

아스팔트 바인더의 노화특성을 고려한 동탄성계수 평가

Evaluation of Dynamic Modulus based on Aged Asphalt Binder

이관호* · 조경래** · 이병식*** · 송용선****

Lee, Kwan-Ho · Cho, Kyung-Rae · Lee, Byung-Sik · Song, Yong-Seon

Abstract

Development of a new design guide which is based on empirical-mechanistic concept for pavement design is in action. It is called AASHTO 2002 Design Guide in USA and the KPRP(Korean Pavement Research Project) in Korea. The material characteristic of hot mix asphalt is a key role in the design guide. Therefore it is urgent to get a proper materials database, especially the dynamic modulus of hot mix asphalt. In this research, dynamic modulus test, which is based on aged asphalt binder, has been carried out and proposed the predicted equation of dynamic modulus. Nine different hot mix asphalt with three different asphalt binder have been used for the dynamic modulus test. Short-term aging, which is covers the time for the production of asphalt plant, transportation, lay-down, and compaction, can be simulated at 135°C with 2 hour curing. Long-term aging has been carried out for a performance period of asphalt pavement. The dynamic modulus of asphalt pavement increases with aging time. As the nominal aggregate size increases, the change of dynamic modulus is not big.

Key Words : hot mix asphalt, mix design, gyratory compactor, superpave, compaction energy index, permanent deformation

요 지

최근 국내외에서 도로포장설계법에 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 동탄성계수시험이다. 본 연구에서는 아스팔트 포장체의 시간에 따른 노화특성을 고려한 아스팔트 포장체의 동탄성계수를 평가하였고, 이를 이용하여 동탄성계수 예측방정식을 제안하였다. 시험에 이용된 아스팔트 혼합물은 KS 표준규격에 사용되는 9종(SMA 및 SBS 포함)과 3종류의 아스팔트 바인더를 이용하였다. 보통 공장에서 배합, 생산되어 현장으로 이동하고 다짐이 완료되기까지 걸리는 시간을 고려하면 단기노화조건은 135°C 4시간이 적절할 것으로 판단되며, 공정이 빠르고 관리가 잘 되는 조건을 반영 한다면 135°C 2시간이 적절할 것이다. 장기노화 시험은 공용단계의 아스팔트 바인더의 노화를 시험하였다. 전체적으로 노화가 진행되면서 동탄성계수가 높아짐을 알 수 있다. 최대입경이 클수록 그 정도는 작아지는데 그 이유는 아스팔트 바인더의 효과 보다 골재의 효과가 그 비중이 증가함에 따른 것이다.

핵심용어 : 아스팔트혼합물, 배합설계, 선화다짐기, 수퍼페이브, 다짐에너지지수, 소성변형

1. 서 론

2000년 초부터 시작된 우리나라의 도로분야의 발전은 타 분야에 비해 매우 비약적인 성장을 하고 있다. 이는 이전의 기간 동안 도로분야의 기술적인 발전이 상대적으로 취약함을 의미한다. 도로분야의 발전에 크게 기여하고 있는 연구 중의 하나가 한국형포장설계법 개발 및 성능개선연구이다. 본 과제는 우리나라의 도로 전 분야, 재료, 실험, 시공, 유지관리, 교

통 등 다양한 분야를 유기적으로 연계하여 효율적이고, 실용적인 연구를 수행하고 있다.

최근 국내외에서 도로포장설계법에 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

*정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 부교수 (E-mail: kholee@kongju.ac.kr)
**정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 석사과정
***정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 교수
****공주대학교 건설환경공학부 교수

이용될 국내 아스팔트 혼합물의 재료물성의 평가가 매우 시급한 실정이다. 이 재료의 물성치를 평가하는 방법 중 최근에 많이 적용되는 방법이 동탄성계수 시험이다(건설교통부 2002).

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 진행 중에 있으나, 동탄성계수에 영향을 주는 다양한 요소에 대한 자료가 필요한 상태이다. 본 연구에서는 아스팔트 바인더의 노화특성이 동탄성계수에 미치는 영향을 주로 평가하였고, 현장에서 발생하는 단기 및 장기노화특성을 실내실험을 통해 구현할 수 있는 실험법을 제안하고자 한다.

2.아스팔트 혼합물의 동탄성계수와 전이함수

아스팔트 혼합물의 점탄성 거동특성은 사인과 하중을 휴지 기 없이 연속 재하한 상태에서 측정된 변형특성과 하중과의 상관관계로부터 규명이 가능하며, 이때 이용하는 파라미터를 복합탄성계수(complex modulus, E^*)로 정의한다(김현오 및 이관호, 2005). 시험에 이용되는 하중과 측정된 변형, 및 복합탄성계수는 다음과 같이 정의되며 그림 1과 같이 표시된다. 동탄성계수는 복합탄성계수의 절대값을 의미하며, 식 (4)와 같이 표현된다.

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

$$\varepsilon = \varepsilon_o \sin(\omega t - \phi) \quad (2)$$

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

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

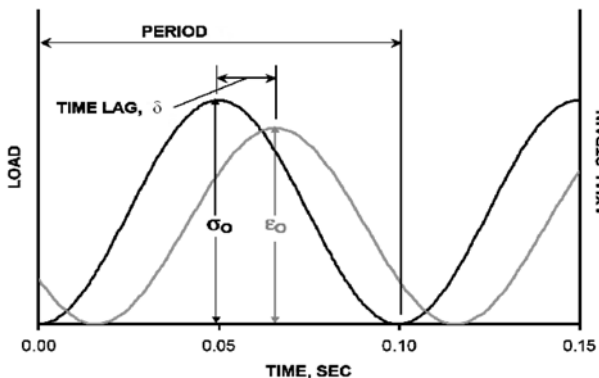


그림 1. 시간에 따른 하중 및 변형

시험으로부터 결정되는 동탄성계수는 시험온도 및 하중의 조합에 따라 각각의 값을 얻을 수 있다. 이것을 하중시간과 온도의 중첩(Superposition Principle)원리를 적용하여 그림 2와 같은 마스터곡선 및 전이함수를 작성할 수 있다. 마스터곡선은 특정 아스팔트 혼합물의 하중과 온도와의 상관관계를 규명할 수 있는 장점을 가지고 있다.

2002 AASHTO에서 추천하는 방법은 아스팔트 바인더의 점도특성을 이용한 것으로, 점도의 감온성(Viscosity Temperature Susceptibility)방법이라고 불리며, 절대온도의 변화에 따른 대수 그래프상의 점도 값의 기울기이다. 이 값은 일반적으로 3.36~3.98의 값을 가진다. 점도와 감온성 관계는 식 (5)로 표현된다.

$$\log(\log \eta) = A + VTS[\log(T_R)] \quad (5)$$

여기서, η : 점도, cPoise,

T_R : temperature, ($^{\circ}R$)

A : 점도-감온성 곡선에서의 절편

VTS : 점도와 감온성 관계에서의 기울기

Pellinen(2002) 등은 점도의 감온성(VTS)을 이용하여 식 (6)에 표현된 것처럼 중심이 되는 온도의 점도를 각 온도의 점도로 나누어 전이함수를 결정하였다.

$$\log a(T) = c \left(10^{A+VTS[\log(T)]} - 10^{A+VTS[\log(T_{R0})]} \right) \quad (6)$$

여기서, c : 상수,

T_R : 변환 할 온도, ($^{\circ}R$)

$(T_R)_0$: 기준온도, ($^{\circ}R$)

일반적으로, 저온 및 상온에서의 아스팔트 혼합물의 하중응답특성은 지수함수형태를 이용하고, 고온에서의 특성 평가시에는 다중함수를 이용한다. Pellinen(2001)에 의해 제안된 새로운 방법은 sigmoidal function을 이용하여 마스터곡선을 결정하는 것으로, 이 함수는 측정된 동탄성계수를 비선형최소자승법을 이용하여 처리한다. 기본방정식은 다음과 같고, MS사

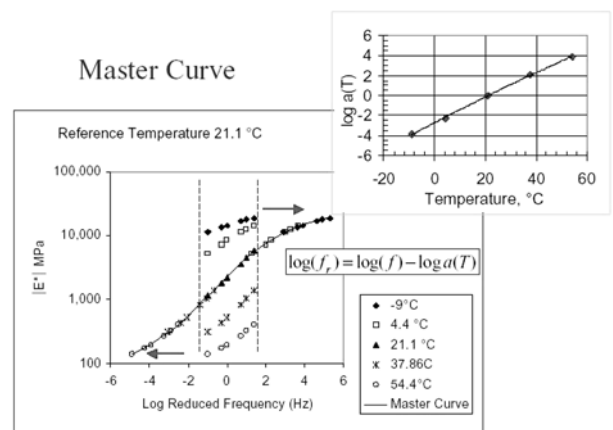


그림 2. 마스터곡선 및 변환함수

의 EXCELL의 Solver function을 이용하여 방정식에 사용된 파라미터를 결정하였다.

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{a}{1 + \exp^{\beta - \gamma \log(t_r)}} \quad (9)$$

$$\log(t_r) = \log(t) - c \{ \log(\eta) - \log(\eta_{T_r}) \} \quad (10)$$

여기서 $\log(|E^*|)$ = 로그함수값의 동탄성계수

δ = minimum modulus (최소값)

a = range of possible value

β & γ = shape parameter

η, η_{T_r} = 아스팔트 바인더의 점도

3. 아스팔트 바인더의 노화특성

아스팔트 도로 포장체의 공용특성에 영향을 주는 중요 요소 중의 하나가 아스팔트 바인더의 유변학(rheology)적 특성이다. 아스팔트 바인더의 유변학적 특성은 시간과 온도에 따라 크게 변화하는 특성을 가지고 있다. 특히, 아스팔트 혼합물의 제조과정, 운송, 현장 다짐, 차량 개방 후 공용기간 동안 지속적으로 경화되는 노화현상이 아스팔트 도로 포장체의 공용특성에 영향을 주게 된다. 즉, 아스팔트의 노화현상은 아스콘의 생산과정에서부터 도로 포장체 시공 및 공용기간 동안 장기간 동안 지속적으로 발생하는 현상이다.

아스팔트의 최초의 급격한 노화는 아스팔트 혼합물의 제조과정중 주로 고온에서 골재와 혼합되는 퍼그밀에서 발생한다. 일반적으로 골재와 혼합되는 아스팔트의 온도는 150°C도 정도로, 아스팔트 바인더의 휘발성분의 증발 및 산화로 인하여 아스팔트 바인더의 물성이 변하게 된다(한국도로학회, 1998). 아스팔트의 노화는 변화속도는 다소 느리지만, 아스팔트 혼합물의 사일로 저장, 포설현장으로 운반, 포설 및 다짐과정, 교통 개방 후 공용기간동안 교통하중의 다짐효과로 인해 공극율이 안정화되는 2-3년 후 까지 느린 속도로 계속된다. 이 시기를 지나면, 노화속도는 매우 크게 감소하며 변화특성을 확인하기 위해서는 많은 시간이 요구된다.

일반적으로 공용기간 동안 발생하는 아스팔트 혼합물의 노화는 산화작용, 휘발작용, 중합반응(polymerization), 의액성(thixotropy), 상승작용(syneresis), 분리작용 등에 의해 발생한다. 산화작용은 아스팔트가 산소와 반응하는 것으로서, 산화속도는 아스팔트의 특성과 온도에 의해 결정된다. 휘발작용은 아스팔트에 잔류되어 있는 미량의 휘발성분이 증발하는 것으로, 주로 온도에 의해 결정되나 포장의 장기노화를 일으키는 중요한 요소는 아니다. 중합반응은 큰 분자 구조를 형성하기 위하여 같은 분자들끼리 서로 결합하는 현상으로 점진적인 경화를 일으킨다. 의액성은 일정기간에 걸쳐 아스팔트내에서 어떤 구조가 형성됨으로 인해 발생하는 점진적인 경화이다. 상승작용은 경량오일액체가 아스팔트 막의 표면으로 스며나오는 삼출작용이다. 이와 같이 오일성분이 제거되면 아스팔트 더욱 단단해진다. 분리작용은 아스팔트로부터 오일성분이나

레진 또는 아스팔텐 등의 다공질 골재 속으로 선택적으로 흡수되어 제거되는 것이다. 아스팔트 바인더의 노화특성은 주로 잔류침입도비 및 노화지수를 이용하여 평가한다.

최근 미국의 전략적 도로연구사업에서 아스팔트 바인더의 노화특성을 실내실험에서 구현할 수 있는 실험방법을 제안하였다. 즉, 단기노화를 구현하기 위한 회전박막가열오븐(Rolling Thin Film Oven, RTFO)시험과 장기노화를 구현하기 위한 압력노화(Pressure Aging Vessel, PAV) 등이 있다. 회전박막가열시험 시방기준은 AASHTO T 240과 ASTM D 2872, 압력노화시험은 ASTM D 454 및 D 572에 제시되어 있다. 압력노화시험을 통해 얻어지는 시편은 5년에서 10년 정도 현장에서 공용중인 아스팔트 포장의 노화정도를 모사하는 것으로 보고되고 있다.

4. 아스팔트 혼합물의 노화실험 및 결과분석

4.1 배합설계 및 부피특성

아스팔트 혼합물에서 노화에 대하여 고려해야 할 점은 크게 두 가지가 있다. 첫 번째가 아스팔트 혼합물이 공장에서 배합되고 포설되어 다짐이 완료되는 순간까지 노화되는 단기노화 단계가 있다. 두 번째가 교통이 개방되고 도로를 사용하면서 아스팔트 혼합물이 변화하게 되는 장기노화 단계가 있다. 본 연구에서는 현장 공용단계를 연구실에서 단기노화 단계와 장기노화 단계로 차례로 모사하여 시험하고자 한다. 동탄성계수 시험은 5, 21, 40°C의 세 가지 온도 조건에서 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 25 Hz의 여섯 가지 주파수로 시험하였다. 실험에 이용된 아스팔트 혼합물 종류는 국내에서 보편적으로 이용된 7가지 종류를 이용하였다.

슈퍼페이즈 배합설계를 이용하여 표 1의 입도로 동일한 교통량으로 최적 아스팔트 함량을 각각 결정하였다. 최적아스팔트 함량에서 동일한 4% 공극률 조건으로 아스팔트혼합물을 준비하고, 혼합물은 135°C 4시간의 단기노화 후 선화다짐기를 이용하여 다짐을 하였다. 다져진 직경 150 mm 혼합물을 직경 100 mm가 되도록 코어링을 하고, 높이 150 mm가 되도록 절단하여, 시험용 시편을 직경과 높이가 1:1.5가 되도록 준비하였다.

4.2 단기노화시험 및 동탄성계수 평가

단기노화 효과를 알아보기 위해 노화시키지 않고 혼합 후 바로 다진 시편, 그리고 135°C와 160°C로 각각 2, 4, 6시간 단기노화 시키고 다져 동탄성계수 시험을 수행하였다. 단기노화 각 조건별 동탄성계수 시험결과는 표 2에 제시하였다. 전체적으로 온도가 감소하고, 하중주파수가 커지고, 단기노화실험 온도가 높을수록 동탄성계수가 커지는 경향을 보여주고 있다.

이 결과를 마스터곡선으로 그림 3에 노화하지 않은 시편과 160°C로 2, 4, 6시간 단기 노화한 시편의 결과를 비교하였다. 그림 5는 노화하지 않은 시편과 135°C로 2, 4, 6시간 단기 노화한 시편의 결과를 마스터곡선으로 비교하였다. 그림 3과 그림 4의 마스터 곡선에서 보면 저온의 빠른 주파수에서

표 1. 노화시험을 위한 골재의 입도 및 물성

| 입도 체크기(mm) | A1 | B1 | C1 | D1 | E1 | F1 | G1 |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 밀입도13 | 세립도13 | 세립도갭13F | 세립도13F | 개립도13 | 밀입도19 | 밀입도25 |
| 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 |
| 아스팔트 혼합물 부피특성 | | | | | | | |
| 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 |
| 아스팔트 등급 | PG58-22 | PG58-22 | PG58-22 | PG58-22 | PG58-22 | PG58-22 | PG58-22 |

| 입도 체크기(mm) | A2 | F2 | G2 | H1 | H2 | I3 |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 밀입도13 | 밀입도19 | 밀입도25 | SMA13 | SMA13 | SBS13 |
| 25 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 19 | 100 | 97.5 | 87 | 100 | 100 | 100 |
| 12.5 | 97.5 | 82.5 | 76 | 95 | 95 | 97.5 |
| 9.5 | 82.5 | 68.75 | 65 | 61.25 | 61.25 | 87.5 |
| 4.75 | 67.5 | 55 | 49 | 27.5 | 27.5 | 61 |
| 2.36 | 51 | 39.5 | 37 | 20 | 20 | 41 |
| 1.18 | 39 | 31.25 | 34 | 18 | 18 | 29.5 |
| 0.6 | 27 | 23 | 17 | 16 | 16 | 20.5 |
| 0.3 | 18.5 | 15.5 | 14 | 13.5 | 13.5 | 13.5 |
| 0.15 | 11 | 10 | 9 | 11.75 | 11.75 | 9 |
| 0.075 | 7 | 5 | 4 | 10 | 10 | 6 |
| 아스팔트 혼합물 부피특성 | | | | | | |
| G _{mm} | 2.478 | 2.492 | 2.507 | 2.51 | 2.512 | 2.483 |
| G _{sb} | 2.647 | 2.647 | 2.647 | 2.647 | 2.647 | 2.647 |
| V _a (%) | 4.041 | 3.652 | 3.691 | 3.666 | 3.693 | 3.855 |
| OAC(%) | 5.3 | 5.1 | 4.5 | 5.7 | 5.7 | 4.6 |
| 아스팔트 등급 | PG 64-22 | PG 64-22 | PG 64-22 | PG 58-22 | PG 64-22 | PG 76-22 |

는 별 차이가 없으나 중간과 고온 영역에서는 135°C보다 160°C에서 단기노화 한 시편의 동탄성계수 값이 많이 증가함을 볼 수 있다. 특히 160°C로 단기노화 한 시편은 노화시간과 상관없이 거의 일정한 수준으로 노화되었음을 확인 할 수 있다. 135°C로 단기노화한 시편은 저온의 빠른 주파수에서 고온의 느린 주파수로 가면서 점점 노화시간에 따라 차이가 커짐을 알 수 있다. 보통 공장에서 배합, 생산되어 현장으로 이동하고 다짐이 완료되기까지 걸리는 시간을 고려하면 단기 노화조건은 135°C 4시간이 적절할 것으로 판단되며, 공정이

빠르고 관리가 잘 되는 조건을 반영 한다면 135 2시간이 적절할 것이다.

4.3 장기노화시험 및 동탄성계수 평가

배합설계 후 4%로 동일한 공극률을 가지도록 만들어진 각 시편을 그림 5의 순서로 차례로 동탄성계수 시험을 한다. 동탄성계수 시험은 비파괴 시험이므로 반복시험이 가능하다. 장기노화 단계에서 균등한 노화의 효과를 얻기 위해 시편의 아래 위를 매 24시간 간격으로 뒤집어 주었다. 동탄성계수 시

표 2. 단기노화 동탄성계수 (단위 : MPa)

| 온도 °C | 주파수 Hz | 원시료 | 단기노화 | | | | | |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 135°C | | | 160°C | | |
| | | | 2시간 | 4시간 | 6시간 | 2시간 | 4시간 | 6시간 |
| 5 | 0.1 | 13906 | 21021 | 19717 | 21425 | 23665 | 21465 | 19264 |
| | 0.5 | 21848 | 26728 | 25495 | 30556 | 32990 | 27874 | 22758 |
| | 1 | 25258 | 32039 | 31608 | 31806 | 35750 | 30537 | 25325 |
| | 5 | 34403 | 41599 | 36290 | 42254 | 48586 | 39767 | 30949 |
| | 10 | 35906 | 46966 | 44238 | 43791 | 51388 | 41770 | 32152 |
| | 25 | 43950 | 53944 | 47309 | 54473 | 54971 | 44512 | 34053 |
| 21 | 0.1 | 2262 | 3558 | 6486 | 5736 | 6418 | 6732 | 7046 |
| | 0.5 | 4365 | 6312 | 10668 | 8829 | 10888 | 10189 | 9490 |
| | 1 | 6067 | 8347 | 12892 | 11962 | 13985 | 13098 | 12210 |
| | 5 | 11440 | 15172 | 18335 | 20384 | 23391 | 20657 | 17924 |
| | 10 | 13408 | 18150 | 29889 | 22288 | 25353 | 22102 | 18850 |
| | 25 | 18683 | 30046 | 28137 | 28514 | 28579 | 22931 | 17284 |
| 40 | 0.1 | 507 | 815 | 1333 | 1276 | 1041 | 1564 | 2088 |
| | 0.5 | 646 | 1045 | 1732 | 1786 | 1419 | 2271 | 3122 |
| | 1 | 706 | 1138 | 1997 | 2131 | 1746 | 2760 | 3774 |
| | 5 | 1137 | 1953 | 3281 | 3402 | 3093 | 5619 | 8146 |
| | 10 | 1531 | 2535 | 5122 | 4782 | 4839 | 6520 | 8202 |
| | 25 | 2357 | 3926 | 6529 | 8554 | 6312 | 8807 | 11301 |

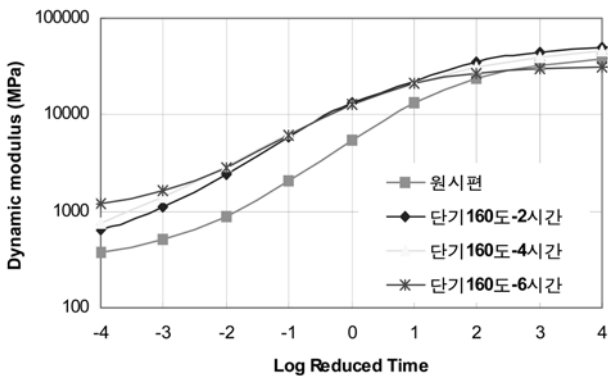


그림 3. 160도 단기노화 마스터곡선 비교

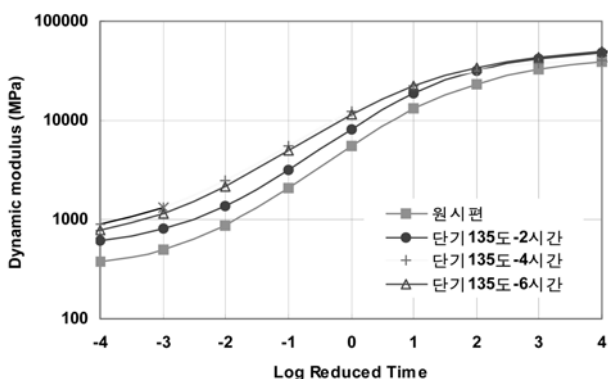


그림 4. 135도에서 단기노화 마스터곡선 비교

험을 하기 전 시편 온도의 안정화를 위해 실험실 온도(약 20°C)에서 12시간 이상 방치한 후 시험을 하였다.

장기노화를 실험실에서 온도조건을 이용하여 모사하였기 때문에 아스팔트의 바인더에 의한 장기노화라 봐야 정확하다.

아스팔트 바인더의 노화특성을 고려한 동탄성계수 평가

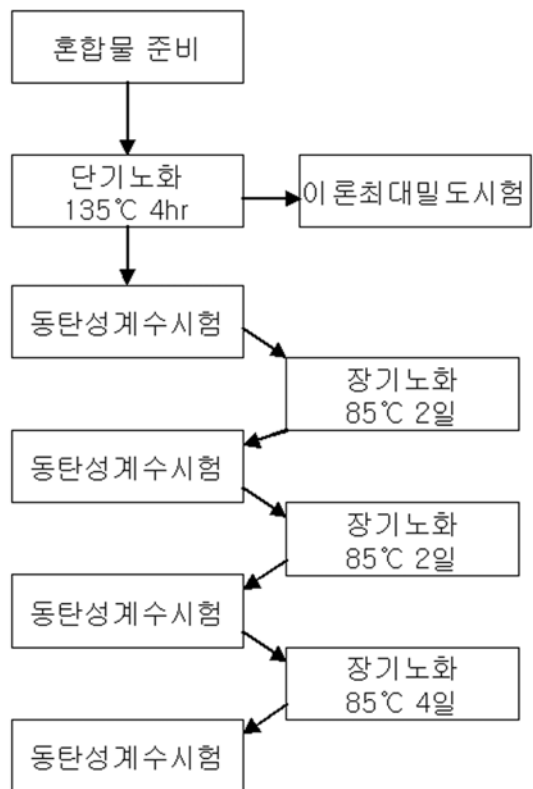


그림 5. 장기노화 시험 순서

그림 6에 나타난 것과 같이 전체적으로 노화가 진행되면서 동탄성계수가 높아짐을 알 수 있다. 최대입경이 클수록 그 정도는 작아지는데 그 이유는 아스팔트 바인더의 효과 보다 골재의 효과가 그 비중이 증가함에 따른 것이다. 표 3에 나타난 것과 같이, AP-3 아스팔트 바인더를 이용한 혼합물의

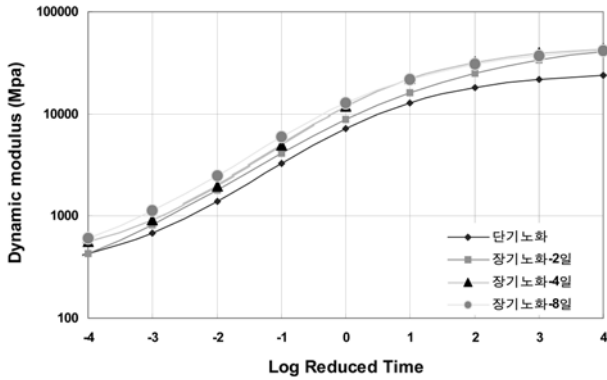


그림 6. 밀입도 13 mm + AP-5 혼합물의 동탄성계수 비교

표 3. 밀입도 13 mm 아스팔트 혼합물의 동탄성계수

| 혼합물 | | 밀입도 13 mm | | | | | |
|------|--------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 아스팔트 | | AP-3 | AP-5 | AP-3 | AP-5 | AP-3 | AP-5 |
| 온도 | 노화 주파수 | 2일 | | 4일 | | 8일 | |
| | | 0.1 | 20925 | 17828 | 24669 | 20566 | 35571 |
| | 0.5 | 27190 | 22627 | 39410 | 30430 | 45922 | 30775 |
| | 1 | 31637 | 26297 | 36844 | 33274 | 43395 | 33111 |
| 5 | 5 | 38789 | 33666 | 46671 | 43129 | 66411 | 40377 |
| | 10 | 50486 | 35705 | 47960 | 38843 | 64015 | 39625 |
| | 25 | 62816 | 38087 | 56899 | 42774 | 73400 | 44941 |
| | 0.1 | 4558 | 4181 | 5653 | 5389 | 9590 | 5995 |
| | 0.5 | 8060 | 7180 | 10205 | 10174 | 16539 | 11604 |
| | 1 | 9929 | 9113 | 13205 | 11886 | 22713 | 13063 |
| 21 | 5 | 17707 | 12911 | 24129 | 17225 | 36375 | 24010 |
| | 10 | 23426 | 19384 | 21607 | 26858 | 35352 | 18707 |
| | 25 | 29285 | 16746 | 44467 | 29250 | 45251 | 25722 |
| | 0.1 | 938 | 859 | 996 | 864 | 1178 | 967 |
| | 0.5 | 1445 | 1442 | 1545 | 1537 | 1805 | 1552 |
| | 1 | 1741 | 1693 | 1961 | 1751 | 2438 | 1850 |
| 40 | 5 | 3113 | 3086 | 3738 | 3437 | 4954 | 3443 |
| | 10 | 4424 | 4599 | 5682 | 4094 | 7666 | 4725 |
| | 25 | 5670 | 5815 | 8448 | 6827 | 10855 | 6550 |

동탄성계수가 AP-5 아스팔트 바인더를 이용한 아스팔트 혼합물의 동탄성계수에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 그림 7에 나타난 것과 같이, 골재의 공칭최대치수가 커지면, 측정된 동탄성계수 값이 커지는 경향을 나타내고 있다. SBS는 최대 입경은 작지만 고점도이기 때문에 고온에서 약간의 상승만 있는 정도였고, SMA는 바인더보다 골재의 맞물림에 의한 작용이 커서 바인더의 노화와 별 관계가 없는 것으로 나타났다. 또한, 아스팔트 바인더의 변화에 의한 효과보다는 골재의 공칭최대치수변화에 따른 동탄성계수의 변화가 큰 경향을 나타내고 있다. 이는 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 크기와 골재의 공칭최대치수와 밀접한 상관관계가 있음을 의미한다. 표 4은 실험에 이용된 전체 아스팔트 혼합물의 8일간후 측정된 동탄성계수값을 보여주고 있다. 전체적으로 밀입도 아스팔트

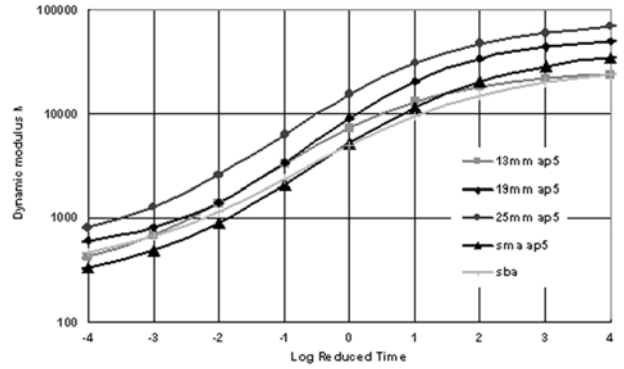


그림 7. 골재크기에 따른 동탄성계수의 비교

혼합물 계열의 동탄성계수 값이 크게 평가되었고, 개립도, SMA 및 SBS 아스팔트 혼합물의 동탄성계수가 작게 평가되었다.

4.4 동탄성계수 예측모형

여러 해 동안 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 예측을 위한 다양한 방법이 제시되었다. 이러한 다양한 연구 결과 중에서 Witzak 연구진의 연구결과가 가장 정확한 모델로 제시되고 있는 실정이다. Witzak 모델은 약 200종류의 아스팔트 혼합물 실험결과를 이용하여 약 2800여개의 data-set을 이용하여 배합설계에서 얻을 수 있는 기본 값, 아스팔트 바인더 점도, 체분석 결과를 이용하여 동탄성계수를 예측할 수 있는 방정식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\log E = 3.750063 + 0.029232p_{200} - 0.001767(p_{200})^2 - 0.002841p_4 - 0.058097V_a - \frac{0.802208V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3.871977 - 0.0021p_4 + 0.003958p_{38} - 0.000017(p_{38})^2 + 0.00547p_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351 \log f - 0.393532 \log \eta)}}$$

여기서

- E = 동탄성계수 (psi)
- η = 아스팔트 바인더의 점도 ($\times 10^6$ poise)
- f = 하중주파수 (Hz)
- V_a = 아스팔트 혼합물의 공극율(%)
- V_{beff} = 아스팔트 바인더의 유효함량(%)
- P_{34} = 체분석시 19mm에 잔류량 (%)
- P_{38} = 체분석시 9.5mm에 잔류량 (%)
- P_4 = 체분석시 4.75mm에 잔류량 (%)
- P_{200} = 체분석시 No. 200번체 통과량 (%)

동탄성계수 실험을 하지 않고 시편의 기본적인 물성실험만으로 시편의 동탄성계수의 평가를 하는 방법을 구하기 위해, 기존의 Witzak의 예측방정식을 기준으로 하여, 실험에서 구한 동탄성계수와 단계별 예측방정식에서 나온 값들의 상호 비교를 하였다. 그림 8에서 보듯이 Witzak의 예측방정식은 우리가 실험한 결과와 비교를 하면 저온에서 저평가된 결과

표 4. 8일간 노화시킨 아스팔트 혼합물(AP-3)의 동탄성 계수

| 혼합물구분 | | 밀입도 13 mm | 밀입도 19 mm | 밀입도 25 mm | 세립도 13 mm | 개립도 13 mm | 세립도 13F | 세립도 캡13F | SMA 13 mm | SBS 개질 |
|-------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|----------|-----------|--------|
| 온도 | 주파수 | | | | | | | | | |
| | 0.1 | 35571 | 31685 | 28933 | 20990 | 17918 | 22511 | 17284 | 17284 | 14980 |
| | 0.5 | 45922 | 39787 | 36656 | 27591 | 22964 | 30223 | 25595 | 25595 | 21651 |
| | 1 | 43395 | 43613 | 38879 | 31500 | 24987 | 32677 | 25380 | 25380 | 24813 |
| 5 | 5 | 66411 | 54213 | 52989 | 34684 | 32249 | 39150 | 39858 | 39858 | 33979 |
| | 10 | 64015 | 51370 | 45040 | 36137 | 32822 | 44884 | 34834 | 34834 | 31779 |
| | 25 | 73400 | 62958 | 58617 | 35002 | 32835 | 43801 | 38242 | 38242 | 32300 |
| | 0.1 | 9590 | 7129 | 12352 | 4932 | 4277 | 5232 | 3984 | 3984 | 3149 |
| | 0.5 | 16539 | 12921 | 17379 | 8651 | 6914 | 8951 | 6858 | 6858 | 6169 |
| | 1 | 22713 | 15474 | 22164 | 10146 | 8503 | 12098 | 8910 | 8910 | 10575 |
| 21 | 5 | 36375 | 29556 | 33265 | 17595 | 13330 | 19591 | 11993 | 11993 | 17310 |
| | 10 | 35352 | 26735 | 49308 | 23543 | 17077 | 27710 | 17064 | 17064 | 17615 |
| | 25 | 45251 | 38149 | 34411 | 27081 | 14987 | 42784 | 25407 | 25407 | 33131 |
| | 0.1 | 1178 | 1087 | 2000 | 995 | 645 | 793 | 715 | 715 | 470 |
| | 0.5 | 1805 | 1591 | 2779 | 1646 | 1083 | 1249 | 1075 | 1075 | 662 |
| | 1 | 2438 | 2495 | 4399 | 2022 | 1338 | 1613 | 1329 | 1329 | 804 |
| 40 | 5 | 4954 | 3665 | 7268 | 3551 | 2227 | 3647 | 2608 | 2608 | 1457 |
| | 10 | 7666 | 5689 | 12547 | 4566 | 3448 | 6060 | 3899 | 3899 | 1965 |
| | 25 | 10855 | 8782 | 12072 | 7166 | 5306 | 8307 | 5160 | 5160 | 4110 |

를 얻었다. 이것은 국내와 미국의 골재의 입도 및 형태에 대한 규정과 아스팔트바인더의 입도규정 등이 다르기 때문이다. 그래서 기존의 예측값에 한번 더 아래와 같이 적용하면 그림 9과 같고, 상관계수가 0.807로 예측값과 실험값을 일치시킬

수 있었다.

$$|E^*| = 0.0017 \times |E^*_{predict}|^{1.5902}$$

보다 정확하게 동탄성계수를 예측하기 위해 Witczak의 예측방정식을 변수는 모두 그대로 쓰고 앞의 계수만 모두 수정하여 아래와 같은 수정된 방정식을 만들었다. 수정 Witczak 방정식과 실험값을 비교 하면 그림 10과 같다. 앞서 간단하게 수정한 Witczak 방정식 보다 좀 더 정확도가 많이 향상되었음을 볼 수 있다. 실험값과 예측값은 상관계수가 0.888로 높게 나타났다. 다양한 골재를 이용한 결과는 아니지만, 국내의 대표적인 아스팔트 혼합물에 대한 동탄성계수 예측방정식으로 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

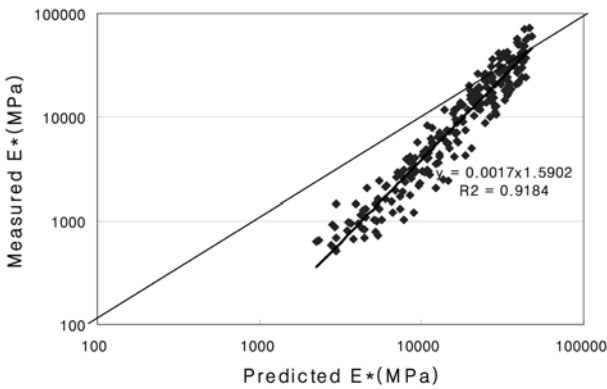


그림 8. Witczak 예측값과 실험값 비교

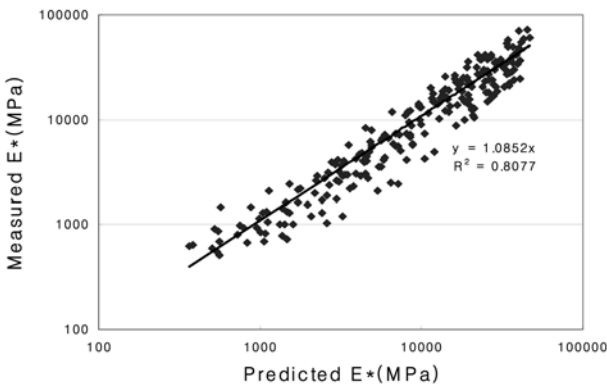


그림 9. 간단하게 보정한 Witczak 예측값과 실험값 비교

$$\log E = 7.461320 - 84 - 0.1110659 p_{200} + 0.0071494 (p_{200})^2 - 0.00655416 p_4 - 0.0573757 V_a - \frac{4.11003849 V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3.08325837 - 0.02179918 p_4 - 0.0234239 p_{38} + 0.0013814 (p_{38})^2 + 0.0110004 p_{34}}{1 + e^{(1.1135572 - 0.5947748 \log f - 0.61092917 \log \eta)}}$$

6. 결 론

아스팔트 혼합물의 노화에 따른 대표적인 도로설계입력변수 중의 하나인 동탄성계수의 변화 특성을 평가하기 위하여 국내 KS 규격에 제시된 아스팔트 혼합물을 이용하여 노화 실험 및 동탄성계수를 측정하였다. 제한한 종류의 아스팔트 혼

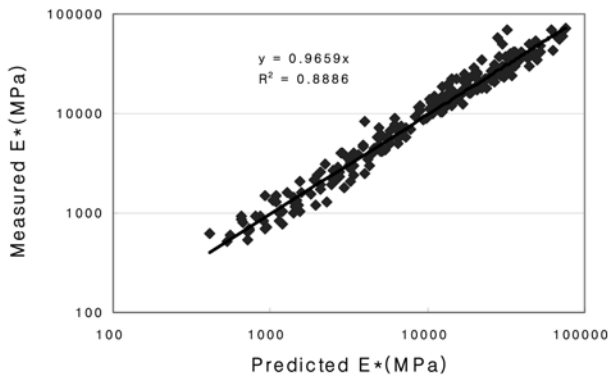


그림 10. 수정 Witczak 방정식과 실험값 비교

합물을 대상으로 하였지만 의미 있는 결과를 다음과 같이 도출하였다.

- (1) 단기노화의 온도조건에 있어서 160°C는 배합 기준 온도이고 135°C는 배합 후 이동과 다짐의 조건을 모사하였다. 160°C는 노화의 정도가 너무 과하게 되어 적절치 못하다. 반면, 135°C로 단기노화한 시편은 저온의 빠른 주파수에서 고온의 느린 주파수로 가면서 점점 노화시간에 따라 차이가 커짐을 알 수 있다. 보통 공장에서 배합, 생산되어 현장으로 이동하고 다짐이 완료되기까지 걸리는 시간을 고려하면 단기노화조건은 135°C 4시간이 적절할 것으로 판단되며, 공정이 빠르고 관리가 잘 되는 조건을 반영 한다면 135°C 2시간이 적절할 것이다.
- (2) 장기노화 시험은 공용단계의 아스팔트 바인더의 노화를 시험하였다. 전체적으로 노화가 진행되면서 동탄성계수가 높아짐을 알 수 있다. 최대입경이 클수록 그 정도는 작아지는데 그 이유는 아스팔트 바인더의 효과보다 골재의 효과가 그 비중이 증가함에 따른 것이다. SBS는 최대입경은 작지만 고점도이기 때문에 고온에서 약간의 상승만 있는 정도였고, SMA는 바인더보다 골재의 맞물림에 의한 작용이 커서 바인더의 노화와 별 관계가 없는 것으로 나타났다. 특이한 것은 세립도 갭 입도에서 동탄성계수가 노화에 따라 일정하다는 것인데 이것 역시 골재 입도작용이 그 원인이다.
- (3) Witczak의 예측방정식은 본 연구에서 실험한 결과와 비교를 하면 저온에서 저평가 되었다. 이것은 국내와 미국의 골재의 입도 및 형태에 대한 규정과 아스팔트바인더의 입도규정 등이 다르기 때문이다. 또 본 시험에

서 사용한 UTM 기계와 변형 측정 방법이 예측식을 만든 조건과는 상이하나 일치하지 않아 정확하게 일치하지 않았다. 이를 통해 기존의 Witczak의 예측방정식을 이용하여 간단하게 수정하여 수정 Witczak의 예측방정식을 만들었다. 그 결과는 상관계수가 0.994로 좋은 결과를 나타내었다.

- (4) 본 연구에서는 노화시험을 실험실에서만 실시하였다. 실험실에서 실시한 결과를 현장의 공용 기간별로 직접 코어링하여 동탄성계수를 측정하여 비교 하면, 현장과 실험실에서 간접적으로 시험한 결과와 상관관계를 찾을 수 있을 것이다. 동탄성계수를 측정하는 시험장비가 고가이고 시험절차가 까다롭고, 현장에서 바로 측정할 수 없는 단점이 있다. 따라서 비파괴 시험으로 파를 이용한 동탄성계수를 간단하게 측정할 수 있는 방법이 연구 되면 보다 편리하고 광범위하게 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

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

참고문헌

건설교통부 (2002) **한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구**. KPRP-요약-02, pp. 142.

김현오, 이관호 (2005) 전이함수 결정법에 따른 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 비교평가. **한국도로학회논문집**, 한국도로학회, 제7권, 제1호, pp. 49-61.

한국도로학회 (1998) **아스팔트 포장공학원론**. 한국도로학회, pp. 35.

Pellinen, T.K. (2001) *Investigation of the Use of Dynamic Modulus as an Indicator of Hot-Mix Asphalt Performance*, Ph.D. dissertation, Arizona State University.

Pellinen, T.K., Witczak, M.W., and Bonaquist, R.F. (2002) Asphalt Mix Master Curve Construction Using Sigmoidal Fitting Function with Non-Linear Least Squares Optimization. *15th ASCE Engineering Mechanics Conference*, ASCE.

© 논문접수일 : 2008년 04월 29일
 © 심사의뢰일 : 2008년 05월 07일
 © 심사완료일 : 2008년 06월 04일