유한차분 시간영역법을 이용한 콘크리트의 두께측정과 철근위치 탐사를 위한 전자기파 전파 모델링

A Study on Using Finite Difference-Time Domain Modeling of Electromagnetic Wave Propagation for Thickness Determination and Rebar Detection in Concrete Specimens

임 홍 철* 조 윤 범**
Rhim, Hong-Chul Jho, Youn-Bum

요 지

레이더법은 건축구조물에 대한 비파괴 검사의 대표적인 방법의 하나이다. 레이더법을 이용하는데 영향을 주는 요인들을 연구하고, 레이더로 측정된 결과들을 분석하기 위해서는 전자기파의 전파에 대한 수치적인 모델링을 통한 이론적인 접근이 필요하다. 콘크리트 시편에 전파되는 전자기파를 모델링하기 위해 유한차분 시간영역법을 적용하고자 한다. 유한차분 시간영역법은 전자파 해석과 모델링을 통한 시뮬레이션에 매우 유용한 방법이다. 본 연구에서는 유한차분 시간영역법을 이용하여 두께가 다른 4개의 시편과 두께는 100 mm로 동일하고 피복두께가 다른 3개의 시편을 3차원으로 모델링하였다. 두께 측정 모델링 결과에서는 계산영역의 셀간격과 입사파의 파장/콘크리트 시편의 두께값이 모델링의 정확성에 미치는 영향을 알 수 있었다. 철근이 있는 시편의 모델링에서는 0.08%~0.5%의 오차로 철근의 위치를 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 레이더, 모델링, 유한차분 시간영역법, 비파괴 검사, 콘크리트

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 measurent results and to study the influence of measurement parameters on the radar measurements. Finite difference-time domain (FD-TD) method can be used to simulate electromagnetic wave propagation through concrete specimens. Four concrete specimens with different thickness and three concrete specimens with a 25 mm diameter steel reinforcing bar embedded at 100 mm depth are modeled in 3-dimension. Through this study, the effect of cell size and the ratio of wavelength to concrete target thickness has been examined quantitatively. For the specimens with a steel bar, the location of the bars has been successfully identified with 0.08%~0.5% error.

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

* 정회원 · 연세대학교 건축공학과, 조교수
** 연세대학교 공과대학 건축과학기술연구소, 연구원

· 이 논문에 대한 토론을 2000년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2000년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

건축구조물은 시간이 지날수록 노화하여 그 구조적 성능이 저하되는데, 이러한 건축구조물의 내구성을 진단하기 위해서 각종 비파괴 검사기술이 사용된다. 비파괴 검사 방법 중, 전자파 시험법은 비접촉 주사방식으로 건물의 손상 없이 검사가 가능하여 매우 선호되고 있으며, 그 방법으로는 레이더법, 방사선법, 전자유도법, 적외선법 등이 대표적이다. 이 중 레이더법은 콘크리트 내의 철근 및 공동의 탐색, 터널 배면의 공동조사, 부재의 두께 측정 등 여러 방면에 적용 가능하다[1].

레이더법은 수 MHz에서 수백 MHz의 고주파수의 전자기파를 검사대상인 지중이나 콘크리트 내로 전파시켜 반사되어 돌아오는 파를 분석하는 방법이다. 전자파를 이용한 비파괴 검사법의 개발은 이론에 기초한 컴퓨터 모델링을 통해서 효과적으로 이루어질 수 있다. 전자파가 콘크리트 안에서 진행하는 모습을 영상화 할 수 있다면 이는 레이더 실측자료를 분석하는데 도움을 줄 수 있다. 또한, 컴퓨터 모델링을 통해서는 콘크리트 안에서의 레이더의 분해능과 측정깊이를 결정하는 요인들인 전자파의 주파수, 대역폭, 주사폭, 편파, 입사각도, 측정거리, 측정대상의 기하학적·재료적 성질 등이 실제 레이더 측정결과에 어떤 영향을 미치는지를 분석할 수 있다[2].

전자기파의 모델링은 여러 방법으로 시도될 수 있다. 그 대표적인 방법들로는 준정적방법(Quasistatic 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 있다.

해석적 모델링 방법은 해석적 해를 구하기까지 많은 과정이 요구되며 해석 가능한 기하학적 구조가 제한되어 있는 반면, 수치적 모델링 방법은 컴퓨터 구현이 용이하여 기하학적 구조에의 제한성이 적기 때문에 최근에 모델링이 복잡해짐에 따라 많이 사용되고 있다[3].

본 연구에서는 수치적 모델링 방법 중에서도 시간영역에서 전자파의 진행을 시각화 할 수 있는 유한차분 시간영역법(Finite difference-time domain method, 이하 FD-TD법)을 사용하여 모델링하고자 한다. FD-TD법은 맥스웰 방정식을 시간의 함수로 풀이하여 직접 이산화시킨 후 계산영역 안에서 전기장과 자기장의 값을 구하는데 그 기초를 두고 있다. 또한, 컴퓨터로 프로그래밍하기 용이하며 한 번의 시뮬레이션으로 넓은 주파수 대역의 특성을 파악할 수 있고, 모델링의 기하학적 제한이 적기 때문에 전자기적 문제의 해석에 널리 사용되고 있는 방법이다[1].

비파괴 검사시 기본이 되는 두께의 측정과 콘크리트 내의 철근 탐사의 경우를 가정하여, 콘크리트 시편에 전자기파를 전파시키고 그 반사파를 통해 분석하는 과정을 유한차분 시간영역법을 사용하여 3차원으로 모델링하여 그 결과를 분석하기로 한다.

2. 유한차분 시간영역법 이론

유한차분 시간영역법이란 시간적 변화를 갖는 맥스웰 방정식을 유한차분 방정식으로 변환하여 시간과 공간에서 동시에 이산화 시키는 방법으로 등방성 매질에서의 전자파 산란문제에 이 방법을 처음 적용한 이후, 전자파의 모델링에 많이 이용되고 있다[4]. FD-TD법은 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[5].

2.1 유한차분 시간영역 방정식

전자파를 해석하기 위해서는 맥스웰의 편미분 방정식을 기본으로 하며, 시변계에서의 맥스웰 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E} \tag{1a}$$

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H} \tag{1b}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \tag{1c}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{1d}$$

여기서, $\vec{E}$: 전계강도 (Electric field density) [volts/meter]

$\vec{H}$: 자계강도 (Magnetic field intensity) [amperes/meter]

$\vec{D}$: 전속밀도[coulombs/meter^2], $\vec{D}=\varepsilon\vec{E}$

ε : 유전율 [farads/meter]

$\vec{B}$: 자속밀도[webers/meter^2], $\vec{B}=\mu\vec{H}$

μ : 투자율 [henrys/meter]

위의 맥스웰 방정식을 3차원 직각좌표계로 전개하면, 모두 6개의 편미분방정식을 얻게 된다. 이 맥스웰 방정식을 유한차분 시간영역법으로 풀기 위해서는 전계와 자계의 각 성분을 시간과 공간으로 이산화시켜야 한다. 시간과 공간에 관한 성분을 다음의 표기법을 사용하여 이산화하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$(i,j,k) = (i\triangle x, j\triangle y, k\triangle z) \tag{2a}$$

$$t_n = n\triangle t \tag{2b}$$

$$u(i\triangle x, j\triangle y, k\triangle z, n\triangle t) = u^{\,n}_{i,j,k} \tag{2c}$$

$\triangle x$, $\triangle y$, $\triangle z$ $\triangle t$는 각 x, y, z 방향의 공간이산간격이며, 는 시간축의 이산간격이다.

이산화된 맥스웰의 1차 편미분 방정식을 계산하기 위해 그림 1과 같은 격자구조(Yee's Mesh)에 중심차분 근사를 적용하였다[4]. 이 격자구조의 3차원의 공간에서 각각의 $\vec{E}$요소들은 4개의 $\vec{H}$요소로 둘러싸여져 있고, 각각의 $\vec{H}$요소들은 4개의 $\vec{E}$요소로 둘러싸여져 있으며, 전계와 자계 성분은 공간축 상에서 서로 반공간($\triangle x/2$, $\triangle y/2$, $\triangle z/2$)씩, 시간축 상에서 반시간($\triangle t/2$)씩 엇갈리게 배치된다. 이를 Leap-frog 알고리즘이라 한다[3), 6)].

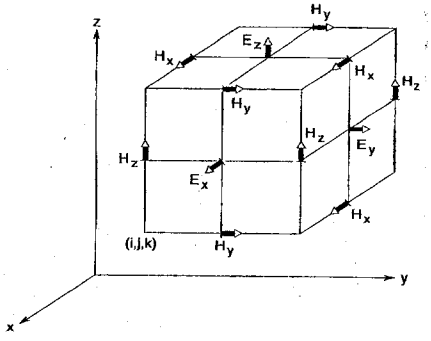

그림 1 직각 좌표계에서의 Yee's mesh

Yee 알고리즘을 이용하여 3차원의 맥스웰 편미분 방정식을 6개의 유한차분 시간영역의 방정식으로 나타낼 수 있다. 그 예로, 다음의 식 (3)은 x축 방향의 전기장 E_x의 유한차분 방정식이며, 식 (4)는 y축 방향의 자기장 H_y의 유한차분 방정식이다.

$$E_x|^{\,n+1}_{i,j,k} = \left(\frac{1-\frac{\sigma_{i,j,k}\triangle t}{2\,\varepsilon_{i,j,k}}}{1+\frac{\sigma_{i,j,k}\triangle t}{2\,\varepsilon_{i,j,k}}}\right) E_x|^{\,n}_{i,j,k} + \left(\frac{\frac{\triangle t}{\varepsilon_{i,j,k}}}{1+\frac{\sigma_{i,j,k}\triangle t}{2\,\varepsilon_{i,j,k}}}\right) \times \left[\frac{\frac{H_z|^{\,n+1/2}_{i,j+1/2,k} - H_z|^{\,n-1/2}_{i,j-1/2,k}}{\triangle y} - \frac{H_y|^{\,n+1/2}_{i,j,k+1/2} - H_y|^{\,n-1/2}_{i,j,k-1/2}}{\triangle z}}{\triangle z}\right] \tag{3}$$

$$H_y|^{\,n+1/2}_{i,j,k} = \left(\frac{1-\frac{\rho'_{i,j,k}\triangle t}{2\,\mu_{i,j,k}}}{1+\frac{\rho'_{i,j,k}\triangle t}{2\,\mu_{i,j,k}}}\right) H_y|^{\,n-1/2}_{i,j,k} + \left(\frac{\frac{\triangle t}{\mu_{i,j,k}}}{1+\frac{\rho'_{i,j,k}\triangle t}{2\,\mu_{i,j,k}}}\right) \times \left[\frac{\frac{E_z|^{\,n}_{i+1/2,j,k} - E_z|^{\,n}_{i-1/2,j,k}}{\triangle x} - \frac{E_x|^{\,n}_{i,j,k+1/2} - E_x|^{\,n}_{i,j,k-1/2}}{\triangle z}}{\triangle z}\right] \tag{4}$$

여기서, ρ': Magnetic resistivity [ohms/meter]

σ : Electric conductivity [siemens/meter]

2.2 안정조건(Stability)

중심차분 근사를 이용하여 식 (3)의 근사식을 얻어낼 때 각 공간과 시간 스텝 간에 2차 오차가 발생한다. 각 스텝과의 오차가 축적되지 않기 위해서

최대시간스텝은 유한차분 방정식들의 안정조건 식 (5)에 의해 제한된다[3), 6)].

$$\triangle t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\triangle x)^2}+\frac{1}{(\triangle y)^2}+\frac{1}{(\triangle z)^2}}} \quad (5)$$

2.3 흡수경계조건(ABC)

FD-TD법을 이용하는 전자파의 해석에 있어서 컴퓨터의 메모리 용량과 계산시간에 의한 제한이 있기 때문에 우선 해석구조에 대해 유한의 크기를 가진 계산영역을 지정해야만 한다[3)]. 그러나 중심차분법은 계산영역 경계선에서 바깥 경계의 성분을 필요로 한다. 한편 이것들의 경계면은 어디까지나 FD-TD 모델링을 행하기 위해 의논되어진 것이기 때문에 물리적인 경계가 존재하는 것은 아니다. 따라서 이것들의 면에 대해서는 반사가 발생하지 않고 전자파가 흡수되어지도록 특별한 처리를 행해야만 한다. 이를 위해서 FD-TD의 해석영역의 외측의 경계에 대한 전계, 자계성분에 대해서는 흡수경계조건(ABC, Absorbing boundary condition)을 적용하여 특별히 계산할 필요가 있다.

본 연구에 사용된 경계조건은 Mur의 1,2차 흡수경계조건으로 식 (6)은 3차원 직각좌표계에서 x=0인 경계면에 대한 Mur의 2차흡수경계조건을 나타낸다[6),7)].

$$\begin{aligned} W|_{0,j,k}^{n+1} = & -W|_{1,j,k}^{n-1}+\frac{c\triangle t-\triangle x}{c\triangle t+\triangle x}\left(W|_{1,j,k}^{n+1}+W|_{0,j,k}^{n-1}\right) \\ & +\frac{2\triangle x}{c\triangle t+\triangle x}\left(W|_{0,j,k}^{n}+W|_{1,j,k}^{n}\right) \\ & +\frac{(c\triangle t)^2\triangle x}{2\triangle y^2(c\triangle t+\triangle x)} \\ & \times\left[\begin{array}{l} W|_{0,j+1,k}^{n}-2W|_{0,j,k}^{n}+W|_{0,j-1,k}^{n}+ \\ W|_{1,j+1,k}^{n}-2W|_{1,j,k}^{n}+W|_{1,j-1,k}^{n} \end{array}\right] \\ & +\frac{(c\triangle t)^2\triangle x}{2\triangle z^2(c\triangle t+\triangle x)} \\ & \times\left[\begin{array}{l} W|_{0,j,k+1}^{n}-2W|_{0,j,k}^{n}+W|_{0,j,k-1}^{n}+ \\ W|_{1,j,k+1}^{n}-2W|_{1,j,k}^{n}+W|_{1,j,k-1}^{n} \end{array}\right] \end{aligned} \quad (6)$$

해석영역이 x, y, z축으로 a×b×c 크기의 직사각형 영역일 때, x=0 이외에 x=a, y=0, y=b, z=0, z=c의 해석영역의 각 경계면에 대해 식 (6)과 같은 방법으로 경계조건 식을 얻을 수 있다.

3. 유한차분 시간영역법을 이용한 수치해석

3.1 입사파 (Incident Wave)

본 연구에서는 전자기파 모델에 많이 이용되는 가우시안 펄스(Gaussian pulse)를 입사파로 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 (7)과 같다.

$$V(t) = e^{-\frac{(t-t_0)^2}{\tau^2}} \quad (7)$$

여기서, t_0 : Time delay (sec)

τ : Pulse width (sec)

식 (7)의 가우시안 펄스를 유한차분 시간영역법에서 사용하기 위해 $u(i\triangle x, j\triangle y, k\triangle z, n\triangle t)=u_{i,j,k}^{n}$와 $t_n = n\triangle t$의 유한차분 표현을 사용하여 나타내면 식 (8)과 같다. 이 때, Time step delay n_0가 $n_0 \geq 3n_{decay}$를 만족시켜야 전체 가우시안 펄스를 나타낼 수 있다[6)].

$$E_z|_{is}^{n} = E_0\, e^{-(\frac{n-n_0}{n_{decay}})^2} \quad (8)$$

여기서, n_0 : Time step delay

n_{decay} : n_0에서 갖는 $\frac{1}{e}$ decay

본 연구에서 사용한 가우시안 펄스는 식 (9)이며, 이는 식 (7)~(8)의 내용을 프로그램에 맞게 변형한 것이다. 식 (9)에서는 Time delay가 $\beta\cdot\triangle t$이며, Decay factor는 $\frac{\beta\triangle t}{4}$가 된다. 식 (8)의 설

명에서와 같이 $n_0 \geq 3n_{decay}$가 되어야 하는데, 식 (9)에서 Time step delay는 Decay factor의 4배로서 이를 만족시킨다(그림 2).

$$V(t) = A \cdot e^{-\frac{(t-\beta\triangle t)^2}{(\frac{\beta\triangle t}{4})^2}} \quad (9)$$

여기서, β : Temporal width of Gaussian pulse
$\triangle t$: 시간간격 (sec)

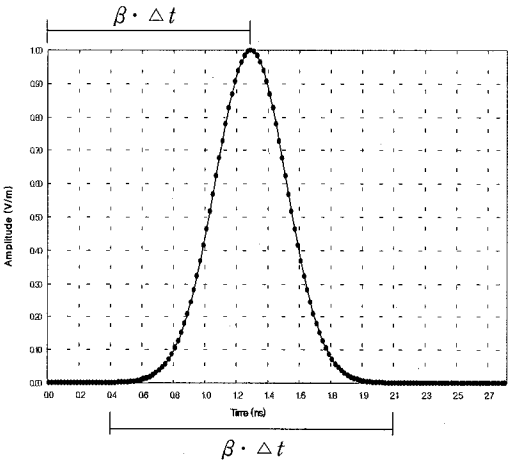

그림 2 프로그램 상에서의 가우시안 펄스

3.2 계산영역 (Computational Domain)

본 연구에 사용된 FORTRAN 컴파일러의 특성상, 프로그램 수행시 총 메모리 크기가 256MB를 넘어서는 안된다. x축, y축, z축의 공간간격이 동일할 경우 전체 계산영역은 190cells × 190cells × 190 cells (전체셀개수=6,859,000개)까지 해석할 수 있다. 경계에서 나타나는 오차 요인을 없애기 위해서는 시편을 계산영역 중앙에 위치시키며 시편 양끝에서 경계까지 시편 길이의 1/2만큼 여유를 둬야 한다(그림 3).

두께 측정 모델링의 시편은 1m × 1m × 두께의 크기를 가지기 때문에 시편을 계산영역에 위치하려면 1m/95cells≒0.01m로 최소 셀 간격을 정할 수 있다. 그러나, 이 경우 프로그램 수행에 걸리는 시간은 약 200시간이기 때문에 현실적으로 불가능하다(Pentium II 300 MHz 컴퓨터의 경우). 프로그램 수행시간을 단축하기 위해서는 전체 셀개수를 최대한 줄여야 하는데 두께 측정 모델의 최대 두께가 0.2 m 이기 때문에 그림 5와 같이 z축 방향의 계산영역을 줄일 수 있으며 이때 프로그램 수행 시간은 약 13시간이 된다. 더 효과적으로 전체 셀개수를 줄이기 위해서는 x, y축 간격은 크게 하고, z축만을 세분화하는 방법을 고려해야 한다.

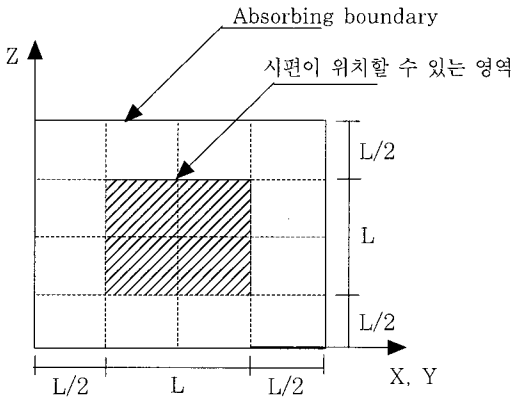

그림 3 계산영역과 시편의 위치

본 연구에서는 각 축 간격이 동일할 때와 두께 측정과 관련된 z축 셀간격 만을 세분화시킨 경우로 나누어 모델링한다(표 1). z 축만을 세분화시킨 경우에는 전체 셀 개수의 변화 없이 각 축이 동일할 때의 셀간격 0.01m를 0.0001m로 100배로 세분화시켜 모델링이 가능하다.

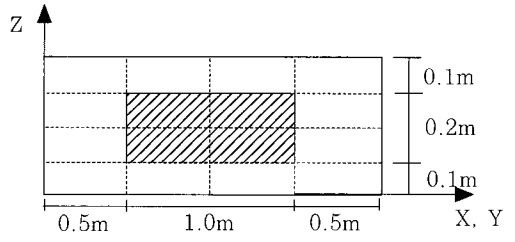

그림 4 z축을 축소시킨 계산영역

표 1 모델링에 사용된 계산영역과 셀간격

계산영역의 실제 크기	셀 간격 (m)			계산영역 각축 셀개수	계산영역 전체 셀개수
	x축	y축	z축		
2m×2m×0.4m	0.01	0.01	0.01	200×200×40	1600000
	0.1	0.1	0.01	20×20×40	16000
	0.1	0.1	0.001	20×20×400	160000
	0.1	0.1	0.0001	20×20×4000	1600000

3.3 초기조건

3.3.1 λ와 셀간격

유한차분 시간영역법 모델링을 하는데 있어서 모델링에 정확성을 얻기 위해선 계산영역의 공간간격이 입사파의 파장 길이의 1/10~1/20이 될 때 적당하다[2].

$$10\triangle \le \lambda \le 20\triangle \tag{10}$$

모델링에 사용된 가우시안 펄스의 파장(λ)은 Free space에서 $\beta \cdot \triangle t \cdot c$로 나타낼 수 있으며, 시간간격 $\triangle t$ 는 식 (11)과 같이 공간간격에 의해 결정된다.

$$\triangle t = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{c}{\triangle x}\right)^2 + \left(\frac{c}{\triangle y}\right)^2 + \left(\frac{c}{\triangle z}\right)^2}} \tag{11}$$

따라서, x축, y축, z축의 공간간격이 동일할 경우 다음과 같이 β값을 구할 수 있다.

$$\triangle t = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{c}{\triangle}\right)^2 + \left(\frac{c}{\triangle}\right)^2 + \left(\frac{c}{\triangle}\right)^2}} = \frac{\triangle}{c\sqrt{3}}$$

$$\lambda = \beta \cdot \triangle t \cdot c = \beta \cdot \frac{\triangle}{c\sqrt{3}} \cdot c$$

$$10\triangle \le \beta \cdot \frac{\triangle}{c\sqrt{3}} \cdot c \le 20\triangle$$

$$10\sqrt{3} \le \beta \le 20\sqrt{3}$$

본 연구에서는 이 조건을 만족시키는 β 값으로 30을 기본적으로 사용하였으며, 계산영역에 유전체가 있을 경우는 β 값에 $\sqrt{\varepsilon_r}$을 곱하여 유전체 안에서 파장길이를 조절하였다.

3.3.2 λ와 시편의 두께(d)

입사파의 파장 λ의 크기와 측정대상의 두께의 관계는 모델링 결과에 큰 영향을 준다. 셀을 아무리 세분화시킨다해도 파장이 시편보다 훨씬 크다면 모델링시 좋은 결과를 얻기 어렵다. 본 연구에서는 파장과 시편 두께와의 관계를 알아보기 위해 파장을 0.1 m로 정하였을 때, 시편의 두께가 2λ, λ, 0.5 λ, 0.25λ로 모델링하였다.

4. 두께 측정 모델

4.1 시편

두께 측정을 위한 시편은 유전상수가 9인 유전체로서 1m×1m×두께의 크기를 가지며, 두께는 초기조건에서 정한 파장 0.1 m에 의해 2λ, λ, 0.5λ, 0.25λ의 두께, 즉 2.5cm, 5cm, 10cm, 20cm의 두께를 갖는 4개의 시편을 모델링하였다. 또한, 시편의 앞표면은 각 시편마다 동일하게 경계면에서 0.1m 떨어지도록 모델링하였다(그림 5). 표 2는 각 계산영역 안에서의 시편의 크기를 셀 개수로 표현한 것이다.

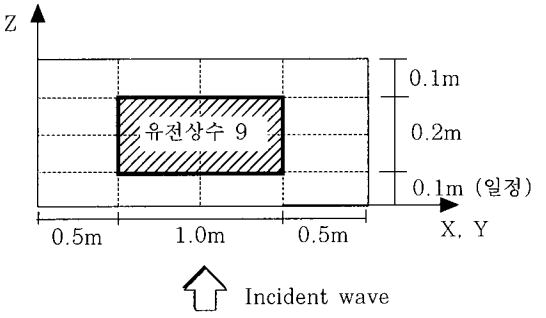

그림 5 두께 측정 시편과 계산영역

표 2 시편의 크기

	시편의 크기 (셀개수)				λ/두께
	x축 셀간격 0.01m	z축 셀간격 0.01m	z축 셀간격 0.001m	z축 셀간격 0.0001 m	
2.5cm	100×100×2.5	10×10×2.5	10×10×25	10×10×250	4
5cm	100×100×5	10×10×5	10×10×50	10×10×500	2
10cm	100×100×10	10×10×10	10×10×100	10×10×1000	1
20cm	100×100×20	10×10×20	10×10×200	10×10×2000	0.5

4.2 모델링 해석 결과

4개의 계산영역마다 4가지 두께의 시편을 모델링

표 3 두께 측정 모델링 결과

	λ/파복 두께	계산 영역 셀 간격 (m)			모델링 결과 (m)	오차 (%)
		x축	y축	z축		
두께 0.025m	4	0.01	0.01	0.01	0.0419	67.4
		0.1	0.1	0.01	0.0314	25.4
		0.1	0.1	0.001	0.0267	6.7
		0.1	0.1	0.0001	0.0262	4.9
두께 0.05m	2	0.01	0.01	0.01	0.0727	45.3
		0.1	0.1	0.01	0.0611	22.1
		0.1	0.1	0.001	0.0511	2.2
		0.1	0.1	0.0001	0.0502	0.5
두께 0.1m	1	0.01	0.01	0.01	0.1140	14.0
		0.1	0.1	0.01	0.1139	13.9
		0.1	0.1	0.001	0.1011	1.2
		0.1	0.1	0.0001	0.1002	0.2
두께 0.2m	0.5	0.01	0.01	0.01	0.2146	7.3
		0.1	0.1	0.01	0.2145	7.3
		0.1	0.1	0.001	0.2005	0.4
		0.1	0.1	0.0001	0.1999	0.04

하여 총 16개의 결과를 얻을 수 있다. 모델링 결과 얻은 반사파는 시간영역에서 나타내지며, 이 그래프에서 앞표면과 뒷표면의 시간차를 통해 시편의 두께를 계산할 수 있다. 각 경우의 두께의 해석결과와 모델링된 실제 크기와 비교한 오차를 정리하면 표 3과 같다.

x, y축 셀 간격이 0.1m이고, z축 셀 간격이 0.001m때의 모델링 결과를 그래프로 표시하면 그림 6과 같다.

전자기파가 두 매질 사이로 진행할 때, 진행하는 매질의 유전상수에 따라 반사계수가 결정되는데, 공기 중에서 유전체 내로 진행할 때 반사계수는 (-) 부호를 가지며, 콘크리트에서 공기로 나갈 때는 (+) 부호를 갖는다. 따라서, 시편의 앞표면에서는 (-) 부호를, 뒷표면에서는 (+) 부호를 나타내야하며, 이 부호에 의해 그림 7에서 A가 앞 표면으로부터의 반사를 나타내며, B1은 두께 2.5cm 시편, B2는 두께 5cm 시편, B3는 두께 10cm 시편, B4는 두께 20cm 시편의 뒷 표면으로부터의 반사로 각각 분석할 수 있다.

4.3 결과 분석

두께 측정 모델링 결과를 분석하면, 원래 가정한 두께와의 오차가 셀간격과 파장/두께의 값에 따라 그림 7과 같은 분포를 나타냈다. 셀 간격이 세분화 될수록 오차가 줄어드는데, z축 셀 간격이 0.001m, 0.0001m일 때 오차가 0.04%~6.7%로 매우 작다. 셀간격이 0.001m, 0.0001m일 때 오차율이 거의 비슷하기 때문에 계산시간을 고려한다면 0.001m의 셀 간격을 사용하는 것이 효율적이다. 또한, 파장/두께의 값이 1이하가 될 때, 모델링의 정확성을 얻을 수 있다. 1%이하의 오차를 얻으려면, 파장/두께의 값을 0.5로 사용하는 것이 적당하다.

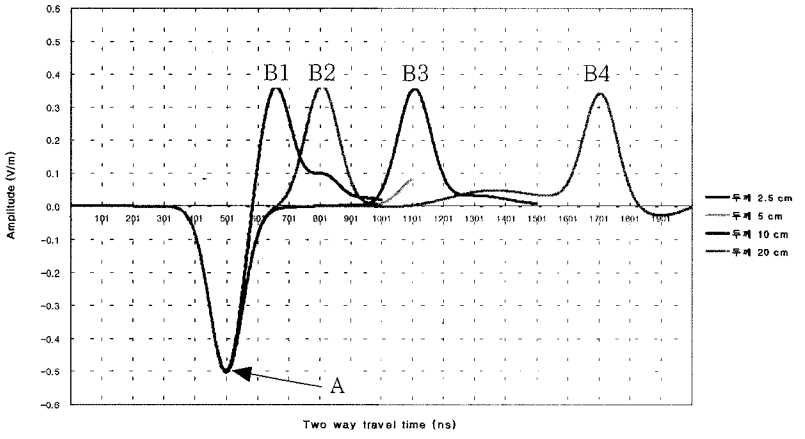

그림 6 두께 측정 모델링 결과

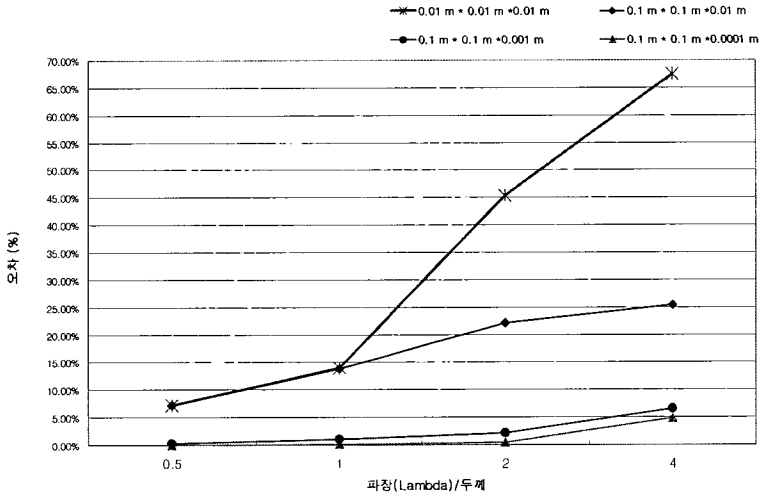

그림 7 두께 측정 모델링 오차

5. 철근 위치 측정 모델링

5.1 시편과 계산영역

두께 측정 모델링 결과를 바탕으로 셀간격은 두께측정에서와 같이 0.001m를 기본으로 정한다. 철근 위치 측정의 경우, 단일 매질로 이루어진 두께 측정 모델링에서 z축 셀간격을 세분화했던 것과 달리 계산영역 내에 두 개의 다른 매질이 존재하며 철근의 형태는 x, y, z축 모두 관련이 있다. 따라서, 어느 한 축 만을 세분화 시키는 것은 해석의 정확도에 영향을 미치기 때문에 세 축 모두 0.001m의 동일한 셀 간격을 갖도록 정하였다. 전체 계산영역은 실제 크기 0.18m×0.18m×0.2m(180cells×180cells×200cells)로 정하였다.

또한, 두께측정 모델링 결과에서 파장(λ)과 두께의 비가 0.5이하일 때 정확한 결과를 얻을 수 있었다. 철근 위치 측정 모델링의 경우, 파장과 전체 시편의 두께의 비를 고려하는 것보다는 측정하고자 하는 피복두께와 파장을 비교하는 것이 더 타당하다. 따라서, 최소 피복두께인 2.5cm를 기본으로 하여 파장을 1.25cm로 정하였다(파장/두께=0.5를 이용).

위의 모든 조건을 조합하여, 철근 위치 측정을 위한 시편은 유전상수가 9인 유전체로서 0.09m×0.09m×0.1m의 크기 안에 직경 25mm인 철근 하나가 내부에 있다고 가정하여, 철근의 피복두께를

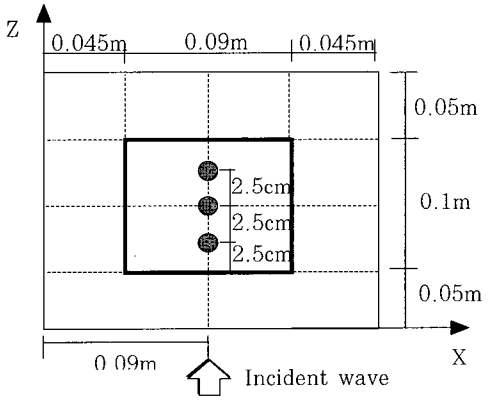

그림 8 철근 위치 측정 시편과 계산영역

표 4 철근 위치 측정 시편

	시편크기		λ/파	철근 직경		피복두께	
	실제크기 (cm)	셀개수	복두께	실제크기 (cm)	셀개수	실제크기	셀개수
모델링 ①	9×9×10	90×90×100	0.5	2.5	25	2.5cm	25cells
모델링 ②						5cm	50cells
모델링 ③						7.5cm	75cells

측정 변수로 사용하였다. 피복두께는 시편의 앞표면에서 철근의 중심까지의 거리로 정의하며, 2.5cm, 5cm, 7.5cm 세 가지의 피복두께를 산정하여 모델링하였다(그림 8, 표 4 참조)

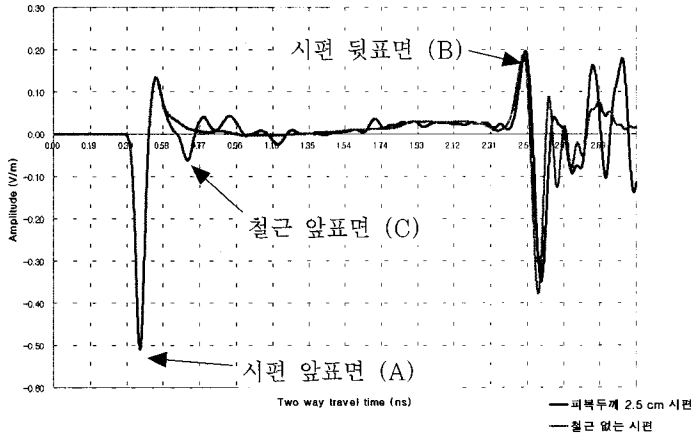

그림 9 피복 두께 2.5cm일 때의 철근 위치 측정 모델링 결과

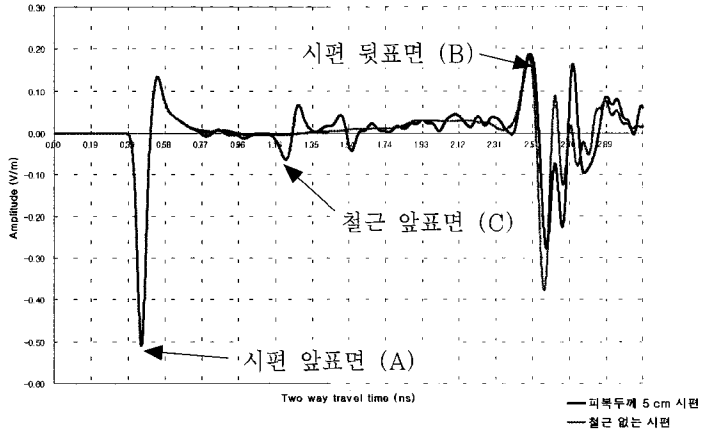

그림 10 피복 두께 5cm일 때의 철근 위치 측정 모델링 결과

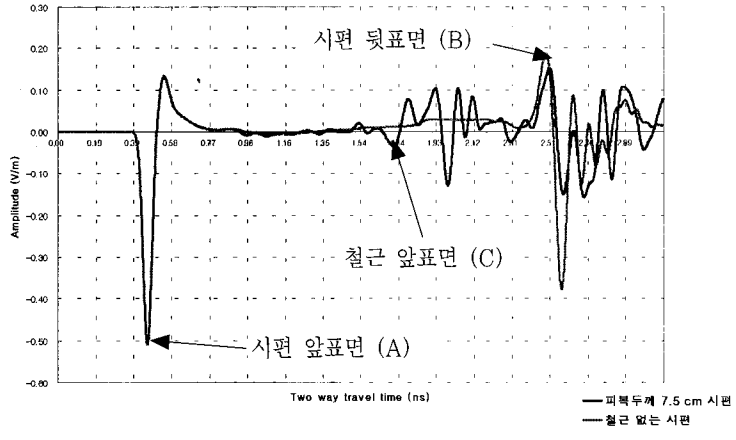

그림 11 피복 두께 7.5 cm일 때의 철근 위치 측정 모델링 결과

5.2 모델링 해석 결과

피복두께에 따른 세 개의 시편을 모델링한 결과를 그래프로 나타내면 그림 9~11이 되며, 각각의 그래프에서 A점은 시편의 앞표면, B점은 시편의 뒷표면, C점은 시편 내부 철근의 앞표면을 나타낸다. 각 점들간의 시간차를 이용하여 시편 전체의 두께와 시편 앞표면에서 철근의 앞표면까지 거리를 계산하여 실제값과 비교·정리하면 표 5와 같다.

표 5 철근 위치 모델링 결과

	피복두께 (cm)	λ/피복두께	계산영역 셀간격 (x,y,z축동일)	시편전체 두께		철근 앞표면까지의 거리		
				모델링 결과 (cm)	오차 (%)	실제거리 (cm)	모델링 결과 (cm)	오차 (%)
①	2.5	0.5	0.001	10.20	1.95	1.25	1.256	0.459
②	5.0			10.20	1.95	3.75	3.767	0.459
③	7.5			10.24	2.29	6.25	6.255	0.074

5.3 결과 분석

철근 위치 측정 모델링 결과를 분석하면, 피복두께에 따른 세 가지 경우 모두 표5에서처럼 시편 전체 두께는 2%~2.3%의 오차를, 시편 앞표면에서 철근 앞표면까지의 거리는 0.08%~0.5%의 오차를 갖는 매우 정확한 결과를 얻을 수 있었다. 시편 전체 두께의 오차가 더 큰 이유는 입사파가 시편의 뒷표면까지 진행하려면 중간의 철근이 반사를 일으켜 왕복 시간이 철근이 없을 때보다 오래 걸려 오차가 생기는 것이라 생각된다. 피복두께 2.5cm와 5cm 모델링의 경우, 그림 9와 10에서 볼 수 있듯이, 시편의 앞표면, 뒷표면, 그리고 철근의 앞표면을 쉽게 구별할 수 있었지만, 피복두께가 7.5 cm인 경우에는 시편의 뒷표면을 명확히 구분하기 어려웠다. 이는 전자파가 시편의 뒤쪽으로 갈수록 파의 반사 형태가 불분명해지는 다반사 현상(Multiple reflection)을 나타내기 때문인 것으로 분석된다.

6. 결 론

본 연구에서는 이상과 같이 유한차분 시간영역법을 사용하여 두께 측정과 철근 위치 측정을 할 때 전자기파의 전파를 모델링하여 그 결과를 분석하였다. 각 모델링에서 정확성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 계산영역 셀간격의 크기이며, 두께 측정의 경우에서 셀간격이 0.001m이하이면 매우 정확한 해석이 가능함을 알 수 있었다. 또한, 측정 대상까지의 거리와 입사파의 파장(λ)과의 관계도 모델링의 정확성에 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 이런 결과를 바탕으로 한 철근 위치 모델링에서는 매우 정확한 결과를 얻을 수 있었고, 피복두께 7.5cm의 경우에만 철근과 뒷표면의 반사파의 중첩이 있었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 박석균, 임홍철, "전자파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴검사", 콘크리트학회지, 제10권, 2호, 1998, pp.27~39
2. O. Buyukozturk & H. C. Rhim, "Modeling of Electromagnetic Wave Scattering by Concrete Specimens", *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 5, 1995, pp.1011~1022
3. 신호섭, "유한차분 시간영역법을 이용한 능동안테나의 해석", 석사학위논문, 충남대학교 대학원 정보통신공학과, 1998, 48
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, 1996, pp.302~307
5. 최희주, 진태훈, 홍성일, 정주수, 변진식, "FDTD법을 이용한 GPS 위성 수신 안테나의 설계 해석", 대한전자공학회 하계종합학술대회 논문집, 제21권, 제1호, 1998, pp.145~148
6. A. Taflove, *Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method*, Artech House, Boston·London, 1995, 599
7. K. Li, M. A. Tassoudji, R. T. Shin & J. A. Kong, "Simulation of Electromagnetic Radiation and Scattering Using a Finite Difference Time Domain Technique", *Computer Applications in Engineering Education*, Vol. 1, 1992, pp.45~63

(접수일자 : 1999. 7. 14)