大韓環境工學會誌 · 논문 · pp. 216~222. 2006.

충진밀도와 여과속도가 섬유사 여과기의 처리 성능에 미치는 영향

임정훈* · 김효관** · 이정준 · 문태섭 · 정민기 · 우혜진 · 김창원†

부산대학교 환경공학과 · *국립환경과학원 수질총량관리센터 · **(주)남원건설엔지니어링 환경부

(2005년 1월 17일 접수, 2006년 2월 8일 채택)

The Effect on Treatment Performance of Fiber Filter Under Various Packing-Density and Filtration Velocity

Jeong-hoon Im* · Hyo-kwan Kim · Jung-june Lee · Tae-sup Moon**

Min-ki Jeong · Hae-jin Woo · Chang-won Kim†

Department of Environmental Engineering, Pusan National University

**Watershed Management Research Center, National Institute of Environmental Research, Ministry of Environment*

***Environment Department,Namwonkeonseol Engineering Co., Ltd.*

ABSTRACT : A flexile fiber filter developed in Korea was operated to evaluate the effect of packing density and filtration velocity on particle removal. The pilot-scale fiber filter with 40 cm of diameter and 2 m of height was packed with polyamide fibers of which mean diameter was approximately 0.93 mm. While the filtration velocity was maintained at 325 m/hr, the particle removal efficiency was compared with various of packing density from 70 kg/m^3 to 100 kg/m^3. On the contrary, when the packing density was maintained at 70 kg/m^3, the particle removal efficiency was examined with various filtration velocity from 65 m/hr to 400 m/hr. The filtration pressure increased with the packing-density increase. Below 80 kg/m^3 of packing density, the removal efficiencies of turbidity and SS were less than 30% and 50%, respectively. At 100 kg/m^3 of packing density, the removal efficiencies of them were nearly 45% and 60% respectively. The filtration pressure increased with the filtration-velocity increase. A better removal efficiency was obtained at a lower filtration velocity, removal efficiency of them were 73% at 65 m/hr. Consequently, The filtration velocity was the more important factor to enhance the particle removal efficiency compared with the packing density in fiber filter.

Key Words : *Filtration, Fiber Filter, Packing Density, Filtration Velocity, WWPT*

요약 : 본 연구에서는 국내에서 개발되어진 섬유사 필터의 충진밀도와 여과속도가 처리 효율에 미치는 영향에 대한 연구결과를 나타내었다. 0.93 mm의 직경을 가진 폴리아마이드 섬유사가 충진된 직경 40 cm, 높이 2 m의 pilot-scale 규모의 반응기에서 수행되었다. 충진밀도가 섬유사 여과기의 처리효율에 미치는 영향을 살펴보기 위해 여과속도를 325 m/hr로 고정하고 충진밀도를 70 kg/m^{3}에서 100 kg/m^{3}의 범위에서 운전하였으며, 이와 반대로 여과 속도가 섬유사 여과기의 처리효율에 미치는 영향을 연구하기 위해서 충진밀도를 70 kg/m^{3}으로 고정시킨 뒤 여과속도를 65 m/hr에서 400 m/hr의 범위로 운전하였다. 충진밀도가 증가할수록 여과 압력은 기하급수적으로 증가하였다. 탁도 및 SS 제거효율은 80 kg/m^{3}까지는 30% 이내의 낮은 제거효율을 나타내었으며, 100 kg/m^{3}에서도 50% 이하의 낮은 제거효율을 나타내었다. 여과속도에 따른 섬유사 여과기의 여과압력은 여과 속도와 비례적으로 증가하였다. 여과속도가 낮을수록 탁도와 SS의 제거효율도 증가하였으며 65 m/hr에서 73%의 제거 효율을 나타내었다. 전체적으로, 섬유사 여과기를 이용한 입자상 물질의 제거 효율을 개선하기 위해서는 충진 밀도 보다 여과속도를 유입수 특성에 따라 적절히 조절하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

주제어 : 여과, 섬유사 여과기, 충진밀도, 여과속도, 하수처리장

1. 서 론

최근 들어 수질의 배출허용 기준 강화로 인하여 하천으로 유입되는 2차 처리된 하수에 대해서 많은 관심을 가지게 되었다. 2차 처리된 하수에서는 SS와 콜로이드성 물질이 잔류하면서 이들이 수중의 탁도를 증가시킴으로 해서 빛 투과성 저하는 물론이고 광합성의 활성을 떨어뜨리는 원인이 되어 물고기와 수중 생물종의 물리학적인 악영향과 하천 오염을 가중시키고 있다. 이에 따라 배출허용기준의 만족을 위해 생물학적 하수처리공정에서 기존의 고액분리 침전조의 유출수에 잔존해 있는 SS와 콜로이드성 물질의 추가제거가 필요하게 되었다.[1,2]

현재 하폐수 처리수준의 입자상 물질을 제거하는 여과설비로는 sand filter와 분리막(M/F, U/F, N/F, R/O 등)이 주로 사용될 수 있다.[3,4] 효율적인 여과를 위해서는 적정한 여재의 선정, 여재의 조건과 조합된 역세척 속도의 선정 및 여과

† Corresponding author
E-mail: cwkim@pusan.ac.kr
Tel: 051-510-2416 Fax: 051-514-9574

지 구조물의 적정한 설계가 이루어져야 한다. 하지만, 국내의 실정을 보면 여과공정에 대한 현장 실험자료 및 발표논문이 많지 않아 우리가 가지고 있는 문제점 및 기술적 해결능력이 부족한 실정이다.

Sand filter는 가장 보편적으로 사용되는 수중 입자상 물질 여과장치이나 완속여과의 경우 부유물질 포획공간이 여재의 표면에만 한정되므로 설치에 넓은 부지가 소요되고, 운전 여과 유량이 상당히 작은 단점을 가지고 있으며, 분리막은 수중 입자상 물질 제거능이 탁월하나 수입품에 의존하여 시설유지관리비가 높고, 고정 세공구조에 의한 잦은 clogging과 fouling, 부유물질 침적 등으로 높은 운전 압력과 투과율이 감소하는 단점을 가지고 있다.[4)]

특히 기존처리장의 고도 처리시설 부지가 미확보된 경우에는 부지확장의 한계성 등 입지 여건을 최대한 고려하여 이에 적합한 입자상 물질 제거공정이 필요한데 이에 대한 대안으로 섬유사를 이용한 여과기가 개발되었다.

본 연구에서는 국내에서 개발되어진 섬유사 여과기에서 충진 밀도 및 여과속도에 따른 여과압력 변화, 처리 수질의 변화, 입경별 처리 성능의 변화를 관찰하여 어떤 인자가 섬유사 여과기의 처리효율에 더 많은 영향을 미치는가를 평가하고 목표 수질을 만족시키기 위한 섬유사 여과기의 최적 운전 방향을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구를 위해 사용되어진 섬유사 여과기는 Fig. 1에 나타냈다. 반응기 사양은 직경 40 cm, 높이 2 m로서 기존의 여과시설과는 달리 공정하부로 유입되어 상부로 유출되는 수직 상향흐름으로 운전되었다. 원수 유입구는 섬유사 하부의 고정판 부분의 구성과 유입시 유체의 원활성을 고려해 본체 하단부에서 200 mm의 간격을 두었다. 여과수 유출구는 역세공정시 농축된 부유물질의 탈리에 의한 여과수 유출구의 배출을 방지하기 위해 본체 상단부로부터 500 mm의 간격을 가지도록 설계하였다.

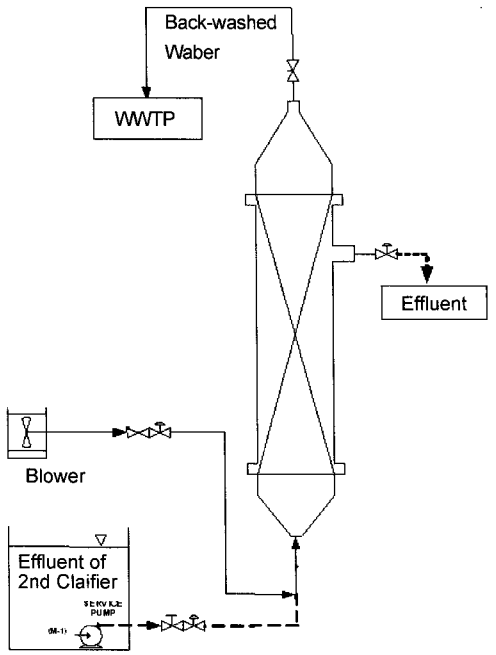

Fig. 1. Schematic diagram of pilot-scale filter plant.

여과 시간은 2시간으로 하였으며 역세는 3분 동안 수행되었고, 역세척은 여재에 부착된 입자상 물질을 효과적으로 제거하기 위하여 Amirtharajah(1991)에 의해 제시된 Collapse-pulsing 현상에 근거를 두고, 물과 공기를 이용하여 여재에 부착된 물질을 탈리시키는 방법을 사용하였다. 역세척의 흐름방향은 여과기의 특성에 따라 여과의 흐름과 동일한 수직 상향 흐름으로 진행된다.[5)] 역세시 유입되는 공기의 압력은 0.8 kg/cm^{2}로 공급하였다. 역세후 농축액은 반응기 상부를 통해 생물학적 공정으로 재 유입되도록 하였다.

2.2. 섬유사의 특성

본 연구에서는 사용된 섬유사는 오염된 유체내의 부유물질이 쉽게 부착되고 탈리될 수 있는 폴리아마이드재질로 단사의 직경이 61 μm인 것을 68 fila, 1100 Denier(데니아)로 제작되어 유효직경이 약 0.93 mm로 공극율이 12.26%을 가지며 비교적 높은 온도에도 적은 수축율을 가지는 특성을 가지고 있다.

섬유사 충진은 Fig. 2에 나타난 것처럼 길게 감은 섬유사의 한쪽 끝은 여과장치 하부의 역세척수 분배구를 겸비한 여재 고정용 플랜지의 여재 고정판에 고정하고 상단쪽은 고정하지 않아 유연성이 유지되도록 한 상태로 여과장치에 여과흐름방향과 동일한 수직방향으로 충진하였다.

2.3. 운전조건

본 연구에서는 섬유사 여과기를 이용한 생물학적 하수처리공정 2차 침전조 유출수에 잔존하는 탁도와 SS의 제거효율을 평가하기위하여 운전시간을 기존 설정 조건인 2시간을 기준으로 운전을 하였다. 하지만 역세척 조건은 유입 압력이 초기압력보다 0.2~0.3 kg/cm^2 이상 증가할 때 역세척을 수행하거나, 일정 여과 시간(2시간)이 지나게 되면 역세척을 수행하였다.

A시의 하수처리장에 pilot scale의 섬유사 여과기를 설치하여 연구 수행을 하였으며, 다음의 Table 1에서 보인바와 같이 충진밀도가 섬유사 여과기의 처리 특성에 미치는 영향을 평가하기 위한 연구 수행을 위해 충진 밀도 70 kg/m^3, 75 kg/m^3, 80 kg/m^3, 90 kg/m^3, 100 kg/m^{3}으로 변화시키고 여과속도를 325 m/hr로 일정하게 유지하면서 연구를 수행하였다.

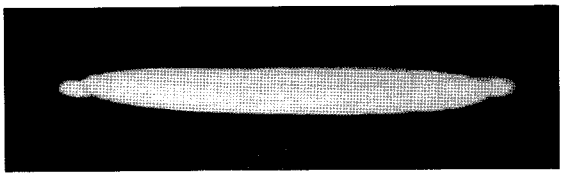

Fig. 2. Flexible fiber.

Table 1. Operating conditions of fiber filter.

Variation of packing density		Variation of filtration velocity	
Filtration velocity (m/hr)	Packing density (kg/m^3)	Packing density (kg/m^3)	Filtration velocity (m/hr)
	70		65
	75		130
325	80	70	200
	90		260
	100		400

또한, 여과속도가 섬유사 여과기 처리특성에 미치는 영향에 대한 연구 수행을 위해 앞서와는 반대로 충진밀도를 70 kg/m^3으로 유지시킨 채 여과속도를 65 m/hr에서 400 m/hr로 넓은 범위로 변화시키면서 섬유사 여과기를 운전하였다.

본 연구에서는 섬유사 여과기 고유의 여과특성 및 성능을 평가하기 위하여 어떤 종류의 응집제나 응집보조제를 이용하지 않고 실험을 수행하였다.

2.4. 분석항목 및 방법

본 연구기간 동안 유입수 및 유출수의 유량과 압력은 여과초기시간, 샘플링 시간(30분, 60분, 90분), 역세 직전시간을 이용했으며 입도 분포, 탁도, SS, BOD_5를 분석하였다.

유입수와 유출수의 입경 분포를 측정하기 위해 WQA-2000 (USA)를 이용하여 운전조건 변화에 따른 입경별 제거 특성을 살펴보았다. 그 외의 분석 항목은 대체적으로 Standard Method 및 공정시험법에 따라 행하였다.[6,7]

3. 결과 및 검토

3.1. 섬유사 여과기의 공정압력 특성

Fig. 3은 충진밀도와 여과속도에 따른 유량과 압력의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)에는 여과속도 325 m/hr로 동일한 운전조건에서 충진밀도에 따른 유입구의 압력변화를 보여주고 있는데, 충진밀도 80 kg/m^3까지는 충진밀도가 증가하여도 유입구의 압력 증가가 거의 없으나 이후 90 kg/m^3과 100 kg/m^3로 충진밀도가 증가하면서 유입압력은 1 kgf/cm^2 이상으로 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 3(b)에서는 여과 유속이 65 m/hr일 때 유입구의 압력이 0.25 kg/cm^2로, 260 m/hr일 때 0.50kg/cm^2, 400m/hr일 때 0.85 kg/cm^2로 나타나 여과 유속과 유입구의 압력이 비례적으로 증가하고 있음을 확연히 보여주고 있다. 여과 유속을 400 m/hr로 운전하였을 때 여과 압력 목표치인 0.7 kg/cm^2을 초과하는 것으로 나타나 앞선 Fig. 3(a)의 충진밀도와 압력의 관계와 비교해 볼 때, 여과기의 전체 공정압력은 여과속도보다 충진밀도에 더욱 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있다. 이는 본 공정에서의 메디아가 공극이 상당히 큰 공정이며 충진 형태가 모든 공간에서 일정하게 고정적으로 충진된 것이 아니라 여재가 여과 흐름에 대해 유동성을 가질 수 있도록 되어있기 때문인 것으로 판단된다.

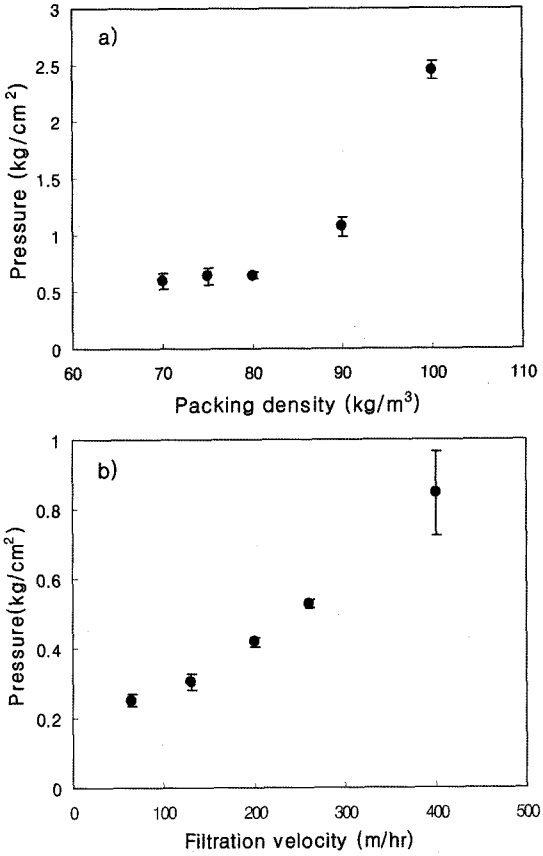

Fig. 3. The variation of filtration pressure according to packing density(filtration velocity: 325 m/hr) and filtration velocity(packing density: 70 kg/m^3).

3.2. 탁도 및 SS 제거

Fig. 4는 하수처리장 2차 침전조 유입수를 원수로 하여 섬유사 여과기에서 충진밀도 및 여과속도에 따른 탁도의 제거효율을 나타내고 있다. 유입수의 변동이 있어서 일정한 유입수 조건에서 연구를 수행하기가 쉽지 않았지만 Fig. 4(a)처럼 충진 밀도에 따른 여과처리 변화로 인한 탁도의 성향을 뚜렷하게 보여주고 있다. 충진 밀도의 증가에 따른 경향은 70 kg/m^3과 75 kg/m^3은 처리효율이 30%였고, 충진 밀도가 증가함에 따라 처리효율이 상승한다는 것을 보여주고 있는데 100 kg/m^3일 때 처리효율이 40%에서 최대 50%까지 높아졌다. 하지만 처리효율로 봤을 땐 충진 밀도 100 kg/m^3의 40~50%를 제외한 나머지 경우에서 대체적으로 20~35%의 낮은 처리효율을 나타내었다.

Fig. 4(b)는 여과속도에 따른 탁도의 제거 효율변화를 나타내고 있는데 여과 유속에 따라 전반적으로 40~80%의 탁도 제거효율을 나타냈고 여과 속도가 130 m/hr 이하일 때는 65~70%의 높은 제거효율을 보인 반면 260 m/hr에서는 제거효율이 50%로 여과 유속이 증가함에 따라 효율이 50% 이하로 저하 되는 양상을 보여주었다. 이는 여과속도가 낮아지면서 압력 또한 1/3~1/4로 급격히 감소하게 되고 여과기내 입자상 물질이 체류하는 시간이 증가함에 따라 입자성 물질들이 섬유사에 부착될 수 있는 접촉 시간이 증가하였기 때문으로 판단된다.

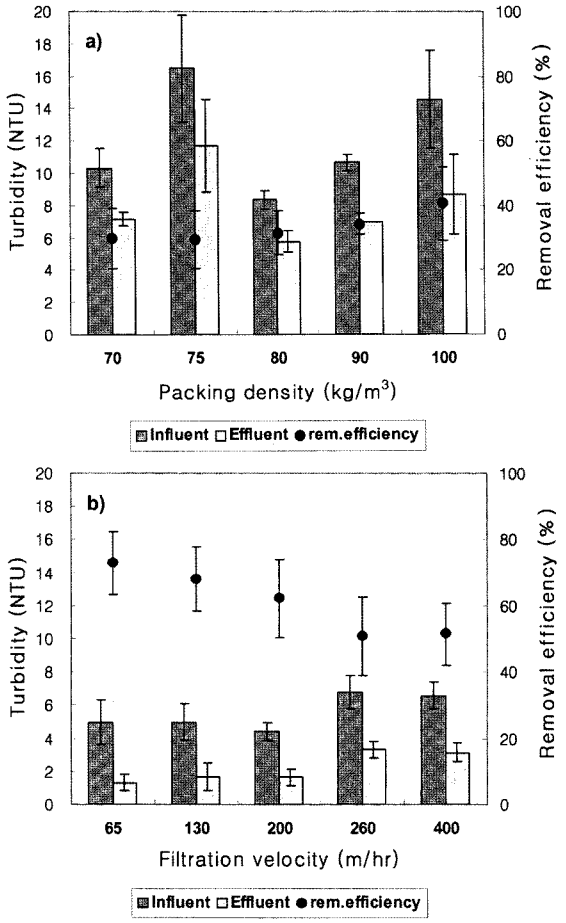

Fig. 4. The variation of turbidity removal with packing density(filtration velocity: 325 m/hr) and filtration velocity (packing density: 70 kg/m^3).

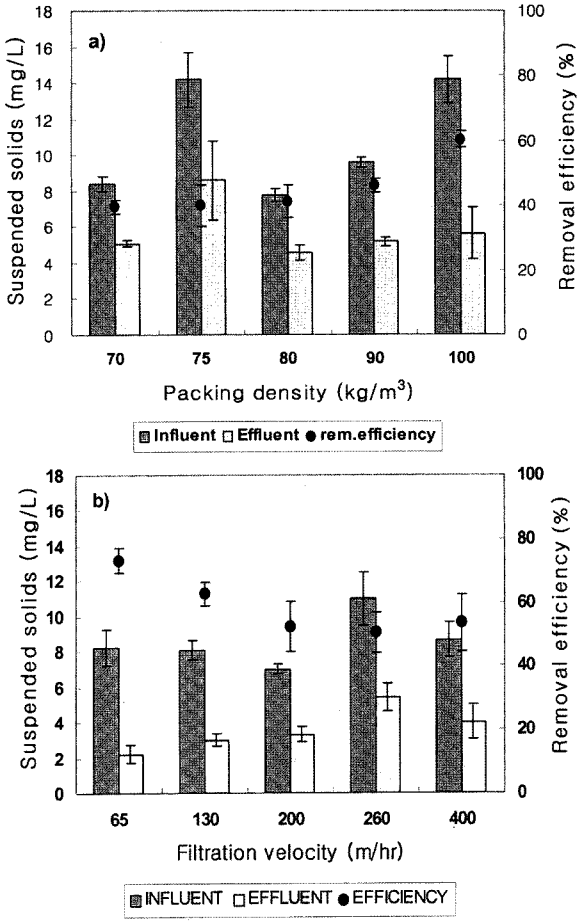

Fig. 5. The variation of SS removal with packing density (filtration velocity: 325 m/hr) and filtration velocity (packing density: 70 kg/m^3).

특히 여과속도 65 m/hr에서는 체류시간이 108초 정도에 불과함에도 유출수의 탁도 수치가 1 NTU에 가까울 만큼 깨끗한 수질로 처리되어 모래 여과기의 여과속도의 3배 이상에서도 거의 유사한 탁도 처리효율을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 충진밀도와 여과속도에 따른 SS의 제거효율 변화를 보여주고 있다. Fig. 5(a)를 보면 충진밀도 70 kg/m^{3}과 80 kg/m^{3}의 처리효율이 대략 40%로 충진 밀도에 따른 차이를 볼 수 없었지만 충진 밀도 100 kg/m^{3}에서 60% 정도로 가장 좋은 제거효율을 보여주어 충진밀도가 증가함에 따라 하수처리장 2차 침전조 유출수의 SS 농도를 60%정도 감소시켜 14 mg/L에 달하던 SS농도를 5 mg/L 이하로 감소시킬 수 있었다.

Fig. 5(b)를 살펴보면 여과 유속에 대한 부유성 고형물 제거효율이 전반적으로 50~70%를 차지하였고, 65 m/hr에서는 최대 85%의 제거 효율을 보이면서 평균 3 mg/L 이하의 처리수질을 나타냈었다. 이는 여재로 사용되고 있는 섬유사가 극히 작은 직경과 비중을 가지며 매끄러운 표면을 가지고 있지만 충분한 접촉시간과 낮은 압력으로 인해 섬유사가 흐트러져 촘촘한 그물처럼 수중에 있는 입자성 물질의 제거가 가능한 것으로 판단할 수 있다. 여과속도 130 m/hr에서는 유입수의 SS 농도가 9 mg/L 이하에서는 3 mg/L 이하의 유출수 수질을 나타냈으나 유입수의 SS 농도가 11 mg/L로 증가하자 유출수 농도가 5 mg/L가 되는 것으로 보아 여과속도의 영향과 함께 유입수의 농도에 따라 섬유사 여과기의 처리성능에 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 충진밀도와 여과속도가 SS 부하율과 제거율에 어떤 관계를 가지고 있는지를 나타내고 있다. Fig. 6(a)에 보인 바와 같이 여과기의 충진 밀도에 의한 SS의 부하율과 제거율은 충진 밀도가 증가할수록 증가되는 경향을 보이고 있으며, 전체적으로 볼 때 75 kg/m^{3}의 충진 밀도 조건을 제외하고는 충진 밀도에 상관없이 SS 부하율이 증가할수록 제거율도 증가하는 것으로 평가될 수 있다. 그러나 충진밀도 별로 상세히 살펴보면 충진 밀도 70 kg/m^{3}와 75 kg/m^{3}에서는 39%의 제거효율을 나타내었으며, 충진 밀도 80 kg/m^{3}와 90 kg/m^{3}에서는 46%의 제거효율을, 충진 밀도 100 kg/m^{3}에서는 60%의 제거효율을 나타내어 섬유사 여과기에서 충진 밀도를 증가시켜 SS 제거효율의 개선 효과를 얻기 위해서는 100 kg/m^3 이상의 충진 밀도가 되어야 한다는 것을 명백히 보여주고 있다.

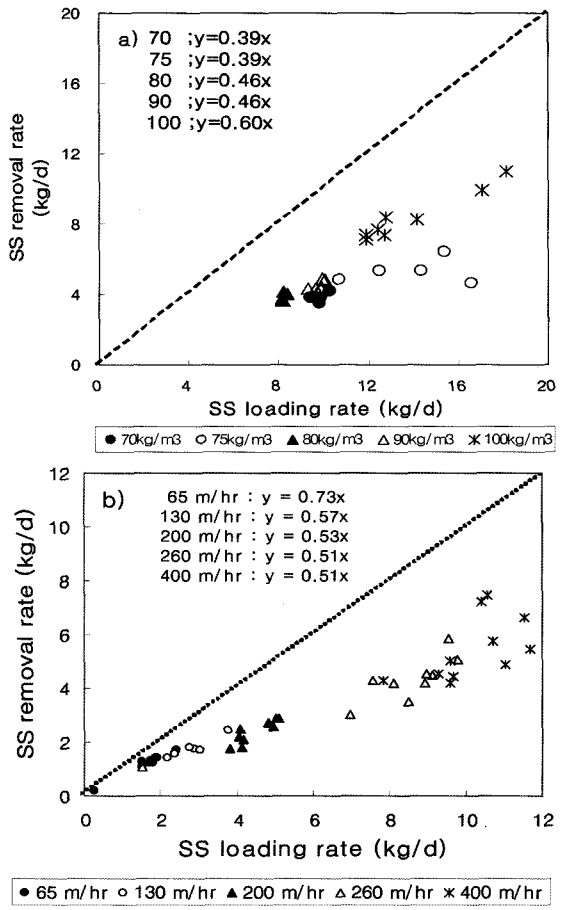

Fig. 6. The variation of SS removal rate with SS loading rate at various packing density(filtration velocity: 325 m/hr) and filtration velocity(packing density: 70 kg/m^3).

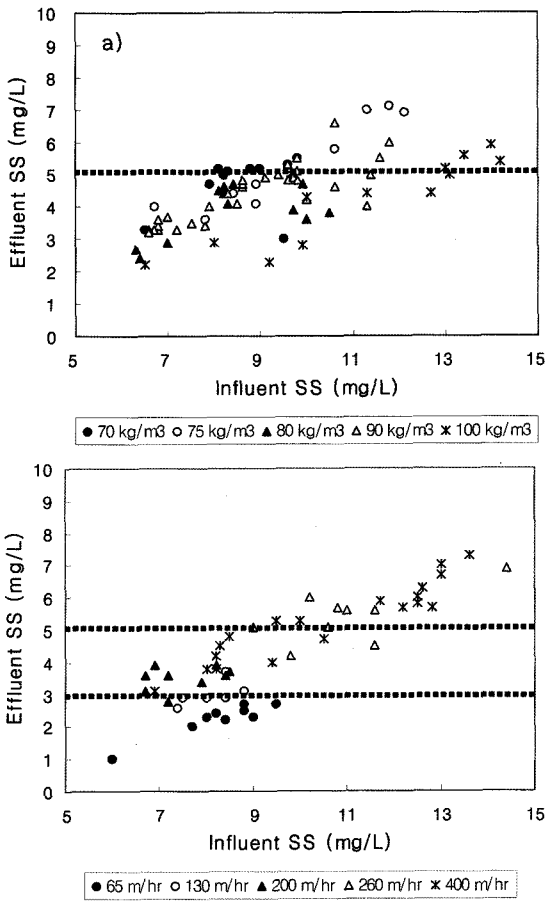

Fig. 7. The relationship between influent SS and effluent SS with packing density(filtration velocity: 325 m/hr) and filtration velocity(packing density: 70 kg/m^3).

Fig. 6(b)는 여과 속도에 따른 SS부하율과 제거율의 관계를 나타내고 있다. 여과속도에 의한 SS의 부하율과 제거율은 HRT가 감소할수록 증가되는 경향을 보이고 있으며 전체적으로 볼 때 여과속도에 상관없이 SS 부하율이 증가할수록 제거율도 증가하는 것처럼 평가될 수도 있다. 그러나 여과 유속별로 살펴볼 때 400 m/hr와 260 m/hr에서는 51%의 제거효율을, 200 m/hr에서는 53%, 130 m/hr에서는 57%, 65 m/hr에서는 73%의 제거효율을 나타내어 여과 유속이 낮을수록 SS의 제거효율은 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 7은 다양한 충진밀도와 여과속도에서 유입수 SS 농도에 따른 유출수 SS 농도의 관계를 보여주고 있는데 충진밀도와 여과속도보다 유입수의 SS 농도에 따라 유출수 SS 농도가 영향을 크게 받는 것을 보여주고 있다. 그러나 충진 밀도 100kg/m^{3}에서는 다른 충진 밀도 조건에 비해 다소 낮은 유출수 농도를 보이는 것으로 확인되었다. 이처럼 충진 밀도에 따라 SS의 유입-유출의 정비례 관계를 보여주고 있지 않는 것은 섬유사 여과기의 여재를 충진하는 과정에서 기계적으로 여재를 충진시키는 데는 한계가 있고 높은 여과속도로 인하여 섬유사의 충진 형태가 고정상태가 아닌 상층이 유동적으로 움직일 수 있는 상태이므로 입자상 물질이 효율적으로 제거되지 않기 때문이라고 판단된다. 따라서 섬유사 여과기의 충진 밀도만 증가시키는 것으로는 SS의 제거효율 개선은 어려울 것으로 판단된다.

Fig. 7(b)에는 다양한 여과속도에서 유입수 SS 농도에 따른 유출수 SS 농도의 관계를 보여주고 있는데 여과속도가 낮을수록 유입수의 SS 농도에 대해 낮은 유출수 SS 농도를 보이고 있다. 특히, 유출수의 SS 농도를 3 mg/L 이하로 만족시키기 위해서는 여과속도를 130 m/hr 이하로 운전하여야 하는 것을 확인할 수 있었으며, 200 m/hr에서도 5 mg/L의 유출수질을 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다. 여과유속 260 m/hr 이상에서는 유입수 SS농도에 따른 유출수 농도는 큰 차이를 나타내고 있지 않아 여과속도 260 m/hr 이상에서는 여과유속이 섬유사 여과기의 SS 처리 성능에 그다지 큰 영향을 주지 않고 있음을 알 수 있다.

3.3. 유기물의 제거 특성

Fig. 8은 섬유사 여과기를 이용하여 하수처리장 2차 침전조 유출수내 입자성 물질과 함께 유기물질을 얼마나 제거할 수 있는지를 평가하기 위해 BOD를 측정한 결과를 나타내었다. 이는 계속해서 강화되는 하수처리장의 BOD 방류수질 기준을 만족시키는데 있어서 섬유사 여과기의 활용성을 평가하기 위해 수행한 것이다.

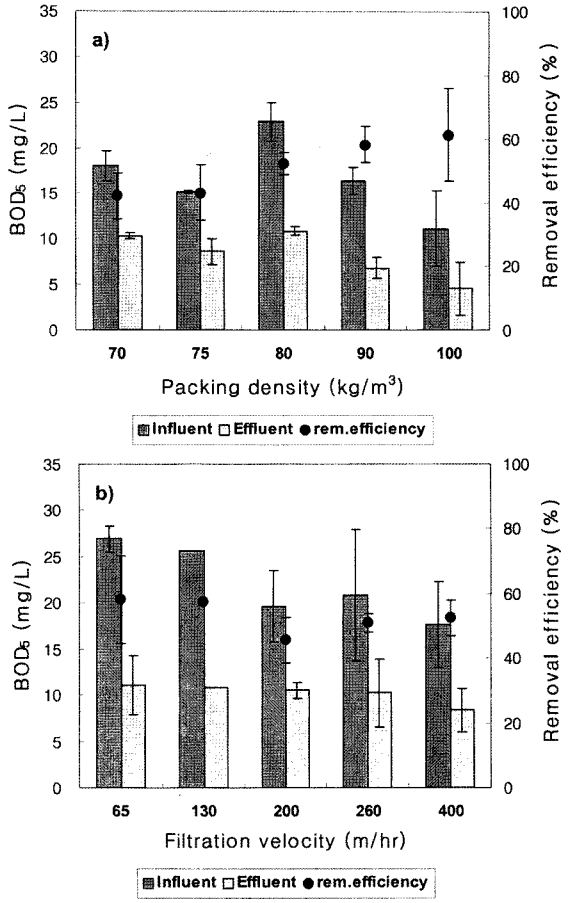

Fig. 8. Removal efficiencies of BOD at various packing density(filtration velocity: 325 m/hr) and filtration velocity (packing density: 70 kg/m^3).

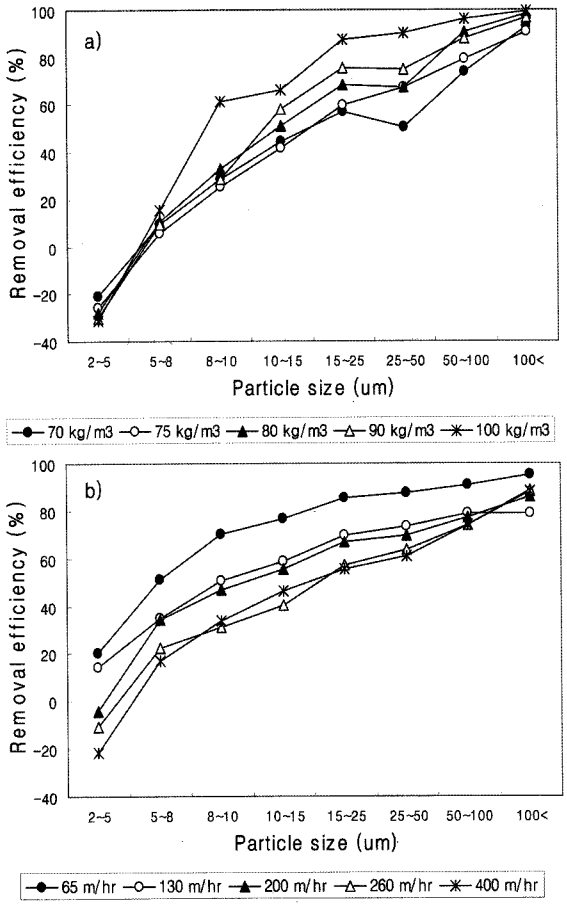

Fig. 9. The variation of particle removal with particle size at various packing density(filtration velocity: 325 m/hr) and filtration velocity(packing density: 70 kg/m^3).

충진밀도에 따른 BOD 제거효율을 보인 Fig. 8(a)를 살펴보면 80 kg/m^3 이상의 충진밀도에서 BOD 제거 효율은 대체로 50~60%의 제거효율을 나타내고 있다. 유입 TBOD와 SBOD를 분석한 결과 SBOD가 30~40%를 차지하고 있으므로 고형상 BOD는 90%이상 제거되었다고 판단된다. 섬유사 여과기의 유출수 BOD 농도는 대략 5~10 mg/L로 섬유사 여과기를 이용하면 엄격해지는 하수처리장의 SS 배출허용 기준을 만족시키는데 충분할 것으로 판단된다.

Fig. 8(b)는 여과속도에 따른 BOD의 제거효율 변화를 나타내고 있는데 전체적으로 여과속도에 관계없이 50~60%의 제거효율을 나타내었다. 유입수 농도의 변화 폭에 비해 유출수의 BOD농도는 평균 10~12 mg/L의 좁은 범위를 나타냈다. BOD의 처리성능은 탁도와 SS와는 달리 여과속도를 130 m/hr이하로 운전하였을 때 BOD 제거효율의 증가는 뚜렷이 나타나지 않았다.

3.4. 입경별 제거특성

Fig. 9(a)는 다양한 충진밀도에서 유입수와 유출수의 입경분포와 입경별 제거효율을 나타내고 있다. 충진 밀도가 클수록 여과기의 입자 처리효율이 좋은 것으로 나타났는데 충진밀도 100 kg/m^{3}에서 입경별 처리성능이 다른 운전조건에 비해 아주 좋은 것으로 나타났으나 325 m/hr의 여과속도에서는 충진밀도 100 kg/m^{3}에서도 5 μm 이하의 입자상 고형물은 유입수보다 유출수에서 개체수가 더 많이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구에 사용된 여과기의 여재가 섬유사이고 기존의 다른 여과기에 비해 flux가 높아 여재와의 전단력으로 인해 입자상 고형물이 분쇄되는 효과로 인한 것으로 판단된다. 그리고 다른 연구에서 섬유 조직을 이용한 디스크 type의 여과기에서도 이러한 결과가 나타났으며, 전단력에 의한 영향인 것으로 보고하였다.[1,8]

그러나, 모든 충진 밀도 조건에서 입경 10~15 μm와 15~25 μm에서의 입자 제거효율이 크게 증가하고 있어 개수가 가장 많은 2-5 μm의 입경제거 효율이 낮아도 전체 입자상 물질중 차지하는 표면적이나 체적이 적어 부유성 고형물의 제거 효율에는 큰 영향을 미치지는 않는 것으로 판단된다.

다시 말해서, 충진 밀도 변화에 따라 작은 입경을 가진 입자상 물질이 제거되는 것은 아니지만 전체적으로 동일한 입경을 가진 입자상 물질에 대해 충진 밀도가 높을수록 제거효율이 증가되는 것으로 나타났다.

Fig. 9(b)는 유입수와 유출수의 입경분포를 통해 여과속도에 따른 입경별 제거효율의 변화를 나타내고 있다. 여과속도가 65 m/hr와 130 m/hr일 때 입경이 5 μm 이하의 입자상

물질도 20% 정도 제거효율을 보이고 있어 충진밀도의 증가만으로는 불가능했던 2~5 μm 입경을 가진 입자상 물질의 제거가 가능한 것으로 나타났다. 그러나 여과속도가 200 m/hr 이상일 때는 3 μm이하의 입경을 가진 입자상 고형물질은 유입수에서 보다 유출수에서 많이 나타나 negative한 제거효율을 보이고 있다. 이러한 결과는 빠른 여과 속도에 의해 발생되는 수류전단력에 의한 입자상 물질의 파쇄 또는 이전에 부착되어있던 입자의 탈착 때문이라 사료된다. 이러한 현상에 대하여 여러 연구자들은 입자의 탈착 또는 파쇄 정도는 여과속도를 증가시킬수록 커진다고 보고하였다.[9~11)]

본 연구에서도 여과속도를 130 m/hr 이하로 운전하였을 때는 2~5 μm 입경을 가진 입자상 물질도 제거가 가능하였으나 200 m/hr 이상일 때는 섬유사 여과기내 섬유사와의 전단력이 크게 작용하여 5 μm 이하의 입경을 가진 입자상 물질이 유출수에서 많이 존재하는 것으로 나타나 미세한 입경을 제거하기 위해서는 여과속도를 보다 작게 운전하여야 할 것으로 판단된다.

결과적으로, 섬유사 여과기의 여과속도를 감소시키면 섬유사 여과기의 입자상 물질의 제거효율 효과가 충진 밀도를 증가시키는 것보다는 많은 효과가 있음을 잘 보여주고 있다. 유입수에 5 μm의 작은 입자가 많이 존재하는 경우에는 여과속도를 130 m/hr 이하로 운전하는 것이 좋은 제거 효율을 보여줄 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

하수처리장 2차 침전조 유출수의 처리를 위한 섬유사 여과기 적용시, 충진밀도와 여과속도에 따른 처리 효율 및 여과압력 관계를 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 충진밀도가 증가할수록 섬유사 여과기의 여과압력은 기하급수적으로 증가하였으며, 여과속도와는 비례적으로 증가하는 것으로 나타나 여과 효율 증진을 위한 충진밀도의 증가는 경제적이지 못한 것으로 나타났다.

2) 섬유사 여과기에서 충진 밀도가 증가할수록 그리고 여과속도가 낮을수록 탁도와 SS의 제거효율은 증가하는 것으로 나타났다. 충진밀도 100 kg/m^{3}에서 탁도 및 SS 제거효율이 각각 45%와 60% 이하로 나타난 반면, 여과 속도 65 m/hr에서는 70 kg/m^{3}의 낮은 충진율에도 불구하고 탁도 및 SS 제거효율이 70% 이상으로 나타나 여과 속도가 섬유사 여과 효율에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

3) 섬유사 여과기를 이용하여 2차 침전조 유출수에 존재하는 BOD 농도의 감소가 가능하였으며, 입자상으로 존재하는 BOD 성분은 충진밀도와 여과속도에 관계없이 거의 제거되는 것으로 나타났다.

4) 여과속도 325 m/hr에서는 충진 밀도의 증가만으로는 유입수내 5 μm 이하의 입자를 제거하는 것이 불가능하였으나, 여과속도를 130 m/hr 이하로 운전하였을 때는 5 μm의 입자상 물질도 20% 정도 제거 가능한 것으로 나타났다.

5) 섬유사 여과기를 이용한 입자상 물질의 제거 효율을 개선하기 위해서는 충진 밀도 보다 여과속도를 유입수 특성에 따라 적절히 조절하는 것이 더 효과적인 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2004년도 한국과학기술평가원(KISTEP) 지원에 의하여 한불공동연구과제와 동남권부품소재산학협력혁신사업단 기술개발과제로 연구되었으며, 본 연구가 원활히 수행되도록 지원해주신 부산대학교 환경기술 산업개발연구소와 연구를 도와주신 프랑스 INSA Toulouse의 Roger BENAIM 교수님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Daniel, K. and Markus, B., "Particle Removal in Different Filtration Systems for Tertiary Wastewater Treatment - A comparison," *Water Sci. Technol.*, **36**(4), 259~267 (1997).
2. Van der Graaf, J. H. and van Nieuwenhuijzen, A. F., "Experiments in High Rate Effluent Filtration in the Netherlands," *Water Sci. Technol.*, **30**(3), 127~134(1998).
3. 한국막학회, 막분리 기초(1996).
4. Rushton, A., Ward, A. S., and Holdich, R. G., "Solid-Liquid Filtration and Separation Technology," *Second Edition*(2000).
5. Amirtharajah, A., "Optimum backwash of dual media filters and GAC filter-adsorbers with air scour, *AWWARF*, Denber, *AWWA*., 49~74(1991).
6. APHA, Standard methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington, DC.(1998).
7. 환경부, 수질오염공정시험법(2002).
8. Bai, R. and Tien, C., "Particle Detachment in Deep Bed Filtration," *J. Colloid and Interface Sci.*, **186**, 307~317 (1997).
9. Raveendran, P. and Amirtharajah, A., "Role of Short-Range Force in Particle Detachment during Backwasing," *J. Envir. Engrg. Div. in ASCE*, **121**, 860~868(1995).
10. Grabbe, U., Seyfried, C. F., and Rosenwinkel, K. H., Advancement technique of wastewater treatment using the improvement fiber filter, PRIMA ATEC. INC.(2000).
11. Ben Aim, R., Vigneswaran, S., H. Prasanthi and Jegatheesan, V., "Influence of Particle Size and Size Distribution in Granular Bed Filtration and Dynamic Microfiltration," *Water Sci. Technol.*, **36**(4), 207~215(1997).