

하상여과 모형에서 유기물과 질소의 제거

안규홍* · 손동빈 · 김승현†

*한국과학기술연구원 수질환경 및 복원연구센터 · 영남대학교 환경공학과

(2005년 2월 25일 접수, 2005년 5월 18일 채택)

Removal of Organic Matter and Nitrogen in a Model System of Riverbed Filtration

Kyu-Hong Ahn* · Dong-Bin Sohn · Seung-Hyun Kim†

*Water Environment and Remediation Center, KIST(Korea Institute of Science and Technology)

Department of Environmental Engineering, Yeungnam University

ABSTRACT : A column experiment was performed to investigate the influence of the sludge cake development on the riverbed and the hydraulic gradient imposed by the drawdown at the well on the filtrate quality in order to offer a guideline in the design and operation of the riverbed filtration. Results show that the sludge cake on the riverbed plays an important role in the removal of the organic matter. Under the conditions of this study the COD removal rate increased from 17% to 50% along with the sludge cake development, which was equivalent to the BCOD removal of 22% and 67%, respectively. The active removal of the organic matter took place in the sludge cake and the upper 40 cm of the riverbed. As the flow rate increased owing to the increase in the head difference imposed on the column, the slope of the COD profile near the column inlet decreased, however, the profiles converged in about 40 cm from the inlet. In 10 days of sludge cake formation the dissolved oxygen was depleted at the depth of 70 cm, which suggests the denitrification can take place beyond the depth. This depth was further reduced to 20~40 cm as the sludge cake developed. From this study the removal of organic matter can be expected through the riverbed filtration even with the depth of as shallow as 3 m, which is frequently met in Korea, while the removal of nitrogen through denitrification is not expected to be active under the condition.

Key Words : Riverbed Filtration, Column Experiment, Flow Rate, Filtrate Quality, Sludge Cake

요약 : 하상여과의 효율적인 적용에 대한 지침을 얻기 위해 이를 모사하는 칼럼실험을 수행하여 적용되는 수두차와 슬러지 케익의 발달에 따른 수질변화를 조사하였다. 하상여과에서 유기오염물을 제거하는데 가장 중요한 요소는 슬러지 케익의 발달임을 알 수 있었다. 본 연구의 조건에서 슬러지 케익의 발달에 따라 COD제거율은 17%에서 50%로 증가하였고, 이를 BCOD로 환산하면 22%에서 67%로 증가한 것이었다. BCOD가 활발히 제거되는 구간은 슬러지 케익층과 하상 약 40 cm 깊이까지였다. 수두차에 의한 유량이 클수록 칼럼입구에서 COD가 완만하게 제거되나 약 40 cm 이상에서는 COD 농도곡선이 유량에 따라 다르지 않고 모두 일정하게 수렴함을 알 수 있었다. 10일 동안의 슬러지 케익 발달 이후에는 70 cm 깊이에서 용존산소가 고갈되어 탈질이 가능하였으며, 케익이 더욱 발달함에 따라 용존산소의 고갈깊이가 20~40 cm까지 단축되었다. 본 연구의 결과로부터 우리나라에 널리 분포되어 있는 3 m 깊이 정도의 하상에서 하상여과를 통해 유기오염물은 충분히 제거되지만 탈질에 의한 질소제거는 제한적임을 알 수 있었다.

주제어 : 하상여과, 칼럼실험, 유량, 여과수질, 슬러지 케익

1. 서론

우리나라는 짧은 우기에 강우가 집중되고, 산이 많아 하천의 종단경사가 급하여 하상계수가 크다. 이로 인해 우기에는 하천의 유량이 많고 유속이 빨라 치수가 쉽지 않다. 우기를 제외한 대부분의 기간에는 이와 반대로 유량이 작아서 수질관리를 비롯한 이수에 어려움을 겪고 있다. 하천에는 주변의 도시로부터 하·폐수가, 그리고 삼림이나 주변의 농경지로부터 비점오염이 유입되고 있다. 도시의 하·폐수는 하천방류 이전에 처리되고 있지만 그 방류수질

은 하천수질관리에 만족스럽지 않으며, 비점오염원은 아무런 여과없이 하천에 그대로 흘러들고 있다. 하천에 유입되는 이들 오염물은 하천의 자정작용에 의해서만 처리되고 있으며, 이에 대한 적극적인 대처가 없이는 추가적인 하천수질 개선은 어려울 것으로 예측된다.¹⁾

우리나라 하천에서 우기를 제외한 나머지 기간에는 그 유량이 작지만, 이를 기존의 하수처리공법으로 처리하기에는 그 유량이 많고 오염농도는 낮다. 우리나라의 강우형태와 하천특성은 하천수질 악화의 원인이 되기도 하지만, 연중 몇 차례의 홍수는 하천바닥을 세척하기도 하고, 상류에서의 침식과 중·하류에서의 퇴적작용은 하상에 상당한 깊이의 충적층을 발달시키기도 한다.²⁾ 유럽에서 100년 이상 사용되어온 강변여과,³⁾ 강원 및 경북지역의 복류수 취수, 그

† Corresponding author
E-mail: kimsh@yu.ac.kr
Tel: 053-810-2548

Fax: 053-810-4624

리고 포항시 유강리 취수장의 경험에서⁴⁾ 알 수 있듯이 하상의 층적층은 물리적, 화학적, 그리고 생물학적 오염정화 능력이 매우 커서 우물을 설치하여 하상여과를 실시할 경우 비교적 쉽게 하천수질을 개선할 수 있을 것으로 기대된다. 이 공법이 가지는 여러 가지 장점은 성 등에^{5,6)} 논의되어 있다.

하천수에 포함된 오염물은 크게 유기오염물과 질소, 그리고 인의 세 종류로 볼 수 있으며,⁷⁾ 하상여과에서 처리를 목표로 하는 주요 오염물은 유기오염물과 질소이다. 하상의 토양층을 통과하면서 유기오염물은 물리적, 화학적 기작에 의한 이동속도 둔화에 더하여 미생물의 생분해에 의해 영구적으로 처리된다고 볼 수 있다. 생분해 반응에는 유기오염물 즉, 전자공여체와 더불어 그 수용체도 필요하며, 하천수에 포함된 질소를 전자수용체로 사용할 경우 이들 두 오염물을 동시에 제거할 수 있을 것으로 기대된다.^{5,6,8)}

하상여과에서 전자공여체와 그 수용체를 동시에 제거하는 것뿐 아니라 이 두 오염물을 완전히 제거하는 것도 매우 중요하다고 할 것이다. 이에 영향을 주는 중요한 요소는 하천수에 포함된 전자공여체와 그 수용체의 비율이다. 이것이 적당하지 않을 경우 사용되지 않은 성분이 여과수에 잔존하게 되어 오염물이 된다. 전자공여체가 적으면 여과수에는 질산성 질소가 잔류할 것이고, 많으면 유기오염물과 망간 또는 철 등이 포함되기 때문이다.⁹⁾ 그러나, 이들 두 오염물의 비율이 적당한 경우에도 다른 가변적인 요소의 영향에 의해 전자공여체와 수용체의 소모비율은 달라질 수 있다. 이들을 동시에 그리고 완전히 제거하기 위해서는 하상여과의 여러 조건에서 이들이 제거되는 현상을 파악할 필요가 있다.

생분해 반응은 속도가 유한하기 때문에 전자공여체와 수용체의 비율 이외에도 하상에서의 체류시간이 적절하여야 이들 두 오염물이 완전히 제거될 수 있다. 하상여과에서 호기성 반응이 완료되기도 전에 하천수가 하상을 통과하여 양수된다면 여과수에는 질산성 질소가 소모되지 않고 그대로 있을 뿐 아니라 유기오염물도 잔류하게 될 것이다. 반대로 양수율이 너무 낮을 경우 호기 및 탈질반응 이외에도 망간과 철이 용출될 가능성이 커진다. 대부분의 우리나라 하상토양은 유기물 함량이 높아서¹⁰⁾ 여과수가 하상에서 오래 체류하면 상당한 유기오염물이 용출되고¹¹⁾ 이의 분해를 위해 전자수용체가 소모되기 때문이다.

하상여과에서 양수율에 크게 영향을 주는 요소는 하천수와 양수정의 수위차에 의한 하상에서의 수력경사와 하상의 투수계수이다. 투수계수는 하상의 고유 투수계수와 하상여과에 의해 발생한 미생물 성장에 의해 결정된다. 미생물 성장은 하상표면에 슬러지 케익과 하상내부에 폐색을 발달시켜 투수계수를 감소시키지만 하천수에 포함된 오염물을 제거하여 수질을 개선하는 역할도 한다.^{12,13)} 미생물 성장과 투수계수의 감소 그리고 수질개선은 서로 밀접한 관계가 있고 이들의 관계를 정량적으로 파악하는 것은 하상여과의 이해에 매우 중요하다.

본 연구에서는 미생물 성장과 투수계수 감소의 관계를 분석한 안 등의¹²⁾ 연구에 이어 하상여과를 모사하는 칼럼 실험을 통해 미생물에 의한 내부폐색 및 표층 슬러지 케익의 발달과 여과수의 수질개선과의 관계를 분석하였다. 대상 오염물은 유기오염물과 질산성 질소 및 아질산성 질소, 그리고 암모니아성 질소로 한정하였다. 또한, 칼럼에는 여러 가지의 수두차를 적용하여 통과유속을 조절하고 이의 오염물질 제거에 대한 영향을 조사함으로써 양수정 건설 및 운영에 도움이 되고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

본 연구에 사용된 장치는 수직으로 세운 직경 10 cm, 길이 160 cm, 두께 10 mm인 4조의 아크릴통과 유입수 저류조, 수위 고정조, 그리고 펌프와 이들 장치를 연결하는 튜브로 구성되었다. 아크릴통의 내부는 직경 0.2~0.4 mm, 비중 2.475의 깨끗한 유리알로 채웠으며, 이는 실험에서 토양유기물의 용출효과를 제거하고 4조의 칼럼에서 모두 균일한 초기 투수계수를 얻기 위함이었다. 유리알을 채운 칼럼의 초기 투수계수는 0.046 cm/sec로 낙동강 중류 하상의 평균적인 투수계수와 유사한 값이었고,¹⁴⁾ 간극율은 0.363이었다. 각 칼럼에는 27개의 시료채취구를 설치하였으며, 상류 10 cm에는 1 cm 간격, 다음 50 cm에는 5 cm 간격, 그리고 마지막 100 cm에는 10 cm 간격이었다. 시료채취구에는 3-방향 밸브가 부착되어 있어서 시료채취와 필요한 경우 수두측정을 동시에 수행할 수 있도록 하였다. 4조의 칼럼 상하단에 서로 다른 수두차를 적용하였고, 수두차는 각각 160, 120, 80, 그리고 40 cm이었으며, 원수가 상향으로 흐르도록 하였다. 이들 칼럼은 적용된 수두차의 순서대로 A, B, C, 그리고 D로 명명하였다. 이들 수두차로 발생하는 수력경사는 실제의 하상여과에서 예상되는 수력경사를 대부분 포괄할 수 있는 범위이다. 하상여과에서 최대 양수율은 양수정에서의 수위가 가장 낮을 때 즉, 수력경사가 약 1일 때 발생하기 때문이다. 실험장치의 개요도는 Fig. 1에 나타내었고, 보다 자세한 설명은 안 등에¹²⁾ 있다.

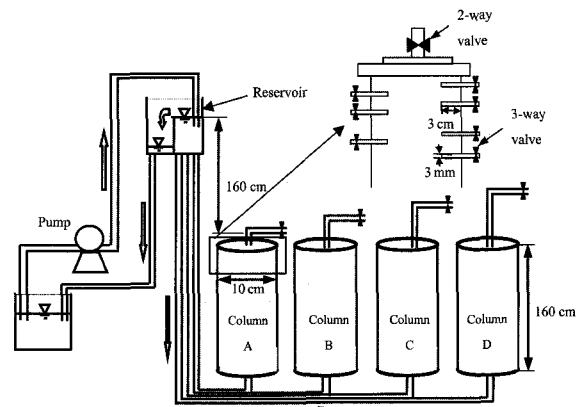


Fig. 1. Schematization of the column reactors.

실험에 사용한 하천수는 경북 경산시 진량면을 통과하여 금호강 중류에 유입하는 오목천 하류에서 얻었다. 하천수는 필요시 수시로 채취하였으며, 이를 400번 체에 여과한 후 원수로 사용하였다. 원수의 수질은 Table 1에 나타내었다. 운전 시작 후 처음 192일 동안은 칼럼의 유출수를 80 L 들이 유입수 저류조에 다시 넣어서 칼럼의 유입수로 재사용하였고, 저류조에서 COD(Chemical Oxygen Demand)가 10 mg/L 이하가 되지 않도록 원수를 보충하였다. 192일의 유출수 재순환 이후에는 칼럼 유출수를 순환시키지 않고 원수만 공급하였다. 칼럼운전시 표층의 슬러지 케익 형성으로 인하여 유량은 지속적으로 줄어들었으며, 이 슬러지 케익을 제거하면 유량이 다시 회복되었다. 이 과정을 반복하였으며, 케익을 제거할 때마다 회복된 침투유량은 조금씩 줄어들었고, 케익을 제거하여도 더 이상 회복유량이 줄어들지 않을 때까지 운전을 지속하였다. 이때를 정상상태로 보아 수질분석을 실시하였으며, 칼럼운전 시작으로부터 약 8개월이 경과했을 때였다. 여기서 정상상태는 유량이 일정한 상태가 아니고 칼럼내부에 미생물량이 더 이상 증가하지 않음을 일컫는다.¹²⁾ 이 상태에서도 슬러지 케익의 발달로 인해 칼럼의 유량은 지속적으로 감소하였으며, 슬러지 케익의 제거 직후 즉, 유량이 회복된 직후부터 유량이 다시 완전히 감소할 때까지의 약 30일 동안 유량감소에 따라 4가지의 서로 다른 유량에 대해 각 칼럼에서의 수질분석을 실시하였다. 이들 4가지 유량은 최대유량과 최저유량 사이의 유량으로 슬러지 케익 제거 후 각각 3, 10, 16, 그리고 25 일 후의 유량이었다. 수질분석은 칼럼의 각 시료채취구에서 용존산소, pH, 그리고 Eh를 측정하였으며, 물 시료를 채취한 직후 질산성 질소, 아질산성 질소, 암모니아성 질소, 그리고 COD를 측정하였다. 시료의 양은 채취구당 30 mL씩 이었고 상류의 시료채취가 하류에 영향을 주지 않도록 하기 위해서 하류로부터 채취하였다. COD는 3중으로, 그리고 질산성 질소와 아질산성 질소는 2중으로 측정하였으며,

Table 1. Characteristics of the raw water used in the experiment

COD (mg/L)	14(10.2~27.01)
NO ₃ -N(mg/L)	3.6(0.8~4.8)
NO ₂ -N(mg/L)	0.03(0.005~0.1)
NH ₃ -N(mg/L)	0.3(0.11~0.57)

암모니아성 질소는 1개의 시료만 측정하였다. 시료채취 지점은 유입구, 유출구를 포함하여 11개 지점이었다. 실험을 완료한 후 미생물량을 측정하였으며 직경 1.1 cm, 길이 9.0 cm인 원통형 색대를 이용하여 미생물이 포함된 유리알 시료를 채취하여 미생물량을 측정하였다.¹²⁾ COD는 COD_{Cr}으로 Standard Method에¹⁵⁾ 의했고, 미생물량은 550℃로 2시간 동안 소각처리하기 전과 후의 질량차로 보았다.¹⁶⁾ 질산성 질소, 아질산성 질소, 그리고 암모니아성 질소의 농도는 FIASTAR 5000 Analyzer(FOSS TECATOR, 스웨덴)로 분석하였고, 용존산소는 Multi-parameter analyzer C535(CONSORT사, 벨기에), 그리고 Eh는 692 pH/Ion meter(Metrohm사, 스위스)로 측정하였다. 모든 실험은 20±1℃로 조절된 실험실에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서의 동일한 장치와 재료, 방법 등을 적용한 실험에서 관찰된 유량, 투수계수, 그리고 미생물량 등에 관한 분석은 안 등¹²⁾에 있다. 운전시작 후 263일에 실험을 종료했고, 이때 칼럼에서의 위치에 따른 미생물량과 미생물 생장으로 인한 간극을 감소를 Fig. 2에 나타내었다. 미생물량을 생물막의 부피로 환산할 때 필요한 생물막 내부의 미생물 농도는 안 등¹²⁾에서 얻은 7,000 mg-biomass/L-total volume을 사용하였다. 미생물량의 분포는 칼럼 상하단의 수두차에 따른 차이가 없었고, 칼럼입구로부터의 거리에 따라 점차 감

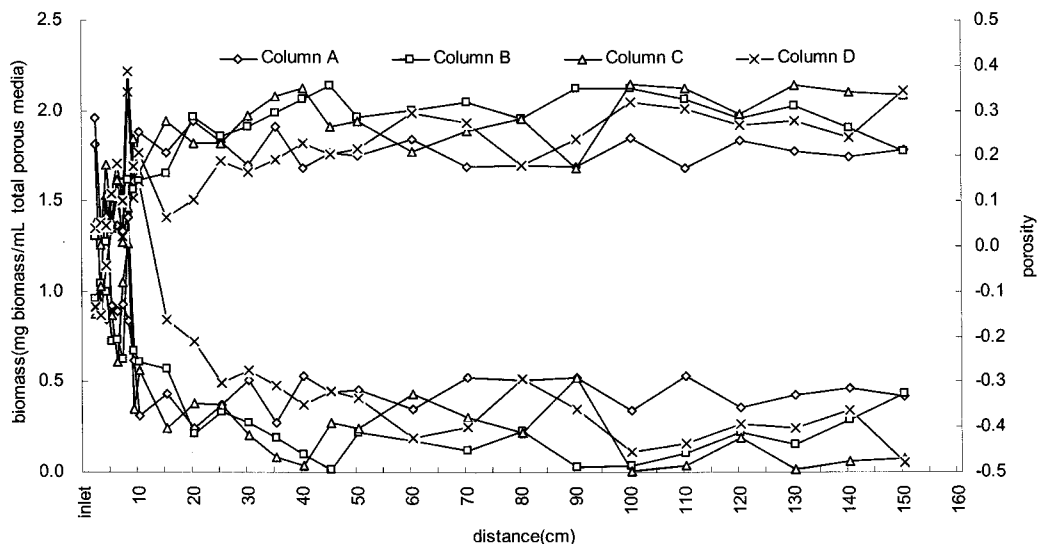


Fig. 2. Biomass and porosity distribution along the column depth in 263 days of operation.

소하였다. 간극율은 칼럼입구에서 원래 간극율의 1/11인 최소값 약 0.033에서부터 칼럼입구로부터의 거리에 따라 점차 증가하여 약 40 cm 이후에는 원래의 간극율에 수렴하는 것을 알 수 있다.

칼럼에서 미생물이 성장하면 간극율과 투수계수가 감소하여 유량이 감소하지만 미생물 성장에 오염물이 이용되므로 수질정화능력은 커진다. 칼럼의 운전시작으로부터 238 일에 마지막으로 슬러지 케익을 제거하였고, 이로부터 3일 경과 후 4조의 칼럼에 대해서 수질을 분석하였다. 이 때의 유량은 A, B, C, 그리고 D칼럼에 대해서 각각 134, 102, 91, 그리고 67 mL/min이었다. 각 칼럼의 입구로부터 거리에 따른 COD 농도분포를 Fig. 3(a)에 나타내었다. COD 제거는 칼럼입구 약 40 cm에서 가장 활발하고 여기서 멀어질수록 점차 줄어들어서 약 70 cm 깊이 이상에서는 제거속도가 매우 느려지는 것을 알 수 있다. 이는 무엇보다도 칼럼입구에서 미생물 농도가 최대이고 입구에서 멀어짐에 따라 점차 감소하기 때문일 것이다. 유량이 클수록 칼럼입구

부근에서 COD가 더 완만히 감소하며, 이는 유량증가에 따라 오염물의 공급속도는 증가하지만 미생물량은 Fig. 2에서 알 수 있듯이 모든 칼럼에서 거의 같아서 생분해로 인한 오염물의 소모속도가 일정하기 때문으로 볼 수 있다. Damkohler수의¹⁷⁾ 감소에 따라 발생하는 이와 같은 현상은 유사한 다른 실험에서도 일반적으로 발견된다.^{18,19)} 칼럼에서의 COD 제거율은 모든 칼럼에서 약 17%이었다. 원수의 COD 중 많은 부분은 생분해가 어려운 것으로 볼 수 있어서, 이를 BCOD(Biodegradable COD) 제거율로 환산하면 약 22%의 제거율이 된다. 본 연구에서 사용된 것과 동일한 하천수에 대한 연구에서^{20,21)} COD의 약 75%가 BCOD이었기 때문이다. 이와 같이 슬러지 케익이 제거되면 유량은 증가하지만 여과수의 수질이 나빠지므로 주의가 필요할 것이다.^{22,23)} 칼럼에서의 위치에 따른 용존산소, 질산성 및 아질산성 질소, 암모니아성 질소의 농도변화를 각각 Fig. 3(b), 3(c), 그리고 3(d)에 나타내었다. 유입구에서의 용존산소 농도는 약 5.5 mg/L이었고, COD의 제거와 비슷한 양상으로

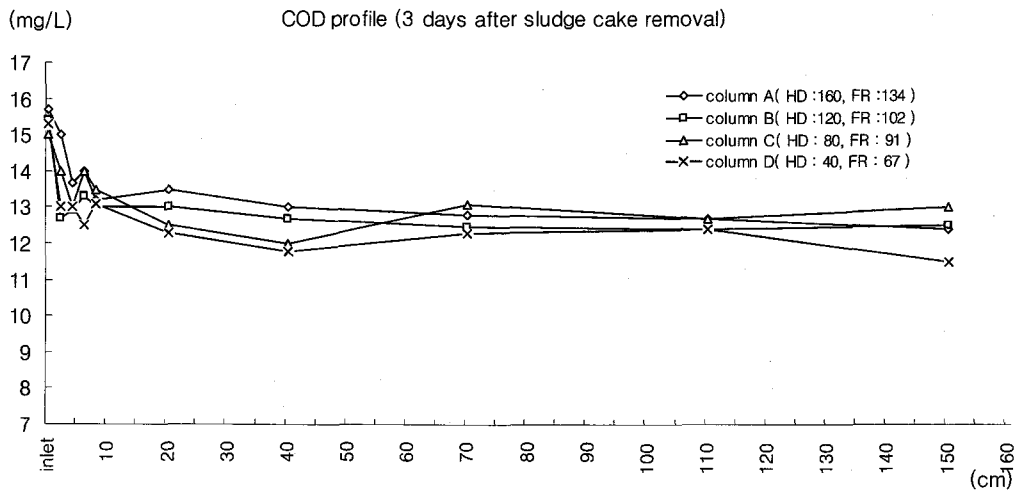


Fig. 3(a). COD concentration profiles at varying flow rates with 3 days of sludge cake formation(HD: Head Difference, cm; FR: Flow Rate, mL/min).

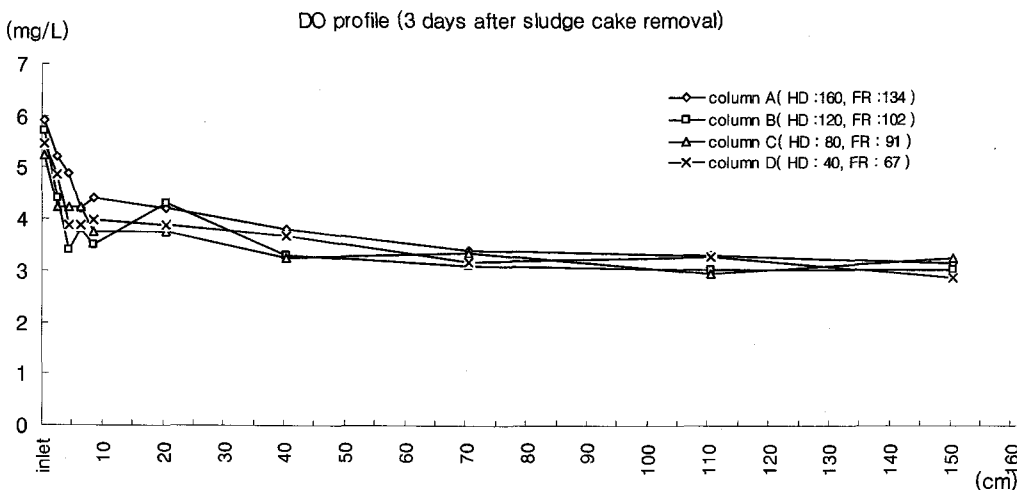


Fig. 3(b). Dissolved Oxygen concentration profile at varying flow rates with 3 days of sludge cake formation(HD: Head Difference, cm; FR: Flow Rate, mL/min).

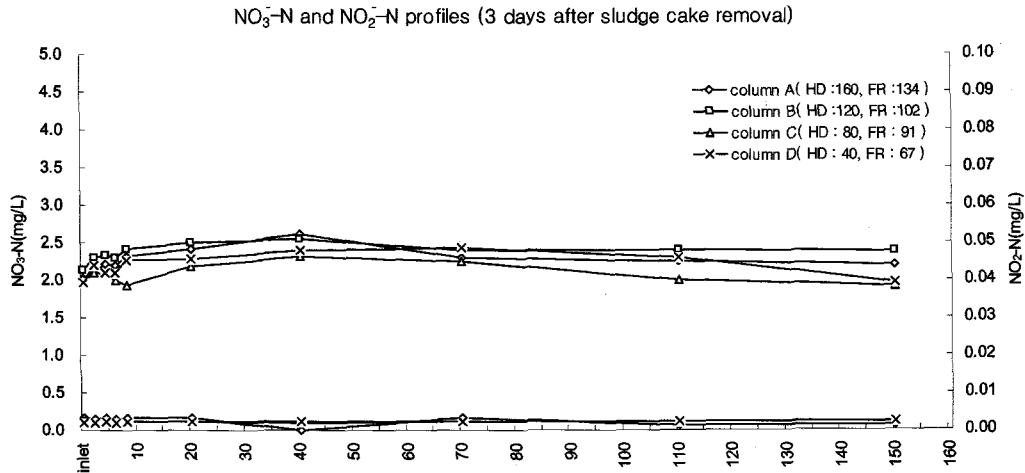


Fig. 3(c). NO_3^- -N and NO_2^- -N concentration profiles at varying flow rates with 3 days of sludge cake formation(HD: Head Difference, cm; FR: Flow Rate, mL/min).

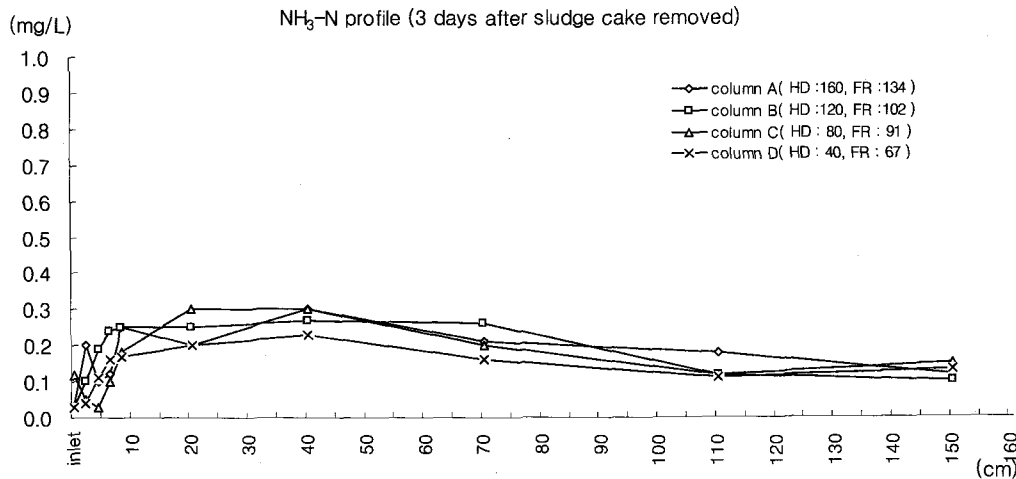


Fig. 3(d). NH_4^+ -N concentration profile at varying flow rates with 3 days of sludge cake formation(HD: Head Difference, cm; FR: Flow Rate, mL/min).

감소하였다. 칼럼입구에서는 COD와 용존산소 농도가 칼럼에 따라 다소 차이를 보였으나 약 40 cm 이상의 깊이에서는 칼럼에 따른 차이가 없었다. 다른 수질지표들은 전체 구간에서 칼럼에 따른 뚜렷한 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 질산성 질소와 암모니아성 질소는 칼럼입구 약 40 cm까지는 약간 증가하였다. 이는 유기물의 분해로 인한 암모니아성 질소의 생성과 높은 용존산소 농도로 인한 활발한 질산화를 나타낸 것으로 볼 수 있으며, 암모니아성 질소의 생성이 질산화로 인한 소모보다 더 빠름도 알 수 있다. 표층부근에서의 활발한 질산화는 하상여과나 강변여과에 상당한 도움이 되며, 이는 질산성 질소의 토양 중 이동 속도가 암모니아성 질소보다 훨씬 빨라서²⁴⁾ 산소가 고갈된 깊은 층까지 도달하여 땅간이나 철의 용출없이 유기물의 산화를 가능케 하기 때문이다. 70 cm보다 깊은 곳에서도 암모니아성 질소의 농도가 감소하였으며, 이는 칼럼 전체에 용존산소 농도가 상당히 높게 유지되어 칼럼의 전체구간에서 지속적인 질산화가 이루어짐을 뜻한다. 40 cm보다 깊은

곳에서는 질산성 질소의 농도가 약간 감소하며 이는 전체적으로 호기성 환경임에도 불구하고 국부적으로 탈질환경이 형성되기 때문으로 판단된다. 아질산성 질소의 농도는 칼럼 전체에서 0.002~0.003 mg/L이었으며, 입구에서 약 40 cm 부근에서는 거의 0이었다. 칼럼입구 부근에서는 질산화 과정에서,²⁵⁾ 그리고 깊은 곳에서는 질산화와 부분적인 탈질에 의해서 아질산성 질소가 발생했음을 알 수 있다.²⁶⁾ Eh는 칼럼입구 부근의 약 280 mV에서 출구 부근의 약 220 mV까지 감소하였다.

칼럼실험에서 표층의 슬러지 케익을 제거하면 유량이 증가하였다가 슬러지 케익이 다시 형성되면서 유량의 감소가 시작되었다.¹²⁾ 슬러지 케익을 제거하고 10일 경과 후 각 칼럼에서의 위치에 따른 COD 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 이때는 슬러지 케익이 상당히 형성되어 유량은 A, B, C, 그리고 D칼럼에 대해서 각각 87, 63, 52, 그리고 46 mL/min이었다. COD 농도변화는 3일 경과시의 COD 농도 분포인 Fig. 3(a)와 전체적으로 비슷하였으나, 칼럼출구에서

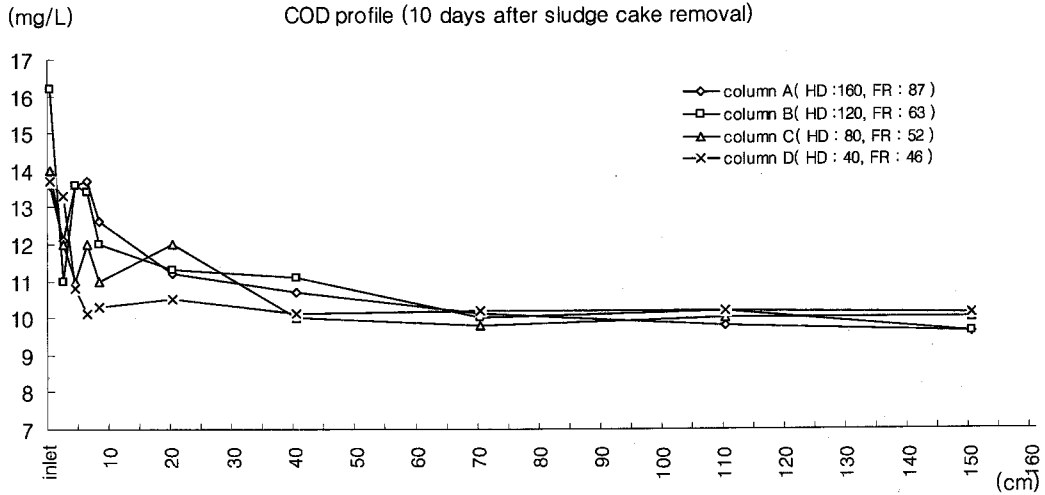


Fig. 4. COD concentration profiles at varying flow rates with 10 days of sludge cake formation(HD: Head Difference, cm; FR: Flow Rate, mL/min).

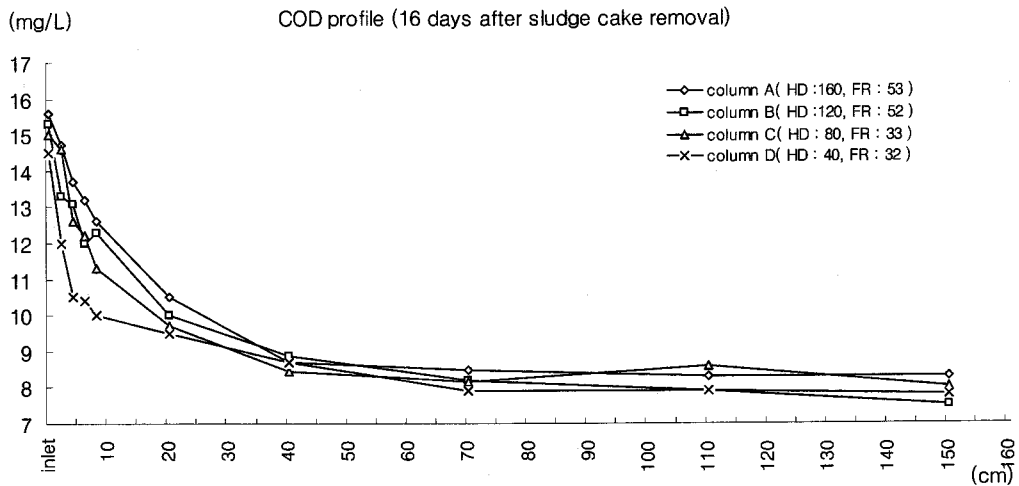


Fig. 5. COD concentration profiles at varying flow rates with 16 days of sludge cake formation(HD: Head Difference, cm; FR: Flow Rate, mL/min).

의 농도는 약 9.5 mg/L로 상당히 많이 감소한 것을 알 수 있다. 칼럼통과에 의한 COD 제거율은 약 37%이고 BCOD 제거율은 약 50%에 이른다. 그림으로 나타내지 않았지만 용존산소는 약 70 cm 깊이에서 고갈되어 그 농도가 0에 이르렀고, 이때의 여과수의 칼럼체류시간을 Fig. 2의 간극을 분포로부터 계산할 수 있으며 44분이었다. 이 시간은 탈질을 기대할 수 있는 최소 체류시간이라고 볼 수 있으나, 유기오염물의 체류시간은 흡착으로 인해 수리학적 체류시간보다 더 클 것으로 판단되므로 이의 적용에 주의가 필요할 것이다. 다른 측정항목들은 3일 경과시의 결과와 유사하였다.

슬러지 케익을 제거하고 16일 경과 후 각 칼럼에서의 위치에 따른 COD 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 이때는 슬러지 케익의 발달로 유량은 A, B, C, 그리고 D칼럼에 대해서 각각 53, 52, 33, 그리고 32 mL/min이었다. COD 농도변화는 전체적으로 Fig. 3(a)나 Fig. 4와 비슷하였으며, 유입구 부근

의 약 10 cm 구간에서의 COD 농도 감소폭은 슬러지 케익이 발달함에 따라 점차 증가함을 알 수 있다. 이는 케익이 발달함에 따라 케익에서의 COD 제거가 점차 활발해짐을 나타낸다. 이러한 결과는 강변여과시 주로 하상의 표층에서 많은 양의 오염물과 병원성 미생물이 제거된다는^{22,23,27)} 연구결과와도 일치된다. 칼럼의 출구에서 COD 농도는 약 7.5 mg/L로 감소하여 칼럼통과에 의해 COD 제거율은 약 50%로, 그리고 BCOD 제거율은 67%로 증가함을 알 수 있다. 그림으로 나타내지는 않았지만 용존산소는 칼럼에 따라 20~40 cm에서 고갈되었고, 암모니아성 질소와 질산성 질소의 농도는 칼럼입구에서는 약간 증가하다가 다시 감소하였으며 최대농도 발생깊이는 슬러지 케익이 발달할수록 점차 얕아짐을 알 수 있었다.

슬러지 케익 제거 후 25일 경과시에 각 수질항목을 측정하였다. 이때의 유량은 칼럼 A, B, C, 그리고 D에 대해서 각각 26, 26, 21, 그리고 20 mL/min이었고, 이는 슬러지 케

익이 충분히 발달하여 더 이상 감소하지 않는 최소유량¹²⁾의 약 3배였다. 그러나, 이때의 수질은 최소유량시의 수질과 차이가 거의 없었다. 칼럼 입구로부터 거리에 따른 COD 농도분포는 Fig. 6(a)에 나타내었다. 앞의 16일 경과시의 경우와 유사한 농도분포를 보임을 알 수 있고, 칼럼출구에서의 COD 농도도 더 이상 감소하지 않음을 알 수 있다. 모든 실험에서 칼럼입구 부근에서는 칼럼의 유량에 따라 COD 농도곡선이 약간의 차이를 보이지만 일정 깊이부터는 COD 농도곡선들이 서로 수렴하는 것을 알 수 있었다. 이 수렴 위치는 슬러지 케익이 발달과 상관없이 항상 약 40 cm이었다. 용존산소의 농도는 Fig. (6)b에 나타내었고, 칼럼에 따라 그 입구로부터 20~40 cm에서 0으로 감소함을 알 수 있었다. 용존산소 농도는 주로 COD 농도감소에 따라 변화했으며, 16일까지는 슬러지 케익의 발달에 따라 그 농도가 급감하였으나 그 이후에는 거의 변동이 없었다. 질산성 및 아질산성 질소의 농도분포는 Fig. 6(c)에 나타내었고, Fig. 3(c)와는 약간 다름을 알 수 있다. 질산성 질소의 최대농도

가 발생하는 깊이는 약 20 cm로 이동하여 칼럼입구에 더 접근하였고, 이는 슬러지 케익의 발달로 인한 유속감소에 기인한다고 볼 수 있다. 용존산소와 질산성 질소 및 아질산성 질소의 농도곡선으로부터 약 20 cm 깊이에서부터 탈질이 발생함을 알 수 있으나,²⁶⁾ 생분해 가능한 유기오염물이 충분하지 않아 탈질반응이 활발하지 않음을 알 수 있다. 탈질에 의한 질소제거가 활발하지 않은 것은 전자공여체의 부족뿐 아니라 질산성 질소의 전자수용능력이 산소에 비해 크기 때문이기도 하다. 탈질반응에서 질산성 질소가 질소가스까지 환원된다면 질산성 질소 1 mg은 산소 2.86 mg에 해당하는 전자수용능력을 가지기 때문이다.²⁵⁾ Eh는 칼럼입구 부근의 약 240 mV에서 출구 부근의 약 185 mV까지 감소하였다. pH는 모든 칼럼실험에서 7.8~8.5의 분포를 보였다. 이상의 결과로부터 하상깊이가 3~4 m 정도의 얇은 곳이 많은 우리나라의 하천²⁾에 대해서 하상여과를 통한 유기오염물과 질소의 제거 가능성을 판단해 볼 수 있다. 수평집수관과 기반암 사이의 이격거리와 수평집수관 자체의 유

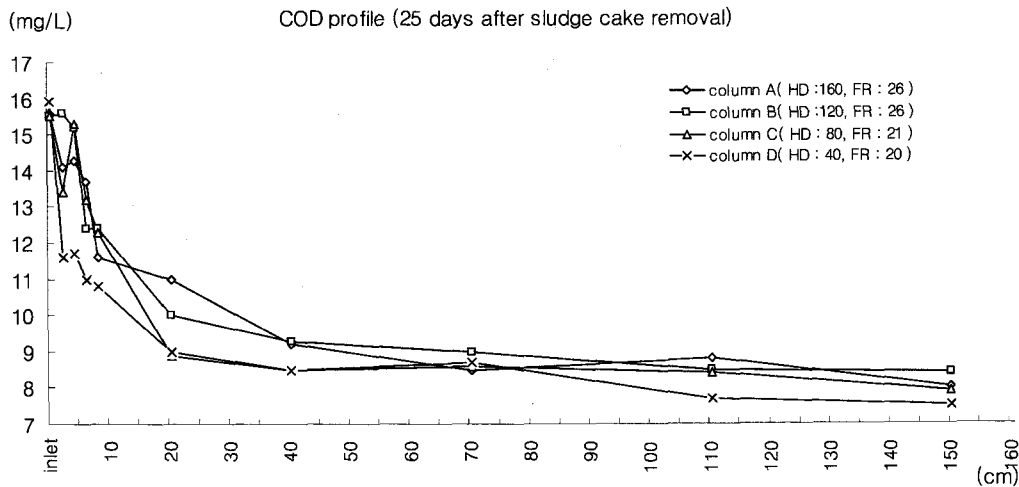


Fig. 6(a). COD concentration profiles at varying flow rates with 25 days of sludge cake formation(HD: Head Difference, cm; FR: Flow Rate, mL/min).

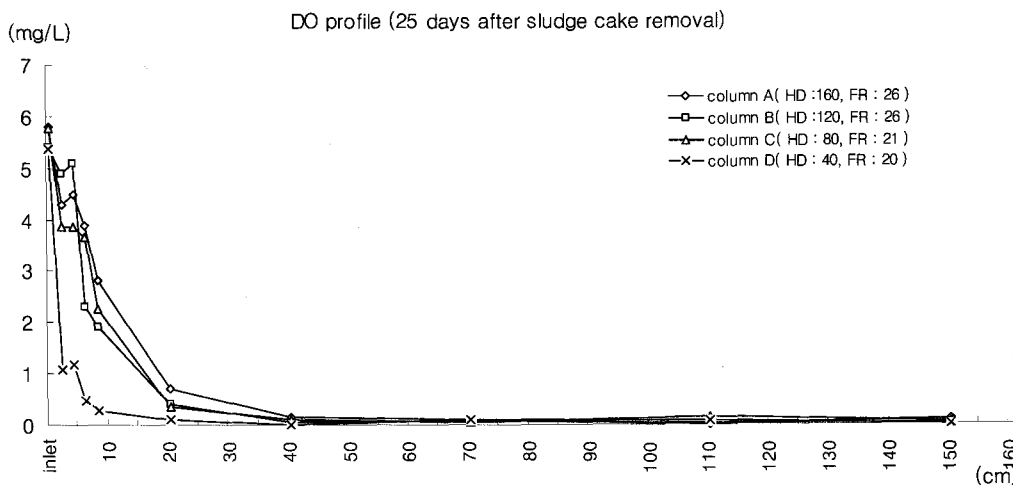


Fig. 6(b). Dissolved Oxygen concentration profile at varying flow rates with 25 days of sludge cake formation(HD: Head Difference, cm; FR: Flow Rate, mL/min).

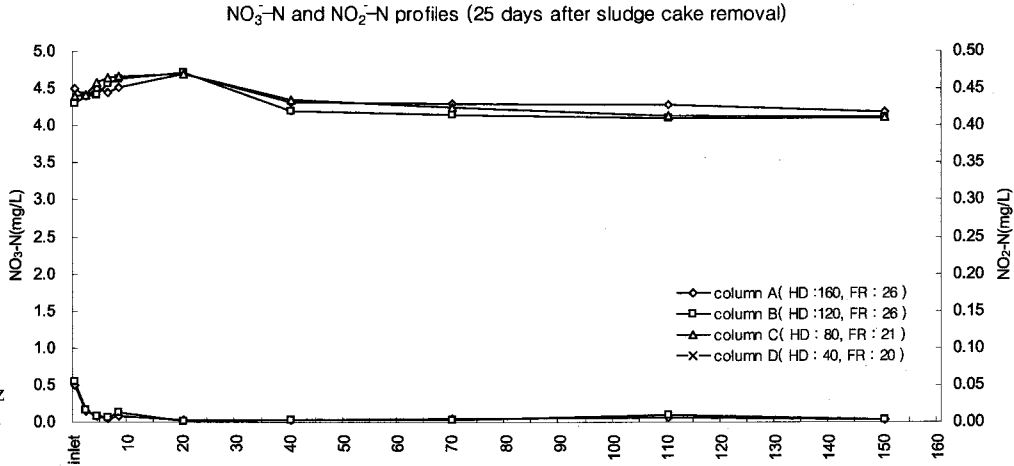


Fig. 6(c). NO_3^- -N and NO_2^- -N concentration profiles at varying flow rates with 25 days of sludge cake formation(HD: Head Difference, cm; FR: Flow Rate, mL/min).

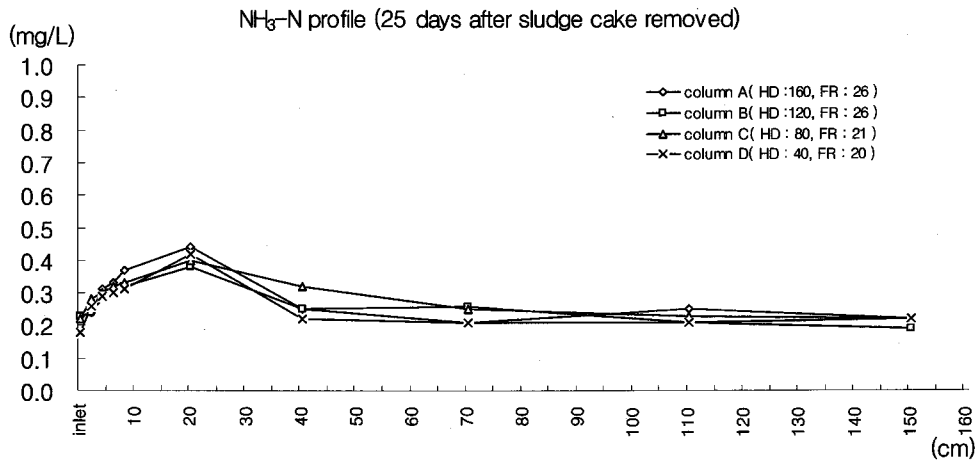


Fig. 6(d). NH_4^+ -N concentration profile at varying flow rates with 25 days of sludge cake formation(HD: Head Difference, cm; FR: Flow Rate, mL/min).

효직경을 제외하면 하상표면과 수평집수관 사이의 여과거리 즉, 하상의 유효깊이가 2 m 정도에 불과할 경우가 있을 것으로 예상된다. 본 연구의 결과 2 m의 여과깊이에서는 수질조절을 위한 유량조절이 큰 의미가 없으며, 하상표면에 슬러지 케익이 발달한 경우 어떠한 유량(혹은 양수정에서의 수위)에서도 충분한 BCOD제거를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 강변여과에서 대부분의 생분해는 하상 1~2 m에서 일어난다는 보고나²⁸⁾ 대부분의 생분해는 하상 2.5 m에서 완료된다는 보고를²⁹⁾ 고려하면 보통의 우리나라 하천수에 포함된 유기오염물을 하상여과를 통해 제거하는데 필요한 최소 하상깊이는 약 2 m 정도임을 알 수 있다. 이는 수학적 모델링과 칼럼 및 모래통 실험을 병행한 성 등의^{5,6)} 연구에서도 확인된다. 우리나라의 하천수질은 대부분 본 연구에 시료로 사용된 수질보다 훨씬 더 좋으므로⁷⁾ BCOD제거에 깊은 층의 하상이 필요하지는 않을 것으로 판단된다. 그러나, 홍수 등으로 인해 하상표면의 슬러지 케익이 제거된 후에는 하천수질에 따라 상당한 농도의 유기오염물이 여과수에 포함될 수 있음에 주의해야 할 것이다. 또한, 하

상표층에 슬러지 케익이 형성되면 2 m 이하의 하상깊이에서도 양수유량에 상관없이 용존산소가 고갈되어 탈질환경이 형성될 것으로 판단된다. 그러나, 2 m 이하의 깊이에서는 탈질에 의한 질소의 제거는 활발하지 않을 것으로 예측된다. 다만, 하상의 깊이가 충분하여 체류시간이 5일 이상이 되는 경우에는 토양입자로부터의 유기물 용출과 이를 이용한 탈질도 상당할 것으로 계산된 바 있다.¹¹⁾ 하상에 슬러지 케익이 발달한 경우에 양수율을 너무 높이면 하상에 불포화대가 형성되어 여과수 생산이 크게 감소할 수 있으므로 주의가 필요할 것이다.³⁰⁾

우리나라의 하상은 그 구성입자의 직경이 유럽이나 미국에 비해 작아서 투수계수가 작고 비표면적은 더 큰 특징이 있다.²³⁾ 하상여과에서 오염물의 제거반응은 토양표면에서 발생하므로 우리나라 하상의 반응성이 더 크고 따라서 더 얇은 하상두께로도 양질의 여과수 생산이 가능함을 알 수 있다. 유효깊이의 부족으로 제거되지 않은 오염물은 하천을 따라 다수의 양수정을 설치하여 이를 반복적으로 하상에 유입시킴으로써 완전한 제거를 도모할 수 있을 것이다.

4. 결론

하상여과에서 유기오염물을 제거하는데 중요한 요소는 슬러지 케익의 발달입을 알 수 있었다. 본 연구의 조건에서 슬러지 케익이 거의 없는 경우 COD 제거는 17%에 불과했으나 케익이 완전히 발달한 경우에는 50%로 증가하였고, 이를 BCOD 제거율로 바꾸면 22%에서 67%로 증가하는 것이다. BCOD가 활발히 제거되는 구간은 슬러지 케익 층과 약 40 cm 깊이까지의 하상층이었다. 수두차가 커서 유량이 커지면 칼럼입구에서 COD가 완만하게 제거되었으나 일정깊이(약 40 cm) 이상에서는 COD 농도곡선이 유량에 따라 다르지 않고 모두 일정하게 수렴함을 알 수 있었다. 10일 동안의 슬러지 케익 발달 이후에는 70 cm 깊이에서 용존산소가 고갈되어 탈질이 가능하였으며, 케익이 더욱 발달함에 따라 용존산소의 고갈깊이가 20~40 cm까지 단축되었다. 본 연구의 결과로부터 우리나라에 널리 분포되어 있는 3 m 깊이 정도의 하상에서 하상여과를 통해 유기오염물은 충분히 제거할 수 있으나 탈질에 의한 질소제거는 제한적임을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국과학기술연구원의 금수강산21 연구사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 권순국, "우리나라 비점원 오염 관리의 문제점과 개선 방안," *대한환경공학회지*, **22**(11), 1497~1510(1998).
2. 한국수자원공사, 전국 총적층 지하수 조사 보고서, 한국수자원공사, pp. 6~45(1996).
3. Tufenkji, N., Ryan, J. N., and Elimelech, M., "Bank filtration, a simple technology may inexpensively clean up poor-quality raw surface water," *Environ. Sci. Technol.*, **36**(21), 423~428(2002).
4. 김승현, 정장식, "하상여과를 이용한 금호강 수질개선 연구," *환경연구(영남대학교 환경문제연구소 논문집)*, **18**(2), 73~86(1999).
5. 성치돈, 안규홍, 이용훈, 공인철, 김승현, "하상여과를 이용한 하천수질 개선 연구-모델전개 및 모델매개변수 결정," *대한환경공학회지*, **25**(4), 486~494(2003a).
6. 성치돈, 안규홍, 이용훈, 공인철, 김승현, "하상여과를 이용한 하천수질 개선 연구-모델해석 및 검증, 민감도 분석," *대한환경공학회지*, **25**(5), 580~587(2003b).
7. 포항산업과학연구원, 낙동강 수질환경 개선계획수립을 위한 기초조사 연구, 포항산업과학연구원, pp. 2~8(1998).
8. Sontheimer, H., "Experience with riverbank filtration along the Rhine river," *Management and Operations, J.*

- AWWA*, **72**(7), 386~390,(1980).
9. Laszlo, F., Homonnay, Z., and Zimonyi, M., "Impacts of river training on the quality of bank-filtered waters," *Water Sci. Technol.*, **22**(5), 167~172(1990).
10. 김승현, 권오익, 공인철, 김익재, 이철희, 박영규, "강둑 여과지에서 지하수 함양율과 질소비료에 의한 지하수 오염량 산정 연구," *대한환경공학회지*, **20**(12), 1689~1703(1998).
11. 안규홍, 문형준, 김승현, "강변/하상여과시 토양에서의 유기물 용출에 관한 동역학적 해석," *대한환경공학회지*, 제출 중(2005).
12. 안규홍, 손동빈, 김승현, "하상여과 모형을 이용한 투수 계수 감소현상 연구," *대한토목공학회지*, 제출 중(2005).
13. Malzer, H. J., Schubert, J., Gimbel, R., and Ray, C., "Effectiveness of Riverbank Filtration Sites to Mitigate Shock Loads," *Riverbank Filtration, Improving Source-Water Quality*, Ray, C., Melin, G., and Linsky R.B. (Eds.), Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 229~259(2002).
14. 김승현, 박영규, 공종복, "이룡지구 강둑여과에서 지하수의 흐름 연구-모델 매개변수의 결정 및 자연지하수 흐름도 해석," *대한환경공학회지*, **21**(10), 1825~1836(1999).
15. APHA (American Public Health Association), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed., Washington, D.C., 5-13~5-18(1998).
16. Schulte, E. E., Kaufmann, C., and Peter, J. B., "The influence of sample size and heating time on soil weight loss-on-ignition," *Commun. In Soil Sci. Plant Anal.*, **22**(1&2), 159~168(1991).
17. Domenico, P. A. and Schwartz, F. W., *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 476(1990).
18. Kim, S. H. and Corapcioglu, M. Y., "A kinetic approach to modeling mobile bacteria facilitated groundwater contaminant transport," *Water Resour. Res.*, **32**, 321~331(1996).
19. 김승현, 정종배, 하현수, Prasher, O. S., "불포화 사질토양을 이용한 도시하수의3차처리," *한국환경농학회지*, **22**(2), 111~117(2003).
20. Kim, S-H, Chung, J-J, Jeong, B-R, Lee, Y-D, and Prasher, S. O., "Electron affinity coefficients of nitrogen oxides and biodegradation kinetics in denitrification of contaminated steam water," *J. Environ. Qual.*, **32**, 1474~1480(2003).
21. Chung, J-B, Kim, S-H, Jeong, B-R, and Lee, Y-D, "Removal of organic matter and nitrogen from river water in a model floodplain," *J. Environ. Qual.*, **33**,

- 1017~1023(2004).
22. Hunt, H., "Operation and maintenance considerations," *Riverbank Filtration, Improving Source-Water Quality*, Ray, C., Melin, G., and Linsky R. B.(Eds.), Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 61~70 (2002).
 23. Grischek, T., Schoenheinz, D., Ray, C., "Siting and design issues for riverbank filtration schemes," *Riverbank Filtration, Improving Source-Water Quality*, Ray, C., Melin, G., and Linsky R.B.(Eds.), Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 291~302(2002).
 24. Doussan, C., Poitevin, G., Ledoux, E., and Detay, M., "Riverbank filtration: Modeling of the changes in water chemistry with emphasis on nitrogen species," *J. Contam. Hydrol.*, **25**, 129~156(1997).
 25. Metcalf & Eddy, Inc., *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*, McGraw-Hill, New York, pp. 711~712(1979).
 26. Cho, C. M., Burton, D. L., and Chang, C., "Kinetic formulation of oxygen consumption and denitrification process in soil," *Can. J. Soil Sci.*, **77**, 253~260(1997).
 27. Baveye, P., Berger, P., Schijven, J., and Grischek, T., "Research needs to improve the understanding of riverbank filtration for pathogenic microorganism removal," *Riverbank Filtration, Improving Source-Water Quality*, Ray, C., Melin, G., and Linsky R. B. (Eds.), Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 311~320(2002).
 28. Schwartzbach, R. P., Giger, W., Hoehm, E., and Schneider, J. K., "Behavior of organic compounds during infiltration of river water to groundwater. Field studies," *Environ. Sci. Technol.*, **17**(8), 472~479(1983).
 29. Verstraeten, I. M., Heberer, T., and Scheytt, T., "Occurrence, characteristics, transport, and fate of pesticides, pharmaceuticals, industrial products, and personal care products at riverbank filtration sites," *Riverbank Filtration, Improving Source-Water Quality*, Ray, C., Melin, G., and Linsky R. B. (Eds.), Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 175~228(2002).
 30. Radke, B. and Huper, G., "Riverbank filtration with horizontal collector wells," *23rd International Symposium on Environmental Issues, at Yeungnam University*, Kyongsan, Korea, pp. 23~34(2001).