International J. Highw. Engineering Vol. 15 No. 1 : 87-94 February 2013
http://dx.doi.org/10.7855/IJHE.2013.15.1.087

동전단 마스터곡선을 이용한 아스팔트 바인더의 노화 특성 평가

Characteristics of Dynamic Shear Modulus Mastercurve of Aged or Unaged Asphalt Binders

윤 태 영 Yun, Tae Young | 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 수석연구원 · 교신저자 (E-mail : tyun@kict.re.kr)
함 상 민 Ham, Sang Min | 정회원 · 한국건설기술연구원 석사후연구원 (E-mail : genie83@kict.re.kr)
유 평 준 Yoo, Pyeong Jun | 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구위원 (E-mail : pjyoo@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : To characterize the aging effect on asphalt binder, dynamic shear modulus mastercurve of two typical asphalt binders are developed.

METHODS : To develop dynamic shear modulus mastercurve, dynamic shear modulus at high temperature and creep stiffness at low temperature are measured by temperature sweep test and bending beam rheometer test, respectively.

RESULTS : It is observed that the aging effect on asphalt binder can be clearly observed from dynamic shear modulus mastercurve and the mastercurve can be utilized to predict behavior of asphalt binder at wide range of temperature

CONCLUSIONS : It is confirmed that SBS 5% modified binder has more desirable mechanical property at low and high temperature as a pavement material comparing to PG64-22 binder and the mastercurve is an effective tool to evaluate the property of asphalt binder.

Keywords
temperature sweep test, bending beam rheometer, dynamic shear rheometer, dynamic shear modulus, interconversion

Corresponding 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
e-mail : tyun@kict.re.kr

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

1. 연구배경 및 목적

SUPERPAVE PG 등급실험에서 수행되는 동전단 레오미터(Dynamic Shear Rheometer, DSR) 실험과 휨저항(Bending Beam Rheometer, BBR) 실험은 아스팔트 바인더의 고온 및 저온 등급을 결정하기 위한 실험방법이다. DSR 실험은 특정한 온도와 빈도(Frequency)에서의 동전단 탄성계수($|G^*|$)를 바인더의 평가기준으로 사용하며, BBR 실험은 특정한 온도에서 하중을 재하하여 변위가 발생한 60초 시점에서의 크리프 스티프니스(Creep Stiffness, S(t))와 기울기 크리프율(Creep Rate, m-value)을 평가기준으로 적용한다. 일반적으로 아스팔트 바인더 DSR 실험은 10℃ 이상 90℃ 이하에서 수행되어 노화되지 않았거나 노화된 바인더의 고온물성을 평가하는 데 사용되며, BBR 실험은 -12℃ 이하에서 노화된 바인더에 수행되어 저온물성을 측정하는 데 사용된다. SUPERPAVE 등급을 결정하는 데 사용되는 DSR 실험에 온도와 빈도 조건을 추가하여 수행할 수 있는 DSR 온도-빈도 변화실험(Temperature Sweep Test)은 매우 넓은 온도범위에서 수행될 수 있으며, 이러한 특성으로 인하여 아스팔트 바인더의 PG 등급을 결정하는 데 사용될 수 있을 뿐만 아니라 넓은

온도 범위에서의 바인더의 기본 거동을 확인하는 데 유용하게 사용될 수 있다. 본 연구에서는 DSR 온도-빈도 변화실험과 BBR 실험 결과를 활용하여 아스팔트 바인더의 특성을 확인하면서 거동을 예측하는 데 사용될 수 있는 동전단 마스터 곡선(Dynamic Shear Modulus Mastercurve)을 PG 64-22 바인더와 SBS 5% 개질 바인더에 대하여 구축하였다. 동전단 마스터 곡선은 아스팔트 바인더의 물성의 특성을 상대 비교하거나 노화에 따른 변화를 평가하는 데 활용될 수 있으며, 또한 향후 아스팔트 혼합물의 물성을 이해하기 위한 기본자료로 사용될 수 있다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험 장비 및 재료

DSR과 BBR 실험에는 각각 TA Instrument의 AR1500과 Applied Test Systems의 Bending Beam Rheometer가 사용되었으며, 일반적인 아스팔트 포장에 사용되는 PG 64-22(AP5) 바인더와 SBS 5% 개질 바인더에 대하여 실험을 수행하였다.

2.2. 실험방법

SUPERPAVE에서는 노화되거나 노화되지 않은 바인더의 물성확인을 통한 PG등급 결정을 위하여 회전점도계, 동적전단 레오미터, 휨저항 시험기, 직접인장시험기에서 얻어진 점탄성 물성을 사용한다. 본 연구에서 구축하고자 하는 동전단 마스터 곡선은 이들 실험으로 직접적으로 얻어질 수는 없으나 온도와 빈도를 바꿔가면서 수행하는 DSR 온도-빈도 변화실험(Temperature Sweep Test)을 수행하여 얻어진 결과와 BBR 실험 결과를 이용하여 구축될 수 있다. 동전단 마스터 곡선을 구축하기 위한 온도-빈도 변화 실험과 휨저항 실험 조건은 다음과 같다.

2.2.1. 온도-빈도 변화(Temperature Sweep) 실험

온도-빈도 변화 실험은 여러 온도범위에서 여러 빈도로 특정 변형률을 발생시키도록 반복적으로 수행하는 실험으로서 예비실험을 통하여 바인더의 특성을 반영하여 온도와 빈도를 결정하여 적용한다. 본 연구에서는 넓은 범위에서의 바인더의 동전단 마스터 곡선을 구축하기 위하여 13℃부터 90℃까지 7℃를 증가시키면서 12개 온도에서 실험을 수행하였으며, 바인더 시편 크기에 따른 오차를 최소화하기 위하여 ASTM에 따라 13℃에서부터 48℃까지는 두께 2mm, 직경 8mm의 바인더 시편을 이용하였다. 따라서 48℃에서부터 90℃까지는 두께 1mm, 직경 25mm의 바인더 시편이 사용되었다. 각 온도에서 적용된 빈도는 다음 Table 1에 나타난 바와 같이 6개의 빈도를 적용하였으며, 예비실험에서 1.0%와 0.1%의 전단변형률에서 두 바인더가 거의 동일한 전단 탄성계수를 나타내는 것을 확인하여 목표 전단변형률을 0.1%로 설정하였다. 실험에는 노화되지 않은 바인더, RTFO노화된 바인더, RTFO노화 후 PAV노화된 PG 64-22 바인더와 SBS 5% 개질 바인더를 사용하였다.

Table 1. Angular Frequencies in Temperature Sweep Test

Angular Frequency (rad/sec)					
6.28	9.96	15.75	25.01	39.64	62.83

다음 Eq. (1)은 온도-빈도 변화 실험을 통하여 얻을 수 있는 응력과 변형률과 이들을 이용하여 얻어지는 동전단 계수의 정의를 나타내고 있다. Eq. (1)을 이용하여 이상의 온도와 빈도 조건에서 얻어진 동전단계수는 13℃ 이상의 온도에서의 동전단 마스터 곡선을 작성하는데 사용된다.

$$|G^*(\omega)| = \frac{|\tau_0(\omega)|}{|\epsilon_0(\omega)|} \quad (1)$$

여기서, $|G^*(\omega)|$ = 동전단계수,

τ_0 = 동전단 응력,

ϵ_0 = 동전단 변형률,

ω = 각속도 ($=2\pi f$).

2.2.2. 휨저항(BBR) 실험

BBR 실험은 노화된 바인더의 스티프니스(Stiffness) 특성을 확인하기 위한 방법으로 DSR로 평가하기 어려운 저온조건에서의 노화된 바인더의 균열에 대한 저항성을 평가하기 위하여 사용된다. BBR 실험에서는 크리프 스티프니스와 크리프율은 일정한 온도조건에서 하중을 60초간 재하하면서 빔 형태의 시편 중앙부의 처짐을 측정하여 계산한다. 본 연구에서는 위의 온도-빈도 변화실험과 같이 노화되지 않은 바인더, RTFO노화된 바인더 및 RTFO노화 후 PAV로 노화된 PG 64-22 바인더와 SBS 5% 개질 바인더로 실험을 수행하여 노화조건에 따른 스티프니스의 변화를 측정하였다. 다음 Eq. (2)는 바인더 시편의 크기와 하중 및 처짐량을 이용하여 결정하는 크리프 스티프니스 계산식을 나타내고

있는데 이는 기본적으로 선형거동을 하는 점탄성 보이론(Beam Theory)에 근거하여 유도되었다(Bahia et al. 1992).

$$S(t) = \frac{1}{D(t)} = \frac{PL^3}{4bh^3u(t)} \quad (2)$$

여기서, $S(t)$: 스티프니스,

$D(t)$: 크리프 컴플라이언스,

$u(t)$: 처짐량,

$P(t)$: 하중($P_0H(t)$),

L : 보의 지지거리,

b : 보의 폭,

h : 보의 높이.

BBR 실험은 동일한 조건에 대하여 2회씩 반복하여 평균값을 분석에 사용하였으며, 동일조건에서는 실험편차는 거의 없는 것으로 확인되었다. 다음 Fig. 1과 Fig. 2는 최소 및 최대 실험편차를 보이는 두 가지 실험조건을 나타내고 있다. -12℃에서 측정된 PG64-22 바인더와 -18℃ SBS 5% 개질 바인더의 스티프니스와 60초에서의 기울기 값인 m-value의 값 차이가 매우 작은 것을 알 수 있다.

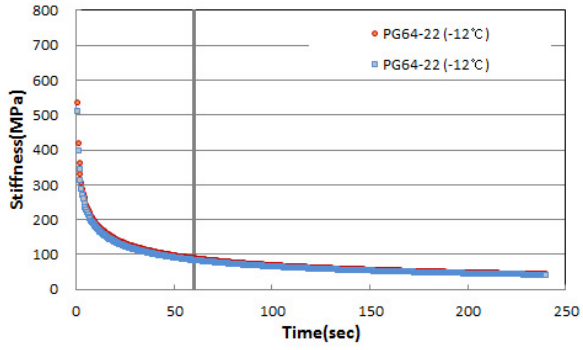

Fig. 1 Stiffness vs. Time Curve of PG64-22 Unaged Binderat -12℃

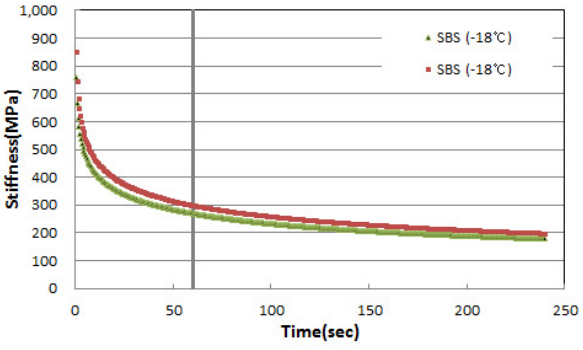

Fig. 2 Stiffness vs. Time Curve of SBS Unaged Binderat -18℃

3. 실험결과 및 분석

3.1. DSR 및 BBR 실험결과

다음 Fig. 3은 노화되지 않은 PG64-22 바인더에 대하여 12개 온도 조건에서 수행한 온도-빈도 변화 실험에서 얻은 전형적인 동전단계수를 나타내고 있다.

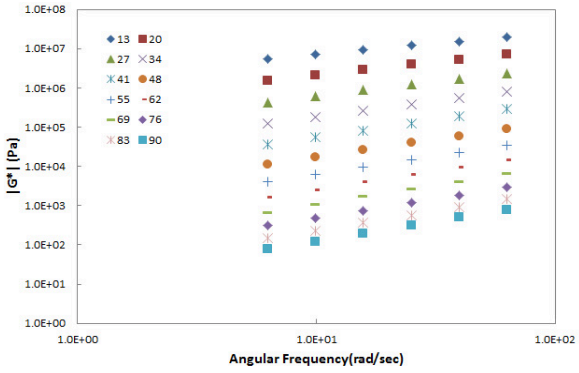

Fig. 3 Typical Dynamic Shear Modulus

아스팔트 바인더의 전형적인 점탄성 특성으로 인하여 13℃에서 결정된 동전단계수가 다른 온도에서 얻은 동전단계수에 비하여 가장 높고 90℃에서 얻은 동전단계수가 가장 낮은 것을 알 수 있다. 또한 낮은 각속도에서의 동전단계수가 높은 각속도에서의 동전단계수보다 낮은 것도 확인할 수 있다.

-12℃, -18℃ 및 -24℃에서 BBR 실험을 통하여 얻은 노화되지 않은 PG 64-22 바인더와 SBS 5% 개질 바인더의 스티프니스는 Fig 4.에 나타나 있다. 온도가 낮아짐에 따라서 재료의 단단함을 나타내는 스티프니스가 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 특히 -24℃에서는 SBS 5% 개질 바인더의 스티프니스가 PG 64-22바인더 보다 낮게 측정되어 PG 64-22 바인더의 등급을 벗어나는 온도 조건에서 SBS 개질 바인더의 저온에 대한 저항성이 PG 64-22 바인더 보다 나은 것을 확인할 수 있다. 이는 반대로 PG 64-22 바인더가 -24℃에서 급격하게 취성이 증대되어 해당 등급기준을 만족하지 못

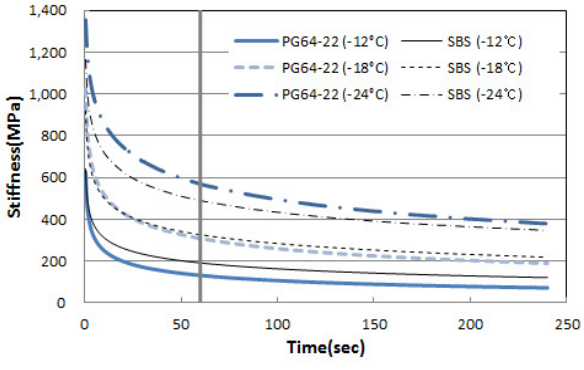

Fig. 4 Stiffness vs. time from BBR Test

하는 것으로 해석될 수도 있으며, 동전단 마스터 곡선에서도 확인할 수 있다.

3.2. 동전단 마스터곡선의 작성

동전단 마스터 곡선을 얻기 위해서는 BBR 실험에서 얻어지는 크리프 컴플라이언스를 DSR 온도-빈도 변화 실험에서 얻어지는 물성인 동전단계수로 변환할 필요가 있다. 이를 위하여 BBR 시편의 중앙에서 얻어진 처짐량을 이용하여 완화계수(Relaxation Modulus, $E(t)$), 저장탄성률(Storage Modulus, $E'(\omega)$), 동탄성 계수(Dynamic Modulus, $E^*(\omega)$) 및 동전단 계수(Dynamic Shear Modulus, $G^*(\omega)$)를 순차적으로 결정한다. Fig. 5는 이와 같은 변환에 사용되는 수식과 순서를 개념적으로 나타내고 있다. Eq. (3)~Eq. (13)은 이상의 과정에서 활용되는 수식을 위한 수학적 유도과정을 나타내고 있는데, 일반적인 중첩적분(Convolution Integral)과 크리프 컴플라이언스와 완화계수 사이의 관계에서 Eq. (3)을 얻을 수 있다(Al-Qadi et al. 2008, Rowe et al. 2001)).

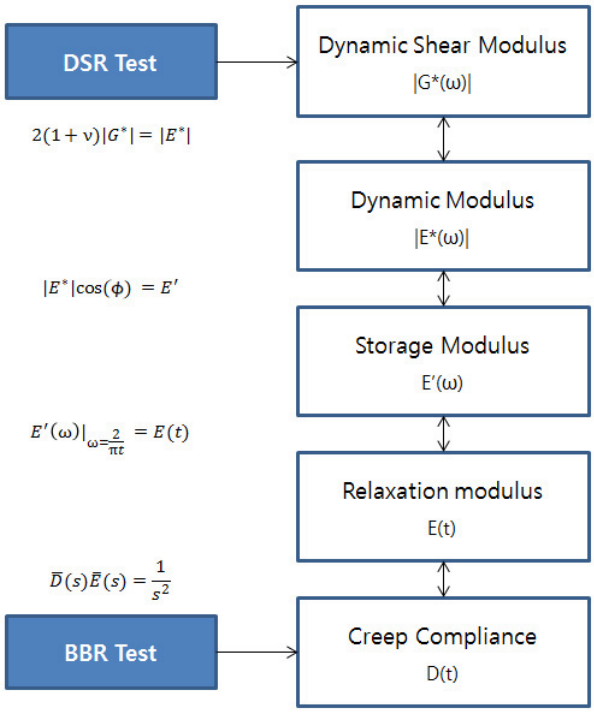

Fig. 5 Interconversion Procedure

$$\int_0^t D(t)E(t-\tau)d\tau = t \tag{3}$$

여기서, τ : 내부시간(Intrinsic Time)

t : 물리적 시간(Physical Time)

Eq. (3)에 라플라스 변환(Laplace Transform)을 취하면 다음 Eq. (4)를 얻을 수 있다.

$$\bar{D}(s)\bar{E}(s) = \frac{1}{s^2} \tag{4}$$

여기서, $\bar{D}(s)$: 라플라스 변환된 크리프 컴플라이언스,

$\bar{E}(s)$: 라플라스 변환된 완화계수.

s : 라플라스 변환 변수.

Schapery and Park(1999)가 제안한 바와 같이 Eq. (4)는 Eq. (5)와 Eq. (6)과 같이 정리될 수 있다.

$$\bar{D}(s) = \frac{\Gamma(1+n)}{s}D(t) \tag{5}$$

$$\bar{E}(s) = \frac{\Gamma(1+n)}{s}E(t) \tag{6}$$

여기서, Γ : 감마함수(Gamma Function)

n : $d(\log D)/d(\log t)$

Eq. (5)와 Eq. (6)을 Eq. (4)에 대입하고 라플라스 역변환(Inverse Laplace Transform)을 수행하면 다음 Eq. (7)과 같은 완화계수와 크리프 컴플라이언스의 관계를 얻을 수 있다.

$$D(t)E(t) = \frac{1}{\Gamma(1+n)\Gamma(1-n)} = \frac{\sin(n\pi)}{n\pi} \tag{7}$$

또한 Eq. (2)를 Eq. (7)에 대입하고 정리하면, 다음 Eq. (8)을 얻을 수 있다.

$$E(t) = \frac{\sin(n\pi)}{n\pi}\frac{1}{D(t)} = \frac{\sin(n\pi)}{n\pi}\frac{PL^3}{4bh^3u(t)} \tag{8}$$

Eq. (8)의 n이 BBR 실험에서 얻어진 m-value와 동일하다고 가정하면 완화계수와 저장탄성률은 빈도 공간(Frequency Domain)에서 다음 Eq. (9)와 같은 관계를 갖는다.

$$E(t) \approx E'(\omega)|_{\omega=\frac{2}{\pi t}} \tag{9}$$

한편 저장탄성률과 동탄성계수는 Eq. (10)과 같은 관계를 갖으며, 저온에서는 아스팔트 바인더의 일반적인 위상각(ϕ)이 24° 이므로 Eq. (11)로 정리될 수 있다(Kim et al. 2011).

$$|E^*(\omega)| = \frac{E'(\omega)}{\cos(\phi)} \quad (10)$$

$$|E^*(\omega)| = \frac{E'(\omega)}{\cos(24)} = 1.095 * E'(\omega) \quad (11)$$

프와송비(ν)를 0.5로 가정하면, 동전단계수와 동탄성계수는 다음 Eq. (12)와 같이 나타내어질 수 있으며, Eq. (2), Eq. (8), Eq. (11), Eq. (12)를 정리하면 최종적으로 다음 Eq. (13)의 BBR의 스티프니스와 동전단계수와의 관계를 얻을 수 있다.

$$|G^*(\omega)| = \frac{|E^*(\omega)|}{2(1+\nu)} = \frac{|E^*(\omega)|}{2(1+0.5)} = \frac{|E^*(\omega)|}{3} \quad (12)$$

$$|G^*(\omega)| = \frac{0.365 * \sin(n\pi)}{n\pi} S(\frac{2}{\pi\omega}) \quad (13)$$

Eq. (13)을 이용하여 BBR 실험으로부터 얻어진 PG 64-22 바인더와 SBS 5% 개질 바인더의 변환된 동전단계수와 온도-빈도 변화 실험을 통하여 측정된 동전단계수의 일부가 해당 각속도에 대하여 다음 Fig. 6~Fig. 7에 나타나 있으며, 노화에 따른 동전단계수의 증가를 확인할 수 있다. 한편 Fig. 7에서 실험일정 및 조건의 제약에 따라 -24℃ BBR 실험 결과는 포함되지 않았다.

여러 연구결과(Gibson et al. 2003, Yun et al. 2010)에 따르면, 각각의 온도에서 BBR 실험과 온도-빈도 변

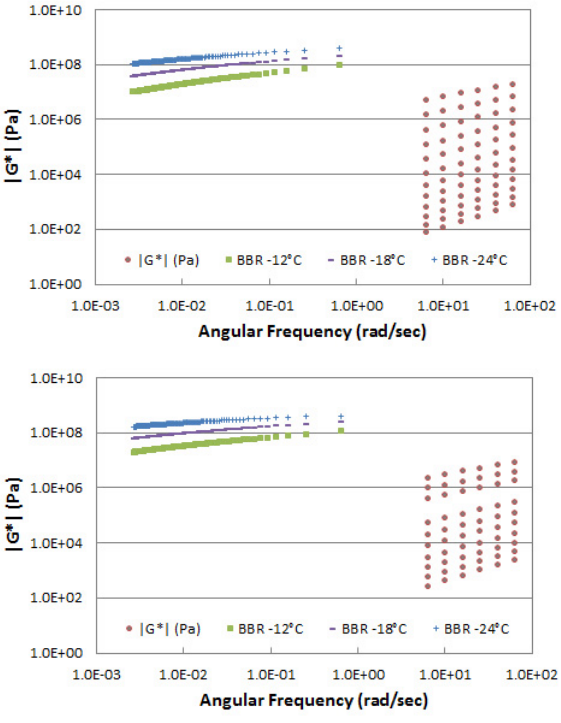

Fig. 6 Dynamic Shear Modulus of PG64-22 Without(Top) and With(Bottom) Aging

화 실험에서 얻어진 Fig. 6~Fig. 7의 동전단계수는 시간-온도 중첩이론(Time-temperature Superposition Principle)을 이용하여 연속된 S형 곡선으로 만들어질 수 있다. 이는 아스팔트 바인더가 열역학적으로 단순(Thermo-rheologically Simple)한 것을 의미한다. 연속된 S형 곡선을 만들기 위하여 일반적으로는 다음 Eq. (14)가 적용되며, Eq. (14)의 모형계수 a, b, c, d를 결정하기 위하여 다양한 최소 오차법(Error Minimization Technique)이 적용될 수 있다. 본 연구에서는 Microsoft Excel의 GRG 비선형 방법으로 모형계수를 결정하였으며, 이 때 중첩을 위한 기준온도(Reference Temperature)는 -18℃로 설정하였다.

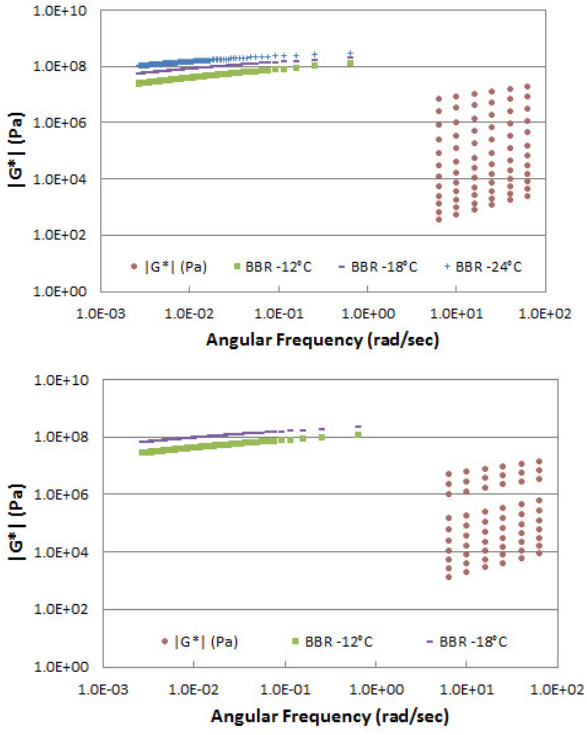

Fig. 7 Dynamic Shear Modulus of SBS 5% Without(Top) and With(Bottom) Aging

$$\log(|G^*(\omega)|) = a + \frac{b}{1+e^{c-d\times\log(\omega)}} \quad (14)$$

여기서, $|G^*|$: 동전단계수(Pa),

a, b, c, d : 모형계수,

ω : 각속도(rad/sec).

다음 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 이상의 과정을 통하여 얻은 PG 64-22 바인더의 동전단 마스터 곡선, 위상각(Phase Angle) 마스터 곡선과 이동함수(Shift Function)을 각각 나타내고 있다. 이동함수에서 얻어진 특정 온도에서의 이동계수(Shift Factor)는 Eq. (15)를 이용하여 감쇠

시간(Reduced Time)으로 변환되어 동전단 마스터 곡선의 x축을 결정한다.

$$t^R = \frac{t}{a_T} \tag{15}$$

여기서, t^R : 감쇠시간
t : 시간
a_T : 시간-온도 이동계수(Shift Factor)

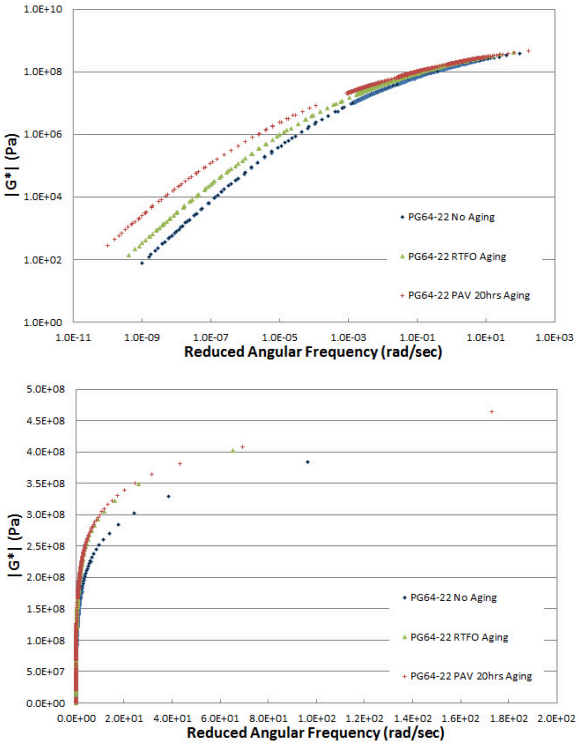

Fig. 8 Dynamic Shear Modulus of PG 64-22 in log-log(Top) and in Normal(Bottom)

Fig. 8에 나타난 바와 같이 PG 64-22 바인더의 저온에 대한 물성 변화는 RTFO 노화단계에서 크게 발생하여 PAV 노화단계에서는 거의 발생하지 않으나 고온에 대한 물성변화는 PAV 노화단계에서 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 PG 64-22 바인더의 장기

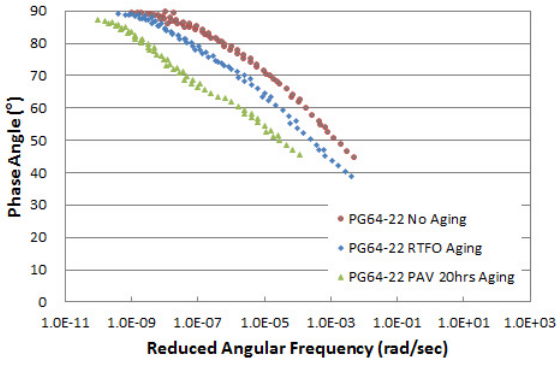

Fig. 9 Phase Angle Mastercurve of PG 64-22

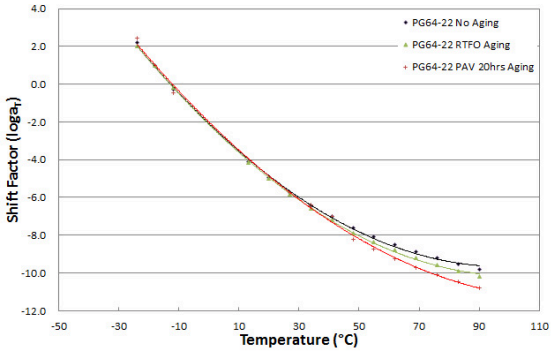

Fig. 10 Shift Function of PG 64-22

노화에 따른 고온물성의 급격한 변화는 아스팔트층에서 발생하는 소성변형(Rutting)의 증가량이 시간이 증가함에 따라 급격하게 감소하는 특성과 관련이 있을 가능성도 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 SBS 5% 개질 바인더의 동전단계수 마스터 곡선과 위상각 마스터 곡선을 나타내고 있는데, SBS 5% 개질 바인더의 동전단계수가 Fig. 8의 PG 64-22에 비하여 노화에 따른 변화폭이 작으며 고온에서 높은 값을 나타내어 재료의 안정성이 높은 것을 알 수 있다.

또한 Fig. 12에서 SBS 5% 개질 바인더의 위상각은 노화에 따라 크게 변화하는데 노화되지 않은 바인더의 위상각이 빈도에 무관하게 일정해지는 경향이 노화가

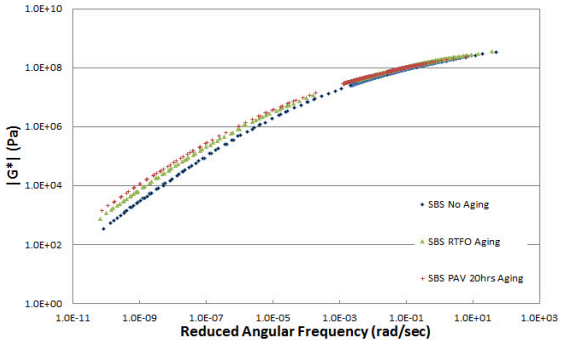

Fig. 11 Dynamic Shear Modulus Mastercurve of SBS 5%

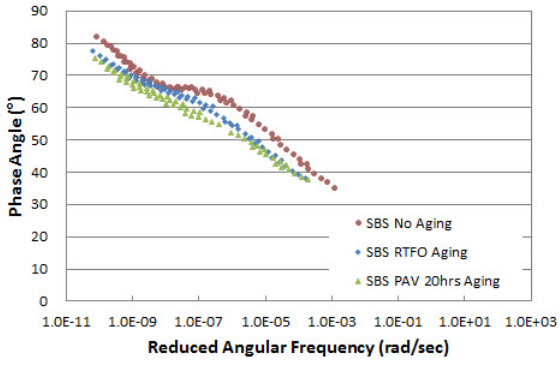

Fig. 12 Phase Angle Mastercurve of SBS 5%

발생함에 따라서 거의 없어지는 것으로 나타났다. 이는 동전단 계수와 함께 재료의 탄성을 나타내는 위상각이, 특히 낮은 온도에서 급격하게 감소되어 발생하는 것으로 노화에 따른 개질 바인더의 분자 또는 결합구조에 변화가 생기기 때문으로 판단된다. 물론 이러한 SBS 5% 개질 바인더의 동전단계수와 위상각의 변화는 PG 64-22 바인더에 비하여 제한적이기 때문에 SBS 5% 개질 바인더의 선형 점탄성 범위(Linear Viscoelastic Region)에서 PG 64-22 바인더에 비하여 안정적이라고 평가하는 데는 문제가 되지 않는 것으로 나타났다. Fig. 13은 측정된 및 변환된 동전단계수에 대하여 찾아진 S자형 곡선으로 나타낸 PG 64-22 바인더와 SBS 5%개질 바인더의 동전단 계수-감쇠시간 곡선을 함께 나타내고 있으며, 위에서 언급한 경향을 보다 명확하게 확인할 수 있다.

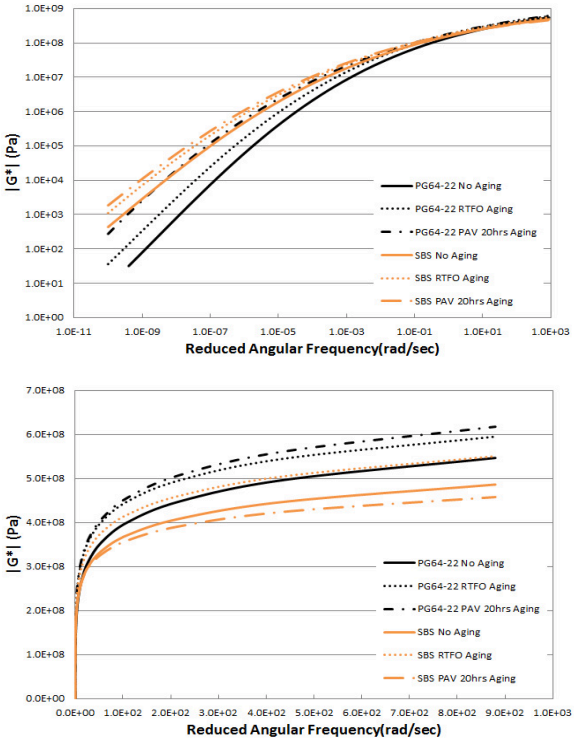

Fig. 13 Dynamic Shear Modulus Mastercurves in log-log(Top) and in Normal(Bottom)

PG 64-22 바인더는 노화의 정도가 커짐에 따라서 고온 및 저온에서 동전단계수가 증가하는 경향을 나타내는데, 특히 고온조건에서는 Fig. 13에 나타난 가장 느린 각속도에서 동전단 계수가 300% 이상 증가하여 물성의 변화가 큰 것으로 나타났다. 한편 저온에서는 계산된 가장 빠른 각속도에서 동전단계수가 20% 증가하는 것으로 확인되었다. 한편 SBS 5% 개질 아스팔트 바인더는 고온조건에서 계산된 가장 느린 각속도에서의 동전단계수의 변화가 400% 이상 증가하는 것으로 확인되었으나 저온에서는 약 10% 감소하여 개질 바인더의 특성을 잘 나타내는 것으로 확인되었다. 동전단계수는 선형점탄성 범위에서 적용할 수 있는 재료의 역학적 특성으로 재료의 장기적인 성능과 직접적으로 연관짓기는 매우 어렵다. 그러나 일반적인 목적을 위하여 개발된 현재까지의 아스팔트 바인더의 거동특성이 높은 회복성을 갖으면서 높은 소성을 갖는 경우는 매우 드물기 때문에 위에서 확인된 바인더의 거동특성은 아스팔트 혼합물의 장기적 성능과 무관하다고 할 수 없다. 또한 AASHTO TP 70에서 제시하는 다중하중 크리프 리커버리 실험(Multiple Stress Creep and Recovery, MSCR) 등을 통하여 측정된 PG 64-22 바인더와 SBS 5% 바인더의 점탄성 및 소성 특성은 위에서 언급한 변형특성 범위 내에 있다(Yun et al. 2012).

4. 결론

동전단계수는 동적특성을 나타내는 물성으로 위상각과 함께 고려되어 바인더의 점탄성 거동예측에 적용되는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 BBR 실험과 DSR 온도-빈도 변화 실험의 결과를 통합하여 아스팔트 바인더의 동전단계수 마스터 곡선을 작성하였으며, 이를 바탕으로 일반적인 PG 64-22 바인더와 SBS 5% 개질바인더의 특성 및 예상되는 성능을 비교하였다. 점탄성 특성을 나타내는 개질 바인더는 위와 같은 과정을 통하여 정량적으로 평가받을 필요가 있으며, 동전단계수 마스터 곡선은 향후 MSCR과 같이 재료의 소성을 평가하는 실험법 등과 같이 실험 등에서 얻어진 재료의 물성과의 조합을 통하여 점탄소성(Viscoelastoplastic)에 근거한 바인더의 역학적 구성모형을 개발하는 데 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업 재원으로 수행되었습니다.

References

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., Witczak MW, 2003. Viscoelastic, Viscoplastic, and Damage Modeling of Asphalt Concrete in Unconfined Compression. *Transportation Research*

Record. Vol. 1860. 3-15.

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.

Yun T, Ohm B, Yoo P, 2012. Performance Evaluation of Polymer Modified Asphalt Binder with PG Testing Protocols. *International Journal of Highway Engineering* Vol. 14. 5. pp47-55.

Yun T, Underwood BS, Kim YR., 2010. Time-Temperature Superposition for HMA with Growing Damage and Permanent Strain in Confined Tesion and Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering,* Vol. 22. 415-422.

AASHTO TP 70. 2009. *Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery(MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rehometer (DSR).*

Al-Qadi IL, Yang S., Elseifi MA, Dessouky S., Loulizi A., Masson J, Kevin K. 2008. Characterization of Low Temperature Creep Properties of Crack Sealants using Bending Beam Rehometry. *Research Report*. ICT-08-029

Kim YR, Underwood BS, Far S., Jackson N., Puccinelli J. 2011. LTPP Computed Parameter: *Dynamic Modulus*. FHWA-HRT-10-035

Park S and Schapery RA. 1999. Method of Interconversion between Linear Viscoelastic Material Functions. Part I-A Numerical Method Based on Prony Series. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 36. pp1653-1675

(접수일 : 2012. 12. 6 / 심사일 : 2012. 12. 20 / 심사완료일 : 2013. 1. 22)