

## 콘크리트 내부 탐사를 위한 전자기파의 2차원 모델링 2-D Modeling of Electromagnetic Waves for the Probing of Concrete

조 윤 범 \*  
Jho, Youn-Bum

임 홍 철 \* \*  
Rhim, Hong-Chul

---

### ABSTRACT

The radar method is becoming one of the major nondestructive testing (NDT) techniques for concrete structures. Numerical modeling of electromagnetic wave is needed to analyze radar measurement results and to study the influence of measurement parameters on the radar measurements. Finite difference-time domain (FD-TD) method is used to simulate electromagnetic wave propagation through concrete specimens. Three concrete specimens with a 19.1 mm rebar embedded at 40 mm, 60 mm, and 80 mm depth are modeled in 3-dimension. As results, 2-D image processing scheme of modeling data has been developed and applied to the imaging of steel bars inside concrete.

*Keywords : Radar, Modeling, Finite difference-time domain method, Nondestructive Testing, Concrete*

---

### 1. 서 론

건축 구조물의 내부 진단을 위한 레이더법은 수 MHz에서 수백 MHz의 고주파수의 전자기파를 이용하여 검사대상인 지중이나 콘크리트 내로 전파시켜 반사되어 돌아오는 파를 분석하는 방법이다. 본 연구는 레이더 실험을 컴퓨터 모델링을 통해서 시뮬레이션하는 것으로, 이러한 모델링 결과는 레이더 측정을 통해서 얻은 결과를 판독할 수 있는 능력을 향상시킬 수 있는 보조수단이 된다<sup>(1)</sup>.

전자기파의 모델링에는 준정적방법 (Quasi-static method), 모멘트법 (Moment method), Spectral domain approach (SDA)와 같이 맥스웰 방정식을 해석적으로 모델링하는 방법과 유한요소법 (Finite element method), 전송선로법 (Transmission line method), Method of line, 유한차분 시간영역법 (Finite difference - time domain method) 등과 같이 수치적으로 모델링하는 방법이 있지만, 본 연구에서는 컴퓨터로 프로그래밍 하기 용이하며 한번의 시뮬레이션으로 넓은 주파수 대역의 특성을 파악할 수 있고, 모델링의 기하학적 제한이 적기 때문에 전자기적 문제의 해석에 널리 사용되고 있는 유한차분 시간영역법을 사용하였다.

모델링의 최종 목표는 실제 결과와 모델링 결과를 비교하여 분석하는데 있을 것이다. 본 연구에서는 기존 연구를 바탕으로 이러한 목표에 좀더 접근하기 위해 2차원 영상화를 연구하였다. 기존에 진행되었던 모델링에서 두께측정과 철근 탐사, 공동 탐사의 경우를 각각 모델링하여 1차원그래프를 사용하여 분석한 결과, 최대 2.4 %의 오차로 매우 정확한 결과를 얻을 수 있었다<sup>(2)</sup>. 본 연구에서는 콘크리트의 내부에 단근 철근이 있

---

\* 연세대학교 건축공학과 박사과정

\* \* 정희원 · 연세대학교 건축공학과 부교수

을 경우를 가정하여 모델링한 후, 그 결과를 2차원으로 영상화하여 실제 레이더 측정에서 얻는 영상과 비교 분석하고자 한다.

## 2. 유한차분 시간영역법 이론

유한차분 시간영역법(FD-TD법)은 유한 공간 체적에 대하여 맥스웰 방정식을 이산화하고, 그 도함수에 중심차분 근사(Centered difference approximation)를 사용, 근사화하여 수식화하는 방법으로 다양한 전자기적 문제를 해석하는데 사용되고 있다 .

유한차분 시간영역 방정식은 전자파를 해석하기 위해서는 맥스웰(Maxwell)의 편미분 방정식을 기본으로 하며, 맥스웰 방정식을 유한차분 시간영역법으로 풀기 위해서는 전계와 자계의 각 성분을 시간과 공간으로 이산화시켜야 한다. 시간과 공간에 관한 성분을 다음의 표기법을 사용하여 이산화하면 식 (1)과 같이 표현할 수 있다 <sup>(3)</sup>.

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (1a)$$

$$t_n = n\Delta t \quad (1b)$$

$$u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = u^n_{i,j,k} \quad (1c)$$

여기서,  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  : 각 x, y, z 방향의 공간이산간격  
 $\Delta t$  : 시간축의 이산간격이다

이산화된 맥스웰의 1차 편미분 방정식을 계산하기 위해 격자구조(Yee's Mesh)에 중심차분 근사를 적용하며, 이런 Yee Algorithm을 통해 3차원의 맥스웰 편미분 방정식을 6개의 유한차분 시간영역의 방정식으로 나타낼 수 있다 <sup>(4)</sup>. 그 예로, 다음의 식 (2)은 x축 방향의 전기장  $E_x$ 의 유한차분 방정식이며, 식 (3)는 y축 방향의 자기장  $H_y$ 의 유한차분 방정식이다<sup>(3), (5)</sup>.

$$E_x|_{i,j,k}^{n+1} = \left( \frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k}\Delta t}{2\epsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k}\Delta t}{2\epsilon_{i,j,k}}} \right) E_x|_{i,j,k}^n + \left( \frac{\frac{\Delta t}{\epsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k}\Delta t}{2\epsilon_{i,j,k}}} \right) \times \left[ \frac{H_z|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i,j-1/2,k}^{n-1/2}}{\Delta y} - \frac{H_y|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i,j,k-1/2}^{n-1/2}}{\Delta z} \right] \quad (2)$$

$$H_y|_{i,j,k}^{n+1/2} = \left( \frac{1 - \frac{\rho'_{i,j,k}\Delta t}{2\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k}\Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) H_y|_{i,j,k}^{n-1/2} + \left( \frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k}\Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) \times \left[ \frac{E_z|_{i+1/2,j,k}^n - E_z|_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} - \frac{E_x|_{i,j,k+1/2}^n - E_x|_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z} \right] \quad (3)$$

여기서,  $\rho'$  : Magnetic resistivity [ohms/meter]  
 $\sigma$  : Electric conductivity [siemens/meter]

### 3. 유한차분 시간영역법을 이용한 수치해석

본 연구에서는 입사파(Incident wave)로 전자기파 모델에 많이 이용되는 가우시안 펄스(Gaussian pulse)를 사용하였다. 가우시안 펄스는 주파수 영역에서 여러 가지 주파수의 조합을 가지기 때문에 넓은 주파수 영역에 걸친 특성을 얻을 수 있고, 시간폭(Pulse width)과 주파수 대역폭(Bandwidth)의 조절이 간단하기 때문에 전자기파 모델링의 입사파로 널리 이용되고 있다. 전자기파 모델링에 사용되는 가우시안 펄스는 식 (4)와 같다.

$$V(t) = e^{-\frac{(t-t_0)^2}{\tau^2}} \quad (4)$$

여기서,  $t_0$  : Time delay (sec)

$\tau$  : Pulse width (sec)

본 연구에서 사용한 가우시안 펄스는 식 (5)이며, 이는 식 (4)을 FD-TD 프로그램에 맞게 변형한 것이다. 식 (5)에서는 Time delay가  $\beta \cdot \Delta t$ 이며, Decay factor는  $\frac{\beta \Delta t}{4}$ 가 된다 (그림 1) <sup>(4)</sup>. 가우시안 펄스는 삼차원 공간에서 그림 2와 같은 평면 전자기파(Plane electromagnetic wave)의 형태로 진행된다.

$$V(t) = A \cdot e^{-\frac{(t-\beta \Delta t)^2}{(\frac{\beta \Delta t}{4})^2}} \quad (5)$$

여기서,  $\beta$  : Temporal width of Gaussian pulse

$\Delta t$  : 시간간격 (sec)

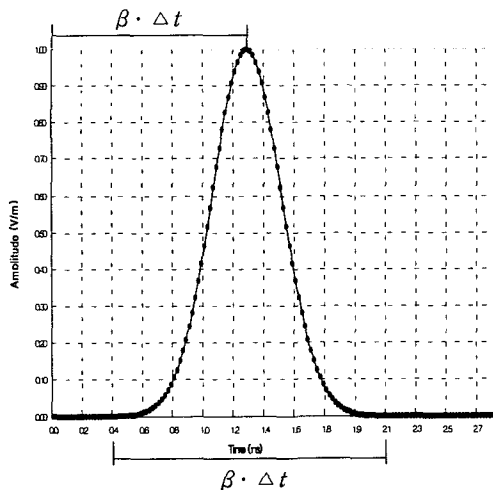


그림 1. 프로그램 상에서의 가우시안 펄스

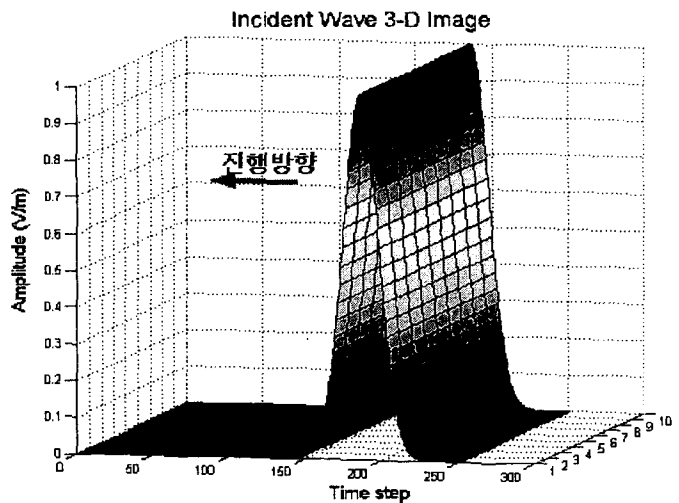


그림 2. 3차원 공간에서의 가우시안 펄스

## 4. 모델링 - 철근의 피복두께 탐사

### 4.1 시편과 계산영역

철근 탐사 모델링은 기존 레이더 실험 연구에 사용된 시편을 대상으로 하였으며, D19(직경 19.1 mm 철근) 철근 1개가 들어있는 경우로 모델링하였다. 실제 시편의 크기는 길이 1000 mm × 폭 1000 mm × 두께 140 mm로 각 시편에 대한 자세한 사항은 다음의 표 1, 그림 3과 같다<sup>(5)</sup>.

표 1. Mortar Specimens (Unit: mm)

Specimens	Inclusion	Distance from surface to center of a steel bar
Specimen 1	none	.
Specimen 2	D19 steel bar	$d_1 = 40$
Specimen 3	D19 steel bar	$d_2 = 60$
Specimen 4	D19 steel bar	$d_3 = 80$

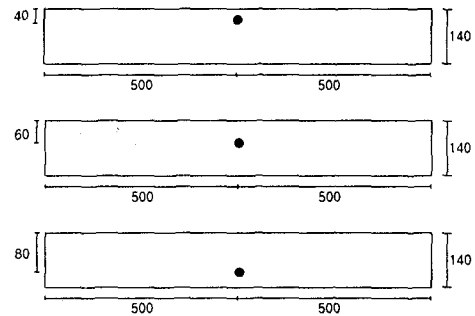
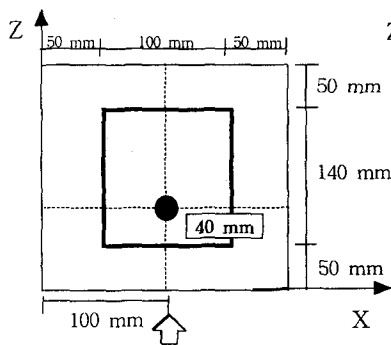


그림 3. Section of Specimens (Unit: mm)

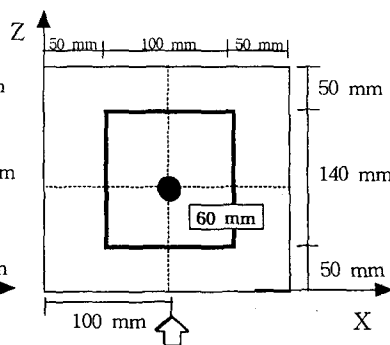
모델링은 실제 시편과 동일하게 철근의 피복두께를 40 mm, 60 mm, 80 mm의 세 가지 경우를 모델링하였으며, 이전의 두께 측정 모델링 결과를 바탕으로 계산영역에서 하나의 셀 간격은 1 mm를 기본으로 정한다. 해석의 정확도를 위해 세 축 모두 동일한 셀 간격을 갖도록 정하였다. 시편 전체를 모델링 할 경우, 프로그램의 메모리 한계를 초과하여 계산이 불가능하기 때문에, 그림 4와 같이 전체 계산영역에서 x축과 y축 부분을 축소하여 계산영역을 설정하였다. 축소된 계산영역은 실제 크기 200 mm × 100 mm × 240 mm (200 cells × 100 cells × 240 cells)로 정하였다. 또한, 이전의 두께 측정 모델링 결과에서 파장( $\lambda$ )과 두께의 비가 0.5 이하일 때 정확한 결과를 얻을 수 있었다<sup>(2)</sup>. 따라서, 모델링하고자 하는 피복두께의 최소값인 40 mm를 기본으로 하여 파장을 20 mm로 정하였다(파장/두께=0.5를 이용).

철근 탐사를 위한 시편은 유전상수가 9인 유전체로서 100 mm × 100 mm × 140 mm의 크기 안에 직경 19 mm인 철근 하나가 내부에 있다고 가정하여, 철근의 피복두께를 측정 변수로 사용하였다.



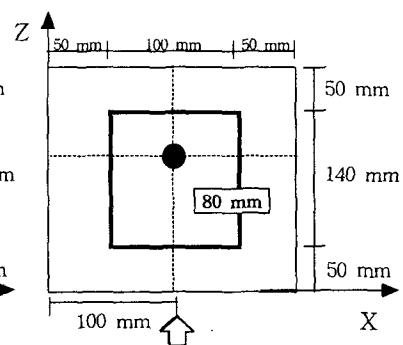
Incident Wave

그림 4. 피복두께 40 mm



Incident Wave

그림 5. 피복두께 60 mm



Incident Wave

그림 6. 피복두께 80 mm

#### 4.2 모델링 데이터 측정 포인트

2차원 영상화를 위해서 다음 그림 7과 같이 3차원 공간 X, Y, Z축 상에서 y 좌표는 시편의 중앙이 되는 50으로, z 좌표는 계산영역의 시작점인 1로 하며, x 좌표를 위치 x=51 에서부터 x=151 까지 100개의 좌표로 모델링하여 결과를 측정하였다.

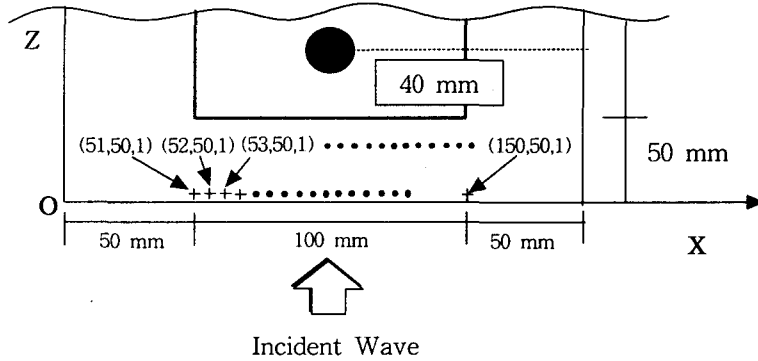


그림 7. 데이터 측정 포인트

#### 4.3 모델링 결과 및 실제 결과와 비교

본 논문은 2차원 영상화에 대한 연구이기 때문에, 피복두께에 따른 세 개의 시편을 모델링 결과에 대한 1차원 그래프에 대한 분석은 언급하지 않도록 하겠다. 모델링을 통해서 얻은 100개의 1차원 데이터를 실제 시편 크기에 맞도록 확장하여 2차원으로 영상화하였다. 다음 그림은 세 개의 시편 중 피복두께가 6 cm 일 때의 결과를 각각 비교한 것이다.

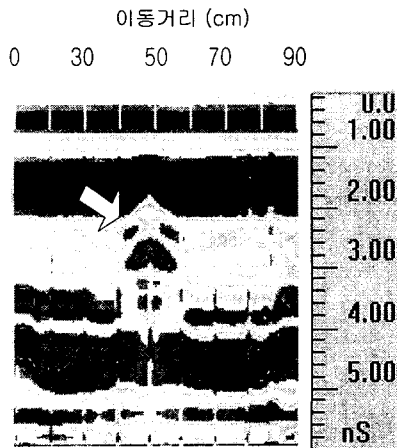


그림 8. Raw Data  
(피복두께 6 cm)

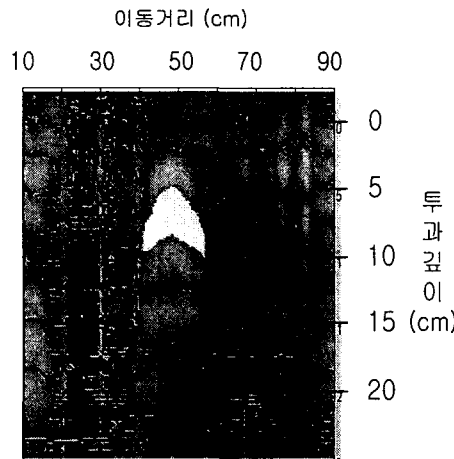


그림 9. Signal Processed Data  
(피복두께 6 cm)

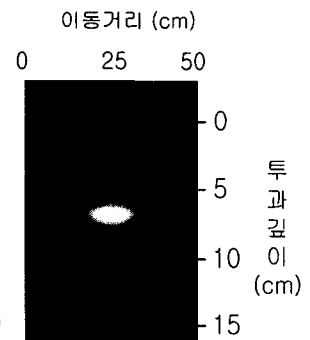


그림 10. Modeling Data  
(피복두께 6 cm)

그림 8은 1 GHz 안테나를 사용한 레이더 측정 시, 현장에서 직접 얻은 raw data 이고, 그림 9는 신호처리 과정을 거친 data이다. 세로축은 유전상수값을 이용하여 시간축을 거리의 축으로 변환한 것이다. 여기에 사용된 유전상수 값은 11.96이다. raw data에서 철근의 존재는 확인할 수 있으나 철근의 정확한 위치를 판별해 내기는 쉽지 않다. 신호처리를 거친 data(그림 9)는 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 비교적 정확히 판별할 수 있었다.

그림 10은 유한 차분 시간 영역법을 사용한 모델링 결과를 2차원으로 나타낸 영상화 결과이다. 그림 9의 결과와 비교해 볼 때, 철근의 위치가 흰색으로 나타났으며 실제 결과와 유사한 모델링을 통해서 레이더 실측 결과를 검증할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 이상과 같이 유한차분 시간영역법을 사용하여 철근 위치 측정을 할 때 전자기파의 전파를 모델링하여 그 결과를 영상화하였다. 모델링시 수평방향으로 적절한 개수의 데이터를 얻을 수 있다면 모델링 결과의 2차원 영상화가 가능함을 알 수 있었으며, 실제 결과보다 Noise나 Ringing이 없는 영상을 얻을 수 있었다.

본 연구를 통해서 콘크리트 내부에 철근이 있을 경우의 레이더 영상을 이론적으로 예측해 볼 수 있었다. 본 영상화 과정에서는 계산 영역을 실제보다 축소하여 모델링하였지만, 실제 크기에 맞는 데이터를 얻기 위해서 프로그램의 해석시간 단축과 프로그램의 계산 메모리 한계에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

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 기자재를 사용하였다.

## 참 고 문 헌

1. O. Buyukozturk and H. C. Rhim, "Modeling of Electromagnetic Wave Scattering by Concrete Specimens", Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 5, pp. 1011~1022, 1995
2. 임홍철, 조운범, "유한차분 시간영역법을 이용한 콘크리트의 두께측정과 철근위치 탐사를 위한 전자기파 전파 모델링", 한국전산구조공학회 논문집, 제 12 권, 제 4 호, pp. 639~648, 1999년 12월
3. A. Taflove, *Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method*, Artech House, Boston · London, 599 p., 1995
4. K. S. Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-14, No. 3, pp. 302~307, 1996
5. K. Li, M. A. Tassoudji, R. T. Shin and J. A. Kong, "Simulation of Electromagnetic Radiation and Scattering Using a Finite Difference Time Domain Technique", Computer Applications in Engineering Education, Vol. 1, pp. 45~63, 1992
6. H. C. Rhim and K. H. Park "Imaging of Steel Bars Embedded inside Mortar Specimens for Nondestructive Testing" KCI Concrete Journal, Korea Concrete Institute, Vol. 12, No. 1, pp. 139~144, 2000