

# 목조 건축물의 비파괴 검사를 위한 표면하부 탐사 레이더의 적용 가능성 검토 : FDTD 모의계산과 실험 측정

## A Feasibility Study on a Subsurface-Penetrating Radar for Nondestructive Testing of Wooden Architectures : FDTD Simulation and Laboratory Measurement

현 승 엽\*\*\* · 김 세 윤\*\*

Seung-Yeup Hyun\*\*\* · Se-Yun Kim\*\*

### 요 약

우리나라에는 역사적으로 아름답고 소중한 목조 건축물들이 문화재로 보존되고 있다. 그러나 목조 건축물들은 오랜 세월동안 풍화작용, 병충해 등과 같은 거친 환경조건에 노출되어 있다. 이러한 원인으로 인하여 건축물에 구조적 결함을 야기하기도 한다. 따라서 사전에 목조 건축물을 진단할 수 있는 방법이 필요하다. 본 논문에서는 목조 건축물의 비파괴 검사에 표면하부 탐사 레이더의 적용 가능성을 3차원 유한차분 시간영역 모의계산과 실제 측정을 통하여 조사하였다.

### Abstract

In our country, historically beautiful and significant wooden architectures are preserved as the cultural properties. For a long time, however, the architectures are often exposed to rough environmental conditions, such as weathering, insect attack, etc. This may lead to deterioration of structural integrity of the architectures. Therefore, it is necessary to diagnose wooden architectures in advance. In this paper, the possibility of a subsurface-penetrating radar (SPR) for non-destructive testing (NDT) of wooden architectures is investigated by using the three-dimensional finite-difference time-domain (FDTD) simulation and actual laboratory measurement.

Key words : SPR, NDT, FDTD, Wooden Architecture

### I. 서 론

최근 문화재청에 따르면 우리나라의 유구한 역사와 전통을 반영하는 대표적인 목조 건축물들이 오랜 세월동안 풍화작용, 병충해 등으로 인하여 썩거나 균열이 발생하고 있다고 한다. 심지어 국보 제

223호인 경복궁 근정전의 경우 주기둥의 심한 균열로 인하여 붕괴의 위험까지 직면해 있어서 현재 대대적인 보수 작업이 진행 중이다. 손상 부위가 표면으로 나타난 경우는 육안 탐지(visual detection) 방법으로 판별이 가능하나, 전문가조차도 내부의 손상이 어느 정도인지 파악하기는 어려운 실정이다<sup>[1]</sup>.

\*고려대학교 전파공학과(Dept. Radio Sciences and Eng., Korea Univ.)

\*\*한국과학기술연구원 영상미디어연구센터(Imaging Media Research Center, Korea Institute of Science and Technology)

· 논문 번호: 20020525-08S

· 수정완료일자: 2002년 8월 12일

따라서 목조 건축물의 내부 손상 정도를 사전에 효율적으로 탐지할 수 있는 비파괴 검사(NDT; Non-Destructive Testing) 방법이 필요하다.

지금까지 목재에 대하여 대표적인 비파괴 검사 방법으로는 X-ray 단층촬영(CT ; Computerized Tomography), 초음파(ultrasonic), 표면하부 탐사 레이더(SPR ; Subsurface-Penetrating Radar)를 이용한 기법에 대한 연구가 진행되었다<sup>[2]</sup>. X-ray CT는 목재의 내부의 공동, 웅이뿐만 아니라 수분이 높게 포함된 부분까지도 우수한 해상도로 검사할 수 있는 반면에 장비의 구성이 복잡하고, 운용이 불편하며, 가격이 비싼 단점을 지니고 있어서 실제로 적용하기는 어렵다. 이와 달리 초음파의 경우에는 운용이 편리하면서 장비의 가격이 저렴하나 비교적 큰 크기의 손상 부위만 탐지가 가능하며, 목재 내부에서 초음파의 손실이 크므로 실제 적용범위가 매우 협소하다. 표면 하부 탐사 레이더는 지하에 매설된 파이프, 선로 등의 탐지에 주로 이용해 온 지하탐사 레이더(GPR; Ground-Penetrating Radar) 기법을 목재의 비파괴 검사에 응용한 것으로서 탐지범위와 장비 운용의 편리성 및 가격면에서 X-ray CT와 초음파 탐지의 중간 범위에 속한다. 현재 레이더를 이용한 비파괴 검사는 전자기 해석의 어려움으로 인하여 지하 매설물 탐지에 이용해 온 GPR 장비를 그대로 목재 구조에 시험적으로 응용하는 범위까지만 연구가 진행되어 있다.

본 연구진은 기존 연구에서 GPR을 이용한 지하 매설물 탐지 상황을 개선된 FDTD 기법으로 실제 측정상황을 등가로 전자기 해석한 바 있으며<sup>[3]</sup>, 이러한 모의계산 기법으로 레이더 시스템의 효율적인 설계와 성능개선에 이용하였다<sup>[4]</sup>. 또한 실험실에 목재 기둥 표본을 마련하고, 레이더를 이용하여 목재 기둥 내부의 공동의 탐지에 대한 FDTD 모의계산과 측정에 관한 비교 결과를 제시한 바 있다<sup>[5]</sup>. 본 연구에서는 [5]의 모의계산 방법을 개선하고, 실제 레이더 운용상에서 배경매질의 영향을 간편하면서 효율적으로 제거하는 방법을 제시함으로써 향후 표면하부 탐사 레이더를 이용한 기법이 목조 건축물의 비파괴 검사에 효과적으로 응용할 수 있음을 제시하였다.

## II. SPR 측정 상황의 FDTD 모의계산

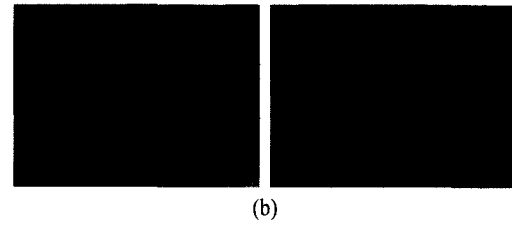
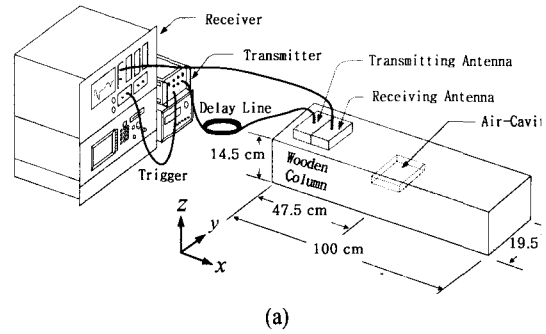


그림 1. 실험실에 마련한 측정 시스템

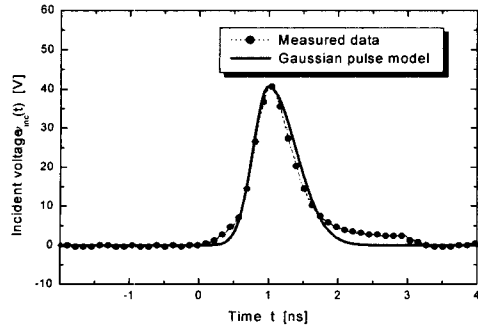
(a) 구성도, (b) 공동을 갖는 목재기둥 표본

Fig. 1. Laboratory measurement system.

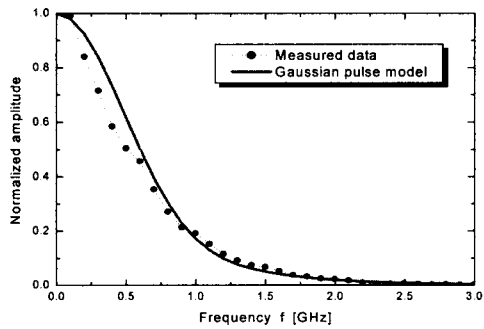
(a) geometry, (b) wooden column sample with air-cavity

그림 1과 같이 실험실내에 공동이 존재하는 목재 기둥 표본을 마련하고, 기둥 표면에 서로 평행인 송·수신안테나에 각각 송신기(임펄스 발생기)와 수신기(디지털 샘플링 오실로스코프)를 연결하여 SPR 측정 시스템을 구성하였다. 시스템 각부에 대한 내용은 [5]에서 다룬 바와 동일하다. FDTD에서 송신안테나의 급전 갭에 인가할 전압펄스는 실제로 측정된 자료를 2개의 Gaussian 펄스로 등가 모델링 하였다<sup>[5]</sup>. 비파괴 검사 대상인 목재기둥은 크기가 100 cm × 19.5 cm × 14.5 cm 인 미송이며, 그림 1(b)와 같이 길이방향(x축)으로 중심부에서 3 cm 깊이에 13 cm × 14.5 cm × 3.5 cm 크기인 직육면체 공동을 만들고, 동일 재질로 뚜껑을 만들어 목재 기둥 내부에 공동이 존재하는 상황으로 설정하였다.

급전선에 의한 손실과 분산특성을 고려하여 송신 안테나의 급전 갭에 인가한 전압펄스를 측정된 결과 그림 2의 점선과 같다. 측정된 펄스는 첨두치(peak value)를 중심으로 펄스의 상승부와 하강부가 서로 비대칭 특성이므로, 서로 다른 펄스폭을 갖는 2개의 Gaussian 펄스로 모델링하였다. 입사펄스의



(a)



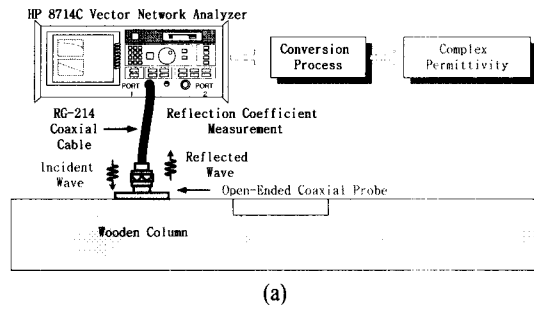
(b)

그림 2. 송신안테나의 급전 갭에서 입사전압 펄스 (a) 시간영역, (b) 주파수 영역

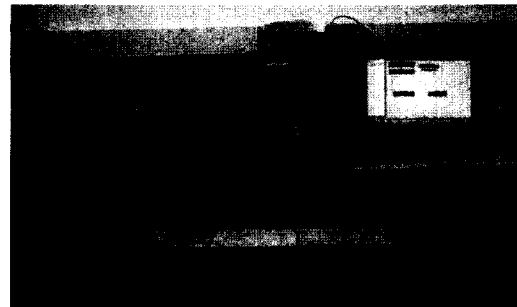
Fig. 2. Incident voltage pulse on feed gap of the transmitting antenna. (a) time domain, (b) frequency domain

주파수 특성을 살펴본 결과 DC에서 최대이고, 약 2.5 GHz까지 90 % 이상의 신호 성분이 존재하는 Gaussian 특성을 보였다.

본 연구진이 자체 개발한 개방단말 동축선 프로브법을 이용하여 그림 3과 같은 방법으로 실험용으로 마련한 목재 기둥 표본에 대하여 송신 펄스의 주파수 범위 내에서 복소 유전율(complex permittivity)을 측정하였다<sup>[6]</sup>. 측정결과를 실효 상대 유전율(effective relative permittivity)과 실효 도전율(effective conductivity)로 나타내면 그림 4의 점선과 같다. 그림 4에 의하면 DC에서 3 GHz까지 실효 상대 유전율은 약 2~1.4, 실효 도전율은 0~10 mS/m의 특성을 보였다. 그림 4에서 실선은 측정 결과를 Debye 분산 공식으로 등가 모델링한 것이다(Debye parameters는  $\epsilon_s = 1.6$ ,  $\epsilon_\infty = 1.2$ ,  $\tau = 8$  [ps],  $\sigma = 3$  [mS/m]).



(a)



(b)

그림 3. 목재 기둥의 전기적 특성 측정 시스템 (a) 구성도, (b) 실제 시스템

Fig. 3. Measurement system of electrical properties of wooden column (a) geometry, (b) actual system

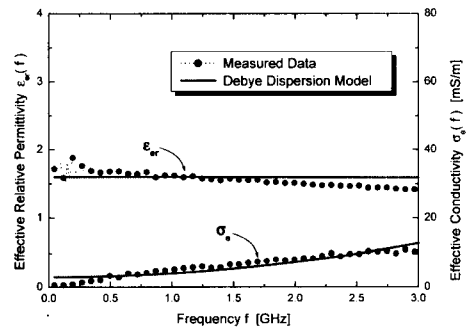


그림 4. 목재 기둥의 전기적 특성의 등가 모델링

Fig. 4. Equivalent modeling of electrical properties of wooden column.

그림 1의 측정상황을 그림 5와 같이 각 부를 FDTD 계산영역에 등가로 모델링하였다. 안테나 및 급전부에 대한 FDTD 등가모델, PML(Perfectly Matched Layer) 흡수경계조건(ABC; Absorbing Boundary Condition), 모의 계산을 위한 FDTD

목조 건축물의 비파괴 검사를 위한 표면하부 탐사 레이더의 적용 가능성 검토 : FDTD 모의계산과 실험 측정

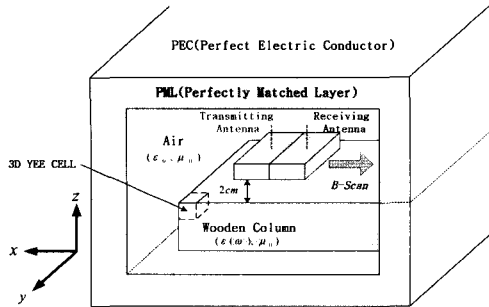
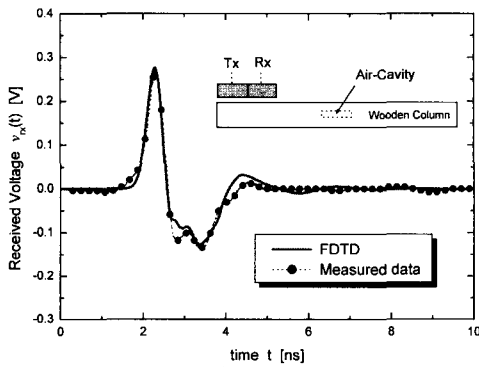
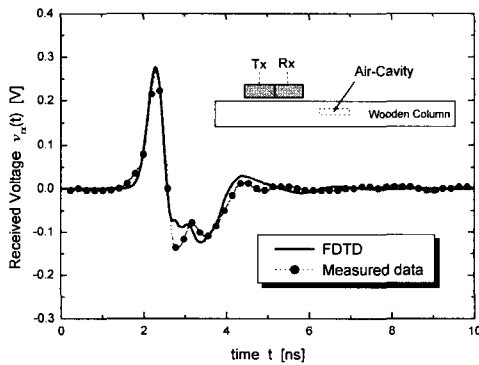


그림 5. SPR 측정상황의 FDTD 모의계산 구조  
Fig. 5. FDTD simulation geometry of SPR measurement situation.



(a)



(b)

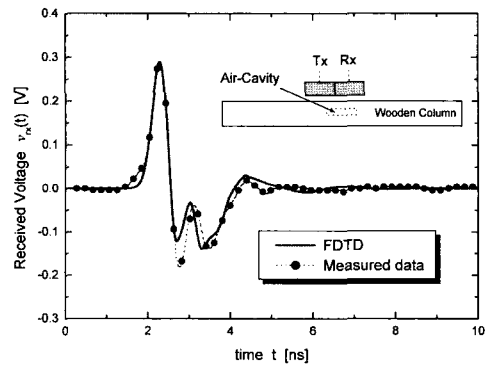
그림 6. 공동이 존재하지 않는 영역에서 수신전압 비교

(a) 기둥의 가장자리 영역, (b) 정상 영역의 중심부

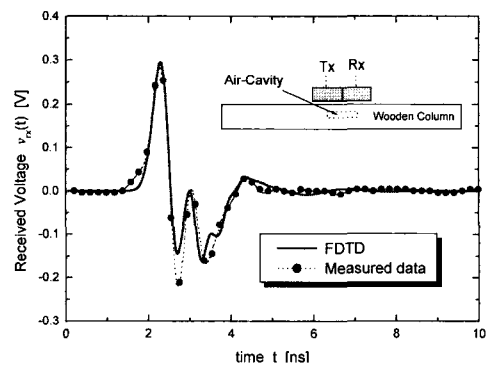
Fig. 6. Comparison results of received voltages in case of sound region of wooden column. (a) edge region of the column, (b) middle part of sound region

parameters (공간간격, 시간간격, 모의계산시간 등)에 관한 내용은 [5]에서 다룬 바와 같다.

안테나 시스템을 목재 기둥의 왼쪽 가장자리부터 길이 방향으로 수평 이동시키면서 측정시 대표적인 4가지 경우에 대한 측정자료와 FDTD 모의계산 결과를 비교하면 그림 6(공동이 존재하지 않는 영역) 그림 7(공동이 존재하는 영역)과 같다. 결과에 의하면 모두 2~2.5 ns 부근의 신호는 송·수신안테나간의 공기 중을 통한 직접 결합(direct-coupling) 성분이며, 2.5~4 ns 범위 시간에는 목재 기둥 내부의 공동 표적에 의한 신호가 수신됨을 알 수 있다. 안테나 시스템이 목재 기둥의 가장자리를 시작점으로 공동 표적에 가까워짐에 따라 공동 표적의 신호가



(a)



(b)

그림 7. 공동이 존재하는 영역에서 수신전압 비교

(a) 공동의 가장자리 영역, (b) 공동의 중심부

Fig. 7. Comparison results of received voltages in case of air-cavity region of wooden column. (a) edge region of the cavity, (b) middle part of the cavity

점차적으로 증가하였다.

기존 연구 [5]의 FDTD 모의계산에서는 목재 기둥을 실효 상대 유전율이 2인 무손실 유전체로 가정하여 모의계산을 수행하였었다. 그 결과(기존연구 [5]의 그림 5와 그림 6)를 본 연구의 그림 6과 그림 7에 각각 비교해 보면 목재 기둥의 분산 특성을 고려함으로써 패턴과 레벨에 대한 정확성이 약 0.5 V 가량 개선되어 측정결과에 좀더 근접함을 볼 수 있었다. 실제로 목재 기둥은 중심 축을 기준으로 표면에서 중심부로 갈수록 밀도가 증가하므로 유전율도 증가한다. 뿐만 아니라 목재 표면으로부터 동일 깊이 하더라도 횡단면과 종단면이 서로 밀도와 구성 조직이 다르므로 유전율이 차이가 발생한다. 본 연구에서 목재 기둥의 유전율 측정에 사용한 방법인 개방단말 동축선 프로브법은 프로브를 목재 표면에만 접촉시켜 반사계수의 변화로부터 유전율을 환산해 내는 방법이므로 목재 기둥의 표면부분의 유전율만 측정이 가능하다.

따라서, 목재 기둥의 방향과 심도별 비균일(inhomogeneous) 특성을 포함하는 유전율 측정된 결과를 이용한다면 본 연구의 결과보다 정확성은 좀더 개선될 것이다.

### III. SPR의 B-scan 운용 실험

실제 SPR의 운용상에서 목재기둥에 대한 2차원 단면 영상을 얻기 위하여 그림 8과 같이 목재 기둥의 축 방향으로 안테나 시스템을 수평이동시키면서 각각의 위치에서 B-scan 자료를 획득하였다. 측정자료를 수평이동 방향의 안테나 위치에 대한 gray-scale로 표현하면 그림 9와 같이 목재 기둥의 횡단

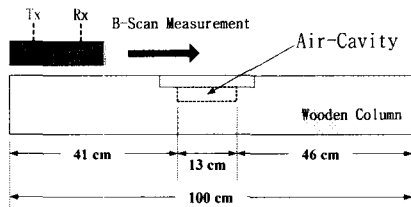


그림 8. 목재기둥에 대한 SPR의 B-scan 운용  
Fig. 8. B-scan operation of SPR on wooden column.

면에 대한 2차원 영상을 얻을 수 있으며, 이를 B-scan 영상(B-scan image)이라고 한다.

그림 9에서 2 ns 근방에 송·수신안테나간의 직접 결합 신호 성분이고, 2.5~4 ns 시간에 수평방향으로 40~60 cm 위치에서 공동에 의한 신호가 희미하게 나타남을 볼 수 있다. 그러나 직접결합 성분이 높기 때문에 공동에 의한 신호에 의한 영상이 미약하여 이 영상만으로는 공동 표적의 위치와 크기를 판별하기 어렵다. 따라서 그림 9와 같이 측정된 B-scan 자료에 후처리(post-processing) 기법을 적용하여 표적에 의한 영상을 추출한다. 일반적으로 B-scan 영상의 전체 평균자료(total average data)를 직접결합 성분으로 가정하여 측정된 B-scan 자료와 평균 자료의 차(subtraction)를 취하는 방법을 이용한다. 이와 같은 방법으로 그림 10과 같은 영상을 얻을 수 있으며, 배경매질에 의한 직접결합 신호 성분은 제거되고, 공동 표적에 의한 신호의 영상만을 근사적 얻을 수 있다. 그림 10에 의하면 그림 9보다 표적의 영상이 뚜렷하게 나타난다. 그러나, 전체 영상에 대한 평균 자료로 얻은 신호에는 공동에 의한 신호도 일부 포함되어 있기 때문에 위와 같은 차(subtraction)로 처리를 과정에서 실제 영상의 해상도가 떨어지며, 심한 경우에는 표적의 영상을 왜곡시키기도 한다. 따라서 본 연구에서는 표적에 의한 응답의 해상도를 높이고, 왜곡을 줄이는 간편한 방법을 제시하고자 한다. 첫 번째 과정에서는 기존의

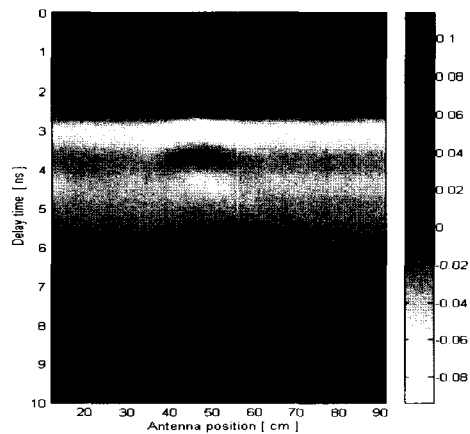


그림 9. 측정자료의 B-scan 영상  
Fig. 9. B-scan image of measured data.

기법을 그대로 적용하여 그림 10과 같은 영상을 우선 얻은 후 공동 표적이 존재하지 않는 구간을 선택한다. 두 번째로 그림 9에서 선택한 구간의 신호만 평균을 취하여 얻은 자료(selected average data)를 그림 9의 영상에서 뺄으로써 그림 11과 같은 표적 영상을 얻을 수 있다. 그림 11에 의하면 공동 표적에 의한 신호가 그림 10의 방법보다 해상도가 높고, 표적 영상의 왜곡도 감소함을 볼 수 있다. 이는 선

택한 평균 자료가 표적에 의한 응답성분이 거의 포함되지 않고, 대부분이 직접결합 신호 성분이기 때문이다.

#### IV. 결 론

목재 기둥의 비파괴 검사에 표면 하부 탐사 레이더의 적용 가능성을 FDTD 모의계산과 실제 측정을 통하여 조사하였다.

실험실에 공동이 존재하는 목재기둥 표본을 마련하고, 펄스 송신기, 수신기, 자체 설계한 안테나를 이용하여 SPR 측정시스템을 구성하였다. SPR 측정 상황을 FDTD 모의계산하기 위하여 송신 펄스와 목재의 복소 유전율은 측정값을 등가로 각각 Gaussian 함수와 Debye 분산 공식으로 모델링하였다. SPR의 B-scan 운용상황의 대표적인 4가지 위치에 대한 A-scan 자료를 모의계산과 측정결과를 비교한 결과 거의 유사함을 보임으로써 본 연구의 타당성을 입증하였다. 또한 공동이 존재하는 목재기둥에 대하여 한번의 측정으로 얻은 B-scan 자료로부터 공동 표적의 영상을 효율적으로 추출하는 후처리 방법을 제시하였다.

향후 본 논문에서 제시한 방법으로 SPR의 성능과 운용방법을 좀더 개선한다면 목조 건축물의 비파괴 검사에 매우 효과적으로 이용할 수 있을 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 문화재청/국립문화재연구소/미술공예실.
- [2] K. C. Schad, D. L. Schmoldt and R. J. Ross, "Nondestructive methods for detecting defects in softwood logs", *Res. Pap. FPL-RP-546. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory*, pp.13, Feb. 1996.
- [3] 현승엽, 김세윤, 김영식, "지하침투 레이더의 FDTD 모의계산 결과와 측정자료의 비교", 대한전자공학회 논문지, 36D(7), pp. 1-8, 1999.
- [4] 현승엽, 김세윤, "유한차분 시간영역법을 이용한 지하탐사 레이더용 광대역 안테나의 설계",

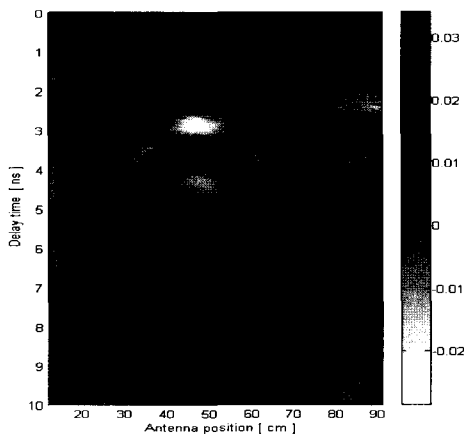


그림 10. 공동의 응답에 의한 B-scan 영상#1  
(측정자료 - 전체 평균 자료)  
Fig. 10. B-scan image #1 of air-cavity response.  
(measured data - total average data)

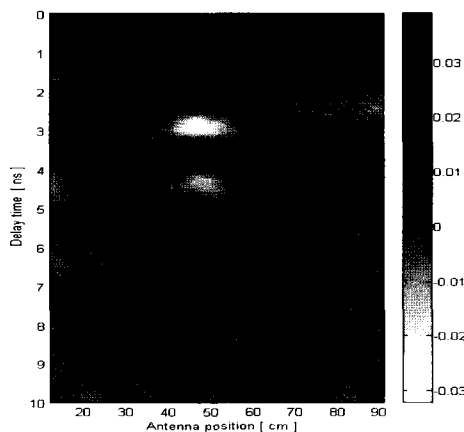


그림 11. 공동의 응답에 의한 B-scan 영상 #2  
(측정 자료 - 선택 후 평균한 자료)  
Fig. 11. B-scan image #2 of air-cavity response.  
(measured data - selected average data)

2001년도 한국통신학회 하계종합학술 발표회,  
vol. 23, no. 2, pp. 896-899, 2001년.

- [5] 현승엽, 김세윤, “고건축물의 목재 기둥에 대한 비파괴 검사용 지하탐사 레이더”, 2001년도 한국전자과학회 종합학술발표회 논문집, vol. 11,

no. 1, pp. 291-295, 2001년 11월.

- [6] 신현, 김세윤, 김영식, “개방단말 동축선 프로브로 측정된 마른 모래의 복소 유전율”, 대한전자공학회 논문지, 36TC(5), pp. 17-23, 2000년.

### 현 승 엽



1997년 2월: 제주대학교 통신공학과 (공학사)  
1997년 2월~2001년 7월: KIST 영상미디어 연구센터 학생연구원  
1999년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)  
1999년 3월~현재: 고려대학교 전

파공학과 박사과정

2001년 8월~현재: SG Technology 연구소 주임연구원  
[주 관심분야] 지하탐사 레이더, 안테나 설계, 전자파 Imaging

### 김 세 윤



1978년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)  
1980년 2월: KAIST 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
1984년 8월: KAIST 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
1986년 11월: KAIST 전기 및 전자

공학과 Post-doctor

1986년 12월~현재: KIST 영상미디어 연구센터 책임연구원  
[주 관심분야] 파동의 회절 및 복사, 전자파 Imaging, 안테나 설계, EMI/EMC