

전해부상에 의한 상수 슬러지 농축효율

Sludge Thickening using Electro-Flotation in Water Treatment Plant

이준¹ · 한무영² · 독고석³ · 박용효⁴ · 김충일² · 김미경^{2,*}

Lee, Jun¹ · Han, Mooyoung² · Dockko, Seok³ · Park, Yonghyo⁴ · Kim, Tschungil² · Kim, Mikyung^{2,*}

1 금호엔지니어링.

2 서울대학교 지구환경시스템 공학부

3 단국대학교 토목환경공학부

4 한국수자원공사

(2004년 11월 4일 논문 접수; 2005년 3월 17일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Gravity thickening process has been widely used in WTP sludge thickening at domestic water treatment plant. The operation method of the process is very simple, however, the process requires long detention time about 24~48 hours for sludge thickening, uses polymer, and low total solids of thickened sludge to increase sludge thickening efficiency. To solve there problems, we studied about flotation process, especially, electro-flotation (EF) process in WTP sludge thickening. Electro-flotation process is simpler than dissolved-air-flotation(DAF) process because EF needs only electrode and current to generate micro-bubbles and the operation is easy. This study was performed at two batch columns to compare interface height, total solids, effluent turbidity between an electro-flotation thickening and a gravity thickening. According to the result, an electro-flotation thickening was that interface height was decreasing, total solids had high concentration, and effluent turbidity was low in comparison with a gravity thickening. Also, it will make the high efficiency of following process, such as a dehydrating process and digestive process, because of high total solids and low moisture content in the sludge.

Key words: Gravity thickening, Electro-flotation thickening, Interface height, Total solids, Effluent turbidity

주제어: 경사판, 저류벽, 유공정류벽, 추적자실험, Morill 지수, Modal 지수, 단락류 지수

*Corresponding author Tel: +82-2-880-7375, FAX : +82-2-880-7376, E-mail: mkkim@waterfirst.snu.ac.kr (Kim, M.K.)

1. 서 론

정수처리는 크게 수돗물 생산을 위한 수처리 공정과 이 과정에서 발생되는 배출수 처리 공정으로 구분할 수 있다. 대부분의 정수처리에서는 두 종류의 배출수가 발생하는데, 하나는 침전지에서 배출되는 침전 슬러지이고, 다른 하나는 역세척 과정에서 발생하는 역세척 슬러지이다. 이를 슬러지의 양은 원수의 특성, 응집제 사용량, 정수공정의 성능, 침전지의 효율과 슬러지 배출방법, 그리고 역세척 빈도 등에 의해 결정된다. 또한, 배출수 처리는 농축, 탈수, 소화, 매립공정으로 나눌 수 있으며, 이 중 농축공정의 목적은 후속공정에서 슬러지를 처리효율을 향상시키는데 있다. 농축공정에서 슬러지의 체적을 줄이게 되면 후속공정의 용량을 감소시켜 처리시간과 경제성을 향상 시킬 수 있다.

현재까지의 농축공정으로는 중력 침강식 농축이 대부분의 정수장에서 사용되어 왔다. 중력 침강식 농축의 경우 시설과 운전이 간단하지만, 24~48시간 정도의 긴 체류시간을 필요로 하며, 농축효율을 향상시키기 위해 폴리머를 사용해야 한다(환경부, 1997). 또한, Bulking 현상이 나타날 경우 슬러지가 월류하게 되는 문제점에 대한 대안이 없으며, 농축슬러지의 총고형물 농도가 1~2% 정도밖에 되지 않아 대용량의 탈수조를 필요로 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 도입된 방법이 부상식 농축공정인데 현재까지는 용존공기부상법(DAF: Dissolved air flotation)이 주로 이용되어 왔다. 이러한 용존공기부상법을 이용한 슬러지 농축은 슬러지와 기포가 충돌하여 수면으로 부상되어 농축시킴으로써 Bulking에 대한 문제가 없으며, 농축슬러지의 총고형물 농도가 2~3%로 중력 침강식에 비해 고효율의 농축이 가능하다. 하지만, 용존공기부상법의 경우 기포발생을 위해 가압탱크, 순환펌프와 같은 추가적인 설비가 필요하고, 높은 압력을 유지하기 위한 동력비가 소요된다. 이에 반해 전해부상법(EF: Electro-flootation)은 기포발생을 위해 금속극판과 전류만을 필요로 하기 때문에 설비가 간단하고, 동력비가 적게 소요된다. 또한 용존공기부상법과 전해부상법에서 운전조건에 따른 기포의 크기를 측정하여 본 결과, 전해부상에서도 스테인레스 극판

을 사용할 경우 용존공기부상과 비슷한 크기의 기포가 발생된다는 것을 알 수 있었다(Han et al., 2002a; Han et al., 2002b). 즉, 용존공기부상법보다 간단한 설비와 저렴한 운전비로 동일한 효과를 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구의 목적은 슬러지 농축에 있어서 중력 침강식과 전해부상식 농축을 적용하여 각각의 농축 방법에 따른 계면 높이, 농축된 슬러지의 총고형물 농도 그리고 농축 후 배출수의 잔류탁도를 측정함으로써 기존의 중력식과 전해부상에 의한 농축 방법을 비교 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1. 실험 재료 본 연구에서 사용된 슬러지는 경기도 소재 S 정수장에서 침전 슬러지와 역세척 슬러지를 저장하고 있는 조정조로부터 농축조로 유입되는 슬러지를 채수하여 사용하였다. 슬러지의 초기 고형물 농도는 0.05~2.55 %의 범위에서 0.5%씩 증가된 농도를 사용하였으며, pH는 6.62~7.26 이었다. 또한 1.55%, 2.05%, 2.55% 농도의 슬러지는 농축을 위한 고분자 응집제로 폴리아크릴아미드계 폴리머(모델명 : K320A)를 사용하였다.

2.2. 실험 장치

본 연구에 사용된 농축조의 반응조는 Fig. 1과 같이 직경 6cm, 높이 50cm의 1/4원형 아크릴 회분식 반응조를 제작하여 실험을 실시하였으며, 실험에 사용된 조건은 Table 1과 2에서 보여주고 있다. 중력 침강식 농축장치는 체류시간을 2~120분간 변화시켜 실험을 실시하였고, 전해부상에서 사용하는 극판은 산화에 대한 저항력이 강한 스테인레스를 양극으로 사용하여 실험을 실시하였다. 전해부상에서 사용하는 극판의 음극은 알루미늄이나 스테인레스를 사용하나 적절한 크기의 기포발생을 위해 스테인레스를 사용하였으며 (Han et al., 2002c), $3 \times 5 \times 0.05\text{cm}^3$ 크기의 극판 3개

Table 1. Experimental condition of gravity thickening

Sludge sample	Sludge from S. WTP
Initial total solids (%)	0.05~2.55 (with increment of 0.5)
HRT(min)	2~120

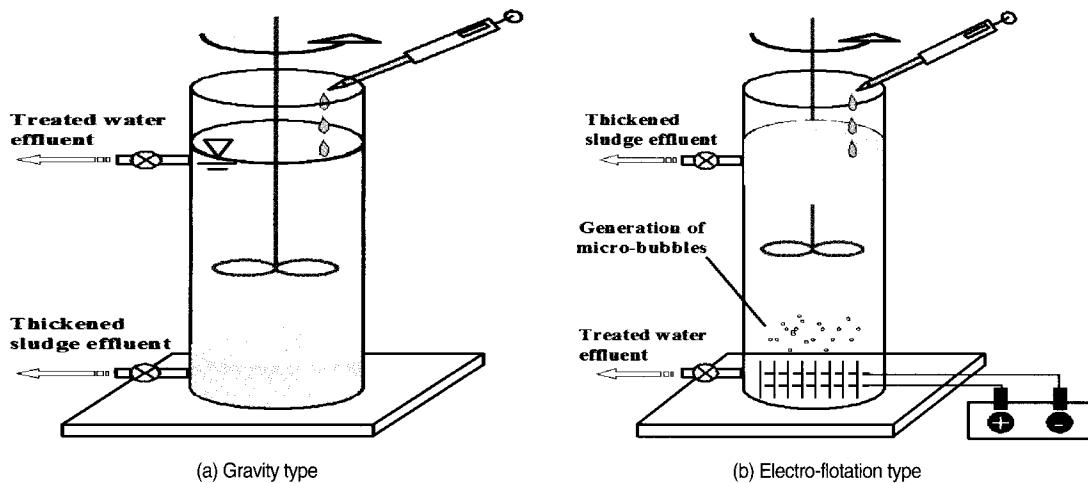


Fig. 1. Thickening Reactor.

Table 2. Experimental condition of EF thickening

Sludge sample	Sludge from S. WTP
Electrode	Stainless steel
Current(mA)	300
Initial total solids (%)	0.05~2.25 (with increment of 0.5)
Reaction time (min)	2~10 (with increment of 2)
Generated total Bubble volume conc.(ml/ml)	6.90~34.52

를 0.5cm 간격으로 설치하였다. 또한 기포의 발생량을 동일하게 하기 위해 전류값을 300mA로 고정시켰다. 이렇게 제작된 반응조에 대하여 Fig. 1과 같이 각 반응조에 슬러지를 유입시킨 후 슬러지가 균일하게 반응조에 섞일 수 있도록 교반기로 교반을 해주었다. 중력침강식 농축조는 농축시간을 변화시켰으며, 전해부상식 농축에서는 미세기포를 발생시킨 다음 기포발생시간에 따른 슬러지의 계면 높이, 농축 슬러지의 총고형물 농도 그리고 배출수의 잔류탁도를 측정하였다. 총고형물 농도가 1.55~2.55%로 고농도인 경우에는 고분자용접제를 주입하였다. 고분자용접제의 주입량은 총고형물 농도가 1.55%, 2.05%, 2.55%로 증가함에 따라 각각 5ppm, 10ppm, 20ppm으로 증가하며 실험하였다.

Table 3. Bubble volume concentration depending on reaction time in EF

Reaction time in EF(min)	2.5	4.5	7.0	9.5	12.0	14.5
Bubble volume concentration(ml/ml)	8.19	16.38	24.57	32.76	40.95	49.14

3. 실험 결과

각 농축 방법의 농축 특성 비교 시 중력침강식 농축과 전해부상식 농축은 초기 고형물 농도에 대해 시간에 따른 계면 높이, 총고형물 농도 그리고 배출수의 잔류탁도 비교가 가능하다. 즉, 시간에 대한 함수로 비교가 가능하다. 그러나 용존공기부상식 농축의 경우 시간에 대한 함수가 아닌 기포발생량에 대한 함수이므로 중력 침강식 농축과의 비교보다는 전해부상식 농축과의 비교가 가능하다. 따라서, 전해부상법에서 기포발생 시간에 따른 기포발생량을 측정하였다 (Table 3).

3.1. 계면의 높이 비교

0.05~2.55%의 슬러지에 대해 중력 침강식 농축과 전해부상식 농축의 계면 높이를 체류시간 및 반응시간에 따라 비교해 본 결과 Fig. 2와 같다.

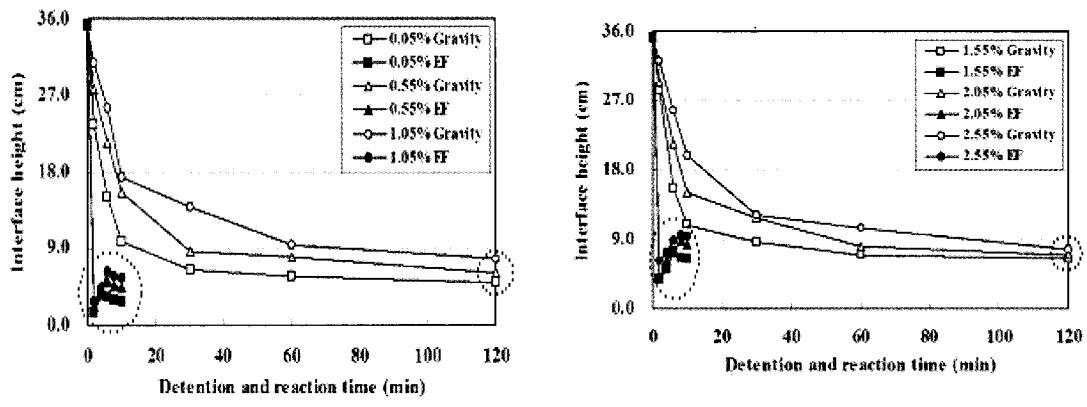


Fig. 2. Comparison of interface height depending on detention and reaction time in gravity and EF thickening.

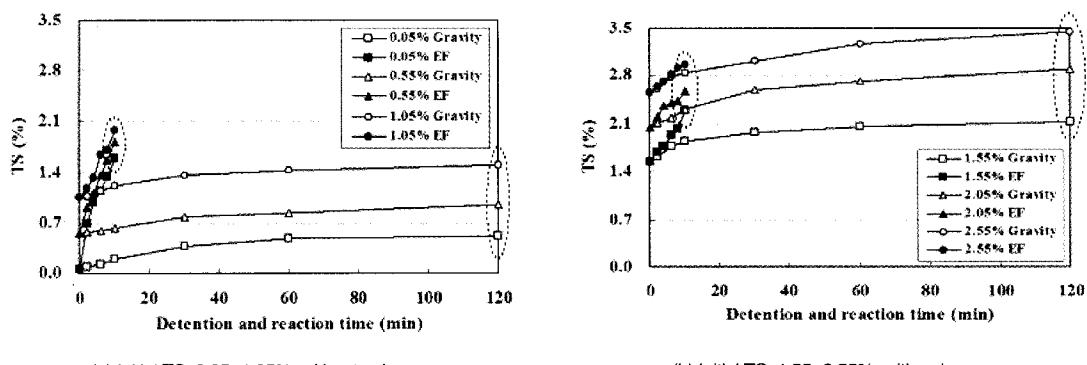


Fig. 3. Comparison of TS depending on detention and reaction time in gravity and EF thickening.

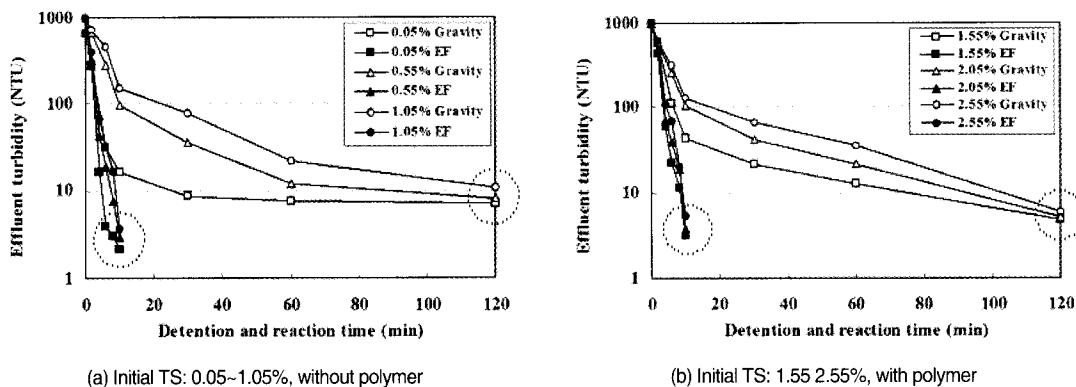
초기 고형물 농도와 관계없이 중력 침강식 농축의 경우 슬러지의 계면 형성은 120분 정도의 긴 체류시간에 걸쳐 일어나지만, 전해부상식 농축에서 슬러지의 계면 형성은 8~10분 사이에 완료되고, 안정화 단계로 접어드는 것을 볼 수 있다. 중력 침강식 농축은 오랜 체류시간이 경과해야 슬러지의 계면이 안정화 단계에 접어드는 것에 비해 전해부상식 농축은 계면 형성이 있어서 약10분 전후로 매우 빠른 시간 안에 완료됨을 알 수 있다. 한편, 슬러지의 초기 고형물 농도가 높아 고분자응집제를 사용하였을 경우, 전해부상식 농축에서는 기포발생이 끝난 10분에서의 계면 높이가 증가하였으나 중력 침강식 농축에서는 체류시간이 120분 정도 경과하여도 계면 높이의 증가가 거의 일어나지는 않았다.

3.2. 총고형물 농도 비교

중력 침강식 농축과 전해부상식 농축의 총고형물 농도를 비교한 결과는 Fig. 3과 같다.

전해부상식 농축은 중력 침강식 농축에 비해 모든 초기 고형물 농도에서 짧은 시간 내에 높은 총고형물 농도를 갖는 슬러지를 얻을 수 있었고, 슬러지의 초기 고형물 농도가 0.05% 낮을 경우 초기 고형물 농도보다 약30배 정도 더 높은 농도의 농축 슬러지를 만들 수 있었다. 또한 처리시간을 지속시켜 주었을 때 그래프에 나타난 이후부터는 큰 변화가 나타나지 않았다.

한편, 슬러지의 초기 고형물 농도가 높아 고분자응집제를 사용하였을 경우, 계면 높이 변화 결과와 마찬가지로 고분자응집제는 중력 침강식 농축에 좀 더

**Fig. 4.** Comparison of effluent turbidity depending on detention and reaction time in gravity and EF thickening.

유리하게 작용한다. Fig. 4(b)로부터 중력 침강식 농축의 경우 초기 농도에서 120분 경과한 후 최종 농도로의 증가율이 고분자응집제를 사용하지 않았을 때에 비해 크다. 그러나 전해부상식 농축은 고분자응집제를 사용하여도 초기 농도에 비해 최종 슬러지의 고형물 농도의 증가율이 크지 않다. 앞의 계면 높이 결과에서와 같이, 전해부상식 농축은 중력 침강식 농축에 비해 고분자응집제의 영향을 덜 받는 것으로 생각된다. 또한, 계면 높이 결과에서 8~10분 정도 경과하면 슬러지 층의 높이 변화가 거의 없어 총고형물 농도도 안정될 것으로 판단하였으나, 10분에 이르기까지 농도가 증가하는 결과를 얻었다. 이 측정값은 슬러지의 계면 높이가 변화하지 않은 상태에서 변하였는데, 이는 슬러지 농축이 완료된 후에도 농축 슬러지 내부의 수분이 중력에 의해 하부로 빠져나가기 때문인 것으로 판단된다. 실제 본 연구에서도 10분 뒤에 기포발생을 중지하고, 약2시간 정도를 정치시킨 후 슬러지의 총고형물 농도를 측정해 본 결과 총고형물 농도값은 약2.16%까지 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 전해부상식 농축조 운전에 있어서 수리학적 부하율뿐만 아니라 고형물의 체류시간을 고려하여 운전하면 보다 높은 고형물 농도의 슬러지로 농축하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 중력 침강식 농축과 비교해 보면 훨씬 짧은 시간에 고농도의 슬러지로 농축할 수 있었는데, 침강식의 경우 슬러지를 물 속에서 농축시키기 때문에 고형물 농도를 증가시키는 데는 한계가 있을 수밖에 없다. 하지만, 부상식의 경우 슬러지를 수면위로 부상시켜 농축을 시키기 때문에 침강식 보다는 고농도의 슬러지 농축이 가

능하다.

3.3. 배출수의 잔류탁도 비교

중력 침강식 농축과 전해부상식 농축을 체류시간 및 반응시간에 따른 배출수의 잔류탁도를 Fig. 4와 같이 비교하였다.

계면 높이 변화와 농축된 슬러지의 총고형물 농도의 결과와 마찬가지로, 배출수의 잔류탁도 또한 전해부상식 농축의 경우 약10분 이내에 매우 양호한 수질의 배출수가 생산되며, 반응시간을 지속시켜 주었을 때 더 이상 낮아지지 않았다. 슬러지의 초기 고형물 농도가 0.05~1.05%일 경우, 중력 침강식 농축은 120 분이 경과하여도 10NTU 내외의 높은 잔류탁도를 보이고 있으나, 전해부상식 농축은 10분 이내에 2~3NTU 정도의 낮은 잔류탁도를 나타내고 있다. 배출수 수질기준과 관련된 추가적인 항목에 대한 분석이 필요하겠지만, 우선적으로 탁도 측면에서 볼 때 전해부상식 농축의 배출수 수질이 매우 양호하다. 또한 슬러지의 초기 고형물 농도가 0.05~1.05%로 낮을 경우 고분자응집제를 사용하지 않고 운전하기 때문에 배출수는 하천에 방류하지 않고 착수정으로 회수할 수 있는 가능성 또한 기대된다.

한편, 슬러지의 초기 고형물 농도가 1.55~2.55%로 높을 경우 전해부상식 농축의 배출수 잔류탁도는 3~5NTU 정도로 매우 양호하다. 또한 중력 침강식 농축의 경우 초기 고형물 농도가 1.55~2.55%로 높아 고분자응집제를 사용했을 경우, 120분이 경과하였을 때 그 잔류탁도는 6~7NTU 내외로 초기 고형물 농도가 낮을 때 보다 더 양호한 잔류탁도를 나타내었

다. 중력 침강식 농축의 경우 고분자응집제의 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 정수장에서 발생되는 상수 슬러지를 처리하는 방법으로 중력 침강식과 전해부상식 농축을 사용하여 0.05~2.55%의 초기 고형물 농도를 갖는 슬러지에 대해 농축 실험을 실시하였다. 두 가지 농축 방법에 대한 농축 효율 및 특성을 비교하기 위해, 슬러지의 초기 고형물 농도에 따른 계면 높이, 농축된 슬러지의 총고형물 농도 그리고 배출수의 잔류탁도를 측정하였다. 결과에 따른 세부적인 결론은 다음과 같다.

1) 각 농축방법에서 계면의 높이를 비교해 볼 때, 중력식 농축은 오랜시간이 경과해야 안정화 단계의 계면을 형성하는 반면, 전해부상식 농축의 경우는 8~10 분 사이에 안정된 계면을 형성하였다.

2) 총고형물의 농도 역시 전해부상식 농축은 초기 저농도 슬러지의 경우 농축 이후 매우 높은 농도의 총고형물 농도를 보였으며, 초기 고농도 슬러지의 경우 역시 중력식 농축에 비해 짧은 시간에 높은 농도로 농축되었다. 또한, 부상되어 농축된 슬러지는 점차 공기와의 접촉이 길어지면서 총고형물의 농도가 더욱 증가하는 양상을 보였다.

3) 배출수의 잔류탁도는 이전 결과와 마찬가지로 6~10NTU의 상대적으로 높은 탁도를 보이는 중력식 농축에 비해 짧은 시간 내에 2~5NTU인 낮은 탁도의 배출수를 생산해 내었다.

4) 또한, 측정된 계면높이, 총고형물 농도, 잔류탁도의 실험을 통해 초기 총고형물 농도가 높은 슬러지에 고분자응집제를 사용하였을 경우, 전해부상식 농축은 중력식 농축에 비해 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있었다.

위 결론으로 미루어 볼 때, 기존의 중력식 슬러지 농축에 비해 전해부상에 의한 농축이 짧은 시간 내에

더 높은 효율을 보임을 알 수 있었다. 일반적인 상수 슬러지의 초기 고형물 농도가 1% 미만인 점을 감안할 때 전해부상을 이용한 농축은 효율이 매우 높음을 알 수 있다. 그러나 하천수와 같이 무기성 고형물을 다량 포함하고, 특히 우수기의 경우 슬러지의 농도는 높아져 배출수 농도가 3~4%를 상회하게 된다. 이러한 경우 중력 침강식이 더 좋은 대안이 될 수 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하고 개발할 경우, 수리학적 부하율을 증가시켜 설계용량을 감소시킬 수 있다. 또한 후속공정인 탈수공정에 있어서도 함수율이 낮으며, 총고형물 농도가 높은 슬러지를 처리하는데 따른 비용 및 시설이 감소할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 환경부(1997), 상수도 시설기준.
한국수자원공사(1990), 정수장 배출수의 처리방안에 관한 연구.
American Water Works Association (1999), *Water Quality and Treatment 5th Ed*, McGraw Hill.
Bratby, J.R. and Ambrose, W.A. (1995), Design and control of flotation thickeners, *Wat. Sci. & Tech.*, **31** (3-4), pp. 247-261.
Han, M.Y., Kim, W.T., Docko, S. (2001), Collision efficiency factor of bubble and particle (bp) in DAF: Theory and experimental verification, *Wat. Sci. & Tech.*, **43**(8), pp. 139-144.
Han, M.Y., Park, Y.H., Lee, J. and Shim, J.S. (2002a), Effect of pressure on bubble size in dissolved air flotation, *Wat. Sci. & Tech.: Water Supply*, **2**(5-6), pp. 41-46.
Han, M.Y. and Park, Y.H. (2002b), Size characteristics of micro-bubbles according to applied voltage and electrode materials, *J. of KSWW*, **16**(6), pp. 663-339.
Han, M.Y. and Shin, M.S. (2002c), The effect of electrode materials on removal efficiency of turbidity by batch electroflootation, *J. of KSWW*, **16**(1), pp. 87-92.
Huisman, L. (EE009/86/1), *Sedimentation and flootation*, IHEE(Netherlands).
Tambo(1995), 浄水の技術, 技報堂, Japan.