



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학박사 학위논문

하수처리시설에 대한 메탄배출계수  
개발 및 적용성에 관한 연구



2015년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

지구환경공학연합동과정

권 영 성

공학박사 학위논문

하수처리시설에 대한 메탄배출계수  
개발 및 적용성에 관한 연구

지도교수 이 석 모

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2015년 2월

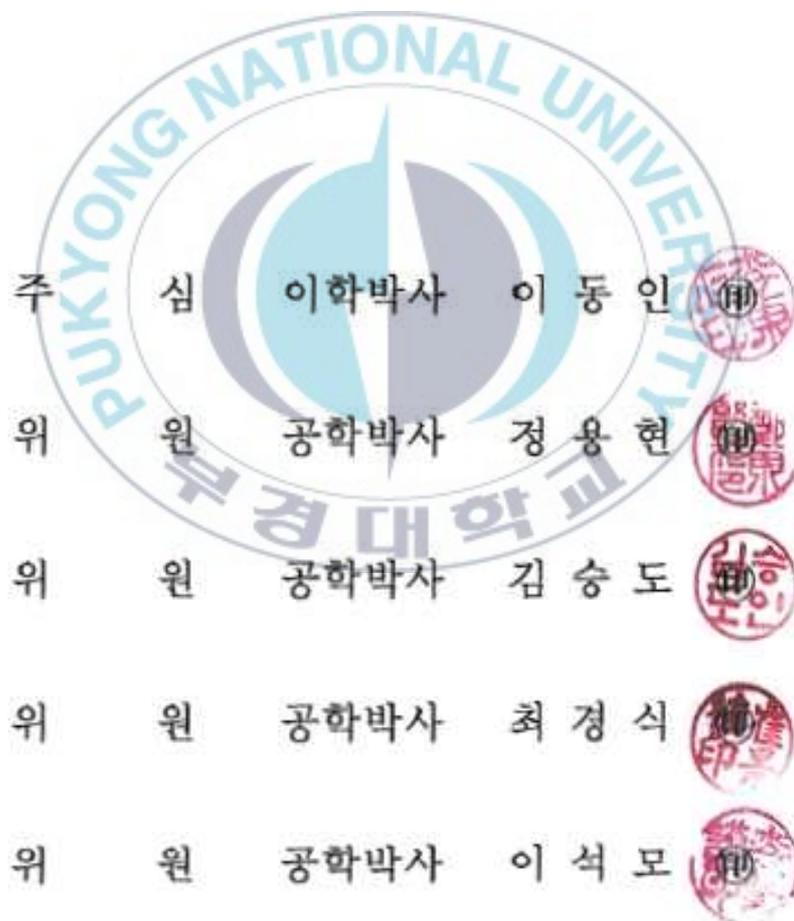
부 경 대 학 교 대 학 원

지구환경공학연합동과정

권 영 성

# 권영성의 공학박사 학위논문을 인준함

2015년 2월



# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	vii
Abstract .....	x
1. 서 론 .....	1
2. 이론적 배경 .....	4
2.1 온실가스 발생특성 .....	4
2.1.1 발생 메커니즘 .....	4
2.1.2. 주요 영향요인 .....	5
2.2 메탄 배출량 산정방법론 .....	9
2.2.1 국내사례 .....	9
2.2.2 국외사례 .....	11
2.3 메탄 배출계수 개발현황 .....	19
2.3.1 국내사례 .....	19
2.3.2 국외사례 .....	21
2.4 불확도 개념 .....	27
2.4.1 불확도 개념 .....	27
2.4.2 불확도 평가 .....	27
2.5 불확도 적용현황 .....	34
2.5.1 국내사례 .....	34
2.5.2 국외사례 .....	35
3. 연구방법 .....	41

3.1 메탄 배출계수 개발 .....	41
3.1.1 대상시설의 선정 .....	41
3.1.2 현장측정방법론 .....	52
3.2 배출계수 불확도 산정방법론 .....	60
3.2.1 오차증식법 .....	60
3.2.2 몬테카를로 시뮬레이션 .....	66
<b>4. 결과 및 고찰 .....</b>	<b>68</b>
4.1 메탄 배출계수 개발결과 .....	68
4.1.1 현장측정결과 .....	68
4.1.2 메탄 배출계수 개발결과 .....	94
4.1.3 온실가스 배출량 산정결과 .....	99
4.2 메탄 배출계수 불확도 산정결과 .....	101
4.2.1 오차증식법을 통한 불확도 산정결과 .....	101
4.2.2 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 불확도 산정결과 .....	132
4.2.3 메탄 배출계수 불확도 산정결과 .....	138
<b>5. 결 론 .....</b>	<b>140</b>
<b>References .....</b>	<b>144</b>
<b>Appendix .....</b>	<b>148</b>

## LIST OF TABLES

Table 2.1. Default MCF values for the domestic wastewater .....	18
Table 2.2. CH <sub>4</sub> EF of MOE .....	20
Table 2.3. CH <sub>4</sub> EF of NIER .....	21
Table 2.4. CH <sub>4</sub> EF about the WWTP in the ANNEX I .....	24
Table 2.5. Estimation procedure of the GHG measurement uncertainty .....	28
Table 2.6. Typical strategies for dealing with different causes of uncertainties .....	30
Table 2.7. Uncertainty of the CH <sub>4</sub> EF .....	34
Table 2.8. Default uncertainty ranges for the domestic wastewater of the IPCC G/L .....	35
Table 2.9. CH <sub>4</sub> EF uncertainty about the WWTP in the ANNEX I .....	38
Table 3.1. Treatment capacity of the WWTP .....	42
Table 3.2. WWTP classification of the each design capacity .....	43
Table 3.3. Design capacity of the WWTP .....	45
Table 3.4. Design capacity of each process in the tertiary treatment process .....	46
Table 3.5. Selected Results of the Study sites .....	47
Table 3.6. Performance test results of the analyzer .....	55
Table 3.7. Test results of the analyzer .....	55
Table 3.8. Status of the carrier gas and the calibration gas .....	55
Table 3.9. Specification of the measurement unit .....	56

Table 3.10. The results of the recovery rate test .....	57
Table 4.1. Measurement results of the A site .....	70
Table 4.2. Calculation of the EF(A Site) .....	71
Table 4.3. Measurement results of the B site .....	73
Table 4.4. Calculation of the EF(B Site) .....	73
Table 4.5. Measurement results of the C site .....	75
Table 4.6. Calculation of the EF(C Site) .....	76
Table 4.7. Measurement results of the D site .....	78
Table 4.8. Calculation of the EF(D Site) .....	79
Table 4.9. Measurement results of the E site .....	81
Table 4.10. Calculation of the EF(E Site) .....	81
Table 4.11. Measurement results of the F site .....	84
Table 4.12. Calculation of the EF(F Site) .....	84
Table 4.13. Measurement results of the G site .....	86
Table 4.14. Calculation of the EF(G Site) .....	87
Table 4.15. Portion of the CH <sub>4</sub> emission at the each reactor .....	89
Table 4.16. CH <sub>4</sub> EF of the each reactor .....	91
Table 4.17. CH <sub>4</sub> EF of the each site .....	94
Table 4.18. Comparison of the CH <sub>4</sub> EF .....	95
Table 4.19. Comparison of the CH <sub>4</sub> EF of the ANNEX I .....	97

Table 4.20. Calculated Results of the CH <sub>4</sub> emission .....	100
Table 4.21. Definition of the uncertainty factor .....	102
Table 4.22. Definition of the uncertainty component .....	103
Table 4.23. Trend of the monthly average temperature .....	105
Table 4.24. Results of the Repeatability of the measurement .....	107
Table 4.25. Results of the Representativeness .....	109
Table 4.26. Results of the uncertainty estimation of R <sub>BOD</sub> .....	118
Table 4.27. QA/QC Target of the BOD .....	119
Table 4.28. Results of the uncertainty estimation of the R <sub>Q</sub> .....	122
Table 4.29. Accuracy and precision of the each flow meter type .....	123
Table 4.30. Uncertainty estimation result of the grit chamber in the A facility	126
Table 4.31. Uncertainty estimation results of the A facility .....	127
Table 4.32. Results of the uncertainty estimation of the each site .....	129
Table 4.33. Results of the uncertainty estimation of the CH <sub>4</sub> EF .....	130
Table 4.34. Contribution portion of the EF .....	131
Table 4.35. PDF of the uncertainty component .....	132
Table 4.36. Uncertainty estimation results of the A facility(Grit chamber) using MonteCarlo simulation .....	135
Table 4.37. Uncertainty estimation results of the CH <sub>4</sub> EF using MonteCarlo simulation	137
Table 4.38. Uncertainty estimation results of the CH <sub>4</sub> EF .....	138

Table 4.39. Comparison of the uncertainty ..... 139



## LIST OF FIGURES

Fig. 2.1. Schematic diagram of the wastewater treatment plant .....	5
Fig. 2.2. Comparison of the IPCC G/L method about the wastewater handling .....	12
Fig. 2.3. Wastewater treatment systems and discharge pathways .....	22
Fig. 2.4. CH <sub>4</sub> EF about the WWTP in the ANNEX I .....	23
Fig. 2.5. Overall structure of a generic uncertainty analysis .....	31
Fig. 2.6. CH <sub>4</sub> EF uncertainty about the WWTP in the ANNEX I .....	37
Fig. 3.1. Classification of the WWTP .....	44
Fig. 3.2. System diagram of the A <sub>2</sub> O process .....	48
Fig. 3.3. System diagram of the 4-stage BNR process .....	49
Fig. 3.4. System diagram of the NPR process .....	49
Fig. 3.5. System diagram of the DeNiPho process .....	50
Fig. 3.6. System diagram of the MLE process .....	51
Fig. 3.7. Schematics of the measuring systems .....	53
Fig. 3.8. Illustration of the Monte Carlo method .....	67
Fig. 4.1. Measurement points at the A site .....	69
Fig. 4.2. Measurement results of the A site .....	69
Fig. 4.3. Measurement points at the B site .....	72
Fig. 4.4. Measurement results of the B site .....	72

Fig. 4.5. Measurement points at the C site .....	74
Fig. 4.6 Measurement results of the C site .....	75
Fig. 4.7. Measurement points at the D site .....	77
Fig. 4.8. Measurement results of the D site .....	78
Fig. 4.9. Measurement points at the E site .....	80
Fig. 4.10. Measurement results of the E site .....	80
Fig. 4.11. Measurement points at the F site .....	83
Fig. 4.12. Measurement results of the F site .....	83
Fig. 4.13. Measurement points at the G site .....	85
Fig. 4.14. Measurement results of the G site .....	86
Fig. 4.15. Trend of the CH <sub>4</sub> concentration .....	88
Fig. 4.16. Portion of the CH <sub>4</sub> emission at the each reactor .....	89
Fig. 4.17. CH <sub>4</sub> EF at the each reactor .....	91
Fig. 4.18. Relationship between site EF and Bioreactor EF, 1st clarifier EF .....	92
Fig. 4.19. Portion of the CH <sub>4</sub> emission in the bioreactor .....	93
Fig. 4.20. Portion of the CH <sub>4</sub> emission at the anaerobic condition .....	93
Fig 4.21. CH <sub>4</sub> EF of the each site .....	95
Fig. 4.22. Comparison of the CH <sub>4</sub> EF .....	96
Fig. 4.23. Comparison of the CH <sub>4</sub> EF of ANNEX I .....	98
Fig. 4.24. Uncertainty component at the CH <sub>4</sub> EF .....	102

Fig. 4.25. Uncertainty estimation results of the grit chamber in the A facility using MonteCarlo simulation ..... 134

Fig. 4.26. Uncertainty estimation results of the A facility using MonteCarlo simulation ..... 136

Fig. 4.27. Uncertainty estimation results of the CH<sub>4</sub> EF using MonteCarlo simulation ..... 137

Fig. 4.28. Comparison of the uncertainty ..... 139



# A Study on the Development of Methane Emission Factor and Its Applicability in the Wastewater Treatment Plant

Young-Sung Kwon

*Interdisciplinary Program of Earth Environmental Engineering, Graduate School,  
Pukyong National University*

## Abstract

The emission factor for calculating GHG emissions is an important parameter for the establishment of mitigation policies and establishing the inventory to implement an assessment. The emission factor that applies when calculating greenhouse gas emissions at the wastewater treatment plant in Korea was developed about 10 years ago, and it does not reflect the changed sewage policy. When the national emission factor was developed, uncertainty assessment, the most important factor for reliability was not done. Uncertainty about the national GHG emission in the WWTP was evaluated using the IPCC G/L default value.

Through the categories analysis, This study evaluated a reasonable development range for the CH<sub>4</sub> emission factor in the wastewater treatment plants and established a methodology for CH<sub>4</sub> emission

- x -

measurement. Seven sites were measured to develop the emission factor based on category analysis and established measurement methodology.

To evaluate the uncertainty, the uncertainty factor that influences the CH<sub>4</sub> emission factor was investigated. The uncertainty was calculated using a sample error propagation equation and the appropriateness was reviewed.

The results of the CH<sub>4</sub> emission calculation about the each WWTP reactor, showed a high correlation ( $R^2=0.9284$ ) between the total CH<sub>4</sub> emission and the 1st clarifier CH<sub>4</sub> emission.

CH<sub>4</sub> emission characteristics are determined by the operating characteristics such as a influent characteristics and sludge recycle rather than process-specific characteristics.

CH<sub>4</sub> emission factors of the WWTPs were calculated as 0.007 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD (max value : 0.030 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD, min value : 0.00076 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD, standard deviation : 0.010 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD). As of 2011 the national calculated GHG emission for the WWTP sector, using the emission factor developed in this study, is 7.1 Gg CH<sub>4</sub>.

Survey results for uncertainty factors included CH<sub>4</sub> concentration, carrier gas flow rate, chamber area, BOD concentration, sewage treatment plant influent flow rate and the site area. There are 21 variables at the detailed uncertainty component, including the representativeness of the measurement period and error of the analyzer.

The evaluation results of the CH<sub>4</sub> emission factor uncertainty, through the sample error propagation equation, is a  $0.007 \pm 0.002$  kg CH<sub>4</sub>/kg BOD (about 95% confidence interval,  $k=2$ ).

To identify the factors affecting the uncertainties, contribution portion analysis was undertaken. “Methane concentration(61.3%)” was the highest contributing factor. “The representativeness of the Measurement period(49.1%)” was the highest detailed contributing component.

Further, The evaluation results of the CH<sub>4</sub> emission factor uncertainty using the Monte Carlo simulation is presented to suggest the improvement directions of the uncertainty evaluation.



# 1. 서 론

인위적 요인에 기인한 기후변화는 현재 전 세계의 가장 중요한 화두이자 국제 사회에서 주요한 의제로 고려되고 있으며, 기후 자체에 대한 영향으로 그치는 것이 아니라 자연환경, 경제 및 사회 여건 등을 포함한 생활환경 전반에 중요한 영향을 미치므로 중요성이 부각되고 있다(윤완우, 2012). 지구온난화는 개별 국가의 문제로 한정되어 논의할 수 없는 문제로써 전 세계적인 차원에서 공동노력의 필요성이 대두되기 시작하였다. 따라서 기후변화대응을 위한 국제적인 노력의 시발점인 리우 UN 환경개발회의에서는 1992년 ‘기후변화협약 (UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change)’을 채택하여 전세계가 공동으로 기후변화에 대응하기 할 수 있는 기반을 구축하였다(한국환경공단, 2011). 이와 관련하여 우리나라는 기후변화협약 당사국으로서 동 협약 제 4조 및 12조에 의해 온실가스 배출량을 산정하고 이를 보고하고 있으며, 온실가스감축을 위하여 국내·외적으로 많은 노력을 기울이고 있다(한국환경공단, 2008).

기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)의 4차 보고서에 따르면 기후변화에 의한 피해를 최소화하는데 드는 비용은 전 세계 국내 총 생산(GDP)의 3%(약 2천조 원)에 이르는 것으로 추정되었고, 현재 추세라면 대기중 이산화탄소 농도는 산업혁명전 280 ppm에서 2040~2050년경에는 자연 수준의 두 배인 550 ppm에 달할 것으로 예상되며 이로 인해 생활환경 전반에 많은 피해가 발생될 것으로 예측하고 있다(IPCC, 2007).

2010년 기준 우리나라의 온실가스 총배출량은 669 백만ton CO<sub>2eq.</sub>로 UNFCCC하의 온실가스 의무감축국(ANNEX I)들과 비교하여 보면 온실가스 총배출량 순위는 미국, 러시아, 일본, 독일 및 캐나다 다음으로 6위에 해당되며, 실질적인 온실가스 다배출국가인 중국, 인도를 포함하면 온실가스 배출량

순위는 8위에 해당된다(온실가스종합정보센터, 2012).

이중 폐기물 분야에서 발생하는 온실가스 배출량은 2010년 기준 14.2 백만 ton CO<sub>2eq.</sub>로 우리나라 전체 온실가스 배출량의 약 2.1%를 차지하고 있으며, 1990년과 비교하여 43.9% 증가하였고 전년 대비 1.5% 감소하였다. 하·폐수 부문은 1.3 백만ton CO<sub>2eq.</sub>로 폐기물 분야 전체 온실가스 배출량의 9.4%를 차지하며, 이중 분뇨분야가 하·폐수분야 온실가스 배출량의 81.9%를 차지하고 있으며 하수분야는 7.27 만ton CO<sub>2eq.</sub>로 이는 1990년 대비 8.7배 증가한 배출량이다(온실가스종합정보센터, 2012).

국내·외적으로 기후변화대응을 위한 노력이 활발해짐에 따라 온실가스 배출량 감축을 위해서 여러 종류의 정책이 다양하게 고려되고 있으며, 또한 배출원의 감축 잠재량 평가, 감축목표 선정 및 감축 이행계획 수립 등에 활용될 수 있는 인벤토리 구축의 필요성이 증대되고 있다. 이와 더불어 인벤토리의 신뢰성 향상을 위한 정확한 활동도 자료의 확보와 국내현실을 반영할 수 있는 국가 고유배출계수의 개발 및 적용, 신뢰성 확보를 위한 불확도 평가 방법의 구축이 중요시 되고 있다. 실제로 IPCC에서는 신뢰성 있는 온실가스 배출량 산정을 위해 국가별 배출특성을 반영할 수 있는 국가 고유배출계수 사용을 권장하고 있으며, 또한 배출량에 대한 신뢰성 확보를 위하여 배출계수 및 활동도에 대한 불확도 평가를 실시하도록 하고 있다(IPCC, 2006).

현재 우리나라 하수처리시설에 대한 온실가스 배출량 산정시 적용되고 있는 메탄 배출계수는 10 여년전에 개발된 값으로 그동안의 하수정책변화 등을 반영하지 못하고 있으며, 불확도 평가 등이 병행되지 않아 온실가스 배출계수에 대한 신뢰성이 떨어지는 상태이다.

따라서 본 연구에서는 국내 하수처리정책의 변화를 고려하여 시설규모, 처리공법 등의 다각적인 측면에서 카테고리 분류를 실시하여 하수처리시설의 메탄 배출계수에 대한 합리적인 개발 범위를 평가하였으며, 국내·외 하수처리시

설의 메탄 배출계수 개발과 관련한 문헌연구를 통하여 현장측정을 통한 배출계수 개발 방법론을 제시하였다. 이를 기초로 하여 7개 하수처리시설에 대해서 현장측정을 통하여 메탄 배출계수를 개발하였으며, 국내·외 연구결과와의 비교를 통하여 적용성을 평가하였다. 추가적으로 본 연구에서 개발된 메탄 배출계수를 적용하여 하수처리시설에 대한 국가 온실가스 배출량 산정에 적용해 봄으로서 적용성에 대해서 검토하였다.

메탄 배출계수에 대한 불확도 산정을 위하여 메탄 배출계수에 영향을 미치는 불확도 인자를 파악하였으며, 각각의 불확도 인자에 대해서 불확도 산정방법을 제시하고, 오차증식법을 통하여 불확도를 산정하였으며, 추가적으로 기여도 분석을 실시하여 각 인자에 대한 불확도 기여율을 평가하였다. 또한 국내·외 연구결과와의 비교를 통하여 메탄 배출계수 불확도에 대한 적절성을 평가하였다. 추가적으로 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 메탄 배출계수에 대한 불확도를 산정하여 봄으로써 향후 불확도 산정방법에 대한 개선방향을 제시하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 온실가스 발생특성

#### 2.1.1 발생 메커니즘

하수의 처리는 처리목적에 따라 1차 처리(물리적 처리), 2차 처리(생물학적 처리) 및 3차 처리(고도처리)로 구분한다. 1차 처리는 입자성 부유물질의 제거를 목적으로 하고, 주로 침전 등의 물리학적 처리방법이 이용된다. 2차 처리에서는 1차 처리후에 잔류하는 부유물질과 용존 유기물의 제거를 목적으로 하고, 주로 미생물을 이용한 생물학적 처리방법 등이 있다. 3차 처리(고도처리)는 위의 방법 이상으로 수질을 정화하는 것을 목적으로 하는 모든 처리를 의미하며, 주로 질소나 인 등의 영양염류 제거를 위한 처리를 의미한다(환경부, 2011).

하·폐수처리시설의 유기물질의 생물학적 변환은 Fig. 2.1에서와 같이 3단계로 이루어진다. 첫 번째 단계는 탄수화물, 지방, 단백질 등의 불용성 유기물이 가용성 유기물로 분해되는 단계(가수분해; Hydrolysis)이다. 두 번째 단계(유기산 형성; Acidogenesis)는 저분자량의 중간화합물로의 생물학적 변환단계이다. 마지막으로 세 번째 단계(메탄형성; Methanogenesis)는 중간 화합물을 보다 단순한 최종생성물형태로 전화하는 단계이며, 주로 메탄 및 탄산가스로 전환되는 생물학적 변환을 이야기한다(서경애, 2003).

일반적으로 활성슬러지 공법은 호기성 미생물과 조류가 같이 존재하는 표면 지역, 혐기성 미생물에 의하여 축적된 고형물이 분해되는 혐기성 바닥지역, 임의성 미생물에 의하여 유기성 폐수가 분해되는 부분적으로 호기성 또는 부분적으로 혐기성인 중간지역의 3가지 종류의 지역이 존재한다(조진영, 2012).

하수처리과정에서 큰 고형물은 침전하여 혐기성 슬러지층을 형성하고 분해되는데, 각 단계별 반응을 살펴보면, 우선 용존 또는 콜로이드성의 유기물은 호기성 또는 임의성 미생물에 의하여 산화되며, 유기물 산화과정에서 생성되는 탄산가스는 조류의 탄소원으로 이용된다. 슬러지층의 고형물은 혐기성으로 분해되면 용존 유기물 및  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ 과 같은 가스상태의 물질이 생산되며, 호기성 미생물에 의하여 산화되거나 또는 대기 중으로 배출된다(조진영, 2012).

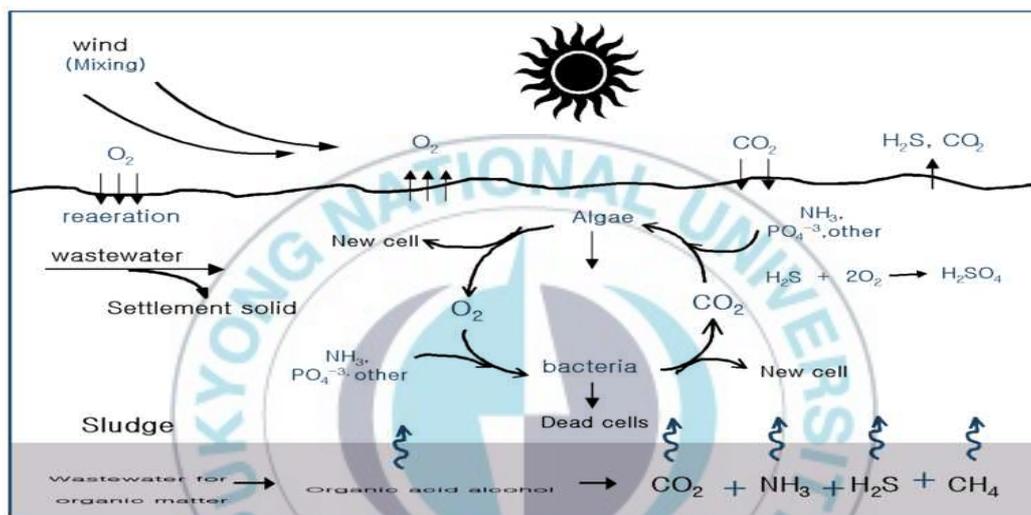


Fig. 2.1. Schematic diagram of the wastewater treatment plant

### 2.1.2 주요 영향요인

하수 및 하수의 슬러지는 혐기적으로 분해되는 경우 메탄을 발생시킬 수 있으며 메탄의 발생 정도는 기본적으로 하수내 분해 가능한 유기 물질의 양, 온도 및 처리 시스템의 유형에 따라 다르다(IPCC, 2006). 본 장에서는 하수처리시설의 메탄 발생에 영향을 미치는 주요인자인 유기물량, 온도 및 처리시스템의 유형에 대해서 살펴보았다.

#### 2.1.2.1 유기물량

IPCC G/L에서는 하수에서의 메탄 발생가능성을 결정짓는 주요한 요인으로 하수내 분해 가능한 유기물질의 양을 제시하였다. 하수의 유기적 구성요소를 측정하는 데 사용되는 일반적인 기준은 생화학적 산소 요구량(BOD)과 화학적 산소 요구량(COD)이며, 동일한 조건에서는 BOD 및 COD의 농도가 높은 하수가 낮은 농도의 하수에 비해 일반적으로 많은 메탄을 발생시킬 것으로 제시하고 있다(IPCC, 2006).

그러나 하·폐수에서 유기물량이 많다고 메탄이 반드시 많이 발생된다는 것을 의미는 아니며, 유기물 농도는 높으나 혐기조건이 형성되지 않을 경우 메탄생성은 방해받을 수 있다. 즉 하·폐수를 혐기적으로 처리하는 과정에 있어서 높은 유기물량은 하·폐수에서 메탄이 발생시킬 가능성이 높다는 것을 암시할 뿐이다(환경관리공단, 2007).

#### 2.1.2.2 온도

IPCC G/L에 따르면 15℃ 이하에서는 메탄 생성 미생물이 활동하지 않으며, 15℃ 이상으로 온도가 상승하면 메탄이 발생된다고 제시하고 있다(IPCC, 2006).

또한 일본의 연구에 따르면 같은 하수처리시설에서 동계 및 하계의 맑은 날에 대해서 메탄 발생량을 비교 측정한 결과, 메탄 발생량은 수온의 영향을 받고 하기의 메탄 발생량은 동기의 메탄 발생량에 비해 3 배정도 많이 발생하는 것으로 나타났다(일본국립환경연구소, 1992).

그러나, 낮은 온도조건에서도 저류조에서 슬러지의 체류시간이 매우 긴 경우는 메탄이 발생된 사례도 있는 것으로 나타났다(한국환경공단, 2007).

또한, 오스트리아 온실가스 인벤토리 보고서(NIR, National Inventory Report)에서는 하수분야 온실가스 배출량 산정시 온도에 대한 영향을 고려하여 메탄 배출계수를 적용하였는데, MCF(Methane Conversion Factor)의 경우 30~40℃에서

100%를 보이지만 20℃에서는 35%, 10℃에서는 10%로 전환율이 낮아진다고 언급되고 있다(UNFCCC, 2013).

추가적으로 Czepiel P. M 등의 연구에서는 온도와 메탄 생성량과는 호기성 조건과 혐기성조건에 따른 상관계수( $R^2$ )는 각각 0.74 및 0.76으로 온도가 증가할수록 메탄 발생량은 선형관계로 증가되는 것으로 제시하고 있다(Czepiel P. M 등, 1993).

### 2.1.2.3 처리시스템의 유형

IPCC G/L에 의하면 대체로 호기성 상태의 하수처리공정에서는 메탄이 발생되지 않거나 조금 발생되지만, 혐기성 상태의 하수처리공정 또는 배출 경로에서는 일반적으로 메탄이 발생하는 것으로 제시하고 있다. 예를 들면, 혼합(Mixing)이나 포기(Aeration)가 없는 라군(Lagoon)에서는 라군의 깊이가 메탄의 발생을 결정짓는 주요한 인자이며, 1m 깊이 이하의 얇은 라군에서는 호기성 조건이 형성되어 메탄이 거의 발생되지 않거나 전혀 발생되지 않으나, 2~3m 이상의 라군에서는 보통 혐기성 환경이 형성되며 이로 인해 메탄이 많이 발생하는 것으로 제시하고 있다(IPCC, 2006).

하지만 이는 메탄의 발생에 대한 개념을 설명하는 전반적인 내용으로 일반적인 하수처리시설은 생물학적 처리 및 고도처리 공법으로 혐기 및 호기적 조건의 반응조가 연속으로 운영되고 있으므로 실제 하수처리시설에서의 메탄 발생 및 배출특성을 설명하기에는 부족하다.

IPCC G/L에 따르면, 하수처리공정 중 호기상태의 반응조에서는 메탄이 발생되지 않아야 하지만 실제로 측정된 결과를 보면 호기조 등에서도 메탄이 배출되고 있다. 이는 Wang Jinhe 등의 연구를 보면 호기형 침사지 및 호기조 등에서 메탄 발생량은 DO(Dissolved Oxygen)농도에 따라서 선형관계( $R^2=0.772, 0.656$ )로 증가되는 것으로 나타났는데 이는 호기조에서 메탄이 발생된 것이

아니라 하수속에 녹아 있는 메탄이 폭기상태에서 Air stripping에 의하여 배출되기 때문에 호기상태의 반응조에서 메탄이 배출되는 것으로 제시하고 있다 (Wang Jinhe 등, 2010).

또한 Global Water Research Coalition의 연구 결과에 따르면 하수관거에서 생성된 메탄이 하수처리시설 유입부에서 배출되며, 하수처리시설에서는 전단에서 발생된 메탄이 호기조 Stripping에 의해서 이후의 공정에서 배출된다고 제시하고 있다(GWRC, 2011).

하수처리공법별 온실가스 배출특성에 관한 연구는 이루어지지 않고 있다. 활성슬러지공법, 5-Stage공법, Denitro공법 및 연속회분식(SBR)공법을 대상으로 메탄 배출계수를 산정한 국내 연구에 따르면 5-Stage공법이 메탄 배출계수가 가장 낮은 것으로 제시하고 있다(국립환경과학원, 2007).

하지만 이는 침사지 등에 대한 측정을 제외한 결과로 실제로 Wang Jinhe 등의 연구에 따르면 A/A/O처리시스템을 대상으로 메탄 Flux를 선정한 결과, Aerated Grit Chamber에서 가장 높은 Methane Flux( $\text{g CH}_4\text{m}^{-2}\text{day}^{-1}$ )를 보였으며, 이는 Anaerobic Tank값의 5.4배에 해당되는 것으로 제시되어 있다 (Wang Jinhe 등, 2010).

또한 Czepiel P. M 등(1993), 조진영(2012) 및 서경애(2003)의 연구결과에서도 일반적인 공정인 침사지 및 1차 침전지 등에서 메탄발생량이 많은 것으로 제시하고 있다.

하수처리공법과 메탄 배출량과의 상관성을 확인하기에는 국내·외적으로 연구자료가 부족하며, 향후 하수처리시설에서의 온실가스 저감방안 연구 등과 연계하여 하수처리 공법 및 수처리 공정에서의 온실가스 발생 기작 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 2.2 메탄 배출량 산정방법론

하수처리시설에 대한 메탄 배출계수에 대한 연구사례 등을 조사하기에 앞서 메탄 배출계수를 적용한 온실가스 배출량 산정방법론을 살펴봄으로써 배출계수의 적용사례 및 적용방식 등을 간략하게 살펴보겠다.

### 2.2.1 국내사례

국내 하수처리시설에 대한 온실가스 배출량 산정 방법론은 크게 국가 배출량 산정방법론, 지자체 온실가스 배출량 산정방법론 및 목표관리제 배출량 산정방법론이 있다.

#### 2.2.1.1 국가 배출량 산정방법론

국가 온실가스 배출량 산정방법론 중 하수처리시설에서의 메탄 배출량 산정은 배출계수와 활동자료를 곱하여 메탄 발생량을 산정한 후 회수량을 제외하여 산정하며, 하수분야 메탄 배출계수는 2000년과 2002년에 환경부에서 개발한 배출계수 값의 평균인  $0.01532 \text{ t CH}_4/\text{t BOD}$ 를 적용하는 것으로 제시되어 있다(온실가스종합정보센터, 2013).

하수에서의 메탄 배출량( $\text{t CH}_4$ )

$$= \text{배출계수} (\text{t CH}_4/\text{t BOD}) \times \text{활동자료} (\text{t BOD}) - \text{회수량} (\text{t CH}_4/\text{yr})$$

#### 2.2.1.2 지자체 배출량 산정방법론

지자체 온실가스 배출량 산정방법론 중 하수처리시설에서의 메탄 배출량 산정은 GPG 2000 방법론에 따라 IPCC G/L에서 제시된 기본 배출계수 및 방법론으로 산정하는 것으로 제시되어 있다(환경관리공단, 2009).

CH<sub>4</sub> Emission<sub>하수</sub>

$$= (TOW_{하수} \times EF_{하수}) - R_{하수}$$

$$EF_i = B_0 \times MCF_{weighted, i}$$

$B_0$  = 최대메탄생성율 ( $kg\ CH_4/kg\ BOD$  또는  $kg\ CH_4/kg\ COD$ )

$MCF_{weighted, i}$  = 메탄전환계수; 처리방법별 가중치고려 factor

추가적으로 활동자료 확보의 어려움 등으로 산정방법론의 적용이 어려울 경우에는 국가 배출계수를 적용하여 GPG 2000 Box4 수준의 배출량 산정을 하여도 무방하다고 제시되어 있다. 이때 적용하는 메탄 배출계수는 0.01532 t CH<sub>4</sub>/t BOD로 제시되어 있다.

CH<sub>4</sub> Emission<sub>하수</sub>

$$= \text{하수처리량} \times BOD_{\text{유입농도}} \times EF \times BOD_{\text{제거율}} \times (1 - CH_4_{\text{회수율}})$$

하수처리량 : 시설별 하수처리량 m<sup>3</sup>/day

EF(배출계수) : CH<sub>4</sub> 배출계수, kg CH<sub>4</sub>/kg BOD

BOD 제거율 : 시설별  $\frac{(BOD_{\text{유입}} - BOD_{\text{방류}})}{BOD_{\text{유입}}}$ , fraction

CH<sub>4</sub> 회수율 : 시설별 하수(슬러지포함) 처리 CH<sub>4</sub> 회수율, fraction

### 2.2.1.3 목표관리제 배출량 산정방법론

목표관리제 온실가스 배출량 산정방법론 중 하수처리시설에서의 메탄 배출량 산정방법론 또한 유입 BOD 부하량 기준으로 메탄 배출량을 산정하며 이때 적용하는 메탄 배출계수는 0.01532 t CH<sub>4</sub>/t BOD로 제시되어 있다(환경부, 2011).

### *CH<sub>4</sub>Emissions*

$$[(BOD_{in} - BOD_{out}) \times 10^{-3} \times Q_{in} \times EF - R] \times F_{eq,j} \times 10^{-3}$$

CH<sub>4</sub> Emissions : 하수처리에서 배출되는 CH<sub>4</sub> 배출량(CO<sub>2eq</sub> ton/yr)

BOD<sub>in</sub> : 유입 하수의 BOD<sub>5</sub>농도(mgBOD/L)

BOD<sub>out</sub> : 유출 하수의 BOD<sub>5</sub>농도(mgBOD/L)

Q<sub>in</sub> : 유입하수량(m<sup>3</sup>/yr)

EF : 배출계수(kg CH<sub>4</sub>/kg BOD)

R : 메탄 회수량(kg CH<sub>4</sub>/yr)

F<sub>eq,j</sub> : 온실가스(j)의 CO<sub>2</sub> 등가계수 (CH<sub>4</sub>=21)

요약하여 보면, 국내 하수처리시설에 대한 메탄 배출량 산정방법론은 기본적으로 IPCC G/L에서 제시한 방법론을 적용하고 있으며, 추가적으로 국내 통계의 적용을 위해서 국가 실정에 맞게 변형된 형태라고 판단된다. 메탄 배출계수는 위의 3가지 방법론 모두 환경부에서 현장측정을 통해 개발한 국가 고유배출계수(0.01532 t CH<sub>4</sub>/t BOD)를 적용하고 있다는 공통점이 있다.

## 2.2.2 국외사례

### 2.2.2.1 IPCC G/L 하폐수분야 방법론 비교

본 연구에서는 하수분야 온실가스 배출량 국외 산정방법론을 분석하기 위해서 가장 대표적인 배출량 산정 방법론인 IPCC G/L을 대상으로 우선 하폐수분야 온실가스 산정방법론을 간략하게 비교하였다. IPCC에서 제시한 방법론은 Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories(이하 1996 G/L), Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories(이하 GPG 2000) 및 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories(이하 2006 G/L)이 있다.

Fig. 2.2는 IPCC G/L별로 방법론을 비교한 것이다. 1996 G/L에서는 하수 처리과정과 슬러지 처리과정에서 배출되는 메탄 배출량으로 각각 나누어서 산정하도록 제시하고 있다. GPG 2000의 메탄 배출량 산정방법은 1996 G/L과 비교하여 하수 및 산업폐수 처리과정에서의 메탄 배출량과 슬러지 처리과정에서 나오는 메탄 배출량을 다른 산정식으로 계산하는 방법이 아닌 하나의 산정식을 적용하여 계산한다는 차이가 있다. 2006 G/L의 메탄 배출량 산정방법에서는 1996 G/L 및 GPG 2000과 마찬가지로 하수 및 산업폐수로 구분하여 산정하고 있다. 기존 산정방법과 비교해 보면 당해년도 수입그룹 i의 인구비용( $U_i$ )과 당해년 수입그룹 i의 하수처리시스템 j별 이용율( $T_{ij}$ )이 소득수준별 하수처리시스템의 이용변화를 고려하기 위해 추가되었으며, 또한 산업폐수의 추가적인 유입에 따른 유기물 부하량의 증가를 반영하기 위하여 보정계수(I)가 추가되었다(에너지경제연구원, 2008).



Fig. 2.2. Comparison of the IPCC G/L method about the wastewater handling

### 2.2.2.2 IPCC G/L 하수분야 산정방법론

IPCC G/L의 하수분야 메탄 배출량 산정방법론 중 하수처리시설에 대한 메탄 배출량 산정방법론에 대해서 자세히 설명하겠다.

#### 가) 1996 IPCC G/L

1996 G/L에서는 하수 및 산업폐수 처리과정에서 나오는 메탄 배출량과 슬러지 처리과정에서 나오는 메탄 배출량을 나누어서 산정하도록 제시하고 있다. 하수분야 메탄 배출량은 하수처리에 의한 메탄배출량(WM)과 하수슬러지처리에 의한 메탄배출량(SM)을 합하여 구하며, 최종적으로 메탄 회수량 및 flaring량을 제외한다. 1996 G/L의 하수에 의한 온실가스 배출량 산정식은 다음과 같다.

○ 하수에 의한 메탄 배출량(톤/년)

$$= \{P \times D_{\text{dom}} \times (1 - DS_{\text{dom}}) \times B_{\text{oi}} \times \sum(WS_{\text{ix}} \times MCF_x)\} - MR_i$$

여기에서,

P : 인구,  $D_{\text{dom}}$  : 1인당 연간 배출되는 분해 가능한 유기물 질량(kg BOD/인/년)

$DS_{\text{dom}}$  : 슬러지로서 제거되는 분해 가능한 유기물질비율

$B_{\text{oi}}$  : 하수종류 i별 최대 메탄생성율(kg CH<sub>4</sub>/kg DC)

$WS_{\text{ix}}$  : 하수처리시스템 x별 하수종류 i별 비율

$MCF_x$  : 하수처리시스템 x별 메탄전환계수

$MR_i$  : 하수종류 i별 메탄회수량 및 Flaring량(kg CH<sub>4</sub>)

#### 나) GPG 2000

GPG 2000과 1996 G/L을 비교하여 보면 가장 큰 차이점은 하수처리과정에서 나오는 메탄 배출량과 슬러지 처리과정에서 나오는 메탄 배출량을 별도의

산정식으로 산정하는 것이 아니라 하나의 산정식을 통하여 계산한다는 것이다. GPG 2000의 하수에 의한 메탄 배출량 산정식은 다음과 같다.

○ 하수에 의한 메탄 배출량(톤/년)

$$= \{P \times D_{\text{dom}} \times B_0 \times \sum(WS_{ix} \times MCF_x)\} - R$$

여기에서,

P : 인구

$D_{\text{dom}}$  : 1인당 연간 배출되는 분해 가능한 유기물 질량(kg BOD/인/년)

$B_0$  : 최대 메탄생성율 (기본값 : 0.25 kg CH<sub>4</sub>/kg COD, 0.6 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD)

$WS_{ix}$  : 하수처리시스템 x별 하수종류 i별 비율

$MCF_x$  : 하수처리시스템 x별 메탄전환계수

R : 메탄 회수량(CH<sub>4</sub> 톤/년)

○ 'check method'를 통한 하수에 의한 메탄 배출량(톤/년)

$$= P \times D \times SBF \times EF \times FTA \times 365 \times 10^{-12}$$

여기에서,

P : 인구

D : 1인당 일일 유기물부하(기본값: 60 g BOD/인/일)

SBF : 쉽게 침전 가능한 유기물비율(기본값: 0.5)

EF : 배출계수(기본값: 0.6 g CH<sub>4</sub>/g BOD)

FTA : 혐기적으로 분해가능한 슬러지의 BOD 비율(기본값: 0.8)

#### 다) 2006 IPCC GL

기존 산정방법과 비교해 보면 당해년도 수입그룹 i의 인구비율( $U_i$ )과 당해년 수입그룹 i의 하수처리시스템 j별 이용율( $T_{ij}$ )이 소득수준별 하수처리시스템의 이용변화를 고려하기 위해 추가되었으며, 또한 산업폐수의 추가적인 유입에

따른 유기물 부하량의 증가를 반영하기 위하여 보정계수(I)가 추가되었다(에너지경제연구원, 2008). 2006 G/L의 아산화질소 배출량 산정방법은 분뇨 뿐만 아니라 고도처리에 의해서 발생하는 아산화질소 부분도 고려하였다는 차이가 있다. 2006 G/L에 따르면, 고도처리에 의한 아산화질소 배출량을 국가 온실가스 배출량으로 포함시킬 때에는 유출수에 의한 배출량 산정에 적용되는 질소 배출량( $N_{EFFLUENT}$ )에서 고도처리와 관련된 질소배출량( $N_{WWT}$ )를 빼고 계산하도록 제시하고 있다. 2006 G/L은 현재 하수와 분뇨를 구분하여 산정하고 있고, 아산화질소는 하수처리과정 중 질산화 및 탈질과정에서 발생하는 것으로 제시하고 있다(조진영, 2012).

○ 하수에 의한 메탄 배출량(톤/년)

$$= (P \times BOD \times 0.001 \times I \times 365 - S) \times [\sum\{U_i \times T_{ij} \times B_0 \times MCF_j\}] - R$$

여기에서,

P : 인구

BOD : 1인당 일일 배출되는 BOD(BOD/인·일)

I : 하수관거로 추가되는 산업폐수의 보정을 위한 계수

S : 하수중 슬러지로 제거되는 유기물(kg BOD/년)

$U_i$  : 당해년 수입그룹 i별 인구비율

$T_{ij}$  : 당해년 수입그룹 i에 대한 시스템 j별 이용율

R : 메탄 회수량(kg  $CH_4$ /년)

$B_0$  : 최대 메탄생성율(kg  $CH_4$ /kg BOD)

$MCF_j$  : 하수처리시스템 j별 메탄전환계수

○ 하수에서의 아산화질소 배출량(톤/년)

$$= \text{유출수로부터의 } N_2O \text{ 배출량} - \text{처리시스템으로부터의 } N_2O \text{ 배출량}$$

- 유출수로부터의 배출량

$$= (P \times \text{Protein} \times F_{\text{NPR}} \times F_{\text{IND-COM}} \times F_{\text{NON-CON}} - N_{\text{sludge}}) \times EF_{\text{EFFLUENT}} \times 44/28$$

• 처리시스템으로부터의 배출량

$$= P \times T_{\text{PLANT}} \times F_{\text{IND-COM}} \times EF_{\text{PLANT}}$$

여기에서,

P : 인구

Protein : 일인당 연간 단백질 흡수량(kg 단백질/인/년)

$F_{\text{NPR}}$  : 단백질중 질소비율(kg 질소/kg 단백질)

$F_{\text{IND-COM}}$  : 산업시설 및 상업시설로부터 추가되는 단백질 비율

$F_{\text{NON-CON}}$  : 하수에 추가는 소비되지 않는 단백질 비율

$N_{\text{sludge}}$  : 슬러지로 제거되는 질소량(g 질소/년)

$T_{\text{PLANT}}$  : 중앙집중식 고도처리 하수처리시스템 이용율

$EF_{\text{PLANT}}$  : 처리시스템에서의 배출계수( $\text{N}_2\text{O}$ /인/년)

$EF_{\text{EFFLUENT}}$  : 유출수로부터의 배출계수(kg  $\text{N}_2\text{O-N}$ /kg 질소)

#### 라) IPCC G/L 메탄 배출계수

IPCC G/L에서 제시한 하수분야 메탄 배출계수 기본값에 대해서는 2006 G/L 위주로 살펴보겠다. IPCC G/L에서는 배출량 산정시 적용한 메탄 배출계수의 성격에 따라서 메탄 배출량 산정 단계를 설명하고 있는데 Tier 1은 IPCC 기본값을 사용하는 경우이며, Tier 2는 고유배출계수를 사용하는 경우며, Tier 3의 경우 bottom-up자료를 이용하여 메탄 배출량을 산정한 경우이다.

IPCC G/L에서 제시한 배출계수는  $B_0$ (최대 메탄생성율, kg  $\text{CH}_4$ /kg BOD)과 MCF(메탄전환계수)의 곱으로 나타 낼 수 있다(IPCC, 2006).

$$EF_j = B_0 \times MCF_j$$

EF<sub>j</sub> : 배출계수, kg CH<sub>4</sub>/kg BOD

j : 각 처리/배출 경로 또는 시스템

B<sub>0</sub> : 최대 메탄생성율, kg CH<sub>4</sub>/kg BOD

MCF<sub>j</sub> : 메탄 전환계수

B<sub>0</sub>는 최대 메탄생성율을 의미하며, 국가별 고유자료를 이용할 수 있는 경우라면 일관성을 위해 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD으로 표현된 B<sub>0</sub>값을 활용하는 것이 good practice로 제시되어 있으며, 국가별 고유자료를 이용할 수 없다면 기본값인 0.6 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD를 사용할 수 있다고 제시되어 있다(IPCC, 2006).

MCF는 유기물이 메탄으로 얼마나 전환이 가능한가를 나타내는 값으로 IPCC G/L에서는 MCF 기본값을 처리경로 처리시스템별로 호기성 및 혐기성 처리여부를 기준으로 구분되어 있다(IPCC, 2006). Table 2.1은 2006 G/L에서 제시되어 있는 MCF 기본값이다.

MCF의 경우 전문가 판단에 의하여 결정되었으며, 기본적으로 처리환경이 호기성이면 “0”에 가깝고, 혐기성 상태로 처리될 경우는 “1”에 가까워진다. 하지만 우리나라와 같이 2차, 3차 처리형태의 하수처리시설은 IPCC G/L상의 구분기준으로는 적용하기가 어려우며, 해외의 배출량 산정 사례 등을 보면 “Treated system, Centralized, aerobic treatment plant”의 Range(0~0.1)범위 내에서 전문가 판단 등을 통하여 MCF값을 결정하여 적용하고 있는 것으로 나타났다.

Table 2.1. Default MCF values for the domestic wastewater

Type of treatment and discharge pathway or system	Comments	MCF <sup>1</sup>	Range
Untreated system			
Sea, river and lake discharge	Rivers with high organics loadings can turn anaerobic.	0.1	0 - 0.2
Stagnant sewer	Open and warm	0.5	0.4 - 0.8
Flowing sewer (open or closed)	Fast moving, clean. (Insignificant amounts of CH <sub>4</sub> from pump stations, etc)	0	0
Treated system			
Centralized, aerobic treatment plant	Must be well managed. Some CH <sub>4</sub> can be emitted from settling basins and other pockets.	0	0-0.1
Centralized, aerobic treatment plant	Not well managed. Overloaded.	0.3	0.2-0.4
Anaerobic digester for sludge	CH <sub>4</sub> recovery is not considered here	0.8	0.8-1.0
Anaerobic reactor	CH <sub>4</sub> recovery is not considered here.	0.8	0.8-1.0
Anaerobic shallow lagoon	Depth less than 2 metres, use expert judgment.	0.2	0-0.3
Anaerobic deep lagoon	Depth more than 2 metres	0.8	0.8-1.0
Septic system	Half of BOD settles in anaerobic tank.	0.5	0.5
Latrine	Dry climate, ground water table lower than latrine, small family (3-5 persons)	0.1	0.05-0.1 5
Latrine	Dry climate, ground water table lower than latrine, communal (many users)	0.5	0.4-0.6
Latrine	Wet climate/flush water use, ground water table higher than latrine	0.7	0.7-1.0
Latrine	Regular sediment removal for fertilizer	0.1	0.1

<sup>1</sup> Based on expert judgment by lead authors of this section.

## 2.3 메탄 배출계수 개발현황

하수처리시설에 대한 메탄 배출계수의 개발은 매립 및 소각분야에 비하여 연구사례가 적은 것으로 조사되었다. 그 이유는 해외 온실가스 인벤토리 보고서(NIR)를 분석하여 본 결과 하·폐수분야의 메탄 배출량의 경우 거의 대부분의 나라에서 “Key Category”에 포함되지 않으며, 또한 하·폐수분야 중 하수처리시설에서의 배출량이 차지하는 비중이 매우 낮아 중요도에서 다른 분야에 비해서 떨어지기 때문으로 판단된다. 우리나라는 2000년 및 2002년에 환경부에서 국내하수처리시설에 대해서 실측을 통하여 메탄 배출계수를 개발하였으며, 그 이후로는 국립환경과학원 및 한국환경공단에서 간헐적으로 배출계수에 대한 개발이 이루어졌다. 그러나 국내에서 개발된 메탄 배출계수 또한 측정방법, 현장측정지점의 선정 등 표준화된 절차에 의하여 실시되지 못했으며, 농도 분석방식 또한 현장분석이 아닌 시료채취후 GC를 통한 분석을 통하여 이루어져서 현장에서의 측정값의 안정화 등에 대한 판단이 불가능한 방식으로 진행되어 왔다. 아래에서 국내·외 하수처리시설의 메탄 배출계수에 대한 개발사례에 대해서 구체적으로 살펴보았다.

### 2.3.1 국내사례

국내 하수처리시설에 대한 메탄 배출계수는 매립, 소각 등 다른 폐기물분야의 온실가스 배출계수 개발사례와 비교하여 보면, 상대적으로 적으며 주로 환경부와 한국환경공단을 통해서 수행되어왔다. 국내 연구논문의 경우도 대부분 이와 관련하여 발표되었다. 따라서 본 연구에서는 자료의 신뢰성 등을 고려하여 환경부 및 한국환경공단에서 개발된 하수처리시설에 대한 메탄 배출계수에 대해서 살펴보았다.

### 2.3.1.1 환경부(2000, 2002)

현재 국내 하수분야 온실가스 배출량 산정방법론에 적용되고 있는 메탄 배출계수는 0.01532 t CH<sub>4</sub>/t BOD로 이는 환경부(2000) 및 환경부(2002) 결과를 평균한 값으로 개발방법 및 결과 등은 Table 2.2와 같다.

환경부의 연구(2000)는 표준활성슬러지공법 2개소에 대해서 침사지, 농축조, 가스저장소 등에서 하절기 1회 시료채취후 GC(FID)로 분석하였으며, 환경부의 연구(2002)는 표준활성슬러지공법 및 회전원판법의 하수처리시설 각각 1개소에 대해서 침사지, 일차·최종 침전지, 농축조, 소화조 등에 대해서 계절별로 4회 시료채취후 GC(FID)로 분석하였다.

Table 2.2. CH<sub>4</sub> EF of MOE

	MOE(2000)	MOE(2002)
EF	0.0207	9.9480×10 <sup>-3</sup>
Process	Activated sludge : 2	Activated sludge : 1 RBC : 1
Site	Grit Chamber, Thickener, Gas storage tank	Grit Chamber, Digester, 1·2 clarifier, Thickener
Method	Chamber Method	
Analysis	GC(FID)	

### 2.3.1.2 국립환경과학원(2007)

국립환경과학원의 연구(2007)에서는 하수처리공법별(5-Stage공법, 표준활성슬러지공법, Denipho공법, SBR공법)로 1회 시료채취후 GC로 분석하였으며, 각각의 측정지점 및 분석방법은 Table 2.3과 같다.

Table 2.3. CH<sub>4</sub> EF of NIER

Process	Activated sludge	5 Stage	DeNipho	SBR
EF	0.00161	0.00057	0.00288	0.00414
Site	1st clarifier, Aerobic(in), Aerobic(out), 2nd clarifier	Anaerobic, Anoxic, Aerobic(in), Aerobic(center)	Anaerobic, Intermittent Aerobic1, Intermittent Aerobic2, Aerobic	Aerobic1, Anaerobic1, Aerobic2, Anaerobic2
Method	Chamber Method			
Analysis	GC(FID)			

### 2.3.2 국외사례

국외 하수분야 배출계수 개발 사례는 국내사례와 유사하게 다른 폐기물분야에 비하여 적은 편이며, 일정한 측정방식이나 단위의 통일성이 없기 때문에 실제로 값을 비교하기에 어렵다. 따라서 본 연구에서는 배출계수에 대한 신뢰성 등을 고려하여 ANNEX I 국가가 국가 온실가스 인벤토리 보고서(NIR) 작성시 적용한 하수처리시설에 대한 메탄 배출계수 위주로 살펴보았다.

하·폐수는 다양한 처리형태 및 방법에 의해서 처리되며, ANNEX I 국가는 국가별 실정에 맞게 처리형태(처리, 미처리 등) 및 처리방법(호기성처리, 혐기성처리, 정화조 등)에 따라서 구분하여 하수분야의 배출량을 산정하며 매년 온실가스 배출량 등에 대한 정보를 국가 온실가스 인벤토리 보고서(NIR)형태로 보고하고 있다. Fig. 2.3은 2006 G/L에서 제시하고 있는 하수처리시스템 및 처리경로를 나타내고 있다.

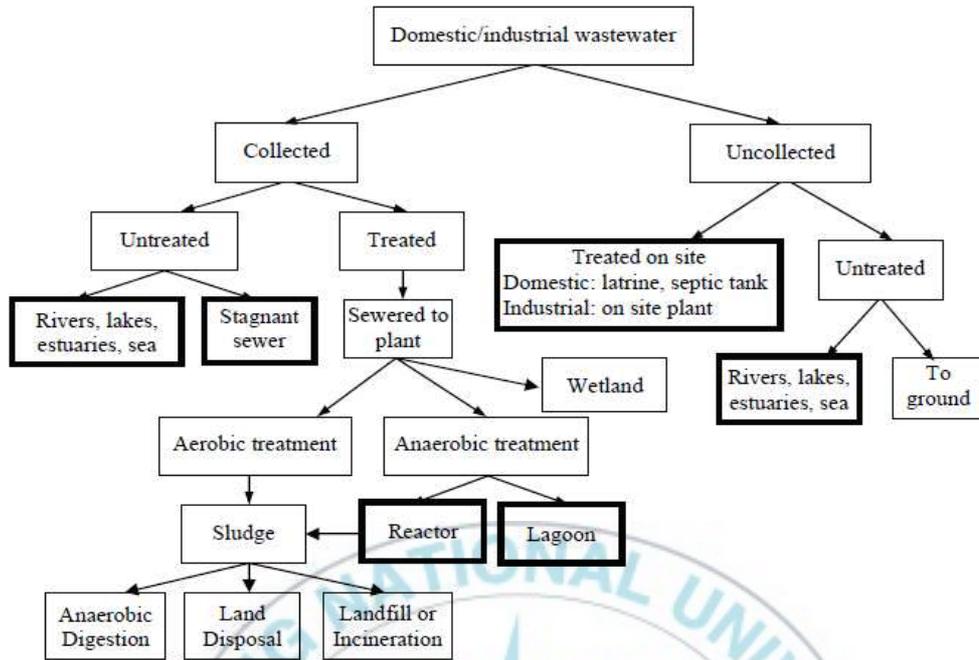


Fig. 2.3. Wastewater treatment systems and discharge pathways

본 연구에서는 ANNEX I 국가의 하수처리시설에 대한 메탄 배출계수 적용현황을 검토하기 위하여 2013년 8월 기준 UNFCCC에 제출된 ANNEX I 국가의 온실가스 인벤토리 보고서를 대상으로 메탄 배출계수 적용현황을 조사하였다.

Fig. 2.4 및 Table 2.4는 ANNEX I 40개 국가(EU제외)에 대한 하수처리시설의 메탄 배출계수 적용현황이다.

하수처리시설에 대한 메탄 배출계수 적용현황을 분석하여 본 결과, 하수분야 메탄 배출량 산정시 하수처리시설에 대해서 별도로 인벤토리에 구분하여 산정하는 국가는 일본 등을 포함하여 17개 국가이며, 나머지 23개 국가는 하수처리시설이 인벤토리에 포함되어 있지 않고 정화조(Septic tank), 호기성처리(MCF : 0) 또는 슬러지처리에서만 발생 등으로 카테고리가 구분되어져 있거나 확인이 불가능한 경우로 조사되었다.

하수처리시설에 대해서 별도로 메탄 배출량을 산정하는 17개 국가 중 15개 국가는 IPCC 기본방법론( $B_0 \cdot MCF$ )을 적용하고 있으며, 이중 6개 국가는 IPCC G/L에서 제시한 MCF 기본값을 그대로 적용하고 있으며, 9개 국가의 경우는 전문가의 판단 등을 통하여 고유 MCF값을 적용하는 것으로 조사되었다.

하수처리시설에 대한 메탄 배출계수를 배출계수형태(EF)로 적용하는 나라는 일본과 스위스가 있으며, 일본의 메탄 배출계수는  $528.7 \text{ mg CH}_4/\text{m}^3$ 이며, 이 값을 일본 NIR에서 제시된 BOD농도값( $180\text{mg/L}$ )을 적용하여 단위를 변경하면 배출계수는  $0.002937 \text{ kg CH}_4/\text{kg BOD}$ 이 된다. 스위스는  $55 \text{ g/inhabitant}$ 를 적용하고 있는 것으로 조사되었다.

하수처리시설에 대해서 별도로 메탄 배출량을 산정하는 17개 국가 중 오스트레일리아, 미국, 스위스를 제외한 14개 국가의 평균 메탄 배출계수는  $0.04484 \text{ kg CH}_4/\text{kg BOD}$ 로 조사되었다.

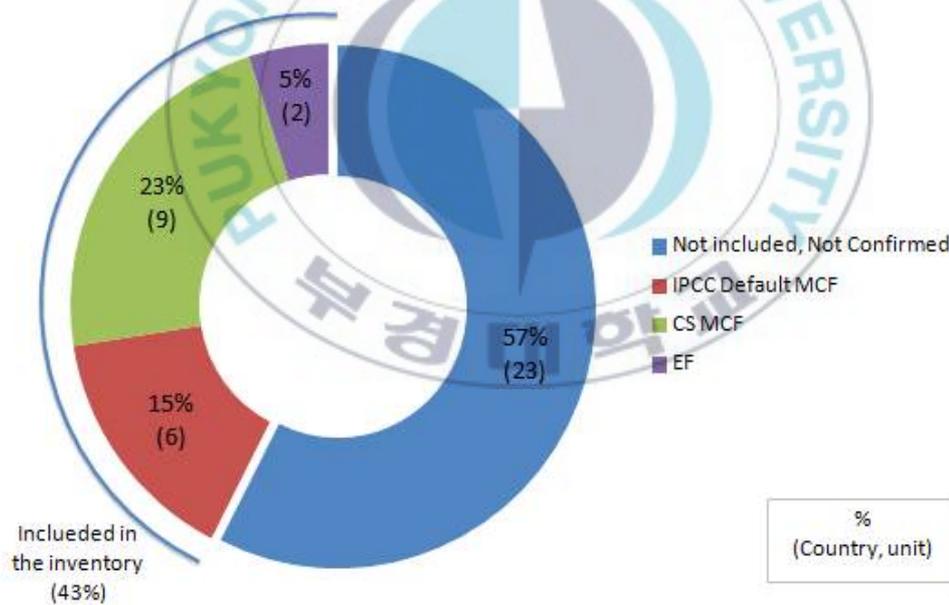


Fig. 2.4.  $\text{CH}_4$  EF about the WWTP in the ANNEX I

Table 2.4. CH<sub>4</sub> EF about the WWTP in the ANNEX I .

Country		WWTP				
		Inclusion of category	Method	EF		
				Emission factor	MCF*BOD	EF
1	AUSTRALIA	O	GPG 2000	D	0	-
2	AUSTRIA	O	GPG 2000	CS	0.162	-
3	BELARUS	X	X	X	-	-
4	BELGIUM	X	X	X	X	-
5	BULGARIA	O	2006 G/L	D	0.18	-
6	CANADA	X	X	X	X	-
7	CROATIA	X	X	X	X	-
8	CZECH	O	GPG 2000	CS	0.03	-
9	DENMARK	O	GPG 2000	D	0.0018	-
10	ESTONIA	X	X	X	X	-
11	FINLAND	O	1996 G/L	CS	0.00625	-
12	FRANCE	-	-	-	-	-
13	GERMANY	X	X	X	X	-
14	GREECE	-	-	-	-	-

Country		WWTP				
		Inclusion of category	Method	EF		
				Emission factor	MCF*BOD	EF
15	HUNGARY	O	2006 G/L	CS	0.03	-
16	ICELAND	X	X	X	X	-
17	IRELAND	X	X	X	X	-
18	ITALY	O	GPG 2000	CS	0.03	-
19	JAPAN	O	CS	CS	X	528.7 mg CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup>
20	LATVIA	X	X	X	X	-
21	LIECHTENSTEIN	X	X	X	X	-
22	LITHUANIA	O	GPG 2000	CS	0.0018	-
23	LUXEMBOURG	X	X	X	X	-
24	MONACO	X	X	X	X	-
25	NETHERLANDS	X	X	X	X	-
26	NEW ZEALAND	-	1996 G/L	CS	-	-
27	NORWAY	X	X	X	-	-
28	POLAND	X	X	X	-	-
29	PORTUGAL	O	GPG 2000	CS	0.006	-
30	ROMANIA	O	1996 G/L	CS	0.027	-

Country		WWTP				
		Inclusion of category	Method	EF		
				Emission factor	MCF*BOD	EF
31	RUSSIA	-	-	-	-	-
32	SLOVAKIA	O	2006 G/L	D	0.06	-
33	SLOVENIA	O	1996 G/L	D	0.03	-
34	SPAIN	-	-	-	-	-
35	SWEDEN	-	-	-	-	-
36	SWITZERLAND	O	CS	CS	-	55 g/inhabitant
37	TURKEY	O	1996 G/L	D	0.06	-
38	UKRAINE	-	-	-	-	-
39	United kingdom	-	-	-	-	-
40	USA	O	GPG 2000	CS	-	-

noted

Inclusion of category : O(Included), X(not Included), -(Not confirmed)

EF : CS(Country Specific), X(Not Included), -(Not Confirmed)

## 2.4 불확도 개념

### 2.4.1 불확도 개념

불확도(Uncertainty)란, 측정값들의 범위와 상대적 분포가능성을 기술할 수 있는, 진실한 값에 대한 상대적인 측정오차를 의미하며 측정량을 합리적으로 추정된 분산특성을 나타내는 파라미터이다.

불확도 산정은 완전한 온실가스 인벤토리 구축을 위한 본질적인 요소이며 인벤토리의 정확도를 향상시키기 위한 실질적인 QA/QC의 실시를 위하여 필요하다(환경부, 2011).

측정결과에 대한 신뢰성을 나타내기 위해서 지금까지는 오차(error), 정확도, 정밀도 및 불확도 등의 여러 종류의 개념들을 사용하여 왔으나, 분야별로 표현 방법이 상이하여 통일된 지침이 필요하게 되었다. 이에 따라 1993년 국제 표준화기구(ISO, International Organization for Standardization)에서 불확도 표현 지침서(GUM, Guide to the expression of Uncertainty in Measurement)를 발행하게 되었고, 이 지침서에 의한 불확도 산출 및 표현방법이 전 세계적으로 확산되어 사용되고 있다.

### 2.4.2 불확도 평가

온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 운영지침(환경부, 2011)에 제시되어 있는 일반적인 온실가스 배출량의 측정불확도 평가절차는 Table 2.5와 같다.

사전검토단계(1단계)는 배출시설 및 배출활동에 대하여 배출량 산정과 관련한 매개변수의 종류, 측정이 필요한 자료, 불확도를 발생시키는 요인을 파악하고 규명하는 단계이다.

Table 2.5. Estimation procedure of the GHG measurement uncertainty

Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
Preview	Estimation of uncertainty	Combination of uncertainty (Multiplication)	Combination of uncertainty (Addition & Subtraction)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classification and review of variable</li> <li>• Review of uncertainty's cause (Expert review...)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determine the probability distribution</li> <li>• Estimation of Standard deviation, mean, uncertainty</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calculation of the individual uncertainty</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The calculation of the total uncertainty</li> </ul>

표준불확도의 추정단계(2단계)는 온실가스 배출량 산정과 관련한 불확도의 추정에서는 표본채취에 대한 확률분포가 정규분포를 따른다는 가정 하에 95%의 신뢰구간에서 불확도를 추정하는 것을 요구하는데, 이에 따라 확률분포값 또는 표준편차 등을 통해서 표준불확도를 산정하는 단계이다.

불확도의 조합단계(3단계, 4단계)는 각 매개변수의 표준불확도를 조합하여 배출량의 불확도를 결정하는 단계이다.

각 단계에 대한 설명은 아래와 같다.

#### 2.4.2.1 사전검토

불확도 평가는 완전한 온실가스 배출량과 저감량 산정을 위해서 필수적인 요소이다. 이는 배출계수, 활동자료 등의 각 부문을 위한 기타 산정모수와 같은 구성인자 뿐만 아니라 국가적 수준 및 추세의 산정을 위해서도 실시되어야 한다(IPCC, 2006).

인벤토리에서의 불확도 요인들은 아래와 같다(한국환경공단, 2011).

- 정의로부터의 불확도(예를 들어, 배출이나 흡수(uptake)에 대한 불완전하거나 불분명하거나 잘못된 정의를 의미)
- 배출이나 흡수가 일어나는 과정에서의 자연적인 변동성(variability)에 의한 불확도
- 사용된 방법에 따라 다음을 포함한, 과정이나 값의 평가로부터 기인한 불확도; (i) 측정에서의 불확도, (ii) 표본으로부터의 불확도, (iii) 불완전하게 설명되어 있을 수 있는 참고 데이터로부터의 불확도, 그리고 (iv) 전문가 판단으로부터의 불확도

불완전한 측정 때문에 발생하는 불확도는 다음과 같다.

- 측정, 기록 및 정보의 전달에 있어서 개인적인 편향(bias);
- 한정된 기기 해상도(instrument resolution) 또는 식별역치(discrimination threshold);
- 정확하지 않은 측정 표준 값과 참조 자료의 값;
- 외부의 요인들(source)로부터 얻거나 데이터 정리 알고리즘(예를 들어 IPCC 기본값)을 사용한 상수 및 다른 매개변수들의 부정확한 값;
- 측정방법과 산정절차에서의 통합된 가정 및 근사치;
- 배출 및 흡수에서의 반복된 관측에서의 변화나 명백히 동일한 조건하에서의 값과 관련된 변화

Table 2.6은 IPCC G/L에서 제시한 불확도의 여러 다른 원인을 다루기 위한 방법이다(IPCC, 2006).

Table 2.6. Typical strategies for dealing with different causes of uncertainties

Causes of Uncertainty	Strategy			Other Comments <sup>1</sup>
	Evaluated Conceptualisation and Model Formulation	Empirical and Statistical	Expert judgement	
Lack of completeness	√			Have key components of the system been omitted? If so, what is the quantifiable or nonquantifiable effect on systematic error? Proper QA/QC should help avoid this.
Model (bias and random errors)	√	√	√	Is the model formulation complete and accurate? What is the uncertainty in model predictions based on validation of the model? What is the estimate of model accuracy and precision based on expert judgment if statistical validation data are not available?
Lack of data			√	If data are lacking, can expert judgment be used to make inferences based on analogous (surrogate, proxy) data or theoretical considerations? May be related to lack of completeness and model uncertainty.
Lack of representativeness of data	√	√	√	
Statistical random sampling error		√		E.g., statistical theory for estimating confidence intervals based on variability in the data and sample size.
Measurement error: random component		√	√	
Measurement error: systematic component (bias)	√		√	QA/QC and verification may provide insight.
Misreporting or Misclassification		√	√	Proper QA/QC should help avoid this.
Missing data		√	√	Statistical or judgment-based approaches to estimating uncertainty because of non-detected measurements or other types of missing data.

<sup>1</sup> It is *good practice* to apply procedures for QA/QC and verification prior to or combining with developing uncertainty estimates according to the guidance in Chapter 6. The QA/QC and verification procedures provide a useful basis for preventing mistakes and for identifying (and preferably correcting) biases. Furthermore, QA/QC should prevent or help detect and correct misreporting and misclassification errors, and there should be iteration between uncertainty analysis and QA/QC if application of the uncertainty methods uncovers potential QA/QC problems.

#### 2.4.2.2 불확도 추정

Fig. 2.5는 IPCC G/L에서 제시한 일반적인 불확도 분석의 전체적인 구조이다 (IPCC, 2006). 불확도 추정은 (1) 개념화, (2) 모형 및 (3) 입력 자료(예를 들면, 활동도 또는 배출계수)와 가정에 기초로 한다. 이들 세 가지는 각각 불확도의

발생원인이 될 수 있다. 분석은 개념화(conceptualisation)에서 시작되며, 이는 인벤토리의 구조 및 부문(sector)의 구조에 관한 일련의 가정이다. 이러한 가정은 지역 범위, Temporal averaging time, 배출/흡수 프로세스 또는 온실가스의 종류 등을 포함한다. 가정 및 방법론의 선택은 정보 및 자료를 위한 요구를 결정하며, 자료 또는 가정과 방법론 선택 사이에는 어떤 상호작용이 존재할 수 있으며, 이것은 양방향 화살표로 표현된다(IPCC, 2006).

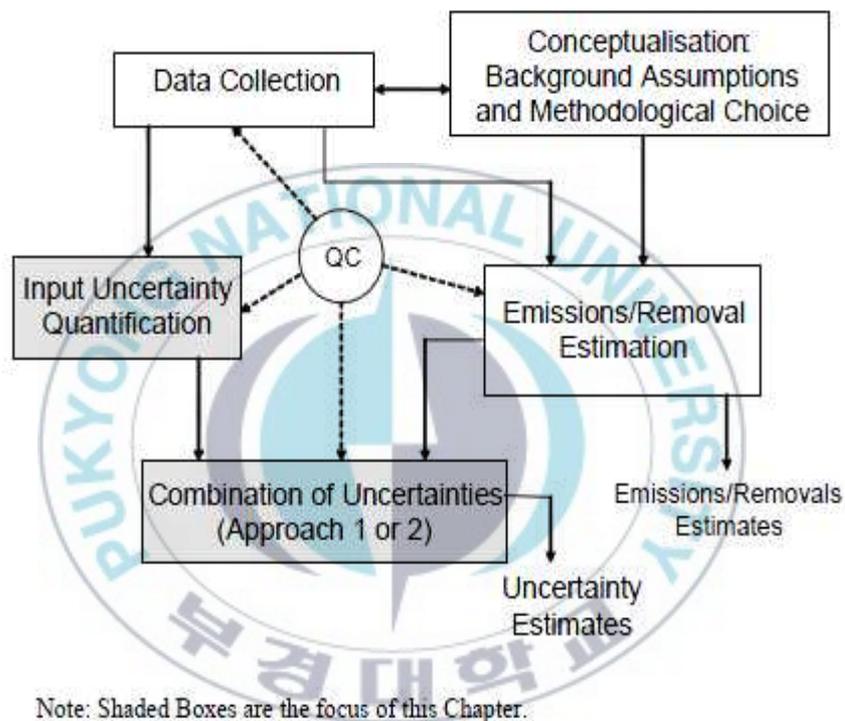


Fig. 2.5. Overall structure of a generic uncertainty analysis

### 2.4.2.3 불확도 조합

2006 G/L에서는 불확도의 산정에 대한 두 가지 접근법을 제시하고 있다. 접근법 1은 오차증식법(Sample error propagation equations)이며, 접근법 2는 몬테카를로 시뮬레이션 또는 유사기법을 적용하는 것이다(IPCC, 2006).

### 가) 오차증식법

오차증식법은 오차증식식(Error propagation equation)을 이용해 활동자료, 배출계수 및 기타 산정 모수의 불확도로부터 불확도를 증식하는 방법이다. 상관관계가 존재할 경우 상관관계를 명시적으로 포함할 수 있으며 또는 상관관계가 덜 중요한 적절한 수준으로 자료들을 합칠 수 있다(IPCC, 2006).

오차증식법의 주요가정은 온실가스 인벤토리 산정과 관련된 주요 변수(활동도, 배출계수 및 다른 주요한 변수)의 개별 오차가 전체 인벤토리의 오차를 산정하는 과정에서 증가하며, 그 관계는 오차증식 방정식(Error propagation Function)으로 나타낸다. 개별적인 오차사이에 상관관계가 존재하면 오차가 중복적으로 산정되는 문제가 발생하며, 이러한 상관관계가 발생되지 않도록 자료 준비과정부터 적절하게 관리할 필요가 있다. 각 입력에 대한 평균과 표준편차의 산출을 통해 접근법 1을 사용하여 정량 불확도를 산정하기 위해서는 모든 입력변수에 대한 방정식과 마찬가지로 산정결과가 방정식에 의해 합성되어야 한다(한국환경공단, 2011).

### 나) 몬테카를로 시뮬레이션

몬테카를로 시뮬레이션은 불확도가 크고, 분포가 비정규적이며, 알고리즘이 복잡 함수(complex functions)이며, 활동도와 배출계수 사이에 상관관계가 존재하는 경우에 적합하다. 몬테카를로 시뮬레이션에서는 지정된 PDF(Probability Density Function, 확률밀도함수)에 따라 가상적 확률표본(Pseudo-random samples)이 생성된다(IPCC, 2006). 표본들은 가상적 난수생성기로 불리는 알고리즘에 의해 생성되므로 가상적 무작위로 불리며, 가상적 난수생성기는 재생 가능한 수열을 만들며 이 수열들은 무작위적인 속성을 지닌다(IPCC, 2006).

다수의 산정치들은 모형의 출력에 관한 PDF의 표본값이다. 평균, 표준편차, 95% 신뢰구간, 모형의 출력 및 출력의 기타 속성을 구하기 위해 PDF의 표본들

을 분석함으로써 PDF로 추론된다. 몬테카를로 시뮬레이션은 수치적 기법이기 때문에, 반복횟수를 증가시킴으로써 결과의 정밀도는 지속적으로 개선된다.

수치적 통계 기법 중 하나인 몬테카를로 시뮬레이션은 아래와 같은 경우에는 배출량 및 흡수량의 불확도 산정 시 접근법 1인 오차증식법 보다 좀 더 적절하다고 판단된다(IPCC, 2006).

- 불확도가 클 경우
- 분포가 정규분포를 따르지 않을 경우
- 알고리즘이 복잡하게 작용할 경우
- 활동자료 및 배출계수들이 혹은 두 가지 모두의 경우에서 상관관계가 발생할 경우



## 2.5 불확도 적용현황

국내·외 하수처리시설에 대한 메탄 배출계수의 개발사례가 적은 만큼 이에 대한 불확도 평가 또한 거의 없는 실정이다. 실제로 국가 배출량 산정시 적용한 메탄 배출계수에 대한 불확도는 IPCC G/L에서 제시한 기본값을 적용하고 있으며, 관련 연구자료 또한 IPCC G/L 기본값의 적용을 제시하고 있다(환경관리공단, 2007). 해외 주요국가의 경우도 대부분 IPCC G/L에서 제시한 기본값을 적용하고 있으며, 추가적으로 전문가판단 등을 통해 결정된 불확도값을 적용하고 있다.

### 2.5.1 국내사례

국내 하수처리시설에 대한 메탄 배출계수 개발은 사례가 적으며, 측정결과에 대한 불확도를 제시한 경우는 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 온실가스종합정보센터(GIR, Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea)에서 제시한 국가 고유배출계수(온실가스종합정보센터, 2013) 및 환경관리공단(EMC, Environment Management Corporation)의 국내 하수처리시설에 대한 불확도 적용방안에 대한 연구자료(환경관리공단, 2007)에서 제시한 불확도 결과에 대해서 살펴보았다. Table 2.7은 하수처리시설에 대한 메탄 배출계수의 불확도 평가에 대한 국내 연구사례이다.

Table 2.7. Uncertainty of the CH<sub>4</sub> EF

Parameter	Uncertainty range		
GIR(2013)	±32%	MCF : 10%	2006 G/L
		B <sub>0</sub> : 30%	
EMC(2007)	±32%	MCF : 10%	2006 G/L
		B <sub>0</sub> : 30%	

검토결과, 국내 하수처리시설의 메탄 배출계수에 대한 불확도 적용사례 모두 IPCC 기본값을 활용하여 불확도를 산정하였으며, 불확도 값은 32%로 동일하였다.

## 2.5.2 국외사례

메탄 배출계수의 불확도 평가에 대한 사례는 메탄 배출계수에 대한 해외사례와 동일하게 국가 온실가스 인벤토리 보고서 작성시 적용한 불확도 사례를 조사하였다.

### 2.5.2.1 국외 평가방법론

2006 G/L에서 제시한 하수처리시설에 대한 불확도 산정 방법은 Table 2.8 과 같다(IPCC, 2006).  $B_0$ 는  $\pm 30\%$ 를 기본값으로 제시하였으며, MCF는 기술적인 면에 의존하기 때문에 전문가의 판단을 근거로 정화조 및 처리되지 않는 시스템은  $\pm 50\%$ , 라군 및 잘 처리되지 않는 처리시설은  $\pm 30\%$ , 잘 관리되는 중앙집중식 처리시설, 소화조 반응조는  $\pm 10\%$ 로 제시하고 있다.

$B_0$  및 MCF값을 불확도 조합방식에 의해서 계산하면 배출계수에 대한 불확도가 산출되며, 우리나라의 하수처리시설은 잘 관리되고 있는 시스템으로 판단할 수 있으므로  $B_0 \pm 30\%$ ,  $MCF \pm 10\%$ 를 적용하여 조합하여 보면 메탄 배출계수의 불확도는  $\pm 32\%$ 로 산정된다.

Table 2.8. Default uncertainty ranges for the domestic wastewater of the IPCC G/L

Parameter	Uncertainty range
Emission factor	
$B_0$	$\pm 30\%$
MCF	The MCF is technology dependent. Thus the uncertainty range is also technology dependent. The

Parameter	Uncertainty range
	uncertainty range should be determined by expert judgement, bearing in mind that MCF is a fraction and must be between 0 and 1. Suggested ranges are provided below.
	Untreated systems and latrines, $\pm 50\%$
	Lagoons, poorly managed treatment plants, $\pm 30\%$
	Centralized well managed plant, digester, reactor, $\pm 10\%$

### 2.5.2.2 ANNEX I 국가의 불확도 적용사례

ANNEX I 국가(EU 제외)의 하수분야에 대한 불확도 적용사례는 아래와 같다. 배출계수에 대한 불확도 값을 확인할 수 있는 국가는 총 24개 국가로 이중 8개 국가는 IPCC G/L에서 제시한 기본값을 적용하였으며, 4개 국가는 전문가의 판단에 의하여 불확도값을 산정하였으며, 벨기에는 EU국가에서 적용한 불확도의 최대값과 최소값의 평균값 적용하였으며, 루마니아는 참고문헌상의 불확도 값을 적용하였으며, 일본은 실제 측정자료를 통해서 불확도를 산정하였다. 나머지 9개 국가는 불확도값은 제시되어 있으나 불확도 산정방법에 대해서 확인이 불가하였다.

ANNEX I 40개 국가중 배출계수에 대한 불확도 값을 확인할 수 있는 국가는 총 24개의 하수분야에 대한 메탄 배출계수의 평균불확도는 46.93%로 산정되었으며, 그중 일본은 실제 측정자료로 불확도를 산정하였는데 그 값은 30.9%로 제시되어 있다.

Fig. 2.6 및 Table 2.9는 ANNEX I 40개 국가(EU제외)에 대한 하수분야의 메탄 배출계수에 대한 불확도 적용현황이다.

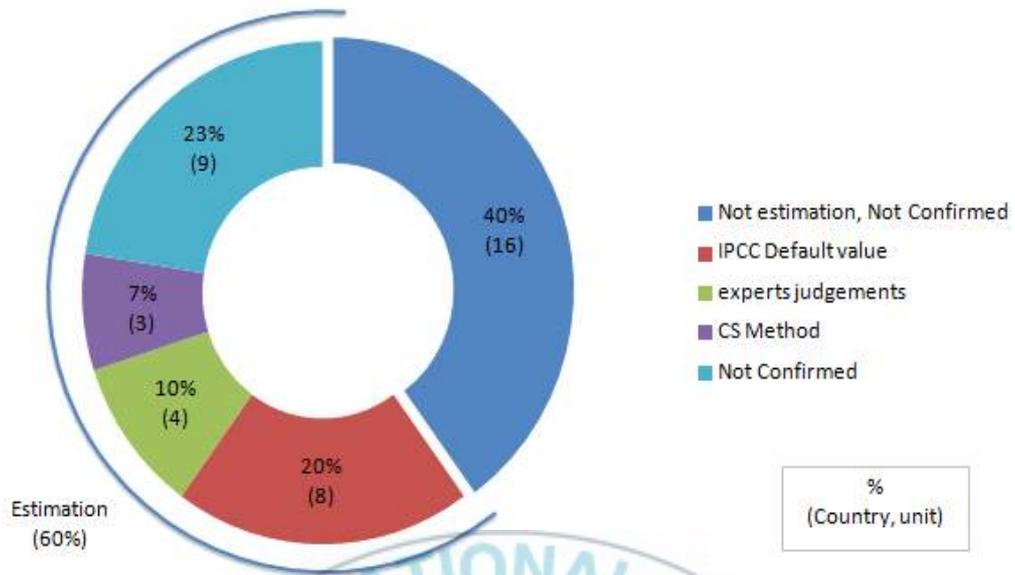


Fig. 2.6. CH<sub>4</sub> EF uncertainty about the wastewater handling sector in the ANNEX I



Table 2.9. CH<sub>4</sub> EF uncertainty about the WWTP in the ANNEX I

	Country	Uncertainty			
		Activity data		Emission factor	
		data	Source	data	Source
1	AUSTRALIA	0	-	50	-
2	AUSTRIA	20	Experts judgements	50	Experts judgements
3	BELARUS	-	-	-	-
4	BELGIUM	20	Experts judgements	70	Average of EU(max, min)
5	BULGARIA	30	-	30	-
6	CANADA	-	-	-	-
7	CROATIA	50	Experts judgements	30	IPCC G/L default value
8	CZECH	21	Experts judgements	50	Experts judgements
9	DENMARK	24	IPCC G/L default value	32	IPCC G/L default value
10	ESTONIA	30	IPCC G/L default value	30	IPCC G/L default value
11	FINLAND	6	Experts judgements	27	Experts judgements
12	FRANCE	-	-	-	-
13	GERMANY	-	-	-	-
14	GREECE	30	IPCC G/L default value	100	IPCC G/L default value

	Country	Uncertainty			
		Activity data		Emission factor	
		data	Source	data	Source
15	HUNGARY	43	IPCC G/L default value	30	IPCC G/L default value
16	ICELAND	-	-	-	-
17	IRELAND	-	-	-	-
18	ITALY	100	IPCC G/L default value	30	IPCC G/L default value
19	JAPAN	10.4	Statistical uncertainties	30.9	Actual measurement data
20	LATVIA	10	-	30	IPCC G/L default value
21	LIECHTENSTEIN	-	-	-	-
22	LITHUANIA	30	Experts judgements	44	IPCC G/L default value
23	LUXEMBOURG	-	-	-	-
24	MONACO	-	-	-	-
25	NETHERLANDS	20	Experts judgements	25	Experts judgements
26	NEW ZEALAND	-	-	-	-
27	NORWAY	25	-	50	-
28	POLAND	30	-	100	-
29	PORTUGAL	30	-	38	-
30	ROMANIA	20	Reference	42.4	Reference

	Country	Uncertainty			
		Activity data		Emission factor	
		data	Source	data	Source
31	RUSSIA	-	-	-	-
32	SLOVAKIA	5	-	100	-
33	SLOVENIA	10	-	100	-
34	SPAIN	-	-	-	-
35	SWEDEN	-	-	-	-
36	SWITZERLAND	21.2	-	21.21	-
37	TURKEY	15	-	19	-
38	UKRAINE	-	-	-	-
39	United kingdom	-	-	-	-
40	USA	-	-	-	-

## 3. 연구방법

### 3.1 메탄 배출계수 개발

#### 3.1.1 대상시설의 선정

##### 3.1.1.1 국내 하수처리현황

일반적으로 “하수”라 함은 사람의 생활이나 경제활동으로 인하여 액체성 또는 고체성의 물질이 섞이어 오염된 물(오수)이라고 정의할 수 있으며, 또한 “공공하수처리시설”이라 함은 하수를 처리하여 하천, 바다 그 밖의 공유수면에 방류하기 위하여 지방자치단체가 설치 또는 관리하는 처리시설과 이를 보완하는 시설이라고 정의할 수 있다(환경부, 2013).

우리나라의 하수처리는 처리구역 내·외로 구분되며 이에 따라 오수 및 분뇨로 구분하여 처리되고 있다. 2007년 기준으로 각 가정 등에서 발생하는 오수의 90.23%는 하수처리구역 내에서 발생되나 하수처리구역 밖의 개별건물에서 발생하는 생활오수는 29만개소의 오수처리시설과 60만개의 단독정화조시설에서 처리되고 있다.

Table 3.1은 하수처리시설의 처리능력을 나타내고 있다(환경부, 2011). 2005년 이후 하수처리시설의 설계용량 및 실제처리량은 증가하고 있으나, 그 증가율은 점점 감소하는 추세를 보이고 있다. 이는 정부의 하수도정책의 패러다임의 변화에 기인한다. 정부는 ‘89년 맑은 물 공급 종합대책을 계기로 하수처리시설 및 관거의 확충 등에 집중 투자해 왔으며, 이를 통해 ’10년기준 하수도 보급률은 90.1%까지 향상되었다. 이후 양적 처리에서 효율적 운영·관리로 하수도정책 방향을 전환하였고, 이에 따라 하수도 서비스의 지역적 형평성 제고, 관거 보급률 및 하수슬러지의 처리 등으로 하수정책이 집중되면서 하수처리시

설의 설계용량의 증가율은 둔화된 것으로 판단된다(한국환경공단, 2011).

처리방법별로 비교하면, 2차 처리는 2001년에는 설계용량 및 실제처리량이 약 95%에 도달하였으나, 2010년에는 그 비율이 35% 이하로 감소하였다. 이와는 대조적으로 3차 처리는 2001년에 시설용량 및 처리비율이 약 1%에 머물렀으나, 2010년에는 그 비율이 68%까지 급증하였다. 이는 부영양화에 따른 질소 및 인에 대한 규제강화에 의해서 3차 처리(고도처리)시설이 증가한 것으로 판단되며, 향후 방류수 수질기준 강화 및 하수처리수 재이용 등의 하수도정책으로 인해 3차 처리 비율은 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.

Table 3.1. Treatment capacity of the WWTP

(Unit : 1,000ton/day, %)

Classification			2001	2005	2007	2008	2009	2010
Total	Design capacity		18,400	22,469	23,816	24,430	24,754	25,118
	Actual occupation		15,771	18,026	18,287	18,351	18,469	18,738
Primary treatment	Design capacity	capa.	530	-	-	-	-	-
		ratio	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Actual occupation	capa.	630	230	8	10	14	44
		ratio	4.0	1.3	0.0	0.1	0.1	0.2
Secondary treatment	Design capacity	capa.	17,603	16,176	14,788	11,014	9,045	8,453
		ratio	95.7	72.0	62.1	45.1	36.5	33.7
	Actual occupation	capa.	14,949	13,320	11,834	8,845	7,057	5,886
		ratio	94.8	73.9	64.6	48.2	38.2	31.4
Tertiary treatment	Design capacity	capa.	267	6,119	9,028	13,413	15,709	16,665
		ratio	1.5	27.2	37.9	54.9	63.5	66.3
	Actual occupation	capa.	192	4,476	6,453	9,495	11,398	12,808
		ratio	1.2	24.8	35.2	51.7	61.7	68.4

Table 3.2는 '09년도 기준 시설용량별 공공하수처리시설 현황이다. 시설용량 10만톤 이상이 개소수비는 11.7%(51개소)인 반면에, 시설용량 기준으로는 80.7%(19,738천톤/일)로 국내 하수처리시설은 대규모 시설 위주로 운영되고 있음을 알 수 있다.

Table 3.2. WWTP classification of the each design capacity

(Unit : 1,000ton/day, unit, %)

Classification	Total	1 under	1~5 under	5~10 under	10~50 under	50~100 under	100~500 under	500 over
Unit	437 (100)	70 (16.0)	124 (28.4)	61 (14.0)	102 (23.3)	29 (6.6)	37 (8.5)	14 (3.2)
Design capacity	24,731 (100)	46 (0.2)	304 (1.2)	411 (1.7)	2,291 (9.3)	1,941 (7.8)	7,609 (30.8)	12,129 (49.0)

### 3.1.1.2 카테고리 분류

국내 하수처리시설의 온실가스 배출계수를 개발하기 위해서는 우선 합리적인 카테고리 분류를 통한 배출계수 개발범위에 대한 판단이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 하수도통계(2007년 말 기준)를 이용하여 국내하수처리시설에 대해서 공법별 용량별로 특성을 분석하여 카테고리를 분류하였다. 국내하수처리시설은 2007년 기준 시설용량 500 톤/일 이상의 하수처리시설은 367개소가 운영되고 있었으며, 시설용량은 23,735,000 톤/일로 80여 종류의 처리공법으로 처리되었다. 카테고리 분석시에는 2007년과 2009년 모두 시설용량이 500톤/일 이상의 하수처리시설에 대해 산정하였으며, 2가지 공법을 동시에 운영하고 있는 하수처리시설에 대해서 별도의 하수처리시설로 구분하여 총 442개소로 구분하여 분석하였다. 본 연구에서는 IPCC G/L에서 언급한 고도처리에 대한 영향을 고려하고 국내 공법의 특성을 구분하기 위해서 생물학적 처리와 고도처

리로 구분하였으며, 생물학적 처리는 공법기준으로 표준활성슬러지법, 산화구법, 회전원판법, 접촉산화법, 장기포기법으로 구분하였고, 고도처리는 공법이 다양하여 공법이 유사한 계열로 A<sub>2</sub>O계열, Media계열, SBR계열, 미생물계열 및 기타계열로 나누었다. Fig. 3.1은 하수처리시설의 공법별 카테고리 분류결과이며, Table 3.4는 고도처리계열별 처리공법이다.

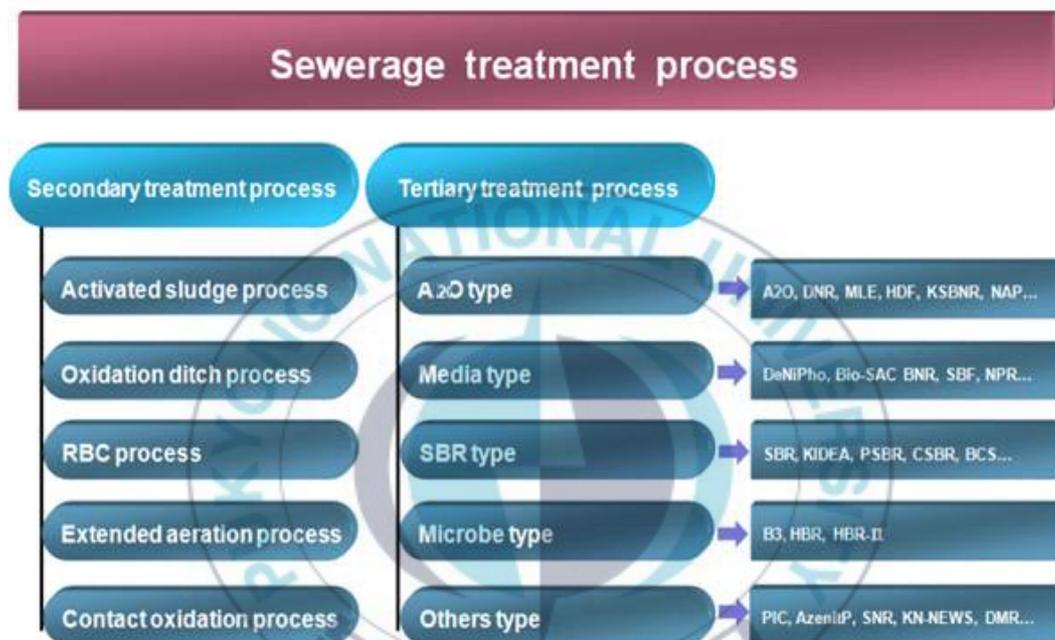


Fig. 3.1. Classification of the WWTP

Table 3.3은 2007년과 2009년의 하수처리공법별 시설용량 비율을 각각 나타내고 있다 2007년과 2009년의 각 공법별 비율은 변화되었지만 표준활성슬러지법, A<sub>2</sub>O계열, Media계열이 모두 상위 3개에 포함되었으며, 시설용량의 누적비율 또한 90% 이상을 차지함을 볼 수 있다(한국환경공단, 2012).

Table 3.3. Design capacity of of the WWTP

(Unit : unit, %)

Category	Process	2007		2009	
		Unit	Design capacity	Unit	Design capacity
Total		367	100	442	100
Secondary treatment	Activated sludge process	80	61.2	42	35.2
Tertiary treatment	A <sub>2</sub> O type	86	25.0	102	35.2
Tertiary treatment	Media type	38	6.1	86	22.4
Tertiary treatment	SBR type	86	3.8	129	3.1
Tertiary treatment	microbe type	17	1.8	17	1.4
Tertiary treatment	Others type	7	0.9	22	1.4
Secondary treatment	Oxidation ditch process	24	0.5	24	0.6
Secondary treatment	RBC process	13	0.4	12	0.4
Secondary treatment	Extended aeration process	10	0.4	8	0.3
Secondary treatment	Contact oxidation process	6	0.4	6	0.4

Table 3.4는 '07년도 기준 고도처리 계열구분에 따른 공법별 개소수 및 시설용량을 나타내고 있다. A<sub>2</sub>O계열의 경우 A<sub>2</sub>O공법, DNR공법 및 4-stage BNR공법이 많은 부분을 차지하고 있으며, Media계열에서는 NPR공법 및 DeNiPho공법이 주요 공법임을 알 수 있다.

Table 3.4. Design capacity of each process in the tertiary treatment process

A <sub>2</sub> O type				Media type			
Classification	Unit	Design apacity	%	Classification	Unit	Design capacity	%
A <sub>2</sub> O	18	2753.0	11.6	NPR	3	502.3	2.1
DNR	20	990.5	4.2	DeNiPho	15	421.5	1.8
4-STAGE BNR	5	852.0	3.6	BIOFOR	2	255.0	1.1
Cohesion Circulation	1	285.0	1.2	CNR	7	173.9	0.7
MLE	6	231.9	1.0	BSTS-II	3	41.0	0.2
BNR-c	1	149.0	0.6	Biostyr	1	30.0	0.1
ASA	1	146.0	0.6	BCF	2	11.6	0.0
MAAO	1	103.0	0.4	Bio-SAC	2	8.5	0.0
KS-BNR	3	96.2	0.4	KS-BNR	1	7.5	0.0
HDF	7	79.6	0.3	SWPP	2	7.0	0.0
Intermittent aeration fixed biofilm	3	72.4	0.3	total	38	1458.3	6.1
P/L-II	2	28.0	0.1	SBR type			
Bio-SAC BNR	1	25.0	0.1	Classification	Unit	Design capacity	%
S-BC	1	25.0	0.1	CSBR	3	513.0	2.2
pure oxygen aeration+chemical sedimentation	1	24.0	0.1	MSBR	2	134.0	0.6
BNR	2	16.0	0.1	SBR	34	112.7	0.5
VIP	1	12.0	0.1	KIDEA	10	36.1	0.2
NAP	1	11.0	0.0	ICEAS	10	33.6	0.1
5-STAGE BNR	1	6.0	0.0	ACS	3	15.1	0.1
BNR3	1	6.0	0.0	PSBR	5	14.2	0.1
MS-BNR	1	5.3	0.0	Vortex flow SBR	5	10.3	0.0
TEC-BNR	1	4.0	0.0	Fluidyne SBR	2	9.0	0.0
HANT	3	2.2	0.0	CASS	3	8.5	0.0
Queensland	1	2.0	0.0	BCS	5	5.5	0.0
symbio	1	1.7	0.0	OMNIFLO	1	3.0	0.0
ACS	1	0.9	0.0	C-TECH	1	2.0	0.0
KNR	1	0.9	0.0	2A2O	2	1.8	0.0
total	86	5928.6	25.0	total	86	898.8	3.8

### 3.1.1.3 대상시설 선정결과

국내 하수처리시설에 대한 메탄 배출계수를 개발하기 위하여 처리방법별, 용량별로 카테고리 분류를 실시하여 본 결과, 질소 및 인 등에 대한 규제가 강화됨에 따라 메탄 배출계수의 대표성 및 향후 효용성을 위하여 고도처리공법을 적용하는 시설에 대해서 배출계수를 개발하는 것이 타당한 것으로 판단되며, 고도처리공법 중 비중이 높은 A<sub>2</sub>O공법, 4-Stage BNR공법, NPR공법, DeniPho공법에 대해서 대표성 확보를 위해 대규모 처리시설 위주로 측정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

본 연구를 위한 대상하수처리시설의 선정결과는 Table 3.5와 같다.

Table 3.5. Selected Results of the Study sites

(Unit : 1,000ton/day)

Site	Type	Process	Design capacity
A	A <sub>2</sub> O	A <sub>2</sub> O process	680
B	A <sub>2</sub> O	A <sub>2</sub> O process	520
C	A <sub>2</sub> O	4-stage BNR process	300
D	Media	NPR process	600
E	Media	DeniPho process	520
F	A <sub>2</sub> O	MLE process	500
G	A <sub>2</sub> O	A <sub>2</sub> O process	460

본 연구에서 측정 대상 하수처리공법인 A<sub>2</sub>O공법, 4-Stage BNR공법, NPR공법, DeniPho공법 및 MLE공법에 대해서 알아보았다.

### 3.1.1.4 공법개요

#### 가) A<sub>2</sub>O공법

A<sub>2</sub>O공법은 Fig. 3.2와 같이 표준활성슬러지공법에서 탈질용 무산소조와 호

기공정에서 무산소조로의 내부공정을 추가한 것으로 A/O공법에서 질소제거 기능을 추가한 공법이다.

유입수와 반송슬러지가 혐기조(Anaerobic basin)로 유입되어 인의 방출과 유기물이 섭취가 이루어지고, 무산소조(Anoxic basin, 탈질조)에서는 호기조로부터 산화된 액이 순환되면서, 질산이나 아질산의 결합된 산소가 미생물의 호흡에 이용되어 탈질이 진행된다.

호기조(Oxic basin)에서는 유기물 산화, 인 섭취, 질소 질산화가 일어난다 (최정우 외, 2002).

Fig. 3.2는 A<sub>2</sub>O공법의 처리계통도이다.

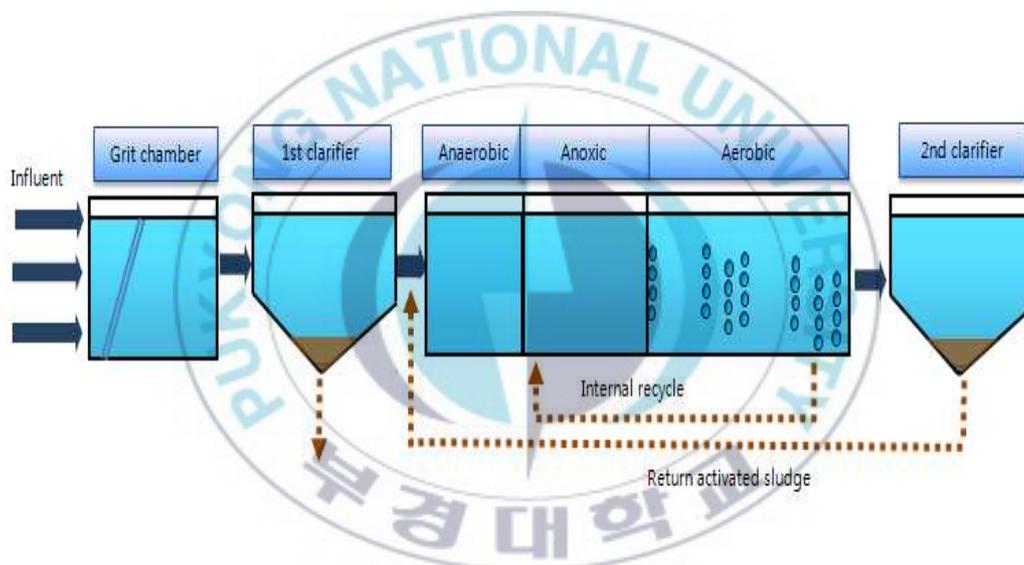


Fig. 3.2. System diagram of the A<sub>2</sub>O process

#### 나) 4-stage BNR공법

4-Stage BNR공법은 A<sub>2</sub>O공법의 변법으로 A<sub>2</sub>O공법과 유사하며 혐기조 전단에 전무산소조를 설치하여 반송수내에 존재하는 질산성 질소를 제거하여 혐기조에서 인방출을 원활하게 유도하도록 설계되었다는 특징이 있다(조진영, 2012). Fig. 3.3은 4-Stage-BNR공법의 처리계통도이다.

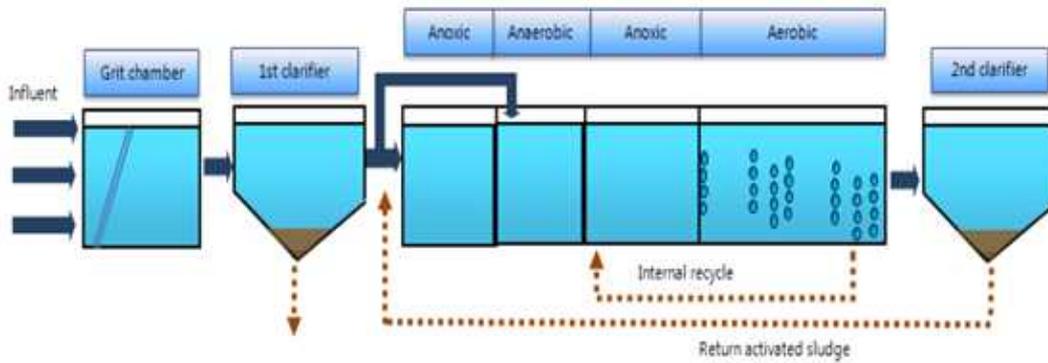


Fig. 3.3. System diagram of the 4-stage BNR process

#### 다) NPR공법

NPR공법은  $A_2O$ 공법의 변형 공법으로서 다공질의 BioCube 담체를 충전하여 담체 내 질산화미생물 고정으로 슬러지체류시간(Sludge Retention Time)을 길게 유지하는 특징이 있으며, 수온 저하시에도 안정적인 처리효율을 유지할 수 있다는 장점이 있다. 하수처리 공정은  $A_2O$ 공법과 유사하게 혐기조, 무산소조 및 호기조 등으로 구성되며 유입수를 혐기조와 무산소조에 나누어 주입하여 탈질과정에 필요한 유기탄소를 일부 확보하게 된다. Fig. 3.4는 NPR공법의 처리계통도이다(권영성 외, 2012).

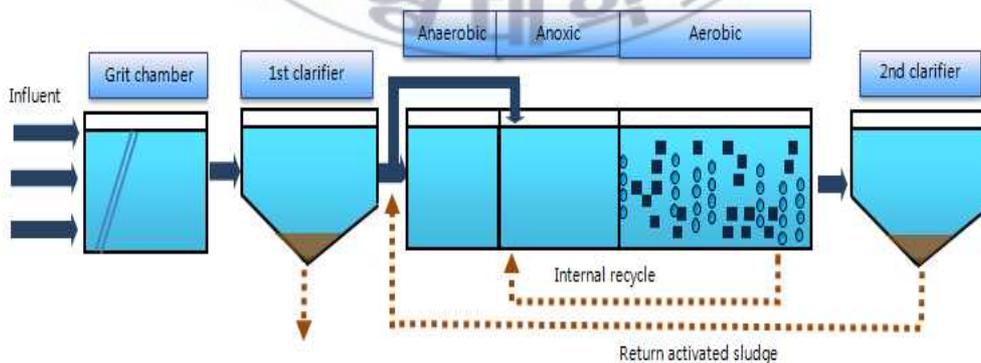


Fig. 3.4. System diagram of the NPR process

### 라) DeNiPho공법

DeNiPho공법은 간헐포기 기능이 구비된 펌프이젝터를 적용하여 포기 및 비포기를 교차로 반복하고, 유동상인 생물막담체가 충전된 간헐포기 접촉산화조에서 고농도의 미생물을 증식하며, 생물슬러지 유기산 발효액을 탈질반응에 필요한 탄소원으로 이용하여 유기물 및 질소/인을 제거하는 고도처리기술이다. 기술특징으로는 간헐포기 주기의 조절을 통해서 반응조의 용량을 변경하는 효과가 가능하며 다양한 운전조건을 선택할 수 있어 유입수의 성상 및 계절적 변화에 효과적으로 대처할 수 있다는 특징이 있다. LOCK은 공극이 크고 단단한 케이스에 내장되어 유효 표면적이 크며, 생체친화성이 큰 생물막 담체가 적용되므로 유동에 의한 전단력으로 노후된 미생물이 자동적으로 탈리되고, 활성이 큰 미생물이 고농도로 부착하므로 반응조의 용량을 줄일 수 있게 된다. 질산화와 탈질반응이 반복되는 간헐포기 기능, 슬러지발효액을 활용하는 후탈질, 내생호흡에 의한 탈질화 및 슬러지 반송수의 전탈질 공정을 종합하여 고도처리 효율을 향상시킨 기술이다. Fig. 3.5는 DeNiPho공법의 처리계통도이다(환경부 외, 2006).

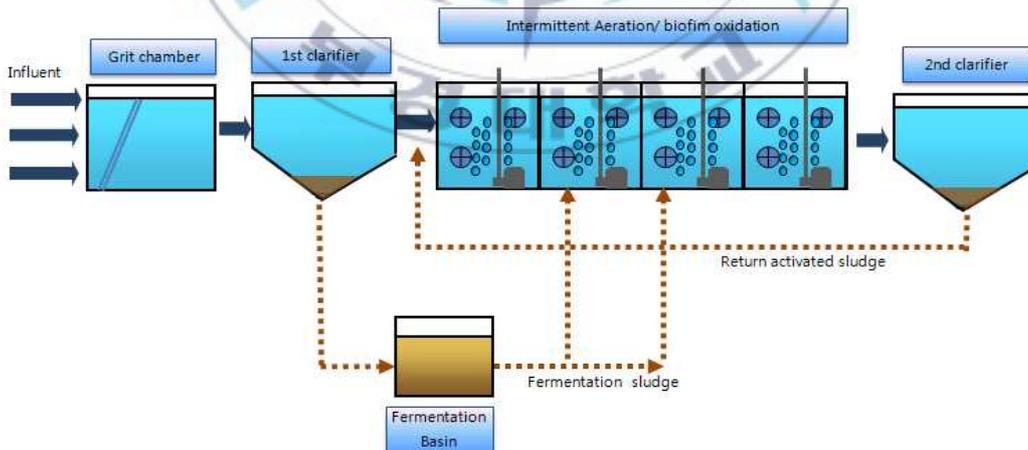


Fig. 3.5. System diagram of the DeNiPho process

### 마) MLE공법

MLE(Modified Ludzack-Ettinger)공법은 가장 보편적으로 사용되고 있는 BNR공법중 하나로 Barnard가 Ludzack-Ettinger의 초기 디자인에 호기조에 무산소조로 가는 내부반송을 개선하여 질산화 효율 뿐만 아니라 전체적인 질소제거효율이 증가 시켰다. Fig. 3.6은 MLE공법의 처리계통도이다(Stensel, H. D, 2002).

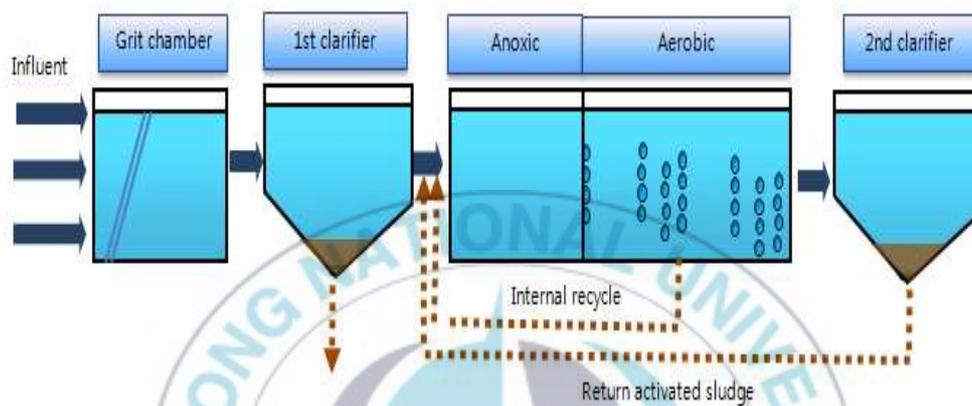


Fig. 3.6. System diagram of the MLE process

## 3.1.2 현장측정방법론

### 3.1.2.1 시료포집방법

정적 또는 동적 플럭스챔버(Flux chamber) 방법은 매립지, 토양 또는 수표면 등으로부터 발산되는 가스의 배출량을 측정할 수 있는 방법으로서, 악취 물질을 비롯하여 이산화탄소 및 메탄, 아산화질소 뿐만 아니라 가스상 수은 측정분야에 이르기까지 오염원에서 배출되는 다양한 가스상 물질의 채취와 측정에 이용되고 있다(이준기, 2012).

본 과제에 적용된 플럭스 챔버는 U.S. EPA(1986)에서 제안한 다이내믹 플럭스 챔버방법을 적용하였다. 측정방법을 간략하게 요약하면, 측정지점에 챔버를 설치하고 챔버내부로 이동가스를 유입시킨다. 이때 수증의 가스는 Henry의 법칙에 따라 발산되어 챔버 내에서 유입가스와 혼합되면 챔버 내부의 가스를 일정한 속도로 채취하고 분석하여 표면발산량을 산정한다(오 등, 2009).

플럭스 챔버를 이용하는 방법은 장치의 구성, 설치 및 운전이 비교적 간단하여 많이 적용되고 있으며, 실제 배출량 산정의 신뢰성에 영향을 줄 수 있는 Chamber와 관련된 요인으로는 Chamber 내부의 압력, Chamber로의 유입유량 그리고 Chamber 내부 온도 등이 있다(국립환경과학원, 2007). 측정에 사용된 챔버의 총부피는 32 L이며 수표면에 부유하게 되면서 일정부분이 잠기게 되어 실제 내부 부피는 30 L가 된다. 챔버 내부의 수위를 확인하기 위해서 30L가 되는 위치에 야광 테이프를 부착하였으며, 측정전에 펌프로 튜브의 부력을 조절하여 30L를 확인하고 측정을 실시하였다. 챔버는 로프를 이용하여 반응조내의 유속에 의해서 떠내려가지 않도록 고정하였다. 챔버 하부의 면적은  $0.13 \text{ m}^2$ 이며 이동가스는 참고문헌에서 제시한 기준( $< 0.3\text{ppmv THC}$ , U.S. EPA)을 만족하는 질소를 사용하였다(U.S. EPA, 1986). 호기조는 별도로 이동가스(Carrier gas)를 주입하지 않고 호기조의 폭기량을 이동가스로 고려하여 산정하였다(권 외, 2010)

Fig. 3.7은 측정시스템 모식도이다.

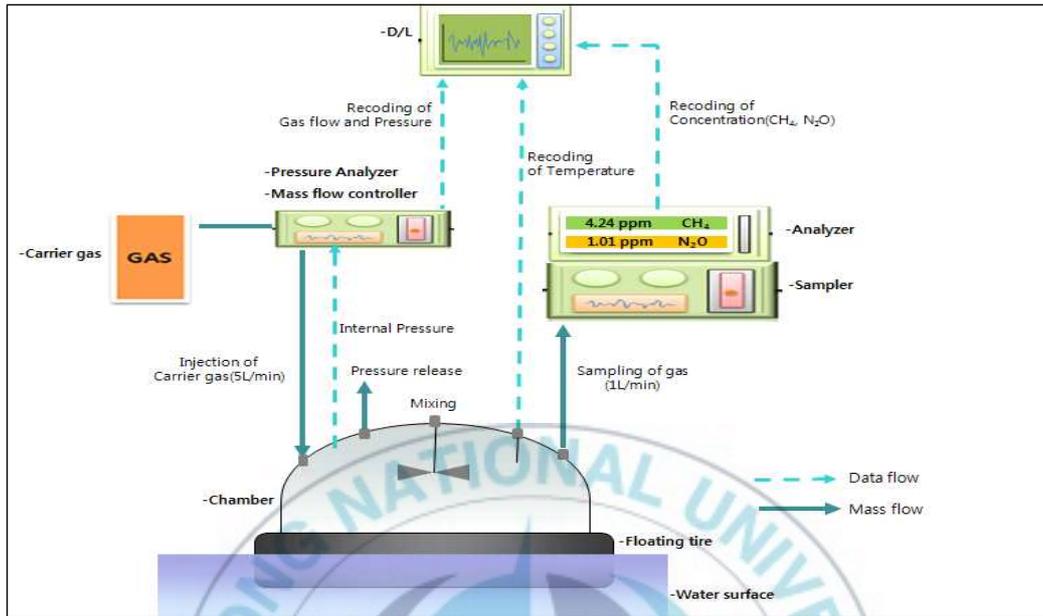


Fig. 3.7. Schematics of the measuring systems

플릭스 챔버의 가스 흐름이 안정적인 확인한 후 시료채취를 실시하며, 시료 채취와 동시에 챔버 내·외부 압력 및 온도를 측정하여 농도 측정결과와 함께 자료수입장치(데이터로거)에 자동으로 저장하였다(권 외, 2012, 조진영, 2012). 또한 별도의 현장측정기록지에 이동가스의 체류시간( $\tau$ ) 간격으로 이동가스 유량, 챔버 내·외부의 온도 및 압력, 측정지점의 여건을 포함한 특이사항을 기록하였다. 플릭스 챔버는 이동가스 체류시간( $\tau$ : 이동가스로 챔버가 채워지는 시간으로 챔버의 부피가 30L이고 5 L/min으로 이동가스가 유입되므로 체류기간은 6분임)의 4배(본 시스템의 경우 24분)가 될 때 안정된 상태가 되므로 이때의 시료값을 최종값으로 적용하였다(U.S. EPA, 1986).

하수처리시설의 표면발산량 측정시 조내의 유동, 복개 등에 따른 반응조내 때

탄가스의 체류 등에 의해서 표면 발산량의 변동이 발생하고 있는바, 본 연구에서는 4τ의 측정값에 대한 안정화 여부의 판단 기준은 5τ때의 농도가 4τ 때의 농도와 비교하여 변화율  $\pm 10\%$  이내 일 때가 안정된 것으로 보았으며, 또한 반응조 내 배경농도가 높아 지속적으로 농도가 감소할 경우는 4τ 이내에에서 변곡구간이 있다면 안정된 것으로 보았다. 일반적으로 측정지점에서 2회내지 3회 측정을 통하여 안정된 값을 사용하였다. 이동가스의 유속은 회수율 실험을 통해서 확인한 5 L/min으로 MFC(Mass Flow Controller)를 사용하여 플럭스 챔버에 일정하게 유입시키고, 1 L/min의 유량으로 시료를 채취하여 측정기(SIEMENS, ULTRAMAT 6)를 통하여 현장에서 분석하였다. 호기조의 경우 Czepiel P. M 등(1993)이 제시한 바와 같이 포기에어가 있기 때문에 이동가스를 별도로 주입하지 않고 단위면적당 포기 에어량을 이동가스 유량으로 반영하였다. 또한 측정결과는 한국산업표준에 의거 수치맞음을 실시하였다(기술표준원, 2008).

### 3.1.2.2 시료분석방법

플럭스 챔버를 통해 포집된 가스는 측정기(비분산적외선분석기)를 통해 현장에서 실시간으로 메탄농도를 분석하였다. 측정기는 측정전 실험실에서 교정등을 포함한 정비를 실시하였으며, 현장에서 측정시작 전에 제로(zero) 및 스패ن(span)교정을 추가로 실시하였다.

온실가스 측정기기는 형식승인 및 정기적 정도검사 대상이 아니므로 신뢰성 확보를 위하여 「환경측정기기의 형식승인 정도검사에 관한 고시(2009-61호)의 대기배출가스 측정기기 및 그 부속기기의 성능시험방법 및 세부시험기준」에 의거하여 자체 정도검사를 실시하였으며 그 결과는 Table 3.6과 같으며 국가공인기관인 한국환경공단에서 환경측정기기 일반시험으로 측정기기의 성능을 점검한 결과는 Table 3.7과 같다. 이동가스 및 교정가스 현황은 Table 3.8과 같다.

Table 3.6. Performance test results of the analyzer

Item	Results	
	Criteria	CH <sub>4</sub>
Zero drift	2%	0.6%
Span drift	2%	0.2%
Repeatability	2%	0.3%
Linearity	5%	1.9%
Response time	5min Under	1min 40sec

Table 3.7. Test results of the analyzer

Item	Results
	CH <sub>4</sub>
Zero drift	0.02%
Span drift	0.46%
Repeatability	0.02%
Response time	1min 40sec

Table 3.8. Status of the carrier gas and the calibration gas

Carrier gas/Zero calibration gas (N <sub>2</sub> , %)	Span calibration gas (CH <sub>4</sub> , ppm)
Purity : N <sub>2</sub> , Min. 99.999% O <sub>2</sub> : 1.0 μmol/mol T.H.C : N.D H <sub>2</sub> O : 1.8 μmol/mol Uncertainty : ±5%(Min 99.999%)	1. CH <sub>4</sub> : 501.2 2. CH <sub>4</sub> : 998.1 3. CH <sub>4</sub> : 4987 N <sub>2</sub> Balance <i>U</i> (Confidence level about 95% <i>k</i> =2) ±2%

챔버 내부에는 온도계와 압력관을 장착하여 내부의 온도와 압력을 측정하였으며, 이동가스 유속계, 온도계 및 압력계는 한국산업기술시험원에서 성능시험을 실시하였다. Table 3.9는 유속계, 온도계 및 압력계의 세부규격이다.

Table 3.9. Specification of the measurement unit

Class.	Flow meter	Thermometer	Pressure gauge
Maker	FATHOM	-	Endress+Houser
Form	Mass flow meter	K-type	Ceraphire
Range	0~7LPM	-20~100 °C	200kPa
Uncertainty (Confidence level about 95% $k=2$ )	±0.38%	±5.08%	±0.0863%

Certification : KTL(Korea Testing Laboratory)

Table 3.10은 회수율(Percent Recovery) 실험결과이다. 회수율시험은 U.S. EPA(1986)에서 제시한 방법으로 수행하였으며, 실험결과 회수율은 90.5%로 측정되었으며, 이를 불확도 산정시 고려하였다.

Table 3.10. The results of the recovery rate

Time(min)	Recovery rate(%)	Notes
	CH <sub>4</sub>	
0	15.6	
2	40.2	
4	52.4	
6	59.8	1τ
8	71.5	
10	77.3	
12	80.3	2τ
14	83.6	
16	85.6	
18	87.8	3τ
20	89.0	
22	89.9	
24	90.5	4τ
26	90.4	
28	90.3	
30	90.6	5τ

### 3.1.2.2 배출계수 산정식

배출계수 산정방법은 세단계로 구분할 수 있는데 첫단계는 지점별 메탄 측정 농도( $C_i$ , ppmv)를 바탕으로 지점별 메탄농도( $Y_i$ ,  $\mu\text{g/L}$ )를 산정하고, 두 번째 단계는 이동가스 유량, 챔버 단면적을 고려해 지점별 온실가스 발산량( $E_i$ )을 계산한다. 마지막 단계는 각 지점별 발산량을 활동자료(BOD 부하량)로 나누어서 지점별 온실가스 배출계수를 산정하고 이를 모두 더해 최종 배출계수를 개발한다 (권 외, 2010).

- 지점별 메탄농도( $Y_i$ ) : Measured concentration be converted ppmv-C to  $\mu\text{g/L}$  for point i

$$Y_i = \frac{C_i \times M_w \times P_i}{R \cdot T_i} \times \frac{T_i}{T} \quad \text{-----(3.1)}$$

$Y_i$  : i지점 메탄 농도( $\mu\text{g/L}$ , 단  $0^\circ\text{C}$ , 1atm 기준)

$C_i$  : i지점 메탄 측정농도(ppmv)

$M_w$  : 메탄 물질량(16 g/mole)

$P_i$  : i지점의 챔버 내부 압력(atm, 대기압력 1atm 적용)

$R$  : 이상기체상수(0.08205 atm·L/mole · K)

$T_i$  : i지점의 플럭스 t챔버 내부 절대온도(K, 단  $0^\circ\text{C}=273.15$  K)

$T$  : 표준상태( $0^\circ\text{C}$ , 1am)의 절대온도(273.15 K)

- 지점별 발산량( $E_i$ ) : Emission rate for point i

$$E_i = \frac{(Q \times Y_i)}{A} \quad \text{-----(3.2)}$$

$E_i$  : i지점의 메탄 발산량( $\mu\text{g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ )

$Q$  : 챔버로 유입된 이동가스 유량(Sweep air flow rate, L/min)

$Y_i$  : i지점의 메탄 농도( $\mu\text{g/L}$ )

A : 챔버의 하부 단면적(m<sup>2</sup>)

○ 지점별 배출계수(EF<sub>i</sub>)

$$EF_i = \frac{E_i \times AR_i}{AD} \times (60 \times 24 \times 10^{-9}) \text{-----(3.3)}$$

EF<sub>i</sub> : i지점의 메탄 배출계수(kg CH<sub>4</sub>/kg BOD)

E<sub>i</sub> : i지점의 메탄 발산량(μg/(min\*m<sup>2</sup>))

AR<sub>i</sub> : i지점의 면적(m<sup>2</sup>)

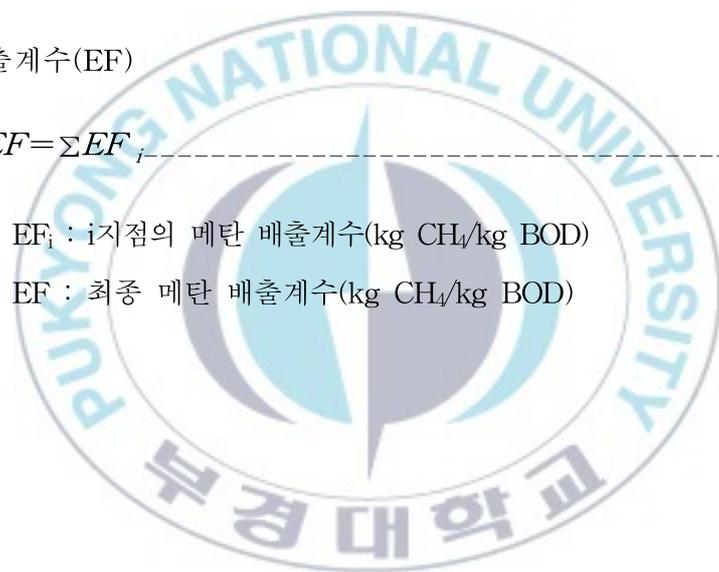
AD : BOD 부하량(kg BOD/일)

○ 최종 배출계수(EF)

$$EF = \sum EF_i \text{-----(3.4)}$$

EF<sub>i</sub> : i지점의 메탄 배출계수(kg CH<sub>4</sub>/kg BOD)

EF : 최종 메탄 배출계수(kg CH<sub>4</sub>/kg BOD)



## 3.2 배출계수 불확도 산정방법론

### 3.2.1 오차증식법

본 연구에서는 고도처리공법으로 운영중인 하수처리시설 7개소에 대해 국제 표준화기구의 불확도 표현 지침서(GUM)에서 제시된 불확도 표현방법 및 산출 방법을 기준으로 불확도 산정을 수행하였다. 각 요인별 표준불확도 및 합성표준불확도를 구하여 최종 확장불확도를 산출하였으며 이에 대한 산출식을 알아 보면 다음과 같다.

#### 3.2.1.1 표준불확도(Standard uncertainty)

측정량  $x$ 에 대한 표준불확도는  $u(x)$ 로 표현하며, A형 불확도와 B형 불확도의 형태로 구분한다.

##### 가) A형 불확도

반복측정에 의해 구해진 자료를 이용하여 통계적인 방법을 통하여 산출한 불확도를 의미하며 산정방법은 아래와 같다(이충렬, 2007).

- 측정시료의 변화가 없다고 판단하는 경우

$$u(x) = \sigma \text{ ----- (3.5)}$$

-  $\sigma$  : 반복측정결과의 표준편차

- 측정자료의 변화가 있다고 판단하는 경우

$$u(x) = \frac{s}{\sqrt{n}} \text{ ----- (3.6)}$$

- s : 측정결과의 표준편차
- n : 측정횟수

#### 나) B형 불확도

선형적으로 측정된 자료, 특성에 대한 상식과 경험, 측정에 관련된 물질과 기기의 성질, 보고자료 및 handbook, 제작자의 규격, 교정, 등에서 제시된 참고자료의 값을 인용하여 산출한 불확도로 아래와 같이 구분하여 표준불확도를 산정하였다(한국환경공단, 2011).

- 인용된 불확도

만일 추정된  $x_i$ 가 제작자의 규격, 교정성적서, handbook 또는 다른 출처로부터 인용되고, 인용되어진 불확도가 표준편차의 특정 배수라면, 표준불확도( $u(x_i)$ )는 인용된 값을 특정 배수로 나눈 값으로 하며 그 값을 제공하면 추정분산( $u^2(x_i)$ )이 된다.

- 신뢰수준에 따른 불확도

추정값  $x_i$ 의 인용된 불확도가 반드시 표준편차의 배수로 주어지는 것은 아니며, 신뢰수준 90%, 95%, 또는 99%를 가지는 구간을 지정하여 주는 경우도 있다. 달리 명시되지 않으면 정규분포를 사용하여 인용된 불확도를 계산하는 것으로 가정하며 인용된 불확도를 정규분포의 적절한 인자로 나누어  $x_i$ 에 대한 표준 불확도를 구할 수 있다. 신뢰수준 90%, 95% 및 99%에 대응하는 적정인자는 각각 1.64, 1.96 및 2.587이다.

- 대칭 직사각형 분포

어떤 경우 입력량  $X_i$ 에 대하여 한계값(상한( $a_+$ ), 하한( $a_-$ ))만이 추정이 가능한

경우가 있다. 특히  $X_i$ 값이  $a_-$ 와  $a_+$ 구간에 있을 확률이 1이며, 이 구간 밖에 있을 확률이 0이라고 가정할 수 있고, 그 구간 내에서  $X_i$ 값에 관한 특별한 자료가 없다면, 최종적으로 그 구간 내에서는 어디에서나  $X_i$ 값의 확률이 동일하고도 밖에 가정할 수 없다.

이러한 경우  $X_i$ 의 기대값  $x_f$ 는 구간이 중앙점,  $x_f=(a_+ + a_-)/2$ 이 되고, 관련된 분산 및 표준불확도는 다음과 같다.

$$u^2(x) = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12}, \quad u(x) = \frac{(a_+ - a_-)}{\sqrt{12}} \quad \text{-----}(3.7)$$

만일  $a_+ - a_-$ 를  $2a$ 라고 나타내면 그에 따른 분산 및 표준불확도는 다음과 같다.

$$u^2(x) = \frac{(a_+ - a_-)^2}{3}, \quad u(x) = \frac{(a_+ - a_-)}{\sqrt{3}} \quad \text{-----}(3.8)$$

### 3.2.1.2 상대표준불확도(Relative standard uncertainty)

단위가 서로 다른 여러 가지 불확도 요인을 합성하기 위해서 단위를 제거한 표준불확도이며, 측정량  $x$ 에 대한 상대표준불확도는  $u_r(x)$ 로 표현한다(이충렬, 2007).

$$u_r(x) = \frac{u(x)}{x} \quad \text{-----}(3.9)$$

- $u(x)$  :  $x$ 에 대한 표준불확도
- $x$  : 측정량

### 3.2.1.3 합성표준불확도(Combined standard uncertainty)

여러 요인들에 대한 표준불확도를 합성하여 산출한 불확도이며, 측정량  $x$ 에 대한 합성표준불확도는  $u_c(x)$ 로 표현한다(이충렬, 2007).

- 감도계수와 표준불확도를 이용한 합성표준불확도 산출

측정량 산출을 위한 함수의 각 요인들간 상관관계를 수식으로 표현할 경우, 각 요인들에 대한 감도계수와 표준불확도를 이용하여 불확도를 합성하는 방법이다(이충렬, 2007).

$$u_c(y(x_1, x_2, \dots)) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot u(x_i)^2} \text{-----} (3.10)$$

- $c_i$  : 감도계수로서, 불확도 요인  $x_i$ 를 편미분한 결과임
- $u(x_i)$  : 불확도요인,  $x_i$ 의 표준불확도

- 상대표준불확도를 이용한 합성표준불확도 산출

상대표준불확도를 “오차의 전파법칙”을 이용하여 합성하는 방법이다.

$$u_c(y(x_1, x_2, \dots)) = y \times \sqrt{\sum_{i=1}^n u_r(x_i)^2} \text{-----} (3.11)$$

- $u_r(x_i)$  :  $x_i$ 의 상대표준불확도

- 불확도 전파법칙에 따른 불확도 합성규칙

불확도 전파법칙에 따른 불확도 합성은 덧셈/뺄셈 및 곱셈/나눗셈의 경우로 구분하여 아래와 같이 실시하였다(이충렬, 2007).

- i) 측정결과 산출식이 덧셈 및 뺄셈으로 구성된 경우

$y=(p - q + r + \dots)$ 일 때,

$$\text{합성표준불확도, } u_c(x) = \sqrt{u(p)^2 + u(q)^2 + \dots} \text{-----} (3.12)$$

- i) 측정결과 산출식이 곱셈, 나눗셈으로 구성된 경우

$y=(p \times q \times r \times \dots)$ 일 때,

$$\text{합성표준불확도, } u_c(x) = \sqrt{u\left(\frac{u(p)}{p}\right)^2 + u\left(\frac{u(q)}{q}\right)^2 + \dots} \text{-----} (3.13)$$

### 3.2.1.4 확장불확도(Expanded uncertainty)

합성표준불확도에 포함인자( $k$ )를 곱하여 추정된 불확도로서, 신뢰구간을 확장하여 표현한 불확도이다(이충렬, 2007).

$$U = k \times u_c(x) \text{-----}(3.14)$$

- $k$  : 포함인자(Coverage factor)
- $u_c(x)$  :  $x$ 의 합성표준불확도

### 3.2.1.5 자유도(Degree of freedom)

측정량,  $x$ 에 대한 자유도는  $\nu_x$ 로 표현한다.

### 3.2.1.6 유효자유도(Effective number of degrees of freedom)

포함인자  $k$ 를 구하기 위해서 합성표준불확도( $u_c(x)$ )의 유효자유도에 대한 추정이 필요한데 이 유효 자유도를  $\nu_{eff}$ 라고 나타낸다. 이 유효자유도는 합성 표준불확도가 측정량  $Y$ 의 표준편차를 얼마나 잘 추정하는가를 나타내는 것으로서 ‘합성표준불확도의 불확도 척도’라고 할 수 있다.

아래의 Welch-Satterthwaite 공식을 이용하여  $u_c(y)$ 의 유효자유도  $\nu_{eff}$ 를 추정한다(임창인, 2006).

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{[c_i u(x_i)]^4}{\nu_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \text{-----}(3.15)$$

$$\nu_{eff} = \frac{\left(\frac{u_c(x)}{x}\right)^4}{\sum_{i=1}^N \frac{[u_r(x_i)]^4}{\nu_i}} \text{-----}(3.16)$$

### 3.2.1.7 기여율(Contribution portion)

기여율은 개별 불확도 요인의 불확실성이 최종 측정결과에 미치는 영향을 분산의 비율로서 나타낸 값을 의미한다(이충렬, 2007).

$$\text{기여율(\%)} = \left[ \frac{u_r(x_i)}{u_c(y)} \right]^2 \times 100 \text{-----}(3.17)$$

### 3.2.1.8 불확도의 자릿수의 표현

한국교정시험기관인정기구의 지침에 의하면 합성표준불확도 또는 확장불확도의 수치 값은 필요이상의 과도한 자릿수로 표시하지 않아야 한다고 명시되어 있으며 다만 후속 계산에서 반올림에 의한 오차를 피하기 위하여 추가적으로 자릿수를 남겨놓을 필요가 있는 경우가 있지만 일반적으로 많아야 유효숫자 두 자리면 충분하다고 되어있다(한국교정시험기관인정기구, 2007).

또한 최종 결과값을 보고 할 때 불확도는 반올림한 값을 사용하는 것보다 그냥 올림하는 것이 적합할 경우가 있다고 명시되어 있다. 각 측정 대상시설의 합성표준불확도 등은 반올림의 오차를 피하기 위해서 계산과정에는 별도의 수치맺음을 실시하지 않았으며, 자료의 검토를 위하여 논문상에서는 자릿수 3 자리까지 명시하였다. 유효자유도의 경우 소숫점 이하는 절하하여 표시하였다(한국화학시험연구원, 2008).

### 3.2.2 몬테카를로 시뮬레이션

몬테카를로 시뮬레이션의 원칙은 개별적 확률밀도함수로부터 배출계수와 활성데이터의 무작위 값을 선택하고 상응하는 배출값을 계산하는 것이다. 이 과정은 컴퓨터를 사용하여 여러 번 반복하고, 수행된 각각의 계산결과는 전체적인 확률밀도함수를 구성한다.

몬테카를로 접근법은 다섯 단계로 구성된다.

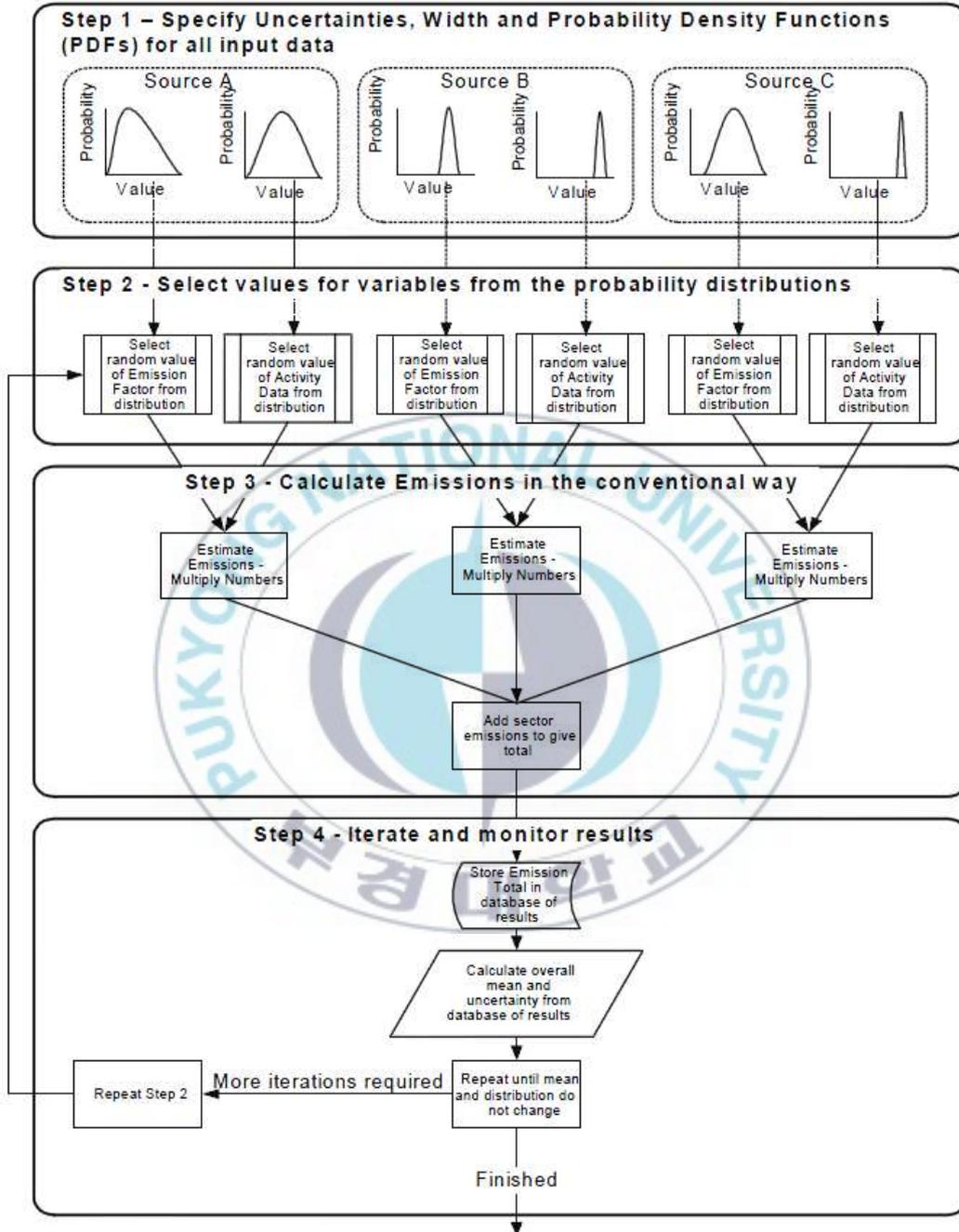
- 단계 1 - 구체적 배출원의 부문에 대한 불확도를 명시한다. 기본 데이터의 불확도를 명시한다. 이것은 배출계수와 활동자료, 그리고 이와 관련된 평균값과 확률밀도함수, 배출원 부문들 사이의 어떤 상호상관 관계를 포함한다.
- 단계 2 - 소프트웨어 패키지를 설정한다. 배출량 인벤토리 계산과 확률밀도함수, 그리고 상관값은 몬테카를로 패키지에 설정되어야 한다.

소프트웨어는 이 이후의 단계에 따라 자동적으로 수행된다.

- 단계 3 - 무작위 변수들을 선택한다. 각각의 입력 데이터 항목, 배출계수 또는 활동자료에 대하여, 숫자는 무작위로 그 변수의 확률밀도함수에서 선택된다.
- 단계 4 - 시뮬레이션을 수행한다.
- 단계 5 - 3과 4의 단계를 반복함으로써 평균값은 최종값에 도달한다. 평균값이 더 이상 변화하지 않을 때 계산은 종결된다.

본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 실시하기 위해서 크리스탈볼 프로그램을 사용하였다. Fig. 3.8은 2006 G/L에서 제시한 몬테카를로 시뮬레이션 기법에 대한 설명이다.

Fig. 3.8. Illustration of the Monte Carlo method



## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 메탄 배출계수 개발결과

#### 4.1.1 현장측정결과

본 연구에서는 7개 하수처리시설에 대해서 각 반응조별로 메탄농도를 측정하여 메탄 배출계수를 개발하였다. 현장측정을 통한 메탄 배출계수 개발결과는 아래와 같다.

##### 4.1.1.1 A 하수처리시설

Fig. 4.1은 A 하수처리시설의 현장 측정지점을 설명하고 있다. 침사지는 전단은 조목스크린 전단에서 측정하였으며 후단은 세목스크린 전단에서 측정하였다. 1차침전지는 복개된 상태로 맨홀을 열고 침사지와 마찬가지로 전단 및 후단으로 구분하여 측정하였으며 전단은 스크레버를 정지시키고 측정하였다.

혐기조는 반응조의 중앙에서 측정하였으며, 무산소조는 전단과 후단으로 구분하여 측정하였다. 선택조는 전단과 후단을 구분하여 측정하였으나 30분마다 표면폭기를 진행하여 표면폭기 여부에 따라서 추가적으로 구분하여 측정하였다. 호기조는 멤브레인 산기방식을 적용하고 있으며, 선택조와 동일하게 전단과 후단으로 구분하여 측정하였다. 2차침전지는 원형으로 설치되어 있으며, 안전상의 이유로 월류웨어 근처에서 측정하였다. 호기조의 폭기 air는 대기를 포집하여 사용하고 있으며, 폭기 air의 바탕농도 반영을 위해 송풍기 입구에서 메탄농도를 추가로 측정하였다.

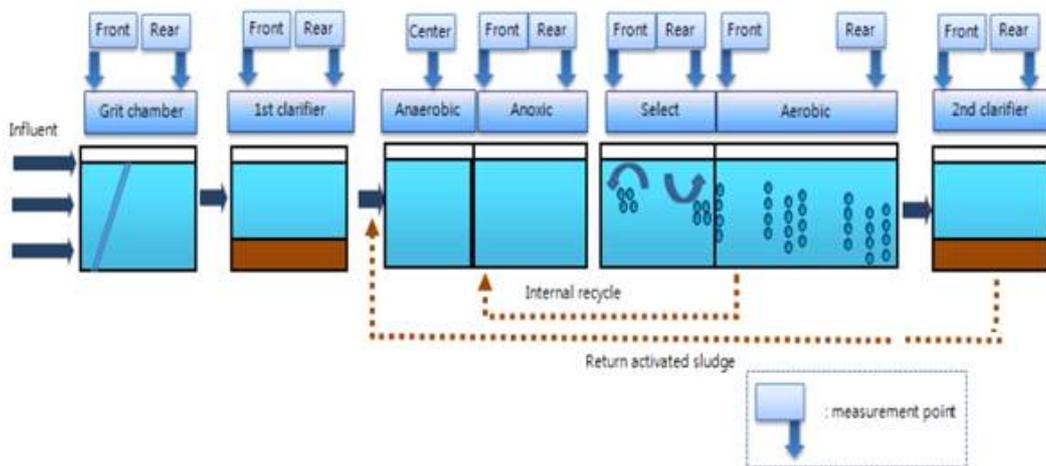


Fig. 4.1. Measurement points at the A site

Fig. 4.2는 A 하수처리시설의 메탄농도 측정결과이다. 메탄농도는 침사지 후단에서 146.3 ppm으로 가장 높게 측정되었고, 2차침전지에서 0.6 ppm으로 가장 낮게 측정되었다. 생물반응조 중에서는 무산소조 전단에서 77.0 ppm으로 가장 높게 측정되었다.



Fig. 4.2. Measurement results of A site

Table 4.1은 평균값을 적용한 지점별 메탄농도, 온도 및 압력측정결과이다. 호기조의 경우 폭기에어에 포함되어 있는 대기중 바탕농도를 제외하였다. 메탄농도 측정결과 침사지에서 78.9 ppm으로 가장 높게 측정되었으며, 2차침전지에서 0.6 ppm으로 가장 낮게 측정되었다.

Table 4.1. Measurement results of the A site

Process	CH <sub>4</sub>	Chamber	
		Temp.	Pressure
	(ppm)	(°C)	(kPa)
Grit Chamber	78.9	29.0	100.9
1st clarifier	5.4	26.2	101.3
Anaerobic	13.5	27.3	101.1
Anoxic	41.3	24.6	101.2
Select	4.6	27.8	101.2
Aerobic	10.4	30.8	101.0
2nd clarifier	0.6	24.9	100.9

Table 4.2는 조별 메탄 메탄농도( $Y_i$ ), 조별 발산량( $E_i$ ) 및 조별 배출계수를 나타내었다. 조별 배출계수 개발 결과 무산소조에서 0.000275 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 가장 높게 나타났으며, 2차침전지에서 0.00001 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 가장 낮게 나타났다. 침사지에서 메탄농도가 가장 높게 측정되었지만, 조별 면적이 상대적으로 적기 때문에 메탄 배출계수는 무산소조에서 가장 높게 나타났다.

Table 4.2. Calculation of the the EF(A Site)

Process	$Y_i$	$E_i$	EF
	( $\mu\text{g/L}$ )	( $\mu\text{g}/\text{min}\cdot\text{m}^2$ )	( $\text{kg CH}_4/\text{kg BOD}$ )
Grit Chamber	56.33	2040.84	0.0000711
1st clarifier	3.86	139.68	0.00011
Anaerobic	9.64	349.19	0.0000895
Anoxic	29.48	1068.27	0.000275
Select	3.28	118.98	0.000031
Aerobic	7.42	188.31	0.000170
2nd clarifier	0.43	15.52	0.00001

#### 4.1.1.2 B 하수처리시설

Fig. 4.3은 B 하수처리시설의 측정지점을 설명하고 있다. 침사지는 전단의 경우 조목스크린 전단에서 측정하였으며 후단의 경우 세목스크린 후단에서 측정하였다.

1차침전지는 복개된 상태로 맨홀을 열고 침사지와 마찬가지로 전단 및 후단으로 구분하여 측정하였으며 전단은 스크레버를 정지시키고 측정하였다. 혐기조는 맨홀을 열고 중앙에서 측정하였으며, 무산소조, 호기조 및 2차침전지도 맨홀을 열고 전단과 후단으로 구분하여 측정하였다.

호기조의 폭기 air는 대기를 포집하여 사용하고 있으며, 폭기 air의 바탕농도 반영을 위해 송풍기 입구에서 메탄농도를 추가로 측정하였다.

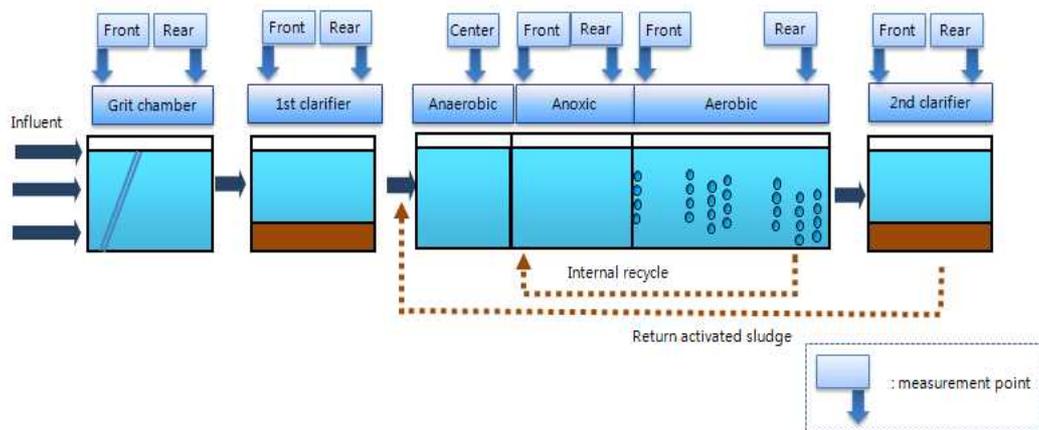


Fig. 4.3. Measurement points at the B site

Fig. 4.4는 B 하수처리시설의 메탄농도 측정결과이다. 메탄농도는 1차침전지 후단에서 240.2 ppm으로 가장 높게 측정되었으며, 2차침전지에서 가장 낮은 농도인 0.2 ppm으로 측정되었다. Table 4.3은 평균값을 적용한 지점별 메탄농도, 온도 및 압력측정결과이다. 호기조의 경우 폭기에어에 포함되어 있는 대기 중 바탕농도를 제외하여 산정하였다.

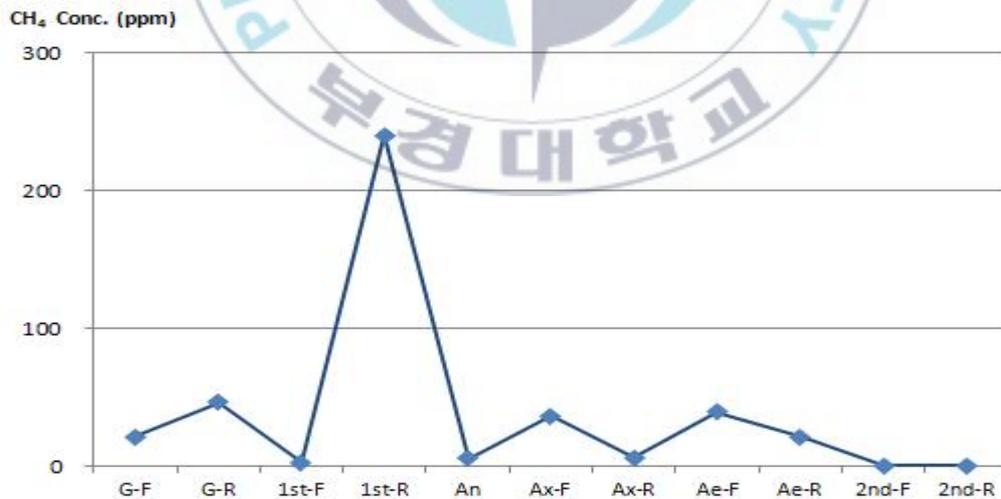


Fig. 4.4. Measurement results of the B site

Table 4.3. Measurement results of the B site

Process	CH <sub>4</sub>	Chamber	
		Temp.	Pressure
	(ppm)	(°C)	(kPa)
Grit Chamber	33.9	24.7	101.2
1st clarifier	121.4	34.0	101.2
Anaerobic	5.5	27.4	101.1
Anoxic	21.3	25.2	101.8
Aerobic	28.0	25.4	101.6
2nd clarifier	0.3	25.9	101.6

Table 4.4는 조별 메탄농도( $Y_i$ ), 조별 발산량( $E_i$ ) 및 조별 배출계수를 나타내었다. 조별 배출계수 개발 결과 일차침전지에서 0.00123 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 가장 높게 나타났으며, 2차침전지에서 0.000003 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 가장 낮게 나타났다.

Table 4.4. Calculation of the EF(B Site)

Process	$Y_i$	$E_i$	EF
	( $\mu\text{g/L}$ )	( $\mu\text{g}/\text{min}\cdot\text{m}^2$ )	(kg CH <sub>4</sub> /kg BOD)
Grit Chamber	24.20	876.86	0.00000754
1st clarifier	86.67	3140.15	0.00123
Anaerobic	3.93	142.26	0.000018
Anoxic	15.21	550.95	0.0000704
Aerobic	19.99	1055.96	0.000270
2nd clarifier	0.21	7.76	0.000003

#### 4.1.1.3 C 하수처리시설

Fig. 4.5는 C 하수처리시설의 측정지점을 설명하고 있다. 침사지는 전단은 조목스크린 전에서 측정하였다. 후단은 세목스크린 전에서 측정하였으며, 육안으로 확인결과 각 반응조별로 수표면에서의 기포발생상태가 상의하여 운영중인 침사지의 반응조를 모두 측정하였다.

1차침전지는 복개된 상태로 맨홀을 열고 침사지와 마찬가지로 전단 및 후단으로 구분하여 측정하였다. 전단은 스크레버의 속도를 최저로 설정한 후 배출농도를 측정하였다.

전무산소조는 맨홀을 열고 가운데에서 측정하였으며, 혐기조 및 무산소조도 전단과 후단으로 구분하여 측정하였으며, 선택조는 현재 호기조로 운영하고 있으며 가운데에 위치한 맨홀을 열고 측정하였다.

호기조 및 2차침전지의 경우 전단과 후단으로 구분하여 측정하였으며, 2차 침전지 후단의 경우 기포가 육안으로 확인할 수 있을 정도로 다량으로 발생하고 있었다.

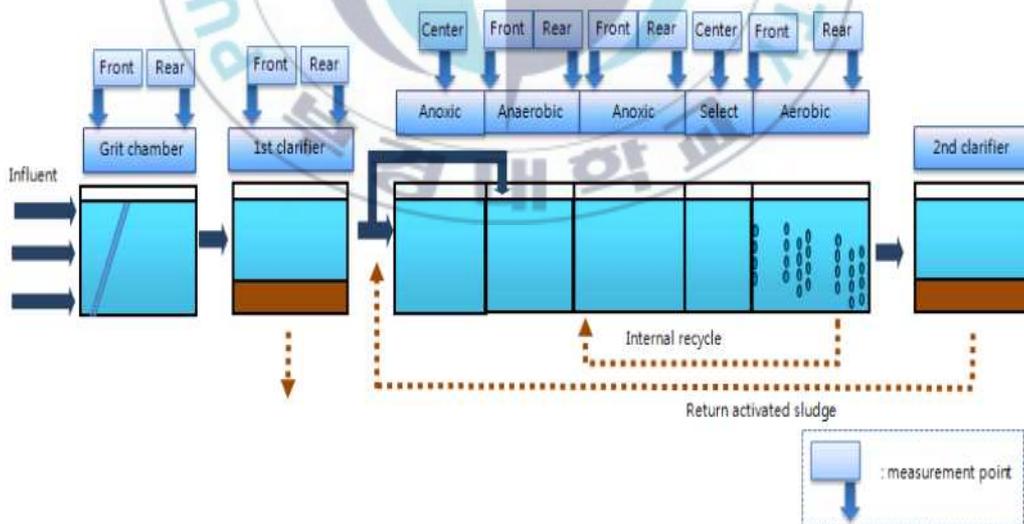


Fig. 4.5. Measurement points at the C site

Fig. 4.6은 C 하수처리시설의 메탄농도 측정결과이다. 메탄농도는 선택조에  
 서 1,153 ppm으로 가장 높게 측정되었으며, 2차침전지 전단에서 0.5 ppm으로  
 가장 낮게 측정되었다. Table 4.5는 평균값을 적용한 지점별 메탄농도, 온도  
 및 압력측정결과이다.

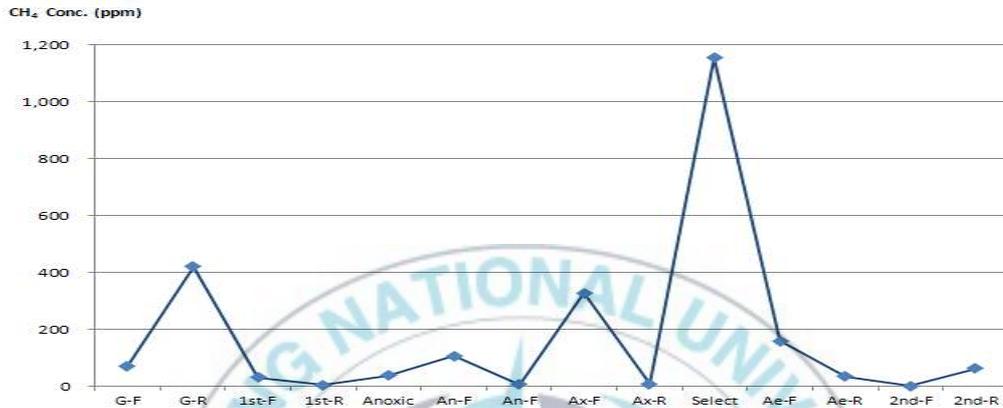


Fig. 4.6 Measurement results of the C site

Table 4.5. Measurement results of the C site

Process	CH <sub>4</sub> (ppm)	Chamber	
		Temp. (°C)	Pressure (kPa)
Grit Chamber	244.9	20.5	101.0
1st clarifier	18.0	21.5	101.3
Anoxic	37.9	21.8	101.3
Anaerobic	55.5	21.5	101.3
Anoxic	167.5	21.4	101.4
Select	1,141	21.7	101.3
Aerobic	84.4	22.7	101.4
2nd clarifier	31.8	22.9	101.5

Table 4.6은 조별 메탄농도( $Y_i$ ), 조별 발산량( $E_i$ ) 및 조별 배출계수를 나타내었다. 조별 배출계수 개발 결과 호기조로 운영되고 있는 선택조에서 0.00399 kg  $CH_4$ /kg BOD로 가장 높게 나타났으며, 침사지에서 0.0000472 kg  $CH_4$ /kg BOD로 가장 낮게 나타났다.

Table 4.6. Calculation of the EF(C Site)

Process	$Y_i$	$E_i$	EF
	( $\mu\text{g/L}$ )	( $\mu\text{g/min}\cdot\text{m}^2$ )	(kg $CH_4$ /kg BOD)
Grit Chamber	174.84	6334.61	0.0000472
1st clarifier	12.85	465.59	0.000147
Anoxic	27.06	980.33	0.0000189
Anaerobic	39.62	1435.57	0.0000832
Anoxic	119.58	4332.57	0.000670
Select	814.57	52710.63	0.00399
Aerobic	60.25	3899.02	0.00115
2nd clarifier	22.70	822.54	0.000431

#### 4.1.1.4 D 하수처리시설

Fig. 4.7은 D 하수처리시설의 측정지점을 설명하고 있다. D 하수처리시설은 반응조의 형태가 모두 장방형으로 측정시 반응조의 전단 및 후단으로 구분하여 측정하였다. 침사지는 전단은 조목스크린 전단에서 측정하였으며 후단은 세목스크린 전단에서 측정하였다. 1차침전지는 복개된 상태로 맨홀을 열고 침사지와 마찬가지로 전단 및 후단으로 나누어서 측정하였으며 전단은 스크레버를 정지시키고 측정하였다.

혐기조와 무산소조는 각각 전단 및 후단으로 나누어서 측정하였다. 호기조는 멤브레인 산기방식으로 폭기되고 있었으며, 혐기조와 무산소조에 비하여 조의 길이가 길어 전단, 중간, 후단에서 각각 측정하였다. 호기조에는 BioCube 라는 담체가 충전되어 있으며, 폭기로 인해 일부 담체가 무산소조로 유출되기도 하였다. 2차침전지도 전단과 후단으로 구분하여 측정하였다.

호기조의 폭기 air는 대기를 포집하여 사용하고 있으며, 폭기 air의 바탕농도 반영을 위해 송풍기 입구에서 메탄농도를 추가로 측정하였다.

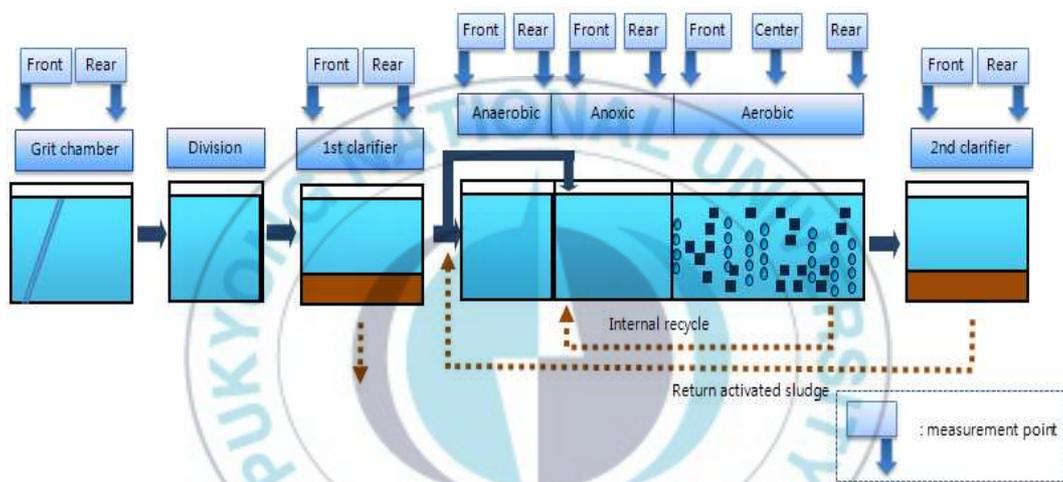


Fig. 4.7. Measurement points at the D site

Fig. 4.8은 D 하수처리시설의 메탄 측정결과이다. 측정 결과 생물반응조에서 가장 높게 측정되었으며 특히 내부반송수가 유입되는 무산소조 전단에서 213.6 ppm으로 가장 높게 측정되었다. Table 4.7은 평균값을 적용한 지점별 온실가스 농도, 온도 및 압력측정결과이다. 메탄농도는 침사지에서 165.6 ppm으로 가장 높게 측정되었으며, 2차침전지에서 1.1 ppm으로 가장 낮게 측정되었다.

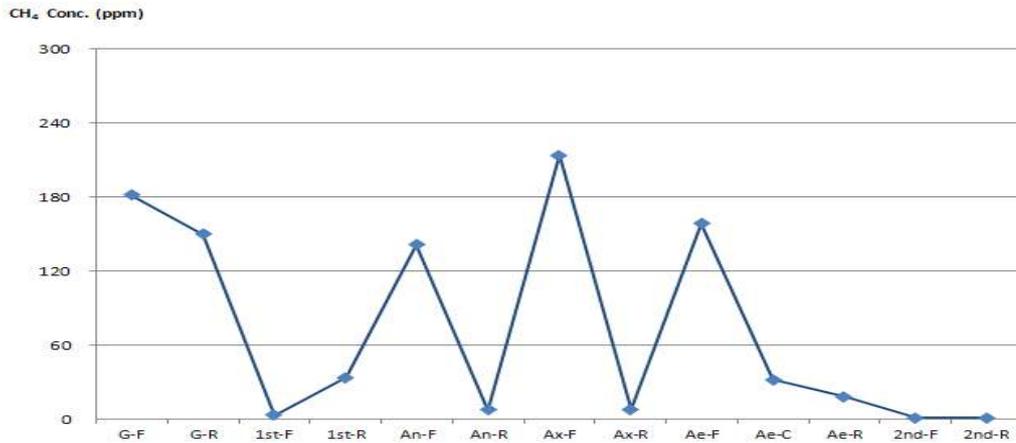


Fig. 4.8. Measurement results of the D site

Table 4.7. Measurement results of the D site

Process	CH <sub>4</sub> (ppm)	Chamber	
		Temp. (°C)	Pressure (kPa)
Grit Chamber	165.6	26.0	101.3
1st clarifier	18.2	36.6	101.0
Anaerobic	74.3	28.5	100.9
Anoxic	110.7	38.9	101.2
Aerobic	67.6	26.4	101.3
2nd clarifier	1.1	32.9	101.3

Table 4.8은 조별 메탄농도( $Y_i$ ), 조별 발산량( $E_i$ ) 및 조별 배출계수를 나타내었다. 조별 배출계수 개발 결과 호기조에서 0.0016 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 가장 높게 나타났으며, 2차침전지에서 0.000018 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 가장 낮게 나타났다. 침사지에서 메탄농도가 가장 높게 측정되었지만, 조별 면적이 상대적으로 적기 때문에 실제 발산량은 호기조에서 가장 높은 것으로 산정되었다.

Table 4.8. Calculation of the EF(D Site)

Process	$Y_i$	$E_i$	EF
	( $\mu\text{g/L}$ )	( $\mu\text{g}/\text{min}\cdot\text{m}^2$ )	( $\text{kg CH}_4/\text{kg BOD}$ )
Grit Chamber	118.22	4,547.02	0.000050
1st clarifier	12.99	499.73	0.00019
Anaerobic	53.04	2,040.12	0.00022
Anoxic	79.03	3,039.59	0.00090
Aerobic	48.26	3,938.75	0.0016
2nd clarifier	0.79	30.20	0.000018

#### 4.1.1.5 E 하수처리시설

Fig. 4.9는 E 하수처리시설의 측정지점을 설명하고 있다. 침사지는 전단은 조목스크린 전단에서 측정하였으며 후단은 세목스크린 후단에서 측정하였다. 1차침전지는 침사지와 동일하게 전단 및 후단으로 나누어서 측정하였다.

담체가 부유하고 있는 생물반응조는 5지로 구분되어 간헐 폭기형태로 운영되고 있으며, 외부반송은 생물반응조 1지 입구로 유입되도록 운영하고 있다. 생물반응조 1지는 상시 비폭기상태로 운영되며, 생물반응조 2지와 3지는 40분 주기로 교차하며 간헐폭기로 접촉폭기방식으로 운영되었다. 생물반응조 4지와 5지는 멤브레인방식으로 운영되며 상시로 폭기되고 있었다. 생물반응조 1지는 전단과 후단으로 나누어서 산정하였으며 2지와 3지는 폭기여부에 따라서 구분하여 각각의 중간지점에서 측정하였고, 4지와 5지는 조의 가운데에서 측정하였다. 호기조의 폭기 air는 대기를 포집하여 사용하고 있으며, 폭기 air의 바탕농도 반영을 위해 송풍기 입구에서 메탄농도를 추가 측정하였다.

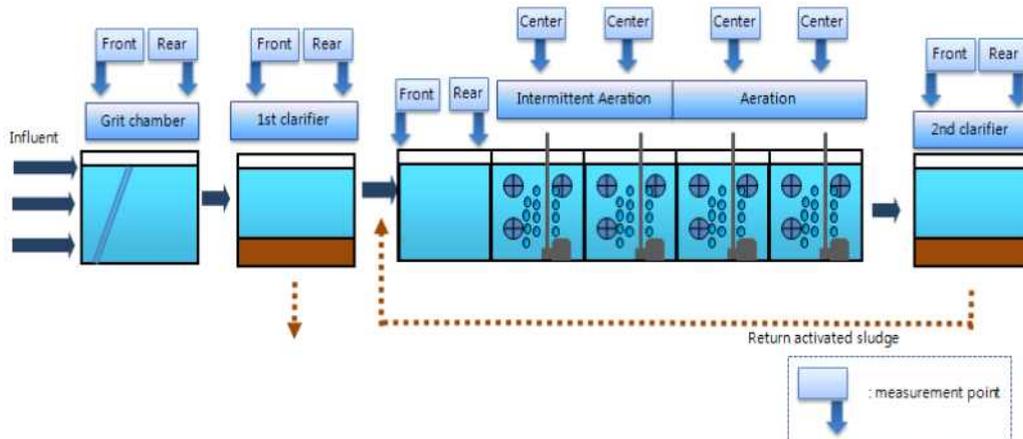


Fig. 4.9. Measurement points at the E site

Fig. 4.10은 E 하수처리시설의 메탄 측정결과이다. 측정 결과 메탄농도는 1차침전지에서 가장 높게 측정되었다. 생물 반응조에서는 내부반송수가 유입되는 무산소조 전단에서 213.6 ppm으로 가장 높게 측정되었다.

Table 4.9는 평균값을 적용한 지점별 메탄농도, 온도 및 압력측정결과이다. 메탄농도 측정결과 침사지에서 2,170 ppm으로 가장 높게 측정되었으며, 2차침전지에서 0.4 ppm으로 가장 낮게 측정되었다.



Fig. 4.10. Measurement results of the E site

Table 4.9. Measurement results of the E site

Process	CH <sub>4</sub>	Chamber	
		Temp.	Pressure
	(ppm)	(°C)	(kPa)
Grit Chamber	484	22.8	100.6
1st clarifier	2,170	32.7	101.0
Bio #1	202	30.3	101.1
Bio #2	135.6	34.1	100.2
Bio #3	23	25.6	100.2
Bio #4	15	25.4	100.1
Bio #5	2.6	24.8	100.1
2nd clarifier	0.4	26.3	25.6

Table 4.10은 지점별 메탄농도( $Y_i$ ), 지점별 발산량( $E_i$ ) 및 지점별 배출계수를 나타내었다. 조별 배출계수 개발 결과 침사지에서 0.028 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 가장 높게 나타났으며, 2차침전지에서 0.000006 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 가장 낮게 나타났다.

Table 4.10. Calculation of the EF(E Site)

Process	Y <sub>i</sub>	E <sub>i</sub>	EF
	(µg/L)	(µg/min*m <sup>2</sup> )	(kg CH <sub>4</sub> /kg BOD)
Grit Chamber	345.53	13289.61	0.00011
1st clarifier	1549.17	59583.58	0.028
Bio #1	144.21	5546.49	0.00085

Process	$Y_i$	$E_i$	EF
	( $\mu\text{g/L}$ )	( $\mu\text{g}/\text{min}\cdot\text{m}^2$ )	( $\text{kg CH}_4/\text{kg BOD}$ )
Bio #2	193.61	10.47	0.00080
Bio #3	32.98	2.25	0.00013
Bio #4	10.71	577.79	0.000089
Bio #5	1.86	100.15	0.000015
2nd clarifier	0.29	10.98	0.000006

#### 4.1.1.6 F 하수처리시설

Fig. 4.11은 F 하수처리시설의 측정지점을 설명하고 있다. F 하수처리시설은 조 형태가 모두 장방형으로 측정시 반응조의 길이 및 면적에 따라 전단 및 후단으로 나누어서 측정하였다. 침사지는 건물 내부 지하에 위치해 있으며, 침사지 주변의 메탄농도 또한 상당히 높았다. 1차침전지는 덮개로 덮여 있었으며, 측정시에는 맨홀이 위치한 장소에서 측정하였다. 무산소조는 전단 및 후단으로 나누어서 측정하였고, 호기조는 면적이 넓어 4지점으로 나누어 측정하였다. 2차침전지도 전단 및 후단으로 나누어서 측정하였다.

호기조에 폭기되는 공기는 침사지와 분배조 상부의 공기와 대기를 혼합하여 송풍하고 있으며, 호기조의 폭기 air는 대기를 포집하여 사용하고 있으며, 폭기 air의 바탕농도 반영을 위해 송풍기 입구에서 메탄농도를 추가로 측정하였다.

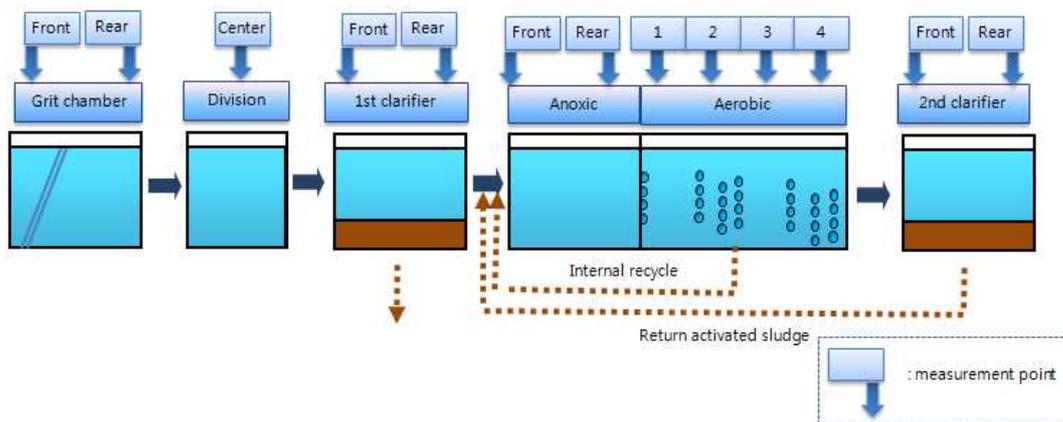


Fig. 4.11. Measurement points at the F site

Fig. 4.12는 F 하수처리시설의 메탄 측정결과이다. 측정 결과 침사지 후단과 1차침전지 전단에서 각각 2,372 ppm, 857.6 ppm으로 높게 측정되었다.

Table 4.11은 평균값을 적용한 지점별 메탄농도, 온도 및 압력측정결과이다. 메탄농도 측정결과 침사지에서 1,877 ppm으로 가장 높게 측정되었으며, 2차침전지에서 4.9 ppm으로 가장 낮게 측정되었다.



Fig. 4.12. Measurement results of the F site

Table 4.11. Measurement results of the F site

Process	CH <sub>4</sub>	Chamber	
		Temp.	Pressure
	(ppm)	(°C)	(kPa)
Grit Chamber	1,877	18.2	101.5
Division basin	86	18.3	100.9
1st clarifier	434.5	21.7	100.7
Anoxic	46	34.3	100.5
Aerobic	75	24.0	101.0
2nd clarifier	4.9	39.2	100.3

Table 4.12는 조별 메탄농도( $Y_i$ ), 조별 발산량( $E_i$ ) 및 조별 배출계수를 나타내었다. 조별 배출계수 개발 결과 1차침전지에서 0.0051 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 가장 높게 나타났으며, 분배조에서 0.000014 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 가장 낮게 나타났다. 침사지에서 메탄농도가 가장 높게 측정되었지만, 조별 면적이 상대적으로 적기 때문에 메탄 배출계수는 무산소조에서 가장 높게 산정되었다.

Table 4.12. Calculation of the EF(F Site)

Process	$Y_i$	$E_i$	EF (kg CH <sub>4</sub> /kg BOD)
	(µg/L)	(µg/min*m <sup>2</sup> )	
Grit Chamber	1,340.00	51,538.42	0.00084
Division basin	61.40	2,361.38	0.000014
1st clarifier	310.19	11,930.44	0.0051
Anoxic	32.84	1,263.06	0.00025
Aerobic	53.54	6,276.85	0.0022
2nd clarifier	3.50	134.54	0.000041

#### 4.1.1.7 G 하수처리시설

Fig. 4.13은 G 하수처리시설의 측정지점을 설명하고 있다. 침사지와 1차침전지는 전 구간이 덮개로 덮여 있었으며, 혐기조·무산소조·호기조는 복개가 되어 있어 맨홀을 열고 측정하였다.

침사지는 유입부와 유출부에만 맨홀이 설치되어 있었으며 전단 및 후단으로 나누어서 측정하였고 측정기간 동안 침사 인양기를 정지시킨 후 측정하였다. 1차침전지도 스크리버를 정지시킨 후 전단, 중간, 후단으로 나누어서 측정하였고 혐기조, 무산소조, 호기조는 맨홀의 크기가 작아 튜브가 들어갈 수 없어 챔버만 삽입하여 측정하였다.

호기조의 폭기 air는 대기를 포집하여 사용하고 있으며, 폭기 air의 바탕농도 반영을 위해 송풍기 입구에서 메탄농도를 추가로 측정하였다.

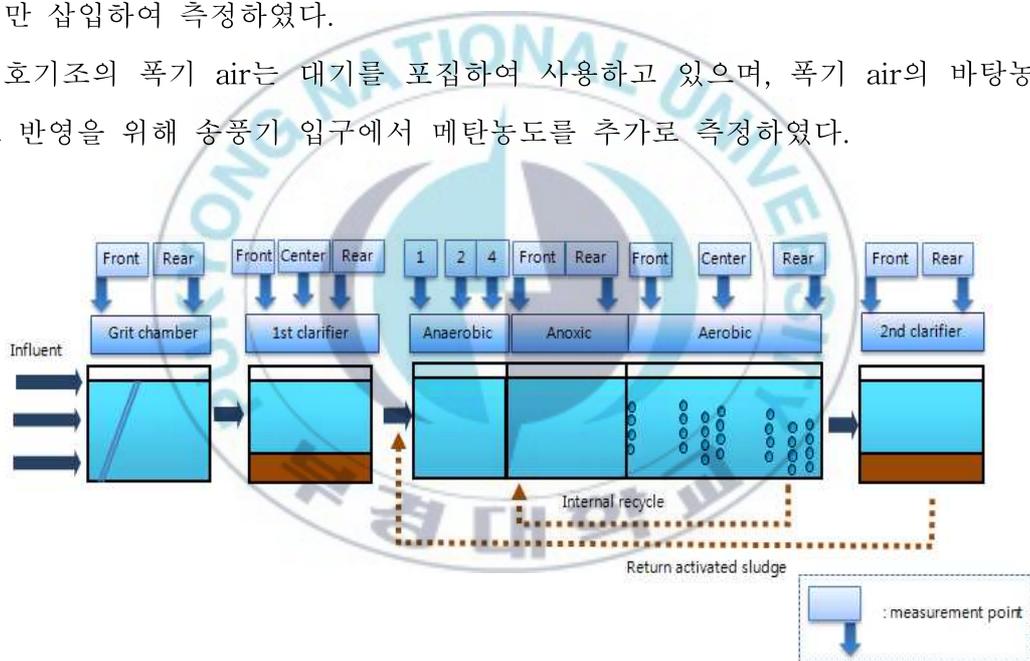


Fig. 4.13. Measurement points at the G site

Fig. 4.14는 G 하수처리시설의 메탄농도 측정결과이다. 측정 결과 메탄농도는 호기조에서 147.7 ppm으로 가장 높게 측정되었다. Table 4.13은 평균값을 적용한 지점별 메탄농도, 온도 및 압력측정결과이다.

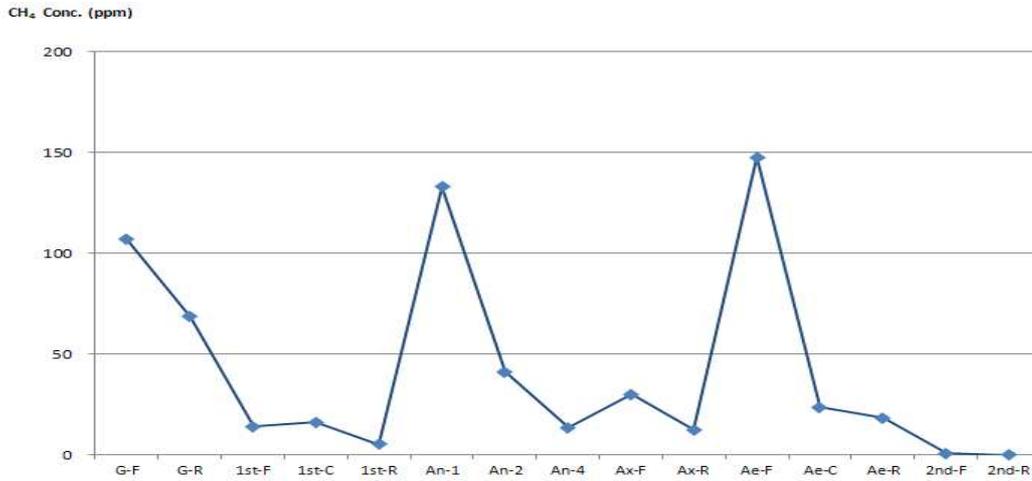


Fig. 4.14. Measurement results of the G site

Table 4.13. Measurement results of the G site

Process	CH <sub>4</sub> (ppm)	Chamber	
		Temp. (°C)	Pressure (kPa)
Grit Chamber	87.9	26.0	101.1
1st clarifier	12.1	30.8	101.3
Anaerobic	62.7	24.7	101.1
Anoxic	21.4	25.5	101.0
Aerobic	63.3	25.0	101.1
2nd clarifier	0.5	38.7	101.4

Table 4.14는 조별 메탄농도( $Y_i$ ), 조별 발산량( $E_i$ ) 및 조별 배출계수를 나타내었다. 조별 배출계수 개발 결과 호기조에서 0.00044 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 가장 높게 나타났으며, 2차침전지에서 0.00001 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 가장 낮게 나타났다. 침사지에서 메탄농도가 가장 높게 측정되었지만, 조별 면적이 상대적

으로 적기 때문에 배출계수는 호기조에서 가장 높게 산정되었다.

Table 4.14. Calculation of the EF(G Site)

Process	$Y_i$	$E_i$	EF
	( $\mu\text{g/L}$ )	( $\mu\text{g}/\text{min}\cdot\text{m}^2$ )	( $\text{kg CH}_4/\text{kg BOD}$ )
Grit Chamber	62.75	2,413.55	0.000033
1st clarifier	8.64	332.24	0.00015
Anaerobic	44.76	1,721.61	0.00016
Anoxic	15.28	587.60	0.000053
Aerobic	43.83	1,621.53	0.00044
2nd clarifier	0.36	13.73	0.00001

#### 4.1.1.8 메탄농도 추이 분석

Fig. 4.15는 하수처리시설에서의  $\text{CH}_4$  농도 측정추이를 나타내고 있다. (A)와 (B)는 일반적인 경우에서의 농도 추이로 (A)는 F 하수처리시설의 일차침전지 후단처럼 측정지점이 복개되어 있거나, 침사지처럼 실내에 위치하며 수심이 매우 낮은 경우로 메탄이 확산되지 못하고 지속적으로 체류하게 되어서 배경농도가 높은 경우로 측정초기에 농도가 매우 높았다가 이동가스에 의해서 농도가 감소하여  $4\tau$  부근에서 안정화되는 경우이다. (B)는 F 하수처리시설의 호기조와 같이 초기에는 배경농도가 없는 상태에서 수표면에서 발생하는 메탄농도가 점점 증가되면서  $4\tau$  부근에서 안정화 되는 경우이다.

(C)와 (D)는 안정화가 안된 경우로 (C)는 배경농도가 매우 높을 경우로 이동가스에 의한 농도 안정화시간이 오래 걸리기 때문에  $4\tau$ 에서 농도가 안정화 되지 않으며, (D)는 불규칙하게 메탄농도가 측정된 경우로  $4\tau$ 에서 농도가 안정화

되지 않는 경우이다.

이처럼 하수처리시설은 다양한 메탄 발생 형태가 존재하므로 단순히 4τ때의 농도만을 가지고 측정자료를 분석하기에는 대표성에 문제가 있는 것으로 판단된다. 따라서 하수처리시설에서의 메탄농도 측정은 현장분석을 통한 안정화여부에 대한 판단이 필요하며, 시료채취후 기기분석 등을 통한 농도측정은 결과에 대한 신뢰성이 매우 떨어지는 것으로 판단되며, 향후 메탄 배출계수의 개발시에도 현장분석에 의한 개발방법으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

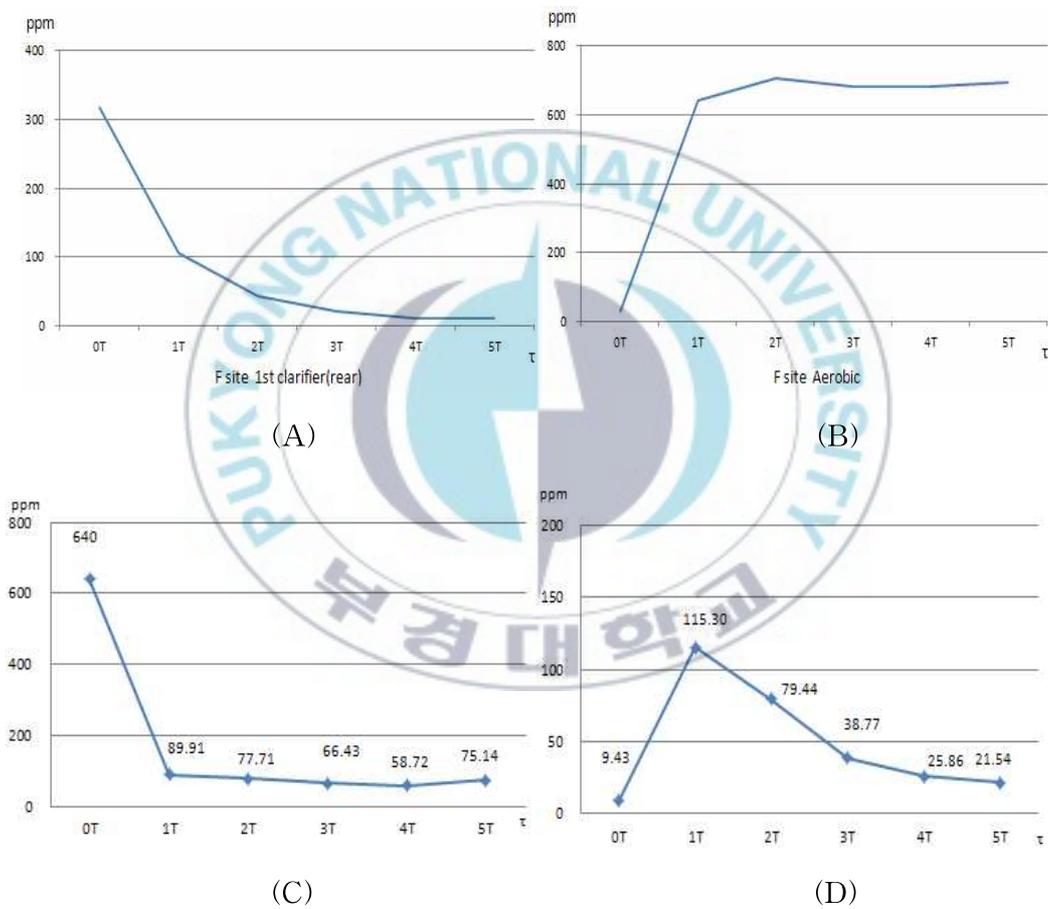


Fig. 4.15. Trend of the CH<sub>4</sub> concentration

#### 4.1.1.9 반응조별 배출특성 비교결과

공법별 특성에 따른 온실가스 배출비중에 대한 특성을 알아보기 위하여 각 반응조별 배출량을 참사지, 1차침전지, 생물반응조(무산소조, 혐기조, 호기조, 선택조 등) 및 2차침전지의 4단계로 구분하여 각 반응조별 메탄 배출비중을 분석하였다. Table 4.15 및 Fig. 4.16은 반응조별 메탄 배출비중을 나타내고 있다.

Table 4.15. Portion of the CH<sub>4</sub> emission at the each reactor

(Unit : %)

Site	Grit chamber	1st clarifier	Bio reactor	2nd clarifier
A	9.36	14.47	74.41	1.32
B	0.47	76.88	22.40	0.19
C	0.72	2.25	90.40	6.59
D	1.67	6.33	90.67	0.60
E	0.37	93.33	6.29	0.02
F	10.00	60.88	29.17	0.49
G	3.88	17.65	76.82	1.18

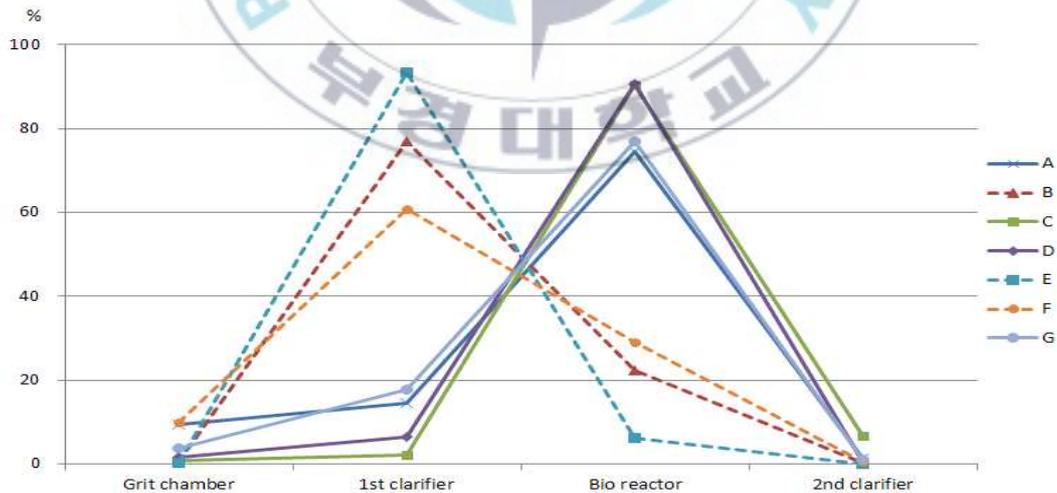


Fig. 4.16. Portion of the CH<sub>4</sub> EF at the each reactor

각 반응조별 메탄 배출비중을 분석하여 본 결과 하수처리시설별로 동일한 특성은 없었으며, 1차침전지의 비중이 높은 경우(점선표시, B, E, F 하수처리시설)와 생물반응조의 비중이 높은 경우(실선표시, A, C, D, G 하수처리시설)로 구분되어짐을 알 수 있었다. 1차 침전지의 메탄 배출비중이 높은 B, E, F 하수처리시설이 공법에 대한 유사성이 있다면 생물반응조에서 메탄 배출계수가 낮은 공법계열로 구분할 수도 있겠으나,  $A_2O$ 공법, Denipho공법 및 MLE공법은 생물반응조의 구조 등으로 비교하여 보면 구조적 유사성이 적으며, 또한 동일하게  $A_2O$ 공법으로 운영중인 A와 B 하수처리시설은 운전상의 차이는 있지만 상이한 메탄 배출특성을 보이는 것으로 보아 하수처리시설에서의 메탄 배출은 공법별 특성보다는 유입수의 성상, 슬러지의 유동 등을 포함한 전반적인 하수처리시설의 개별 특성에 의해서 결정되는 것으로 판단된다.

추가적으로 공법을 결정하는 생물반응조에서 메탄 배출계수가 차지하는 비중이 높다면 이를 분석하여 각 공법별로의 배출특성을 확인할 수 있겠지만, 본 연구결과와 같이 하수처리시설이 기본공정인 일차침전지에서 높은 경우가 존재하기 때문에 공법별 메탄 배출특성을 확인할 수 없는 것으로 판단된다.

Table 4.16 및 Fig. 4.17은 반응조별 메탄 배출계수를 나타내고 있다. 반응조별 메탄 배출계수 또한 측정대상 하수처리시설의 생물반응조의 구성이 다양하여 혐기조, 무산소 및 호기조로 구분하여 비교하기가 불가하여 생물반응조로 합하여 비교하였다. 각 반응조별 배출계수에 대해서 산정해본 결과 1차침전지에서의 배출계수가  $0.005 \text{ kg CH}_4/\text{kg BOD}$ 로 가장 높게 산정되었으며, 2차침전지에서의 배출계수가  $0.00007 \text{ kg CH}_4/\text{kg BOD}$ 로 가장 낮게 산정되었다. 1차 침전지에서 배출계수가 가장 높게 산정된 이유는 E 하수처리시설의 1차 침전지에서 배출계수가  $0.028 \text{ kg CH}_4/\text{kg BOD}$ 로 매우 높게 산정되어서 평균값의 적용시 전체적으로 1차 침전지에서의 메탄 배출계수가 높아졌기 때문으로 판단된다.

Table 4.16. CH<sub>4</sub> EF at the each reactor

(Unit : kg CH<sub>4</sub>/kg BOD)

Reactor	Grit chamber	1st clarifier	Bio reactor	2nd clarifier
Value	0.00017	0.005	0.00208	0.00007



Fig. 4.17. CH<sub>4</sub> EF at the each reactor

Fig. 4.18은 측정대상 하수처리시설 7개소에 대한 1차침전지 및 생물반응조에서의 메탄 배출계수와 전체 배출계수와의 상관성을 분석한 결과이다. 분석결과 하수처리시설별 1차침전지 배출계수와 하수처리시설별 최종배출계수 사이의 상관계수( $R^2$ )값은 0.9284로 매우 높은 상관성을 보였으며, 하수처리시설별 생물반응조 배출계수와 하수처리시설별 최종배출계수 사이의 상관계수( $R^2$ )값은 -0.659로 상관성이 없는 것으로 나타났다.

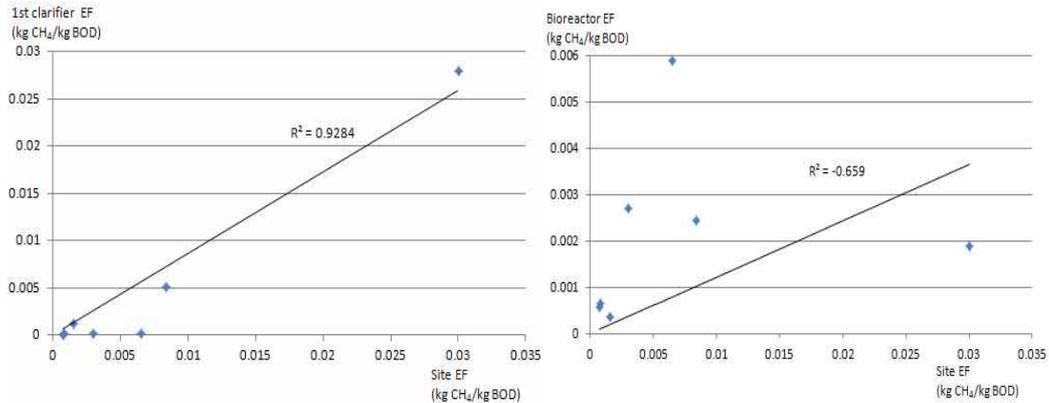


Fig. 4.18. Relationship between site EF and 1st clarifier EF, Bioreactor EF

생물반응조내 메탄 배출특성을 알아보기 위해서 생물반응조를 혐기조, 무산소조 및 호기조로 구분하여 생물반응조내의 메탄 배출비율을 비교하여 보았다. 호기조로 운영되는 선택조는 호기조로 구분하였으며, 공법의 특성상 혐기조, 무산소조 및 호기조로 구분이 불가능한 E(DeniPho공법), F(MLE공법) 하수처리시설은 비교에서 제외하였다. Fig. 4.19는 생물반응조내 메탄 배출비율을 비교한 것이다.

비교결과 생물반응조내에서 메탄 배출비율은 평균적으로 혐기조에서 11%, 무산소조에서 24.2%이며 호기조에서 64.8%로 나타났으나 A 하수처리시설은 호기조보다는 무산소조에서 메탄 배출계수가 높은 것으로 나타났다. 호기조의 저층부나 Dead space에서 혐기적 상태가 유지되기도 하지만, 가장 큰 이유는 전단에서 발생된 메탄가스가 호기조의 폭기 등으로 인하여 배출되기 때문으로 판단된다.

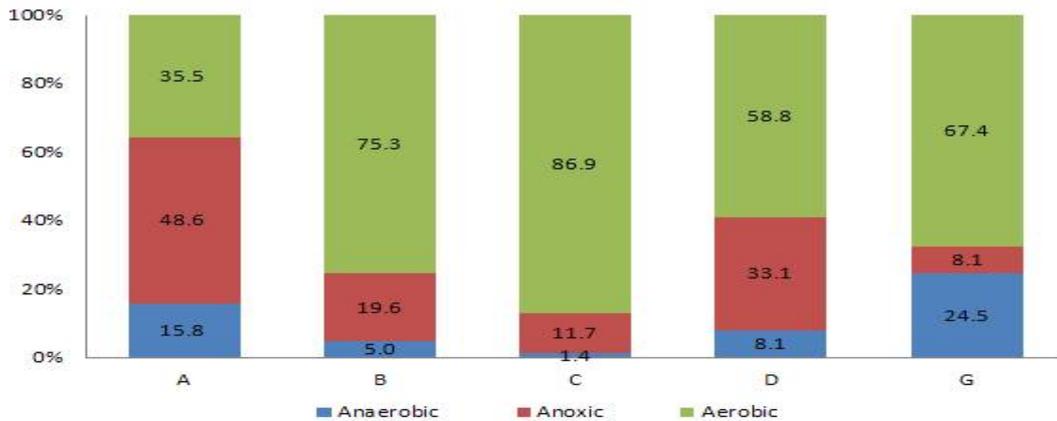


Fig. 4.19. Portion of the CH<sub>4</sub> emission in the bioreactor

Fig. 4.20은 측정대상 하수처리시설에 대한 혐기성 조건에서의 메탄배출비율을 나타내고 있다. E 하수처리시설은 혐기성조건인 1차 침전지에서 E 하수처리시설의 전체 메탄배출량의 93%가 배출되며 E 하수처리시설 전체로 보면 메탄배출량의 97%가 혐기성 조건에서 배출되는 것으로 나타났다. 반면 C 하수처리시설의 경우는 혐기성 조건에서의 메탄 배출비율은 21%로 대부분 호기조(선택조 포함)에서 배출되는 것으로 나타났다. 측정대상 하수처리시설에 대해서 전체적으로 보면 63%의 메탄이 혐기성 조건에서 배출되는 것으로 나타났다.

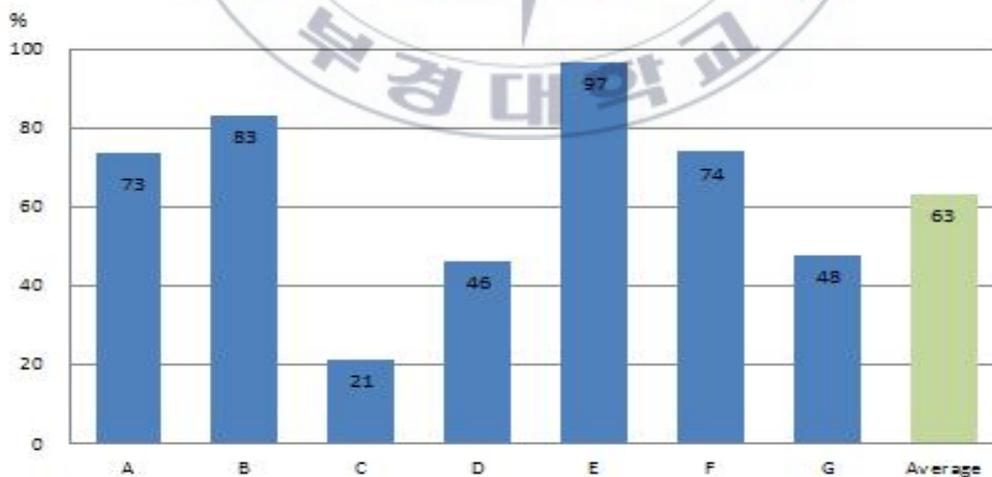


Fig. 4.20. Portion of the CH<sub>4</sub> emission at the anaerobic condition

#### 4.1.2 메탄 배출계수 개발결과

고도처리공법을 적용한 7개소의 국내하수처리시설에 대해서 현장측정을 통해서 메탄 배출계수를 개발한 결과는 Table 4.17 및 Fig. 4.21과 같다. 하수처리시설별 메탄 배출계수는 식 (3.4)에서 제시한 바와 같이 각 반응조별 배출계수를 합하여 산정하였다.

현장측정을 통한 메탄 배출계수 개발결과, 메탄 배출계수는 0.007 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 산정되었으며 이때 최대값은 0.030 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD이며, 최소값은 0.00076 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD이며, 표준편차는 0.010 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 산정되었다.

Table 4.17. CH<sub>4</sub> EF of the each site

Site	CH <sub>4</sub> (kg CH <sub>4</sub> /kg BOD)
A	0.00076
B	0.00160
C	0.00654
D	0.0030
E	0.030
F	0.0084
G	0.00085
Average	0.007
Min	0.00076
Max	0.030
Standard deviation	0.010

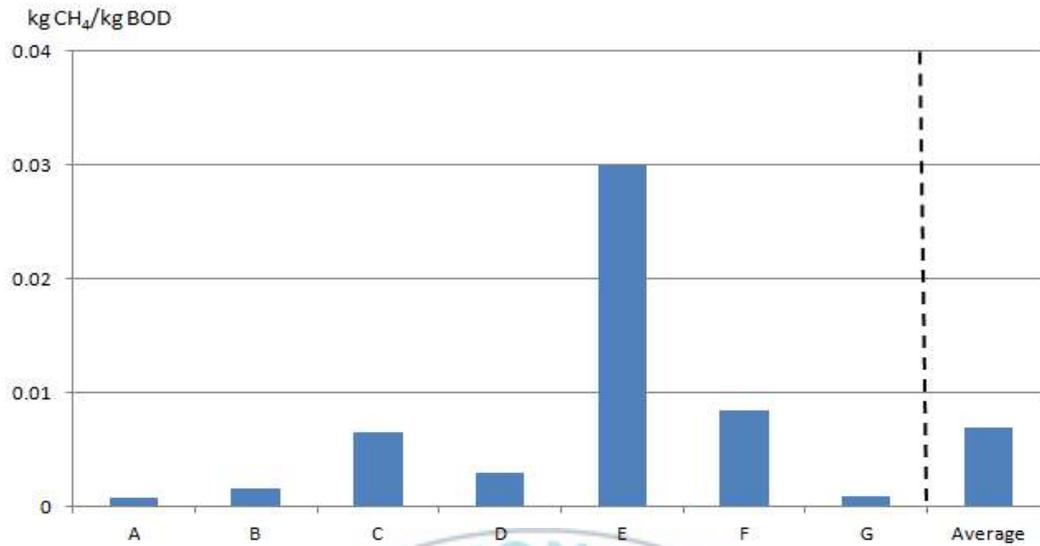


Fig 4.21. CH<sub>4</sub> Emission factor of the each site

국내 연구자료와 비교한 결과는 Table 4.18 및 Fig. 4.22와 같다.

Table 4.18. Comparison of the CH<sub>4</sub> EF

Case	Factor (kg CH <sub>4</sub> /kg BOD)	Note
National EF	0.00355	National EF(Except the Recovery)
NIER case1	0.00161	NIER(2007), Activated sludge Process
NIER case2	0.00057	NIER(2007), 5 Stage Process
NIER case3	0.00288	NIER(2007), DeNipho Process
NIER case4	0.00414	NIER(2007), SBR Process
Average of references	0.00255	-
Result of study	0.007	

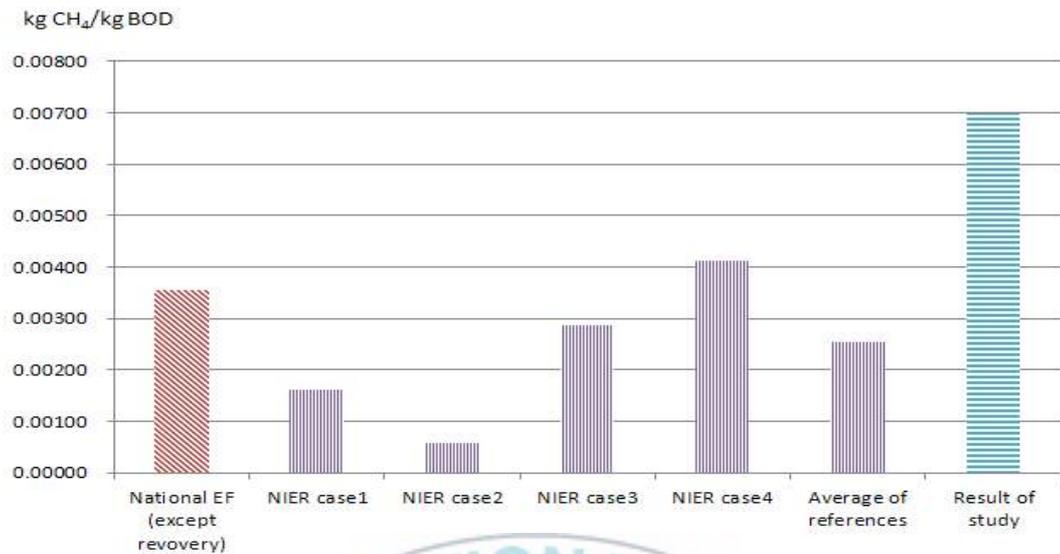


Fig. 4.22. Comparison of the CH<sub>4</sub> EF

우리나라 국가 온실가스 인벤토리 보고서 작성시 적용되고 있는 회수량을 제외한 메탄 배출계수(National EF) 및 국립환경과학원에서 개발한 메탄 배출계수(NIER case1 ~ case4)의 평균은 0.00255 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD(표준편차: 0.00145 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD)로, 본 연구 결과인 0.007 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD와 비교하여 보면 본 연구결과가 약 2.7배 높게 나타났다.

세부적으로 비교하여 보면, 국가 온실가스 인벤토리 보고서 작성시 적용하고 있는 배출계수 중 회수량(0.01532 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD의 76.8%)을 제외한 배출계수인 0.00355 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD와 비교하여 보면 본 연구결과가 약 2배 정도 높은 것으로 산정되었으며, 국립환경과학원의 연구결과에 대한 평균값인 0.00230 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD와 비교하여 보면 약 3배 정도 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발한 배출계수가 높은 이유는 국가 보고서 작성시 적용하고 있는 배출계수와 국립환경과학원에서 개발한 배출계수는 침사지, 호기조 및 농축조 등 일부 반응조에 대해서만 측정하였으나, 본 연구는 혐기성 조건

의 반응조 뿐만 아니라 침사지, 호기조(간헐포기조), 분배조, 선택조 및 2차침전지 등을 포함하여 측정 가능한 전체 수처리 공정에서 측정하였으며, 또한 본 연구는 측정 여건상 메탄배출량이 가장 많은 하기에 측정을 실시하여 보수적으로 배출계수를 개발하였기 때문에 상대적으로 메탄 배출계수가 높게 산정된 것으로 판단된다.

국외 연구자료와 비교한 결과는 Table 4.19 및 Fig. 4.23과 같다.

국외 연구자료와 비교하여 보면, ANNEX I 국가가 국가보고서 작성시 적용하는 메탄 배출계수의 평균값(0.04484 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD)과 비교한 결과, ANNEX I 국가가 국가 온실가스 인벤토리 보고서를 작성할때 적용하는 메탄 배출계수가 약 6.4배 높은 것으로 나타났다.

Table 4.19. Comparison of the CH<sub>4</sub> EF of the ANNEX I

Country	EF kg CH <sub>4</sub> /kg BOD
BULGARIA	0.18
AUSTRIA	0.162
SLOVAKIA	0.06
TURKEY	0.06
CZECH	0.03
HUNGARY	0.03
ITALY	0.03
SLOVENIA	0.03
ROMANIA	0.027
FINLAND	0.00625
PORTUGAL	0.006
JAPAN	0.002937
DENMARK	0.0018
LITHUANIA	0.0018
Average	0.04484

이는 일부 ANNEX I 국가에서 혐기성 조건에서 메탄이 나오는 것으로 판단하여 IPCC G/L상에서 상대적으로 기본값이 높은 혐기성조건의 MCF값을 적용하면서 전체적으로 평균값이 높아졌기 때문으로 판단된다. 본 연구와 유사하게 현장측정을 통하여 개발한 일본의 국가 배출계수(0.002937 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD)와 비교하여 보면 본 연구에서 개발한 배출계수가 약 2.4 배 높은 것으로 나타났다. 이는 일본은 다른 대부분의 ANNEX I 국가와는 다르게 현장측정을 통하여 배출계수를 개발하여 적용하고 있기 때문에 ANNEX I 국가의 평균값보다는 낮게 나타났으며, 본 연구결과가 높은 이유에 대해서는 일본의 배출계수에 대한 세부자료를 검토할 수 없어서 확인이 어렵지만 국내연구결과와 유사하게 측정지점의 선정 및 측정시기에 의해서 차이가 발생한 것으로 추정된다.



Fig. 4.23. Comparison of CH<sub>4</sub> EF of the ANNEX I

국내·외 하수처리시설에 대한 메탄 배출계수는 측정방법, 측정위치 및 시기 등이 매우 다양하여 구체적으로 비교하기에는 무리가 있으며, 이 부분에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 4.1.3. 온실가스 배출량 산정결과

현재 하수분야 국가 온실가스 배출량 산정방식은 문헌연구에서도 제시한 바와 같이 메탄회수량을 포함한 메탄 배출계수를 적용하여 메탄 발생량을 산정한 후 회수량(76.8%)을 제외하여 최종 메탄 배출량을 산정하는 방식이다. 이 방법은 메탄 회수량에 대한 정보가 부족한 경우에 적용이 가능하며, 메탄 회수량은 에너지화 정책 등에 의해서 유동적으로 변동되기 때문에 고정된 비율로 회수량을 제외하는 것은 왜곡된 배출량 산정결과를 가져올 수 있다.

따라서 본 연구에서는 새로운 하수분야 배출량 산정식을 제시하고 본 연구에서 개발된 메탄 배출계수를 적용하여 국가 하수분야 온실가스 배출량을 산정하였다.

본 연구에서 제시한 하수분야 온실가스 배출량 산정식은 아래와 같다.

$\begin{aligned} & \text{하수에서의 메탄 배출량(t CH}_4\text{)} \\ & = EF \times AD \\ & \quad EF : \text{배출계수, 0.007 ton CH}_4\text{/ton BOD} \\ & \quad AD : \text{BOD부하량, ton BOD} \end{aligned}$
--

위의 식은 국가 고유배출계수를 적용하여 산정하는 식으로 메탄 회수량에 관한 사항은 배출량 산정식에서 제외하였다. 현재 소화조에서의 메탄 회수량은 하수도통계 작성시 조사항목으로 조사되고 있으며, 또한 목표관리제를 통해서도 대규모 하수처리시설에 대해서는 회수량에 대한 자료가 조사되고 있다. 따라서 회수량은 별도 산정이 가능하여 본 산정식에서는 제외하였다. 소화조에서의 메탄 회수량은 목표관리제의 효율적 운영 등을 포함한 전반적인 하수처리시설의 온실가스 감축활동에 중요한 자료이므로 소화가스 중 메탄농도에 대한 측정 방법의 표준화 등을 포함하여 소화조 메탄 회수량에 대한 신뢰성 확

보를 위한 국가차원의 노력이 필요할 것으로 판단된다.

Table 4.20은 본 연구에서 산정한 메탄 배출계수를 적용하여 계산한 하수분야에 대한 국가 온실가스 배출량을 산정한 결과이다. 본 연구에서 산정한 메탄 배출계수를 적용하여 계산한 하수분야 국가 온실가스 배출량은 7.1 Gg CH<sub>4</sub>로 2013년 국가 온실가스 인벤토리 보고서(2011년 배출량)에서 제시한 하수분야 배출량(3.6 Gg CH<sub>4</sub>)보다 약 2배 정도 많이 배출되는 것으로 나타났다.

Table 4.20. Calculated Results of the CH<sub>4</sub> emission

-	Value (ton CH <sub>4</sub> /ton BOD)	BOD load (ton BOD/yr)	Recovery amount (Gg CH <sub>4</sub> )	CH <sub>4</sub> emission (Gg CH <sub>4</sub> )
National EF	0.01532	1,015,481.9	11.9	3.6
Result	0.007		-	7.1

## 4.2 메탄 배출계수 불확도 산정결과

본 연구에서는 IPCC G/L에서 제시한 불확도 산정방법인 오차증식법 및 몬테카를로시뮬레이션을 이용한 방법을 적용하여 불확도를 산정하였다.

### 4.2.1 오차증식법을 통한 불확도 산정결과

하수처리시설에 대한 메탄 배출계수는 각각의 하수처리시설에 대해 반응조별로 배출계수를 구하여 합하는 방법으로 하수처리시설별 배출계수를 산정한 후 하수처리시설별 배출계수를 산술평균하여 메탄 배출계수를 구하는 방식으로 진행된다. 따라서 불확도 산정방법도 메탄 배출계수 산정방법과 동일하게 각각의 하수처리시설에 대해 반응조별로 배출계수 불확도를 산정한 후 합성하여 하수처리시설별 배출계수 불확도를 산정한 후 하수처리시설별 배출계수 불확도를 다시 합성하여 메탄 배출계수에 대한 불확도를 구하는 방식으로 진행하였다.

#### 4.2.1.1 관계모델식 정립

메탄 배출계수에 대한 불확도를 산정하기 위해서는 배출계수에 영향을 미치는 불확도 요인에 대한 분석이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 메탄 배출계수 산정식을 변수와 상수부분으로 구분하여 관계 모델식을 정립하였으며, 변수부분은 현장측정자료(메탄농도, 챔버면적, 이동가스 유량)와 활동자료(BOD농도, 조별면적, 유입유량)로 다시 구분하였다. 메탄 배출계수 산정식은 아래와 같다.

$$EF_{CH_4} = \left( \frac{C_{CH_4} \times Q_C}{A_C} \right) \times \left( \frac{A}{BOD \times Q} \right) \times \left( \frac{16 \times 60 \times 24 \times 10^{-6}}{0.08205 \times 273.15} \right) \text{-----(4.1)}$$

각각의 불확도 요인에 대한 정의는 Table 4.21과 같다.

Table 4.21. Definition of the uncertainty factor

Factor	Definition	Unit
$EF_{CH_4}$	$CH_4$ emission factor	kg $CH_4$ /kg BOD
$C_{CH_4}$	$CH_4$ concentration	ppm
$Q_c$	Carrier gas flow	L/min
$A_c$	Chamber area	$m^2$
BOD	BOD concentration	mg/L
Q	Influent flow	$m^3/day$
A	Site area	$m^2$

각각의 불확도 요인에 대하여 불확도 인자를 분석한 결과는 Fig. 4.24와 같다. 메탄농도( $C_{CH_4}$ )에 대한 불확도 인자는 대표성, 반복성, 정확도 및 분해능이 존재하여, 이동가스 유량( $Q_c$ )에 대한 불확도 인자는 대표성, 정확도 및 분해능이 존재한다. 챔버면적( $A_c$ )에 대한 불확도 인자는 정확도가 존재한다. BOD농도(BOD) 및 유입유량(Q)에 대한 불확도 인자는 대표성, 정확도 및 분해능이 존재하며, 조별면적(A)에 대한 불확도 인자는 정확도가 존재한다.

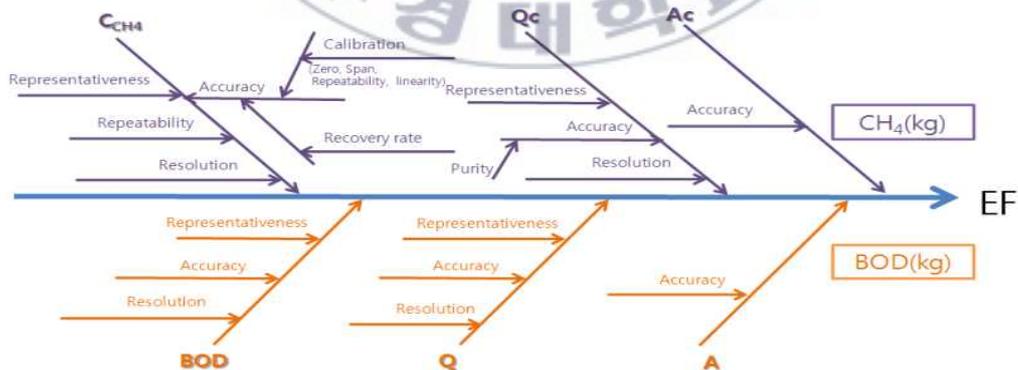


Fig. 4.24. Uncertainty component at the  $CH_4$  EF

불확도인자에 대한 정의 및 불확도 형태(Type)는 Table 4.22와 같다.

Table 4.22. Definition of the uncertainty component

Factor	Component	Definition	Type
C <sub>CH4</sub>	R <sub>M,CH4</sub>	Representativeness of the measurement period	A
	f <sub>C,CH4</sub>	Repeatability of the measurement	A
	f <sub>S,CH4</sub>	Representativeness of the measurement point	A
	f <sub>R,CH4</sub>	Error of the recovery rate	A
	f <sub>CAL,Z</sub>	Error of the zero calibration	B
	f <sub>CAL,S</sub>	Error of the span calibration	B
	f <sub>CAL,R</sub>	Error of the Repeatability calibration	B
	f <sub>CAL,L</sub>	Error of the linearity calibration	B
	f <sub>reso</sub>	Resolution	B
Q <sub>c</sub>	R <sub>QC</sub>	Error of the analyzer	B
	f <sub>conc</sub>	Purity of the carrier gas	B
	f <sub>reso</sub>	Resolution	B
	f <sub>mcf</sub>	Error of the MFC	B
Ac	R <sub>AC</sub>	Error of the area calculation	B
BOD	R <sub>BOD</sub>	Representativeness of the measurement period	A
	f <sub>anal</sub>	Error of the analysis	B
	f <sub>reso</sub>	Resolution	B
Q	R <sub>Q</sub>	Representativeness of the measurement period	A
	f <sub>anal</sub>	Error of the analyzer	B
	f <sub>reso</sub>	Resolution	B
A	R <sub>A</sub>	Allowed error of the building code	B

#### 4.2.1.2 인자별 불확도 산정결과

각각의 반응조에 대한 인자별 불확도는 반응조별로 유사하므로 A 하수처리 시설의 침사지에 대한 인자별 불확도 산정결과에 대해서 자세히 설명하겠으며, 기타 하수처리시설에 대한 불확도 산정결과는 부록에 제시하겠다.

#### 가) 메탄 농도(CH<sub>4</sub> Concentration, C<sub>CH<sub>4</sub></sub>)

##### 1) 요인별 관계 모델 설정

메탄 농도에 대한 측정량과 입력간의 요인별 관계분석 모델설정결과는 아래와 같다. 메탄 농도의 불확도에 영향을 미치는 인자로는 측정기간의 대표성, 반복성, 측정지점의 대표성, 회수율, ZERO, SPAN, 반복성 및 직선성 교정오차 및 분해능이 있다.

$$C_{CH_4} = R_{M_{CH_4}} \cdot f_{C_{CH_4}} \cdot f_{S_{CH_4}} \cdot f_{R_{CH_4}} \cdot f_{CAL_Z} \cdot f_{CAL_S} \cdot f_{CAL_R} \cdot f_{CAL_L} \cdot f_{reso} \quad (4.2)$$

- C<sub>CH<sub>4</sub></sub> : 메탄농도(ppm)
- R<sub>M<sub>CH<sub>4</sub></sub></sub> : 측정기간의 대표성
- f<sub>C<sub>CH<sub>4</sub></sub></sub> : 반복성 오차
- f<sub>S<sub>CH<sub>4</sub></sub></sub> : 측정지점의 대표성 오차
- f<sub>R<sub>CH<sub>4</sub></sub></sub> : 회수율에 의한 오차
- f<sub>CAL\_Z</sub> : ZERO 교정오차
- f<sub>CAL\_S</sub> : SPAN 교정오차
- f<sub>CAL\_R</sub> : 반복성 교정오차
- f<sub>CAL\_L</sub> : 직선성 교정오차
- f<sub>reso</sub> : 분해능

## 2) 입력량의 요인별 측정값과 표준불확도 산정

- 측정기간의 대표성에 의한 불확도( $R_{M-CH_4}$ )

본 연구에서의 측정은 전체기간이 아닌 하절기에 대해서만 측정을 실시하였기 때문에 측정기간의 대표성에 의한 불확도를 산정하기 위한 자료가 부족하다. 따라서 본 연구에서는 측정기간의 대표성을 의미하는 온도에 따른 메탄농도의 변화를 고려하기 위해서 기존연구에서 제시된 온도에 따른 메탄 FLUX에 대한 회귀분석식을 활용하여 측정기간의 대표성에 의한 불확도를 산정하였다.

Czepiel P. M 등의 연구(1993)등에 따르면 침사지에서의 호기성 조건(aerated)과 비호기성조건(non-aerated)에서의 메탄 Flux( $g\ CH_4M^{-2}day^{-1}$ )에 대한 상관관계는 호기성조건에서는  $Flux=1.61T-9.0(R^2=0.78)$ 이며, 비호기성조건에서는  $Flux=1.62T - 14.3(R^2=0.76)$ 로 제시되고 있다. 따라서 본 연구에서는 생물 반응조에 대한 월별 평균 온도자료가 있는 D 및 E 처리시설에 대해서 호기성 조건의 상관관계식을 적용하여 각 월별 메탄 Flux를 산정한 후 불확도를 산정하여 전체 하수처리시설에 동일 적용하였다. 불확도 산정에 적용한 값은 Table 4.23과 같다. 메탄농도의 변화는 E 하수처리시설 경우 동절기(1월)와 하절기(8월)을 비교하여 보면 4배의 차이를 보였으며 기존 일본연구 결과인 3배 정도와 유사한 특성을 보이는 것으로 나타났다.

Table 4.23. Trend of the monthly average temperature

Month	Temperature		Flux	
	°C		$CH_4M^{-2}day^{-1}$	
	D	E	D	E
2010. 1.	12	10.7	10.3	8.2
2010. 2.	12.6	11.4	11.3	9.4
2010. 3.	15	13.3	15.2	12.4
2010. 4.	16.1	15.9	16.9	16.6

Month	Temperature		Flux	
	°C		CH <sub>4</sub> M <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	
	D	E	D	E
2010. 5.	19	19.7	21.6	22.7
2010. 6.	22.8	23.6	27.7	29.0
2010. 7.	25.3	26.1	31.7	33.0
2010. 8.	27.1	26.4	34.6	33.5
2010. 9.	26.1	24.7	33.0	30.8
2010. 10.	22.3	22.1	26.9	26.6
2010. 11.	17.5	18.3	19.2	20.5
2010. 12.	14.7	14.3	14.7	14.0
Value	19.6	22.4	22.6	27.1
Average	-	-	21.9	21.4
Standard deviation	-	-	8.62	9.21
<i>u</i> ( <i>x</i> )	-	-	2.49	2.66
<i>u<sub>r</sub></i> ( <i>x</i> )(%)	-	-	11.0	12.4
U	-	-	5.48	5.85
U(%)	-	-	24.3	27.4

표준불확도 산정결과 D 하수처리시설은 2.49 g CH<sub>4</sub>M<sup>-2</sup>day<sup>-1</sup>, E 하수처리시설의 경우 2.66 g CH<sub>4</sub>M<sup>-2</sup>day<sup>-1</sup>로 산정되었으며, 본 연구에서는 불확도가 큰 E하수처리시설의 값을 전체하수처리시설의 측정기간의 대표성에 의한 불확도값으로 적용하였으며, E 하수처리시설에 대한 불확도는 A형 불확도 산정식에 의거 산정하였다.

A하수처리시설의 침사지의 메탄농도(78.9 ppm)에 대한 측정기간의 대표성에 의한 확장불확도 산정결과 ±27.4%(신뢰수준 95%, *k*=2.2)로 산정되었다. 확장불확도를 이용하여 불확도 합성을 위해서 표준불확도 및 상대표준불확도를 산정한 결과, 표준불확도는 9.81 ppm으로 산정되었으며, 상대표준불확도는 12.4%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(R_{CH_4}) = 78.9 \times \frac{0.274}{2.2} = 9.81 \text{ ppm}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(R_{CH_4}) = \frac{u(R_{CH_4})}{x} = \frac{9.81}{78.9} \times 100 = 12.4\%$$

$$\text{자유도, } v(R_{BOD}) = n - 1 = 12 - 1 = 11$$

- 반복성에 대한 불확도( $f_{C-CH_4}$ )

반복성에 대한 불확도는 각 측정대상 하수처리시설별로 실시하여야 하나, 측정조건 및 이동가스 소모 등의 영향으로 C 하수처리시설의 호기조 전단에서 실시한 자료를 근거로 A형 불확도 산출식에 의해서 산출하였다.

A하수처리시설의 침사지의 메탄농도(78.9ppm)에 대한 반복성에 대한 확장 불확도 산정결과,  $\pm 8.20\%$ (신뢰수준 95%,  $k=3.18$ )로 산정되었으며 전체 하수처리시설에 대해서 동일하게 적용하였다. Table 4.24는 반복측정결과이다.

Table 4.24. Results of the Repeatability of the measurement

Class.	CH <sub>4</sub>	Temperature	Pressure
	ppm	°C	kPa
1	360.4	23.38	101.6
2	354.9	23.44	101.6
3	351.7	23.62	101.6
4	320.6	23.69	101.6
Average	346.90	-	-
Standard deviation	17.90	-	-
$u(x)$	8.95	-	-
$u_r(x)(\%)$	2.58	-	-

Class.	CH <sub>4</sub>	Temperature	Pressure
	ppm	°C	kPa
U	28.46	-	-
U(%)	8.20	-	-

확장불확도를 이용하여 불확도 합성을 위해서 표준불확도 및 상대표준불확도를 산정한 결과, 표준불확도 산정결과 2.04ppm으로 산정되었으며, 상대표준불확도는 2.58%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(f_{C,CH_4}) = 78.9 \times \frac{0.0820}{3.18} = 2.04 \text{ ppm}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(f_{C,CH_4}) = \frac{u(f_{C,CH_4})}{x} = \frac{2.04}{78.9} \times 100 = 2.58\%$$

$$\text{자유도, } v(f_{C,CH_4}) = n - 1 = 4 - 1 = 3$$

- 측정지점의 대표성에 대한 불확도( $f_{S,CH_4}$ )

측정지점의 대표성에 대한 불확도는 측정대상 하수처리시설별로 실시하여야 하나, 측정여건 및 이동가스 소모 등의 영향으로 E 하수처리시설의 생물반응조 4지 및 5지에서 5m 간격으로 2지점에서 실시한 자료를 근거로 A형 불확도 산출식에 의해서 반복성에 대한 불확도를 산정하였으며, 산정결과 표준불확도가 높은 생물반응조 5지에서의 불확도 산정결과로 측정지점의 대표성에 대한 불확도로 산정하였다. Table 4.25는 측정지점의 대표성 측정결과이다. A하수처리시설의 침사지의 메탄농도(78.9ppm)의 측정지점 대표성에 대한 확장불확도 산정결과  $\pm 7.87\%$ (신뢰수준 95%,  $k=12.71$ )로 산정되었으며 전체 하수처리시설에 대해서 동일하게 적용하였다.

Table 4.25. Results of the Representativeness

Site	#4	#5
	CH <sub>4</sub> (ppm)	
Site 1	25.99	13.50
Site 2	27.19	11.64
Average	26.59	12.57
Standard deviation	0.85	1.32
$u(x)$	0.60	0.93
$u_r(x)(\%)$	2.26	7.40
U	7.63	11.82
U(%)	7.87	7.87

확장불확도를 이용하여 불확도 합성을 위해서 표준불확도 및 상대표준불확도를 산정한 결과, 표준불확도는 0.488ppm으로 산정되었으며, 상대표준불확도는 0.619%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(f_{S\_CH_4}) = 78.9 \times \frac{0.0787}{12.71} = 0.488 \text{ ppm}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(f_{S\_CH_4}) = \frac{u(f_{S\_CH_4})}{x} = \frac{0.488}{78.9} \times 100 = 0.619\%$$

$$\text{자유도, } v(R_{S\_CH_4}) = n - 1 = 2 - 1 = 1$$

- 회수율에 의한 오차에 대한 불확도( $f_{R\_CH_4}$ )

메탄농도에 대한 회수율 시험결과의 오차는 9.5%로 이를 근거로 B형 불확도 산출식(직사각형분포)에 의해서 메탄농도 회수율에 의한 오차에 대한 불확도를 산정하였다.

A하수처리시설의 침사지의 메탄농도(78.9ppm)에 대한 회수율에 의한 오차에 대한 표준불확도는 4.33ppm으로 산정되었으며, 상대표준불확도는 5.48%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(f_{R\_CHA}) = 78.9 \times \frac{0.095}{\sqrt{3}} = 4.33 \text{ ppm}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(f_{R\_CHA}) = \frac{u(f_{R\_CHA})}{x} = \frac{4.33}{78.9} \times 100 = 5.48\%$$

$$\text{자유도, } \nu(f_{cal\_Z}) = \infty$$

- ZERO 교정오차에 의한 불확도( $f_{CAL\_Z}$ )

메탄 측정기의 ZERO 교정오차에 의한 불확도는 환경측정기기 일반시험 (Table 3.8 참조) 결과 중 ZERO 교정오차값(오차 0.02%)을 근거로 B형 불확도 산출식(직사각형분포)에 의해서 측정기 ZERO 교정오차에 의한 불확도를 산정하였다. A하수처리시설의 침사지의 메탄농도(78.9ppm)에 대한 ZERO 교정오차에 의한 표준불확도는 0.00911ppm으로 산정되었으며, 상대표준불확도는 0.0115%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(f_{CAL\_Z}) = 78.9 \times \frac{0.0002}{\sqrt{3}} = 0.00911 \text{ ppm}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(f_{CAL\_Z}) = \frac{u(f_{CAL\_Z})}{x} = \frac{0.00911}{78.9} \times 100 = 0.0115\%$$

$$\text{자유도, } \nu(f_{cal\_Z}) = \infty$$

- SPAN 교정오차에 의한 불확도( $f_{CAL_S}$ )

메탄 측정기의 SPAN 교정오차에 의한 불확도는 환경측정기기 일반시험 (Table 3.8 참조) 결과 중 SPAN 교정오차값(오차 0.46%)을 근거로 B형 불확도 산출식(직사각형 분포)에 의해서 측정기 SPAN 교정오차에 의한 불확도를 산정하였다. A하수처리시설의 침사지의 메탄농도(78.9ppm)에 대한 SPAN 교정오차에 의한 표준불확도는 0.210ppm으로 산정되었으며, 상태표준불확도는 0.266%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(f_{CAL_S}) = 78.9 \times \frac{0.0046}{\sqrt{3}} = 0.210 \text{ ppm}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(f_{CAL_S}) = \frac{u(f_{CAL_S})}{x} = \frac{0.210}{78.9} \times 100 = 0.266\%$$

$$\text{자유도, } \nu(f_{CAL_S}) = \infty$$

- 반복성 교정오차에 의한 불확도( $f_{CAL_R}$ )

메탄 측정기의 반복성 교정오차에 의한 불확도는 환경측정기기 일반시험 (Table 3.8 참조) 결과 중 반복성 교정오차값(오차 0.02%)을 근거로 B형 불확도 산출식(직사각형분포)에 의해서 측정기 반복성 교정오차에 의한 불확도를 산정하였다. A하수처리시설의 침사지의 메탄농도(78.9ppm)에 대한 반복성 교정오차에 의한 표준불확도는 0.00911ppm으로 산정되었으며, 상태표준불확도는 0.0115%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(f_{CAL_R}) = 78.9 \times \frac{0.0002}{\sqrt{3}} = 0.00911 \text{ ppm}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(f_{CAL_R}) = \frac{u(f_{CAL_R})}{x} = \frac{0.00911}{78.9} \times 100 = 0.0115\%$$

$$\text{자유도, } v(f_{CAL_R}) = \infty$$

- 직선성 오차에 의한 불확도( $f_{CAL_L}$ )

메탄 측정기의 직선성 교정오차에 의한 불확도는 관련고시에 의거 실시한 자체정도검사 결과 중 직선성 교정오차값(오차 1.9%)을 근거로 B형 불확도 산출식에 의해서 측정기 직선성 교정오차에 의한 불확도를 산정하였다.

A하수처리시설의 침사지의 메탄농도(78.9ppm)에 대한 직선성 오차에 의한 표준불확도는 0.866ppm으로 산정되었으며, 상대표준불확도는 1.097%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(f_{CAL_L}) = 78.9 \times \frac{0.019}{\sqrt{3}} = 0.866\text{ppm}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(f_{CAL_L}) = \frac{u(f_{CAL_L})}{x} = \frac{0.866}{78.9} \times 100 = 1.097\%$$

$$\text{자유도, } v(f_{CAL_L}) = \infty$$

- 분해능에 의한 불확도( $f_{reso}$ )

메탄 측정기의 분해능에 의한 불확도는 가장 많이 사용한 측정범위(0~500ppm)에서의 분해능(0.1ppm)으로 B형 불확도 산출식(직사각형분포)에 의해서 분해능에 의한 불확도를 산정하였다.

A하수처리시설의 침사지의 메탄농도(78.9ppm)에 대한 분해능에 의한 표준불확도는 0.0289 ppm으로 산정되었으며, 상대표준불확도는 0.0366%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(f_{reso}) = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.0289$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(f_{reso}) = \frac{u(f_{reso})}{x} = \frac{0.0289}{78.9} \times 100 = 0.0366\%$$

$$\text{자유도, } \nu(f_{reso}) = \infty$$

## 나) 이동가스 유량(Carrier gas flow, $Q_c$ )

### 1) 요인별 관계 모델 설정

이동가스 유량에 대한 불확도 요인은 유량계 오차, MCF의 안정성에 대한 오차, 이동가스의 농도오차 및 분해능에 대한 오차가 있으며 요인별 관계 모델은 아래와 같다.

$$Q_c = R_{Q_c} \cdot f_{conc} \cdot f_{reso} \cdot f_{mcf} \quad \text{-----(4.3)}$$

- $Q_c$  : 이동가스 유량(L/min)
- $R_{Q_c}$  : 이동가스 유량값(L/min) 또는 단위면적당 포기량(L/min)
- $f_{conc}$  : 이동가스 순도
- $f_{reso}$  : 분해능
- $f_{mcf}$  : MCF 오차

### 2) 입력량의 요인별 측정값과 표준불확도 산정

- 이동가스 유량계 오차에 의한 불확도( $R_{Q_c}$ )

이동가스 유량계는 교정된 유량계를 사용하였으므로 이동가스 유량계의 확장 불확도는 교정성적서( $U=\pm 0.38\%$ , 신뢰수준 약 95%,  $k=2$ )에 근거하여 불확도를 산정하였다.

A하수처리시설의 침사지의 이동가스 유량(5L/min)에 대한 유량계 오차에 의한 표준불확도는 0.00950L/min으로 산정되었으며, 상태표준불확도는 0.190%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(R_{Q_c}) = 5 \times \frac{0.0038}{2} = 0.00950L/\text{min}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(R_{Q_c}) = \frac{u(R_{Q_c})}{x} = \frac{0.00950}{5} \times 100 = 0.190\%$$

$$\text{자유도, } \nu(R_{Q_c}) = \infty$$

- 이동가스 순도에 의한 오차( $f_{conc}$ )

이동가스의 경우 순도 99.999%의 교정가스( $N_2$ )를 사용하였으므로 이동가스 순도에 의한 오차는 무시할 수 있는 것으로 판단된다.

- 이동가스 유량계 분해능에 의한 불확도( $f_{reso}$ )

이동가스 유량계에 대한 측정값은 소수점 2자리에서 측정 및 계산되고 있으므로 B형 불확도 산출식(직사각형분포)을 적용하여 불확도를 산정하였다.

A하수처리시설의 침사지의 이동가스 유량(5L/min)에 대한 유량계 분해능에 의한 표준불확도는 0.00289L/min으로 산정되었으며, 상태표준불확도는 0.0577%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(f_{reso}) = \frac{\frac{0.01}{2}}{\sqrt{3}} = 0.00289L/\text{min}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(f_{reso}) = \frac{u(f_{reso})}{x} = \frac{0.00289}{5} \times 100 = 0.0577\%$$

$$\text{자유도, } \nu(f_{anal}) = \infty$$

- MFC 오차에 의한 불확도( $f_{mcf}$ )

이동가스 유량계는 MFC(Mass Flow Controller)를 사용하여 5L/min으로 고정하여 시료채취를 실시하였으나, MFC의 고정상 문제로  $\pm 0.01\text{L/min}$  정도로 변동이 발생하고 있으므로 B형 불확도 산출식(직사각형분포)을 적용하여 불확도를 산정하였다.

A하수처리시설의 침사지의 이동가스 유량(5L/min)에 대한 MFC 오차에 의한 표준불확도는 0.0115L/min으로 산정되었으며, 상대표준불확도는 0.231%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(f_{mcf}) = \frac{(a_+ - a_-)}{\sqrt{3}} = \frac{(0.01 - (-0.01))}{\sqrt{3}} = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.0115\text{L/min}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(f_{mcf}) = \frac{u(f_{mcf})}{x} = \frac{0.0115}{5} \times 100 = 0.231\%$$

$$\text{자유도, } \nu(f_{mcf}) = \infty$$

#### 다) 챔버면적(Chamber area, $A_c$ )

##### 1) 요인별 관계 모델 설정

챔버면적에 대한 불확도 요인은 각 조별 면적에 대한 불확도로 요인별 관계 모델은 아래와 같다.

$$A_c = R_{A_c} \text{-----}(4.4)$$

- $A_c$  : 지점별 면적( $m^3$ )
- $R_{A_c}$  : 면적에 대한 오차

## 2) 입력량의 요인별 측정값과 표준불확도 산정

- 챔버면적 계산시 불확도( $R_{A_c}$ )

챔버면적 산정시 사용한 자의 분해능은 0.001m(1mm)로 챔버의 반지름(0.21m)을 고려한 오차는 0.476%(0.001/0.21\*100)이다. 따라서 면적에 대한 오차는  $\sqrt{0.00476^2 + 0.00476^2} = 0.00476\sqrt{2}\%$ 로 평가될 수 있다. B형 불확도 산출식(직사각형분포)을 적용하여 불확도를 산정하였다.

A하수처리시설의 침사지의 챔버면적( $0.138m^2$ )에 대한 챔버면적 계산시 불확도에 대한 표준불확도는  $0.000536m^2$ 으로 산정되었으며, 상대표준불확도는 0.389%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(R_{Ac}) = 0.138 \times \frac{0.00476\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0.000536m^2$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(R_{Ac}) = \frac{u(R_{Ac})}{x} = \frac{0.000536}{0.138} \times 100 = 0.389\%$$

$$\text{자유도, } \nu(R_{Ac}) = \infty$$

## 라) BOD 농도(BOD Concentration, BOD)

### 1) 요인별 관계 모델 설정

BOD 농도에 대한 측정량과 입력간의 요인별 관계분석 모델설정결과는 아래와 같다. BOD농도의 불확도에 영향을 미치는 인자로는 측정기간의 대표성, 분석 오차 및 분해능이 있다.

$$BOD = R_{BOD} \cdot f_{anal} \cdot f_{reso} \text{-----}(4.5)$$

- $BOD$  : BOD농도(ppm)
- $R_{BOD}$  : 측정기간의 대표성
- $f_{anal}$  : 분석 오차
- $f_{reso}$  : 분해능

## 2) 입력량의 요인별 측정값과 표준불확도 산정

- 측정기간의 대표성에 의한 불확도( $R_{BOD}$ )

하수처리시설의 메탄 배출계수를 산정하기 위해 적용한 BOD 농도는 측정기간 동안의 일별 연계전 BOD 농도의 평균값이다. 하지만 일별 연계전 유입수 BOD농도의 경우 하수처리시설 고유자료로 전체기간에 대해서는 활용이 불가하여 본 연구에서는 측정기간의 대표성에 의한 불확도를 산정하기 위해서 홈페이지 등에서 제공되어 있는 측정년도의 월별 BOD 평균값을 이용하였으며, 제공된 월별 평균 BOD농도가 연계후 농도(A, C 하수처리시설)일 경우는 측정기간 동안의 연계전후의 BOD농도의 비를 적용하여 연계전 농도로 변환한 후 A형 불확도 산출식을 적용하여 불확도를 산정하였다. 아래는 A 하수처리시설의 BOD 농도에 대한 측정기간의 대표성에 의한 불확도 산정결과이다. A하수처리시설의 BOD농도(71.2 ppm)에 대한 측정기간의 대표성에 의한 표준불확도 산정결과 5.26 ppm으로 산정되었으며, 상대표준불확도는 7.38%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(R_{BOD}) = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{18.2}{\sqrt{12}} = 5.26 \text{ ppm}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(R_{BOD}) = \frac{u(R_{BOD})}{x} \times 100 = \frac{5.26}{71.2} \times 100 = 7.38\%$$

$$\text{자유도, } v(R_{BOD}) = n - 1 = 12 - 1 = 11$$

측정기간의 대표성에 의한 불확도( $R_{BOD}$ ) 산정 방법은 BOD 농도값 및 자료 수를 제외하고는 전체 하수처리시설에서 동일하므로 A하수처리시설에 대해서만 서술하였으며, 각 측정대상 하수처리시설의 측정기간의 대표성에 의한 불확도는 Table 4.26에 요약하였다. B처리시설의 경우 월별 평균유량자료가 없어서 측정기간 17일간의 유량자료를 활용하여 산정하였으며, F 하수처리시설의 경우 12월에 대한 자료가 없어서 11개월에 대한 자료로 불확도를 산정하였다.

Table 4.26. Results of the uncertainty estimation of  $R_{BOD}$

Item	Input data	S	$u(R_{BOD})$	$u_r(R_{BOD})$	$v$
		(ppm)		%	-
A	71.2	18.2	5.3	7.38	11
B	204.9	55.6	16.0	7.83	16
C	125.2	10.7	3.1	2.46	11
D	120.4	14.6	4.2	3.51	11
E	139.7	12.6	3.6	2.60	11
F	125.6	17.2	5.2	4.14	10
G	134.8	12.7	3.7	2.72	11

- 분석오차에 의한 불확도( $f_{anal}$ )

BOD 분석오차에 의한 불확도는 하수처리시설에 대한 불확도 산정결과가 없는 관계로 수질오염공정시험법(환경부, 2011) ES04305.1중 부록에 제시되어 있는 BOD값에 대한 정도관리 목표값인 “상대표준편차값  $\pm 15\%$  이하”를 적용하여 B형 불확도 산출식(직사각형분포)을 적용하여 불확도를 산정하였다.

A하수처리시설의 BOD농도(71.2ppm)에 대한 분석오차에 의한 표준불확도는 6.17ppm으로 산정되었으며, 상대표준불확도는 8.66%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(f_{anal}) = 71.2 \times \frac{0.15}{\sqrt{3}} = 6.17\text{ppm}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(f_{anal}) = \frac{u(f_{anal})}{x} \times 100 = \frac{6.17}{71.2} \times 100 = 8.66\%$$

$$\text{자유도, } \nu(f_{anal}) = \infty$$

Table 4.27은 수질오염공정시험기준(환경부, 2011)에 제시된 BOD에 대한 정도관리 목표값이다.

Table 4.27. QA/QC Target of the BOD

Item of the QA/QC	QA/QC Target
Precision	Relative standard deviation, under $\pm 15\%$
Accuracy	Relative standard deviation, 85 ~ 115 %

- 분해능에 의한 불확도( $f_{reso}$ )

BOD 농도에 대한 측정값은 수질오염공정시험법(환경부, 2011) ES04363.0는

‘소수첫째자리까지 표기한다’라는 규정에 의거하여 표기하고 있는바, 이에 의거하여 BOD농도에 대한 분해능에 의한 불확도는 B형 불확도 산출식(직사각형 분포)을 적용하여 불확도를 산정하였다.

A하수처리시설의 BOD농도(71.2 ppm)에 대한 분해능에 의한 표준불확도는 0.0289ppm으로 산정되었으며, 상대표준불확도는 0.0405%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(f_{reso}) = \frac{\frac{0.1}{2}}{\sqrt{3}} = 0.0289\text{ppm}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(f_{reso}) = \frac{u(f_{reso})}{x} = \frac{0.0289}{71.2} \times 100 = 0.0405\%$$

$$\text{자유도, } \nu(f_{reso}) = \infty$$

#### 마) 유입 유량(Influent flow, Q)

##### 1) 요인별 관계 모델 설정

유입유량에 대한 측정량과 입력간의 요인별 관계분석 모델설정결과는 아래와 같다. 유입유량의 불확도에 영향을 미치는 인자로는 측정기간의 대표성, 측정기 오차 및 분해능이 있다.

$$Q = R_Q \cdot f_{anal} \cdot f_{reso} \text{-----(4.6)}$$

- Q : 유입유량(m<sup>3</sup>/day)
- R<sub>Q</sub> : 측정기간의 대표성
- f<sub>anal</sub> : 측정기오차
- f<sub>reso</sub> : 분해능

## 2) 입력량의 요인별 측정값과 표준불확도 산정

- 측정기간의 대표성에 의한 불확도( $R_Q$ )

A하수처리시설의 침사지에 대한 메탄 배출계수를 산정하기 위해 적용한 유량값은 측정기간 동안의 일별 유입유량의 평균값이다. 본 연구에서는 측정기간의 대표성에 의한 불확도를 산정하기 위해서 월별 유입유량 평균값을 이용하여 A형 불확도 산출식을 적용하여 불확도를 산정하였다.

A하수처리시설의 유입유량( $289,968\text{m}^3/\text{일}$ )에 대한 측정기간의 대표성에 의한 표준불확도는  $10,096\text{m}^3/\text{일로}$  산정되었으며, 상대표준불확도는 3.48%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(R_Q) = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{34,974}{\sqrt{12}} = 10,096 \text{ m}^3/\text{day}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(R_Q) = \frac{u(R_Q)}{x} = \frac{10,096}{289,968} \times 100 = 3.48\%$$

$$\text{자유도, } v(R_Q) = n - 1 = 12 - 1 = 11$$

유입유량에 대한 측정기간의 대표성에 의한 불확도( $R_Q$ ) 산정시 적용한 적용한 유량값 및 자료수를 제외하고는 동일하므로 A하수처리시설에 대해서만 서술하였으며, 각 측정대상 하수처리시설의 측정기간의 대표성에 의한 불확도는 Table 4.28에 요약하였다. B 하수처리시설은 월별 평균유량자료가 없어서 측정기간 17일간의 유량자료를 활용하여 산정하였으며, F 하수처리시설은 12월에 대한 자료가 없어서 11개월에 대한 자료로 불확도를 산정하였다.

Table 4.28. Results of the uncertainty estimation of the  $R_Q$

	Input data	S	$u(R_Q)$	$u_r(R_Q)$	$v$
	(m <sup>3</sup> /day)		%		-
A	289,968	34,974	10,096	3.48	11
B	392,313	39,006	9,460	2.41	16
C	284,226	61,062	17,627	6.20	11
D	268,192	27,865	8,044	3.00	11
E	382,201	88,924	25,670	6.72	11
F	378,662	43,859	13,224	3.49	10
G	277,200	18,229	5,262	1.90	11

• 측정기 오차에 의한 불확도( $f_{anal}$ )

유입유량을 측정하는 유량계의 불확도는 측정대상 하수처리시설에서 실제 운영되고 있는 유량계에 대한 자료를 확보할 수 없어서 수질오염 공정시험기준에서 제시한 각 유량계 타입별 정확도 오차범위중 최대값인  $\pm 3\%$ 를 B형 불확도 산출식(직사각형분포)을 적용하여 불확도를 산정하였다.

A하수처리시설의 유입유량(289,968m<sup>3</sup>/일)에 대한 측정기 오차에 의한 표준 불확도는 5,022m<sup>3</sup>/일로 산정되었으며, 상대표준불확도는 1.73%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(f_{anal}) = 289,968 \times \frac{0.03}{\sqrt{3}} = 5,022 \text{ m}^3/\text{day}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(f_{anal}) = \frac{u(f_{anal})}{x} = \frac{5,022}{289,968} \times 100 = 1.73\%$$

$$\text{자유도, } \nu(f_{anal}) = \infty$$

Table 4.29는 수질오염공정시험기준(환경부, 2011)에 제시된 유량계에 따른 정확도 및 정밀도이다.

Table 4.29. Accuracy and precision of the each flow meter type

Flow meter type	Accuracy (about the actual flow, %)	Precision (about the max flow, %)
Venturi meter	± 1	± 0.5
Nozzle	± 0.3	± 0.5
Orifice	± 1	± 1
Pitot	± 3	± 1
Magnetic flow meter	± 1 ~ 2	± 0.5

- 분해능에 의한 불확도( $f_{reso}$ )

유입유량에 대한 측정값은 정수단위로 측정 및 계산되고 있으므로 유입유량에 대한 분해능에 의한 불확도는 B형 불확도 산출식(직사각형분포)을 적용하여 불확도를 산정하였다.

A하수처리시설의 유입유량( $289,968\text{m}^3/\text{일}$ )에 대한 분해능에 의한 표준불확도는  $0.289\text{m}^3/\text{일}$ 로 산정되었으며, 상대표준불확도는  $0.0000996\%$ 로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(f_{reso}) = \frac{\frac{1}{2}}{\sqrt{3}} = 0.289\text{m}^3/\text{day}$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(f_{reso}) = \frac{u(f_{reso})}{x} = \frac{0.289}{289,968} \times 100 = 0.0000996\%$$

$$\text{자유도, } \nu(f_{reso}) = \infty$$

## 바) 지점별 면적(site area, m<sup>3</sup>)

### 1) 요인별 관계 모델 설정

지점별 면적에 대한 불확도 요인은 각 조별 면적에 대한 불확도로 요인별 관계 모델은 아래와 같다.

$$A = R_A \text{-----}(4.7)$$

- A : 지점별 면적(m<sup>3</sup>)
- R<sub>A</sub> : 면적에 대한 오차

### 2) 입력량의 요인별 측정값과 표준불확도 산정

- 건축기준의 허용오차에 의한 불확도(R<sub>A</sub>)

“건축법 시행규칙(시행 2013.3.23) 별표 5”에 따르면 건축물관련 건축기준의 허용오차는 평면길이의 2%로 규정하고 있는바, 면적에 대한 허용오차는  $\sqrt{0.02^2 + 0.02^2} = 0.02\sqrt{2}$  %로 평가될 수 있으며, B형 불확도 산출식(직사각형분포)을 적용하여 불확도를 산정하였다.

A하수처리시설의 침사지 면적(499.2m<sup>2</sup>)에 대한 건축기준의 허용오차에 의한 표준불확도는 8.15m<sup>3</sup>/일로 산정되었으며, 상대표준불확도는 1.63%로 산정되었다.

$$\text{표준불확도, } u(R_A) = 499.2 \times \frac{0.02\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 8.15m^2$$

$$\text{상대표준불확도, } u_r(R_A) = \frac{u(R_A)}{x} = \frac{8.15}{499.2} \times 100 = 1.63\%$$

자유도,  $\nu(R_A) = \infty$

#### 4.2.1.3 합성표준불확도( $u_c(x)$ )의 계산

합성표준불확도 및 유효자유도( $\nu_{eff}$ )의 산정결과는 아래와 같다.

합성표준불확도,

$$u_c(EF_{A\_GC}) = EF_{A\_GC} \times \sqrt{u_r(R_Q)^2 + u_r(f_{anal})^2 + \dots + u_r(R_A)^2 + u_r(R_{Ac})^2}$$

$$= 0.000131 \text{ kg CH}_4/\text{kg BOD}$$

유효자유도,

$$\nu_{eff} = \frac{\left(\frac{u_c(EF_{A\_GC})}{(EF_{A\_GC})}\right)^4}{\frac{u_r(R_Q)^4}{\nu_{R_Q}} + \frac{u_r(R_{BOD})^4}{\nu_{R_{BOD}}} + \dots + \frac{u_r(R_{Ac})^4}{\nu_{R_{Ac}}}} = 46.0$$

Students t 분포표에서 95% 신뢰수준에 자유도가 46일 때,  $k$ 값은 2.01이므로 A하수처리시설의 침사지에 대한 불확도는  $0.0000711 \pm 0.0000264 \text{ kg CH}_4/\text{kg BOD}$  (신뢰수준 95%,  $k=2.01$ )로 산정되었다. 기여율(Contribution portion, %) 산정결과, 불확도에 가장 큰 영향을 미치는 인자로는 메탄농도( $C_{CH_4}$ )로 나타났으며, 기여율은 56.7%로 산정되었다. 각각의 세부인자로 살펴보면 측정기간의 대표성에 의한 불확도( $R_{M-CH_4}$ )의 기여율이 45.4%로 산정되었다. 요인별 불확도 산정결과 및 기여율 산정결과는 Table 4.30과 같으며, A하수처리시설의 각 반응조별 상대불확도 산정결과는 Table 4.31과 같다.

Table 4.30. Uncertainty estimation results of the grit chamber in the A facility

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	10,096	3.48	11	3.6
	$f_{anal}$	-	5,022	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000996	$\infty$	0.0
$Q_c$	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	5.26	7.38	11	16.0
	$f_{anal}$	-	6.17	8.66	$\infty$	22.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0405	$\infty$	0.0
$C_{CH_4}$	$R_{M_{CH_4}}$	ppm	9.81	12.4	11	45.4
	$f_{C_{CH_4}}$	-	2.04	2.58	3	2.0
	$f_{S_{CH_4}}$	-	0.488	0.619	1	0.1
	$F_{R_{CH_4}}$	-	4.33	5.48	$\infty$	8.8
	$f_{CAL_Z}$	-	0.00911	0.0115	$\infty$	0.0
	$f_{CAL_S}$	-	0.210	0.266	$\infty$	0.0
	$f_{CAL_R}$	-	0.00911	0.0115	$\infty$	0.0
	$f_{CAL_L}$	-	0.8655	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0366	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	8.15	1.63	$\infty$	0.8
$A_c$	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

Table 4.31. Uncertainty estimation result of the A facility

Site	EF	$u(x)$	$v_{eff}$
Grit Chamber	0.0000711	0.0000131	46
1st clarifier	0.00011	0.000020	46
Anaerobic	0.0000895	0.000017	46
Anoxic	0.000275	0.000051	46
Select	0.000031	0.000006	47
Aerobic	0.000170	0.000031	46
2nd clarifier	0.00001	0.000002	70
-	0.00076	0.0000667	115

#### 4.2.1.4 A 하수처리시설의 불확도 산정결과

A 하수처리시설의 각 반응조별 표준불확도의 합성은 식(3.12)에 제시되어 있는 측정결과의 산출식이 덧셈과 뺄셈으로 구성된 경우에 해당되며 합성한 결과는 아래와 같다.

합성표준불확도,

$$\begin{aligned}
 u_c(EF_A) &= EF_A \times \sqrt{u_r(EF_{Grit\ chamber})^2 + u_r(EF_{1st\ clarifier})^2 + \dots + u_r(EF_{2ed\ clarifier})^2} \\
 &= 0.0000667 \text{ kg } CH_4/\text{kg } BOD
 \end{aligned}$$

유효자유도,

$$v_{eff} = \frac{\left(\frac{u_c(EF_A)}{(EF_A)}\right)^4}{\frac{u_r(EF_{1st\ grit\ chamber})^4}{v_{EF_{1st\ grit\ chamber}}} + \dots + \frac{u_r(EF_{2ed\ grit\ chamber})^4}{v_{EF_{2ed\ grit\ chamber}}}} = 115.801$$

소숫점 이하는 절사하여 최종 유효자유도는 115로 산정되었다.

A하수처리시설의 확장불확도는 students t 분포표에서 95% 신뢰수준에서 자유도가 115일 때  $k$ 값은 1.98이므로 확장불확도는 아래와 같다.

$$U = k \times u_c(A) = 1.98 \times 0.0000667 = 0.00013 \text{ kg CH}_4/\text{kg BOD}$$

A하수처리시설의 불확도 산정결과  $0.00076 \pm 0.00013 \text{ kg CH}_4/\text{kg BOD}$ (신뢰수준 95%,  $k=1.98$ )로 산정되었다.

#### 4.2.1.5 계산에 의한 불확도 산정결과

Table 4.32는 각 하수처리시설별 확장불확도 산정결과이다. 산정결과 E 하수처리시설의 불확도가 33.2%로 가장 높게 산정되었으며, A 하수처리시설의 불확도가 16.4%로 가장 낮게 산정되었다. 이는 기여율 분석에도 알 수 있듯이 불확도에 가장 많은 영향을 미치는 인자가 메탄농도인데 실제로 E 하수처리시설의 메탄농도가 가장 높고 A 하수처리시설의 메탄농도가 가장 낮기 때문이다.

Table 4.32. Results of the uncertainty estimation of the each site

Site	EF	$u_c(x)$	$v$	$k$	$U$	$U(\%)$
A	0.00076	0.0000667	115	1.98	0.000132	17.1
B	0.00160	0.000233	51	2.01	0.000467	29.4
C	0.00654	0.000716	53	2.00	0.001431	22.0
D	0.0030	0.000321	66	1.99	0.000639	21.3
E	0.030	0.00505	44	2.01	0.010145	36.7
F	0.0084	0.000968	52	2.00	0.001937	23.8
G	0.00085	0.0000837	57	1.99	0.000166	20.0
Result	0.007	0.00074	-	-	0.0015	28.6

각 하수처리시설에 대한 메탄 배출계수의 불확도에 대한 합성은 식(3.10)에서 제시한 것과 같이 감도계수와 표준불확도를 이용한 불확도 합성방법을 통하여 실시하였다. 불확도 합성결과,

$$\begin{aligned}
 u_c(EF) &= \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot u(x_i)^2} = \sqrt{(1/7)^2 \times u(EF_A)^2 + \dots + (1/7)^2 \times u(EF_G)^2} \\
 &= 0.00074 \text{ kg CH}_4/\text{kg BOD}
 \end{aligned}$$

자유도의 경우 위에서 유효자유도 계산식으로 산정이 불가하여 본 연구에서는 약 95% 신뢰수준,  $k=2$ 로 확장불확도를 산정하였다.

확장불확도(U) 산정결과 0.001488 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 산정되었으며, 올림 처리한 결과 0.002 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 산정되었다. Table 4.33은 메탄 배출계수에 대한 불확도 산정결과이다.

Table 4.33. Results of the uncertainty estimation of the CH<sub>4</sub> EF

EF	$u_c(x)$	$U$	$U(\%)$
kg CH <sub>4</sub> /kg BOD		kg CH <sub>4</sub> /kg BOD	%
0.007	0.00074	0.002	28.6

#### 4.2.1.6 기여율 분석결과

기여율은 개별 불확실성이 최종 결과에 미치는 영향을 분산의 비율로 표현한 값으로 하수처리시설별 불확도요인 및 불확도인자에 대한 기여율 분석결과는 Table 4.34와 같다.

기여율 분석결과 불확도 요인에 의한 기여율은 하수처리시설 평균적으로 메탄농도( $C_{CH_4}$ )가 61.3%로 가장 높았으며, 그 다음으로 BOD농도(BOD)가 31.0%, 하수처리시설의 유량(Q)이 6.8%로 나타났으며, 이동가스유량( $Q_c$ ) 및 챔버 면적( $A_c$ )에 의한 불확도는 기여율이 없는 것으로 나타났다.

세부적인 불확도 인자에 의한 기여율 분석결과, 전체적으로는 메탄농도의 측정기간의 대표성( $R_{M,CH_4}$ )에 의한 기여율이 49.1%로 가장 높았으며, BOD농도의 측정기기 오차( $f_{anal}$ )가 23.8%로 높았다. 메탄농도는 온도에 의하여 영향을 받는 인자로 계절적 편차에 의해서 불확도가 발생되기 때문에 기여율이 큰 것으로 판단되며, BOD농도에 대한 측정기기 오차( $f_{anal}$ )는 각 시설별 고유 불확도에 대한 자료가 부족한 관계로 수질오염공정시험법에 제시하고 있는 표준편차값( $\pm 15\%$ )을 적용하여 불확도를 산정하였으며 이때 적용된 표준편차값이 보수적으로 높게 적용되었기 때문에 기여율이 높은 것으로 판단된다. 향후 기여율이 높은 인자에 대해서 시설별 실제 불확도값을 적용하여 산정하는 방법 등을 통해 불확도를 합리적으로 산정할수 있는 방향으로 연구가 진행되어 진다면 좋을 것으로 판단된다.

Table 4.34. Contribution portion of the EF

Item	Factor	A	B	C	D	E	F	G	Average	
									Item	Factor
Q	R <sub>Q</sub>	3.6	1.7	12.1	4.1	13.8	4.0	1.3	5.8	6.8
	f <sub>anal</sub>	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	1.1	1.0	
	f <sub>reso</sub>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Q <sub>c</sub>	R <sub>QC</sub>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	f <sub>conc.</sub>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	f <sub>reso</sub>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	f <sub>mcf</sub>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
BOD	R <sub>BOD</sub>	16.0	18.0	1.9	4.1	2.1	5.6	2.6	7.2	31.0
	f <sub>anal</sub>	22.0	22.0	23.6	25.1	23.0	24.7	26.3	23.8	
	f <sub>reso</sub>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
C <sub>CH4</sub>	R <sub>M_CH4</sub>	45.4	45.3	48.5	51.8	47.4	51.0	54.3	49.1	61.3
	f <sub>C_CH4</sub>	2.0	2.0	2.1	2.2	2.0	2.2	2.3	2.1	
	f <sub>S_CH4</sub>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
	F <sub>R_CH4</sub>	8.8	8.8	9.4	10.1	9.2	9.9	10.6	9.6	
	f <sub>CAL_Z</sub>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	f <sub>CAL_S</sub>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	f <sub>CAL_R</sub>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	f <sub>CAL_L</sub>	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
	f <sub>reso</sub>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
A	R <sub>A</sub>	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8
A <sub>c</sub>	R <sub>AC</sub>	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0

## 4.2.2 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 불확도 산정결과

### 4.2.2.1 PDF 선정

몬테카를로 시뮬레이션에 의한 불확도 산정을 위해서는 우선 PDF(확률밀도 함수)를 선정하여야 한다. 각 하수처리시설에 대한 불확도 요인별 PDF는 Table 4.35와 같다.

IPCC G/L에서는 전문가 판단을 이용해서 개별변수에 대한 확률밀도함수를 추정할때 특정분포를 사용해야 하는 이유가 명확하지 않을 경우는 기본적으로 정규분포나 로그정규분포를 사용하도록 권장하고 있으며, 균일분포는 극단값에 대한 정보만을 알고 있을 경우 적용이 가능하다고 제시되어 있다(전봉일 외, 2014). 또한 한국환경공단의 연구(2011)를 참고하여 PDF를 결정하였다.

Table 4.35. PDF of the uncertainty component

Factor	Component	PDF
C <sub>CH4</sub>	R <sub>M,CH4</sub>	Normal
	f <sub>C,CH4</sub>	Normal
	f <sub>S,CH4</sub>	Normal
	f <sub>R,CH4</sub>	Normal
	f <sub>CAL,Z</sub>	Normal
	f <sub>CAL,S</sub>	Normal
	f <sub>CAL,R</sub>	Normal
	f <sub>CAL,L</sub>	Normal
	f <sub>reso</sub>	Uniform
Q <sub>C</sub>	R <sub>QC</sub>	Normal
	f <sub>conc</sub>	Normal

Factor	Component	PDF
	$f_{reso}$	Uniform
	$f_{mcf}$	Uniform
Ac	$R_{AC}$	Uniform
BOD	$R_{BOD}$	Normal
	$f_{anal}$	Normal
	$f_{reso}$	Uniform
Q	$R_Q$	Normal
	$f_{anal}$	Normal
	$f_{reso}$	Uniform
A	$R_A$	Normal

#### 4.2.2.2 몬테카를로 시뮬레이션 적용

불확도 산정을 위한 몬테카를로 시뮬레이션의 적용방법은 계산에 의한 불확도 산정방법과 전체적으로는 산정방식이 동일하며, 전체 불확도산정과정에 대해서 한번에 시뮬레이션을 실시하였으며, 난수 발생횟수의 경우 기존연구결과(한국환경공단, 2011)에서 수행한 1만회보다 많은 4만회로 하였으며, 신뢰수준은 95%로 실시하였다.

#### 4.2.2.3 불확도 산정결과

Fig. 4.25는 A하수처리시설 중 침사지에 대한 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 불확도 산정결과이다. 산정된 불확도는 평균값(Mean)으로 표현되며, 불확도 범위는 상·하한값을 평균값으로 나누어서 표현한다.

즉, A하수처리시설 중 침사지에 대한 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 불확도 산정결과 불확도는 평균값인 0.0000719 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 산정되었으며, 산정되었으며, 95% 신뢰수준에서 하한값은 0.0000578 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로, 상한값은 0.0000902 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 산정되었다.

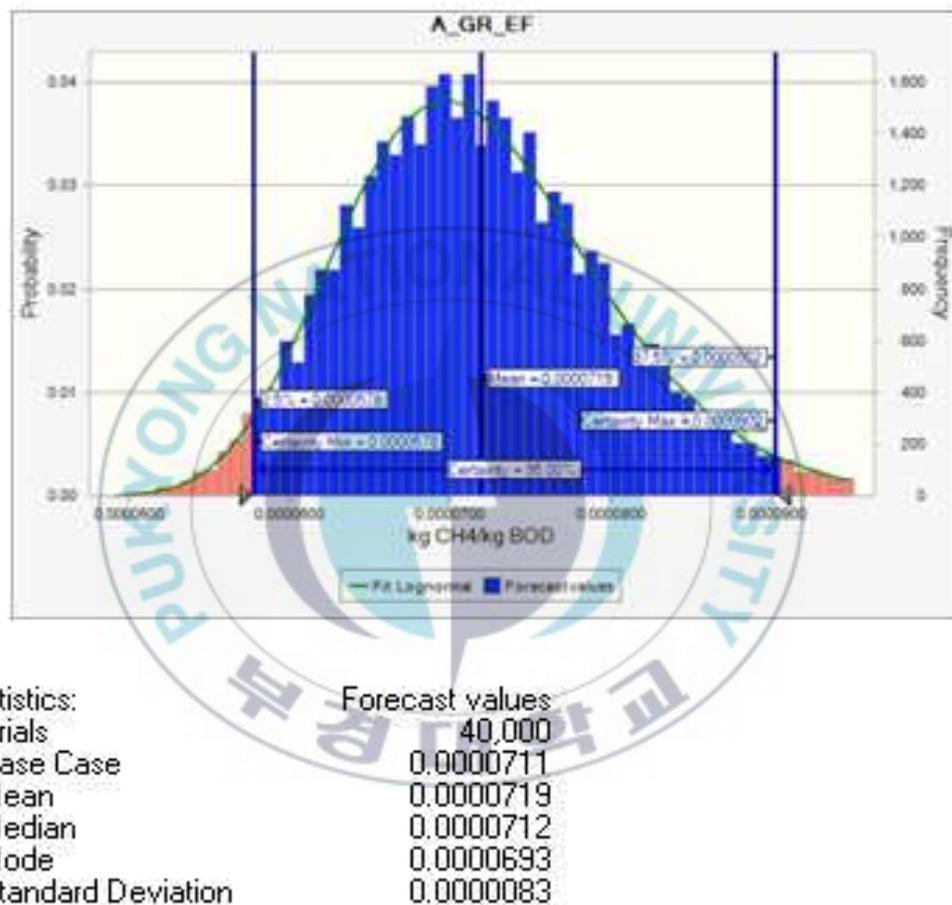


Fig. 4.25. Uncertainty estimation results of the grit chamber in the A facility using MonteCarlo simulation.

Table 4.36은 A 하수처리시설의 침사지에 대한 불확도 인자별 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 불확도 산정 결과이다.

Table 4.36. Uncertainty estimation results of the A facility(Grit chamber) using MonteCarlo simulation.

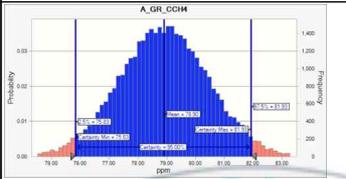
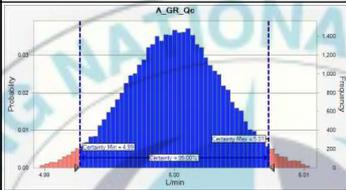
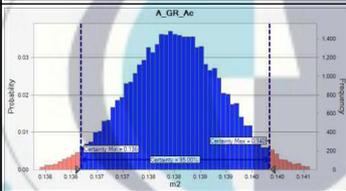
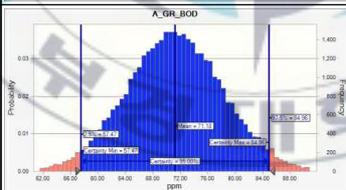
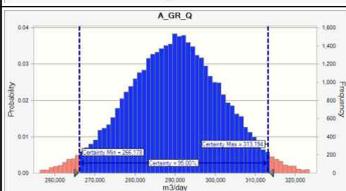
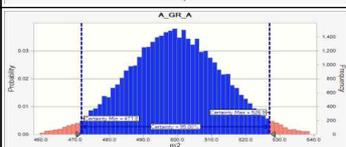
Uncertainty factor	Distribution	Mean	Confidence level about 95%	
			2.5%	97.5%
$C_{CH_4}$		78.90	75.82	81.93
$Q_c$		5.00	4.99	5.01
$A_c$		0.138	0.136	0.140
BOD		71.18	57.47	84.96
Q		289,916	266,178	313,194
A		499.2	472.8	526.9

Fig. 4.26은 A하수처리시설에 대한 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 불확도 산정 결과이다.

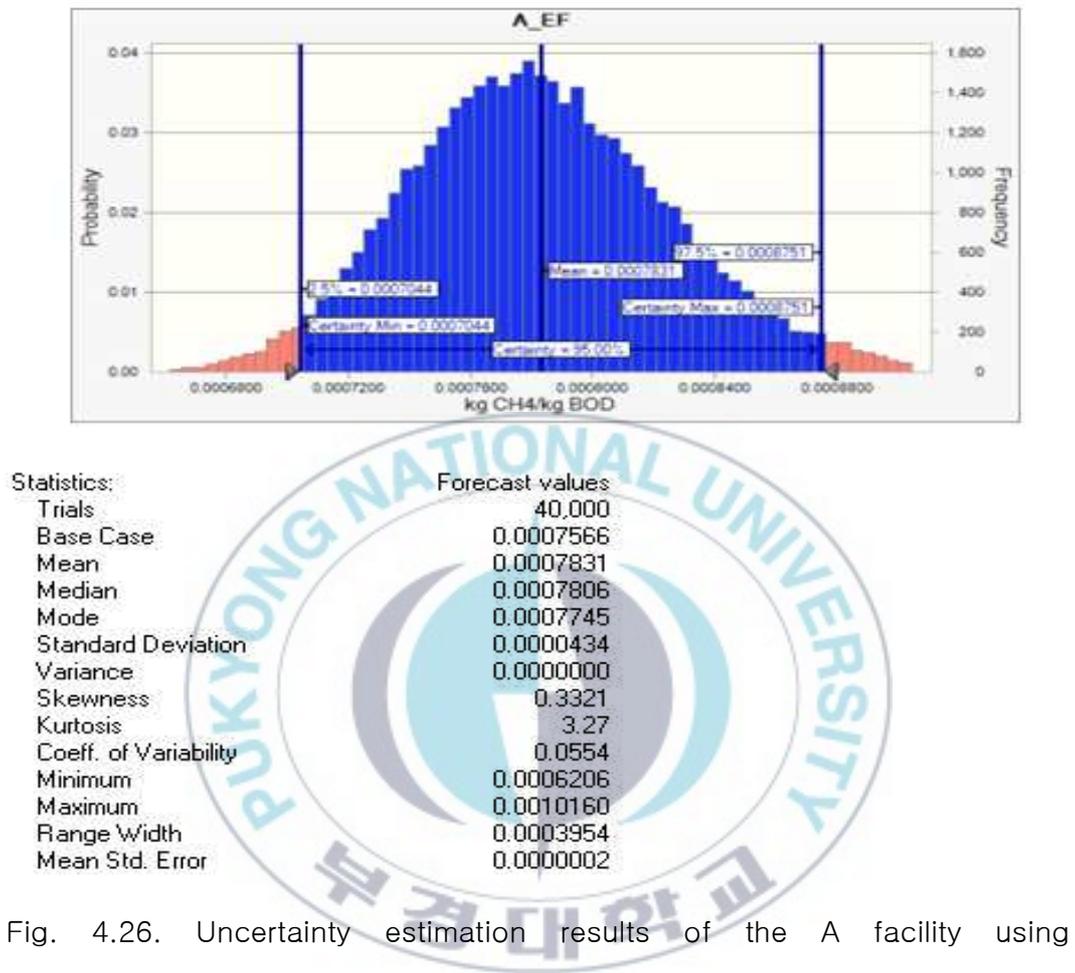
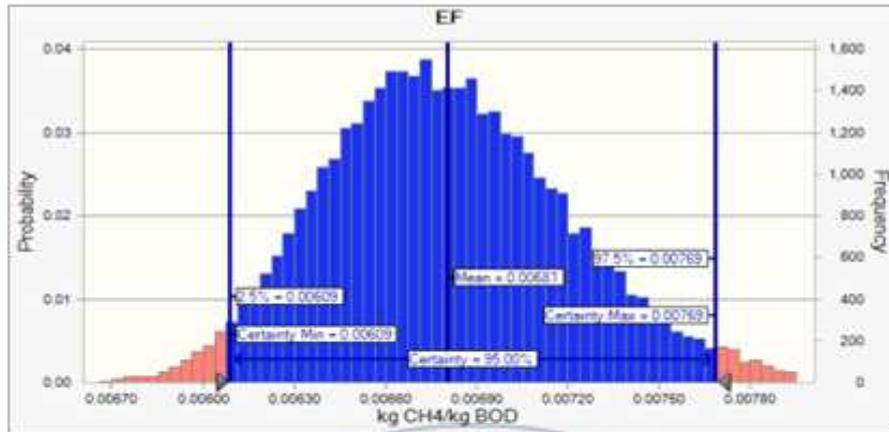


Fig. 4.26. Uncertainty estimation results of the A facility using MonteCarlo simulation

Fig. 4.27 및 Table 4.37은 메탄 배출계수에 대한 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 불확도 산정 결과이다.

메탄 배출계수에 대한 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 불확도 산정결과  $\pm 12.9\%$ 로 산정되었다. 하한값과 상한값의 %가 상의하여 본 연구에서는 불확도가 큰 하한값을 적용하였다.

Fig. 4.27. Uncertainty estimation results of the CH<sub>4</sub> EF using MonteCarlo simulation.



Statistics:	Forecast values
Trials	40,000
Base Case	0.00729
Mean	0.00681
Median	0.00678
Mode	0.00654
Standard Deviation	0.00041
Variance	0.00000
Skewness	0.4187
Kurtosis	3.39
Coeff. of Variability	0.0600
Minimum	0.00550
Maximum	0.00946
Range Width	0.00397
Mean Std. Error	0.00000

Table 4.37. Uncertainty estimation results of the CH<sub>4</sub> EF using MonteCarlo simulation

Class		Uncertainty	
EF		0.00681	
95% confidence interval	Upper	0.00609	10.6%
	Lower	0.00769	12.9%

### 4.2.3 메탄 배출계수 불확도 산정결과

국내 하수처리시설에 대한 메탄 배출계수의 불확도 산정결과는 Table 4.38과 같다. 오차증식법 및 몬테카를로시물레이션을 통한 메탄 배출계수에 대한 불확도는 각각 28.6%와 12.9%로 산정되었으며 평균은 20.8%로 산정되었다. 각각의 불확도 산정방법에 차이에 대한 원인으로는 몬테카를로 시물레이션을 수행하기 위해서 최소 5개 이상의 자료가 필요하나(한국환경공단, 2011) 본 연구에서는 7개를 사용하여 최소 필요자료수를 겨우 충족하는 수준이었다. 또한 불확도 인자에 대한 확률밀도함수의 가정시 모든 인자에 대해 정규분포 및 균일분포로 가정하였으나, Fitting 결과 감마분포로 적용되는 등 확률밀도함수의 가정에 대한 불확실성에서 기인한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 오차증식법에 의한 배출계수 불확도 산정결과를 중심으로 국내·외 불확도와 비교분석을 실시하였다.

Table 4.38. Uncertainty estimation results of the CH<sub>4</sub> EF

-	Simple error propagation equations	MonteCarlo simulation
EF	0.007	0.00681
<i>U</i>	28.6%	12.9%

Table 4.39 및 Fig. 4.28은 본 연구에서 개발된 메탄 배출계수의 불확도와 국내·외에서 하수처리시설에 대한 온실가스 배출량 산정시 적용하고 있는 배출계수에 대한 불확도를 비교한 결과이다.

우리나라의 국가 온실가스 인벤토리 보고서 작성시 적용되는 불확도는 문헌연구에서 언급한 바와 같이 IPCC G/L에서 제시하고 있는 기본값인 32%를 적용하

고 있으며 본 연구에서 산정된 28.6%와는 유사하게 산정되었다. 일본의 국가 온실가스 인벤토리 보고서 작성시 적용되는 메탄 배출계수의 불확도인 30.9%와는 7.5%의 차이를 보였다. 또한 ANNEX I 국가가 온실가스 인벤토리 보고서의 작성시 적용한 메탄 배출계수의 불확도인 45.98%와는 상당한 차이를 보였는데 이는 ANNEX I 국가중 불확도를 제시한 대부분의 국가가 전문가 판단 또는 IPCC 기본값을 적용하고 있는데 이중 전문가의 판단에 의한 불확도가 보수적으로 판단되어져서 IPCC 기본값보다는 불확도가 높게 적용되었기 때문으로 판단된다.

Table 4.39. Comparison of the uncertainty

Case	Uncertainty (%)	Note
1	32	Default uncertainty of IPCC G/L
2	32	Uncertainty of Korea(National EF)
3	45.98	Average of the ANNEX I (NIR)
4	30.9	JAPAN(NIR)
Average	35.22	

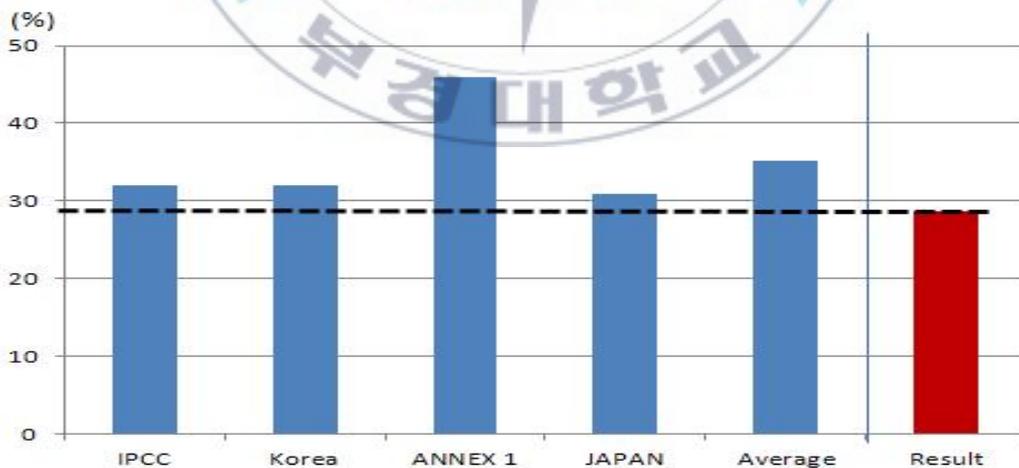


Fig. 4.28. Comparison of uncertainty

## 5. 결 론

온실가스 배출계수는 온실가스 저감정책의 수립 및 이행평가를 위한 인벤토리 구축에 가장 근간이 되는 주요한 요소이다. 하지만 현재 우리나라의 하수처리시설에 대한 온실가스 배출량 산정시 적용하고 있는 메탄 배출계수는 10여 년 전에 개발된 값으로 그동안의 하수정책변화 등을 반영하지 못하고 있으며, 측정방법 또한 표준화 되어 있지 않아, 지속적인 연구에 많은 어려움이 있다. 또한 배출계수의 신뢰성 평가 등을 위한 가장 중요한 자료인 불확도 평가가 병행되지 못하여 IPCC G/L에서 제시하는 기본 불확도를 적용하여 온실가스 배출량에 대한 불확도를 평가하고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내 하수처리정책의 변화를 고려하여, 시설규모, 처리공법 등의 다각적인 측면에서 카테고리를 분류하여 하수처리시설의 메탄 배출계수개발에 대한 합리적인 개발 범위를 평가하였으며, 또한 국내·외 문헌 분석을 통하여 하수처리시설에서의 온실가스 측정을 위한 측정방법론을 제시하였으며, 마지막으로 카테고리 분석 및 측정방법론 연구결과를 기초로 하여 국내 7개 하수처리시설에 대해서 실측을 통하여 메탄 배출계수를 개발하였다.

하수처리시설에 대한 메탄 배출계수의 불확도 산정을 위하여 메탄 배출계수에 영향을 미치는 불확도 인자 및 요인을 파악하였으며 오차증식법을 적용하여 불확도를 산정하여 국내·외 연구결과와 비교해봄으로써 적용성을 검토하였으며 추가적으로 몬테카를로시뮬레이션을 이용하여 메탄 배출계수에 대한 불확도를 산정하여 봄으로써 향후 불확도 산정방법에 대한 개선방향을 제시하고자 하였다.

1) 국내 하수처리시설에 대한 메탄 배출계수를 개발하기 위하여 처리방법별, 용량별로 카테고리 분류를 실시하였다. 질소, 인 등에 대한 규제가 강화됨에 따라 배출계수의 대표성 및 향후 효용성을 고려하여 고도처리공법을 적용하는 시설에 대해서

배출계수를 개발하는 것이 타당한 것으로 판단되며, 고도처리공법중 비중이 높은  $A_2O$ 공법, 4-Stage BNR공법, NPR공법, Denipho공법을 적용한 시설에 대해서 대표성 확보를 위해 대규모 하수처리시설 위주로 측정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

2) 7개 하수처리시설에 대해서 현장측정을 통해 메탄농도를 측정하여 본 결과, 현장측정시 측정농도에 대한 안정화 여부에 대한 판단 등의 이유로 현장에서 실시간 농도분석을 통한 온실가스 농도측정방법의 적용이 필요하며, 기존 연구에서 수행한 시료채취 후 기기분석을 통한 방법은 안정화 여부에 대한 판단이 불가하여 측정농도에 대한 대표성의 확보가 어려울 것으로 판단된다.

3) 공법별 특성에 따른 메탄 배출계수의 변화여부에 대해서 판단하기 위하여 각 반응조별 메탄 배출량을 참사지, 1차침전지, 생물반응조(무산소조, 혐기조, 호기조 및 선택조 등) 및 2차침전지의 4단계로 구분하여 메탄 배출비율을 분석하여 본 결과, 공법별 특성을 확인할 수 없었다. 또한 각 하수처리시설별로 반응조별 메탄 배출계수와 시설별 최종 메탄 배출계수에 대해서 상관성을 분석하여 본 결과, 1차침전지의 메탄 배출계수와 최종 메탄 배출계수의 상관계수( $R^2$ )가 0.9284로 상관성이 매우 높은 것으로 나타났다. 생물반응조내 메탄 배출특성을 알아보기 위해서 생물반응조를 혐기조, 무산소조 및 호기조로 구분하여 배출특성을 검토하여 본 결과, 하수처리시설 중 생물반응조내 각 반응조의 메탄 배출비율은 혐기조에서 11%, 무산소조에서 24.2%, 및 호기조에서 64.8%가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 측정대상 하수처리시설에는 평균적으로 63%의 메탄이 혐기성 조건에서 배출되며, 37%의 메탄이 호기성 조건에서 배출되는 것으로 나타났다. 이는 호기조에서 메탄이 발생되었다기보다는 혐기조 및 무산조 등에서 생성된 메탄이 호기조에서 폭기에 의해서 배출된 것으로 판단된다. 공법별 및 반응조별 메탄 배출특성에 대해서는 운영인자 변화

에 따른 메탄 배출량 변동을 확인할 수 있는 lab scale의 반응조 실험 등을 통하여 규명되어야 할 것으로 판단된다.

4) 하수처리시설에 대한 메탄 배출계수의 개발 결과 0.007 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 산정되었으며 이때 최대값은 0.030 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD이며, 최소값은 0.00076 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD이며, 표준편차는 0.010 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD로 산정되었다. 국내연구 결과와 비교하여 보면, 본 연구결과는 우리나라의 국가 온실가스 인벤토리 보고서 작성시 적용한 국가 메탄 배출계수 0.00355 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD(회수량을 제외한 배출계수)보다 약 2배 높으며, 국립환경과학원 연구의 평균값인 0.00230 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD와 비교하여 보면 약 3배 정도 높게 산정된 것으로 나타났다. 본 연구가 높게 산정된 이유는 본 연구는 침사지부터 최종침전지까지 전체 공정에서 측정함 반면 기존 국내연구는 전체 시설이 아닌 일부시설에 대해서만 측정하여 기존 국내연구가 상대적으로 메탄 배출량이 과소평가되었기 때문으로 판단된다.

ANNEX I 국가가 온실가스 인벤토리 보고서 작성시 적용하고 있는 하수처리시설에 대한 메탄 배출계수의 평균값(0.04484 kg CH<sub>4</sub>/kg BOD)과 비교한 결과, ANNEX I 국가의 메탄 배출계수가 본 연구와 비교하여 약 6.4배 높은 것으로 나타났다. 이는 일부 ANNEX I 국가가 혐기성 조건에서 메탄이 나오는 것으로 판단하여 IPCC G/L상에서 상대적으로 기본값이 높은 혐기성조건에서의 MCF값을 적용하면서 평균값이 높아졌기 때문으로 판단된다.

5) 본 연구에서 개발된 메탄 배출계수를 적용하여 산정한 국내 하수처리시설에서의 온실가스 배출량은 2011년 기준 7.1 Gg CH<sub>4</sub>로 기존 국가 온실가스 배출량인 3.6 Gg CH<sub>4</sub> 대비 약 2배 증가된 것으로 산정되었다.

6) 본 연구에서는 하수처리시설에서의 메탄 배출계수에 대한 불확도의 산정을

위하여 배출계수에 영향을 미치는 불확도 요인을 분석하였으며, 관계 모델식을 정립하였다. 불확도 요인으로는 메탄농도, 이동가스 유량, 챔버 면적, BOD 농도, 하수처리시설의 유입유량 및 조별 면적이 있었으며, 각각의 불확도 요인에 대한 세부 불확도 인자를 분석하여 본 결과, 계절적 대표성, 측정기 교정오차 등 21개의 인자가 있는 것으로 조사되었으며, 각각의 인자에 대한 불확도 산정방법을 제시하였다.

7) 불확도에 대한 기여율 분석결과, 불확도 요인에 대한 기여율은 평균적으로 “메탄농도( $C_{CH_4}$ )”요인이 61.3%로 가장 높았으며, 그 다음으로 “BOD농도(BOD)”요인이 31.0%, “하수처리시설의 유량(Q)”요인이 6.8%로 나타났으며, “이동가스 유량” 및 “챔버 면적” 요인은 기여율이 없는 것으로 나타났다.

세부적인 불확도 인자에 대한 기여율 분석결과, “메탄농도의 측정기간의 대표성( $R_{M,CH_4}$ )”인자가 기여율이 49.1%로 가장 높았으며, “BOD농도의 측정기기 오차( $f_{anal}$ )”인자가 23.8%로 두 번째로 높았다. 향후 메탄농도의 계절적 변화에 대한 실측자료를 통한 불확도 산정 및 BOD농도에 대한 시설별 고유 불확도 평가자료의 활용이 병행된다면 보다 정확한 불확도 평가가 가능할 것으로 판단된다.

8) 오차증식법을 통한 불확도 산정결과  $0.007 \pm 0.002$  kg  $CH_4$ /kg BOD(신뢰수준 약 95%,  $k=2$ )로 산정되었다. 이는  $\pm 28.6\%$ 의 불확도로 IPCC G/L에서 제시한 불확도 기본값 및 우리나라 국가 온실가스 인벤토리 보고서 작성시 적용한 불확도인  $\pm 32\%$ 와 유사하게 산정되었으며, 일본의 온실가스 인벤토리 보고서 작성시 적용되는 메탄 배출계수의 불확도( $\pm 30.9\%$ )와도 유사하게 산정되었다.

9) 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 불확도 산정결과,  $0.00681 \pm 0.00088$  kg  $CH_4$ /kg BOD(신뢰수준 95%,  $k=1.96$ )로 산정되었다.

## References

Czepiel P. M, Crill P. M, Harriss. R. C, 1993, Methane Emissions from Municipal Wastewater Treatment Process, Environ. Sci. Technol. 27, 2472-2477

Global Water Research Coalition, 2011, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emission from wastewater collection and treatment system, 2011-29

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 1997, Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2000, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2006, 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007, IPCC Fourth Assessment Report : Climate Change (AR 4)

Stensel H. D, 2003, Wastewater Engineering Treatment and Reuse

UNFCCC, 2007, Text of the Kyoto Protocol

UNFCCC 213, National Inventory Report

U.S. EPA, 1986, Measurement of gaseous emission rates from land surfaces using an emission isolation flux chamber

Wang Jinhe, Zhang Jian, Xie Huijun, Qi Pengyu, Ren Yang, Hu Zhen, 2010, Methane emission from a full-scale A/A/O wastewater treatment plant, Bioresource Technology

국립환경과학원, 2007, 하수처리장으로부터 지구온난화가스(GHG) 발생량 저감 공정 연구

국제표준화기구, 1993, ISO 17025(Guide to the Expression of the Expression of Uncertainty of Measurement)

권영성, 이석모, 김유중, 조진영, 조경호, 2012, 하수처리시설 중 고도처리공법에 서의 온실가스 배출 특성 분석, 한국생태공학회 추계학술발표 논문집

권영성, 조진영, 윤완우, 이준기, 진병복, 이준홍, 2010, 하수처리(표준활성슬러지공법)분야 온실가스 배출계수 개발, 한국폐기물자원순환학회 추계학술발표 논문집

기술표준원, 2008, KS Q 5002 - 데이터의 통계적 해석 방법 - 데이터의 통계적 기술

서경애, 2003, 하폐수처리시설에서의 온실기체 배출량 평가 연구, 동신대학교 박사학위논문

서울대학교, 카이트엔지니어링, 2007, 환경부문의 온실가스 배출통계 산정방법론 개발

에너지경제연구원, 2008, 기후변화협약 대응 국가온실가스 IPCC 신규가이드라인 적용을 위한 기획연구

오원기, 추용엽, 정영민, 김광구, 진병복, 2009, MLE공법을 적용한 하수처리장의 온실가스 배출량 산정과 배출계수의 개발연구, 한국환경분석학회지 제12권(제2호) 87-95

온실가스종합정보센터, 2012, 국가 온실가스 인벤토리 보고서

온실가스종합정보센터, 2013, 국가 온실가스 인벤토리 보고서

윤완우, 2012, 효율적인 감축정책수립을 위한 지자체 온실가스 배출특성분석 연구, 부경대학교 공학박사 학위논문

이준기, 2012, 매립 폐기물의 성상별 메탄발생속도상수 산정에 관한 연구, 부경대학교 공학박사 학위논문

이충렬, 2007, 수질자동측정 시스템의 측정자료 불확도 산출방법 개발, 전남대학교 박사학위 논문

일본국립환경연구소, 1992, N<sub>2</sub>O 및 CH<sub>4</sub> 방출원 및 방출량 규명에 관한 연구

임창인, 2006, 다이옥신 숙련도 시험용 비산재 시료의 제조 및 불확도 평가에 관한 연구, 광운대학교 환경대학원 석사논문

전봉걸, 심성희, 황인창, 진상현, 2014, 발전부문 온실가스 배출량의 불확도 분석, 환경정책 제22권 제1호 2014. 3:1-29

조진영, 2012, 하수처리시설 중 고도처리공법에서의 온실가스 배출특성 연구, 광운대학교 석사학위논문

최정우, 현길수, 2002, 하수도공학

한국교정시험기관인정기구, 2007, 측정결과의 불확도 추정 및 표현을 위한 지침

한국화학시험연구원, 2008, 측정불확도 교육과정

한국환경공단, 2011, 폐기물부문 온실가스 배출계수 국내외 전문가 기술포럼 실시 및 배출계수 불확도 산정

한국환경공단, 2011, 폐기물부문(하폐수분야) 2011년도 온실가스 배출계수 개발 보고서

한국환경공단, 2012, 폐기물부문(하폐수분야) 2012년도 온실가스 배출계수 개발 보고서

환경관리공단, 2007, 하폐수분야 온실가스 배출통계 구축방안 확립

환경관리공단, 2009, 지자체 온실가스 배출량 산정지침

환경부, 2000, 환경기초시설에서 발생하는 온실가스 배출량 조사

환경부, 2002, 환경부문의 온실가스 배출량 조사 및 통계구축

환경부, 2006, 환경신기술 설계편람

환경부, 2011, 수질오염공정시험기준(ES 04140.1), pp29

환경부, 2011, 온실가스 에너지 목표관리 운영지침

환경부, 2011, 환경통계연감, pp.476

환경부, 2012, 2011 하수도통계, pp 1840

환경부, 2013, 하수도법, 제2조



## Appendix

[Appendix 1]. Uncertainty estimation results(Error propagation)

### 1. A, Grit chamber

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$v$ (-)	
Q	$R_Q$	m <sup>3</sup> /day	10,096	3.48	11	3.6
	$f_{anal}$	-	5,022	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000996	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	5.26	7.38	11	16.0
	$f_{anal}$	-	6.17	8.66	$\infty$	22.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0405	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	9.81	12.4	11	45.4
	$f_{C\_CH4}$	-	2.04	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.488	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	4.33	5.48	$\infty$	8.8
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.00911	0.0115	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.210	0.266	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.00911	0.0115	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.8655	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0366	$\infty$	0.0
A	$R_A$	m <sup>2</sup>	8.15	1.63	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	m <sup>2</sup>	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

2. A, 1st Clarifier

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	10,096	3.48	11	3.6
	$f_{anal}$	-	5,022	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000996	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	5.26	7.38	11	16.1
	$f_{anal}$	-	6.17	8.66	$\infty$	22.1
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0405	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	0.67	12.4	11	45.5
	$f_{C\_CH4}$	-	0.14	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.033	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.2962	5.4848	$\infty$	8.9
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.000115	0.002138	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.00266	0.04918	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.000115	0.002138	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.0110	0.2031	$\infty$	0.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.5346	$\infty$	0.1
A	$R_A$	$m^2$	176.7307	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

### 3. A, Anaerobic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	10,096	3.48	11	3.6
	$f_{anal}$	-	5,022	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000996	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	5.26	7.38	11	16.0
	$f_{anal}$	-	6.17	8.66	$\infty$	22.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0405	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	1.68	12.4	11	45.4
	$f_{C\_CH4}$	-	0.35	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.084	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.7405	5.4848	$\infty$	8.8
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.001559	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.03585	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.001559	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.1481	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.2138	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	60.0125	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

4. A, Anoxic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	m <sup>3</sup> /day	10,096	3.48	11	3.6
	$f_{anal}$	-	5,022	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000996	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	5.26	7.38	11	16.0
	$f_{anal}$	-	6.17	8.66	$\infty$	22.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0405	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	5.13	12.4	11	45.4
	$f_{C\_CH4}$	-	1.07	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.256	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	2.2652	5.4848	$\infty$	8.8
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.004769	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.10969	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.004769	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.4530	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0699	$\infty$	0.0
A	$R_A$	m <sup>2</sup>	60.2574	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	m <sup>2</sup>	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

5. A, Select

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	10,096	3.48	11	3.6
	$f_{anal}$	-	5,022	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000996	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	5.26	7.38	11	16.0
	$f_{anal}$	-	6.17	8.66	$\infty$	22.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0405	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	0.57	12.4	11	45.3
	$f_{C\_CH4}$	-	0.12	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.028	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.2523	5.4848	$\infty$	8.8
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.000531	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.01222	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.000531	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.0505	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.6276	$\infty$	0.1
A	$R_A$	$m^2$	60.2574	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

6. A, Aerobic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	10,096	3.48	11	3.6
	$f_{anal}$	-	5,022	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000996	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00599	0.1710	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0825	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.330	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	5.26	7.38	11	16.0
	$f_{anal}$	-	6.17	8.66	$\infty$	22.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0405	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	1.29	12.4	11	45.4
	$f_{C\_CH4}$	-	0.27	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.064	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.5704	5.4848	$\infty$	8.8
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.001201	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.02762	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.001201	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.1141	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.2776	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	211.3910	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

7. A, 2nd clarifier

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	10,096	3.48	11	3.6
	$f_{anal}$	-	5,022	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000996	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	5.26	7.38	11	16.0
	$f_{anal}$	-	6.17	8.66	$\infty$	22.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0405	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	0.07	12.4	11	45.4
	$f_{C\_CH4}$	-	0.02	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.004	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.0548	9.141	$\infty$	24.5
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.000069	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.00159	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.000069	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.0066	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	4.8113	$\infty$	6.8
A	$R_A$	$m^2$	222.1276	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

8. B, Grit chamber

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	9,460	2.41	16	1.7
	$f_{anal}$	-	6,795	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000736	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	16.04	7.83	16	18.0
	$f_{anal}$	-	17.74	8.66	$\infty$	22.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0141	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	4.21	12.4	11	45.3
	$f_{C\_CH4}$	-	0.87	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.210	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	1.8594	5.4848	$\infty$	8.8
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.003914	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.09003	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.003914	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.3719	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0852	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	7.8384	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

9. B, 1st Clarifier

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	9,460	2.41	16	1.7
	$f_{anal}$	-	6,795	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000736	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	16.04	7.83	16	18.0
	$f_{anal}$	-	17.74	8.66	$\infty$	22.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0141	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	4.21	12.4	11	45.3
	$f_{C\_CH4}$	-	0.87	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.210	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	1.8594	5.4848	$\infty$	8.8
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.003914	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.09003	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.003914	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.3719	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0852	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	7.8384	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

10. B, Anaerobic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	9,460	2.41	16	1.7
	$f_{anal}$	-	6,795	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000736	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	16.04	7.83	16	18.0
	$f_{anal}$	-	17.74	8.66	$\infty$	22.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0141	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	0.68	12.4	11	45.3
	$f_{C\_CH4}$	-	0.14	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.034	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.3017	5.4848	$\infty$	8.8
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.000635	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.01461	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.000635	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.0603	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.5249	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	116.3998	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

11. B, Anoxic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	9,460	2.41	16	1.7
	$f_{anal}$	-	6,795	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000736	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	16.04	7.83	16	18.0
	$f_{anal}$	-	17.74	8.66	$\infty$	22.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0141	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	2.65	12.4	11	45.3
	$f_{C\_CH4}$	-	0.55	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.132	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	1.1683	5.4848	$\infty$	8.8
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.002460	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.05657	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.002460	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.2337	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.1355	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	116.3998	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

12. B, Aerobic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	9,460	2.41	16	1.7
	$f_{anal}$	-	6,795	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000736	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.01385	0.1900	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0396	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.158	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	16.04	7.83	16	18.0
	$f_{anal}$	-	17.74	8.66	$\infty$	22.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0141	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	3.48	12.4	11	45.3
	$f_{C\_CH4}$	-	0.72	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.173	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	1.5358	5.4848	$\infty$	8.8
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.003233	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.07436	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.003233	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.3072	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.1031	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	232.7995	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

13. B, 2nd clarifier

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	9,460	2.41	16	1.7
	$f_{anal}$	-	6,795	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000736	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	16.04	7.83	16	18.0
	$f_{anal}$	-	17.74	8.66	$\infty$	22.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0141	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	0.04	12.4	11	45.3
	$f_{C\_CH4}$	-	0.01	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.002	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.0548	18.283	$\infty$	8.8
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.000035	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.00080	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.000035	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.0033	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	9.6225	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	376.2416	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

14. C, Grit Chamber

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	17,627	6.20	11	12.1
	$f_{anal}$	-	4,923	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001016	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.08	2.46	11	1.9
	$f_{anal}$	-	10.84	8.66	$\infty$	23.6
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0231	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	30.45	12.4	11	48.5
	$f_{C\_CH4}$	-	6.32	2.58	3	2.1
	$f_{S\_CH4}$	-	1.516	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	13.4323	5.4848	$\infty$	9.4
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.028279	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.65041	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.028279	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	2.6865	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0118	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	3.0047	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

15. C, 1st clarifier

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	17,627	6.20	11	12.1
	$f_{anal}$	-	4,923	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001016	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.08	2.46	11	1.9
	$f_{anal}$	-	10.84	8.66	$\infty$	23.6
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0231	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	2.24	12.4	11	48.5
	$f_{C\_CH4}$	-	0.46	2.58	3	2.1
	$f_{S\_CH4}$	-	0.111	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.9873	5.4848	$\infty$	9.4
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.000115	0.000642	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.00266	0.01475	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.000115	0.000642	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.0110	0.0609	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.1604	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	126.9815	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

16. C, 1st clarifier

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	m <sup>3</sup> /day	17,627	6.20	11	12.1
	$f_{anal}$	-	4,923	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001016	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.08	2.46	11	1.9
	$f_{anal}$	-	10.84	8.66	$\infty$	23.6
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0231	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	2.24	12.4	11	48.5
	$f_{C\_CH4}$	-	0.46	2.58	3	2.1
	$f_{S\_CH4}$	-	0.111	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.9873	5.4848	$\infty$	9.4
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.000115	0.000642	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.00266	0.01475	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.000115	0.000642	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.0110	0.0609	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.1604	$\infty$	0.0
A	$R_A$	m <sup>2</sup>	126.9815	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	m <sup>2</sup>	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

17. C, Pre-Anoxic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	17,627	6.20	11	12.1
	$f_{anal}$	-	4,923	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001016	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.08	2.46	11	1.9
	$f_{anal}$	-	10.84	8.66	$\infty$	23.6
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0231	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	4.71	12.4	11	48.5
	$f_{C\_CH4}$	-	0.98	2.58	3	2.1
	$f_{S\_CH4}$	-	0.235	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	2.0787	5.4848	$\infty$	9.4
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.004376	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.10066	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.004376	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.4157	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0762	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	7.7953	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

18. C, Anaerobic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	17,627	6.20	11	12.1
	$f_{anal}$	-	4,923	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001016	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.08	2.46	11	1.9
	$f_{anal}$	-	10.84	8.66	$\infty$	23.6
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0231	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	6.90	12.4	11	48.5
	$f_{C\_CH4}$	-	1.43	2.58	3	2.1
	$f_{S\_CH4}$	-	0.344	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	3.0441	5.4848	$\infty$	9.4
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.006409	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.14740	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.006409	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.6088	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0520	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	23.3858	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

19. C, Anoxic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	17,627	6.20	11	12.1
	$f_{anal}$	-	4,923	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001016	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.1900	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.08	2.46	11	1.9
	$f_{anal}$	-	10.84	8.66	$\infty$	23.6
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0231	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	20.82	12.4	11	48.5
	$f_{C\_CH4}$	-	4.32	2.58	3	2.1
	$f_{S\_CH4}$	-	1.037	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	9.1871	5.4848	$\infty$	9.4
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.019341	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.44485	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.019341	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	1.8374	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0172	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	62.3620	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

## 20. C, Select

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	17,627	6.20	11	12.1
	$f_{anal}$	-	4,923	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001016	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.106	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0323	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.129	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.08	2.46	11	1.9
	$f_{anal}$	-	10.84	8.66	$\infty$	23.6
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0231	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	141.85	12.4	11	48.5
	$f_{C\_CH4}$	-	29.43	2.58	3	2.1
	$f_{S\_CH4}$	-	7.063	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.0548	0.005	$\infty$	9.4
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.131751	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	3.03028	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.131751	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	12.5164	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0025	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	30.5696	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

21. C, Aerobic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	17,627	6.20	11	12.1
	$f_{anal}$	-	4,923	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001016	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.106	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0323	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.129	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.08	2.46	11	1.9
	$f_{anal}$	-	10.84	8.66	$\infty$	23.6
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0231	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	10.49	12.4	11	48.5
	$f_{C\_CH4}$	-	2.18	2.58	3	2.1
	$f_{S\_CH4}$	-	0.522	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.0548	0.065	$\infty$	9.4
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.009746	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.22415	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.009746	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.9258	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0342	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	119.1432	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

22. C, 2nd clarifier

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	17,627	6.20	11	12.1
	$f_{anal}$	-	4,923	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001016	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.08	2.46	11	1.9
	$f_{anal}$	-	10.84	8.66	$\infty$	23.6
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0231	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	3.95	12.4	11	48.5
	$f_{C\_CH4}$	-	0.82	2.58	3	2.1
	$f_{S\_CH4}$	-	0.197	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.0548	0.172	$\infty$	9.4
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.003672	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.08445	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.003672	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.3488	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0908	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	211.6359	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000536	0.389	$\infty$	0.0

23. D, Grit chamber

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	8,044	3.51	11	4.1
	$f_{anal}$	-	4,645	1.73	$\infty$	1.0
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001076	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	4.22	3.51	11	4.1
	$f_{anal}$	-	10.43	8.66	$\infty$	25.1
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0240	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	20.59	12.4	11	51.8
	$f_{C\_CH4}$	-	4.27	2.58	3	2.2
	$f_{S\_CH4}$	-	1.025	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	9.0829	5.4848	$\infty$	10.1
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.019122	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.43980	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.019122	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	1.8166	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0174	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	3.9976	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.1

24. D, 1st Clarifier

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	8,044	3.51	11	4.1
	$f_{anal}$	-	4,645	1.73	$\infty$	1.0
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001076	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	4.22	3.51	11	4.1
	$f_{anal}$	-	10.43	8.66	$\infty$	25.1
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0240	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	2.26	12.4	11	51.8
	$f_{C\_CH4}$	-	0.47	2.58	3	2.2
	$f_{S\_CH4}$	-	0.113	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.9982	5.4848	$\infty$	10.1
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.000115	0.000634	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.00266	0.01459	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.000115	0.000634	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.0110	0.0603	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.1586	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	142.6583	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.1

25. D, Anaerobic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	8,044	3.51	11	4.1
	$f_{anal}$	-	4,645	1.73	$\infty$	1.0
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001076	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	4.22	3.51	11	4.1
	$f_{anal}$	-	10.43	8.66	$\infty$	25.1
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0240	$\infty$	0.0
$C_{CH_4}$	$R_{M_{CH_4}}$	ppm	9.24	12.4	11	51.8
	$f_{C_{CH_4}}$	-	1.92	2.58	3	2.2
	$f_{S_{CH_4}}$	-	0.460	0.619	1	0.1
	$F_{R_{CH_4}}$	-	4.0752	5.4848	$\infty$	10.1
	$f_{CAL_Z}$	-	0.008579	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL_S}$	-	0.19733	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL_R}$	-	0.008579	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL_L}$	-	0.8150	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0389	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	40.2370	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.1

26. D, Anoxic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	8,044	3.51	11	4.1
	$f_{anal}$	-	4,645	1.73	$\infty$	1.0
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001076	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	4.22	3.51	11	4.1
	$f_{anal}$	-	10.43	8.66	$\infty$	25.1
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0240	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	13.76	12.4	11	51.8
	$f_{C\_CH4}$	-	2.86	2.58	3	2.2
	$f_{S\_CH4}$	-	0.685	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	6.0717	5.4848	$\infty$	10.1
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.012783	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.29400	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.012783	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	1.2143	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0261	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	109.0056	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.1

27. D, Aerobic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	m <sup>3</sup> /day	8,044	3.51	11	4.1
	$f_{anal}$	-	4,645	1.73	$\infty$	1.0
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001076	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.01385	0.1318	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0275	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.110	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	4.22	3.51	11	4.1
	$f_{anal}$	-	10.43	8.66	$\infty$	25.1
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0240	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	8.40	12.4	11	51.8
	$f_{C\_CH4}$	-	1.74	2.58	3	2.2
	$f_{S\_CH4}$	-	0.418	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	3.7077	5.4848	$\infty$	10.1
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.007806	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.17953	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.007806	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.7415	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0427	$\infty$	0.0
A	$R_A$	m <sup>2</sup>	148.1451	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	m <sup>2</sup>	0.000505	0.389	$\infty$	0.1

28. D, 2nd clarifier

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	8,044	3.51	11	4.1
	$f_{anal}$	-	4,645	1.73	$\infty$	1.0
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001076	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	4.22	3.51	11	4.1
	$f_{anal}$	-	10.43	8.66	$\infty$	25.1
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0240	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	0.14	12.4	11	51.8
	$f_{C\_CH4}$	-	0.03	2.58	3	2.2
	$f_{S\_CH4}$	-	0.007	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.0548	4.986	$\infty$	10.1
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.000127	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.00292	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.000127	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.0121	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	2.6243	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	219.4743	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.1

29. E, Grit Chamber

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	25,670	6.72	11	13.8
	$f_{anal}$	-	6,620	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000755	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.64	2.60	11	2.1
	$f_{anal}$	-	12.10	8.66	$\infty$	23.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0207	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	60.17	12.4	11	47.4
	$f_{C\_CH4}$	-	12.49	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	2.996	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	26.5466	5.4848	$\infty$	9.2
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.055888	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	1.28541	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.055888	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	5.3093	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0060	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	4,8990	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.0

30. E, 1st clarifier

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	m <sup>3</sup> /day	25,670	6.72	11	13.8
	$f_{anal}$	-	6,620	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000755	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.64	2.60	11	2.1
	$f_{anal}$	-	12.10	8.66	$\infty$	23.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0207	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	269.78	12.4	11	47.4
	$f_{C\_CH4}$	-	55.98	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	13.433	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	119.0208	5.4848	$\infty$	9.2
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.000115	0.000005	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.00266	0.00012	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.000115	0.000005	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.0110	0.0005	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0013	$\infty$	0.0
A	$R_A$	m <sup>2</sup>	282.1812	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	m <sup>2</sup>	0.000505	0.389	$\infty$	0.0

## 31. E, Bio #1

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	25,670	6.72	11	13.8
	$f_{anal}$	-	6,620	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000755	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.64	2.60	11	2.1
	$f_{anal}$	-	12.10	8.66	$\infty$	23.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0207	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	25.11	12.4	11	47.4
	$f_{C\_CH4}$	-	5.21	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	1.250	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	11.0794	5.4848	$\infty$	9.2
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.023325	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.53647	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.023325	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	2.2159	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0143	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	92.8030	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.0

## 32. E, Bio #2

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	25,670	6.72	11	13.8
	$f_{anal}$	-	6,620	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000755	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.64	2.60	11	2.1
	$f_{anal}$	-	12.10	8.66	$\infty$	23.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0207	$\infty$	0.0
$C_{CH_4}$	$R_{M_{CH_4}}$	ppm	16.86	12.4	11	47.4
	$f_{C_{CH_4}}$	-	3.50	2.58	3	2.0
	$f_{S_{CH_4}}$	-	0.839	0.619	1	0.1
	$F_{R_{CH_4}}$	-	7.4374	5.4848	$\infty$	9.2
	$f_{CAL_Z}$	-	0.015658	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL_S}$	-	0.36013	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL_R}$	-	0.015658	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL_L}$	-	1.4875	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0213	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	92.8063	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.0

## 33. E, Bio #3

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	25,670	6.72	11	13.8
	$f_{anal}$	-	6,620	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000755	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.1355	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0412	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.165	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.64	2.60	11	2.1
	$f_{anal}$	-	12.10	8.66	$\infty$	23.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0207	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	2.86	12.4	11	47.4
	$f_{C\_CH4}$	-	0.59	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.142	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	1.2615	5.4848	$\infty$	9.2
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.002656	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.06108	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.002656	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.2523	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.1255	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	92.8063	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.0

## 34. E, Bio #4

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	25,670	6.72	11	13.8
	$f_{anal}$	-	6,620	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000755	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.64	2.60	11	2.1
	$f_{anal}$	-	12.10	8.66	$\infty$	23.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0207	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	1.86	12.4	11	47.4
	$f_{C\_CH4}$	-	0.39	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.093	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.0548	0.366	$\infty$	9.2
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.001732	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.03984	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.001732	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.1645	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.1925	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	92.8063	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.0

## 35. E, Bio #5

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	25,670	6.72	11	13.8
	$f_{anal}$	-	6,620	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000755	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.136	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0412	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.165	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.64	2.60	11	2.1
	$f_{anal}$	-	12.10	8.66	$\infty$	23.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0207	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	0.32	12.4	11	47.4
	$f_{C\_CH4}$	-	0.07	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.016	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.0548	2.110	$\infty$	9.2
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.000300	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.00691	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.000300	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.0285	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	1.1103	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	92.8063	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.0

## 36. E, 2nd clarifier

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	25,670	6.72	11	13.8
	$f_{anal}$	-	6,620	1.73	$\infty$	0.9
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000755	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.64	2.60	11	2.1
	$f_{anal}$	-	12.10	8.66	$\infty$	23.0
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0207	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	0.05	12.4	11	47.4
	$f_{C\_CH4}$	-	0.01	2.58	3	2.0
	$f_{S\_CH4}$	-	0.002	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.0548	13.712	$\infty$	9.2
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.000046	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.00106	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.000046	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.0044	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	7.2169	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	338.6175	1.63299	$\infty$	0.8
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.0

37. F, Grit Chamber

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	13,224	3.49	10	4.0
	$f_{anal}$	-	6,559	1.73	$\infty$	1.0
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000762	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	5.20	4.14	10	5.6
	$f_{anal}$	-	10.88	8.66	$\infty$	24.7
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0230	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	233.35	12.4	10	51.0
	$f_{C\_CH4}$	-	48.42	2.58	3	2.2
	$f_{S\_CH4}$	-	11.619	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	102.9502	5.4848	$\infty$	9.9
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.216737	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	4.98496	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.216737	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	20.5900	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0015	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	8.8182	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.0

## 38. F, Division basin

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	m <sup>3</sup> /day	13,224	3.49	10	4.0
	$f_{anal}$	-	6,559	1.73	$\infty$	1.0
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000762	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	5.20	4.14	10	5.6
	$f_{anal}$	-	10.88	8.66	$\infty$	24.7
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0230	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	10.69	12.4	10	51.0
	$f_{C\_CH4}$	-	2.22	2.58	3	2.2
	$f_{S\_CH4}$	-	0.532	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	4.7170	5.4848	$\infty$	9.9
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.000115	0.000134	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.00266	0.00309	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.000115	0.000134	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.0110	0.0128	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0336	$\infty$	0.0
A	$R_A$	m <sup>2</sup>	3.1066	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	m <sup>2</sup>	0.000505	0.389	$\infty$	0.0

## 39. F, 1st clarifier

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	13,224	3.49	10	4.0
	$f_{anal}$	-	6,559	1.73	$\infty$	1.0
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000762	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	5.20	4.14	10	5.6
	$f_{anal}$	-	10.88	8.66	$\infty$	24.7
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0230	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	54.02	12.4	10	51.0
	$f_{C\_CH4}$	-	11.21	2.58	3	2.2
	$f_{S\_CH4}$	-	2.690	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	23.8316	5.4848	$\infty$	9.9
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.050172	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	1.15395	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.050172	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	4.7663	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0066	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	232.6427	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.0

40. F, Anoxic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	13,224	3.49	10	4.0
	$f_{anal}$	-	6,559	1.73	$\infty$	1.0
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000762	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	5.20	4.14	10	5.6
	$f_{anal}$	-	10.88	8.66	$\infty$	24.7
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0230	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	5.72	12.4	10	51.0
	$f_{C\_CH4}$	-	1.19	2.58	3	2.2
	$f_{S\_CH4}$	-	0.285	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	2.5230	5.4848	$\infty$	9.9
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.005312	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.12217	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.005312	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.5046	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0628	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	106.4842	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.0

41. F, Aerobic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	13,224	3.49	10	4.0
	$f_{anal}$	-	6,559	1.73	$\infty$	1.0
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000762	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.01385	0.0909	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0189	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.076	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	5.20	4.14	10	5.6
	$f_{anal}$	-	10.88	8.66	$\infty$	24.7
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0230	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	9.32	12.4	10	51.0
	$f_{C\_CH4}$	-	1.93	2.58	3	2.2
	$f_{S\_CH4}$	-	0.464	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	4.1136	5.4848	$\infty$	9.9
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.008660	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.19919	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.008660	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.8227	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0385	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	190.5507	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.0

## 42. F, 2nd clarifier

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	13,224	3.49	10	4.0
	$f_{anal}$	-	6,559	1.73	$\infty$	1.0
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0000762	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	5.20	4.14	10	5.6
	$f_{anal}$	-	10.88	8.66	$\infty$	24.7
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0230	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	0.61	12.4	10	51.0
	$f_{C\_CH4}$	-	0.13	2.58	3	2.2
	$f_{S\_CH4}$	-	0.030	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.0548	1.119	$\infty$	9.9
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.000566	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.01301	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.000566	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.0538	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.5891	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	164.6057	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.0

43. G, Grit Chamber

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	5,262	1.90	11	1.3
	$f_{anal}$	-	4,801	1.73	$\infty$	1.1
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001041	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.66	2.72	11	2.6
	$f_{anal}$	-	11.67	8.66	$\infty$	26.3
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0214	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	10.93	12.4	11	54.3
	$f_{C\_CH4}$	-	2.27	2.58	3	2.3
	$f_{S\_CH4}$	-	0.544	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	4.8212	5.4848	$\infty$	10.6
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.010150	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.23345	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.010150	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.9642	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0328	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	5.7155	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.1

44. G, 1st clarifier

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	5,262	1.90	11	1.3
	$f_{anal}$	-	4,801	1.73	$\infty$	1.1
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001041	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.66	2.72	11	2.6
	$f_{anal}$	-	11.67	8.66	$\infty$	26.3
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0214	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	1.50	12.4	11	54.3
	$f_{C\_CH4}$	-	0.31	2.58	3	2.3
	$f_{S\_CH4}$	-	0.075	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.6637	5.4848	$\infty$	10.6
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.000115	0.000954	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.00266	0.02195	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.000115	0.000954	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.0110	0.0907	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.2386	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	186.3964	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.1

## 45. G, Anaerobic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	5,262	1.90	11	1.3
	$f_{anal}$	-	4,801	1.73	$\infty$	1.1
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001041	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.66	2.72	11	2.6
	$f_{anal}$	-	11.67	8.66	$\infty$	26.3
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0214	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	7.79	12.4	11	54.3
	$f_{C\_CH4}$	-	1.62	2.58	3	2.3
	$f_{S\_CH4}$	-	0.388	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	3.4390	5.4848	$\infty$	10.6
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.007240	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.16652	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.007240	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.6878	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0460	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	38.1990	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.1

## 46. G, Anoxic

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	5,262	1.90	11	1.3
	$f_{anal}$	-	4,801	1.73	$\infty$	1.1
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001041	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.66	2.72	11	2.6
	$f_{anal}$	-	11.67	8.66	$\infty$	26.3
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0214	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	2.66	12.4	11	54.3
	$f_{C\_CH4}$	-	0.55	2.58	3	2.3
	$f_{S\_CH4}$	-	0.132	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	1.1738	5.4848	$\infty$	10.6
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.002471	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.05683	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.002471	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.2348	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.1349	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	38.1990	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.1

## 47. G, Aerobic

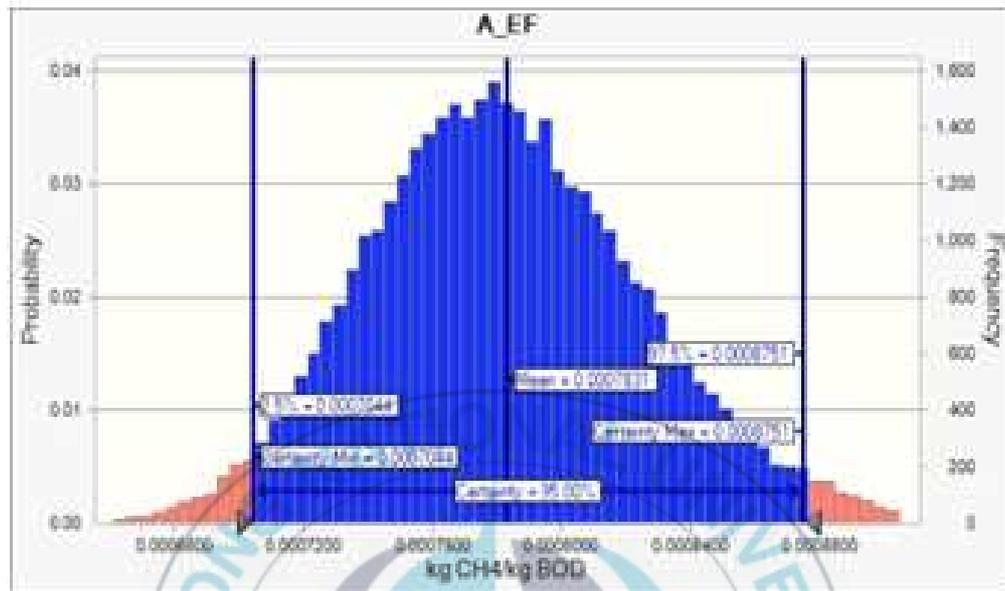
Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	5,262	1.90	11	1.3
	$f_{anal}$	-	4,801	1.73	$\infty$	1.1
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001041	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.01385	0.2880	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0600	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.240	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.66	2.72	11	2.6
	$f_{anal}$	-	11.67	8.66	$\infty$	26.3
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0214	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	7.63	12.4	11	54.3
	$f_{C\_CH4}$	-	1.58	2.58	3	2.3
	$f_{S\_CH4}$	-	0.380	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	3.3677	5.4848	$\infty$	10.6
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.007090	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.16307	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.007090	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.6735	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0470	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	114.5969	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.1

## 48. G, 2nd clarifier

Item	Input data		Uncertainty			C.P. (%)
	Factor	unit	$u(x)$ (Unit)	$u_r(x)$ (%)	$\nu$ (-)	
Q	$R_Q$	$m^3/day$	5,262	1.90	11	1.3
	$f_{anal}$	-	4,801	1.73	$\infty$	1.1
	$f_{reso}$	-	0.289	0.0001041	$\infty$	0.0
Qc	$R_{QC}$	L/min	0.00950	0.190	$\infty$	0.0
	$f_{conc.}$	-	-	0	-	0.0
	$f_{reso}$	-	0.00289	0.0577	$\infty$	0.0
	$f_{mcf}$	-	0.0115	0.231	$\infty$	0.0
BOD	$R_{BOD}$	ppm	3.66	2.72	11	2.6
	$f_{anal}$	-	11.67	8.66	$\infty$	26.3
	$f_{reso}$	-	0.0289	0.0214	$\infty$	0.0
C <sub>CH4</sub>	$R_{M\_CH4}$	ppm	0.06	12.4	11	54.3
	$f_{C\_CH4}$	-	0.01	2.58	3	2.3
	$f_{S\_CH4}$	-	0.003	0.619	1	0.1
	$F_{R\_CH4}$	-	0.0548	10.970	$\infty$	10.6
	$f_{CAL\_Z}$	-	0.000058	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_S}$	-	0.00133	0.26558	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_R}$	-	0.000058	0.011547	$\infty$	0.0
	$f_{CAL\_L}$	-	0.0055	1.0970	$\infty$	0.4
	$f_{reso}$	-	0.0289	5.7735	$\infty$	0.0
A	$R_A$	$m^2$	250.8277	1.63299	$\infty$	0.9
Ac	$R_{AC}$	$m^2$	0.000505	0.389	$\infty$	0.1

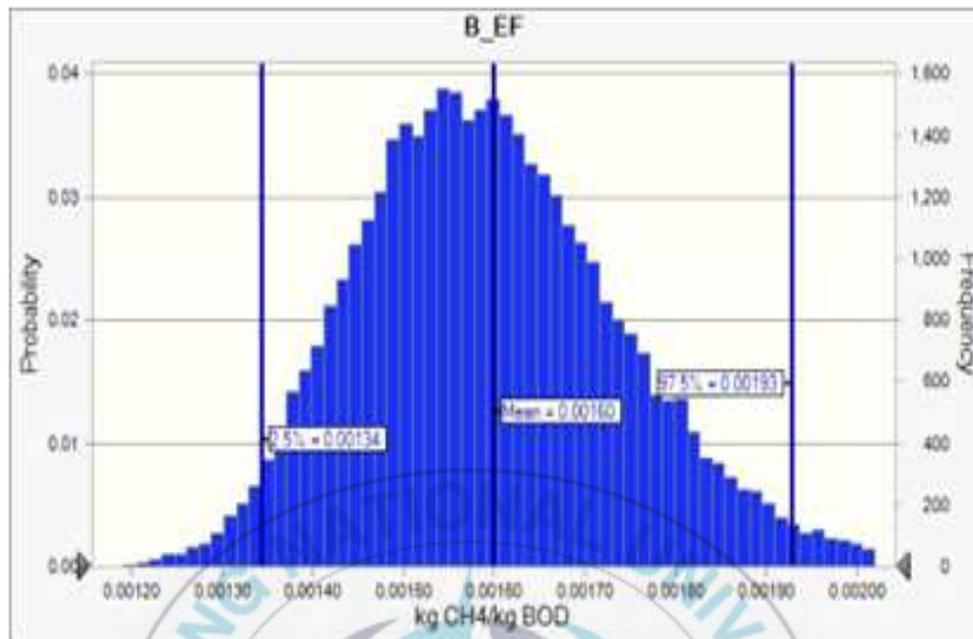
[Appendix 2]. Uncertainty estimation results(MonteCarlo simulation)

1. A Site



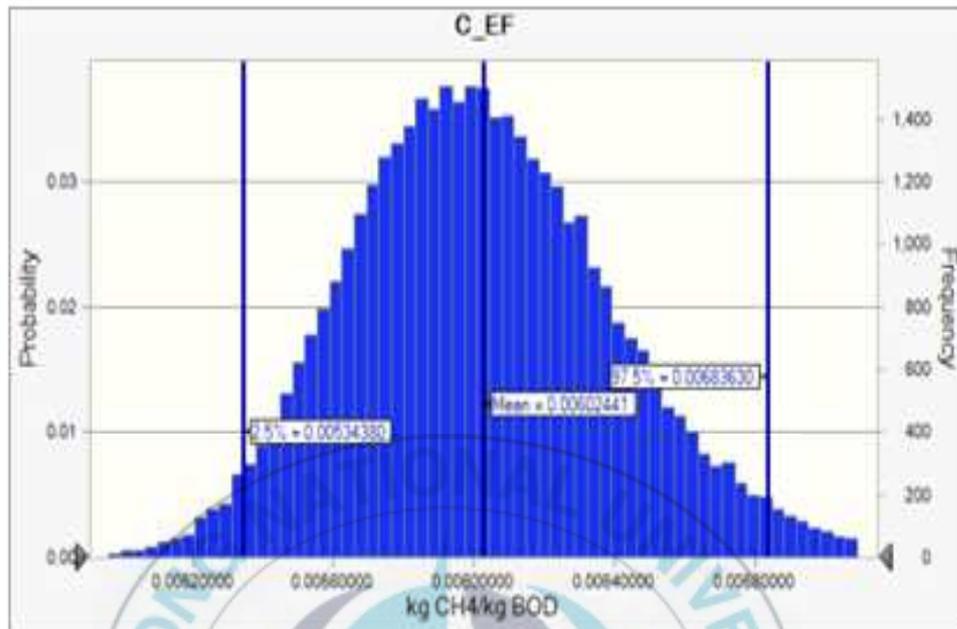
Statistics:	Forecast values
Trials	40,000
Base Case	0.0007566
Mean	0.0007831
Median	0.0007806
Mode	0.0007745
Standard Deviation	0.0000434
Variance	0.0000000
Skewness	0.3321
Kurtosis	3.27
Coeff. of Variability	0.0554
Minimum	0.0006206
Maximum	0.0010160
Range Width	0.0003954
Mean Std. Error	0.0000002

2. B Site



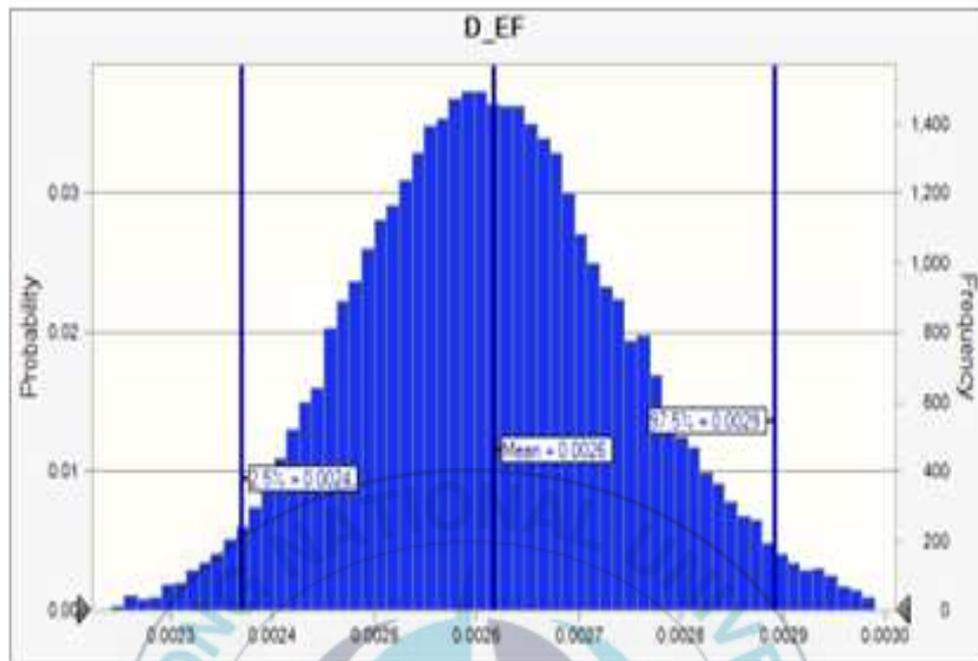
Statistics:	Forecast values
Trials	40,000
Base Case	0.00160
Mean	0.00160
Median	0.00159
Mode	0.00144
Standard Deviation	0.00015
Variance	0.00000
Skewness	0.5670
Kurtosis	3.66
Coeff. of Variability	0.0940
Minimum	0.00111
Maximum	0.00248
Range Width	0.00137
Mean Std. Error	0.00000

### 3. C Site



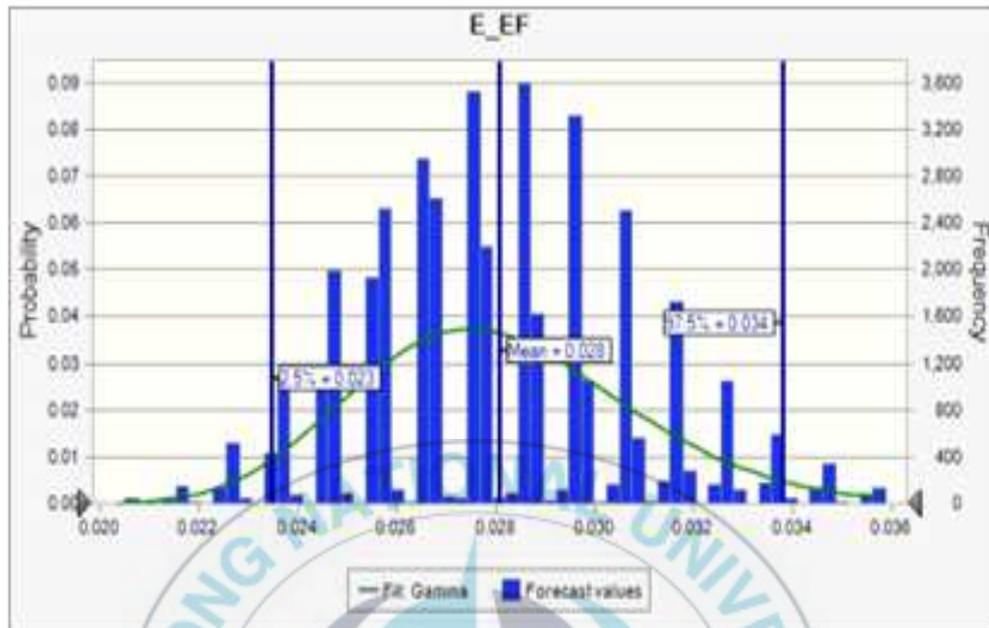
Statistics:	Forecast values
Trials	40,000
Base Case	0.00653730
Mean	0.00602441
Median	0.00600245
Mode	0.00626210
Standard Deviation	0.00038012
Variance	0.00000014
Skewness	0.3662
Kurtosis	3.27
Coeff. of Variability	0.0631
Minimum	0.00484360
Maximum	0.00824150
Range Width	0.00339790
Mean Std. Error	0.00000190

4. D Site



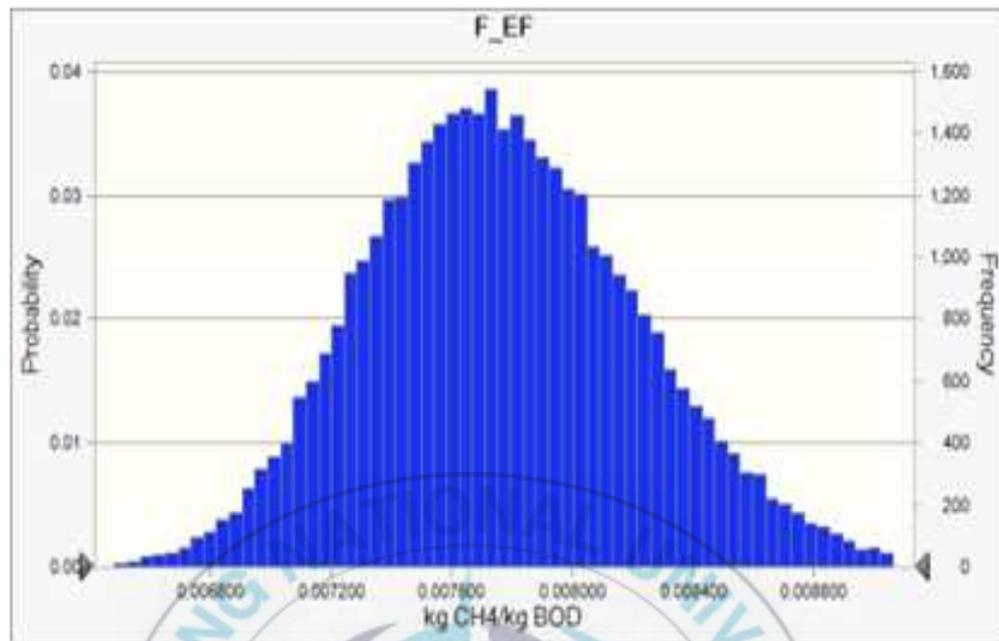
Statistics:	Forecast values
Trials	40,000
Base Case	0.0030
Mean	0.0026
Median	0.0026
Mode	0.0025
Standard Deviation	0.0001
Variance	0.0000
Skewness	0.2425
Kurtosis	3.14
Coeff. of Variability	0.0510
Minimum	0.0021
Maximum	0.0032
Range Width	0.0011
Mean Std. Error	0.0000

5. E Site



Statistics:	
Trials	40,000
Base Case	0.030
Mean	0.028
Median	0.028
Mode	0.026
Standard Deviation	0.003
Variance	0.000
Skewness	0.4424
Kurtosis	3.42
Coeff. of Variability	0.0994
Minimum	0.020
Maximum	0.047
Range Width	0.027
Mean Std. Error	0.000

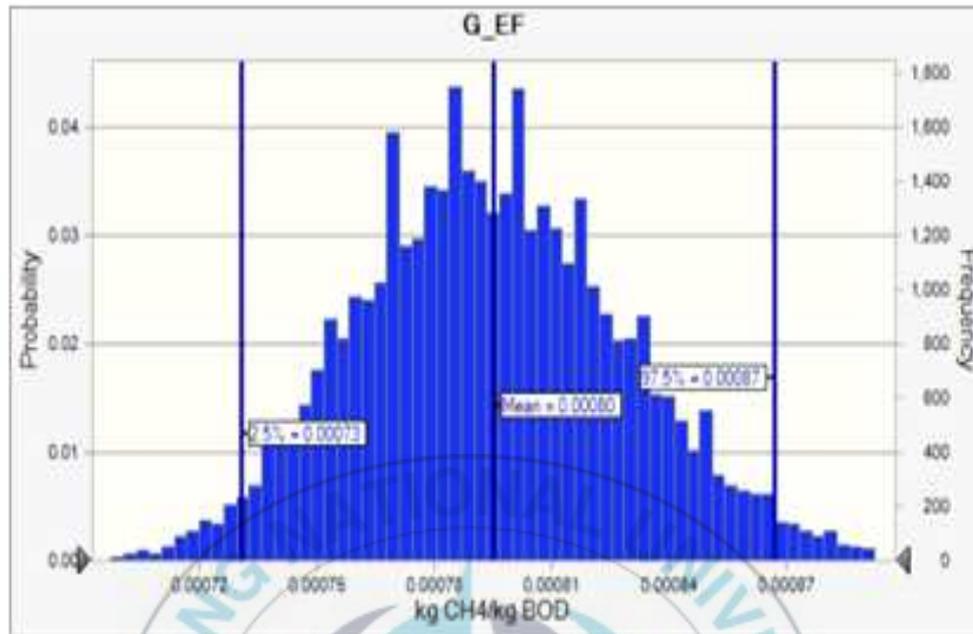
6. F Site



Statistics:

	Forecast values
Trials	40,000
Base Case	0.008529
Mean	0.007772
Median	0.007746
Mode	0.007859
Standard Deviation	0.000461
Variance	0.000000
Skewness	0.3293
Kurtosis	3.28
Coeff. of Variability	0.0593
Minimum	0.006160
Maximum	0.010698
Range Width	0.004538
Mean Std. Error	0.000002

7. G Site



Statistics:	Forecast values
Trials	40,000
Base Case	0.00085
Mean	0.00080
Median	0.00079
Mode	0.00079
Standard Deviation	0.00003
Variance	0.00000
Skewness	0.2568
Kurtosis	3.17
Coeff. of Variability	0.0438
Minimum	0.00067
Maximum	0.00097
Range Width	0.00029
Mean Std. Error	0.00000