

충격공진실험과 만능재료시험기에 의한 아스팔트 공시체의 동탄성계수 예측 모델 개발

Development of the Predicted Model for the HMA Dynamic Modulus by using the Impact Resonance Testing and Universal Testing Machine

김도완	Kim, Do wan	정희원 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 석사과정 (E-mail: marinater@daum.net)
김동호	Kim, Dong-ho	서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 학사과정 (E-mail: dongho3889@naver.com)
문성호	Mun, Sungho	정희원 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학부 조교수 · 교신저자 (E-mail: smun@seoultech.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The dynamic modulus can be determined by applying the various theories from the Impact Resonance Testing(IRT) Method. The objective of this paper is to determine the best theory to produce the dynamic modulus that has the lowest error as the dynamic modulus data obtained from these theories(Complex Wave equation Resonance Method related to either the transmissibility loss or not, Dynamic Stiffness Resonance Method) compared to the results for dynamic modulus determined by using the Universal Testing Machine. The ultimate object is to develop the predictive model for the dynamic modulus of a Linear Visco-Elastic specimen by using the Complex Wave equation Resonance Method(CWRM) came up for an existing study(S. O. Oyadiji; 1985) and the Optimization.

METHODS : At the destructive test which uses the Universal Testing Machine, the dynamic modulus results along with the frequency can be used for determining the sigmoidal master curve function related to the reduced frequency by applying Time-Temperature Superposition Principle.

RESULTS : The constant to be solved from Eq. (11) is a value of 14.13. The reduced dynamic modulus obtained from the IRT considering the loss factor related to the impact transmissibility has RMSE of 367.7MPa, MPE of 3.7%. When the predictive dynamic modulus model was applied to determine the master curve, the predictive model has RMSE of 583.5MPa, MPE of 3.5% compared to the destructive test results for the dynamic modulus.

CONCLUSIONS : Because we considered that the results obtained from the destructive test had the most highest source credibility in this study, the dynamic modulus data obtained respectively from DSRM, CWRM were compared to the results obtained from the destructive test by using th IRT. At the result, the reduced dynamic modulus derived from DSRM has the most lowest error.

Keywords

time-temperature superposition principle(TTSP), master curve, impact resonance testing(IRT), complex wave equation resonance method(CWRM), dynamic stiffness resonance method(DSRM), frequency response function(FRF)

Corresponding Author : Mun, Sungho, Assistant Professor
Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science
and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Korea
Tel : +82.2.970.9014
E-mail : smun@seoultech.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ijhe.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Mar. 18, 2014 Revised Mar. 18, 2014 Accepted Apr. 21, 2014

1. 연구배경 및 목적

점탄성체로 분류되어지는 아스팔트는 온도와 충격에 민감하게 반응하며 실제 이러한 열이나 충격으로 인해 도로포장에 포트홀, 싱크홀, 피로 등의 파손을 유발시킨다. 이러한 아스팔트 도로의 파손은 아스팔트포장의 특성에 의해 구분된다.

이와 관련하여 아스팔트-콘크리트 포장설계 시 재료의 물성을 평가하는 기준으로 적용되는 것이 동탄성계수 측정시험이다. 따라서 동탄성계수는 도로의 파손과의 관계가 밀접하다고 할 수 있다. 이러한 동탄성계수를 측정하는 방법 중 본 연구에서는 만능시험기를 활용하는 파괴시험법과 충격으로부터 고유진동수를 결정해 동탄성계수를 구할 수 있는 비파괴시험방법(Non-Destructive Test) 중 Impact Resonance Testing(IRT)을 수행하였다. 이 두 실험을 병행한 것은 아스팔트-콘크리트의 동탄성계수를 구하는 것에 있어서 가장 공신력이 있다는 전제 하에 이것에 의한 결과와 IRT 시험에 의한 결과를 비교하기 위함이다.

더욱이, 본 연구에서는 IRT 시험에 의한 동탄성계수를 결정하는 방법을 크게 3가지로 구분하여 어떠한 이론에 의한 동탄성계수가 만능시험에 의한 동탄성계수에 비해 가장 적은 오차를 발생시키는지 확인하기 위함이다. 이러한 목적과 관련하여 본 연구에서 최종적으로 가장 적은 오차를 갖는 시험방법을 확인하고 최적화기법을 통해 더 적은 오차를 도출하는 동탄성계수 예측모델을 개발하기 위함이다.

2. Hot-Mixed Asphalt(HMA) 상태

다양한 방법을 이용하여 동탄성계수를 구하기 위해 공극률이 각기 다른 HMA 시편을 제작하였다. 공시체 제작 시 공극률은 10%, 15%, 20%로 3가지 시편을 제작하였으며 10%와 20%의 공시체로부터 다양한 방법으로 동탄성계수를 구한 후 이를 이용하여 동탄성계수 예측모델을 개발하고자 한다. 또한 동탄성계수모델의 정확성을 판단하기 위하여 공극률 15%의 HMA 동탄성계수와 비교해 보도록 한다. 이러한 동탄성계수 예측 모델은 공극률이 다른 공시체에 대한 모델로 구성할 수 있다. 또한 이러한 예측 모델은 성질이 같은 공시체의 경우에도 온도별 예측 모델로도 구성되어질 수 있다. 결국 본 연구에서 실시한 시험의 두 가지 변수는 시험 시 온도와 HMA 공시체의 공극률이다. 다음 Table 1은 공시체를 제작한 후 각 시험에 사용되기 위하여 코어된 시편

의 특성을 나타낸 표이다.

Table 1. HMA Specimen Condition

Porosity (%)	Diameter (cm)	Length (cm)	mass (g)
10	9.976	14.902	262.06
15	10.010	15.105	254.49
20	10.041	14.953	238.57

3. 동탄성계수 시험 및 측정방법

본 연구에서 동탄성계수를 측정하기 위해 만능재료시험기(Universal Testing Machine, MTS-810)를 이용한 파괴시험과 공시체의 비파괴를 적용하기 위한 충격공진시험(Impact Resonance Testing, IRT)을 이용하였다. 만능시험기의 경우 각 진동수를 환산진동수로 변환하여 마스터커브를 작도함으로써 진동수와 동탄성계수의 관계를 밝힐수 있다. 충격공진시험으로 동탄성계수를 예측하는 경우 기존연구의 Complex Wave equation Resonance Method(CWRM)를 이용하여 구하는 방법과 Dynamic Stiffness Resonance Method(DSRM)를 이용하여 구하는 방법이 존재한다.

3.1. Destructive Test(Using MTS-810)

만능재료시험기는 건설기술연구원에 설치되어있는 MTS-810 시험기를 사용하였으며, 공시체에 4기의 변형측정자기센서(Linear Variable Differential Transformer, LVDT)를 부착하여 시험을 실시하였다. 본 연구에서 실시한 만능재료시험기에 의한 시험은 AASHTO TP 62-03의 절차에 의해 실시되었으며 동탄성계수 시험의 실제 측정온도는 각 실험마다 약간의 오차를 갖는 5℃, 20℃, 40℃, 54℃이다. 또한 0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0, 20.0Hz의 주기로 시험을 실시하였다.

이러한 조건으로 시험을 실시하는 경우, 실험결과로써 주파수 별 동탄성계수와 위상각(Phase Angle), 그리고 미소변형(Microstrain)을 도출하게 된다.

실험 후 시험공시체에 대한 동탄성계수의 특성을 파악하기 위하여 마스터커브를 작성할 필요가 있다. 마스터커브는 기존의 시험주파수에서부터 다양한 시간별 주파수를 예측하고 판단할 수 있는 매우 유용한 그래프이며, 이는 기본적으로 아스팔트의 특성인 온도와 시간에 대해서 전이시켜줌으로써 다양한 주파수에 대한 동탄성계수의 특성을 확인가능하게 해준다. 이를 작도하기 위

해 시간-온도 중첩의 원리(Time-Temperature Superposition Principle, TTSP)가 적용된다. 마스터 커브를 작성하기 위해서는 각 온도 및 주파수를 전이시켜주어야 하며, 이러한 전이는 전이함수(Shift Factor)에 의존하게 된다. 전이함수 $a_{T, T_{ref}}$ 는 다음 Eq. (1)과 같이 Williams-Landel-Ferry (WLF) equation에 의해 구할 수 있다.

$$\log(a_{T, T_{ref}}) = \frac{-c_1^{ref}(T - T_{ref})}{c_2^{ref} + (T - T_{ref})} \quad (1)$$

여기서, T_{ref} 는 기준온도이며 본 연구에서는 이를 5°C로 설정하였다. T 는 해당 시험 시 측정온도이다. c_1 과 c_2 는 각각 전이함수상수이다.

도출된 전이함수는 오차를 갖는 온도에서 다양하게 구하기 위하여 2차함수 회귀식(Second order Polynomial Regression)으로 Eq. (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\log(a_T) = aT^2 + bT + c \quad (2)$$

다양한 주파수 별 공시체의 거동특성을 예측하기 위한 마스터커브를 작도하기 위하여 전이시켜 주기 위한 전이주파수를 구할 필요가 있다. 이러한 전이주파수는 해당 온도의 주파수에서 전이함수를 나누어 줌으로써 도출되며 다음 Eq. (3)을 이용한다.

$$\log(f_r) = \log(f) - \log(a_T) \quad (3)$$

전이주파수와 동탄성계수를 이용하여 마스터커브의 작도가 가능해지며, 이러한 마스터커브함수는 Sigmoidal Function으로 정의됨으로써 x축의 $\log(\text{frequency})$ 마스터커브는 부드러운 곡선으로 표현되게 된다. 마스터커브의 Non-linear Sigmoidal Function은 최적화(Optimization)를 활용하여 가용프로그램의 Solver기능으로 쉽게 구할 수 있다. 그 과정에서 동탄성계수의 오차와 real값의 동탄성계수의 오차를 구하여 보정한다.

3.2. Non-Destructive Test(IRT)

비파괴시험 중 충격공진시험은 항온항습기에 의해 온도 및 환경조건을 충분히 제한시킨 뒤 양방향을 구속시

켜 쇠구슬을 이용하여 공시체를 타격하는 방식으로 진행되어 진다. 본 연구에서 실시한 실험은 총 7개의 온도에서 진행(5, 15, 20, 30, 35, 40, 50°C)되었다. 쇠구슬은 자유낙하시키는 것을 원칙으로 하며, 이 구슬이 공시체를 타격하는 경우 타격면에서 재료에 전달되는 파를 측정하는 Inpulse 가속도계에서 파동을 수신하고 반대쪽의 시험체 표면에 전달되어 다시 output파를 수신하게 된다. 다음 Fig. 1는 Input신호(Signal 1)와 Output신호(Signal 2)의 결과를 나타낸 것이며, MATLAB에 의해 구상화 된 것이다.

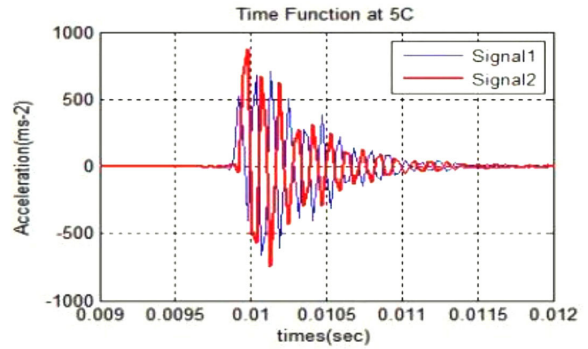


Fig. 1 Time Signal Example

이 과정을 통해 수신되어진 2가지 신호를 이용하여 Fast Fourier Transform(FFT) 분석을 수행하여 주파수에 대한 Frequency Response Function(FRF)의 결과를 Fig. 2와 같이 MATLAB으로 도출하였다. Fast FFT분석은 Discrete Fourier Transform(DFT)분석의 이산적이고 반복되는 행렬의 계산을 보완하여 신속하고 신호에 대한 연속적 분석을 가능하게 하는 분석방법이다.

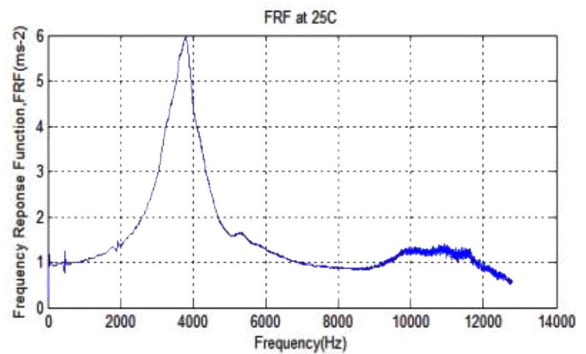


Fig. 2 FRF Example

비파괴의 목적으로 실시되는 충격공진시험은 Complex Wave equation Resonance Method(CWRM)와 Dynamic Stiffness Resonance Method(DSRM)의 두

가지 방법으로 구할 수 있다. CWRM은 Transmissibility Function을 Complex Wave Equation에 적용한 방법으로 유도되며, DSRM은 Complex Dynamic Stiffness에 탄성계수방정식을 도입한 것이다.

3.2.1. Complex Wave equation Resonance Method(CWRM)

CWRM은 기본 스트링에 대해 Wave equation을 적용한 이론으로써 본 연구에서 수행한 방법은 다음 Fig. 3과 같이 모델화 된다.

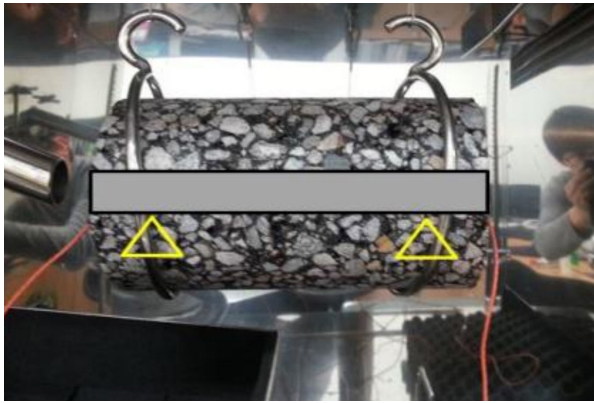


Fig. 3 Modeling for Wave Equation

본 연구에서 수행한 시험방법에 따라 지지점이 단순 보로 종방향으로 구속된 파로 모델가능하다. 그러므로 유도된 2차 ODE는 다음 Eq. (4)와 같다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E^*}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4)$$

여기서, E^* 와 ρ 는 재료의 동탄성계수와 밀도이며, u, x 는 각각 종방향과 횡방향의 축을 나타낸다. 이 과정에서 도입되는 것이 Complex Dynamic Modulus이다. 실제 동탄성계수는 Real값과 Complex Conjugate를 포함하는 두 가지로 구분한다.

$$E^* = E' + iE'' \quad (5)$$

충격공진시험으로부터 공진주파수를 구하고 전달율과 손실계수의 관계 결과는 다음 Eq. (6)과 같다.

$$\tau_{length} = \frac{1}{\left(\cos \sqrt{\frac{\rho}{E}} \omega l - \gamma_2 \sqrt{\frac{\rho}{E}} \omega l \sin \sqrt{\frac{\rho}{E}} \omega l \right)} \quad (6)$$

길이에 대한 전달율의 관계식에서 E 는 동탄성계수를 의미하며 w 는 각주기, l 은 대상재료의 파동전파길이를 의미한다. 이러한 길이에 대한 주기를 각 주기로 변환시켜주는 과정에서 동탄성계수와 밀도, 모드번호, 길이의 관계는 각 주기가 된다. 이에 Complex Modulus Equation과 Peak 전달조건을 적용함으로써 다음과 같은 조건식을 얻게 된다.

$$n^* l = \frac{\omega l}{D} \sqrt{\frac{\rho}{E'}} \left[\sqrt{\frac{D+1}{2}} - i \sqrt{\frac{D-1}{2}} \right] \quad (7)$$

where,

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\omega l}{D} \sqrt{\frac{\rho}{E'}} \sqrt{\frac{D+1}{2}} \\ \epsilon &= -\sqrt{\frac{D-1}{D+1}} \\ D &= \sqrt{(1+\eta^2)} = \frac{E^*}{E'} = \frac{E}{E'} \end{aligned}$$

여기서, n^* 는 Complex Wave 수이다. Eq. (7)의 ρ, ϵ, D 를 단순히 복합시키면 다음과 같은 주기함수를 도출할 수 있으며 이 도출된 함수는 다시 정형파의 모드번호와 주기 관련함수의 복합식으로 나타내어 질 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho &= \omega l \sqrt{\frac{\rho}{E}} \sqrt{\frac{D+1}{2D}} \\ \rho &= \frac{(2n-1)\pi}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

두 관계식을 결합하고 공시체의 고유진동수는 라디안 주기의 1/2이므로 다음과 같은 동탄성계수 계산식을 도출할 수 있다.

$$E_n = \frac{16\rho f_n^2 l^2}{(2n-1)^2} \left(\frac{1+D}{2D} \right) \quad (9)$$

기존 연구(S. O. Oyadiji와 1명; 1985)에서 D(손실계수 또는 Complex Dynamic Modulus와 관련된 함수)에 의한 오차를 실험을 통해 증명하였다. 이에 대한 오차를 고려하여 변동된 동탄성계수는 최대 측정된 동탄성계수의 0.95배라는 결론을 제시하였다.

3.2.2. Dynamic Stiffness Resonance Method (DSRM)

한 부분이 고정되어진 재료 및 공시체의 경우 외력에 대한 처짐은 complex dynamic axial stiffness로 표현할 수 있다. 이 경우 횡방향으로 양쪽 면이 자유단인 본 연구의 실험이 적용되어질 수 있는 것은 공시체에 가해지는 외력이 Step excitation으로 매우 짧은 시간동안 가해지며, 이러한 외력에 비해 지지되는 지점에 공시체의 자중에 의해 충분히 횡방향으로 지지되어 있다고 가정할 수 있다. 따라서 Complex Stiffness는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$k^* = k' + ik'' = \frac{P_{force}}{u_{dis}} \quad (10)$$

외력에 대한 2차미방의 모델링에서부터 이러한 강성도는 손실각에 대한 real값과 complex값으로 표현할 수 있다. 또한 손실각(δ)과 손실계수(η)는 서로 tangent의 기울기의 관계를 갖기 때문에 이를 탄성계수방정식에 적용하게 되면 최종적으로 다음과 같은 결론을 얻게 된다.

$$E = \frac{f_n^2 ml}{A(1 + \beta S^2)} \quad (11)$$

이 결과에서 S 는 형상계수를 의미하며, 원통형의 공시체의 경우 β 의 값은 2로 정의된다. 또한 여기서 재료의 고유진동주기와 재료의 강성도의 관계를 결부시켰다.

본 연구와 관련하여 동탄성계수를 측정할 수 있는 3가지 이론 및 실험에 기초하여 동탄성계수 예측모델을 개발하고자 한다.

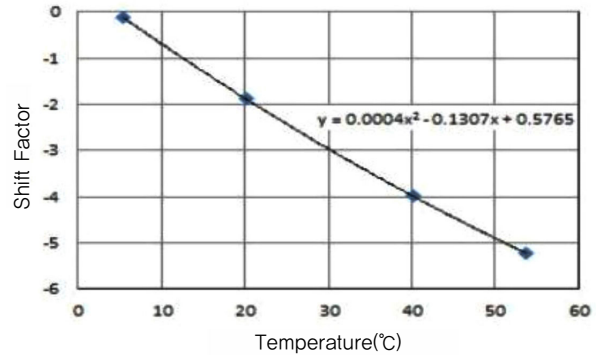
4. 동탄성계수 측정결과

동탄성계수는 파괴시험법인 만능시험기에 의해 최종적으로 시간-온도 중첩 원리에 기초하여 마스터커브를 작성하였으며, 비파괴시험법인 충격공진시험에 의해 온도 별 동탄성계수를 도출하였다.

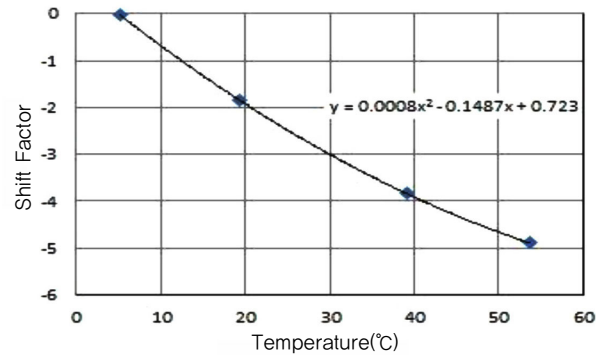
4.1. Destructive Test(Master Curve)

다양한 주파수에 걸친 동탄성계수의 특성을 확인하기 위하여 먼저 전이함수를 도출하였다. 도출된 전이함수를 이용하여 온도에 따른 값을 구하기 위해 다음 Fig.

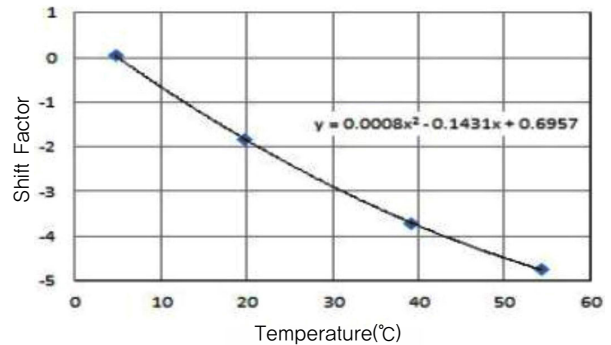
4와 같이 Eq. (2)를 이용하여 각 공시체에 대한 2차회귀방정식을 결정하였다.



(a) 10% Porosity Specimen



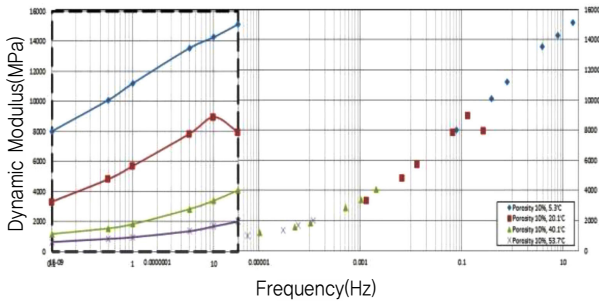
(b) 15% Porosity Specimen



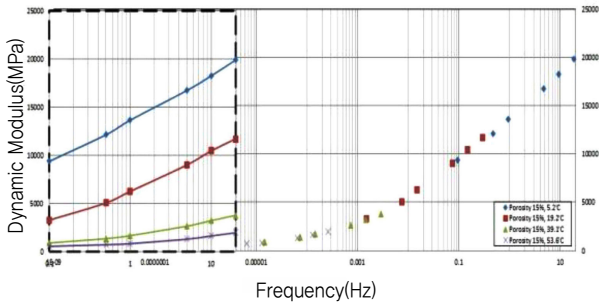
(c) 20% Porosity Specimen

Fig. 4 Log-Log Shift Factor Regression

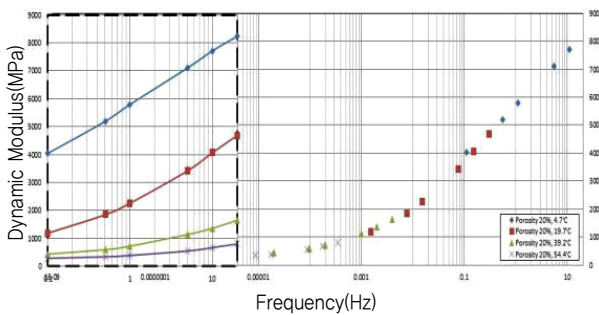
이러한 전이함수의 2차회귀방정식은 TTSP를 적용하기 위해 중요한 함수로 작용한다. 이 방정식에 의해 각 온도에 해당하는 Frequency를 Reduced Frequency로 변환시켜 다음 Fig. 5와 같이 다양한 주파수에 대한 동탄성계수를 확인가능한 마스터커브를 작도하였다. Fig. 5에서 왼쪽은 전이시키기 전 주파수에 따른 동탄성계수를 나타내며 오른쪽은 전이가 완료된 마스터커브를 나타낸다.



(a) 10% Porosity Specimen



(b) 15% Porosity Specimen



(c) 20% Porosity Specimen

Fig. 5 Log-Dynamic Modulus Master Curve

4.2. Non-Destructive Test(Temp-Dynamic Modulus)

이미 언급되어진 DSRM이론과 CWRM이론의 두 가지 방법에 의해 공시체의 동탄성계수를 결정하였다. 두 방법은 도출되는 결과만 다를 뿐 한 실험에 의해 도출되는 것이므로 공시체의 재료적 성질과 고유진동수(f_n)는 모두 같다.

그러나 CWRM이론을 적용하는 것에 있어, 전달율의 손실에 따른 오차범위가 매우 적다고 기존 연구에서 판단하여 파의 전달의 손실오차를 고려하지 않은 경우 (Dynamic Modulus)와 손실오차를 고려한 경우 (Reduced Dynamic Modulus) 2가지로 온도 별 동탄성계수를 산정하였다.

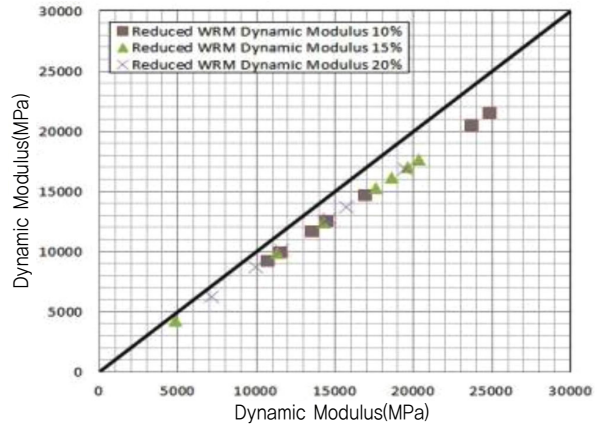


Fig. 6 Dynamic Modulus vs Reduced Dynamic Modulus

그 결과 파의 전달에 있어서 손실의 크기는 0.0001로 측정된 동탄성계수에 약 0.87배가 된다.

동탄성계수를 구하는 또 다른 한 방법인 DSRM이론의 위 Eq. (11)을 이용하여 온도 별 동탄성계수를 Fig. 7과 같이 도출하였다.

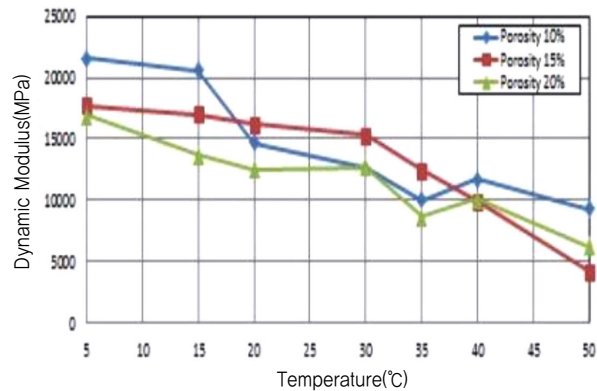


Fig. 7 Dynamic Modulus for DSRM

산출된 세 가지 동탄성계수의 크기를 서로 비교하기 위해 다음 Fig. 8과 같이 도시화하였다.

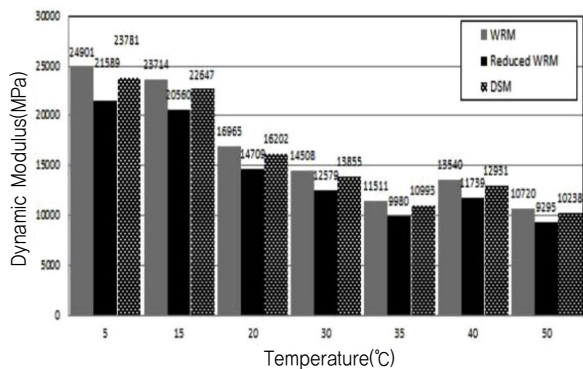


Fig. 8 Dynamic Modulus from IRT

온도에 따른 동탄성계수를 산정한 결과 DSRM의 손실을 고려하지 않은 경우 결과가 가장 크게 도출되었으며 그 다음 CWRM으로 인한 동탄성계수가 큰 것으로 나타났다.

5. 동탄성계수 예측 모델

본 연구에서 도출하고자 하는 동탄성계수는 DSRM의 손실을 고려하지 않은 경우의 동탄성계수를 이용하고자 함이다. 본 연구에서 수행한 시험은 비파괴시험과 파괴시험이다. 하지만 본 연구에서 진행한 두 시험방법 중 현재 MTS사의 만능시험기가 가장 큰 공신력을 얻고 있다. 따라서 본 연구에서 초점을 맞춘 DSRM의 Eq. (9)를 활용하여 동탄성계수 예측 모델을 개발하고자 한다. 이를 수행하기 위하여 현재 공신력을 얻고 있는 만능시험기에 의한 마스터커브를 IRT 시험결과와 비교함으로써 어느 정도 두 결과 값이 상관관계를 갖는지 확인하고자 한다. 이를 위해 모든 표본에서 공극률 10%의 동탄성계수에 대해 전위함수를 활용하여 IRT 시험결과인 동탄성계수를 다음 Fig. 9와 같이 전이시켰다.

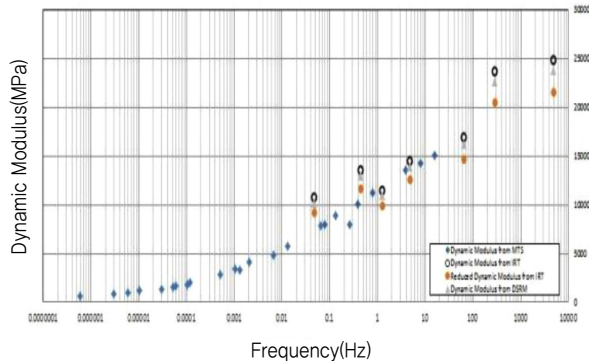


Fig. 9 Dynamic Modulus Master Curve

만능시험기에 의한 실험결과의 오차를 계산하기 위하여 Root Mean Square Error(RMSE)분석과 오차율을 계산하기 위한 Mean Percentage Error(MPE)분석을 실시하였다. 다음 Eq. (12), (13)은 각각 RMSE와 MPE에 대한 식이다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (E_{MTS, n}^* - E_{another, n}^*)^2} \quad (12)$$

$$MPE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{freq=1}^N \frac{E_{max, freq}^* - E_{min, freq}^*}{E_{max, freq}^*}} \quad (13)$$

여기서 N은 주파수의 개수이므로 만능시험기를 이용한 경우 측정주파수와 IRT 시험의 주파수의 수이므로 총 13개의 표본에 대해 비교를 실시하였다. E_{max}^*, E_{min}^* 은 MTS와 다른 IRT 실험에 대한 동탄성계수 값 중 최대값과 최소값을 의미한다. 이로 인한 결과는 다음 Table 2와 같다.

Table 2. RMSE and MPE Results

Comparison Target	RMSE(MPa)	MPE(%)
Dynamic Moduli(CWRM)	1951.6	13.7
Reduced Dynamic Moduli(CWRM)	637.7	3.7
Dynamic Moduli(DSRM)	1285.7	9.2

Eq. (9)에서 공시체의 구성성질은 변화시켜 줄 수 없다. 따라서 전달손실에 의한 보정값을 임의의 수로 지정하여 정수를 포함하여 이를 고정상수로 판단하여 최적화기법으로 찾아나가도록 한다. 예측 모델을 위한 상수는 최적화기법 중 단순한 오차에 의한 반복수행의 기법을 사용하였으며 최종적으로 14.13의 최적화 정수가 도출되었다. 이를 실제 IRT실험의 결과에 부합시켜본 결과는 다음 Fig. 10과 같다.

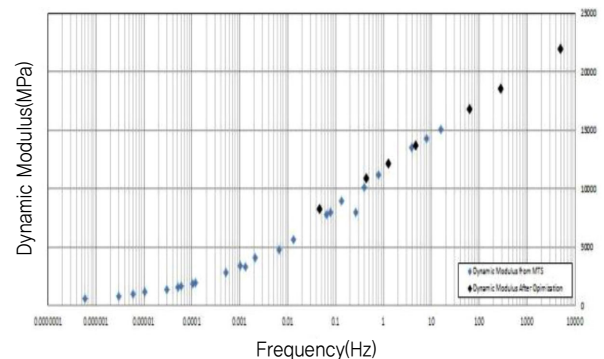


Fig. 10 Dynamic Modulus After the Optimization

이로부터 RMSE는 초기 583.5MPa로 감소하였으며, MPE역시 3.5%로 감소하였다.

6. 결론

본 연구에서는 기존연구의 IRT 실험을 통해 전달에 대한 손실을 고려하지 않는 경우 동탄성계수와 손실을 고려한 동탄성계수, DSRM이론을 통한 동탄성계수가 만능시험기를 통해 도출된 동탄성계수와 어느정도 차이가 있는지를 확인하고, 최적화 기법을 활용하여 CWRM에 대

한 동탄성계수의 상수를 결정하여 가장 적은 오차를 갖는 동탄성계수 예측 모델을 개발하고자 하는 것에 목적을 두었다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 본 연구의 시험 수행방법 중 만능시험기가 가장 공신력이 있다고 판단하여 이로 도출된 동탄성계수와 다양한 방법으로 IRT 시험에 의한 동탄성계수를 비교해본 결과 파동의 전달에서 손실율을 고려한 경우 MPE와 RMSE가 가장 적다는 것을 확인하였다.
2. IRT 실험을 통한 동탄성계수와 만능시험기의 동탄성계수의 결과를 비교해본 결과 만약 파의 전달손실계수를 구하지 못하는 경우 Dynamic Stiffness Resonance Method를 사용하는 것이 Complex Wave Resonance Method를 이용하는 것보다 오차를 줄일 수 있다고 사료된다.
3. 만능시험기에 의한 실험과 IRT 시험을 모두 실시한 경우에는 전달손실을 고려하여 동탄성계수를 구하는 것보다 최적화 기법을 사용하여 동탄성계수 예측 모델을 구성하는 것이 오차를 줄일 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030040).

References

Beom-Seok Jung, Jae-Hoan Lee and Gi-Chul Kweon, Application of Impact Resonance Test to the Determination of Elastic Modulus and Damping Ratio of Concrete, Journal of the Korea

Concrete Institute, 22(5), pp. 625-632. 2010.

J. K. Van Vesor, L. Premkumar, G. Chehab and J.L Rose, Measuring the Complex Modulus of Asphalt Concrete Using Ultrasonic Testing, Journal of Engineering Science and Technology Review, 4(2), pp. 160-168. 2011.

Jang, ByungKwan, Kim, DoWan, Mun, SungHo, Yang, SungLin and Jang, YeongSun, Study on Dynamic Modulus Change Measurement of Permeable Asphalt Mixtures with Various Porosity using Non-Destructive Impact Wave, Journal of Korean Society of Road Engineers, 15(3), pp. 65-74. 2013.

Kim, hyunOh, Lee, KwanHo and Kim, JoonKi, Master Curve of Dynamic Modulus for Hot Mix Asphalt, Presentation, Journal of Korean Society of Road Engineers, 7, pp. 177-182. 2005.

Kim, hyeonOh and Lee, KwanHo, Comparison and Evaluation of Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt with Different Shift Factors, Journal of Korean Society of Road Engineers, 15(1), pp. 87-94. 2013.

Kweon, Gichul and Lee, Jaehaon. Evaluation of Effect on Impact Resonance Test for Determining Modulus of Asphalt Concrete, Journal of Korean Society of Road Engineers, 9(2), pp. 89-99. 2007.

Lee, Jaehaon and Kweon, Gichul, Evaluation of Freeze-Thaw Effect on the Modulus of Subgrade Soils from Impact Resonance Test, Journal of Korean Society of Road Engineers, 12(3), pp. 71-77. 2010.

Oyadiji S. O. and Tomlinson G.R. Determination Of The Complex Moduli Of Viscoelastic Structural Elements By Resonance And Non-Resonance Methods, Journal of Sound and Vibration, 101(3), pp. 277-298. 1985.

Yoon, TaeYoung, Ham, SangMin and Yoo, PyoungJun. Characteristics of Dynamic Shear Modulus Mastercurve of Aged or Unaged Asphalt Binder, Journal of Korean Society of Road Engineers, 15(1), pp. 87-94. 2013.