

미세 기포에 의한 활성슬러지의 부상특성

Flotation Characteristics of Activated Sludge by Micro-bubbles

김성진¹ · 강병준² · 박상욱² · 이재욱² · 정흥조² · 곽동희^{2*}

Seong-Jin Kim¹ · Byoung-Jun Kang² · Sang-Wook Park² · Jae-Wook Lee² · Heung-Joe Jung² · Dong-Heui Kwak²

1 여수한영대학 보건환경학과

2 서남대학교 환경화학공학부

(2005년 10월 26일 논문저수: 2006년 8월 12일 최종수정논문 채택)

Abstract

Dissolved air flotation (DAF) has been well known for the gravity separation process. The solids to be separated are transferred from the water body to the water surface using micro-air bubbles. DAF has also been used for enhancing solids-liquid separation of industrial and municipal wastewater by adding a unit parallel to a sedimentation unit to reduce the hydraulic loading in the sedimentation clarifier.

This study was to investigate flotation characteristics of activated sludge by the recent DAF technique without chemical agents. In addition, the effect on temperature in flotation of activated sludge and the thickening degree of activated sludge were studied.

Key words: Activated sludge, Micro-bubbles, Dissolved Air Flotation

주제어: 활성슬러지, 미세기포, 용존공기 부상

1. 서 론

DAF(dissolved air flotation)은 미세한 기포(10~100 μ m)를 이용하여 물속에서 수면으로 부상시키면서 고형물을 분리하는 중력분리공정 중 하나이다. DAF는 산업폐수처리에서 널리 이용되고 있으며(Vitasaari, et al., 1995) 미국에서는 수백 개의 하수처리장에서 슬러지 농축에 사용하고 있다(WPCF, 1980).

활성슬러지를 이용한 도시하수의 2차 침전조에 있어서 DAF 공정의 이용 가능성에 대해 최초로 Mulbarger과 Huffman(1970)가 소개하였고, 이들은

수리학적 부하율을 1m³/m²·h, 수리학적 체류시간은 3.4hour로 운전하였을 때 DAF 공정에 의한 고액분리가 CGS(conventional gravity sedimentation)보다 비용이 많이 소요된다고 보고하였다. 그 후 DAF에 관한 많은 연구들에 의해 DAF 공정의 수리학적 부하율이 크게 향상되었으며, 근래에 활성슬러지 공법에 있어 DAF와 심층포기공정(deep tank aeration process)과 결합된 연구가 산업폐수(Severeid, 1979)와 도시하수(Benoit, et al., 1994)에 접목되어 연구되고 있다. 또한, 현재 DAF는 또한 CGS에서 수리학적 부하를 낮추기 위해 DAF 공정을 병렬로 추가시킴으로써 활성

*Corresponding author Tel: +82-63-620-0223, FAX: +82-63-620-0211, E-mail: kwak124@seonam.ac.kr (Kwak, D.-H.)

슬러지 공법을 향상시키는데 많이 이용되고 있으며 (Gnrss, et al., 1996), Bennoit 등(1997)은 CGS를 이용한 활성슬러지 공법에서 DAF 추가 적용으로 인한 성공적인 효율 향상 결과를 발표하였다(Bennoit, et al., 1997).

하수처리과정에서 1년 중 대부분 기간에는 침전 문제가 발생하지 않지만, 기온이 3~12 정도인 겨울철에는 2차 침전조는 COD를 함유한 부유 고형물(suspended solid)을 처리하는데 효율이 급격히 저하되기 때문에 침전조에서 부유 고형물농도가 수천 mg/L 정도가 유출되어 문제가 되고 있다(Kwak, et al., 2005). 이와 같은 CGS가 존재하는 공정에서 발생할 수 있는 문제를 해결하는 방향에 대한 연구가 종종 발표되고 있으나, 활성슬러지 공법의 2차 침전조에 있어서 DAF의 이용은 그다지 보고되고 있지 않다(Jung, et al., 2006). 그러나 최근 DAF 기술은 미세기포의 형성(Lee, et al., 2002) 및 미세기포 분사 장치(Dong-Heui, et al., 2003) 등에서 매우 괄목할 만한 연구 기술 진보를 이루었고 이와 같은 기술을 바탕으로 폐수처리 공정의 효율성 증대를 위하여 활성슬러지 공법에서 CGS의 대안으로 최신 DAF 기술의 적용 연구가 필요하다. 이에 본 연구는 DAF에 의한 활성슬러지 부상 있어서 DAF의 반송비 (recycle flow ratio)의 변화 대한 활성슬러지의 부상 효율의 변화를 조사하였으며 특히, CGS의 비교를 통해 DAF의

Table 1. Composition of synthetic wastewater

Name	Constituent ^{a)}	Concentration(g/L)
Solution 1	K ₂ HPO ₄	21.71
	KH ₂ PO ₄	8.5
	Na ₂ HPO ₄ · 12H ₂ O	44.6
	NH ₄ Cl	1.7
Solution 2	D-Glucose	50
Solution 3	MgSO ₄ · 7H ₂ O	22.5
	FeCl ₃ · 6H ₂ O	0.25
	NH ₄ Cl	46.4
Solution 4	CaCl ₂	27.5
Organic material	Poly-pepton	0.15

a) The constituents were dissolved in one liter distilled water.

CGS의 대체 가능성을 조사하였고, DAF의 온도에 변화에 대한 활성슬러지의 부상특성에 대해 조사하였고 CGS와 DAF에 의한 활성슬러지의 농축정도에 대해 비교 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험장치

Fig. 1에서와 같이 본 실험을 위한 장치는 완전혼합형 회분식 반응기로 반응 유효용적 10L로서 아크릴을 이용하여 제작하였으며, 반응기 하단에는 포기 장치와, 미세기포를 발생하기 위한 가압식 공기 용존 장치(saturator)가 연결되어 있으며, 유출수 배출 라인(line)과 반응조 중앙에 슬러지를 채취할 수 있는 라인(line)이 연결 되어 있다.

2.2. 실험시료

본 실험은 전라북도 N-하수처리장 포기조 내 미생물을 채취하여 실험실에서 Table 1과 같이 합성용액(solution) 4가지를 이용한 합성폐수(synthetic wastewater)를 제조하여 미생물을 순양시킨 후 실험을 실시하였다. 이는 본 실험과 같이 미생물의 처리특성이나 미세한 변화를 파악하기 위해서는 균질의 유입수가 필수적으로 요구되기 때문이다(Bennoit, et al., 1994).

2.3. 실험방법

안정화를 위하여 2주 동안 실험실에서 수리학적 체

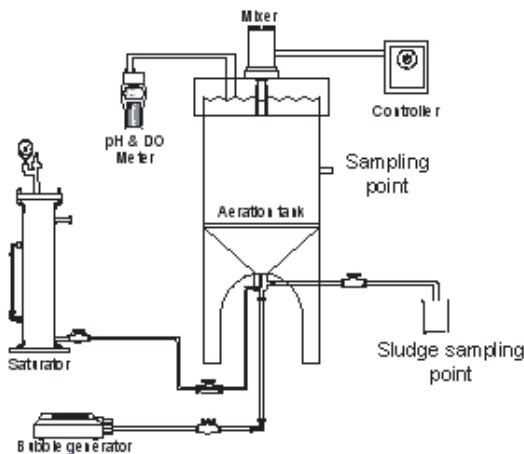


Fig. 1. Diagram of an experimental apparatus for flotation of activated sludge.

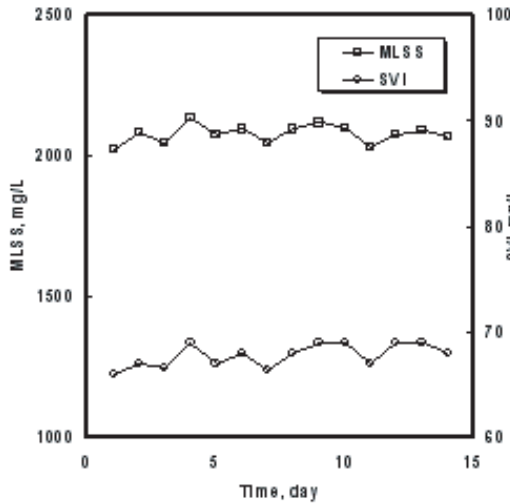


Fig. 2. Variation of MLSS and SVI.

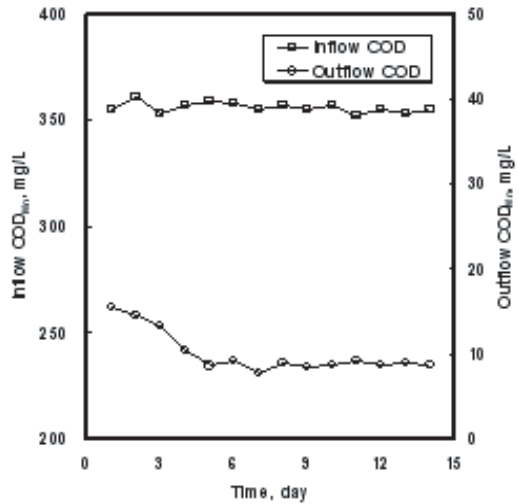


Fig. 3. Variation of COD_{Mn}.

Table 2. Analysis methods and experimental conditions

Item	Method	Average	
MLSS(mg/L)	Standard method	2100	
SVI	Standard method	67	
SDI	Standard method	1.5	
COD _{Mn} (mg/L)	Inflow	350	
	Outflow	9	
DO(mg/L)	Standard method	3.5	
pH	Orion, Model 920A, USA	7.2	
Micro-bubble	size(μm)	Laser Trac, PC2004D, USA	25
	eq./mL	Laser Trac, PC2004D, USA	20,000
Initial turbidity(NTU)	Lqmotte, Model 2008	600	

류시간(HRT)을 24h로 하여 포기조에서 순양을 하였다. 실험의 평균화를 위하여 유입수와 유출수의 유기물 제거효율 변화, 미생물 침전성을 알아 보기 위한 SVI, 미생물 농도 변화를 알아보기 위하여 위해서 MLSS를 측정하였으며, Fig. 2와 Fig. 3은 미생물의 안정화에 있어서 2주 동안의 변화를 나타낸 MLSS, SVI, 유입수·유출수 COD변화의 결과를 보여주고 있으며, 그 결과를 Table 2에 요약하였다. 순양 후 5일이 경과 후부터 안정한 상태로 운전되었으며, 안정화된 상태에서 유기물 제거 효율은 약 99% 정도로 미생물의 활성도가 매우 양호한 조건에서 실험을 실시하였다.

Table 2에서와 같은 평균조건에서 본 실험을 수행하였으며, 유기물의 제거효율은 COD_{Mn}법을 이용하

여 분석하였고, 탁도는 탁도계(Lqmotte, Model 2008)를 이용하여 분석하였으며, 미세기포의 입경 및 분포는 입도 분석계(Laser Trac, PC2004D, USA)를 이용하여 측정하였고 기타 COD, MLSS, SVI의 측정은 standard method에 준하여 실험을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 침전 효율과 부상효율의 비교

CGS(conventional gravity sedimentation)와 DAF(dissolved air flotation)과의 효율 비교 실험을 실시하였다. 처리효율은 탁도와 MLSS 측정하여 알아보았다. 먼저 CGS는 교반기와 포기장치를 멈춘 상태로 부터 30sec 단위로 10min까지, DAF는 Saturator에

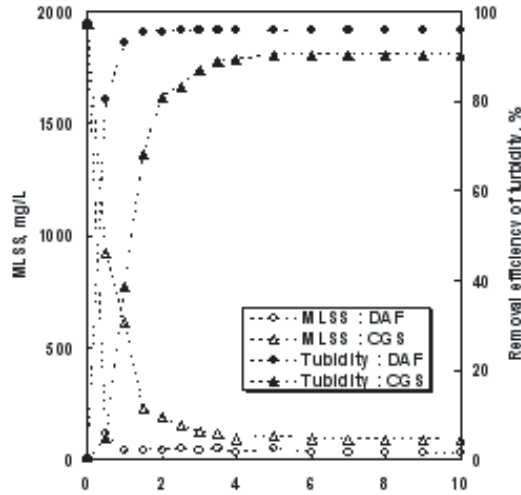


Fig. 4. Comparison of efficiency for sedimentation and flotation by CGS and DAF.

서 수돗물을 채우고 가압장치로 공기를 용해시킨 포화수(milky water)를 처리수량의 10%를 분사하여 CGS와 동일하게 30sec 단위로 Fig. 1의 채취지점(sampling point)에서 분석시료를 채취하여 측정하였다.

Fig. 4에서 MLSS농도와 탁도 제거에 있어 실험 시

간 5min 경과 후부터는 CGS와 DAF의 MLSS 및 탁도 제거율이 90% 이상의 침전 및 부상으로 인한 제거율을 보여주고 있다. 그러나, 탁도제거율에 있어서 DAF 공정의 경우 공기 주입 후 2min 정도 경과 후 평균 95.8%의 처리효율을 보이는 반면, CGS는 5분이 경과 후 90% 정도의 제거율을 나타내고 있다. 이것은 DAF 공정이 CGS 공정에 비해 침전이 잘 되지 않는 미세한 미생물플록을 보다 유효하게 제거함을 보여주는 결과라 판단된다.

3.2. 반송비(recycle ratio)에 의한 부상효율

부상공정에 있어서, 미세기포를 주입하기 위하여 적정량의 반송이 필요하며 이 반송수량은 포화장치(saturator)로 포화수(milky water)를 만들어 반송기에 주입하게 된다. 이때 반송비(recycle ratio)는 처리 대상의 용적(volume)에 대응하여 주입되는 가압수량(volume)의 비율(ratio)을 의미한다.

Fig. 5은 반송비에 따른 부상효율 및 탁도의 제거효율에 대한 실험결과를 보여 나타내고 있으며, Fig. 5(a)에서 반송비는 10%이상에서는 부상효율이 99%로서 큰 변화가 없으며, 활성 슬러지 부상에 있어서 최적 반송비는 10%임을 알 수 있었다. Fig. 5(b)에서 탁도의 제거효율 역시 반송비가 10%가 적정함을 알

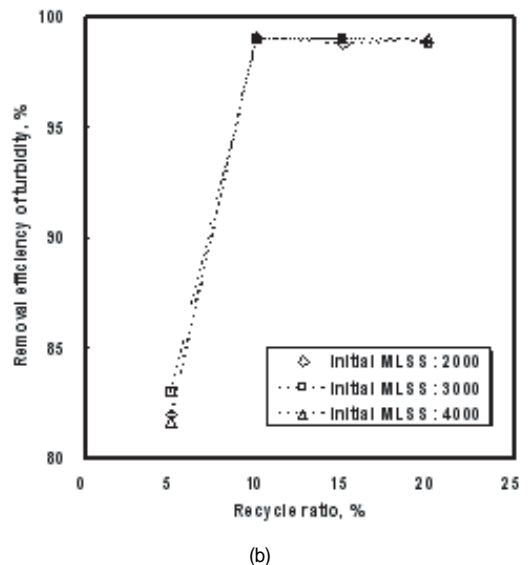
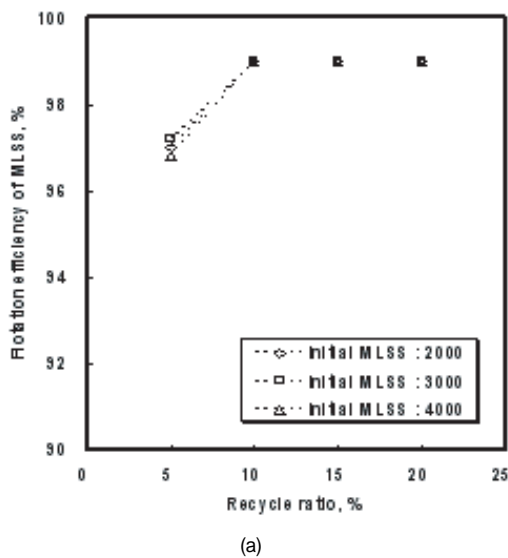


Fig. 5. Flotation efficiency of activated sludge by recycle ratio.

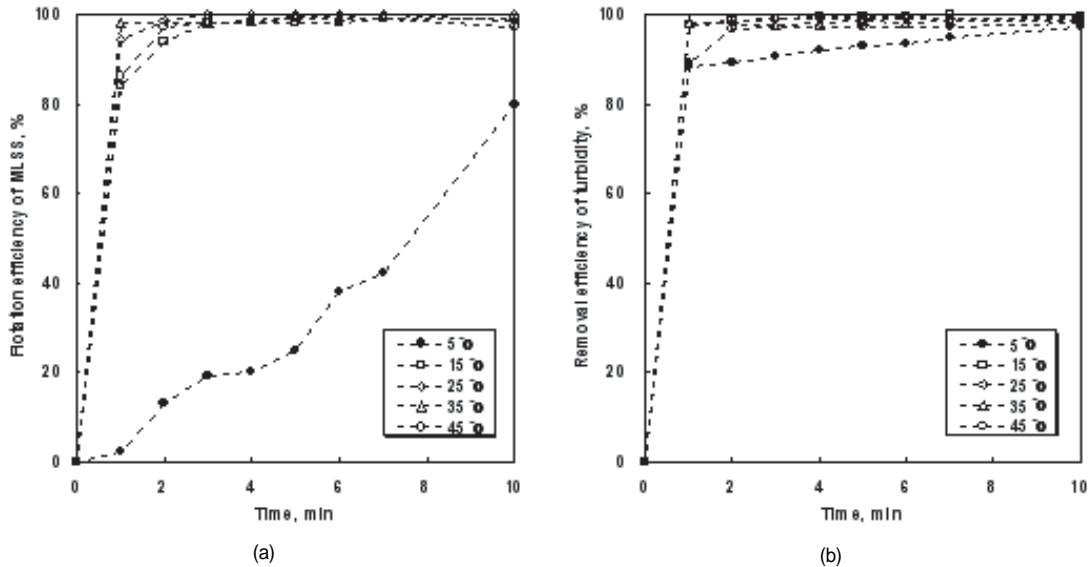


Fig. 6. Flotation efficiency of activated sludge by variation of temperature.

수 있었다.

3.3. 온도 변화에 의한 부상효율

우리나라는 겨울과 여름의 온도차이가 매우 크기 때문에 활성 슬러지의 부상에 있어서 온도 변화에 대한 부상효율 변화에 대한 실험을 실시하였다. 최적 반응비(3.2절)에 의한 결과를 바탕으로 반응비 10% 조건에서 반응기, 시료, saturator의 온도를 일정하게 유지시킨 상태로 부상실험을 실시하였다. 시료의 채취는 1min 단위로 10min까지 하여 분석 비교 하였다.

Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이, 5°C일 경우 부상효율은 급격히 저하되며, 부상 초기 3min 이내에서 온도가 15°C, 25°C, 35°C로 온도가 상승할 경우 부상효율이 상승하였으나 온도 45°C로 상승하면서 다시 부상효율이 감소함을 알 수 있었다. 그러나 온도가 5°C를 제외한 나머지 온도조건에서 4min 이상에서는 부상효율은 거의 차이가 없었다. 또한, 탁도의 제거율의 경우 Fig. 6(b)와 같이 온도가 5°C의 경우가 제거효율이 낮은 것은 Fig. 6(a)의 결과와 일치하지만 MLSS의 부상변화 추세와 탁도의 제거 변화추세가 일치하는 않는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 5°C에서는 완전 부상이 일어나지 않고 슬러지 층이 부상하는 층과 침전하는 층이 반으로 나뉘는 것을

볼 수 있었던 점으로 미루어 DAF에 의해 활성 슬러지가 부상되지 않아 탁도가 제거되지 않았기 때문이 아니라 부상 후 다시 플록의 침강에 의해서 침강된 거대 플록에 의한 탁도 측정에 영향을 끼쳤기 때문이다. 5°C 이하의 저온에 대해서만 DAF에 의한 슬러지 부상에 영향을 받음을 알 수 있었다.

3.4. 슬러지의 농축효과

2차 침전지 대신 DAF를 적용할 경우 장점 중 하나는 슬러지의 농축효과를 얻을 수 있다는 점이다. 본 연구는 Table 2의 활성 슬러지 조건에서 슬러지의 농축정도를 중력침전 (CGS)과 용존공기부상 (DAF)을 비교 실험하였다.

실험결과, Fig. 7는 DAF에 의해 농축된 슬러지의 사진을 나타내고 있으며, 농축실험 결과는 Fig. 8에서와 같이, 중력침전(CGS)에 의해서 포기조의 농축 슬러지 고형물 농도는 약 1.2%(함수율 98.8%)인 반면 DAF에 의한 슬러지 농축 결과에 있어서 농축슬러지 고형물농도는 반응비가 5%일 경우 3.3%(함수율 96.7%), 반응비가 10%, 15%, 및 20%는 모두 3.5%(함수율 96.5%)의 결과를 보였으며, 반응비가 10% 이상에서는 인해 중력침전(CGS)에 비해 용존공기부상(DAF)에 의한 슬러지 농축정도가 약 3배 정도 높

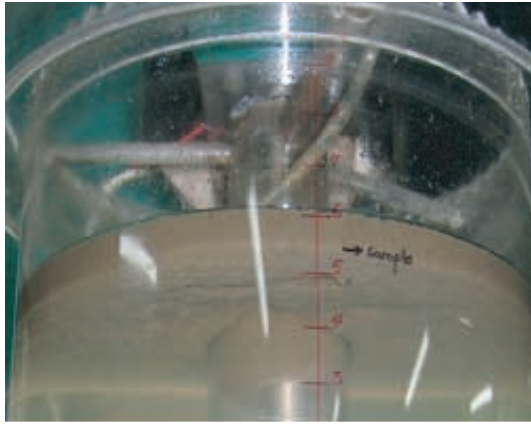


Fig. 7. Photograph of thickened sludge by Dissolved air flotation (DAF).

음을 알 수 있었다. 그러나 부상에 의한 슬러지의 농축농도는 EPA에서는 3.5~5% 정도이며, 이 결과는 공기/고형물의 비, 슬러지의 특성, 고형물 부하율, 고형물응집제의 첨가 여부 등의 영향을 받는다고 보고되었다(USA EPA, 1979). 그러므로, 향후 이 부분에 대한 세밀한 연구가 필요할 것이다.

4. 결 론

2차 침전조의 슬러지 처리에 있어서 DAF공정을 도입할 경우 CGS공법에 비해 본 실험의 조건에서 슬러지의 처리율이 95% 이상 도달하는 시간이 2min 정도로 보편적으로 운전하는 CGS공정보다 소요시간 30분에 비해 효과적임을 알 수 있었으며, 그 때의 DAF 최적 반송비는 10%정도가 유효함을 알 수 있었다. 또한 슬러지의 농축에 있어서도 역시 CGS공정에 비해 3배 이상의 슬러지 농축 농도를 보임으로서 CGS공정에 비해 유리함을 알 수 있었다. 한편, 공기/고형물의 비, 고형물 부하율, 고형물응집제의 첨가 여부 및 불안정한 슬러지의 상태 등의 조건에서 향후 세밀한 연구가 요구된다.

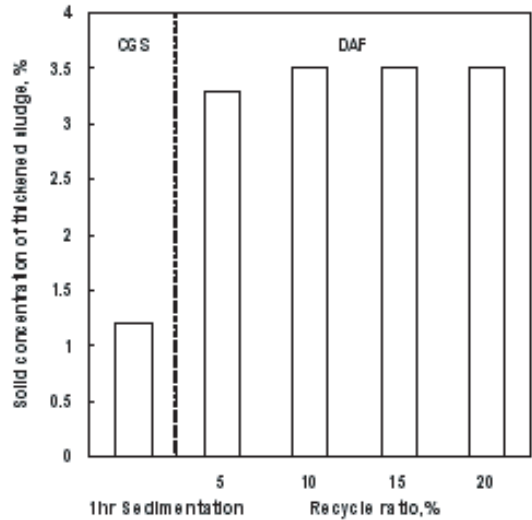


Fig. 8. Variation of solid concentration of thickened sludge by CGS and DAF.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구사업 (2005년도 특정기초연구, 과제번호 R01-2004-000-11029-0)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Benoit, H., Peter-Frohlich, A., Schmidt, V. and Schuster, C. (1994). Biological treatment of municipal wastewater in Berlin, using a 10 m deep basin and flotation for secondary clarification. *Wat. Sci. Tech.*, **30**(4) 81-88.
2. Benoit, H., Muller, G. and Schuster, C. (1997). Upgrading of waste treatment plants with flotation. Preprints of IA WQ Conference Upgrading of Waste Water Treatment Systems, Kalmar, Swedenn, May 25-28, 1997. 8p.
3. Dong-Heui Kwak, Seok-Dockko, (2003) Effect of controlling the of microbubble in DAF. *Proceeding of 2nd International Workshop on Flotation*, B-5, 157-167.
4. Gnriss, R. and Peter-Frohlich, A. (1996). Biological treatment of municipal wastewater with deep tanks and flotation for secondary clarification. *Wat. Sci. Tech.*, **34**(3-4), 257-265.
5. Kwak, D.-H., Jung, H.-J., Kim, S.-J., Won, C.-H., Lee, J.-W. (2005) Separation Characteristics of Inorganic Particles

- from Rainfalls in Dissolved Air Flotation: A Korean Perspective. *Separation Science and Technology*, **40**, pp. 3001-3016.
6. Jung, H.-J., Choi, D.-Y., Kim, S.-J., Lee, J.-W., and Kwak, D.-H. (2006) Removal Efficiency of Activated Sludge Floes in Dissolved Air Flotation Using Population Balance Model. *Korean Journal of Chemical Engineering*, **23**(2), pp. 271-278.
 7. Lee, Sang-hun. Han, Mooyoung. (2002) The Effect of Bubble Bed Depth on Removal Efficiency in DAF Process. *Proceeding of International Workshop on Flotation in Water and Wastewater Treatment*.
 8. Mudllbarger, M and Huffman, D. (1970). Mixed liquor solids separation by flotation. *Journal of the sanitary Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, **96**(SA 4), 861-871.
 9. Severeid, D.E. (1979). Development of an improved secondary treatment process. *Tappi J.*, **62**(2), 61-63.
 10. U.S.A. EPA (1979) U.S. Environmental Protection Agency, *Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal*, Washington, D.C.
 11. Viitasaari, M., Jokela, P. and Heinanen J. (1995). Dissolved air flotation in the treatment of industrial wastewaters with a special emphasis on forest and foodstuff industries. *Wat. sci. Tech.*, **31**(3-4) 299-313.
 12. WPCF (1980). Sludge thickening. Manual of practice No.FD-1. Water Pollution Control Federation, Washington, D.C.