

## 흡착 소재별 도로 노면 유출 오염원의 저감성 비교 연구

### Feasibility Study with Several Sorption Materials to Treat Road Runoff Pollutions

박상우 · 오재일\* · 최영화

Park, Sangwoo · Oh, Jeill\* · Choi, Younghwa

중앙대학교 건설환경공학과

(2006년 8월 3일 논문 접수: 2006년 9월 25일 최종 수정논문 채택)

#### Abstract

This research was conducted to figure out the feasibility of several sorption materials to treat various pollutants in road runoff. In advance of the major feasibility test with various sorption materials, the separation process with 1.2 $\mu$ m filter was conducted and showed that slight portion of pollutants was removed(Organic pollutant - 20%, Nutrient salt - 50%, Heavy metals - 0~30%). To remove dissolved pollutants in runoff, various materials were tested through an isotherm sorption experiment. As a result, GAC showed most effective material among them to lessen most contaminants such as organic compounds and nutrients. On the other hand, ion-exchange resin and Zeolite showed limited usefulness on the some heavy metals. Freundlich model was most suitable for the current experiment data, and the amount of adsorbent (GAC) could calculated based on this model.

**Key words:** Non-point source, Urban Stormwater, Separation, Adsorption, GAC

**주제어:** 비점오염원, 도시 유출수, 분리, 흡착, 활성탄

#### 1. 서 론

대부분의 도로는 불투수성 포장 재료를 사용하기 때문에 일정량 이상의 강우가 발생하면 도로노면 위에 축적된 각종 오염물질들이 유출(Runoff)되는 도로 노면 오염유출 현상이 발생한다. 이러한 도로노면 유출수의 경우 도시 내 비점오염 발생원의 주된 구성원

으로 알려져 있으며, 강우강도, 선행건기일수, 차량 통행량, 포장 형태 등의 다양한 인자에 의하여 오염 유출 정도가 다양하게 변동하는 것으로 알려져 있고 다량의 유기성 오염물질과 영양염류 및 각종 중금속 성분들이 유출수 내에 포함되어 배출되고 있는 것으로 밝혀지고 있다(최광운과 이종태, 2000; 김석구 등, 2004; 노성덕 등, 2004; 최상용, 2004; 김이형과 강주현, 2004; 이준호 등, 2005).

\*Corresponding author. Tel: +82-2-820-5339, FAX: +82-2-812-1834, E-mail: ohjeill@cau.ac.kr (Oh, J.I.)

국내의 경우 1997년에 수립된 '물관리종합대책'에서 비점오염원 관리부분이 정부 계획 차원에서 처음으로 고려된 이후 도로노면 유출수의 오염원 저감을 위한 처리 기술이 점차 소개되기 시작하였으며, 크게 저류형, 침투형, 식생형, 장치형 등으로 구분 발전되어 왔다. 한편, 각각의 방식마다 장·단점이 있으나 설치 소요 부지가 적고 상대적으로 적은 비용이 요구되는 국내 현실을 고려하였을 때, 최근 도시지역을 중심으로 장치형 시설(상용화 - Stormceptor, Stormtreat, StormFilter, AquaFilter, RCS 등)의 설치가 점차 증대되고 있는 실정이다(공민근 등, 2004; 김석구 등, 2004; 노성덕 등, 2004). 한편, 국내·외 대부분의 장치형 시설은 상당량의 도로노면 오염원이 용존된 형태로 배출되기 때문에 단순 침전 형태만이 아닌 침전과 여과형 방식을 병행하는 저감 방식을 주로 사용하고 있다(Glenn, 2001; 최영화 등, 2004; 오재일 등, 2005).

본 연구는 국내에 소개되기 시작한 장치형 필터 방식을 위한 최적 필터 소재를 파악하기 위한 선행연구의 성격을 지니고 있으며, 국내 도로노면 유출수 오염원에 적합한 저감 필터 소재를 사전적으로 파악하기 위한 연구이다. 최근 들어 국내에서 발생하는 도로노면 유출수의 오염성분 규명이 어느 정도 이루어지고 있으나, 이에 상응하는 저감 필터 소재에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 용존 상태의 도로노면 유출수 오염원 처리를 위한 필터(이온교환·흡착) 방식에 초점을 맞추어 실험을 수행하였다. 먼저 사전 중력 침전 및 분리 공정을 통하여 도로노면 유출수의 1차적인 오염원 저감을 관찰하고, 용존성 오염원의 저감은 다양한 필터 소재별(천연 제올라이트, 이온교환수지, 활성탄-GAC)별로 3~4개 제품을 선택하여 흡착(이후 본문에 제시되는 이 용어는 이온교환의 의미도 포함함) 실험을 실시하여 소재별 차이에 의한 도로노면 오염원(용존성)의 저감 현상을 비교·분석하였다.

## 2. 실험 재료 및 방법

국내 도로노면 유출수의 용존상 오염원 구현을 위한 사전 분리공정(침전/필터 분리) 성능 및 흡착에 따른 저감 성능을 각종 흡착 소재에 따라 종합적으로

분석하기 위해 연속적인 실험을 수행하였다. 먼저 단순 중력 침전과 1.2 $\mu$ m의 GF/C 필터를 이용한 오염원의 입자성/용존성 분리(separation) 실험을 한 뒤, 천연 제올라이트(Natural Zeolite), 이온교환수지(Ion-Exchange Resin), 활성탄(GAC-Granular Activated Carbon) 소재를 이용한 흡착 실험을 실시하였다. 이러한 소재별 흡착실험을 통하여 소재별 오염저감 능력, 최적투입량 산정 및 시간에 따른 오염저감 속도 등 소재별, 도로노면 오염원별(COD, N, P, 중금속 등) 처리 성능을 판단하는 기본 자료를 획득할 수 있으며, 추후에 엔지니어링 도로노면 오염 유출수 처리를 위한 저감시설 설계인자 산출을 위한 기초 자료로 활용 가능케 하였다.

### 2.1. 흡착 소재

흡착 소재는 크게 3가지 그룹(Natural Zeolite, Ion-Exchange Resin, GAC)으로 나눌 수 있으며, 각 그룹별 제조사의 재료 제원 혹은 생산 특성에 따라 다시 세부분류로 나뉘지며 그 자세한 내용은 **Table 1**과 같다.

본 실험에 사용된 소재는 현장 적용성 위주로 판단하기 위하여 순도가 높은 실험실용 재료가 아니라 주로 현장에서 사용되는 공업용 재료들을 무작위로 구매하여 사용하였으며, 제품 품질의 QA/QC를 보장하기에는 가격 대비 품질 특성상 상당히 어려운 것으로 판단되었다. 다만 소재별 비교 성능의 전체적인 경향(Trend)을 판단하기 위한 근거 자료로서 본 실험 결과를 활용하고자 하였음이 주된 실험 목적이었음을 사전에 주지하는 바이다. 획득된 재료를 통한 본격적인 실험에 앞서 각 재료별로 사전에 간단한 전처리를 수행하였다. 일단 제올라이트와 GAC 시료에 대하여 8번(2.36mm)과 12번(1.0mm)체로 체가름을 하여 시료의 입경을 모두 균등하게 조절하였다. 이후 천연 제올라이트와 GAC는 보관 및 운반상의 변질을 보정하기 위하여 110°C에서 12시간 건조한 뒤 데시케이터 안에서 1시간 동안 방냉을 실시하였고, 천연 제올라이트에 대하여서는 건조 전에 증류수 세척 및 NaCl(38,000mg/L) 용액을 통한 사전 이온치환 작업을 실시하였다. 이온교환수지는 전처리 과정 없이 본 실험에 그대로 사용하였다.

**Table 1.** 실험에 사용된 흡착소재 세부구분 및 특성

천연 제올라이트	비중	교환용량(meq/100g)	입도범위(mm)	재료특성
Z-A	2.2	N/A	1-2.36	Clinoptilolite
Z-B	2.2	123	1-2.36	Clinoptilolite
Z-C	2.01-2.2	70-130	1-2.36	Clinoptilolite, Mordenite
이온교환수지	총전밀도(g/L)	교환용량(eq/L)	모체	기타
R-A	755	2.2	N/A	Macro Porous, 킬레이트수지
R-B	700-735	N/A	Styrene-Divinylbenzene	Macro Porous, 킬레이트수지
R-C	665-730	1.35	Styrene-Divinylbenzene	Macro Porous, 약산성양이온교환수지
R-D	825	2.0	Polystyrene-Divinylbenzene	Gel, 강산성양이온교환수지
활성탄	총전밀도(g/L)	요오드 흡착력(mg/g)	입도범위(mm)	비표면적(m <sup>2</sup> /g)
G-A-1	430-480	950	1-2.36	950
G-A-2	430-480	1,000	1-2.36	1,100
G-B-1	480-550	1,000	1-2.36	N/A
G-B-2	450-500	1,000	1-2.36	N/A
G-C-1	400-500	N/A	1-2.36	700-1,300
G-C-2	400-500	N/A	1-2.36	600-1,500

1) 구분 : Z-Zeolite, R-Resin, G-GAC; A, B, C, D-제조사별 분류 표기; GAC 분류에서 1-석탄계, 2-야자계 원료를 의미함.  
2) 입도범위 : 원재료를 체가를 하여서 획득된 실험재료 입도범위.

## 2.2. 도로노면 유출수 시료채취 및 입자성 물질 사전 분리단계

실험에 사용된 도로노면 유출수는 현장(원효대교)에서 강우 시 여러 번 채취된 시료 중에서 사전건기 일수 및 강우강도가 충분히 확보된 샘플(초기오염농도가 가장 높을 것이라고 판단)을 실험 유출수로 사용하였으며, 강우발생 후 유출 시작으로부터 30분 이내의 노면 유출수를 교량 집수관으로부터 순서대로 준비된 집수통(20L 5통=100L)을 이용하여 채취(각 집수통마다 다른 오염 농도 분포)하였다. 이후 집수통을 실험실로 운반한 뒤 2차체에 걸쳐 혼합샘플(Composite sample)을 조성하여 실험에 사용하였다(1차 조성 - 전반기 강우초기 오염수, 전반기 집수통 3통 혼합; 2차 조성 - 후반기 강우초기 오염수, 후반기 집수통 2개 혼합). Table 2는 강우 유출 초기의 집수통 3개를 이용하여 조성한 1차 실험용 혼합시료와 2차 추가 실험을 위하여 강우 유출 후반기의 집수통 2개를 이용하여 조성한 2차 실험용 혼합시료의 성상이다. 한편, 언급한 바와 같이 조성된 시료의 경우 모래, 협잡물 등과 같은 입자성 물질(particulates; SS)들을 다수 내포하고 있기 때문에 용존성 흡착시험에 영향을 미칠 수 있는 이러한 입자성 물질들을 사전에 제거하였다. 1차적으로는 단순 중력 침전을 이용 협

잡물 등을 가라앉힌 후 상정액을 1.2µm의 GF/C (Whatman International Ltd., Maidstone, England) 필터를 사용하여 2차 처리하였으며 궁극적으로는 흡착 시험을 위한 SS성분 제거 시료를 준비하였다. 다음 표는 이러한 과정을 거쳐 조성된 2개의 혼합시료의 초기 농도 범위를 표시한 것이다(냉장 보관되는 시료를 단계별로 시차를 두어 실험을 실시함으로써 초기 측정 농도가 각 실험마다 다소 차이를 보이고 있음).

## 2.3. 흡착 실험

흡착 실험은 분리 방식에 의하여 SS성분이 제거된 상태의 시료를 사용하여 진행하였으며 사용된 시료의 성상은 Table 2에 제시되었다.

흡착 실험은 흡착 소재별 정해진 투입량(천연 제올라이트-5, 10, 20, 50, 100, 200g; 이온교환수지-5, 10, 30, 60, 100, 150g; GAC-0.5, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200g)을 준비된(SS제거) 도로 노면 유출수 1L와 함께 비이커(2L 용기)에 넣어서 Jar-tester로 교반하면서 실시하였다. 교반 속도는 200rpm으로 온도 및 pH의 변화를 관찰해 가면서 총 3시간 동안의 반응시간을 거쳐 실시하였다. 교반 시작 및 종료 시에는 일정량(50ml)의 시료를 샘플링하여 필터 작업을 거친 뒤 COD<sub>Cr</sub>, BOD<sub>5</sub>(GAC에 한정), T-N, T-P,

**Table 2.** 흡착소재 실험에 사용된 도로노면 유출수 오염원별(용존상) 초기 농도

(단위: mg/L)

구분	천연 제올라이트, 활성탄 실험용 (1차 조성 노면 유출수 시료)	이온교환수지 실험용 (2차 조성 노면 유출수 시료)	
일반 수질 항목	COD <sub>Cr</sub>	1168-1238	435-507
	BOD <sub>5</sub>	320-326	N/A
	T-N	15.54-20.85	8.68-14.8
	T-P	0.35-0.50	0.06-0.08
중금속 항목	Zn	1.721-1.744	0.770-0.780
	Pb	0.055-0.058	0.059-0.081
	Cu	0.343-0.350	0.135-0.145
	Cr	0.024-0.026	0.028-0.029
	Cd	0.014-0.014	0.010-0.013

- 1) 재료별 용존상 오염원 흡착 저감을 살펴보기 위한 위 실험의 유출수 시료는 중력 침전과 1.2 $\mu$ m의 GF/C 필터를 이용한 사전 분리 공정(침전/필터링)을 거친 용존 오염원별 초기 농도임.
- 2) 시차를 두고 실시한 각 흡착시험에서 측정된 초기농도는 매 실험에서 다소 다른 정도를 보임. 따라서 본 표에서는 이러한 측정범위를 초기농도 범위를 종합 표기함.

**Table 3.** 국내·외 자료에서의 도로노면 유출수 수질 성상(EMC)

(Unit: mg/L)

Reference	COD	T-N	T-P	SS	Zn	Pb	Cu	Cr	ADT*
NCHRP (2001)	114	1.83	0.4	142.0	0.329	0.400	0.054	-	>30,000
Legret and Pagotto (1999)	103	2.30	-	71.0	0.356	0.058	0.045	-	12,000
IECA (2002)	103	1.82	0.43	141.0	0.158	0.049	0.003	-	-
최영화 등 (2004)	146	5.38	0.45	102.8	0.450	0.120	0.070	0.010	84,000
김구범 등 (2005)	82	2.49	0.42	88.7	0.101	0.008	0.093	0.002	-

1) ADT: Average Daily Traffic

2) EMC = Event Mean Concentration

중금속(Zn, Pb, Cu, Cr, Cd) 항목에 대하여 분석을 실시하였으나(수질오염 공정시험법, 환경부, 1999; Standard method, APHA, 1998; 유도분극 플라즈마 원자발광광도계, ICP, JobinYvon, Ultima2), 본 실험에서 의미있는 정량화 수치가 구현되는 수질항목인 COD<sub>Cr</sub>, BOD<sub>5</sub>, T-N, Zn에 대해서 중점 분석을 실시하였다.

한편 상대적으로 흡착 효과가 뛰어난 GAC에 대하여서는 추가적으로 흡착 시간에 따른 흡착평형도달 실험을 추가로 수행하였다. GAC 100g을 노면 유출수 시료 1L와 함께 비이커(2L 용기)에 넣어서 Jar-tester를 이용하여 교반하면서 실험 진행시간(총 4시간) 동안 정해진 시간 간격(0, 2, 7, 12, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240분)에 일정량(50ml)의 시료를 샘플링하여 필터 작업을 거친 뒤 COD<sub>Cr</sub>, T-N에 대해

수질분석을 실시하고 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 입자성 물질 제거에 따른 도로노면 유출수 수질 특성

기존에 발표된 국내·외 도로노면 유출수 수질 성상 조사 연구에 의하면, Table 3과 같은 특성을 보여주고 있으며 조사 대상에 따라 상당량의 입자성 물질(SS성분) 및 다양한 오염물질을 포함하고 있는 것으로 나타나고 있다.

따라서 본 연구에서 용존성 오염물질의 소재별 흡착시험을 수행하기 전에 간단한 중력 침전(24 hrs)과 필터링(1.2 $\mu$ m GF/C 필터)을 통한 사전 여과 단계를 거쳤으며, 이를 통한 수질 특성 변동 결과는 Fig. 1과

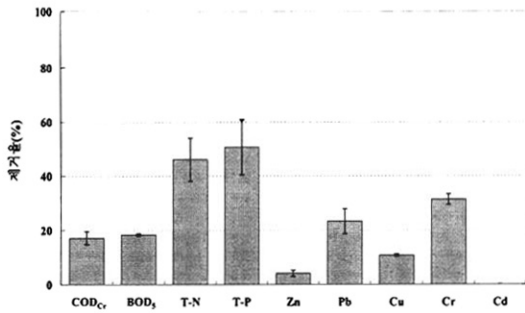


Fig. 1. 도로노면 유출수의 입자성 성분 제거에 따른 수질 특성 (제거율) 변동.

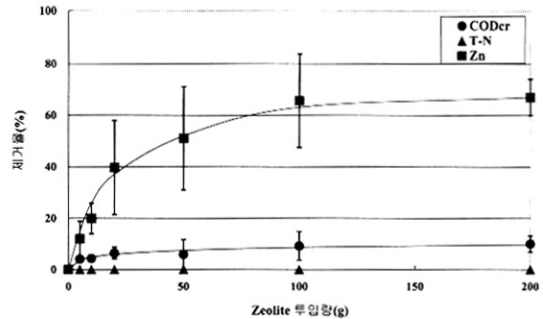


Fig. 2. 국내 생산(3종류) 천연 제올라이트의 투입량에 따른 오염물질별 제거 Isotherm(서로 다른 제올라이트 3종류의 제거율을 통합하여 그래프로 표기함).

같이 확인할 수 있었다. 일반적으로 도로노면 오염수의 장치형 저감 장치에는 입자성 오염물질의 저감도 매우 큰 비중을 차지하고 있음을 주지하는 바이다.

수질 항목별로 상이한 제거율을 나타내고 있으며, 일부 수질항목에서는 상당한 저감 효과를 보여주고 있다. COD<sub>Cr</sub>, BOD<sub>5</sub> 같은 유기성 입자는 약 20% 정도, T-N, T-P는 약 50% 정도, 중금속 항목들은 0~30%까지 제거율을 보이고 있는 것으로 나타났다. 사용된 필터의 종류가 1.2 $\mu$ m의 GF/C 필터임을 고려하였을 때 입자상의 오염물질 중 일부의 미량은 제거되지 않고 필터를 통과한 것으로 판단되지만, 이와 같은 결과는 도로노면 오염물 배출시 COD<sub>Cr</sub>, Zn, Cu, Cd는 주로 용존상의 형태로 배출되며, T-N, T-P, Pb, Cr은 주로 용존상과 입자상의 중간 형태로 배출된다고 보고된 선행 연구결과(최영화 등, 2004; 오재일 등, 2005) 및 다른 연구결과(Sansalone et al., 1996; Glenn, 2001)와 상당히 일치하는 유사성을 보여주고 있다. 따라서 상기 결과로 미루어 볼 때 도로노면 유출수의 저감 시설에서 침전 및 단순 여과 시설을 설치할 경우 유기오염물은 약 20%, 영양염류는 약 50%, 중금속 오염물의 일부는 약 30%까지 저감될 수 있는 것으로 판단되어지지만, 상당부분의 용존성 오염물질 처리를 위해서는 새로운 수단(공정)의 도입이 요구됨을 알 수 있다.

### 3.2. 소재별 흡착 실험을 통한 도로노면 유출수의 용존성 물질 제거 특성

도로노면 유출수의 흡착 소재에 따른 저감 특성을 관심 수질 항목별로 살펴보고, 이를 통해 저감 장치(시설) 설계에 필요한 흡착 소재 선택성 및 효용성

기초 평가를 수행하고자 하였다. 일부 수질항목은 초기 발현 농도가 적고, 사전 침전, 필터링 공정에서 그 농도가 추가적으로 저감되어 후속 흡착 공정을 통한 연속 저감(공정)이 큰 의미를 부여할 수 없고 분석적으로 QA/QC가 확보되기 어려워 본 논문의 대상에서 제외하였다. 따라서 본 절의 주요 분석 대상 용존성 수질항목은 COD<sub>Cr</sub>, T-N, Zn으로 한정하였다.

#### 3.2.1. 천연 제올라이트를 통한 도로노면 유출수의 용존성 물질 제거

천연 제올라이트는 중금속 흡착의 효능을 지니는 것으로 널리 알려져 있으며, 본 실험에서는 Table 1에서 제시한 국내 생산 천연 제올라이트 3종류에 대한 Isotherm 실험 결과를 종합하여 Fig. 2에 표기하였다(천연 제올라이트는 제조사에 따른 흡착 특성이 다를 수 있으나, 전체적으로 다른 소재에 비해 오염물질 저감 특성이 상대적으로 낮아 하나의 통계자료를 통한 저감 경향의 판단만이 유효한 것으로 판단됨. 또한 제올라이트 제조사별 소재 품질 보증이 상대적으로 어려운 것도 감안함).

예비실험(소재 평형도달시간 사전 파악)과 본격 Isotherm 실험 결과 제올라이트는 중금속인 Zn에 대하여 최대 65%의 제거율을 보이고 있으나, 다른 오염수질 항목에 대해서는 예측한대로 큰 저감율을 보여주지 못하였다(100g 투입 시점에서 Zn 제거율은 평형상태에 도달하였으며, 이때의 흡착량은 0.008~0.014mg Zn/g Zeolite이고 COD<sub>Cr</sub>의 경우 100g 투입 시점에서 0.35~1.53mg COD<sub>Cr</sub>/g Zeolite의 흡착량을 보임. T-N은 전혀 제거되지 않음).

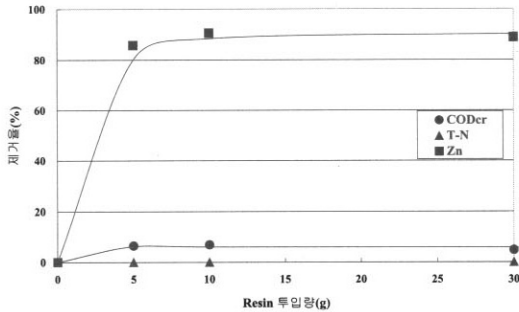


Fig. 3. 선별된 이온교환수지(표 1의 R-C type)의 투입량에 따른 오염물질별 제거 Isotherm.

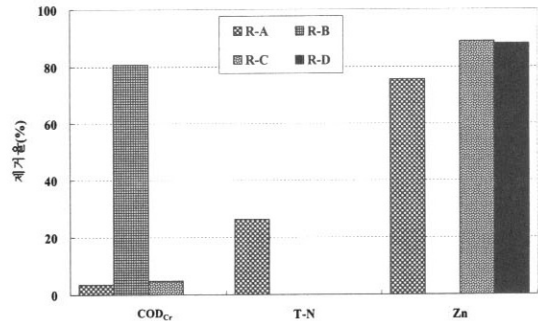


Fig. 4. 이온교환수지 종류에 따른 도로노면 용존 오염원 (COD<sub>Cr</sub>, T-N, Zn)의 저감 특성(시료 1L에 이온교환수지 30g 투입 기준).

### 3.2.2. 이온교환수지를 통한 도로노면 유출수의 용존성 물질 제거

이온교환수지는 사용 목적에 따라 다양한 특성의 제품을 선택할 수 있으며, 제품별 특이성으로 인하여 특정 수질 이온 항목에 한하여 선택적인 저감 효과를 기대할 수 있는 것으로 알려져 있다(본 실험에서는 양이온수지-중금속 성분 제거; 킬레이트수지-유기성 성분 제거 기대). 특히, 개별 화학물질 측정 형태가 아닌 종합측정인자(예를 들면 COD, T-N 등)에 대한 선택 저감 평가는 일반화할 수 없으므로 반드시 시료 검증 실험을 통한 평가가 필요하다. 따라서 본 실험(Table 1 참조)에서 선택한 이온교환수지 그룹은 근본적으로 도로노면 유출수에 포함된 다양한 양이온 성분(중금속) 제거를 목적으로 선택되어진 것이며, 도로노면 유출수에 적용 가능함을 기초적으로 평가하는 것이 주목적이다. 실험에 선택된 수지의 전형적인 Isotherm 거동은 Fig. 3에서 보이는 것과 같으며, 선택 수지의 경우에는 수질항목 COD<sub>Cr</sub>, T-N, Zn 중 중금속 항목인 Zn에 대해서만 높은 처리 효율을 보임을 확인할 수 있었다.

각각의 이온교환수지에 따른 예비(소재 평형 도달 시간 사전 파악) 및 본격 Isotherm 실험 결과 예상한 대로 전반적으로 천연 제올라이트(비용은 상대적으로 저렴)에 비하여 상대적으로 높은 처리 효율을 보이고 있다. 따라서 포화상태(Saturation)에 도달하는 수지 투입량(본 실험에서는 약 30g) 대비 각각 저감되는 수질항목(COD<sub>Cr</sub>, T-N, Zn)의 제거율을 산정하여 수지 소재에 따른 상대적 기능성 평가를 수행하

면 Fig. 4와 같이 정리할 수 있다.

Isotherm 실험의 30g 투입 시점에서 R-A 수지는 Zn의 경우 0.0194mg Zn/g Resin의 흡착량을 보이며 약 80%의 제거율을 나타냈으며, COD<sub>Cr</sub>와 T-N에서도 낮은 제거율을 나타냈다. R-B 수지의 경우 COD<sub>Cr</sub>에 대하여 12.2333mg COD<sub>Cr</sub>/g Resin의 흡착량을 보이며 약 80%의 제거율을 나타냈으며, 중금속에 대한 제거 효율은 나타나지 않았다. R-C 수지의 경우 Zn에 대하여 0.0230mg Zn/g Resin의 흡착량을 보이며 90%의 제거율을 나타냈으며 COD<sub>Cr</sub>에서는 낮은 제거율을 나타냈다. R-D의 경우 Zn에 대하여 0.0229mg Zn/g Resin의 흡착량을 보이며 80%의 제거율을 나타냈으며 COD<sub>Cr</sub>과 T-N은 전혀 저감되지 않았다. 결론적으로 살펴보면, 양이온교환수지(약산성, 강산성) 모두는 중금속 성분(Zn) 저감을 위한 후보수지로서 보다 안정적인 결과를 보여주고 있으며, 일부 킬레이트 수지는 유기성 COD<sub>Cr</sub>의 제거에 그 효용성을 보여주고 있으나 일부 킬레이트 수지는 그렇지 않은 결과를 도출하고 있다. 그럼에도 불구하고 COD<sub>Cr</sub>과 중금속 모두를 저감할 수 있는 효과를 제올라이트와 마찬가지로 수지에서는 기대할 수 없었다(Macro Porous 형태를 지니고 있는 수지는 흡착을 통하여 유기성 성분과 일부의 이온 성분을 동시에 저감할 수 있음). 궁극적으로 수지는 비용 측면과 선택적 특이성으로 말미암아 특정 성분(중금속)의 제거를 위한 후단 공정 소재로 사용됨이 타당한 것으로 판단되었다.

**Table 4.** 활성탄(GAC) 투입량에 따른 도로노면 유출수의 오염물질별 제거율

제거율(%) \ 투입량(g)		0.5	2	5	10	20	50	100	200
COD <sub>Cr</sub>	Avg.	0.60	6.82	16.89	27.84	42.87	68.77	86.01	91.53
	Std.	9.26	10.01	9.91	8.19	9.30	10.00	8.23	7.00
BOD <sub>5</sub>	Avg.	64.96	68.00	70.74	80.12	80.65	88.73	93.13	93.20
	Std.	11.83	11.12	11.50	6.80	7.76	5.57	2.96	5.26
T-N	Avg.	33.35	35.12	38.45	43.28	42.13	53.78	64.39	66.77
	Std.	9.29	9.27	14.12	11.78	13.37	15.15	9.23	7.15
Zn	Avg.	4.97	17.39	35.56	55.71	73.98	89.20	93.16	94.37
	Std.	1.76	2.69	5.21	5.22	4.86	2.28	2.26	2.82

3.2.3. 활성탄을 통한 도로노면 유출수의 용존성 물질 제거

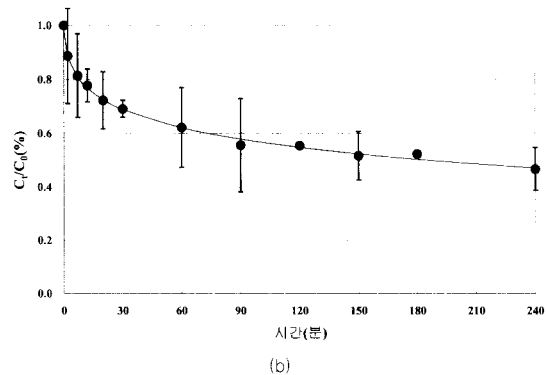
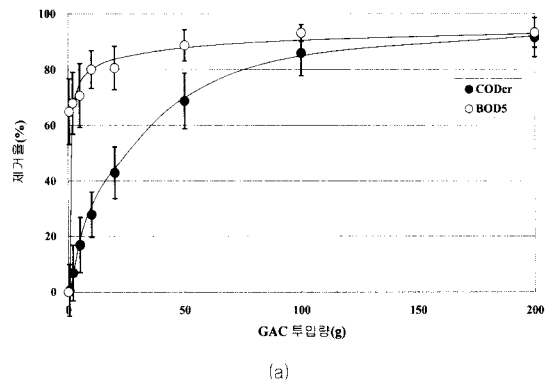
활성탄 흡착 실험은 제조사별 석탄계와 야자계 원료로 세분된 모든 종류에서 Isotherm 실험을 실시하였는데, 실험 결과 제조사나 원료에 따라 통계적으로 의미 있는 차이를 도출하기가 어려웠다. 따라서 모든 제품(총 6개)의 실험 결과를 통계적으로 분석(평균, 표준편차)하여 종합적인 대표수치 형태로 표현하였으며, 대표적인 흡착 소재인 활성탄(GAC)의 경우 도로노면 유출수에 내포되어 있는 대부분의 오염물질 항목(COD<sub>Cr</sub>, BOD<sub>5</sub>, T-N, Zn)들이 상당량 제거되는 것을 확인할 수 있었다(Table 4, Fig. 5 참조).

활성탄의 경우 본 실험에서는 100g 투입 시점에서 COD<sub>Cr</sub>, BOD<sub>5</sub>, T-N, Zn의 제거율이 최고조에 도달하였으며, 이 때 9.6516mg COD<sub>Cr</sub>/g GAC, 3.0034mg BOD<sub>5</sub>/g GAC, 0.0147mg Zn/g GAC의 흡착량을 나타내면서 모두 약 80% 이상의 제거율을 확보하였다. 한편, T-N에 대해서도 0.1117mg T-N/g GAC의 흡착량을 보이며 약 60%의 제거율을 나타냈다.

활성탄 입자와 같이 표면이 균질하지 못한 입자성 흡착제를 이용한 수용액 흡착 현상에 가장 적합한 Freundlich 등온흡착식(식 (1) 참조)을 적용하여, 앞 실험에서 얻은 자료(6개 제품의 평균값)를 활용하여 모델 파라미터(K 및 1/n) 값을 Table 5와 같이 산출하였다(Langmuir 흡착모델을 적용해 본 결과 본 실험 데이터와 모델식이 적합하지 않은 것으로 판명됨).

$$q = K \times C_{eq}^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

q(or x/m) = 단위중량의 흡착제에 흡착된 물질의 양 (mg/흡착제g)



**Fig. 5.** 활성탄(GAC) 투입량에 따른 도로노면 유출수의 오염물질별 제거율. (a) COD<sub>Cr</sub>, BOD<sub>5</sub>, (b) T-N, Zn

C<sub>eq</sub> = 흡착이 일어난 후 용액 내 흡착질의 평형농도 (mg/l)

K, n = Freundlich 흡착등온식의 실험상수

현재 도로노면 유출수 배출 수질 기준이 제정되어 있지 않으므로, 현행 방류수 수질 기준에 맞추어 배출 농도를 결정한다고 가정할 경우 요구되는 흡착소재량을 식 (2)를 통하여 살펴보았다. 이 때 중금속 향

**Table 5.** Freundlich 등온흡착모델을 이용한 도로노면 유출수 오염물질별 산출 파라미터값

구분	COD <sub>Cr</sub>	BOD <sub>5</sub>	T-N	Zn
K	0.1798	0.0365	0.0009	0.1486
1/n	0.8016	1.4172	2.6328	1.0050
R <sup>2</sup>	0.98	0.99	0.97	0.98

목 기준은 제시되지 않아 제외하였으며, 일반 수질 항목 중 T-N, T-P는 유입 수질 시료의 농도가 수질 기준보다 낮아 제외하였고, SS는 시료의 특성상 제거된 상태라 제외하여, COD<sub>Cr</sub> 및 BOD<sub>5</sub>에 대하여서만 수행하였다.

$$D = \frac{(C_0 - C_e)}{q_e} \quad (2)$$

D = 유입수의 수질을 목표 수질까지 저감시키기 위하여 필요한 활성탄의 양(g/L)

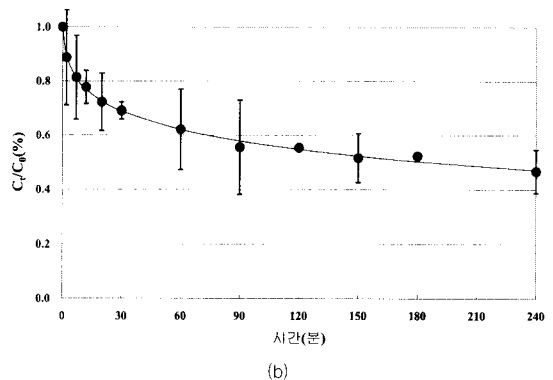
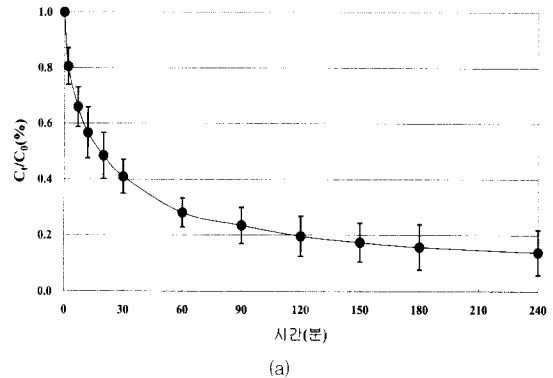
C<sub>0</sub> = 유입수의 유입 수질(mg/L)

C<sub>e</sub> = 유입수의 목표 수질(mg/L)

q<sub>e</sub> = Freundlich 등온흡착모델에 따른 단위중량당 흡착량(mg/흡착제g)

목표 수질은 방류수 수질 기준인 COD<sub>Cr</sub>은 40mg/L, BOD<sub>5</sub>는 10mg/L, 유입 수질은 흡착 실험 시료의 초기 평균값인 COD<sub>Cr</sub>은 1203mg/L, BOD<sub>5</sub>는 323mg/L를 사용하였다. 단위중량당 흡착량은 Table 5에서 구해진 Freundlich 등온흡착모델 파라미터값을 식 (1)에 대입하여 구한 값을 사용하였으며, 그 결과 COD<sub>Cr</sub>을 목표 수질까지 저감시키기 위하여 필요한 활성탄의 양은 336.19mg/L이며, BOD<sub>5</sub>를 목표 수질까지 저감시키기 위하여 필요한 활성탄의 양은 328.13mg/L인 것으로 확인되었다.

한편, 추가적으로 활성탄의 반응 시간에 따른 오염원의 저감 특성(Kinetics)을 살펴보기 위하여 활성탄 투입 후 각 시간대별 각 오염물질 농도를 분석하여 초기농도에 대한 각 시간대의 농도변화를 살펴보았다. COD<sub>Cr</sub>의 경우 GAC 투입 후 1~2시간 이내에 전체의 약 70~80%가 저감되었으며, 이후 저감정도가 미미한 변화를 보여주고 있다(3시간 후에는 약 85% 정도 저감). T-N의 경우 GAC 투입 후 1~2시간 이내에 전체의 약 40~50%가 저감되었다.



**Fig. 6.** 흡착 시간에 따른 오염원 저감 변화(도로노면 유출수 1L에 활성탄 100g 투입). (a) COD<sub>Cr</sub>, (b) T-N

#### 4. 결 론

도로 노면 유출수에 대하여 SS성분 제거 및 다양한 흡착 소재를 통한 흡착 실험을 하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) 침전 및 필터 여과를 이용한 도로 노면 유출수의 SS성분 제거를 통해 유기오염물은 약 20%, 영양염류는 약 50%, 중금속은 0~30% 제거되었다. SS성분 제거만으로는 다량의 용존 상태로 배출되는 유기오염물과 영양염류 및 기타 중금속 오염물질들을 완벽히 제거할 수 없었으며, 따라서 해당 오염물질의 저감을 위하여서 용존 오염물질의 제거가 가능한 흡착 처리 공정이 필요하다.

2) 제거율이 정상상태에 도달했을 때의 소재별 평균 제거율은 대체로 유기오염물에 대하여서는 GAC >> 천연 Zeolite, Ion-Exchange Resin의 순으로 나타났



으며, 영양염류에 대하여서는 GAC Ion-Exchange Resin>천연 Zeolite, 중금속에 대해서는 Ion-Exchange Resin>GAC>천연 Zeolite의 순으로 나타났다.

3) Freundlich 흡착등온모델을 적용한 결과, 예상 유입수 내의 오염물질을 저감하여 현 방류수 수질 기준에 도달하기 위하여 필요한 GAC 소재량은 약 336g/L인 것으로 나타났다.

### 감사의 글

“이 논문은 2004년도 한국 학술 진흥 재단의 지원에 의하여 연구되었음.”(KRF-2004-042-D00117)

### 참고문헌

1. 공민근, 배기현, 강우영(2004), 비점오염 저감을 위한 장치형 시설의 현황. *상하수도학회지*, **18**(6), pp. 707-711.
2. 김구범, 김구범, 이은주, 임지현, 고석오, 강희만, 이주광, 김이형(2005), 포장된 비점오염원에서의 EMC 비교. *공동추계 학술발표회 논문집*, 대한상하수도학회, pp. 6-12.
3. 김석구, 김영임, 윤상린, 이용재, 김이호, 김종오(2004), 강우강도에 따른 노면유출수의 유출 특성. *한국물환경학회지*, **20**(5), pp. 494-499.
4. 김석구, 윤상린, 김영임, 이용재, 김이호, 김종오(2004), 여재에 따른 도로면 유출수의 배수 및 처리특성. *한국물환경학회지*, **20**(5), pp. 500-505.
5. 김이형, 강주현(2004), 강우시 발생하는 고속도로 유출수의 초기우수 특성 및 기준. *한국물환경학회지*, **20**(6), pp. 641-646.
6. 노성덕, 이대근, 전양근(2004), 도로상의 비점오염물질 저감을 위한 초기 우수유출수 처리에 관한 연구. *한국물환경학회지*, **20**(5), pp. 525-533.
7. 노성덕, 김민국, 전양근(2004), Catch Basin과 미디어 및 식생대를 이용하여 도로상의 초기강우 유출수 등의 비점오염물질 사전처리기술. *공동추계 학술발표회 논문집*, 한국물환경학회 · 대한상하수도학회, pp. 427-430.
8. 오재일, 박상우, 최영화(2005), 도로 노면 유출수의 비점오염원 배출 특성 - 중금속 및 병원성 미생물. *공동추계 학술발표회 논문집*, 대한상하수도학회, pp. 436-441.
9. 이준호, 조용진, 방기웅(2005), 강우시 도로유출수 수질 특성 및 입경분포. *대한환경공학회지*, **27**(7), pp. 777-784.
10. 최광운, 이종태(2000), 강우 풍속 및 건기일수와 대기 먼지 오염량과의 상관성 분석. *학술발표회 논문집*, **3**, pp. 119-122.
11. 최상용(2004), 도로유출수의 초기수질특성에 관한 연구, 석사학위 논문, 연세대학교
12. 최영화, 오재일, 황환구, 김종화(2004), 교량부 비점오염원 배출 특성 분석: 2. 배출 부하 산정을 중심으로. *공동추계 학술발표회 논문집*, *한국물환경학회*, pp. 466-471.
13. Sansalone J.J., Buchberger S.G., Al-Abed S.R. (1996) Fractionation of heavy metals in pavement runoff, *The Science of the Total Environment*, **189/190**, pp 371-378
14. Glenn D.W. (2001) *Heavy metal distribution for aqueous and solid phases in urban runoff, snowmelt and solids*, Doctor of Philosophy, Louisiana State University, U.S.
15. International Erosion Control Association (2002) Stormwater Quality specialist Review (<http://www.ieca.org>)
16. M. Legret and C. Pagotto (1999) Evaluation of pollutant loadings in the rural waters from a major rural highway, *The science of the Total Environment*, **235**, pp. 143-150.
17. NCHRP (2001) Management of runoff from surface transportation facilities- synthesis and research plan, Web Document 37.