

論 文

정수처리공정의 침전법을 개선하기 위한 대체공정으로 용존공기부상법 (DAF)을 사용할 때 여러조건에 대한 처리효율 비교

Comparison of Removal Rates of Sedimentation and DAF(Dissolved Air Flotation) for various Different Conditions in Water Treatment

김미정* · 이병호**

Mi-Jeong Kim · Byoung-Ho Lee

Abstract

Conventional sedimentation method has some limitations for turbidity removal in water treatment because drinking water sources are getting polluted. Removal rates of turbidity using DAF and sedimentation process were compared for various water conditions to know whether DAF is effective to improve sedimentation process. Water samples were clay(gravity 2.65) water 100mg/l, H raw water, mixed water of H raw water and clay 100mg/l, and mixed water of HA(Humic Acid) 5mg/l and clay 100mg/l. Other parameters were temperature, coagulants(Alum, FeCl₃), and treatment time. Water temperature greatly affected in removal rates of turbidity for sedimentation and DAF. Generally DAF was more effective in removal rates of turbidity than sedimentation at the same experimental condition. Removal rates of UV₂₅₄ were high to over 90%, and independent of temperature and coagulant.

1. 서 론

상수원을 대표하는 하천수는 날로 오염이 심화되고 있다. 조류의 발생은 계절에 관계없이 나타나고 있고 상수원에는 발암물질인 트리할로메탄을 생성할 수 있는 유기물질의 농도가 계속 높아가고 있다. 이러한 오염물질들을 기

존의 수처리 방법으로는 제거가 어렵기 때문에 고도정수처리를 도입하여 오존과 활성탄등을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 1) 고도정수처리의 오존과 활성탄처리는 전처리과정이 매우 중요한 것으로 알려져 있다. 2) 기존의 응집·침전방법으로는 고도정수처리에 대한 진처리과정으로 한계가 있다고 판단하여 침전법을 개선할 수 있는 방법으로 DAF(Dissolved Air Flotation)가 효과적인지를 연구하였다. DAF는 1960년대 후반이 되어서야 하수나 음용수처리

* 울산대학교 토목·환경공학부 박사과정

**울산대학교 토목·환경공학부 교수

에 적용이 되었는데³⁾ 기존의 단순한 응집제와의 반응을 이용한 침전처리와는 달리 압력을 받은 순환수가 대기압까지 감소되면서 발생하는 미세한 기포가 응집처리에서 형성된 플록과 접촉하고 표면으로 떠오르면서 제거가 된다.³⁾ 4) DAF는 일반적으로 음용수 처리에서 나타날 수 있는 박테리아, 조류, 색 등의 낮은 밀도 성분을 처리하는 데 있어 침전법보다 훨씬 효율적인 것으로 알려졌다. 4) DAF의 체류시간이 짧기 때문에 처리조의 크기도 작고 수리학적 부하율이 침전법보다 큰 장점이 있다. 또한 DAF는 부유물질이 부상되는 동안에 air stripping에 의해 휘발성 유기물질, 맛, 그리고 냄새성분의 제거를 겸하게 되므로 침전처리보다 효율적인 것으로 발표되고 있다.^{3, 4)} Matthew et. al은 DAF의 처리를 위한 응집에서 물리적인 응집보다 화학적 응집과정에 사용하는 요소들 즉 pH나 응집제의 영향이 크다고 했다.⁵⁾ 이러한 부상처리도 전처리로서 응집과정의 유·무, 응집조건등에 따라 플랜트 설계나 경제성에 영향을 주게 된다.^{3, 5)} 본 논문에서는 상수처리에서 일반적으로 행해지는 응집·침전 처리에서 응집·부상으로 처리공정을 바꾸었을 때 처리효율이 어떻게 다른지 비교하기 위한 기초연구로서 alum($Al_2(SO_4)_3$)과 $FeCl_3$ 를 사용하여 여러 수질조건에 따른 침전법과 DAF의 효율을 검토하였다. 또한 같은 조건하에서 부상법과 침전법이 처리시간, 잔류탁도, 그리고 UV제거에 어떻게 차이가 나는지도 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험용 원수

본 연구의 기초실험을 위해 pH와 알칼리도를 0.1N H_2SO_4 와 0.1N Na_2CO_3 로 조절한 초순수 증류수에 비중이 약 2.65인 acid clay를 사용하여 clay water 100mg/l, 실제 H원수, H원수와 clay 100mg/l와의 혼합수, 그리고 Aldrich사의 HA(Humic Acid) 5mg/l와 clay 100mg/l와의 혼합수를 대상으로 하여 각각 실험

표 1. H원수의 수질조건

parameter (Units)	Sampling date	
	96/08/05	96/08/12
Temperature (°C)	26.5	26.7
pH	7.21	7.23
Turbidity (NTU)	2.76	2.56
Total alkalinity (mg/l $CaCO_3$)	34	36
Total Hardness (mg/l $CaCO_3$)	73	74
$KMnO_4$ consumption (mg/l)	8.05	8.60
SS(mg/l)	4.5	5.2
$UV_{254}(cm^{-1})$	0.080	0.068

현하여 그 결과를 비교·검토하였다. 본 연구의 시료 조제에 사용된 초순수 증류수는 증류기를 거친 후 R·O(역삼투압)과 활성탄 시스템을 거쳐서 생산되었다. 표 1은 H원수의 기본적인 수질조건을 나타낸 것이다.

2.2 실험방법

2.2.1 시료의 응집 실험

용존공기에 의한 부상처리를 할 때 필요한 응집실험은 jar test기를 사용하였으며, jar는 아크릴판을 이용하여 약 1.5l용량의 장방형으로 따로 제작하였다. 본 실험에서는 급속교반(Rapid mixing)을 위하여 200rpm으로 1분간, Flocculation은 30rpm으로 20분간 조정하였으며, 시료는 정치시킨 후 부상법과 비교하기 위하여 표면으로부터 약 1cm 지점에서 시간에 따라 채취하였다.

2.2.2 용존공기부상(DAF) 실험

Fig. 1은 본 연구에서 이용한 실험장치를 나타냈다. 이 장치는 투명한 아크릴판과 알루미늄 등을 이용하여 가압조(Pressure Chamber)와 부상조(Flotation Column)로 나누어 제작하였다. 가압조에는 증류수를 대략 3/4정도로 채우고 Compressor로 필요한 공기를 주입하게 되는데 가압조내의 공기는 잘 포화될 수 있도록 가압조를 30초이상 흔들고 3분동안 정치시켰다. 부상조에는 생성된 플록이 파괴되지 않

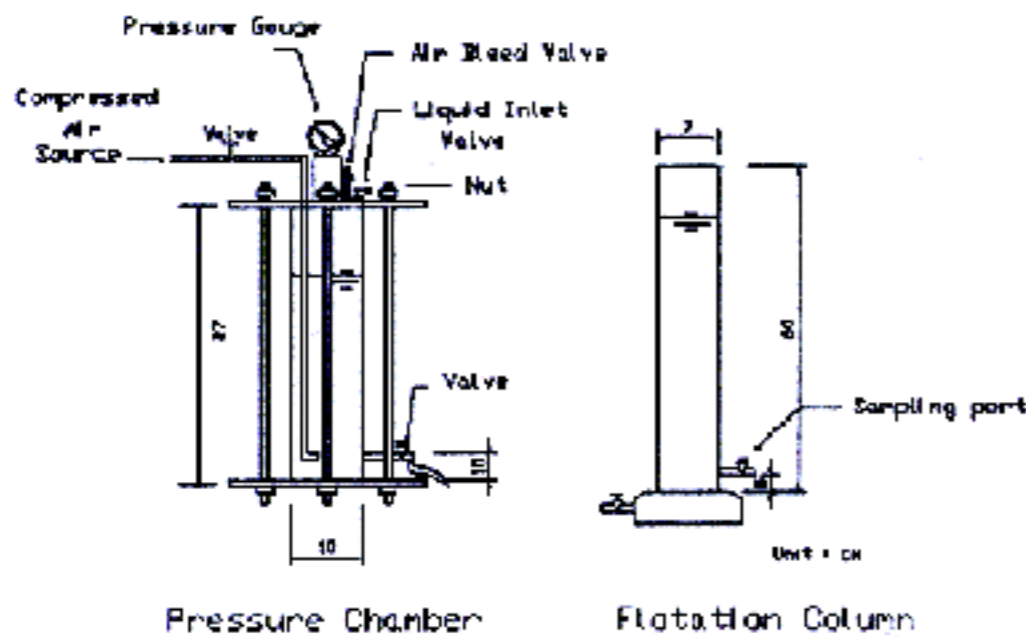


그림 1. DAF(Dissolved Air Flotation) 실험장치

도록 주의하면서 응집처리한 실험수를 넣었다. 그리고 가압수의 일부를 주입하고 일정한 부상시간이 경과된 후 Sampling Port에서 시료를 채취하였다.

2.2.3 실험조건 및 분석방법

온도를 10°C, 20°C로 조절하기 위하여 4°C 용 냉장고와 Incubator를 이용하였으며, 실험하기 전 해당 온도에서 12시간이상을 보관하였다. H원수인 경우는 Sampling 후 1주 이내에 실험을 끝냈으며, 실험동안 온도변화를 줄이기 위하여 실험기구에 단열재를 1점으로 싸고 수행하였다. pH조정은 0.1N H₂SO₄를 사용하여 7.2 ± 0.1로, 알카리도는 0.1N Na₂CO₃로 60 ± 2mg/l CaCO₃로 조정하였다. Alum은 2,000mg/l, FeCl₃는 5,000mg/l, 그리고 HA(Humic Acid)는 1,000mg/l로 Stock Solution을 조제하여 사용하였으며 FeCl₃는 사용할 때마다 조제하였다. HA의 농도는 UV₂₅₄와의 상관관계를 이용하여 표시하였다.

분석항목중 pH는 Fisher Scientific사의 Accument 925 pH미터기를 사용하였으며, 탁도는 HF사 모델 DRT 100B를 그리고 UV₂₅₄는 GF/C로 여과한 뒤 SHIMADZU 모델 UV 1201를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용존공기부상법에 대한 응집제의 영향
용존공기에 의한 부유물질류의 부상처리를

위하여 진처리과정으로 응집이 필요하다. 본 실험에서는 응집을 거친 뒤 샘플의 수질조건, 응집제 종류, 온도, 순환비 등에 따른 부상효과에 대하여 연구하였다.

3.1.1 Clay water 100mg/l에서의 영향

Fig. 2는 pH 7.2 ± 0.1, 알카리도 60 ± 2mg/l CaCO₃로 조정된 초순수 증류수에 무기성 Clay 100mg/l를 혼합한 시료에 대하여 응집·침전시킨 결과와 응집·부상시킨 결과를 alum의 주입량에 따라 잔류탁도값을 비교한 것이다. Jar test와 부상처리에서 잔류탁도값이 가장 낮을 때의 alum 주입량은 20mg/l로 최적 주입량이 일치하였다. 그리고 과도한 응집제 주입량은 부상수행에 역효과를 줄 수 있었다. 이것은 응집의 효율성이 부상처리에도 영향을 줄 수 있음을 보여준다.

Fig. 3은 응집제로 alum과 FeCl₃를 사용하여 시료의 온도가 10°C, 20°C일 때 부상처리 후의 탁도를 순환비에 따라 나타낸 것이다.

Fig. 3에서는 전반적으로 순환비가 클수록 잔류탁도가 감소하지만 순환비가 50% 이상이 되면 잔류탁도가 3~6NTU 사이에서 큰 영향이 없었다. Alum을 사용했을 때는 FeCl₃에 비해

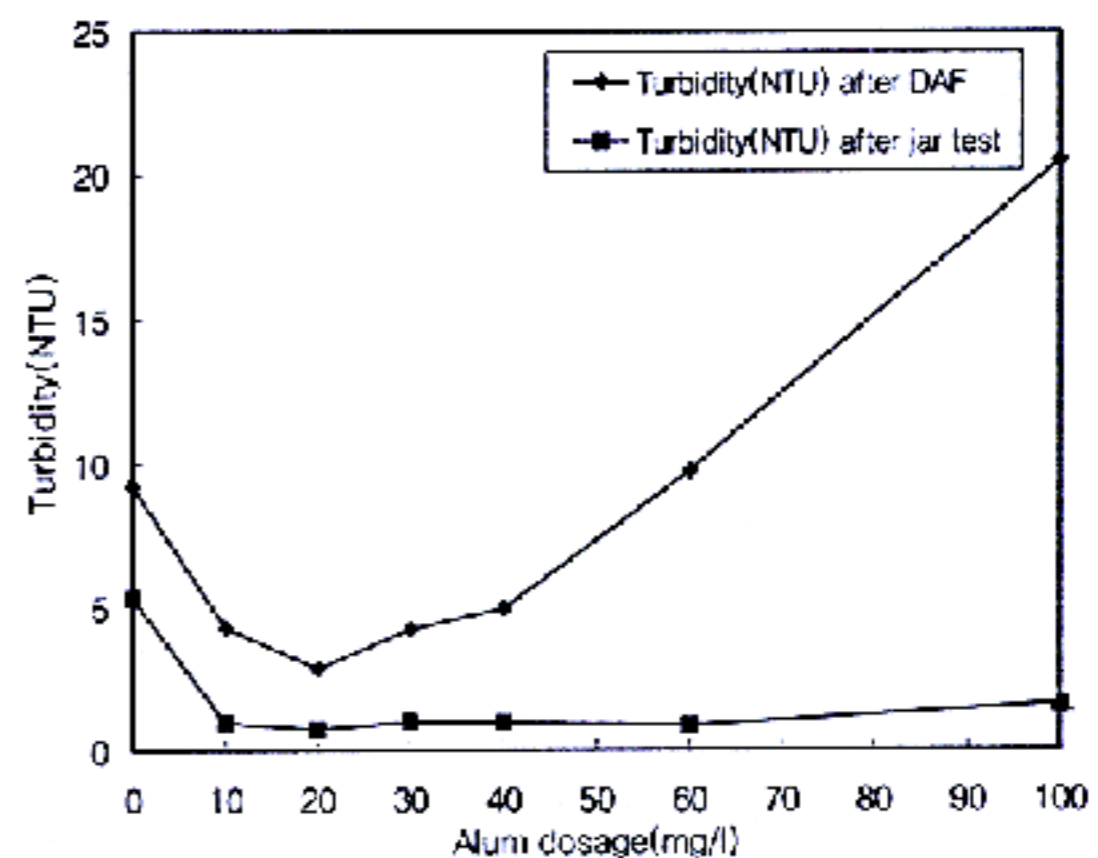


그림 2. Clay 100mg/l에서 응집·부상법과 응집·침전법의 탁도 비교(온도: 20 ± 2°C, clay 100mg/l의 탁도: 10NTU, 침전시간: 30분, 부상시간: 2분, 압력: 4atm, 순환비: 30%)

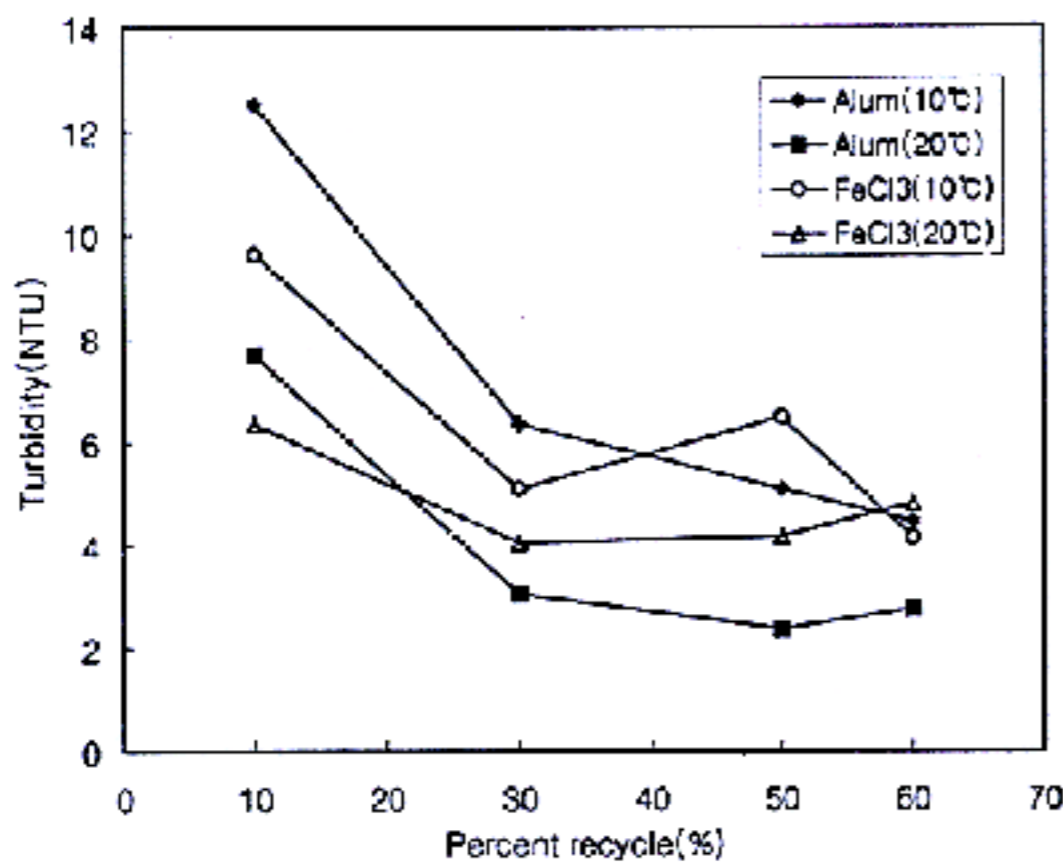


그림 3. Clay 100mg/l에서 온도와 응집체에 대한 순환비의 영향(부상시간: 3분, 압력: 4atm, 온도 10°C: alum 40mg/l, FeCl₃ 30mg/l, 온도 20°C: alum 20mg/l, FeCl₃ 20mg/l)

온도의 영향이 2배정도 컸다. 20°C에서는 alum이 순환비가 30% 이상일 때 FeCl₃보다 부상처리에 더 효율적이었다. 그러나 10°C 저온에서는 FeCl₃를 사용했을 때 순환비와 관계없이 잔류탁도가 낮았다. 각각 응집제에서는 온도가 높을수록 부상처리율이 높았다. 실제 상수처리에서는 지온에서 생길 수 있는 alum의 부상능력 감소문제를 대체 응집제로 PAC(Poly Aluminum Chloride)나 염화철을 사용하여 제거율 감소를 줄이기도 한다. 3. 4) 무기성 clay만의 부상처리에 있어서는 부상후 일부 새침강하는 현상과 잔류탁도가 높은 문제가 있었다. 그러나 비중이 2.65로 매우 높은 부유물질조차도 DAF에 의하여 처리가 가능하였다.

3. 1. 2 H 원수에서의 명향

실제 H원수에 alum과 FeCl₃의 두 응집제를 사용하여 부상법을 적용하였다. 최적 응집제 투입량을 결정하기 위하여 부상 실험을 해 본 결과 두 응집제에 대하여 약 10mg/l 이상 투입할 때 음용수 수질 기준인 2NTU 미만에 도달하였다. 최적 응집제량은 alum은 20mg/l, FeCl₃은 40mg/l였다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 H원수는 순환비가 10%이상이면 응집제와 상관없이 잔류탁도

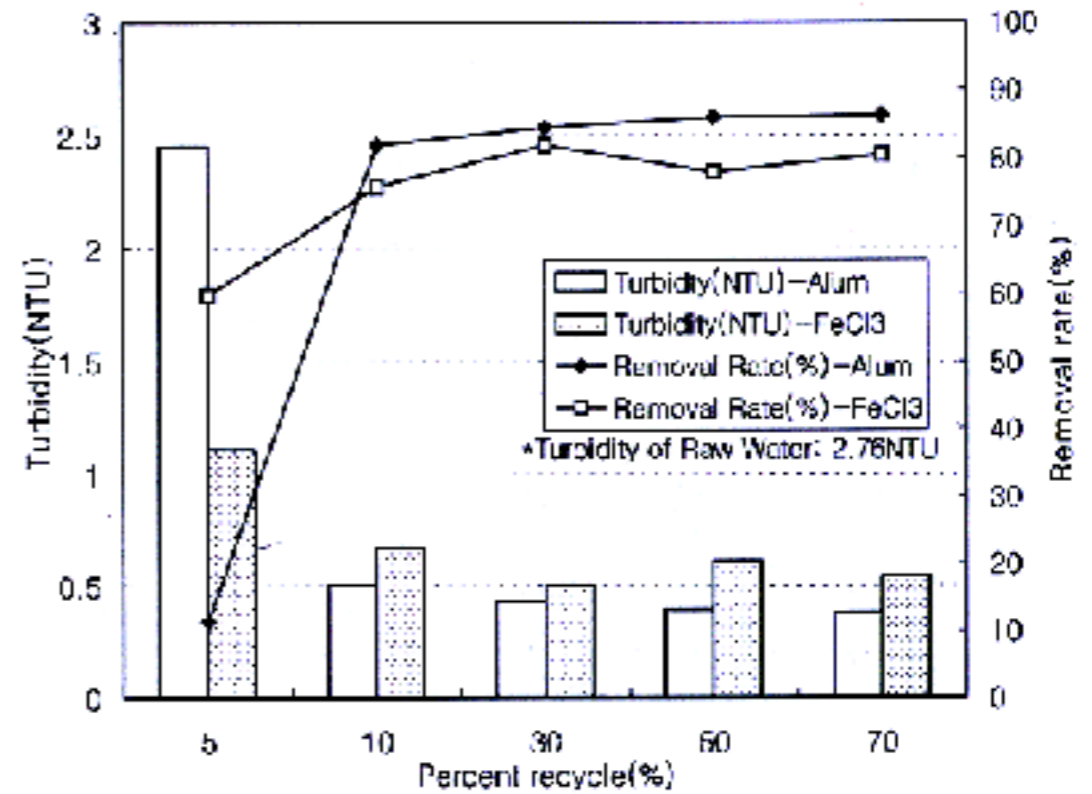


그림 4. H원수에서 응집제와 순환비의 제거율에 대한 영향(부상시간: 5분, 압력: 4atm, 온도 20°C: alum 20mg/l, FeCl₃ 40mg/l)

가 1NTU 미만으로 높은 제거율을 보였다. alum을 사용할 때 탁도 제거율은 약 85%, FeCl₃를 사용할 때는 약 80%로 alum의 제거율이 높았다. 실제 municipal wastewater를 부상처리하는데 있어서도 lime보다는 alum이 부유물질과 COD를 제거하는 효율이 높았다. 7) 이론적으로 응집과 부상 메카니즘이 pH와 온도에 의존적이기는 하지만 H원수의 큰 수질변동이 없는 한 alum이 효율적임을 알 수 있다.

3. 1. 3 H원수와 clay 100mg/l의 혼합수에서의 명향

샘플로 사용된 H원수는 3NTU미만의 저탁도의 수질이었다. 그러므로 고탁도의 경우에 부상법의 적용 가능성과 응집제에 대한 영향을 알아보기 위하여 H원수에 clay 100mg/l을 혼합한 후 온도 및 순환비에 따른 제거율을 실험하였다.

Fig. 5에서는 두 응집제에 대하여 각각 순환비 10% 이상에서 안정된 탁도 제거율을 나타냈다. 즉 alum을 사용할 때는 91~98%의 탁도 제거율을, FeCl₃을 사용할 때는 87~93%의 탁도 제거율을 보였다. 온도와 상관없이 alum이 더 높은 제거율을 나타내고 있다. 이러한 경향은 clay 100mg/l만 부상처리했을 때 alum이 지온(10°C)에서 FeCl₃보다 탁도 제거율이 낮았던 것과 차이가 있는 것으로 실제 H

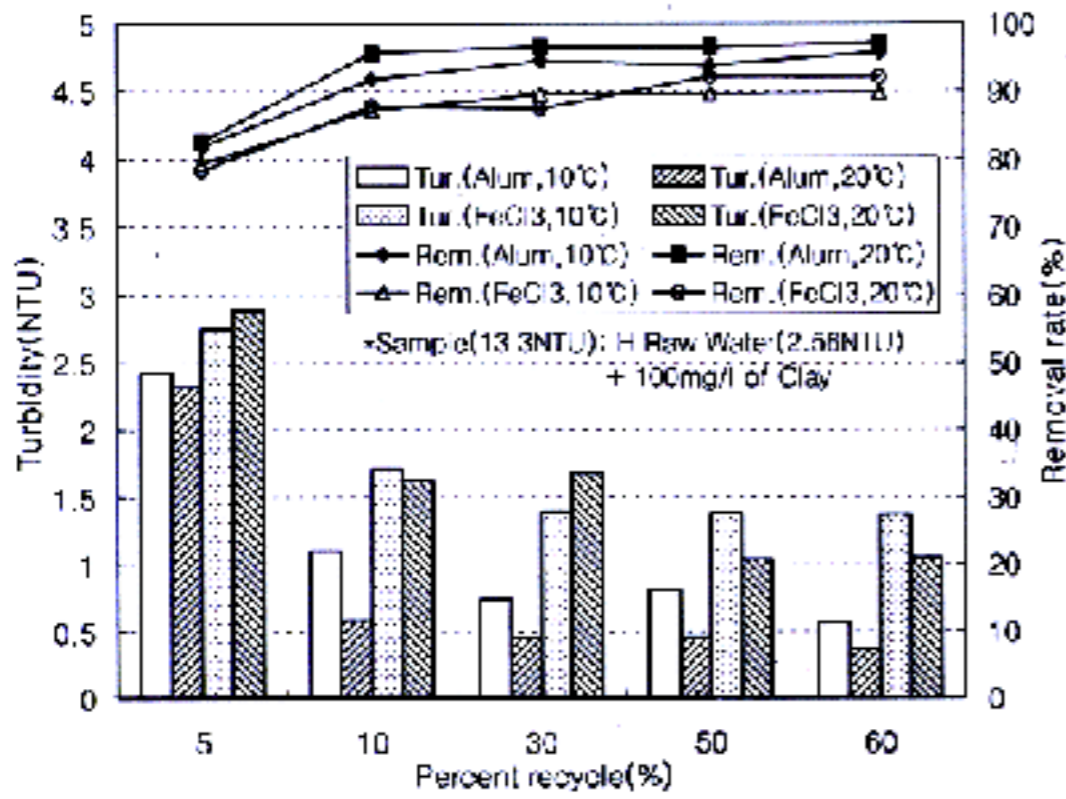


그림 5. H원수와 clay 100mg/l와의 혼합수에서 응집제와 순환비의 제거율에의 영향(혼합수의 탁도: 13.3NTU, 부상시간: 5분, 압력: 4atm, 온도 10°C: alum 20mg/l, FeCl₃ 30mg/l, 온도 20°C: alum 20mg/l, FeCl₃ 40mg/l, Tur: 탁도(NTU), Rem.: 제거율(%))

원수를 부상처리할 경우에는 원수의 탁도와 상관없이 alum이 효율적임을 알 수 있다. 그리고 무기성의 clay 100mg/l만의 부상처리에서 부상되었던 플러크가 재침강하는 현상과 처리후의 높은 잔류탁도는 H원수와 혼합된 시료에서는 이러한 현상이 없어졌다. 이것은 H원수에 포함되어 있는 복합적인 유기물질성분들과 clay(비중 2.65)가 결합하여 무기성 부유물질의 응집력과 부상력이 증가했기 때문으로 분석된다.

3.1.4 HA(Humic Acid) 5mg/l와 clay 100mg/l의 혼합수에 대한 영향

유기물질과 응집제가 부상에 미치는 영향을 연구하기 위하여 유기물질을 대표할 수 있는 Aldrich사의 HA를 사용하여 HA 5mg/l와 clay 100mg/l를 혼합한 시료에 대하여 그 영향을 살펴보고자 하였다. 연구에 따르면 유기물질의 존재는 응집제 요구량을 증가시키고 응집과정을 변화시키는데 이러한 유기물 함유도와 최적 응집제 주입량사이에는 화학정량적인 관계가 존재한다고 한다.³⁾ 그리고 무기성 clay 현탁액에 휴믹산이나 펄빅산과 같은 전형적인 용해성 유기물질이 혼합되어 있으면 서로간에 응집반응에 대

한 경쟁이 생기게 되며 양이온성 응집제인 경우는 유기물질과 선택적으로 반응하여 clay 입자와 응집제와의 반응을 방해함으로써 실질적으로 더 높은 응집제 주입량을 요구하게 된다.^{3,8)} 본 연구에서 사용된 시료의 조건에서 FeCl₃를 사용했을 때 응집제량이 최소 80mg/l 이상이 주입되어야 안정된 응집·부상처리를 보이기 시작했다. 그러나 샘플의 pH에 따라 같은 조건에서도 응집제의 요구량은 달라질 수 있다고 판단된다. 다음 Fig. 6에서 HA 5mg/l와 clay 100mg/l의 혼합수에 대한 최적 응집제량은 alum은 40mg/l, FeCl₃는 100mg/l이었다. HA 5mg/l의 UV₂₅₄(cm⁻¹)값은 0.194였다.

Fig. 6에서 잔류탁도를 살펴보면 각 응집제에서 온도가 높을수록 탁도가 낮았다. 전반적으로 alum을 사용할 때 처리율이 좋았다. 순환비가 50% 이상이 되면 탁도가 다시 증가하였으며 특히 FeCl₃를 사용할 때는 순환비가 60%일 때 처리수 탁도가 약 13NTU로 높았다. 이와 같이 탁도가 증가하는 것은 공기의 양이 과다하여 플러크가 깨어지기 때문으로 분석된다. 즉 철염 응집제의 특징이 alum보다 무거운 플러크를 생성하는데다 FeCl₃의 주입 응집제량이 100mg/l으로 높은 경우에는 60%의 높은 가압

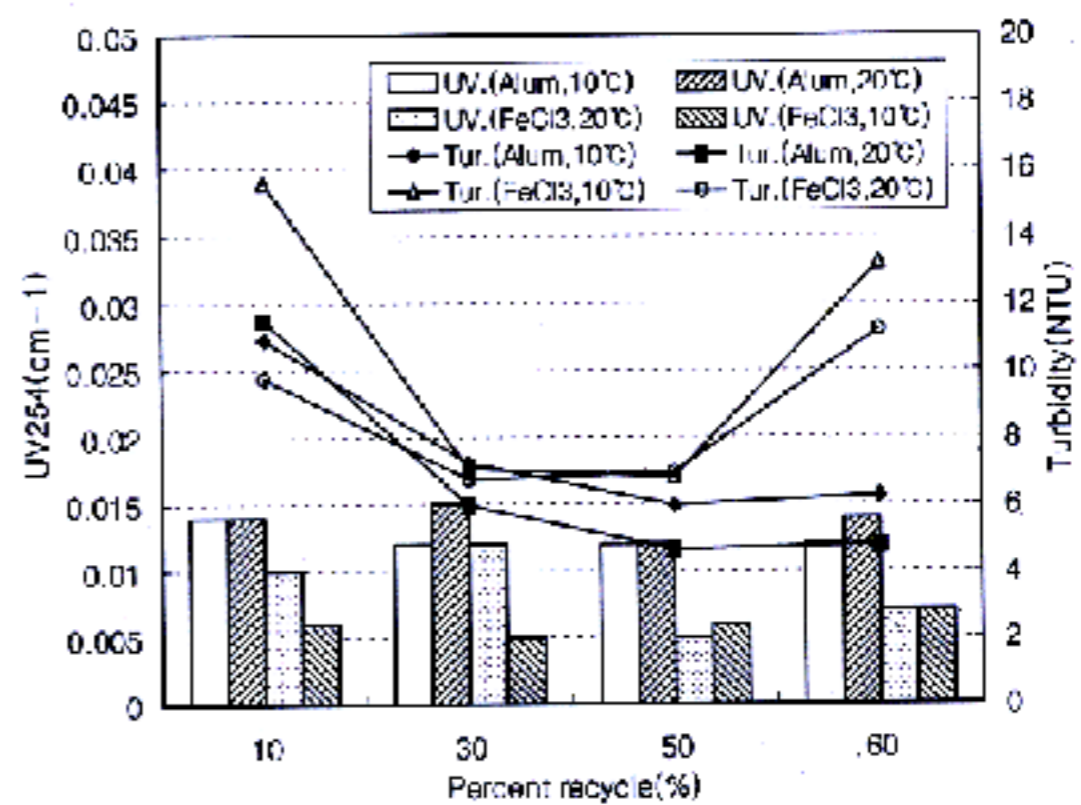


그림 6. HA 5mg/l와 clay 100mg/l와의 혼합수에서 온도와 응집제에 대한 순환비의 영향(부상시간: 3분, 압력: 4atm, 온도 10°C와 20°C: alum 40mg/l, FeCl₃ 100mg/l, UV.: UV₂₅₄(cm⁻¹) Tur: 탁도(NTU))

수는 도리어 형성된 플러크와 스컴층을 깨는 것으로 예측된다. UV₂₅₄ 값은 순환비와 온도와 거의 관계없이 0.015cm⁻¹ 이하였다. 그리고 FeCl₃가 alum을 사용할 때보다 처리율이 좋았다. 실질적으로 UV제거는 두 응집제 모두 최적의 pH조건에서 최적 응집제 주입량이 결정된다면 약 90% 이상의 좋은 결과를 보이며 용해성 UV를 측정하기 위하여 여과과정을 거치기 때문에 부상처리와 관련이 없으며 각 온도에 따른 처리에서도 순환비와는 독립적인 형태를 보여준다고 한다. 4.9) UV₂₅₄ 처리에서 FeCl₃가 alum보다 효과적인 이유는 주입된 최적 응집제량의 차이에 있는 것으로 보이지만 구체적인 이유는 더 연구가 필요하다.

3.2 침전법에 대한 응집제의 영향

3.2.1 HA(Humic Acid) 5mg/l와 clay 100mg/l의 혼합수에 대한 영향

침전처리에서 응집제가 온도와 침전시간에 따라 어떤 영향을 주는지 탁도와 UV값에 대하여 연구하였다.

Fig. 7에서 시료수가 10°C에서 settling time이 3분일 때를 제외하고는 온도가 높을수록

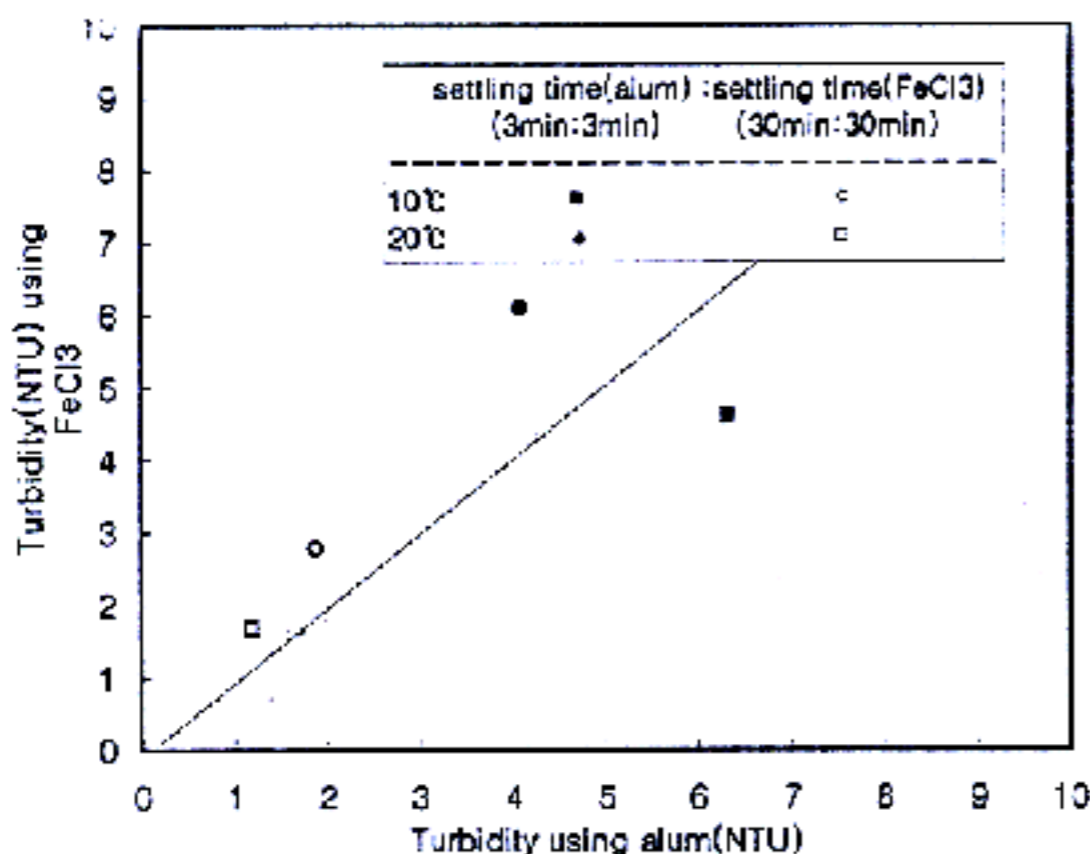


그림 7. HA 5mg/l와 clay 100mg/l의 혼합수에서 Alum과 FeCl₃의 제거율 비교(침전시간: 3분과 30분, 압력: 4atm, 온도: 10°C와 20°C, alum 40mg/l, FeCl₃ 100mg/l, UV: UV₂₅₄, Tur.: 탁도(NTU))

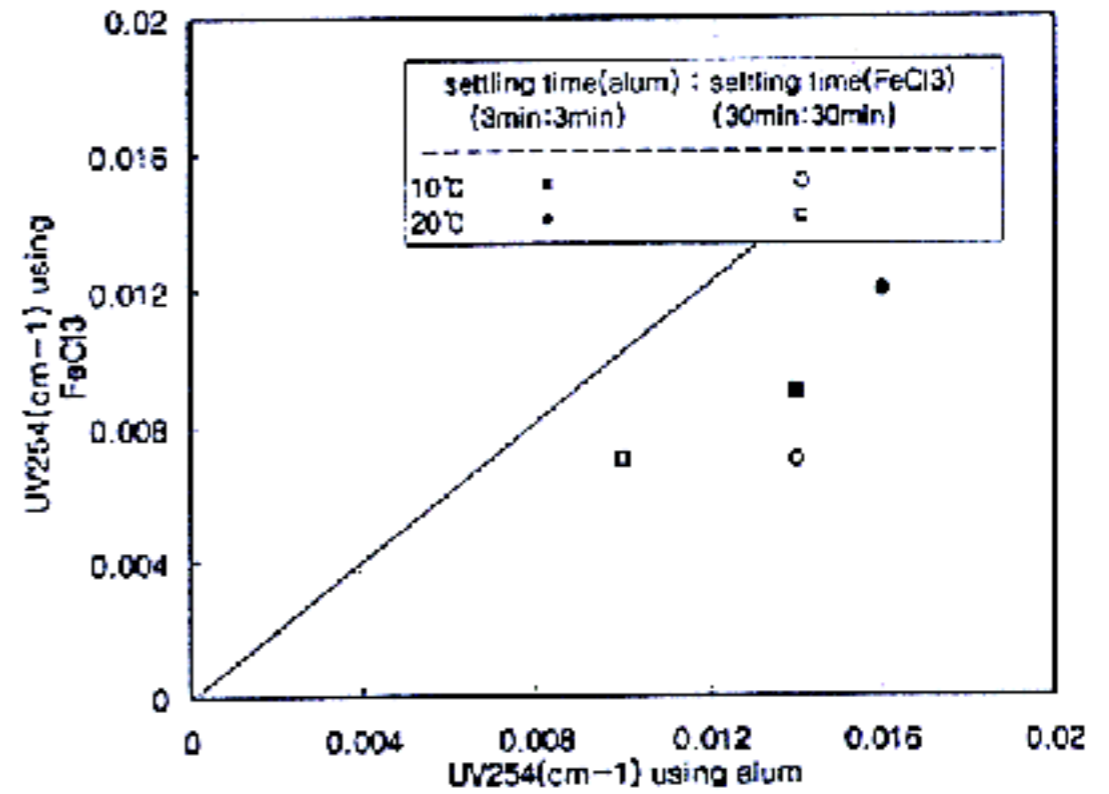


그림 8. HA 5mg/l와 clay 100mg/l의 혼합수에서 Alum과 FeCl₃의 UV₂₅₄ 비교(침전시간: 3분과 30분, 온도: 10°C와 20°C, alum 40mg/l, FeCl₃ 100mg/l)

alum을 사용했을 때가 FeCl₃을 사용했을 때보다 탁도가 낮았다. 각 응집제에서 settling time이 길수록 처리율이 높았다. Fig. 8은 Fig. 7과 같은 조건에서 UV값을 비교한 것이다. 온도와 settling time과 상관없이 FeCl₃를 사용할 때 alum보다 나은 결과를 나타냈다. 이것은 본 실험조건에서 FeCl₃는 100mg/l를 주입하였고 alum은 40mg/l를 주입하여 HA성분과 수산화철의 흡착이 alum보다 상대적으로 컸기 때문인 것으로 분석된다. 실제 UV제거는 부상법과 침전법의 처리효율에서도 차이가 없는데 용해성 유기물의 제거는 응집에 의해 대부분 이루어지기 때문이다. 9)

3.3 용존공기 부상법과 침전법의 탁도 제거에 대한 비교

본 연구 조건에서 수행된 침전처리와 부상처리를 수질조건, 응집제, 온도, 시간등에 따라 처리효율을 비교·검토하였다.

3.2.1 H원수에 대한 비교

실제 H원수에 대하여 같은 실험조건에서 침전, 부상실험을 하였을 경우 flocculation time을 20분으로 할 때 settling time을 5분과 30분으로 나누어 부상시간 5분과 비교하였다.

Fig. 9에서는 전반적으로 침전법과 부상법에 시 settling time이 5분일 때를 제외하고 잔류 탁도가 1NTU 미만으로 양호한 결과를 나타내고 있다. 그러나 settling time이 5분, 30분일 때와 부상시간을 5분으로 했을 때를 비교해볼 때 두 응집제에서 모두 부상법이 더 효율적이었다. 다른 연구결과에서도 조류 크기의 입자가 있는 실험수에 flocculation time이 20분일 때 $FeCl_3$ 등의 응집제는 부상법과 침전법이 거의 같은 처리율을 나타내는 반면 alum을 사용할 경우는 부상법이 침전법보다 제거율이 높았으며 특히 4°C 저온수일 경우는 모두 부상법이 나은 결과를 보여주었다. 9) 그리고 부상법의 flocculation time은 10분으로 하고, 침전법은 20분으로 하여서 실험한 결과에서도 부상법의 효율이 높은 것으로 나타났다. 10)

3.2.2 H원수와 clay 100mg/l와의 혼합수에 대한 비교

H원수와 clay 100mg/l를 혼합하였을 경우 각 온도에 대하여 부상법과 침전법의 영향을 살펴보았다.

Fig. 10에서 alum을 사용하였을 때 부상법과 침전법에서 온도가 높을수록 탁도가 1NTU 미

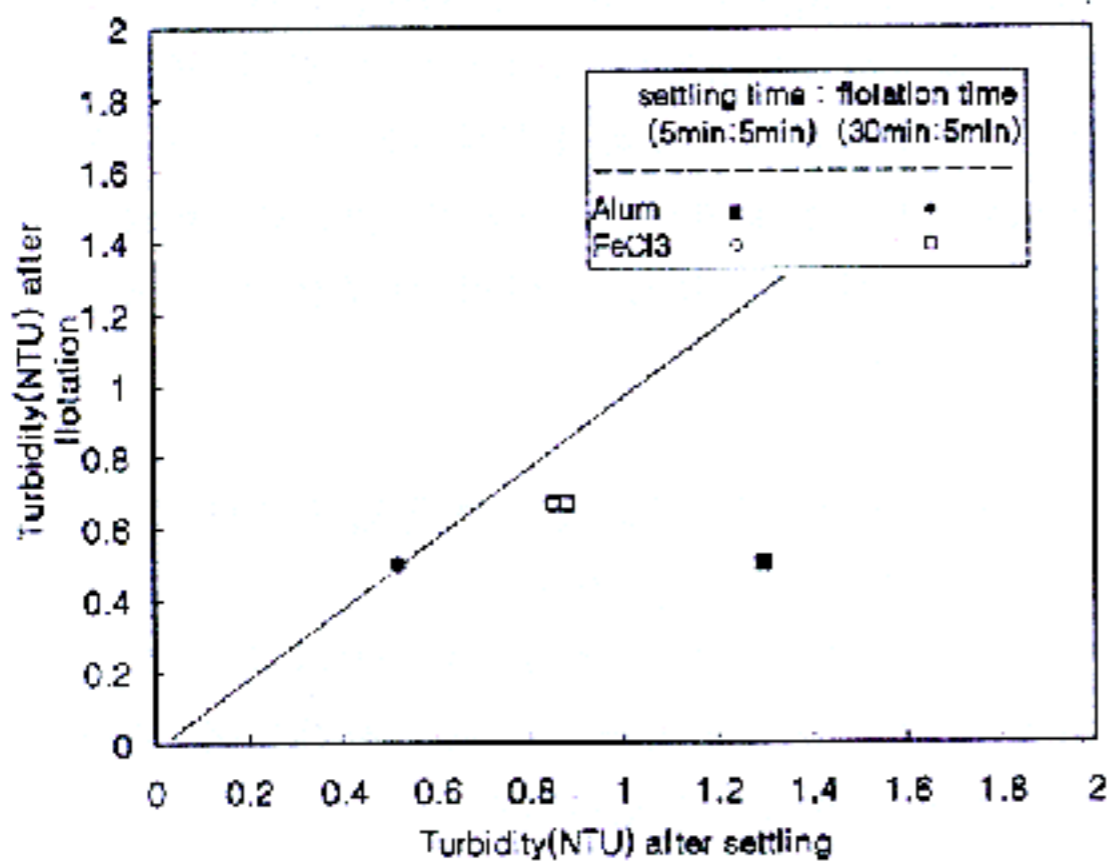


그림 9. H원수에서 응집제와 처리시간에 대한 응집·부상법과 응집·침전법의 비교(침전 시간: 5분과 30분, 부상시간: 5분, 압력: 4atm, 순환비: 10%, 온도 20°C: alum 20mg/l, $FeCl_3$ 40mg/l)

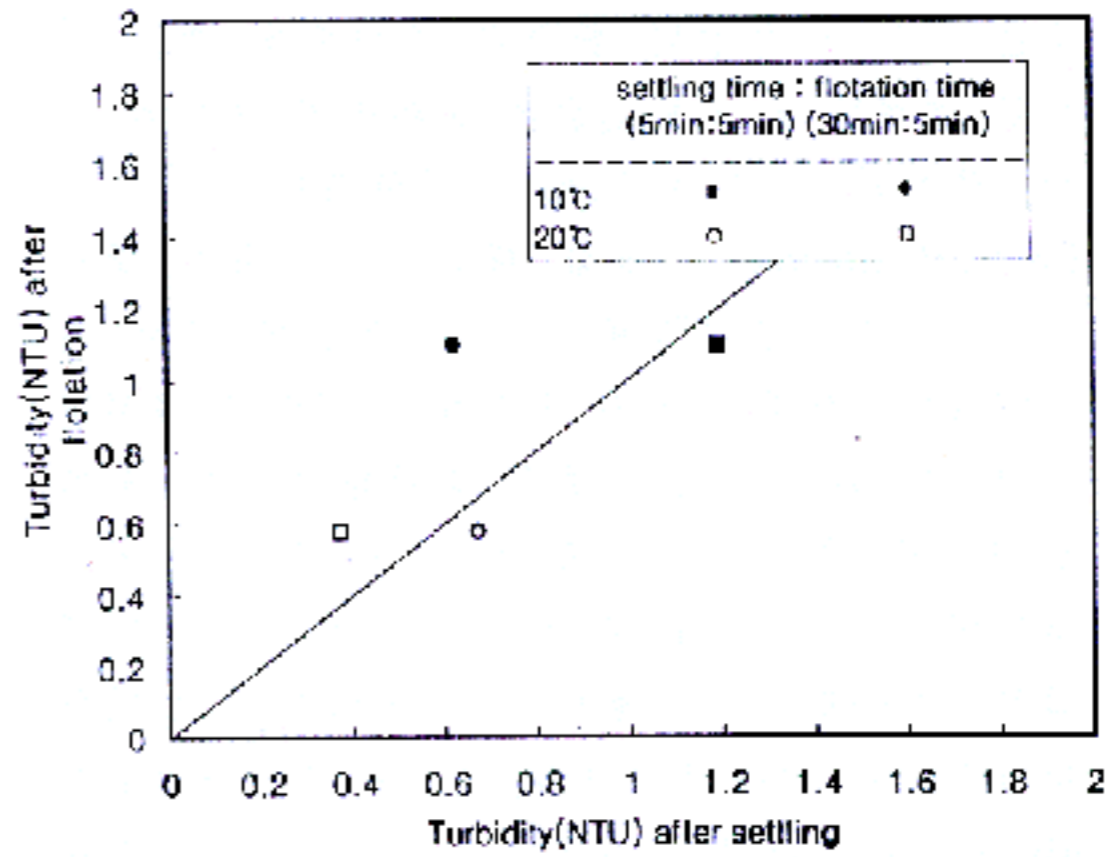


그림 10. H원수와 clay 100mg/l에서 온도와 처리시간에 대한 응집·부상법과 응집·침전법의 비교(침전시간: 5분과 30분, 부상시간: 5분, 압력: 4atm, 순환비: 10%, 온도 10°C와 20°C, alum 20mg/l)

만으로 낮았다. 그리고 부상시간과 settling time이 각각 5분일 경우에는 부상법이 효율적이었으나, settling time이 30분일 때는 온도와 상관없이 침전법이 탁도 제거율이 높았다. 이것은 지탁도의 H원수에 clay가 혼합되어 응집 보조제 역할을 하여 침전효율을 높인 것으로 예측된다. H원수와 clay 100mg/l의 혼합수에서도 부상법이 처리시간측면에서는 효율적임을 알 수 있다. 실제 stormwater와 같이 원수의 농도 변화가 클 경우 침전법은 한계가 있으며 미세한 입자를 제거하기 위하여 부상법이 침전법보다 더 적당한 처리방법인 것으로 분석되고 있다. 11)

4. 결 론

용존공기부상법과 기존의 침전법에 대하여 탁도의 처리율을 비교하였다. clay(비중 2.65) water 100mg/l 샘플에서 jar test와 부상실험의 최적 alum 주입량이 20mg/l로 일치하여 응집이 잘 될 때 부상처리도 좋았다. DAF를 이용한 처리에서 alum이 $FeCl_3$ 에 비해 온도에 따른 제거율의 변화가 컸다. 실제 H원수에서는 순환비 10%에서 두 응집제에 대하여 샘플 온

도 20°C에서 alum은 85%, FeCl₃는 80%의 탁도 제거율을 보였다. H원수와 clay 100mg/l의 혼합수에서는 온도와 상관없이 FeCl₃를 사용했을 때의 87~93%보다 alum이 91~98%의 제거율로 더 좋은 결과를 보였다. HA 5mg/l와 clay 100mg/l의 혼합수에서는 잔류탁도는 alum을 사용했을 때 낮았으나 UV₂₅₄는 FeCl₃를 사용했을 때 제거율이 높았다. 그리고 UV값을 제거하는데는 온도의 영향을 거의 받지 않았다. UV제거율은 FeCl₃를 사용할 때가 alum(40mg/l)을 사용했을 때보다 처리율이 높았으나 응집제는 FeCl₃를 사용했을 때 더 높은 농도(100mg/l)를 투여해야 했다. 응집·침전처리에서는 두 응집제에서 모두 온도가 높고 settling time이 길수록 잔류탁도가 낮았다. 용존공기부상법과 침전법의 효율성을 비교한 결과 부상법이 탁도의 잔류농도는 낮고 체류시간이 짧아 더 효율적이었다.

참고문헌

1. 이상은, "상수고도처리의 최근동향", 음용수의 안정성관리를 위한 상수고도처리 학술심포지움, 연세대학교 보건대학원 및 환경공해연구소, 1991.
2. 강용태, "폭기 생물막여과법에 의한 상수의 고도처리", 낙동강 맑은 물 관리기술에 관한 세미나, 부산수산대학교 환경문제연구소, 1994.
3. Frederick W Pontius, "Water Quality and Treatment", McGraw-Hill, Inc., Fourth Edition, 1990.
4. James K. Edzwald and John P. Walsh, "Dissolved Air Flotation: Laboratory and Pilot Plant Investigation", AWWA, 1992.
5. Matthew T. Valade et al, "Partical Removal by Flotation and Filtration Pretreatment Effects", Journal AWWA, December 1996.
6. P. Mavros and K. A. Matis (eds), "Innovations in Flotation Technology", p.431-45, Kluwer Academic Publishers, 1992.
7. Luis Caceres, "Comparison of Lime and Alum Treatment of Municipal Wastewater", Wat. Sci. Tech., Vol. 27, No. 11, p.261-264, 1993.
8. N. Narkis, M. Rebhun, "Inhibition of Flocculation Processes in Systems Containing Organic Matter", Journal WPCF, Vol. 55, No. 7, July 1983.
9. J. K. Edzwald et al, "Dissolved Air Flotation: Pretreatment and Comparisons to Sedimentation", Chemical Water and Wastewater Treatment III, June 20-22, 1994.
10. J. K. Edzwald, "Algae, Bubbles, Coagulants, and Dissolved Air Flotation", Wat. Sci. Tech., Vol. 27, No. 10, p.67-81, 1993.
11. R. Pfeifer and H. H. Hahn, "Dissolved Air Flotation: Efficient Removal of Micropollutants from Stormwater Runoff", Chemical Water and Wastewater Treatment II, September 28-30, 1992.