

슬러지 SVI와 화학적 개량이 슬러지부상농축에 미치는 영향

이기용 · 김신조 · 권오상 · 엄익태^{*†}

국립환경과학원 물환경제어연구과
*성균관대학교 사회환경시스템공학과

Effects of Sludge SVI and Chemical Conditioning on Activated Sludge Flotation Thickening

Ki Yong Lee · Shin Jo Kim · Oh Sang Kwon · Ick Tae Yeom^{*†}

Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research

*Civil & Environmental Engineering Department, Sungkyunkwan University

(Received 19 January 2010, Revised 5 February 2010, Accepted 5 February 2010)

Abstract

Electroflotation (EF) was conducted for activated sludge thickening to investigate the effects of sludge SVI (sludge volume index) and chemical conditioning. Return sludge samples were used for the experiment, which were collected from municipal wastewater treatment plants. The performance of sludge thickening was significantly dependent on sludge SVI. For the sludges with SVI values in a range from 50 to about 150 mL/g, the maximum float content decreased rapidly from 8.4 to 3.5% and flotation compressibility followed the same pattern. In cases of sludges with SVI higher than 150 mL/g, those results showed low content levels without large changes. Gas/solids ratio tended to increase with an increase in SVI. When polyelectrolyte was added into sludges for the conditioning, compressibility increased up to 75% and gas/solids ratio was reduced up to about 35% under the condition of microbubble production rate of 530 mL/h, however, there was no consistent effect of chemical conditioning on the maximum float solids content; some cases were positive but the others negative. It was expected that the optimum dose of electrolyte depends on sludge SVI and an excessive chemical dose causes a performance deterioration of flotation thickening.

keywords : Activated sludge thickening, Chemical conditioning, Flotation, Sludge volume index (SVI)

1. 서론

부상분리는 물속에 함유되어 있는 부유고형물에 미세기포를 부착시켜 비중이 작아진 혼합 고형물을 수면위로 분리하는 기술로서 주로 비중이 낮은 고형물의 분리에 적합한 것으로 알려져 있다(Edzwald, 1995; Rubio et al., 2002).

수처리 분야에서 부상분리법은 고형물의 제거능력이 우수하고 체류시간을 단축시킬 수 있어 정수나 폐수처리 시 침전조를 대체하는 전처리공정으로 많이 활용되고 있다. 또한 활성슬러지 등 생물학적 고형물의 분리 및 농축에도 효과적인 방법으로 제시되어 있다(박민정과 최영균, 2008; Gnirss et al., 1996).

부상식 농축공정의 설계 및 운전 시 고려하여야 할 중요한 사항으로는 고형물부하와 기고비(기체/고형물 비)가 있으며 이들 인자의 상호작용에 의하여 농축공정의 효율은 결정된다(Walzer, 1978). 한 연구(Bratby, 1978)에서는 고형물부하를 증가시키면 따라 농축농도는 선형적으로 감소하

며, 원수의 최대 유입량과 기고비 또한 선형적인 반비례관계에 있다는 연속식 농축공정의 운전결과가 제시되기도 하였다.

고형물부하, 기고비 같은 설계 및 운전인자와 더불어 플록의 크기나 밀도 등 슬러지 고형물의 특성 자체도 부상농축 효율에 영향을 미치는 또 다른 중요한 요인이 될 수 있다. Bratby and Ambrose(1995)는 부상농축성이 다른 두 종류의 슬러지를 대상으로 고형물부하에 따른 농축슬러지의 고형물 함량변화에 대한 연구를 수행하였으며, 일반적인 고형물부하의 범위 내에서 두 슬러지의 고형물 함량은 2배 이상 차이가 나는 것으로 보고하였다. 하지만 부상농축성을 판별할 수 있는 인자로서 가용한 슬러지 특성을 제시하지는 못하였다. 슬러지 SVI(sludge volume index)는 중력식 농축성을 나타내는 지표로서, 일부 연구진(Gulas et al., 1978; Langenegger and Viviers, 1978)에 의하여 부상농축공정에서의 슬러지 농축성과 SVI의 상관관계를 산정하기 위한 시도가 이루어졌다. 이들 연구에서는 SVI가 증가함에 따라 부상농축농도는 낮아지는 경향이 관찰되었다. 하지만 아직까지 농축농도를 포함한 부상분리 성능에 미치는 슬러지 SVI의 영향은 자세히 알려지지 않은 상태이다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
yeom@skku.edu

부상농축공정의 고흡물부하를 증가시키거나 기고비를 줄이기 위해서 슬러지의 화학적 개량을 도입하기도 한다 (Haarhoff and Van Vuuren, 1995). 또한 화학적 개량은 일반적으로 부상농축슬러지의 고흡물 함량을 높일 수 있는 것으로 알려져 있다(Bratby, 1978; Komline, 1978). 하지만 아직까지 슬러지 개량을 위하여 첨가되어야 하는 응집제 양이나 고흡물 함량의 증가 정도를 예측하는 데에는 어려움이 있으며 앞으로도 연구가 계속 이루어져야 하는 부분으로 남아있다.

본 연구는 슬러지 SVI와 화학적 개량이 부상농축성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수행하였다. 여러 하수처리장의 활성슬러지를 대상으로 회분식 전해부상을 실시하였으며, 농축성능의 비교평가를 위하여 슬러지 별로 얻은 수 있는 최대농축농도, 농축속도를 미세기포 공급량으로 보정한 농축경사, 최대농축농도에 도달하는데 필요한 기고비를 산정하였다.

2. 연구방법

2.1. 활성슬러지

실험에 사용한 활성슬러지 시료는 표준활성슬러지공정이나 혐기조, 무산소조, 호기조로 구성되어 있는 연속식 BNR(biological nutrient removal) 공정이 적용된 도시하수처리장의 슬러지 반응라인에서 채취하였으며, 시료의 성상을 Table 1에 정리하였다.

화학적 개량이 슬러지 부상분리에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 사용한 응집제는 양이온성 유기고분자(C-494HMW, SUPERFLOC)이었으며, 0.063~0.5%의 범위에서 주입량을 2배씩 증가시켜 주입하였다. 혼화는 20 L의 슬러지 시료가 채워져 있는 30 L 용량의 사각반응조에 응집제 투입 후,

Table 1. Characteristics of activated sludges used in this study

SS conc. (%)	VSS/SS	SVI (mL/g)	pH	Conductivity (μS/cm)
0.23~1.12	0.76~0.82	50~400	6.5~7.2	409~947

직경 7 cm의 스크류형 임펠러가 장착된 direct driven stirrer를 이용하여 약 1분간의 급속교반과 5분간의 완속교반의 과정을 거쳐 실시하였다. 급속교반과 완속교반 시 회전수는 각각 1,000과 200 rpm을 적용하였다.

슬러지 SVI의 측정은 1 L 용량의 유리실린더에 시료를 채운 후 30분간 정체시켜 침전·압밀된 슬러지층의 두께를 기록하는 방식으로 하였으며, 이때 stirring은 수행하지 않았다. 다만, wall effect를 최소화하기 위하여 슬러지층이 전체 실린더 부피의 25%를 초과하지 않도록 슬러지 부상 분리 후 얻은 고액분리수를 이용하여 희석한 슬러지 시료를 사용하였다. 슬러지의 지역침전속도(zone settling velocity, ZSV)는 직경 10 cm, 유효높이 60 cm의 아크릴 원형조에 시료를 담아 시간에 따른 슬러지 계면의 높이를 기록하여 측정하였다.

2.2. 회분식 전해부상 장치

슬러지의 부상농축 특성을 파악하기 위하여 본 연구에서는 전기분해법을 이용한 회분식 전해부상(electroflotation, EF) 실험을 수행하였다. 회분식 실험에서 EF는 가압공기용존법을 이용한 DAF(dissolved air flotation)에 비하여 장치가 간단하고, 미세기포 공급량의 미세조정이 가능하여 상대적으로 신뢰성과 재연성이 높은 장점을 가지고 있다. 회분식 부상분리 장치는 Fig. 1과 같이 부상칼럼과 전기분해장치로 구성하였다.

슬러지 부상농축을 위한 칼럼은 직경 14.5 cm, 유효높이 100 cm의 눈금이 새겨진 원형 아크릴조를 사용하였다. 미세기포 발생을 위한 전기회전은 미세기포 발생 극판, DC전원 공급 장치, 전압계(voltammeter), 전류계(ammeter)로 구성되어 전원 공급 장치의 전압과 그에 따른 전류밀도를 조절하여 미세기포를 발생시켰다. 극판은 12 cmW×5 cmH×0.1 cmT 크기의 평판형(plate type)으로서, 음극은 스테인리스 재질의 극판을, 양극은 산화철이 주성분인 합금으로 표면 처리된 티타늄(titanium) 극판을 이용하였다. 양극을 중심으로 음극 2개를 양측 면에 0.5 cm 간격을 두어 단극식으로 연결하였다. 농축실험을 위하여 적용한 전류는 800과

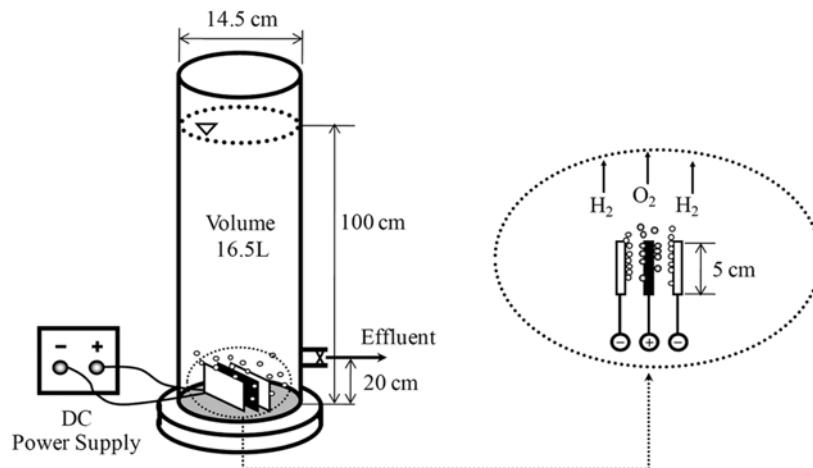


Fig. 1. Batch-type experimental set-up.

2,400 mA이었으며, 각 전류에 해당하는 전류밀도는 음극판을 기준으로 각각 6.7과 20 mA/cm²이었다.

미세기포 발생량을 측정하기 위한 장치는 전술한 부상농축장치와 유사하게 전기분해조, 극판, DC전원 공급장치, 전압계, 전류계로 구성하였다. 전기분해조는 1 L 용량의 원형 아크릴조를 이용하였으며, 극판은 5 cmW×3 cmH×0.1 cmT 크기의 동일 재질의 평판형을 이용하였다. 전기분해 대상 시료는 슬러지 고액분리수를 평균 1.2 μm 크기의 공극을 갖는 유리섬유지(GF/C, Whatman)에 여과하여 얻었다. 본 시료의 전기분해에 의하여 발생하는 가스량은 전기분해조 상단을 배가스관이 장착된 실리콘 마개로 밀폐한 후, 배기관을 버블유량계(bubble flowmeter)에 연결하여 측정하였다. 전류밀도는 0~25 mA의 범위에서 다르게 하여 전류밀도와 가스발생량간의 상관관계를 도출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. EF에 의한 활성슬러지 부상분리 특성 및 해석

활성슬러지의 부상분리를 위한 미세기포의 공급은 실험이 종료될 때까지 일정한 가스의 유량을 연속적으로 발생시키는 방식으로 하였다. 부상실험에 사용한 슬러지들 중 일부에 대하여 고액분리수를 얻어 미세기포 발생량을 측정 한 결과, 모든 측정에서 전류밀도를 증가시키에 따라 미세기포 발생량은 선형적으로 증가하였으며 패러데이 법칙에 의한 전류효율은 93~105%로 나타났다. 그러므로 미세기포 발생량은 미세기포 발생량은 패러데이 법칙에 의한 가스 발생량과 동일하다고 가정하여 산정하였다.

미세기포 발생량은 전류에 따라 변화하므로 부상분리에 소요되는 시간 또한 적용전류에 의하여 차이가 발생할 것이다. 통전량을 높이면 많은 미세기포를 발생시킬 수 있으므로 부상분리 실험을 빠른 시간 안에 종료할 수 있지만 과도한 난류가 발생하여 슬러지 플록이 파괴되거나 부상농축 슬러지층이 탈리되는 등 실험오차를 증가시킬 가능성이 있다. 본 실험에서는 일부 응집효과실험에서 2,400 mA를 적용한 경우를 제외하고는 모든 부상분리 테스트에 800 mA의 전류를 적용하였다. 전류량 800 mA에서 발생하는 가스의 유량은 약 530 mL/h로서 합리적인 시간 내에 실험을 종료하면서도 빠른 수류 형성에 의한 악영향을 최소화할 수 있는 조건이라 판단하였다. 2,400 mA에서 발생하는 가스유량은 약 1,600 mL/h이었다.

Fig. 2는 전해부상에 의하여 슬러지 고형물이 부상분리되는 모습을 보여주고 있다. 극판에 통전이 이루어지면 얼마 지나지 않아 슬러지 고형물은 미세기포에 의해 조금씩 부상하기 시작하며 이들이 수표면에 모여 슬러지층을 형성한다. 부상된 슬러지 고형물이 많아질수록 수표면에 형성된 슬러지층의 두께는 아랫방향으로 서서히 증가하며, 일정 시간이 경과하여 거의 모든 고형물질이 부상되었을 때 슬러지층과 액상 사이에 뚜렷한 경계면이 나타난다. 이 시점부터는 슬러지층의 압축만이 진행되면서 시간이 경과할수록 층의 두께는 감소한다. Fig. 3(a)에 전해부상 시 나타나는

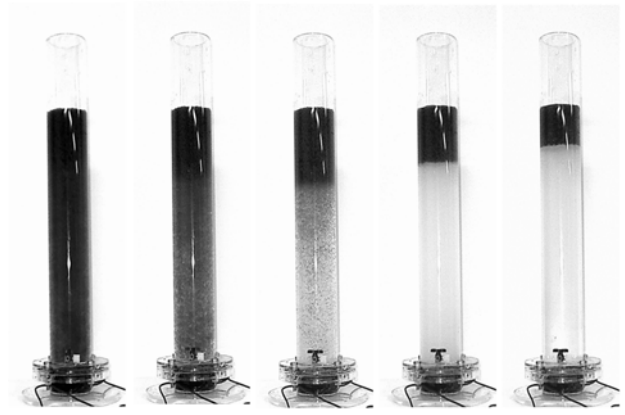
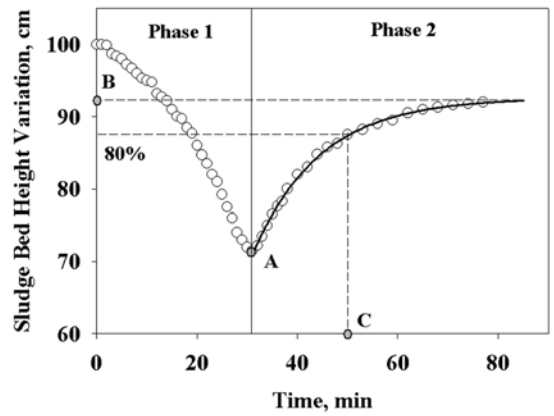
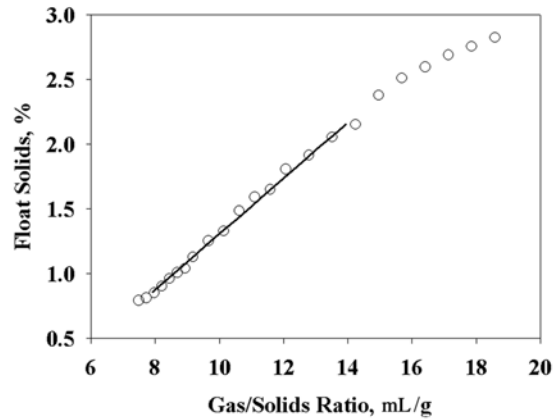


Fig. 2. Process of batch-type electroflotation (EF) of activated sludge.



(a)



(b)

Fig. 3. Representative electroflotation property of activated sludge (a) variation of the sludge bed height from the bottom of the reactor and (b) variation of the float solids content in phase 2 in terms of gas/solids ratio.

전형적인 슬러지층 계면의 변화를 나타내었다. 기술한 바와 같이 슬러지층과 액상의 구분이 명확해지는 시점(point A)을 기준으로 슬러지층의 변화과정은 두 구간으로 나눌 수 있다(Choi et al., 2005). phase 1은 슬러지층이 형성되는 과정을 나타내며, phase 2는 거의 모든 고형물이 부상되어 만

들어진 슬러지층이 압밀되는 과정을 나타낸다. 본 연구에서는 이러한 슬러지층 거동을 나타내는 곡선을 이용하여 각각의 슬러지를 대상으로 부상분리 성능을 비교 분석하였다. 부상분리 성능을 나타내는 인자로서 최대 고행물 농축농도, 단위 고행물 당 소요 가스량(기고비), 기포주입량에 대한 고행물 농축경사를 제시하였다.

최대고행물농축농도는 식 (1)과 같이 슬러지 시료의 초기 높이(100 cm)와 부상농축에 의한 슬러지층의 최종높이의 비율(농축률)을 구하고 여기에 슬러지 초기농도를 곱하여 산정하였다. 부상에 따른 최소높이는 슬러지층의 변화가 거의 일어나지 않을 때까지 실험을 진행하면서 시간에 따라 감소하는 슬러지층의 높이를 기록한 후 Fig. 3(a)의 phase 2에 나타낸바와 같이 비선형 회귀분석법을 이용하여 추정하였다(point B).

$$C_{t, \max} = \frac{H_i}{H_{i, \text{final}}} \times C_i \quad (1)$$

여기서, $C_{t, \max}$: 부상에 의해 얻을 수 있는 슬러지의 최대 농축농도, %

- C_i : 슬러지 시료의 초기농도, %
- $H_{i, \text{final}}$: 부상에 의한 슬러지층의 최종높이(100-B), cm
- H_i : 초기 슬러지 시료의 높이(100), cm

기고비는 실험 대상 슬러지의 단위 고행물 질량 당 발생된 가스 부피로 정의하였다. 발생된 가스 부피는 패러데이 법칙에 따라 적용전류와 통전시간을 고려하여 산정하였다. 본 연구에서 제시하는 최종 기고비는 Fig. 3(a)와 같이 최대 농축농도의 80%에 해당하는 압밀시간인 point C를 기준으로 하였다. point C 이후부터는 슬러지의 압밀이 완만하게 이루어지므로 최대농축농도에 도달하는 시간을 기준으로 최종 기고비를 산정하는 경우 오차가 커질 가능성이 있기 때문이다.

고행물농축경사는 Fig. 3(a)의 phase 2에서 일정시간 동안 공급된 기고비에 따른 고행물의 농도변화 관계로부터 도출하였다(Fig. 3(b)). 모든 슬러지에 대한 농축농도의 변화는 최대농축농도의 약 80%에 해당하는 기고비까지는 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며 1차 회귀분석 결과로부터 얻은 기울기(식 (2))를 고행물 농축경사로 정의하였다. 농축경사는 기고비에 의하여 normalization된 고행물의 부상압밀성을 나타내며, DAF 방식의 회분식 부상분리 실험에서 일반적으로 제시되고 있는 농축속도(시간에 따른 농축농도변화)와 비교해 보았을 때 초기 농도가 다른 슬러지에 대한 고행물 농축성을 비교하는데 있어 상대적으로 더욱 유용한 방법이라고 판단하였다.

$$Sl_t = \frac{\Delta C_t}{\Delta G/S} \quad (2)$$

- 여기서, Sl_t : 고행물 농축경사, % / (mL/g)
- ΔC_t : 슬러지 압밀구간에서 고행물 농도증가량, %

$\Delta G/S$: 미세기포공급시간에 따른 기체/고행물 비의 증가량, mL/g

3.2. 슬러지 SVI가 슬러지 부상농축 성능에 미치는 영향

각기 다른 하수처리장에서 채취한 활성슬러지를 대상으로 전해부상농축을 실시하여 산정된 최대부상농축농도를 Fig. 4에 나타내었다. SVI가 50 mL/g인 침강성이 가장 양호한 슬러지의 농축고행물 함유량은 8.4%로 가장 높은 값을 보여주었으며, SVI가 증가함에 따라 고행물 함유량은 빠르게 감소하여 SVI가 150 mL/g 수준까지 증가하였을 때 고행물 함유량은 약 3.5%를 나타내었다. SVI가 더욱 높은 범위에서는 3.5~2.5%으로 큰 차이를 나타내지는 않았다. SVI에 따른 농축고행물 함유량 변화는 동일 하수처리장의 활성슬러지에 대해서도 발생하였다. Fig. 4에 나타낸 최대 농축농도 중 6개의 데이터는 3곳의 하수처리장에서 계절이 변화하였을 때 시료채취를 하여 부상농축을 실시한 결과이다. 각 하수처리장의 슬러지 SVI는 53→160, 85→150, 210→400 mL/g으로 변화하였으며 이에 따라 농축농도도 전체 SVI에 따른 농축농도의 변화경향에 따라 바뀌는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 본 실험의 대상이었던 표준활성슬러지공정이나 BNR공정이 적용된 하수처리장의 활성슬러지에 대해서는 SVI만으로 부상에 의하여 얻을 수 있는 최대농축농도의 예측이 가능함을 의미한다. SVI에 따른 최대농축농도(C_{\max})의 변화를 회귀분석한 결과 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다($r^2=0.90$).

$$C_{\max} = 13.88 \exp(-0.017 \times SVI) + 2.44 \quad (3)$$

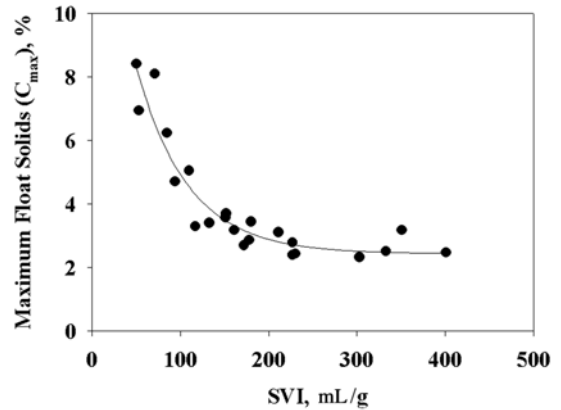


Fig. 4. Effect of the sludge SVI on the maximum float solids content obtainable by means of flotation thickening.

일부 연구자들에 의하여 슬러지 SVI에 따른 최대농축농도의 변화에 관한 연구는 이미 진행된 바 있다. Langenegger and Viviers(1978)는 활성슬러지를 이용하여 파일롯 규모의 연속식 DAF 부상농축을 수행하였다. SVI 50 mL/g인 슬러지의 최대농축농도는 약 6.0%이었으며 SVI가 450 mL/g일 경우에는 약 2.5%로 SVI의 증가에 따라 최대농축이 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 SVI가 다른 4종류의 활성슬러지만을 대상으로 하였기 때문에 농축농도변화 경

향을 추정하기에는 무리가 있었다. Gulas 등(1978)은 SVI가 다른 7종류의 슬러지를 대상으로 회분식 DAF 실험을 수행하였다. 최대농축농도의 변화 경향은 본 연구결과와 매우 유사하였지만 SVI에 따른 각각의 농도는 전체적으로 2배 이상 낮게 나타났다. 이는 회분식 DAF 실험이 실제 연속식공정의 성능을 제대로 반영하지 못하기 때문인 것으로 판단된다(Bratby, 1983). 회분식 DAF 실험에서 미세기포의 공급은 높은 압력 하에서 공기로 포화된 가압수가 부상칼럼에 주입되는 방식으로 이루어지기 때문에 짧은 시간 안에 모든 미세기포의 공급이 완료된다. 또한 가압수는 작은 용적의 부상칼럼 내에 과도한 와류를 형성시키므로 결과적으로 많은 양의 미세기포가 불충분한 체류시간과 높은 전단력에 의하여 고형물에 부착되지 못하고 부상칼럼 밖으로 빠져나가게 된다. 즉, 주입된 미세기포의 많은 부분이 실제 부상분리에 이용되지 못한 채 소실되므로 슬러지를 농축시킬 수 있는 부상능력이 크지 않아 농축농도는 부상농축에 의하여 얻을 수 있는 최대값에 다다르지 못하게 된다. 반면 연속식 공정은 수표면 전체에 농축슬러지층이 일정 두께로 존재하므로, 농축조 하부에서 공급되는 미세기포는 회분식실험과는 다르게 유입고형물과의 흡·부착효과와는 관계없이 대부분 농축슬러지층의 압밀에 기여하게 되므로 고형물 부하를 낮게 유지한다면 최대농축농도를 얻을 수 있다. 본 실험에서 사용한 회분식 전해부상의 경우에도 일정 유량의 미세기포를 슬러지 고형물의 압밀이 완료되는 시점까지 계속하여 공급할 수 있으므로 미세기포가 고형물에 흡·부착되는 효율에 상관없이 최대 농축농도를 얻을 수 있다. 그러므로 Fig. 4의 최대농축농도는 연속식 DAF 실험을 통하여 얻은 Langenegger and Viviers(1978)의 결과와 비교적 유사하게 나타난 것으로 판단된다.

슬러지 SVI가 고형물농축경사에 미치는 영향을 Fig. 5에 제시하였다. 고형물농축경사는 기술한 바와 같이 부상분리된 슬러지층이 압밀되면서 발생하는 농도변화를 압밀이 진행되는 동안 증가한 기고비로 나눈 값으로서, 초기 농도가 서로 다른 슬러지의 부상압밀성을 비교하기 위하여 정의하였다. 미세기포 발생량 530 mL/h 하에서 SVI가 약 50 mL/g인 슬러지의 농축경사는 1.5로 가장 높게 나타났다. 농축경사 1.5는 부유고형물층의 단위 gram 고형물에 1 mL의 미세기포를 공급하였을 때 고형물농도는 1.5% 증가한다는 의미이다. SVI가 150 mL/g으로 증가하였을 때 농축경사는 약 0.45로 SVI 50 mL/g인 슬러지에 비하여 70% 이상 감소하였다. 이후 SVI 증가에 대응하는 농축경사는 완만한 감소를 나타내었으며, 전체적인 변화경향은 최대고형물농축농도 변화와 유사하였다. 슬러지의 초기농도에 따라 농축경사는 달라질 수 있으므로 초기농도가 유사한 슬러지(0.4~0.5%)만을 대상으로 농축경사의 변화를 살펴보았지만(Fig. 5의 흰점) 전체적인 변화 경향과 크게 다르지 않았다. 농축경사가 크다는 것은 동일 기고비에 대하여 보다 높은 고형물 함량의 농축슬러지를 얻을 수 있거나, 동일 농축농도를 얻기 위해서 부상슬러지층에 공급되어야 하는 기고비가 낮아질 수 있음을 의미한다.

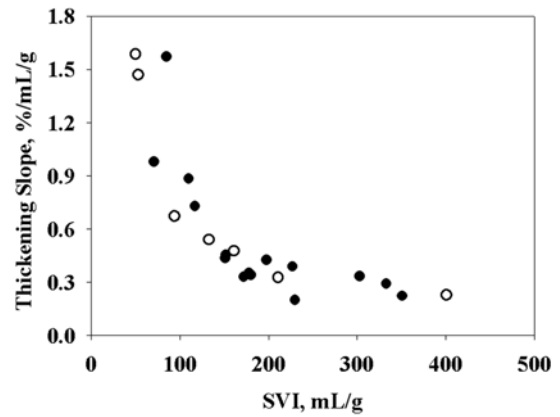


Fig. 5. Variation of the thickening slope against the sludge SVI at microbubble generation rate of 530 mL/h (black dots are for sludges with the various initial concentration, while white dots for those with the initial concentration of 0.4~0.5%).

부상농축슬러지의 농도가 최대농축농도의 80%에 도달하는데 요구되는 기고비를 Fig. 6에 나타내었다. 슬러지에 따라 소요되는 기고비는 큰 차이를 보였으며, SVI가 증가함에 따라 기고비는 증가하는 경향을 보여주었다. 초기농도가 0.4~0.5%로 유사한 슬러지의 기고비를 살펴본 결과, SVI 50~200 mL/g까지 기고비는 4.6에서 8.5 mL/g가 조금 넘는 수준까지 증가하는 것으로 나타났다. SVI가 200 mL/g 보다 큰 경우에는 데이터가 부족하기 때문에 기고비가 계속해서 증가할지 아니면 더 이상 증가하지 않는 경향을 보일지 명확하지는 않다. 하지만 SVI가 증가하는 경우 200 mL/g 수준의 기고비보다 감소하지는 않을 것이라는 예상은 충분히 할 수 있었다.

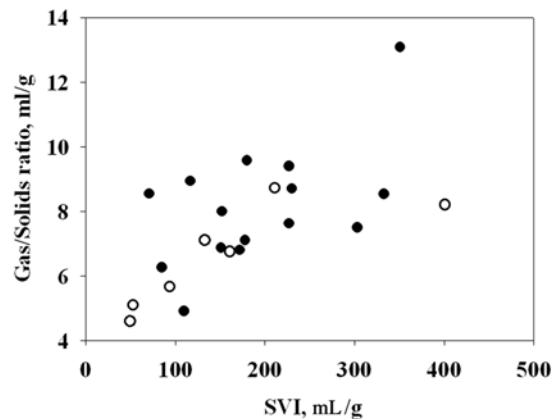


Fig. 6. Variation of gas/solids ratio against the sludge SVI at microbubble generation rate of 530 mL/h (black dots are for sludges with the various initial concentration, while white dots for those with the initial concentration of 0.4~0.5%).

3.3. 슬러지의 화학적 개량이 부상농축에 미치는 영향
 양이온 고분자 응집제의 농도를 달리하여 슬러지의 화학적 개량이 부상농축에 미치는 영향을 조사하였다. 이때 사

용한 슬러지의 SVI는 각각 95(WAS1), 135(WAS2, WAS2-2), 200(WAS3), 220(WAS4) mL/g이었으며 실험 전 고형물 농도를 약 0.4%로 조정하였다.

응집제 주입농도가 0~0.25%인 범위에서 최대농축농도와 농축경사, 소요 기고비의 변화를 Fig. 7~9에 각각 나타내었다. 여기서 가스발생량은 WAS1~4에 대하여 530 mL/h를 적용하였으며, WAS2-2(WAS2와 동일 시료)에선 1,600 mL/h로 증가시켰다.

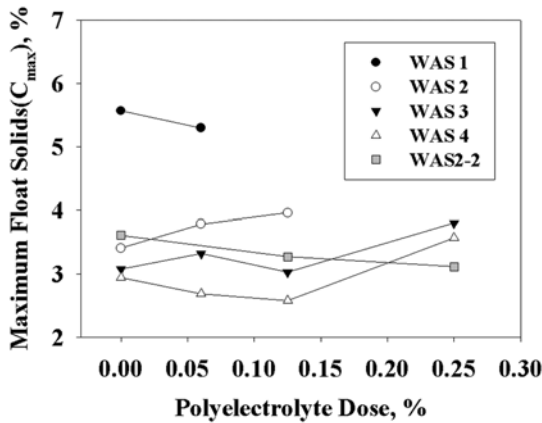


Fig. 7. Variation of the maximum float solids content according to the polyelectrolyte dose.

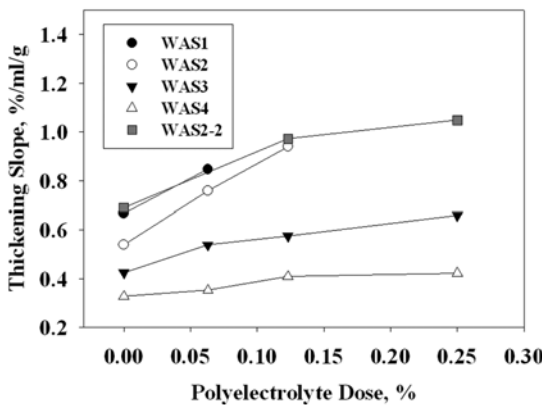


Fig. 8. Variation of the thickening slope according to the polyelectrolyte dose.

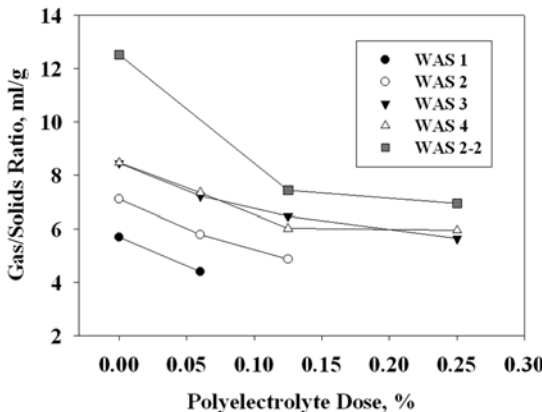


Fig. 9. Variation of the gas/solids ratio according to the polyelectrolyte dose.

응집제 주입에 따른 최대농축농도는 일정한 변화경향이 없이 슬러지와 미세기포 공급량에 따라 다르게 나타났다. 예를 들어, WAS2는 530 mL/h의 미세기포 발생량에서 응집제를 첨가하였을 때 농축농도가 최대 18%까지 증가하였지만, 미세기포 발생량을 1,600 mL/h로 증가시켜 응집제를 첨가하였을 때에는 농축농도가 감소하는 경향을 보였다. WAS4는 응집제 주입량 0.12%까지는 농축농도가 감소하다가, 주입량을 0.25%로 증가시켰을 경우에는 응집제를 주입하지 않았을 때보다도 높은 농도를 나타내었다. 하지만, 주목할 점으로서, 이러한 불규칙적인 변화를 보이더라도 Fig. 4와 같이 슬러지 SVI에 따른 최대농축농도의 변화경향(2.5~8.4%)을 크게 벗어나지 않는 수준이었다. 즉, 슬러지 초기 SVI와 비교해 보았을 때 응집제 주입량은 최대농축농도에 영향을 미치는 주요인자로 보기는 어려웠다.

농축경사와 기고비는 Fig. 8과 9에 제시한 응집제 주입 범위 내에서 개선 효과가 있는 것으로 나타났다. 농축경사는 응집제 주입량 증가에 따라 높아지는 경향을 보였다. 하지만 응집제 주입량에 대한 농축경사의 상승 정도는 슬러지에 따라 다르게 나타났다. 슬러지 WAS2에 응집제 0.125%를 주입하였을 때 농축경사는 9.41로 응집제 미첨가일 때에 비하여 1.75배 증가함으로써 가장 높은 개선 효과를 보였다. 반면, WAS4의 경우 응집제 주입량을 0.25%로 증가시켜도 농축경사 증가율은 약 1.3배로 가장 낮은 효과를 보였다. 기고비(최대농축농도의 80%에 해당하는 값)는 응집제 주입량이 많을수록 낮아지는 경향을 보였다. 동일 미세기포 발생량(530 mL/h)에 대하여 모든 슬러지의 기고비 감소율(Fig. 9에서 응집제 주입량에 대한 기고비 감소 기울기)은 유사한 것으로 나타났다. 응집제 첨가에 의해서 농축경사가 증가하고 기고비가 감소하는 결과는 연속식 부상농축공정에서 고형물부하를 증가시켜도 동일한 부상농축농도를 얻을 수 있거나 최대농축농도를 얻기 위하여 설계되어 있지 않은 경우 동일 고형물부하 조건에서 농축농도가 증가될 수 있음을 의미한다. 하지만 과량의 응집제 첨가는 슬러지 플록의 침강속도를 과도하게 증가시켜 부상농축공정의 성능 저하를 야기할 수 있다. Fig. 7~9에 제시된 각 슬러지에 대한 가장 높은 응집제 주입량보다 2배 많은 응집제가 첨가되었을 때 모든 슬러지는 부상하지 않고 빠른 속도로 침전해버리는 모습을 보여주었다. Fig. 10은 응집제 주입량에 따른 슬러지의 지역침전속도(ZSV)의 변화를 나타내고 있다. 미세기포 발생량 530 mL/h인 실험의 경우 ZSV가 15 cm/min 내외일 때 슬러지는 부상하지 않고 침전하였다. WAS2 슬러지에 응집제를 0.25% 첨가한 후 미세기포 발생량을 1,600 mL/h로 증가시켰을 때에는 슬러지의 부상농축이 가능하였으나, 응집제 주입량 0.13%에 비하여 농축경사나 기고비의 개선이 거의 이루어지지 않았다(Fig. 8, 9의 WAS2-2). 즉, 미세기포 발생량 530과 1,600 mL/h에서 WAS2 슬러지에 대한 적정 응집제 주입량은 약 0.13%로 정할 수 있다.

만약 미세기포 발생량을 다르게 한다면 적정 응집제 주입량은 달라질 수 있을 것이다. 본 연구에서는 미세기포

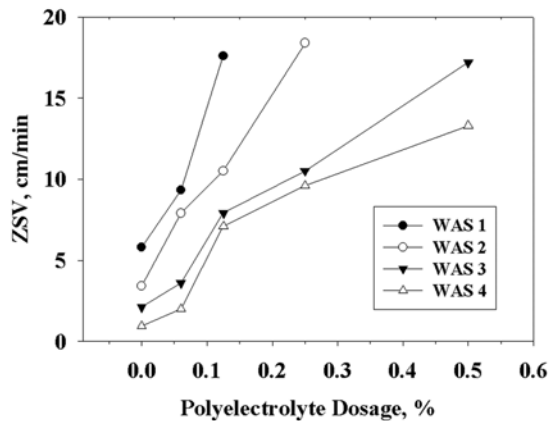


Fig. 10. Variation of the sludge zone settling velocity (ZSV) according to the polyelectrolyte dose.

발생량에 따른 적정 응집제 주입량을 도출하는 실험을 수행하지는 않았다. 하지만 Fig. 10과 같이 SVI가 낮은 슬러지 일수록 ZSV는 응집제 주입량에 민감하게 반응하므로, 슬러지 SVI는 적정 응집제 주입량에 영향을 매우 크게 미치는 인자인 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

활성슬러지 SVI와 응집제를 이용한 슬러지의 화학적 개량이 부상분리 성능 및 효율에 미치는 영향에 관하여 연구를 수행하였다.

슬러지 SVI는 부상분리성능에 매우 큰 영향을 미치는 인자로서 SVI가 높아질수록 부상농축성능은 낮아지는 경향을 나타내었다. 최대농축농도는 SVI 50 ~ 150 mL/g의 범위에서 SVI가 증가함에 따라 매우 급격하게 감소하였으며, SVI가 본 범위보다 높은 경우에는 완만한 감소로 이어졌다. 고형물농축경사는 최대농축농도 변화와 매우 유사한 경향으로 변화하였으며, 소요 기고비는 SVI가 높은 슬러지일수록 증가하는 것으로 나타났다.

응집제를 이용한 슬러지의 화학적 개량을 통하여 부상분리 성능을 개선시킬 수 있었다. 최대농축농도는 슬러지에 따라 증가하거나 감소하는 등 일관성 있는 변화경향을 찾을 수 없었으나, 모든 슬러지에 대하여 고형물농축경사는 증가하였으며 소요 기고비는 감소하였다. 미세기포 발생량 530과 1,600 mL/h에서 슬러지 개량을 위한 적정 응집제 주입량은 0.067~0.25%로 슬러지에 따라 달랐으며, 슬러지 SVI에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 과다한 응집제의 주입은 부상농축 성능에 개선효과가 없거나 부정적인 영향

을 주었다. 특히 SVI가 낮은 슬러지일수록 응집제 주입량의 작은 차이에도 침전속도의 변화폭이 크므로 화학적 개량 시 세심한 주의가 요구됨을 예상할 수 있었다.

사 사

본 연구는 국립환경과학원 박사후연수과정 지원사업에 의해 이루어진 것임

참고문헌

- 박민정, 최영균(2008). 전해부상을 고액분리 방법으로 적용한 SBR 공정의 운전 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(3), pp. 340-344.
- Bratby, J. R. (1978). Aspects of sludge thickening by dissolved air flotation. *Wat. Pollut. Control*, **77**(3), pp. 421-432.
- Bratby, J. R. (1983). Batch flotation tests: how useful are they?. *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, **55**(1), pp. 110-113.
- Bratby, J. R. and Ambrose, W. A. (1995). Design and control of flotation thickeners. *Wat. Sci. Tech.*, **31**(3-4), pp. 247-261.
- Choi, Y. G., Kim, H. S., Park, Y. H., Jeong, S. H., Son, D. H., Oh, Y. K., and Yeom, I. T. (2005). Improvement of the thickening and dewatering characteristics of activated sludge by electroflotation (EF). *Wat. Sci. Tech.*, **52**(10-11), pp. 219-226.
- Edzwald, K. J. (1995). Principles and application of dissolved air flotation. *Wat. Sci. Tech.*, **28**(2), pp. 1-23.
- Gnirss, R., Peter-Fröhlich, A., and Schmidt, V. (1996). Municipal wastewater treatment in Berlin with deep tanks and flotation for secondary clarification. *Wat. Sci. Tech.*, **33**(12), pp. 199-210.
- Gulas, V., Lindsey, R., Benefield, L., and Randall, C. (1978). Factors affecting the design of dissolved air flotation systems. *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, **50**(7), pp. 1835-1840.
- Haarhoff, J. and Van Vuuren, L. R. J. (1995). Design parameters for dissolved air flotation in South Africa. *Wat. Sci. Tech.*, **31**(3-4), pp. 203-212.
- Komline, T. R. (1978). Dissolved air flotation tackles sludge thickening. *Water Waste Eng.*, **15**(2), pp. 63-67, 69.
- Langenegger, O. and Viviers, J. M. P. (1978). Thickening of waste activated sludge with a dissolved air flotation unit. *Wat. Pollut. Control*, **77**(1), pp. 79-86.
- Rubio, J., Souza, M. L., and Smith, R. W. (2002). Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Miner. Eng.*, **15**(3), pp. 139-155.
- Walzer, J. G. (1978). Design criteria for dissolved air flotation. *Pollut. Eng.*, **10**(2), pp. 46-48.