

콘크리트 보강재 박리 검사를 위한 전자파 모델링

Modeling of Electromagnetic Wave Propagation for Detection of Bond Delamination in Concrete

임 홍 철* 남 연 수*

Rhim, Hong-Chul Nam, Yeun-Soo

(논문접수일 : 2003년 12월 10일 ; 심사종료일 : 2004년 6월 9일)

요 지

콘크리트 보의 내력 증강을 위해, 탄소 섬유시트와 유리 섬유시트 등의 보강재를 보의 하부에 접착시킴으로써, 기존 콘크리트 부재를 보강할 수 있다. 이러한 보강법에 대한 다양한 설계 방법 및 적용 기법들이 개발되고 있지만, 보강 후 접착 성능을 포함한 견진도 평가는 아직 실용화되지 않은 상태이다. 본 연구에서는 콘크리트 보에 부착된 보강재의 박리 여부를 검사하기 위해 전자기파의 모델링 기법을 적용하였고, 이는 박리검사용 실험 장치를 개발하기 위한 토대를 마련하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 3GHz와 5GHz의 가우스 파와 사인 파를 입사파로 사용하여, 박리 두께가 각각 1mm와 3mm 인 콘크리트 시편에 전자파를 보내는 경우를 유한차분 시간영역법(FD-TD method)으로 모델링 하였다. 그 결과, 파형과 중심 주파수에 따라 정확도의 차이는 있었으나 박리의 유무와 위치를 찾아 낼 수 있었다.

핵심용어 : 마이크로 웨이브, 유한차분 시간영역법, 보강판, 박리, 전자파, 모델링

Abstract

The existing concrete beams can be retrofitted or reinforced by attaching carbon fiber or glass fiber sheet beneath the beams. Although diverse design methods and application techniques of the retrofitting are studied and developed, the testing method of examining retrofitted beams have not been put into practice yet. In this study, a bond delamination has been modeled and studied to provide a basis for the development of actual testing equipments. For this purpose, Gaussian and sinusoidal waves with 3GHz and 5GHz center frequency are used as an incident wave and 1mm and 3mm bond delamination under the reinforcement are modeled. In the modeling, Finite Difference-Time Domain algorithm is used to investigate the behavior of electromagnetic waves in concrete. The results have shown that 5GHz waves are suitable for the detection of delamination.

keywords : microwave, FD-TD method, nondestructive testing, concrete, bond delamination

1. 서 론

안전은 구조물에서 요구되어지는 중요한 요소 중 하나이며 구조물의 안전성을 정량화하기 위해 다양한 진단 기법들이 실무에 사용되고 있다. 그중 레이더 법은 전자기파를 목표물에 입사시키고, 수신된 파를 분석하여 진단하는 기법으로, 목표물에서 산란되어 돌아오는 파는 목표물의 물리적

상태에 대한 정보를 담고 있다. 이미 국내 연구를 통하여 이 기법은 콘크리트의 두께, 콘크리트 내의 공동 또는 철근의 위치와 크기를 찾는 데에 적용된 바 있다.^{1,2)}

본 연구는 레이더 법을 시뮬레이션 한 전자파 모델링을 통해 보강재의 콘크리트 보 접착 면에서 발생 가능한 박리 현상을 탐색하는 것으로 이를 바탕으로 실험장치 개발 가능성을 판단하는데 그 목적이 있다. 구조물의 보강 기법은 기

† 책임저자, 정회원 · 연세대학교 공과대학 건축공학과 부교수
전화: 02-2123-2792 ; Fax: 02-365-4668
E-mail: hcrhim@yonsei.ac.kr

* 정회원 · 연세대학교 건축공학과 대학원 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2004년 12월 31일까지 본 학회에 보내주
시면 2005년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

존 건물의 내력을 증가시켜주는 방법으로 그 사용이 증가하고 있으며 실무 적용에 필요한 각종 연구가 진행되고 있다. 하지만 시공 직후의 작업 완결성과 사용 중의 보강 신뢰성을 진단할 만한 방법은 아직 사용되지 않고 있다. 따라서 이 기법의 개발은 보강 기법의 신뢰성을 높여 그 사용을 확대시킬 수 있다. 그림 1은 레이더 장비를 통해 박리 탐사를 수행하는 개요도이다.

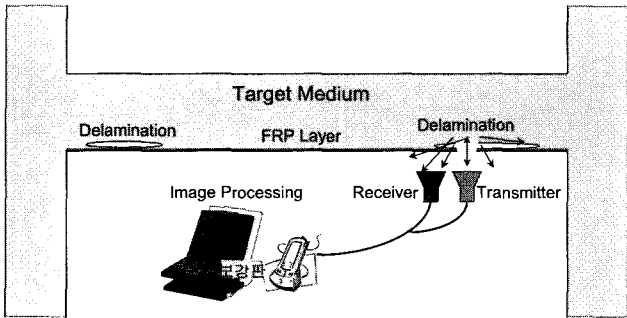


그림 1 보강판 박리 탐사 개요도

모델링에서, 콘크리트가 갖는 전자기적 특성을 입력값으로 프로그램에서 사용하고, 다양한 전자파의 입력과 수신 신호를 분석함으로써, 실제 실험 장치개발에 필요한 주파수, 주파수 대역, 콘크리트 조건 등을 컴퓨터 시뮬레이션을

통하여 알아보려는 목적이다.

2. 유한차분 시간영역 법

유한차분 시간영역 법(Finite Difference-Time Domain Method, 이하 FD-TD법)이란 시간의 변화에 따른 전기장(Electric Field)과 자계(Magnetic Field)의 변화를 설명하는 맥스웰 방정식(Maxwell's equations)을 유한 차분 방정식으로 변환하여 시간과 공간에서 동시에 이산화시켜 전자기파의 진행, 투과, 반사를 컴퓨터로 계산할 수 있게 하는 수학적 기법이다. 등방성 매질에서의 전자파 산란문제에 이 방법을 처음 적용한 이후, 다양한 전자기적 문제를 해석하는데 이용되고 있다.^{3),4)}

3. 모델링

3.1 입사파

3.1.1 가우스 파

가우스 파(Gaussian Wave)가 모델링에 사용되는 이유는 식 (1)을 이용하여 펄스 파 구현이 쉬우며 파형이 단순

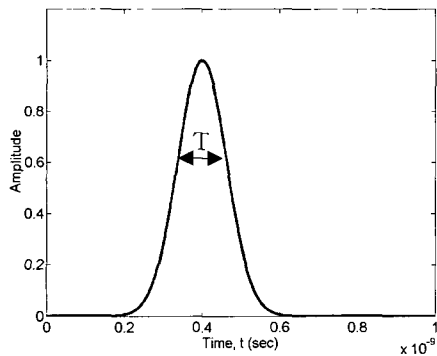


그림 2a 3GHz의 가우스 파 시간 영역

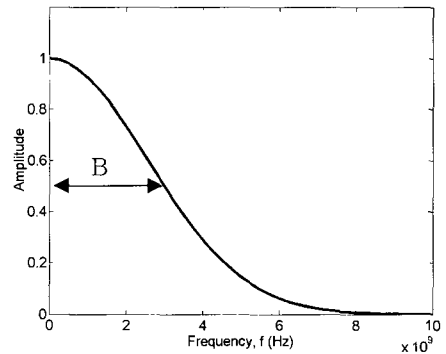


그림 2b 3GHz의 가우스 파 주파수 영역

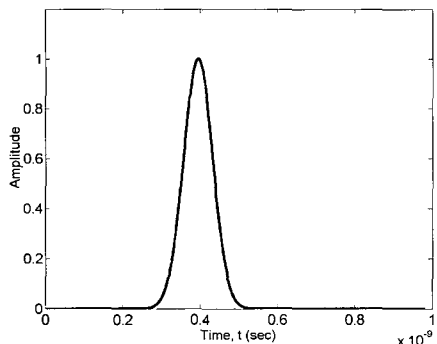


그림 3a 5GHz 가우스 파 시간 영역

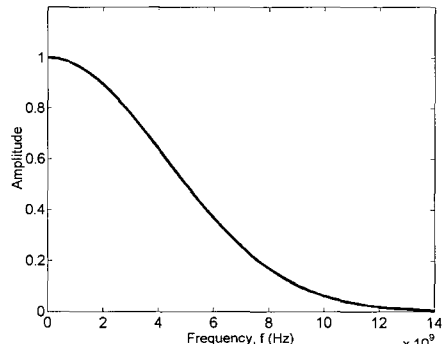


그림 3b 5GHz 가우스 파 주파수 영역

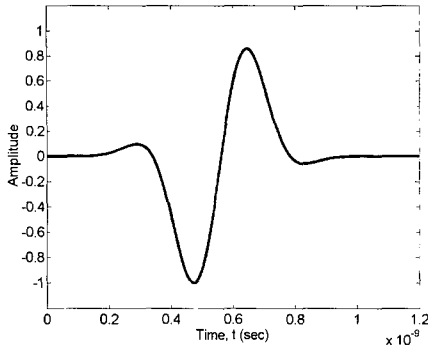


그림 4a 3GHz 사인 파 시간영역

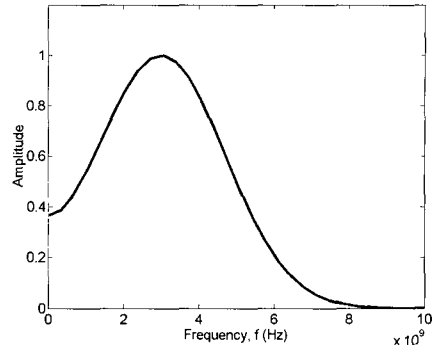


그림 4b 3GHz 사인 파 주파수 영역

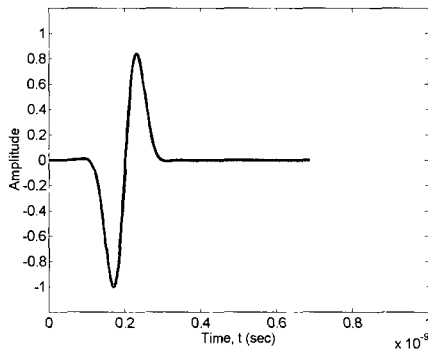


그림 5a 5GHz 사인 파 시간 영역

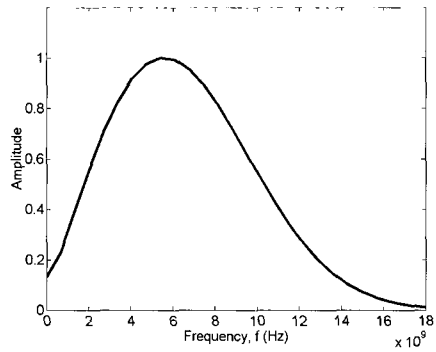


그림 5b 5GHz 사인 파 주파수 영역

하여 산란파를 분석하는데 용이하기 때문이다. 가우스 파의 일반식과 사용되는 변수는 식 (1)과 같다.⁵⁾

$$P(t) = e^{\left(\frac{-2(t-t_0)^2}{T^2}\right)} \quad (1)$$

T : 펄스 폭 (Pulse Width) (초)

t_0 : 시간 이격 (초)

B : Half Power Band Width (Hz)

t : 시간 (초)

기존 연구²⁾에서 2GHz의 가우스 파 2.5cm의 두께를 6.9%의 오차로 탐색 가능하였으므로 그보다 작은 두께 1 mm와 3mm를 탐색해야 하는 본 연구에서는 각각 3GHz, 5GHz의 더 높은 Half Power Band Width를 갖는 가우스 파를 사용하기로 한다. 시간 영역과 주파수 영역에서의 그 모습은 그림 2, 3과 같다.

3.1.2 사인 파

사인 파(Sine Wave)는 실제 상용 레이더 장비에서 나오는 입사파와 유사하기 때문에 실제와 가까운 실험을 모델링하기 위해서 필요하다. 프로그램 내에서 모델링 되어지는 사인 파의 일반식과 변수는 식 (2)와 같다.

$$P(t) = \cos(\omega t) e^{\left(\frac{-2(t-t_0)^2}{T^2}\right)} \quad (2)$$

T : 펄스 폭(Pulse Width) (초)

t_0 : 시간 이격 (초)

ω : 중심 주파수 (Hz)

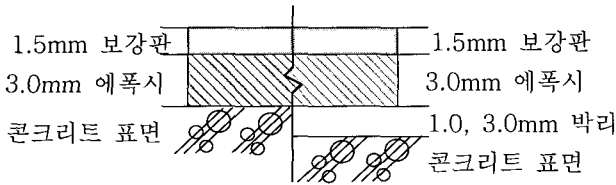
t : 시간 (초)

본 연구에서 입사파로 사용할 사인 파는 가우스 파와 같이 각각 3GHz, 5GHz의 중심 주파수를 갖는 파로 시간 영역과 주파수 영역에서의 그 모습은 그림 4, 5와 같다.

3.2 시 편

본 연구에 사용된 프로그램은 사용자의 필요에 따라 계산 영역을 정할 수 있게 되어 있다. 계산 영역은 격자의 개수로 결정되는데 격자의 개수가 많아지면 매우 자세하게 시편을 모델링 할 수 있어 정확성을 높일 수 있다는 장점이 있으나 그 만큼 셀의 개수가 증가하므로 계산 시간이 늘어나는 단점도 가지게 된다. 최적의 조건으로 보강판의 박리를 탐사하기 위해 본 실험에서는 직사각형 모양의 가로, 세로 1200×600개의 격자로 구성된 계산 영역을 사용하였으며, 총 720,000개의 계산 셀을 가지고 있다. 또한 보강판과 콘크리트간의 박리를 충분히 모델링 할 수 있도록 0.5mm로

격자 간격을 정하여 실제 시편의 크기가 가로, 세로 600mm×300mm이 되도록 하였다. 계산 영역 중앙에 길이, 두께 600mm×150mm의 콘크리트를 위치시키고, 1.5mm 두께의 보강판을 3mm 두께의 에폭시에 의해 콘크리트 구조물의 표면과 접착되도록 모델링 하였다. 비록 콘크리트는 불균질한 재료이지만 콘크리트 표면에 발생한 보강재와의 박리를 찾는다는 실험 목적상 균질한 것으로 가정하기로 한다. 그리고 접착 면 아래에 각각 1mm와 3mm의 미세 박리를 삽입하였다. 이외에도 각각의 시편에 전자파를 입사시킨 후 받은 산란파를 비교 분석하기 위하여 동일한 보강 조건을 가지면서 접착 면에서 박리가 발생하지 않은 정상적인 시편도 모델링 하였다. 시편의 세부적인 모습은 그림 6과 같다.



<정상적 시편> <박리 발생 시편>

그림 6 보강부의 상세 모습

1) 시편 A

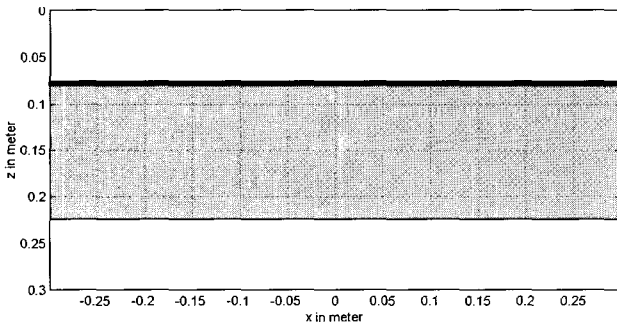


그림 7 시편 A(1.5mm 보강판과 3mm 에폭시, 박리 없음)

2) 시편 B

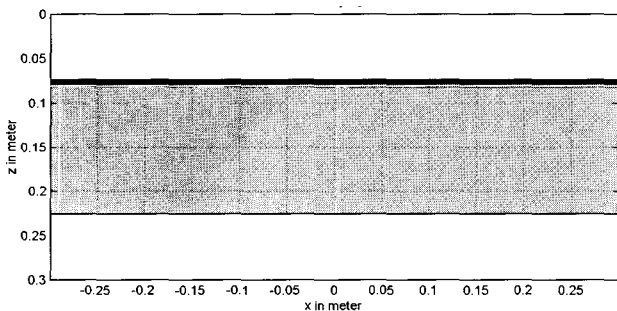


그림 8 시편 B(1.5mm 보강판과 3mm 에폭시 하면에 1mm 박리)

3) 시편 C

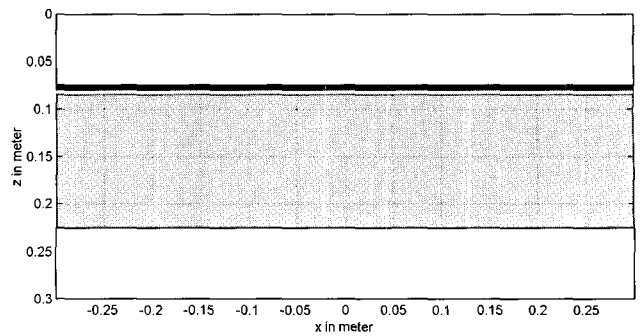


그림 9 시편 C(1.5mm 보강판과 3mm 에폭시 하면에 3mm 박리)

3.3 격자 간격

FD-TD법으로 전자파를 모델링 할 때, 시편의 격자 간격은 계산의 정확성과 안정성에 지대한 영향을 미친다.⁶⁾ 먼저 정확한 계산을 위해서 격자 간격은 식 (3)과 같이 시편에 입사되는 입사파의 최소 파장을 20으로 나눈 길이보다 작아야 한다. 또한 안정성을 위해, 시간의 증가분과 격자 간격은 식 (4)를 만족하여야 한다.

$$ds \leq \frac{\lambda}{20} \tag{3}$$

ds : 셀의 최소 간격 (초)

λ : 입사파의 최소 파장 (m)

$$\Delta t \leq \left(\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{dx}\right)^2 + \left(\frac{1}{dy}\right)^2}} \times c_0 \right) \tag{4}$$

Δt : 시간의 증가분 (초)

dx : x 방향의 격자 간격 (m)

dy : y 방향의 격자 간격 (m)

$$c_0 = 3.0 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

본 모델링 연구에서는 위의 두 가지 조건들을 다음과 같이 만족시키고 있다.

첫째, 격자 간격 0.5mm를 이용하여 입사파로 사용 가능한 최대 주파수의 크기는

$$ds \leq \frac{\lambda_{\min}}{20} \cdot 0.5 \times 10^{-3} \leq \frac{\lambda_{\min}}{20} \therefore \lambda_{\min} \geq 0.01 \text{ m} \tag{5}$$

콘크리트 내에서 입사파의 파장은 짧아지고 전파 속도는 느려지게 된다.

$$f \times \lambda \times \sqrt{\epsilon_r} = c_0 = 3.0 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

$$\therefore f = \frac{3.0 \times 10^8}{\lambda \times \sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

$$\therefore f \leq \frac{3.0 \times 10^8}{0.01 \times \sqrt{5}} = 13.4 \times 10^9 \text{ Hz} \quad (7)$$

λ_{\min} : 입사파에 포함된 가장 짧은 파장의 길이 (m)

f : 격자 간격을 만족하는 입사파의 주파수 (Hz)

$$c_0 = 3.0 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

$$\epsilon_r(\text{유전 상수}) = 5 \text{ (Air dried)}$$

따라서 격자 간격이 0.5mm일 때, 입사파의 주파수가 13.4GHz 이하 이면 정확한 계산이 이루어 질 수 있다. 본 실험에서는 3GHz와 5GHz를 사용하므로 조건을 만족한다.

둘째, 식 (4)를 만족시키기 위해 FD-TD 프로그램 내에서는 안정 계수 1.2를 이용하여 Δt 의 값을 다음과 같이 정한다.

$$\Delta t = \left(\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{dx}\right)^2 + \left(\frac{1}{dy}\right)^2} \times c_0 \times 1.2} \right) \quad (8)$$

$$\Delta t = \frac{0.5 \times 10^{-3}}{\sqrt{2} \times 3.0 \times 10^8 \times 1.2} = 0.982 \times 10^{-12} \quad (9)$$

$$\therefore dx = dy = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

따라서 1.2를 안정 계수로 정한 FD-TD 프로그램 내에서 Δt 의 값은 $0.982 \times 10^{-12} \text{ sec}$ 가 된다.

3.4 전자기적 특성

본 실험에서 사용된 시편의 전자기적 특성은 표 1과 같다.

표 1 재료의 전자기적 특성¹⁾

	유전상수	전기전도도	투자상수
공기	1.0	0 mhos/m	1.0
콘크리트	5.0	0.05 mhos/m	1.0
보강재	4.0	0 mhos/m	1.0
에폭시	3.0	0 mhos/m	1.0

4. 결과 분석

4.1 시편의 두께 측정 결과 분석

앞서 언급한 4가지 파, 3GHz, 5GHz의 가우스 파와 3GHz, 5GHz의 사인 파를 시편 A에 입사시킨 후 그 산란 파의 신호를 저장하고 이를 그림 10, 11, 12, 13과 같이 시간 축 상에 나타내었다. 전자기파가 공기와 콘크리트와 같이 서로 다른 두 매질 사이를 수직으로 통과할 때, 매질의 유전상수에 따라 식 (10)과 같이 반사계수가 결정된다.

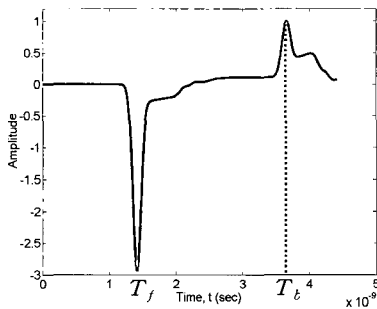


그림 10 시편 A에서 산란된 3GHz 가우스 파

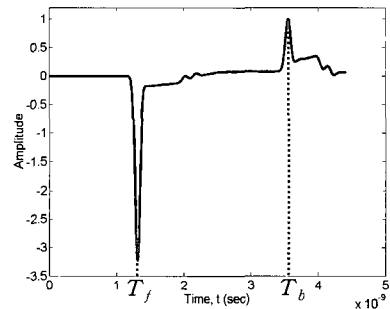


그림 11 시편 A에서 산란된 5GHz 가우스 파

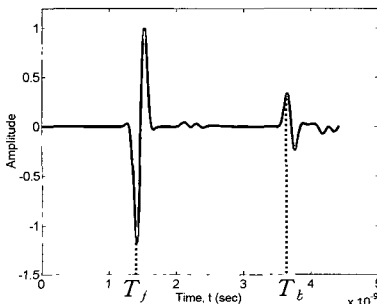


그림 12 시편 A에서 산란된 3GHz 사인 파

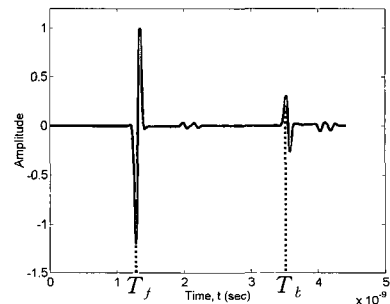


그림 13 시편 A에서 산란된 5GHz 사인 파

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (10)$$

R : 반사계수 단, T(투과계수) = 1 - R

ϵ_{r1} : 매질 1의 유전상수

ϵ_{r2} : 매질 2의 유전상수

식 (10)과 같이 계산된 계수들에 의해 시편을 향해 진행 하였던 입사파들은 투과 및 반사를 하게 되고 일부는 안테나의 수신부에 기록되게 된다. 이 때, 입사파가 경험했던 매질의 종류에 따라 수신된 파의 진폭 및 부호가 변하게 되는데 이를 통해 시편의 내부를 예측하게 된다. 이와 같이 수신 파를 분석하여 그림 10, 11, 12, 13에 앞면과 뒷면을 나타내는 신호를 찾고 그 시간 상 위치를 점선으로 내려 각각 T_f 와 T_b 로 구별하였다.

공기 중에서 빛의 속도로 진행되는 전자파는 유전체인 매질에 입사되어 통과할 때 그 속도가 변화하게 되는데, 이 때, 입사파의 진행 속도는 식 (11)에 의해 구할 수 있다.⁷⁾

$$v_c = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (11)$$

v_c : 유전체 내에서 입사파의 속도 (m/sec)

C_0 : 빛의 속도(0.3×10^9 m/sec)

ϵ_r : 유전체의 유전 상수

따라서 식 (11)을 이용하여 유전 상수가 5.0인 기전 콘

크리트의 내부를 통과하는 입사파의 속도를 구하면 $v_c = 134.16 \times 10^5$ m/sec가 된다.

표 2는 시편의 앞 표면과 뒤 표면의 시간 값의 차이를 구하고 이에 앞서 구한 속도로 곱해 프로그램을 통해 계산된 시편의 크기와 실제 모델링 했던 시편의 크기를 비교한 표이다.

표 2 시편의 두께 측정 결과

입사파	앞면 T_f (초)	뒤면 T_b (초)	두께(mm)	오차(%)
3GHz 가우스 파	1.414E-09	3.655E-09	150.33	0.22
5GHz 가우스 파	1.313E-09	3.553E-09	150.26	0.18
3GHz 사인 파	1.408E-09	3.647E-09	150.20	0.13
5GHz 사인 파	1.285E-09	3.525E-09	150.20	0.13

표 2에서 알 수 있듯이 오차의 범위가 0.3%이내로 미소하므로 그림 10, 11, 12, 13에 나타난 산란파의 파형을 박리를 찾기 위한 기준파로 선택할 수 있다.

4.2 박리의 유무 탐색

4.2.1 가우스 파

앞서 4.1절에서 설명하였듯이, 전자기파는 유전상수가 서로 다른 매질을 통과할 때, 매질의 유전상수 값에 따라 구별된 투과와 반사를 하며 매질 속을 진행하게 되는데, 이는 레이더 법을 보강재 박리 탐사에 적용할 수 있는 가장 중요한 원리가 된다. 그림 14, 15, 16, 17은 1mm와 3

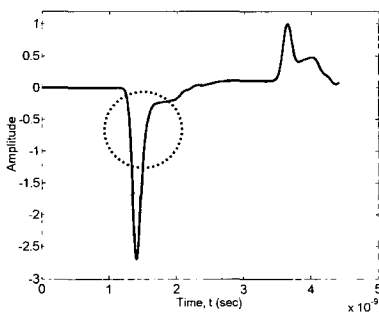


그림 14 시편 B에서 산란된 3GHz 가우스 파

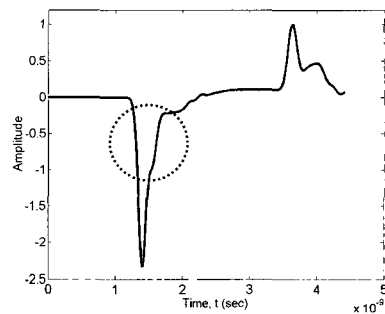


그림 15 시편 C에서 산란된 3GHz 가우스 파

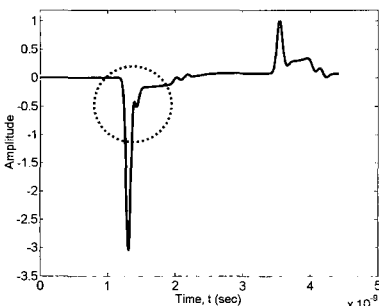


그림 16 시편 B에서 산란된 5GHz 가우스 파

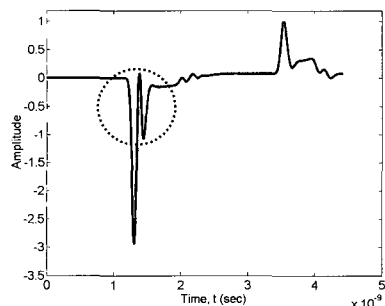


그림 17 시편 C에서 산란된 5GHz 가우스 파

mm의 박리를 가진 시편 B와 C에 입사된 3GHz와 5GHz의 가우스 파의 반사파의 모습이다. 이 그래프들을 박리가 없는 시편 A에서 얻어진 그래프, 그림 10, 11과 비교하여 보면 동그라미로 표시된 부분에서 진폭의 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 보강재 아래에 삽입된 공기로 구성된 박리 지점에서 입사파가 일부 반사해서 그 진폭이 변화한 것으로 박리의 두께가 클수록 주파수가 높아질수록 그 변화가 확연히 나타남을 알 수 있다.

4.2.1 사인 파

그림 18, 19, 20, 21은 1mm와 3mm의 박리를 가진 시편 B와 C에 입사된 3GHz와 5GHz의 사인 파의 반사파의 모습이다. 가우스 파의 경우와 마찬가지로 이 그래프들을 박리가 없는 시편 A에서 얻어진 그래프, 그림 12, 13과 비교하여 보면 동그라미로 표시된 부분에서 진폭의 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다. 하지만 가우스 파에서와 달리 그 변화가 매우 민감함을 알 수 있다.

4.3 박리의 위치 탐색

반사파 그래프에서 진폭의 변화로 박리의 존재 여부를 확인할 수 있었다. 하지만 그 신호가 약하고 입사파의 파형이 복잡한 이유로 박리의 정확한 위치에 대한 정보는 알 수 없

었다. 또한 보강 된 부분의 두께와 박리의 두께가 mm단위이기 때문에 박리가 발생한 시편 B, C에서 산란된 파만을 분석해서는 박리의 위치 탐사가 어려웠다. 이런 이유로 박리가 발생하지 않은 정상 시편 A로부터 반사된 반사파와 박리가 발생한 시편 B, C로부터 나온 반사파를 비교하여 그 차이를 분석함으로써 박리의 위치를 추정하고자 한다. 그림 22에서 실선은 박리가 발생하지 않은 정상적인 시편 A로부터 얻어진 산란된 파의 모양이며 이때, T_s 는 최초 절대치가 최대인 진폭을 가지는 위치에서의 시간 값이다. 점선으로 표시된 그래프는 박리가 있는 시편으로부터 얻은 산란파에서 정상적인 시편으로부터 얻은 산란파를 뺀 그래프이다. T_d 는 최초 절대치가 최대인 진폭을 가지는 위치에서의 시간 값이다.

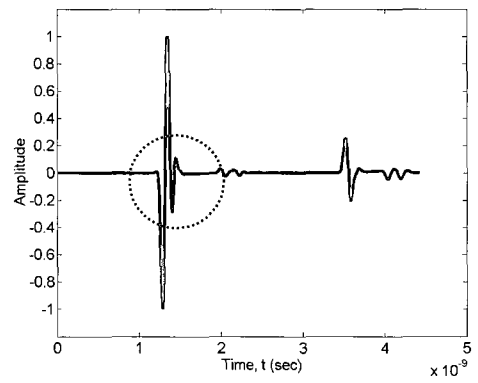


그림 20 시편 B에서 산란된 5GHz 사인 파

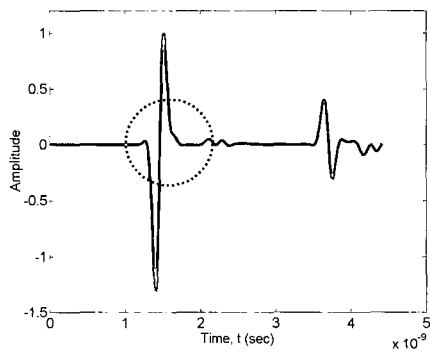


그림 18 시편 B에서 산란된 3GHz 사인 파

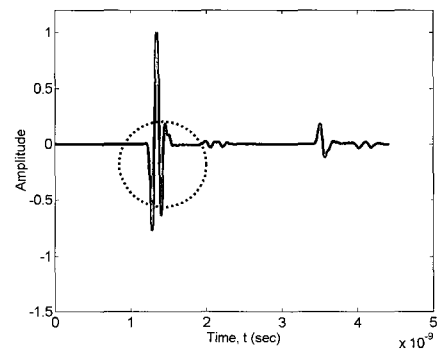


그림 21 시편 C에서 산란된 5GHz 사인 파

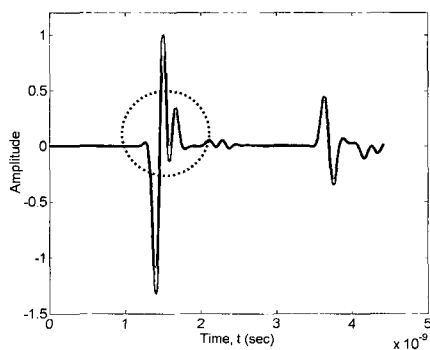


그림 19 시편 C에서 산란된 3GHz 사인 파

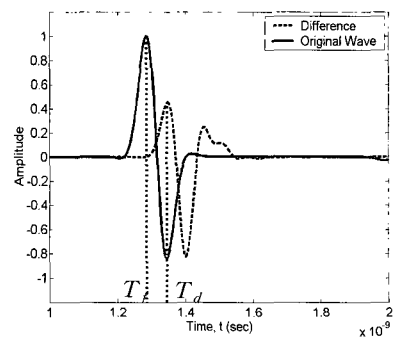


그림 22 5GHz 사인파와 시편 C

표 3 1mm 크기의 박리를 가진 시편 B로부터 산란된 파의 결과

	T_f (sec)	T_d (sec)	시간차 (sec)	계산 거리	실제 거리	오차 거리	오차율(%)
3GHz 가우스 파	1.4132E-09	1.4289E-09	1.570E-11	1.053 mm	4.5 mm	-3.446 mm	-76.60
5GHz 가우스 파	1.3121E-09	1.3533E-09	4.120E-11	2.763 mm	4.5 mm	-1.736 mm	-38.58
3GHz 사인 파	1.4080E-09	1.4810E-09	7.300E-11	4.896 mm	4.5 mm	0.396 mm	8.82
5GHz 사인 파	1.2846E-09	1.3416E-09	5.700E-11	3.823 mm	4.5 mm	-0.676 mm	-15.03

표 4 3mm 크기의 박리를 가진 시편 C로부터 산란된 파의 결과

	T_f (sec)	T_d (sec)	시간차 (sec)	계산 거리	실제 거리	오차 거리	오차율(%)
3GHz 가우스 파	1.4132E-09	1.4368E-09	2.360E-11	1.583 mm	4.5 mm	-2.917 mm	-64.82
5GHz 가우스 파	1.3121E-09	1.3621E-09	5.000E-11	3.354 mm	4.5 mm	-1.146 mm	-25.46
3GHz 사인 파	1.4080E-09	1.4722E-09	6.420E-11	4.307 mm	4.5 mm	-0.193 mm	-4.30
5GHz 사인 파	1.2846E-09	1.3474E-09	6.280E-11	4.213 mm	4.5 mm	-0.287 mm	-6.38

표 3과 표 4는 박리가 발생하지 않은 시편 A에서 얻어진 반사파와 박리가 발생한 시편 B, C에서 얻어진 반사파를 비교하여 정리한 결과이다. 각각의 경우 최초 진폭의 절대값이 최대가 되는 지점에서의 시간을 구하고, 이 두 시간의 차에 입사파의 속도를 곱해서 계산 거리를 구하였다. 이는 모델링을 통해 실험적으로 얻은 콘크리트 표면에서의 박리의 위치를 의미하며 이를 실제거리와 비교하여 오차 거리와 오차율을 구하였다. 오차율 비교를 통해 박리의 위치를 탐색함에 있어 사인 파가 가우스 파보다 더 정확한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 박리의 두께 관점에서 박리의 두께가 두꺼울수록 모델링을 통해 실험값의 오차가 적어지는 경향을 보이고 있다. 중심 주파수의 크기에 따른 해상도의 변화는 가우스 파일 경우 고주파일수록 해상도가 좋아졌으나 사인 파의 경우 다소 나빠지는 경향을 보였다.

이는 박리의 두께가 작은 시편 B에서 더욱 확연이 나타났다.

4.4 2 차원 모델링의 예

그림 23은 중심 주파수 5GHz의 사인파를 박리가 발생하지 않은 시편 A에 입사시키고 콘크리트 표면 전체에서 반

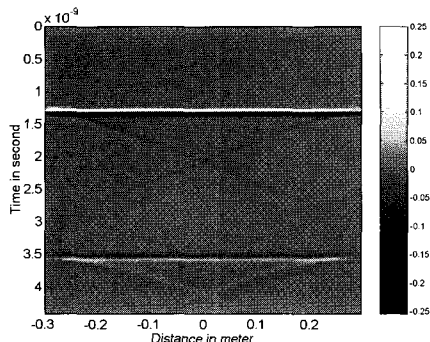


그림 23 시편 A에서 반사된 5GHz 사인 파

사 받은 신호를 2 차원으로 나타낸 그림이며 그림 24는 같은 입사파를 시편 C에 입사시키고 반사되는 파를 받아 2 차원으로 나타낸 그림이다. 진폭 1과 -1을 흰색과 검은색으로 나타내고 그 사이 값들을 명암으로 구별한 그래프로 그림 23에서는 흰색과 검은색이 한번 반복하며 그림 24에서는 흰색과 검은색 다음에 다시 흰색이 나타남을 알 수 있다. 이는 박리로 인해 진폭의 변화가 있음을 나타낸다.

5. 모델링 결과 및 분석

앞서 모델링을 통해 구해진 그래프에서 얻은 두 값 T_f 와 T_d 와 콘크리트 내부에서의 입사파의 속도를 이용하면 두 지점에서의 시간적 이격이 거리로 환산되어지며, 이 결과들을 정리하면 위의 표 2, 3과 같이 나타낼 수 있다. 표 3은 1mm의 박리를 가진 시편 B에 관한 값이며, 표 4는 3mm의 박리를 가진 시편 C에 관한 값이다. 오차율은 계산 거리에서 실제 거리를 뺀 오차값의 실제 거리에 대한 백분율로 나타낸 값이다.

위의 표에서 알 수 있듯이 박리의 두께가 클수록, 박리의 위치 탐색이 더 용이하며, 가우스 파보다 사인 파가 더

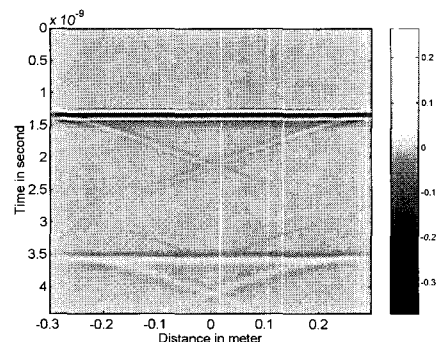


그림 24 시편 C에서 반사된 5GHz 사인 파

정확히 박리의 위치를 찾아내고 있음을 알 수 있다. 또한 사인 파의 경우, 고주파로 갈수록 해상도가 높아져 더 정확한 결과를 구할 수 있을 것이라는 일반적인 추측과 상반된 결과를 보인 점은 조금 더 연구해 볼 필요가 있다고 하겠다.

6. 결 론

보강재로 보강된 콘크리트 수평 부재에서 박리 현상은 보강 성능에 치명적인 악영향을 줄 수 있는 중요한 인자로서 정기적인 진단으로 박리 발생 유무를 조사하여야 한다.

본 연구는 정확성과 안전성을 입증 받은 첨단 레이더 장비를 보강재로 보강된 콘크리트의 안전 진단에 적용 할 수 있는지에 대한 가능성을 실험하는 모델링으로서 그 의미가 있다. 앞서 진행한 연구에 의하면, 4.5mm 두께의 보강재 아래에 발생한 1mm, 3mm 두께의 미세 공동의 위치가 중심 주파수 3GHz의 사인 파에 의해 각각 8.82%, 4.30%의 오차 범위 내에서 탐색 가능함을 알 수 있다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 실험에서는 수많은 입사파와 시편을 이용하여 실험을 수행했으며 정확한 모양의 3GHz, 5GHz의 가우스 파와 사인 파를 프로그램 상에서 모델링 하는데 성공하였다.
- 2) 보강재와 콘크리트 사이에서 박리는 매우 얇기 때문에 박리 발생 지점에서 반사파와 투과파 사이에 간섭이 심하게 발생하여 단순히 박리가 모델링 된 시편에서 얻어진 산란파만을 가지고는 정확한 분석이 어려우며, 박리가 발생하지 않은 정상적인 시편에서 얻어진 산란파와 비교 분석함으로써 박리의 위치를 밝혀낼 수 있었다.
- 3) 모델링 결과에서 나타나듯이 가우스 파, 사인 파 모두의 경우 1mm의 박리 보다 3mm의 박리를 찾아내는데 더 정확한 결과를 보였다. 즉 박리의 두께가 클수록 측정의 정확성이 높아짐을 알 수 있었다. 또한 같은 박리의 두께를 가지는 시편에서는 가우스 파보다 사인 파를 입사파로 사용하여 얻어진 산란파가 박리에 대한 보다 정확한 정보를 가지고 있음을 알 수 있었다. 특히 3GHz의 사인 파의 경우, 3mm에서 -4.30%, 1mm에서 8.82%의 오차를 보여 박리의 두께가 클수록 측정 오차율이 줄어들을 알 수 있다. 실제 레이더 장비의 입사파가 사인 파와 유사하다는 점에서, 본 실험의 결과는 레이더 장비를 보강재 박리 탐사에 적용하는데 있어 긍정적으로 평가될 수 있다.
- 4) 본 연구에서 측정의 정확성으로 제시되었던 오차율은 그

기준이 되는 길이가 보강재의 보강두께 4.5mm로 미소해 mm단위의 오차에도 매우 민감하게 오차율에 영향을 미쳤다. 또한 본 연구의 목적인 보강재의 박리 탐사에서 박리의 발생위치보다 발생여부가 더 중요한 관심의 대상이므로 측정자의 오차 한계 기준에 따라 1mm의 박리 탐사에서 얻어진 결과 값도 충분히 유효한 측정값이 될 수 있다고 판단된다.

- 5) 5GHz의 사인파보다 3GHz의 사인파가 더 좋은 해상도를 보이고 있는데 이는 향후 연구과제로 두어 오차의 크기와 중심주파수 간의 어떠한 관계가 있는지 살펴 볼 필요가 있겠다.

감사의 글

이 연구는 산업자원부 2003년도 전력산업기술개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 임홍철, 남국광, "유한차분 시간영역법을 이용한 콘크리트 두께측정 전자파 모델링의 적용", 한국전산구조공학회 논문집, 제16권, 제2호, 2002, pp. 341~349
2. 임홍철, 조운범, "유한차분 시간영역법을 이용한 콘크리트의 두께측정과 철근위치 탐사를 위한 전자기파 전파 모델링", 한국전산구조공학회 논문집, 제12권, 제4호, 1999, pp. 639~648
3. Karl, S. K. and Raymond, L., "The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics", CRC Press, 1993.
4. Taflove, A., "Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method", Artech House, 1992.
5. Buyukozturk, O. and Rhim, H. C., "Modeling of electromagnetic wave scattering by concrete specimens", Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 5, 1995, pp. 1011~1022
6. Taflove, A. and Brodwin, M. E., "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol 23, No. 8, 1975, pp. 623-630
7. Rhim, H. C. and Buyukozturk, O., "Electromagnetic Properties of Concrete at Microwave Frequency Range", ACI Materials Journal, Vol. 95, No. 3, 1998, pp. 262~271