



통계분석을 통한 골재입도와 동탄성계수 상관도 평가

Evaluation of Correlation between Aggregate Gradation and Dynamic Modulus with Statistical Analysis

이 관 호*
Lee, Kwanho

조 경 래**
Cho, Kyungrae

이 병 식***
Lee, Byungsik

Abstract

In recent, lots of researches for mechanical-empirical design concept for asphalt pavement are on going. AASHTO 2002 Design Guide in USA and KPRP(Korean Pavement Research Program) in Korea are under developing. In these programs, the mechanical properties of hot mix asphalt are a key role for design and analysis. Unfortunately, there is no proper database on the mechanical properties of hot mix asphalt, such as dynamic modulus. The use of dynamic modulus has couple of good advantages which is based on temperature, traffic loading and frequency on pavement. In this research, the verification of the relationship between maximum nominal aggregate size and dynamic modulus has been carried out. Also, test specimen size effect on dynamic modulus has been conducted. Considering the limitation of laboratory testing machine in Korea, test specimen with 100mm diameter and 150mm height is recommended for dynamic modulus test. Also, as the maximum nominal aggregate size increases, the dynamic modulus of hot mix asphalt increases.

keywords : aggregate gradation, design guide, dynamic modulus, hot mix asphalt, maximum nominal aggregate size

요 지

최근 국내외에서 역학적-경험적 설계법의 개발 및 이의 활용을 위한 각종 연구가 매우 활발하게 진행중에 있다. 미국의 경우 AASHTO 2002 설계법, 우리나라의 경우 한국형 도로포장설계법의 개발이 진행 중에 있고, 개발되는 설계법에 도로포장재료의 역학적 물성치 평가가 상당히 중요한 역할을 하도록 구성되어 있다. 따라서 설계법에 이용될 국내 아스팔트 혼합물의 재료물성의 평가가 매우 시급한 실정이다. 설계법에 이용되는 재료 물성을 평가하는 방법 중 최근에 많이 적용되는 방법이 동탄성계수 실험이다. 동탄성계수는 다양한 온도조건, 하중, 속도를 이용하여 다양한 교통조건을 반영할 수 있다. 사용된 골재의 입도, 아스팔트 바인더에 따라서 변화하며, 특히 아스팔트 혼합물의 점탄성적인 특성을 잘 묘사할 수 있는 물성치 평가방법이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 아스팔트 혼합물에 사용되는 골재의 공칭최대치수 및 입도분포와 동탄성계수와의 상관관계를 규명하는 것이다. 국내의 실험장비 조건을 고려할 때, 시편의 직경 및 높이는 100mm 및 150mm를 이용하는 것이 바람직하다. 또한, 골재의 공칭최대치수가 커짐에 따라 동탄성계수가 증가하는 경향을 나타내었다.

핵심용어 : 골재입도, 공칭최대치수, 동탄성계수, 설계법, 아스팔트 혼합물

1. 서론

현재 도로 포장체의 성능은 다양한 요소에 의해 영향

을 받는다. 이중 하나가 도로포장재료이다. 아스팔트 포장의 설계 및 공용성 평가를 위하여 필요한 각종 입력변수에 대한 연구가 지난 수십년간 진행되었고, 다양한 실

* 공주대학교 건설환경공학부 부교수, 정회원
** 공주대학교 건설환경공학부 석사과정
*** 공주대학교 건설환경공학부 교수, 교신저자



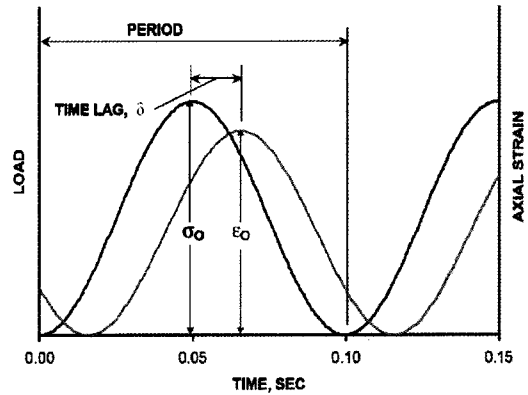
협법이 제시되었다. 최근 국내외에서 도로포장 설계법에 경험적/역학적 개념을 적용한 설계법의 개발 및 이의 활용을 위한 연구가 매우 활발하게 진행 중에 있다. 미국의 경우 AASHTO 2002 설계법, 우리나라의 경우 한국형 도로포장설계법의 개발이 진행 중에 있고, 개발되는 설계법에 도로포장재료의 역학적 물성치 평가가 상당히 중요한 역할을 하게 구성되어 있다. 따라서 설계법에 이용될 국내 아스팔트 혼합물의 재료물성의 평가가 매우 시급한 실정이다. 이 재료의 물성치를 평가하는 방법 중 최근에 많이 적용되는 방법이 동탄성계수 실험이다. 동탄성계수는 다양한 온도조건, 하중, 속도를 이용하여 다양한 교통조건을 묘사할 수 있으며, 사용된 골재의 입도, 아스팔트 바인더에 따라서 변화하며, 특히 아스팔트 혼합물의 점탄성적인 특성을 잘 묘사할 수 있는 물성치 평가방법이라고 할 수 있다. 아스팔트 혼합물의 동탄성계수는 현재 개발 중인 한국형 포장설계법의 아스팔트해석의 핵심이 되는 중요한 설계입력변수이다. 이 연구는 주로 국내 대표 아스팔트 혼합물에 대한 동탄성계수 값의 DB화가 진행중에 있으나, 동탄성계수에 영향을 주는 다양한 요소에 대한 자료가 필요한 상태이다.

본 연구의 주요 목표는 아스팔트 혼합물의 동탄성계수에 영향을 주는 대표요소 중 아스팔트 혼합물 시편 크기에 의한 영향 및 골재의 입도특성에 의한 영향을 평가하는데 있다. 연구방법으로는 슈퍼패브 배합설계를 이용하여 다양한 골재 입도에 대한 배합설계를 실시하고, 이를 이용하여 동일한 공극률의 시편을 제작하여 일축압축 동재하 시험을 이용하여 동탄성계수를 평가한다. 이는 앞으로 개발될 한국형 포장설계법의 설계입력 변수 정량화 및 포장재료의 공학적인 활용에 목적을 두고 있다.

2. 아스팔트 혼합물의 동탄성계수

아스팔트 혼합물의 점탄성 거동특성은 사인파 하중을 휴지기 없이 연속 재하한 상태에서 측정된 변형특성과의 상관관계로부터 규명이 가능하며, 이때 이용하는 파라미터를 복합탄성계수(complex modulus, E^*)로 정의한

다(이 등, 2006). <그림 1>은 사인하중을 재하 했을 때 하중과 변형량과의 관계를 나타낸 것이다. <그림 1>에서 보이는 것처럼, 동하중이 재하 되면 변형량은 점탄성 성질로 인하여 위상차가 발생하게 된다. 시험에 이용되는 하중과 측정된 변형 및 복합탄성계수는 다음과 같이 정의된다. 식 1에서 σ_o 는 하중의 진폭이다. ω 는 각속도이다. 변형량은 식 2로 정의할 수 있다. ϵ_o 는 변형량의 진폭이며, ϕ 는 위상각이다. 선형재료이면 위상각은 0° 가 되고, 완전한 점성재료는 위상각이 90° 이다. 식 3은 식 (1)과 식 (2)를 바탕으로 만들어졌다.



(그림 1) 동하중과 변형량과의 관계 (AASHTO 2002 Design Guide)

$$\sigma = \sigma_o \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\epsilon = \epsilon_o \sin(\omega t - \phi) \quad (2)$$

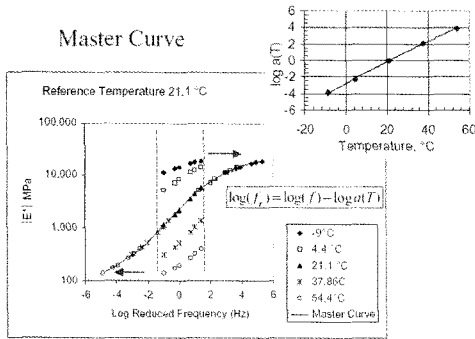
$$E^* = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma_o e^{i\omega t}}{\phi_o e^{i(\omega t - \phi)}} \quad (3)$$

동탄성계수는 복합탄성계수의 절대값을 의미하며, 식 4와 같이 표현된다.

$$|E^*| = \frac{\sigma_o}{\epsilon_o} \quad (4)$$

일축압축 시험으로부터 결정되는 동탄성계수는 시험

온도 및 하중의 조합에 따라 각각의 값을 얻을 수 있다. 이것을 하중시간과 온도의 중첩(Superposition Principle) 원리를 적용하여 <그림 2>와 같은 마스터곡선(Master Curve)을 작성할 수 있다. 마스터곡선은 특정 아스팔트 혼합물의 하중과 온도와의 상관관계를 규명할 수 있는 장점을 가지고 있다.



(그림 2) 마스터곡선 및 전이계수(Pellinen and Wilczak, 2000)

마스터곡선을 작성하는 방법은 크게 세 가지로 구분 되는데, 하중주파수와 온도의 상관관계를 이용하는 Arrhenius 방법, 실험방법(Experimental Method), 아스팔트 바인더의 점도와 하중재하시간과의 상관관계를 이용하는 AASHTO 2002 방법이 있다. 본 연구에서는 주로 사용하는 AASHTO 2002 방법을 이용하였다. AASHTO 2002 방법은 아스팔트 바인더의 점성(viscosity)를 이용하여 변환함수(shift factor)를 결정하고, 이를 이용하여 아스팔트 혼합물의 동탄성 계수를 결정한다.

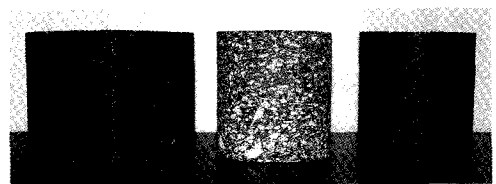
동탄성 계수 시험결과에서 결정된 동탄성 계수를 실수부(탄성영역, E1)와 허수부(점성영역, E2)로 구분할 수 있고, 이를 그래프로 표시한 것을 Cole & Cole Plane 또는 복소평면(Complex plane)이라 한다. 로그스케일의 동탄성 계수의 절대값과 위상각과 상관관계를 나타내는 그래프를 검정평면(Black space)이라 정의한다. 검정평면에 나타난 것과 같이 하중주파수와 온도는 동탄성 계수와 위상각과의 상관관계가 없음을 보여주고, 위상각이 0 인 경우는 재료의 탄성적인 특성을 보여준다. 역학적-경험적 설계법인 AASHTO 2002 Design Guide

에서는 다층탄성이론을 이용하여 포장체의 응력과 변형을 해석하고, 해석에 이용되는 포장체의 주요 물성치가 동탄성 계수이다.

3. 시편크기 및 코어링에 의한 동탄성계수 영향

3.1 시험방법

슈퍼페이브 배합설계를 이용하여 <표 1>의 입도와 <표 2>의 아스팔트혼합물 배합특성 조건으로 아스팔트 혼합물을 준비한다. 혼합물은 135℃ 4시간의 단기노화 후 선화다짐기를 이용하여 6% 공극률로 다진다. 다져진 시편은 <그림 3>과 같이 세 가지 다른 조건으로 준비한다. 첫 번째 시편은 직경 150mm에 코어링 하지 않고, 높이만 150mm가 되도록 자른 시편이다. 두 번째 시편은 직경 100mm로 코어링 후 높이가 150mm가 되도록 자른 시편이다. 세 번째 시편은 직경 100mm로 코어링 하지 않고, 높이가 150mm가 되도록 자른 시편이다. 세 가지 종류의 시편이 준비되면 5, 21, 40℃의 온도에서 25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1Hz의 주파수 조건으로 동탄성계수 시험을 한다. 동탄성계수 표준 시험방법에는 -10℃와 55℃가 포함되어 있으나, -10℃에서는 시편이 수증기와 함께 얼어붙는 현상이 발생하고, 시험기기의 조작이 쉽지 않은 단점이 있다. 55℃역시 아스팔트바인더의 특성상 점성이 거의 없고, 흘러내리는 성질 때문에 예폭시로 붙이는 LVDT가 미끌어지는 현상으로 변형율의 컨트롤이 쉽지 않고, 허용 영구변형조건을 만족시키기가 쉽지 않은 단점이 있다. 따라서 본 실험에서는 시편직경 및 코어링이 동탄성계수에 주는 영향을 평가하는 목적에는 필요하지 않기 때문에 두 온도에서는 실험하지 않았다.



(그림 3) 시험 시편



〈표 1〉 밀입도 13mm 혼합물 입도

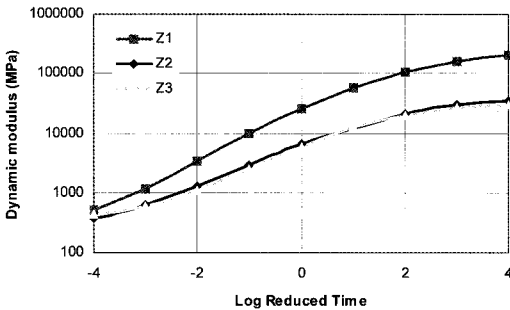
체크기(mm)	19	13	10	5	2.36
통과율(%)	100	97.5	65.8	34.0	22.5
체크기(mm)	1.2	0.6	0.3	0.15	0.074
통과율(%)	18.3	14.0	9.5	7.0	4.5

〈표 2〉 밀입도 13mm 아스팔트혼합물 배합특성

Asphalt inder	G _{mm}	G _{sb}	OAC(%)	V _a (%)
PG 58-22	2,482	2,647	5.2	6

3.2 시험방법

〈그림 4〉는 AASHTO방법을 이용하여 결정한 마스터곡선으로, 시편의 크기 및 코어링 여부에 따른 동탄성계수 변화를 보여주고 있다. 편의상 직경 150mm에 코어링하지 않은 시편을 Z1, 직경 100mm에 코어링한 시편을 Z2, 직경 100mm에 코어링하지 않은 시편을 Z3라 표기하였다.



〈그림 4〉 시편크기 및 코어링에 의한 동탄성계수 마스터곡선

직경 150mm에 코어링하지 않은 시편의 동탄성계수 결과를 시편의 직경이 커지면 일반적으로 이용되는 UTM 시험장비 조합의 문제와 시편제작에 많은 골재의 사용등으로 인한 문제가 있기 때문에 특별한 목적이 있지 않는한 100mm 시편을 이용하는 것을 제안한다.

동일한 직경의 경우에는 동탄성계수가 거의 차이가 나지 않는다. 이는 〈그림 4〉에서 Z2와 Z3가 거의 포개어 짐으로 확인 할 수 있다. 반면 직경 100mm에서 코어링을 하지 않는 경우 시편을 만드는 골재가 적게 들고 코어링을 하지 않으므로 시편 제작이 훨씬 간편하나, 표면이 거칠고 표면과 속과의 밀도차가 생기게 된다. 더 중요한

문제는 표면에 공극이 커 고온에서 에폭시로 접착한 LVDT가 탈락하는 경우가 자주 발생하여 표준 시험에서 사용되는 55℃에서는 시험시 측정오차 발생에 큰 영향을 주는 요소가 된다. 따라서 동탄성계수의 시험에는 직경 150mm 몰드로 다져진 시편을 코어링하고 150mm 높이로 절단하여 사용하는 것이 바람직하다. 이는 KSF 2486의 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 시험용 시편제작 방법과 동일하다. 하지만 사용할 수 있는 골재의 최대 공칭치수가 크기 않고, 고온에서 시험할 필요 없고, 시편을 준비하는 시간이 얼마 없다면, 직경 100mm 몰드로 다지고 높이만 절단하는 방법으로 시험을 해도 표준방법과 동일한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

4. 골재의 입도특성과 동탄성계수의 상관관계

4.1 실험재료특성

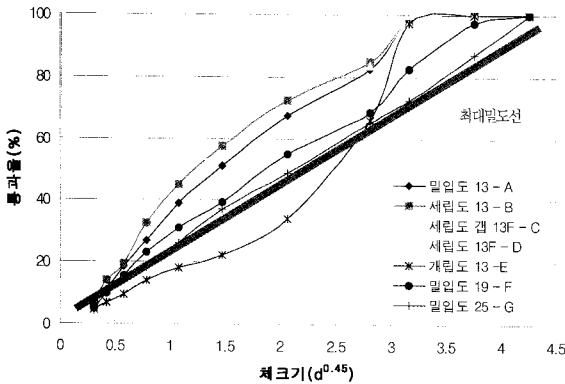
〈표 3〉 골재 입도 평가를 위한 혼합물의 입도

입도 체크지 (mm)	A	B	C	D	E	F	G
25	100	100	100	100	100	100	100
19	100	100	100	100	100	97.5	87
12.5	97.5	97.5	97.5	97.5	97.5	82.5	76
9.5	82.5	85	83.75	90	65.75	68.75	65
4.75	67.5	72.5	70	82.5	34	55	49
2.36	51	57.5	55	72.5	22.5	39.5	37
1.18	39	45	52.5	62.5	18.25	31.25	34
0.6	27	32.5	50	52.5	14	23	17
0.3	18.5	19.5	32.5	32.5	9.5	15.5	14
0.15	11	14	17.5	22.5	7	10	9
0.075	7	7	10.5	11.5	4.5	5	4

〈표 4〉 아스팔트 혼합물의 부피특성

입도 구분	A	B	C	D	E	F	G
G _{mm}	2,482	2,475	2,477	2,432	2,502	2,495	2,501
G _{sb}	2,647	2,647	2,647	2,647	2,647	2,647	2,647
V _a (%)	4.182	4.417	4.195	4.009	4.289	3.694	3.865
OAC(%)	5.2	5.4	5.4	6.9	4.5	5.1	4.3

〈표 3〉은 실험에 이용한 아스팔트 혼합물의 골재입도로서, 현재 국내에서 사용하는 한국표준규격(KS)에 제시된 입도를 이용하였다. 표 4는 각각의 아스팔트 혼합물의 부피특성을 평가하여 정리한 것이다. 실험에 이용된 골재입도는 〈그림 5〉와 같이 밀입도, 세립도, 세립도갭, 개립도등의 다양한 입도를 조건으로 총 7종류를 이용하였다. 최적아스팔트 함량에서 동일한 4% 공극률 조건으로 아스팔트혼합물을 준비하였다. 혼합물은 135℃ 4시간의 단기노화 후 선화다짐기를 이용하여 다진 후, 직경 150mm 혼합물을 직경 100mm가 되도록 코어링을 하고, 높이 150mm가 되도록 절단한다. 즉, 시험용 시편을 직경과 높이비가 1: 1.5가 되도록 준비하였다. 아스팔트혼합물의 특성상 고온의 느린 하중에서 골재 입도의 영향을 많이 받는다. 때문에 골재의 입도에 따른 동탄성계수 평가는 40℃ 0.1Hz 조건에서 시험하였다.



〈그림 5〉 사용된 골재 입도의 체크기별 누적통과율

4.2 Power Law Relationship을 이용한 입도분석

아스팔트혼합물의 종류는 골재의 입도와 밀접한 상관관계가 있다. 골재의 입도는 일반적으로 골재크기와 통과율을 이용하여 표시하였다. 본 연구에서는 Goode와 Lufsey가 개발한 0.45 power chart를 이용하였다. 0.45 power chart는 사용하는 골재의 최대공칭치수에 따른 최대다짐밀도를 확인이 가능하다. 굵은골재와 잔골재 비율을 이용한 입도 분석용 기본 방정식은 다음과 같다.

$$P_{ca} = a_{ca} (d)^{n_{ca}} \quad (5)$$

$$P_{fa} = a_{fa} (d)^{n_{fa}} \quad (6)$$

여기서, P_{ca}, P_{fa} = 체크기(d)에서 통과율, %

a_{ca} = 굵은골재입도 계수

a_{fa} = 잔골재입도 계수

d = 체크기, mm

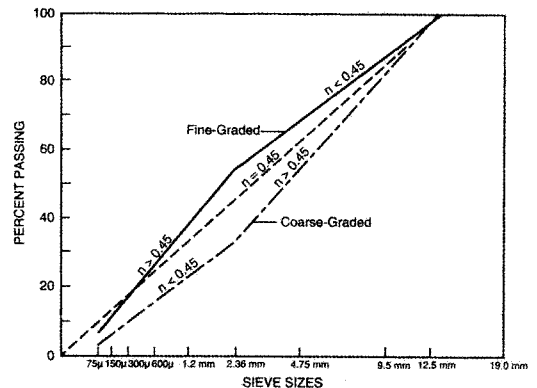
n_{ca} = 굵은골재입도 기울기

n_{fa} = 잔골재입도 기울기

세립형 골재와 개립형 골재입도의 기본 개념은 〈그림 6〉에서 보는 것과 같다. 이 방법을 사용하려면 세립형과 개립형 사이 끊어지는 점을 찾아야하는데 식 7과 같이 Bailey method를 사용한다.

$$PCS = NMPS \times 0.22 \quad (7)$$

여기서 PCS(Primary Control Sieve)는 굵은골재와 잔골재를 구분하는 점의 위치이고, NMPS (Nominal Maximum Particle Size)는 슈퍼패이브 배합설계에서 골재의 최대 공칭치수를 의미한다. 식에 사용된 0.22는 Vavrik et al.이 사용한 경험적인 결과이다. 이와 동일한 방법으로 〈표 5〉는 통계를 위한 혼합물의 세립형 골재와 개립형 골재입도 계수를 계산한 것이다. 〈표 5〉의 동탄성계수는 40℃, 0.1Hz에서 시험한 결과 값이다. 이 조건은 골재의 입도에 의한 영향을 가장 잘 반영하는 시험조건이다.



〈그림 6〉 0.45 Power Chart에서 잔골재 및 굵은골재 입도 비교 (Brigison & Roque, 2005)



〈표 5〉 Power Regression Constants와 동탄성계수(at 1Hz and 40°C(MPa))

Mixture	Dynamic Modulus (MPa)	Coarse Aggregate Portion			Fine Aggregate Portion		
		a_{ca}	n_{ca}	r	a_{fa}	n_{fa}	r
A	866,0	36,872	0,369	0,991	33,650	0,518	0,996
B	693,0	44,382	0,298	0,991	38,503	0,511	0,992
C	547,0	41,174	0,326	0,991	45,744	0,350	0,916
D	592,5	62,821	0,166	0,991	54,391	0,412	0,972
E	649,5	7,013	1,009	0,988	16,175	0,422	0,994
F	922,0	25,704	0,450	0,990	26,827	0,456	0,997
G	1473,5	24,287	0,436	0,995	24,706	0,453	0,977

4.3 Power Law Gradation Factors와 동탄성계수 상관관계

〈표 5〉에서 구한 Power law gradation factors를 입도와 동탄성계수 사이의 상관관계를 알기 위해 〈표 6〉과 같이 상관관계분석을 하였다. a_{ca} , a_{fa} 와 $|E^*|$ 는 음의 상관관계를 가지고, n_{ca} , n_{fa} 과 $|E^*|$ 는 양의 상관관계를 가진다. 여기서 0에 가까울수록 상관관계가 없음을 의미한다. n_{ca} 과 n_{fa} 을 주요하게 살펴보면 $|E^*|$ 를 빼고는 모두 음의 상관관계를 가지고 있다. 이를 통해 n_{ca} , n_{fa} 과 $|E^*|$ 사이에는 중요한 관련성이 있음을 알 수 있다.

〈표 6〉 40°C, 1Hz에서 동탄성계수와 Power Law Parameters의 상관분석

	$ E^* $	Power Law Regression Coefficients			
		a_{ca}	n_{ca}	a_{fa}	n_{fa}
$ E^* $	1	-0.362	0.018	-0.487	0.347
a_{ca}	-0.362	1	-0.897	0.967	-0.048
n_{ca}	0.018	-0.897	1	-0.835	-0.080
a_{fa}	-0.487	0.967	-0.835	1	-0.276
n_{fa}	0.347	-0.048	-0.080	-0.276	1

중요한 관련성이 있는 n_{ca} , n_{fa} 과 $|E^*|$ 를 편상관분석을 통하여 제 3의 변수를 통제하고 순수한 상관관계를 표 7과 표 8에서 확인 할 수 있다. 표 7은 n_{ca} 를 통제변수

로 두고 n_{ca} 와 $|E^*|$ 를 상관 분석한 결과이다. 표 8은 n_{fa} 를 통제변수로 두고 n_{fa} 와 $|E^*|$ 를 상관 분석한 결과이다. 두 결과에서 모두 양의 상관관계가 있음을 확인할 수 있다.

〈표 7〉 n_{ca} 를 통제변수로 두고 n_{ca} 와 $|E^*|$ 의 상관분석

	n_{ca}	
	N	r(Correlation coefficient)
$ E^* $	7	0.492

〈표 8〉 n_{fa} 를 통제변수로 두고 n_{fa} 와 $|E^*|$ 의 상관분석

	n_{fa}	
	N	r(Correlation coefficient)
$ E^* $	7	0.3493

4.4 Power Law Parameters의 분류와 일원분산분석

상관관계를 통하여 n_{ca} 과 n_{fa} 두 변수를 통해 $|E^*|$ 를 분류 할 수 있음을 확인 할 수 있다. 예를 들어 n_{ca} 를 한 점을 기준으로 크게 혹은 작게 분류 할 수 있고, n_{fa} 역시 마찬가지로 분류 할 수 있다. 두 변수를 모두 분류 할 수 있기 때문에 크거나 작은 값으로 분류를 한다면 총 4가지의 경우로 분류 할 수 있다. 본 연구에서는 각 변수의 평균값을 기준으로 각각 반으로 나누어 총 4개로 나누었다. 표 9는 n_{ca} 과 n_{fa} 을 크거나 혹은 작은 조건으로 $|E^*|$ 을 분류한 결과이다.

〈표 9〉 n_{ca} , n_{fa} 의 조건에 따른 $|E^*|$ 의 분류

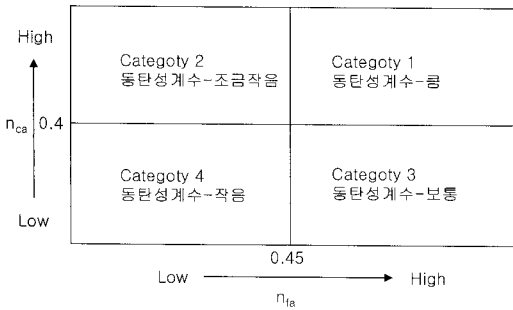
분류	조건	
Category 1	F, G	$n_{ca} > 0.4$, $n_{fa} > 0.45$
Category 2	E	$n_{ca} > 0.4$, $n_{fa} < 0.45$
Category 3	A, B	$n_{ca} < 0.4$, $n_{fa} > 0.45$
Category 4	C, D	$n_{ca} < 0.4$, $n_{fa} < 0.45$

〈표 10〉은 〈표 7〉에서 네 가지로 분류한 $|E^*|$ 을 평균과 표준편차를 통하여 기술통계를 나타낸 결과이다. 이를 결과에서 $|E^*|$ 은 평균보다 큰 값을 가지는 Category

1, 평균정도의 값을 가지는 Category 3, 평균보다 조금 작은 Category 2, 아주 작은 Category 4로 분류되었음을 알 수 있다. <그림 7>은 n_{ca} 과 n_{fa} 의 관계를 그림으로 도식화한 것이다.

<표 10> $|E^*|$ 의 분류에 따른 기술통계

	N	평균	표준편차	표준오차
Category 1	2	1197.7	389.97	275.75
Category 2	1	649.5	.	.
Category 3	2	779.5	122.33	86.50
Category 4	2	569.7	32.17	22.75
합계	7	820.5	319.13	120.62



<그림 7> 입도에 따른 아스팔트혼합물의 동탄성계수 분류

$|E^*|$ 를 <표 10>에서 분류한 4개의 집단으로 일원분산 분석을 하면 <표 11>과 같다. <표 11>의 분산분석표에서 $F=2.636$, 유의확률은 0.224로서 $\alpha = 0.05$ 라는 기본 조건에 기각된다. 즉, $|E^*|$ 에 따른 각 집단은 적어도 어느 두 집단 간에는 차이가 있다고 판단된다. <표 5>에서 <표 10>까지의 결과를 종합하면, Power low parameters와 동탄성계수 사이에는 의미 있는 어떤 관계가 존재하며, 이것은 최종적으로 <그림 7>과 같은 중요한 연관이 있음을 알 수 있다.

<표 11> $|E^*|$ 의 일원분산분석

	제곱합	자유도	평균 제곱	F	유의 확률
집단-간	442989.25	3	147663.083	2.636	0.224
집단-내	168075.75	3	56025.250		
합계	611065.00	6			

4.5 아스팔트 혼합물 골재 입도 분류

아스팔트 혼합물용 골재는 굵은골재와 잔골재로 분류된다. 이를 위에서 분류한 내용을 다시 정리하면 <표 12>와 같다. 굵은골재는 Category 2이고, 잔골재는 Category 1, 3, 4에 포함된다. 잔골재 혼합물 내에서 $|E^*|$, n_{ca} , n_{fa} 의 0차 상관관계를 <표 13>에서 확인하면 역시 n_{ca} , n_{fa} 과 $|E^*|$ 사이에는 중요한 양의 상관관계가 있음 확인 할 수 있다.

<표 12> 혼합물의 Coarse and Fine grade 분류

Gradation Type	$ E^* $	분류	Aggregate Portion		
			Coarse(n_{ca})	Fine(n_{fa})	
Coarse	E	649.5	Category 2	1,009395	0,422187
Fine	A	866.0	Category 3	0,368644	0,517507
	B	693.0	Category 3	0,297976	0,510721
	C	547.0	Category 4	0,325834	0,350208
	D	592.5	Category 4	0,165625	0,412198
	F	922.0	Category 1	0,449900	0,456144
	G1	1473.5	Category 1	0,435631	0,453103

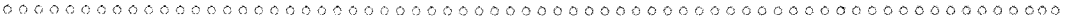
<표 13> Fine-graded mixtures에서 $|E^*|$, n_{ca} , n_{fa} 의 0차 상관관계

	$ E^* $	n_{ca}	n_{fa}
$ E^* $	1	0,6987	0,3181
n_{ca}	-	1	0,2555
n_{fa}	-	-	1

5. 결론

아스팔트 혼합물용 골재의 입도특성과 동탄성계수의 상관관계 분석을 수행하였다. 실험대상을 국내 KS 표준 규격상의 아스팔트 혼합물을 대상으로 하다보니, 사용 가능한 아스팔트 혼합물의 수가 다소 부족하지만, 실험 시편의 크기에 따른 동탄성계수의 영향을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 동탄성계수 실험을 위한 시편의 크기는 국내 실험장비의 제한적인 여건을 고려할 때, 선회다짐기를 이용한



시편을 이용하는 것이 바람직하고, 직경 100mm, 높이 150mm의 코어링한 시편을 이용하는 것을 제한한다. 코어링 하지 않는 시편의 경우 측정용 LVDT의 설치에 따른 오차가 발생할 수 있으므로, 주의가 필요하다.

- 골재입도의 기울기를 보면 밀입도 혼합물인 A, F, G의 기울기가 1에 가깝고, F와 G는 골재의 최대공칭치수가 A보다 커서 동탄성계수가 크게 나타났다. B는 세립도로 밀입도와 곡선의 기울기가 비슷하여 A과 동일하게 분류되었다. 결과적으로 슈퍼페이브 배합설계에서 추천하고 있는 밀입도의 곡선 기울기에서 멀어질수록 동탄성계수의 크기가 작아짐을 알 수 있다.

- 밀입도 혼합물의 곡선의 기울기를 기준으로 n_{ca} 가 커지고, n_{fa} 가 작아지면 개립도 혼합물로 동탄성계수가 밀입도 혼합물의 값에 비해 조금 작아지고, 반대로 n_{ca} 가 작아지고, n_{fa} 가 작아지면 갭입도 혼합물로 밀입도 혼합물의 값에 비해 많이 작아짐을 확인 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단 지역대학우수과학자 지원사업(과제번호 D00511, 2006년) 지원으로 수행되었고, 이에 감사드립니다.

참고문헌

이관호, 김현오, 장민석 (2006), "국내 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 예측방정식", 대한토목학회 논문집 26권 3D호, pp. 425-433

AASHTO 2002 Design Guide Draft - 2.4 Modulus of Elasticity for Major Material Groups, NCHRP Project 1-37A.

Brigison & Roque (2005), "Evaluation of the Gradation Effect on the Dynamic Modulus", *TRB 1929*, pp. 193-199

Brigison, Sholar & Roque (2005), "Evaluation of a Predicted Dynamic Modulus for Florida Mixtures", *TRB 1929*, pp. 200-207

Pellinen, T. K., and M. W. Witzak, "Use of Stiffness of Hot-Mix Asphalt as a Simple Performance Test," *Transportation Research Board (TRB) 2002 Annual Meeting*, Washington, D.C.

접 수 일 : 2008. 3. 4
 심사 일 : 2008. 3. 5
 심사완료일 : 2008. 8. 4