



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](#)

工學碩士 學位論文

터널 폐수처리를 위한 일체형 고속응집  
침전장치의 적용



2007年 2月

釜慶大學校 大學院

環境工學科

鄭世永

工學碩士 學位論文

터널 폐수처리를 위한 일체형 고속응집  
침전장치의 적용

指導教授 姜 壬 錫

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2007年 2月

釜慶大學校 大學院

環境工學科

鄭世永

# 鄭世永의 工學碩士 學位論文을 認准함

2006年 12月 22日



主 審 工學博士 李 柄 憲



委 員 理學博士 朴 清 吉



委 員 工學博士 姜 壬 錫



# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 문헌연구 .....	3
2.1 응집 및 침전공정 .....	3
2.1.1 응집 메카니즘 .....	3
2.1.2 침전공정 .....	8
2.1.3 침전공정 종류 .....	11
2.2 터널폐수의 특성 .....	16
2.3 터널폐수의 방류 기준 및 슬러지의 재이용을 위한 관계법령 .....	17
제 3 장 재료 및 방법 .....	22
3.1 응집 실험장치 .....	22
3.1.1 Jar-Test .....	22
3.1.2 In-line 정적혼화 장치 .....	23
3.1.3 일체형 고속응집침전장치 .....	24
3.1.4 침전관 시험 .....	24
3.2 수질분석방법 .....	26
제 4 장 결과 및 고찰 .....	28
4.1 터널폐수 처리를 위한 응집-침전효율 평가 .....	28
4.1.1 Jar-test 결과 .....	28
4.1.2 터널 폐수의 입자 침강시험 .....	29
4.1.3 폴리머 주입에 따른 침전효율 평가 .....	36
4.2 Lab-Scale PICAF(LS-PICAF)의 응집 특성 .....	39
4.2.1 Back mixer와 Lab-Scale PICAF의 비교 .....	39

4.2.2 Lab-Scale PICAF에서 cone과 baffle의 효과 .....	41
4.2.3 Lab-Scale PICAF 공정에서 응집 pH의 영향 .....	45
4.3 일체형 고속 응집침전 장치의 수리학적 특성 .....	47
4.3.1 입체형 고속 응집침전 장치의 수리계산 .....	47
4.3.2 반응부에서의 추적자 실험 .....	52
4.3.3 반응부에서의 CFD 모사 분석 .....	56
4.4 터널공사 현장에서 발생하는 폐수의 PICAF 처리 결과 .....	57
4.4.1 폐수의 처리 특성 .....	57
4.4.2 PICAF에서 발생하는 터널 폐수 슬러지의 재이용 평가 .....	59
제 5장 결 론 .....	63
감사의 글 .....	65
참고문헌 .....	67



## List of Tables

Table 2.1 Guideline of acceptable for pollutants discharge in Korea .....	17
Table 3.1 Analytical method and instruments .....	26
Table 4.1 Settling velocity(m/min) on height of column and settling time .....	30
Table 4.2 Calculation of Coefficient of kinematic viscosity and Reynolds number	50
Table 4.3 Analysis of index method .....	53
Table 4.4 Calculation of coefficient form Index method .....	55
Table 4.5 Efficiency of PICAF treatment for tunnel wastewater .....	58
Table 4.6 Analysis of water content of sludge from tunnel wastewater .....	59
Table 4.7 Analysis of mineral content of sludge from tunnel wastewater .....	60
Table 4.8 Analysis of hazardous material of sludge from tunnel wastewater .....	62

## List of Figures

Fig. 2.1 Schematic diagram of the enmeshment process for a hydrolyzing metal coagulant. ....	5
Fig. 2.2 Schematic representation of the bridging model for the destabilization of colloid by polymers. ....	6
Fig. 2.3 Relationship between settling type, concentration, and flocculent nature of particles. ....	10
Fig. 2.4 Diagram of sludge thickener of sedimentation basin where thickening is taking place. ....	11
Fig. 2.5 Schematic of superpulsator clarifier. ....	13
Fig. 2.6 Schematic of ACTIFLO process(Courtesy of U.S.Filter, Inc). ....	14
Fig. 2.7 Schematic of Densadeg Clarifier. ....	15
Fig. 2.8 Schematic of GEWE Lamella. ....	15
Fig. 2.9 Program of reuse and treatment of sludge from tunnel wastewater. ...	18
Fig. 3.1 Schematic diagram of jar and paddle used for 2ℓ reactor test. ....	22
Fig. 3.2 Schematics of in-line static mixer element. ....	24
Fig. 3.3 Schematic diagram of PICAF unit. ....	25
Fig. 3.4 Schematic diagram of settling column test. ....	25

Fig. 4.1 Changes in turbidity on alum dose. ....	29
Fig. 4.2 Residual SS concentration on settling velocity(initial SS: 60mg/L, I type settling). ....	31
Fig. 4.3 Removal efficiency of SS on settling time(min) (initial SS: 60mg/L, II type settling). ....	31
Fig. 4.4 Residual SS concentration on settling velocity(initial SS: 220mg/L, I type settling). ....	32
Fig. 4.5 Removal efficiency of SS on settling time(min) (initial SS: 220mg/L, II type settling). ....	32
Fig. 4.6 Residual SS concentration on settling velocity(initial SS: 680mg/L, I type settling). ....	33
Fig. 4.7 Removal efficiency of SS on settling time(min) (initial SS: 680mg/L, II type settling). ....	33
Fig. 4.8 Removal curve of SS on column depth and settling time. ....	35
Fig. 4.9 Changes in SS on polymer dose (alum dose: 20mg/L). ....	37
Fig. 4.10 Changes in turbidity on polymer dose (alum dose: 20mg/L). ....	37
Fig. 4.11 Effect of settling time on turbidity. ....	38
Fig. 4.12 Comparison of backmixer and LS-PICAF on residual SS and turbidity. ....	40
Fig. 4.13 Comparison of backmixer and LS-PICAF on settling time. ....	40
Fig. 4.14 Effect of cone and baffle on turbidity (alum dose: 20mg/L). ....	41
Fig. 4.15 Effect of cone and baffle on polymer dose. ....	42
Fig. 4.16 Effect of coagulation pH on turbidity at jar-test. ....	45
Fig. 4.17 Effect of coagulation pH on turbidity at LS-PICAF. ....	46
Fig. 4.18 Configuration of inclined settlers in settling part. ....	48
Fig. 4.19 Effect of cone and baffle on tracer concentration. ....	54
Fig. 4.20 Effect of cone and baffle on accumulation tracer concentration. ....	54
Fig. 4.21 Result of simulation using CFD (vector and streamline. ....	56

# *Application of Packaged Inclined Claifier with Accelerating Flocculation(PICAF) for treat of tunnel wastewater*

*Seh-Young Jeong*

*Department of Environmental Engineering, Graduate school,  
Pukyong National University*

## *Abstract*

The objective of this study was to evaluate the mechanism and removal efficiency of turbidity using Packaged Inclined Claifier with Accelerating Flocculation(PICAF) for the treatment of tunnel wastewater. From the experimental results of this study, the characteristics of coagulation in the reaction part and the characteristics of particle removal in the settling par showed as follows:

According to the result of jar-test and LS-PICAF, the optimum alum and polymer dosage for removing turbidity applied for the coagulation process was 20mg/L and 0.2mg/L respectively. When comparing the settling efficiency, backmixer was more effective than LS-PICAF for the coagulation-sedimentation process. In addition, the most effective pH range for the removal of turbidity was found to be pH 7.0~9.0. The morrill index and modal index from cone and baffle conditions for the reaction in PICAF showed 4.34 and 0.91, respectively, and it can be concluded that the cone and baffle will be effective for coagulation-sedimentation process. Therefore, this PICAF process is the best process for the treatment of tunnel wastewater.

## 제 1 장 서 론

국내 토목 건설현장 등의 대형 건설현장에서 발생하는 폐수는 일반적인 제조업체의 생산 공정에서 발생하는 폐수와는 달리 적절한 처리가 이루어지지 않았다. 이는 오염원의 주성분이 토양의 굴착공사에서 비롯되는 토사인 관계로 그 오염의 심각성이 대두되지 못하였기 때문이다. 하지만 고농도의 토사가 지표수로 유입될 경우 수중 생태계에 악영향을 미칠 수 있으며, 하천 바닥에 누적된 토사는 수로 변화를 일으키거나 차단하는 경우가 발생하여 폭우시 심각한 재해를 유발할 수 있다. 특히 터널공사현장에서 발생하는 폐수는 터널 벽면에 타설되는 쏫크리트(shotcrete)와 공사장에서 흘러나오는 지하수가 혼합된 형태로 발생되며 이로 인하여 폐수의 pH가 12 이상인 강알칼리 폐수가 되며 부유물질 농도 또한 대단히 높아 적절한 처리가 반드시 요구된다(한국수자원공사, 1996). 뿐만 아니라 이러한 터널공사의 대부분이 산악지역에서 이루어지고 있으며, 일부는 상수원보호구역에서도 실시되고 있어 상수원을 오염시킬 가능성도 높은 상황이다.

일반적으로 건설현장에서 발생하는 대부분의 폐수성상 특징으로는 pH가 높고 부유물질 농도가 높은 반면엔 BOD, COD와 같은 유기물 농도는 낮아 기존의 응집-침전과 같은 재래식 방법으로도 쉽게 처리가 가능한 것으로 알려져 있다. 하지만 터널공사의 대부분이 산악지역에 위치하고 있어 터널공사 중 이러한 폐수처리를 위한 별도의 폐수처리장 건설은 주변 지역의 환경파괴와 경제적 비용문제로 고려되지 않는 실정이다. 특히 수질환경보전법 등의 관계법령이 강화되어 터널 폐수의 무단방류 및 기준치를 초과하여 방류할 경우 배출부담금, 및 조업정지와 같은 처벌기준이 강화되고 있는 현실과 민원에 의한 환경문제로 인한 분쟁이 발생되고 있어 건설현장에서 발생하는 폐수의 적절한 처리는 중요한 과제가 아닐 수 없다.

이에 따라 본 연구에서는 응집공정과 침전공정이 하나로 통합된 침전장치인 “일체형 고속응집 침전장치”에 대한 연구를 통해 터널 폐수의 처리특성을 평가하고자 하였다. 이러한 일체형 고속응집 침전장치는 이동성이 뛰어나 설치 및 해체가 용이하여 터널 폐수의 처리에 적합한 장치로 평가된다.

따라서 이러한 일체형 고속응집 침전장치를 터널 폐수의 처리에 적용시 처리효율 및 제거 메카니즘에 대해 연구하고자 하였으며, 세부적인 연구 내용은 다음과 같다.

- 1) 먼저 일체형 고속응집 침전장치의 수리적 계산을 통해 유체 흐름의 특성 파악과 혼화강도를 산출하였다. 또한 터널 폐수 처리를 위한 적정 유·무기응집제 주입량의 산정과 적정 응집 pH 범위를 산출하여 응집 메커니즘을 분석하였다.
- 2) 추적자(Trace test) 시험 및 CFD(Computational Fluid Dynamics) 모사를 통해 응집부 및 침전부에서의 수리거동에 대해 분석하였다.
- 3) 실규모의 일체형 고속응집 침전장치의 운전을 통해 터널폐수의 처리효율과 발생하는 슬러지의 성상 분석을 통해 재이용 가능성에 대해서도 평가하였다.



## 제 2 장 문헌연구

### 2.1 응집 및 침전공정

#### 2.1.1 응집 메카니즘

수중에 존재하는 대부분의 입자들과 mineral, organic 물질은 음(-)으로 하전된 표면전하를 가지고 있다(Niehof and Loeb, 1992; Hunter and Liss, 1979). 이들은 서로 간의 반발력에 의해 일정한 거리를 유지하면서 침전하거나 충돌하지 않고 안정한 상태로 부유하게 된다. 이렇게 음의 전하로 대전되어 안정한 부유상태를 유지하고 있는 콜로이드성 물질에 양의 전하를 띤 응집제를 투입함으로써 전하를 중화시켜 입자간 결합을 가능하게 하는 과정을 불안정화(destabilization)라 하며, 응집(coagulation)이란 불안정화과정과 불안정화된 입자들을 충돌시켜 서로 뭉치게 하는 과정(flocculation)을 포괄하는 개념이다. 이러한 입자의 불안정화는 다음과 같은 메카니즘에 의해 일어난다.

- 1) 전하 이중층 압축(Double layer compression)
- 2) 흡착과 전하중화(Adsorption and Charge neutralization)
- 3) Sweep floc coagulation
- 4) 입자간의 가교작용

#### 1) 이중층 압축

2중층 압축 이론은 비슷한 전하를 띤 입자들 사이에서 정전기적 반발력에 기초를 둔 것으로, 입자와 반대되는 이온들이 증가하게 되면 입자의 분산층(diffuse layer)주위에 이들이 모여들게 되고 정전기적 반발력은 감소되어 분산층은 압축되어진다. 정전기적 반발력이 감소되어짐으로써 입자의 표면전위차는 감소하게 되고 상대적으로 Van der Waals 인력이 강하게 작용하여 입자들은 서로 접근하여 뭉쳐지게 된다(Amirtharajah and O'Melia, 1990). 이러한 이중층 압축에 의해 이루어지는 불안정화 과정은 NaCl과 같은 간단한 전해질을 가해줌으로서 일어날 수 있는데 반대이온의 전하수가 많을수록 그 효과는 증대된다. 하지만 이러한 반응은 매우 느리게 일어나므로 실제 수처리 시스템에서 사용되는 주요 메카니즘은 아니다.

## 2) 흡착과 전하중화

전하중화에 의한 불안정화는 입자들의 표면전하를 감소시킴으로써 이루어지는데, 이러한 과정은 두 가지 process에 의해 일어난다. 첫째, 입자와 반대되는 전하를 가지고 있는 응집제 성분은 입자의 표면에 흡착되어진다. 특히 유기 고분자 전해질이나 금속염 응집제로부터 형성되어지는 가수분해 생성물은 반대전하를 띠는 입자표면에 흡착하려는 강한 경향을 가지고 있다. 이러한 응집제의 입자표면에 흡착하려는 경향은 입자표면에 대한 응집제와 용매의 상호작용, 응집제와의 화학적 친화력, 응집제 표면의 chemical groups에 기인한다. 이러한 응집제의 흡착은 입자의 표면 전하가 역전되어 재안정화가 이루어질 때까지 입자표면에 흡착되어질 수 있다. 일반적으로 가수분해되는 다가 금속이온의 모든 형태는 가수분해되지 않은 이온 보다 콜로이드 경계면에서의 흡착이 더 효율적이고, 흡착된 표면에서의 전하역전의 원인이 되기도 한다 (Matijevic and Jananer, 1966; Weber, 1972; Stumm and Morgan, 1981). 둘째, heterocoagulation은 반대전하를 띤 가수분해 중의 흡착에 의한 표면 전하중화과정과 유사한 불안정화 메카니즘이지만 이 경우에는 하나의 입자가 다른 반대전하 표면에 축적되는 것을 포함한다. 예를 들어 높은 음의 표면전하를 가지고 있는 큰 입자들은 비교적 낮은 양의 전하를 가진 더 작은 입자들과 결합할 수 있다. 이때 입자들은 반대전하를 가지게 되고 전기적 인력은 입자간의 상호작용을 증가시켜 준다. 음의 전하를 가진 더 큰 입자들의 안정화는 축적된 양전하를 띤 입자들에 의해 감소되어지고 더 큰 입자들의 부유상태는 불안정화 되어진다.

## 3) Sweep floc coagulation

Alum이나 철염과 같은 금속염이 수중에 고농도로 용해되거나, 높은 pH 범위에서는 수산화 침전물을 형성하게 되는데 이때 수중의 콜로이드성 입자들은 이들 침전물들에 의해 둘러싸이게 되며 이들 간의 상호 충돌에 의해 floc을 형성하게 된다 (Amirtharajah and O'Melia, 1990). 즉,  $Al(OH)_3$ 와 같은 precipitate가 충분히 형성되어질 때 금속수산화 침전물에 의해 enmeshment 되어지는 입자들은 aggregation과정을 거치게 되는데, 이러한 응집의 과정을 "sweep 응집"이라 한다. 이러한 enmeshment에 의한 sweep 응집의 과정을 도식화하면 Fig. 2.1과 같다. 수산화 알루미늄의 낮은 용해도( $K_{so} = 10^{-32}$ )를 고려하면 실제 정수공정에 이용되는  $Al(III)$ 의 주입량은  $Al(OH)_3$ 에 관하여 과포화 상태를 유발한다. 하지만 이러한 과포화 상태가 금속수산화물의 침전물 형성을 반드시 유발하지는 않는다 (Stumm

and O'Melia, 1968). 이들에 의하면 금속침전물 형성이 일어나기 위해서는 초과포화(supersaturation) 상태를 초과해야 한다고 보고하고 있다.

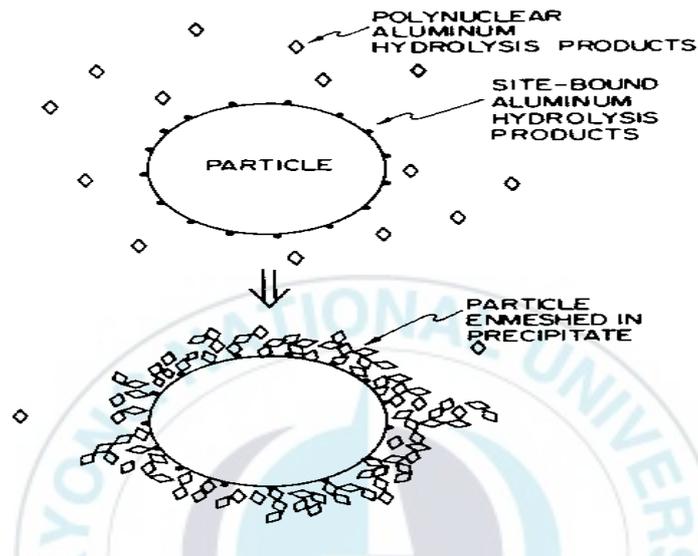


Fig. 2.1 Schematic diagram of the enmeshment process for a hydrolyzing metal coagulant(Letterman, 1991)

콜로이드 입자의 농도가 낮을 경우 응집에 있어서 많은 양의 수산화 침전물이 필요하다. 즉 sweep 응집의 조건하에서는 응집제의 양과 입자의 농도 사이의 관계는 더 이상 정량적 관계에 있지 않다. 정수공정에 있어서 저콜로이드 농도의 젤라틴 상태의 수산화 금속침전물의 형성이 급속히 이루어질 정도로 고농도의 응집제 주입이 응집에 효과적이다. 저탁도 원수의 조건하에서 응집에 필수적인 입자간의 충돌 및 접촉기회가 제한된다. 이러한 조건하에서 금속염 응집제로부터 형성된 고농도의 침전물은 floc의 부피 증가를 가져오고 따라서 입자의 충돌 기회도 증가시키며 이에 따라 보다 침전이 용이한 floc을 형성하게 된다(Dentel and Gossett, 1988). 또한 유기성 polymer를 응집보조제로 사용할 경우 이러한 응집 메카니즘을 기본으로 응집작용을 촉진시켜 주는 보조적 역할을 함으로써 응집의 효율을 높여 주게 된다(한 등, 2003).

#### 4) 입자간 가교작용

입자의 가교작용을 이루는 흡착에 의한 입자의 불안정화는 높은 분자량을 가지고 있는 polymer에 의하여 많은 입자들이 흡착됨으로 인해 발생된다. 즉, 콜로이드 물질이 polymer에 접촉될 때, polymer의 작용기가 입자의 표면에 흡착되고 잔여하는 작용기는 수중에 남게 된다. 만약 다른 콜로이드 물질이 polymer의 비어 있는 작용기에 흡착이 일어날 경우 polymer는 내부 입자의 가교를 형성한다. 따라서 polymer는 전기적인 이중층의 불안정화 외에 충분히 긴 가교를 이룰 수 있는 polymer이어야 할 것이다. 하지만 과도한 polymer에 의한 흡착은 수중에서 재안정화를 야기할 수가 있다. 칼슘과 같은 이온은 polymer 연결에 작용하는 연결작용기로서 입자사이의 가교작용에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Black *et al.*, 1965 ; Lyklema, 1978 ; Dentel, 1991). Fig. 2.2는 폴리머에 의한 입자의 가교작용을 나타낸 것으로 불안정화된 입자들의 표면에 입자와 입자를 연결하여 더 큰 플럭을 형성시키고 있음을 알 수 있다.

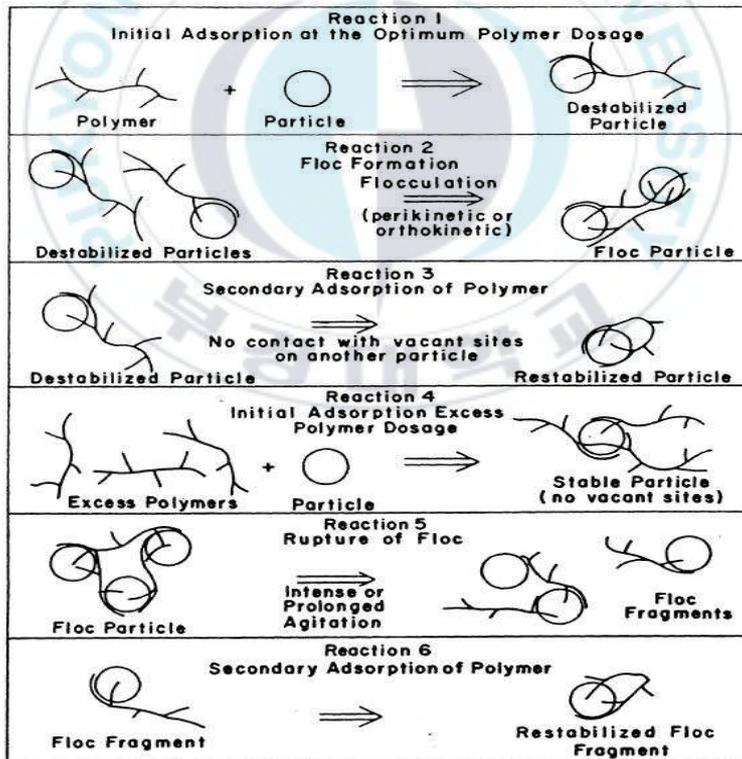


Fig. 2.2 Schematic representation of the bridging model for the destabilization of colloid by polymers(O'Melia, 1972).

## 5) 응집 pH의 영향

Hall과 Packham (1965)의 연구에 의하면 alum을 사용한 유기물 제거에 있어서 적정 pH 영역은 5~6.5 범위라 하였다. 또한 Mangravite (1975)에 의하면 5 mg humic acid/L를 사용한 인공시수에 대한 응집의 경우 응집 pH와 응집제 주입량에 따라 두 가지의 응집영역에서 유기물의 제거가 이루어지는 것을 관찰하였다. 이러한 두 가지의 유기물 제거 영역은 양의 전하를 가진 Al(III)종들과 음전하를 가진 humic acid 분자와의 화학적인 결합에 의한 제거 영역과 알루미늄 수산화물 형성에 따른 흡착으로의 유기물 제거 영역으로 구성되어 있다고 추정하였다. 첫번째 제거 영역에서의 주 mechanism은 알루미늄과의 전하 중화에 따른 침전물 형성에 의한 유기물질 제거를 칭하는 것으로 유기물 제거에 따른 응집 pH 범위는 4~5.5라고 하였다. 이러한 mechanism의 특징은 pH 범위가 좁으며 수중의 유기물질 농도와 적정 응집 주입량 사이에 화학 양론적으로 관계가 성립된다고 하였다. 그리고 두번째 mechanism 영역은 sweep coagulation 영역으로서 비결정성의 Al(OH)<sub>3</sub>가 발생하며 유기물질은 pH 6~8범위에서 Al(OH)<sub>3</sub>의 표면에 흡착됨으로써 제거되어진다고 하였다. 이와 같이 제거 mechanism에 따른 유기물질과 탁질의 차이점은 아래와 같이 제시할 수가 있다. 후자의 sweep coagulation에 의한 mechanism 영역에서의 탁질의 제거는 일반적으로 Al(OH)<sub>3</sub>에 의한 물리적인 제거를 현상에 의해 이루어지고, 전자의 경우인 전하중화와 침전에 있어서는 탁질 주위로 알루미늄 종들에 의한 입자의 불안정화를 초래하여 반발력이 감소됨으로서 탁질 입자가 제거된다. Edwards와 Amirtharajah (1985)에 의하면 humic acid와 응집제를 사용한 응집실험 결과 전하중화와 침전 mechanism 영역의 경우 응집 pH 범위는 4~4.75 그리고 응집제 주입량은 15~80 mg/L로 나타났으며, 과다한 응집제 주입량으로 인하여 재안정화가 발생하였다고 하였다. 또한 sweep coagulation mechanism 영역의 경우에 있어서 응집 pH 범위는 5.75~7.5 그리고 응집제 주입량은 30mg/L로 나타났다고 보고하였다.

## 2.1.2 침전공정

침전공정은 현탁액을 청정액과 보다 농축된 현탁액으로 분리시키는 공정으로서 정수 및 폐수처리에서 가장 일반적이며 중요한 단위공정 중의 하나이다. 침전공정에 있어서 입자의 제거율을 고려한 경우 가장 기초가 되는 지표는 표면부하율(Camp, 1936)이다. 표면부하율은 침전지에서 100% 제거 가능한 가장 작은 입자의 침강속도를 의미하고 있다. 이를 고려할 때 플록의 성질에 대해서 침전공정의 효율을 높이기 위해서는 Stokes 식에 의해서 짧은 체류시간에 침전될 수 있는 크기가 크고 밀도가 높은 플록이 요구된다. 일반적으로 현탁액의 침전과정은 입자의 성질(밀도, 형상, 입경, 입도 분포, 응집성)과 액체의 성질(밀도, 점성) 및 그 유동상태에 따라 다르다. 일반적으로 침전의 형태는 Fig. 2.3과 같이 독립입자의 침전, 응집침전, 간섭침전, 압축침전의 네 가지로 분류하고 있다(Crittenden, *et al*, 2005).

### 1) I형 침전(Type I settling)

I형 침전 또는 독립 침전 (Discrete Settling)은 부유물의 농도가 낮은 상태에서 응결하지 않은 독립입자의 침전이다. 입자는 각각 따로 침전하며 입자간의 응결이나 상호작용이 전혀 없다. I형 침전의 예로는 지표수의 보통침전과 침사지에서 모래 입자의 침전 등이 있다. 독립침전에서 입자는 독립성을 유지하고 침전하는 동안 크기, 모양, 밀도가 변하지 않는다. 입자의 침전속도는 일정하다.

### 2) II형 침전(Type II settling)

II형 침전 또는 응집침전(Flocculant Settling)은 농도가 낮은 응결입자들의 침전이다. 이 경우 입자는 침전하면서 응결하게 되고 따라서 더 큰 입자가 되어 침전속도가 더 빨라지게 된다(침전하는 동안 뭉쳐지는 floc의 밀도가 점차적으로 감소하지만 비중과 침전율의 변화를 야기하여 전체의 침전속도는 증가한다). II형 침전의 예는 폐수의 1차 침전과 화학적으로 응집된 용수 또는 폐수의 침전이다.

### 3) III형 침전(Type III settling)

III형 침전, 즉 지역침전(Zone Settling) 또는 방해침전(hindered settling)은 입자의 농도가 중간 정도인 경우의 침전으로서 입자들이 너무 가까이 있어서 입자간의 힘이 이웃입자의 침전을 방해하게 된다. 입자는 상호간에 상대적으로 고정된 위치에 존재

하며 모든 입자가 동일한 속도로 침전하게 되는데 결국 입자들은 한 덩어리로서 지역적으로 침전하게 된다. 침전하는 덩어리의 상부에서는 침전입자 덩어리와 정화된 액체간에 뚜렷한 고-액 경계면이 생기게 된다. III형 침전의 예는 활성 슬러지 공법의 최종침전지의 중간 정도 깊이에서 일어나는 침전이다. 입자의 덩어리는 독립, 응결입자들보다 늦게 침전하는 경향이 있다.

#### 4) IV형 침전(Type IV settling)

IV형 침전 또는 압축 침전 (Compression settling)은 고농도 입자들의 침전으로 입자들이 서로 접촉하며, 침전은 단지 밀집된 덩어리의 압축에 의해서만 일어난다. IV형 침전의 예는 활성 슬러지 공법의 최종 침전지의 하부(슬러지부)에서 일어나는 압축 침전이다. 독립입자와 응결입자도 지역 침전 또는 압축 침전에 의해서 침전되기도 하나 보통은 응결입자의 침전에서 일어난다.

용수 및 폐수처리에서 농도가 낮은 부유물질의 침전은 대부분 Stokes법칙에 따른다. 자유침강과 간섭침전의 차이는 자유침강의 경우 침전하는 개개의 입자가 각각 서로에게 영향을 주지 않고 독립적으로 침전한다. 이와는 달리 간섭 침전의 경우 농도가 상당히 높은 경우로 입자들 사이의 거리가 매우 가까이 있어서 입자간의 힘(Van der Waals' force)이 이웃 입자의 침전을 방해하게 된다. 따라서 자유 침강의 경우 침전 초기에 입자의 형상 및 크기 등에 따라 일정시간 가속운동을 하다가 종말 속도에 이르러서는 비로소 등속 운동을 하는데 반해, 간섭 침전의 경우 입자간 힘의 작용으로 인해 입자 상호간에 상대적으로 고정된 위치에서 같은 속도로 침전을 하게 된다. 이때 침전 속도는 자유침강에서의 종말속도와는 다르게 된다.

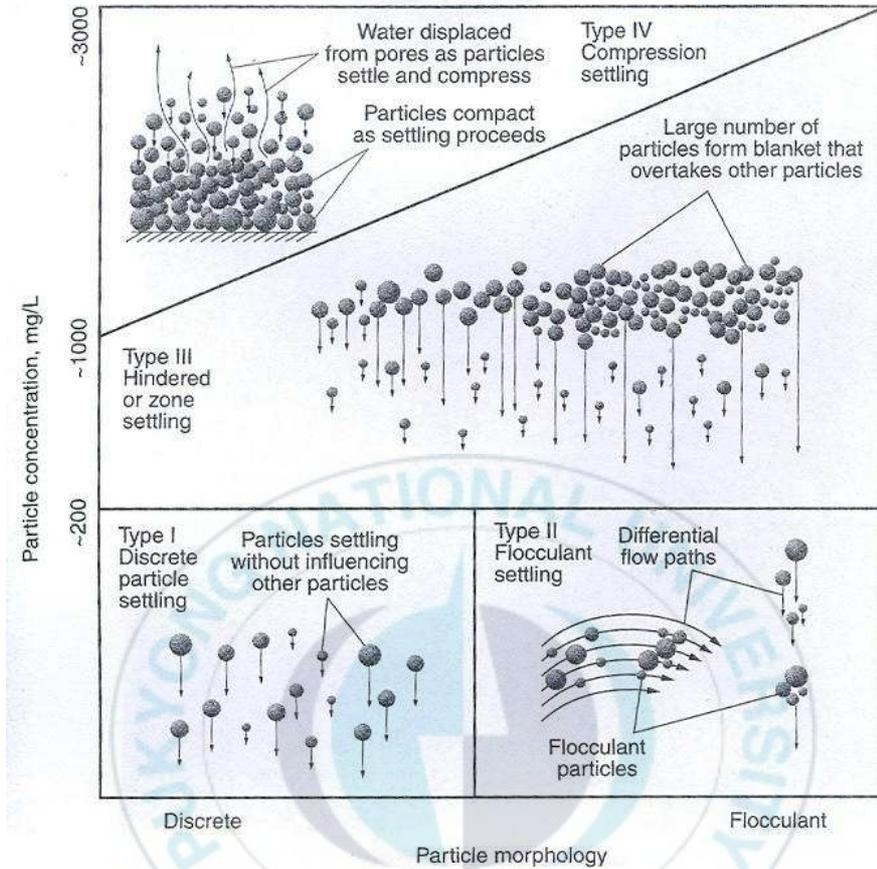


Fig. 2.6 Relationship between settling type, concentration, and flocculent nature of particles.

Fig. 2.4는 원형침전지에서 슬러지 배출에 따른 슬러지 침강·농축을 나타낸 그림이다. 침전지에서 고형물 유동 또는 고형물 침강농축은 중력에 의한 입자의 침강속도와 하부 슬러지배출에 따른 슬러지 층의 이동과 비교할 수 있으며, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$G_T = G_S + G_b$$

여기서,  $G_T$  = 슬러지 배출부로의 총 고형물의 유동,  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{sec}$

$G_S$  = 중력에 의한 침강 유동,  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{sec}$

$G_b$  = 슬러지 배출에 따른 슬러지 층의 유동,  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{sec}$

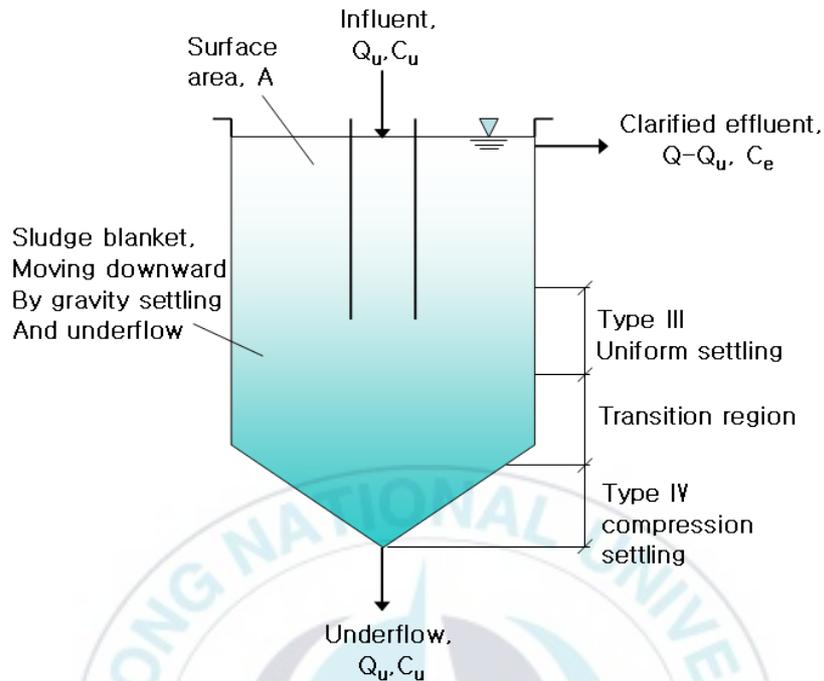


Fig. 2.7 Diagram of sludge thickener of sedimentation basin where thickening is taking place.

### 2.1.3 침전공정 종류

침전은 아주 오래전부터 이용되어 왔으며, 수처리 공정에서도 중요한 역할을 하고 있다. 물보다 무거운 입자는 정체된 물이나 유속이 낮은 물에서 침강하여 물과 분리가 되는데 이와 같은 원리를 이용하여 원수가 천천히 흐르도록 넓은 지에 유입시켜 입자를 분리하는 것을 침전지라 한다. 그러나 입자가 너무 작으면 거의 침전이 되지 않거나 이론적으로는 침전이 되어도 물의 온도차나 바람 등의 영향을 받아 상·하로 혼합되어 실제로는 침전되지 않기도 한다. 오래전에 사용되던 보통침전지는 약품을 사용하지 않고 단순히 침전시키는 기능만을 사용하는 것으로 8~12시간 정도의 체류 시간(침전시간)을 가지므로 수요량이 증가할수록 침전지를 위한 부지소요가 상당히 크게될 뿐만 아니라 8~12시간 이내에 침전되기 어려운 입자가 존재하는 경우 침전이 되지 않은 상태에서 침전지를 통과하여 여과지로 들어가게 된다. 이와 같은 문제점을

해결하기 위하여 입자와 입자의 결합을 유도할 목적으로 응집제를 투입하여 입자들의 크기 및 밀도를 크게 한 후 침전지내에서 빠른 시간 내에 침전이 되도록 하였는데 이런 침전지를 약품침전지라 한다. 이것은 국내의 경우 침전지의 대부분을 차지하고 있고 체류시간은 3~4시간이 보통이다. 이와 같은 3~4시간의 체류시간은 최근 유럽을 중심으로 침전지내 체류시간의 감소를 위한 시스템이 연구되어 적용되고 있는 점이나 북미 등에서 침전지내 체류시간이 1~2시간에 이르는 것과 비교하면 침전지내 체류시간이 상대적으로 길다는 것을 알 수 있다.

약품침전지 내에서의 효율을 향상시키기 위해서는 침전지내에서의 여러 영향보다는 침전지 유입전에 형성된 플럭의 특성에 크게 영향을 받게 된다. 우선, 약품혼화지에서는 원수중에 혼합되어 있는 입자들을 보다 효율적이며 강하게 연결시켜 줄 수 있도록 주입 응집제를 개선하고 주입된 응집제가 효과적으로 작용할 수 있도록 교반강도를 조절하는 등 보다 효과적으로 응집이 이루어질 수 있는 방안이 모색되고 있다. 약품혼화지에서 유출되는 원수는 응집지에서보다 침전성이 양호한 형태의 플럭으로 성장하게 된다. 이와 같은 플럭의 성장을 위해서는 응집지의 형태뿐만 아니라 교반강도, 교반형태, 교반시간 등이 크게 영향을 미치게 되어 이에 대한 연구도 상당히 폭넓게 이루어지고 있다. 침전효율의 차이를 결정하기 위해서는 선행적으로 혼화지나 응집지내에서의 플럭형성 및 성장이 전제되어야 하므로 전처리 공정의 복잡함에 비하여 침전지내에서의 효율향상의 정도는 상대적으로 적은 것으로 알려져 왔다. 이런 이유로 원수중의 입자들이 침전지내에서 제거되는 효율을 침전효율이라고 하면서도, 침전지 자체에서 이를 향상시키기 위한 각종 연구나 노력이 상대적으로 적게 이루어졌다. 침전지 전처리 공정에서 형성된 동일한 플럭이라 할지라도 침전지에서 여러 침전형식, 유입·유출부 형태, 정류벽 여부 등 여러 조건에 따라 침전형태나 침전시간 등에 차이가 남에도 불구하고 국내의 경우 침전지 내에서의 연구는 상당히 적은 편이다. 실제로 약품 침전지를 설치하는 경우에도 장방형의 침전지가 거의 정형화될 정도로 효율향상을 위한 노력이 적은 실정이었다.

그러나 최근의 연구경향은 침전지의 효율을 향상시킴과 동시에 여러 공정을 조합하여 보다 컴팩트한 구조를 만들어 부지면적의 감소를 얻고자 한다. 이를 위해 침전지내에서의 각종 현상에 대한 원인 규명이나 효율향상을 위한 정류벽, 경사판 침강장치 등 지내 구조물의 설치나 유입 및 유출부 구조변경, 침전지의 형태변경 등에 대한 효과분석에 관한 관심이 점차적으로 증가되고 있다. 이중에서도 컴팩트화에 의한 이익을 얻기 위해 처음으로 경사판에 대한 생각이 Hazen(1904)에 의해 시작되었으며, 현

재 설계된 고효율 경사판 침전장치는 다음과 같다.

Fig. 2.5는 기존의 맥동식 침전지의 상부에 경사판을 조합한 형태로 만들어 졌는데, 이 공정은 진공펌프를 이용해 물을 위로 흐르게 한 후 슬러지 층을 형성시킨 후 상부의 경사판에서 슬러지를 분리시키는 방법이다. 이 경사판의 장점은 경사판으로 인하여 침강면적을 증가시키고, 슬러지층을 이용하여 밀도가 높은 슬러지를 형성시키므로 단위 면적당 침전효율이 크다. 그러나 건물 내부에 설치해야 하고, 유량에 의해 침전효율이 큰 영향을 받는다.

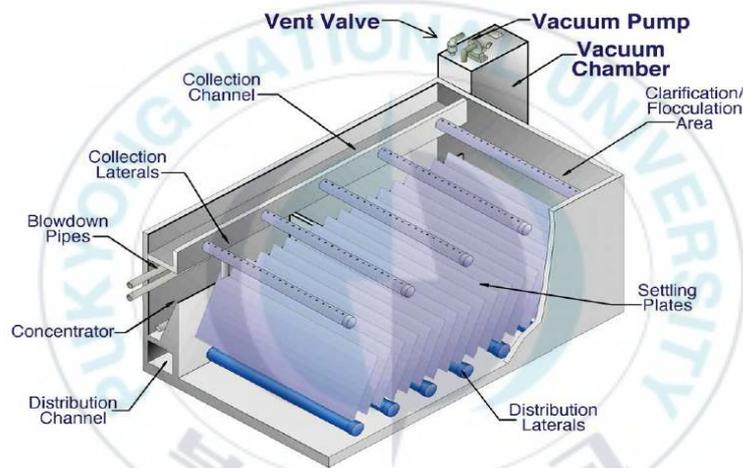


Fig. 2.5 Schematic of superpulsator clarifier.

Fig. 2.6은 혼화와 응집 단계에서 미세한 모래를 주입하여 플럭을 형성시킴으로서 침강성을 높여주고, 침전지의 상부에 경사판을 설치하여 분리를 함으로써 처리효율을 증가시키는 형태로 개발되었다. 이 공정의 핵심은 슬러지에 포함된 미세한 모래를 원심 분리하여 재활용할 수 있도록 한 것이며, 독특한 처리방식으로 최근 유럽 및 북미를 중심으로 인기있는 공정이기도 하다.

Fig. 2.6과 비슷한 공정인 Fig. 2.7은 lamella와 슬러지 블랭킷의 복합공정으로 침전지슬러지의 일부를 응집지로 반송시켜 플럭의 크기와 침강성을 개선하였다. 이 공정 또한 컴팩트화에 중점을 둔 대표적인 예이다.

Fig. 2.8는 기존의 lamella settler가 시설을 새로 설치해야함에 반해 장방향 침전지

의 시설개량을 통해 lamella의 형태로 개량할 수 있는 방향으로 상용화되었다. 원리는 ①을 통해 원수가 유입되고, 하부 유입부(②)를 통해 55° 경사판 (③)을 통과시켜 슬러지를 제거한다. 슬러지를 제거시킨 후 상부 웨어(④)를 거친 처리수를 수로 (⑤)를 통해 모래 여과지로 보내는 방식이다. 축적된 슬러지는 하부에 설치된 수로 ⑥를 통해 제거되는데, 유럽 전역의 정수, 하수종말, 화학, 금속, 제지공정의 폐수처리에 널리 이용되고 있다.

이와 같이 국내에서처럼 경사판 침전지의 사용을 기피하지 않는 선진국에서는 경사판 침전지와 연관된 각종 기술의 발전과 아울러 경사판 침전지의 활용이 점차 늘어나고 있다. 특히, 프랑스를 중심으로 유럽의 여러 국가나 일본에서의 경사판 침전지의 사용이 활발하며 북미지역의 경우도 tube settler 등의 이용이 증가하고 있다.

이런 예들을 종합하여 볼 때 국내에서는 침전지내 효율향상이나 콤팩트화에 관한 연구 또는 새로운 기술개발에 대하여 적극적이지 못하고 있다. 따라서 선진국의 경우보다 경제적이고 효율적인 침전효과를 얻기 위하여 시설의 개선을 위한 각종 기술개발에 노력을 기울여야 하며, 국내에서도 효율저하 문제나 유지관리상의 문제를 적절히 해결해 경사판의 장점을 살리는 각종 기술 개발의 필요성이 요구된다.

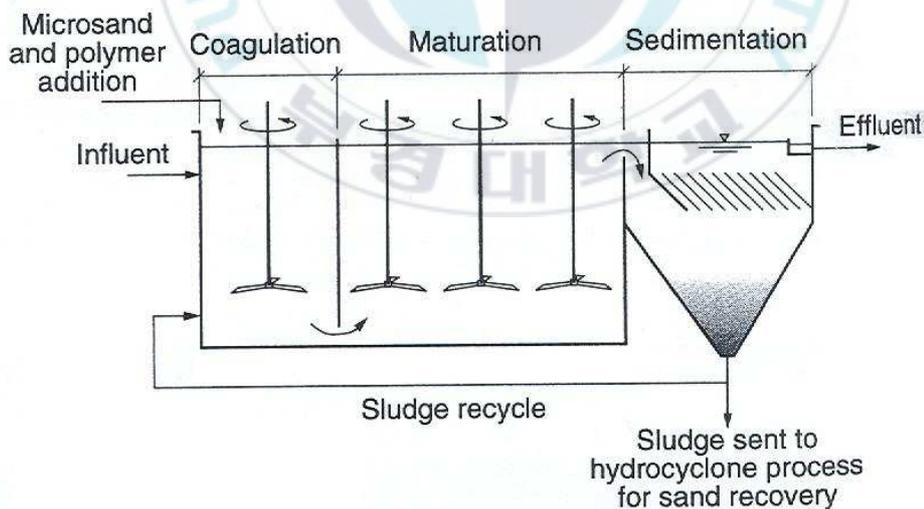


Fig. 2.6 Schematic of ACTIFLO process(Courtesy of U.S.Filter, Inc).

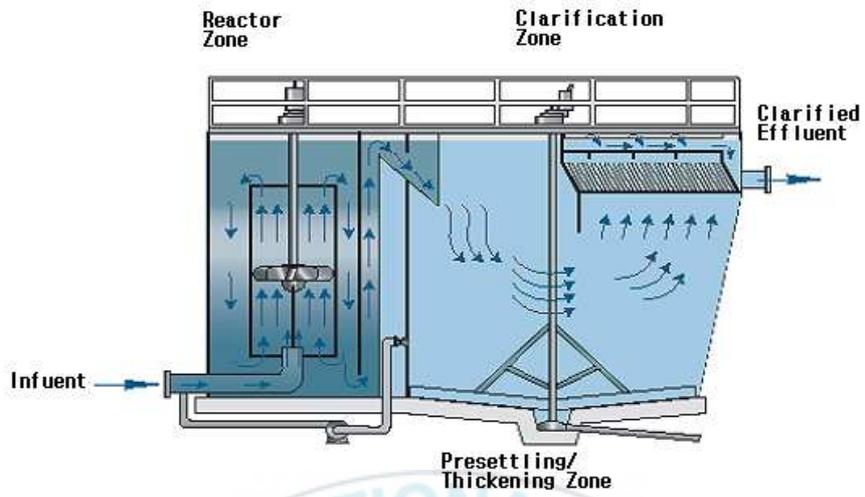


Fig. 2.7 Schematic of Densadeg Clarifier.

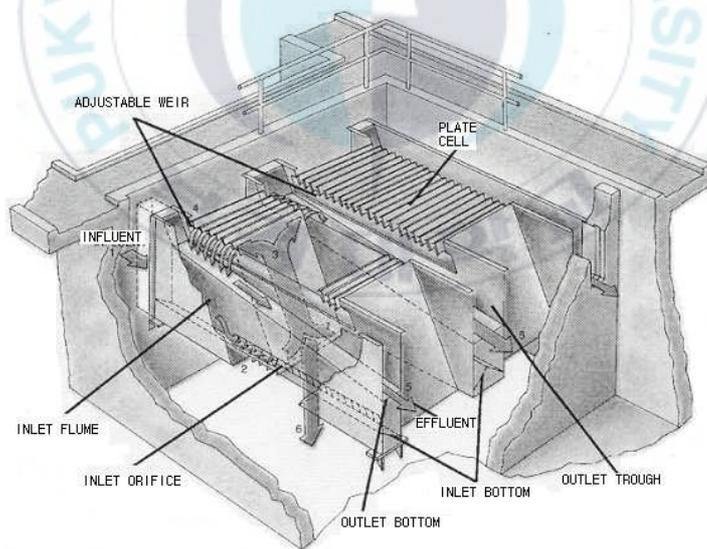


Fig. 2.8 Schematic of GEWE Lamella.

## 2.2 터널폐수의 특성

터널공사 현장에서 발생하는 오탍수는 토사와 암석의 굴착에 의한 미세립분, 공사용수, 슛크리트(shotcrete) 작업에 의한 시멘트 성분의 누출, 지하수의 유출로 인한 발생이 있으며, 세부적인 내용은 다음과 같다.

- 1) 토사 및 암석굴착으로 발생하는 미세립분에 의한 오탍수
- 2) 토사 및 암석의 운반과정에서 누출되는 미세립분에 의한 오탍수
- 3) 터널공사중 발생하는 지하용출수
- 4) 기계굴착의 경우 cutter의 냉각수
- 5) NATM 등 터널굴착면 지반강화를 위하여 시행되는 슛크리트의 시멘트 누출에 의한 탁수
- 6) 석회석, 철광석 등 암석의 화학적 물질의 용출에 의한 탁수

터널공사의 굴착과정에서 발생하는 폐수는 일반적으로 무해한 것이나, 착암과정에서 수반되는 굴착 및 버력반출기에 의한 세립화된 토사의 혼입, 콘크리트 타설 및 약액주입등에 사용된 시멘트와 주입제의 혼입, 터널굴착기에서 미량 누출되는 유분 등의 탁수가 있다. 터널공사에서 발생하는 부유물질(SS)의 농도는 굴착 버력운반 등 터널내의 작업내용에 따라 다르나 일반적으로 200~10,000ppm의 범위에 있고, 평균 500~1000ppm 농도를 가지는 것으로 보고되고 있다(한국수자원공사, 1995). 탁도의 경우 터널의 굴착방법 및 굴착작업 시행여부에 따라 큰 변화를 보이는데, 일반적으로 500-1000 NTU 범위를 가지는 것으로 보고되고 있다(김영한 외, 1995). 그리고 터널 폐수의 pH는 일반적으로 6.5-7.5 정도로서 중화처리를 필요로 하지 않으나, 콘크리트 타설, 약액주입 등을 시행 할 경우에는 pH가 10-13까지 상승하는 경우가 있어 중화처리 공정이 요구된다. 또한 암질 및 토질에 의한 용수자체가 강산성, 강알칼리성을 나타내는 경우도 있어 지질에 따라 폐수의 pH가 달라질 수 있다. 터널 굴착용 기계등에서 누출되는 유분은 부상하기 때문에 유분 흡착제를 이용하여 제거할 수 있다.

### 2.3 터널폐수의 방류 기준 및 슬러지의 재이용을 위한 관계법령

국내 터널공사는 대부분은 도로와 도로를 연결하는 산간지역에서 많이 진행되고 있으며 이러한 공사현장에서 발생하는 터널폐수가 적절히 처리되지 않고 자연수계로 유입될 경우 수서생물의 생태계에 심각한 악영향을 초래할 수 있다. 현재 우리나라 수질환경보전법령에서는 4개 지역으로 나누어 폐수발생량에 따른 수질오염 기준을 각각 달리 정하고 있다. 따라서 터널공사가 진행되는 지역이 수질환경보전법상 어느 지역에 해당하는지 여부에 따라 처리 효율도 달리 할 수 있으므로 이에 따른 법령 해석이 필요하다.

수질환경보전법에서는 청정지역, 가 지역, 나 지역, 특례지역의 4개 지역으로 나누어 차별하고 있다. 먼저 청정지역은 환경기준(수질) I 등급 정도의 수질을 보전하여야 한다고 인정하는 수역의 수질에 영향을 미치는 지역으로서 환경부장관이 정하여 고시하는 지역이며, 가 지역은 환경기준(수질) II 등급 정도의 수질을 보전하여야 한다고 인정하는 수역의 수질에 영향을 미치는 지역으로서 환경부장관이 정하여 고시하는 지역, 나 지역은 환경기준(수질) III, IV, V 등급 정도의 수질을 보전하여야 한다고 인정하는 수역의 수질에 영향을 미치는 지역으로서 환경부장관이 정하여 고시하는 지역, 특례지역은 환경부장관이 공단폐수종말처리구역으로 지정하는 지역 및 시장·군수가 산업입지 및 개발에 관한법률 제8조의 규정에 의하여 지정하는 농공단지로 분류하고 있다.

Table 2.1 Guideline of acceptable for pollutants discharge in Korea

항 목 지 역	1일 폐수배출량 2,000m <sup>3</sup> 이상			1일 폐수배출량 2,000m <sup>3</sup> 미만		
	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)
청정지역	30이하	40이하	30이하	40이하	50이하	40이하
가 지역	60이하	70이하	60이하	80이하	90이하	80이하
나 지역	80이하	90이하	80이하	120이하	130이하	120이하
특례지역	30이하	40이하	30이하	30이하	40이하	30이하

수처리 공정에서 발생하는 슬러지를 자원화 및 재이용할 경우에 우선적으로 슬러지의 유무해성이 검토되어야 한다. Fig. 2.9는 슬러지의 처리 및 재이용 방안을 나타낸 그림으로 슬러지의 처리방법으로서 매립, 소각, 퇴비화(녹농지이용), 건설자재화 등으로 구분할 수 있다. 슬러지의 재이용 방안으로는 퇴비화, 토양개량제, 노반재료, 경량골재, 기와 및 보도블럭 등과 같은 성형품으로 이용될 수 있다.

이러한 용도로 사용하기 위해서는 슬러지의 특성이 중요한데, 하수 슬러지의 경우 유기물 함량이 높아 일반적으로 퇴비화 또는 토지개량제로 많이 이용되고 있다. 하지만 터널 폐수처리공정에서 발생하는 슬러지는 대부분이 점토와 무기성분으로 구성되어 있어 복토재나 보도블럭 등과 같은 성형품으로 재이용 될 수 있다.

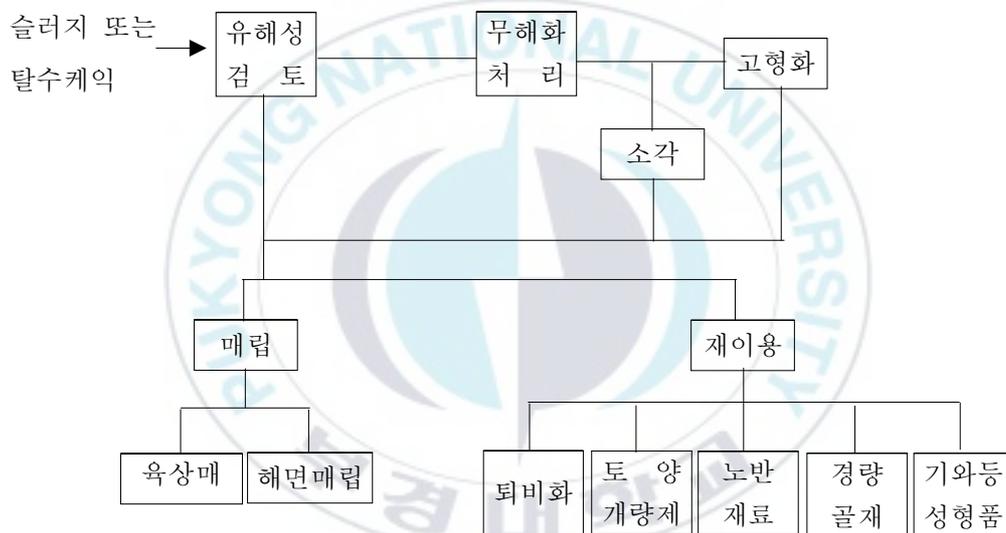


Fig. 2.9 Program of reuse and treatment of sludge from tunnel wastewater.

슬러지의 재이용을 위해서는 먼저 발생된 슬러지가 특성과 유해성 조사를 통하여 일반슬러지인지 특정슬러지인지를 판가름해야한다. 본 연구에 사용된 터널 폐수슬러지는 폐기물관리법에서 지정폐기물로 분류되고 있다. 일반적으로 터널공사 현장에서 발생하는 토사류와 같은 부산물은 건설폐기물로 분류될 수 있는데 이의 관련법규는 다음과 같다.

-건설산업기본법 중에서-

- 건설산업기본법 제2조제4호에 해당하는 건설공사로 인하여 공사를 착공하는 때부터 완료하는 때까지 건설현장에서 발생하는 5톤 이상의 폐기물
- 건설폐기물의 종류(영제2조)
  - 폐콘크리트, 폐아스팔트콘크리트, 폐벽돌, 폐블럭, 폐기와, 폐목재, 폐섬유, 폐벽지, 건설오니(굴착공사, 지하구조물 공사 등을 할 때 연약지반을 안정화시키는 과정 등에서 발생하는 무기성오니를 말한다), 폐금속류, 폐유리, 건설폐토석(건설공사에서 발생되거나 건설폐기물을 중간처리하는 과정에서 발생된 흙·모래·자갈 등으로서 자연상태의 것을 제외한 것을 말한다), 혼합건설폐기물(제1호 내지 제13호의 건설폐기물중 2 이상의 건설폐기물이 혼합된 것으로서 건설폐토석을 제외한다)

하지만 터널 폐수에서 발생하는 슬러지는 단위공정인 PICAF를 거치기 때문에 지정폐기물로 분류된다. 이는 폐기물관리법 시행령에 나와 있으며, 그 내용은 다음과 같다.

-폐기물관리법 시행령 중에서-

지정 폐기물의 종류(제3조관련)

1. 특정시설에서 발생하는 폐기물

가. 폐합성고분자화합물

- (1) 폐합성수지(합성수지제조업의 제조공정에서 발생하는 것에 한한다)
- (2) 폐합성고무(합성고무제조업의 제조공정에서 발생하는 것에 한한다)

나. 오니류(수분함량이 95퍼센트 미만이거나 고형물함량이 5퍼센트 이상인 것에 한한다)

- (1) 폐수처리오니(환경부령이 정하는 물질을 함유한 것으로 환경부장관이 고시한 시설에서 발생하는 것에 한한다)
- (2) 공정오니(환경부령이 정하는 물질을 함유한 것으로 환경부장관이 고시한 시설에서 발생하는 것에 한한다)

이러한 지정폐기물의 처분에서 슬러지의 처분방법에 대한 법규내용은 다음과 같이 나타내고 있다.

-폐기물관리법 시행규칙 중에서-

: 오니의 경우 <시행일 2005. 1. 1>

다음 각호의 1에 해당하는 방법으로 처리하여야 한다.

- ① 소각하여야 한다.
- ② 시멘트·합성고분자화합물을 이용하여 고형화 처리하거나 이와 유사한 방법으로 고형화 처리하여야 한다.
- ③ 수분함량 85퍼센트 이하로 하여 안정화 처리하여야 한다.
- ④ 수분함량 85퍼센트 이하로 하여 지정폐기물을 매립할 수 있는 관리형 매립시설에 매립하여야 한다.
- ⑤ 폐수배출량 2천세제곱미터 이상인 배출업소의 유기성오니는 바로 매립하여서는 아니되며, 소각하거나 시멘트·합성고분자화합물의 이용 기타 이와 유사한 방법으로 고형화 처리하거나 생물학적 처리방법으로 처리하여 퇴비로 사용하거나 환경부장관이 정하여 고시하는 용도 및 방법에 따라 처리하여야 한다. 다만, 수분함량이 75퍼센트 이하인 유기성오니는 지정폐기물을 매립할 수 있는 관리형 매립시설에 매립할 수 있다.
- ⑥ 1일 폐수배출량 700세제곱미터 이상 2천세제곱미터 미만인 배출업소의 유기성 오니도 ⑤와 같이 처리하여야 한다.

PICAF에서 발생하는 슬러지의 재이용을 위해서는 슬러지의 위해성 평가가 요구되며, 평가항목은 폐기물관리법에서 제시하는 항목을 기준으로 하였으며, 그 내용은 다음과 같다. 또한 이를 위해 슬러지의 용출실험을 실시하였으며, 실험방법은 폐기물공정시험방법에 준하여 실시하였다.

-폐기물관리법 시행규칙 중에서-

지정 폐기물에 함유된 유해물질(제2조제1항관련)

1. 오니류·폐흡착제 및 폐흡수체에 함유된 유해물질

- 가. 납 또는 그 화합물(폐기물공정시험방법에 의한 용출시험결과 용출액 1리터당 3밀리그램 이상의 납을 함유한 경우에 한한다)
- 나. 구리 또는 그 화합물(폐기물공정시험방법에 의한 용출시험결과 용출액 1리터당 3밀리그램 이상의 구리를 함유한 경우에 한한다)
- 다. 비소 또는 그 화합물(폐기물공정시험방법에 의한 용출시험결과 용출액 1리터당 1.5밀리그램 이상의 비소를 함유한 경우에 한한다)
- 라. 수은 또는 그 화합물(폐기물공정시험방법에 의한 용출시험결과 용출액 1리터당 0.005밀리그램 이상의 수은을 함유한 경우에 한한다)
- 마. 카드뮴 또는 그 화합물(폐기물공정시험방법에 의한 용출시험결과 용출액 1리터당 0.3밀리그램 이상의 카드뮴을 함유한 경우에 한한다)
- 바. 6가크롬화합물(폐기물공정시험방법에 의한 용출시험결과 용출액 1리터당 1.5밀리그램 이상의 6가크롬을 함유한 경우에 한한다)
- 사. 시안화합물(폐기물공정시험방법에 의한 용출시험결과 용출액 1리터당 1밀리그램 이상의 시안화합물을 함유한 경우에 한한다)
- 아. 유기인화합물(폐기물공정시험방법에 의한 용출시험결과 용출액 1리터당 1밀리그램 이상의 유기인화합물을 함유한 경우에 한한다)
- 자. 테트라클로로에틸렌(폐기물공정시험방법에 의한 용출시험결과 용출액 1리터당 0.1밀리그램 이상의 테트라클로로에틸렌을 함유한 경우에 한한다)
- 차. 트리클로로에틸렌(폐기물공정시험방법에 의한 용출시험결과 용출액 1리터당 0.3밀리그램 이상의 트리클로로에틸렌을 함유한 경우에 한한다)
- 카. 기름성분(중량비로 5퍼센트 이상 함유한 경우에 한한다)
- 타. 기타 환경부장관이 정하여 고시하는 물질

## 제 3 장 재료 및 방법

### 3.1 응집 실험장치

#### 3.1.1 Jar-Test

응집의 교반조건은 교반속도 (rpm)에 따른 평균속도경사 (G) 값을 이용하여 예비실험을 통하여 결정하였다. 응집 실험에 사용된 jar-tester는 Fig. 3.1에서와 같이 2 L용량의 사각형 Jar로  $2.5^W \times 7.5^L$  cm 크기의 paddle (two-blade)식 임펠러를 사용하였다. 응집실험에 사용된 응집제는 알루미늄계 응집제인 Alum ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$ )을 사용하였다. 응집제 주입을 위한 응집제 (alum) 농도는 0.25 M stock solution을 제조하여, 실험 중 응집제의 급격한 정상변화에 의한 영향을 최소화하기 위해서 24 시간 전에 10 g/L dosing solution을 제조하여 사용하였다.

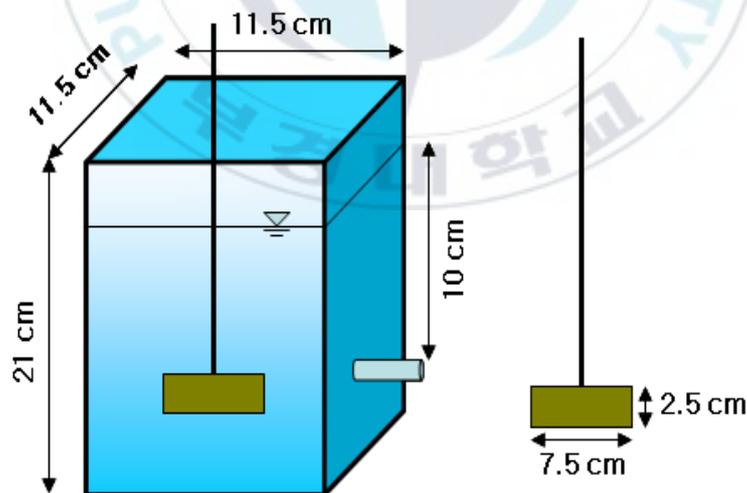


Fig. 3.1 Schematic diagram of jar and paddle used for 2 ℓ reactor test.

### 3.1.2 In-line 정적혼화 장치

실험에 사용된 정적혼화기는 관 내부에 2~5 개의 혼화저류관 (elements)를 부착할 수 있도록 설계되었으며 정적혼화기가 설치되는 관은 아크릴재질을 이용하였으며 element의 재질은 304 스테인레스 스틸로 제작하였다. 정적혼화기 관의 내경은 0.91 cm, 관의 길이는 10 cm 이었으며, Fig. 3.2에는 element의 형상과 제원을 나타내었다. 정적혼화기로의 응집제 주입은 정량주입식 (peristaltic) 펌프를 이용하여 관의 유입부 중양에 주입되도록 하였으며 관내의 수두 손실은 차압계 (differential pressure transducer)를 이용하여 압력손실 ( $\Delta P$ )을 측정하였다. 정적혼화기를 거친 후 응결 (flocculation)을 위하여 jar-test 실험에서 사용한 2 L용량의 사각형 jar를 사용하였다.

일반적으로 응집혼화기의 설계시 속도경사,  $G$  또는 속도경사와 교반시간을 함께 고려한  $GT$ 값을 기준으로 하고 있다. backmixer에서의  $G$ 는 식 (3-1), in-line static mixer에서의  $G$ 는 식 (3-2)를 사용하여 계산하였다.

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad \text{-----(3-1)}$$

여기서,  $P$  = 혼화조로의 유입동력 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{sec}^3$ )

$V$  = 혼화조의 부피 ( $\text{m}^3$ )

$\mu$  = 유체의 점성 ( $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{sec}$ )

$$G = \sqrt{\frac{g u h_L}{L v}} \quad \text{-----(3-2)}$$

여기서,  $v$  = 동점성계수 ( $\text{m}^2/\text{sec}$ )

$u$  = 유속( $\text{m}/\text{sec}$ )

$h_L$  = 손실수두 (m)

$g$  = 가속도 ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

$L$  = 관의 길이 (m)

식 (3-2)에 나타난 바와 같이 정적혼화기 내의 유속 또는 유량에 따라 변화하는 수두손실 ( $h_L$ )을 차압계로 측정하여 교반강도를 속도경사 ( $G$ )로 나타낼 수가 있다. 식

(3-2)을 이용하여 속도경사, G를 측정하기 위하여 다양한 유입 유량과 관 내부의 element 수에 따라 정적혼화기에서 발생하는 수두손실을 차압계를 이용하여 측정하였다.

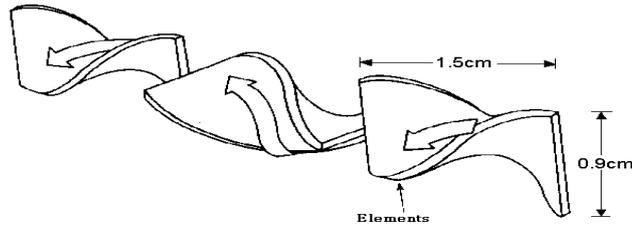


Fig. 3.2 Schematics of in-line static mixer element.

### 3.1.3 일체형 고속응집침전장치

일체형 고속 응집침전장치의 침전 실험을 위해 높이 0.2m, 직경 0.08m의 아크릴 반응조를 제작하였으며, 유량이 10L/hr이 되도록 하였으며, Fig. 3.3에 나타내었다.

응집 반응조 내부에는 플럭 형성을 위한 cone과 baffle이 포함되어 있다. 응집제 주입은 peristaltic 펌프를 이용하여 주입되도록 하였다. 그리고 일체형 고속 응집 경사판 장치는 내부 반응부의 여러 단계로 구성된 미끄럼 원추 (sliding cone)와 정류판 (baffle plate)에 의해 원수가 자연스럽게 혼합되어 보다 큰 플럭이 형성되도록 유도하여 응집 반응이 이루어지게 되어있다. 또한 응집 반응이 이루어진 원수는 침전지의 하부에서 상부로 이동하면서 침전되는 상향류식 침전 방식을 가지고 있다. 상류로 이동하는 원수는 경사판 (inclined plate)에 의해 침전효율이 증대되어 양호한 처리수질을 얻을 수 있게 하였다.

### 3.1.4 침전관 시험

터널 폐수에 포함된 입자의 침강특성을 알아보기 위해 침전관 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 침전관은 Fig. 3.4에 나타난 것처럼 아크릴 재질의 직경이 0.14m, 높이는 2m인 관을 사용하였다. 입자의 침강속도를 측정하기 위해 침전관의 시료 채취지점을 각각 달리 하였으며, 그 위치는 수면으로부터 0.6, 0.9, 1.2m로 하였다.

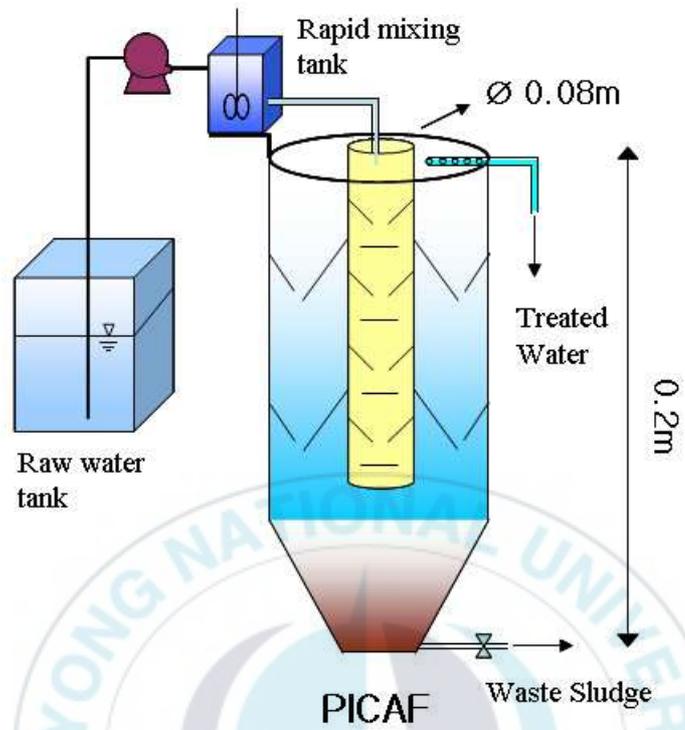


Fig. 3.3 Schematic diagram of PICAF unit.

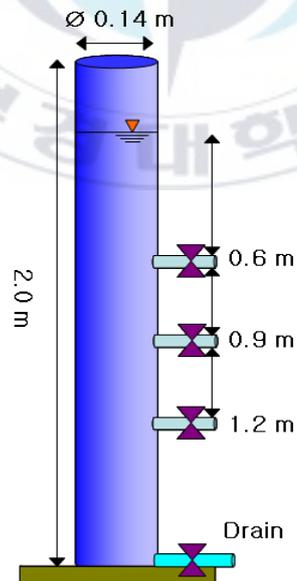


Fig. 3.4 Schematic diagram of settling column test.

### 3.2 수질분석방법

본 실험의 모든 분석은 Standard methods(APHA, AWWA, WPCF, 1998) 및 수질 오염공정시험법에 따랐으며 분석에 사용되는 수질분석 항목 및 방법과 분석기기는 Table 3.1과 같다.

Table 3.1 Analytical method and instruments

Item	Unit	Analytical method and instruments
Jar-test	-	Jar tester(Phipps & Bird, Model 7790-500)
pH	-	pH meter (METTLER DELTA 345)
Turbidity	NTU	Turbidimeter(HACH, 2100P)
SS	mg/L	Standard Method 20th
COD <sub>Cr</sub>	mg/L	수질오염공정시험법
BOD	mg/L	수질오염공정시험법

#### 1) Turbidity, SS

HACH, 2100P 탁도계를 사용하여 0~4000 NTU의 표준용액으로 검량선을 작성하였고 2차 표준액으로 확인 후 탁도를 측정하였다. 탁도는 cell 내의 기포생성에 주의하며 cell을 흔들어서 준 이후 탁도를 측정하였다. SS는 수질오염공정시험법에 준하여 실험을 실시하였다.

#### 2) Particle counter

입도분석은 Vivendi, USfilter 입도분석기를 사용하여 1~50 $\mu$ m 크기의 입자를 측정하였다.

#### 3) UV<sub>254</sub> (UV 254nm absorbance, cm<sup>-1</sup>)

여러 유기탄소 화합물들이 수중에서 lignin, tannin, humic 물질 등의 형태로 존재한다. 이러한 유기탄소 화합물질은 200~400nm의 근자외선 영역에서 최대 흡광도를 나

타낸다. 이러한 사실은 방향족 화합물질(aromatic substances), 불포화지방족 화합물질(unsaturated aliphatic compounds), 포화지방족 화합물(saturated aliphatic compounds)등 탄소 고리가 이중결합 이상을 하고 있는 물질들이 빛을 흡수하는 것에 근거한다. 이러한 이유 때문에 UV-254nm가 UV 흡광도치를 결정하는데 유기물질의 변화상태를 간접적으로 측정하는데 많이 이용되고 있다. 시료는 Type A/E Glass Fiber Filter(Gelman Science)를 사용하여 여과한 후 1cm 석영 cell을 사용하여 파장 254nm에서 spectrophotometer를 사용하여 측정하였다.



## 제 4 장 결과 및 고찰

### 4.1 터널폐수 처리를 위한 응집-침전효율 평가

#### 4.1.1 Jar-test 결과

본 연구는 일체형 고속응집 침전장치의 응집-침전 효율을 평가하기 이전에 터널 폐수에 대한 기초적 응집 실험을 실시하였다. 실험에 사용한 터널 폐수의 pH는 12 이상으로 매우 높게 나타나 응집실험을 하기위해 먼저 가성소다(NaOH)를 이용하여 pH를 7.0~9.0 범위로 조정하였다. 또한 폐수의 초기 탁도에 따른 영향을 알아보기 위해 각각 40, 170, 380 NTU으로 조정하여 실험을 실시하였다.

실험은 alum을 이용하여 jar-test를 실시하였으며, 이때 응집제 주입량은 각각 10, 20, 30, 40, 50mg/L로 하였으며, 30분간 침전 후 잔류 탁도를 측정하였다.

Fig. 4.1은 응집제 주입량에 따른 탁도 제거율을 나타낸 것이다. 실험결과에 나타난 바와 같이 낮은 탁도에서 탁도 제거율이 높게 나타났으며, 각각의 원수 탁도 조건에서 적정 응집제 주입량은 20mg/L인 것으로 나타났다. 일반적으로 지표수의 경우 적정 alum 주입량은 30~40 mg/L이나 본 연구에서는 고탁도 원수임에도 불구하고 적정 주입량이 낮게 나타난 것은 원수중의 낮은 유기물 농도에 기인하는 것으로 판단된다. 이에 따라 이후의 실험에서는 응집제 주입량을 20mg/L로 고정하여 실험을 수행하였다.

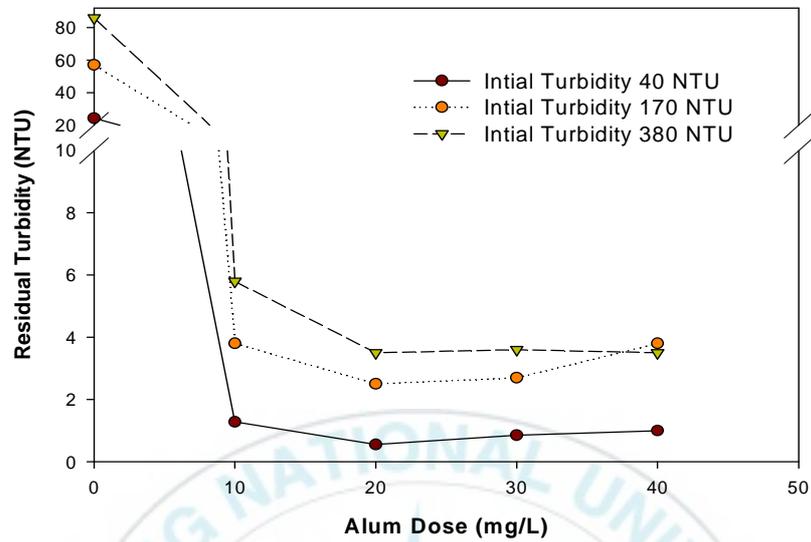


Fig. 4.1 Changes in turbidity on alum dose.

#### 4.1.2 터널 폐수의 입자 침강시험

그리고 터널 폐수에 포함된 입자의 침강특성을 알아보기 다음과 같은 침전관 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 침전관은 아크릴 재질의 직경이 0.14m, 높이는 2m인 관을 사용하였다. 입자의 침강속도를 측정하기 위해 침전관의 시료 채취지점을 각각 달리 하였으며, 그 위치는 수면으로부터 0.6, 0.9, 1.2m로 하였다. 또한, 시료의 채취시간은 5, 10, 20, 30, 60, 90분으로 하였다.

Table 4.1은 침전관의 높이와 시간에 따른 침강속도를 나타내었다.

Table 4.1 Settling velocity(m/min) on height of column and settling time

time(min) height(m)	5	10	20	30	60	90
0.6	0.12	0.06	0.03	0.02	0.01	0.00666
0.9	0.18	0.09	0.045	0.03	0.015	0.01
1.2	0.24	0.12	0.06	0.04	0.02	0.01333

SS 농도에 따른 침전형태를 알아보기 위하여 SS 농도를 각각 60, 220, 680mg/L으로 조절하여 침전관 실험을 수행하였다. Fig. 4.2와 Fig. 4.3은 낮은 SS농도인 60mg/L에서 I형 침전과 II형 침전을 한 실험결과이다. 우선 I형 침전실험 결과에서 침전속도가 0.025m/min 이상이면 약 40% 정도의 제거가 일어난다는 것을 알 수 있다. 이때 일체형 고속 침전장치의 침전부에서 상승 유속이 0.077m/min 임을 감안할 때는 약 20% 정도만이 침전이 가능하고 대부분의 플럭들은 유출수와 함께 빠져나갈 수 있다. 하지만 II형 침전의 결과를 보면 처리수의 방류기준인 40mg/L에는 만족하는 수질을 얻을 수 있다. 또한 SS가 220mg/L인 경우 실험결과를 Fig. 4.4와 Fig. 4.5에 나타내었으며, Fig. 4.2와 Fig. 4.3의 결과와 유사한 결과를 나타내었다. Fig. 4.6과 Fig. 4.7은 SS 농도가 가장 높은 680mg/L의 실험결과를 나타낸 것으로 앞의 저농도에 비해, 침전속도가 낮아서 일부분의 경우에는 방류 기준을 초과하는 것을 알 수 있다. 따라서 SS 농도가 높은 경우처럼 침전속도가 낮아서 제거되지 않는 부유물질은 폴리머를 주입함으로써 침전속도를 증가시킬 수 있다고 판단된다.

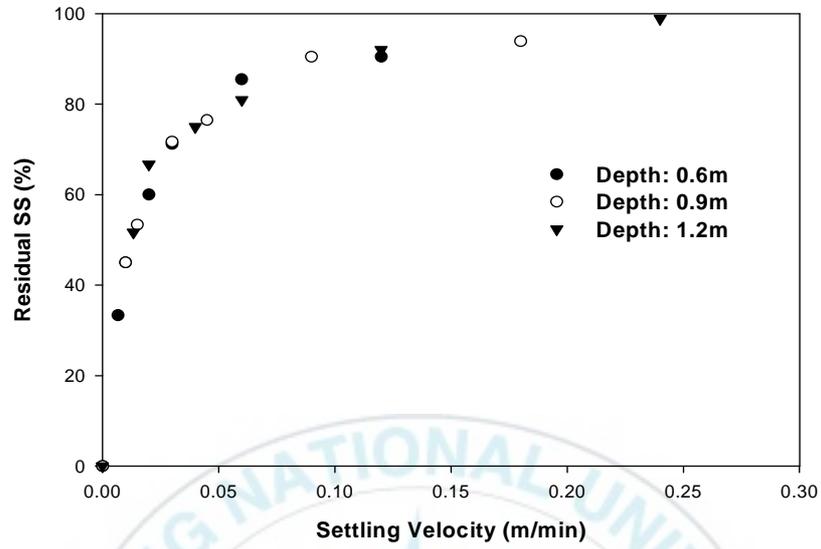


Fig. 4.2 Residual SS concentration on settling velocity(initial SS: 60mg/L, I type settling).

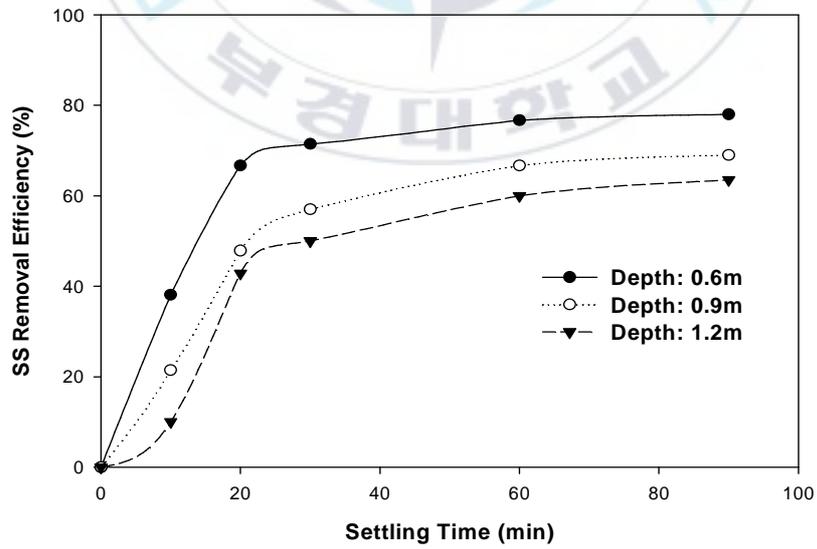


Fig. 4.3 Removal efficiency of SS on settling time(min) (initial SS: 60mg/L, II type settling).

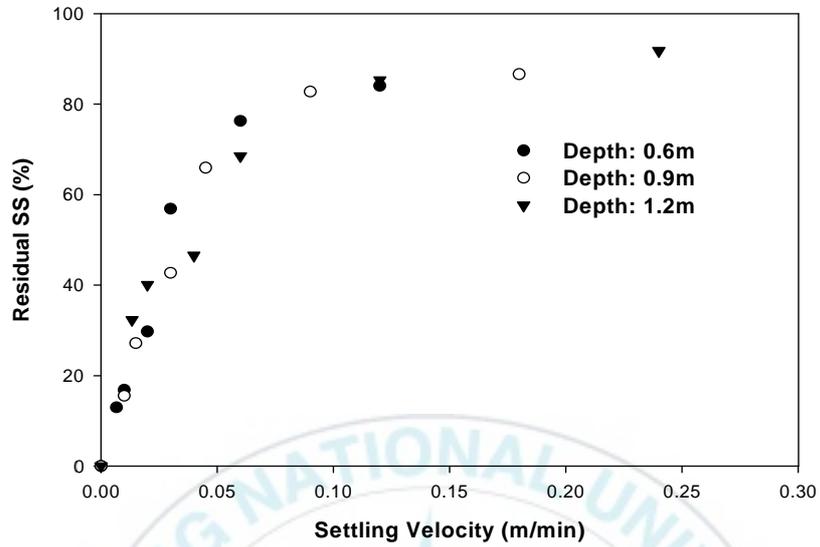


Fig. 4.4 Residual SS concentration on settling velocity(initial SS: 220mg/L, I type settling).

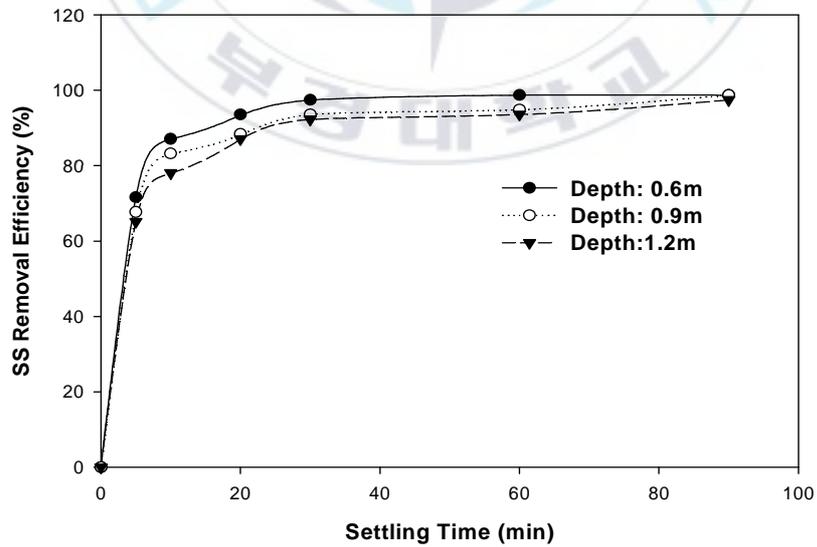


Fig. 4.5 Removal efficiency of SS on settling time(min) (initial SS: 220mg/L, II type settling).

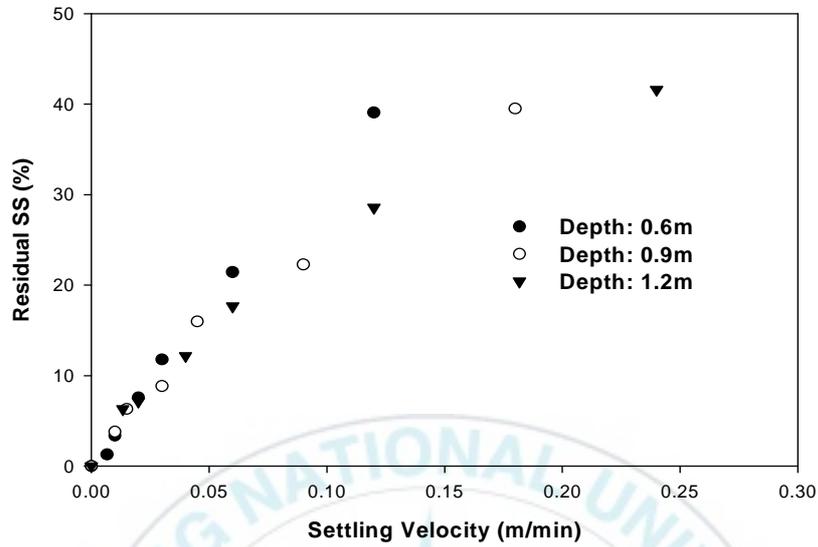


Fig. 4.6 Residual SS concentration on settling velocity(initial SS: 680mg/L, I type settling).

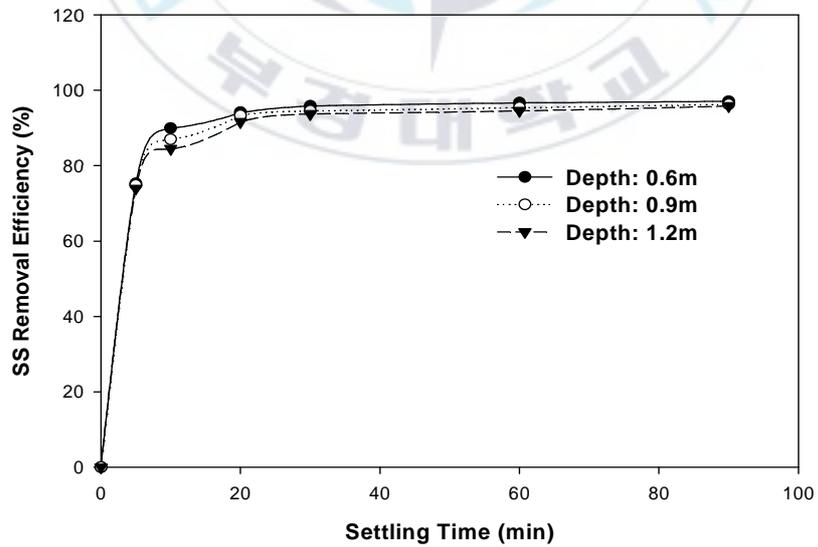
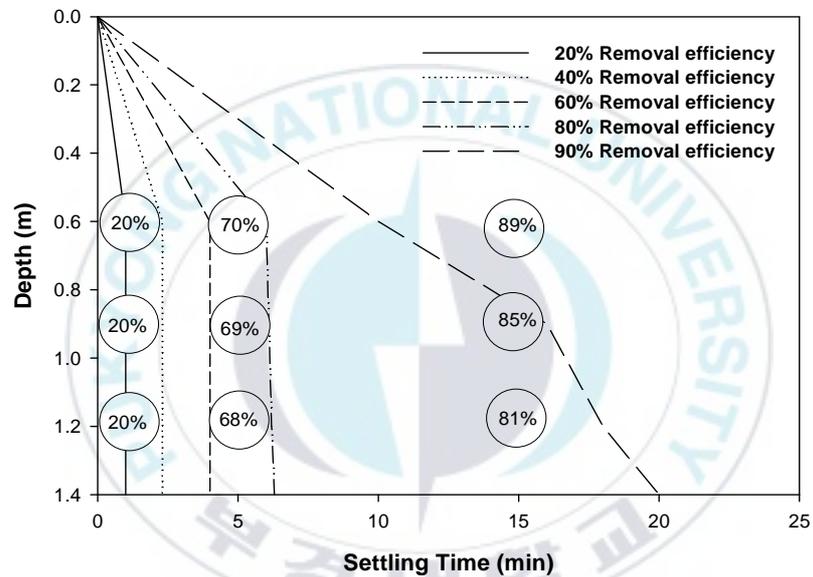
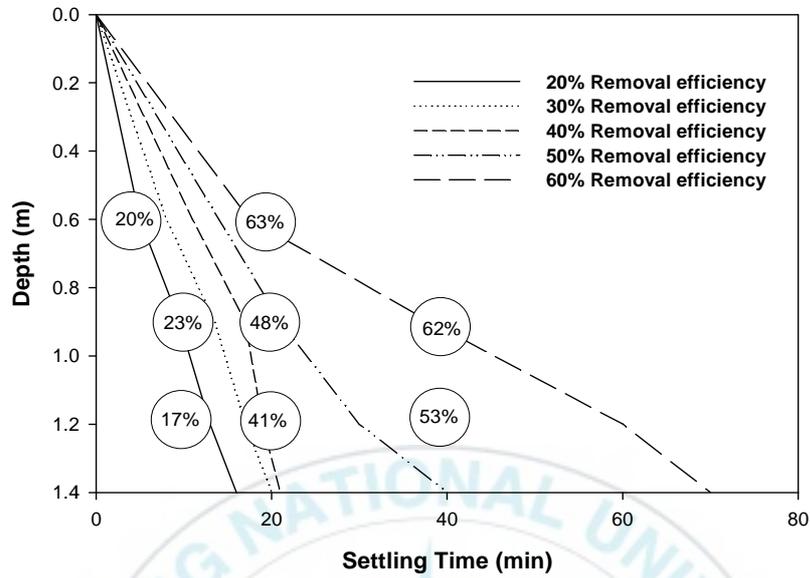


Fig. 4.7 Removal efficiency of SS on settling time(min) (initial SS: 680mg/L, II type settling).

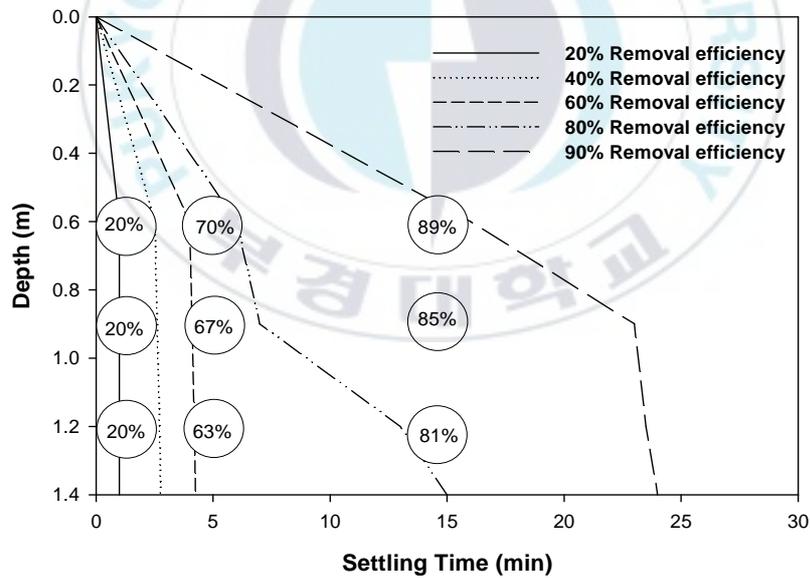
Fig. 4.8에는 II형 침전 실험결과를 높이와 시간에 따른 등제거율 곡선으로 나타내었다. Fig. 4.8에 나타난 바와 같이 SS 농도가 높을수록 높은 제거율을 나타내는 것을 알 수가 있는데 이는 주입되는 응집제로 인하여 수중에 존재하는 탁도유발 물질 및 SS가 서로 더 큰 플록을 형성시킴으로 인하여 침강성이 더욱 높게 나타나서 낮은 SS 농도일 때보다 더 큰 제거율을 나타낸다고 판단된다. 이 실험을 토대로 해서 유입되는 SS의 농도가 달라지더라도 얻고자 하는 제거율에 맞는 표면부하율을 계산할 수가 있다.



a. initial SS: 60mg/L



b. initial SS: 220mg/L



c. initial SS: 675mg/L

Fig. 4.8 Removal curve of SS on column depth and settling time.

#### 4.1.3 폴리머 주입에 따른 침전효율 평가

부유 고형물의 농도에 따른 폴리머의 주입량을 결정하기 위하여 응집제량을 고정하여 폴리머 주입량에 따른 실험결과를 Fig. 4.9에 나타내었으며, 초기 탁도에 대한 폴리머 주입량을 결정하기 위하여 Fig. 4.10에 나타내었다. 폴리머의 주입량은 각각 0.05, 0.1, 0.2, 0.5mg/L으로 각각 주입하여 실험을 하였다. 실험에 사용된 원수의 SS 농도는 각각 54, 448, 773mg/L 이었으며, 탁도는 각각 31, 220, 400NTU 이었다. 실험 결과 폴리머를 주입함으로써 인하여 고형 부유물이 농도에 관계없이 방류수 기준에 만족하는 수질을 얻을 수 있었으며, Fig. 4.9와 4.10을 통해서 SS와 탁도를 동시에 만족시키는 폴리머의 주입량은 0.2mg/L인 것으로 나타났다. SS의 측면에서는 폴리머의 양이 증가할수록 높은 효율을 얻을 수 있었으나, 본 연구에 사용되는 원수가 상수를 목적으로 하는 것이 아니므로 적정 수준을 만족시키는 폴리머의 양을 취하게 되었다.

또한 침전시간이 다를 경우의 침전효율을 보고자 침전시간을 10분과 30분으로 하여 비교하였으며, 결과는 Fig. 4.11에 나타내었다. Fig. 4.11에서 보듯이 폴리머의 주입량이 0.2mg/L일 때, 침전 효율이 높게 나타남을 알 수 있다. 그리고 침전시간이 10분일 경우에도 침전효율이 상당히 양호한 것을 알 수 있는데, 이는 원수 자체의 성질과 주입되는 폴리머의 영향으로 인하여 침전성이 양호한 플러크가 형성되었기 때문이라고 판단된다.

이상의 결과에서 터널 폐수의 처리를 위한 최적 alum 응집제 주입량은 20mg/L, 폴리머의 주입량은 0.2mg/L로 나타났다. 따라서 이와 결과를 바탕으로 이후 PICAF의 응집제 및 폴리머의 주입량을 결정하여 탁질의 제거 특성에 대해 세부적인 연구를 수행하였다.

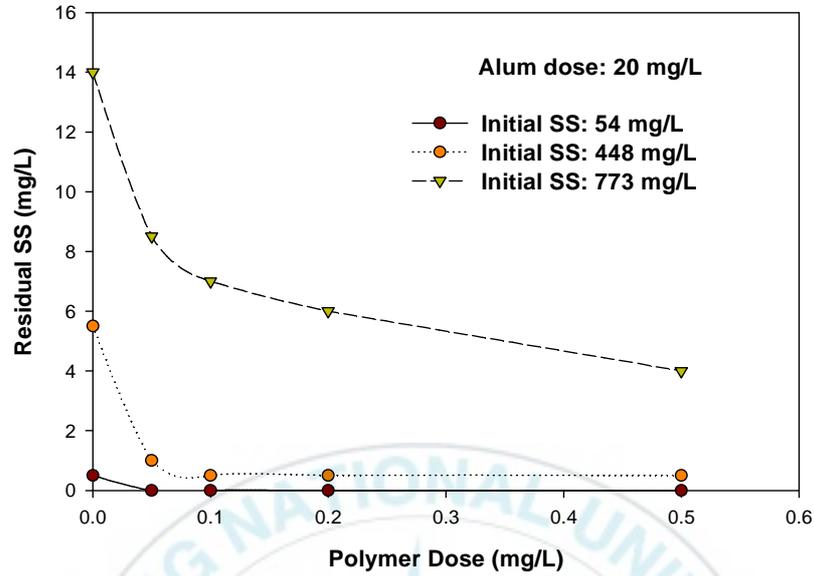


Fig. 4.9 Changes in SS on polymer dose (alum dose: 20mg/L).

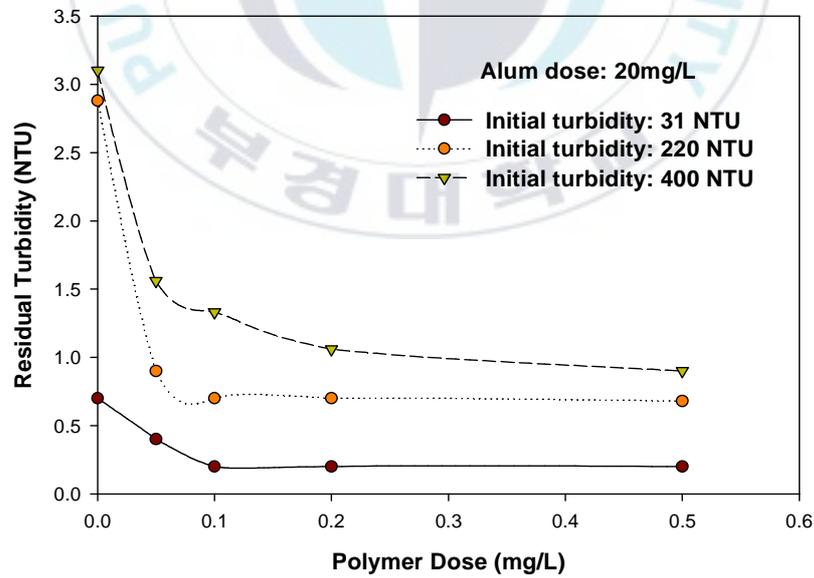


Fig. 4.10 Changes in turbidity on polymer dose (alum dose: 20mg/L).

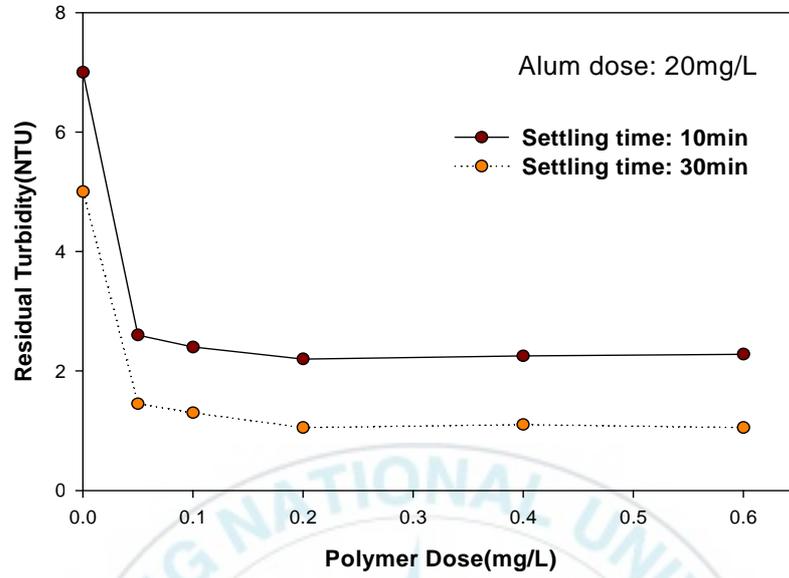


Fig. 4.11 Effect of settling time on turbidity.

## 4.2 Lab-Scale PICAF(LS-PICAF)의 응집 특성

### 4.2.1 Back mixer와 Lab-Scale PICAF의 비교

실규모의 PICAF의 응집 특성을 구체적으로 알아보기 위하여 실험실에서 많이 사용하는 back mixer 장치(jar-test)와 Lab-Scale PICAF(LS-PICAF)의 비교 실험을 통하여 응집효율의 차이를 알아보고자 하였다.

급속교반에 의해 응집제를 골고루 섞어 입자를 불안정화한 후(chemical process), 플러크 형성지에서는 불안정화된 입자를 완속 교반하여 입자끼리의 접촉기회를 크게 하여 충돌을 유발(physical process), 플러크를 커지게 하는 역할을 한다. 플러크 형성지에서 입자간 충돌에 의해 플러크를 형성하도록 하기 위해서 일정한 속도로 교반을 하게 되는데, 이때 물속에서의 입자들은 브라운 운동, 유체전단, 속도차 침전의 세 가지 메커니즘에 의해 서로 접근한다고 알려져 있다.

Fig. 4.12는 원수의 초기 탁도가 360NTU, SS가 650mg/L인 원수를 사용하여 back mixer와 LS-PICAF의 응집효율을 비교하였다. 앞의 jar-test에서 최적의 응집제 주입량을 20mg/L로 산정하였기에 이후 실험에서 동일한 응집제 주입량으로 실험을 실시하였다. 실험의 과정은 back mixer와 LS-PICAF에서 급속혼화, 완속혼합, 침전 후의 탁도 제거율을 비교하였다. Fig. 4.12에서처럼 back mixer를 적용하였을 때 보다 높은 탁도 제거율을 얻을 수 있었는데, 이는 교반시간과 침전시간이 LS-PICAF에 비하여 길기 때문에 생긴 결과로 판단된다. Back mixer의 경우 완속교반시간이 30분인데 비하여 LS-PICAF의 경우 완속교반시간이 평균 5.5분정도 밖에 되지 않는다. 따라서 동일한 침전시간에서 Back mixer를 이용한 침전과 LS-PICAF의 응집효율을 비교한 실험을 실시하였다. Fig. 4.13은 두 응집 장치에서 침전시간을 각각 10분, 30분으로 하여 침전시간에 따른 응집효율을 나타낸 것이다. Fig. 4.13에 나타난 바와 같이 30분의 긴 침전시간에 비해 침전시간이 짧은 경우(10분)에서 탁도제거율이 더 낮아짐을 알 수 있다. 따라서, PICAF의 침전효율을 더욱더 높이기 위해서는 보다 긴 침전시간이 필요할 것으로 판단된다.

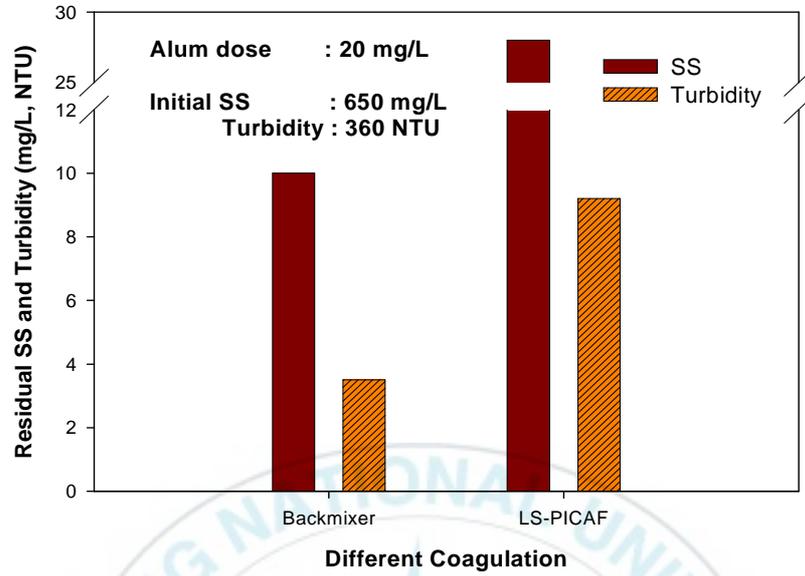


Fig. 4.12 Comparison of backmixer and LS-PICAF on residual SS and turbidity.

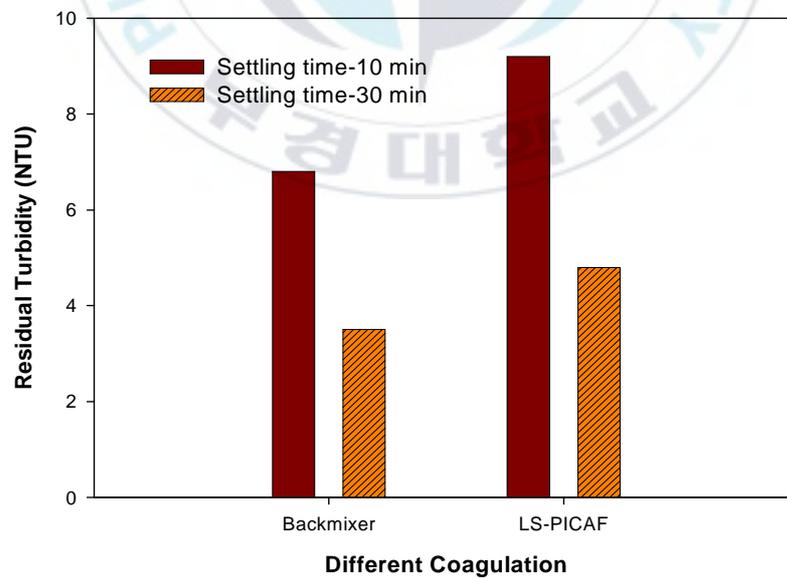


Fig. 4.13 Comparison of backmixer and LS-PICAF on settling time.

#### 4.2.2 Lab-Scale PICAF에서 cone과 baffle의 효과

LS-PICAF내의 응집특성을 보다 명확하게 알아보하고자 cone과 baffle의 유무에 따른 응집효율을 평가하기위한 실험을 수행하였다. 실험은 초기 탁도가 350NTU인 터널 폐수를 사용하여 응집제 주입에 따른 침전효율을 살펴보았다.

Fig. 4.14는 cone과 baffle의 유무에 따른 탁도 제거율을 나타낸 것이다. Fig. 4.14에서 보듯이 응집부내에 cone과 baffle이 있음으로 인해서 탁도에 대한 제거율이 향상되어짐을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 급속교반이 끝난 후 응집부내에서 콘과 baffle로 인해서 난류가 발생하여 입자들이 보다 큰 플록으로 형성되는데 영향을 미쳤기 때문이다. 그리고 cone과 baffle이 없는 경우에서도 급속혼화를 통한 응집과 압축침전이 일어나 상당한 탁질의 제거가 이루어짐을 확인할 수 있었다.

Fig. 4.15는 Fig. 4.14와 동일한 실험방법으로 폴리머 주입에 따른 영향을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 최적의 폴리머 주입량은 jar-test와 동일하게 0.2mg/L으로 나타났으며, 폴리머의 양을 1mg/L로 과량 주입하더라도 탁도 제거율의 차이는 거의 나타나지 않았다.

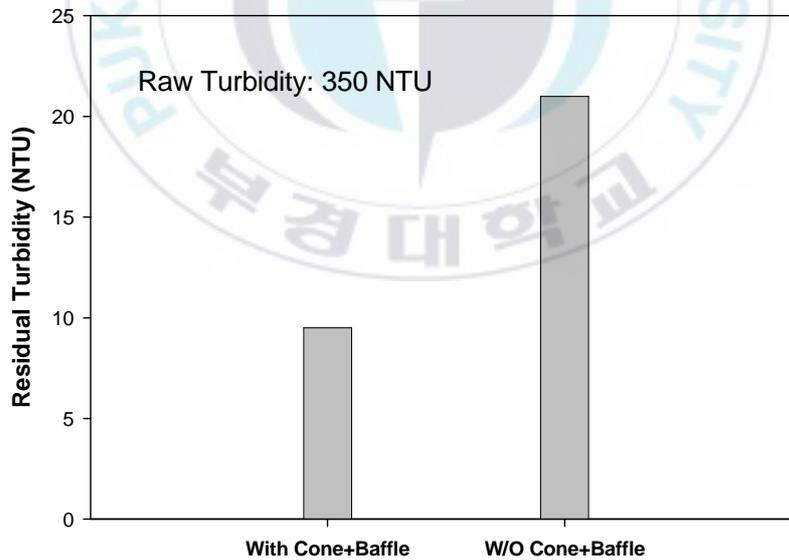


Fig. 4.14 Effect of cone and baffle on turbidity (alum dose: 20mg/L).

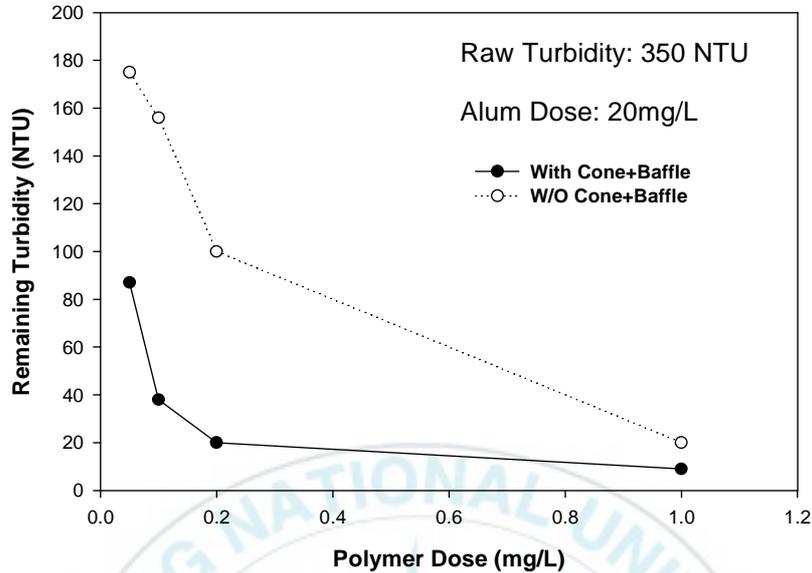


Fig. 4.15 Effect of cone and baffle on polymer dose.

일반적으로 정수공정의 플록 형성지에서 생성해야 하는 플록의 크기와 형상은 후속 되는 공정에 따라 달라지는데 일반적인 급속여과 방식에서는 침전지에서 침전이 잘 되도록 침강성이 좋은 플록을 생성해야 하는 반면, 직접여과법에서는 여과가 잘 되도록 하기 위하여 플록의 크기는 작지만 밀도가 높은 플록을 생성하여야 한다. 그러므로 플록 형성지에서의 체류시간은 최소 20분~40분이 필요한 것으로 알려져 있으며, GT값은 Kawamura(1976)는 10000~100000, Sank(1979)는 20000~200000, 우리나라의 시설기준(1992)은 23000~210000으로 설정하고, 실제 G값은  $75\text{sec}^{-1}$ ~ $10\text{sec}^{-1}$ 로 권하고 있는데 G값을 너무 크게 하면 플록이 깨어지므로 플록을 어느 크기 이상으로 하려면 G값을 20이하의 값으로 하는 것이 좋다.

이에 따라 PICAF의 cone과 baffle이 있는 응집부에서도 일정량의 혼화강도가 발생 하는데 이러한 혼화강도가 침강효율을 증대 시킬 수 있는 적정 강도인지 평가해볼 필요가 있어 다음과 같이 혼화강도를 계산하였다.

PICAF의 수리학적 인자:

- ① 유량:  $600\text{m}^3/\text{day}$
- ② 관내 유속:  $0.02\text{m}/\text{sec}$
- ③ cone 통과 유속:  $0.1832\text{m}/\text{sec}$
- ④ baffle 통과 유속:  $0.2734\text{m}/\text{sec}$

1) 관내 마찰손실 수두

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

where,  $h_L$  = 손실수두(m)

$f$  = 마찰손실계수(unitless)

$L$  = 관의 길이(m)

$D$  = 관의 직경(m)

$v^2$  = 관내 유속(m/sec)

$g$  = 가속도(m/sec<sup>2</sup>)

$f$ 는 Hazen-williams 공식을 사용해서 얻어지므로

$$f = \frac{98.78}{D^{0.167} C^{1.85} v^{0.15}} = \frac{98.78}{0.66^{0.167} 130^{1.85} 0.02^{0.15}} = 0.0234$$

where,  $D$ : 관내 직경

$C$ : 조도계수 (주철관: 130)

$v$ : 관내유속

$$\therefore h_L = 0.0234 \frac{4.5}{0.66} \frac{0.02^2}{2 \times 9.8} = 0.3256 \times 10^{-5}$$

2) cone에서의 손실수두

$$h_c = f_c \frac{v^2}{2g} \quad (f_c=0.035)$$

$$= 0.035 \frac{0.1832^2}{2 \times 9.8} = 0.599 \times 10^{-4}$$

3) baffle에서의 손실수두

$$h_b = f_b \frac{v^2}{2g} \quad (f_b=14.5)$$

$$= 14.5 \frac{0.0434^2}{2 \times 9.8} = 0.14 \times 10^{-2}$$

- cone과 baffle이 없을 경우의 G값

$$G = \sqrt{\frac{g \times h_L}{\nu \times t}} \quad (h_L=0.3256 \times 10^{-5})$$

$$= \sqrt{\frac{9.8 \times 0.3256 \times 10^{-5}}{1.003 \times 10^{-6} \times 44.4}} = 0.85 \text{sec}^{-1}$$

- cone과 baffle이 있을 경우의 G값

$$G = \sqrt{\frac{g \times h_L}{\nu \times t}} \quad (h_L=0.599 \times 10^{-4} + 0.14 \times 10^{-2} = 0.00146)$$

$$= \sqrt{\frac{9.8 \times 0.00146}{1.003 \times 10^{-6} \times 44.4}} = 18 \text{sec}^{-1}$$

위 식을 통해서 얻어진 G값  $18 \text{sec}^{-1}$ 은 앞서 언급했던 바와 같이 응결조에서의 적정 G값인  $75 \text{sec}^{-1} \sim 10 \text{sec}^{-1}$ 에 만족한다는 것을 알 수 있다.

또한 G값을 너무 크게 하면 플러이 깨어지므로 플러를 어느 크기 이상으로 하려면 G값을 20이하의 값으로 하는 것이 좋다.

이상의 결과들을 종합해 보면 응집부의 cone과 baffle에 의한 수리적 난류가 발생하여 back mixer 보다는 작으나 침전이 가능한 플러를 형성시킬 수 있는 적정 혼화강도가 일어남 알 수 있다.

#### 4.2.3 LS-PICAF 공정에서 응집 pH의 영향

LS-PICAF 공정에서 응집 pH의 영향을 알아보기 위하여 우선 jar-test를 먼저 실시하였다. 실험에 사용한 터널 폐수의 초기 탁도는 200NTU 이었으며, 초기 pH는 11.5로 나타났다. Alum 응집제 주입량은 각각 20, 50, 100mg/L으로 하였으며, 응집 pH는 각각 5, 7, 9, 11.5로 조정하여 실험을 수행하였다.

Fig. 4.16에 나타난 것처럼 응집 pH가 7~9에서 가장 좋은 침전 효율을 얻을 수 있었다. 이는 응집 pH를 조절하는 과정에서 투입된 산으로 인하여 알칼리도의 감소로 인해 응집 pH가 7과 9에서 높은 침전효율을 얻는데 반해 응집 pH가 5인 경우에는 낮은 침전효율을 보였다. 하지만 응집 pH가 5인 경우에서도 주입되는 응집제가 증가함으로 높은 침전이 일어난다는 것을 알 수 있었다. 그리고 응집제 주입량이 증가함에 의하여 pH 조정을 별도로 하지 않은 영역에서도 높은 제거효율을 얻을 수 있었다.

따라서 응집 pH에 따른 제거효율 실험결과 pH가 7~9 사이에서 침전효율이 가장 효과적이었으며 이는 본 연구에 사용된 터널 폐수 중에 존재하는 탁도 유발 물질이 대부분 입자상 물질로 적정 응집제가 주입되면 침전효율이 매우 높은 플럭스로 형성되기 때문이라고 판단된다.

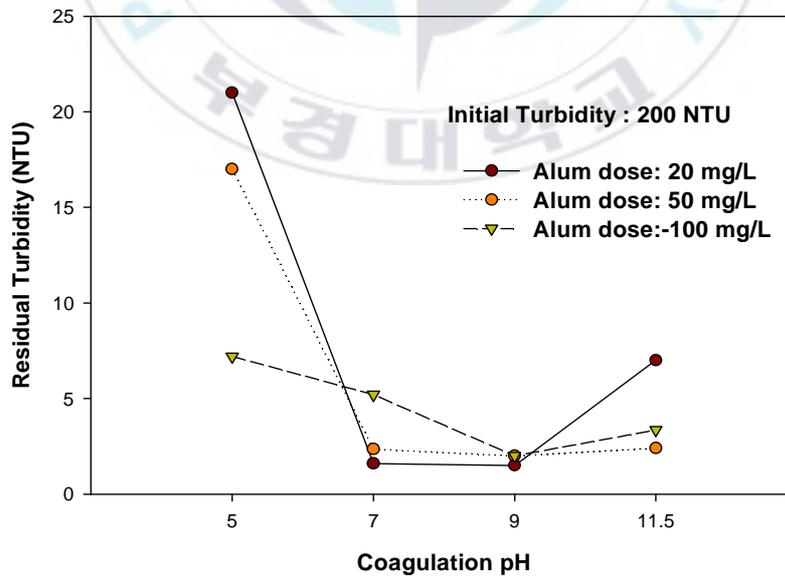


Fig. 4.16 Effect of coagulation pH on turbidity at jar-test.

그리고 Fig. 4.17은 LS-PICAF를 사용해서 응집 pH의 영향에 대한 SS 제거효율과 탁도 제거를 나타낸 것이다. Fig. 4.17의 결과에 나타난 바와 같이 jar-test의 실험결과와 비슷하게 응집 pH가 7~9 사이에서 제거효율이 높게 나타났다.

이와 같은 결과를 통해 터널 폐수의 처리를 위한 응집 pH의 경우, 지표수의 응집 pH인 5~7보다 조금 더 높다는 것을 알 수 있다. 따라서 수질환경보전법의 배출 기준인 pH 5.8~8.6 범위중 7~9에서 응집효율이 높아 배출기준에 만족하는 양호한 수질을 얻을 수 있다고 판단된다.

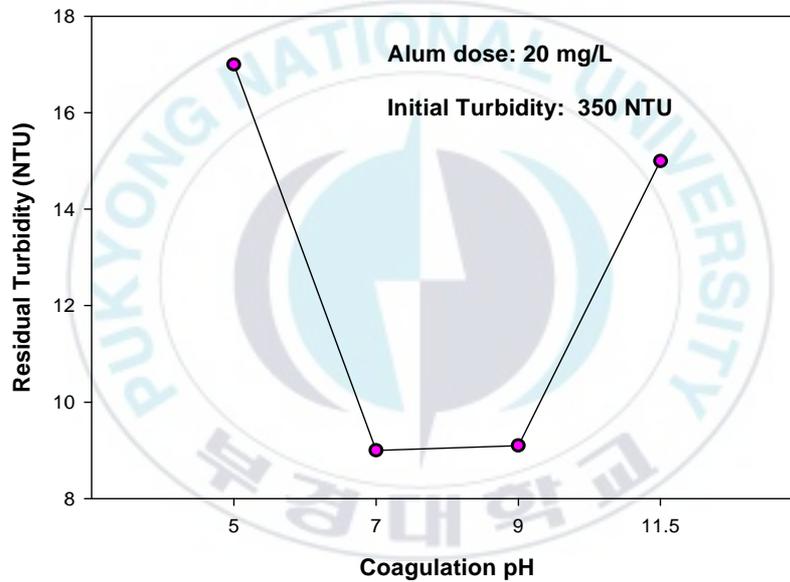


Fig. 4.17 Effect of coagulation pH on turbidity at LS-PICAF.

## 4.3 일체형 고속 응집침전 장치의 수리학적 특징

### 4.3.1 입체형 고속 응집침전 장치의 수리계산

일체형 고속 응집침전 장치(PICAF)의 구성은 크게 응집 반응부(A)와 침전부(B)로 나눌 수 있다. 반응부내의 cone과 baffle에 의해 발생하는 수리학적 특성을 알아보기 위하여 실 규모(600m<sup>3</sup>/day)의 장치를 대상으로 수식화 하여 그 특성을 평가하고자 하였다.

1) 콘과 정류판이 없을 경우

① 유량,  $Q = 600\text{m}^3/\text{day}$

② 반응부의 지름,  $R = 0.66\text{m}$

③ 반응부의 단면적,  $A = \frac{\pi \times (0.66\text{m})^2}{4} = 0.342\text{m}^2$

④ 반응부에서의 유속,  $v = \frac{Q}{A} = \frac{600\text{m}^3/\text{day}}{0.342\text{m}^2} = 0.02\text{m}/\text{sec}$

2) 콘과 정류판이 있을 경우

① 유량,  $Q = 600\text{m}^3/\text{day}$

② 콘 통과 지름,  $R = 0.22\text{m}$

정류판의 지름,  $R = 0.48\text{m}$

③ 콘 통과 단면적,  $A = \frac{\pi \times (0.22\text{m})^2}{4} = 0.038\text{m}^2$

정류판 통과 단면적,  $A = \frac{\pi \times (0.66\text{m})^2}{4} - \frac{\pi \times (0.48)^2}{4} = 0.16\text{m}^2$

④ 콘 통과 유속,  $v = \frac{Q}{A} = \frac{600\text{m}^3/\text{day}}{0.038\text{m}^2} = 0.1832\text{m}/\text{sec}$

정류판 통과 유속,  $v = \frac{Q}{A} = \frac{600\text{m}^3/\text{day}}{0.16\text{m}^2} = 0.0434\text{m}/\text{sec}$

위의 식에서 보듯이 반응부내에 존재하는 cone과 baffle에 의해 반응부를 통과하는 유속이 더 커진다는 것을 알 수 있는데, 이를 통해서 수리학적으로 발생하는 교반으로 인해 응결이 발생된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.18은 PICAF 장치에서 경사판의 형상을 나타낸 그림이다. 그림과 같이 침전 부에서 경사판의 설치에 따른 수리학적 특성을 알아보기 위하여 실 규모(600m<sup>3</sup>/day)의 장치를 대상으로 수식화 하여 침전 특성을 평가하고자 하였다.

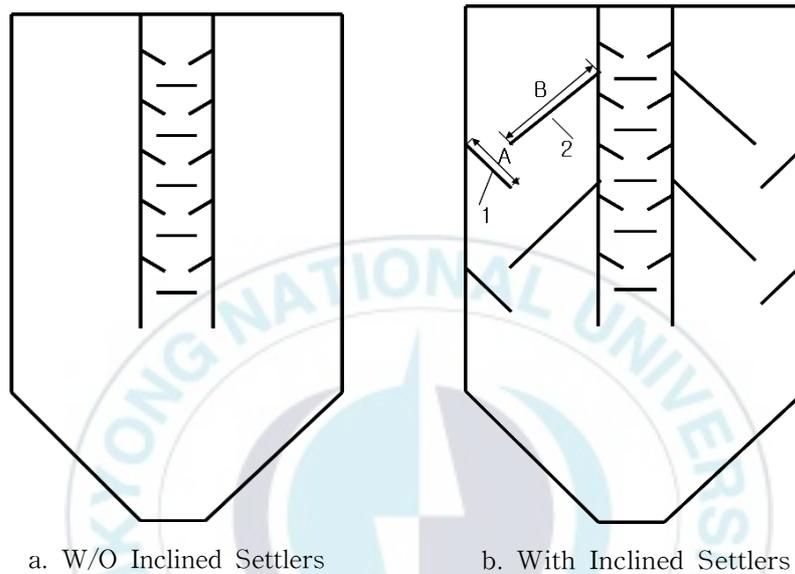


Fig. 4.18 Configuration of inclined settlers in settling part.

1) 경사판이 없을 경우의 침전가능 면적

① 유량, Q = 600m<sup>3</sup>/day

② 침전가능면적,  $A = \frac{\pi \times (2.7m)^2}{4} = 5.73m^2$

2) 경사판이 있을 경우의 침전가능 면적

① 유량, Q = 600m<sup>3</sup>/day

② 침전가능면적, A+2(A1)+2(A2)

여기서, A= 경사판이 없을 경우의 침전가능면적

A1, A2= 경사판 1, 2에 의한 침전가능면적

$$-A1 = A \cos \theta = 2.189m^2$$

$$-A_2 = Bncos\theta = 2.248m^2$$

$$\therefore A + 2(A_1) + 2(A_2) = 5.73 + 4.378 + 4.496 = 14.604m^2$$

따라서 각 경사판이 두 개씩 존재하므로 경사판이 존재할 때의 유효분리면적,  $A = n \cdot a \cdot \cos\theta$ 에서 볼 때 경사판이 없을 경우의  $5.73m^2$ 보다 약 2.55 배가 커진  $14.604m^2$ 의 유효분리면적을 가진다. 따라서 경사판이 있음으로 인해서 보다 효율적인 침전이 발생한다고 판단된다.

침전지내에서의 침전효율은 난류 또는 편류 등의 발생에 따라 크게 저하되는 것으로 알려지고 있다. 침전지내에서의 흐름을 나타내는 지표로서 Reynolds 수와 Froude 수가 사용된다. Reynolds 수와 Froude에 대한 자세한 설명은 Appendix에 자세히 나타내었다.

-경사판이 없을 경우에 Reynolds number와 Froude number를 계산하여 보면,

$$Re = \frac{v \times R}{\nu} = \frac{(0.129 \times 10^{-2} m/sec) \times (0.51m)}{1.003 \times 10^{-6} m^2/sec} = 656$$

where,  $\nu$  : 통과 유속 (m/sec) ( $600m^3/day / 5.38m^2 = 0.129 \times 10^{-2} m/sec$ )

$R$  : 경심 (단면적/윤변)(m)

$\nu$  : 동점성 계수 ( $m^2/sec$ )

$$\ast R = \frac{A}{P} = \frac{\frac{\pi \times (2.7m)^2}{4} - \frac{\pi \times (0.66m)^2}{4}}{\pi \times 2.7m + \pi \times 0.66m} = 0.51m$$

이때 온도에 따른 Re 값을 계산하면 Table 4.2와 같다.

Table 4.2 Calculation of Coefficient of kinematic viscosity and Reynolds number

Temp.(°C)	Coefficient of kinematic viscosity ( $\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{sec}$ )	Re
5	1.519	433
10	1.306	504
15	1.139	578
20	1.003	656
25	0.893	737

$$Fr = \frac{v^2}{g \times R} = \frac{(0.129 \times 10^{-2} \text{m})^2}{(9.8 \text{m}/\text{sec}^2) \times (0.51 \text{m})} = 0.332 \times 10^{-6}$$

where,  $v$  : 통과유속(m/sec)

$g$  : 중력가속도(m/sec<sup>2</sup>)

$R$  : 경심(m)

경사판이 없을 경우의 Reynolds number는 수온이 20°C일 때 656이며, Froude number는  $0.332 \times 10^{-6}$ 이다. 이는 장방형 침전지에서 guide line으로 제시하는  $Re < 2,000$ 에는 만족하지만,  $Fr > 10^{-5}$ 에는 만족하지 못한다는 것을 알 수 있다.

또한, 경사판이 있을 경우에 Reynolds number와 Froude number를 계산하여 보면, 단면적,  $A = 5.3834 \text{m}^2 + 14.604 \text{m}^2 = 19.9874 \text{m}^2$

윤변,  $P = 10.556 \text{m} + 17.724 \text{m} \times 2 = 46.004 \text{m}$

유속,  $v = 0.129 \times 10^{-2} \text{m}/\text{sec}$

Re를 계산하면,

$$Re = \frac{v \times R}{\nu}$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{19.9874 \text{m}^2}{46.004 \text{m}} = 0.435 \text{m}$$

$$\therefore Re = \frac{(0.129 \times 10^{-2} \text{m}/\text{sec}) \times (0.435 \text{m})}{1.003 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{sec}} = 560$$

Fr을 계산하면,

$$Fr = \frac{v^2}{g \times R} = \frac{(0.129 \times 10^{-2} m)^2}{(9.8 m/sec^2) \times (0.435 m)} = 0.39 \times 10^{-6}$$

임을 알 수 있다. 따라서 경사판이 존재함으로 인하여 Reynolds 수는 감소하고, Froude 수가 증가하는 바람직한 현상이 나타난다.

본 연구의 PICAF의 경사판의 경사각은 60°로 설계되었는데, Hudson(1981) 등의 실험결과에 의하면 약 60°를 경사판의 한계 경사각이라고 하였다.

개수로내의 흐름은 일반적으로 Reynolds 수가 500이하일 때에는 층류이고, 2000이상이면 완전난류로서, 지내흐름을 층류로 만들기 위해서는 유속이나 경심을 작게 해야 한다. 침전지에 경사판을 설치하면 이에 의해 수로가 작게 분할되어 운반이 크게 증가하므로 입자 침전에 적합한  $Re < 100$ 의 층류가 형성된다. 흐름의 안전성을 표시하는 지표로서 Froude 수는 Fr수가 클수록 흐름은 안정되고 침전지의 용량효율은 증가되어 침전제거율이 향상된다. 경사판 침전지에서는 경심이 보통 침전지의 1/20~1/40이 되어 Fr 수도 커지고 제거율은 증가하게 된다. 또한 Reynolds수를 줄이고 Froude를 늘리기 위해서 물의 방향으로 도류벽의 설치를 검토할 수 있다.

#### 4.3.2 반응부에서의 추적자 실험

혼합과 난류상태(turbulence)는 밀접한 상관관계가 있는데 난류상태는 혼합을 초래한다. 따라서 난류상태가 없으면 혼합이 발생하지 않는다. 수처리조의 설계에 있어서 혼합정도를 알아보기 위하여 두 가지의 이상적인 수리적 모델이 있는데 이상적 plug flow와 이상적인 완전혼합이다. 반응부 구조에 대한 수리학적 효율 비교를 위하여 다음과 같은 추적자 실험의 분석방법을 도입하였다. 추적자 실험이란 반응조 내에 유체의 흐름을 추적하기 위해, 추적자를 투입하여 이 물질의 시간에 따른 유출형태의 관찰을 통하여 조내의 수리학적 특성을 파악하는 것이다. 본 연구에서는 메틸렌 블루를 추적자로 적용하였으며, 유출되는 메틸렌 블루의 농도로 유출형태를 분석하였다. 하지만 정수장에서 단위 공정의 수리학적 특성을 파악하기 위해서 행해지는 추적자 실험은 먹는 물을 생산하는 공정의 일부이기 때문에 추적자의 선택에 신중을 기할 필요가 있다 (Hudson, 1975). 메틸렌 블루의 주입시간은 반응부 이론적 체류 시간의 2%를 초과하지 않는 범위 내에서 유입부에 순간적으로 한 번에 주입하였다 (Kawamura, 2000; Hudson, 1981). 본 연구에서 사용하는 반응부는 물과 응집제간의 최대한의 접촉시간 확보를 위하여 궁극적으로 plug flow를 지향하는 구조이어야 한다. Plug flow는 이상적으로 유체내 분자들간에 유체의 흐름에 의한 이동 이외에는 아무런 운동이 일어나지 않는 상태를 나타내는 것으로 흐름 단면적 내에서 분자들의 횡방향 운동은 물론 단락류, 반응조 내 dead zone의 발생이 전혀 없는 이상적인 흐름상태를 말한다.

추적자의 유출양상을 이용하여 조내의 plug flow와 mixing의 정도, 그리고 단락류의 정도 등의 수리학적 효율을 분석하는 방법에는 여러 가지가 알려져 있으나 본 연구에서는 Index법에 의하여 분석을 실시하였다. Table 4.3에는 각각의 Index 법에 대한 설명을 나타내었다.

① Morill Index=  $t_{90}/t_{10}$

: 조 내에서의 mixing 정도를 나타내는 상수로 이상적 plug flow에서는 1, 완전혼합 반응조(CSTR)에서는 1보다 매우 큰 값을 갖는다.

② Modal Index=  $t_p/T$

: 조 내의 plug flow 정도를 나타내는 상수로, 1에 가까울수록 이상적 상태의 plug flow에 가까운 것이다.

- $t_{10}$ : 누적 유출량이 전체 유출량의 10%가 될 때의 시간
- $t_p$ : 유출농도가 최대일 때의 시간
- $t_{90}$ : 누적 유출량이 전체 유출량의 90%가 될 때의 시간
- T: 이론적 체류시간

Table 4.3 Analysis of index method

Analysis	Index	설 명
Index method	Morill Index	조 내의 mixing 정도를 나타내는 상수
	Modal Index	조 내의 흐름에서 plug flow의 정도를 나타내는 상수

우선적으로 PICAF를 통한 추적자 실험을 통하여 cone과 baffle의 영향을 알아보고자 하였다. 우선 응집조 내에 cone과 baffle이 있을 경우와 없을 경우의 추적자 농도 분포를 비교하기 위하여 메틸렌 블루의 주입시간은 반응부 이론적 체류 시간의 2%를 초과하지 않는 범위 내에서 유입부에 순간적으로 한 번에 주입하는 slug dose method를 이용하여 실험을 실시하였다. 추적자로는 메틸렌 블루를 사용하였으며 시간 별로 샘플을 채취하여 흡광도를 통해 농도를 비교하였다.

Fig. 4.19는 cone과 baffle의 유무에 따른 추적자 실험의 결과이다. Fig. 4.5에서 보듯이 cone과 baffle이 있는 경우와 없는 경우 모두 종모양의 농도 분포를 갖는다는 것을 알 수 있다. 이는 순간적으로 메틸렌 블루를 주입하였을 경우 완전한 혼합이 발생하지 못하기 때문에 생기는 현상이다. 그러나 cone과 baffle이 있을 경우에 보다 넓은 종모양의 농도 분포를 나타낸다는 것을 알 수 있는데 이를 통해서 효과적인 혼합이 일어난다는 것을 알 수 있다. 또한 morrill index와 modal index를 통한 유출상태를 알아보기 위하여 Fig. 4.19의 결과를 누적 농도로 표시하여 Fig. 4.20과 같이 나타내었다. Fig. 4.20을 통해서 구한 각각의 index 계수는 Table 4.4에 나타내었다. 반응부 내의 흐름은 수리학적으로 plug flow에 가까울수록 접촉시간의 증가와 더불어 우수한 효율을 보이게 된다. 두 경우의 분석결과 cone과 baffle이 있는 경우가 morrill index와 modal index에서 1에 가까운 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

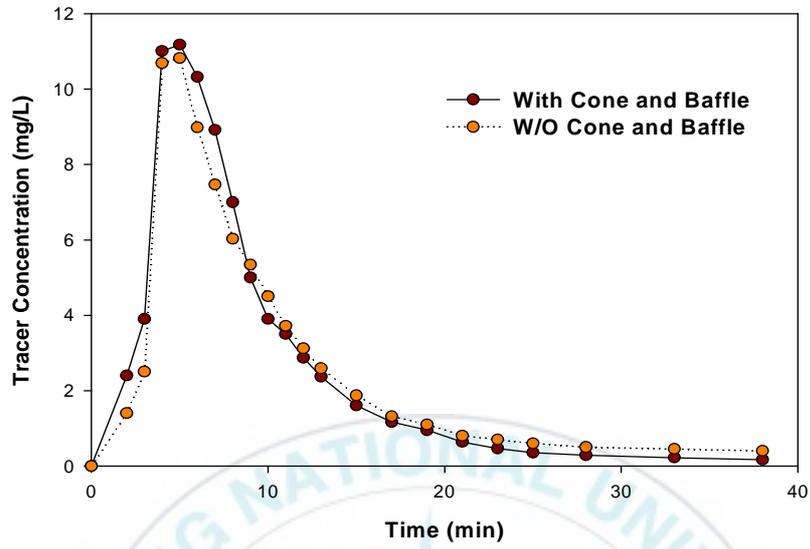


Fig. 4.19 Effect of cone and baffle on tracer concentration.

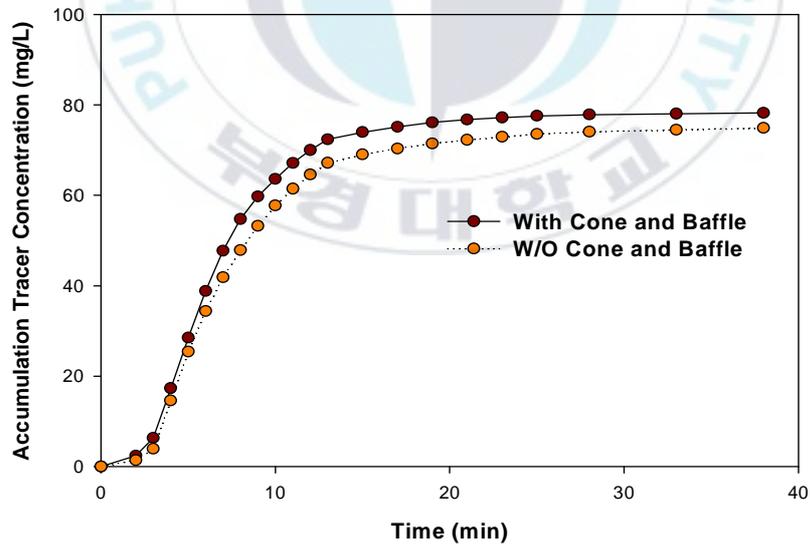


Fig. 4.20 Effect of cone and baffle on accumulation tracer concentration.

Table 4.4 Calculation of coefficient form Index method

	t <sub>10</sub> (분)	t <sub>90</sub> (분)	t <sub>p</sub> (분)	T(분)	morrill index	modal index
with cone+baffle	3.35	12.1	5	5.5	3.61	0.91
without cone+baffle	3.3	13.8	5	5.7	4.18	0.877

한편, 난류확산계수는 혼합의 지표로서 이용되는데, 위의 그림들을 Harelmann에 의해 제안된 수리식으로 설명하면,

$$E = CnvR^{5/6}$$

여기서,  $E$  : 난류확산계수(m<sup>2</sup>/s)

$C$  : 63.2(SI 단위)

$n$  : Manning의 조도계수

$v$  : 유속(m/s)

$R$  : 유체의 평균깊이(m)

위 식을 통해 cone과 baffle이 있을 경우와 없을 경우를 비교했을 때 cone을 통과하는 유속이 보다 빠르기 때문에 cone과 baffle에서의 난류확산계수가 더 커진다는 것을 알 수 있다. 따라서 이 식을 통해서도 cone과 baffle이 있을 경우 보다 큰 혼합을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

### 4.3.3 반응부에서의 CFD 모사 분석

전산유체역학 (CFD; Computational Fluid Dynamics)는 수작업으로 해석이 불가능한 복잡한 구조물내의 유동장 해석을 FDM(Finite Differential Method) 기법을 이용하여 작은 셀로 분할하여 각각의 경계조건을 두어 해를 구해내는 방법으로 이용된다 (박, 2004). 본 연구에서는 이러한 CFD 모사방법을 이용하여 응집혼화부와 침전부에 유체 흐름 특성을 파악하여, 일체형 고속 응집침전 장치의 효율을 평가하고자 하였다. Fig. 4.21은 일체형 고속 응집침전 장치를 CFD 모사한 결과이다. 좌측 그림은 반응조의 벡트(vector)장을 나타낸 것이며, 우측은 유체의 흐름강도를 나타낸 그림이다. 왼쪽 그림의 벡트장과 같이 cone의 주변에서 유속이 높음을 알 수 있는데, 이는 cone의 좁은 면적으로 인하여 유속이 증가한 것으로 판단된다. 따라서 cone과 baffle은 효과적인 응집이 일어날 수 있는 완속혼화의 속도경사를 제공하고, 오른쪽 그림의 유체 흐름강도에서는 경사판에 의하여 PICAF의 바닥에서 웨어 방향으로 속도가 점감하여 침전이 용이함을 예측할 수 있다.

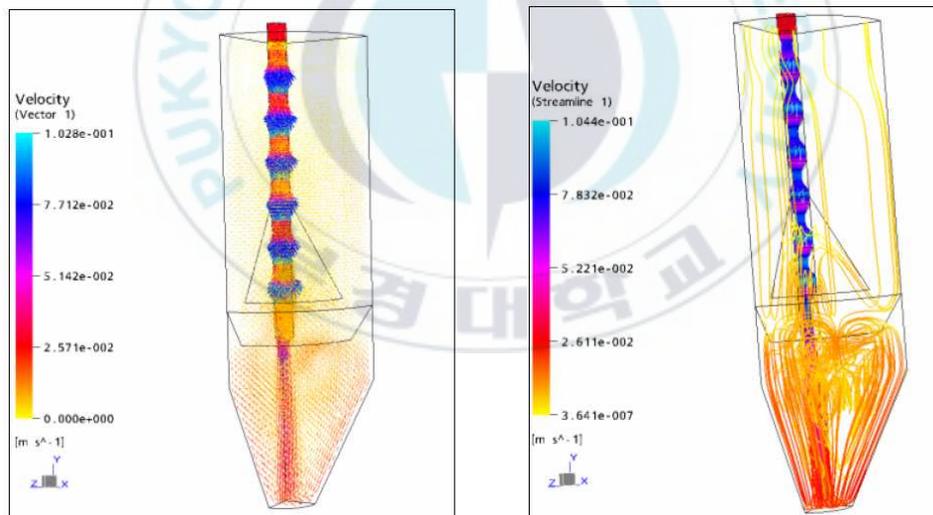


Fig. 4.21 Result of simulation using CFD (vector and streamline).

## 4.4 터널공사 현장에서 발생하는 폐수의 PICAF 처리 결과

### 4.4.1 폐수의 처리 특성

PICAF의 처리효율을 파악하기 위하여 터널공사 현장에 설치된 1000m<sup>3</sup>/day 규모의 장치를 이용하여 폐수처리 효율을 비교 분석하였다.

터널 공사현장에서 배출되는 폐수는 지층 및 암반의 굴착시 발생하는 토사류와 숯크리트 타설 작업시 발생하는 시멘트 성분의 폐수가 혼합된 것으로 수질환경보전법에 따르면 일반폐수로 분류되며, 만일 일정량 (수질환경보전법시행규칙 별표 3 제1호 가목 및 나목)이상을 초과한 경우라면 동 별표 제2호 폐수배출시설의 분류 중 "82. 기타 폐수배출시설"에 해당되게 된다.

이에 따라 부산지역 터널공사 현장 2곳(S 지역, H 지역) 에 설치 운영 중인 곳의 수질환경기준은 "나" 지역에 해당되며, 폐수발생량이 일 2000m<sup>3</sup> 미만의 경우 수질조건은 pH 5.8~8.6, BOD 120 mg/L 이하, COD 130 mg/L 이하, SS 120 mg/L 이하의 조건을 가지고 있다. 현재 두 지역에서 운전 중인 PICAF의 하루 폐수처리량은 1000m<sup>3</sup> 미만으로 운영되고 있으며, 전처리 시설로 장방형 침사지 2지를 두고 있다.

S 지역의 터널 폐수처리 공정은 침사지-중화-응집·침전-모래여과 공정으로 구성되어 있으며, 모래여과 공정은 PICAF의 처리수질 악화시 비상용으로 사용되었다. 그리고 PICAF에서 발생하는 침전 슬러지의 처리는 원형 농축조와 벨트 탈수기를 거쳐 처리 하였다.

터널 폐수는 숯크리트 타설작업으로 인해 발생하는 폐수의 pH가 12 이상으로 매우 높아 응집·침전공정 이전에 반드시 pH 중화가 필요하다. 이에 따라 본 공정에서는 황산을 이용하여 폐수를 적정 pH로 중화시키고 있으며, 응집제는 무기응집제인 alum과 유기응집제인 양이온성 폴리머를 사용하였다.

Table 4.5는 두 지역에서 PICAF 공정을 통한 터널 폐수의 pH 변화 및 BOD, COD<sub>Mn</sub>, SS의 처리효율을 나타낸 것이다. 원수의 pH는 12 이상으로 높게 나타났으나, 중화와 응집공정을 통해 중성 pH 범위로 유지되었다. 유기물 함량의 지표인 BOD, COD의 원수 중 함량은 비교적 낮게 나타났는데, 이는 폐수의 주 성분이 무기물질인 토사와 시멘트로 구성된 것에 기인한 것으로 보인다. BOD는 두 지역의 제거율이 45.9%와 48.1%로 높게 나타났고, COD는 BOD보다 더 높은 제거율을 보여 PICAF 공정을 통한 유기물의 제거가 효과적으로 일어남을 알 수 있다. 특히 SS의 경우 원수의 농도가 600~700 mg/L의 매우 높은 농도를 보이고 있으나, 처리율은 98% 이상으로 높

은 제거율을 보이고 있다. 이러한 처리결과를 통해 PICAF 공정은 탁월한 SS 제거율과 유기물 제거능력을 가진 것으로 판단되며, 이를 통한 처리수는 수질환경보전법의 “청정지역” 오염물질 배출지역의 기준에 부합하는 것으로 나타났다.

Table 4.5 Efficiency of PICAF treatment for tunnel wastewater

Item	Guideline (나 지역, 2000m <sup>3</sup> /일 미만)	H 지역		S 지역	
		before	after (removal eff. %)	before	after (removal eff., %)
pH	5.8~8.6	11.8	6.6 (-)	12.5	7.4 (-)
BOD (mg/L)	120 mg/L 이하	17.4	9.4 (45.9)	15.8	8.2 (48.1)
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	130 mg/L 이하	42.5	14.1 (66.8)	37.8	16.9 (55.3)
SS (mg/L)	120 mg/L 이하	656.4	8.33 (98.7)	720.6	14.41 (98.0)

#### 4.4.2 PICAF에서 발생하는 터널 폐수 슬러지의 재이용 평가

슬러지의 재이용 또는 매립을 위해서는 적정량의 낮은 함수율을 가져야 한다. 따라서 터널폐수에서 발생된 슬러지의 함수율을 알아보기 위해 폐기물공정시험법에 준하여 실험한 결과를 Table 4.6에 나타내었다.

우리나라 폐기물 관리법에서는 수분함량이 95% 미만이거나 고형물 함량이 5% 이상인 것을 ‘오니(슬러지)’라고 명하고 있으며, 대부분이 수처리공정에서 발생된다. 일반적으로 표준 활성슬러지법의 수처리 공정에서 발생하는 생슬러지와 잉여 슬러지량은 전체 유입하수량의 약 1% 정도가 발생하며, 또한 고형물량의 40~90%가 유기물로 구성되어 있고 함수율이 97~99%로써 최종 처분하는 데는 많은 문제점을 가지고 있다. 이에 반해 터널폐수 슬러지는 Table 4.6과 같이 매우 낮은 함수율을 가지고 있으며, 성분의 대부분이 무기성분으로 구성되어져 있어, 매립처분 뿐만 아니라 다양한 재이용 용도로 사용하기 위해 충족할 만한 조건을 가지고 있다.

Table 4.6 Analysis of water content of sludge from tunnel wastewater

Time	Area	Water content (%)	
		H area	S area
2005. 10		50.19%	63.3%
2005. 12		63.28%	52.87%

Table 4.7은 슬러지의 무기성분을 분석한 결과이다. 전체 성분 중에서 SiO<sub>2</sub> 성분이 약 60%로 가장 많은 양을 차지하는 것으로 나타났으며, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분도 상당량 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 요인은 터널공사시 굴착공사 및 쇼크리트 작업으로 인해 시멘트성분이 많이 들어감에 따른 것으로 보인다. 일반적으로 시멘트의 주요 성분은 CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 이며, 본 터널폐수 슬러지도 이와 같은 성분을 지니고 있어 시멘트의 원료로 사용 가능하다고 판단된다.

Table 4.7 Analysis of mineral content of sludge from tunnel wastewater

Mineral content	Content (%)	
	H area	S area
SiO <sub>2</sub>	58.7407	57.4972
CaO	12.7291	17.1754
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.3166	13.6011
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.0158	3.0695
SO <sub>3</sub>	0.5349	2.0300
MgO	2.8923	2.0237
K <sub>2</sub> O	2.1683	1.9730
Na <sub>2</sub> O	1.6952	1.7220
TiO <sub>2</sub>	0.4285	0.3409
MnO	0.1576	0.2592
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.2023	0.1841
ZnO	0.0362	0.0516
NiO	0.0416	0.0342
ZrO <sub>2</sub>	0.0031	0.0192
SrO	0.0380	0.0189

Table 4.8은 터널폐수 슬러지의 용출실험을 통해 유해물질 성분을 분석한 결과로 두 번의 시기별로 측정하였다. Table 4.8에 나타난 바와 같이 납, 구리, 비소, 수은, 카드뮴, 시안화합물, 유기인화합물, 트리클로로에틸렌, 유분은 검출한계 이하로 나와 검출되지 않은 것으로 처리하였다. 하지만 6가 크롬 화합물 및 테트라클로로에틸렌은 검출되기 하였으나, 매립처리를 위한 제한농도보다 매우 낮은 농도를 보여주고 있다. 또한 용출시험액의 pH는 평균 11.3으로 나타나 매우 높게 나타나 슬러지 처리시 중화가 필요한 것으로 나타났다. 하지만 이러한 슬러지를 토지개량제로 이용시 산성화된 토양을 중성화하여 지력을 증가시킬 수 있는 방안이 될 수 있다.

따라서 터널폐수에서 발생하는 슬러지는 낮은 함수율과 유해성분이 포함되어 있지 않아 매립처리 보다는 시멘트의 원료 또는 토지개량제 등과 같은 다양한 목적으로 재이용 하는 것이 경제적인 것으로 평가된다. 현재 국내 폐기물관리법에 의하면 공정오니(슬러지)는 일반매립지 또는 관리형매립지에 매립처리 하여야 한다고 명시되어 있으나, 터널폐수에서 발생하는 슬러지는 본 실험결과 매우 안전한 상태를 가져 시멘트 원료, 토지개량제, 토지복토재, 보도블록과 같은 성형재 등으로 재이용이 가능할 것으로 판단된다. 특히 중화처리하지 않은 슬러지는 산성화된 토양의 토지 개량제로 소석회 대신 사용가능할 수 있으며, 산성광산폐수로 중화제로도 사용 가능할 것으로 판단된다.

Table 4.8 Analysis of hazardous material of sludge from tunnel wastewater

<i>Item</i>	<i>Analysis method</i>	<i>Limited</i>	<i>H area</i>		<i>S area</i>	
			<i>Oct.</i>	<i>Dec.</i>	<i>Oct.</i>	<i>Dec.</i>
Pb	ICP	3 mg/L	N.D	N.D	N.D	N.D
Cu	ICP	3 mg/L	N.D	N.D	N.D	N.D
As	ICP	1.5 mg/L	N.D	N.D	N.D	N.D
Hg	AA	0.005 mg/L	N.D	N.D	N.D	N.D
Cd	ICP	0.3 mg/L	N.D	N.D	N.D	N.D
Cr <sup>6+</sup>	ICP	1.5 mg/L	0.074	0.023	0.027	0.083
CN	UVA	1 mg/L	N.D	N.D	N.D	N.D
Organophosphorous Compounds	GC	1 mg/L	N.D	N.D	N.D	N.D
PCE	GC	0.1 mg/L	0.0025	N.D	0.0029	N.D
TCE	GC	0.3 mg/L	N.D	N.D	N.D	N.D
Oil	weight	5 %	N.D	N.D	N.D	N.D
pH	electrode	-	11.2	11.4	11.6	11.2

## 제 5장 결 론

본 연구에서는 터널 공사현장에서 나오는 폐수를 제거하기 위하여 응집과 침전이 함께 조합되어 있는 일체형 고속 응집침전 장치를 적용하여 탁질의 제거효율 및 제거 메카니즘에 대해 연구하였으며, 세부적으로 반응부에서의 응집특성, 침전부의 입자제거 특성 등에 대하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 원수 자체의 침강성이 일반적인 상수 원수에 비하여 상당히 높은 것을 알 수 있었으나, 방류 기준을 만족시키기 위해서는 응집과 침전 공정이 반드시 필요하였다. Jar-test 실험과 LS-PICAF를 통한 실험결과 최적응집제 주입량은 20mg/L, 폴리머 주입량은 0.2mg/L 인 것으로 나타났다.
2. LS-PICAF와 jar-test의 침전효율 비교에서 back mixer가 약간 효율이 높게 나타났으며, LS-PICAF의 응집부내에서 교반강도는 18/sec으로 나타났다. 또한 적정 응집 pH 범위는 7~9로 나타났다.
3. PICAF의 반응부에서 cone과 baffle이 있는 경우에 morrill index와 modal index가 각각 4.347, 0.91로 cone과 baffle이 없을 경우의 4.461, 0.899보다 1에 가까운 값을 나타내어 응집효율이 높은 조건으로 나타났다.
4. 반응부내에서 발생하는 수리학적 교반으로 인해 침전하기에 양호한 플러이 생성된다는 것을 알 수 있었으며, 터널 폐수의 SS 농도와 탁도의 변화는 PICAF 침전효율을 결정하는 인자로 나타나지는 않았다.

5. 침전부내에 경사판 설치로 인하여 유효침전 면적이 약 2.55 배로 증가하였으며, 이로 인해 경사판이 없을 때보다 Reynolds 수는 656에서 560으로 감소하였으며, Froude 수는  $0.332 \times 10^{-6}$  에서  $0.39 \times 10^{-6}$  로 증가하여 침전효율을 증가시키는 것으로 나타났다.
6. 일체형 고속 응집침전 장치를 CFD 모사한 결과 반응부내의 baffle 상부 부분에서 백트장이 감소함을 알 수 있었으며, 유체의 흐름은 침전부 하류부에서 빠른 경향을 보여주고 있다.
7. 터널폐수 처리를 위한 실규모 PICAF 적용에서 BOD 및 COD 제거율은 45~65%, SS 제거율은 98% 이상의 높은 제거율을 얻어 수질환경보전법상 "청정지역" 기준 이상의 적합한 결과를 나타내었다.
8. 터널폐수에서 발생하는 슬러지는 낮은 함수율과 유해성분이 포함되어 있지 않아 매립처리 보다는 시멘트의 원료 또는 토지개량제 등과 같은 다양한 목적으로 재이용 하는 것이 경제적인 것으로 평가되었다.

## 감사의 글

먼저 본 연구의 원천인 ‘일체형 고속 응집 경사관 침전 장치(상표명:PICAF) 기술을 학문적으로 접근하여 좋은 논문이 되도록 많은 조언과 지도를 해주신 강임석 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

제가 어려울 때마다 자문을 구하러 찾아보면 못한 제자에게 한결같이 따뜻한 격려로 바른 길을 인도해 주신 ‘나의 영원한 참 스승님’ 박정길 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 만학의 어려움을 이해해 주시고 격려해 주신 이제근 교수님, 여석준 교수님, 이병현 교수님, 김일규 교수님, 김상단 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 학위를 마치는 것이 좋겠다고 용기를 주셨던 생태공학과 이석모 교수님과 부산지역환경기술개발센터 김정숙 박사님에게도 감사를 드립니다.

20년간 밀린 숙제를 안고 지내던 중, 만학의 길이 가능하다는 확인과 재입학의 길을 동분서주하시면서 열어주신 이철우 박사님과 김정선 조교선생님의 수고에 또한 깊은 감사를 드립니다. 덕분에 잃어버릴 뻔한 젊은 시절의 소중한 부분을 다시 들추어내서 연결할 수 있었습니다.

본 논문의 작성과 실험에 아낌없는 지원을 해 준 강민수 후배님께도 감사를 드리며, Clean Water 실험실의 여러 후배님들에게도 감사를 드립니다.

암담하던 시절 본 기술을 개발할 당시 터널현장 여건 및 요구 조건 등을 자세히 설명해 주고, 현장 배출량의 기준과 수질 기준을 선정하기 위해 수십 번의 대전지하철 터널 현장을 방문할 때마다 당시 현장 소장이었던 ‘참친구’ 동아지질 우병재 상무님..... 늘 따뜻한 소주 자리를 마련해 주고 용기를 낼 수 있도록 배려해 준 뜨거운 우정에 깊은 고마움을 전합니다.

그리고 본 장치 기술을 처음으로 현장 적용할 때 발생한 문제점으로 하마터면 본 기술이 사장될 뻔도 하였으나, 묵묵히 인내해 주시고 아낌없는 지원으로 업그레이드가 가능하도록 도와주신 당시 미시령터널 현장의 코오롱건설 정윤기 소장님, 이교형 공무팀장님, 허경범과장님, 김형철 공사팀장님, 김병우 과장님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

멀리 보시는 혜안으로 본 기술에 대한 굳은 믿음과 신뢰로서, 물심양면의

지원으로 상용화가 가능하도록 도와주신 효림산업 남철우 부회장님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 진지하게 학문의 길을 다시 시작하여 마치는 것이 좋겠다고 조언해 주신 효림산업 북경지사 김광길 지사장님, 해외영업팀 이형태 차장님에게도 감사드립니다. 가까운 거리에서 늘 도움과 용기를 준 든든한 나의 후배 기술개발본부 이일국 상무님에게도 감사드립니다.

어려운 바다 길을 같은 배를 타고 상호 신뢰와 믿음으로 자신의 역할에 최선을 다 하며 본 기술의 시장 인지도를 높이는데 일조해 주신 알핑기계 이광근 사장님, (주)태진 유건열 사장님, 김민혁 부사장님께도 깊은 감사를 드립니다. 그리고 본 장치의 공장 제작과 현장 설치를 묵묵히 성실히 수행해 주신 현장 작업반의 여러분께도 감사드립니다.

평생을 -암으로 투병하시던 임종 한 달 전까지도- 자식들의 건강과 안녕을 위해 늘 면벽 기도하시던 저 세상의 아버님. “내 몸이 너무 아파서 이제는 너희들을 위해 더 기도를 할 수가 없어 내 가슴이 아프다”라고 하시며 눈물을 흘리시던, 당신의 죽음 앞에서도 오직 자식들만을 염려하시고 배려하시던 아버님의 영전에 이 논문을 바치며 불초 소자는 다시 한 번 극락왕생을 빕니다.

평생을 사랑으로 자식들을 키워 주시고 못한 장남의 재기를 믿어 주셨던 나의 어머니 김필순 여사님께 깊은 존경과 사랑의 마음을 전합니다.

꽤 오랜 기간 동안 난생 처음으로 생활 전선에서 힘들게 집안을 이끌어 주며 다시 일어설 날을 굳게 믿어 주었던 나의 동지이자 반려자로서 사랑스러운 아내 정영옥, 예민한 사춘기 시절 힘든 엄마 아빠를 이해해 주며 건강하게 자라준 사랑스런 나의 딸 우정, 나의 아들 우진에게도 정말 고맙고 사랑한다는 말을 전한다. 주변의 친지 친구 분들에게도 감사의 말씀을 전합니다.

이 순간 ‘세상은 고마운 분들로만 가득하고, 그래도 우리가 살고 있는 이 세상은 살만한 곳이다. 참 아름다운 곳이다.’라는 상념에 빠지게 합니다.

“저를 아시는 모든 분들과 이 논문을 접하시는 모든 분들의 건강과 행복을 기원합니다.”

2006년 12월 20일

정 세 영 올림

## 참고문헌

- Amirtharajah, A. and O'Melia, C. R., Coagulation process : destabilization, mixing, and flocculation,. In Water Quality and Treatment, 4th Ed., McGraw-Hill, NY. (1990).
- Amirtharajah, A. and Mills, K. M., Rapid-Mix Design for Mechanisms of Alum Coagulation, *J. AWWA*, 74(4), 210. (1982).
- Amirtharajah, A. and Truser, S. L., Estabilization of Particles by Turbulent Rapid Mixing, *ASCE J. Env. Eng.*, 112. 1085, (1986).
- Amirtharajah, A., Mixing in Coagulation and flocculation. (1991).
- Amirtharajah, A., Clark, M. M. and Trussell, R. R., Mixing in coagulation and Flocculation, pp.256-281, eds. Denver, CO: AWWA Research Foundation. (1991).
- Aveston, J., Hydrolysis of the Aluminum Ion: Ultracentrifuge and Acidity Measurements. *J. Chem. Soc.* 4483-4443, (1965).
- Baes, C. F. and Mesmer, R. E., The hydrolysis of cations, John Wiley and Sons, NY, (1976).
- Bersillon, J. L., Brown, D. W. and Fiessinger, F. and Hem, J. D., Studies of Hydroxy-aluminum Complexes in Aqueous Solution. *J. Res. U. S. Geol. Survey.* 6(3), 325-337, (1978).
- Bertsch, P. M., Conditions for  $Al_{13}$  polymer formation in partially neutralized aluminum solutions, *J. Soil Sci. Soc. Am.* 51, 825-828, (1987).
- Black, A. P., Destabilization of dilute clay suspensions with labeled polymers, *J. AWWA*, 57(12), 1547, (1965).
- Camp, T. R., A study of the rational design of settling tank. " *J. Sewagr Work*, 8, 742-758 (1936).

- Clark, M. M., Scale-Up of Laboratory Flocculation Results, Presented to AWWA Annual Conference, Denver, Co, (1986).
- Clark, M. M., David, R. and Wiesner, M. R., Effect of Micromixing on Product Selectivity in Rapid Mix. June 14-18. Kansas City Proceeding of the Annual Conference of the AWWA, (1987).
- Corrsin, S., Simple Theory of an Idealized Turbulent Mixer. *J. AICHE*, 3, 329, (1957).
- Cutter, L. A., Flow and turbulence in a Stirred Tank, *J. AICHE*, 12(1), 34-45., (1976).
- David, R. and Clark. M. M., Micromixing Models and Application to Aluminum Neutralization Precipitation Reactions In Mixing in Coagulation and Flocculation, AWWA Research Foundation, Denver, Co: 170-216. (1991).
- Dempsey, B. A., Reaction between fulvic acids and aluminum, In Aquatic humic substances; Influence on Fate and Treatment of pollutant, ACS. (1989).
- Dempsey, B. A., Xioxin Men, Bench-scale Production, Characterization, and Applicatipn of Polyaluminum Sulfate (PAS), *J. AWWA*. (1989).
- Dempsey, B. A., sheuh., Mentink J. Polyaluminum chloride and alum coagulation of clay-fulvic acid suspensions, *J. AWWA*, 77, 74-80. (1985).
- Dentel, S. K., (1991), Coagulant control in water treatment, Critical Reviews in Environmental Control, CRC Press, Boca Rotan, 21(1), 41-135, (1991).
- Edzward, G.A. and Amirtharajah, A., Rmoving color caused by humic acid, *J. AWWA*, 77, 50-57, (1985).
- Hall, E.S. and Packham, R.F., Coagulation of organic color with hydrolyzing

- coagulants, *J. AWWA*, 57, 1149-1166, (1965).
- Hazen, A. M., On Sedimentation, ASCE Trans., 63, 45, (1904).
- Hunter, R. J., and Liss, P. S., The surface charge of suspended particles in estuarine and coastal water, *Nature*, 282, 823, (1979).
- Hunter, R. J., Zeta Potential in Colloid Science. London: Academic Press, (1981).
- Hudson, H.E., Jr., Residence Times in Pre-treatment, *J. AWWA*, 67(5), 45-52, (1975).
- Hudson, H.E., Jr., Water Clarification: Processes, Practical Design, and Evaluation, Van Nostrand Reinhold, New York, (1981).
- James M., Precipitation, Coagulation, Flocculation. Montgomery Consulting Engineers Inc., Chap. 6: In Water Treatment Principles and Design. John Wiley & sons, New York, NY:116-134, (1985).
- Jardine, P. M. and Zelazny, L. W., Mononuclear and polynuclear aluminum speciation through differential reactions with ferron. *J. Soil Sci. Am.* 50, 895-900, (1986).
- Kang, L. S. and Cleasby, J. L., Temperature effects on flocculation kinetics using Fe(III) coagulant. *J. Envir. Engrg.*, ASCE, 121(12), 893-901, (1995).
- Kang, L. S. and Cleasby, J. L., The effects of water temperature and sulfate ion on flocculation kinetics using Fe(III) coagulant in water treatment, Am. Water Works Assoc. Annual conference. (1994).
- Kawamura, S., Considerations for Improving Flocculation, *J. AWWA*, 68(6), 328-336, (1976).
- Kawamura, S., Integrated design of water treatment facilities. 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, (2000).
- Letterman R. D., Coagulation and flocculation: rapid mixing. In Water Quality and Treatment, ch.6, ed. New York : McGraw-Hill, (1999).

- Letterman, R. D. and Asolekar, S., Surface ionization of polynuclear species in Al(III) hydrolysis- I. Titration results, *Water Res.*, 24(8), 931, (1990).
- Letterman, R. D. and Driscoll, C.T., Survey of residual aluminum in filtered water, *J. AWWA*, 80(4), 154-158, (1988).
- Lyklema, J., Surface chemistry of colloids in connection with stability, in Ives, K.J. eds., *The Scientific Basis Flocculation*, Sijthoff and Noordhoff, The Netherlands, (1978).
- Mangravite, F. Jr., Removal of humic acid by coagulation and microflotation, *J. AWWA*, 67(2), 88, (1975).
- Niehof, R. A., and Loeb. G. I., The surface charge of particulate matter in sea water. *Limnology Oceanography*, 17(7), (1992).
- O'Melia, C. R., Coagulation & Flocculation, in W. J. Weber, Jr.(ed.), *Physicochemical Processes for Water Quality Control*, Wiley-Interscience, New York, (1972).
- Parks, G. A., Free Energies of Formation and Aqueous Solubility of Aluminum Hydroxide and Oxide-Hydroxide at 25°C. *Am. Mineral.* 57, 1163-1189, (1972).
- Parker, D. R. and Bertsch, P. M., Formation of the Al<sub>13</sub> tridecameric polycation under diverse synthesis condition, *ES&T*, 26(5), 914-921, (1992).
- Pouillot, M. and Suty, H., High-basidity polymeric aliminum salts for drinking-water prodction, *Water Supply*, 10(4), 133-153. (1992).
- Randtke, S. J., Organic contaminant removal by coagulation and related process combination, *J. AWWA*, 80(5), 40. (1988).
- Rebhun, M. and Lulie, M., control of organic matter by coagulation and floc separation, *Wat. Sci. Tech*, 27(11), 1-20. (1993).

- Sanks, R. L., Water Treatment Plant Design for the Practing Engineers, Ann Arbor Science Publishers, *Ann Arbor*, MI, (1979).
- Schoen, R. and Roberson, C. E., Structures of Aluminum Hydroxide and Geochemical Implications. *Am. Mineral.* 55, 43-77. (1970).
- Schofield, R. K. and Taylor, A. W., Hydrolysis of Aluminum Salt Solution. *J. Chem. Soc.*, 4445-4448, (1954).
- Stumm, W. and Morgan, J. J. Chemical Aspects of Coagulation. *J. AWWA*, 54, 971-994. (1962).
- Stumm, W. and Morgan, J. J., Aquatic Chemistry. John Wiley & Sons, Inc., New York. pp.168-466. (1970).
- Stumm, W. and O'Melia, C. R., Stoichiometry of coagulation. *J. AWWA*, 60(5), 514-539. (1968).
- Stumm, W. and Morgan, J. J., Aquatics Chemistry. 2nd eds. John Wiley and Sons, NY. (1981).
- Viessman, W. and Hammer, M. J., Water Supply and Pollution Control, 4th ed., Garoer & Row, New York, NY. (1985).
- Vrale, L. and Jordan, R. M., Rapid Mixing in Water Treatment. *J. AWWA* 63(1), 52-59. (1971).
- Weber, W. J., Physicochemical Processes for Water Quality Control, Wiley-Interscience, New-York. (1972).
- 건설부, 상수도시설 설계기준, (1992).
- 김영환, 나광주, 신흥식, 박현순, 곽종운, 영천도수로 터널공사 오탁수의 응집처리 특성 (1), 1995년도 추계 대한환경공학회 발표논문집, 114-117, (1995).
- 박세진, 박노석, 임재립, 김선규, 김석구, 문용택, 방기웅, CFD를 이용한 침전지 구조가 수리거동에 미치는 영향 평가(I): 도류벽의 영향, 상하수도학회지, 20(5),

667-676, (2006).

전일권, 라덕관., 환경수리학. 동화기술, (1997).

한국수자원공사, 터널공사중 발생하는 오탁수 처리방안 연구, (1995)

한승우, 상수처리용 무기고분자 응집제의 제조 및 적용. 부경대학교 환경공학과 박사학위 논문. (2000).

