

GPR을 이용한 콘크리트 내 공동 탐사

Detection of Delamination inside Concrete Using Ground Penetrating Radar

임 흥 철* 이 승 재** 우 상 균*** 송 영 철****

Rhim, Hong-Chul Lee, Soong-Jae Woo, Sang-Kyun Song, Young-Chul

Abstract

A series of experimental work has been conducted to evaluate the capability of Ground Penetrating Radar (GPR) system in detecting delamination inside concrete. Three antenna at 900 MHz, 1000 MHz, and 1500 MHz frequency are used in the experiments for laboratory size specimens, and 400 MHz antenna has been used for a large size specimen.

The laboratory size specimens have the dimensions of 1,000 mm (length) × 600 mm (width) × 140 mm (thickness) with a delamination of 200 mm (length) × 600 mm (width) × 140 mm (thickness). The cover depth of the delamination is varied as follows: 20 mm, 30 mm, 60 mm, and 70 mm. In all cases, the delamination has been successfully identified. The property of three frequencies was seized about detecting delamination. Also, it was shown that the image results in GPR were improved by signal processing.

요 약

비파괴 검사에 널리 쓰이는 Ground Penetrating Radar (GPR)의 콘크리트내 공동 탐사 성능을 알아 보기 위해, 일련의 실험을 실시하였다. 공동 탐사는 사용하는 안테나의 주파수에 가장 큰 영향을 받으며, 실험에서는 900 MHz, 1 GHz, 1.5 GHz 3개의 안테나를 사용하였다. 콘크리트 기본시편의 크기는 1,000 mm (길이) × 600 mm (폭) × 140 mm (두께)이고, 공동은 200 mm (길이) × 600 mm (폭) × 50 mm (두께)의 크기를 갖고 있다. 공동의 매립 깊이를 20 mm, 30 mm, 60 mm, 70 mm 4개고 달리한 결과, 모든 경우에서 공동을 성공적으로 탐사하였으며, 각 안테나 주파수에서의 특성을 파악하였다. 또한 상업용 레이더 시스템의 영상 처리 결과를 향상시킨 결과를 논문에서 다루었다.

Keywords : ground penetrating radar, delamination, frequency, signal processing

* 정회원, 연세대 건축공학과 교수, 공학박사

** 학생회원, 연세대 건축공학과 석사

*** 한국전력연구원 선임연구원

**** 한국전력연구원 책임연구원

E-mail : hcrhim@yonsei.ac.kr 02-2123-2792

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2003년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 연구 배경과 목적

콘크리트 구조물의 비파괴 검사는 그 실시 목적을 크게 두께 측정, 철근 탐사, 공동 탐사 등으로 분류할 수 있고, 그 중 공동 탐사는 주로 터널 라이닝 배면 공동 탐사에 많이 활용되어 왔다.^{(1),(2)} 콘크리트 구조물의 내구성 진단의 중요한 요소인 강도측정과 더불어 내부결함 즉, 공동이나 균열 등의 탐사를 하는 것은 매우 중요하다. 이것을 레이더를 활용해 탐사 할 수 있는지를 실험을 통하여 알아보려 한다.

본 연구에서는 Ground Penetrating Radar (GPR) 을 이용하여 콘크리트 구조물 내부에 위치한 공동을 탐사하기 위한 실험을 실시하고 그 내용을 분석하였다. 기본시편의 실험에서는 900MHz, 1000MHz, 그리고 1500MHz의 세 종류의 안테나를 사용하였으며, 공동까지의 매립 깊이를 20mm, 30mm, 60mm, 70mm로 각각 변화시켜서 시편을 제작하였다. 그리고, 응용시편의 실험에서는 400MHz의 안테나를 사용하여 원자력 발전소 격납건물 벽체 실물 모형에 대해서 실험 하였다. 실험 결과 분석과정에서 일반 상용레이더의 출력 영상을 향상시킨 신호처리 방법을 적용하였다.

2. 레이더를 이용한 공동 탐사

2.1 공동 탐사 원리

레이더 (radar)의 측정 원리는 마이크로파 대역의 전자파가 목표물 혹은 매질을 통과할 때, 그 전자파의 투과와 반사가 목표물 혹은 매질의 전자기적 특성과 모양에 영향을 받는 성질을 이용한 것이다. 실측 과정에서는 송신 안테나로부터 탐사하고자 하는 콘크리트 시험체에 전자파를 방사하면, 이 전자파는 전자기적 성질이 다른 물질, 예를 들어, 철근, 공동, 또는 배관 등의 경계면에서 반사되어 수신 안테나에 도달한다. 이 전자파의 반사파형으로부터 매립된 물체의 모양과 재질을 판정한다.⁽³⁾

매질의 경계면에서의 전자기파의 반사와 투과는 매질의 전자기적 특성에 직접적인 영향을 받는다. 전자

기적 특성이 서로 다른 두 매질의 경계에서 발생하는 전자기파의 반사계수(Γ)는 다음과 같다.

$$\Gamma = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (1)$$

여기서,

η_1 과 η_2 는 특성임피던스 (characteristic impedance)를 나타내고, ϵ_{r1} 과 ϵ_{r2} 는 유전상수 (dielectric constant)를 나타낸다. 아래첨자 1과 2는 각각 첫 번째 매질과 두 번째 매질을 가르킨다. 이러한 반사계수의 부호에 따라 반사파의 위상이 달라지게 된다.⁽⁵⁾⁽⁷⁾ 따라서 전자파가 콘크리트 속을 진행하다가 매질이 다른 물질 즉, 공동에 다다르면 반사파의 위상이 틀려지는데, 이 위상을 해석하여 매립된 물체를 판단하는 것이다.

2.2 컴퓨터 모델링에 의한 해석

컴퓨터 모델링을 실험에 앞서 실시하고 콘크리트 안에서의 레이더파 진행과 반사를 예측할 수 있다.⁽⁶⁾

Fig. 1은 피복 깊이 30 mm의 공동탐사를 모델링한 결과이다. Fig. 1에서 시편의 앞 표면은 반사파가 처음 나타나는 지점으로 반사파의 위상 (amplitude)이 가장 크다. 공동의 앞 표면은 반사파의 위상이 바뀐 지점이며, 시편의 뒷 표면은 공동의 앞 표면과 반사파의 위상이 같은 부호로 나타나는 지점이 된다. 이는 콘크리트와 공기 경계면에서의 전자기파 반사계수로 설명될 수 있다.

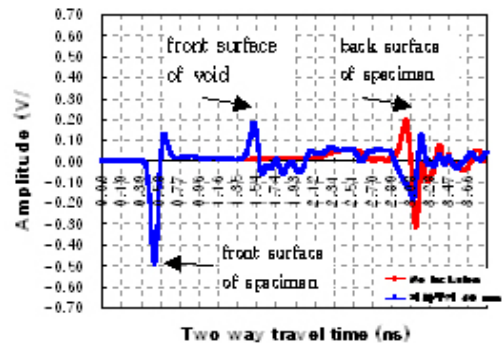


Fig. 1 Void detection modeling

2.3 측정시 고려해야 할 요인

레이더로 공동 측정 시, 중요한 변수는 안테나의 주파수와 콘크리트의 수분 함유상태 등이다. 안테나의 주파수는 주파수가 높을수록 해상도와 분해능은 우수해지지만, 투과 심도가 낮아지는 단점이 있다. 이러한 안테나의 영향 요인을 알아보기 위해 기본시편에 대해서 현재 실무에서 비파괴 검사에 주로 쓰이는 900MHz, 1000MHz, 1500MHz 의 3 종류의 안테나를 사용하여 탐사성능을 비교하였다.

또한, 전자파의 진행속도는 콘크리트의 수분 함유상태에 따라 영향을 받게 된다.⁽⁴⁾ 콘크리트 속에 수분이 많이 함유하고 있을 경우, 전자파의 진행 속도가 느려진다. 일반적인 콘크리트의 유전상수는 4~5의 값을 가진다.

3. 실험

3.1 시편

시편은 실험실에서 측정할 수 있는 소형시편과 실제 콘크리트 구조물 크기로 만들어진 대형시편을 사용하였다. 소형시편의 크기는 길이 1,000mm × 폭 600mm × 두께 140mm이다. Fig. 2와 같이 모르타르 내부에 길이 200mm × 폭 600mm × 두께 50mm의 스티로폼을 피복두께가 다르게 매립하였다. d는 콘크리트 표면에서 공동까지의 피복 두께이다.

피복두께 d는 20mm, 30mm, 60mm, 그리고, 70mm 4가지 경우를 실험에 사용하였다.

대형시편은 원자력 발전소 격납건물 벽체 모형 시편

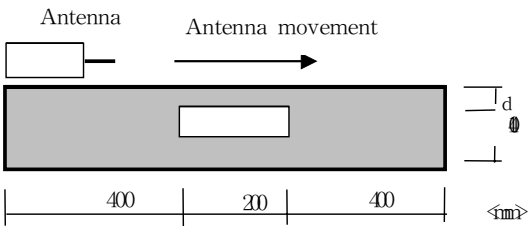


Fig. 2 Section of laboratory size specimen and measurement scheme

을 사용하였다. 이 시편 안에 있는 공동의 위치와 크기는 사전 공개 없이 실험이 진행되었다. Photo 1은 응용시편의 실물 사진이다. 시편의 크기는 길이 4,200mm × 폭 1,800mm × 두께 1,200 mm 이다.

3.2 실험 장비

소형시편에는 900MHz, 1000MHz, 그리고, 1500 MHz의 주파수를 갖는 안테나를 사용하였다. 그리고, 대형시편에는 100MHz의 중심주파수를 갖는 안테나를 사용하였다. 실험에 사용된 안테나는 송신안테나와 수신안테나가 상자 안에 따로 분리되어 있는 형태이다. 수신안테나에서 받은 반사파는 본체 제어부에 저장되고 여기서 측정된 데이터는 신호처리를 위한 데이터 분석용 프로그램에서 분석된다. Photo 2는 실험에 사용된 GPR의 실물 사진이다.

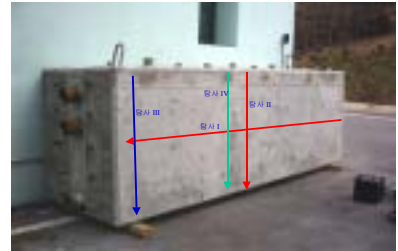


Photo 1 Mock-up specimen of quarantine building wall of atomic power plant



Photo 2 GPR equipments

3.3 측정 방법

소형시편 실험은 Fig. 2에서와 같이 시편의 표면에 안테나를 접촉시킨 상태에서 이동하면서 측정하였다. 대형시편 실험은 시편 표면에서 안테나를 수평, 수직 방향으로 이동시키면서 공동을 탐사하였다.

Fig. 3은 레이더의 측정원리를 나타내고 있다.

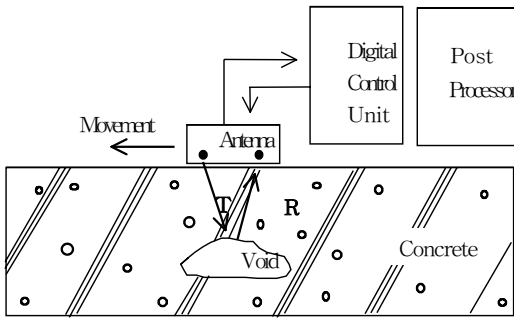


Fig. 3 Schematic view of radar system

4. 실험 결과

4.1 유전상수의 측정

유전상수(ϵ')를 구하는 식은 (2)와 같다.

$$\epsilon' = \left(\frac{c}{S} \times \frac{\Delta t}{2} \right)^2 \quad (2)$$

실제 시편의 두께(S)는 0.14 m, c는 전자파의 속도($=3 \times 10^8$ m/s), 왕복시간 Δt 는 측정된 시편의 뒷 표면의 시간과 앞 표면 시간의 차이값이다. 식 (2)를 이용하여 두 시편 양생 후 4주간 매주 시편을 레이더로 탐사하여 유전상수의 값을 측정했을 때의 값을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Measured dielectric constant

Specimens	Week 1	Week 2	Week 3	Week 4
1	11.38	11.72	10.27	10.17
2	11.91	12.24	10.51	10.33

유전상수 값의 추세를 보면 시간이 갈수록 줄어들고 있다. 이유는 콘크리트가 양생되어 감에 따라 내부 수분이 줄어들어 전자파의 속도가 빨라지고, 따라서 유전상수 값이 작아지기 때문이다. 유전상수의 평균값을 구하면 11.07이다.

4.2 일반 신호처리 결과

Fig. 4는 일반 상용장비의 신호처리를 이용한 측정 결과이다. 측정 결과는 2차원적 영상으로 표시되는데, Fig. 4에서 수평방향은 콘크리트시편의 표면을 움직이는 안테나의 방향이고, 수직방향은 표면에서부터 콘크리트 내부까지의 깊이를 나타내고 있다.

영상결과에는 우선 0.05 m 깊이 전후에 3 - 4개의 목표물이 보이고, 0.12 - 0.15 m 내 사이에 층 모양의 측정결과가 나타나있다.

분석 순서는 우선 콘크리트 시편의 두께를 찾았는지 여부를 판가름 하는 것이다. 시편의 두께는 앞표면의 시간과 뒷표면의 시간의 차이에 1/2를 곱한 값에 레이더파의 시편 내에서의 속력을 곱해서 두께를 계산하고, 그리고, 탐사의 목적인 공동의 위치를 찾는 것이다.

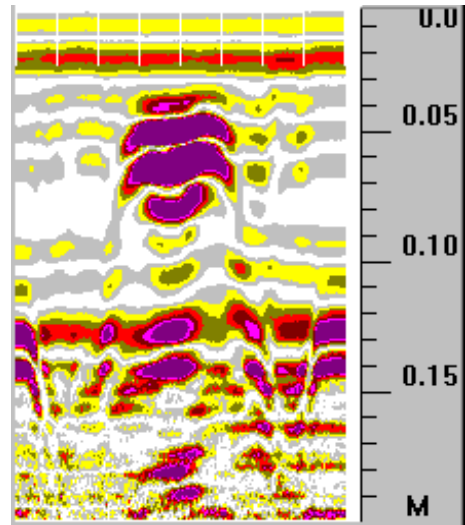


Fig. 4 1.5 GHz Radar measurement result of a concrete specimen with a delamination at 60 mm depth

주어진 조건을 알고, 이 때 나타나는 현상 등을 연구하는 것을 Forward Problem이라고 한다. 공동의 위치가 표면에서부터 60mm 라는 것을 알고, Fig. 4를 검토하면, 유전상수 값을 감안하여, 60mm 깊이내 공동이 나타나야 한다. 그러나, Fig. 4에서 보이는 것으로는 앞표면과 뒷표면의 위치를 정확히 파악하기 어렵고, 이것으로 구한 시간의 차이도 객관성이 상당히 떨어진다. 즉, 상용시스템의 신호처리결과를 이용할 때 공동면을 구분하여 찾는 것은 어렵고, 주관적인 결정을 내릴 가능성이 있다.

4.3 향상된 신호처리 결과

일반 상용레이더의 출력 영상에서는 주관적인 판단에 좌우될 수 있고 정확하지 않은 결과를 가져올 수 있다. 좀 더 정확한 방법으로 객관적인 결과를 얻기 위해 보다 향상된 신호처리 방법을 사용할 필요가 제기된다. 이러한 신호처리를 통해 나온 결과가 Fig. 5이다. Fig. 4에서는 확인하기 힘든 앞표면과 뒷표면의 구분이 명확히 되고 있고, 중간의 하얀색 공동부분도 뚜렷이 구분이 되고 있다.

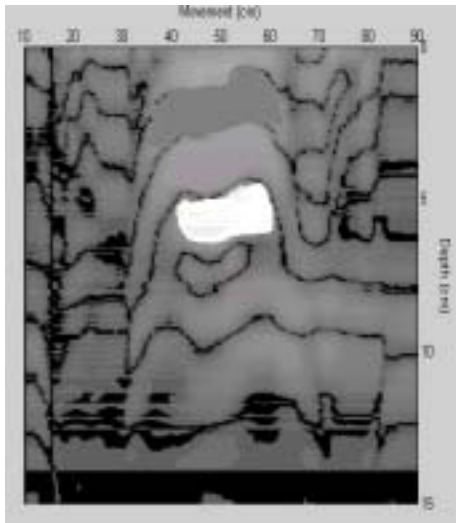
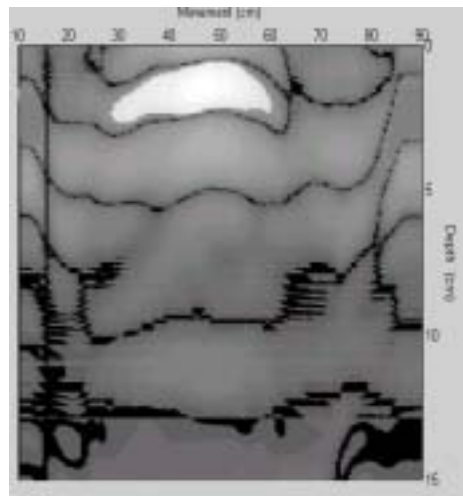


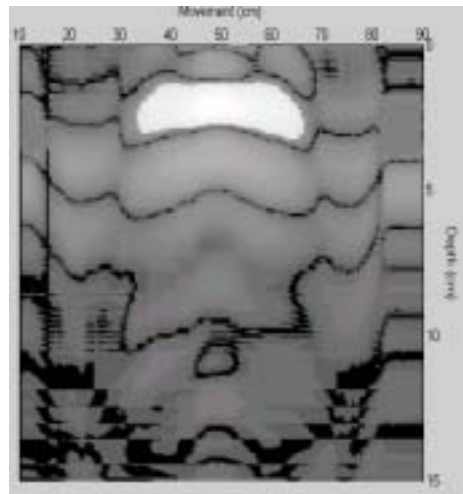
Fig. 5 1.5 GHz Radar signal processed result of a concrete specimen with a delamination at 60 mm depth

4.4 주파수에 따른 공동 탐사결과

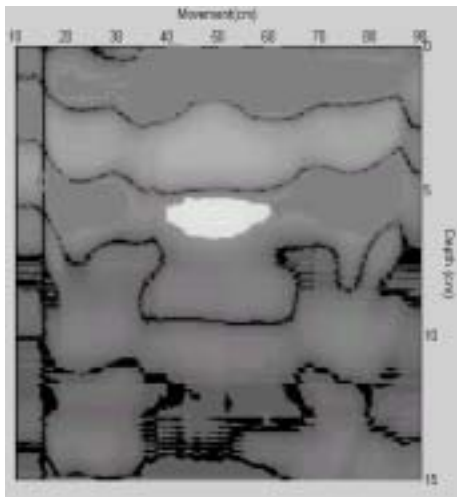
900MHz를 이용하여 공동을 탐사한 결과, 피복 깊이에 무관하게 공동을 모두 탐사할 수 있었다. Fig. 6은 공동 탐사결과이며, 신호처리 한 출력영상이다. 피복 깊이가 얇은 경우 공동의 형상이 비교적 정확하게 나타나고 있으나, 피복 깊이가 깊어지는 경우 공동의 형상이 작아짐을 알 수 있다. 이는 피복 깊이가 깊어지는 경우 레이더의 전자파는 투과깊이가 증가함에 따라 감쇠하기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 20 mm delamination at depth



(b) 30 mm delamination at depth



(c) 60 mm delamination at depth

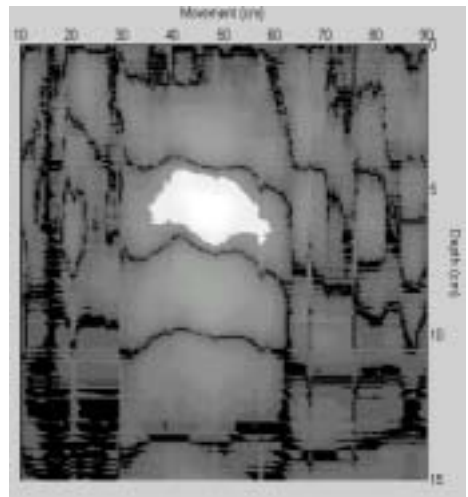
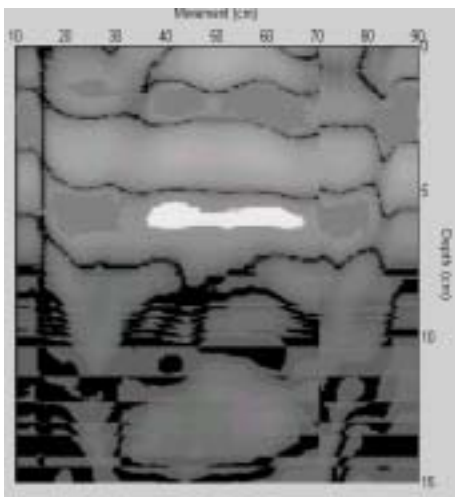


Fig. 7 Result of Measuring 60 mm delamination at depth with 1 GHz antenna



(d) 70 mm delamination at depth

Fig. 6 Results of 900 MHz Measurement

1 GHz 안테나를 이용하여 공동 측정할 경우에도 신호처리를 통해 공동을 성공적으로 탐사할 수 있었다. Fig. 7은 1 GHz의 안테나를 이용하여 공동을 탐사한 결과이다.

똑같은 시편과 실험 방법으로 1.5 GHz 안테나를 이용하여 콘크리트 내 공동탐사 실험을 하였다.

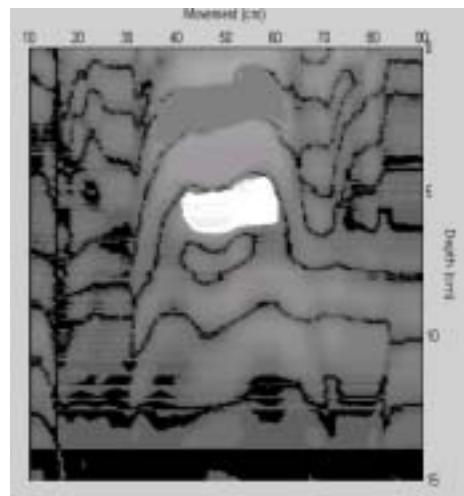


Fig. 8 Result of Measuring 60 mm delamination at depth with 1.5 GHz antenna

1 GHz에 비해서 피복 깊이가 깊어지더라도 출력 영상이 크게 감소하지는 않았고, 그럴수록 측정의 정확도는 향상되었다. 이러한 이유는 1.5 GHz의 안테나가 1 GHz에 비해서 분해능과 해상도가 우수하기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 8는 실험 결과 영상이다.

Table 2 Results of measurements

피복 두께	900 MHz		1000 MHz		1500 MHz	
	측정값 (mm)	오차 (%)	측정값 (mm)	오차 (%)	측정값 (mm)	오차 (%)
20 mm	10	50.0	10	50.0	15	25.0
30 mm	20	33.3	20	33.3	25	16.7
60 mm	50	16.7	50	16.7	50	16.7
70 mm	60	14.7	70	0	70	0

이상의 측정 결과 값을 종합하면 Table 2와 같다.

주파수의 크기가 커질수록, 피복두께가 두꺼워질수록 오차가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그러나, 깊이에 따른 주파수의 투과능력의 한계로 위의 결과가 지속적으로 선형의 관계를 갖는 것은 아닐 것으로 생각된다.

4.5 400MHz 안테나 이용한 공동 탐사결과

대형시편으로 400MHz 안테나를 이용하여 콘크리트 내 공동탐사 실험을 하였다. 900MHz, 1000MHz, 1500MHz 안테나를 사용하여 대형시편을 측정하지 않은 이유는 대형시편의 두께가 1.2m의 매우 두꺼운 시편이었기 때문에 이 안테나들로는 공동을 탐사할 수 없었기 때문이다. 실험 결과 수평방향으로 스캔한 것으로는 정확히 공동의 위치를 찾을 수 있었다. 하지만 수직으로 스캔하였을 때는 그 방향으로 수직 철근이 들어있어 그 간섭에 의해 정확하게 찾을 수가 없었다.

이 대형시편에서는 공동의 위치를 대략적으로 찾는 것이 목적이었으나 가로방향으로 스캔함에 의해서 공동의 위치는 정확하게 확인이 되었으므로 수직스캔에 의한 데이터는 여기선 큰 의미가 없다.

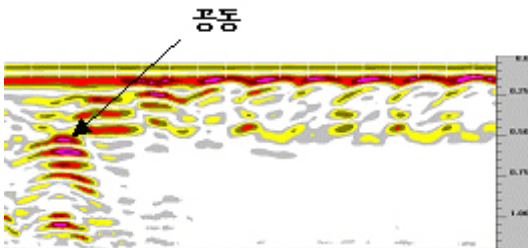


Fig. 9 Results of 400 MHz Measurement (Horizontal Scan)

5. 결 론

900MHz, 1GHz 그리고 1.5GHz의 안테나를 사용하여 모르타르 시편 내에 매립된 피복 깊이가 각각 다른 공동을 탐사한 결과, 그 존재여부와 위치를 모두 확인하였다. 또한 대형시편에 대한 공동탐사에 있어서도 400MHz 안테나를 사용하여 공동의 위치를 정확하게 탐사하였다. 초기 2차원 영상에서는 확인하기 힘든 공동의 정확한 위치를 신호처리 과정을 거친 2차원 영상에서 확인할 수 있었다. 실험 결과를 종합하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 소형시편의 실험에서 세 종류의 안테나 중에서 1.5 GHz의 안테나를 사용하였을 때, 보다 정확하게 공동의 형상이나 위치를 확인할 수 있었다.
- 2) 공동 탐사의 경우 피복 깊이가 깊어질수록 탐사의 정확도는 향상되지만, 공동의 형상이 작아짐을 알 수 있다. 이는 레이더의 전자파가 감쇠하기 때문이며, 이러한 감쇠 때문에 주파수가 높은 안테나일수록 투과 깊이의 한계가 알아진다.
- 3) 유전상수 값은 양생기간이 길어질수록 감소하였다. 이는 양생기간이 길어질수록 콘크리트 속의 수분이 감소하기 때문인 것이다.
- 4) 일반 상용장비에서 판독하기 힘든 영상을 신호처리 후 판독능력을 향상시켰다. 신호처리 후에는 링잉(ringing)과 노이즈(noise)가 제거되어 비교적 쉽게 공동을 탐사할 수 있었다.
- 5) 1.2 m의 두께를 갖는 시편에 대해서는 400MHz 안테나를 사용하여 공동의 위치를 탐사할 수 있었다.
- 6) 신호처리방법과 모델링(modeling)을 통하여 보다 정확하게 콘크리트 내부를 탐사하는 기법을 개발할 수 있다.
- 7) 응용시편에 대해서는 신호 처리(signal Processing)을 할 수 없었는데, 그것과 크기와 재질에서 같은 무근 콘크리트(plain concrete)를 측정할 수 없기 때문이다. 현실적으로는 실제 공동탐사에서 무근 콘크리트(plain concrete)를 측정할 수 없기 때문에 이것을 해결할 수 있는 향상된 신호 처리(signal Processing) 기법을 개발해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(KOSEF)에서 설립한 지진공학연구센터(KEERC)와 한국전력공사 전력연구원(KEPRI)으로부터 연구비를 지원 받았고, 교육부의 1996년도 이공계 대학연구소 기자재 첨단화 지원사업에 따라 연세대학교 공과대학 건축과학기술연구소 비파괴구조연구실이 보유하고 있는 실험 장비를 사용하였습니다. 논문 정리에 도움을 준 연세대학교 건축공학과 비파괴 구조 연구실 이윤식 연구원에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 김영의, “지하레이더탐사기(GPR)를 이용한 콘크리트 구조물의 안전 진단 사례,” 한국콘크리트학회지, 제12권 3호, 2000년 5월, pp. 78-84.
2. 신성렬, 조철현, 신창수, 양승진, 장원일, “GPR 및 단일채널 탄성파탐사에 의한 터널라이닝 배면공동 조사,” 한국구조물진단학회지, 제2권 4호, 1998년 11월, pp. 148-158.
3. 이종득, “콘크리트 구조물의 비파괴검사,” 일광, 1996.
4. 임홍철, 정성훈, “비파괴 시험을 위한 콘크리트의 전자기적 특성의 측정,” 한국콘크리트학회지, 제12권 3호, 2000년 6월, pp. 115-123.
5. R. K. Fruhwirth and R. Schmöller, “Some Aspects on the Estimation of Electromagnetic Wave Velocities,” Proceedings of 6th International Conference on Ground Penetrating Radar, September 30-October 3, Tohoku University, Sendai, Japan, 1996.
6. O. Buyukozturk and H. C. Rhim, “Modeling of Electromagnetic Wave Scattering by Concrete Specimens,” Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 5, 1995, pp. 1011-1022.
7. D. K. Cheng, “Field and Wave Electromagnetics,” Addison Wesley, 1989.

(접수일자 : 2002년 6월 29일)