

# 폴리머 개량에 의한 Alum 슬러지의 슬러지 탈수성과 결합수 함량에 대한 영향

- Effect of Polymer Conditioning on the Bound Water Content and  
SludgeDewaterability of Alum Sludge -

Chihpin Huang\*

Chih-Chao Wu\*

Yao-Chia Chuang\*

## 초 록

개량제로 폴리머를 적절하게 사용하는 것은 탈수공정에서 중요한 문제이다. 슬러지의 결합수 함량과 탈수성 변화는 슬러지 탈수시, 폴리머 사용의 최적화를 위한 중요한 정보가 된다. 본 연구에서는 Alum 슬러지의 결합수 함량과 탈수성에 대한 양이온계 폴리머와 음이온계 폴리머 개량의 영향을 조사하였다. 결합수 함량과 슬러지 입자의 입경을 측정하기 위해서 팽창기술(Dilatometric technique)과 형상분석(Image analysis)을 이용하였다.

본 연구에서는 CST와 제타 전위의 측정에 의해, 최적 투입량은 음이온계 폴리머보다 양이온계 폴리머에서 쉽게 결정되었으며, 전하 중화의 작용은 슬러지 탈수성과 결합수 함량에서 중요하게 고려해야 할 문제로 나타났다. 슬러지 개량 후 결합수 함량은 물의 대체에 의해 감소되고 공극수 형성에 의해 증가되는 수분 함량의 순수한 변화를 나타낸다. 폴리머 개량에 의한 슬러지 총밀도의 감소는 결합수 함량의 증가를 가져올 수 있다.

## 서 론

폴리머 개량은 일반적으로 슬러지의 탈수특성을 향상시켜 탈수비용을 감소시키기 위해 적용된다.

슬러지 내의 물의 분포는 탈수특성을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 결합수는 기계적 탈수의 이론적 한계로 간주된다. 폴리머 개량에 의한 슬러지의 결합수 함량과 탈수성 변화는 슬러지 탈수에서 폴리머의 사용을 최적화하는데 중요한 정보를 제공할 수 있다.

탈수 성능의 향상과정에서 슬러지내의 물의 분포와 탈수성의 변화에 대한 폴리머의 영향은 많은 연구자들에 의해 제출되었다. 하지만 폴리머의 하전 형태(예를 들면 양이온계, 음이온계)와 결합수 함량 사이의 관련성에 대한 정보는 매우 부족하였다. Katsiris와 Kouzeli-Katsiri[1]는 폴리머 첨가에 따른 결합수 함량 감소를 해석하기 위해 가설을 제안하였다. 후에 Robinson과 Knocke[2]도 이 가설과 일치하는 의견을 내었다. 하지만 이 저자들은 과잉 투입되었을 경우 결합수 함량에 대한 해석을 제공하지 못하였다.

본 조사는 Alum 슬러지의 결합수 함량과 탈수성에 대한 양이온계 및 음이온계 폴리머의 영향에 대해 조사하였다. 이 조사는 결합수 함량과 과잉 폴리머 투입 간의 관련성을 보여주는 것이라고 예상할 수 있다. 개량된 슬러지의 플록 밀도와 플록 크기 사이의 관련성은 결합수 함량 변화를 고려하여 입증할 수 있을 것이다.

## 실 험

슬러지는 대만의 Ming-Der 정수처리장의 침전

\* Institute of Environmental Engineering  
National Chiao Tung University (Taiwan)

조에서 채취하였다. 본 연구에서 사용된 폴리머는 PC320과 PA220이다. PC320은 양이온계 폴리머이며 PA220은 음이온계 폴리머이다. 두 폴리머 모두 Taiwan Polymer Company에서 제조되었으며, 유사하게 평균  $1.1\sim 1.2\times 10^6$  정도의 분자량과 20%정도의 전하밀도를 갖는다. 혼합조는 다양한 속도의 모터로 구성된 교반장치가 있는 방해판 혼합조이다. 슬러지는 800ml를 1L 교반기에 넣고 125rpm에서 60초 동안 혼합하였다. 2시간 동안 침전시킨 후 상정수는 제거시킨 후, 침전된 덩어리의 결합수 함량을 측정하였다. 제거된 상정수는 전위 측정기(Zeta-meter 3.0+, Zeta-meter, Inc. USA)로 제타 전위를 측정하기 위해 보관하였다.

슬러지 탈수성은 모세관 흡입시간(CST) 장치(Triton 165)로 정량화하였다. 1.8cm 입경의 실린더를 이용하였으며 슬러지 부피는 5ml이다. 팽창계(Diatometer)는 슬러지 결합수 함량을 측정하기 위해 사용하였다. 이 방법은 결합수가 자유수가 빙점(-20℃) 이하의 온도에서도 액상으로 존재한다는 이론에 바탕을 두고 있다. 전체 수량과 자유수의 양을 알면 그 차이를 결합수라고 볼 수 있다. 상세한 실험과정은 보고되었다(2,4). 플록 밀도는 최종 침강 속도와 슬러지 플록 입경에 기초한 수정 Stokes 식을 이용하여 계산하였다(5). 정지된 칼럼에서 각각의 슬러지 덩어리들의 침강은 close-up 렌즈를 장착한 비디오 카메라로 기록하였다. 칼럼에서의 플록 입경과 최종 속도는 테이프를 재생하면서 측정 및 결정하였다. 슬러지 플록 입경과 유효 밀도 사이의 상관성은 양대수 그래프를 통해 구하였다. 슬러지 덩어리의 크기와 분포는 모니터와 비디오 카메라를 장착한 형상분석기(Galai ScanArray-2, Israel)로 측정하였다.

### 결과 및 고찰

슬러지 탈수 성능에 대한 양이온계 및 음이온계

폴리머 투입량의 영향을 그림 1에 나타내었다. 양이온 폴리머 투입량에 따라 CST값은 초기에 감소하며, 최적 투입량이라고 볼 수 있는 10mg/L에서 최소값에 이른다. 투입량이 20mg/L를 초과하면 CST값은 최적 상태로 부터 상당히 증가한다. 결과는 또 음이온계 폴리머 투입으로 CST가 초기에 감소되다가 이후 안정된 값을 갖는다는 것을 보여준다. CST가 다시 증가하는 현상이 과잉 투입에 기인한다면, 과잉투입 상태가 음이온계 폴리머 개량 동안에는 발견되지 않는다. 운전의 관점에서보면 이는 음이온계 폴리머보다 양이온계 폴리머에서 CST가 최저가 되는 최적 투입량을 찾기 쉽다는 것을 의미한다.

그림 1은 또한 폴리머 투입량에 대한 슬러지의

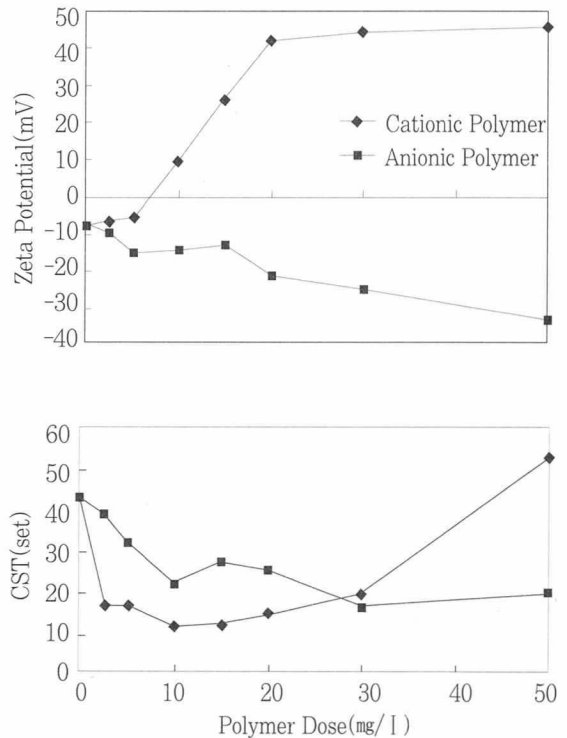


Fig1. Effect of cationic polymer on zeta potential and CST. Reported CST values are average of triplicates. Total solid content of raw sludge is 2.8%

제타 전위를 보여준다. 생 슬러지의 제타 전위는 음의 값을 갖는다. 슬러지가 양이온계 폴리머에 의해 개량되면 제타 전위는 폴리머 투입량이 증가됨에 따라 감소되며, 폴리머 투입량이 10mg/L에 근접하면 양의 값을 갖는다. 폴리머 개량에 의한 슬러지의 전하 중화 상태는 적절한 여과 환경을 얻는 것을 목적으로 한다. La Mer와 Healy[6]는 최적 폴리머 응결은 반 표면 피복도(half surface coverage)에서 나타난다고 하였다. 10mg/L이상의 양이온계 폴리머의 투입할 경우 슬러지가 양의 값을 갖는 것은 과잉 폴리머가 존재하여 CST를 증가시킨다는 것을 보여준다. 음이온계 폴리머의 경우, 개량된 슬러지의 제타 전위는 투입량이 증가되면 음의 방향으로 증가하게 된다. 일반적으로 가교 응결은 폴리머 개량제의 작용에 중요한 매카니즘이다[7]. CST와 제타 전위에 기초해서 볼 때, 최적의 슬러지 탈수성을 얻기위한 전하 중화 작용은 중요하게 고려해야 할 문제이다[8,9].

폴리머 투입량에 대한 결합수 함량을 그림 2에 나타내었다. 이 두 곡선을 비교하면 양이온계 폴리머와 음이온계 폴리머 사이에 큰 차이가 발견된다.

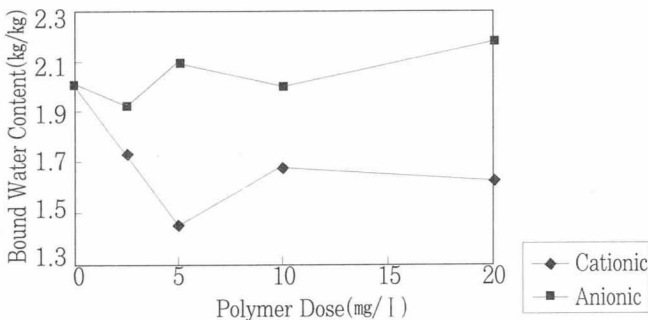


Fig2. Effect of cationic and anionic polymer on the bound water content alum sludge. Reported bound water content values are average of triplicates. Total solid content of raw sludge is 2.8% and the unit of bound water content is kg-H<sub>2</sub>O/kg-dry sludge

이 결과는 양이온계 폴리머의 투입량이 증가하면 결합수 함량은 초기에 감소하며 5mg/L의 투입량에서 가장 낮은 값에 도달한 후 증가하기 시작한다. 이는 양이온계 폴리머 투입이 이루어지는 동안 결합수 함량의 변동이 제타 전위의 변화와 밀접한 관련을 갖는다는 것을 보여준다. 결합수 함량이 최대일 때, 입자 표면의 하전은 중성으로 이동하며 입자는 가장 효과적으로 덩어리를 이루어 더 많은 물의 방출을 가져온다. 더 많은 양이온계 폴리머를 첨가하면 제타 전위는 양의 값으로 돌아오고 재안정화 현상을 일으켜 결합수 함량의 증가를 가져온다.

그림 2에 나타난 것처럼 음이온계 폴리머 투입의 결과는 결합수 함량에 대해 그다지 영향을 나타내지 않는다. 양이온계 폴리머와 비교하면, 음이온계 폴리머는 그림 1에 나타난 CST결과처럼 슬러지 탈수성을 향상에 있어 다른 작용을 나타낸다. 따라서 결합수가 슬러지 탈수성에서 중요한 역할을 하고 있음을 알려준다.

Katsiris와 Kouzeli-Katsiri[1]는 결합수 방출은 입자 표면에 부착된 물분자를 폴리머가 대체하기 때문이라는 가설을 제안하였다. 이는 폴리머 투입에 따른 결합수 함량의 변동에 대한 설명을 가능하게 해 준다. 양이온계 폴리머가 첨가되었을 때, 입자들은 응집되고 압축되어 물의 대체와 방출을 가져온다. 나아가 이러한 응괴들은 결합수의 방출을 가져오고 슬러지 탈수성을 향상시킨다. 그림 1에 나타난 대로 양이온계 폴리머 투입이 10mg/L를 초과하여 제타 전위가 양의 값을 갖게됨에 따라 결합수 함량은 증가된다. 양이온계 폴리머는 미세 입자에 부착되어 큰 덩어리를 형성하여 물리적 결합수분 분율을 증가시킨다[10]. 이는 과잉의 폴리머 투입

으로 슬러지 입자가 좀더 양의 값을 갖게되면 높은 전기적 반발력이 생겨 최적의 조건에서보다 공극이 증가되기 때문이다. 자유수의 일부는 공극에 갇혀 결합수 함량을 증가시키게 된다

음이온계 폴리머 개량에서는 전하 중화가 일어나지 않기 때문에 입자가 뭉치는 동안 물의 대체와 배제가 이루어지지 않는다. 결합수의 감소량은 공극 내의 수분함량(공극수, interstitial water)과 거의 같다. 결합수의 대체와 공극수의 생성 매카니즘이 슬러지 개량에서 동시에 일어나면 슬러지 개량후의 결합수 함량은 물의 대체에 의해 감소되고 공극

수의 생성에 의해 증가되는 수분 함량의 순수한 변화가 된다.

자유 침강 분석에서 구한 개량 슬러지의 입경과 유효 밀도의 대표적인 관련성을 그림 3에 나타내었다. 이 결과는 플록 입경이 감소함에 따라 입자 밀도가 증가되며 두 인자 사이에 선형 관계가 존재함을 보여준다.

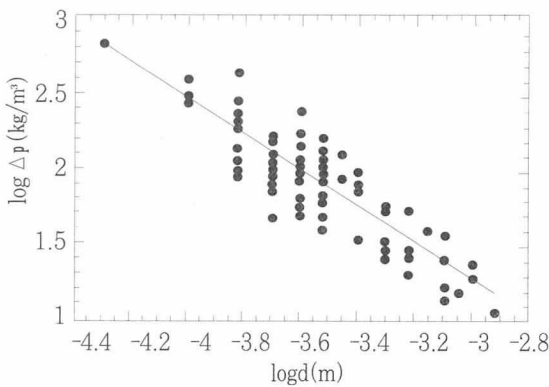


Fig3. Typical relationship between the sludge diameter and effective density. Cationic polymer dose is 60 mg/L

표 1은 5개의 슬러지 입경과 폴리머 투입량에 따른 슬러지의 습윤 밀도의 변동을 보여준다. 입자의 각 입경에 대한 습윤 밀도는 크기와 밀도를 회귀분석하여 계산하였다. 표 1에서 두가지 현상이 주목할 만하다. 첫째, 큰 크기(0.6 & 0.8mm)에서 입자의 습윤밀도는 폴리머 투입에 따라 증가되며, 작은 크기(0.1 & 0.2mm)에서는 투입량의 증가에 따라 감소된다. 이는 슬러지의 습윤밀도가 폴리머의 첨가로 변화될 수 있음을 보여준다. 둘째, 입자 입경은 폴리머 투입에 따라 증가된다는 것을 보여준다. 폴리머 개량에 의한 입자 덩어리의 입경은 입자의 50%가 그것보다 작거나 크게 되는 직경(D<sub>50</sub>)으로 나타내었다. 다양한 폴리머 투입량에 대한 D<sub>50</sub>은 형상분석 결과에서 얻어진다. 밀도와 크기의 회귀분석에서 계산된 D<sub>50</sub> 입경에 따른 입자군

〈표 1〉 양이온 폴리머 투입과 슬러지 입경 그리고 D<sub>50</sub> 함수로서의 계산된 밀도

입경 (mm)	밀도 kg/m³				
	폴리머 투입량 (mg/L)				
	00	05	10	20	30
0.1	1752	1628	1654	1518	1283
0.2	1213	1162	1214	1170	1126
0.4	1061	1042	1070	1056	1056
0.6	1029	1019	1037	1029	1035
0.8	1017	1011	1023	1018	1025
밀도	1258	1198	1184	1105	1053
D <sub>50</sub> (mm)	0.18	0.18	0.22	0.27	0.42

밀도는 본 연구에서 개량 슬러지의 총 밀도를 나타내는데 사용할 수 있다. 이 결과는  $D_{50}$ 의 총 밀도가 폴리머 투입량의 증가에 따라 감소된다는 것을 나타낸다.  $D_{50}$ 의 밀도가 실제로 슬러지의 총밀도가 아닐지라도 슬러지 총 밀도에 대한 지표를 제공할 수 있다. 이상과 같이, 폴리머 개량에 따른 슬러지 총 밀도의 감소는 결합수 함량의 증가를 가져올 수 있다.

## 결론

CST의 최저값으로 결정되는 최적 투입량을 결정하는 것은 음이온계 폴리머보다 양이온계 폴리머가

쉽다. CST와 제타 전위 측정에 기초하여 보면, 전하 중화의 작용은 슬러지 탈수성에 있어 중요하게 고려해야 할 문제가 나타나게 된다. 제타 전위의 변화는 양이온계 폴리머 투입이 이루어지는 동안 결합수 함량의 변동과 밀접한 관련을 갖는다. 결합수는 슬러지 탈수성에 대해 중요한 역할을 할 수 있을 것이다. 슬러지 개량 후 결합수 함량은 물의 대체에 의해 감소되고 공극수의 생성에 따라 증가하는 수분의 순수한 변화이다. 폴리머 개량에 따른 슬러지 총 밀도의 감소는 결합수 함량의 증가를 가져온다. ●