



아스팔트 콘크리트 메스터 곡선에 대한 수정 Ramberg-Osgood 모델 적용

Application of Modified Ramberg-Osgood Model for Master Curve of Asphalt Concrete

권 기 철*

Kweon Gi-Chul

Abstract

The dynamic moduli of asphalt concrete are very important for the analysis and the design of asphalt pavement systems. The dynamic modulus master curve is usually represented by a sigmoidal function. The Ramberg-Osgood model was widely used for fitting of normalized modulus reduction curves with strain of soils in soil dynamic fields. The master curves were obtained by both sigmoidal functions and modified Ramberg-Osgood model for the same dynamic modulus data set, the fitting abilities of both methods were excellent. The coefficients in sigmoidal function are coupled. Therefore, it is not possible to separate the characteristics of the master curve with absolute value and shape. However, the each fitting coefficient in the Ramberg-Osgood model has a unique effect on the master curve, and the coefficients are not coupled with each other.

Keywords : asphalt concrete, master curve, curve fitting, sigmoidal function, Ramberg-Osgood model

요 지

아스팔트 콘크리트의 동탄성계수는 아스팔트 포장 해석 및 설계에 매우 중요하다. 동탄성계수의 메스터 곡선은 일반적으로 시그모이달 함수로 표현된다. Ramberg-Osgood 모델은 지반동역학분야에서 변형률 크기에 따른 정규화 탄성계수 감소 곡선에 대한 피팅모델로 널리 사용되고 있다. 동일한 동탄성계수 시험자료에 대하여 시그모이달 함수와 수정 Ramberg-Osgood 모델 모두를 사용하여 메스터 곡선을 획득하였으며, 두 피팅모델 모두 적용성이 우수함을 확인하였다. 시그모이달 함수의 계수들은 서로 연관되어 있어서 메스터 곡선의 절대값과 형상 특성을 서로 분리하는 것이 불가능하다. 그러나 Ramberg-Osgood 모델의 계수는 물리적 의미가 명확할 뿐 아니라 서로 분리되어 있어서 메스터 곡선에 대한 영향요소를 서로 분리하여 평가할 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 아스팔트 콘크리트, 메스터 곡선, 곡선적합, 시그모이달 함수, Ramberg-Osgood 모델

* 정회원 · 동의대학교 토목공학과 부교수



1. 서론

동탄성계수(dynamic modulus)는 아스팔트 혼합물의 피로균열과 소성변형을 예측하는 최적의 계수로 평가되고 있다(Witczak, 2000). 아스팔트 콘크리트 재료의 탄성계수는 온도 및 하중 주파수의 영향을 대단히 크게 받으며, 이를 고려하여 결정된 동탄성계수(dynamic modulus) 및 위상각(phase angle)은 역학적인 아스팔트 포장 설계 및 해석에 있어서 매우 중요한 입력변수로 한국형 포장설계법과 AASHTO 2002 설계법에서 기본 입력변수로 적용하고 있다(건설교통부, 2007; 문성호, 2004).

아스팔트 콘크리트의 온도 및 하중주파수에 따른 탄성계수는 합축된 주파수(reduced frequency) 영역에서 하나의 곡선으로 표시되며, 이를 마스터 곡선(master curve)이라 칭한다. 마스터 곡선을 설계입력물성치로 사용하기 위해서는 함수형태로 곡선 피팅을 하여야 한다. 현재는 일반적으로 시그모이달 함수(sigmoidal function)를 사용하여 마스터 커브를 표현한다(김현오 등, 2005; Kweon 등, 2006). 그러나 시그모이달 함수의 계수들은 서로 연관되어 있어서 마스터 곡선의 절대값과 형상 특성을 서로 분리하는 것이 불가능하여 계수들의 물리적 의미가 명확하지 못한 단점이 있다.

Ramberg-Osgood 모델은 지반동역학분야에서 변형률 크기에 따른 정규화 탄성계수 감소곡선에 대한 피팅모델로 널리 사용되고 있다(한국지반공학회, 2006; 김용석, 2000). Ramberg-Osgood 모델의 계수는 서로 분리되어 있어서 피팅된 곡선에 대한 영향요소를 서로 분리하여 평가할 수 있는 장점이 있다. 또한 Ramberg-Osgood 모델은 크기와 형상 정보를 별개의 모델계수를 사용하여 표현하고 있어서 아스팔트 혼합물의 동탄성계수에 대한 영향요소를 효과적으로 분리해 낼 수 있다.

아스팔트 혼합물의 동탄성계수는 매우 다양한 요소의 영향을 받고 결정하는 시험과정이 복잡하다(Kweon 등, 2005; 김낙석, 2006). 따라서 많은 연

구자들이 동탄성계수 마스터 곡선의 예측모형, 보다 간편한 시험에 의한 마스터 곡선 결정기법 개발 등의 연구를 진행해 오고 있다(Witczak, 2000; Christensen 등, 2003; Dongre 등, 2005; Kweon 등, 2006). 이러한 동탄성계수 마스터 곡선 예측모형 개발에 있어서, 우수한 피팅 능력, 모델의 안정성, 사용하는 계수의 명확한 물리적 의미를 내포하는 합당한 마스터 곡선 피팅모델 사용이 요구된다.

본 연구에서는 Ramberg-Osgood 모델을 일부 수정하여 아스팔트 혼합물의 마스터 곡선의 커브피팅에 적용 가능한 모델을 제안하였다. 시그모이달 함수와 수정 Ramberg-Osgood 모델을 사용하여 마스터 곡선을 획득하였으며, 두 피팅모델의 적용성을 비교 분석하였다. 또한 두 모델의 모델계수의 영향을 분석하여 제안한 수정 Ramberg-Osgood 모델의 특성을 분석하였다.

2. 복소탄성계수(Complex Modulus)

아스팔트 혼합물과 같은 점탄성 재료의 강성은 일반적으로 복소탄성계수(E^*)로 표현된다. 점성감쇠가 있는 탄성재료에서 관성력의 영향을 무시한 조화운동은 그림 1 및 식 (1)과 같이 표현된다.

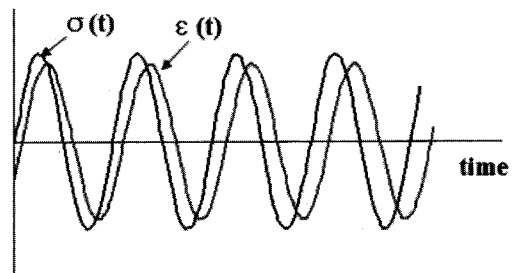


그림 1. Steady-State Motions in Viscoelastic Materials with Harmonic Loading

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \sin(\omega t - \phi) = \frac{\sigma_0}{|E^*|} \sin(\omega t - \phi) \quad (1)$$



여기서,

- $\varepsilon(t)$ = strain with time,
- ε_0 = strain amplitude,
- $\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t)$ = stress with time
- ω = circular loading frequency
- $|E^*|$ = dynamic modulus, and
- ϕ = phase angle

복소탄성계수는 탄성부분 즉, 저장되는 부분과 감쇠부분 즉, 손실되는 부분으로 나누어진다. 저장되는 부분은 에너지를 저장하는 재료적 능력과 관련된 것이고, 손실되는 부분은 에너지 손실을 의미하는 감쇠와 관련되어 있다. 따라서 감쇠가 없는 순수한 탄성체에서는 선형탄성계수가 복소탄성계수와 일치한다. 복소탄성계수(complex modulus)와 저장되는 탄성계수(storage modulus) 그리고 손실되는 탄성계수(loss modulus)의 관계는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$E^* = E' + iE'' \quad (2)$$

여기서,

- E^* = complex modulus
- E' = storage modulus, elastic modulus
- E'' = loss modulus, and
- $i = \sqrt{-1}$

E^* 의 크기를 동탄성계수(dynamic modulus)라고 칭하며 $|E^*|$ 로 나타내고, 식 (3)과 같이 정의된다.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

위상각(phase angle, ϕ)은 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{E''}{E'}\right) \quad (4)$$

3. 동탄성계수 마스터 곡선 (Dynamic Modulus Master curve)

동탄성계수 마스터 곡선은 시간-온도 중첩원리(time-temperature superposition)를 기초로 결정한다(김현오 등, 2004). 시간-온도 중첩원리는, 낮은 온도 긴 하중재하시간 조건에서 결정된 탄성계수는 높은 온도 짧은 하중재하시간 조건에서 동일하게 획득할 수 있음을 의미한다. 바꾸어 표현하면, 높은 온도에서 재료의 거동은 긴 하중재하시간 또는 느린 하중재하속도와 동일하고, 낮은 온도에서의 거동은 짧은 하중 재하시간 또는 빠른 하중재하속도와 동일함을 의미한다. 이러한 거동특성을 갖는 재료를 열유변학적 단순재료(thermorheologically simple, TRS)라 칭한다.

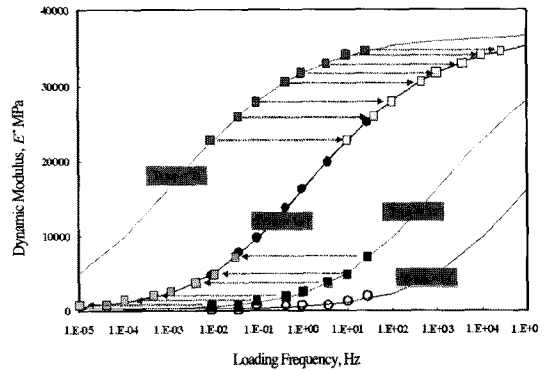


그림 2. Dynamic Modulus Mastercurve Construction

그림 2는 동탄성계수의 대표적인 일례를 나타낸 것이다. 여러 온도에서 시험된 자료는 단순한 수평방향의 이동에 의해서 연속적인 곡선이 획득된다. 수평방향의 이동이 이루어지면 온도 및 하중주파수의 영향은 합축된 주파수(reduced frequency)로 표현된다. 수평방향 이동, 온도, 하중주파수 영향의 관계는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$a_T = \frac{f_{T0}}{f_T} \quad (5)$$



여기서,

a_T = frequency-temperature shift factor for temperature T ,

f_{T_0} = reduced frequency at the reference temperature (T_0), and

f_T = frequency at temperature, T .

기준 온도에서 주파수-온도 전환계수(frequency-temperature shift factor)는 1의 값을 갖게 된다. 주파수-온도 전환계수는 온도만의 함수로 나타나며 식 (6)과 같이 대수영역에서 포물선 함수로 표현할 수 있다.

$$\log(a_T) = \log\left(\frac{f_{T_0}}{f_T}\right) = f(T) = A(T - T_0)^2 + B(T - T_0) \quad (6)$$

여기서,

a_T = frequency-temperature shift factor for temperature T ,

T = temperature, and

T_0 = reference temperature.

전환된 온도영역에서, 서로 다른 주파수를 갖는 동탄성계수 곡선은, 식 (6)과 같이 주파수-온도 전환계수가 결정되면, 주파수 전환계수(frequency shift factor)를 사용해서 수평으로 이동할 수 있다. 주파수 전환계수, a_f 는 그림 3에 나타낸 것과 같이 $\log(\text{frequency})$ 와

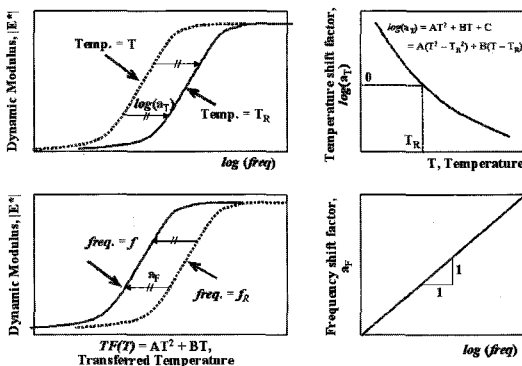


그림 3. Frequency Shift and Temperature Shift of Dynamic Modulus

직선의 관계를 갖는다. 만일 직선의 관계가 성립하지 않는다면 동탄성계수는 주파수영역에서 수평이동 하는 것이 불가능하다.

4. 메스터 곡선 커브피팅 함수

동탄성계수 메스터 곡선은 식 (7)로 표현되는 시그모이드 함수를 사용하여 모델하는 것이 일반적이다(김현오 등, 2005).

$$\log(|E^*|) = a + \frac{b}{1 + \frac{1}{\exp^{g + f \cdot \log(f_R)}}} \quad (7)$$

여기서,

$|E^*|$ = dynamic modulus,

f_R = reduced frequency, and

a, b, g, f = fitting coefficients

Ramberg-Osgood 모델은 지반동역학분야에서 변형률 크기에 따른 정규화탄성계수 감소곡선의 커브 피팅에 널리 사용되고 있다(한국지반공학회, 2006; 김용석, 2000). Ramberg-Osgood 모델의 기본함수 식은 식 (8)과 같다.

$$\gamma = (G/G_{\max}) \cdot \gamma + C(G/C_{\max})^R \quad (8)$$

여기서,

γ = 전단변형률

(G/G_{\max}) = 정규화탄성계수

C, R = 모델계수

식 (8)과 같이 정규화 탄성계수에 대한 Ramberg-Osgood 모델의 모델계수는 두 개다. 모델계수 C, R 은 정규화탄성계수 감소곡선의 형상에 관련된 계수다. 정규화되지 않은 상태에서는 G_{\max} 을 포함하여 세 개의 모델계수를 갖는다.

아스팔트 혼합물 메스터 곡선의 형태는 지반재료



의 정규화탄성계수 감소곡선과 매우 유사한 형태로 나타난다. 모든 지반재료에 있어서 최소탄성계수는 변형률 크기가 커지면서 영의 값을 갖게 되고, 고변형률 크기에서의 탄성계수는 물리적 의미를 가지지 못한다. 이에 반하여 아스팔트 혼합물의 낮은 하중주파수에서의 최소탄성계수는 재료의 특성에 따라서 차이가 나고 중요한 물리적 의미를 내포하고 있다. 따라서 정규화탄성계수를 최소탄성계수를 포함하여 식 (9)와 같이 수정하여 결정하는 방법을 제안하였다. 물론 이러한 과정에서 모델계수가 하나 증가하게 된다.

$$EN = \frac{(|E^*| - |E^*|_{\min})}{(|E^*|_{\max} - |E^*|_{\min})} \quad (9)$$

여기서,

EN = normalized dynamic modulus,

$|E^*|$ = dynamic modulus,

$|E^*|_{\max}$ = minimum dynamic modulus

$|E^*|_{\min}$ = maximum dynamic modulus

식 (9)와 같이 정규화된 탄성계수를 사용하여 하중 주파수에 따른 탄성계수의 변화, 즉 마스터 곡선에 대하여 Ramberg-Osgood 모델을 적용하면 식 (10) 및 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 식 (10)을 제안하였으며, 아스팔트 혼합물 마스터 곡선에 대한 수정 Ramberg-Osgood 모델로 칭한다.

$$\log(f_R) = (EN)f_R + C((EN)f_R)^R \quad (10)$$

여기서,

f_R = reduced frequency,

$$EN = \frac{(|E^*| - |E^*|_{\min})}{(|E^*|_{\max} - |E^*|_{\min})} = \text{normalized dynamic modulus,}$$

$|E^*|$ = dynamic modulus,

$|E^*|_{\max}$ = minimum dynamic modulus,
fitting coefficient,

$|E^*|_{\min}$ = maximum dynamic modulus,
fitting coefficient, and

C, R = fitting coefficients

$$f_R = \left[\frac{C \left(\frac{(|E^*| - |E^*|_{\min})}{(|E^*|_{\max} - |E^*|_{\min})} \right)^R}{1 - \frac{(|E^*| - |E^*|_{\min})}{(|E^*|_{\max} - |E^*|_{\min})}} \right]^{\frac{1}{1-R}} \quad (11)$$

5. 제안된 모델의 적합성 평가

그림 4는 시그모이달 함수에 완벽하게 적합한 가상의 마스터 곡선 동탄성계수 자료에 대해, 본 연구에서 제안한 수정 Ramberg-Osgood 모델을 적용하여 비교하여 나타낸 것이다. 가상의 시그모이달 함수 값은 일반적인 표층용 아스팔트 혼합물에 대한 실제 동탄성계수시험에서 결정된 마스터곡선을 이용하여 작성된 것이다.

그림 4의 결과에서, 가상의 시그모이달 함수 마스터 커브 곡선과 수정 Ramberg-Osgood 모델을 적용하여 결정된 커브피팅 함수가 거의 완벽하게 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 제안된 수정 Ramberg-Osgood 모델을 사용해서 아스팔트 혼합물 마스터 곡선을 합리적으로 커브피팅할 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 기존에 널리 사용되는 시그모이달 함수와 같이 제안된 수정 Ramberg-Osgood 모델의 모델

표 1. Combination of Fitting Coefficients

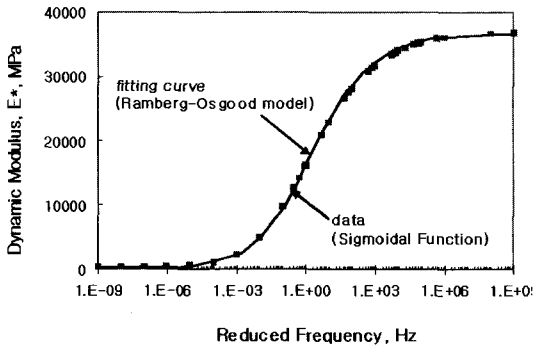
coefficients		Low	Medium	Upper
Sigmoidal Function	a	0.8	1.2	1.6
	b	2.5	3	3.5
	g	1.5	1.7	1.9
	f	0.4	0.45	0.5
Ramberg-Osgood Model	E_{\min}	20	40	60
	E_{\max}	30000	35000	40000
	R	0.65	0.7	0.75
	C	0.5	1.0	1.5



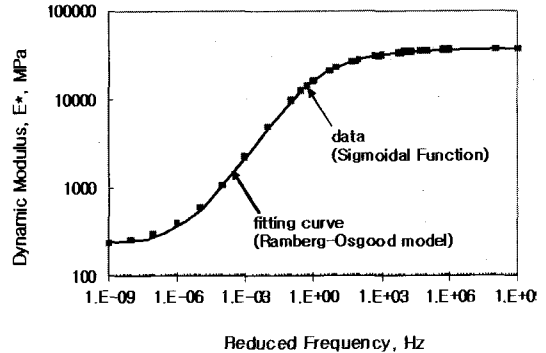
계수가 모두 네 개로 동일하기 때문에 그림 4에 확인한 커브피팅 능력 자체로 제안된 모델이 우수하다고 평가할 수는 없다.

피팅함수의 특성을 분석하고자 표 1에 나타난 모델계수의 범위에서 각 모델계수의 영향성 민감도를

분석하였다. 모델계수의 범위는 Kweon 등(2006)의 자료를 바탕으로 상한계와 하한계를 설정하였다. 모델계수 변화에 따른 마스터 곡선과 정규화된 마스터 곡선의 변화를 그림 5~그림 8에 나타내었다.

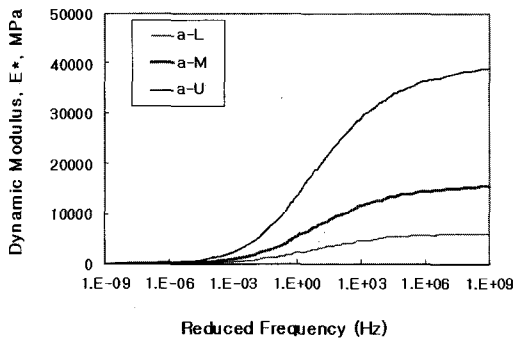


(a) linear space

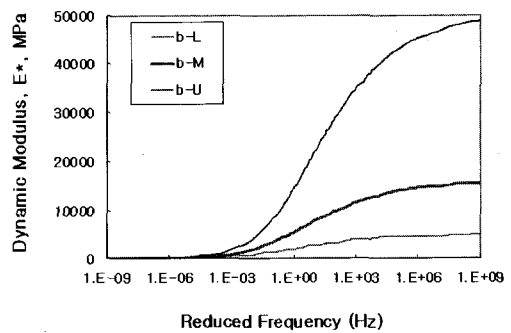


(b) logarithmic space

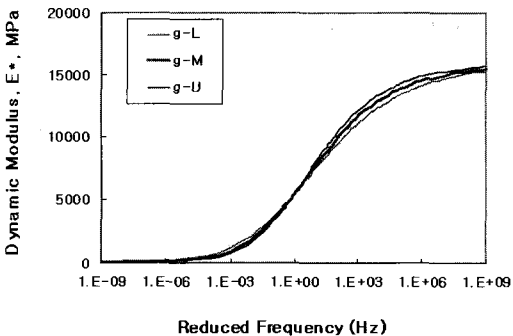
그림 4. Comparison of Fitted Master Curve was Using Sigmoidal Function and Ramberg-Osgood Model.



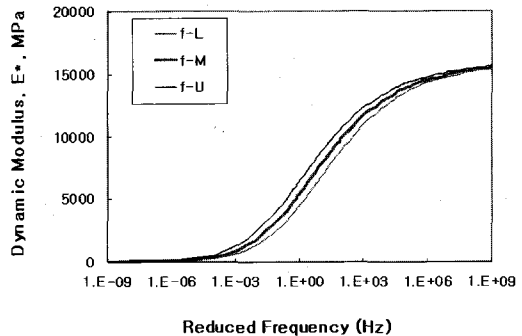
Reduced Frequency (Hz)



Reduced Frequency (Hz)

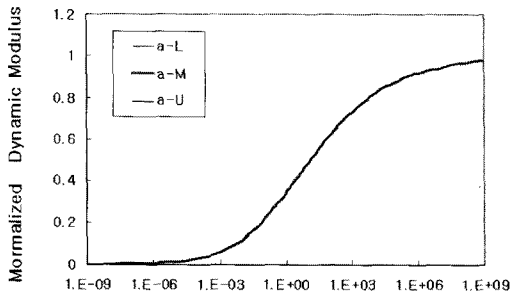


Reduced Frequency (Hz)

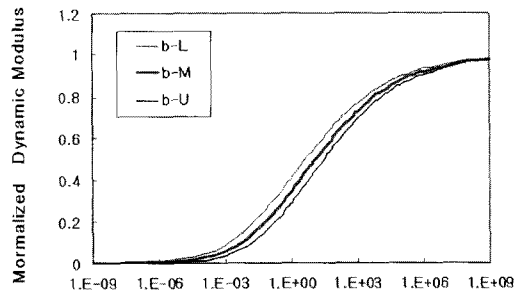


Reduced Frequency (Hz)

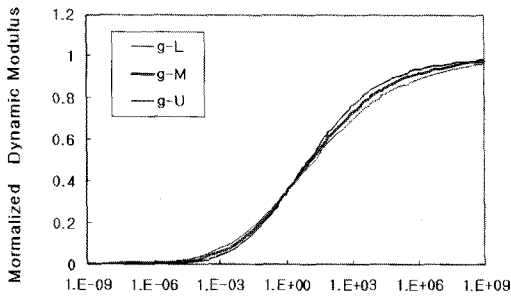
그림 5. Variation of Mastercurve with Fitting Coefficients (Sigmoidal Function)



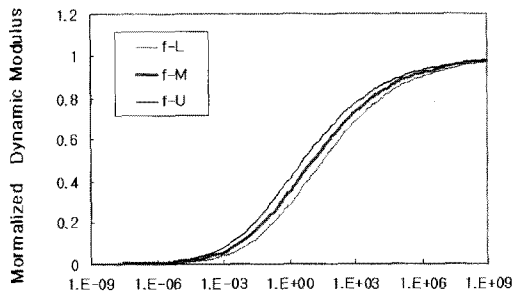
Reduced Frequency (Hz)



Reduced Frequency (Hz)

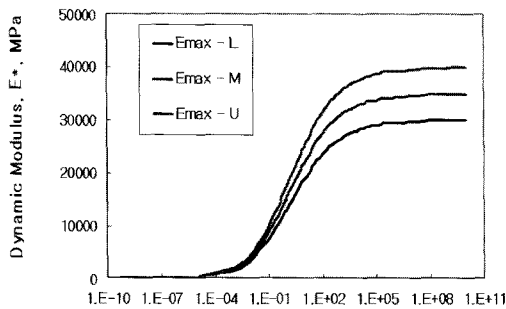


Reduced Frequency (Hz)

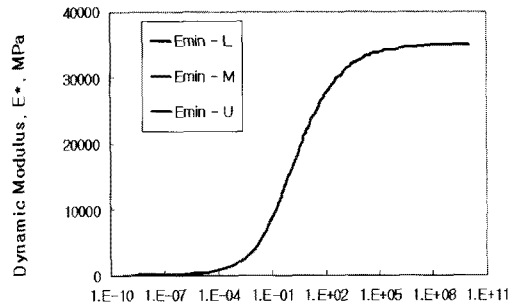


Reduced Frequency (Hz)

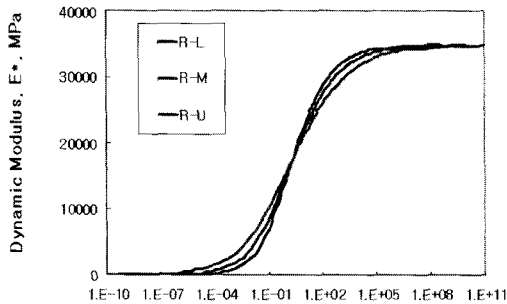
그림 6. Variation of Normalized Mastercurve with Fitting Coefficients (Sigmoidal Function)



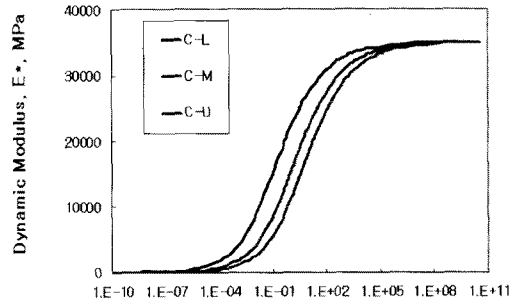
Reduced Frequency (Hz)



Reduced Frequency (Hz)



Reduced Frequency (Hz)



Reduced Frequency (Hz)

그림 7. Variation of Mastercurve with Fitting Coefficients (Ramberg-Osgood Model)

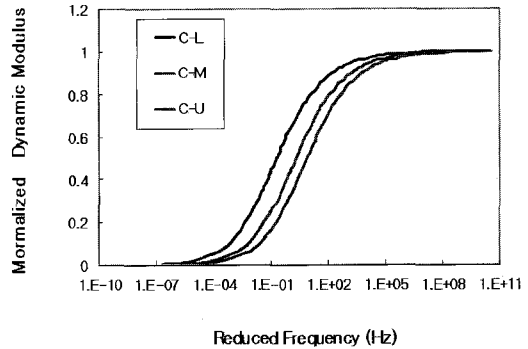
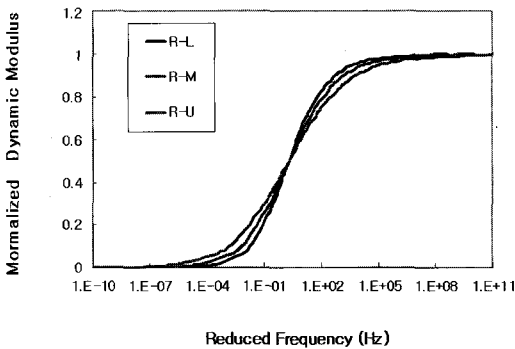
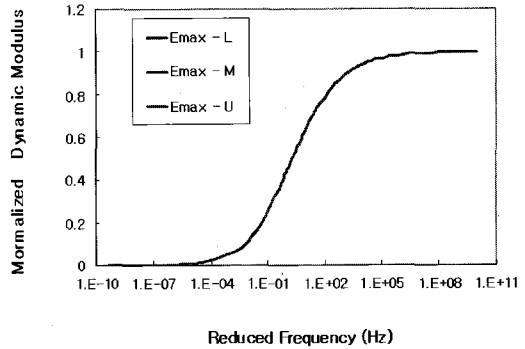
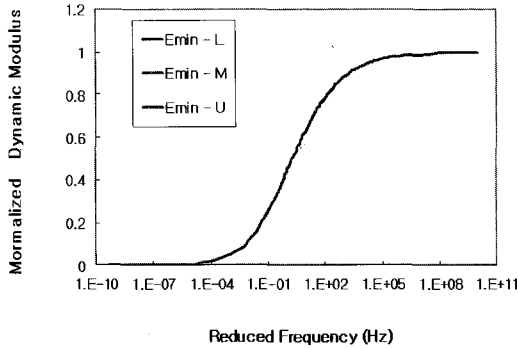


그림 8. Variation of Normalized Mastercurve with Fitting Coefficients (Ramberg-Osgood Model)

그림 5~그림 8에 나타난 마스터 곡선과 정규화된 마스터 곡선에 대한 각 모델계수의 영향을 표 2에 정리하였다.

표 2. Effect of Coefficients on Master curve

coefficients		Mastercurve			
		Absolute Value		Shape	
		Min.	Max.	Curvature	Parallel Moving
Sigmoidal Function	a	○	○	×	×
	b	×	○	×	○
	g	×	×	○	×
	f	×	×	×	○
Ramberg-Osgood Model	E_{min}	○	×	×	×
	E_{max}	×	○	×	×
	R	×	×	○	×
	C	×	×	×	○

note : ○ - effect, × - does not effect

표 2에 정리한 바와 같이, 시그모이달 함수의 모델 계수 a, b 는 동탄성계수 절대값에 영향을 주는 반면 모델계수 g, f 는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 모델계수 g, f 는 마스터 곡선의 형상에만 영향을 주는 것으로 나타났다. 모델계수 g 는 마스터 커브의 경사, 즉 하중 주파수에 따른 탄성계수의 변화 정도에 영향을 주고 있다. 모델계수 f 는 마스터 곡선의 수평이동에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나, 불행하게도, 마스터 곡선의 수평이동은 모델계수 f 뿐 아니라 모델계수 b 의 영향을 함께 받고 있고, 최대 동탄성계수는 모델계수 a 및 b 의 영향을 모두 받는 것으로 나타났다. 정리하면 동탄성계수의 크기와 형상에 각 모델계수가 서로 연관되어 영향을 미치고 있어서 각 모델계수의 물리적 의미를 명확하게 설정하기 힘든 단점이 있다.

제안된 수정 Ramberg-Osgood의 모델계수는 각각 독립적인 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다.



모델계수 E_{max} 은 높은 하중주파수 영역에서의 최대 동탄성계수와만 관련되어 있고, 모델계수 E_{min} 은 낮은 주파수 영역에서 최소동탄성계수 값과, 모델계수 C 는 메스터 곡선 형상의 수평방향 이동정도, 모델계수 R 은 메스터 곡선 형상의 기울기와만 관련되어 있음을 확인할 수 있다. 즉 수정 Ramberg-Osgood의 모델계수는 각각 서로 독립적임을 확인할 수 있다. 특히 수평방향의 이동을 표현하는 모델계수 C 는 시간-온도 전환계수 a_T 와 물리적 의미가 유사하기 때문에, 서로 통합적인 모델 개발 가능성이 충분히 예상된다. 그러나 본 연구에서 제안한 수정 Ramberg-Osgood의 모델 및 기존의 시그모이달 함수 모델 모두 메스터 곡선의 합리적인 피팅 능력 확보를 중심으로 제안된 것으로 동탄성계수 메스터 곡선에 대한 다양한 물리적 영향요소 모두를 고려할 수 없는 제약이 있다.

6. 결론

본 연구에서는 아스팔트 혼합물 동탄성계수 메스터 곡선의 피팅에 합당한 수정된 Ramberg-Osgood 모델을 제안하였다. 제안된 모델은 기존에 널리 사용되는 시그모이달 함수와 같이 네 개의 모델변수를 가지고 있고, 메스터 곡선에 합당한 커브피팅 능력을 가지고 있음을 확인하였다. 특히 제안된 모델에서 사용하는 각각의 모델계수는 물리적 의미가 명확할 뿐 아니라 서로 독립적인 요소인 장점을 가지고 있다. 본 연구에서 얻은 세부적인 결론은 다음과 같다.

1. 아스팔트 혼합물 동탄성계수 메스터 커브의 피팅에 사용되는 시그모이달 함수와 제안된 수정 Ramberg-Osgood 모델 모두 곡선 피팅 능력이 우수함을 확인하였다.
2. 기존에 널리 사용되는 시그모이달 함수의 모델계수 a, b 는 동탄성계수 절대값에 영향을 주는 반면 모델계수 g, f 는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 모델계수 g, f 는 메스터곡선의 형상에

만 영향을 주는 것으로 나타났다. 메스터곡선의 수평이동은 모델계수 f 뿐 아니라 모델계수 b 의 영향을 함께 받고 있으며, 최대 동탄성계수는 모델계수 a 및 b 의 영향을 모두 받는 것으로 나타났다. 즉 시그모이달 함수는 동탄성계수의 크기와 형상에 각 모델계수가 서로 연관되어 영향을 미치고 있어서 각 모델계수의 물리적 의미를 명확하게 설정하기 힘든 단점이 있음을 확인하였다.

3. 제안된 수정 Ramberg-Osgood 모델의 계수는 서로 분리되어 있어서 메스터 곡선에 대한 영향요소를 서로 분리하여 평가할 수 있음을 확인하였다. 또한 각각의 모델계수의 물리적 의미가 명확하게 구분되기 때문에 아스팔트 혼합물 동탄성계수 특성을 직접적으로 표현하는데 매우 유용할 것으로 판단된다.
4. 제안된 수정 Ramberg-Osgood 모델에서 모델계수 E_{max} 은 최대동탄성계수 값과, 모델계수 E_{min} 은 최소 동탄성 값과, 모델계수 C 는 메스터커브형상의 수평방향 이동정도, 모델계수 R 은 메스터곡선 형상의 기울기와만 관련되어 있음을 확인하였다. 특히 수평방향의 이동을 표현하는 모델계수 C 는 시간-온도 전환계수 a_T 와 물리적 의미가 유사하기 때문에 향후 두 계수를 통합하는 모델 개발 가능성이 높은 것으로 판단된다.

참고문헌

- 건설교통부 (2007), “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구; 설계입력변수 정량화; 아스팔트 포장재료 물성정량화”, KPRP-G-07.
- 김낙석 (2006), “다양한 Sinusoidal 하중을 받는 아스팔트 혼합물의 Moduli 값에 대한 비교연구” 한국방재학회논문집, vol.6, no.1, pp. 39-48.
- 김용석 (2000) “지반의 비선형 특성이 수평방향 운동을 받는 기초지반체의 동적강성에 미치는 영향” 한국지진공학회논문집, vol.4, no.3, pp. 55-66.
- 김현오, 이관호, 김준기 (2005) “아스팔트 혼합물의 동



탄성계수 마스터 곡선” 한국도로학회학술발표회논문집, pp. 177- 182.

김현오, 이종석, 이관호 (2004) “하중-온도 중첩원리를 이용한 표층용 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 시험 방법 및 해석” 대한토목학회논문집 24권 3D호, pp. 395-404.

문성호 (2004) “AASHTO 2002 Design Guide에서 제시하는 아스팔트 동탄성계수” 한국도로학회지 vol.6, no.3, pp. 82-84.

한국지반공학회, (2006) “지반구조물의 내진설계, 지반공학 시리즈 8” 구미서관, ISBN 89-8225-535-4.

Christensen, D.W., Jr, T. Pellinen, and R.F. Bonaquist (2003) “Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete” *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, vol.72, pp. 97-121.

Dongre, R., L. Myers, J. D' Angelo, C. Paugh, J. Gudimettla (2005) “Field Evaluation of Witczak and Hirsch Models for Predicting Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt” *Presentation at Association of Asphalt Paving Technologists*.

Kweon G. C. and Kim Y. R. (2006) “Determination of Asphalt Concrete Complex Modulus with Impact Resonance Test.” *Transportation Research Record 1970*, pp. 151-160.

Witczak, M.W. (2000) “Simple Performance Test: Test Results and Recommendations. NCHRP 9-19 Interim Task C Report, *Privileged Document by Transportation Research Board*.

접 수 일: 2008. 2. 27
심 사 일: 2008. 3. 21
심사완료일: 2008. 10. 30