

배수성 아스팔트 표층용 혼합물의 강도특성

이관호^{1*}, 함상민¹

¹국립공주대학교 건설환경공학부

The Strength Properties of Permeable Hot Mix Asphalt for Surface Course

Kwan-Ho Lee^{1*} and Sang-Min Ham¹

¹Dept. of Civil Engineering, Kongju National University

요약 배수성포장은 다양한 장점을 가지고 있어 점차 보편화되고 있는데, 주요 효과로는 수막현상 최소화, 빗물에 의한 미끄럼저항값을 일정하게 유지하고, 차량과 포장체 사이에서 발생하는 소음을 저감시켜준다. 도로소음 및 수막현상 감소효과에 대한 많은 연구가 수행되었다. 본 연구의 목적은 배수성 포장 표층의 역학적 특성(강도 및 탄성계수)을 평가하는 것이다. 시험에 사용된 시편은 선화다짐기를 이용하여 제작하였다. 배수성포장의 상부표층 및 하부표층용 시편을 실험에 이용하였다. 마샬안정도시험(KS F 2377), 자유단공진주시험(KS F 2730), 일축압축시험(KS F 2314), 슈미트햄머시험 등을 수행하였다. 일축압축강도 및 슈미트햄머를 이용한 강도값을 비교 분석하였다.

Abstract The Porous pavement gains popularity because of several benefits. It is to minimize hydro-planning condition, spraying condition, and splash to increase friction resistance, and decrease noise. Also, other studies showed that it is important to have appropriate porosity to reduce noise and water flush. The purpose of this study is an evaluation on the mechanical properties of asphalt pavements for surface course. In this study the specimen was manufactured using the Gyratory compactor in order to compact the strengthened surface course that involved the two-layer pavement. This study is conducted by using Marshall stability test(KS F 2377), Impact resonance test, Schmidt hammer test(KS F 2730), and the Uniaxial compression test(KS F 2314). Using the Uniaxial compression test and Schmidt hammer test, the values of compressive strength and bearing capacity were measured, and the modulus of elasticity for each specimen was respectively measured using the Uniaxial compression test, Impact Resonance test.

Key Words : Porous pavement, Strength, Elastic modulus, Surface course, Impact resonance test

1. 서론

배수성 포장은 1950년대 영국에서 개발되어 80년대 초부터 유럽과 미국을 중심으로 개발되었다. 일반 밀입도 포장이나 SMA 포장과는 달리 전압 후 약 20%의 공극을 갖는 기능성 특수포장으로서 투수성의 표층 밑에 불투수층을 설치하여 빗물을 포장의 가장자리로 배수하는 포장이다. 비가 오는 경우에 수막현상의 방지, 마찰저항의 증진, 물 튀김 및 분무현상의 최소화가 가능하며 자동차 바

퀴와 포장면 사이에서 발생하는 소음을 저감시키고 야간 대형차의 전조등에 의한 시인성 불량 조건을 개선시킬 수 있다[1]. 국내에서는 1999년에 처음 도입하여 현재까지 많은 포장 시공을 하고 있는 추세에 있으며 특히 서울 시 및 주요 대도시 등의 주택가를 중심으로 포장을 시공하고 있다. 배수성 포장의 실용화를 통해 배수성 포장관련 분야의 골재산업, 고점도 아스팔트 바인더 및 개질아스팔트 산업의 전문화 및 고도화를 촉진할 수 있고, 이를 이용한 각종 도로현장의 도로포장기술 분야의 기술개발

본 논문은 국토해양부 지역기술혁신사업의 “환경친화적 연안역 개발 기술” 연구단 과제로 수행되었고, 이에 감사드립니다.

*교신저자 : 이관호(kholee@kongju.ac.kr)

접수일 11년 05월 31일

수정일 11년 06월 28일

게재확정일 11년 07월 07일

및 이의 상용화를 이룰 수 있다고 예상된다[2,7-9].

본 연구에서는 표층용 배수성 아스팔트 포장의 상부표층과 하부표층의 역학적인 특성을 평가하는데 목적이 있다. 이를 위해 슈퍼페이즈 배합설계를 시행하였고, 이 시편에 대한 기본 물성 시험 실시 후 마찰 안정도 시험에 대한 안정도와 흐름값을 평가하였다. 그리고 상부표층과 하부표층의 자유단 공진주 시험을 통해 탄성계수(E)를 측정하였고, 비파괴 시험법인 슈미트해머(Schmidt hammer)를 이용해 반발경도를 측정한 후 강도를 추정하였다. 또한 일축압축시험으로 측정된 압축강도로 탄성계수(E50)를 평가하였다. 마지막으로 각각의 역학적 시험을 통해 얻어진 결과값으로 강도(qu)와 탄성계수(E50)의 상관관계와 추정식으로 구한 강도와 일축압축강도 시험으로 얻어진 강도와의 상관관계를 분석하였다.

2. 국내외 연구현황[1,2]

미국의 배수성 포장은 1930년대 오레곤 주에서 여러 번 실코트 층을 시공하는 방식에서 출발하여 1959년 애리조나 주 및 네바다 주에서 개립도 마모층(OGFC : Open-Graded Friction Course) 혼합물을 처음으로 사용하였다.

1998년 NCAT(National Cement for Asphalt Technology)에서 행한 설문 조사 결과에 따르면 OGFC는 내구성과 미끄럼저항성 등의 문제로 미국의 몇몇 주에서 사용을 중단한 것으로 보고되었으며 주요 원인으로서는 라벨링과 골재이탈 등으로 나타났다. 또한 공극막힘 현상으로 인하여 침투성도 저하되었다. 이에 따라 미국의 많은 주에서는 바인더 및 첨가제 종류의 변화를 시도하고 있으며 입도 분포도 굵은 골재의 비율을 높임으로써 OGFC의 단점을 보완하고자 하였다.

일본에서의 배수성 포장은 1993년부터 보급되었으며, 현재는 밀입도 포장과 배수성 포장이 거의 동등한 비율로 시공되고 있다. 배수성 포장의 도입은 1dB의 소음저감 효과와 차량주행시 시야확보, 미끄럼 현상 방지에 따른 안전성을 확보할 수 있는 장점 등으로 인해 이루어졌다[6].

독일의 배수성 포장은 1986년 처음으로 시공된 이래 1990년부터 소음 저감 등 환경에 대한 관심이 증가되면서 시공 실적도 급격히 증가하고 있는 추세이다. 또한 다공성 혼합물의 내구성 증진과 골재의 부착을 고려하여 SBR, SBS, EVA 등의 폴리머를 사용한 개질 아스팔트를 사용하고 있다. 쇄석 골재는 일반 아스팔트 혼합물에 적용하고 있는 것과 동일한 것이 사용되는데 편평률은 1:3

을 기준으로 사용하고 있다.

국내 배수성포장이 국내에 처음 도입된 것은 1996년 경부고속도로의 보수 공사시 시험 시공한 사례이다. 고속도로는 1996년 경부고속도로 양산 200m 구간에 보수공사 후 2001년 남해고속도로 400m 구간의 보수공사에서, 적용하고 있다. 일반국도는 1999년 충북 영동 국도 500m 구간에 처음으로 보수 공사 시 시험 포장을 실시하였으며, 2000년과 2001년에는 시가지 구간에 소음 방지를 목적으로 약 15km, 34km를 시공하였다. 2002년에는 미끄럼 사고 방지를 위하여 위험 도로 구간에 약 23km를 시공하였고, 2003년에도 약 55km에 적용하였다. 이후 점차 적용 구간이 확대되어 가는 추세에 있으며, 적용 구간의 확대와 효과에 대한 평가가 이루어지면서 특별시, 광역시, 및 지방시의 시가지 구간에서도 적용이 확대되고 있는 실정이다.

3. 실험재료 및 시편제작

3.1 아스팔트 바인더

본 실험의 아스팔트 바인더 선정은 OO에너지의 슈퍼팔트 포러스를 사용하였다. 사용된 아스팔트 바인더의 물성은 표 1에 나타내었다.

[표 1] 바인더 물성 실험
[Table 1] Properties of Asphalt Binder

항 목	시험 단위	기 준	시험 방법	시험 결과
				결과
침입도(25℃)	1/10mm	40 이상	ASTM D 5	55.3
연화점℃	℃	80 이상	ASTM D 36	99.0
신도(15℃)	cm	50 이상	ASTM D 113	75
박막가열 질량변화율	%	0.6 이하	JIS K 2207 (변동가능)	0.13
박막가열 침입도잔류율	%	65 이상	"	94
터프니스 (25℃)	kg·cm	200 이상	일본 포장 시험법 편람	373.6
테너시티 (25℃)	kg·cm	150 이상	"	256.9
점도(60℃)	poise	200,000 이상	ASTM D 2171	500,000 이상
밀도(15℃)	g/cm ³	-	ASTM D 70	1.03
인화점(℃)	g/cm ³	-	ASTM D 92	300 이상

3.2 골재

본 연구에서 사용된 골재는 비중, 흡수율, 마모감량에

서 기준치에 만족함을 실험을 통해 알 수 있었고, 골재의 실험 결과 값과 품질 기준 및 시험방법을 표 2에 나타내었다.

[표 2] 골재의 물리적 특성

[Table 2] Physical Characteristics of Aggregate

항 목	기 준	시험 방법	실험 결과	
			잔골재	굵은골재
진 비 중(%)	2.45 이상	KS F 2503	2.657	2.683
겉보기 비중(%)			2.555	2.649
유효 비중(%)			2.594	2.661
흡 수 율(%)	3.0 이하	KS F 2504	1.5	0.475
마모감량(%)	30 이하	KS F 2508	-	27.24

3.3 최적배합설계

최대 공칭치수 13mm인 하부표층 골재의 배합입도 결정은 배수성 아스팔트의 입도기준에 맞추어 배합을 시행하였으며, 공극률 20%로 만들기 위해 반복적 시편제작을 통하여 표 3에 저소음 아스팔트 혼합물의 입도 범위를 나타내었다.

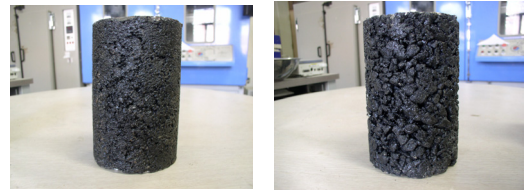
[표 3] 저소음 아스팔트 혼합물 입도

[Table 3] Gradation of Quiet Pavement

체크기 (mm)	통 과 율 (%)	
	하부표층	상부표층
19	100	-
13	92~100	-
10	62~81	100
4.75	10~31	70~90
2.36	10~21	45~70
1.18	-	28~50
0.6	4~17	19~34
0.3	3~12	12~25
0.15	3~8	7~18
0.075	2~7	5~15

아스팔트 함량의 변화에 따라 각각의 손실률을 결정하고 아스팔트 함량과 흐름율과의 관계에서 변곡점을 나타내는 아스팔트 함량을 최적 아스팔트 함량으로 결정하게 되는 침강 손실률 시험을 시행하였다. 하부표층의 최적 아스팔트 함량은 5.1%, 상부표층의 최적 아스팔트 함량은 5%로 결정하였다. 실험용 시편제작을 위하여 135℃ 온도에서 4시간 동안 단기 산화시킨다. 그 후 직경 100mm의 시편을 제작 할 수 있는 몰드를 핫플레이트에

150℃로 40~60동안 가열 시킨 뒤 건조로 안의 배합된 아스팔트 혼합물을 꺼내어 몰드에 넣고 선화다짐기를 이용해 상부표층 30회, 하부표층 50회 다짐을 실시하여 공극률 20%의 시편을 제작하였다(KS F 2377). 배합과 다짐을 통해 만들어진 시편은 공극률을 측정하여 20%에 만족할 때 역학적 실험을 할 수 있도록 절단 작업을 해야 한다. 그림 1은 상부표층 및 하부표층 시편을 나타낸 것이다.



(a) 표층상부
(a) Upper Layer

(b) 표층하부
(b) Lower Layer

[그림 1] 실험용 시편
[Fig. 1] Testing Specimen

4. 역학적 특성 평가

4.1 마찰안정도 시험

마찰안정도란 공시체의 파괴를 야기 시키도록 가해져야 하는 하중이나, 공시체가 견딜 수 있는 최대하중을 나타낸다. 흐름지수 또는 흐름치는 최대하중 하에서 공시체의 총 수직변위를 의미하며, 하중이 가해지는 시작점부터 하중이 감소하기 시작할 때까지의 총 변위를 나타낸다. 수조에서 공시체를 꺼내어 최대하중을 측정할 때까지 시험에 소요된 시간은 30초 이내이어야 한다. (KS F 2337) [3]

표 4의 상부표층은 일반적인 포장에 비해 안정도와 흐름값이 다소 낮게 나타났고, 표 5의 하부표층 배수성 포장의 다짐횟수, 안정도, 흐름값, 공극률 모두 품질기준에 만족함을 알 수 있었다.

[표 4] 표층상부 시험결과 (30회 다짐)

[Table 4] Test Results of Upper Layer

결과	실험 시 편				
	1	2	3	4	평균
안정도(N)	1778	2151	1969	1999	1974.3
흐름값(mm)	0.372	0.328	0.368	0.460	0.382

[표 5] 하부표층의 마찰안정도 시험 (50회 다짐)

[Table 5] Test Results of Lower Layer

결과	시편 배수성 품질기준	실험 시편				
		1	2	3	4	평균
안정도 (N)	4900이상	5096	6247	5217	6722	5820.5
흐름값 (mm)	2~4	4.642	5.708	4.872	2.754	4.494
공극률 (%)	20 이상	20 이상				

4.2 자유단 공진주 시험

자유단 공진주 시험은 실험체의 동적특성을 구하기 위해서 충격반향시험을 이용하여 공진주파수를 측정한다. 자유단 공진주 시험의 구성으로는 응력파 감지에 가속도계(Accelerometer)를 사용하고, 응력파를 발생시키기 위한 Source로는 쇠구슬(Steel Ball)를 사용하였다. 여기서 발생하는 탄성파를 동적신호분석기(Dynamic Signal Analyzer)에 의해서 Voltage 신호를 획득하고, 실시간 주파수 영역 해석을 수행한다[그림 2]. 이렇게 획득한 신호는 Matlab 프로그램을 사용하여 시간영역의 신호를 주파수 영역의 신호로 변화하는 FFT(Fast Fourier Transform) 처리하여 공진주파수를 취득하였다.

비구속압축파를 측정하기 위해서는 그림 3 처럼 공시체의 한쪽 면에 가속도계를 수직방향으로 부착하고 반대쪽 면을 충격해머나 쇠구슬로 가격하여 응력파를 발생시킨다. 이렇게 응력파가 양쪽 단에서의 반사를 반복하게 될 때, 공시체 길이의 두 배의 파장에 대한 정현파가 가장 지배적인 성분이 되고 이성분의 주파수를 파워 스펙트럼(Power Spectrum)에 의하여 결정한 후, 다음 식 (1)에 의해 비구속압축파의 속도를 구할 수 있다.

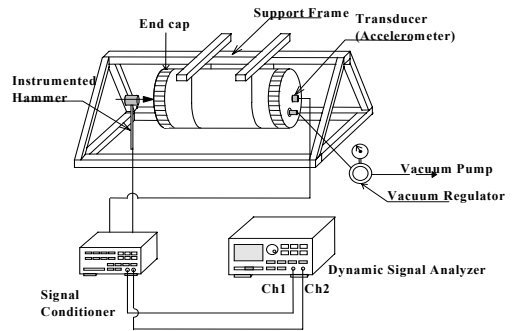
$$V_c = f_c \times \lambda = f_c \times 2l \tag{1}$$

여기서, f_c 는 비구속압축파의 공진주파수이고, l 은 공시체의 길이이다.

또한, 비구속압축파의 속도를 이용하여 식 (2)에 의해 영탄성계수(Elastic Modulus)를 결정할 수 있다.

$$E = \rho \times V_c^2 \tag{2}$$

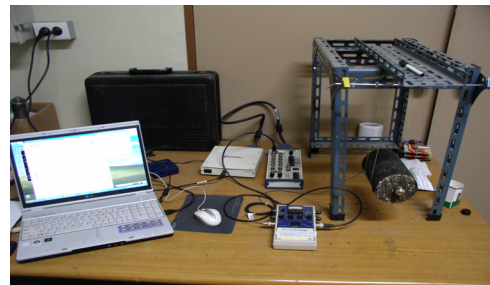
여기서, ρ 는 공시체의 밀도(Density)이다.



[그림 2] 자유단 공진주시험 개요도

[Fig. 2] Setup of IR Test

상부표층과 하부표층 시편을 각 10개씩 준비하여 시편 1개당 5회 이상의 반복 측정을 실시하여 비슷한 결과값이 나오는 공진주파수를 얻었다. 지지대에 연결은 시편의 1/3의 지점을 맞추어서 지탱하였으며 진자의 운동을 이용하여 쇠구슬로 시편의 중심부를 타격하였다. 쇠구슬은 직경 10 mm의 것을 사용하였다.



[그림 3] 자유단 공진주 시험 장비

[Fig. 3] Equipment of IR Test

자유단 공진주 시험의 상부표층과 하부표층의 결과값을 이용하여 식 (1)과 식 (2)를 통해 탄성계수(E)값을 얻을 수 있었다. 결과 값은 다음의 표 6과 같다.

[표 6] 공진주 시험을 이용한 탄성계수

[Table 6] Stiffnes by IR Test

	번호	밀도 (ton/m ³)	압축파속도 Vc(m/s)	탄성계수 E(MPa)
표층 상부	평균	2.25	2066.8	9618.6
	표준 편차	0.108	117.8	1059.6
표층 하부	평균	1.92	2007.1	7628.5
	표준 편차	0.060	149.9	1025.4

4.3 반발경도시험

슈미트해머는 1948년 스위스의 E. Schmidt 에 의해 고안된 것으로 스프링의 복귀력으로 콘크리트 표면에 충격을 주어 반발 경도를 측정하여 경화 콘크리트의 압축 강도를 추정하는 것이다.

시험횟수는 ASTM C805에서는 10회, BS 1881 : Part 202 등에서 12회로 제시하고 있으나 시험빈도가 증가됨에 따라 시험값의 신뢰수준이 향상됨은 물론, 현재 국내 안전진단의 실정상 20회 시험값을 구하는 것이 일반화되어 있고, 테스트 해머 시험을 8-10회 더 수행하는데 큰 무리가 없으므로 이 규격에서는 20회로 규정하였다[4].



[그림 4] 상부표층의 반발경도측정
[Fig. 4] Hardness Test of HMA

한 군의 시험에서 개별 시험값의 변동계수는 일반적으로 10% 정도이다. 변동계수는 시편의 강도가 커짐에 따라 감소하며, 굵은 골재의 양과 크기가 증가하면 함께 증가한다. ASTM C805에서는 시험값의 평균으로부터 ± 6 을 벗어나는 값을 결격 처리하도록 정하고는 있으나, 이는 시편 강도의 영향을 반영하지 않은 것이므로 평균 값에 대한 오차가 $\pm 20\%$ 를 초과하는 경우의 시험값을 버리도록 한다. 강도 및 탄성계수 추정을 위해서 시험방법 및 시험조건에 맞는 방법을 선정하는 것이 중요하다. 다음은 국내에서 주로 이용되고 있는 제안식을 정리한 것이다.

- 1) 일본재료학회에서 발표한 강도 추정식

$$F_c = 1.27R_0 - 18 (MPa)$$

- 2) 동경건축재료검사소에 의한 강도 추정식

$$F_c = (10R_0 - 110) \times 0.098 (MPa)$$

- 3) U. S. Army 시험소 식

$$F_c = (-120.6 + 8.0R_0 + 0.0932R_0^2) \times 0.098 (MPa)$$

최대공칭치수 13mm의 입도로 제작된 상부표층과 최

대공칭치수 19mm의 입도로 제작한 $\Phi 10 \times 15$ cm의 공시체를 슈미트해머를 이용해 수직으로 20회를 타격하여 반발경도를 측정하였다. 이렇게 얻은 반발경도 값에 타격방향(-90°)에 대한 보정을 하여 KS규격에 제시된 식으로부터 압축강도를 추정하였다. 표 7과 같이 상부표층과 하부표층의 슈미트해머의 반발경도 값을 이용하여 압축강도를 추정해 본 결과 제안식에 대한 값의 평균값의 크기는 비슷하게 나왔음을 알 수 있었다. 또한 하부표층의 추정 압축강도보다 상부표층의 추정 압축강도가 더 큼을 알 수가 있었다.

[표 7] 상부표층의 추정압축강도

[Table 7] Predicted Strength of Upper Layer

층	제안식	시험결과	
		시편별 추정압축강도(MPa)	
		평균	표준편차
표층 상부	일본재료학회	18.47	1.19
	동경건축재료검사소	17.38	0.90
	U.S Army	18.23	1.25
표층 하부	일본재료학회	8.46	2.25
	동경건축재료검사소	9.63	1.77
	U.S Army	8.49	2.08

4.4 일축압축강도시험

일축압축강도(q_u)에 영향을 미치는 요인은 흙의 상태, 고화제의 종류, 온도, 흙의 양생기간 등 여러 가지가 있다. 일축 압축 시험기는 변형 제어식 압축 장치, 하중계 및 변위계로 구성되며, 상부표층과 하부표층의 각 시편에 대해 실험을 실시하였다.(KS F 2314) [5]

흙의 응력-변형률(σ - ϵ)곡선은 일반적으로 위로 볼록한 곡선으로 나타나며, 다만 초기의 곡선 부분에서는 거의 직선상이다. 따라서 $q_u/2$ 되는 응력까지는 직선이라고 가정하고 활선계수(Secant modulus)개념의 탄성계수(E_{50})을 다음 식과 같이 구한다.

$$E_{50} = \frac{q_u/2}{q_u/2 \text{에 대응하는 변형률}} \times 100$$

탄성계수(E_{50})는 일반적으로 시료의 응력변형(Stress-Strain)의 관계를 나타낸다. 일축압축강도(q_u)가 증가함에 따라 탄성계수(E_{50})도 증가하는 경향을 나타내며, 여기서는 $E_{50} = (350 \sim 1000)q_u$ 의 식으로 나타낼 수 있다고 기술하였다.(Kawasaki, 1981)

표 8은 상부표층과 하부표층에 대한 일축압축강도(q_u)를 나타내고 있다. 굵은 골재의 함유량이 더 많았던 하부표층이 공극률로 인하여 상부표층의 일축압축강도보다 더 작은 값을 얻었다. 또한, 위의 일축압축강도(q_u)의 결과값을 이용하여 활선계수(Secant modulus) 개념의 탄성계수(E_{50})의 값을 표 8에 나타냈다.

[표 8] 일축압축강도(MPa) 및 탄성계수
[Table 8] Strength(MPa) and Stiffness

실험	결과		평균	표준편차
	표층			
일축압축강도	상부		4.30	0.88
	하부		2.74	0.28
탄성계수	상부		152.4	24.3
	하부		159.1	29.0

6. 결론

본 연구는 2-Layer 아스팔트 혼합물의 상부표층과 하부표층의 강도 및 탄성계수 특성을 평가하기 위하여 마샬안정도 시험, 자유단 공진주 시험, 슈미트 해머를 이용한 반발경도 시험, 일축압축시험을 실시하였고 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 배수성포장기준에 입각하여 골재기준과 바인더 기준, 골재 배합기준 등을 고려한 최대공칭치수 13mm 하부표층의 실험값은 배수성 포장 기준을 모두 만족시켰다.
- (2) 자유단 공진주 시험으로 상부표층과 하부표층의 강도 값을 얻은 결과 상부표층의 경우 평균 9618MPa, 하부표층은 평균 7628MPa 정도로 측정되었다.
- (3) 슈미트해머 시험으로 상부표층과 하부표층의 강도 값을 얻은 결과 상부표층의 경우 17.3-18.4MPa, 하부표층의 경우 8.46-9.63MPa 정도로 측정되었다.
- (4) 일축압축시험기로 상부표층과 하부표층의 압축강도를 측정해본 결과 상부표층은 평균 4.30MPa, 하부표층은 평균 2.74(MPa)의 값이 나왔다. 이는 하부표층의 경우 상부표층의 공극률보다 높기 때문에 강도의 값이 작게 나왔음을 알 수 있었다.

References

[1] No, Seong-Yul (2005), "Desi후 and Construction of

Quiet Pavement", Kumi Seokwan

- [2] Jeong, Tae-Hyun (2009), "Mix Design and Strength Properites of Quiet Pavement", MS Thesis, Kongju National University
- [3] Korean Agency for Technology and Standard (2007), "KS F 2337 "
- [4] Korean Agency for Technology and Standard (2008), "KS F 2730"
- [5] Korean Agency for Technology and Standard (2001), "KS F 2314"
- [6] Korean Roadway Association (2003), "Introduction of Two-Layer Quiet Pavement System of Japan"
- [7] Browne, M.J. (2006), "Feasibility of using a gyratory compactor to determine compaction characteristics of soil", Master of Science, Montana State University
- [8] Carsten Bredahl Nielsen (2005), "Construction of Two-Layer Porous Pavements", Quiet Asphalt Symposium
- [9] Ferguson, B. K. (2005), "Porous Pavements", Taylor & Francis

이 관 호(Kwan-Ho Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1996년 12월 : 미국 Purdue Univ. Civil Eng., (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : 국립공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>

도로공학 및 지반공학

함 상 민(Sang-Min Ham)

[정회원]



- 2009년 2월 : 국립공주대학교 건설환경공학부 (공학사)
- 2011년 2월 ~ 현재 : 국립공주대학교 건설환경공학부(공학석사)

<관심분야>

도로공학 및 지반공학