

콘크리트 배면공동 탐지를 위한 GPR, IE 및 IR기법의 복합 적용

노명근¹ · 오석훈^{1*} · 장봉석²

¹강원대학교 지구시스템공학과

²한국수자원공사 K-water연구원

Integrated Application of GPR, IE and IR Methods to Detection of the Rear Cavity of Concrete

Myunggun Noh¹, Seokhoon Oh^{1*}, and Bongseok Jang²

¹Department of Geosystem Engineering, Kangwon National University

²Dam Safety Research Center, K-water Institute, KWATER

요약: 콘크리트의 배면에 위치하는 공동을 탐지하기 위해 실제 구조물과 같은 스케일의 모형을 제작하여 비파괴 검사로 널리 사용되는 GPR (ground penetrating radar) 탐사와 충격반향기법(IE; impact echo), 충격응답기법(IR; impulse response)을 복합적으로 적용하였다. 콘크리트 모형은 철근 및 공동의 유무에 따라 다양한 반응을 관찰할 수 있도록 설계하였다. GPR 탐사결과 공동의 유무에 따라 반응의 차이가 나타났지만 정확하게 공동의 존재를 파악하기 어려웠으며, 주로 건전도 측정을 위해 기반조사에 활용되었던 IE 및 IR 기법은 공동의 유무를 구분할 수 있는 반응을 보여주었다. 각 탐사의 적용 결과 철근의 존재에 따라 각 방법별로 배면의 공동을 탐지하는데 반응의 변화가 나타나긴 했지만, 세 가지 방법을 복합적으로 적용하였을 때 단일 탐사를 이용한 결과보다 정확하게 배면 공동의 위치를 파악할 수 있었다

주요어: 콘크리트 배면 공동, GPR탐사, 충격반향기법(IE), 충격응답기법(IR)

Abstract: Integrated analysis of GPR, impact echo (IE) and impulse response (IR) was performed to detect the rear cavity of concrete for a test-bed which was made with the same scale and component ratio to the real concrete structure. The test-bed was designed to be capable of observing various response reflecting the existence of iron reinforcing bar and cavity. GPR survey did not clearly resolve the existence of the cavity, although distinguishable responses were observed in the presence of the cavity. In contrast, IE and IR method showed distinct responses, indicating the existence of the cavity. Finally, integrated application of the three methods makes it possible to exactly identify the location of the cavity, although the iron reinforcing bar made a little variation of response.

Key words: rear cavity of concrete, GPR, impact echo, impulse response

서 론

최근 콘크리트 구조물의 노후화와 대형 구조물의 등장으로 안전진단의 중요성이 대두되면서 다양한 형상의 구조물에 대한 진단이 수행되고 있다. 이러한 안전진단은 댐과 같은 큰 수리시설물부터 터널의 라이닝과 상하수도관, 도로, 콘크리트 건축물 등 여러 대상에 대해 실시되고 있는데, 특히 비파괴기법을 이용한 진단에서는 콘크리트 표면 차수형 댐(CFRD)이나 터널의 라이닝 부분, 관로 등의 배면에 위치한 공동탐지를 목

적으로 연구가 수행되었다(권형석 등, 1998; 정호찬 등, 2007). 기존의 연구는 GPR 탐사 결과에 바탕을 두고 진단을 실시하였는데, 대부분의 콘크리트는 철근이 배근되어 있어 전자파가 투과하기 어렵고 전파현상 또한 복잡하기 때문에 공동을 탐지하기가 쉽지 않았다. 본 연구에서는 현재 운용되고 있는 수리시설물의 규격과 동일한 크기의 철근콘크리트 구조물 모형을 제작하여 기존의 안전진단방법으로 사용되는 GPR 탐사와 현재 국내외에서 활발히 연구되고 있는 IE 및 IR 기법을 복합적으로 적용하여 공동의 위치를 확인하고자 하였다. IE 기법은 주로 콘크리트 구조물의 두께 측정을 위해 많이 이용되었으나 본 연구에서 공동의 유무에 따른 반응을 조사하기 위해 적용하였고, 말뚝의 건전도 시험 등에 적용되었던 IR 기법은 콘크리트 배면의 공동 탐지를 위해 적용하였다.

한편 콘크리트는 양생 방법이나 기간에 따라 전기적 물성의

2009년 10월 30일 접수; 2009년 11월 18일 채택

*Corresponding author

E-mail: gimul@kangwon.ac.kr

Address: Dept. Geosystem Eng., Kangwon National Univ.,

Hyoja-2-dong, Chuncheon, Kangwon-do, Korea

변화가 많이 발생하는 것으로 알려져 있는데, 본 연구에서 이용한 콘크리트 모형은 양생이후 시간이 짧아(5개월 이내) 실제 현장에서 GPR 탐사를 이용하여 배면 공동에 대한 조사를 실시할 경우 다소 다른 경향이 나타날 수 있다. 이러한 점을 고려하여, 신속하게 많은 영역을 조사할 수 있는 GPR 기법의 장점과 함께, 본 연구에서 제안한 IE 및 IR 기법을 복합적으로 적용한다면 배면 공동 탐지에 대한 정확성을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

적용 기법

GPR 탐사는 콘크리트 배면의 공동 조사를 위해 많이 이용되고 있는 탐사법으로 송신안테나로부터 방출된 전자기파가 전기적 물성이 다른 물체를 만나 반사되는 신호를 수신안테나에서 탐지하여, 이를 처리하고 해석하는 탐사법이다(김지수 등, 2003). GPR 탐사의 원리는 널리 알려져 있으므로, 본 논문에서는 IE 및 IR 기법에 대해서만 간단히 소개하고자 한다.

IE 기법

IE 기법은 구조체 표면에 기계적 충격을 가하여 발생된 탄성파가 불연속면이나 이질 매질 층 사이의 경계면에서 반사되어 표면으로 돌아온 파형을 측정·분석하여 구조체의 품질 판정, 두께 측정, 또는 균열과 공동을 탐사하는 방법이다(Fig. 1). 즉, 구조체 표면에 기계적 충격을 가하면, 구조체 내부로 전파되는 체적파(P, S파)와 구조체 표면을 전파하는 표면파(L파)가 발생한다(Richart *et al.*, 1970). 이때 체적파는 균열, 공동과 같은 불연속체나 이질 매질층간의 경계면을 만나면 반사되어 표면으로 돌아온다. 이때 감지기가 충분히 송신원 근처에 위치한다면 반사된 P파의 표면변위가 S파의 표면변위보다 훨씬 크므로 표면에서 감지되는 파형은 P파에 의한 파형으로 볼 수 있다. 또한, 표면에 도달한 파는 표면에서 반사되어 다시 매질 속으로 전파되며 이러한 파는 다시 불연속층에서 반사된다. 이와 같이 표면과 이질 매질층 사이의 다중 반사에 의한 공진 상태가 유발된다. 이때, 구조체의 두께 또는 깊이를 알고 있을 경우 구성 재료의 강성도 결정을 통한 콘크리트의 불량도를 추정할 수 있고, 재료의 P파 속도를 알고 있다면 반사파의 도달 시간을 측정하여 구조체 내부에 존재하는 불연속면의 위치를 알아낼 수 있다(Carino *et al.*, 1986; Lin *et al.*, 1991; Mathorta and Carino, 1991).

일반적으로 IE 기법에서는 경계조건에 따라 파장과 그에 따른 주기가 결정되는데, 자유면-자유면의 경계를 가질 때의 파장과 주기는 각각,

$$f_n = \frac{nV_p}{2T}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

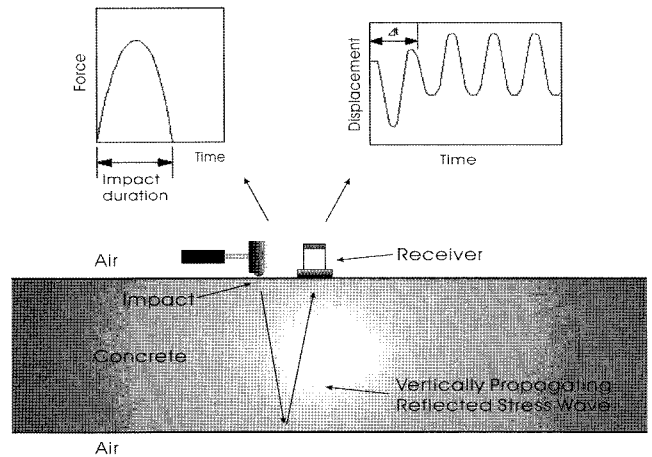


Fig. 1. Schematic diagram of Impact echo and Impulse response method.

$$T = \frac{V_p}{2f_n}$$

여기서 n : 모드의 수

f_n : n번째 모드의 공진주파수

V_p : P파의 속도

T : 콘크리트 두께

로 주어진다(Sansalone and Carino, 1988). 이를 이용하여 각 주파수에 해당하는 층의 두께를 결정할 수 있다.

IR 기법

IR 기법은 말뚝의 건전도 평가를 목적으로 개발되었으며, TDR (Transient Dynamic Response)법 또는 운동성(Mobility) 방법으로 불린다. 기계적인 충격을 콘크리트 표면에 가하여 그 때 발생한 탄성파를 이용하여 콘크리트 내부의 결함을 탐지한다는 원리에 있어서는 IE 기법과 동일하지만(Fig. 1), 결함 확인을 위한 신호처리방법이 다르다는 특징이 있다(김형우 등, 2006). 본 기법에서는 Fig. 2에 나타난 바와 같이, 주파수영역에서의 운동성에 대한 해석을 실시한다. 운동성은 주파수 반응곡선에서 전파속도(V)에 대한 힘(F)의 비로 계산된다. 운동성을 계산하는 과정에서 이와 반비례 관계인 강성도(Stiffness)에 대한 정보도 얻을 수 있는데, 주파수 반응 곡선에서 직선 부분에 해당하는 초기 신호의 변화율에 대한 역수로부터 계산된다(Sansalone and Streett, 1997). 이는 콘크리트의 품질, 부재 두께, 부재의 지지조건 등에 따라 달라진다.

또한 IR 기법을 통해 층의 두께도 추정할 수 있는데, Fig. 2에 나타난 바와 같이 주파수 영역에서 각 마무의 간격은 특정 속도에 의한 주파수 차이를 나타내는데, 이를 이용하면 두께를 추정할 수 있다.

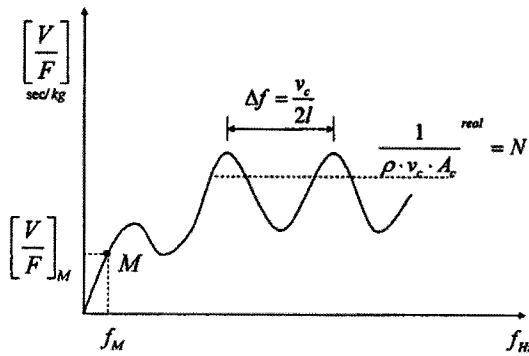


Fig. 2. An example of impulse response spectrum. Axis of y indicates the mobility given by ratio between velocity and force, and axis of x is frequency. The mobility is related to the stiffness N and the distance between two hills is used to infer plate thickness.

모형제작 및 모형실험

모형제작

탐사의 적용을 위한 콘크리트 모형은 강원도 춘천시 서면 방동리에 $2.4 \times 6.0 \times 1.0$ (가로×세로×높이) m^3 의 크기로 제작하였다. 공동의 규격은 Fig. 3에서 보는 것과 같이 $2.4 \times 2.0 \times 0.3$ (가로×세로×높이) m^3 크기로 모형의 중앙에 위치시켰고, 좌우측에 사력 재료를 이용하여 콘크리트를 지지하였다. 지반을 압밀하여 공동의 변화가 없도록 하였다. 콘크리트는 Table 1과 같이 배합하여 타설을 하였고, 철근 배근은 직경 25 mm의 철근을 이용하여 콘크리트 상부에서 35 cm를 이격시켜 배근하였다(Fig. 3(b)). 철근 간격은 20 cm로 조밀하게 배근하여 탐사를 실시하였다. 공동의 상부에는 Fig. 3(a)에서 나타낸 바와 같이, 콘크리트 부분과 철근+콘크리트 부분을 분리시켜 각 조건에 따른 변화를 살펴보았다.

본 연구에 사용한 GPR탐사 장비는 캐나다 Sensor & Software사의 PulseEKKO 1000을 사용하였고, IE 기법과 IR 기법은 자체 제작한 장비를 이용하여 자료를 수집, 분석하였다.

모형실험

Fig. 4와 5는 각각 GPR 측선과 IE 및 IR 측정점의 위치를 나타낸다. Fig. 4의 GPR 측선은 전체 모형을 가로지르는 측선(A-B)과 각 영역(콘크리트+철근, 콘크리트+철근+공동, 콘크리트+공동, 콘크리트)을 가로지르는 측선(E-F, E'-F', C'-D', C-D)으로 구성되었다.

IE 기법과 IR 기법은 40 cm 간격으로 측정점을 배치하여 각

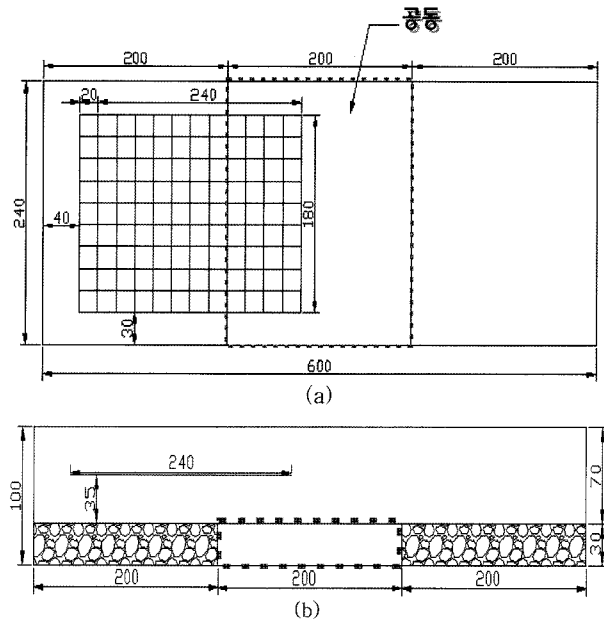


Fig. 3. (a) plane and (b) vertical view of test-bed.

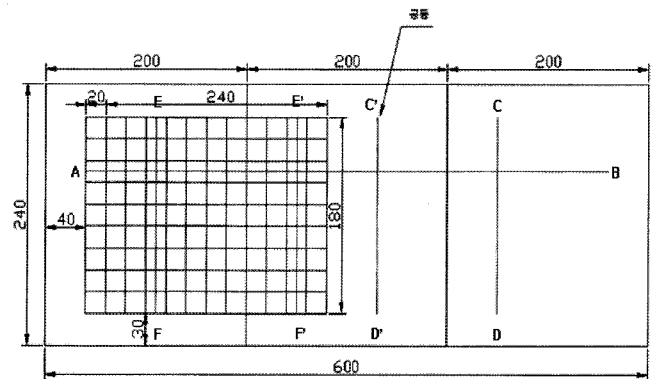


Fig. 4. The profiles for GPR survey.

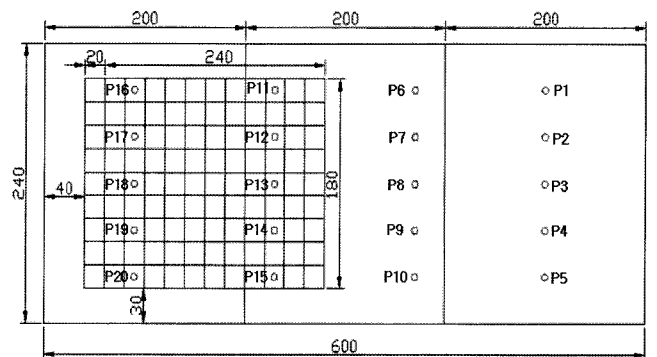


Fig. 5. The measurement points for IE and IR test.

Table 1. Component index of concrete used to make the test-bed compared with a real dam.

type	index	strength of design (kg/cm^2)	cement (kg/cm^3)	sand (kg/cm^3)	W/C (%)	S/A (%)	air content (%)	AD (g)	steel diameter (mm)
dam		210	313	734	51	40	4.5	470	29
model		210	360	822	50	40	4.5	470	25

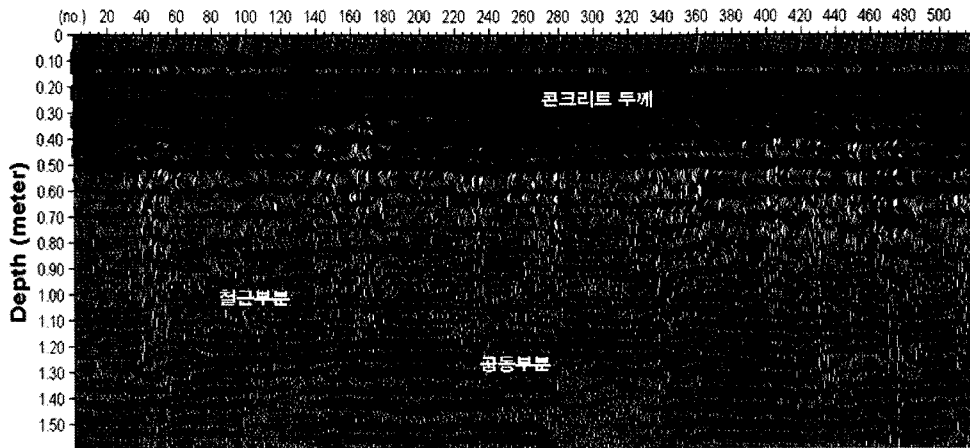


Fig. 6. Result of GPR test for profile A-B in Fig. 4 with 450 MHz transmitter.

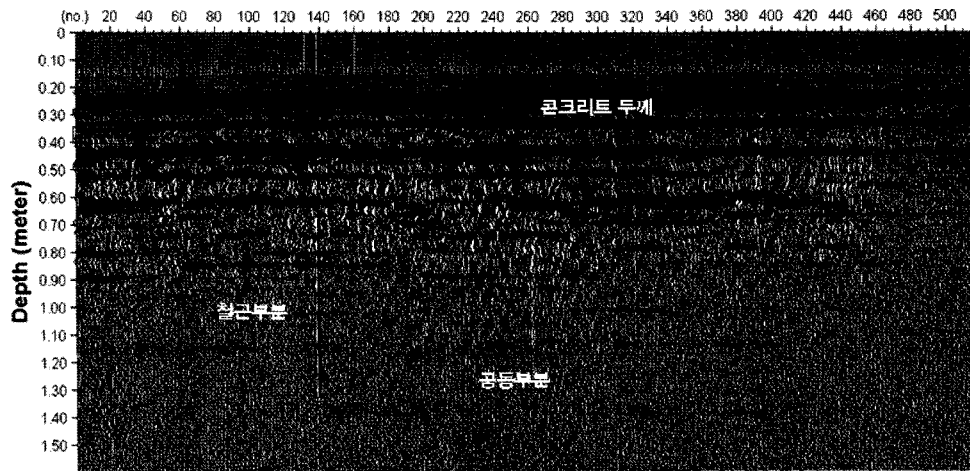


Fig. 7. Result of GPR test for profile A-B in Fig. 4 with 900 MHz transmitter.

영역별로 5지점을 선정하여 측정하였다(Fig. 5). 각 지점의 콘크리트의 속도를 구하여 콘크리트 두께를 계산하였다. 향후 전체 영역에서의 동적 강성도를 측정하기 위해, Fig. 5에 나타난 측정 지점을 기준으로 보다 좁은 간격으로 IR 자료를 추가적으로 획득하였다.

GPR 탐사 결과 및 해석

콘크리트 모형을 대한 GPR 결과의 양상을 보기 위해 0.01 m 간격으로 5.4 m를 step모드로 측정하였다. 강성체인 철근 하부로 투과하는 전자파는 감쇠가 심하기 때문에 시간에 따른 게인(gain)의 변화를 주어 공동 부근에서 반사된 파를 강조하여 살펴보았다.

콘크리트의 두께는 450 MHz의 영상(Fig. 6)과 900 MHz의 영상(Fig. 7) 모두, 콘크리트에서 반사되어 나온 파의 깊이가 0.7m와 근사한 값을 나타내고, 철근의 위치도 38 cm와 39 cm로 나타나 실제 35 cm와 차이가 거의 없음을 알 수 있었다. 공동 구간인 1.7 m에서 3.7 m의 위치에서 450 MHz에 의한 결과는 지반과 공동에서 큰 차이를 볼 수 없었고, 900 MHz 영역

에서는 전자파의 양상이 공동과 지반에서 차이가 나타나는 것을 볼 수 있었다. 분해능 차이로 900 MHz 영역에서 공동 위치가 보이는 하지만 두 주파수 영역 대에서 공동의 양상이 쉽게 구분되지 않았다. 위의 결과를 통해 콘크리트 배면의 공동 탐사에서 900 MHz를 이용하여 탐사를 수행해도 충분히 철근 부분을 투과하는 결과를 얻을 수 있지만, 공동의 위치를 정확히 확인하는 것은 어려웠다. 앞에서도 언급한 바와 같이, 이 부분은 양생의 정도에 따라 반응이 다소 다르게 나타날 수 있을 것이라 생각된다. Fig. 8은 나머지 측선(C-D, C'-D', E'-F', E-F)에서의 GPR 탐사 결과이다.

IE 기법의 결과 및 해석

모형실험을 수행하기 전에 콘크리트 부분에서 IE 기법을 이용하여 콘크리트 속도를 계산하여 보았다. 콘크리트의 평균 속도는 3000~4000 m/s로 알려져 있는데 실제로 각 지점에서 측정을 수행한 결과, 평균 속도가 3400 m/s로 나타났다. 측정된 평균 속도는 층의 두께를 추정하는데 이용된다. 시간 영역의 측정결과를 푸리에(Fourier) 변환하여 주파수 영역에서 반응을

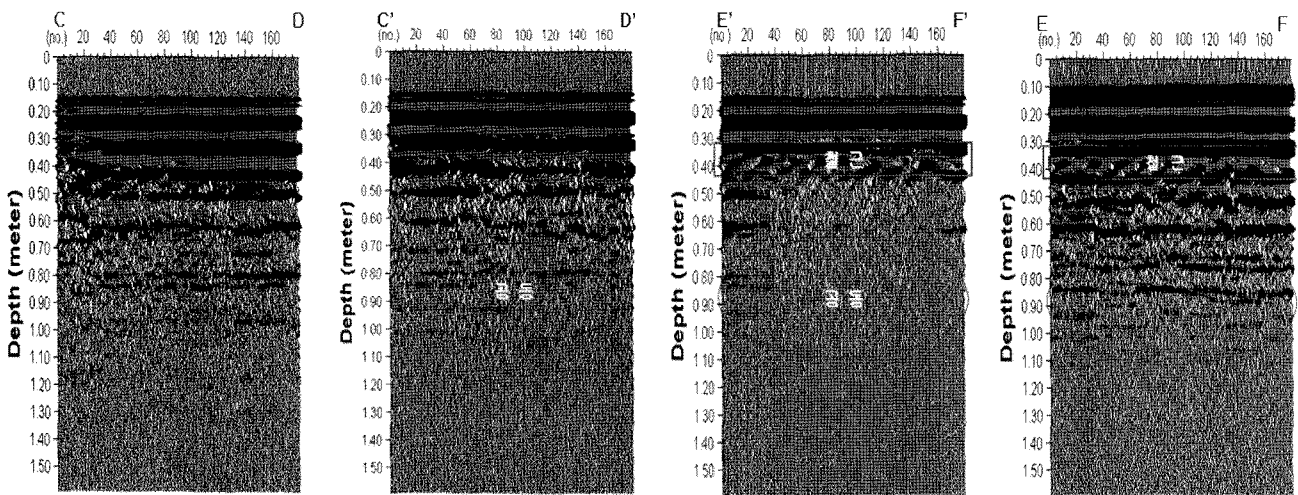


Fig. 8. Result of GPR test for profile C-D, C'-D', E'-F', E-F in Fig. 4 with 900 MHz transmitter.

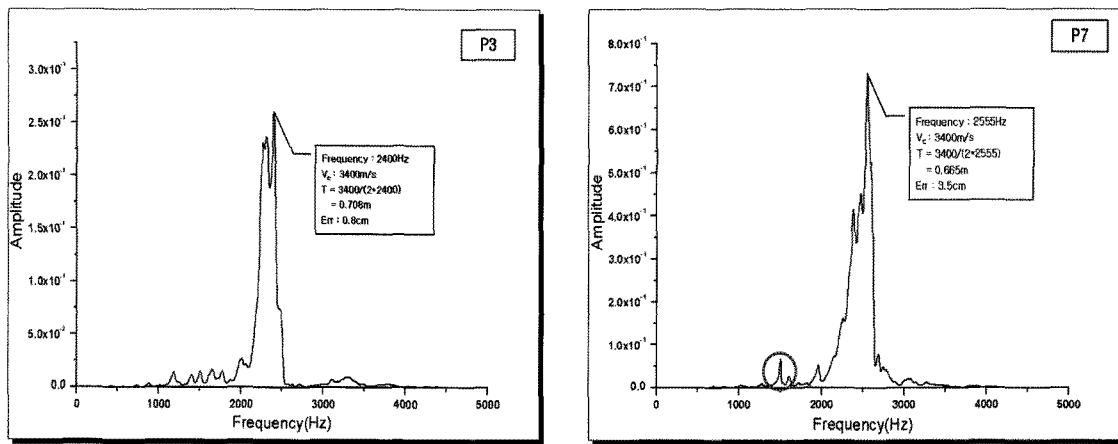


Fig. 9. Impact echo test at points P3, P7 in Fig. 5.

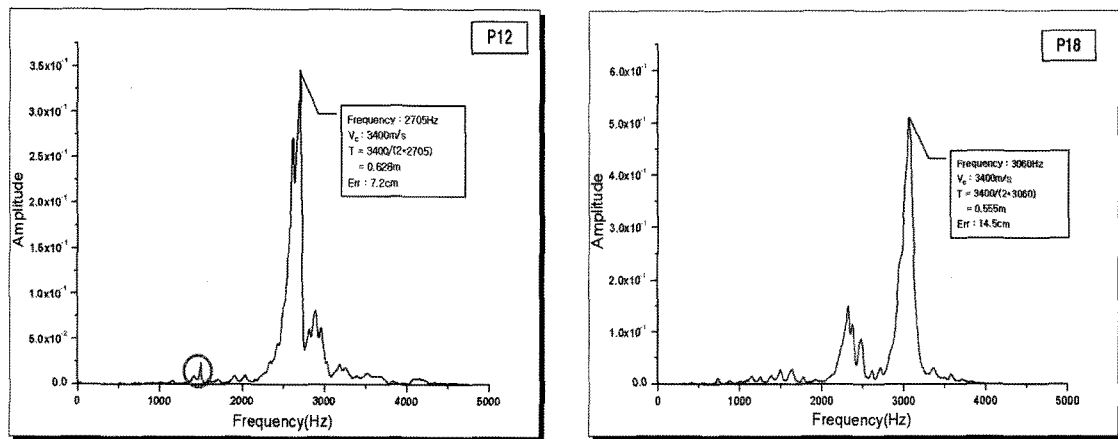


Fig. 10. Impact echo test at points P12, P18 in Fig. 5.

분석하였다.

콘크리트의 실제 두께는 0.7 m인데 이를 측정된 콘크리트의 전파 속도를 고려하여 계산하면 예상되는 공진주파수는 대략 2430 Hz이다. 실험결과인 Fig. 9에서 볼 수 있는 바와 같이, P3에서 공진주파수는 2400 Hz를 나타내고, P7에서는 2555 Hz에

서 공진주파수가 나타나 예상주파수와 비슷한 것을 확인할 수 있었다. 공동이 존재하는 지점에서는 진폭이 가장 큰 주파수와 더불어 보다 저주파수(1500 Hz 부근)에서 작은 피크가 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 공동의 존재에 의한 것으로 판단된다. 공동 주변에서의 이와 같은 반응을 예상하고 철근+콘크

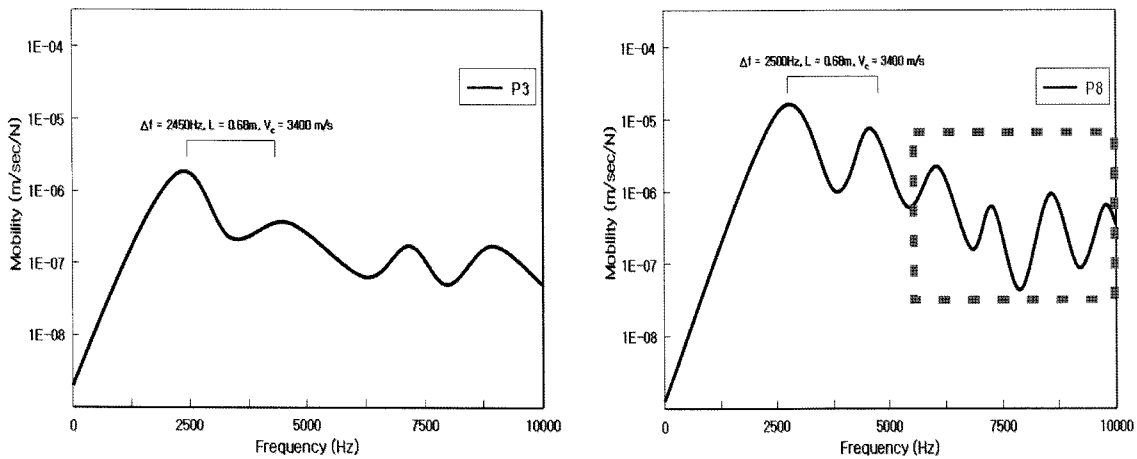


Fig. 11. Impulse response test in concrete section for P3, P8.

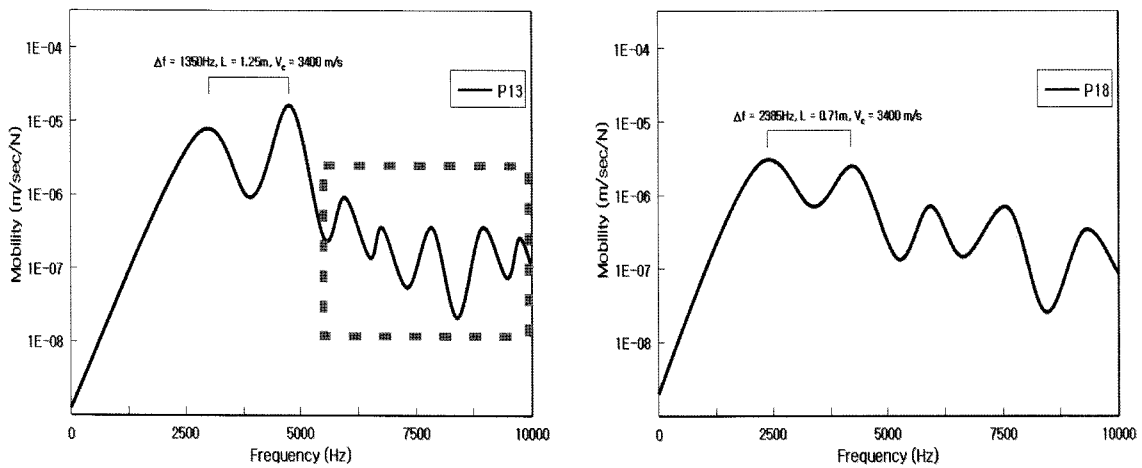


Fig. 12. Impulse response test in the iron+concrete section for P13, P18.

리트 영역에서의 반응을 살펴보았다.

철근+콘크리트 영역에서의 결과를 살펴보면 콘크리트 부분과 유사한 결과를 나타냈지만 철근의 존재로 인해서 두께의 추정오차가 높아진 것을 볼 수 있었다. Fig. 10에서 공진주파수에 대한 진폭의 차이는 있지만 공진주파수 부분이 2500 Hz와 3000 Hz 부분에서 나타나는 것을 볼 수 있었는데, 2500 Hz는 콘크리트에 의해 나타난 반응으로 유추할 수 있고, 3000 Hz는 철근에 의한 영향으로 발생된 것으로 예상된다. 철근+콘크리트 영역에서 공동이 있는 부분과 없는 부분의 IE 조사의 반응 양상은 콘크리트만 존재하는 영역과 비슷한 저주파수(1500 Hz)의 작은 피크의 양상을 볼 수 있었다. 이를 통해 철근의 존재와 상관없이 공동 탐지를 위해 IE 기법이 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

IR 기법의 결과 및 해석

IR 기법은 본래 막돌 및 판구조물의 건전도를 검사하기 위해 주로 이용되어 왔던 비파괴 검사기법이다. 본 연구에서는 이를 확장하여 콘크리트 배면의 상태에 따른 반응을 살펴보았다. IR 기법으로 층의 두께를 결정하기 위해서 콘크리트의 속

도는 IE 기법에서 사용한 것과 동일하게 3400 m/s로 적용하였다. 그 결과, 콘크리트의 두께는 철근+콘크리트+공동 영역을 제외하고는 0.7 m에 수렴하는 결과를 얻을 수 있었으나, 공동의 존재에 따라 스펙트럼의 양상이 다양하게 나타났다.

Fig. 11은 철근은 없고 콘크리트만 있는 영역(Fig. 5 참조)에서 공동 유무에 따른 IR 반응을 살펴보기 위해 측정값에 대해 이동 평균을 취한 결과를 도시한 것이다. 그림에서 y축은 운동성(m/sec/N)을 나타내는데, P3지점의 값이 P8지점에 비해 많이 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 하부에 공동이 존재하지 않는 P3지점에서는 바로 지반과 맞닿아서 운동성이 낮게 나타난 반면, 공동이 위치한 P8지점에서는 운동성이 크게 나타난 것으로 볼 수 있다. 또한 P8지점에서는 5000 Hz 이후의 주파수 반응곡선에서 주파수 주기에 변화가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 공동 상부에서 측정할 경우 운동성의 증가와 고주파수 영역의 진동 주기가 변하는 양상이 관찰된 것이다. 이러한 결과가 철근이 함께 존재하는 곳에서도 나타나는지 파악하기 위해 철근+콘크리트 영역에서도 동일한 분석을 수행하였다.

Fig. 12은 철근+콘크리트 영역에서 측정된 자료에 IR 해석 결과이다. 철근이 없었던 Fig. 11에 비하여 주파수 반응곡선의

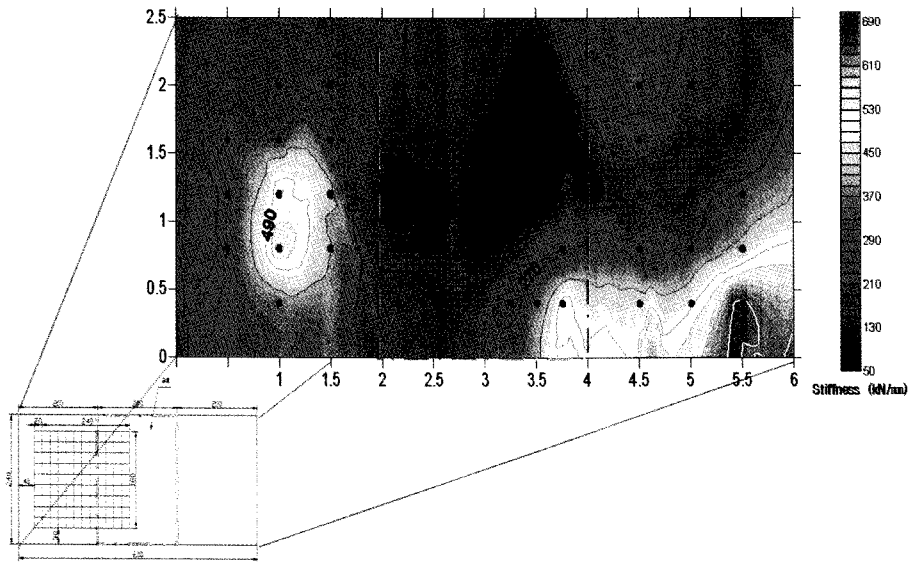


Fig. 13. The plane map stiffness calculated from IR method.

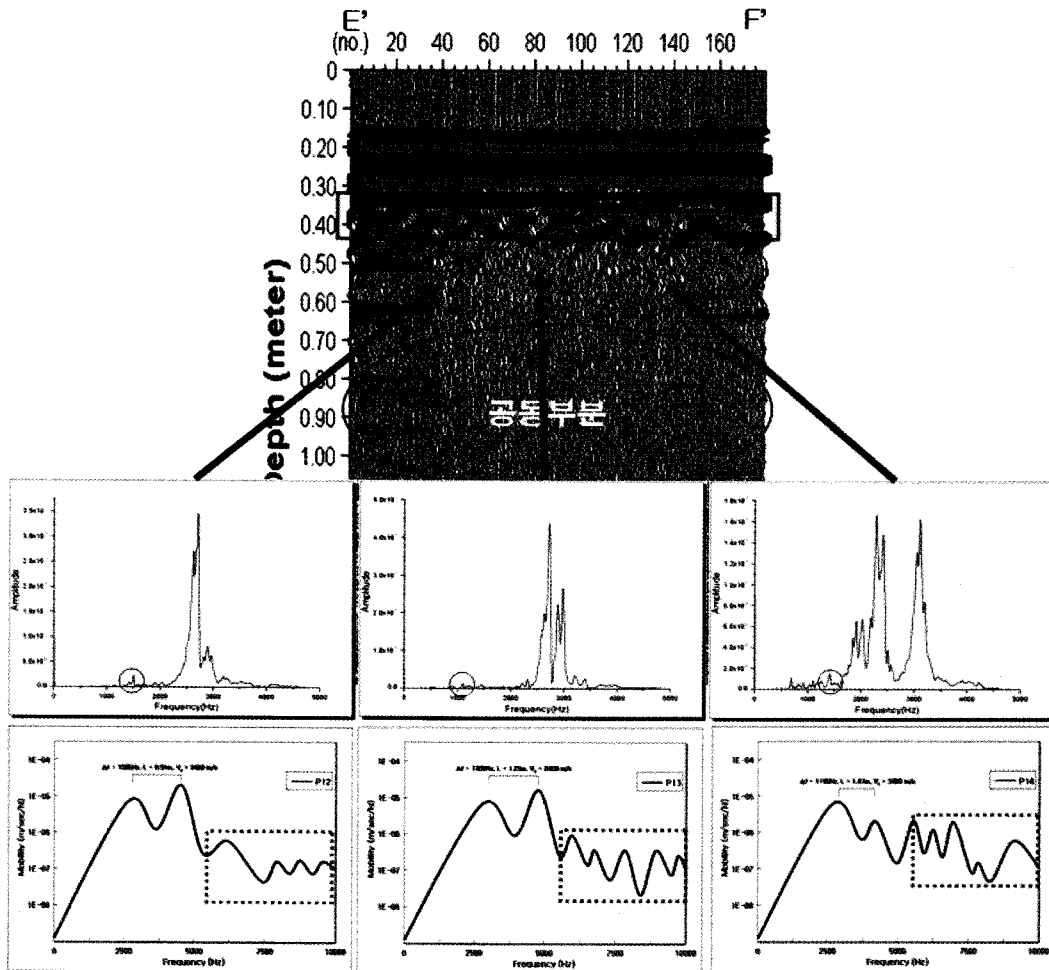


Fig. 14. Integrated analysis of response of GPR, IE and IR methods in the iron+concrete section (Fig. 4).

주기에 다소 변화가 있지만 콘크리트 영역에서 나타난 것과 유사한 양상을 볼 수 있었다. 이러한 점을 고려할 때, 공동이 존재하는 부분과 공동이 없는 부분에서는 주파수 및 운동성에

서 차이를 보여 공동의 탐지가 가능하며, 특히 5000 Hz 이상의 주파수 주기의 변화를 통해 공동의 양상을 파악할 수 있을 것으로 예상된다.

IR 기법은 콘크리트의 부재 두께 및 품질, 부재의 지지조건 등에 따라 달라지는 동적강성도에 대한 정보를 제공하는데, 이는 응답 곡선부의 기울기 즉 운동성의 역수를 통해 계산된다. Fig. 13은 Fig. 5의 위치를 기준으로 추가적인 측정을 수행한 측정하여 동적강성도를 계산한 결과이다. Fig. 13에 나타난 바와 같이, 공동이 있는 구역에서 강성도의 값이 작은 것을 확인할 수 있었다. 이는 공동이 존재할 경우 콘크리트의 부재의 지지조건이 좋지 않아 지반과 접한 부분보다 상대적으로 낮은 강성도를 나타낸 것으로 여겨진다.

복합적 해석

지금까지 GPR 탐사와 IE 및 IR 기법을 이용하여 공동의 존재에 따른 각 탐사에서의 반응을 살펴보았다. 그 결과 일부 탐사의 경우 특수한 조건에서 단일 탐사만으로도 공동을 잘 구분할 수 있는 것도 있었지만, 공동의 존재를 한 가지의 탐사만으로 결정하기는 어려웠다. 특히, 콘크리트와 철근이 함께 존재하는 경우 하부 공동의 탐지가 관건이 되는데, 이 경우 탐사 결과를 복합적으로 해석하고자 각 탐사를 통해 얻은 반응을 함께 도시하였다(Fig. 14).

Fig. 14에서 볼 수 있는 바와 같이, 철근+콘크리트 구역의 하부에 공동이 존재하는 경우에 GPR 탐사는 철근에서의 반사도가 높아 전자파의 투과량이 적어 공동에서의 반사가 약하기 때문에 공동에 의한 반사파의 양상을 살펴보기 어려웠다. 그러나 IE 기법과 IR 기법을 복합적으로 분석해 보면 공동의 존재를 예상할 수 있다. 즉, IE 기법에서 공동이 존재할 때 나타났던 저주파수(1500 Hz 부근)에서 피크 반응이 보이고 있으며, IR 기법의 결과로부터 콘크리트에서와 같이 주파수반응곡선의 주기가 5000 Hz 이후로 짧아지고 불규칙적으로 변하는 현상이 나타나고 있다. 이와 같은 반응을 고려할 때, IE 기법과 IR 기법으로부터 파의 양상에 따른 변화를 이용하여 철근+콘크리트 영역에서 복합적인 해석을 한다면 실제 현장에서 공동의 위치를 발견할 수 있는 확률을 높일 것으로 생각된다.

결 론

실제 구조물 크기의 콘크리트 모형을 제작한 후 그 콘크리트의 배면에 공동을 만들고, GPR 탐사와 IE 기법, IR 기법을 이용하여 공동의 존재에 따른 반응을 조사하였다.

GPR 탐사는 450 MHz와 900 MHz 두 개의 주파수를 이용하여 수행하였는데, 두 주파수 모두 철근의 위치나 깊이 등을 정확히 파악할 수 있었고 진폭 조절을 적절히 수행하여 공동 부근까지의 영상단면을 얻는데 문제는 없었다. 900 MHz 대역에서도 전자파가 충분히 투과하였으나, GPR 탐사만으로 공동의 존재 여부를 정확히 결정할 수 있는 반응을 얻지는 못하였다.

GPR 탐사 결과를 보강하기 위해 IE 및 IR 기법을 함께 적

용하였다. IE 기법의 경우, 공진주파수를 이용하여 콘크리트의 두께(0.7 m)를 비교적 정확하게 추정할 수 있었고, 공동이 존재할 때 1500 MHz 내외의 주파수 영역에서 공동에 의한 것으로 여겨지는 작은 피크를 확인할 수 있었다. 이를 계산한 결과 그 깊이가 1 m 정도로 근사하는 것으로 나타나 공동에서 반사된 파로 추정된다.

IR 기법은 주파수에 따른 운동성(mobility)을 파악하는 방법인데, 공명하는 피크의 위치에 따른 주파수의 차이를 통해 콘크리트의 두께를 측정한 결과 실제값과 유사한 결과를 나타냈고, 공동이 존재하는 경우 공동이 없을 때 보다 큰 운동성을 보여주었다. 콘크리트 부분과 철근+콘크리트 부분에서 공통적으로 공동이 존재하는 경우, 주파수가 5000 Hz 이상에서 주파수 반응곡선의 주기에 변화가 생겨 공동 예측이 가능할 것으로 보였다. 이후 추가적인 자료획득을 통해 동적강성도를 추정한 결과, 전반적으로 공동이 있는 부분에서 동적강성 값이 낮은 것을 확인할 수 있었다.

모형실험의 결과로부터 실제 공동의 탐지를 위해서, GPR 탐사 결과와 IR 기법에 의한 동적강성도의 분포를 통해 공동이 존재할 가능성이 높은 영역을 대략적으로 선정하고, IE 기법을 추가적으로 적용하여 공진주파수의 특성을 정밀하게 분석한다면, 공동 탐지를 위한 좋은 성과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

사 사

본 연구는 기상청 지진기술개발사업(CATER 2009-5303)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김형우, 김동수, 2006, “충격응답기법 및 충격반향기법에 의한 콘크리트 구조물의 건전성평가”, 한국비파괴검사학회 춘계학술대회-2006, 6(7), 368-393
- 김지수, 송영수, 윤왕중, 조인기, 김학수, 2003, 물리탐사의 활용, 시그마프레스.
- 권형석, 설순지, 서정희, 장현삼, 임해룡, 홍재호, 1998, GPR을 이용한 터널 라이팅 두께 검증, 한국자원공학회지, 512-519.
- 정호찬, 황환국, 김원대, 한상중, 2007, “GPR을 이용한 관로 배면 탐사기법”, 대한상하수도학회 한국물환경학회 2007공동추계학술발표회 논문집, pp. 58-63.
- Carino, N. J., Sansalone, M., and H. N., 1986, “Point source - point receiver technique for flaw detection in concrete”, *ACI Journal, Proceedings* 83, 199-208.
- Lin, Y., Sansalone, M., Carino, N. J., 1991, “Impact-Echo Response of Concrete Shaft”, *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, 14(2), 121-137.
- Lin, J. M., and Sansalone, M., 1994, “The impact-echo response of hollow cylindrical concrete structures surrounded by soil or rock, Part 1 - Numerical Studies”, American Society of

- Testing and Materials - Journal of Geotechnical Testing, 17(2), 207-219.
- Malhotra, V. M., and Carini, N. J., 1991, "Handbook on nondestructive testing of concrete", CRC Press, NEW YORK, 343p.
- Richart, F. E., Jr., Hall, J. R., Jr., and Woods, R. D., 1970, "Vibrations of Soils and Foundations", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 414.
- Sansalone, M., and Carino, N. J., 1988, "Detecting honeycombing, the depth of surface-opening cracks, and ungrouted ducts", Concrete International: Design & Construction, 10(4), 38-46.
- Sansalone, M., and Streett, W. B., 1997, Impact-Echo: nondestructive evaluation of concrete and masonry, Ithaca, N.Y, bullbrier Press.