



BNR 하수처리시스템에서 효과적 고형물 분리를 위한 DAF 공정의 적용과 처리특성

Treatment Characteristics and Application of DAF Process for Effective Solid Separation in BNR Municipal Wastewater Treatment System

곽동희^{1*} · 유대환²

Kwak, Dong-Heui^{1*} · Rhu, Dae-Hwan²

1 서남대학교 환경화학공학과 · 2 (주)부강테크

(2010년 2월 20일 접수 ; 2010년 4월 2일 수정 ; 2010년 2010년 5월30일 채택)

Abstract

Many plants have been improved to adapt the target of the biological treatment processes changed from organics to nutrients since the water quality criteria of effluent was reinforced and included T-N and T-P for the municipal wastewater treatment plant. To meet the criteria of T-N and T-P, the conventional biological reactor such as aeration tank in activated sludge system is changed to the BNR (biological nutrient removal) processes, which are typically divided into three units as anaerobic, anoxic and oxic tank. Therefore, the solid separation process should be redesigned to fit the BNR processes in case of the application of the DAF (dissolved air flotation) process as an alternatives because the solid-liquid separation characteristics of microbial flocs produced in the BNR processes are also different from that of activated sludge system as well.

The results of this study revealed that the microbial floc of the anaerobic tank was the hardest to be separated among the three steps of the unit tanks for the BNR processes. On the contrary, the oxic tank was best for the removal efficiency of nutrients as well as suspended solid. In addition, the removal efficiency of nutrients was much improved under the chemical coagulation treatment though coagulation was not indispensable with a respect to the solid separation. On the other hand, in spite that the separation time for the microbial floc from the BNR processes were similar to the typical particles like clay flocs, over 2.32×10^3 ppm of air volume concentration was required to keep back the break-up of the bubble-floc agglomerates.

Key words : DAF, Bubble, Microbial floc, BNR, Flotation

주제어 : 용존공기부상, 기포, 미생물 플록, 생물학적 영양소 제거, 부상

1. 서론

부상공정에서 기포의 입자는 약 10~120 μ m의 범위에 존재하며(Edzwald, 1995; Han et al., 2002) 이 기포는 자체

의 부력에 의하여 상승력을 가진다. 기포가 플록입자에 결합하는 물리적 작용은 다음의 3가지 현상으로 정의할 수 있다 (Vrablick, 1959; Packham, et al., 1972).

* Corresponding author Tel:+82-63-620-0223, Fax:+82-63-620-0211, E-mail: kwak124@hanmail.net(Kwak, D.)

- 플록입자에 기포의 부착(adhesion) : 여기에는 기포의 핵형성과정(process of nucleation)이 포함된다.
- 형성된 플록에 의한 상승기포의 포집(trapping)
- 플록 형성시 플록구조내부에 기포의 흡수(absorption) 및 흡착(adsorption)

이러한 물리적 작용에 의한 기포와 플록입자간의 결합에 의한 기포-플록 응집체(bubble-floc agglomerate) 입자의 형성은 다음의 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

이와 같은 기포-플록 응집체의 형성에 있어서 기포와 플록간의 부착 정도는 플록의 물성에 기초한 초기 부착효율(initial adhesion efficiency)에 따라 달라지며, Kwak 등(2005)에 따르면 무기성 고흡물인 점토입자는 이 초기 부착효율이 0.3 정도로 낮은 반면 생물학적 플록은 통상적인 초기 부착효율의 범위인 0.3~0.4에서 결정되어지는 것으로 알려져 있다(곽동희 등, 2004; Jung et al., 2006; Kwak et al., 2009). 활성슬러지공정과 같은 생물학적 플록의 성장단계별 초기 부착효율은 대수성장기에는 낮은 값을 나타내며 내생호흡단계에서 상승하는 것으로 보고되어진 바 있다. 이러한 초기 부착효율의 차이는 활성슬러지공정의 포기조(aeration tank)에서 성장하는 플록에 대한 것으로써 동일한 미생물 플록의 성장곡선에서 얻어진 결과이다.

한편, 국내 하수처리시설은 1970년대부터 활발히 건설되어왔으나 시간이 경과함에 따라 많은 처리장에 시설 노후화

의 개량과 처리효율 향상을 위한 개선이 요구되고 있다. 특히 기존 처리장은 대부분 표준2차 처리공정인 활성슬러지공정과 같은 유기물 처리공정이 주류를 이루고 있어 근래에 대내외적으로 질소인체제의 필요성이 대두되고 법적인 관리기준도 강화되면서 고도처리공정으로의 전환이 빠르게 이루어지고 있다. 이에 따라 대부분의 하수처리장 개량시, 기존 활성슬러지 공정의 호기조를 다양한 방식의 BNR(biological nutrient removal) 공정으로 개선하고 있으나, 기존의 중력식 침전조에 대한 시설개량과 효율 향상을 위한 연구는 활발히 진행되고 있지 못하고 있다. 최근에는 BNR공정으로의 개량이나 신규 시설의 도입 시, 생물반응조의 활성슬러지 농도를 적절히 조절하거나 고액분리를 효과적으로 달성하기 위하여 영양소제거공정에 맞춘 생물학적 플록의 분리에 대한 연구가 시도되고 있다. 여기서 부상분리공정은 적은 시설로 빠르게 고액분리가 가능하며(김성진 등, 2006), 생물반응조의 미생물 농도를 고농도로 유지할 수 있어 유용한 대안으로 부상하고 있다.

BNR공정에서의 부상분리는 생물학적 플록의 물성에 의해 부상효율이 좌우될 것이며, 기존의 연구정보를 활용하여 생물학적 플록의 부상특성을 예측할 수 있다. 그러나 근래에 건설되어지고 있는 BNR 공정의 생물반응조는 혐기성조(anaerobic tank), 무산소조(anoxic tank) 그리고 산소조(oxic tank)와 같이 생육환경이 각각 다른 상태에서 미생물 플록이 형성되어지므로 활성슬러지와 같은 단일 성상의 미생물 플록의 부상특성을 그대로 적용하기는 곤란하다.

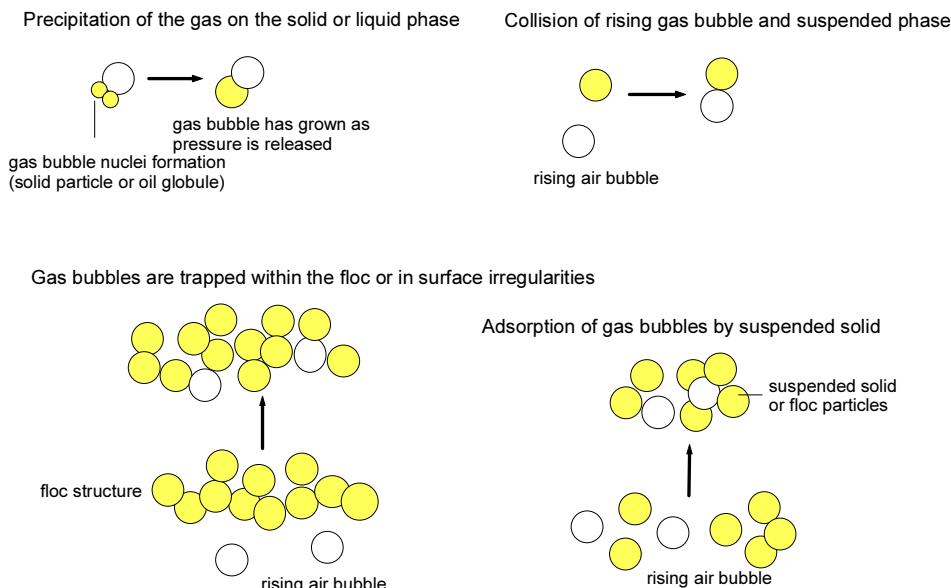


Fig. 1. Schematic diagram of float (floc-bubble agglomerates) formation.

본 연구에서는 이와 같은 현실적인 필요성에 따라 BNR 공정에서 생물학적 미생물 플록의 분리를 위해 DAF 공정의 도입에 있어서, 적용지점의 선택과 효과적인 고흡물 분리 및 부상특성을 파악하고자 일련의 실험을 실시하여 실질적 연구정보를 제공하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 회분식 DAF 부상분리 컬럼을 제작하여 실험을 실시하였으며 다음의 Fig. 2에 나타난 것처럼 모든 실험조건을 동일하게 적용하도록 하여 실험오차를 줄일 수 있도록 타이머와 교반장치에 제어설비를 부착하여 구성하였다. 미세 기포를 주입하는 공기의 양도 동일하도록 Compressor를 사용하지 않고 일반 공기펌페(air bomb)를 활용하였다. 실험과정에서 Jar test와 같이 별도의 부상

실험을 위해서 Compressor를 사용하여 saturator를 인위적으로 수동 조작하고 미생물 플록에 대한 부상분리를 실시하였다.

2.2 시료 및 분석방법

본 연구에서 사용한 시료는 BNR 공정으로 건설된 J시 하수종말처리장의 생물반응조에서 세부 공정별(혐기, 무산소, 산소조)로 미생물 현탁액을 채취하여 본 실험에 적용하였다. 시료는 시료채취 즉시 실험을 실시하였으며, 확인실험이 필요한 경우 시료냉장고에 보관하여 시료 성상의 변화를 최소화 하도록 하였다. DAF batch tester의 부상시간은 10min으로 부상이 끝나면 부상조 하단 20% 지점에서 시료를 채취하여 분석하였다.

본 실험 장치에서의 시료채취는 pilot plant의 원수, 부상조 유출수가 기본 분석시료가 되므로 feeding tank, flotation outlet 등의 위치에서 시료를 채취하여 이와 더불어

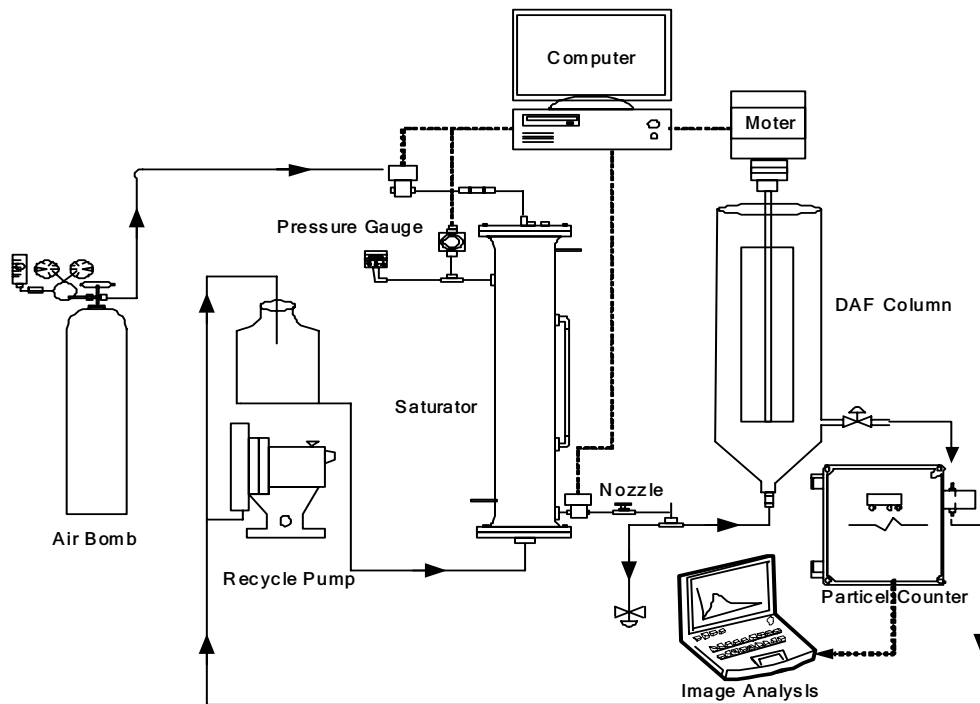


Fig. 1. Schematic diagram of batchwise DAF pilot plant.

Table 1. Characteristics of sludge samples taken from J municipal wastewater treatment plant

Processes	BOD	SS	T-N	PO4-P	T-P	Turbidity
Anaerobic	1,714	3,250	212.3	116.3	133.5	1,825
Anoxic	1,578	3,020	194.5	97.5	116.1	2,200
Oxic	1,162	2,880	171.2	72.1	93.9	2,095

어 부상조의 중앙 및 전 후 위치 등 수질의 변동이 발생하는 시점이나 지점마다 시료를 채취 분석하였다.

실험 방법은 수질환경공정시험법에 의거 실시하며 이 시험방법에 제시되지 않은 항목은 standard method for water and wastewater 실험방법을 이용하였다.

2.3 운전방법

본 실험장치의 운전은 미생물을 이용한 생물학적 처리 공정과는 달리 운전상 휴지시간을 두어도 별 문제나 지장이 발생하지 않는 물리화학적 처리공정이므로 운전은 회분식 방식(batch type)을 택하여 운전과 실험을 실시하였다. 운전조건은 특별히 처리실험에서 명시하지 않을 경우 saturator의 압력은 유입측을 기준으로 $5.0 \pm 0.5 \text{ kg/cm}^2$, 순환율 $15 \pm 5\%$ 에서 본 DAF pilot plant를 운전하는 것을 원칙으로 하였다. 이는 기포체적농도로써 $6,000 \sim 12,000 \text{ ppm}$ 의 범위를 나타낸다.

본 실험장치(pilot plant)에 사용될 약품은 통상 부상처리에 사용되는 응집제와 알칼리제를 적용하였으며 응집제로는 폴리염화알루미늄(PACl, poly-aluminium chloride)을 사용하였고, 응집에 요구되는 알칼리도의 보충을 위하여 수산화나트륨(NaOH)를 사용하였다.

약품의 주입은 교반시험(Jar-test)을 걸쳐 확정된 최적 응집제 주입율을 시간적 주입량이 정확히 지켜져야 하는 정량펌프를 채택한 약품주입펌프를 이용하여 운전기간에 연속 주입될 수 있도록 하였다.

아울러, 급속 혼합과 완속 교반이 요구되므로 앞에서 기술한

속도경사(speed gradient, G) 값을 만족할 수 있는 교반기를 조에 설치하여 운전기간중에 연속 운전될 수 있도록 하여 실제 처리 현장과 그 조건을 최대한 동일하게 되도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 생물반응조의 기초 부상실험

본 절에서는 BNR 생물반응조에서 혐기조(anaerobic tank), 무산소조(anoxic tank) 그리고 산소조(oxic tank)에서 채수한 생물학적 플록의 부상분리 효율 비교평가를 위한 일련의 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 응집제의 주입이나 생물반응조로부터 채수한 시료에 대한 전처리 없이 채취한 시료 그대로 DAF 공정을 이용하여 부상 분리한 실험결과를 나타낸다.

본 실험의 적용에 앞서서 기포체적농도(air volume concentration, AVC ϕ) $1.2 \sim 8.1 \times 10^3 \text{ ppm}$ 범위의 부상분리과정에서 변화되는 조건을 살펴보기 위하여 측정된 pH는 $6.6 \sim 7.1$ 정도에서 실험이 수행되었으며 알칼리도는 $112 \sim 221 \text{ mg/L as CaCO}_3$ 에서 부상분리가 실시되었다.

DAF 실험장치를 이용하여 응집제를 주입하지 않고 부상 분리 실험을 실시한 결과, 탁도 제거율은 $96.3 \sim 99.6\%$ 로 양호한 처리효율을 보였고, 기포체적농도(air volume concentration, AVC)의 상승에 따라 제거효율도 상승하였다. 각 세부공정별로는 산소조의 제거효율이 가장 높았으며, 다음으로 무산소 공정이었고 혐기성조의 제거효율이 가장 낮았다.

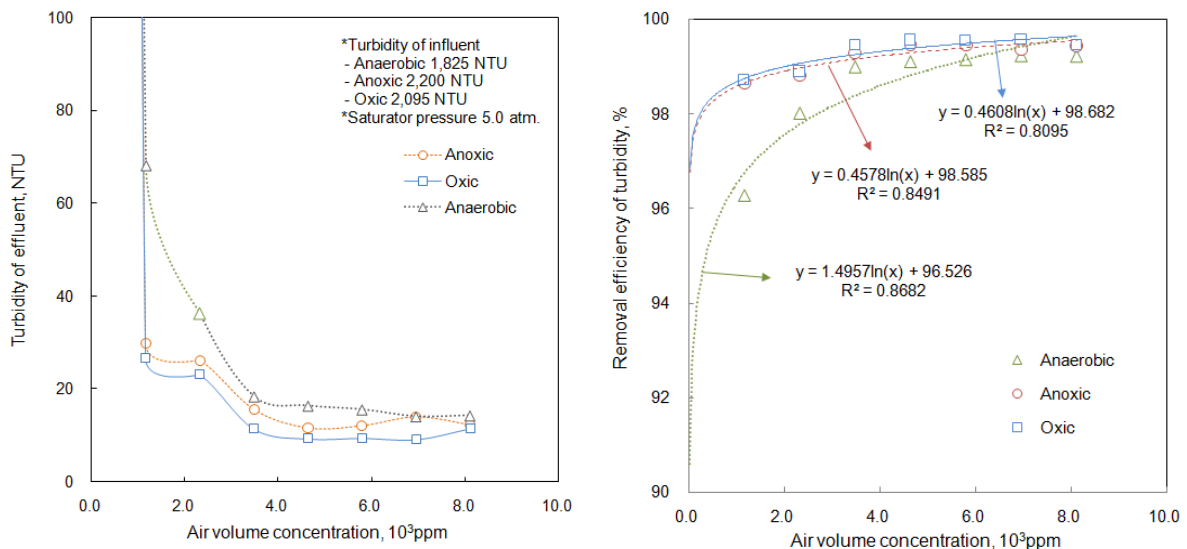


Fig. 2. Removal efficiency of turbidity in terms of air volume concentration.

3.2 생물반응조의 세부 공정별 부상효율

다음은 여러 수질항목별 제거효율을 살펴보았다. 다음의 Fig.3과 같이 SS는 97.9~99.4%, BOD는 89.0~98.5%, T-N은 52.2~77.1% 그리고 T-P는 62.8~77.8%의 제거율을 보였다. 생물반응조의 각 세부공정별로는 산소조의 제거효율이 가장 높았으며, 다음으로 무산소 공정이었고 혐기성조의 제거효율이 가장 낮았다. 본 실험의 처리효율은 일반적인 BNR 공정에서 나타나는 효율과는 다른 값을 나타내며, 하수처리장 원수와 방류수로 산출한 처리효율이 아니고 생물반응조에서 채취한 미생물 현탁액을 유입수로 하여 실험된 고액분리 실험이기 때문이다.

시료를 채취한 생물반응조의 세부 공정별 체류시간의 차이에 따라 부상분리 효율은 선행 연구결과(곽동희 등, 2004; 김성진 등, 2006; Jung at al., 2006)와 같이 미생물 플록의

생장단계가 다소 다른 결과를 나타내었다. 이 실험결과로 미루어 볼 때, 고액분리공정으로써 DAF공정을 BNR 하수처리시스템에 도입함에 있어서, 단일지점을 고려할 경우 산소조 후단 또는 산소조 유출수를 처리하도록 부상공정을 배치하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

DAF 공정은 전형적인 고형물 분리공정이므로 SS제거율이 가장 높았으며 용존성 물질로 구성된 질소와 인은 SS에 비하여 다소 낮은 제거효율을 보였다. 따라서 BOD, T-N 및 T-P의 제거기작은 고형물의 제거율에 따라 일정한 패턴을 나타낼 것으로 예상되어 다음의 Table 2에 나타낸 바와 같이 항목별 상관성 분석을 실시하였다. 항목별 상관계수는 유의성이 크게 나타나지는 않았으며 BOD가 상대적으로 높은 값을 나타내었다.

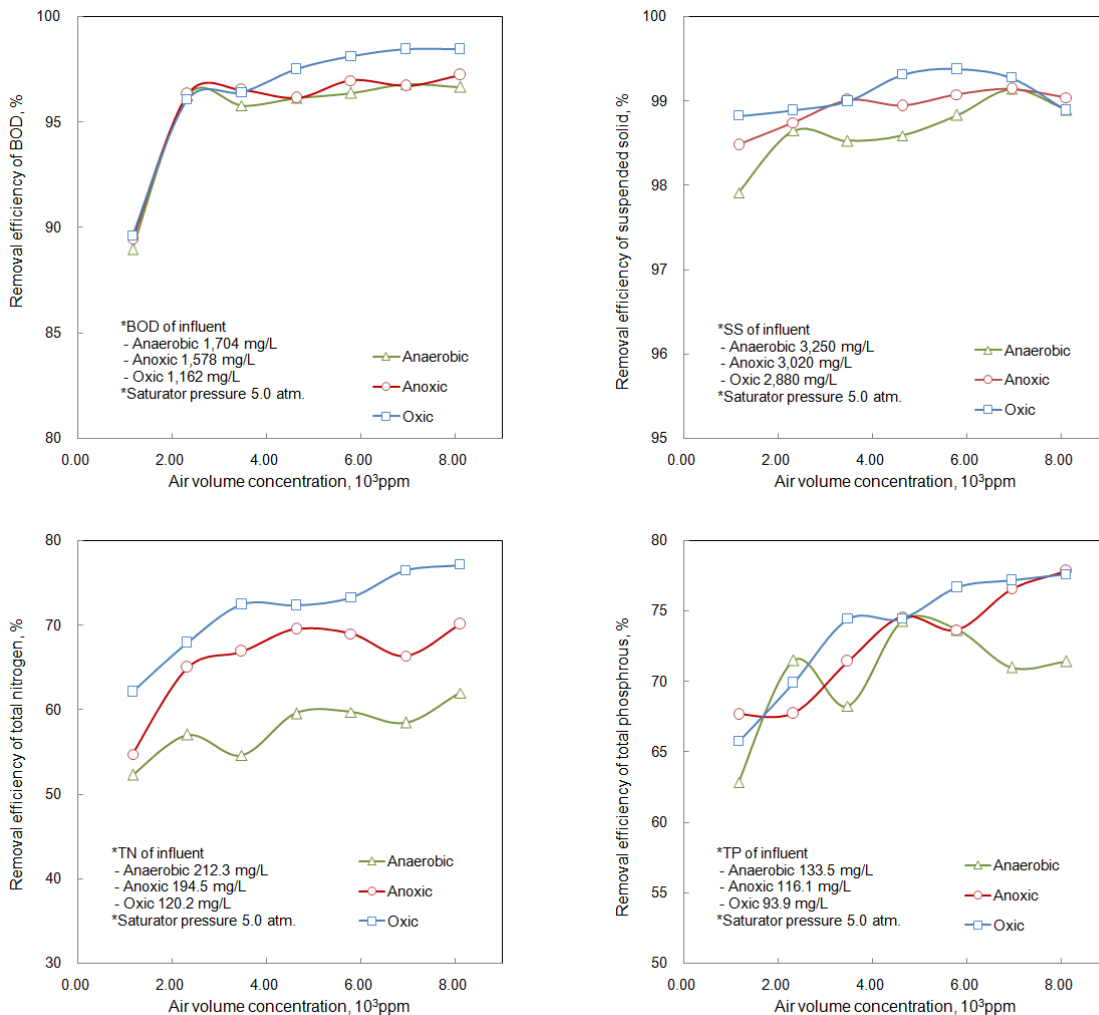


Fig. 3. Comparison of removal efficiency in terms of three steps of biological processes.

Table 2. Correlation coefficients of removal efficiency between SS and other water quality criteria

Description	Anaerobic tank	Anoxic tank	Oxic tank
BOD	0.89	0.87	0.59
T-N	0.76	0.86	0.50
T-P	0.75	0.83	0.61

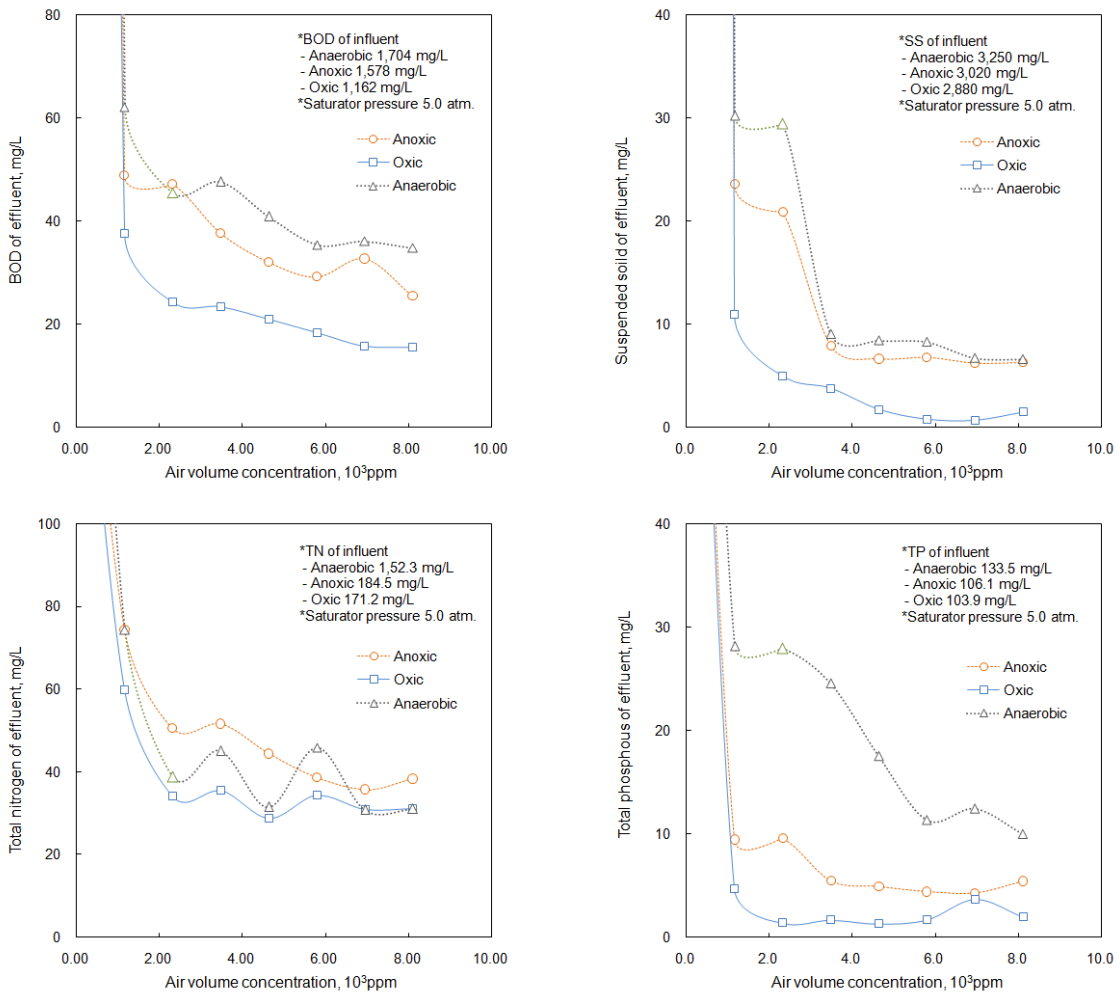


Fig. 4. Variation of turbidity and SS T-P in terms of air volume concentration (With coagulation).

3.3 고액분리와 처리효율 향상을 위한 응집

일반적으로 미생물 플록의 부상분리에는 별도의 응집조작이 요구되지 않으나 효율을 보다 높이고자 할 경우에는 화학적 응집을 거친 부상처리를 고려할 수 있다. 이에 따라 응집공정의 필요성과 그 효과를 판단하기 위하여 응집조작을 병행한 부상실험을 실시하였다. 응집제는 폴리염화알루미늄(poly-aluminium chloride, PACl)이며 pH와 알칼리도 조절을 위하여 수산화나트륨(NaOH)을 사용하였다. 여기서 PACl은 입자표면의 제타전위를 충분히 높이기 위하여

충분한 양을 주입하도록 하였다.

응집제를 주입하여 실험을 실시한 결과, 다음의 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 SS는 99.1~100%, BOD는 96.4~98.7%, T-N은 59.7~87.8% 그리고 T-P는 78.9~98.7%로 높은 제거율을 보였다. 또한 각 세부공정별 효율은 응집을 하지 않은 앞의 실험결과와 마찬가지로 SS, BOD, T-N T-P 모두 혐기성조, 무산소조 그리고 산소조의 순으로 효율이 높게 나타났다.

Table 3. Increase fraction of removal efficiency through coagulation.

AVC (ppm)	BOD (%)			SS (%)		
	Anaerobic	Anoxic	Oxic	Anaerobic	Anoxic	Oxic
1.16	7.39	7.49	7.18	1.16	0.74	0.80
2.32	1.09	0.69	1.87	0.45	0.57	0.94
3.47	1.43	1.10	1.60	1.20	0.73	0.87
4.63	1.47	1.84	0.70	1.16	0.84	0.63
5.79	1.56	1.19	0.31	0.91	0.70	0.60
6.95	1.11	1.22	0.19	0.65	0.65	0.70
8.10	1.30	1.17	0.22	0.90	0.75	1.06
AVC (ppm)	T-N (%)			T-P (%)		
	Anaerobic	Anoxic	Oxic	Anaerobic	Anoxic	Oxic
1.16	10.70	7.48	2.92	16.10	26.46	26.41
2.32	20.81	9.59	12.15	7.57	26.28	25.82
3.47	20.33	6.99	6.83	13.37	26.10	21.48
4.63	21.56	8.08	10.86	12.60	23.15	21.82
5.79	15.74	11.76	6.72	17.85	24.61	19.41
6.95	22.79	16.15	5.55	19.67	21.58	17.05
8.10	19.70	10.79	4.73	21.10	19.11	18.35

다음의 **Table 3**은 생물학적 플록의 처리효율을 향상시키기 위하여 별도의 응집조작을 실시하여 얻어지는 항목별 제거효율의 상승폭을 나타내고 있다. 일정한 추이는 찾아볼 수 없지만 대체적으로 혐기성조, 무산소조, 산소조의 순으로 처리효율이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 이 상승폭은 응집조작을 실시하게 되면 항목별 처리효율이 상승하여 각 반응조별 처리효율의 차이가 좁혀지는 이유에서 기인한 결과로 여겨진다. 결국 효율을 상승시키기 위하여 화학적 응집을 실시한다면 생물반응조의 세부공정별 차이는 없어지므로 DAF 공정의 선택지점은 큰 차이를 보이지 않을 것이다.

항목별로는 화학적 응집을 하지 않은 경우에 비하여 다음의 **Fig. 5**와 같이 SS는 0.57~1.16%, BOD는 0.19~7.49, T-N은 4.73~22.79 그리고 T-P는 17.05~31.10%의 효율상승을 달성하였다. 가장 높은 상승폭을 나타낸 T-P 제거율은 화학적 응집과정에서 정인산 이온($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} 등)이 용존 상태에서 플록으로 전환되어 고액 분리됨으로써 얻어지는 것으로, 일반적으로 화학적 응집은 인제거에 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

3.4 생물학적 플록의 분리시간과 Break-up 특성

본 DAF 실험장치를 이용하여 응집체를 주입하지 않은 상태에서 분리시간에 따라 SS를 처리대상으로 부상분리 실험을 실시하였다. 이 실험은 생물학적 플록의 부상조 설계에 필요한 수리학적 부하율을 결정하는데 기초적 정보를 제공한다. 다음의 **Fig. 6**에서 나타난 바와 같이 분리시간 1~5분에서는 SS의 제거효율이 지속적으로 상승하였으나 5분을 초과하는 분리시간에서는 그 상승폭이 둔화되는 경향을 나타내었다. 분리시간 10분을 초과하는 조건에서는 SS 제거효율의 상승이 거의 이루어지지 않았다. 이 결과는 타 연구결과(Kwak et al., 2005; 2009)의 clay와 같은 무기성 플록의 경우와 크게 다르지 않은 것이며 상대적으로 산소조는 분리시간 4분에서, 무산소조는 분리시간 5분에서 그리고 혐기성조에서는 분리시간 10분에서 99.0%의 제거효율이 달성되었다.

한편, 본 제거효율은 실험조건과 같이 1,000~3,000 mg/L MLSS 농도조건에서의 실험결과에 한정되며 고농도의 MLSS나 슬러지에 있어서는 그 분리시간과 최적 기포농도가 달라지므로 이 결과를 직접 적용하기에는 무리가 따를 것이다.

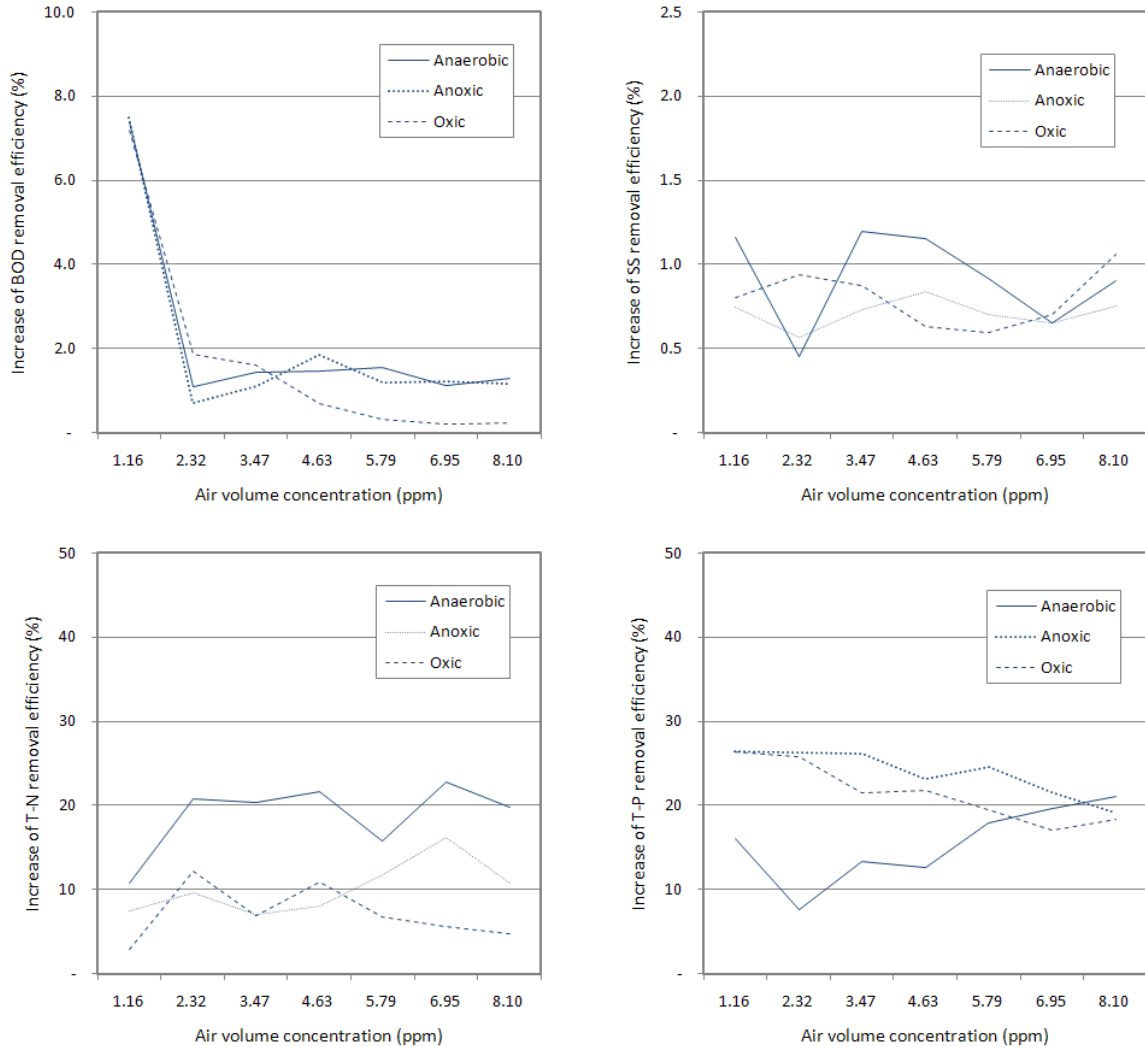


Fig. 5. Increase fraction of removal efficiency through coagulation.

DAF 공정에서 기포주입장치를 통하여 주입된 미세 기포와 유입수중에 존재하는 생물학적 플록과 적절한 충돌과 접촉이 이루어지면 기포-플록 응집체(bubble-floc agglomerate)가 형성된다. 이 기포-플록 응집체가 유입된 분리존(separation zone)에서 효과적으로 부상분리를 수행해야 하는데, 이 분리존의 상층에 부상된 기포-플록 응집체가 축적되게 된다. 이 플로트층(float layer)은 조내부의 수리학적 전단력이나 외부의 강한 외류에 의해서 고형물에 결합되었던 기포가 탈리되어 침강하는 현상이 발생하지만, 축적된 플로트층의 시간경과에 따라 자체의 물성변화나 응집체 상호충돌 또는 기포와 고형물간의 비중 차이에 의한 자리이동 등의 조건변화에 기인하여 기포가 탈리되는 상황

이 발생한다. 이와 같은 기포의 탈리(break-up)를 방지하기 위해서는 생물학적 플록의 물성에 기초한 기포-플록 응집체로서의 실제 유지시간의 측정이 필요하다. 이 실험결과 는 스키머(skimmer)의 설계에 중요한 정보가 된다.

본 실험은 입자의 분리효율을 고려하여 응집을 실시하지 않은 경우와 실시한 경우를 구분하여 두 가지로 대별 실험을 수행하였으며, 산소조에서 채취한 시료의 부상분리효율이 가장 좋았던 점을 고려하여 산소조 시료를 이용하여 일련의 탈리 실험을 실시하였다. Saturator의 압력은 5.0 atm, 그리고 기포체적농도는 단계적으로 증가시키면서 분리시간의 경과에 따라 부상분리후 저부에 침전된 SS를 채수하여 농도를 측정하였다.

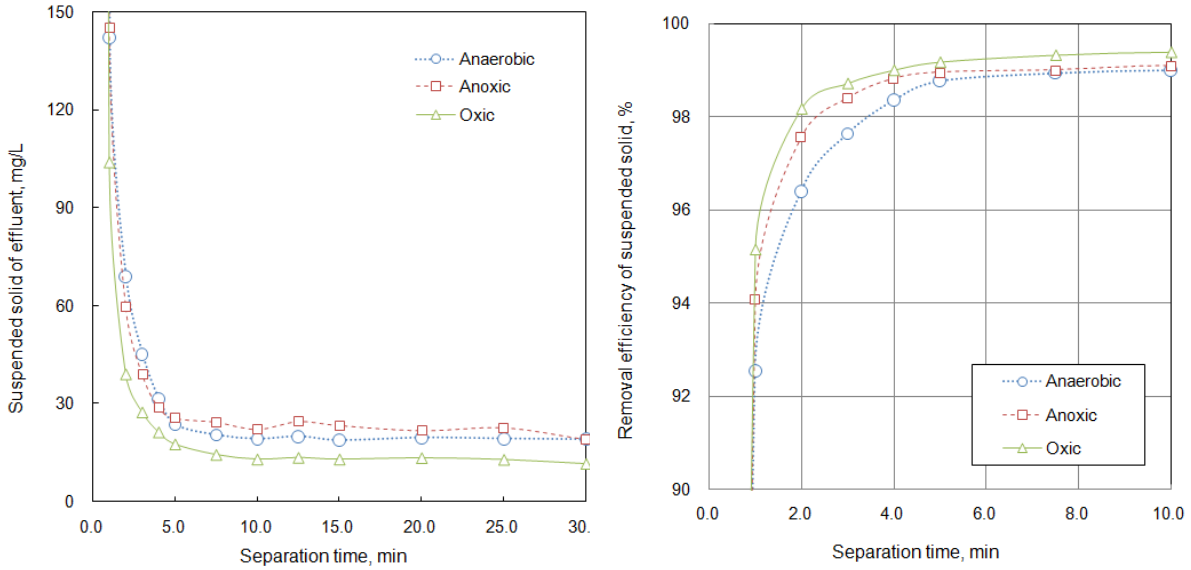


Fig. 6. Variation of suspended solid removal efficiency in terms of separation time (without coagulation).

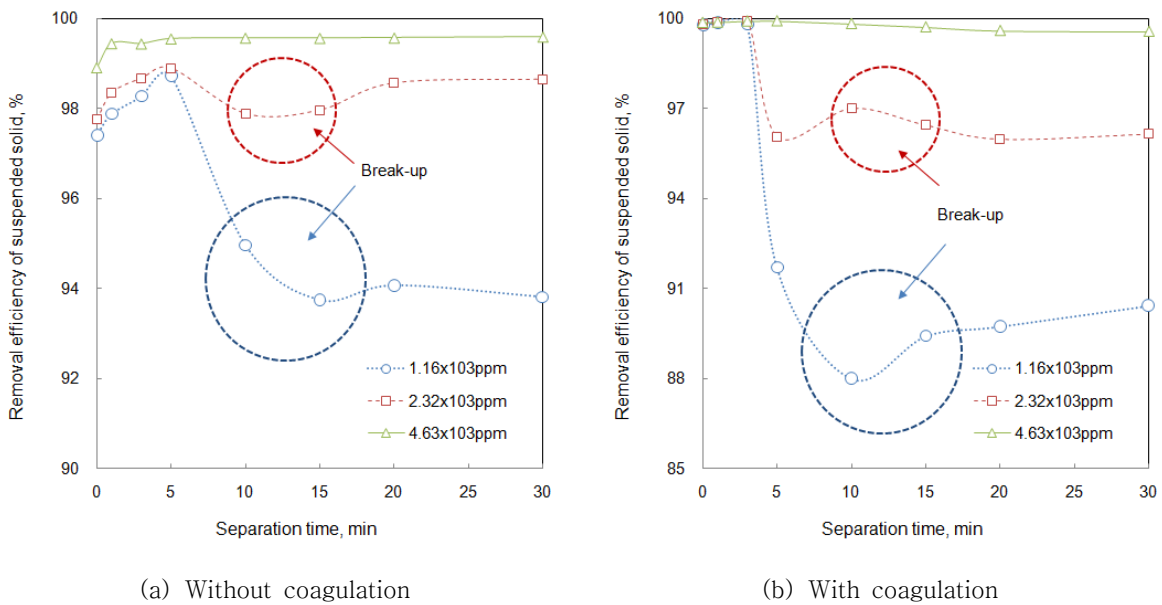


Fig. 7. Change of suspended solid concentration and break-up of bubble-floc agglomerates.

실험 결과 다음의 Fig. 7에 나타난 것처럼 두 경우 모두 1.16×10^3 ppm 및 2.32×10^3 ppm에서 탈리현상이 나타났으며 응집을 실시한 경우가 오히려 탈리현상이 보다 뚜렷하였다. 한편, 기포체적농도를 증가시킨 4.63×10^3 ppm에

서는 응집체의 탈리 현상은 발생하지 않았으며 BNR 하수처리시스템에 DAF 공정을 적용할 경우 기포체적농도는 4.63×10^3 ppm 정도로 유지되어야 안정한 부상분리 효율을 얻을 수 있을 것으로 여겨진다.

5. 결 론

본 연구에서는 하수처리장에서 생물학적 미생물 플록의 분리를 위하여 DAF 공정을 도입함에 있어서, 생물반응조에서의 적용지점 선택과 효과적인 고행물 분리 및 부상특성을 파악하고자 일련의 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

DAF 실험장치를 이용하여 생물학적 플록의 고액분리를 실시한 결과, SS는 97.9~99.4%, BOD는 89.0~98.5%, T-N은 52.2~77.1% 그리고 T-P는 62.8~77.8%의 제거율을 보였다. 생물반응조의 각 세부공정별로는 산소조의 제거효율이 가장 높았으며, 다음으로 무산소 공정이었다고 혐기성조의 제거효율이 가장 낮았다. 따라서 고액분리공정으로써 DAF공정을 BNR 하수처리시스템에 도입할 경우, 단일 지점으로 산소조 유출수를 처리하도록 부상공정을 배치하는 것이 유리할 것이다.

응집제를 주입하여 부상분리 실험을 실시한 결과, SS는 99.1~100%, BOD는 96.4~98.7%, T-N은 59.7~87.8% 그리고 T-P는 78.9~98.7%로 높은 제거율을 보였다. 화학적 응집을 실시한다면 고액분리 효율이 크게 개선되어 생물반응조의 세부공정별 차이는 없어지므로 DAF 공정의 선택지점은 큰 차이를 보이지 않을 것으로 여겨진다.

또한, 부상분리 시간에 따른 생물학적 플록의 부상특성은 clay와 같은 무기성 플록의 경우와 크게 다르지 않았으며 산소조는 분리시간 4분에서, 무산소조는 분리시간 5분에서 그리고 혐기성조에서는 분리시간 10분에서 99.0%의 제거효율이 달성되었다.

플로트층의 탈리실험에서는 화학적 응집여부와 상관없이 기포체적농도 2.32×10^3 ppm이하에서 탈리현상이 나타났으며 응집을 실시한 경우가 오히려 탈리현상이 보다 뚜렷하였다. 이후 기포체적농도를 증가시킨 4.63×10^3 ppm에서는 응집체의 탈리 현상은 발생하지 않았다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No.2010-0016075)입니다.

참고문헌

Edzwald J.K. (1995), Principles and applications of dissolved air flotation, *Water Science and Technology*, 31(3-4),

pp.1-23.

Jung, H.-J., Lee, J.-W. Choi, D.-Y. Kim, S.-J. Kwak, D.-H. (2006), Flotation Efficiency of Activated Sludge Flocs using Population Balance Model in Dissolved Air Flotation, *Journal of Korean Chemical Engineering*, **23**(2), 271-278.

Han M.Y., Park Y. H. and Yu T.J. (2002) Development of new method of measuring bubble size. *Water Science and Technology: Water Supply*, **2**(2), pp.77-83

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**, 3001-3016.

Kwak, D.H., Jung, H.J., Kwon, S.B., Lee, E.J., Won, C.H., Lee, J.W. and Yoo, S.J. (2009), Rise Velocity Verification of Bubble-Floc Agglomerates Using Population Balance Model in DAF Process, *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, **58**(2), 85-94.

Kwak, D.H., Yoo, S.J. Lee, E.J. and Lee, J.W. (2010), Evaluation on simultaneous removal of particles and off-flavors using population balance for application of powdered activated carbon in dissolved air flotation process, *Water Science & Technology-WST*, **61**(2), 323-330.

Packham, R. F., and Richards, W. N. (1972), Water Clarification by Flotation-1, Water Research Association, November.

Vrablick, E. R. (1959), Fundamental Principles of Dissolved-air Flotation of Industrial Wastes, West Lafayette, Ind. Proc. 14th Annu. Purdue Industrial Waste Conference.

곽동희, 김성진, 임영환 (2004), 용존공기부상(DAF) 공정을 이용한 생물학적 플록의 부상분리, *상하수도학회지*, **18**(5), 649-655.

김성진, 강병준, 박상욱, 이재욱, 정홍조, 곽동희 (2006), 미세기포에 의한 활성슬러지의 부상특성, *상하수도학회지*, **20**(4), 501-507.