

급속모래여과에서 PAC 피복에 의한 초기 유출수의 탁도 개선

Improving the Initial Effluent Turbidity by Polyaluminium Chloride(PAC) Coating in Rapid Sand Filtration

윤태한, 김우항*

Tae-Han Yoon, Woo-Hang Kim*

도드람 축산 기술연구소 · *목포해양대학교 해양시스템공학부

Dodram Pig Farmers' Co-Operative

500-5, Kasanri, Pubaleup, Icheon, 467-861, South Korea

* Faculty of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University,
571 Chukkyo-dong, Mokpo, Chonnam, 530-729, Korea

Abstract

The purpose of this research was to describe the mechanisms and prevention of initial degradation in turbidity of the sand filter effluent. The method used was by adding a coagulant (PAC) to the sand filter after backwashing as a means of reducing turbidity. It was found that adding 80 mg/L of PAC solution to the sand filter was very effective in improving the initial effluent turbidity. A turbidity removal efficiency of 99 % was observed in the initial term period as compared to a 70% efficiency without PAC addition.

The PAC solution added to the sand filter resulted in high aluminum concentration at the upper layer as compared with the bottom layer of the sand filter column. A change in the zeta potential to a strong positive-ions at upper layer was observed at this time but only a small change was obtained at the bottom. This result showed that the zeta potential of the sand was changed to positive with PAC coating.

The effect of pH on zeta potential with PAC addition was also investigated. Zeta potential was greatly changed to positive-ion at pH 4-6. A series of experiments was then conducted in this study to optimize the pH of the PAC solution to be added to the sand filter after backwashing. The removal efficiency of turbidity was found to be highest at pH 5. This result suggested that hydrolyzed aluminium species attached to the surface of the sand enhanced the removal of turbidity of the effluent.

Keywords : Sand filtration, Turbidity, Backwashing, Aluminum, Zeta potential

1. 서 론

우리나라 정수처리의 주요공정은 응집-침전, 모래여과, 소독공정으로서 응집침전, 모래여과에서 주로 탁도를 제거하고 있다. 이와 같은 공정은 응집플록을 크게하여 침전으로 제거하고, 제거되지 않는 탁질은 급속여과에서 처리하고 있다. 그러므

로 급속여과는 시간이 경과하면서 손실수두가 커지고, 처리수의 탁도가 높아져서 역세척을 행하지 않으면 안된다⁽¹⁾. 그러나, 역세척 직후에 처리수의 탁도가 높게 나타나고 있다. 이러한 문제는 시간이 경과하면서 모래의 입자들 사이에 탁질들이 포착되어 현저히 개선되고 있다^(2,3,4,5). 그러나, 역세척 직후에 병원성균이나, *Cryptosporidium*,

Giardia와 같은 유해한 미생물들이 유입될 경우, 여과에서 제거되지 않고 처리수 속에 존재하여 건강을 위협하게 될 수도 있다.

이러한 것을 방지하기 위하여 많은 연구들이 진행되었으며, 역세척수에 응집제를 주입하거나^(6,7,8), 역세척 후 운전초기에 응집제를 주입하여⁽⁹⁾ 처리수의 탁도를 낮추는 연구가 진행되었다. 이들의 연구에서는 역세척 직후의 처리수의 탁도를 낮추는 결과를 나타내고 있으나, 어떻게 제거가 되는지의 메카니즘을 규명하는 연구나, 그와 같은 결과를 자료로서 발표한 논문은 거의 없는 실정이다.

물속에 존재하는 콜로이드의 표면은 통상적으로 음전하로 대전되어 있다⁽¹⁰⁾. 그러므로 이러한 콜로이드 성분은 음전하로 대전된 여재의 표면에서는 반발력으로 인하여 유출될 가능성이 높다. 그러나, 여재의 표면을 양전하로 대전시킬 경우 콜로이드는 전기적인 인력에 의하여 제거될 가능성이 크다. 그러므로 역세척 직후에 polymer 주입한 후 여재의 표면에 전하가 어떻게 변화하는지를 규명하는 것은 매우 중요하다. 그러나 지금까지는 이러한 연구에서는 응집제를 주입함으로써 역세척 후에 처리수의 탁도를 낮게 유지하는 연구들이 진행되었다. 이러한 연구들은 응집제의 주입으로 인

하여 탁도를 낮게 유지하는 결과를 나타내었을뿐 그 결과들이 어떻게 일어나는지는 아직 밝혀지지 않고 있다.

그러므로 본 연구에서는 모래여과에서 역세척 후 응집제를 주입함으로써 세척후 초기에 탁도가 낮아지는 메카니즘을 규명하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

실험에 사용한 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 직경이 5cm 이고 높이가 150cm인 여과탑에 유효경이 0.61mm이고 균등계수가 1.39, 비중이 2.6인 모래를 60cm (공극율 44.3%)로 충전하였다. 그 모래의 여재에 있어서는 실험의 재현성을 높이기 위하여 실험전에 1N-HCl용액에 30분간 침적시킨후 pH의 변화가 없을 때 까지 세척하였으며, 그 후 증류수에 1회 세척후 105℃에서 건조하여 사용하였다. 이와같이 전처리한 모래를 여과탑에 충전한 후 물을 사용하여 여재를 충분히 팽창시키면서 30분간 역세척(팽창율 50%, 유속 120 cm/min)하여 완전히 성층화 시킨 다음 실험을 실시하였다.

그리고 원수는 지하수를 수돗물로 사용하는 수

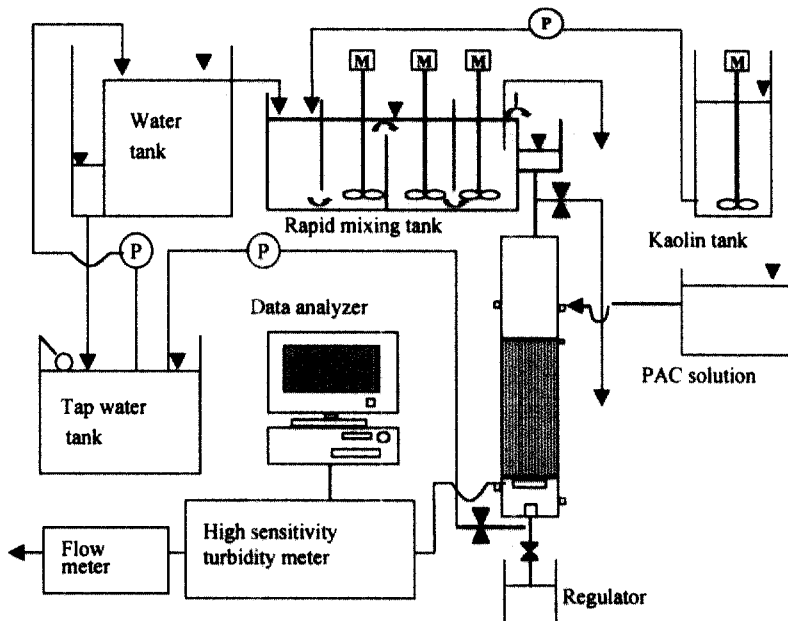


Fig. 1. Schematic of pilot sand filtration plant

돛물에 카울린 1mg/l을 주입하고 여과속도 120m/d로 하여 여과를 행하였으며, 원수의 탁도는 0도 이었다. PAC(poly aluminium chloride)의 피복은 pH 5로 조정한 수돛물을 여과개시전에 여층의 상부로부터 80m/d의 유속으로 여층 공극율의 2배 정도를 통과시켜 여재를 피복하였다. 피복하는 동안에 알루미늄수산화물 플록이 형성되지 않도록 160rpm으로 급속교반을 하였다.

2.2 탁도 및 알루미늄 농도의 측정 방법

여과전후에 시료의 탁도는 고감도탁도계 (ZYU, 富士電機社)를 사용하였다. 또 알루미늄의 농도는 흡광광도계 (UV-1200型, SHIMADZU)를 사용하여 Oxine법으로 측정하였다. 모래의 표면에 피복된 알루미늄의 정량에 있어서는 여층의 각 부분으로부터 채취한 모래를 황산을 사용하여 pH 2.0으로 조정한 증류수에서 용출시켜, 여지로 여과한 후 여액을 분석하였다. 이 경우, 모래 자체에서 알루미늄이 용출되어 나오는 오차를 방지하기 위하여 pH 2.0의 용액에서 접촉하는 시간은 1분 이내로 하였다.

2.3 모래표면의 제타전위 측정

모래 표면에서 제타전위의 측정방법은 Fig. 2에 나타낸 장치를 사용하였다. 측정방법은 실험에서 얻은 모래를 원통셀 (∅ 14×50mm)에 충전한 후, 수온과 전기전도도를 미리 측정해둔 증류수를 상향으로 통수시켰다. Purge 밸브 개방전후에 발생하는 유동전위 (E₁, E₂)와 압력 (P₁, P₂)을 다음의

Helmholtz-Smoluchowski식에 대입하여 제타전위를 계산하였다. 유동수의 점성계수는 온도에 따라 변화하므로 온도를 측정하여 보정하였으며, 유동수의 유전율과 저항은 센서를 이용하여 측정을 하였다. 도전율셀 정수의 계산은 다음과 같다.

$$\zeta = 1.15 \times 10^{10} \times \eta / \epsilon \times K / R \times (E_1 - E_2) / (P_1 - P_2)$$

여기서 ζ : 제타전위 (mV), η :유동수의 점성계수 (g/cm.sec), ϵ :유동수의 유전율(-), K: 도전율셀 정수(1/cm), R:유동수의 저항(Ω)이다. 이 때 유동수의 점성계수 η 와 유전율 ϵ 은 온도에 따라 달라지므로 측정해둔 온도에 의해 결정된다. 20℃에서 물의 점성계수는 0.010 g/m.sec, 유전율은 80.36(공기와 비교한 값)이다. 유동수의 저항 R은 전기전도도를 측정 저항값으로 환산하여 사용하였으며, 도전율셀 정수 K값은 0.01 N KCl의 저항값에 0.01 N KCl의 비도전율(1/ Ω .cm)을 곱하여 얻어진다. 출고되는 셀의 경우 K값이 결정되어 있으므로 그 값을 사용하면 된다. 20℃에서 0.01 N KCl의 비도전율은 0.001278/ Ω .cm 이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PAC 피복에 의한 여과수의 탁도 변화

PAC의 농도를 변화시키면서 피복한 후 시간에 따른 탁도의 제거율을 Fig. 3에 나타내었다. 피복에 사용한 PAC의 농도는 5mg/l에서 80mg/l까지 변화를 시켰다. 그 결과 여과사를 PAC로 피복하

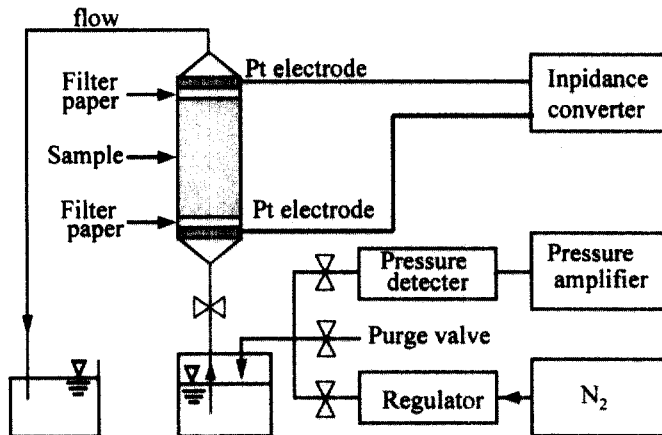


Fig. 2. Schematic diagram of zeta potential detection on sand.

지 않은 경우에는 여과개시 후 초기 (약 1시간 이내) 탁도의 평균 제거율은 67%로서 낮게 나타났으나, PAC로 피복한 경우 90% 이상의 탁도 제거율을 나타내고 있다. 또한 PAC의 농도가 20 mg/l 이상일 경우에 탁도의 평균 제거율은 95% 이상인 것으로 나타났으며, PAC의 농도가 80 mg/l에서는 99%를 나타내었다. 여과시간이 3시간 경과후 PAC로 피복을 하지 않은 경우, 평균 제거율이 약 84%을 나타내었으며, PAC 80 mg/l로 피복을 행한 경우는 98%, PAC 20 mg/l로 피복한 경우는 약 95%의 제거율을 나타내었다. 그러므로 PAC로 피복한 경우와 피복을 하지 않는 경우를 비교하면, 초기에는 21~29%이상 탁도 제거율이 높게 나타나고 있으며, 3시간이후에도 약 6~14%이상 높게 나타났다. 이것은 PAC로 여과사를 피복할 경우 초기에 높게 유출되는 탁도를 방지하는 것이 가능하다는 것을 보여준다.

3.2 피복한 여과사에서 알루미늄과 제타전위의 분포

PAC로 여과사를 피복한 후 여층의 깊이별로 알루미늄의 포착율을 Table 1에 나타내었으며, 알루미늄의 양을 추정하여 Fig. 4에 나타내었다. Table 1은 PAC의 농도를 변화시킨 경우 여과사를 깊이 별로 피복된 알루미늄의 비율을 나타내고 있다. PAC 80mg/l를 주입한 경우, 알루미늄의 포착율을 살펴보면 여층의 상층부에서 10cm이내

70.4%로 포착되어 있었으며, 깊이가 10~20cm와 20~30cm 사이에서는 15.7% 와 7.4%로 나타났으며, 30cm이하(30-60cm)의 여과사에서는 8.7%로 낮은 비율로 존재하였다. 이것은 PAC를 사용하여 여과사에 피복하는 경우 알루미늄은 거의 대부분이 상층부에서 포착 되는 것을 알 수 있다. 알루미늄이 여과사에 결합된 경우와 여과사의 간극내에 존재하는 경우를 정확히 구별하기 위하여 PAC 80 mg/l 를 하향류로 주입하여 120 cm/min 역세척 속도로 약 1분간 세척한 후 여과사에 결합된 알루미늄을 분석한 결과는 다음과 같다. 알루미늄이 여과사에 결합된 비율은 약 51.5%로 나타났으며, 나머지는 간극내에 존재하여 역세척시 씻겨나가 제거되었다. 그러므로 실제 주입량의 절반 정도는 여과사에 부착하지 않고 여과사의 사이에 존재하는 것을 알 수 있다. 깊이별 결합하고 있는 비율은 상층부에서 10 cm까지가 32.4%로서 절반이상을 차지하고 있어, 세척을 행하지 않는 경우와 같은 결과를 나타내었다.

Fig. 4는 PAC를 농도별로 주입한 후 실제 여과사에 존재하는 알루미늄의 양을 여과사의 깊이에 따라서 나타내고 있다. 여과층의 상층부에서 깊이 0.5cm에서 여과사에 존재하는 알루미늄의 양은 PAC의 농도 5, 20, 40, 80mg/l에서 0.057, 0.578, 1.890, 3.060 mg/100g(여과사)로 농도가 높으면 높은 농도로 포착이 되는 것을 알 수 있다. 또한 여

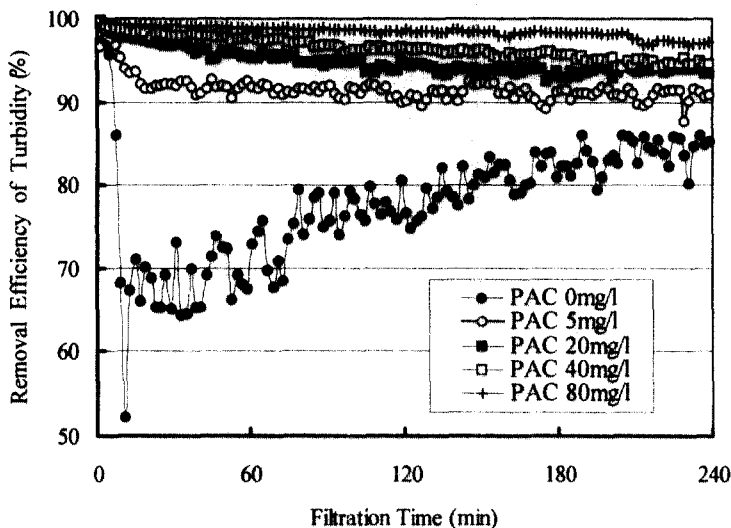


Fig. 3. Determination of optimum PAC dosage after backwash.

층의 깊이가 상층부에서 아래로 내려갈수록 포착되는 알루미늄의 양은 급격하게 낮아지는 것으로 나타났다.

물속에 존재하는 콜로이드의 표면은 통상적으로 마이너스로 대전되어 있어, 여재의 표면이 마이너스로 대전되어 있을 경우 작은 입자들은 제거되지 않고 유출될 가능성이 높다. 실제 정수처리의 모래여과에서 역세척 직후 탁도의 제거율이 낮고, 시간이 경과하면서 제거율이 높게 나타나는 것을 보면 알 수 있듯이 역세척 후 초기에는 탁도 성분들이 많이 유출되고 있다. 그러나 PAC를 피복한 후에는 초기의 탁도 제거율이 매우 향상되는 것으

로 나타나고 있다. 이것을 알아보기 위하여 여과사의 zeta전위를 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 피복을 하지 않은 경우 zeta전위는 상층부에서는 -6.1mV, 하층부에서는 -3.1mV를 나타내었다. 이와 같이 상,하층에서 zeta전위가 다르게 나타나는 것은 모래여과 탑에서 모래의 성층화에 의한 것으로 판단된다. 모래는 역세척에 의해서 작은 입자들은 상층부로 큰 입자들은 하층부로 이동하게 된다. 그러므로 입자들의 비표면적이 상층부가 하층부보다 크게되어 zeta전위도 상층부에서 더 강한 마이너스 전하를 띠는 것으로 사료된다.

그러나 PAC를 주입한 경우에 있어서 zeta전위

Table 1. Captured aluminium percent on depth of sand under various PAC dosage

PAC dosage (mg/l) \ Depth(cm)	5	20	40	80	80*
0~10 (0~5)	59.4%(48.5%)	70.1(51.9%)	69.4(57.2%)	70.4(55.0%)	32.4(23.5%)
10~20	16.7%	11.3%	9.2%	15.7%	11.5%
20~30	7.5%	3.7%	7.6%	7.4%	4.8%
30~60	1.1%	7.2%	12.7%	8.7%	2.8%
Total	84.7%	92.3%	98.9%	102.2%	51.5%

* captured aluminium percent after washing

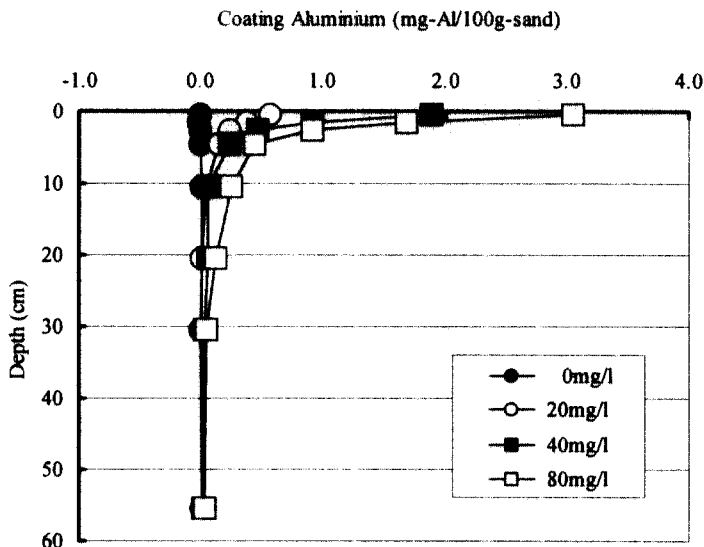


Fig. 4. Variation of captured aluminium on depth of sand

는 마이너스에서 플러스로 변화하는 것을 나타내고 있다. 특히, 상층부에서는 강한 플러스로 변화한 것을 볼 수 있으며, 이것은 알루미늄의 결합한 양이 증가하는 것과 비례하여 증가하는 경향을 나타내고 있다. 즉, 여층의 최상부에서 zeta전위는 PAC(80 mg/l)를 주입하기 전과 후를 비교하면 -6.1mV에서 +12.4mV로 변화하였다. 그러므로 역세척 후 PAC의 주입은 모래여과상의 상층부에서 모래의 제타전위가 플러스로 바뀌므로 인하여 불속에 마이너스로 존재하는 입자들이 초기에도 높은 농도로 제거되었다고 할 수 있다.

3.3 PAC 용액의 pH에 따른 제타전위의 변화

PAC의 주 성분으로 있는 알루미늄 가수분해종은 용액의 pH에 따라서 변화하므로 여층에 존재하는 알루미늄의 형태는 달라진다. 그러므로 PAC를 주입시에 pH의 변화에 따른 여과사 표면의 하전상태를 조사하는 것이 필요하다. Fig. 6은 pH의 변화에 따른 여과사의 하전상태를 조사하기 위하여 나타내었다. PAC 50mg/l 용액의 pH를 2~10으로 변화시킨 후, 20g의 모래를 주입하고 2시간 교반시켜 제타전위를 측정하였다. 그 결과 모래의 제타전위는 pH 4~6에서 가장 많이 플러스로 변화하였다. 이 결과는 pH 4~6사이에서 수산화알

루미늄의 존재 형태가 플러스로 존재하는 것으로 생각할 수 있다.

3.4 주입하는 PAC 용액의 pH에 따른 탁도의 제거율의 변화

Fig. 7은 PAC 용액의 pH를 5에서 8로 변화시킨 후 여과사에 주입하고 여과를 실시하여 탁도의 제거율을 나타낸 것이다. PAC의 농도는 20mg/l를 사용하여 역세척 후 하향류로 주입하여 피복하였다. 여과 초기의 탁도 제거율은 pH가 5에서 가장 높은 제거율을 나타내었다.

여과의 초기에 탁도의 제거율은 피복하는 PAC 용액의 pH가 낮을수록 높으나, 여과시간이 4시간 경과한 후에는 거의 비슷한 제거율을 보이고 있다. 이것은 여과가 진행되면서 피복된 표면에서 화학적으로 제거되는 탁질보다 표면에 포착된 탁질에 의한 거름작용이 우세한 것으로 판단된다. pH 7과 8에서도 여과 초기에는 탁도의 제거율이 급격히 감소하나 시간이 경과하면서 제거율이 증가하고 있는 것은 포착된 탁질에 의하여 거름효과가 증가한 것으로 생각된다. 그러므로 pH 5와 6으로 피복한 경우에는 초기에는 화학적인 결합에 의해서 제거율이 높아지나 시간이 경과하면서 물리적인 거름효과가 커지는 것으로 설명할 수 있다.

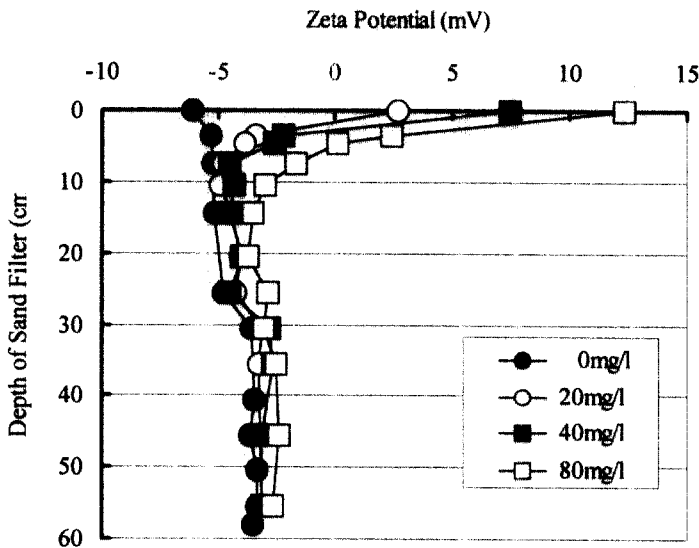


Fig. 5. Variation of zeta potential on depth of sand

또한 정수처리시 pH를 낮게하여 피복한 경우 처리수의 pH가 낮아지는지를 알아보았다. 그 결과 pH 5인 PAC 용액을 사용하여 여과사를 피복한 여과수의 pH는 원수와 크게 차이를 나타내지

않았다. 그러므로 PAC용액의 pH를 낮게하여 피복하고 여과를 실시해도 여과수의 pH에는 문제를 일으키지 않는 것으로 나타났다.

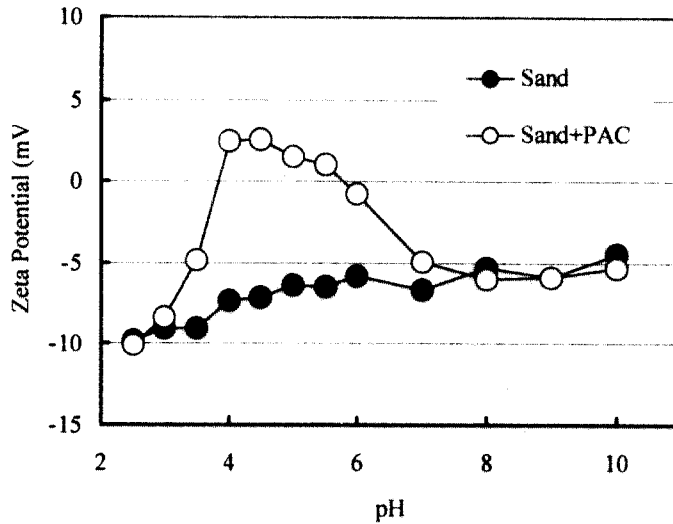


Fig. 6. Variation of zeta potential with PAC dosage as a function of pH

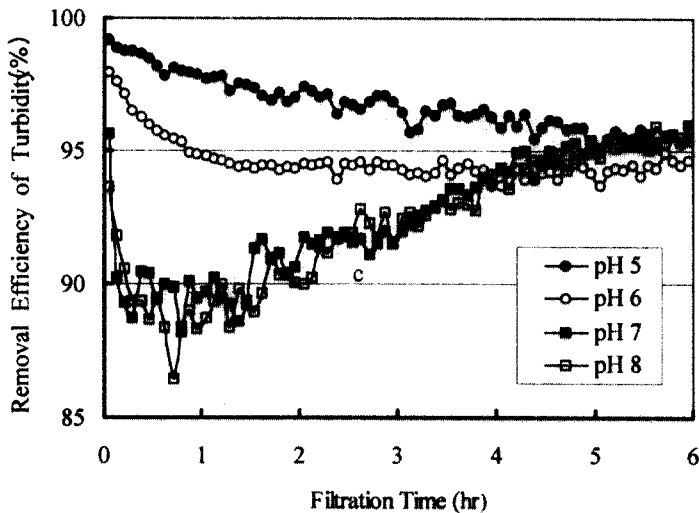


Fig. 7. Comparison of turbidity removal efficiency according to pH variation of PAC solution

4. 결 론

- 1) 역세척 직후 초기(1시간 이내)의 탁도 제거율은 70%로 낮게 나타났으며 3시간이 경과 후에는 84%로 높아졌다. 이것은 여과사의 역세척 직후 고농도의 탁도가 유출되는 것을 의미한다. 그러나 PAC 80 mg/l의 용액으로 피복 후 여과 초기의 탁도 제거율은 99%이상으로 나타났으며, 3시간 이후에도 제거율이 98%로 높게 나타나, 역세척 후 높은 농도로 유출되는 것을 방지하는 것이 가능하였다. 그러므로 PAC 용액의 주입은 여과사의 제타전위를 변화시키는 것으로 나타났다.
- 2) PAC용액으로 피복한 후 여층의 알루미늄 분포는 여층의 표면에서 높은 농도로 존재하였으며, 하부로 갈수록 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 또한 여층의 깊이에 따른 제타전위의 분포도 같은 경향을 나타내는 것으로 나타났다.
- 3) 여과사의 제타전위는 -6.1 ~ -3.4mV로서 음전하로 대전되어 있었으며 PAC 용액으로 피복한 결과 중성 또는 양전하로 바뀌는 것으로 나타났다. 이 때 PAC 용액의 pH는 4~6에서 제타전위가 가장 많이 양전하로 변화하였다.
- 4) PAC 용액의 pH를 5~8로 변화시켜 피복한 후 여과를 실시하여 탁도의 제거율을 평가한 결과, pH 5에서 초기에 탁도의 제거율이 가장 높게 나타났다. pH 7과 8에서 초기에 탁도의 제거율이 낮으나 시간이 경과하면서 제거율이 증가하는 것은 포착된 탁질에 의해 거름효과가 증가한 것으로 생각된다.

참고문헌

1. A. Amirtharajah "The interface between filtration and backwashing" *Wat. Res.*, Vol. 19, No. 5, 581-588 (1985)
2. 海老江邦雄 "急速ろ過ろ層における抑留濁質の舉動(I)" *水道協會雜誌*, 第493號, 25-46 (1975)
3. 海老江邦雄 "急速ろ過ろ層における抑留濁質の舉動(II)" *水道協會雜誌*, 第498號, 15-37 (1976)
4. 海老江邦雄 "急速ろ過ろ層における抑留濁質の舉動(III)" *水道協會雜誌*, 第507號, 20-34 (1976)
5. 海老江邦雄 "急速ろ過ろ層における抑留濁質の舉動(IV)" *水道協會雜誌*, 第508號, 18-37 (1977)
6. K. O. Cranston and A. Amirtharajah "Improving the initial effluent quality of a dual-media filter by coagulants in backwash" *J. AWWA*, Vol. 79, No. 12, 50-63 (1987)
7. C. Yapijakis, Direct Filtration "Polymer in Backwash Serves Dual Purpose" *J. AWWA*, Vol. 74, No. 8, 426-428 (1982)
8. 今野弘, 藤井正春 "急速ろ過の付着過程と水酸化アルミニウムの役割" *水*, Vol. 27, No. 5, 63-69 (1985)
9. R. J. Francois and A. A. Van Haute "Backwashing and conditioning of a deep bed filter" *Water Res*, Vol. 19, No. 11, 1357-1362 (1985)
10. 丹保憲仁, 小笠原 紘 "浄水の技術" 技報堂出版 (1997)