

시간-온도 중첩이론을 적용한 아스팔트 바인더의 점소성 구성 모형

A Viscoplastic Constitutive Model Based on Overstress Concept with Time-Temperature Superposition Principle

윤 태 영 Yun, Tae Young
 엄 병 식 Ohm, Byung Sik
 유 평 준 Yoo, Pyeong Jun
 김 연 복 Kim, Yeon Bok

정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 (E-mail: tyun@kict.re.kr)
 정회원 · 한국건설기술연구원 전임연구원 (E-mail: bseom@kict.re.kr)
 정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원 (E-mail: pjyoo@kict.re.kr)
 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구위원 (E-mail: ybkim@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : Suggestion of asphalt binder constitutive model based on time-temperature superposition principle and overstress concept in order to describe behavior of asphalt binders.

METHODS : A series of temperature sweep tests and multiple stress creep and recovery(MSCR) tests are performed to verify the applicability of time-temperature superposition principle(t-Ts) and to develop viscoelastoplastic constitutive equation based on overstress concept. For the tests, temperature sweep tests at various high temperature and various frequency and MSCR test at 58°C, 64°C, 70°C, 76°C, and 82°C are performed. From the temperature sweep tests, dynamic shear modulus mastercurve and time-temperature shift function are built and the shift function and MSCR at 58°C are utilized to determine model coefficients of VBO model.

RESULTS : It is observed that the time-temperature shift function built at low strain level of 0.1% is applicable not only to 1.0% strain level temperature sweep test but also maximum 500,00% strain level of MSCR test. As well, the modified VBO model shows perfect prediction on MSCR measured strain at the other temperatures.

CONCLUSIONS : The Time-temperature superposition principle stands hold from very low strain level to very high strain level and that the modified VBO model can be applicable for various range of strain and temperature region to predict elastic, viscoelastic, and viscoplastic strain of asphalt binders.

Keywords

time-temperature superposition principle, asphalt binder, multiple stress cree and recovery test, viscoelastoplastic, constitutive equation

Main Author : Yun, Taeyoung, Senior Researcher
 Highway Research Division, Korea Institute of Construction Technology,
 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea
 Tel : +82.31.910.0445 Fax : +82.31.910.0161
 email : tyun@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering
<http://www.ksre.or.kr/>
 ISSN 1738-7159 (Print)
 ISSN 2287-3678 (Online)

1. 연구배경 및 목적

아스팔트 바인더는 아스팔트 혼합물의 전체무게 대비 5% 정도의 작은 양이 사용되지만 아스팔트 혼합물의 거동에 큰 영향을 미치며, 하중의 재하시간>Loading Time)이

나 재하속도>Loading Rate) 및 온도에 따라 회복(Recoverable)되거나 회복(Irrecoverable)되지 않는 변형률이 변화하는 전형적인 점탄소성(Viscoelastoplastic) 재료이다. 따라서 아스팔트 혼합물에서의 거동에 영향을 미치

는 다른 인자인 골재의 형태 및 입도(Gradation) 특성과 함께, 노화(Aged)되거나 노화(Unaged)되지 않은 아스팔트 바인더의 시간 및 온도에 따른 특성은 다양한 연구자들에 의하여 여러 가지 방법으로 연구된 바 있다 (Anderson and Kennedy 1993, Bahia et al. 1992, Andrew et al. 2009, Rowe et al. 2001).

아스팔트 바인더의 물리적 특성을 평가하기 가장 간편한 방법 중의 하나인 침입도 시험법은 바늘(Needle)과 아스팔트 바인더의 전단저항(Shear Resistance) 또는 점성(Viscous)을 간접적으로 평가하는 방법이지만, 바늘의 침입깊이에 따라 변화하는 침입속도를 물리적으로 정량화할 수 없는 한계 때문에 역학적인 재료의 물성으로 이용되기 어렵다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 동전단 레오메터(Dynamic Shear Rheometer, DSR)를 이용하여 아스팔트 바인더의 역학적인 물성 중의 하나인 동전단계수(Dynamic Shear Modulus)를 평가하는 방법이 현재 널리 사용되고 있다(Bahia et al. 1992, Airey and Brown 1998). DSR은 동전단계수 뿐만 아니라 소성(Plasticity)에 대한 저항성을 평가하기 위해서도 사용될 수 있는데, 이러한 소성에 대한 저항성을 평가하기 위한 방법으로 다중하중 크리프-리커버리(Multiple Stress Creep and Recovery, MSCR) 실험방법이 최근 표준화되어 SUPERPAVE PG 시스템에서 적용되었다(Nader et al. 2010, AASHTO TP 70). MSCR 실험을 이용한 바인더 평가에서는 비회복 컴플라이언스(Non-Recoverable Compliance, J_{nr})와 회복률(%Recovery) 등을 기준으로 이용하는데, 고온에서 아스팔트 바인더의 탄성적(Elastic) 특성과 소성적(Viscoplastic) 특성을 이전의 평가 기준인 $|G^*|/\sin\phi$ 보다 명확하게 평가할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 MSCR 실험결과를 활용하여 결정되는 비회복 컴플라이언스는 침입도나 기타의 재료물성에 비하여 상대적으로 역학적 재료물성에 가까우며, 손쉽게 바인더의 비회복 특성을 확인할 수 있다는 측면에서 매우 효율적이라 할 수 있으나, 비회복 컴플라이언스를 이용하여 바인더의 구성 모형적 특성 또는 응력에 따른 변형률의 변화를 표현하는 일반적이고 손쉬운 방법은 아직 제시되지 못하고 있다는 점에서 아직까지는 그 한계가 있다. 한편 아스팔트 바인더와 같은 점탄소성(Viscoelastic) 재료의 응력-변형률의 관계를 나타내어 복잡한 하중에서의 아스팔트 혼합물의 거동을 예측하기 위한 방법들은 여러 연구자들(Schapery 1961, Uzan 1996)에 의하여 제시되었는데, 이 방법들은 모형계수를 결정하기 위하여 탄성변형률(Elastic Strain)과 비탄성

변형률(Inelastic Strain)을 각 하중 단계마다 구분하여 측정해야하는 불편함이 있거나 점탄성 거동은 매우 정확한 예측이 가능하나 소성 거동에 대한 예측은 그렇지 못하거나, 모형계수를 결정하기 위해서 별도의 실험을 추가로 수행해야 하는 문제점들이 있기 때문에, 아스팔트 바인더의 거동 변화를 예측하기 위하여 실제적으로 활용되지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 J_{nr} 을 이용하는 MSCR 실험 이외에 추가적인 실험 없이 Krempl(1987)에 의하여 제시된 초과응력(Overstress) 개념을 활용한 점탄소성 구성 모형(Viscoplastic Model Based on Overstress, VBO)을 기본으로 이를 단순화하여 아스팔트 바인더의 응력-변형률의 관계를 나타내고자 하였다. 또한, 이렇게 결정된 VBO 구성 모형에 바인더에 선형 점탄성 범위(Linear Viscoelastic Range)에서 동전단실험에 의하여 결정된 시간-온도 중첩이론(Time-Temperature Superposition Principle, t-Ts)을 점소성 영역에서 확대하여 적용하여 제시된 구성 모형의 확장성을 확인하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 시간-온도 중첩이론

시간-온도 중첩이론(Time-Temperature Superposition Principle)은 점탄성 재료의 거동을 결정하는 시간과 온도 변수가 하나의 감쇠시간(Reduced Time, t^R)으로 합쳐질 수 있다는 이론으로, 열유변학적으로 단순한(Thermorheologically Simple, TRS) 고분자재료의 고유한 특성으로 이해된다. Fig. 1 상단은 아스팔트 혼합물에 대하여 -10.2°C , 10.6°C , 35.0°C 및 53.5°C 에서 25Hz, 10Hz, 5Hz, 1Hz, 0.5Hz, 0.1Hz, 0.05Hz 및 0.01Hz의 빈도(Frequency)로 얻어진 동탄성계수 마스터 곡선(Dynamic Modulus Mastercurve)의 한 예를 log-log 공간에 나타낸 것인데, 기준온도(Reference Temperature)인 10.6°C 에서 얻어진 동탄성계수를 제외하고 3개의 온도에서 얻어진 동탄성계수를 x 축인 빈도축(Frequency Axis)을 따라 좌우방향으로 이동시켜 부드러운 S자형 함수(Sigmoidal function)의 형태로 나타내어지는 순간의 각 동탄성계수의 이동거리가 이동계수 $\log(a_T)$ 로 표현된다. 따라서 온도와 시간을 합친 개념의 감쇠시간은 다음 Eq. (1)과 같이 정의되며, 각 온도에서 얻어진 동탄성계수를 기준온도를 기준으로 이동시켰을 때의 이동거리를 나타내는 이동계수(Shift Factor)가 온도의 함수 형태로 Fig. 1의 하단에 나타나 있다.

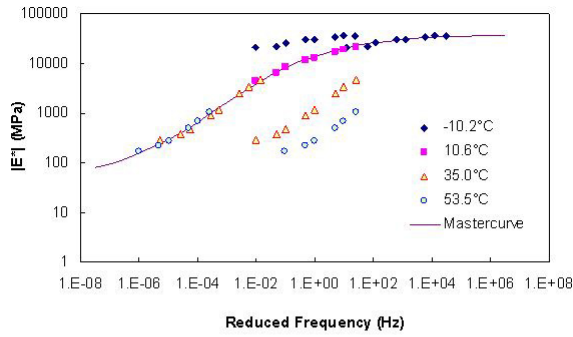


Fig. 1 Dynamic Modulus Mastercurve and Shift Function

$$t^R = \frac{t}{a_T} \quad (1)$$

여기서,

t^R : 감쇠시간

t : 시간

a_T : 시간 - 온도 이동계수(Shift Factor)

다음 Eq. (2)는 측정과 이동으로 결정된 동탄성계수 마스터곡선을 수학적으로 표현하기 위하여 사용된 S자형 곡선을 나타내고 있으며, Eq. (3)은 Eq. (2)의 동전단계수를 안정화(Steady State) 조건에서의 전단응력과 전단변형률의 절대값의 비로 결정하는 정의를 나타내고 있다.

$$\log(|G^*|) = a + \frac{b}{1 + \exp(d - e \times \log(\omega))} \quad (2)$$

여기서,

$|G^*|$: 동전단계수(Dynamic Shear Modulus, Pa),

a, b, d, e : 모형계수,

ω : 각속도(Angular Frequency, rad/sec).

$$|G^*(\omega)| = \frac{|\tau_0(\omega)|}{|\epsilon_0(\omega)|} \quad (3)$$

여기서,

$|G^*(\omega)|$: 동전단계수(Pa),

ω : 각속도($=2\pi f$),

τ_0 : 전단응력(Pa),

ϵ_0 : 전단변형률.

한편 Fig. 1에서의 동탄성계수는 아스팔트 혼합물이 선형 점탄성 거동의 범위에 있는 것으로 예상되는 변형률 100microstrain 이하에서 결정된 것이기 때문에, 결정된 이 동탄성계수는 선형 점탄성 거동 범위 내에서만 적용하는 것이 이론적으로 타당하다. 그러나 대부분의 아스팔트 혼합물에 대해서는 피로균열 및 소성변형이 발생하는 비선형점탄성(Nonlinear Viscoelastic with Damage) 또는 소성(Viscoplastic) 범위에서도 적용될 수 있는 것으로 실험적으로 확인된 바 있으므로(Gibson et al. 2003, Yun et al. 2010), 아스팔트 바인더에서도 선형 점탄성 거동 범위에서 얻어진 동전단계수를 그 밖의 범위에서 적용하고자 하였다.

2.2. 점탄소성 구성모형

다음 Eq.(4)는 Kim and Chehab.(2004)에 의하여 제시된 연속체 손상 역학(Continuum Damage Mechanics)을 활용한 점탄성 손상 모형과 단순한 형태의 소성모형을 결합한 점탄소성 연속체 손상(Visco-elastoplastic Continuum Damage, VEPCD) 구성모형을 나타내고 있다. 이 모형은 선형 점탄성 이론에서 사용되는 일반적인 구성방정식에서 재료의 손상도를 나타내는 손상계수(C)를 적용하여, 파손에 따른 재료의 점탄성적 변화를 반영하였으며, Uzan(1996)에 의하여 제시된 변형률경화 소성모형(Viscoplastic Model with Strain Hardening)을 적용하여 하중의 속도(Rate)에 따른 점소성 변형률의 증감을 반영하였다. 그러나 이 모형은 재료의 손상도를 나타내는 손상계수를 결정하기 위하여 재료가 선형점탄성 거동을 나타낼 수 있는 낮은 온도에서의 실험이 필요하여 DSR을 이용한 아스팔트 바인더의 구성 모형을 개발하는데 사용되기에 적절하지 않다.

$$\epsilon(t) = \int_0^t D(t-\tau) \frac{d\left(\frac{\sigma(\tau)}{C(S)}\right)}{d\tau} d\tau \quad (4)$$

$$+ \left(\frac{p+1}{Y}\right)^{\frac{1}{p+1}} \left(\int_0^t \sigma^q dt\right)^{\frac{1}{p+1}}$$

여기서,

$D(t)$: 크리프 컴플라이언스(Creep Compliance)

$C(S)$: 손상계수(Material Integrity Function)

p, q, Y : 모형계수

다음 Eq. (5)는 아스팔트 바인더에 적용되고 있는 비선형 점탄성 모형으로 Massad et al.에 의하여 2009년에 제시되었다. 이 모형은 복잡한 형태의 거동, 즉 하중에 대한 시간 종속적 또는 시간 비종속적 변형률의 거동을 적절하게 표현할 수 있다. 그러나 각 변수 및 함수를 결정하기 위하여 하중에 따른 탄성 변형률, 점탄성 변형률 및 소성변형률을 구분하여 모형의 계수를 결정해야 하기 때문에 모형의 계수 결정이 어려운 단점이 있다.

$$\epsilon(t) = g_0 D_0 \sigma + g_1 \int_0^t \Delta D(t-\tau) \frac{dg_2(\sigma)}{d\tau} d\tau \quad (5)$$

여기서,

$$\Delta D(t-\tau) = D(t) - D_0,$$

g_1, g_2, g_3 : 모형계수 또는 모형함수.

Krempf(1986, 1987)과 Krempf and Khan(2003)이 제시한 초과응력에 근거한 점탄소성(Viscoelastoplastic) 구성모형은 점탄성(Viscoelastic) 이론에 근거하여 개발된 모형으로, 금속이나 고분자(Polymer) 재료의 등변형률(Constant Strain Rate) 하중, 크리프(Creep) 하중, 반복하중(Ratcheting)에 대한 재료의 복잡한 거동을 설명하기 위하여 다양한 형태로 수정되어 적용되었으며, 만족할 만한 결과를 나타낸 바 있다(Krempf 1986, Khan 2003, Ho 2006). 다음 Eq. (6)은 변형률의 시간에 대한 기울기가 탄성 변형률(elastic strain)의 기울기와 비탄성 변형률(Inelastic Strain)의 기울기의 합으로 표현될 수 있다는 가정에서 제시되었음을 나타내고 있으며, 여기에서 비탄성 변형률 부분은 일반적인 점소성(Viscoplastic)재료의 거동을 나타내는데 사용되는 Eq. (7)의 Perzyna 형식을 따르는 초과응력(Overstress)개

념의 점소성 구성모형과 매우 유사한 것을 알 수 있다. Perzyna 형식의 점소성 모형의 유도 및 기본 이론에 관련된 자료는 기존의 문헌(Perzyna, 1971) 등에서 찾을 수 있다.

$$\frac{d\epsilon^t}{dt} = \frac{d\epsilon^e}{dt} + \frac{d\epsilon^i}{dt} \quad (6)$$

$$= \frac{d\sigma}{dt} \frac{1}{E} + \dot{\epsilon}_0 \left(\frac{|\sigma - g|}{D}\right)^k \frac{\sigma - g}{|\sigma - g|}$$

여기서,

ϵ^t : 변형률(Strain),

ϵ^e : 탄성변형률(Elastic Strain),

ϵ^i : 비탄성변형률(Inelastic Strain),

σ : 응력(Stress)

E : 탄성계수(Elastic Modulus)

D : 저항응력(Drag Stress),

g : 평형응력(Equilibrium or Yield Stress),

$\dot{\epsilon}_0, k$: 재료상수(Material Coefficients).

$$\frac{d\epsilon^i}{dt} = \lambda \left(\frac{|\sigma - g|}{D}\right)^k \frac{\sigma - g}{|\sigma - g|} \quad (7)$$

여기서,

λ, k : 재료 상수.

위의 Eq. (6)과 Eq. (7)에 나타난 바와 같이, 주어진 모형에서 비탄성 변형률이 발생하기 위해서는 재하된 응력이 가정된 평형응력보다 커야 하며, 재하된 응력과 평형응력과의 차이는 초과응력으로 정의된다. 한편, 평형응력은 다음 Eq. (8)과 같이 정의되며, 평형응력의 증가 및 감소(Evolution)를 수학적으로 표현하기 위하여 기타의 변수들이 추가된다. 점소성 재료의 경화(Hardening) 또는 연화(Softening)는 일반적으로 응력의 방향과 절대값으로 정의되는 이동성(Kinematic) 경화 또는 연화와 응력의 절대값만으로 정의되는 등방성(Isotropic) 경화 또는 연화로 구분되어 표현된다. 등방성 응력은 인장과 압축이 발생하는 재료의 경화 또는 연화를 나타내는데 일반적으로 사용되며, 이동성 응력은 인장 또는 압축의 단일 방향의 경화 및 연화를 나타내는데 적용된다. Eq. (9)에서 f 는 평형응력을 구성하는 일부로 제시되어 있으며, 소성 구성모형에서 적용되

는 Prager(1956)의 선형 이동성 경화 모형(Linear Kinematic Hardening Model)과 동일한 형태임을 알 수 있다.

$$\frac{dg}{dt} = \psi_1 \frac{d\sigma}{dt} + \dot{\epsilon}_o \left(\frac{|\sigma - g|}{D} \right)^k E\psi \left(\frac{\sigma - g}{|\sigma - g|} - \frac{g - f}{A} \right) + (1 - \psi_1) \frac{df}{dt} \quad (8)$$

$$\frac{df}{dt} = E_t \dot{\epsilon}_o \left(\frac{|\sigma - g|}{D} \right)^k \frac{\sigma - g}{|\sigma - g|} = E_t \frac{d\epsilon^t}{dt} \quad (9)$$

여기서,

- ψ_1, ψ : 시간종속성(Time Dependency) 상수,
- f : 이동성(Kinematic) 응력,
- A : 등방성(Isotropic) 응력,
- E_t : 이동성 응력의 기울기.

한편 Krempl and Khan(2003)이 제시한 점탄소성 모형은 (1)선형 이동성(Linear Kinematic)과 함수 f 로 표현되는 시간독립적 경화(Rate Independent Hardening) 모형과 (2)시간독립적 응력항(Rate Independent Quantity, $g - f$), (3)시간종속적 응력항(Rate-Dependent Overstress, $\sigma - g$) 등 3개의 세부 모형으로 구성되어 재료의 시간독립적 및 시간종속적 거동을 표현한다. 다음 Fig. 2는 응력-변형률 공간에서 일정한 변형률로 재하되는 하중에 따른 각각의 응력의 변화를 나타내고 있다. 등변형률(Constant Strain Rate) 실험과 같이 변형률이 일정하게 증가되는 하중조건에서는 평형응력과 등방성 응력이 이동성

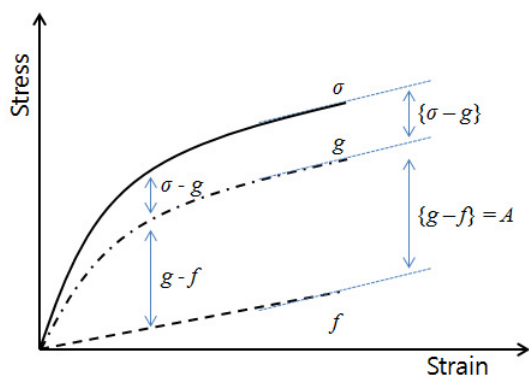


Fig. 2 Stress Variation in the Overstress Model (Krempl and Khan, 2003)

응력과 함께 점근선(Asymptote)으로 접근하게 되고, 이에 따라 초과응력으로 발생하는 점소성 변형률이 일정하게 되므로 일반적으로 아스팔트 바인더에서 발생하는 점성흐름(Viscous Flow)를 적합하게 표현할 수 있다는 것을 알 수 있다.

3. 실내실험

3.1. 실험재료 및 실험장비

본 실험에서는 일반적으로 국내에서 일반적으로 사용되는 PG64-22 아스팔트 바인더를 노화없이 사용하였으며, DSR 실험을 수행하기 위한 장비로서 TA-Instruments의 AR-1500를 이용하였다.

3.2. 실험방법 및 결과

3.2.1. DSR을 이용한 Temperature Sweep Test

아스팔트 바인더에 대한 동전단계수 마스터곡선(Dynamic Shear Modulus Mastercurve)을 작성하기 위하여, 0.1% strain과 1.0% strain level에서 실험을 수행하였다. 실험 온도는 13°C, 20°C, 27°C, 34°C, 41°C, 48°C, 55°C, 62°C, 69°C, 76°C, 83°C 및 90°C에서 7°C 간격으로 실험을 수행하였으며, 각 온도에서의 각속도(Angular Frequency)는 6.28Hz, 9.96Hz, 15.78Hz, 25.01Hz, 39.64Hz 및 62.83Hz의 6개의 속도를 적용하였다. 실험에서 얻어진 동전단계수는 위의 2.1절에 나타난 방법을 통하여 동전단계수 마스터곡선을 작성하는데 사용되었다. 실험은 저온 및 낮은 빈도에서 고온 및 높은 빈도로 진행되었으며, 48°C를 기준으로 다른 직경의 회전판(Plate)을 이용하여 다른 간격(Gap)을 적용하여, 실험의 오차를 최소화하고자 하였다. Fig. 3은 27°C를 기준온도(Reference Temperature)로 적용한 0.1% Strain level의 동전단 마스터곡선을 나타내고 있으며, Fig. 3 내 범례의 숫자는 실험이 수행된 온도(°C)를 나타

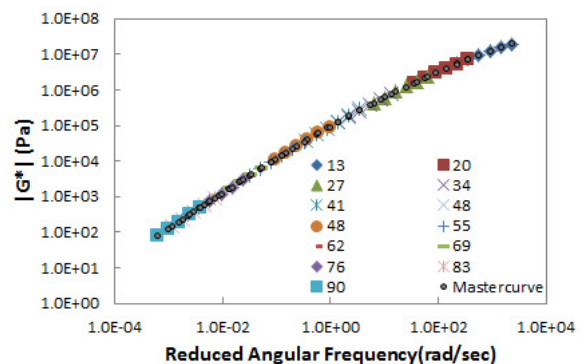


Fig. 3 Mastercurve at 0.1 Strain Level

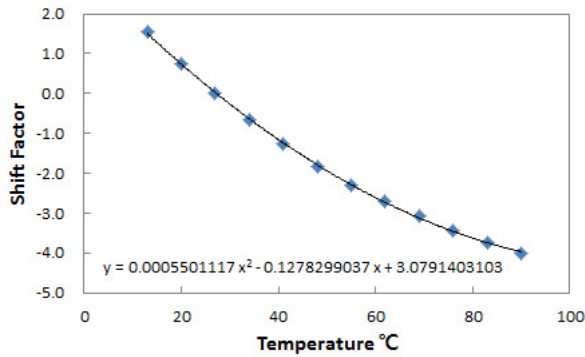


Fig. 4 Shift Function at 0.1% Strain Level

낸다. Fig. 3은 동전단 마스터곡선을 만들면서 얻어진 이동계수(Shift Factor)에 2차함수를 fitting하여 얻은 결과를 나타내며, Fig. 4 내의 계수값은 MSCR 실험에서 임의의 온도에서의 이동계수(Shift Factor)를 결정하는데 적용되었다.

Fig. 5는 0.1% strain level에서 얻은 Fig. 3의 이동계수를 1.0% strain level에서 얻은 동전단계수에 적용하여 마스터곡선을 얻은 결과로서, 이는 0.1% strain level에서 얻어진 동전단 마스터곡선과 매우 유사한 전단탄성계수값과 연속성을 나타내는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 PG64-22 바인더가 0.1% strain level과 1.0% strain level 및 주어진 온도조건에서 선형탄성 거동을 하며, 0.1% strain level에서 얻어진 마스터곡선 및 이동계수가 선형탄성 거동 범위 내에서 얻어진 것을 의미한다. Table 1은 Excel Solver를 이용하여 최소오차법을 이용하여 결정된 Sigmoidal 함수의 계수를 나타낸다.

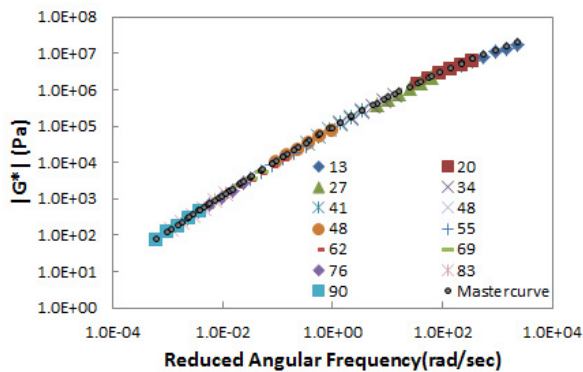


Fig. 5 Mastercurve built at 1.0% Strain Level with 0.1% Shift Function

Table 1. Coefficients of Sigmoidal Function

Coefficients	a	b	d	e
Value	4.35	13.76	-0.75	0.29

3.2.2. DSR을 이용한 MSCR 실험

MSCR 실험은 아스팔트 바인더의 고온 탄성 회복력을 평가하기 위하여 ASTM D7405-10a에 최근 제시된 실험방법으로, 기존의 DSR 실험을 이용한 PG 등급 실험에서의 기준인 $|G^*|/\sin\phi$ 이 아닌 비회복 컴플라이언스(Non-Recoverable Compliance, J_{nr})을 평가기준으로 적용한다(Angelo et al. 2007, AASHTO 2009, Yun et al. 2012) PG 등급구분을 위한 MSCR 실험에서는 0.1kPa과 3.0kPa의 하중만을 이용하지만, 본 실험에서는 하중을 1초 동안 재하한 후 9초 동안의 휴지기를 두는 과정을 10회 반복한 후 순차적으로 증가시켜 동일하게 반복하여 적용하였다. 실험에 사용된 하중은 Table 2에 나타난 바와 같다.

Table 2. MSCR Loading Condition

Testing Order	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Creep Stress (kPa)	0.02	0.04	0.08	0.16	0.32	0.64	1.28	2.56	6.12	12.24

Fig. 6은 변형률-시간 공간에서 나타난 온도별 실험 결과를 나타내고 있는데, 예상할 수 있는 바와 같이 높은 온도에서 상대적으로 높은 소성 변형이 발생되었음을 알 수 있다. 또한 Fig. 6 하단의 log-log 공간에서와 같이, 온도별 변형률의 간격이 매우 균등한 비율로 발생하는 것으로 나타났다.

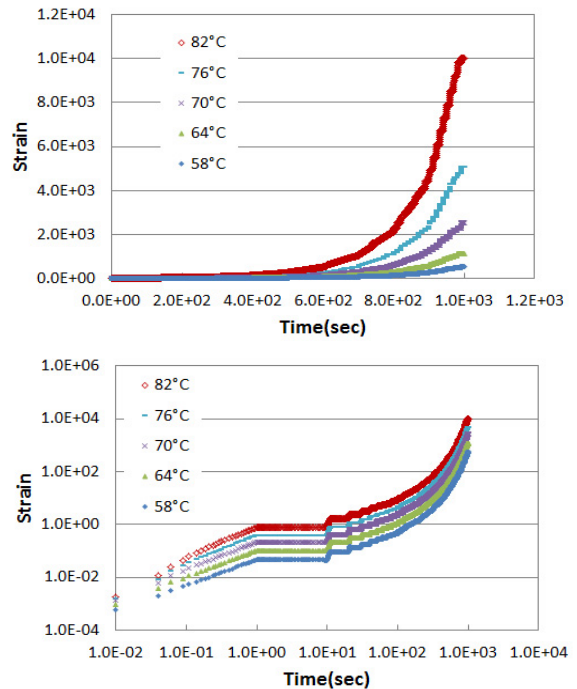


Fig. 6 Strain History at Several Temperature (Normal and Log-Log Space)

4. 모형을 이용한 거동 예측

4.1. VBO 모형계수 결정

재료의 점소성 변형률이 복잡한 비선형 형태로 발생하지 않는 경우에는 위의 Eq. (6)과 Eq. (8)의 가정을 통하여 각각 Eq. (10)과 Eq. (11)로 단순화 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실험에 사용된 PG64-22 바인더의 거동특성을 확인하여 단순화된 Eq. (10)과 Eq. (11)을 적용하였으며, 시간-온도 중첩이론의 적용성을 확인하기 위하여 Temperature Sweep Test에서 이동계수를 시간에 적용하였다. 또한 하중의 속도에 따라서 응력-변형률 곡선이 등간격(Equidistant)일 경우에는 저항응력은 상수가 되며, 등거리 간격이 아닐 경우에는 저항응력이 함수의 형태가 되는 것이 일반적이는데, 이와 유사한 영향을 나타내는 온도에 대한 변형률에서 유사한 등간격을 나타내었으므로, 상수 저항응력을 적용하였다. VBO 모형에서 탄성계수 E 는 초기 크리프 응력-변형률 곡선의 기울기를 이용하여 결정될 수 있으며, 이외의 계수들은 Excel의 Solver를 이용하여 최소오차를 발생시키는 값이 결정된다. 모형계수 결정에는 58℃에서 실험된 PG64-22의 MSCR 실험결과가 활용되었으며, 결정된 값은 다음 Table 3에 나타나 있다.

$$\frac{d\epsilon^t}{dt^R} = \frac{d\sigma}{dt^R} \frac{1}{E} + \left(\frac{|\sigma - g|}{D} \right) \frac{\sigma - g}{|\sigma - g|} \quad (10)$$

$$\frac{dg}{dt^R} = \psi_1 \frac{d\sigma}{dt^R} + \left(\frac{|\sigma - g|}{D} \right) E \psi \left(\frac{\sigma - g}{|\sigma - g|} - \frac{g}{A} \right) \quad (11)$$

Table 3. VBO Model Coefficients

Coefficients	E	D	A	ψ	ψ_1
Value	34276	100000	400	0.000001	0.2

4.2. VBO 모형과 t-Ts을 이용한 점소성 거동예측

다음 Fig. 7은 58℃에서 MSCR 하중에 대하여 측정된 변형률과 모형계수 결정을 통하여 예측된 변형률을 일반공간과 log-log 공간에서 나타내고 있다. Fig. 7에서 나타난 바와 같이, 예측된 초기 변형률의 변화, 전체적인 변형률의 변화, 크리프 변형률 및 리커버리 변형률 모두가 측정된 변형률과 잘 일치하여 모형계수의 결정이 매우 타당하게 되었음을 알 수 있다.

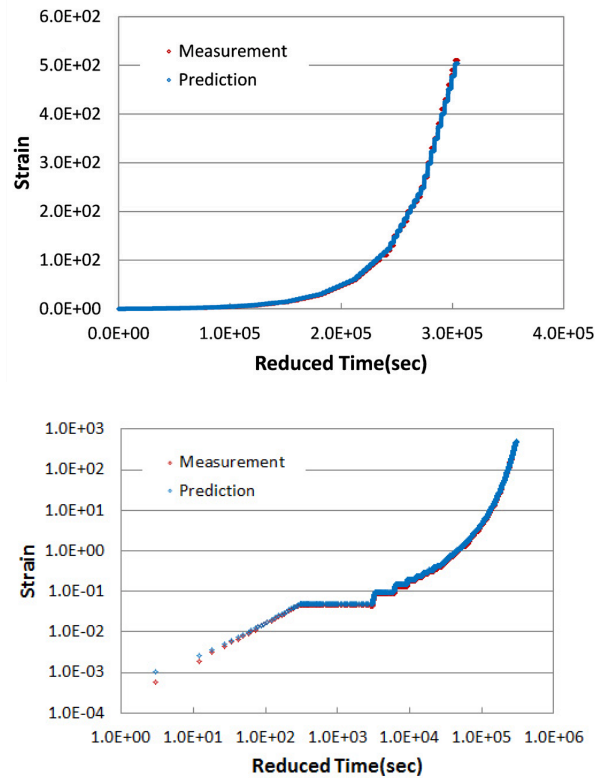


Fig. 7 Strain vs. Time Curve at 58℃

한편 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11은 Fig. 7의 자료를 바탕으로 결정된 모형계수를 적용하여 각각 64℃, 70℃, 76℃, 82℃에서 측정된 변형률과 예측된 변형률을 변형률-시간 공간에 나타낸 것으로서, 모형계수 결정결과를 나타내는 Fig. 7과 같이 매우 정확한 예측결과를 나타내었다. 이것은 선형탄성 거동 범위에서 결정된 시간-온도 중첩이론이 비선형, 소성 범위의 점소성 거동 범위에서도 적용될 수 있는 것을 나타내며, 초과응력을 이용한 점소성 구성 모형이 단순화되어서도 매우 정확하게 아스팔트 바인더의 변형률 거동을 예측하는데 사용될 수 있음을 나타낸다. 또한 모든 응력-변형률 구성 모형에서 재료의 물성변화를 설명하기 위해서 외부의 물리적인 시간(Physical Time)에 이동계수 개념을 적용하여 내부시간(Internal Time)을 적용하는 방법이 항상 적용되지는 않는다. 그러나 본 연구에서 적용된 구성모형에서는 매우 큰 온도와 변형률 범위에서 정확하게 변형률이 예측되므로, 고온에서 온도 및 하중변화에 따른 아스팔트 바인더의 물성변화가 내부시간 변화 개념으로 충분히 설명될 수 있는 것으로 판단되며, 하중에 따른 재료의 피로(Fatigue)나 노화(Aging) 등도 단순화된 구성 모형의 변화부분(Evolution Law)을 합리적으로 결정하면 타당하게 적용될 수 있는 것으로 판단된다.

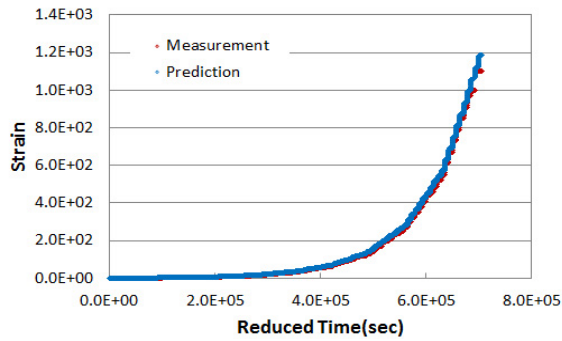


Fig. 8 Strain vs. Time Cruve at 64°C

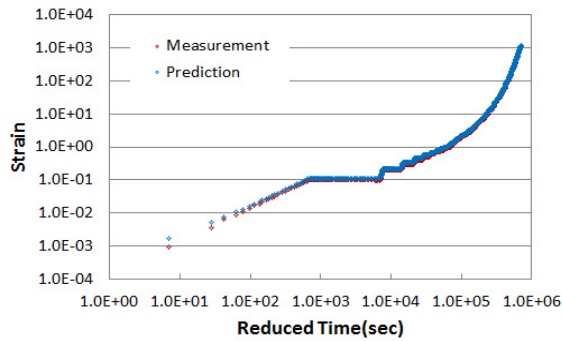


Fig. 9 Strain vs. Time Cruve at 70°C

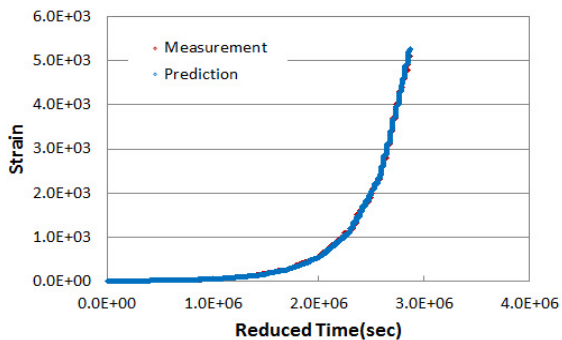


Fig. 10 Strain vs. Time Cruve at 76°C

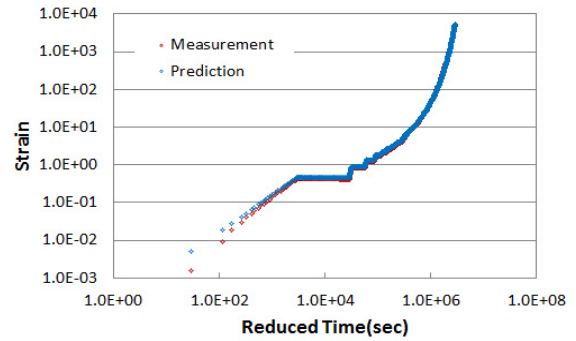


Fig. 11 Strain vs. Time Cruve at 82°C

5. 결론

본 연구에서는 일반 아스팔트 바인더에 대하여 시간-온도 중첩이론의 적용성과 초과응력을 근거로한 점소성 구성 모형의 적용성을 Temperature Sweep Test와 MSCR 실험을 통하여 확인하고자 하였다. 이를 위하여 넓은 온도 범위에서 0.1%의 Strain level에서 Temperature Sweep Test를 수행하여 이동계수를 결정하였으며, 결정된 이동계수와 58°C에서 오차 최소화 적합화(Error Minimum Optimization)를 통하여 결정된 VBO모형의 모형계수를 이용하여 64°C, 70°C, 76°C 및 82°C에서 MSCR 실험을 통하여 측정된 변형률을 예측하였다. 예측결과 주어진 모든 온도와 하중범위에서 변형률을 매우 정확하게 예측한 결과를 얻을 수 있었

는데, 이것은 PG 등급 결정을 위하여 사용되는 MSCR 실험을 활용하여 변형률을 예측하는 점소성 모형을 결정할 수 있어, 아스팔트 혼합물의 거동을 예측하는데 기본적으로 확인되어야 할 아스팔트 바인더의 물성을 간단한 방법으로 정량화할 수 있으며, 바인더의 노화 및 피로에 의한 물성변화도 향후 충분히 반영될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업 재원으로 수행되었습니다.

References

- Anderson DA, Kennedy TW, 1993. Development of SHRP Binder Specification. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Vol. 64, 481-507.
- Andrew J. Hanz, Zelalem A. Arega, Hussain U. Bahia, 2009. *Rheological Evaluation of Emulsion Residues Recovered Using Newly Proposed Evaporative Technique*, Transportation Research Board
- Angelo DJ, Kluttz R, Dongre RN, 2007. Revision of the Superpave High Temperature Binder Specification: The Multiple Stress Creep Recovery Test. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 123-162.
- Airey GD, BROWN S, 1998. Rheological Performance of Aged Polymer Modified Bitumens. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 67. 66-100.
- AASHTO TP 70. 2009. *Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery(MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*.
- AASHTO TP 70. 2009. *Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery(MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. AASHTO 2009.
- Bahia HU, Anderson DA, Christensen DW, 1992. The Bending Beam Rheometer; A Simple Device for Measuring Low-Temperature Rheology of Asphalt Binders. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 61. 117-153.
- Gibson NH., Schwartz CW, Schapery RA., Witzak MW, 2003. Viscoelastic, Viscoplastic, and Damage Modeling of Asphalt Concrete in Unconfined Compression. *Transportation Research Record*. Vol. 1860. 3-15.
- Ho KS., 2006. Unified Constitutive Equations of Viscoplastic Deformation: Development and Capabilities. *International Journal of Japan Society Mechanical Engineering*. Vol. 49. 138-146.
- Kim YR, Chehab G., 2004. *Development of Viscoelastic Continuum Damage Model for Asphalt-Aggregate Mixtures*. Arizona State University.
- Krempf E., 1986. Viscoplasticity Based on Overstress with a Differential Growth Law for The Equilibrium Stress. *Mechanics of Materials*. Vol. 5. 35-48.
- Krempf E. 1987. Models of Viscoplasticity-Some Comments on Equilibrium (Back) Stress and Drag Stress. *Acta Mech*, Vol. 69. 25-42.
- Krempf E, Khan F., 2003. Rate(Time)-Dependent Deformation Behavior: an Overview of Some Properties of Metal and Solid Polymers. *International Journal of Plasticity*. Vol. 19. 1069-1095.
- Masad EA, Huang CW, D'Angelo J, Little DN., 2009. Characterization of Asphalt Binder Resistance to Permanent Deformation Based on Nonlinear Viscoelastic Analysis of Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 78. 535-566.
- Nader Tabatabaee, Hassan Ali Tabatabaee, 2010. *Multiple Stress Creep and Recovery Time Sweep Fatigue Test: Crumb Rubber Modified Binder and Mixture Performance*, Transportation Research Board.
- Perzyna P. "Thermodynamic Theory of Viscoplasticity." *Advances in Applied Mechanics* 1971; 11; 313-354.
- Prager W. A New Method of Analyzing Stresses and Strains in Work Hardening Plastic Solids. *Journal of Applied Mechanics* 1956; 23;. 493-496.
- Rowe GM, Sharrock MJ, Bouldin MG, Dongre RN, 2001. Advanced Techniques to Develop Asphalt Master Curves From The Bending Beam Rheometer. *Petroleum and Coal*, Vol. 43. 54-59.
- Schapery RA. 1961. *A Simple Collocation Method for Fitting Viscoelastic Models to Experimental Data*. California Institute of Technology, Pasadena CA.
- Uzan J. 1996. Asphalt Concrete Characterization for Pavement Performance Prediction. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Vol. 65. 573-607.
- Yun T, Underwood BS, Kim YR., 2010. Time-Temperature Superposition for HMA with Growing Damage and Permanent Strain in Confined Tension and Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 22. 415-422.
- Yun T., Eum BS., Yoo PJ., Performance Evaluation of Polymer Modified Asphalt Binder with PG Testing Protocols. *Journal of Korean Society of Road Engineers (Accepted)*.

(접수일 : 2012. 7. 5 / 심사일 : 2012. 7. 10 / 심사완료일 : 2012. 9. 21)