

## DAF(Dissolved Air Flotation)를 이용한 팽화 슬러지 농축

김 동 석\* · 박 영 식

\*대구가톨릭대학교 환경과학과, 대구대학교 보건과학부  
(2005년 8월 17일 접수; 2005년 12월 20일 채택)

### Thickening of Bulking Sludge using DAF (Dissolved Air Flotation)

Dong-Seog Kim\* and Young-Seek Park

\*Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Daegu 712-702, Korea

Division of Health Science, Daegu University, Daegu 712-830, Korea

(Manuscript received 17 August, 2005; accepted 20 December, 2005)

An effective technique of sludge separation is required for excess sludge of sewage or wastewater plant. The separation of bulking sludge of paper manufacturing plant was studied using DAF(Dissolved Air Flotation) system. The effects of parameters such as nozzle type, A/S(air/solid) ratio, pressure, injection time of pressured water and saturation time were examined. The results showed that the best nozzle type was flat which had small orifice hole. The optimum A/S ratio and pressure were  $7.070 \times 10^{-3}$  (recycle ratio of pressured water : 20%) and 5 atm, respectively. Injection times of pressurized water around 20-25 sec and flotation time of 30 min appeared to be optimal for the DAF operation. The order of performance of packing was 18 mm > 22 mm > 32 mm.

Key Words : DAF, Bulking sludge, Packing, A/S ratio, Interface height

#### 1. 서 론

2004년도 말을 기준으로 하수도 보급율이 81.4%를 상회하여 2004년말 하수종말처리장 268개소에서 발생하는 하수 슬러지 양은 2003년에 2,266천톤/년<sup>1,2)</sup>, 국내 하수 및 폐수처리장에서 발생하는 많은 양의 슬러지는 대부분 매립이나 해양투기되고 있고 일부가 자원화를 포함하여 재활용되고 있는데<sup>3)</sup>, 2003년 7월 이후부터 시설부피가 1만톤/일 이상 하수처리장에서 유기성 슬러지의 직매립이 금지되고 있어 해양투기가 증가하고 있으나 국제협약과 배출해양의 수질보전 등의 이유로 점점 축소될 수밖에 없기 때문에 다른 방법을 찾아야 한다.

국내외에 실용화되어 있는 슬러지 처분기술은 해양투기, 매립, 소각, 용융, 고화, 건조, 열분해, 고화, 퇴비화 등이 있다. 슬러지 처리방법 중 금지되는 해양투기와 매립을 제외한 방법 중 다른 방법들을 적

용하기 위해서는 슬러지 내의 함수율이 문제가 되며, 대량으로 발생하는 슬러지의 처분방안으로 소각과 퇴비화 등이 추진되고 있는데, 앞으로 주된 처리방법으로는 소각처리방법이 될 것이라는 보고가 있다<sup>4)</sup>. 일부 하수처리장에서는 슬러지 처리를 위해 유동층 소각로를 설치하여 운전하고 있는데, 지금까지의 주요 문제점으로는 슬러지의 발열량이 낮아 보조연료의 소모가 심하다는 것이다. 슬러지의 발열량이 낮은 것은 함유되어 있는 수분함량이 높은 것이 가장 큰 요인으로 저위발열량이 고위발열량에 비하여 아주 낮은 수치를 보이고 있다<sup>5)</sup>.

슬러지의 수분을 제거하는 방법 중에서 슬러지 농축(thickening), 개량(conditioning), 탈수(dewatering), 건조(drying) 등의 공법은 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.

Corresponding Author : Young-Seek Park, Division of Health Science, Daegu University, Daegu 712-830, Korea  
Phone: +82-53-650-8043  
E-mail: ysparkk@daegu.ac.kr

슬러지 농축법 중에서 부상 농축방법에는 용존공기 부상, 진공 부상, 분산공기 부상의 세 가지 방법이 있다. 미국에서는 용존공기 부상법(DAF, Dissolved Air Flotation)이 슬러지 농축에 널리 이용되고 있다. 용존공기 부상 농축은 활성슬러지법이나 부유성장 질산화 공정과 같은 부유 성장의 생물학적 처리 공정에서 배출되는 폐 슬러지를 농축시키는데 효과적으로 사용된다. 1차 슬러지, 살수여상 슬러지, 호기성 소화슬러지, 화학적 처리로 인하여 금속염을 함유한 슬러지도 역시 부상 농축시킬 수 있다<sup>6)</sup>.

용존공기 부상법은 가압상태에서 가포화된 물을 감압시킬 때 발생하는 미세기포가 상승하는 과정에서 수중의 콜로이드 물질과 충돌. 부착되는 원리를 이용하여 수중의 부유물질을 제거하는 수처리 방법이다<sup>7)</sup>.

용존공기 부상법은 정수처리 시스템에서 최종공정인 여과의 전처리 공정으로 기존의 침전공정을 대체할 수 있는 효과적인 대안으로 부상하고 있으며 특히 저탁도, 부식질(humic substances) 또는 자연적인 색도나 조류 등을 함유한 원수의 처리에 유용한 공정으로 알려져 있다<sup>8)</sup>.

아울러, 제지 및 식품폐수 등의 생물학적 폐수처리 시설에서 뿐만 아니라 하수처리 공정에 있어서도 플록의 부상분리와 슬러지 농축에 DAF 공정이 적용되고 있다. DAF 공정을 생물학적 폐수처리시설에 도입하면 기존의 생물학적 수처리공정에서 많은 동력비와 유지관리상 어려움을 유발하고 있는 다음과 같은 문제를 해소하고 여러 가지 효과를 얻을 수 있다.

1) 원수 중에 함유된 가벼운 물질의 용이한 고액분리와 더불어 미생물 플록의 비중을 CGS(Conventional Gravity Sedimentation)에 비하여 보다 크게 증가시킬 필요가 없으며,

2) 기존 부유성장 폐수처리시스템의 가장 대표적인 문제점인 슬러지 팽화(bulking) 문제를 해소시키거나 용이하게 제어할 수 있게 되고,

3) DAF 노즐에서 분사되는 미세한 기포로부터 용해되는 산소는 그 용해효율이 뛰어나 폭기조 미생물의 생장에 훨씬 유리하게 된다<sup>9)</sup>.

상기와 같은 장점을 가지고 있는 DAF는 1960년대 남아프리카 공화국에서 음용수를 얻기 위한 수처리기술로 이용되기 시작하면서부터 연구가 활발하게 진행되어 해외에서 정수장을 중심으로 부상기술이 채택되고 있으며<sup>10)</sup>, 폐수, 하수, 생물학적 처리에의 적용 등으로 그 범위를 넓혀 가고 있기 때문에 DAF 기술의 폐수 슬러지 처리로의 적용은 슬러지

내 수분 감소기술로서 슬러지 처리. 처분의 부하를 경감시킬 것이라고 사료된다<sup>11)</sup>.

용존공기 부상법에서 슬러지의 고형분리에 영향을 주는 인자는 슬러지의 성상과 농도, 유입폐수의 질과 양, A/S비, 압력, 체류시간, 온도, 반송 슬러지량, 응집제의 종류와 질 등이다<sup>12)</sup>.

본 연구는 위의 인자 중에서 용존공기 부상장치의 운전과 관련되는 인자(노즐 종류, A/S비, 압력, 부상시간, 가압수 주입시간, 충전재 크기)를 중심으로 고농도의 농축슬러지를 얻을 수 있는 조건을 도출하고자 하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 재료 및 방법

실험에 사용한 슬러지는 M 제지사의 반송슬러지를 채취하여 표준체(No. 60; 눈금크기, 250  $\mu\text{m}$ )로 체질한 뒤 폭기되는 저류조에 보관하였다. 슬러지는 인공 합성원수에 순양시켜 실험에 사용하였다.

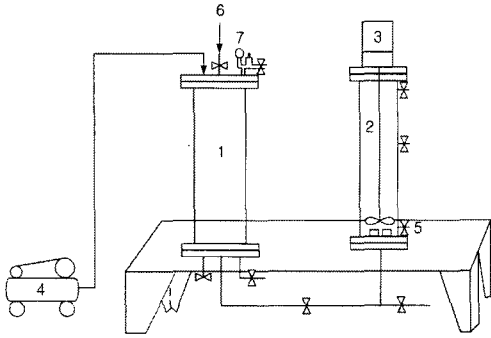
M 제지사는 응집·침전 + 활성슬러지법으로 폐수를 처리하고 있는데, SS 부하량이 많고 가볍기 때문에 flocc 강도가 낮으므로 단순한 침전으로는 처리하기 어렵고 제조하는 지중에 따라 cellulose의 종류, 크기, 화학약품 등이 다르므로 배출하는 폐수의 특성이 수시로 변하기 때문에 처리에 어려움이 많고, 슬러지 팽화가 자주 일어나 제어하기 어렵다<sup>13,14)</sup>.

실험에 사용한 M 제지사의 반송슬러지는 SVI를 측정된 결과 350-450 mL/g을 나타내어 팽화가 발생한 상태였으며, 농도는 2000-2500 mg/L의 범위에 있었으며, 평균 반송슬러지 농도인 2200 mg/L를 기준으로 실험하였다.

### 2.2. 실험장치 및 실험방법

실험에 사용한 DAF 장치는 크게 가압수조와 부상수조로 나뉘며, 이를 Fig. 1에 나타내었다. 가압수조(Air dissolving tank)는 내경이 15 cm, 높이가 50 cm이며, 총 부피는 8.83 L이고, 스테인리스 스틸로 제작되었고, 상부는 공기 유입구, 수도수 유입구 및 안전변으로 이루어져 있고, 하부는 배출구, 부상수조의 유출구로 이루어져 있다. 부상수조(Flotation column)는 가압수가 부상하는 부상조와 응집과 응결이 이루어지는 응집조의 역할을 한다. 부상수조는 내경이 7 cm, 높이가 50 cm이며, 총 부피는 1.92 L이다. 부상수조의 상부는 모터와 감속기가 달려 있으며 속도 조절장치에 의하여 속도를 조절하며, 부상수조는 내부를 관찰하기 위하여 아크릴로 제작하였다.

가압수로는 수도물을 사용하였으며, 순환비를 10-



1. Air dissolving tank
2. Flotation column
3. Motor
4. Air compressor
5. Sampling port
6. Recycle water
7. Safety valve

Fig. 1. Schematic diagram of DAF system.

50%로 변화시켜 A/S비를 조절하였으며, 가압수조 압력은 3.5-6 atm으로 조절하여 실험하였다. 최적 부상조건을 찾기 위하여 가압수 주입시간을 10-40 초, 부상시간을 10-50 분으로 조절하여 실험하였다. 가압수조에 충전하는 충전재는 길이와 외경이 18, 22, 32 mm인 PVC 파이프를 사용하였으며, 부상수조의 노즐은 Flat, Full-Cone 및 Assemble 형을 사용하여 실험하였다.

### 2.3. 분석 및 측정

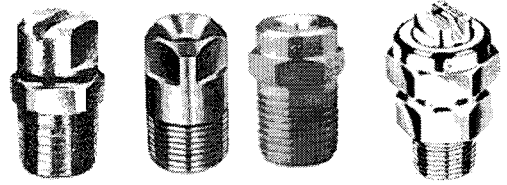
부상공정에서 농축된 슬러지 농도는 부상시간이 끝난 뒤 슬러지 계면 상부에서 피펫을 이용하여 채취한 뒤, 농도를 측정하였으며, 부상수조 하부의 슬러지 농도는 부상수조 하부 5 cm지점의 채취구에서 50 mL를 폐기하여 남아있는 전 실험의 슬러지를 제거한 후 10 mL 채취하여 농도를 측정하였다. 침전공정의 상등수 슬러지 농도는 상부에서 채취하여 농도를 측정하였다. 슬러지 농도는 Standard Methods<sup>15)</sup>에 따라 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 슬러지 농축에 대한 노즐 종류의 영향

부상공정에서 주로 사용되는 노즐은 크게 두 가지 종류가 있다. 한 종류는 유량이 조절가능한 오리피스(adjustable orifice)로 니들밸브이고, 다른 하나는 고정형 노즐(fixed nozzle)을 사용한다<sup>16)</sup>. 본 실험에서는 시중에서 쉽게 구할 수 있는 세 종류의 고정형 노즐[Flat(1자형 분출); Full-Cone (원형 분출); Assemble (안개형, 원형 분출)]을 장착하여(Fig. 2) 슬러지 부상에 적합한 노즐을 선정하는 것이 중요하다.

부상수조에 가압수를 공급한 뒤부터 가압수에 합



(a) Flat (b) Full-Cone (c) Assemble

Fig. 2. Photographs of similar nozzle using experiments.

유된 미세기포에 의하여 슬러지가 부상하기 시작하고 부상에 의한 슬러지 농축이 진행되면서 슬러지로부터 물이 빠져나가 점차 슬러지와 물의 계면이 형성된다. 노즐을 선정하기 전에 가압수 주입 후 슬러지의 부상시간에 따른 농축 슬러지 농도를 측정하여 최적 부상시간을 먼저 결정하였다.

실험은 MLSS가 2190 mg/L인 슬러지를 사용하였으며 가압수조압력은 5 atm, A/S비는  $8.88 \times 10^{-3}$ , 가압수 주입시간은 30초, 부상시간은 10-50분으로 변화시키면서 배출직경이 작은 Flat 형 노즐에 대하여 실험하여 부상시간에 따른 슬러지 농도를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에서 보듯이 Flat형 노즐과 Full-Cone형 노즐을 사용하여 부상시간에 따른 농축슬러지 농도를 고찰한 결과 초기 30분까지 농축슬러지 농도가 빠르게 증가하지만 30분 이후부터는 증가속도가 감소되었다. Flat형 노즐의 경우 30분과 50분의 슬러지 농도차이는 4.7%, Full-Cone형 노즐의 경우는 4.2%의 농도차이를 보여 30분의 부상시간이면 충분할 것으로 사료되었다.

다른 조건을 일정하게 하면서 부상시간을 30분으로 고정하고 노즐 종류에 따른 슬러지 농도를 Fig. 4에 나타내었다.

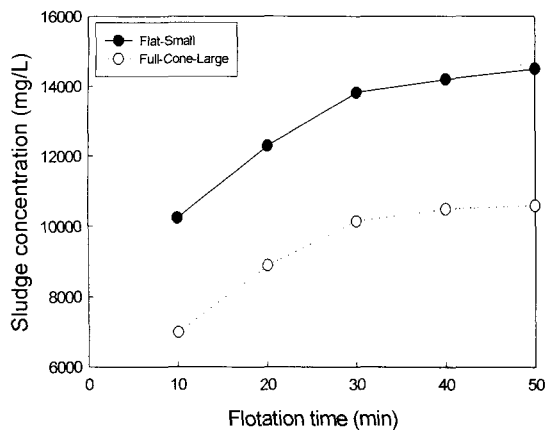


Fig. 3. Effect of the flotation time on the sludge concentration.

Fig. 4는 가압수 배출직경이 다른 3 종류의 Flat형 노즐[타원형 오리피스 구멍(hole): Flat-L(폭, 2.75 mm; 길이, 6 mm), Flat-M(폭, 1.8 mm; 길이, 4.6), Flat-S(폭, 0.85 mm; 길이, 2.3 mm)], 2 종류의 Full-Cone 노즐[원형 오리피스 : Full-C-L(지름 : 1.9 mm), Full-C-S(지름, 1.35 mm)], 1 종류의 Assemble형 (원형 오리피스 : 지름, 0.9 mm)노즐을 장착하여 같은 실험조건에서 실험하여 농축슬러지 농도를 나타내었다.

Fig. 4에서 보듯이 Flat형 노즐의 경우 가압수가 배출되는 오리피스의 배출구가 작을수록(Flat-L < Flat-M < Flat-S) 농축된 슬러지의 농도가 높은 것으로 나타났다. 이는 DAF에 폭넓게 사용되는 노즐은 노즐에서의 머무는 시간이 1.5 m/sec보다 작도록 오리피스의 크기를 2.5 mm이하로 한다<sup>16)</sup>는 보고로 볼 때 가압수가 배출되는 오리피스의 크기가 작으면 유리한 것으로 사료되었다. 이와 같은 경향은 두 종류의 오리피스를 가진 Full-Cone형 노즐도 같은 경향을 나타내었다. Flat형 노즐의 경우 큰 직경의 오리피스와 작은 오리피스의 경우 농축 슬러지 농도가 13.8%의 차이를, Full-Cone형 노즐의 경우는 20.2%의 농도차이를 보였다.

오리피스의 직경이 비슷한 Flat-S 노즐과 Full-C-S 노즐의 농축슬러지는 13820 mg/L와 13740 mg/L로 거의 유사하게 나타났다. 부상수조를 육안으로 관찰한 결과 Flat-L, Flat-M, Full-Cone-L 노즐의 경우 일부 슬러지가 부상하지 않고 침전하는 경향을 보여 재실험하여 비교해보아도 같은 결과를 얻어 농축 슬러지 농도와 슬러지의 부상 제거라는 측면에서 볼 때 오리피스 직경이 1.35 mm이하인 것이 슬러지 부상에 필요한 노즐이라고 사료되었다.

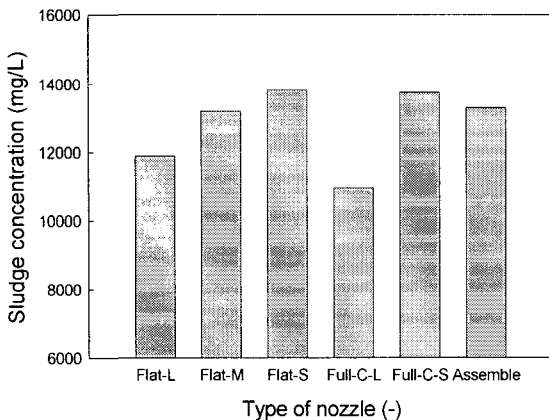


Fig. 4. Effect of the nozzle type on the sludge concentration.

반면 Flat-S 노즐 및 Full-C-S 노즐을 Assemble형 노즐 결과와 비교한 결과 Assemble형 노즐은 오리피스 크기가 가장 작지만 노즐 내부에 200 mesh의 필터(눈금크기 : 76 $\mu$ m)가 장착되어 있기 때문에<sup>17)</sup> 가압수 내의 공기 기포가 필터를 통과하면서 기포가 합체될 수 있는 가능성이 있기 때문에 처리율이 낮다고 사료되었다. 또한 Assemble 노즐은 노즐의 크기가 1 mm보다 작고 노즐 내부에 장착된 필터 때문에 가압수의 주입시간이 51 초가 소요되어 가압수 주입시간을 적절하게 조절할 수 없다는 단점이 나타나 부상공정에 사용하기에는 부적절한 것으로 사료되었다. 부상에 적절한 노즐은 형태에 관계없이 1-1.35 mm 부근인 것으로 사료되었으며, 향후 실험은 Flat-S 노즐을 사용하여 실험하였다.

### 3.2. A/S비가 부상에 미치는 영향

부상조로 공급되는 공기의 양은 포화압력이나 순환비 또는 양쪽 모두를 변화시킴으로서 바꿀 수 있으며, 최적 A/S(Air/solids, mL/mg)비는 DAF 운전 에 있어 매우 중요한 요소이다<sup>18)</sup>. 최적 A/S비를 고찰하기 위하여 다른 인자는 고정하고 가압수 순환 유량을 변화시켜 고찰하였다. A/S비를 구하기 위하여 아래 식을 사용하였다<sup>6)</sup>.

$$\frac{A}{S} = \frac{1.3a_s(f \cdot P - 1)R}{S_s \cdot Q} \quad (1)$$

여기서,  $a_s$ : 공기 용해도(18.7 mL/L at 20°C)

$f$ : 공기포화율(0.8)

$S_s$ : SS (mg/L)

$P$ : 기압 (atm)

$R$ : 가압수 순환유량 (m<sup>3</sup>/d)

$Q$ : 처리유량 (m<sup>3</sup>/d)

가압수 순환유량을 처리유량의 10-50%까지 변화시켰을 때 A/S비는  $3.53 \times 10^{-3}$  -  $1.414 \times 10^{-2}$ 로 변화하였으며, Fig. 5에 A/S비에 따른 제지 슬러지의 농축 농도를 나타내었다. Fig. 5에서 보듯이 A/S비가  $7.070 \times 10^{-3}$ 까지는 A/S비 증가에 따라 슬러지 농축량이 증가하였으나  $8.840 \times 10^{-3}$ 이상의 A/S비에서는 A/S비 증가에 따른 슬러지 농축량이 일정해지는 경향을 보였다. A/S비  $7.070 \times 10^{-3}$ 는 가압수 순환유량이 처리유량의 20%에 해당하는 양이며,  $8.840 \times 10^{-3}$  이상의 A/S비에서의 운전은 가압수 순환유량의 증가에 비해 슬러지 농도가 거의 증가하지 않기 때문에 바람직하지 않은 것으로 사료되었다. 이<sup>19)</sup>는 DAF를 이용한 상수슬러지의 부상에서 너무 많은 기포발생량(높은 A/S비)은 슬러지 층 내에서 기포

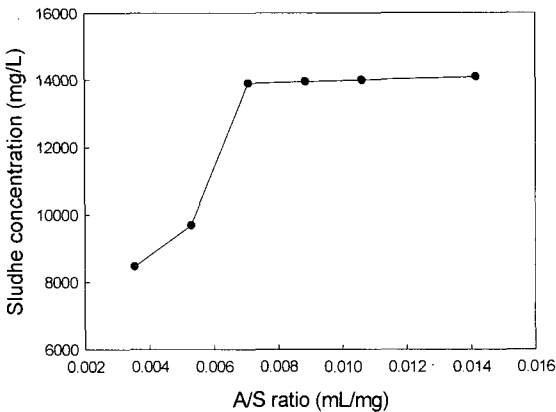


Fig. 5. Effect of the A/S ratio on the sludge concentration.

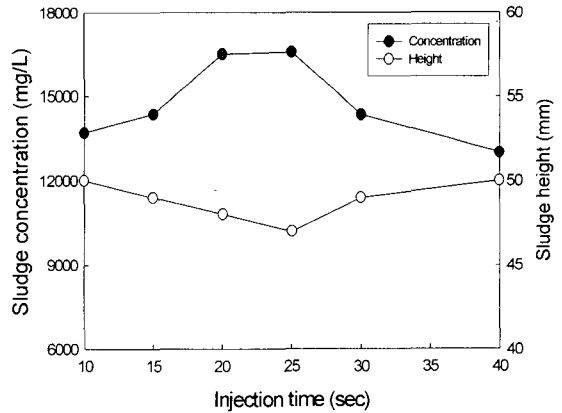


Fig. 6. Effect of the injection time of pressured water on the sludge concentration and interface height.

들의 이동통로 및 공간을 만들어 슬러지의 밀도를 떨어뜨려 농축된 슬러지의 농도를 떨어뜨린다고 보고한 결과와 일치하는 결과를 얻었다. 최적 A/S비에서의 농축 슬러지 농도는 13900 mg/L로 나타났으며 향후 실험은 실험에 이용하는 슬러지의 농도가 조금씩 다르기 때문에 A/S비도 달라지므로 A/S비를 이용하는 것보다는  $7.070 \times 10^{-3}$ 의 A/S비에 해당하는 가압수 순환유량이 처리유량의 20%를 기준으로 실험하였다.

### 3.3. 가압수 주입시간과 압력이 부상에 미치는 영향

가압수조압력을 5 atm, 가압수 순환비를 20%, 부상시간 30분으로 유지하면서 가압수 주입시간에 따른 슬러지 농도와 슬러지 계면높이를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보듯이 가압수 주입시간이 10초에서 20초로 증가하면서 슬러지 농도가 빠르게 증가되었으며, 25초의 경우 20초와 유사한 농도를 나타내어 가압수 주입시간은 20-25초인 것으로 사료되었으며, 향후 실험은 가압수 주입시간을 25초로 고정하여 실험하였다. 25초 이후의 가압수 주입시간은 10-20초 구간과는 거의 같은 기울기로 빠르게 농도가 감소하였다. 가압수 주입시간이 10초에서는 일부 슬러지는 부상하다 다시 침전하는 경향을 보였으며, 15초의 부상시간에서는 모든 슬러지가 부상하지만 슬러지 부상에 걸리는 시간이 느린 것으로 관찰되었다.

가압수 주입시간이 길어지면 가압수와 가압수조 내부의 유체와의 접촉이 증가하여 부상효율이 증가할 것으로 예측되었으나 실험결과와는 다르게 나타났다. 이와 같은 경향을 고찰하기 위하여 가압수 주입 후 부상시 부상수조 내의 유체 흐름을 관찰한 결과 25초 이내의 주입시간에서는 주입시간이 끝난 뒤 대부분의 유체 흐름은 상향류였으며, 국소적으로 순

환흐름이 존재하는 것이 관찰되었으나 30초 이상의 주입시간에서는 주입이 끝난 뒤 부상수조 중심부에서 하부에서 상부로 이동흐름, 부상수조 관벽을 중심으로 상부에서 하부로 이동흐름이 발생하여 양쪽 방향으로의 순환흐름이 발생하였는데, 이 현상은 주입시간이 길수록 더 확연하게 나타나는 것이 관찰되었다. 상기의 결과로 볼 때 가압수의 최적 주입시간은 상향흐름이 주요 흐름인 조건에서 가압수와 수중의 슬러지가 최대로 접촉할 수 있는 시간이며, 본 실험에서는 20-25초 부근인 것으로 사료되었으며 향후 실험은 25초로 고정하여 실험하였다.

상기 결과는 SS 농도가 420-428 mg/L인 제지폐수를 용존공기부상법으로 농축처리하였을 때 최적 가압수 주입시간은 30초이고 최적 가압수 주입시간 이상의 주입시간에서는 순환흐름 현상이 발생하였다는 김<sup>13)</sup>의 연구결과와 비교할 때 최적 가압수 주입시간은 다르지만 같은 결과를 얻었다.

슬러지 계면높이는 가압수 주입시간이 10초일 때 50 mm에서 25초일 때 47 mm로 감소하였다 가압수 주입시간이 30초 이상으로 증가하면서 50 mm로 다시 증가하는 경향을 보였다.

30분의 부상기간이 종료된 후 부상수조 하부의 슬러지 농도를 측정하여 Table 1에 나타내었다. 부상수조 하부의 슬러지 농도는 가압수 주입시간이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 10초의 가압수 주입시간에서는 슬러지 부상이 느리고 일부 슬러지가 침전되기 때문에 하부 슬러지 농도가 높은 것으로 나타났다.

최적 압력을 결정하기 위하여 가압수 순환비 20%, 가압수 주입시간을 25초, 부상시간 30분으로 유지하면서 가압수조 압력을 3.5-6 atm으로 변화시켜 압력 변화에 따른 슬러지 농도 변화와 슬러지 계면 높

이를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에서 보듯이 가압수조의 압력이 3.5 atm에서 5 atm으로 증가되면서 농축슬러지 농도가 증가하는 것으로 나타났으며, 5.5 atm 이상에서는 처리효율이 5 atm와 비슷한 것으로 나타나, 최적 압력은 5 atm인 것으로 나타났다. 4.5 atm 이하의 가압수조 압력에서는 일부 슬러지는 부상에 참여하지 않고 침전하는 경우가 발생하여 최소 5 atm이상에서 운전하여야 모든 슬러지가 부상할 것이라고 사료되었다. 3.5 atm 이상의 압력에서는 부상하는 기포크기가 일정하기 때문에 탁도 제거율은 가압수 순환유량 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내지만 5 atm 이상의 압력에서는 노즐 주변에 난류현상이 발생하여 처리효율이 감소한다고 보고한 박<sup>20)</sup>의 결과와 비교할 때 유사한 결과를 나타내었다.

슬러지 계면 높이는 3.5 atm에서의 56 mm에서 5 atm으로 증가하면서 49 mm로 감소하였으며 5 atm 이상의 압력에서는 계면 높이가 48, 49 mm로 거의 일정하게 나타났다.

부상수조 하부의 슬러지 농도를 측정된 결과 압력에 따른 하부 슬러지 농도는 별 다른 경향을 나타내지 않았으며 100-115 mg/L의 농도를 나타내었다.

Table 1. Variation of sludge concentration of the bottom water with injection time of pressured water

Injection time of pressurized water (sec)	SS concentration (mg/L)
10	230
15	142
20	112
25	110
30	75
40	74

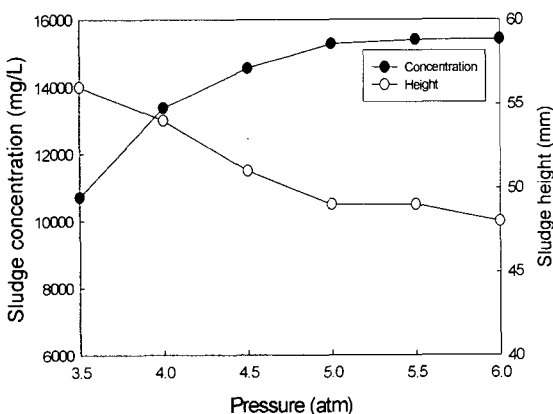


Fig. 7. Effect of the pressure on the sludge concentration and interface height.

### 3.4. 충전재 크기와 가압수 포화시간이 부상에 미치는 영향

가압수조에서 A/S비는 총 공기농도(mg/L)로 나타내는데, 이것은 가압수조의 압력과 효율 및 순환비율의 함수이다. 일반적으로 수처리에서 사용되는 충전된(packed) 가압수조의 효율은 90-95%이고, 충전되지 않은(unpacked) 가압수조의 효율은 60-70%로 가정한다. 높은 효율의 가압수조는 추가적인 에너지 소비 없이 기포발생량을 극대화할 수 있기 때문에 가압수조의 가압효율을 높일 수 있는 방법이 필요하다. 효율을 높이기 위해서는 DAF의 공기 가압기용 충전층(packed column)에 사용되는 충전재(packing)은 raschig ring, lessing ring, berl saddle 및 pall ring 등이 있으며, 그 외 pall ring이나 raschig ring에 비해 가격이 저렴한 PVC 파이프 등을 이용하기도 한다<sup>16)</sup>.

본 실험에서는 슬러지 초기 농도가 1980 mg/L, 가압수 순환비율 20%, 가압수조 압력을 5 atm, 가압수 주입시간을 25초, 부상시간을 30분으로 유지하면서 외경과 길이(18, 22 및 32mm)가 같은 세 종류의 PVC 파이프를 충전재로 사용하여 가압수조에 100% 충전하여 충전하지 않은 경우의 슬러지 농축정도를 고찰하여 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서 보듯이 충전재를 충전하지 않은 경우보다 충전재를 충전한 경우의 슬러지 농도가 높게 나타나지만 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 충전재를 충전하지 않은 경우와 18 mm PVC 파이프를 100% 충전한 경우의 슬러지 농도차이는 9.3%의 차이를 나타내었다. 충전재의 충전율에 따른 슬러지 농도차이는 크지 않을 것으로 사료되어 충전율에 따른 실험은 실시하지 않았다. 충전재의 크기에 따른 슬러지 농도는 PVC 파이프 크기 순서인

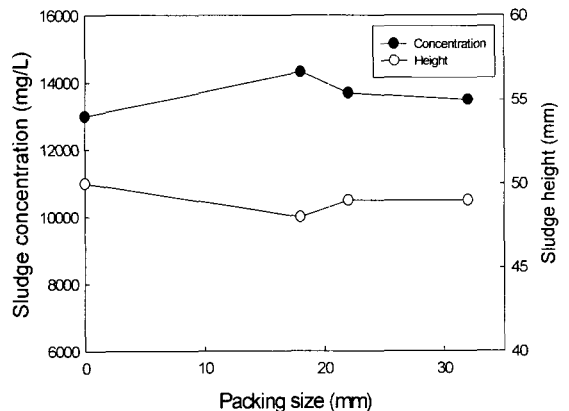


Fig. 8. Effect of the packing size on the sludge concentration and interface height.

18 > 22 > 32 mm로 나타났으며, 18 mm와 32 mm 충전재의 농도 차이는 5.7%인 것으로 나타났다. 이는 PVC 파이프 크기가 작을수록 충전되는 양이 많기 때문인 것으로 사료되었다. 슬러지 계면높이도 48-50 mm로 나타나 그 차이가 크지 않았으며, 부상수조 하부의 슬러지 농도도 100-115 mg/L의 농도범위를 나타내었다.

결과적으로 충전재의 존재는 예상과는 달리 그 효과가 크지 않았으나 저렴한 비용으로 추가적인 에너지 비용의 추가없이 9.3% 정도의 성능향상 효과를 가져오기 때문에 향후 실험은 18 mm PVC 파이프를 100% 충전하여 실험하였다.

공기의 포화율에 직접적인 영향을 주는 인자는 가압수조에 콤프레셔에서 발생한 가압공기를 공급하여 수중에서 공기를 포화시키는 시간이다. 공기포화시간에 따른 슬러지 농축정도를 관찰하기 위하여 가압수 순환유량을 20%, 가압수조 압력을 5 atm, 가압수 주입시간을 25초, 부상시간 30분으로 유지하면서 가압수조에서 가압 공기를 주입하여 포화시킬 때의 가압수 포화시간을 5-50분으로 변화시켜 실험하여 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9에서 보듯이 5분의 포화시간에서는 공기포화가 충분하지 못하여 전혀 부상하지 않는 것으로 나타났다. 포화시간 10분에서는 모든 슬러지가 부상하였으나 부상수조를 육안 관찰한 결과 기포발생량도 적고 느리게 부상하는 것이 관찰되었으며, 10분의 포화시간시 슬러지 농도는 18 mm PVC 파이프가 가압수조에 충전되지 않은 것은 8700 mg/L, 100% 충전된 것은 9854 mg/L로 나타났다. 포화시간이 10분에서 30분으로 증가하면서 슬러지 농도는 각각 12800 mg/L와 14320 mg/L로 증가하였다, 그러나 40분과 50분의 포화시간에서는 30분의 결과와

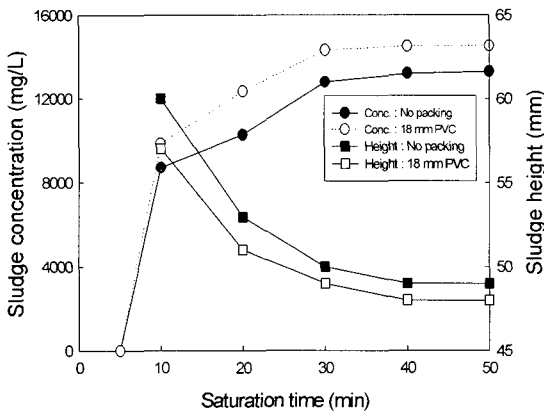


Fig. 9. Effect of the saturation time of pressured water on the sludge concentration and interface height.

비교할 때 18 mm PVC 파이프가 가압수조에 충전되지 않은 것은 3.7%, 충전된 것은 1.4%의 차이를 보여 실험 실시 전 가압수조에 가압공기를 주입한 뒤의 포화시간은 30분이면 충분한 것으로 사료되었으며, 이후 실험에서는 가압공기를 주입한 후 30분 이상의 포화시간에서 실험하였다.

슬러지 계면 높이는 충전재가 충전되지 않은 경우는 가압시간 10분에서 60 mm, 충전된 것은 57 mm의 계면높이를 나타내었으며, 30분에는 각각 50 mm와 49 mm로 감소된 후 50분에는 각각 49 mm와 48 mm 소량 감소하는 경향을 나타내었다. 부상수조 하부수의 슬러지 농도는 10분 이후부터는 충전재의 유무와 가압시간에 관계없이 90-115 mg/L를 나타내었다.

침전 공정과의 비교를 위해 1 L 메스실린더를 이용하여 30분간 침강시킨 후 침전 후 슬러지 농도를 측정하고자 하였으나 침전이 거의 이루어지지 않아 측정이 어려웠다.

#### 4. 결 론

DAF를 이용하여 SVI가 높고 침전이 어려운 제지공장 폐수처리장의 반송슬러지를 대상으로 부상 실험을 행하여 최적 설계 및 운전조건을 구하고 부상공정 적용의 타당성을 고찰하였다.

1) 최적 노즐을 선정하기 위한 실험에서 농축 슬러지 농도가 높은 노즐은 Flat-S 노즐과 Full-C-S 노즐로 나타났다. 부상에 적절한 노즐은 형태에 관계없이 1-1.35 mm 부근인 것으로 사료되었다.

2) 가압수 순환비를 처리유량의 10-50%까지 변화시켰을 때 A/S비는  $3.53 \times 10^{-3}$ - $1.414 \times 10^{-2}$ 로 변화였다. A/S비가  $7.070 \times 10^{-3}$ 까지는 A/S비 증가에 따라 슬러지 농축량이 증가하였으나  $8.840 \times 10^{-3}$  이상의 A/S비에서는 A/S비 증가에 따른 슬러지 농축량이 일정해지는 경향을 보였다. 최적 A/S비는  $7.070 \times 10^{-3}$ 이었으며 가압수 순환비가 처리유량의 20%에 해당하는 양이었다.

3) 가압수 주입시간이 길어지면 가압수와 가압수조 내부의 유체와의 접촉이 증가하여 부상효율이 증가할 것으로 예측되었으나 실험결과는 다르게 나타났다. 가압수의 최적 주입시간은 상향흐름이 주요 흐름인 조건에서 가압수와 수중의 슬러지가 최대로 접촉할 수 있는 시간이며, 본 실험에서는 20-25초 부근인 것으로 사료되었다.

4) 최적 가압수조압력 선정에서 가압수조의 압력이 3.5 atm에서 5 atm으로 증가되면서 농축된 슬러지 농도가 증가하는 것으로 나타났으며, 5.5 atm 이상에서는 처리효율이 5 atm와 비슷한 것으로 나타

나, 최적 압력은 5 atm인 것으로 나타났다. 슬러지 계면 높이는 3.5 atm에서의 56 mm에서 5 atm으로 증가하면서 49 mm로 감소하였으며 5 atm이상의 압력에서는 계면 높이가 48, 49 mm로 거의 일정하게 나타났다.

5) 충전재를 충전하지 않은 경우와 18 mm PVC 파이프를 100% 충전한 경우의 슬러지 농도차이는 9.3%의 차이를 나타내었다. 충전재의 크기에 따른 슬러지 농도는 PVC 파이프 크기 순서인 18 > 22 > 32 mm로 나타났으며, 18 mm와 32 mm 충전재의 농도 차이는 5.7%인 것으로 나타났다.

6) 공기의 포화율에 직접적인 영향을 주는 인자는 가압수조에 콤프레셔에서 발생한 가압공기를 공급하여 수중에서 공기를 포화시키는 시간이다. 가압수조에서 가압 공기를 주입하여 포화시킬 때의 공기포화시간을 5-50분으로 변화시켜 실험하였을 때 가압시간이 10분에서 30분으로 증가하면서 슬러지 농도는 각각 12800 mg/L와 14320 mg/L로 증가하였다. 그러나 40분과 50분의 가압시간에서는 30분의 결과와 비교할 때 18 mm PVC 파이프가 가압수조에 충전되지 않은 것은 3.7%, 충전된 것은 1.4%의 차이를 보여 실험 실시 전 가압수조에 가압공기를 주입한 뒤의 가압시간은 30분이면 충분한 것으로 사료되었다.

### 감사의 글

본 연구는 2005년도 경북지역환경기술개발센터의 지원을 받아 진행되었기에 감사드립니다(과제번호 : 05-2-10-11-06).

### 참 고 문 헌

- 1) 환경부, 2005, 환경백서, pp. 536-546.
- 2) 김덕진, 2004, 하수슬러지 감량화기술 동향, 수처리기술, 12(3), 85-92.
- 3) 임호주, 김병수, 이수구, 김종훈, 2001, 수중 분산형 고분자 응집제에 의한 하수처리장 농축 및 소화슬러지의 탈수효율 평가, 한국폐기물학회 추계학술발표회 논문집, 163-166.
- 4) 권재현, 박기영, 이용훈, 안규홍, 2001, 저함수율 케이크 생산을 위한 하수슬러지 전처리 연구, 한물물환경학회.대한상수도학회 공동추계학술발표회 논문집, 195-198.
- 5) 배재근, 2002, 슬러지의 처리 및 자원화의 문제점 및 향후 개선방안, 폐기물자원화, 10(3), 21-33.

- 6) 고팡백, 김영관, 윤주환, 이병현, 임봉수, 임재명, 한무영, a, 1995, 폐수처리공학, 동화기술, 서울, 245-248.
- 7) 김유창, 김재형, 신흥식, 2001, 용존공기부상(Dissolved air Flotation)을 이용한 수처리 기술, 機械와 材料, 13(2), 113-124.
- 8) Zebel, T., 1985, The advantages of dissolved air flotation, J. of AWWA, 77(5), 4245.
- 9) 광동희, 김성진, 임영환, 2004, 용존공기부상(DAF) 공정을 이용한 생물학적 플록의 부상분리, 상하수도학회지, 18(5), 649-655.
- 10) 유제선, 김성훈, 신은희, 박희경, 2003, Dissolved Air Flotation(DAF) 집축조의 수리동력학적 조건이 입자의 제거에 미치는 영향, 상하수도학회지, 17(1), 93-102.
- 11) 조삼일, 2001, TOP DAF SYSTEM (Micro-bubble generator)를 이용한 용존공기부상시스템, 제2회 환경신기술발표회, 환경관리공단, pp. 184-193.
- 12) 양상현, 라덕관, 1985, 가압부상법에 의한 활성슬러지 혼합액의 고액분리에 관한 연구, 대한토목학회지, 5(3), 21-29.
- 13) 김성기, 2005, 용존공기부상법에 의한 제지폐수 처리의 최적조건에 관한 연구, 영남대학교, 석사학위논문, 38-52.
- 14) 정원구, 1998, 제지폐수의 응집특성 및 활성슬러지 처리에 관한 연구, 강원대학교, 석사학위논문, 1-21.
- 15) APHA, AWWA, WPCF., 1992, Standard method for the examination of water and wastewater, 18th ed.
- 16) 김유창, 신흥식, 나은수, 2001, 용존공기부상(Dissolved air Flotation; DAF)의 핵심기술, 機械와 材料, 13(4), 16-22.
- 17) Coluson, J. M. and J. F. Richardson, 1978, Chemical Engineering, Vol. 2: Unit Operation, 3rd Eds., Pergamon Press, Oxford, 4-6.
- 18) 박치현, 2001, DAF(Dissolved Air Flotation)공법을 응용한 정수처리 공정의 개량, 부산대학교, 석사학위논문, 7-10.
- 19) 이준, 2004, 부상공정에 의한 상수슬러지 농축, 서울대학교, 석사학위논문, 38-40.
- 20) 박용호, 2003, 용존공기부상공정에서의 압력의 영향, 서울대학교, 석사학위논문, 41-55.