아스팔트 혼합물의 투수 특성 평가

Evaluation of Permeability of Hot Mix Asphalt

이관호* · 김성겸** · 김정구***

Lee, Kwan-Ho · Kim, Seong-Kyum · Kim, Jeong-Ku

Abstract

In recent, lots of multi-functional hot mix asphalt, including permeable pavements, quiet pavement, SMA, etc, have been developed. The performance and permeability of each pavement highly depend on the void characteristic of hot mix asphalt. Couple of different mixtures, including permeable asphalt pavement, SMA and dense-graded asphalt mixture, were used for void analysis. In case of PA-13 permeable asphalt pavement and SMA 10 mm, the effective void, total void and the ratio of connection between void increase as the level of compaction decreases. In case of permeability, the dense graded HMA showed little permeable. The permeability of permeable pavement were 0.18 to 0.41 cm/s. The modified Hazen model and Kozeny-Carman model were used to predict the permeability of each pavement. The $K = C \times D_{20}^2$ of modified Hazen model and $K = \frac{1}{C \times T^4 \times S^{21+e}} \frac{e^4}{S^2}$ of KC model were recommended for permeable pavement.

Key words : Void, Compaction energy, Permeable pavement, Hot mix asphalt, Permeability

요 지

최근 다양한 기능성을 고려한 배수성 아스팔트, 저소음 아스팔트, 보습성 아스팔트, SMA 등 다양한 아스팔트 혼합물이 개발되어 이용되고 있다. 이러한 아스팔트 혼합물의 공용성능 및 투수특성은 공극특성과 밀접한 상관관계를 가진다. 이에 본 연구에서는 배수성아스팔트 혼합물 2종, SMA 10 mm 혼합물 및 일반밀입도 아스팔트를 이용하여 공극특성과 투수특성을 분석하였다. PA-13 배수성포장용 아스팔트 혼합물과 SMA 10 mm 혼합물의 경우 다짐횟수가 작을수록 투수특성에 영향을 주는 유효공극량 및 총공극량이 크게 나타났다. 정수위 투수시험을 이용하였다. 투수계수의 경우 밀입도 아스팔트 혼합물은 거의 투수가 되지 않았다. 배수성포장의 경우 0.18-0.41 cm/s 정도로 평가되었다. 또한, 아스팔트 혼합물의 투수계수 예측을 위하여 기존의 Hazen 공식과 Kozeny-Carman 공식을 변형하여 적용하였다. Hazen 공식의 경우 $K = C \times D_{20}^2$ 모형, KC 모델의 경우 $K = \frac{1}{C \times T^4 \times S^{21+e}} \frac{e^4}{S^2}$ 를 이용하는 것을 제안하였다.

핵심용어 : 공극, 다짐에너지, 배수성포장, 아스팔트혼합물, 투수계수

1. 서 론

아스팔트 포장도로의 파손은 매우 다양하고, 많은 복합적인 요소에 의해 나타난다. 아스팔트 포장의 파손 원인 중 가장 중요한 요소는 차량하중 및 교통량이다. 또한, 외부 환경에 의한 기후변화 및 강우/강수 등이 직접적인 영향을 주고 있다. 아스팔트 포장의 파손에 직/간접적으로 큰 영향을 주는 요소중의 하나가 배수문제와 연결되는 투수계수이다.

일반적으로 아스팔트 포장체는 불투수층 개념으로 설계하고 있다. 그러나, 최근 다양한 기능성 아스팔트 포장체가 개

발되어 이용되고 있다. 특히, 도심지 도로의 우천시 수막현상 및 빗길 미끄러짐 현상을 저감하기 위한 배수성 및 투수성 포장이 확산되고 있는 실정이다. 이러한 배수성 및 투수성 포장의 적절한 설계를 위해 투수계수를 정확히 평가하고 분석하는 기술이 필요하다. 아스팔트 포장의 투수계수 특성에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 아스팔트 혼합물내의 공극(Void)이다.

아스팔트 혼합물의 경우 이러한 공극들을 직접 관찰하기 어렵기 때문에 그 크기 및 분포 상태를 파악하기 쉽지 않다. 육안으로 보이지 않는 아스팔트 내부구조를 관찰하기 위해서

*교신저자. 정회원. 공주대학교 건설환경공학부 교수(Tel: +82-41-521-9313, Fax: +82-41-568-0287, Email: kholee@kongju.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University

**정회원. 공주대학교 건설환경공학부 박사과정

Member. Ph.D Candidate, Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University

***정회원. 공주대학교 건설환경공학부 박사과정

Member. Ph.D Candidate, Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University

Fig. 1. Velocity vs. Hydraulic Gradient

최근 각광받는 기술이 Micro Computed Tomography(CT)를 활용한 방법이다. Micro X-ray CT는 내부의 단층영상을 재구성하는 비파괴검사의 한 방법으로 3차원 대상의 단면을 생성하기 위해 물질을 투과하는 X-ray를 사용하여 3차원 대상의 원형에 손상을 가하지 않고 마이크로(Micro)단위의 픽셀(Pixel)크기를 가진 단면이미지를 통해 물질내의 다양한 위치의 정보를 획득하고 수학적으로 연산하는 과정을 거쳐 피사체 내부의 투과정보를 얻는 기술이다(Shin et al., 2012). 최근에는 아스팔트 혼합물의 공극특성과 파손특성에 대한 다수의 연구가 Wang et al. (2001), Tashman et al. (2004)에 의해 수행되었다. 아스팔트 혼합물의 공극과 공극을 통과하는 물의 흐름에 대한 연구는 Auzerais et al. (1995) 등이 있다.

본 연구에서는 국내 배수성 아스팔트 혼합물 PA-13, 배수성 PA-20, 미국 AASHTO SMA 10mm시편을 이용하여 아스팔트 혼합물의 투수특성을 평가하고자 한다

2. 아스팔트 혼합물의 투수계수모형

일반적으로 유체의 흐름은 층류(Steady)와 난류(Transient or turbulent)로 구분된다. 층류는 유속이 작은 경우 주로 발생하며, 난류는 유속이 큰 경우 발생한다 (Scheidegger 1974). 배수성 또는 저소음 아스팔트포장과 같이 공극이 큰 재료를 통과하는 유체의 흐름은 2가지 매카니즘으로 구분될 수 있다. 첫째는, creeping flow라고 하는 유체의 점성에 의해 영향을 받는 흐름특성과 둘째는 convection flow라고 하는 재료들 간에 발생하는 관성력 등이다. 이러한 유체의 흐름특성은 주로 레이놀드수(Reynolds number, Re)에 영향을 받는다. 레이놀드수는 유체의 밀도, 점도, 유속 및 공극이 큰 재료의 크기의 함수로 표현된다. 동일한 유체 및 공극이 큰 재료의 경우 유속의 변화는 흐름방향에 따른 동수경사(Hydraulic gradient, i)의 함수로 표현된다. Fig. 1과 같이 동수경사와 유속의 상관관계는 일정 속도 이상이 되면 비선형관계를 나타낸다.

Holtz와 Kovacs (1981)은 흙속에서의 물의 흐름은 층류에 가깝고, 동수경사(i)와 투수계수(k)의 함수로 표현하였다. 공극을 가지고 있는 대부분의 매체의 경우 투수계수는 주로 작은 레이놀드수의 범위인 층류로 해석을 하였다(Adler et al., 1990; Martys et al., 1994; Masad et al., 2000). Darcy(1856)는 단위시간 및 면적당 유량은 단면적(A), 투수계수 및 동수

경사에 비례한다는 것을 수식($q=kiA$)으로 표현하였다. 유체의 평균 속도는 q 를 단면적 A 로 나눈 것으로 식 (1)와 같은 벡터로 표현할 수 있고, Absolute permeability tensor(K)는 유체의 단위중량과 점도를 고려하여 식 (2)와 같이 정의된다. 유체의 단위중량과 점도는 일반적으로 유체의 온도에 따라 변화하는 값이므로, 투수계수 정의시 온도에 대한 보정이 반드시 필요하다.

$$\vec{V} = \frac{1}{\mu} K \cdot \vec{\nabla} P \quad (1)$$

$$k = K \frac{\gamma}{\mu} \quad (2)$$

Holtz와 Kovacs (1981)은 공극이 있는 매체의 투수계수는 입자의 유효크기, 공극의 크기 및 형상, 물의 흐름 체적 및 재료의 포화도 등에 영향을 받는 것을 증명하였다. 또한, 많은 연구자들이 암석, 점토, 콘크리트 및 아스팔트의 투수계수에 대한 연구를 수행하였다(Huang et al., 1999; Shackelford et al., 2000; Mohammad et al., 2003.) 아스팔트 혼합물의 투수계수에 영향을 주는 요소로는 위의 항목과 물의 침투량(Water infiltration), 골재/아스팔트/공극 등이 추가된다. 특히, 골재 및 공극의 크기, 형상, 분포도 등은 아스팔트 혼합물의 투수특성을 결정하는 매우 중요한 요소이다.

Zube(1962), Brown et al.(1989)은 밀입도 아스팔트 혼합물의 경우 현장시공시 공극률이 8% 이상이 되면 상당히 큰 투수특성을 보임을 증명하였다. 이외에도 미국 플로리다교통국(Florida DOT)에서는 현장시공시 공극률이 8% 이하인 경우에도 투수계수가 클 수 있음을 증명하였다.

Mohammad et al.(2003)은 슈퍼페이버 혼합물에 대한 투수특성을 평가하였고, 공극의 양, 다짐에너지, 골재의 입도 및 층별 다짐두께가 투수계수에 큰 영향을 준다는 것을 증명하였다. 일반적으로 세립도 아스팔트는 불투수성을 가지고, 개립도/조립도아스팔트는 공극률 5.3%이상 및 현장시공시 1층 다짐깊이 6 cm 이상인 경우 투수계수가 커지는 것으로 나타났다.

Cooley et al.(2002)은 골재의 공칭최대치수(NMAS) 및 혼합물의 밀도가 투수계수에 영향을 주는 것을 밝혔다.

일반적으로, 아스팔트 포장의 투수계수 모형은 크게 4가지 정도, 즉 해석형 모델, 확률형 모델, morphological, 수치해석 모델 등으로 구분된다. Analytical model은 주로 공극의 특성을 평가하여 투수계수 모형을 적용하였고, 주요 모형은 Table 1과 같다.

Analytical model은 기본적으로 $K = f(n) \cdot C \cdot D_s^2$ 으로 표현할 수 있다. 여기서, $f(n)$ 은 공극 또는 공극률 함수이고, C 는 공극의 분포특성, D_s 는 골재의 평균크기를 의미한다. 해석적 모델은 투수계수를 간단한 형태로 표현하지만, 실제 사용되는 골재의 크기의 다양성 등을 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다.

확률모델은 주로 공극의 크기 및 분포, 공극의 연결가능성 등을 확률적으로 평가하여 개발된 모델로서 Taylor et al. (1990) 등이 연구를 수행하였다.

Table 1. Models of permeability

Model	Permeability	Constants
Fissure	$K=Cn_a b^2$	$C=1/12$ for parallel fissures of width b
Capillary Tubes	$K=Cn_a \delta^2$	$C=1/32$ for tube in 1-D $C=1/96$ for tube in 3-D
	$K=Cn_a \int_0^\delta \delta^2 \alpha(\delta)$	$C=1/96$ for capillarity in orthogonal directions
Resistance to Flow	$K=\frac{Cn_a^2 D_s^2}{\lambda(1-n_a)}$	Factor of packing, $\lambda=3\pi$ for single sphere in infinite fluid; $C=\pi/6$ for spherical particles
Hydraulic Radius	$K=\frac{Cn_a^3 D_s^2}{(1-n_a)^2}$	$C=1/180$ for spherical particles

n_a =porosity(percent air voids), δ =air void diameter, $\alpha(\delta)$ =fraction of air void diameter δ , D_s =average particle size.

Morphological analysis model은 주로 매체내의 미세입자의 기하구조특성을 이용하여 개발된 모형으로 Lock et al. 2002 등이 제안하였다. 투수가 가능한 미세공극의 연결을 랜덤 네트워크 개념을 적용하여 해석하였다. 이러한 해석법은 매체내의 공극의 분포특성을 평가하는 것이 투수계수 모형개발에서 매우 중요한 항목이다. 전지주사현미경을 이용하여 얻은 시료의 이미지 사진을 분석하여 공극의 특성, 면적, 분포도등을 평가하였다. 이러한 이미지 분석결과는 이미지의 해상도에 의해 크게 영향을 받는 것을 증명하였다.

수치해석 모델은 유체의 흐름방정식을 이용하여 투수계수를 평가하는 기법으로 공극속을 통과한 유체의 흐름과 연관된 연속방정식 및 Navier-Stokes 방정식을 이용한다.

3. 실험재료 기본물성

3.1 아스팔트 바인더

아스팔트 혼합물 시편 제작에 사용한 바인더는 밀입도용 AP-3 및 고분자 개질 아스팔트(SBS PMA)를 사용하였다. 현재 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서 가장 많이 사용하는 고무계통의 열가소성 탄성중합체인 SBS(Styrene-Butadiene-Styrene Block Co-polymer)를 개질제로 사용하고 있는 바인더로 이는 일반 아스팔트 바인더에 비해 소성변형 및 균열에 대한 저항성을 높인 제품이다. 사용된 아스팔트 바인더의 물성은 Table 2에 나타내었다(Shin et al., 2012).

3.2 골재

본 연구에서 사용된 골재는 비중, 흡수율, 마모감량에서 기준치에 만족함을 실험을 통해 알 수 있었고, 골재의 실험 결과 값과 품질 기준 및 시험방법을 Table 3에 나타내었다.

3.3 아스팔트 혼합물

본 연구에서는 국내에서 사용되는 배수성 아스팔트 혼합물 PA-13 및 PA-20, 미국 AASHTO SMA 10 mm, 밀입도 아

Table 2. Properties of asphalt binder

Type	Spec.	Testing Method	Testing Result
Penetration (25°C), (1/10 mm)	> 40	ASTM D 5	55.3
Softing Point (°C)	> 80	ASTM D 36	99.0
Ductility (15°C)(cm)	> 50	ASTM D 113	75
Mass of RTFO (%)	< 0.6	JIS K 2207 (변동가능)	0.13
Penetration after RTFO (%)	> 65	"	94
Toughness (25°C), (kg·cm)	> 200	일본 포장 시험법 편람	373.6
Viscosity (60°C), (poise)	> 200,000	ASTM D 2171	> 500,000
Density (15°C), (g/cm³)	-	ASTM D 70	1.03
Flash Point (°C), (g/cm³)	-	ASTM D 92	> 300

Table 3. Properties of aggregate

Test Items	Spec.	Test Method	Test Result	
			Fine Agg.	Coarse Agg.
Apparent S.G.	2.45 이상	KS F 2503	2.66	2.68
Bulk S.G.			2.56	2.65
Effective S.G.			2.59	2.66
Absorption (%)	3.0 이하	KS F 2504	1.5	0.475
Abrasion (%)	30 이하	KS F 2508	-	27.24

Table 4. Properties of hot mix asphalts

Type of HMA	Permeable HMA PA-13	Permeable HMA PA-20	SMA 10 mm	Dense Graded HMA 19 mm
Sieve Size (mm)				
25.0	-	100	-	100
19.0	100	95~100	-	75~100
12.5	92~100	53~78	100	-
9.5	62~81	35~62	93~100	45~70
4.75	10~31	10~31	25~45	30~50
2.36	10~21	10~21	15~30	20~35
1.18	-	-	-	-
0.60	4~17	4~17	11~20	5~20
0.30	3~12	3~12	10~16	3~12
0.15	3~8	3~8	9~15	2~8
0.075	2~7	2~7	8~13	0~4
Optimum Asphalt Content(%)	5.0%	5.5%	6.0%	4.3%
Theoretical Max. Density (g/)	2.450	2.460	2.410	2.468
Air Void (%)	35 blow	23.7	21.7	23.2
	50 blow	19.4	20.0	21.9
	75 blow	18.1	19.4	21.5

스팔트 혼합물 19 mm의 표층용 아스팔트 혼합물을 이용하였다. 표층용 아스팔트 혼합물의 입도, 최적아스팔트 함량, 이론최대밀도값, 평균공극률 등은 Table 4과 같다. 실험용 시편을 제작하기 위하여 충격식 다짐방법인 마샬다짐기 다짐방법을 이용하여 실험용 시편을 제작하였다.

4. 실험 방법 및 결과분석

4.1 통계분석을 이용한 공극분포특성

Fig. 2는 X-ray CT를 이용하여 한 시편에서 6-7 mm 간격으로 10개의 이미지를 선정한 후 선정된 이미지의 공극 크기에 따른 분포도를 히스토그램을 통하여 조사하였다(Shin et al., 2012). 히스토그램은 하나의 시편에서 일정간격으로 선정한 10개의 이미지를 통하여 공극면적, 공극 갯수 특성을 측정하여 나열한 후 그래프를 통하여 조사하였고, 또한 평균공

극의 크기 및 표준편차를 제시하였다. 일반적으로 다짐에너지가 작을수록 평균공극의 크기가 크게 나타났다.

X-Ray CT를 이용한 이미지 분석결과와 평균값은 Table 5와 같다. 배수성 포장용 아스팔트 혼합물 PA-13의 경우 다짐에너지에 따른 최소공극의 크기는 거의 유사한 값을 나타냈지만, 최대공극의 크기 및 공극의 평균크기는 다짐에너지가 작을수록 크게 나타났다. 공극의 평균면적은 35타 및 50타에서 2.8 mm^2 정도로 나타났다.

SMA 10 mm 시편을 분석한 결과, 배수성 포장 PA-13과 거의 유사하는 결과를 나타내었다.

밀입도 아스팔트 혼합물의 경우 최대공극면적인 3.37 mm^2 정도로 PA-13 및 SMA 10 mm 혼합물에 비해 상대적으로 매우 작게 나타났다. 또한, 공극총면적, 평균면적, 개체수 등이 매우 작게 나타났고, 단면 공극률이 0.6%로 거의 공극이 없는 것으로 분석되었다.

Fig. 2. Statistical Analysis of Void Distribution

Table 5(a). Image analysis for PA-13

Characteritic	HMA PA-13 35 Blow	PA-13 50 Blow	PA-13 75 Blow
Min Void (mm ²)	0.44	0.44	0.44
Max Void (mm ²)	14.55	15.11	12.09
Aver. Area (mm ²)	2.80	2.79	2.44
Total Area (mm ²)	159.2	103.2	104.0
# of Voids	57	38	43
% of Voids	8.4%	5.5%	5.3%

Table 5(b). Image analysis for SMA and dense grade asphalt mixture

Characteritic	HMA 35 blow	SMA 50 blow	SMA 75 blow	Dense 35 blow
Min Void (mm ²)	0.46	0.43	0.42	0.48
Max Void (mm ²)	15.47	10.81	10.38	3.37
Aver. Area (mm ²)	2.36	2.18	2.10	1.32
Total Area (mm ²)	144.7	139.7	129.5	10.8
# of Voids	61	64	62	7
% of Voids	7.3%	7.2%	6.4%	0.6%

4.2 투수계수방법 및 측정값

4가지 아스팔트 혼합물에 대한 투수계수 시험을 시행하였다. 아스팔트 혼합물의 투수특성을 평가하기 위하여 KS F 2494의 정수위투수시험을 이용하였다. Fig. 3은 정수위투수시험 방법과 투수계수 방정식, 시험장비를 보여주고 있다.

본 연구에 적용되는 다양한 아스팔트 표층용 혼합물에 대한 투수계수시험결과는 Table 6과 같다. 다짐된 시편의 다짐 에너지에 따라 투수계수가 변하는 것을 알 수 있으며, 중간 정도 교통량 조건(마살다짐 50타/면)과 중하중교통량조건(마살다짐 75타/면)의 경우 투수계수의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 각 시편의 투수계수를 비교하였을 때 다짐에너지가 증가할수록 투수계수가 감소하는 결과가 나타났다.

다짐에너지에 영향을 가장 많이 받는 시편은 PA-13으로 나타났다. PA-13과 비교했을 때 PA-20과 SMA 10 mm의 경우 다짐에너지에 따른 투수계수 변화가 적게 나타났으며 투수계수 또한 PA-20보다 크게 나타났다. 이는 중간정도 교통량 조건(마살다짐 50타/면)을 기준으로 했을 때 약 1.8에서 2.4배에 가까운 투수계수 차이를 보였다.

또한, 밀입도 19 mm와 배수성 포장의 경우 약 200배에 가까운 투수계수 차이를 보였으며 이는 투수가 거의 일어나

Fig. 3. Testing Setup

Table 6. Measured permeability (cm/s)

HMA	Compaction	Measured Permeability (cm/s)	Standard Div.	Permeability at 15°C (cm/s)
Permeable 13mm (PA13)	35	0.444	0.115	0.41
	50	0.195	0.017	0.18
	75	0.190	0.058	0.18
Permeable 19mm (PA19)	35	0.446	0.059	0.41
	50	0.440	0.059	0.40
	75	0.374	0.054	0.33
SMA 10mm (SMA10)	35	0.407	0.131	0.38
	50	0.332	0.020	0.30
	75	0.308	0.018	0.28
Dense 19mm (DEN19)	35	0.002	0.0015	0.002
	50	0.0022	0.0003	0.002
	75	0.0022	0.0003	0.002

지 않으며, 중하중 교통량 조건의 경우 불투수층에 가까운 상태를 보였다.

4종의 아스팔트 혼합물의 투수계수와 공극률의 상관관계는 Fig. 4에 나타내었다. 그림에 나타난 것과 같이 공극률이 커짐에 따라 투수계수가 지수형으로 커지는 것으로 나타났다. 이의 상관관계는 $R^2=0.967$ 로 매우 높게 나타났다. 일반적으로 밀입도 19 mm의 경우 거의 불투수층에 가까운 결과를 나타냈다. 그림에 나타난 것과 같이 아스팔트 혼합물의 투수계수는 공극률이 15% 정도는 되어야 0.005 m/sec 정도의 물의 흐름이 가능한 투수계수값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 일반적인 밀입도 아스팔트 포장체에서는 균열등이 발생하지 않는 한 포장체를 통한 투수가 거의 발생하지 않음을 의미한다. 배수성포장 13 mm 및 19 mm, SMA 10 mm 아스팔트 혼합물은 0.002 m/sec에서 0.004 m/sec 정도의 투수계수를 가지며, 이는 모래질 흙의 투수계수범위에 포함되는 값이다.

아스팔트 혼합물의 투수계수 모형을 개발하기 위하여 기본적으로 $K=f(n) \times C \times D_s^2$ 으로 표현할 수 있는 Analytical model을 이용하였다. Analytical model로는 Hazen 공식과 Kozeny-Carman 공식을 기본으로 이를 실측값과 비교하여 국내 아스팔트 혼합물 특성이 고려된 투수계수 모형으로 변환

Fig. 4. Relationship of Air Void and Permeability

Fig. 5. Modified Hazen Equation

Fig. 6. Equality Line of Modified Hazen Equation

하여 제시하고자 한다.

첫째로, Fig. 5는 Hazen 공식, $K = C \times D_{10}^2$ 을 이용한 것으로 입도분포곡선에서 D_{10} 대신 D_{20} 및 D_{30} 을 적용하여 투수계수를 평가하였고, 이를 실측값과 비교하였다. 실측한 값과 각각의 입도크기를 이용한 좌측 그래프의 경우 아스팔트 혼합물의 투수특성을 제한적으로 반영하는 것으로 나타났다. 실측값과 예측값의 상관관계를 보기 위하여 우측 그래프에 equality line을 작도하여 각각의 입도 크기중 어느 것이 가장 좋은 결과를 주는지 Fig. 6을 이용하여 평가하였다. 평가 결과, D_{20} 을 이용한 결과가 실측값과 비교적 유사한 결과를 나타내는 것으로 나타났다. 따라서, 아스팔트 혼합물에 Hazen 공식을 이용할 경우 $K = C \times D_{20}^2$ 을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

둘째로, Kozeny-Carman 공식의 투수계수 모형 $K = \frac{1}{C \times T^4 \times S^2} \frac{e^3}{1+e}$ 를 이용한 것이다. 방정식에서 C 는 투수계수용 상수로서 보통 2에서 3을 적용한다. e 는 아스팔트 혼합물의 공극률, S 는 아스팔트 혼합물 골재의 비표면적(m^2/kg), T 는 골재와 골재사이의 공극을 통과하는 물의 실질적인 이동거리를 직선거리로 나눈 값을 의미한다. Fig. 7는 충격식다짐 (Marshall Compaction)을 이용하여 제작한 시편의 측정된 투수계수와 KC공식을 이용하여 예측한 투수계수의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 것과 같이 전체적으로 $R^2=0.413$ 정도로 비교적 상관관계가 적은 것으로 나타났다. 위의 공식을 $K = \frac{1}{C \times T^4 \times S^2} \frac{e^4}{1+e}$ 으로 수정하여 결과를 분석하였고, 이를 Fig. 8에 나타내었다. $R^2=0.885$ 정도이고, equality line과 매우 근접한 결과값을 보여주고 있다. Fig. 9는 선회 다짐(Gyratory Compaction)을 이용하여 제작한 시편의 측정

Fig. 7. Predicted Equation of K-C Model

Fig. 8. Modified Equation of K-C Model for Marshall Compaction

Fig. 9. Predicted Equation of K-C Model for Gyratory Compaction

된 투수계수와 KC공식을 이용하여 예측한 투수계수의 상관관계를 나타낸 것이다. $R^2=0.644$ 정도로 충격식 다짐시편에 비해 상관관계가 다소 개선된 것으로 나타났다. Fig. 10은 수정된 KC공식을 이용한 것으로, $R^2=0.988$ 정도로 크게 개선되었다. 다만, 측정값과 예측값사이의 관계는 예측값이 다소 작게 산정되는 결과를 나타내었다.

좀더 많은 시험자료를 이용한 모형에 대한 검증이 필요하지만, 제한된 결과로부터 아스팔트 혼합물의 투수계수는 공극률과 물의 흐름거리특성이 중요한 요소로 판단된다. 아스팔트 혼합물의 경우 이러한 공극률과 흐름거리 특성은 CT를 이용한 X-Ray 이미지분석 결과를 활용하여 결정할 수 있다. 특히, 흐름거리의 경우 기존의 골재의 형상을 고려한 방법에 비해 실질적인 물의 흐름을 시편길이에 대해 평가할 수 있다.

Fig. 10. Modified Equation of K-C Model for Gyratory Compaction

본 연구결과에 의하면 아스팔트 혼합물 속을 흐르는 물의 흐름거리는 골재형상을 고려해서 결정하는 것에 비해 약 50%에서 60% 이상 작은 값을 나타낸다. 따라서, 흙에 적용하는 KC공식을 아스팔트 혼합물에 적용하기 위해서는 $K = \frac{1}{C \times T^4 \times S^2} \frac{e^4}{1+e}$ 와 같은 수정된 공식을 이용하는 것이 더욱 효과적인 것으로 판단된다.

5. 결 론

제한된 조건의 실내실험으로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 아스팔트 혼합물 내부에서 존재하는 공극 분포상태를 묘사하기 위해서 이미지분석을 이용하여 각 단면의 내부공극 분포의 평균을 히스토그램을 이용하였다. micro CT와 이미지 분석 방법을 통하여 아스팔트 혼합물 내부에 존재하는 공극의 분포 상태를 효과적으로 파악할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 배수성 포장용 아스팔트 혼합물 PA-13의 경우 다짐에너지에 따른 최소공극의 크기는 거의 유사한 값을 나타냈지만, 최대공극의 크기 및 공극의 평균크기는 다짐에너지가 작을수록 크게 나타났다. 공극의 평균면적은 35타 및 50타에서 2.8 mm² 정도로 분석되었다. SMA10 시편을 분석한 결과, 배수성 포장 PA-13과 거의 유사하는 결과를 나타내었다.
- 3) 다짐된 시편의 다짐에너지에 따라 투수계수가 변하는 것을 알 수 있으며, 중간정도 교통량 조건(마살다짐 50타/면)과 중하중교통량조건(마살다짐 75타/면)의 경우 투수계수의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 각 시편의 투수계수를 비교하였을 때 다짐에너지가 증가할수록 투수계수가 감소하는 결과가 나타났다.
- 4) 다짐에너지에 영향을 가장 많이 받는 시편은 PA-13으로 나타났다. PA-13과 비교했을 때 PA-20과 SMA 10 mm의 경우 다짐에너지에 따른 투수계수 변화가 적게 나타났으며 투수계수 또한 PA-20보다 크게 나타났다. 이는 중간정도 교통량 조건(마살다짐 50타/면)을 기준으로 했을 때 약 1.8에서 2.4배에 가까운 투수계수 차이를 보였다.

- 5) 배수성포장의 경우 아스팔트 혼합물 투수계수 평가시 Hazen 공식을 이용할 경우 $K = C \times D_{20}^2$ 을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.
- 6) 흙에 적용하는 KC 공식을 아스팔트 혼합물에 적용하기 위해서는 $K = \frac{1}{C \times T^4 \times S^2} \frac{e^4}{1+e}$ 와 같은 수정된 공식을 이용하는 것이 더욱 효과적인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 2012년 연구지원에 의해 수행되었고, 이에 감사드립니다.

References

- Adler, P.M., Jacquin, C.G., and Quiblier, J.A. (1990) Flow in simulated porous media., *Internat. J. Multiphase Flow*, Vol. 16, No. 4, pp. 691-712.
- Brown, E.R., Collins, R., and Brownfield, J.A. (1989) Investigation of segregation of asphalt mixtures in the state of Georgia., *Transportation Research Record 1217*, Transportation Research Board, Washington, D. C., 1-8.
- Cooley, Jr., A.L., Prowell, B.D., Brown, E.R., Hall, K., Button, J., and Davis, R. (2002) Issues pertaining to the permeability characteristics of coarse-graded Superpave mixes, *Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, 71, Colorado Springs, CO, 1-29.
- Holtz, R.D. and Kovacs, W.D. (1981) An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series.
- Huang, B., Mohammad, L., Raghavendra, A., and Abadie, C. (1999). Fundamentals of permeability in asphalt mixtures, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 68, 479-500.
- Lock, P.A., Jing, X.D., Zimmerman, R.W., and Schluter, E.M. (2002) Predicting the permeability of sandstone from image analysis of pore structure, *J. Appl. Phys.*, 92, 6311-6319.
- Martys, N.S., Torquato, S., and Bentz, D.P. (1994) Universal scaling of fluid permeability for sphere packings, *Physical Review E*, 50, 403-408.
- Masad, E.A., Muhunthan, B., and Martys, N. (2000) Simulation of fluid flow and permeability in cohesionless soils, *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 4, pp. 851-864.
- Mohammad, L.N., Herath, A., and Huang, B. (2003) Evaluation of permeability of Superpave [registered trademark] asphalt mixtures, *Transportation Research Record 1832*, Transportation Research Board, Washington, D. C., 50-58.
- Shackelford, C.D., Benson, C.H., Katsumi, T., Edil, T.B., and Lin, L. (2000) Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 18, No. 2, 133-161.
- Shin, K.H., Kim, S.K., and Lee, K.H. (2012) Evaluation of Void Distribution of Hot Mix Asphalt Using Micro CT Scanner, Vol. 12, No. 3, pp. 169-175.
- Taylor, S.W., Milly, P.C.D., and Jaffe, P.R. (1990) Biofilm growth and the related changes in the physical properties of a porous

medium 2. permeability, *Water Resources Research*, Vo. 26, No. 9, pp. 2161-2169.

Tashman, L., Masad, E., Little, D., and Lytton, R. (2004) Damage evolution in triaxial compression tests of HMA at high temperatures, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 73, In Press.

Wang, L.B., Frost J.D., and Shashidhar N. (2001) Microstructure

study of Westrack mixes from X-ray tomography images, *Transportation Research Record* 1767.

◎ 논문접수일 : 2012년 10월 16일

◎ 심사의뢰일 : 2012년 10월 17일

◎ 심사완료일 : 2012년 11월 09일