아스팔트 노반 설계를 위한 간이 비파괴시험에 의한 동탄성계수 취득방법 적합성 분석

Application of a Simple Non Destructive Test Method to Obtain the Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures used for an Asphalt Trackbed Foundation

임유진* · 이성혁 · 이진욱 · 이병식

Yujin Lim · SeongHyeok Lee · JinWook Lee · ByeongSik Lee

Abstract An asphalt trackbed is to be adapted in Korea to provide better bearing capacity and stability to the track and a comfortable ride to passengers. The dynamic modulus of Hot Mixed Asphalt(HMA) mixes is a critical design input parameter to determine the thickness of the asphalt trackbed. In this study, impact resonant tests and ultrasonic test methods are designed to obtain the dynamic modulus. These test methods are also verified to check the effectiveness of constructing a master curve of the dynamic modulus over a wide range of frequencies and temperatures. The test results are compared to the computed dynamic modulus using AASHTO 2002 and the KPRP's proposed model. It can be concluded that the proposed simple test methods are effective to obtain the dynamic moduli of the asphalt mixes for the design of an asphalt trackbed foundation.

Keywords : Asphalt Trackbed, Dynamic Modulus, Impact Resonant Test, Ultrasonic test

초 록 지지력과 주행쾌적성을 개선시키기 위하여 아스팔트노반의 도입이 고려되고 있다. 다져진 아스팔트 혼합물의 동탄성계수는 아스팔트 노반설계에 있어 매우 중요한 설계입력요소이다. 동탄성계수(E^*)를 획득하기 위하여 사용할 수 있는 간이 시험법으로서 소형충격공진시험 및 초음파시험의 사용적합성을 분석하였다. 간이 시험법에 의한 시험결과와 신뢰도를 검토하기 위하여 혼합물의 동탄성계수 예측식으로 사용되는 AASHTO 2002 MEPDG 제안식 및 한국형 포장설계법(KPRP)에서 제시한 예측식 계산 결과와 간이 비파괴시험법에 의한 취득결과를 비교, 분석하였다. 분석한 실험결과를 추가시험과 보완을 통해 철도 아스팔트 노반설계를 위한 간이시험법으로 적용할 수 있을 것으로 판단되었다.

주요어 : 아스팔트 노반, 동탄성계수, 소형충격공진시험, 초음파시험

1. 서 론

철도는 육상교통수단 중 국가경제활동의 이동과 접근을 제 공하는 중요한 사회 간접자본 시설이다.

최근 철도교통량의 급격한 증가와 고속화 등으로 인해 궤도틀림 유발 가능성이 커지고 있어 철도의 안정성 확보를 위한 관련 기술개발이 시급한 실정이다. 특히, 노반을 포함한 궤도하부구조는 철도의 주행 안정성 확보에 있어 가장 중요한 부분이다. 따라서 궤도 공용성 및 주행안정성 개선을 목적으로 독일, 프랑스 등 철도 선진국에서는 아스팔트 노반(Fig. 1)을 개발하여 적용하고 있으며, 최근 국내에서도 이와 같은 목적으로 아스팔트 노반 실용화 관련기술을 개발 중에 있다. 아스팔트 노반의 실용화를 위해서는 국내 철도 교통조건 및 환경조건에 적합한 혼합물의 최적구성비를 확정

하고 이에 기반하여 동탄성계수 등 역학적 특성을 정량화할 필요가 있다.

최근 개발된 바 있는 도로분야의 아스팔트 포장설계법([1], [2])은 모두 아스팔트 혼합물의 동탄성계수(E^*)를 기반으로 포장두께를 설계하는 로직을 선택하였다. 동탄성계수는 아스팔트 혼합물의 피로균열과 영구변형 예측모델 구성에 필수적인 입력 파라미터로 온도 및 하중주파수에 따라 변하는 아스팔트혼합물의 역학적특성을 효과적으로 고려할 수 있는 장점이 있다.

아스팔트 포장층의 구조적 안정성에 있어 가장 크게 영향을 미치는 요소로서 포장두께와 함께 동탄성계수를 들 수 있다[3]. 특히, 특정온도(T_{ref})에서 넓은 대역의 하중주파수에 따른 동탄성계수 마스터커브의 수립과 온도변화를 고려한 동탄성계수의 결정은 역학적 아스팔트 노반두께 결정로직의 수립에 있어 매우 중요하다고 할 수 있다.

동탄성계수는 포장분야에서 원주형 아스팔트혼합물 시편에 대해 다양한 온도 및 하중주파수 대역에서 반복일축압축 시험(Repetitive uniaxial compression test; RUCT)을 실시하

*Corresponding author.

Tel.: +82-42-520-5402, E-mail : yujin@pcu.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2014

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.2.114>

Fig. 1 Typical asphalt trackbed foundation: (a) ballasted asphalt trackbed, (b) asphalt slab trackbed

거나 반복간접인장강도시험(Repetitive indirect tensile test; RIDT)을 실시하여 구한다. 반면 이와 같은 시험법은 매우 고가의 시험장비가 필요하며 복잡한 시험절차와 숙련된 데이터분석이 요구된다.

소형충격공진시험(Impact Resonance Test)은 일반 산업현장에서 다양한 목적으로 공진주파수 획득을 위해 사용되고 있으며 공진주파수를 이용하여 점탄성거동(Visco-Elastic) 특성을 갖는 아스팔트 혼합물의 동탄성계수를 획득할 수 있어 적용성이 있음이 확인되었다([4-6]). 특히, 시편크기나 직경 대비 길이의 비율 즉, 형상비(길이/직경; L/D)의 영향을 고려할 수 있을 경우 원주형시편에 대한 기존 공진시험을 대체할 수 있는 간편한 공진시험법의 개발이 가능할 것으로 보고, 본 연구에서는 동탄성계수 획득을 위한 소형충격공진 시험법의 적용성을 검토하였다.

또한 초음파시험(Ultrasonic Test)을 이용하여 아스팔트포장체의 탄성계수를 측정하는 기술은 이미 보편화 되어있다 [11]. 다만 측정된 탄성계수를 넓은 대역의 하중주파수와 온도변화를 고려할 수 있는 동탄성계수 및 동탄성계수 마스터 커브로 변환하기 위해서는 포아송비와 적절한 scale factor의 고려가 필요하다[7,11].

아스팔트 노반설계법의 주요한 설계입력요소가 되는 동탄성계수(E^*) 획득방법으로서의 두 비파괴시험법의 신뢰도와 사용가능성을 검토하기 위하여 철도레도용 아스팔트 노반 혼합물의 잠정 배합설계를 바탕으로 마살다짐(Martial compaction) 및 선회다짐(Gyratory compaction)으로 제작된 혼합물시편을 이용하여 마살안정도시험, 간접인장강도 시험 등 역학시험을 실시하여 기본적인 역학적 특성을 검토하였다. 역학적 기본 요구특성이 만족된 시편을 대상으로 AASHTO 2002 MEPDG[1]에서 제시한 동탄성계수 예측식모형과 한국형포장설계법(KPRP) 예측식모형[2]을 이용해 구한 계산결과와 비교분석을 실시하였다. 분석결과를 근거로 이와 같은 비파괴시험법으로 동탄성계수를 획득하는데 필요한 상세한 시험절차, 취득로직과 시험데이터 해석방법 및 보정계수(scale factor)를 제시하였다.

2. 노반용 아스팔트 혼합물에 대한 역학적 특성 분석

2.1 동탄성계수

2.1.1 동탄성계수의 의미

동탄성계수는 아스팔트 혼합물과 같이 유변학적 즉, 점탄

성거동 특성을 갖는 재료의 탄성계수를 표현하기 위하여 복소탄성계수(Complex modulus; E^*)의 개념으로 개발되었다. 복소탄성계수는 아래와 같이 정의된다.

$$E^* = E' + iE'' = |E^*|e^{i\delta} \quad (1)$$

여기서, E' 는 보존(또는 실수)탄성계수, E'' 는 손실(또는 허수)탄성계수, δ 는 위상차, $i = \sqrt{-1}$. E^* 의 절대크기를 동탄성계수, $|E^*|$ 라고 하며 응력진폭(σ_0) 및 변형률진폭(ϵ_0) 사이에 아래와 같은 관계를 갖는다.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (2)$$

따라서, 복소탄성계수는 각각 재료에 저장되는 에너지 및 손실되는 에너지와 관련된 부분으로 구성된다. 위상차(δ)와 감쇠계수(damping factor, ξ)는 식 (3)의 관계를 갖는다.

$$\xi = (\tan\delta)/2 = (E''/E')/2 \quad (3)$$

조화운동(oscillatory vibration)을 받는 점탄성거동 재료의 응력~변형률 사이에는 위상차(phase lag)가 발생하며 아래 식 (4) 및 식 (5) 및 Fig. 2와 같이 거동을 설명할 수 있다.

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \sin(\omega t - \delta) \quad (5)$$

여기서, $\sigma(t)$ 는 시간경과에 따른 응력변화, σ_0 는 응력진폭, $\epsilon(t)$ 는 시간경과에 따른 변형률변화, ϵ_0 는 변형률진폭, ω 는 각주파수

Fig. 2 Steady oscillatory vibration in viscoelastic materials

2.1.2 동탄성계수 매스터커브(Dynamic Modulus Master Curve)

동탄성계수는 일반적으로 반복일축압축시험 또는 반복간접인장강도시험에 의해 결정되며 적용 하중주파수는 0.1 ~ 25Hz 대역이다. 동탄성계수는 시간-온도 중첩이론에 의하여 넓은 하중주파수 대역으로 확장할 수 있으며 이때 낮은 온도, 긴 하중재하시간 조건에서 결정된 동탄성계수가 높은 온도, 짧은 하중재하시간 조건에서 획득된 동탄성계수와 동일할 수 있다는 가정이 설정된다. 따라서 유변학적 단순재료(thermorheologically simple material)로 가정된 아스팔트는, 여러 온도의 좁은 주파수 대역에서 측정된 동탄성계수가 단일 온도의 넓은 주파수에서 측정된 동탄성계수와 등가의 관계를 갖게 된다. 이와 같은 특성을 이용하여 동탄성계수 매스터커브를 작성할 수 있으며 특정 아스팔트 혼합물의 하중과 온도와의 상관관계를 규명할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 3과 같이 여러 온도에서 측정된 동탄성계수값을 주파수축을 따라 수평방향으로 이동시키면 단일의 매스터커브를 구할 수 있으며 이때 특정 온도에서의 변환량 즉, 변환계수(shift factor; $a(T)$)는 아래 식과 같은 관계를 가지며 이동된 주파수를 수축주파수(reduced frequency)라 한다.

$$f_{R-T_0} = a(T)f_T \quad (6)$$

여기서, $a(T)$ = 임의 온도 T 에 대한 주파수-온도 변환계수, f_{R-T_0} = 기준온도 T_0 에서의 수축주파수, f_T = 임의 온도 T 에서의 주파수. 일반적으로 저온 및 상온에서의 아스팔트 혼합물의 하중 응답특성은 지수함수형태를 이용하고, 고온에서의 특성 평가시에는 다차원식으로 표현된다. 또한, 일반적으로 변환계수 $a(T)$ 는 아래와 같이 WLF(Williams Landel Ferry) 식 등으로부터 결정할 수 있다[8].

$$\log(a_T) = \frac{C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (7)$$

여기서, C_1 및 C_2 = 결정할 계수. AASHTO 2002 설계법에서 채택된 새로운 매스터커브 작성 방법은 아래 식과 같이 sigmoidal 함수를 이용하는 것이다[9].

Fig. 3 Example of the master curve construction

$$\log(|E^*|) = a + \frac{b}{1 + e^{(\beta - \gamma \log f_{red})}} \quad (8)$$

여기서, a = 최소 값, b = 탄성계수의 가능대역, β 및 γ = 매스터커브의 형상계수. 따라서 미지수가 모두 여섯 개(C_1 , C_2 , a , b , β , γ)가 되어 식 (7) 및 식 (8)이 동시에 여러 온도 및 하중주파수에서 측정된 동탄성계수값과 일치되는 계수 값을 찾아야 한다. Microsoft Excel 프로그램의 solver 기능을 이용하여 비선형 최소자승법에 의한 회귀분석을 실시하면 소요의 계수를 구할 수 있다.

2.2 아스팔트 혼합물 재료 특성

노반용 아스팔트 혼합물 사용 재료로, 바인더는 국내에서 가장 널리 사용되는 AP-5(침입도 Pen. 60~80, PG 64-22)등급을 선택, 사용하였다. 골재는 충남 금산군 복수면의 석산에서 생산된 화강변성암 재질이며 ‘가열 아스팔트 혼합물 배합설계 지침[10]’에서 규정한 국내 혼합골재의 입도기준 중, 표준용 밀입도 19mm혼합물 배합에 사용하도록 제시된 WC-4(20F) 골재입도를 모두 만족하는 범위 내에서 결정하였다. 따라서, 아스팔트 혼합물은 WC-4(19mm 밀입도) 국내 규정을 적용하여 혼합물을 제작하였으며 제작된 시편의 크기는 마샬다짐시 직경 100mm, 높이 75mm, 선회다짐시 직경 100mm, 높이 150mm이었다. 각 다짐시험기로 만든 시편을 각각 마샬 안정도시험, 간접인장강도시험, 충격공진시험 및 초음파시험에 공히 사용하였다.

2.3 기초 역학시험

마샬 안정도(Marshall stability test: MST) 및 간접인장강도 (Indirect Tensile Test: IDT)시험을 통해 아스팔트 케도 노반용으로 제시된 아스팔트 혼합물의 역학적 소요 특성을 평가하였다(Fig. 4). MST는 상부, 하부 2개로 되어 있는 1개조의 원호모양의 헤드로 60°C에서 50.8mm/분 재하속도의 하중으로, 다져진 공시체에 작용하는 최대하중(안정도)과 변형

(a) Marshall Test (b) Indirect Tensile Strength Test

Fig. 4 Basic mechanical tests using an asphalt mixture mixed for a track foundation

Fig. 5 Concept of the indirect tensile strength test

률(흐름값)을 측정한다[11,12]. 높은 흐름값은 아스팔트 바인더가 과다하게 포함된 연한 배합을 의미하며 이러한 배합은 소성변형을 발생시키므로 소성변형에 대한 저항성을 평가하기 위해 사용한다.

IDT는 ASTM D 4123의 규정에 따라 아스팔트 혼합물의 균열발생에 대한 저항성능을 평가하기 위해 실시한다. IDT는 50.8mm/분의 변형속도와 25°C의 온도에서 실시하였다. Fig. 5와 같이 직경면을 따라 균등한 인장을 발생시켜 파괴에 이르게 되는 강도를 측정하는 시험이다. 파괴에 도달했을 때의 인장강도(ST)와 및 인장변형률(ϵ_T)은 각각 식 (9) 및 식 (10)과 같이 표현된다.

$$S_T = \frac{2P_{ult}}{\pi D} \quad (9)$$

$$\epsilon_T = \Delta H_T / [(0.03896 + 0.1185v) / (0.0673 + 0.249v)] \quad (10)$$

여기서, P_{ult} : 극한하중, D : 공시체의 지름, t : 공시체 두께, ΔH_T : 수평변위, v : Poisson's ratio

획득한 두 시험의 평균 값은 국내 도로포장 밀입도 혼합물(WC-4) 기준을 모두 만족하였으며 MST의 경우 아스팔트 노반용 독일(800kgf) 및 일본(500kgf)의 기준치보다 매우 크게 평가되었다(Fig. 6). 따라서 두 나라 기준과의 단순비교 시 본 연구에서 배합설계하여 제작한 혼합물은 노반용으로 사용가능 한 것으로 평가되었다.

2.4 소형충격 공진시험에 의한 동탄성계수의 취득

아스팔트 노반용 혼합물의 동탄성계수(E^*)를 획득하기 위한 간편한 비파괴 시험방법을 도출하기 위하여 소형충격공진시험과 초음파 시험을 실시하였다. 소형 충격공진시험의 경우 Fig. 7과 같이 마살다짐에 의해 제작된 시편의 반을 잘라 디스크 형태로 만들고 이에 대해 소형의 햄머와 가속도계를 이용하여 충격공진시험을 실시하는 것이다[6]. 온도조건(-20°C, 0°C, 20°C, 40°C)을 달리하여 한 개의 시편당 20차례 이상의 충격시험을 실시한 후 획득된 공진주파수의 평균값을 이용하였다.

아스팔트 시편과 같은 고형물의 공진주파수(f_R)는 시편의 기하조건(직경(D)/길이(L) = D/L), 질량(m) 및 탄성계수(E)에 따라 영향 받는다. 일반적으로 원주형시편($L/D > 2$ 또는 $L/$

Fig. 6 Test Results of the basic mechanical tests using an asphalt mixture mixed for a track foundation

Fig. 7 Measurement of the dynamic elastic modulus using an impact resonant test

$D < 0.25$)에 대한 충격공진시험으로부터 간단하게 실용적으로 공진주파수를 구할 수 있으며 이론상의 공진주파수를 1차원 파동방정식으로부터 정확하게 산정할 수 있다. 본 연구에서는 디스크형태 아스팔트 시편의 진동모드(mode shape)별 공진주파수와 이에 기초한 동탄성계수를 정확히 산출하기 위하여 먼저 아스팔트 디스크에 3개 진동모드(f_1, f_2, f_3)를 고려하여 Fig. 7과 같이 진동모드별 공진주파수의 측정을 시도하였다. 다만 현단계에서 f_3 모드는 분석대상에서 제외하였다.

Fig. 7과 같이 반대칭(anti-symmetric)의 굽힘 진동모드에서 측정된 공진주파수를 f_{1R} , 대칭의 중축 중심진동모드(symmetric)에서의 공진주파수를 f_{0R} , 비틀림(torsional) 진동모드에서의 공진주파수를 f_{3R} 로 각각 정의하고 시험을 진행하였다. 각각의 진동모드에 대해 수치해석 등에 의한 정밀해의 획득에 앞서 기존 이론해([13])에 의한 공진주파수해석결과와 포아송비에 대한 제안식을 이용하여 반복계산에 의해 동탄성계수를 구할 수 있다. 사용된 가속도계는 PCB 353 B15모델이며 가진을 위해 그림과 같은 소형타격장치를 사용하였다. 데이터의 수집 및 FFT분석을 위해 IOtech사의 WaveBook 512 Dynamic Analyzer 및 WBK14 컨디셔너를 사용하였다.

아스팔트 디스크 시편에 대한 충격공진시험에 의해 진동모드별 1차 공진주파수를 획득할 수 있다. 측정된 공진주파수는 엄밀한 의미에서 감쇠공진주파수(damped resonant frequency: f_d)가 된다. 따라서 자연공진주파수(f_n)와는 식 (9)의 관계를 갖는다.

$$f_d = f_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (9)$$

여기서, ξ = 감쇠계수. 측정된 공진주파수(f_d)에서 최대 진폭값(Apeak)의 0.707배에 해당하는 주파수차(bandwidth: Δf)를 이용하면 감쇠계수를 식 (10)과 같이 계산할 수 있다. 따라서 측정된 감쇠공진주파수(f_d)를 이용하여 자연공진주파수(f_n)와 감쇠계수(ξ)를 산출한 다음 Martineck[13] 등의 해석해(식 11)를 이용하여 복소탄성계수 중 실수탄성계수 E' 를 구할 수 있다.

$$\xi = \Delta f / (2f_d) \quad (10)$$

$$E' = \frac{4\pi^2 f_n^2 R^2 \rho}{\bar{\omega}} \quad (11)$$

여기서 $\bar{\omega} = \omega R / (\sqrt{E/\rho})$, ω = 각주파수, R = 시편반경, E' = 실수탄성계수, ρ = 재료밀도이며 보정주파수 $\bar{\omega}$ 의 값은, 자유단 원주형 두꺼운 임의의 시편의 진동에 대해 시편의 형상비(h/R ; h =시편두께)와 포아송비 ν 의 변화에 따라 결정할 수 있도록 Fig. 8과 같이 Martineck[13]에 의해 제시된 바 있다.

아울러 이들 값과 함께 식 (3)을 이용하면 복소탄성계수 중 허수탄성계수(손실탄성계수) E'' 를 구할 수 있고 최종적으로 동탄성계수 $|E^*|$ 를 포아송비 ν 에 대한 아래 식 (12)의 제안식([1])을 이용하여 반복시행법에 의해 초기 가정값을 보

Fig. 8 Curves showing the characteristic values of the parameter $\bar{\omega}$ for the first two natural vibration modes of a thick circular plate (Martineck[13])

정해 가면서 오차를 줄여 구한다. 제작된 아스팔트 디스크 시편에 대한 소형충격공진시험에서는 시편의 형상비(h/R)를 0.75로, 포아송비를 $\nu = 0.3$ 로 가정하고 보정주파수($\bar{\omega}$)는 F1 진동모드에서 0.859, F2 진동모드에서 1.316으로 선택한 후 (Martineck[13]이 제시한 Table 1 및 Table 2 참조) 최종 동탄성계수를 식 (12)로부터 구하였다. 이와 같이 충격공진시험으로부터 아스팔트 혼합물의 동탄성계수를 측정하는 개략적인 산정흐름도는 Fig. 9와 같다.

$$\nu = 0.15 + \frac{0.35}{1 + e^{(-12.452 + (2.291 \log(E^*))}} \quad (12)$$

따라서 다른 온도수준(T)과 진동모드별(f_i)로 시험을 수행

Table 1 Corrected frequency ($\bar{\omega}$) in the F1 mode

h/R	0	0.1	0.25	0.5	0.75	1.0
$\nu=0$	0	0.176	0.419	0.737	0.954	1.101
$\nu=0.15$	0	0.167	0.400	0.699	0.906	1.045
$\nu=0.30$	0	0.160	0.380	0.664	0.859	0.987
$\nu=0.50$	0	0.150	0.356	0.621	0.803	0.930

Table 2 Corrected frequency ($\bar{\omega}$) in the F2 mode

h/R	0	0.25	0.5	0.75	1.0	1.50
$\nu=0$	0	0.554	0.942	1.188	1.460	1.532
$\nu=0.15$	0	0.583	0.997	1.243	1.525	1.603
$\nu=0.30$	0	0.626	1.053	1.316	1.594	1.681
$\nu=0.50$	0	0.713	1.168	1.436	1.712	1.788

Fig. 9 Flow chart for the determination of the dynamic modulus measured from a small impact resonance test on thick circular plate sample

하여 가급적 많은 동탄성계수($E^*(T, f)$) 데이터를 구하면 최종적으로 동탄성계수 매스터커브를 획득할 수 있다.

2.5 초음파시험에 의한 동탄성계수의 취득

초음파 시험은 전달파를 생성하는 송신부와 전달된 파를 수집하는 수신부로 구성된다[14]. 본시험에서는 원주형시편의 양끝에 각각 송신부와 수신부를 부착하고 시편중축방향으로 전달되는 직접파를 측정하는 시험을 실시하였다(Fig. 10). 이때 매질에 전달되는 파중 P 파의 속도는 식 (13)에 의해 계산할 수 있다. 시편의 길이 L 인 원주형시편의 한쪽 면에 기계적인 저에너지의 펄스파를 송신하고 수신된 전기신호를 이용하면 파의 전달속도를 식 (14)에 의해 계산할 수 있다.

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (13)$$

$$V_R = L/t \quad (14)$$

여기서, t =파의 전달 소요시간. 따라서 초음파 시험에 의한 시편의 동탄성계수 결정을 위해서는 시편의 길이(L), 직경(d), 무게(W), 구성재료의 포아송비(ν), 시험시의 온도(T) 등에 대한 정보가 필수적으로 필요하다. 시편의 밀도는 크기(L, d)와 무게(W)로부터 쉽게 구할 수 있다. 따라서, 위의 식들을

Fig. 10 Measurement of the dynamic elastic modulus using an ultrasonic test

종합하면 초음파시험에 의한 아스팔트 혼합물 시편의 최종적인 동탄성계수를 식 (15)에 의해 구할 수 있다.

$$E_u^* = 1.274 \times 10^9 \frac{WL(1+\nu)(1-2\nu)}{d^2 t^2 (1-\nu)} \quad (15)$$

여기서 E_u^* = 초음파시험(Ultrasonic Test)으로 측정한 동탄성계수(MPa), V_R = 펄스속도(L/t, m/s), L = 아스팔트 혼합물 시편 길이(m), t = 파의 전달시간(μ s), W = 무게(kgf), d = 직경(mm)

초음파시험을 위한 아스팔트 혼합물시편은 소형충격공진 시험과 동일한 아스팔트 노반용으로 배합된 혼합물 재료를 사용하여 선회다짐기로 목표 공극률 3%가 되도록 설정, 제작하였다. 제작된 시편은 코어기로 절삭하여 직경(d) 100mm, 길이(L) 150mm, 무게(W) 2.743kg^g이 되도록 하였다. 제작된 시편을 이용하여 온도조건(각 -20, 0, 20, 40°C)을 달리하여 해당 온도당 7번 이상의 초음파 신호를 측정, 평균값으로 대표 동탄성계수를 산정하였다.

3. 노반용 아스팔트 혼합물의 역학적 특성 비교

3.1 동탄성계수 예측식

아스팔트 혼합물의 동탄성계수를 혼합물의 구성특성을 이용하여 예측하려는 시도가 있어왔다. 이중 Arizona대학의 Witczak교수에 의해 제시된 예측모형(식 16)이 비교적 정확한 것으로 알려진 바 있으며 AASHTO 2002 MEPDG (Mechanical and Empirical Pavement Design Guide)에서 채택[1]된 바 있다. 비교대상으로서 한국형포장설계법(KPRP; Korea Pavement Research Program)에서 제시한 동탄성계수 예측모형은 식 (17)과 같으며 해당 모형은 개발시 PG 58-22(AP-3), PG 64-22(AP-5), PG 76-22의 3개 아스팔트 바인더가 사용되었다[2]. 그러나, Witczak 예측모형에 비하여 바인더의 종류, 샘플 시험개수 및 취득데이터가 충분하게 확보되지 않아 포괄적 예측모형이 되기는 어려웠을 것으로 판단된다.

$$\log|E^*| = -1.249937 + 0.02923p_{200} - 0.001767(p_{200})^2 - 0.002841p_4 - 0.05809V_a - \frac{0.082208V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3.871977 - 0.0021p_4 + 0.003958p_{38} - 0.000017(p_{38})^2 + 0.000547p_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351\log(f) - 0.393532\log(\eta))}} \quad (16)$$

여기서 E^* = 동탄성계수($\times 10^5$ psi), η = 아스팔트 바인더의 점도($\times 10^6$ poise), f = 하중주파수(Hz), V_a = 아스팔트 혼합물의 공극율(%), V_{beff} = 아스팔트 바인더의 유효함량(%), P_{34} = 20mm 체에서의 누가잔류 백분율(%), P_{38} = 10mm 체에서의 누가잔류 백분율(%), P_4 = 5mm 체에서의 누가잔류 백분율(%), P_{200} = 0.08mm 체에서의 통과백분율(%) (이하 식 (17)에 동일하게 적용됨)

$$\log|E^*| = 6.940166 - 0.00176p_{200} + 0.003889p_4 - 0.08776V_a - \frac{1.33426V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{-3.63992 - 0.03114p_4 + 0.015546p_{38} + 0.010469p_{34}}{1 + e^{(-0.09942 + 0.162727\log(f) + 0.180695\log(\eta))}} \quad (17)$$

3.2 실측값과 예측식에 의한 동탄성계수의 비교

3.2.1 초음파시험과 예측식 결과의 비교

초음파시험에 의해 획득된 동탄성계수 시험결과와 동탄성계수 예측식으로부터 계산한 값을 비교하여 Fig. 11에 도시하였다. 예측식의 산출 결과는 하중주파수 1Hz 및 10Hz로 가정하여 계산하였다. 10Hz로 가정한 경우, 저온영역(-20°C)에서는 초음파로 측정된 동탄성계수가 예측식에 의해 계산된 결과보다 작게 산출되지만, 고온영역에서는 오히려 초음파시험결과가 예측식에 의한 결과보다 다소 크게 산출되는 것을 알 수 있으며 0°C에서는 AASHTO 2002 예측식 결과와 정확히 일치하는 것을 확인하였다. 따라서, 초음파시험시 동탄성계수 조정 scale factor를 도입할 경우 하중주파수에 대한 보정이 필요할 것으로 보인다. 동일주파수에서 0°C 이상 상온~고온영역에서는 측정 동탄성계수를 감소시키는 scale

factor가 필요하며 0°C이하의 저온에서는 측정 동탄성계수를 증가시키는 scale factor가 필요한 것을 알 수 있다.

초음파시험에 의한 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 측정시 하중주파수에 직접 변화를 주며 시험을 실시할 수는 없으나, 0°C를 기준온도로 설정하여 온도대역별 scale factor를 설정한다면 적정한 동탄성계수의 변화를 산정할 수 있을 것으로 판단된다. AASHTO 예측식(1Hz)을 채택할 경우 -20°C에서 1.43, 20°C에서 0.23, 40°C에서 0.12 정도의 scale factor가 예상되었다.

3.2.2 소형충격공진시험과 예측식 결과의 비교

측정된 공진주파수와 2.4절에 설명한 동탄성계수 산정 절차를 이용하여 각각 F1 및 F2모드에서 소형충격공진시험에 의해 획득된 동탄성계수 결과값과 초음파시험에서 획득된 동탄성계수 결과를 Fig. 12에 함께 도시하였다. 전체적으로 소형충격공진시험에 의한 동탄성계수는 모드(F1, F2)에 상관없이 온도증가에 따른 강성의 저하경향을 적절히 구현할 수 있음을 알 수 있다. 또한 마찰다짐에 비하여 선화다짐으로 만들어진 시편에서 획득된 동탄성계수값이 더 크게 평가되는 것을 알 수 있었으나 온도증가에 따라 그 차이는 크게 줄어드는 것을 알 수 있다. F1모드에서 측정된 동탄성계수가 더 크게 평가되었으며 F2모드에서 측정된 동탄성계수가 작게 평가되었다. 이는 진동모드에 따라 공진주파수가 서로 다르게 측정되기 때문이다.

저온(-20°C)에서 측정된 소형충격공진시험 동탄성계수 측정값이 초음파시험에 비해 8배 이상 크게 나타났다. 이는 시험방법에 의한 차이로 초음파시험은 하중주파수의 개념이 사용되지 않았기 때문이다.

소형충격시험결과를 예측식에 의해 획득되는 동탄성계수 마스터커브상에 도시하면 좁은 대역의 주파수에 몰리게 된다. 전체주파수 대역으로 확장하여 마스터커브를 완성하기 위해서는 주파수 축으로 온도-주파수 축변환을 시켜야 한다. 이를 위하여 온도-주파수 축변환 계수(식 (6))를 기존 아스팔트 혼합물 시험결과와 데이터베이스에서 구하였다.

소형충격공진시험 결과를 아레니우스 방법에 의한 온도-주파수 변환계수로 온도-주파수 축변환을 가한 후 이를 동탄성계수 예측식에 의해 예측된 값과 Fig. 13에 비교, 도시하였다. 전체적으로 소형충격시험에 의해 획득한 동탄성

(a) AASHTO & KPRP and ultrasonic test result (1Hz)

(b) AASHTO & KPRP and ultrasonic test result (10Hz)

Fig. 11 Comparison of the dynamic modulus between the prediction model and an ultrasonic test

(a) Ultrasonic and impact resonant test (F1) results

(b) Ultrasonic and impact resonant test (F2) results

Fig. 12 Comparison of the dynamic moduli measured from different test methods

(a) KPRP Master curve and impact resonant test (F1)

(b) KPRP Master curve and impact resonant test (F2)

(c) AASHTO Master curve and impact resonant test (F1)

(d) AASHTO Master curve and impact resonant test (F2)

Fig. 13 Comparison of the predicted AASHTO and KPRP master curves with shifted impact resonant test results

계수는 매스터커브 분포 그래프에 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 반면, F1모드에서는 AASHTO예측식에 비하여 다소 크게, F2모드에서는 큰 주파수 대역에서 KPRP 예측식에 의한 매스터커브보다 다소 작게 예측되는 것을 파악하였다. AASHTO 2002 동탄성계수 예측식의 경우 sigmoidal함수에 의한 최소 예측 값이 과소하게 산출되는 것을 확인할 수 있다. 실험결과 정확한 예측식 수립을 위해서는 보다 많은 혼합물에 대한 시험 및 데이터를 기본으로 하는 수정계수 산출이 요구된다.

3. 결 론

철도용 아스팔트노반 혼합물의 잠정 배합설계를 바탕으로 제작된 시편에 대하여 마찰 안정도시험과 간접인장강도 시험을 기반으로 소요의 역학적 특성을 검토한 후, 소형충격 공진 및 초음파시험 등을 실시하여 아스팔트 노반 설계시 요구되는 혼합물의 동탄성계수를 측정할 수 있는 간이 비파괴 시험법의 적용가능성을 검토하였으며 이를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 노반용으로 배합설계(19mm 밀입도 혼합물(WC-4))된 아스팔트 혼합물의 역학적 특성을 마찰안정도 및 간접인장 강도 위주로 평가한 결과, 일본 및 독일 등의 아스팔트노반용 혼합물 요구조건을 모두 만족하는 것으로 판단되었다. 따라서, 단순 비교시 아스팔트 노반용으로 사용 가능한 것으로 판단되었다.

(2) 노반용 아스팔트 혼합물의 동탄성계수를 획득하기 위해 소형충격공진주시험을 효과적으로 사용할 수 있음을 확인하였다. 동탄성계수를 획득하기 위한 고가의 시험기를 사용하지 않고도 실용적인 수준에서 아스팔트 혼합물의 동탄성계수를 구할 수 있음을 확인하였다. 반면, 이러한 동탄성계수의 시험결과와 신뢰도를 높이기 위해서는 시험방법의 표준화와 분석기준의 수립이 추가로 요구된다.

(3) 초음파시험의 경우 파의 전달속도만을 고려하여 혼합물의 탄성계수(constrained modulus)를 측정한다. 따라서, 하중주파수 또는 공진주파수의 영향을 고려하지 않을 경우 하중주파수를 고려하는 AASHTO 2002 등의 예측식과 차이가 날 수 밖에 없다. 그러므로, 노반용 아스팔트 혼합물의 동탄성계수를 획득하기 위하여 초음파시험을 사용하기 위해서는 하중주파수의 영향을 고려할 수 있는 방안의 수립이 필요하다. 본 시험에서는 단순비교시, 0°C에서 초음파시험에 의해 측정된 동탄성계수 값이 하중주파수 1Hz 및 10Hz에서 산출된 AASHTO 2002예측식과 비교적 유사한 것을 확인하였다. 타 온도영역에서 초음파시험시 동탄성계수 조정을 위한 scale factor를 도입할 경우, 온도에 대한 보정과 하중주파수에 대한 보정이 모두 필요할 것으로 판단되었다. 향후 추가연구를 통하여 0°C를 기준온도로 설정하고 온도대역별 scale factor를 설정한다면 동탄성계수의 변화를 예측값과 비교적 일치하게 산정할 수 있을 것으로 판단되었다. 현재수준에서의 시험결과만을 이용하여 판단할 하였을 때, AASHTO 예측식(1Hz)을 채택할 경우 -20°C에서 1.43, 20°C에서 0.23, 40°C에서 0.12 정도의 scale factor가 예상되었다

후 기

이 논문은 한국철도기술연구원 “철도건설 및 운용비 절감을 위한 경제성 향상 기술개발”(-고속화에 대응한 철도 아스팔트 노반 및 레도구조 개발-)과제 및 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NO.: 2012R1A1A4A01009639)의 성과물로서 양 기관의 지원에 감사드립니다.

References

- [1] AASHTO (2002) 2002 Design Guide of New and Rehabilitated Pavement Structures, Research Report, National Cooperative Highway Research Program, USA.
- [2] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011) Development of Korean Pavement Design Method and Pavement Improvement Guideline, Korea Pavement Research Program.
- [3] G. Garcia, M. Thompson (2007) HMA Dynamic Modulus Predictive Models-A Review, Research Report FHWA-ICT-07-005, Illinois Center for Transportation
- [4] S. Whitmoyer, Y.R. Kim (1994) Determining Asphalt Concrete Properties via the Impact Resonant Method, *J. Testing and Evaluation*, ASTM, 22(2), pp. 139-148.
- [5] G. Kweon, Y.R. Kim (2006) Determination of Asphalt Concrete Complex Modulus with Impact Resonance Test, *Transportation Research Record*, 1970, pp. 151-160.
- [6] N. Ryden (2011) Resonant Frequency Testing of Cylindrical Asphalt Samples, *Nondestructive Testing in Civil Engineering*, EJECE, 15(4), pp. 587-600.
- [7] J. Norambuena-Contreras, D. Castro-Fresno, A. Vega-Zamainillo, M. Celaya, et al. (2010) Dynamic modulus of asphalt mixture by ultrasonic direct test, *NDT & E International*, 43, pp. 629-634.
- [8] T.O., Medani, M. Huurman (2003) Constructing the Stiffness Master Curves for Asphaltic Mixes, Report 7-10-127-3, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology.
- [9] T.K. Pellinen, M.W. Witczak (2002) Stress Dependent Master Curve Construction for Dynamic (Complex) Modulus, Annual Meeting Association of Asphalt Paving Technologies, Colorado Springs, Colorado, USA.
- [10] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2005) Hot mix asphalt design guideline.
- [11] ASTM (1998) ASTM D1559-89 Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus, ASTM.
- [12] Korean Standards Industrial KS F 2337 Testing methods for resistance to plastic flow of bituminous materials.
- [13] G. Martincek (1965) The Determination of Poisson's Ratio and the Dynamic Modulus of Elasticity from the Frequencies of Natural vibration in thick circular plates, *Journal of Sound and Vibration*, 2, pp. 116-127.
- [14] ASTM (1998) ASTM C 597 Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, ASTM.
- [15] B.S. Lee (2012) Analysis of Dynamic Modulus and Permanent Deformations in Asphalt Mixtures for Design of Asphalt Trackbed Foundation, *Master's Thesis*, Paichai University.

접수일(2013년 10월 7일), 수정일(2014년 1월 1일),
게재확정일(2014년 3월 13일)

Yujin Lim : yujin@pcu.ac.kr

Department of Civil and Railroad Engineering Paichai University,
155-40 Baejae-Ro, Seo-Gu, Daejeon, Korea

SeoungHyeok Lee : Shlee@krii.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-Ro,
Uiwang-Si, Gyeonggi-Do, Korea

JinWook Lee : jinugi@krii.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-Ro,
Uiwang-Si, Gyeonggi-Do, Korea

ByeongSik Lee : bs1227@sedamenc.com

Formerly Paichai University, Sedam E&C, 4F Serim Bldg. 94,
Seongsui-Ro Seongdong-Gu, Seoul, Korea