

## 1 GHz 안테나를 이용한 콘크리트 시편 내 철근간격 탐사방법 개발

### Development of Rebar Detection Techniques for Concrete Specimens Using 1 GHz Antenna

김우석, 임홍철

연세대학교  
서울특별시 서대문구 신촌동 134

#### 요약

철근콘크리트 구조물의 안전 점검을 위한 비파괴 검사 방법 중 하나로서, 레이더 검사법이 최근 들어 건축·토목 구조물에 적용되고 있다. 레이더를 이용한 검사법은 안테나를 통하여 방출되는 전자파가, 특히 콘크리트 안에 매립되어 있는 철근에 민감하게 반응하는 성질을 갖고 있어, 철근 탐사용으로 쓰이기에 적합한 것으로 평가된다. 그러나, 레이더 검사법은 아직 개발 및 응용의 초기 단계에 있으며, 사용 목적에 맞는 탐사방법 개발을 위한 체계적 연구가 필요하다. 이 논문에서는, 수평과 수직 방향으로 이중 배근 되어있는 콘크리트 시편에 중심 주파수 1 GHz의 전자파를 보내, 수신된 신호를 처리하여, 철근의 위치를 찾아내고 그 실험 결과를 분석한다. 개발된 방법은 기존의 상업용 레이더 시스템에서 처리되는 영상보다 뛰어난 철근 판별력을 보여주었다. 이 같은 레이더를 이용한 콘크리트 구조물 내 철근 탐사는 원자로 구조물과 같은 철근콘크리트 구조물이 시간이 흐름에 따라 노화되거나, 지진과 같이 급작스런 구조적 피해를 입었을 때, 정확한 파손 상태를 알아내는 데 유용하게 사용될 수 있는 기초를 제공하게 된다.

#### Abstract

Radar method has been recently applied to reinforced concrete structures as one of nondestructive testing methods for condition assessment purposes. The method is regarded as an appropriate one for the probing of rebar embedded inside concrete, as the electromagnetic wave is sensitive to metallic objects as the rebar. Still, the radar method is in its early stage of development and application. In this paper, detection of double layered steel reinforcing bars inside concrete specimens is presented using 1 GHz center frequency. The results show that processed data is more exact and clear in identifying the rebar compared to signal processing scheme in commercially available radar systems. The developed method can be used in the assessment of reinforced concrete structures as in a nuclear power plant either deteriorated over its normal life cycle or damaged suddenly by earthquake.

## 1. 서론

비파괴 검사기술은 철근콘크리트 구조물의 품질관리 상태 및 구조안전성을 분석·평가하는 일환으로 활용되고 있다. 비파괴검사방법 중 전자파를 이용한 레이더(Radar)법은 전자기파가 매질 내에서 매질의 특성에 따라 일정한 속도로 전파 또는 반사하는 성질을 이용한다. 매질 속의 목표물이 매질과의 임피던스의 차이에 의해 반사하는 파를 분석·이용하여 목표물을 감지하고 그 위치와 상태를 검사한다 [1, 2]. 주로 선박, 항공, 기상 등 분야에서 이 방법이 이용되고 있으나, 최근에는 지반 내부의 매질물 조사와 콘크리트 구조물 탐사에도 레이더법이 적용되고 있다 [3]. 특히 잇달아 일어나는 지진에 의한 구조물의 피해를 검사하는 것뿐만 아니라 안전성이 요구되는 원자로의 검사를 위해서도 비파괴 검사기술의 필요성이 증가되고 있다.

레이더를 이용한 콘크리트 구조물을 탐색은 부재의 두께, 매립된 철근이나 공동의 위치와 크기 등을 측정할 수 있다 [4].

이 논문에서는 1 GHz의 중심주파수를 갖는 안테나가 연결된 레이더를 이용하여 모르타르 시편 내 철근배근간격 탐색에 관한 결과를 분석한다. 이를 통하여 수평간격을 달리하는 배근상태 탐색에 있어서 레이더의 적용성을 알아보고, 결과분석에 영향을 미치는 요소에 대해서도 논의한다.

## 2. 레이더를 이용한 비파괴 검사의 이론적 배경

### 2.1 콘크리트 내에서의 파의 전파속도

매질 내에서의 전자기파의 속도는 유전상수(permittivity)와 투자율(permeability)로 결정되는데 콘크리트의 전자기적 특성은 주변 자장에 의한 영향을 받지 않아서 전자파가 콘크리트 속에서 전파될 때 유전상수 값에 의해서 속도가 결정된다 [5].

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

$\epsilon_r$  : 유전상수(relative permittivity)

$c$  : 진공에서의 전자파의 속도

( $= 3 \times 10^8$  m/s)

전자파를 이용하는 비파괴검사에서는 전파속도가 측정시간을 결정하고 이것을 바탕으로 해서 물체에 대한 정보를 판별하기 때문에 매질의 전자기적 특성이 미치는 영향 중 중요한 것이라 할 수 있다 [6].

### 2.2 특성임피던스

매질내 경계면에서의 반사파는 각 물질의 임피던스 차이에 의한 반사계수에 따른다. 임피던스도 유전율과 투자율의 상호 관계에 의해서 결정이 되는데 특성 임피던스( $Z$ )와 반사계수( $r$ )는 아래와 같다.

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \quad [\Omega] \quad (2)$$

$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (3)$$

### 2.3 수평해상도

수평해상도(horizontal resolution)는 동일 깊이에 있는 두 물체, 즉 콘크리트의 경우는 주로 철근간격을 구별하는 능력을 말한다. 여기서 제시한 식 (4)에서 식 (6)은 송신기와 수신기가 동시에 작동하는 송수신기(transducer)의 경우에 해당하고 실험에 사용된 bistatic의 경우는 오차가 있다. 식 (4)에서 보면 피복두께가 얇을수록 표면반사가 크므로 최소간격은 커져야 한다 [7].

$$r^2 = \frac{\lambda d}{2} + \frac{\lambda^2}{16} \quad (4)$$

$$r^2 = \frac{150d}{f\sqrt{\epsilon_r}} + \frac{1}{16} \left[ \frac{300}{f\sqrt{\epsilon_r}} \right]^2 \quad (5)$$

$$\text{Horizontal Space} > 2r \quad [\text{m}] \quad (6)$$

d : 피복두께 (m)

f : frequency (MHz)

수평 해상도를 규정하는 또 다른 식은 아래와 같다 [8].

$$\Delta x = 4d \sqrt{\frac{\ln 2}{2 + \alpha d}} \quad (7)$$

$\alpha$  : attenuation factor

식 (6)과 식 (7) 모두 유전상수값에 의해 영향을 받고, 1 GHz 안테나에서 유전상수가 9이고, attenuation factor가 10일 때 12 cm 정도의 값을 나타낸다.

### 2.4 수직 해상도

수직 해상도는 수직방향으로 인접해 있는 두 물체를 구별해 내는 능력, 즉 시간영역에서 두 신호를 구별해 내는 능력을 말한다. 최대 수직 해상도는 식 (8)로 구할 수 있다. 안테나의 수직해상도의 경우도 유전상수의 영향을 받는다 [7].

$$d > \frac{75}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad [\text{m}] \quad (8)$$

### 2.5 레이더의 측정원리

레이더에 의한 탐사는 콘크리트 표면에서 콘크리트 내부를 향해 안테나로부터 전자파를 방사한 후 반사되어 돌아온 신호의 영상을 해석하는 것이다 [9]. 콘크리트 내에 송신된 전자파는 철근, 매설물, 공동 등 각각 유전을 및 도전을 등의 전기적 특성이 다른 물질의 경계에서 반사된다. 그

반사파를 통해 콘크리트 내부에 있는 물체의 위치와 크기 등을 알아 낼 수 있다 [4].

### 3. 실험

#### 3.1 예비 실험체 제작

본 실험에 앞서 예비 실험으로 철근 하나의 시편을 만들어 실험하였다. 예비 실험체는 모르타르로 1 개를 제작하였으며 배합비는 무게비로 물 : 시멘트 : 모래 = 1 : 2.22 : 5.61 이다.

실험체의 크기는 길이 100 cm × 폭 100 cm × 두께 14 cm이다. 실험체 내부에 D13 철근이 시편의 표면에서 철근 중심까지의 거리 4 cm와 6 cm에 매립되어있다 (그림 1).

측정방법은 모르타르 표면에 안테나를 놓고 송신부와 수신부의 방향이 철근의 방향과 맞게 안테나를 진행시킨다.

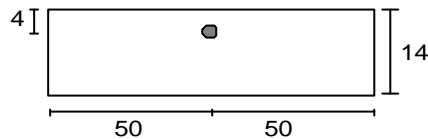


그림 1. 예비 실험체(1) (단위 : cm)

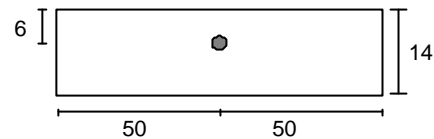


그림 2. 예비 실험체(2) (단위 : cm)

#### 3.2 본 실험체 제작

본 실험체는 수평해상도를 위한 실험체 4개, 수직 해상도를 위한 실험체 4개로 총 8개를 제작하였으며 배합비는 예비실험체와 같고, 시편 크기는 길이 100 cm × 폭 60 cm × 두께 14 cm이다. 레이더의 수평해상도를 측정하기 위하여 그림 3과 같이 D19 철근을 피복두께  $d_1 = 6$  cm에 수평 간격  $l_2$ 를 6 cm부터 3 cm간격으로 매립하였다. 수직해상도를 측정하기 위하여 피복두께  $d_3 = 4$  cm를 기준으로 하여 수직 간격  $d_4$ 를 2 cm부터 2 cm간격으로 매립하였다 (그림 4). 이는 일반 콘크리트 건물의 피복두께를 고려하였고, 안테나의 이론적 수직, 수평 해상도의 1/2와 3/2 사이의 값으로 정한 것이다.

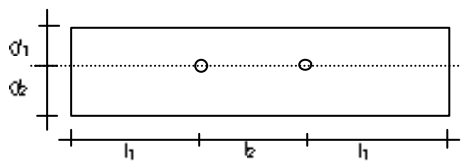


그림 3. 수평해상도 측정을 위한 본 실험체

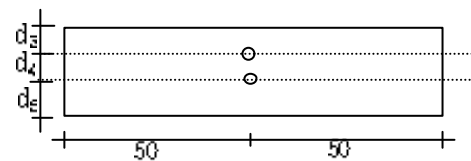


그림 4. 수직해상도 측정을 위한 본 실험체

#### 3.3 실험장비

1 GHz의 중심주파수를 갖는 안테나를 레이더에 연결해서 사용하였다. 1 GHz 안테나는 안테나 상자 내부에 송신 안테나와 수신안테나가 따로 분리되어 있는 형태이며, 수신안테나에서 받은 반사파는 본체 제어부에 저장되고 여기서 측정된 데이터는 신호처리를 위한 데이터 분석용 프로그램에서 분석된다.

### 3.4 실험결과

#### 3.4.1 예비 실험 결과

다음은 양생 8주가 지난 시편 내의 D13의 철근을 탐사한 결과중 중심거리 기준 4 cm와 6 cm의 경우를 나타낸 것이다. 첫번째 그림은 현장에서 직접 얻은 raw data 이고, 두 번째 그림은 신호처리 과정을 거친 data이다. 가로축은 안테나의 진행방향에 따른 거리의 축이고, 세로축은 유전상수값을 이용하여 시간축을 두께의 축으로 변환한 것이다. 여기에 사용된 유전상수 값은 4 cm 경우 11.34와 6 cm의 경우 12.13이다.

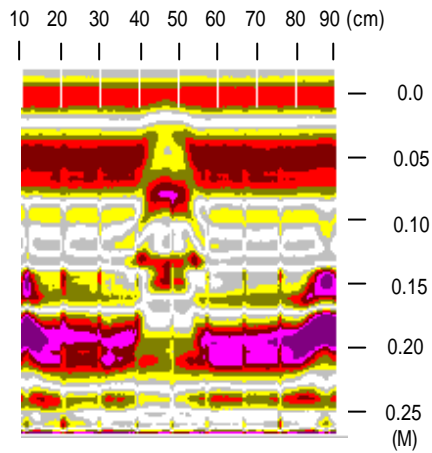


그림 5. Raw data (depth 4 cm)

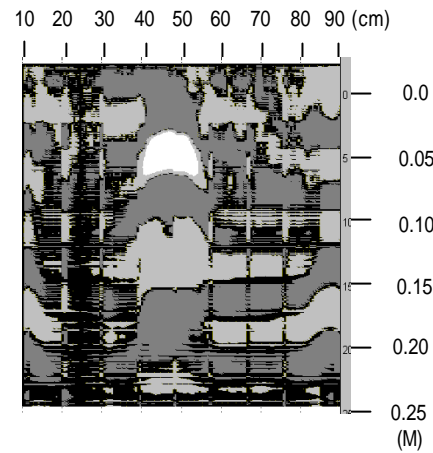


그림 6. Processed data (depth 4 cm)

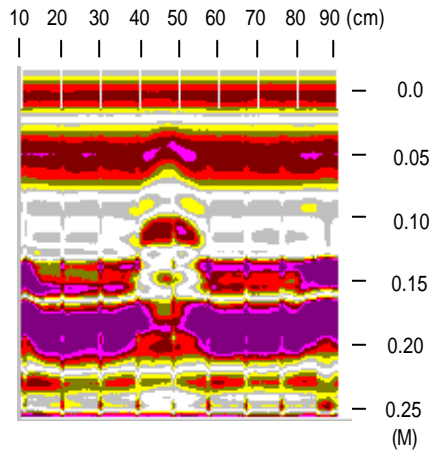


그림 7. Raw data (depth 6 cm)

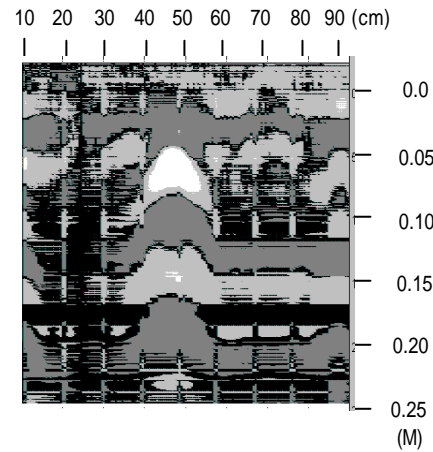


그림 8. Processed data (depth 6 cm)

raw data는 단면상에서 철근의 위치를 판단하기 어렵고, 신호가 변형되어 다중으로 나타나는 링잉(ringing)현상도 생긴다. 신호처리를 거친 data는 noise와 ringing 현상이 상당히 제거된 것을 알 수 있으며, 흰색으로 보이는 부분은 임피던스의 차이에 의해 반사파의 에너지가 커지는 것으로 철근의 위치가 흰색으로 나타나 그 위치를 판별할 수 있었다. 표 1에서 실제 위치는 시편 제작시 생긴 오차로 표기상의 위치와는 차이가 있다. 측정위치는 표면에서 철근의 중심까지의 위치이다.

표 1 철근의 위치와 오차

실제 위치	측정 위치	오차
4.1 cm	4.12 cm	0.5 %
5.6 cm	5.45 cm	2.7 %

#### 4. 결론

원자로와 같은 철근 콘크리트 구조물 (reinforced concrete structures)의 구조적 안전 진단을 위한 방법으로써, 레이더 검사법이 사용될 수 있는 가능성을 레이더 측정 실험을 통해 보여주었다. 콘크리트 안에 매립된 철근의 존재와 위치를 찾는 것은 안전 진단의 일차적 과정이며, 현재의 상업용 레이더 시스템이 제공하는 기술로는 부분적인 성과가 있을 뿐이다.

논문에서는 레이더 검사법의 중요한 과정중 하나인 신호처리 방법을 개발하여, 단일 배근 된 콘크리트 시편에 그 적용 가능성을 실험하였다. 개발된 신호처리법은 기존의 상업용 레이더 시스템에서 보여주는 결과 보다 그 정확도가 뛰어나며, 레이더를 이용한 철근탐사의 기초를 마련하였다.

본 연구는 한국과학재단 (KOSEF)에서 설립한 서울대학교 지진공학연구소 (KEERC)로부터 연구비를 지원받았고 교육부의 1996년도 이공계대학연구소 기자재 첨단화 지원사업에 따라 연세대학교 공과대학 건축과학기술연구소 비파괴구조실험실이 보유하고 있는 장비를 사용하였다.

#### 참고문헌

1. 한국콘크리트학회(1995). 『콘크리트구조물의 비파괴 검사 및 안전진단』, 한국콘크리트학회.
2. Johnson, R.C.(1993). 『Antenna Engineering Handbook』, McGraw-Hill.
3. Bungey, J.H., Shaw, M.R., Millard, S.G. and Thomas, C.(1994). 『Radar Testing of Structural Concrete』, Proceedings of 5th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 12-16, Kitchener, Ontario, Canada.
4. H.C.Rhim, O.Buyukoztu and D.J.Blejer (1995). 『Materials Evaluation, American Society for Nondestructive Testing, Vol. 52, No. 2, pp. 295-299: Remote Radar Imaging of Concrete Slabs with and without a Rebar』.
5. Ulaby, F.T., Moore, R.K. and Fung, A.K. (1982). 『Microwave Remote Sensing Active and Passive, Vol. 2: Radar remote sensing and surface scattering and emission theory』, Addison-Wesley.
6. Fruhwirth, R.K. and Schmöller, R.(1996). 『Some Aspects on the Estimation of Electromagnetic Wave Velocities』, Proceedings of 6th International Conference on Ground Penetrating Radar, September 30-October 3, Tohoku University Faculty of Engineering, Sendai, Japan.
7. H.C.Rhim (1995). 『Experimental Techniques, Society for Experimental Mechanics, Vol. 19, No. 1, pp. 21-22: Radar Imaging of a Cylindrical Concrete Specimen for Nondestructive Testing』.
8. D. J. Daniels(1996). 『Surface-penetrating Radar』 The International Electrical Engineers.
9. 이종득(1996). 『콘크리트 구조물 비파괴검사』, 일광.