



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

廢아스팔트의 透水性 鋪裝材料로서  
再活用 可能性에 關한 研究

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學 專攻

邊 成 文

2011年 6月

碩士學位論文

廢아스팔트의 透水性 鋪裝材料로서  
再活用 可能性에 關한 研究

指導教授 李 東 昱

濟州大學校 產業大學院

建設環境工學科

邊 成 文

2011年 6月

廢아스팔트의 透水性 鋪裝材料로서  
再活用 可能性에 關한 研究

指導教授 李 東 昱

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2011 年 6 月

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科 土木工學 專攻

邊 成 文

邊成文의 工學 碩士學位 論文으로 認准함.

2011 年 6 月

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

# A Study on Reusability of Waste Asphalt for Porous Pavement Material

Sung-Moon Byun

Department of Construction and Environmental Engineering

Graduate School of Industry

Jeju National University

Supervised by Professor Dong Wook Lee

## Summary

With dramatic advance of national economy, generations of every kind of wastes, industrial waste, pollutants, etc. are on the rise, while the total generation of construction wastes in Jeju-do for 2009 was around 900 thousand tons per year, a 46% increase compared to the previous year's around 617 thousand tons. Of these, as to waste asphalt, 2009 generation was 224 thousand tons per year, a 77% surge compared to the previous year's 127 thousand tons. Also coming to the fore is the exhaustion of natural aggregate resources together with social and environmental problems. As for building a bike road or pedestrian road for making low-carbon green growth city, it is time that

R&D on porous pavement material was required because of the need for constructing the eco-friendly road resistant to localized heavy rain. Thus, reusing the waste asphalt for porous pavement material rather than the existing simple use for producing recycled asphalt would reduce environmental problems, maximizing the usage of cycle aggregate.

In this study, to review the possibility for waste asphalt cycle aggregate to substitute for ordinary fine aggregate, its physical and chemical characteristics were analyzed. As the result, waste asphalt cycle aggregate revealed little difference from the ordinary fine aggregate in characteristics with no particular impeding elements found. So cycle aggregate from waste asphalt is considered usable for ordinary fine aggregate. Besides, compressive strength test, permeability experiment and porosity experiment were conducted to analyze the dynamic characteristics of porous pavement material using cycle aggregate from waste asphalt and the strength required as a structure. The result was considered safely available for porous pavement material.

This content corresponds with “constructing activated infrastructure involving the use of bike and building an eco-friendly road resistant to localized heavy rain” of the items under “practical tasks responding to climate change for making a low-carbon green growth city”, which is currently being pushed for by local governments. So it could be used as an alternative plan for this.

# 목 차

목 차	i
표 목 차	iii
그림 목차	iv
Summary	vi
<b>I. 서 론</b>	<b>1</b>
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구범위	1
<b>II. 기존이론</b>	<b>3</b>
2.1 투수성포장	3
2.1.1 투수성 포장공법의 정의	3
2.1.2 투수성 포장공법과 배수성 포장공법	4
2.1.3 투수성 포장공법의 구성	7
2.1.4 투수성 포장재의 종류	9
2.1.5 투수성 포장의 사용현황	10
2.2 투수콘크리트포장	11
2.2.1 투수콘크리트의 구조	12
2.2.2 투수콘크리트의 특성	13
2.2.3 투수콘크리트의 공극막힘현상 재현	15
<b>III. 실험재료 및 실험방법</b>	<b>22</b>
3.1 실험개요	22
3.2 실험재료	22

3.2.1	페아스팔트	22
3.2.2	시멘트	32
3.3	실험계획	33
3.4	실험항목 및 실험방법	34
3.4.1	공시체 제작	34
3.4.2	압축강도 실험	34
3.4.3	투수실험	35
3.4.4	공극률실험	38
<b>IV.</b>	<b>실험결과</b>	<b>40</b>
4.1	배합인자별 특성	40
4.1.1	압축강도	40
4.2	배합설계	42
4.2.1	투수계수에 따른 압축강도	42
4.2.2	C/A와 투수계수의 상관관계	44
4.2.3	W/C와 C/A의 상관관계	44
4.2.4	배합설계 과정	45
4.2.5	배합설계 기준에 따른 압축강도 실험결과	46
4.2.6	현장투수실험	47
4.3	경제성 분석	48
<b>V.</b>	<b>결론 및 활용계획</b>	<b>50</b>
5.1	결론	50
5.2	연구결과의 활용계획	51
	<b>참고문헌</b>	<b>52</b>
	<b>부록</b>	<b>53</b>
	<b>감사의 글</b>	<b>70</b>



## 표 목 차

표 2.1 다공성 및 배수성 포장재의 강우 흐름의 특성 비교	6
표 2.2 투수기능을 가진 표층 재료	10
표 2.3 투수성 포장의 사용 현황	11
표 2.4 투수콘크리트의 물성 값	13
표 2.5 각 지역별 공극막힘재의 균등계수(Cu)와 곡률계수(Cg)	16
표 2.6 비점오염원의 조사대상 지역	18
표 2.7 비점오염원의 강우특성과 강우사상	18
표 2.8 현장 강우조건에 따른 지역별 SS량	18
표 2.9 막힘재량 산정결과	19
표 3.1 페아스팔트의 성분분석	23
표 3.2 비중실험 결과	25
표 3.3 수정CBR실험 값	25
표 3.4 페아스팔트의 구성 성분	26
표 3.5 분석방법	30
표 3.6 용출실험 분석결과	31
표 3.7 시멘트의 화학적 구성	32
표 3.8 시멘트의 물리적 특성	32
표 3.9 페아스팔트를 활용한 투수성 포장재의 배합비	33
표 4.1 배합설계 결과	46
표 4.2 현장 변수위투수 실험결과	48
표 4.3 골재별 1m <sup>3</sup> 당 단가 비교	49

## 그림 목 차

그림 2.1 다공성 및 배수성 포장재의 강우 흐름 .....	4
그림 2.2 투수성 포장재의 기본 순서 .....	7
그림 2.3 투수성 포장재의 개념도 .....	12
그림 2.4 투수계수와 압축강도의 관계 .....	14
그림 2.5 각 지역별 공극막힘재의 입도분포곡선 .....	16
그림 2.6 각 지역별 공극막힘재로부터 산정된 공극막힘재의 입도분포곡선 .....	17
그림 2.7 공극막힘재량의 농도별 투수계수 산정결과 .....	21
그림 3.1 아스팔트 분자의 유형 .....	23
그림 3.2 입도분포곡선 .....	24
그림 3.3 폐아스팔트의 SEM 촬영 결과 .....	27
그림 3.4 현무암의 SEM 촬영 결과 .....	27
그림 3.5 폐아스팔트와 석분의 XRD 분석 결과 .....	28
그림 3.6 만능재료시험기 .....	35
그림 3.7 제작된 공시체 예 .....	35
그림 3.8 정수위투수시험 장치 .....	36
그림 3.9 변수위투수시험 장치 .....	36
그림 3.10 현장 변수위투수시험기의 모식도 .....	37
그림 3.11 현장투수시험 계측 전경 .....	37
그림 3.12 공극의 개방성과 불규칙성 .....	38
그림 4.1 물/시멘트비와 단위시멘트량에 따른 압축강도 .....	40
그림 4.2 공극률에 따른 압축강도 .....	41
그림 4.3 공극률에 따른 투수계수 .....	42
그림 4.4 투수계수에 따른 압축강도 .....	43
그림 4.5 C/A와 투수계수의 상관관계 .....	44
그림 4.6 W/C와 C/A의 상관관계 .....	45

그림 4.7 배합설계기준에 따른 압축강도실험 결과 .....	47
그림 4.8 현장 투수실험 계측사진 .....	48
그림 4.9 사용량별 금액 및 절감액 .....	49



## I. 서론

### 1.1. 연구배경 및 목적

국가 경제의 비약적인 발전과 더불어 각종 폐기물, 산업 쓰레기, 오염물질 등의 발생량은 늘어나는 추이에 있으며 2009년도 건설폐기물 총발생량은 66,923천톤/년으로, 전년도 64,403천톤/년에 비해 약 3.9% 증가한 반면, 폐아스팔트콘크리트의 경우는 11,903천톤/년으로, 전년도 9,231천톤/년에 비해 28.9%로 증가하였으며, 특히 제주도의 경우 224천톤/년으로, 전년도 127천톤/년에 비해 무려 77% 급증하였다. 또한 천연골재 자원의 고갈과 사회·환경적 문제가 대두 되고 있으며 저탄소 녹색성장도시 조성을 위해 자전거도로나 보행자도로를 건설함에 있어 친환경적이고 집중호우에 강한 도로건설의 필요성에 따라 투수성 포장재에 대한 연구개발이 요구되는 시점이다. 이에 폐아스팔트콘크리트 재활용 방안이 절실히 요구되는 시점이다.

이런 요구에 따라 폐아스팔트콘크리트를 단순 재생아스팔트 생산에만 의존해왔던 것을 투수성 순환골재의 기초적 자료를 제시하고 투수성 포장재료로 재활용함으로써 폐기물 매립지 부족해결, 환경문제 감소등 순환골재의 재활용 범위를 확대하고자 한다.

### 1.2. 연구 범위

본 연구에서는 기존 포장재와 투수성 포장재료의 공학적 특성을 비교하여 폐아스팔트 순환골재의 일반잔골재 대체 가능성을 분석하고자 하였으며, 폐아스팔트를 활용한 투수성 포장재의 단위시멘트량, 잔골재 비율, 물/시멘트(W/C)비의 혼합을 변화에 따른 역학적 특성과 구조체로서 요구되는 소요강도에 대하여 분석

하고자 한다.

다음과 같은 범위의 연구를 수행 하였다.

가. 폐아스팔트 순환골재의 일반잔골재 대체 가능성 분석

- 물리적 특성(입도분석, 비중, CBR 실험) 분석
- 화학적 특성(XRF, SEM, XRD) 분석
- 환경적 유해성에 대한 영향 검토

나. 폐아스팔트를 활용한 투수성 포장재의 역학적 특성 및 소요강도 분석실험

- 압축강도 실험
- 실내투수 실험
- 현장투수 실험
- 공극률 실험

다. 폐아스팔트를 활용한 투수성 포장재료 배합설계

라. 경제성 분석

## II. 기존이론

### 2.1. 투수성 포장

#### 2.1.1. 투수성 포장공법의 정의

투수성 포장공법은 우수나 기타 유수를 표층과 기층을 통해 침투시키고 노상과 기층을 분리하는 월터층을 통과하여 노상으로 침투하며 투수계수  $1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$  이상인 포장공법을 말하는 것이다. 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. 투수성 포장재의 유출은 6~10cm 두께의 공극 아스팔트 층을 통하여 기층으로 침투하므로 결국 침투성 포장재의 저류



능력은 기층의 두께와 밀접한 관계가 있다. 침투성 포장재를 사용하면 설계강우보다 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.

### 2.1.2. 투수성 포장공법과 배수성 포장공법

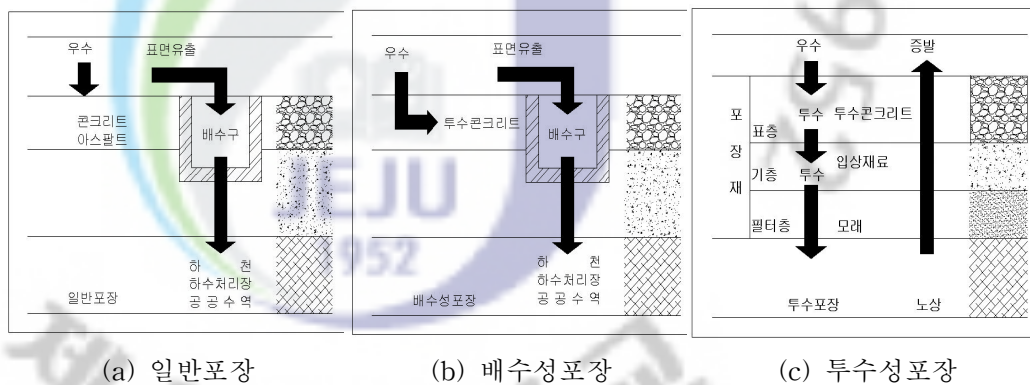


그림 2.1 다공성 및 배수성 포장재의 강우 흐름

침투성 포장공법은 우수등이 포장층을 통과하여 노상까지 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 도로 경사에 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 노

상이 과잉의 수분을 포함하게 되면 강도의 저하를 초래하기 때문에 투수성 포장  
은 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 한  
다. 이 배수성 포장은 표층부 바로 밑의 불투수성 층의 위를 약 2%의 횡단기울기  
에 의해 노면방향으로 물을 유하시켜 측구로 배수시키는 포장구성으로 이루어진  
다. 이때 어느 정도의 강우강도까지는 노면에 우수면이 생기지 않고 투수층 내에  
서 물이 흘러 배수된다. 배수성 포장공법은 표층의 공극 특성으로부터 소음 감소  
효과와 주행 안전성의 효과를 기대 할 수 있지만 우수를 흡 속으로 환원시킬 수  
없어 배수성 포장과 투수성 포장공법은 기능과 포장구성이 다르다. <표 2.1>은  
보행자용 도로에 적용한 투수성 포장공법과 차도에 적용시킨 배수성 포장공법의  
효과를 비교한 것이다.



표 2.1 다공성 및 배수성 포장재의 강우 흐름의 특성 비교 (김선태, 2002)

분류	항 목	적용 장소	투수성 포장	배수성 포장	일반 포장
			보행자용	차도용	
자연 환경	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	○		
사회 환경	주행소음의 감소	엔진음 등의 흡음		○	
		에어 펌핑음의 제거		○	
	주행안전성	물이 튀는 것을 방지		○	
		스모킹 방지		○	
		hydroplaning의 방지		○	
		미끄럼 저항의 증대		○	
	유지보수의 감소	포장의 내구성			○
		유지관리의 용이성			○

### 2.1.3. 투수성 포장공법의 구성

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

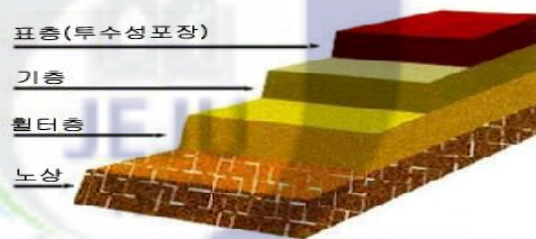


그림 2.2 투수성 포장재의 기본 순서

#### 1) 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 시공상의 투수계수 확보등도 중요하지만, 시공 후의 철저한 유지관리가 반드시 지속되어야 한다.

#### 2) 기 층

기층은 상부의 표층을 지지하고, 하중을 분산하며, 표층 시공을 위한 작업대역

할을 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 이루어져야 한다. 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.

### 3) 필터 층

노상토가 노반으로 침투하는 것을 방지하며, 미세 입도의 불순물이 노상에 침투하여 연약화 시키는 것을 방지하고, 노반에 미치는 하중을 등분포로 노상에 전달할 목적으로 설치하여야 한다. 필터층은 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. 필터층으로는 일반적으로 모래를 사용한다.

### 4) 노 상

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 침투시킬 수 있는 성질의 지반인가 하는 점을 고려해야 한다. 만약 원래의 노상 자체가 투수능이 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 배수능이 좋지 않을 경우 침투된 우수에 의해 동해(凍害)의 가능성이 있으므로 동해 방지층을 추가로 설치하여 이에 대비해야 한다. 동해 방지층은 보통 보조기층으로 구성된다

#### 2.1.4. 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 제품으로서 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 <표 2.2>와 같다.

표 2.2 투수기능을 가진 표층 재료 (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

#### 2.1.5. 투수성 포장의 사용현황

투수성 포장은 자전거도로, 주차장, 채움재, 호안블럭 등으로 활용되고 있다.

표 2.3 투수성 포장의 사용 현황

구 분	세 부 내 용
자전거도로	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 압축강도 18Mpa, 인장 강도 4Mpa</li> <li>- 일반적으로 표층, 기층, 노상으로 구성되며 필요에 따라 동상방지층으로 활용</li> </ul>
주차장	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 일반적으로 표층, 기층, 노상으로 구성되며 필요에 따라 동상방지층으로 활용</li> </ul>
채움재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 일반도로에서 사용하는 기층용 및 표층용에 활용</li> </ul>
호안블럭	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 천수·하천이용, 생태계 보전, 경관 보전, 식생 등의 환경 호안에 사용되는 전반적인 블록</li> </ul>

## 2.2. 투수콘크리트포장

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. 투수성 포장재를 적용하게 될 포장형식은 무근 콘크리트 포장에 적용될 수 있다. 이러한 무근 콘크리트 포장은 현재 국내에서도 가장 많이 사용되는 포장형식이나 차량의 주행안정성이나 도로주변의 환경보전 등



의 문제점을 내포하고 있으며 투수성 포장재 포장이 이의 해결방안으로 제시되고 있다. 그러나 국내의 투수성 포장재 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. 도시의 포장면 중 가장 많은 비율을 차지하는 곳이 도로이다. 도시에서 도로의 투수성을 유지하는 것은 매우 중요하다.

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

### 2.2.1. 투수콘크리트의 구조

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

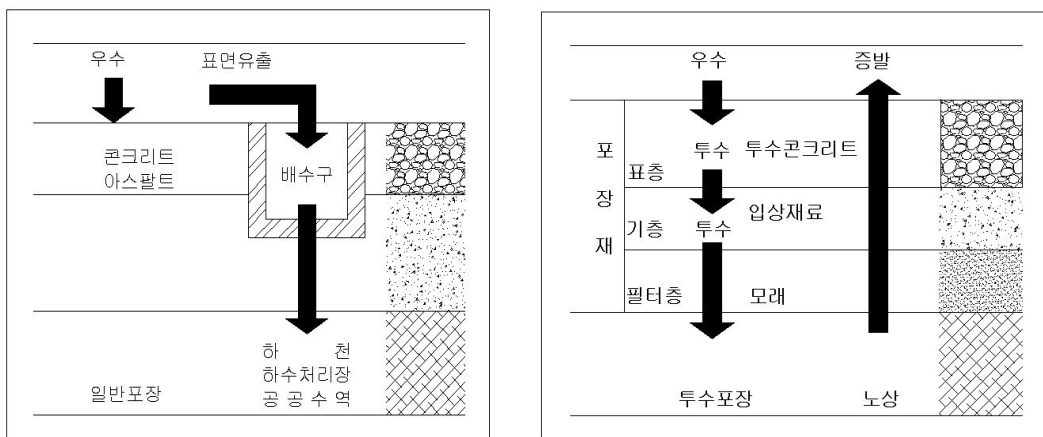


그림 2.3 투수성 포장재의 개념도

### 2.2.2. 투수콘크리트의 특성

투수성 포장재는 일반콘크리트와는 상반된 개념으로서 연속된 공극을 형성하다 보면 콘크리트에 요구되는 강도 및 역학적특성이 저하되므로 투수성 포장재 제조에 있어서의 핵심은 구조체로서의 요구 특성을 만족함과 동시에 투수성을 확보하여야 하는 것이다.

<표 2.4>은 일반적으로 투수성 포장재에 요구되는 물성 값으로서 강도와 공극률과의 조화가 요구되는 콘크리트라 할 수 있다.

표 2.4 투수콘크리트의 물성 값

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 kg · cal/m <sup>2</sup> · h · °C

#### 1) 투수콘크리트의 강도



투수성 포장재의 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 투수성 포장재의 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.

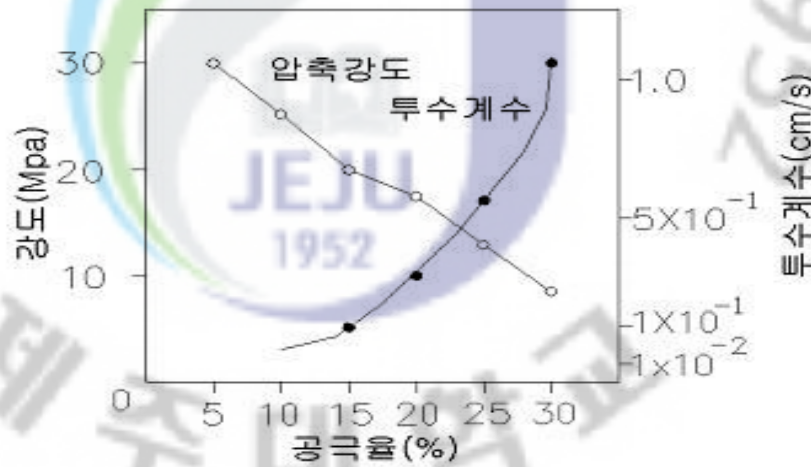


그림 2.4 투수계수와 압축강도의 관계(김선태, 2002)

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

## 2) 투수콘크리트의 내구성

투수성 포장재의 내구성에 대한 연구는 현재로서는 활발하게 진행되지 않은 상

태지만 내구성에 관한 동결융해 저항성 실험으로 ‘수중동결 수중 융해법’과 ‘공기 중 동결 수중 융해법’에 의한 보고가 있다. 투수성 포장재는 다량의 연속된 공극이 존재하므로 이 공극내로 수분이 쉽게 유입되어 동결 팽창함으로써 일반 콘크리트에 비해 동결융해 저항성이 낮은 것으로 알려져 있다. 하지만 골재 크기가 비교적 큰 쇄석을 사용한 투수성 포장재의 경우 ‘수중동결 수중 융해법’에 의한 결과 공극 내 얼음의 팽창압을 직접받기 때문에 열화가 빠르나 ‘공기 중 동결 수중 융해법’에 의한 실험처럼 공극이 물로 가득 차 있지 않은 경우 실내 동결융해 실험에서는 200회를 반복시키더라도 탄성계수의 저하는 없는 것으로 나타났다.

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

또한 단위 시멘트량이 적은 투수성 포장재의 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 투수성 포장재는 골재와 골재를 연결하는 시멘트가 공극을 갖고 있어 공극을 통해 유수를 침투시키는 것이다.

### 2.2.3. 투수콘크리트의 공극막힘 현상 재현

투수성콘크리트의 강도증진에 관한 연구는 많이 이루어지고 있으나 투수성콘크리트의 공극막힘(투수성한계)에 대한 연구는 미비한 실정으로 이에 대한 검증이 필요하다. 또한 이는 장기적인 검토와 연구가 이루어져야 하는 만큼 본 과제에서는 이용남의 2008년 “투수콘크리트의 공극막힘현상에 의한 투수성 검토”를 이론적으로 검토하였으며 차후 공극막힘현상에 대하여 연구를 진행할 계획이다.

#### 1) 공극막힘재 입경분석

공극막힘재의 입경을 산정하기 위하여 제주시(제주특별자치도) 일원 다섯 개의 지역(제주대, 관덕정, 연복로, 중앙로, 서사라)에서 노면 위의 시료를 채취해 입도 분석한 결과 <표 2.5>와 <그림 2.5>과 같다. 시가지의 일반적인 시료는 조립토이고 시가지에서 외각으로 벗어난 제주대에서는 약 45%정도의 세립토를 가지고 있었다.

아래 다섯 개의 지역의 입도분포를 이용하여 대표입경을 산정하였으며 실내시험 시 사용할 공극막힘재를 만들었다. 공극막힘재는 조립토와 세립토를 적절히 섞어 아래 <그림 2.6>와 같은 입도분포곡선을 갖는 시료를 만들어 실험에 사용하였다.

표 2.5 각 지역별 공극막힘재의 균등계수(Cu)와 곡률계수(Cg)

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

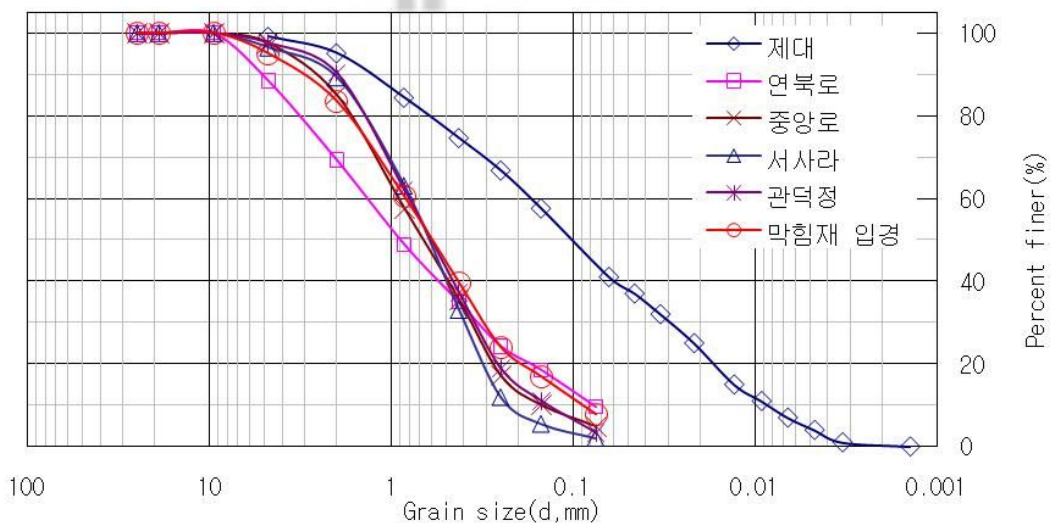


그림 2.5 각 지역별 공극막힘재의 입도분포곡선

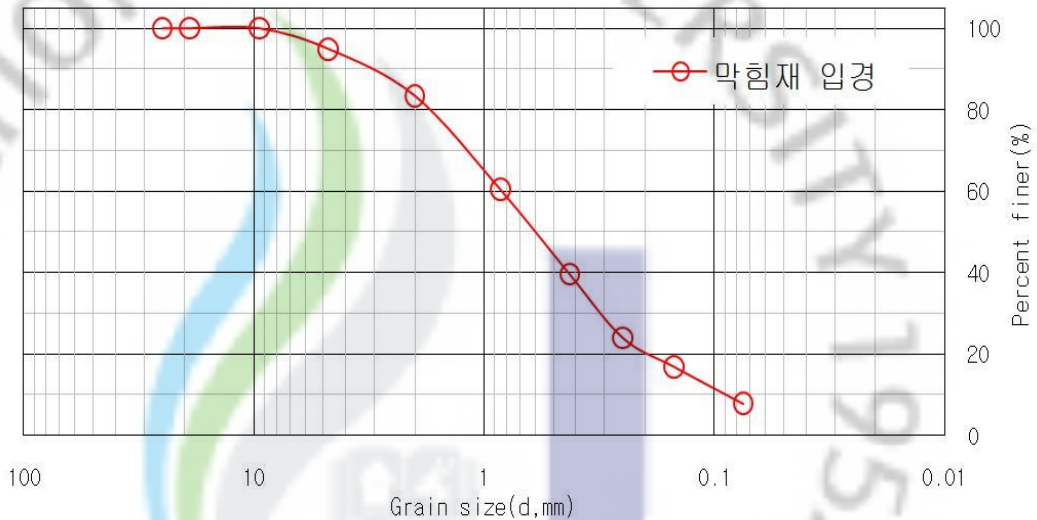


그림 2.6 각 지역별 공극막힘재로부터 산정된 공극막힘재의 입도분포곡선

## 2) 공극막힘재량 산정

공극막힘현상은 빗물과 비점오염원이 함께 투수콘크리트 표면으로 유입되어 누적으로 인한 공극막힘이 발생하게 된다. 이러한 공극막힘현상의 부유물질량(공극막힘재량)을 산정하기 위하여 최근 보고 된 2005년 조은일의 “제주지역에 배출되는 비점오염원의 관리방안 연구보고서”의 산정결과를 토대로 산정하였으며 산정방법은 다음과 같다.

### ① 조사지점 및 강우사상

조사지점을 제주지역 내 분류식 하수관거가 설치되어 강우 시 하수에 의한 영향을 배제할 수 있는 지역 내에서 <표 2.6>과 같은 네 개의 지역으로 구분하여 조사대상지역으로 선정하고 <표 2.7>과 같은 강우사상들에 대하여 강우유출수의 비점오염원에 대하여 조사를 하였다.

표 2.6 비점오염원의 조사대상 지역

구분	위치	유역면적( $m^2$ )
아파트지역	제주시 일도 2동 유역	62,811
단독주거지역	제주시 연동 1519번지 유역	75,218
공원지역	제주시 일도 2동 신산공원 유역	38,400
공업지역	제주시 화북 1동 지역	148,286

표 2.7 비점오염원의 강우특성과 강우사상

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)

주) ( ):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 채취하였고 조사 결과는 <표 2.8>과 같다.

표 2.8 현장 강우조건에 따른 지역별 SS량 (Unit : mg/L)

구분	단독주거지역	아파트지역	공원지역	공업지역
강우.1	-	11	194	-
강우.2	13.1	11.3	42.1	205.3
강우.3	13.8	16	-	160.6

위 <표 2.8>의 자료를 이용하여 공극막힘재량을 산정하기 위해 비점오염원의



원단위산정법을 사용하였다.

비점오염원의 원단위를 간단히 정의하면 단위시간당 단위 면적에서 배출되는 오염물질량을 말한다. 현재 사용되고 있는 원단위 산정법으로는 경험식 등을 이용한 계산법과 유역에서 유량과 오염부하량을 실측해서 산정하는 실측법이 있다. 본 실험에서는 공극막힘재량 산정을 위하여 경험식을 사용하였으며, 아래 <식 3.4>와 같다.

$$\text{원단위 (kg/ha/yr)} = P \times P_j \times C \times EMC \quad (3.4)$$

$P$  = 연평균강수량(1704.1mm/yr)  
 $P_j$  = 강우보정치  
 $C$  = 유출계수  
 (아파트, 단독주거지역 0.65, 공원 0.35, 공업지역 0.5)  
 $EMC$  = 유량가중평균농도

<식 3.4>에 각 강우사상에 대하여 연평균강수량, 강우보정치, 각 지역별 유출계수, 유량가중평균농도 (EMC)를 각각에 대입하여 원단위를 산정하였으며 네 개 지역의 산정 값을 평균을 내어 실내 정수위실험 시 투수실험체의 면적에 상응한 12개월에 해당되는 막힘재량을 산정하였으며, <표 2.9>에 나타내었다.

표 2.9 막힘재량 산정결과

	kg/ha/yr	g/ m <sup>2</sup> /yr	4개지역 평균 (g/ m <sup>2</sup> /yr)	투수실험체 면적 0.0177 m <sup>2</sup> 대입
아파트	14,141	1,414.1	6,383.28	112.98g
공원	70,409	7,040.9		
단독 거주지	14,898	1,489.8		
공업지역	155,883	15,588.3		

### 3) 공극막힘실험 결과

실험방법에서 산정 된 막힘재를 이용하여 1회 투입농도 0.27g/L, 0.80g/L, 1.07g/L, 1.61g/L를 각각 투수콘크리트로 일반적으로 사용되는 13mm 입경의 투수 실험체에 누적 통과시켜 막힘재의 농도에 따른 실험체의 투수계수 값을 산정

하고 막힘현상을 재현해 보았다.

본 연구에서는 투입되는 막힘재농도를 개월(Month)로 표현하여 투수계수와 비교 하였으며, 투수성 포장의 시공 시 투수계수는  $10^{-2} \text{cm/sec}$  이상을 기준으로 하므로 본 연구에서도 투수계수  $10^{-2} \text{cm/sec}$  을 투수성 포장의 수명한계로 보았다.

- 투수실험체에 막힘재를 1회 투입 농도 0.27g/L로 누적 통과 시켰을 때, 총67회 누적 통과 실시한 결과, 수명한계는 급극막힘재 투입에 따라 서서히 감소하여 약 37.5개월의 한계를 보였다.
- 투수실험체에 막힘재를 1회 투입 농도 0.80g/L로 누적 통과 시켰을 때, 총19회 누적 통과 실시한 결과, 수명한계는 약 24개월의 한계를 보였다.
- 투수실험체에 막힘재를 1회 투입 농도 1.07g/L로 누적 통과 시켰을 때, 총13회 누적 통과 시킨 결과 수명한계는 급격히 감소하여 약 20개월의 한계를 보였다.
- 투수실험체에 막힘재를 1회 투입 농도 1.61g/L로 누적 통과 시켰을 때, 총7회 누적 통과 시킨 결과 수명한계는 급격히 감소하여 약 11개월의 한계를 보였다.

실험결과는 <그림 2.7>에 나타내었으며, 현장입경의 막힘재를 사용한 결과이다. 더 작은 입경을 사용하면 투수성 수명의 한계치가 다른 결과를 보일 것으로 사료된다.

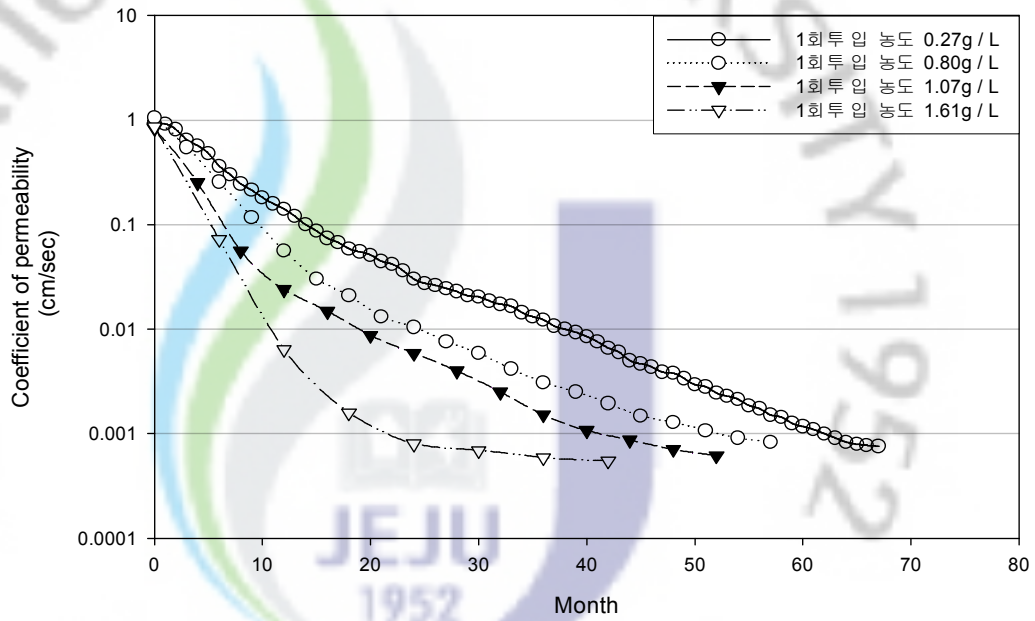


그림 2.7 공극막힘재량의 농도별 투수계수 산정결과



### III. 실험재료 및 실험방법

#### 3.1. 실험개요

본 장에서는 투수성 포장재의 특성에 영향을 미치는 시멘트, 혼화재 및 잔골재로 사용된 페아스팔트의 물리·화학적 특성에 대하여 기술하였다. 페아스팔트를 투수성 콘크리트의 잔골재로 사용함으로써 페아스팔트의 재활용 방안을 모색하였으며 각 재료의 혼합비율에 따른 물리적 특성의 변화와 압축강도 실험을 실시하였다. 이를 바탕으로 페아스팔트를 사용한 투수성 순환골재의 기초적 자료를 제시하고자 한다.

#### 3.2. 실험재료

##### 3.2.1. 페아스팔트

###### 1) 아스팔트의 성상

아스팔트의 분자구조를 살펴보면 <그림 3.1>과 같이 지방족, 순환형 및 방향족의 세가지 기본유형이 있다. 지방족(또는 파라핀족)은 직선형, 삼차원, 사슬형의 분자이며 성상은 “기름” 또는 “밀납”과 같다. 순환형(또는 나프텐족)은 삼차원의 포화탄소 고리에 여러 가지 원소가 붙어있다. 방향족은 평평한, 안정된 탄소고리이며, 쉽게 쌓아 올려지고 강한 냄새가 난다. 이 세유형의 분자들 모두는 여러 방법으로 상호작용을 하여 아스팔트의 물리적 화학적 거동에 영향을 준다.

분자들을 한데 모아두는 화학적 결합은 비교적 약하고 열이나 전단응력에 의해

서 쉽게 파괴된다. 이것은 아스팔트가 점탄성의 성질을 갖는 원인의 설명이 된다. 예를 들어 아스팔트가 가열되면 분자간 결합은 파괴되고, 아스팔트는 자유롭게 흐른다. 아스팔트가 냉각되면 약한 결합은 다시 형성되고 화학적 구조는 다시 이루어진다. 다만 반드시 가열전과 동일한 분자구조로 복원되는 것은 아니다.

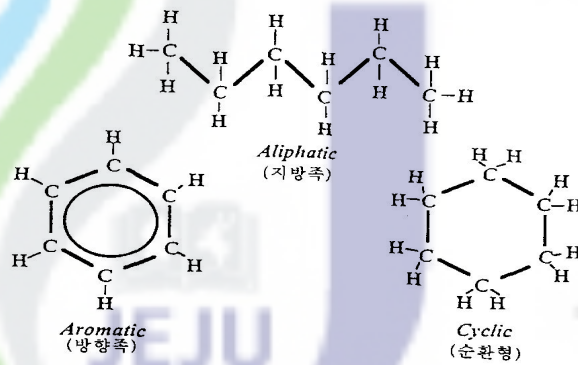


그림 3.1 아스팔트 분자의 유형

## 2) 페아스팔트의 성상

페아스팔트의 성상을 분석한 결과 <표 3.1>과 같이 침입도, 연화점, 신도, 점도에서 신재아스팔트와 유사한 결과를 보이고 있다.

표 3.1 페아스팔트의 성상분석

항목	페아스팔트	비고
침입도(25℃, 1/100mm)	32	
연화점(℃)	53.2	
신도(25℃, 5cm/min)	150이상	
화학적 조성(TLC분석)		
포화탄화수소, vol%	6.4	
Total Aromatics, vol%	93.6	
- 방향족 함량, vol%	40.1	
- 레진함량, vol%	33.3	
- 아스팔텐함량, vol%	20.2	

### 3) 물리적특성

본 연구에 사용된 시료는 제주도내에 위치한 건설폐기물사업장의 가공된 페아스팔트 순환골재를 대상 시료로 사용하였다.

#### ① 입도분석곡선

페아스팔트의 입도분석결과는 <그림 3.2>와 같으며 페아스팔트의 경우 2~10mm의 골재가 약65%이상을 차지하고 있으며 입자는 균질한 형태를 보였다. 또한 일반잔골재의 경우 2~10mm의 골재가 약 60%이상을 차지하고 있으며 입자는 균질한 형태를 보였다.

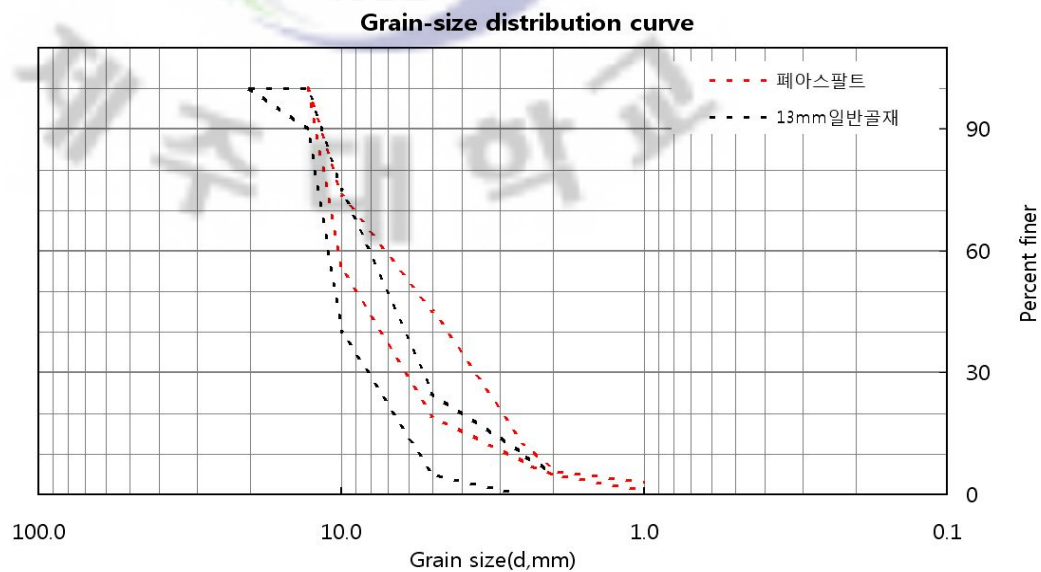


그림 3.2 입도분포곡선

### ② 비중실험

폐 아스팔트는 분쇄기로 분쇄한 뒤 건조로를 이용하여 35±5CENTIGRADE에서 완전 건조시켜 No.10(2.0mm)체를 통과한 시료를 KSF2308의 비중실험에 따라 입도조정 과정을 거친 후 실험에 사용하였다. 비중실험은 총 3회 5세트에 걸쳐 실험하였으며 그 결과 <표 3.2>와 같이 평균 비중값이 2.34로서 일반적인 골재의 비중값 2.65~2.70에 비해 작은 것으로 분석되었다.

표 3.2 비중실험 결과

시 료	비 중(Gs)	비 고
폐아스팔트	2.34	-

### ③ CBR분석

CBR실험결과는 <표 3.3>와 같으며 수정CBR값이 약 35로서 보조기층재로서의 조건에는 만족하나 입도조정기층재의 재료 조건에는 부적합한 것으로 분석되었다.

표 3.3 수정CBR실험 값

분 류	수정CBR값	비 고
보조기층재	30이상	-
입도조정기층재	80이상	-
폐아스팔트	35	-

#### 4) 화학적특성

##### ① XRF분석

페아스팔트의 화학성분을 분석하기 위해 XRF(X-ray Fluorescence Spectrometer)을 통하여 알아보았다. 화학성분 분석에 사용된 Glass bead 시편은 100℃의 온도에서 건조시킨 시료 0.5g과 용제(Li<sub>2</sub>B<sub>5</sub>O<sub>7</sub>, lithium tetraborate) 5g을 혼합하여 제작하였으며 검량선을 작성하여 정량하였다. L.O.I(Loss of Ignition)은 950℃의 온도에서 시료를 태운 후 무게를 측정하여 태우기 전 무게에서 얼마나 감소하였는지에 대한 무게 퍼센트를 나타내는 것이다. XRF를 통해 분석한 페콘크리트의 화학적 조성을 보면 실리카성분인 SiO<sub>2</sub>의 함량이 44.88%로 가장 큰 비율을 나타내었으며 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 14.39%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 10.28%, CaO의 함유율은 5.99%로 나타났다. 페아스팔트의 XRF분석결과는 <표 3.4>과 같다.

표 3.4 페아스팔트의 구성 성분

표본 구성 성분	페아스팔트(%)	현무암석분(%)	일반잔골재(%)
SiO <sub>2</sub>	44.88	52.66	46.29~62.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.39	14.67	13.90~19.65
TiO <sub>2</sub>	1.80	1.93	0.26~3.51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.28	11.06	4.25~13.59
MgO	3.44	6.33	0.1~8.69
CaO	5.99	8.31	1.02~10.32
Na <sub>2</sub> O	3.66	2.84	2.70~6.54
K <sub>2</sub> O	1.86	0.98	0.85~3.83
MnO	0.14	0.14	0.09~0.23
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.67	0.34	0.10~0.29
LOI	12.87	-	0.25~10.97

※ LOI : 점화 손실

## ② SEM분석

페아스팔트의 입자모양과 상태를 살펴보기 위하여 장방출주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, SEM JSM-6700F JEOL CO.LTD)사진을 통해 관찰한 결과는 <그림 3.3>와 같고 표면은 불규칙하고 미세 입자들로 이루어져 있으며 타르가 표면 전체를 덮고 있음을 알 수 있다. <그림 3.4>의 현무암 SEM 분석결과와 비교했을 때 현무암의 표면은 여러 겹의 결로 되어 있으며 날카로운 형태를 하고 있다.

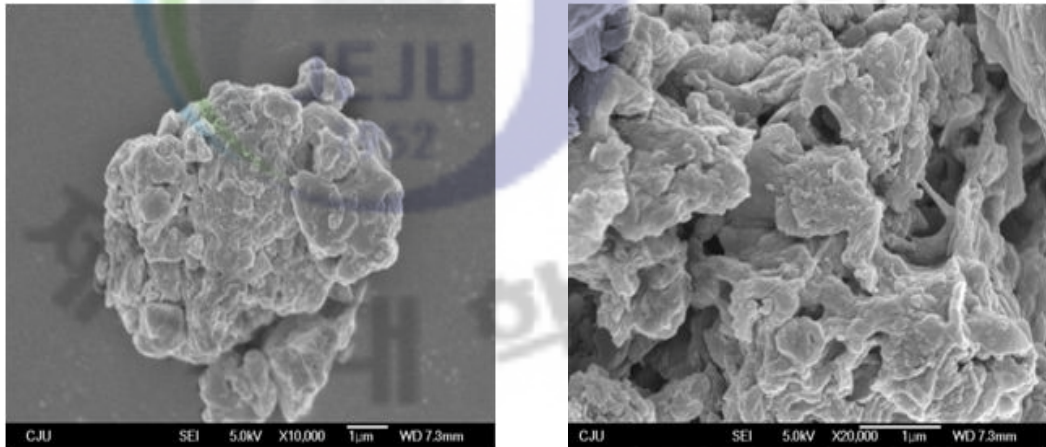


그림 3.3 페아스팔트의 SEM 촬영 결과 (×10,000)

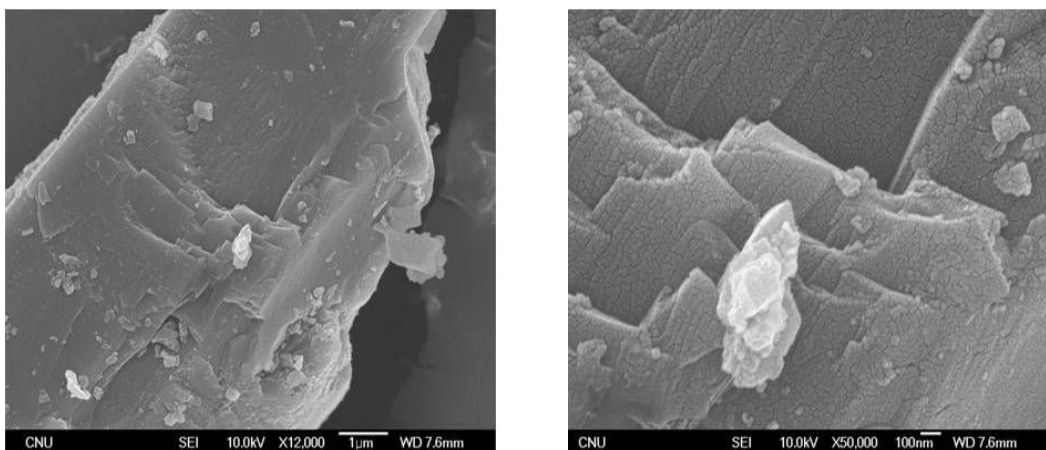


그림 3.4 현무암의 SEM 촬영 결과 (×10,000)



### ③ XRD분석

페아스팔트의 결정 구조를 알아보기 위해 X-Ray Diffractometer(XRD)를 통하여 알아보았다. 시료들의 최적의 입도와 균질성을 위해서 고밀도 분쇄기를 이용하여 분말상태의 시료를 준비 하였고, 분석은 구리 X-선 튜브(CuK $\alpha$ )를 사용하였고 가속 전압은 40Kv, 가속전류 주사방법은 2°/min의 속도로 연속 주사방법을 사용 하였다.

그 결과는 <그림 3.5>와 같다. 본 재료는 실험결과 조장석(NaAlSi $_3$ O $_8$ )과 회장석(CaAl $_2$ Si $_3$ O $_8$ )의 결합물인 안데신(andesine)이 검출되었고 이는 결정구조인 삼사정계 상태인 것으로 볼 수 있다. 비교를 위한 석분의 XRD 분석 결과를 보면 석분의 경우에는 장석이 주를 이루고 있는 것을 알 수 있다.

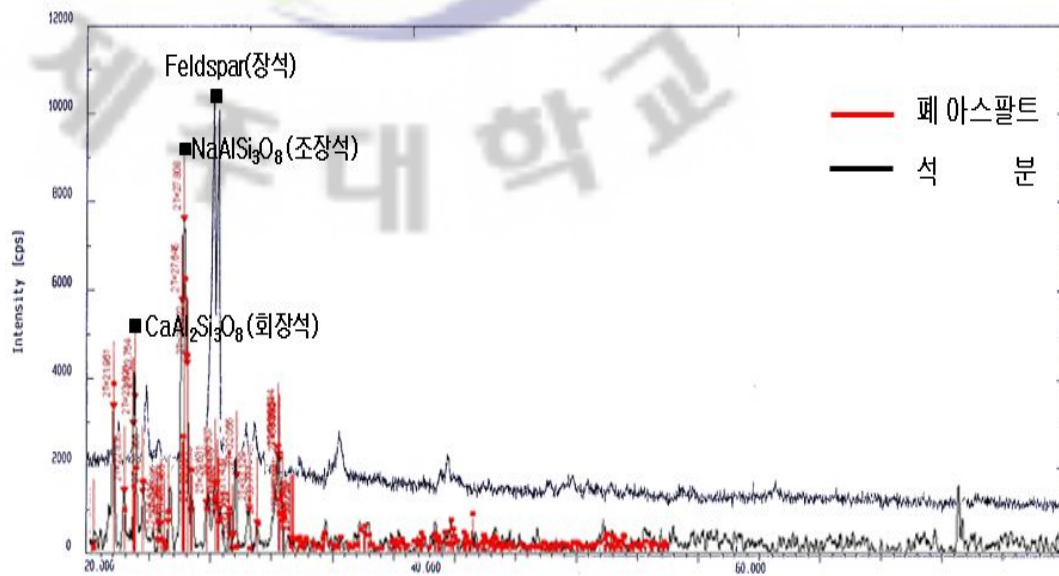


그림 3. 5 페아스팔트와 석분의 XRD 분석 결과

## 5) 페아스팔트의 환경적 유해성에 대한 영향 검토

일반적인 아스팔트콘크리트 포장은 석유 아스팔트, 조골재(10~40m/m), 세골재(모래), 석분을 소정의 입도에 맞게 배합설계하여 가열한 후 다짐하여 공기중 양생 안정된 상태로서 페아스콘의 환경적 유해성에 대한 영향을 검토하기 위하여 덩어리상태와 잘게 부수어진 입경 40mm 내외의 임의의 시료를 채취하여 자연상태에서 산성강우에 의한 용출성분 및 폐기물 공정실험방법상의 용출실험의 방법으로 하였으며 자연상태에서 페아스콘이 대기중에 노출되었을 때 주위환경에 미치는 영향을 검토하기 위해 접촉 가능한 용매를 세 가지로 설정하여 각각의 용출 분석 실험을 실시하였다.

### 가. 실험방법

#### (1) 용매설정

- pH를 조절하지 않은 증류수
- pH 5.8~6.3으로 절한 증류수 (폐기물공정실험법상의 실험방법)
- pH 4.5로 조절한 증류수 (산성비 접촉 가정)

#### (2) 시료액의 조제

아스팔트콘크리트 절삭물의 입경을 5mm미만으로 분쇄하여 체로 걸러서 입경이 0.5~5mm로 시료를 조제하고 제조한 시료 100g이상을 정확히 달아 각각의 용매(ml)를 1:10(W:V)의 비율로 2,000ml를 삼각플라스크에 넣어 혼합하였다.

#### (3) 용출조작

각각의 시료액의 조제가 끝난 혼합액을 상온·상압에서 진탕횟수가 매분당 약



200회, 진폭이 4~5cm의 진탕기를 사용하여 6시간 연속진탕한 다음 1.0 $\mu$ m의 유리섬유여과지로 여과하여 여과액을 적당량 취하여 용출실험용 검액으로 하였다.

(4) 분석항목 및 분석방법

표 3.5 분석방법

실험항목	①pH를 조절하지 않은 증류수	②pH 5.8~6.3으로 조절한 증류수 (폐기물공정실험기준:2008)	③pH 4.5로 조절한 증류수 (산성비 접촉 가정)	비고
Pb	-	3.0 이하	-	
Cu	-	3.0 이하	-	
As	-	1.5 이하	-	
Hg	-	0.005 이하	-	
CN <sup>-</sup>	-	1.0 이하	-	
Cr(VI)	-	1.5 이하	-	
Cd	-	0.3 이하	-	
PCE(mg/ℓ) 테트라클로로에틸렌	-	0.1 이하	-	
TCE(mg/ℓ) 트리클로로에틸렌	-	0.3 이하	-	
기름 성분	-	5%이내	-	

나. 분석결과

상기 언급한 실험방법을 통하여 아스팔트콘크리트 절삭물의 용출실험을 시행한바 납, 수은, 카드뮴 성분만이 미량 검출되었을 뿐 그 외 유해물질의 경우에는 검출되지 않는 것으로 조사되었으며 특히, 용매의 종류에 따라 유해물질의 용출정도는 검출된 물질의 경우 pH가 낮은 조건일수록 용출량이 많아지는 결과를 보이고 있으나 그 차이 또한 매우 적은 것으로 분석되었다.

표 3.6 용출실험 분석결과

실험항목	①pH를 조절하지 않은 증류수	②pH 5.8~6.3으로 조절한 증류수 (폐기물공정실험기준:2008)	③pH 4.5로 조절한 증류수 (산성비 접촉 가정)	비고
Pb(mg/ℓ)	검출 안됨	검출 안됨	0.011	
Cu(mg/ℓ)	검출 안됨	검출 안됨	검출 안됨	
As(mg/ℓ)	검출 안됨	0.062	0.071	
Hg(mg/ℓ)	검출 안됨	검출 안됨	검출 안됨	
CN <sup>-</sup> (mg/ℓ)	검출 안됨	검출 안됨	검출 안됨	
Cr(VI)(mg/ℓ)	검출 안됨	검출 안됨	검출 안됨	
Cd(mg/ℓ)	검출 안됨	0.002	0.003	
PCE(mg/ℓ) 테트라클로로 에틸렌	검출 안됨	검출 안됨	검출 안됨	
TCE(mg/ℓ) 트리클로로 에틸렌	검출 안됨	검출 안됨	검출 안됨	
기름 성분	4.684%	4.684%	4.684%	

### 3.2.2. 시멘트

본 실험에 사용한 시멘트는 국내에서 생산되는 D사의 1종 보통포틀랜드시멘트 (OPC)를 사용하였으며 시멘트의 물리·화학적 특성은 <표 3.7~3.8>와 같다.

표 3.7 시멘트의 화학적 구성

원 소	비 율(%)
$SiO_2$	21.71
$Al_2O_3$	5.46
$Fe_2O_3$	3.45
$CaO$	62.27
$MgO$	2.61
$SO_3$	2.11
손 실	0.89
총 계	98.50

표 3.8 시멘트의 물리적 특성

내 용	일반 포틀랜드 시멘트
강열감량 (%)	0.99
밀도 ( $kg/m^3$ )	2.9~2.95
섬도 ( $>45\mu m$ )	2.0
입자 직경( $\mu m$ )	10~13
특정표면 면적( $cm^2/g$ )	4,210
모르타르의 공기량(%)	3.46
비중	3.04

### 3.3. 실험계획

일반적인 콘크리트는 시멘트+굵은골재+잔골재+물+혼화제의 적정비율로 물/시멘트비의 범위가 40~60%이고 공극이 매우 작은 수밀한 상태를 요구한다. 그러나 투수성을 갖기 위한 투수콘크리트의 배합은 시멘트+골재+물+혼화제로 잔골재를 제외한 배합을 주로 사용하고 물/시멘트비는 대단히 작으며 불규칙한 연속공극을 필요로 한다. 본 연구는 잔골재를 제외한 배합으로 <표 3.9>과 같은 배합비를 사용하여 반복적인 실험을 통하여 배합비를 얻을 예정이다.

표 3.9 페아스팔트를 활용한 투수성 포장재의 배합비 (단위: kg)

단위골재량 (A)	C/A	시멘트(C)	W/C	물(W)	비 고
1,337	0.16	214	0.30	64	
	0.18	241	0.31	75	
	0.20	267	0.32	86	
	0.22	294	0.33	97	
	0.24	321	0.34	109	
	0.26	348	0.35	122	
	0.28	374	0.36	135	
	0.30	401	0.37	148	
	0.32	428	0.38	163	
	0.34	468	0.39	183	

### 3.4. 실험항목 및 실험방법

#### 3.4.1. 공시체 제작

시멘트와 페아스팔트 순환골재를 교반기에 함께 넣은 상태에서 건비빔을 행한 후 두 재료가 잘 섞이도록 충분히 교반되었을 때 배합수를 투입한 후 3분간 재차 교반 하고 이때 생성된 혼합물을 내경(d) 100mm, 높이(h) 200mm인 원통형 압축강도 실험용 공시체를 각 재령별로 3개씩 제작한다. 제작된 공시체는 공기중에서 수분이 증발되지 않도록 밀봉한 상태에서 48시간이 경과한 후에 탈형하여 소정의 기간 동안 습윤양생을 할 예정이다.

#### 3.4.2. 압축강도 실험

압축강도 실험은 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 실험방법)의 실험방법에 따라 제작된 공시체를 습윤양생하여 만능재료실험기로 압축강도를 측정할 것이다. 3개의 공시체 평균값을 실험결과로 채택할 것이며 압축강도 산정식은 <식 3.1>와 같다. <그림 3.5>은 만능재료실험기이며 <그림 3.6>는 제작될 공시체의 예시 사진이다.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (3.1)$$

여기서,  $\sigma_c$ : 압축강도(MPa)

$P$ : 최대하중(N)

$A$ : 공시체의 단면적(mm<sup>2</sup>)

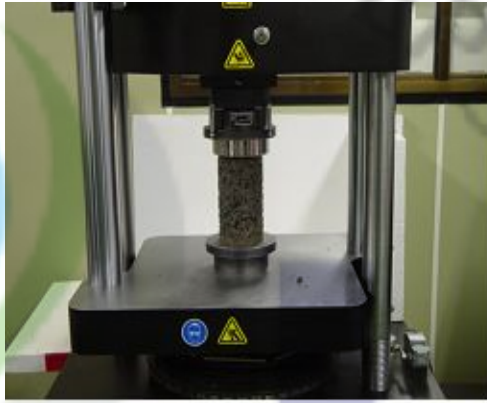


그림 3. 6 만능재료시험기



그림 3. 7 제작된 공시체 예

### 3.4.3. 투수실험

투수성 포장재의 강도증진에 관한 연구는 많이 이루어지고 있으나 투수성 포장재의 공극막힘(투수성한계)에 대한 연구는 미비한 실정으로 이에 대한 검증이 필요하다. 이에 본 연구과제에서는 실내투수실험(정수위투수실험)법을 이용하여 공극막힘현상을 분석하였다.

#### 1) 실내투수실험

정수위투수실험은 상류 측의 수위를 일정하게 유지하고 일정 두께의 시료를 통과하는 침투수량에 의하여 투수계수를 측정하는 실험방법으로 일반적으로 투수성이 작



은 흙에 대해서는 침투수량이 작기 때문에 부정확하게 되어 비교적 투수성이 큰 흙에 사용되어진다.

본 연구에서는 실내정수위투수실험법을 사용하였고 정수위투수실험 장치는 <그림 3.8>과 같은 구조로 되어 있으며,  $\Phi 15 \times 10 \text{cm}$ 의 투수콘크리트 공시체를 <그림 3.9>와 같이 제작한 투수실험기를 이용하여 실험하였으며 <식 3.3>에 의해 투수계수를 산정하였다.

$$K = \frac{QL}{Ah(t_2 - t_1)} \quad \text{..... (3.3)}$$

$K$ : 투수계수 ( $\text{cm/sec}$ )

$L$ : 시료의 높이 ( $\text{cm}$ )

$A$ : 시료의 단면적 ( $\text{cm}^2$ )

$h$ : 수두 ( $\text{cm}$ )

$Q$ : ( $t_2 - t_1$ )시간내에 유통한수량 ( $\text{cm}^3$ )

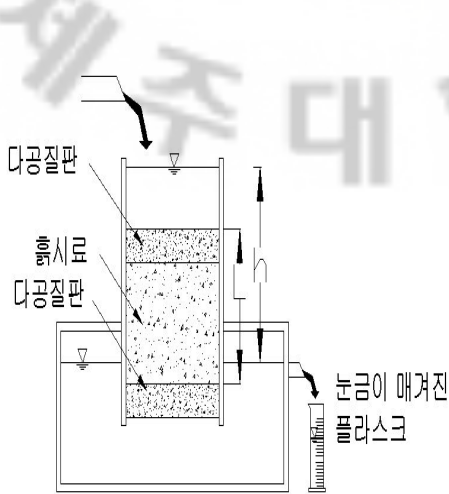


그림 3.8 정수위투수실험 장치

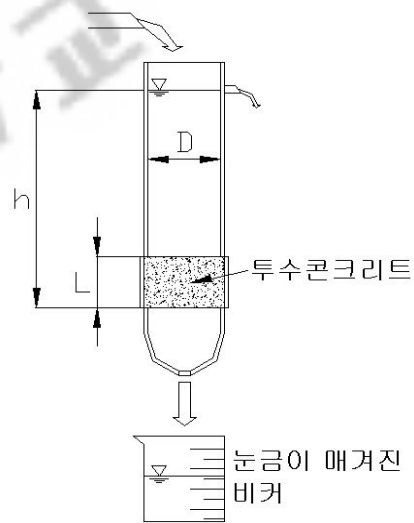


그림 3.9 변수위투수실험 장치

## 2) 현장투수실험

현장투수실험은 현장여건 상 변수위투수실험을 행할 것이고 변수위투수실험은 다져진 점토와 같이 투수성이 작은 시료에 대하여 행한다. <그림 3.10>은 현장

변수위투수실험기의 모식도이고 투수계수의 산정은 <식 3.4>를 이용하여 구한다. 실험방법은 유점토나 실리콘을 기함기 저면에 미리 부착시켜 노면과 접촉면에서의 누수를 방지한 다음 측정이 이루어진다.

$$K = 2.3 \frac{aL}{AT} \cdot \log\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \dots\dots\dots (3.4)$$

- $K$ : 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 ( $sec$ )

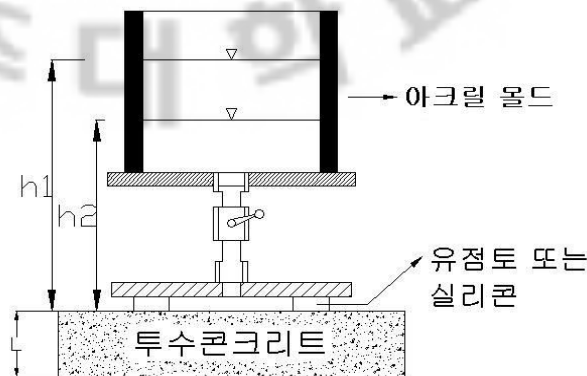


그림 3.10 현장 변수위투수실험기의 모식도

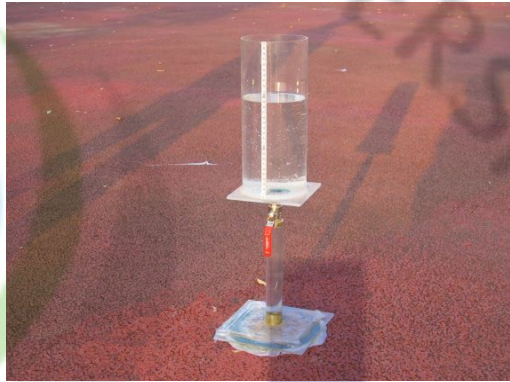


그림 3.11 현장투수실험 계측 전경

실험대상지역은 (주)청봉환경내 실험포장 현장이며 페아스팔트를 활용한 투수성 포장재를 실험 시공하여 현장투수실험을 수행할 예정이다. <그림 3.13>은 현장투수실험 계측의 예이다.

#### 3.4.4. 공극률실험

페아스팔트를 활용한 투수성 포장재는 공극의 확보와 더불어 공극이 지닌 특성이 중요하다. 투수성 포장으로 기능을 발휘하기 위해서는 공극은 <그림 3.12>와 같이 연속성과 불규칙성, 그리고 개방형을 확보하고 있어야 투수성 포장재로서의 기능을 수행할 수 있다. 투수성 포장재의 공극은 우수 등이 관통하여야 하므로 공극은 연속적이 되어야 한다. 그러나 연속성만을 위해 공극이 일직선으로 조성되는 경우포장면의 다른 임의의 하중에 의해 포장층 하부의 재료들이 역류할 우려가 있으므로 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 불투수성 포장재는 내부의 공극을 최소화하여 밀실하게 제조하는 반면 투수성 포장재의 경우, 소요의 투수성을 유지하기 위하여 공극률 15% 정도 및 연속공극률이 최소한 확보되어야 한다는 연구를 발표하였다(문한영, 1999).

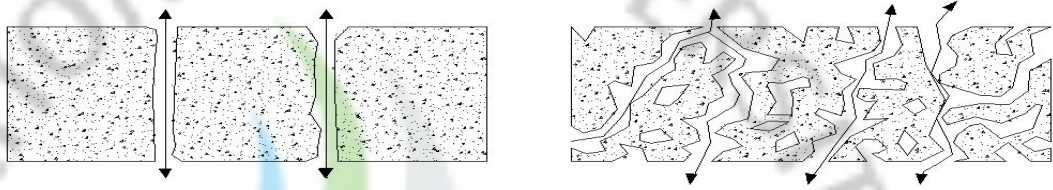


그림 3.12 공극의 개방성과 불규칙성

공극률실험은 제작한  $\Phi 13 \times 10 \text{cm}$ 의 공시체를 2시간 수침 시켜 공시체가 완전히 포화된 후 꺼내 기울여 15분 간격으로 위아래를 뒤집어 공극내의 물이 빠져나가게 한 후 물이 일정하게 담긴 메스실린더에 넣어 1시간 후 공시체의 진부피를 측정한다. 실험은 3개의 공시체를 실험하여 산술평균하며 공극률은 <식 3.5>를 이용하여 계산한다.

$$\text{공극률}(\%) = \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right) \times 100 \dots\dots\dots (3.5)$$

$V_1 =$  공시체의 진부피( $\text{cm}^3$ )  
 $V_2 =$  공시체의 겉보기부피( $\text{cm}^3$ )

## IV. 실험결과

### 4.1. 배합인자별 특성

#### 4.1.1. 압축강도

##### 1) 물/시멘트비와 단위시멘트량에 따른 압축강도

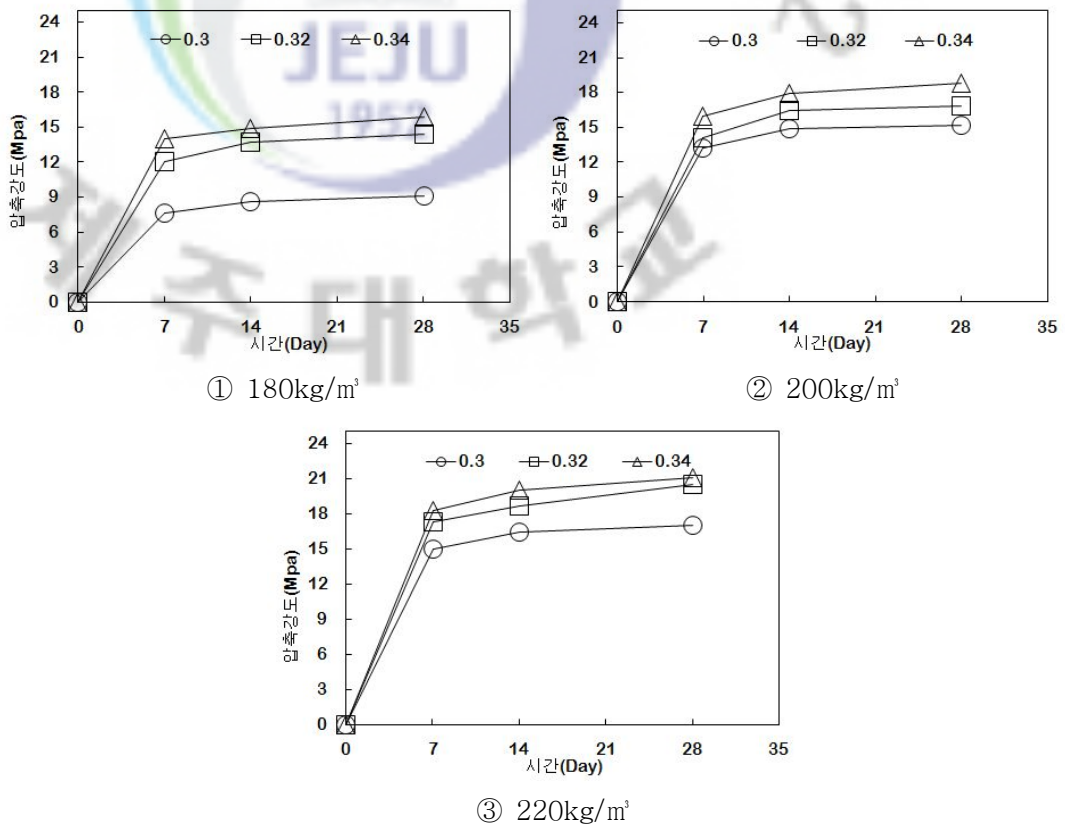


그림 4.1 물/시멘트비와 단위시멘트량에 따른 압축강도

페아스팔트를 활용한 투수성 포장재(투수성 콘크리트)의 단위시멘트량과 물/시멘트비에 따른 재령별 압축강도를 <그림 4.1>와 같이 나타내었다. 단위시멘트량이 증가할수록 투수성 콘크리트의 압축강도는 비례적으로 증가하는 경향을 나타

냈으며 단위시멘트량이 20kg/m<sup>3</sup>씩 증가함에 따라 압축강도는 2.6~3.8%정도 상승되었다. 이는 고품분인 시멘트량의 증가로 인한 공극률 감소와 단위체적중량 상승에 따른 것으로 사료된다. 또한 보통콘크리트의 특성 중 압축강도는 물/시멘트비가 낮을수록 증가되는 것으로 알려져 있다. 하지만 투수성 콘크리트의 경우는 슬럼프가 거의 없는 빈배합의 형태로 물/시멘트비에 따른 압축강도의 특성이 일정한 경향을 나타내기가 매우 어렵다.

2) 공극률에 따른 압축강도

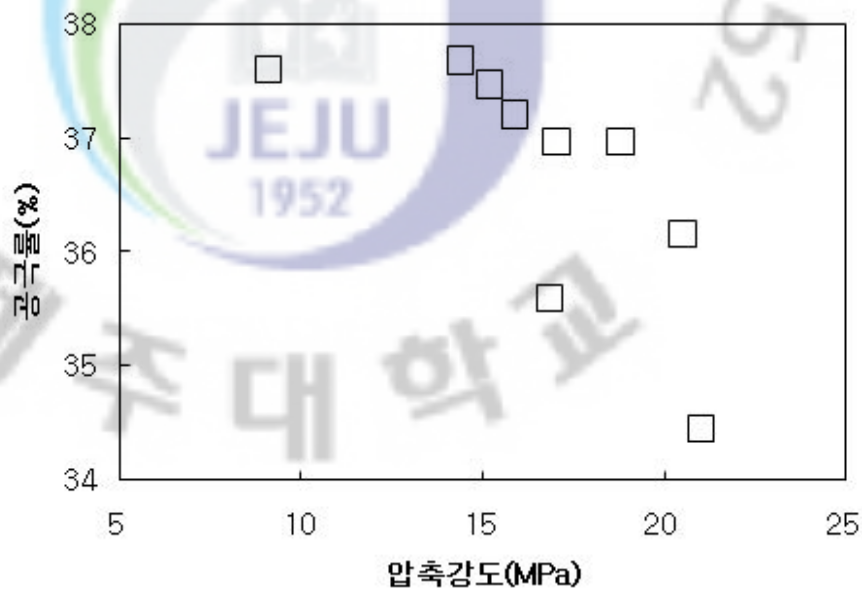


그림 4. 2 공극률에 따른 압축강도

페아스팔트를 활용한 투수성 포장재(투수성 콘크리트)의 공극률에 따른 압축강도를 <그림 4.2>과 같이 나타내었다. 일반적으로 잔골재의 비율이 높을수록 단위체적 내의 공기량은 감소되고 고품분이 많아짐에 따라 빈 공간을 채움으로써 단위체적중량이 증가하기 때문에 압축강도의 상승을 예상할 수 있다. 하지만 투수성 콘크리트에서는 잔골재를 제외한 빈배합으로 불규칙한 연속공극을 필요로 함에 따라 투수성 콘크리트의 압축강도는 공극률이 0.48~1.88% 증가할 경우 압축강도는 0.52~1.96MPa정도 감소하는 것으로 나타났으며 37%이상 공극률의 증가는 곤란하다는 것을 알 수 있다.



### 3) 공극률과 투수계수

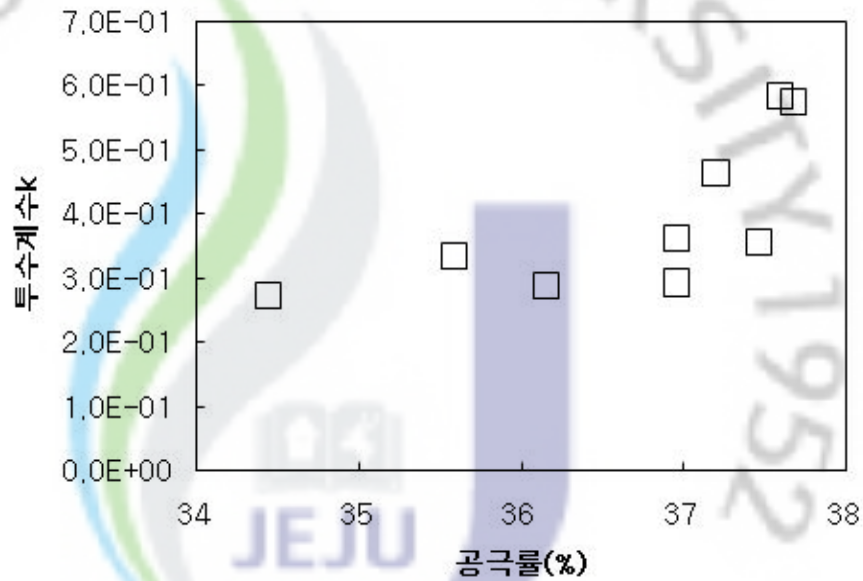


그림 4.3 공극률에 따른 투수계수

페아스팔트를 활용한 투수성 포장재(투수성 콘크리트)의 공극률에 따른 투수계수를 <그림 4.3>과 같이 나타내었다. 공극률이 0.48~1.88% 증가할 경우 투수계수 0.1E-01cm/sec 정도의 투수성능이 향상되는 경향을 보였다.

## 4.2. 배합설계

### 4.2.1. 투수계수에 따른 압축강도

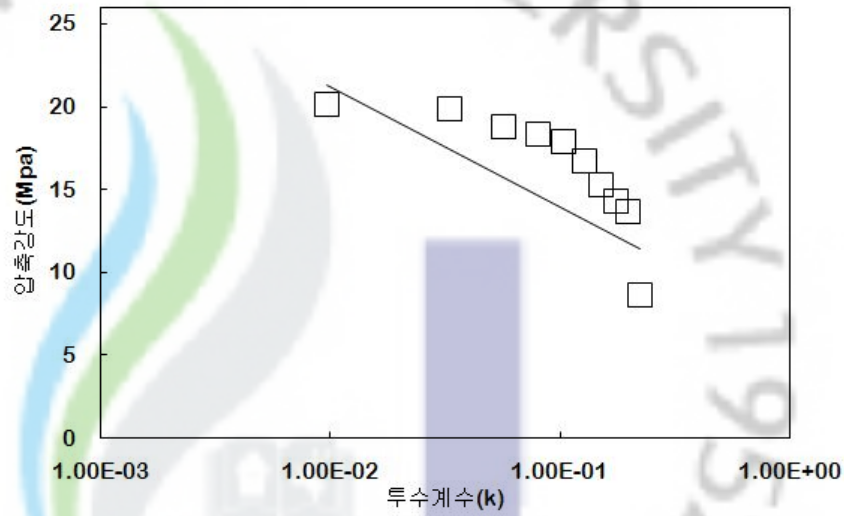


그림 4.4 투수계수에 따른 압축강도

<그림 4.4>와 같이 투수성 콘크리트의 압축강도는 투수계수에 따라 변화하며 서로 상관관계를 이룬다. 이들의 관계는 <식 4.5>와 같이 나타내었다.

$$\sigma_{28} = -46.19k + 21.71 \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

$$R^2 = 0.878$$

여기서,  $\sigma_{28}$ : 28일 압축강도(MPa)

$k$ : 투수계수(cm/sec)

단위골재량을 기준으로 시멘트비율이 증가함에 따라 물/시멘트비를 변화시켰을 때의 압축강도와 투수계수를 실내실험을 통하여 측정하였으며, 이들의 상관관계로부터 소요 28일 압축강도(또는 설계기준강도)에 따른 투수계수를 <식 4.5>로부터 구할 수 있다.

#### 4.2.2. C/A와 투수계수의 상관관계

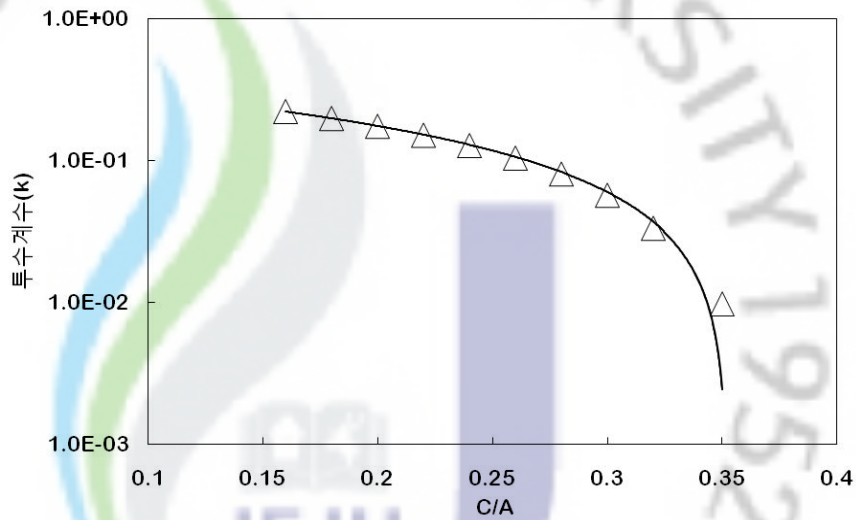


그림 4.5 C/A와 투수계수의 상관관계

<그림 4.5>과 같이 투수성 콘크리트의 투수계수는 단위골재량의 시멘트비율에 따라 변화하며 서로 상관관계를 이룬다. 이들의 관계는 <식 4.7>과 같이 나타내었다.

$$k = 1.146(C/A) + 0.403 \dots\dots\dots (4.7)$$

$$R^2 = 0.998$$

여기서, C/A: 단위골재량의 시멘트비율

투수계수가 정해지면 <식 4. 7>로부터 필요한 시멘트비율을 구할 수 있다.

#### 4.2.3. W/C와 C/A의 상관관계

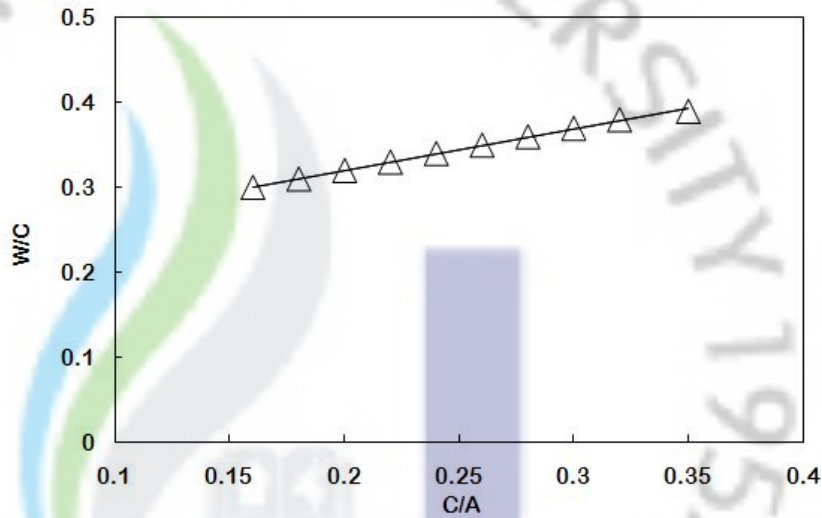


그림 4.6 W/C와 C/A의 상관관계

단위골재량을 기준으로 시멘트비율이 증가함에 따라 물/시멘트비를 변화시켜 플로우 값이 거의 발생하지 않도록 하여 최소한의 유동성만을 확보하였다. <그림 4.6>과 같이 시멘트비율과 물/시멘트비는 서로 상관관계를 이루며 시멘트비율이 정해지면 <식 4.9>로부터 물/시멘트비를 구할 수 있다.

$$W/C = 0.558(C/A) + 0.209 \dots\dots\dots (4.9)$$

$$R^2 = 0.990$$

여기서, W/C: 물/시멘트비(%)

C/A: 단위골재량의 시멘트비율

#### 4.2.4. 배합설계 과정

소요 28일 압축강도가  $\sigma_{28} = 18\text{MPa}$ , 투수계수  $k = 1.0\text{E}-02\text{cm/sec}$  이상인 페아스팔트를 활용한 투수성 포장재료(투수성 콘크리트)를 제작하려 한다. 배합설계의 경계조건으로 시멘트는 보통 포틀랜드시멘트, 골재는 페아스팔트를 분쇄한 후 13mm이하의 페아스팔트 순환골재를 사용한다. 배합설계 결과는 <표 4.1>에 나타내었다. 단, 단위골재량은 단위체적내 최대골재량  $1337\text{kg/m}^3$ 을 단위골재량으로

선정하였다.

1) 소요 28일 압축강도(또는 설계기준강도)가 정해지면 시멘트비율과 압축강도의 상관관계로부터 <식 4.5>에 대입하여 필요한 투수계수  $k=8.0E-02\text{cm/sec}$ 를 구할 수 있다.

2) 투수계수  $k=8.0E-02\text{cm/sec}$ 을 <식 4.7>에 대입하여 필요한 단위골재량의 시멘트비율  $C/A=0.28$ 을 구할 수 있다.

3) <그림 4.6>과 같이 시멘트비율과 물/시멘트비는 서로 상관관계를 이루며 단위골재량의 시멘트비율  $C/A=0.28$ 을 <식 4.9>에 대입하여 물/시멘트비  $W/C=36\%$ 를 구할 수 있다.

표 4.1 배합설계 결과

W/C(%)	C/A	단위중량(kg/m <sup>3</sup> )		
		시멘트량(C)	물량(W)	골재량(A)
36	0.28	374	134	1,337

#### 4.2.5. 배합설계기준에 따른 압축강도실험 결과

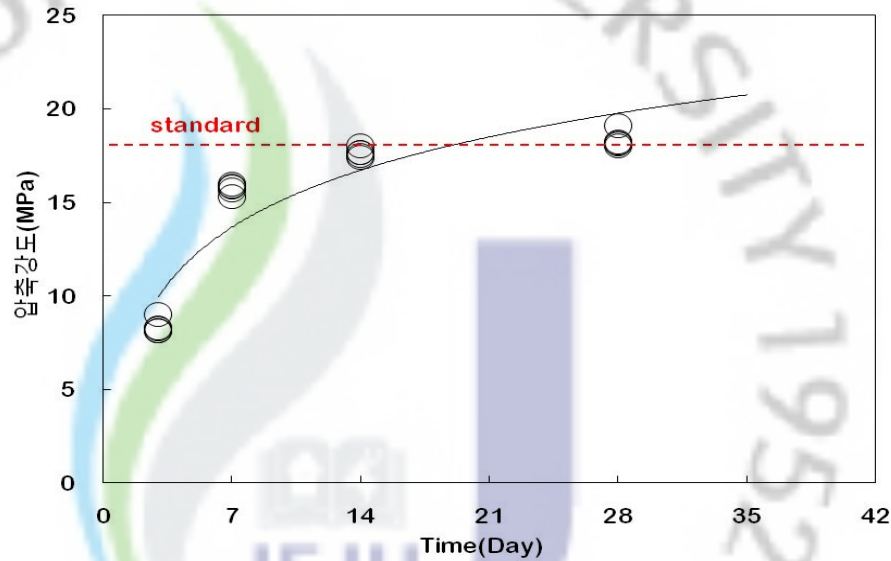


그림 4. 7 배합설계기준에 따른 압축강도실험 결과

앞서 설계된 배합조건을 기준으로 소요 28일 압축강도가  $\sigma_{28}=18\text{MPa}$ , 투수계수  $k=8.0\text{E}-02\text{cm}/\text{sec}$ 인 페아스팔트를 활용한 투수성 포장재(투수성 콘크리트)를 제작하였다. <그림 4. 7>와 같이 총5회의 압축강도실험결과 28일 압축강도가 18.2~19.5MPa로 설계강도 이상의 압축강도를 발현하였으며 투수계수는  $k=7.3\text{E}-02\text{cm}/\text{sec}$ 로 설계 기준보다  $7.0\text{E}-03\text{cm}/\text{sec}$ 정도의 오차를 보였다.

#### 4.2.6. 현장투수실험

실험대상지역은 제주도 봉개동 C산업에서 이루어졌으며 실험결과는 <표 4. 2>과 같으며, 현장변수위투수실험은 실내실험을 통하여 얻어진 소요 28일 압축강도의 설계배합비를 기준으로 <그림 4. 8>와 같이 현장시공하여 투수계수를 측정하였다. 현장 투수실험결과 A, B두지역의 투수계수가  $7.1\text{E}-02\text{cm}/\text{sec}$ 로 측정되었으며 실내 정수위투수실험 결과와 비교 하였을때  $2.0\text{E}-03\text{cm}/\text{sec}$ 정도의 오차를 보였다.



표 4. 2 현장 변수위투수 실험결과

No.	A	B
투수계수 (cm/sec)	7.1E-02	7.1E-02

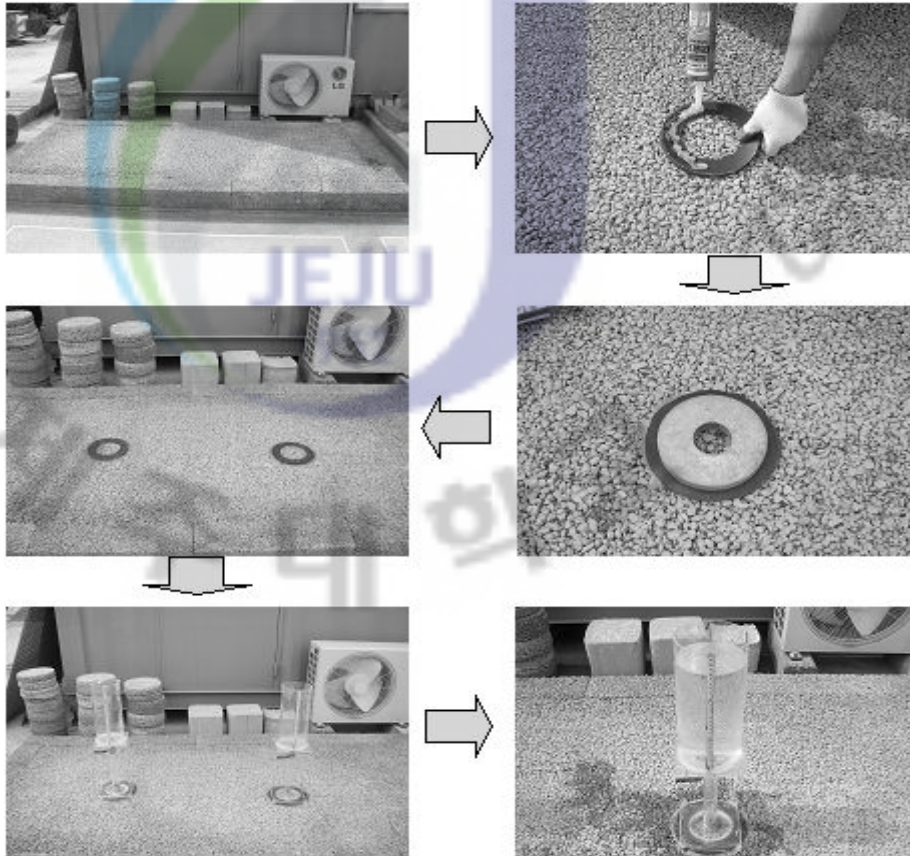


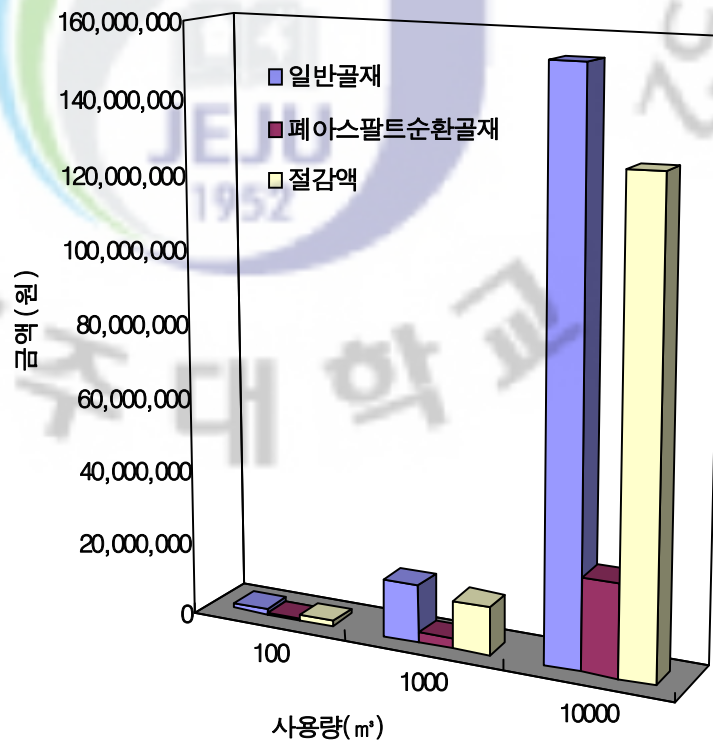
그림 4. 8 현장 투수실험 계측사진

### 4.3. 경제성 분석

<표 4. 3>은 골재별 1m<sup>3</sup>당 단가이다. 일반 13mm골재와 페아스팔트 순환골재의 대량 사용 시의 경제성을 <그림 4. 9>과 같이 비교해 보았다. 100m<sup>3</sup> 사용 시 재료비 절감액은 1,290,000원이며 10000m<sup>3</sup> 사용 시에는 증가된 사용량과 비례하여 절감액이 129,000,000원이며 83.76%의 재료비 절감효과를 확인할 수 있다.

표 4.3 골재별 1m³당 단가 비교

구 분	일반 13mm골재	페아스팔트 순환골재(13mm)
단가(m³/원)	15,400	2,500



<그림 4.9> 사용량별 금액 및 절감액

## V. 결론 및 활용계획

### 5.1. 결론

본 연구에서는 페아스팔트를 활용한 투수성 포장재(투수성 콘크리트)의 단위골재량, 단위골재량의 시멘트 비율, 물/시멘트비의 혼합을 변화에 따른 역학적 특성과 구조체로서 요구되는 소요강도에 대하여 실내시험을 통하여 분석하였으며, 투수성 콘크리트의 투수성능에 대한 기초적 특성을 분석하였다.

가. 페아스팔트 순환골재의 일반잔골재 대체 가능성 분석결과

- 1) 입도분석결과 페아스팔트의 경우 2~10mm의 골재가 약65%이상을 차지하고 입자는 균질한 형태를 보였으며 일반잔골재의 경우 2~10mm의 골재가 약60%이상을 차지하고 입자는 균질한 형태를 보였다.
- 2) 비중실험결과 페아스팔트 비중이 2.34로 일반잔골재 비중값 2.65~2.7에 비해 작은 것으로 분석되었다.
- 3) CBR분석결과 페아스팔트의 수정CBR값이 35로서 보조기층재로서는 적합하나 입도조정기층재로서는 부적합한 것으로 분석되었다.
- 4) XRF분석결과 페아스팔트의 구성성분이 일반잔골재의 구성성분범위내에 속하는 것으로 분석되었다.
- 5) KRDb 분석결과 페아스팔트는 조장석과 회장석이 주 구성성분이고 일반잔골재의 경우에는 장석이 주 성분으로 분석되었다.
- 6) SEM분석결과 페아스팔트는 불규칙한 타르입자들로 덮여 모가 발달하지 않았으며 일반잔골재는 여러겹의 결로 되어 있으며 모가 발달하여 날카로운 형태를 보였다.
- 7) 용출실험분석결과 유해물질 함유량이 기준치 이하로 분석되었다.

물리 화학적 특성 분석결과 페아스팔트 순환골재는 일반잔골재 대체 재료로서

사용 가능할 것으로 분석되었다.

나. 일반적으로 투수성 콘크리트의 압축강도는 18MPa이상을 기준으로 하며, 13mm 페아스팔트 순환골재를 활용한 투수성콘크리트의 압축강도는 18.2~19.5MPa로 투수성 콘크리트의 구조체로서 사용에 무리가 없음을 확인하였다.

다. 투수성 콘크리트의 투수성을 분석한 결과 실내정수위투수실험과 변수위투수실험에서 투수계수가 각각  $8.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 와  $7.3 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 으로 일반적인 투수성 콘크리트의 수명한계선 기준인  $1.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 을 상회하는 것으로 분석되었으며, 투수성 확보에 무리가 없을 것으로 판단된다.

단, 13mm이하의 투수콘크리트의 한계수명은 제2장의 투수콘크리트의 공극 막힘현상 재현에서와 같이 최소 11개월에서 최대 37.5개월까지로 알려져 있는바 장기적 투수성을 확보하기 위한 방안을 모색해야 할 것이다.

라. 페아스팔트를 활용한 투수성콘크리트의 경제성 분석 결과 일반 13mm 골재 단가가 15,400원/m<sup>3</sup>, 페아스팔트 순환골재 단가가 2,500원/m<sup>3</sup>일 경우 사용량에 비례하여 83.76%의 절감 효과를 보이는 것으로 분석 되었다.

## 5.2. 연구결과의 활용계획

지자체에서 추진중인 “저탄소 녹색성장도시 조성을 위한 기후변화대응 실천과제(45개)”항목 중 “자전거 이용 활성화 인프라 구축, 친환경적이며 집중호우에 강한 도로건설”과 상응하는 내용이며, 이를 위한 대안방안으로 활용할 것이다. 또한 주차장, 채움재, 호안블럭 등 일반 토목구조물의 투수성 포장재료로 활용할 것이다.

## 참 고 문 헌

강영민, 2010, 폐콘크리트 잔분을 이용한 경량기포콘크리트의 역학적 특성, 제주대학교 석사학위논문, pp.

김기영, 2007, 현무암석분슬러지의 공학적 특성 및 활용방안 연구, 제주대학교 박사학위논문, pp.

김선태, 2002, 투수성 포장공법의 시공실태 및 개선방안에 관한연구, 한양대학교 석사학위논문, pp.

김성은, 2008, 송이 및 현무암 석분을 이용한 탄성포장재의 중금속제거에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, pp13~19.

김승현, 2008, 투수성 탄성포장재의 투수성 향상 및 친환경적 개발에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, pp.4~18

김영일, 2008, 친환경 투수성 탄성포장재 개발에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, pp.

류남형, 강호철, 1998, 투수성 포장재의 물리적 특성에 관한 연구(I), 진주대학교 건설기술연구소보, Vol. 1, pp.243~250

이용남, 2008, 투수콘크리트의 공극막힘현상에의한 투수성 검토, 제주대학교 석사학위논문, pp.

건설교통부, 2006, 순환골재 품질기준 pp.

Braja M. Das, Fifth Edition, Principles of Geotechnical Engineering



부  
록





YOUR PARTNER FOR THE BEST QUALITY

# TEST REPORT

우 415-871 경기도 김포시 월곶면 고막리 7-6

TEL (031)999-3000

FAX (031)999-3001

성적서번호 : TAH-004540

접수 일자 : 2010년 07월 06일

대표자 : 이호원

시험완료일자 : 2010년 07월 16일

업체명 : 제주대학교신학협력단

주소 : 제주 제주시 아라1동

시료명 : 페아스팔트 순환골재

## 시험결과

시험항목	단위	시료구분	결과치	시험방법
Pb	ng/L		검출안됨	폐기물공정시험기준 : 2008
Cu	ng/L		검출안됨	폐기물공정시험기준 : 2008
As	ng/L		0.062	폐기물공정시험기준 : 2008
Hg	ng/L		검출안됨	폐기물공정시험기준 : 2008
CN <sup>-</sup>	ng/L		검출안됨	폐기물공정시험기준 : 2008
Cr(VI)	ng/L		검출안됨	폐기물공정시험기준 : 2008
Cd	ng/L		0.002	폐기물공정시험기준 : 2008
테트라클로로에틸렌	ng/L		검출안됨	폐기물공정시험기준 : 2008
트리클로로에틸렌	ng/L		검출안됨	폐기물공정시험기준 : 2008

\* 관련기준 : 폐기물관리법시행규칙 [별표1] 지정폐기물에 함유된 유해물질

Pb 3, Cu 3, As 1.5, Hg 0.005, Cd 0.3, Cr(VI) 1.5, 시안 1,

유기인 1, TCE 0.3, PCE 0.1 mg/L, 기름성분 5 % 이상 함유

용도 : 자체참고용

비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.

2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

**Byung-Soo Kang**

시험원 : 감봉수  
Tel : 031-999-3154

**Jun-Hee Lee**

기술책임자 : 이준희  
E-mail : ljh554@ktr.or.kr

2010년 07월 16일

**KTR** 한국화학융합시험연구원





YOUR PARTNER FOR THE BEST QUALITY

# TEST REPORT

우 415-871 경기도 김포시 월곶면 고막리 7-6

TEL (031)999-3000

FAX (031)999-3001

성적서번호 : TAH-006947

접수 일자 : 2010년 10월 07일

대표자 : 이호원

시험완료일자 : 2010년 10월 13일

업체명 : 제주대학교산학협력단

주소 : 제주 제주시 아라1동

시료명 : 페아스팔트

## 시험결과

시험항목	단위	시료구분	결과치	시험방법
기름성분	%		4.684	폐기물공정시험기준 : 2008

\* 관련기준 : 폐기물관리법시행규칙 [별표1] 지정폐기물에 함유된 유해물질  
기름성분 5% 이상 함유

용도 : 품질관리용

비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.  
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

**Byung-Soo Kang**

시험원 : 강병수  
Tel : 031-999-3154

**Jum-Hee Lee**

기술책임자 : 이준희  
E-mail : ljh554@ktr.or.kr

2010년 10월 13일

**KTR 한국화학융합시험연구원**



기초과학공동기기원 X-선형광분석기실



서울대학교 기초과학공동기기원  
 SEOUL NATIONAL UNIVERSITY  
 NATIONAL CENTER FOR INTER-UNIVERSITY FACILITIES

151-742 서울특별시 관악구 관악로 599  
 139동 306호  
 Tel : (02) 880-5822  
 Fax : (02) 884-6661

\* Data Sheet NO. : 2010/07/07

- 1. Requester : 전주섭
- 2. Department : 제주대학교
- 3. Instrument : XRF1700
- 4. Sample Number : 총 1개
- 5. Analytical Condition :  
 \* Model : Shimadzu XRF - 1700

6. Results :

Sample	SiO2	Al2O3	TiO2	Fe2O3	MgO	CaO	Na2O	K2O	MnO	P2O5	LOI	Total
페아스팔트	44.88	14.39	1.80	10.28	3.44	5.99	3.66	1.86	0.14	0.67	12.87	99.99

Unit : wt%

Fe2O3\* : Total Fe

n.d. : not detected

L.O.I. : loss on Ignition

\* LOI = [ (도가니+시료)LOI전 - (도가니+시료)LOI후 ] / (시료 무게) \* 100

LOI(Loss On Ignition)은 950도의 온도에서 시료를 태운후의 무게를 측정하여 태우기 전의 무게에서 얼마나 감소하였는지에 대한 무게퍼센트입니다.

\* 본 공동기기원의 분석결과는 광고, 선전, 홍보 및 법적 수단으로 이용될 수 없습니다.

2010년 7월 7일  
 서울대학교 기초과학 공동 기기원장

기초과학공동기원 고분해능 X-선 회절분석기실



서울대학교 기초과학공동기원

SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

NATIONAL CENTER FOR INTER-UNIVERSITY FACILITIES

151-742 서울특별시 관악구 관악로 599

139동 306호

Tel : (02) 880-5822

Fax : (02) 884-6661

\* Data Sheet NO. : 2010/07/07

1. Requester : 김결현

2. Department : 제주대학교

3. Instrument : HRXRD

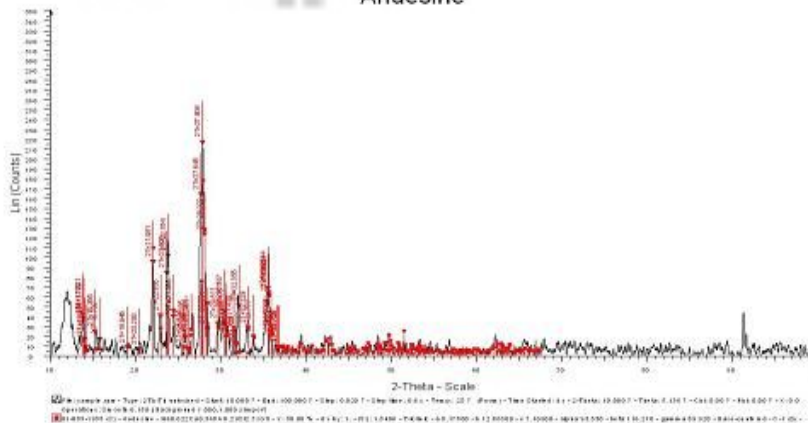
4. Sample Number : 총 1개

5. Analytical Condition :

\* Model : Bruker D8 DISCOVER (Germany)

6. Results

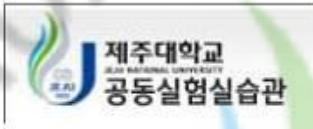
Andesine



\* 본 공동기원의 분석결과는 광고, 선전, 홍보 및 법적 수단으로 이용될 수 없습니다.

2010년 7월 7일

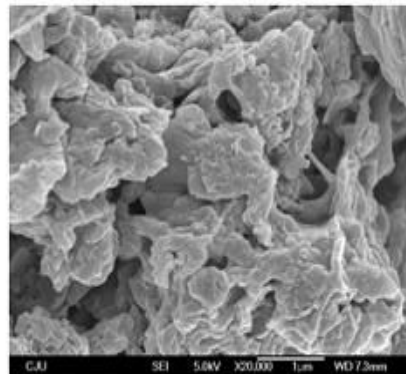
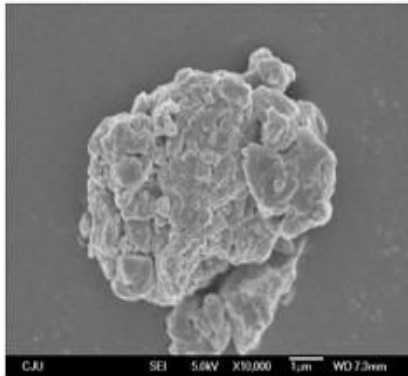
서울대학교 기초과학 공동 기원장



690-756 제주도 제주시 아라1동 1번지  
제주대학교 공동실험실습관  
Tel : (064) 754-2295  
Fax : (064) 725-0926

• Data Sheet NO. : 2010/06/25

1. Requester : 현주섭
2. Department : 제주대학교
3. Instrument : 장방출 주사 현미경
4. Sample Number : 총 1개
5. Analytical Condition :  
• Model : Field Emission Scanning Electron Microscope
6. Results



2010년 6월 25일  
제주대학교 공동실험실습관



690-756 제주도 제주시 제주대학교  
 해양토목공학과 지반공학연구실  
 Tel : (064) 754-3499  
 Fax : (064) 725-2519

▲ Data Sheet N.O. : 2010/09/25

1. Requester : 고영진
2. Department : 제주대학교
3. Instrument : 용출실험 분석
4. Sample Number : 총 1개
5. Results

실험항목 : PH를 조절하지 않은 증류수일때 페아스팔트 용출실험

sample	Pb	Cu	As	Hg	CN-	Cr(VI)	Cd	PCE	TCE	기름성분
페아스팔트	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨	4.684%

2010년 9월 25일  
 제주대학교 지반공학연구실



690-756 제주도 제주시 제주대학교  
 해양토목공학과 지반공학연구실  
 Tel : (064) 754-3499  
 Fax : (064) 725-2519

▲ Data Sheet NO. : 2010/09/25

1. Requester : 고영진
2. Department : 제주대학교
3. Instrument : 음향실험 분석
4. Sample Number : 총 1개
5. Results

실험항목 : PH를 4.5로 조절한 증류수일때 페아스팔트 용출실험  
 (산성비 접촉가정)

sample	Pb	Cu	As	Hg	CN-	Cr(VI)	Cd	PCE	TCE	기름성분
페아스팔트	0.011	검출안됨	0.071	검출안됨	검출안됨	검출안됨	0.003	검출안됨	검출안됨	4.684%

2010년 9월 25일  
 제주대학교 지반공학연구실

690-756 제주도 제주시 제주대학교  
 해양토목공학과 지반공학연구실  
 Tel : (064) 754-3499  
 Fax : (064) 725-2519

• Data Sheet NO. : 2010/07/15

1. Requester : 김경현
2. Department : 제주대학교
3. Instrument : 일도분포시험
4. Results

Sieve No.	Grain size d, mm	Retained		Finer		Retained		Finer				
		Ri %	R %	P %	Ri %	R %	P %					
	25.0			100.0					100.0			
	19.0			100.0					100.0			
	9.5			100.0					100.0			
4	4.75	150.260	22.5	77.5	132.370	22.6	77.4					
10	2.00	217.810	55.2	44.8	167.230	51.1	48.9					
20	0.85	173.810	82.0	18.0	154.340	77.4	22.6					
40	0.425	82.380	94.4	5.6	89.050	92.6	7.4					
60	0.250	22.090	97.7	2.3	25.810	97.0	3.0					
100	0.150	8.250	98.9	1.1	10.080	98.7	1.3					
200	0.075	4.740	99.6	0.4	5.520	99.7	0.3					
pan		2.500	100.0		1.910	100.0						
			D10	D30	D60	Cu	Cg	D10	D30	D60	Cu	Cg
			0.5	1.7	3.3	6.6	1.75	0.85	2	4.2	4.94	1.12

2010년 7월 15일  
 제주대학교 지반공학연구실

690-756 제주도 제주시 제주대학교  
 해양토목공학과 지반공학연구실  
 Tel : (064) 754-3499  
 Fax : (064) 725-2519

• Data Sheet N.O. : 2010/07/15

1. Requester : 김경현
2. Department : 제주대학교
3. Instrument : CBR 분석
4. Results

수정 CBR

a & CBR 다짐 횟수	지지력 (a, Kg/cm <sup>2</sup> )		지지력비 (CBR, %)				수정 CBR : 32.0 0.95 rdmax: 1.50
	2.5 mm	5 mm	2.5 mm	5 mm	CBR	rd, t/m <sup>2</sup>	
10	10.31	16.67	14.7	15.9	15.67	1.479	표준 : a2.5= 70kg/cm <sup>2</sup> a5.0= 105kg/cm <sup>2</sup>
25	22.34	44.16	31.9	42.1	42.06	1.621	
55	30.07	54.64	51.4	52.0	52.00	1.650	

2010년 7월 15일  
 제주대학교 지반공학연구실

690-756 제주도 제주시 제주대학교  
 해양토목공학과 지반공학연구실  
 Tel : (064) 754-3499  
 Fax : (064) 725-2519

• Data Sheet N.O. : 2010/08/25

1. Requester : 김경현
2. Department : 제주대학교
3. Instrument : 현장 투수
4. Results

측정 번호		해대암	주도로	자대암
물드 단면적 a (Cm <sup>2</sup> )		122.718463	122.718463	122.718463
측정시작시 t1 (sec)		0	0	0
측정종료시 t2 (sec)		48	42	51
T = t2 - t1 (sec)		48	42	51
변수위	t1에서의 수위 h1 (Cm)	58.5	59	59
	t2에서의 수위 h1 (Cm)	36.6	37.6	35.5
	log <sub>10</sub> (h1/h2)	0.203674781	0.19566417	0.22062366
	2.3/(t1-t2)	0.047916667	0.0547619	0.04509804
	Kr = 2.3aL / {A(t2-t1)} * log <sub>10</sub> (h1/h2) (Cm/sec)	0.06831506	0.07500366	0.06964699
수 온 T °C		14	14	14
μ <sub>15</sub> / μ <sub>T</sub>		1.026	1.026	1.026
K15 = Kr * μ <sub>15</sub> / μ <sub>T</sub>		7.01E-02	7.70E-02	7.15E-02
평균값 (K15) (Cm/sec)		7.10E-02		

2010년 8월 25일  
 제주대학교 지반공학연구실

690-756 제주도 제주시 제주대학교  
 해양토목공학과 지반공학연구실  
 Tel : (064) 754-3499  
 Fax : (064) 725-2519

▲ Data Sheet NO. : 2010/07/15

1. Requester : 김경현
2. Department : 제주대학교
3. Instrument : 압도시험
4. Sample Number : 흙 27개
5. Results

압축강도		기간별 압축강도			
C	C/G	0	7	14	28
180	0,3	0	7,65	8,60	9,10
	0,32	0	12,00	13,69	14,41
	0,34	0	13,97	14,92	15,90
200	0,3	0	13,20	14,91	15,20
	0,32	0	14,10	16,40	16,85
	0,34	0	15,90	17,87	18,81
220	0,3	0	15,00	16,40	17,04
	0,32	0	17,30	18,60	20,52
	0,34	0	18,30	19,99	21,04

2010년 7월 15일  
 제주대학교 지반공학연구실



690-756 제주도 제주시 제주대학교  
 해양토목공학과 지반공학연구실  
 Tel : (064) 754-3499  
 Fax : (064) 725-2519

• Data Sheet NO. : 2010/07/15

1. Requester : 김경현
2. Department : 제주대학교
3. Instrument : 투수시험기
4. Results

측정 번호	1	2	3
유리관 단면적 a (Cm <sup>2</sup> )	0.745360	0.764788	0.762969
측정시작시 t1 (sec)	0	0	0
측정종료시 t2 (sec)	3.31	4.14	3.57
T = t2 - t1 (sec)	3.31	4.14	3.57
수두 h (Cm)			
A*T (Cm <sup>2</sup> · sec)			
L/h (Cm)			
투수량 Q (Cm <sup>3</sup> )			
Q/(AT) (Cm/sec)			
K <sub>r</sub> =L/h · Q/(AT) (Cm/sec)			
t1에서의 수위 h1 (Cm)	157.5	162.1	163.5
t2에서의 수위 h2 (Cm)	119.5	118.1	120.1
log <sub>10</sub> (h1/h2)	0.119913	0.137533	0.133975
2.3/(t1-t2)	0.694864	0.555556	0.644258
K <sub>r</sub> = 2.3aL/{A(t2-t1)} + log <sub>10</sub> (h1/h2) (Cm/sec)	0.700065	0.500724	0.594677
수 온 T °C	19	19	19
μ <sub>15</sub> /μ <sub>T</sub>	0.903	0.903	0.903
K <sub>15</sub> = K <sub>T</sub> + μ <sub>15</sub> / μ <sub>T</sub>	0.632159	0.452154	0.536994
평균값 (K <sub>15</sub> ) (Cm/sec)	5.40E-01		

2010년 7월 15일  
 제주대학교 지반공학연구실



690-756 제주도 제주시 제주대학교  
 해양토목공학과 지반공학연구실  
 Tel : (064) 754-3499  
 Fax : (064) 725-2519

\* Data Sheet N.O. : 2010/07/15

1. Requirer : 김경현
2. Department : 제주대학교
3. Instrument : 투수시험2
4. Results

측정번호		1	2	3
유리관 단면적 a (Cm <sup>2</sup> )		0.745360	0.764788	0.762969
측정시작시 t1 (sec)		0	0	0
측정종료시 t2 (sec)		6.121	6.24	5.67
T = t2 - t1 (sec)		6.121	6.24	5.67
정수위	수두 h (Cm)			
	A+T (Cm <sup>2</sup> - sec)			
	L/h (Cm)			
	투수량 Q (Cm <sup>3</sup> )			
	Q/(AT) (Cm/sec)			
	K <sub>r</sub> =L/h * Q/(AT) (Cm/sec)			
	변수위	t1에서의 수위 h1 (Cm)	157.5	162.1
t2에서의 수위 h2 (Cm)		119.5	118.1	120.1
log <sub>10</sub> (h1/h2)		0.119913	0.137533	0.133975
2.3/(t1-t2)		0.375756	0.36859	0.405644
K <sub>r</sub> = 2.3aL/{k(t2-t1)} * log <sub>10</sub> (h1/h2) (Cm/sec)		0.378568	0.332211	0.374426
수온 T * C	19	19	19	
μ <sub>15</sub> / μ <sub>T</sub>	0.903	0.903	0.903	
K <sub>15</sub> = K <sub>T</sub> * μ <sub>15</sub> / μ <sub>T</sub>	0.341847	0.299987	0.338107	
평균값 (K <sub>15</sub> ) (Cm/sec)		3.27E-01		

2010년 7월 15일  
 제주대학교 지반공학연구실

690- 756 제주도 제주시 제주대학교  
 해양토목공학과 지반공학연구실  
 Tel : (064) 754- 3499  
 Fax : (064) 725- 2519

\* Data Sheet NO. : 2010/07/15

1. Requester : 김경현
2. Department : 제주대학교
3. Instrument : 투수시험기
4. Results

측정번호		1	2	3
유리관 단면적 a (Cn2)		0.745360	0.764788	0.762969
측정시작시 t1 (sec)		0	0	0
측정종료시 t2 (sec)		6.32	6.44	6.39
T = t2 - t1 (sec)		6.32	6.44	6.39
정수위	수두 h (Cn)			
	A+T (Cn2 · sec)			
	L/h (Cn)			
	투수량 Q (Cn3)			
	Q/(AT) (Cn/sec)			
	$K_T=L/h \cdot Q/(AT)$ (Cn/sec)			
변수위	t1에서의 수위 h1 (Cn)	157.5	162.1	163.5
	t2에서의 수위 h2 (Cn)	119.5	118.1	120.1
	$\log_{10}(h1/h2)$	0.119913	0.137533	0.133975
	$2.3/(t1-t2)$	0.363924	0.357143	0.359937
	$K_T = 2.3aL/\{A(t2-t1)\} + \log_{10}(h1/h2)$ (Cn/sec)	0.366648	0.321894	0.332238
수온 T °C		19	19	19
$\mu_{15}/\mu_T$		0.903	0.903	0.903
$K_{15} = K_T + \mu_{15} / \mu_T$		0.331083	0.290671	0.30001
평균값 (K15) (Cn/sec)		3.07E-01		

2010년 7월 15일  
 제주대학교 지반공학연구실

690- 756 제주도 제주시 제주대학교  
 해양토목공학과 지반공학연구실  
 Tel : (064) 754- 3499  
 Fax : (064) 725- 2519

\* Data Sheet NO. : 2010/07/15

1. Requester : 김경현
2. Department : 제주대학교
3. Instrument : 공극률시험
4. Results

	캔	물+캔 넣은 체적	공시체+캔	물+공시체+캔	공극률	공극률(%)
10-(1)	189.31	2092.6	3894	4671	0.378	37.8
10-(2)	158.34	2125.77	3919	4720	0.377	37.7
10-(3)	168.17	2091.21	3931	4608	0.372	37.2
13-(1)	171.3	2122.05	3687	4483	0.375	37.5
13-(2)	168.56	2103.64	3885	4633	0.366	36.6
13-(3)	170.68	2089.81	3816	4590	0.370	37.0
19-(1)	168.43	2085.91	3872	4643	0.370	37.0
19-(2)	159.58	2108.94	4000	4764	0.362	36.2
19-(3)	169.91	2086.21	3823	4541	0.344	34.4

공극률 시험

2010년 7월 15일  
 제주대학교 지반공학연구실

690-756 제주도 제주시 제주대학교  
 해양토목공학과 지반공학연구실  
 Tel : (064) 754-3499  
 Fax : (064) 725-2519

• Data Sheet NO. : 2010/07/15

1. Requester : 김경현
2. Department : 제주대학교
3. Instrument : 비중
4. Sample Number : 총 2개
5. Results

흙의 비중시험							
조 사 명: 페 아스팔트		시험일자: 2010. 7. 15					
		시 험 자: 제주대학교 지반공학 연구실					
시료번호							
별번호		1	2	1	2	1	2
별무게 (M)		312.23	336.66				
건조시료무게 (Ms)		76.05	60.87				
(별+건조시료)무게 (M <sub>s</sub> )		388.28	397.53				
(별+증류수)무게 (M <sub>w</sub> )		1335.17	1331.68				
t°C (별+증류수)무게 (M <sub>w</sub> )		1335.17	1331.68				
M <sub>w</sub> 측정시의 온도 (T <sub>w</sub> °C)		25.00	25.00				
(별+건조시료+증류수)무게 (M <sub>b</sub> )		1379.44	1366.35				
(M <sub>b</sub> 측정시의 온도 (T <sub>b</sub> °C)		22.00	22.00				
보 정 계 수 K		0.9978	0.9978				
흙 의 비 중		2.363	2.3180				
평균값 G <sub>s</sub> =		2.3405					

2010년 7월 15일  
 제주대학교 지반공학연구실

## 감사의 글

논문을 완성하여 감사의 글을 쓰려고 하니 짧지 않은 2년 반의 대학원 생활이 주마등처럼 생각납니다. 학업적 성취에 있어서의 아쉬움만이 아닌 고마운 많은 분들께 감사의 마음을 제대로 전하지 못했기에 더욱 그러한 것 같습니다. 회사를 다니면서 회사와 학교, 두 마리의 토끼를 놓치지 않으려고 무던히 노력했던 제 모습과 그 모습에 지지와 격려를 보내 주셨던 많은 분들께 일일이 찾아 뵙고 고마운 말씀을 올림이 도리어오나 우선 지면을 빌어 머리숙여 감사의 마음을 전하고자 합니다.

우선, 본 논문을 완성하기까지 항상 격려해 주시고 정성으로 이끌어 주신 이동욱 지도교수님께 존경과 감사의 마음을 전합니다. 그리고 논문 심사 과정에서 세심한 지도와 격려로 많은 가르침을 주신 이병걸 교수님, 김상진 교수님께도 깊이 감사드리며, 매 학기 마다 큰 열정으로 수준 높은 강의를 해주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 박상렬 교수님께도 깊은 감사의 마음을 전합니다.

그리고 본 연구에 참여할 수 있도록 물심양면으로 도와주신 김남식 사장님과 바쁜 학업 중에도 논문작성에 큰 도움을 준 조홍준 학생에게도 감사의 마음을 전합니다.

또한, 바쁜 업무 중에도 많은 시간을 배려하여 주신 직장 상사 및 동료들에게 고마움과 미안함을 함께 전하고 싶습니다. 특히, 제가 대학원에 진학하게 멘토를 해준 오동훈 선배에게도 감사의 마음을 전합니다.

사랑하는 가족들에게

평생을 자식의 뒷바라지만 하시며 항상 사랑으로 키워주시고 부족한 자식을 믿어주신 어머니께 건강한 모습으로 오랫동안 살아가시길 기도드리며 부끄럽지 않은 아들로써 살아갈 것을 약속 드립니다. 그리고, 삶에 많은 도움을 주며 든든한 버팀목과 같은 매형과 누나, 형과 형수님께도 고마움을 전합니다.

끝으로, 언제나 나를 믿고 따라와 주는 나의 사랑·나의 반쪽 주경, 그리고 우리 집안의 기둥 지환이와 곧 세상을 보게 될 우리 딸에게 이 논문을 바칩니다.

2011년 6월

변 성 문