

淨水處理 過程에서의 重金屬除去에 關한 研究

김중구* · 고영송 · 남상호

*서울시 수도기술연구소, 건국대학교 환경공학과

Removal of Heavy Metals Through Conventional Water Treatment Processes

Jung-Ku Kim*, Young-Song Ko and Sang-Ho Nam

**Institute of Water Works Technology, Seoul Metropolitan Government
Department of Environmental Engineering, Kon-Kuk University*

ABSTRACT

A study was carried out in order to investigate the removal efficiencies and removal characteristics of heavy metals such as Pb, Cd, Cr, Cu in raw water by one of conventional water treatment processes. The coagulants used in this study were Alum and PAC. Three kinds of water samples were provided : kaolin water, kaolin water mixed with humic acid and raw water from Han River mixed with suspended matter deposited on raw water inlet pipe. Heavy metals were added to the water samples with their respective turbidity, and jar tests were performed. In the results from heavy metal removal studies, lead might be adsorbed or exchanged on the particle surface (SS) rather than react with organic matter added. Cadmium was affected on the dissolved organic matter. Chromium was affected by the both dissolved organic matter and SS concentration, and the restabilization and the enmeshment appeared at moderate (50~80 NTU) and high (100 NTU) turbidity as defined in this experiment. The removal efficiency of copper was relatively little affected by the dissolved organic matter but by SS concentration in comparison with other heavy metals. In these studies as to the raw water turbidities and concentration of heavy metals, it is proved out that the removal efficiency on heavy metals in both cases of PAC and Alum as coagulants was not significantly different.

Keywords : Heavy metal, coagulant, removal efficiency.

I. 서 론

인류 문명의 역사는 큰 강의 유역에서 태동되었으며, 물은 인류문화를 지배해온 기반이라고 하여도 과언이 아닐 것이다. 물은 곧 모든 생명의 근원이며, 수자원의 양과 질은 각종 생산활동 및 도시 규모를 결정하는 제한 요인이 되어왔다.

날로 증가하는 생활하수, 공장폐수, 농경지 배수 등이 상수원에 유입되어 원수의 수질이 악화되고 있는 실정이며, 과거에 검출되지 않았던 중금속 및 발암물질 등 유해물질이 검출되고 있다. 기존의 정수처리 공정으로는 이러한 유독물질을 제거할 수 없는 경우가 많아 외국에서는 화학산화(chemical oxidation), 침전(precipitation), 흡착(adsorption) 및 이온

교환(ion exchange) 등 특수정수기법의 도입이 늘어가고 있는 실정이다.¹⁾

수중 중금속의 검출은 많은 문제를 야기시켜 왔으며, 그에 대한 제거 연구도 국내·외에서 활발히 이루어져 많은 연구가 보고되고 있으나 재래식 정수처리 공정이 대다수인 우리의 정수처리 현실에서 이러한 물질들에 대한 거동 및 제거율에 대한 연구가 부족한 실정이다.

이러한 물질들은 후속공정인 활성탄 공정에서 부분적으로 제거가 가능하나 활성탄 공정은 시설비용, 부지, 재생, 폐활성탄의 처분 등 많은 문제점이 있으므로 전처리 공정인 응집·침전에서 이들 물질에 대한 제거율을 향상시키는 것이 바람직하다.

본 연구는 유해물질 중 중금속이 함유된 오염

물질이 기존 정수장에 유입되었을 때 정수처리 공정에서의 제거정도 및 그 주요한 제거행태를 고찰하기 위하여 카올린용액, 카올린용액에 휴믹산을 첨가한 시료 및 한강 원수에 퇴적슬러지를 첨가한 시료를 대상으로 각 탁도별로 중금속(납, 카드뮴, 크롬, 구리)을 첨가하고 Jar-test를 행하여 그 제거율 및 제거행태를 고찰하고자 하였다.

II. 실험방법

1. 실험기기

1) Jar-tester

응집실험은 Jar-tester(우주공학공사, Model JA)를 사용하여 행하였다.

2) I.C.P.(Inductively coupled plasma)^{2,3)}

중금속 분석은 I.C.P.(FRANCE JOBIN YVON, J.Y. 38 Plus Model)를 이용하였다. 분석 조건은 Table 1과 같으며, 중금속 측정파장은 납 220.35 nm, 구리 324.75 nm, 카드뮴 214.43 nm, 크롬 205.55 nm이었다.

3) pH 및 탁도계

시료원수 및 상징액의 pH 측정은 pH meter(Central Kaga-kuum. Model-23, Japan)를 이용하였으며, 탁도 측정은 HACH(Model 2100A Turbidimeter, U.S. A.)를 이용하였다.

2. 인공현탁액

본 실험에 사용된 인공 현탁액은 유기물 함량의 변화 및 고형물의 영향을 살펴보기 위하여 3가지로 조제하였다.

첫째, 증류수에 카올린(Junsei Chemical, Yakuri Pure Chemical 제품시약 1급)을 첨가하여 500 NTU로 하였으며 NaHCO_3 를 투여하여 알칼리도를 43 mg/l로 하였다. 그 용액을 실험 조건에 따라 탁도 10, 30, 50, 80, 100 NTU로 희석하여 사용하였으며 이때의 pH는 7.3이었다.

둘째, 유기물 함량의 변화를 고찰하기 위하여 위 용액에 고체 휴믹산(humic acid)을 1 mg/l와 3 mg/l를 첨가하여 시료수로 사용하였다.

셋째, 실제 정수장 침전지에 유입되는 유입수의 수질조건에 접근하는 인공현탁질로 실험하기 위해 홍수시 한강변에 퇴적된 슬러지를 회수한 후 건조시켜 곱게 분쇄하였다. 그 현탁질을 한강 원수와 함께 넣고 1시간 정도 교반한 다음 24시간 정제시킨 후 탁도를 500 NTU로 조절하여 사용하였다. 이때의 pH는 7.4이었으며, 알칼리도는 45 mg/l이었다.

Table 1. Conditions for I.C.P. measurement

Items	Condition
Optics	none
Int. time	0.5 Sec
PMT Volt	600~800 Volt
Nebulizer Flow Rate	3 l/min
Argon Coolant Flow Rate	2.5 l/min
Sample uptake	3 l/min

Table 2. The quality of raw water

Examination-terms	Average results
Water temperature (°C)	20.5
Turbidity (NTU)	10.5
pH	7.3
Alkalinity (mg/l)	46
KMnO_4 consumed (mg/l)	6.0
Total hardness (mg/l)	58
Residue on evaporation (mg/l)	128
Lead(Pb) (mg/l)	ND
Cadmium(Cd) (mg/l)	ND
Copper(Cu) (mg/l)	0.017
Cromium(Cr) (mg/l)	ND

(1993. 9.)

3. 응집제⁴⁾

응집실험에 사용된 응집제는 신창산업(주)의 PAC (poly aluminium chloride) 및 LAS(Liquid Aluminium Sulfate)를 10,000 mg/l, 1,000 mg/l의 용액으로 제조하여 사용하였으며, pH 및 알칼리도 조절을 위해 응집보조제로 소석회(Ca(OH)_2), Shinyo Pure Chemical Co., LTD)를 사용하였다.

4. 실험방법

1) 시료원수의 수질

실험대상 시료는 잠실수중보 상류의 원수를 채수하여 사용하였다. Table 2는 1993년 9월중 원수의 평균수질을 나타낸다.

2) 응집제 주입에 따른 pH와 알칼리도 변화 실험
응집에 영향을 미치는 주요한 인자인 pH, 알칼리도를 응집제 투여량의 변화에 따라 고찰하기 위하여 원수 1l를 취해 원수의 pH 및 알칼리도를 측정후 PAC와 alum에 대해 1 ml = 10 mg/l가 되도록 조제하여 각각 1 ml씩 주입량을 변화시켰다. 각 응집제에 대하여 시료수 pH가 7.0, 알칼리도 30 mg/l 이하로 되는데 소모되는 PAC와 alum의 양을 조사하였다.

Table 3. PAC dosages for turbidity

Raw Water				Results of Jar Test						Optimum dose(mg/l)	
Turbidity (NTU)	Alkalinity (mg/l)	pH	Temp. (°C)	항 목	1	2	3	4	5		6
10	45	7.4	20	PAC dose(mg/l)	13	14	15	16	17	18	15
				Ca(OH) ₂ dose(mg/l)	-	-	-	-	-	-	
				상징액 탁도(NTU)	3.2	2.8	2.4	2.4	2.3	2.2	
				Post pH	7.3	7.3	7.3	7.2	7.2	7.1	
				Post alkalinity(mg/l)	43	43	43	43	43	43	
30	45	7.4	20	PAC dose(mg/l)	17	18	19	20	21	22	20
				Ca(OH) ₂ dose(mg/l)	-	-	-	-	-	-	
				상징액 탁도(NTU)	3.0	3.0	2.5	2.2	2.0	2.0	
				Post pH	7.2	7.2	7.2	7.2	7.1	7.1	
				Post alkalinity(mg/l)	43	43	42	42	42	42	
50	45	7.4	20	PAC dose(mg/l)	26	27	28	29	30	31	29
				Ca(OH) ₂ dose(mg/l)	-	-	-	-	-	-	
				상징액 탁도(NTU)	3.4	3.2	2.6	2.3	2.6	2.4	
				Post pH	7.1	7.1	7.1	7.1	7.0	7.0	
				Post alkalinity(mg/l)	41	41	41	41	40	40	
80	45	7.4	20	PAC dose(mg/l)	33	34	35	36	37	38	35
				Ca(OH) ₂ dose(mg/l)	-	-	-	-	-	-	
				상징액 탁도(NTU)	2.8	3.0	2.2	2.2	2.0	2.3	
				Post pH	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	
				Post alkalinity(mg/l)	41	41	41	41	41	40	
100	45	7.4	20	PAC dose(mg/l)	36	37	38	39	40	41	39
				Ca(OH) ₂ dose(mg/l)	-	-	-	1	1	1	
				상징액 탁도(NTU)	2.8	2.6	2.3	2.1	2.3	2.0	
				Post pH	7.0	7.0	7.0	7.1	7.1	7.1	
				Post alkalinity(mg/l)	41	41	40	40	40	40	

3) 최적 응집제 주입을 실험

최적 응집제 주입을 실험은 증류수에 카올린만 넣은 시료, 카올린 및 휴믹산을 넣은 시료를 회석하여 사용하였다. 탁도 10 NTU인 한강원수 퇴적슬러지를 사용한 시료는 그대로 사용하였으며 30, 50, 80, 100 NTU는 전처리한 현탁액 500 NTU를 시료 원수에 적량 주입하여 제조한 후 시료수의 탁도, pH, 알칼리도, 수온 등을 측정하였다. 각각의 시료수 1

l를 1l용 비이커에 취하여 응집제인 PAC 및 Alum에 대해 1 ml = 10 mg/l 및 Ca(OH)₂을 1 ml = 1 mg/l가 되도록 주입 농도를 1 mg/l씩 증가시키며 투여하였다. 교반속도 150 rpm에서 1분간 급속 교반을 시킨 후 50 rpm으로 5분간 완속교반하였으며, 15분간 정지시킨 후 응집된 플럭의 침전이 완료되면 수면으로부터 1.5~2 cm 지점에서 20 ml씩 상징액을 취하여 유용수 시험방법에 따라 pH, 알칼리도 등을

분석하여 최적 응집제 주입율을 결정하였다.

5) 중금속 제거실험

중금속 표준용액 1,000 mg/l를 사용하여 적당량을 첨가한 후 시료수(10, 30, 50, 80, 100 NTU)로 1/표선까지 정확히 채워 납, 크롬, 카드뮴, 구리의 농도가 0.5, 1.0, 1.5 mg/l이 되도록 시료수를 조제하였다. 각 탁도에 따라서 1/용 비이커에 취하여 응집제를 주입한 후 150 rpm에서 1분간 급속교반을 시킨 후 50 rpm으로 5분간 완속교반하여 15분간 정치시켰다. 상징액을 취하여 탁도, pH, 알칼리도를 측정하였으며, I.C.P.를 이용하여 납, 크롬, 카드뮴, 구리를 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 응집제 주입에 따른 pH와 알칼리도 변화

응집제 가장 중요한 화학적 인자는 pH와 알칼리도로 이들은 서로 상관관계가 있으며 정수처리에서는 통상 최종 정수의 상징액이 pH 및 알칼리도가 각각 7.0 및 30 mg/l가 되도록 권장하고 있다.^{5, 8)} 본 실험에서는 응집에 최적 조건이라 할 수 있는 pH 7.47, 알칼리도 45 mg/l인 한강 원수를 시료로 하여 PAC(10.3% as Al_2O_3)와 alum(8% as Al_2O_3)을 10~100 mg/l 투입하였을 때의 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 pH 7.0, 알칼리도 30 mg/l이 되는데 필요한 응집제량은 PAC의 경우 pH 및 알칼리도는 각각 40 mg/l, 100 mg/l이었으며, alum의 경우는 20 mg/l, 60 mg/l이었다. 이와 같이 PAC가 alum보다 pH 및 알칼리도의 강하가 적은 것은 응집제에 함유된 음이온 즉, SO_4^{2-} 이온이 Cl^- 이온보다 이온강도가 크기 때문으로 생각된다. 일반적으로 응집제의 종류에 따라서 1 mg/l 주입시 고체 황산알루미늄은 알칼리도를 0.45 mg/l 감소하고 액체 황산알루미늄 및 폴리염화알루미늄은 각각 0.24, 0.15 mg/l의 알칼리도를 감소하는 것으로 알려져 있다.^{5, 9)}

2. 최적 응집제 주입율 실험

본 실험은 한강원수에 대해 인공탁도(10~100 NTU)를 유발하여 실험조건에 따른 최적 응집제 주입율을 결정하였다.

Table 3과 4는 탁도에 따른 PAC와 alum의 응집실험 결과를 나타낸 것이다. 침전지 웨어(weir)의 탁도권장 기준인 5 NTU 이하로 유지하는데 필요한 PAC와 alum의 각 탁도에 대한 적정 주입량 차는

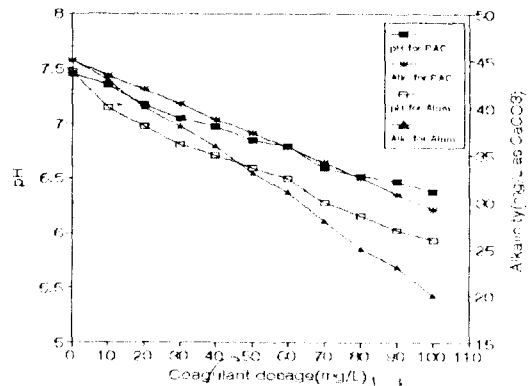


Fig. 1. pH and Alkalinity vs. coagulants.

저탁도(10 NTU)일 때 10 mg/l 중간탁도(50 NTU)와 고탁도(100 NTU)일 때 각각 16 mg/l, 26 mg/l로 PAC 주입량 보다 alum 주입량이 더 많았다.

중간탁도 범위에서 PAC와 alum의 응집제 주입량은 저탁도 및 고탁도시 보다 차가 크지 않았으나 고탁도일수록 주입량은 증가하였다. 전체적으로 PAC주입량은 alum 주입량보다 더 컸다.

이 경우 상징액 pH를 7.0 이상으로 유지하기 위한 $Ca(OH)_2$ 소요량은 PAC가 고탁도(100 NTU)에서 1 mg/l, alum은 저탁도(10 NTU)에서 2 mg/l, 고탁도(100 NTU)에서 최고 7 mg/l가 필요하였다. 이는 alum의 황산기(SO_4^{2-})에 기인하는 것으로 응집반응시 알루미늄이 수산화기(OH)와 반응하므로써 급격히 pH를 강하시키고 알칼리도를 소모하기 때문에 알카리 보조제를 더 필요로하는 것으로 생각된다.

PAC에 의한 응집실험 결과 상징액의 최대 탁도는 원수탁도 10 NTU일 때 3.2~2.2 NTU, 50 NTU일 때 3.4~2.3 NTU, 100 NTU일 때 2.8~2.0 NTU이었으며, alum의 경우 원수탁도 10 NTU일 때 3.8~2.5 NTU, 50 NTU일 때 3.4~2.4 NTU, 100 NTU일 때 2.8~2.3 NTU이었다.

전체적으로 보면 수온 20°C에서 PAC가 alum에 비해 응집 효과가 좋음을 알 수 있었고 PAC와 alum은 모두 저탁도일 경우 육안으로 관찰된 플럭 입자가 작아 침전하는데 더 많은 어려움이 있음을 알 수 있었다. 그 결과는 저탁도시 플럭 형성이 어렵다는 연구결과¹⁰⁾와도 일치하였다. 각 탁도별 적정 주입량 결정은 상징액 탁도 및 응집제량의 경제성을 고려하여 PAC의 경우 탁도 10~100 NTU에서 15~39 mg/l에서 alum은 25~65 mg/l이었다.

Table 4. Alum dosages for turbidity

Raw Water				Results of Jar Test						Optimum dose(mg/l)	
Turbidity (NTU)	Alkalinity (mg/l)	pH	Temp. (C)	항 목	1	2	3	4	5		6
10	45	7.4	20	Alum dose(mg/l)	23	24	25	26	27	28	25
				Ca(OH) ₂ dose(mg/l)	2	2	2	2	2	2	
				상징액 탁도(NTU)	3.8	3.2	2.8	2.6	2.5	2.6	
				Post pH	7.3	7.3	7.3	7.3	7.2	7.2	
				Post alkalinity(mg/l)	39	39	39	38	38	38	
30	45	7.4	20	Alum dose(mg/l)	34	35	36	38	38	39	37
				Ca(OH) ₂ dose(mg/l)	3	3	3	3	3	3	
				상징액 탁도(NTU)	3.4	3.2	3.0	2.6	2.6	2.4	
				Post pH	7.2	7.2	7.2	7.2	7.1	7.1	
				Post alkalinity(mg/l)	39	39	39	39	38	38	
50	45	7.4	20	Alum dose(mg/l)	43	44	45	46	47	48	45
				Ca(OH) ₂ dose(mg/l)	4	4	4	4	4	4	
				상징액 탁도(NTU)	3.4	3.4	2.7	2.6	2.4	2.4	
				Post pH	7.2	7.2	7.2	7.2	7.1	7.1	
				Post alkalinity(mg/l)	39	39	39	39	38	38	
80	45	7.4	20	Alum dose(mg/l)	53	54	55	56	57	58	56
				Ca(OH) ₂ dose(mg/l)	5	5	5	5	5	5	
				상징액 탁도(NTU)	3.2	3.0	2.6	2.5	2.4	2.5	
				Post pH	7.3	7.3	7.3	7.3	7.2	7.2	
				Post alkalinity(mg/l)	38	38	38	38	37	37	
100	45	7.4	20	Alum dose(mg/l)	62	63	64	65	66	67	65
				Ca(OH) ₂ dose(mg/l)	7	7	7	7	7	7	
				상징액 탁도(NTU)	2.8	3.0	2.5	2.3	2.4	2.4	
				Post pH	7.3	7.3	7.3	7.2	7.2	7.1	
				Post alkalinity(mg/l)	39	39	39	38	38	37	

3. 납, 카드뮴, 크롬, 구리의 제거율

시료수의 탁도별(10~100 NTU) 최적응집제 주입을 실험에서 결정된 응집제 주입량을 투입하고 중금속제거 실험을 통해서 납, 카드뮴, 크롬, 구리의 제거 특성 및 제거율을 고찰하였다.

1) 납 제거 효율

전체적인 납의 제거율은 Fig.2~4와 같고, 동일 탁도에서 납 농도가 증가할수록 PAC 및 alum 모두

제거율이 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 시료 탁도가 증가하면서 2가지 응집제간의 동일 탁도에 대한 제거율의 차이는 점차 감소하는 경향이였다. 탁도가 30 NTU일 경우 PAC 및 alum에 의한 납 제거율이 급격히 상승 하였으나 그 이상에서는 완만히 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 납의 제거가 중·저탁도(30 NTU)에서 시작하여 약·고탁도(80 NTU)에서 완결된 것을 알 수 있었다.

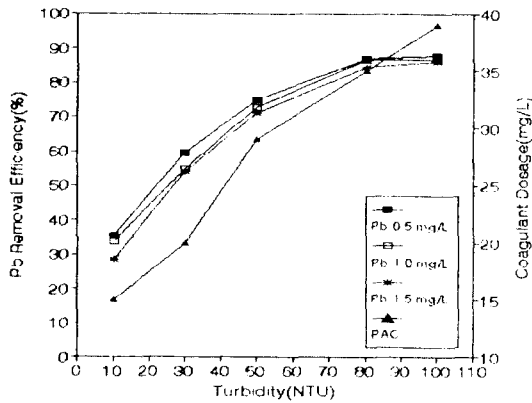


Fig. 2. Pb removal efficiency with PAC.

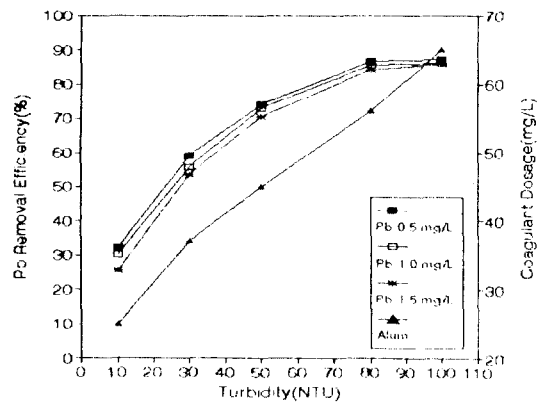


Fig. 3. Pb removal efficiency with alum.

PAC와 alum의 납 제거율의 차이를 살펴보면 중·저탁도에서는 PAC의 제거율이 약간 높게 나타났지만 고탁도에서는 alum의 제거율이 높은 경향을 나타내었다.

유기물의 형태에 따른 PAC의 납 제거 특성을 살펴보기 위해 증류수에 카올린만 첨가한 경우, 증류수에 카올린과 휴믹산을 첨가한 경우 한강원수에 퇴적슬러지를 첨가하여 납 제거율 실험을 한 결과 전체적으로 유기물의 존재와는 상관없이 카올린만 첨가하는 경우와 카올린과 휴믹산을 첨가한 경우에서 제거율이 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 한강 원수에 퇴적슬러지를 첨가한 경우에는 약간의 차이를 보였다. 특히 이러한 경향은 탁도가 높아짐에 따라 더욱 두드러지게 나타났다. 본 실험에 사용한 시료수의 특성을 살펴보면 카올린만 넣은 경우는 무기물의 특성을 대신하며 카올린과 휴믹산을 첨가한 경우 용존유기물의 특성을 대신한다. 한강 원수에 퇴적슬러지를 첨가한 경우에는 위의 두 특성 뿐만 아니라 SS 특성이 첨가되므로 납의 제거형태가 상당히 달라질 것으로 사료된다. 본 실험에서 정확한 제거 메커니즘을 규명하기는 어렵지만 납의 농도 0.5 mg/l에서 한강 원수에 퇴적슬러지를 첨가한 각 탁도의 납 제거율을 100%로 한다면 카올린만 넣은 경우는 70~86%, 카올린과 휴믹산을 첨가한 경우 70.8~92.0%로 나타났다. 휴믹물질에 의해 제거된 양은 0.4~6% 정도이고 SS에 흡착된 양은 8~29.2% 정도로 추정할 수 있다.

2) 카드뮴 제거 효율

전체적인 카드뮴의 제거율은 Fig. 5~7과 같다. PAC를 응집제로 사용하였을 경우 탁도 10 NTU, 카드뮴 농도 0.5~1.5 mg/l에서 제거율은 9.2~2.4%이었으며, 탁도 50 NTU 및 100 NTU에서도 제거율

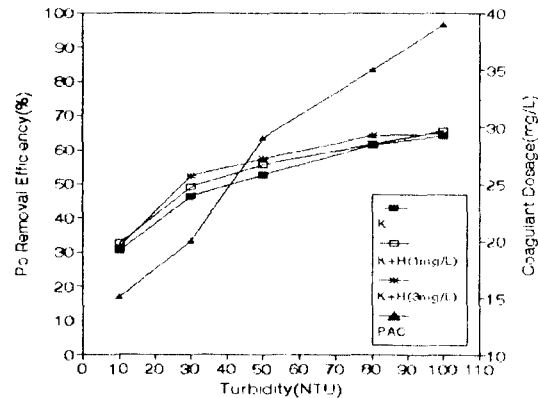


Fig. 4. Pb removal efficiency with PAC in kaolin mixed with humic acid solution.

은 각각 12.1~7.7%, 24.5~22.8%를 나타내었다. Alum을 응집제로 사용하였을 경우는 탁도 10 NTU, 카드뮴농도 0.5~1.5 mg/l에서 8.3~12%이었으며, 탁도 50 NTU, 탁도 100 NTU에서도 제거율은 각각 11.8~6.1%, 22.8~20.8%을 보였다. PAC와 alum의 전반적인 특성은 약·고탁도(80 NTU) 이상에서 카드뮴의 제거율이 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 탁도 증가에 따른 공침 현상으로 생각된다. 휴믹산 첨가에 따른 카드뮴의 제거 특성을 살펴보면, 휴믹산의 농도변화에는 큰 변화를 나타내지 않았다. 중간탁도(50 ONTU)에서는 휴믹물질을 넣은 시료에서 한강 원수에 퇴적슬러지를 넣은 시료보다 더 높은 카드뮴의 제거율을 나타내었다. 이는 카드뮴이 용존유기물에 더 친화력이 크기 때문으로 생각된다. 즉 슬러지의 SS 성분에 의한 흡착이 일어나지 않는 것으로 보이며, 이러한 경향은 고탁도(100 NTU)에서도 나타나는데 카올린과 휴믹산을 넣은 시료와

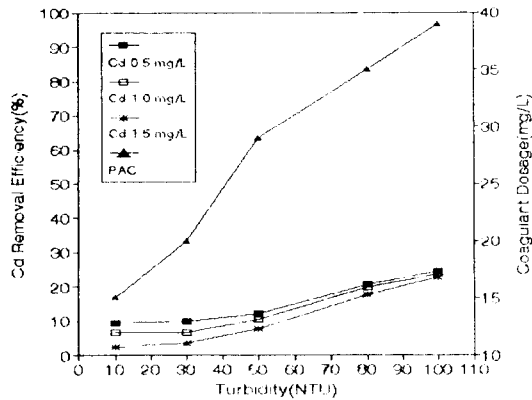


Fig. 5. Cd removal efficiency with PAC.

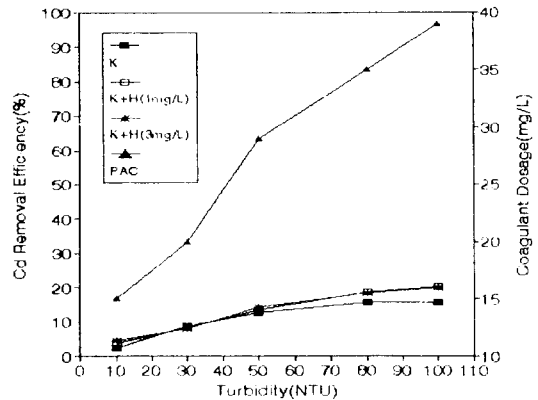


Fig. 7. Cd removal efficiency with PAC in kaolin mixed with humic acid solution.

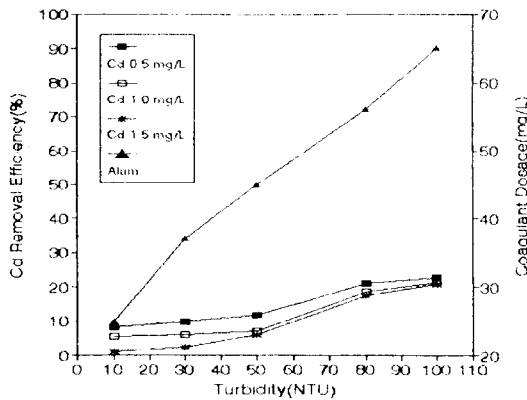


Fig. 6. Cd removal efficiency with alum.

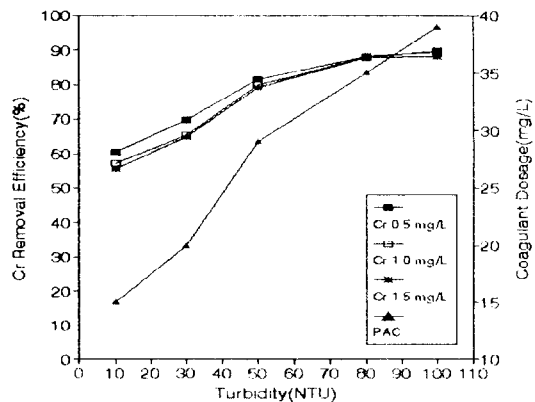


Fig. 8. Cr removal efficiency with PAC.

한강 원수에 퇴적슬러지를 넣은 시료에서 다른 금속들에 비해 상대적으로 낮은 약 4.3% 제거율을 나타내고 있다.

카드뮴 농도 증가에 따른 제거율은 점차 감소하는 경향을 보였는데 이는 카드뮴의 용해도적이 타 중금속들보다 크고 응집에 의해 제거되지 않기 때문에 전반적으로 다른 중금속들에 비해 그 제거율이 낮은 것으로 사료되며, 농도의 증가에도 비슷한 경향을 나타내는 것으로 판단된다. 다른 한편으로 카드뮴의 제거율이 이처럼 제거율이 낮은 것은 용해도적(K_{sp})이 4×10^{-14} 이며, 일반적으로 산성 영역에서는 금속양이온으로 용해되어 있으나 알칼리성의 영역에서는 물에 난용성의 금속수산화물을 형성하기 때문에 본 실험의 pH가 7.4인 것을 감안할 때 카드뮴 최적 응집 pH 범위(8.0~9.0)와 일치하지 않기 때문인 것으로 추측된다.^{11,12)}

이러한 경향은 pH7에서 ferric sulfate[$Fe_2(SO_4)_3$]

를 사용하여 용해성 카드뮴의 제거실험을 통해 약 24%의 제거율을 나타낸 AWWA(1988) 보고서¹³⁾와는 상당히 유사하지만 PAC를 대상으로 카드뮴을 응집·침전시켜 34% 제거율을 얻은 맹(1985)¹⁴⁾의 연구와는 상당히 다른 경향을 나타내었다.

3) 크롬 제거 효율

진제적인 크롬의 제거율을 Fig. 8~10과 같다. PAC를 응집제로 사용하였을 경우 탁도 10 NTU, 크롬 농도 0.5~1.5 mg/l에서 제거율은 60.2~55.4% 이었고, 탁도 50 NTU 및 탁도 100 NTU에서는 각각 81.5~79.0%, 89.4~88.2%이었다. 탁도 50 NTU 이상에서는 제거율이 완만하게 증가함을 보였다.

Alum을 응집제로 사용하였을 경우 탁도 10 NTU, 크롬농도 0.5~1.5 mg/l에서의 제거율은 58.4~52.1%이었다. 탁도 500 NTU, 탁도 100 NTU에서는 각각 82.1~77.6%, 89.2~88.6%이었다. 이처럼 크롬의 제

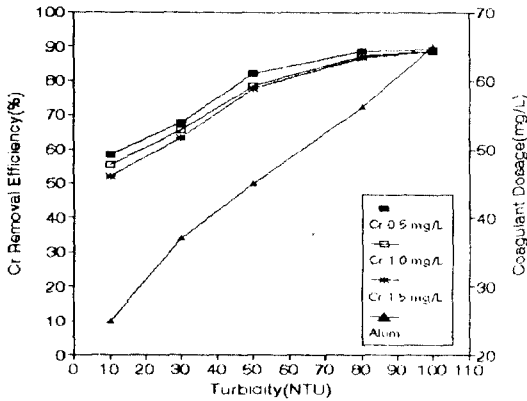


Fig. 9. Cr removal efficiency with alum.

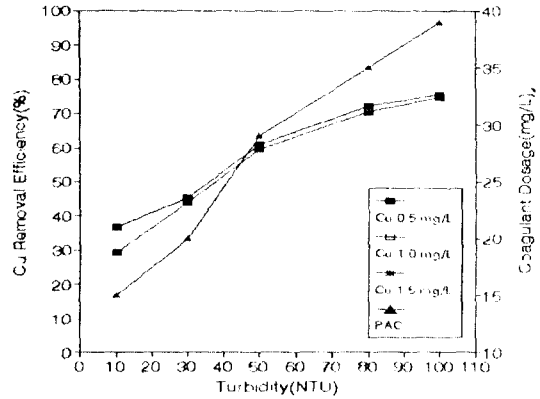


Fig. 11. Cu removal efficiency with PAC.

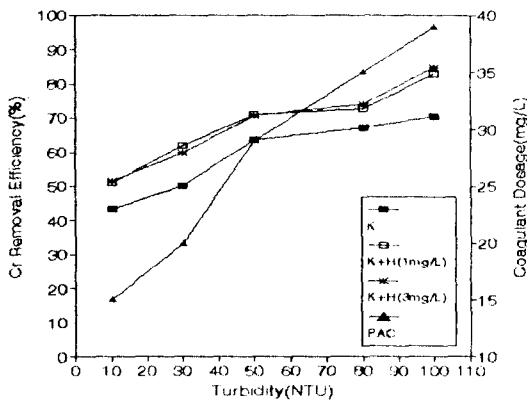


Fig. 10. Cr removal efficiency with PAC in kaolin mixed with humic acid solution.

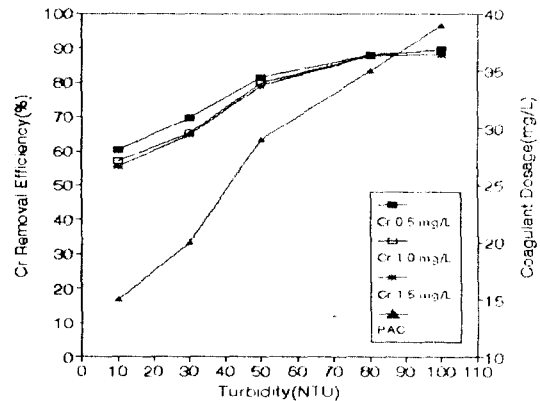


Fig. 12. Cu removal efficiency with alum.

거울이 전반적으로 높게 나타난 것은 본 실험의 pH가 7.4인 것을 감안할 때 크롬의 최적 응집 pH 범위(6.0~7.0)와 어느 정도 일치하는 것으로 생각된다.^{21, 22)} 휴믹산 첨가에 의한 크롬 제거율은 각 탁도 범위에서 카울린 용액의 경우 휴믹산을 첨가한 시료에 대해 약 5.6~12.4% 정도 낮은 제거율을 나타내었다. 그러나 다른 중금속들과 마찬가지로 본 실험에 사용된 휴믹산의 농도에는 큰 차이를 나타내지 않았다. 휴믹산 농도 1 mg/l 및 3 mg/l, 탁도 50~80 NTU에서는 크롬 제거율이 매우 완만하게 증가하였다. 이는 탁도 범위에서 재안정화(restabilization)¹⁵⁾가 일어나는 것으로 생각된다.

카울린 용액에 휴믹산을 첨가한 시료와 한강 원수에 퇴적슬러지를 첨가한 시료에 있어서 크롬 제거율을 비교하면 80 NTU까지는 각 탁도 범위에서 약 10% 정도가 퇴적슬러지의 SS에 의한 흡착에

의해 제거되는 것으로 사료되며 100 NTU에서는 공침 현상이 일어나는 것으로 보인다.

4) 구리 제거 효율

전체적인 구리의 제거율을 Fig. 11~13과 같다. PAC를 응집제로 사용하였을 경우 탁도 10 NTU, 구리 농도 0.5~1.5 mg/l에서의 제거율은 36.8~25.4%로 카드뮴보다는 높으나 크롬, 납에 비해 낮은 제거율을 나타내었다. 탁도 50 NTU 및 탁도 100 NTU에서도 61.0~55.8%, 75.6~73.8%로 크롬, 납에 비해 낮은 제거율을 나타냈다. Alum을 응집제로 사용하였을 경우 탁도 10 NTU, 구리농도 0.5~1.5 mg/l에서 32.3~21.5%의 제거율을 나타내었고 탁도 50 NTU 및 탁도 100 NTU에서도 각각 54.6~50.8%, 75.5~73.5%이었다. 납, 카드뮴, 크롬과 마찬가지로 구리에서도 alum이 PAC보다 응집효과가 약간 떨어짐을 알 수 있었으나 큰 차이는 없었다.

본 실험의 전반적인 경향은 카울린 용액에 휴믹

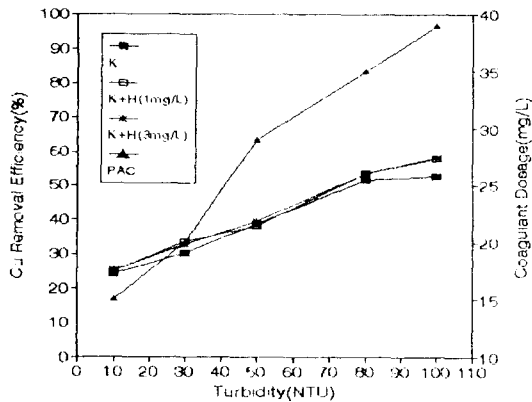


Fig. 13. Cu removal efficiency with PAC in kaolin mixed with humic acid solution.

산의 첨가에 의한 영향이 거의 없는 것으로 생각되며, 구리는 용존유기물과 거의 반응을 하지 않는 것으로 판단된다. 본 실험에서 구리의 제거는 주로 퇴적슬러지의 SS성분에 흡착되어 제거되는 것으로 판단되며, SS에 의한 제거율은 11.6~23.1%이었다.

탁도 증가에 따른 구리의 제거특성을 살펴보면 중간탁도(50 NTU)까지는 공침 현상이 나타나며 약고탁도(80 NTU) 이상에서는 재안정화가 일어나기 때문에 제거율의 증가가 크지 않는 것으로 보이며 구리의 농도 증가에 따른 제거율은 각 탁도 범위에서 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 구리 농도의 증가에 따라 이온 상태로 존재하는 양이 많아지며, 이들 이온상태의 구리들이 응집 과정에서 제거되는 양이 적기 때문으로 생각된다.

IV. 결 론

중금속이 함유된 오염물질이 기존 정수장에 유입되었을 때 2급수 처리과정에서 이들 물질의 제거 정도 및 그 주요한 제거행태를 고찰하기 위하여 카울린 시료, 카울린 시료에 휴믹산을 첨가한 시료 및 한강원수의 퇴적슬러지를 첨가한 시료를 대상으로 각 탁도별로 중금속(납, 카드뮴, 크롬, 구리)을 첨가하여 jar-test를 행한 결과는 다음과 같다.

① 납의 제거는 동일 탁도에서 납의 농도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 납의 제거는 유기물과의 반응보다는 오히려 입자에 흡착되어 제거되는 경향을 나타내었다.

② 카드뮴은 용해도적이 크고 알칼리(pH 8)에서 응집되기 때문에 제거율이 낮았다. 그러나 타 중금속들과는 달리 용존 유기물에 영향을 받는 것으로 나타났다.

③ 크롬의 제거는 용존 유기물 및 SS 함량의 영향을 받았으며 중간탁도 이상에서는 재안정화(50~80 NTU) 및 공침현상(100 NTU)을 나타내었다.

④ 구리의 제거는 용존유기물에 거의 영향을 받지 않았으나 타 중금속 보다 SS 함량의 영향이 컸다.

⑤ 원수의 탁도별, 중금속 농도별로 실험한 결과, PAC와 Alum 응집제는 실험대상 중금속 제거율에 큰 차이를 나타내지 않았다.

참고문헌

- 1) 한국건설기술연구원 : 상수원수질 향상을 위한 수처리공정 개선에 관한 연구. 1980.
- 2) Hasegawa, T. and Haraguchi, H. : Inductively Coupled Plasma in Analytical Atomic spectrometry, VCH publishers Co., 1986.
- 3) 김영상, 성학제 공저 : I.C.P. 방출분광법. 자유아카데미, 1990.
- 4) 신정래 : 수처리약품. 녹원출판사, 1985.
- 5) 건설부 : 상수도 시설기준(유지관리편). 1992.
- 6) 박영규외 3명 : 상수처리에서 HCO_3^- 농도가 응집 효과에 미치는 영향에 관하여. 한국수도협회지, 27, 22, 1982.
- 7) Moffett, J. W. : The Chemistry of High-Rate Water Treatment, J. AWWA, 60, 1255, 1968.
- 8) 김원만, 김홍석 : 정수처리에서의 응집제 투입율에 관한 연구. 한국수질보전학회지, 5(2), 23, 1989.
- 9) 황병주의 2명 : 수도용 알칼리제중 가성소다 사용에 관한 연구. 팔당수원지, 1984.
- 10) 정규영 : 저탁도원수의 급속여과에 관한 실험적 연구. 한국수도협회지, 1, 15, 1974.
- 11) Rubin, Alan J. : Aqueous Environmental Chemistry of Metals. Ann Arbor Science Publishers Inc., 1976.
- 12) 이규성의 3명 : 수질오염방지기술. 동화기술, 1992.
- 13) Trace Inorganic Substances Research Committee : A Review of Solid-Solution Interactions and Implications for controlling Trace Inorganic Materials. J. AWWA, 80(10), 56-64, 1988.
- 14) 맹중재 : 탁도 성분의 응결 침전에 관한 연구. 한