

## 충격공진법을 이용한 콘크리트 슬래브 내의 개재물 검출 Detection of Inclusions in Concrete Slab by Impact-Resonance Method

김학현\*, 임현준\*\*, 이광명\*\*\*, 조남준\*\*\*\*

Hak-Hyun Kim\*, Hyunjune Yim\*\*, Kwang-Myong Lee\*\*\* and Nam Jun Cho\*\*\*\*

**초 록** 콘크리트 비파괴검사법인 충격공진법의 유용성과 적용 한계를 살펴보기 위하여 실험 및 이론적 연구를 수행하였다. 실험적 연구를 위하여, 다양한 개재물이 포함된 콘크리트 슬래브 공시체를 제작한 후 충격공진법을 적용하여 개재물의 존재 및 매설 위치를 찾아보았다. 공시체들 중 몇 경우에는 개재물의 위치를 정확하게 검출할 수 있었으나, 나머지의 경우에는 검출하지 못하였다. 후자의 경우에 있어서 그 실패 원인을 규명하고, 나아가 본 기법의 유용성을 결정하는 주요 인자들을 알아보기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 본 연구는 충격공진법의 물리적 이해 증진과 향후 발전에 기여할 것이다.

**주요용어** : 충격공진법, 콘크리트, 비파괴평가, 공진, 공진주파수, 유한요소 해석

**Abstract** The usefulness and limitations of the impact-resonance method, which is a nondestructive evaluation (NDE) method for concrete, are studied by both experimental and theoretical methods. For the experimental study, several concrete slab specimens with various inclusions embedded were fabricated, and tested by the impact-resonance method. Some of the inclusions have been detected and accurately located, but some have not. The reasons for the failure in the latter cases have been investigated theoretically by using finite element analyses, from which the primary factors determining the success of the method have also been identified. This study will serve to enhance the understanding of the underlying physics and to improve the usefulness of the impact-resonance method as applied to concrete NDE.

**Keywords**: impact-resonance method, concrete, nondestructive evaluation, resonance, resonant frequency, finite element analysis

### 1. 서론

콘크리트의 비파괴검사를 위하여 다양한 방법이 개발되어 왔다[1]. 많이 사용되는 방법으로서, 콘크리트 시험체의 동역학적 특성인 고유진동수를 측정하는 공진법(resonance method)과 초음파를 이용하여 내부의 결함을 검출하는 초음파법(ultrasonic method)이 있다. 전자의 방법은 시험체가 큰 경우 전체에 공진을 발생시키기 어려운 단점이 있으며, 후자의 초음파법 역시 초음파의 감쇠

로 인하여 시험체가 큰 경우 적용하기 어렵고, 또 시험체의 표면 거칠기에도 영향을 받는 등의 단점이 있다. 위의 두 방법 외에도 자기장, 전기장, 방사선, 레이더(radar), 적외선을 이용하는 방법과 음향방출법 등이 있으나, 이들 모두 현장에서 콘크리트 내부의 결함을 바로 검출할 목적으로 사용하기에는 어려움이 많이 있다.

본 연구에서는, 위의 방법들에 비해 현장 적용성이 우수한 충격공진법에 대해 실험적, 이론적으로 살펴본다. 충격공진법은 철근으로 강화된 콘크리트 슬래브나 벽체

에서 균열이나 공극을 검출할 목적으로 1980년 중반부터 미국에서 개발되어[2,3], 국내에서도 활발하게 연구되어 왔다(최근의 예를 들면, 참고문헌[4,5]). 구체적으로 설명하면, 충격공진법은 공시체의 표면에 충격을 가함으로써 발생하는 탄성 입사파가 공시체 내부의 결함(또는 개재물)과 가진된 표면에서 반복적으로 반사되어 형성되는 국부적인 공진현상의 (공진)주파수를 측정하고, 그 값으로부터 결함 또는 개재물의 존재 및 위치를 예측하는 방법이다. 본 논문에서는 다양한 종류의 개재물을 삽입하여 슬래브 형태의 콘크리트 공시체를 제작하고 이들 공시체에 충격공진법을 적용한다. 또한, 실험 결과를 면밀히 분석하고 이를 이론적으로 연구하기 위하여 간단한 유한요소 해석을 수행한다.

## 2. 실험 개요 및 원리

### 2.1. 실험의 개요

충격공진법의 실험장치는 Fig. 1과 같이 가진용 강구(steel ball), 수신용 가속도계 및 앰프, 신호회독용 휴대형 노트북 PC로 구성된다. 본 실험에서 사용된 가진용 강구의 직경은 10mm이며, 가속도계는 PCB사의 352C68로서 감도는 107.6mV/g이고 수신 가능한 주파수의 범위는 0.2kHz에서 20kHz( $\pm 3$ dB)이다. 신호회독용 노트북 PC에는 A/D 변환보드(National Instrument사의 DAQScope-5102)가 장착되어 있고 Fast Fourier Transformation(FFT) 프로그램(VirtualBench)도 내장되어 있다. 실험에 있어서는 Fig. 1과 같이 콘크리트 슬래브의 윗면에 가속도계를 부착하고, 가속도계 근처의 슬래브 표면을 강구로 가진한다. 가속도계에서 수신된 신호는 앰프를 거쳐 5 $\mu$ sec의 샘플링(sampling) 간격, 즉 200 kHz의 샘플링 속도로 획득되어 4096개의 데이터가 저장된 후, 48.8 Hz의 주파수 해상도로 FFT 처리된다.

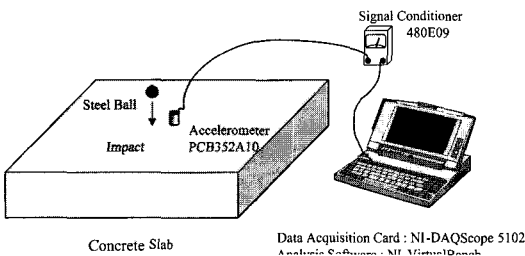


Fig. 1 Experimental setup for impact-resonance method

공시체는 Fig 2와 같이 콘크리트 슬래브 내에 다양한 종류의 개재물을 삽입하여 제작하였다. 공시체 1(Fig. 2(a))은 가로 2m, 세로 2m, 높이 0.2m의 무결함 콘크리트 슬래브이다. 공시체 2, 3의 크기는 가로 1.5m, 세로 1.5m, 높이 0.3m이다. 공시체 2(Fig. 2(b))에는 가로 0.15m, 세로 0.05m인 단면의 스티로폼과 직경 0.05m의 속이 빈 플라스틱 파이프가 0.15m 깊이에 삽입되어 있다. 공시체 2에 삽입된 스티로폼은 콘크리트 내에 존재할 수 있는 공극(void)을 모사할 목적으로 사용된 개재물이다. 공시체 3(Fig. 2(c))에는 직경 25mm의 철근이 0.1m 와 0.15m 깊이에 삽입되어 있고, 직경이 16mm인 가로, 세로 간격 10cm의 철망이 0.15m 깊이에 삽입되어 있다. 공시체 4와 5(Fig. 2(d))는 상이한 두 재료로 제작된 경우로서 각각 압반층과 불량콘크리트(강성이 낮은 콘크리트)층이 포함되어 있으며, 두 매질의 경계면에 방수포가 삽입되어 있다.

### 2.2. 충격공진법의 원리

본 절에서는 충격공진법의 원리를 설명한다. 우선, 고체 매질 내에서 전파하는 탄성파에는 종파와 횡파가 있는데, Fig. 1의 실험에서 가속도계에 의해 감지되는 파동은 주로 종파이므로 본 연구에서는 종파만을 고려하고, 이후 탄성파라 하면 탄성종파를 의미함을 밝혀둔다. Fig.

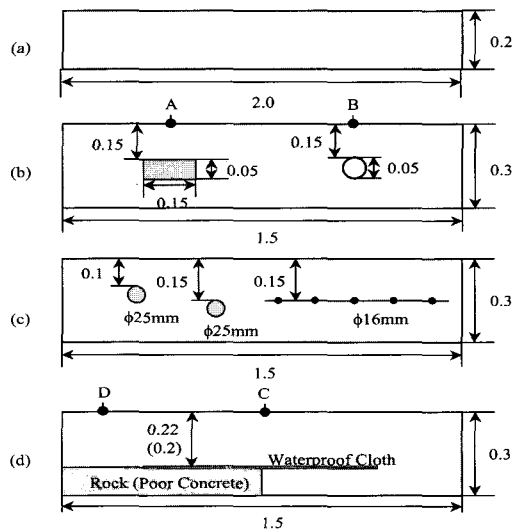


Fig. 2 Cross sections of prepared concrete slabs [unit: m], containing (a) no inclusion, (b) styrofoam and plastic pipe, (c) steel rebars and mesh, (d) rock layer or poor concrete layer and waterproof cloth

2와 같은 공시체의 윗면을 가진하면 탄성파가 발생되어 아래 방향으로 전파하고, 상이한 매질과의 경계면(개재물과의 경계면 또는 개재물이 없는 경우에는 공시체의 저면)에 도달하면 그 일부 또는 전부가 반사된다. 이렇게 발생한 반사파는 위쪽으로 전파하여 공시체의 윗면에서 다시 반사되어 아래쪽으로 전파된다. 이와 같이 충격에 의해 발생한 탄성파는 공시체의 윗면(가진면)과 상이한 매질과의 경계면 사이에서 반복적으로 반사되고, 이때 탄성파 내에 포함되어 있는 많은 주파수 성분 중에서 특정한 주파수 성분이 공진을 일으킨다. 이때 발생하는 공진은 서론에서 언급한 공진법(resonance method)에서와 달리 공시체의 전체가 아니라 일부에서만 발생하는 국부적인 공진 현상이다. 이러한 국부적 공진이 발생하는 공진주파수는 위에 설명한 실험에서 가속도계로부터 측정된 신호를 FFT 처리하면 주파수 영역에서 피크(peak)로서 나타난다.

충격공진법에서 발생하는 공진주파수는 탄성파가 반복적으로 반사되는 두 면 사이의 거리와 매질의 성질에 따라 결정된다. 먼저, Fig. 3과 같이 충격에 의해 탄성파가 발생하는 매질(본 논문의 경우, 콘크리트)의 두께를  $T$ , 밀도와 종파속도의 곱으로 정의되는 임피던스(impedance)를  $Z_1$ 이라 하고, 탄성파가 처음으로 반사되는 경계면 아래에 위치한 매질(본 논문의 경우, 개재물 또는 공기)의 임피던스를  $Z_2$ 라 하자. 공진주파수를 계산하는 식은  $Z_1$ 과  $Z_2$ 의 상대적 크기에 따라 달라지는데,  $Z_1 > Z_2$ 인 경우의 공진주파수  $f$ 는

$$f = 0.96 \frac{c_p}{2T} \tag{1}$$

으로 계산된다[3]. 식 (1)에서  $c_p$ 는 콘크리트 내에서 탄성종파의 속도이고, 0.96은 모양인자(shape factor)로서 슬래브형 공시체에 대한 충격공진법에서의 종파 속도가 실제 종파 속도보다 5~10%정도 느리기 때문에 삽입된 일종의 보정계수이다[2,5]. 한편,  $Z_1 < Z_2$ 인 경우에는

$$f = 0.96 \frac{c_p}{4T} \tag{2}$$

와 같이 된다. 이와 같이 경우에 따라 다른 식이 성립하는 이유는, 두 매질의 임피던스 차이에 따라 그 경계면에서 발생하는 반사파의 위상이 입사파와 같거나  $180^\circ$  만큼 차이 나기 때문이다[2]. 정리하면, Fig. 2의 공시체에 대해 Fig. 1과 같은 충격공진 실험을 수행할 때, 실험결

과에서 공진주파수  $f$ 를 측정함으로써 식 (1) 또는 (2)로부터 개재물의 매설 깊이  $T$ 를 구할 수 있다.

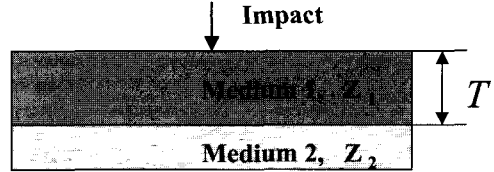


Fig. 3 Schematic of two-media slab in impact-resonance test

### 3. 실험결과

#### 3.1. 무결함 콘크리트 슬래브(공시체 1)

개재물의 매설 위치를 구하기 위하여 식 (1) 또는 (2)를 사용하려면, 콘크리트 내에서 종파의 속도  $c_p$ 를 알아야 한다. 이러한 목적으로 개재물이 포함되어 있지 않은 공시체 1에 대하여 충격공진법을 시행한 실험 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. 이 경우, 개재물이 없으므로 탄성파가 슬래브의 저면(즉, 공기와의 경계면)에서 반사된다. 공기의 임피던스는 콘크리트에 비해 무시할 정도로 작으므로, 식 (1)이 성립된다. 따라서, Fig. 4에 나타난 공진주파수  $f = 10.06\text{kHz}$ 와 슬래브의 두께  $T = 0.2\text{m}$ 를 식 (1)에 대입하면 탄성(종)파의 속도  $c_p$ 는  $4191\text{m/s}$ 가 된다. 가진 위치를 달리 해 본 결과, 공진주파수가  $9.776\text{kHz}$  및  $9.667\text{kHz}$ 로 측정되어  $c_p$ 는 각각  $4073\text{m/s}$  및  $4027\text{m/s}$ 로 계산된다. 세 지점의 실험치가 약간의 오차를 보이는 원인은 콘크리트 슬래브의 두께가 실험위치에 따라 약간 다르고, 골재 등으로 인해 매질이 균질하지 않기 때문이다. 세 실험치의 평균을 구하면  $c_p = 4097\text{m/s}$ 이다.

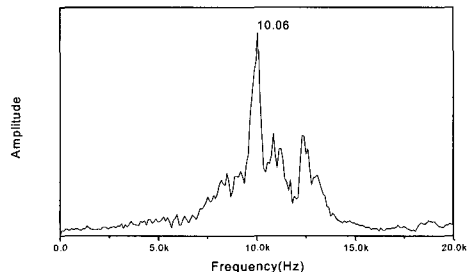


Fig. 4 Typical experimental result for Specimen No. 1

3.2. 스티로폼과 파이프가 포함된 콘크리트 슬래브(공시체 2)

개재물이 스티로폼 또는 속이 빈 플라스틱 파이프인 경우, Table 1의 물성치를 사용하면  $Z_1 > Z_2$ 에 해당되므로 식 (1)이 성립된다. 스티로폼의 매설 깊이를 찾기 위해 Fig. 2(b)의 스티로폼 바로 위(A점)에서 실험한 결과, Fig. 5와 같이 14.03 kHz의 공진주파수가 측정되었다.  $c_P = 4097\text{m/s}$ 를 이용하면 식 (1)로부터  $T = 0.1401\text{m}$ 로 계산되며, 이는 실제값인 0.15m에 근접한 값이다.

Fig. 2(b)와 같이 속이 빈 파이프가 삽입된 콘크리트 슬래브에서 파이프가 매설된 바로 위(B점)에서 충격공진법을 수행한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 측정된 공진주파수  $f = 11.29\text{kHz}$ 를 사용하여 식 (1)로부터 파이프의 매설 깊이를 계산하면 0.1741m가 된다. 실제 매설 깊이 0.15 m보다 약간 크게 측정되었는데, 그 원인으로는 입

사된 탄성파가 반사되는 면이 파이프의 등근 면이므로 반사되는 파의 경로가 다소 길어질 수 있다는 점과 공시체 2에서의 종파속도가 공시체 1에서 구한 기준속도 4097m/s와 다소 다를 수 있다는 점을 들 수 있다.

3.3. 철근과 철망이 포함된 콘크리트 슬래브(공시체 3)

철근과 철망을 포함하고 있는 공시체 3(Fig. 2(c))의 경우, Table 2에서  $Z_1 < Z_2$ 이므로 식 (2)가 성립한다. 0.1m의 깊이에 매설된 철근의 바로 위에서 충격하여 얻은 실험 결과가 Fig. 7에 나타나 있으며, 이때 지배적인 공진주파수는 6.683kHz이다. 이 주파수 값을 식 (2)에 대입하면 개재물의 매설 깊이가  $T = 0.1471\text{m}$ 로 계산되는데, 이는 철근의 실제 매설 깊이인 0.1m와 크게 차이를 알 수 있다. 유한요소 해석을 통한 기존 연구[6]에 의하면, 직경  $D$ 의 철근이 깊이  $t$ 에 매설된 경우,  $D/t$ 의 비가 0.3보다 작으면 (즉, 철근이 너무 가늘거나 너무 깊 이 매설되어 있으면) 가진면과 철근 사이에서 공진이 뚜렷이 발생되지 않아 충격공진법으로 철근의 위치를 찾기가 매우 어려운 것이 밝혀져 있다. Fig. 7의 실험에서  $D/t = 0.167$ 이므로 공진이 잘 발생되지 않는 경우에 해당되며, 따라서 지배적인 공진주파수 6.683kHz는 철근에 의한 공진주파수가 아니라 식 (1)을 이용하면,  $T = 0.2941\text{m}$ 가 되므로) 슬래브의 저면에 의한 공진주파수인 것으로 판단된다. 본 논문에서 그 결과는 생략하였지만, 매설 깊이가 0.15m인 철근의 경우와 철망이 매설된 경우에 대한 실험결과에서도  $D/t$  값이 너무 작아 (각각,

Table 1 Material properties used for theoretical calculations

Material	Stiffness (GPa)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson's ratio	Wave speed $c_P$ (m/s)	Impedance $Z$ (kg · s/m <sup>2</sup> )
Concrete	33.1	2300	0.2	3998	9.2E6
Steel	207	7850	0.28	5806	45.6E6
Styrofoam	0.25	28	0.29	108	3.0E3
Plastic	0.057	1490	0.29	223	0.3E6
Rock	55.4	2770	0.23	4815	13.3E6

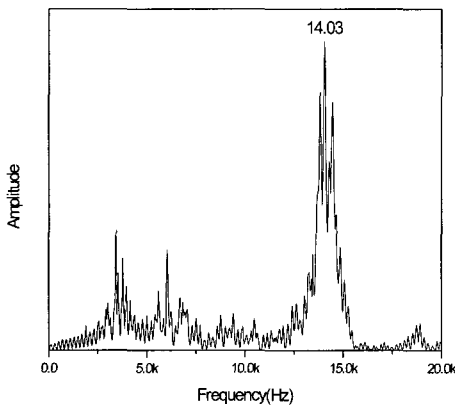


Fig. 5 Experimental result for styrofoam inclusion in specimen No. 2

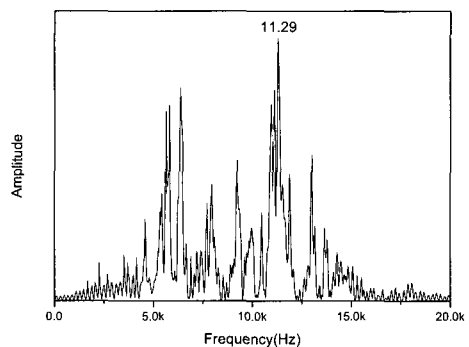


Fig. 6 Experimental result for pipe inclusion in specimen No. 2

0.25 및 0.1) 매설 위치를 찾을 수 없었다. 4절에서는 유한요소 해석을 통하여 이와 같은  $D/t$  값의 영향을 보다 상세히 살펴본다.

3.4. 암반층 또는 불량콘크리트층이 포함된 콘크리트 슬래브(공시체 4, 5)

Fig. 2(d)에 보인 공시체 4 및 5에서 암반층과 불량콘크리트층의 위치를 측정하기 위하여 충격공진법을 적용해 보았다. 암반층이 포함된 공시체 4의 중앙(C점)에서 가진하여 얻은 실험결과가 Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 8의 지배적인 공진주파수 값  $f=9.179$  kHz를 식 (1)에 대입하여 계산하면 (방수포의 경우,  $Z_1 > Z_2$ ), 개재물의 매설 깊이가 0.2141m로 구해지는데 이는 방수포의 실제 깊이가 0.22m에 근접한 값이다. 따라서, 측정된 공진주파수는 방수포에 의한 것으로 판단되고, 충격공진법으로 방수포의 위치를 쉽게 찾을 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 공시체 4(Fig. 2(d))에서 방수포가 매설되어 있지 않은 가장자리 쪽(예를 들면, D점)에서 가진하는 경우의 실험 결과에서는 콘크리트/암반 경계면 및 암반의 저면으로 인해 발생되어야 하는 공진주파수의 위치에서 피크를 발견할 수 없었다. 콘크리트/암반 경계면에 의한 주파수 피크가 발생하지 않는 이유는 콘크리트와 암반의 임피던스 차이가 미미하여 그 경계면에서 탄성파의 반사가 잘 일어나지 않기 때문으로 생각된다. 기존 연구[2]에 의하면 두 매질의 경계면에서 반사계수(coeffcient of reflection)가 0.25 이하인 경우에는 충격공진법을 이용하여 그 경계면을 검출하기가 어려운 것으로 알려져 있는데, 콘크리트

/암반 경계면이 이러한 경우에 해당된다. 이와 같은 현상에 대해서는 4절에서 유한요소 해석을 통해 보다 자세히 살펴볼 것이다. 실험 결과에서 암반의 저면으로 인한 공진주파수도 발견되지 않는 이유는 실험 위치가 방수포의 끝 부분이나 공시체의 모서리에 가까워(Fig. 2(d)를 보라) 공시체의 옆면 및 방수포에서 발생하는 탄성파의 반사 현상이 간섭을 일으키기 때문으로 생각된다.

불량 콘크리트층을 포함하고 있는 공시체 5의 경우에서도, 방수포 위에서 가진한 경우 Fig. 9와 같은 결과를 얻어 그 지배적인 공진주파수 10.10kHz로부터 방수포의 실제 매설 깊이 0.2m에 매우 근접한 0.1946m를 얻을 수 있었다. 그러나, 공시체 4의 경우와 마찬가지로, 방수포가 없는 위치에서 가진한 경우 두 콘크리트의 경계면이나 공시체의 저면에 의해 발생되어야 하는 공진주파수 피크를 관찰할 수 없었다.

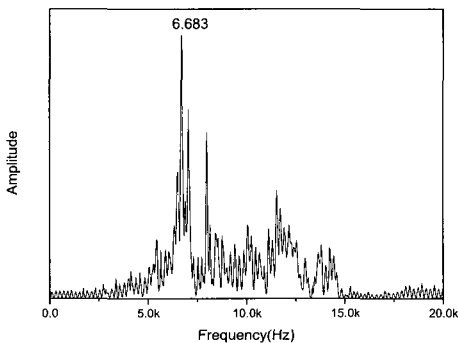


Fig. 7 Experimental result for rebar inclusion at depth of 0.1m in Specimen No. 3

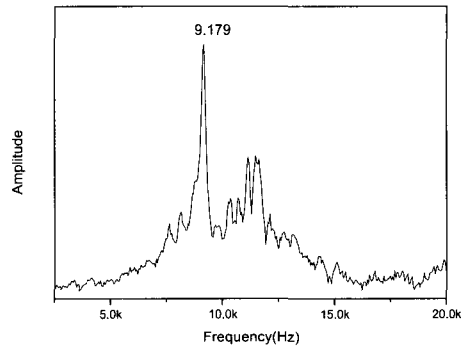


Fig. 8 Experimental result for Specimen No. 4 with rock layer, showing peak due to waterproof cloth

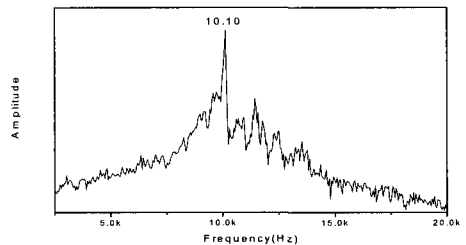


Fig. 9 Experimental result for Specimen No. 4 with poor concrete layer, showing peak due to waterproof cloth

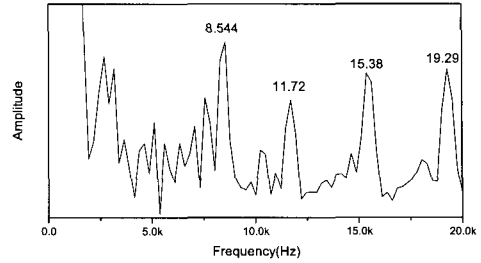
#### 4. 유한요소 해석

충격공진법에 대한 물리적 이해를 증진시키고 앞의 실험결과를 이론적으로 뒷받침하기 위해 3절에서 실험을 수행한 모든 콘크리트 공시체에 대해 유한요소 해석을 수행하였다[7]. 본 논문에서는, 실험에서 개재물의 검출에 실패한 경우의 원인 설명을 중심으로 하여 충격공진법에 영향을 미치는 인자들에 대해 해석하고, 충격공진법의 적용한계를 규명한다. 모든 경우에 있어서 문제를 2차원으로 단순화시켜 평면변형률 요소를 사용하였고, 경계조건은 변위를 전혀 구속하지 않는 자유지지 조건으로 가정하였으며, 재료의 물성치는 Table 1의 값을 사용하였다. 해석방법으로는 충격공진 실험을 모사하여 과도해석(transient analysis)을 수행하였는데, 이때 가진시간은  $32\mu\text{sec}$ 로 하였고 시간 간격을  $8\mu\text{sec}$ 로 하여 계산을 수행하였다. 또, 과도해석 결과를 FFT할 때 나타나는 공진 주파수의 물리적 의미를 파악하기 위하여 필요에 따라 모드해석(modal analysis)도 수행하였다. 유한요소 해석은 범용 프로그램인 ANSYS를 사용하여 수행하였다.

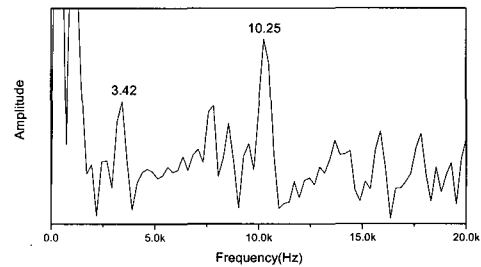
##### 4.1. 슬래브의 두께 및 밀변 길이의 영향

기존의 연구[2]에 의하면, 슬래브의 충격공진 실험에서 가진면과 평행한 탄성파의 반복적 반사에 의해 형성되는 공진주파수식 (1) 또는 (2)가 지배적인 주파수로 나타나기 위해서는, 슬래브의 두께와 밀변의 비가 특정한 조건을 만족해야 한다. 본 연구에서는 이를 검증하기 위하여 균질 슬래브의 두께를 0.2m로 고정하고 단면의 밀변 길이를 0.2m에서 1.0m까지 0.2m 간격으로 증가시킨 5개의 슬래브에 대해 충격가진 과도해석을 수행하였다. 그 결과를 주파수 영역에서 나타내면 Fig. 10과 같다.

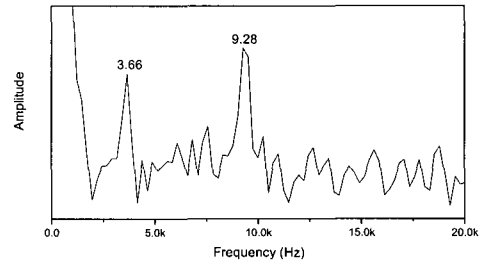
밀변이 0.2m인 경우에는 단면의 형상이 정사각형이 되고, 이때의 해석결과(Fig. 10(a))에서는 20kHz 이내의 주파수 범위에서 4개의 피크가 나타난다. 밀변의 길이가 0.4m가 되면 Fig. 10(b)와 같이 3.42kHz와 10.25kHz에서 두 개의 피크가 나타나고, 밀변이 0.8m이면 Fig. 10(c)와 같이 3.66kHz와 9.28kHz에서, 밀변이 1.0m일 때에는 Fig. 10(d)와 같이 2.93kHz와 9.28kHz에서 피크가 나타난다. Fig. 10(c)와 (d)에서 공통적으로 나타나는 9.28kHz의 공진주파수에 해당되는 공진모드를 알아보기 위해 모드해석을 수행한 결과, Fig. 11과 같이 9.28kHz에 근접한 9.69kHz에서 국부적인 두께 공진모드(thickness mode)가 발생됨을 알 수 있다. 이러한 국부적



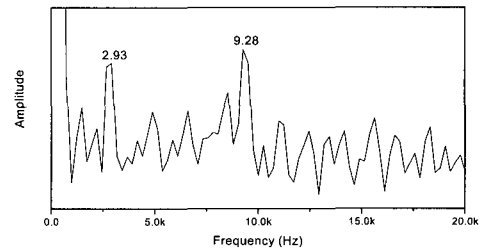
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 10 Transient analysis results for concrete slab with thickness of 0.2m and width of (a) 0.2m, (b) 0.4m, (c) 0.8m, (d) 1.0m

인 두께 공진모드가 충격공진법에서 사용되는 모드이다. 따라서, Fig. 10의 여러 경우를 살펴볼 때, 슬래브의 밀변 길이를 증가시키기에 따라 국부적인 두께 공진모드가 점차 뚜렷하게 나타나고 그에 해당되는 공진주파수가 점차 감소하다가, 밀변이 두께의 4배 이상이 되면 밀변 길이가 국부적인 두께 모드에 더 이상 영향을 미치지 않으므로 공진주파수 값이 더 이상 변하지 않음을 알 수 있다. 이는 기존의 연구[2]와 정량적으로 잘 부합되는 결과이다. 실제로 두께가 0.2m인 슬래브에 대해 식 (1)을 적용할 때 얻어지는 공진주파수  $f=9.6\text{kHz}$ 와 3.1절의 실험에서 나타난 10.06, 9.766, 9.668kHz의 공진주파수가 모두 위의 유한요소 해석에서 구한 주파수와 거의 일치함을 확인할 수 있다. 참고적으로, Fig. 10(d)와 (e)에서 나타난 또 하나의 공진주파수(각각의 경우, 3.66kHz 및 2.93kHz)는 실험에서 관찰되지 않는데, 이 공진주파수들은 Fig. 12와 같이 슬래브 전체에 굽힘이 발생하는 구조모드(structural mode)에 해당된다. 실험에서는 이와 같이 슬래브 전체에 굽힘 변위를 발생시킬 수 있는 많은 양의 에너지가 입력되지 못하므로, 이러한 공진주파수가 나타나지 않는 것으로 생각된다.

4.2. 철근의 직경 및 매설 깊이의 영향

3.3절에서 철근과 철망(공시체 3)을 충격공진법으로 검출하지 못한 이유가 철근의 직경과 매설 깊이의 비가 나

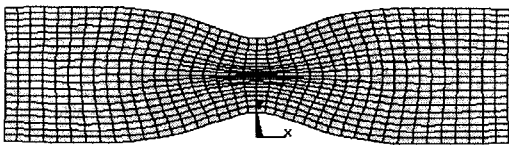


Fig. 11 Mode shape of thickness mode for concrete slab in Fig. 10(c)

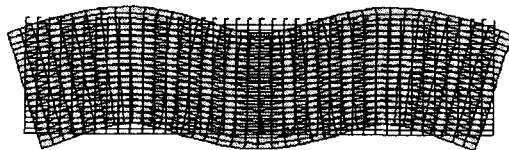


Fig. 12 Mode shape of structural mode for concrete slab in Fig. 10(c)

무 작기 때문에 설명한 바 있다. 기존 연구[6]에서는 이러한 이유를 유한요소법으로 입증하기 위하여 철근의 매설 깊이  $t$ 를 고정시키고 직경  $D$ 을 변화시켰으나, 본 연구에서는  $D$ 를 25mm로 고정시키고  $t$ 를 0.1, 0.05, 0.04, 0.03, 0.02m(즉,  $D/t=0.25, 0.5, 0.63, 0.83, 1.25$ )로 변화시키며 유한요소 해석을 수행하였다. 이를 위하여 사용한 유한요소 모델은 Fig. 13과 같이 두께가 0.3m, 밀변이 0.6m인 슬래브에 직경 25mm의 철근이 삽입된 모델이며, 좌우 대칭이므로 우측 반만을 모델링하고 모델의 좌측면에서 수평방향 변위가 없도록 구속조건을 주어 해석하였다.

유한요소 해석을 수행한 5가지 경우 중에서  $t=0.1, 0.04\text{m}$ 인 두 경우의 과도해석 결과가 Fig. 14에 나타나 있다. Fig. 14(a) 및 (b)에서 볼 수 있는 6.25 kHz의 피크는 다섯 경우에서 모두 발견되며, 슬래브의 두께에 해당되는 공진주파수이다. Fig. 14(a)를 보면, 철근의 매설 깊이가 0.1m일 때 식 (2)에 의해 나타나야 하는 공진주파수는 9.59kHz이지만, 이 주파수에서 피크가 나타나지 않음을 알 수 있다. 매설 깊이가 감소함에 따라 6.25kHz에서의 피크뿐 아니라 다른 주파수에서도 점차로 피크가 나타나기 시작하여, Fig. 14(b)와 같이 매설 깊이가 0.04m가 되면 해석적으로(즉, 식 (2)로부터) 구해지는 공진주파수 23.99kHz와 근사한 25 kHz에서 뚜렷하게 피크가 나타난다. 본 논문에서는 생략하였지만, 매설 깊이가 0.03m, 0.02m일 때에는 이러한 피크가 더욱 뚜렷해진다. 따라서  $D/t$ 의 값이 0.3 이상인 모든 경우, 식 (2)로 구해지는 해석적인 공진주파수와 근접한 주파수에서 피크를 확인할 수 있으며, 이는 기존의 연구[6]와 부합되는 결과이다. 이와 같이 개재물의 크기가 일정할 때 충격공진법의 유용성이 그 매설 깊이에 의해 영향을 받는 것은, 깊이가 깊어짐에 따라 충격탄성파의 퍼짐현상(spreading)으로 인해 개재물에 도달하는 에너지가 적어지고 따라서

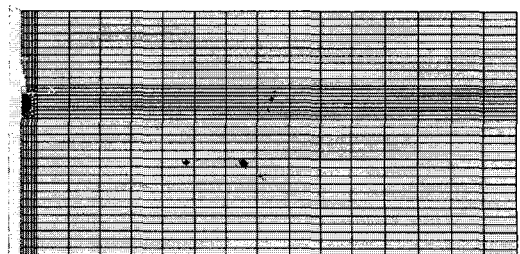


Fig. 13 FE model for concrete slab containing steel rebar

반사되는 에너지도 적어져서 공진이 쉽게 형성되지 못하기 때문에 생각된다.

4.3. 상이한 매질의 임피던스 차이에 따른 반사율의 영향

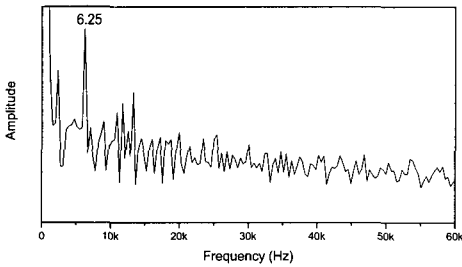
3.4절에서 충격공진법으로 암반층 및 불량콘크리트층을 검출하지 못한 이유가 콘크리트와 암반(또는 불량콘크리트)의 임피던스 차이가 미미하여 공진이 잘 형성되지 않기 때문이라고 설명한 바 있다. 본 연구에서는 이를 유한요소법으로 검증하기 위하여 Fig. 15와 같이 암반층을 포함한 슬래브(Fig. 15(a)) 및 전체가 콘크리트로 된 슬래브(Fig. 15(b))의 모델에 대해 과도해석을 수행하였다. 각 모델의 치수는 Fig. 15와 같으며, 두 경우 모두 밀변의 길이는 1.2 m이다. 해석적으로는, Fig. 15(a)의 모델에서는 식 (2)로부터 콘크리트/암반 경계면으로 인한 공진주파수가 4.99 kHz에서 나타나야 하고, Fig. 15(b)의 모델에서는 식 (1)로부터 슬래브 전체 두께에 해당하는 공진주파수 6.66kHz가 나타나야 한다. 유한요소 해석결과(Fig. 16)에서 두 경우 모두 Fig. 15(b)의 해석적 공진주

파수 6.66kHz와 근사한 6.4kHz 근처에서 피크가 나타나는데, 이는 암반이 콘크리트와 구분되지 못하고 따라서 Fig. 15의 두 모델이 충격공진법에 있어서는 동일한 공시체처럼 거동함을 의미한다. 이는 물론 암반과 콘크리트의 임피던스 차이가 작아서 그 경계면에서 반사가 매우 미약하게 일어나고 따라서 국부적 공진이 잘 형성되지 않기 때문이다. 두 매질 사이의 경계면에서의 반사율은 두 매질의 임피던스로부터 구해지는데[8], 콘크리트와 암반의 경우에는 반사율이 0.18정도에 불과하여 (참고로, 콘크리트/강 경계면에서는 0.66) 반사율이 0.25 이상이어야 충격공진법이 효과적이라는 기존 연구[2]의 결과와도 부합된다.

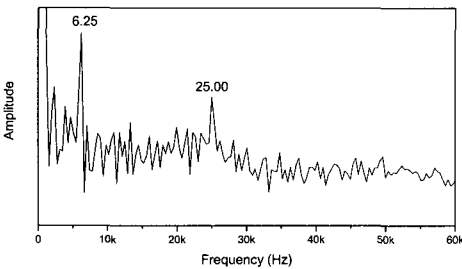
4.4. 충격공진법을 이용한 개재물 검출능의 결정 인자

위의 유한요소 해석 결과를 기초로 하여 충격공진법의 개재물 검출능에 영향을 미치는 인자들을 정리해 보고자 한다.

- 1) 충격공진법에서 이용하는 국부적인 두께 모드의 공진주파수가 두드러지게 나타나서 식 (1) 또는 (2)를 유용하게 쓸 수 있기 위해서는, 슬래브의 밀변 길이가 두께의 4배 이상이어야 한다.
- 2) 개재물의 크기  $D$ 가 충분히 커야 한다. (이론적으로, 파동현상을 이용하는 모든 비파괴평가법에 있어서 개재물의 크기가 사용하는 파장에 비해 매우 작으면 개재물의 검출이 불가능하다. 따라서 검출하고자 하는 개재물의 크기가 작아지면 입사파의 파장을 작게 하여야 한다. 충격공진법의 경우에는, 가진용 강구의 직

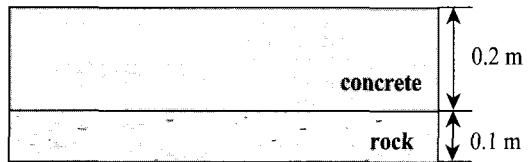


(a)

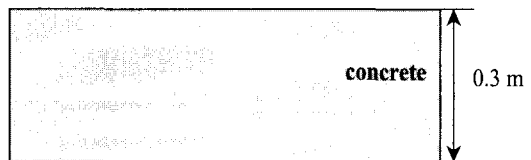


(b)

Fig. 14 Transient analysis results for concrete slab containing steel rebar at depth (a) 0.1 m, (b) 0.04 m



(a)



(b)

Fig. 15 FE models for concrete slabs (a) with rock layer, (b) without rock layer



경을 작게 하면 파장이 작아진다. 본 논문에서는 생략하였지만, 충격공진법으로 직사각형 공동을 검출함에 있어서 공동의 크기가 결정적인 영향을 미치는 것을 유한요소 해석을 통해 확인할 수 있다(7.)

- 3) 개재물의 크기  $D$ 가 충분히 크고 매질 깊이  $t$ 가 충분히 깊어서 그 비가  $D/t > 0.3$ 을 만족하여야 한다.
- 4) 입사 매질과 반사 매질의 임피던스 차이가 충분히 커서 반사율이 커야 한다.
- 5) 이 외에도, 개재물의 형상, 개재물의 매질 방향, 개재물의 개수 등이 충격공진법의 유용성에 영향을 줄 것이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 실험적 연구와 이론적 연구를 통하여, 콘크리트 슬래브 내의 결함이나 개재물을 현장에서 쉽게 검출할 수 있는 비파괴검사 기법인 충격공진법의 원리, 유용성 및 적용한계를 살펴보았다. 먼저, 스티로폼, 플라스틱 파이프, 철근, 철망, 암반층, 불량콘크리트층, 방수포 등의 다양한 개재물을 함유하는 콘크리트 슬래브 공시체를 제작한 후, 장구, 가속도계, 휴대용 PC 등으로 구성된

실험장치를 이용하여 충격공진 실험을 수행하였다. 개재물이 없는 슬래브로부터 실험적으로 구한 탄성중파의 속도를 이용하여 다양한 개재물의 매질 위치를 측정해 보았다. 실험 결과, 스티로폼, 파이프, 방수포 등은 그 매질 위치가 정확하게 검출되었으나, 철근, 철망, 암반층, 불량콘크리트 층은 검출되지 않았다.

실험적으로 충격공진법이 실패한 경우, 기존의 연구[2]로부터 그 원인을 찾을 수 있으나 이를 보다 구체적으로 확인하고 충격공진법의 적용한계를 알아보기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석을 간단히 하기 위해 평면변형률 요소를 사용한 2차원해석을 하였으며, 주로 충격을 가할 때 발생하는 과도 응답을 구하여 FFT하는 해석을 수행하였다. 해석 결과, 실험이 실패한 경우는 모두 개재물에 의한 탄성파의 반사가 약해서 국부적 공진이 잘 형성되지 않았기 때문으로 분석되었으며, 이러한 해석 과정을 통하여 충격공진법에서 일반적으로 중요한 인자들을 찾을 수 있었다. 즉, 슬래브의 폭과 두께의 비, 매질과 개재물의 임피던스 차이, 개재물의 크기 및 매질 깊이, 개재물의 형상과 방향 등에 따라 충격공진법을 이용한 개재물 검출능이 영향을 받음을 알 수 있었다.

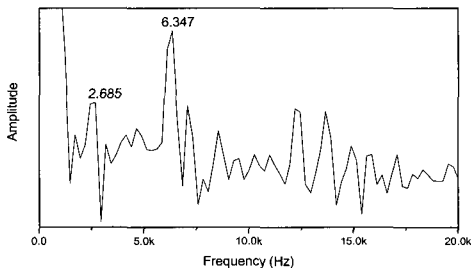
본 연구를 통하여, 충격공진법에 대한 물리적 이해도가 크게 향상되었으며 실제 적용에 필요한 경험이 많이 습득되었다. 특히, 충격공진법의 성패에 영향을 미치는 주요 인자를 명시하였으므로, 여타 연구자들이 이 방법의 적용가능성을 예측하는데 큰 도움이 될 것으로 생각된다. 충격공진법이 콘크리트의 비파괴평가법으로 보다 유용한 방법이 되기 위해서는 여러 방향의 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다. 한 예로서, 콘크리트의 비균질성이 탄성파의 전파에 미치는 영향을 이론적으로 연구하여, 그 결과를 충격공진법의 계산식에 반영하는 것이 바람직할 것이다. 많은 향후 연구를 통하여 충격공진법이 보완, 발전되면 지금보다 훨씬 유용한 콘크리트 시험법으로서의 역할을 할 것으로 기대한다.

### 후 기

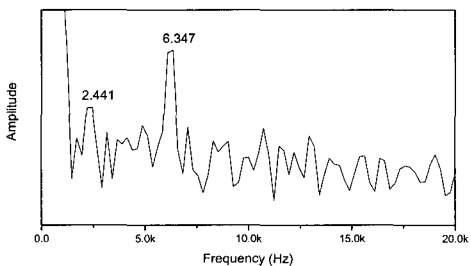
이 연구는 한국과학재단 산하 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 및 한국전력공사 전력연구원의 위탁연구비 지원에 의하여 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

[1] N. J. Carino and V. M. Malhotra, Handbook on



(a)



(b)

Fig. 16 Transient analysis results for slabs in Fig. 15

- Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, (1991)
- [2] M. J. Sansalone and W. B. Streett, Impact-echo Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., (1997)
- [3] M. J. Sansalone and N. J. Carino, "Laboratory and Field Studies of the Impact-Echo Method for Flaw Detection in Concrete", in Nondestructive Testing of Concrete, Special Publication of the American Concrete Institute, pp. 1-20, (1988)
- [4] 김동수, 박형춘, 이광명, "충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴검사", 콘크리트학회지, 제9권 2호, pp. 109-119, (1997)
- [5] 김병극, 고영대, 최재우, 이승석, 문한규, "콘크리트 구조물의 충격탄성파시험 영향인자 평가", 한국비파괴검사학회 춘계학술발표회, pp. 59-68, (1999)
- [6] C. Cheng and M. J. Sansalone, "The Effects of Steel Bars and Cracking Around Bars on Impact-Echo Signals", Materials Journal of the American Concrete Institute, Vol. 90, No. 5, pp. 421-434, (1993)
- [7] 김학현, 충격공진법을 이용한 콘크리트 슬래브 내의 다양한 결함과 개재물 검출, 홍익대학교 대학원 석사 학위 논문, (1999)
- [8] H. J. Pain, The Physics of Vibrations and Waves, K. F. Graff, 4th ed., John Wiley & Sons, pp. 156-158, (1993)