

장방향 응집지에서의 한 대의 수직형 응집기를 설치하는 방법

강문후* · 배영준**

1. 서 론

응집기의 효율 가치는 수질 정화에 전반적으로 매우 중요하게 적용이 되고 있으며 그 사용처도 갈수록 넓어져 가고 있다.

특히 21세기에 들어서면서 경제의 발전과 더불어 수질 환경 오염 사건이 빈번하게 발생함으로써 환경 보전에 대한 중요성이 커지고 이에 대한 설비를 국가별로 신규로 확대 설치하는 경향이 있으므로 국가적인 차원에서 응집기란 설비의 중요성도 매우 커가고 있다.

각 지자체 현장에서 사용되는 다양한 응집기의 설계 기술은 인터넷을 이용한 정보 공유로 인해 기술개발의 속도가 과거에 비해 비약적으로 발전이 이루어지고 있으나 동력 절감, 유지 관리비의 절감 등 보다 개선된 형태의 설계 부분은 쉽게 발전되어지지 않아 왔다.

그러므로 본 실험 결과보고서는 상수도정수장에 적용되는 응집지의 설비개선을 설계 및 운영자들에게 간단하게 요약 정리하여 설계 및 성능 검증 기술의 향상 내용을 쉽게 알 수 있고 적용할 수 있도록 하고자 하는 것이 목적이다.

2. 장방향 응집기의 목적 및 기술적 내용

2.1 응집기의 역사

현재 상·하수도설비에서 적용되고 있는 응집기는 역사적으로 다음과 같이 변천되어져 왔다.

Horizontal Paddle (50 Years Ago)



Vertical Flat Blade Turbine (40 Years Ago)



45° Pitched Blade Turbine (35 Years Ago)



32° Pitched Blade Turbine (30 Years Ago)



Hydrofoil Impeller (10 Years Ago to Today)

2.1.1 Horizon Paddles

- No design data
- Poor mechanical design
- Underwater bearing not reliable
- Steel requied high maintenance on paddle supports
- Limits on basin sizes due to machine design

2.1.2 Vertical Flat Blade Turbine

- Bearing and gears above water so the machine

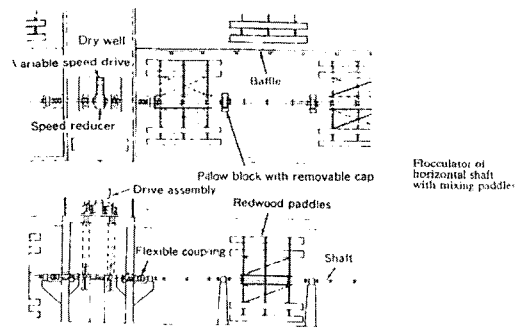


Fig. 1 Horizontal Paddle Flocculator

* 주식회사 우진
 ** 주식회사 우진
 E-mail : kmh@woojinmixers.com

was reliable

- High Power number impeller would cause floc breakage at low G factors
- Radial flow of impeller was not designed for vertical velocities to suspend solids easily
- Low pumping efficiency

2.1.3 45° Pitched Blade Turbine

- Good ratio of pumping to shear rate
- Higher flow than VFBT's
- Velocities in proper direction for solids suspension (axial flow)
- Still tended to break floc at relatively low G factors
- Power distribution across impeller high at tips

2.1.4 32° Pitched Blade Turbine

- Lower pumping to shear ratio, better for floc

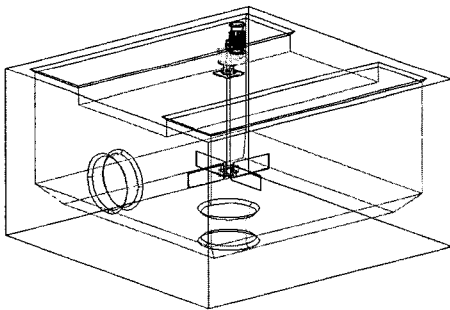


Fig. 2 Vertical Flat Blade Turbine Flocculator

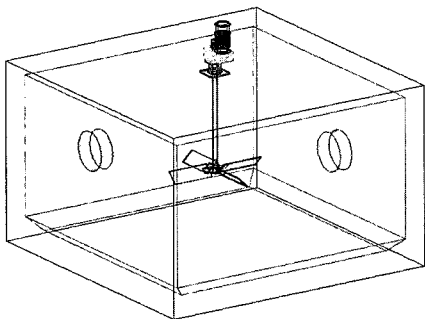


Fig. 3 45° Pitched Blade Turbine Flocculator

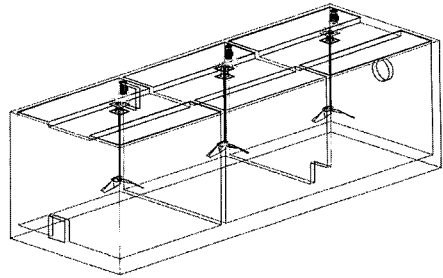


Fig 4. Hydrofoil Type Flocculator

- formation at required G values
- Power concentrated at tips of the impeller

2.1.5 Hydrofoil Impellers

- Very Low shear rates (Pumping number is higher than power number)
- Designed for high D/T ratios to provide maximum floc contracting through out the basin
- Power/Pumping is distributed evenly across the entire impeller blade
- Maximize floc formation and minimize chemical use

즉, 응집기의 개발사에서 보듯이 최근에는 임펠러의 형태가 전단율 (Shear rate)은 낮고 응집지내 넓은 범위에서 유동이 균일하게 분포되도록 변화하고 있는 추세이다.

이는 동력소모를 줄이고, 유지관리를 용이하게 하여 설계자 및 현장 운영자의 요구조건을 최대한 반영하며 변천되어지고 있다.

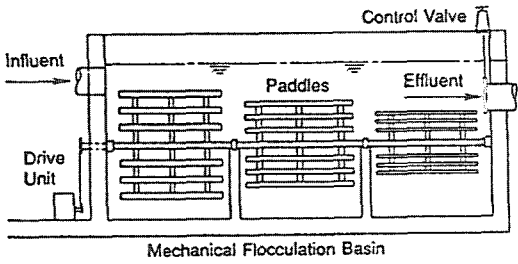
2.2. 장방향 응집기의 목적

장방향 형태 (응집지의 가로×세로 폭이 1.5~2:1정도 이상인 형태) 응집지내에 1대의 수직형 응집기를 설치하여 응집에 필요한 응집기의 절대 수량을 감소시켜 시설비 및 유지관리비 등 제반 비용을 크게 절감시키고자 하는 것이 목적이다.

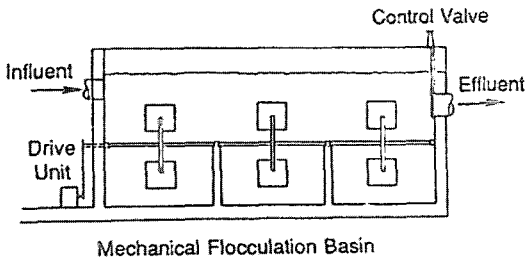
2.3. 장방향 응집지에서 종래의 기술 내용

종래의 상·하수처리장에서 응집지는 일반적으로 다음과 같이 설계되어져 왔다.

장방향 응집지에서의 한 대의 수직형 응집기를 설치하는 방법



(a) Horizontal Shaft - Paddle Flocculator



(b) Horizontal Shaft - Shroud Turbine Flocculator

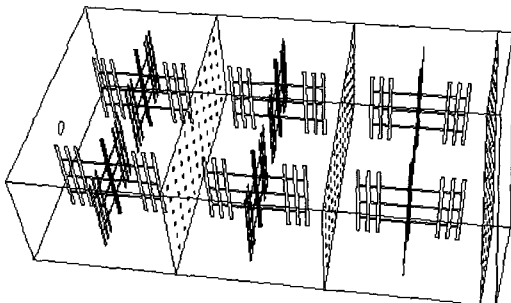
Fig. 5 Horizontal Shaft Type

2.3.1 장방향 조에 적용된 수평축 구조

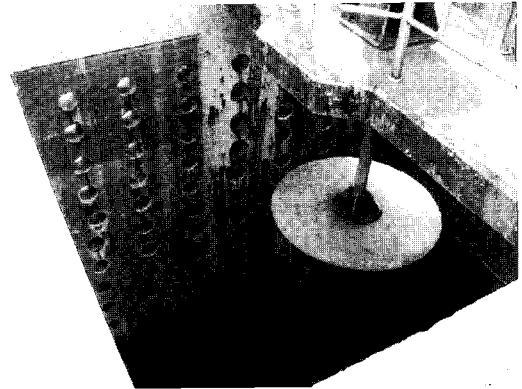
이는 1개의 조에 1대의 구동부로 여러개의 Paddle 등 임펠러를 설치하여 운용되어지는 것으로 동력전달효율이 떨어져 적용 동력이 상승되고, 유지관리 비용이 많이 소요되는 문제점이 발생되어 왔다.

2.3.2 장방향 조에 적용된 수직축(방사형 유동) 구조

이는 1개의 조에 1~수대의 수직축 응집기를 설치하여 운용하는 것으로서 유동 전달 효율이 떨어져 응집지



(a) Vertical Shaft - Paddle Flocculator (2대 적용)



(b) Vertical Shaft - Shroud Turbine Flocculator(1대 적용)

Fig. 6 Vertical Shaft Type

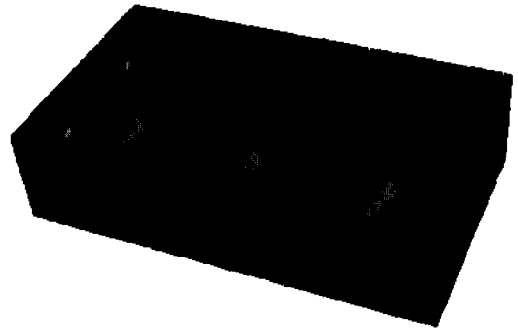


Fig 7. Vertical Shaft Type - Hydrofoil(1대 적용)

모서리 및 조 바닥에 Flocc의 침전이 발생하거나 최초 설치비의 증대 즉, 시설비 및 유지관리비 등 제반 비용이 크게 든다.

2.4 장방향 응집지에서 개선된 기술 내용

현재 응집지에서의 개선된 기술적 내용은 1개의 장방향조에 1대의 수직축 Hydrofoil Type의 응집기를 설치하여 운용함으로써 유동 전달 효율은 수대의 응집기 역할과 같게 하며 응집지 각 구획별로 단락류를 방지하고, 응집지 모서리 및 조 바닥에 Flocc의 침전 방지를 시키는 역할을 만족할 수 있게 개선되어 시설비 및 유지관리비 등 제반 비용이 크게 줄이는 기능을 동시에 갖춘 것이 그 특징이다.

3. 장방향 응집기의 설계 내용

3.1 장방향 응집기의 설계 계산

$$P = \frac{N_p \times \rho \times N^3 \times D^5}{2.48 \times 10^5} \text{ (kW)} \quad (1)$$

$$D = (0.35 \times 0.4) \times Te \text{ (m)} \quad (2)$$

$$C = (0.5 \times 0.6) \times D \text{ (m)} \quad (3)$$

$$Te = 1.13 \times \sqrt{(L \times W)} \text{ (m)} \quad (4)$$

여기서, 각 변수의 주요부는 다음과 같다.

- D : 임펠러 직경, m
- C : 임펠러 설치 위치 (바닥에서의 높이), m
- L : 응집조의 길이, m
- W : 응집조의 폭, m
- Te : 등가탱크직경, m
- P : 응집기의 소요 동력, kW

3.2 PILOT 및 FULL SCALE 응집지의 설계 사양

3.2.1 Full Scale에서의 유입수 조건

유량(Q₁) : 150,000 m³/일/6지
 ⇒ 25,000 m³/일/지 = 17.631 m³/min/지
 = 0.289 m³/s/지

3.2.2 Pilot Scale에서의 유입수 조건

유량(Q₂) = 유량(Q₁)/R³ = 유량(Q₁)/10³

Table. 1 Pilot & Full scale에서의 치수비

Pilot Scale		Full Scale		비 고
D _p	0.3m	D	3.0m	임펠러직경
L _p	0.88m	L	8.8m	조 길 이
W _p	0.5m	W	5.0m	조 폭
T _p	0.75m	T	7.5m	등가조직경
Z _p	0.385m	Z	3.85m	수 심
C _p	0.18m	C	1.8m	임펠러설치
V _p	0.169m ³	V	169m ³	조 체 적
D _p /T _p	0.4	D/T	0.4	

유량(Q₂) : 25 m³/일 = 0.017 m³/min
 = 0.00029 m³/s

cf) R (선형치수비)는 10임.

3.2.3 상사값 적용에 의한 회전수선정

Pilot Scale과 Full Scale의 R (선형치수비)는 1 : 10으로 선정한다. (Table 1. 참조)

$$N = N_p \left(\frac{D_p}{D}\right)^n = N_p \left(\frac{1}{R}\right)^n \text{ (rpm)} \quad (5)$$

여기서, n값은 3/4를 적용한다.

4. 장방향 응집기의 Pilot Scale 실험 내용

4.1 Pilot Scale 설비에서의 실험 내용

Pilot Scale 설비의 시험은 3항의 조건을 기준으로 응집지의 유동 패턴 (단락류 방지)등을 분석을 위해 PIV (Particle Image Velocitometry) 장비를 이용하였다.

Figure 8의 PIV 장치는 컴퓨터의 고속연산기능과 영상처리기법을 활용하여 가시화 유동장으로부터 속도벡터를 동시다점으로 획득할 수 있는 최신 계측 기술이다.

이 방법으로 비정상상의 유동장에 대하여 순간의 속도 분포를 연속적으로 구할 수 있으며, 기록된 영상은 반복 처리가 가능하여 데이터의 재현성 확보가 유리하다.

Figure 9는 Pilot Scale 실험 장치의 장면이다. 모터는

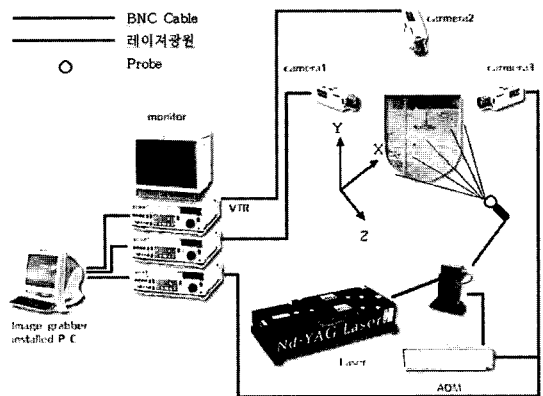


Fig 8. PIV 실험장치 구성도

장방향 응집지에서의 한 대의 수직형 응집기를 설치하는 방법

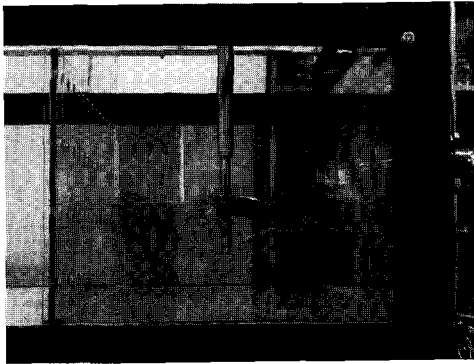
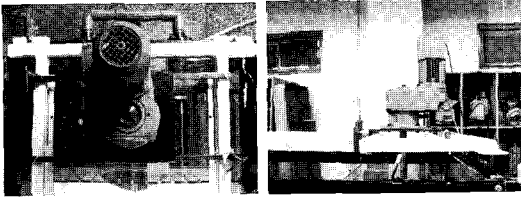


Fig 9. Pilot 실험장치 전경

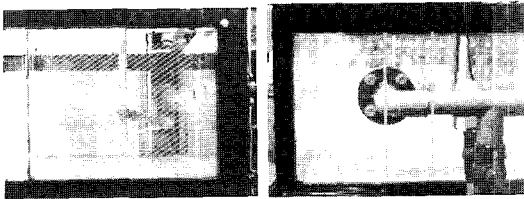


Fig. 10 유속 측정 포인트

인버터에 의한 속도 변속이 가능하며 임펠러는 Table 1의 설계 내용대로 설치하였다.

유입구 중앙수직단면 (Case 1)은 유입부에서의 유동 형태 (pattern)을 확인코자 하는 목적이다.

임펠러 팁 부분 수직단면 (Case 2)는 임펠러 끝단에서의 유속 즉, Tip 끝 속도를 확인코자 하는 목적이다.

4.2 PIV 계측 장비의 설명

- 입력장치 : 고속도카메라 (HI1020x V1020)
 - 화면 및 해상도
- 획득프레임수 (시간평균 및 동영상용)
 - : 250 frames/케이스 - 초당 250회 촬영
- 조명 : Ar-Ion 연속광레이저 (500 mW)
- 추적입자 : 평균직경 100 마이크로미터 PVC 입자 - 비중 : 대략 1.0~1.02

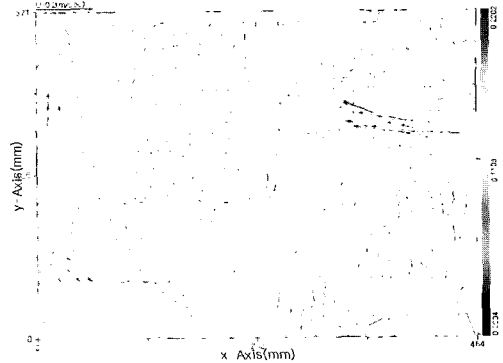


Fig. 11 임펠러 설치 위치 (Velocity Vector 영역 Case 1부분) 순간속도벡터



Fig. 12 속도벡터 동영상 장면

- PIV 처리 소프트웨어 : (주)아이아이티 CACTUS 3.3

4.3 PIV 처리 결과(Pilot Scale 실험 결과)

Figure 11의 내용을 분석하면 다음과 같다.

- 유입부의 유속은 0.22 m/sec로 형성됨. (방향은 X 축으로 좌측으로 이동됨)
- 유입부 벽면과 임펠러 중심선의 약 3/4지점부터 흐름이 하향으로 유도되어 형성됨. (단락류의 흐름 패턴이 발생하지 않음)
- 상기 유동 패턴으로 보면 유입부에서 임펠러 중심선의 약 3/4지점부터 하향으로 흐름이 유도되어 임펠러 중심선과 다공벽의 약 1/2 지점에서 조 바닥으로 부딪혀서 반동됨.
- PIV 실험에서 유의할 점은 유속의 기준점을 정한

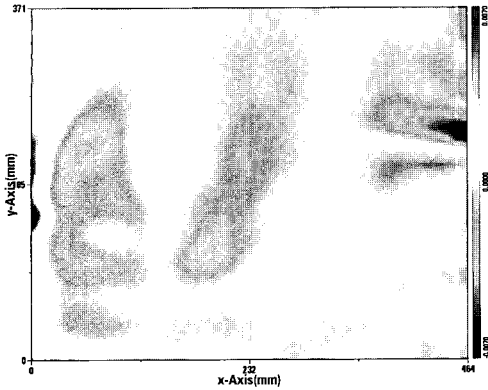


Fig. 13 평균 와도 장면

상태에서 입자의 벡터 (속도-벡터량)를 측정할 수 있음. 즉, 기준되는 속도가 있어야 측정 및 분석이 가능함.

- 상기의 화살표는 유속 (벡터량)을 나타내는 것으로 최고 속도는 유입부의 0.2202 m/sec를 나타냄.
- 상기의 속도 벡터는 250 frames 중 1 frame을 도식한 것임.

Figure 13의 내용을 분석하면 다음과 같다.

- 평균속도벡터에서의 와도(vortex : 소용돌이, 회전류)를 나타낸 것이다.
- 전체면에서의 와도가 유입부 및 다공벽 중간 지점을 제외하곤 면적의 약 4/5 정도 영역에서 고르게 형성되는 것으로 보아 G값이 안정적이다.

4.4 Pilot Scale 설비에서의 실험 결과

- 상기 실험조건에서 임펠러 회전수는 67.5 rpm을 적용하였다.
- 유입 유속인 0.22 m/sec를 적용하여도 응집지의 전반적인 유동 형태는 단락류가 발생하지 아니한다.
- 응집지 내에 지속적인 순환 흐름이 발생하여 모서리나 그 밖의 영역에서 DEAD ZONE이 형성되지 아니한다.
- 임펠러 끝단에서 파생되는 흐름이 유속 및 와도의 크기가 크지 않음으로 플록의 생성이 잘 이루어질 것으로 예측된다.
- 유동의 형태가 조내에서 정방향(정육면체 구조)와 동일한 Single Flow가 형성됨으로 수류 순환이 원활하여 유입수의 체류시간 원활화와 PIN 플록간의

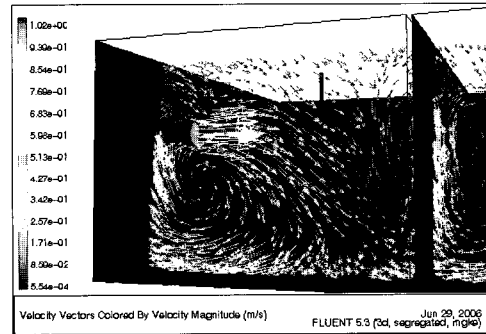
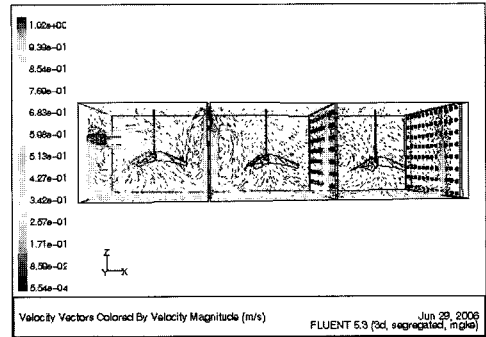
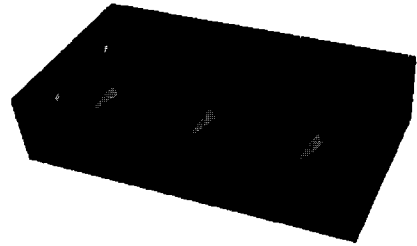


Fig. 14 장방향 응집지 Simulation 장면

- 충돌회수 증가로 응집에 효율적인 것으로 판단된다.
- 응집지의 전 영역에 대부분 와도의 편차가 균일하여 양호한 플록 형성이 될 것으로 파악된다.

5. 장방향 응집기의 Full Scale Simulation 해석 내용

5.1 Full Scale에서의 해석 내용

식 (5)를 사용하여 Pilot Scale에서의 축 회전수 67.5 rpm은 Full Scale에서 12 rpm이 필요하다는 것을 확인할 수 있다.

- 응집기 제1열 : 12 rpm, 제2열 : 9.5 rpm, 제3열 5.5

장방향 응집지에서의 한 대의 수직형 응집기를 설치하는 방법

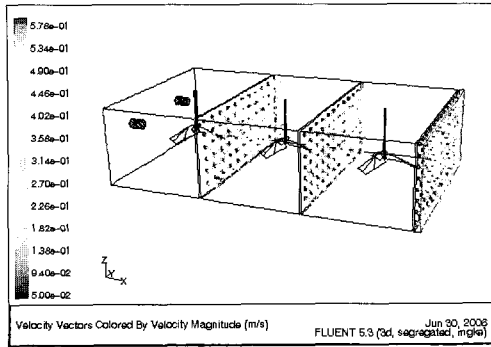


Fig. 15 다공벽에서의 유속 크기

rpm, 기타 조건은 3.2.1항과 같다.

Figure 14의 내용을 분석하면 다음과 같다.

- 유입부에서의 유선이 Pilot 설비의 유동 Pattern과 동일하게 유지되어 상가값이 옳다는 것을 확인할 수 있다.
- 그리고, 각 열의 유동이 Single flow로 형성되어 짐으로 단락류는 형성되지 않는다는 것을 파악할 수 있다.

Figure 15의 내용을 분석하면 다음과 같다.

	유속 설계 기준	생성 유속 크기	개구비
제1~2열	0.55 m/s 이내	0.389 m/s	3%
제2~3열	0.45 m/s 이내	0.309 m/s	4%
제3열 후단부	0.35 m/s 이내	0.230 m/s	5%

즉, Simulation 결과는 설계 기준에 만족한다.

5.2 Full Scale 설비에서의 Simulation 결과

- 상기 조건에서 임펠러 회전수는 제1열 12rpm, 제2열 9.5rpm, 제3열 5.5rpm을 적용하였다.
- 응집지의 유입부에서의 유동 형태는 Pilot 설비와 동일하게 형성되어 단락류가 발생하지 아니한다.
- 응집지의 전반적인 유동형태도 단락류가 형성되지 않는 Single Flow가 형성된다.
- 응집지 내에 지속적인 순환 흐름이 발생하여 모서

리나 그 밖의 영역에서 DEAD ZONE이 형성되지 아니한다.

- 유동의 형태가 조내에서 장방향 (정육면체 구조)와 동일한 Single Flow가 형성됨으로 수류 순환이 원활하여 유입수의 체류시간 원활화와 PIN 플록간의 충돌회수 증가로 응집에 효율적인 것으로 판단된다.

6. 결론

본 실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 상·하수도정수장에서 사용하는 가장 최선의 응집기는 Hydrofoil Type으로 전단율 (Shear rate)은 낮고 응집지내 넓은 범위에서 유동이 균일하게 분포되도록 한다.
- 2) 또한, 여기서 한단계 발전시켜 장방향 형태 (응집지의 가로×세로 폭이 1.5~2 : 1정도 이상인 형태) 응집지내에 1대의 수직형 응집기를 설치하여 응집에 필요한 응집기의 절대 수량을 감소시켜 시설비 및 유지관리비 등 제반 비용을 크게 절감시킬 수 있는 기술적인 토대가 마련되어 있다.
- 3) 상기 자료들은 Pilot Sclae 설비의 테스트와 Full Scale의 Simulation 자료를 이용하여 작성하였고 현재 Field에서의 운용 및 테스트를 실시하기 위해 준비중이다.

후 기

본 실험은 2006년 한국해양대학교 기계정보공학부에서 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) American Water Works Association Research Foundation, 1991, "Mixing in Coagulation and Flocculation."
- (2) 주식회사 우진 기술자료.
- (3) 김기석, 강문후, 2003, "한국형 배연탈황공정 격상 실증연구사업 흡수탑 교반기 최적화 연구," 산업자원부, pp14~15.