

고건축물의 목재 기둥에 대한 비파괴 검사용 지하탐사 레이더

°현 승 엽***, 김 세 윤**

* 고려대학교 전파공학과

** 한국과학기술연구원 영상미디어연구센터

A Ground-Penetrating Radar for Nondestructive Testing on Wooden Column of Old Architecture

°Seung-Yeup Hyun*** and Se-Yun Kim**

* Dept. Radio Sciences and Eng., Korea Univ.

** Imaging Media Research Center, Korea Institute of Science and Technology

ABSTRACT

지하탐사 레이더를 이용한 고건축물의 목재 기둥에 대한 비파괴 검사에 응용 가능성을 조사하였다. 실험실에 공동이 존재하는 목재 기둥을 마련하고, 자체 설계 및 제작한 안테나로 구성된 지하탐사 레이더 시스템을 이용하여 기둥 축 방향으로 안테나를 이동시키면서 펄스의 송수신 특성을 측정하였다. 측정에 사용한 펄스와 목재 기둥의 전기적 특성, 안테나, 급전선 등 레이더 시스템 전체를 3차원 FDTD로 모델링하였다. 측정과 동일한 상황에 대한 FDTD 해석결과와 측정자료가 부합됨을 입증하였다. 목재 기둥과 공동간의 낮은 유전율 차이도 쉽게 탐지할 수 있음을 보임으로써 향후 지하탐사 레이더를 고건축물의 비파괴 검사에 효과적으로 응용할 수 있음을 제시하였다.

I. 서론

우리 나라에는 오랜 역사와 전통을 간직하고 있는 귀중한 자산인 고궁, 사원을 비롯한 수많은 목조 건축물들 전국에 분포하고 있으며, 주요 문화재로 지정하여 보존하고 있다. 최근 문화재청에 따르면 경복궁 근정전과 같은 대형 목조 건축물들이 오랜 세월 동안 비, 바람 및 충해에 의한 손상으로 썩거나 공동과 균열이 발생하고 있으며, 심한 경우에는 붕괴의 위험에 직면해 있다고 한다. 손상부위가 목재 표면으로 나타난 경우에는 육안으로 쉽게 탐지가 가능하나 내부가 손상된 경우에는 현재 적절한 탐지 방법이 없는 실정이다.

지표면 상에서 지하에 매설된 표적이거나 지반구조 조사에 주로 이용해 왔던 지하탐사 레이더(GPR;

ground-penetrating radar)는 최근 도로, 터널, 댐, 다리 등과 같은 콘크리트 구조물에 대한 비파괴 검사에도 효과적인 방법으로 쓰이고 있다[1]. 본 논문에서는 이러한 지하탐사 레이더 기법을 목조 건축물의 비파괴 검사에 활용이 가능한지 여부에 대한 사전 검토 방법을 제시하고자 한다.

본 저자는 지하탐사 레이더의 효율적인 설계를 위하여 유한차분 시간영역(FDTD; finite-difference time-domain) 법을 이용한 실제 레이더의 모의해석 결과와 측정자료가 부합됨을 보임으로써 특정상황에 적합한 레이더를 설계할 수 있음을 입증하였다[2]. 이와 같은 기법을 이용하여 낮은 유전율을 갖는 지하상황의 조사에 적합한 광대역 안테나를 설계한 바 있다[3]. 본 논문에서는 실험용 목재 기둥을 마련하고, 일부분을 파내어 내부에 공동이 존재하는 기둥으로 설정하였다. 자체 개발한 개방단말 동축선 프로

브 법으로 목재 기둥의 상대 유전율을 측정된 결과 송신펄스의 주파수 범위에서 약 2로서 낮은 유전율을 가지므로 [3]에서 설계한 안테나를 이용하여 레이더 시스템을 구성하였다. 실험용 레이더 시스템을 구성하는 각부인 안테나, 급전부, 목재 기둥, 기둥 내에 존재하는 공동을 [2]에서 제시한 방법으로 모델링하였다. 목재 기둥의 축 방향으로 안테나를 이동시키면서 대표적인 4가지 위치에 대해 측정된 수신 응답 자료와 FDTD 해석결과를 비교하였다. 목재 기둥과 공동은 각각 상대 유전율이 2와 1로서 유전율 차이가 낮음에도 불구하고 수신응답에서 충분히 공동에 의한 신호를 검출할 수 있었다. 또한 측정자료와 FDTD 해석 결과가 거의 일치하므로 향후 최적 설계과정을 거친다면 목조 건축물에 대한 지하탐사 레이더의 응용이 매우 효과적일 것이다.

II. 측정 시스템 구성 및 FDTD 모델링

그림 1과 같이 마른 목재를 100 cm × 19.5 cm × 14.5 cm 크기로 가공하여 실험용 기둥을 마련하였다. 기둥의 상부 중심의 3 cm 깊이에 13 cm × 14.5 cm × 3.5 cm 크기의 파내고, 동일 재질의 목재로 17.3 cm × 19.2 cm × 3 cm 크기의 뚜껑으로 덮어 외부는 균일한 목재인 반면에 내부에 공동이 존재하는 목재 기둥으로 설정하였다. 기둥의 표면으로부터 2 cm 높이에 [3]에서 설계 및 제작한 두 안테나를 중심간의 거리가 9 cm를 유지하면서 서로 평행으로 위치시켰다. 송신안테나는 동축선로를 거쳐 송신기(입 펄스 발생기)에 접속하고, 수신안테나는 수신기(디지털 샘플링 오실로스코프)에 연결하여 레이더 시스템을 구성하였다.

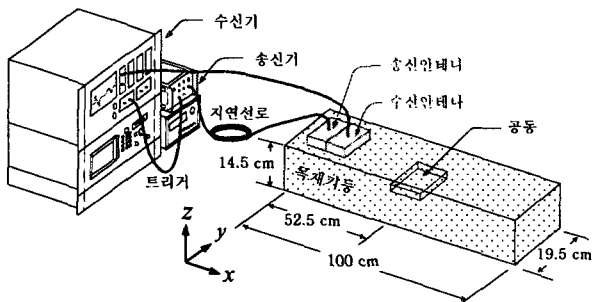


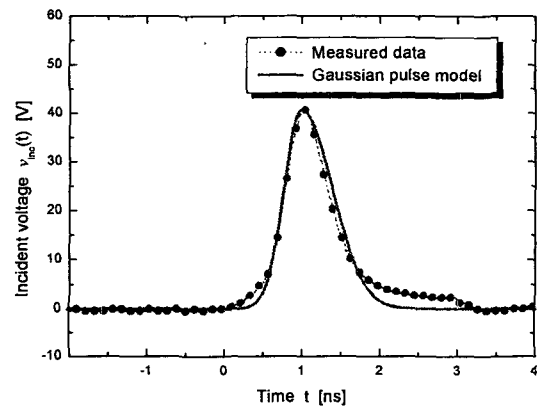
그림 1. 레이더 시스템의 구성도

FDTD 해석에 인가할 입사전압을 결정하기 위하여 그림 1의 송신안테나의 급전 갭에서 측정된 펄스 전압은 그림 2(a)와 같다. 그림 2(a)에서 송신펄스의

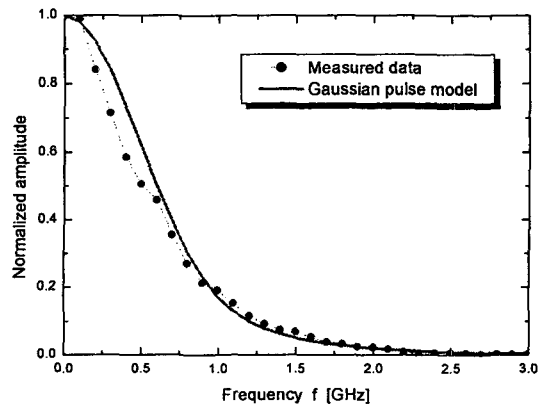
상승부와 하강부가 서로 비대칭인 이유는 송신기 구현상 완벽한 대칭인 펄스를 만들어낼 수 없기 때문이다. 따라서 다음과 같이 진폭 $V_0 = 46.6262$ V이고, 초기시간 $t_0 = 1$ ns, 펄스의 상승부와 하강부의 특성시간은 각각 $\tau_{p, rise} = 0.21739$ ns, $\tau_{p, fall} = 0.4$ ns 인 두 개의 Gaussian 펄스의 중첩으로 모델링하였다.

$$v_{inc}(t) = V_0 \begin{cases} \exp[-0.5(t - t_0)^2 / \tau_{p, rise}^2], & t < t_0 \\ \exp[-0.5(t - t_0)^2 / \tau_{p, fall}^2], & t \geq t_0 \end{cases} \quad (1)$$

그림 2(a)에 대한 주파수 성분을 살펴보면 그림 2(b)와 같이 약 2.5 GHz까지 신호 성분이 존재하며, 그림 2(a)에서 2 ns 이후의 성분은 그림 2(b)와 같이 약 0.2 GHz ~ 0.6 GHz까지 성분 에 대한 모델링 오차임을 알 수 있다.



(a) 시간 영역



(b) 주파수 영역

그림 2. 입사 펄스 신호의 Gaussian 펄스 모델링

자체 개발한 개방단말 동축선 프로브 법을 이용하여 실험에 사용한 목재 기둥의 전기적 특성을 송신 펄스의 주파수 성분이 존재하는 2.5 GHz까지 측정된 결과 상대 유전율은 약 2이고, 도전율은 거의 0에 가까운 값을 보였다. 따라서 FDTD 해석에서는 목재 기둥을 상대 유전율 2를 갖는 완전유전체로 간주하였다. 이외의 안테나 구조와 급전부에 대한 모델링 방법과 흡수경계조건은 [2,4]에서 상세히 다루었으므로 본 논문에서는 생략하였다.

III. FDTD 결과와 측정자료의 비교

본 저자가 설계 및 제작한 안테나로 구성된 지하 탐사 레이더를 이용하여 목재 기둥 내부에 존재하는 공동의 탐지능력에 대한 측정과 FDTD 해석결과를 비교하기 위하여 다음과 같은 상황을 설정하였다. 그림 1과 같은 측정 시스템에서 안테나를 기둥 축을 따라 x 방향으로 이동시키면서 측정하므로 그 중에서 대표적인 4가지 상황을 측정 시스템의 정면에서 바라본 경우로 그림 3과 그림 4로 나눌 수 있다. 그림 3은 공동이 존재하지 않는 부위에 안테나가 위치한 경우로서 측정위치가 목재 기둥의 모서리 부위에 근접한 경우와 모서리에서 조금 떨어진 위치로 선정하였다. 그림 4는 안테나가 공동이 존재하는 영역을 조사할 경우에 공동에 근접한 경우와 공동의 바로 상부에 안테나가 위치한 경우이다. 각각에 대한 FDTD 모의계산은 그림 3과 그림 4에서 사각 점선에 해당하는 영역에 대해서만 수행하였다.

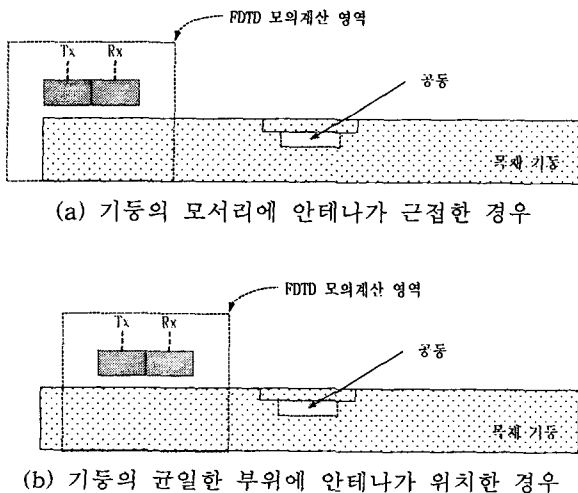


그림 3. 공동이 존재하지 않는 영역

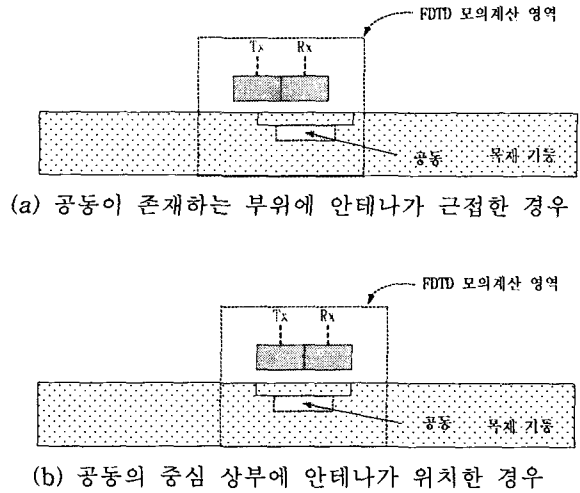
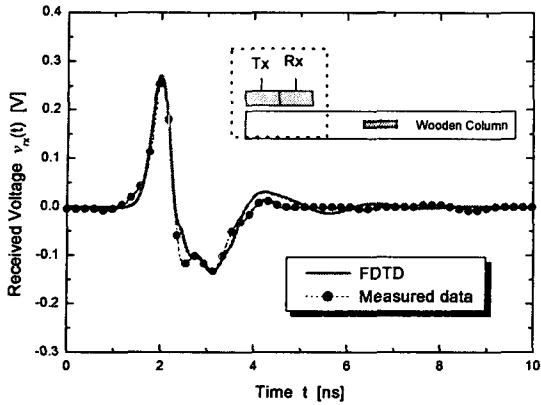
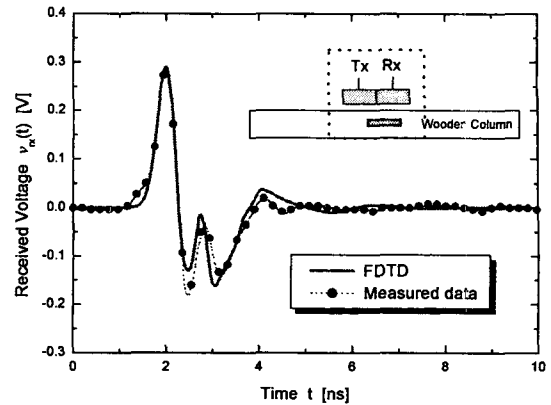


그림 4. 공동이 존재하는 영역

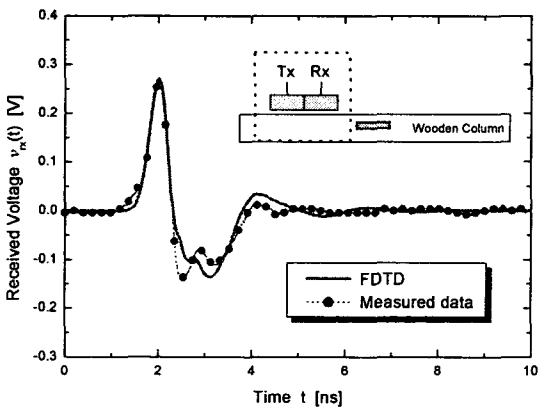
그림 3과 그림 4와 같은 상황에 대하여 측정자료와 3차원 FDTD 해석결과를 비교하면 각각 그림 5, 그림 6과 같다. 그림 5는 그림 3과 같은 상황에서 수신된 전압으로서 2 ns 부근의 펄스는 공기 중을 통하여 송신안테나에서 수신안테나로 직접결합(direct coupling)된 신호 성분이고, 이 이후의 신호는 목재 표면과 안테나간의 복잡한 다중반사(multiple reflection)에 의한 성분이다. 그림 5(a)는 그림 3(a)와 같이 안테나가 목재 기둥의 모서리 근방에 위치한 경우에 대한 결과이다. 그림 5(b)는 그림 3(b)와 같이 목재 기둥의 모서리로부터 안테나가 충분히 떨어진 위치의 균일한 목재 부위에 해당하는 수신응답이다. 그림 5(a)와 5(b)를 비교해 보면 약 3 ns 시간에 측정된 수신전압의 레벨은 약 0.05 V가량의 변화를 볼 수 있는 반면 FDTD 결과들간에는 거의 변화가 없다. 이러한 차이는 그림 2(a)에서 볼 수 있는 것처럼 측정 사용한 펄스를 FDTD 상에서는 Gaussian 펄스로 모델링하는 과정에서 펄스의 하강부 이후의 펄스부에 대한 모델링 오차와 측정에서는 목재 표면과 안테나 표면이 정확하게 평행을 이루도록 제어하기 어렵기 때문에 발생한 측정오차가 원인으로 생각된다. 그러나 이러한 오차는 그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이 전체 수신응답의 비중에 비하여 비교적 적은 양이므로 측정자료와 FDTD 결과가 패턴과 레벨이 거의 유사함을 알 수 있다. 향후 인가펄스의 모델링과 측정상황의 목재와 안테나 면간의 기울기 정도를 FDTD 해석에서 모델링한다면 정확성은 좀 더 개선될 것이다.



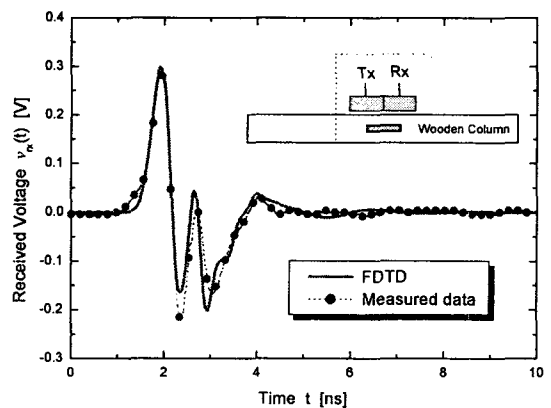
(a) 기둥의 모서리에 안테나가 근접한 경우



(a) 공동이 존재하는 부위에 안테나가 근접한 경우



(b) 기둥의 균일한 부위에 안테나가 위치한 경우



(b) 공동의 중심 상부에 안테나가 위치한 경우

그림 5. 공동이 존재하지 않는 영역에서 수신전압

그림 6. 공동이 존재하는 영역에서 수신전압

그림 6은 그림 4와 같이 공동이 존재하는 영역 가까이 안테나가 위치할 경우에 대한 수신응답을 나타낸 것이다. 그림 6에서 2 ns 부근의 신호는 그림 5의 결과와 마찬가지로 두 안테나간에 공기 중을 통한 직접결합 성분이고, 반면에 2.4 ns ~ 4 ns까지는 목재 표면과 안테나간의 다중반사 성분과 공동에 의한 산란파 성분이 중첩으로 나타난 것이다. 목재 기둥의 상대 유전율이 약 2 이므로 4 ns에는 목재 기둥의 반대편에서 처음 반사되어 되돌아 온 성분이 존재한다. 공동이 존재하지 않는 영역의 수신전압을 나타낸 그림 5와 공동에 의한 영향을 포함하고 있는 그림 6을 비교해 보면 공동이 존재하는 위치에 안테나가 가까워짐에 따라 2.4 ns ~ 3 ns 부근의 신호 변화가 크게 나타남을 볼 수 있다. 2.4 ns에서 공동에 의한 초기 반사파가 수신되므로 이를 거리로 환산하면 약 3 cm 깊이에 해당한다.

그림 6은 그림 5와 마찬가지로 측정자료와 FDTD 해석결과가 패턴과 레벨이 모두 잘 부합됨을 알 수 있다. 또한 목재 기둥과 공동간의 유전율 차이가 1로서 비교적 낮음에도 불구하고 신호의 변화가 약 0.2 V 가량 변화하므로 본 논문에서 사용한 안테나를 좀 더 최적 설계하여 제작한다면 보다 나은 탐지능력을 보일 것이다. 목재 기둥에 공동이 존재하는 경우보다 유전율 차이가 큰 경우인 썩은 부위 탐지는 좀 더 용이할 것이다.

향후 본 논문의 결과를 바탕으로 목재 기둥 탐사용 안테나의 최적설계와 탐지 가능한 공동의 최소 크기와 방향에 대한 조사가 선행되어야 한다. 또한 목재 기둥의 축 방향으로 안테나를 이동시키면서 수신한 전압으로 구현한 단면 영상으로부터 이상 부위의 모양, 위치 및 구성성분에 대한 정보를 추출할 수 있는 영상화(imaging) 기법에 대한 연구가 필요하다.

IV. 결론

본 논문에서는 지하탐사 레이더를 고건축물의 목재 기둥에 대한 비파괴 검사용으로 응용이 가능한지 여부를 조사하였다. 우선 공동이 존재하는 실험용 목재 기둥을 마련하고, 자체 개발한 개방단말 동축선 프로브 법을 이용하여 기둥의 유전율을 측정하였다. 실험실에 탐사용 레이더 시스템을 구축하고, 목재 기둥의 축 방향으로 안테나를 이동시키면서 측정을 수행하였다. 측정과 동일한 상황을 3차원 FDTD법을 이용하여 안테나, 급전선, 인가신호와 목재 기둥과 공동의 모양과 전기적 특성을 등가로 모델링하였다. 측정자료와 FDTD 해석결과가 패턴과 레벨이 거의 일치함을 제시함으로써 본 논문의 타당성을 입증하였다. 또한 목재 기둥 내에 공동이 존재하는 위치에 안테나가 가까워질수록 공동에 의한 수신응답 변화가 증가하였다.

공동과 목재 기둥간의 유전율 차이가 낮음에도 불구하고 공동에 대한 탐지능력이 높게 나타났다. 따라서 지하탐사 레이더 기법을 이용하여 고건축물의 목재 기둥에 대한 비파괴 검사는 매우 유용할 것으로 판단된다. 앞으로 실제적인 응용을 위해서는 안테나의 최적화와 다양한 목재 상황에 대한 탐지 능력의 조사 및 수신신호로부터 목재의 손상부위의 위치, 모양, 구성성분에 대한 정보를 추출할 수 있는 고도의 영상화기법에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] D. J. Daniels, *Subsurface-Penetrating Radar*. London, UK: IEE, 1996.
- [2] 현승엽, 김세윤, 김영식, “지하침투 레이더의 FDTD 모의계산 결과와 측정자료의 비교,” *대한전자공학회 논문지*, 제 36권, D편, 제 7호, 1-8쪽, 1999.
- [3] 현승엽, 김세윤, “유한차분 시간영역법을 이용한 지하탐사 레이더용 광대역 안테나의 설계.” *2001년도 한국통신학회 하계종합학술발표회 논문집*, 896-899쪽, 2001년 8월.
- [4] 현승엽, 김세윤, “지하침투 레이더의 응답 계산에 적합한 안테나 급전모델의 비교 연구,” *대한전자공학회 논문지*, 제 38권, TC편, 제 2호, 18-27쪽, 2001.