

## 지반보강재로서 폐타이어의 활용; (2) 환경적 영향

### Utilization of Waste Tires as Soil Reinforcement; (2) Environmental Effects

윤 여 원<sup>1</sup> Yoon, Yeo-Won  
문 창 만<sup>2</sup> Moon, Chang-Man  
김 건 흥<sup>3</sup> Kim, Geon-Heung

#### Abstract

Environmental impact of waste tires as ground-reinforcing material is studied. Analysis for chemical compounds and toxic effect were performed on effluents from twelve lysimeters in which waste tires were mixed with sand and three initially different environmental solutions of acidic, neutral, and basic circulated through the mixture. The test results of effluents collected from the lysimeters provided that the contaminant concentrations were lower than those of Korean drinking water standards for all the selected and tested metal elements. While iron concentration increased slightly with the exposure period, other metal concentrations decreased with the number of circulation times. From the comparison with previous investigations, the contaminant concentration decreased with the increase of tire size, i.e. increases with the increase of the exposed surface of tire metals. From the toxicity tests, no deteriorative effect was observed and it could be concluded that waste tires are not biologically hostile materials.

#### 요 지

본 연구에서는 지반 보강재로 폐타이어를 사용함에 있어서 환경적인 영향에 대하여 고찰하였다. 시험은 12개의 침출수 발생장치 속에 모래와 타이어조각들을 섞은 후 세 가지 조건의 용액을 각각 순환시킨 침출수에 대하여 화학적 분석과 생물학적 독성영향을 조사하였다. 연구결과, 검출된 모든 금속원소의 오염농도는 우리나라 먹는물 수질기준치보다 훨씬 낮았고, 철을 제외한 모든 금속원소의 농도가 시간이 지남에 따라 줄어드는 것으로 나타났다. 선행된 시험과 비교한 결과 노출되는 금속의 비표면적이 클수록 즉, 타이어칩, 타이어조각, 전체타이어의 순서로 오염물질의 농도가 크게 검출되었다. 형광성 박테리아를 이용한 독성검사의 결과에서는 독성이 발견되는 경향을 보이지 않아 폐타이어에서 나오는 침출수가 유기체에 유해한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Environmental solutions, Lysimeter test, Sands, Toxic effect, Waste tires

#### 1. 서 론

소득수준의 향상에 수반된 폭발적인 자동차 증가는 폐타이어의 발생량 역시 증가 추세로 이어져 폐타이어

에 의한 오염 문제를 안겨 주게 되며, 환경오염에 대한 사람들의 인지도가 높아감에 따라 폐타이어의 처리가 큰 관심사로 떠오르고 있다. 폐타이어를 그대로 방치 및 적재할 경우 주변 경관의 손상, 해충의 서식처 제공,

1 정희원, 인하대학교 환경토목공학부 부교수 (Member, Assoc. Prof., Dept. of Civil and Environ. Eng., Inha Univ., yoonyw@inha.ac.kr)

2 정희원, 인하대학교 대학원, 청석엔지니어링 (Member, Chungbuk Engr.)

3 인하대학교 환경토목공학부 교수 (Prof., Dept. of Civil and Environ. Eng., Inha Univ.)

화재의 위험과 이용면적의 고갈을 야기하고 매립에 의한 처리방법은 매립지 부족, 환경오염 및 지역주민의 기피 등으로 매립지 확보에 한계가 있을 뿐만 아니라 매립되었던 폐타이어가 땅 위로 노출되어 토양을 균열시키며 땅을 매마르게 하여 매립지는 황폐화 될 수 있다.

이러한 문제점들로 인해 폐타이어의 재활용에 대한 관심이 높아지고 폐타이어를 재활용하기 위한 새로운 방법들이 소개되어 왔지만 폐타이어를 적치 및 매립해야 할 장소를 지속적으로 필요로 하고 있다. 폐타이어를 토목공사용으로 재활용하기 위한 여러 방법 중 폐타이어를 파쇄하여 칩의 형태로 시공하거나 시험한 사례가 많으며(Humphrey와 Manion, 1992; Foose 등, 1996; 기타), 일부만을 절단하여 시공 혹은 시험 사례(Nguyen, 1996; Garga와 O'Shaughnessy, 2000; O'Shaughnessy와 Garga, 2000; Gerscovich 등, 2001; 기타)가 있다. 폐타이어를 칩 혹은 한쪽 측면을 제거한 타이어로 활용할 경우에 대한 환경적 영향에 대한 평가는 Liu 등(1998), Sengupta와 Miller(1999), O'Shaughnessy와 Garga(2000), Westerberg와 Macsik(2001) 등에 의하여 연구된 바 있다. 타이어를 토공구조물에 원형 그대로 사용하게 되면 타이어의 속채움에 어려움이 따르며 큰 침하를 유발하게 되며, 칩으로 작게 절단하여 토사와 혼합하여 사용하면 흙의 강도특성을 증가시키게 된다(Humphrey 등, 1993; Tatlisoz 등, 1998). 그러나 타이어는 트레드 내부에 다수의 강선을 포함하고 있기 때문에 칩으로 사용하게 되면 중금속의 오염가능성이 증대하게 된다. 따라서 이러한 단점을 보완하고 지반의 지지력 증대와 응력을 보강하는 기술로 고안된 지오셀과 유사한 형태의 타이어셀이 지반의 침하감소와 지지력 증대에 효과가 있음이 실내시험 및 현장시험(윤여원 등, 2003; 서덕성, 2002; 이상준, 2002)을 통하여 밝혀졌다.

따라서 본 연구에서는 타이어를 토목공사용 재료로 적용함에 있어서 타이어에서 스며 나올 수 있는 오염물질을 규명하기 위하여 모래지반에 폐타이어를 칩크기보다 큰 다양한 크기로 혼입하고 이로부터 유출되는 침출수를 분석하여 환경적영향을 고찰하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 타이어 구조 및 재료

타이어는 그림 1과 같은 구조로 되어있으며 각 부분

은 트레드(tread), 브레이커(breaker), 카카스(carccass), 비드(bead) 등의 네 가지 부분으로 구성되어 있다. 고온 경화된 타이어는 보강섬유로 꼰 끈과 고강도 철 또는 섬유 벨트, 고강도 철사로 보강한 비드 등을 포함하고 있다. 가장 흔히 사용되고 있는 타이어용 고무는 약 25%의 styrene을 함유한 styrene-butadiene copolymer(SBR)로 알려져 있으며 다른 타이어용 고무로는 천연고무(cis-polyisoprene), synthetic cis-polyisoprene 그리고 cis poly-butadiene이 있다. 고무를 강화시키고 마찰에 의한 고무의 마모에 대한 저항을 증가시키기 위하여 Carbon black이 첨가된다. 공장제조에 사용되는 팽창유(extender oil)는 고무를 부드럽게 하고 시공성을 증가시키기 위한 방향성 탄화수소(aromatic hydrocarbon)의 혼합물이다. 유황(Sulphur)은 고온에서의 변형을 억제하는 고무내의 폴리머 체인을 상호연계시켜 고무를 경화하기 위하여 사용된다. 그리고 산화아연(zinc oxide), 스테아르산(stearic acid), 유기유황 가속기(organo-sulphur accelerator)는 고온경화과정을 돕고 고무의 물리적 성질을 고양시키기 위하여 사용된다(Williams 등, 1990). 산화방지제(anitoxidant)와 기타 첨가물은 고무합성물의 열화를 방지하기 위하여 첨가된다. 타이어용 고무의 대표적인 구성은 표 1에 나타내었다.

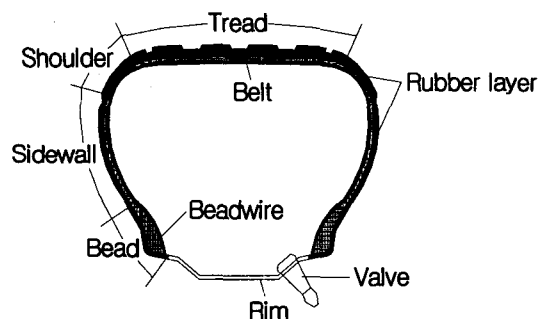


Fig. 1. Tire structure

Table 1. Typical composition of tire material

Tire rubber (Williams et al. 1990)		Tire (Hankook tire, 2000)	
Compound	Weight (%)	Compound	Weight (%)
Rubber polymer (SBR)	62.1	Natural & synthetic rubber	49
Carbon black	31.0	Rubber compound	37
Extender oil	1.9	Other compound	13
Zinc oxide	1.9	Bead wire	4
Stearic acid	1.2	Cord fabric	10
Sulphur	1.1		
Accelerator	0.7		

## 2.2 기존의 연구

타이어를 토목공사에 사용하는데 있어서 가장 염려하는 것 중의 하나는 타이어로부터의 침출수의 독성에 대한 염려이다. 페타이어가 수질에 미치는 영향은 (1) 지표수에 노출된 경우, (2) 지하수위 위의 지중에 매립된 경우, (3) 지하수위 아래에 매립된 경우로 나누어 볼 수 있다. 이 중 경우(1)은 크게 주목할 것이 되지 못하고, (2)의 경우인 지하수위 위에 위치한 타이어에 대한 조사는 바륨(barium), 카드뮴(cadmium), 납(lead), 크롬(chromium) 등이 미네소타 오염 관리국의 1990년도 현장 조사에서 발견되었고, 위스콘신 주 교통과의 1992년 연구보고서에 의하면 납(lead), 아연(zinc), 망간(manganese) 등이 기준치 이하로 검출되었다. 지하수위 아래 경우인 (3)에서는 타이어칩을 가지고 미국 Main대학에서 실시된 현장시험결과 철(iron)과 망간(manganese)이 검출되었는데 철은 2차 먹는 물 수질기준치 보다 높게 나왔고, 망간은 기준치에 훨씬 미달되는 것으로 조사되었다(Humphrey와 Katz, 1992).

문헌에 의하면 타이어로부터 나오는 침출수는 거의 환경에 미치는 영향이 무시할 정도라고 보고하고 있다. 최근까지 단지 일부의 보고서만이 이러한 환경문제를 다루고 있을 뿐이다. 타이어칩(50×50mm<sup>2</sup>)을 배수재로 이용한 경우에 대한 환경적 영향을 검토한 사례가 있으며(Westerberg와 Macsik, 2001), 전체의 타이어나 타이어의 일부를 잘라 성토에 사용하고 환경 영향을 다룬 것으로는 유일하게 캐나다 주 정부의 지원하에 이루어진 O'Shaughnessy와 Garga(2000)의 연구가 있다. 이들의 연구는 57m×17m의 넓이, 4m의 성토체 하단에 집수용 파이프를 설치하고 2년여 동안 집수된 침출수를 분석하였으며 아울러 실내에서는 규모를 고려하여 전체 타이어 대신에 타이어 칩을 일정 비율로 섞어 인위적으로 물을 침투시켜 침출수를 분석하였다. 특히 전체 타이어 대신에 타이어칩을 사용하게 되면 이로부터 나오는 결과는 현장의 자료보다 큰 농도의 침출수를 유출시키는 결과를 가져오게 되는데 이는 전체 타이어는 섬유나 강선이 고무로 피복되어 있는 반면에 타이어칩은 잘게 잘려서 타이어 내부의 강선이 노출될 뿐만 아니라 체적은 동일하지만 타이어 칩은 더 큰 표면적을 갖기 때문이다.

미네소타 오염관리 협회(Minnesota Pollution Control Agency, MPCGA)에서는 여러 환경조건 하에서의 침출시험을 수행하였다. 이 시험에서 타이어 칩은 흡수에 포함

되지 않았다. 이 연구는 바륨(barium), 카드뮴(cadmium), 크롬(chromium), 납(lead), 셀레늄(selenium) 그리고 아연(zinc)이 산성환경(pH 3.5-5)에서 우려되는 구성물이며 염기조건(pH 8.0)에서 일정한 형태의 탄화수소(polynuclear aromatic hydrocarbons, PAHs)가 방출됨을 보고하고 있다. Eldin과 Senouci(1992)는 환경영향을 평가하기 위하여 위스콘신에서 타이어칩을 사용한 시험 성토를 한 후 성토저면에 설치된 집수정으로부터 주기적으로 침출수를 분석하였다. 무기물의 화학분석 결과 클로라이드, 철분, 망간이 간혹 미국환경보호국(U.S., EPA)의 허용기준치를 초과하여 검출되었으며 sodium과 알칼리도는 Ontario주의 식수기준을 초과하는 것으로 나타났다. 캐나다의 Ontario 환경에너지부는 바륨, 크롬, 납, 셀레늄, 구리 그리고 알루미늄에 대한 허용기준치가 미국환경보호국보다 엄격하다. Blumental 등(1997)은 지하수위보다 높은 곳에 타이어칩과 흙을 섞어 성토한 제방의 침출수를 2년 반 후에 분석한 결과 특별한 환경적 영향이 없는 것으로 밝히고 있다. 화학분석 결과 타이어 칩은 먹는 물 수질기준인 주요 무기물, 즉 바륨(barium, Ba), 카드뮴(cadmium, Cd), 크롬(chromium, Cr), 납(lead, Pb), 셀레늄(selenium, Se)의 농도를 증가시키지 않는 것으로 밝히고 있다(O'Shaughnessy와 Garga, 2000).

## 3. 실험

### 3.1 시험 재료

#### 3.1.1 모래

시험에 사용된 모래는 10번 체를 통과한 인천 연안 해역에서 채취한 바다모래로서 3차에 걸쳐 세척하여 모래에 있는 염분 등 시험결과에 영향을 미칠 수 있는 물질을 사전에 제거하였고, 7일 이상 자연 건조하여 산성, 중성, 염기성 용매의 영향을 받지 않게 하였다. 사용 모래는 99.5%이상이 석영으로 구성되어 있어, 시험에 사용된 증류수와 모래 자체를 증류수에 담근 용액과 비교한 결과 모래는 침출되어 나오는 오염 물질에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

#### 3.1.2 타이어

페타이어에서 나오는 침출수의 오염 정도를 좀 더 효과적으로 측정하기 위하여 그림 2와 같이 타이어 본체

를 절단 기구를 이용하여 측면(sidewall)과 트레드(tread) 부분으로 분리한 후 이것을 여러 조각으로 잘라서 사용하였다. 각각의 침출수 장치(lysimeter)에 들어가는 타이어 조각은 측면 2개 분량과 트레드 2개 분량 또는 측면과 트레드 각각 하나의 분량이 사용되었다. 사용된 측면 한 개의 무게는 평균 1.5kg이며, 트레드의 무게는 평균 3.3kg이다. 승용타이어에 들어 있는 금속보강재의 타이어 전체무게에 대한 비율은 약 15% 정도로 트레드 부분에 사용된 스틸코드가 전체무게의 9~10%를 차지하고 양쪽 측면에 사용된 비드와이어 부분의 금속보강재가 5~6%를 차지한다.

본 연구에 사용된 타이어는 승용차용 타이어로 측면의 경우 외부직경은 50cm, 내부직경은 30cm이며, 트레드는 길이가 170cm, 폭이 13cm, 두께가 5cm이다. 이렇

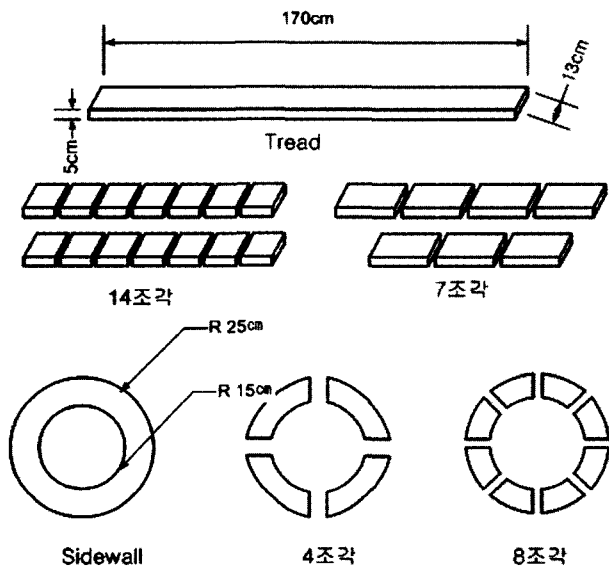


Fig. 2. Type of tire segments

게 잘라진 타이어 조각들은 증류수로 깨끗이 씻어 다른 오염물질에 영향을 받지 않게 하였다.

### 3.2 시험 준비

완전 건조된 모래와 절단된 타이어 조각들을 평균 47cm의 직경과 65cm의 높이를 가지는 12개의 침출수 장치에 타이어 매트 및 타이어 셀을 지반 속에 보강한 것과 유사하게 그림 3과 같은 방법으로 모래지반 내에 타이어 조각을 혼입시켰다. 타이어 1층 및 2층에 들어가는 타이어 전

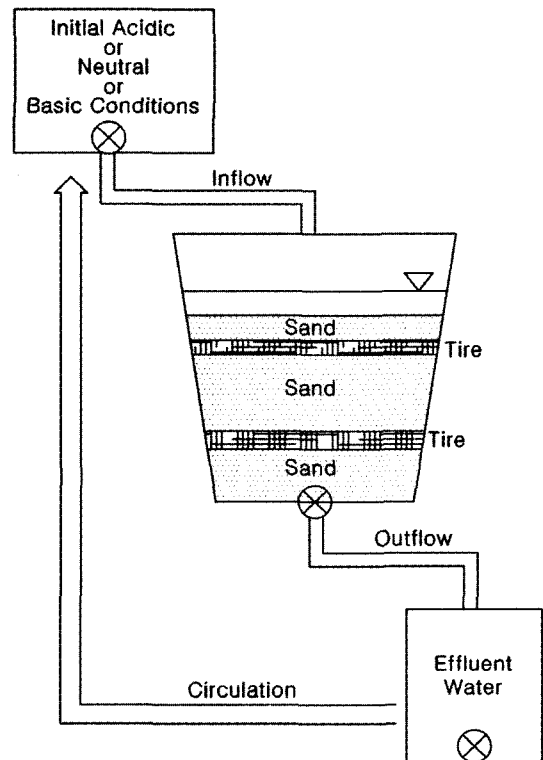


Fig. 3. Schematic diagram of effluent circulation

Table 2. Lysimeter test program

Number	Composition of lysimeter	Tire shreds(kg)	Initial leaching medium
1	Sand + 2 Whole Sidewalls	3.0	Acidic, pH ≈ 3.5
2	Sand + 2 Whole Treads	6.6	Acidic, pH ≈ 3.5
3	Sand + Tread 8 pieces	6.6	Acidic, pH ≈ 3.5
4	Sand + Sidewall 16 pieces	3.0	Acidic, pH ≈ 3.5
5	Sand + Tread 28pieces	6.6	Acidic, pH ≈ 3.5
6	Sand + Sidewall 8 + Tread 14pieces	5.0	Acidic, pH ≈ 3.5
7	Sand + Sidewall 16pieces	3.0	Neutral, pH ≈ 6.5
8	Sand + Tread 28pieces	6.6	Neutral, pH ≈ 6.6
9	Sand + Sidewall 8+Tread14pieces	5.0	Neutral, pH ≈ 6.7
10	Sand + Sidewall 16pieces	3.0	Basic, pH ≈ 9.5
11	Sand + Tread 28pieces	6.6	Basic, pH ≈ 9.5
12	Sand + Sidewall 8+Tread 14pieces	5.0	Basic, pH ≈ 9.5

체나 타이어 조각들은 하나의 측면 부분과 트레드 부분을 각각 다른 비율로 잘라 내어 같은 양을 사용하였다.

침출수 장치에 들어가는 페타이어의 측면 부분과 트레드 부분의 전체 또는 조각들은 표 2와 같이 3가지의 다른 환경적 조건 즉, 산성, 중성, 염기성에 대하여 시험하였다. 산성의 경우 98.08%의 황산용액을 증류수로 희석시켜 pH=3.5의 산성비의 효과를 모델링하였고, 중성은 1차 증류수의 초기값인 pH=6.5를 사용하였으며, 염기성은 수산화나트륨 알갱이를 증류수로 희석시켜 pH=9.5로 만들어 사용하였다.

### 3.3 시험 방법

12개의 침출수 장치(lysimeter)에 채워진 타이어조각과 모래에 준비된 3가지 다른 pH용액을 채워 포화시킨 후 시험을 시작하였다. 사용된 용액의 손실 없이 흘러나오는 용액을 일주일에 3회씩 순환시켜 침출수를 적당하게 섞이게 하였다. 침출수 측정은 30일에 1회씩 실시하였고, 30일 동안의 순환시험이 끝난 다음에는 침출수 장치 및 순환 장치에 있는 모든 용액을 제거한 후 초기조건과 같게 만들어진 용액을 다시 주입시켜 위와 같은 방법으로 다시 시험하였다. 침출수 장치로부터 수집된 용액은 몇 개의 선별된 무기물원소를 WHO의 기준보다 납(Pb)과 카드뮴(Cd)을 제외하고는 엄격하며, 다른 선진국과도 비슷한 규정을 가지고 있는 우리나라 먹는 물 수질기준과 비교하여 분석하였다. 무기물 원소의 선별은 지금까지 타이어에서 나오는 오염물질을 조사한 보고서등을 참고하였고, 타이어 보강재로 사용된 금속부분의 성분을 참고하였다. 9개의 선별된 무기물 원소들과 오염 기준은 표 3에 나타내었다.

Table 3. List of drinking water regulations for the selected chemical compounds

No.	Inorganic element	Unit	Korea	WHO	U.S.A.	Japan	British	Canada	German	France
1	Lead(Pb)	mg/ℓ	0.05	0.01	0.015	0.05	0.05	0.01	0.04	0.05
2	Selenium(Se)	mg/ℓ	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
3	Chromium(Cr)	mg/ℓ	0.05	0.05	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
4	Cadmium(Cd)	mg/ℓ	0.01	0.003	0.005	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
5	Copper(Cu)	mg/ℓ	1	2(1)	1.3	1	3	1	3	1
6	Zinc(Zn)	mg/ℓ	1	3	5	1	5	5	5	5
7	Iron(Fe)	mg/ℓ	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2
8	Manganese(Mn)	mg/ℓ	0.3	0.5(0.1)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
9	Aluminum(Al)	mg/ℓ	0.2	0.2	0.05	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Table 4. Percent rank method by the Bulich(1982)

Test Result EC50	Class	Rank
< 25%	Very Toxic	1
25~59%	Moderately Toxic	2
51~75%	Toxic	3
>75%	Slightly Toxic	4
No Toxic Effect	Non Toxic	5

### 3.4 분석 방법

무기물 원소의 분석을 위하여 사용한 장치는 ICP-MS (모델명 Perkin Elmer Elan 6100)로 유해 물질의 질량분석을 위하여 사용되었고, 형광성박테리아에 의한 독성 시험은 Microtox Model 500 Toxicity Analyzer(AZUR Corp., Carlsbad, California, USA)를 사용하여 EC50을 측정하였다. 독성의 분류는 Bulich(1982)의 시험 결과인 표 4를 기준으로 삼았다.

## 4. 시험 결과 및 고찰

### 4.1 시간경과에 따른 오염농도의 변화

산성 조건일 때 각각의 타이어 조각에 대한 9개의 원소 모두 먹는 물 수질기준치보다 적게 나왔다. 철(Fe)을 제외한 대부분의 원소들이 시간이 지남에 따라 검출농도가 낮아지는 것을 볼 수 있었으나 철은 검출농도가 줄었다가 다시 늘어나는 것으로 나타났다. 그 이유는 비드 와이어나 스틸코드의 성분이 대부분 철로 되어 있고 산화가 되어 가는 중이기 때문인 것으로 사료된다. 중성과 염기성 조건의 결과들도 모든 원소가 기준치 이하로 나타났고, 철의 오염농도만 증가와 감소를 반복하는 것을 볼 수 있다. 아래 표 5에는 산성조건에서의 시간에

Table 5. Water quality results under the acidic condition (pH=3.5) (unit :  $\mu\text{g}/\ell$ )

Inorganic element	Detection Limits ( $\mu\text{g}/\ell$ )	Tire Type & Sampling term(days)								
		Whole Sidewall 16 Pieces			Whole Tread 28 Pieces			Sidewall 8+Tread 14 Pieces		
		30	90	150	30	90	150	30	90	150
Copper(Cu)	1000	26.95	11.00	1.52	7.80	29.13	1.23	10.99	27.31	1.28
Lead(Pb)	50	9.59	0.73	0.24	14.82	0.78	0.31	12.31	1.25	1.39
Aluminum(Al)	200	45.23	18.91	15.66	26.08	13.11	7.86	18.81	11.92	10.67
Chromium(Cr)	50	2.49	2.54	2.74	2.49	3.41	1.83	1.93	3.64	1.95
Manganese(Mn)	300	20.63	10.06	7.39	50.18	15.53	4.24	30.48	4.92	3.32
Iron(Fe)	300	47.59	31.21	54.46	26.86	27.21	48.10	22.34	26.47	52.93
Zinc(Zn)	1000	12.78	0.92	-	4.08	10.72	-	4.77	19.23	-
Selenium(Se)	10	1.79	1.85	3.27	0.86	2.20	4.97	1.13	2.92	4.38
Cadmium(Cd)	10	0.70	0.03	0.00	1.32	0.04	0.01	1.09	0.04	0.01

\* : Drinking water quality standard of the Ministry of Environment, Korea(2001)

따른 농도변화를 나타내었다.

#### 4.2 환경 조건에 따른 오염 농도의 변화

##### 4.2.1 철(Fe)

검출된 철의 오염농도는 우리나라 먹는 물 수질기준인  $300\mu\text{g}/\ell$  을 넘지 않았다. 그림 4는 다섯 번에 걸쳐 나타난 검출농도를 절단된 타이어조각의 유형에 대하여 나타내었다. 첫 번째 순환시기에서 검출된 농도는 용매가 산성이나 염기성인 경우보다 중성인 경우 더 많은 오염 물질이 검출되어 나머지 다른 순환 시기의 오염물질농도와 다른 경향을 보였다. 이것은 타이어 절단 시 절단면이 고르지 못하기 때문에 발생한 것으로 보여지고 산성에서 보다 높은 농도의 철 성분이 검출된 것은 pH가 감소함에 따라 강의 부식속도가 증가하기 때문으로 판단된다. 부식되어 타이어 조각으로부터 떨어져 나온 물질은 매 순환시기마다 새로운 용매로 갈아주기 때

문에 전 단계에서 용해된 물질은 거의 배출된다. 이런 새로운 용액의 공급으로 노출된 보강재를 덮고 있는 산화된 물질이 표면에서 떨어져 나와 다시 검출농도가 증가되는 것을 다섯 번째 순환 시기의 결과를 보면 알 수 있다.

##### 4.2.2 알루미늄(Al)

알루미늄의 오염농도 역시 그림 5의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 철과 마찬가지로 한국의 먹는 물 기준치인  $200\mu\text{g}/\ell$  을 넘지 않았고, 시간에 따른 오염농도의 배출 경향도 비슷하다. 알루미늄은 증류수에서보다 강산성 또는 알칼리성에서 더 빠른 속도로 부식이 발생한다. 실온에서는 pH 4~8 사이에서 부식속도가 가장 느리게 나타나며, 알칼리 영역에서는 pH가 증가함에 따라 부식속도가 크게 증가한다. 이런 성질은 철의 거동과 반대를 나타내 순환시기가 증가함에 따라 알칼리성에서 큰 오염농도를 나타낸다.

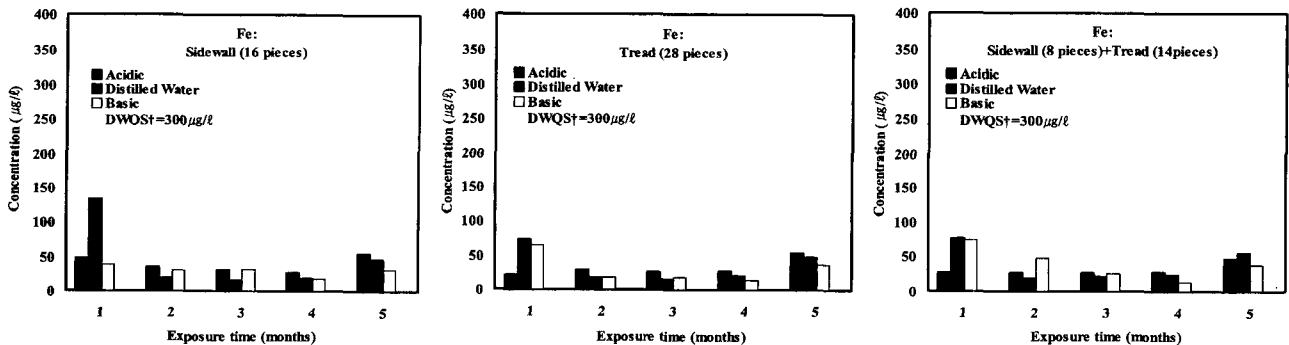


Fig. 4. The variation of iron(Fe) concentration with time, environment conditions and shreds tire types(DWQS, drinking water quality standard of Korea)

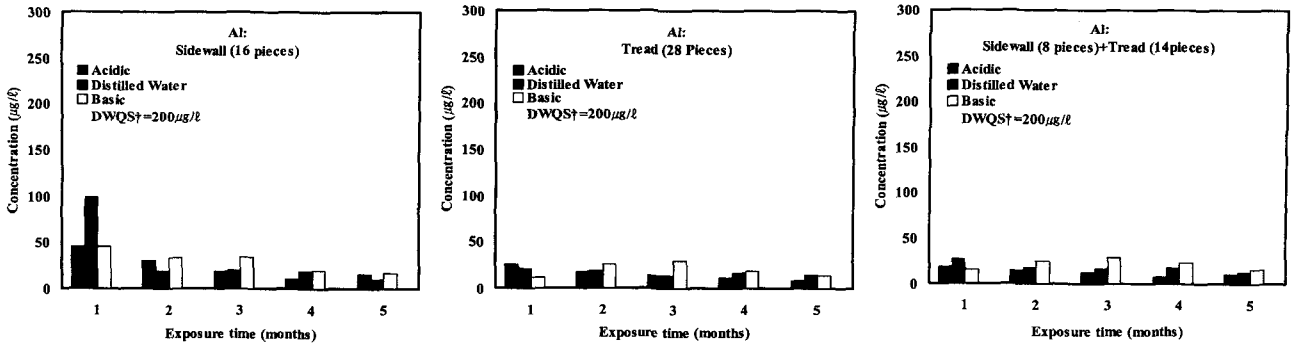


Fig. 5. The variation of aluminum(Al) concentration with time, environment conditions and shreds tire types

#### 4.2.3 망간(Mn)

그림 6은 침출수로부터 검출된 망간의 농도를 기간별로 나타낸 것으로 망간은 3가지 환경조건 모두에서 기준치인  $300\mu\text{g}/\text{l}$  보다 훨씬 못 미치게 검출되었고, 철이나 알루미늄의 농도검출 경향과 달리 순환횟수가 증가함에 따라 그림 6과 같이 빠르게 감소한다.

순환횟수 다섯 번째부터 검출이 되지 않았다. 그러나 산화 아연(ZnO)이 타이어 성분의 약 2%를 차지하고 있으므로 타이어 고무가 노화됨에 따라 계속 검출될 수 있는 잠재성이 있어 장기적인 변화추세를 알기 위해서는 지속적인 관찰이 필요할 것이다.

#### 4.2.4 아연(Zn)

그림 7은 침출수의 아연농도를 나타낸 것으로 아연은 전 순환기간에 대하여 한국의 먹는 물 수질기준치인  $1000\mu\text{g}/\text{l}$  보다 훨씬 못 미치는 검출농도를 나타냈고,

#### 4.3 노출면적에 따른 오염 정도

철이 가장 잘 부식되는 산성 조건에서 타이어의 트레드안에 포함되어 있는 강선의 노출 정도에 따른 오염 정도를 알아보기 위하여 그림 2와 같이 동일 크기와 무

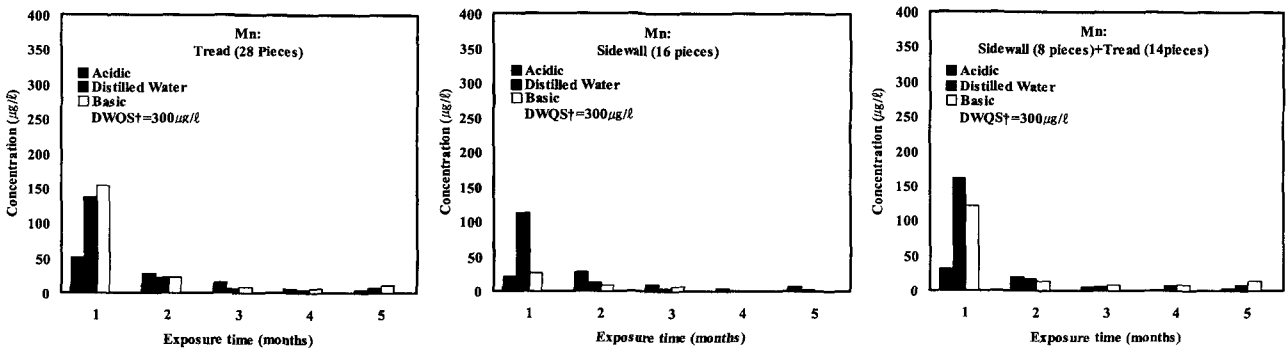


Fig. 6. The variation of manganese(Mn) concentration with time, environment conditions and shreds tire types

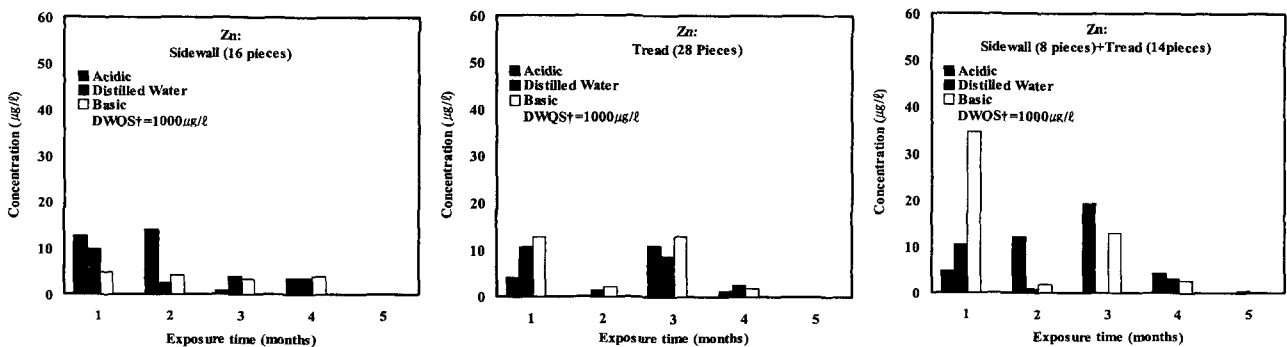


Fig. 7. The variation of zinc(Zn) concentration with time, environment conditions and shreds tire types

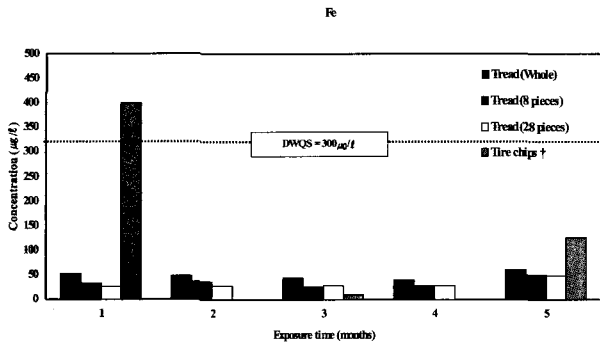


Fig. 8. The variation of iron(Fe) concentration with time and shreds tire types under acidic condition(† : Data from O'Shaughnessy and Garga's laboratory test(2000) on tire chips embedded in sand, each leaching cycles is 90, 130 and 180 days)

개의 트레드를 여러 조각으로 절단하여 같은 무게를 갖는 타이어 조각을 여러 개의 순환장치에서 실시하였다. 검출된 농도는 타이어 절단면과 산성의 용액과의 접촉 면적과 상관없는 결과를 나타내었다. 이는 절단된 타이어 조각에 노출된 강선의 표면적에서 큰 차이가 없어 검출된 농도가 낮게 나와 정확한 비교가 안되기 때문인 것으로 생각된다. 그러나, 본 연구에서보다 훨씬 더 작은 50mm × 50mm 크기의 타이어 조각을 가지고 시험한 O'Shaughnessy와 Garga(2000)의 결과와 비교해보면 첫 번째 순환시기인 90일 후의 철 성분 검출농도는 약 400 µg/l로 기준치를 초과했고 본 연구의 첫 번째 순환시기의 검출농도 50 µg/l보다 8배나 많이 검출된 것으로 살펴볼 때 노출 비표면적이 클수록 검출농도가 커지는 것을 알 수 있다. 그림 8은 O'Shaughnessy와 Garga의 결과와 본 연구의 결과를 비교하여 나타낸 것으로 비록, 순환시기의 차이는 있지만 노출 비표면적이 커질수록 오염농도가 커지는 것을 잘 보여주고 있다.

#### 4.4 검출수의 pH변화

매 순환시 검출수의 pH 검사를 실시한 결과 산성, 염

기성, 중성 등 초기 상태와 상관없이 모두 pH 7.6 정도의 중성과 가까운 수치를 나타냈다. 이는 최근에 연구된 결과와 같이 고무가 여과용액을 중성화시키는 경향이 있음을 나타내었으며 환경영향에는 적합한 것으로 판단된다.

#### 4.5 독성검사

형광성 박테리아로 생물검정(bioassay)하여 EC50의 독성영향 농도를 측정하여 Microtox Omni 프로그램으로 분석하였다. 15분 또는 30분이 경과한 후의 Blank의 빛 발산량(It)이 오염물질의 백분율이 증가함에 따라 감소하지 않고 대부분의 시료가 Blank값과 차이가 없었다. 따라서 3가지 인공적인 환경조건하의 모든 타이어와 모래의 혼합물의 침출수에서는 독성이 나타나지 않은 것으로 판단된다. 몇몇 시료의 결과에서는 빛 발산량이 오염 물질의 증가에 따라 소량 감소하였지만, 이 역시 EC50의 값이 100%를 넘어 Bulich(1982)의 백분율 등급화 방법에 따라 No Toxic Effect로 판단할 수 있다.

#### 4.6 기존 연구와의 비교

본 절에서는 O'Shaughnessy와 Garga(2000)가 수행한 타이어 전체를 사용한 현장시험과 타이어 조각만을 사용한 실내시험의 연구결과를 가지고 본 연구와 비교하였다. 용매의 순환시기와 타이어의 크기 등 초기조건들이 모두 같지는 않기 때문에 정확히 비교하는 것은 대단히 어려운 일이지만 페타이어에서 나올 수 있는 오염물질의 농도를 비교해 봄으로써 환경에 미치는 영향에 대하여 고찰할 수 있을 것으로 생각된다.

O'Shaughnessy와 Garga의 실내시험 초기조건은 표 6과 같다.

이들의 연구결과 타이어 전체를 사용한 현장 시험에서는 셀레늄을 제외한 모든 오염물질의 측정치가 기준

Table 6. Initial condition of O'Shaughnessy and Garga's(2000) tests

1. Lysimeter size	Diameter: 150mm, Length: 400mm
2. Tire chip size	50mm×50mm
3. Tire chip content	25~30% of volume of lysimeter
4. Initial environmental conditions	Basic, Acidic and Neutral
5. The frequency of circulation	Continually circulated by chemical feed pump
6. The expose time (leaching cycle)	90~180 days
7. Analysis equipment	ICP-AES



Table 7. Comparison of various testing conditions(unit:  $\mu\text{g}/\ell$ )

Inorganic elements	Detection Limits ( $\mu\text{g}/\ell$ )	O'Shaughnessy & Garga's study				This study	
		Field Test (whole tires)		Lab. Test (tire chips: 50mm×50mm)		Lab. Test (siderwall8+tread 14pieces)	
		1 <sup>st</sup> year	2 <sup>nd</sup> year	90days	400days	30days	150days
Copper(Cu)	1000	7	3	N.A.	N.A.	10.99	1.28
Lead(Pb)	10	<4	<4	N.A.	N.A.	12.31	1.39
Aluminum(Al)	200	21	63	≈ 400	50~180	18.81	10.67
Chromium(Cr)	50	<4	<4	N.A.	N.A.	1.93	1.95
Manganes(Mg)	100	18	<4	50~150	20~180	30.48	3.32
Iron(Fe)	300	<3	44	300~600	0~120	22.34	52.93
Zinc(Zn)	3000	13	140	50~550	50~200	4.77	-
Selenium(Se)	10	<1	10	N.A.	N.A.	1.13	4.38
Cadmium(Cd)	3	<0.5	<0.5	N.A.	N.A.	1.09	0.01

에 훨씬 밑돌았으며, 셀레늄 역시 2년간 8번의 측정에서 2번만 그 기준치를 초과했다. 반면에 평균 50mm×50mm의 타이어조각을 사용한 실내 시험의 결과는 타이어 보강재의 노출이 크고 장기간에 걸친 연속된 물의 순환으로 인하여 그 검출 농도가 초기에는 모두 먹는 물 수질 기준을 넘겼다. 산성에서의 검출농도가 다른 두 가지 환경조건(염기성, 중성)에서보다 훨씬 큰 검출 농도를 보였으며 순환시기가 더해짐에 따라 검출농도는 점차 감소하여 400일 후에는 모두 먹는 물 수질기준치 보다 적게 검출되었다. 이상의 결과를 본 연구와 비교해보면 타이어를 더 잘게 자를수록 보강재의 노출이 커져서 금속 오염물질이 많이 나온다는 사실을 알 수 있고 오염물질의 농도는 시간이 경과함에 따라 점차 감소하여 노출된 금속이 약 2년 정도 진행되면 먹는 물 수질기준치 이하의 결과를 나타낸다. 표 7은 본 연구와 O'Shaughnessy와 Garga의 연구를 비교한 결과이다. 오염물질의 농도는 노출된 금속의 비표면적이 클수록 즉, 잘게 자른 타이어 칩이 가장 크고, 전체 타이어를 사용한 것이 가장 작으며, 본 연구에서 사용된 타이어 조각에서는 타이어칩과 전체타이어에서 검출되는 농도 사이의 값을 나타냈다.

## 5. 결론

본 연구에서는 폐타이어를 토목공사에 재활용하여 사용하는데 있어 환경적인 영향을 고찰하기 위하여 모래와 여러 종류의 타이어 조각을 섞은 시료에 산성, 중성, 염기성의 침출수를 통과시켜 배출되는 오염물질에 대한 분석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 검사한 9개의 금속원소의 오염농도는 우리나라 먹는 물 수질기준치를 훨씬 밑도는 것으로 나타났다.
- (2) 시간 경과에 따른 오염농도의 변화는 철을 제외한 모든 금속원소의 오염농도가 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 금속의 산화현상 때문인 것으로 판단된다.
- (3) 산성, 중성, 염기성의 세가지 다른 환경 조건하에서의 오염농도변화는 뚜렷하게 구분되지는 않았지만 철(Fe)은 산성조건에서 더 많은 오염물질을 배출하였고, 알루미늄(Al)은 염기성에서 더 많은 오염물질을 생성하였다.
- (4) 여과용액을 중성화시키려는 고무의 성질로 인하여 초기의 환경 조건에 관계없이 매 순환 후 검출수의 pH 농도는 약 7.6으로 일정하게 나타났다.
- (5) 노출되는 타이어보강재의 비표면적이 커질수록 즉, 타이어를 더 작게 자를수록 타이어 내에 있는 철선의 노출이 커져서 금속오염물질의 농도가 증가하였으며, 오염물질의 농도는 시간이 경과함에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다.
- (6) 형광성 박테리아로 알아본 오염물질의 독성평가 결과는 모든 경우에서 EC50의 값이 100%를 넘어 독성을 나타내지 않았고, 이로부터 폐타이어에서 나오는 침출수가 유기체에 유해한 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.
- (7) 아연(Zn)의 경우 기준치를 훨씬 못 미치는 오염물질이 검출되었지만 타이어 고무성분의 약 2%가 산화아연으로 구성되어 있으므로 지속적인 관찰이 필요하고, 독성시험에서도 독성이 나타나지는 않았지만 생체내 축적될 경향이 있으므로 지속적인 관찰이 필요할 것으로 생각된다.

결론적으로, 페타이어를 지반보강재로 사용할 경우 타이어 보강재를 크게 할수록 철선의 노출면적이 적어 환경적으로 더 유리할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 대림산업(주)의 2003년도 연구비의 일부에 의하여 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 서덕성 (2003), 사질토지반에서 타이어셀과 지오셀의 지지력, 석사학위논문, 인하대학교, 60p.
2. 윤여원, 최경순, 천성한 (2003), "지반보강재로서 페타이어의 보강 효과", 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp.827-832.
3. 이상준 (2003), 풍화토 지반에서 타이어셀 매트와 지반보강 효과, 석사학위논문, 인하대학교, 56p.
4. 환경부 (2002), "먹는물 수질관리 지침", 상하수도국.
5. Blumenthal M., Humphrey Dana N. and Katz Lynn E. (1997), "Water Quality effects of Tire Chip Fills Placed Above the Groundwater Table", Testing Soil mixed with Waste or Recycled Materials, *The American Society for Testing and Materials*, pp.299-313.
6. Bulich A.A. (1982), "A practical and reliable method for monitoring the toxicity of aquatic samples", *Process, Biochem*, Vol.45.
7. Foose, G. J., Benson, C. H., and Boscher, P. J. (1996), "Sand Reinforced with Shredded Waste Tire", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122, pp.760-767.
8. Garga, Vinod K. and O'Shaughnessy, Vince (2000), "Tire-reinforced earth fill. Part1 : Construction of a test fill, performance and retaining wall design", *Canadian Geotechnical Journal*, pp.75-96.
9. Gerscovich, D.M.S., de Medeiros, L.V., and Sayao, A.S.F.J. (2001), "Field pullout tests of scrap tire reinforcement layers under different soil surcharges", *Proc. of the 15th ISMGE*, Vol.2, pp.1587-1590.
10. Humphrey, D. and Katz, Lynn E. (2001), *Field Study of Water Quality effects of Tire Shreds Placed Below the Water Table*, Air and Water Management Association.
11. Humphrey, D. and Manion, W.P. (1992), "Properties of tire chips for light weight fill", *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, Geotechnical Special Publication, No.30, Vol.2, pp.1345-1355.
12. Humphrey, D., and Stanford, T, Cribbs, M., and Manion, W. (1993), "Shear strength and compressibility of tire chips for use as retaining wall backfill", *Transp. Res. Rec. 1422*, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp.29-35.
13. Liu H.S., Mead J.L. and Stacer Poss G. (1998), *Environmental Impacts of Recycling Rubber in Light Fill Applications: Summary & Evaluation of Existing Literature*, Chelsea Center for Recycling and Economic Development, University of Massachusetts Lowell, Technical Report No.2, 17p.
14. Nguyen T.H. (1996), "Utilization of used tyres in civil engineering - The Pneusol 'Tyresoil'", *Proc. of the 2nd Int'l Congress on Environmental Geotechnics*, pp.809-814.
15. Tatlisoz, N., Edil, T.B., and Benson, C.H. (1998), "Interaction Between Reinforcing Geosynthetics and Soil-Tire Chip Mixtures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 1109-1119.
16. O'Shaughnessy, V., and Garga, V.K. (2000), "Tire-reinforced earth fill. Part3: Environmental assessment", *Canadian Geotechnical Journal*, pp.117-131.
17. Sengupta S., and Miller, H.J. (1999), *Preliminary Investigation of Tire Shreds for Use in Residential Subsurface Leaching Field Systems*, Chelsea Center for Recycling and Economic Development, University of Massachusetts Lowell, Technical Report No.12, 11p.
18. Westerberg B., and Maccsik J. (2001), "Geotechnical and environmental properties of tire shreds in landfill drainage applications", *Proc. of the 15th ISMGE*, Vol.3, pp.2017-2021.
19. Williams, P.T., Besler, S., and Taylor, D.T. (1990), The pyrolysis of scrap automotive tyres: the influence of temperature and heating rate on product composition, *Fuel*, Vol.69, pp.1474-1482.

(접수일자 2003. 10. 17, 심사완료일 2004. 2. 6)