

아스팔트 혼합물의 회복탄성계수를 이용한 상대강도계수 결정

Determination of Layer Coefficients Using the Resilient Modulus of Asphalt Concrete Mixture

전성일* · 김연복** · 김부일*** · 이문섭****

1. 서론

상대강도계수는 미국 AASHTO 포장설계에서 아스팔트 포장 각층의 상대적인 강성을 나타내는 경험적인 계수로서, 포장전체의 구조지수와 포장층 두께 사이의 관계를 나타낸다. 상대강도계수는 최초 AASHTO 도로시험조건에 따라 경험적으로 산출되었기 때문에, 당시 적용되지 않은 현재의 국내 포장재료에 대하여 이를 그대로 적용하기에는 많은 제약이 따른다. 그러나 국내에서 현재 개발중인 역학적 개념의 포장 설계법이 개발되기 전까지 기존의 AASHTO 포장설계법이 도로설계에 빈번히 사용될 것임을 고려할 때, 과거 제안된 상대강도계수의 적절성을 파악하고 그 적용범위를 합리화할 필요가 있다.

과거 국내에서도 국내 포장재료에 대한 상대강도계수를 제안하기 위하여 관련 연구가 수행된 바 있으나, 여러 가지 한계에 의하여 상대강도계수의 기준값이나 기준 범위로 활용되지는 못하였다. 따라서 현재 국내 아스팔트 포장의 두께는 국내 환경과 재료 특성을 고려한 합리적인 근거가 부족한 상황에서 설계되고 있는 실정이다. 이에 본 논문에서는 AASHTO 회귀식과 상대적상관법(Relative Method)을 이용하여 국내 밀입도 아스팔트 혼합물의 상대강도계수 범위를 산정하였다.

2. 상대강도계수의 이론적 배경

AASHTO에서는 누적교통량에 따른 시험도로 전체의 공용성(서비스지수)의 변화를 통계적으로 분석하여 각 층의 구성 재료에 대한 상대강도계수를 산정하였다. <식 1>은 상대강도계수 산정에 이용된 서비스지수 예측 모형을 나타내고 있는데, 현재 서비스지수를 최초 공용 서비스지수, 최종 공용 서비스 지수, 누적 교통량 및 하중 변수, 설계변수로 표현한 지수함수이다.

$$p = C_0 - (C_0 - C_1) \left(\frac{W}{\rho} \right)^\beta \quad \text{<식 1>}$$

여기서, p : 현재 서비스지수

C_0 : 최초 공용 서비스지수(아스팔트 포장 = 4.5)

C_1 : 최종 공용 서비스지수(= 2.5)

W : 현재 누적교통량

ρ : 설계변수(SN), 하중변수(L_1, L_2)를 독립변수로 하는 양의 함수
(= 공용말기의 누적교통량 W)

β : 설계변수(SN), 하중변수(L_1, L_2)를 독립변수로 하는 양의 함수

* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원 · 공학석사 031-910-0542 (E-mail : jeonsi@kict.re.kr)
** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구위원 · 공학박사 031-910-0310 (E-mail : ybkim@kict.re.kr)
*** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원 · 공학박사 031-910-0240 (E-mail : bikim@kict.re.kr)
**** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원 · 공학석사 031-910-0610 (E-mail : truepath@kict.re.kr)



$$\rho = \frac{A_0 (SN+1)^{A_1} L_2^{A_2}}{(L_1+L_2)^{A_3}}, \quad \beta = 0.4 + \frac{B_0 (L_1+L_2)^{B_1}}{(SN+1)^{B_2} L_2^{B_3}}, \quad SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3$$

AASHTO 도로시험에서는 데이터를 통계적으로 분석하여, 변수 β , ρ 와 D_1, D_2, D_3 사이의 관계를 a_1, a_2, a_3 로 표현하였으며, A_n, B_n 도 동시에 계산하였다. 그러나 각 포장층의 두께는 포장내 재료의 위치를 반영하지 못하기 때문에, 동일한 포장재료가 다른 포장층에 적용되었을 경우 포장의 거동이 달라지는 것을 설명하지 못하며, AASHTO 도로시험에서 사용되지 않은 포장재료에 대해서는 합리적인 상대강도계수를 제시하지 못하는 한계가 있다.

미국의 많은 주에서는 AASHTO에서 제안한 상대강도계수를 수용하여 아스팔트 포장 설계를 수행하였으며, 일부 주에서는 지속적인 연구를 통하여 AASHTO에서 제안하지 못한 포장재료를 대상으로 상대강도계수를 제안하였다. 일반적으로 이들이 제안한 방법은 실내 실험을 통하여 대상재료의 탄성계수 또는 압축강도, CBR 값, R값 등과 상대강도계수와의 상관관계를 정의한 것으로서 이는 회귀식을 통하여 표현하였다.

<표 1>은 현재 적용되고 있는 아스팔트 혼합물의 상대강도계수를 나타내고 있다.

표 1. 아스팔트 혼합물의 상대강도계수

| 구 분 | AASHTO 도로시험 | 미국 4개주(중부내륙지역) 상대강도계수 | | | | 국내적용치 |
|--------------|-------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 오하이오 | 유타 | 와이오밍 | 일리노이 | |
| 아스팔트 표층 | 0.173 | 0.157 | 0.157 | 0.137 | 0.127 | 0.145 |
| 아스팔트 안정처리 기층 | 0.133 | - | 0.118 | 0.098 | 0.114 | 0.110 |

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

<그림 1>은 실내실험을 이용한 표층·기층재료의 상대강도계수 산정절차를 나타내고 있다. 그림에서 나타낸 것과 같이 상대강도계수 산정절차는 크게 2개의 카테고리로 분류가 되는데, 첫째는 AASHTO 도로시험에서 사용한 재료의 역학적 특성치와 AASHTO 도로시험에 사용한 재료의 입도를 재현하여 얻은 역학적 특성치를 비교·분석하는 과정, 둘째는 국내재료를 이용하여 얻은 역학적 특성치와 기존에 국내에서 연구되었던 자료를 이용하여 역학적 특성치를 분석하는 과정으로 분류될 수 있다. 이와 같은 과정을 통해 산정된 회복탄성계수값은 AASHTO 제안식과 Relative Method를 이용하여 각각의 상대강도계수를 산정한다.

본 연구에서는 19mm 밀입도 혼합물과 25mm 밀입도 혼합물(BB3)에 대하여 입도별 마찰안정도, 간접인장강도, 회복탄성계수 실험을 수행한다.

3.2 실험재료

아스팔트의 분류는 침입도, 연화점 및 점도를 기준으로 하고 있으며, 우리나라에서는 KS M 2252 (침입도 분류에 의한 도로포장용 아스팔트) 및 KS M 2208 (점도 분류에 의한 도로포장용 아스팔트)에 따라 아스팔트를 분류하고 있다. <표 2>는 본 연구에 사용된 아스팔트의 물성특성을 나타내고 있다.

본 연구에서는 전국적으로 분포가 많고 성능이 좋은 편마암(Gneiss)과 화강암(Granite)을 선정하였다. 이들을 각기 KS F에 규정된 방법에 따라 품질 시험한 결과는 <표 3>과 같다. 또한 굵은골재 최대치수를 19mm와 25mm로 하여 잔골재, 채움재와 혼합하여 건설교통부 19mm와 25mm 밀입도 규격에 적합한 입도로 조정하여 사용하였다.

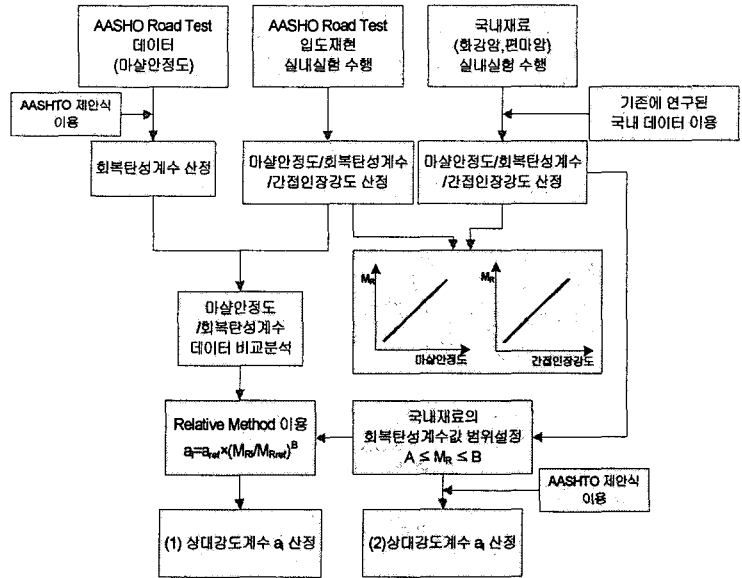


그림 1. 실내실험을 이용한 상대강도계수 산정 절차

표 2. 아스팔트의 물성특성

| 분 류 | AC 60-80 |
|-------------------|----------|
| 침입도(25℃ (0.1mm)) | 60 |
| 절대점도(60℃ (poise)) | 2,464 |
| 동점도(135℃ (cP)) | 425 |
| 연화점(25℃ (cm)) | 138 |
| 인화점(℃) | 334 |
| 비 중 | 1.024 |

표 3. 골재 특성

| Classification | 골재타입 | 25mm 골재 | 19mm 골재 | 잔골재 | 필러 |
|---------------------------|------|---------|---------|------|------|
| Apparent specific gravity | 편마암 | 2.68 | 2.67 | 2.67 | 2.75 |
| | 화강암 | 2.75 | 2.72 | 2.74 | 2.83 |
| Absorption (%) | 편마암 | 1.25 | 1.25 | 1.19 | - |
| | 화강암 | 0.56 | 0.55 | 1.41 | - |
| Abrasion (%) | 편마암 | 17.94 | 17.76 | - | - |
| | 화강암 | 19.68 | 19.60 | - | - |

3.3 회복탄성계수 실험방법

아스팔트 혼합물의 회복탄성계수 실험은 ASTM D 4123 규정에 준하여 수행되었다. 본 시험에서는 25℃에서 회복탄성계수를 측정하였으며, 시험에 사용된 하중 형태는 정현파 하중을 사용하고, 이때 하중 재하는 0.1초의 재하 기간>Loading Time)과 0.9초의 휴지 기간>Rest Time)을 1사이클로 하였다. 또한 하중의 크기는 공시체의 거동이 선형 탄성 범위 안에 들게 하기 위하여, 수평 변위가 350 micro-strain 이하에 들 수 있는 크기로 선정하였다. <그림 2>는 회복탄성계수 실험 형상을 나타내고 있다.

회복탄성계수(M_R)와 포아손 비(ν)는 다음식에 따라 구한다.

$$M_R = P(\nu + 0.27) / t \Delta H$$

$$\nu = 3.59 \Delta H / \Delta V - 0.27 \quad \text{<식 2>}$$

- 여기서, P : 반복 하중(N)
- t : 공시체 두께(mm)
- ΔH : 회복 수평 변형(mm)
- ΔV : 회복 연직 변형(mm)

4. 실험결과

4.1 배합설계결과

각 혼합물에 대한 배합설계 결과로부터 최적 아스팔트 함량(Optimum asphalt content : OAC)를 결정하였다. 각 혼합물의 최적 아스팔트 함량과 물성특성은 <표 4>와 같다.

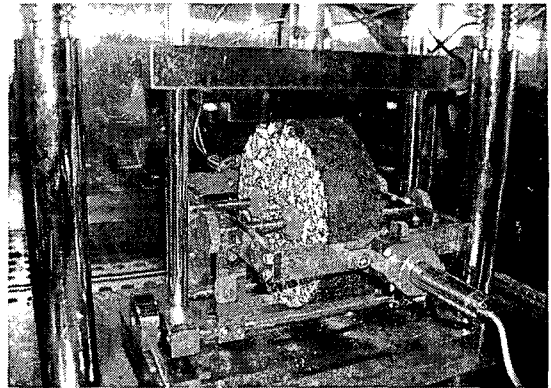


그림 2. 회복탄성계수 실험 형상

표 4. 최적 아스팔트 함량에서 마찰안정도와 간접인장강도 특성

| 혼합물 종류 | | OAC (%) | 안정도 (kgf) | 흐름값 (0.01cm) | ITS (kgf/cm ²) |
|----------|--------|---------|-----------|--------------|----------------------------|
| 표층 | 19-화-G | 5.0 | 1,125 | 34 | 9.1 |
| | 19-화-A | 5.4 | 985 | 38 | 8.7 |
| | 19-편-G | 5.0 | 1,094 | 32 | 8.5 |
| | 19-편-A | 5.4 | 1,014 | 39 | 8.9 |
| 기층 (BB3) | 25-화-G | 4.0 | 1,086 | 35 | 8.2 |
| | 25-화-A | 5.2 | 992 | 36 | 8.1 |
| | 25-편-G | 4.0 | 1,069 | 37 | 8.3 |
| | 25-편-A | 5.2 | 953 | 37 | 8.1 |

G : 일반밀입도 / A : AASHO 도로시험에 적용된 입도

4.2 회복탄성계수 실험결과

회복탄성계수 실험은 각 변수 당 20개 이상의 시편을 사용하였으며, <표 5>는 회복탄성계수의 평균값을 나타내고 있다.

표 5. 회복탄성계수 실험결과

| | 회복탄성계수(kg/cm ²) | | | | | | | |
|------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 19화G | 19화A | 25화G | 25화A | 19편G | 19편A | 25편G | 25편A |
| 평균 | 29,435 | 27,662 | 24,379 | 23,369 | 25,020 | 24,320 | 23,914 | 22,668 |
| 표준편차 | 4,848 | 4,397 | 3,544 | 3,235 | 3,205 | 3,979 | 3,458 | 3,252 |

4.3 회복탄성계수를 이용한 상대강도계수 산정

실내실험을 통해 상대강도계수를 산정하기 위한 방법은 AASHTO 회귀식과 상대적상관법을 사용하였으며, 상대적상관법은 Odemark Equation을 사용하였다. <식 3>과 <식 4>는 상대강도계수 산정을 위한 AASHTO 회귀식을 나타내고 있으며, <식 5>는 Odemark Equation을 나타내고 있다.



$$a_1 = 0.16 \times \log\left(\frac{M_R}{30584}\right) + 0.17 \quad \text{<식 3>}$$

$$a_2 = 0.12 \times \log\left(\frac{M_R}{30584}\right) + 0.13 \quad \text{<식 4>}$$

$$a_i = a_{AASHTO} \times \left(\frac{M_R}{M_{R,AASHTO}}\right)^B = \left(\frac{a_{AASHTO}}{M_{R,AASHTO}^B}\right) \times M_R^B = A_i \times M_R^B \quad \text{<식 5>}$$

여기서, M_R = 본 재료의 회복탄성계수

$M_{R,AASHTO}$ = AASHTO 도로시험에서의 아스콘 혼합물의 회복탄성계수

B = 1/3 (Odemark에 의해 제안)

(1) AASHTO 회귀식 이용

<표 6>은 AASHTO 회귀식을 이용하여 산정된 상대강도계수를 나타내고 있다. 표에서 나타낸 것과 같이 평균 회복탄성계수를 이용하여 산출된 상대강도계수 값이 국내적용 기준치 0.145보다는 약간 크게 나타났으며, AASHTO 적용 기준치 0.173보다는 약간 작게 나타났다. 또한 각 변수마다 최소 회복탄성계수를 적용한 결과 상대강도계수는 국내기준치보다도 약간 작게 나왔다.

<그림 3>과 <그림 4>는 회복탄성계수의 확률밀도분포를 나타낸 것이다.

표 6. AASHTO 회귀식을 이용한 상대강도계수 산정

| | 표 층 | | | 기 층 | | |
|-----|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
| | 19-화-G | 19-편-G | 평 균 | 25-화-G | 25-편-G | 평 균 |
| 평균값 | 0.167 | 0.156 | 0.162 | 0.118 | 0.117 | 0.117 |
| 최소값 | 0.146 | 0.141 | 0.144 | 0.103 | 0.104 | 0.103 |

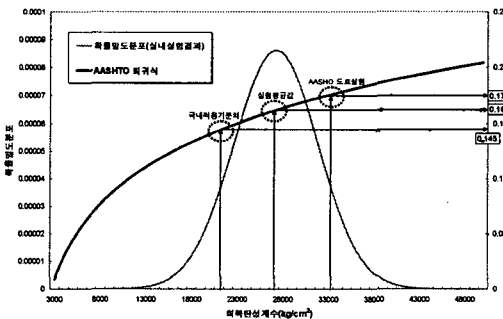


그림 3. 회복탄성계수의 확률밀도분포 및 상대강도계수 추정차트(표층)

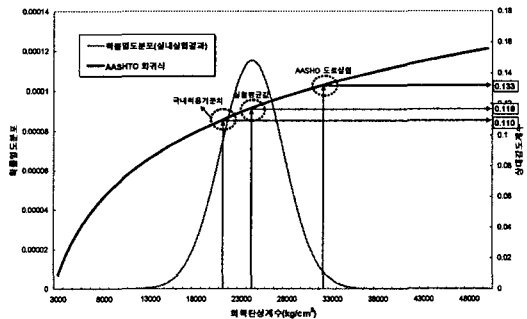


그림 4. 회복탄성계수의 확률밀도분포 및 상대강도계수 추정차트(기층)

(2) 상대적상관법(Relative Method)

Relative Method는 AASHTO 도로시험에서 적용된 혼합물의 회복탄성계수와 상대강도계수를 이용하여 현재 사용되고 있는 혼합물의 상대강도계수를 상대적으로 산정하는 방법이다. 하지만 AASHTO 도로시험에서는 아스팔트 혼합물의 마찰안정도 값을 제시하였으며, 이에 본 연구에서는 AASHTO 혼합물의 회복탄성계수를 3가지 방법을 통해 추정하였다.

Method I : AASHO 입도를 재현한 혼합물의 회복탄성계수와 상대강도계수 0.173(표층)/0.133(기층) 적용
 Method II : AASHO 입도를 재현한 혼합물의 회복탄성계수와 AASHTO 회귀식을 통해 산정된 상대강도계수 적용

Method III : AASHO 도로시험에서 적용된 혼합물의 물성치와 기후조건을 고려하여 회복탄성계수를 추정된 값과 상대강도계수 적용 -Missouri Highway 연구-

$$(a_{1,AASHO} = 0.173, M_{R,AASHO} = 46175 \text{ kg/cm}^2, a_{2,AASHO} = 0.133, M_{R,AASHO} = 42533 \text{ kg/cm}^2)$$

위의 방법을 이용하여, <표 7>과 같이 상대강도계수를 산정하였다. Method I, II는 국내 기준치보다 약간 크게 산정되었으며, Method III의 경우 국내 기준치와 거의 일치하였다.

표 7. Relative Method를 이용한 상대강도계수

| | | 표 층 | | | 기 층 | | |
|------------|--------|---------|---------|-------|---------|---------|-------|
| | | 19-화-G | 19-편-G | 평균 | 25-화-G | 25-편-G | 평균 |
| Method I | Ai | 0.00572 | 0.00597 | | 0.00465 | 0.00470 | |
| | 상대강도계수 | 0.177 | 0.175 | 0.176 | 0.135 | 0.135 | 0.135 |
| Method II | Ai | 0.00539 | 0.00532 | | 0.00406 | 0.00404 | |
| | 상대강도계수 | 0.166 | 0.156 | 0.160 | 0.118 | 0.116 | 0.117 |
| Method III | Ai | 0.00482 | 0.00482 | | 0.00381 | 0.00381 | |
| | 상대강도계수 | 0.149 | 0.141 | 0.145 | 0.110 | 0.110 | 0.110 |

(3) 상대강도계수 비교·분석

<그림 5>는 표층과 기층에 대하여 각각의 산정방법에 따른 회복탄성계수와 상대강도계수의 추이를 나타내고 있다. 아스콘 표층의 경우, 상대적상관법 I, III는 다른 방법들과 비교하여 큰 차이를 보였으며, 상대적상관법 II와 AASHTO 회귀식은 유사한 경향을 나타내었다.

본 실험결과를 볼 때 아스팔트 포장설계에서 국내 적용되는 상대강도계수값이 너무 작게 적용된다고 볼 수도 있으나, 혼합물의 변동성을 고려할 때 안전측의 설계가 이루어지고 있다고 판단된다. 물론 본 연구에서 사용된 산정방법은 상대강도계수를 정량화하는데 있어 문제점을 안고 있다. 그러나 국내에 적용되고 있는 상대강도계수와 비교해 볼 때, 상대적상관법 III가 가장 유사한 결과를 나타낼을 알 수 있다.

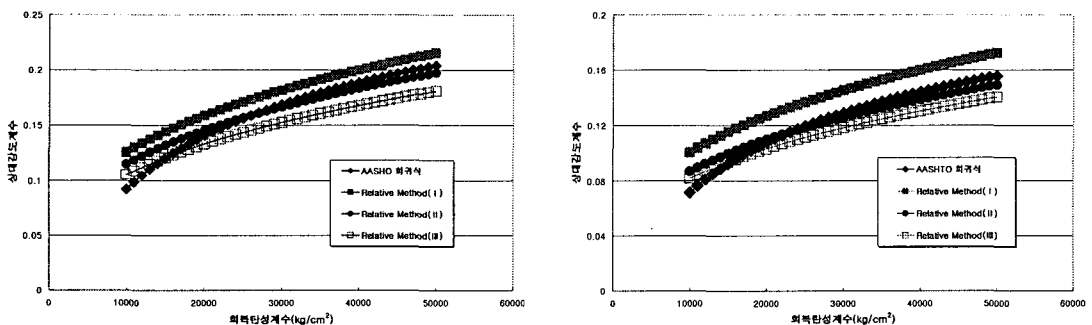


그림 5. 산정방법에 따른 상대강도계수 비교 (표층<좌>, 기층<우>)

5. 결론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 상대강도계수는 등가계수(Equivalence Factor) 개념으로, 강성/강도 개념으로 정의하기에는 한계가 있으나, 등가계수(Equivalence Factor)를 결정하는 것은 현실적으로 어려움이 따르기 때문에, 본 연구에 선 회복탄성계수데이터를 AASHTO 회귀식과 상대적상관법에 적용하여 상대강도계수를 추정하였다.



- 아스팔트 표층 혼합물의 상대강도계수는 0.145~0.176 정도를, 아스팔트 기층 혼합물의 상대강도계수는 0.110~0.135 정도를 나타내었다.
- 현재 국내에서 적용되고 있는 상대강도계수 값은 혼합물의 변동성과 안전측 설계를 고려할 때 적절한 것으로 판단된다. 물론 본 방법이 상대강도계수를 정량화 하는 것에는 한계가 있지만, 국내에 적용되고 있는 상대강도계수와 비교해 볼 때 상대적상관법 Ⅲ가 가장 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 건교부 수탁과제인 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 일부 성과물로서 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. Rhode Island DOT(1994), “Estimation of layer coefficients of bound layers for flexible pavement design in Rhode island”
2. K.P. George(1996), “AASHTO layer coefficients for bituminous materials”
3. Missouri Highway(1994), “Determination of AASHTO Layer Coefficients Volume I :Bituminous Materials”
4. Vincent C. Janoo(1994), “Layer coefficeints for NHDOT pavement materials”