

## 분산지역의 생활하수 처리를 위한 고친수성 Biofilter 개발

권태영 · 윤춘경<sup>\*†</sup> · 정광욱<sup>\*</sup>

(주)자연과환경

<sup>\*</sup>건국대학교 환경과학과

## Development of high-hydrophilic Biofilter for Decentralized Regions and Rural Communities

Tae-Young Kwon · Chun-Gyeong Yoon<sup>\*†</sup> · Jung Kwang-Wook<sup>\*</sup>

Nature and Environment Co., Ltd.

<sup>\*</sup>Department of Environmental science, Konkuk University

(Received 26 April 2006, Accepted 26 May 2006)

### Abstract

The feasibility of the high-hydrophilic biofilter was examined for application in rural wastewater treatment in Korea. The intermittent trickling biofilter was developed for wastewater treatment of media and examined instantaneous wetting water and immersional wetting water. Melamin foam absorbed 120 times its weight in water and maintained wetting status than other materials. These characteristics are improvement for application in rural areas showing large variance of amount of influent. The biofilter process was effective in treating organic pollutants; mean removal efficiencies of BOD<sub>5</sub> and TSS were above 80%. The average SS concentrations of effluent was showed below 10 mg L<sup>-1</sup> and meet guidelines in special regions, however, the average concentration of BOD<sub>5</sub> was about 20 mg L<sup>-1</sup>. The removals of T-N and T-P were relatively less effective and removal efficiencies were below 40%. It might meet the guidelines for T-P because of low levels of influent T-P concentration. However, the T-N concentration were too high and further treatment is required. The effluent concentration of NH<sub>4</sub>-N showed a significant reduction rate about 43.8%, but part of NH<sub>4</sub>-N was transformed to NO<sub>2</sub>-N and NO<sub>3</sub>-N inside the biofilter through nitrification process. The effluent concentration of org-P was removed about 78.8% of influent concentration by filtration. Considering stable performance and effective removal of pollutant in wastewater, low maintenance, and cost-effectiveness, the hydrophilic biofilter system was thought to be an effective and feasible alternative for decentralized rural areas.

**keywords** : Decentralized regions, High-hydrophilic biofilter, Melamin-foam media, Rural communities

### 1. 서론

하수 및 오수·분뇨처리는 국민의 건강보호에 필요한 공중위생 및 생활환경의 개선뿐만 아니라 공공수역의 수질환경기준을 유지하기 위한 중요한 국가의 정책목표이다. 인구가 밀집되어 있는 대도시지역에서는 대규모 하수종말 처리 시설을 설치하고 있으나 인구가 분산되어 있는 지역이나 농촌마을에서는 소규모 현장처리 시스템의 도입이 유리할 수 있다. 하지만 소규모 분산처리에 적합한 하수 및 오수 처리기술은 현장여건에 맞는 기술의 개발이 다양하게 연구되고 있지 못한 실정이다.

이상적인 분산처리 시스템의 조건에는 여러 가지가 있으나 첫째, 유지관리가 간편하고 전문 인력의 관리가 필요 없어서 무인운전이나 순회관리방식만으로도 안정된 운전이 가능해야한다. 둘째, 대부분의 분산지역 및 농촌마을들은

유량 및 유입농도의 변화가 크기 때문에 이에 대하여 안정적인 처리효율을 보장할 수 있어야 한다. 셋째, 대도시의 종말처리시설과는 달리 설치장소가 거주지와 멀리 떨어져 있지 않으므로 소음, 악취 등 주변경관과 주민들을 특히 고려하여야 한다. 하지만 현재까지 보급되는 처리시설의 경우 상기와 같은 여러 가지 여건을 충분히 고려하여 분산처리 시스템으로 개발된 기술은 극소수에 불과하며, 대부분 중대규모 하수처리장에 사용되던 기술들을 규모를 축소하거나 일부공정을 생략한 기술들이 대부분이므로 현장에서 많은 운전상의 어려움을 보이고 있다. 또한 이러한 처리기술들은 많은 기술들이 생물학적인 처리원리에 근거한 기술이기 때문에 잦은 슬러지처리와 많은 기계장비의 사용으로 유지관리에 큰 어려움이 있다. 그러므로 최근에는 소규모 처리시설들의 운영 및 유지관리상의 어려움과 처리효율의 불확실성 등으로 하수관거 설치사업들을 통하여 하수종말 처리시설 보급에 많은 예산과 노력을 투자하고 있는 실정이다. 하지만 지형여건이 열악한 분산지역의 경우에는 관거

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
chunyoan@konkuk.ac.kr

사업을 통한 하수의 차집처리는 경제성이 현저히 떨어진다. 또한 합류식 관거 뿐만 아니라 분류식 관거도 설치 공사 중 부실과 오접, 그리고 노후로 인한 파손 등의 문제로 하수뿐만 아니라 강우시의 우수, 지하수, 농업용수 등의 유입으로 인하여 하천 상류부의 건천화를 유발하고 있으며, 하수종말처리장 운전에도 악영향을 준다고 보고되었다(이 등, 2003). 이러한 관점에서 볼 때 분산지역 및 농촌마을의 경우 하수관거 설치 길이가 긴 중·대규모의 처리장보다는 그 지역 특성에 맞고 유지관리가 편한 소규모 처리기술을 여러 개 보급하는 현장처리(On-site treatment) 방식을 선택하는 것이 유리할 수 있다.

Biofilter를 이용하는 하수처리기술은 Packed-Bed Filter, Trickling Biofilter, BAF(Biological Aerated Filter)등으로 불리기도 하며 filter media에 미생물을 접촉시켜서 하수를 처리하는 방식으로 하수의 공급에 따라 상향류식, 하향류식, 살수식 등으로 나눌 수 있다. 이중 살수여상(trickling filter)은 1893년 영국에 있는 Birmingham에 최초로 건설되었다. 이 때 여재로 토양을 사용하였으며, 그 후 미국에서는 모래를 사용하여 하수처리를 시도하였다. 그러나 토양이나 모래는 여재층이 쉽게 막히는 결점이 있어 이를 보완하기 위하여 살수여상 층 내에 돌이나 쇠석을 넣고 하수를 간헐적으로 유입시켜서 처리하는 간헐식 살수여상(intermittent trickling filter)이 개발되었다. 그 이후 접촉여재를 다양하게 연구하여 판, 목재, 석면판 등을 이용한 연구가 이루어졌으나, 처리효율은 크게 향상되지 못하였으며, 잉여슬러지 발생량이 감소하고 충격부하에 강하며 슬러지 팽화문제(bulking)를 해결할 수 있는 기술을 개발하였다(주, 1999).

캐나다 Waterloo 대학은 주목할 만한 처리기술을 개발하였는데, Waterloo Biofilter System라는 polyurethane 합성수지 재질의 여재를 도입하여 실내실험 및 현장실험을 한 결과 실내실험에서는 BOD<sub>5</sub> 98%, SS 94%의 높은 처리효율을 보였으며, 현장실험에서도 BOD<sub>5</sub> 90%이상, SS 95%이상의 처리효율을 나타냈다(Jowett et al., 1995). 또 다른 진보적인 연구 결과는 칼럼 중간에 공간을 두어 3개의 층으로 구성된 장치에 접촉여재로 textile과 non-woven fabric을 충전하여 실험하여 유출수 BOD<sub>5</sub> 농도가 10 mg L<sup>-1</sup> 이하의 높은 처리효율을 보이기도 하였다(Roy et al., 1998).

주(1999)는 Waterloo Biofilter를 국산화하기 위해 불석, 수세미, 흡수성 biofilter, 부직포, 숯 등 5가지 재료를 가지고 기초실험을 하였는데, 흡수성 biofilter는 유기물질 처리에는 적합하지만, 질소·인 제거효율이 저조하였다. 방(2001)은 같은 시스템에서 흡수성 biofilter와 zeolite를 이용하여 질소처리 효율을 높이는 연구를 수행하였다. 흡수성 biofilter를 이용한 장기적인 운전 실험결과 설치비용이 저렴하며 유지관리가 용이하고 유출수 BOD<sub>5</sub> 및 SS농도를 10 mg L<sup>-1</sup> 이하로 유지 하였지만, T-N과 T-P의 제거에 있어서는 한계가 있음을 보고한 바 있다(Kwun et al., 2000). 본 연구에서는 분산지역의 하수처리에 최적화하기 위하여 고친수성 filter media를 이용하여 '고친수성 biofilter 공법'을 개발하고자 연구를 수행하였으며, 본고에 2년간의 시험연구 결과

를 소개하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 고친수성 여재 선정을 위한 실험

Biofilter 공법은 처리공정이 단순하여 간편하게 유기물질을 처리할 수 있는 것으로 알려져 있다. 공정의 구성은 하수를 filter media에 공급하고 이 과정 중에 산소를 함께 접촉시키면서 여재에 부착된 미생물에 의하여 유기물이 제거되는 간단한 공정구성으로 이루어진다. 그러므로 filter media의 특성 및 역할이 매우 중요하다. 실험 재료의 선정 기준 및 조건으로는 ① 물을 잘 흡수할 수 있는 친수성 재질, ② 비표면적을 극대화할 수 있는 다공성 형태, ③ 연속 공급의 존재, ④ 형태의 가공이 용이한 재질, 그리고 ⑤ 고유한 재질의 특성을 장기간 유지할 수 있는 특성을 갖고 있는 재료를 선정하였다. 따라서 본 연구에서는 선행된 연구결과들을 바탕으로 충분한 여과능력을 갖고 비표면적이 많아 미생물의 부착생장이 용이하고, 또한 간헐식 살수 여상과 같은 biofilter 공법에서 하수의 공급시 벽면을 타고 흐르거나 수로화 현상을 방지할 수 있도록 수분을 잘 흡수하고 유지할 수 있는 melamin, PVA(poly vinyl alcohol), pulp, 그리고 rock wool 재질의 재료들을 선정하여 biofilter 공정에 이용할 재료에 대해 평가하였다.

#### 2.1.1. 여재의 흡수능 비교 실험

하수 공급시 분사나 살수가 있을 때 여재의 하수 흡수량과 순간흡수량은 하수의 체류시간과 처리효율, 그리고 편향 흐름과 뒀에 큰 영향을 주므로, 여재의 건조중량, 순간흡수중량, 침적흡수중량을 조사하였다. 사용된 각각의 여재는 모두 다공질의 특성을 가지는 것을 선정하였으며, 가로, 세로, 높이의 길이가 4 cm인 정육면체 모양으로 가공하여 사용하였다. 순간흡수중량은 각각의 여재를 1초간 물에 접촉 후 꺼내어 중력에 의해 소실되어진 물의 양을 배제한 후 무게를 측정하였다. 침적흡수중량은 여재를 물에 충분히 접촉시켜서 꺼낸 후 중력에 의해 소실되어진 물의 양을 배제한 후 무게를 측정하였다. 또한 각각의 여재의 무게를 고려한 상대적인 평가를 위하여 건조중량 대비 흡수량의 비를 수치화하여 비교하였다.

#### 2.1.2. 여재의 수분유지능 비교 실험

가로 0.6 m, 세로 0.6 m, 높이 1.0 m(He 0.8 m)의 아크릴 재질의 직육면체 모형을 만들어, 멜라민 폼과 유사한 폼 여재를 충전한 후 상부에서 하수를 노즐에 의하여 30초간 충분히 살수하고 10분, 1시간, 3시간, 24시간, 일주일, 한 달이 경과한 후 여재가 보유하고 있는 하수의 무게를 측정하여 비교하였다. 여재 충전 전에 5개를 임의로 선택하여 각각의 무게를 측정된 다음 평균값을 살수 전 무게로 사용하였고, 시간대 별로 반응용기의 상단부에서 여재 3개씩을 임의로 취하여 측정된 여재별 중량을 초기의 완전침적무게로 나누어 보유율로 표시하였다.

### 2.2. 고친수성 Biofilter의 운전

본 연구에 사용된 고친수성 biofilter는 lab-scale을 제작하여 2003년 3월부터 12월까지, 그리고 pilot-scale은 2004년 9월에서 2005년 7월까지 약 2주에 1회 간격으로 유입수와 유출수를 분석하였으며 제원은 Table 1과 같다. Lab-scale과 pilot-scale은 모두 2개씩을 제작하여 운영하였으며, lab-scale은 건국대학교 평생교육원의 생활오수를 이용하였고, pilot-scale은 축산폐수를 희석하여 사용하였다. 수질분석항목은 Standard Methods에 따라 분석하였다(APHA, 1998). 고친수성 여재로 사용된 melamin foam은 열경화성 melamin 수지를 원료로 제조된 발포성 수지체(melamine resin foam)로 내화성이 강하며, 기포구조 표면이 암모늄염으로 일부 또는 완전히 코팅되어있는 소재이다. 특히 수분보유력이 뛰어난 melamin은 다음 하수의 공급 때까지 많은 양의 하수를 보유할 수 있다. 그러나 흡수력이 뛰어나서 흡수한 후 무게가 증가하여 많은 양의 적층시에는 여재의 모양이 변형되고 공간 밀집현상이 나타나는 것이 lab-scale 실험에서 확인되었기 때문에, pilot-scale의 제작시에는 여재의 지지와 공기의 원활한 순환을 위해 스테인레스 재질의 지지망을 40 cm 간격으로 배치하여, 부정형으로 쌓여진 melamin foam 여재 사이에도 공기와 하수의 이동이 가능한 공간들이 존재하도록 제작하여 운영하였다.

하수의 공급이 이루어질 때에는 melamin foam이 순간적으로 많은 양의 하수를 흡수하게 되며, 서서히 증력에 의하여 아래로 충분한 체류시간을 확보하면서 흐른다. 유입수는 타이머에 의하여 조절되는 수증펌프를 통하여 간헐적으로 공급되도록 설계하였다. 모형 상부에는 5 mm 정도의 입자에도 막힘이 없으며 분사시 빈 공간이 생기지 않는 분사노즐을 사용하여 하수가 골고루 공급되도록 하였다. Melamin foam은 길이가 4 cm인 정육면체 모양이며 0.50 m<sup>3</sup>을 충전 하였다.

모형의 상부와 하부에는 플라스틱 재질의 공기순환파이프가 연결되어 있으며, 그 중간에 공기순환을 가능케 하는

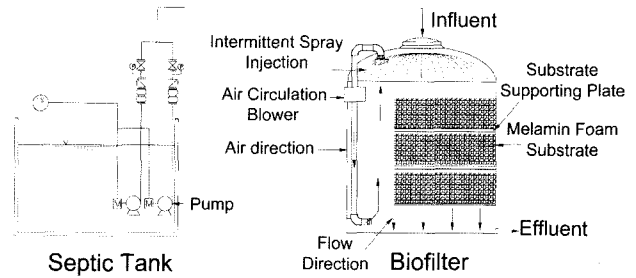


Fig. 1. Schematic diagram of the high-hydrophilic biofilter.

저소음, 저전력의 공기 순환팬을 설치하여, 팬의 상부에 외부의 공기가 유입될 수 있는 흡을 만들어 외부의 산소를 공급하도록 하였다. 공급되는 공기는 하수 및 오수의 흐름 방향과는 반대로 하부에서 상부로 순환되게 설계하였다 (Fig. 1). 공기 순환팬은 용량은 6.65 m<sup>3</sup>/min를 공급하며 압력은 0.768 Pa, 25.2 W, 그리고 회전속도는 3,400 rpm이다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 고친수성 biofilter의 여재 선정

Table 2에는 melamin 여재와 유사한 폼 여재들의 순간흡수중량과 침적흡수중량을 측정한 결과를 정리하였다. Melamin은 polyurethane등 다른 재질의 여재들과 비교할 때 순간흡수량이 매우 우수하였으며, 건조중량의 약 120배 정도의 하수를 흡수하였다. 또한 순간흡수량과 침적흡수량의 차이가 거의 없기 때문에 여재위에 하수가 유입될 경우 순간적으로 물을 흡수할 수 있어서 하수가 튀거나 상층부에 고이는 현상을 예방할 수 있는 특징을 갖고 있다. 다른 여재의 경우에도 polyurethane을 제외하고는 순간 흡수량과 침적흡수량의 차이가 크지 않았으나 단위중량당 흡수할 수 있는 물의 양은 melamin보다 현저하게 적은 수준이었다.

본 연구에서 사용된 biofilter 공정은 살수나 분사에 의해 하수를 공급하므로 순간적인 하수의 흡수는 안정적인 체류

Table 1. Characteristics of lab and pilot scale plant used for experiment

	Period	Diameter (m)	Height (m)	Packing height (m)	Hydraulic loading (m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Amount of packing media (m <sup>3</sup> )	Container
Lab-scale	2003. 3 ~ 2003. 12	0.6	2.0	1.8	4.42	0.50	Acrylic resins
Pilot-scale	2004. 9 ~ 2005. 7	1.49	2.0	1.2	4.31 ~ 8.62	2.50	Poly ethylene resins

Table 2. Characteristics of selected filter media for biofilter

Material	Dry weight (A)	Instantaneous wetting water (B)	Immersional wetting water (C)	B/A ratio	C/A ratio
Melamin	0.51 g	61.25 g	62.86 g	120.78	123.96
PVA	2.26 g	46.82 g	57.56 g	20.71	25.47
Rock wool	3.89 g	49.71 g	54.52 g	12.78	14.06
Cellulose	1.65 g	54.43 g	60.28 g	32.99	36.53
Polyurethane	1.29 g	3.89 g	47.40 g	3.00	36.61

시간을 확보하는데 도움이 된다. 기존 살수여상식 공법들은 충분한 처리시간을 확보하기 위한 방법으로 높이나 부피 등을 크게 하고 여재 충전량을 증가시켜야 했다. 그러나 melamin 폼은 건조중량에 비해 순간흡수량과 침적흡수량이 크므로 단위면적당 처리효율이 증대되는 효과를 얻을 수 있다. 또한 melamin은 하수 공급시 다른 여재들에서 발생하는 수로화 현상(channel flow)이나 유입된 하수가 반응조의 벽면을 타고 흘러내리는 현상이 발생하지 않았다.

Table 3은 여재의 친수성, 장기간의 수분유지능력, 하수 공급이 중단되었다가 재공급되었을 때 여재의 대응능력 등을 알아보는 실험을 수행한 결과이다. 실험은 물속에 완전하게 침적시킨 여재를 대기중에 노출시켜 시간의 경과에 따라 무게와 흡수율을 측정하였다. Melamin, PVA, rock wool, 그리고 cellulose들은 수분 보유율이 90% 이상이지만, polyurethane 여재의 경우 39%에 불과하였다. 30일 경과 후에는 melamin과 cellulose은 육안과 손으로 판단할 수 있을 정도의 하수를 보유하고 있었으나, polyurethane 여재는 7일 이후부터 하수가 상당량 소실되었으며, 20일 이후부터는 여재에 남아있는 험잡 물질 외에는 하수의 대부분이 사라졌고, 30일 후 측정된 결과에서는 보유율이 6%로 나타났다. 이 6% 또한 험잡물질의 누적으로 인한 무게로 판단되었다.

Melamin, PVA, rock wool, 그리고 cellulose의 경우 초기에는 차이가 없었으나 시간이 경과됨에 따라 점차 보유능력의 차이를 보였으며, PVA의 경우 건조가 진행될수록 초기의 물성에서 변화가 나타나 딱딱하게 굳어지는 현상을 보였으며 초기의 친수 능력을 잃어버리는 현상이 나타났다. 실험 결과, melamin을 이용하여 하수의 유기물을 처리할 경우 운영 중 기계의 오작동이나 장치·설비의 보수 등으로 하수공급이 중단되더라도 여재가 수분을 유지하고 있으므로 미생물이 죽거나 유출수와 함께 유출되는 문제없이 운영될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 처리시설을 재가동한 후에도 빠른 시간 내에 정상화가 가능하여 시설의 보호나 안정도 면에서도 다른 여재보다 우수하다고 판단된다.

분산지역 및 농촌마을은 유량변동이 상대적으로 심하며, 농촌마을은 아침과 저녁에만 물 사용량이 많으며 낮 시간 동안에는 물 사용량이 적어 유입되는 하수량도 거의 없다. 그러므로 유량조정조의 체류시간을 충분히 확보하도록 권

고하고 있지만, 휴양지나 수련원 등은 소수의 관리자 외에는 대부분 유동인구로 사용인구의 변동이 심해 심지어 수일에서 일주일까지 하수의 공급이 없다가 주말에 많은 인구가 집중되는 하수발생 특성이 있기 때문에 유량 조정조 체류시간을 충분히 확보하는 것이 사실상 매우 어렵다.

그러므로 위와 같은 실험을 통한 melamin의 수분유지능력은 유량변동이 심한 농촌지역에 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 고친수성 biofilter는 생물학적 처리공법과 비교해볼 때 기계적인 설비를 최소화하였기 때문에 전문 인력 없이 간단한 제어장치만으로도 무인운전이 가능하고, 단순한 시설 설비로 잦은 기계고장으로 인한 시설의 유지관리의 어려움이 없다. 공정 자체의 슬러지 처리도 불필요하고, 역세척이나 주기적인 슬러지처리를 해야 하는 처리시설과 비교해 볼 때 유지관리가 간편하다. 또한, 연구에 사용된 melamin 여재는 open-cell 구조와 초극세사 3차원 망상구조를 가지고 있으며, 단열성 및 난연 방염성이고, 연속 사용 가능 온도가 150~180°C를 넘는 고내열성 초경량의 흡음 단열 소재이다. 기계적인 강도도 우수하고, 가공성도 매우 우수하다고 알려져 있어서 주로 건설 분야, 자동차 산업, 조선 분야에서 엔진실의 방열 및 방음, 건축용 자재 및 흡음 재료로 사용되고 있는 소재이다(권, 2006). 이러한 본래의 특성 외에도 melamin은 대단히 고친수성이며 다수의 연속된 미세공극은 여과와 미생물 부착생장에 용이한 구조를 가지고 있어 하수처리를 위한 새로운 용도로 사용하여 biofilter 공정을 개발하였다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 melamin의 미세한 연속 공극은 뛰어난 여과기능을 제공하고 미생물 부착생장이 용이하며, 미생물의 탈리를 방지하는 기능을 제공하며, 하수와 공기 등이 자유로이 이동 가능한 장점이 있다. 이러한 연속 공극이 간헐 살수여상식 biofilter 공법에서 유리한 점은 Waterloo biofilter media를 이용한 연구에서도 밝혀진 바 있다(Jowett et al., 1995).

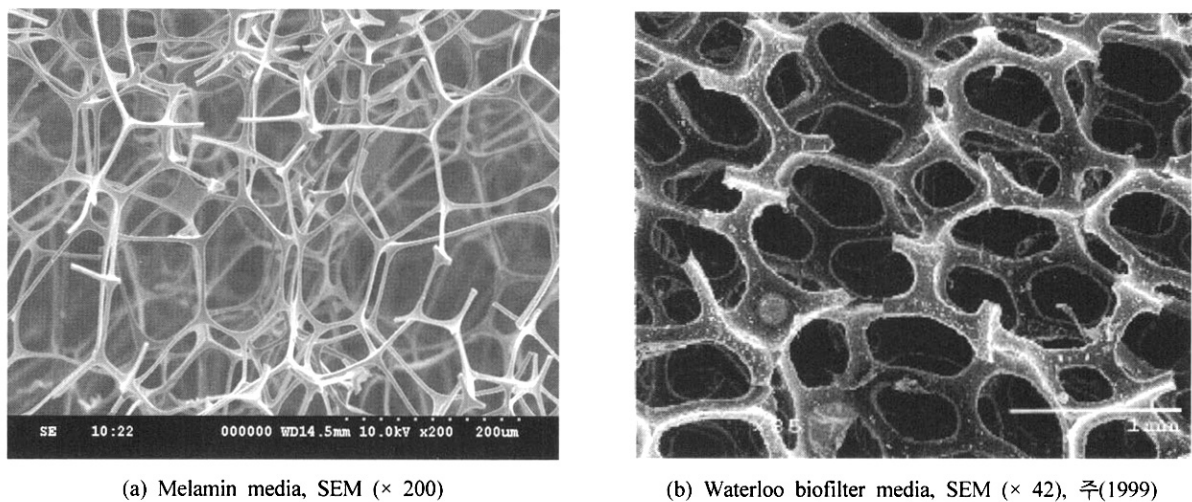
### 3.2. 고친수성 biofilter의 운전결과

Table 4는 biofilter 공정의 유입수와 유출수의 평균농도, 표준편차, 그리고 제거율을 수질기준과 함께 나타내었다. SS의 경우 유입수의 평균 농도가 86.7 mg L<sup>-1</sup>에서 평균 88.5%의 제거되어 유출수의 평균 농도가 9.5 mg L<sup>-1</sup>로 감

Table 3. Variation of moisture content in filter media after 100% moisture saturation

Time	Melamin		PVA		Rook wool		Cellulose		Polyurethane	
	Weight (g)	M.C. (%)	Weight (g)	M.C. (%)	Weight (g)	M.C. (%)	Weight (g)	M.C. (%)	Weight (g)	M.C. (%)
Dry	0.5	0	2.3	0	3.7	0	1.7	0	1.8	0
Wet	64.2	100	57.7	100	53.6	100	63.3	100	32.0	100
10 min	61.6	96	54.2	94	47.7	89	55.5	92	12.1	39
1 hour	57.0	89	50.2	87	34.8	65	50.0	83	8.1	26
3 hour	55.1	86	40.9	71	27.9	52	48.8	81	7.1	23
1 day	44.2	69	27.7	48	23.6	44	37.9	63	4.0	13
7 day	38.4	60	19.0	33	21.9	41	29.5	49	2.5	8
30 day	32.6	51	15.0	26	19.3	36	27.1	45	1.9	6.6

M.C.: moisture content

(a) Melamin media, SEM ( $\times 200$ )(b) Waterloo biofilter media, SEM ( $\times 42$ ), 주(1999)**Fig. 2.** SEM(Scanning Electron Microscope) micrograph comparison between melamin form and Waterloo biofilter media.**Table 4.** Summary of major water quality parameter in the high-hydrophilic biofilter performance and water quality water quality standard for WWTPs

Parameter	Influent Conc. $\pm$ SD	Biofilter effluent		Water quality standard for WWTPs
		Conc. $\pm$ SD	Removal (%)	
SS ( $\text{mg L}^{-1}$ )	86.7 $\pm$ 56.13	9.5 $\pm$ 5.23	88.5	10/20*
BOD <sub>5</sub> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	121.2 $\pm$ 49.57	19.8 $\pm$ 16.25	83.7	10/20
COD ( $\text{mg L}^{-1}$ )	28.9 $\pm$ 12.20	30.9 $\pm$ 16.58	-6.6	40/40
T-N ( $\text{mg L}^{-1}$ )	42.1 $\pm$ 12.05	26.2 $\pm$ 11.97	37.8	20/60
NH <sub>4</sub> -N ( $\text{mg L}^{-1}$ )	31.5 $\pm$ 9.22	17.7 $\pm$ 14.34	43.8	-
NO <sub>2</sub> -N ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0.5 $\pm$ 0.47	1.8 $\pm$ 2.51	**	-
NO <sub>3</sub> -N ( $\text{mg L}^{-1}$ )	2.9 $\pm$ 5.04	17.1 $\pm$ 14.27	**	-
PO <sub>4</sub> -P ( $\text{mg L}^{-1}$ )	1.3 $\pm$ 0.54	1.3 $\pm$ 0.47	6.0	-
T-P ( $\text{mg L}^{-1}$ )	3.1 $\pm$ 1.68	1.7 $\pm$ 0.82	45.1	2/8

\* : Guidelines for WWTPs effluent of special region (4 big river) / Other region

\*\* : Minor removal

소하였는데, 이는 하수처리장 방류수 수질기준을 만족하는 수준이었다. BOD<sub>5</sub>도 83.7%의 제거율을 나타내었으며 유출수의 평균 농도는 19.8  $\text{mg L}^{-1}$ 로 특별지역 외 수질기준인 20  $\text{mg L}^{-1}$ 을 만족하는 수준이었다.

유입수의 질소성분은 암모니아성 질소가 대부분으로 약 80%의 점유율을 보였으며, 약 15%는 유기질소가, 나머지는 NO<sub>3</sub>-N과 NO<sub>2</sub>-N이 2  $\text{mg L}^{-1}$ 이하의 낮은 농도로 분석되었다. Biofilter를 거친 후 질소성분비를 살펴보면 NH<sub>4</sub>-N의 점유율이 약 20%로 감소하였으며, NO<sub>3</sub>-N의 농도가 약 55%로 증가한 결과를 나타내었는데 biofilter 내부를 호기성으로 유지하였기 때문에 질산화 미생물에 의해 질산화(nitrification)가 이루어졌기 때문으로 판단된다. 인의 성분비를 살펴보면 인의 유입수는 입자성인과 PO<sub>4</sub>-P의 비율이 약 50%였으나 biofilter 공정을 거친 후에는 용존성 인이 80%이상을 차지하였다. 이유는 biofilter 여재에 의한 필터 효과에 의해 입자성인이 제거되었기 때문이며, T-P의 유출수 농도는 특별지역 방류수 수질기준을 만족시키는 수준이었다. 고친수성 biofilter 공정은 질소·인의 처리 결과는

상대적으로 저조하였으나 유기물과 SS에 제거에는 효과적이었다. 따라서 biofilter 유출수를 이용하여 인공습지와 같은 후처리 공정을 연속적으로 이용할 경우 용존성의 질소와 인의 처리가 보다 효과적일 것이라 판단된다.

Fig. 3은 2003년 3월~2005년 7월까지 lab-scale 실험과 pilot-scale 실험이며, 수리학적 부하를 4.31~8.62  $\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 로 운전한 결과이다. 유입수의 pH범위는 7.18~8.80이었으며, 유출수는 5.50~8.21, median 값은 7.20이었다. 여름기간에는 biofilter 유출수의 pH범위가 5.5~5.7 정도로 약산성이었는데, 이는 biofilter의 효율이 증가하면서 질산화율이 높아진 것으로 판단된다. DO 농도는 유입수의 경우 평균 0.51  $\text{mg L}^{-1}$ 이었지만, biofilter 공정을 거친 유출수의 평균 농도는 7.75  $\text{mg L}^{-1}$ 로 증가하였다. 일반적으로 정화조에서 배출되는 하수는 산소가 부족한 혐기성상태가 대부분이다. 따라서 정화조의 배출수를 사용하는 본 실험의 경우 초기 유입수의 상태는 혐기성이었으나, biofilter 공정을 통과하면서 기계적으로 공기를 순환시킴으로서 질산화에 상당부분의 산소를 사용하였음에도 불구하고 일반적인 자연수와 유

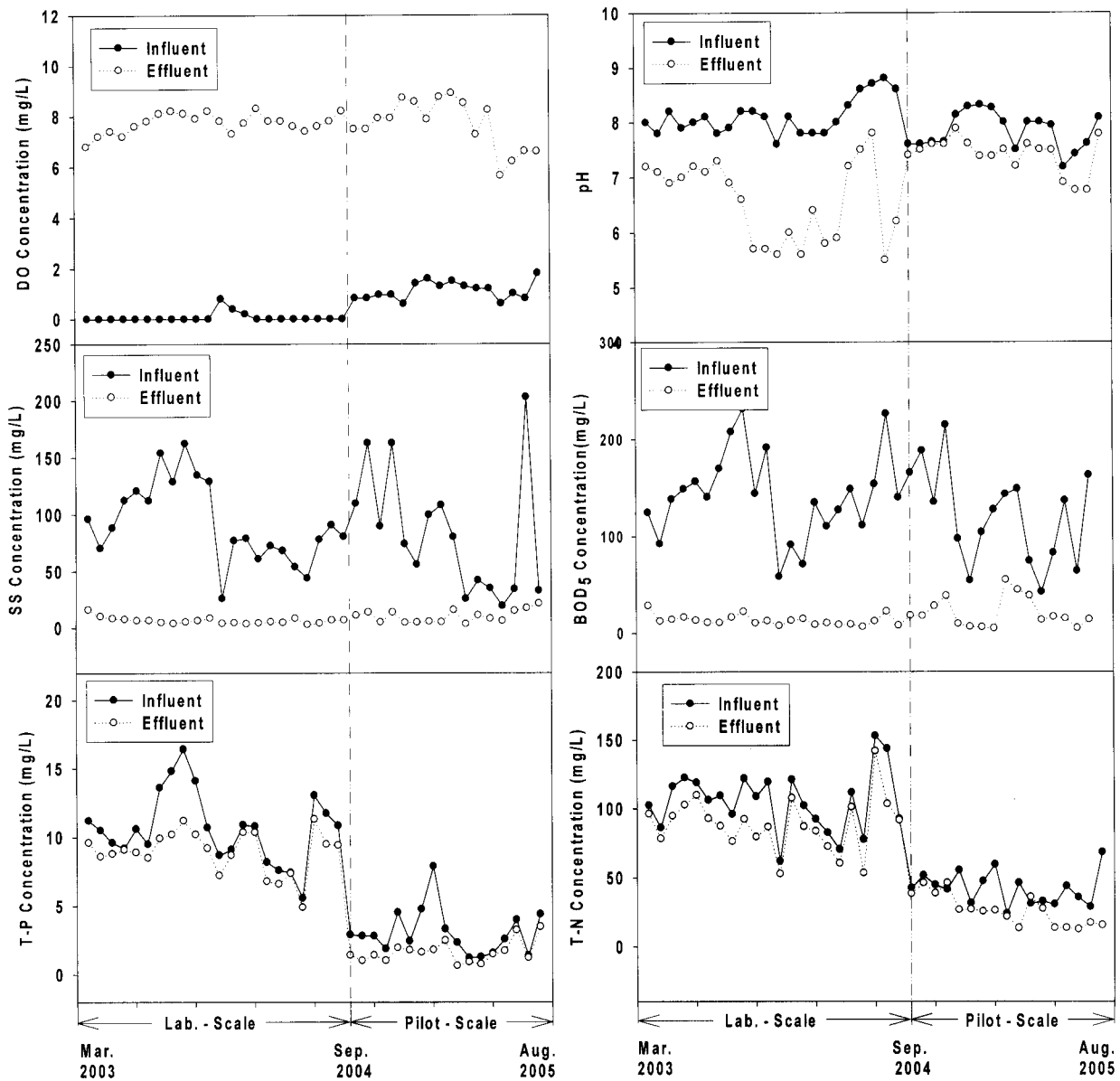


Fig. 3. Performance results of water qualities in biofilter process.

사한 수준의 DO농도를 나타내었기 때문에 수계로 방류하거나 후속되는 처리에도 보다 유리할 것으로 판단된다.

SS의 유입수의 농도는  $19.2 \sim 203.0 \text{ mg L}^{-1}$  범위였고, 유출수의 경우  $2.8 \sim 21.3 \text{ mg L}^{-1}$  범위를 나타내었으며, 평균 88.5%의 처리효율을 나타내었다. Biofilter에 의한 SS의 제거는 주로 여과기능에 의해 이루어지는데, 이러한 여과는 궁극적인 제거가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 입자상태로 처리조내에 잔류하게 되며, SS가 제거됨에 따라 유기물인 BOD<sub>5</sub>와 COD와 영양물질인 질소와 인도 부분적으로 제거된다. 이렇게 잔류하는 고형물질 중에서 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적 분해 등의 화학반응을 거치면서 유기물이 분해되거나 탈·질산화과정의 탄소원으로의 이용 등으로 제거된다. 그런데, 유입되어 잔류하는 고형물질의 부하량이 처리조내의 제거율을 초과할 경우 고형오염물질이 누적되어 처리조의 전반적인 효율을 감소시킬 수

있다. 하지만, 본 연구기간동안에 고형오염물질의 누적으로 인한 처리효율저하는 발생하지 않았다.

본 실험의 유입수를 수리학적 부하  $4.31 \sim 8.62 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , BOD<sub>5</sub> 유입농도  $42.6 \sim 231.2 \text{ mg/L}$ , SS 유입농도  $19.2 \sim 203.0 \text{ mg/L}$ 에서 운전한 결과 유출수 농도는 BOD<sub>5</sub>  $4.7 \sim 55.1 \text{ mg/L}$ , SS  $2.8 \sim 21.3 \text{ mg/L}$ 로 median 제거효율은 BOD<sub>5</sub> 90.4%, SS 92.7%이었다. SS와는 달리 BOD<sub>5</sub> 유출수의 농도가  $38 \sim 55 \text{ mg/L}$  정도로 높게 유출되었다. 이는 수리학적 부하를 2배로 증가시킨 결과이며 일시적으로 유출수의 농도가 높아졌으나 곧 안정된 처리수를 얻을 수 있었다. 본 연구결과를 다른 살수여상식 처리공법의 연구결과와 비교해보면, 숲, 부직포, 수세미, 그리고 Waterloo biofilter (Jowett et al., 1995) 여재 등을 가지고 수리학적 부하  $0.51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , 유입수 BOD<sub>5</sub> 농도  $62 \sim 185.6 \text{ mg L}^{-1}$ , SS 농도  $24 \sim 92 \text{ mg L}^{-1}$ 로 운전하였을 때, BOD<sub>5</sub> 76~94%, SS 4

9~91%의 제거효율을 보고하였는데(주, 1999), 본 연구결과와 유사한 범위 내에 있었다. 정 등(1995)이 굴폐각을 여재로 한 살수여상 공법에서 수리학적부하  $1.16 \sim 7 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ,  $\text{BOD}_5$  유입농도  $84.4 \sim 93.6 \text{ mg L}^{-1}$  범위에서 운전한 결과, 수리학적부하가  $4.7 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 까지는 처리효율이 증가하였으나 그 이상에서는 감소하는 경향을 보였고, 처리효율은  $\text{BOD}_5$  60.9~80.1%와 SS 79.0~93.9%을 나타내었다.

본 연구의 결과는 기존의 연구결과보다 수리학적 부하를 최소 1.2배 ~ 최대 16배까지 크게 적용했지만 유사한 처리효율을 나타내어 현장처리시설로서 적용가능성이 큰 것으로 판단된다. T-N은 유입수 농도범위가  $23.8 \sim 152.8 \text{ mg L}^{-1}$ 일 때 유출수 농도범위는  $12.5 \sim 141.7 \text{ mg L}^{-1}$ 로 제거효율은 평균 25.7%이었다. T-N 제거효율은 유기물질에 비해 매우 낮은 수준이었으나, 원수의 대부분을 차지하고 있는  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 제거율은 매우 높은 수준이었다.  $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 유입수 평균농도가  $14.9 \sim 143.5 \text{ mg L}^{-1}$ 일 때 유출수 평균농도는  $0.4 \sim 79.1 \text{ mg L}^{-1}$ 로 제거효율은 평균 78.9%였다.  $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 biofilter를 운전하기 시작하여 20일이 경과한 후부터 95% 이상의 제거효율을 보였는데, 이는 여재에 부착한 미생물이

질산화에 필요한 시간과 관계있는 것으로 판단된다. T-P의 유입수 농도범위는  $1.23 \sim 16.4 \text{ mg L}^{-1}$ 이고 유출수 농도범위는  $0.66 \sim 11.3 \text{ mg L}^{-1}$ 으로서 제거효율이 평균 25.7%로 낮은 수준이었다. Kwun 등(2000)은 흡수성 biofilter를 여재로 하는 농촌마을 오수처리를 위한 연구에서 수리학적 부하  $0.5 \sim 2.5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ,  $\text{BOD}_5$   $38 \sim 250 \text{ mg L}^{-1}$ , SS  $18 \sim 125 \text{ mg L}^{-1}$ 로 유입하여 운전하였을 때,  $\text{BOD}_5$  제거율 84.3~93.0%, SS 제거율 59.2~89.5%, 질소 제거율 38% 및 인 제거율 22.6~31.1%로 조사되었다. 본 연구는 Kwun 등(2000)의 연구보다 최대 8.8배 큰 수리학적 부하로 운전하여 유사한 제거효율을 얻을 수 있었으며 같은 규모의 처리시설에서 많은 양을 처리할 수 있다는 가능성을 나타내었다.

Fig. 4는 biofilter의 미생물의 부착여부와 공극 폐색 현상을 조사하기 위해 주사현미경(SEM)으로 사용 전·후 공극을 촬영하여 비교한 결과이다. 공극의 심한 폐색은 보이지 않았으며 망상구조 주변에 부착생물막이 형성되어 있음을 확인할 수 있었다(b, c, d). 상층부의 여재(b)의 경우 하수가 직접 접촉하기 때문에 생물막이 가장 활성화되어 있

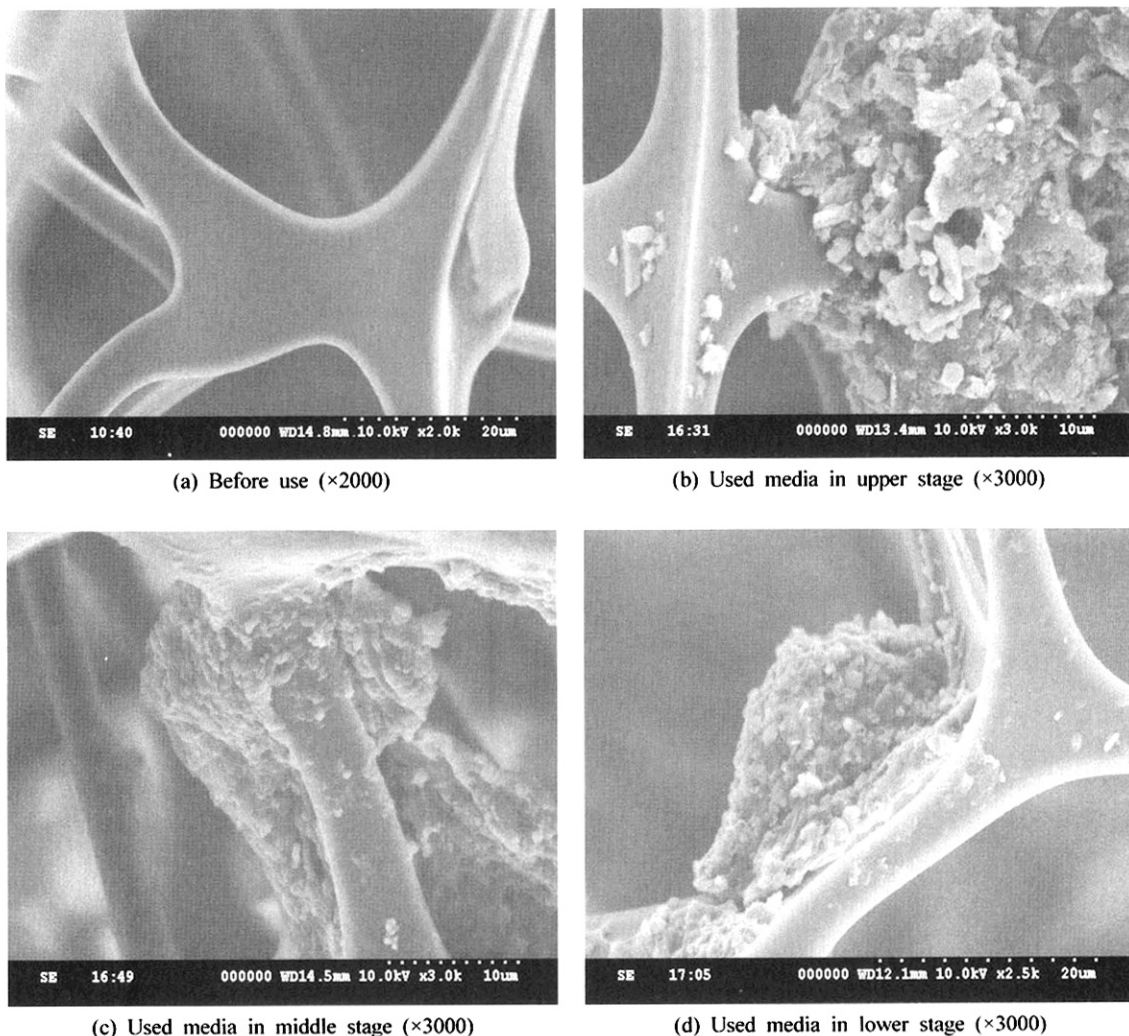


Fig. 4. SEM (Scanning Electron Microscope) micrograph for media before and after use in biofilter.

며, 중단(c)의 경우 생물막에 의한 공극폐쇄가 많이 진행되지 않았으며 하부(d)의 여재에서는 거의 폐색되지 않은 것을 알 수 있다. 따라서 오랜 운전기간 동안 공극이 폐색되어 손실수두가 커질 경우 상층부의 여재를 제거하고 교체하는 방법을 통해 관리할 경우 공극폐쇄로 인한 처리효율감소를 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5는 BOD<sub>5</sub>와 SS의 유입 부하량과 biofilter에 의한 제거량을 비교하였으며, 유입수의 농도범위를 함께 표현하였다. BOD<sub>5</sub>와 SS의 경우에는 부하량이 커질수록 제거량이 거의 수직적으로 증가하며, SS의 경우 유입수의 농도가 약 200 mg L<sup>-1</sup>까지 안정적인 처리가 가능한 것으로 나타났다. BOD<sub>5</sub>의 경우에도 SS와 유사한 결과를 나타내었는데 유입 부하량이 약 0.6과 1.3 kgm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>인 곳에서 처리량이 감소하는 경우도 조사되었다. 이유는 이 실험시기에 일시적으로 나타난 실험오류이거나 유입수에 화장실 청소용 유해화합물 등의 유입으로 일시적으로 처리율이 낮게 나타났을 것으로 추정된다. 모형의 회귀모형의 결정계수 R<sup>2</sup>값이 모두 0.9이상이기 때문에 본 연구에서 사용된 biofilter의 적용시 BOD<sub>5</sub>와 SS의 경우 약 20~200 mg L<sup>-1</sup> 범위에서는 유입부하량을 산정하여 적용할 경우 회귀모형을 이용해 유출수의 농도와 제거량을 예측하여 설계에 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 생물막공법의 일종인 고친수성 biofilter 시스템을 개발하기 위해 시중에서 쉽게 구할 수 있는 재료에 대해 biofilter 여재로 사용하기 위한 기초실험을 실시하였으며, 선정된 여재를 이용하여 biofilter 시스템을 lab-scale과 pilot-scale로 제작하여 현장실험으로서 적용성을 평가하였다.

고친수성 biofilter 공정은 SS와 BOD<sub>5</sub>의 경우는 평균 처리 효율이 80%이상 처리되는 것으로 나타났으며, 다른 연

구자들의 처리방법 및 처리효율과 비교했을 경우 단위면적당 처리량을 증가시켜도 안정적인 처리 효과를 나타내었다. 본 연구에서 실험했던 biofilter는 하나의 공정만으로 SS와 TP의 특별지역의 방류수 수질기준인 각각 10, 2 mg L<sup>-1</sup>를 만족시킬 수 있었다. 하지만, BOD<sub>5</sub>는 유출수의 농도가 높은 수준이었으나 20 mg L<sup>-1</sup> 이하의 평균농도를 보여 특별지역 이외의 지역에 적용된 수질기준을 만족하였고, T-N은 약 37%가 제거되었고 방류수 수질기준을 만족하지 못하여 추가적인 처리가 필요한 것으로 나타났으며 T-P의 경우에도 처리효율은 45%로 낮은 수준이었다. 유입수의 질소 형태별 점유율은 NH<sub>4</sub>-N이 80%인 전형적인 하수의 성상을 나타내었으나 유출수의 경우에는 20%로 감소하였으며, 상대적으로 NO<sub>3</sub>-N이 약 50%를 차지하였다. 이는 biofilter에 공기순환장치를 설치하여 미생물이 질산화과정을 통해 NH<sub>4</sub>-N이 NO<sub>3</sub>-N으로 변화하였기 때문으로 판단된다. 또한 유입수의 DO농도가 약 0.5 mg L<sup>-1</sup>에서 유출수의 DO농도가 약 7.7 mg L<sup>-1</sup>로 높아졌다. 이렇게 변화한 수질성상으로 볼 때 biofilter에 별도의 폭기 장치나 질산화 과정이 필요 없이도 운영상에는 유리할 것으로 판단된다.

또한, 공정을 일정기간 운영하지 못하거나, 수리학적 부하의 변화가 심한 분산지역의 하수를 처리할 경우 여재에서 유입하수를 처리하는 미생물의 생존율이 중요한데 친수성이 높은 melamin을 여재로 이용할 경우 유리한 것으로 판단된다. 장기간 사용으로 손실수두가 커지고 처리효율이 감소할 경우 상단의 일부 폐색된 여재를 교체하는 방법으로 관리할 경우 장기간 운전에도 효과적인 것으로 생각된다.

본 연구결과 고친수성 biofilter 공법은 운영기간 동안 안정적인 방류수 수질을 나타내었고 기존 유사 공법보다 작은 면적을 이용한 처리가 가능하였으며, 간단한 구조와 큰 완충능력, 적은 슬러지 발생, 간소한 유지관리의 장점을 가지고 있어서, 분산지역 및 농촌마을 하수처리기술로서 적용 가능성이 클 것으로 판단된다. 하지만, 질소와 인의 처리수준이 미흡하여 고친수성 biofilter 공법 후에 추가처리 시설

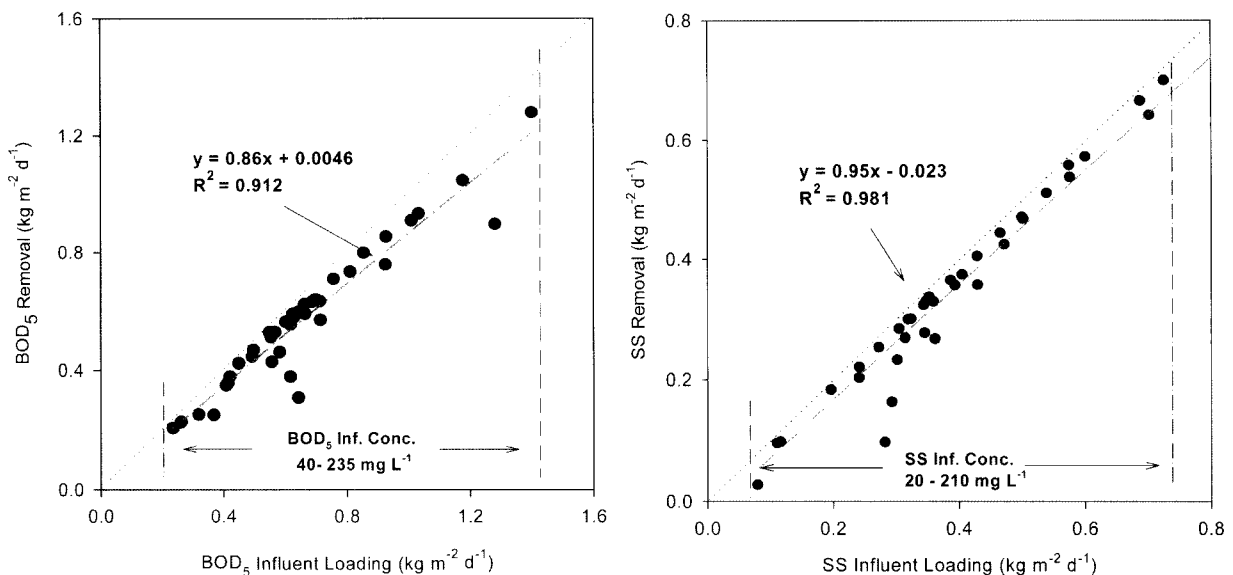


Fig. 5. Regression of influent of pollutant loading and amount of removal.



이 필요할 것으로 생각되며, 장기간의 모니터링을 통해 처리효율과 운영상의 개선점에 대한 충분한 검토 및 보완이 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구개발 수행에 있어 연구비를 지원한 (주)자연과학원과 연구수행에 장소를 제공해주신 건국대학교와 한국농촌공사 농어촌연구원 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 권태영, 분산지역 및 농촌마을 하수처리를 위한 자연정화 고도처리 공법 개발, 건국대학교 박사학위논문, 서울 (2006).
- 방천희, 소규모 오수처리 시스템에서의 제올라이트에 의한 질소 제거, 서울대학교 석사학위논문, 서울 (2001).
- 이기영, 김지영, 경기도내 하천의 건천화 방지에 관한 연구, 경기개발 연구원, pp. 29-30 (2003).
- 정팔진, 정정권, 권지영, 폐각을 여재로 한 살수여상공법에 의한 유기물질 제거에 관한 연구, *대한환경공학회 추계 학술연구발표회 논문초록집*, pp. 212-214 (1995).
- 주옥중, 생물막 여과법에서 여재별 유기성오수의 처리특성에 관한 연구, 서울대학교, 서울 (1999).
- APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (19th edition.) American Public Health Association, Washington, D.C., USA (1998).
- Green, M., Friedler, E., Ruskol, Y. and Safrai, I., Investigation of Alternative Method for Nitrification in Constructed Wetlands, *Water science and Technology*, **35**(5), pp. 63-70 (1997).
- Jowett, E. C. and McMaster, M. L., On-site Wastewater Treatment using Unsaturated Absorbent Biofilters, *Journal of Environmental Quality*, **3**(24), pp. 86-95 (1995).
- Kwun, S. K., Yoon, C. G. and Kim, B., Performance of a Small on-site Wastewater Treatment System using Absorbent Biofilter for Korean Rural Community, *Journal Environmental. Science and Health, A*, **35**(9), pp. 1701-1717 (2000).
- Roy, C., Auger, R. and Chenier, R., Use of Non-woven Fabric in Intermittent Filters, On-Site Wastewater treatment, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, **8**, pp. 500-508 (1998).