



슬러지 응집효율이 침강특성에 미치는 상관관계에 대한 연구

한기봉[†], 윤지현

가톨릭대학교 생명공학부 환경공학전공
(2006년 2월 20일 접수, 2006년 3월 21일 채택)

Effective correlation between coagulation efficiency and the sludge settling characteristic

Gee-Bong Han[†], Ji-Hyun Yoon

Department of biotechnology Environmental engineering division, The Catholic university of Korea

ABSTRACT

In these days, the importance of sludge treatment is emerging due to the London Convention, so this study was conducted to propose the alternatives for the improved sludge treatment on the organic wastewater and sewage sludge with JAR test and settling column equipped with stirrer.

The minimum coagulant dosage to earn the optimum sludge settling efficiency resulted from 200mg/l and each critical sludge settling interface showed no distinct difference when PAC was dosed over 200mg/l. Accordingly, Clarification Rate(CR) with 200mg/l dosage was calculated to $CR = (H_o - H_t) / H_o = 1 - 0.4 = 0.6$ because the critical sludge settling height stopped at 0.4.

The settling velocity of sludge interface was decreased with the increase of MLSS concentration but rather increased with MLSS concentration over 1,000mg/l. This resulted from positive effect of interacted coagulation for floc formation by transfer to the zone of compressed settling when MLSS concentration increased over 1,000mg/l. The settling velocity of sludge interface showed $28.66 \times 10^{-3} / \text{min}$ for average settling velocity of sewage sludge which is 6.7 times higher than $4.25 \times 10^{-3} / \text{min}$ for average settling velocity of organic wastewater sludge.

The increasing rate of CR for organic wastewater activated sludge was higher than that of settling velocity under 200mg/l of PAC dosage but settling velocity was higher than CR over 200mg/l of PAC dosage. However, in case of sewage sludge, the differential rate of CR was low when PAC dosage was increased but the settling velocity was suddenly increased with over 200mg/l dosage. Therefore coagulation effect was more efficient to MLSS settling velocity rather than SS removal effect in the supernatant.

[†]Corresponding author (geebhan@catholic.ac.kr)

Keywords : Coagulation, Sludge, Settling Velocity, CR, MLSS

초 록

런던협약의 영향으로 슬러지 처리의 중요성이 대두되고 있는 실정이므로 본 연구는 슬러지 처리에 대한 개선방안의 제시를 목적으로 유기성 폐수 및 하수처리장 슬러지를 대상으로 JAR test 및 교반장치를 부착한 침강 column을 이용하여 응집효율이 침강특성에 미치는 영향에 대한 실험을 실시하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

최적의 침강효율을 얻기 위한 최소의 응집제 투여농도는 200mg/L의 경우로 나타났으며, 200mg/L 이상으로 PAC가 투여될 경우 각각의 임계슬러지 영역의 크기에서는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 따라서 200mg/L로 투여되었을 때의 Clarification Rate(CR)은 임계슬러지 침강높이 비율이 0.4로 나타났으므로 $CR = (H_o - H_t) / H_o = 1 - 0.4 = 0.6$ 로 산정되었다.

MLSS농도가 높아질수록 슬러지 계면 침강속도는 감소하였으나 MLSS농도가 1,000mg/l 이상으로 증가하면 오히려 침강속도는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 슬러지 농도가 1,000mg/l 이상으로 증가하게 되면 압밀침전영역으로 전이되어 상호작용에 의한 응집에 영향을 미치게 됨으로써 오히려 floc 형성에 긍정적인 영향을 미치기 때문이다.

슬러지 응집계면의 침강속도는 유기폐수 활성슬러지의 평균 침강속도 $4.25 \times 10^{-3} / \text{min}$ 보다 하수처리장 슬러지의 평균 침강속도가 $28.66 \times 10^{-3} / \text{min}$ 로 6.7배 높은 것으로 나타났다.

유기성 폐수 활성슬러지는 PAC의 투여량이 200mg/l 이하일 때는 침강속도 증가율보다 CR의 증가율이 더 컸으나 200mg/l 이상일 때는 CR의 증가율보다 침강속도 증가율이 더 커졌음을 알 수 있었다. 그러나 하수슬러지의 경우는 PAC 투여량이 증가함에 따라 CR의 변화율에는 차이가 적었으나 침강속도는 200mg/l 이상일 때 차이가 급격히 증가하였다. 따라서 응집제 투여효과는 상등수의 SS제거율 효과보다는 MLSS의 침강속도에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

핵심용어 : 응집, 슬러지, 침강속도, CR(Clarification Rate), 용존고형물

1. 서론

1973년 및 1978년의 전 세계적인 석유파동 이후 자원과 에너지 분야의 중요성이 대두되었다. 따라서 하·폐수 처리장에서의 슬러지 농축 및 탈수 처리 과정에서의 에너지 소비도 결코 예외가 될 수 없으므로 향후 대두될 환경분야의 문제 중에는 슬러지의 처리 및 처분이 중요해질 전망이다¹⁾. 그러므로 슬러지의 처리를 위한 다각도의 방법과 장치의 개발이 필요한 실정이며, 처리장으로부터 배출되는 슬러지를 처분하기 위하여 기존에 여러 종류의 탈수기를 비롯한 관련 기기들이 개발되고 있다²⁾. 그러나 이러한 기기들은 현재와 같은 슬러지 처

리로 인한 환경문제가 대두되기 전에 개발된 것들로써, 이러한 기기들을 이용하여 슬러지를 처리하기 위해서는 전처리로서 농축조와 슬러지 저류조 등의 부대시설이 필요하다³⁾.

한편, 기존의 하수처리장은 주로 유기물 제거를 위한 활성슬러지 공법을 채택하고 있는데 향후 영양염류의 배출에 의한 부영양화를 방지하기 위하여 대부분의 하수처리장들이 고도처리 공법을 채택하여 시설을 보완 또는 시행 중에 있다. 그러나 기존의 대부분의 하수처리장에서는 잉여 슬러지의 배출 시 상등액이 유입수조로 반송될 때 반송수의 부하에 대한 고려가 충분히 되지 않아 전체적인 공정의 효율이 저하되는 문제점이 제기된 상태이다

7). 따라서, 슬러지 처리효율의 증대와 슬러지 배출 시 방출되는 영양염류의 영향을 최소화시킴으로써 당면하고 있는 환경기술적인 문제의 해결과 슬러지 처리문제로 인한 정책적이고 사회적인 문제에 대한 해결책의 강구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 침전지에서의 방류수의 수질을 높이고 기존 탈수기의 성능을 한층 더 up-grade 시킬 수 있는 이론적인 방안의 마련에 중점을 두고자 탈수기에 투입되는 슬러지 플럭의 농도를 균일하게 유지하고 PAC를 사용할 경우 응집침전에 의한 침강특성 등의 영향으로 농축조 등에서 응집침전 효율의 최적화 조건 등에 미치는 영향⁴⁾을 JAR-test 및 침강 column 등을 이용하여 유기폐수 및 하수슬러지를 대상으로 실험하였다.

2. 실험장치 및 방법

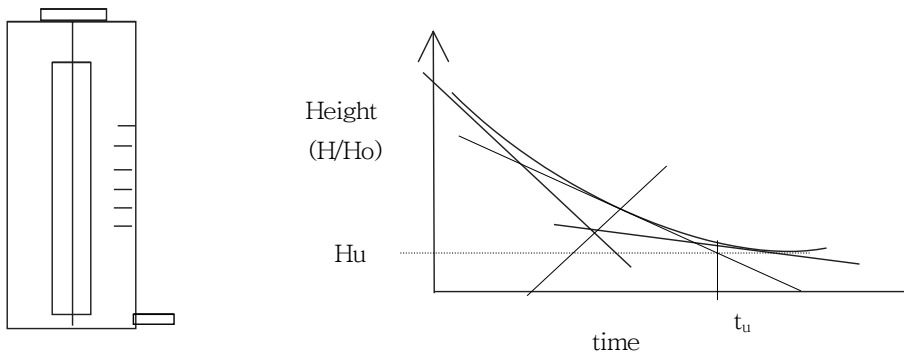
실험에 사용된 슬러지는 유기폐수를 이용한 실험실 표준 활성슬러지 공정에서 채취한 것(SS Wt%: 2.7, M_v/M_s: 0.67)과 경기도 K시의 하수종말처리장에서 채취한 하수 슬러지(SS Wt%: 3.1, M_v/M_s: 0.71)를 사용하였다. 실험실에 설치된 활성슬러지 포기조에서 MLSS를 채취한 뒤 JAR Test를 실시하여 최적의 응집제 투여 농도를 결정하였고, 그 결과를 적용하여 실린더형 중력식 침강칼럼에서 침강속도를 측정하였다. 또한 MLSS 농도별 테스트를 수행하기 위하여 슬러지를 침전조 상등수로 일정 비율 (V/V)로 희석하여 실험을 하였다.

2.1 응집침전- Jar test

Jar test에는 유기폐수를 이용한 표준활성슬러지 및 하수종말처리장 포기조 슬러지를 이용하였고 응집제는 PAC원액(ρ : 1.3 ± 0.05 , Al₂O₃(%): 18.5 ± 0.5 , salt(%): 70 ± 10 , pH(1Wt%): $3.5 \sim 5$)을 1.0%(v/v)로 희석하여 사용하였다. 최적의 응집제 투여량 결정을 위하여 Jar tester(YUYU SCIENTIFIC M.F.G.)에 500ml 용량의 비이커를 탑재하고 여기에 슬러지를 분취한 뒤 응집제를 각각 다르게 단계별로 투여한 다음 2분간 급속교반(200rpm) 후 15분간 완속교반(35rpm) 하고 20분간 침전시킨 후 상등액을 취해 pH 및 SS를 측정하였다.

2.2 중력식 침강 Column test- 실린더형 교반장치 침전 test

슬러지 응집침강실험을 수행하기 위하여 [Fig. 1]에 나타난 것처럼 교반장치가 부착된 실린더형 침강 column을 사용하였다. 이 실험은 중력식 침전조의 설계 시 침전에 필요한 면적을 결정하는 Talmage and Fitch가 개발한 방법⁶⁾으로 실린더형의 교반장치를 이용하여 [Fig. 1]에 나타난 것처럼 침강곡선을 구한 뒤 각각에서의 접선을 그어 침전속도를 측정하고, 농도별 농축침전 시험을 수행하여 고형물 flux(SFg: kg/m²/hr)를 구한다. 농축에 필요한 면적은 식 $A=Q \cdot t_u / H_o$ 에 의하여 구하고 flux를 계산하는데 필요한 농도와 속도는 그래프로부터 구한다. 시험방법은 PAC 투입농도



[Fig. 1] Cylindrical settling column and graphical settling velocity.

및 MLSS 농도별 슬러지 침강높이를 시간에 따라 측정하여 그래프로 그리고 각각의 그래프의 기울기를 구하여 간섭침전속도를 구한다. 각각의 농도에서의 간섭침전속도와와의 곱이 flux로 계산된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 응집제 투여 최적조건

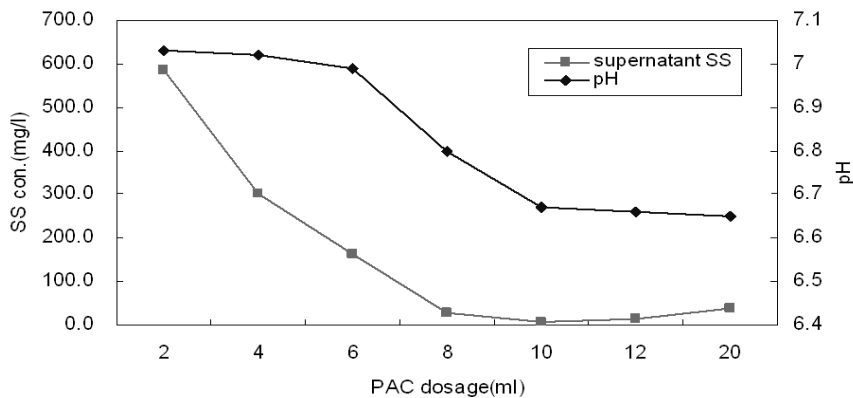
Jar-test에 의한 최적의 응집제 투여는 PAC를 사용하여 1% 농도로 원액을 조제하고 시료에 1ml씩을 넣으면서 최적의 조건을 관찰한 결과 [Table 1]에 나타난 바와 같이 각각의 경우마다

pH, 투여량 및 최대의 응집효율 결정을 위한 SS 등이 10ml PAC 투여의 경우가 제거율 99.5%로 최적의 조건으로 나타났다.

Jar-test 실험결과 응집제 투여량에 따른 상등수 내에 잔존하는 SS의 농도를 측정한 결과와 각각의 pH는 [Fig. 2]에 나타난 바와 같이 응집제 투여량 증가에 따라 SS제거율도 증가하여 상등수 내에 잔존하는 SS 농도가 감소하였으며 10ml이상 투여 시 95%이상의 제거율을 나타내었다. 따라서 [Table 1]에 나타난 결과와 같이 최적의 SS제거 효율을 나타내는 최소투입량은 10ml 임을 알 수가 있었다. 따라서 투여된 PAC 농도는 시료의 부피가

[Table1] Suspended Solids(SS) Analysis With Coagulant Dosage

PAC dosage (10,000ppm, ml)	MLSS conc. (mg/l)	Supernatant SS conc. (mg/l)	Rem. eff. (%)	pH	temp. (°C)
2	1,315	586.0	55.48	7.03	17
4	1,315	302.0	77.03	7.02	17
6	1,315	163.0	87.61	6.99	17
8	1,315	26.0	98.02	6.80	17
10	1,315	7.0	99.47	6.67	17
12	1,315	14.0	98.94	6.66	17
20	1,210	37.0	96.94	6.65	17
30	1,210	15.0	98.76	5.60	17



[Fig.2] The SS concentration & pH in the supernatant with PAC dose.

500m^l이므로 $10\text{mg/ml} \times 10\text{ml} \div 0.5\text{L} = 200\text{mg/l}$ 로 계산 되고 이때의 pH는 6.67로 나타났다.

3.2 PAC 투여에 따른 침강계면 하강특성

[Fig. 3]에는 침강칼럼을 이용하여 PAC 투여에 따른 응집침전 시 슬러지 계면의 하강에 따른 계면높이 비율을 나타내었다. 침강테스트 칼럼의 용적은 6.154 l 였고 그래프에 나타난 각각의 침강곡선은 PAC의 투여량에 따른 계면의 시간별 침강높이를 측정하여 초기높이(Ho)에 대한 침강시간 t에서의 높이(Ht) 비율로 나타낸 것이다. 각 곡선이 나타내는 PAC 투여량은 농도로 환산할 경우 40, 100, 160, 200, 280 및 360mg/L였다.

그래프로부터 최적의 계면침강, 전이침강 및 압밀침강의 각 단계를 명확히 나타내는 농도는 200mg/L이상인 경우임을 알 수 있었다. 이 경우 200mg/L 이상으로 PAC가 투여될 경우 각각의 임계슬러지 영역의 크기에서는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

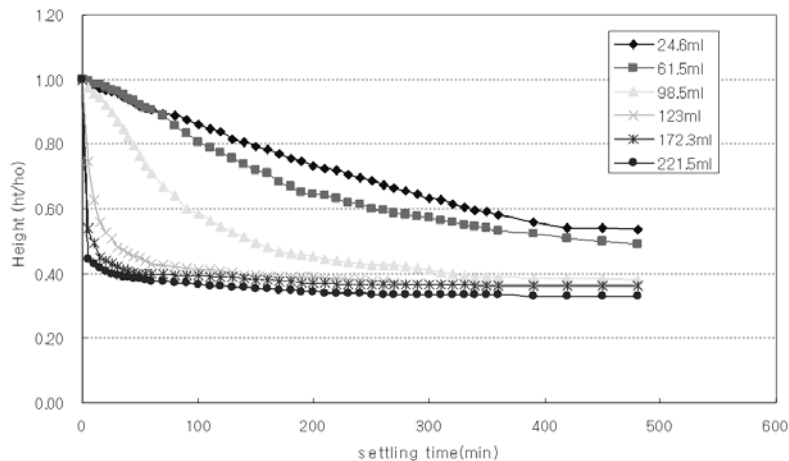
칼럼침강 테스트로부터 나타난 침강계면 높이의 하강 특성은 [Fig. 3]의 그래프에 나타난 것처럼 초기 20~30분 내에 간섭침전이 이루어지고 50% 이상의 Ht/Ho에 도달하는 것을 알 수 있었다. 즉 초기 30분 이내에 전체 침강칼럼 높이의 50%에 도달하여 최종 침강되는 깊이의 90%이상으로 침

강한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 200mg/L로 투여되었을 때의 Clarification Rate(CR)은 임계슬러지 침강높이 비율이 0.4로 나타났으므로 $CR = (H_o - H_t) / H_o = 1 - 0.4 = 0.6$ 임을 알 수 있다.

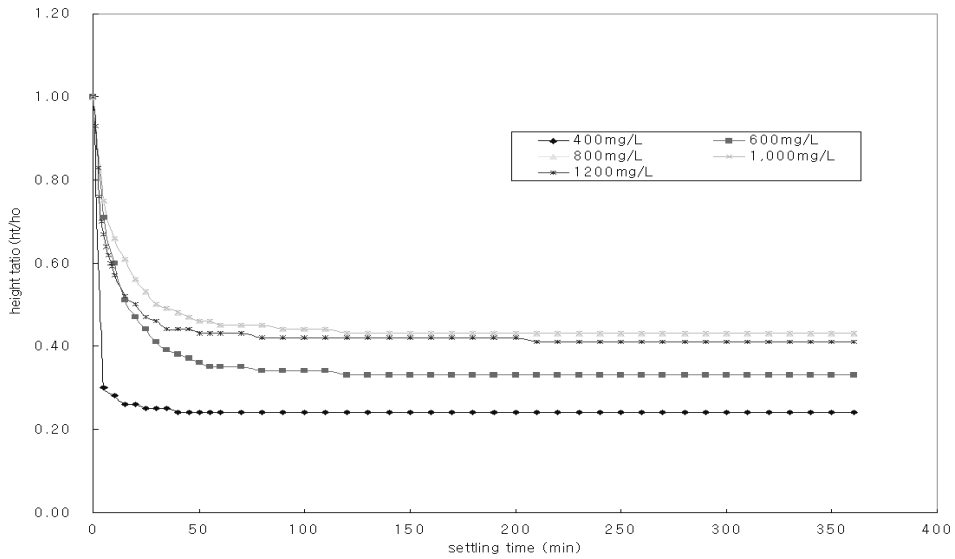
3.3 MLSS 농도에 따른 침강계면 하강특성

[Fig. 4]에는 MLSS 농도변화에 의한 슬러지 응집침전 형태에 따른 간섭침강, 전이침강 및 압력침강의 단계별 계면침전 곡선 시험결과를 도식화하였다. 측정방법은 최적의 PAC 투여량 200mg/l를 고정적으로 투여하고 MLSS 농도를 변화시키면서 응집침강속도로 나타나는 침전형태별 변화를 측정하였다. x축에는 시간(min)을 분단위로 측정하여 나타내었고 y축에는 응집 슬러지 침강계면의 높이 비율(Ht/Ho)을 나타내었다.

[Fig. 4]에 나타난 그래프로부터 MLSS 농도 차이와 상관관계 없이 응집 침전 슬러지는 측정시간 60분 이내에 한계슬러지 배출농도인 최저 침강 높이에 도달하는 것으로 나타났다. 또한 MLSS농도가 높아질수록 슬러지 계면 침강속도는 감소하였으나 MLSS농도가 1,000mg/l 이상으로 증가하면 오히려 침강속도는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 1,000mg/l 이하의 MLSS농도에서는 슬러지 flocc 입자들끼리의 충돌 및 간섭에 의한 영향으로 침강이 방해받으나(간섭침전 영역) 슬러지 농



[Fig. 3] Profile of settling height ratio with time by PAC dose in the settling column.

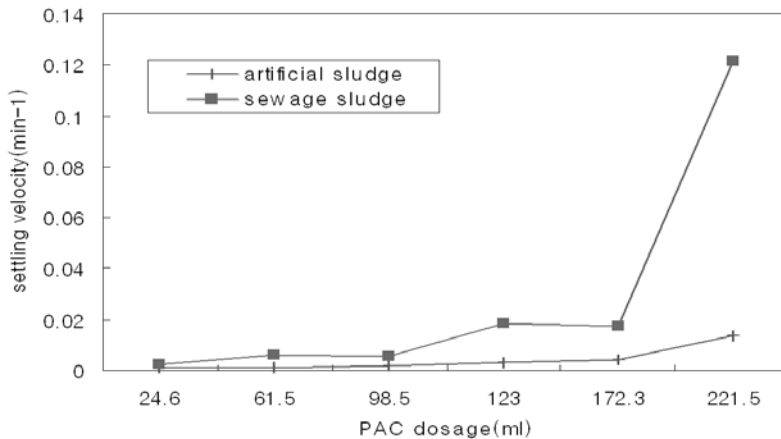


[Fig. 4] Profile of settling height ratio of sludge interface according to MLSS concentration.

도가 1,000mg/l 이상으로 증가하게 되면 상호작용에 의한 응집에 영향을 미쳐 오히려 floc 형성에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 이후 계속 농도가 높아지면 압밀침전영역으로 전이되는 것으로 기존 연구자들의 연구결과도 보고되었다⁹⁾.

3.4 응집 및 MLSS 농도가 침강속도에 미치는 영향 비교분석

응집효율이 침강속도에 미치는 영향의 비교분석을 위하여 [Fig. 5]에는 PAC 투입량에 따른 응집 슬러지 계면의 하강속도를 [Fig. 3]에서 나타낸 직선구간만을 대상으로 하여 구한 값을 투입량에 따른 침강속도의 변화로 나타내었다. 또한 인공 유



[Fig. 5] Profile of settling Velocity for artificial activated and sewage sludge with PAC dosage.

기폐수 활성슬러지의 결과와 비교하기 위하여 경기도 K 하수처리장 슬러지를 대상으로 같은 방법에 따라 구한 침강속도를 그래프로 함께 나타내었다.

슬러지 응집계면의 침강속도는 PAC 투여농도가 160mg/l에 달할 때부터 증가하기 시작하여 200mg/l 이상으로 투입될 때부터 급격하게 증가하기 시작하였다. 각각의 경우 침강속도 증가경향은 모두 동일한 형태로 나타났으나 유기폐수 활성슬러지의 평균 침강속도 $4.25 \times 10^{-3}/\text{min}$ 보다 하수처리장 슬러지의 평균 침강속도가 $28.66 \times 10^{-3}/\text{min}$ 로 6.7배 높은 것으로 나타났는데 이는 하수처리장 슬러지 floc의 성상이 더 coarse 하고 시험대상 슬러지의 MLSS 농도는 약절 3.3에서 나타났듯이 1,000mg/l 이상으로 더 높아질수록 그 영향력이 급격히 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 [Fig. 6]에는 MLSS 농도변화에 따른 슬러지 침강계면 하강속도 변화를 유기폐수 및 하수처리장 슬러지를 대상으로 측정된 결과를 각각 그래프 (a), (b)로 나타내었다. 그래프 (a)로부터 MLSS 농도가 낮은 구간에서는 농도 증가에 따라 침강속도가 $4.5 \times 10^{-3}/\text{min}$ 로부터 감소하여 MLSS농도가 1,000mg/l 일 때까지 $1.09 \times 10^{-3}/\text{min}$ 으로 감소한 뒤 이후 MLSS농도의 증가에 따라 침강속도도 증가하는 것으로 나타났다. 그래프 (b)로부터도 침강속도는 $13.43 \times 10^{-3}/\text{min}$ 으로부터 감소하여 MLSS가 1,115mg/l 일 때까지 $3.19 \times 10^{-3}/\text{min}$ 로 감소한 뒤 유기폐수 슬러지와 마찬가지로 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서

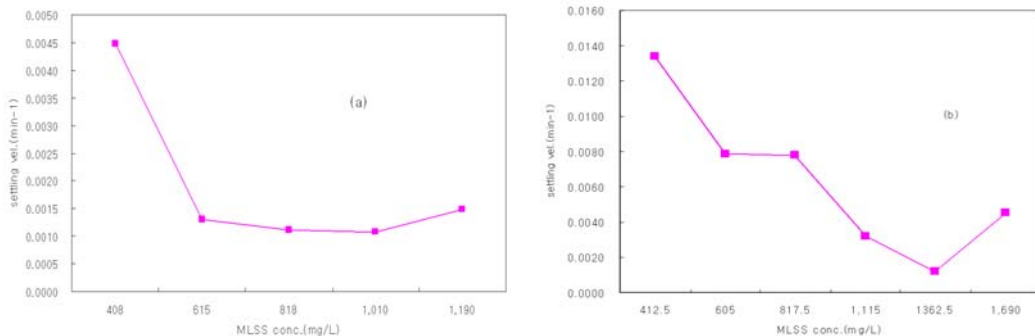
1,000mg/l 이하의 MLSS농도에서는 슬러지 floc 입자들끼리의 충돌 및 간섭에 의한 영향으로 침강이 방해를 받으나(간섭침전 영역) 슬러지 농도가 1,000mg/l 이상으로 증가하게 되면 상호작용에 의한 응집에 영향을 미쳐 오히려 floc 형성에 긍정적인 영향을 미치므로 슬러지 성상이 다를 경우 각각의 영향으로 침강속도는 차이를 보이지만, 침강 시간-전이-압력의 과정을 거치는 계면침전의 형태에 따라 침강특성에는 유사성을 나타내고 있으므로¹⁰⁾ 응집제 투여 시에도 MLSS 농도변화에 따른 영향을 고려해야 하는 것으로 나타났다.

3.5 응집효율이 침강특성에 미치는 영향 비교분석

응집효율이 침강특성에 미치는 영향의 비교분석을 위하여 [Table 2]에는 PAC 투입량에 따른 CR(Clarification Rate)과 SV(Settling Velocity)를 슬러지 특성별로 비교분석하여 나타내었다.

CR은 슬러지 침강column 테스트에서 정화율 $(H_o - H_u)/H_o$ 식을 이용하여 구하였으며, SR은 [Fig. 3]에서 나타난 그래프의 직선구간 만을 대상으로 슬러지 계면 침강속도를 구하였다.

[Table 2]에 나타난 결과로부터 유기성 폐수 활성슬러지는 PAC의 투여량이 200mg/l 이하일 때는 침강속도 증가율보다 CR의 증가율이 더 컸으나 200mg/l 이상일 때는 CR의 증가율보다 침강속도 증가율이 더 커졌음을 알 수 있었다. 그러나 하수슬러지의 경우는 PAC 투여량이 증가함에 따라



[Fig.6] The settling velocity of sludge interface with MLSS concentration.

[Table2] The Coagulation Effect on CR and SV With PAC Dosage

Sludge type		Coagulant	PAC dosage(mg/ ℓ)					
			40	100	160	200	280	360
Organic wastewater	CR		0.46	0.51	0.61	0.63	0.63	0.64
	SV(10^{-3} /min)		1.14	1.22	1.94	2.85	4.56	13.79
Sewage	CR		0.76	0.80	0.80	0.81	0.81	0.83
	SV(10^{-3} /min)		2.56	5.94	5.39	18.69	17.64	121.71

CR의 변화율에는 차이가 적었으나 침강속도는 200mg/l 이상일 때 차이가 급격히 증가하였다. 따라서 응집제 투여효과는 상등수의 SS제거율 효과 보다는 MLSS의 침강속도에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다^{5,6,8)}.

4. 결론

JAR test 시험결과 및 PAC와 MLSS 농도에 따른 유기폐수 활성슬러지와 하수처리장 슬러지에 대한 침강 column 실험으로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

1. JAR test 및 PAC 투여량에 따른 응집침강 column 시험결과 최적의 침강효율을 얻기 위한 최소의 응집제 투여농도는 200mg/L의 경우로 나타났으며, 200mg/L 이상으로 PAC가 투여될 경우 각각의 입체슬러지 영역의 크기에서는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 따라서 200mg/L로 투여되었을 때의 Clarification Rate(CR)은 $CR = (H_o - H_t) / H_o = 1 - 0.4 = 0.6$ 로 산정되었다.
2. MLSS농도가 높아질수록 슬러지 계면 침강속도는 감소하였으나 MLSS농도가 1,000mg/l 이상으로 증가하면 오히려 침강속도는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 슬러지 농도가 1,000mg/l 이상으로 증가하게 되면 기존 연구자들의 연구결과로 보고^{7,9)}된 것처럼 압밀침전영역으로 전이되어 상호작용에 의한 응집에 영향을 미치게 됨으로써 오히려 flocc 형성에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3. 슬러지 응집계면의 침강속도는 PAC 투여농도가 160mg/l에 달할 때부터 증가하기 시작하여 200mg/l 이상으로 투입될 때부터 급격하게 증가하기 시작하였다. 유기폐수 활성슬러지의 평균 침강속도 4.25×10^{-3} /min보다 하수처리장 슬러지의 평균 침강속도가 28.66×10^{-3} /min로 6.7배 높은 것으로 나타났다. 따라서 침강 시간-전이-압력의 과정을 거치는 계면침전의 형태에 따라 침강특성에는 유사성을 나타내고 있으므로¹⁰⁾ 응집제 투여 시에도 MLSS 농도변화에 따른 영향을 고려해야 한다.

4. 유기성 폐수 활성슬러지는 PAC의 투여량이 200mg/l 이하일 때는 침강속도 증가율보다 CR의 증가율이 더 컸으나 200mg/l 이상일 때는 CR의 증가율보다 침강속도 증가율이 더 커졌음을 알 수 있었다. 그러나 하수슬러지의 경우는 PAC 투여량이 증가함에 따라 CR의 변화율에는 차이가 적었으나 침강속도는 200mg/l 이상일 때 차이가 급격히 증가하였다. 따라서 응집제 투여효과는 상등수의 SS제거율 효과보다는 MLSS의 침강속도에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

사사

본 연구는 2005년도 가톨릭대학교 교비연구비의 지원으로 이루어졌음. This study was supported by the Research Fund, 2005 of The Catholic University of Korea.

참고문헌

1. 홍상헌, 보조응집제와 다중원판외통형 여과농축기에 의한 벨트프레스탈수기의 기능개선에 관한 연구, 하수도연구발표회, 35회, pp. 891~893 (1998).
2. 홍상헌, 중·소규모 하수처리장 운영 및 설계 지침, 환경관리공단 (1999).
3. 홍상헌, 농축·탈수공법을 이용한 슬러지처리-Volute 농축탈수기-, 첨단환경기술, 2, pp. 2~8 (2000).
4. 김지훈, 최혁, 김형수, 엄익태, 한기봉, Pilot 규모의 정수처리용 정밀여과 시스템에서 PACs 응집제가 투과 플럭스에 미치는 영향 한국물환경학회지, 19(2), pp. 225~231 (2003).
5. 명규남, 슬러지의 물리적 특성이 침강성에 미치는 영향, MS Thesis, 서울시립대학교 (1991).
6. 이상민, 남세용, SBR 공정에서 유입수 주입방식과 비 포기 유입수 주입시간이 탈질효율과 슬러지 침강성에 미치는 영향 대한환경공학회, 27(7), pp. 719~725 (2005).
7. Hiraoka, Sludge treatment engineering, Donghwa Technology Publishing Co (1998).
8. Kynch, G.J., A theory of sedimentation, Trans. Faraday Assoc., 48, pp. 166~171 (1952).
9. Talmadge, W.P., and E.B. Fitch, "Determining Thickener Unit Areas", Industrial Engineering Chemistry, 47(1), pp. 38~41 (1955).
10. Tchobanoglous, G., F. Burton and H.D. Stensel, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4th ed., Metcalf & Eddy, pp. 389~414 (2004). 