Int. J. Highw. Eng. Vol. 18 No. 4 : 37-45 AUGUST 2016
http://dx.doi.org/10.7855/IJHE.2016.18.4.037

충격공진시험을 활용한 얇은 원판형 아스팔트 콘크리트 시편의 탄성계수 결정

Determination of Dynamic Modulus of Thin-Disk-Shaped Asphalt Concrete Specimens Using Impact Resonance Test

김 다 혜 Kim, Dahae | 노스캐롤라이나 주립대학교 토목공학과 · 공학박사 (E-mail : dkim15@ncsu.edu)
임 정 혁 Im, Jeong Hyuk | 정회원 · 경기도 건설국 건설안전과 주무관 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : jhim@gg.go.kr)
김 영 수 Kim, Y. Richard | 정회원 · 노스캐롤라이나 주립대학교 토목공학과 · 공학박사 · 석좌교수 (E-mail : kim@ncsu.edu)

ABSTRACT

PURPOSES : The objective of this study was to develop an impact resonance (IR) test procedure for thin disk-shaped specimens in order to determine the $|E^*|$ and phase angle values of various asphalt mixtures.

METHODS : An IR test procedure was developed for evaluating thin disk-shaped specimens, in order to determine the dynamic modulus ($|E^*|$) of various asphalt mixtures. The IR test method that was developed to determine the elastic modulus values of Portland cement concrete was evaluated, which method uses axisymmetric flexural vibration proposed by Leming et al. (1996). The IR tests were performed on three different mixtures of New York with varying nominal maximum aggregate sizes (NY9.5, NY19, and NY25) at six different temperatures (10 - 60℃). The $|E^*|$ values obtained from the IR tests were compared with those determined by the commonly used AASHTO T342-11 test.

RESULTS AND CONCLUSIONS : The IR test method was employed to determine the $|E^*|$ values of thin-disk-shaped specimens of various asphalt mixtures. It was found that the IR test method when used with thin disk-like specimens is a simple, practical, and cheap tool for determining the $|E^*|$ values of field cores. Further, it was found the $|E^*|$ values obtained from the IR tests using thin disk-like specimens were almost similar to those obtained using the AASHTO T342-11 test.

Keywords
dynamic modulus ($|E^*|$), impact resonance (IR), phase angle, thin-disk-shaped specimens

Corresponding Author : Im, Jeong Hyuk, Ph.D., Public Officer
Construction & Safety Division, Gyeonggi, Provincial Government,
1, Cheongsa-ro, Uijeongbu-si, Gyeonggi-do, 11780, Korea
Tel : 82.31.8030.3846 Fax : 82.31.8030.3639
E-mail : jhim@gg.go.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received May. 12, 2016 Revised May. 26, 2016 Accepted Jun. 20, 2016

1. 서론

아스팔트 혼합물의 동탄성계수(Dynamic modulus, $|E^*|$)는 아스팔트 혼합물의 점탄성적인 특성을 모사할 수 있는 물성치로, 다양한 온도, 하중, 속도 조건에서 재료의 거동을 예측할 수 있는 장점이 있어 역학적인 아스팔트 포장 해석에서 매우 중요한 입력변수이다. 그러나 동탄성계수 시험(Dynamic Modulus Test)은 고가의 장비를 사용하고 숙련자의 시편제작이 필요하며, 시험시간이 매우 긴 문제점이 있다(Kwon et al. 2006).

충격공진시험(Impact Resonance Test)은 아스팔트의 동탄성 계수를 측정할 수 있는 대안시험법으로, 시험이 비교적 용이하며, 시험시간이 매우 짧은 비파괴 시험

방법이다. 기존의 연구에서는 동탄성계수 시험에 보통 사용하는 형태인 원통형의 아스팔트 시편(100×150㎜)에 충격공진시험을 적용하여 시험방법을 검증한 바 있다(Kwon et al. 2006, Lacroix 2009). 그러나 원통형 아스팔트 시편을 사용한 충격공진시험법은 일반적인 포장층의 두께가 보통 10㎝ 이하로 얇은 점을 고려할 때 현장시편을 사용할 수 없는 문제점이 있다.

본 연구에서는 얇은 콘크리트 시편의 탄성계수 측정을 위해 개발된 방법 중 하나인 Leming(1996)의 충격공진시험 방법을 아스팔트 시편에 적용하여 그 가능성을 검증하고, 얇은 아스팔트 시편의 동탄성계수측정을 위한 실험법을 개발하고자 한다. 충격공진시험을 통한 얇은 아스팔트 시편의 동탄성계수는 AASHTO TP342-11 시험법에 의한 동탄성계수 값과 비교하여 제안된 시험법의 정확성을 검증하였다.

2. 문헌고찰

2.1. 동탄성계수 (Dynamic Modulus)

동탄성계수($|E^*|$, Dynamic Modulus)는 위상각(ϕ, Phase Angle)과 함께 동탄성계수시험(Complex Modulus Test)에서 얻을 수 있는 물성치로 아스팔트 혼합물의 점탄성적인 특성(Linear Viscoelastic)을 묘사하며 다양한 온도, 하중, 속도 조건에서 재료의 거동을 예측할 수 있는 장점이 있어 역학적인 아스팔트 포장 해석에 있어서 매우 중요한 입력변수이다.

아스팔트 혼합물의 점탄성 재료의 강성은 일반적으로 복소탄성계수(E^*)로 표현된다. 복소탄성계수(E^*, Complex Modulus)는 Eq. (1) 에 정의된 바와 같이 탄성부분 즉, 저장되는 부분 (E', storage modulus)과 감쇠부분 즉, 손실되는 부분 (E'', loss modulus)으로 나뉘어진다.

$$E^* = E' + E'' \tag{1}$$

where,

E^* = complex modulus

E' = storage modulus, elastic modulus,

E'' = loss modulus, and

i = $\sqrt{-1}$.

E^* 의 크기를 동탄성계수($|E^*|$, Dynamic Modulus)라고 하며, 다음 Eq. (2)와 같이 정의된다.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \tag{2}$$

where,

$|E^*|$ = dynamic modulus,

σ_0 = peak-to-peak stress amplitude, and

ϵ_0 = peak-to-peak strain amplitude.

위상각(Phase Angle)은 Eq. (3)과 같이 정의된다.

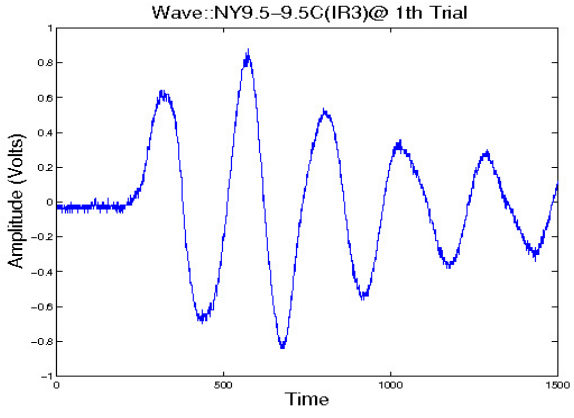
$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{E''}{E'}\right) \tag{3}$$

where,

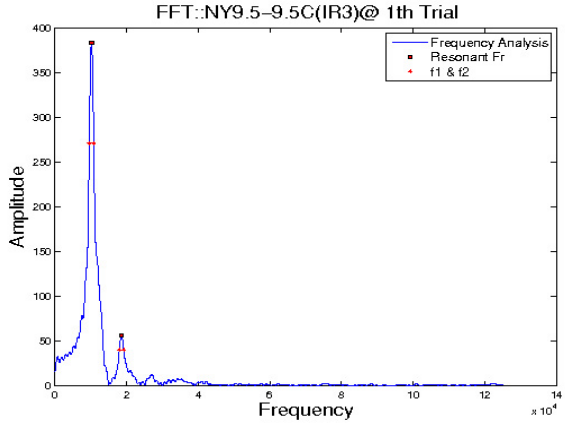
ϕ = phase angle.

2.2. 충격공진시험

충격공진시험은 쇠공(Steel Ball)으로 시편의 한쪽 끝에 충격하중을 재하하고 이때의 반응을 다른 쪽에서 측정하여 전단파의 속도로부터 공진주파수(Resonance Frequency)와 감쇠비(Damping Ratio)를 측정하는 비파괴 시험법이다. 이 시험법은 물체의 기본 물성과 동적 특성을 바탕으로 물체의 탄성계수를 구할 수 있다.



(a) Time Domain



(b) Frequency Domain

Fig. 1 Example of Signals

충격공진시험법은 충격하중을 시편에 발생시켰을 때 시편의 반응을 가속도계 센서(Accelerometer)를 사용하여 획득하는 것이다. 충격하중을 시편에 재하하면 Fig. 1(a)와 같은 시간영역의 반응이 측정되고, 측정된 신호는 FFT(Fast-Fourier Transform) 기법을 이용하여 Fig. 1(b)와 같은 주파수 영역신호(주파수 반응곡선)를 얻게 된다. 주파수반응곡선을 이용하여 충격공진시험의 가장 중요한 인자인 공진주파수 및 감쇠비를 얻을 수 있다. Kweon(2006)의 연구에서 아스팔트 콘크리트 재료에 대한 충격공진시험의 해석기법이 개발되었고, 원통형 시편(Cylindrical Specimen)을 사용하여 적용성을 확인하였다.

2.3. Leming et al. 연구의 분석

Leming(1996)은 얇은 디스크 형태의 시멘트 콘크리트 시편의 탄성계수 측정을 위해 충격공진시험을 제안하였다. 시편을 부드러운 수평 지지대 위에 수평으로 거치하고, 시편 위쪽 중앙에 쇠공을 떨어뜨려 충격하중을 재하한 후, 아래쪽 중앙에 가속도계를 연결하여 주파수 영역신호를 얻는 방법이다. 아스팔트 혼합물의 탄성부분 즉, 저장되는 부분(Storage Modulus)은 Hutchinson(1979)이 제안한 축대칭 원판의 굽힘 자유진동 해석(Axisymmetric Flexural Vibration of Thick Free Circular Plate)을 기본으로 한 원판이론(Plate Thoery)에 의해 결정된다. 충격공진시험 후 다음 Eq. (4)를 이용하여 시편의 탄성부분을 구할 수 있다.

$$E' = 2(1+\nu)\rho\left[\frac{\pi f d}{\Omega_0}\right]^2 \tag{4}$$

where,

Ω_0 = frequency parameter associated with the fundamental mode of vibration,

ν = Poisson's ratio,

ρ = mass density of the disk,

f = first natural frequency, and

d = diameter of the disk.

감쇠비(ξ)는 Fig. 2에 설명된 Half-Power Bandwidth 방법으로 결정되며, Eq. (5)에 정의된 바와 같이 주파수 반응곡선의 최대 진폭(A)에서의 주파수를 f_n, 진폭의 절반이 되는 주파수를 각각 f_1, f_2 로 정의한다.

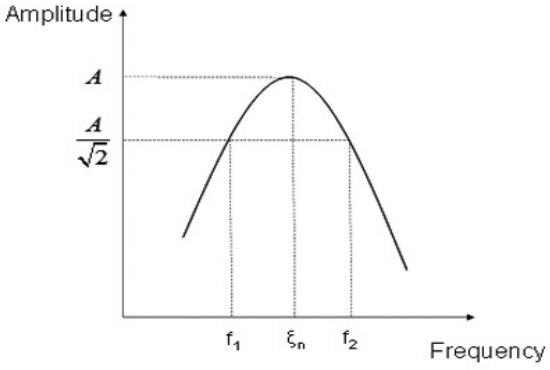


Fig. 2 Half-power Bandwidth Method

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{2f_n} \tag{5}$$

위상각은 주파수 반응곡선의 감쇠비로부터 Eq. (6)을 이용하여 계산할 수 있다(Clough et al., 1993).

$$\phi = \tan^{-1}(2\xi) \tag{6}$$

충격공진시험을 통해 Eq. (4)에 정의된 아스팔트 혼합물의 탄성부분 즉, 저장되는 부분(E')과 Eq. (6)의 위상각(ϕ)이 결정되면 Eq. (7)에 의해 아스팔트 시편의 동탄성계수를 정의할 수 있다.

$$|E^*| = \frac{E'}{\cos(\phi)} \tag{7}$$

3. 연구목적 및 실험계획

3.1. 연구목적

본 연구에서는 현장에서 채취한 코어 시편에 충격공진시험을 사용할 수 있도록 아스팔트 콘크리트의 얇은 시편에 적용가능한 충격공진시험방법을 제안하였다. 이를 통해 계산된 동탄성계수 값을 AASHTO TP 342-11 시험법을 통하여 얻어진 동탄성계수값과 비교하여 제안된 시험방법의 정확성을 검증하고자 하였다.

3.2. 실험시편 제작

시험에 사용된 모든 아스팔트 시편은 Servopac Superpave Gyratory Compactor를 사용하여 직경 150㎜, 높이 178㎜의 크기로 제작하고 비교적 일정한 아스팔트 시편의 공극률을 얻기 위해 코어 및 절삭하여 사용하였다. 얇은 아스팔트 시편에 충격공진시험의 적용

성을 평가하기 위해 시편을 직경 100mm, 높이 25mm로 얇게 잘라 충격공진시험을 수행하였다. 또한, 일반적인 아스팔트 시편 사이즈인 직경 100mm, 높이 150mm의 시편을 AASHTO T 342-11에 따라 동탄성계수 시험을 수행하고, 충격공진시험으로 계산된 동탄성계수 값과 AASTHO T 342-11를 통하여 얻어진 동탄성계수 값을 비교하였다. Fig. 3은 시험에 사용된 시편에 대한 요약 정보를 보여준다.

본 연구에서는 충격공진시험의 영향요소 검토를 위해 최대골재입경 9.5mm, 19mm 및 25mm의 세 가지 뉴욕 아스팔트 혼합물을 사용하였으며, PG 64-22 바인더를 사용하였다.

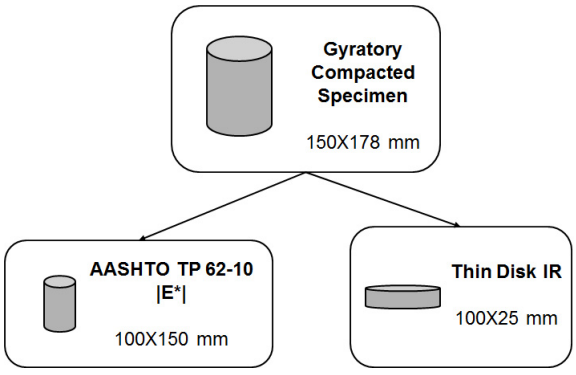


Fig. 3 Specimen Preparation

3.3. 실험방법

3.3.1. 충격공진시험

얇은 아스팔트 시편에 대한 충격공진시험 장치의 전체적인 구성은 Fig. 4와 같다. 시편 거치 장치(Poly-Urethane Form), 충격하중 재하장치(Steel Ball and IR Test Device), 동적신호 획득센서(Accelerometer), 동적신호 측정장치(Signal Conditional) 및 신호처리 장치(Oscilloscope)로 구성된다.

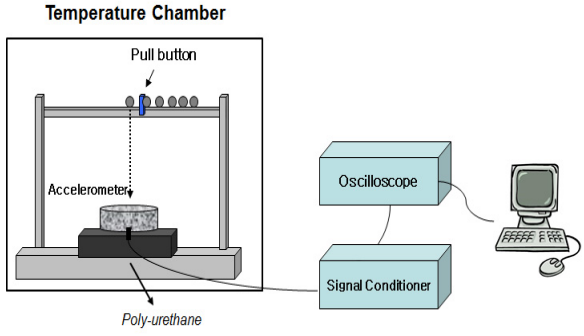
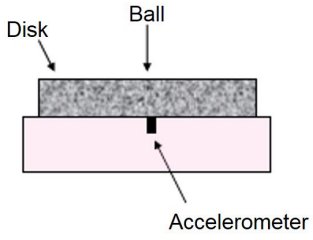
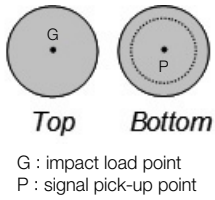


Fig. 4 Schematic of IR Testing for Thin Disk Shaped Specimens

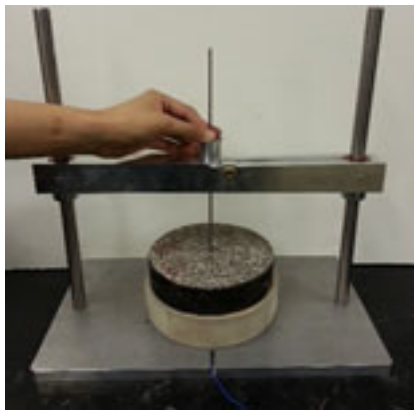
Fig. 5와 같이 아스팔트 시편을 부드러운 폴리우레탄폼(Poly-Urethane Foam) 위에 거치하고 직경 16mm 쇠구슬을 이용하여 충격하중을 재하하였다. 이 때 Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 시편의 아래쪽에 폴리우레탄폼을 절삭하여 설치한 가속도계를 통해 반응신호를 획득한다. 시편의 고유 진동을 최대한 정확하게 획득하기 위해서는 Fig. 5(b)의 쇠구슬이 떨어지는 위치 및 신호 획득 지점이 매우 중요하며, 시험 시 쇠구슬이 시편위로 낙하하는 지점을 확인하였다. Fig. 5(c)의 충격공진시험 장치는 버튼을 눌렀을 때 쇠구슬이 일정한 높이에서 정확히 시편 중심에 떨어져 하중을 재하하도록 고안되었다.



(a) Test Set-up



(b) Signal Pick-up and Impact Points



(c) Test Device

Fig. 5 IR Test Set-Up Summary

본 연구에서는 10℃~60℃의 온도범위에서 충격공진시험의 적용성을 평가하였다. Fig. 5(c)의 충격공진시험 장치를 항온챔버에 최소 2시간 이상 거치시켜 시편 내부의 온도가 시험 온도에 도달하도록 한 후, 각각의 시험 온도에서 각 시편마다 10회의 시험을 수행하였다. 충격공진시험은 시험시간이 1회 당 10초 이내로 매우 짧은 장점이 있어 10회의 반복시험을 하더라도 최대 5분 이내에 실험을 완료할 수 있다. 비파괴 시험의 이점 덕분에 아스팔트 콘크리트 시편의 강도가 가장 높은 온도인 10℃에서부터 60℃까지 동일한 시편으로 실험하였다.

3.3.2. AASHTO T 342-11 (AASHTO, 2011)

아스팔트 콘크리트의 충격공진시험을 통해 얻은 동탄성계수값의 정확성 평가를 위해 아스팔트 콘크리트의 보편적인 동탄성계수 측정방법인 AASHTO T 342-11의 값과의 비교는 필수적이다. 본 연구에서는 Fig. 6의 Asphalt Mixture Performance Tester(AMPT) 장비를 사용하여 AASHTO T 342-11 방법에 따른 동탄성계수값을 측정하였다. 이를 위해 각 혼합물마다 지름 100mm 높이 150mm의 시편 세 개를 준비하였으며, 시험 후 동탄성계수 평균값을 비교하였다. Table 1은 충격공진시험법과 AASHTO T 342-11 방법을 자세하게 비교하여 보여준다.

Fig. 6 Asphalt Mixture Performance Test (AMPT)

Table 1. Summary of Tests Performed in This Study

Test method	Impact resonance	AASHTO T 342-11
Mixtures	NY9.5, NY19, NY25	
Temp. (℃)	10, 20, 30, 40, 50, 60	5, 20, 40, 54
Frequency	Table 2	25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1
Sample size (diameter×height) (mm)	100×25	100×150
Testing time	1 days	3 days
Number of samples	4	3

4. 실험결과 및 분석

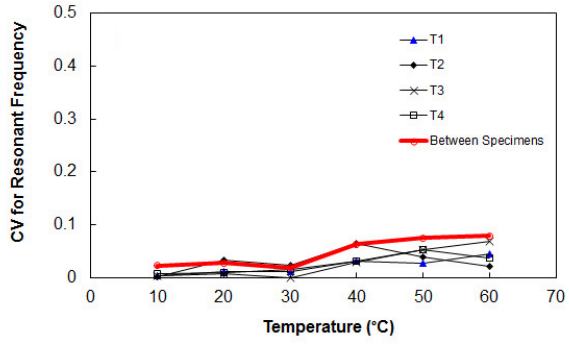
4.1. 충격공진시험의 반복성에 대한 평가

충격공진시험에서 합리적으로 공진주파수와 감쇠비를 결정하기 위해서는 Fig. 1(b)와 같은 이상적인 주파수영역의 신호를 획득하여야 한다. Fig. 1(b)의 첫 번째 최고 진폭에 해당하는 주파수인 공진주파수와 부근의 형상이 감쇠비를 결정한다. 이 모든 해석 과정은 MATLAB® 프로그램을 이용하였다.

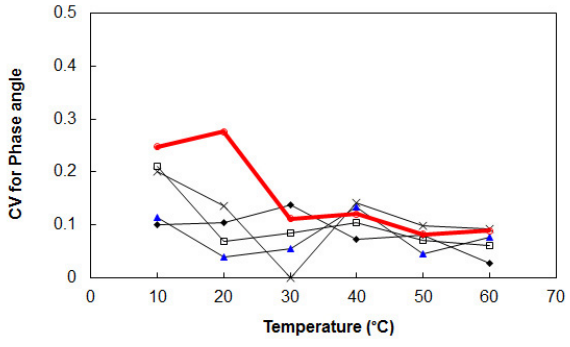
충격공진시험의 반복성 검증을 위해 공진주파수 및 감쇠비의 변동계수(Coefficient of Variation)를 비교하였다. 변동계수는 표준편차(σ, Standard Deviation)와 평균(μ, Mean)의 비율이며, Eq. (8)과 같이 정의된다.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \tag{8}$$

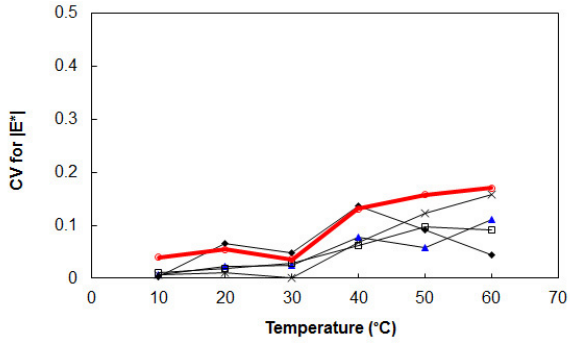
Fig. 7은 NY9.5 혼합물의 실험결과로 각각의 온도에서 얻은 공진주파수 및 위상각의 변동계수를 보여준다. 공진주파수 및 감쇠비는 아스팔트의 동탄성계수 결정을 위해 가장 중요한 입력변수로 각각 아스팔트 콘크리트 혼합물의 탄성부분(E') 및 위상각(ϕ)을 결정한다.



(a) Resonant Frequency



(b) Damping Ratio



(c) Dynamic Modulus

Fig. 7 CVs of NY9.5 Mixture at Different Temperatures

Fig. 7(a)의 공진주파수의 변동계수는 10% 이하로 전반적으로 매우 좋은 반복성을 보여주었으나, Fig. 7(b)의 위상각은 10℃ 및 20℃의 낮은 온도에서 그 반복성이 공진주파수만큼 우수하지 않았다. 이는 실험적 오류에 그 원인이 있으며, 가속도계와 시편간의 불안전한 접촉 및 시스템의 전기적 잡음 등의 이유가 복합적으로 작용한 것으로 판단된다. 하지만, 본 연구에서는 실험의 변동성이 큰 경우더라도 10개의 타격 횟수에서 획득한 모든 신호를 사용하여 결과를 분석하였으며, 추후 충격공진 실험 시 신호 획득의 오류 개선을 위한 추가 실험이 필요한 것으로 생각된다.

Fig. 7(a)는 시험 온도가 높아질수록 각 샘플 및 샘플간의 공진주파수 분산도가 커짐을 보여준다. 이는 온도가 올라감에 따라 아스팔트 재료의 점성이 증가하고 그에 따라 에너지가 감쇠하는 것으로 설명할 수 있다. Fig. 7(b)는 감쇠비의 변동계수를 보여주며, 공진주파수보다는 큰 오차를 보여주고 있다. 일반적인 실험과 비교하면 매우 큰 수준의 오차는 아니지만 매우 뛰어난 반복성이 장점인 충격공진시험의 특성을 고려한다면 낮은 온도에서의 높은 변동계수는 개선되어야 한다. 그러나 Fig. 7(a)의 공진주파수와 Fig. 7(b)의 감쇠비로 계산된 Fig. 7(c)의 동탄성계수는 감쇠비보다는 작은 오차를 보여주고 있다. 특히 30℃ 이하의 낮은 온도에서는 실험 반복성이 매우 우수하였다. 충격공진시험을 활용한 아스팔트의 동탄성계수 값 결정은 다음 장에서 자세히 설명하였다.

Table 2는 각 실험온도에서 충격공진시험의 주파수 반응곡선으로부터 얻은 각 샘플의 공진주파수 및 감쇠비 결과를 보여준다.

Table 2. IR Test Results for NY9.5 Mixture

Resonant frequency				
Temp.(℃)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
10	10126	10538	10490	10024
20	9276	9388	9756	8698
30	7938	7986	7070	7958
40	7034	7744	7454	6860
50	5480	6186	5980	5342
60	4202	4394	4924	4682
Damping ratio				
Temp.(℃)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
10	0.05	0.05	0.05	0.06
20	0.08	0.09	0.08	0.07
30	0.10	0.10	0.09	0.10
40	0.15	0.15	0.16	0.16
50	0.22	0.23	0.22	0.21
60	0.34	0.30	0.32	0.29

Table 2에서 온도가 증가함에 따라 공진주파수는 감소하고 감쇠비는 증가함을 확인할 수 있으며, 이는 온도가 증가할수록 아스팔트 콘크리트 재료의 강성이 감소하고 위상각이 급격히 증가하는 특성과 관련이 있다고 판단된다.

4.2. 충격공진시험을 적용한 아스팔트 콘크리트 동탄성계수 결정 가능성 평가

충격공진시험의 반복성이 매우 좋더라도 이를 통해 정확한 동탄성계수 값을 측정할 수 없다면 그 시험은 무의미하다. 따라서 충격공진시험으로부터 얻은 동탄성계수와 대표적인 동탄성계수 측정방법인 AASHTO T 342-11로부터 얻은 동탄성계수 값의 비교가 필수적이다.

Table 2에 나타낸 바와 같이 충격공진시험으로 측정된 공진주파수가 매우 높기 때문에, 충격공진시험의 주파수는 같은 온도에서 측정된 T342-11의 주파수보다 훨씬 높다. 따라서, 충격공진시험을 통한 동탄성계수와 AASHTO T 342-11방법을 통한 동탄성계수 값의 직접적인 비교를 위해 각 시험의 주파수는 Eq. (9)에 따라 환산주파수(Reduced Frequency)로 변환하였다.

$$f_R = a_T \times f \tag{9}$$

where,

f_R = reduced frequency,

a_T = time-temperature shift factor, and

f = frequency, Hz.

이 때, 공진 주파수를 환산 주파수로 변환하기 위해서는 Time-Temperature Shift Factor가 필수적이다. 이는 동탄성계수 시험을 통해서 얻을 수 있는 값이지만, 충격공진시험의 장점인 간편성을 생각한다면 추가 실험을 통해 이를 얻는 방법은 지양하여야 한다. Lacroix(2009)는 평균 아스팔트 바인더 Shift Factor와 평균 아스팔트 혼합물 Shift Factor를 적용하여 주파수를 환산하였으며, 평균 바인더 Shift Factor를 사용하였을 때의 결과가 AASHTO TP 342-11를 통해 얻은 Shift Factor를 사용했을 때와 통계적으로 다르지 않았음을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서는 Sakhaei Far(2011)가 제안한 Eq. (10)의 평균 바인더 Shift Factor를 이용하여 충격공진시험의 측정값을 환산 주파수로 변환하였다.

$$\log(a_T) = 0.0011\,T^2 - 0.1727\,T + 3.018 \tag{10}$$

where,

reference temperature = 20℃

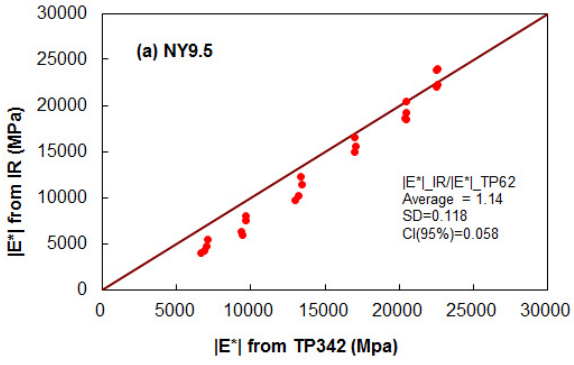
충격공진시험을 통한 아스팔트 콘크리트의 동탄성계수는 주파수 반응곡선에서 얻은 공진주파수를 Eq. (4)에, 감쇠비로부터 계산된 위상각 값을 Eq. (7)에 입력하여 계산한다. 입력변수 중 하나인 아스팔트의 온도별 포아송 계수는 Table 3과 같이 가정하였다(Whitmoyer et al. 1994).

Table 3. Poisson's Ratio for E^* Calculation for the Equation (4) (Whitmoyer et al. 1994)

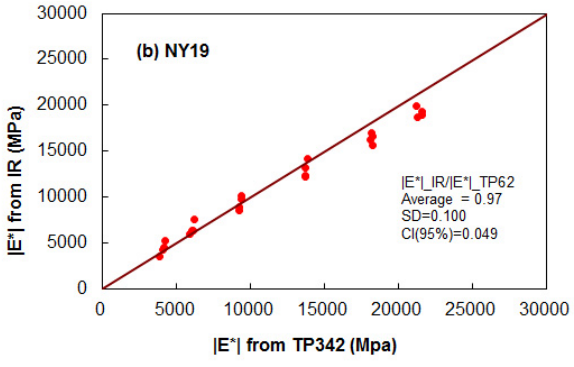
Temp. (℃)	Poisson's ratio (ν)
10	0.28
20	0.30
30	0.33
40	0.39
50	0.42
60	0.45

본 연구에 사용된 세 가지 아스팔트 혼합물(NY9.5, NY19, NY25)의 동탄성계수값을 충격공진시험 및 AASTHO T 342-11의 두 가지 방법으로 실험하고 환산된 주파수에서의 동탄성계수값을 비교하였다. 다음 Fig. 8은 동일한 환산 주파수에서 X축의 AASHTO T 342-11을 통해 얻은 동탄성계수값과 Y축의 충격공진시험을 통해 얻은 동탄성계수값을 비교하여 보여주고 있다. 낮은 온도에서 높은 강도를 보여주는 아스팔트 혼합물의 특성을 고려하면, Fig. 8의 각 오른쪽 끝 데이터 포인트에서부터 차례로 10℃~60℃의 충격공진시험 결과 값임을 확인할 수 있다. Fig. 8에서 전반적으로 충격공진시험으로 얻은 동탄성계수값은 AASHTO T 342-11로 얻은 동탄성계수값과 비교적 일치하는 것으로 판단된다. 특히, 30℃ 이하의 낮은 온도에서는 그 정확성이 높았다. 다만, Fig. 8(c)에서 보는 바와 같이 공칭 최대 골재 치수가 25mm로 큰 경우 샘플간의 오차가 큰 것으로 판단된다.

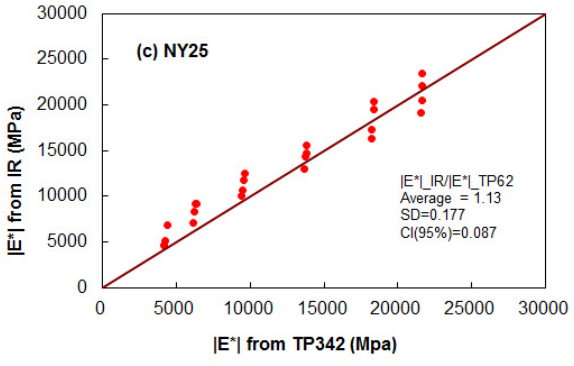
본 연구에서는 충격공진시험의 온도별 결과 분석을 위해 매 10℃마다 시험을 실시하였지만, 온도조건의 변화가 실험시간의 대부분을 차지하는 충격공진시험의 특성 및 높은 온도에서 실험의 반복성이 감소한다는 점을 고려하여 10℃, 30℃, 50℃의 세 가지 온도에서 충격공진시험을 실시하는 것을 추천한다.



(a) NY9.5



(b) NY19



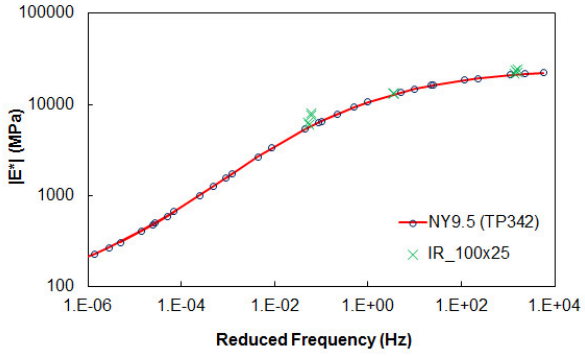
(c) NY25

Fig. 8 Comparison of |E*| Measured from IR Tests and T 342-11 Tests

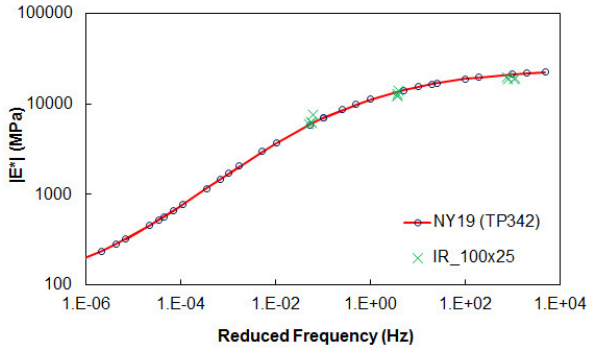
Fig. 9는 AASHTO T 342-11을 통해 얻은 마스터커브와 추천된 세 가지 온도에서의 충격공진시험을 통해 얻어진 동탄성계수 결과를 보여준다.

Fig. 9에 나타난 바와 같이 10℃, 30℃, 50℃의 충격공진시험의 동탄성계수값은 AASHTO T 342-11로 얻은 동탄성계수 마스터커브와 비교적 일치하는 것으로 판단된다. 하지만, 50℃ 충격공진시험에서 얻어진 결과는 동탄성계수를 높게 예측하는 경향이 발견되었다. 충격공진시험은 낮은 주파수 대역의 동탄성계수 값을 측정할

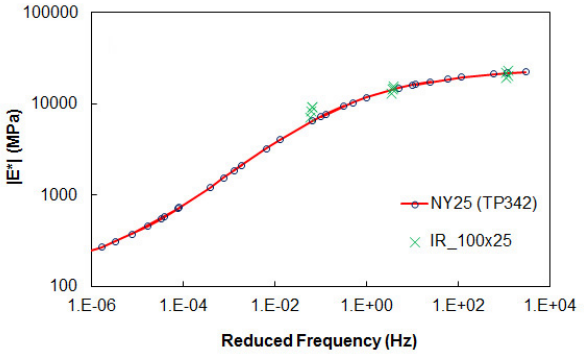
수 없고, 높은 실험온도에서 실험의 정확성이 떨어질 수 있는 단점이 존재하기 때문에, 보다 정확한 동탄성계수 결과를 얻기 위해서는 동탄성계수 예측방정식 등의 적용과 이의 수정 및 보완이 필요할 것으로 판단된다.



(a) NY9.5



(b) NY19



(c) NY25

Fig. 9 Comparison of |E*| Measured from IR Tests and Mastercurve Obtained from T 342-11 Tests

5. 결론

본 연구에서는 얇은 콘크리트 시편의 탄성계수 측정을 위해 개발된 방법 중 하나인 Leming(1996)의 충격공진시험(Impact Resonance) 방법의 아스팔트 시편에의 적용가능성을 검증하였다. 또한 얇은 아스팔트 시편에의 충격공진 시험의 정확성을 검증하기 위해 AASHTO T 342-11의 동탄성계수값과 비교하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론은 도출하였다.

1. 충격공진시험을 통한 아스팔트 시편의 동탄성계수 측정 방법은 간단하고, 실용적이며, 경제적이다. 특히 얇은 콘크리트 시편의 충격공진시험은 현장시편에 적용가능한 장점이 있을 것으로 판단된다.
2. 모든 조건이 동일한 상태에서 충격공진시험 자체의 반복성에 따른 공진주파수의 변동계수는 10% 이하로 시험의 반복성이 매우 우수함을 확인하였다. 위상각의 경우 그 변동계수가 20% 이하였으며, 추후 실험 시 정확한 신호 획득을 위한 추가실험이 필요한 것으로 판단된다.
3. NY9.5, NY19, NY25의 세 가지 혼합물에 충격공진시험을 통한 동탄성계수값은 AASHTO T 342-11로 얻은 동탄성계수값과 비교적 일치함을 확인하였다. 다만, 공칭 최대 골재 치수가 25mm로 큰 경우 샘플간의 변동성이 커짐을 확인하였다.
4. 온도조건의 변화가 실험시간의 대부분을 차지하는 충격공진시험의 특성을 고려하여 10℃, 30℃, 50℃에서 충격공진시험을 실시하는 것을 추천한다.
5. 충격공진시험은 낮은 주파수 대역의 동탄성계수값을 측정할 수 없는 단점이 있기 때문에, 추가 연구를 통하여 동탄성계수 예측방정식 등을 적용하고 수정, 보완함으로써 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있도록 하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 Federal Highway Administration의 연구과제인 "Hot Mix Asphalt Performance-Related Specifications Based on Viscoelastoplastic Continuum Damage Models (No. DTFH61-08-H-00005)"와 국토교통부의 정부수탁과제인 "기후변화에 대비한 도로포장 시공 품질관리시스템 개발연구(6차)"의 연구지원으로 수행되었으며 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

REFERENCES

American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) (2011). AASHTOT 342-11: Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures. AASHTO, Washington, D.C.

Clough, R. W. and J. Penzien, (1993). Dynamics of Structures, McGraw-Hill, Inc., Second Edition, ISBN 0-07-011394-7.

Hutchinson, J.R. (1979). Axisymmetric Flexural Vibrations of a

Thick Free Circular Plate. Journal of Applied Mechanics, ASME, 46, pp.39-144.

Kweon, G. and Y. R. Kim (2006). Determination of the Complex Modulus of Asphalt Concrete Using the Impact Resonance Test. Transportation Research Record 1970, National Research Council, Washington, D. C., pp.151-160.

LaCroix A., Y.R. Kim, and M.S. Sakhaei Far (2009). Constructing the Dynamic Modulus Mastercurve Using Impact Resonance Testing. Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.78, pp.67-102.

Leming, M.L. and J. Nau (1996). Nondestructive Determination of the Dynamic Modulus of Concrete Disks. ACI Materials Journal, 95-M6, pp.50-57.

Sakhaei Far, M. S. (2011). Development of New Dynamic Modulus Predictive Models for Hot Mix Asphalt Mixtures. Ph.D. Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, NC.

Whitmoyer, S.L. and Y.R. Kim (1994). Determination of Elastic Properties of Asphalt Concrete Using Vibrational Analysis. ASTM Journal of Testing and Evaluation, 22(2), pp.139-148.