

비파괴 충격파를 이용한 아스팔트 공시체의 수분민감도 평가

Evaluation for Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures using Non-Destructive Impact Wave

| | | |
|-----|------------------|---|
| 장병관 | Jang, Byung Kwan | 정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정 (E-mail : sheraphim27@nate.com) |
| 김도완 | Kim, Do Wan | 정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정 (E-mail : marinater@hanmail.net) |
| 문성호 | Mun, Sung Ho | 정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 조교수 · 교신저자 (E-mail : smun@seoultech.ac.kr) |
| 장영선 | Jang, Yeong Sun | 정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정 (E-mail : marinater@hanmail.net) |

ABSTRACT

PURPOSES : This study is to evaluate moisture susceptibility of asphalt mixtures by using non-destructive impact wave and to determine durability so as to decrease the gap between before and after freezing in the future.

METHODS : Using non-destructive impact wave, this study is to determine the dynamic modulus of asphalt specimen. Furthermore, the results obtained from two experiment accelerometers are used for the dynamic modulus determination. The dynamic moduli of specimens are compared with those of the freezing-thawing specimens.

RESULTS : Test results showed that the dynamic modulus before freezing and thawing environment loads at each temperature dropped about 3.7% after the environmental loads. Furthermore, correlation analysis indicates that transition of dynamic modulus at each point is about 89.59%.

CONCLUSIONS : Evaluation of asphalt mixtures using non-destructive impact wave has excellent repeatability and simple equipment for the test. Consequently, the method in the study will be useful for evaluating the characteristics of a various asphalt mixtures.

Keywords

non-destructive impact wave, dynamic modulus, temperature, MPE (Mean Percentage Error), RMSE (Root Mean Square Error), correlation analysis

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)

1. 서론

1.1. 연구배경 및 목적

최근 환경에 대한 관심이 커져가고 있는 상황에서 기후변화에 대한 국내외연구가 활발히 진행 중에 있다. 특히, 우리나라는 기후변화의 영향으로 최근 여름철 이 상 고온과 폭우발생 빈도 및 강도가 증가하고 있다. 빈

번히 발생하는 대형 폭우와 이상 고온, 겨울철의 한랭한 기온에 의해 도시의 아스팔트 포장에 수축과 팽창을 반복하며 균열과 소성변형, 포트홀 등 다양한 형태의 파손이 진행 중에 있다. 도로포장의 파손은 교통사고를 유발할 뿐만 아니라, 유지보수 비용의 증가를 초래하고 인적·물리적 피해를 가져오고 있다.

현재 도로분야는 기후변화에 따른 피해를 최소화하기 위한 투수성 아스팔트 포장 연구에 몰두하고 있다. 투수성 아스팔트 포장은 열섬현상의 감소, 도시홍수의 억제, 배수시설의 부하 경감 등 기후변화에 대한 여러 가지 문제들을 저감시킬 수 있는 것으로 기대되고 있다. 하지만 투수성 포장은 물과의 접촉으로 강도와 안정도가 저하되는 것으로 보고되고 있다. 이러한 현상은 물을 포함한 아스팔트 혼합물이 동결하면 공극내의 수분이 팽창하여 내부 응력을 유발하고 미세균열을 발생시키기 때문이다.

본 연구에서는 향후 기후변화에 대비하여 향상된 내구성과 강도를 가진 투수성 포장 공시체를 제작하기 위해 비파괴 충격파를 이용하여 구해진 실험적 데이터를 이용, 투수성 포장의 수분민감도를 평가하고자 한다. 수분민감도 평가는 다양한 온도조건, 하중, 속도를 이용하여 다양한 교통조건을 묘사할 수 있는 동탄성계수를 측정하여 평가하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 실험 장비

본 연구는 비파괴 충격파를 이용하여 동적 탄성계수를 측정하고 수분민감도를 평가하기 위해 Accerlerometer-Types 4516(Output, Input)을 각 1개씩 2개 사용하였으며, 공시체의 온도를 측정하기 위한 온도계 및 Bruel & Kjaer의 신호분석기인 Type 3050-A-040을 사용하였다.

2.2. 시편제작

아스팔트 포장체는 골재 배열에 따라 기본적인 물성에 차이가 난다. 아스팔트 다짐 방법 중 마샬다짐은 기본적으로 충격하중을 이용하여 공시체를 다지는 방법으로 골재가 파손되어 현장에서 사용되는 롤러다짐의 포설 방법과는 다르다. 따라서 본 연구에서는 현장상황과 가장 유사한 공시체를 만들기 위하여 선회다짐기를 이용한 투수성 포장 공시체를 제작하였다.

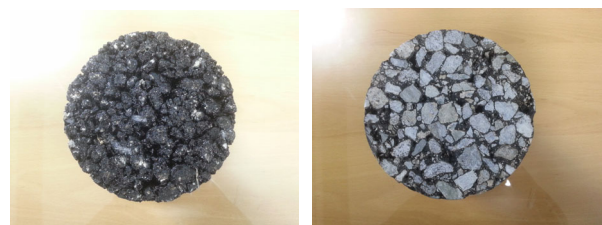
본 연구에서는 Table 1과 같이 골재를 배합하고 선회다짐기(Gyratory Compactor)를 이용하여 높이 178mm, 지름 150mm의 공시체를 제작하였다. 공시체의 공극률은 15%로 다짐 시 무게 6623g으로 조정하여 공극률을 맞추었다. 또한 비파괴 충격파를 이용한 동탄성계수의 결정을 위한 공시체를 만들기 위하여 높이 178mm, 지름 150mm로 제작된 공시체를 높이 150mm, 지름 100mm로 코어링 하였다.

Table 1. Recipe for Mixing Asphalt Concrete

| Recipe | |
|-------------------|-----------|
| Type | Weight(g) |
| SMA O-19 | 270 |
| SMA O-13 | 2465 |
| SMA O-10 | 3106 |
| 8# | 101 |
| 16# | 203 |
| 30# | 169 |
| 50# | 68 |
| 100# | 68 |
| 200# | 68 |
| Filler | 246 |
| AP(PG 76-22) | 298.32 |
| Additives(rubber) | 40.68 |

이는 코어링을 하지 않으면 시편 제작이 훨씬 간편하나, Fig. 1에서와 같이 표면이 거칠고 공시체 표면과 내부의 밀도차가 생기게 된다. 또한 표면에 공극이 커 온도에 따른 수분민감도 평가를 위한 동탄성계수 측정 시, 저온과 고온의 반복으로 공시체 표면에 이탈현상이 발생하는 문제점이 있다.

따라서 높이 150mm, 지름 100mm로 공시체를 제작하는 것이 바람직하며, 이는 Fig. 2와 같이 골재의 입도가 가장 고르게 분포되어있는 부분을 이용하여 비파괴 충격파를 이용한 동탄성계수 측정에 정확성을 가지기 위함이다.



(a) Before Coring (b) After Coring

Fig. 1 Specimen of Before and After Coring

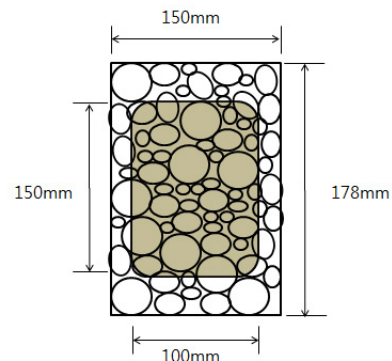


Fig. 2 Sectional View of Specimen

본 연구에서는 공시체 제작과정을 거쳐 공극률 14.71%를 갖는 투수성 포장 공시체를 이용하여 수분민감도를 평가하기 위한 비파괴 충격파 실험을 진행하였다. Table 2는 실험을 위해 제작한 공시체의 제원을 나타낸다.

Table 2. Data of Specimen for Evaluating Moisture Susceptibility

| Height (cm) | Diameter (cm) | Volume (cm ³) | Dry weight (g) | Porosity (%) |
|-------------|---------------|---------------------------|----------------|--------------|
| 15.025 | 10.007 | 1181.740 | 2496.5 | 14.71 |

2.3. 실험방법

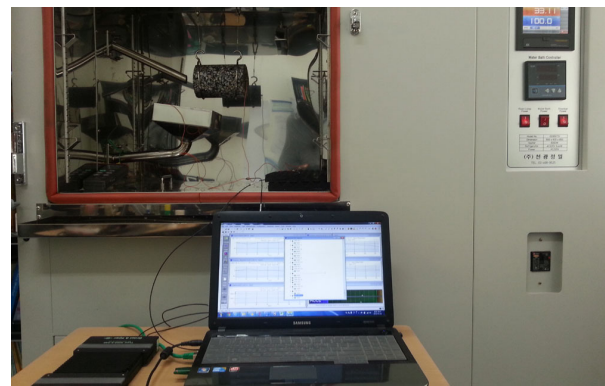
본 연구는 공극률 14.71%의 공시체를 이용하였으며, 각 온도별 5℃, 10℃, 15℃, 20℃, 25℃, 30℃, 35℃, 40℃, 45℃, 50℃의 공진 주파수(Resonance Frequency)를 측정하였다. 각 온도는 항온항습기에 8시간씩 보관하여 내·외부 온도를 맞추었다. 공시체는 Fig. 3과 같이 얇은 와이어(wire)끈을 이용하여 Free-Free 조건으로 공중에 매달았으며, Accelerometer(Input)은 중앙을 타격하는 쇠구슬을 피하여 약 1cm 떨어진 거리에 부착하였다. 마지막으로 Accelerometer(Output)은 공시체의 중앙에 B-Wax를 이용하여 부착하였다.

주파수의 측정은 슬라이딩대에 쇠구슬을 굴려 Accelerometer Input과 Output에 입력된 신호를 취합하였다.

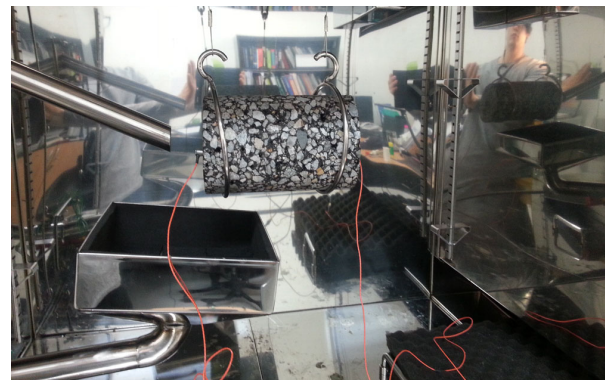
수분민감도를 평가하기 위하여 앞서 실험했던 공시체를 KS F2398 아스팔트 혼합물의 수분저항성 시험방법 규정에 근거하여 실험하였다. 하지만 KS F2398은 밀입도 포장 공시체를 기준으로 한 방법으로 본 연구의 투수성 포장 공시체와는 다르다. 투수성 포장 공시체는 항온 수조에 넣었을 때, 밀입도 포장 공시체와는 다르게 즉시 포화가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 25±1℃의 항온 수조에 각 투수성 포장 공시체를 1시간가량 모든 기포가 제거되도록 물속에 충분히 포화시켰다. 투수성 포장 공시체는 밀입도 포장에 비해 공시체 내부 공극의 크다. 따라서 동결이 되어 내부 공극에 물이 팽창하여도 밀입도 포장에 비해 균열에 대한 동탄성계수 측정 시 실험값이 미미하게 나타내게 된다. 따라서 본 연구에서는 KS F2398보다 낮은 온도인 -20±1℃의 항온항습기에 24시간동안 동결시켰다. 동결 후 60±1℃의 항온수조에 동결된 공시체를 다시 24시간 동안 용해시키고 다시 25±1℃로 설정한 항온항습기에 공시체가 충분히 마를 때까지 약 24시간 방치하였다. 그 후 공시체의 동결 전과 후의 동탄성계수 측정값을 비교하기 위하여 앞서 실험했던 방법을 토대로 반복 실험을 하였다.

3. 비파괴 충격파를 이용한 동탄성계수의 결정방법

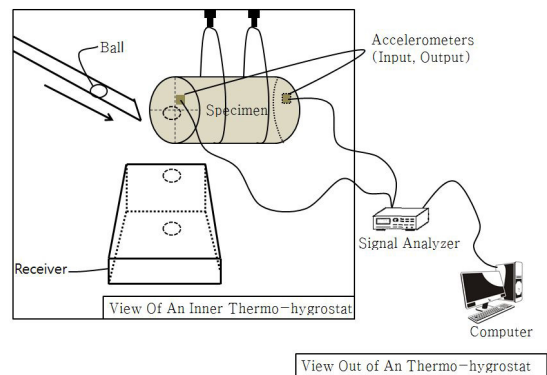
기존의 만능시험기는 다양한 주파수 및 온도별 Sinusoidal 형태의 압축하중에 따른 변형값을 측정하여 동탄성계수를 측정하였다. 또한 복잡한 시험과정과 더불어 요구되는 시간이 많이 걸리는 문제점이 있다. 하지만 본 연구에서 사용한 비파괴 충격파 실험법은 우수한 반복성과 간편한 실험절차 및 적은 비용으로 동탄성계수의 측정이 가능하다. 따라서 비파괴 충격파를 이용한 실험방법으로 수분민감도를 평가하고자 한다.



(a) View Out of an Thermo-hygrostat



(b) View of an Inner Thermo-hygrostat



(c) System of Non-Destructive Impact Wave

Fig. 3 Equipment for Experiment Using Non-Destructive Impact Wave

본 연구에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 비파괴 충격파를 이용하여 온도 및 충격파의 주파수별로 가속도 값을 측정하고, 시편의 온도에 따른 가속도값은 시편을 항온항습기에서 넣어 두어 일정하게 원하는 온도에 도달하였을 때 그 시편을 꺼낸 후 공중에 매달아 쇠구슬을 이용하여 충격을 가해 그에 따른 양측면의 가속도값을 측정하였다.

즉, 양측면의 가속도계로부터 체적파(Body Wave)의 일종인 P파의 전달속도를 구하였다. 여기의 P파는 축방향 변위가 허용되는 봉(Bar)과 같은 형태의 매질인 시편을 이용함에 따라 참고문헌(S. O. Oyadiji 등; 1985)에 상세히 설명이 되어있는 Eq. (1)의 관계식을 이용하여 탄성계수를 구하였다.

$$E_n = 16\rho f^2 L^2 / (2n-1)^2 \quad (1)$$

여기서, E_n 는 탄성계수, ρ 는 공시체의 밀도, f 는 각 온도별 주파수, L 은 공시체의 길이 그리고 n 은 자유도의 수이다. 즉, 실험을 통해 측정한 값인 전달속도 및 밀도를 이용하여 탄성계수를 구할 수 있다. 따라서 반복성이 뛰어난 비파괴 충격파를 이용하여 구한 측정치를 비교 및 분석을 수행하여 아스팔트 공시체의 수분민감도를 평가하고자 하였다.

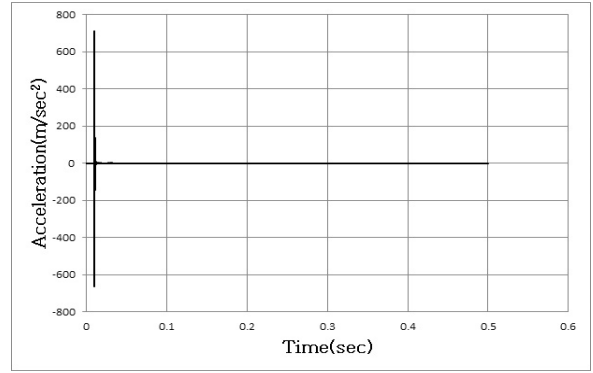
4. 신호(Signal) 비교 분석

비파괴 충격파 시험은 시편의 한쪽 부분에 충격하중(Impulse)를 재하하고 이때의 신호(Signal)를 시편의 반대쪽에서 측정하여 공진주파수(Resonance Frequency)와 감쇠비(Damping Ratio)를 측정하여야 한다. 또한 아스팔트 혼합물의 점탄성적인 특성을 고려하여 비파괴 충격파를 이용한 수분민감도를 평가하기 위해서는 실험을 통하여 얻어진 여러 가지 신호(Signal)을 종합적으로 판단하는 것이 중요하다.

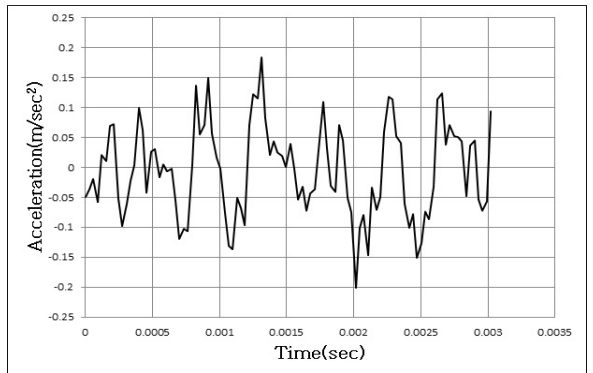
따라서 본 연구에서는 Time Function, Time Weighting Function, Coherence Function, Frequency Response Function의 신호(Signal)을 비교 분석하였다.

4.1. Time Function

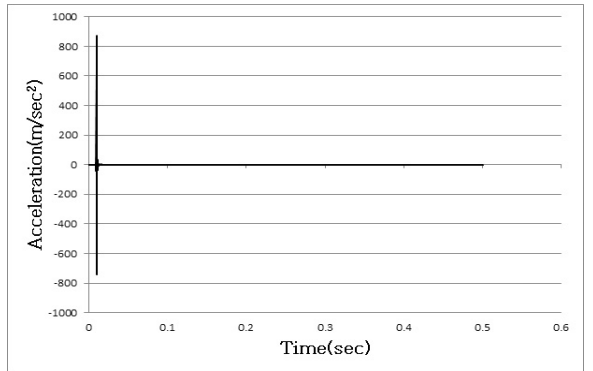
본 연구의 실험방법은 비파괴 충격파를 이용한 임펄스 가진(Impulse Excitation)으로 매우 짧은 시간동안 가해지는 충격 하중이다.



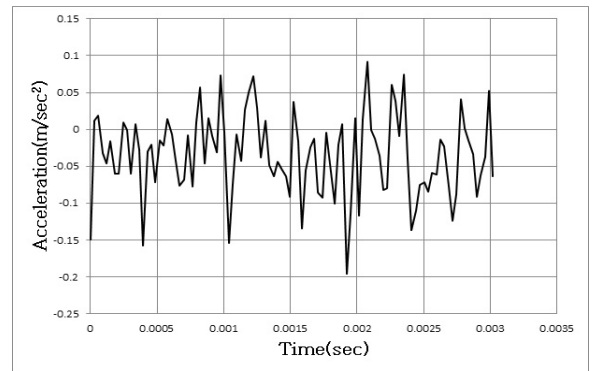
(a) Impulse Signal at the Input Accelerometer



(b) Rippling Noise Signal at the Input Accelerometer



(c) Impulse Signal at the Output Accelerometer



(d) Rippling Noise Signal at the Output Accelerometer

Fig. 4 Impact Signal Obtained from the Output Accelerometer at Normal Specimen

따라서 Input과 Output의 시간함수는 Fig. 4와 같이 매우 짧은 시간에 복잡한 잡음(Noise)을 갖게 된다. 또한 임펄스 가진(Impulse Excitation)에 대한 Input Data는 구슬을 굴러 충격하중을 가한 것을 묘사하기 위하여 Fig. 5과 같이 Rectangular Weighting Function으로 실험의 조건을 유지하였으며, Output Data는 시편의 한쪽에 임펄스 가진(Impulse Excitation)후 반대쪽에 하중이 전달되는 모습을 묘사하기 위하여 Fig. 6처럼 Exponential Weighting Function으로 실험을 하였다.

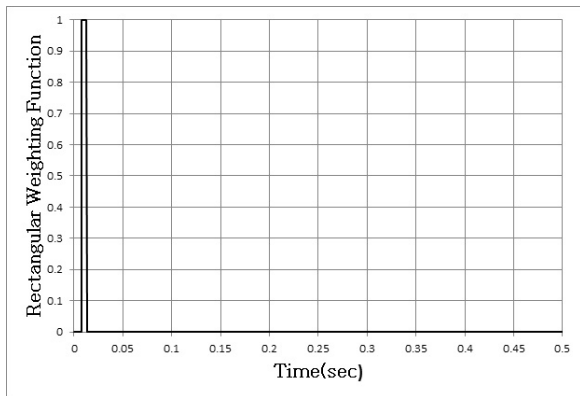


Fig. 5 Rectangular Weighting Function Obtained from Input Accelerometer at Normal Specimen

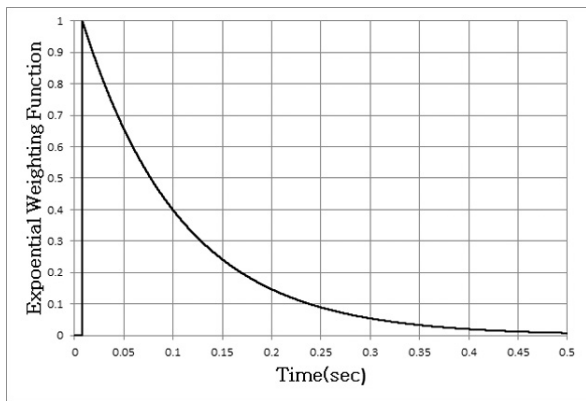


Fig. 6 Exponential Weighting Function Obtained from Output Accelerometer at Normal Specimen

4.2. FRF와 Coherence

비파괴 충격파를 이용한 실험에서 쇠구슬 직경, 타격 및 신호측정 위치, 시편거치조건, 신호획득 속도 등은 시편의 물성을 변화시키지 않는 시험조건이며 실험온도는 아스팔트 콘크리트 시편 자체의 물성을 변화시키는 조건이다(권기철 등, 2007).

본 연구의 실험방법으로 측정한 공진주파수(Resonance Frequency)는 아스팔트 콘크리트의 온도

에 가장 민감하게 반응하며, 비파괴충격파를 이용한 동탄성계수를 구하기 위해 가장 중요한 Parameter라고 할 수 있다. 공진주파수(Resonance Frequency)는 주파수 응답함수(FRF)의 가장 꼭대기(Peak) 지점을 측정하여 구할 수 있다. 공진주파수(Resonance Frequency)를 측정한 후, 앞서 언급한 Eq. (1), $E_n = 16pf^2L^2/(2n-1)^2$ 를 사용하여 탄성계수 E를 간단하게 구할 수 있다. 각각의 Input과 Output의 Accelerometer에서 구해진 온도별 주파수 응답함수(Frequency Response Function)는 Fig. 7과 같다.

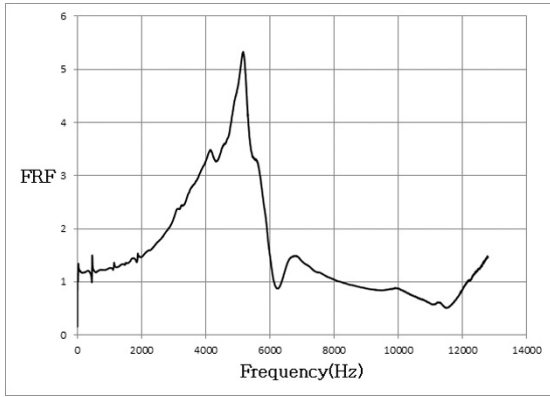
가속도계(Accelerometer)를 이용한 주파수응답함수(FRF)의 측정은 진동시험 중에 하나이며, 신호들은 여러 형태의 잡음(noise)을 포함한다. 따라서 기여도 함수를 이용하여 실험의 신뢰도를 파악해야만 한다. 기여도 함수(X^2)는 다음과 같이 정의된다.

$$X^2 = \frac{|S_{xy}(w)|^2}{S_{xx}(w)S_{yy}(w)} \quad (2)$$

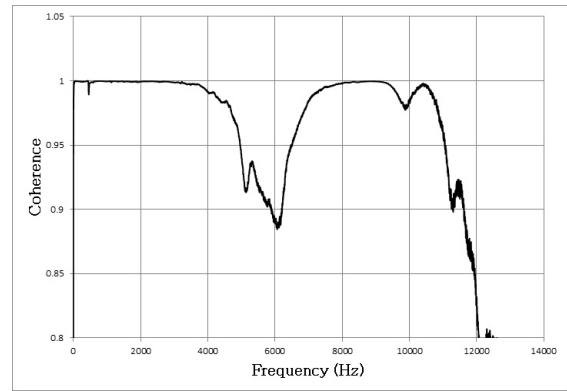
여기서, $S_{xx}(w)$ 는 입력에 대한 파워 스펙트럼 밀도이며, $S_{yy}(w)$ 는 출력에 대한 파워 스펙트럼 밀도, $S_{xy}(w)$ 는 입·출력에 대한 상호 스펙트럼밀도 함수이다. 즉, 실험 시 입력(Input)신호와 출력(Output)신호의 상호 연관성을 나타내는 기여함수(Coherence Function)를 측정하여 실험의 신뢰도를 높였다.

기여도함수는 항상 0에서 1의 값을 가지며 실험의 일관성이 유지되었다면, Eq. (2)의 기여도함수는 1의 값을 가진다. 하지만 실험과정에 있어서 잡음(noise)이 포함된다면 기여도함수는 1을 나타낼 수 없다.

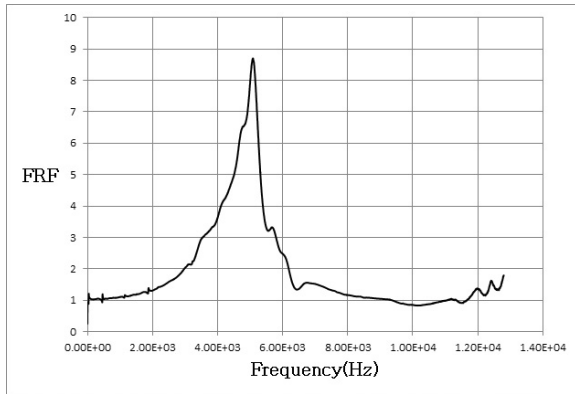
본 연구에서는 실험의 신뢰도를 측정하기 위해 Fig. 7과 같이 각 온도별 5℃, 10℃, 15℃, 20℃, 25℃, 30℃, 35℃, 40℃, 45℃, 50℃의 주파수 응답함수(FRF)와 기여도함수를 측정하였다. 기여도함수는 전체적으로 1에 가까운 값을 나타내지만, 주파수응답함수(FRF)의 Peak 지점 부분에서는 반공진 지점이 되므로 기여도함수가 갑작스럽게 떨어지는 것을 알 수 있다.



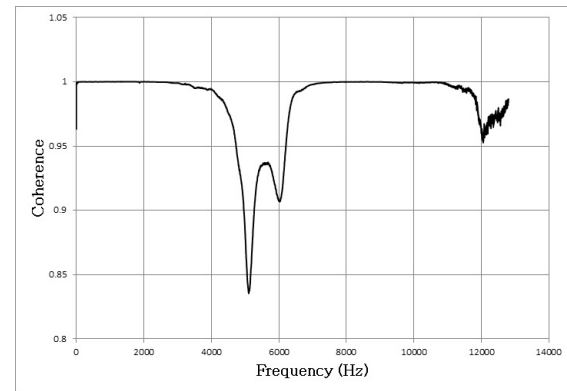
(a) FRF based on the Input and Output Signals at 5°C



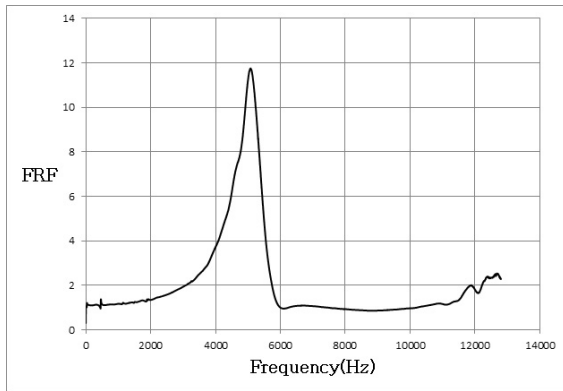
(b) Coherence based on the Input and Output Signals at 5°C



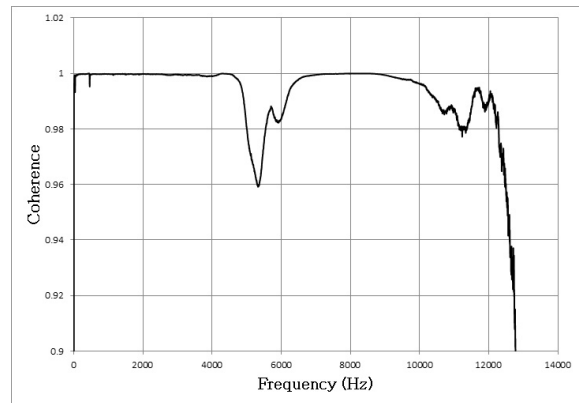
(c) FRF based on the Input and Output Signals at 10°C



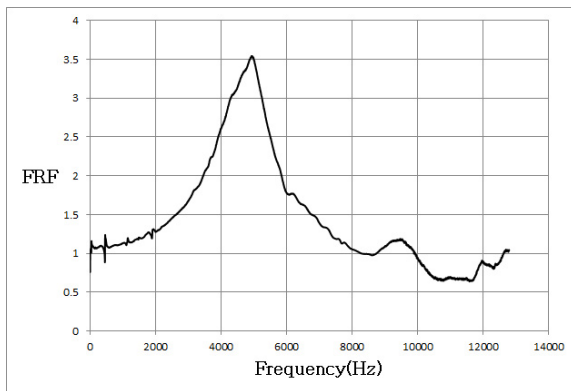
(d) Coherence based on the Input and Output Signals at 10°C



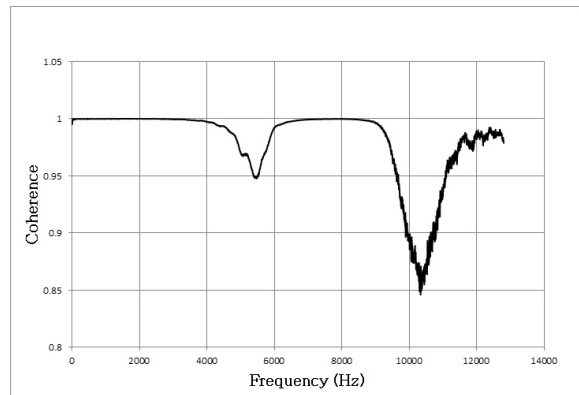
(e) FRF based on the Input and Output Signals at 15°C



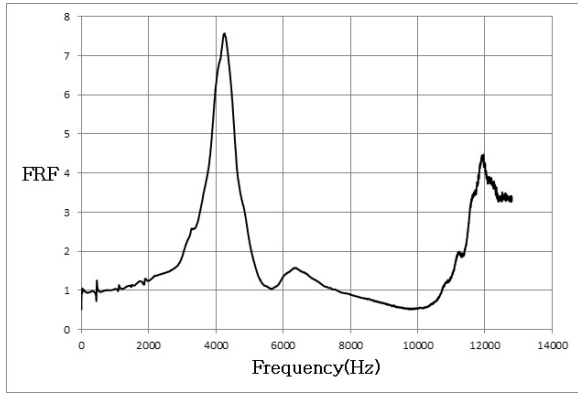
(f) Coherence based on the Input and Output Signals at 15°C



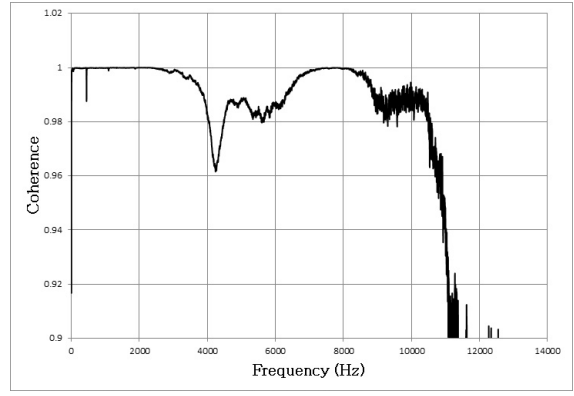
(g) FRF based on the Input and Output Signals at 20°C



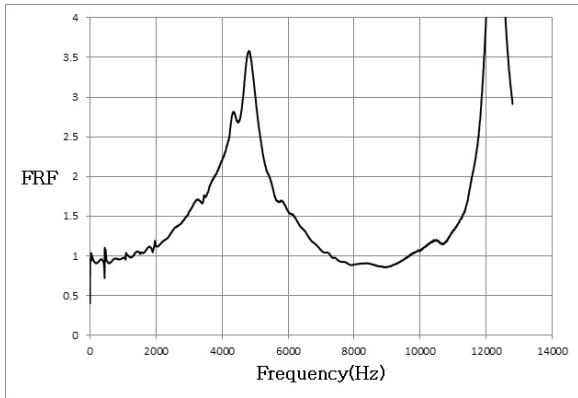
(h) Coherence based on the Input and Output Signals at 20°C



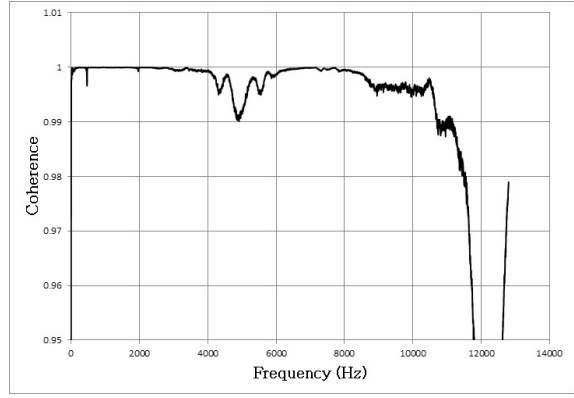
(i) FRF based on the Input and Output Signals at 25°C



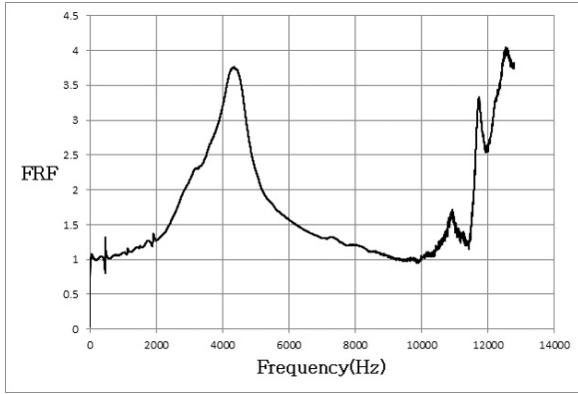
(j) Coherence based on the Input and Output Signals at 25°C



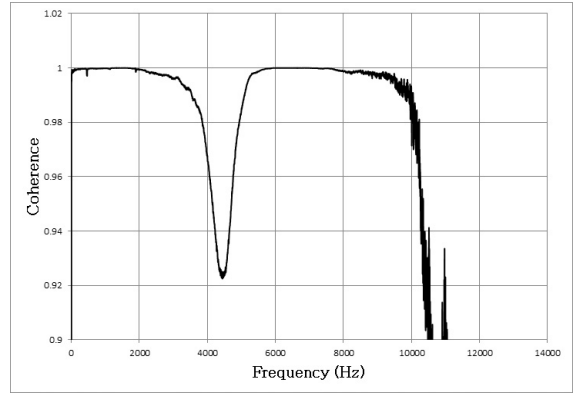
(k) FRF based on the Input and Output Signals at 30°C



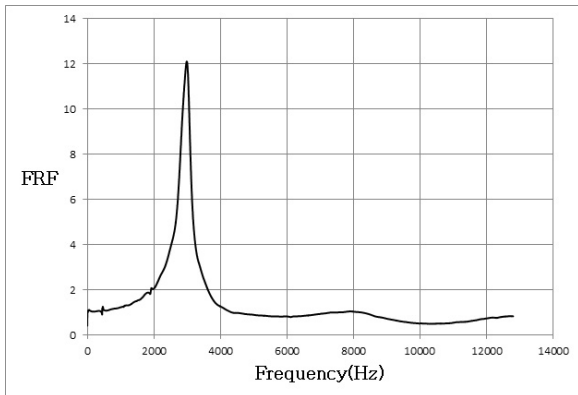
(l) Coherence based on the Input and Output Signals at 30°C



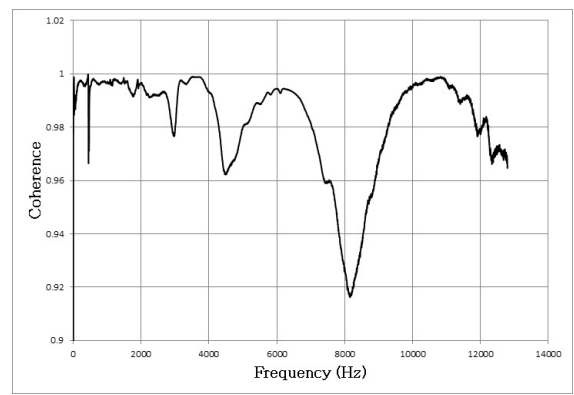
(m) FRF based on the Input and Output Signals at 35°C



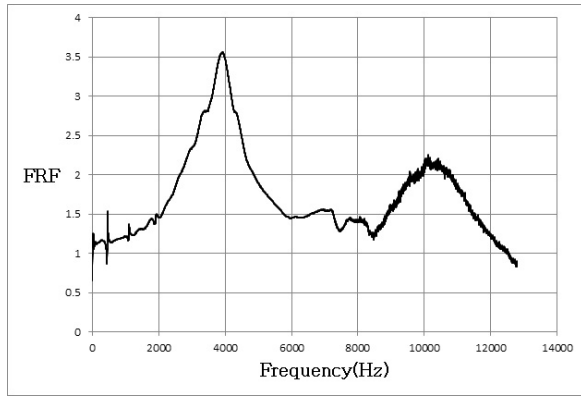
(n) Coherence based on the Input and Output Signals at 35°C



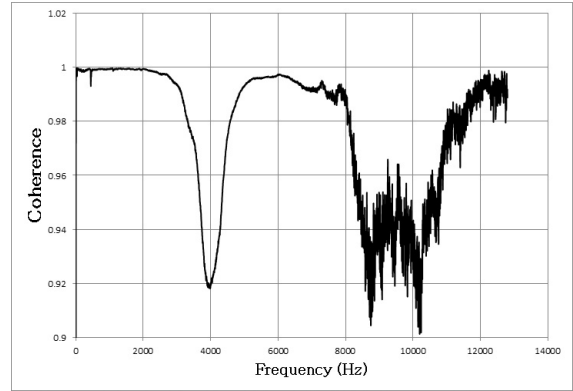
(o) FRF based on the Input and Output Signals at 40°C



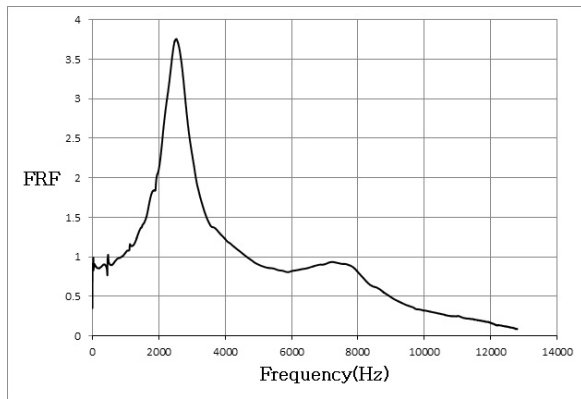
(p) Coherence based on the Input and Output Signals at 40°C



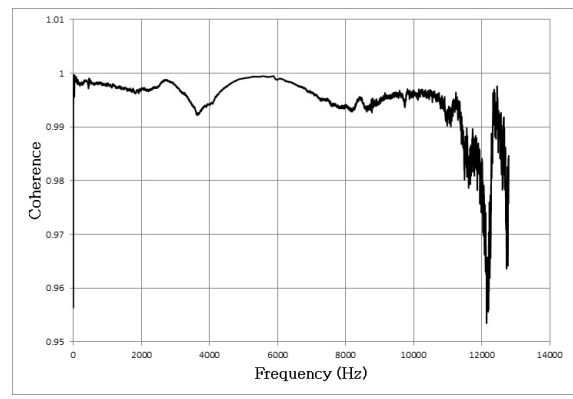
(q) FRF based on the Input and Output Signals at 45°C



(r) Coherence based on the Input and Output Signals at 45°C



(s) FRF based on the Input and Output Signals at 50°C



(t) Coherence based on the Input and Output Signals at 50°C

Fig. 7 FRF and Coherence of Normal Specimen at each Temperature

Table 3. Frequency of Peak Point at each Temperature

| Temperature | Hz | |
|-------------|--------|----------------|
| | Normal | First Freezing |
| 5°C | 5170 | 5026 |
| 10°C | 5090 | 4922 |
| 15°C | 5074 | 4678 |
| 20°C | 4942 | 4352 |
| 25°C | 4270 | 3880 |
| 30°C | 4306 | 4040 |
| 35°C | 4334 | 3966 |
| 40°C | 2986 | 3878 |
| 45°C | 3916 | 3614 |
| 50°C | 2534 | 3078 |

5. 비파괴 충격파를 이용한 동적탄성계수 산정

동탄성계수는 사용된 골재의 입도, 아스팔트 바인더에 따라서 변화하며, 다양한 온도조건, 하중, 속도를 이용하여 다양한 재료의 성질을 묘사할 수 있는 물성치 평가방법이다.

진동학의 기초이론에 따르면 질량과 스프링으로 이루어진 진동계의 고유 원 진동수는 바로 w_n 이며, 질량(m)과 스프링의 특성(k)에 따라 고유 진동수 값이 변화됨을 알 수 있다. 이것은 다음의 식과 같이 표현된다.

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ [rad/sec]} \quad (3)$$

$$f_n = \frac{w_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ [Hz(cycle/sec)]} \quad (4)$$

여기서, k 는 스프링 상수, m 은 공시체의 질량이다.

Eq. (3)을 살펴보면, 동일한 스프링(k 값이 일정하다)에서 질량이 증대되면 고유 진동수는 작아지고, 반면에 질량이 줄어들면 커지게 됨을 알 수 있다. 마찬가지로 동일한 질량에서 스프링의 특성에 따라서 진동계의 고유 진동수도 변화된다. 스프링이 딱딱해지면(k 값이 커지면) 고유 진동수는 커지고, 부드러워지면(k 값이 줄어든다) 고유 진동수는 작아지게 된다.

위의 실험에서 공시체의 질량은 일정하며, 스프링 상수인 k 값은 온도에 따라 변화 한다고 할 수 있다. 즉,

일반적으로 온도가 높아질수록 아스팔트 혼합물은 점탄성의 성질에 따라 부드러워지고 스프링상수 k 값은 줄어들게 되어 고유진동수는 감소하고, 온도가 낮아질수록 딱딱해지고 스프링상수 k 값은 증가하게 되어 고유진동수가 증가한다.

앞서 말한, Eq. (1)을 이용하여 동결 전과 후의 동탄성계수를 구한 결과 Table 4와 같은 값이 나온다. 이것을 다시 그려보면 Fig. 8과 같다.

Table 4. Dynamic Modulus of Asphalt Mixture Before and After Freezing

| Temperature | kPa | |
|-------------|-----------------|----------------|
| | Before Freezing | After Freezing |
| 5°C | 21013 | 19859 |
| 10°C | 20368 | 19046 |
| 15°C | 20240 | 17204 |
| 20°C | 19201 | 14890 |
| 25°C | 14334 | 11835 |
| 30°C | 14577 | 12831 |
| 35°C | 14767 | 12366 |
| 40°C | 7009 | 11823 |
| 45°C | 12056 | 10268 |
| 50°C | 5048 | 7448 |

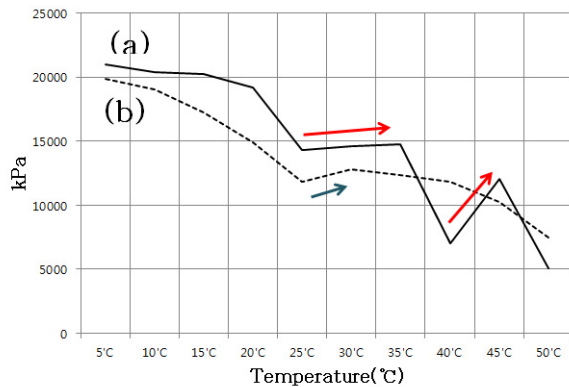


Fig. 8 Determining the Linear Dynamic Modulus of Asphalt Mixture using Non-Destructive Impact Wave (a): Before Freezing (b) After Freezing

일반적으로 온도가 높아짐에 따라 동탄성계수는 감소하는 성향을 보여야 하지만, 동결 전의 공시체는 온도 25°C와 30°C구간 그리고 40°C와 45°C에서 상승하는 경향을 보이며, 동결 후의 공시체는 온도 25°C와 30°C 구간에서 약간 증가한다. 이는 공시체 내부 온도와 상대 습도에 대한 실험적인 오차로 판단된다.

6. 동결 전·후의 동탄성계수 비교

Fig. 9의 결과를 보면 대부분의 동결 전 동탄성계수가 동결 후 동탄성계수보다 크게 측정되었음을 알 수 있다. 하지만 40°C와 50°C의 측정 결과에서 동결 후의 동탄성계수가 동결 전의 동탄성계수보다 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 동탄성계수의 동결 전과 후의 전체적 차이를 규명하기 위하여 RMSE(Root Mean Square Error)분석을 실시하였다. 각 온도마다 다른 동탄성계수의 RMSE 오차의 크기는 다음 Eq. (5)에 의해 정의된다.

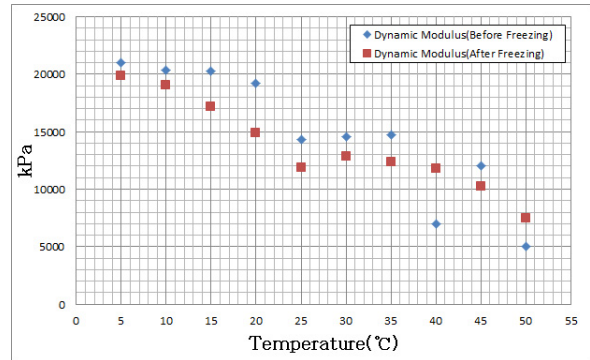


Fig. 9 Determining the Dynamic Modulus of Asphalt Mixture using Non-Destructive Impact Wave

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^{10} (E_{5t,b} - E_{5t,a})^2} \quad (5)$$

여기서, t 는 해당 온도를 의미하는 섭씨(°C)온도단위를 의미한다. 따라서 $5t$ 의 함수를 1에서 10까지 합한다는 것은 5°C단위로 5°C부터 50°C까지의 동탄성계수를 합한다는 것을 의미한다. 또한 T 는 전체 실험온도의 수이며 동결 전·후 각 10회를 실시하였으므로 10이다. E_b 와 E_a 는 각각 동결 전과 동결 후의 동탄성계수를 의미한다.

다음 Table 5는 각 온도에서의 동결 전과 후의 동탄성계수 차이 및 RMSE값을 나타낸다.

대부분 동결 전의 동탄성계수가 동결 후의 동탄성계수보다 더 큰 것으로 판단되며 40°C와 50°C에서 동결 후의 동탄성계수가 동결 전의 동탄성계수보다 큰 것과 상관없이 전체적 RMSE분석에 의한 결과는 2794.07kPa차이를 보였다.

RMSE분석은 단지 두 관계에 대한 전체적인 오차의 크기를 나타낼 뿐, 어느 정도의 관계를 갖는지를 나타내지 않는다. 따라서 동결전과 동결후의 동탄성계수 크기의 관계를 규명하기 위해 MPE(Mean Percentage Error)분석과 상관관계분석(Correlation Analysis)을

실시하였다.

Table 5. RMSE Analysis Results

| Temp | kPa | |
|------|-----------------------------------|---------|
| | The difference of Dynamic Modulus | RMSE |
| 5°C | 1154.3 | 2794.07 |
| 10°C | 1322.38 | |
| 15°C | 3036.09 | |
| 20°C | 4311.02 | |
| 25°C | 2498.89 | |
| 30°C | 1745.36 | |
| 35°C | 2401.33 | |
| 40°C | -4813.6 | |
| 45°C | 1787.83 | |
| 50°C | -2400.2 | |

MPE분석은 RMSE분석과 마찬가지로 두 관계의 오차에 대한 정도를 규명할 수 있다. 이는 두 관계의 오차를 확률적으로 표현가능하다. 이는 다음과 같은 Eq. (6)으로 표현이 가능하다.

$$MPE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{10} S(E_{s,t})$$

$$\text{where, } S(E_{s,t}) = \begin{cases} \frac{E_{\min,5t} - E_{\max,5t}}{E_{\max,5t}}, & \text{if } E_a < E_b \\ \frac{E_{\max,5t} - E_{\min,5t}}{E_{\max,5t}}, & \text{if } E_a > E_b \end{cases} \quad (6)$$

여기서, E_{\max} 와 E_{\min} 은 동결 전과 후에 관계없이 한 온도에서의 동탄성계수 중 큰 값과 작은 값을 의미한다. 합이 표현이 RMSE방법과 일치한다. 또한, 마찬가지로 T 는 온도 독립변수의 수 10을 의미한다.

만약 두 관계가 일치하는 경우 MPE값은 0을 나타낸다. MPE에서 가장 중요한 것은 기준 동탄성계수를 동결 전의 동탄성계수로 설정하였다. 따라서 기준 값보다 하락한 경우(동결 전 동탄성계수보다 동결 후 동탄성계수가 작은 경우) 음의 값을 갖게 되고 그 역의 관계에서는 양의 값을 갖게 된다. 그 결과 두 관계의 차이율은 다음 Table 6과 같다.

이 결과, 동결 전·후의 동탄성계수의 차이가 가장 크게 발생하는 부분은 40°C인 경우이며, 동결 전의 동탄성계수 기준으로 약 3.7%만큼의 차이를 보였다.

MPE는 동결전 동탄성계수를 기준으로 할 때, 차이율을 규명하였지만 동결 전과 후의 전체적 동탄성계수의 상관관계를 규명했다고 볼 수 없다. 따라서 두 관계를

규명하기 위하여 상관관계분석을 실시하였다. 상관관계 분석은 대개 회귀분석에서 회귀방정식에 대한 검증으로 사용하나 본 연구에서는 동탄성계수에 대한 두 관계를 규명하기 위하여 사용되었다.

Table 6. MPE Analysis Results

| Temperature | percentage(%) | |
|-------------|--|---------|
| | The percentage difference of Dynamic Modulus | MPE |
| 5°C | -5.493 | -3.6997 |
| 10°C | -6.4922 | |
| 15°C | -15 | |
| 20°C | -22.452 | |
| 25°C | -17.433 | |
| 30°C | -11.973 | |
| 35°C | -16.261 | |
| 40°C | 40.7124 | |
| 45°C | -14.829 | |
| 50°C | 32.224 | |

다음 Fig. 10의 동탄성계수 상관도(Correlation Diagram for the Dynamic Modulus)에서 동결 전과 동결 후의 탄성계수 관계가 직선적이라고 판단할 수 있다.

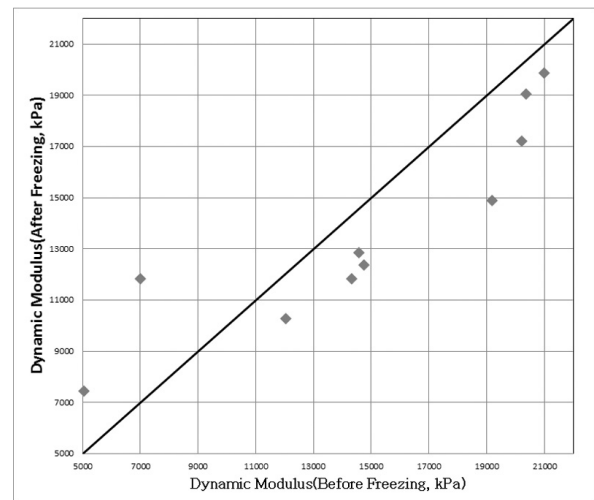


Fig. 10 Correlation Diagram for the Dynamic Modulus

따라서, Pearson의 단순상관계수(R^2 , Simple Correlation Coefficient)를 구한다. Pearson의 단순상관계수는 다음의 Eq. (7)로부터 구할 수 있다.

$$R_{XY} = \frac{\sum_{t=1}^{10} (E_{s,t,b} - \bar{E}_b)(E_{s,t,a} - \bar{E}_a)}{(n-1)S_{E_b}S_{E_a}} \quad (7)$$

여기서, E_b 와 \bar{E}_b 는 동결 전 동탄성계수의 크기 및 평균 크기이며, E_a 와 \bar{E}_a 는 동결 후 동탄성계수의 크기 및 평균 크기를 의미한다. S 는 각 표본에 대한 표준편차이며, 합의 표현은 RMSE방법과 일치한다. 그 결과 Pearson의 단순상관계수에 의한 상관도는 89.59%이다.

7. 결론

본 연구에서는 비파괴 충격파를 이용한 아스팔트 공시체의 수분민감도를 평가하기 위한 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 비파괴 충격파로 측정된 동결 전과 후의 동탄성계수는 MPE분석결과 동결 후 감소하는 것으로 판단하였으며 그 차이는 RMSE결과 값과 같다(Table 5 참조). 또한 상관관계분석결과, 동탄성계수의 온도에 따른 변화는 동결 전과 동결 후가 89.59%로 일치하는 경향을 보였다.
2. 본 연구의 실험적인 방법은 아직 정확한 기준이 없기 때문에 실험장비와 절차의 표준화가 필요하다.
3. 비파괴 충격파를 이용한 동적탄성계수 측정 방법은 아스팔트 혼합물의 점탄성적인 성질을 그대로 표현 가능하다. 따라서 온도별 주파수를 이용한 비파괴 충격파 이용이 앞으로 동적탄성계수 측정에 매우 유용하다고 판단된다.
4. 비파괴 충격파를 이용한 실험은 고가의 장비나 많은 시간이 소요되지 않는 반복성이 우수한 실험방법으로 앞으로 내구성이 있는 공시체를 개발하기 위해 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부[미래창조과학부]의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 [No. 2011-0030848].

References

- Oyadj S. O.i and Tomlinson G. R. (1985), *Determination Of The Complex Moduli Of Viscoelastic Structural Elements By Resonance And Non-Resonance Methods*
- 권기철, 이재환(2007) “아스팔트 콘크리트 탄성계수 결정을 위한 충격공진시험 영향요소 평가”, *한국도로학회 논문집*, 한국도로학회, 제 9권, 2호, pp. 89-99.
- 이관호, 조경래, 비영식, 송용선(2008) “아스팔트 바인더의 노화특성을 고려한 동탄성계수 평가”, *한국방재학회논문집*, 한국방재학회, 제8권, 3호, pp. 51-58.
- Haidong Kuai(2009). “*Top-down cracking model of asphalt pavements based on a viscoelastic fracture mechanics theory.*” 석사학위논문, 세종대학교
- 박상민(2008). “*Test method for measuring dimensional stability of rubbery materials upon heating.*” 석사학위논문, 전남대학교
- Wang Shan(2010). “*A super resolution image reconstruction approach in frequency domain based on discrete Fourier transform.*” 석사학위논문, 울산대학교
- 이경하, 박은용, 조성환(2006) “아스팔트 혼합물의 수분 민감 특성 연구” *한국도로학회 논문집*
- 송재혁(2010). “아스팔트 포장상태 평가 및 생애주기비용을 고려한 보수공법 연구”, 석사학위논문, 세종대학교
- David Roylance(2000). “*ENGINEERING VISCOELASTOCITY.*” Department of Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA 02139
(접수일 : 2013. 4. 18 / 심사일 : 2013. 4. 18 / 심사완료일 : 2013. 5. 8)