콘크리트의 탄성계수 및 감쇠비 결정에 대한 충격공진시험 적용

정범석^{1)*} · 이재환¹⁾ · 권기철¹⁾

¹⁾동의대학교 토목공학과

Application of Impact Resonance Test to the Determination of Elastic Modulus and Damping Ratio of Concrete

Beom-Seok Jung,^{1)*} Jae-Hoan Lee,¹⁾ and Gi-Chul Kweon¹⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

ABSTRACT The moduli of concrete has been determined by various testing methods. The impact resonance (IR) method has been shown to be truly a simple nondestructive testing method which produces consistent results. It is possible to determine not only the modulus but also damping ratio from the IR test. However, the values of elastic modulus and damping ratio of concrete from the test is known to be affected by various test conditions including, specimen support condition, impact steel ball size and sampling rate. In this study, the optimum IR test conditions are suggested and validated experimentally. The test results showed that the recommended test conditions yielded a variation of resonant frequency within $\pm 0.3\%$ and damping ratio $\pm 10.0\%$. In addition, the modulus from the IR test was comparable to that from a static test when the effect of strain amplitude was properly taken into account.

Keywords : impact resonance test, concrete, resonant frequency, elastic modulus, damping ratio

1. 서 론

콘크리트 구조물의 유지관리와 평가를 위해 다양한 비파괴 시험기법이 사용되고 있다.^{1,2)} 현재 활용되고 있는 비파괴 기법 중 대표적인 것으로는 반발경도법, 초음파 기법, 성숙도(maturity) 기법, 탄성파 기법 등이 있다.³⁾ 탄성파를 이용한 기법으로는 표면파기법(SASW) 및 충격 반향기법(IE, impact echo)이 대표적으로 사용되고 있다. 이러한 기법은 부재의 두께와 탄성계수를 동시에 평가하는 장점이 있으나, 엄밀한 탄성계수 결정에는 한계를 가지고 있다.

콘크리트의 탄성계수를 결정하는 기존의 방법은 KS F 2438 “콘크리트 원주 공시체의 정탄성계수 및 포아송비 시험방법”에 준하여 LVDT 및 변형률게이지를 사용하는 전통적인 방법을 적용하여 왔다. 이러한 정탄성계수를 측정하는 방법은 실험자의 숙련도나 시멘트 콘크리트 재료의 불균질성 등의 이유로 시험체간의 오차가 비교적 큰 단점이 있다. 또한 이러한 파괴에 의한 시험기법은 고가의 시험장비, 숙련된 시험기술자, 과다한 시험시간, 고가의 시험비용 등의 문제점을 안고 있다.^{2,4)}

시험의 탄성계수와 감쇠비를 충격하중에 의한 공진주파수로부터 결정하는 충격공진시험(IR: impact resonance test)이 개발되어 지반재료 및 아스팔트 콘크리트에 적용되고 있다. 특히 충격공진시험은 미소변형률 영역에서 동적하중 재하조건에서의 재료적 감쇠비를 매우 신속하고 신뢰성 있게 결정할 수 있는 장점이 있다. 그리고 충격공진 시험기법은 시험장치 구성이 매우 간단하고, 시험수행에 숙련된 기술을 요하지 않을 뿐 아니라 시험수행과 결과해석의 전 과정이 불과 몇 분 내에 완료되는 매우 간편한 비파괴시험 방법이다.⁵⁾ 충격공진시험은 시험에 충격하중을 가하여 시간영역 응답을 측정하고 이를 다시 주파수 영역으로 신호를 변환하여 해석하는 기법이다. 이 실험기법의 원리는 충격반향기법과 매우 유사하나, 경계조건이 명확한 공시체에 대하여 수행함으로써 미소변형률 영역에서의 탄성계수와 감쇠비를 효과적이고 신뢰성 있게 획득할 수 있는 장점이 있다. 지반공학 분야에서는 이러한 시험기법을 자유단공진주시험(free-free resonant column)이라고 칭하며 지반의 미소변형률 영역의 탄성계수와 감쇠비를 평가하기 위하여 널리 사용되어 오고 있다.⁶⁻⁸⁾ 그러나 아직까지는, 콘크리트 재료에 대한 시험자료 해석기법과 세부적인 시험조건이 표준화 되어 있지 못한 단계이다. 따라서 충격공진시험을 보다 보편적인 시험으로 사용하기 위해서는 시험에 대한 영향요소들을 평가하여 최적의 시험기법 정립을 필요로 한다.

*Corresponding author E-mail: bsjung@deu.ac.kr

Received March 11, 2010, Revised April 20, 2010,

Accepted June 18, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

이 연구에서는 콘크리트 시편에 대한 충격공진시험에서 충격하중의 타격위치, 시편 거치조건, 충격하중원의 특성, 신호획득 속도, 신호처리기법 등의 영향요소를 평가하여 최적의 시험조건을 제시하며, 시험 결과로부터 콘크리트에 대한 최적의 충격공진시험 조건 설정, 콘크리트의 동적 감쇠비 특성, 전체 변형률 영역에서 탄성계수 결정 가능성 등을 확인하고자 한다.

2. 실험 연구

2.1 목적 및 실험변수

콘크리트 재료에 대한 충격공진시험 장치의 전체적인 구성은 Fig. 1과 같이 시편 거치 장치, 충격하중 재하장치, 동적신호 획득센서와 동적신호 측정장치(dynamic logger), 그리고 신호처리 장치로 구성된다. 이 연구에서

Fig. 1 Schematic diagram of IR setup

Fig. 2 Specimen support conditions in IR test

검토한 충격공진시험의 시험조건 변수로는 i) 충격하중 특성과 관련된 쇠구슬 직경, ii) 경계조건과 관련된 시편 거치 조건, 그리고 iii) 신호획득 속도를 대상으로 하였다 (Table 1). 충격공진시험의 가장 이상적인 조건은 아무런 지지없이 공기중에 완전한 자유 경계를 형성하는 것이지만 이것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 시편을 어떠한 형태로든 거치하게 되는데, 이 연구에서는 Fig. 2와 같은 4종의 거치 조건에 대하여 검토하였다. Fig. 2(a)는 공기 중에 끈으로 시편의 1/3 지점을 지지하여 매달아 놓은 것으로 가장 이상적인 조건에 부합하는 경우이다.^{6,9,10)} 이러한 지지조건에서는 서로 다른 면에서 충격과 신호측정이 가능하고, 동일한 면에서 충격과 신호측정을 수행할 수도 있다. 이 연구에서는 두 가지 경우 모두에 대하여 시험을 수행하였다. Fig. 2(b)는 강재의 거치대 위에 시편을 수평으로 놓은 경우이고, Fig. 2(c)는 특별한 거치대를 사용하지 않고 시험용 목재 테이블 바닥에 직접 수평으로 거치 한 것이다. Fig. 2(d)는 시험용 테이블 바닥에 시편을 수직으로 놓은 것으로 동일면에서 충격과 신호측정을 수행하였다.

충격공진시험에서 가장 이상적인 입력하중은 모든 주파수 성분에서 에너지 크기가 일정한 충격하중이다. 가

Table 1 Testing variation in IR tests for evaluation of effects on the test result

Test parameters	Test conditions
Support condition	Hang with straps horizontal on support frame horizontal on floor vertical on floor
Ball diameter (mm)	15.8, 14.3, 12.7, 11.0, 8.7
Sampling rate (μ s)	1, 2, 4, 8, 10, 20

진원의 특성은 쇠구슬의 직경에 따라서 발생 가능한 주파수 범위가 달라진다.¹⁾ 쇠구슬 직경이 작을수록 발생 가능한 주파수 영역이 확장되지만, 직경이 감소함에 따라서 가해지는 충격하중의 에너지 성분이 줄어들어, 결과적으로 신호/잡음비(signal to noise ratio)가 줄어드는 단점이 있다. 이 연구에서는 직경 8.7 mm부터 15.8 mm 사이의 5종의 서로 다른 쇠구슬을 사용하여 충격하중의 영향을 검토하였다. 충격하중에 의한 응답을 시간영역에서 가속도 신호로 측정한다. 이때 측정되는 신호의 시간 간격은 주파수 영역에서 공진주파수를 신뢰성 있게 측정할 수 있을 정도로 충분히 짧아야 한다. 이 연구에서는 1 μ s에서 40 μ s 사이에서 신호획득 속도(sampling rate)를 변화시켰다.

2.2 시편 제작

충격공진시험의 적용성을 평가하기 위하여 일반적인 콘크리트 시편에 대한 시험을 수행하였다. 이 연구의 목적은 충격공진시험에서 시험조건의 상대적인 영향 정도 평가에 국한하였으므로 목표강도를 얻기 위한 배합설계의 수정과 절대값의 비교 대상이 되는 시험은 별도로 수행하지 않았다. 직경 100 mm, 높이 200 mm의 원기둥 공시체를 KS F 2403 “콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법”에 의하여 물-시멘트비를 50%에서 30%까지 변경시켜 6종의 공시체로 제작하였고 28일 수중양생 후 압축강도 20~60 MPa 범위의 결과를 얻을 수 있었다.

2.3 실험 방법

Fig. 1과 같은 시스템에서 충격하중은 일반적으로 쇠구슬(steel ball)을 사용하여 발생시킨다. 이때 충격하중에 의한 시편의 응답은 수만 Hz 범위에 있어 신호의 획득은 가속도계 센서를 사용하는 것이 일반적이다.

충격하중을 시편에 재하하여 Fig. 3과 같이 측정된 시간영역의 응답을 FFT 신호처리 기법을 적용함으로써 주파수 영역신호(주파수 반응곡선)를 얻게 된다. 이러한 주파수 반응곡선으로부터 공진주파수와 감쇠비를 얻을 수 있으며, 탄성계수는 공진주파수로부터 결정된다.

충격하중원은 쇠구슬을, 신호측정은 PCB 353B15 가속도계와 PCB 480E09 신호안정기를 사용하였으며, 신호획득은 GRAPHTEC WR1000, 시간영역 신호를 주파수 영역으로의 전환과 공진주파수 및 감쇠비의 결정은 제작한 프로그램을 이용하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 충격공진시험의 반복성에 대한 평가

충격공진시험에서 합리적으로 공진주파수와 감쇠비를 결정하기 위해서는 앞의 Fig. 3과 같은 결과를 획득해야

Fig. 3 Typical signal in IR test and signal processing

한다. 그러나 시험의 조건에 따라서, 불규칙적으로 저주파 영역에서 과대한 에너지를 갖는 경우, 공진주파수 이후의 고주파 영역에서 과대한 에너지를 갖는 경우, 저주파 영역과 고주파 영역 모두에서 과대한 신호를 갖는 경우 등 매우 다양한 양상의 오류가 포함된 신호를 획득하는 경우가 발생한다.¹¹⁾ 이러한 실험적 오류의 원인이 현재까지 명확히 규명되지 못한 상태이다. 다만, 가속도계와 시편간의 불완전한 접촉, 충격하중 재하시 입력신호 자체의 불규칙한 오류, 시험 시스템의 전기적 잡음, 연속적인 충격하중 재하과정에서 시편의 미세한 운동 등이 복합적으로 작용하는 것으로 추측된다.

이 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 타격에는 소요되는 시간은 30초 이내였다. 따라서 시험 횟수를 증가시키는 경우에도 시험 소요시간의 증가는 미미하여 충격공진시험의 간편성은 계속적으로 확보할 수 있었다.

3.2 쇠구슬 직경의 영향

쇠구슬 직경에 따라 결정된 공진주파수와 감쇠비 변화를 6종의 공시체에 대하여 실험하고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 실험에 적용된 쇠구슬의 직경 변화 범위에서 쇠구슬 직경의 영향은 매우 작음을 확인할 수 있었다. 시편의 강도 및 강성도(공진주파수)가 증가할수록 대체로 감쇠비가 작게 결정되는 경향을 보이고 있다. 미소변형률 영역에서 시멘트 콘크리트의 감쇠비는 0.4~0.6% 범위에서 결정되었다. 따라서 감쇠비가 매우 큰 아스팔

Fig. 4 Variation of resonant frequency and damping ratio with ball size

Fig. 5 Variation of resonant frequency and damping ratio with ball size

트 콘크리트의 경우와 같이 공진주파수에 대한 감쇠비의 영향을 추가적으로 고려하는 해석기법⁵⁾은 불필요할 것으로 판단된다.

충격공진시험의 실험조건에 대한 각각의 영향요소의 정도를 상대적으로 평가하기 위하여, 결정되는 물성치의 변동량(% variation)을 식 (1)과 같이 정의하였다. 식 (1)에 나타난 변동량은 영향요소의 변화에 따라서 결정되는 값의 상대적인 변동량을 나타낸 것으로, 변동량이 작을수록 해당요소의 영향이 매우 작음을 나타낸다.

$$\text{변동량}(\%) = \frac{\text{평균값} - \text{측정값}}{\text{평균값}} \times 100 \quad (1)$$

쇠구슬 직경에 따른 변동량을 Fig. 5에 나타내었다. 평균적으로 공진주파수 결정에 있어서는 $\pm 0.18\%$, 감쇠 결정에 있어서는 $\pm 6.0\%$ 의 변동이 있는 것으로 나타났다. 쇄구슬의 직경이 증가할수록 측정되는 공진주파수의 변동량은 작게 결정되고, 감쇠비의 경우는 크게 측정되는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 시편의 강도와 무관하게 일정한 경향을 보이고 있다. 이러한 원인은 쇄구슬의 직경이 증가할수록 저주파 영역의 에너지 성분이 크게 발생하기 때문으로 사료된다. 그러나 그 변화의 정도가 매우 작아(최대 $\pm 6\%$) 공학적으로 쇄구슬 직경에 대

한 영향은 무시할 수준으로 판단된다. 다만 쇄구슬을 지나치게 큰 것을 사용하는 경우에는 오차량이 증가할 수 있으므로 직경 10~13 mm 정도의 쇄구슬을 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

3.3 시편경거치조건 영향

쇠구슬의 직경을 12.65 mm로 단일화하고, 앞에 언급한 네 가지 시편 거치조건 및 시편을 공기 중에 끈으로 매달고 동일면에서 가진과 신호측정을 한 경우에 대한 공진주파수 및 감쇠비의 변동량을 Fig. 6에 나타내었다. 변동량은 공진주파수 결정에 있어서는 $\pm 0.13\%$, 감쇠비 결정에 있어서는 $\pm 9.0\%$ 로 나타났다. 변동량이 10% 이내로 작아 어떠한 시편 거치조건을 적용하여도 신뢰성있는 충격공진시험을 수행할 수 있음을 확인할 수 있다.

충격공진시험의 가장 이상적인 거치조건에 부합하는 것은 시편을 공기중에 끈으로 매달고 서로 다른 면에서 가진과 신호측정을 하는 경우다. Fig. 6에서 보듯이 이러한 경우(Fig. 6의 straps 조건)의 변동량이 작았다(공진주파수, $\pm 0.11\%$; 감쇠비, $\pm 4.1\%$). 한편, 공기중에 시편을 끈으로 매단 경우라 할지라도 동일면에서 가진과 신호측정을 하는 경우(Fig. 6의 straps-edge 조건)에는 변동량이 증가하고 있는데, 이는 시편의 중앙부분에 정밀한 가진을

(a) Resonant frequency

(b) Damping ratio

Fig. 6 Variation of resonant frequency and damping ratio with support conditions

할 수 없는 영향으로 판단된다. 이상적인 자유 경계조건을 다소 구속하는 경우(Fig. 6에서 frame, floor-hor, floor-ver 조건)에는 변동량이 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

3.4 신호획득 속도(sampling rate)의 영향

저장하는 신호의 개수를 2,000개로 동일하게 사용한 경우, 신호획득 속도에 따른 시험 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 신호획득 속도가 40 μ s 이상의 느린 경우에는 신뢰성 있는 결과 획득이 불가능하였다. 이것은 신호획득 속도가 측정 가능한 주파수 영역의 범위와 관련되어 있기 때문에 신호획득 속도를 지나치게 느리게 할 경우 공진주파수를 포함하는 주파수 영역 범위의 신호를 측정할 수 없기 때문이다. Fig. 7을 살펴보면, 공진주파수 결정에 있어서는 신호획득 속도의 영향이 거의 없는 것으로 나타났으나, 감쇠비 결정에 있어서는 신호획득 속도에 따른 변화가 매우 크게 나타났다.

Fig. 8은 동일한 메모리를 사용(동일한 신호의 수를 저장)하는 경우 신호획득 속도에 따라 획득되는 시간영역 신호의 일례를 나타내고 있다. 동일한 메모리를 사용하여 신호를 획득하는 경우 신호획득 속도가 증가할수록 측정되는 신호의 시간 길이는 줄어든다. Fig. 8(a)와 같이 신호획득 속도가 매우 빠른 경우에는 충격하중 신호

(a) Resonant frequency

(b) Damping ratio

Fig. 7 Effects of sampling rate of resonant frequency and damping ratio

의 전체부분을 충분하게 획득하지 못하게 되어 주파수반응곡선 결정에 영향을 미친다. 따라서 빠른 신호획득 속도로 신호를 얻는 경우에는 보다 많은 수의 신호를 저장하여, 충격 가진을 모두 포함하는 충분한 길이의 시간영역 신호를 확보하여야 한다.

충격 가진을 모두 포함하는 충분한 길이의 시간영역 신호를 획득할 수 있도록, 충분한 메모리를 사용하여 해석에 적용한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(b)에 보듯이 신호획득 속도가 빠른 경우에도 매우 안정적인 감쇠비 측정 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 즉, 신호획득 속도가 빠른 경우에는 충분한 시간영역 신호를 얻는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 9의 결과를 변동량으로 나타낸 것이다. 신호획득 속도의 영향은 공진주파수 결정에 있어서는 $\pm 0.6\%$, 감쇠비 결정에 있어서는 $\pm 10.0\%$ 이내의 변동 범위에 들었다.

3.5 충격공진시험을 적용한 콘크리트 비선형 탄성계수 결정 가능성 평가

충격공진시험에서 결정된 탄성계수는 미소변형률 영역의 값으로 일반적인 정적시험에서 결정된 탄성계수와는 차이가 있다. 일반적으로 충격공진시험과 같이 동적시험

Fig. 8 Typical time domain signals with sampling rate using limited number of sampling data

Fig. 9 Variation of resonant frequency and damping ratio with sampling rate

에서 결정된 탄성계수를 동탄성계수라 칭하고, 정탄성계수와 차별하여 고려한다. 콘크리트 재료에 대한 동탄성계수와 정탄성계수의 상관성에 대한 다양한 연구가 진행

Fig. 10 Variation of resonant frequency and damping ratio with sampling rate

되어 왔다.^{4,12,13)}

지반재료에 있어서도 과거에는 동탄성계수와 정탄성계수를 구분하였으나, 현재는 정적, 동적 또는 반복재하 시험 중 어떠한 시험방법으로 시험이 실시되는가에 관계없이 변형특성(평균주응력, 변형률 크기, 하중주파수, 하중반복횟수 등)을 고려하면 동일한 탄성계수를 얻을 수 있음이 확인되고 있다.¹⁴⁻¹⁶⁾

이 연구에서는 콘크리트 재료에 있어서, 충격공진시험에 대한 미소변형률 영역에서 결정되는 탄성계수와 정적 시험에서 결정된 탄성계수를 변형률 크기를 고려하여 비교하여 보았다. 시멘트 콘크리트의 정적 탄성계수는 KS F 2438 “콘크리트 원주 공시체의 정탄성계수 및 포아송비 시험방법”을 적용하여 평가하였다. 시편의 변형측정은 Fig. 11과 같이, 콘크리트 공시체용 LVDT를 적용하는 방법과 시편에 변형률계를 부착하는 방식을 적용하였다. 시편은 배합강도 30 MPa 시편을 사용하였고, 하중재하는 UTM을 사용하였다.

Fig. 12는 이 연구에서 실시한 정적시험과 충격공진시험에서 결정된 탄성계수를 변형률 크기에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 변형률 크기 $0.01\%(1 \times 10^{-4})$ 이하에서는 정적시험으로부터 신뢰성 있는 탄성계수 결정이 어려웠다. 이러한 원인은 측정센서 자체의 한계 보다는 시편과 측정시스템 사이의 다양한 적합성 오차(system compliance)

(a) LVDT

(b) Strain gage

Fig. 11 Deformation measuring equipment in static test

Fig. 12 Comparison of modulus with strain amplitude from IR and static tests

에 기인하는 것으로 판단된다.

주어진 자료에 국한하여 평가하면, 콘크리트의 탄성계수는 변형률 크기 0.05 이하의 범위에서는 선형거동을 보이다가, 변형률 크기가 증가하면서 급격하게 탄성계수가 감소하는 비선형 거동을 나타내고 있다. 아울러, 충격공진시험에서 결정된 탄성계수는 정적시험에서 결정된 미소변형률 영역에서의 탄성계수와 비교적 일치하는 결과를 얻고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 콘크리트에 대한 충격공진시험의 영향요소를 평가하여 최적의 충격공진시험 조건, 시멘트 콘크리트의 감쇠비 특성, 전체 변형률 영역에서 탄성계수 결정 가능성을 평가하였다. 세부적인 결론은 다음과 같다.

1) 시멘트 콘크리트의 탄성계수와 감쇠비를 충격공진

시험으로부터 효과적이고 신뢰성 있게 결정할 수 있음을 확인하였다.

- 2) 충격공진시험에서 쇄구슬의 직경, 타격 및 신호측정위치, 시편거치 조건, 신호획득 속도의 영향은 매우 작은 것으로 판단된다. 공진주파수에 있어서는 변동량이 $\pm 0.3\%$ 이내로 영향이 거의 없는 것으로 평가되었고, 감쇠비에 있어서는 변동량이 $\pm 6.0\% \sim \pm 10.0\%$ 로 나타났다. 시험의 편의성과 시편 안정성을 고려한다면 직경 10 mm 내외의 쇄구슬, 시편 중앙 부분 타격 및 신호획득, 공기 중에 줄을 이용해 매달아 놓은 상태, 10~30 μs 사이의 빠른 신호획득 속도 조건이 콘크리트 재료에 대한 충격공진시험 조건으로 합당한 것으로 나타났다.
- 3) 빠른 신호획득 속도를 적용하는 경우 충분한 가진하중을 모두 포함하는 충분한 길이의 시간영역 신호획득이 중요함을 확인하였다.
- 4) 충격공진시험에서 결정된 탄성계수는 정적시험에서 결정된 미소변형률 영역에서의 탄성계수와 비교적 일치하는 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 향후 보다 엄밀한 시험이 수행된다면 충격공진시험과 시멘트 콘크리트 재료의 비선형성을 결합하여 전체 변형률 영역의 탄성계수 평가방법의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국건설교통기술평가원 “도로 동상방지층의 효용성 검증 및 설치기준 연구”의 과제 일환으로 작성되었습니다. 이 연구의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김동수, 박형춘, 이광명, “충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴 검사,” 콘크리트학회 논문집, 9권, 2호, 1997, pp. 109~119.
2. 조윤희, 조성호, 여성훈, “파괴 및 비파괴시험을 통한 콘크리트 강도와 탄성계수에 관한 실험적 연구,” 대한토목학회 학술대회 논문집, 2000, pp. 265~268.
3. 조미라, 조성호, 강태호, “콘크리트 구조물의 깊이별 탄성계수 분포를 평가하기 위한 공진탐색법의 자동화,” 대한토목학회 학술대회 논문집, 2006, pp. 646~649.
4. 안남식, “재령과 온도에 따른 콘크리트 압축강도와 탄성계수에 관한 연구,” 한국도로학회 학술발표회 논문집, 4권, 1호, 2002, pp. 127~132.
5. Kweon, G. C. and Kim, Y. R., “Determination of Asphalt Concrete Complex Modulus with Impact Resonance Test,” *Transportation Research Record* 1970, 2006, pp. 151~160.
6. Sun, C. W., *Stiffness and Damping from the Frequency Response of a Free-Free Specimen*, Master's Thesis GT93-8, The University of Texas at Austin, 1993, pp. 10~35.
7. Kim, D. S., Kweon, G. C., and Lee, K. H., “Alternative Method of Determining Resilient Modulus of Compacted

- Subgrade Soils Using Free-Free Resonant Column Test,” *Transportation Research Board* 1557, 1997, pp. 62~69.
8. 권기철, 김동수, “현장공진주시험을 이용한 보조기층 재료의 대체 M_R 시험법,” 한국도로포장공학회 논문집, 2권, 2호, 2000, pp. 149~161.
 9. 조성호, 강태호, “운동방정식에 기초한 공진주 실험의 자료분석 및 해석,” 한국지반공학회 논문집, 19권, 4호, 2003, pp. 133~144.
 10. 조성호, 조미라, 박병선, 권수안, “콘크리트 공시체의 압축강도 추정을 위한 최적전단파공진 기법,” 한국도로학회 학술발표회 논문집, 2006, pp. 229~236.
 11. 권기철, 이재환, “아스팔트 콘크리트 탄성계수 결정을 위한 충격공진시험 영향요소 평가,” 한국도로학회 논문집, 9권, 2호, 2007, pp. 89~99.
 12. 장동일, 손영현, 조광현, 김광일, “강섬유보강 고강도콘크리트의 응력-변형률 곡선 및 탄성계수 추정식 평가,” 콘크리트학회 논문집, 12권, 2호, 2000, pp. 13~20.
 13. 한상훈, 김진근, 박우선, 김동현, “온도와 재령이 콘크리트의 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계에 미치는 영향,” 콘크리트학회 논문집, 13권, 6호, 2001, pp. 610~618.
 14. Kim, D. S., Kweon, G. C., and Lee, K. H., “Alternative Method of Determining Resilient Modulus of Subgrade Soils Using Static Triaxial Test,” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38, No. 1, 2001, pp. 107~116.
 15. Buland, J. B., “Ninth Lauritis Bjerrum Memorial Lecture: Small is Beautiful-The Stiffness of Soils at Small Strains,” *Canadian Geotechnical Journal*, No. 26, 1989, pp. 52~65.
 16. Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y. S., and Sato, T., “A Simple Gage for Local Small Strain Measurement in the Laboratory,” *Soil and Foundations*, Vol. 31, No. 1, 1991, pp. 169~180.

요 약 콘크리트의 탄성계수 결정을 위해 다양한 시험기법이 사용되고 있다. 충격공진시험(IR: impact resonance test)은 비파괴시험으로서 간편한 시험장치와 단순한 시험방법이며 반복성이 뛰어나다. 또한 충격공진시험은 탄성계수 뿐만 아니라 감쇠비 결정이 가능하다. 이 연구에서는 콘크리트 시편에 대한 충격공진시험의 다양한 영향요소(시편거치 방법, 충격하중원의 특성, 신호획득 속도 등)를 평가하고 최적의 시험조건을 제시하였다. 이 연구에서 적용한 모든 시험조건 범위에서 충격공진시험에서 측정된 결과의 변동량은 공진주파수 결정에 있어서 $\pm 0.3\%$, 감쇠비 결정에 있어서 $\pm 10.0\%$ 로 나타났다. 충격공진시험에서 결정된 탄성계수와 정적시험에서 결정된 탄성계수를 변형률 크기를 고려하여 비교하면 비교적 서로 잘 일치함을 확인하였다.

핵심용어 : 충격공진시험, 콘크리트, 공진주파수, 탄성계수, 감쇠비