

콘크리트 구조물의 충격공진 시험

Impact-Resonance Testing of Concrete Structures

김영환

Young H. Kim

초 록 콘크리트 구조물의 건전성은 공공의 안전에 미치는 영향이 크기 때문에, 이들의 진단은 매우 중요하다. 충격공진 시험은 콘크리트 구조물의 비파괴검사에 널리 사용되어왔다. 이 글에서는 충격-공진 시험의 배경과 기본 원리에 대하여 기술하였으며, 실험실의 연구사례는 물론이고 대형 구조물의 기초콘크리트와 대형 슬러리 월에 대한 현장 적용사례도 기술하였다.

주요용어: 콘크리트 구조물, 충격공진법, 현장적용 사례

Abstract Condition assessment of concrete structures is essential since their performance affects public safety. Impact resonance testing has been widely used for the nondestructive testing of the concrete structures. In this article, the background, basic principles of the impact resonance testing were described. Not only laboratory studies but also the field applications such as basement concrete of large structure and large slurry wall are described.

Keywords: concrete structures, impact-resonance testing, field applications

1. 서 론

1960년대 이후의 급속한 경제발전과 더불어 교통 시설, 항만시설, 발전설비, 에너지 저장시설 등과 같은 우리나라의 국가기간 시설물의 건설이 활발히 진행되었다. 이러한 국가기간 시설물은 국가 경제의 기반인 핵심 시설로 그 중요성은 매우 크다. 그러나, 성수대교와 삼풍백화점과 같은 대형구조물의 잇따른 붕괴로 인하여 국가기간 시설물의 안전문제가 심각한 사회문제로 대두되었다. 대형 구조물의 사고를 미연에 방지하기 위하여 주기적인 안전 점검, 정확한 구조해석 기술, 신뢰성 높은 비파괴검사 기술, 사용 중 재료의 열화와 손상의 정량적인 평가 기술, 파괴역학에 기초한 잔여수명평가 기법 등

은 필수적이다. 특히 우리나라의 비파괴 검사 기술의 수준은 구조물의 안전평가에 근거가 되는 검사 결과를 제공하기에는 부족한 점이 많다. 따라서 안전진단에 필요한 다양한 비파괴 검사 기술이 요구되고 있으며 이러한 비파괴 검사 기술의 정밀성이 곧 안전진단의 신뢰도와 직결된다고 할 수 있다.

현대 건축 및 토목분야에서 콘크리트는 가장 널리 쓰이는 구조재료이며 따라서 콘크리트의 상태는 구조물의 안전에 절대적인 영향을 미친다. 특히 콘크리트는 일반 건축물 뿐만 아니라 교량이나 댐과 같은 산업 구조물, 원자력 발전 설비나 군사 시설물과 같은 특수 대형 구조물에도 널리 쓰이고 있어 그 중요성은 더욱 크다. 콘크리트는 다른 재료에 비하여 내구성 및 내열성이 뛰어나고 어떤 형상의

구조에도 쉽게 타설할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나, 콘크리트 구조물은 다른 구조물에 비하여 자체 하중이 크고 균열이 생기기 쉬워서 붕괴의 우려성을 내포하고 있다. 콘크리트 구조물의 붕괴와 파손은 구조물의 설계 또는 시공상의 과오에 의한 요인 뿐만 아니라 사용시간의 경과에 따른 적절한 안전점검과 유지관리의 소홀로 인하여 발생할 수도 있음을 간과해서는 안된다. 대형 콘크리트 구조물의 안전진단은 콘크리트 열화 기구와 과정을 규명하고 결함 및 손상의 원인을 분석하여 적절한 검사 기법을 적용하여 수행되어야 한다.

콘크리트 구조물의 비파괴검사를 위하여 많은 방법들이 개발되었으며, 또한 지속적으로 개발되고 있다. 그 중에서 충격-공진법은 'impact-echo'라는 방법으로 1980년대 중반에 소개된 이래로[1,2] 약 20년 동안 많은 적용사례가 보고되고 있다. 이 방법은 콘크리트 슬래브의 두께 측정[3], 공동탐사, 박리 검사 tendon과 같은 보강재의 상태진단, 다짐 불량으로 인한 honeycomb 구조 검출[4]과 같은 콘크리트 구조물의 안전도 진단의 수단으로 널리 사용되며[5], 하나의 표준 시험법으로 자리를 잡아가고 있다[6]. 본고에서는 충격공진법의 기본원리, 시험 장치, 실험실에서의 연구, 현장적용 사례를 기술한다.

2. 이론적인 배경

탄성파는 전자파에 비하여 콘크리트 내부를 쉽게 전파할 수 있으므로, 콘크리트 내부에 대한 정보를 얻기 위해서 사용될 수 있다. 콘크리트 내부를 진행하는 탄성파는 골재에 의해서 산란이 되어 그 에너지가 점차 줄어들게 된다. 따라서, 초음파 pulse-echo 시험을 실시하기 위해서는 골재의 크기보다 훨씬 큰 파장의 초음파를 사용하여야 하지만, 저주파 초음파의 경우는 지향성이 적어지고 초음파의 pulse 폭이 넓어져서 반사파 신호를 얻기가 어렵다. 이러한 어려움을 극복하기 위해서 새로운 결함 탐지법에 대해 한국표준과학연구원(KRIS)과 미국표준기술연구소(NIST)가 공동으로 콘크리트 시험편의 공진 주파수로부터 결함을 검출하는 충격-공진법을 개발하였다. 이 방법은 공진법에서 구동 주파수를 변화시키면서 공진주파수를 찾는 방법과는 달리 짧은 시간 폭의 충격을 가하여 시험편 내부에 광대역 탄성파를 발생시키면 시험편의

공진조건을 만족하는 주파수의 탄성파만 남게 된다. 이 진동 신호를 주파수 분석을 하면 공진 주파수를 알게 되고 속도를 알면 이로부터 시험편의 크기를 결정할 수 있다.

콘크리트 표면을 가진시키면 표면에서 발생한 탄성파는 내부를 전파하여 되돌아 오는데, 두께가 D 인 콘크리트 구조물에서 되돌아오는 시간 δt 는

$$\delta t = \frac{2D}{c} \tag{1}$$

와 같이 주어진다. 여기서, c 는 콘크리트 내에서의 종파의 속도이다. 양쪽이 자유단일 경우에 되돌아오는 시간 δt 가 표면에 가한 탄성파의 진동 주기, T 의 정수배가 되면 보강 간섭이 일어나서 진폭이 커지고, 그렇지 않을 경우에는 진폭이 작아진다. 따라서, 공진이 일어날 조건은

$$\delta t = nT = \frac{n}{f} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \tag{2}$$

와 같다. 여기서 $n=1$ 인 기본 공진 모드가 가장 잘 일어나고, 이 경우에 공진이 일어나는 주파수 f 와 두께 사이의 관계는

$$D = c \frac{\delta t}{2} = \frac{c}{2f} \tag{3}$$

와 같이 주어진다. 이때 깊이에 대한 분해능(Δf)은 깊이에 따라 달라지게 되고 측정오차는 다음과 같다.

$$\Delta D = \frac{c}{2f^2} \Delta f = \frac{2}{c} D^2 \Delta f \tag{4}$$

실제의 경우에 구동 주파수를 바꾸어가면서 콘크리트를 가진하기보다는 Fig. 1과 같이 콘크리트 표면에 기계적인 충격을 가하는 것이 실용적이다. 짧은 시간 폭의 충격으로 인해 여러 주파수 성분의 탄성파가 콘크리트 내부를 전파하고, 그 중에서 식 (3)을 만족하는 주파수 성분만 살아남고 나머지는 소멸된다. 만일, 콘크리트 내부에 delamination과 같은 결함이 존재하게 되면, 그 경계면에서 탄성파가 반사되므로 공진 주파수가 달라진다. 따라서, 콘크리트 구조물의 표면에서 진동 신호를 수신하고 그 주파수를 분석하면, 콘크리트의 두께, 내부 결함의 유무를 알 수가 있다.

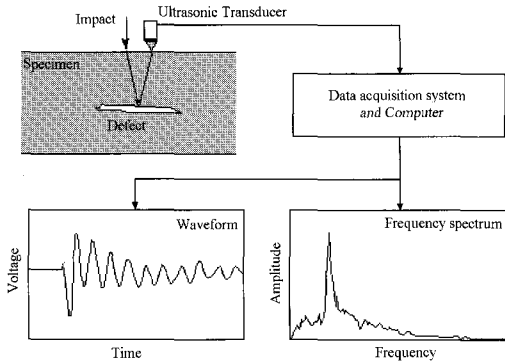


Fig. 1 Schematic diagram of the impact-resonance testing [7]

3. 시험장치

충격공진 시험에 사용하는 시험 장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 크게 1) 충격을 발생시키는 충격원, 2) 콘크리트 표면의 진동을 검출하는 광대역 탐촉자, 3) 프리앰프, 오실로스코프, 컴퓨터 등으로 구성된 신호처리부의 3부분으로 이루어진다.

충격을 발생시키는 충격원은 강철구의 자유낙하, 햄머, 슬레노이드를 사용한 충격기 등이 사용되고 있다. 충격원의 특성을 규명짓는 중요한 인자는 충격력과 접촉시간이다. 접촉시간이 τ 인 충격원의 주파수 범위는 $1/\tau$ 로 주어지기 때문에 접촉시간이 짧을수록 높은 주파수 성분까지 지니게 된다. 반면에 두꺼운 콘크리트 구조물에서는 큰 에너지의 충격원이 필요한데, 이 경우에는 접촉시간이 일반적으로 길어도 무방하다. 따라서, 두꺼운 부재의 경우에는 큰 강철구 또는 햄머를 충격원으로 사용하고, 얇은 부재에서는 작은 충격원으로 짧은 시간 폭의 충격원을 사용해야 한다.

콘크리트 표면의 진동을 검출하기 위해서 사용하는 탐촉자는 광대역 특성을 지녀야 한다. 초기에는 원추형 압전탐촉자를 사용하였으나, 가속도계 등을 사용해도 무방하다. 다만, 충격공진시험으로 얻어지리라 예상되는 공진주파수 영역에서 평탄한 특성을 지닌 탐촉자를 사용해야 한다.

충격공진법 개발의 초기에는 오실로스코프와 컴퓨터를 사용한 커다란 신호처리부가 필요했으나, 전자기술의 발달에 힘입어 1990년대에 들어서는 Laptop PC와 A/D board를 사용한 충격공진 전용

시험기가 등장하였다. 국내에서는 Fig. 2와 같이 충격공진 시험에 적절하게 설계된 A/D board와 filter를 사용한 시험기가 개발되었다[8].

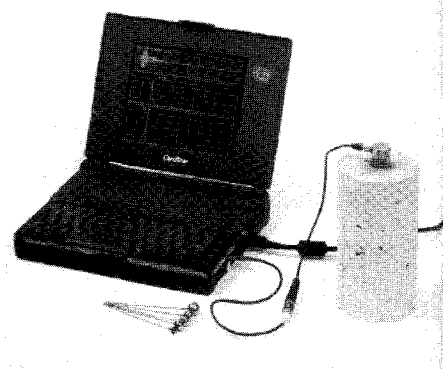


Fig. 2 Impact-resonance testing device developed in Korea

4. 실험실 연구사례

대표적으로 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 전체 두께 50 cm인 콘크리트 내부의 깊이 10 cm에 있는 직경 50 cm인 원판형 결함에서의 충격에 의한 진동신호의 주파수 스펙트럼을 위치별로 Fig. 4에 나타내었다[9]. Fig. 4(a)에서 'B'로 표시된 공진주파수는 두께 50 cm에 의한 공진주파수이고 식(3)으로부터 콘크리트의 음속을 결정하였다. Fig. 3(d)의 경우에는 'B'로 표시된 저면 공진주파수와 함께 4-16 kHz 범위에서 공진 주파수가 나타났는데, 이는 원판의 모서리 근처에서 실험을 했기 때문으로 판단된다. 여러 위치에서 측정된 공진주파수로부터 두께를 산출하여 그 결과를 Fig. 3(b)에 나타내었는데 그 결과 결함의 형상을 파악할 수 있다. 그밖에도 경사진 결함, 다층의 결함, 구형 결함 탐지, 균열의 깊이 결정 등에도 우수한 결과를 얻을 수 있었고, 결함의 직경이 깊이의 절반보다 클 경우에는 결함의 깊이를 결정할 수 있었다. 이에 대한 자세한 연구 결과는 참고문헌 [1]과 [9]에 기술되어있다.

또한 두께가 1 m 까지의 시험편에서도 결함 탐지가 가능하였는데, 이 경우에는 식(4)에 의해 주어지는 분해능을 극복하기 위해서 zoom-FFT를 사용하였다[1]. 또한, 시험편의 크기가 유한한 경우에는 많은 공진모드들이 존재하는데, 이 경우에는 시험편의 공진 모드를 고려하여 두께에 대한 공진 주파수만을 분리할 수가 있었다[10].

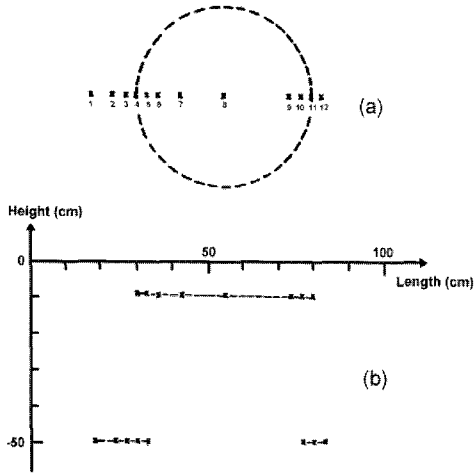


Fig. 3 (a) Test position and (b) the depth determined by impact-resonance testing[9]

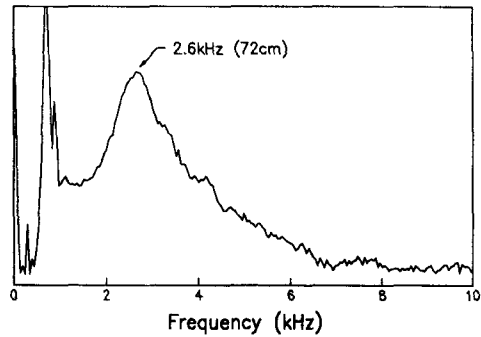
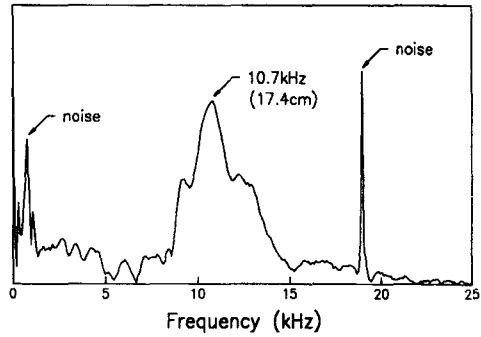


Fig. 5 Typical impact-resonance spectra obtained from the concrete basement[3]

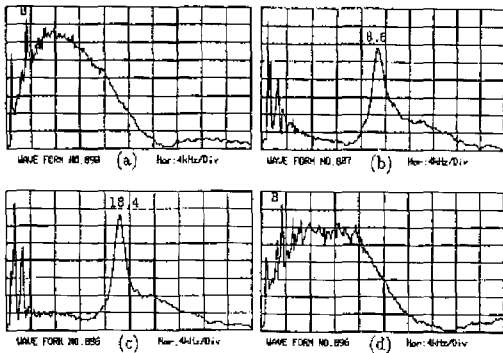


Fig. 4 Frequency spectra of the impact-resonance testing for the flaw with depth of 10 cm and diameter of 50 cm. (a)-(d); results at the 3, 6, 7, 12 position shown in Fig. 3, respectively[9]

5. 현장적용 사례

1988년에 국내 모 신문사에서 운전기 설치를 위하여 기초 콘크리트의 상태를 진단할 필요가 있었다. 이때에 충격공진법이 사용되었는데, 충격을 가하는 강철구의 직경을 달리하면서 10 cm 부터 100 cm까지의 두께를 판단할 수 있었고, 두 층으로 구성된 기초 콘크리트에서 계면의 상태를 평가하였다. 대표적으로 얻어진 주파수 스펙트럼은 Fig. 5에 나타내었으며, 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [3]에 기술되어있다.

또다른 현장 적용의 예는 1999년에 수행된 가스 공사 인천인수기지내 LNG 저장 탱크 11호기 지중 연속벽(slurry wall)에 대한 품질시험이다[11]. 지중 연속벽은 LNG 저장탱크를 지하에 설치하기 위하여 땅속에 설치하는 용벽형태의 벽체로서 직경과 깊이가 각각 75 m에 이르는 대형 구조물이다. 지중벽의 품질을 시험하기 위해서 철근의 깊이 및 간격, 강도 추정, 벽체의 두께를 측정하였다. 이를 위해서 GPR, 충격 공진법 등이 사용되었다. 지중벽은 공법상 그 두께를 정확히 알 수 없는데, 두께를 측정하기 위해서 충격 공진법이 사용되었다.

콘크리트의 음속이 알려져 있지 않은 경우에 충격공진 시험을 수행하면 오차가 커지는데, 이 오차를 줄이기 위해서 지중 연속벽에서 채취된 길이 210mm 공시체(core)에 대하여 충격 공진 시험을 실시하여 대표적인 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 3회 실시하여 얻어진 공진주파수는 10.413, 10.449, 10.437 kHz로서 이의 평균값은 10.433 kHz로 그 결과 얻어지는 탄성과 속도는 식 (2)로부터

$$c = 2f \times D = 2 \times 10 \text{ kHz} \times 0.21 \text{ m} = 4,382 \text{ m/s}$$

로 주어진다. 이 값은 막대파의 속도로 종파의 속도와는 차이가 있고, 이 값을 음속으로 사용하게 되면 벽체의 두께 평가에 오차가 있다. 종파의 속도가 막대파의 속도보다는 빠르고 그 결과로 평가된 두께보다는 실제 두께가 더 두껍다. 본 검사의 주된 목적이 연속벽의 품질관리이고 150 cm 보다 두께가 얇은 부분이 있는지 여부를 평가하는 것이므로 편의상 종파의 속도를 4,382 m/s 로 가정하였다.

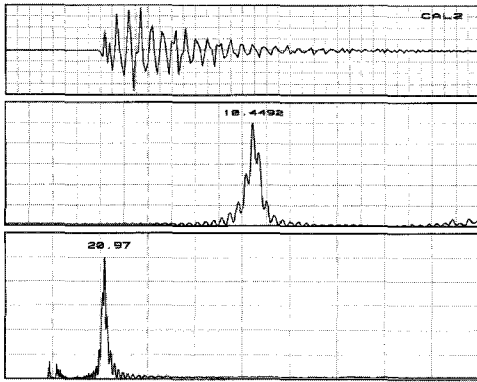


Fig. 6 Results of impact-resonance testing for the core specimen. Top: Time domain waveform (0.1 ms/div), middle: frequency spectrum (1 kHz/div), bottom: depth profile (10 cm/div) [11]

구조물의 두께를 측정하기 위해서 망치를 사용하여 벽체에 충격을 가하고 그 진동 신호를 광대역 압전형 탐촉자를 사용하여 수신하였다. 진동신호는 20 μ s 간격으로 총 4096개의 파형을 수신하였다. 그 결과 주파수 분해능은 12.2 Hz로서 음속이 알려져 있을 경우에 식 (4)로부터 벽체의 두께가 1.5 m 일 경우에 이론적인 측정 정밀도는

$$\delta D = \frac{2}{c} D^2 \Delta f = \frac{2}{4382} \times 1.5^2 \times 12.2 = 0.0125 \text{ (m)}$$

로서 약 1.3 cm의 오차를 지닌다.

구조물의 벽체가 단순한 슬래브 형태가 아니고 내부에 철근, 볼트 및 기타 내부 구조물이 존재하여 복잡한 공진 모드를 나타낸다. Fig. 7에 충격-공진 시험을 실시한 결과를 나타내었다. 이 경우에 1.3672 kHz의 강한 두께 공진 이외에도 2 kHz 이상의 높은 주파수는 철근, 볼트, 기타내부 구조물의 영향으로 판단되며 이들로 인하여 두께 모드의 공진 주파수를 정확하게 찾아내는 것이 어렵다. 따라서 digital filter를 사용하여 2.5 kHz 이상의 고주파 성분에 해당하

는 부분은 제거하였다. 그 결과는 Fig. 8에 나타내었는데, filtering이 두께 모드 공진주파수에 영향을 미치지 않았음을 알 수 있다. 2.5 kHz는 약 1 m 두께에 해당하는 공진주파수로 low-pass filter를 사용하면 1 m 이상의 두께에 해당하는 정보만 선택적으로 처리하게 되므로 본 검사에서 주요 관심사인 전체 벽체의 두께를 측정하는데 매우 유용한 방법이다. 따라서, 다른 부위에서 얻어지는 충격-공진 시험 결과도 $f_c = 2.5 \text{ kHz}$ 인 low-pass filter를 사용한 결과를 이용하였다. 이와 같은 방법으로 지중연속벽의 9개소에 대하여 충격공진 시험을 수행하였는데, 검사한 부위의 두께는 모두 150 cm 이상이었다.

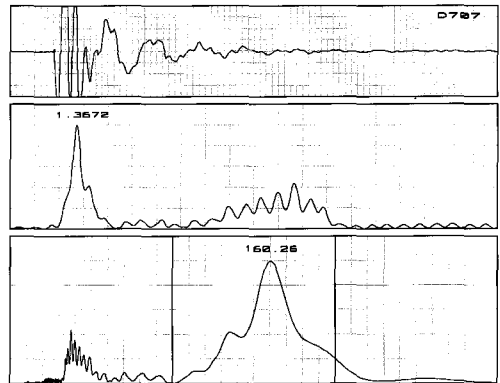


Fig. 7 Results of impact-resonance testing for the slurry wall. Top: Time domain waveform (0.1 ms/div), middle: frequency spectrum (0.5 kHz/div), bottom: depth profile(10 cm/div) [11]

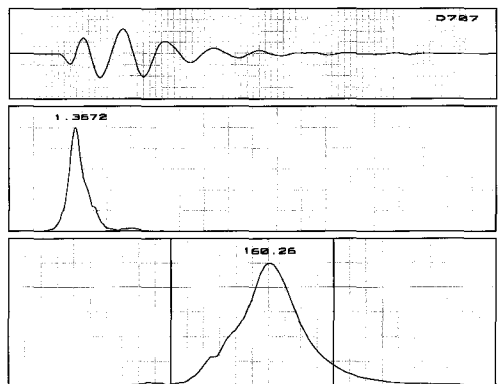


Fig. 8 Low-pass filtered ($f_c = 2.5 \text{ kHz}$) results of the results shown in Fig. 7. Top: Time domain waveform (0.1 ms/div), middle: frequency spectrum (0.5 kHz/div), bottom: depth profile (10 cm/div) [11]

6. 결 론

충격공진법은 콘크리트 구조물의 비파괴검사에 유용하게 사용할 수 있다. 특히 두께 측정에 매우 유용하게 활용될 수 있다. 모든 검사 방법이 다 그러하듯, 충격공진법에도 그 한계가 있으므로 잘 이해하고 적용해야 할 것이다. 구조물의 형상이 복잡하게 되면 충격공진 시험 결과로 얻어지는 주파수 스펙트럼이 매우 복잡해지는데, 어떠한 것이 유용한 정보를 나타내 주는가에 대한 정확한 이해가 필요하다. 구조물의 형상에 의한 공진주파수는 공진 모드의 해석이나 FEM과 같은 수치해석적인 방법을 통하여 예측할 수 있으므로 공진 주파수 스펙트럼을 분석하는 데에 도움이 될 것이다.

참고문헌

- [1] 이세경 등저, "콘크리트 구조물의 초음파 탐상법 개발 (2차년도)", KSRI-87-45-IR, 한국표준연구소 (1987)
- [2] M. Sansalone and N. J. Carino, "Impact-echo: A method for flaw detection in concrete using transient stress waves," Nat'l Bur. Stds., NBS IR 86-3452, (1986, Gaithersberg, MD, USA)
- [3] 김영환, 이세경, 김호철, "탄성과 공진법에 의한 기초 콘크리트의 두께측정," 한국콘크리트 학회지, 제3권 3호, pp. 121-128 (1991)
- [4] M. Sansalone and N. J. Carino, "Detecting honeycombing, the depth of surface-opening cracks and ungrouted ducts using the impact-echo method," Concr. Int'l, Vol. 10, No. 4, pp. 38-46 (1988)
- [5] G. Schickert, "NDT-CE symposium Berlin 1995: A concluding review," Proc. Int'l Symp. Nondestr. Test. Civil Eng., Berlin, pp. 757-776 (1995)
- [6] "Proposed standard practice for measuring the P-wave speed and the thickness of concrete plate using the impact-echo method," submitted to ASTM subcommittee C09.64 in (Dec. 1996)
- [7] <http://www.impact-echo.com/Impact-Echo/impact.htm>
- [8] 김영환, "콘크리트 구조물 시험용 충격-공진 시험기 개발," 1996년도 춘계학술발표회, 한국비파괴검사학회, pp. 125-130 (1996)
- [9] J. Y. Koo, S. Lee, Y. H. Kim and H. S. Lew, "Quantitative spectral analysis for flaw detection in Concrete," Research in Nondestructive Evaluation, Vol. 3, No. 3, pp. 171-182 (Sep. 1991)
- [10] Y. H. Kim, S. Lee and H. C. Kim, "Quantitative vibration mode analysis of mortar and concrete blocks containing flaws", NDT Int'l. Vol. 23, No. 2, pp. 67-74 (1990)
- [11] 김영환, 조철현, 임성진, "LNG 저장 탱크 지중 연속벽 품질시험," 비파괴검사학회지, 제23권 제2호, pp. 107-115 (2003)