

## 난류모델을 이용한 재응집 Floc의 물리적 특성 연구

### Relationship between Physical Property of Re-agglomerated Floc and Turbulent flow

박노석<sup>1\*</sup> · 김성수<sup>1</sup> · 김관엽<sup>1</sup> · 김종오<sup>2</sup>

No-Suk Park<sup>1\*</sup> · Seong-Su Kim<sup>1</sup> · Kwan-Youp Kim<sup>1</sup> · Jong-Oh Kim<sup>2</sup>

1 한국수자원공사, 2 강릉원주대학교 토목공학과

(2010년 1월19일 접수, 2010년 2월 10일 수정, 2010년 2월 12일 채택)

#### Abstract

Until now, research reports that it is difficult for brokenup floc after coagulation to reaggregate and settling efficiency of reaggregated floc is relatively low have dominated in water treatment process. In contrast, from recent study conducted by the French researcher, because the density of the reaggregated floc was higher than the previous floc, the settling efficiency of reaggregated floc increased. In this study, 15 times wet test were carried out and the removal efficiency of reagrregated floc was considerably increased. Moreover, this result was explained using the turbulent model for the flow occurred around the floc. Consequently, in the case of suitable hydrodynamic condition for the reaggregation, the characteristics of the reaggregated floc was changed into the favorable condition for improvement of settling efficiency. Also, the most important factor for reaggregation of floc was governed by hydrodynamic shear stress.

**Key words** : turbulent model, reaggregate floc, physical characteristics, turbulent diffusion

**주제어** : 난류모델, 재응집 플록, 물리적 특성, 난류확산

#### 1. 서론

수처리 공정에서 많은 오염물질의 대부분을 차지하고 있는 입자성 물질을 수중에서 제거하기 위한 고액분리는 매우 중요하며 일반적으로 응집(coagulation)과 플록형성(flocculation) 공정으로 이루어진다. 즉, 콜로이드 입자의 flocculation은 두 가지 단계로 구성된다. 그 첫 번째는 입자를 불안정화(destabilization) 시키고 각 입자 주위의 에너지 barrier를 감소시키기 위해 응집제를 주입하고 확산시키는 단계이다. 이 단계에서는 응집제의 빠르고 균일한 확산을

위해 상대적으로 높은 혼화강도가 요구된다. 두 번째는 불안정화 된 입자간의 충돌 기회를 부여하며, 이미 생성된 플록이 파괴(break-up) 되지 않도록 낮은 교반 강도를 단계별로 유지하는 응집 단계이다.

입자의 충돌은 수류의 전단력, 즉 수중에서 생성되는 국부 속도경사에 의해 일어난다. 일찍이 Thomas(1964)는 입자의 충돌에 유효한 국부속도경사는 "*Kolmogorov length scale*( $\eta$ , m)"과 비교하여 전적으로 입자의 크기에 좌우된다고 하였다.

\* Corresponding author Tel:+82-42-870-7525, Fax:+82-42-870-7549, E-mail: nspark@kwater.or.kr(Park, N.S.)

$$\eta = \left( \frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{1/4}$$

여기서,  $\nu$ 는 동점성 계수( $m^2/s$ )를 나타내고,  $\epsilon$ 은 난류에너지의 소산(dissipation,  $m^2/s^3$ ) 속도를 나타낸다.

Kolmogorov length-scale은 난류에너지가 점성에 의해 소산되는 가장 작은 크기의 eddy 크기로 정의된다. 응집체가 주입되기 전에 초기 콜로이드 입자는  $\eta$ 에 비해 아주 작다. 대부분의 flocculation은 점성이 지배하는 범위 이하에서 일어난다. 즉, Kolmogorov length-scale이하에서 발생하게 된다. 이러한 이유로 인해 초기에 일어나는 응집현상의 모델은 동역학적 변수를 반드시 함으로 포함하게 된다. 서로 상이한 측면에서 현상을 관찰하지만, 충돌기회(Collision efficiency)를 표현하기 위한 몇몇 모델들이 제안되었다. 1912년 입자 충돌을 통계학적으로 접근했던 Smoluchowski이론에서와 같이 대부분의 모델들은 충돌이 일어나기 전까지의 입자의 거동은 직선운동을 함을 가정하였다. 참고로 반경이  $r_i$ 와  $r_j$ 인 입자의 충돌 기회는 다음 식으로 통상 나타내며, 충돌에 관여되는 물리화학적 변수가 정해지는 경우  $\beta(i, j)$ 도 상수로 도출된다.

$$\beta(i, j) = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{\epsilon}{\nu}} (r_i + r_j)^3$$

플록의 직경이 증가할수록 동력학적 전단력은 입자를 깨뜨려 몇 개의 입자로 조각낼 수 있다. 이에 입자가 깨뜨려지는 현상은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$B = \frac{\text{Hydrodynamic force}}{\text{Cohesion force}} = \frac{F}{J}$$

여기서,  $F$ 는 수류흐름에 의해 플록에 작용하는 동역학적 힘을 의미하는 것이며,  $J$ 는 플록의 결속강도를 의미한다. 만약  $B$ 값이 1보다 작다면 입자는 전단력에 견디면서 깨지지 않게 되는 것이나, 1보다 크다면 동력학적 힘이 플록을 깨뜨리게 된다. Cohesion force는 물리화학적 조건과 입자의 형상에 관계되고, 동력학적 힘(hydrodynamic force)는 다음 식으로 표현된다.

$$F \approx \sigma d^2$$

여기서  $d^2$ 은 플록의 표면적을 나타내고,  $\sigma$ 는 플록에 작용하는 동력학적 전단응력을 나타낸다. 앞에서 언급한 바와 같이,  $\sigma$ 는 Kolmogorov length-scale과 비교하여 플록의

크기에 따라 크기가 달라진다. 그러나 Bouyer 등(2004)은 플록의 크기에 관계없이 고정된 결속강도를 가지는 경우 플록의 크기는 난류에너지의 소산속도( $\epsilon$ )에 전적으로 의존하는 것을 제시하였으며, 입자의 직경은 난류에너지의 소산속도와 다음과 같은 관계를 가진다고 하였다.

$$d \approx \epsilon^{-1/4}$$

즉, 고정된 물리화학적 환경에서 플록이 생성되고 깨뜨려지는 현상은 직접적으로 동력학적 요소와 관련되어져 있다. 이에 플록의 크기 분포(size distribution)와 동력학적 요소와의 관계를 고찰하기 위해서는 연속된 동력학적 전단응력의 변화를 임의로 가하여 플록의 size distribution의 변화양상을 고찰할 필요가 있다. 이미 몇몇 연구자들(Clark and Flora (1991), Jung et al., (1996), Spicer et al., (1998))은 이미 반복되는 flocculation 공정(flocculation - break-up - reflocculation)이 플록의 크기에 미치는 영향을 연구하였다. 그들은 일정 혼화조건에서 생성된 플록이 break-up되고 reflocculation 되더라도 break-up되기 전 초기의 플록과 같은 구조와 크기를 가질 수 없음을 역설하였다.

이에 본 연구에서는 국내 K\_정수장에 유입되는 원수를 대상으로 하절기(7월~8월)에 반복적인 flocculation - break-up - reflocculation 실험을 수행하여 break-up과 reflocculation 현상이 궁극적으로 침전수의 탁도에 미치는 영향을 알아보고 그 원인을 상기와 같은 기존 연구를 근간으로 하여 규명하고자 하였다.

## 2. 실험방법

전라북도에 위치한 용담댐 호소수를 수원으로 생활 및 농업용수를 생산하는 K\_정수장(시설용량 700,000 $m^3$ /일)의 유입원수를 대상으로 실험을 수행하였다. 실험은 Jar-test 장비를 이용하였으며, Jar의 geometry는 일반적으로 이용되는 Gator jar(2L) 6개를 이용하였다. 임펠러는 패들 타입이며, 응집제는 현재 K\_정수장에서 사용하고 있는 폴리염화알루미늄(PACl,  $[Al_2(OH)_nCl_{6-n}]_m$ )과 폴리수산화염화황산알루미늄(PAHCS,  $Al_{13}(OH)_{28}Cl_9SO_4$ )를 구분하여 사용하였다. Table 1은 K\_정수장에서 수행한 반복적인 flocculation 실험 조건을 표로 나타낸 것이다. 실험기간 동안의 탁도는 1.17 ~ 28.4 NTU의 범위에서 10 NTU 이하의 양호한 수질조건을 나타내었다. 또한, 수온은 22 ~ 25 $^{\circ}C$ , pH는 6.58 ~ 7.22, 알카리도는 16 ~ 28.7mg/L(as  $CaCO_3$ )의 범위를 나타내었다.

Table 1. 유입수 수질 및 실험 조건

날짜	원수 수질				약품 주입률 (ppm)						혼화 조건
	수온 (°C)	pH	알카리도 (mg/L)	탁도 (NTU)	Jar1	Jar2	Jar3	Jar4	Jar5	Jar6	
7/5(1)	22.6	6.82	27.7	1.17	15.14	17.19	19.24	21.29	23.34	25.39	- 급속교반 : 320rpm - 완속교반 1 : 80rpm - 완속교반 2 : 40rpm - 완속교반 3 : 20rpm - 침강 : 20분
7/5(2)	22.6	6.82	27.7	1.17	15	17	19	21	23	25	
7/12(1)	22.9	6.69	28.7	3.1	15.25	17.30	19.35	21.40	23.45	25.50	
7/12(2)	22.9	6.96	28.7	3.1	15	17	19	21	23	25	
7/18	22.9	7.22	18.6	28.4	20	22.5	25	27.5	30	32.5	
7/20	22.8	6.96	19.2	10.1	17.50	20	22.5	25	27.5	30	
7/21	22.9	6.96	16	12.4	18	20.5	23	25.5	28	30.5	
7/26	23.2	6.69	16	12.5	18	20.5	23	25.5	28	30.5	
7/29	23.2	6.69	16	12.5	20	22	24	26	28	30	
8/1(1)	23.9	6.93	17.2	8.09	18	20	22	24	26	28	
8/1(2)	23.9	6.93	17.2	8.09	18	20	22	24	26	28	
8/3(1)	25.2	6.58	16.2	7.64	18	20	22	24	26	28	
8/3(2)	25.2	6.58	16.2	7.64	18	20	22	24	26	28	

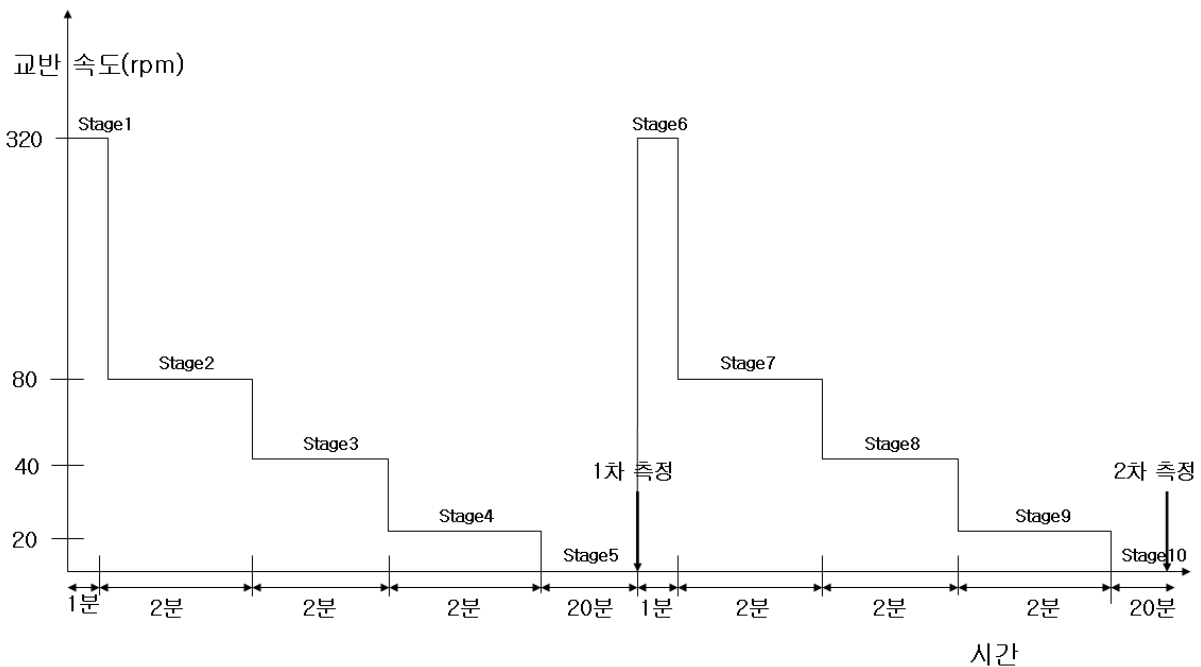
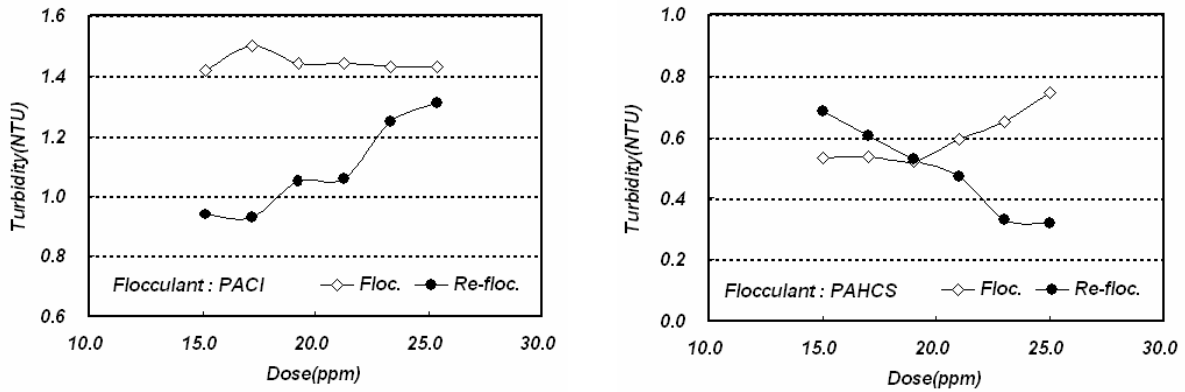
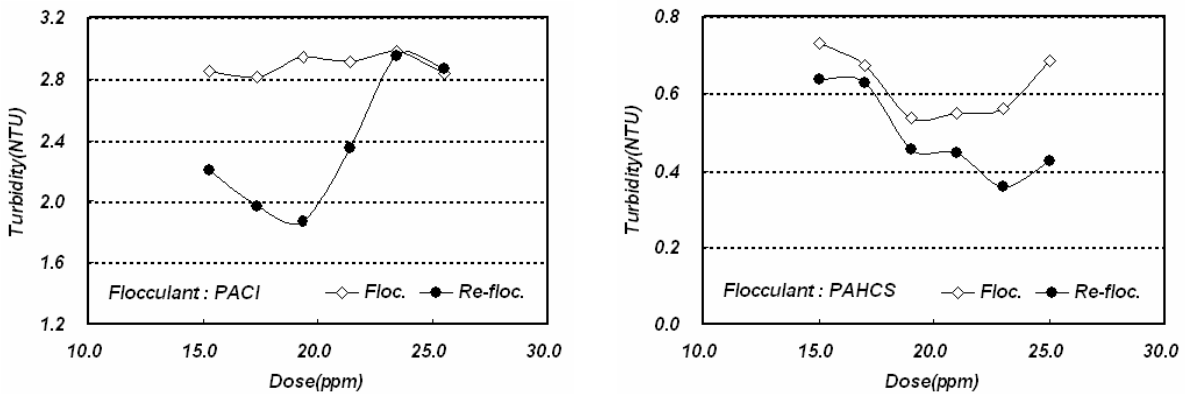


Fig. 1 반복적 flocculation 실험시 교반 속도의 schematic

Fig. 1은 반복적인 flocculation-break-up-reflocculation 실험을 수행하기 위한 각 단계별 교반 속도 schematic을 나타낸 것이다.



(a) 원수탁도 1.17 NTU 대상



(b) 원수탁도 3.1 NTU 대상

Fig. 2 반복적 Flocculation 실험결과 A(유입탁도 1.17~3.1 NTU)

### 3. 실험결과

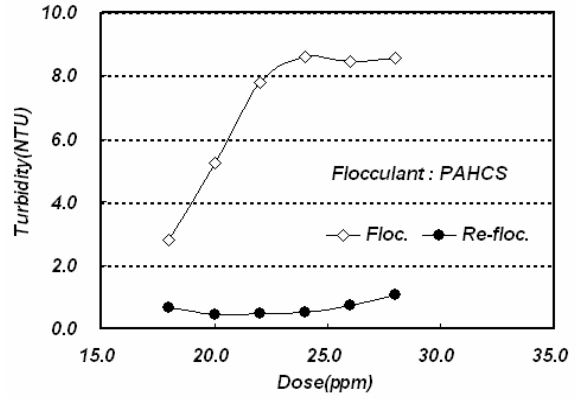
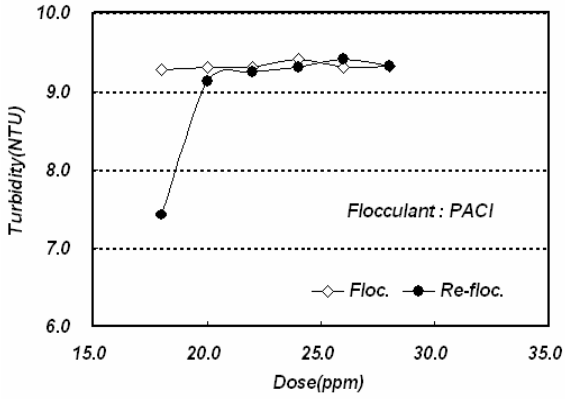
국내 K\_정수장에 유입되는 원수를 대상으로 반복적인 flocculation - break-up - reflocculation 실험을 수행하여 break-up과 reflocculation 현상이 궁극적으로 침전수의 탁도에 미치는 영향을 알아보려고 다양한 원수 탁도 조건에서 두 가지 종류의 응집제를 이용하여 Jar-test를 수행하였다.

다음의 Fig. 2는 탁도가 1.17~3.1 NTU로서 매우 양호한 수질을 나타낸 유입원수를 대상으로 Jar-test를 수행한 결과를 나타낸 것이다. 탁도 1.17 NTU의 원수를 대상으로 실시한 Jar-test 결과를 나타낸 Fig. 2의 (a)를 보면 최초 플록형성 단계보다 재응집(re-flocculation)이 수행된 경우가 최종 탁도가 더 낮은 것을 나타내고 있다. 이러한 경향

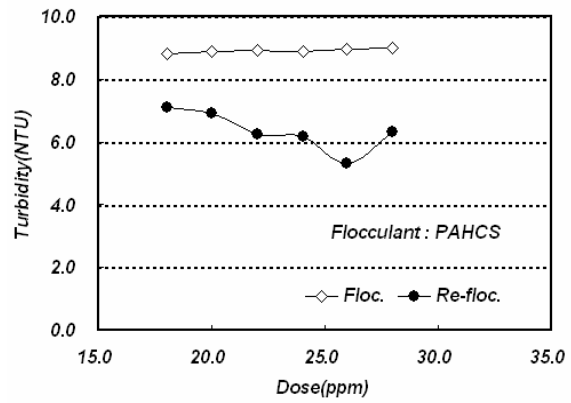
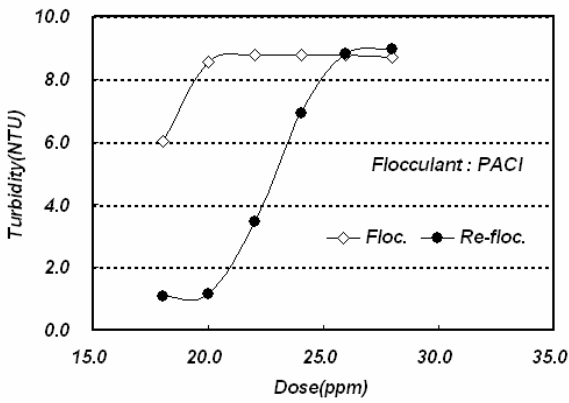
은 PACI 및 PAHCS의 2 종류 응집제 모두 같은 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 탁도 3.1 NTU의 원수를 대상으로 수행된 결과에서도 2 종류의 응집제 모두 재응집이 수행된 경우가 최초 응집을 수행한 경우보다 더욱 낮은 탁도를 나타내고 있다.

이러한 경향은 유입탁도 7~8 NTU 범위 및 12.5 NTU 범위의 원수를 대상으로 수행된 실험에서도 마찬가지로 경향을 나타내었다(Fig. 3, Fig 4 참조).

또한, Fig. 5에서 보이는 바와 같이 다른 실험시 보다 상대적으로 높은 탁도가 유입된 경우 수행된 실험에서도 재응집이 수행된 경우가 탁도가 낮게 나타나는 경향을 보이고 있다. 모든 실험결과를 다 도시하지는 않았지만 Fig. 2 ~ Fig. 5에서 나타난 바와 같이 Reflocculation이 수행된 경우가 모두 탁도가 낮은 것으로 나타났다.



(a) 원수탁도 8.09 NTU 대상



(b) 원수탁도 7.64 NTU 대상

Fig. 3 반복적 Flocculation 실험결과 B(유입탁도 7.64~8.09 NTU)

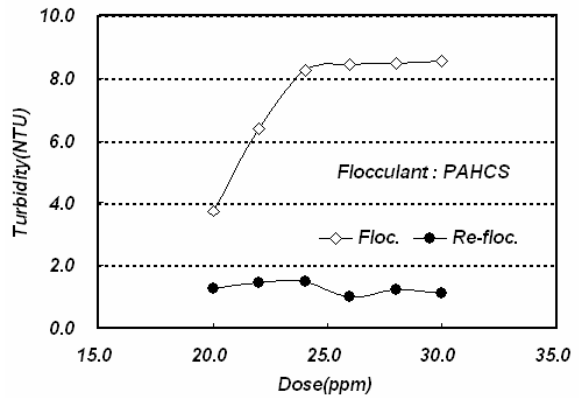
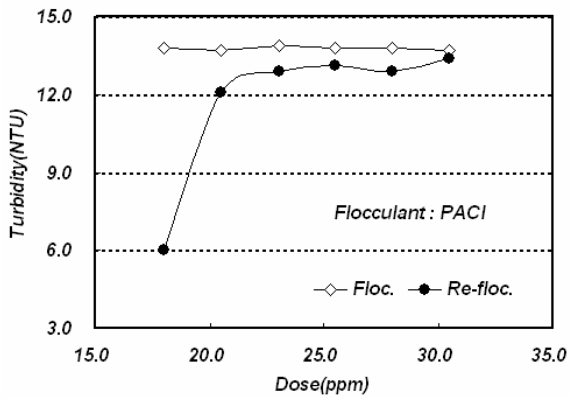


Fig. 4 반복적 Flocculation 실험결과 C(유입탁도 12.5 NTU)

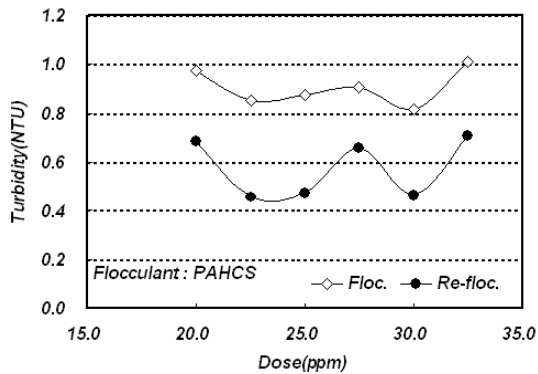


Fig. 5 반복적 Flocculation 실험결과 D(유입탁도 28.4 NTU)

#### 4. 고찰

상기의 실험결과에서 나타난 경향은 Carole 등(2005)이 제시한 연구결과와 일치하고 있다. Carole 등(2005)은 한 쌍의 중심이 같은 2개의 실린더로 구성되어 20cm의 지름을 가진 내부실린더는 회전하고 23cm의 외부실린더는 고정되어 있는 Taylor-Couette 반응조를 이용하여 aluminum sulphate 용액과 bentonite를 대상으로 reflocculation 실험을 수행하였다. 그의 실험에서도 reflocculation한 경우 입자의 표면적이 감소하고 압밀성(compactness)이 증가하여 침강이 잘 되는 것으로 보고하고 있다. 그의 결과에서는 break-up 단계(stage 6)에서 입자의 총 표면적이 감소하며, 이로 인하여 플록의 구조가 바뀌고 압밀이 잘 된 플록이 생성된다는 것이다. 또한 Spicer 등(1998)은 break-up과 reflocculation이 flocculation의 진화에 미치는 영향을 연구하였는데 break-up단계에서 플록에 가해지는 동력학적 전단력이 플록의 구조를 더욱더 단단하게 하는 것을 발표하였다. 이에 Carole 등과 Spicer등의 연구를 인용함으로써 본 연구에서 수행한 국내 원수 대상 Jar-test의 원인을 규명할 수 있다. 현재 국내 정수장 진단시 자주 사용되는 응집지내의 단별 교반강도의 최적화 및 응집된 플록을 깨뜨리지 않기 위한 방인수립 등의 획일적인 운영모드의 수립이 침전지에서 유출되는 유출수의 탁도에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 재검토가 필요하다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 국내 K\_정수장에 유입되는 원수를 대상으로 실험을 수행하여 break-up과 reflocculation 현상이 공

극적으로 침전수의 탁도에 미치는 영향을 알아보고 그 원인을 기존 연구를 근간으로 하여 규명하고자 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 국내 K\_정수장 원수를 대상으로 Jar-test를 수행한 결과 flocculation공정에서 생성된 플록은 reflocculation과정에서 생성된 플록보다 침전성이 낮다.
2. 입자의 재응집에 적합한 난류흐름이 조성되는 경우 재응집되는 입자의 물리적인 특성은 침강효율이 증가하는 방향으로 변환된다. 또한 입자의 재응집에 가장 중요한 인자는 수리동력학적 전단응력에 지배를 받는다.
3. 현재 국내 정수장 진단시 자주 사용되는 응집지내의 단별 교반 강도의 최적화 및 응집된 플록을 깨뜨리지 않게 하기 위한 방편 수립 등의 획일적인 운영모드의 수립이 침전지에서 유출되는 유출수의 탁도에 어떠한 영향을 미치는지 재검토해 볼 필요가 있다.

#### 참고문헌

- Thomas D.G. (1964). Turbulent disruption of flocs in small particle size suspension, *AIChE Journal* 10(4), 517-523
- Bouyer D., Line A. and Do-Quang Z. (2004) Experimental analysis of floc size distribution under different hydrodynamics in a mixing tank. *AIChE Journal* 50(9), 2064-2081
- Clark M. M. and Flora J.R.V. (1991) Floc Restructuring in Varied Turbulent Mixing, *Journal of Colloid and Interface Science*, 147, 407-421
- Jung S.J., Amal R., Raper J.A (1996) Monitoring effects of shearing in floc structure using small angle light scattering. *Powder Technology*, 88, 51-54
- Spicer P.T., Pratsinis S.E., Raper J., Amal R., Bushell G., and Meesters G., (1998) Effect of shear schedule on particle size, density and structure during flocculation in stirred tanks, *Powder Technology*, 97, 26-34
- Carole Coufort, Arnaud Cockx and Alain Line (2005) Hydrodynamic conditioning of aluminum-bentonite flocs, *Proceeding of IWA International Conference on Particle Separation 2005*, Seoul, Korea