

# 충격공진시험을 이용한 다양한 공극률을 가진 투수성 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 변화 측정에 관한 연구

## Study for Dynamic Modulus Change Measurement of Permeable Asphalt Mixtures with Various Porosity using Non-Destructive Impact Wave

장 병 관 Jang, Byung Kwan | 학생회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 석사과정 (E-mail: sheraphim27@nate.com)  
양 성 린 Yang, Sung Lin | 정 회 원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 전임연구원 (E-mail: siyang@kict.re.kr)  
문 성 호 Mun, Sung Ho | 정 회 원 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 조교수 · 교신저자 (E-mail: smun@seoultech.ac.kr)

### ABSTRACT

**PURPOSES :** This study is to evaluate the dynamic modulus changes of permeable asphalt mixtures by using non-destructive impact testing method and to compare the dynamic moduli of permeable asphalt mixtures through repeated freezing and thawing conditions.

**METHODS :** For the study, non-destructive impact testing method is used in order to obtain dynamic modulus of asphalt specimen and to confirm the change of dynamic modulus before and after freezing and thawing conditions.

**RESULTS :** This study has shown that the dynamic moduli of asphalt concrete specimens consisting of 10%, 15% and 20% porosity are reduced by 11.851%, 1.9564%, 24.593% after freezing and thawing cycles.

**CONCLUSIONS :** Non-destructive impact testing method is very useful and has repeatability. Specimen with 15% porosity has high durability than others.

### Keywords

*non-destructive impact testing method, dynamic modulus, asphalt concrete, porosity*

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

최근 기후변화가 진행되고 있다는 증거가 세계 곳곳에서 나타나고 있다. 이는 전 지구적으로 지구온난화로 인한 것이며, 지난 100년 동안 세계온도 증가율에 맞추어 한반도 온도 또한 증가하였다. 특히, 우리나라는 매년 홍수피해로 인하여 대규모의 재산피해와 인명피해가 발생하고 있다. 이는 하천단면의 점용과 도시화, 산업화

현상에 의한 토지이용의 변화 외에도 대규모 개발사업에 따른 도시의 불투수성 면적의 증가가 한몫을 하고 있다. 도시 도로의 불투수성으로 인하여 강우가 배수구를 통해 급속히 배수됨으로써 하수관거에 과부하를 일으키고 도시 홍수를 발생시키고 있다.

이러한 문제를 완화하기 위하여 현재 도로분야는 투수성 포장 연구에 몰두하고 있다. 투수성 포장 시스템은

빗물이 포장체를 통하여 침투, 흡수되어 환원되는 기능을 갖도록 포장 내부를 다공질로 만든다. 투수성 포장은 열섬현상의 감소, 도시홍수의 억제, 배수시설의 부하 경감 등 기후변화에 대한 여러 가지 문제들을 저감시킬 수 있는 것으로 기대되고 있다. 따라서 도시부 도로에서 투수성 포장의 효용성은 널리 인식되고 있으나, 투수성 포장은 공극의 막힘이 발생하고 공극률이 감소하여 기능을 상실하게 된다. 또한 물과의 접촉으로 강도와 안정도가 저하되어 노상이 악화되는 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 향후 도심 속 홍수피해를 저감하기 위하여 향상된 내구성과 강도를 가진 투수성 포장을 개발하기 위하여 직접 제작한 투수성 포장 공시체를 이용, 충격공진시험을 이용하여 다양한 공극률을 갖는 공시체의 동결 전과 후의 동탄성계수 변화를 측정하고자 한다.

## 2. 기존연구 및 문헌고찰

### 2.1. 연구의 필요성

본 연구의 목적은 충격공진시험을 이용하여 투수성포장 공시체의 동결 전·후의 동탄성계수를 측정하기 위함이다.

아스팔트 포장은 우기에 포트홀이 발생하는 등 수분 취약성을 가지고 있다. 우수가 아스팔트 혼합물의 골재로 침투하면 이러한 침투수로 아스팔트 피막과 골재를 분리시키며 친수성골재인 경우 이러한 현상이 쉽게 일어나게 된다. 이러한 현상을 박리 현상(Stripping)이라고 한다(이경하 등, 2006).

아스팔트 포장재료인 아스팔트 혼합물은 물과의 접촉으로 안정도와 강도가 저하되는 것으로 보고되고 있다. 이러한 현상은 골재를 에워싸고 있는 아스팔트 피막이 골재로부터 벗겨지는 박리 현상(Stripping)에 주로 기인한다고 보고되고 있다. 또한 물을 포함한 혼합물이 동결하면 공극내의 수분이 팽창하여 내부 응력을 유발하고 미세 균열의 발생으로 강도가 저하된다(전종명 등, 2006).

### 2.2. 연구 동향

본 연구의 충격공진시험 방법은 시편에 충격하중을 재하하고 이때의 시간영역 응답을 측정하고 주파수 영역으로 신호를 변환하여 해석하는 충격공진파 시험방법(이재환 등, 2010)으로 지반공학분야에서는 자유단공진주 시험(Free-Free Resonant Column)이라고 칭하며 지반의 미소변형률 영역의 탄성계수와 감쇠비를 평가하기 위하여 널리 사용되어 오고 있다(권기철 등, 2007). 이 시험방법은 기존의 간접인장시험(Indirect Tensile Test,

IDT)을 통해 크리프시험(Creep Test), 회복탄성계수시험(Resilient Modulus Test) 및 강도시험(Strength Test)을 이용하여 아스팔트 혼합물의 특성을 파악하는 복잡한 방법과는 다르다. 동탄성계수는 다양한 온도조건, 하중, 속도를 이용하여 다양한 교통조건을 묘사할 수 있으며, 사용된 골재의 입도, 아스팔트 바인더에 따라서 변화하며, 특히 아스팔트 혼합물의 점탄성적인 특성을 잘 묘사할 수 있는 물성치 평가방법(이관호 등, 2008)으로 높은 반복성과 적은 비용 그리고 간단한 시험절차가 가능한 충격공진시험으로도 측정이 가능하다. 하지만 충격공진시험 방법은 우수한 장점에 불구하고 아직 시험방법에 대한 정확한 기준을 가지고 있지는 않다.

권기철 외 1인(2007)은 충격공진시험에 대한 영향요소 평가를 위한 연구에서 쇠구슬 직경, 타격 및 신호측정 위치, 시편 거치조건, 신호획득 속도 그리고 시편 온도의 영향에 대하여 연구하였다. 연구 결과에 따르면 충격공진시험 자체의 반복성(Repeatability)을 고려하면 쇠구슬의 직경, 타격 및 신호측정 위치, 시편 거치조건, 신호획득 속도의 영향은 매우 작다. 또한 연구결과에서 는 시험조건의 영향보다는 온도변화에 따른 영향이 매우 크게 나타나는 것으로 판단하였다.

## 3. 시험 재료 및 시편 제작

### 3.1. 시험 장비

본 연구의 측정 장비로는 공시체의 온도를 측정하기 위한 온도계(Thermometer), B-wax, 향온습습기, 향온수조, 신호분석기(Signal Analyzer), 노트북(Laptop), 쇠구슬(Steel Ball) 그리고 가속도계(Accerlerometer) 2개를 사용하였다.

### 3.2. 시편 제작

본 연구에서는 선회다짐기(Gyratory Compactor)를 이용하여 높이 178mm, 지름 150mm의 공시체를 제작하였다. 공시체의 공극률은 10%, 15%, 20%로 다짐 시 각 무게 7012g, 6623g, 6233g으로 조정하여 공극률을 맞추었다. 또한 충격공진시험을 이용한 동탄성계수 측정을 위한 공시체를 만들기 위하여 높이 178mm, 지름 150mm로 제작된 공시체를 높이 150mm, 지름 100mm로 코어링 하였다.

본 연구에서는 공시체 제작과정을 거쳐 공극률 20.20%, 14.71%, 10.90%를 갖는 투수성 포장 공시체를 이용하여 동탄성계수의 변화를 측정하기 위한 충격공진시험을 진행하였다. Table 1은 시험을 위해 제작된

공시체의 제원을 나타낸다.

Table 1. Data of Specimen for Evaluating Dynamic Modulus

|   | Height (cm) | Diameter (cm) | Volume (cm <sup>3</sup> ) | Dry weight (g) | Porosity (%) |
|---|-------------|---------------|---------------------------|----------------|--------------|
| 1 | 14.953      | 10.041        | 1184.082                  | 2340.4         | 20.20        |
| 2 | 15.025      | 10.007        | 1181.740                  | 2496.5         | 14.71        |
| 3 | 14.902      | 9.976         | 1164.867                  | 2570.8         | 10.90        |

## 4. 시험계획 및 평가방법

### 4.1. 충격공진 시험계획

본 연구에서는 공극률 20.20%, 14.71% 10.90% 각 1개씩 3개의 공시체를 이용하여 5℃, 10℃, 15℃, 20℃, 30℃, 35℃, 40℃, 45℃, 50℃의 공진주파수(Resonance Frequency)를 측정하였다. 공시체는 각 시험온도에서 항온항습기에 8시간씩 보관하여 내·외부 온도를 맞추었다. 공시체는 감쇠(Damping)의 영향을 무시할 수 있을 정도의 얇은 와이어(wire)끈을 이용하여 Free-Free 조건으로 공중에 매달았다. 가속도계(Accelerometers)는 공시체의 양면 중앙에 위치되도록 B-Wax를 이용하여 부착하였다. 이때 충격하중(Impulsive Load)이 가해지는 면의 가속도계(Input Accelerometer)는 중앙을 타격하는 쇠구슬을 피하여 약 1cm 떨어진 거리에 부착하였다.

공진주파수(Resonance Frequency)의 측정은 충격하중(Impulsive Load)에 의해 가속도계(Accelerometer) 입력(Input)과 출력(Output)에 입력된 신호 중 꼭대기점(Peak Point)의 값을 취합하였다.

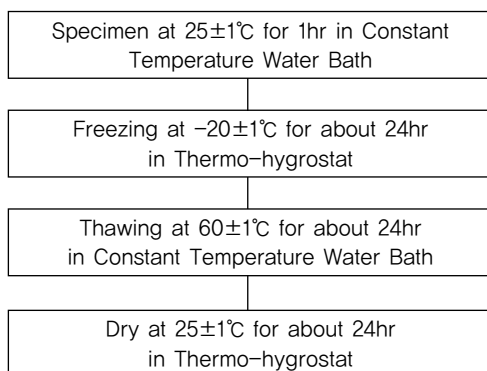


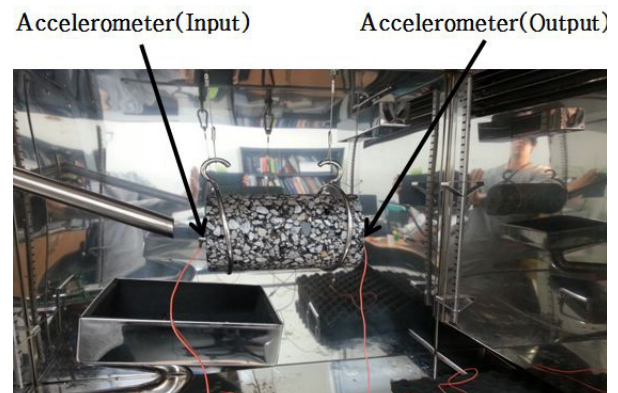
Fig. 1 Process of Experiment for Freezing and Thawing

동결 전과 후의 동탄성계수 변화를 측정하기 위해 동결 전의 공시체를 아스팔트 혼합물의 수분저항성 시험

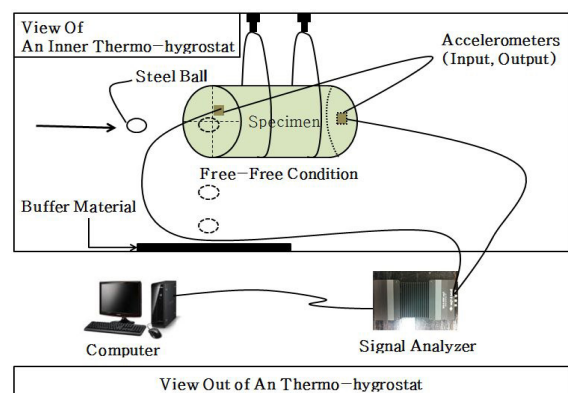
방법 규정(KS F2398)에 근거하여 시험하였다. 하지만 본 연구의 시험을 위해 참고한 KS규정은 밀입도 포장 공시체를 사용한 방법으로써 투수성포장 공시체를 사용한 본 연구의 시험방법과는 약간 다르다. 본 연구의 투수성 포장 공시체는 밀입도 포장에 비해 공극률이 크기 때문에 물에 침수 시 즉시 포화가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 25±1℃의 항온수조에 각 투수성 포장 공시체를 2시간이 아닌 1시간가량 모든 기포가 제거될때까지 물속에 포화시켰다. 그 후 항온항습기에 KS F2398에서 제시한 온도보다 낮은 온도인 -20±1℃에 24시간 동안 동결시켰다. 동결 후 60±1℃의 항온수조에 동결된 공시체를 다시 24시간동안 융해시키고 다시 25±1℃로 설정한 항온항습기에 공시체가 충분히 마를 때까지 약 24시간 방치하였다. 그 후 공시체의 동결 전과 후의 동탄성계수 측정값을 비교하기 위하여 앞서 시험했던 방법을 토대로 반복 시험을 하였다.

### 4.2. 동탄성계수 평가 방법

본 연구에서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 가속도계(Accelerometer)를 이용하여 시험의 온도에 따른 공진



(a) View of an Inner Thermo-hygrostat



(b) System of Non-Destructive Impact Wave

Fig. 2 Equipment for Experiment Using Non-Destructive Impact Wave

주파수(Resonance Frequency)를 측정하였다. 시편의 온도는 항온항습실을 이용하여 외부의 온도를 차단하고 항온항습실 내부가 일정하게 원하는 온도에 도달하였을 때, 항온항습실 자체에 부착되어있는 고무장갑을 이용하여 쇠구슬을 굴려 시편에 충격을 가하였다.

하지만 본 연구에서 사용하는 충격공진시험은 기존의 연구나 표준화된 절차가 미비한 것이 사실이다. 따라서 본 연구에서는 기존연구에 대한 문헌고찰과 KS규정에 근거하여 시험을 실시하였다. 또한 동탄성계수를 결정하기 위하여 2가지의 식, Determination of dynamic stiffness(ISO 9052-1)규정의 Eq. (1)과 참고문헌(S. O. Oyadiji 등; 1985)에 자세히 설명이 되어있는 Eq. (2)를 이용하여 각각의 동탄성계수를 구한 후, 이를 비교하였다.

먼저, ISO규정에서는 뜬 바닥용 재료의 동탄성계수 결정에 관하여 규정하므로 본 연구에서 사용하는 Free-Free 조건과는 다르지만, 기존연구의 고찰(권기철 등, 2007)에서 어떠한 시편 거치조건을 가지더라도 신뢰성있는 시험을 수행할 수 있음을 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 동탄성계수를 구하기 위하여 ISO 9052-1에 상세히 설명 되어있는 Eq. (1)의 관계식을 이용하였다.

$$s'_i = (2\pi f_0)^2 m'_i \quad (1)$$

여기서,  $s'_i$ 는 시험편의 단위 길이 당 동탄성계수,  $f_0$ 는 각 온도별 꼭대기 점(Peak Point)의 공진주파수(Resonance Frequency),  $m'_i$ 는 시험편의 단위 길이당 질량이다.

다음으로 참고문헌(S. O. Oyadiji 등; 1985)에 설명 되어있는 식은 다음과 같다.

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

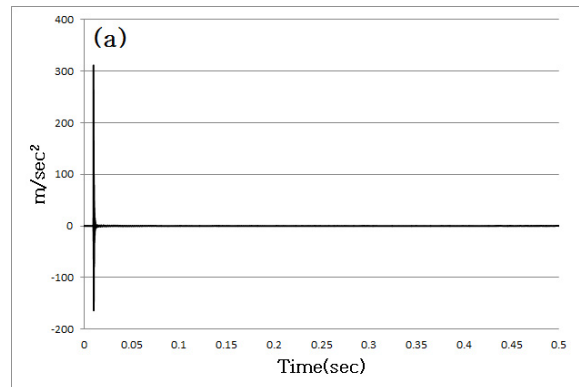
여기서,  $E_n$ 는 탄성계수,  $\rho$ 는 공시체의 밀도,  $f$ 는 각 온도별 주파수,  $L$ 은 공시체의 길이 그리고  $n$ 은 자유도의 수이다.

본 연구의 시험방법은 기존의 인장시험기(IDT)에 비하여 우수한 장점을 많이 가지고 있는 것이 사실이나, 아직 동탄성계수를 결정하기 위한 정확한 기준이 없기 때문에 두 가지의 관계식을 이용하여 동탄성계수를 결정하고 이를 비교하였다.

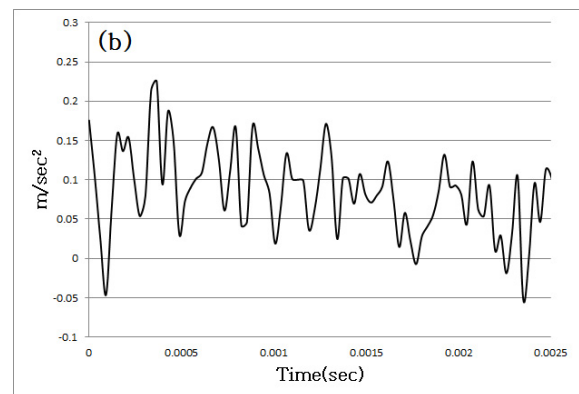
### 4.3. 측정 신호(Signal)

충격공진시험을 이용한 아스팔트 공시체의 동탄성계수 변화를 측정하기 위해서는 시험을 통하여 얻어진 여러 가지 신호(Signal)을 종합적으로 판단하는 것이 중요하다. 그 중에서 매우 짧은 시간동안 가해지는 충격하중(Impulsive Load)에 대한 가속도계(Accelerometer)의 입력(Input)과 출력(Output)에 대한 신호를 파악하기 위한 Time Function과 Time Weighting Function, 그리고 실험의 신뢰도를 파악하기 위한 Coherence Function, 마지막으로 본 연구에서 동탄성계수를 파악하기 위해 가장 중요한 Parameter인 FRF(Frequency Response Function)의 신호(Signal)을 취합하는 것은 매우 중요하다.

아래의 Fig. 3은 시간에 대한 시험의 특성을 보여준다. 본 연구는 구슬을 이용하여 공시체에 충격하중(Impulsive Load)을 가했기 때문에 Fig. 3의 (a)처럼 매우 짧은 시간에 대한 특성을 보이며, 이를 확대하면 Fig. 3의 (b)와 같이 매우 복잡한 잡음(Noise)를 포함한 신호(Signal)의 특성을 보여준다.



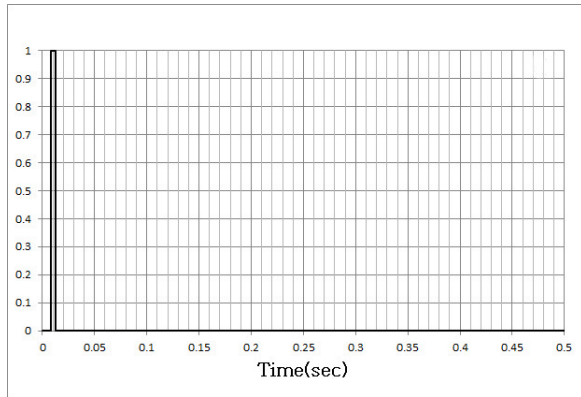
(a) Rippling Noise Signal



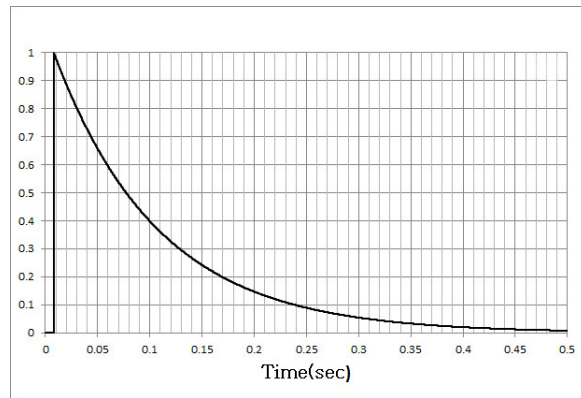
(b) Impulse Signal

Fig. 3 Impact Signal Obtained from Accelerometer at Specimen

또한 Fig. 4와 같이 입력신호(Input Signal)는 충격 하중을 가한 것을 표현하기 위하여 Rectangular Weighting Function으로 시험의 초기조건을 설정하였으며, 출력신호(Output Signal)는 시편의 한쪽에 임펄스 가진(Impulse Excitation) 후 공시체의 길이만큼 하중이 반대쪽으로 전달되는 모습을 묘사하기 위하여 Exponential Weighting Function으로 조건을 설정하여 시험을 하였다.



(a) Rectangular Weighting Function



(b) Exponential Weighting Function

Fig. 4 Time Weighting Function Obtained from Accelerometers

본 연구에서 측정 한 공진주파수(Resonance Frequency)는 일반적으로 Eq. (3)과 같이 질량과 스프링으로 이루어진 진동계의 고유진동수는  $f_n$ 이며, 질량( $m$ )과 스프링의 특성( $k$ )에 따라 고유진동수 값이 변화된다. 온도에 따라 강성에 차이가 크게 나타나는 아스팔트 공시체는 동탄성계수 측정 시 공진주파수(Resonance Frequency)의 영향을 가장 크게 받는다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ [Hz (cycle/sec)]} \quad (3)$$

공진주파수(Resonance Frequency)의 측정방법은 주파수응답함수(FRF)의 가장 꼭대기(Peak) 지점을 측정하여 구할 수 있다. 공진주파수(Resonance Frequency)를 측정 한 후, 앞서 언급한 Eq. (1)과 (2)를 사용하여 탄성계수  $E$ 를 간단히 구할 수 있다. 입력신호(Input Signal)와 출력신호(Output Signal)의 가속도계(Accelerometer)에서 구해진 주파수 응답함수(Frequency Response Function)는 Fig. 5와 같다.

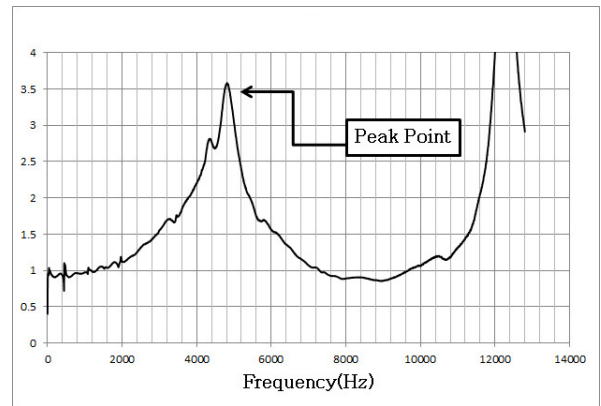


Fig. 5 FRF Based on the Input and Output Signals

또한 충격공진시험을 이용한 방법의 신호(Signal)들은 여러 종류의 잡음(Noise)를 포함하기 때문에 시험의 신뢰도를 파악한 후 Data를 이용하여야 한다. 기여도함수는 시험의 신뢰도를 파악할 수 있는 간단한 방법이다. 기여도함수( $Y^2$ )는 다음과 같이 정의된다.

$$Y^2 = \frac{|S_{vw}(x)|^2}{S_{vv}(x) S_{ww}(x)} \quad (4)$$

여기서,  $S_{vv}(x)$ 는 입력에 관한 함수 값,  $S_{ww}(x)$ 는 출력에 관한 함수,  $S_{vw}(x)$ 는 입·출력에 관한 함수이다. 기여도함수를 통하여 신뢰도가 높은 시험은 1에 가까운 값을 가지며, 시험의 신뢰도가 낮아질수록 0에 가까운 값을 나타낸다.

Fig. 6은 기여도함수(Coherence Function)를 그래프로 나타낸 것이며, 공진주파수가 발생하는 꼭대기 지점(Peak Point)에서 기여도 함수는 반공진점을 갖는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 시험의 신뢰도를 측정하기 위해 10%, 15%, 20%의 공시체를 Fig. 5 그리고 6과 같이 각 온도별 5℃, 10℃, 15℃, 20℃, 30℃, 35℃, 40℃, 45℃, 50℃의 공진주파수(Resonance Frequency)와 기여도 함수

(Coherence Function)를 측정하였다.

기여도 함수는 전체적으로 1에 가까운 값을 나타내었으며, 이때의 10%, 15%, 20% 공시체에 대한 각각의 공진주파수(Resonance Frequency)는 Table 2, 3 그리고 4와 같다.

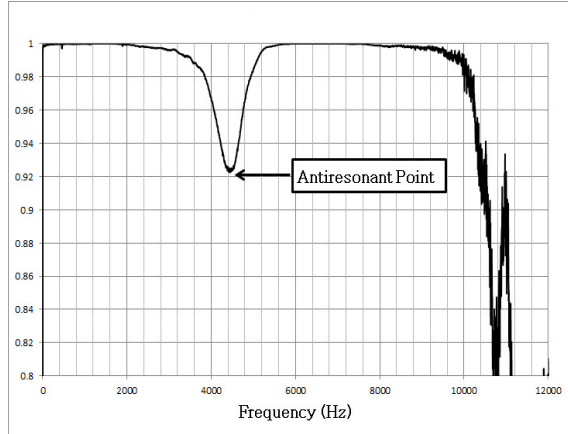


Fig. 6 Coherence Based on the Input and Output Signals

Table 2. Resonance Frequency of Specimen with 10% Porosity at Each Temperature

| Temperature | Hz     |                |
|-------------|--------|----------------|
|             | Normal | First Freezing |
| 5°C         | 5636   | 5034           |
| 10°C        | 4622   | 4600           |
| 15°C        | 5496   | 4454           |
| 20°C        | 4644   | 4114           |
| 30°C        | 4306   | 4638           |
| 35°C        | 3844   | 4208           |
| 40°C        | 4168   | 4168           |
| 45°C        | 2790   | 3750           |
| 50°C        | 3704   | 2306           |

Table 3. Resonance Frequency of Specimen with 15% Porosity at Each Temperature

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

Table 4. Resonance Frequency of Specimen with 20% Porosity at Each Temperature

| Temperature | Hz     |                |
|-------------|--------|----------------|
|             | Normal | First Freezing |
| 5°C         | 5250   | 5652           |
| 10°C        | 4814   | 4546           |
| 15°C        | 4722   | 4576           |
| 20°C        | 4514   | 4816           |
| 30°C        | 4558   | 4510           |
| 35°C        | 3760   | 4314           |
| 40°C        | 4070   | 2626           |
| 45°C        | 4108   | 2556           |
| 50°C        | 3168   | 2318           |

## 5. 동결 전·후의 동탄성계수 산정과 비교

본 연구에서는 충격공진파시험을 통하여 측정된 공진주파수(Resonance Frequency)와 각 요소들을 구한 후, 동결 전의 투수성포장 공시체가 동결 후 수분팽창으로 인해 발생하는 공시체의 동탄성계수 변화를 측정하기 위하여 Eq. (1)과 (2)를 이용하여 동탄성계수를 구하였다.

Table 5, 6 그리고 7은 각 식을 이용하여 동결전과 후의 동탄성계수를 산출한 결과 값이다.

일반적으로 아스팔트공시체의 동탄성계수 값들은 강성( $k$ )에 영향을 받는다고 말하였다. 이는 아스팔트공시체가 점탄성적인 성질을 갖고 있어 온도가 높아질수록 강성( $k$ )가 낮아져 동탄성계수 또한 낮아진다. 이는 앞서 언급한 Eq. (3)을 통해 쉽게 확인 할 수 있다.

Table 5. Dynamic Modulus of Asphalt Mixture with 10% Porosity Before and After Freezing

| Temp | kPa             |       |                |       |
|------|-----------------|-------|----------------|-------|
|      | Before Freezing |       | After Freezing |       |
|      | Eq(1)           | Eq(2) | Eq(1)          | Eq(2) |
| 5°C  | 21611           | 24922 | 17241          | 19882 |
| 10°C | 14534           | 16761 | 14396          | 16602 |
| 15°C | 20551           | 23699 | 13497          | 15565 |
| 20°C | 14673           | 16921 | 11515          | 13279 |
| 30°C | 12615           | 14547 | 14635          | 16877 |
| 35°C | 10053           | 11593 | 12047          | 13893 |
| 40°C | 11819           | 13630 | 11819          | 13630 |
| 45°C | 5296            | 6107  | 9567           | 11033 |
| 50°C | 9334            | 10764 | 3617           | 4172  |

Table 6. Dynamic Modulus of Asphalt Mixture with 15% Porosity Before and After Freezing

| Temp | kPa             |       |                |       |
|------|-----------------|-------|----------------|-------|
|      | Before Freezing |       | After Freezing |       |
|      | Eq(1)           | Eq(2) | Eq(1)          | Eq(2) |
| 5°C  | 17515           | 21013 | 16553          | 19859 |
| 10°C | 16977           | 20368 | 15875          | 19046 |
| 15°C | 16870           | 20240 | 14340          | 17204 |
| 20°C | 16004           | 19201 | 12411          | 14890 |
| 30°C | 12150           | 14577 | 10695          | 12831 |
| 35°C | 12308           | 14767 | 10307          | 12366 |
| 40°C | 5842            | 7009  | 9854           | 11823 |
| 45°C | 10048           | 12056 | 8558           | 10268 |
| 50°C | 4207            | 5048  | 6208           | 7448  |

Table 7. Dynamic Modulus of Asphalt Mixture with 20% Porosity Before and After Freezing

| Temp | kPa             |       |                |       |
|------|-----------------|-------|----------------|-------|
|      | Before Freezing |       | After Freezing |       |
|      | Eq(1)           | Eq(2) | Eq(1)          | Eq(2) |
| 5°C  | 17013           | 21419 | 19719          | 24825 |
| 10°C | 14305           | 18009 | 12756          | 16060 |
| 15°C | 13763           | 17327 | 12925          | 16272 |
| 20°C | 12577           | 15834 | 14317          | 18024 |
| 30°C | 12824           | 16145 | 12555          | 15806 |
| 35°C | 8726            | 10986 | 11487          | 14462 |
| 40°C | 10225           | 12873 | 4256           | 5358  |
| 45°C | 10416           | 13114 | 4032           | 5077  |
| 50°C | 6195            | 7799  | 3316           | 4175  |

본 연구에서 측정한 값들을 그래프로 옮기면 Fig. 7, 8 그리고 9과 같다. 하지만 이론적으로는 온도가 높아질수록 동탄성계수가 낮아지며 동결 후의 동탄성계수가 수분 팽창으로 인한 내부 균열로 인해 동탄성계수가 낮아져야 함에도 불구하고 어떤 값들은 실험적인 오차로 인하여 맞지 않는 경우도 발생한다. 따라서 그래프로만으로는 동결 후의 동탄성계수가 동결 전보다 낮아졌다고 할 수 없다.

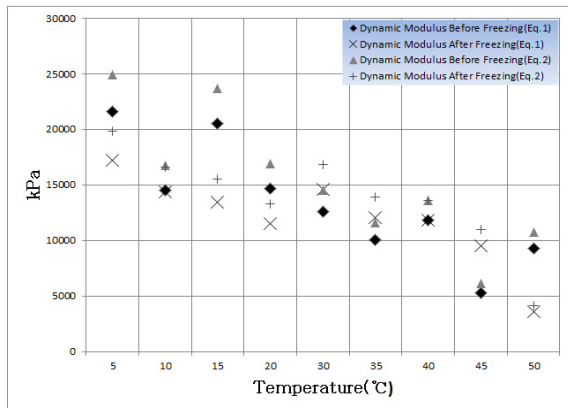


Fig. 7 Dynamic Modulus of Asphalt Mixture for 10% Specimen Using Eq. (1) and Eq. (2)

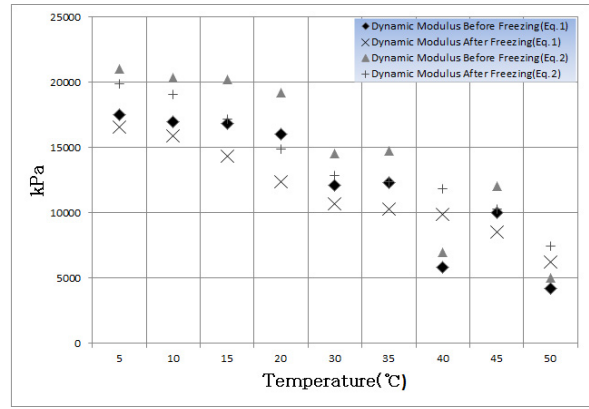


Fig. 8 Dynamic Modulus of Asphalt Mixture for 15% Specimen Using Eq. (1) and Eq. (2)

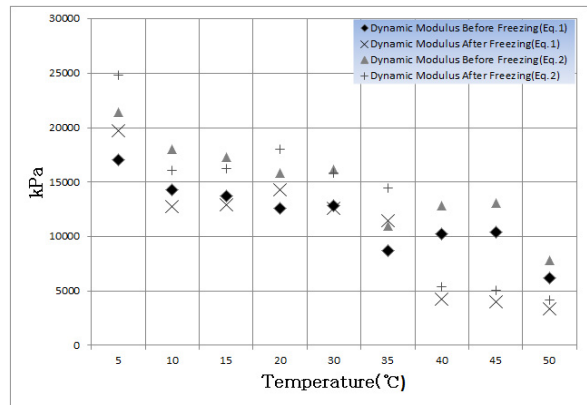


Fig. 9 Dynamic Modulus of Asphalt Mixture for 20% Specimen Using Eq. (1) and Eq. (2)

본 연구에서는 측정한 동탄성계수의 동결 전·후의 전체적인 차이와 오차율을 확률적으로 표현하고 상관관계를 증명하기 위하여 RMSE(Root Mean Square Error), MPE(Mean Percentage Error) 그리고 상관관계분석(Correlation Analysis)을 실시하였다.

먼저, 시험에서 측정한 결과 값의 전체적인 차이를 확인하기 위하여 RMSE(Root Mean Square Error)분석을 하였다. 각 온도에 따른 동탄성계수의 전체적인 RMSE(Root Mean Square Error)오차의 크기는 다음 Eq. (5)와 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{V} \sum_{t=1}^{10} (E_{St,n} - E_{St,m})^2} \quad (t \neq 5) \quad (5)$$

여기서,  $t$ 는 각 온도를 나타내는 섭씨(°C)로 온도 단위이다. 따라서 5를 제외하고 1부터 10까지 함수를 합한다는 것은 5°C, 10°C, 15°C, 20°C, 30°C, 35°C, 40°C, 45°C, 50°C의 동탄성계수를 합한다는 것을 의미한다. 또한  $V$ 는 시험을 위해 측정한 온도의 수이며 동결전·후 9

회 실시하였으므로  $v$ 는 9이다.  $E_n$ 와  $E_m$ 는 각각 동결 전과 동결 후의 동탄성계수이다.

위의 RMSE분석을 실시하여 얻은 오차의 크기는 Table 8, 9 그리고 10과 같다.

Table 8. RMSE Analysis Results at 10% Specimen

| Temp | kPa                               |         |         |         |
|------|-----------------------------------|---------|---------|---------|
|      | The difference of Dynamic Modulus |         | RMSE    |         |
|      | Eq. (1)                           | Eq. (2) | Eq. (1) | Eq. (2) |
| 5°C  | 4370.226                          | 5039.78 | 3712.58 | 4281.37 |
| 10°C | 138.0355                          | 159.184 |         |         |
| 15°C | 7053.973                          | 8134.69 |         |         |
| 20°C | 3158.085                          | 3641.93 |         |         |
| 30°C | -2020.29                          | -2329.8 |         |         |
| 35°C | -1994.11                          | -2299.6 |         |         |
| 40°C | 0                                 | 0       |         |         |
| 45°C | -4271.61                          | -4926.1 |         |         |
| 50°C | 5716.427                          | 6592.22 |         |         |

Table 9. RMSE Analysis Results at 15% Specimen

| Temp | kPa                               |          |         |         |
|------|-----------------------------------|----------|---------|---------|
|      | The difference of Dynamic Modulus |          | RMSE    |         |
|      | Eq. (1)                           | Eq. (2)  | Eq. (1) | Eq. (2) |
| 5°C  | 962.119                           | 1154.297 | 2233.81 | 2680    |
| 10°C | 1102.22                           | 1322.377 |         |         |
| 15°C | 2530.61                           | 3036.087 |         |         |
| 20°C | 3593.28                           | 4311.019 |         |         |
| 30°C | 1454.78                           | 1745.361 |         |         |
| 35°C | 2001.53                           | 2401.326 |         |         |
| 40°C | -4012.2                           | -4813.57 |         |         |
| 45°C | 1490.18                           | 1787.834 |         |         |
| 50°C | -2000.6                           | -2400.17 |         |         |

Table 10. RMSE Analysis Results at 20% Specimen

| Temp | kPa                               |          |         |         |
|------|-----------------------------------|----------|---------|---------|
|      | The difference of Dynamic Modulus |          | RMSE    |         |
|      | Eq. (1)                           | Eq. (2)  | Eq. (1) | Eq. (2) |
| 5°C  | -2705.29                          | -3405.85 | 3252.78 | 4095.12 |
| 10°C | 1548.43                           | 1949.421 |         |         |
| 15°C | 837.9603                          | 1054.959 |         |         |
| 20°C | -1739.28                          | -2189.68 |         |         |
| 30°C | 268.679                           | 338.2562 |         |         |
| 35°C | -2761.08                          | -3476.09 |         |         |
| 40°C | 5968.479                          | 7514.077 |         |         |
| 45°C | 6384.219                          | 8037.477 |         |         |
| 50°C | 2878.431                          | 3623.829 |         |         |

공극률 10%의 공시체에서는 30°C, 35°C, 40°C에서, 공극률 15%의 공시체는 40°C와 50°C에서, 그리고 20%의 공시체에서는 5°C, 20°C, 35°C에서 동결 후의 동탄성계수가 동결 전의 동탄성계수보다 크게 나타난다. 하지만 RMSE분석을 통해 대부분 동결 전의 동탄성계수가 동결 후의 동탄성계수보다 더 큰 것으로 판단되며 10%의 투수성 포장 공시체는 Eq. (1)과 (2)에서 각각 3712.58kPa와 4281.37kPa의 차이를, 15%의 투수성 포장 공시체에서는 2233.81kPa와 2680kPa의 차이를, 그리고 20%의 투수성 포장 공시체는 3252.78kPa와 4095.12kPa의 차이를 보인다.

또한 각 공극률에 따른 공시체 10%, 15%, 20%에 대한 Eq. (1)과 (2)의 차이는 각각 568.79kPa, 446.19kPa, 842.34kPa로 Eq. (2)로 구한 동탄성계수의 값이 더 크게 나온다. 본 연구에서는 RMSE분석을 통해 두 관계에 대한 전체적인 오차의 크기를 나타내고 동결 전과 동결 후의 동탄성계수에 대한 오차율을 파악하기 위해 MPE(Mean Percentage Error)분석을 실시하였다.

MPE분석을 통해 동결 전과 후의 동탄성계수의 오차율을 확률적으로 표현하였다. 이는 다음과 같이 Eq. (6)으로 표현 할 수 있다.

$$MPE = \frac{1}{V} \sum_{t=1}^{10} S(E_{5t})$$

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

여기서,  $E_{\max}$ 와  $E_{\min}$ 은 동결 전과 후에 상관없이 각 온도에서의 동탄성계수 중 큰 값과 작은 값을 의미하며,  $V$ 는 시험에서 측정된 온도의 수 9를 의미한다.

여기서 중요한 것은 동탄성계수의 기준을 동결 전의 값으로 설정하였다. 따라서 동결 후 동탄성계수가 동결 전 보다 낮은 값을 나타내면 값은 음의 값을 갖게 되고 반대의 경우 양의 값을 갖는다. 또한 두 관계가 일치하는 경우 MPE값은 0을 나타낸다. 그 결과 두 동결 전·후 동탄성계수 차이율은 다음 Table 11, 12 그리고 13과 같다.

MPE분석 결과 10%, 15%, 20% 공극률을 가진 투수성 포장 공시체의 차이율은 각각 동결 전 동탄성계수를 기준으로 11.851%, 1.9564%, 24.593% 하락하였다. 어느 온도에 대해서는 동결 전 동탄성계수에 비하여 동결 후의 동탄성계수가 높게 나오어도 불구하고 전체적으로 기준 동탄성계수에 비해 음의 부호로 측정되어 동결 후



의 동탄성계수가 전체적으로 낮아진 것을 수치적으로 확인하였다. 여기서 중요한 것은 Eq. (1)과 (2)를 사용하여 구한 동탄성계수와는 관련없이 MPE방법으로 동일한 차이율을 나타낼 수 있었다.

Table 11. MPE Analysis Results at 10% Specimen

| Temperature | percentage(%)                                |         |
|-------------|----------------------------------------------|---------|
|             | The percentage difference of Dynamic Modulus | MPE     |
| 5°C         | -20.2218                                     | -11.851 |
| 10°C        | -0.9497                                      |         |
| 15°C        | -34.324                                      |         |
| 20°C        | -21.5227                                     |         |
| 30°C        | 16.01481                                     |         |
| 35°C        | 19.83528                                     |         |
| 40°C        | 0                                            |         |
| 45°C        | 80.65672                                     |         |
| 50°C        | -158.002                                     |         |

Table 12. MPE Analysis Results at 15% Specimen

| Temperature | percentage(%)                                |         |
|-------------|----------------------------------------------|---------|
|             | The percentage difference of Dynamic Modulus | MPE     |
| 5°C         | -5.493                                       | -1.9564 |
| 10°C        | -6.4922                                      |         |
| 15°C        | -15                                          |         |
| 20°C        | -22.452                                      |         |
| 30°C        | -11.973                                      |         |
| 35°C        | -16.261                                      |         |
| 40°C        | 40.7124                                      |         |
| 45°C        | -14.829                                      |         |
| 50°C        | 32.224                                       |         |

Table 13. MPE Analysis Results at 20% Specimen

| Temperature | percentage(%)                                |         |
|-------------|----------------------------------------------|---------|
|             | The percentage difference of Dynamic Modulus | MPE     |
| 5°C         | 15.9006                                      | -24.593 |
| 10°C        | -10.8243                                     |         |
| 15°C        | -6.08822                                     |         |
| 20°C        | 13.82819                                     |         |
| 30°C        | -2.0951                                      |         |
| 35°C        | 31.63901                                     |         |
| 40°C        | -140.215                                     |         |
| 45°C        | -61.2866                                     |         |
| 50°C        | -86.7856                                     |         |

본 연구에서 사용한 MPE방법은 동결 전 동탄성계수를 기준으로 할 때, 차이율을 규명할 수 있었지만, 동결 전·후의 전체적인 동탄성계수의 상관관계를 규명하지는 못한다. 따라서 두 관계를 규명하기 위하여 상관관계분석을 실시하였다. 본 연구에서는 상관관계분석을 동결 전·후 동탄성계수에 대한 두 관계를 규명하기 위하여 사용하였다.

본 연구에서는 Fig. 10의 동탄성계수 상관도와 같이 각 10%, 15%, 20%의 공극률을 갖는 투수성 포장 공시체의 동결 전·후 관계가 직선적이라고 판단하였다.

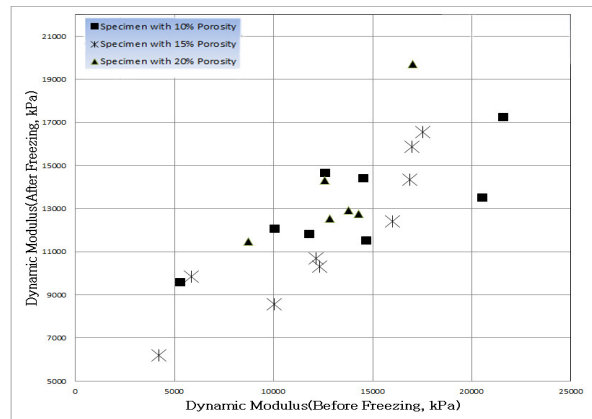


Fig. 10 Correlation Diagram for the Dynamic Modulus

따라서 Pearson의 단순상관계수를 이용하였으며, 단순상관계수는 Eq. (7)과 같이 정의된다.

$$R_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^{10} (E_{St,n} - \bar{E}_n)(E_{St,m} - \bar{E}_m)}{(n-1)S_{E_n}S_{E_m}} \quad (7)$$

여기서,  $E_n$ 와  $\bar{E}_n$ 는 동결 전 동탄성계수의 크기 및 평균 크기이며,  $E_m$ 와  $\bar{E}_m$ 는 동결 후 동탄성계수의 크기 및 평균 크기를 의미한다.  $S$ 는 각 표본에 대한 표준편차이다.

본 연구에서 단순상관계수를 사용하여 각 공시체에 대한 상관도를 구한 결과 Table 14와 같다. 상관계수가 0.8 이상은 강한 상관관계, 0.6~0.8은 높은 수준의 상관관계, 0.4~0.6은 보통수준의 상관관계, 0.2~0.4는 약한 상관관계라 할 때, 15% 투수성 포장공시체에 대한 상관관계가 가장 강한 상관관계를 가지며, 10% 투수성 포장공시체는 높은 수준의 상관관계를 보이지만, 15%, 20% 투수성 포장 공시체에 비하여는 낮은 것으로 판단된다.

Table 14. Correlation Diagram for the Dynamic Modulus

|                | 10%   | 15%   | 20%   |
|----------------|-------|-------|-------|
| Correlation(%) | 66.91 | 90.40 | 82.72 |

## 6. 결론

본 연구에서는 충격공진시험을 이용한 아스팔트 공시체의 동결 전·후에 대한 동탄성계수 변화에 대해 측정하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 충격공진 시험으로 측정한 동결 후의 동탄성계수는 동결 전에 비하여 MPE분석결과 10%, 15%, 20% 투수성 포장 공시체에 대하여 각각 11.851%, 1.9564%, 24.593% 감소한 것으로 나타났다. 또한 15% 투수성 포장 공시체에 비하여 10%와 20%의 투수성 포장 공시체의 동탄성계수 감소율이 큰 것은 10% 투수성 포장 공시체가 내부의 공극이 다른 공시체에 비하여 작으므로 수분팽창 시 내부응력으로 인한 크랙 발생이 다른 공시체에 비하여 크기 때문인 것으로 판단되며, 20% 투수성 포장 공시체는 다른 공시체에 비하여 내부의 공극이 너무 크기 때문에 골재의 결합력이 다른 공시체에 비하여 작아, 동결 후 내구성이 급격하게 저하되는 것으로 판단된다. 즉, 15% 투수성 포장 공시체가 가장 높은 내구성을 갖는 것으로 판단된다.
2. 본 연구의 충격공진시험은 고가의 장비나 많은 시간이 소요되지 않는 반복성이 우수한 시험방법이다. 따라서 앞으로 내구성이 있는 공시체를 개발하기 위해 유용하게 사용될 것으로 판단된다. 하지만 동탄성계수를 측정하기 위하여 Eq. (1)과 (2)를 사용한 것과 같이 아직 정확한 기준이 없기 때문에 시험장비와 절차 그리고 동탄성계수 산정을 위한 표준화가 필요하다.
3. 본 연구에서 동탄성계수를 산정하기 위해 Eq. (1)과 (2)를 사용하였다. Eq. (2)로 구한 동탄성계수 값이 더 크게 나타나며, 전체적인 동탄성계수의 경향과 차이율 파악을 위해서는 Eq. (1)과 (2) 모두 사용가능할지 모르지만, 충격공진과 시험을 통해 정확한 동탄성계수를 측정하기 위해서는 각 식에 대한 정확한 기준이 필요하다.

## 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*
- Lee, J. H., Kweon, G. C., 2010. Evaluation of Freeze-Thaw Effect on the Modulus of Subgrade Soils from Impact Resonance Test, *Journal of the Korean Society Road Engineers*, Vol. 12, No. 3, 71-77
- (이재환, 권기철(2010). 충격공진시험을 이용한 동결·융해에 따른 노상토의 탄성계수 평가, 한국도로학회 논문집, 12권, 3호, 71-77)
- Kweon, G. C., Lee, J. H., 2007. Evaluation of Effects on Impact Resonance Test for Determining Modulus of Asphalt Concrete, *Journal of the Korean Society Road Engineers*, Vol. 9, No. 2, 89-99
- (권기철, 이재환(2007). 아스팔트 콘크리트 탄성계수 결정을 위한 충격공진시험 영향요소 평가, 한국도로학회 논문집, 9권, 2호, 89-99)
- Jeon, J. M., Kim, H. M., Hwang, S. D., and Rhee, S. K., 2006. Evaluation for Moisture Susceptibility of SBS Modified Asphalt Mixtures, *Proceedings of 2006 Korean Society of Road Engineering Conference*, 63-66
- (전종명, 김홍만, 황성도, 이석근(2006). SBS 개질 아스팔트 혼합물이 수분민감도 평가, 한국도로학회 2006년 학술발표회, 63-66)
- Lee, K. H., Cho, K. R., Lee, B. S., and Song, Y. S., 2008. Evaluation of Dynamic Modulus based on Aged Asphalt Binder, *Journal of the Korean Society Road Engineers*, Vol. 8, No. 3, 51-58
- (이관호, 조정래, 비영식, 송용선(2008). 아스팔트 바인더의 노화특성을 고려한 동탄성계수 평가, 한국방재학회 논문집, 8권, 3호, 51-58)
- Lee, K. H., Park, E. Y., and Cho, S. H., 2006. A Study on Moisture Susceptibility Characteristics of Asphalt Mixtures, *Proceedings of 2006 Korean Society of Road Engineering Conference*, 67-70
- (이경하, 박은용, 조성환(2006). 아스팔트 혼합물의 수분 민감 특성 연구, 한국도로학회 2006년 학술발표회, 67-70)
- David Roylance(2000). "ENGINEERING VISCOELASTOCITY." Department of Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA 02139
- KS F 2398, 2005. *Standard test method for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture induced damage*
- (KS F 2398, 2005. 아스팔트 혼합물의 수분저항성 시험방법)
- ISO 9052-1, 1989. *Determination of dynamic stiffness*
- (접수일 : 2013. 5. 6 / 심사일 : 2013. 5. 6 / 심사완료일 : 2013. 5. 21)