

Pilot-scale Biological Aerated Filter에 의한 제지폐수 처리 및 역세조건에 관한 연구

유익근* · 김건협* · 김동진†

*SK건설(주) 연구소

한림대학교 환경학과

(1998년 6월 11일 접수, 1998년 9월 10일 채택)

A Study on Paper Industry Wastewater Treatment by Pilot-scale Biological Aerated Filter and Optimum Backwash Condition

Ik-Keun Yoo*, Gun Hyub Kim* and Dong Jin Kim†

*R & D Center, SK Engineering & Construction Ltd.

Department of Environmental Science, Hallym University

(Received 11 June 1998; accepted 10 September 1998)

요 약

상향류 방식의 생물막 여과법(BAF)을 제지폐수 처리에 응용하기 위해 하루 처리용량 100톤 규모의 파일롯플랜트를 설계/제작/운전하였다. 발포폴리프로필렌 담체를 미생물 고정 및 여과를 위한 여재로 도입하여 BAF에 충전하였는데, 제작된 BAF 반응기는 각각의 단면적이 1.5m²인 두 개의 독립적인 폭기 필터로 구성되었으며 총 시스템의 높이는 6m였다. 본 연구의 목적은 BAF의 제지폐수 처리효율과 아울러 시스템 설계에 필요한 최적의 역세척 조건을 찾는 것이어서, 측정지표로 유입폐수/처리수의 COD, SS 농도 및 BAF 필터의 수두손실을 측정하였다. 연속 운전기간동안, 76-80%의 COD 제거효율 및 90-92%의 SS 제거효율이 안정적으로 유지되었으며 empty bed contact time 기준으로 약 0.85 시간까지 유기물 부하를 증가시켰을 때도 처리효율의 감소를 발견할 수 없었다. 역세척 후의 처리수의 soluble COD, SS 농도를 측정했을 때, COD 농도변화는 크지 않은데 비해 SS 농도는 처리직후 급격히 상승하여 처리수질이 악화되었다가 점차 정상상태로 회복되는 경향을 보여주었다. 이와 같이 SS 농도가 변화하는 정도는 역세척수의 선속도에 의존하였는데 빠른 선속도로 역세척하였을 때 SS 농도의 변화율이 증가하였다.

Abstract—Pilot plant experiments were carried out to study the steady and unsteady state behaviors of the upflow biological aerated filter(BAF) to remove organics and suspended solids from paper industry wastewater. Expanded polypropylene beads were used as the floating media for biomass attachment and filtration. The BAF pilot plant with a treatment capacity of 100 ton/day comprised two aerated filters which have cross sectional area of 1.5 m² each and total height of 6 m. The COD and SS concentrations of the effluent and the head loss buildup of aerated filters were monitored to evaluate the treatment efficiency and to optimize backwash condition of the BAF system. The removal efficiencies of 76-80% for COD and 90-92% for SS were kept stable throughout the experiment. There was no significant difference in treatment efficiencies when the organic load increased up to 0.85 hour of empty bed contact time. The analysis of SS concentration of the effluent after periodical backwash showed sharp increase right after backwash and gradual decrease to steady state while soluble COD was maintained nearly constant. The effluent concentrations and the required time intervals to reach steady state after backwashes were dependent on backwash conditions, like superficial linear velocities of backwash water. The higher the linear velocity of backwash water, the larger the deviation of SS concentration from steady state was obtained.

Key words: Backwash, Biological Aerated Filter(BAF), Head Loss, Upflow, Paper Industry Wastewater

1. 서 론

전통적으로 폐수처리에 많이 이용되어온 활성오니법은 비교적 처

리율이 양호하고 많은 처리시설이 건설되고 운영되어 이 공정에 대한 경험이 축적되어 있는 장점이 있지만 오니 반송 및 2차 침전조에 서의 bulking 발생 우려 등으로 고도의 유지관리 기술이 필요하고 또한 단위 처리량당 넓은 부지면적의 필요성, 잉여오니의 발생량이 다른 공정에 비하여 많은 등의 단점도 가지고 있다. 따라서 이와 같

† E-mail : dongjin@sun.hallym.ac.kr

은 단점을 보완하기 위해 많은 대체 공정의 개발이 이루어져 왔는데 그중 하나가 여재에 부착된 미생물을 이용하여, 활성오니법의 폭기조와 2차 침전조, 그리고 여과조 역할을 동시에 수행할 수 있도록 충진담 반응기 형태로 개발된 것이 BAF(Biological Aerated Filter, 생물여과) 공정이다. BAF는 충진된 여재에 고농도로 미생물을 부착시킬 수 있으므로 단위부피당 유기물 제거효율이 우수하고 충진여재의 부유물질 여과기능으로 인해 별도의 2차 침전시설이 필요없어 폐수 처리장 건설부지 절감효과 때문에 이에 대한 연구가 80년대 후반부터 외국에서 활발하게 이루어져 왔다[1-7]. 특히 프랑스, 캐나다, 일본 등에서는 이미 BAF를 이용한 폐수처리 플랜트가 상용화되어 운전중에 있으나 국내의 경우는 아직 기초실험 단계에 머물러 있어 이의 상용화를 위한 설계기술 개발이 절실하다.

제지산업은 공업용수를 대량으로 소비하는 산업 중의 하나로서 처리해야 할 폐수량 역시 많다는 점이 특징인데, 국내 제지업계에서 흔히 이용하고 있는 활성오니법이 일반적으로 처리량에 비해하여 넓은 부지를 필요로 한다는 점에서 개선의 여지가 크다. 또한 제지생산 공정의 특성에 따라 폭기조로 도입되는 BOD 부하의 변화나 첨가제 변화에 따른 bulking 발생, 미생물 활성저하 등을 방지하기 위해 폐수처리장 관리자가 항상 세심한 주의를 기울이고 있어야 한다. 본 연구진은 이와 같은 제지폐수 처리의 문제점에 대한 대안으로서 이미 실험실 규모의 BAF를 설계/운전하여 그 효율성을 확인한 바 있다[8, 9]. 본 연구에서는 상업적 규모의 BAF system의 scale-up 인자와 최적설계인자를 구하기 위해 하루 처리용량 100톤 규모의 상향류 BAF pilot plant를 설계/운전한 결과의 일부를 나타내었다. BAF 공정의 경제성을 좌우하는 대표적인 두 가지 요소는 미생물 부착 여재의 비용과 효율적인 역세척 방법의 결정이라고 할 수 있다.

BAF는 운전하는 부하 범위내에서 처리수의 수질, 제거율 외에도 역세척 주기가 이 시스템의 경제성 평가에 중요한 역할을 하게 된다. 역세척은 보통 BAF를 통과한 처리수로 행하는데 잦은 역세척은 주기적인 반응기 운전의 불안정성을 야기시키며 유입수 부하를 증가시키고 처리수량을 감소시키게 된다. BAF의 역세척 주기는 여재의 직경과 직접적인 연관이 있는데, 여재의 직경이 작을수록 미생물 부착 표면적이 늘어나고 여과 효율은 향상되지만 head loss가 많이 걸리고 역세척 주기가 짧아지며 여재층이 포함할 수 있는 슬러지량이 작아지는 문제점이 있다. BAF가 경제성을 갖기 위해서는 역세척은 보통 1일 1회 정도의 주기로, 역세척에 소요되는 물은 처리수의 10% 내외로 유지하여야 한다고 알려져 있다[13]. 여재층의 깊이는 1일 1회 역세척을 기준으로 하여 유입수 농도와 처리수 농도의 차이, 미생물 수율 및 수분함량을 계산하여 슬러지 저장부피를 구하고 여재의 공극률로부터 필요한 여재층의 대략적인 부피를 구할 수 있으며 여기서 유입수의 최소 체류시간을 고려하면 여재층의 깊이를 결정할 수 있다.

이와 같은 역세척 조작의 필요성 때문에 BAF에 의한 폐수처리 공정은 기존의 활성오니 공정과 같은 정상상태 공정과는 달리 주기적인 운전순서가 반복되는 비정상상태 공정이라고 생각할 수 있다. 역세척시 세척수(상향류 BAF의 경우는 위의 처리수탱크에서 여재층을 거쳐 유입수쪽으로 떨어지는 흐름)의 선속도가 너무 빠를 경우는 짧은 시간에 많은 양의 역세척수가 소비되고 순간적인 슬러지 인출 및 처리를 위한 인출관경과 슬러지 저류조 용량 등이 커야 하는 단점과 여재층에 형성된 생물막의 급격한 탈리가 일어날 수 있어서, 주기적인 폐수처리 운전조작에서 역세척 직후의 처리효율이 떨어질 가능성이 많다. 또한 여재층이 급격히 팽창하여 팽창률이 높아지므로 반응기 설계시에 여재층 하부의 깊이를 길게 잡아야 하는 단점도 발생할 수 있다. 반대로 선속도가 너무 느릴 경우 생물막의 과잉 탈리 현상은 막을 수 있겠지만, 여재층에 저장된 과잉 슬러지 및 SS의 세

척이 원활하게 이루어지지 않으므로 여재층에 의한 head loss 발생 주기가 짧아져서 결국 역세척 주기가 짧아지는 단점이 있다. 따라서 적절한 역세척 주기 및 역세척 수량, 역세척수의 선속도 등에 대한 선택이 BAF 공정의 효율성, 경제성을 좌우하는 가장 중요한 요소 중의 하나가 된다.

현재까지 생물여과에 관한 많은 논문이 발표되었지만 역세척에 관한 논문은 거의 발표되지 않았다. 이는 역세척 기구가 복잡하기도 하지만 실험실 규모에서는 정확한 값을 얻기 힘든 점 때문에 그 중요도에 비해 연구 결과가 적었다[10, 11]. 본 연구에서는 pilot 규모의 장치를 사용하므로써 이의 처리효율 외에도 역세척 조건에 따른 처리수 수질을 검토할 수 있었다.

본 연구에서는 상향류 BAF 방식에서 상업적으로 많이 이용되고 있는 발포 폴리스타이렌 여재[4] 대신에 물리화학적 물성이 비슷하고 가격면에서 더 저렴한 발포 폴리프로필렌 여재를 새롭게 도입하였고, 주기적인 역세척 조작이 처리효율에 미치는 영향을 고찰함으로써 최적의 역세척 조건 및 설계인자를 얻고자 했다. BAF pilot plant는 활성오니법에 의해 폐수처리가 이루어지고 있는 H 제지공장의 폐수처리장내에 설치하여 약 1년 6개월간 운전하였으며 본 논문은 그 내용 중의 일부이다.

2. 실 험

2-1. Pilot Plant 설계

BAF 반응기 내부에 충진된 여재로는 비중 0.08, 직경 3-5 mm의 발포 폴리프로필렌을 선정하였다. 전체적인 시스템은 BAF 반응기(역세척 처리수 저장을 위한 처리수탱크 포함), 원수탱크, air 공급을 위한 blower, 원수공급 펌프와 이의 운전 및 밸브 조작, 온도 및 pH, 폐수 및 공기 유량 표시를 위한 control system으로 크게 구성되어 있다. BAF 반응기는 단면적 1.5 m²(1×1.5 m), 높이 6 m의 직사각형 철제 탱크 두 개를 붙여 제작하였고 각각이 독립적으로 운전될 수도 있고 처리수를 서로 공유할 수도 있는 module 형태로 설계하였다. BAF는 여재 충진 깊이 2 m, 여재층 밑으로 역세척시 여재층의 팽창 공간을 위한 하부 깊이 2 m 그리고 역세척을 위한 BAF 상부의 처리수 탱크 깊이 2 m가 위치한다. Fig. 1에서와 같이 여재층과 상부 처리수 탱크 중간에 각각의 BAF에 70개의 0.8 mm sieving slit를 가진 스트레이너가 판에 설치되어 발포 폴리프로필렌 여재층과 처리수를 분리하면서 처리된 폐수와 공기가 통과하도록 했고, 각각의 반응기에 sight glass를 설치하여 여재에 형성되는 생물막의 상태를 시각적으로 확인하도록 하였다.

공기는 각 BAF 반응기 하부에서 4개의 관으로 모두 120개의 노즐(직경: 1.5 mm)을 통하여 공급되었다. 폐수는 BAF 반응기 하부에서 3개의 관으로 모두 60개의 노즐(직경: 10 mm)을 통하여 공급되었다. 역세척은 BAF 하부의 drain관(직경: 30 cm)의 전동식 밸브를 열어주면 여재층 상부의 처리수가 낙하하면서 여재층을 팽창시키면서 여재층 사이의 슬러지 및 shear에 의해 여재 표면에 과다 증식한 생물막을 제거한다. 이 슬러지는 반응기 바닥의 2개의 슬러지 인출관(직경: 20 cm)의 구멍(노즐갯수: 40; 직경: 30 mm)으로 인출되어 슬러지 농축조로 이송된다.

2-2. 운전 및 분석조건

본 연구에 사용된 원폐수는 H 제지공장 폐수처리장 두 곳의 1차 침전조 배출수를 원심펌프로 상부의 원수탱크로 이송하였으며 이때 질소와 인 성분은 Fig. 1에서와 같이 BOD에 대하여 적정 비율(100:3:0.5)로 요소(NH₂CONH₂)와 인산(H₃PO₄)의 형태로 투입하였다. 첫 단계의 실험에서 BAF에 도입된 폐수의 수질은 COD가 170-300 mg/l,

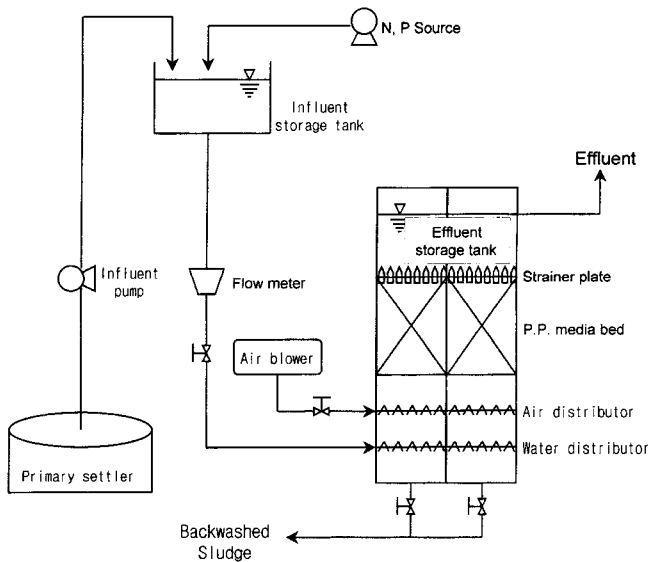


Fig. 1. Schematic flow diagram of a pilot-scale upflow BAF system.

SS 농도범위는 평균 30-100 mg/l 정도로 유지되었으며 pH는 6.5-7.5, 온도는 25-30 °C 정도로 유지되었다. 두 번째 실험에 사용된 폐수는 대체로 COD가 100-140 mg/l, SS 100-130 mg/l로 유지되었고 pH와 온도는 전과 같았다. 이렇게 BAF 반응기 상부에 따로 설치된 원수 탱크로 이송된 폐수는 BAF 반응기와 원수탱크의 수두차에 의해 자연유하 방식으로 반응기 하부로 유입되어 여재층 및 스트레이너를 거쳐 처리되면서 처리수탱크로 올라온다. 공기는 본 BAF 시스템의 수두 및 BOD부하를 고려하여 적정하게 설계된 air blower에 의해 Fig. 1과 같이 반응기 하부로 공급되었으며, 그밖에 펌프, 연결배관, 밸브 등은 하루 처리용량 100톤을 기준으로 하여 설계되었다. 역세척은 손실수두가 일정 높이(80 cm) 이상 증가하거나 timer에 의해 24시간 마다 진행하도록 설치하였는데 대부분의 경우 24시간 마다 자동으로 역세척되었다. 분석을 위해 BOD는 BOD₅, COD는 KMnO₄ 법에 의한 COD를 측정하였으며 모든 분석방법은 공해공정시험법에 준하였다. 일반적으로 처리수 및 원수의 sample은 역세척 후 4시간 이 경과한 다음 시료를 채취하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 여재 부착 미생물상 고찰

BAF 시스템에서는 여재에 미생물이 안정하게 부착 서식하는 것이 무엇보다 중요하다. BAF의 여재에 이와 같은 생물막을 구성하는 주요 물질은 미생물이 합성한 extracellular polymer와 미생물, 그리고 여과에 의해 걸러진 부유물질로 알려져 있다. 그런데 유입 유기물의 제거에 따라 미생물의 부착량 및 여과 부유물질의 양이 점점 늘어나면 반응기에 head loss를 유발하므로 BAF 시스템에서는 유입폐수와 수두차를 유지하기 위해 주기적인 역세척이 이루어져야 한다. 본 연구에서 미생물 부착 여재로 이용한 발포 폴리프로필렌은 운전 시작 후 약 2주후부터 생물막이 형성되면서 폐수처리장 1차 침전조 유출수의 수질변동에도 비교적 안정된 처리효율을 나타냈다. 생물막 공정을 이용하는 경우 미생물이 안정하게 생물막을 형성되는 것이 무엇보다 중요한 만큼 이 기간을 최소화하는 방법과 이에 적합한 여재의 개발은 매우 중요하다.

역세척을 하지 않은 채로 1주일 경과후 현미경으로 BAF 반응기의 여재의 생물막을 관찰한 결과, 하부(원수유입부)에서는 일반적으

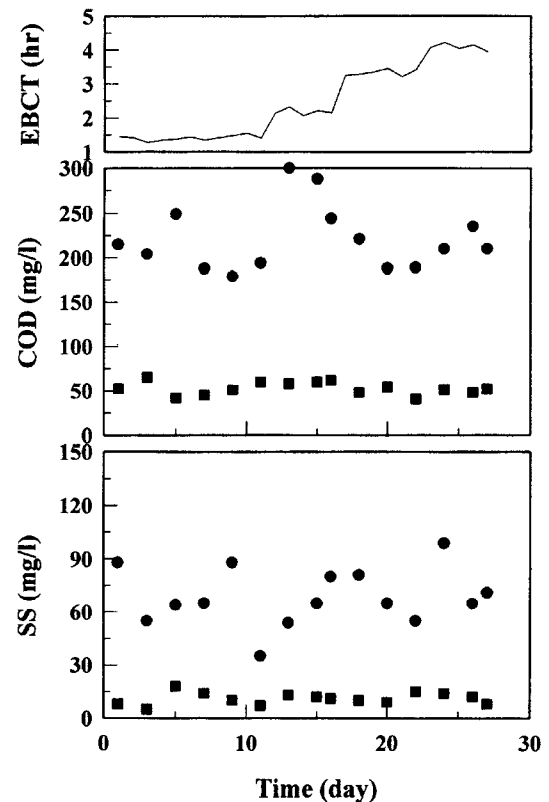


Fig. 2. Time profile of COD, SS concentration in the first operation of BAF.

(●) influent; (■) effluent.

로 생물막에서 많이 보여진다고 알려진 *Vorticella*, *Carchesium*, *Epistylis* 등의 섬모충류가 다량으로 출현하였고 종종 장기폭기법에서 흔히 볼 수 있는 *Lepadella* 등의 원생동물이 출현하기도 했다[12]. 반면 여재층 상부에서는 미생물의 종류 및 양이 하부에 비해 감소되었는데 이는 여재층 깊이에 따라 처리되어야 할 유기물의 종류 및 농도 분포가 다르고 이에 따라 미생물의 분포도 달라짐을 의미한다. 그러나 주기적으로 역세척을 진행하면서 반응기 상부와 하부의 여재에 부착된 미생물을 현미경으로 조사한 결과 특별한 차이점을 발견할 수 없었다. 이는 주기적인 역세척으로 여재층이 뒤섞이면서 생물막이 부착된 여재가 반응기내에서 공간적으로 균일하게 분포함을 의미한다. 폐수처리 공법별로 관찰되는 원생동물의 종류에는 약간의 차이가 있는 걸로 알려지고 있으나 일반적으로 부유미생물을 폐수처리에 이용하는 활성슬러지법에서는 *Aspidisca*가 상당히 높은 순위로 우점하는데 비해 BAF와 같이 부착미생물을 이용하는 생물막법에서는 우점하지 않는다는 특유의 부착성장 시스템의 특성이 나타났다. 또한 폐수처리가 정상적으로 운전되고 있을 때는 폐수처리 공정에 관계없이 대체로 섬모충류가 우점하고 있다는 사실을 본 연구에서도 확인할 수 있었다.

3-2. 처리효율 특성

앞의 운전조건에서 기술한 바와 같이 실험기간 중 원폐수의 유입 조건이 달라짐에 따라 우선 Fig. 2에서는 1단계로 원폐수의 COD가 170-300 mg/l일 때의 처리효율을 나타내었다. 처리수의 COD는 유입 농도에 상관없이 평균적으로 50 mg/l 정도 유지되었으며 SS는 평균 10 mg/l를 나타내었다. 실험기간 동안 처리수의 COD를 낮추기 위해 폐수의 도입유량을 낮추어 미생물이 부착된 여재층을 통과하는 체류시간을 EBCT(Empty Bed Contact Time) 기준으로 약 4시간까지

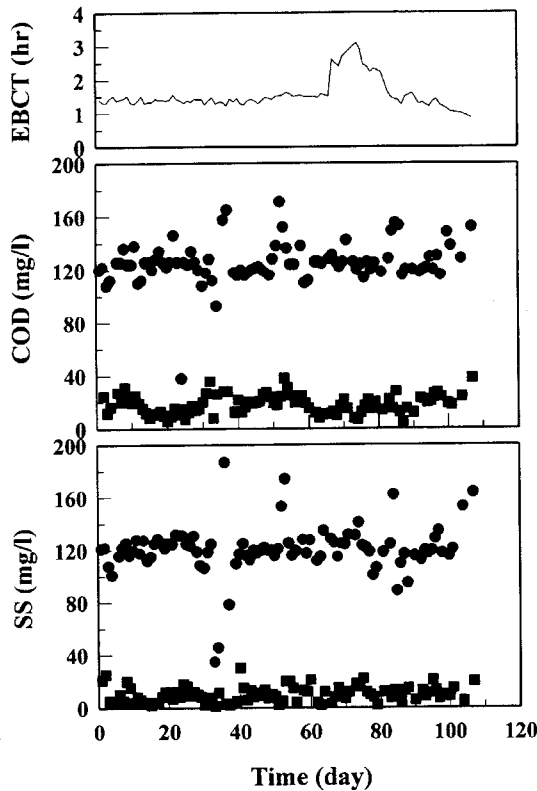


Fig. 3. Time profile of COD, SS concentration in the second operation of BAF.

(●) influent; (■) effluent.

(폐수 상향류 선속도=0.5 m/hr까지) 점차적으로 증가시켜 보았다. 그러나 처리수의 COD는 50 mg/l 내외에서 크게 변화하지 않았다. 결국 유입폐수의 성상에서 생물학적 난분해성 물질이 존재함을 추측할 수 있었으며, 여기에 data로 나타내지는 않았지만 실험기간 중 처리수의 BOD를 측정했을 때 대부분 10 mg/l 이하의 낮은 값을 안정적으로 나타낸 것으로 보아 이를 확인할 수 있었다. 따라서 대부분의 생물학적으로 분해가능한 물질은 1.4시간 정도의 EBCT에서 모두 분해가 되었다고 볼 수 있다.

Fig. 3은 2단계 기간의 실험으로서 원폐수의 COD가 100-140 mg/l로 유지되었다. 정상적인 처리효율이 나타난 뒤 두 달 동안 폐수의 EBCT를 1.4시간으로 유지하였고 그 이후에는 폐수의 유입량을 변화시켜 폐수의 EBCT 변화에 따른 COD 및 SS 제거효율을 검토하였다. 처리수의 평균 COD는 20 mg/l로 1단계 실험에 비해 낮게 유지되었고 제거율은 대체로 80% 이상 유지되었다. SS 기준으로 처리수는 평균 10 mg/l 정도였는데 이는 앞의 1단계 실험과 같은 결과이다. 이렇게 처리수의 SS가 낮게 유지되는 것은 BAF 공정의 장점인 생물학적 분해와 여과능력을 잘 보여주는 결과이다. 여기에 data를 정리하지는 않았지만 BAF를 제작하여 시운전하는 기간에는 생물막 형성이 완벽하지 않아 처리수의 SS 농도가 다소 높은 범위에서 분포하였다. 이는 BAF에서의 여과가 단순히 여재층에 의한 것뿐 아니라 생물막의 성장에 의한 공극률의 감소와 생물막 표면에서의 흡착 작용도 있기 때문으로 설명되어진다.

Fig. 4에서는 Fig. 2, 3에서 EBCT 변화에 따른 유기물과 부유물질의 부하 변동에 따른 제거율을 통계적으로 얻기 위해 도식한 것이다. 여기서 기울기 값이 결국 평균 제거율이 되는데, 원폐수의 COD가 높고 난분해성 물질이 많은 1단계 실험에서는 COD 제거율 76%, SS 제거율 90%였고, 2단계 실험에서는 COD 제거율 80%, SS 제거

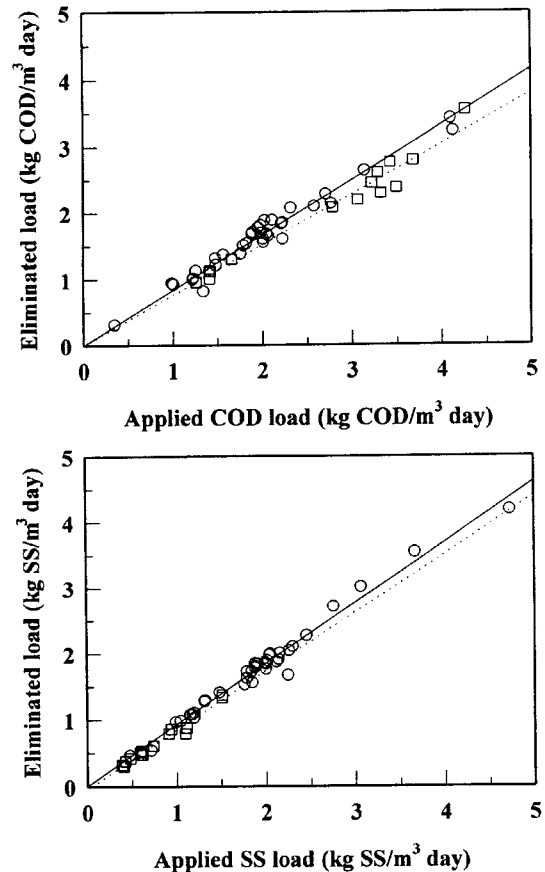


Fig. 4. Removal efficiencies of COD and SS obtained from the slope of the applied load versus eliminated load.

(□ dotted line) 1st operation; (○ solid line) 2nd operation.

율 92%로 나타났다. COD의 제거율이 유입부하가 낮은 범위에서도 더 이상 향상되지 못하는 것은, 앞에서 기술했듯이 본 연구에서 적용한 H 제지공장의 폐수 성상이 생물학적으로 제거되기 어려운 난분해성 물질을 일부 포함하기 때문으로 여겨진다. 만약 배출수의 COD를 더 낮게 유지하려 한다면, 활성탄 흡착, 오존분해 등의 물리화학적 공정을 전후에 도입하는 것이 필요하다.

일반적으로 BAF 시스템에서 처리수의 SS 농도는 사용한 여재의 직경에 비례하고 여재층의 깊이에 반비례한다고 알려져 있으므로 본 연구에서 이용한 여재의 직경 3-5 mm 보다 작은 여재를 사용하면 처리수질이 보다 좋아질 수 있다. 하지만 BAF 시스템의 가장 중요한 운전조건인 역세척의 횟수 및 편리성 측면에서 문제가 될 수 있으며 이 정도의 SS 농도는 현 규제치를 충분히 밀도는 수치이므로 본 시스템에서 여재의 직경을 더 이상 줄이는 것은 바람직하지 않다고 판단된다.

3-3. 역세척 조건의 처리효율 영향

본 실험에서는 우선 역세주기를 결정하기 위하여 EBCT 1.4시간으로 유입수량을 유지했을 때(하루 처리수량 100톤), 시간 경과에 따른 head loss의 변화를 측정해 보았다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 역세척 직후의 수두는 약 10 cm 전후였지만 하루 정도 지난후 급격하게 head loss가 증가하고 있다. 물론 이 그림은 본 연구에서 이용한 H 제지공장 폐수의 COD 농도가 100-140 ppm 사이를 유지하는 조건에서 얻어진 것이므로 COD나 SS 농도가 더 높은 조건에서는 head loss가 급격하게 증가하는 구간이 24시간 전에 시작될 것이며 낮은

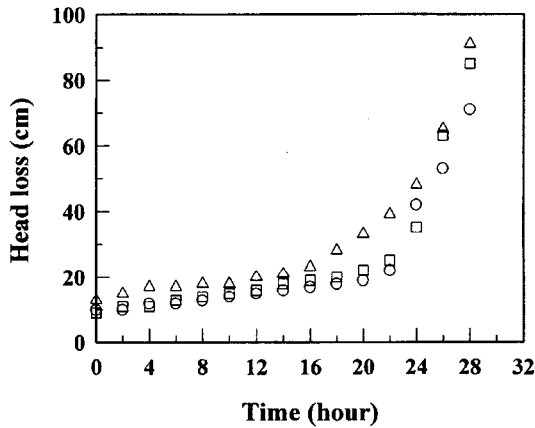


Fig. 5. Head loss profiles of BAF.

조건에서는 그 반대일 것이다. 결국 앞에서 본 pilot plant 운전을 EBCT 0.85시간(처리수량 기준 $170 \text{ m}^3/\text{day}$)까지 부하를 증가시켰을 때도 처리효율의 변화가 크지 않았지만, 1.4시간에서 크게 벗어나는 고부하 범위로 본 BAF를 운전했을 때는 역세척 주기가 하루에 한 번보다 짧아지게 될 것이다.

이와 같은 기준에 근거하여 하루에 한 번 역세척 조건을 유지하면서 연속운전했을 때 본 연구에서는 일반적으로 알려진 10%의 역세척 수량보다도 더 작은 5% 이하의 수량을 유지하면서도 충분히 역세를 할 수 있다는 결론에 도달했다. 이는 본 논문에서 측정치를 제시하지는 않지만, 역세척수에서 측정되는 배출 SS농도가 5% 수량 이전에 급격히 떨어져서 그 이후에는 크게 역세효과가 반감되기 때문이다. 또한 역세 도중 역세척 공기를 주입하여 팽창한 여재층의 순환을 촉진시킴으로써 역세수 역활의 일부를 공기로서 대신할 수 있었다. 따라서 역세수량은 5%로 고정시키고 다음에는 역세척수의 선속도에 따른 영향을 Fig. 6과 같이 나타내었다. 즉, 역세척 직전 처리수의 soluble COD, SS 농도를 1로 정규화했을 때 역세척 직후 매 시간별로 처리수의 COD, SS 농도가 어떻게 변화하는지를 측정해 보았다. Fig. 6과 같은 그림에서 알 수 있는 중요한 설계인자는 두 가지인데 첫 번째는 역세척 직후 처리수 수질의 악화 정도(peak height)와 두 번째는 악화된 처리수 수질이 회복되는 시간(peak width)이다. 먼저 SS 농도면에서 보면 역세척수의 선속도가 20 m/hr에서 105 m/hr로 증가함에 따라 peak height, width 모두 증가하고 있어, 역세척 직후 BAF의 SS 처리능력이 현저히 떨어짐을 알 수 있다. 즉, 여재로부터의 생물막의 탈리가 심할수록 부유물질의 여과효과가 감소함을 알 수 있다. 또한 여과효과를 회복하는데 걸리는 시간도 생물막의 탈리가 심할수록 길어진다는 것을 알 수 있다. 반면 soluble COD 농도는 통제오차를 고려할 때 실험에 이용한 역세척수의 선속도 범위에서는 별다른 차이를 발견할 수 없었다. 이와 같은 결과는 105 m/hr 정도의 역세척 선속도까지는 COD 분해에 직접적인 영향을 미치는 기본적인 생물막의 탈리 현상이 심하지 않았거나 탈리된 생물막이나 미생물이 여재층 사이에 남아 있으면서 용존 유기물의 분해에 도움을 주고 있음을 의미한다. 위의 실험조건에서 볼 때 역세척수의 선속도는 50에서 70 m/hr의 범위에서 운전하는 경우가 역세척후의 유출수의 수질을 완화하는데 적절한 것으로 사료된다. 여기에 표시하지는 않았지만 20 m/hr의 경우는 역세후 10시간 정도 지난 후 head loss가 기준을 초과하였으며 다른 경우는 모두 24시간 후에 기준 head loss를 넘었다.

역세척 후 SS의 농도가 급격히 증가하다 감소하며 특히 역세척 선속도가 증가함에 따라 특히 변화율이 심한 이유는 선속도가 빠를수록 여재층의 팽창률이 증가하므로 역세척후 다시 여재층이 압축

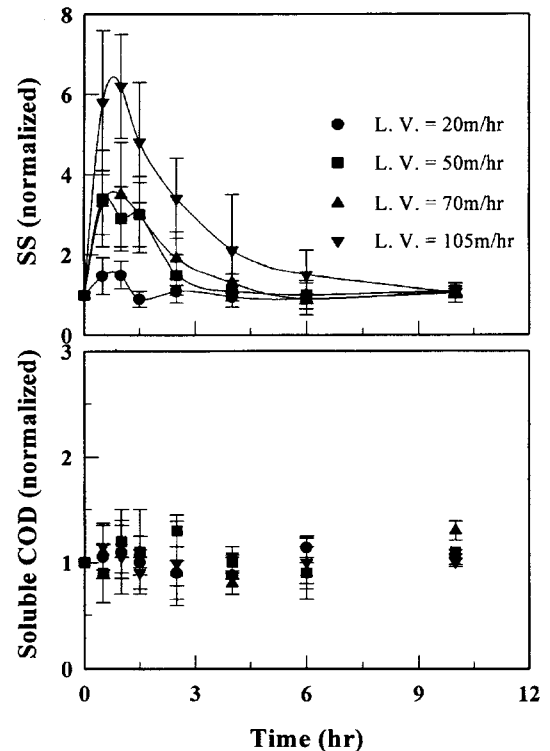


Fig. 6. Effluent concentration of soluble COD and SS after back-washes at various superficial linear velocities of backwash water. Error bar was calculated from at least three independent experiments.

되는 과정에서 여재 표면의 생물막과 여재층 사이의 슬러지가 탈리된 상황에서 일부 남아 있는 슬러지와 새로 도입되는 폐수의 부유물질이 같이 유출되기 때문으로 사료된다. 즉 BAF에서의 여과효과는 여재 자체에 의한 것보다는 유입폐수의 유기물질로 인해 여재 표면에 축적된 생물막 및 여재층 공극 사이의 슬러지에 의해 여과 성능이 좌우된다는 것이다. 따라서 역세척 주기가 적절한 범위에서 역세척 선속도는 되도록 낮추어 여재표면의 생물막과 층 사이의 슬러지의 완전 탈리를 막는 것이 유리하다. 그러나 앞에서 논의한 바와 같이 충분한 역세척이 이루어지지 않으면 역세척 주기가 짧아지기 때문에 최적 역세 조건을 얻기 위해서는 각각의 역세척 선속도에 대해 역세주기 동안의 head loss 증가율 곡선을 실험에 의해 얻어, 앞에서 기술한 바와 같이 적절한 역세척 주기와의 타협점을 찾는 것이 중요하다.

그외에 다른 방법은 여러 개의 BAF 반응기를 동시에 운전할 수 있는 modular design을 하는 것이다. 즉, 여러 개의 BAF 반응기의 역세척을 순차적으로 하여 배출되는 SS의 농도가 평균값으로 나오도록 하면 급격한 SS 농도의 상승을 예방할 수 있다. 이와 같은 modular design에 의한 순차적인 역세척을 하기 위해서는 역시 실험에 의해 Fig. 6과 같은 역세척 직후의 처리수 수질변화 곡선을 도출하여 반응기 개수에 따른 처리수의 평균값을 얻을 수 있어야 한다. 그밖에 modular design을 하게 되면 유입폐수의 계절적, 시간적 변화에 대해 적절하게 대응할 수 있다는 점과 처리수 탱크 및 슬러지 처리계통의 용량을 줄일 수 있는 점 등 여러 가지 장점을 가지고 있으며 상업적인 설계에 있어서는 모두 이 방법을 활용하고 있다.

4. 결 론

본 연구는 lab-scale에서 확인했던 BAF에 의한 폐수처리 효율을

실규모의 플랜트 설계로 연결하기 위한 pilot test 결과로서 하루 처리용량 100톤 규모의 상향류 방식 BAF에 의한 제지폐수 적용결과다. Pilot test에 이용된 H 제지공장의 배출폐수 성상에 맞춰 펌프, air blower, 연결배관 및 밸브, 탱크 등을 설계/제작하였고 연속운전기간 동안 COD 및 SS의 평균 제거율은 80-90%의 안정적인 처리효율을 보여주었다. 특히, 유기물 부하를 증가시켜 EBCT를 0.85시간까지 감소시켰을 때에도 본 연구에서 설계된 BAF의 처리효율에는 별다른 영향이 없었다. BAF 공법의 경제성을 좌우하는 요소인 역세척 조작의 최적화 및 modular design의 근거로서 역세척 주기 동안에 나타나는 처리효율 변화곡선을 도출하였으며 역세척 수량을 5% 이내로 유지할 수 있어 처리용량을 최대화할 수 있었다. 이 실험조건에서의 최적 역세척수의 낙하속도는 50-70 m/hr였다. 또한 현재까지 국외에서 널리 이용되어온 발포 폴리스타이렌 여재에 비해 가격경쟁력이 있는 발포 폴리프로필렌 여재를 사용하여 우수한 처리효율을 확인할 수 있었다.

감 사

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(생물화학 Bio 97-A-3)에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Adachi, S. and Fuchu, Y.: *Wat. Sci. Tech.*, **24**, 195(1991).
2. Canler, J. and Perret, J.: *Wat. Sci. Tech.*, **29**, 13(1994).
3. Pujol, R., Hamon, M., Kandel, X. and Lemmel, H.: *Wat. Sci. Tech.*, **29**, 33(1994).
4. Rogalla, F. and Bourbigot, M. M.: *Wat. Sci. Tech.*, **22**, 273(1990).
5. Rovel, J., Trudel, J., Lavallee, P. and Schroeter, I.: *Wat. Sci. Tech.*, **29**, 217(1994).
6. Stensel, H. D., Brenner, R., Lee, K., Melcer, H. and Rakness, K.: *ASCE J. Env. Eng.*, **114**, 655(1988).
7. Yamayuki, M.: *J. of Water and Waste*, **34**, 926(1992).
8. Kim, D. J., Kim, K. H., Cha, K. C., Lee, K. H., Lee, Y. T. and Lee, T. J.: *Chemical Industry and Technology*, **14**(1), 40(1996).
9. Kim, D. J., Kim, K. H., Yoo, I. K., Lee, K. H., Lee, T. J., Lee, Y. T. and Cha, K. C.: *J. of Korea Society of Water Quality*, **13**(2), 177(1997).
10. Kang, Y. T. and Hyun, K. S.: *J. of The Korean Society of Civil Engineers*, **12**(2), 285(1992).
11. Lee, K. H., Chung, E. J. and Park, T. J.: *J. of Korea Society of Water Quality*, **12**(4), 359(1996).
12. "Advanced Treatment and Recycle System Development of Paper Industry Wastewater with BAF/Membrane System", SKEC Research Report(1998).
13. EPA, "Technology Assessment of the Biological Aerated Filter", EPA/600/2-90/015(1990).