



# 아스팔트 콘크리트 탄성계수 결정을 위한 충격공진시험 영향요소 평가

## Evaluation of Effects on Impact Resonance Test for Determining Modulus of Asphalt Concrete

권 기 철\*      이 재 환\*\*  
Kweon Gi chul      Lee, Jae hoan

### Abstract

The stiffness of the asphalt concrete is represented by the complex modulus,  $E^*$ , which is very important properties in the mechanistic design of flexible pavement system. The moduli of asphalt concrete were generally determined by dynamic modulus test. However, the dynamic modulus testing method is too complex, expensive, and time consuming to be applicable on a production basis. The IR(Impact Resonance) method has been shown to be a truly simple nondestructive testing method which produces very repetitive, consistent results. The major object of this study was to estimate of the effects on IR tests for determining modulus of asphalt concrete including impact position, specimen support condition, impact steel ball size and sampling rate. The variations of IR test results with various testing conditions are within  $\pm 2.7\%$ .

**Keywords :** *impact resonance test, asphalt concrete, resonance frequency, modulus, damping ratio*

### 요 지

복소수계수,  $E^*$  로 표현되는 아스팔트 콘크리트의 탄성계수는 아스팔트 포장설계에서 매우 중요한 입력변수다. 일반적으로 아스팔트 콘크리트의 탄성계수는 동탄성계수시험(Dynamic Modulus Test)을 사용하여 평가한다. 그러나 동탄성계수시험은 일상적인 시험법으로 적용하기에는 고가의 시험장비, 복잡한 시험장비, 많은 시험시간 등의 문제가 있다. 이에 반하여 충격공진시험(IR: Impact Resonance test)은 비파괴시험으로서 간편한 시험장치, 단순한 시험방법이며 반복성이 뛰어나다. 본 연구의 주요 목적은 충격하중의 타격위치, 시편거치 방법, 충격하중원의 특성, 신호획득 속도, 신호처리방법 등을 포함한 IR 시험의 시험조건의 영향을 평가하는 것이다. 본 연구에서 적용한 모든 시험조건 범위에서 충격공진시험에서 측정된 결과의 변동은  $\pm 2.7\%$  이내에 들었다.

**핵심용어 :** *충격반향시험, 아스팔트 콘크리트, 공진주파수, 탄성계수, 감쇠비*

\* 정회원 · 동의대학교 토목공학과 부교수

\*\* 동의대학교 토목공학과 석사과정

## 1. 서 론

아스팔트 콘크리트 재료의 탄성계수는 온도 및 하중 주파수의 영향을 대단히 크게 받으며, 이를 고려하여 결정된 동탄성계수(dynamic modulus) 및 위상각(phase angle)은 역학적인 아스팔트 포장 설계 및 해석에 있어서 매우 중요한 입력변수다(건설교통부, 2006). 아스팔트 콘크리트의 온도 및 하중주파수에 따른 탄성계수와 위상각은 일반적으로 동탄성계수시험(Dynamic Modulus Test)으로 평가한다. 그러나 본 시험방법은 일상적인 시험으로 적용하기에는 고가의 시험장비, 숙련된 시험기술자, 많은 시험시간 소요, 고가의 시험비용 등의 문제점을 안고 있다(Kweon 등, 2006).

충격공진시험(IR: Impact Resonance Test)은 시험장치 구성이 매우 간단하고, 시험수행에 숙련된 기술을 요하지 않을 뿐 아니라 시험수행과 결과해석의 전 과정이 불과 몇 분 내에 완료되는 매우 간편한 비파괴시험 방법이다. 충격공진시험으로부터 아스팔트 콘크리트의 하중주파수에 따른 탄성계수와 위상각을 결정하기 위한 기본적인 이론은 최근에 미국 NCSU 연구팀에서 개발되었으며, Kweon 등(2006)은 충격공진시험을 통하여 결정된 값이 동탄성계수시험을 통하여 결정된 값과 잘 일치함을 확인한 바 있다. 그러나 아직까지는 아스팔트 콘크리트 재료에 대한 시험결과 해석기법과 세부적인 시험조건이 표준화 되어 있지 못한 단계이다. 따라서 충격공진시험을 보다 보편적인 시험으로 사용하기 위해서는 시험장치 및 절차의 표준화, 고온에서 시험방법 및 해석기법의 개발을 필요로 한다.

본 연구에서는 충격공진시험의 시험기법을 표준화하기 위한 다양한 시험조건에 영향정도 자료를 구축하였다. 세부적으로는 충격공진시험에서 충격하중의 타격위치, 시편 거치조건, 충격하중원의 특성, 신호획득 속도, 신호처리기법 등의 영향요소를 평가하였다.

## 2. 충격공진시험(Impact Resonance Test)

충격공진시험은 시편의 한쪽 부분에 충격하중을 재하하고 이때의 반응을 시편의 다른 한쪽에서 측정하여 공진주파수(resonance frequency)와 감쇠비(damping ratio)를 측정하는 비파괴 시험방법이다. 본 시험방법은 지반공학분야에서는 자유단공진주시험(Free-Free resonant Column)이라고 칭하며 지반의 미소변형률 영역의 탄성계수와 감쇠비를 평가하기 위하여 널리 사용되어 오고 있다(Sun, 1993; Kim 등, 1997; 권기철 등, 2000).

지반재료의 감쇠비 또는 위상각은 아스팔트 콘크리트에 비하여 매우 작기 때문에 지반재료에 대한 자유단공진주시험의 해석기법을 아스팔트 콘크리트에 대한 해석에 직접적으로 적용하기는 곤란하다. Kweon 등(2006)은 매우 큰 감쇠비 또는 위상각을 갖는 아스팔트 콘크리트 재료에 대한 해석기법을 개발하여 적용성을 확인한 바 있다.

아스팔트 콘크리트 재료에 대한 충격공진시험 장치의 전체적인 구성은 그림 1과 같이 온도 조절을 위한 항온조, 시편거치장치, 충격하중 재하장치, 동적신호 획득 센서와 동적신호 측정장치(Dynamic logger), 그리고 신호처리 장치로 구성된다. 충격공진시험의 포괄적인 시험장치 구성에 대해서는 정립

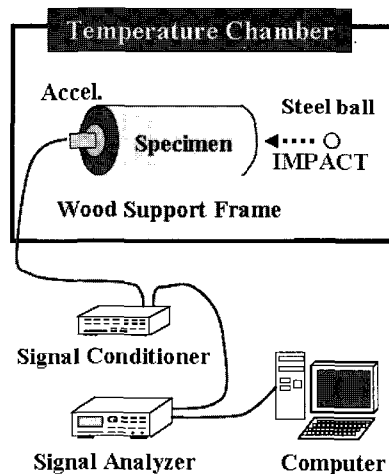
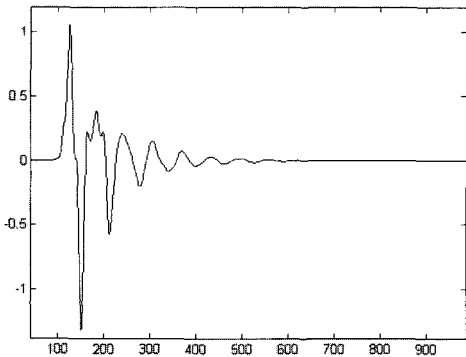


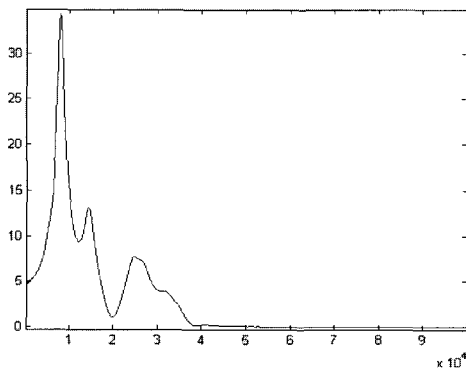
그림 1. 충격공진시험장치 시스템 구성

되어 있으나, 각각의 세부적인 시험장치의 조건에 대해서는 아직까지 보편적인 규정이 미흡한 실정이다.

그림 1과 같은 장치 구성에서 충격하중은 일반적으로 쇠구슬(steel ball)을 사용하여 발생시킨다. 이때 충격하중에 의한 시편의 반응은 수만Hz 범위에 있어 신호획득은 가속도계 센서를 사용하는 것이 일반적이다. 충격하중을 시편의 한쪽에 재하하면 그림 2(a)와 같은 시간영역의 반응이 측정되며 FFT 신호처리 기법을 적용하여 그림 2(b)와 같은 주파수 영역 신호(주파수반응곡선)를 얻게 된다. 주파수반응곡선으로부터 공진주파수와 감쇠비를 얻을 수 있다. 공진주파수와 감쇠비로부터 아스팔트 콘크리트의 주파수에 따른 탄성계수와 위상각을 얻게 되는데 이러한 해석기법은 Kweon 등(2006)에 상세히 서술되어 있다.



(a) 시간영역 신호



(b) 주파수영역 신호

그림 2. 충격공진시험의 동적신호 일례

### 3. 충격공진시험 영향요소 평가를 위한 시험계획

충격공진시험의 영향요소 검토를 위한 본 연구에서는 최대 골재 입경 19mm의 일반적인 아스팔트 콘크리트 시편을 사용하였다. 본 연구의 목적은 충격공진시험에서 시험조건의 상대적인 영향 정도 평가와 고온에서 시험 자체의 수행 가능성만을 평가하는 것이어서, 시험시편은 한 종에 국한하였으며 절대 값의 비교대상이 되는 동탄성계수시험(Dynamic Modulus Test) 또한 별도로 수행하지 않았다. 시편의 크기는 직경 100mm, 높이 150mm로 일반적인 동탄성계수시험에서 사용하는 시편과 동일한 시편을 사용하였다.

충격하중원은 쇠구슬을, 이대의 반응은 PCB 353B15 가속도계와 PCB 480E09 신호안정기를 사용하였으며, 신호획득은 GRAPHTEC WR1000, 신호영역 신호를 주파수영역으로의 전환과 공진주파수 및 감쇠비의 결정은 Mat Lab.으로 제작한 프로그램을 이용하였다.

본 연구에서는 상온에서 충격공진시험의 영향요소 평가와 함께 40℃ 이상의 온도에서 충격공진시험의 적용성을 예비적으로 평가하여 보았다. 시험시편을 향한 챔버에서 4시간 이상 두어 시편 내부의 온도가 일정한 상태가 되도록 한 후 각각의 시험조건에서 10회의 시험을 수행하였다. 10회의 충격하중을 발생하는 시험시간은 길어야 30초 이내로 매우 짧은 시간에 시험을 완료할 수 있었다.

시험장치의 제약으로 향한 챔버의 문을 열지 않은 상태에서 충격하중을 발생시키는 것이 불가능하여, 온도 조절된 시편을 꺼내어 대기온도 상태에서 거치하고 시험을 수행하여 시편의 정확한 온도조건은 확보할 수는 없었다. 모든 시험은 향한 챔버에서 시편을 꺼낸 후 2분 이내에 시험을 완료하여 온도조건 변화를 최소화하고자 하였으나, 2분이라는 짧은 시간 내에서도 온도변화 영향에 따른 측정결과의 확연한 변화를 관찰할 수 있었다. 본 연구의 목표가 고온의 아스팔트 콘크리트 재료에 대한 충격공진시험 수행

가능성만을 평가하고자 했기 때문에 온도변화에 따른 엄밀한 물성변화 자체는 별도로 고려하지 않았다.

본 연구에서 검토한 충격공진시험의 시험조건 변수로는 충격하중 특성과 관련된 쇠구슬 직경 및 타격 위치, 해석의 경계조건과 관련된 시편거치 조건, 그리고 신호해석과 관련된 신호획득속도 및 신호처리 방법 등을 대상으로 하였다. 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 충격공진시험의 영향요소 평가를 위한 시험조건 변수

시험조건 변수	조건 수	조건 변화 범위	검토 내용
쇠구슬의 직경 (mm)	4	15.8, 14.3, 12.7, 11.0, 8.7	충격하중의 특성 변화
타격위치	3	골재, 아스팔트, 패인 곳	
시편거치조건	4	공기 중, 수평-거치대, 수평-바닥, 수직-바닥	경계조건의 변화
신호획득속도 ( $\mu s$ )	6	1, 2, 4, 8, 10, 20	시험장치 소요성능 평가
특이신호 처리	4	정상, 저주파이상, 고주파이상, 저고주파이상	특이 신호의 판정 기준

충격공진시험은 동적시험으로 시험결과가 시편의 거치 경계조건에 영향을 받는다. 가장 이상적인 조건은 완전한 자유조건을 형성하는 것이지만 이것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 시편을 어떠한 형태로든 거치하게 되는데, 본 연구에서는 그림 3과 같은 4종의 거치조건에 대하여 검토하였다. 그림 3(a)는 공기 중에 끈을 사용하여 시편의 1/3 지점을 지지하여 매달아 놓은 것으로 가장 이상적인 조건에 부합하는 경우다(Sun, 1993; 조성호 등, 2006). 그러나 이러한 조건은 고온에서 아스팔트 콘크리트 시편의 자중에 의해서 시편에 손상이 발생할 가능성이 매우 큰 단점이 있다. 그림 3(b)는 쇠 재질의 거치대 위에 시편을 수평으로 놓은 경우이고, 그림 3(c)는 특별한 거치대를 사용하지 않고 바닥에 직접 수평으로 거치한 것이다. 마지막으로 그림 3(d)의 조건은 시편을 수직으로 놓은 것이다. 그림 3(d)의 조건에서는 충격하중을 발생하는 면과 신호를 측정하는 면이 동일한 면에 존재하게 된다.

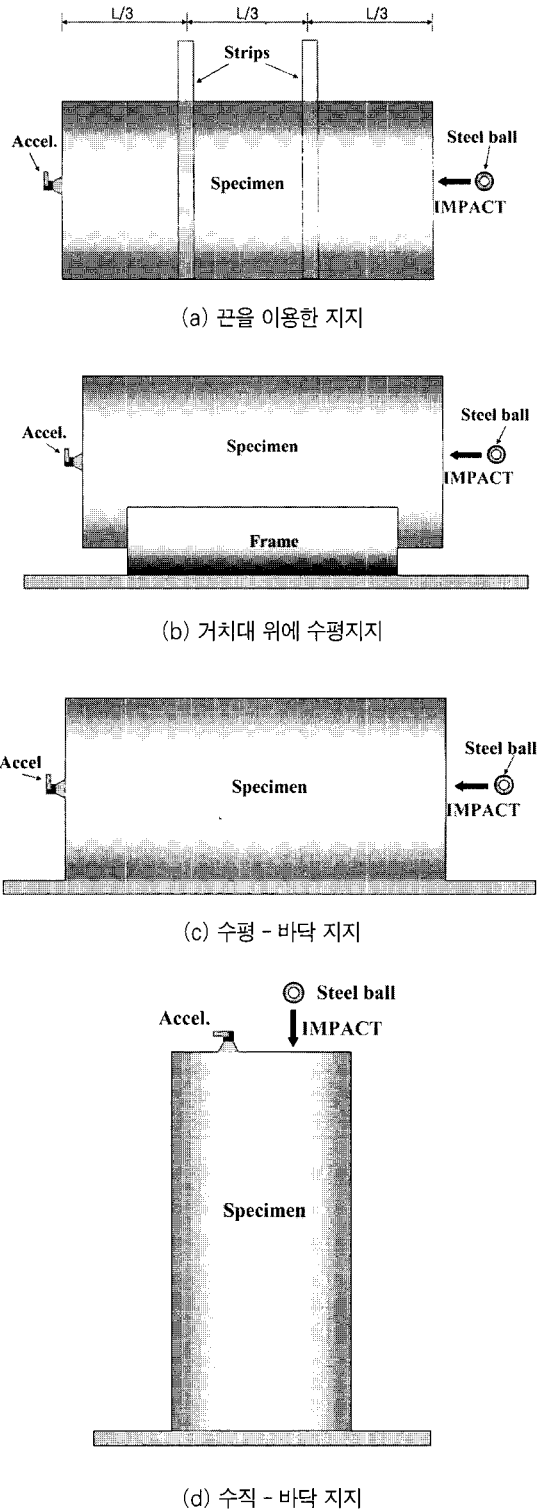


그림 3. 충격공진시험 시편지지 경계 조건



충격공진시험에서 가장 이상적인 입력하중은 모든 주파수 성분에서 에너지 크기가 일정한 충격하중이다. 이상적인 조건에 가장 부합되는 하중원은 쇄구슬에 해당하며, 쇄구슬의 직경에 따라서 발생 가능한 주파수 범위가 달라진다(김동수 등, 1997). 쇄구슬의 직경이 작아질수록 발생 가능한 주파수 영역이 확장되지만, 직경이 줄어들어 따라서 가해지는 충격하중의 에너지 성분이 줄어들어, 결과적으로 신호/잡음비(signal to noise ratio)가 줄어드는 단점이 있다. 본 연구에서는 직경 8.7mm부터 15.8mm 사이의 5종의 서로 다른 쇄구슬을 사용하여 충격하중의 영향을 검토하였다.

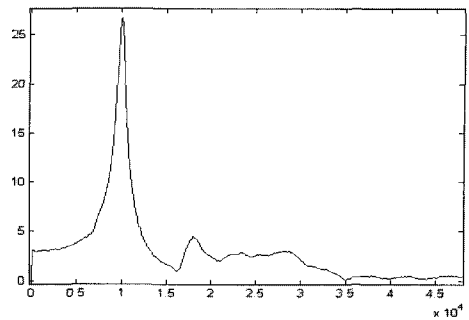
충격하중의 특성에 관련된 또 다른 요인은 쇄구슬이 시편에 접촉하는 부분의 특성이다. 아스팔트 콘크리트 시편 표면을 골재 부분, 아스팔트 부분, 패인 부분으로 구분하여 충격하중을 재하하였다. 시편을 통하여 전달되는 충격하중에 의한 탄성파는 충격하중이 시편의 중앙에 발생한 경우가 가장 이상적이므로 모든 경우에 있어서 시편의 중앙 부분에 최대한 근접하도록 하중을 재하하였다.

충격하중에 의한 반응을 시간영역에서 가속도계 신호로 측정한다. 이때 측정하는 신호의 시간간격(sampling rate)은 주파수 영역에서 공진주파수를 신뢰성있게 측정할 수 있을 정도로 충분히 빨라야 한다. 본 연구에서는 1 $\mu$ s에서 20 $\mu$ s 사이에서 신호획득속도(sampling rate)를 변화시켰다.

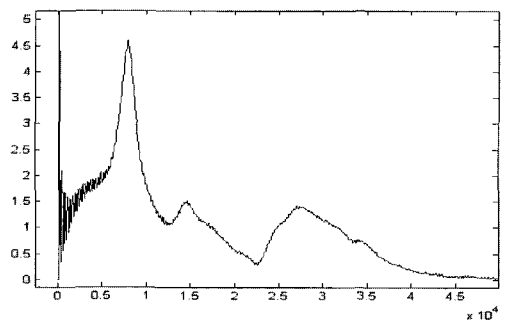
## 4. 충격공진시험 시험조건 영향요소

### 4.1 충격공진시험 주파수 영역 신호의 특성

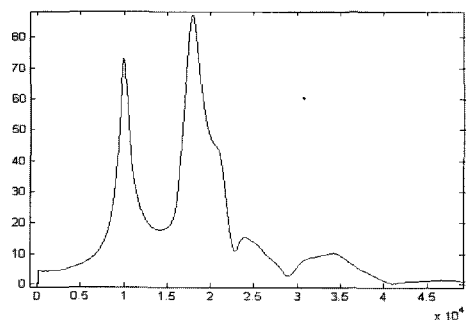
그림 4는 충격공진시험에서 결정된 주파수영역 신호의 특성에 따른 일례를 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 이론적인 특성에 잘 부합하는 이상적인 주파수영역 신호의 일례다. 그림 4(a)의 결과에서 최고 진폭에 해당하는 주파수로부터 공진주파수를 결정하고 공진주



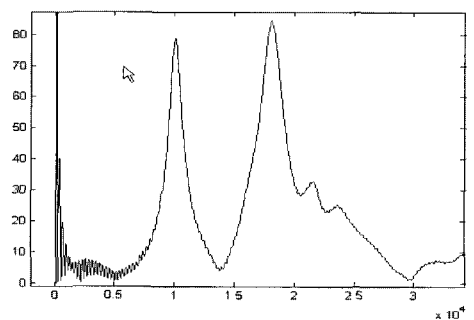
(a) 이상적인 주파수영역 신호



(b) 과도한 저주파영역 신호



(c) 고주파영역의 과도신호



(d) 저주파 고주파영역 모두의 과도신호

그림 4. 충격공진시험에서 결정된 주파수영역 신호특성 일례



파수 부근의 형상으로부터 감쇠비를 결정하게 된다 (Sun, 1993). 모든 일련의 과정은 Mat Lab.으로 제작된 프로그램을 이용하여 결과를 해석하였다.

본 연구에서 적용한 모든 시험조건의 시험에서, 대부분의 경우 그림 4(a)와 같은 주파수영역의 신호를 획득할 수 있었다. 그러나 불규칙적으로 저주파 영역에서 과도한 에너지를 갖는 경우(그림 4(b)), 또는 공진주파수 이후의 고주파영역에서 과도한 에너지를 갖는 경우(그림 4(c)) 그리고 저주파영역과 고주파영역 모두에서 과도한 신호를 갖는 경우 등의 결과가 획득되었다.

그림 4에 나타낸 오류가 포함된 신호의 형태별 정확한 발생원인은 현재까지 명확하게 규명되지 못하고 있으나 가속도계와 시편간의 불완전한 접촉, 충격하중 재하시 입력신호 자체의 불규칙한 오류, 시험시스템의 전기적 잡음, 연속적인 충격하중 재하과정에서 시편의 미세한 운동 등이 복합적으로 작용한 것으로 추측된다.

본 연구에서는 모든 시험조건에서 이상적인 형태에 부합되지 못하는 주파수영역 신호는 결과 해석의 대상에서 제외하였다. 1회 충격하중 타격에 소요되는 시간이 불과 수초에 불과하고, 15회 정도 타격하면 10개 이상의 우수한 신호를 획득할 수 있었으며, 15회 타격에 소요되는 시간은 30초 이내였다. 따라서 시험 횟수를 증가시키는 경우에도 시험소요시간의 증가는 대단히 미비하여 충격공진시험의 간편성은 계속적으로 확보할 수 있었다.

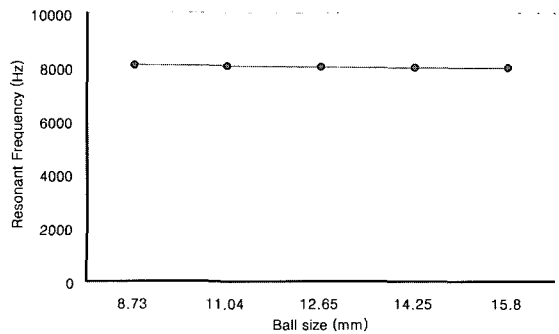
동일한 시험조건에서 그림 4(a)와 같이 이상적인 신호만을 대상으로 한 30개 이상의 신호에 대한 결과해석 결과 공진주파수 측정에 있어서의 반복성(repeatability)은  $\pm 0.07\%$ , 감쇠비 결정에 있어서의 반복성은  $\pm 0.9$  로 매우 반복성이 뛰어난 시험임을 확인하였다.

한편, 그림 4에 나타낸 비 이상적인 신호에 대해서, 공진주파수영역의 신호 이외의 모든 주파수영역 신호를 무시하고 공진주파수영역 부근의 신호만을 대상으로 결과해석을 한 경우, 정상적인 신호로부터

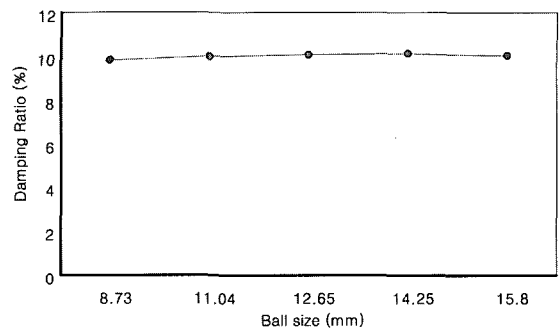
얻은 결과와 비교한 차이가 공진주파수 결정에 대해서는  $\pm 1.9\%$ , 쇠비 결정에 있어서는  $\pm 8.5\%$ 로 나타났다. 공진주파수보다는 감쇠비 결정에 있어서 매우 큰 오차를 유발하였다. 오차의 절대량이, 일반적인 시험에서의 오차와 비교하면, 매우 큰 수준은 아니지만 충격공진시험 자체의 뛰어난 반복성을 고려하면 매우 높은 수준이다. 따라서 비 이상적인 신호에 대한 특별한 신호처리방법이 개발되기 전에는 결과해석에서 제외하는 것이 합당한 것으로 판단된다.

#### 4.2 쇠구슬 직경의 영향

쇠구슬 직경에 따라 결정된 공진주파수와 감쇠비 변화를 그림 5에 나타내었다. 시험에 적용된 쇠구슬의 직경 변화 범위에서 쇠구슬 직경의 영향은 매우 작음을 확인할 수 있다.



(a) 공진주파수에 대한 영향



(b) 감쇠비에 대한 영향

그림 5. 쇠구슬 직경에 따른 공진주파수 및 감쇠비 변화



영향요소의 상대적인 영향정도를 검토해보고자 변동량(% variation)을 식 (1)과 같이 정의하였다.

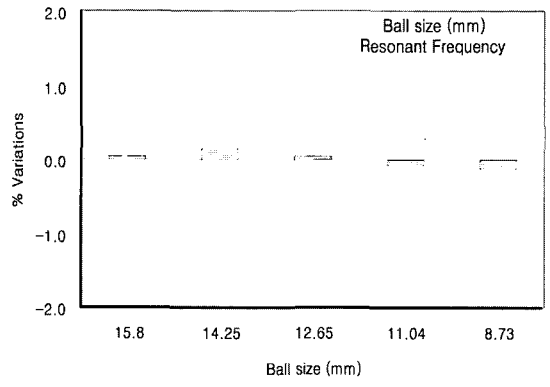
$$\% \text{ Variation} = \frac{(\text{Average value} - \text{Measured Value})}{\text{Average Value}} \times 100(\%) \quad (1)$$

쇠구슬 직경에 따른 변동량을 그림 6에 나타내었다. 평균적으로 공진주파수 결정에 있어서는  $\pm 0.2\%$ , 감쇠 결정에 있어서는  $\pm 1.8\%$ 의 변동이 있는 것으로 나타났다. 모든 시험조건이 동일한 상태에서 충격공진 시험의 반복성을 고려하면, 본 연구에서 적용한 범위에서는 쇠구슬 직경이 충격공진 시험의 결과에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 즉, 직경 8.7mm부

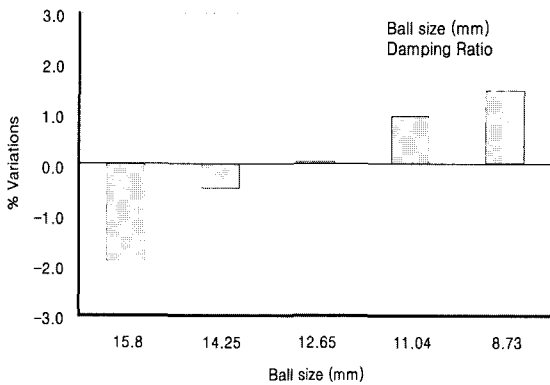
터 15.8mm 사이의 어떠한 쇠구슬을 사용해도 동일한 결과를 획득할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4.3 타격 및 신호측정 위치의 영향

타격지점은 쇠구슬 직경과 함께 시편에 가해지는 충격하중의 특성에 영향을 준다. 이상적인 경우는 시편의 중앙부분을 타격하는 것이다. 한편 노출된 아스팔트 콘크리트 시편의 표면은 사진 1과 같이 골재 부분, 아스팔트 부분, 패인 부분으로 나누어 볼 수 있다. 가속도계의 위치 또한 시편의 중앙부분에 위치하는 것이 이상적인데 이곳의 재료가 아스팔트 또는 골재 부분일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 가속도계의 위치를 골재 부분 및 아스팔트 부분으로 변화시키면서, 각각의 경우에 대하여 타격위치를 골재, 아스팔트, 패인 곳으로 의도적으로 조절하여 타격 및 신호측정 위치의 영향을 검토하였다.



(a) 공진주파수에 대한 영향



(b) 감쇠비에 대한 영향

그림 6. 공진주파수 및 감쇠비 결정에 대한 쇠구슬 직경의 영향

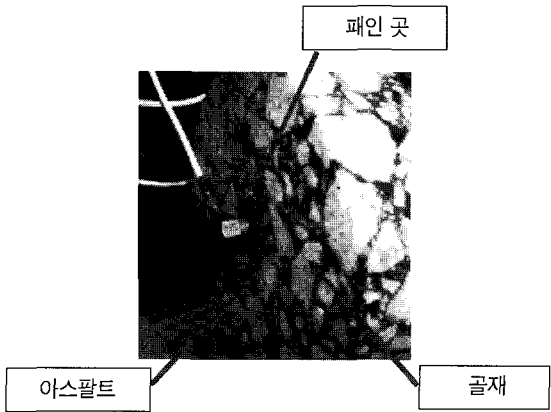
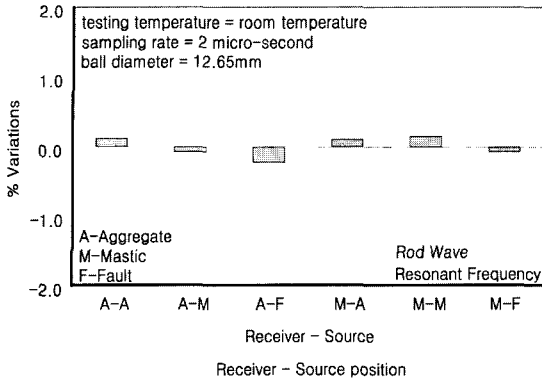
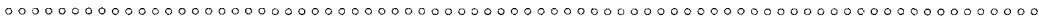
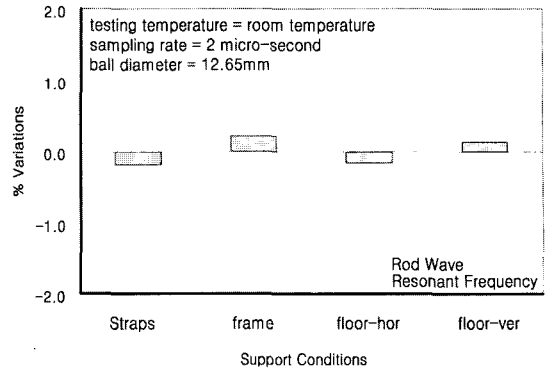


사진 1. 아스팔트 콘크리트 시편 타격위치의 구분

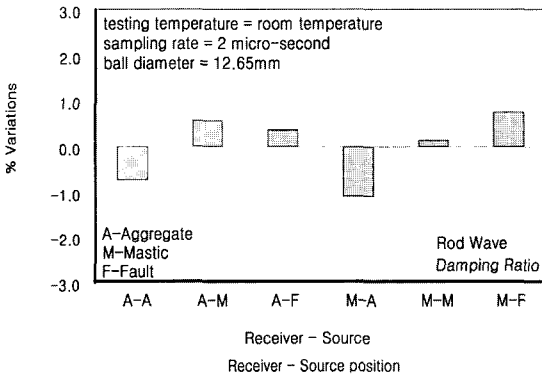
타격 및 신호측정 위치에 따라 결정되는 공진주파수는 그림 7(a)와 같이 골재, 아스팔트, 패인 곳 모두에서 거의 일정하게 나타났으며 변동률은  $\pm 0.2\%$ 의 매우 작은 범위 이내 들었다. 감쇠비의 경우에는 공진주파수에 비하여 변동이 컸으나 모든 경우에  $\pm 1.1\%$  이내에 들었다.



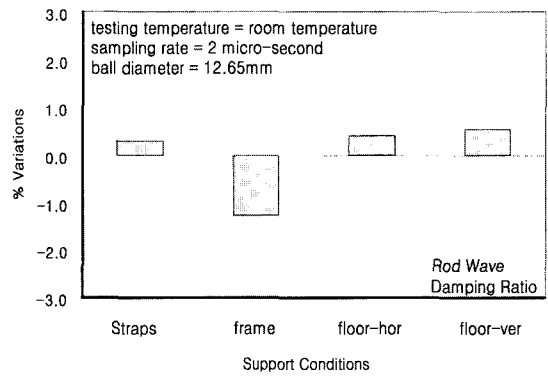
(a) 공진주파수에 대한 영향



(a) 공진주파수에 대한 영향



(b) 감쇠비에 대한 영향



(b) 감쇠비에 대한 영향

그림 7. 타격 및 신호측정 위치에 따른 충격공진시험 결과

그림 8. 시편 거치 조건에 따른 충격공진시험 결과

#### 4.4 시편 거치조건 영향

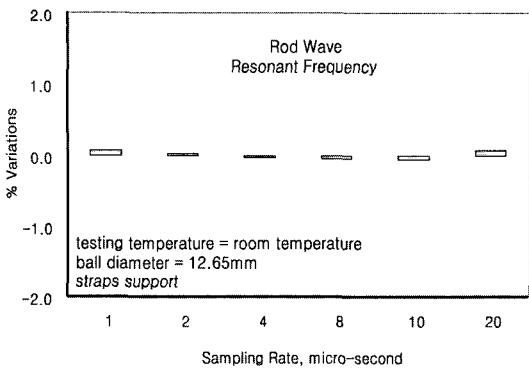
본 연구에서 적용한 4가지 거치방법에서 결정된 공진주파수 및 감쇠비의 변화를 그림 8과 같이 나타냈다. 그림 8과 같이, 공진주파수 결정에 있어서는  $\pm 0.3\%$ , 감쇠비 결정에 있어서는  $\pm 1.3\%$  이내의 변동범위에 들었다. 따라서 어떠한 시편 거치조건을 적용하여도 신뢰성있는 충격공진시험을 수행할 수 있음을 확인할 수 있다. 한편 고온에서 아스팔트 콘크리트 시편의 안정성을 고려한다면 바닥 수평거치 또는 수직거치방법이 보다 효용성이 클 것으로 예상된다.

#### 4.5 신호획득 속도(sampling rate)의 영향

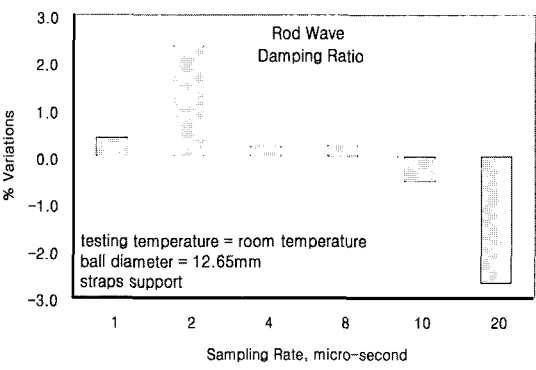
신호획득 속도에 따른 시험결과의 변화를 그림 9에 나타내었다. 공진주파수 결정에 있어서는  $\pm 0.1\%$ , 감쇠비 결정에 있어서는  $\pm 2.7\%$  이내의 변동 범위에 들었다.

본 연구에서는  $20\mu s$  이하의 느린 신호획득 속도에 대해서도 시험을 수행하였으나 신뢰성있는 결과 획득이 불가능하였다. 이것은 신호획득 속도 (sampling rate)가 측정 가능한 주파수영역의 범위와 관련되어 있기 때문에 신호획득 속도를 지나치게 느리게 할 경우 공진주파수를 포함하는 주파수영역 범위의 신호를 측정할 수 없기 때문이다. 아울러 감





(a) 공진주파수에 대한 영향



(b) 감쇠비에 대한 영향

그림 9. 신호획득속도(sampling rate)에 따른 충격공진시험 결과

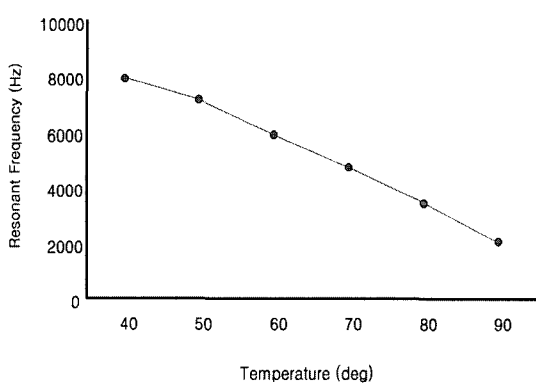
쇠비는 공진주파수영역 부근의 신호형태를 이용하므로, 신뢰성있는 결과해석을 위해서는 공진주파수의 두 배 이상의 주파수영역까지 신호측정을 필요로 한다. 이러한 조건을 충족시키는 범위에서는 신호획득 속도의 영향은 매우 작은 것으로 판단된다. 신호획득 속도 2 $\mu$ s에서 감쇠비 측정의 변동이 다른 신호획득 속도에 비하여 상대적으로 크게 나타났는데, 이것은 시험의 반복성에서 발생한 오차로 추측된다.

일반적인 아스팔트 콘크리트에서 저온에서는 10~20kHz 고온에서는 수백Hz 정도의 공진주파수를 갖는다. 따라서 전체 온도 범위에서 충격공진시험을 위해서는 10 $\mu$ s 이상의 빠른 신호획득 속도가 필요함을 확인할 수 있다.

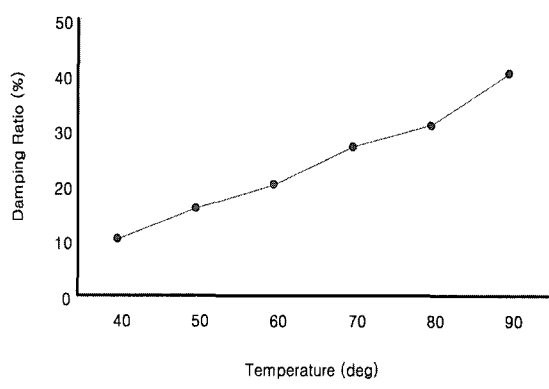
#### 4.6 시편 온도영향

앞에서 검토하였던 쇠구슬 직경, 타격 및 신호측정 위치, 시편거치조건, 신호획득 속도 등은 시편의 물성을 변화시키지 않는 시험조건이며 시험온도는 아스팔트 콘크리트 시편 자체의 물성을 변화시키는 조건이다. 즉 시험온도는 온도변화에 따른 아스팔트 콘크리트의 물성변화를 시험적으로 평가해야 하는 시험변수에 해당한다.

그림 10은 온도변화에 따라 충격공진시험에서 결정된 공진주파수와 감쇠비 변화의 일례를 나타내고 있다. 잘 알려진 바와 같이 온도가 증가할수록 아스팔트 콘크리트 재료의 강성도(공진주파수)가 급격하게 감소하고 위상각(감쇠비)이 급격히 증가함을 확



(a) 온도에 따른 공진주파수 변화



(b) 온도에 따른 감쇠비 변화

그림 10. 온도에 따른 아스팔트 콘크리트의 충격공진시험 결과 일례

인할 수 있다.

시편의 물성을 변화시키지 않고 다만 측정결과와 신뢰성과 관련된 시험조건들인 쇠구슬 직경, 타격 및 신호측정 위치, 시편거치 조건, 신호획득 속도 등의 변동성에 비하여 온도변화에 의한 변동이 매우 큼을 알 수 있다. 따라서 충격공진시험으로부터 온도에 따른 아스팔트 콘크리트 재료의 물성변화를 의미 있게 결정할 수 있음을 확인 할 수 있다. 다만 충격공진시험에서 결정되는 온도변화에 대한 결과가 실제 물성변화를 얼마나 신뢰성 있게 반영하는가에 대한 연구는 추후에 계속적으로 수행되어야 할 부분이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는, 아스팔트 콘크리트 재료의 탄성계수와 위상각을 간편하게 측정할 수 있는 새로운 방법으로 제안되고 있는, 충격공진시험(Impact Resonance)의 시험조건에 대한 영향정도를 평가하였다. 시험결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 모든 조건이 동일한 상태에서 충격공진시험 자체의 변동성, 즉 반복성(repeatability)에 따른 변동은 공진주파수 결정에 있어서는  $\pm 0.07\%$ , 감쇠비 결정에 있어서는  $\pm 0.9\%$ 로 반복성이 매우 우수함을 확인하였다..
- 2) 시험조건에 대한 영향요소로는 쇠구슬의 직경, 타격 및 신호측정위치, 시편거치조건, 신호획득 속도에 대하여 검토하였다. 검토결과 각 영향요소의 최대 변동범위는 표 2와 같이 결정되었다.

표 2. 충격공진시험 시험조건 변화에 따른 측정결과 변동범위

구 분	측정결과 변동범위	
	공진주파수	감쇠비
쇠구슬 직경	$\pm 0.2 \%$	$\pm 1.8 \%$
타격 및 신호측정 위치	$\pm 0.2 \%$	$\pm 1.1 \%$
시편거치 경계조건	$\pm 0.3 \%$	$\pm 1.3 \%$
신호획득 속도	$\pm 0.1 \%$	$\pm 2.7 \%$

3) 충격공진시험 자체의 반복성(repeatability)에 을 고려하면 쇠구슬의 직경, 타격 및 신호측정위치, 시편거치조건, 신호획득 속도의 영향은 매우 작은 것으로 판단된다. 시험의 편의성과 시편 안정성을 고려한다면 직경 10mm 이상의 쇠구슬, 시편 중앙부분 타격 및 신호획득, 바닥위에 수평방향 시편거치조건, 10 $\mu$ s 이상 빠른 신호획득속도 조건을 아스팔트 콘크리트 재료에 대한 잠정적인 시험방법의 조건으로 제안한다. 그러나 다양한 아스팔트 콘크리트 재료의 특성, 고온에서 시험의 특성, 시험하는 시험시스템의 특성 등을 고려한 최적의 시험방법에 대해서는 향후 추가적인 검토가 필요하다.

4) 시험조건에 대한 영향보다는 온도변화에 따른 영향이 매우 크게 나타나 충격공진시험으로부터 온도에 따른 아스팔트 콘크리트 재료의 물성변화를 의미 있게 결정할 수 있음을 확인할 수 있었다. 향후에는 충격공진시험에서 결정되는 온도변화에 대한 결과가 실제 물성변화를 얼마나 신뢰성있게 반영하는가에 대한 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 동의대학교(2007AA157) 연구결과와 일부로, 지원에 감사드립니다. 또한 충격공진시험의 기본적인 연구방향에 많은 도움을 주신 NCSU 김영수교수님께 감사를 포함합니다.

## 참고문헌

건설교통부 (2006), “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”, KPRP-G-06.  
 권기철, 김동수 (2000), “현장공진시험을 이용한 보조기층 재료의 대체  $M_R$  시험법”, 한국도로포장공학회 논문집, 제2권, 제2호, pp. 149-161.  
 김동수, 박형춘, 이광명 (1997) “충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴 검사”, 한국콘크리트학회 논문집, 9권, 2호, pp. 109-119.



조성호, 조미라, 박병선, 권수안 (2006) "콘크리트 공시체의 압축강도 추정을 위한 최적전단파공진 기법", 한국도로학회 학술발표회, pp. 229-236.

Kim D. S., Kweon G. C. and Lee K. H. (1997), "Alternative Method of Determining Resilient Modulus of Compacted Subgrade Soils Using Free-Free Resonant Column Test" , *Transportation Research Board 1557*, pp.62-69.

Kweon G. C. and Kim Y. R. (2006) "Determination of Asphalt Concrete Complex Modulus with Impact Resonance Test," *Transportation Research Record 1970*, pp. 151-160.

Sun, C. W. (1993), 'Stiffness and Damping from the Frequency Response of a Free-Free Specimen,' Master's Thesis GT93-8, The University of Texas at Austin.

접 수 일 : 2007. 4. 24

심 사 일 : 2007. 4. 27

심사완료일 : 2007. 6. 7