



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

공학석사 학위논문

다변량 분석을 이용한 하수처리장
유출수 수질예측



부 경 대 학 교 대 학 원

환 경 공 학 과

김 철 만

공학석사 학위논문

다변량 분석을 이용한 하수처리장
유출수 수질예측

지도교수 이 병 헌

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2019년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

환 경 공 학 과

김 철 만

김철만의 공학석사 학위논문을
인준함

2019년 8월 23일



위 원 장 공학박사 강 임 석(인)

위 원 공학박사 손 윤 석(인)

위 원 공학박사 이 병 현(인)

<목 차>

I . 서론	1
II . 연구대상 및 이론적 배경	3
2.1 울산 방어진하수처리장 현황	3
2.1.1 하수처리장의 유량 및 지역 기상현황	3
2.1.2 하수처리장의 수질 및 운영현황	4
2.2 다변량 회귀분석 방법	7
2.2.1 다중 선형 회귀 분석법	7
2.2.2 반응 표면 회귀 분석법	12
2.3 하수처리장 유출수 예측 모델	14
2.3.1 이론적 유출수 예측 모델	14
2.3.2 통계적 유출수 예측 모델	15
III . 자료수집 및 연구방법	18
3.1 울산 방어진 하수처리장의 자료수집	18
3.2 울산 방어진 하수처리장의 연구방법	18
3.2.1 단계적 회귀분석법을 이용한 다변량 회귀분석 모델	20
3.2.2 반응표면법을 이용한 다변량 회귀분석 모델	22
IV . 결과 및 결과분석	23
4.1 단계적 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수의 예측모델	23
4.1.1 단계적 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 BOD 농도 예측 모델	24
4.1.2 단계적 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 COD 농도 예측 모델	29

4.1.3 단계적 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 SS 농도 예측 모델	34
4.1.4 단계적 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 T-N 농도 예측 모델	39
4.1.5 단계적 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 T-P 농도 예측 모델	44
4.2 반응표면 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수의 예측 모델	49
4.2.1 반응표면 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 BOD 농도 예측 모델	50
4.2.2 반응표면 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 COD 농도 예측 모델	54
4.2.3 반응표면 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 SS 농도 예측 모델	58
4.2.4 반응표면 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 T-N 농도 예측 모델	62
4.2.5 반응표면 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 T-P 농도 예측 모델	66
4.3 단계적 회귀분석 및 반응표면 회귀분석 예측모델의 비교	70
 V. 결 론	 72
 참 고 문 헌	 74

<List of Table>

Table 2.1 Flow and weather status of Ulsan Bangujin sewage treatment plant in 2017	4
Table 2.2 Design water quality and operating water quality of Ulsan Bangujin sewage treatment plant	5
Table 2.3 Water Quality and Operation Status of Ulsan Bangujin Sewage Treatment Plant	6
Table 2.4 Analysis of variance	12
Table 3.1 Stepwise regression analysis independent variables	20
Table 3.2 Stepwise regression analysis Dependent variable	20
Table 3.3 Response surface regression analysis independent variables	22
Table 3.4 Response surface regression analysis Dependent variables	22
Table 4.1 BOD step-by-step regression analysis results of Ulsan Bangujin sewage treatment plant	24
Table 4.2 Stepwise regression analysis BOD regression variable	25
Table 4.3 BOD dispersion analysis of stepwise regression analysis	26
Table 4.4 COD step-by-step regression analysis results of Ulsan Bangujin sewage treatment plant	29
Table 4.5 Stepwise regression analysis COD regression variable	30
Table 4.6 COD dispersion analysis of stepwise regression analysis	31
Table 4.7 SS step-by-step regression analysis results of Ulsan Bangujin sewage treatment plant	34
Table 4.8 Stepwise regression analysis SS regression variable	35
Table 4.9 SS dispersion analysis of stepwise regression analysis	36
Table 4.10 T-N step-by-step regression analysis results of Ulsan Bangujin sewage treatment plant	39

Table 4.11 Stepwise regression analysis T-N regression variable	40
Table 4.12 T-N dispersion analysis of stepwise regression analysis	41
Table 4.13 T-P step-by-step regression analysis results of Ulsan Bangujin sewage treatment plant	44
Table 4.14 Stepwise regression analysis T-P regression variable	45
Table 4.15 T-P dispersion analysis of stepwise regression analysis	46
Table 4.16 BOD Reaction Surface Regression Analysis of Ulsan Bangujin Sewage Treatment Plant	50
Table 4.17 BOD dispersion analysis of Response surface regression	51
Table 4.18 COD Reaction Surface Regression Analysis of Ulsan Bangujin Sewage Treatment Plant	54
Table 4.19 COD dispersion analysis of Response surface regression	55
Table 4.20 SS Reaction Surface Regression Analysis of Ulsan Bangujin Sewage Treatment Plant	58
Table 4.21 SS dispersion analysis of Response surface regression	59
Table 4.22 T-N Reaction Surface Regression Analysis of Ulsan Bangujin Sewage Treatment Plant	62
Table 4.23 T-N dispersion analysis of Response surface regression	63
Table 4.24 T-P Reaction Surface Regression Analysis of Ulsan Bangujin Sewage Treatment Plant	66
Table 4.25 T-P dispersion analysis of Response surface regression	67
Table 4.26 Comparison of stepwise regression and response surface regression	70

<List of Figures>

Fig. 4.1 Stepwise regression analysis BOD Fitted line Plot	27
Fig. 4.2 Stepwise regression analysis BOD time series	28
Fig. 4.3 Stepwise regression analysis COD Fitted line Plot	32
Fig. 4.4 Stepwise regression analysis COD time series	33
Fig. 4.5 Stepwise regression analysis SS Fitted line Plot	37
Fig. 4.6 Stepwise regression analysis SS time series	38
Fig. 4.7 Stepwise regression analysis T-N Fitted line Plot	42
Fig. 4.8 Stepwise regression analysis T-N time series	43
Fig. 4.9 Stepwise regression analysis T-P Fitted line Plot	47
Fig. 4.10 Stepwise regression analysis T-P time series	48
Fig. 4.11 Response surface regression analysis BOD Fitted line Plot	52
Fig. 4.12 Response surface regression analysis BOD time series	53
Fig. 4.13 Response surface regression analysis COD Fitted line Plot	56
Fig. 4.14 Response surface regression analysis COD time series	57
Fig. 4.15 Response surface regression analysis SS Fitted line Plot	60
Fig. 4.16 Response surface regression analysis SS time series	61
Fig. 4.17 Response surface regression analysis T-N Fitted line Plot	64
Fig. 4.18 Response surface regression analysis T-N time series	65
Fig. 4.19 Response surface regression analysis T-P Fitted line Plot	68
Fig. 4.20 Response surface regression analysis T-P time series	69

Prediction of effluent concentration in wastewater treatment plant using multivariate analysis

Chul Man Kim

Department of Environmental Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

This study was carried out to evaluate the influent quality of the water quality of a defrosted sewage treatment plant. In 2017, we used multivariate analysis with stepwise regression analysis and response surface regression analysis using BOD, COD, SS, TN, and TP for influent data. As a result of the analysis, both analysis methods were suitable and reliable.

Regression analysis of the BOD, COD, SS, T-N and T-P predictions of the effluent The correlation coefficient R of the response surface methodology was higher than that of the stepwise regression analysis. In stepwise regression analysis, it is easy to find out the causal factors affecting the predicted value because the calculation formula is simple, but the correlation coefficient tends to be large.

The response surface regression analysis shows that the predictive equation is complex but the correlation is high, so that better results can be obtained if the data is highly accurate.

Response surface regression analysis is suitable for predicting effluent water quality of a sewage treatment plant. If data are managed by reflecting various variables beforehand, it can be considered that the operation of sewage treatment plant can be improved efficiently.

I. 서론

울산시의 산업 발전과 인구 증가에 따른 생활하수와 산업폐수의 양은 점점 증가하고 있으며 이에 따라 기존의 하수처리장의 운영에 따른 효율성 향상 필요성과 관심이 증가하고 있다. 본 연구대상인 울산 방어진하수처리장은 울산 동구 지역의 하수를 처리하고 있으며 이 지역에는 공업단지 및 이를 중심으로 주거지 및 상업지역이 발달되어 있어 산업폐수와 주거 인구로부터 발생하는 생활하수의 실질적인 처리를 맡고 있다. 하수처리장의 방류수는 생태계 변화에 밀접하게 관련되어 있기 때문에 환경을 보호하기 위한 정부의 수질 환경기준도 강화되어 국내 하수처리장의 방류수 기준도 앞으로 점점 강화될 계획이다. 환경부는 2012년 하천 수질 개선을 위해 상수원보호구역, 수변구역 등 수질보전 중요성이 큰 지역의 방류수 수질기준을 2010년에 비해 대폭 강화하여 용수 사용 및 공공수역의 생태계 보전에 중점을 두고 부영양화 생성의 주요인자인 영양물질 총인(T-P)과 유기물에 대한 기준을 대폭 강화하여 특히 수질보전의 중요성이 큰 상수원 보호구역, 수변구역의 경우 총인(T-P)은 10배($2 \rightarrow 0.2\text{mg/L}$), BOD($10 \rightarrow 5\text{mg/L}$) 및 COD($40 \rightarrow 20\text{mg/L}$)는 각각 2배로 강화하였다(환경부 수질 및 수생태계보전에 관한 법률 시행규칙 개정안, 2010). 2018년부터는 금호강 단위유역 공공하수처리시설 중 대구광역시, 고령군, 합천군은 기존보다 강화된 방류수 수질 BOD기준이 시행되었다. 환경부는 2018년에 충남 아산 탕정 산업단지 공공폐수처리시설에 대한 방류수 수질기준에 pH, F, ABS 항목을 추가 설정하였다(환경부고시 제2018-6호, 2018). 강화되는 환경부의 수질 환경기준에 대비하여 울산 방어진하수처리장의 운영효율성 검토

와 개선이 필요한 전망이다.

하수처리장을 운영하면서 현장에서 운전조건이나 공법개선 변경을 통한 실험은 현실적으로 쉽게 적용하기 어렵다. 그리하여 하수처리장 운전자들의 경험과 지식에 의해 공정 효율성이 결정된다고 볼 수 있다. 본 연구는 방어진하수처리장의 유입수와 유출수의 상관관계를 분석하여 이를 바탕으로 수질을 예측하여 효과적인 하수처리장 운영 개선 방안을 마련하고자 한다. 국내에서도 하수처리장의 유입수와 공정운영 개선에 대한 연구는 활발하게 이루어지고 있으며 실제 현장에서 운전조건이나 공법 변경은 적용이 어렵기 때문에 하수처리장의 유입수와 공정 운전에 관한 데이터를 수집해 통계 분석을 이용해 유출수를 예측하는 연구도 지속적으로 행해지고 있다. 김병균, 문용택, 김홍석, 김종락(2007)은 시계열 모델을 이용하여 하수처리장 유입수 성상을 예측하는 연구를 하였다. 정화진(2008)은 다변량 통계기법을 이용해 새만금 수역의 수질 특성을 평가 연구 하였고 최소연(2011)은 다변량 통계기법으로 생물학적 하수처리장의 진단 및 단순화한 활성슬러지 모델을 개발 연구 하였다. 김중각(2013)은 다변량 분석을 이용해 하수처리장 유입수 특성을 예측하는 연구를 하였고 김정훈(2013)은 통계기법을 이용해 하수처리장의 총인처리시설의 처리효율을 연구하였다. 본 논문에서는 울산 방어진 하수처리장의 유입수와 운전인자 데이터를 자료로 컴퓨터 프로그램 minitap을 사용하여 단계적 회귀 분석법과 반응표면 회귀분석법을 통해 유출수 수질을 예측하고 두 분석법의 예측 신뢰성과 적합성을 비교 분석해 보았다.

Ⅱ. 연구대상 및 이론적 배경

2.1 울산 방어진하수처리장 현황

2.1.1 하수처리장 유량 및 지역 기상현황

방어진하수처리장의 2017년 유량 및 기상현황은 표 2.1 과 같으며 월간 유량 변동율은 계절에 따른 가옥내 하수사용량의 영향으로 소량 변동이 있다. 일 평균하수 유입유량은 $91,743\text{m}^3/\text{일}$ 로 시설 용량 $100,000\text{m}^3/\text{일}$ 대비 약 92% 수준이다. 계절별 강우량의 변화가 있으며, 분류식 하수관거 설치 지역으로 강우량이 하수 유입량에 크게 관여하지 않는 것으로 판단된다.

Table 2.1 Flow and weather status of Ulsan Bangujin sewage treatment plant in 2017

구 분		Influent flow(m ³)	Discharge flow(m ³)	Temperatures (℃)	fall(mm)
1월	일평균	92,485	92,192	2.8	16.1
2월	일평균	91,885	91,594	4.4	16.0
3월	일평균	93,319	93,021	8.0	17.7
4월	일평균	97,642	97,355	15.1	20.0
5월	일평균	93,828	93,571	19.6	23.0
6월	일평균	94,188	93,626	21.2	25.2
7월	일평균	95,816	95,527	27.1	27.5
8월	일평균	87,063	86,773	25.9	28.1
9월	일평균	95,831	95,526	21.3	26.6
10월	일평균	89,025	88,753	17.0	24.2
11월	일평균	86,328	86,042	9.8	21.4
12월	일평균	83,747	83,463	2.3	17.1
평 균		91,743	91,434	14.6	22.0

(출처 : 방어진하수처리장 연간운영보고서)

※ 1) 유입수 설계값

2.1.2 하수처리장 수질 및 운영현황

방어진하수처리장의 수질 및 운영현황은 표 2.2, 표 2.3으로 나타내었으며 유입수와 1차 처리수의 BOD₅와 T-N은 분류식 유입으로 고농도 하수가 유입되어 설계기준을 초과해 운영되고 있으나, 방류수 수질 기준에는 적합하게 처리하고 있다. 그러나 향후 T-N 및 TOC 적용등 강화되는 수질 기준을 맞추기 위해 전체적으로 공정의 효율 개선 방안을 연구 할 필요가 있다.

Table 2.2 Design water quality and operating water quality of Ulsan Bangujin sewage treatment plant

구 분	유 입 수				1차 처리수		방류수	
	순수하수		반송수 포함					
	설 계	운 영	설 계 ¹⁾	운 영	설 계	운 영	설 계	운 영
pH	-	7.5	-	7.4	-	7.3	-	6.9
수온(℃)	-	21.9	-	22.1	-	22.3	-	22.7
BOD ₅ (mg/L)	151.0	173.5	157.2	192.4	110.3	116.8	7.7	2.5
COD(mg/L)	154.0	105.0	160.2	118.5	112.4	81.5	13.5	11.2
SS(mg/L)	161.0	172.6	179.9	194.2	117.2	116.4	8.2	2.7
T-N(mg/L)	32.000	48.670	34.200	50.651	30.800	39.396	8.600	7.317
T-P(mg/L)	5.000	5.105	5.400	5.260	4.300	4.147	0.600	0.184
대장균군수 (개/ml)	-	423,589	-		-		-	558

(출처 : 방어진하수처리장 연간운영보고서)

※ 1) 유입수 설계값

Table 2.3 Water Quality and Operation Status of Ulsan Bangujin Sewage Treatment Plant

구 분	수온(℃)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
1월	16.1	159.3	97.6	152.6	46.927	4.741
2월	16.0	165.0	103.5	163.2	49.661	5.090
3월	17.7	172.3	105.3	174.0	48.901	5.209
4월	20.0	177.9	99.9	176.0	47.576	5.070
5월	22.9	172.8	107.9	174.2	49.149	5.214
6월	25.2	169.7	108.2	171.4	47.792	5.067
7월	27.5	179.4	108.8	182.2	48.510	5.201
8월	28.2	180.5	103.1	177.1	48.174	5.134
9월	26.6	173.7	101.3	172.6	45.852	4.947
10월	24.2	173.9	102.3	170.3	48.026	5.022
11월	21.4	180.0	110.5	185.8	51.157	5.257
12월	17.1	176.8	111.7	171.5	52.336	5.301
평 균	22.0	173.5	105.0	172.6	48.670	5.105

구 분	잉여 슬러지	Alum	MLSS	SRT	F/M	BOD 용적부 하	HRT
1월	878	1,311	2,692	13.768	0.107	0.296	8.787
2월	1,138	1,769	2,901	11.191	0.109	0.316	8.758
3월	1,032	1,597	2,692	10.626	0.115	0.305	8.645
4월	1,078	849	2,660	10.540	0.136	0.357	8.241
5월	977	1,851	3,118	13.260	0.112	0.348	8.541
6월	1,300	1,901	3,146	11.246	0.118	0.369	8.578
7월	1,149	1,451	2,789	10.297	0.125	0.349	8.440
8월	1,288	549	2,751	9.199	0.116	0.318	9.382
9월	1,005	682	2,716	11.654	0.125	0.339	8.434
10월	1,221	1,587	2,679	9.3	0.117	0.312	9.123
11월	1,036	3,960	2,450	10.077	0.111	0.271	9.341
12월	915	2,679	2,650	12.827	0.094	0.250	9.640
평 균	1,084	1,680	2,770	11.2	0.115	0.319	8.8

(출처 : 방어진하수처리장 연간운영보고서)

표 2.3 의 현황자료는 방어진하수처리장 주 운영인자로 다변량 분석에 사용할 자료의 월별 평균값으로 나타내었다.

2.2 다변량 회귀분석 방법

2.2.1 다중 선형 회귀 분석법

다변량 분석은 어떤 대상의 성격을 자세히 따져서 밝히기 위해 다양한 측면에서 대상을 분석하고 관찰하여 2개 이상의 종속변수나 독립변수를 동시에 분석할 경우에 사용하는 통계학적 분석 방법이다. 통계는 실험이나 관찰로 얻은 자료를 수집해 어떠한 가설을 검정하는 것으로 자료를 분석한 결과를 그 자료에만 국한시키는 경우는 기술 통계이며 그렇지 않고 분석한 결과를 자료가 속한 집단의 특징이나 현상으로 일반화 시키는 것은 통계적 추론이라고 한다. 일반적으로 통계 테스트와 통계 모델을 적용할 때는 기술 통계를 사용해 데이터의 기본 기능을 조사하고 검토하게 된다(Bulman and Osborn, 1989). 기술통계는 중앙값에 의한 경향을 나타내는 중심경향과 자료의 분산과 확산을 나타내는 변동성을 가진 분산편차, 표준편차가 있다. 기술통계에서 자료가 평균에 비해 비대칭으로 분포되는 정도를 나타내는 것은 왜도(skewness)이며 오른쪽 꼬리 형상으로 표현되는 양의 비대칭과 왼쪽 꼬리 형상으로 분포되는 음의 비대칭이 있다. 첨도는 자료가 평균값 쪽으로 집중되어 있는지를 중심 부근의 분포의 높이로 나타내는데 분포가 정규분포보다 높으면 양의 첨도, 낮으면 음의 첨도로 표현이 된다 (Obrien and Shampo 1981; Cheong 1978; Pikkemaat, 1969). 기술 통계에서의 상관관계는 자료의 변수들 사이의 상호관계를 나타내는 용어로 피어

슨의 상관관계를 사용해 두 변수 사이의 선형 관계의 정도를 측정한다. 이를 문자 “R”로 표현하는데 범위는 -1에서 +1사이다. R값이 0에 가까우면 두 변수 사이에는 아무 관계가 없다는 것을 나타내며 -1과 +1에 가까울수록 두 변수간의 상호관계가 더 강하다고 볼 수 있다(Williams 1996; Mudelsee 2003; Gravier et al. 2008). 기술통계의 선형 회귀 분석은 선형성 충족시 독립변수와 종속 변수의 관계를 설명하거나 예측하기 위한 통계 방법으로 회귀 분석에서 독립변수에 따라 일정한 패턴으로 종속변수의 값이 변하는데 이 관계가 직선에 가까운 회귀선으로 나타내는 경우를 말한다. 독립변수가 하나인 경우는 단순 선형 회귀 분석이며 독립변수가 여러 개일 때 1개의 종속변수 사이의 선형식을 구하여 종속변수를 예측하는 경우를 다중 선형 회귀 분석이라고 한다(조영범, 2015).

다중 선형 회귀 분석(Multiple Linear Regression, MLR)의 목표는 여러개의 독립 변수의 함수로 종속 변수를 예측 할 수 있는 방정식을 찾아 내는 것으로 n개의 관측치가 주어지면 다음과 같은 Te MLR 방정식으로 나타낸다(Coelho-Barros et al, 2008). 여기서 x는 독립변수, y는 종속변수, i는 n 표본 관측값, β_0 는 y절편에 추정된 다중 독립변수 x에 대한 회귀 계수이며 각각의 회귀 계수는 각각의 단위 변화에 대한 종속 변수의 변화를 나타낸다. ϵ 는 임의의 오차항이다(Agirre-Basurko et al. 2006; Ferraro and Giordani et al. 2012; Kovdienko et al. 2010).

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \epsilon_i$$

$$i=1,2,\dots,n.$$

이 논문에서의 독립변수 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ 는 하수처리장의 운전 매개 변수, 유입수의 BOD, COD, SS, TN, TP이며 종속 변수 y는 유출수의 BOD, COD, SS, TN, TP이다.

다변량 회귀 모델을 적용하기 위해서는 종속 변수를 설명하거나 종속 변수

의 미래를 예측하는데 있어서 하나 이상의 유용한 독립변수가 있는지를 검토해야 한다. 그리고 모든 독립 변수가 종속 변수를 설명하는데 있어서 관계가 있어야 하며 일부의 독립 변수 제거시에도 회귀 모델 예측값이 가치가 있으며 통계모델에 대한 자료가 적합한가를 검토해야 한다.

회귀 모델에서 독립변수의 관계성을 검토시 회귀 모형에 추가의 설명 변수를 포함하면 더 유용할 수 있으며 이것은 또한 모델에 현재 있는 하나 이상의 설명 변수를 제거할 때도 유용하다. 개별 회귀 계수에 대한 t-검정은 회귀 모형에 다른 설명 변수가 존재하는 것을 고려할 때 쓰는 검정으로 다음과 같다.

$$t = \frac{\beta_j}{S_{\beta_j}}$$

여기서 S_{β_j} 는 각 동위 원소 β_j 의 표준 오차이며 이 통계는 $n - p$ 의 자유도를 가진 t-분포를 따른다(Vounatsou, Karydis 1991). 여기서 n 은 관측치의 수이고 p 는 예측 변수의 수이다.

다중 선형 회귀 분석에서 t-검정에 대한 가설은 Null 가설과 대체가설이 있다. Null 가설에서 변수는 이 모델에 기여하지 않으며 $\beta_j = 0$ 으로 표현되는 모델에서 제외되어야 하는 것이며 대체 가설에서 대안은 설명 변수가 기여하며 모델에 남아 있어야 한다는 것이다($\beta_j \neq 0$).

Null 가설이 기각된 경우에는 독립 변수 X_j 는 모델에 설명력 또는 예측력이 있다고 결론 내릴 수 있다. Null 가설이 기각되지 않는다면 독립 변수 x_j 의 설명력 증거가 없다고 결론지을 수 있다. 즉, 모델에 X_j 를 갖는 것은 의미가 없으며 X_j 를 제거하고 회귀 분석을 다시 실행하는 것을 고려해야 한다. 모형에 설명 변수를 포함하거나 제거하기 위한 유효수준(α)은 0.05로 설정된다.

회귀 모형에서 적합성을 검토할 때에는 R의 곱(R^2)이라는 통계적 항목을

사용하여 종속 변수의 상관성을 설명하는 독립 변수 범위를 조사할 수 있다. 회귀 분석에서 R^2 , 결정계수는 회귀선이 실제 자료를 얼마나 잘 추정하는지를 나타내는 통계적 측정값이다. R^2 는 모형의 회귀 모형의 모든 설명 변수가 종속 변수의 변동에 영향을 미친다고 가정하며 이 경우 변동의 백분율로 해석될 수 있다.(조영범, 2015).

평균 제곱 오차(MSE) 및 평균 제곱 오차(RMSE)의 제곱근은 모형의 계산값과 실제 자료의 차이의 정도를 표현한다. R^2 , MSE 및 RMSE는 다음 식을 통해 계산한다.

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

$$MSE = \frac{SSE}{n-k}$$

$$SE = \sqrt{\frac{SSE}{n-k}}$$

여기서 SSE는 제곱오차의 합계, SST는 제곱합, n은 관측치 자료수, k는 독립변수의 자료수이다(Archer and Lemeshow 2006; Fagerland and Hosmer 2013; Yang et al. 2011).

회귀 모형의 적합성은 설명되지 않은 분산을 설명한 F-test으로 점검할 수 있는데 F-test는 회귀 모형이 분산분석을 통해 전체적으로 적합한지 여부를 테스트한다. F-test는 nominator와 denominator 각각에 대해 k-1(모형) 및 n-k(오차)자유도를 갖는 F 분포를 따른다. 여기서 n은 관측 수이고 k는 추정된 매개 변수 수이다. 시험 통계 (F-test)는 다음에 의해 주어진다.

$$F = \frac{MSR}{MSE}$$

여기서 MSR은 회귀의 평균 제곱 오차이고 MSE는 잔차의 평균 제곱 오차이다(박정수, 2019). 다중 선형 회귀 모형에서의 F-test에 대한 가정으로

Null 가설은 모든 계수는 0($\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$)으로 독립 변수 중 어느 것도 종속 변수의 중요한 예측 인자가 아님을 의미한다.

대체 가설에서는 적어도 하나의 계수는 0이 아니며($\beta_j \neq 0$) 이것은 독립 변수 중 적어도 하나가 종속 변수의 중요한 예측 인자임을 의미한다.

Null 가설이 기각될 경우에는 변수들 간에 관계가 있다고 보며 회귀 모델에 설명력이나 예측력이 있다는 것을 의미한다. Null 가설이 기각되지 못하면 설명력의 증거가 없다고 결론지으며 회귀 모델을 사용하는 데 의미가 없음을 시사한다. 일반적으로 관련성의 유의수준(α)은 0.05로 일반적으로 설정된다.

다음 표 2.4 에서 n 은 모델의 총 합계이고 k 는 적합한 모델에 대한 설계 변수의 수를 나타낸 것이다. 자유도는 주어진 조건에서 자유롭게 변화할 수 있는 점의 수를 나타내며 기호로는 DF라고 표시한다. 평균제곱은 제곱합을 자유도로 나눈 것으로 총 평균 제곱에 이용되는 오차분산 추정된 값의 잔차 평균제곱에 의하여 제공된 오차분산 추정된 값의 측도 비율을 말한다. F_0 는 F-test를 위한 검정통계량으로 회귀방정식이 데이터의 성질을 설명하는데 유용성이 있는지를 검정한다. 유의수준에서 만약 F_0 의 값이 $F_0 > F(k, n - k - 1;)$ 이면 회귀방정식이 유의한 것으로 회귀변동(R)이 상대적으로 잔차변동(E)보다 유의하게 크다. 그러므로 회귀선의 타당성은 회귀변동이 잔차변동보다 큰 경우에 결정된다.(A.I Khuri and J.A Comell, 1996).

Table 2.4 Analysis of variance

요인 Source of Variation	자유도 (DF)	제곱합 (SS)	평균제곱 (MS)	F ₀	F(α)
회귀	k - 1	SS _R	SS _R /k = MS _R	MS _R /M S _E	F(k,n-k-1;α)
잔차	n - k - 1	SS _E	SS _E /n-k-1 = MS _E		
총	n - 1	S _{yy}			

2.2.2 반응표면법(Response surface methods, RSM)

반응표면법(RSM)은 공정이나 시스템에서 다수의 설명변수가 복합적인 작용으로 어떤 반응 변수에 영향을 주고 있을 때 관측된 자료를 이용해 반응표면에 대한 통계적인 분석을 하는 방법이다(조영범, 2015). 독립변수와 종속변수 사이의 관계성을 찾는데 독립변수에 의해 예측되는 종속변수 값은 일반적으로 실제 실험이나 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 나오며 종속 변수 y 는 기댓값 또는 평균값이라 한다. 본 논문에서는 관측된 하수처리장 자료를 이용해 설계된 독립변수를 사용해 MINITAP 프로그램으로 종속변수의 예측값을 추정해 보았다. k 개의 독립변수와 종속변수 y 의 관계는 다음과 같다.

$$y = f(X, \theta)$$

여기에서 변수($x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$)는 자연변수이며, 실제의 측정 단위를 가지며 실제 응답함수 f 의 근사함수인 y 는 Taylor 급수 전개를 기본으로 하여 1차 또는 2차 다항 모형으로 근사하게 된다. 본 논문에서 선택한 연구대상

의 반응표면이 곡면으로 표현될 것이라고 예측할 수 있으므로 근사함수를 2차 모형으로 사용하였다. 따라서 실제 응답함수 f 와 근사함수 y 와의 관계는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij} X_i X_j$$

ϵ 은 응답의 오차항이고 변수($x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$)는 코드 변수로 ϵ 을 통계적인 오차로 다루며 일반적으로 평균이 0이고 분산 σ^2 을 가지는 정규분포로 가정한다. 따라서 근사함수로부터 n 개의 샘플 자료에서 추정된 출력값 y 는 행렬의 형태로서 다음과 같이 정리된다.

$$y = X\beta + \epsilon$$

여기서 X 는 설계변수 레벨의 행렬, β 는 회귀계수의 벡터, ϵ 은 임의의 오차의 벡터이다. 회귀계수의 벡터는 임의의 오차의 제곱합을 최소로 하는 최소자승법을 이용하여 추정한다. 최소자승함수는 다음 식과 같으며 기호 ‘ $\hat{\cdot}$ ’는 추정값을 나타낸다. 일반적으로 추정된 근사함수의 정도를 확인하기 위해 분산분석을 이용한다(조영범, 2015).

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \epsilon' \epsilon = (y - X\hat{\beta})'(y - X\hat{\beta})$$

2.3 하수처리장 유출수 예측 모델

2.3.1 이론적 유출수 예측 모델

1950년대부터 시작된 하수 처리 시스템을 위한 모델의 개발에서는 이전보다 간단한 경험식을 사용하는데 이것은 Monod(1494)가 미생물 성장에 대한 수학적인 설명을 통해 생물학적 과정의 기계모델의 개발이 가능해졌기 때문이다(Monod. J, 1949). 1976년 초기 정상 상태의 활성 슬러지 시스템의 바이오 프로세스 모델(Marais and Ekama, 1976)은 바이오 매스 성장과 사멸 재생 원리(Dold et al., 1980)를 포함한 동적 모델을 연구하게 되었으며 이것이 오늘날의 프로세스 모델이다(Makinia, 2010). 1980년대에 활성화된 슬러지 시스템을 위한 최첨단 모델인 ASM1(Activated Sludge Model no.1)이 나오게 되었다(Henze et al., 1987). ASM1의 연구는 성공적이어서 이 후 계속된 모델 개발로 새로운 공정인 생물학적 인 제거가 추가된 ASM 2와 ASM 1의 메커니즘에 현실을 좀 더 반영하도록 개선된 ASM 3이 나오게 되었다(Henze, 2000). 1990년대에 혐기성 소화에 대한 모델링의 상세한 연구가 시작되었고(Siegrist et al., 1993) 이것은 나중에 표준 모델인 혐기성 소화 모델 ADM 1이 되었다(Batstone et al., 2002). 1996년 남아프리카 공화국의 케이프 타운 대학에서 활성 슬러지 시스템을 위한 바이오 프로세스 모델을 근본적으로 개발되었다(Jeppsson, 1996). 모델링 기본 단위 프로세스에서 2차 침전 프로세스에 관한 많은 연구가 진행되었는데 이 중 Settler 모델은 완전한 활성 슬러지 장치의 시뮬레이션을 용이하게 해주는 모델로 여기에서 침전은 물과 슬러지를 분리해 슬러지를 활성 슬러지 반응조로 보내는 것이다. 처음에는 단순히 내부 용적이 없는

분리 단위의 침전 모델이 사용되었으며 이것은 유출물 TSS의 농도나 유압이 중요하지 않은 경우에 사용 할 수 있었다. 보다 유능한 모델을 개발하기 위해 많은 원칙들이 제안되고 있다(Makinia, 2010).

2.3.2 통계적 유출수 예측 모델

하수 처리 시스템에서 통계를 이용해 유출수를 예측하는 모델에는 인공지능을 이용한 인공 신경망 모델, 유전자 프로그래밍 모델, 뉴로 퍼지 모델과 통계를 이용한 회귀 분석 모델 등이 있다. 여러 나라에서 인공지능을 이용해 하수 처리 시스템에서 수질 인자들을 예측하고 제어하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. T.Y. Pai et al.(2006)은 병원에서 발생하는 폐수 처리에 뇌 신경망을 적용하여 유출수의 SS와 COD 농도를 예측하였다. 인공지능을 이용한 예측 모델에서 인공 신경망 모델은 인간 두뇌의 신경 세포를 모델로 인공 지능을 구현하는 것으로 단순계산 요소들로 이루어져 있으며 이들의 상호작용을 통해 기존의 학습 데이터에 대한 정보도 패턴을 학습하여 새로운 학습들을 하게 함으로 데이터를 예측하는 모델이다(한국과학기술원, 2009). 인공 신경망 모델을 적용할 경우에는 비선형적인 패턴 분석을 수행 할 수 있기 때문에 매우 정확한 예측을 할 수 있으며 다양한 학습이 가능하고 이것을 병렬 분산 처리 하는 능력도 가지고 있다.

유전자 프로그래밍 모델 기법은 컴퓨터 프로그램 모델에서 개체군을 기초로 하여 자연적으로 선택하거나 유전 메카니즘으로 선택해 연산하는 방법이다. 이 과정에서 모든 개체들의 적합도를 계산해 선택된 개체는 새로운 개체군에 넣는다. 하나의 개체는 하나 또는 그 이상의 염색체로 구성되어 있으며 유전 연산자를 통해 개체들을 복제, 교차, 돌연변이 등의 연산을 통해 변형시킨다. 이렇게 진화하며 연산 하는 과정은 측정된 복잡한 시스템

의 자료들을 적합한 수학적식으로 만들어 가장 잘 맞는 모델을 만들 수 있게 해준다(한국과학기술원, 2009). 유전자 프로그래밍 모델을 하수 처리의 생물학적 공정 에 사용하게 되면 공정 운전자가 가지고 있는 지식과 경험을 바탕으로 기존 모델에 진화된 새로운 모델을 만들 수 있다. 유전자 프로그래밍 모델을 하수처리에 적용한 사례로는 뉴질랜드의 하수처리장에서 유출수의 SS와 반응조내의 MLSS를 예측하는데 유전자 프로그래밍 모델을 사용한 연구가 있다(Y.S. Hong et al., 2003).

뉴로 퍼지 모델은 신경 회로망 기법을 이용해 특정한 개체가 집합에 속하거나(True=1) 속하지 않는(False=0) 과정을 통해 0이나 1의 결과값을 갖게 되는 부울 논리를 확장하여 특정 개체가 집합에 어느 정도 속해 있는지를 0과 1 사이의 결과값으로 나타내는 퍼지 이론을 기초로 하며 이는 개체의 소속 정도를 알 수 있게 해준다. 이 퍼지 이론은 물리적인 수치와 양에 대한 불확실한 개념을 수학적 표현이 가능하게 해 준다(한국과학기술원, 2009).

회귀 분석 모델은 상호관계가 있는 독립변수와 종속변수 사이의 관계를 수학적 모형을 가정한 함수식으로 나타내 이를 이용해 측정된 자료를 추정해 예측값을 도출하는 통계적 분석 방법이다. 이 때 독립변수는 종속변수로부터 영향을 받지 않으며 종속변수는 독립변수에 의해 영향을 받는다. 회귀 분석은 독립변수의 수에 따라 단순 회귀 분석, 다중 회귀 분석, 곡선 회귀 분석으로 구분된다. 단순 회귀 분석을 독립 변수와 종속 변수가 각 1 개로 이들 사이의 관계는 1차 함수인 직선관계로 가정하게 된다. 다중 회귀 분석은 독립변수가 2개 이상이며 종속변수는 1개로 이들 사이의 관계는 단순 회귀 분석처럼 1차 함수인 직선 관계로 가정하게 된다(조영범, 2015). 다중 회귀분석은 단순 회귀 변수에서 독립변수가 2 개 이상이라는 것 외에는 통계적으로 추정하거나 검정하는 과정은 같다. 곡선 회귀 분석은 독립변수가

1개일 때 2차 이상의 고차함수를 가정하는데 이용하는 방법이다. 회귀분석은 독립변수에 대한 종속변수의 값의 분산이 정규분포를 가져야 하며 독립변수의 값에 상관없이 종속변수는 일정한 분산을 가져야 한다. 여러개의 독립변수가 있는 다중 회귀 분석에서는 독립변수들이 서로 상호, 독립해야 하며 계수에 대한 가정으로 독립변수와 종속변수의 관계는 선형이어야 한다(오승은, 2016).



Ⅲ. 자료수집 및 연구방법

3.1 울산 방어진하수처리장의 자료수집

울산방어진하수처리장을 비롯한 울산시 3개 하수처리장 최근 5개년 유량 및 수질의 자료를 검토하여 유량의 변동이 적고 처리공정의 안정성이 확보된 방어진하수처리장 2017년 유입유량 및 수질 등 운영데이터를 적용하였으며, 그 중 수질 및 운영자료 14항목과 방류수질 5개의 일별자료를 선별하여 적용하였다.

기상 자료는 울산기상대 자료를 참조하여 강우량과 유입수량의 상관관계를 검토하였고 유입수량에 우수의 영향도 검토한 후 적용하였다.

3.2 울산 방어진하수처리장의 연구 방법

울산 방어진하수처리장의 공정은 유입수의 다양한 오염물질들을 처리하기 위한 생물학적, 화학적 반응에 의해 이루어지며 이는 방류수의 수질관리를 위해 매우 중요하다. 하수처리장의 유입수 수질은 강우량, 하수 유입 유량, 유입수의 오염 물질 부하량에 따라 변화하며 이들의 관계를 파악하기 위한 연구가 필요하다.

현재 울산 방어진하수처리장에서는 지역의 많은 관로를 통해 유입수가 들어오고 있는데 이를 관로마다 유입수의 수질 데이터를 얻을 수 없으며 한정된 유입위치의 수질 데이터만을 가지고 있기 때문에 통계적 유출수 예측

모델에서 인공 신경망 모델, 유전자 프로그래밍 모델, 뉴로 퍼지 모델을 적용하기에는 어려움이 있다. 방어진하수처리장의 유입수 수질데이터를 이용한 통계적 다중 회귀 분석을 통해 유출수 수질 데이터를 예측해보고자 한다. 방어진하수처리장의 실제 데이터의 회귀 분석을 위해 미니탭 (Minitab Inc. Release 15) 프로그램을 이용하였다. 미니탭을 이용한 다중 회귀 분석법은 종속변수와 하나 이상의 독립변수로 구성되며 그 관계를 표본으로부터 추정하여 수학적 모형을 만들어 이를 이용해 종속변수를 예측하는 방법이다.

자료를 탐색하고 회귀분석을 수행해 예를 들어 $Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k$ 라는 수학적 모형을 만들어 모형을 검토해 반응 인자를 예측을 할 수 있다. 모형을 검토하는 과정에서는 인자를 추가하거나 삭제할 수도 있다. 미니탭 회귀 분석의 결과 그래프 기울기가 0이 아니면 반응인자 X와 Y간에는 관계가 존재한다는 뜻이며 R-sq(R^2)는 변동에 대한 회귀모형의 설명 정도를 나타낸다. 미니탭 프로그램의 단계적 회귀분석(stepwise)과 RSM(반응표면법) 회귀분석을 통해 하수처리장 유출수의 예측값을 비교해 보았다.

3.2.1 단계적 회귀분석법을 이용한 다변량 회귀분석 모델

본 논문에서는 단계적 회귀 분석을 위해 2017년 방어진하수처리장의 자료를 이용해 표 3.1과 표 3.2와 같이 독립변수 14개, 유출수 종속변수 5개를 선정하였다.

Table 3.1 Stepwise regression analysis independent variables

항 목	독립변수
X1	Qin(유입유량)
X2	Tempin(유입수 수온)
X3	BODin(유입수 BOD)
X4	CODin(유입수 COD)
X5	SSin(유입수 SS)
X6	T-Nin(유입수 T-N)
X7	T-Pin(유입수 T-P)
X8	Qw(잉여슬러지)
X9	Alum(응집제)
X10	MLSS
X11	HRT
X12	SRT
X13	F/M
X14	BODLoad(용적부하)

Table 3.2 Stepwise regression analysis Dependent variable

종속변수				
유출수 BOD	유출수 COD	유출수 SS	유출수 T-N	유출수 T-P

다중 회귀분석을 이용하면 독립변수의 개별적인 주효과(main effect)와 그것들의 교호작용의 효과에 대한 유의성을 평가할 수 있다. 그러나, 이러한 과정에서 집합을 구성하고 있는 독립변수의 개수가 많아지게 되면 그 주효과와 교호작용에 대한 조합의 수 역시 많아지게 된다. 아울러 그에 따른 모형의 비교 또한 다양한 각 경우에 대하여 복잡하게 이루어져야 하므로, 유의성 평가를 효율적으로 수행할 필요성이 대두된다. 이러한 효율적인 분석을 수행하기 위해, 본 연구에서는 적절한 회귀모형의 구축을 위해 일반적으로 사용되는 단계적 변수 선택 방법을 적용하였다(Neter J 1996; Bowerman BL 1990; Vittinghoff E 2005). 먼저, 종속변수에 영향력이 큰 독립변수를 하나씩 선형회귀모형에 추가해 가는데, 이렇게 독립변수들이 추가된 선형모형에서 특정한 독립변수가 종속변수에 유의한 영향을 미치지 못하면 이 독립변수를 선형회귀모형에서 제외시킨다. 이러한 방법을 최적의 모형을 구성할 때까지 계속 반복하는 것이다.

미니탭(Minitab Inc. Release 15) 프로그램을 이용하여 지금까지 기술한 단계적 회귀분석 방법을 실제 자료에 적용하여 분석하였다.

3.2.2 반응표면법을 이용한 다변량 회귀분석 모델

반응표면법(response surface methods, RSM)은 2차 모형의 추정과 최적화에 사용되는 방법으로 단계적 회귀분석에 사용된 14개의 독립변수 중에서 표3.3 과 같이 상관도가 높은 10개의 독립변수를 반응표면법에 의한 회귀분석에 사용하였다. 반응표면법을 통한 결과는 분산분석을 통해 유의성을 검토하였다. 분산분석은 특성치의 분포를 제곱합으로 나타내 이것을 관련된 요인별 제곱합으로 분해해 각각의 오차의 자유도로 나누어 계산된 분산과 오차항의 분산을 비교해 큰 분산을 가지고 있는 쪽을 규명하는 분석이다. 분산분석은 독립변수들과 종속변수간의 상관관계의 유의성을 통해 모델의 정확성을 평가한다.(이지아, 2008)

Table 3.3 Response surface regression analysis independent variables

항 목	독립변수
X1	Qin(유입유량)
X2	Tempin(유입수 수온)
X3	BODin(유입수 BOD)
X4	CODin(유입수 COD)
X5	T-Nin(유입수 T-N)
X6	T-Pin(유입수 T-P)
X7	Alum(응집제)
X8	MLSS
X9	HRT
X10	SRT

Table 3.4 Response surface regression analysis Dependent variables

종속변수				
유출수 BOD	유출수 COD	유출수 SS	유출수 T-N	유출수 T-P

IV. 결과 및 결과분석

4.1 단계적 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수의 예측 모델

방어진 하수처리장의 2017년 1월부터 12월까지 측정된 유입수 수온, 유입 유량, 유입수의 BOD, COD, SS, T-N, T-P, 잉여슬러지, 응집제, MLSS(미생물농도), HRT, SRT(체류시간), F/M, BOD Load(용적부하)를 독립변수로 하여 유출수의 BOD, COD, SS, T-N, T-P를 예측하는 단계적 회귀 분석을 해 보았다. 단계적 회귀 분석을 통해 회귀분석 방정식을 도출해 실제 유출수와 예측된 유출수 값을 비교 분석해 보고 이를 시계열 자료로도 나타내었다. 시계열(time series) 자료는 시간에 따라 변화하는 현상을 기록한 자료이며, 과거의 자료를 가지고 미래의 값을 예측한다(김병균 외, 2007).

4.1.1 단계적 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 BOD 농도 예측 모델

Table 4.1 BOD step-by-step regression analysis results of Ulsan Bangujin sewage treatment plant

단계	1	2	3	4	5	6	7	8	9
상수	4.125	2.547	1.546	1.589	2.428	1.934	-1.0414	-0.0765	5.36114
Tempin	-0.0738	-0.0753	-0.0826	-0.0782	-0.0801	-0.0854	-0.0811	-0.0800	-0.0789
T-Value	-17.36	-18.25	-18.82	-17.26	-17.88	-18.07	-17.10	-16.75	-16.39
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CODin		0.0153	0.0195	0.0272	0.0283	0.0256	0.0233	0.0247	0.0235
T-Value		5.03	6.21	7.03	7.42	6.62	6.08	6.33	5.90
P-Value		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
F/M			6.3	7.3	12.6	14.5	37.8	38.0	37.9
T-Value			4.21	4.90	6.15	6.87	6.17	6.22	6.20
p-Value			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SSin				-0.0063	-0.0081	-0.0063	-0.0059	-0.0056	-0.0053
T-Value				-3.32	-4.21	-3.22	-3.04	-2.89	-2.76
P-Value				0.001	0.000	0.000	0.003	0.004	0.006
Qin					-0.0138	-0.0176	-0.0110	-0.0149	-0.0461
T-Value					-3.69	-4.55	-2.67	-3.17	-2.28
P-Value					0.000	0.000	0.008	0.002	0.023
MLSS						0.00029	0.00140	0.00128	0.00127
T-Value						3.20	4.85	4.30	4.27
P-Value						0.001	0.000	0.000	0.000
BODload							-10.5	-9.6	-9.3
T-Value							-4.05	-3.66	-3.55
P-Value							0.000	0.000	0.000
BODin								-0.0045	-0.0050
T-Value								-1.71	-1.88
P-Value								0.088	0.060
HRT									-0.28
T-Value									-1.58
P-Value									0.114
S	0.352	0.341	0.333	0.328	0.323	0.318	0.311	0.311	0.310
R-sq	46.19	49.82	52.24	53.71	55.46	56.74	58.70	59.05	59.35
R-sq(adj)	46.04	49.53	51.83	53.18	54.82	55.99	57.86	58.10	58.28
Mallows Cp	107.6	78.8	60.3	49.8	37.0	28.1	13.4	12.5	12.0

표 4.1 에서 단계적 회귀분석 결과 R-Sq는 59.35%, R-Sq(adj)는 58.28%이다. R-sq는 회귀식의 선형성을 나타내는 결정계수로 종속변수의 전체 변동 중에서 회귀모형에 의하여 설명된 변동의 비율을 말한다. 결정계수가 1에 가까울수록 좋은 모형이라 할 수 있으며 결정계수는 독립변수가 많을수록 자연히 증가하는 경향이 있어 이를 보완하기 위해 수정결정계수 R-Sq(adj)를 사용한다(강선해, 2013). 회귀 변수는 다음 표 4.2 와 같다.

Table 4.2 Stepwise regression analysis BOD regression variable

예측변수	Coef	SE_Coef	T	P
상 수	5.361	3.586	1.49	0.136
Tempin	-0.078944	0.004815	-16.39	0.000
CODin	0.023470	0.003977	5.90	0.000
F/M	37.860	6.103	6.20	0.000
SSin	-0.005333	0.001930	-2.76	0.006
Qin	-0.04612	0.02025	-2.28	0.023
MLSS	0.0012659	0.0002968	4.27	0.000
BODLoad	-9.340	2.634	-3.55	0.000
BODin	-0.005026	0.002668	-1.88	0.060
HRT	-0.2790	0.1762	-1.58	0.114

이는 BOD값을 추정하는 회귀분석 방정식으로 나타 낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{BODeff} = & 5.36 - 0.0789 \text{ Tempin} + 0.0235 \text{ CODin} + 37.9 \text{ F/M} \\
 & - 0.00533 \text{ SSin} - 0.0461 \text{ Qin} + 0.00127 \text{ MLSS} - 9.34 \text{ BODLoad} \\
 & - 0.00503 \text{ BODin} - 0.279 \text{ HRT}
 \end{aligned}$$

Table 4.3 BOD dispersion analysis of stepwise regression analysis

출처	DF	SS	MS	F	P
회귀분석	9	48.0993	5.3444	55.64	0.000
잔차오차	343	32.9474	0.0961		
전체	352	81.0467			

※ DF(자유도) , SS(제곱합) , MS(평균제곱), F(F비=MSR / MSE),
P(Prob > F)

분산비 F값은 회귀식에 의해 설명되는 변동(MSR)과 회귀식에 의해 설명되지 않은 변동(MSE)의 비로 값이 커질수록 회귀식의 신뢰도가 높은 것으로 판단되며, F-통계량의 유의확률 P값이 유의수준 0.05보다 작을 때 회귀식이 유의하다고 판단한다(강선해, 2013).

표 4.3에서 F(F비)가 회귀분석 DF(자유도) 9 와 잔차오차 DF(자유도) 343 사이에 있으므로 Null 가설은 기각되고 회귀 분석의 유입수 BOD자료는 적합하며 P값이 0으로 유의수준 0.05보다 작으므로 BOD 단계적 회귀분석 모델은 예측성이 있다고 본다.

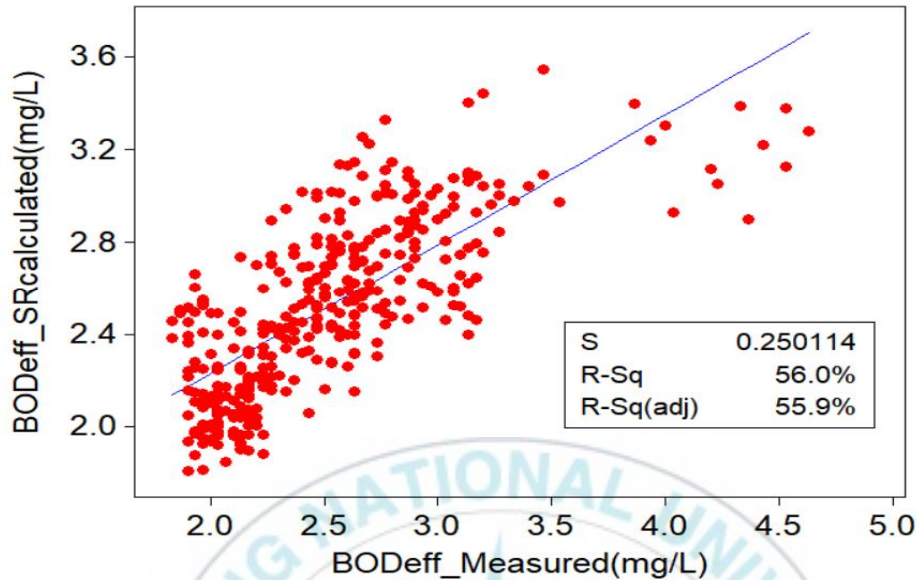


Fig 4.1 Stepwise regression analysis BOD Fitted line Plot

그림 4.1은 단계적 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 BOD값과 실제 유출수 BOD값의 관계를 표현한 것이다. 방정식의 결정계수 R-Sq는 56.0%, 수정결정계수 R-Sq(adj)는 55.9%이다. 고도처리 공정 A₂O로 운전중인 대구 북부 하수처리장의 운전데이터로 예측 모델을 구성해 인공지능망 기법과 유전자 프로그래밍 기법, 뉴로 퍼지 기법으로 유출수 BOD를 예측한 연구에서는 결정계수 R-Sq가 각각 52.9%, 51.2%, 53.0%였다 (한국과학기술원, 2009). 대구 하수처리장의 유출수 예측 분석에는 2007년 1월 2일부터 12월 31일까지의 364개 운전데이터(BOD, COD, SS, TN, TP) 중에서 200개를 인공지능 모델 훈련에 사용하였고 나머지 164개를 모델 훈련을 통해 구성된 모델 검증에 사용하였다. 모델 검증 기간 중에 실제 데이터보다 약간씩 높게 예측하는 경향을 보여 실제 운전데이터 365개를 단계적 회귀 분석에 적용한 본 연구와 차이를 보였다.

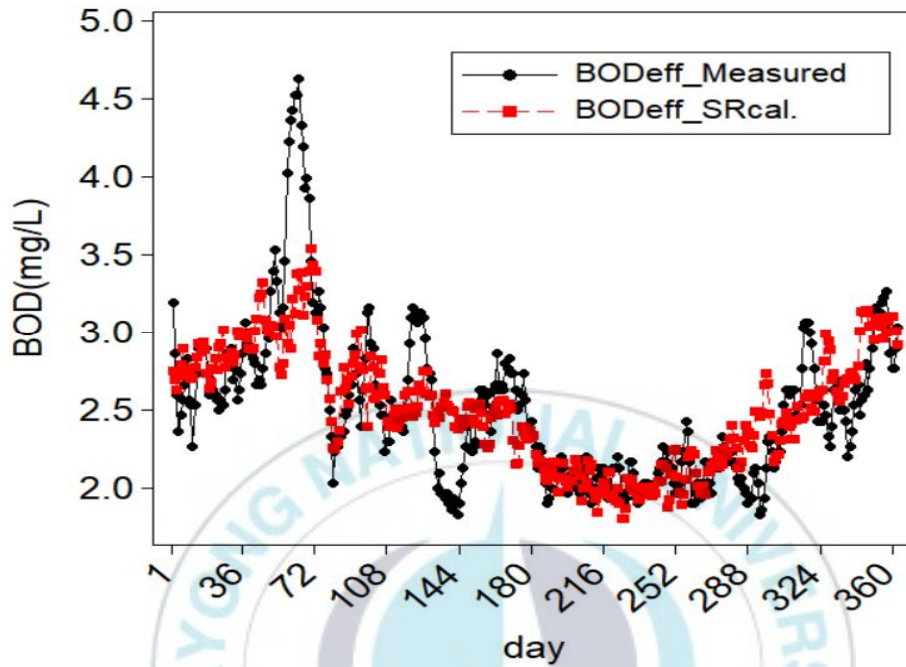


Fig 4.2 Stepwise regression analysis BOD time series

그림 4.2는 단계적 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 BOD값과 실제 유출수 BOD값을 시간에 따라 표현한 것이다. 실제 유출수 값이 급변하는 구간에서는 계산된 유출수 BOD값과의 차이가 있다. 이는 유입수의 정상 중 9개 항목을 독립변수로 계산된 유출수의 BOD값이 실제 공정에서의 유입수의 다른 성장요인으로 인해 급격하게 변화한 BOD값을 예측하지 못했다고 볼 수 있다. 유출수 BOD값의 신뢰성을 높이기 위해 다른 항목을 추가적으로 회귀분석 모델에 적용하는 것을 고려해 볼 필요가 있다.

4.1.2 단계적 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 COD 농도 예측 모델

Table 4.4 COD step-by-step regression analysis results of Ulsan
Bangujin sewage treatment plant

단계	1	2	3	4	5	6	7	8
상수	14.422	11.040	5.100	3.963	6.323	6.426	6.408	7.962
Tempin	-0.148	-0.205	-0.219	-0.213	-0.224	-0.217	-0.226	-0.232
T-Value	-12.43	-18.42	-20.73	-20.79	-20.85	-19.91	-19.97	-19.73
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
BODLoad		14.4	16.6	12.9	17.6	18.1	17.4	18.0
T-Value		11.95	14.25	9.66	8.72	8.99	8.69	8.90
P-Value		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CODin			0.0528	0.0438	0.0424	-0.0346	0.0388	0.0441
T-Value			7.34	6.11	5.98	4.52	4.45	4.71
p-Value			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MLSS				0.0014	0.00086	0.00089	0.00113	0.00105
T-Value				5.12	3.63	3.79	4.54	4.18
P-Value				0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Qin					-0.0296	-0.0281	-0.0240	-0.0309
T-Value					-3.08	-2.94	-2.50	-3.02
P-Value					0.002	0.004	0.013	0.003
Alum						0.00011	0.00012	0.00013
T-Value						2.58	2.78	2.97
P-Value						0.010	0.006	0.003
SRTB17							-0.049	-0.048
T-Value							-2.74	-2.72
P-Value							0.006	0.007
T-N inB17								-0.038
T-Value								-1.87
P-Value								0.063
S	0.990	0.835	0.779	0.752	0.743	0.737	0.730	0.728
R-sq	30.58	50.69	57.29	60.28	61.33	62.06	62.87	63.24
R-sq (adj)	30.35	50.41	56.92	59.82	60.77	61.40	62.12	62.39
Mallows Cp	297.0	111.8	52.4	26.6	18.8	14.0	8.5	7.0

단계적 회귀분석 결과 R-Sq = 63.24%, R-Sq(adj) = 62.39%이다. 회귀 변수는 다음 표 4.5 와 같다.

Table 4.5 Stepwise regression analysis COD regression variable

예측변수	Coef	SE Coef	T	P
상수	4.985	1.419	3.51	0.000
TempinB17	-0.22447	0.01231	-18.24	0.000
BODLoadB17	11.091	1.761	6.30	0.000
CODinB17	0.042275	0.009883	4.28	0.000
MLSSB17	0.0016186	0.0002419	6.69	0.000
QinB17	-0.000181	0.009574	-0.02	0.985
AlumB17	0.00008589	0.00004637	1.85	0.065
SRTB17	-0.06402	0.01879	-3.41	0.001
T-NinB17	-0.01536	0.02116	-0.73	0.468

이는 COD값을 추정하는 회귀분석 방정식으로 나타 낼 수 있다.

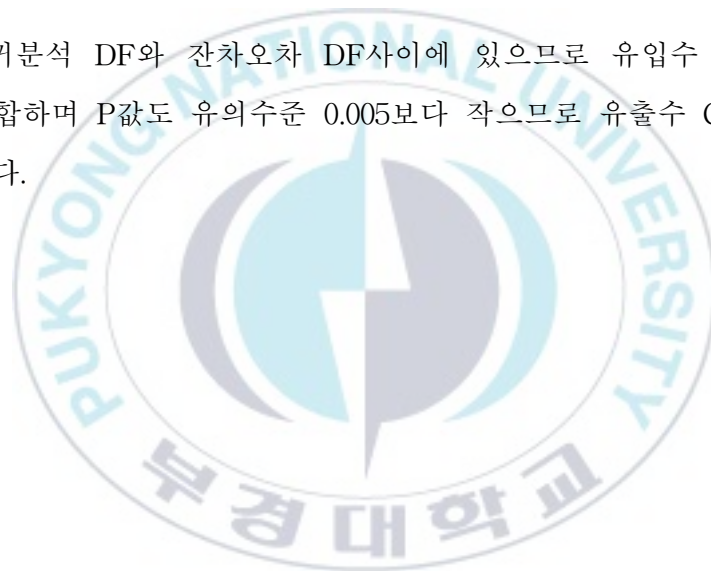
$$\begin{aligned}
 \text{CODEffB17} = & 4.98 - 0.224 \text{ Tempin} + 11.1 \text{ BODLoad} + 0.0423 \text{ CODinB} \\
 & + 0.00162 \text{ MLSS} - 0.00018 \text{ Qin} + 0.000086 \text{ Alum} - 0.0640 \text{ SRT} \\
 & - 0.00154 \text{ T-Nin}
 \end{aligned}$$

Table 4.6 COD dispersion analysis of stepwise regression analysis

출처	DF	SS	MS	F	P
회귀분석	8	312.353	39.044	64.53	0.000
잔차오차	354	214.191	0.605		
전체	362	526.544			

※ DF(자유도) , SS(제곱합) , MS(평균제곱), F(F비=MSR / MSE),
P(Prob > F)

F값이 회귀분석 DF와 잔차오차 DF사이에 있으므로 유입수 COD자료는
분석에 적합하며 P값도 유의수준 0.005보다 작으므로 유출수 COD를 예측
에 적합하다.



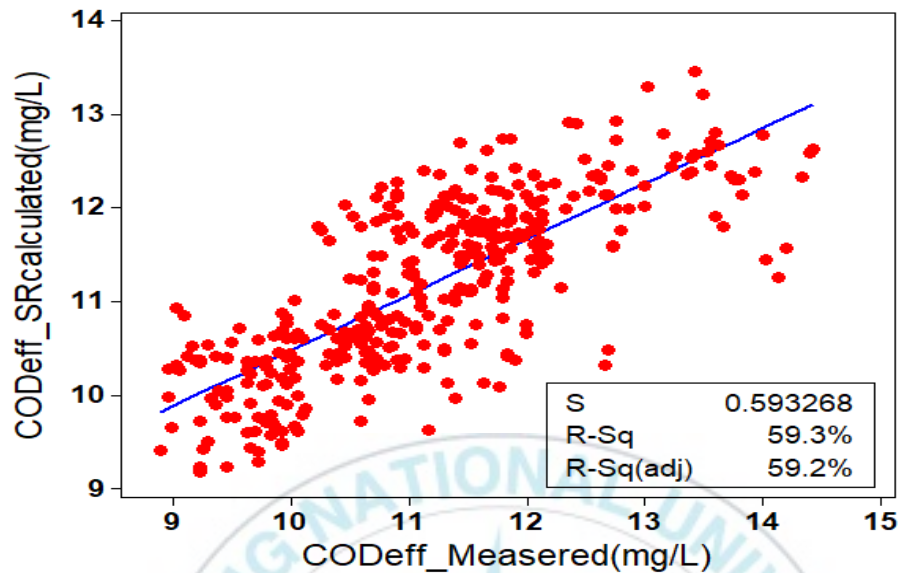


Fig 4.3 Stepwise regression analysis COD Fitted line Plot

그림 4.3 은 단계적 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 COD값과 실제 유출수 COD값의 관계를 표현한 것이다. 방정식의 결정계수 R-Sq는 59.3%, 수정결정계수 R-Sq(adj)는 59.2%이다. 인공신경망기법과 유전자 프로그래밍 기법, 뉴로 퍼지 기법으로 A₂O공정의 대구 북부 하수처리장 유출수 COD를 예측한 연구(한국과학기술원, 2009)에서는 R-Sq가 각각 28.2%, 28.6%, 29.1%였으며 하수처리장 방류수 수질을 예측하기 위해 다중회귀 분석 모델에서 단계적 회귀분석을 이용한 연구(민상윤 외, 2012)에서는 일차침전지 유입부터 이차침전지 유출까지의 생물반응조 공정을 대상으로 2차 침전지 유출수의 COD 예측 모형의 R-Sq는 67.2%였으며 변수 선택법을 적용하지 않은 경우의 R-Sq는 70.9%였다. 생물반응조 공정만을 대상으로 예측 모델을 구축하였으므로 전체 공정을 대상으로 예측 모델을 구성한 본 연구 결과보다 결정계수가 높다.

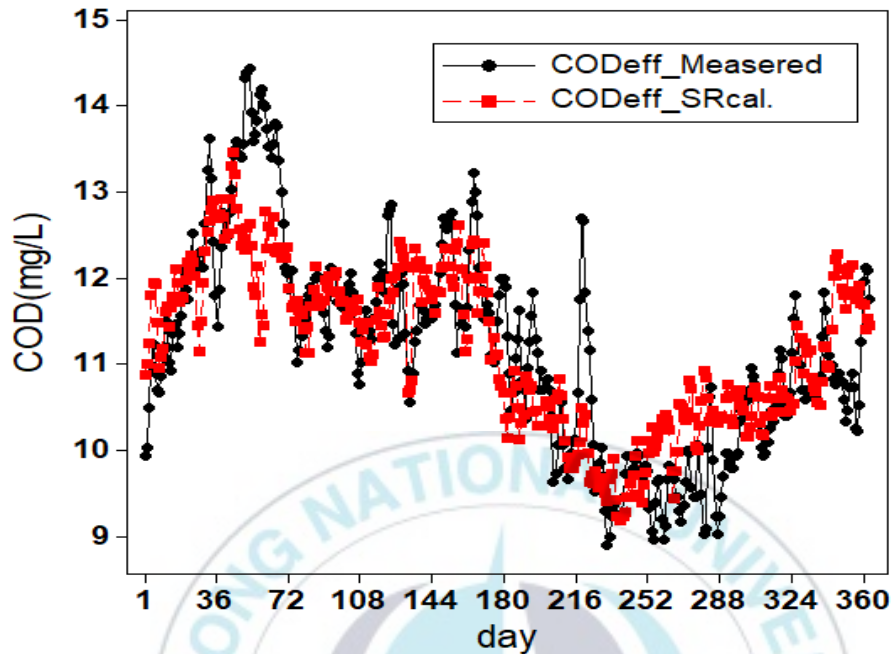


Fig 4.4 Stepwise regression analysis COD time series

그림 4.4는 계산된 유출수 COD값과 실제 유출수 COD값을 시간에 따라 표현한 것으로 변화 거동이 유사하며 분석된 예측 모델이 예측 정확도가 높다고 볼 수 있다. 실측치와 관측치의 차이를 줄이고 예측 신뢰성을 높이기 위해 추가적으로 다른 운전데이터를 회귀분석 모델에 적용할 필요가 있다. 또한 실제 공정 운전시 유출수 BOD와 COD 값을 안정적으로 얻기 위해서는 생물학적 공정에서 MLSS와 SRT 제어가 중요하므로 향후 현장에서의 효율적인 공정 운전이 필요하다.

4.1.3 단계적 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 SS 농도 예측 모델

Table 4.7 SS step-by-step regression analysis results of Ulsan
Bangujin sewage treatment plant

단계	1	2	3	4	5	6	7
상수	4.7723	3.0954	1.6777	0.4918	0.8098	11.7229	12.61
Tempin	-0.0954	-0.1010	-0.1021	-0.1103	-0.1128	-0.1103	-0.1103
T-Value	-17.49	-19.15	-19.71	-19.66	-19.36	-18.79	-18.85
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MLSS		0.00065	0.00062	0.00067	0.00074	0.00077	0.00077
T-Value		6.10	5.89	6.46	6.59	6.90	6.88
P-Value		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CODin			0.0146	0.0188	0.0181	0.0157	0.0208
T-Value			3.85	4.80	4.60	3.90	4.16
p-Value			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
F/M				6.6	9.5	10.2	10.8
T-Value				3.52	3.57	3.82	4.02
P-Value				0.000	0.000	0.000	0.000
Qin					-0.0077	-0.0710	-0.075
T-Value					-1.53	-2.73	-2.90
P-Value					0.126	0.007	0.004
HRTB17						-0.58	-0.60
T-Value						-2.48	-2.58
P-Value						0.013	0.010
T-Pin							-0.17
T-Value							-1.71
P-Value							0.088
S	0.452	0.431	0.422	0.416	0.415	0.412	0.411
R-sq	46.58	51.72	53.68	55.27	55.57	56.35	56.72
R-sq (adj)	46.43	51.44	53.28	54.76	54.93	55.59	55.84
Mallows Cp	79.5	40.2	26.5	15.7	15.3	11.1	10.1

단계적 회귀분석 결과 $R-Sq = 56.72\%$, $R-Sq(adj) = 55.84\%$ 이다. 이를 바탕으로 우선순위 6 개의 독립변수로 SS를 회귀분석하면 회귀 변수는 다음 표 4.8 과 같다.

Table 4.8 Stepwise regression analysis SS regression variable

예측변수	Coef	SE Coef	T	P
상수	0.9181	0.7250	1.27	0.206
TempinB17	-0.111486	0.006232	-17.89	0.000
MLSSB17	0.0006348	0.0001200	5.29	0.000
CODinB17	0.023136	0.005382	4.30	0.000
F/MB17	3.653	2.554	1.43	0.153
QinB17	0.001540	0.005098	0.30	0.763
T-PinB17	-0.1026	0.1103	-0.93	0.353

이는 SS값을 추정하는 회귀 분석 방정식으로 나타 낼 수 있다.

$$SS_{effB17} = 0.918 - 0.111 \text{ Tempin} + 0.000635 \text{ MLSS} + 0.0231 \text{ CODin} \\ + 3.65 \text{ F/M} + 0.00154 \text{ Qin} - 0.103 \text{ T-Pin}$$

Table 4.9 SS dispersion analysis of stepwise regression analysis

출처	DF	SS	MS	F	P
회귀분석	6	81.537	13.590	66.98	0.000
잔차오차	356	72.228	0.203		
전체	362	153.765			

※ DF(자유도) , SS(제곱합) , MS(평균제곱), F(F비=MSR / MSE),
P(Prob > F)

F(F비)는 회귀분석 DF(자유도) 6 과 잔차오차 DF(자유도) 356 사이에 있으므로 Null 가설은 기각되었다. 모델의 유의성 검증인 P값은 0으로 유의수준 0.05보다 낮기 때문에 회귀 분석에 유입수 SS자료는 적합하며 SS 단계적 회귀분석 모델은 예측성이 있다.

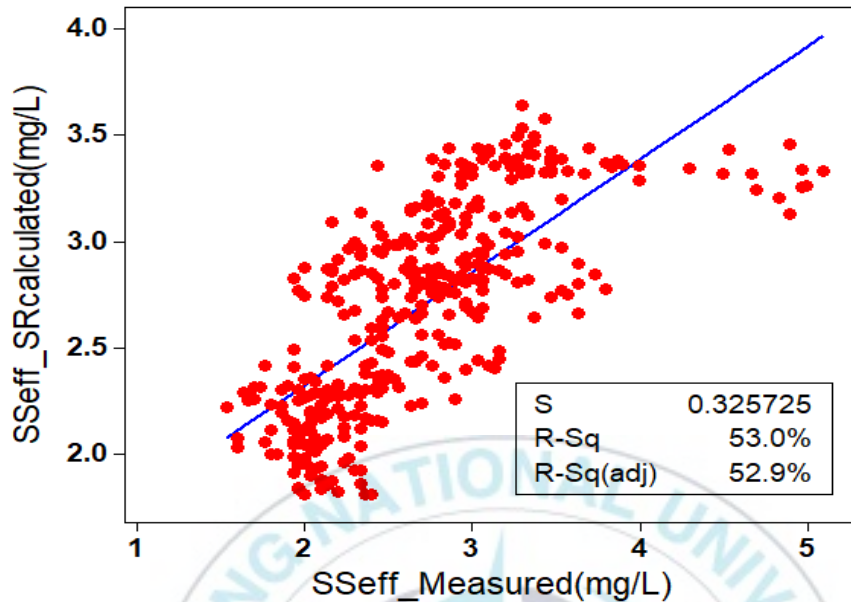


Fig 4.5 Stepwise regression analysis SS Fitted line Plot

그림 4.5 는 단계적 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 SS값과 실제 유출수 SS값의 관계를 표현한 것이다. 방정식의 결정계수 R-Sq는 53.0%, 수정 결정계수 R-Sq(adj)는 52.9%이다. R-Sq가 53.0%로 Minitap 프로그램을 이용해 남부하수처리장의 유입수 SS를 단계적 회귀 분석한 연구(김종각, 2013)에서 예측된 SS의 R-Sq값 52.0%보다 상관성이 더 양호하였다. A₂O 공정의 의성 하수처리장의 유출수 SS를 인공 신경망 기법과 유전자 프로그래밍 기법, 뉴로 퍼지 기법으로 예측한 모델의 R-Sq는 20.5%, 19.0%, 20.2%였다(한국과학기술원, 2009). 의성 하수처리장의 2007년 유입수 실측 데이터에 하루전 유출수의 BOD, COD, SS, T-N, T-P값을 입력변수로 인공지능 모델로 유출수의 SS를 예측한 결과값이 실제 SS값보다 시간에 따른 변동이 큰 경향을 보였다. A₂O공정은 탈질화와 하수의 인 제거에는 효과적이거나 단위공정별 조작이 복잡하며 낮은 기온에서 처리 효율이 떨어지므로 안정적인 유출수 데이터 값을 얻기 위한 공정 운전 개선이 필요하다.

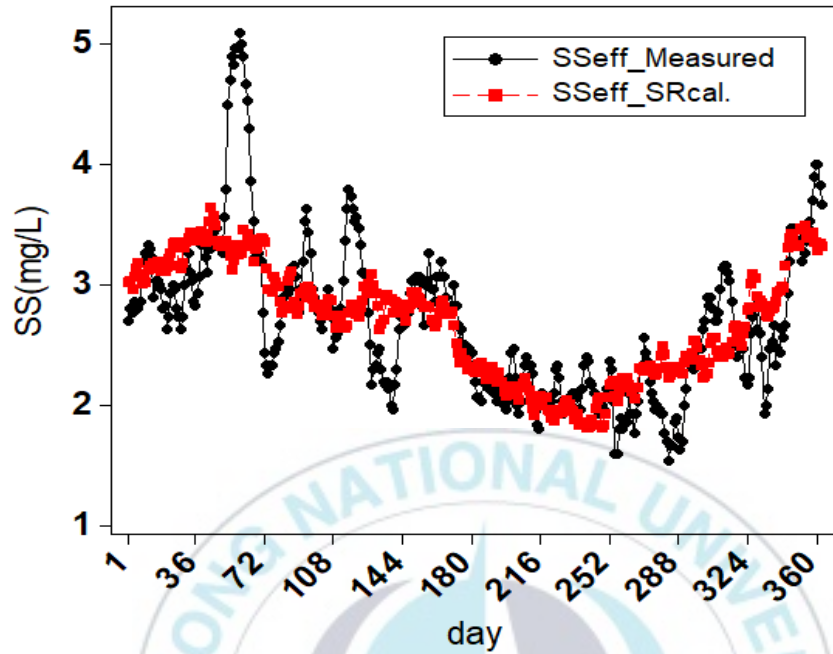


Fig 4.6 Stepwise regression analysis SS time series

그림 4.6 은 단계적 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 SS값과 실제 유출수 SS값을 시간에 따라 표현한 것이다. 유입유량이 낮은 봄철에는 실제 유입수의 COD, T-P의 수질측정값이 높아 이를 바탕으로 단계적 회귀 분석의 예측 유출수 SS값이 실제 유출수 SS값보다 높은 경향은 있다.

4.1.4 단계적 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 T-N 농도

예측 모델

Table 4.10 T-N step-by-step regression analysis results of Ulsan Bangujin sewage treatment plant

단계	1	2	3	4	5	6	7
상수	9.876	13.855	13.559	14.065	11.596	11.021	10.89
Tempin	-0.1168	-0.1094	-0.0986	-0.1023	-0.0997	-0.0796	-0.072
T-Value	-13.22	-13.48	-11.27	-11.46	-11.18	-8.31	-6.95
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Qin		-0.0451	-0.0293	-0.0315	-0.0245	-0.0187	-0.0194
T-Value		-8.45	-3.97	-4.24	-3.13	-2.43	-2.52
P-Value		0.000	0.000	0.000	0.002	0.015	0.012
F/M			-12.0	-12.9	-13.1	-12.5	-10.7
T-Value			-3.07	-3.29	-3.38	-3.33	-2.73
p-Value			0.002	0.001	0.001	0.001	0.007
Alum				-0.00007	-0.00010	-0.00012	-0.00011
T-Value				-1.93	-2.69	-3.35	-2.95
P-Value				0.054	0.007	0.001	0.003
T-Nin					0.038	0.163	0.169
T-Value					2.60	5.54	5.73
P-Value					0.0010	0.000	0.000
T-Pin						-1.27	-1.12
T-Value						-4.84	-4.03
P-Value						0.000	0.000
SSin							-0.0077
T-Value							-1.77
P-Value							0.078
S	0.733	0.669	0.661	0.658	0.653	0.633	0.631
R-sq	33.23	44.55	46.01	46.58	47.60	50.93	51.37
R-sq (adj)	33.04	44.23	45.55	45.97	46.85	50.08	50.38
Mallows Cp	127.5	48.7	40.3	38.2	32.9	11.2	10.1

표 4.10 에서 단계적 회귀분석 결과 $R-Sq = 51.37\%$, $R-Sq(adj) = 50.38\%$ 이다. 회귀 변수는 다음 표 4.11 과 같다.

Table 4.11 Stepwise regression analysis T-N regression variable

예측변수	Coef	SE Coef	T	P
상수	10.898	1.062	10.26	0.000
TempinB17	-0.07329	0.01034	-7.08	0.000
QinB17	-0.019497	0.007118	-2.74	0.006
F/MB17	-10.299	3.409	-3.02	0.003
AlumB17	-0.00009962	0.00003682	-2.71	0.007
T-NinB17	0.16238	0.02928	5.55	0.000
T-PinB17	-1.0460	0.2752	-3.80	0.000
SSinB17	-0.008079	0.004314	-1.87	0.062

이는 T-N 값을 추정하는 회귀분석 방정식으로 나타 낼 수 있다.

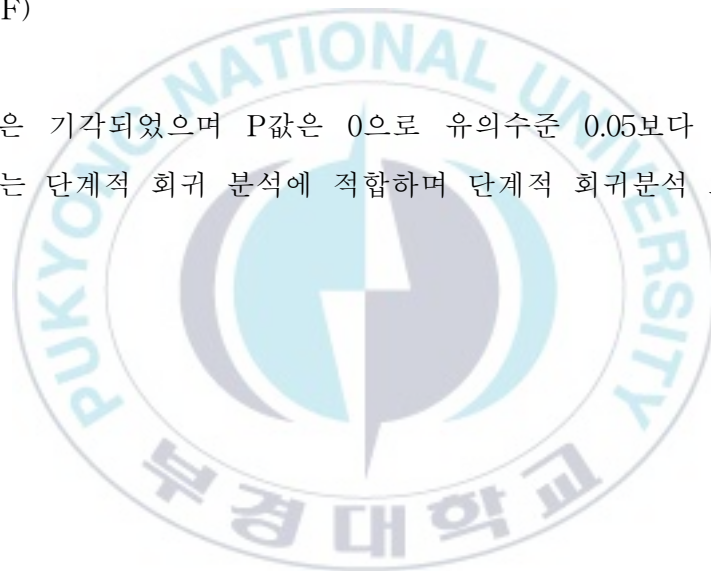
$$T-N_{\text{eff}} = 10.9 - 0.0733 \text{ Tempin} - 0.0195 \text{ Qin} - 10.3 \text{ F/M} \\ - 0.000100 \text{ Alum} + 0.162 \text{ T-N} - 1.05 \text{ T-Pin} - 0.00808 \text{ SSin}$$

Table 4.12 T-N dispersion analysis of stepwise regression analysis

출처	DF	SS	MS	F	P
회귀분석	7	147.350	21.050	52.92	0.000
잔차오차	355	141.204	0.398		
전체	362	288.554			

※ DF(자유도) , SS(제곱합) , MS(평균제곱), F(F비=MSR / MSE),
P(Prob > F)

Null 가설은 기각되었으며 P값은 0으로 유의수준 0.05보다 작다.유입수
T-N 자료는 단계적 회귀 분석에 적합하며 단계적 회귀분석 모델은 예측
성이 있다.



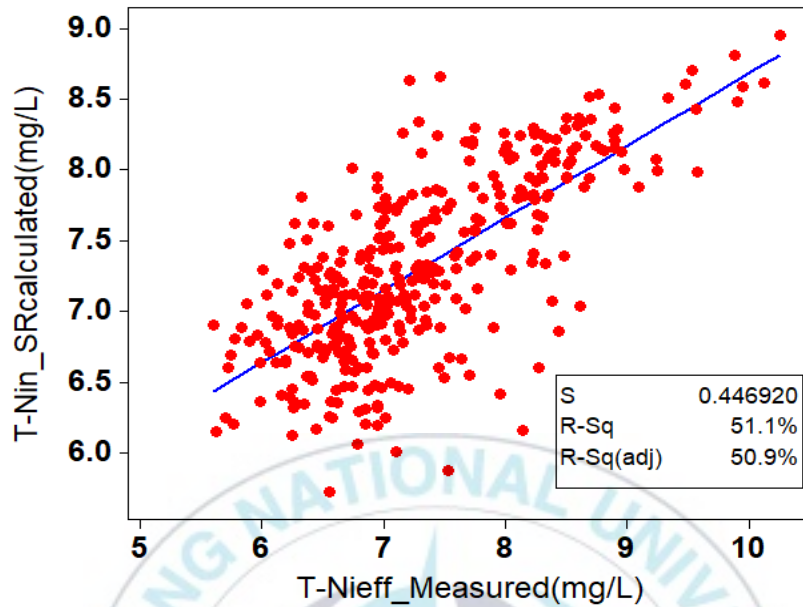


Fig 4.7 Stepwise regression analysis T-N Fitted line Plot

그림 4.7 은 단계적 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 T-N값과 실제 유출수 T-N값의 관계를 표현한 것이다. 방정식의 결정계수 R-Sq는 51.1%, R-Sq(adj)는 50.9 %이다. 일차침전지 유입부터 이차침전지 유출까지의 생물반응조 공정을 대상으로 단계적 회귀 분석을 통해 2차 침전지 유출수를 예측한 연구(민상윤 외, 2012)에서는 2차 침전지 유출수의 T-N 예측 모델의 결정계수 R-Sq는 77.7%였으며 변수 선택법을 적용하지 않은 경우의 R-Sq는 77.5%였다.

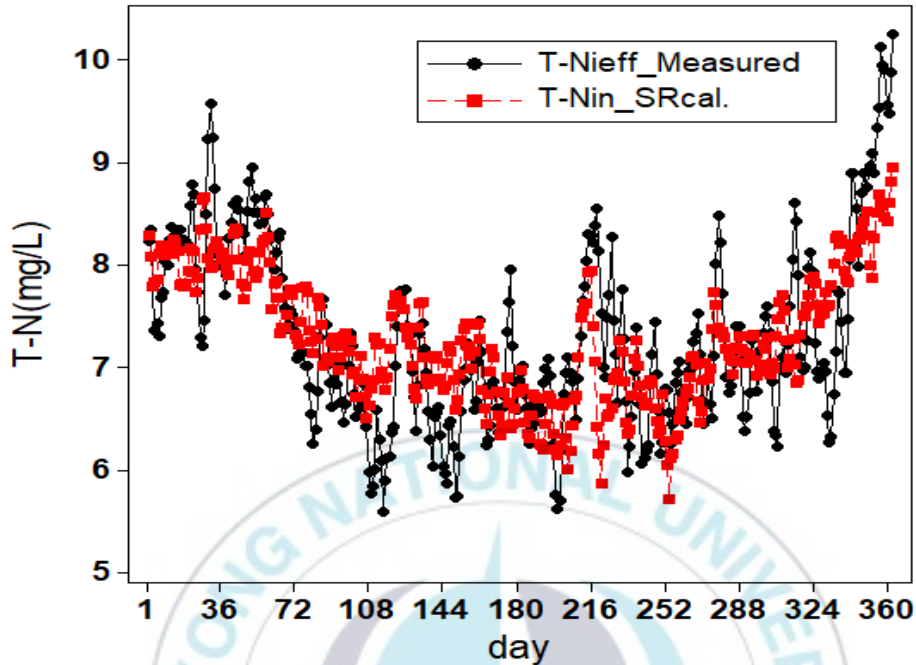


Fig 4.8 Stepwise regression analysis T-N time series

그림 4.8 은 단계적 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 T-N값과 실제 유출수 T-N값을 시간에 따라 표현한 것이다. 어느 정도는 정확하게 예측하고 있으나 계산된 유출수 T-N값보다 실제 관측된 유출수 T-N값이 시간에 따른 변동이 크다. 방어진 하수처리장이 사용중인 MLE 공정은 호기구역에서 무산소구역으로 더 많은 질산성 질소를 주입하기 위해 원래의 Ludzack-Ettinger 설계를 개량해 내부반송을 함으로써 탈질율과 총질소 제거효율을 증가시켰다. MLE 공정은 기존 활성 슬러지공정에 적용이 쉬우며 T-N을 10mg/L 이하의 농도로 처리가 수월하다(박정수, 2019). 방어진 하수처리장의 유출수 T-N 설계기준 8.6mg/L 보다 낮은 유출수 T-N값으로 공정을 운전하고 있으나 좀 더 안정적인 유출수 값을 얻기 위해서는 질산화가 저하되는 겨울철에 충분한 체류 시간을 확보하는 것이 중요하다.

4.1.5 단계적 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 T-P 농도
예측 모델

Table 4.13 T-P step-by-step regression analysis results of Ulsan
Bangujin sewage treatment plant

단계	1	2	3	4	5	6
상수	0.3024	0.4828	0.4263	0.6039	0.5090	1.3985
Tempin	-0.00541	-0.00507	-0.00459	-0.00429	-0.00485	-0.00462
T-Value	-9.24	-8.96	-7.87	-7.38	-7.72	-7.25
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Qin		-0.00205	-0.00168	-0.00205	-0.00195	-0.00703
T-Value		-5.50	-4.34	-5.14	-4.91	-2.54
P-Value		0.000	0.000	0.000	0.000	0.012
Alum			0.00001	0.00001	0.00001	0.00001
T-Value			2.97	3.70	3.50	3.13
p-Value			0.003	0.000	0.001	0.002
T-Pin				-0.0302	-0.0339	-0.0362
T-Value				-3.32	-3.69	-3.91
P-Value				0.001	0.000	0.000
BODin					0.00068	0.00066
T-Value					2.28	2.20
P-Value					0.023	0.029
HRT						-0.047
T-Value						-1.85
P-Value						0.065
S	0.0485	0.0466	0.0461	0.0454	0.0452	0.0450
R-sq	19.56	25.96	27.78	30.00	31.02	31.70
R-sq (adj)	19.33	25.54	27.16	29.19	30.03	30.52
Mallows Cp	64.8	33.9	26.5	17.2	13.9	12.4

표 4.13에서 단계적 회귀분석 결과 $R-Sq = 29.5\%$, $R-Sq(adj) = 28.3\%$ 이며 회귀 변수는 다음 표 4.14 와 같다.

Table 4.14 Stepwise regression analysis T-P regression variable

예측변수	Coef	SE Coef	T	P
상수	1.1598	0.5028	2.31	0.022
TempinB17	-0.0049220	0.0006608	-7.45	0.000
QinB17	-0.005502	0.002860	-1.92	0.055
AlumB17	0.00000792	0.00000264	3.00	0.003
T-PinB17	-0.029148	0.009503	-3.07	0.002
BODinB17	0.0004218	0.0003085	1.37	0.172
HRTB17	-0.03405	0.02599	-1.31	0.191

이는 T-P 값을 추정하는 회귀분석 방정식으로 나타 낼 수 있다.

$$T-P_{eff} = 1.16 - 0.00492 \text{ Tempin} - 0.00550 \text{ Qin} + 0.000008 \text{ Alum} \\ - 0.0291 \text{ T-Pin} + 0.000422 \text{ BODin} - 0.0341 \text{ HRTB17}$$

Table 4.15 T-P dispersion analysis of stepwise regression analysis

출처	DF	SS	MS	F	P
회귀분석	6	0.327287	0.054548	24.82	0.000
잔차오차	356	0.782327	0.002198		
전체	362	1.109614			

※ DF(자유도) , SS(제곱합) , MS(평균제곱), F(F비=MSR / MSE),
P(Prob > F)

F(F비)가 회귀분석 DF(자유도) 6 과 잔차오차 DF(자유도) 356 사이에 있는 24.82로 Null 가설은 기각되어 회귀분석의 유의수 T-P값은 적합하다. P 값은 0으로 유의수준 0.05보다 작으므로 T-P 단계적 회귀분석 모델은 예 측성이 있다.

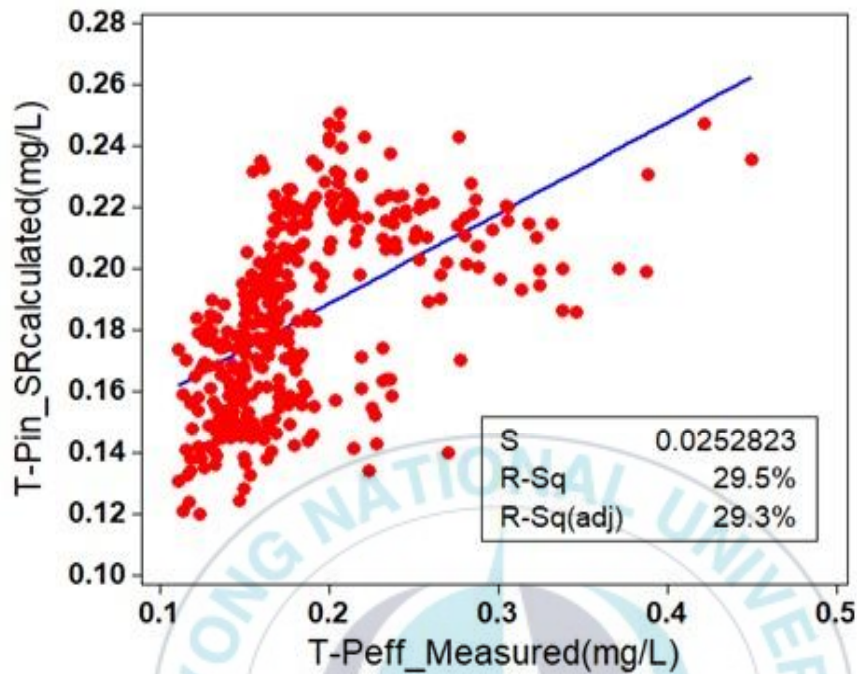


Fig 4.9 Stepwise regression analysis T-P Fitted line Plot

그림 4.9 는 단계적 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 T-P값과 실제 유출수 T-P 값의 관계를 표현한 것이다. 방정식의 결정계수 R-Sq는 29.5%, R-SQ(adj)는 29.3%로 앞서 BOD, COD, SS, T-N의 단계적 회귀 분석 방정식의 결정계수보다 낮은 값이다. 유출수 T-P값을 예측하는 회귀 방정식의 신뢰도는 낮다. 단계적 회귀 분석으로 유출수의 BOD, COD, SS, T-N을 예측하는 것은 성공하였으나 추후 더 많은 운전 데이터를 확보해 단계적 회귀 모델을 구성한다면 유출수 T-P의 예측성을 높일 수 있을 것이다.

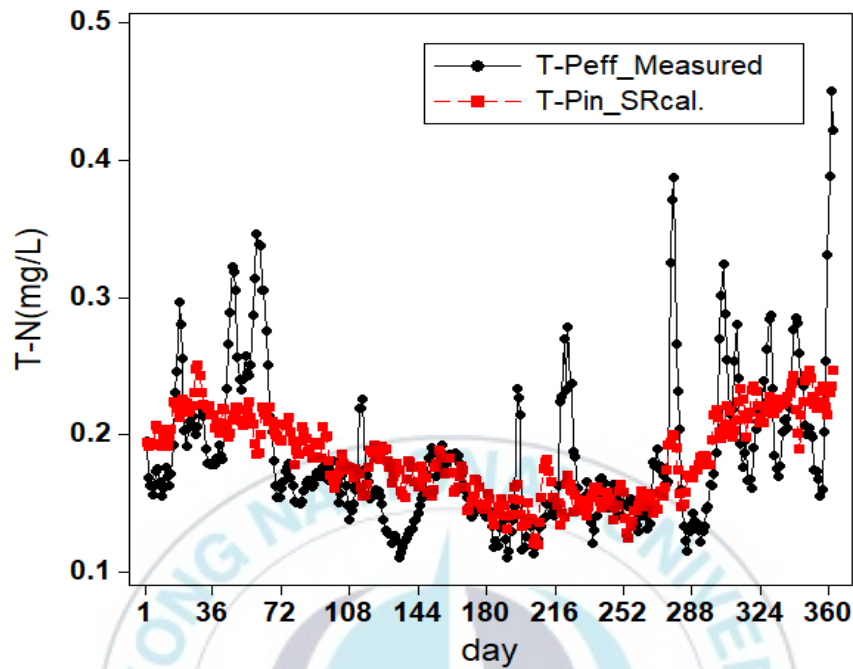
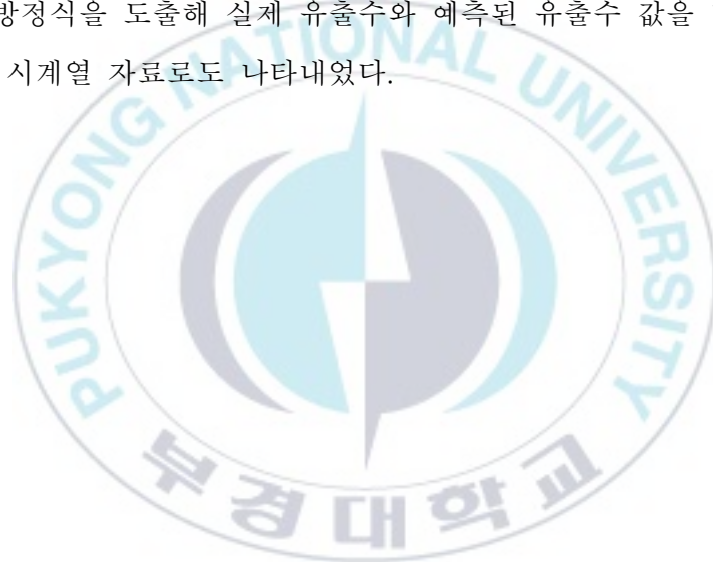


Fig 4.10 Stepwise regression analysis T-P time series

그림 4.10 은 계산된 유출수 T-P값과 실제 유출수 T-P값을 시간에 따라 표현한 것으로 계산된 유출수 T-P값보다 실제 유출수 T-P값이 일 변동성이 큰 경향을 보였다.

4.2 반응표면 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수의 예측 모델

방어진 하수처리장의 2017년 1월부터 12월까지 측정된 유입수 수온, 유입 유량, 유입수의 BOD, COD, T-N, T-P, 응집제, MLSS(미생물농도), HRT, SRT(체류시간)를 독립변수로 하여 유출수의 BOD, COD, SS, T-N, T-P를 예측하는 반응표면 회귀분석을 해 보았다. 반응표면 회귀분석을 통해 회귀분석 방정식을 도출해 실제 유출수와 예측된 유출수 값을 비교 분석해 보고 이를 시계열 자료로도 나타내었다.



4.2.1 반응표면 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 BOD 농도 예측 모델

Table 4.16 BOD Reaction Surface Regression Analysis of Ulsan
Bangujin Sewage Treatment Plant

	Term	Coef		Term	Coef
1	상수	-934.173	34	Tempin * T-Pin	0.208
2	Qin	8.684	35	Tempin * Alum	0
3	Tempin	-8.464	36	Tempin * MLSS	0
4	BODin	0.757	37	Tempin * HRT	0.457
5	CODin	2.931	38	Tempin * SRT	-0.004
6	T-Nin	-3.675	39	BODin * CODin	-0.001
7	T-Pin	22.743	40	BODin * T-Nin	0.003
8	Alum	-0.036	41	BODin * T-Pin	-0.016
9	MLSS	0.115	42	BODin * Alum	0
10	HRT	68.647	43	BODin * MLSS	0
11	SRT	1.599	44	BODin * HRT	-0.046
12	Qin*Qin	-0.019	45	BODin * SRT	0
13	Tempin * Tempin	-0.002	46	CODin * T-Nin	-0.003
14	BODin * BODin	0	47	CODin * T-Pin	-0.03
15	CODin * CODin	-0.001	48	CODin * Alum	0
16	T-Nin * T-Nin	-0.017	49	CODin * MLSS	0
17	T-Pin * T-Pin	-2.655	50	CODin * HRT	-0.129
18	Alum * Alum	0	51	CODin * SRT	-0.008
19	MLSS * MLSS	0	52	T-Nin * T-Pin	0.487
20	HRT * HRT	-1.102	53	T-Nin * Alum	0
21	SRT * SRT	-0.005	54	T-Nin * MLSS	0
22	Qin * Tempin	0.045	55	T-Nin * HRT	0.146
23	Qin * BODin	-0.005	56	T-Nin * SRT	0.008
24	Qin * CODin	-0.014	57	T-Pin * Alum	0
25	Qin * T-Nin	0.013	58	T-Pin * MLSS	-0.003
26	Qin * T-Pin	-0.043	59	T-Pin * HRT	-0.764
27	Qin * Alum	0	60	T-PinB17 * SRTB17	0.052
28	Qin * MLSS	-0.001	61	Alum * MLSS	0
29	Qin * HRT	-0.29	62	Alum * HRT	0.002
30	Qin * SRT	-0.013	63	Alum * SRT	0
31	Tempin * BODin	0.001	64	MLSS * HRT	-0.006
32	Tempin * CODin	-0.007	65	MLSS * SRT	0
33	Tempin * T-Nin	-0.007	66	HRT * SRT	-0.052

표 4.16 BOD의 반응표면 회귀분석결과는 다음과 같다.

$$S = 0.297907 \quad \text{PRESS} = 38.0392$$

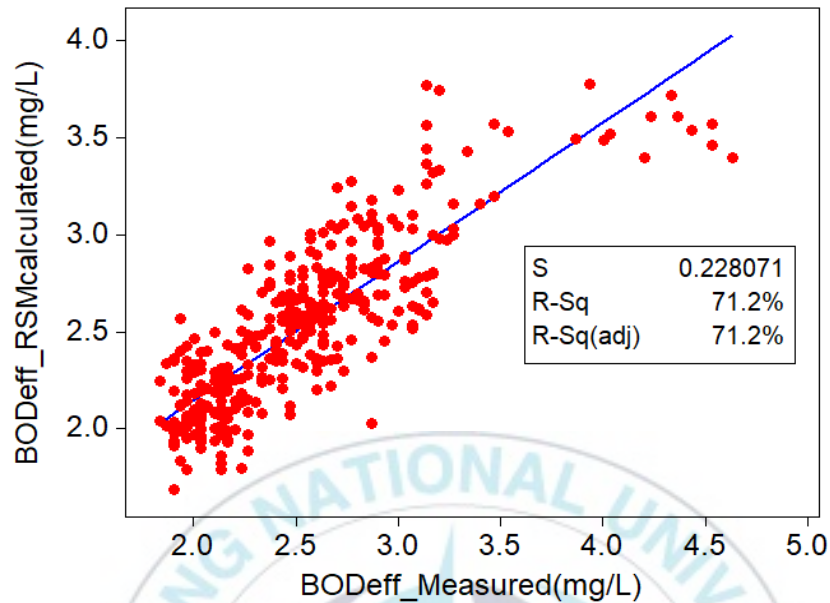
$$R\text{-Sq} = 71.24\% \quad R\text{-Sq(pred)} = 58.50\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 64.95\%$$

Table 4.17 BOD dispersion analysis of Response surface regression

출처	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
회귀분석	65	65.2934	65.2934	1.004514	11.32	0.000
선형	10	47.4080	2.3842	0.238419	2.69	0.004
제곱	10	3.0487	1.4393	0.143925	1.62	0.100
상호작용	45	14.8367	14.8367	0.329704	3.72	0.000
잔차오차	297	26.3584	26.3584	26.3584		
전체	362	91.6518				

※ DF(자유도) , SS(제곱합) , MS(평균제곱), F(F비=MSR / MSE),
P(Prob > F)

분산분석표에서 P값은 유의수준 0.05보다 작으므로 반응표면 회귀 분석의
유입수 BOD 자료는 높은 적합성을 보이며 BOD 반응표면 회귀분석 모델
은 유출수 BOD값을 예측하는데 예측성이 있다.



F i g

4.11 Response surface regression analysis BOD Fitted line Plot

그림 4.11 은 반응표면 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 BOD값과 실제 유출수 BOD 값의 관계를 표현한 것이다. 방정식의 결정계수 R-Sq는 71.2%, R-SQ(adj)는 71.2%로 반응모델이 적합성이 높은 것으로 판단되었다. 단계적 회귀분석의 BOD 방정식 결정계수 R-Sq 56.0%보다 높으며 Minitap 프로그램을 이용해 남부하수처리장의 유입수 BOD를 단계적 회귀 분석한 연구(김종각, 2013)에서 예측된 BOD의 R-Sq값 52.0%보다 상관성이 더 양호하였다. 단기 예측에 좋은 성능을 보인 시계열 모델 ARIMA를 이용해 과거 유입수 자료와 강수량으로 유입수 성상을 예측한 연구(김병균 외, 2007)에서는 유입수 성상을 예측해 실제 유입수 성상과 비교한 결과 1일 후 유입수 BOD 예측 R-Sq는 95.0%, 2일 후 예측 R-Sq는 77.9%로 본 연구의 유출수 성상 예측보다 상관성이 높았다.

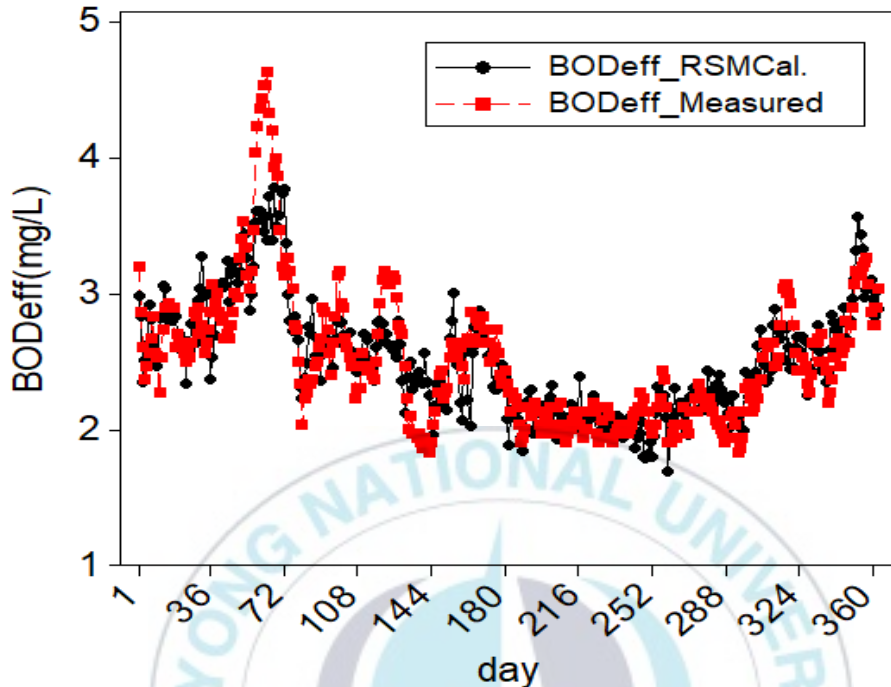


Fig 4.12 Response surface regression analysis BOD time series

그림 4.12 는 반응표면 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 BOD값과 실제 유출수 BOD값을 표현한 것으로 계산된 유출수 BOD값이 실제 유출수 BOD값을 잘 모사하고 있으나 자료의 값이 급변하는 구간에서는 독립 변수로 사용한 유입수의 자료 외의 다른 자료의 영향으로 변화하는 유입수를 예측하지 못한 것으로 본다. 국내 하수 종말처리시설의 설계 유입 BOD와 실제 운영치 BOD의 차이에 대한 연구(성남준, 2007)에서는 하수종말처리 시설의 전체 가동일수의 30%이상이 연평균 하수 유입률 및 유입BOD 이상으로 유입되었으며, 갈수기인 11월부터 3월까지의 하수유입률은 연평균 하수유입률에 비해 낮은 값을 나타내었고, 유입BOD는 연 평균 유입BOD에 비해 높은 값을 나타내었음이 연구 된 바 있다. 유입유량 및 오염 물질 농도 변화가 심한 하수의 특성에 적합한 공정 개선과 적용이 필요하다.

4.2.2 반응표면법 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 COD 농도 예측 모델

Table 4.18 COD Reaction Surface Regression Analysis of Ulsan
Bangujin Sewage Treatment Plant

	Term	Coef		Term	Coef
1	상수	91.626	34	Tempin * T-Pin	0.196
2	Qin	-2.491	35	Tempin * Alum	0.000
3	Tempin	-13.926	36	Tempin * MLSS	-0.000
4	BODin	-0.052	37	Tempin * HRT	0.696
5	CODin	1.239	38	Tempin * SRT	0.008
6	T-Nin	-9.578	39	BODin * CODin	-0.001
7	T-Pin	156.448	40	BODin * T-Nin	0.009
8	Alum	-0.031	41	BODin * T-Pin	-0.119
9	MLSS	0.136	42	BODin * Alum	-0.000
10	HRT	-50.185	43	BODin * MLSS	0.000
11	SRT	3.766	44	BODin * HRT	-0.011
12	Qin * Qin	0.012	45	BODin * SRT	-0.000
13	Tempin * Tempin	0.021	46	CODin * T-Nin	0.005
14	BODin * BODin	0.001	47	CODin * T-Pin	-0.166
15	CODin * CODin	0.002	48	CODin * Alum	0.000
16	T-Nin * T-Nin	-0.015	49	CODin * MLSS	0.000
17	T-Pin * T-Pin	-4.698	50	CODin * HRT	-0.094
18	Alum * Alum	-0.000	51	CODin * SRT	-0.025
19	MLSS * MLSS	0.000	52	T-Nin * T-Pin	0.697
20	HRT * HRT	2.621	53	T-Nin * Alum	0.000
21	SRT * SRT	-0.012	54	T-Nin * MLSS	-0.000
22	Qin * Tempin	0.068	55	T-Nin * HRT	0.216
23	Qin * BODin	-0.001	56	T-Nin * SRT	0.054
24	Qin * CODin	0.007	57	T-Pin * Alum	-0.000
25	Qin * T-Nin	0.036	58	T-Pin * MLSS	-0.003
26	Qin * T-Pin	-0.596	59	T-Pin * HRT	-4.712
27	Qin * Alum	0.000	60	T-Pin * SRT	-0.335
28	Qin * MLSS	-0.001	61	Alum * MLSS	-0.000
29	Qin * HRT	0.400	62	Alum * HRT	0.002
30	Qin * SRT	-0.025	63	Alum * SRT	0.000
31	Tempin * BODin	0.001	64	MLSS * HRT	-0.009
32	Tempin * CODin	-0.005	65	MLSS * SRT	0.001
33	Tempin * T-Nin	0.008	66	HRT * SRT	-0.132

표 4.18 의 COD의 반응표면 회귀분석결과는 다음과 같다.

$$S = 0.643435 \quad \text{PRESS} = 180.770$$

$$R\text{-Sq} = 76.65\% \quad R\text{-Sq}(\text{pred}) = 65.67\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 71.54\%$$

Table 4.19 COD dispersion analysis of Response surface regression

출처	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
회귀분석	65	403.583	403.583	6.20897	15.00	0.000
선형	10	294.884	8.263	0.82627	2.00	0.034
제곱	10	35.395	15.734	1.57339	3.80	0.000
상호작용	45	73.304	73.304	1.62898	3.93	0.000
잔차오차	297	122.960	122.960	0.41401		
전체	362	526.544				

※ DF(자유도) , SS(제곱합) , MS(평균제곱), F(F비=MSR / MSE),
P(Prob > F)

표 4.19 에서 F(F비)가 회귀분석 DF(자유도) 65 와 잔차오차 DF(자유도) 297 사이에 있으므로 Null 가설은 기각되고 P값은 유의수준 0.05보다 작다. 반응표면 회귀 분석의 유입수 COD 자료는 적합하며 COD 반응표면 회귀 분석 모델은 예측성이 있다고 본다.

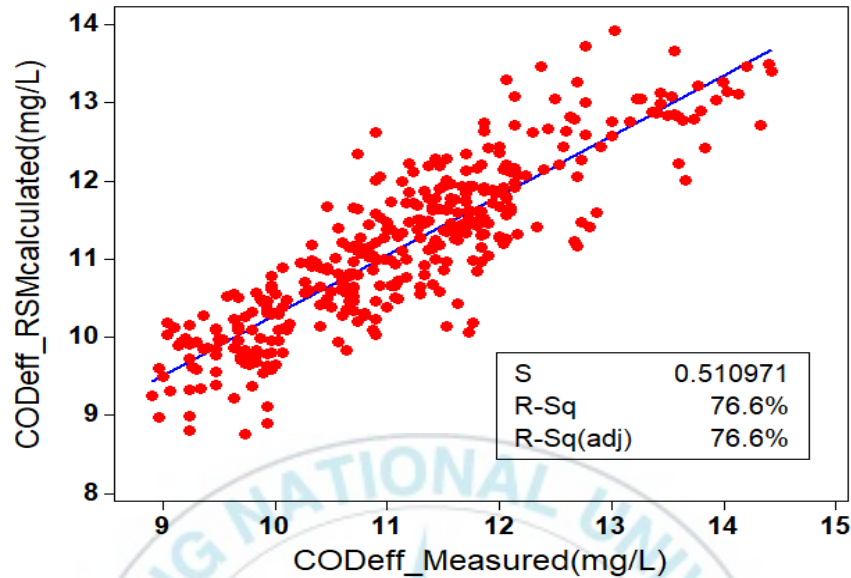


Fig 4.13 Response surface regression analysis COD Fitted line Plot

그림 4.13 은 계산된 유출수 COD값과 실제 유출수 COD 값의 관계를 표현한 것이다. 방정식의 결정계수 R-Sq는 76.6%, R-Sq(adj)는 76.6%이다. 단계적 회귀분석의 COD 방정식 결정계수 R-Sq 59.3%보다 높으며 Minitap 프로그램을 이용해 남부하수처리장의 유입수 COD를 단계적 회귀 분석한 연구(김종각, 2013)에서 예측된 COD의 R-Sq값 80.3%보다는 낮았다. 유입수를 시계열 모델을 이용해 예측한 연구(김병균 외, 2007)에서는 유입수 성상을 예측해 실제 유입수 성상과 비교한 결과 1일 후 유입수 COD 예측 R-Sq는 99.7%, 2일 후 예측 R-Sq는 69.2%였다. 2일 후 유입수 예측결과가 1일 후 유출수 예측 결과값보다 낮다는 것은 하수처리장의 유입수 일일 변동이 크다는 것을 의미한다. 예측성을 높이기 위해서는 일일 변동이 큰 유입수 성상에 맞는 효율적인 공정 운전과 추가 공정의 도입에 대한 연구가 필요하다.

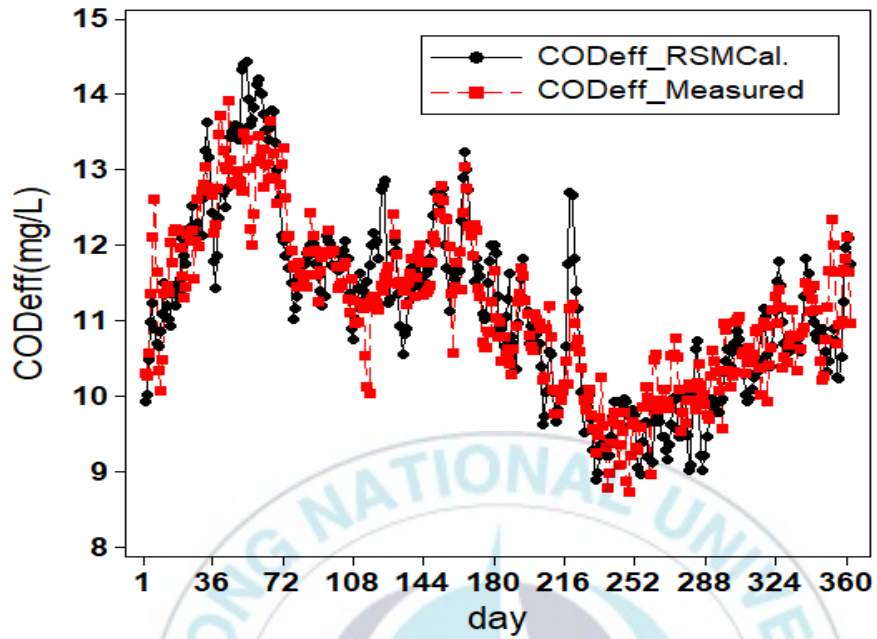


Fig 4.14 Response surface regression analysis COD time series

그림 4.14 는 반응표면 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 COD값과 실제 유출수 COD값을 시간에 따라 표현한 것으로 계산된 유출수 COD값과 실제 유출수 COD값의 변화거동이 유사하므로 반응표면 회귀 분석 모델의 예측 정확도는 높은 것으로 검토된다.

4.2.3 반응표면 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 SS농도 예측 모델

Table 4.20 SS Reaction Surface Regression Analysis of Ulsan
Bangujin Sewage Treatment Plant

	Term	Coef		Term	Coef
1	상수	-618.484	34	Tempin * T-Pin	0.096
2	Qin	7.143	35	Tempin * Alum	0.000
3	Tempin	-0.923	36	Tempin * MLSS	0.000
4	BODin	0.763	37	Tempin * HRT	0.058
5	CODin	-2.972	38	Tempin * SRT	-0.005
6	T-Nin	7.452	39	BODin * CODin	-0.001
7	T-Pin	-26.555	40	BODin * T-Nin	0.004
8	Alum	-0.024	41	BODin * T-Pin	-0.059
9	MLSS	0.080	42	BODin * Alum	-0.000
10	HRT	42.609	43	BODin * MLSS	-0.000
11	SRT	-0.282	44	BODin * HRT	-0.019
12	Qin * Qin	-0.022	45	BODin * SRT	0.000
13	Tempin * Tempin	0.004	46	CODin * T-Nin	0.011
14	BODin * BODin	-0.000	47	CODin * T-Pin	-0.128
15	CODin * CODin	-0.000	48	CODin * Alum	0.000
16	T-Nin * T-Nin	-0.02	49	CODin * MLSS	0.000
17	T-Pin * T-Pin	0.062	50	CODin * HRT	0.173
18	Alum * Alum	0.000	51	CODin * SRT	-0.002
19	MLSS * MLSS	-0.000	52	T-Nin * T-Pin	0.248
20	HRT * HRT	-0.871	53	T-Nin * Alum	0.000
21	SRT * SRT	-0.001	54	T-Nin * MLSS	0.000
22	Qin * Tempin	0.001	55	T-Nin * HRT	-0.437
23	Qin * BODin	-0.003	56	T-Nin * SRT	0.000
24	Qin * CODin	0.019	57	T-Pin * Alum	-0.000
25	Qin * T-Nin	-0.046	58	T-Pin * MLSS	-0.002
26	Qin * T-Pin	0.216	59	T-Pin * HRT	2.314
27	Qin * Alum	0.000	60	T-Pin * SRT	0.032
28	Qin * MLSS	-0.000	61	Alum * MLSS	-0.000
29	Qin * HRT	-0.295	62	Alum * HRT	0.001
30	Qin * SRT	-0.003	63	Alum * SRT	-0.000
31	Tempin * BODin	0.001	64	MLSS * HRT	-0.003
32	Tempin * CODin	-0.003	65	MLSS * SRT	0.000
33	Tempin * T-Nin	-0.012	66	HRT * SRT	0.034

표 4.20 의 SS의 반응표면 회귀분석결과는 다음과 같다.

$S = 0.410253$ $PRESS = 70.2225$

$R-Sq = 67.49\%$ $R-Sq(pred) = 54.33\%$ $R-Sq(adj) = 60.38\%$

Table 4.21 SS dispersion analysis of Response surface regression

출처	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
회귀분석	65	103.778	103.7777	1.596580	9.49	0.000
선형	10	82.183	2.1528	0.215281	1.28	0.241
제곱	10	6.411	2.8988	0.289880	1.72	0.075
상호작용	45	15.184	15.1835	0.337412	2.00	0.000
잔차오차	297	49.987	49.9875	0.168308		
전체	362	153.765				

※ DF(자유도) , SS(제곱합) , MS(평균제곱), F(F비=MSR / MSE),
P(Prob > F)

표 4.19 분산분석표에서 Null 가설은 기각되고 P값은 유의수준 0.05보다 작으므로 SS 반응표면 회귀분석 모델의 적합성과 예측성이 높은 것으로 판단된다.

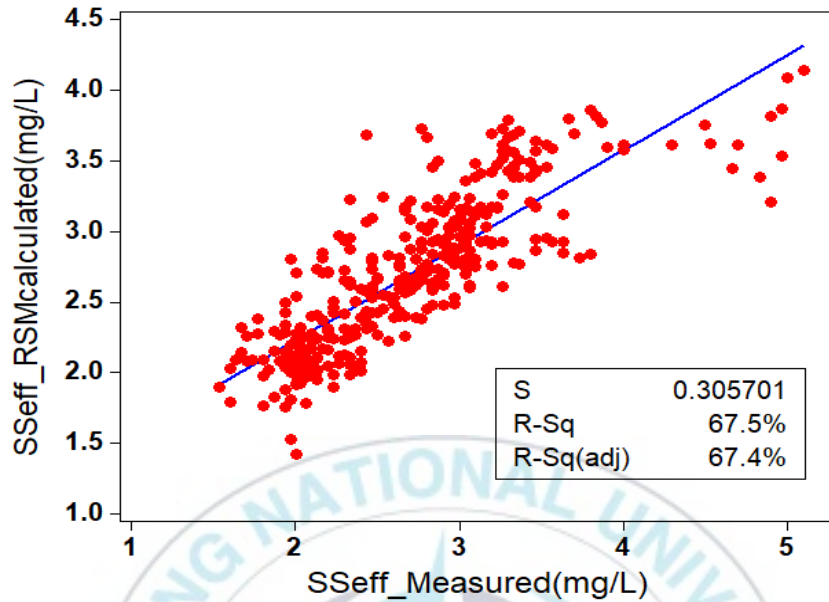


Fig 4.15 Response surface regression analysis SS Fitted line Plot

그림 4.15 는 반응표면 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 SS값과 실제 유출수 SS값의 관계를 표현한 것으로 방정식의 결정계수 R-Sq는 67.5%, R-Sq(adj)는 67.4%이다. 단계적 회귀분석의 SS 방정식 결정계수 R-Sq 53.0%보다 높으며 Minitap 프로그램을 이용해 남부하수처리장의 유입수 COD를 단계적 회귀 분석한 연구(김종각, 2013)에서 예측된 SS의 R-Sq값 52.0%보다 높아 상관성이 더 양호하였다.

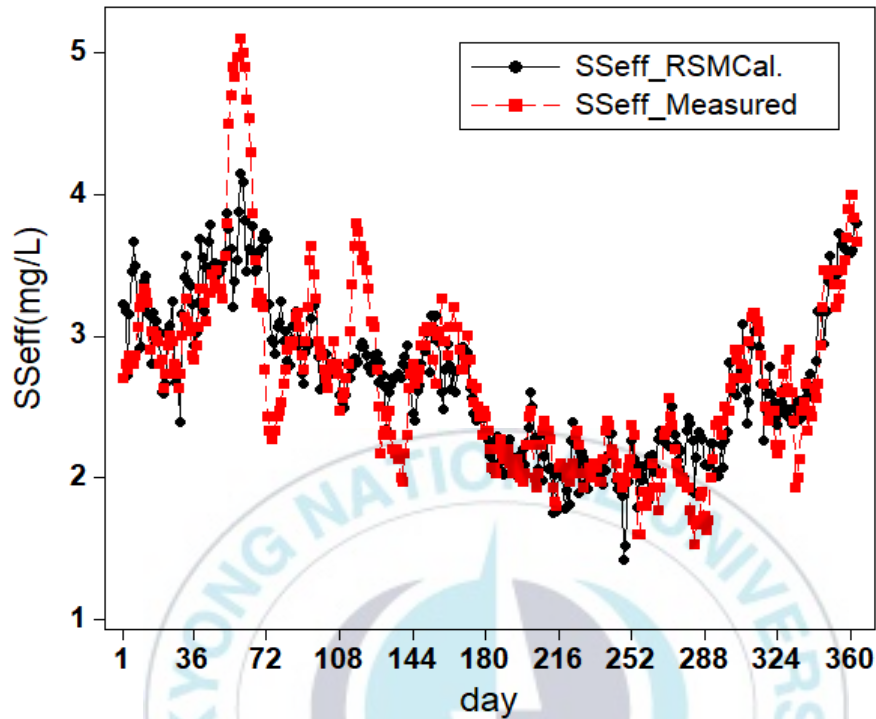


Fig 4.16 Response surface regression analysis SS time series

그림 4.16 은 반응표면 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 SS값과 실제 유출수 SS값을 시간에 따라 표현한 것이다. 일부 기간에서는 계산된 유출수 SS값이 실제 유출수 SS값을 초과하거나 불안정하지만 어느 정도 예측 경향이 정확하다고 판단된다. 수온이 상승하는 여름철에는 미생물의 활성도가 증가하여 Floc의 응집성이 향상되고 물의 비중이 감소함으로 BOD와 SS의 제거 효율이 상승하게 되어 실제 유출수 SS값이 낮은 경향을 보인다(서동섭, 2004).

4.2.4 반응표면법 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 T-N농도 예측 모델

Table 4.22 T-N Reaction Surface Regression Analysis of Ulsan
Bangujin Sewage Treatment Plant

	Term	Coef		Term	Coef
1	Constant	-1033.21	34	Tempin * T-Pin	-0.06
2	Qin	11.79	35	Tempin * Alum	-0.00
3	Tempin	-3.78	36	Tempin * MLSS	-0.00
4	BODin	-1.18	37	Tempin * HRT	0.20
5	CODin	-0.91	38	Tempin * SRT	0.01
6	T-Nin	7.01	39	BODin * CODin	-0.00
7	T-Pin	-77.29	40	BODin * T-Nin	-0.00
8	Alum	0.01	41	BODin * T-Pin	0.04
9	MLSS	0.15	42	BODin * Alum	-0.00
10	HRT	110.89	43	BODin * MLSS	0.00
11	SRT	0.66	44	BODin * HRT	0.05
12	Qin*Qin	-0.03	45	BODin * SRT	0.00
13	Tempin * Tempin	0.02	46	CODin * T-Nin	0.01
14	BODin * BODin	0.00	47	CODin * T-Pin	-0.01
15	CODin * CODin	-0.00	48	CODin * Alum	-0.00
16	T-Nin * T-Nin	0.01	49	CODin * MLSS	0.00
17	T-Pin * T-Pin	0.75	50	CODin * HRT	0.09
18	Alum * Alum	0.00	51	CODin * SRT	0.01
19	MLSS * MLSS	0.00	52	T-Nin * T-Pin	-0.13
20	HRT * HRT	-2.84	53	T-Nin * Alum	-0.00
21	SRT * SRT	0.01	54	T-Nin * MLSS	-0.00
22	Qin * Tempin	0.02	55	T-Nin * HRT	-0.43
23	Qin * BODin	0.01	56	T-Nin * SRT	0.05
24	Qin * CODin	0.01	57	T-Pin * Alum	0.00
25	Qin * T-Nin	-0.04	58	T-Pin * MLSS	0.00
26	Qin * T-Pin	0.42	59	T-Pin * HRT	3.58
27	Qin * Alum	-0.00	60	T-Pin * SRT	-0.39
28	Qin * MLSS	-0.00	61	Alum * MLSS	-0.00
29	Qin * HRT	-0.61	62	Alum * HRT	-0.00
30	Qin * SRT	-0.01	63	Alum * SRT	-0.00
31	Tempin * BODin	-0.00	64	MLSS * HRT	-0.01
32	Tempin * CODin	-0.01	65	MLSS * SRT	-0.00
33	Tempin * T-Nin	0.02	66	HRT * SRT	-0.09

표 4.22 의 T-N의 반응표면 회귀분석결과는 다음과 같다.

$$S = 0.413921 \quad \text{PRESS} = 75.6377$$

$$R\text{-Sq} = 82.37\% \quad R\text{-Sq}(\text{pred}) = 73.79\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 78.51\%$$

Table 4.23 T-N dispersion analysis of Response surface regression

출처	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
회귀분석	65	237.669	237.6689	3.656445	21.34	0.000
선형	10	145.333	7.2560	0.725597	4.24	0.000
제곱	10	49.469	7.4025	0.740253	4.32	0.000
상호작용	45	42.857	42.8669	0.952598	5.56	0.000
잔차오차	297	50.885	50.8852	0.171331		
전체	362	288.554				

※ DF(자유도) , SS(제곱합) , MS(평균제곱), F(F비=MSR / MSE),
P(Prob > F)

표 4.19 분산분석표에서 반응표면 회귀 분석의 유입수 T-N 자료는 적합성을 가지며 T-N 반응표면 회귀분석 모델은 예측성이 있다고 판단된다.

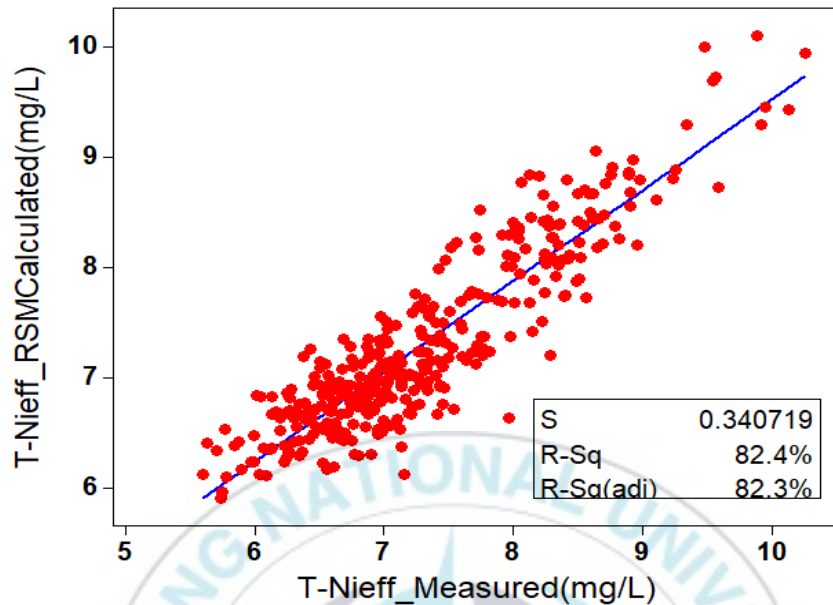


Fig 4.17 Response surface regression analysis T-N Fitted line Plot

그림 4.17은 반응표면 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 T-N값과 실제 유출수 T-N값의 관계를 표현한 것이다. 방정식의 결정계수 R-Sq는 82.4%, R-Sq(adj)는 82.3%이다. 단계적 회귀분석의 T-N 방정식 결정계수 R-Sq 51.1%보다 높으며 Minitap 프로그램을 이용해 남부하수처리장의 유입수 T-N을 단계적 회귀 분석한 연구(김종각, 2013)에서 예측된 T-N의 R-Sq값 81.8%보다 높아 상관성이 더 양호하였다. 시계열 모델을 이용한 연구(김병균 외, 2007)에서는 유입수 성상을 예측해 실제 유입수 성상과 비교한 결과 1일 후 유입수 T-N 예측 R-Sq는 94.2%, 2일 후 예측 R-Sq는 68.1% 였다.

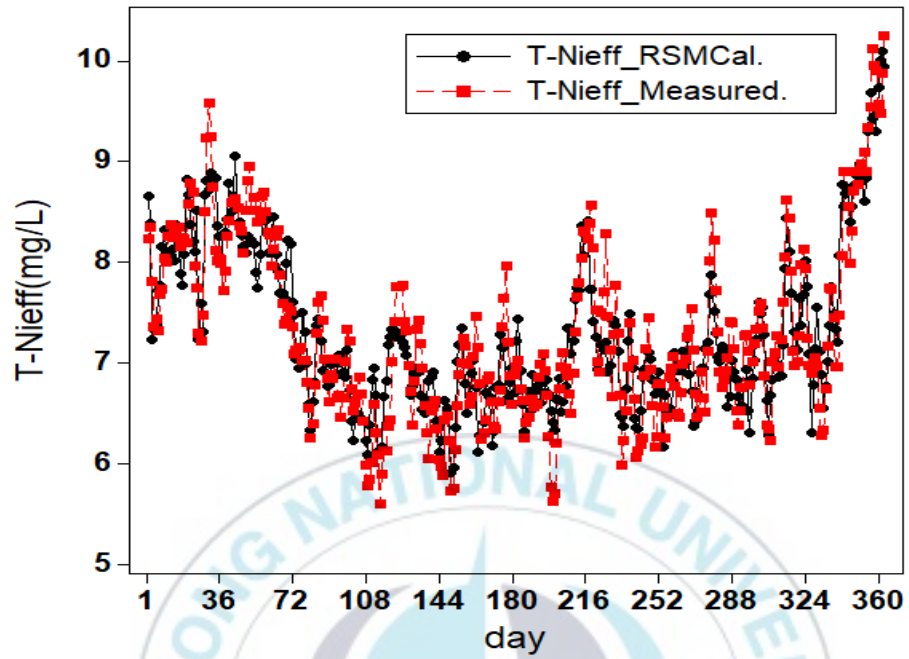


Fig 4.18 Response surface regression analysis T-N time series

그림 4.18 는 반응표면 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 T-N값과 실제 유출수 T-N값을 표현한 것으로 실제 유출수 T-N값을 잘 예측하는 경향을 보인다.

4.2.5 반응표면법 회귀분석에 의한 하수처리장 유출수 T-P농도 예측 모델

Table 4.24 T-P Reaction Surface Regression Analysis of Ulsan
Bangujin Sewage Treatment Plant

	Term	Coef		Term	Coef
1	상수	-58.9099	34	Tempin * T-Pin	0.0050
2	Qin	0.4306	35	Tempin * Alum	-0.0000
3	Tempin	0.0979	36	Tempin * MLSS	0.0000
4	BODin	0.0657	37	Tempin * HRT	-0.0108
5	CODin	-0.0568	38	Tempin * SRT	0.0002
6	T-Nin	-0.0575	39	BODin * CODin	0.0000
7	T-Pin	-2.5026	40	BODin * T-Nin	0.0004
8	Alum	0.0030	41	BODin * T-Pin	-0.0072
9	MLSS	0.0197	42	BODin * Alum	-0.0000
10	HRT	3.4768	43	BODin * MLSS	0.0000
11	SRT	-0.4815	44	BODin * HRT	-0.0028
12	Qin * Qin	-0.0006	45	BODin * SRT	0.0004
13	Tempin * Tempin	0.0008	46	CODin * T-Nin	0.0008
14	BODin * BODin	0.0000	47	CODin * T-Pin	-0.0077
15	CODin * CODin	0.0000	48	CODin * Alum	-0.0000
16	T-Nin * T-Nin	-0.0004	49	CODin * MLSS	0.0000
17	T-Pin * T-Pin	-0.1197	50	CODin * HRT	0.0025
18	Alum * Alum	0.0000	51	CODin * SRT	-0.0003
19	MLSS * MLSS	0.0000	52	T-Nin * T-Pin	0.0257
20	HRT * HRT	-0.0059	53	T-Nin * Alum	0.0000
21	SRT * SRT	0.0016	54	T-Nin * MLSS	-0.0000
22	Qin * Tempin	-0.0007	55	T-Nin * HRT	-0.0133
23	Qin * BODin	-0.0005	56	T-Nin * SRT	0.0006
24	Qin * CODin	0.0003	57	T-Pin * Alum	-0.0000
25	Qin * T-Nin	-0.0006	58	T-Pin * MLSS	-0.0002
26	Qin * T-Pin	0.0277	59	T-Pin * HRT	0.2626
27	Qin * Alum	-0.0000	60	T-Pin * SRT	0.0001
28	Qin * MLSS	-0.0001	61	Alum * MLSS	-0.0000
29	Qin * HRT	-0.0058	62	Alum * HRT	-0.0002
30	Qin * SRT	0.0022	63	Alum * SRT	-0.0000
31	Tempin * BODin	0.0002	64	MLSS * HRT	-0.0011
32	Tempin * CODin	-0.0003	65	MLSS * SRT	0.0000
33	Tempin * T-Nin	-0.0003	66	HRT * SRT	0.01905

표 4.24 의 T-P의 반응표면 회귀분석 결과는 다음과 같다.

$S = 0.0376665$ $PRESS = 0.671364$

$R-Sq = 62.03\%$ $R-Sq(pred) = 39.50\%$ $R-Sq(adj) = 53.71\%$

Table 4.25 T-P dispersion analysis of Response surface regression

출처	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
회귀분석	65	0.68824	0.688240	0.010588	7.46	0.000
선형	10	0.33123	0.024017	0.002402	1.69	0.082
제곱	10	0.09934	0.036420	0.003642	2.57	0.005
상호작용	45	0.25767	0.257670	0.005726	4.04	0.000
잔차오차	297	0.42137	0.421374	0.001419		
전체	362	1.10961				

※ DF(자유도) , SS(제곱합) , MS(평균제곱), F(F비=MSR / MSE),
P(Prob > F)

표 4.19 에서 F(F비)가 회귀분석 DF(자유도) 65 와 잔차오차 DF(자유도) 297 사이에 있으므로 Null 가설은 기각되고 반응표면 회귀 분석의 유입수 T-P 자료는 적합하며 T-P 반응표면 회귀분석 모델은 예측성이 있다.

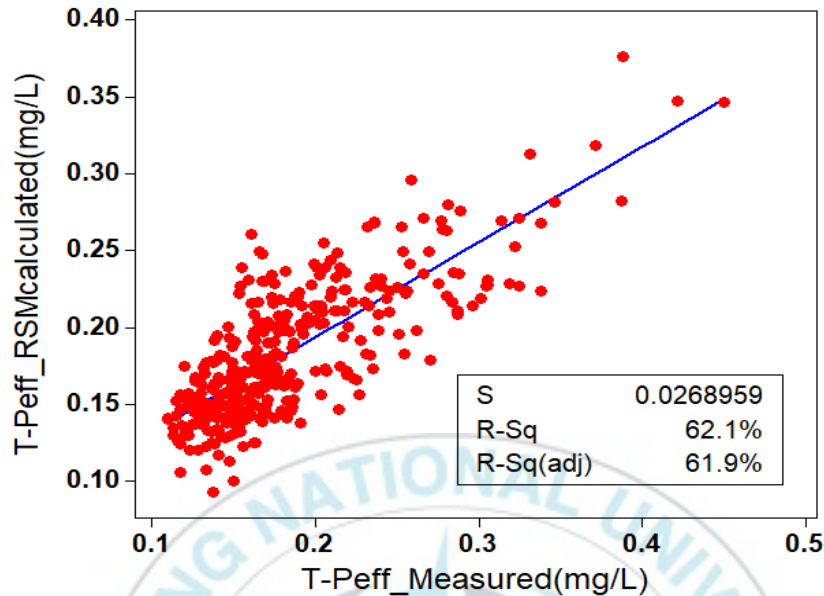


Fig 4.19 Response surface regression analysis T-P Fitted line Plot

그림 4.19는 반응표면 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 T-P값과 실제 유출수 T-P값의 관계를 표현한 것으로 방정식의 결정계수 R-Sq는 62.1%, R-Sq(adj)는 61.9%이다. 단계적 회귀분석의 T-P 방정식 결정계수 R-Sq 29.5%보다 높으며 Minitap 프로그램을 이용해 남부하수처리장의 유입수 T-N을 단계적 회귀 분석한 연구(김종각, 2013)에서 예측된 T-P의 R-Sq 값 78.1%보다는 낮았다. 시계열 모델을 이용한 연구(김병균 외, 2007)에서는 유입수 성상을 예측해 실제 유입수 성상과 비교한 결과 1일 후 유입수 T-P 예측 R-Sq는 98.4%, 2일 후 예측 R-Sq는 54.4% 였다. 1일 후 와 2일 후 예측 결정계수가 많은 차이를 보인 것은 일별 유입수의 변동이 크다는 것을 의미하므로 유출수 관리를 위해서 급변하는 유입수에 대비해 효율적인 공정 운전이 필요하다.

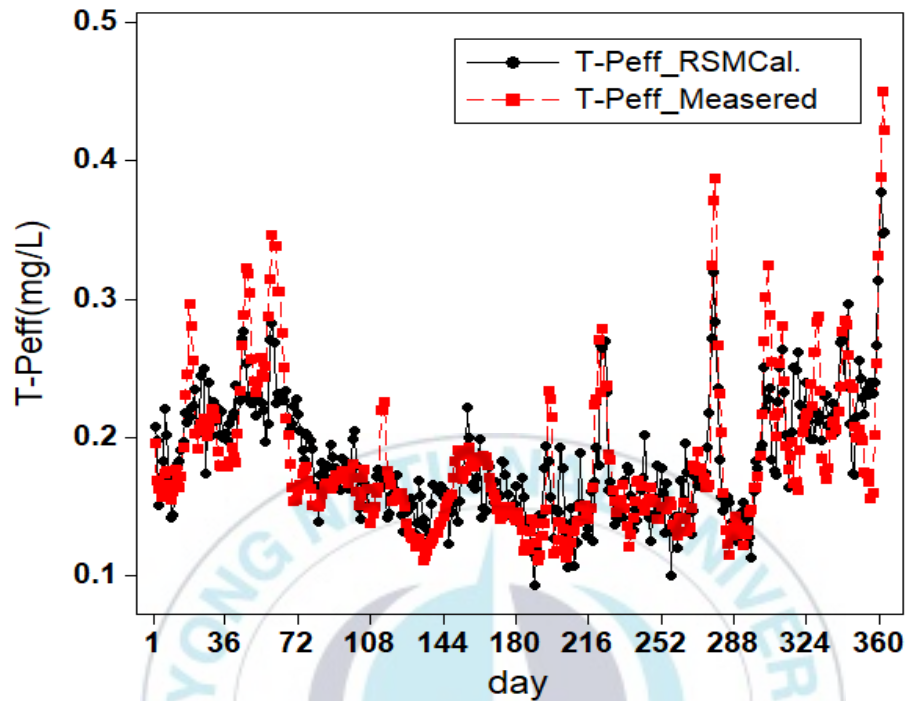


Fig 4.20 Response surface regression analysis T-P time series

그림 4.20 은 반응표면 회귀분석 방정식으로 계산된 유출수 T-P값과 실제 유출수 T-P값을 시간에 따라 표현한 것이다. 계산된 유출수 T-P값이 실제 유출수 값보다 높게 예측한 부분도 있었으나 전체적으로 잘 예측하고 있다.

4.3 단계적 회귀분석 및 반응표면 회귀분석 예측 모델의 비교

울산 방어진 하수 처리장의 2017년 데이터를 이용해 유출수를 단계적 회귀 분석과 반응표면 회귀 분석 모델로 예측해 보았다. 그 결과 나온 회귀 분석 결정 계수(R^2)와 RSME(평균 제곱근 편차)는 표 4.26 과 같다.

평균 제곱근 편차(Root Mean Square Deviation; RMSD) 또는 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error; RMSE)는 추정 값 또는 모델이 예측한 값과 실제 관찰되는 값의 차이를 다룰 때 흔히 사용하는 측도이다. 정밀도를 표현하는데 적합하다. 각각의 차이값은 잔차라고도 하며, 평균 제곱근 편차는 잔차들을 하나의 측도로 종합할 때 사용된다.

RMSE값은 작을수록 예측성이 높으며 R^2 의 값은 1에 가까울수록 독립변수와 종속 변수사이의 관계에 대한 적합성과 유의성이 높으며 0에 가까워질수록 적합성과 유의성이 떨어지게 된다.

Table 4.26 Comparison of stepwise regression and response surface regression

유출수	단계적 회귀분석		반응표면 회귀분석	
	결정계수(R^2)	RSME	결정계수(R^2)	RSME
BOD	59.3 %	0.33329	71.2%	0.26945
COD	59.3%	0.76815	76.6%	0.58201
SS	53.0%	0.44607	67.4%	0.37109
T-N	51.1%	0.62369	82.3%	0.37437
T-P	29.5%	0.04642	62.0%	0.03405

방어진 하수처리장의 2017년 데이터로 단계적 회귀 분석을 통해 유출수의 성상을 예측하였을 때 BOD, COD, SS, T-N은 결정계수 R-Sq가 50%이상이었으며 T-P는 29.5%로 낮은 예측성을 보였다. 반응표면 회귀 분석으로 유출수 성상을 예측한 결과 결정계수 R-Sq는 BOD, COD, SS, T-N, T-P 모두 67%이상으로 단계적 회귀 분석 결과보다 상관성이 높아 반응표면 회귀 분석의 유출수 성상 예측 결과가 실제 유출수 성상에 가까운 것으로 볼 수 있다. 통계 분석 방법을 통한 모델링은 데이터와 미지의 변수들에 대한 정보가 많을수록 예측의 확실성을 높일 수 있기 때문에 앞으로도 더 많은 방어진 하수처리장의 데이터와 운전인자를 추가한다면 유출수 예측성을 높일 수 있을 것이다. A2O공정으로 운전중인 대구 하수처리장의 2007년 운전데이터를 이용해 인공지능 기법인 인공 신경망 모델기법과 유전자 프로그래밍법, 뉴로 퍼지 기법으로 유출수의 BOD, COD, SS, T-N, T-P를 예측한 연구(한국과학기술원, 20009)에서는 인공신경망모델기법의 결정계수 R-Sq는 COD가 28.2%로 가장 낮았으며 T-N이 86.7%로 가장 높았다. 유전자프로그래밍법과 뉴로 퍼지 기법의 경우도 COD는 28.6%, 29.1% 였으며 T-N은 85.4%, 86.1%로 차이를 보였다. 대구 하수처리장 유출수를 예측한 인공지능기법도 상당히 정확하지만 결정계수 R-Sq는 가장 낮은 COD와 가장 높은 T-N의 차이가 약 50%였다. 방어진 하수처리장의 유출수를 반응표면 분석법으로 예측한 모델링의 결정계수 R-Sq는 T-P가 62.0%, T-N이 82.35%로 약 20%의 차이를 보였다.

V. 결 론

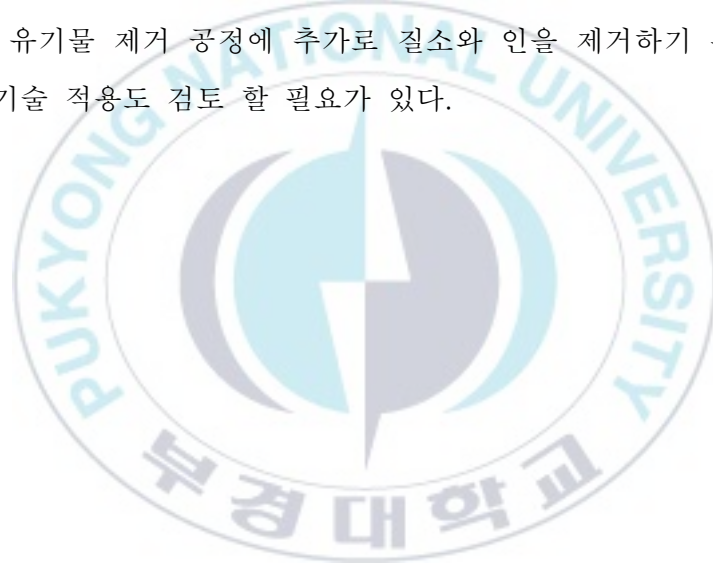
본 논문에서는 울산 방어진 하수처리장의 운영 현황을 파악하고 공정 운전의 개선을 위한 방안을 찾기 위해 2017년 운전 데이터를 이용하여 Minitap 프로그램의 단계적 회귀분석법과 반응표면 분석법으로 유출수의 BOD, COD, SS, T-N, T-P를 예측해 보았다.

단계적 회귀분석의 상관계수(R^2 , %)와 반응표면 회귀분석 상관계수(R^2 , %)를 비교해 보면 BOD, COD, SS, T-N, T-P 모두 단계적 회귀분석 보다 반응표면 회귀분석이 약 12% ~ 32% 정도 높았다. 단계적 회귀분석은 계산식이 단순한 만큼 빠른 결과를 도출할 수 있어 예측값에 영향을 주는 원인을 쉽게 찾을 수가 있지만 상관률의 편차가 큰 경향이 있다. 반응표면 회귀분석은 예측식이 복잡한 반면 상관관계가 62%~82%까지 높아 정확도가 확보된 다량의 데이터를 반영한다면 더 좋은 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다. 방어진 하수처리장의 유출수 수질 예측 방법에는 반응표면 회귀 분석이 적합하며 여러 변수를 사전에 반영하여 데이터를 관리한다면 이를 이용해 하수처리장의 안정적인 공정 운전을 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

최근 5년 동안의 유량 및 수질의 자료를 검토하여 유량의 변동이 적고 처리공정의 안정성이 확보된 방어진하수처리장 2017년 유입유량 및 수질 등 운영데이터를 적용하였기 때문에 보다 광범위하게 적용하기 위해서는 추가적인 자료를 토대로 한 연구가 필요하다. 유출수의 성상을 예측하기 위해 입력한 독립변수에 추가적으로 외부 요인과 공정의 운전 데이터를 사용하면 더 높은 예측성과 적합성을 가진 분석 결과를 얻을 수 있을 것이며 독립변수와 종속변수간의 상관관계를 파악해 상대적으로 상관관계가 높은

변수를 선택해 예측한다면 더 높은 예측성을 가질 것이다.

울산 방어진 하수처리장의 2017년 일 평균하수 유입유량은 $91,743\text{m}^3/\text{일}$ 이며 유입수와 1차 처리수의 BOD_5 와 T-N은 분류식 유입으로 고농도 하수가 유입되어 설계기준을 초과해 운영되고 있으나, 방류수 수질 기준에는 적합하게 처리하고 있다. 방류수 수질은 $\text{BOD } 2.5\text{mg/L}$, $\text{COD } 11.2\text{mg/L}$, $\text{SS } 2.7\text{mg/L}$, $\text{T-N } 7.317\text{mg/L}$, $\text{T-P } 0.184\text{mg/L}$ 로 현재 방류수 수질 기준을 초과하지 않으나 앞으로 강화되는 방류수 수질 기준으로 인해 좀 더 다양한 유입수와 유출수의 성상 예측에 대한 연구와 노후화된 시설을 개선하고 기존의 유기물 제거 공정에 추가로 질소와 인을 제거하기 위한 새로운 고도처리 기술 적용도 검토 할 필요가 있다.



참 고 문 헌

강선훈(2013), 다변량 통계분석을 이용한 시화호의 수질특성 평가와 연안오염총량관리를 위한 목표수질 설정방안에 관한연구, 명지대학교 대학원

김병균, 문용택, 김홍석, 김종락(2007), 시계열모델을 이용한 하수처리장 유입수 정상 예측, 상하수도학회지 21권 제 5호, 대한상하수도협회

김정훈(2013), 통계기법을 이용한 경상남도 하수처리장 총인처리시설의 처리효율평가에 관한 연구, 창원대학교 대학원

김중각(2013), 다변량 분석을 이용한 남부처리장 유입수 특성 예측, 석사학위논문, 부경대학교 대학원

김효영(2015), 통계기법을 활용한 수질관리정책 시행에 따른 수질변화 분석 방법 연구, 이화여자대학교 대학원

권동민, 유은희, 권기원, 빈재훈(2008), 다변량 분석법을 이용한 수영강 수계의 수질특성 평가, 보건환경연구원

민상윤, 이승필, 김진식, 박종운, 김만수(2012), 하수처리장 방류수 수질 예측을 위한 다중회귀분석 모델 개발 및 검증, 대한환경공학회지 34권 제5호

박정수(2019), 통계분석과 모델링을 이용한 하수처리장의 최적화 연구(A_2O 공법을 중심으로), 청주대학교 대학원

서동섭(2004), 하수처리장의 효율적인 운영에 관한 연구 : M하수처리장의 사례 , 연세대학교 대학원

성남준(2007), 국내 하수종말처리시설의 설계 유입 하수량 및 BOD와 운영치의 차이에 관한 연구, 창원대학교 산업정보 대학원

오승은(2016), 다중회귀분석을 이용한 남한강보 지점에서의 Chlorophyll-a 농도예측에 대한 연구, 을지대학교 대학원

이정민(2002), 통계적 회귀분석에 관한 연구 , 석사학위논문, 연세대학교 교육대학원

이지아(2019), TiO₂ 광촉매 공정을 이용한 황화수소 제거, 석사학위논문, 부경대학교 대학원

이지혜(2011), 통계기법을 이용한 하수처리장의 신뢰도 평가 및 요인 분석, 석사학위논문, 전남대학교 대학원

정용준, 김예진(2016), 상관분석 및 의사결정나무분석을 통한 하수처리시설의 에너지 소비량과 운영인자의 관계분석, 부산카톨릭대학교

정화진(2008), 다변량 통계기법을 이용한 새만금수역 수질특성 평가, 군산대학교 대학원

조영범(2015), 염색폐수의 다변량 통계분석 및 실험계획법을 이용한 펜톤산화공정의 최적화, 서울시립대학교 대학원

최소연(2011), 다변량통계기법에 기반한 생물학적 하수처리장 이상진단 및 단순화한 활성슬러지 모델 개발, 경북대학교 산업대학원

한국과학기술원(2009), 국제공동연구를 통한 한국형 인공지능 하수처리공정 모델 기법 개발 및 적용, 한국과학기술원, 환경부

환경부(2010), 수질 및 수생태계보전에 관한 법률 시행규칙 개정안

환경부(2018), 환경부고시 제2018-6호

Agirre-Basurko, E., Ibarra-Berastegi, G., & Madariaga, I. (2006). Regression and multilayer perceptron-based models to forecast hourly O₃ and NO₂ levels in the Bilbao area. *Environmental Modelling & Software*, 21(4), 430-446.

Archer, K. J., & Lemeshow, S. (2006). Goodness-of-fit test for a logistic regression model fitted using survey sample data. *The Stata Journal*, 6(1), 97-105.

Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., ... & Vavilin, V. A. (2002). The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1). *Water Science and Technology*, 45(10), 65-73.

Bowerman, B. L., & O'connell, R. T. (1990). Linear statistical models:

An applied approach. Brooks/Cole.

Bulman, J. S., & Osborn, J. F. (1989). Descriptive statistics. *British dental journal*, 166(2), 51-54.

Fagerland, M. W., & Hosmer, D. W. (2013). A goodness of fit test for the proportional odds regression model. *Statistics in medicine*, 32(13), 2235-2249.

Fahrmeir, L., & Tutz, G. (2013). *Multivariate statistical modelling based on generalized linear models*. Springer Science & Business Media.

Ferraro, M. B., & Giordani, P. (2012). A multiple linear regression model for imprecise information. *Metrika*, 75(8), 1049-1068.

Gravier, J., Vignal, V., Bissey-Breton, S., & Farre, J. (2008). The use of linear regression methods and Pearson's correlation matrix to identify mechanical - physical - chemical parameters controlling the micro-electrochemical behaviour of machined copper. *Corrosion Science*, 50(10), 2885-2894.

Henze, M., Grady Jr, C. L., Gujer, W., Marais, G. V. R., & Matsuo, T. (1987). A general model for single-sludge wastewater treatment systems. *Water research*, 21(5), 505-515.

Henze, M., Gujer, W., Mino, T., & van Loosdrecht, M. C. (2000). *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. IWA publishing.

Jeppsson, U. (1996). *Modelling aspects of wastewater treatment processes* (p. 428). Sweden: Lund Institute of Technology.

Khuri, A. I., & Cornell, J. A. (1996). Response surfaces: designs and analyses. Marce l Dekker. *Inc., New York*.

Kovdienko, N. A., Polishchuk, P. G., Muratov, E. N., Artemenko, A. G., Kuz'min, V. E., Gorb, L., ... & Leszczynski, J. (2010). Application of random forest and multiple linear regression techniques to QSPR prediction of an aqueous solubility for military compounds. *Molecular informatics*, 29(5), 394-406.

Makinia, J. (2010). *Mathematical modelling and computer simulation of activated sludge systems*. IWA publishing.

Mudelsee, M. (2003). Estimating Pearson's correlation coefficient with bootstrap confidence interval from serially dependent time series. *Mathematical Geology*, 35(6), 651-665.

Monod, J. (1949). The growth of bacterial cultures. *Annual Reviews in Microbiology*, 3(1), 371-394.

Neter, J. (1996). Kutner MH, Nachtsheim CJ, Wasserman W. *Applied Linear Statistical Models*. Chicago, IL: Irwin.

O'brien, P. C., & Shampo, M. A. (1981, January). Statistics for clinicians. 1. Descriptive statistics. In *Mayo Clinic Proceedings* (Vol. 56, No. 1, p. 47).

Siegrist, H., Renggli, D., & Gujer, W. (1993). Mathematical modelling of anaerobic mesophilic sewage sludge treatment. *Water Science and Technology*, 27(2), 25-36.

Ukoumunne, O. C., Gulliford, M. C., & Chinn, S. (2002). A note on the use of the variance inflation factor for determining sample size in cluster randomized trials. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 51(4), 479-484.

Vittinghoff, E., Glidden, D. V., Shiboski, S. C., & McCulloch, C. E. (2011). *Regression methods in biostatistics: linear, logistic, survival, and repeated measures models*. Springer Science & Business Media.

Vounatsou, P., & Karydis, M. (1991). Environmental characteristics in oligotrophic waters: data evaluation and statistical limitations in water quality studies. *Environmental Monitoring and Assessment*, 18(3), 211-220.

Williams, S. (1996). Pearson's correlation coefficient. *The New Zealand medical journal*, 109(1015), 38.

Yang, Y., Xue, L., & Cheng, W. (2011). The empirical likelihood goodness-of-fit test for a regression model with randomly censored data. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 40(3), 424-435.

부록 1 하수처리장 유출수의 실측치와 Stepwise 회귀분석에 의한 예측치

	유출 BOD(mg/L)		유출 COD(mg/L)		유출 SS(mg/L)		유출 TN(mg/L)		유출TP (mg/L)	
	실측	예측	실측	예측	실측	예측	실측	예측	실측	예측
1										
2	3.400	2.756	9.933	10.888	2.700	3.024	8.232	8.298	0.195	0.194
3	3.500	2.695	10.033	11.017	2.800	3.029	8.353	8.086	0.168	0.191
4	3.200	2.635	10.500	11.252	2.767	2.969	7.813	7.802	0.162	0.194
5	3.200	2.753	11.000	11.805	2.867	3.072	7.362	7.840	0.156	0.193
6	3.000	2.791	11.233	11.959	2.833	3.138	7.437	7.860	0.163	0.192
7	3.400	2.896	10.900	11.930	2.800	3.186	7.317	8.119	0.173	0.207
8	3.500	2.720	10.700	11.488	2.867	3.092	7.682	8.197	0.175	0.203
9	3.800	2.745	10.667	10.969	3.067	3.015	7.734	8.179	0.165	0.204
10	5.000	2.766	10.867	11.095	3.200	3.042	8.044	8.097	0.155	0.191
11	5.200	2.703	11.100	11.190	3.267	3.024	8.008	8.127	0.161	0.197
12	4.800	2.709	11.500	11.613	3.333	3.122	8.256	8.137	0.176	0.194
13	4.400	2.781	11.200	11.675	3.300	3.162	8.374	8.107	0.169	0.191
14	4.900	2.840	11.033	11.444	3.233	3.138	8.242	8.255	0.163	0.198
15	5.200	2.927	10.933	11.671	2.900	3.181	8.346	8.227	0.171	0.204
16	5.700	2.873	11.367	11.785	3.033	3.163	8.270	8.146	0.192	0.224
17	5.700	2.939	11.467	12.106	3.033	3.195	8.346	7.805	0.230	0.223
18	5.000	2.894	11.200	11.951	3.000	3.161	8.160	7.821	0.245	0.219
19	5.200	2.734	11.367	11.734	2.967	3.116	8.246	7.794	0.296	0.212
20	4.500	2.640	11.567	11.797	2.800	3.124	8.240	7.829	0.280	0.217
21	5.000	2.681	12.100	11.773	2.833	3.114	8.198	7.947	0.255	0.226
22	5.000	2.769	11.867	11.987	2.633	3.154	8.586	8.166	0.203	0.223
23	4.800	2.830	11.767	12.188	2.733	3.219	8.788	8.145	0.191	0.223
24	4.000	2.762	12.133	12.090	2.933	3.270	8.690	7.940	0.204	0.216
25	4.500	2.904	12.233	12.263	3.000	3.343	7.958	7.737	0.209	0.218
26	4.400	2.928	12.533	12.191	2.967	3.357	7.740	7.878	0.214	0.221
27	4.000	3.017	12.067	12.032	2.800	3.307	7.296	8.344	0.206	0.231
28	3.800	2.781	12.167	11.459	2.733	3.166	7.216	8.634	0.200	0.247
29	4.200	2.839	12.300	11.158	2.633	3.143	7.470	8.660	0.206	0.251
30	3.800	2.820	12.133	11.497	2.733	3.188	8.503	8.367	0.220	0.243

31	4.000	2.878	12.133	11.946	3.000	3.310	9.237	8.074	0.219	0.230
32	4.000	2.810	12.633	12.312	3.133	3.359	9.580	7.981	0.214	0.222
33	4.100	2.857	13.267	12.547	3.267	3.391	9.252	7.995	0.189	0.221
34	4.200	3.012	13.633	12.674	3.100	3.432	8.753	8.175	0.179	0.219
35	4.200	2.980	13.167	12.800	3.033	3.436	8.120	8.244	0.179	0.221
36	3.800	3.006	12.433	12.903	2.867	3.440	8.013	8.173	0.178	0.215
37	4.000	2.990	11.800	12.742	2.833	3.366	8.040	8.074	0.180	0.214
38	3.800	2.999	11.433	12.696	2.933	3.371	7.990	8.124	0.178	0.204
39	4.100	2.960	11.867	12.741	3.067	3.388	7.714	8.061	0.183	0.207
40	3.500	2.899	12.367	12.919	3.333	3.455	7.910	7.957	0.192	0.200
41	3.800	2.891	12.767	12.725	3.333	3.412	8.260	7.913	0.185	0.208
42	3.900	2.896	12.700	12.461	3.233	3.353	8.412	8.059	0.182	0.219
43	4.100	3.008	12.500	12.519	3.100	3.422	8.592	8.310	0.203	0.218
44	3.800	3.089	12.767	12.927	3.300	3.533	8.612	8.363	0.234	0.206
45	3.800	3.227	13.033	13.301	3.300	3.642	8.638	8.339	0.266	0.198
46	4.200	3.252	13.433	13.463	3.433	3.581	8.544	8.061	0.289	0.201
47	3.800	3.326	13.500	13.215	3.367	3.497	8.356	7.824	0.322	0.210
48	4.000	3.081	13.600	12.811	3.467	3.371	8.308	7.670	0.319	0.214
49	4.400	3.033	13.433	12.579	3.333	3.338	8.098	7.798	0.305	0.220
50	4.300	3.005	13.400	12.386	3.333	3.324	8.522	8.040	0.256	0.220
51	4.000	3.051	13.567	12.461	3.267	3.354	8.818	8.137	0.240	0.218
52	4.000	3.043	14.333	12.331	3.567	3.331	8.956	8.124	0.232	0.210
53	4.200	2.976	14.400	12.594	3.800	3.370	8.510	7.947	0.240	0.206
54	3.800	2.978	14.433	12.637	4.500	3.319	8.648	7.878	0.258	0.210
55	3.900	2.775	13.933	12.386	4.700	3.242	8.512	7.939	0.245	0.217
56	4.200	2.727	13.600	11.909	4.900	3.128	8.404	8.131	0.243	0.224
57	4.000	2.797	13.667	11.802	4.833	3.208	8.422	8.219	0.251	0.212
58	4.000	3.093	13.833	12.144	4.967	3.335	8.660	8.246	0.287	0.208
59	4.100	2.930	14.133	11.267	4.967	3.253	8.698	8.520	0.314	0.193
60	3.600	3.052	14.200	11.577	5.100	3.331	8.500	8.286	0.346	0.186
61	4.200	2.900	14.033	11.453	5.000	3.265	8.300	8.033	0.338	0.186
62	4.000	3.218	14.000	12.785	4.900	3.457	8.270	7.574	0.338	0.200
63	4.000	3.128	13.733	12.346	4.667	3.317	7.960	7.825	0.305	0.220

64	4.100	3.380	13.533	12.607	4.533	3.430	8.132	7.851	0.305	0.216
65	4.300	3.281	13.400	12.544	4.300	3.347	8.262	7.682	0.276	0.214
66	4.000	3.389	13.567	12.716	3.867	3.381	8.328	7.340	0.251	0.210
67	4.400	3.115	13.800	12.313	3.533	3.199	7.880	7.400	0.213	0.220
68	4.100	3.240	13.767	12.308	3.233	3.296	7.588	7.390	0.201	0.209
69	4.200	3.306	13.367	12.368	3.300	3.316	7.382	7.522	0.181	0.203
70	4.500	3.396	13.000	12.243	3.267	3.364	7.422	7.715	0.163	0.199
71	4.000	3.543	12.633	12.328	3.200	3.389	7.558	7.767	0.154	0.198
72	4.200	3.443	12.133	12.237	2.767	3.386	7.520	7.718	0.154	0.196
73	4.300	3.401	12.067	12.365	2.433	3.357	7.358	7.325	0.161	0.195
74	3.800	3.087	11.867	11.882	2.333	3.134	7.096	7.290	0.165	0.207
75	4.200	2.848	12.100	11.656	2.267	2.964	7.126	7.232	0.173	0.207
76	3.800	2.932	11.700	11.700	2.333	2.965	7.132	7.453	0.176	0.206
77	4.400	2.804	11.500	11.501	2.333	2.939	7.160	7.782	0.179	0.213
78	4.000	2.858	11.033	11.737	2.433	3.072	7.022	7.796	0.169	0.201
79	4.400	2.696	11.167	11.629	2.467	3.026	7.028	7.744	0.163	0.195
80	4.200	2.577	11.333	11.579	2.533	2.986	6.814	7.365	0.151	0.178
81	4.000	2.428	11.600	11.401	2.667	2.862	6.556	7.261	0.150	0.189
82	4.700	2.260	11.533	11.138	2.767	2.774	6.258	7.147	0.150	0.185
83	3.900	2.252	11.733	11.442	2.900	2.824	6.402	7.282	0.149	0.195
84	4.200	2.302	11.800	11.139	2.967	2.810	6.776	7.680	0.151	0.205
85	4.600	2.374	11.900	11.678	2.933	3.033	7.298	7.605	0.159	0.202
86	4.300	2.627	11.867	11.873	2.967	3.084	7.606	7.417	0.164	0.197
87	3.400	2.777	12.000	12.146	3.133	3.117	7.674	7.023	0.167	0.187
88	3.600	2.639	12.033	11.770	3.167	2.863	7.428	7.090	0.164	0.189
89	4.000	2.696	11.767	11.684	3.067	2.822	7.038	7.058	0.162	0.182
90	3.800	2.543	11.733	11.712	2.867	2.762	6.850	7.111	0.164	0.184
91	3.800	2.723	11.600	11.746	2.767	2.832	6.616	7.253	0.168	0.194
92	4.200	2.800	11.400	11.979	2.967	2.931	6.890	7.304	0.172	0.193
93	4.500	2.856	11.200	11.903	3.200	2.942	6.846	7.217	0.169	0.192
94	4.000	2.998	11.333	12.028	3.533	2.973	7.036	6.987	0.169	0.183
95	3.800	2.785	12.133	11.855	3.633	2.899	6.660	7.105	0.176	0.205
96	4.000	3.018	12.067	12.037	3.433	2.989	6.674	7.209	0.174	0.198

97	4.100	2.765	12.033	12.077	3.267	2.953	6.463	7.312	0.170	0.199
98	3.600	2.637	11.733	11.839	2.967	2.887	6.651	7.345	0.167	0.181
99	3.400	2.395	11.733	11.858	2.900	2.812	7.017	7.159	0.174	0.171
100	3.400	2.647	11.700	11.720	2.867	2.842	7.338	7.272	0.180	0.167
101	2.900	2.853	11.667	11.741	2.767	2.844	7.222	6.945	0.171	0.161
102	2.800	2.778	11.767	11.516	2.700	2.809	6.746	6.965	0.161	0.168
103	3.000	2.574	11.867	11.569	2.633	2.742	6.528	6.714	0.150	0.172
104	3.200	2.597	11.933	11.733	2.767	2.786	6.602	6.887	0.157	0.178
105	3.000	2.739	12.067	11.609	2.800	2.788	6.692	7.117	0.170	0.185
106	2.800	2.822	11.833	11.715	2.967	2.883	6.856	6.904	0.176	0.179
107	3.500	2.649	11.367	11.628	2.800	2.876	6.698	6.724	0.163	0.177
108	3.000	2.598	10.900	11.760	2.733	2.872	6.422	6.516	0.148	0.174
109	3.400	2.428	10.767	11.494	2.467	2.742	5.990	6.635	0.137	0.176
110	3.200	2.397	11.033	11.271	2.567	2.646	5.781	6.804	0.145	0.174
111	3.200	2.418	11.433	11.408	2.600	2.665	5.842	6.883	0.149	0.168
112	3.600	2.469	11.633	11.228	2.700	2.662	6.017	7.296	0.159	0.175
113	3.400	2.511	11.433	11.492	2.800	2.742	6.592	7.234	0.164	0.172
114	3.000	2.387	11.400	11.084	3.033	2.644	6.303	7.245	0.219	0.171
115	3.100	2.422	11.300	11.037	3.367	2.645	6.093	6.968	0.219	0.161
116	3.600	2.453	11.533	11.119	3.633	2.664	5.603	6.903	0.225	0.155
117	3.400	2.511	11.733	11.515	3.800	2.776	5.898	6.792	0.175	0.156
118	3.000	2.603	12.000	11.909	3.733	2.845	6.130	6.906	0.170	0.164
119	3.800	2.625	12.167	11.613	3.633	2.805	6.132	7.193	0.165	0.176
120	3.500	2.622	12.033	11.450	3.533	2.769	6.377	7.506	0.153	0.188
121	3.000	2.519	12.067	11.319	3.567	2.754	6.432	7.622	0.155	0.187
122	3.200	2.461	11.833	11.336	3.467	2.739	7.018	7.718	0.157	0.192
123	3.000	2.483	12.733	11.582	3.333	2.819	7.408	7.662	0.160	0.183
124	3.300	2.523	12.800	11.767	3.100	2.871	7.760	7.657	0.159	0.184
125	3.100	2.660	12.867	12.000	3.100	2.983	7.758	7.569	0.155	0.182
126	2.500	2.624	11.467	11.836	3.067	2.934	7.754	7.579	0.149	0.192
127	3.000	2.749	11.233	12.032	2.767	3.016	7.766	7.390	0.138	0.188
128	2.200	2.609	11.300	12.134	2.500	2.984	7.415	7.301	0.130	0.190
129	2.800	2.750	11.900	12.431	2.167	3.092	7.323	7.232	0.128	0.181

130	2.800	2.587	12.067	12.344	2.300	2.997	6.969	7.026	0.127	0.176
131	3.100	2.599	11.933	12.257	2.333	2.935	6.716	6.798	0.120	0.165
132	2.600	2.473	11.367	12.150	2.433	2.827	6.389	6.708	0.126	0.169
133	2.500	2.421	10.933	10.668	2.467	2.635	6.823	7.400	0.126	0.177
134	2.800	2.490	10.567	10.704	2.300	2.676	7.341	7.635	0.122	0.179
135	3.000	2.451	10.833	10.818	2.200	2.718	7.430	7.647	0.110	0.174
136	2.400	2.524	10.900	12.134	2.167	2.874	7.190	7.100	0.114	0.159
137	2.700	2.550	11.267	12.355	2.200	2.917	6.950	6.903	0.118	0.156
138	2.800	2.607	11.400	12.197	2.133	2.873	6.578	6.839	0.123	0.154
139	3.100	2.538	11.700	12.205	2.000	2.880	6.304	6.904	0.125	0.167
140	2.700	2.517	11.700	11.723	1.967	2.772	6.046	7.115	0.127	0.181
141	2.500	2.504	11.633	11.982	2.167	2.858	6.522	7.089	0.130	0.179
142	2.400	2.497	11.467	11.941	2.300	2.846	6.568	7.124	0.131	0.176
143	2.200	2.394	11.533	12.111	2.633	2.845	6.623	6.898	0.136	0.165
144	2.500	2.381	11.567	11.876	2.733	2.796	6.342	6.865	0.138	0.166
145	2.700	2.449	11.533	11.755	2.800	2.772	6.037	6.784	0.143	0.162
146	2.500	2.399	11.633	11.845	2.667	2.778	5.973	6.835	0.149	0.165
147	2.200	2.411	11.700	11.593	2.700	2.704	5.880	7.054	0.153	0.177
148	2.600	2.436	11.833	11.850	2.767	2.806	6.437	7.221	0.156	0.171
149	2.800	2.528	12.067	11.844	2.933	2.842	6.477	7.154	0.158	0.168
150	2.700	2.550	12.400	12.126	3.033	2.947	6.232	6.884	0.171	0.158
151	2.500	2.444	12.700	12.146	2.933	2.912	5.733	6.599	0.182	0.158
152	2.800	2.427	12.600	12.356	3.067	2.947	5.753	6.692	0.191	0.155
153	3.000	2.413	12.567	12.344	3.033	2.894	6.135	6.944	0.187	0.160
154	2.800	2.513	12.667	12.145	3.067	2.885	6.573	7.276	0.176	0.176
155	2.800	2.545	12.767	11.993	2.833	2.849	6.880	7.385	0.169	0.179
156	2.300	2.490	12.000	11.905	2.667	2.811	6.997	7.433	0.175	0.188
157	2.500	2.396	11.700	12.329	3.000	2.828	7.240	7.216	0.188	0.185
158	2.300	2.280	11.133	12.409	3.033	2.820	7.168	7.116	0.192	0.183
159	2.800	2.260	11.667	12.624	3.267	2.811	6.985	6.991	0.182	0.171
160	2.800	2.287	11.467	12.106	2.967	2.714	6.592	7.161	0.179	0.172
161	2.600	2.453	11.567	11.590	2.967	2.696	6.670	7.425	0.181	0.183
162	2.400	2.481	11.433	11.153	2.867	2.657	7.065	7.443	0.185	0.183

163	2.600	2.517	11.667	11.292	3.067	2.692	7.458	7.283	0.184	0.172
164	2.300	2.468	12.333	11.992	3.067	2.774	7.160	6.780	0.183	0.158
165	2.800	2.557	12.900	12.406	3.200	2.849	6.798	6.604	0.186	0.160
166	2.800	2.564	13.233	12.445	3.067	2.873	6.248	6.453	0.185	0.162
167	2.900	2.564	13.000	12.017	3.067	2.817	6.305	6.744	0.179	0.169
168	2.500	2.476	12.733	11.605	2.900	2.761	6.435	6.973	0.171	0.177
169	2.800	2.537	12.133	11.859	2.767	2.771	6.837	7.187	0.164	0.174
170	3.200	2.544	11.867	11.997	2.767	2.761	6.873	7.108	0.158	0.162
171	2.600	2.513	11.533	12.411	2.833	2.784	6.613	6.779	0.154	0.145
172	3.000	2.305	11.833	12.139	3.000	2.672	6.368	6.540	0.148	0.146
173	3.200	2.153	11.700	11.837	2.833	2.521	6.350	6.346	0.140	0.151
174	2.900	2.161	11.600	11.500	2.667	2.435	6.612	6.447	0.142	0.155
175	2.800	2.276	11.100	11.052	2.533	2.358	6.735	6.754	0.144	0.167
176	2.800	2.399	11.033	11.317	2.633	2.438	7.360	6.908	0.149	0.167
177	2.500	2.365	11.067	11.109	2.500	2.375	7.640	6.663	0.146	0.161
178	2.900	2.388	11.500	11.116	2.433	2.370	7.963	6.416	0.150	0.149
179	2.600	2.318	11.800	10.834	2.300	2.304	7.210	6.451	0.146	0.146
180	2.700	2.377	12.000	10.760	2.467	2.309	6.870	6.605	0.142	0.145
181	2.500	2.327	12.000	10.668	2.433	2.325	6.595	6.760	0.140	0.146
182	2.800	2.339	11.900	10.375	2.333	2.286	6.887	6.780	0.146	0.157
183	2.800	2.216	11.333	10.143	2.200	2.274	6.958	6.981	0.140	0.153
184	3.000	2.160	10.900	10.387	2.067	2.290	7.023	6.799	0.133	0.140
185	2.800	2.177	10.467	10.679	2.067	2.343	6.745	6.473	0.118	0.134
186	2.600	2.171	10.667	10.925	2.033	2.360	6.623	6.353	0.122	0.142
187	2.900	2.124	11.067	10.752	2.200	2.324	6.262	6.317	0.119	0.148
188	2.800	2.066	11.300	10.503	2.267	2.277	6.410	6.540	0.132	0.147
189	2.800	2.046	11.633	10.133	2.200	2.215	6.458	6.748	0.141	0.153
190	2.600	2.147	10.800	10.328	2.133	2.306	6.640	6.715	0.138	0.148
191	2.800	2.126	10.700	10.415	2.167	2.299	6.635	6.705	0.124	0.141
192	2.800	2.171	10.367	10.865	2.200	2.318	6.565	6.257	0.110	0.131
193	3.000	2.071	10.967	10.786	2.100	2.237	6.587	6.251	0.115	0.141
194	2.200	1.973	11.267	10.712	2.033	2.194	6.858	6.207	0.129	0.142
195	2.500	2.069	11.567	10.755	2.133	2.270	6.992	6.461	0.138	0.153

196	2.700	2.075	11.833	10.451	2.133	2.192	7.087	6.726	0.148	0.161
197	2.900	2.159	11.300	10.474	2.067	2.195	6.923	6.699	0.233	0.164
198	2.800	2.059	11.133	10.294	2.000	2.119	6.678	6.643	0.227	0.152
199	2.500	2.007	10.700	10.288	1.967	2.076	6.267	6.362	0.214	0.142
200	2.500	2.049	10.933	10.298	2.033	2.109	5.770	6.201	0.116	0.133
201	2.600	2.052	10.700	10.287	2.233	2.087	5.630	6.151	0.118	0.138
202	2.800	2.111	10.733	10.575	2.433	2.162	5.708	6.245	0.126	0.135
203	2.000	2.188	10.833	10.516	2.467	2.156	6.200	6.636	0.138	0.151
204	2.500	2.130	10.700	10.329	2.233	2.129	6.742	6.658	0.133	0.139
205	1.900	2.084	10.400	10.367	2.000	2.121	6.957	6.320	0.125	0.138
206	2.000	1.919	9.633	10.268	1.933	2.048	7.107	6.010	0.113	0.121
207	2.200	2.003	9.733	10.602	2.033	2.149	6.955	6.198	0.117	0.124
208	2.400	2.040	10.067	10.666	2.233	2.181	6.873	6.443	0.123	0.120
209	2.500	2.177	10.600	10.837	2.333	2.232	6.688	6.687	0.132	0.136
210	2.100	2.116	10.567	10.650	2.400	2.160	6.500	6.736	0.133	0.154
211	2.100	2.154	10.067	10.371	2.333	2.123	6.892	7.110	0.138	0.175
212	2.500	1.988	9.800	10.116	2.333	2.041	7.315	7.493	0.139	0.179
213	2.400	1.937	9.667	9.922	2.267	1.981	7.660	7.559	0.149	0.181
214	2.300	1.844	9.833	9.797	1.933	1.917	7.793	7.636	0.149	0.173
215	2.500	1.966	9.967	9.900	1.833	2.001	8.043	7.626	0.150	0.165
216	1.800	1.960	10.100	9.792	1.800	2.004	8.307	7.937	0.143	0.154
217	1.800	2.040	10.133	9.871	2.067	2.079	8.295	7.951	0.140	0.154
218	2.000	2.012	10.667	9.953	2.100	2.049	8.230	7.408	0.149	0.148
219	1.600	2.109	11.767	10.097	2.067	2.063	8.391	7.069	0.163	0.150
220	1.900	2.102	12.700	10.496	2.067	2.065	8.562	6.433	0.224	0.134
221	2.000	1.947	12.667	10.326	2.000	1.965	8.142	6.163	0.228	0.143
222	1.700	1.961	11.833	10.420	1.967	1.953	7.529	5.874	0.270	0.140
223	1.800	1.919	11.400	9.973	2.033	1.901	7.015	6.244	0.232	0.163
224	2.000	2.003	11.167	9.636	2.100	1.873	6.912	6.709	0.278	0.170
225	1.800	1.902	10.600	9.723	2.300	1.928	7.497	6.527	0.236	0.164
226	1.800	1.809	10.067	9.622	2.333	1.926	7.713	6.548	0.237	0.159
227	2.100	1.807	9.533	9.772	2.233	1.962	8.283	6.606	0.188	0.144
228	1.900	1.875	9.833	9.580	2.033	1.940	7.469	6.882	0.184	0.156

229	2.000	2.068	9.867	9.687	1.933	1.988	7.131	6.905	0.161	0.144
230	1.900	2.028	10.033	9.670	2.033	2.026	6.664	6.947	0.153	0.149
231	2.000	2.061	9.700	9.627	2.033	2.050	7.288	7.269	0.145	0.150
232	1.800	1.981	9.300	9.515	2.067	2.015	7.773	7.165	0.152	0.153
233	1.800	1.977	8.900	9.418	2.000	1.960	7.291	6.871	0.155	0.147
234	2.100	1.937	9.000	9.663	2.100	1.948	6.683	6.474	0.166	0.140
235	1.900	1.924	9.233	9.730	2.100	1.884	5.989	6.361	0.148	0.147
236	2.200	2.009	9.367	9.908	2.067	1.932	6.233	6.396	0.136	0.154
237	2.300	1.996	9.267	9.424	1.967	1.842	6.520	6.734	0.120	0.157
238	1.900	1.996	9.233	9.233	1.967	1.846	6.968	7.093	0.130	0.161
239	2.000	1.957	9.233	9.192	2.133	1.859	7.398	7.274	0.141	0.161
240	2.000	2.009	9.233	9.242	2.333	1.863	7.024	7.017	0.154	0.159
241	1.800	1.950	9.467	9.240	2.400	1.814	6.644	6.831	0.167	0.151
242	1.800	1.993	9.733	9.290	2.367	1.816	6.067	6.721	0.168	0.146
243	2.100	1.968	9.933	9.465	2.200	1.824	6.122	6.639	0.164	0.148
244	2.200	2.038	9.933	9.614	2.167	1.879	6.197	6.658	0.151	0.151
245	2.000	2.046	9.933	9.470	2.100	1.841	6.252	6.843	0.147	0.158
246	1.700	2.154	9.800	9.722	2.000	1.981	6.873	6.881	0.152	0.153
247	1.700	2.155	9.900	9.944	2.000	2.045	7.137	6.861	0.155	0.150
248	1.800	2.134	9.967	10.123	1.933	2.065	7.453	6.605	0.163	0.138
249	1.600	1.879	9.933	9.500	2.000	1.811	6.935	6.477	0.154	0.146
250	1.600	1.932	9.733	9.404	1.967	1.837	6.573	6.359	0.152	0.148
251	1.500	2.087	9.633	9.608	2.067	1.935	6.165	6.404	0.140	0.159
252	1.700	2.247	9.833	9.748	2.133	2.069	6.272	6.751	0.140	0.163
253	1.500	2.250	9.767	10.111	2.367	2.175	6.798	6.293	0.149	0.157
254	1.400	2.072	9.333	9.977	2.300	2.185	6.793	6.058	0.150	0.139
255	1.500	1.980	9.067	10.271	2.033	2.206	6.560	5.724	0.150	0.128
256	1.300	1.893	8.967	9.992	1.600	2.075	6.258	6.128	0.147	0.124
257	1.500	1.964	9.400	10.050	1.600	2.035	6.455	6.170	0.153	0.133
258	1.600	2.059	9.633	10.142	1.800	2.117	6.853	6.306	0.150	0.137
259	1.500	2.202	9.667	10.237	1.900	2.157	6.950	6.340	0.137	0.145
260	1.300	2.215	9.200	10.377	1.800	2.234	7.062	6.492	0.134	0.145
261	1.300	2.241	8.967	10.289	1.867	2.200	6.765	6.575	0.129	0.149

262	1.500	2.216	9.133	10.424	1.867	2.226	6.505	6.676	0.141	0.152
263	1.600	2.101	9.667	10.356	2.100	2.170	6.457	6.762	0.141	0.159
264	1.500	2.020	9.833	10.243	1.933	2.147	6.712	6.807	0.152	0.149
265	1.400	1.969	9.733	9.770	1.933	2.117	6.987	6.910	0.140	0.147
266	1.500	1.974	9.667	9.443	1.767	2.060	7.043	7.108	0.131	0.157
267	1.500	2.014	9.467	9.768	1.933	2.149	7.262	7.114	0.135	0.152
268	1.800	1.963	9.467	9.986	2.033	2.148	7.333	7.035	0.149	0.157
269	1.500	2.115	9.300	10.543	2.300	2.311	7.540	6.674	0.180	0.143
270	1.700	2.110	9.167	10.525	2.333	2.301	7.133	6.466	0.177	0.149
271	1.700	2.144	9.367	10.420	2.567	2.319	6.690	6.583	0.190	0.146
272	1.900	2.168	9.633	10.361	2.433	2.292	6.460	6.877	0.175	0.157
273	1.800	2.245	10.000	10.451	2.367	2.304	6.657	7.055	0.177	0.159
274	1.800	2.192	9.967	10.825	2.200	2.333	6.912	6.894	0.170	0.155
275	1.700	2.141	9.567	10.719	2.100	2.286	6.650	6.996	0.163	0.162
276	2.000	2.153	9.467	10.391	2.033	2.278	6.507	7.384	0.163	0.174
277	1.700	2.262	9.467	10.055	1.967	2.254	7.116	7.738	0.165	0.192
278	2.200	2.226	10.067	10.004	2.000	2.266	8.013	7.620	0.325	0.195
279	1.800	2.215	10.000	10.290	1.967	2.308	8.490	7.388	0.371	0.200
280	1.900	2.313	9.500	10.574	1.933	2.410	8.222	7.345	0.387	0.199
281	2.400	2.402	9.033	10.936	1.933	2.492	7.721	7.356	0.266	0.190
282	1.800	2.327	9.100	10.858	1.767	2.421	7.310	7.296	0.231	0.174
283	1.900	2.261	10.033	10.615	1.700	2.319	6.915	7.193	0.203	0.157
284	1.700	2.132	10.633	10.347	1.533	2.225	6.755	7.116	0.160	0.147
285	1.700	2.140	10.733	10.394	1.667	2.255	6.828	7.080	0.133	0.149
286	1.600	2.170	9.900	10.464	1.667	2.273	6.918	6.937	0.122	0.158
287	1.800	2.312	9.233	10.357	1.867	2.302	7.047	7.067	0.115	0.170
288	1.700	2.409	9.033	10.325	1.900	2.322	7.413	7.197	0.129	0.168
289	1.500	2.363	9.233	10.378	1.733	2.315	7.405	7.310	0.134	0.168
290	1.700	2.277	9.467	10.411	1.633	2.289	7.137	7.186	0.143	0.169
291	1.600	2.256	9.700	10.371	1.700	2.262	6.527	7.156	0.137	0.174
292	2.000	2.338	9.967	10.616	2.000	2.357	6.385	7.048	0.135	0.174
293	1.900	2.496	9.967	10.772	2.133	2.416	6.522	7.055	0.130	0.178
294	2.000	2.491	9.867	10.638	2.367	2.418	6.758	7.127	0.122	0.184

295	1.900	2.459	9.800	10.379	2.367	2.382	7.277	7.307	0.129	0.185
296	1.900	2.489	9.800	10.313	2.400	2.432	7.288	7.332	0.133	0.184
297	1.600	2.664	9.933	10.690	2.300	2.539	7.118	7.071	0.145	0.178
298	1.700	2.739	9.967	10.630	2.400	2.537	6.777	6.927	0.147	0.178
299	1.700	2.675	10.333	10.713	2.500	2.483	7.013	6.963	0.163	0.178
300	1.800	2.476	10.467	10.532	2.467	2.376	7.193	7.041	0.163	0.196
301	1.500	2.343	10.633	10.461	2.467	2.334	7.337	7.231	0.171	0.214
302	1.800	2.168	10.400	10.170	2.633	2.232	7.508	7.184	0.187	0.218
303	1.800	2.203	10.600	10.167	2.700	2.243	7.597	7.302	0.217	0.212
304	1.700	2.221	10.700	10.275	2.900	2.263	7.345	6.937	0.269	0.202
305	1.900	2.308	10.967	10.396	2.833	2.359	6.872	7.047	0.301	0.197
306	1.700	2.411	10.867	10.677	2.900	2.521	6.385	6.989	0.324	0.200
307	1.800	2.428	10.767	10.745	2.800	2.561	6.350	7.310	0.288	0.208
308	1.800	2.487	10.633	10.630	2.700	2.563	6.235	7.479	0.254	0.221
309	1.700	2.438	10.300	10.329	2.700	2.463	7.012	7.651	0.215	0.217
310	1.800	2.398	10.033	10.194	2.767	2.417	7.102	7.712	0.200	0.206
311	1.800	2.316	9.933	10.187	2.967	2.398	7.273	7.559	0.218	0.198
312	1.600	2.320	9.967	10.406	3.133	2.404	6.957	7.275	0.253	0.203
313	1.700	2.439	10.100	10.607	3.167	2.452	7.227	7.013	0.281	0.211
314	1.500	2.527	10.267	10.754	3.167	2.487	7.600	7.092	0.241	0.224
315	1.700	2.442	10.467	10.402	3.100	2.420	8.053	7.291	0.193	0.234
316	1.700	2.443	10.333	10.453	3.033	2.442	8.617	7.041	0.176	0.226
317	1.500	2.463	10.500	10.609	2.867	2.525	8.438	6.858	0.186	0.214
318	1.700	2.584	10.900	10.856	2.667	2.639	7.910	6.885	0.196	0.198
319	2.000	2.606	11.167	10.857	2.500	2.670	7.112	7.325	0.166	0.212
320	1.800	2.585	11.067	10.709	2.400	2.593	6.977	7.522	0.168	0.217
321	1.800	2.517	10.567	10.619	2.467	2.555	7.012	7.508	0.161	0.233
322	2.000	2.491	10.400	10.453	2.467	2.496	7.267	7.606	0.190	0.235
323	1.700	2.583	10.400	10.613	2.467	2.599	7.980	7.716	0.204	0.232
324	1.900	2.594	10.667	10.474	2.233	2.658	8.130	7.862	0.209	0.221
325	2.200	2.621	11.133	10.548	2.167	2.789	7.940	7.892	0.215	0.209
326	2.200	2.630	11.533	10.552	2.233	2.819	7.243	7.823	0.217	0.213
327	2.000	2.817	11.800	11.039	2.600	3.015	6.973	7.611	0.239	0.209

328	1.900	2.995	11.467	11.453	2.733	3.089	6.900	7.433	0.223	0.216
329	2.200	2.946	11.000	11.309	2.833	3.062	6.970	7.516	0.262	0.221
330	1.900	2.893	10.700	11.312	2.633	2.912	7.052	7.533	0.284	0.228
331	2.100	2.694	10.700	10.894	2.900	2.814	6.970	7.739	0.287	0.222
332	2.300	2.733	10.600	11.242	2.600	2.874	6.545	7.605	0.233	0.216
333	2.400	2.623	10.700	11.132	2.400	2.851	6.277	7.623	0.185	0.215
334	1.900	2.586	10.700	11.173	1.933	2.826	6.327	7.807	0.175	0.219
335	2.600	2.559	10.733	10.857	2.000	2.744	6.742	8.016	0.169	0.221
336	2.700	2.592	10.633	10.744	2.133	2.740	7.167	8.261	0.177	0.226
337	2.700	2.670	10.667	10.696	2.467	2.776	7.752	8.300	0.201	0.221
338	2.500	2.699	10.600	10.563	2.533	2.800	7.733	8.211	0.210	0.224
339	2.900	2.703	10.867	10.528	2.667	2.815	7.448	8.247	0.212	0.224
340	2.700	2.740	11.333	10.799	2.333	2.863	6.958	7.948	0.205	0.228
341	2.600	2.748	11.833	11.216	2.467	2.947	6.957	7.870	0.219	0.231
342	2.400	2.710	11.633	11.204	2.433	2.960	7.475	7.842	0.236	0.238
343	2.600	2.696	11.400	11.001	2.633	2.984	8.065	8.092	0.277	0.243
344	2.700	2.782	11.100	10.956	2.567	2.983	8.898	8.155	0.285	0.218
345	2.900	3.012	11.000	11.412	2.667	3.159	8.907	8.206	0.281	0.201
346	2.600	3.138	10.833	12.023	2.933	3.314	8.552	8.134	0.259	0.189
347	2.000	3.133	10.767	12.226	3.200	3.394	7.995	8.263	0.238	0.215
348	2.000	3.145	10.900	12.285	3.467	3.427	8.305	8.248	0.235	0.224
349	1.900	3.145	10.900	12.113	3.467	3.379	8.708	8.354	0.207	0.239
350	2.100	3.047	10.800	11.895	3.433	3.327	8.897	8.434	0.200	0.243
351	2.200	3.050	10.600	11.810	3.467	3.337	8.768	8.533	0.205	0.246
352	2.000	2.954	10.333	11.652	3.467	3.324	8.920	8.290	0.200	0.241
353	2.300	3.089	10.467	12.043	3.367	3.470	8.973	8.006	0.198	0.228
354	2.200	3.061	10.733	12.121	3.200	3.458	9.100	7.879	0.174	0.222
355	2.200	3.104	10.900	12.162	3.267	3.495	8.895	8.265	0.173	0.219
356	2.300	3.041	10.733	11.859	3.367	3.405	9.342	8.511	0.167	0.224
357	2.000	2.964	10.267	11.761	3.467	3.392	9.538	8.700	0.155	0.232
358	2.100	3.004	10.233	11.809	3.533	3.391	10.12 ₈	8.617	0.159	0.235
359	2.300	3.079	10.533	11.912	3.700	3.439	9.950	8.590	0.201	0.224
360	2.400	3.106	11.267	11.715	3.900	3.362	9.910	8.479	0.253	0.220

361	2.600	3.112	11.967	11.701	4.000	3.358	9.568	8.430	0.331	0.214
362	2.300	3.015	12.133	11.409	4.000	3.288	9.482	8.606	0.388	0.231
363	2.400	3.013	12.100	11.543	3.833	3.351	9.882	8.814	0.450	0.236
364	2.000	2.926	11.767	11.451	3.667	3.321	10.25_4	8.953	0.422	0.247



부록 2 하수처리장 유출수의 실측치와 RSM 회귀분석에 의한 예측치

	유출 BOD(mg/L)		유출 COD(mg/L)		유출 SS(mg/L)		유출 TN(mg/L)		유출TP(mg/L)	
	실측	예측	실측	예측	실측	예측	실측	예측	실측	예측
1										
2	3.200	2.978	9.933	10.307	2.700	3.22	8.232	8.658	0.195	0.207
3	2.867	2.829	10.033	10.284	2.800	3.176	8.353	8.382	0.168	0.197
4	2.600	2.343	10.500	10.573	2.767	2.723	7.813	7.231	0.162	0.15
5	2.367	2.513	11.000	11.374	2.867	3.154	7.362	7.337	0.156	0.161
6	2.467	2.611	11.233	12.115	2.833	3.452	7.437	7.38	0.163	0.182
7	2.567	2.914	10.900	12.616	2.800	3.669	7.317	7.715	0.173	0.22
8	2.667	2.806	10.700	11.659	2.867	3.497	7.682	7.777	0.175	0.201
9	2.833	2.609	10.667	10.35	3.067	3.06	7.734	8.154	0.165	0.17
10	2.567	2.502	10.867	10.089	3.200	2.911	8.044	8.323	0.155	0.141
11	2.533	2.464	11.100	10.494	3.267	2.925	8.008	8.084	0.161	0.143
12	2.267	2.823	11.500	11.366	3.333	3.387	8.256	8.035	0.176	0.165
13	2.533	2.817	11.200	11.472	3.300	3.427	8.374	8.064	0.169	0.18
14	2.733	3.053	11.033	11.376	3.233	3.166	8.242	8.125	0.163	0.182
15	2.900	3.037	10.933	12.053	2.900	3.14	8.346	8.02	0.171	0.19
16	2.900	2.812	11.367	11.783	3.033	2.807	8.270	8.37	0.192	0.196
17	2.933	2.878	11.467	12.193	3.033	3.165	8.346	8.199	0.230	0.217
18	2.900	2.799	11.200	12.22	3.000	3.106	8.160	7.882	0.245	0.21
19	2.900	2.854	11.367	12.196	2.967	3.032	8.246	7.77	0.296	0.214
20	2.600	2.827	11.567	11.964	2.800	3.006	8.240	8.078	0.280	0.221
21	2.700	2.693	12.100	11.604	2.833	2.605	8.198	8.823	0.255	0.222
22	2.633	2.705	11.867	11.321	2.633	2.59	8.586	8.666	0.203	0.234
23	2.600	2.576	11.767	11.448	2.733	2.666	8.788	8.372	0.191	0.202
24	2.567	2.648	12.133	12.153	2.933	3.031	8.690	8.209	0.204	0.21
25	2.500	2.337	12.233	12.066	3.000	3.076	7.958	8.11	0.209	0.244
26	2.567	2.648	12.533	12.199	2.967	3.24	7.740	8.519	0.214	0.249
27	2.533	2.581	12.067	11.56	2.800	2.761	7.296	7.234	0.206	0.173
28	2.633	2.783	12.167	12.061	2.733	2.671	7.216	7.586	0.200	0.205
29	2.867	2.802	12.300	12.624	2.633	2.63	7.470	7.313	0.206	0.239
30	2.833	2.637	12.133	11.983	2.733	2.39	8.503	8.674	0.220	0.201
31	2.900	2.945	12.133	12.717	3.000	3.156	9.237	8.806	0.219	0.225

32	2.700	3.032	12.633	12.819	3.133	3.41	9.580	8.728	0.214	0.211
33	2.767	3.272	13.267	13.051	3.267	3.569	9.252	8.884	0.189	0.22
34	2.567	2.98	13.633	12.776	3.100	3.386	8.753	8.845	0.179	0.201
35	2.633	3.008	13.167	12.753	3.033	3.359	8.120	8.841	0.179	0.218
36	2.733	2.677	12.433	12.667	2.867	3.223	8.013	8.358	0.178	0.199
37	2.867	2.37	11.800	12.163	2.833	2.929	8.040	8.254	0.180	0.202
38	3.067	2.532	11.433	12.277	2.933	3.027	7.990	8.01	0.178	0.197
39	2.933	2.69	11.867	12.75	3.067	3.232	7.714	8.268	0.183	0.209
40	3.000	3.043	12.367	13.471	3.333	3.682	7.910	8.297	0.192	0.214
41	2.867	3.066	12.767	13.72	3.333	3.559	8.260	8.43	0.185	0.217
42	2.833	3.043	12.700	13.26	3.233	3.177	8.412	8.79	0.182	0.237
43	2.800	3.082	12.500	13.051	3.100	3.48	8.592	8.498	0.203	0.202
44	2.667	3.051	12.767	13.004	3.300	3.669	8.612	8.664	0.234	0.226
45	2.700	3.239	13.033	13.92	3.300	3.787	8.638	9.054	0.266	0.271
46	2.667	2.943	13.433	13.13	3.433	3.492	8.544	8.388	0.289	0.276
47	2.767	3.146	13.500	12.84	3.367	3.51	8.356	8.395	0.322	0.253
48	2.867	3.179	13.600	12.814	3.467	3.422	8.308	8.27	0.319	0.229
49	3.000	3.226	13.433	12.993	3.333	3.447	8.098	8.163	0.305	0.227
50	2.967	3.079	13.400	12.858	3.333	3.464	8.522	8.092	0.256	0.224
51	3.267	3.155	13.567	12.848	3.267	3.517	8.818	8.255	0.240	0.227
52	3.400	3.159	14.333	12.716	3.567	3.587	8.956	8.199	0.232	0.215
53	3.533	3.53	14.400	13.488	3.800	3.863	8.510	8.226	0.240	0.229
54	3.333	3.43	14.433	13.402	4.500	3.758	8.648	8.176	0.258	0.242
55	3.133	3.259	13.933	13.029	4.700	3.616	8.512	7.899	0.245	0.224
56	3.033	2.87	13.600	12.226	4.900	3.205	8.404	7.743	0.243	0.219
57	3.167	2.998	13.667	12	4.833	3.383	8.422	8.076	0.251	0.196
58	3.467	3.199	13.833	12.421	4.967	3.533	8.660	8.44	0.287	0.209
59	4.033	3.52	14.133	13.113	4.967	3.873	8.698	8.474	0.314	0.27
60	4.233	3.609	14.200	13.457	5.100	4.147	8.500	8.414	0.346	0.282
61	4.367	3.605	14.033	13.142	5.000	4.087	8.300	8.093	0.338	0.268
62	4.433	3.538	14.000	13.268	4.900	3.819	8.270	8.091	0.338	0.224
63	4.533	3.457	13.733	12.783	4.667	3.45	7.960	8.295	0.305	0.231
64	4.533	3.565	13.533	13.084	4.533	3.62	8.132	8.45	0.305	0.228

65	4.633	3.395	13.400	12.882	4.300	3.61	8.262	8.077	0.276	0.229
66	4.333	3.717	13.567	13.656	3.867	3.772	8.328	7.917	0.251	0.226
67	4.200	3.392	13.800	12.893	3.533	3.456	7.880	7.698	0.213	0.233
68	3.933	3.775	13.767	13.225	3.233	3.473	7.588	7.692	0.201	0.212
69	4.000	3.486	13.367	12.877	3.300	3.572	7.382	7.643	0.181	0.205
70	3.867	3.489	13.000	12.568	3.267	3.617	7.422	7.986	0.163	0.209
71	3.467	3.571	12.633	12.82	3.200	3.69	7.558	8.222	0.154	0.222
72	3.200	3.741	12.133	13.086	2.767	3.73	7.520	8.176	0.154	0.227
73	3.133	3.768	12.067	13.301	2.433	3.688	7.358	7.607	0.161	0.216
74	3.133	3.366	11.867	12.637	2.333	3.223	7.096	7.477	0.165	0.204
75	3.267	2.998	12.100	12.119	2.267	2.972	7.126	7.04	0.173	0.19
76	3.167	2.803	11.700	12.128	2.333	2.954	7.132	6.947	0.176	0.183
77	3.033	2.728	11.500	11.93	2.333	2.871	7.160	7.027	0.179	0.202
78	2.767	2.827	11.033	11.734	2.433	3.064	7.022	7.507	0.169	0.2
79	2.733	2.755	11.167	11.714	2.467	3.091	7.028	7.313	0.163	0.197
80	2.500	2.661	11.333	11.459	2.533	3.244	6.814	7.006	0.151	0.191
81	2.333	2.314	11.600	11.768	2.667	2.964	6.556	6.587	0.150	0.164
82	2.033	2.229	11.533	11.625	2.767	3.031	6.258	6.337	0.150	0.164
83	2.233	2.379	11.733	11.51	2.900	2.825	6.402	6.62	0.149	0.138
84	2.267	2.485	11.800	11.615	2.967	2.795	6.776	6.81	0.151	0.172
85	2.367	2.751	11.900	11.454	2.933	2.97	7.298	7.377	0.159	0.181
86	2.333	2.702	11.867	11.922	2.967	3.073	7.606	7.437	0.164	0.176
87	2.367	2.965	12.000	12.439	3.133	3.177	7.674	7.221	0.167	0.17
88	2.467	2.538	12.033	12.138	3.167	2.937	7.428	6.926	0.164	0.178
89	2.500	2.671	11.767	11.932	3.067	2.974	7.038	7.043	0.162	0.194
90	2.600	2.594	11.733	11.621	2.867	2.732	6.850	6.774	0.164	0.185
91	2.667	2.358	11.600	11.26	2.767	2.665	6.616	6.783	0.168	0.169
92	2.900	2.554	11.400	11.675	2.967	2.883	6.890	6.988	0.172	0.177
93	2.867	2.575	11.200	11.847	3.200	2.928	6.846	6.884	0.169	0.168
94	2.733	2.663	11.333	11.876	3.533	2.957	7.036	7.044	0.169	0.161
95	2.567	2.652	12.133	11.92	3.633	3.122	6.660	6.885	0.176	0.184
96	2.400	2.648	12.067	12.211	3.433	3.213	6.674	7.075	0.174	0.182
97	2.633	2.454	12.033	11.907	3.267	3.265	6.463	7.001	0.170	0.178

98	2.833	2.659	11.733	11.934	2.967	2.854	6.651	6.911	0.167	0.162
99	3.133	2.788	11.733	11.936	2.900	2.619	7.017	6.862	0.174	0.17
100	3.167	2.799	11.700	11.727	2.867	2.634	7.338	7.123	0.180	0.198
101	2.933	2.789	11.667	11.441	2.767	2.704	7.222	6.734	0.171	0.204
102	2.900	2.687	11.767	11.467	2.700	2.877	6.746	6.422	0.161	0.179
103	2.667	2.618	11.867	11.512	2.633	2.768	6.528	6.224	0.150	0.148
104	2.600	2.624	11.933	11.717	2.767	2.732	6.602	6.452	0.157	0.14
105	2.533	2.715	12.067	11.785	2.800	2.758	6.692	6.489	0.170	0.15
106	2.467	2.568	11.833	11.299	2.967	2.809	6.856	6.697	0.176	0.166
107	2.467	2.45	11.367	11.124	2.800	2.772	6.698	6.44	0.163	0.161
108	2.233	2.506	10.900	11.571	2.733	2.802	6.422	6.436	0.148	0.148
109	2.300	2.427	10.767	11.274	2.467	2.579	5.990	6.23	0.137	0.148
110	2.300	2.475	11.033	10.978	2.567	2.535	5.781	6.09	0.145	0.149
111	2.567	2.547	11.433	10.992	2.600	2.489	5.842	6.382	0.149	0.149
112	2.467	2.697	11.633	11.244	2.700	2.586	6.017	6.838	0.159	0.171
113	2.467	2.694	11.433	11.245	2.800	2.717	6.592	6.955	0.164	0.176
114	2.433	2.655	11.400	11.168	3.033	2.7	6.303	6.685	0.219	0.172
115	2.467	2.505	11.300	10.552	3.367	2.77	6.093	6.11	0.219	0.169
116	2.400	2.454	11.533	10.139	3.633	2.844	5.603	6.121	0.225	0.166
117	2.367	2.359	11.733	10.052	3.800	2.836	5.898	6.166	0.175	0.141
118	2.500	2.6	12.000	11.29	3.733	2.808	6.130	6.669	0.170	0.144
119	2.700	2.786	12.167	11.322	3.633	2.924	6.132	6.824	0.165	0.157
120	2.933	2.794	12.033	11.194	3.533	2.956	6.377	7.185	0.153	0.168
121	3.100	2.777	12.067	11.249	3.567	2.923	6.432	7.259	0.155	0.161
122	3.167	2.648	11.833	11.151	3.467	2.863	7.018	7.337	0.157	0.172
123	3.133	2.704	12.733	11.475	3.333	2.779	7.408	7.323	0.160	0.154
124	3.067	2.629	12.800	11.406	3.100	2.746	7.760	7.255	0.159	0.143
125	3.100	2.617	12.867	11.586	3.100	2.806	7.758	7.259	0.155	0.132
126	3.133	2.588	11.467	11.631	3.067	2.863	7.754	7.271	0.149	0.155
127	3.100	2.613	11.233	11.718	2.767	2.877	7.766	7.2	0.138	0.145
128	2.967	2.532	11.300	11.503	2.500	2.668	7.415	7.15	0.130	0.153
129	2.767	2.801	11.900	12.426	2.167	2.816	7.323	7.075	0.128	0.155
130	2.733	2.629	12.067	12.158	2.300	2.72	6.969	6.977	0.127	0.15

131	2.700	2.36	11.933	11.879	2.333	2.641	6.716	6.675	0.120	0.13
132	2.467	2.117	11.367	11.49	2.433	2.344	6.389	6.767	0.126	0.137
133	2.233	2.379	10.933	11.524	2.467	2.601	6.823	6.903	0.126	0.168
134	2.000	2.465	10.567	11.395	2.300	2.652	7.341	6.955	0.122	0.157
135	2.100	2.496	10.833	11.441	2.200	2.704	7.430	6.916	0.110	0.14
136	1.967	2.297	10.900	11.216	2.167	2.705	7.190	6.677	0.114	0.135
137	1.967	2.347	11.267	11.502	2.200	2.712	6.950	6.532	0.118	0.124
138	1.933	2.399	11.400	11.629	2.133	2.736	6.578	6.502	0.123	0.13
139	1.967	2.423	11.700	11.837	2.000	2.706	6.304	6.625	0.125	0.151
140	1.900	2.359	11.700	11.329	1.967	2.802	6.046	6.826	0.127	0.165
141	1.867	2.338	11.633	11.587	2.167	2.849	6.522	6.854	0.130	0.164
142	1.933	2.566	11.467	11.905	2.300	2.932	6.568	6.911	0.131	0.162
143	1.900	2.349	11.533	12.001	2.633	2.752	6.623	6.577	0.136	0.16
144	1.833	2.249	11.567	11.778	2.733	2.63	6.342	6.426	0.138	0.164
145	1.900	1.911	11.533	11.354	2.800	2.453	6.037	6.118	0.143	0.156
146	2.033	1.961	11.633	11.38	2.667	2.398	5.973	6.234	0.149	0.16
147	2.133	2.178	11.700	11.418	2.700	2.607	5.880	6.418	0.153	0.159
148	2.267	2.329	11.833	11.476	2.767	2.654	6.437	6.625	0.156	0.123
149	2.400	2.35	12.067	11.771	2.933	2.806	6.477	6.547	0.158	0.145
150	2.433	2.262	12.400	12.139	3.033	2.926	6.232	6.229	0.171	0.153
151	2.233	2.18	12.700	12.049	2.933	2.89	5.733	5.903	0.182	0.152
152	2.267	2.279	12.600	12.628	3.067	3.022	5.753	5.959	0.191	0.138
153	2.300	2.138	12.567	12.431	3.033	2.74	6.135	6.358	0.187	0.153
154	2.533	2.675	12.667	12.787	3.067	3.147	6.573	7.012	0.176	0.174
155	2.633	2.798	12.767	12.59	2.833	3.06	6.880	7.177	0.169	0.175
156	2.567	3.001	12.000	12.363	2.667	3.145	6.997	7.35	0.175	0.191
157	2.633	2.551	11.700	12.35	3.000	2.963	7.240	7.005	0.188	0.221
158	2.533	2.477	11.133	11.986	3.033	3.004	7.168	6.798	0.192	0.199
159	2.600	2.2	11.667	11.359	3.267	2.605	6.985	6.5	0.182	0.165
160	2.467	2.072	11.467	10.574	2.967	2.486	6.592	6.682	0.179	0.166
161	2.367	2.565	11.567	11.461	2.967	2.764	6.670	6.894	0.181	0.162
162	2.633	2.573	11.433	11.781	2.867	2.944	7.065	7.024	0.185	0.17
163	2.667	2.222	11.667	11.928	3.067	2.788	7.458	6.752	0.184	0.198

164	2.867	2.028	12.333	11.411	3.067	2.62	7.160	6.117	0.183	0.141
165	2.633	2.562	12.900	12.433	3.200	2.756	6.798	6.285	0.186	0.148
166	2.667	2.756	13.233	13.042	3.067	2.601	6.248	6.273	0.185	0.146
167	2.633	2.625	13.000	12.757	3.067	2.753	6.305	6.412	0.179	0.181
168	2.800	2.695	12.733	12.267	2.900	2.909	6.435	6.699	0.171	0.178
169	2.767	2.875	12.133	12.137	2.767	2.916	6.837	6.853	0.164	0.159
170	2.833	2.821	11.867	11.871	2.767	2.923	6.873	6.663	0.158	0.152
171	2.733	2.633	11.533	12.277	2.833	2.836	6.613	6.183	0.154	0.167
172	2.733	2.731	11.833	12.206	3.000	2.881	6.368	6.32	0.148	0.159
173	2.633	2.539	11.700	11.438	2.833	2.631	6.350	6.756	0.140	0.157
174	2.500	2.543	11.600	11.332	2.667	2.566	6.612	6.783	0.142	0.182
175	2.533	2.317	11.100	10.715	2.533	2.454	6.735	7.277	0.144	0.181
176	2.600	2.298	11.033	10.656	2.633	2.399	7.360	7.15	0.149	0.172
177	2.733	2.296	11.067	10.657	2.500	2.428	7.640	7.151	0.146	0.158
178	2.567	2.378	11.500	10.859	2.433	2.429	7.963	6.632	0.150	0.143
179	2.400	2.407	11.800	10.848	2.300	2.418	7.210	6.659	0.146	0.142
180	2.333	2.481	12.000	11.266	2.467	2.424	6.870	6.807	0.142	0.151
181	2.433	2.387	12.000	11.673	2.433	2.312	6.595	6.945	0.140	0.164
182	2.333	2.077	11.900	11.04	2.333	2.256	6.887	6.71	0.146	0.138
183	2.267	1.884	11.333	10.802	2.200	2.155	6.958	7.218	0.140	0.141
184	2.133	2.143	10.900	10.986	2.067	2.06	7.023	7.44	0.133	0.17
185	2.267	2.085	10.467	10.482	2.067	2.09	6.745	6.928	0.118	0.156
186	2.233	2.136	10.667	10.787	2.033	2.247	6.623	6.589	0.122	0.135
187	2.167	2.08	11.067	10.504	2.200	2.291	6.262	6.324	0.119	0.136
188	2.033	2.048	11.300	10.641	2.267	2.112	6.410	6.611	0.132	0.136
189	1.900	1.938	11.633	10.434	2.200	2.043	6.458	6.712	0.141	0.117
190	1.933	1.836	10.800	10.301	2.133	2.021	6.640	6.52	0.138	0.093
191	2.000	1.971	10.700	10.641	2.167	2.169	6.635	6.889	0.124	0.12
192	2.167	2.204	10.367	10.946	2.200	2.245	6.565	6.704	0.110	0.141
193	2.167	2.279	10.967	11.268	2.100	2.27	6.587	6.725	0.115	0.143
194	2.100	2.294	11.267	11.374	2.033	2.141	6.858	6.78	0.129	0.144
195	2.133	1.969	11.567	11.712	2.133	2.101	6.992	6.607	0.138	0.177
196	2.200	1.999	11.833	11.601	2.133	2.009	7.087	7.073	0.148	0.193

197	2.133	1.988	11.300	11.273	2.067	2.151	6.923	6.701	0.233	0.182
198	2.033	2.13	11.133	11.102	2.000	2.124	6.678	6.832	0.227	0.156
199	1.967	2.175	10.700	10.817	1.967	2.197	6.267	6.694	0.214	0.147
200	2.033	2.097	10.933	10.664	2.033	2.095	5.770	6.524	0.116	0.127
201	2.100	2.078	10.700	10.623	2.233	2.242	5.630	6.405	0.118	0.147
202	2.100	2.187	10.733	11.097	2.433	2.351	5.708	6.333	0.126	0.145
203	2.167	2.236	10.833	11.024	2.467	2.605	6.200	6.635	0.138	0.192
204	2.000	2.327	10.700	10.969	2.233	2.5	6.742	6.841	0.133	0.177
205	1.967	2.143	10.400	10.894	2.000	2.278	6.957	6.519	0.125	0.137
206	2.033	2	9.633	10.23	1.933	2.282	7.107	6.62	0.113	0.13
207	2.167	1.93	9.733	10.263	2.033	2.058	6.955	6.772	0.117	0.106
208	2.200	2.107	10.067	10.894	2.233	1.987	6.873	7.346	0.123	0.148
209	2.033	2.081	10.600	11.207	2.333	1.982	6.688	7.348	0.132	0.138
210	1.967	2.035	10.567	10.803	2.400	2.147	6.500	7.088	0.133	0.107
211	1.900	2.002	10.067	10.103	2.333	2.294	6.892	7.224	0.138	0.124
212	1.967	2.053	9.800	9.769	2.333	2.06	7.315	7.624	0.139	0.151
213	2.000	2.182	9.667	10.083	2.267	2.066	7.660	7.748	0.149	0.188
214	2.067	2.111	9.833	9.775	1.933	1.751	7.793	7.72	0.149	0.151
215	2.133	2.012	9.967	9.959	1.833	2.022	8.043	8.362	0.150	0.144
216	2.100	2.088	10.100	10.086	1.800	1.758	8.307	8.061	0.143	0.129
217	2.133	2.079	10.133	10.17	2.067	2.046	8.295	8.269	0.140	0.134
218	2.033	2.391	10.667	10.465	2.100	2.05	8.230	8.414	0.149	0.16
219	1.933	1.99	11.767	10.179	2.067	2.006	8.391	7.73	0.163	0.125
220	2.000	2.072	12.700	11.17	2.067	1.777	8.562	7.729	0.224	0.167
221	2.000	2.041	12.667	11.223	2.000	1.91	8.142	7.414	0.228	0.192
222	2.133	2.069	11.833	10.97	1.967	1.805	7.529	7.263	0.270	0.179
223	2.133	2.098	11.400	10.679	2.033	2.263	7.015	6.939	0.232	0.266
224	2.200	2.25	11.167	10.763	2.100	2.396	6.912	6.916	0.278	0.264
225	2.133	2.104	10.600	10.6	2.300	2.227	7.497	7.175	0.236	0.269
226	1.967	1.95	10.067	10.378	2.333	2.105	7.713	7.124	0.237	0.232
227	1.900	1.934	9.533	9.96	2.233	1.893	8.283	7.205	0.188	0.161
228	1.933	1.992	9.833	9.828	2.033	2.184	7.469	6.905	0.184	0.167
229	2.067	2.115	9.867	9.976	1.933	2.143	7.131	6.97	0.161	0.158

230	2.167	1.992	10.033	10.096	2.033	1.949	6.664	6.669	0.153	0.136
231	2.167	1.946	9.700	9.753	2.033	1.921	7.288	7.429	0.145	0.141
232	2.100	1.94	9.300	9.58	2.067	2.091	7.773	7.375	0.152	0.151
233	1.933	2.003	8.900	9.252	2.000	2.016	7.291	7.121	0.155	0.141
234	1.900	2.032	9.000	9.489	2.100	2.015	6.683	6.491	0.166	0.141
235	1.967	2.035	9.233	9.725	2.100	2.066	5.989	6.467	0.148	0.168
236	2.000	2.097	9.367	10.266	2.067	2.009	6.233	6.376	0.136	0.178
237	2.033	1.946	9.267	9.611	1.967	2.078	6.520	6.749	0.120	0.175
238	1.967	2.01	9.233	9.326	1.967	2.107	6.968	7.217	0.130	0.157
239	2.033	1.934	9.233	8.798	2.133	1.95	7.398	7.492	0.141	0.133
240	2.000	2.071	9.233	8.992	2.333	2.054	7.024	6.952	0.154	0.147
241	1.967	2.028	9.467	9.386	2.400	2.154	6.644	6.452	0.167	0.139
242	2.000	2.086	9.733	9.667	2.367	2.311	6.067	6.359	0.168	0.147
243	2.033	2.063	9.933	9.787	2.200	2.309	6.122	6.345	0.164	0.161
244	2.100	2.003	9.933	9.636	2.167	2.165	6.197	6.52	0.151	0.17
245	2.133	1.864	9.933	9.107	2.100	1.982	6.252	6.86	0.147	0.201
246	2.167	1.934	9.800	9.364	2.000	1.919	6.873	6.939	0.152	0.154
247	2.267	1.972	9.900	9.541	2.000	1.91	7.137	7.133	0.155	0.141
248	2.167	2.051	9.967	9.796	1.933	1.873	7.453	7.099	0.163	0.125
249	2.233	1.799	9.933	8.888	2.000	1.421	6.935	7.043	0.154	0.143
250	2.133	1.791	9.733	8.748	1.967	1.521	6.573	6.837	0.152	0.155
251	2.133	1.822	9.633	9.219	2.067	1.967	6.165	6.692	0.140	0.179
252	2.033	1.901	9.833	9.669	2.133	2.107	6.272	6.818	0.140	0.147
253	1.967	1.793	9.767	9.643	2.367	2.262	6.798	6.916	0.149	0.177
254	2.033	1.949	9.333	9.337	2.300	2.126	6.793	6.737	0.150	0.159
255	2.033	2.123	9.067	9.302	2.033	2.099	6.560	6.167	0.150	0.131
256	2.167	2.314	8.967	9.595	1.600	1.787	6.258	6.675	0.147	0.166
257	2.233	2.258	9.400	9.859	1.600	2.023	6.455	6.485	0.153	0.135
258	2.433	2.206	9.633	9.865	1.800	1.975	6.853	6.553	0.150	0.1
259	2.367	2.251	9.667	10.136	1.900	2.08	6.950	6.482	0.137	0.132
260	2.167	2.086	9.200	9.988	1.800	2.088	7.062	6.816	0.134	0.142
261	1.900	1.687	8.967	8.976	1.867	1.825	6.765	7.098	0.129	0.12
262	1.900	1.986	9.133	9.885	1.867	2.147	6.505	6.925	0.141	0.142

263	1.967	2.067	9.667	10.5	2.100	2.165	6.457	6.926	0.141	0.168
264	2.033	2.301	9.833	10.562	1.933	2.038	6.712	6.924	0.152	0.154
265	1.933	2.121	9.733	9.836	1.933	2.073	6.987	7.117	0.140	0.195
266	2.033	2.133	9.667	9.955	1.767	2.275	7.043	6.996	0.131	0.174
267	2.033	2.195	9.467	9.841	1.933	2.333	7.262	7.239	0.135	0.145
268	2.167	2.195	9.467	10.092	2.033	2.321	7.333	6.886	0.149	0.13
269	2.033	2.105	9.300	9.939	2.300	2.308	7.540	6.712	0.180	0.146
270	2.033	1.993	9.167	9.936	2.333	2.244	7.133	6.371	0.177	0.171
271	1.967	1.954	9.367	9.843	2.567	2.225	6.690	6.422	0.190	0.164
272	2.133	2.239	9.633	10.553	2.433	2.413	6.460	6.7	0.175	0.175
273	2.133	2.3	10.000	10.557	2.367	2.501	6.657	6.915	0.177	0.172
274	2.233	2.258	9.967	10.773	2.200	2.303	6.912	6.946	0.170	0.166
275	2.133	2.311	9.567	10.52	2.100	2.227	6.650	6.955	0.163	0.173
276	2.333	2.268	9.467	10.106	2.033	2.116	6.507	7.138	0.163	0.192
277	2.267	2.148	9.467	9.552	1.967	2.19	7.116	7.201	0.165	0.217
278	2.233	2.26	10.067	9.793	2.000	1.975	8.013	7.681	0.325	0.271
279	2.200	2.146	10.000	9.648	1.967	1.996	8.490	7.875	0.371	0.319
280	2.167	2.432	9.500	9.965	1.933	2.332	8.222	7.51	0.387	0.283
281	2.233	2.417	9.033	10.174	1.933	2.421	7.721	7.295	0.266	0.235
282	2.167	2.285	9.100	10.113	1.767	2.378	7.310	7.062	0.231	0.183
283	2.133	2.215	10.033	9.957	1.700	2.26	6.915	7.01	0.203	0.156
284	2.067	2.208	10.633	9.833	1.533	1.893	6.755	7.164	0.160	0.146
285	2.033	2.336	10.733	10.196	1.667	2.139	6.828	7.123	0.133	0.151
286	2.067	2.401	9.900	10.436	1.667	2.322	6.918	6.868	0.122	0.156
287	2.000	2.294	9.233	10.155	1.867	2.287	7.047	6.56	0.115	0.152
288	1.967	2.256	9.033	10.021	1.900	2.266	7.413	6.668	0.129	0.138
289	1.900	2.194	9.233	9.902	1.733	2.089	7.405	7.02	0.134	0.133
290	1.933	2.116	9.467	9.762	1.633	2.088	7.137	6.917	0.143	0.129
291	1.933	2.01	9.700	9.705	1.700	2.078	6.527	6.838	0.137	0.125
292	2.100	2.246	9.967	10.285	2.000	2.242	6.385	6.665	0.135	0.142
293	2.133	2.247	9.967	10.609	2.133	2.237	6.522	6.529	0.130	0.145
294	2.033	2.095	9.867	10.482	2.367	2.012	6.758	6.572	0.122	0.152
295	1.833	2.041	9.800	10.325	2.367	2.038	7.277	6.753	0.129	0.14

296	1.867	2.012	9.800	10.085	2.400	2.009	7.288	6.936	0.133	0.123
297	1.933	2.122	9.933	10.351	2.300	2.232	7.118	6.523	0.145	0.128
298	2.133	1.986	9.967	9.589	2.400	2.075	6.777	6.302	0.147	0.113
299	2.300	2.42	10.333	10.974	2.500	2.263	7.013	6.852	0.163	0.16
300	2.333	2.238	10.467	10.891	2.467	2.323	7.193	7.031	0.163	0.182
301	2.233	2.383	10.633	10.35	2.467	2.812	7.337	7.226	0.171	0.177
302	2.133	2.28	10.400	10.142	2.633	2.811	7.508	7.602	0.187	0.19
303	2.167	2.253	10.600	10.276	2.700	2.597	7.597	7.489	0.217	0.194
304	2.300	2.426	10.700	10.334	2.900	2.686	7.345	7.555	0.269	0.25
305	2.233	2.612	10.967	11	2.833	2.582	6.872	7.278	0.301	0.219
306	2.367	2.733	10.867	11.033	2.900	2.703	6.385	6.622	0.324	0.227
307	2.533	2.538	10.767	11.07	2.800	2.753	6.350	6.284	0.288	0.235
308	2.633	2.481	10.633	10.569	2.700	3.083	6.235	6.679	0.254	0.183
309	2.633	2.347	10.300	10.598	2.700	2.622	7.012	6.839	0.215	0.175
310	2.600	2.364	10.033	10.322	2.767	2.379	7.102	7.084	0.200	0.172
311	2.633	2.435	9.933	10.457	2.967	2.533	7.273	6.988	0.218	0.225
312	2.633	2.771	9.967	10.653	3.133	2.928	6.957	6.865	0.253	0.25
313	2.467	2.885	10.100	10.48	3.167	3.119	7.227	6.878	0.281	0.263
314	2.467	2.767	10.267	10.559	3.167	3.032	7.600	7.183	0.241	0.232
315	2.533	2.725	10.467	10.86	3.100	3.109	8.053	7.936	0.193	0.201
316	2.767	2.669	10.333	10.9	3.033	2.921	8.617	8.442	0.176	0.163
317	3.033	2.762	10.500	10.384	2.867	2.66	8.438	8.106	0.186	0.187
318	3.067	2.513	10.900	10.027	2.667	2.256	7.910	7.689	0.196	0.203
319	3.067	2.75	11.167	10.997	2.500	2.663	7.112	7.133	0.166	0.25
320	3.000	2.606	11.067	10.934	2.400	2.592	6.977	7.306	0.168	0.248
321	2.933	2.449	10.567	9.936	2.467	2.786	7.012	7.135	0.161	0.261
322	2.767	2.457	10.400	10.416	2.467	2.591	7.267	7.645	0.190	0.223
323	2.567	2.597	10.400	10.647	2.467	2.531	7.980	7.372	0.204	0.214
324	2.433	2.685	10.667	11.149	2.233	2.421	8.130	7.679	0.209	0.22
325	2.433	2.579	11.133	11.337	2.167	2.375	7.940	8.013	0.215	0.239
326	2.433	2.552	11.533	10.969	2.233	2.462	7.243	7.763	0.217	0.211
327	2.533	2.68	11.800	11.417	2.600	2.532	6.973	7.094	0.239	0.198
328	2.467	2.651	11.467	11.181	2.733	2.622	6.900	6.302	0.223	0.217

329	2.333	2.25	11.000	10.378	2.833	2.477	6.970	6.776	0.262	0.198
330	2.267	2.457	10.700	10.524	2.633	2.433	7.052	7.143	0.284	0.217
331	2.400	2.433	10.700	10.452	2.900	2.478	6.970	7.553	0.287	0.211
332	2.633	2.612	10.600	10.694	2.600	2.385	6.545	7.116	0.233	0.214
333	2.633	2.642	10.700	10.818	2.400	2.386	6.277	6.89	0.185	0.197
334	2.667	2.77	10.700	11.156	1.933	2.492	6.327	6.546	0.175	0.229
335	2.500	2.578	10.733	10.794	2.000	2.541	6.742	6.768	0.169	0.23
336	2.700	2.429	10.633	10.347	2.133	2.408	7.167	7.009	0.177	0.208
337	2.500	2.432	10.667	10.805	2.467	2.423	7.752	7.368	0.201	0.214
338	2.433	2.35	10.600	10.632	2.533	2.55	7.733	7.754	0.210	0.224
339	2.200	2.41	10.867	10.853	2.667	2.676	7.448	7.494	0.212	0.211
340	2.267	2.585	11.333	10.925	2.333	2.617	6.958	7.335	0.205	0.203
341	2.367	2.844	11.833	11.509	2.467	2.735	6.957	7.202	0.219	0.236
342	2.533	2.787	11.633	11.398	2.433	2.575	7.475	8.067	0.236	0.268
343	2.633	2.732	11.400	11.134	2.633	2.65	8.065	8.77	0.277	0.27
344	2.667	2.563	11.100	11.286	2.567	2.825	8.898	8.559	0.285	0.236
345	2.467	2.789	11.000	11.472	2.667	3.174	8.907	8.682	0.281	0.28
346	2.567	2.634	10.833	11.153	2.933	3.188	8.552	8.706	0.259	0.296
347	2.600	2.894	10.767	11.145	3.200	3.169	7.995	8.402	0.238	0.209
348	2.800	2.665	10.900	10.465	3.467	2.946	8.305	8.559	0.235	0.173
349	2.633	2.77	10.900	10.22	3.467	3.172	8.708	8.764	0.207	0.172
350	2.767	2.799	10.800	10.279	3.433	3.389	8.897	8.864	0.200	0.214
351	2.900	2.963	10.600	10.752	3.467	3.566	8.768	8.906	0.205	0.255
352	3.067	3.098	10.333	11.183	3.467	3.441	8.920	8.98	0.200	0.242
353	3.167	3.321	10.467	11.671	3.367	3.383	8.973	8.795	0.198	0.228
354	3.133	3.56	10.733	12.343	3.200	3.421	9.100	8.61	0.174	0.216
355	3.133	3.437	10.900	12.01	3.267	3.727	8.895	8.839	0.173	0.234
356	3.200	3.331	10.733	11.646	3.367	3.713	9.342	9.297	0.167	0.23
357	3.233	2.971	10.267	10.701	3.467	3.643	9.538	9.69	0.155	0.239
358	3.267	3.03	10.233	10.955	3.533	3.618	10.128	9.431	0.159	0.231
359	3.067	3.032	10.533	11.005	3.700	3.695	9.950	9.452	0.201	0.239
360	2.867	3.104	11.267	11.687	3.900	3.593	9.910	9.299	0.253	0.266
361	2.767	2.962	11.967	11.835	4.000	3.581	9.568	9.733	0.331	0.313

362	2.767	2.828	12.133	12.111	4.000	3.61	9.482	10.001	0.388	0.377
363	2.900	3.017	12.100	11.656	3.833	3.819	9.882	10.102	0.450	0.347
364	3.033	2.89	11.767	10.973	3.667	3.796	10.254	9.939	0.422	0.348

