

투수성 포장과 배수성 포장 구조형식의 성능평가 및 비교 연구

A Study on the Performance Evaluation and Comparison of Porous and Drainage Pavement Types

김도완 Kim, Dowan | 정회원 · (주)건화 도로공학부 대리 (E-mail : kimdw@kunhwaeng.co.kr)
정상섬 Jeong, Sangseom | 연세대학교 사회환경시스템공학부 건설환경공학과 교수 (E-mail : soj9081@yonsei.ac.kr)
문성호 Mun, Sungho | 정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 부교수 · 교신저자 (E-mail : smun@seoultech.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The permeable pavement type has been rapidly developed for solving problems regarding traffic noise in the area of housing complex and heavy rainwater drainage in order to account for the climate change. In this regards, the objective of this study is to figure out the characteristics of pavement types.

METHODS : The laboratory test for deriving optimum asphalt content (OAC) was conducted using the mixtures of the permeable asphalt surface for the pavement surface from Marshall compaction method. Based on its results, the pavement construction at the test field was conducted. After that, the site performance tests for measuring the traffic noise, strength and permeability were carried out for the relative evaluation in 2 months after the traffic opening. The specific site tests are noble close proximity method (NCPX), Light falling deflectometer test (LFWD) and the compact permeability test.

RESULTS : The ordered highest values of the traffic noise level can be found such as normal dense graded asphalt, drainage and porous structure types. In the results from LFWD, the strength values of the porous and drainage asphalt types had been lower, but the strength of normal asphalt structure had relatively stayed high.

CONCLUSIONS : The porous structure has been shown to perform significantly better in permeability and noise reduction than others. In addition to this study, the evaluation of the properties and the determination of the optimum thickness for the subgrade course under the porous pavement will be conducted using ground investigation technique in the further research.

Keywords

Permeable Pavement, Porous Pavement, Drainage Pavement, Impermeable Pavement, Noble Close ProXimity (NCPX), Light Falling Weight Deflectometer (LFWD), Optimum Asphalt Content (OAC)

Corresponding Author : Sungho Mun, Associate Professor
The Road Pavement Research Division, No.43, Seoul National
University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu,
Seoul, 01811, Korea
Tel : +82.2.970.9014
E-mail : smun@seoultech.ac.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (Print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Apr. 20, 2018 Revised Apr. 21, 2018 Accepted Apr. 30, 2018

1. 서론

최근 한국에서는 급격한 기상이변 현상과 관련하여

폭우 및 국지성 호우로 인해 도로가 침수하는 등의 문제가 발생하고 있다. 도로내에서 우수를 적절하게 처리하

지 못하는 경우, 포장층 내부 공극이 포화상태가 된다. 이 포화된 포장층에 반복적으로 교통하중이 가해지게 되면 내부 수압의 영향으로 인해 포장의 손상률이 증가하게 된다. 이 뿐만 아니라 노면배수가 적절하게 처리되지 않아 도로표층 위에 물이 고이는 수막현상이 발생하는 경우 사고를 유발할 수 있으며 이에 대한 운전자의 안전성에 악영향을 미친다.

이를 해결하기 위해 한국도로공사에서는 저소음-배수성 포장 형식 및 재료를 개발해 고속도로에 적용하고 있으며, 중앙분리대 및 길어깨에 연속배수시설을 설치하는 등의 노력을 기울이고 있다. 또한, 서울시와 같은 각 지자체에서는 국부적인 배수문제 및 도로교통 소음문제를 해결하기 위해 배수성 포장형식을 적용하고 있다.

포장공학적으로 이러한 문제를 해소할 수 있는 형식으로 배수성 및 투수성포장 구조형식이 있으며, 이 포장 구조형식은 공극을 통해 우수를 투과시킬 수 있는 특징을 공통적으로 가지고 있다. 그 중, 투수성 포장 구조형식은 다른 형식의 아스팔트 포장에 비해 아스팔트 층의 투수성을 증가시켰다는 점에서 우수를 처리하는데 가장 효과적이다. 그러나 한국에서는 낮은 강도와 지반교란으로부터 발생하는 문제 때문에 투수성포장 구조형식을 선호하지 않고 있다.

이와 관련하여 본 연구에서는 배수성포장 구조형식과 투수성포장 구조형식에 대해 이론적인 특성을 파악하고, 이를 바탕으로 실제 3가지 형식(투수성포장구조, 배수성포장구조, 일반 포장구조)으로 구분하여 포장 설계 및 시험시공을 실시했다. 또한, 3가지 형식 포장에 대한 현장시험(소음도, 강도 및 투수성)을 실시하여 공학적인 성능을 비교분석했다.

2. 포장형식 별 특성

2.1. 개요

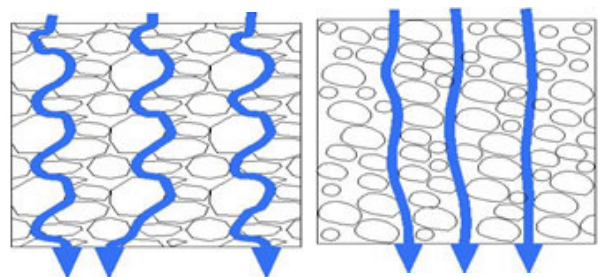
일반적으로 아스팔트 포장은 약간의 공극을 가지고 있으나, 그 양이 상당히 미미하여 투수 또는 배수 기능을 갖춘 것으로 보기는 어렵다. 이에 따라, 우천 시 도로 노면에 흐르는 빗물에 의해 차선의 가시성이 떨어져 교통사고의 원인이 되기도 한다. 이를 고려하여 일반적인 아스팔트에 비해 높은 공극률을 가지는 배수성포장 구조 및 투수성포장 구조 등을 개발하여 활용 중에 있다.

이와 관련하여 본 연구에서는 우수를 투과시키는 면에서 우수한 배수성 포장과 투수성 포장에 대해 성능평가를 실시하였다.

2.2. 배수성 포장

배수성 포장은 공극률 20% 이상을 만족하는 공극을 가진 아스팔트 혼합물로서, 고성능의 아스팔트 바인더를 사용한다. 이는 한국산업규격의 KS F 2397 시험 품질기준 공극률 8~15%를 가지는 저소음 포장의 형식과도 유사하다. 저소음 포장은 배수기능의 목적보다는 도로교통소음을 저감시키기 위한 목적으로 시공되는 포장이다. 저소음 포장과 배수성 포장은 공극률이 다른 포장 형식에 비해 비교적 높은 포장으로 국내에서는 PG 82-22 혹은 PG 74-22와 같이 고성능의 아스팔트 바인더를 사용한다.

최근 한국에서는 도심지를 통과하는 고속도로의 민원과 이상기후로 인한 강수에 대비하기 위해 저소음-배수성포장을 적용하고 있다. 국내의 고속도로에서 사용되는 저소음-배수성 포장형식은 기존 배수성포장과는 다르게 SMA포장용 골재 이상을 사용하며, 연속배수시설을 함께 설치하여 그 효과를 증진시키고 있다. 한국도로공사의 연구결과에 따르면, 개발된 저소음-배수성 포장은 공극막힘 현상과 미끄럼저항성(SN)이 개선되고, 소음도가 기존 배수성포장에 비해 3.4dB(A) 저감되며, 투수성능을 월등히 높인 것으로 나타났다. Fig. 1은 한국에서 사용되는 저소음-배수성 포장과 기존 배수성 포장의 차이를 나타낸 것이다.



(a) Previous Porous Pavement (b) Developed Porous Pavement

Fig. 1 Difference of Previous and Developed Porous Pavement (Drainage)

2.3. 투수성포장 구조

투수성포장 구조는 저소음 및 배수성 포장과 같은 목적으로 사용되지만, 투수성포장은 모든 포장층이 투수층으로만 형성되어 지반으로 배수처리가 가능한 구조이다. 이 포장 구조형식은 불투수층을 포함하지 않고 있기 때문에 다른 포장형식에 비해 소음저감 효과 및 투수성능이 우수하다. 그러나 국내에서는 보조기층 하부의 배수처리로 인한 교란, 공극으로 인한 강도저하 등의 이유로 적용성이 낮다. Fig. 2는 투수성포장형식과 배수성

포장형식의 단면을 나타낸다.

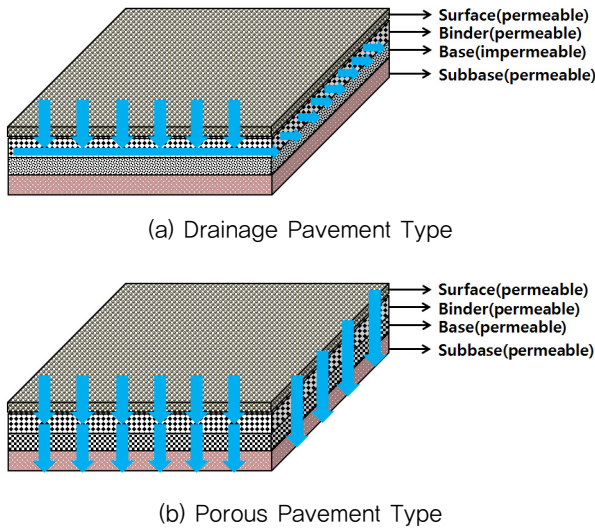


Fig. 2 Comparison between Drainage and Porous Pavement Type

이와 관련하여 본 연구에서는 아스팔트포장 구조형식 중 우수를 처리하기 위한 목적으로 시공되는 저소음-배수성포장 구조와 투수성포장 구조의 성능을 평가하는 것에 그 목적을 두고 있다.

3. 도로설계 및 포장 실내시험

3.1. 시험시공 개요

국내에서 배수시설을 설계하는 경우, 국토교통부에서 발간한 설계지침을 따르도록 규정하고 있으며, 포장층의 설계 및 시공을 실시하는 경우, 역학적-경험적 포장 설계에 근거한 한국형 포장설계법을 적용하고 있다. 한국형 포장설계프로그램은 소성변형 및 균열과

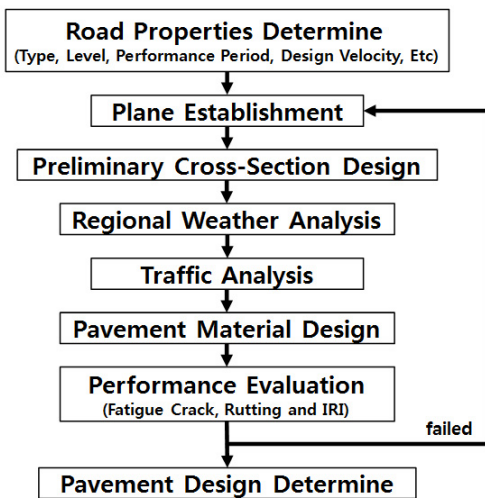


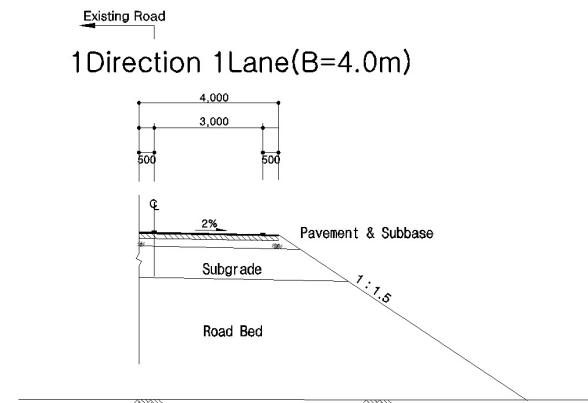
Fig. 3 Flowchart for Korea Pavement Design Program

IRI(International Roughness Index, IRI)에 대한 예측결과를 기준으로 포장단면의 구조해석을 실시하여 그 두께를 산정하는 프로그램이다. Fig. 3은 한국형 포장설계프로그램에 의한 두께 산정 프로세스를 나타낸다.

본 연구에서는 시험시공을 실시하기 위해 한국형 포장설계프로그램을 활용하여 충청남도 아산에 위치한 현장을 중심으로 포장설계를 실시했다. Fig. 4는 시험시공현장의 위치도, 포장형식 결정구간 및 표준횡단면도이다.



(a) Construction Site



(b) Standard Cross Section

Fig. 4 Construction Site Location and Standard Cross Section

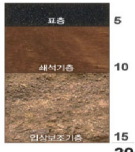
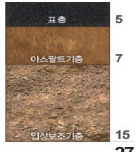
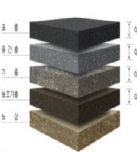
3.2. 배수시설 설계

본 시험포장구간에 대한 배수시설 설계는 국토교통부의 '도로 배수시설 설계 및 관리 지침'에 따르며, 현장의 유역면적 및 강수량은 각각 0.0028km²과 9,221mm이다. 또한, 근처 소하천으로 우수를 처리해야 한다는 제약을 가지고 있다. 따라서, 현장의 연속배수처리를 위해 수로관을 L형 측구하부에 설치했다. 현장의 종단선형은 하향 구배로서 현장을 벗어난 구간의 V형 측구를 통해 배수를 계획하여 교량 시점 전의 횡배수관을 설계했다.

3.3. 포장설계

시험시공현장은 지방도로, 본선 및 연결로의 설계속도가 각각 60km/h와 30km/h이다. 본 구간의 교통량은 AADT가 1,000대 이하의 도로로 한국의 3등급포장형식에 속한다. 한국형 포장설계에서는 이 등급을 교통량으로 나누며, AADT 7,000대 이하의 3등급 포장은 그 구조결과를 카달로그 결과로부터 도출한다. 그러나 본

Table 1. Properties of Pavement Type Alternatives

Item	Alternative no. 1	Alternative no. 2	Alternative no. 3	
Pavement type				
Road design level	Level 3	Level 3	Level 2	
Pave ment depth (cm)	Total	30	27	46
	Surface	5	5	5
	Binder course	-	-	6
	Base course	10	7	15
	Subbase	15	15	20
Material	Surface	Porous asphalt	Porous asphalt	Porous asphalt
	Binder course	-	-	Porous asphalt (Dense grade asphalt)
	Base course	Crushed stone	Porous asphalt (Dense grade asphalt)	Porous asphalt (Dense grade asphalt)
	Subbase	Granular material	Granular material	Granular material
Economy	· Very good (Asp minimum quantity)	· Good	· Bad (Asp maximum quantity)	
Research development	· Lab test bad (5cm cored asp pavement) · Site test good	· Lab test good (12cm cored asp pavement) · Site Test Good	· Lab test very good (Total cored asp pavement) · Site test good (Describe highway pavement)	
Application of construction equipment	Good	Good	Good	
Maintenance	Bad	Not bad	Good	
	Initial failure of pavement because of heavy traffic for construction			
Construction application		◎		

연구에서는 7,000대 이하의 3등급도로이지만, 2등급도로 설계의 새로운 물성을 입력변수로 활용한 대안을 추가적으로 설계했다. 한국에서는 교통량에 따라 3등급의 카탈로그 설계를 실시하는 경우, 중간층의 부재가 발생한다. Table 1은 한국형 포장설계의 도로등급기준 및 본 연구의 대안을 나타낸 것이다.

본 연구에서는 시험시공의 경제성 및 투수성 포장과 배수성 포장 성능을 비교 분석하기 위한 목적을 전제로 하여 3등급 포장의 표층, 기층, 보조기층의 두께가 각각 5cm, 7cm, 15cm인 Type. 2를 선정하여 시험시공을 수행했다.

4. 시험시공

4.1. 단면 구성

본 시험포장구간은 일반 밀입도 포장, 배수성 포장, 투수성 포장의 총 3가지 포장 구조형식으로 구성된다. 이 포장 구조형식은 같은 포장두께 및 노상층을 두어 시공되었으며, 보조기층 역시 같은 입상재료를 사용하여 포설 및 다짐을 실시했다. 다만, 배수성포장의 기층은 밀입도 포장과 같은 기층을 가지며, 투수성포장의 표층은 배수성포장과 같은 형식으로 구성되었다. 이에 대한 포장단면도는 Fig. 5와 같다.

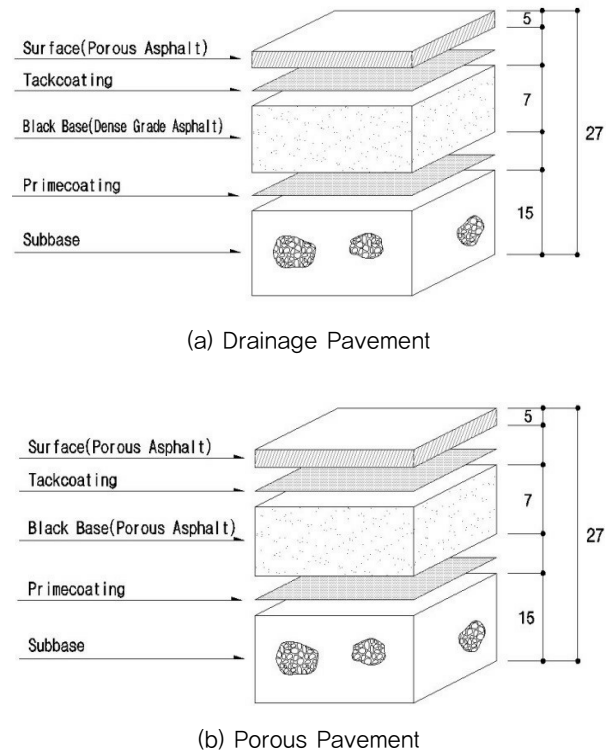


Fig. 5 Sectional Detail Drawing

4.2. 저소음-배수성 아스팔트 혼합물 품질

시험시공에 사용한 재료는 한국규격기준에 준하는 것을 사용토록 했다. 본 연구에서 적용한 저소음-배수성 포장용 시험시공 전 혼합물의 배합설계에 의해 그 규격이 맞는 것을 사용토록 했다. 배합설계는 KS F 2337의 마샬 다짐에 의해 수행되었으며, 안정도, 공극률, 칸타브로 손실률, 수분저항성, 동적 안정도 등의 기준을 만족하여야 한다.

Table 2. Korean Material Quality Standards for Porous Pavement

(a) Asphalt binder		
Item	Test method	Standard
Penetration (25°C, 100g, 5sec)	KS M 2252	40 Over
Softening point(°C)	KS M 2250	70 Over
Rate of mass change after heating thin films(%)	KS M 2259	0.6 Under
Rate of penetration after heating thin films(%)		65 Over
Toughness (kgf · cm)	KS F 2448	200 Over
Tenacity (kgf · cm)		150 Over
Viscosity (60°C, Poise)	KS M 2247	200,000 Over
PG	KS F 2389	82-22
(b) Coarse aggregate		
Item	Test method	Standard
Fracture surface(%)	KS F 2541	85 Over (Over 2 surface)
Absorption rate(%)	KS F 2503	3.0 Under
Abrasion percentage(%)	KS F 2508	35 Under
Stability(%)	KS F 2507	12 Under (Sodium thiosulfate)
Flat and elongated particles rate(%)	KS F 2575	10 Under
Aggregate coating area(%)	KS F 2355	95 Over
(c) Mineral filler		
Item	Test method	Standard
Plasticity index	KS F 2303	6 Under
Flow test(%)	KS F 3501	50 Over
Flood expansion(%)		3 Under
Peel resistance		0.25 Under

저소음-배수성 아스팔트 혼합물은 다른 아스팔트 형식과 비교해 뚜렷한 성능을 가지고 있기 때문에 배합에 사용되는 재료의 품질기준을 명확히 만족해야 한다. 배합에 사용되는 바인더는 PG 82-22로서, 프리 믹스된 개질 아스팔트 바인더를 사용했다. 잔골재는 0.4mm체를 통과한 골재에 대하여 액성한계, 소성한계 시험을 실시했을 때 비소성이여야 하며, 잔골재의 안정성시험을 반복적으로 5회 실시했을 때 중량감소비가 10% 이하여야 한다. 굵은 골재는 쇄석으로 구성되며, 5mm체에 남는 골재에서 편평한 골재를 10% 이상 함유하지 않아야 한다. 또한, 저소음-배수성 포장에서 굵은 골재의 역할은 공극을 발휘하는 것에 영향을 미치기 때문에 본 포장의 합성입도를 용이하게 맞추기 위해 직경 2mm~5mm 골재를 별도로 관리했다. 또한, 채움재는 함유비가 1% 이하인 것을 사용토록 했다. Table 2는 본 연구에서 사용한 재료의 품질기준을 나타낸다.

4.3. 아스팔트 혼합물 실내시험

투수성 및 배수성 포장에 사용될 재료는 배합설계 및 실내시험 기준에 만족해야 한다. 본 연구에서는 마샬 다짐에 의해 아스팔트 혼합물을 제작하여 실내시험을 수행했으며, 이 결과로부터 혼합물의 최적아스팔트 함량을 구해 현장에 도입했다. Table 3은 플랜트 배합을 위한 투수성 아스팔트 혼합물의 품질기준을 나타낸다.

Table 3. Quality Standards for Porous Pavement

Standard	Item	Test method	Standard	
Mix design	The number of marshall compaction	KS F 2337	Both sides 50	
	Porosity(%)	KS F 2397	20±0.3	
	Cantabro test	20°C	KS F 2492	20 Under
		-20°C		30 Under
	Moisture resistance	KS F 2398	0.85 Over	
	Dynamic stability	KS F 2374	3,000 Over	
Performance quality	Permeability test in lab	KS F 2494	0.01 Over	
	Permeability test in site	City Road way	KS F 2394	In 400ml/10sec
				In 1,000ml/15sec

최적 아스팔트 함량을 도출하고 혼합골재의 합성입도 기준을 만족하기 위해 체가름 시험을 실시했다. 체가름 시험 시 합성입도를 만족하며 공극률이 20±0.3%를 유지하는 배합을 결정하기 위해, 13mm, 10mm의 굵은 골

재, 잔골재 및 채움재 배합비를 각각 31%, 45%, 20% 및 4%를 목표로 체가름을 실시했다. 체가름 시험에 대한 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Sieve Test for Mix Design of Porous Asphalt Mixture

Sieve size	Separate gradation							
	13 mm	10 mm	7 mm	Filler (F)	13 mm	10 mm	7 mm	Filler (F)
25	100	100	100	100	31	45	20	4
19	100	100	100	100	31	45	20	4
13	91.0	100	100	100	28.2	45	20	4
10	3.8	93.3	100	100	1.2	42	20	4
5	0.3	1.7	87.9	100	0.1	0.8	17.6	4
2.5	0.3	0.6	59.4	100	0.1	0.3	11.9	4
0.6	0.3	0.6	28.7	100	0.1	0.3	5.7	4
0.3	0.3	0.6	20.6	100	0.1	0.3	4.1	4.0
0.15	0.3	0.6	12.8	97.7	0.1	0.3	2.6	3.9
0.08	0.3	0.6	9.6	82.9	0.1	0.3	1.9	3.3
Sieve size	Combined gradation			Error	Standard limit			
	Combined gradation	Limited gradation						
25	100	100	0.0	100				
19	100	100	0.0	100				
13	97.2	92	5.2	92				
10	67.2	62	5.2	62				
5	22.5	10	12.5	10				
2.5	16.3	12.5	3.8	4				
0.6	10.1	10.0	0.1	3				
0.3	8.5	7.5	1.0	3				
0.15	6.9	5.0	1.9	2				
0.08	5.6	4.5	1.1	2				

Table 5. Results for Asphalt Mixture Mix Design

No	Asphalt content	Thick ness	Mass	Dia meter	Area	Volume	Density (g/cm ³)	
	(%)	(mm)	(g)	(mm)	(cm ²)	(cm ³)	Real	Theory
1	5.30	68.1	1095.3	101.6	81.0	551.8	1.98	
2		68.5	1095.7	101.5	80.9	554.0	1.97	
3		68.3	1095.8	101.6	81.0	553.4	1.98	
Aver							1.98	2.46
No	AP volume	Void ratio	VFA	Drain down	Cant ablo loss	Tensile strength rate	Dynamic stability	
	(cm ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	1Cycle freeze	(No./mm)	
1	10.1	19.4	34.2	0.11	6.80	0.91	1192	
2	10.1	19.7	33.9	0.13	7.30	0.93	1433	
3	10.1	19.6	34.0	0.09	7.20	0.90	4212	
Aver		19.6	34.0	0.1	7.1	0.91		

결정한 골재 배합은 혼합물에 의한 흐름 시험으로부터 아스팔트 함량을 설정한 후 밀도, 칸타브로, 휠 트래킹 시험을 실시하여 최적 아스팔트 함량을 결정했다. 추정 아스팔트 함량은 경험에 따른 방법과 결정식을 사용하는 방식 중 경험에 의한 방법으로 5.3%의 함량으로 아스팔트 바인더로 혼합물을 배합했다. 이에 대한 결과는 Table 5와 같다.

Table 5에서 이론최대밀도(G_{mm})는 Eq. (1)에 의해 도출된다.

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (1)$$

여기서, P_{mm} , P_s , G_{se} , P_b 및 G_b 는 각각 다져지지 않은 혼합물의 중량비(%), 혼합물에 대한 골재 함량(%), 골재의 유효비중, 혼합물 중량에 대한 아스팔트 함량 및 아스팔트의 비중을 나타낸다.

4.4. 밀입도, 배수성, 투수성 포장 시험시공

본 연구에서 적용한 아스팔트 투수층은 PG 82-22의 바인더를 사용하여 플랜트에서 생산한 뒤, 현장으로 운반하여 시험시공을 실시했다. 배수성포장을 시공하는 경우, 중요한 것이 아스팔트 품질 및 혼합물 다짐이라 할 수 있다. 아스팔트 품질이 생산 및 운반에서 저하될 경우 공극률이 큰 포장층의 생애주기가 짧아지며, 현장에서 다짐 시 소요 공극률에 도달하지 못하기 때문이다. 또한, 포장의 과도한 다짐은 포장층의 공극 및 골재상태에 영향을 미칠 수 있으며, 부족한 다짐은 혼합물의 조기 파손 및 탈리, 박리 현상을 발생시킬 수 있다. 이와 관련하여 적절한 다짐을 실시하기 위해 12톤 이상의 머 케덤롤러와 8톤의 텐덤롤러 및 10톤 이상의 타이어롤러로 다짐을 실시했다. Table 6은 본 연구에서 사용한 바

Table 6. Roller Application for Porous Pavement Compaction

	1 st Compaction	2 nd Compaction	3 rd Compaction
Roller type	Macadam	Macadam	Tandem
Machine weight(ton)	12 Over	12 Over	8 Over
Compaction number	2~3	4~5	1~2
Paving temperature(°C)	140~160	110~140	60~80
Paving velocity(km/h)	4~7	4~7	4~7



(a) Asphalt Mixing Plant



(b) Pavement Surface

Fig. 7 Complete of Paving Porous Asphalt Pavement



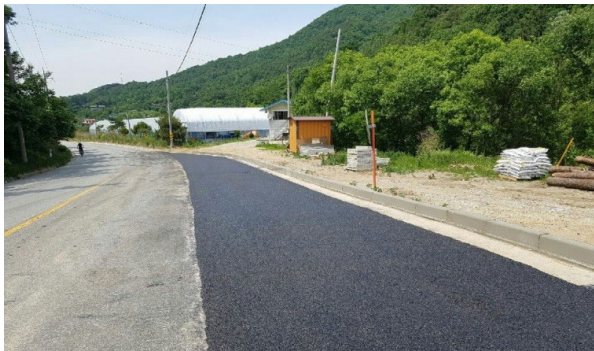
(b) Pavement of Porous Asphalt

Fig. 6 Pavement Construction

인터의 품질 기준 및 다짐 특성을 나타내며, Fig. 6은 시험포장을 실시하는 모습을 나타낸다.

플랜트에서 합성입도의 체구성은 직경 20mm~13mm, 13mm~5mm, 5mm~2.5mm 및 2.5mm~0mm의 4개조로 구분하며, 저소음-배수성 포장의 공극을 장시간 유지시키기 위해 직경 5mm골재와 2.5mm골재의 입도분포 차이를 최소화했다. 여기서, 합성입도는 잔골재, 굵은 골재 및 채움재에 대한 혼합골재 입도를 의미한다.

공극률이 높은 저소음-배수성 포장을 하부 아스팔트 포장과 접착시키는 경우, 보다 높은 접착성을 발휘하기 위해 일반 유화 아스팔트가 아닌 개질제가 첨가된 아스팔트 텍코트를 아스팔트 디스트리뷰터를 사용하여 적용했다. Fig. 7은 시험시공 완료 후 시공현장의 모습을 나타낸다.



(a) Final Construction Site

5. 현장 시험

5.1. 현장 시험 종류 및 개요

현장시험 전, 투수성포장 구조와 배수성포장 구조는 공극률을 가진 하부포장의 구조적인 성능이 다르기 때문에 도로 교통소음, 강도 그리고 투수성능에서 확연히 다를 것이라 판단했다. 이와 관련하여 도로포장 성능을 평가하기 위한 현장시험으로 소음도 측정시험, 강도시험, 투수성시험으로 구분하여 실시했다. 또한, 교통개방 3개월 동안 본 포장 형식에 대한 시험을 반복적으로 실시함으로써 교통개방 후 공용기간에 대한 영향성을 평가했다.

5.2. 소음도 측정시험

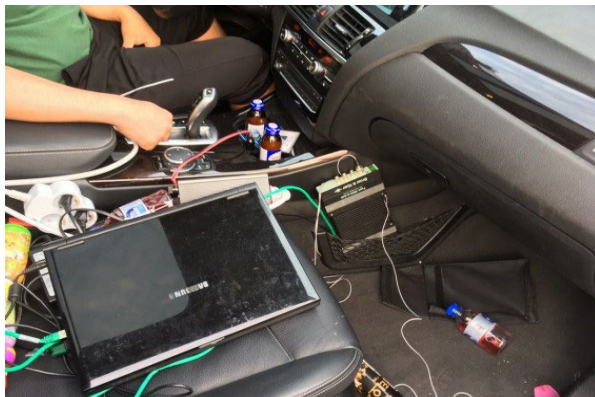
도로교통소음의 소음원은 기존 연구(Kim et al., 2013)에 따르면, 엔진에 대한 소음보다 타이어와 노면 사이에서 발생하는 마찰소음에 기인하는 것으로 판단하고 있다. 또한, 공학적인 측면에서 공극율이 큰 경우나 주행속도가 적은 경우, 타이어와 노면의 마찰면적 및 마찰이 적어 마찰소음도가 감소된다.

이와 관련하여 본 연구에서는 타이어와 노면사이에서 발생하는 마찰음과 관련된 포장형식에 따른 소음특성을 보다 정확하게 평가하기 위해 NCPX(Noble Close ProXimity)계측방법을 이용했다. NCPX는 타이어와 인접한 차량의 앞바퀴 휠다 패널에 특수 마이크로폰을 설치하여 보다 가까운 위치에서 마찰소음도를 측정할 수 있는 방법이다.

Fig. 8은 본 연구에서 마찰소음도 측정을 실시한 모습을 나타낸다.



(a) Microphone Installation



(b) Signal Receiving Equipment



(c) NCPX Testing

Fig. 8 NCPX Test for Detecting Friction Noise

특수 마이크로폰으로 받아들여진 마찰 소음에 대한 신호는 디지털신호처리와 주파수 분석의 일부인 FFT 및 CPB 분석을 통해 A-가중치 데시벨로 변환하여 포장 형식에 대한 성능을 비교 평가했다.

Fig. 9는 CPB주파수 분석을 수행한 결과의 예시를 나타낸 것이며, Table 7은 이에 대한 마찰 소음도를 나타낸다.

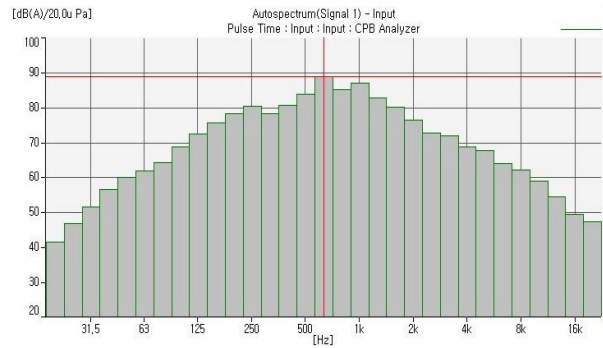


Fig. 9 Example of CPB Frequency Analysis

Table 7. Results of NCPX Traffic Noise Test (dB(A))

	Pavement type	Velocity (km/h)	Test 1.	Test 2.	Test 3.	Aver
Traffic opening	Porous	30	80.8	76.6	81.4	79.6
		40	85.1	85.3	83.9	84.8
	Drainage	30	83.7	83.9	85.2	84.3
		40	87	87.9	88.7	87.9
	Normal	30	85.9	85.9	87.1	86.3
		40	89.6	90.5	89.4	89.8
After 1 month	Porous	30	82.6	83.1	85	83.6
		40	86.4	87	86.2	86.5
	Drainage	30	87.6	83.9	82.1	84.5
		40	89.5	89	88.3	88.9
	Normal	30	87.9	88.8	88.1	88.3
		40	94.6	90	91.8	92.1
After 2 month	Porous	30	84	82.2	85.2	83.8
		40	86.7	88.3	87.4	87.5
	Drainage	30	86	82.8	86	84.9
		40	89.2	90.4	89.6	89.7
	Normal	30	88.5	87.9	89.2	88.5
		40	92.7	92.6	92.1	92.5

5.3. 강도측정

현장의 포장층을 채취하여 실내시험을 실시하지 않고 포장의 강도를 시험할 수 있는 방법은 FWD(Falling Weight Deflectometer)를 사용하는 것이다. 시험구간은 교통이 개방된 구간으로서 현장에서 보다 빠르고 용이한 강도시험이 이루어져야하기 때문에 소형 FWD인 LFWD를 이용하여 강도측정을 실시했다. LFWD시험은 높이 75cm에서 자유낙하시킨 하중으로 인한 포장의 처짐량을 측정하여 동적탄성계수를 구하는 방법이다. 본 시험장비로 인해 측정되는 탄성침하량은 Eq. (2)와 같이 Timoshenko의 탄성이론을 통해 동적탄성계수로 표현된다.

$$E_{LFWD} = \frac{q_d}{W_d} r \frac{\pi}{2} (1 - v^2) \quad (2)$$

여기서, E_{LFWD} , q_d , W_d 및 v 값은 각각 동적탄성계수, 하중 판의 작용응력, 치짐 및 푸아송비를 나타낸다. 시험은 모두 같은 조건하에 수행되었으며, 총 5회 시험에 대한 평균값을 사용했다. 이와 같은 방법으로 도출한 강도시험 결과는 Table 8 및 Fig. 10과 같다.

Table 8. Results of Site Test for Pavement Strength using LFWD (Mpa)

	Pavement type	Test 1.	Test 2.	Test 3.	Aver
Traffic opening	Porous	535	543	537	538.3
	Drainage	692	650	701	681.0
	Normal	1079	1005	961	1015.0
After 1 month	Porous	469	481	489	479.7
	Drainage	547	559	525	543.7
	Normal	1090	1043	1090	1074.3
After 2 month	Porous	331	337	327	331.7
	Drainage	305	299	300	301.3
	Normal	1072	1051	1068	1063.7



Fig. 10 LFWD Test Machine

5.4. 현장 투수 시험

본 연구에서는 교통개방 후 투수성능을 평가하기 위해 안전성 및 편의성을 고려하여 소형 현장 투수시험기를 사용했다. 본 연구에서 사용한 투수시험기는 일정량의 물이 포장층을 통해 빠져 나가는 시간을 측정하여 포장에 대한 투수성능을 평가한다. 본 연구에서는 400ml의 물이 모두 통과하는 시간을 측정했으며, 시험 전에 포장층을 충분히 포화시키기 위해 5분동안 연속적으로 살수

를 실시했다. Fig. 11은 투수성 시험을 실시하는 모습이며, Table 9는 투수성 평가에 대한 결과를 나타낸다.



Fig. 11 Pavement Permeability Test Equipment

Table 9. Results of Site Test for Permeability (sec)

	Pavement type	Test 1.	Test 2.	Test 3.	Aver
Traffic opening	Porous	85.65	85.11	86.77	85.84
	Drainage	54.42	55.94	52.91	54.43
After 1 month	Porous	82.82	77.97	79.52	80.10
	Drainage	62.50	50.63	51.68	54.94
After 2 month	Porous	87.53	79.37	80.48	82.30
	Drainage	47.68	44.54	54.42	48.54

6. 시험결과

본 연구에서는 배수성 포장 형식과 투수성 포장형식의 성능을 비교평가하기 위해 공용기간(Month) 및 포장 형식에 따른 성능 변화율을 산정했다. 소음 및 투수성능에 대한 비교평가는 배수성포장을 기준으로 삼았으며, 강도에 대한 비교평가는 투수성 포장을 기준으로 했다. 이에 대한 함수식은 Eq. (3)에 따라 상대 성능 발휘율을 계산했다.

$$P_{T,P} = \left(\frac{P_T}{P_S} - 1 \right) * 100 \quad (3)$$

여기서, $P_{T,P}$, P_T 및 P_S 는 각각 타겟 항목에 대한 상대성능 발휘율, 타겟의 성능, 기준이 되는 항목의 성능을 나타낸다. 각 기준에 대한 결과는 Table 10과 같다.

Table 10. Relative Performance Exercitation Rate (%)

Item	Condition		Relative performance(%)
Traffic noise (dB(A))	Traffic opening	30km/h	5.90
		40km/h	3.66
	After 1 month	30km/h	1.08
		40km/h	2.77
	After 2 month	30km/h	1.31
		40km/h	2.51
Pavement strength (Mpa)	Traffic opening		26.50
	After 1 month		13.34
	After 2 month		-9.14
Permeability (ml/sec)	Traffic opening		57.71
	After 1 month		45.80
	After 2 month		69.55

NCPX시험 결과, 공용개시 후 2달까지 소음도가 증가되었으며, 투수성 포장 형식, 배수성 포장 형식, 일반포장 형식 순서로 소음도가 적은 것으로 조사되었다. 강도 측정 결과로는, 공용개시 후 2달까지 배수성 포장 및 투수성 포장의 강도가 저하되었으며, 일반 포장의 경우 비슷하게 강도를 유지하는 것으로 나타났다. 공용 개월에 따른 강도 변화율은 투수성 포장, 배수성 포장 및 일반 포장형식은 2달 동안 평균 각각 -20.88%, -32.37% 및 +2.43%이다.

7. 결론

본 연구에서는 투수성 포장, 배수성 포장 및 일반 포장형식에 대해 시험포장을 실시하여 소음도, 강도 및 투수시험을 통해 각 포장 형식에 대한 성능을 비교 평가하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 투수성 포장과 배수성 포장 형식에 대한 강도를 비교한 결과, 투수성 포장에 비해 배수성 포장이 높은 강도를 갖는 것으로 나타났다. 그러나 공용 2개월 동안 배수성 포장의 강도 변화율이 가장 크게 나타났다. 이는 배수성 포장은 투수성 포장의 강도와 비교해 평균 1.2배 높은 것은 포장의 투수층 두께에 의한 것이라 판단했으며, 공용일수가 지남에 따라 강도차이가 줄어들다는 것을 알 수 있었다.
2. 배수성 포장형식에 비해 투수성 포장형식의 소음도는 30km/h로 주행 시 2.2dB(A) 저감효과가 있는 것으로 판단했으며, 40km/h로 주행 시 2.6dB(A)

저감되었다. 또한, 일반 포장 형식과 대비해 투수성 포장은 평균 5.2dB(A) 이상의 소음을 저감시켜 확연한 성능을 부각시켰다. 이러한 결과는 Fig. 5와 같이 배수성포장 보다 투수성포장에서 실제 투수층 영역의 두께가 크기 때문에 나타난 결과로 판단할 수 있다. 또한, 동일한 이유로 투수성포장은 배수성 포장에 비해 투수성 포장이 약 1.58배 높은 성능을 보여 투수성포장과 소음저감 성능이 보다 우수한 포장으로 나타났다.

차후 연구에서는 투수성 포장의 지반교란에 대한 문제를 해결하기 위해 지반조사를 실시할 예정이며, 투수층 두께로 인해 발생하는 강도 저하 문제를 해결하기 위해 코어를 통한 실내시험을 실시하여 투수성 포장의 적절한 두께를 도출할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIP) (No. 2011-0030040).

REFERENCES

- Highway & Transportation Technology Institute Korea Highway Corporation (2005). *Noise Reduction of Asphalt Concrete Pavement: Techniques and their Application*, Report No. RT PA-05-19 (in Korean).
- Jang, B., Kim, D., and Mun, S., (2013) "Study on Dynamic Modulus Change Measurement of Permeable Asphalt Mixtures with Various Porosity using Non-Destructive Impact Wave." *International Journal of Highway Engineering.*, Vol.15, No.3, pp.65-74.
- Jang, Y., Kim, D., Mun, S., and Jang, B. (2013). "Proposal for the Estimation of the Hydraulic Conductivity of Porous Asphalt Concrete Pavement using Regression Analysis." *International Journal of Highway Engineering.*, Vol.15, No.3, pp.45-52.
- Kim, D., Lee, S., and Mun, S., (2016). "Evaluation of Optimum Contents of Hydrated-Lime and Anti-Freezing Agent for Low-Noise Porous Asphalt Mixture considering Moisture Resistance." *International Journal of Highway Engineering.*, Vol.18, No.6, pp.123-130.
- Kim, D., Mun, S., An, D., and Son, H. (2013). "A Study on Development of the Prediction Model Related to the Sound Pressure in Terms of Frequencies, Using the Pass-by and NCPX Method." *International Journal of Highway Engineering.*, Vol.15, No.6, pp.79-91.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2017). *Guideline of Asphalt Concrete Pavement Construction* (in Korean).

Mun, S., Kim, D., Jun, E., Lee, S., and Yoon, T. (2004).
“Performance Evaluation of Porous Asphalt Mixtures Using

Hydrated-lime.” *Journal of The Korean Society of Hazard
Mitigation.*, Vol.14, No.6, pp.73-82.