파일럿 규모의 저압형 부상장치를 이용한 하수슬러지 농축에 관한 연구 Thickening of Activated Sludge Using Low Pressure Flotation Pilot System

김지태* · 오준택** · 김종국†
Ji Tae Kim* · Joon Tack Oh** · Jong Kuk Kim†

*경기대학교 환경에너지시스템공학과 · **에네트 · 건양대학교 화학생명학과

*Department of Environmental & Energy Systems Engineering, Kyonggi University · **ENET Com.

Department of Chemical and Bio Engineering, Konyang University

(2013년 4월 22일 접수, 2014년 2월 19일 채택)

Abstract : Low pressure air flotation (LAF) pilot plant for sludge thickening was installed in Chung Nam N.S. municipal waste water treatment plant to verify its application possibility. Effects of operating conditions such as coagulant dosages and microbubble water ratio on thickening of the mixed sludge were examined. Microbubbles which were generated in the chamber of 1.5 kg/cm^2 by high speed collision method with foaming agent were used to float sludge. Solid loading of $30 \text{ kg/m}^2/\text{hr}$, solid contents in thickened sludge of $60,300 \text{ mg/L}$ and SS removal efficiency of 99% were obtained through long period operating LAF in conditions of mixed sludge concentration of $14,400 \text{ mg/L}$, coagulant dosage of 27.6 mg/L , foaming agent addition of 4.0 mg/L and microbubble water injection ratio of 9.7%.

Key Words : Low Pressure Air Flotation, Microbubble, Sludge Thickening, DAF

요약 : 가압형 부상법에 비해 낮은 압력에서 미세기포를 발생시키는 저압형 부상법을 슬러지 부상 농축에 적용하여 그 성능을 검증하고 실제 적용가능성을 확인하였다. 파일럿 규모의 저압형 부상조를 충남 N.S. 하수처리장에 설치하여 혼합슬러지의 농도, 응집제 주입량 및 혼합슬러지 대비 미세기포수의 비율과 같은 운전 변수가 혼합슬러지 농축에 미치는 영향을 확인하였다. 미세기포는 내부 압력이 1.5 kg/cm^2 로 유지된 미세기포발생기에서 공기와 기포조제가 포함된 물을 고속 충돌 방식으로 발생시켰으며, 이를 부상농축 실험에 사용하였다. 장기운전 시 유입된 혼합슬러지의 SS 농도는 평균 $14,400 \text{ mg/L}$ 였으며, 응집제 농도 27.6 mg/L , 기포조제 농도 4.0 mg/L , 혼합슬러지 대비 미세기포수의 비율 9.7%로 하여 저압형 부유부상조를 운전한 결과, $60,300 \text{ mg/L}$ 의 농축슬러지 고형물함량과 99% 이상의 고형물 회수율을 얻었다. 이 경우의 고형물 표면적 부하율은 $30 \text{ kg/m}^2/\text{hr}$ 로 2011년 환경부에서 제정한 하수도 상압 부상농축 시설기준 $25 \text{ kg/m}^2/\text{hr}$ 를 상회하였다.

주제어 : 저압 부상, 미세기포, 슬러지 농축, DAF

1. 서론

하수처리 시 발생하는 1차, 2차 또는 1, 2차 혼합슬러지의 농축 공정은 고형물 함량을 증가시켜 부피를 감소시킴으로써 소화나 탈수 등의 후속 슬러지 처리공정을 원활하게 하고자하는데 그 목적이 있다. 슬러지 농축은 일반적으로 중력농축이나 가압부상(dissolved air flotation, DAF) 또는 원심분리를 이용하는 방법이 알려져 있다. 이 외에도 전해부상방법¹⁾이나 여과모듈^{2,3)} 또는 기계식 농축⁴⁾에 대한 연구도 진행되고 있다.

기계식 농축의 한 가지인 원심탈수방식의 경우는 낮은 폴리머 사용량으로도 비교적 높은 고형물회수율을 얻을 수 있는 장점이 있으나, 기계적 장치 제작의 어려움이나 에너지 소요량이 크다는 점이 주된 단점으로 지적되고 있다.⁵⁾

용존공기 부상법은 일반적인 중력농축공정과 비교했을 때 플러크 형성시간이 적게 들고 10배 이상의 수리학적 표면부하율(hydraulic loading rate)을 갖고 있으며⁶⁾ 또한 슬러지의 농축을 5~6배 이상 달성할 수 있다는 장점이 있다.⁷⁾ 용존공기 부상법중 널리 상용화된 가압부상법(DAF)은 공기를 5

kg/cm^2 이상으로 가압을 하여 과포화 시킨 후, 압력을 낮춰 과포화된 공기가 미세기포로 발생되도록 하는 방법이다. 이 방법은 작은 기포를 얻을 수 있으나, 높은 압력 및 순환율 등으로 인하여 장치가 크고 운전비가 높아 이를 대체할 수 있는 기술개발이 필요한 실정이다.⁸⁻¹¹⁾

최근 국내에서는 하수처리장의 에너지 자립화 정책에 따라 처리공정에서 사용되는 단위장치들의 에너지 소요량이 적은 설비에 대한 관심 및 선호도가 높아지고 있다. 이 같은 이유로 농축 효율을 높이거나 소요 에너지를 절감할 수 있는 방법에 대한 연구가 관심을 받고 있다. 그 중에는 전기분해하여 발생시킨 기포를 이용해 오염물을 파괴하거나 부상시켜 농축시키는 전기부상법¹²⁾과 저압에서 기포를 발생시키는 저압형 부상법이 포함된다.

저압형 부상법(또는 상압부상법)이 처리효율 및 경제성 등에서 기계식 농축법은 물론, 가압부상을 사용한 농축에 비해 뛰어나 향후 이들 기술을 대체할 기술로 관심을 받고 있다. 상압부상법에 의한 농축은 고형물 부하량이 $25 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{hr)}$ 으로 가압부상의 $100 \sim 120 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{d)}$ 보다 높아 부상장치 크기를 줄일 수 있다.¹³⁾ 일본에서는 이미 10여 년 전부터 가

† Corresponding author E-mail: kjjkim@konyang.ac.kr Tel: 041-730-5293 Fax: 041-735-9597

압 부상법을 대신하여 상압부상법이 설치되기 시작하여 현재 약 140여 곳에서 가동 중이다. 국내에서도 상압부상법을 이용한 음폐수의 고형물 제거에 적용한 연구결과가 발표되고 있다.¹⁴⁾

본 연구에서는 저압형 부상법을 이용한 파일럿 실험장치를 이용하여 혼합슬러지의 부상 농축시 응집제 농도, 기포조제 농도, 혼합슬러지 대비 미세기포를 함유한 물의 비율에 대한 영향을 고찰하고 하수슬러지 농축을 및 고형물 회수율을 평가함으로써 저압형 부상법의 성능을 검증하고 실제 적용가능성을 확인하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구를 위하여 제작된 파일럿 저압형 부상장치의 구성은 Fig. 1에, 설비 확보는 Fig. 2에 나타내었다. 혼합슬러지 저장탱크, 기포조제 희석탱크, 미세기포발생기(MB Chamber), 혼합장치(90 L), 부상조(W 800 mm × L 2,000 mm × H 900 mm, 유효부상면적 W 800 mm × L 1,200 mm), 그리고 관련 된 펌프 및 교반기로 되어 있다.

기포조제는 미세기포를 쉽게 생성시키고 생성된 기포의 안정성을 부여하며, 슬러지와 결합력을 향상시키는 역할을 하는 계면활성제이다. 본 연구에서는 음이온성 계면활성제인 SLES (sodium lauryl ether sulfate)를 사용하였다. 저장탱크로부터 펌프를 이용하여 희석탱크로 이송된 기포조제는 40 mg/L로 희석된다. 희석된 기포조제를 포함한 물은 by-pass 밸브를 이용하여 일정 유량으로 조절되어 벤추리(venturi)로 도입된다. 벤추리를 통과하면 압력이 낮아져 자연적으로 대기 중의 공기가 흡입된다. 흡입된 공기와 물은 미세기포발생기로 도입시켜 내부의 충돌판에 고속으로 충

Fig. 2. Photograph of low pressure flotation pilot plant.

Fig. 3. Structure of microbubble chamber.

돌시킨다. 미세기포발생기의 구조를 Fig. 3에 나타내었다. 빠른 유속으로 충돌하며 공기가 물에 분산되는데, 이 때 기

Fig. 1. Schematic diagram of the low pressure flotation system.

포조제에 의해 기포가 안정화되어 기포가 합체되는 것이 방지된다. 이러한 방식은 높은 압력으로 공기를 용존시킨 후 상압으로 낮추며 과용존된 공기가 미세기포화 되는 원리를 사용하는 기존의 가압부상 방식에 비해 낮은 압력에서 미세기포를 발생시킬 수 있다. 본 실험에 사용된 MB Chamber는 D 18 cm × H 25 cm 크기로 제작되었다.

혼합슬러지는 혼합장치에서 60 rpm으로 교반되며 0.2%의 농도로 희석된 응집제 ZETAG-78 (BASF, 독일)에 의해 응집된다. 혼합장치에서 유출된 슬러지는 미세기포를 포함한 물(이하 ‘미세기포수’라 함)과 혼합되어 부상조로 이동한다.

플럭과 기포가 파괴되지 않도록 유입속도를 점차 저감시켜 부상조로 주입하고 균등 분배되도록 하였다. 부상조에는 부상된 슬러지를 제거하기 위한 수집기를 설치하여 부상된 고형물을 분리하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 응집제 농도 결정

본 파일럿 실험대상인 충남 N.S. 하수처리장 혼합 슬러지의 최적 응집 조건을 알아보기 위하여 파일럿 실험에 앞서 응집제 최적 주입량 및 응집된 생성 플록의 특성을 알아보았다.

혼합 슬러지 중 SS 농도는 11,630 mg/L이었다. 실험 장치는 jar-tester기를 사용하였고, 교반속도를 150 rpm으로 조절하였다. 응집제는 액상 양이온 고분자 응집제인 ZETAG-78 (BASF, 독일)을 0.2%로 희석하여 사용하였고, 비이커에 폐수 200 mL를 채우고 교반시키면서 응집제를 주입하여 최적의 응집제 주입농도를 도출하고 생성된 플럭과 상등여액의 탁도를 관찰하였다.

2.2.2. 실험조건

충남 N.S. 하수처리장의 생슬러지는 1차 침전지에서 침전·분리된 무기성 물질이 많이 함유된 슬러지로 고형물의 농도가 30,000 mg/L 이상이었고, 잉여슬러지는 2차 침전지에서 가라앉은 활성슬러지 중에서 일부 폭기조로 반송되고 남은 슬러지로 미생물 덩어리이며 유기성이고 고형물의 농도가 5,000~9,000 mg/L로 생슬러지 보다 낮았다. 본 실험의 실험대상인 혼합슬러지는 생슬러지와 잉여슬러지가 일정 시간마다 유입되었으며 평균적인 유입비율은 3:7이었다.

Table 1. Experimental conditions for sludge thickening using pilot plant

Parameter	Condition
Coagulant dosage	18~40 mg/L
Surface active agent dosage	4.0 mg/L
Flux of mixed sludge	34 L/min
Microbubble water flux / Mixed sludge flux	< 10%

충남 N.S. 하수처리장은 생슬러지와 잉여슬러지를 혼합하여 저장하는 저장조가 있어 이곳에 수중펌프를 설치하여 혼합슬러지 저장탱크로 이송하여 실험하였다. 혼합슬러지 저장탱크 용량은 200 L이고, 이 탱크에 수중펌프를 사용하여 혼합슬러지를 혼합장치로 34 L/min의 유량으로 이송하였다. 처리장의 공정수를 미세기포 발생을 위한 물(미세기포수)로 사용하였다. 기포조제는 정량펌프에 의하여 이송되어 적정 농도로 희석되었으며, 희석탱크에서 희석된 기포조제는 MB chamber로 펌프 이송되어 기포발생에 이용되었다. MB chamber의 기포발생능력은 최대 6.0 L/min이었다. 유입 혼합슬러지 대비 미세기포수의 비율(이하 ‘미세기포수 주입율’이라 함)은 미세기포수의 by-pass 밸브를 통하여 조절하였다.

본 실험에 사용된 생슬러지와 잉여슬러지를 혼합한 혼합슬러지의 SS 농도는 9,600~14,700 mg/L 범위이었다. 기타 실험조건은 Table 1과 같다.

본 실험의 성상분석은 수질공정시험법, 폐기물공정시험법 또는 KS 기준에 의한 방법으로 실시하였다.

3. 실험결과

3.1. Jar test를 통한 응집제 최적 농도 결정

본 파일럿 실험대상인 혼합 슬러지의 응집 최적 조건을 알아보기 위하여 파일럿 실험에 앞서 전 실험으로 응집제 최적 주입량 및 응집된 생성 플록의 특성과 상등여액의 특성을 알아보았다. SS 농도는 11,630 mg/L이었다.

Fig. 4와 같이 응집제를 21.6 mg/L 주입한 경우 상등액 탁도가 가장 맑고, 응집플록이 견고하여 최적임을 알 수 있었다. 이는 일정량 이상의 응집제 투입은 부상이나 침전에 불리하다는 연구결과⁶⁾와 일치한다.

(a) Mixed sludge (b) 7.2 mg/L (c) 14.4 mg/L (d) 21.6 mg/L (e) 28.8 mg/L

Fig. 4. Photograph of the mixed sludge coagulated.

응집시 교반에 의한 안정성 확인 결과, 응집제를 투입하여 일정시간 이상 교반할 경우 응집된 플러크가 깨짐을 확인할 수 있었으며 이러한 현상은 응집제의 양이 적을수록 그리고 교반속도가 클수록 심하게 나타났다.

3.2. 미세기포 크기

MB chamber와 기포조제를 이용하여 부상에 필요한 미세기포를 발생시켜 그 발생된 기포의 크기와 분포도 등을 분석하였다.

기포조제를 40 mg/L의 농도로 희석시킨 후 MB chamber를 통과시켜 고속충돌 방식으로 기포를 발생하였고, 기포

는 1,000 μm 눈금의 scale (stage 마이크로미터)과 100배율 광학현미경을 이용하여 크기를 측정하였다.

기포조제와 MB chamber를 이용하여 발생시킨 미세기포의 사진을 Fig. 5(a)에 나타내었으며, 발생된 기포크기를 측정하여 얻은 분포를 Fig. 5(b)에 나타내었다. MB Chamber 내의 압력이 증가함에 따라 발생된 기포의 수평균직경은 작아졌다. 1.5 kg/cm^2 일 때 평균 기포크기는 110 μm 였으며, 2.0과 2.5 kg/cm^2 일 때는 각각 80 μm 과 68 μm 였다. 이는 MB Chamber 내부의 압력이 증가함에 따라 고속 충돌이 미세기포발생에 미치는 영향이 일정한 반면, 용기내 압력과 부상조의 압력차이에 따른 공기 용해도 차이에 의해 미세기포가 발생되는 효과가 증가한 결과이다. 압력이 높아짐에 따라 발생되는 기포의 크기가 작아지는 결과는 기존의 연구¹⁵⁾에서도 확인된 바 있다. 이러한 기포크기는 가압부상법에서 일반적으로 만들어지는 기포의 직경 10 내지 50 μm ¹⁵⁾ 보다는 크다.

미세기포의 크기가 작을수록 이에 투입되는 에너지 비용이 크다는 사실과 응집된 플러크의 입자와 미세기포 직경의 비가 0.75 내지 2.0일 때 충돌반응이 가장 활발하다는 연구결과^{15,16)}를 감안할 때, 본 연구의 경우와 같이 고농도의 슬러지를 응집시켜 플러크의 크기가 클 경우에는 가압부상법 보다는 저압부상 또는 상압부상을 적용하는 것이 적합하다고 판단된다.

이후 파일럿 실험에서는 MB Chamber 내부의 압력을 1.5 kg/cm^2 으로 유지하며 부상농축실험을 수행하였다.

3.3. 영향인자별 하수슬러지 농축 특성

3.3.1. 미세기포수 주입율의 영향

SS농도가 9,600~14,700 mg/L인 혼합슬러지를 대상으로 미세기포수 주입율이 슬러지 농축에 미치는 영향을 관찰하였다.

미세기포수 주입율에 따른 농축슬러지의 고형물 농도를 Fig. 6에 나타내었다. 미세기포수 주입율의 증가에 따라 농축슬러지의 고형분이 증가하는 경향을 나타내었다. 미세기

Fig. 5. Photograph of the generated microbubble (a) and size distribution of microbubble according to pressure of MB Chamber (b).

Fig. 6. Effect of microbubble water injection ratio on sludge thickening.

포 주입율이 높다는 것은 혼합슬러지 단위부피당 기포량이 많은 것을 의미한다. 농축슬러지의 고형물 농도가 미세기포 주입율에 비례하는 것은 기포량이 많을수록 고형물과의 접촉확률이 높아 부상되는 고형물이 많으며, 슬러지가 부상된 이후에도 슬러지와 결합하지 않은 잉여 기포에 의해 지속적으로 압밀화되기 때문이다. 이에 따라 부상 효율도 높아짐을 알 수 있었다. 8%의 미세기포수 주입율에서 혼합슬러지의 고형물 회수율은 90%였으며, 미세기포수 주입율이 높아질수록 회수율은 증가하였다. 실험결과를 통하여 일정 비율 이하의 미세기포수 주입율(본 실험에서는 10%)에서는 슬러지 농축농도에 매우 민감하게 작용함을 확인하였으며, 미세기포수 주입율이 혼합슬러지의 8% 이상이면 농축슬러지의 고형물 함량 40,000 mg/L 이상, 고형물 회수율 90% 이상(최대 99% 이상)이 가능함을 확인하였다.

미세기포수 주입율에 따른 농축슬러지와 처리수의 비율을 확인하였다. 응집제 주입율은 39.6 mg/L이었다. 혼합슬러지는 2 m³/hr (34 L/min)의 유량으로 부상조에 유입되었으며, 미세기포수 주입율을 7.1~9.7%로 변화시키면서 실험하였다.

Fig. 7. Effect of microbubble water injection ratio on (thickened sludge volume/filtrate volume) (SS concentration of mixed sludge: 13,200 (mg/L)).

Fig. 8. Thickened sludge volume and filtrate volume were measured using mass cylinder.

농축슬러지와 처리수의 비율은 미세기포수와 응집된 혼합슬러지가 부상조로 이송되는 배관에 미리 설치된 샘플링 밸브를 열어 매스실린더에 담아 일정시간 후 상부의 농축슬러지와 하부의 처리수의 부피를 각각 측정하여 계산하였다. 실험결과는 Fig. 7과 8에 나타내었다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 미세기포수 주입율이 높을수록 농축슬러지의 부피가 감소하고 농도가 높았다. 이는 앞서 실시한 미세기포수 주입율이 슬러지 농축에 미치는 영향에 대한 실험결과에서 언급한 바와 같이 기포의 양이 많을수록 슬러지의 농축효율이 높아지고 부상슬러지가 압밀화되기 때문으로 판단된다.

3.3.2. 응집제 농도에 따른 슬러지 농축

하수처리장에서 사용하는 약품비의 상당부분이 응집제 구입비이기 때문에 응집제의 주입율은 부상의 운영에 있어 약품비와 밀접한 관계가 있다. SS 회수율 90% 이상, 농축슬러지의 SS 함량 4% 이상을 만족하는 부상의 범위에서의 적정 응집제 주입율을 알아보려고 하였다.

실험대상 혼합슬러지의 SS 농도는 16,200 mg/L이었다. 실험결과는 Fig. 9에 나타내었다.

실험결과에서 보여지듯이 18~35 mg/L의 범위에서 응집제 주입 양을 변화시킨 결과, 28.9 mg/L에서 농축된 슬러지의 고형분이 가장 높았으나 큰 차이를 나타내지는 않았다. 응집제 농도가 일정 수준 이상으로 높아질 경우 농축슬러지 농도가 오히려 감소하는 것은 jar test에서 나타난 현상과도 일치한다. 18 mg/L의 경우 생성된 플록의 크기가 작아 교반속도 등의 작은 조건 변화에서도 민감하게 반응하여 안정적인 처리가 쉽지 않았다.

3.3.3. 장기 운전 결과

충남 N.S. 하수처리장에서 2012년 7월 28일부터 8월 31일까지 현장 실험한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 응집제 평균 주입 농도는 29.6 mg/L였으며 미세기포수 주입율은 평균 9.7%이었다. 파일럿 실험결과 혼합슬러지의 SS 농도는

Fig. 9. Effect of dosage of coagulant on concentration of thickened sludge.

Fig. 10. Daily flotation results of mixed sludge.

평균 14,400 mg/L으로 유입되어 부상된 농축슬러지의 고형물 함량은 평균 60,300 mg/L이었다.

4. 결론

파일럿 규모의 저압형 부상조를 충남 N.S. 하수처리장에 설치하여 운전변수별로 SS 농도가 9,600~18,300 mg/L인 혼합슬러지의 부상 농축실험을 수행하였다.

미세기포 발생기 내부의 압력이 증가함에 따라 발생된 미세기포의 평균크기는 작아졌으며 미세기포수 주입율 10%에서 농축 고형물의 최대 농도를 얻어 가장 적절한 비율로 나타났다.

응집제 평균 농도 27.6 mg/L, 기포조제 평균 농도 4.0 mg/L, 미세기포수 주입율 평균 9.7%로 파일럿 저압형 부상조를 장기 운전한 결과, 고형물 표면적 부하율은 30 kg/m²/hr로 나타났고, 농축슬러지 고형물 함량은 60,300 mg/L, 고형물 회수율은 최대 99% 이상을 나타내었다.

1.5 kg/cm²에서 기포조제를 사용하여 발생시킨 미세기포의 경우 가압부상법에서 일반적으로 만들어지는 기포보다는 컸으나, 본 연구의 대상과 같이 슬러지의 농도가 높아 응집 후 플럭의 크기가 큰 경우에는 저압부상법을 사용하여도 99% 이상의 고형물 회수율을 얻을 수 있어 가압부상법의 대안이 될 수 있음을 확인하였다.

사사

본 연구는 환경부 “글로벌 환경기술개발사업”으로 지원 받은 과제임(과제번호: GT-11-B-01-017-0).

KSEE

Reference

1. Choi, Y. G., Chung, T. H. and Yeom, I. T., “Improvement of

the thickening characteristics of activated Sludge by electro-flotation,” *J. Kor. Soc. Water Waste.*, **19**(3), 295~300(2005).

2. Jung, Y. J., Kiso, Y. and Min, K. S., “Thickening of excess sludge using mesh filter,” *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **20**(4), 346~351(2004).

3. Kim, B. G. and Park, M. S., “Study on sludge thickening with mesh is used as filtration media,” *J. Environ. Sci.*, **15**(10), 945~949(2006).

4. Lee, I. Y., Ju Y. S., Kim, Y. I. and Lee, S. M., “Dewaterability of sewage sludge by using screw thickener,” in Proceedings of the annual meeting of Korean Society on Water Quality, KSEW, Daejeon, pp. 490~494(2004).

5. Lee, J. W., Choi, H. C., Jung, J. D., Jun, G. Y., Kwon, S. Y. and Ahn, Y. H., “Thickening and dewatering of municipal wastewater sludge : separate and combined treatment of primary and secondary sludge,” *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **27**(1), 93~100(2005).

6. Park, Y. S. and Kim, D. S., “Effect of coagulant addition on sedimentation and thickening of bulking sludge by dissolved air flotation,” in *Proceedings Korean Environ. Sci. Soc. Conferences*, KENSS, Miryang, **15**(1), 326~329(2006).

7. Lee, J., “Thickening of WTP sludge by flotation process,” M. S. Thesis, Seoul National University, Seoul, pp. 80~83(2004).

8. Lee, C. H., “The characteristics of activated sludge thickening by dissolved air flotation,” in Proceedings of the annual meeting of Korean Society of Environmental Engineers, KSEE, Ulsan, pp. 1206~1209(2008).

9. Lee, K. R., Oh, Y. K., Lee, S. I., Chung, I. J. and Yeom, I. T., “Effect of sludge settleability and sludge conditioning on waste activated sludge thickening by flotation,” in Proceedings of the annual meeting of Korean Society on Water Quality, KSEW, Daegu, pp. 122~126(2006).

10. Kim, D. S. and Park, Y. S., “Effect of sludge characteristics on the thickening of bulking sludge using DAF (Dissolved Air Flotation),” *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **22**(1), 97~103(2006).

11. Lee, C. H. and Ahn, K. H., “Effect of chemical conditioning on flotation and thickening properties of sludge using a microbubble generating pump,” *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **31**(8), 641~648(2009).

12. Park, Y. S. and Kim, D. S., “Sludge thickening using electro-flotation,” in *Proceedings Kor. Environ. Sci. Soc. Conferences*, KENSS, Daegu, **16**(1), 284~287(2007).

13. Ministry of Environment, “Criteria of sewerage facilities,” Korea Water and Wastewater Works Association, Seoul, p. 687(2011).

14. Kim, B. B., “Factors affecting on acid fermentation of food wastewater by flotation separation and UBF process,” M. S. Thesis, Daegu haany University, pp. 62~63(2009).

15. Dockko, S., Kwak, D. H. and Kim, Y. H., “Analysis of controlling the size of microbubble in DAF,” *J. Kor. Soc. Water Waste.*, **18**(2), 235~241(2004).

16. Kim, S. J., “Modeling on prediction of collision efficiency between bubble and floc in DAF process,” Ph.D. Thesis, Chonbuk National University, pp. 133~134(2004).