

선회류를 이용한 응집침전모듈의 개발 및 실증 연구

문진영¹, 조영근², 송승준², 김진한^{2*}
¹인하대학교 환경연구소, ²인천대학교 도시환경공학부

Development and Lab-scale Plant Study of Coagulation Sedimentation Module using Cyclone

Jinyoung Moon¹, Young-Gun Cho², Seung-Jun Song² and Jin-Han Kim^{2*}

¹Environmental Research Institute, Inha University

²School of Urban and Environmental Engineering, Incheon National University

요약 본 연구의 목적은 소규모 응집침전모듈의 개발 및 lab-scale 테스트를 통한 실증이다. 최근 하수처리율이 높아짐에 따라 비점오염원 관리에 대한 관심이 높아지고 있어 소규모 처리장치 개발의 필요성이 증대되고 있다. 본 연구의 응집침전모듈은 응집공정 이후 외부 영역에서 선회류를 통한 플럭(floc)의 추가 성장 및 미세 플럭 수의 감소, 내부 침전 영역에서 수직·수평류 복합침전방식을 통한 침전효율 증대로 효과적인 고액분리가 가능토록 하였다. 응집침전모듈은 수직·수평류 복합침전방식을 통해 재래식침전조에 비해 같은 체적에서 침전면적 및 표면부하율을 4.4배 증가시킬 수 있었다. 본 연구에서 외부 및 내부 침전 영역에서의 선회류 형성·유지와 내부 침전영역에서의 균등한 유량분배를 본 공정의 중요한 설계인자로 선정하였고, 이의 도출을 위해 유체유동해석 모델인 FLUENT를 이용하였다. 선회류 유동경향 모사를 통해 유입속도, 외부조의 규격, 하부콘호퍼 깊이 등을 결정하였고 속도분포 및 유량분배 해석을 통해 유출공 직경과 개수, 유출홀 직경 등 내부 침전영역의 세부 규격을 도출하였다. 60 ℓ/hr 규모의 과일릿 테스트 결과 20분의 체류시간 동안(표면부하율은 37.3 m³/m²일) 탁도 300~800 NTU의 폐수를 고분자응집제 주입 없이 10 NTU 이하로 처리할 수 있었으며, 유체유동해석 모델을 활용한 설계인자 도출의 가능성을 확인하였다.

Abstract The purpose of this study is small scale coagulation module is developed and demonstrated through a lab-scale test. Recent as a sewage treatment rate increases, have heightened the interest in the necessity on the nonpoint source and developing a small processing unit has been increased. Coagulation sedimentation module in this study is additional growth of floc through swirling in the outside zone, reduction of microstructure floc number and the internal settling zone through vertical/level flow complex sedimentation method after the coagulation process precipitation method as an effective high separation efficiency can be divided was also assessed. Coagulation sedimentation module can increase the load factor was 4.4 times compared to conventional clarifier base on the same volume and surface area through vertical/level flow. In this study, this process was selected formation and maintenance of swirling and uniform flow distribution in the internal settling zone as an important design factor, to derive its FLUENT was used to characteristics of the flow model. Through the simulation of swirling, influent velocity, dimensions of external basin, hopper depth of bottom cone was determined and through analysis of velocity distribution, flow distribution detailed specifications are derived like as diameter and number of effluent hole. Lab-scale(120 ℓ/hr) test results, influent of 300~800 NTU to less than 10 NTU without polymer feeding was able to operate in the 20minutes retention time(surface loading rate 37.3m³/m²-day), and through analysis FLUENT the possibility of using design parameters were derived.

Key Words : coagulation sedimentation module, cyclone, non-point source

이 논문은 인천대학교 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jin-Han Kim(Incheon Univ.)

Tel: +82-32-835-8745 email: jinhan@incheon.ac.kr

Received January 24, 2014

Revised March 11, 2014

Accepted May 8, 2014

1. 서론

현재까지 도시지역의 하수처리시설 설치, 산업폐수의 처리의무 부과 등 점오염원 중심의 물관리대책의 시행으로 수질개선에 어느 정도 효과를 거둘 수 있었다. 그러나 하천의 획기적인 수질개선 및 호소의 탁수문제 등을 완벽히 제어하지 못했으며, 도시의 고밀도 개발, 자연지역의 개발 등에 의한 비점오염원 및 비점오염물질의 증가에도 불구하고 이에 대한 대책이 수반되지 않아 비점오염원이 공공수역의 수질에 미치는 영향은 지속적으로 증가되었다. 따라서 공공수역의 수질을 더욱 개선하기 위해서는 점오염원 중심의 수질보전대책을 보완할 비점오염원 관리대책의 마련 및 추진이 필요하다. 최근 “녹색성장 국가 전략”의 일환으로 비점오염원 관리 및 하수 처리수와 우수 재이용을 재고에 대한 관심이 증가하고 있으며 특히 비점오염원 처리를 위한 소규모 고효율 처리장치의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

비점오염원이라 함은 도시, 도로, 농지, 산지, 공사장 등으로서 불특정 장소에서 불특정하게 수질오염물질을 배출하는 배출원을 말한다. 비점오염은 인위적, 자연적 배출지점이 불특정하게 희석·확산되면서 넓은 지역으로 배출되며, 배출량의 예측 및 수집이 어렵고 일정치 않은 처리효율을 보이는 특징을 가지고 있다[1].

이러한 비점오염원 저감시설은 크게 저류형 시설(연못, 장기저류지, 인공습지, 강우저장시설 등)과 식생형 시설(식생수로, 식생여과대 등), 침투형 시설(침투조, 침투도랑/건조우물, 유공성포장 등), 우수유출수 처리시설(스크린, 와류형 부유물 분리기, 용존공기부상, 여과처리시설, 수유입장치 등)과 생물학적 처리 및 화학적 처리 등 하수처리 기술을 직접 적용하는 방법 등으로 분류할 수 있다[2].

장치형 비점오염원 처리시설 중 응집침전형은 부유물질뿐만 아니라 용존성 유기물에 대한 제거도 기대할 수 있고 특히 인의 제거에 탁월한 성능을 보이는 장점이 있다. 그러나 현재까지의 재래식 응집침전공정은 급속·완속교반, 침전공정 등의 시설 설치로 인한 소요부지가 넓고 이동성의 제약이 있으며 설치 가격이 높은 점에서 이를 대체할 소규모의 이동가능한 고효율 장치의 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 선회류를 이용한 소규모 응집침전모듈을 개발하고 lab-scale 테스트를 통해 설계인자

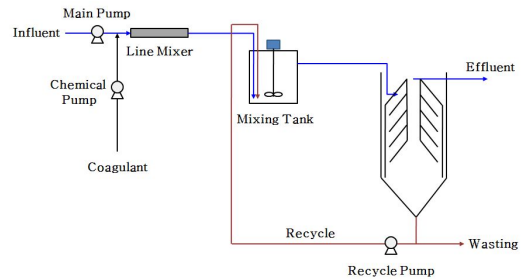
의 타당성 및 장치의 처리 효율을 실증하였다.

2. 본론

2.1 연구방법

2.1.1 응집장치의 구성

응집장치는 1)폐수와 응집제의 효율적인 초기혼화를 위한 라인믹서, 2)응집(coagulation)과 응결(flocculation)반응이 동시에 이루어지는 단일교반조, 3)침전모듈로 구성되어 있다[Fig. 1].



[Fig. 1] Diagram for Coagulation processes

라인믹서는 기존 급속교반의 백믹싱(back mixing) 문제의 해결과 장치의 단순화를 위해 도입하였다. 급속교반에서의 백믹싱은 응집제의 국부 분산으로 빈약한 플럭의 성장, 잔류 알루미늄 농도 증가, 응집제 주입량 증가 등의 원인이 된다[3]. 이에 라인믹서의 도입으로 응집반응 초기에 응집제를 빠르고 균일하게 분산시킬 수 있으며 이는 응집·응결반응이 단일교반에 의해 동시에 일어날 수 있도록 하는 중요한 단위공정이 된다. 본 연구에서는 Fig. 2에 나타난 나선형 엘리먼트(helical elements)로 구성된 케닉스 스태틱 믹서(kenics static mixer)를 사용하였다.



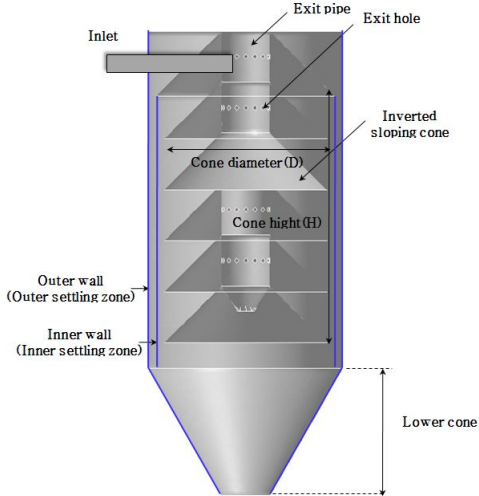
[Fig. 2] Line mixer

(a) Kenics static mixer (b) Helical elements

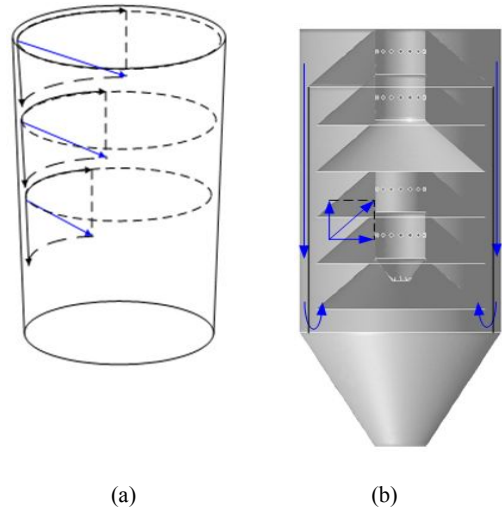
Fig. 3과 Fig. 4에 침전모듈의 형태와 외·내부침전영역에서의 유체 흐름을 나타내었는데 본 연구에서 개발한 침전모듈은 기본 원통형 구조의 몸체와 하부에 원뿔형의 콘이 연결된 형태로 구성되어 있으며, 45° 기울기의 경사콘 6개가 설치되어 있고 경사콘 사이마다 유출공이 위치하고 있다. 최상부 경사콘은 나머지 경사콘을 감싸는 구조로 설치되어 외부 침전영역과 내부 침전영역을 구분하고 있고 이 내벽으로 인해 침전에 필요한 체적을 모듈 높이가 전체로 활용할 수 있도록 하였다. 외부 침전영역은 순회류에 의해 플럭의 충돌을 유도하여 더욱 조대한 플럭이 형성될 수 있는 기회를 제공하며, 내부 침전영역은 유체의 상향류-수평류 복합흐름으로 인해 필요 침전면적 및 침전효율을 증대할 수 있도록 하였다. 내부 침전조 내에 설치되어 있는 경사콘들은 상향류를 전체적으로 고르게 분포시키는 역할을 하며, 내부침전조 중심에 위치한 유출부로 인해 유체의 흐름은 상향류와 수평류가 복합된 형태로 움직이며 실제 침전면적은 경사콘 외곽의 표면적이 된다. 이때 모듈의 단면적인 겉보기 침전면적에 비해 4.4배 증가된 침전면적을 확보할 수 있다.

$$practical\ sedimentation\ area = \pi \cdot D \cdot H$$

여기서, D = 경사콘 직경
 H = 경사콘 전체 높이



[Fig. 3] Coagulation sedimentation module overview



[Fig. 4] Fluid flow in sedimentation module
 (a) Outer zone (b) Inner zone

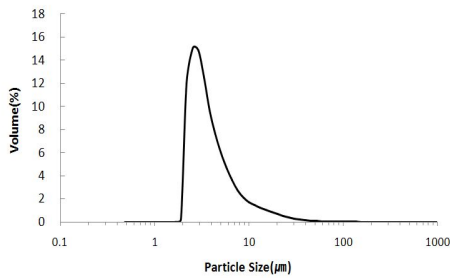
2.1.2 응집실험(jar-test)

일반적인 응집과정에서 급속교반은 주입된 응집제가 수화되어 불용성 입자가 되기 전에 입자에 작용하여 입자의 응집반응을 일으키는 역할을 하며, 완속교반은 상대적으로 낮은 교반강도에서 응집된 미세입자가 충돌하여 더욱 조대한 플럭으로 응결시키기 위해 필요하다.

본 연구에서는 단일교반조에서 응집과 응결반응이 동시에 일어나 고분자응집제 없이 침전가능한 플럭으로 성장하기 위한 조건 도출을 위하여 응집실험(jar-test)을 수행하였다.

대상원수는 분말황토를 이용하여 200 NTU의 탁도를 가진 인공폐수를 제조하여 사용하였으며 황토의 입자 분포도는 Fig. 5와 같고 평균 직경은 0.69 μ m이었다.

응집실험에서 자(jar)는 2 l의 사각형 단면을 가진 게이터자(Gator's jar)를 사용하였으며, 자테스터(jar-tester)에 설치된 패들(paddle)은 직사각형(7.5 × 2.5 cm)의 단일 패들을 사용하였다. 응집제는 추가적인 pH 조정공정이 필요하지 않도록 PAC 제품류중 염기도를 높은 APAC50(Al₂O₃ 10.5%, 염기도 50~55, 이영화학)을 사용하였다. 또한 응집반응에 필요한 알칼리도(50~100 mg/l as CaCO₃)를 보충하여 자테스트를 수행하였다.



[Fig. 5] Particle distribution of ocher soil powder

응집과 응결을 위한 단일교반조건인 속도경사 및 교반시간을 결정하기 위해 Table 1 - Table 3에 나타난 조건에 따라 실험을 수행하였다.

고분자응집제는 사용하지 않았으며 응집반응 완료 후 5분간 침전시킨 다음 상등액을 취하여 탁도를 측정하였다.

[Table 1] Experimental conditions as mixing time (velocity gradient $100s^{-1}$, $200s^{-1}$)

Spec.	Velocity gradient (G, s^{-1})	Mixing time (sec.)	Mixing intensity (GT)
Run 1	100	50	5,000
Run 2		100	10,000
Run 3		150	20,000
Run 4		300	30,000
Run 5		450	60,000
Run 6		900	90,000
Run 7	200	25	5,000
Run 8		50	10,000
Run 9		100	20,000
Run 10		150	30,000
Run 11		300	60,000
Run 12		450	90,000

[Table 2] Experimental conditions as velocity gradient (mixing time 200 sec.)

Spec.	Velocity gradient (G, s^{-1})	Mixing time (sec.)	Mixing intensity (GT)
Run 1	20	250	5,000
Run 2	40		10,000
Run 3	80		20,000
Run 4	120		30,000
Run 5	240		60,000
Run 6	360		90,000

[Table 3] Experimental conditions as velocity gradient and mixing time (mixing intensity 20,000)

Spec.	Velocity gradient (G, s^{-1})	Mixing time (sec.)	Mixing intensity (GT)
Run 1	50	400	20,000
Run 2	100	200	
Run 3	150	133	
Run 4	200	100	
Run 5	300	67	
Run 6	400	50	

2.1.3 FLUENT 모델을 이용한 모듈 설계

최근 장치 내부의 유체 흐름 거동을 해석하기 위해 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)를 이용하는 연구[4-6]들이 활발히 수행되고 있으며, 컴퓨터 성능 발전으로 인한 결과 해석의 신뢰도 향상으로 일반 실험을 대체하는 수준까지 발전하였다[7].

범용 유체해석 프로그램 FLUENT[8]는 유체 및 열전달, 물질 전달 그리고 화학반응 문제를 해석하기 위해 사용되는 CFD 툴(tool)로써 본 연구에서는 침전모듈의 설계인자를 도출하기 위하여 사용하였다. 모델에서 사용된 기본 식은 연속방정식과 모멘텀 방정식(Navier-Stokes equation)이다[9,10].

침전모듈 설계인자 도출을 위한 해석 목록은 다음과 같다.

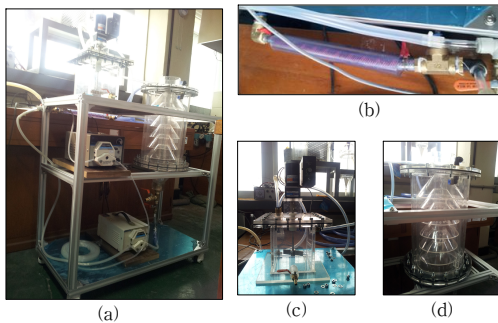
- (1) 외부침전용역의 선회류 유동경향에 따른 설계인자 도출
 - 1) 유입속도(0.1, 0.2, 0.5 m/s)에 따른 선회류 유동 경향
 - 2) 외부침전영역 너비(0.05D, 0.1D, 0.2D)에 따른 선회류 유동 경향
- (2) 내부침전영역의 속도분포 및 유량분배 해석에 따른 설계인자 도출
 - 1) 유출관 하부 폐쇄 여부에 따른 속도분포 및 유량분배 해석
 - 2) 유출면적($0.005D^2$, $0.011D^2$, $0.023D^2$)에 따른 유량분배 해석
 - 3) 내벽과 경사판 사이 간격(0.05D, 0.1D, 0.2D)에 따른 유량분배 해석
 - 4) 유출관 직경(0.15D, 0.3D, 0.45D)에 따른 유량분배 해석

2.1.4 Lab-scale 장치를 이용한 실증

자테스트를 통해 얻어진 운전인자 및 FLUENT 모델

을 이용하여 설계한 침전모듈에 대한 실증 연구를 위해 lab-scale(용량 60 l/hr)의 연속식 응집침전 장치를 제작하여 운전하였으며, 공정 및 장치의 사진을 각각 Fig. 1과 Fig. 6에 나타내었다.

응집제는 원수의 탁도(200~800 NTU)에 따라 50~100 mg/l를 주입하였고 고분자응집제는 주입하지 않았으며, 운전 개시 1시간 후 처리수를 채취하여 탁도를 측정하였다.



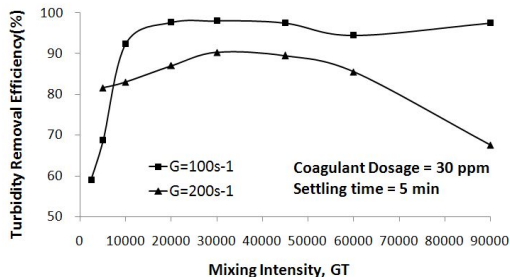
[Fig. 6] Lab-scale pilot apparatus
(a) Entire apparatus (b) Line mixer (c) Mixing tank (d) Sedimentation module

2.2 연구결과

2.2.1 단일교반조건 도출 실험 결과

(1) 교반시간 변화(속도경사 100 s⁻¹, 200 s⁻¹)

100 s⁻¹과 200 s⁻¹의 속도경사에서 25~900초 범위의 교반시간에 따른 탁도 제거효율 결과를 [Fig. 7]에 나타내었다.



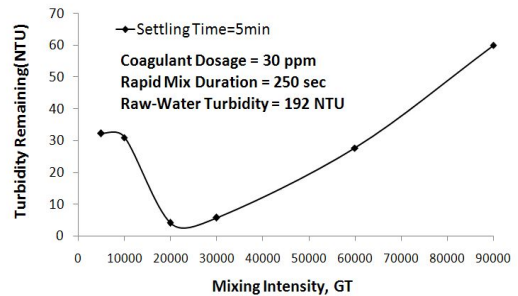
[Fig. 7] Turbidity removal efficient as velocity gradient

플럭의 침강성은 혼합강도 10,000 이상, 속도경사 100 s⁻¹에서 200 s⁻¹일 때보다 월등히 높은 것으로 나타났고

속도경사 100 s⁻¹일 경우 플럭이 충분히 응결하여 미세플럭의 수가 최소화되는 시간은 최소 100초 이상임을 확인할 수 있었다. 이는 충분한 응집반응이 일어난 후 응결반응까지 완료되어 조대한 플럭으로 성장할 수 있는 시간을 나타내며, 너무 긴 교반시간은 응결된 조대 플럭이 다시 미세 플럭으로 해제될 수 있다는 것을 속도경사 200 s⁻¹에서의 결과로 확인할 수 있다.

(2) 속도경사 변화(교반시간 250초)

교반시간을 250초로 고정하고 속도경사를 20~360s⁻¹로 변화시켰을 때 잔류 탁도를 Fig. 8에 나타내었다. 혼합강도 20,000 미만에서 잔류 탁도가 높게 나타난 것은 속도경사 100 s⁻¹ 이하에서는 응집반응에 필요한 충분한 교반이 이루어 지지 않고 있음을 의미하며, 30,000 이상의 혼합강도에서 잔류 탁도가 급격히 증가하는 양상은 강한 교반에 의한 전단력의 영향으로 응집된 플럭이 조대한 플럭으로 성장할 수 없다는 것을 보여준다.



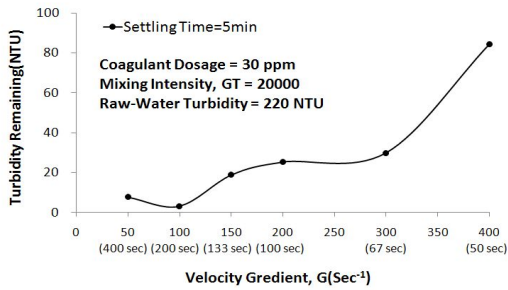
[Fig. 8] Turbidity remaining as velocity gradient, G

(3) 속도경사 및 교반시간 변화(혼합강도 20,000)

혼합강도 20,000에서 속도경사와 교반시간을 변화하여 실험한 잔류 탁도를 Fig. 9에 나타내었다.

100s⁻¹ 이상의 속도경사에서 교반시간과 관계없이 높은 잔류 탁도의 결과를 보였으며, 플럭이 성장하지 못하는 조건은 같은 혼합강도에서 교반시간보다는 속도경사에 의한 것으로 판단할 수 있다.

따라서 응집과 응결이 동시에 일어날 수 있는 조건은 적절한 속도경사와 교반시간에 의해 결정되는 것을 확인할 수 있으며 대상 원폐수에 따라 적절한 운전 조건을 찾는 것이 중요하다.



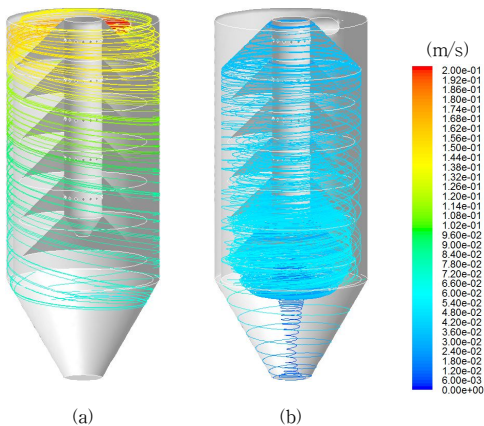
[Fig. 9] Turbidity remaining as mixing intensity, GT

2.2.2 FLUENT 모사 결과

(1) 외부침전영역의 선회류 유동경향 모사 결과

Fig. 10에 유입속도 0.2 m/s, 외부침전영역 너비 0.05D에서 내·외부침전영역의 선회류 유동경향을 나타내었다. 0.1 m/s의 유입속도는 내부침전영역에서 최상부 경사면까지 선회류가 유지되지 않는 것으로 모사되었고 0.5 m/s의 유입속도는 유체의 전단력에 의해 조대 플러키가 파괴될 우려가 있는 것으로 판단되었다. 한편 외부침전영역의 너비에 따른 선회류 유동경향은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

외부침전영역 너비에 따른 선회류 유동경향은 0.05D, 0.1D, 0.2D의 조건에서 큰 차이를 보이지 않았고 모듈의 전체 체적을 고려할 때 너비가 좁을 수록 유리한 것으로 사료된다.



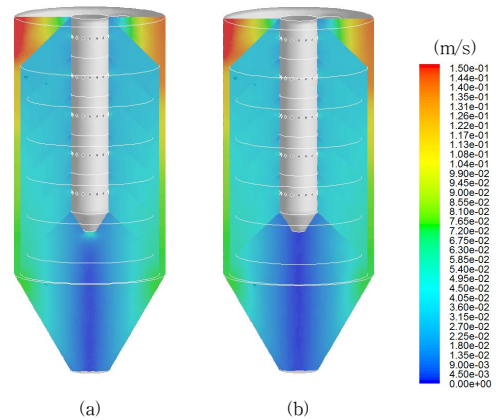
[Fig. 10] Swirling flow with influent velocity(0.2 m/s) and 0.05D-wide outer zone
(a) Outer zone (b) Inner zone

(2) 내부침전영역의 속도분포 및 유량분배

1) 유출관 하부 폐쇄 여부에 따른 속도분포 및 유량분배 해석 결과

유출관 하부 폐쇄 여부에 따른 속도분포를 Fig. 11에, 유량분배 해석 결과를 Table 4에 나타내었다.

유출관 하부를 폐쇄했을 경우 속도분포는 하부콘에서 저속도 영역이 더 확대되는 결과를 보였고 유출관 전체 높이를 통해 유출되는 유량도 유출관 하부를 폐쇄했을 경우 더 균등하게 분배되는 것으로 나타났다.



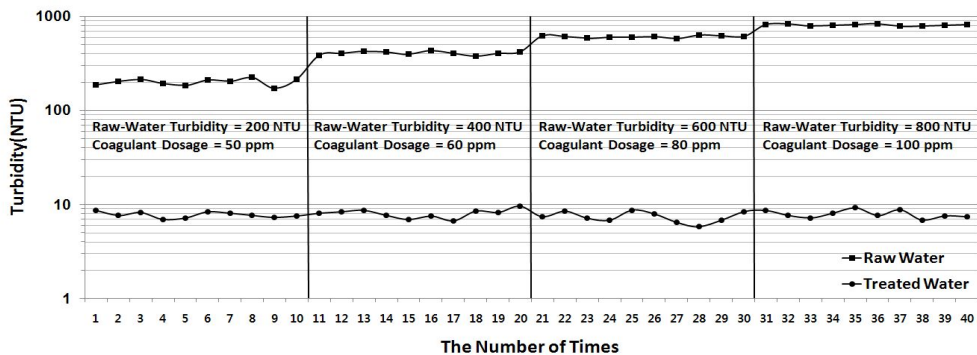
[Fig. 11] Velocity distribution as bottom of exit pipe opening and closing
(a) Opening (b) Closing

[Table 4] Effluence fraction as bottom of exit pipe opening and closing

Spec.	Effluence fraction(%)	
	Opening	Closing
1st exit hole	17.8	20.9
2nd exit hole	17.0	20.3
3rd exit hole	16.3	19.7
4th exit hole	16.0	19.7
5th exit hole	15.3	19.3
Bottom	17.5	-
Total	100.0	100.0
Max./min.	1.159	1.082

2) 유출면적에 따른 유량분배 해석 결과

유출홀 직경 및 개수에 따른 유출면적을 변화하여 유량분배 해석을 한 결과, Table 5와 같이 유출면적이 작을 수록 유량분배는 더 균등한 것으로 나타났으며 유출홀을 통과할 때의 유속으로 인해 미세 플러키가 유출관을 통해 배출되지 않도록 유출면적을 결정해야 할 것으로 사료된다.



[Fig. 12] Result of operating lab-scale pilot apparatus

[Table 5] Effluence fraction as effluence area

Spec.	Effluence area of exit hole		
	0.005D ²	0.011D ²	0.023D ²
1st hole	20.0	20.6	21.3
2nd hole	20.2	20.1	20.4
3rd hole	20.4	19.5	19.9
4th hole	19.8	19.9	19.0
5th hole	19.6	19.8	19.4
Total	100.0	100.0	100.0
Max./min.	1.045	1.052	1.118

3) 내벽과 경사콘 사이 간격에 따른 유량분배 해석 결과 내벽과 경사콘 사이 간격에 따른 유량분배 해석 결과를 Table 6에 나타내었는데 세 가지 조건에서 특별한 경향을 보이지는 않았으며, 모듈의 전체 체적을 고려하여 좁은 간격으로 설계하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

[Table 6] Effluence fraction as gap between inner wall and sloping cone

Spec.	Gap between wall and cone		
	0.05D	0.1D	0.2D
1st hole	20.9	21.2	20.6
2nd hole	20.3	20.8	20.7
3rd hole	19.7	19.7	19.8
4th hole	19.7	19.2	19.6
5th hole	19.3	19.0	19.3
Total	100.0	100.0	100.0
Max./min.	1.082	1.115	1.074

4) 유출관 직경에 따른 유량분배 해석 결과 유출관 직경을 0.15D~0.45D로 변화하여 모사한 결과를 Table 7에 나타내었는데 직경에 따른 유량분배 균등도는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 유출관 직경이 너무 작을 경우 유출관 내부의 상승 유속이 증가하여 미세

플러키가 유출될 수 있고, 반대로 너무 클 경우 경사콘의 너비가 감소하여 플러키의 이동거리가 짧아 유출관으로 유출될 수 있는 점을 고려하여 유출관 직경을 결정하여야 할 것으로 판단된다.

[Table 7] Effluence fraction as diameter of exit pipe

Spec.	Diameter of exit pipe		
	0.15D	0.3D	0.45D
1st hole	20.9	20.9	20.0
2nd hole	19.9	20.3	20.8
3rd hole	20.0	19.7	19.9
4th hole	19.3	19.7	19.9
5th hole	19.9	19.3	19.4
Total	100.0	100.0	100.0
Max./min.	1.080	1.082	1.071

2.2.3 Lab-scale 장치 실험 결과

원폐수의 탁도를 200~800 NTU로 변화하여 랩스케일 장치를 총 40회 운전한 결과를 [Fig. 12]에 나타내었는데, 결과를 보면 원폐수 탁도에 관계없이 적절한 응집제 주입량에 따라 탁도 10 NTU 이하의 안정된 처리수 수질을 보였으며, 처리수의 탁도는 5.8~9.6 NTU 범위에 평균 7.75 NTU 이었다.

3. 결론

본 연구를 통해 기존 급속교반과 완속교반으로 이어지는 응집공정을 원폐수와 응집제의 효율적인 초기혼화를 목적으로 하는 라인믹서와 응집·응결반응이 동시에 일어나는 단일교반으로 이어지는 공정으로 개선하여 재

래식에 비해 더 단순한 구성과 설치 용이성, 에너지 효율성이 뛰어난 비점오염원 처리장치로서의 효율성을 실증을 통해 증명하였다.

또한, 설계인자에 따른 다수의 lab 혹은 pilot-scale 장치의 제작 및 운전 없이 FLUENT 모델만을 이용해 다양한 설계인자를 도출함으로써 장치 설계시 CFD 적용 가능성을 확인하였으며 적정 유입속도, 외부 및 내부 침전 영역의 세부 규격 등을 도출할 수 있었다. 60 ℓ/hr 규모의 lab-scale 테스트 결과 20분의 체류시간 동안(표면부 하율은 37.3 m³/m²일) 탁도 300~800 NTU의 폐수를 고분자응집제 주입 없이 10 NTU 이하로 처리할 수 있었다.

References

- [1] J. Y. Choi, C. M. Shin, *Management of Nonpoint Pollution By Reducing Storm Runoff*, p. 1, KEI, 2002.
- [2] J. Y. Choi, E. S. Shin, *Management of Nonpoint Pollution in Urban Area*, p. 37-84, KEI, 1997.
- [3] J. W. Gwak, "Influences of Mixing in Wastewater Treatment(II)-Velocity Gradient and Coagulation", *Monthly Chemical Engineering*, pp. 92-95, July, 2000.
- [4] Cao Z., Wiley D. E., Fane A. G., "CFD simulations of net-type turbulence promoters in a narrow channel". *J. Membr. Sci.*, 185, pp. 157-176, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0376-7388\(00\)00643-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0376-7388(00)00643-8)
- [5] Cockx A., Do-quang Z., Line A. & Roustan M., "Use of computational fluid dynamics for simulating hydrodynamics and mass transfer in industrial ozonation towers", *Chem. Eng. Sci.*, 54(21), pp. 5085-5090, 1999.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00239-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00239-0)
- [6] Choi B. S., Wan B., Philyaw S., Dhanasekharan K. and Ring T. A., "Residence time distributions on a stirred tank: comparison of CFD predictions with experiment", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43(20), pp. 6548-6556, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie0308240>
- [7] Panneerselvam R., Savithri S., Surender G. D., " CFD simulation of hydrodynamics of gas-liquid-solid fluidised bed reactor", *Chem. Eng. Sci.*, 64(6), pp. 1119-1135, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2008.10.052>
- [8] Anflux, ANSYS workbench release 9.0. Canonsburg, Pennsylvania, U.S.A, 2004.
- [9] Kessler David P., Greenkorn Robert A., *Momentum, heat and mass transfer fundamentals*, Marcel Dekker, New York, 1999.

- [10] McCabe Warren L., Smith Julian C., Harriott Peter, *Unit operations of chemical engineering*, McGraw-Hill, Boston, 2005.

김진한(Jin-Han Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 인하대학교 화학공학과(공학박사)
- 1982년 3월 ~ 1985년 5월 : 한국화학연구원 연구원
- 1985년 9월 ~ 2010년 2월 : 인천전문대학 조교수, 부교수, 교수
- 2010년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 도시환경공학부 교수

<관심분야>

물 환경, 환경에너지

문진영(Jin-Young Moon)

[정회원]



- 2004년 2월 : 인하대학교 일반대학원 환경공학과(공학석사)
- 2011년 8월 : 인하대학교 일반대학원 환경공학과(공학박사)
- 2011년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 환경연구소 박사후연구원

<관심분야>

하·폐수처리, 악취

조영근(Young-Gun Cho)

[정회원]



- 2004년 8월 : 인하대학교 공학대학원 환경공학과(공학석사)
- 2013년 3월 : 인천대학교 일반대학원 건설환경공학과(박사과정 재학 중)
- 2013년 7월 ~ 현재 : 인천광역시 청 환경녹지국장 재직 중

<관심분야>

하·폐수처리

송 승 준(Seung-Jun Song)

[정회원]



- 2011년 2월 : 인하대학교 공학대학원 환경공학과(공학석사)
- 2013년 3월 : 인천대학교 일반대학원 건설환경공학과(박사과정 재학 중)
- 2013년 4월 ~ 현재 : 주)대일환경부설 환경기술연구소 소장 재직중

<관심분야>

산업폐수처리, 고도처리