

정수처리공정에서 잔류 알루미늄 최소화 방안

이미영* · 조덕희* · 박종현**

*성남시 상하수도사업소 정수과

**경원대학교 식품공학과

Minimizing of Residual Aluminum in Water Treatment Process

Abstract

Use of aluminum salts as coagulants in water treatment may lead to increased concentrations of aluminum in finished water. Aluminum is a suspected causative agent of neurological disorders such as Alzheimer's disease. The objective of this study was to examine variation and minimizing in residual aluminum concentration during water treatment process. The aluminum sources at Bokjeong Water Plant were present naturally aluminum in the raw water and derived due to use of PACS as a coagulant. Much of the raw water total aluminum were in particulate and suspended aluminum.

In this study was compared the optimize condition to minimize the concentration of residual aluminum using Jar-test with the various coagulants such as alum, PAC, PACS. The results indicated that PACS was more effective than alum, PAC and insufficient or excessive alum, PAC, PACS addition led to increase residual aluminum. Adjustment raw water pH 6.5~7.0 before coagulation using PACS was capable of minimizing total and dissolved aluminum.

Thus it is important that the optimal dosage of coagulant and the optimal pH adjustment before coagulation can decided to minimize the concentration of residual aluminum in treated water.

Keywords : Residual Aluminum, Coagulants, J-test, Water treatment process

1. 서론

정수처리공정에서 원수 중에 존재하는 미세한 입자성 물질, 유기물질, 색도, 탁도, 미생물 등을 제거하기 위해서 알루미늄계의 응집제가 널리 이용되고 있다. 그러나 처리수

중의 잔류 알루미늄농도가 높으면 급·배수관망에서의 재 응집에 의한 탁도 유발과 인체의 건강에 대한 영향이 문제가 된다. 즉 정수처리시 잔류 알루미늄농도가 높아 배수관내에 0.1 mg/L이상의 알루미늄이 잔류하면 급배수관망에서 수산화알루미늄의 침전물을 형성하여 탁도를 유발하고 소독장애 및 수송능력 저하의 문제를 야기하기도 한다¹⁾. 또한 먹는 물 중의 높은 알루미늄이 알츠하이머병(Alzheimer's disease)이라는 악성 노인성치매나 경련, 뇌질환 및 고등동물의 신경원 섬유변성을 일으킨다는 연구보고²⁾가 있어 알루미늄의 존재가 건강에 영향을 줄 가능성에 대한 관심이 높아졌다.

보통 사람은 알루미늄을 하루에 5~50 mg씩 음식을 통해 섭취하나 흡수된 알루미늄은 급속히 소변으로 배설되고 단지 1%이하만이 혈청단백질과 결합하여 체내를 순환하면서 아주 극소량이 두뇌에 축적된다고 한다. 그러나 인체의 알루미늄 대사는 충분히 해명되어 있지 않다³⁾. 알루미늄이 건강에 미치는 영향에 대한 Reiber⁴⁾의 연구에 의하면 알루미늄은 신경독성물질로 혈중에 장기적으로 축적되면 치매를 일으키며 또한 동물의 뇌에 주입된 알루미늄은 노인성 치매병 환자에서 발견되는 것과 유사한 증상을 형성하는 원인이 되었다고 하였다. Davidson 등⁵⁾은 신장투석환자의 경우 투석액의 농도가 80 $\mu\text{g/L}$ 이상일 경우 노인성치매를 일으킨다는 것을 발견하였다. 또한 투석전에 투석액에서 알루미늄을 제거하면 환자의 치매증상이 감소했다고 한다. Rondeau 등⁶⁾은 프랑스에서 8년간의 자료를 분석하여 알루미늄과 알츠하이머병과의 관련성을 연구하였는데 182명의 알츠하이머 환자 가운데 13명이 고농도의 알루미늄에 노출되어 있었음을 밝혔다. 나이, 성별, 교육수준, 거주지역, 음주량 등의 요소를 조정하여 알츠하이머병의 알루미늄에 대한 상대적 위험도를 조사했을 때 알루미늄 농도가 0.1 mg/L이상인 물에 노출되었을 때 위험도가 약 2배가량 높았다고 하였는데 이는 먹는물 중의 고농도 알루미늄이 알츠하이머병을 유발하는 위험인자라는 주장을 지지해 주었다.

그러나 Reiber & kukull⁷⁾의 연구에서는 먹는물 중의 알루미늄은 알츠하이머병과 관련이 없다고 하였으며, WHO⁸⁾에서도 알루미늄의 존재가 알츠하이머 질병과 같은 뇌질환과 관련은 있지만 음용수중의 알루미늄이 그러한 질병의 직접적인 원인이라는 것은 확실치 않다고 보고하고 있다. WHO는 음용수중 알루미늄농도 권장치를 0.2 mg/L이하로 정하고 있으며 EU와 USEPA 가이드라인으로 0.05 mg/L, 최고허용농도(MCL)를 0.2 mg/L이하로 규제하고 있다(Federal Register, 1991). 또한 우리나라에서도 먹는물관리법에서 0.2 mg/L이하로 정하고 있다.

따라서 본 연구는 정수처리공정별 잔류 알루미늄 농도변화를 측정하고, 잔류 알루미늄 최소화 방법으로서 응집제 종류별 최적주입량 결정 및 응집제선택과 응집전 pH 조정에 따른 알루미늄농도 최소화를 연구하고자 한다.

II. 실험재료 및 방법

1. 시료

한강 하천수를 상수원으로하여 응집제 PACS (poly aluminum chloride silicate)로 정수처리하는 성남시 북정정수장에서 2003년 9월부터 2004년 3월까지 착수정원수, 혼화·응집수, 침전수, 여과수, 정수를 채수하여 실험하였다.

2. 응집제

수처리제의 기준과 규격 및 표시기준⁹⁾에 수록된 응집제 중 alum (aluminum sulfate), PAC (poly aluminum chloride), PACS (poly aluminum chloride silicate) 를 이용하였으며 각 응집제의 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of each coagulants

Item	alum	PAC	PACS
Chemical formula	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	$[Al_2(OH)_nCl_{6-n}]_m$	$Al_2(OH)_n(Cl_x-n) (SiO_2)_m$
Al ₂ O ₃	17%	17%	17%
pH	3.0 이상	3.5 ~ 5.0	3.0 ~ 5.0
Optimum pH limit	5.5~8.5	6.0~9.0	6.0~9.0
Appearance	편상 또는 결정성 파편으로 백색 분말	엷은 황갈색의 투명한 액체	미황색의 점조성이 있는 액체

3. Jar-tester (Tops AR-300 Jar-tester)

약품응집교반시험기로 교반봉과 교반날개로 된 6개의 교반장치, 타이머, 속도(rpm)조절 다이얼, 아크릴재질의 2ℓ 용량 사각모양의 시료용기 등으로 구성되어 있다.

4. 유도결합플라즈마발광광도계(ICP : JY138ULTRACE, JOBIN-YVON)

유도결합플라즈마 발생장치인 ICP generator 와 spectro(분광장치) 및 데이터 처리장치로 구성되어 있으며, 측정과장범위가 160 - 800nm이며 동시 다원소분석이 가능하고

검출한계가 우수하다. 측정농도범위가 넓으며 carrier gas는 불활성가스인 아르곤을 사용한다.

5. 알루미늄 분석

알루미늄측정은 Letterman과 Driscoll¹⁰⁾에 의해 제안된 방법으로 전처리하여 총 알루미늄, 용존성 알루미늄, 입자성 알루미늄을 유도결합플라즈마 발광광도계로 파장 396.152 nm에서 측정하였다. 총알루미늄은 시료 30 mL를 폴리프로필렌 시험관에 넣고 conc-HNO₃를 0.05 mL 넣어 pH 2이하로 맞추어 2시간후 측정하였다. 용존성 알루미늄은 시료를 0.45 μm membrane filter로 자연여과하며 여과시 처음 여액 20~30 mL는 버린 후 여액 30 mL를 시료로 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 정수처리공정에서 알루미늄농도 변화

원수 탁도가 평상시 탁도를 유지했던 2003년 11월부터 2004년 3월까지 원수의 알루미늄농도는 0.086 mg/L에서 1.110 mg/L로서 평균 0.358 mg/L였지만 고탁도 원수 유입으로 평균 탁도가 33.8 NTU였던 2003년 9월의 원수 알루미늄농도는 2.092 mg/L로서 상당히 높았다. 2003년 9월에 알루미늄농도가 높았던 이유는 태풍으로 인한 호우로 고탁도 원수가 정수장에 유입되어서 토양중에 다량으로 함유되어 있던 알루미늄이 빗물에 의해 용출되었기 때문이며, 또한 대기오염으로 인한 산성우의 영향으로 pH 5.5이하의 토양에서 알루미늄의 용해도가 급속히 증가하여 토양에 함유된 알루미늄이 수중 환경으로 이동하여 수중 환경에서 알루미늄농도가 높아질 수 있었기 때문이었다.

정수의 평균 알루미늄농도는 0.063 mg/L로서 원수의 평균 알루미늄농도 0.358 mg/L보다 전체적으로 낮은 결과를 나타냈으며, 이는 먹는물중 알루미늄의 규제와 탁도 및 잔류알루미늄 최소화를 위한 정수처리기술의 발달 등에 의한 것으로 사료된다.

총 알루미늄의 공정별 평균농도는 Fig.1에서와 같이 원수가 0.358 mg/L, 혼화·응집수 1.941 mg/L, 침전지 유출수 0.268 mg/L, 여과수 0.070 mg/L, 처리수(정수)는 0.063 mg/L로서 응집제가 주입된 후 floc이 형성되면서 혼화·응집수는 원수에 비해 약 5.4배 정도 농도가 증가하였으며 이러한 floc들이 침전 제거되어 침전지 유출수중의 농도가 원수와 비슷한 농도로 낮아졌다. 침전지중에 남아있는 알루미늄은 여과지에서 0.1 mg/L 이하로 제거되었고, 소독공정에서 미량(0.007 mg/L) 제거되었는데 이는 염소처리

로 인해 정수 pH가 평균 6.8~7.0에서 약간 저하되어 일부 용존성 알루미늄이 입자성으로 바뀌어 정수지에서 2~3시간 체류하는 동안 침전 제거된 것으로 판단된다.

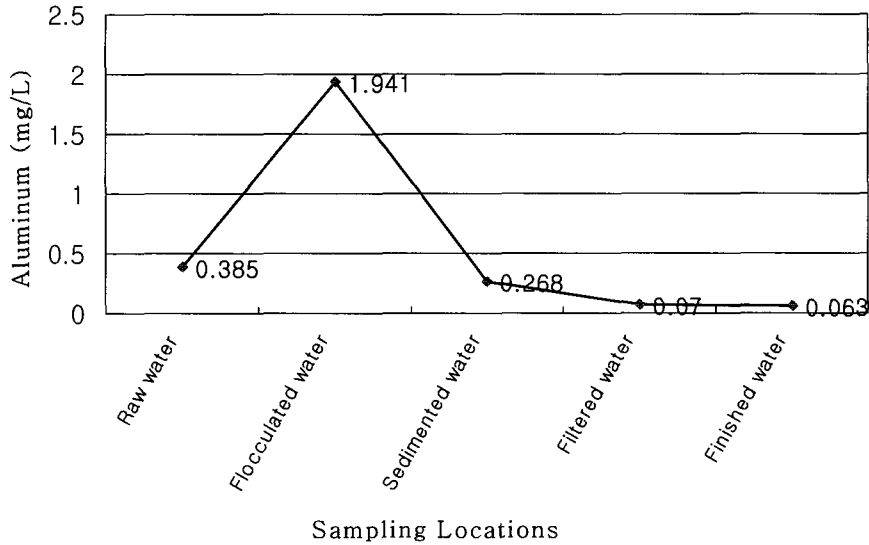


Fig. 1. Variations of total Aluminum in water treatment process.

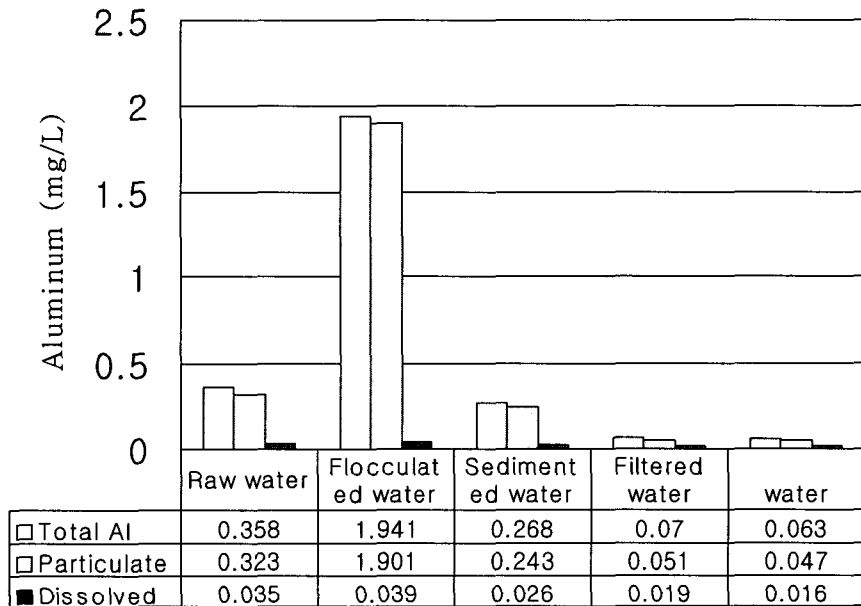


Fig. 2. Variations of total, particulate, dissolved Aluminum in water treatment process.

정수처리과정별로 총 알루미늄농도에 대한 입자성 알루미늄과 용존성 알루미늄의 비율은 Fig. 2에서와 같이 원수가 90.2% : 9.8%, 혼화·응집수 97.9% : 2.1%, 침전수 90.7% : 9.3%, 여과수 72.5% : 27.5%, 정수 74.2% : 25.8%로서 모든 공정에서 입자성

알루미늄이 더 많이 존재하였으며 입자성 알루미늄의 비율은 여과수, 정수로 갈수록 감소되었고 용존성 알루미늄은 원수에서 침전수까지는 10%이하로 비율이 낮다가 여과수, 정수에서 25%이상으로 비율이 증가했다. 이것은 입자성 알루미늄이 침전, 여과공정을 거치면서 제거율이 높아지고 상대적으로 용존성 알루미늄의 제거율은 낮았기 때문이며, 정수처리 전 공정에서 주로 존재하는 형태는 입자성 알루미늄 있었다.

2. 잔류 알루미늄 농도 최소화 방안

(1) 잔류 알루미늄 최소화를 위한 응집제 선택 및 최적주입량 결정

Jar-test시 탁도 9.1 NTU, 수온 8 °C, pH 7.7, 알카리도 45 mg/L, 총 알루미늄 0.349 mg/L, 용존성 알루미늄 0.036 mg/L인 원수를 응집제별 Jar-test 후 탁도와 알루미늄의 잔류농도를 나타냈다. Fig. 3에서와 같이 alum, PAC, PACS 주입농도는 각각 모두 10, 15, 20, 25, 30, 35 mg/L를 주입하여 Jar-test한 결과 alum은 30 mg/L를 투여했을 때 탁도가 0.432 NTU로서 탁도 제거율이 좋았으며, PAC의 경우는 25 mg/L일 때 탁도가 0.335 NTU, PACS는 15 mg/L에서 탁도가 0.219 NTU로서 각각 탁도 제거효율이 가장 좋았다.

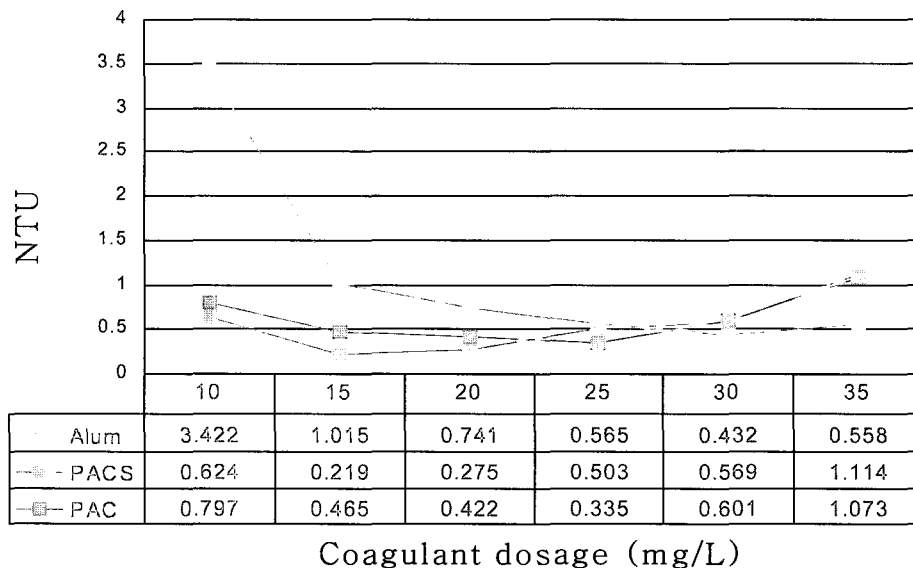


Fig. 3. Residual turbidity by coagulants dosage.

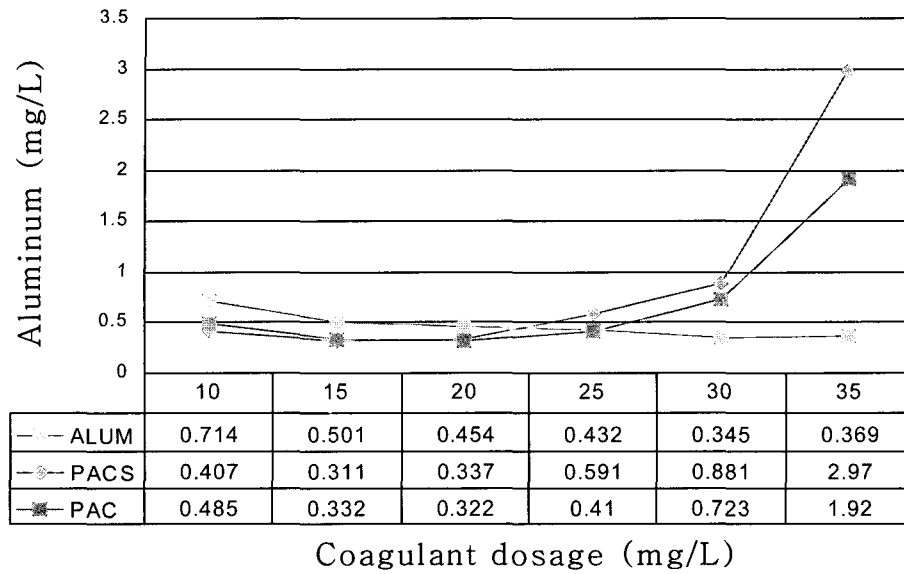


Fig. 4. Residual Aluminum by coagulants dosage.

Fig.4에서와 같이 알루미늄계 응집제투여로 인한 알루미늄의 잔류특성은 alum과 PACS의 경우는 탁도제거를 위한 최적주입농도인 30 mg/L과 15 mg/L에서 각각 0.345 mg/L, 0.311 mg/L이었고 PAC의 경우는 탁도제거율이 가장 좋은 25 mg/L에서 보다 더 낮은 20 mg/L에서 알루미늄농도가 0.322 mg/L로 가장 낮게 잔류하였다. 이러한 결과로 볼 때 PACS가 주입량이 가장 적으면서 잔류 탁도 및 잔류 알루미늄농도가 가장 낮았다. PAC도 잔류 탁도와 잔류 알루미늄농도가 비교적 낮았으나 PACS에 비해 주입농도가 5 mg/L~10 mg/L 더 높았다. Alum의 경우 PACS에 비해 같은 원수탁도에서 주입량이 15 mg/L 더 높았으며 잔류알루미늄농도와 잔류탁도도 PAC나 PACS보다 높았다.

따라서 3종의 응집제중 PACS가 가장 적은 양으로 탁도와 알루미늄 최소화에 있어서 가장 효과적이었고, PAC도 주입량과 잔류알루미늄농도가 비교적 양호했다. 따라서 정수의 잔류알루미늄 농도는 탁도와 높은 상관관계를 갖고 있으므로 alum 보다는 PAC와 PACS의 이용이 정수 중 잔류알루미늄농도 최소화에 효과적이었다.

Jar-test에 의한 alum, PAC, PACS의 존재형태별 알루미늄특성을 살펴 볼 때 3종의 응집제 모두 주입농도 10 mg/L에서 35 mg/L까지 총 알루미늄 중 입자성 알루미늄이 높은 농도로 존재하였다 (Fig. 5-7). 이러한 결과로 볼 때 응집제는 주로 부유성 알루미늄 형태로서 Floc을 형성하는 작용을 하였다. 용존성 알루미늄은 alum, PAC, PACS 모두 주입농도별로 일정하지는 않지만 탁도 및 제거효율이 가장 좋은 최적주입농도 범위에서 가장 낮은 농도를 나타냈다.

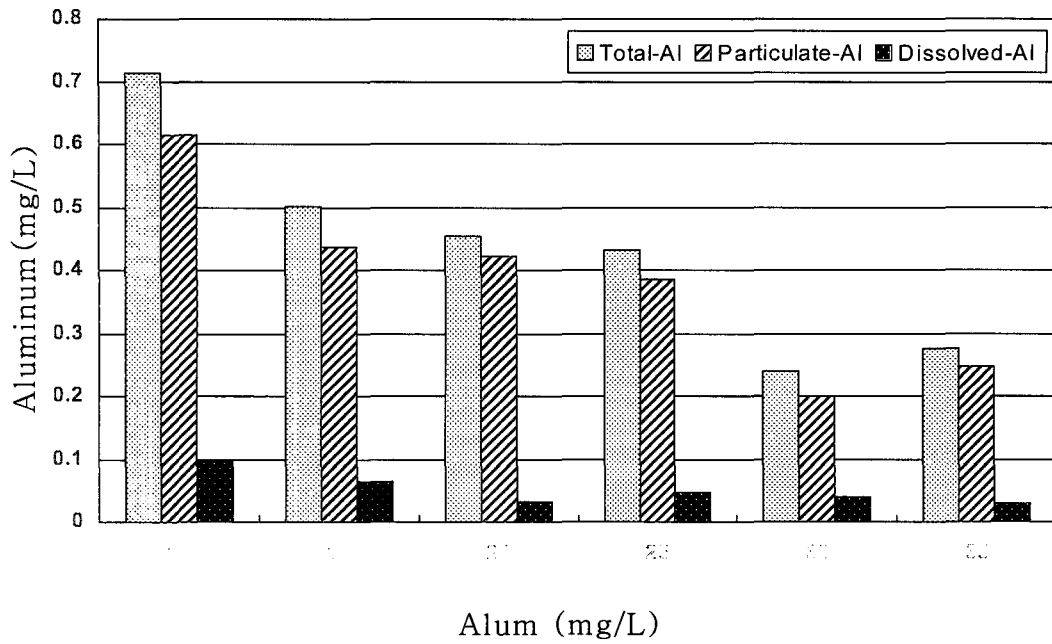


Fig. 5. Variation of total, particulate, dissolved aluminum by alum dosage.

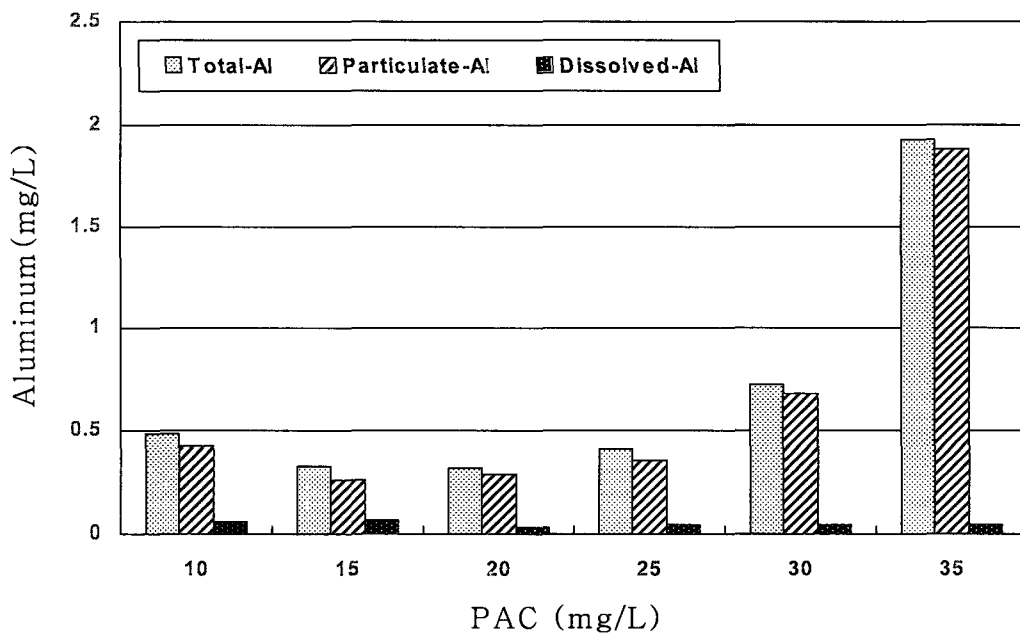


Fig. 6. Variation of total, particulate, dissolved aluminum by PAC dosage.

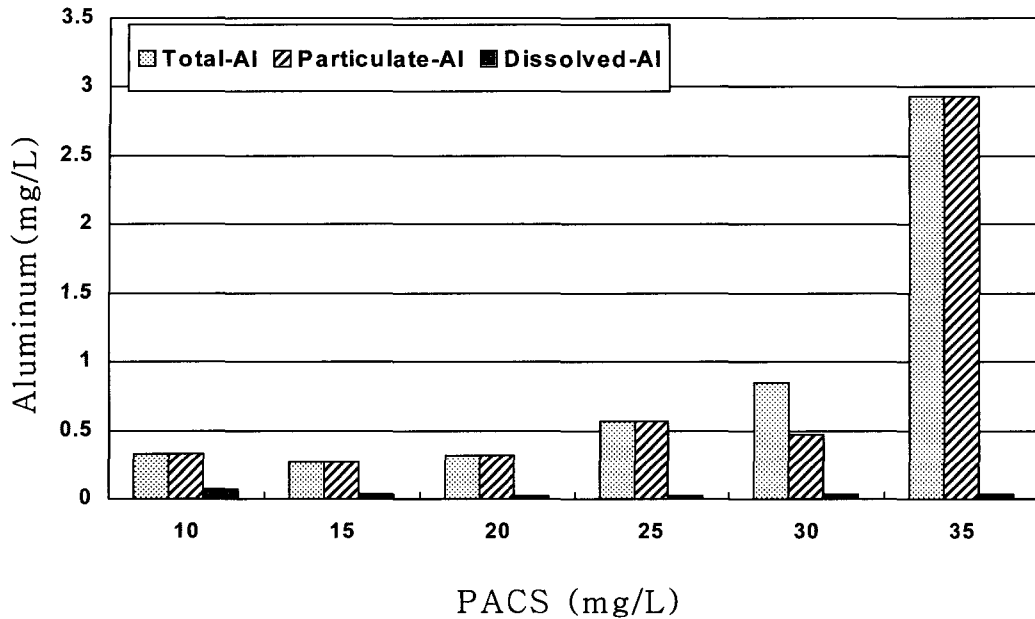


Fig. 7. Variation of total, particulate, dissolved aluminum by PACS dosage.

김승현 등¹¹⁾에 의해서도 입자성 알루미늄과 용존성 알루미늄에 대하여 보고되었는데 즉 응집제로 주입된 알루미늄은 수산화알루미늄 플록을 형성하는데 사용되므로 응집이 적정하게 진행된다면 침전수의 입자성 알루미늄농도가 증가하고, 용해성 알루미늄은 작게 되며, 응집이 잘 이루어지지 않았다면 용해성 알루미늄농도는 커질 수 있다고 하므로서 응집효율의 기준을 제시하였다.

(2) pH 조정에 의한 용존성 알루미늄 최소화 방안

사각모양의 2ℓ 시료용기에 원수 1 ℓ를 넣고 HCl과 NaOH로 pH를 5.6, 6.0, 6.6, 7.0, 7.6, 8.6, 8.9, 9.5로 조절한 후 PACS를 똑같은 농도로 주입하여 급속교반 200 rpm 30초, 완속교반 50 rpm 10분 동안 혼화·응집시켜 1시간 침전 후 상등수를 채취하여 탁도와 총 알루미늄, 용존성 알루미늄을 측정하였다.

Fig.8에서와 같이 원수 pH를 5.5에서 9.6까지 조절한 후 PACS 13 mg/L를 동일하게 주입한 결과 탁도제거가 가장 좋은 pH 범위는 7.2로서 응집·침전 후 pH 7.03, 탁도 0.564 NTU, 총 알루미늄농도는 0.265 mg/L, 용존성 알루미늄은 0.031 mg/L 이었다. 또한 pH 7.6의 결과도 탁도는 0.591 NTU로서 비교적 양호하였지만 pH 7.2 일때 보다 용존성 알루미늄농도가 200%가 높아졌으며 pH를 8.9~9.6으로 조정하였을 때는 응집이 제대로 이루어지지 않았을 뿐 아니라 pH의 영향으로 탁도 및 총 알루미늄농도, 용존성 알루미늄농도가 상당히 높은 경향을 나타냈다.

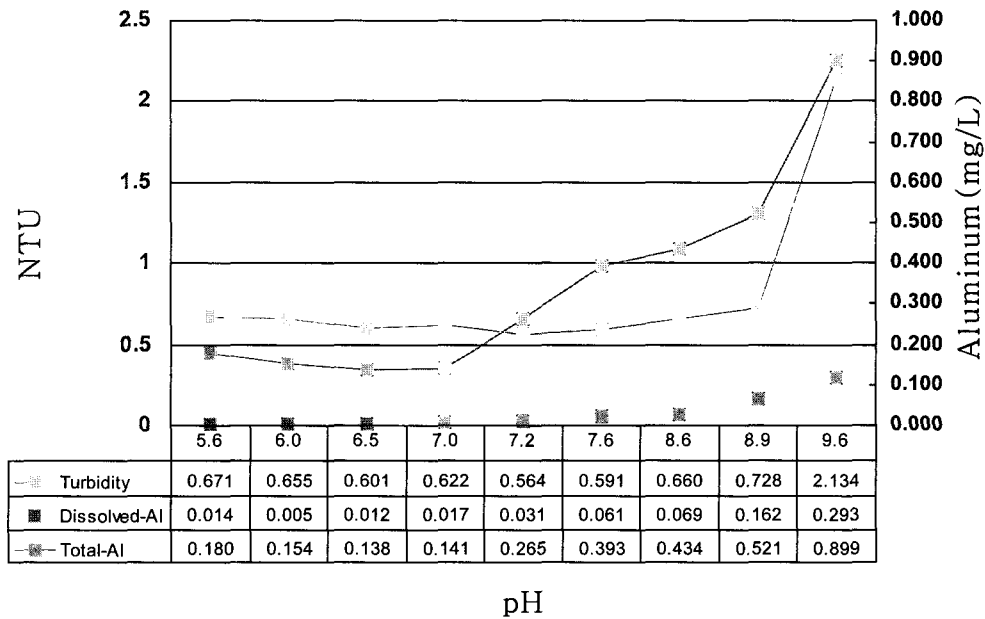


Fig. 8. Effects of pH adjustment on turbidity and aluminum removal.

특히 총 알루미늄 중 용존성 알루미늄이 차지하는 비율이 31.1% 내지 32.6%까지 높아졌다. 따라서 정수처리시 정수 pH가 너무 높으면 총 알루미늄과 용존성 알루미늄이 높아지므로 정수 pH가 높아지지 않도록 주의해야 할 것이다.

pH 6.0, 6.5, 7.0으로 조정했을 때 탁도는 각각 0.655, 0.601, 0.622 NTU로서 탁도제거 효율이 가장 좋았던 pH 7.2에서의 0.564 NTU와 비교할 때 비교적 높지 않았던 반면에 총 알루미늄과 용존성 알루미늄농도는 각각 pH 6.0에서는 0.154, 0.005 mg/L, pH 6.5는 0.138, 0.012 mg/L, pH 7.0은 0.141, 0.0017 mg/L로서 원수 pH가 7.2이었을 때의 알루미늄 농도보다 총 알루미늄농도가 41.9%에서 47.9%까지 감소되었고 용존성 알루미늄은 45.2%에서 83.9%까지 감소되었다. 그러나 응집제 주입농도에 따라 달라지지만 Jar-test 후 pH는 응집제영향으로 pH 6.0으로 조정했을 때 응집·침전 후 pH는 5.7로 낮은 pH를 나타냈다. 또한 실제 정수처리공정에서 응집제주입 및 후 염소처리공정을 거치면서 수질에 따라 약간의 차이는 있지만 원수에서 최종처리수인 정수까지 pH가 평균적으로 0.3정도 낮아지므로 처리수의 pH를 고려하여야 할 것이다.

IV. 결 론

PACS로 정수처리하는 정수장에서의 공정별 알루미늄농도 변화와 존재형태별 특성을 분석하고 정수 중 잔류 알루미늄의 최소화 방법으로 alum, PAC, PACS의 응집제별 최적주입농도 및 응집특성 실험에 의한 응집제 선택과 응집처리 전 pH 조정에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

정수장에 유입되는 원수의 평균 알루미늄농도는 0.358 mg/L이고 정수는 0.063 mg/L로서 통상 처리수인 정수의 잔류 알루미늄농도는 원수보다 감소되었고, 먹는물 수질기준인 0.2 mg/L이하에 적합했다.

알루미늄의 존재형태는 정수처리공정에서 용존성 알루미늄보다 입자성 알루미늄이 주로 존재하였으며, 정수처리공정에서 알루미늄 제거율은 96.8%였으며 침전공정에서 86.2%로 가장 높은 제거율을 나타냈다. 알루미늄 존재형태별로 보면 입자성 알루미늄이 97.5%로서 주로 제거되었고 용존성 알루미늄은 59%가 제거되었다.

정수중 탁도 및 잔류알루미늄 최소화를 위한 최적 주입량 결정에서 같은 조건일 때 잔류알루미늄 제거에 대한 응집효율은 PACS가 가장 우수하고 다음이 PAC, alum의 순서였으며, 응집제 주입농도가 너무 낮으면 응집이 불량하여 Floc이 제대로 형성되지 않고 응집제중의 알루미늄이 그대로 상등수에 잔류하여 높은 잔류알루미늄 농도를 나타냈다. 또한 과량주입시 응집제의 가수분해 생성물 증가로 용존성 알루미늄농도가 높아져서 최종처리수의 알루미늄농도가 높아질 가능성이 많았다.

정수처리 공정에서 쉽게 제거되지 않는 용존성 알루미늄의 농도를 최소화하는 방법으로 응집제 주입전 원수 pH를 6.5~7.0으로 조정하였을 때 총 알루미늄 및 용존성 알루미늄농도가 최소로 잔류하였으며 pH를 8.6이상으로 조정하였을 때 용존성 알루미늄농도가 높게 상승하였다.

결론적으로 정수처리공정에서 최적응집제 선택 및 주입농도 결정과 pH조정이 정수 중 잔류알루미늄 최소화를 위한 중요한 방안으로서, PACS가 잔류알루미늄농도가 가장 낮았고, 또한 응집 전 원수의 pH를 6.5~7.0으로 조정하여 처리하는 방법이 잔류알루미늄을 최소화 시킬 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Costello JJ. Postprecipitation in distribution systems. J. Am. Water Works Assoc. 76(11): 46 (1984)
2. Crapper DR. Krishanan SS. & Dalton AJ. Aluminum in Alzheimer's disease and experimental neurofibrillary degeneration. Sci. 110 (511) (1973)
3. 이태관, 김수봉, 오종민. 수중의 잔존 알루미늄의 실태와 대책. J. Korea Technol. Soc.

- Water Wastewater Treatment 4(3): 35~44 (1996)
4. Reiber S, Kukull W. and Standish-Lee P. Drinking water aluminum and bioavailability. J. Am. Water Works Assoc. 76(11): 46~49 (1995)
 5. Davidson AM, Walker GS. and Lewins AM. Water supply aluminum concentration dialysis dementia and effect of reverse osmosis water treatment. Lancet. 2 785~787(1982)
 6. Rondeau V, Commengies D, Jacqmin-Gadda H. and Dartigues JF. Relation between aluminum concentrations in drinking water and Alzheimer's disease: An 8-year follow-up study. Am J. Epidemiology 152(1): 59~66 (2000)
 7. Reiber, S.H., and Kukull W.A. Aluminum, Drinking Water, and Alzheimer's Disease. Denver, CO : AWWA Research Foundation, 1996.
 8. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. 2nd ed. addendum to Vol. 1. recommendations. Geneva. p. 3~4 (1998)
 9. 환경부 고시 187호. 수처리제의 기준과규격 및 표시기준. (2002. 12.9)
 10. Driscoll CT, Letterman RD. Factors regulating residual aluminum concentrations in treated waters. Environmetrics 6: 287-309 (1995)
 11. 김승현, 전종희. 정수처리과정에서의 알루미늄 농도변화와 그 요인에 관한 연구. J. Korean Soc. Environ. Engineers 7(12): 1289~1297 (1995)