

응집과 균질화가 팽화슬러지의 용존공기부상과 침전에 미치는 영향

김동석 · 박영식*†

대구가톨릭대학교 환경과학과, *대구대학교 보건과학부

Effect of Coagulation and Homogenization on the Dissolved Air Flotation and Sedimentation of Bulking Sludge

Dong Seog Kim · Young Seek Park*†

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk

*Division of Health Science, Daegu University, Gyeongbuk

(Received June 21, 2006/Accepted December 10, 2006)

ABSTRACT

The objective of this study is to examine the effect of the coagulation and homogenization in bulking sludge thickening of paper manufacturing plant using DAF (Dissolved Air Flotation) and gravitational sedimentation. The effects of parameters such as dosage of coagulant and homogenization time were examined. The results showed that DAF and sedimentation was affected aluminum sulfate and anion polymer coagulant differently. At the optimum dosage of aluminum sulfate, thickening efficiency of DAF and sedimentation process were increase 1.25 time and 2.02 time, respectively. At the optimum dosage of anion polymer coagulant, thickening efficiency of DAF process was increase 1.35 time, but thickening efficiency at sedimentation was 1.06 time. When anion polymer coagulant of 0.5 mg/l was added in DAF process, water content of sludge was decreased from 96.6% to 90.7% in dewatering process using Buchner funnel test device. After homogenization (20500 rpm, 10 min), Sauter mean diameter of sludge floc was decreased from 631 μ m to 427 μ m, however increase of flotation efficiency by DAF was only 1.09 time.

Keywords: sludge thickening, dissolved air flotation, bulking sludge, sedimentation, water content

I. 서 론

국내 하수슬러지 발생량은 하수도 보급률의 증가와 고도처리기술이 도입됨에 따라 점차 증가하고 있는 추세이다. 2004년 말 기준 268개 하수종말처리시설에서 연간 2,426,070톤의 하수슬러지가 발생되었으며, 2003년 7월 이후 함수율이 75% 이상인 슬러지의 직 매립 금지로 인하여 2004년에는 1,869,334톤(77.1%)이 해양 투기에 의하여 처리되었고, 재활용 239,085톤(9.8%), 육상매립 34,295톤(1.4%) 및 소각 283,356톤(11.7%)으로 다른 처리방법에 비해 해양투기의 비율이 매우 높은 편이다.^{1,3)}

그러나 연안해역의 오염 가중 및 국제적인 규제강화(런던협약 '96 의정서) 발효를 앞두고 하수슬러지 등 폐

기물의 해양배출규제가 대폭 강화됨에 따라 육상처리 대책 마련이 시급한 실정이며, 2012년부터는 하수슬러지 및 축산폐수의 해양배출을 금지하는 것으로 국무회의에 보고됨에 따라 해양오염방지법 시행규칙을 개정할 예정이다. 그간 해양에 배출해오던 하수슬러지를 재활용, 소각 등의 방법으로 처리해야 하므로 이에 대한 체계적 계획의 마련이 필요하다.⁴⁾

하수슬러지의 소각 및 재활용 등의 방법이 폭넓게 검토되고 부분적으로 실행되고 있으나, 기존의 처분방법들에 비해 비용이 상당히 많이 소요된다는 경제적인 문제점 때문에 적용에 있어 현실적 제약을 받고 있다.

슬러지의 함수율은 소각 및 재활용 등에 있어 처리비용을 결정하는 중요한 요소 중의 하나로 최근 슬러지의 감량화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 슬러지 처리비용의 절감과 슬러지 처리를 효율적으로 하기 위해서는 슬러지에 함유되어 있는 수분을 최소화시키는 감량화 과정이 중요하다.^{5,6)}

슬러지의 수분을 제거하는 방법 중에서 슬러지 농축

†Corresponding author : Division of Health Science, Daegu University
Tel: 82-53-650-8043, Fax: 82-53-650-8049
E-mail : ysparkk@daegu.ac.kr

(thickening), 개량(conditioning), 탈수(dewatering), 건조(drying) 등의 공법이 일차적으로 슬러지의 수분을 제거하는데 이용된다. 그 중에서 농축은 슬러지로부터 액체의 일부를 제거하여 슬러지의 고형물 함량을 높이는 과정이다. 농축은 일반적으로 중력침전, 부상, 원심분리, 중력식 벨트 등의 물리적인 방법에 의하여 이루어진다.

슬러지 농축은 일반적으로 중력침전, 부상, 원심분리 등의 물리적인 방법을 이용하여 이루어지며, 슬러지 자체의 중력을 이용한 농축은 주로 1차 슬러지에 적합하다고 알려져 있으며, 슬러지 밀도가 1.01-1.09 g/cm³인 2차 슬러지인 잉여슬러지에는 좋은 방법이 아닌 것으로 보고되고 있다.⁷⁾

부상분리(flotation)는 분산매(dispersion medium) 중에 함유된 부유상에 미세기포를 부착시켜 분산매와 공기가 접하고 있는 한계 면까지 부상시켜 고액분리를 유도하는 것을 말하며 부유물질, 유분, 그리스 등을 물로부터 분리하여 폐수를 정화하고 슬러지를 분리, 농축하는데 사용된다.⁸⁾

복유법을 중심으로 널리 적용되고 있는 부상분리의 일종인 용존공기부상(Dissolved Air Flotation) 공정은 정수공정 뿐만 아니라, 식품 및 제지폐수 등의 생물학적 처리시설에서 뿐만 아니라 하수처리공정에 있어서도 플록의 부상분리와 슬러지 농축에 DAF 공정이 적용되고 있다.⁹⁾

본 연구는 팽화 상태에 있는 슬러지 농축에서 농축 효율을 증진시키기 위하여 응집제와 homogenizer에 의한 균질화가 팽화슬러지의 부상효율에 미치는 영향을 고찰하고 후속 공정인 탈수공정에 미치는 영향을 고찰하였으며, 비교를 위해 중력침전 공정에서의 성능을 비교하였다.

II. 연구방법

1. 실험재료

실험에 사용한 슬러지는 M 제지사의 반송슬러지를 채취하여 No. 60 표준체로 체질한 뒤 폭기되는 저류조에 보관하였다. 슬러지는 인공 합성원수에 순용시켜 실험에 사용하였다. 실험에 사용한 M 제지사의 반송슬러지는 순용 후 SVI를 측정된 결과 350-450 ml/g 나타나 팽화가 발생한 상태였으며, 평균 반송슬러지 농도인 2200 mg/l를 기준으로 실험하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험에 사용한 DAF 장치는 크게 가압수조와 부상수조로 나뉘며, 가압수조는 길이와 외경이 18 mm인

PVC 파이프를 100% 충전하여 실험하였다. 부상수조는 내경이 7 cm, 높이가 50 cm이며, 총 부피는 1.92 l이다. 부상수조의 상부는 모터와 감속기가 달려 있으며 속도 조절장치에 의하여 속도를 조절하였다. 가압수로는 수돗물을 사용하였으며, 예비실험에서 팽화 슬러지의 부상에서 최적조건으로 나타났던 가압수 순환비는 20% (A/S 비, 7.070×10⁻³ ml/mg), 가압수조 압력은 5 atm, 가압수 주입시간은 25초, 부상시간은 30분으로 조절하여 실험하였다.¹⁰⁾

황산알루미늄 첨가 실험에서 부상수조에 슬러지 1 l를 투입하고 황산알루미늄을 1-9 mg/l 투입한 뒤 200 rpm으로 3분간 급속 교반하고, 20 rpm으로 10분간 완속 교반한 뒤 가압수를 주입하였다. 고분자 응집제 첨가실험은 부상수조에 슬러지 1 l를 투입하고 제지공장에서 사용하는 음이온 응집제(A-301)를 0.1-3.0 mg/l를 투입하고 황산알루미늄과 같은 조건으로 급속 및 완속 교반한 뒤 가압수를 주입하였다.

균질화 실험은 슬러지를 1 l 비커에 투입하고 homogenizer(T25basic, IKA LaBoTechnic)로 8000, 9500, 13500, 20500 rpm의 속도에서 시간을 바꾸어 실험하였다.

3. 분석 및 측정

부상공정에서 농축된 슬러지 농도는 부상시간이 끝난 뒤 슬러지 계면 상부에서 피펫을 이용하여 채취한 뒤, 농도를 측정하였으며, 침전공정에서의 슬러지 농도는 30분의 침전 시간 후 피펫을 이용하여 슬러지 층에서 농도를 측정하였다.

부상수조 하부의 슬러지 농도는 부상수조 하부 5 cm 지점의 채취구에서 50 ml를 폐기하여 남아있는 전 실험의 슬러지를 제거한 후 10 ml 채취하여 농도를 측정하였다. 침전공정의 상등수 슬러지 농도는 상부에서 채취하여 농도를 측정하였다.

SVI는 1 l 메스실린더를 이용하여 농도를 미리 측정 한 슬러지를 투입시킨 뒤 30분 침강시킨 후 슬러지-물 계면 부피를 측정하여 아래의 계산식에 의해 계산하였다.

$$SVI = \frac{SV \times 10^3}{MLSS} \quad (1)$$

SVI : 슬러지 부피지수(ml/g)

SV : 슬러지 용적(ml/l)

MLSS : 슬러지 농도(mg/l)

슬러지의 농축이 진행됨에 따라 슬러지로부터 물이

빠져나가 점차 슬러지와 물의 계면이 형성된다. 이러한 계면의 형성과 그 높이의 변화는 농축의 효율을 평가하는 중요한 수단이 되는데, 계면 높이 변화가 더 이상 일어나지 않을 때 농축공정은 완료되었다고 할 수 있다.¹¹⁾

슬러지의 농축이 진행됨에 따라 슬러지가 부상수조 윗부분으로 부상하기 때문에 부상수조 윗부분부터 슬러지 계면이 형성된다. 계면이 형성된 후 부상수조 윗부분부터 줄자를 이용하여 계면높이를 측정하였다.

여과 전 부상에 의한 슬러지 함수율은 슬러지 농도를 구하여 식 (2)에 의하여 구하였다. 부상실험이 끝난 시료를 채취하여 여과 후 Buchner funnel test 장치를 이용하여 함수율을 측정하였다. 미리 무게를 측정한 직경 47 mm인 GF/C 여과지를 패널에 놓고 시료 10 ml를 투입하고 32 cmHg 진공에서 1분 동안 여과시킨 후 무게를 측정하고 105°C에서 2시간 건조시킨 후 무게를 측정하고 식 (3)에 의해 슬러지의 함수율을 측정하였다.

$$C_i = \frac{100 - P_s}{100} \times 100 \quad (2)$$

여기서 C_i : 슬러지 최초 수분량(%)
 P_s : 슬러지 무게(%)

$$C_f = \frac{(W_w - W_f) - (W_d - W_d)}{(W_w - W_d)} \times 100 \quad (3)$$

여기서, C_f : 함수 후 수분함량(%)
 W_w : 젖은 여과지 무게(g)
 W_f : 건조 여과지 무게(g)
 W_d : 공 여과지 무게(g)

슬러지의 평균 직경은 현미경에서 사진을 촬영하고, Image analyser(Focus Technology, Image Inside)로 200개의 입자에 대해 장축(a_i)과 단축(b_i)을 구하여 아래와 같이 계산되는 직경 D_i 를 가지는 volume-equivalent 구형으로 전환하고,¹²⁾ 평균 입자 크기는 Sauter mean diameter에 의해 구하였다.

$$D_i = \sqrt[3]{a_i \cdot b_i^2} \quad (4)$$

여기서, a_i : 장축(μm)
 b_i : 단축(μm)

평균 입자 크기는 식 (5)로 표현되는 Sauter mean diameter에 의해 구하였다.

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i^3}{\sum_{i=1}^n D_i^2} \quad (5)$$

여기서, \bar{D} : Sauter mean diameter
 n : 측정 횟수

III. 결과 및 고찰

1. 황산알루미늄 첨가의 영향

Fig. 1에 황산알루미늄 첨가량에 따른 부상과 침전 공정에서의 농축 슬러지 농도를 나타내었다. 그림에서 보듯이 부상공정의 경우 황산알루미늄 4 mg/l의 투입량이 최적 투입량이었으나 응집제가 투입되지 않았을 때에 비해 1.25배의 슬러지 농축량이 증가하였다. 침전의 경우는 1 mg/l만 증가하여도 2.02배의 농축효율을 얻었으나 그 이상의 응집제 농도에서는 효과가 없는 것으로 나타났다. 부상공정과 침전공정을 비교하면 각각의 최적 응집제 농도에서 부상농도는 11580 mg/l, 침전농도는 4910 mg/l로 나타나 부상에 의한 농축 슬러지 농도가 2.35배 높은 것으로 나타났다, 부상공정에서의 하부수의 슬러지 농도는 응집제를 투입하지 않았을 경우의 농도인 84 mg/l에서 20~30 mg/l로 나타나 하부수의 슬러지 농도 감소에는 효과가 있는 것으로 나타났다.

2. 고분자 응집제 첨가의 영향

Fig. 2에 고분자 응집제 첨가량에 따른 부상공정에서의 슬러지 계면높이와 침전공정에서의 SVI 변화를 나타내었다. 부상공정에서 부상 후 슬러지 계면높이는 응집제 미 투입시 60 mm에서 0.5 g/l 투입시 52 mm까지

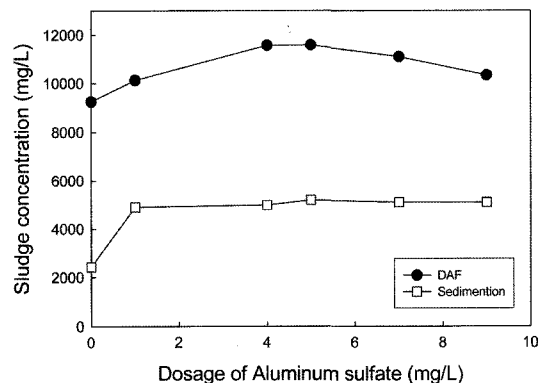


Fig. 1. Variation of sludge concentration on the DAF and sedimentation process with the dosage of aluminum sulfate.

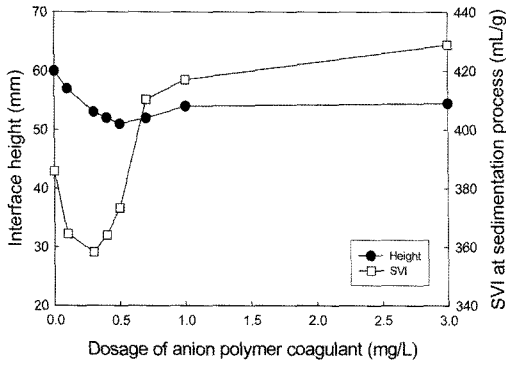


Fig. 2. Variation of sludge wet density on the DAF and SVI on the sedimentation with the dosage of polymer coagulant.

감소하는 경향을 보였으나 0.5 mg/l 이상의 응집제 투입량에서는 슬러지 계면높이가 증가하는 경향을 보였다. 반면 침전 공정의 경우 응집제 미 투입시 SVI가 385 ml/g에서 0.3 g/l 투입시 358 ml/g으로 감소되었으나 0.7 mg/l 투입시 SVI가 410 ml/g으로 빠르게 증가되었으며 응집제 미 투입시의 SVI보다 높게 나타났다. 일정량 이상의 고분자 응집제 투입은 부상과 침전 공정에 모두 불리한 것으로 나타났다.

Fig. 3에 고분자 응집제 첨가량에 따른 부상과 침전 공정에서의 슬러지 농도를 나타내었다. 그림에서 보듯이 부상에 의한 슬러지 농도는 응집제 미 첨가시 9121 mg/l에서 0.5 mg/l 첨가시 12298 mg/l로 1.35배 증가하였다. 그러나 0.5 mg/l 이상의 응집제 농도에서는 농축 슬러지 농도가 감소하는 경향을 나타내었다. 침전의 경우 0.3 mg/l에서 1.06배의 농축 증가율을 얻었지만 그 차이는 무시할 정도로 적었다.

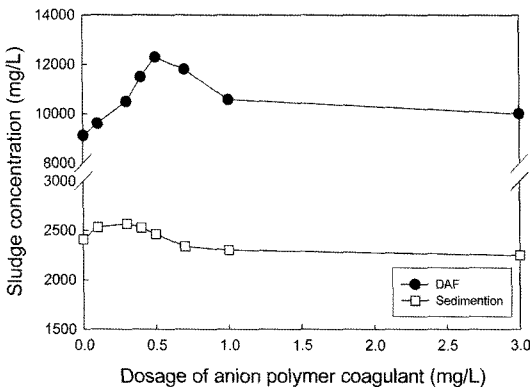


Fig. 3. Variation of sludge concentration on the DAF and sedimentation process with the dosage of polymer coagulant.

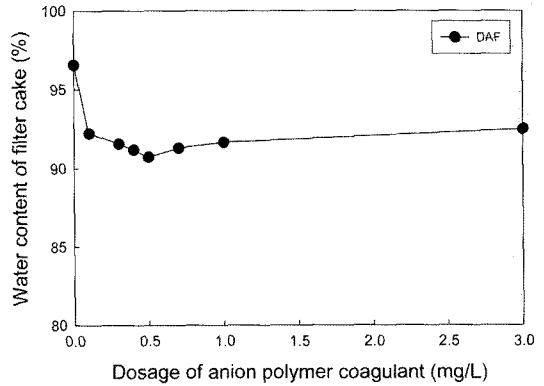


Fig. 4. Effect of dosage of polymer coagulant on water content after filtration.

동일한 슬러지와 실험조건에서 부상 증진을 위해 황토와 폐굴패각을 첨가하였을 때 최적 황토 투입농도시 슬러지의 농축율은 1.41배, 굴패각 투입시 1.36배 증가하였다는 박¹⁰⁾의 결과와 비교할 때, 무기물인 황토, 폐굴패각과 유기물인 고분자 응집제 투입시의 농축효과는 비슷한 것으로 나타났다.

고분자 응집제 투입이 농축의 후속공정인 탈수공정에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Fig. 4에 음이온 고분자 응집제의 투입량에 따른 슬러지의 함수율 변화를 나타내었다. 응집제 미 투입시 부상공정에 의한 농축 슬러지의 함수율은 96.6%였으며, 0.5 mg/l의 응집제 투입시 90.7%로 5.9%의 함수율 감소를 얻었다. 0.5 mg/l 이상의 응집제 투입량에서는 함수율이 서서히 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 3과 4의 결과를 종합해보면 최적 농도까지의 고분자 응집제 투입은 부상시 슬러지 계면높이 감소, 침전시 SVI의 감소로 인하여 부상과 침전공정에서 슬러지 농축율이 증가하고 탈수율도 증가하지만 최적 농도 이상에서는 잉여고분자로 인해 부상과 농축을 방해하고 탈수율도 감소하는 것으로 사료되었다.

박¹⁰⁾은 부상증진방안으로 굴패각과 황토를 투입하였을 때 최적 굴패각과 황토 투입량에서 함수율은 각각 89.4%, 89.2%로 나타났다고 보고한 결과와 본 연구에 의한 고분자 응집제투입시 함수율은 90.7%와 비교할 때 후속공정까지 고려하면 고분자 응집제보다는 굴패각이나 황토의 적용이 타당하다고 사료되었다.

3. Homogenizer를 이용한 균질화의 영향

Homogenizer로 8000, 9500, 13500 및 20500 rpm의 속도로 5분간 균질화하고 최적 부상 조건에서 부상시켜 슬러지 농도를 측정된 결과 부상효율이 증가하지

않았다.

균질화 속도를 20500 rpm으로 고정하고 균질화 시간을 5, 10, 20, 30 및 60분으로 변화시키면서 균질화한 뒤 부상시킨 결과 슬러지 계면 높이와 농축 슬러지 농도를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보듯이 20500 rpm에서 10분 균질화까지 계면높이는 감소하였으나 10분 이상의 시간에서는 계면 높이가 증가하는 경향을 나타내었으며, 슬러지 농도도 10분까지 경향을 농축농도가 증가하지만 그 이상의 균질화 시간에서는 농도가 서

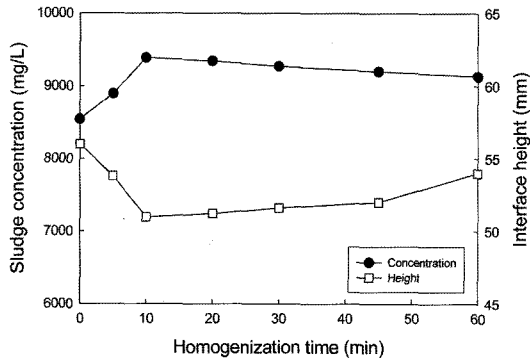
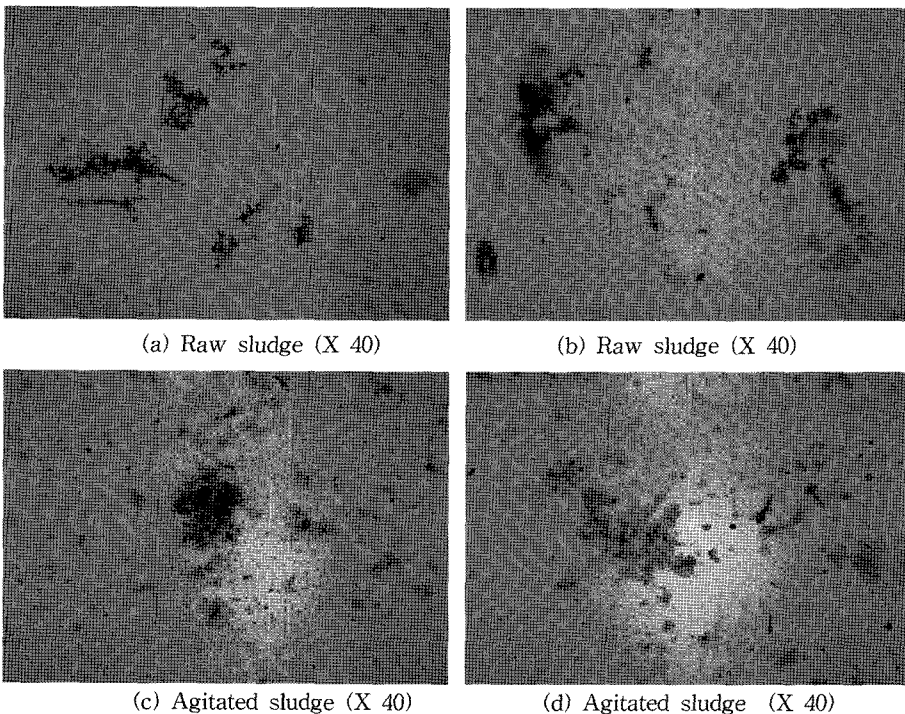


Fig. 5. Sludge concentration and interface height with homogenization time (DAF).

서히 감소되는 경향을 나타내었다. 균질화에 의한 최적 조건에서의 부상효율은 1.09배 증가하는 것으로 나타났다. 침전공정에서는 슬러지 균질화로 인한 효과가 전혀 관찰되지 않아 침전농도는 나타내지 않았다.

Fig. 6에 homogenizer로 균질화하기 전 슬러지와 20500 rpm으로 60분 균질화후 슬러지 사진을 나타내었다. 슬러지의 모습을 명확하게 관찰하기 위하여 균질화 전과 후의 슬러지를 채취하여 시험관에 넣고 그림염색에 사용되는 사프란인 염색액을 몇 방울 떨어뜨린 후 10분 뒤 현미경에서 40배의 배율로 사진 촬영하였다.

Fig. 6(a)와 (b)에서 보듯이 플록의 크기가 크고 사상성 미생물이 플록 외부로 뻗어 있는 것이 관찰되었다. 그러나 20500 rpm에서 60분간 균질화한 슬러지인 (c)와 (d) 사진을 보면 플록을 구성하고 있던 미생물들이 떨어져 나가 새로운 작은 플록을 형성하고 있는 것이 관찰되었으며, 사상성 미생물도 잘려져 있는 것이 관찰되었다. Image analyser로 두 상태의 슬러지의 Sauter mean diameter를 측정한 결과 각각 631 μ m와 427 μ m로 나타나 슬러지 플록의 입경이 줄어든 것으로 나타났다. homogenizer로 균질화한 슬러지 플록 중에서 image analyser로 입경의 크기를 정확하게 측정하기 어려운 15 μ m 이하의 플록을 제외하였다. 두 상태의 슬



(a) Raw sludge (X 40)

(b) Raw sludge (X 40)

(c) Agitated sludge (X 40)

(d) Agitated sludge (X 40)

Fig. 6. Photographs of sludge before and after homogenization.

Table 1. Size of sludge floc before and after homogenization

	Under 50 μm	50.1 μm ~100 μm	100.1 μm ~200 μm	200.1 μm ~300 μm	300.1 μm ~400 μm	400.1 μm ~500 μm	500.1 μm ~700 μm	700.1 μm ~1000 μm	Over 1000 μm	Total
Raw sludge	10.2%	30.1%	34.1%	13.6%	4.5%	1.2%	3.9%	1.2%	1.2%	100%
Agitated sludge	12.8%	33.8%	34.8%	14.9%	0%	0%	1.5%	2.2%	0%	100%

러지 플록 약 200개의 Sauter mean diameter 범위를 Table 1에 나타내었다.

표에서 보듯이 원 슬러지보다는 균질화한 슬러지의 플록 크기가 줄어든 것을 알 수 있었다. 300 μm 이상인 플록은 원 슬러지의 경우 12.0%, 균질화 슬러지의 경우는 3.7%로 나타났으며, 균질화 슬러지의 경우 1000 μm 이상의 크기를 가지는 플록은 관찰되지 않았다. 그러나 균질화 슬러지의 경우 image analyser로 분석하기 어려운 15 μm 이하의 플록은 제외하였기 때문에 실제 Sauter mean diameter가 427 μm 보다 적고, 50 μm 이하의 플록수가 많을 것이라고 사료되었다.

Fig. 7에 20500 rpm에서 시간에 따라 균질화하고 부상한 슬러지를 여과시킬 때의 슬러지 함수율을 나타내었다. 그림에서 보듯이 슬러지의 함수율은 10분의 균질화 시간까지 조금 감소하였으나 10분 이상의 균질화 시간에서는 슬러지 함수율이 증가하여 60분에는 99.1%까지 증가하였다. 20분 이상의 균질화 시간을 가진 슬러지를 여과할 때 케이크 위에 끈적이는 투명한 물질이 남아 있는 것이 관찰되었는데, 이는 세포의 고분자 물질과 같은 것이 균질화에 의해 세포로부터 빠져 나가기 때문이라고 사료되었다. 이들 물질의 정량적인 고찰은 실시하지 않았다. 일정 균질화 시간내에서는 사상성 플록이 깨져 부상효율이 증가하지만 최적 균질화 시간이상에서는 세포에서 빠져나온 물질과 균질화로 인한 사상성 미생물이 잘려져 형성된 다양한 크기의 입

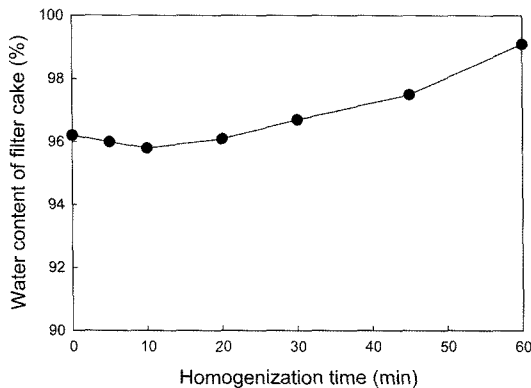


Fig. 7. Effect of homogenization time on water content after filtration.

경을 가지는 작은 플록들이 큰 플록 사이에 끼어들어 가압수 중의 기포의 상승을 막아 사상성 플록의 크기 감소로 인한 부상효율 증가효과를 상쇄시키기 때문에 부상효율이 감소되는 것으로 사료되었다.

균질화에 의해 슬러지 크기의 감소는 부상이나 침전 공정과 후속공정인 탈수공정에서도 효율증진효과가 적기 때문에 바람직한 방안이 아니라고 사료되었다.

IV. 결 론

응집제의 투입과 homogenizer에 의한 균질화에 의해 제지공장의 팽화 슬러지 부상과 침전 증진방안을 고찰하여 다음의 결과를 얻었다.

1. 부상의 경우 황산알루미늄 4 mg/l의 투입량이 최적 투입량이었으나 응집제가 투입되지 않았을 때에 비해 1.25배의 슬러지 농축량이 증가하는데 그쳤다. 침전의 경우는 1 mg/만 증가하여도 2.02배의 농축효율을 얻었으나 그 이상의 응집제 농도에서는 효과가 없는 것으로 나타났다.

2. 최적 고분자 응집제 투입량에서 부상공정에서 부상 후 슬러지 계면높이와 침전공정에서의 SVI는 감소하는 경향을 보였으나 최적 투입량이상에서는 증가하는 경향을 보였다. 부상에 의한 슬러지 농도는 0.5 mg/l 첨가시 1.35배 증가하였다. 그러나 0.5 mg/l 이상의 응집제 농도에서는 농축 슬러지 농도가 감소하는 경향을 나타내었다. 침전의 경우 0.3 mg/l에서 1.06배의 농축 증가율을 얻었지만 그 차이는 무시할 정도로 적었다. 응집제 미투입시 슬러지의 함수율은 96.6%였으며, 0.5 mg/l의 응집제 투입시 90.7%로 5.9%의 함수율 감소를 얻었다.

3. 20500 rpm에서 10분 균질화까지 부상공정에서 슬러지 계면높이는 감소하였으나 10분 이상의 시간에서는 계면 높이가 증가하는 경향을 나타내었으며, 균질화에 의한 최적조건에서의 부상효율은 약 1.09배 증가 효과가 있는 것으로 나타났다. Image analyser로 균질화 전, 후의 슬러지 Sauter mean diameter를 측정된 결과 각각 631 μm 와 427 μm 로 나타나 슬러지 플록의 입경이 줄어든 것으로 나타났다. 슬러지 함수율은 10분의 균질화 시간까지 조금 감소하였으나 10분 이상의 균질

화 시간에서는 슬러지 함수율이 증가하여 60분에는 99.1%까지 증가하였다.

참고문헌

1. 환경부 : 2004하수도통계, 2005.
2. 문종익, 최성문, 임영석, 성낙창, 김철, 광영규 : 분말 폐굴껍질을 이용한 정수슬러지의 탈수 개선방안. 한국환경위생학회지, **27**(2), 17-21, 2000.
3. 신남철, 문종익, 정유진, 장혜정, 성낙창 : 굴껍질을 이용한 하수슬러지의 탈수특성에 관한 기초연구. 한국환경위생학회지, **26**(2), 30-33, 2000.
4. 환경부 : 하수슬러지관리계획수립지침, 2006.
5. 황경사, 최준창, 김영택, 배운선, 박철휘 : 하수슬러지 농축 및 탈수를 위한 오존 적용가능성 연구. 대한상하수도학회 · 한국물환경학회 공동 추계학술발표회 논문집, F24-32, 2004.
6. 김희준, 김성홍, 최재성 : 간헐포기 소화 슬러지의 고분자 응집에 의한 개량과 침도 분포 변화에 관한 연구. 한국환경보건학회지, **30**(3), 253-258, 2004.
7. Choi, Y. G. and Chung, T. H. : Effects of humus soil on the settling and dewatering characteristics of activated sludges. *Water Science Technology*, **42**(9), 127-134, 2000.
8. 광동희, 김성진, 임영환 : 용존공기부상(DAF) 공정을 이용한 생물학적 플록의 부상분리. 상하수도학회지, **18**(5), 649-655, 2004.
9. Zebel, T. : The advantages of dissolved air flotation. *Journal of AWWA*, **77**(5), 4245-4246, 1985.
10. 박영식 : 용존공기 부상법을 이용한 폐수 슬러지 함수율 감소 방안. 경북지역환경기술개발센터 과제 최종보고서, 1-24, 2006.
11. 이준 : 부상공정에 의한 상수슬러지 농축. 서울대학교, 석사학위논문, 2004.
12. Bailey, J. E. and Ollis, D. F. : *Biochemical Engineering Fundamentals*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 480-485, 1986.