

碩士學位論文

투수성 탄성포장재의 투수성 향상 및
친환경적 개발에 관한 연구



濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

金 承 賢

2008年 2月

투수성 탄성포장재의 투수성 향상 및
친환경적 개발에 관한 연구

指導教授 南 正 萬

金 承 賢

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 2月

金承賢의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2008年 2月

A Study on the Environmental-friendly Development
and Permeability Improvement of Porous Elastic
Pavement Materials

Seung-Hyun Kim

(Supervised by Professor Jung-Man Nam)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Master of Engineering

2008. 2

This thesis has been examined and approved

Thesis director, Byung-Gul Lee, Prof. of Civil engineering

Thesis director, Sang-Yeol Park, Prof. of Civil engineering

Thesis director, Jung-Man Nam, Prof. of Civil engineering

February. 2008

Department of Civil & Ocean Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	vi
Summary	ix
I. 서 론	1
1. 연구배경 및 목적	1
2. 연구내용 및 범위	3
II. 기존이론	4
1. 투수성포장	4
1.1 투수성 포장공법의 정의	4
1.2 투수성 포장공법과 배수성 포장공법	5
1.3 투수성 포장공법의 구성	8
1.4 투수성 포장재의 종류	11
1.5 투수성 포장공법의 문제점	13
2. 투수콘크리트	14
2.1 투수콘크리트포장	14
2.2 투수콘크리트의 구조	14
2.3 투수콘크리트의 특성	15
2.3.1 투수콘크리트의 강도	16
2.3.2 투수콘크리트의 내구성	17
3. 탄성포장재	19
3.1 타이어 구조	19
3.2 페타이어 고무 칩 제조	24
3.2.1 국내 페타이어 발생 및 처리 현황	24
3.2.2 페타이어 칩 제조방법	26

Ⅲ. 재료의 성질	28
1. 투수콘크리트	28
1.1 시멘트 및 혼화제	28
1.2 골재	29
1.3 배합비	31
2. 페타이어 칩	32
2.1 XRF 분석	32
2.2 XRD 분석	33
2.3 SEM 분석	33
3. 송이(Scoria)	35
3.1 송이의 정의	35
3.2 제주도내 송이의 분포	36
3.1 송이의 특성	38
3.1.1 물리적 특성	38
3.1.2 화학적 특성	40
4. 석분	42
4.1 석분슬러지 발생 과정 및 현황	43
4.2 현무암 석분 슬러지의 특성	46
4.2.1 물리적 특성	46
4.2.2 화학적 특성	48
Ⅳ. 실험방법 및 결과	51
1. 투수콘크리트	51
1.1 압축강도 및 휨강도시험	51
1.1.1 압축강도시험	51
1.1.2 휨강도시험	52
1.1.3 압축강도 및 휨강도 시험결과	53

1.2 공극막힘시험	55
1.2.1 공극막힘재 산정식	55
1.2.2 자연시료의 입경	58
1.2.3 공극막힘재	59
1.2.4 공극막힘시험	60
1.3 현장투수시험	67
1.4 공극률시험	69
1.4.1 골재치수별 공극률시험결과	70
2. 탄성포장재	71
1.1 중금속 흡착실험	71
1.1.1 용출실험	72
1.1.2 흡착실험	73
V. 고 찰	79
1. 투수콘크리트	79
1.1 강 도	79
1.2 투수성 수명	80
1.3 경제성	81
2. 탄성포장재	82
2.1 중금속흡착효과	82
VI. 결 론	84
참 고 문 헌	86

List of Tables

Table 2.1 Features comparison of porous pavement & drainage pavement (김선태, 2002)	7
Table 2.2 Surface course materials with permeability(김선태, 2002)	12
Table 2.3 Properties of porous concrete	16
Table 2.4 Composition Ratio according to the use purpose(나대엽, 2000)	22
Table 2.5 A mount of production and recycling of the waste tires(KTMA)	24
Table 2.6 The present situation of recycling of the waste tires(KTMA) ·	25
Table 2.7 The application with the sizes of rubber chip	26
Table 3.1 Chemical composition of cement	28
Table 3.2 Physical composition of cement	28
Table 3.3 Chemical composition of quick setting admixtures	29
Table 3.4 The measured results according to KS F 2503	29
Table 3.5 Mix proportion ratio of prous concrete	31
Table 3.6 Total concentration of discarded automotive tires	33
Table 3.7 The sampling location and each colors of scoria	37
Table 3.8 Samples gradation	38
Table 3.9 Compaction test results	39
Table 3.10 Chemical composition of scorias	40
Table 3.11 SEM results of each colors of scoria	42
Table 3.12 The current status of the stone sludge production amount and treatment expenses(김기영, 2007)	44
Table 3.13 The present status of the scrapped stone material disposal (김기영, 2007)	45
Table 3.14 The production amount of the Powdered basalt sludge	

(김기영, 2007)	45
Table 3.15 The physical properties of the Powdered basalt sludge	47
Table 3.16 Chemical composition of Powdered basalt	49
Table 4.1 The grain size distribution of the waste tire chips	57
Table 4.2 Uniformity Coefficient(Cu) and Coefficient of Gradation(Cg) in Fields	58
Table 4.3 Investigation location and section in Jeju	61
Table 4.4 The rainfall property with rainfall event	61
Table 4.5 The sum and SS average concentration on location rainfall runoff	62
Table 4.6 The result and place in field permeability test	68
Table 4.7 the result according to leaching test of the waste tire chips ·	72
Table 4.8 Criteria of hazardous material with the solid waste leaching test 72	
Table 5.1 A unit price per m ³ with coarse aggregate	81

List of Figures

Fig. 2.1 The rainfall flow of porous pavement & drainage pavement	6
Fig. 2.2 The basic section of porous pavement	8
Fig. 2.3 The concept map of porous concrete	15
Fig. 2.4 Relation between compressive strength and porosity (김선태, 2002)	17
Fig. 2.5 General structure of the tire	20
Fig. 2.6 Structure of carbon black	23
Fig. 3.1 Grain size distribution curve according to aggregate (a) 13mm aggregate (b) 19mm aggregate (c) 25mm aggregate (d) 40mm aggregate	30
Fig. 3.2 Consistent elements in the discarded automotive tires.	34
Fig. 3.3 X-ray diffractogram of discarded automotive tires	34
Fig. 3.4 SEM photogram of discarded automotive tires($\times 11,000$)	34
Fig. 3.5 Colorific Distribution of scorias in Jeju(윤정수, 1995)	36
Fig. 3.6 The sampling location of scorias	37
Fig. 3.7 Grain size distribution curve with scorias	38
Fig. 3.8 Compaction curve of samples	39
Fig. 3.9 Chemical composition of scorias	41
Fig. 3.10 The flow chart of the Powdered basalt sludge production	43
Fig. 3.11 Grain-size distribution curve of Powdered basalt	47
Fig. 3.12 Compaction curve of Powdered basalt	48
Fig. 3.13 Chemical composition of Powdered basalt	49
Fig. 3.14 SEM results of Powdered basalt	50
Fig. 4.1 Photograph of compression test	51
Fig. 4.2 The specimen for compressive strength with aggregate	51

Fig. 4.3 A diagram of flexural strength test	52
Fig. 4.4 Photograph of flexural strength test	53
Fig. 4.5 The specimen for flexural strength with aggregate	53
Fig. 4.6 The result of compressive strength	54
Fig. 4.7 The result of flexural strength	54
Fig. 4.8 Selection criteria of the filter material	56
Fig. 4.9 Grain-size range effects on the waste tire chips filter	57
Fig. 4.10 Grain-size distribution curve of samples in Jeju	58
Fig. 4.11 Grain-size distribution curve of the pore-clogging materials	59
Fig. 4.12 A diagram of constant head permeability test apparatus	60
Fig. 4.13 Produced constant head permeability test apparatus	60
Fig. 4.14 The result of pore-clogging test with aggregate size	64
Fig. 4.15 The result of pore-clogging test with aggregate size after primer spread	64
Fig. 4.16 The result of pore-clogging test with variable W/C ratio	66
Fig. 4.17 A diagram of variable head permeability test apparatus in field	67
Fig. 4.18 Photograph of permeability test in field	68
Fig. 4.19 Continuity and irregularity of open pore	69
Fig. 4.20 The result of porosity test with aggregate	70
Fig. 4.21 Used agitator	71
Fig. 4.22 AAS(Atomic Absorption Spectrometer)	71
Fig. 4.23 Remove rate of Pb(lead) with mixed samples	74
Fig. 4.24 Remove rate of Cu(copper) with mixed samples	74
Fig. 4.25 Remove rate of Cd(cadmium) with mixed samples	75
Fig. 4.26 Remove rate of Cr(chrom) with mixed samples	75
Fig. 4.27 Remove rate of yellowish brown scoria with heavy metals	76
Fig. 4.28 Remove rate of basalt sludge with heavy metals	76
Fig. 4.29 Remove rate of black scoria with heavy metals	77

Fig. 4.30 Remove rate of reddish brown scoria with heavy metals 77

Fig. 4.31 Remove rate of dark gray scoria with heavy metals 78

Fig. 5.1 The result of compressive strength and flexural strength with aggregate 79

Fig. 5.2 The result of pore-clogging test with aggregate size 80

Fig. 5.3 The effect of materials savings with the amount used 81

Fig. 5.4 The result of heavy metals adsorption of reddish brown scoria 83

Fig. 5.5 The result of heavy metals adsorption of basalt sludge 83



Summary

The purpose of the study was to develop the environmental-friendly and permeability improvement of porous elastic pavement materials. First, the study analyzed porous concrete through the pore-clogging test by changing a size of coarse aggregate to look for a plan to extend life of permeability as well as to satisfy the intensity required to structure. As the result, aggregate of 13mm, 19mm and 25mm satisfied the intensity required and had each 16 months, 48 months and 66 months in life of permeability. Therefore, aggregate of 25mm had the longest life of permeability. Second, in the elastic pavement layer with pore, a surface layer, the study analyzed heavy metals (Pb, Cu, Cd and Cr) removal effect by mixing four kinds of scoria by each color and one kind of basalt sludge with materials of elastic pavement layer to remove a pollution source of heavy metals happened at the time of running of rainfall. As the result, the study was analyzed in order of yellowish brown scoria > basalt sludge > black scoria > reddish brown scoria > dark gray scoria, but yellowish brown scoria is not enough in side of supply since it has a little reserves. Therefore, it is judged that basalt sludge is the most environmental friendly material which can have an effect of cost reduction and of the material cost reduction by waste treatment and an effect of environmental conservation and of a heavy metal pollution source's removal by recycling of waste matters.

Consequently, it is judged that it is the most reasonable to use coarse aggregate of 25mm on the porous concrete layer and to make laying of the elastic pavement layer with pore by mixing basalt sludge on the surface layer.

I. 서 론

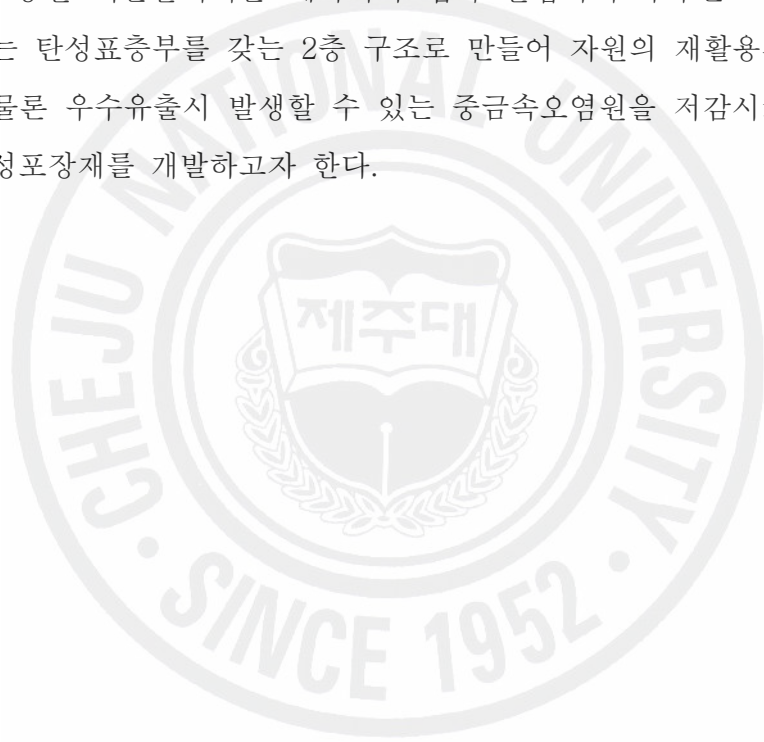
1. 연구배경 및 목적

1980년대 이후 하천을 따라 급속히 도시화가 진행되면서 불투수 면적이 증가하여, 동일한 호우에 대해서도 도시화 이전과 비교할 때, 하천으로의 유출량과 침투유량이 증가할 뿐 만 아니라 침투유량의 발생시간도 감소하는 등 방재측면에서도 불리한 여건이 심화되고 있다. 홍수에 의한 피해를 저감시키기 위해 우수 유출저감방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 그 방법들로는 저수지, 우수지와 같은 저류시설을 이용하여 침투홍수량을 감소시키는 방법, 일정 규모 이하의 홍수량만 하도 내에 소통될 수 있도록 제방 또는 암거를 축조하는 방법, 하천 개수 등을 통하여 흐름의 소통을 원활하게 하여 침투수위를 낮추는 방법, 유역변경으로 홍수량을 해양으로 방류시키는 방법, 불투수 면적을 줄여 도시유출을 감소시키는 방법으로 우수를 지하로 침투시키기 위한 투수성포장, 침투트렌치 설치 등의 구조적 방법과 홍수 예·경보 시스템의 체계 강화, 홍수 상습피해 지역의 토지이용도 제한, 홍수보험제도에 의한 피해 보상 등의 비구조적 방법을 사용하고 있다.(이재응, 2001)

그리고 국민 소득의 증대와 산업의 발전으로 인해 기하급수적으로 증가된 자동차는 현재 국민 3명당 1대 꼴인 1600만대를 넘어섰으며, 이에 따라 해마다 엄청난 수(약 2천3백만개)의 폐타이어가 배출되고 있으나, 이들 폐타이어는 대부분 토목공사(군부대진지 구축) 등 단순 재이용되거나 수출되고 있으며, 가공이용, 열이용 등 부가가치를 높일 수 있는 용도로는 상당히 미미한 수준에 머물고 있다. 또한 즉시 재활용되지 않는 폐타이어는 쌓여 불미스러운 뿐만 아니라 화재발생 또는 건강 악화의 원인이 될 수 있으며 환경문제를 야기할 수 있다. 따라서, 환경문제의 해결과 경제성 측면을 충족시킬 재활용 기술에 대한 관심이 높아지고 있는데 현재까지 진행되고 있는 폐타이어 재활용에 관한 연구는 처리 방법에 따라서 크게 물리적 처리, 화학적 처리 그리고 소각 처리로 구분된다. 효율적으로

페타이어를 대량 소모할 수 있는 방법 중의 하나가 페타이어를 분쇄, 분말(칩)화하여 재활용하는 방법(오현수, 2007)이며 최근 폐자재의 재활용이라는 친환경 건설기술개발 요구에 따라 페타이어를 이용한 페타이어 칩의 활용이 증가되고 있는 실정이다.(남명식, 2007)

본 연구에서는 투수콘크리트의 구조체로서 요구하는 강도를 만족하고 공극막힘현상을 해석해 구조체의 수명을 연장하고, 제주에 많은 양이 있고 얼굴에 사용하는 껍에 혼합하여 사용할 정도로 인체에 이롭고 우수정화능력을 가지고 있는 송이와 석재산업의 부산물로 발생돼 폐기물로 처리되어 현재 재활용에 대한 연구가 진행 중인 석분슬러지를 페타이어 칩과 혼합하여 투수콘크리트기층 위에 공극이 있는 탄성표층부를 갖는 2층 구조로 만들어 자원의 재활용과 우수유출저감효과는 물론 우수유출시 발생할 수 있는 중금속오염원을 저감시켜 친환경적인 투수성 탄성포장재를 개발하고자 한다.



2. 연구내용 및 범위

본 연구에서는 투수콘크리트의 공극막힘현상을 실내시험을 통해 재현하고 기능성 수명의 한계를 확인하여 연장할 수 있는 방안을 연구하고, 탄성포장재의 주재료인 페타이어 칩에 석분슬러지 및 송이 등의 재료들을 혼합하여 중금속오염원을 최대한 제거하면서 구조체로서 요구하는 기능을 유지할 수 있는 범위를 분석하였다.

다음과 같은 연구를 수행 하였다.

(1) 투수성포장의 메커니즘 분석

- 기존 투수콘크리트의 메커니즘 분석
- 페타이어 칩을 이용한 2층 구조 투수성탄성포장 분석

(2) 단입도 골재 별 투수콘크리트 분석

- 구조체로서의 기능을 유지하는 투수콘크리트의 강도 분석
- 단입도 골재 별 공극막힘시험을 통한 기능적 수명 분석

(3) 페타이어 칩과 시료들의 혼합특성 분석

- 페타이어 칩과 시료들의 혼합에 의한 강도 특성 분석
- 페타이어 칩과 시료들의 혼합에 의한 중금속 흡착능 분석

II. 기존이론

1. 투수성포장

1.1 투수성 포장공법의 정의

투수성 포장공법은 도시에서 발생한 우수의 지하 침투, 도시유출에서 용해성 오염물질과 미세한 오염물질의 제거, 지하수 함양, 제방 세굴 조절 등의 기능을 가지고 있다. 투수성 포장재의 사용은 일반 포장재와 비교할 때 강도가 떨어지기 때문에 주차장, 보도 등으로 사용이 제한되어 왔지만 최근강도를 높이기 위한 활발한 연구가 진행되고 있다. 투수성 포장은 경사가 완만하고, 토양의 투수성이 양호하며, 지하수위가 깊은 장소에 비교적 적합하다.

미국 펜실바니아주 월로우 그로브, 메릴랜드주의 락빌, 버지니아주의 프린스 윌리엄 카운티 등의 투수성 포장공법으로 시공한 지역에서 수행한 물 수지 연구에 따르면 연 강우량의 60~90% 가 지하수로 침투된다고 한다. 식물이 없으므로 증산이 발생하지 않기 때문에 자연 조건에서보다 투수성 포장재를 설치했을 경우 지하수 함양율은 약간 더 큰 것으로 연구되었다. 약간의 개발이 진행되어도 중·소 하천에서 여름철의 기저유량이 급격하게 감소하여 수질이 악화되고 생태계가 파괴되는 것을 고려할 때, 지하수 함양율이 증가하면 갈수기에 하천 유량을 유지할 수 있다.

또한, 저류지나 우수지와는 달리, 투수성 포장재를 사용하면 우수유출량을 감소시킨다. 월로우 그로브, 락빌, 프린스 윌리엄에서 발생한 우수유출의 약 20-40% 만이 지표수 유출로 나타났다. 나머지는 투수성 포장재 내에 존재하다 증발하거나 지하로 침투하여 지하수를 함양시킨다. 따라서 투수성 포장공법은 우수나 기타 유수를 표층과 기층을 통해 침투시키고 노상과 기층을 분리하는 필터층을 통과하여 노상으로 침투하며 투수계수 $1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 이상인 포장공법을 말하는 것이다.

투수성 포장재의 유출은 6~10cm 두께의 공극 아스팔트 층을 통하여 기층으

로 침투하므로 결국 침투성 포장재의 저류 능력은 기층의 두께와 밀접한 관계가 있다. 침투성 포장재를 사용하면 설계강우 보다 작은 강우에 대해 침투유량을 개발 전 단계까지 조절할 수 있다. 투수성 포장 시스템의 유일한 한계는 큰 설계강우로부터 유출량을 수용할 수 있는 기층의 깊이가 충분하지 않을 수 있다는 것이다.

1.2 투수성 포장공법과 배수성 포장공법

침투성 포장공법은 노상까지 우수를 침투시키는 투수성 포장공법과 노상까지 침투시키지는 않지만 표층과 기층에서 침투된 우수를 트랜치로 배수시키는 배수성 포장공법으로 구분한다.

지금까지의 포장은 그 내구성을 향상시키기 위해 수밀성이 우수한 구조를 가지는 콘크리트와 아스팔트로 진보되어 왔다. 이에 반해 투수성 포장은 지금까지의 포장기술과는 완전히 반대의 발상에 의해 우수를 공극이 많은 다공질 표층부에서 노상으로 침투시키는 구조로 되어 있다. 따라서 일반 포장의 우수처리는 도로경사에 의해 포장표면을 따라 집수구나 배수구로 흘러가는데 대하여 투수성 포장은 포장체의 공극속을 통과시킴으로써 바로아래의 노상에 침투시킨다. 노상 아래에 우수를 침투시킴으로써 투수성 포장공법에는 강우의 표면배수 억제, 식생, 흙 속 생태의 개선, 지하수의 보존 등 본래자연이 가지는 물 순환에 가까운 효과를 얻을 수 있게 된다.

그런데 표층을 침투한 물이 기층과 차단층을 통과하여 노상이 과잉의 수분을 포함하게 되면 강도의 저하를 초래하기 때문에 투수성 포장은 큰 하중을 받는 포장에는 사용하는데 신중하여야 한다. 이에 대한 보완책으로 포장의 표층부에는 투수성의 콘크리트 또는 아스팔트를 사용하나 노상 이하로 물을 침투시키지 않는 구조를 가지는 배수성 포장공법이 제안되고 있다. 배수성 아스팔트 포장에서는 표층부의 두께를 4~5cm 정도로 한다. 이배수성 포장은 표층부 바로 밑의 불투수성 층의 위를 약 2%의 횡단기울기에 의해 노견방향으로 물을 유하시켜 측구로 배수시키는 포장구성으로 이루어진다. 이때 어느 정도의 강우강도까지는 노

면에 우수면이 생기지 않고 투수층 내에서 물이 흘러 배수된다.

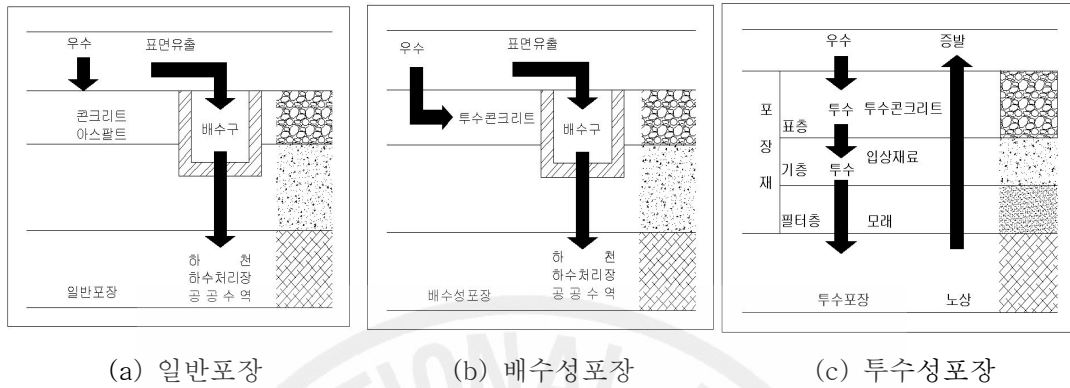


Fig. 2.1 The rainfall flow of porous pavement & drainage pavement

배수성 포장공법은 표층의 공극 특성으로부터 소음 감소효과와 주행 안전성의 효과를 기대 할 수 있지만 우수를 흡 속으로 환원시킬 수 없어 배수성 포장과 투수성 포장공법은 기능과 포장구성이 다르다. Table 2.1은 보행자용 도로에 적용한 투수성 포장공법과 차도에 적용시킨 배수성 포장공법의 효과를 비교한 것이다.

Table 2.1 Features comparison of porous pavement & drainage pavement
(김선태, 2002)

분류	항 목		적용 장소	투수성 포장	배수성 포장	일반 포장
				보행자용	차도	
자연환경	표면배수의 억제	도시하천의 범람방지	○			
		하수도 부담 경감	○			
		공공수역의 오염 경감	○			
		배수시설의 부담경감	○			
	식생, 흙 속 생태의 개선	가로수의 육성	○			
		토양의 산소결핍방지	○			
		흙 속 온도의 상승억제	○			
	지하수 보전	지반 침하의 억제	○			
		지하수의 저장	○			
	노면 온도의 저하	열섬(heat island)현상의 억제	○			
사회환경	주행소음의 감소	엔진음 등의 흡음		○		
		에어 펌핑음의 제거		○		
	주행안전성	물이 튀는 것을 방지		○		
		스모킹 방지		○		
		hydroplaning의 방지		○		
	유지보수의 감소	미끄럼 저항의 증대		○		
		포장의 내구성				○
	유지관리의 용이성				○	

1.3 투수성 포장공법의 구성

투수성 포장은 노상 위에 필터층, 기층, 표층의 순서로 시공되어지며 Fig. 2.2는 투수성포장공법의 기본단면이다. 이들 각층 어느 한 부분이라도 투수능력이 저하되면 전체투수성 포장의 투수기능이 마비된다. 따라서 어느 한 부분이라도 소홀히 여겨서는 안 되며, 특히 각층마다 다음과 같은 사항을 엄두에 두어야 한다.

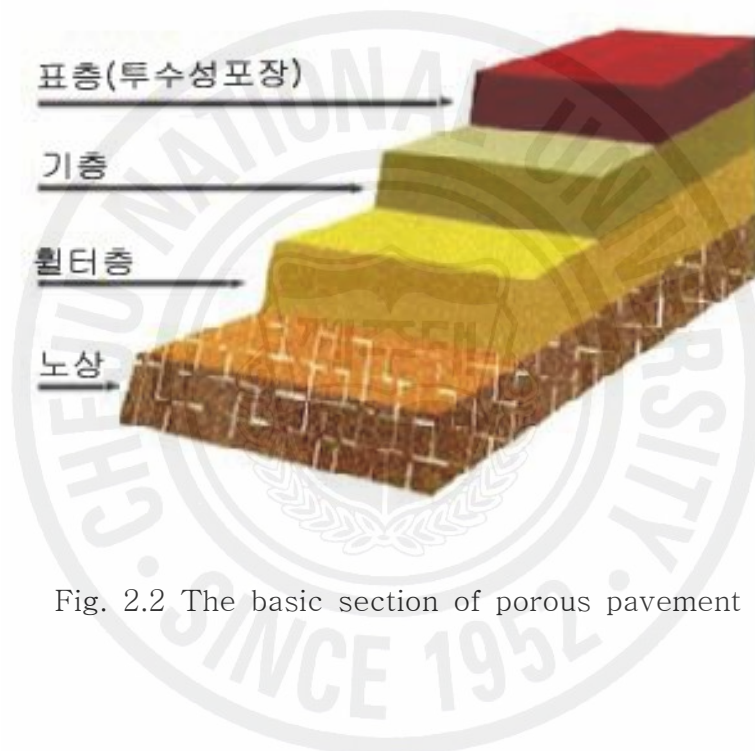


Fig. 2.2 The basic section of porous pavement

1) 노상

노상은 포장의 두께를 결정하는 기초가 되는 흙의 부분으로 포장 밑 약 1m의 층을 말한다. 투수성 포장공법의 적용 시에는 원지반의 투수계수, 즉 노상의 투수정도를 고려해야 한다. 우리나라 대부분의 지층은 충적층으로서 모래와 자갈 성분의 퇴적층이라고 할 수 있다. 지층을 구성하는 성분의 배합 비율과 층의 깊이 에 따라 투수계수가 달라지는데 충적층만 해도 그 범위가 크다. 투수성 포장을 적용할 경우에는 우수가 투수포장체인 표층을 거쳐 기층과 보조기층, 필터를 통과하여 노상에 도달하게 되는데 이 부분에서 구조체를 통과한 우수를 모두 침투

시킬 수 있는 성질의 지반인가 하는 점을 고려해야 한다. 만약 원래의 노상 자체가 투수성능이 낮다면 이층에 모인 우수를 유도하여 배수시킬 다른 공법이 도입되어야 한다. 또한 노상은 충분한 지지력을 확보하여야 하며, 물이 침투되더라도 쉽게 연약화 되는 지반은 곤란하다. 노상이 연약할 경우에는 양질의 재료로 치환하는 등의 개량작업이 필요하게 된다. 그리고 노상의 배수성능이 좋지 않을 경우 침투된 우수에 의해 동해(凍害)의 가능성이 있으므로 동해 방지층을 추가로 설치하여 이에 대비해야 한다. 동해 방지층은 보통 보조기층으로 구성된다.

2) 월터층

노상토가 노반으로 침투하는 것을 방지하며, 미세 입도의 불순물이 노상에 침투하여 연약화 시키는 것을 방지하고, 노반에 미치는 하중을 등분포로 노상에 전달할 목적으로 설치하여야 한다. 월터층은 균일하게 인력, 도우저 또는 모터그레이드 등으로 포설하고 정돈한다. 노상이 약한 경우 노반재(기층)를 깔고 동시에 전압해도 되며, 노상토와 섞이지 않도록 포설하고, 다짐은 로울러나 콤팩터 등을 사용한다.

3) 기층

기층은 상부의 표층을 지지하고, 하중을 분산하며, 표층 시공을 위한 작업대 역할을 제공하는 중요한 부분이다. 그리고 표층에서 침투된 우수가 머물러 있지 않도록 기층에서 원활한 구배를 확보해 주어야 한다. 이러한 물리적 기능 외에 기층은 침투된 우수를 노상으로 전달하는 중간역할을 하게 되므로, 투수계수의 확보라는 기본적인 기능을 지니고 있다. 이러한 이유로 투수성 포장에서의 기층은 일반 포장과 달리 기층의 재료로 막부순돌(크러셔런), 입도조정쇄석, 재생콘크리트 등 입자가 굵은 입상재료를 주로 사용하고 있다.

그러나 투수성능의 확보는 기층의 두께나 공극으로만 이루어지는 것이 아니라 적용 현장의 조건에서 요구되는 투수계수를 확보하는 것이 더욱 중요하다. 그런데 국내 투수성 포장 계약에서는 표층 시공만 하고, 기층시공과는 별도로 이루어지는 경우가 많다. 이는 결국 투수성 포장에 적합하지 않은 기층의 시공으로 인해 기층의 투수 성능 확보가 어려워지게 된다. 따라서 투수성 포장에서의 기층은

계획초기부터 상부의 표층에 따라 적절한 투수계수를 확보하도록 설계되고, 적합한 재료의 선택이 이루어져야한다. 시공 측면에서도 기층과 표층을 함께 발주하여 투수성에 대한 책임소재를 분명하게 하고, 투수성능을 확보할 수 있는 여건을 마련하여야 한다. 또한 시공이 진행되면서 표층의 미분이 기층에 섞여 투수성능을 떨어뜨리지 않도록 해야 한다. 그리고 기층과 노상 사이에는 필터층을 조성하여 노상의 흙이 노반으로 침투하거나 미세입도의 불순물이 노상에 침투하여 침투성능을 약화시키거나 지반을 연약화 시키는 것을 방지하도록 한다. 필터층으로는 일반적으로 모래를 사용한다.

4) 표 층

표층은 외부 하중을 직접 받는 층으로서 적용하고자 하는 지역에 따라 평탄성, 안정성, 보행감 등을 고려하여 요구되는 투수성능 및 물리적 성능을 만족시켜야 한다. 일반적으로 투수성포장은 일반포장에 비해 휨강도가 약하기 때문에 보행로, 자전거도로, 광장, 주차장, 공원길 등으로만 한정되어 적용되고 있다. 각 공간에 따라 포설형의 콘크리트 및 아스팔트 포장을 비롯하여 각종 블록형을 적용할 수 있으나 국내의 경우는 포설형을 주로 이용하고 있는 실정이다. 표층은 시공 상의 투수계수 확보등도 중요하지만, 시공 후의 철저한 유지관리가 반드시 지속되어야 한다.

1.4 투수성 포장재의 종류

투수성 포장재는 크게 콘크리트계 포장과, 블록 등을 사용한 2차제품계 포장, 상온 혼합물과 가열혼합물을 사용한 혼합물계 포장 및 도포식 포장이 있다. 이들의 제조에는 안료 등 여러 가지의 재료가 사용되며 경우에 따라서는 골재로서 칼라세라믹 골재, 천연자갈을 사용한 것, 그리고 탄력성을 가지는 고무 조각과 나무 조각 등의 목질 계 재료를 사용한 것이 있다. 공장에서 만들어지고 있는 2차 제품으로서는 콘크리트를 주원료로 한 인터 록킹 블록과 콘크리트 판, 그리고 고무조각과 세라믹을 블록 모양으로 성형 가공한 것이 있으며, 그 밖에 표층에 따라 투수기능을 가지는 표층재료를 살펴보면 Table 2.2와 같다.



Table 2.2 Surface course materials with permeability(김선태, 2002)

구분	표층에 의한 분류		주요사용재료
혼합물계	가열혼합물계	아스팔트계	투수성아스팔트 혼합물 개질아스팔트혼합물 착색투수성 아스팔트 혼합물 칼라골재 사용 혼합물 탄력성 아스팔트 혼합물
		수지계	열가소성수지 혼합물
	상온혼합물계	수지계	수지모르타르 천연자갈 세라믹골재 고무조각 나무조각, 목재 섬유
		아스팔트유제계	상온 아스팔트 혼합물
콘크리트계			투수성 콘크리트
도막계	상온도막계	용제계등	아크릴 수지 등
2차제품계	블록계		인터록킹 블록 콘크리트 평판 세라믹 블록 고무칩 블록
	인조잔디계		인조잔디 모래 혼합 인조잔디
기타	자연석		천연자갈

1.5 투수성 포장공법의 문제점

최근 이상기후로 인한 집중 강우, 홍수 등의 수해가 많이 발생하고 있어 도시에서의 물 순환 체계의 하나로서 대기에서 토양으로 물을 전달하는 표층의 기능이 더욱더 중요시되고 있다. 그러나 현실적으로 도심지 주거환경 대부분이 불투수층으로 피복되어 있고, 표층은 투수층이라 하더라도 토양층이 깊지 않은 인공지반으로서, 투수포장을 적용할 시에도 많은 제약이 따르고 있다.

우리나라는 80년대에 일본에서 처음으로 투수콘크리트, 투수아스팔트 등의 기술을 도입하여 왔으나 제조기술에 치중하여 시공에 있어서 기층의 중요성 및 유지관리측면을 감안한 시공 상세 기술이 미비한 실정이다. 또한 시공 후의 공극 막힘 방지를 위한 정기적인 청소작업이 필수적인데 현재 국내에서 제조, 시공의 유지관리체제가 완벽하게 이루어진 현장은 거의 찾아볼 수 없다. 국내에서 가장 많이 적용하는 공법 또한 이 포설형 방법인데 투수포장면적 증가라는 점에서 상당한 성과를 이루었지만, 포장재의 구조적 문제를 비롯하여 투수성능의 확보 등 많은 문제점이 발생하였다.

투수성 포장은 시공 후 사후관리가 매우 중요한데, 특히 포설형 공법의 경우가 더욱 그러하다. 외국의 경우는 사후관리를 위한 유지관리 매뉴얼이 보급되어 철저한 유지관리가 이루어지고 있는 실정이나, 국내에서는 유지관리를 위한 청소차량을 비롯한 사후관리 대책이라 할 수 있는 어떠한 관리도 이루어지지 않고 있는 실정이다. 국내 시공업체에서는 시공 초기에 목표 투수계수보다 높게 시공하여, 하자 보수기간이 지나면 투수성능을 확보하지 못한다는 결론이다.

투수성 포장을 청소하는 방법으로는 기계를 이용하는 경우와 인력으로 하는 경우가 있다. 기계를 이용하는 경우는 수압을 이용하는 방법과 압축공기를 이용하는 방법이 있다. 두 방법 모두 수압 또는 압축공기의 압력을 이용하여 포장표면에 끼어 있는 미분을 제거하는 것이다. 인력을 이용하는 방법은 포장 표면에 물을 뿌린 후 사람이 블러싱 하면서 청소하는 방법이다.

2. 투수콘크리트

2.1 투수콘크리트포장

도시의 포장면 중 가장 많은 비율을 차지하는 곳이 도로이다. 도시에서 도로의 투수성을 유지하는 것은 매우 중요하다. 도로 포장 구조체는 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 그 하나가 아스팔트 포장인 가형성 포장(Flexible Pavement)이고, 다른 하나는 콘크리트 포장인 강성 포장(Rigid Pavement)이다. 투수콘크리트를 적용하게 될 포장형식은 무근 콘크리트 포장에 적용될 수 있다. 이러한 무근 콘크리트 포장은 현재 국내에서도 가장 많이 사용되는 포장형식이나 차량의 주행안정성이나 도로주변의 환경보전 등의 문제점을 내포하고 있으며 투수콘크리트포장이 이의 해결방안으로 제시되고 있다. 그러나 국내의 투수콘크리트 포장에 대한 기술은 초보적인 단계라 할 수 있어 일반적인 포장재와 비교할 때 강도가 떨어진다. 이러한 문제 때문에 주차장, 보도, 자전거도로 등으로 사용이 제한되어 왔지만 최근 투수성 포장재의 강도를 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

한편 투수성 아스팔트 콘크리트가 개발되어 사용되고 있으나 여름철 노면의 온도 상승으로 아스팔트의 점성으로 인한 공극 막힘과 차량의 하중으로 노면이 변형, 투수기능이 상실되는 단점이 있다.

2.2 투수콘크리트의 구조

일반적으로 콘크리트는 굵은 골재의 공극을 시멘트, 물, 잔골재로 혼합된 모르타르로 채우고 있으며 밀실하게 채워질수록 좋은 콘크리트로 평가하지만 투수콘크리트는 모르타르 부분을 최소화하여 콘크리트내부에 투수성을 갖는 콘크리트로서 일명 포러스(Porous)콘크리트 또는 잔골재가 거의 사용되지 않았다 하여 No-Fines Concrete라고도 불린다. Fig. 2.3는 투수콘크리트의 개념도이다.

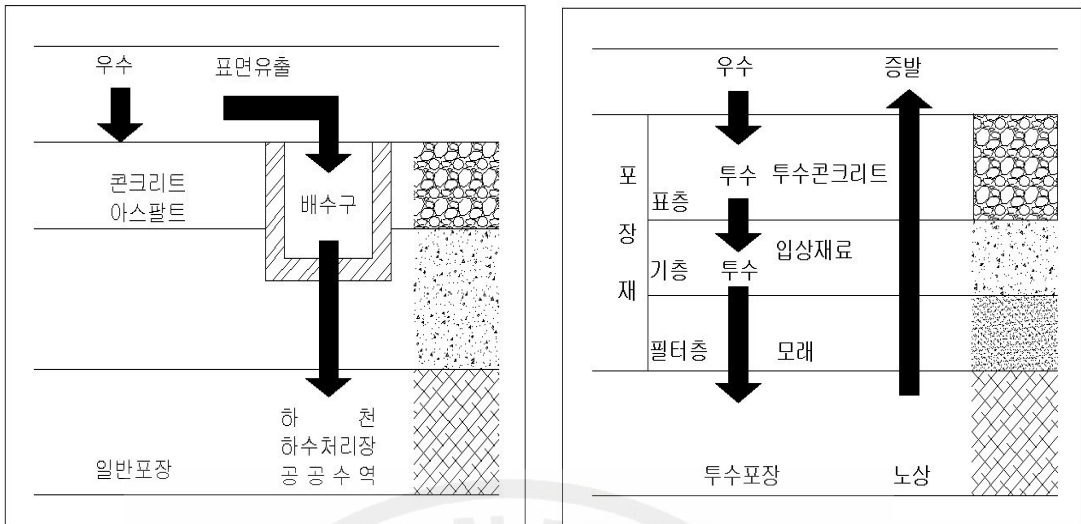


Fig. 2.3 The concept map of porous concrete

2.3 투수콘크리트의 특성

투수콘크리트는 일반콘크리트와는 상반된 개념으로서 연속된 공극을 형성하다보면 콘크리트에 요구되는 강도 및 역학적특성이 저하되므로 투수콘크리트 제조에 있어서의 핵심은 구조체로서의 요구 특성을 만족함과 동시에 투수성을 확보하여야 하는 것이다.

Table 2.3은 일반적으로 투수콘크리트에 요구되는 물성 값으로서 강도와 공극률과의 조화가 요구되는 콘크리트라 할 수 있다.

Table 2.3 Properties of porous concrete

물성항목	물성값의 범위
비중	1.6~2.0
공극률	5~35 %
압축강도	5~30 MPa
인장강도	압축강도의 1/7~1/14
휨 강도	1~5 MPa
부착강도	1.5~6 MPa
투수성	10^{-2} cm/s 이상
단열성	$0.3 \text{ kg} \cdot \text{cal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$

2.3.1 투수콘크리트의 강도

투수콘크리트의 강도는 보통 콘크리트에서와 마찬가지로 시멘트와 같은 사용 재료 또는 시멘트 페이스트의 양, 공극률 및 물-시멘트비 등의 배합조건과 다짐의 시공조건 등에 의해 결정된다고 할 수 있다. 이중 공극률의 영향이 가장 크다고 할 수 있으며 특히 투수성 확보를 위해서는 투수콘크리트의 공극률이 20~30%가 적절한 것으로 알려져 있다. 이때 공극률의 증가에 따른 강도의 저감 및 단위 시멘트량의 증가에 따른 공극률의 감소는 배합측면에서 충분히 고려하여야 한다.

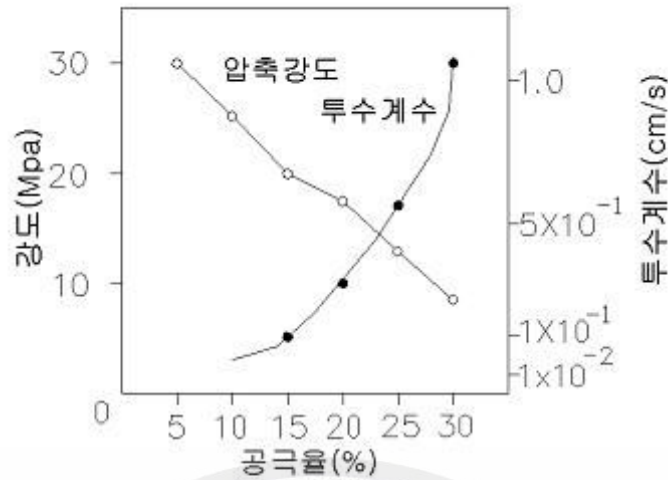


Fig. 2.4 Relation between compressive strength and porosity(김선태, 2002)

Fig. 2.4은 동일한 골재를 사용하고 공극률을 5~30%까지 6단계로 변화시켰을 때의 투수콘크리트의 압축, 휨, 및 인장강도의 측정결과를 나타낸 것이다. 이 결과에서도 투수콘크리트의 강도는 공극률의 증가에 직선적으로 감소함을 확인할 수 있으며 20~30%의 공극률에서도 투수콘크리트가 약 10~20MPa의 압축강도를 발휘함을 알 수 있다. 일반적으로 시공되고 있는 투수콘크리트의 골재크기는 골재최대 치수 13mm이하의 골재를 사용하고 있는데 이는 투수콘크리트를 포층으로 직접 노출시키기 때문으로 그 이상의 골재를 사용하면 포설 후 전압을 하여도 노출면이 거칠기 때문이다.

2.3.2 투수콘크리트의 내구성

투수콘크리트의 내구성에 대한 연구는 현재로서는 활발하게 진행되지 않은 상태지만 내구성에 관한 동결융해 저항성 실험으로 ‘수중동결 수중 용해법’과 ‘공기 중 동결 수중 용해법’에 의한 보고가 있다. 투수콘크리트는 다량의 연속된 공극이 존재하므로 이 공극내로 수분이 쉽게 유입되어 동결 팽창함으로써 일반 콘크

리트에 비해 동결융해 저항성이 낮은 것으로 알려져 있다. 하지만 골재 크기가 비교적 큰 쇄석을 사용한 투수콘크리트의 경우 ‘수중동결 수중 융해법’에 의한 결과 공극 내 얼음의 팽창압을 직접받기 때문에 열화가 빠르나 ‘공기 중 동결 수중 융해법’에 의한 시험처럼 공극이 물로 가득 차 있지 않은 경우 실내 동결융해 시험에서는 200회를 반복시키더라도 탄성계수의 저하는 없는 것으로 나타났다.

그리고 적설량이 많은 한랭지에서의 옥외 폭로시험결과에 의하면 물-시멘트 비가 낮다면 투수콘크리트의 내구성도 양호한 것으로 나타나 있고, V. M. Malhotra의 연구보고서에서도 이런 구조의 콘크리트는 AE제의 첨가로 인하여 내동해성을 향상시킬 수 있다고 한다. 그러므로 이러한 결과들을 종합해보면 투수콘크리트를 호안 등의 수면하의 부위에 적용하는 경우에는 주의가 요망되지만 기타의 경우는 한랭지에 대해서도 내구성이 있는 것으로 생각된다.

또한 단위 시멘트량이 적은 투수콘크리트의 경우 건조수축 면에서 보통콘크리트에 비하여 약 60%의 수준으로 낮고 건조수축의 속도도 완만한 것으로 알려져 있다. 보통콘크리트는 골재와 조밀한 구성으로 일정한 수준의 강도를 유지할 수 있으나 투수콘크리트는 골재와 골재를 연결하는 시멘트가 공극을 갖고 있어 공극을 통해 유수를 침투시키는 것이다.

3. 탄성포장재

3.1 타이어 구조

공압식 타이어는 고성능의 고분자 복합체이며, 그것은 도로주행 능력과 도로에 대한 탄성력 그리고 도로에서 핸들링 능력을 동시에 가지는 유연한 멤브레인 압력용기의 특성을 가지고 있다. 이와 같은 타이어의 복합적인 성능을 최대화하기 위해서는 타이어에 함유된 각 성분의 성질들이 복잡한 체계의 상호작용으로 공존하고 있다.

타이어는 카카스를 구성하는 코드가 타이어의 원주방향에 대해 직각으로 즉 타이어의 측면에서 보면 원의 중심에서 방사상(radial)으로 비드에서 비드를 직각 원주 방향에 가까운 각도로 코드를 배치한 벨트로 단단히 조여져 있다. 강성을 높이고 있는 것과 카카스 코드가 래디알 구조인 것에 의해 고속타이어로서의 성능을 발휘한다.

공압식 타이어는 타이어의 전체 성능을 최적화하기 위해 여러 종류의 고무성분으로 이루어져 있다. 고무화합물은 hardness, 신율, 탄성률, 굴곡도(flex property) 그리고 내구성과 같은 요구되는 물성에 따라 제조된다. 공압식 타이어의 일반적인 제조방법은 잘 알려져 있으나 배합조성은 타이어 제조회사의 기술력에 따라 다양하다고 알려져 있다. 최소의 성분으로 간단하게 경화하여 타이어를 제조하는 것이 가장 합리적이지만 더 나은 내구성, 핸들링, 승차감과 같은 요구 조건은 타이어 제조회사로 하여금 타이어의 구조에 점점 더 복잡한 체계를 갖도록 하고 있다. 승용차에 사용되는 래디알 타이어의 가장 일반적인 단면구조는 Fig.2.5와 같다. 구조를 살펴보면 트레드(tread), 사이드월(sidewall), 카카스(carcase), 비드(bead), 벨트(belt), 캡플라이(caply), 숄더(shoulder), 그루브(grove), 에이펙스(apex), 체파(chafar) 그리고 인너라이너(inner liner)로 구성되어 있다(나대엽, 2000).



Fig. 2.5 General structure of the tire

1) 트레드(tread)

트레드는 타이어의 여러 고무 성분 중 도로면과 직접 접촉하는 주요한 타이어 구조의 한 성분이다. 이것은 도로면에서 가해지는 충격과 전단력으로부터 타이어 몸체를 보호하기 위하여 질기면서도 탄성을 지녀야 한다. 대부분의 승용차 트레드는 styrene-butadiene rubber(SBR), 천연고무 그리고 비닐기를 많이 가지고 있는 polybutadiene으로 구성되어 있다. 트레드는 높은 마모성과 내커팅성이 양호해야 하며 외부 충격에도 견딜 수 있고 발열이 적어야 한다. 따라서 최적의 성능을 가지기 위해서는 적당한 고분자 블렌드를 선택하는 것이 중요하다.

2) 사이드월(sidewall)

사이드월은 타이어의 옆 부분을 지칭하는 것으로 카카스를 보호하고 굴신운동을 통해 승차감을 좋게 한다. 타이어의 사이드월에서 직접적으로 상호 작용하는 요소는 브레이크 쿠션(breaker cushion), 블랙사이드월(black sidewall), 차퍼(chaffer) 또는 림플렌지(rimflange)등의 세요소로 구성되어 있다.

브레이크 쿠션은 와이어 브레이크 하에서 와이어가 고무에 접촉하는 것을 방지하고 블랙사이드월은 내마모성, 내오존크래킹성 그리고 좋은 유연성을 갖게 하며 차퍼 또는 림플렌지는 타이어에 안정성을 부여하고 비드차핑에 대해 내마모

성을 갖게 한다. 외부 환경에 드러나 있는 사이드월과 림플렌지의 성분은 오존이나 산화에 의한 분해 등에 견딜 수 있는 물질들로 이루어져 있다. 사이드월과 림플렌지 속에는 내오존 크래킹성을 높이기 위해 소량의 6PPD와 IPPD와 같은 alky1 ary1 paraphenylene diamine이 블렌드 된 왁스 속에 사용되어진다. 일반적으로 사이드월은 천연고무와 cis-BR이 블렌드 되어 있다. 이것은 유연성을 제공하기 위해 탄성율을 낮추어주고 낮은 온도에서의 내커팅성과 히스테리시스를 개선한다.

3) 기타요소

카카스는 타이어 내부의 코드층을 가리키는 것으로 하중을 지지하고 충격을 흡수하는 역할을 하므로 주행 중 굴신운동에 대한 내피로성이 강해야 한다.

그리고 비드는 코드의 끝부분을 감아주어 타이어를 림에 장착시키는 역할을 하며 비드와이어(강성)와 코아고무 등으로 구성되어 있고 벨트는 스틸와이어 또는 직물 섬유로 구성되어 주행시 노면 충격을 감소시키고 노면에 닿은 트레드 부위를 넓게 하여 주행안정성을 좋게 하는 역할을 한다. 캡플라이는 벨트위에 부착되는 특수코드로 주행시 성능을 향상시켜주며 벨트의 이탈현상을 방지하고 트레드에 패인 홈을 지칭하는 그루부는 조종 안정성, 견인력, 제동성을 높이는 기능을 한다. 그리고 에이팩스는 비드의 흐트러짐(분산)을 최소화 할 수 있도록 하며 비드가 받는 충격을 완화시켜 준다. 인너 라이너는 튜브대신 타이어 안쪽에 붙어 있는 것으로 공기가 통하기 어려운 특수 고무층을 가리키며 체과는 림과 코드간의 직접 접촉을 방지하며 코드를 보호하는 기능을 한다.

타이어의 조성은 제조회사에 따라 다르고 배합비와 타이어의 용도에 따라 변화하며 화학 성분에서 부분적인 차이가 있을 수 있다. 가장 일반적으로 사용되는 타이어고무는 styrene-butadiene 공중합체(SBR)이며, butadene과 styrene을 약 3:1비로 혼합하여 중합한다. 천연고무(NR)와 IR 고무 그리고 BR 고무등이 SBR 고무와 다양한 조성으로 타이어 제조에 사용되며 용도에 따른 조성을 Table 2.4에 나타내었다.

Table 2.4 Composition ratio according to the use purpose(나대엽, 2000)

Tire type	Composition(wt%)	
	Synthetic rubber	Natural rubber
Passenger vehicle	55	45
Light truck	50	50
Race car	65	35
Heavy-duty truck	20	80
Aircraft	0	100

황성분은 인접한 고무 분자의 이중결합과 반응하며 이러한 것을 가황(vulcanization)이라 한다. 그것은 탄성체 분자 골격사시의 가교를 일으켜 탄성체의 성질을 좌우한다. 승용차 타이어의 트레드 화합물은 마찰저항과 회전저항을 최적화하고 글루브 현상을 방지하기 위해 일반적으로 SBR-BR 블렌드를 사용한다. 승용차 사이드월은 굴신율, 내커팅성, 내오존성에 잘 견디어야 하므로 사이드월은 원칙적으로 SBR을 많이 함유한다. 그리고 주행 중 굴곡운동에 대한 내피로성이 강해야 하는 카카스는 천연고무를 반드시 사용하여야 한다. 코드의 끝부분을 감아주어 타이어를 림에 장착시키는 역할을 하는 비드 부분에서는 SBR과 NR을 함께 사용한다. 카본블랙은 타이어의 중요한 부분이며 탄성율, 내마모성, 인열강도 등을 증가시킨다. Fig. 2.6은 carbon black의 화학구조를 나타내고 있다. 보통 20~30 μm 의 미립자가 내마모성과 인열강도를 높이기 위해 트레드에 사용되고 50~100 μm 의 비교적 큰 입자들이 비용을 줄이기 위해 그 외 부분에 사용되고 있다. Extender oil은 고무를 부드럽게 하는 일차적인 기능을 가진 방향족 탄화수소 화합물로서 대체로 고무의 작업성을 좋게 하고 zinc oxide는 고무를 딱딱하게 하는데 일찍부터 사용되어 왔으며 여전히 타이어 제조에 널리 사용되고 있다. 그리고 accelerator는 2-mercaptobenzothiazole 같은 organic 화합물로서 가황공정의 촉매로 사용된다. zinc oxide 와 steric acid 는 고무의 물리적 성질을 향상시키는 것 외에도 가황공정을 제어하기 위해 accelerator와 함께 사용된다.

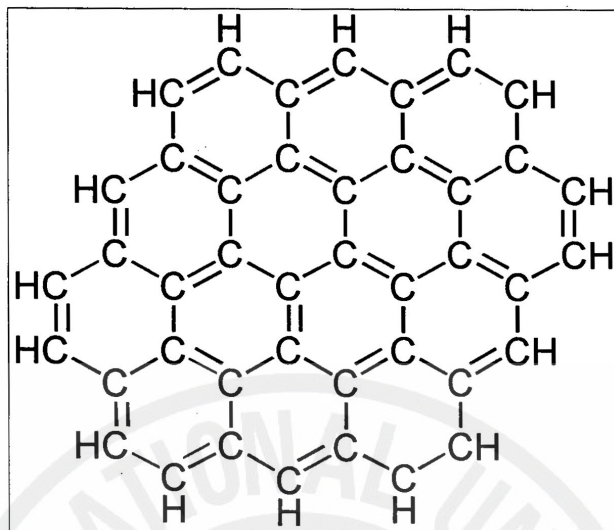


Fig. 2.6 Structure of carbon black



3.2 폐타이어 고무분말 제조

3.2.1 국내 폐타이어 발생 및 처리 현황

자동차 보급대수의 증가로 폐타이어의 발생량은 꾸준히 증가하고 있으며, ‘자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률’에 따라 재활용 실적은 폐타이어 발생량 증가율을 상회하며 증가하고 있다(남명식, 2006) 국내의 폐타이어 발생량 및 재활용량은 다음의 Table 2.5와 같다.

Table 2.5 A mount of production and recycling of the waste tires(KTMA)

구 분	2003년	2004년	2005년	2006년
폐타이어 발생량(ton)	272,280	260,266	275,072	282,990
재활용량(ton)	239,870	246,101	267,351	272,066
재활용률(%)	88.1	94.5	97.2	96.1

이용방법별 재활용 현황은 Table 2.6과 같이 나타내었다. 주종이 열 이용이며 2006년 전체 재활용 방법 중 63.3%를 차지하였고, 그 밖에 고무 칩이나 밧줄을 만드는 가공이용이 12.6%, 폐타이어를 그대로 사용하는 원형이용이 3.1%, 그리고 기타 이용이 17.1%를 차지하였다.

이 가운데 폐타이어 고무 칩의 활용현황은 지속적으로 증가하여 2006년도 기준 33,092ton 약 12.6% 정도를 보이고 있다.

폐타이어 고무 칩 활용분야가 향후 폐타이어의 가공 이용 시장에서 주도적인 역할을 할 것으로 예상되지만 전체의 폐타이어 발생량에 대해서는 여전히 한계가 있을 것이며, 외국처럼 폐타이어 고무 칩 시장의 고부가 가치의 상품 개발이 전제되면 활용처가 급격히 늘어날 것으로 예상된다.

Table 2.6 The present situation of recycling of the waste tires(KTMA)

구 분		2003		2004		2005		2006		
		중 량 (ton)	구성비 (%)	중 량 (ton)	구성비 (%)	중 량 (ton)	구성비 (%)	중 량 (ton)	구성비 (%)	
협 회 재 활 용 실 적	가공 이용	고무 칩	21,766	8.0	20,629	7.9	25,008	9.1	33,092	11.7
		뱃 줄 등	2,913	1.1	1,156	0.5	1,396	0.5	2,538	0.9
		소계	24,679	9.1	21,785	8.4	26,404	9.6	35,630	12.6
	열 이용	시멘트 킬른	153,675	56.4	152,392	58.6	170,521	62.0	173,299	61.2
		건류 조각	7,465	2.8	8,625	3.3	5,425	2.0	5,922	2.1
		소계	161,140	59.2	161,017	61.9	175,946	64.0	179,221	63.3
	원형 이용	매립장	4,383	1.6	5,275	2.0	7,939	2.9	7,075	2.5
		공사용								
		수출	4,204	1.5	2,414	0.9	2,862	1.0	1,762	0.6
		소계	8,587	3.1	7,689	2.9	10,801	3.9	8,837	3.1
	합계		194,406	71.4	190,491	73.2	213,151	77.5	223,688	79.0
	기 타	재생타이어	20,937	7.7	24,054	9.2	26,445	9.6	23,759	8.4
중고차수출장착		24,528	9.0	31,556	12.1	27,755	10.1	24,619	8.7	
합계		45,465	16.7	55,610	21.3	54,200	19.7	48,378	17.1	
총재활용량		239,870	88.1	246,101	94.5	267,351	97.2	272,066	96.1	
미확인량		32,410	11.9	14,165	5.5	7,721	2.8	10,924	3.9	
발생량		272,280	100	260,266	100	275,072	100	282,990	100	

한편 선진국에서는 페타이어 고무 칩을 재활용하는 기술을 각 회사별로 꾸준히 개발하고 있으며 대표적인 예로 미국, 일본, 독일, 네덜란드 등에서 볼 수 있다. Table 2.7는 선진국에서의 고무 칩이 활용되는 용도를 고무분말 크기별 활용도로 나타낸 것이다.

Table 2.7 The application with the sizes of rubber chip

고무 칩 크기	용도
4~10mesh	승마장 표면, 운동장 표면, 고무 아스팔트
10~20mesh	산업 및 소비재 몰드, 고무아스팔트, 경기장 표면, 카펫갈개, 비피로 매트
20~30mesh	자동차 매트, 접착제 지붕, 고무 아스팔트
30~40mesh	플라스틱/ 고무 제품, 크랙접착제, 카펫갈개
40~60mesh	경화방지, 고무/플라스틱 압출, 브레이크 패드, 고무제품의 고급 확장재, 고무 아스팔트, 카펫갈개
60~80mesh	플라스틱 주입몰딩, 경화방지, 고무제품용 고급 확장재, 표면처리 고무
80mesh이하	타이어 제조, 플라스틱 주입몰딩, 경화방지, 고무제품용 고급 확장재, 표면처리 고무, 스프레이 코팅

3.2.2 페타이어 칩 제조방법

1) 상온 분쇄(Ambient Process)

가장 오래된 분쇄 방법으로 생산된 고무 칩의 입도는 대략 6mm~0.6mm (30mesh)이고, 수율은 50~65%로 다른 고정에 비해 비교적 낮다. 생산된 칩은 비교적 순도가 낮고, 고무 칩이 마찰열에 의한 열 변성을 겪게 되므로 물리적 특성이 변하는 등의 단점이 있으나 시설 투자비가 상대적으로 저렴한 장점이 있다.

2) 냉동 분쇄(LN2 Cryogenic Process)

비교적 최근에 상용화된 기술로 생산되는 고무 칩의 입도는 대략 50mesh 이하이고, 수율은 70~80%정도로 상온분쇄의 경우보다 미세한 칩을 얻을 수 있다. 사용되는 냉각열원은 액체질소로 페타이어 1kg을 분쇄시키는데 약 0.5~1kg 정도가 소비된다. 이 방법은 1977년에 오사카가스(주)에서 개발되었으며 공정의 특징은 액체질소를 사용하기 때문에 분쇄 시 열 발생에 의한 고무의 물리적 성

질 변화를 억제할 수 있을 뿐 아니라 냄새 및 가스등의 공해물질이 발생하지 않는다.

냉동분쇄기술은 최근에 실용화되었지만 과다하게 사용된 액체질소를 다시 회수할 수 없기 때문에 시설운영비가 많이 드는 단점이 있다.

3) 공랭식 분쇄

러시아에서 개발된 기술로서 최근 국내에 소개되었으며 공랭식 분쇄 고무 칩 제조기술은 찬 공기로 페타이어를 $-60\sim -90^{\circ}\text{C}$ 까지 냉각시킨 후 페타이어의 취성을 이용하여 분쇄하는 기술이다. 페타이어를 냉각시키기 위해 공랭식 터빈 냉각기 TXM1-25P와 연속가동 냉각실을 이용하는 기존의 액화질소를 사용하는 것보다 에너지비용이 2~3배 절감된다. 현재 기술적 단계는 실험실 수준을 넘지 않은 것으로 상용화까지는 시간이 필요하다.

4) LNG 냉열이용 분쇄

K건설에서 개발한 기술로 LNG의 유효에너지를 페타이어의 동결열원으로 이용하는 공정으로 페타이어를 유리전이온도 이하로 냉각하여 분쇄하는 동결분쇄 공정과 분쇄된 페타이어로부터 철분, 섬유 등 이물질을 제거하는 선별공정, LNG로부터 냉열을 회수하는 열교환 및 열교환매체 순환공정으로 이루어진다.

본 연구대상인 페타이어 칩을 이용한 탄성포장재는 구조체의 특성상 큰 하중을 지지해야하는 지역의 포장으로 이용하기에는 적절하지 않으나 탄성을 가지고 있기 때문에 사람의 보행 시 피로도가 적고 여러 가지의 색상을 선택할 수 있어 어떤 공간에서도 자유로운 연출이 가능하므로 인도, 공원 산책로, 학교 체육시설, 골프장 카트도로, 어린이 놀이터 등에 매우 어울린다. 사용되는 장소가 인체와의 접촉이 직접적으로 이루어질 수 있는 곳이므로 인체에 유해성이 없어야하며 환경적인 측면에서 또한 우수유출로 인해 발생할 수 있는 오염원들을 제거할 수 있다면 활용적인 측면에서 우수한 제품이 되리라 사료된다.

Ⅲ. 재료의 성질

1. 투수콘크리트

1.1 시멘트 및 혼화제

시험에 사용한 시멘트는 국내에서 생산되는 D사 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며 혼화제는 D사 제품을 사용하였다. 사용된 시멘트는 화학적·물리적 특성은 Table 3.1~3.2에 나타내었다. Table.3.3은 혼화제의 화학적 특성을 나타내었다.

Table 3.1 Chemical composition of cement

constituent	chemical composition (%)
SiO_2	30~36
Al_2O_3	12~18
Fe_2O_3	0.25~0.35
CaO	38~45
MgO	10.0이하
SO_3	2.74
S(황분)	1.0

Table 3.2 Physical composition of cement

Contents	Physical composition
강열감량 (%)	0.99
밀도(kg/m^3)	2.9~2.95
잔분(>45 μm)	2.0 이하
평균입경(μm)	10~13
비표면적(cm^2/g)	4,210
모르타의 공기함유량(%)	3.46
비 중	3.04

Table 3.3 Chemical composition of quick setting admixtures

constituent	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	P_2O_5	LOI	total
Contents (%)	-	6.59	-	-	36.41	-	-	-	37.87	80.86

LOI : Loss of Ignition

1.2 골재

본 연구에서는 투수콘크리트에 일반적으로 사용되는 13mm골재와 19mm, 25mm, 40mm의 골재를 각각 비교 분석하였고 사용된 골재의 물리적 특성으로 Table 3.4는 KS F 2503(굵은 골재 밀도 및 흡수율 시험방법)에 의해 측정된 결과이고 Fig. 3.1은 KS F 2502(골재의 체가름 시험방법)에 의해 측정된 입도분포곡선이다.

Table 3.4 The measured results according to KS F 2503

굵은골재 최대치수(mm)	밀도(g/cm^3)	흡수율(%)	비고
13	2.43	1.99	
19	2.62	1.90	
25	2.64	2.24	
40	2.64	2.21	

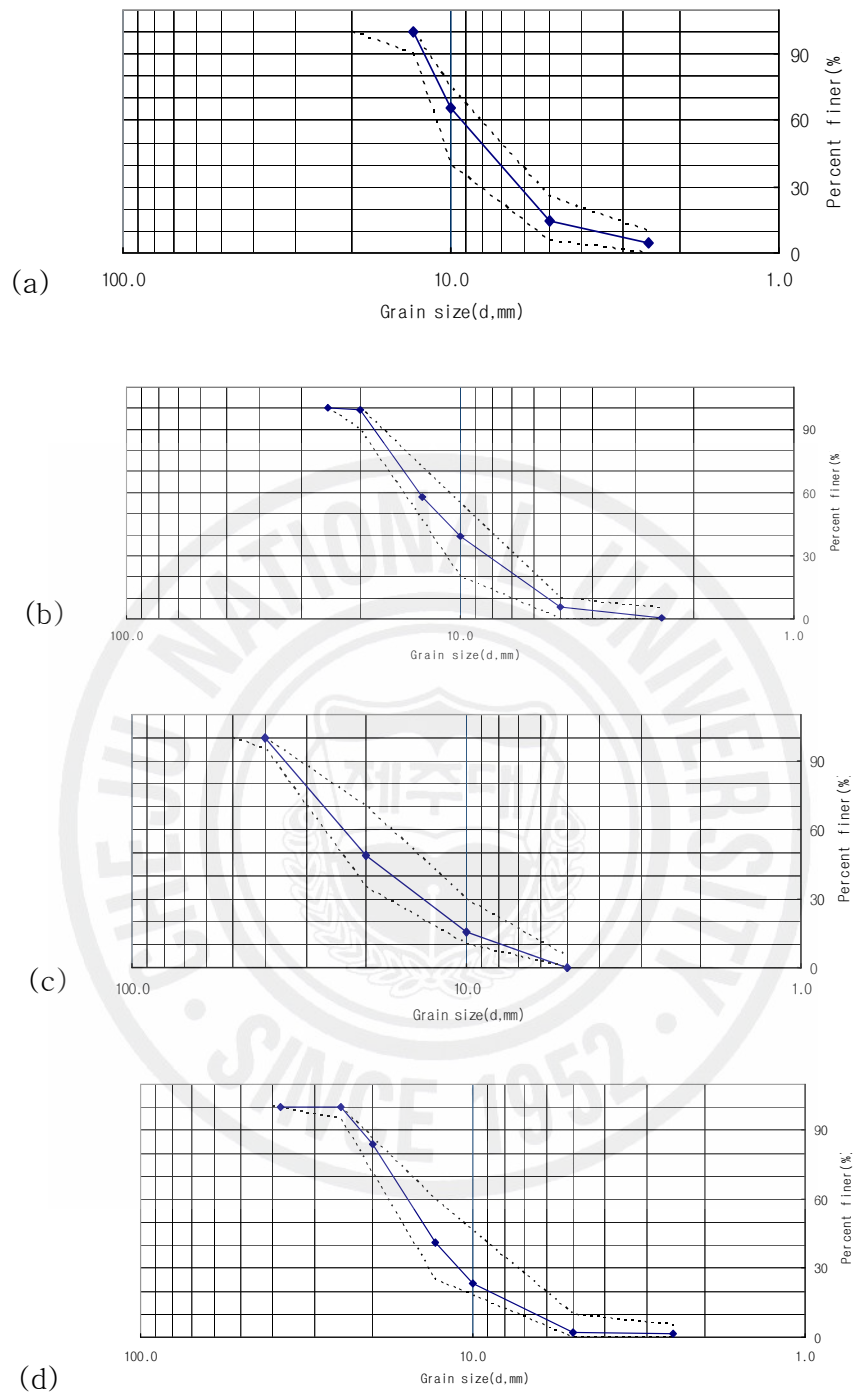


Fig. 3.1 Grain size distribution curve according to aggregate (a) 13mm aggregate (b) 19mm aggregate (c) 25mm aggregate (d) 40mm aggregate

1.3 배합비

일반적인 콘크리트는 시멘트+ 굵은 골재+ 잔골재+ 물+ 혼화제의 적정비율로 물-시멘트 비의 범위가 40~60%이고 공극이 매우 작은 수밀한 상태를 요구한다. 그러나 투수성을 갖기 위한 투수콘크리트의 배합은 시멘트+ 굵은 골재+ 물+ 혼화제로 잔골재를 제외한 배합을 주로 사용하고 물-시멘트 비의 대단히 작으며 불규칙한 연속공극을 필요로 한다. 본 연구는 잔골재를 제외한 배합으로 Table 3.5와 같은 배합비를 사용하였으며 이 배합비는 반복적인 실험에 의해서 얻은 배합비이다.

Table 3.5 Mix proportion ratio of prous concrete

설 계	W (물)	C (시멘트)	W/C	G (굵은골재)	단위중량 (kg/m ³)
13-180-0	105	330	31.8	1628	2063
19-180-0	110	360	30.6	1523	1993
25-180-0	115	372	30.9	1485	1972
40-180-0	108	371	29.1	1385	1864

2. 페타이어 칩

본 실험에서 사용된 페타이어는 기계식 파쇄방법으로 1~2mm, 2~5mm크기로 파쇄된 두 타입의 페타이어 칩을 페타이어 재활용 업체인 H업체에서 제공받았으며 인장강도 및 신장률 변화시험에는 원형을 그대로 사용하였고 중금속이온제거시험에는 액체질소를 이용해 잘게 부순 뒤 체로 쳐서 0.3mm이하의 페타이어 칩을 사용하였다.

2.1 XRF 분석

X-Ray Fluorescence Spectrometer(XRF, SHIMADZU, XRF-1700)로 화학 성분 분석 결과는 Table 3.6과 Fig. 3.2와 같다. Glass bead 시편은 100℃의 온도에서 건조시킨 시료 0.5g과 용제(Li₂B₅O₇, lithium tetraborate) 5g을 혼합하여 제작하였으며 검량선을 작성하여 정량하였다.

L.O.I(Loss of Ignition)은 950℃의 온도에서 시료를 태운 후의 무게를 측정하여 950℃의 온도에서 태우기 전의 무게에서 얼마나 감소하였는지에 대한 무게 퍼센트로 아래의 식을 사용하여 계산하였다.

$$L.O.I = \frac{[(\text{도가니} + \text{시료})L.O.I_{\text{전}} - (\text{도가니} + \text{시료})L.O.I_{\text{후}}]}{\text{시료무게}} \times 100$$

분석결과 탄소(C)가 전체 성분의 약 83%를 차지하고 있으며 그 외에 수소(H) 7.0%, 산소(O) 2.5%가 차지하고 있다. 또한 Ash부분을 따로 분석한 결과 아연(Zn)이 47.4%, 염소(Cl) 33.74%로 대부분을 차지하고 있으며, 그 외에 황(S) 5.8%, 철(Fe) 4.5%, 칼슘(Ca) 4.8%를 차지하고 있다. 이 외에도 니켈(Ni), 알루미늄(Al), 구리(Cu), 코발트(Co)도 아주 낮지만 페타이어 구성성분으로 분석되었다.(고득영, 2007)

2.2 XRD 분석

페타이어분말의 결정 구조를 알아보기 위해 X-Ray Diffractometer(XRD, PHILIPS X'pert-MPD System)을 통하여 알아보았다. 시료들의 최적의 입도와 균질성을 위해서 막자사발을 이용하여 분말상태로 준비 하였고, 분석은 구리 X-선 튜브(CuK α)를 사용하였고 가속 전압은 40Kv, 가속전류는 주사 방법은 2°/min의 속도로 연속 주사방법을 사용 하였다.

그 결과 Fig. 3.3과 같다. 페타이어분말은 주로 Zinc Oxide(Zno) 와 Iron(Fe)으로 구성된 구조임을 알 수 있으며, 비결정질 상태인 것으로 볼 수 있다.

2.3 SEM 분석

페타이어분말의 입자 모양과 상태를 살펴보기 위하여 장방출주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, SEM JSM-6700F JEOL Co.Ltd)사진을 통해 관찰한 결과는 Fig. 3.4와 같다. 그림에서 보는 것과 같이 페타이어 표면은 매우 불규칙하며 또한 기공이 고루 분포하지 않은 것으로 관찰 되었다.

Table 3.6 Total concentration of discarded automotive tires

element	Zn	Cl	D	Ca	Fe	Si	Br	K	Ti	Co	Ni	Al	Cu
Ratio(%)	47.36	33.74	5.81	4.76	4.48	1.35	0.49	0.44	0.44	0.31	0.28	0.27	0.24

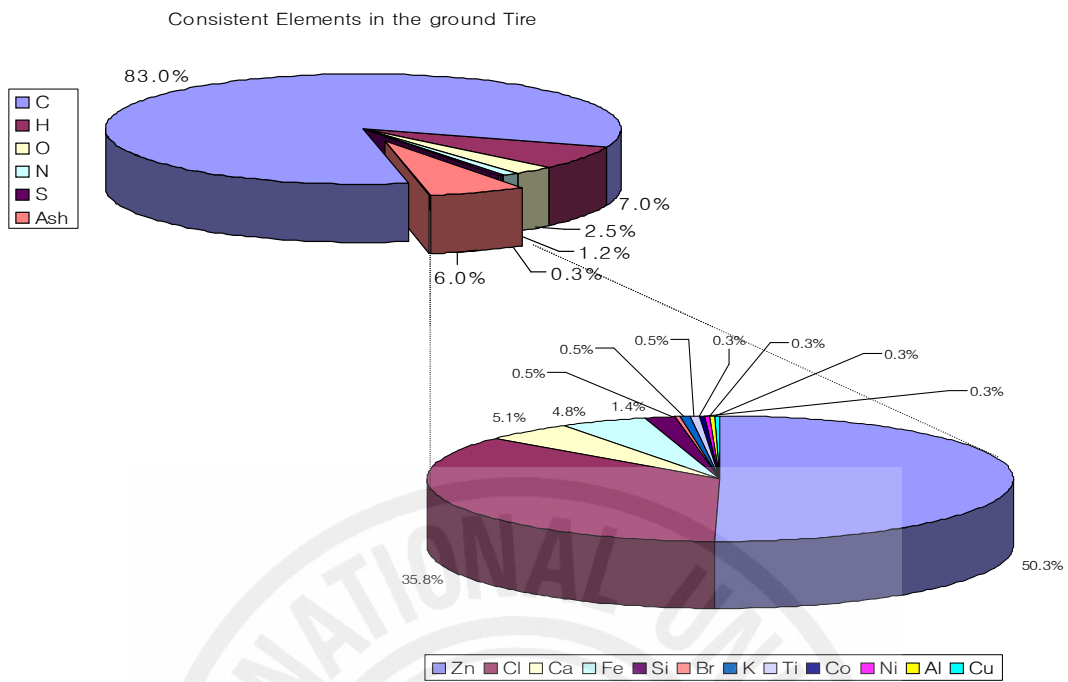


Fig. 3.2 Consistent Elements in the Discarded Automotive tires.

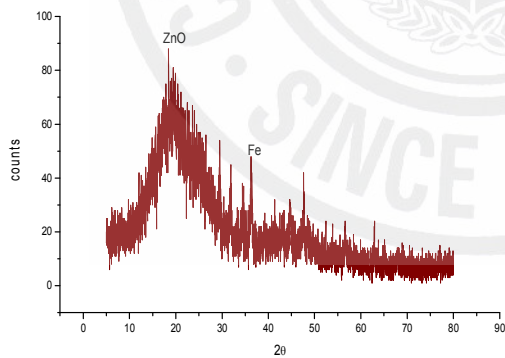


Fig. 3.3 X-ray diffractogram of Discarded automotive tires

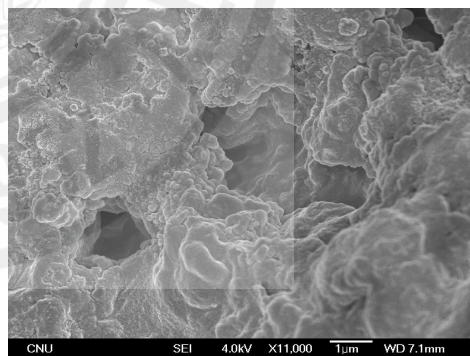


Fig. 3.4 SEM photogram of Discarded automotive tires($\times 11,000$)

3. 송이(Scoria)

3.1 송이의 정의

화산분출물 중 다공질이며 암색(검정, 적갈색, 암회색 등)인 암괴(岩塊)로 암재라 한다. 마그마가 대기 중으로 방출되어 그 속의 휘발성 성분이 빠져나가 많은 기공(氣孔)이 생긴 것으로 부석(浮石)보다 무겁고, 염기성 또는 중성의 마그마에서 유래된 것을 스킨리아(scoria)라 한다. 이러한 암재를 제주도방언으로 “송이”라 한다. 한라산 화산체의 국부적인 지형의 특징은 중심 화산의 활동이 정지된 후 그 주변의 틈을 이용하여 분출 생성된 360여개의 기생화산과 깊은 관련이 있다. 제주도에 기생화산이 널리 분포되어 있으며 장축과 일치하는 방향으로 집중적으로 배열되어 있고 제주도에서는 이를 “오름”이라 한다. 이러한 기생화산은 현무암구(Basalt cone)와 분석구(Cinder cone)의 두 종류로 크게 분류할 수 있으며, 전자는 성산층 및 화순층 퇴적기에 형성된 화산구(Volcanic cone)로서 10여개에 불과하고 대부분은 후기 화산활동 후에 형성된 분석구이다.

화산의 화구로부터 분출되는 암편과 화산회를 총칭하여 화산쇄설물이라고 하는데, 그 중 직경이 32mm 이상인 것이 화산암괴(Volcanic block)라 하며, 이 중 어느 정도 둥글거나 방추형으로 생긴 것을 화산탄(Volcanic bomb)이라고 하며 이는 용암이 공중에서 회전하면서 냉각되어 만들어진 것이다. 모양이 불규칙하고 직경이 4~32mm 사이에 있는 것을 화산력(lapilli) 또는 분석(cinder)이라고 하고, 4mm 이하의 세편을 화산회(Volcanic ash), 0.25mm 이하의 가루를 화산진(Volcanic dust)이라 하며 이러한 화산쇄설물이 낙하하여 퇴적되어 있는 지층을 스킨리아(Scoria)층이라 한다. 스킨리아로 구성된 분석구는 분출 퇴적 범위는 수 km이며, 분화구에서 3km 지점에는 1cm 크기의 스킨리아가 10cm 두께로 층을 이룬다고 한다. 스킨리아로 구성된 분석구 분포지역은 스킨리아의 물성에 좌우된다. 스킨리아는 기공의 함량이 높고 각력상으로 산출된다. 이러한 조립질층 상위에는 미립질 스킨리아가 협재되어 층리를 형성하고 있다.

3.2 제주도내 송이의 분포

송이는 색상에 있어서 검정색, 적색, 황색등으로 크게 세 가지로 구별하고, 적갈색(Redish-Brown), 황갈색(Yellow-Brown), 흑색(Black) 및 암회색(Dark-Grey) 등으로 세분할 수 있으며 송이는 원 지반이 크고 많은 기공을 가지고 있는 연속체인 덩어리로 되어있어 채취 시 다양한 입도로 분해되므로 흙으로 분류되기에는 다소 문제를 내포하고 있으나 흙으로 간주하여 이에 대한 물리·화학적 특성 등에 대한 연구를 한다. 제주도내 송이의 분포는 문헌(윤정수, 1995)을 참고하였다. Fig. 3.5는 북제주군 지역을 위주로 하였지만 일반적으로 적갈색 송이가 20개 지역으로 가장 많이 분포하는 것으로 나타났으며 이들은 특히 중산간 지역에 많이 있는 것으로 나타났다. 다음으로는 황갈색 송이가 9개 지역, 흑색 송이가 5개 지역 그리고 암회색 송이가 6개 지역에 분포하는 것으로 나타났으며 암회색 송이는 주로 해안 지역에서 분포하고 있는 것으로 나타나고 있다.

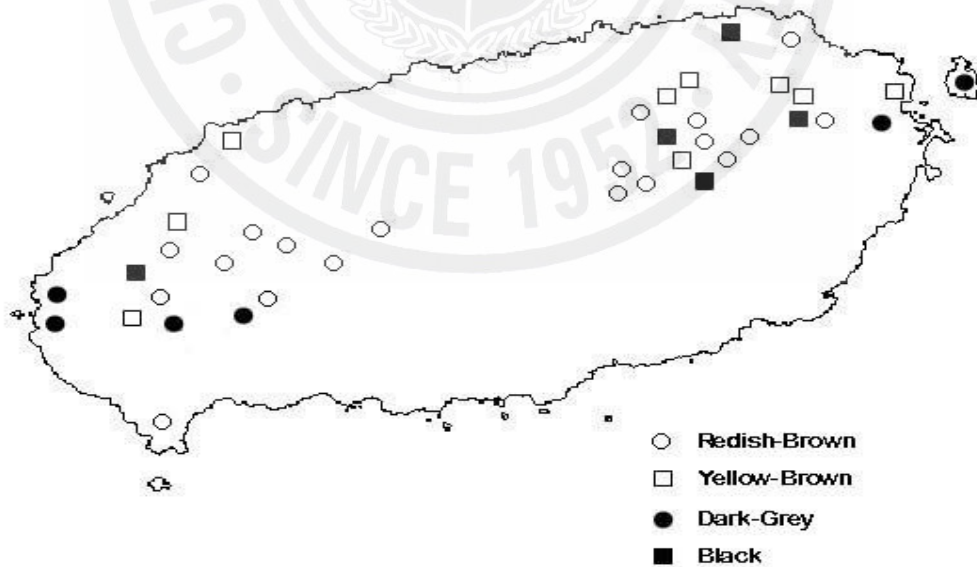


Fig. 3.5 Colorific Distribution of Scorias in Jeju(윤정수, 1995)

본 연구에서 사용된 송이의 채취장소별 색상은 Table 3.7와 같고, 대표적인 네 가지의 색상 적갈색(Redish-Brown), 황갈색(Yellow-Brown), 검정색(Black) 그리고 암회색(Dark-Grey)을 한 가지 씩 채취하여 사용하였으며 Fig. 3.6은 연구에 사용된 송이의 채취위치이다.

Table 3.7 The sampling location and each colors of scoria

위치번호	색상	장소	비고
①	암회색	지미봉	
②	검정색	월랑봉 (A)	
③	적갈색	월랑봉 (B)	
④	황갈색	월랑봉 (C)	



Fig. 3.6 The sampling location of scorias

3.1 송이의 특성

3.1.1 물리적 특성

입도분석 결과는 시료가 원지반에서 채취하는 순간부터 부서짐이 일어나기 때문에 자연 상태의 조건을 대표 한다고 보기는 어려우나, 전혀 현장의 조건과 무관하지는 않다. 따라서 분석결과는 시험에 사용한 시료의 조건을 보여주고 있는 것으로 보아야 할 것이다. Fig. 3.7은 본 연구에 사용된 시료의 채취 후 실내시험한 입도분포곡선이며 균등계수(Cu),곡률계수(Cc) 그리고 비중 값은 Table 3.8에 나타내었다. 그러나 본 연구에서는 페타이어 칩과 혼합하기 위해 시료를 분쇄하여 사용하였으며 페타이어 칩과 혼합된 시료는 0.15mm이하의 시료를 사용하였다.

Table 3.8 Samples gradation

위 치	Cu	Cc	비중
지미봉	4.74	1.40	2.70
월랑봉(A)	5.05	1.56	2.65
월랑봉(B)	15.5	1.61	2.77
월랑봉(C)	4.92	1.31	2.75

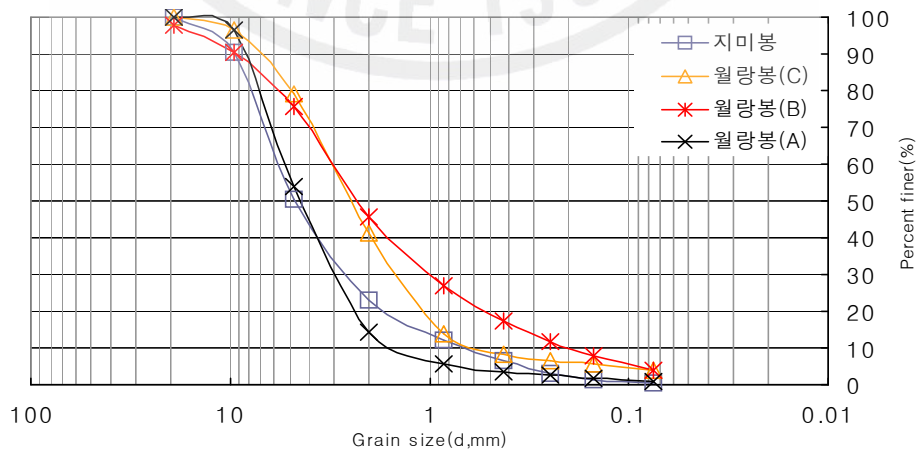


Fig. 3.7 Grain size distribution curve with scorias

Table 3.9과 Fig. 3.8은 네 개 지역 시료에 대한 다짐시험결과로서 각 시료의 최적함수비와 최대건조단위중량 값이다. 이때의 허용최대입경은 19.2mm이고 다짐시험은 D다짐방법으로 시행 하였다. 시험결과 황갈색과 암회색 송이는 함량에 비례하여 최적함수비가 증가하고 최대건조단위중량은 감소 검은색 송이와 적갈색 송이의 경우는 최적함수비가 낮고 최대 건조단위 중량이 높은 경향을 보인다 (김인석, 2004).

Table 3.9 Compaction test results

위 치	색상	$w_{opt}(\%)$	$\gamma_{dmax}(t/m^3)$
지미봉	암회색	19.5	1.38
월랑봉(A)	검정색	9.8	1.32
월랑봉(B)	적갈색	5.6	1.51
월랑봉(C)	황갈색	22.0	1.4

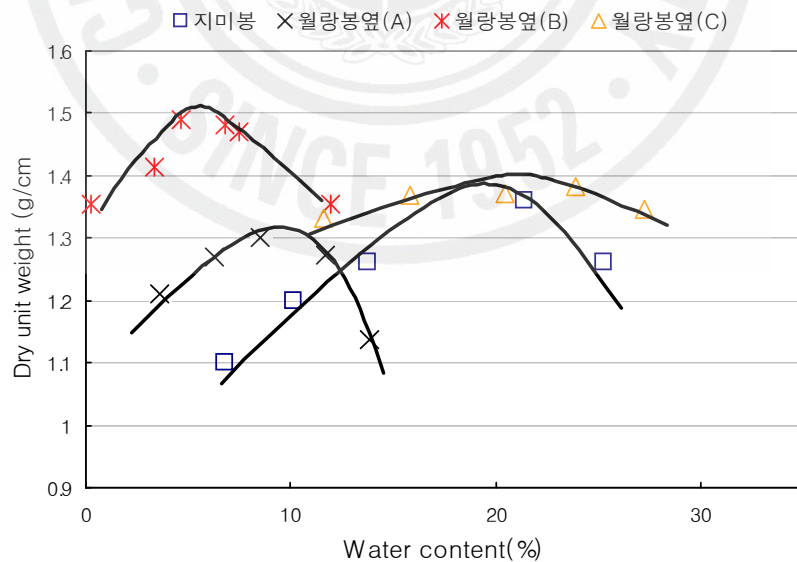


Fig. 3.8 Compaction curve of samples

3.1.2 화학적 특성

Table 3.10 와 Fig. 3.9는 X선 형광분석기(X-Ray Fluorescence, XRF)를 이용해 화학분석을 실시한 결과이다. 여기서 단위는 무게의 비(Ratio of Weight)이며, LOI(Loss of Ignition)는 950도의 온도에서 시료를 태운 후의 무게를 측정하여 950도의 온도에서 태우기 전의 무게의 비이다. 주성분은 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 로 함량이 약 75%에 달하며, 색상에 따른 산화물의 조성비를 보면 SiO_2 는 검정색과 적갈색 송이가 높은 함량치를 보이며, Al_2O_3 는 암회색, Fe_2O_3 는 황갈색, CaO 는 검정색과 적갈색, MgO 는 황갈색, Na_2O 는 적갈색, K_2O 는 암회색, TiO_2 는 암회색 송이가 각각 높은 함량을 보인다.

송이의 물리적 특성을(윤정수, 1991)보면, 내화도는 1120~1210℃ 이고, 흡수율은 17.7~32.5% 로 높은 흡수율을 보인다. 마모율은 조직의 치밀, 강약, 균질, 기공의 과다 등 여러 가지 요인에 기인하는 것으로 47.25~67.22%로 일반 자갈이나 모래보다 높다. 단위중량은 0.65~0.75g/cm³의 범위로, 송이의 기공내의 수분함유량에 기인하는 절대건조비중은 1.31~1.90의 범위를 보이며, 표면 건조 비중 1.85~2.45보다 작다. Table 3.11은 SEM분석 결과로 송이의 표면은 매우 거칠며 일부분에서 아주 조밀한 기공들을 가지고 있다.

Table 3.10 Chemical composition of scorias

Place name (Color)	SiO ₂ wt(%)	Al ₂ O ₃ wt(%)	TiO ₂ wt(%)	Fe ₂ O ₃ wt(%)	MgO wt(%)	CaO wt(%)	Na ₂ O wt(%)	K ₂ O wt(%)	MnO wt(%)	P ₂ O ₅ wt(%)	LOI wt(%)	Total wt(%)
지미봉 (암회색)	43.51	20.82	2.87	12.61	4.06	5.32	2.12	1.68	0.19	0.48	6.24	99.90
월랑봉(A) (검정색)	48.99	14.53	2.42	12.27	7.93	8.73	2.67	1.33	0.15	0.45	0.14	99.62
월랑봉(B) (적갈색)	48.60	14.28	2.38	12.30	7.46	8.21	3.02	1.63	0.15	0.52	0.83	99.37
월랑봉(C) (황갈색)	43.45	15.63	2.79	14.62	8.25	6.99	1.42	0.58	0.18	0.49	5.82	100.22

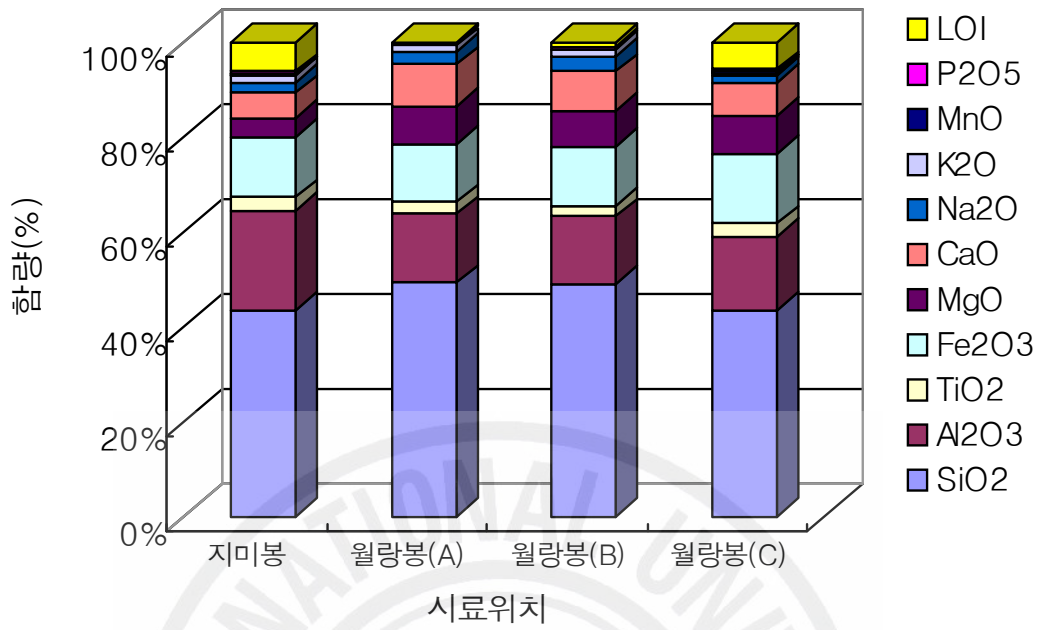
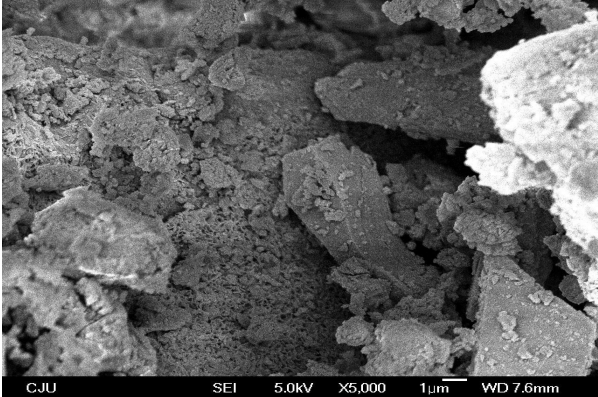
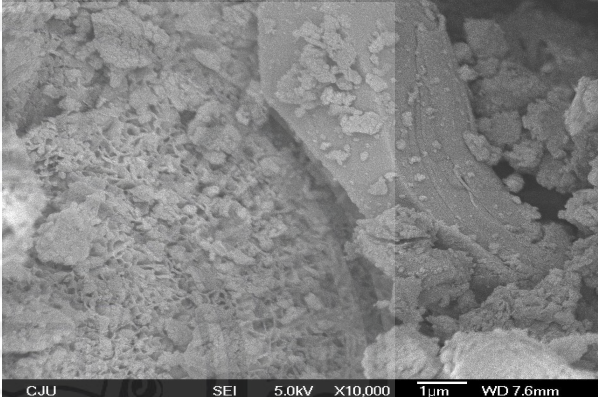
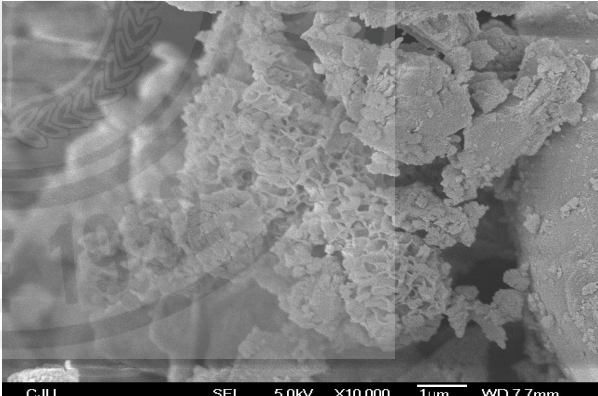
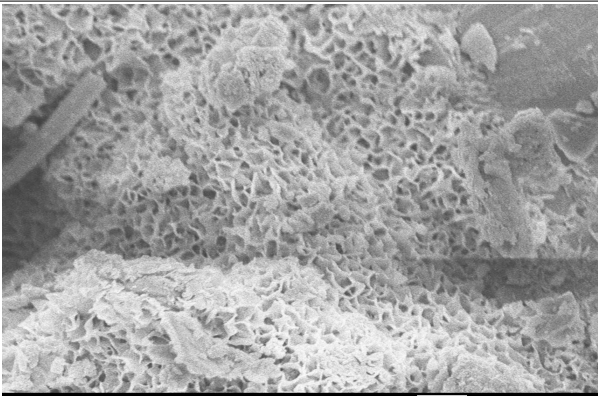


Fig. 3.9 Chemical composition of scorias

Table 3.11 SEM results of each colors of scoria

<p>지미봉</p>	<p>암회색</p>	
<p>월랑봉(A)</p>	<p>검정색</p>	
<p>월랑봉(B)</p>	<p>적갈색</p>	
<p>월랑봉(C)</p>	<p>황갈색</p>	

4. 석분

4.1 석분슬러지 발생 과정 및 현황

석재 가공과정에서 발생하는 석분슬러지는 기계의 냉각수로 사용되는 물과 절삭 및 연마시 발생하는 석분이 혼합되어 현탁액으로 분출되는데 원폐수인 현탁액이 기계하부의 수로와 공장내부에서 외부로 보내지는 수로를 통해 이동하여 1, 2, 3차 침전지와 저수조 중화 및 응집조, 농축 및 침전조를 거친 후 탈수과정 이후 석분슬러지가 발생하게 된다. Fig. 3.10은 계통에 따라 처리과정에서 석분슬러지가 발생하는 과정이다.

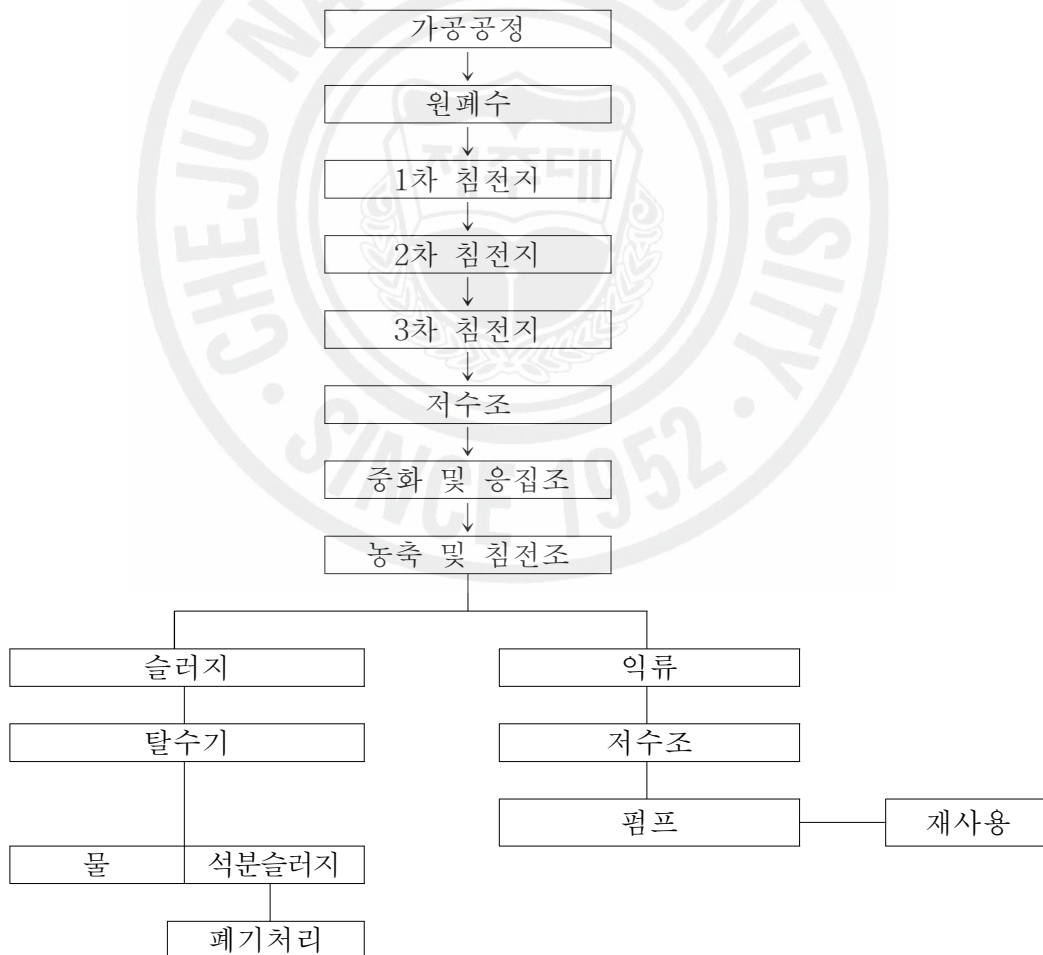


Fig. 3.10 The Flow chart of the Powdered Basalt Sludge Production

전국적으로 석재 가공과정에서 발생하는 석분슬러지의 연간 발생량 및 처리비용은 Table 3.12에 나타내었다. 석분슬러지 발생량은 2003년을 기준으로 약 80만톤(톤당 처리 비용 15,000원)으로 계산할 때 연간 처리 비용은 약 120억원 정도 소요되고 있다.

Table 3.12 The current status of the stone sludge production amount and treatment expenses(김기영, 2007)

Section	'97	'99	'00	'01	'02	'03	Note
Stone Sludge (ton)	987,200	983,800	780,000	733,500	790,300	787,800	
Cost of Disposal (one hundred million won)	148	147.6	117	110	118.5	118.2	15,000 won/ton

전국적으로 발생하는 석분 슬러지의 발생량에 비해 제주도에서 발생하는 석분 슬러지양은 현재 정확한 집계가 어려워 폐기물을 처리하는 업체에서 입고된 폐기물의 양을 근거로 추정하여 산출하였다. 제주도내 석재 가공 공장에서의 발생량을 추정하면 Table 3.13과 Table 3.14와 같다.

Table 3.13 The present status of the scrapped stone material disposal
(김기영, 2007)

Section	'03	'04	'05	'06. 9	Note
Amount of Construction Wastes (ton)	169	4,380	6,524	2,493	①
Amount of Basalt Stone Sludge Wastes(ton) (two plants)	68	1,752	2,610	997	About 40% of ①
Amount of Production per Industry (ton)	34	876	1,305	499	
Amount of Estimated Production (ton)	442	11,388	16,965	6,481	13 Plants

Table 3.14 The production amount of the Powdered basalt sludge
(김기영, 2007)

Section	'03	'04	'05	'06. 9	Note
Basalt Stone Sludge(ton)	442	11,388	16,965	6,481	
Cost of Disposal (one million won)	6.6	170	254	97	15,000 won/ton

석분슬러지의 발생의 추정은 '03년도부터 조사가 되었으나, '03년도의 조사는 신뢰성이 없으며, '04년도와 '05년도의 발생량을 표에서 보는 것과 같이 50%정도가 늘어났다. 실제 폐기물처리 업체를 통해 처리되는 석분슬러지는 1년에 약 15,000톤으로 추정되지만, 2005년도 관급자재와 사급자재 생산량을 기준으로 산출한다면 생산량 45,530톤의 40%정도로 약 18,000톤 이상이 발생하는 것으로 추정되어진다.(김기영, 2007)

4.2 현무암 석분 슬러지의 특성

4.2.1 물리적 특성

실험에 사용된 시료는 100°C 이상으로 24시간 이상 완전 건조한 시료를 사용하였다. Table 3.15은 석분슬러지의 기본 물성을 파악하기 위한 실험 결과를 제시하였다. 각 측정치는 3회 측정치의 평균값이다. Fig. 3.11은 연구에 사용된 현무암 석분의 입도분포 곡선을 나타내었다. 입도분포곡선에서 미세입자들의 함량이 비교적 크게 나타났다. 입자의 직경이 0.002mm보다 작은 부분이 약 20% 정도로 나타나고 있다. 비중은 2.87~2.97로서 일반적인 토사의 비중값, 2.65~2.7에 비해 크다. 액성한계(LL)는 22.3%~23.00%, 소성한계(PL)는 16.57%~18.7%로; 소성지수(PI)는 3.46%~5.73%로 소성이 작은 것으로 나타났다. 다짐 시험결과 최적함수비는 21%~25%에 분포하며, 최대건조단위중량은 1.62g/cm³~1.675g/cm³의 범위에 분포하고 있다. Fig. 3.12는 석분의 다짐곡선을 보여주고 있다. 다짐 석분슬러지의 투수계수 5.42E-06cm/sec으로 나타나고 있다.

현무암 석분은 토사와 다르므로 토질의 분류기준을 적용하기는 어려우나 통일분류법에 의하여 분류하면 무기질의 실트 및 매우가는 모래의 ML과 소성이 보통이하인 무기질 점토인 CL과 유사한 것으로 나타났다.

Table 3.15 The physical properties of the Powdered basalt sludge

Tests	Test Result	
	Contents	Powdered basalt
Specific gravity	Specific gravity(Gs)	2.92
Water contents	Water contents(%)	35%
Liquid & Plastic Limits	Liquid limit (LL,%)	22.67
	Plastic limit (PL,%)	17.97
	plastic index (PI)	4.7
Shrinkage Limit	Shrinkage Limit (SL,%)	15.32
	Shrinkage Ratio (SR)	2.43
	Volume Change (Sv,%)	9.77
	Linear Shrinkage (Ls,%)	3.06
Compaction	Optimum moisture content(%)	21.57
	Maximum dry unit weight (g/cm ³)	1.65

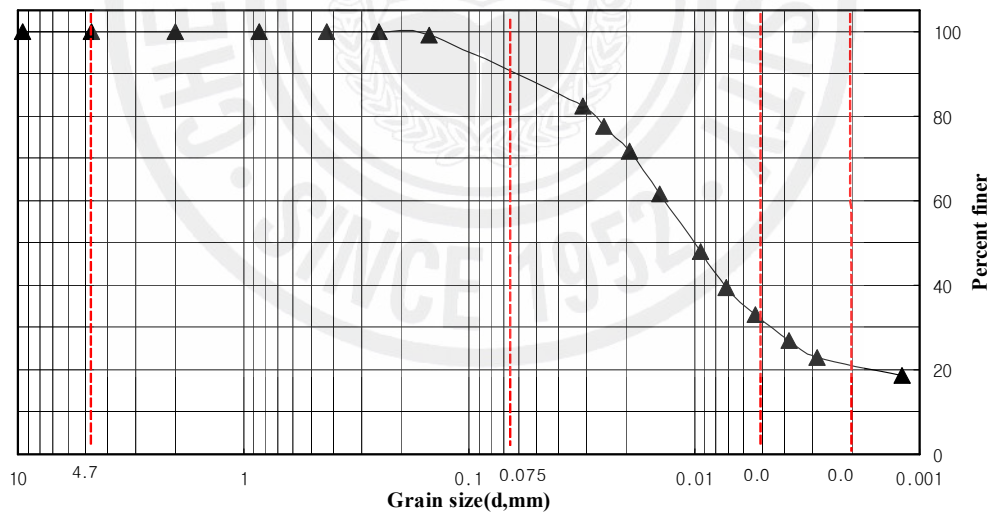


Fig. 3.11 Grain-size distribution curve of powdered basalt

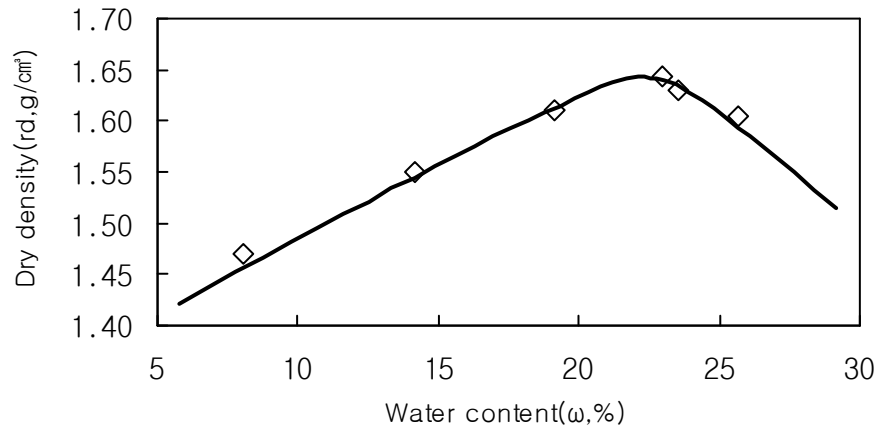


Fig. 3.12 Compaction curve of powdered basalt

4.2.2 화학적 특성

현무암 석분슬러지의 화학적 특성을 알아보려고 서울대학교 기초과학 교육연구 공동기기원에 의뢰 X선 형광분석기(X-Ray Fluorescence, XRF)를 통해 주요 성분을 분석하였다.

주성분은 $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ 가 78.39%로 주종을 이루고 있는 것으로 나타났다. 석분슬러지의 pH는 약 8.67로 나타나 약알카리성을 띠고 있다. pH 상승물질인 CaO 와 MgO , K_2O , Na_2O 가 약 18%를 차지하고 있어 이들의 가수분해 작용에 의해 생성된 2 mole 의 OH^- 에 의해 알카리성 상태를 나타내는 것으로 판단된다.



여기서 M: Ca, Mg, K, Na

Table 3.16와 Fig. 3.13는 XRF를 통해 현무암 석분에 대하여 분석한 현무암 석분슬러지의 화학적 조성 분석결과를 나타내었다. 화학적 조성을 보면 실리카성분인 SiO_2 의 함량이 52.66%로 나타나 가장 많은 비율을 나타내었으며 CaO 의 함유율은 8.31%로 Al_2O_3 가 14.67%, Fe_2O_3 가 11.06%로 나타났다. Fig. 3.14

은 석분의 SEM분석사진이다.

Table 3.16 Chemical composition of Powdered basalt

Sample constituent	Contents(%)
SiO_2	52.66
Al_2O_3	14.67
TiO_2	1.93
Fe_2O_3	11.06
MgO	6.33
CaO	8.31
Na_2O	2.84
K_2O	0.98
MnO	0.14
P_2O_5	0.34
LOI	-
total	99.26

※ LOI : Loss of Ignition

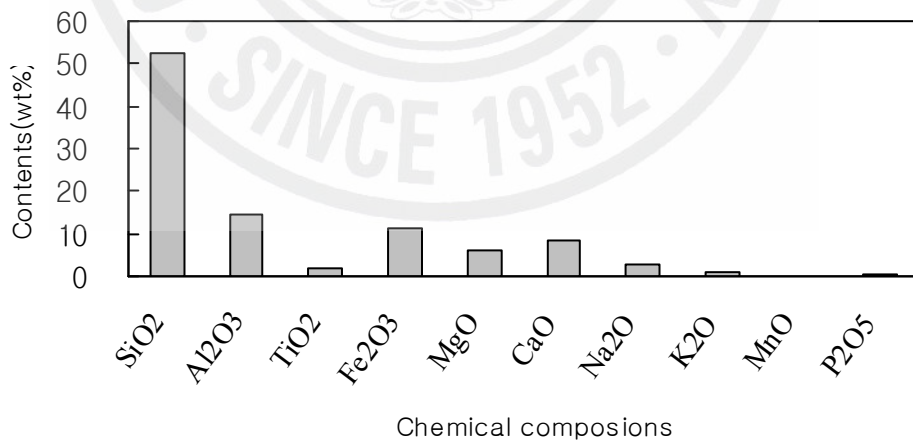


Fig. 3.13 Chemical composition of Powdered basalt

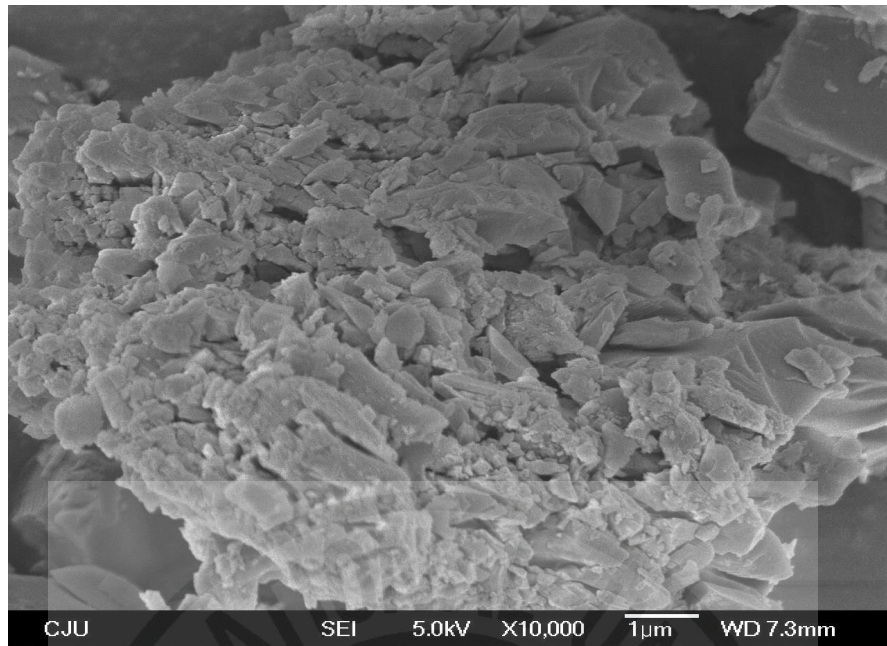
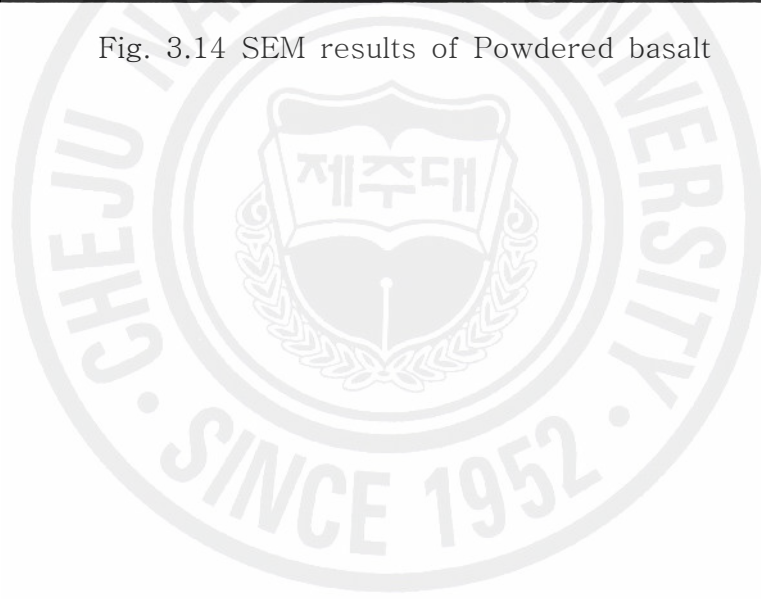


Fig. 3.14 SEM results of Powdered basalt



IV. 실험방법 및 결과

1. 투수콘크리트

1.1 압축강도 및 휨강도시험

1.1.1 압축강도시험

압축강도 시험은 KS F 2405(콘크리트 압축강도 시험방법)의 시험방법에 따라 골재 최대치수 13mm, 19mm, 25mm는 10×20cm 공시체를 제작하고, 40mm의 골재는 15×30cm의 공시체를 제작하여 20±2℃에서 양생하였으며 만능재료시험기를 이용하여 압축강도를 측정하였고, 3개의 공시체 평균값을 시험 결과로 채택하였으며 압축강도 산정식은 식 4.1과 같으며, Fig. 4.1은 압축강도 시험기이고 Fig. 4.2는 제작된 골재치수별 공시체이다.

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} f_c &= \text{콘크리트 압축강도 (MPa)} \\ P &= \text{최대하중 (N)} \\ A &= \text{공시체의 단면적 (mm}^2\text{)} \end{aligned}$$



Fig. 4.1 Photograph of
compression test



Fig. 4.2 The specimen for
compressive strength with aggregate

1.1.2 휨강도시험

휨강도시험은 KS F 2408(콘크리트 휨강도 시험방법)의 시험방법에 따라 Fig.4.3의 3등분점 재하시험방법을 이용하고 골재 최대치수 13mm, 19mm, 25mm는 B×H×L=10×10×40cm 공시체를 제작하고, 40mm의 골재는 15×15×60cm 의 공시체를 제작하여 20±2℃에서 양생하였으며 만능재료시험기를 이용하여 휨강도를 측정하였고, 3개의 공시체 평균값을 시험결과로 채택하였으며 휨강도 산정식은 식 4.2와 같다.

$$f_b = \frac{Pl}{bh^2} \quad (4.2)$$

f_b = 휨강도(MPa)
 P = 최대하중(N)
 l = 지간(mm)
 b = 파괴 단면의 폭(mm)
 h = 파괴 단면의 높이(mm)

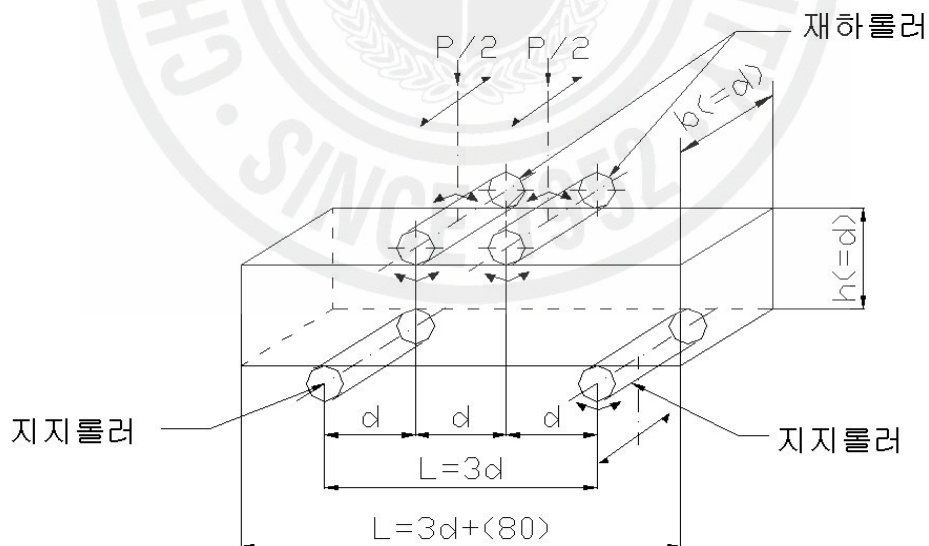


Fig. 4.3 A diagram of flexural strength test



Fig. 4.4 Photograph of flexural strength test



Fig. 4.5 The specimen for flexural strength with aggregate

1.1.3 압축강도 및 휨강도 시험결과

투수콘크리트가 인도 및 자전거도로 포장에 적용되는 경우 일반적인 압축강도는 18MPa이상 그리고 휨강도는 4MPa이상을 발휘하는 것이 바람직하다. 네 가지의 골재최대치수별로 압축강도 및 휨강도를 산정하여 소요강도를 만족하는지 실험을 통하여 알아보았다.

압축강도는 Fig. 4.6과 같은 결과를 얻었으며 골재 최대치수 13mm, 19mm, 25mm의 공시체는 소요압축강도 18MPa이상을 만족하였고, 골재 최대치수 13mm인 공시체의 재령 28일 압축강도는 22.4MPa이고, 골재 최대치수 19mm인 공시체의 재령 28일 압축강도는 21.4MPa이고, 골재 최대치수 25mm인 공시체의 재령 28일 압축강도는 약 24.3MPa로 소요압축강도보다 약 6MPa정도 더 크게 나타났다.

휨강도는 Fig. 4.7과 같은 결과를 얻었으며 골재 최대치수 13mm, 19mm, 25mm의 공시체는 소요휨강도 4MPa이상을 만족하였고 골재 최대치수 13mm인 공시체의 재령 28일 휨강도는 5.1MPa이고 골재 최대치수 19mm, 25mm인 공시체의 재령 28일 압축강도는 각각 4.6MPa, 4.5MPa로 소요휨강도를 약간 상회하는 것으로 나타났으나, 압축강도시험 결과와는 달리 골재 최대치수 13mm인 공시체가 19mm, 25mm인 공시체보다 휨강도가 크게 나타났는데 이는 골재크기가 작은 공시체가 잔골재가 없는 투수콘크리트에서 골재 간 부착면이 더 커져

강도가 커지는 결과를 가져온 것으로 사료된다.

그리고 골재최대치수 40mm인 공시체의 경우는 재령 28일의 압축강도가 약 14MPa, 휨강도가 약 2.1 MPa로 소요강도를 만족하지 못하였는데 이는 공시체의 공극이 너무 크기 때문으로 사료 된다.

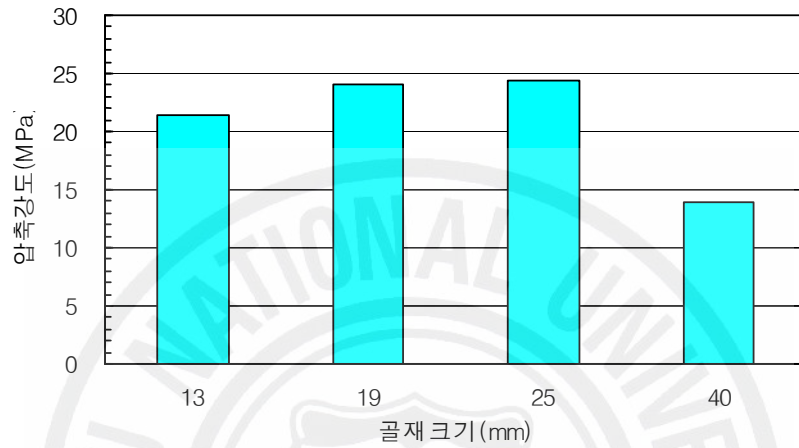


Fig. 4.6 The result of compressive strength

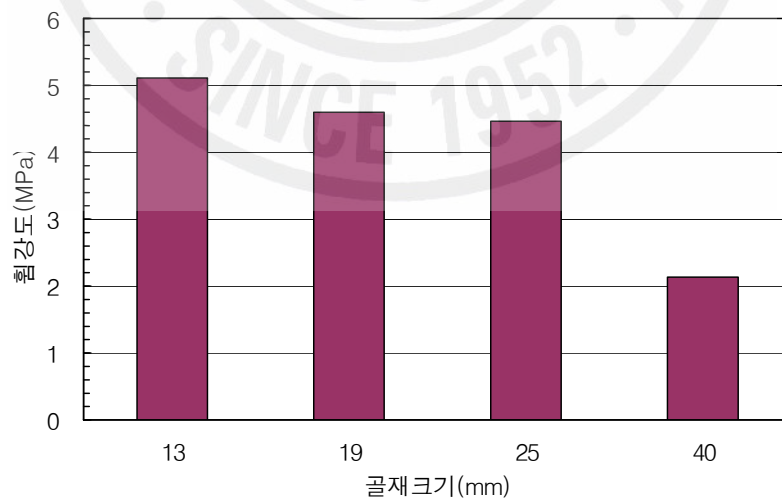


Fig. 4.7 The result of flexural strength

1.2 공극막힘시험

투수성 포장의 강도증진에 대한 연구는 많이 이루어져 있고 현재도 이루어지고 있는 상태이지만 공극막힘(투수성 한계)에 대한 연구는 미비한 실정으로 이에 대한 검증이 필요하다. 이에 본 연구에서는 실내투수시험(정수위투수시험)법을 이용하여 공극막힘현상을 연구하였다.

1.2.1 공극막힘재 산정식

투수성 탄성포장재의 구조상 탄성포장이 투수콘크리트의 상부에 위치하게 되므로 탄성포장의 공극을 빠져나갈 수 있는 흙 입자의 최대입경을 산정하여 시험에 적용하여야 한다.

공극막힘재 산정식은 Terzaghi & Peck(1948)이 제안한 필터재료 선정기준을 이용하였으며 식은 아래의 식 4.3과 같다.

$$\begin{aligned} 1. \quad & \frac{D_{15(F)}}{D_{85(B)}} < 4 \\ 2. \quad & \frac{D_{15(F)}}{D_{15(B)}} > 4 \end{aligned}$$

(4.3)

$$\begin{aligned} D_{15(F)} &= \text{가적통과율이 15\%인 필터재료의 입경} \\ D_{15(B)} &= \text{가적통과율이 15\%인 본체재료의 입경} \\ D_{85(B)} &= \text{가적통과율이 85\%인 본체재료의 입경} \end{aligned}$$

위 기준은 본체재료(보호해야할 흙)의 흙입자들이 필터를 통하여 빠져나가는 것을 방지하기 위한 것으로 기준은 그림 을 이용하여 설명할 수 있다.

식 4.3의 선정기준 1로부터 $D_{15(F)} < 4D_{85(B)}$ 의 조건을 만족시켜야 한다. 점 A의 횡좌표 값이 $D_{85(B)}$ 로부터 $4D_{85(B)}$ 의 값을 계산할 수 있으며, 횡좌표값이 $4D_{85(B)}$ 인 점 B를 도시할 수 있다. 같은 방법으로 식 4.3의 선정기준 2는 $D_{15(F)} > 4D_{15(B)}$ 이

다. 여기에서 횡좌표값이 각각 $D_{15(B)}$, $4D_{15(B)}$ 인 점 C와 점 D를 구할 수 있다. 점 B와 D를 경계로 하면서 곡선 a와 기하학적으로 비슷한 모양의 곡선 b와 곡선 c를 그릴 수 있다. Fig. 4.8에서 입도분포곡선이 곡선 b와 곡선 c의 경계 내에 있는 흙이 좋은 필터재료이다.

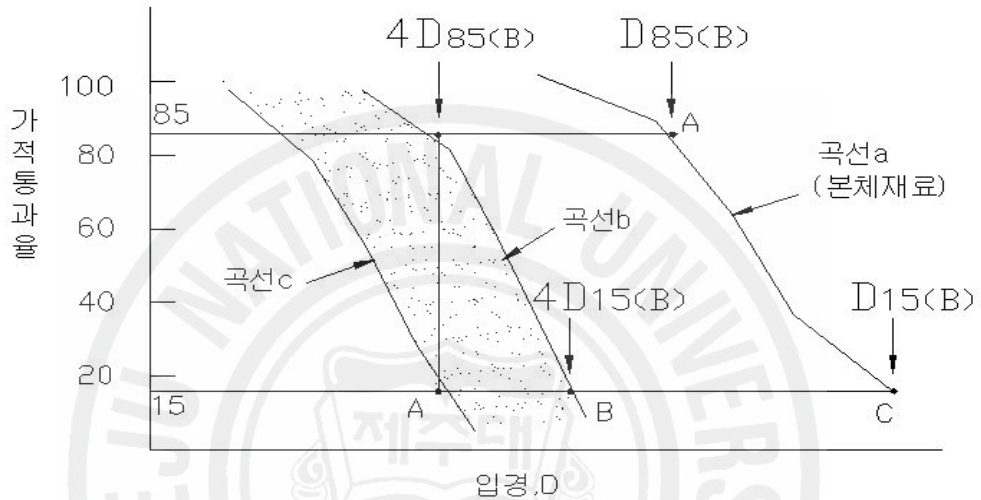


Fig. 4.8 Selection criteria of the filter material

위의 식 4.3은 필터재료의 범위를 선정하기 위한 기준이나 본 연구에서는 탄성포장이 필터재료 역할을 한다고 가정하여 탄성포장을 통과하여 투수콘크리트의 공극을 막을 수 있는 재료의 입경범위를 산정하고자 하므로 탄성포장재의 재료인 페타이어 칩의 입경을 확인하여 역으로 필터재료의 입경에 영향을 주는 흙 입자의 입경범위를 그림과 같이 산정하였다.

산정과정은 우선 페타이어 칩의 입경은 Table 4.1과 같고 Fig. 4.9에서 직선 a와 유사한 입도분포를 보이므로 직선 a로 표현하고 $D_{15(F)}=2.2\text{mm}$ 이므로 식 4.3의 선정기준 1로부터 $D_{15(F)} < 4D_{85(B)} \rightarrow 0.55 < D_{85(B)}$ 이라는 조건을 만족하는 직선 c를 그릴 수 있고, 식 4.3의 선정기준 2로부터 $D_{15(F)} > 4D_{15(B)}$

→ $0.55 > D_{15}(B)$ 이라는 조건을 만족하는 직선 b를 그릴 수 있다. 다시 한 개의 선정기준으로 바꾸면 $D_{85}(B) > 0.55 > D_{15}(B)$ 처럼 두 개의 직선 b와 직선 c의 경계 내에 있는 입경이 탄성포장에 영향을 주는 입경의 범위라는 결론을 얻을 수 있고 최대입경의 범위가 1.1mm~0.61mm로 나타났으나 탄성포장의 공극 안으로 들어가 공극을 막을 수 있는 입경의 최대입경은 0.61mm로 판단되어 본 연구에서는 공극막힘재의 최대입경을 0.61mm로 산정하여 시험하였다.

Table 4.1 The grain size distribution of the waste tire chips

Grain size(mm)	Finer(%)
4.75	100.0
3.35	63.8
2.36	13.2
2.00	0

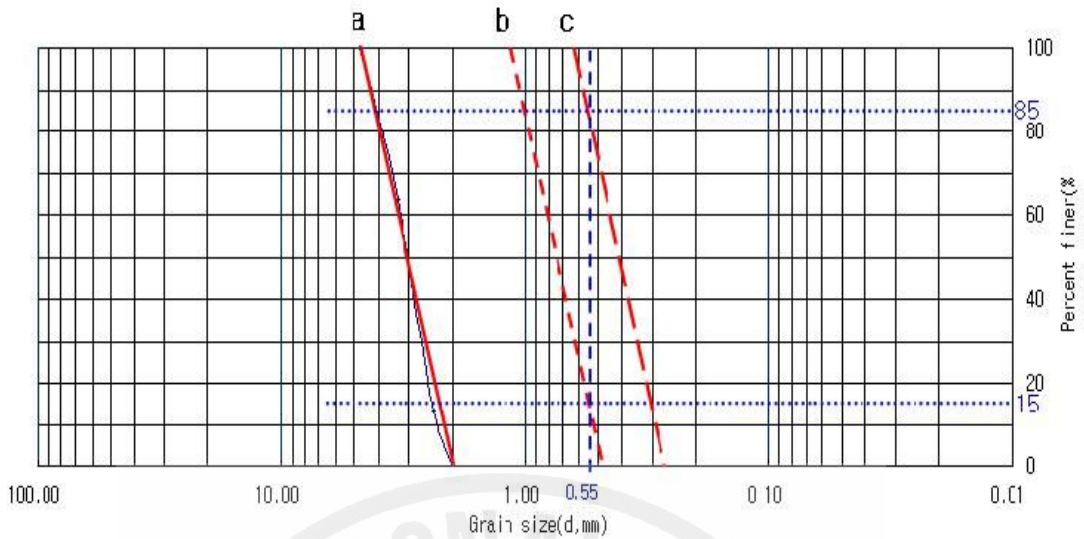


Fig. 4.9 Grain-size range effects on the waste tire chips filter

1.2.2 자연시료의 입경

투수성 포장재는 도시에서 발생한 우수의 지하침투, 도시유출에서 용해성 오염물질과 미세한 오염물질의 제거, 지하수 함량 등의 기능을 가지고 도시 지역 즉, 시가지에서 불투수성 포장면을 줄이기 위해서 사용이 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 사용될 공극막힘재의 입경을 산정하기 위하여 제주도 제주시 일원 다섯 개의 지역(제주대, 관덕정, 연북로, 중앙로, 서사라)에서 노면 위의 시료를 채취해 입도분석한 결과 Table 4.2 와 Fig. 4.10 와 같다. 시가지의 일반적인 시료는 조립토이고 시가지에서 외각으로 벗어난 제주대에서는 약 45%정도의 세립토를 가지고 있었다.

Table 4.2 Uniformity Coefficient(Cu) and Coefficient of Gradation(Cg) in Fields

	제주대	관덕정	연북로	중앙로	서사라
Cu	18.89	6.67	16.44	6.43	3.81
Cg	0.55	1.07	1.1	1.03	0.95

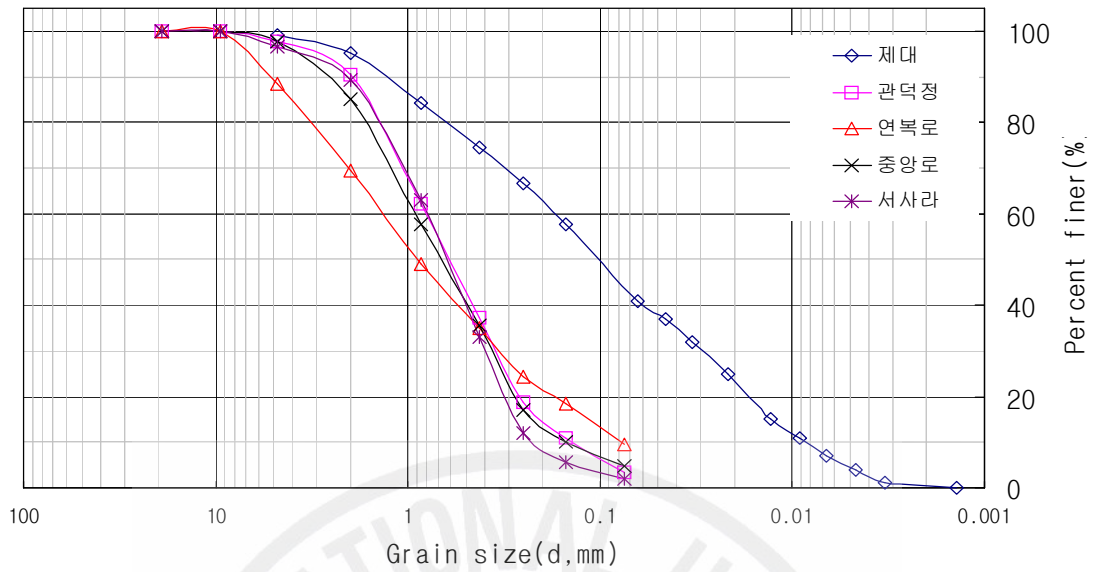


Fig. 4.10 Grain-size distribution curve of samples in Jeju

1.2.3 공극막힘재

위 1.2.1항과 1.2.2항에서 조사한 결과를 바탕으로 하여 실내시험 시 사용할 공극막힘재를 만들었다. 공극막힘재는 조립토와 세립토를 적절히 섞어 아래 Fig. 4.11과 같은 입도분포곡선을 갖는 시료를 만들어 시험에 사용하였다.

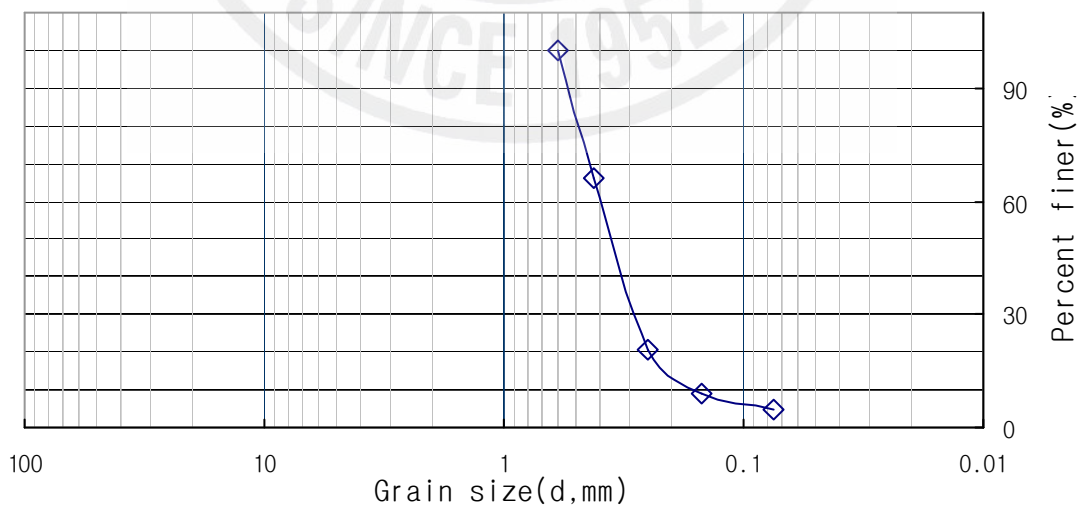


Fig. 4.11 Grain-size distribution curve of the pore-clogging materials

1.2.4 공극막힘시험

정수위투수시험은 상류 측의 수위를 일정하게 유지하고 일정 두께의 시료를 통과하는 침투수량에 의하여 투수계수를 측정하는 시험방법으로 일반적으로 투수성이 작은 흙에 대해서는 침투수량이 작기 때문에 부정확하게 되어 비교적 투수성이 큰 흙에 사용되어진다. 본 연구에서는 공극막힘현상을 해석하기 위해서 실내정수위투수시험법을 사용하였고 정수위투수시험 장치는 Fig. 4.12와 같은 구조로 되어 있으며, $\Phi 13 \times 10$ cm의 투수콘크리트 공시체를 Fig. 4.13과 같이 제작한 투수시험기를 이용하여 실험하였으며 식 4.3에 의해 투수계수를 산정하였다.

$$K = \frac{QL}{Ah(t_2 - t_1)}$$

(4.3)

K : 투수계수 (cm/sec)
 L : 시료의 높이 (cm)
 A : 시료의 단면적 (cm^2)
 h : 수두 (cm)
 Q : ($t_2 - t_1$)시간내에 월류한수량 (cm^3)

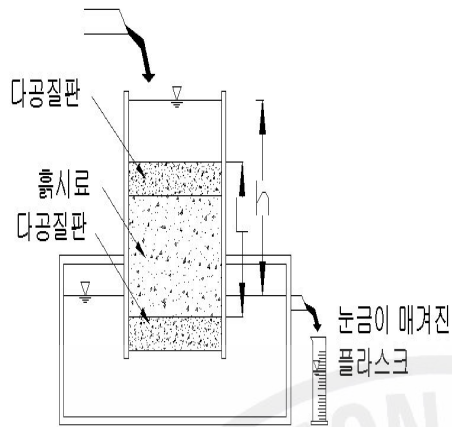


Fig. 4.12 A diagram of constant head permeability test apparatus

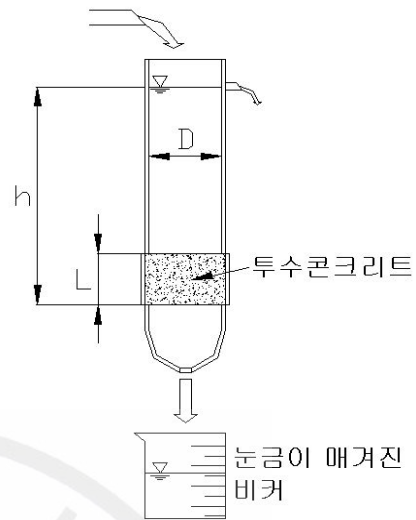


Fig. 4.13 Produced constant head permeability test apparatus

1.2.4.1 공극막힘재 투입에 따른 수명산정

공극막힘 시험 시 투입되는 부유물질량을 제주지역 우수유출수의 비점오염물질 분석항목 중 SS(부유물질: Suspended Solids)의 농도로 환산하기 위해 최근에 보고된 2005년 조은일, 제주지역에서 배출되는 비점오염원 관리방안 연구 보고서의 연구 자료를 활용하였다.

위 보고서의 내용 중 본 연구에 활용된 내용을 간략하게 정리하면

1) 조사지점 및 강우사상

조사지점을 제주시지역 내 분류식 하수관거가 설치되어 강우 시 하수에 의한 영향을 배제할 수 있는 지역 내에서 Table 4.3과 같은 네 개의 지역으로 구분하여 조사대상지역으로 선정하고 Table 4.4와 같은 강우사상들에 대하여 강우유출수의 비점오염원에 대하여 조사를 하였다.

Table 4.3 Investigation location and section in Jeju

구분	위치
아파트지역	제주시 일도 2동 유역
단독주거지역	제주시 연동 1519번지 유역
공원지역	제주시 일도 2동 신산공원 유역
공업지역	제주시 화북 1동 지역

Table 4.4 The rainfall property with rainfall event

강우사상	발생일시	강우량 (mm)	지속시간 (hr)	선행무강우일수 (day)
강우.1	2005.10.28 05시~06시	5.5	2	6(14)
강우.2	2005.11.05 10시~24시	29.0	14	1(5)
강우.3	2005.11.28 16시~19시	0.5	3	1(16)

() : 강우유출특성이 잘 나타나는 강우량 0.5mm이상을 고려한 선행무강우일수

2) 조사방법 및 결과

우수유출수의 수질 조사 분석을 위해 채수 빈도는 강우 발생 시 초기 0분, 15분, 30분, 1시간, 2시간 간격으로 현장 강우조건에 따라 유동성 있게 시료를 채취 하였고 조사 결과는 Table 4.5와 같다. 각 강우사상에 대한 지역별 농도는 평균농도이고, 합계는 각 강우사상을 독립적으로 봐야 하므로 지역별 평균농도의 합으로 표현하였다.

Table 4.5 The sum and SS average concentration on location rainfall runoff (Unit : mg/L)

구 분	단독주거지역	아파트지역	공원지역	공업지역	합 계
강우.1	-	11	194	-	
강우.2	13.1	11.3	42.1	205.3	
강우.3	13.8	16	-	160.6	
소 계	26.9	38.3	236.1	365.9	667.2

제주시 지역의 1995년 ~ 2004년까지 10년간 연평균강우량은 1,507.6mm이고 조사된 세 개의 강우사상에 대한 강우량은 35mm로 연평균강우량을 조사된 세 개의 강우사상에 대한 강우량으로 나누면 약 43.1배가 된다. 그리고 다시 각 강우사상에 대한 강우량 35mm를 연평균강우량 1,507.6mm에 대하여 일(day)수로 환산해보면 약 8.5일로 환산이 된다.

1.2.4.2 공극막힘시험결과

본 연구에서는 골재크기별로 제작한 13mm, 19mm, 25mm 시험체를 각각 실내정수위시험을 하여 골재크기별 투수성의 수명을 알아보았다. 실내시험에 사용된 정수위투수시험기의 직경 $D=13\text{cm}$ 이고, 시료에서 정수위까지의 높이 $h=37\text{cm}$ 이므로 시험기의 용량은 4.911L이다. 시험은 건조된 공극막힘재를 100g씩 단계적으로 투입하여 투수계수를 계측하였다

투입된 공극막힘재를 일(day)수로 환산해 보았다. 우선 공극막힘재 100g의

농도는 $100000\text{mg}/4.911\text{L} = 20362.5\text{mg/L}$ 이고 위에서 계산된 세 개의 강우사상에 대한 SS농도는 667.2mg/L 이므로 이 계산된 SS농도로 시험기의 농도를 나누면 위와 같은 강우량 35mm인 강우사상 약 30회에 해당된다. 그러므로 $30\text{회} \times 8.5\text{일} = \text{약 } 255\text{일}(8.5\text{개월})$ 이 된다. 따라서 정수위투수시험기에 공극막힘재 100g을 투입하면 약 255일 개월 수로하면 8.5개월에 해당 된다.

Fig. 4.14는 골재크기별 공극막힘시험 결과이다. 투입된 공극막힘재의 양을 강우량 35mm인 강우사상에 대한 횡수로 환산하여 투수계수와 비교하였으며 투수성 포장의 시공 시 투수계수는 10^{-2}cm/s 이상을 기준으로 하므로 본 연구에서도 투수계수 10^{-2}cm/s 을 투수성 포장의 수명한계로 보았다. 일반적으로 투수콘크리트에 사용되는 13mm 골재의 경우 수명한계는 공극막힘재 투입에 따라 급격히 감소하여 약 57회로 16개월의 한계를 보였으며, 19mm 골재의 경우는 13mm에 비해 서서히 감소하여 약 170회로 48개월 정도에서 한계를 보인다. 그리고 25mm 골재의 경우는 세 가지의 골재 중 가장 긴 약 232회로 66개월 정도에서 한계를 보였다. 결과적으로 골재별 수명한계는 $13\text{mm} < 19\text{mm} < 25\text{mm}$ 순으로 길게 나타났다. 그리고 시험결과는 입경 0.6mm이하의 부유사를 공극막힘재로 사용한 결과이고 조금 더 큰 입경을 공극막힘재로 사용하면 투수성 수명이 한계치가 다른 결과를 보일 것으로 사료된다.

Fig. 4.15는 투수콘크리트 위층에 공극을 갖는 탄성포장을 시공하여 2층 구조를 갖는 탄성투수성포장 시공 시 두 개의 층을 매끄럽게 부착하기 위해서 사용하는 투수성 프라이머를 도포 하였을 때의 투수성 프라이머에 의한 영향을 알아보기 위해 시험한 결과이다. 결과는 전체적으로 투수콘크리트의 수명을 단축하였으며 13mm골재의 경우는 수명이 16개월에서 7개월로 약 56%가 줄어들었으며, 19mm골재의 경우는 48개월에서 42개월로 약 12.5%가 줄어들었다. 그리고 25mm의 경우는 66개월에서 61개월로 약 7.6%가 줄어들었다. 결과적으로 25mm의 골재가 투수성 프라이머의 영향을 가장 적게 받는 것으로 분석되었다.

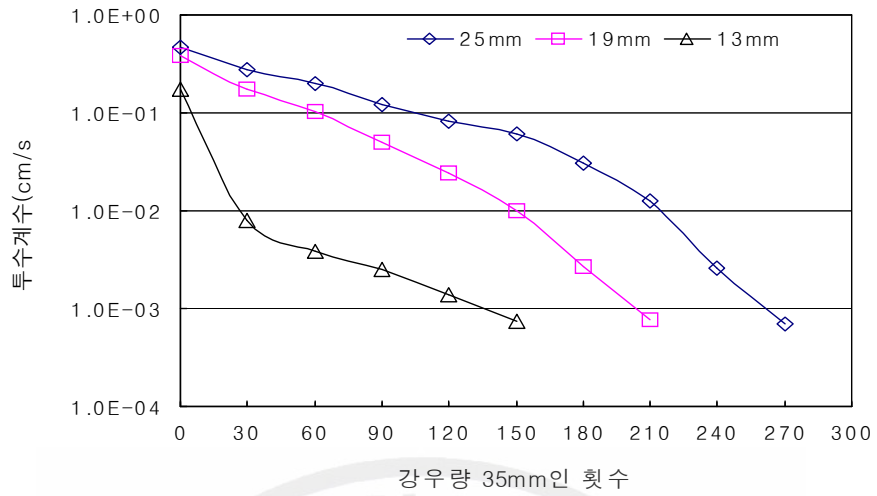


Fig. 4.14 The result of pore-clogging test with aggregate size

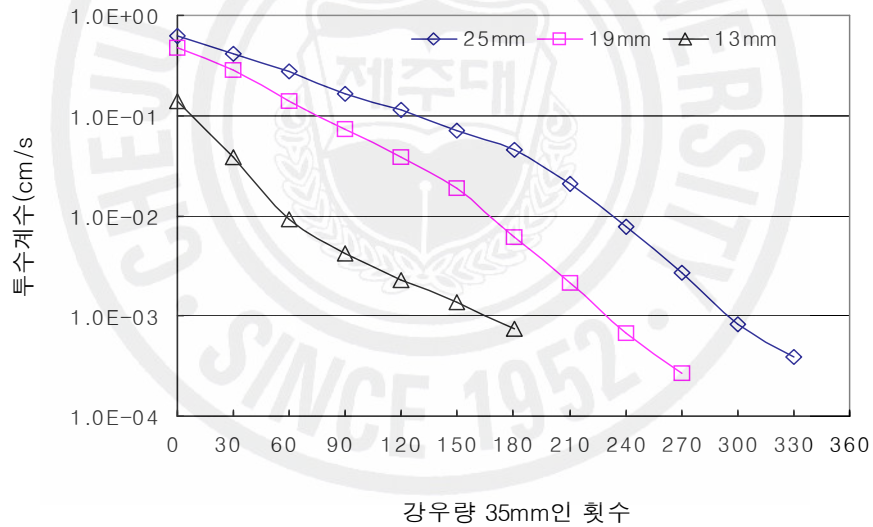


Fig. 4.15 The result of pore-clogging test with aggregate size after primer spread

1.2.4.3 물-시멘트비(W/C)변화에 따른 공극막힘시험결과

Fig. 4.16은 본 연구에 사용된 골재최대치수 25mm인 입경을 가지는 배합비의 물-시멘트비(W/C)가 31%이고 콘크리트슬럼프 시험 값이 0cm인 배합비에 시공성이 용이하도록 배합비의 단위수량을 2.4%씩 6단계로 증가시켜 공시체를

만들어 물-시멘트(W/C)비 변화에 따른 공극막힘현상을 분석한 결과이다. 그리고 Fig. 4.18의 수평축을 강수량 35mm인 강우사상의 횡수가 아닌 투입량으로 나타내었다. 투수계수 10^{-2} cm/s을 투수성 수명한계로 기준하여 물-시멘트비(W/C)가 작은 순서대로 W/C가 31%인 시험체는 앞에서 시험된 결과이고 투수성 수명한계는 66개월로 770g이고, W/C 31.8%인 시험체는 투수성 수명한계 600g, W/C 32.5%인 공시체는 투수성 수명한계 400g, W/C 33.2%인 공시체는 투수성 수명한계 320g, W/C 34%인 공시체는 투수성 수명한계 200g, W/C 34.7%인 공시체는 투수성 수명한계 100g, W/C 35.1%인 시험체는 투수성 수명한계 70g으로 분석이 되었다. 모든 공시체는 W/C 35.1%와 34.7%인 공시체를 제외하고는 Fig. 4.16의 회색선인 골재크기 13mm인 공시체 보다 투수성 수명한계가 길었으나 W/C 34%인 경우는 골재크기 13mm인 공시체에 비해 급격히 공극이 막히는 현상을 확인 할 수 있다. Fig. 4.16의 점선은 앞에서 시험된 골재크기 19mm인 공시체를 비교하기 위해 그림 안에 도시하였다. 비교결과 W/C 31.8%인 공시체의 수명한계 보다 약간 짧게 분석되었다.

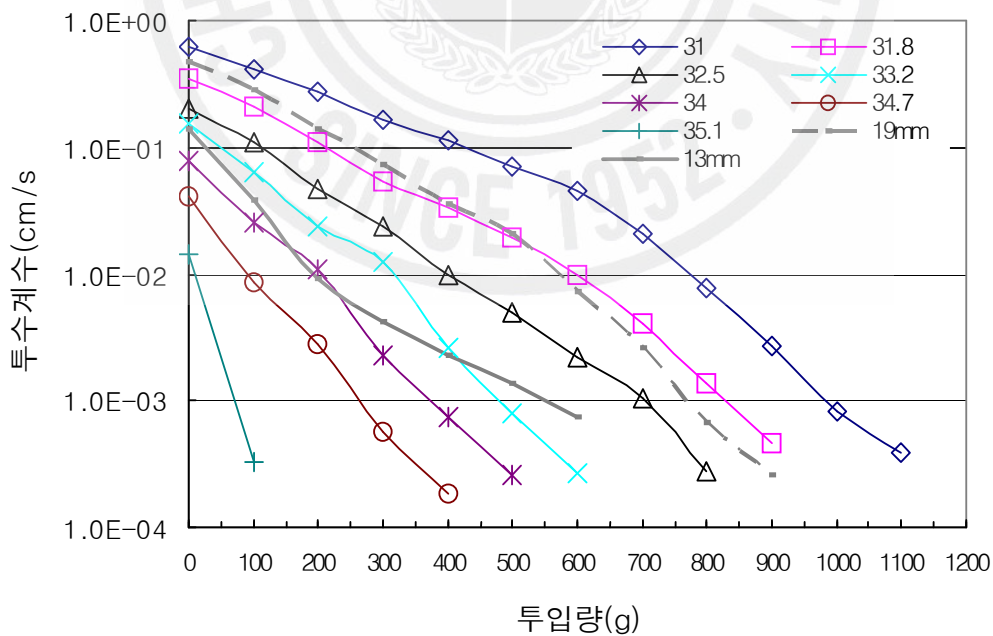
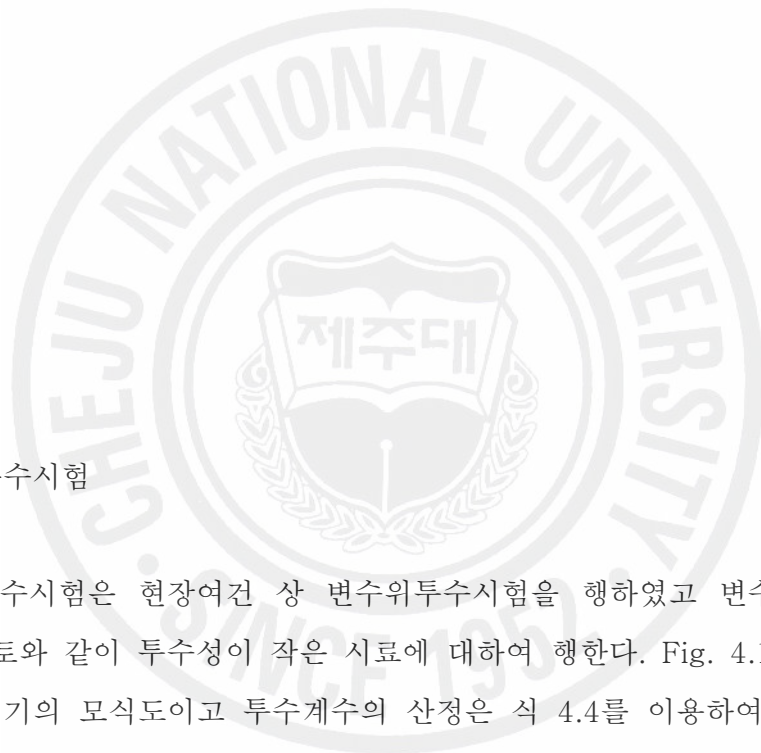


Fig. 4.16 The result of pore-clogging test with variable W/C ratio



1.3 현장투수시험

현장투수시험은 현장여건 상 변수위투수시험을 행하였고 변수위투수시험은 다져진 점토와 같이 투수성이 작은 시료에 대하여 행한다. Fig. 4.17은 현장변수위투수시험기의 모식도이고 투수계수의 산정은 식 4.4를 이용하여 구한다. 시험 방법은 유점토나 실리콘을 기험기 저면에 미리 부착시켜 노면과 접촉면에서의 누수를 방지한 다음 측정이 이루어진다.

$$K = 2.3 \frac{aL}{AT} \cdot \log\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

(4.4)

- K : 투수계수 (cm/sec)
- a : 몰드의 단면적 (cm^2)
- L : 투수콘크리트의 두께 (cm)
- A : 시료의 단면적 (cm^2)
- h_1 : 측정개시 수위 (cm)
- h_2 : 측정종료 수위 (cm)
- T : 시험동안 측정된 시간 (sec)

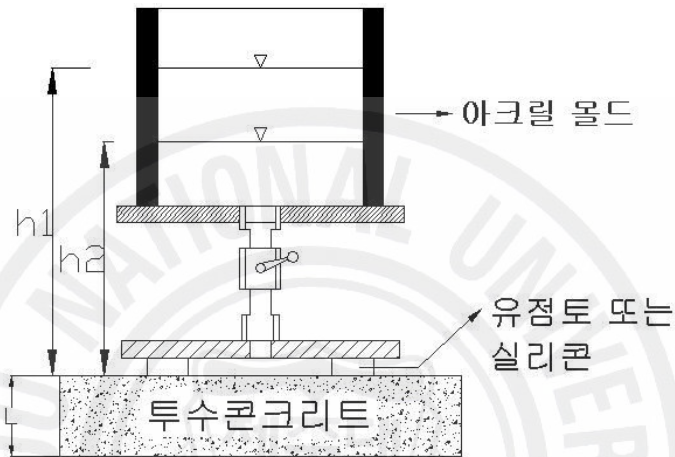


Fig. 4.17 A diagram of variable head permeability test apparatus in field

시험대상지역은 제주대학교에서 투수콘크리트가 시공된 3곳에서 이루어졌으며 시험결과는 Table 4.6과 같다. 3곳은 시공된 지 8년째이고 여느 장소와 마찬가지로 유지관리가 되지 않기 때문에 공극이 막혀 투수성포장의 기능을 상실하였다. 1.2.4.2항의 결과에서 보면 투입량이 많아질수록 투수계수값 변화의 폭이 작아지고 시간이 길어지는 경향으로 볼 때 현장투수시험의 결과와 일치할 것으로 예상된다. 이 Fig. 4.18은 현장투수시험 계측사진이다.

Table 4.6 The result and place in field permeability test

장 소	해양과학대학 앞	주 도로	자연과학대학 2호관 앞
투수계수 (cm/s)	1.29E-04	4.84E-05	4.26E-05



Fig. 4.18 Photograph of permeability test in field

1.4 공극률시험

투수콘크리트는 공극의 확보와 더불어 공극이 지닌 특성이 중요하다. 투수콘크리트가 투수성 포장으로 기능을 발휘하기 위해서는 공극은 Fig. 4.19와 같이 연속성과 불규칙성, 그리고 개방형을 확보하고 있어야 투수콘크리트로서의 기능을 수행할 수 있다. 투수콘크리트의 공극은 우수 등이 관통하여야 하므로 공극은 연속적이 되어야 한다. 그러나 연속성만을 위해 공극이 일직선으로 조성되는 경우 포장면의 다른 임의의 하중에 의해 포장층 하부의 재료들이 역류할 우려가 있

으므로 반드시 연속적이면서 동시에 불규칙적으로 연결되어야 할 것이다. 공극이 개방형이 되어야 하는 이유는 폐쇄형이 될 경우 지면의 우수를 빠르게 저면으로 흡수할 수 없기에 많은 양의 우수로 인한 물고임 현상 등을 막기 위해서는 개방형 공극이 되어야 할 것이다(최규형, 2005). 그리고 일반적인 불투수성콘크리트 포장층은 내부의 공극을 최소화하여 밀실하게 제조하는 반면 투수성콘크리트 포장층의 경우, 소요의 투수성을 유지하기 위하여 공극률 15% 정도 및 연속공극률이 최소한 확보되어야 한다는 연구를 발표하였다(문한영, 1999).

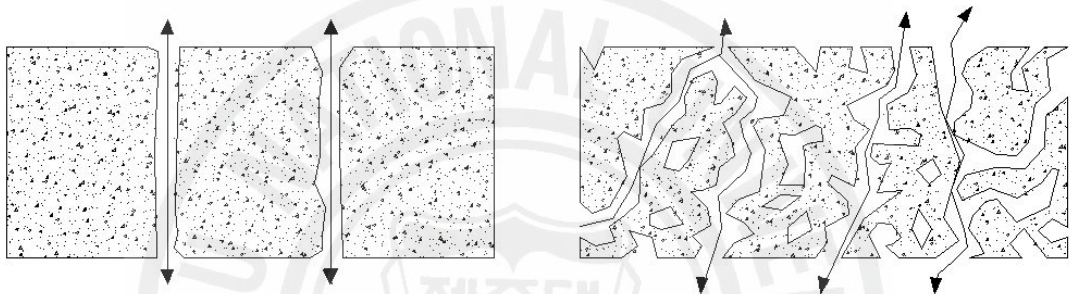


Fig. 4.19 Continuity and irregularity of open pore

공극률시험은 제작한 $\Phi 13 \times 10 \text{cm}$ 의 공시체를 2시간 수침 시켜 공시체가 완전히 포화된 후 꺼내 기울여 15분 간격으로 위아래를 뒤집어 공극내의 물이 빠져 나가게 한 후 물이 일정하게 담긴 메스실린더에 넣어 1시간 후 공시체의 진부피를 측정한다. 시험은 3개의 공시체를 시험하여 산술평균하였으며 공극률은 식 4.5를 이용하여 계산하였다.

$$\text{공극률}(\%) = \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right) \times 100$$

(4.5)

$$V_1 = \text{공시체의 진부피} (\text{cm}^3)$$

$$V_2 = \text{공시체의 겉보기 부피} (\text{cm}^3)$$

1.4.1 골재치수별 공극률시험결과

Fig. 4.20은 골재 치수별 공극률 시험결과로 13mm골재의 공시체는 공극률은 7.8%로 대단히 낮은 결과를 보이고, 19mm골재의 공시체는 공극률 15.4%의 결과를 보이고 25mm의 공시체는 공극률 20.2%로 가장 높은 결과를 보였다. 이는 공극률이 커질수록 투수계수 값도 커지는 결과와 상응하고, 단입도 골재의 경우는 공극률이 증가할수록 압축강도가 저하된다는 연구결과가 보고되었는데 시험에 사용된 골재는 세 종류의 다른 입도를 가지는 골재이므로 연구결과와의 적용은 적절하지 않다.

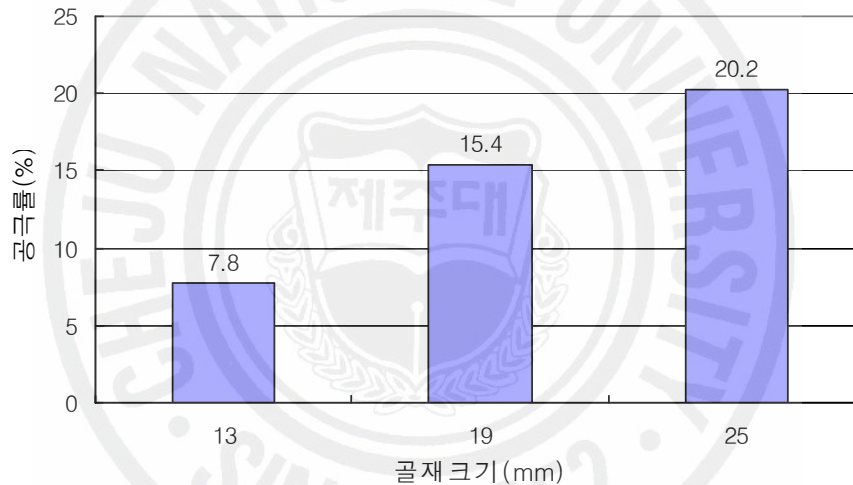


Fig. 4.20 The result of porosity test with aggregate

2. 탄성포장재

1.1 중금속 흡착실험

단일 중금속 흡착실험은 페타이어 칩 + 혼합시료(송이 4종, 석분) 각 % 별로 1g을 각각 만들어 250mL 삼각 플라스크에 취하고 5mg/L의 각 금속용액 25ml를 가해 200rpm에서 120분 교반하여 회분식 실험을 행하였다. 시료는 교반 후 10mL를 취하여 이를 5B 여과지를 사용하여 흡착제 입자를 여과 시킨 후 중금

속의 잔류농도를 AAS : 원자흡광분광계(Shimadzu AA-6701)를 사용해 측정하였다. 흡착률의 계산은 식 4.6을 사용하였다. Fig. 4.21은 시험에 사용한 교반기이고, Fig 4.22는 AAS기기이다.

$$Removal(\%) = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100$$

(4.6)

C_i = 중금속 초기농도 (mg/L)
 C_f = 잔류 중금속 농도 (mg/L)



Fig. 4.21 Used agitator

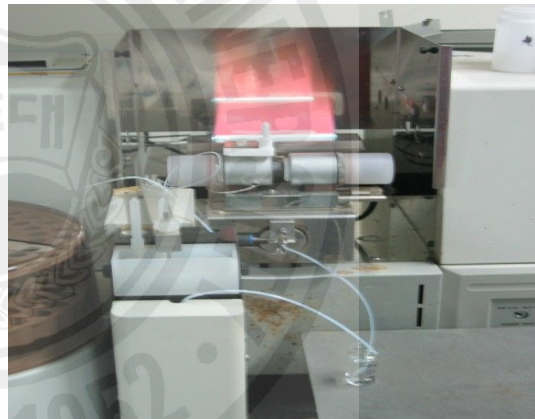


Fig. 4.22 AAS(Atomic Absorption Spectrometer)

1.1.1 용출실험

우선 폐타이어 칩 자체에서 발생하는 환경유해성을 조사하기 위해 국내 지정 폐기물 공정 시험법에 따른 용출 시험 (KSLP) 통해 중금속 함유량을 분석 ICP (Inductively coupled plasma spectrophotometer, IRIS.Advantage) 하여 하였다.(고득영, 2007)

폐타이어 칩의 용출 시험 결과와 각 국의 지정폐기물 용출 기준을 Table 4.7, Table 4.8에 나타내었다.

Table 4.7 the result according to leaching test of the waste tire chips

(Unit : $\mu\text{g/L}$)

항 목	Cd	Pb	Cr	As	Cu	Se	Zn	Mn	Ni	Ba	F
KSLP	0.75	0.023	0.18	0.14	2.03	0.33	4,156	11.73	0.79	26.33	0.79

Table 4.8 Criteria of hazardous material with the solid waste leaching test

(Unit : mg/L)

항 목	Cd	Pb	Cr	As	Cu	Se	Zn	Mn	Ni	Ba	F
Korea	0.3	3	1.5	1.5	3	-	-	-	-	-	-
Japan	0.3	3	1.5	1.5	-	0.3	-	-	-	-	-
U.S.A	1	5	5	5	-	1	-	-	-	100	-

Zn의 경우 $4,156\mu\text{g/l}$ 로 가장 높은 농도를 나타냈으며, 다음으로 Ba, Mn 순으로 각각 $26.33\mu\text{g/l}$, $11.73\mu\text{g/l}$ 으로 나타났으나 Table 4.8의 지정폐기물항목에서 제외된 항목이다. 그 외에 지정폐기물 항목들인 Cd, Pb, Cr, Cu는 KSLP에서 $0.75\mu\text{g/l}$, $0.023\mu\text{g/l}$, $0.18\mu\text{g/l}$, $2.03\mu\text{g/l}$ 으로 검출한계 이하의 값을 나타내어 지정폐기물로 구분되지 않았다. 그리고 Zn의 용출 농도가 높는데, 이는 XRD 및 XRF실험 결과에서 페타이어의 구성성분에 Zn의 함유율이 높기 때문이다.

본 연구에서는 지정폐기물 용출기준 항목 중 As를 제외한 Cd, Pb, Cr, Cu에 대해서 흡착시험을 행하였다.

1.2.2 흡착실험

중금속 Pb, Cu, Cd, Cr에 대한 혼합시료(송이 적갈색, 황갈색, 검정색, 암회색 4종과 현무암 석분 1종)의 투입량에 따른 영향을 살펴보기 위해서 투입량 1g 중 혼합시료를 wt%(weight percent)로 1, 2, 3, 4, 5, 10%까지 단계적으로 변화시키면서 구한 흡착률을 Fig. 4.23 ~ Fig. 4.26에 나타내었다. 시험결과 모든 혼합시료는 투입량이 증가할수록 흡착량도 증가하였다. 이는 Gadd와 de Rome(1988)이 흡착제의 양이 많아질수록 정전기적 인력이 높아져서 중금속 이

온이 더 많이 흡착된다고 한 가설과 같은 결과를 보이고 있다.

초기 1%에서 4%까지는 일정하게 증가하다가 5%이후에서는 흡착률이 줄어들어 변곡점을 4%와 5%사이에서 형성하고 있다. Pb, Cd, Cu의 시험결과에서 송이 황갈색 > 석분 > 송이 검정색 > 송이 적갈색 > 송이 암회색 순의 흡착률을 보이고, Pb의 경우 5종의 혼합시료 모두 95%이상의 흡착률을 보였으며, Cd의 경우는 혼합시료별 초기 흡착률은 다르지만 1%에서 10%까지의 흡착률 증가량이 유사하고 혼합시료량 4%와 5%사이의 변곡점 반경이 크다. 그리고 Cu의 경우는 송이 황갈색과 석분은 흡착률의 증가량이 크고 변곡점에서의 반경이 작으나 그 외의 혼합시료는 흡착률 증가량이 크지 않아 1%에서 10%까지 20%내외의 흡착률 변화를 보이고 있다. Cr의 시험결과는 송이 황갈색 > 석분 > 송이 적갈색 > 송이 암회색 > 송이 검정색 순의 흡착률을 보이고 Cu에 비해 흡착률은 떨어지지만 유사한 양상을 보이고 있다.

Fig. 4.27 ~ Fig. 4.31은 혼합시료별 중금속 흡착률을 나타내었다. 모든 시료는 중금속이온 Pb > Cu > Cd > Cr 순으로 흡착률을 보이고 송이 황갈색과 석분의 경우는 초기 1%에서는 Cd가 Cu보다 큰 흡착률을 보이지만 시료량이 증가하면서 4%이후에서는 Cu가 Cd 보다 큰 흡착률을 보이고 있다. 흡착률은 Ⅲ.장 재료의 성질에서 SEM 분석한 재료의 조밀한 기공의 양 즉, 비표면적에 영향을 받는다.

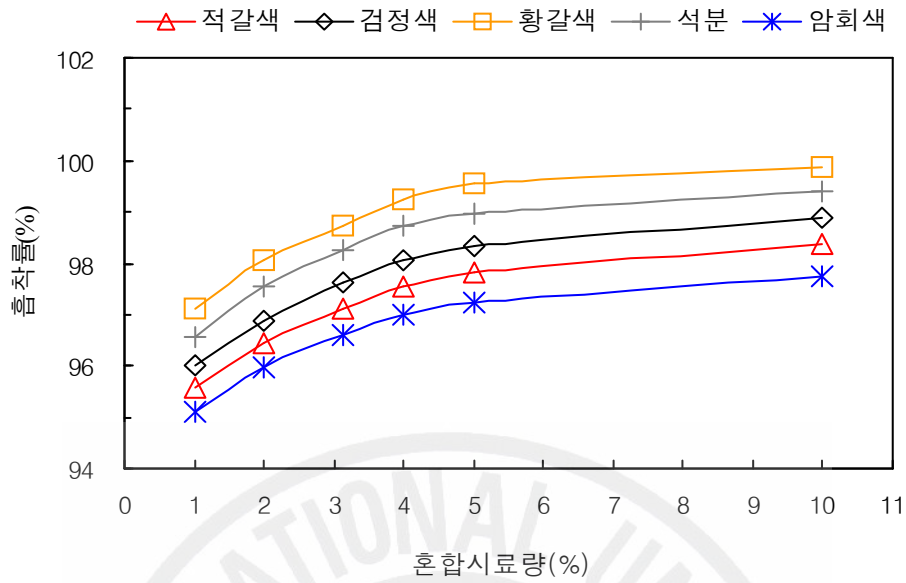


Fig. 4.23 Remove rate of Pb(lead) with mixed samples

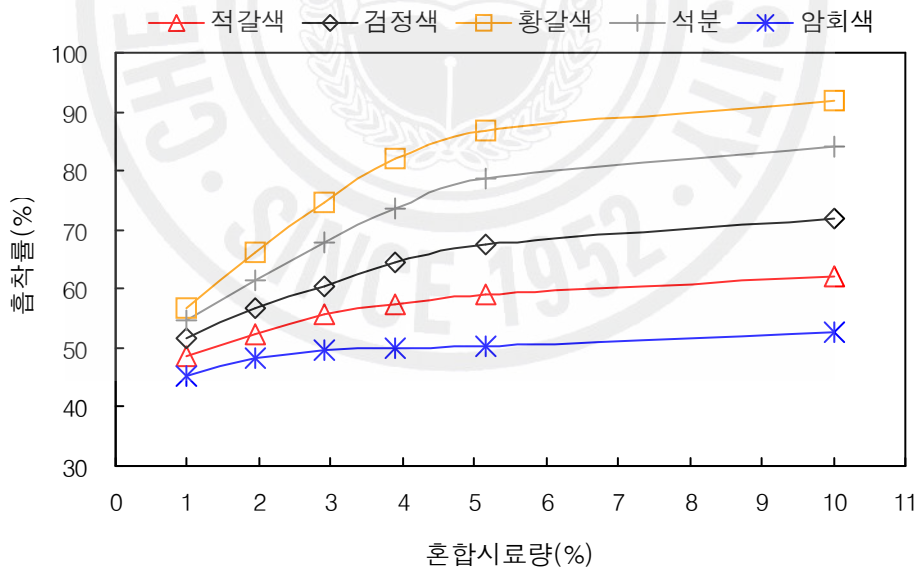


Fig. 4.24 Remove rate of Cu(copper) with mixed samples

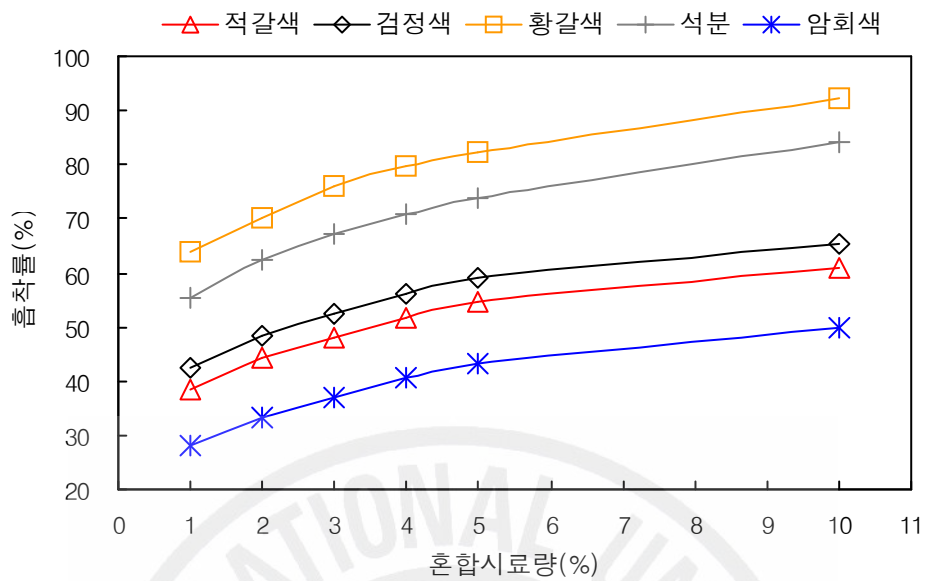


Fig. 4.25 Remove rate of Cd(cadmium) with mixed samples

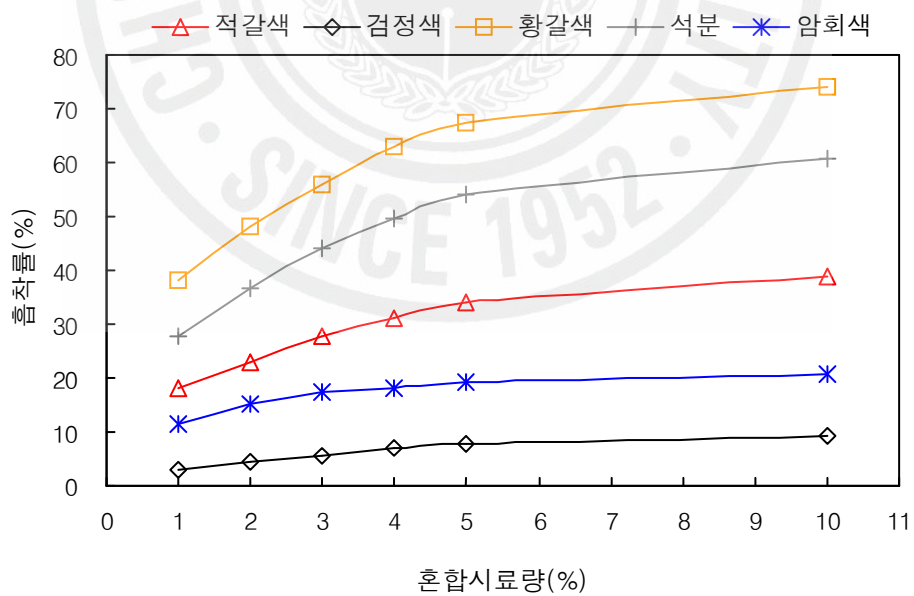


Fig. 4.26 Remove rate of Cr(chrom) with mixed samples

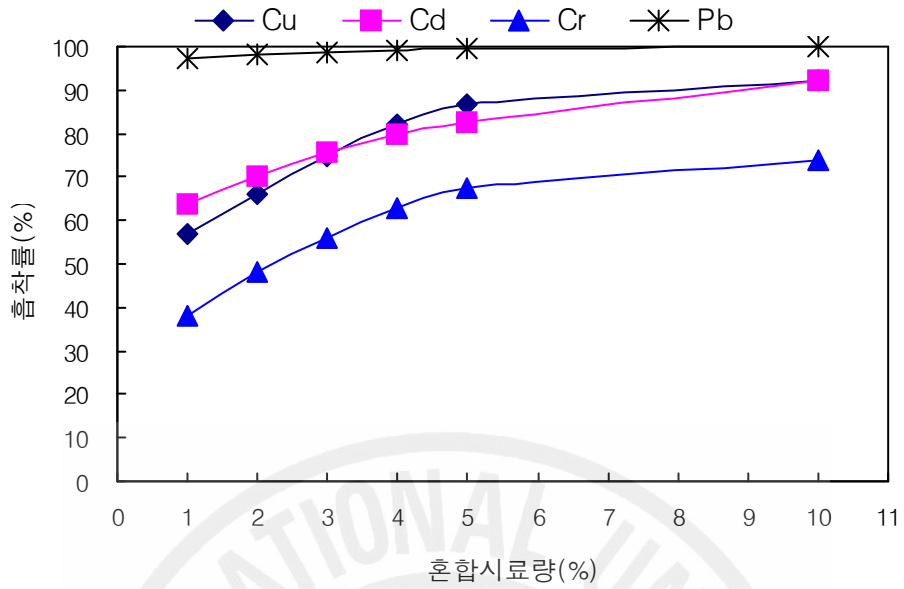


Fig. 4.27 Remove rate of yellowish brown scoria with heavy metals

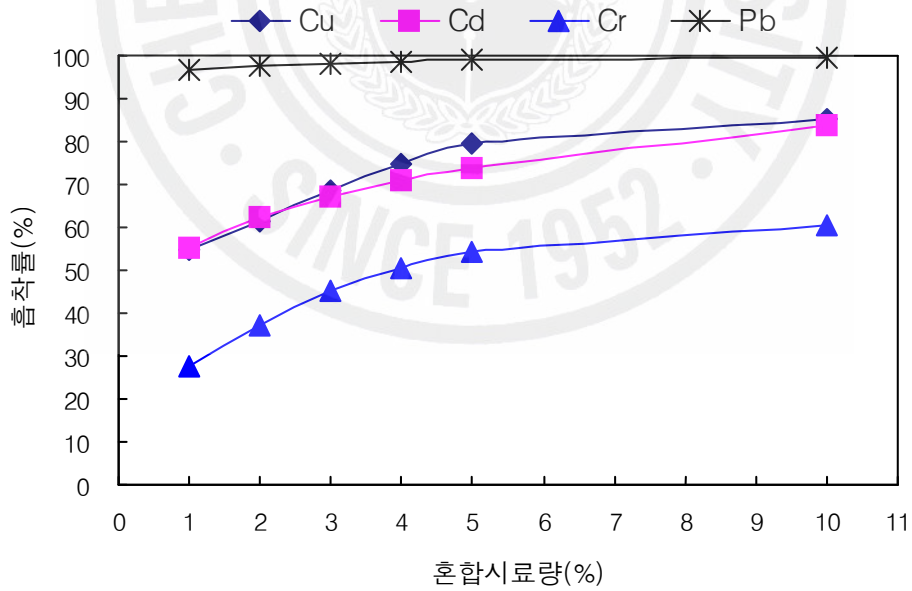


Fig. 4.28 Remove rate of basalt sludge with heavy metals

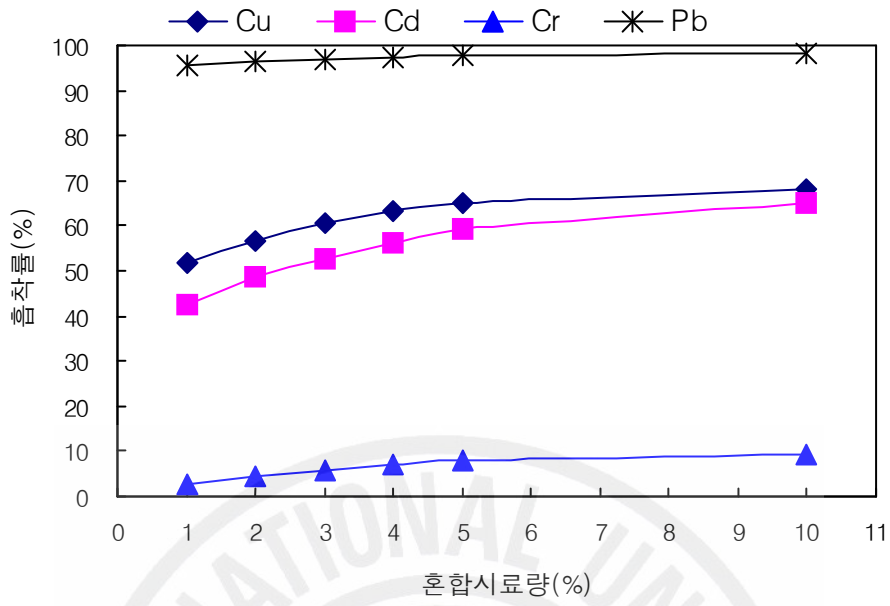


Fig. 4.29 Remove rate of black scoria with heavy metals

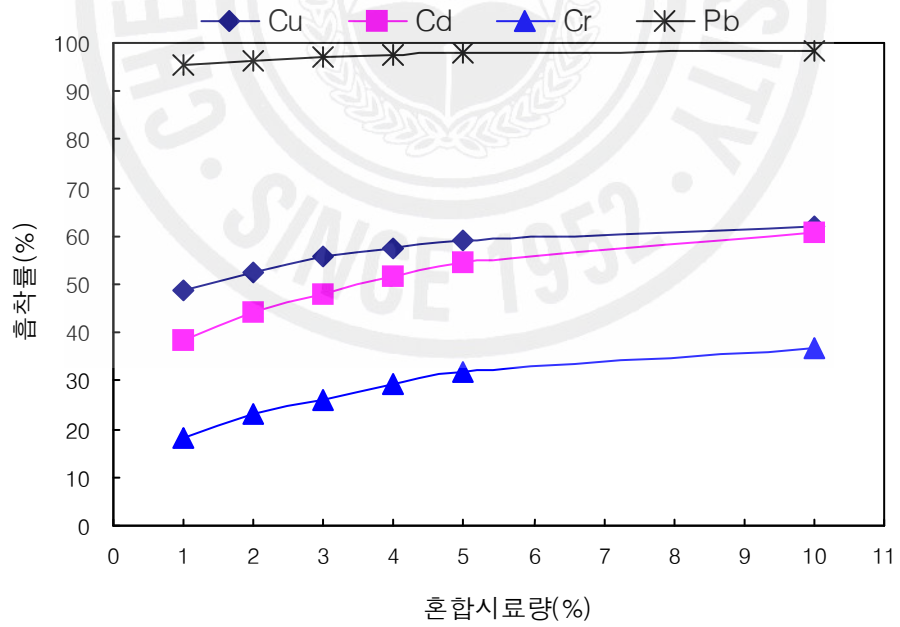


Fig. 4.30 Remove rate of reddish brown scoria with heavy metals

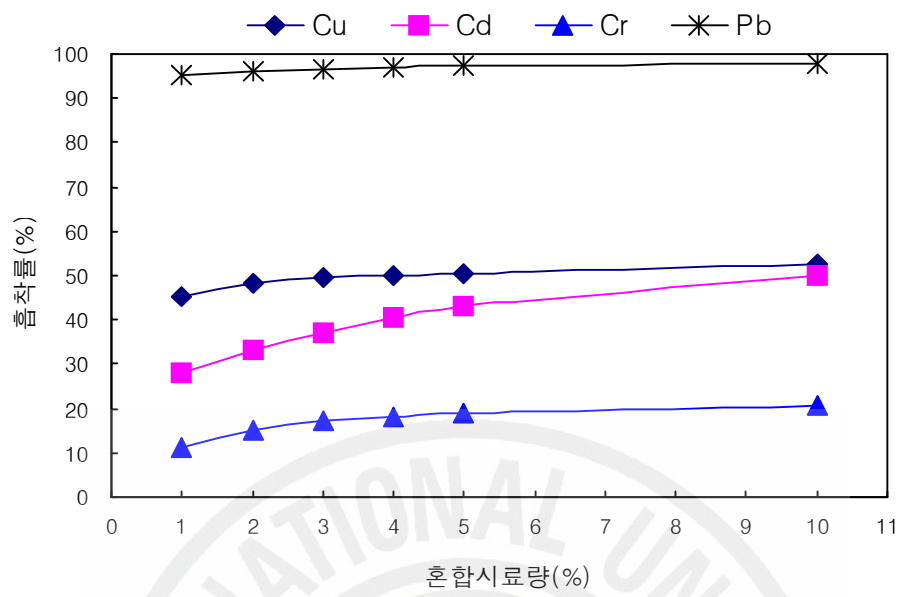
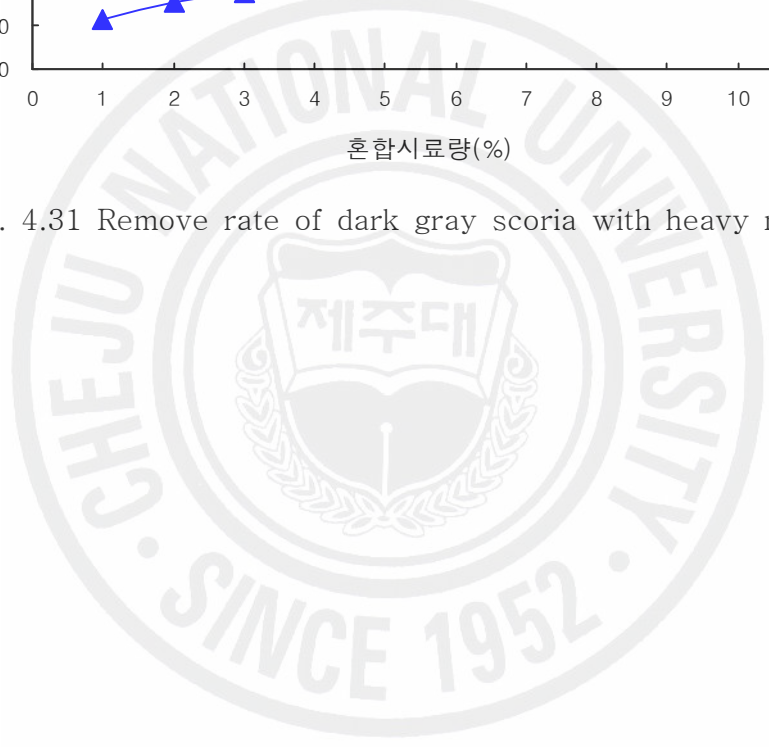


Fig. 4.31 Remove rate of dark gray scoria with heavy metals



V. 고찰

1. 투수콘크리트

1.1 강 도

굵은 골재치수별 압축강도 및 휨강도는 Fig. 5.1에서처럼 40mm골재를 제외하고는 13mm, 19mm, 25mm골재 전부가 인도 및 자전거 도로에서 요구 하는 구조체로서의 시방기준(압축강도 18MPa이상, 휨강도 4MPa이상)을 기준치 이상으로 만족하므로 일반적으로 사용되는 13mm골재 외에 19mm, 25mm의 골재도 투수콘크리트로서 사용에 무리가 없고 골재가 커질수록 노출면이 거칠어진다는 단점을 가지고 있으나 투수콘크리트층 위에 공극이 있는 탄성포장층을 갖는 2층 구조로 노출면이 탄성포장층이므로 단점을 충분히 보완할 수 있다.

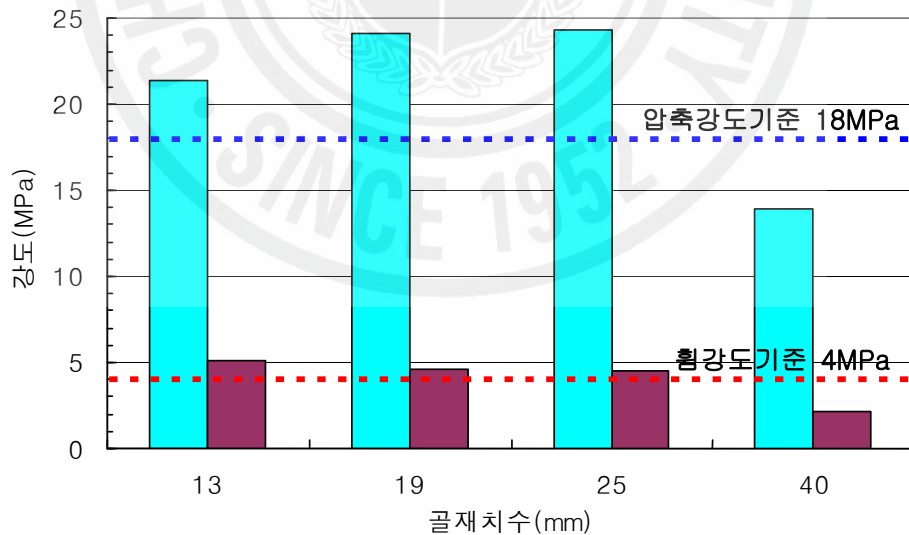


Fig. 5.1 The result of compressive strength and flexural strength with aggregate

1.2 투수성 수명

투수콘크리트의 중요한 기능적 요소는 투수성이다. 투수성으로 투수콘크리트의 수명을 이야기하여도 무리가 없다고 사료되며 1.2.4.2 공극막힘시험결과 항에서 분석된 시험결과를 보면 Fig. 5.2에서 보는 바와 같이 13mm 골재의 수명은 16개월로 1년 4개월, 19mm 골재의 수명은 48개월로 4년, 25mm 골재의 수명은 66개월로 5년 6개월로 나타났다. 이 결과들은 실제 보다 다소 길게 산정됐다고 판단이 되어진다. 결과를 보면 투수성 탄성포장재의 골재는 수명이 가장 긴 25mm골재의 사용이 적절하다고 판단된다. 그리고 투수콘크리트의 장점들로 인해 투수콘크리트 포장면이 지속적으로 늘어나고 있지만 아직 국내에는 유지관리 시스템이 정착되지 않아 시공 후 몇 개월만 지나면 투수성 원래의 기능을 상실하여 불투수성포장과 다를 바 없게 된다. 조속히 유지관리 체계를 구축하여 사용 취지를 살려야 할 것으로 사료된다.

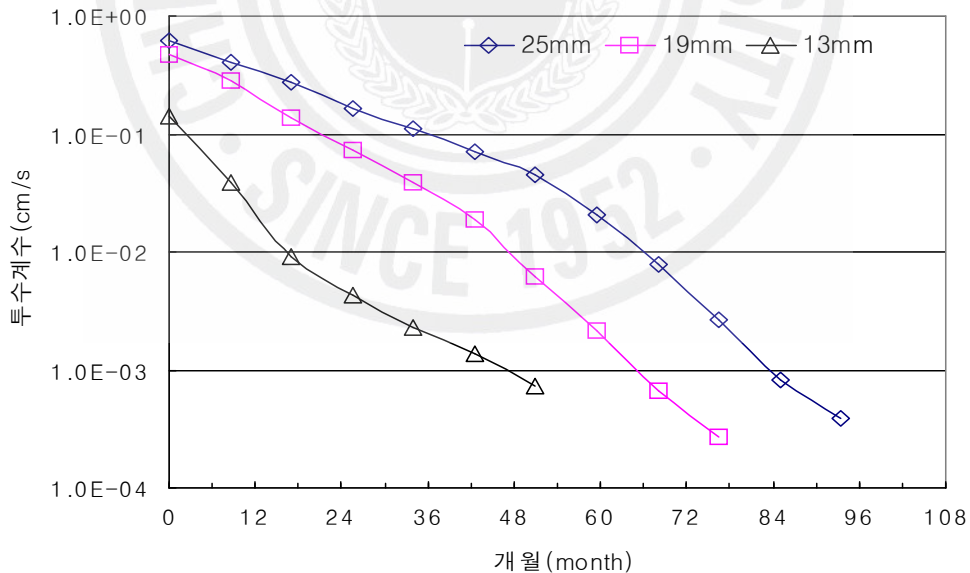


Fig. 5.2 The result of pore-clogging test with aggregate size

1.3 경제성

Table 5.1은 골재별 1m³당 단가이다. 골재의 크기가 작아질수록 작게 생산하기 위한 비용이 많이 들어간다. 투수성탄성포장재의 경우 25mm골재의 사용이 보다 더 효과적이라 판단되므로 일반적인 투수콘크리트의 골재 13mm와 대량사용시의 경제성을 Fig. 5.3과 같이 비교해 보았다. 100m³ 사용 시 재료비 절감액은 340,000원 그러나 10000m³ 사용 시에는 증가된 사용량과 비례하여 34,000,000원의 재료비 절감효과를 확인할 수 있다.

Table 5.1 A unit price per m³ with coarse aggregate (Current : 2007)

골재치수	13mm	19mm	25mm
단가(원)	15,400	14,300	12,000

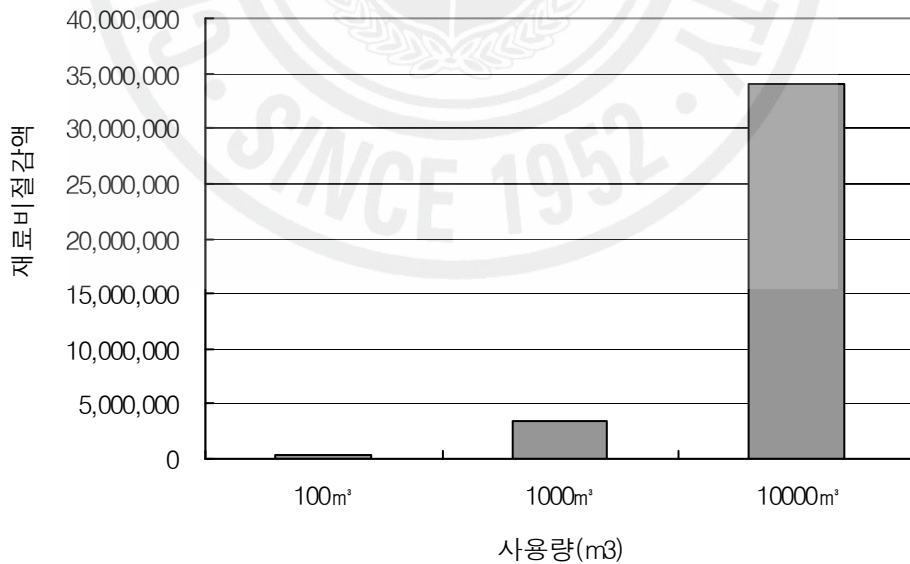


Fig. 5.3 The effect of materials savings with the amount used

2. 탄성포장재

2.1 중금속흡착효과

기존의 탄성포장재는 페타이어칩 또는 페타이어칩+우레탄과 바인더의 적정 혼합에 의한 제품이나 본 연구에서는 페타이어칩에 환경적인 측면을 고려해 종이 색상별 4종과 석분슬러지를 혼합하여 우수유출시 발생될 수 있는 중금속오염원에 대한 제거능력을 갖는 투수성탄성포장재를 개발하고자 하였다. 시험에 사용된 시료 5종을 투입량 1g에 대한 1, 2, 3, 4, 5, 10wt%로 변화시켜 중금속 Pb, Cu, Cd, Cr들에 대한 흡착능을 확인한 결과 Fig. 4.23 ~ 4.26에서 보는바와 같이 흡착제의 양이 많아질수록 중금속이온의 더 많이 흡착되었고, 시료마다 각각의 중금속에 대하여 다른 흡착률을 보이며, Pb경우는 1wt%에서 모든 시료가 95%이상의 흡착률을 보여 대단히 우수한 결과를 보였고 흡착률이 큰 순으로는 황갈색 종이 > 석분 > 검정색 종이 > 적갈색 종이 > 암회색 종이로 나타났으며 이 순서는 혼합시료별로 흡착률의 변화는 있으나 Cr을 제외한 다른 중금속에서도 같은 결과를 보였으며 흡착률의 변화는 일반적으로 흡착제의 투입량 증가에 따라 1 ~ 4wt%까지는 같은 기울기로 증가하고 5 ~ 10wt%에서는 기울기가 줄어들어 4wt%와 5wt%사이에서 변곡점을 보였다. 기존 탄성포장재가 가지고 있는 장점들 탄성, 색상 등을 저해하지 않는 범위에서 최적 혼합비는 4wt%와 5wt%사이라 판단되어진다. 그리고 혼합시료는 종이의 경우 색상이 황갈색, 검정색, 암회색인 경우는 양이 많지 않아 활용하기가 어렵고 가장 많은 양을 가지고 있는 적갈색계열을 사용해야 하는데 Fig. 5.4~5.5에서 보는바와 같이 적갈색 종이 보다는 석분슬러지가 더 높은 흡착률을 보이므로 석분슬러지를 활용하는 것이 폐기물처리로 인한 비용절감효과와 재료비 절감 및 폐기물을 재활용함으로써 인한 환경보전효과 그리고 중금속오염원 제거효과를 동시에 갖는 재료로서 활용될 수 있다고 판단된다.

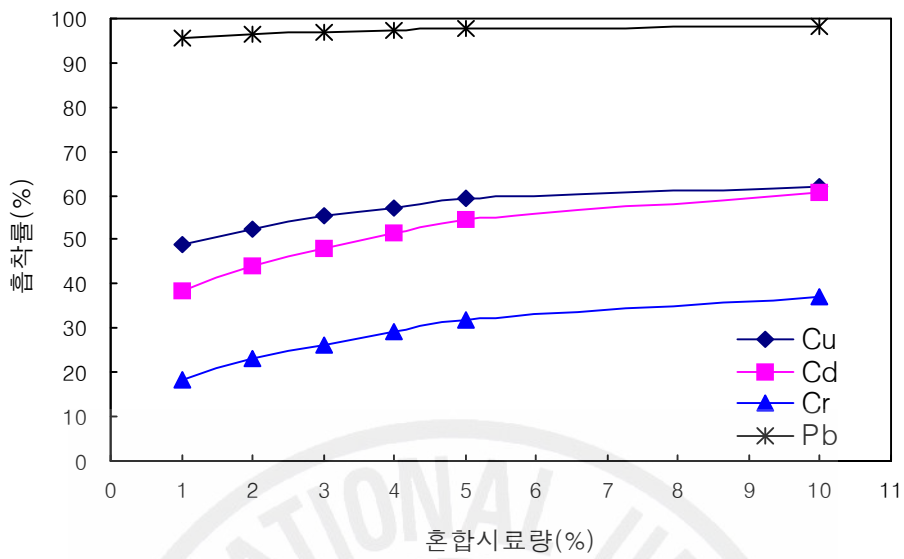


Fig. 5.4 The result of heavy metals adsorption of reddish brown scoria

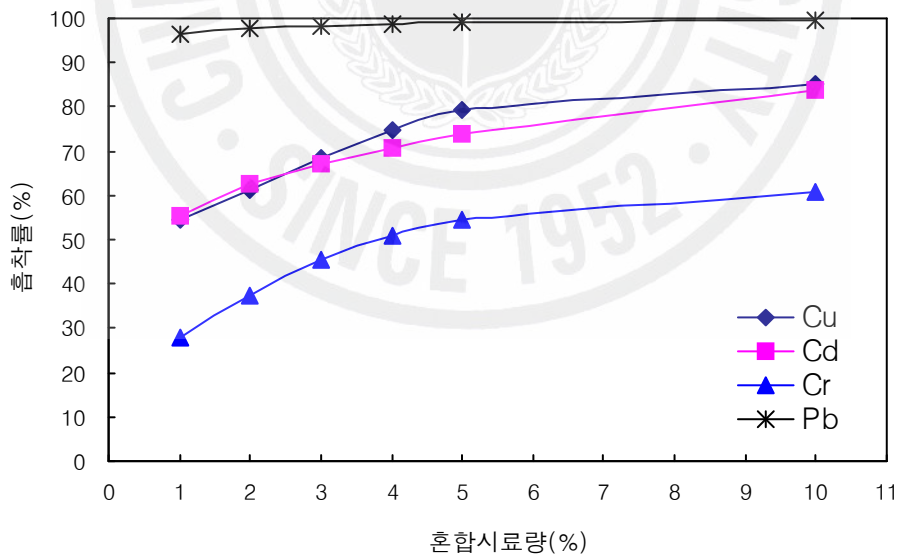


Fig. 5.5 The result of heavy metals adsorption of basalt sludge

VI. 결 론

본 연구에서는 2층 구조를 갖는 투수성 탄성포장재에 대하여 첫째 투수콘크리트층을 골재별로 구조체로서 요구하는 소요강도와 공극막힘에 대한 분석을 실시시험을 통하여 확인하였고, 두 번째 탄성포장재층의 재료구성에 송이 및 석분슬러지를 추가하여 중금속흡착효과를 분석하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 투수콘크리트에 일반적으로 사용되는 13mm 골재와 시험에서 비교한 19mm, 25mm, 40mm 골재 공시체들의 압축강도 및 휨강도시험결과 40mm 골재를 제외하고 구체로서의 사용에 무리가 없음을 확인하였다.
2. 공극막힘시험을 통해 각 골재들의 투수성 수명한계를 분석한 결과 13mm 골재에 비해 19mm 골재는 약 3배 그리고 25mm 골재는 4.1배 길게 추정되었다.
3. 프라이머 도포 후 공극막힘시험을 통해 프라이머의 영향을 분석한 결과 13mm 골재가 약 56% 감소, 19mm 골재가 약 12.6% 감소 그리고 25mm 골재가 약 7.6% 감소하여 25mm 골재가 프라이머 도포로 인한 영향을 가장 적게 받았다.
4. 시험에 사용된 송이 4종과 석분슬러지 1종의 시료는 모두 중금속 용액 Pb, Cu, Cd, Cr에 대해 $Pb > Cu > Cd > Cr$ 의 순으로 흡착률이 높은 경향을 보였다.
5. 시험에 사용된 중금속 용액 Pb, Cu, Cd, Cr에 대하여 시료별 흡착률은 황갈색 송이 > 석분슬러지 > 검정색 송이 > 적갈색 송이 > 암회색 송이 순으로 분석되었다.

6. 2층 구조를 갖는 투수성 탄성포장재는 투수콘크리트층의 골재를 25mm로 사용할 경우 효과적이고 공극을 있는 탄성포장층은 석분슬러지를 중금속흡착제로 활용해 탄성포장재를 제품화 할 경우에 경제성과 환경적인 측면들을 만족하는 우수한 제품이 될 수 있다고 판단된다.



참고문헌

- 고득영, 2007, 페타이어 표면에 형성되는 Functional group을 이용한 중금속 (Cu, Cd, Pb)제거에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, pp.
- 김기영, 2007, 현무암석분슬러지의 공학적 특성 및 활용방안 연구, 제주대학교 박사학위논문, pp.
- 김덕수, 2005, 전처리에 의한 제올라이트의 중금속 이온 제거능 개선, 제주대학교 기초과학연구소, Vol. 18, No. 2, pp.129-143
- 김선태, 2002, 투수성 포장공법의 시공실태 및 개선방안에 관한연구, 한양대학교 석사학위논문, pp.
- 김인석, 2004, 송이의 쇄석다짐말뚝에 대한 재료 적합성 연구, 제주대학교 석사학위논문, pp.33-35
- 나대엽, 2000, 페타이어 분해에 대한 아임계 및 초임계유체의 영향, 부산대학교 석사학위논문, pp.
- 남명식, 2006, 페타이어 미세분말을 이용한 개질아스팔트 혼합물의 성능평가에 관한 연구, 서울산업대학교 석사학위논문, pp.
- 류남형, 강호철, 1998, 투수성 포장재의 물리적 특성에 관한 연구(I), 진주대학교 건설기술연구소보, Vol. 1, pp.243-250
- 문한영, 1999, 전기로슬래그 골재를 투수콘크리트 포장용으로 활용하기 위한 기초적 연구, 대한토목학회논문집, Vol. 19, No. 1, pp.111-121
- 오현수, 홍영근, 2007, 투수성도로 포장재의 내구성 향상에 관한 연구, 엘라스토머, Vol. 42, No. 2, pp.93-101
- 이민규, 서근학, 1996, 제주송이를 이용한 중금속 흡착에 관한 연구, 한국환경과학회지, Vol. 2, No. 5, pp.195-201
- 이재응, 여운광, 심재현, 강태호, 2001, 투수성포장재를 사용한 호우시 우수유출 저감효과 분석, 대한토목학회논문집, Vol. 21, No. 6B, pp.645-654

- 홍영근, 엄준길, 정경호, 주강, 1998, 페타이어 분말을 이용한 탄성 투수성 도로 포장재에 관한 연구, 엘라스토머, Vol. 33, No. 4, pp.290-296
- 윤정수, 1991, 북제주군 지역 기생화산(오름)에 관한 보고서, 북제주군, pp.
- 윤정수, 1995, 제주도 북사면의 기생화산체에 관한 연구, 제주대학교 해양과환경 연구소, Vol. 19, pp.25-38
- 조은일, 2005, 제주지역에서 배출되는 비점오염원 관리방안 연구 보고서, pp.
- 취규형, 2005, 고성능 투수콘크리트 개발, 상지대학교 석사학위논문, pp.
- 최지용, 신창민, 2002, 비점오염원 저감을 위한 우수유출수 관리방안 보고서, 한국환경정책·평가연구원, pp.
- 현성수, 2000, 제주 스코리아로부터 합성된 제올라이트를 이용한 폐수 중 중금속 제거에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, pp.
- 홍종현, 김문훈, 양철신, 2006, 친환경 도로포장용 투수콘크리트의 제조와 이를 이용한 도로포장시스템의 수질정화특성, 한국환경과학회지, Vol. 15, No. 11, pp.1045-1052
- Braja M. Das, Fifth Edition, Principles of Geotechnical Engineering, pp.
- Ohama Y., Demura K., 1979, Effect of Coarse Aggregate on Compressive Strength of Polyester Resin Concrete, The International Journal of Cement Composites, Vol. 1, No. 3, pp.111~115
- Pindado M. A., A. Aguado, A. Josa., 1999, Fatigue behavior of polymer-modified porous concretes, The Journal of Cement and Concrete Research, 29, pp.1077-1083

감사의 글

부족한 저를 대학원으로 받아주시고 많은 가르침을 주시고 지도해주신 남정만 교수님께 머리 숙여 진심으로 감사드립니다. 그리고 학부에서 대학원까지 가르침을 주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 이병걸 교수님, 박상렬 교수님, 김상진 교수님께 감사드립니다. 전공분야의 선배로서 교수로서 관심을 갖어 주신 이동욱 교수님께도 감사드립니다. 그리고 아낌없는 애정으로 가르침을 주신 홍원표 교수님, 멀리서 저희들을 위해 출장 강의도 마다하지 않으신 윤중만 교수님, 연구과정에서 아낌없는 조언을 해주신 김덕수 교수님, 연구에 도움주신 (주)한라환경 오태흠 사장님께 감사드립니다.

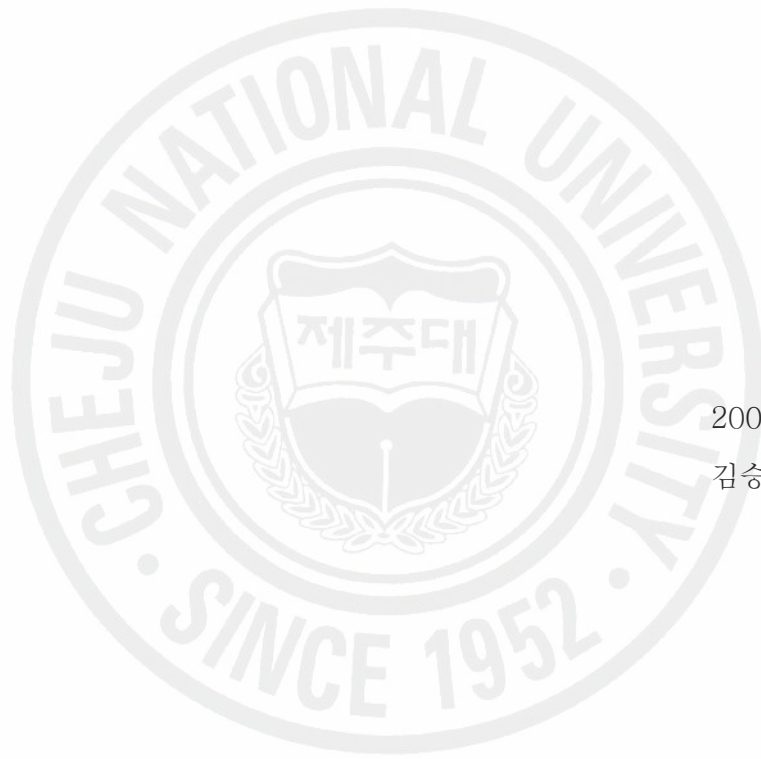
논문이 완성되기까지 많은 격려와 도움주신 우리 연구실의 김기영 선배님, 조영웅 선배님, 소재관 선배님, 오동일 선배님, 허용 선배님 그리고 김승범, 김준호, 조성환에게도 감사드립니다. 그리고 대학원 시작과 끝을 같이하며 서로를 위로하고 격려하고 배려해준 김도형, 실험하는 동안 많은 도움을 준 홍종완, 강경덕, 김태건, 강영민, 이창선, 양창세, 윤성운, 강진훈에게도 고마운 마음을 전합니다.

학과사무실에서 논문이 완성될 수 있도록 많은 배려를 해준 양태혁, 그리고 대학원 최고참 김창훈 선배님, 서로를 격려하며 같이 지낼 수 있었던 고행식, 강향혜, 문지원, 정우열, 김상봉, 홍성룡 그리고 김경남, 문경태, 홍성협, 한용규, 이승호에게도 고마운 마음 전합니다. 학과는 다르지만 실험과정에서 많은 도움 준 송승혁 선배님, 강봉권, 유경봉에게도 고마운 마음 전합니다.

그리고 어렵고 힘들 때 소주 한잔 채워주는 고희훈, 송훈, 김진수, 이확석, 이행규, 고영훈, 한승현, 강문종, 김기운, 현동민, 김경돈, 광정용,..... 나의 친구들아! 고맙다.

그리고 무엇보다 소중한 나의 가족, 묵묵히 지지하고 믿어주시는 아버지, 어머니와 자신의 일에 최선을 다하며 열심히 살아가는 승미, 저를 믿고 곱게 키운 따님을 주신 장인, 장모님 그리고 자신의 꿈을 위해 밤을 지새우는 처남 현철이 진심으로 감사합니다.

마지막으로 사랑하는 나의 아내 지니, 미안한 마음과 고마운 마음을 글로써 다 표현 못하지만 “사랑한다”.



2008년 1월

김승현 올림