

정수처리 응집효율 개선을 위한 Al(III)염과 Fe(III)염 응집제의 비교 Comparison of Al(III) and Fe(III) Coagulants for Improving Coagulation Effectiveness in Water Treatment

한승우* · 강임석[†]

Seung woo Han* · Lim seok Kang[†]

(주)이에프티 기업부설연구소 · *부경대학교 환경공학과

EFT R&D Center · *Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

(Received April 22, 2015; Revised June 9, 2015; Accepted June 18, 2015)

Abstract : The experimental results of the characteristics of aluminum based and ferric based coagulants for the Nakdong River water showed that the main hydrolysis species contained in alum and FeCl₃ are monomeric species of 98% and 93.3%, respectively. The PACI of r=1.2 produced by the addition of base contained 31.2% of polymeric Al species and the PACI of r=2.2 contained 85.0% of polymeric Al species, as showing more polymeric Al species with increasing r value. Coagulation tests using Al(III) and Fe(III) salts coagulants for the Nakdong River water showed that the coagulation effectiveness of turbidity and organic matter was high in the order of FeCl₃ > PACI (r=2.2) > PACI (r=1.2) > alum. FeCl₃ has showed better flocculation efficiency than Al(III) salts coagulants. In addition, in case of Al(III) coagulants, the Al(III) coagulants of higher basicity, which contained more polymeric Al species, resulted in better coagulation efficiency for both turbidity and organic matter removed. The optimum pH range for all of the coagulants investigated was around pH 7.0 under the experimental pH range of 4.0~9.5. Especially, the highest basicity PACI (r=2.2) and FeCl₃ were considered as more appropriate coagulants for the removal of turbidity in the case of raw water exhibiting higher pH.

Key Words : Coagulant, Basicity, Aluminum Salt, Ferric Salt, Coagulation Effectiveness

요약 : 낙동강 하류부의 상수원수를 대상으로 Al(III)염과 Fe(III)염계 응집제를 이용한 응집제의 특성 실험 결과, alum과 FeCl₃의 경우는 모노머성 화학종이 각각 98%와 93.3%로 응집제내에 함유된 주된 가수분해종은 모노머성 화학종을 알 수 있었다. 염기를 첨가하여 제조한 염기 첨가비 r=1.2인 PACI의 경우 폴리머성 Al(III)종은 31.2%이었으며, r=2.2인 PACI의 경우 함유된 폴리머성 Al(III)종은 85.0%로 r 값이 증가함에 따라 더 많은 폴리머성 Al(III)종이 함유되어 있는 것으로 나타났다. 응집제별 응집실험 결과, 원수의 탁도가 높고 낮음에 관계없이 응집제별 탁도 및 유기물 제거정도는 FeCl₃ > PACI (r=2.2) > PACI (r=1.2) > alum의 순으로 나타났다. Al(III)계 응집제 보다 FeCl₃의 경우 응집효율이 우수한 것으로 나타났다. 그리고 Al(III)계 응집제의 경우 염기도가 높은 응집제의 경우 polymeric Al(III)종을 많이 함유함에 따라 응집효율이 향상됨에 따라 염기도가 높은 응집제일수록 응집효율이 높은 것으로 나타났다. 실험에 적용된 응집 pH 범위(pH 4.0~9.5)에서 모든 응집제의 최적 응집 pH는 약 7.0으로 나타났다. 특히 고염기도 PACI (r=2.2)과 FeCl₃의 경우 pH 7.0 이상에서도 높은 탁도 응집효율을 유지하였다. 따라서 pH가 높은 상수원수의 경우 탁도 제거에서는 고염기도 PACI이나 FeCl₃ 응집제가 더 적합한 것으로 판단된다.

주제어 : 응집제, 염기도, 알루미늄염, 철염, 응집효율

1. 서론

기존 정수처리 공정 중에서 응집공정의 효과적인 운전은 후속 정수공정의 효율을 좌우하는 중요한 공정이라고 할 수 있다. 상수원수의 오염현상이 지속됨에 따라 각 정수장에서는 응집효과 및 유기물제거의 우수성으로 인하여 기존에 사용하던 황산반토(alum)를 대체한 Al(III)계 무기고분자 응집제(PACI)의 사용이 보편화되고 있다. 정수장에서 사용하고 있는 Al(III)계 무기응집제는 정수후 잔류하는 알루미늄에 의해 송·배수관망에서의 알루미늄 침전물 재형성으로 탁도 증가 및 미생물 재생장을 유발시키기도 합니다. 또한 잔류알루미늄은 노출되었을 경우 알츠하이머병(Alzheimer's disease)이라 불리는 노인성 치매 및 기타 신경계 장애를 일으키는 등 인체의 건강에 따른 영향을 미치는 것으로 보고

되고 있으며,¹⁾ 외국에서는 알루미늄계 무기응집제를 철염계 응집제로 대체하여 정수공정에 이용하고 있다. 이에 따라 국내에서도 철염계 무기응집제의 도입에 따른 필요성이 제기되었으며, 1997년에 환경부에서는 철염계 무기응집제를 수처리제 품목으로 고시 기준을 마련하기도 하였으나, 오늘날에 이르기까지 알루미늄계 무기응집제의 사용이 주를 이루고 있는 실정이다

PACI은 알루미늄염에 염기를 가하여 반응시킨 것으로서, 응집제 제조 시 투입되는 원료(Al(OH)₃)에 의해 일정한 염기도(35~45%)를 함유하고 있으며, 일부의 정수장에서는 이보다 염기도가 높은(염기도 60% 이상) PACI을 정수처리에 적용하고 있다. PACI의 응집효과는 PACI에 함유된 Al 가수분해종의 분포와 밀접한 관계가 있다. 예로서 염기도가 높은 PACI은 응집제 내에 높은 양 전하의 고분자성 알루미늄

[†] Corresponding author E-mail: kangls@pknu.ac.kr Tel: 051-629-6527 Fax: 051-629-6523

높을 많이 함유하고 있음에 따라 전하중화에 의한 응집효율이 향상된다.²⁾ PACI에 함유되어 전하중화에 가장 효율적인 Al은 Al₁₃ 폴리머, [AlO₄Al₁₂(OH)₂₄]⁷⁺로 알려져 있으며, 특정 염기도까지는 염기도가 증가할수록 Al₁₃ 종의 함량이 증가한다고 알려져 있다.³⁾

응집효율을 향상시키기 위한 또 다른 응집제로 Fe(III)염의 응집제가 있다. Fe(III)염의 응집제는 Al(III)계 응집제와 비교하여 최적 응집 pH 범위가 넓고 유기물 제거에 보다 효율적이며, 특히 저온의 영향을 덜 받는 응집제로 알려져 왔다.⁴⁻⁶⁾ 철염 응집제의 응집효율에 대한 연구는 문 등,⁷⁾ 이 등⁸⁾ 및 황보 등⁹⁾을 통해 철염에 대한 응집의 우수성을 확인되었으나, 실제 국내의 정수장에서의 적용되지 않는 실정이다. 그러나 최근 역삼투막(RO)을 이용한 해수담수화 플랜트가 증가하면서 철염응집제에 대한 관심이 다시 증가하고 있다. 일반적으로 해수의 응집에는 FeCl₃ 등의 철염 응집제가 주로 사용되고 있다.¹⁰⁾

이에 따라 본 연구에서는 각 정수공정에서 사용하고 있는 Al(III)계 응집제가 함유하고 있는 염기도에 따른 응집제의 화학적 특성과 응집특성을 평가하고, 또한 Fe(III)염계 응집제를 비교하여 정수공정에 있어서 철염 응집제의 적용 가능성을 평가하고자 하였다. 특히 본 연구에서 적용된 낙동강 하류부의 상수 원수는 조류의 빈번한 대변성으로 인하여 원수의 pH가 9.0 이상이 되는 시기가 자주 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서는 높은 pH 에서의 응집제 별 응집 효율도 동시에 비교하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 응집제 특성실험

본 연구에서 사용된 응집제는 Al(III)계 응집제 3종류와 Fe(III)계 응집제 1 종류를 사용하였으며, 사용된 응집제 모두 시약급으로 제조하여 사용하였다. Al(III)계 응집제로는 alum (Al₂(SO₄)₃·16H₂O, Fluka, USA)과 염화알루미늄 (AlCl₃·6H₂O, Fluka, USA)에 염기(NaOH)를 첨가하여 제조한 PACI 2종류(r=1.2, 2.2)를 사용하였으며, Fe(III)계 응집제로는 염화제2철 (FeCl₃·6H₂O, Fluka, USA)을 사용하였다. PACI의 제조에 사용된 r 값은 사용된 염기와 알루미늄의 몰 비, 즉 OH/Al을 나타내며 국내 PACI 응집제의 특성에 사용되는 염기도와 연관된 값이다.

2.1.1. Al계 응집제의 특성실험

Al(III)계 응집제의 물리·화학적 특성은 재현성 및 민감도가 가장 높은 방법으로서 Ferron 분석법¹¹⁻¹³⁾을 사용하였으며, Ferron 시약과 각각의 Al(III) 가수분해종은 (1) 모노머성 Al(III) (Al_a)은 Ferron시약과 즉시(10 sec 이내) 반응하며 (2) 폴리머성 Al(III) (Al_b)은 Ferron 시약과 일정시간 동안 일정 속도로 반응하여 평형에 이르게 되면 UV 흡광도가 일정하게 유지되며 (3) precipitate Al(III) (Al_c)은 Ferron시약과 반응

하지 않는 특성을 이용하여 Al(III) 종의 분포를 측정하였다.⁸⁾

본 실험에서 모노머성 Al(III)종은 반응 30초 후의 370 nm에서의 흡광도 수치로서 예측하여 정량화하였으며, 응집제 내의 Al(III)종과 Ferron 시약과의 총 반응시간은 Al-Ferron 착화합물 생성이 완료되어 흡광도의 변화가 없는 120분으로 하였다.

2.1.2. Fe(III)계 응집제의 특성실험

Fe(III)계 응집제에 대한 특성 분석은 Al(III)종들에 대한 특성 분석방법¹¹⁾과 유사한 Ferron 방법¹⁴⁾이 사용되었다. UV 흡광도 파장 600 nm에서 시간의 변화에 의한 흡광도의 변화로 Fe(III)종의 변화를 파악할 수 있는데, 먼저 monomeric Fe(III)종과 dimeric Fe(III)종 그리고 일부의 trimeric Fe(III)종은 Ferron 시약과 1분 이내에 반응이 종결된다.¹⁴⁾ 이를 Fe_a라 하며, 24시간 후까지의 반응에 관여하는 것을 polymeric Fe(III)종으로서 Fe_b라하고, 24시간 후 반응하지 않고 남아 있는 화학종을 precipitate Fe(III)종으로 Fe_c로 나타내었다. 따라서 polymeric Fe(III)종은 1분에서 24시간까지의 반응에서 나타난 흡광도 수치의 차를 이용하여 구할 수 있다.

2.2. 응집실험

응집실험에서 사용된 Jar test 장치(Phipps & Bird사)는 6개의 교반장치를 갖춘 것으로 paddle (two-blade)의 크기는 2.54^W × 7.6^L cm이었다. 응집실험에서 사용된 Jar는 2 L 용량의 사각형 Jar로서 교반하는 동안 물의 회전에 의한 vortex를 감소시키고 열의 전달에 의한 온도의 변화가 작은 특징을 가지고 있다.

응집실험에 사용된 시수로는 낙동강 상수원수로서 낙동강 하류부인 물금지역에서 취수하여 사용하였다. 응집실험에 사용된 응집제는 알루미늄계 응집제 3종류와 철염계 응집제 1종류를 사용하였으며, Al(III)계 응집제로는 alum과 제조한 PACI 2종류(r=1.2, 2.2)를 사용하였으며, Fe(III)염계 응집제로는 FeCl₃을 사용하였다.

응집실험에 있어서의 응집제 주입농도는 제조된 응집제의 경우 희석에 의한 Al(III) 화학종의 변화를 막기 위해서 원액을 그대로 사용하였으며, alum과 FeCl₃의 경우에 있어서는 0.25 M stock solution을 제조 후, 실험 전 날 초순수를 사용하여 10 g/L로 희석하여 사용 하였다. Dosing solution 제조 시 희석에 의한 응집제 성상변화에 따른 오차를 최소화하기 위하여 dosing solution을 실온에서 하루 방치하여 안정화시킨 후 사용하였다.

응집의 교반 조건을 사용하기 위하여 교반속도(rpm)에 따른 평균속도경사(G) 값은 예비실험에 의하여 결정하였다. 최적 G 값 및 교반시간은 예비 실험 결과, 급속 및 완속 혼합의 교반조건은 각각 250 rpm (G = 550 sec⁻¹ at 20°C)과 30 rpm (G = 22 sec⁻¹ at 20°C), 교반시간은 각각 1 min과 30 min으로 유지하였다. 완속교반 후 침전시간은 30분으로 하였으며, 침전 후 상정액은 수표면 밑 10 cm 지점에서 채취하여 각 수질분석에 사용되었다.

Table 1. Analytical method and instruments

Item	Unit	Analytical method and instruments
pH	(-)	pH meter (METTLER DELTA 345)
Turbidity	(NTU)	Turbidimeter (HACH, 2100P)
TOC	(mg/L)	TOC Analyzer, Shimadzu TOC-V
UV ₂₅₄	(cm ⁻¹)	UV-Spectrophotometer (UV-2401PC, Shimadzu)

2.3. 수질분석

본 연구에서 실시된 수질분석은 Standard methods¹⁵⁾에 준하여 수행되었으며 분석에서 사용된 수질분석 항목과 기기는 Table 1과 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 응집제의 화학적 특성

Ferron 분석법을 이용한 Al(III) 및 Fe(III)염계 응집제의 함유된 화학종 분석 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서와 같이 alum과 FeCl₃의 경우는 모노머성 화학종이 각각 98%와 93.3%로 응집제 내에 함유된 주된 가수분해종은 모노머성 화학종을 알 수 있다.³⁾ 또한 염기를 첨가하여 제조한 Al(III)계 무기고분자 응집제인 PACI의 경우에는 첨가되는 염기에 따라 염기도의 증가로 모노머성 Al(III)종이 폴리머성 Al(III)종으로 전이가 됨으로써 폴리머성 Al(III)종을 많이 함유하게 된다.^{12,13)} 이에 따라 r=1.2인 PACI의 경우 폴리머성 Al(III)종은 31.2%이었으며, r=2.2인 PACI의 경우 함유된 폴리머성 Al(III)종은 85.0%로 r 값이 증가함에 따라 더 많은 폴리머성 Al(III)종이 함유되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 여러 연구자들에 의하여 이러한 Al 폴리머종의 대부분은 Al₁₃, [AlO₄Al₁₂(OH)₂₄]⁷⁺인 것으로 확인된바 있다.¹⁶⁾ PACI의 경우 2가지 r 값에 따라 수처리제 표시기준¹⁷⁾에 따라 염기도를 분석한 결과, r 값이 1.2인 경우 염기도는 40%이었으며, r 값이 2.2인 경우에는 71%의 염기도를 나

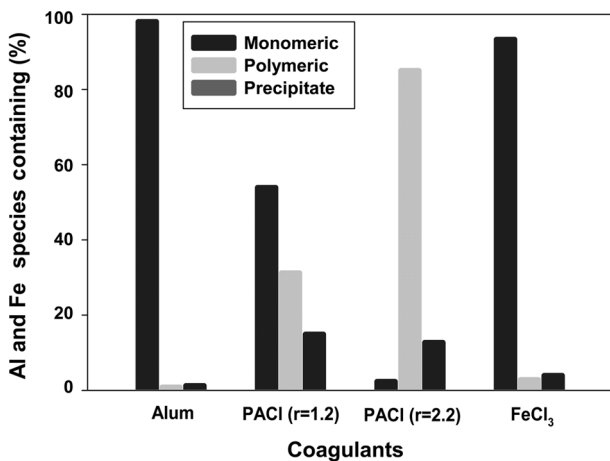


Fig. 1. Distribution of Al(III) and Fe(III) species for hydrolysis products of various coagulants (alum, PACI (r=2.2), PACI (r=1.2) and FeCl₃).

타내었다. 이와 같은 염기도는 현재 정수장에서 사용 중인 PACI과 고염기도 PACI이 가진 염기도와 유사한 값을 나타내고 있으며, 이에 따라 정수장에서 사용되고 있는 응집제의 응집효율에 대한 비교자료로 유용할 것으로 판단된다.

3.2. 응집특성

응집실험은 낙동강 하류부의 상수원수가 사용되었으며, 원수 성상의 변화를 방지하기 위해 실험실로 운반 즉시 응집 실험을 실시하였다. Table 2는 본 연구의 응집실험을 위해 채수 한 원수의 성상을 나타낸 것이다. 응집실험에 있어서 사용된 탁도는 저탁도와 고탁도로 구분하여 실험하였으며, 저탁도의 경우는 원수 탁도가 3~6 NTU 정도일 때 채수한 것을 그대로 사용하였으며, 고탁도의 경우에는 채수한 원수에 Kaolin clay (Fluka, USA)를 첨가하여 30~35 NTU를 유지하여 사용하였다.

3.2.1. 응집제 주입량에 따른 응집특성

Fig. 2는 저탁도(5.5 NTU)에 대한 응집실험에서 응집제별 응집제 주입량에 따른 탁도 제거 정도를 나타내고 있다. 본 실험에서 응집제 주입량은 사용된 응집제에 함유된 금속 함량의 상대적인 비교를 위하여 mM as Al, Fe로 환산하여 나타내었다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 사용된 응집제 모두 80% 이상의 탁도 제거효율을 나타내었다. FeCl₃의 경우 주입량의 증가에 따라 탁도 제거율이 향상되었으며, 응집실험

Table 2. Characteristics of raw water taken from the Nakdong River

Item	Unit	Low turbidity	High turbidity
Temperature	°C	13~16	13~16
pH	-	7.8~8.2	7.8~8.2
Turbidity	NTU	5.5	32.6
UV ₂₅₄	cm ⁻¹	0.097	0.127
TOC	mg/L	4.5	6.5

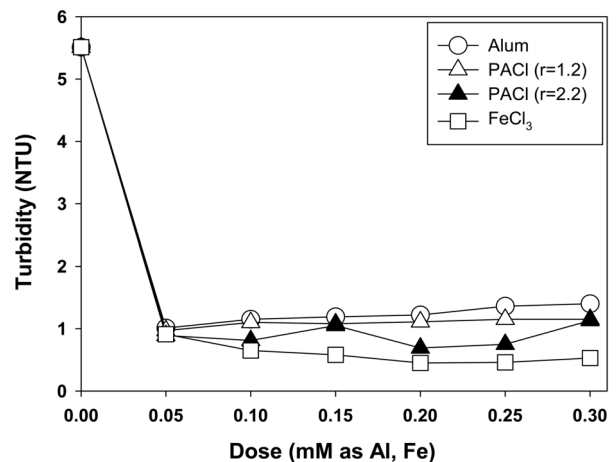


Fig. 2. Comparison of alum, PACI (r=1.2), PACI (r=2.2) and FeCl₃ coagulants for turbidity removal as a function of coagulant dose (Initial turbidity: 5.51 NTU).

에 사용된 응집제 중에서 가장 높은 탁도 제거효율을 나타내었다. 응집제 별 탁도 제거 정도는 $\text{FeCl}_3 > \text{PACl} (r=2.2) > \text{PACl} (r=1.2) > \text{alum}$ 의 순으로 나타났으며, Al(III)계 응집제의 경우 염기도가 높을수록 탁도 제거 효율이 높은 것으로 나타났다. 이는 염기도가 높은 응집제의 경우 응집제 제조 시 미리 가수분해를 시킴으로써 polymeric Al(III)종을 많이 함유함에 따라 응집효율이 향상되었기 때문으로 판단된다. AlCl_3 를 염기첨가를 통하여 미리 가수분해 시킨 PACl은 응집과정 중 폴리머성 Al_{13} , $[\text{AlO}_4\text{Al}_{12}(\text{OH})_{24}]^{7+}$ 의 생성량을 증가시키며 이로 인하여 응집효율이 증가된다.²⁾ Edzwald¹⁸⁾은 초기탁도 1.5 NTU인 상수원수에 대하여 응집제 주입농도 0.1~0.6 mM Al 또는 Fe를 사용한 결과 탁도의 제거효율이 $\text{FeCl}_3 > \text{PACl} > \text{alum}$ 의 순으로 나타나 본 연구와 유사한 결과를 보였다.

Fig. 3과 4는 저탁도 원수의 경우에서 응집제별 응집제 주입량에 따른 UV_{254} 와 TOC 제거정도를 나타낸 것이다. 응집

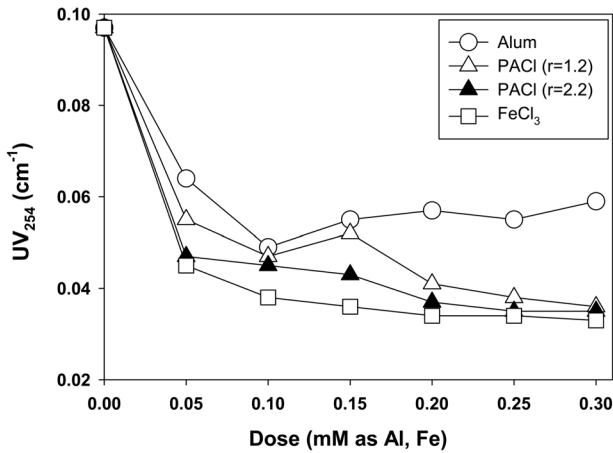


Fig. 3. Comparison of alum, PACl (r=1,2), PACl (r=2,2) and FeCl_3 coagulants for UV_{254} removal as a function of coagulant dose (Initial UV_{254} : 0.097 cm^{-1}).

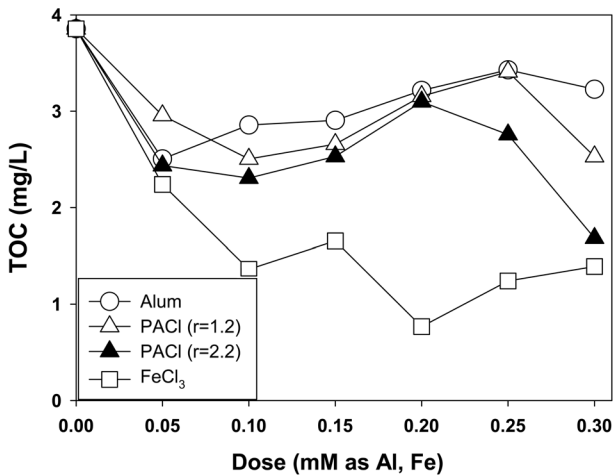


Fig. 4. Comparison of alum, PACl (r=1,2), PACl (r=2,2) and FeCl_3 coagulants for TOC removal as a function of coagulant dose (Initial TOC: 4.5 mg/L).

제별 응집제 주입량에 따른 UV_{254} 와 TOC 제거정도는 $\text{FeCl}_3 > \text{PACl} (r=2.2) > \text{PACl} (r=1.2) > \text{alum}$ 의 순으로 나타났다. Al(III)계 응집제의 경우 Fig. 1의 탁도 제거 정도에서와 같이 응집제 제조 시 미리 가수분해를 시킴으로써 polymeric Al(III)종을 많이 함유함에 따라 염기도가 높은 응집제일수록 유기물 제거 효율이 나은 것으로 나타났다. FeCl_3 의 경우 주입량의 증가에 따라 유기물제거율이 향상되었으며, 이는 Fe(III)용해도가 Al(III)의 용해도 보다 낮음에 따라 탁도 및 유기물 제거에 있어서 Al(III)계 응집제 보다 FeCl_3 의 경우 응집효율이 우수하게 나타난 것으로 판단된다.¹⁾ 문 등⁷⁾의 연구 결과에 의하면, FeCl_3 의 경우 Al(III)계 응집제 보다 유기물 제거율이 우수한 것은 FeCl_3 응집제가 Al(III)계 응집제 보다 높은 zeta 전위값을 유지함에 따라 유기물 전하중화에 효과적이라 하였다. 또한 Edzwald¹⁸⁾의 연구 결과에 의하면 응집제 주입량 0.1~0.6 mM Al 범위에서 alum과 PACl의 TOC 제거효율은 거의 동일하게 나타났다.

Fig. 5는 비교적 탁도가 높은 경우(32.6 NTU)의 응집실험에서 응집제 별 응집제 주입량에 따른 탁도 제거를 나타낸 것으로 사용된 응집제 모두 90% 이상의 탁도 제거효율을 나타내었다. 탁도 제거정도는 $\text{FeCl}_3 > \text{PACl} (r=2.2) > \text{PACl} (r=1.2) > \text{alum}$ 의 순으로 저탁도의 경우에서와 같은 순서대로 응집효율이 나타났으며, Al(III)계 응집제의 경우 염기도가 높을수록 탁도 제거효율은 더 높은 것으로 나타났다. 이는 염기도가 높은 응집제의 경우 응집제 제조 시 미리 가수분해를 시킴으로써 polymeric Al(III)종을 많이 함유함에 따라 응집효율이 향상되었기 때문으로 판단된다. FeCl_3 의 경우 응집제 주입량의 증가에 따라 안정된 탁도 제거율을 나타내었으며, Al(III)계 응집제의 경우에는 응집제 주입량의 증가에 따라 재안정화 (restabilization)에 따라 탁도 제거효율이 다시 감소하는 것으로 나타났다. FeCl_3 응집제의 경우에는 Al(III)계 응집제 보다 용해도가 낮으며, 전하중화 및 sweep coagulation에 따른 응집 기작이 우수하기 때문으

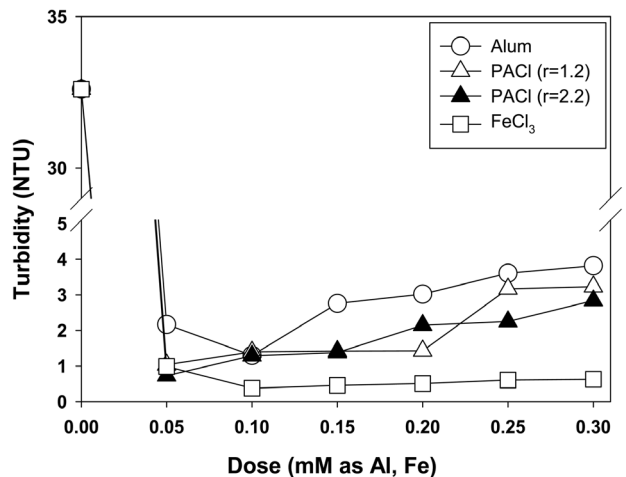


Fig. 5. Comparison of alum, PACl (r=1,2), PACl (r=2,2) and FeCl_3 coagulants for turbidity removal as a function of coagulant dose (Initial turbidity: 32,6 NTU).

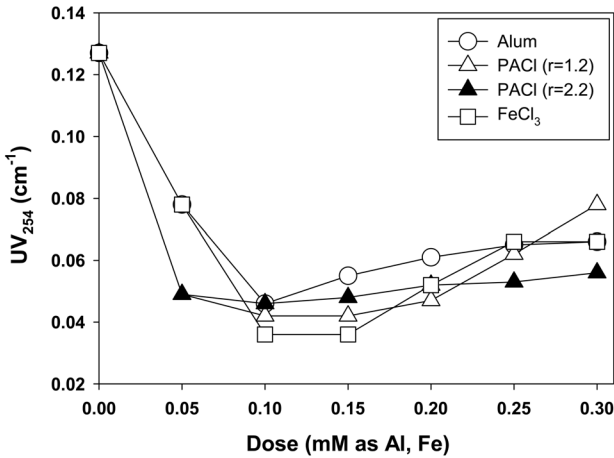


Fig. 6. Comparison of alum, PACI (r=1.2), PACI (r=2.2) and FeCl₃ coagulants for UV₂₅₄ removal as a function of coagulant dose (Initial UV₂₅₄: 0.127 cm⁻¹).

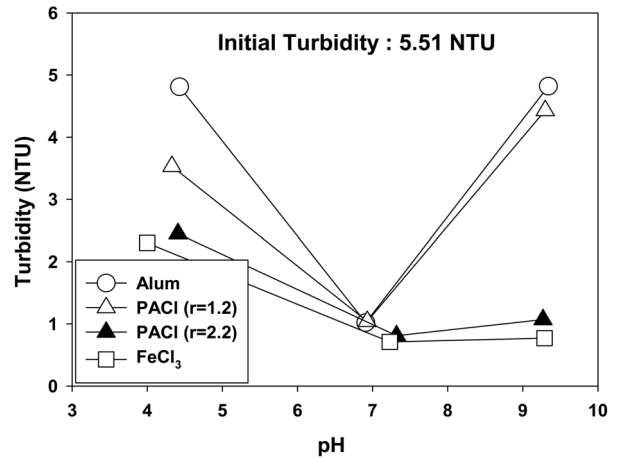


Fig. 8. Effect of coagulation pH on turbidity removal using alum, PACI (r=1.2), PACI (r=2.2) and FeCl₃ (Dose: 0.1 mM as Al, Fe).

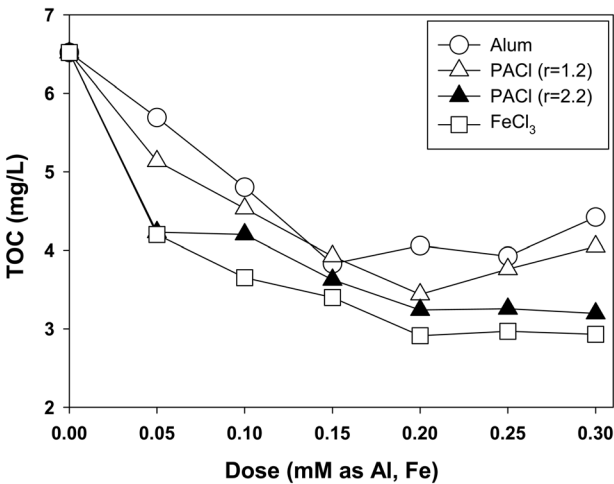


Fig. 7. Comparison of alum, PACI (r=1.2), PACI (r=2.2) and FeCl₃ coagulants for TOC removal as a function of coagulant dose (Initial TOC: 6.5 mg/L).

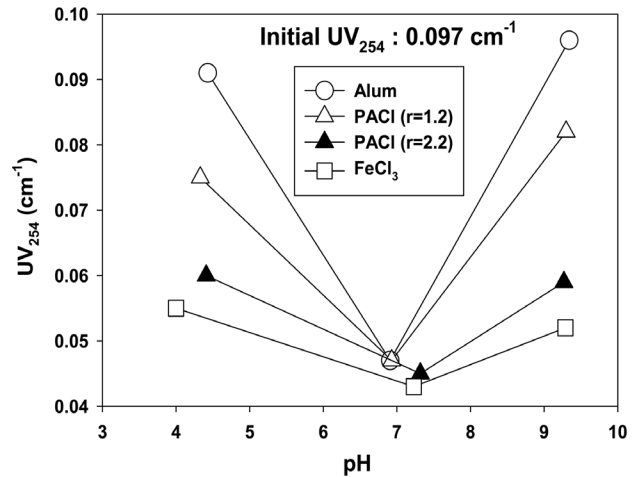


Fig. 9. Effect of coagulation pH on UV₂₅₄ removal using alum, PACI (r=1.2), PACI (r=2.2) and FeCl₃ (Dose: 0.1 mM as Al, Fe).

로 판단된다. PACI는 고탁도의 경우 폴리머성 Al의 높은 전하 중화능력으로 인하여 응집효율이 우수한 것으로 알려져 있다.^{2,19)}

Fig. 6과 7은 응집제별 응집제 주입량(mM as Al, Fe)에 따른 UV₂₅₄와 TOC 제거정도를 나타낸 것으로 유기물에 대한 응집효율을 살펴보았다. UV₂₅₄의 경우에는 응집제별 응집제 주입량에 따른 서로 비슷한 유기물 제거정도를 나타내었으나, TOC의 경우에는 Fig. 4의 저탁도의 TOC 제거정도에서와 같이 FeCl₃ > PACI (r=2.2) > PACI (r=1.2) > alum의 순으로 응집효율이 더 높은 것으로 나타났다.

3.2.2. 응집 pH에 따른 응집특성

Fig. 8~10은 저탁도(5.5 NTU)에 대한 응집실험에서 응집제별 응집 pH에 따른 탁도 및 유기물(UV₂₅₄, TOC) 제거정도를 나타낸 것으로 사용된 응집제 주입량은 앞서 도출된 실험 결과에 따라 0.1 mM (as Al, Fe)로 하였다. 본 실험 결

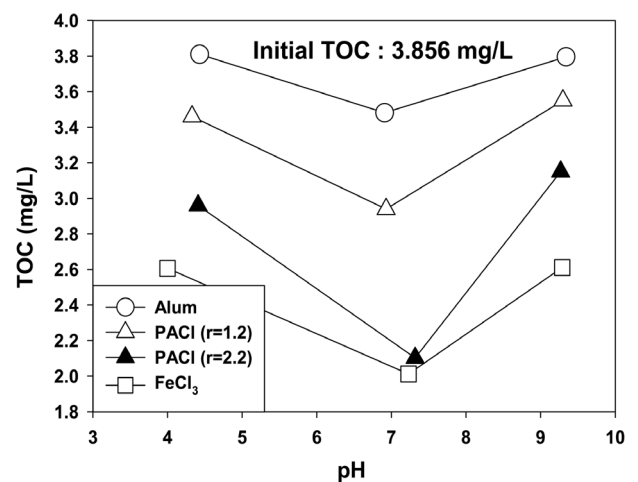


Fig. 10. Effect of coagulation pH on TOC removal using alum, PACI (r=1.2), PACI (r=2.2) and FeCl₃ (Dose: 0.1 mM as Al, Fe).

과에 따르면 실험에 적용된 응집 pH 범위(pH 4.0~9.5)에서 모든 응집제의 최적 응집 pH는 약 7.0 으로 나타났다. 특히 고염기도 PACI ($r=2.2$)과 $FeCl_3$ 의 경우 pH 7.0 이상에서도 높은 탁도 응집효율을 유지하였다. 따라서 pH가 높은 상수원수의 경우 탁도 제거에서는 고염기도 PACI이나 $FeCl_3$ 응집제가 더 적합한 것으로 판단된다. 응집제 별 응집 효율에서는 탁도 및 유기물 제거 정도 모두 $FeCl_3 > PACI (r=2.2) > PACI (r=1.2) > alum$ 의 순으로 응집효율이 나타났다. 특히 Al(III)계 응집제 보다 $FeCl_3$ 의 경우 응집효율이 우수한 것으로 나타났다. 이는 $FeCl_3$ 의 경우 용해도가 Al(III)의 용해도 보다 낮으며, 응집 pH 또한 Al(III)계 응집제의 경우 보다 넓음으로 인하여 응집 pH의 영향에 덜 민감하기 때문으로 판단된다.^{2,18)} 그리고 염기도가 높은 응집제의 경우 응집제 제조 시 미리 가수분해를 시킴으로써 polymeric Al(III)종을 많이 함유함에 따라 응집효율이 향상됨에 따라 염기도가 높은 응집제 일수록 유기물 응집효율이 높은 것으로 나타났다.

Fig. 11~13은 비교적 탁도가 높은 경우의 응집실험에서 응

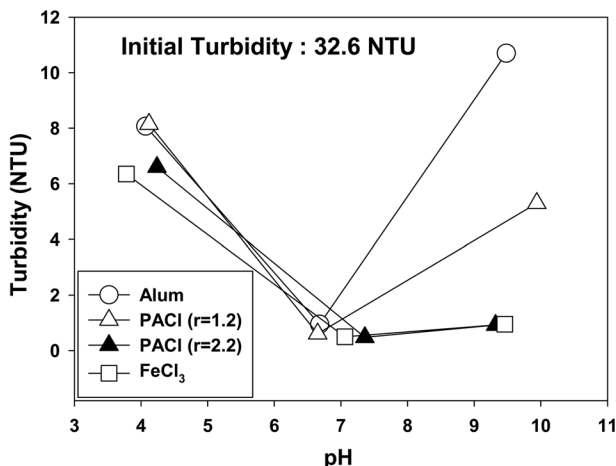


Fig. 11. Effect of coagulation pH on turbidity removal using alum, PACI ($r=1.2$), PACI ($r=2.2$) and $FeCl_3$ (Dose: 0.1 mM as Al, Fe).

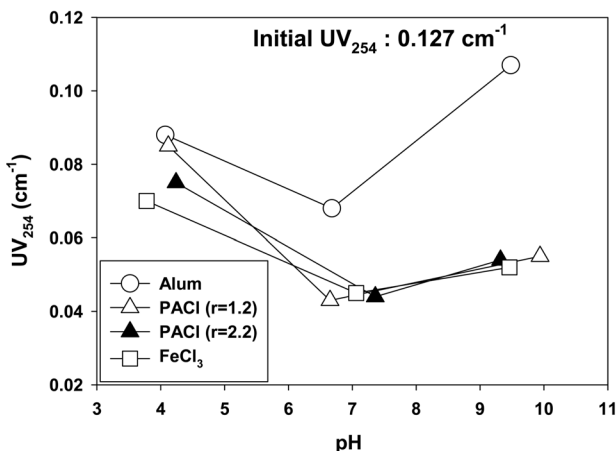


Fig. 12. Effect of coagulation pH on UV_{254} removal using alum, PACI ($r=1.2$), PACI ($r=2.2$) and $FeCl_3$ (Dose: 0.1 mM as Al, Fe).

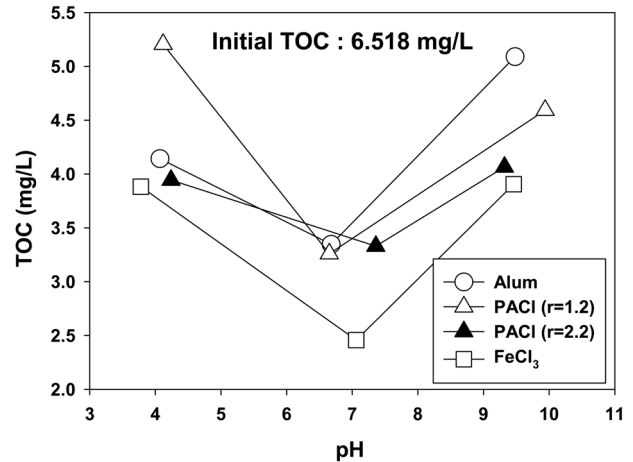


Fig. 13. Effect of coagulation pH on TOC removal using alum, PACI ($r=1.2$), PACI ($r=2.2$) and $FeCl_3$ (Dose: 0.1 mM as Al, Fe).

집제별 응집 pH에 따른 탁도 및 유기물(UV_{254} , TOC) 제거 정도를 나타낸 것이다. 실험 결과 앞의 저탁도에서와 같이 탁도 및 유기물 제거 정도 모두 $FeCl_3 > PACI (r=2.2) > PACI (r=1.2) > alum$ 의 순으로 응집효율을 나타내었으며, Al(III)계 응집제 보다 $FeCl_3$ 의 경우 응집효율이 우수한 것으로 나타났다. 이는 $FeCl_3$ 의 경우 용해도가 Al(III)의 용해도 보다 낮으며, Fe 용해도의 변화가 Al 보다는 용액의 pH 변화에 덜 민감하기 때문으로 판단된다.¹⁹⁾ 그리고 염기도가 높은 응집제의 경우 응집제 제조 시 미리 가수분해를 시킴으로써 polymeric Al(III)종을 많이 함유함에 따라 응집효율이 향상됨에 따라 염기도가 높은 응집제일수록 응집효율이 나은 것으로 나타났다.

4. 결론

낙동강 하류부의 상수원수를 대상으로 Al(III) 및 Fe(III) 염계 응집제를 이용한 응집제의 특성 실험 및 응집실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 응집제의 특성 실험 결과, alum과 $FeCl_3$ 의 경우는 모노머성 화학종이 각각 98%와 93.3%로 응집제내에 함유된 주된 가수분해종은 모노머성 화학종이었으며, 염기를 첨가하여 제조한 $r=1.2$ 인 PACI의 경우 폴리머성 Al(III)종은 31.2%이었으며, $r=2.2$ 인 PACI의 경우 함유된 폴리머성 Al(III)종은 85.0%로 r 값이 증가함에 따라 더 많은 폴리머성 Al(III)종이 함유되어 있는 것으로 나타났다.

2) 응집제별 응집제 주입량(mM as Al, Fe)에 따른 응집 실험 결과, 탁도의 높고 낮음에 관계없이 응집제별 탁도 및 유기물 제거정도는 $FeCl_3 > PACI (r=2.2) > PACI (r=1.2) > alum$ 의 순으로 나타났다.

3) $FeCl_3$ 의 경우 용해도가 Al(III)의 용해도 보다 낮음에 따라 탁도 및 유기물 제거에 있어서 Al(III)계 응집제 보다

FeCl₃의 경우 응집효율이 우수하게 나타났으며, Al(III)계 응집제의 경우 염기도가 높을수록 탁도 및 유기물 제거 효율이 높게 나타났다.

4) 응집제별 응집 pH에 따른 응집실험 결과, FeCl₃의 경우 용해도가 Al(III)의 용해도 보다 낮고 응집 pH의 영향에 덜 민감하기 때문에 FeCl₃이 Al(III)계 응집제 보다 응집효율이 우수한 것으로 나타났다.

5) 응집 pH에 따른 응집실험 결과 고염기도 PACl (r=2.2)과 FeCl₃의 경우 pH 7.0 이상에서도 높은 탁도 응집효율을 유지하였다. 따라서 pH가 높은 상수원수의 경우 탁도 및 유기물 제거에서는 고염기도 PACl이나 FeCl₃ 응집제가 더 적합한 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)로 수행된 연구입니다.

KSEE

References

- Letterman, R. D. and Driscoll, C. T., "Survey of residual aluminum in filtered water," *J. Am. Water Works Assoc.*, **80**(4), 154~158(1988).
- MWH, *Water treatment principles and design*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., New Jersey(2012).
- Van Benchofen, J. E. and Edzwald, J. K., "Chemical aspects of coagulation using aluminum salts," *Water Res.*, **24**(12), 1519~1526(1990).
- Crozes, G., White, P. and Marshall, M., "Enhanced coagulation: Its effect on NOM removal and chemical costs," *J. Am. Water Works Assoc.*, **87**(1), 78~89(1995).
- Haarhoff, J. and Cleasby, J. L., "Comparing aluminum and iron coagulants for in-line filtration of cold water," *J. Am. Water Works Assoc.*, **80**(4), 168~175(1988).
- Morris, N. and Knocke, W. R., "Temperature effects on the use of metal-ion coagulants for water treatment," *J. Am. Water Works Assoc.*, **76**(3), 74(1984).
- Moon, S. D., Son, H. J., Yeom, H. S., Choi, J. T. and Jung, C. W., "Application of enhanced coagulation for Nakdong River water using aluminum and ferric salts coagulants," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **34**(9), 590~596(2012).
- Lee, C. H., Lee, S. H. and Okada, M., "Removal algae and Cryptosporidium on drinking water treatment by polysilicate-iron coagulant," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **26**(8), 876~882(2004).
- Hwang-Bo, B. H., Kim, J. S., Han, S. W. and Kang, L. S., "Comparison of Al(III) and Fe(III) salt coagulants for improving water treatment process," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **20**(7), 1005~1014(1998).
- Nikolay, V., "Considerations for selection of seawater filtration pretreatment system," *Desalination*, **261**(3), 354~364(2010).
- Smith, R. M., "Relation Among Equilibrium and Nonequilibrium Aqueous Species of Aluminum Hydroxy Complexes, Nonequilibrium Systems in Natural Water Chemistry," (Gould, R. F. Ed.), A.C.S. Advances in Chemistry Series No. 106, American Chemical Society, Washington, D.C., pp. 250~279(1971).
- Bersillon, J. L., Hsu, P. H. and Fiessinger, F., "Characterization of Hydroxy-Aluminum Solutions," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **51**, 825~828(1988).
- Parker, D. R. and Bertsch, P. M., "Identification and Quantification of the "Al₁₃" Tridecameric Polymeric Polycation Using Ferron," *Environ. Sci. Technol.*, **26**(5), 908~914(1992).
- Murphy, P. J., Posner, A. M. and Quirk, J. P., "Chemistry of iron in soils. Ferric hydrolysis products," *Australian J. Soil Res.*, **13**, 189~201(1975).
- APHA, AWWA and WEF, "Standard Method of the Examination of Water and Wastewater," 20th ed., APHA, AWWA and WEF(2005).
- Lin, J. L., Chin, C. J., Huang, C. and Wang D., "Coagulation behavior of Al₁₃ aggregates," *Water Res.*, **42**(16), 4281~4290(2008).
- Ministry of environment, "Standards and indication of water treatment agents," Notification No. 2013-188, pp. 7~14(2014).
- Edzwald, J. K., "Coagulation in drinking water treatment: particles, organics and coagulants," *Water Sci. Technol.*, **27**, 21~35(1993).
- Bratby, J., "Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment" 2nd. ed., IWA Publishing(2006).