

콘크리트내의 철근 및 공동탐사를 위한 측정과 분석

Measurements and Data Interpretation for the Detection of Steel Bars and Delamination inside Concrete

임홍철*, 박기준**, 이승재***

Hong-Chul Rhim*, Ki-Joon Park** and Soong-Jae Lee***

초 록 콘크리트 내부에 위치한 철근과 공동의 탐사 성능을 파악하기 위해, 상용 비파괴 검사 장비를 이용한 측정과 이론적 모델링을 실시하고, 향상된 신호처리 결과의 예를 제시하였다. 실측에 사용된 장비는 레이더 장비 2종과 전자기법 철근 탐사 장비 2종이다. 철근 탐사에는 직경 19mm의 철근을, 그리고 공동 탐사에는 두께 50 mm의 스티로폼을 콘크리트 시험체 안에 각기 다른 피복 두께로 매립하여 측정하였다. 또한, 철근의 수평 배근 간격 탐사를 위해 두 개의 철근을 매립 측정하였다. 실험과 함께 전자기파 모델링 방법을 소개하여, 레이더를 이용한 경우, 철근과 공동이 탐지되는 과정을 이론적으로 보여주었다. 탐사능을 향상시키기 위해, 상용 레이더 장비의 측정 결과를 신호처리 과정을 통해 개선하였다.

주요용어: 레이더, 전자기법, 피복 두께, 철근, 공동

Abstract To determine detection capabilities of locating steel bars and delamination inside concrete, commercially available nondestructive testing (NDT) equipments have been tested. The equipments include two radar systems and two electromagnetic method systems. The inclusions are a 19 mm diameter steel bar and 50 mm thick delamination embedded at different cover depths from the surface of concrete specimens. For the steel bar, attempts were made to determine the size of the bars by changing the diameter of the bars. A sample result of measuring horizontal spacing between doubly reinforced bars is presented in this paper. Experimental results on various measurement cases are discussed. Application of numerical modeling technique for the simulation of radar measurements and improved output display of radar measurements are also presented.

Keywords: radar, electromagnetic method, cover depth, steel bar, delamination

1. 서 론

구조물을 안전한 상태로 유지 관리하기 위해서는, 구조물을 정밀하게 검사하여 이상 여부를 확인할 수 있어야 한다. 또한, 구조적으로 문제가 되기 전에 미리 조치를 취하여, 안전한 상태로 구조물을 보전할 수 있도록 하여

야 한다. 이를 위해서는 내구성 진단이 필요하며, 그 진단 방법으로 비파괴 검사의 활용도가 점차 증가하고 있다[1,2]. 그러나, 비파괴 검사방법의 중요도에 비해 검사방법을 보다 정확하고 체계적으로 활용하기 위한 연구는 국내외적으로 아직 초기 단계에 있다고 할 수 있다.

이 연구의 목적은 국내에서 현재 사용되고 있는 비파

과 검사 장비의 철근 및 공동 탐사 성능을 파악하는데 있다. 실험에 사용된 장비는 국내에 활용되고 있는 장비 중 레이더 2종, 전자기 장비 2종이다. 장비의 종류별 특성을 알고자 하는 것이 이 연구의 목적이므로, 제조 회사나 장비명은 공개하지 않고, 다만 이해를 돕기 위해 실제 장비의 사진만을 실었다. 측정 결과는 사용된 장비의 평균값을 사용하였다.

측정 결과, 레이더 장비는 콘크리트 내 철근과 공동의 위치 탐사, 그리고 철근의 배근 간격 탐사에 효과적이며, 전자기 장비는 철근의 위치 탐사, 철근의 직경 측정, 그리고 철근 배근 간격 탐지에 유용한 것으로 나타났다. 또한, 실험과 함께 모델링을 실시하여 레이더를 이용한 경우, 철근과 공동이 탐지되는 과정을 보여 주었다. 모델링에는 유한 차분 시간 영역법(Finite difference-time domain method)을 사용하였고, 콘크리트 내 매립된 물체의 유전상수에 따라 반사 계수가 달라지고, 이를 이용하여 매립물의 종류를 판별하는 방법을 다루었다.

철근과 공동의 탐사능을 향상시키기 위해서는 측정된 신호값을 처리하는 기법이 필요하며, 신호처리 과정을 통하여 개선된 측정 결과를 제시하였다.

2. 측정 장비의 작동 원리와 특성

2.1. 레이더 장비

전자기파를 이용한 레이더(Radar)의 측정 원리는, 마이크로파 대역의 전자파가 목표물 혹은 매질을 통과할 때, 그 전자파의 투과와 반사가 목표물 혹은 매질의 전자기적 특성과 모양에 영향을 받는다는 것이다. 실측 과정에서는 송신 안테나로부터 탐사하고자 하는 콘크리트 시험체에 전자파를 방사하면, 이 전자파는 전자기적 성질이 다른 물질, 예를 들어, 철근, 공동 또는 배관 등의 경계면에서 반사되어 수신 안테나에 도달한다. 이 전자파의 반사파형으로부터 매립된 물체의 모양과 재질을 판정한다. Fig. 1에 레이더 장비를 이용한 측정 개요를 나타내었다.

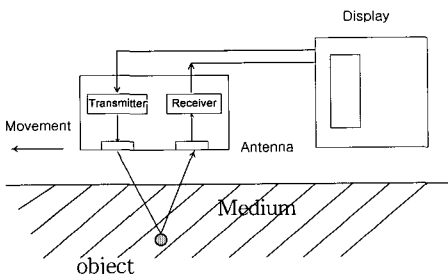


Fig. 1 Schematic view of radar system

이때, 콘크리트중의 전자파 속도 (ν)는 콘크리트의 전자기적 재료 특성인 유전상수 ϵ_r 에 따라 변화한다[3].

$$\nu = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ (m/s)} \quad (1)$$

여기서, C : 진공상태에서 전자파의 속도 ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$),

ϵ_r : 콘크리트의 유전상수

매립된 목표물까지의 거리(D)는 입사파와 반사파의 왕복 전달시간(T)로부터 다음 식을 이용하여 구할 수 있다 [4].

$$D = \nu \times \left(\frac{T}{2}\right) \\ = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \left(\frac{T}{2}\right) \text{ (m)} \quad (2)$$

레이더법을 이용한 비파괴 검사 장비는 주로, 철근탐사, 공동 탐사, 배관 탐사, 터널 라이닝 배면탐사, 그리고 금속 파이프 탐사 등에 쓰이며, 측정심도가 수 미터에 달한다. Photo 1과 2는 이러한 레이더 측정기기 중 이 연구에 사용된 2개 장비의 실물 모습이다.

2.2. 전자기 장비

전자기법(electromagnetic method)의 측정 원리는 탐침(probe)의 양극 사이에 자기장을 발생시켜 되돌아온 자속의 양을 측정하여 철근의 유무를 확인하는 것이다. 철근이 존재하는 경우, 자기장의 세기가 변화하며, 그 변화량의 정도는 철근 직경과 탐침으로 부터의 거리에 따라 달라진다. 철근을 통과하는 자속의 양은 피복의 두께와 철근 직경에 영향을 받으며 피복 두께가 얇을수록, 철근 직경이 클수록 더 많은 자속을 통과시켜서 탐사 가능성이 높아진다.

일반적으로 전자기법은 0 ~ 120mm의 피복 두께내에서 철근을 탐사할 수 있으며, 배근 간격이 넓은 철근에 대해서는 좋은 결과를 얻지만, 철근이 조밀하게 배근되었거나 주위에 큰 장애가 있는 곳에서는 신뢰성 있는 결과를 얻기 힘들어진다[5].

국내에 사용되고 있는 전자기 장비는 주로 철근 탐사, 철근 직경 탐사, 콘크리트 피복두께 탐사 등에 쓰이며, 측정 심도는 수십 센티미터에 달한다.

Photo 3과 4는 실험에 사용된 전자기 장비 2개의 실물 모습이다.

3. 시험체 제작

실험은 철근 위치 측정(피복 두께 측정, 철근 직경 측정, 공동 탐사 및 철근 수평 간격 탐사로 이루어졌다.

철근 위치 측정을 위한 콘크리트 시험체의 크기는 1,000mm (길이) × 1,000mm (폭) × 140mm (두께) 이며, 피복 두께를 32mm, 54mm, 71mm로 변화시켜 시험체 3개를 제작하였고, 매립된 철근 1개의 직경은 19mm 이다.

철근 직경 측정을 위한 시험체의 크기는 1,000mm (길이) × 1,000mm (폭) × 140mm (두께) 이며, 피복 두께 32mm에, 시험체에 매립된 철근의 직경을 13mm, 19mm, 25mm로 변화시켰다. 철근 길이는 1,000mm로, 시험체의 폭과 동일하게 제작하였다.

공동 탐사를 위한 시험체의 크기는 1,000mm (길이) × 600mm (폭) × 140mm (두께) 이며, 시험체에 매립된 공동의 크기는 길이 200mm (길이) × 600mm (폭)

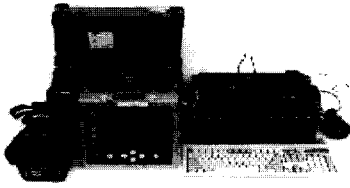


Photo 1 Radar Equipment A

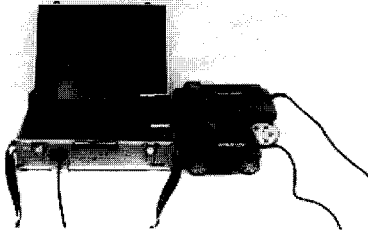


Photo 2 Radar Equipment B



Photo 3 Electromagnetic Equipment A

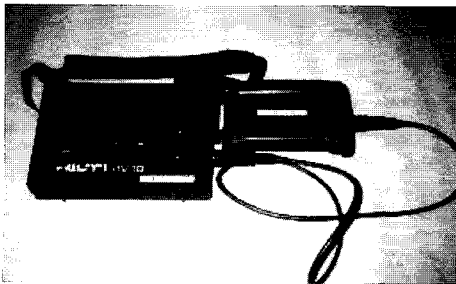
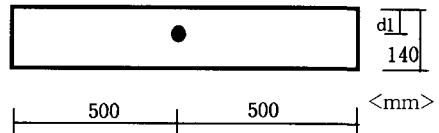
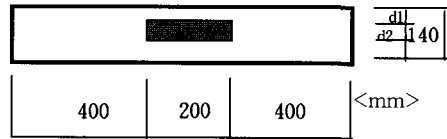


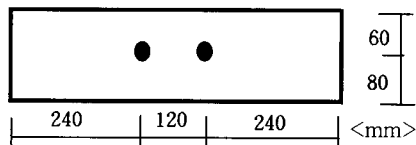
Photo 4 Electromagnetic Equipment B



(a) Specimen for the measurement of cover depth and diameter of a steel bar (d1: cover depth)



(b) Specimen for the detection of delamination (d1: 30, 60, 75mm, d2: 50mm)



(c) Specimen for the detection of horizontally embedded ϕ 19mm steel bars

Fig. 2 Section view of concrete specimens

× 140mm (두께) 이다. 피복 두께를 30mm, 60mm, 75mm로 변화시켜서 시험체를 제작하였으며, 이때 공동의 재질로는 스티로폼을 사용하였다.

철근의 수평 간격 탐사를 위한 시험체의 크기는 600 mm (길이) × 600 mm (폭) × 140 mm (두께) 이며, 시험체에 매립된 2개의 철근은 직경 19 mm로 두 철근사이의 수평 간격은 120 mm이다. 피복 두께는 60 mm 로 시험체를 제작하였다.

이상 4개 실험을 위한 시험체의 단면과 실험 종류를 Fig. 2와 Table 1에 각각 정리하였다.

Table 1 Measurement cases

Target	Cover depth	Diameter of steel bar	Thickness of delamination	Method used
Steel bar	32mm	19mm	-	R E
	54mm	19mm	-	
	71mm	19mm	-	
Diameter of steel bar	32mm	13mm	-	E
	32mm	19mm	-	
	32mm	25mm	-	
Delamination	30mm	-	50mm	R
	60mm	-	50mm	
	75mm	-	50mm	
Horizontal spacing of steel bars	60mm	19mm	-	R E

R : Radar method
E : Electromagnetic method

4. 실험 결과

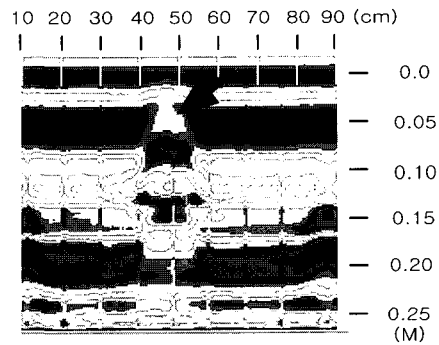
4.1. 철근 위치 측정

철근 위치 측정에서는, 레이더법과 전자기법 모두 약간의 오차는 있었지만, 성공적으로 찾아 낼 수 있었다. 레이더법의 경우, Fig. 3 (a)와 (b)에서처럼 출력된 화상으로 철근을 판독하게 되는데, 숙련된 검사자가 아니면 정확한 철근의 위치를 판독하기가 쉽지 않다. 화상표로 표시한 곳이 실제 철근의 위치이다. 측정 결과에서는, 또한, 목표물이 반복하여 나타나는 ringing 현상이 나타나는데, 이는 철근이 연속해서 있는 경우에 철근의 위치를 판독하기 힘들게 만드는 요인중 하나이다. 실험결과의 판독에 있어 레이더법의 경우 조작자 분석에 따라 차이가 날 수

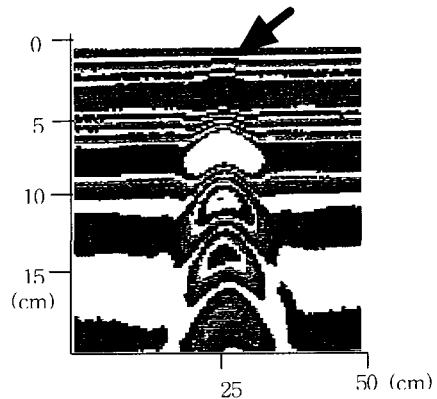
있다. 보다 객관적인 분석을 위한 레이더법의 신호 처리 과정을 5절에서 언급하였다.

전자기법은 Fig. 3 (c)와 (d)에서처럼 레이더법에 비해 단순 명료하게 철근의 위치를 측정할 수 있다. Fig. 3 (d)가 (c)에 비해서 굵게 철근이 나타나고 있으나, 이는 장비의 특성상 굵게 나타나는 것으로, 실제로는 똑같은 직경의 철근에 대한 측정 결과이다.

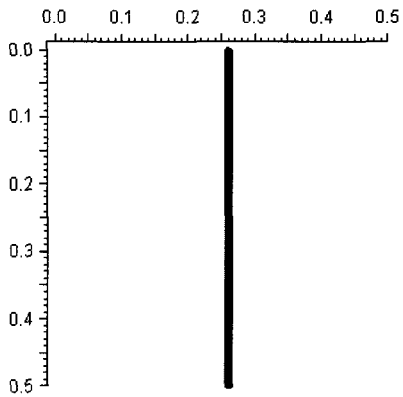
측정 결과에 대한 정량적 비교를 Table 2에 정리하였으며, 그 결과를 보면, 피복 두께가 가장 얇은 32 mm인 경우, 레이더법과 전자기법 모두 오차가 크게 나타나고 있는데, 이는 피복 두께가 얇을 경우, 시편의 표면과 철근의 상호 작용으로 인한 결과로 판단된다. 피복 두께가 어느 정도 깊이 이상이 되면, 실제와 거의 동일한 값을 찾아낼 수 있음을 Table 2에서 알 수 있다.



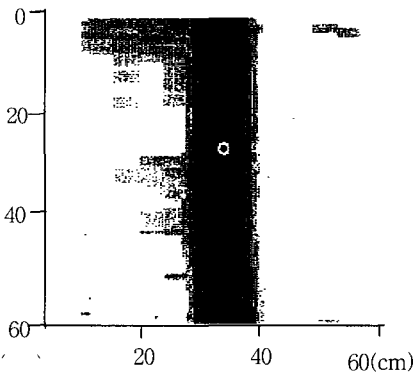
(a) Radar Equipment A



(b) Radar Equipment B



(c) Electromagnetic Equipment A (단위: m)



(d) Electromagnetic Equipment B

Fig. 3 Results of steel bar detection

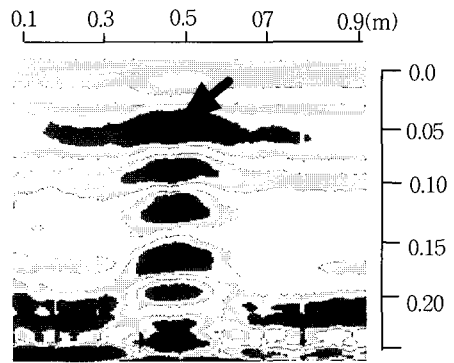
4.2. 철근 직경 측정

레이더법에서는 출력 데이터로 철근 직경을 찾아내는 것이 어려웠다. 반면에, 전자기법을 이용한 경우에는, 비교적 간편하게 직경을 찾아낼 수 있었다. Table 2에서 보듯이 철근의 직경이 두꺼워 질수록 정확하게 직경을 찾아내고 있음을 알 수 있다. 이는 전자기법의 측정 원리에 따라, 철근 직경이 클수록 더 많은 자속을 통과시킬 수 있기 때문이다.

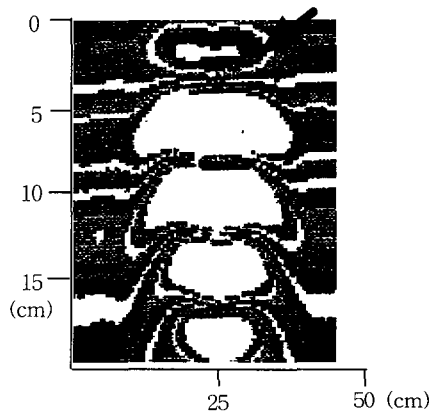
4.3. 공동 탐사

전자기법을 이용하는 측정 장비는 비금속성인 공동의 탐사가 불가능하므로, 레이더만을 이용하여 공동을 탐사하였다. 레이더법을 이용한 공동 탐사는 전자파가 콘크리트 내에서 공동을 통과할 때, 반사계수의 차이가 나므로, 이를 통해 공동의 위치를 Table 2 결과처럼 찾아내고 있다. 피복 두께가 두꺼워 질수록 측정 결과가 정확해짐을 알 수 있는데, 이는 철근의 위치 측정에서와 같이 피복 두께가 얇으면, 레이더와 목표물 사이에 상호 작용을 일으키기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4의 (a)와 (b)는 레이더법을 이용한 피복 두께 30 mm 공동 탐사의 결과를 보여주고 있다. 단, 공동 탐사의 경우도, 철근 탐사와 마찬가지로, ringing 현상이 나타나 숙련된 검사자가 아니라면 정확한 위치를 판별하기 힘들다.



(a) Radar Equipment A



(b) Radar Equipment B

Fig. 4 Results of delamination measurement

4.4. 철근 수평 간격 탐사

레이더법, 전자기법 모두 시편의 철근 수평 간격인 120mm를 찾아내었다. Fig. 5 (a)와 (b)는 레이더법을 이용한 철근 수평 간격 탐사 결과이고, (c)와 (d)는 전자기법을 이용한 철근 수평 간격 탐사 결과이다.

5. 컴퓨터 모델링과 신호 처리

5.1. 전자파의 컴퓨터 모델링

전자파를 이용한 비파괴 검사법은 컴퓨터 모델링을 통해서 효과적으로 이루어질 수 있다. 모델링은 전자파가 콘크리트안에서 진행되는 모습을 영상화 할 수 있기 때

문에 레이더 실측자료를 분석하는데 도움을 줄 수 있다. 컴퓨터 모델링을 통해서 콘크리트 안에서의 레이더의 분해능과 측정깊이를 결정하는 요인들인 전자파의 주파수, 대역폭, 주사폭, 편파, 입사각도, 측정거리, 측정대상의 기하학적·재료적 성질 등이 실제레이더 측정결과에 어떤 영향을 미치는지를 분석할 수 있다[6].

이 연구에서는 수치적 모델링 방법 중에서 시간영역에서 전자파의 진행을 시각화 할 수 있는 유한차분 시간영역법(Finite difference-time domain method, 이하 FD-TD법)을 사용하여 모델링하였다. FD-TD법은 맥스웰 방정식을 시간의 함수로 풀이하여 직접 이산화시킨 후 계산영역 안에서 전기장과 자기장의 값을 구하는데 그 기초를 두고 있다.

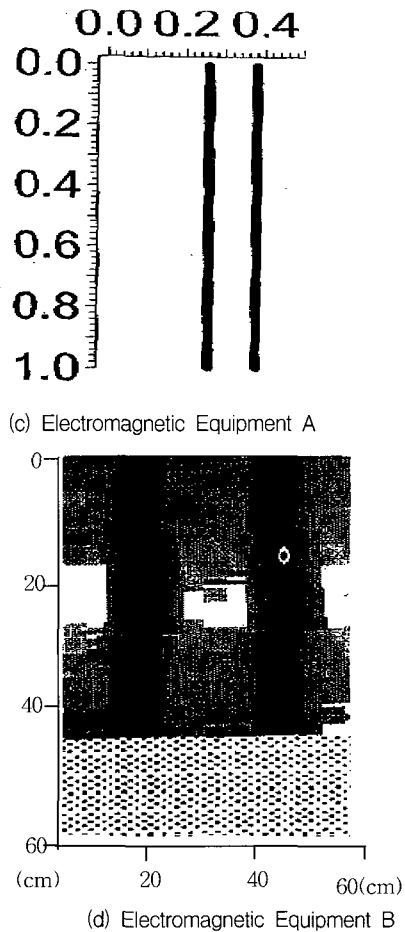
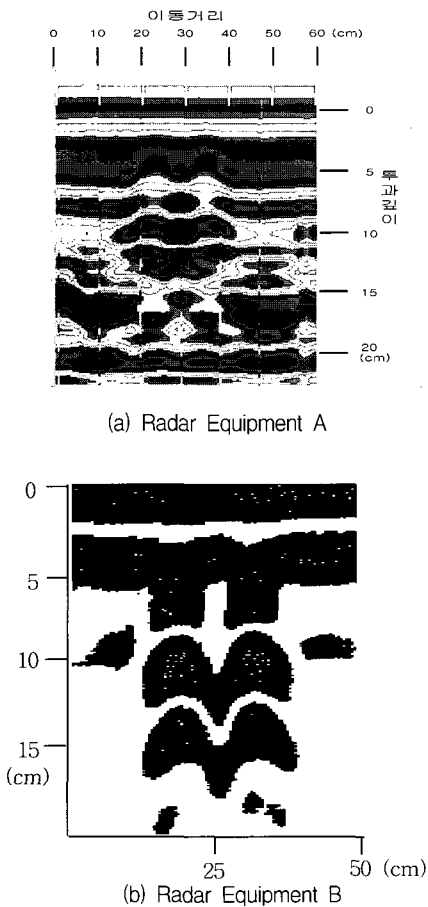


Fig. 5 Results of horizontal spacing measurement of steel bar

전자파를 해석하기 위해서는 맥스웰의 편미분 방정식을 기본으로 하며, 시변계에서의 맥스웰 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E} \tag{3a}$$

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H} \tag{3b}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \tag{3c}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{3d}$$

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

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

\vec{D} : 전속밀도 [coulombs/meter²],

\vec{B} : 자속밀도[webers/meter²],

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. 시간

과 공간에 관한 성분을 다음의 표기법을 사용하여 이산화하면 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \tag{4a}$$

$$t_n = n\Delta t \tag{4b}$$

$$u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = u^n_{i,j,k} \tag{4c}$$

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 는 각 x, y, z 방향의 공간 이산간격이며, Δt 는 시간축의 이산간격이다.

Fig. 6은 피복 두께 32mm의 시험체에 매립된 철근 탐사를 위한 모델링이며, 그림에서 보면 시험체의 표면에서 전자파는 음의 방향으로 반사하며, 철근의 표면에서 또한 전자파는 음의 방향으로 반사하게 된다. 그리고 시험체의 뒷 표면에서 전자파는 양의 방향으로 반사하게 되는데, 이러한 모델링을 통해서 철근 위치 측정에 관한 이론적 비교 결과를 얻을 수 있다. Fig. 7은 피복 30mm의 시험체에 있는 공동을 탐사하기 위한 모델링이며, 전자파는 시험체의 앞 표면에서는 음의 방향으로 반사하게 되며, 시험체 안에 있는 공동에서는 전자파가 양의 방향으로 반사하게 된다. 그리고, 전자파가 계속 진행하여 시험체의 뒷 표면에 도착하게 되면, 전자파는 또 다시 양의 방향으로 반사하게 된다. 이러한 모델링을 통해서 공동의 위치를 알 수 있다.

Table 2 Measured data for four different cases

Target		Steel bar			Diameter of steel bar			Delamination			Horizontal spacing of steel bars
Actual dimension		Cover depth (mm)			Diameter (mm)			Cover depth (mm)			Spacing (mm)
		32	54	71	13	19	25	30	60	75	120
Radar method	Measured value ¹⁾	39.6	57.7	75.0	- ³⁾	-	-	33.9	54.9	69.8	121.5
	Error (%) ²⁾	23.8	6.9	5.6	-	-	-	13.0	8.1	6.9	1.3
Electro-magnetic method	Measured value	36.0	52.0	74.5	14.0	20.0	25.0	-	-	-	123.0
	Error (%)	12.5	3.7	4.9	7.7	5.3	0	-	-	-	2.5

주 1) 각 측정 결과 값은 레이더 장비 2종과 전자기 장비 2종의 측정 결과를 각각 평균한 값임.

2) 오차는 절대 값을 백분율로 표시.

3) “-” 표시는 측정이 불가능한 경우임.

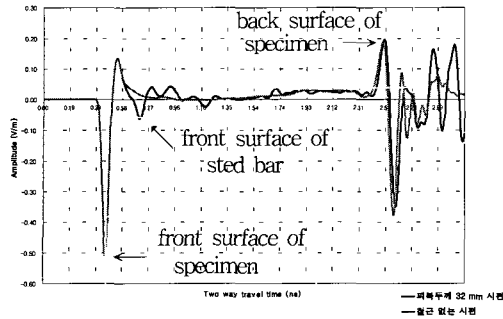
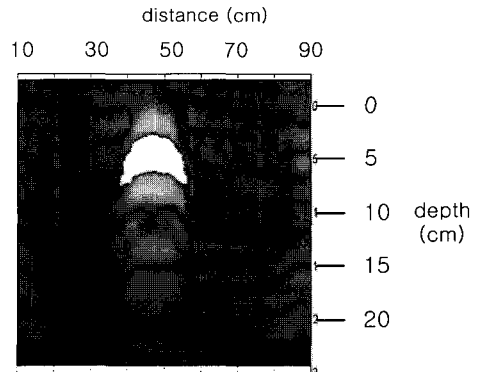


Fig. 6 Result of steel bar detection modeling



(a) Processed data for a steel bar

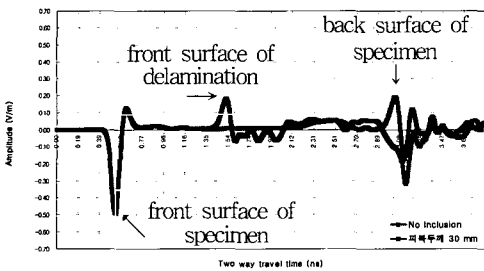
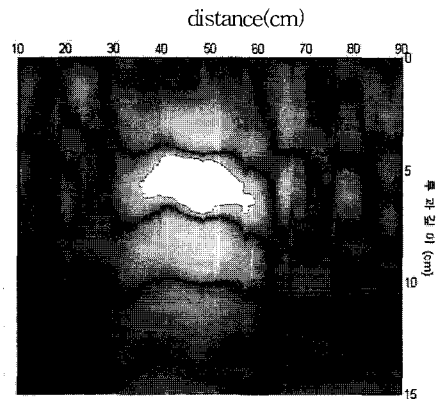


Fig. 7 Result of delamination detection modeling



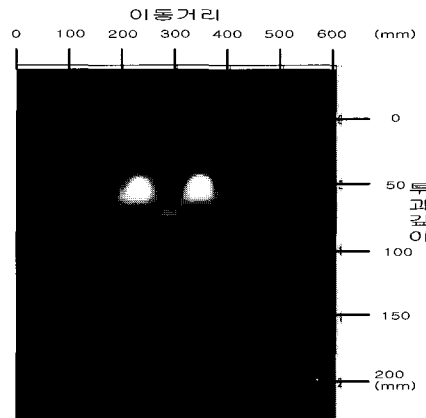
(b) Processed data for delamination

5.2. 신호처리 방법 개발

상용 레이더 장비의 측정 결과는, 숙련된 검사자에게도 매립된 물체의 정확한 위치를 찾는 데 어려움을 줄 수 있다. 이러한 측정값을, 앞서 기술한 모델링 결과에 근거하여 신호처리하게 되면, Fig. 8 (a),(b),(c)에 나타난 것처럼, 개선된 화상처리 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 8의 (a)는 철근이 1개 매립되어 있는 시험체를 신호처리한 결과이며, 신호처리하기 전의 출력 결과는 Fig. 3 (a)에서와 같이 ringing 현상 때문에 여러 파형 중에서는 반사파형이 철근인지 구별하기 쉽지 않았으나, Fig. 8 (a)를 보게 되면 ringing이 모두 제거되고, 철근의 형상만 남게 되므로 측정 결과를 판독하기에 용이하다[7].

Fig. 8 (b)는 공동을 탐사 신호처리한 결과이며, 신호처리하기 전의 출력 화상은 Fig. 4 (a)에서 보는 것과 같이 ringing 때문에 어느 반사파형을 공동으로 판독해야 할지 곤란하지만, 신호처리를 통하여, ringing을 제거하



(c) Processed data for two steel bars

Fig. 8 Improved radar image

게되면, 공동을 쉽게 판독할 수 있다[8].

Fig. 8 (c)는 Fig. 5 (a)의 철근이 2개 있는 시험체를 신호처리한 결과이다. 신호처리를 통하여, 측정하고자하는 목표물만이 선명하게 남게된다[9].

5.3. 향후 개발 방향

기존의 상용장비 결과를 향상시키기 위해서는 전자파 이론에 근거한 컴퓨터 모델링과 신호처리과정이 필요하며, 신호처리를 통해서 획득한 정확한 영상으로 비파괴 검사의 신뢰도가 증진될 수 있다.

6. 결 론

연구 결과, 레이더법은 콘크리트 내 철근과 공동의 위치 탐사, 그리고 철근의 배근 간격 탐사에 효과적이며, 전자기법은 철근의 위치 탐사, 철근의 직경 측정, 그리고 철근 배근 간격 탐사에 유용한 측정방법으로 판별되었다. 레이더법은 매질 상호간의 서로 다른 전자기적 성질을 이용하기 때문에 철근이나 공동 모두 잘 찾아내었으나, 전자기법은 금속성에 대해서만 전자기파가 반응하기 때문에 공동이나 crack 등 비금속성 물체에 대해서는 탐사할 수 없었다.

레이더법을 이용한 철근과 공동 탐사의 모델링과 신호처리 방법을 제시함으로써, 장비 조작자에 따라서 출력 결과를 상이하게 판독할 수 있는 레이더법의 판독상 난점을 개선할 수 있는 가능성을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(KOSF)에서 설립한 지진공학 연구센터(KEERC)로부터 연구비를 지원 받았고, 교육부의 1996년도 이공계 대학 연구소 기자재 첨단화 지원 사업에 따라 연세대학교 공과대학 건축과학기술연구소 비파괴구조연구실이 보유하고 있는 실험장비를 사용하였다.

참고 문헌

- [1] Chong, K. P., Scalzi, J. B., and Dillon, O. W., Overview of Nondestructive Evaluation Projects

and Initiative at NSF," Journal of Intelligent Materials, System and Structures, Vol. 1, pp. 422-431, October (1990)

- [2] 건축 토목 구조물의 비파괴 검사방법," 한국콘크리트학회지, 제10권, 제2호, pp. 5-64, (1998)
- [3] Rhim, H. C. and Buyukozturk, O., "Electromagnetic Properties of Concrete at Microwave Frequency Range," ACI Materials Journal, Vol. 95, No. 3, pp. 262-271, May-June (1998)
- [4] 박석균, 임홍철, "전자파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴검사", 콘크리트학회지, 제10권, 2호, pp. 27-39, (1998)
- [5] 윤재진, "구조물 진단의 이론과 실제", 기문당, (1999)
- [6] Buyukozturk O. and Rhim, H. C. "Modeling of Electromagnetic Wave Scattering by Concrete Specimens," Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 5, pp. 1011-1022, (1995)
- [7] Rhim, H. C. and Park, K. H., "Imaging of Steel Bars Embedded inside Mortar Specimens for Nondestructive Testing," KCI Concrete Journal, Vol. 12, No. 1, pp. 139-144, January (2000)
- [8] Rhim, H. C. "Detection of Steel Reinforcing Bars inside Concrete Using Radar," by Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2000, Edited by Taketo Uomoto, pp. 577-581, The Fifth International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Sanjyo Kaikan Hall, Hongo Campus, University of Tokyo, Tokyo, Japan, April 25-27, (2000)
- [9] 임홍철, 김우석, "레이더를 이용한 콘크리트 시편내 수평 배근 간격 탐사 (Measurement of Horizontal Rebar Spacing in Concrete Specimens Using Radar)," 한국지진공학회 논문집, 제4권, 제2호, pp. 65-71, 6월 (2000)