

레이더를 이용한 콘크리트내 철근탐사에 관한 기초연구

A Study on Detecting Steel Bars Embedded inside Concrete using Ground Penetrating Radar

이 지 훈* 임 홍 철**
Lee, Ji-Hoon Rhim, Hong-Chul

Abstract

Ground Penetrating Radar (GPR) is a powerful tool with a wide range of applications in the nondestructive testing of concrete. It's useful for the detection of steel bars and delaminations embedded inside concrete, nondestructively.

The purpose of this study is to detect a reinforced bar embedded inside concrete and to determine the range of application using GPR. A concrete specimen used for this study has a 25 mm diameter steel bar and it's dimensions are 1,000 mm (L) × 1,000 mm (W) × 280 mm (D).

The advantages and limitations of GPR in these applications for concrete are also discussed.

1. 서론

비파괴 검사 장비 중에 다양한 용도를 가진 대표적인 장비는 레이더로서 그 원리는 목표물로부터 반사된 전자파를 수신해서 목표물에 관한 정보를 알아내는 것이다. 구조물에 손상을 가하지 않고 검사를 할 수 있기 때문에 레이더의 원리를 잘 이해하고 발전시킨다면 건축, 토목 분야에서도 큰 기여를 할 수 있을 것이다 [1, 2, 3].

레이더를 이용한 지반조사 등의 연구가 최근 들어 활성화되고 콘크리트의 비파괴 검사로서도 적용 가능하다고 생각되어 현재 터널 배면의 공동조사와 같은 연구들이 계속되고 있다 [4, 5]. 또한 콘크리트로 된 건축·토목구조물로 활용범위가 넓어져서 콘크리트내의 결함 및 철근탐색, 그리고 부재의 두께 측정 등과 같은 목적으로 이용될 수 있다 [6].

현재 상용되고 있는 레이더의 기능을 활용하기 위해서는 체계화된 접근이 필요하다. 즉, 레이더의 기본원리와 콘크리트가 전자파의 매질로서 규정되는 방법, 그리고 반사파에 대한 보다 자세한 분석 방법 등에 대한 연구가 상용시스템의 사용과 병행되어야 한다. 이 논문에서는 상용레이더인 GSSI사의 SIR2 시스템에 1 GHz의 중심주파수를 갖는 안테나를 연결하여 콘크리트 내부의 철근탐색에 관한 결과를 분석한다. 이를 통하여 철근위치탐색에 있어서 레이더의 적용성을 알아보고, 결과분석에 영향을 미치는 요소에 대해서도 간단히 논의한다.

2. 레이더에 관한 이론적 배경

2.1 마이크로파의 전파특성

* 연세대학교 건축공학과 대학원 석사과정

** 정희원, 연세대학교 건축공학과 조교수

전자파는 투과되는 매질의 전자기적 특성에 의해 속도와 감쇄가 결정되는데 진공 이외의 매질에서는 진공에서 보다 느린 속도로 투과하게 된다. 자계강도에 대한 전계강도의 비율은 특성임피던스 (η)로 표시되며 이는 재료의 두가지 특성에 의해 결정된다.

$$\eta = \frac{E_o}{H_o} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad [\Omega] \quad (2.1)$$

여기서, E_o : 전계강도 (electric field density) [volts/m]

H_o : 자계강도 (magnetic field intensity) [amperes/m]

μ : 복소투자율 (complex permeability)

ϵ : 복소유전율 (complex permittivity)

2.2 콘크리트의 전자기적 특성

콘크리트의 전자기적 특성에 따라 비파괴검사 결과에 대한 해석이 달라진다. 예를 들면 파가 공기에서 매질로 투과될 때 임피던스의 차이에 의해 경계면에서 에너지가 반사·투과되는데, 이때 매질에서 파의 속도와 파장은 매질의 전자기적 특성에 의해 변한다 [7].

2.2.1 콘크리트 내에서의 파의 전파속도

공기 중에서의 전자파는 빛의 속도로 전파되는데 이 속도는 매질에 따라 달라진다.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon'}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.2)$$

여기서, v : 매질에서의 속도

ϵ' : 유전율 (permittivity)

ϵ_r : 유전상수 (relative permittivity)

c : 진공에서의 전자파의 속도 ($=3 \times 10^8$ m/s)

전자파를 이용하는 비파괴검사에서는 전파속도가 측정시간을 결정하고 이를 통해서 물체를 판별하기 때문에 매질의 전자기적 특성이 미치는 영향중 가장 중요한 것이라 할 수 있다 [7].

2.2.2 콘크리트 내에서의 파장

평면파의 파장 (λ , wavelength)은 식2.3에서 볼 수 있듯이 매질의 유전상수뿐 아니라 주파수 (f , frequency)에도 관련되어 있음을 알 수 있다.

콘크리트의 경우 유전상수가 1보다 큰 수이므로 파장은 공기 중에서 보다 작아진다.

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1}{f} \times \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.3)$$

2.2.3 콘크리트 내에서의 파의 감쇄

콘크리트와 같은 저손실 유전체는 불완전한 절연체이고 이를 이용하여 감쇄상수 (α)를 구해보면 식2.4와 같다.

$$\alpha \cong \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon'}} \quad (2.4)$$

여기서, μ_o : 진공에서 투자율 ($4\pi \times 10^{-7} \text{ Henry/m}$)

σ : 전도율 (conductivity) [S/m]

2.2.4 콘크리트 내에서의 투과깊이

진행 평면파의 진폭이 $e^{-1} = 0.368$ 만큼 감쇄하는 거리 δ 를 표피두께 (skin depth) 또는 투과깊이 (depth of penetration)라고 한다.

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{2}{\sigma} \sqrt{\frac{\epsilon'}{\mu_o}} \quad (2.5)$$

감쇄와 투과깊이는 매질의 전도율과 파의 주파수에 의존하므로 이에 대한 연관성을 파악하는 것이 중요하다 [8].

3. 실험

3.1 실험체 제작

본 실험체의 재료는 콘크리트이며, 크기는 안테나의 edge에 의해 반사되는 파의 영향을 없애기 위해서 송신파의 입사유효면적보다 크게 1,000 mm (L) × 1,000 mm (W) × 280 mm (D)로 제작했다.

그림1에서 볼 수 있듯이 실험체 내부에 지름 25 mm의 철근을 삽입해서 표면으로부터 철근의 위치가 8.75 cm일 때와 16.75 cm일 때를 측정해서 비교한다.

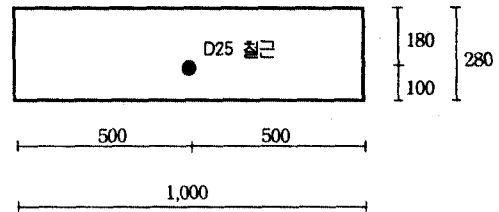


그림 1 실험체 단면도

3.2 실험장비

실험에 쓰인 GPR장비는 미국 GSSI사의 SIR2 시스템이고 1 GHz의 중심주파수를 갖는 안테나를 연결해서 사용하였다.

3.3 실험결과

그림2~5는 레이더로 측정된 데이터를 각 철근의 위치별로 나타낸 것이다.

이렇게 측정된 데이터는 신호처리 (signal processing)의 과정을 거치게 된다. 그 과정에서 noise를 제거하기 위해서 filtering을 하게 되는데 수신 주파수 영역을 정해줌으로써 철근을 구별하는데 용이하게 할 수 있다. 이때 철근과 noise의 수신 주파수 영역이 비슷할 경우 noise는 제거되지 되는데, 많은 경우 noise만을 깨끗하게 제거하는 것은 쉽지 않다 [9].

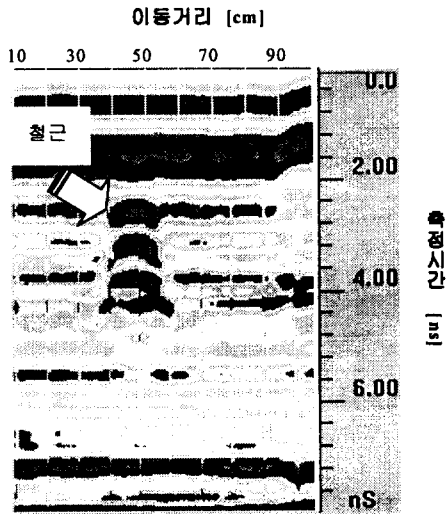


그림 2 철근위치 8.75cm일 때의 화상데이터 분석

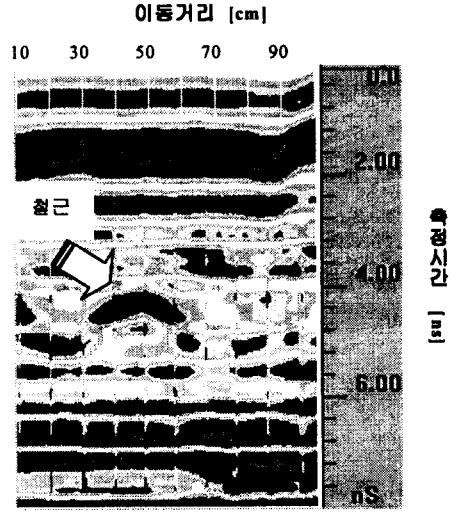


그림 3 철근위치 16.75cm일 때의 화상데이터 분석

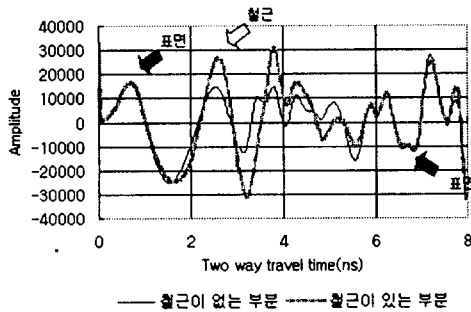


그림 4 철근위치 8.75cm일 때의 oscilloscope 분석

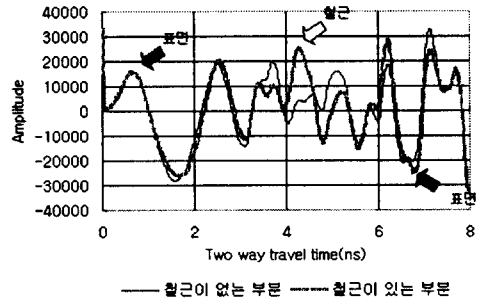


그림 5 철근위치 16.75cm일 때의 oscilloscope 분석

3.4 실험결과 분석

3.4.1 유전상수측정

측정된 데이터를 분석하기 위해서는 실험체의 유전상수값 (ϵ_r)을 알아야 속도측정이 가능하게 되고 이를 통해 거리를 계산할 수 있게 된다. 일반적으로 밝혀진 콘크리트의 유전상수는 6.5~13으로 되어 있으며 이는 수분함량과 배합비 등에 영향을 받는다 [1]. 예를 들어 수분함량이 높을수록 유전상수도 커지게 되므로 이에 대한 보정이 먼저 실시되어야 한다.

실제로 bistatic안테나의 경우 한 방향에서 접근이 가능할 때에는 코어채취를 해서 유전상수를 구하는 것이 가장 정확하다 [1]. 하지만 코어채취가 불가능한 경우가 많고 번거롭기 때문에 이를 각 환경요소별로 데이터베이스를 만드는 연구가 현재 본 연구실에서 진행중이다. 여기에 사용되는 장비는 회로망분석기(Radio Frequency Vector Network Analyzer)로 도파관(waveguide)을 연결해서 측정하면 비금속의 유전상수를 정확하게 측정할 수 있다 [6].

여기에서는 실험체의 두께를 알고 있으므로 이를 통해 유전상수를 구하도록 한다.

$$\epsilon_r = \left[\frac{c}{v} \right]^2 = 10.68 \quad (3.1)$$

여기서, 실험체의 두께(D) = 0.28 [m]

표면 사이의 시간차(ΔT) = $(6.8-0.7) \times 10^{-9}$ [s]

$$v = \frac{D}{\Delta T/2} \text{ [m/s]}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ [m/s]}$$

식3.1에서 구한 실험체의 유전상수는 10.68이며 이는 콘크리트의 유전상수가 6.5~13인 것으로 볼 때 콘크리트 내부의 수분함량이 많은 것으로 생각된다.

3.4.2 철근의 위치산정

철근의 위치는 식3.2에서 볼 수 있듯이 철근에서의 측정시간과 첫 번째 표면(top surface)에서의 측정시간과의 차이로 구할 수 있는데 이때의 시간차는 왕복시간차이므로 1/2을 곱한 값에 속력을 곱하면 철근의 위치가 나오게 된다.

여기서 유전상수는 식3.1에서 구한 10.68을 사용한다.

$$\text{철근위치} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{\Delta T}{2} \quad (3.2)$$

표 1 철근 위치산정

철근의 실제 위치 [cm]	대상	시간차(ΔT) [ns]	철근의 측정 위치 [cm]	철근의 실제위치와 측정위치간의 오차 [%]
8.75	철근-표면	2.58 - 0.7 = 1.88	8.63	1.4
16.75	철근-표면	4.30 - 0.7 = 3.60	16.52	1.4

철근위치를 산정하는 실험에서 실제위치와의 오차는 1.4%로 거의 정확한 위치를 찾아낼 수 있었다. 즉, 유전상수값을 정확히 측정할 수 있으면 철근의 위치를 정확하게 알 수 있다 [7].

그림2-5의 oscilloscope와 화상데이터에서 표면이나 철근의 반사파가 다중으로 나타나는 것을 볼 수 있는데 이를 ringing이라고 한다. 이러한 현상의 원인은 여러 가지가 있는데 주된 원인은 레이더내의 시스템을 통과해서 송출된 신호가 그 과정에서 각 요소의 비선형성과 주파수특성에 따라 변형되어 나타나기 때문이다. 즉, 레이더의 펄스가 특정 주파수대역을 갖는 안테나 등의 시스템 계에 들어오면 그 시스템 계의 고역통과와 저역통과 필터의 주파수특성에 따라 이 계를 통과하면서 파형이 변형되어 생기는 현상이다. 이 외에도 ringing이 발생하는 이유에는 송신기와 송신안테나, 수신기와 수신안테나 등의 불일치 또는 이들 양자간 신호의 다중반사, 그리고 송신안테나와 측정표면간의 왕복 등에 따라서도 발생한다. 따라서 이 현상은 이와 같이 다양한 원인에 의하므로 완전한 제거는 어렵고, 다만 시스템 계의 하드웨어의 개선에 의해서 어느 정도 제어가 가능할 것으로 보인다 [9].

4. 결론

본 연구에서는 GPR의 콘크리트내 철근탐사에 관한 실험적인 연구를 통해 기존 연구결과와의 비교

검토후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 철근은 식2.5에서 볼 수 있듯이 전도율 (conductivity)이 아주 크므로 감쇄상수가 ∞ 에 가깝게 되고 투과깊이는 0에 가깝게 되는 전반사와 비슷한 현상이 발생하므로 파장의 크기에 상관없이 탐색이 가능하다.
- ② oscilloscope의 분석에서 볼 수 있듯이 파가 실험체의 top surface에서 반사될 때와 철근에서 반사될 때 같은 부호를 갖고, bottom surface에서 반사될 때는 다른 부호를 갖게 되는데 이는 다층반사모델을 해석해서 얻는 반사계수의 값에 의해서이다.
- ③ oscilloscope에서 표면반사나 철근반사가 가장 큰 값을 가지지 않는 이유는 각 시간별로 각기 다른 gain을 가지기 때문이다. 각 시간별로 gain을 다르게 하는 이유는 파가 콘크리트내부를 진행함에 따라 감쇄하여 실제로 깊이 있는 물체는 측정이 거의 불가능해지기 때문이다. gain을 크게 해주면 깊이 있는 물체를 찾아 낼 수가 있다. 본 시스템에서는 8개의 gain까지 나눠서 측정이 가능하며 본 데이터도 그 값을 사용했다.
- ④ 레이더로 측정된 데이터를 분석하기 위해서는 유전상수를 정확하게 아는 것이 가장 중요한데 이것을 알아내는 것은 안테나가 bistatic인 경우 코어채취를 함으로써 얻는 것이 가장 정확하다. 하지만 실제로 코어채취가 어렵거나 불가능한 경우가 많기 때문에 이를 위해서 환경요소의 변화에 따른 유전상수를 정리해놓을 필요가 있다. 하지만 정리된 값을 정확하게 적용하는 것도 어려운 과제이다.

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

참고문헌

- [1] M. Krause, Ch. Maierhofer, H. Wiggenhauser, 『Thickness Measurement of Concrete Elements using Radar and Ultrasonic Impulse Echo Techniques』, Proceedings of 6th International Conference Structural Faults and Repair, 1995.7.4
- [2] R. & D. Center, Dongbu Engineering & Construction Co. Ltd, 『Case Studies on the application of Ground Penetrating Radar Technology in Detection of Underground Utilities and Structure Safety Diagnosis』, Proceedings of 6th International Conference Structural Faults and Repair, 1995.7.4
- [3] U.B. Halabe, R.H.L. Chen, V. Bhandarkar, Z. Sami, 『Radar Signal Processing and Analysis for Evaluation of Reinforced Concrete Bridge Decks』, Proceedings of 5th International Conference on Ground Penetrating Radar, 1994.6.12-16
- [4] 이종득, 『콘크리트 구조물 비파괴검사』, 일광, 1996.4
- [5] Daewoo Institute of Construction Technology, 『Model Test for Inspecting and Estimating Tunnel Lining using GPR』, Proceedings of 6th International Conference on Ground Penetrating Radar, 1996.9.30-10.3
- [6] J.H. Bungey, M.R. Shaw, S.G. Millard, C. Thomas, 『Radar Testing of Structural Concrete』, Proceedings of 5th International Conference on Ground Penetrating Radar, 1994.6.12-16
- [7] R.K. Fruhwirth, R. Schmöller, 『Some Aspects on the Estimation of Electromagnetic Wave Velocities』, Proceedings of 6th International Conference on Ground Penetrating Radar, 1996.9.30-10.3
- [8] I.J. Padaratz and M.C. Forde, 『Influence of Antenna Frequency on Impulse Radar Surveys of Concrete Structures』, Proceedings of 6th International Conference Structural Faults and Repair, 1995.7.4
- [9] 박석균, 임홍철, 『전자파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴검사』, 콘크리트학회지 제10권2호 특집 : 건축 토목구조물의 비파괴 검사방법, 1998.4