

# 아스팔트 혼합물의 골재 입도특성에 따른 동탄성계수 연구

## Aggregate Gradation Effect on Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt

이 관호\* · 이 병식\*\* · 송 용선\*\*\* · 정 태현\*\*\*\* · 조 경래\*\*\*\*\*

Lee, Kwan-Ho · Lee Byung-Sik · Song Young-Sun · Jung Tae-Hyun · Cho, Kyung-Rae

### 1. 서 론

도로 포장체의 성능은 다양한 요소에 의해 영향을 받는다. 이중 하나가 도로포장재료이다. 아스팔트 포장의 설계 및 공용성 평가를 위하여 필요한 각종 입력변수에 대한 연구가 지난 수 십년간 진행되었고, 다양한 실험법이 제시되었다. 최근 국내외에서 도로포장설계법에 경험적/역학적 개념을 적용한 설계법의 개발 및 이의 활용을 위한 연구가 매우 활발하게 진행중에 있다. 미국의 경우 AASHTO 2002 설계법, 우리나라의 경우 한국형 도로포장설계법의 개발이 진행중에 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 시험이다.

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.

### 2. 시험 순서 및 방법

슈퍼페이브 배합설계를 이용하여 표 1의 입도로 동일한 교통량으로 최적 아스팔트 함량을 각각 결정한다. 최적아스팔트 함량에서 동일한 4% 공극률 조건으로 아스팔트혼합물을 준비한다. 혼합물은 135℃ 4시간의 단기노화 후 Gyratory Compactor를 이용하여 다진다. 다져진 직경 150mm 혼합물을 직경 100mm가 되도록 코어링을 하고, 높이 150mm가 되도록 절단한다. 즉, 시험용 시편을 직경과 높이가 1: 1.5가 되도록 준비한다.

아스팔트혼합물의 특성상 고온의 느린 하중에서 골재 입도의 영향을 많이 받기 때문에 골재의 입도에 따른 동탄성계수 평가는 40℃ 0.1Hz 조건에서 시험하였다. 그림 1에서 보는 것과 같이 밀입도, 세립도, 세립도 갭, 개립도등의 다양한 입도를 조건으로 시험하였다.

\* 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 부교수 · 041-521-9313(E-mail : kholee@kongju.ac.kr)

\*\* 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 부교수

\*\*\* 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 교수

\*\*\*\* 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 석사과정

\*\*\*\*\* 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 석사과정



표 1. 골재 입도 평가를 위한 혼합물의 입도 및 특성

Type	A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1
체크기(mm)							
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
Volumetric property							
$G_{mm}$	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
Binder Grading	PG 58-22	PG 58-22	PG 58-22	PG 58-22	PG 58-22	PG 58-22	PG 58-22

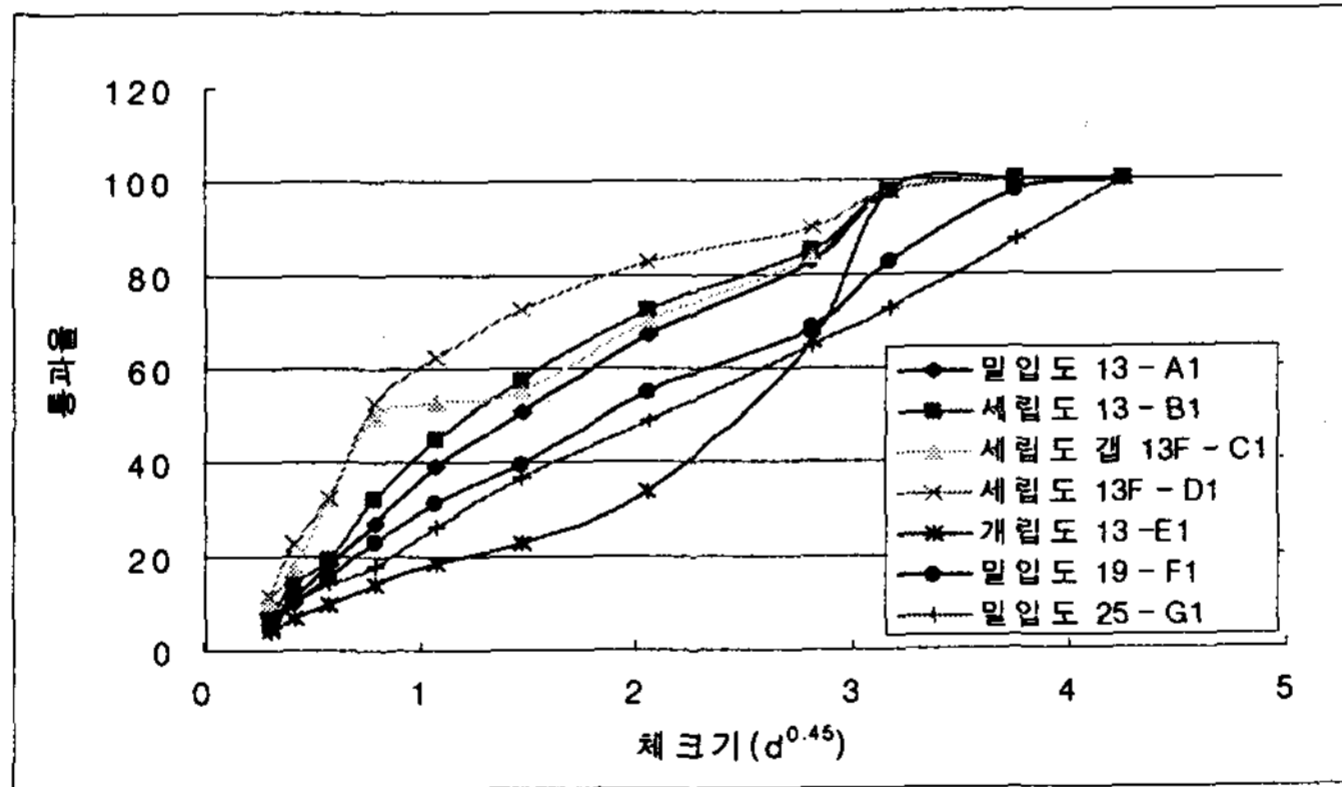


그림 1. 0.45승 입도 곡선

### 3. Power Law Relationship을 이용한 입도분석

아스팔트혼합물의 종류는 골재의 입도와 밀접한 상관관계가 있다. 골재의 입도는 일반적으로 골재크기와 통과율을 이용하여 표시한다. 본 연구에서는Goode와 Lufsey가 개발한 0.45 power chart를 이용한다. 0.45 power chart는 사용하는 골재의 최대공칭치수에 따른 최대다짐밀도를 확인이 가능하다. 여기에 Ruth가 발달시킨 굵은골재와 잔골재 비율을 이용하여 입도를 분석한다. Power Law Equation은 아래 식과 같다.

$$P_{ca} = a_{ca} (d)^{n_{ca}} \quad (1)$$

$$P_{fa} = a_{fa} (d)^{n_{fa}} \quad (2)$$

여기서,  $P_{ca}, P_{fa}$  = 체크기(d)에서 통과율, %

$a_{ca}$  = 굵은골재 입도 계수



- $a_{fa}$  = 잔골재입도 계수
- $d$  = 체크기, mm
- $n_{ca}$  = 굵은골재 입도 기울기
- $n_{fa}$  = 잔골재입도 기울기

세립형 골재와 개립형 골재입도의 기본 개념은 그림 2에서 보는 것과 같다. 이 방법을 사용하려면 세립형과 개립형 사이 끊어지는 점을 찾아야하는데 3식과 같이 Bailey method를 사용한다.

$$PCS = NMPS \times 0.22 \quad (3)$$

여기서 PCS(Primary Control Sieve)는 coarse와 fine를 나누는 점의 위치이고, NMPS(Nominal Maximum Particle Size)는 슈퍼페이브 배합설계에서 골재의 최대 공칭치수를 의미한다. 식에 사용된 0.22는 Vavrik et al.이 사용한 경험적인 결과이다. 예를 들면 12.5mm를 공칭최대치수라면 PCS는 2.36mm ( $NMPS \times 0.22 = 2.750$ )이 된다. 이와 동일한 방법으로 표 2는 통계를 위한 혼합물의 세립형 골재와 개립형 골재입도 계수를 계산한 것이다. 표 2의 동탄성계수는 40℃, 0.1Hz에서 시험한 결과 값이다. 이 조건은 골재의 입도에 의한 영향을 가장 잘 반영하는 시험조건이다.

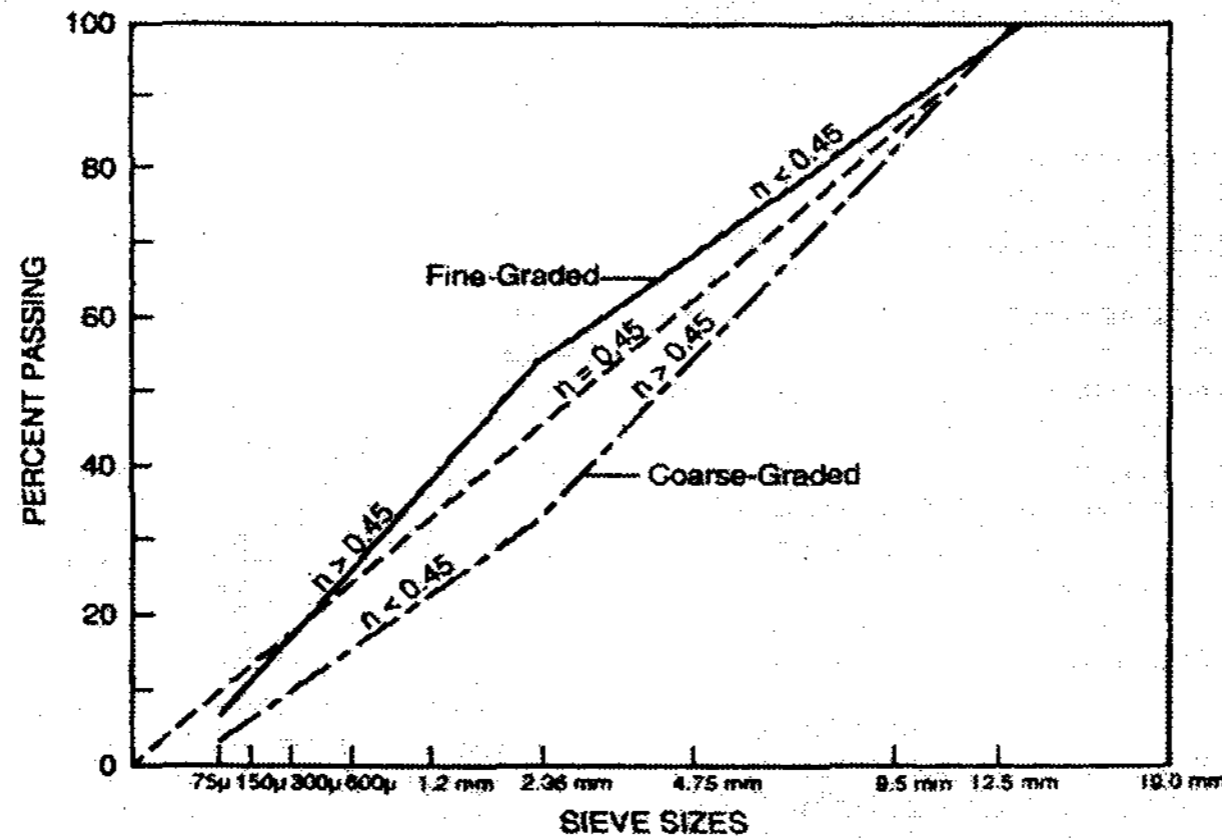


그림 2. 0.45 Power Chart에서 잔골재 및 굵은골재 입도비교

표 2. 혼합물의 Power Regression Constants와 동탄성계수

Mixture	Dynamic Modulus at 1Hz and 40℃ (MPa)	Coarse Aggregate Portion			Fine Aggregate Portion		
		$a_{ca}$	$n_{ca}$	r	$a_{fa}$	$n_{fa}$	r
A1	866.0	36.872	0.369	0.991	33.650	0.518	0.996
B1	693.0	44.382	0.298	0.991	38.503	0.511	0.992
C1	547.0	41.174	0.326	0.991	45.744	0.350	0.916
D1	592.5	62.821	0.166	0.991	54.391	0.412	0.972
E1	649.5	7.013	1.009	0.988	16.175	0.422	0.994
F1	922.0	25.704	0.450	0.990	26.827	0.456	0.997
G1	1473.5	24.287	0.436	0.995	24.706	0.453	0.977

#### 4. Power Law Gradation Factors와 동탄성계수 상관관계

표 2에서 구한 Power law gradation factors를 입도와 동탄성계수 사이의 상관관계를 알기 위해 표 3과 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 3. 40℃, 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 4와 표 5에서 확인할 수 있다. 표 4는  $n_{fa}$ 를 통제변수로 두고  $n_{ca}$ 와  $|E|$ 를 상관 분석한 결과이다. 표 5는  $n_{ca}$ 를 통제변수로 두고  $n_{fa}$ 와  $|E|$ 를 상관 분석한 결과이다. 두 결과에서 모두 양의 상관관계가 있음을 확인할 수 있다.

표 4.  $n_{fa}$ 를 통제변수로 두고  $n_{ca}$ 와  $|E|$ 의 편상관분석

	$n_{fa}$	
	N	r(Correlation coefficient)
$ E $	7	0.492

표 5.  $n_{ca}$ 를 통제변수로 두고  $n_{fa}$ 와  $|E|$ 의 편상관분석

	$n_{ca}$	
	N	r(Correlation coefficient)
$ E $	7	0.3493

#### 5. Power Law Parameters의 분류와 일원분산분석

상관관계를 통하여  $n_{ca}$ 과  $n_{fa}$  두 변수를 통해  $|E|$ 를 분류할 수 있음을 확인할 수 있다. 예를 들어  $n_{ca}$ 를 한 점을 기준으로 크게 혹은 작게 분류할 수 있고,  $n_{fa}$  역시 마찬가지로 분류할 수 있다. 두 변수를 모두 분류할 수 있기 때문에 크거나 작은 값으로 분류를 한다면 총 4가지의 경우로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 각 변수의 평균값을 기준으로 각각 반으로 나누어 총 4개로 나누었다. 표 6은  $n_{ca}$ 과  $n_{fa}$ 을 크거나 혹은 작은 조건으로  $|E|$ 을 분류한 결과이다.



표 6.  $n_{ca}$ ,  $n_{fa}$  의 조건에 따른  $|E|$  의 분류

분류		조건	
Category 1	F1,G1	$n_{ca} > 0.4$	$n_{fa} > 0.45$
Category 2	E1	$n_{ca} > 0.4$	$n_{fa} < 0.45$
Category 3	A1,B1	$n_{ca} < 0.4$	$n_{fa} > 0.45$
Category 4	C1,D1	$n_{ca} < 0.4$	$n_{fa} < 0.45$

표 7은 표 6에서 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 3은  $n_{ca}$  과  $n_{fa}$  의 관계를 그림으로 도식화한 것이다.

표 7.  $|E|$  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

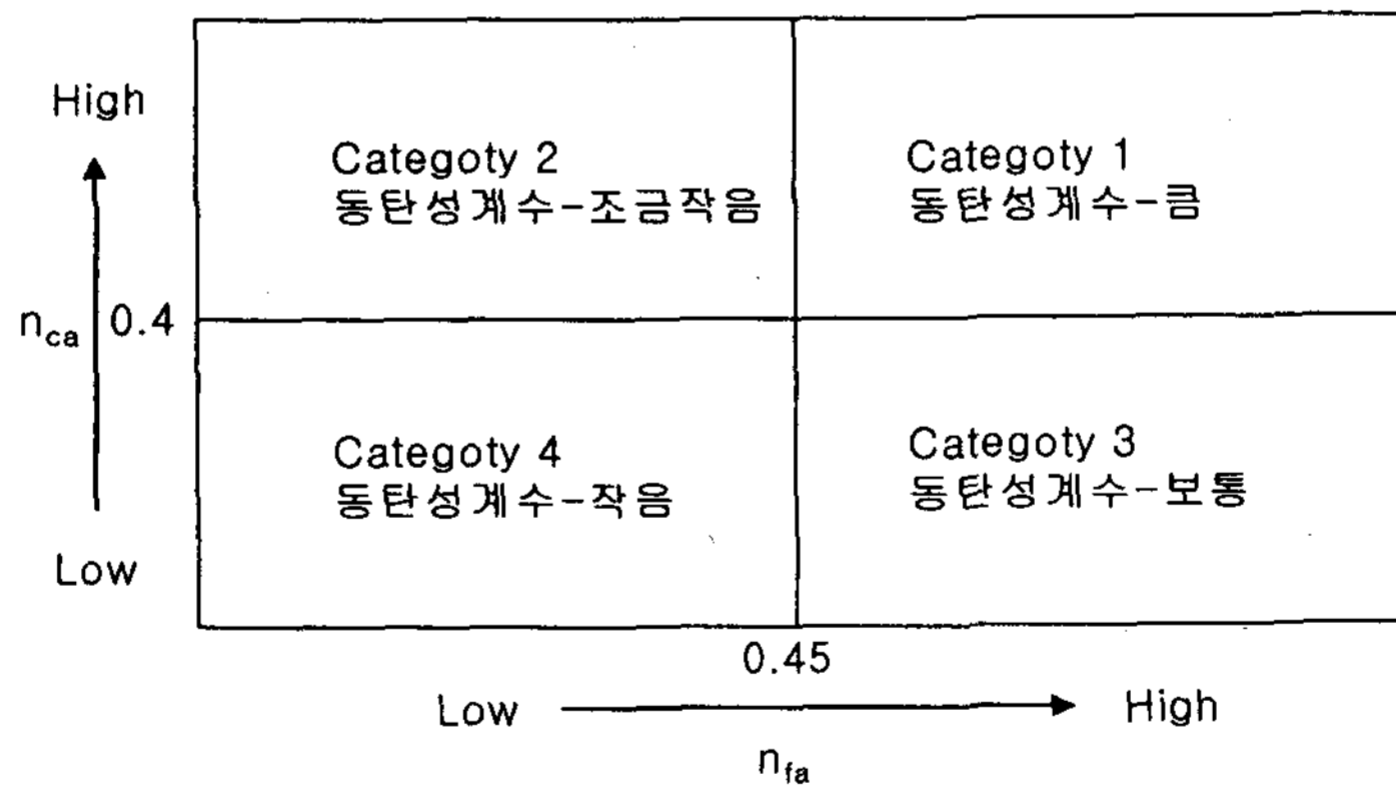


그림 3. 입도에 따른 아스팔트혼합물의 동탄성계수 분류

$|E|$  를 표 7에서 분류한 4개의 집단으로 일원분산분석을 하면 표 8과 같다. 표 8의 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 3~8까지의 결과를 종합하면, Power low parameters와 동탄성계수 사이에는 의미있는 어떤 관계가 존재하며, 이것은 최종적으로 그림 3과 같은 중요한 연관이 있음을 알 수 있다.



표 8.  $|E^*|$  의 일원분산분석

	제공합	자유도	평균제공	F	유의확률
집단-간	442989.25	3	147663.083	2.636	0.224
집단-내	168075.75	3	56025.250		
합계	611065.00	6			

6. 혼합물의 Coarse- and Fine-Graded 분류

그림 2에서 혼합물은 Coarse graded와 fine graded로 분류됨을 알 수 있다. 이를 통해 위에서 분류한 내용을 다시 정리하면 표 9와 같다. Coarse graded는 Category 2이고, Fine graded는 Category 1,3,4에 포함된다. Fine graded 혼합물 내에서  $|E|$ ,  $n_{ca}$ ,  $n_{fa}$ 의 0차 상관관계를 표 10에서 확인하면 역시  $n_{ca}$ ,  $n_{fa}$ 과  $|E|$  사이에는 중요한 양의 상관관계가 있음 확인할 수 있다.

표 9. 혼합물의 Coarse and Fine grade 분류

	$ E $	분류	Aggregate Portion	
			Coarse( $n_{ca}$ )	Fine( $n_{fa}$ )
Coarse-graded mixtures				
E1	649.5	Category 2	1.009395	0.422187
Fine-graded mixtures				
A1	866.0	Category 3	0.368644	0.517507
B1	693.0	Category 3	0.297976	0.510721
C1	547.0	Category 4	0.325834	0.350208
D1	592.5	Category 4	0.165625	0.412198
F1	922.0	Category 1	0.449900	0.456144
G1	1473.5	Category 1	0.435631	0.453103

표 10. 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

7. 결론

파워함수를 이용한 입도분석결과에서 골재의 기울기를 보면 밀입도 혼합물인 A1, F1, G1의 기울기가 1에 가깝다. 여기서 F1과 G1은 골재의 최대공칭치수가 A1보다 커서 동탄성계수가 높았고, 분류 역시 다르게 되었다. B1은 세립도로 밀입도와 곡선의 기울기가 비슷하여 A1과 동일하게 분류되었다. 결과적으로 슈퍼페이브 배합설계에서 추천하고 있는 밀입도의 곡선 기울기에서 멀어질수록 동탄성계수의 크기가 작아짐을 알 수 있다. 실험결과 및 분석자료를 종합하면, 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 잦입도 혼합물로 밀입도 혼합물의 값에 비해 많이 작아짐을 확인할 수 있다. 이는 밀입도 혼합물의 곡선에서 아래로 혹은 위로 곡선이 변화함으로 동탄성계수가 작아짐을 의미한다.



### 감사의 글

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

### 참고문헌

1. 김현오, 이관호 (2006), "국내 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 예측방정식", 대한토목학회 논문집
2. 한국도로포장공학회 : 아스팔트 포장공학 원론, 한국도로포장공학회 편저, pp. 571. (1999)
3. Brigison & Roque (2005), "Evaluation of the Gradation Effect on the Dynamic Modulus", TRB 1929, pp. 193-199
4. Andrei, D., Witczak, M. W., and Mirza, W., "Development of a revised Predictive Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures," Inter Team Technical Report NCHRP Project 1-37A, University of Maryland, March, 1999
5. Vavrik, W. R. , W. J. Pine, G. Huber, and S. H. Carpenter. The Bailey Method of Gradation Evaluation : The Influence of Aggregate GRadation and Packing Characterixtics on Voids in the Mineral Aggregate. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 70. 2001.
6. Ruth, B. E., R. Roque, and B. Nukunya. Aggregate Gradation Characterization Factors and Their Relationships to Fracture Energy and Failure Strain of Asphalt Mixtures. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2002.