

## 필터 분리기를 이용한 여재별 도로퇴적물의 오염물질 제거효율 비교

방기웅<sup>†</sup> · 이준호\* · 최창수\*\* · 이상일\*\*

한밭대학교 토목 · 환경 · 도시공학부 · \*충주대학교 환경공학부 · \*\*충북대학교 환경공학과

(2007년 1월 29일 접수, 2007년 3월 12일 채택)

### Comparison of Pollutant Removal Efficiency in Road Sediment with Media Using Filter Separator

Ki-Woong Bang<sup>†</sup> · Jun-Ho Lee\* · Chang-Su Choi\*\* · Sang-Il Lee\*\*

Division of Civil, Environment and Urban Engineering, Hanbat National University

\*Division of Environmental Engineering, Chungju National University

\*\*Department of Environment Engineering, Chungbuk National University

**ABSTRACT :** Storm runoff from road contains significant loads of particulate and dissolved solids, organic constituents and metal elements. Micro particle is important when considering pollution mitigation because pollutant metal and organics have similar behavior with particles. The objective of this research is to evaluate the hydrodynamic filter separator performance for road storm runoff treatment. A various types of media such as perlite, granular activated carbon, zeolite were used for column test packing media and filter separator, and to determine the removal efficiency with various surface loading rate. As the results of column test, the highest SS removal efficiency was using mixed media(granular activated carbon, zeolite and perlite), and granular activated carbon mixed with zeolite has higher heavy metal removal efficiency than perlite. In laboratory scale hydrodynamic filter separator study, the operation ranges of surface loading rates were from 192 to 1,469 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/day. The estimated overall removal efficiencies of hydrodynamic filter separator for typical storm runoff were SS 48.1%, BOD 31.9%, COD 32.6%, TN 15.5%, and TP 17.3%, respectively. For the case of heavy metals, overall removal efficiencies were Fe 26.0%, Cu 19.4%, Cr 25.7%, Zn 16.6%, and Pb 15.0%, respectively. The most appropriate medium for hydrodynamic filter separator was perlite mixed with granular activated carbon to treatment of road storm runoff.

**Key Words :** Hydrodynamic Filter Separator, Road Runoff, Column Filtration, Media, Nonpoint Source

**요약 :** 강우 시 도로에서의 초기 유출수는 유·무기물질, 중금속 등 유해물질이 부유물질에 흡착되어 거동되는 비율이 높으므로 부유물질을 분리할 수 있다면 상당량의 오염부하를 줄일 수가 있다 따라서 본 연구의 목적은 도로에서 배출되는 강우유출수의 오염저감을 위해 필터를 이용한 수리동력학적 필터분리기를 이용하여 부유물질을 처리함에 있어 필터별 오염물질 처리효율을 비교 평가함으로써 도로유출수에 대한 오염물질 저감을 위한 현장에의 적용 방안을 모색함에 있다. 사용한 여재는 perlite, 활성탄, zeolite와 이들의 혼합소재를 대상으로 하여 칼럼여과실험과 필터분리기를 이용한 현장에서의 처리실험을 통해 여재별 처리정도 및 처리효율을 비교하였다. 칼럼여과실험결과 대체로 SS는 활성탄과 perlite, 활성탄, 소성한 zeolite의 혼합여재가, 중금속은 zeolite 및 활성탄이 양호하였다. HDFS에 의한 처리실험은 perlite와 활성탄 혼합여재가 도로유출수 처리에 적합할 것으로 조사되었다. 혼합여재에 대한 평균 처리효율은 여재층이 9 cm, 수면적부하율 192-1,469 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d의 범위에서 SS 48.1%, BOD 31.9%, COD 32.6%, TN 15.5%, TP 17.3%의 제거율을 나타내었고, 중금속인 경우 Fe 26.0%, Cu 19.4%, Cr 25.7%, Zn 16.6%, Pb 15.0%로 조사되었다. 도로유출수의 처리를 위한 HDFS의 여재로서는 perlite와 활성탄을 혼합한 여재가 적절하였다.

**주제어 :** 수리동력학적 필터분리기, 도로유출수, 칼럼여과, 여재, 비점오염원

## 1. 서론

비점오염원은 토지 이용형태에 따라 다양한 배출원을 갖고 있다. 특히 고밀도 도시지역의 주요 비점오염원으로는 합류식하수관 월류수(CSO, Combined Sewer Overflow)와 도로면의 강우 유출수(SSO, Storm Sewer Overflow)를 들 수 있다.

이중 도로유출수는 부유물질 이외에도 유기물질, 자동차 배기가스 침전물질, 타이어 마모물질, 기름, 윤활유, 중금속 등 다양한 유해물질을 함유하고 있어 도시 관류하천의 수생태계에 영향을 크게 미치고 있다. 또한 도로유출수는 강우초기에 오염물질이 매우 높은 농도로 배출되며, 동절기에는 제설용으로 살포한 염화칼슘 등의 영향으로 하천뿐 아니라 도로 주변의 식생에도 영향을 미치고 있다.<sup>1~3)</sup>

도로유출수의 대부분은 우수관이나 합류식 하수관을 통해 하천으로 유출하고 있어 도시하천의 수질보전과 비점오염원의 관리 차원에서 도로유출수의 오염물질 농도가 높은 초기

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: bangkw@hanbat.ac.kr

Tel: 042-821-1260

Fax: 041-821-1476

유출수에 대한 오염물질 저감이 필요하다. 그러나 오염물질 제거를 위해서는 중금속 등 유해물질이 SS와 같은 부유물질에 부착되어 거동되는 경향이 높으므로 도로 퇴적물과 같은 부유물질에 대한 합리적인 관리대책이 필요할 것이다.<sup>3)</sup> 이를 위해서 원심력을 이용한 분리기에 여과용 필터를 부착한 필터형 처리장치를 도로유출수 배출구에 설치하여 부유물질을 분리할 수 있다면 상당량의 비점오염물질을 제거할 수 있을 것이라 사료된다.

따라서 본 연구의 목적은 비점오염원 중 도로에서 배출되는 강우유출수의 오염저감을 위해 장치형 처리시설 중 필터를 이용한 수리동력학적 필터 분리기(HDFS, Hydrodynamic Filter Separator)를 이용하여 도로 퇴적물을 처리함에 있어 필터별 오염물질 처리효율을 비교 평가함으로써 도로유출수 처리에 대한 현장에의 적용 방안을 모색함에 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 여재의 선정

실험에 사용한 여재는 수처리에 일반적으로 이용되고 있는 여재 중에서 여과에 의한 체거름과 흡착이 가능할 것으로 판단되는 perlite, 활성탄, zeolite와 이들의 혼합소재를 실험대상 여재로 선정하였다.<sup>4~6)</sup> 특히 perlite는 비중이 0.78로서 물보다 가벼우며, 화산암의 일종으로 원석을 700~1,200℃에서 급속 가열하면 8~15배로 팽창된다.<sup>6)</sup> 활성탄은 석탄계 활성탄을 사용하였고, zeolite는 300℃에서 건조만 시킨 것(Zd)과 건조 후 700℃에서 소성한 것(Zc)의 두 종류를 사용하였다. 여재는 입상으로 입경이 1.4~2 mm가 되도록 비교적 입자 분포를 고르게 체 분리하여 이들 여재를 단독 또는 혼합하여 필터로 사용하였다.

### 2.2. 실험장치의 구성

#### 2.2.1. 칼럼여과장치

도로유출수 처리의 예비실험으로서 칼럼을 이용하여 여재별 여과실험을 실시하였다. 내경 5 cm, 높이 60 cm인 아크릴 칼럼에 대상 여재를 각각 30 cm 채웠으며, 여재 양단을 고정하여 상향류 여과 시 여재의 유실을 방지토록 하였다. 여과칼럼은 Fig. 1과 같고, 교반기가 부착된 유입수조, 미량 펌프, 여과 칼럼, 유출수조로 장치를 구성하였다.

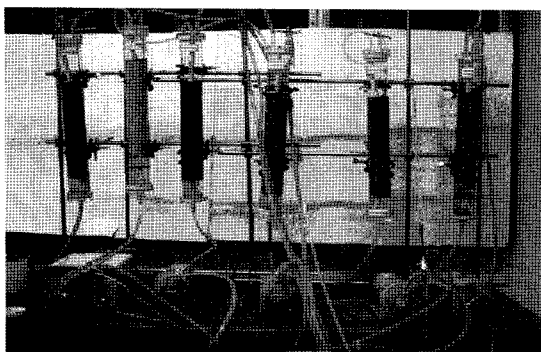


Fig. 1. Column set used in filtration test.

#### 2.2.2. HDFS 실험장치

도로 유출수를 처리하기 위한 필터형 분리기는 수류의 원심력을 이용하여 입경이 큰 부유물질을 분리하는 동수역학적 분리장치(HDS, Hydrodynamic Separator)에 여과용 필터를 부착한 필터형 분리기인 HDFS(Hydrodynamic Filter Separator) 처리장치를 실험실 규모로 아크릴 수지로 제작하여 여재별로 처리성 실험을 실시하였다. 제작한 실험장치는 고히름 또는 미세 부유물질을 동시에 제거가 가능해야 하며, 외부 동력 없이 수류를 이용한 처리와 유지관리가 용이해야 한다는 점을 고려하여 장치를 구성하였는데 필터는 본체 중앙에 카트리지가 형태로 설치하였다. 제작된 HDFS는 하부는 D150 mm × H200 mm 규모의 선회류식 분리조(vortex chamber)와 상부 본체는 D300 mm × H400 mm 규모의 여과형 분리기(dynamic filter chamber)를 조합한 장치이며, 분리조 하부에 농축된 퇴적물을 하부 배출구를 통해 배출되도록 제작하였다. 실험장치는 선회류식 분리조에 접선방향으로 연결된 유입관을 통해 원심력을 이용하여 입자경과 비중이 큰 부유물질들을 분리하고, 분리되지 않은 미세입자들은 상부 본체에 설치된 여과형 분리기를 통해 일부 제거된 후 유출토록 구성하였다. 또한 여재의 자동세척을 위해 하부 배출구를 통해 배출되는 본체 수류의 하강에 의해 여재 공간 내에 포집된 부유물질이 하부로 배출되도록 하였다. HDFS의 모식도는 Fig. 2와 같으며, Fig. 3은 현장에 설치된 장면이다.

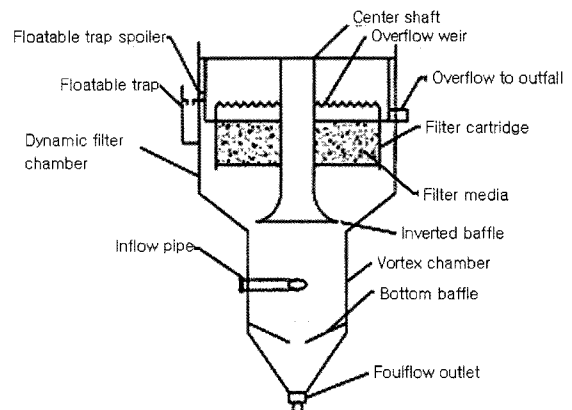


Fig. 2. Schematic diagram of HDFS.

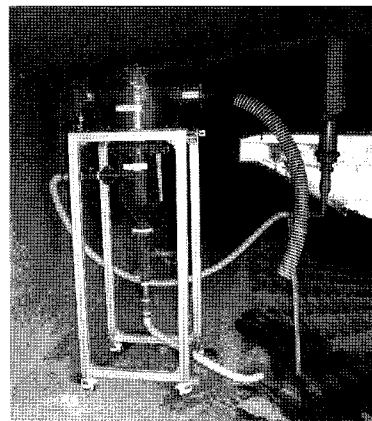


Fig. 3. Overview of HDFS setting in the field.

### 2.3. 실험방법

#### 2.3.1 칼럼여과장치

칼럼여과실험에 사용된 여재는 perlite(P), 활성탄(A), 건조한 zeolite(Zd), 소성한 zeolite(Zc)와 perlite(P), 활성탄(A), 소성한 zeolite(Zc)를 같은 부피로 혼합한 혼합여재(PAZ)의 5 가지 종류에 대해 실시하였다. 대상 시료수는 도로 측구퇴적 물을 체 분리(100 μm 이하)한 부유물질을 수도수에 희석하여 일정농도 범위(200~550 mg/L)로 만든 후, 중금속의 흡착성을 조사하기 위해 FeCl<sub>3</sub>와 ZnCl<sub>2</sub>를 일정농도 수도수에 용해시켜 혼합하여 사용하였다.

여과유량은 수면적부하율(Vo) 기준으로 200~600 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d (Empty Bed Contact Time 기준으로 0.72~12.16 min) 범위에서 유입 펌프에 의해 상향류 여과방식으로 운전하였다. 분석 항목은 유량과 유입수 및 유출수의 SS, Fe, Zn 농도 및 부유물질의 입자분포를 조사하였다.

#### 2.3.2. HDFS 실험장치

HDFS 장치내에 설치한 필터는 상향류식 여과방식으로 여재의 역세 효과를 높이기 위해 여재층 상부를 10% 정도 open space(즉, 필터 카트리지가 깊이: 10 cm, 필터여재 깊이: 9 cm)를 두었다. 사용한 여재는 칼럼여과실험 결과를 고려하여 perlite(P), 활성탄(A)와 두 여재를 같은 부피로 혼합한 PA의 3가지 종류에 대해 도로유출수에 대해 현장에서 초기강우유출 경과시간에 따른 처리효율을 분석하였다. 또한 하부배출 유량(foul flow)은 유입유량의 5~10% 정도가 되도록 일정 유량을 하부로 배출토록 하였다.

분석항목은 유입유량과 유입수 및 유출수의 SS, BOD, COD, TN, TP와 중금속으로서 Fe, Cu, Cr, Zn 및 Pb의 5가지 종에 대해 조사하였다.

### 2.4. 분석 방법

SS, BOD, COD, TN, TP는 수질오염공정시험법에 의해 실시하였고, COD는 크롬법에 의해 분석하였다. 중금속은 AA(AAnalst 700, perkin elmer)를 사용하여 분석하였으며, 입경은 입경분석기(CIS-1, Galai)를 이용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. 여재 특성

사용한 여재의 비중은 Zc > Zd > A > P 순으로서 perlite는

물보다 가벼우나 다른 여재는 물보다 무거웠다. 여재를 채운 여과칼럼의 공극율은 23~37% 범위로 P > Zc > Zd > A 순으로 큰 것으로 분석되었다. 여재 내부의 기공율(porosity)은 perlite가 다른 여재에 비하여 상대적으로 큰 공극을 가진 것으로 분석되었으며, pore 크기도 perlite가 가장 높았다. 공극의 크기에 따른 특성으로 볼 때 perlite는 macro pore인데 반해 활성탄 및 zeolite는 macro 및 meso pore가 공존하는 것으로 분석되었으며, 사용된 여재의 특성은 Table 1에 나타내었다.

### 3.2. 칼럼여과실험 결과

#### 3.2.1. 수면적부하율별 처리효율

도로유출수와 같은 비점오염물을 처리하는 경우는 강우사상에 따른 유출 유량이 달라지므로 여러 수면적부하에 대한 종합적인 처리효율을 비교할 필요가 있다. 일반적으로 저유량을 처리 시에는 처리효율이 높으나, 고유량을 처리 시에는 처리효율이 낮아지는 경향이 있어 오염부하 저감이란 차원에서는 농도보다는 부하량을 기준으로 한 효율을 비교하는 것이 타당할 것이다. 그러므로 본 연구에서는 유량가중평균에 의한 평균 처리효율을 아래 식을 이용하여 산출하였다.<sup>7,8)</sup>

$$E(\%) = \sum V_i \eta_i / \sum V_i$$

여기서, V<sub>i</sub> : 수면적부하율(m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d)

η<sub>i</sub> : 해당 수면적 부하율에 대한 처리효율(%)

HDFS에 적용할 여재의 성능을 조사하기 위해 여러 여재를 이용한 칼럼여과실험을 실시한 결과 각 수면적부하율 별 SS 및 Fe, Zn에 대한 여재별 제거효율을 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4에서와 같이 수면적부하율이 작을수록 제거효율이 높았으며, 수면적부하율이 증가할수록 제거율은 낮아지는 것으로 조사되었다. 대체로, 수면적부하율 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d~400 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d까지는 비교적 높은 처리효율을 나타내었으나, 그 이상의 부하율에서는 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이는 수면적부하율이 일정 범위 이상이 되면 여재 공극 속에 포집된 부유물질이 일부 돌파되는 것으로 평가된다. 여재별 처리효율도 수질항목과 수면적부하율에 따라 다소 차이가 있는 것으로 나타났다.

수면적부하율 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d~600 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d의 범위에서 여재별 처리효율의 범위 및 평균 처리효율을 보면 SS의 경우 per-

Table 1. Characteristics of used media

Media	material	specific weight	column porosity (%)	Total pore area (m <sup>2</sup> /g)	Porosity (%)	Median pore diameter		Avg. pore diameter V/A (μm)
						Vol(μm)	Area(μm)	
P	perlite	0.78	37.4	0.536	45.8834	6.0342	8.2794	13.3878
A	Activated carbon	1.76	22.7	45.755	27.0073	1.1254	0.0048	0.0239
Zd	zeolite(dry, 300 °C)	2.28	23.3	14.081	27.2106	0.2554	0.0118	0.049
Zc	zeolite(calcination, 700 °C)	2.38	24.1	9.100	28.0864	0.5657	0.0153	0.0754

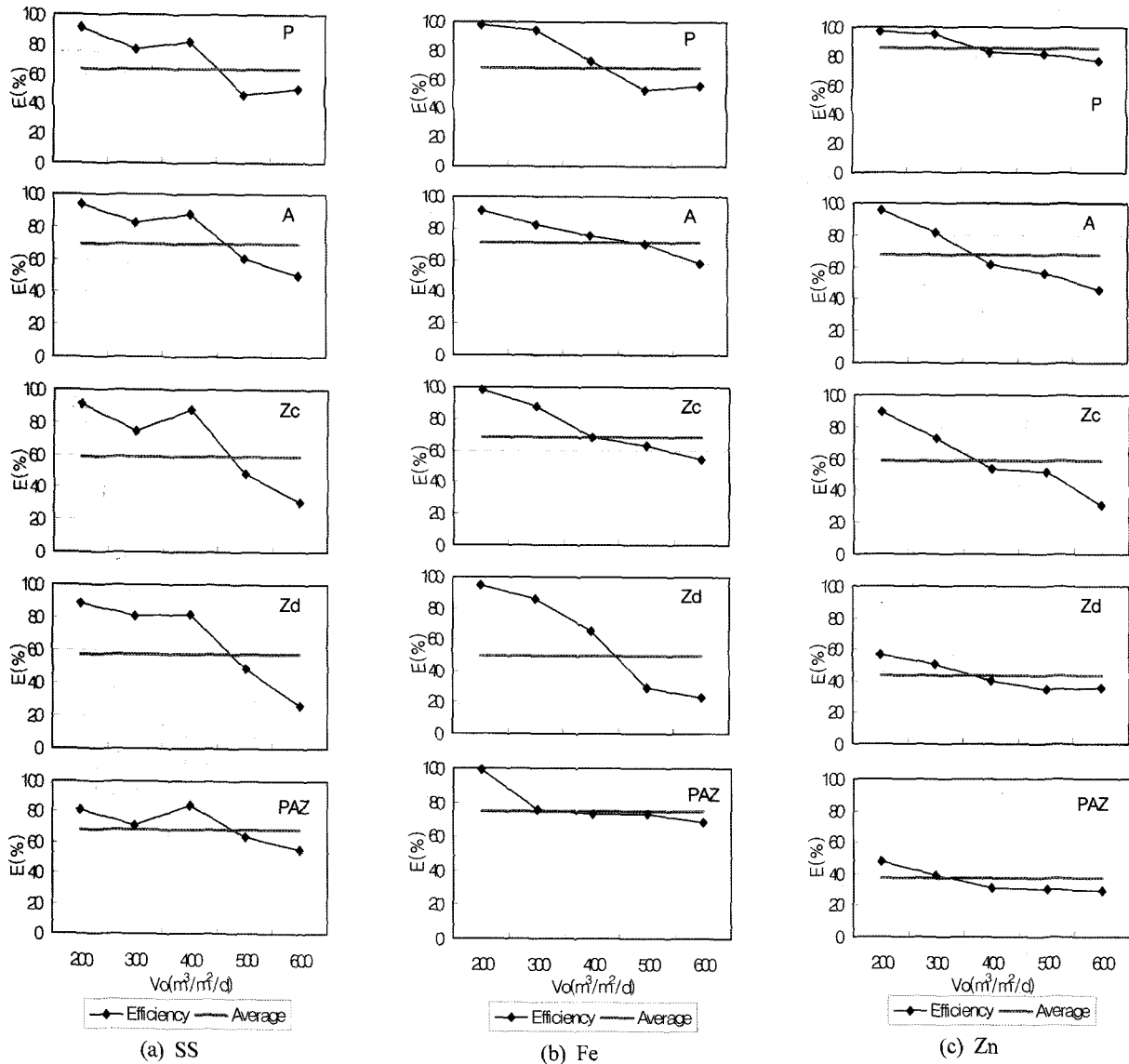


Fig. 4. Removal efficiency of SS, Fe, and Zn as a function of surface loading rate.

lite(P)가 45.8%~91.6%(평균 63.5%), 활성탄(A)은 50.2%~93.4%(평균 69.4%), 소성한 zeolite(Zc)는 30.8%~91.5%(평균 59.2%), 건조한 zeolite(Zd)는 25.7%~89.1%(평균 57.2%), 세 여재를 혼합한 PAZ 여재의 경우는 55.1%~81.4%(평균 68.1%)이었다. 대체로 활성탄, 혼합여재, perlite, 소성 zeolite, 건조 zeolite 순이었으며 활성탄 및 혼합 여재가 상대적으로 처리효율이 양호하였고, 소성 및 건조한 zeolite는 낮은 것으로 조사되었다.

중금속의 경우는 항목에 따라 다소 차이가 있는 것으로 조사되었다. 대체로 Fe는 처리효율이 높은 반면 Zn는 낮은 처리효율을 나타내었다. 처리효율도 SS와 같이 수면적부하율이 증가할수록 낮아지는 경향을 보였다. 여재별 중금속에 대한 처리효율의 차이는 여재에 의한 흡착으로 인한 제거보다는 중금속 성분이 퇴적물 입자와의 결합에 의해 부유물질이 제거되는 과정에서 제거되는 비율에 좌우되는 것으로 판단되며, 중금속이 퇴적물과의 결합정도가 처리효율과 관련

이 있는 것으로 평가된다.<sup>3)</sup>

수면적부하율 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d~600m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d의 범위에서 여재별 처리효율을 보면 Fe의 경우 perlite(P)가 52.4%~98.4%(평균 68.4%), 활성탄(A)은 57.9%~90.8%(평균 71.4%), 소성한 zeolite(Zc)는 63.5%~98.4%(평균 74.9%), 건조한 zeolite(Zd)는 23.4%~94.3%(평균 49.7%), 세 여재를 혼합한 PAZ 여재의 경우는 68.2%~99.3%(평균 74.7%)로, 소성한 zeolite, 혼합 여재, 활성탄 순으로 처리효율이 양호하였다. Zn의 경우는 perlite(P)가 28.8%~82.5%(평균 46.2%), 활성탄(A)은 30.3%~95.3%(평균 63.5%), 소성한 zeolite(Zc)는 30.6%~97.0%(평균 40.5%), 건조한 zeolite(Zd)는 38.7%~82.0%(평균 60.7%), 세 여재를 혼합한 PAZ 여재의 경우는 35.5%~76.8%(평균 50.4%)로 활성탄, 건조한 zeolite, 혼합 여재 순으로 처리효율이 양호하였다.

대체로 SS는 활성탄과 혼합여재가, 중금속은 zeolite 및 활성탄이 양호하였고, perlite는 중간 정도의 처리효율을 나타내었다.

**Table 2.** Results of particle size distribution for column test (unit :  $\mu\text{m}$ , %)

Media	Surface loading rate( $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ )					Average	Size reduction rate
	200	300	400	500	600		
Inflow	40.3 $\mu\text{m}$	44.0 $\mu\text{m}$	245.1 $\mu\text{m}$	118.7 $\mu\text{m}$	95.5 $\mu\text{m}$	108.7 $\mu\text{m}$	%
P	27.9	28.9	29.9	57.8	65.0	41.9	61.4
A	12.0	22.5	27.8	26.8	30.8	24.0	77.9
Zc	25.2	34.1	36.2	32.4	48.7	35.3	67.5
Zd	20.5	25.3	25.8	64.8	107.7	48.8	55.0
PAZ	30.7	34.5	48.8	85.7	101.0	60.1	44.6
Average	23.3	29.1	33.7	53.5	70.7	42.0	61.3

**3.2.2. 여재 별 처리 전후의 입경분포**

여과 실험에 사용된 여재에 의한 처리 전후의 입경분포를 조사함으로써 입경분포 특성을 조사하였다. 유입수의 입경 범위는 입자의 부피를 기준(volume base)으로 조사한 경우 40.3~245.1  $\mu\text{m}$ 이고, 산술평균 입경은 108.7  $\mu\text{m}$ 이었다. 100  $\mu\text{m}$  체로 거른 부유물질을 대상으로 한 유입수의 입자 중 100  $\mu\text{m}$ 를 초과하는 것은 시료가 저류조에서 교반하는 과정에 응결된 것으로 추정된다.

여재별 처리수에 대한 평균입경은 perlite가 41.9  $\mu\text{m}$ , 활성탄이 24.0  $\mu\text{m}$ , 소성한 zeolite가 35.3  $\mu\text{m}$ , 건조한 zeolite가 48.8  $\mu\text{m}$ , 혼합여재가 60.1  $\mu\text{m}$ 로 전반적으로 평균 24~60  $\mu\text{m}$  분포를 나타내었다. 평균 입경감소율은 perlite가 61.4%, 활성탄이 77.9%, 소성한 zeolite가 67.5%, 건조한 zeolite가 55.0%, 혼합여재가 44.6%로 전체로는 입경이 평균 61.3% 감소하는 것으로 조사되었다. 유출수의 입경분포는 수면적부하율에 따라 다소 증가하는 경향은 있으나 이는 높은 수면적부하율로 인한 입자의 돌파로 추측된다. 대체로 60  $\mu\text{m}$  이상의 입자는 대부분 제거되는 것으로 조사되어 여재에 의한 처리효율은 유입수의 입자 분포가 큰 변수가 될 수 있고, 입도분포에 따라서는 처리에 한계가 있음을 확인할 수 있었다. 여과실험에 이용된 시료의 유입수 및 유출수의 평균 입경분포와 입경감소율을 Table 2에 정리하였다.

**3.3. HDFSE에 의한 처리실험 결과**

**3.3.1. 여재별 도로 유출수처리**

수리동력학적 필터형 분리장치인 HDFSE를 이용하여 도로의 초기 강우유출수에 대해 현장에서의 처리실험을 실시하였다. 칼럼여과실험 결과를 근거로 하여 선정된 적용 여재는 perlite(P), 활성탄(A)과 두 여재를 같은 부피로 혼합한 PA에 대해 도로의 초기 강우유출수에 대한 처리실험결과는 다음과 같다.

**(1) perlite 여재(P)에 의한 처리**

내경이 26 cm, 높이 10 cm인 filter cartridge에 perlite 여재를 9 cm 충전한 HDFSE에 의해 도로 초기유출수의 처리 결과를 수면적부하율 별로 Table 3에 정리하였으며, 이를 유출수의 경과시간 별로 비교한 그래프는 Fig. 5와 같다.

**Table 3.** Results of field test of HDFSE by perlite filter media (unit : %)

Component	Surface loading rate( $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ )						QWA*
	327	506	659	908	1121	1449	
SS	70.3	54.4	44.7	34.8	27.8	25.2	36.1
BOD	18.3	16.8	16.8	12.4	12.7	9.1	12.9
COD	24.3	21.1	19.4	15.1	12.1	10.1	14.8
TN	29.5	21.4	18.3	15.1	13.1	10.3	15.3
TP	38.6	36.3	35.7	27.3	14.1	11.6	22.5
Fe	51.9	41.1	39.8	31.6	21.9	19.8	29.4
Cu	45.1	38.7	35.4	31.7	26.5	20.0	29.2
Cr	38.6	33.3	29.0	26.5	25.5	23.6	27.2
Zn	27.2	22.2	20.0	14.4	10.3	9.1	14.3
Pb	36.4	32.7	29.5	28.6	24.0	18.2	25.6

\* QWA : flow-weighted average

수면적부하율은 320~1,450  $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ 의 범위에서 운전되었으며, 이때 여재에 의한 손실수두는 0.2~1.0 cm로 수두손실이 비교적 적었다. 적용실험 결과 성능인자(performance indicator)라 할 수 있는 유량가중 평균제거율은 SS 36.1%, BOD 12.9%, COD 14.8%, TN 15.3%, TP 22.5%의 제거율을 나타내었다. 중금속인 경우 Fe 29.4%, Cu 29.2%, Cr 27.2%, Zn 14.3%, Pb 25.6%인 것으로 조사되었다. 이러한 처리성능은 칼럼여과실험 결과와 비교할 때 전반적으로 낮은 처리효율을 나타내었다. 이러한 이유는 도로유출수내의 부유물질 입자분포가 평균 20  $\mu\text{m}$  이하의 미세한 입자들의 비율이 높은 점과 여재층의 깊이도 칼럼 여과층의 30 cm에 비해 1/3 수준으로 작는데 원인이 있는 것으로 분석된다.

대체로 수면적부하율이 증가할수록 제거율이 감소하는 일반적인 경향을 보였으며, 강우지속시간 별로는 강우 시간이 지속될수록 처리효율이 감소하는 것으로 조사되어 수시로 여재의 세척이 필요한 것으로 평가된다.

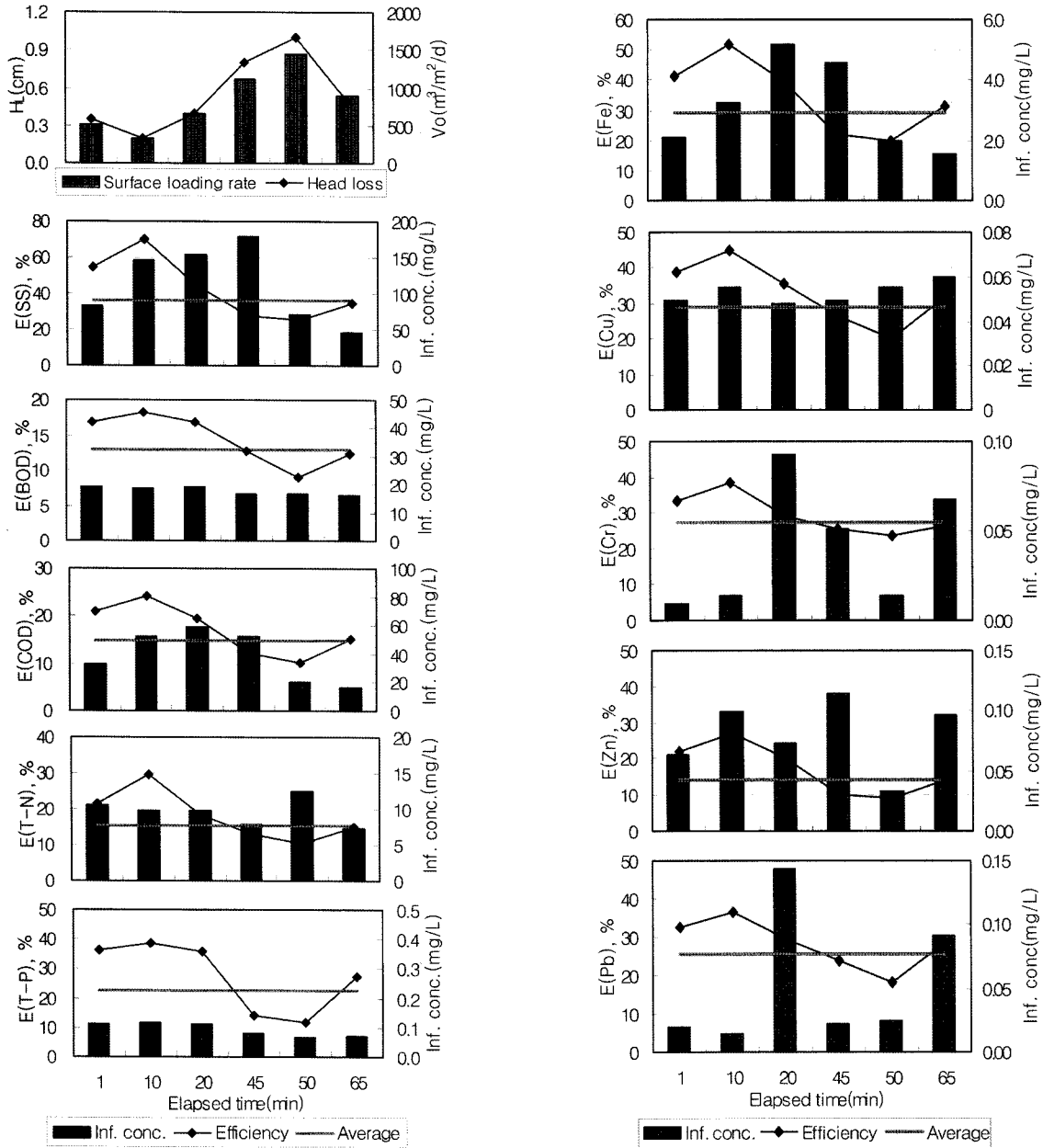
**(2) 활성탄 여재(A)에 의한 처리**

활성탄 여재에 의한 도로유출수의 처리 결과를 수면적부하율 별로 Table 4에 정리하였으며, 이를 유출수 경과시간 별로 비교한 그래프는 Fig. 6과 같다.

수면적부하율은 123~803  $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ 의 범위에서 운전되었으며, 이때 여재에 의한 손실수두는 0.5~3.5 cm로 perlite 여재 보다는 다소 높았다. 처리실험 결과 유량가중 평균제거율은 SS 22.0%, BOD 26.8%, COD 36.6%, TN 20.3%, TP 27.1%를 나타내었다. 중금속인 경우 Fe 20.0%, Cu 29.3%, Cr 30.5%, Zn 26.7%, Pb 20.4%인 것으로 조사되었다. 활성탄도 perlite의 경우와 같이 수면적부하율이 증가할수록 제거율이 감소하는 경향과 유입농도가 높을수록 처리효율도 증가하는 것으로 조사되었다. 또한 perlite에 비해 SS를 제외하고는 처리효율이 높은 것으로 분석되었다.

**(3) Perlite와 활성탄 혼합여재(PA)에 의한 처리**

Perlite와 활성탄을 같은 부피로 혼합한 PA여재에 의한 강우유출수의 처리 결과를 수면적부하율별로 Table 5에 정



(a) SS, BOD, COD, TN, TP

(b) Heavy metals

Fig. 5. Graph of field test results of HDFS by perlite filter media with elapse time.

Table 4. Results of field test of HDFS by activated carbon filter media (unit : %)

Component	Surface loading rate(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d)							QWA
	123	216	227	232	452	484	803	
SS	66.1	60.7	57.8	45.8	34.5	33.9	19.8	22.0
BOD	39.2	30.8	28.8	22.5	21.4	18.7	17.1	26.8
COD	66.4	52.9	46.4	33.3	21.4	20.0	13.3	36.6
TN	34.6	28.1	26.3	23.3	20.5	18.5	14.5	20.3
TP	44.1	39.4	35.2	31.4	25.8	23.7	20.5	27.1
Fe	43.5	37.6	30.9	21.6	19.8	16.6	10.4	20.0
Cu	52.7	42.8	35.0	31.5	31.2	26.8	20.4	29.3
Cr	53.6	46.0	34.9	33.8	32.1	28.1	21.1	30.5
Zn	48.2	38.6	33.8	32.7	26.5	23.2	18.7	26.7
Pb	37.1	34.4	28.9	23.6	20.1	16.5	13.1	20.4

리하였으며, 이를 유출수의 경과시간에 따른 처리효율 그래프를 Fig. 7에 비교하였다.

수면적부하율은 192~1,469 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d의 범위에서 운전되었으며, 이때 여재에 의한 손실수두는 1~4 cm의 높은 수치를 나타냈다. 처리실험 결과 평균 제거율은 SS 48.1%, BOD 31.9%, COD 32.6%, TN 15.5%, TP 17.3%의 제거율을 나타내었다. 중금속인 경우 Fe 26.0%, Cu 19.4%, Cr 25.7%, Zn 16.6%, Pb 15.0%로서 대체로 perlite나 활성탄 단독 여재 보다는 다소 처리효율이 높은 것으로 조사되었다.

수면적부하율이 높을수록 제거율이 낮아지는 일반적 경향 외에, 강우 시간이 지속될수록 처리효율이 증가하는 또 다른 경향을 보였는데 이는 강우 후반기에 유입 농도가 높아 부

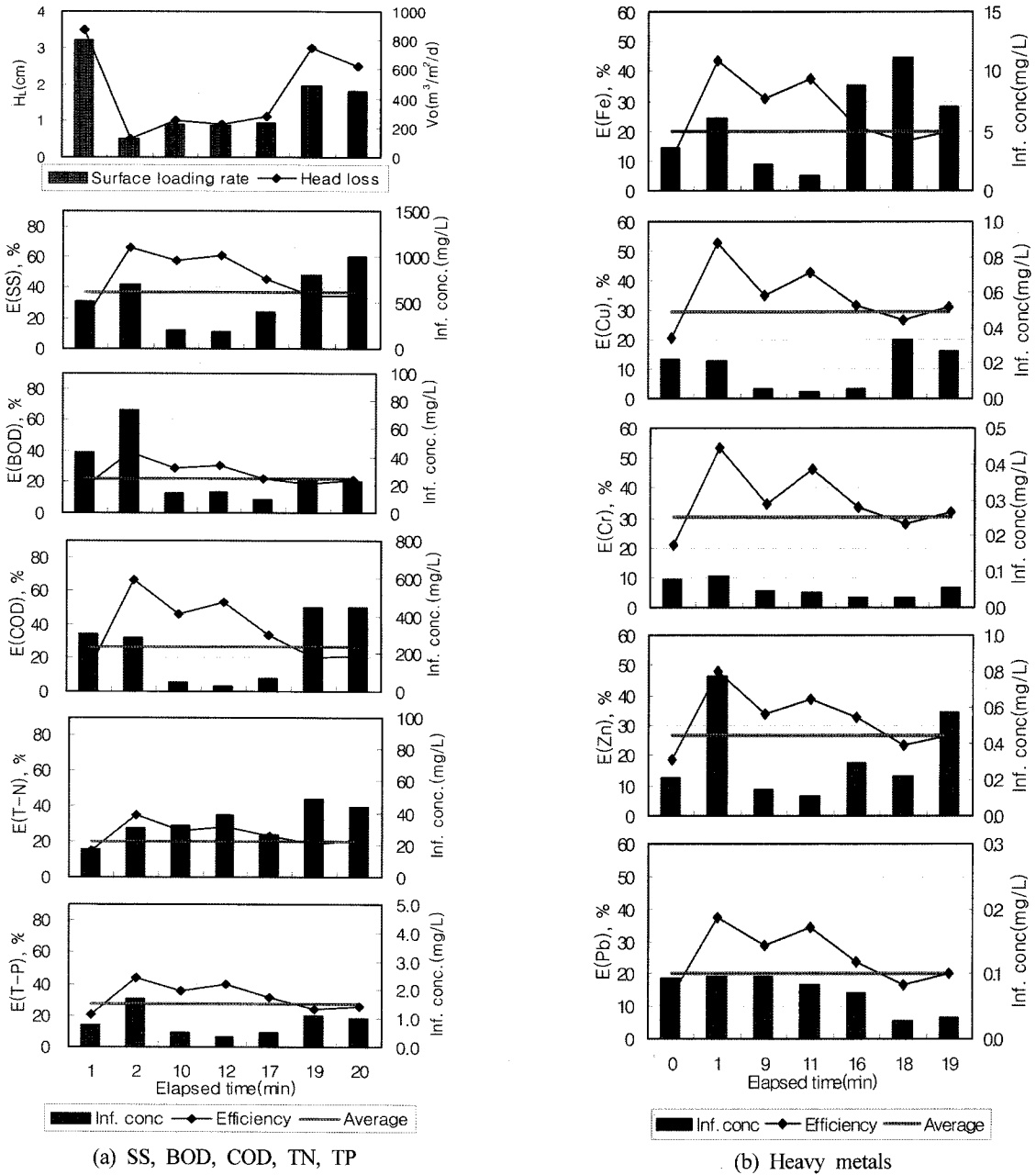


Fig. 6. Graph of field test results of HDFFS by activated carbon filter media with elapse time.

Table 5. Results of field test of HDFFS by mixed filter media of perlite and activated carbon (unit : %)

Component	Surface loading rate(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d)							QWA
	192	339	426	778	897	1190	1469	
SS	19.7	63.9	56.4	49.3	46.6	44.7	40.8	48.1
BOD	49.4	46.5	45.5	44.4	37.0	21.4	20.9	31.9
COD	72.7	64.3	41.7	37.0	33.3	27.3	19.0	32.6
TN	36.4	29.1	25.9	16.7	14.5	11.0	10.2	15.5
TP	27.4	23.9	19.8	18.6	17.8	16.4	13.4	17.3
Fe	38.6	36.8	33.1	32.1	23.6	22.7	20.7	26.0
Cu	32.0	26.4	23.1	20.4	19.8	19.8	13.8	19.4
Cr	29.6	28.8	26.6	25.0	24.7	26.0	25.0	25.7
Zn	23.1	23.0	23.0	21.3	16.8	14.6	11.3	16.6
Pb	26.8	19.4	18.1	17.9	17.6	14.8	8.6	15.0

유물질을 거르는 과정에서 나타난 현상이라 판단된다.

3.3.2. 처리 효율의 종합평가

HDFFS를 이용하여 현장에서의 도로퇴적물의 초기 유출수에 대한 필터여재별 평균 처리효율을 Table 6에 정리하였으며, 비점오염원의 장치형 처리시설들이 제시한 처리효율과 본 장치의 처리효율을 Table 7에 비교하였다. 일반적인 처리 경향을 보면 대체로 SS 등 일반적인 수질항목은 perlite와 활성탄 혼합여재가, 중금속은 활성탄이 양호한 것으로 조사되었다. 그러나 활성탄의 흡착능이 소실되면 단순히 여재로서 부유물질의 거름에 의한 오염물질을 처리하여야 함으로 perlite와 활성탄 혼합여재가 도로유출수 처리에 적합할 것으

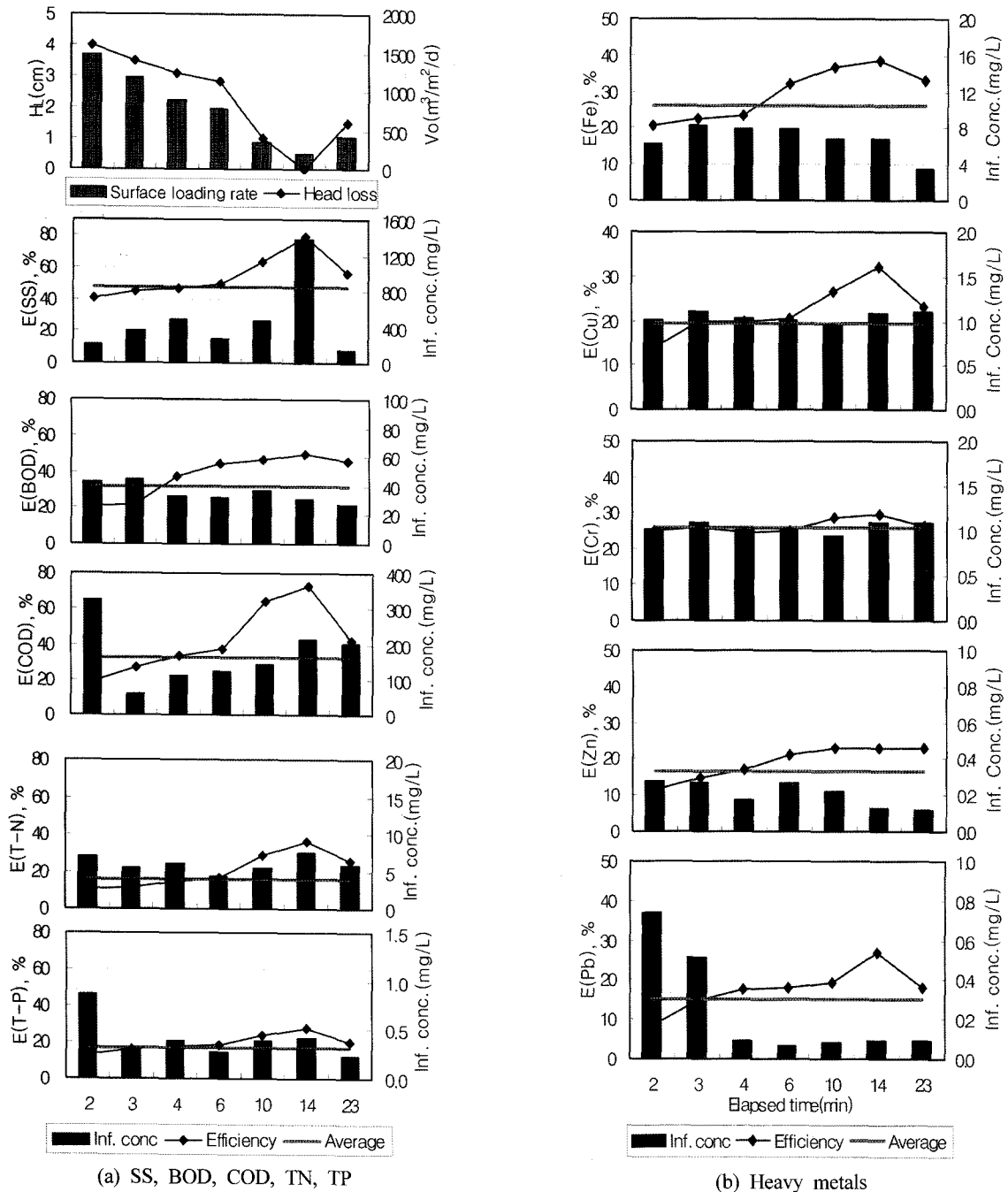


Fig. 7. Graph of field test results of HDFS by mixed filter media of perlite and activated carbon with elapse time.

로 판단된다

HDFS에 의한 처리실험결과를 다른 처리장치와 비교한다는 것은 처리유량이나 체류시간, 입자분포와 같은 처리 대상 물질의 성상 등의 차이가 있으므로 이를 비교하기 위해서는 처리대상물질 및 제한조건 등을 동일하게 하여 비교하여야 타당할 것이다. 그러나 Table 7에서와 같이 문헌에 보고된 효율과 단순 비교하면 본 처리장치가 다소 낮은 효율을 나타내고 있다. 그러나 체류시간이 1분 미만이고, 대상 유입수의 평균입자분포가 대체로 20  $\mu\text{m}$ 인 점을 감안하면 현장에 적용 가능성이 있는 것으로 평가한다. 그러나 여재 재생을 위한

세척방법과 불규칙한 처리유량에 대한 대처 등의 문제는 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Table 6. Comparison of average removal efficiencies in according to media of HDFS (unit : %)

Media	$V_o$ ( $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ )	SS	BOD	COD	T-N	T-P	Fe	Cu	Cr	Zn	Pb
P	327~1,449	36.1	12.9	14.8	15.3	22.5	29.4	29.2	27.2	14.3	25.6
A	123~803	22.0	26.8	36.6	20.3	27.1	20.0	29.3	30.5	26.7	20.4
PA	192~1,469	48.1	31.9	32.6	15.5	17.3	26.0	19.4	25.7	16.6	15.0



**Table 7.** Comparison of removal efficiencies of storm runoff with various type of separator

Investigator	Removal Efficiency(%)		Reactor type
	SS	COD	
Field(1996) <sup>9)</sup>	21~68	-	Swirl Concentrator
Brombach(1993) <sup>10)</sup>	32~91	30~92	Vortex Separator
Plum(1998) <sup>11)</sup>	67~91	15~75	Actflo Method
Bridoux(1998) <sup>12)</sup>	70	60	Lamella Settler
Delporte(1995) <sup>13)</sup>	80~90	35~75	Lamella Settler
H.I.L.(1991) <sup>14)</sup>	80	70	Storm King
Bang(2001) <sup>15)</sup>	67~92	38~75	Swirl Concentrator
This Study	36~48	15~33	HDFS

#### 4. 결론

도로에 퇴적되었다가 배출되는 강우유출수의 오염저감을 위해 perlite, 활성탄, zeolite와 이들의 혼합소재를 이용하여 필터별 오염물질 처리효율을 비교 평가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 칼럼여과실험결과 수면적부하율 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d~600 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d의 범위에서 여재별 유량가중 평균처리효율을 보면 SS의 경우 perlite가 63.5%, 활성탄은 69.4%, 소성한 zeolite는 59.2%, 건조한 zeolite는 57.2%, 세 여재를 혼합한 PAZ 여재의 경우는 68.1%이었다.

Fe의 경우는 perlite가 68.4%, 활성탄은 71.4%, 소성한 zeolite는 74.9%, 건조한 zeolite는 49.7%, 세 여재를 혼합한 PAZ 여재의 경우는 74.7%이었다.

Zn의 경우는 perlite가 46.2%, 활성탄은 63.5%, 소성한 zeolite는 40.5%, 건조한 zeolite는 60.7%, 세 여재를 혼합한 PAZ 여재의 경우는 50.4%로서 대체로 SS는 활성탄과 혼합여재가, 중금속은 Zeolite 및 활성탄이 양호하였다.

2) 여재의 입자경이 1.4~2 mm 범위에서 여재별 처리수에 대한 입자들의 평균입경은 perlite가 41.9 μm, 활성탄이 24.0 μm, 소성한 zeolite가 35.3 μm, 건조한 zeolite가 48.8 μm, 혼합여재가 60.1 μm로 전반적으로 평균 24~60 μm 분포를 나타내었다.

3) 현장에서 필터분리기인 HDFS를 이용한 처리실험을 한 결과 perlite와 활성탄 혼합여재가 가장 양호한 결과를 보였다. Perlite와 활성탄 혼합여재에 의한 유량가중 평균 처리효율은 수면적부하율 192~1,469 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d인 범위에서 SS 48.1%, BOD 31.9%, COD 32.6%, TN 15.5%, TP 17.3%의 제거율을 나타내었다. 중금속인 경우 Fe 26.0%, Cu 19.4%, Cr 25.7%, Zn 16.6%, Pb 15.0%이었다.

4) 처리실험결과를 분석할 경우 대체로 SS, BOD 등 일반 수질항목은 perlite와 활성탄 혼합여재가, 중금속은 활성탄이 양호한 것으로 조사되었다. 그러나 장기적인 측면에서는 부유물질의 여과에 의해 오염물질을 처리하여야 함으로 perlite와 활성탄의 혼합여재가 도로유출수 처리에 적용 가능할 것으로 사료된다.

#### 사 사

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(R05-2003-000-11303-0)로 연구비를 지원한 관계기관에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Vaze, F., Chiew, F.H.S., "Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface," *Urban Water*, **4**, 379~389(2002).
- Lee, J. H., Bang, K. W., Ketchum, Jr. L. H., Choe, J. S., and Yu, M. J., "First flush analysis of urban storm runoff," *Sci. Total Environ.*, **293**, 163~175(2002).
- 이준호, 조용진, 방기웅, "강우시 도로유출수 특성분석 : 수질특성 및 입경분포," 대한환경공학회지, **27**(7), 777~784(2005).
- 강희만, 이주광, 김혜진, 고석오, 김이형, "고속도로 강우유출수 처리를 위한 여재의 흡착특성," 대한환경공학회 2006 춘계학술연구발표회 논문집, pp. 821~826(2006).
- 박상우, 오재열, 최영화, "흡착소재에 따른 도로노면 유출수의 오염원 저감특성," 대한환경공학회 2006 춘계학술연구발표회 논문집, pp. 903~908(2006).
- Mehmet Dogan, et. al., "Kinetics and mechanism of removal of methylene blue by adsorption onto perlite," *J. Hazardous Materials*, **B109**, 141~148(2004).
- Martin Hübner, Wolfgang F. Geiger, "Review of hydrodynamic separator-regulator efficiencies for practical application," *Water Environ. Technol.*, **32**(1), 109~117(1995).
- Richard Field, Thomas P. O'Connor, "Swirl technology : Enhancement of design, evaluation, and application," *J. of Environ. Eng., ASCE*, **122**(8), 741~748(1996).
- Field R., O'Connor T. P., "Swirl technology : enhancement of design, evaluation, and application," *J. of Environ. Eng., ASCE*, **122**(EE8), 741~748(1996).
- Brombach H., Xanthopoulos C., Hahn H. H., Pisano W. C., "Experience with vortex separators for combined sewer overflow control," *Water Environ. Technol.*, **27**(5), 93~104(1993).
- Plum, V., Dahl, C. P., Bentsen, L., "The Actfloc method," *Water Environ. Technol.*, **37**(1), 269~275(1998).
- Bridoux, G. A., Villeroix, A., Riotte, M., "Optimised lamella settling process for runoff water treatment," *Water Environ. Technol.*, **38**(10), 107~114(1998).
- Delporte, C., Pujol, R., Vion, P., "Optimum Lamellae settling for urban stormwater waste," *Water Environ. Technol.*, **32**(1), 127~136(1995).
- H.I.L. Technology Inc., Storm King(1991).
- 방기웅, 이준호, "Swirl 농축분리기를 이용한 합류식 하수관 월류수의 처리," 대한환경공학회지, **23**(1), 21~30(2001).