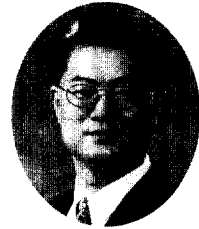


## 비파괴 방법에 의한 지진후 피해 평가

### Post-Earthquake Damage Assessed Nondestructively

본 글은 미국 비파괴 검사학회(American Society for Nondestructive Testing) 학회지인 Materials Evaluation의 1996년 8월호 "Back to Basics" 난에 게재된 기사를 요약 번역한 것이다. 이 글을 소개함에 앞서 Materials Evaluation 편집국으로부터 번역 및 게재에 대한 허가를 받았음을 밝혀둔다.



임 홍 철 \*

남부 캘리포니아가 1994년 Northridge에서 발생한 지진의 후유증으로부터 벗어날 즈음, 2만 5천호의 주택은 거주 불능 상태가 되었고, 캘리포니아 주정부는 지진으로 파괴된 주고속도로 보수비로 5억달러, 그리고 학교시설물 수리비로 7억달러를 각각 지출할 처지에 놓이게 되었다. 또한, 이 지진으로 인하여 52명의 사망자가 발생하였다.

지진으로 인하여 얻은 한가지 희망적인 결과는 앞으로 다시 발생할지 모르는 지진에 대비하여, 보다 나은 건물의 설계 방법과 재료 사용에 대한 관심이 커졌다는 것이다. 한 예로, Woodland Hills에 위치한 Warner Center Marriott 호텔은 단지 지진으로 인한 피해 복구작업 뿐만 아니라, 473개의 객실이 있는 이 호텔 전체를 내진 보강하기로 하였다.

이 호텔 건물의 보강을 위해서는, 건물 본체를 호텔 전면에 위치한 두 개의 철근 콘크리트 기둥에 건물을 보다 확실히 지지할 수 있도록 접합시키는 일이 필요했다. 콘크리트 기둥은 직경이 50cm로, 지하

4.5m, 지상 6m 높이의 크기였다. 시공업자는 기존 기둥에 구멍을 내고 이를 이용, 기둥과 건물 본체를 연결하려 했다. 문제는 기둥 전체에 나선형으로 촘촘히 배근된 철근을 어떻게 파손시키지 않고 구멍을 내느냐는 것이었다.

시공업자는 콘크리트 구조물 안의 배근 위치를 찾아, 구멍을 낼 때 이를 피하기 위해 전문 비파괴진단 업체를 고용했다. 비파괴진단 업체는 여러 측정 방법 중에서 레이더를 사용하기로 했다.

#### 가능한 비파괴 실험 방법

진단에 앞서 먼저 결정해야 할 사항은 어떠한 비파괴 실험 방법을 선택할 것인가 하는 것이다. 지하투과용 레이더(ground penetrating radar), 자력계(magnetometer), 그리고 X-ray 방법을 일차적으로 들 수 있다. 각각의 방법은 제각기 장단점이 있는데, 조사에 필요한 지역과 조사 대상 물체의 상태에

\* 정회원, 연세대학교 건축공학과 조교수

따라 결정을 내린다. 어느 한 방법이 늘 좋은 것은 아니고, 한 두가지 방법이 때에 따라 적합하다고 할 수 있다.

자력계는 레이더에 비해 기기 값이 싸고 사용하기 편리하다. 어떤 경우에는 자력계만으로도 매설된 물체를 쉽게 찾을 수 있는 경우가 있다. 그러나, 앞서 이야기된 호텔 건물의 경우 보다 높은 해상도와 투과 깊이가 요구되었다. 자력계는 조사대상 지역에 철근, 파이프 등 금속성 물질이 있을 경우 신속히 그 존재 여부를 확인할 수 있지만, 매설물체의 갯수와 위치를 알려면, 더 나은 해상도를 가진 레이더를 사용해야 한다.

비파괴 진단업체는 또한 두가지 이유로 이번 일에 X-ray 측정방법보다 레이더 방법을 택했다. 첫째, X-ray를 건물 전면부에 투사하기 위해서는, 안전을 위해 조사기간중 수일간 입구를 폐쇄하고, 안전 구역을 설정해야 했다. 그렇게 되면, 투숙객과 종업원은 호텔 로비, 호텔 전면에 위치한 주차장, 식당 출입에 제약을 받게 된다. 둘째, X-ray 방법은 조사대상인 기둥의 뒷편에 투과된 방사선을 받기위해 필름을 놓아야 하는데, 이 호텔의 경우 기둥과 건물 사이에 필름을 놓기 위해 필요한 공간이 없었다.

이번 일의 특징상, 위의 이유로 비파괴 진단업체는 레이더 방법을 택하여 조사를 실시, 6m 높이의 기둥 두 개에 대한 측정을 하루 작업량인 8 시간만에 끝냈다. X-ray 방법을 택했다면 2주 정도의 시간과 많은 양의 값비싼 필름이 소요되었을 것이다. 또한, 조사에 지출된 총 비용도 X-ray 방법의 5 퍼센트 가량밖에 되지 않았다.

조사팀은 사다리를 이용, 레이더 안테나를 기둥 위에 설치한 다음 지지대를 이용 아래로 내리었다. 측정 결과, 조사팀은 철근의 정확한 배근 위치를 알아낼 수 있었다. 안테나를 기둥 위에서 아래쪽으로 낮추면서, 레이더 시스템은 전자파를 콘크리트 기둥에 투사하고, 콘크리트로부터 반사된 전자파는 안테나에 다시 수신되었다. 이어 시스템 제어기에 수집된 자료는 처리후 프린터로 나오게 된다.

레이더 측정에는 고해상도를 위하여 비교적 높은 주파수(1 GHz)의 안테나가 사용되었다. 주파수 대역은 보통 16MHz에서 2GHz이다. 저주파수의 안테나는 깊은 투과력을 갖지만, 해상도가 떨어진다. 이번 측정의 경우, 투과해야 할 콘크리트 두께가 수

피트 이내였으므로, 좋은 해상도를 얻을 수 있는 고주파수 안테나가 사용되었다.

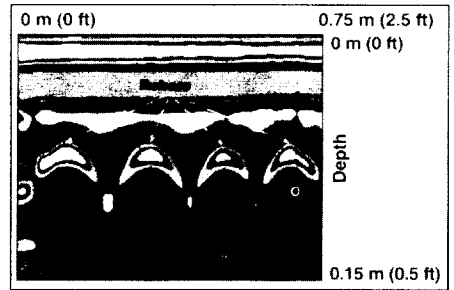


그림 1 콘크리트 구조물에서 레이더로 탐사된 4개의 철근 모습

## 주요 변수

레이더 시스템을 적용하는데는 몇가지 고려해야 할 사항들이 있다. 우선, 전자파가 투과하는 매질 (medium)의 도전율 (conductivity)이다. 도전율은 전자파의 투과 깊이를 결정한다. 전자파는 전기 저항이 큰 (도전율이 낮은) 매질에서 더 깊이 투과한다. 일반적으로, 매질의 전기 저항율 (resistivity)이 100 ohm meter 이상일 때 (도전율이 10 milliohms per meter 이하일 때) 가장 좋은 레이더 측정 결과가 나온다. 이러한 매질의 저항율은 현장에서 측정될 수 있다.

일반적으로, 마르고 모래 성분이 있는 매질이 레이더 측정에 가장 좋은 반면, 습기가 있거나 점토질 성분의 매질은 레이더 측정이 힘들다.

참고자 하는 물체와 매질의 전자기적 특성(dielectric properties)은 레이더 방법에 있어서 중요한 변수가 된다. 두 물체간의 전자기적 특성의 차이가 클수록, 레이더는 더욱 효과적으로 쓰여진다. 예를 들어, 콘크리트와 철근은 그 전자기적 특성의 차이가 커, 콘크리트 구조물안에 배근을 찾는데 유용하다.

## 지하층 중공부 탐사

레이더 시스템은 도로, 공항의 활주로, 건물의 슬래브, 그리고 기타 구조물 표면안에 위치한 중공부(void)를 찾아낼 수 있다. 뉴욕시에서는 공원 분수대에서 새어나온 물이 Park Avenue에 있는 한 아파

트 건물의 기반을 침식하는 일이 발생했다. 이 문제에도 레이더를 이용하여, 물새는 곳을 찾아서 막은 후, 침식된 중공부를 찾아내 매꾸는 작업을 할 수 있었다. 이렇듯 레이더가 중공부를 쉽게 찾을 수 있는 이유는 토질과 중공부 안에 있는 공기의 전자기적 특성이 확연히 다르기 때문이다.

또 한 예로서, 1991년 뉴욕주 Nassau County 상하수도국에서는 교통량이 많은, 한 대로 밑 어느 곳에서 하수도관이 막혔다는 사실을 알게 되었다. 그러나 정확한 위치를 알 수 없었고, 이로 인하여 도로에 피해를 주게 될 것을 염려하게 되었다.

상하수도국은 3.2Km 길이의 도로를 레이더로 측정하기로 결정했다. 하수도관은 지하수면보다 더 깊이 위치하고 있었으므로, 도전을 위하여 주위의 견고한 토양보다 더 높았다. 도로표상의 두께는 230mm였고 철근이 배근되어 있었다.

이같은 상황에서는 다른 비파괴 측정 방법 뿐만 아니라 레이더로 데이터를 얻는데도 문제가 있었다. 그러나 레이더 측정결과는 성공적이었다.

측정팀은 500 MHz 안테나를 시속 3.2Km의 속도로 손으로 끌고 다니며 데이터를 수집했고, 그 데이터는 6m 앞에 위치한 차량의 데이터 입력장치에 기록되었다. 측정결과 도로표면 아래에 위치한 여러개의 중공부를 찾아내었다. 그리고 그 위치는 boring을 통하여 실제 확인되었다. 측정은 모두 4일만에 끝났으며

불필요한 다량의 boring작업과 교통방해를 최소화 할 수 있었다.

### 스페이스 셔틀의 안전한 착륙

비행공우주국(NASA) 지질탐사팀은 Space Shuttle 이 California Mojave 사막에 위치한 Edward 공군기지에 착륙하기전 그 활주로를 레이더로 탐사한다. 그 이유는 활주로 밑에 있을지 모르는 중공부를 미리 찾아내기 위해서이다. Mojave사막의 Rogers Dry Lakebed는 홍적세(Pleistocene)기에 축적된 진흙으로 만들어져 있다. 이 진흙층은 얇은 침적토(silt) 층으로 덮혀있다. 진흙층 밑에는 자갈층을 포함한 크고 넓은 지하수층이 위치하고 있다. 제 2차세계대전이 끝난 후 캘리포니아와 미 남서부 농장에서는 작물 재배를 위해 바로 이 지하수층의 물을 뽑아냈다. 마을과 도시가 자리잡으면서 더욱 더 많은 물을 뽑아쓰게 되었다. 결과적으로, 물은 고갈되었고, 1990년 이후에는 지하 21m 이하에 위치한 암반층을 뚫고서야 물을 찾는 것이 가능해졌다.

사람들이 물을 뽑아내면서, 진흙층은 물이 빠지고 건조 수축되었으며 점차 그 층이 압축되며 부피가 축소되었다. 이러한 현상이 연속적으로 그리고 전반적으로 일어나면서 Rogers Dry Lakebed의 표면은 부드럽고 건조한 반면 그 밑에는 중공부(void)와 큰

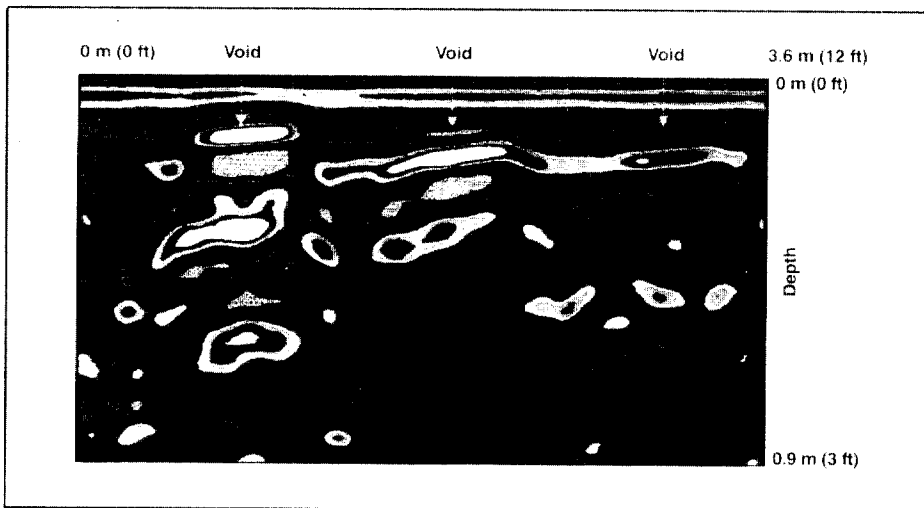


그림 2 레이더 측정 결과 나타난 콘크리트 바닥의 세 개의 공동

열 (fissure)이 존재하게 되었다.

캘리포니아의 우기인 겨울이 지나면 빗물이 이 건조한 호수 밑바닥의 빈틈을 찾아다니며 흐르게 되고, 새로운 중공부와 틈이 생겨나 shuttle과 같이 막중한 하중이 가해지면 붕괴될 위험을 안고 있다.

NASA팀은 shuttle 착륙전 10회에 걸친 활주로 지반측정을 실시한다. 활주로 중심선에서 좌우로 각각 1.5, 3, 6, 15, 그리고 30m 지점을 레이더로 측정하는 것이다. 이때 투과 깊이는 1.5에서 3m이다. 5,060m 길이의 활주로를 한번 측정하는데 대략 하루가 걸린다.

측정된 레이더 자료는 바로 분석되어, 활주로 밑에 중공부가 예상되는 지점이 발견되면, NASA 지질탐사반은 현장에 다시 나가 610mm까지 측정할 수 있는 자동 관통기를 사용하여 중공부의 유무를 확인한다. 지표면으로부터 610mm 이하에 있는 중공부는 shuttle 착륙시 문제를 일으키지 않는다.

지금까지 레이더로 측정된 중공부 존재 예상지역의 70%에서 실제로 shuttle 착륙에 위험한 중공부가 발견되었다. 발견된 중공부는 NASA 지질탐사반에 의해 주변에 있는 자연토양으로 shuttle 착륙전 모두 메워진다.

## 지질학적 응용

레이더를 이용한 비파괴 측정방법은 군사용 지하 탐지로부터 환경공학, 지질학 등 그 사용범위를 점차 넓혀가고 있다. 레이더는 지하에 매설된 저장용 탱크와 지하 매설관을 찾는데 유용하게 사용되고 있다. 어떤 경우에는 고고학자들이 숨겨진 옛 유적을 발견하는데 쓰이기도 하고, 경찰이 살인사건의 피해자를 찾는데 사용되기도 했다.

## 요 약

레이더 시스템은 최근 디지털 기술의 발전으로 측정과정의 대부분이 자동화되고 있다. 그러나 그 사용에 있어서는 숙련과 기술을 요구하고 있다. 현재, 레이더 시스템 제조업체는 교육 프로그램과 교육용 비디오 등을 통해 그 사용법을 알리고 있다.

레이더 탐사법은 숙련과 경험을 축적하면, 매설된 물체를 빠르고, 정확히, 그리고 비파괴 방식으로 찾을 수 있는 효과적인 방법이다. □

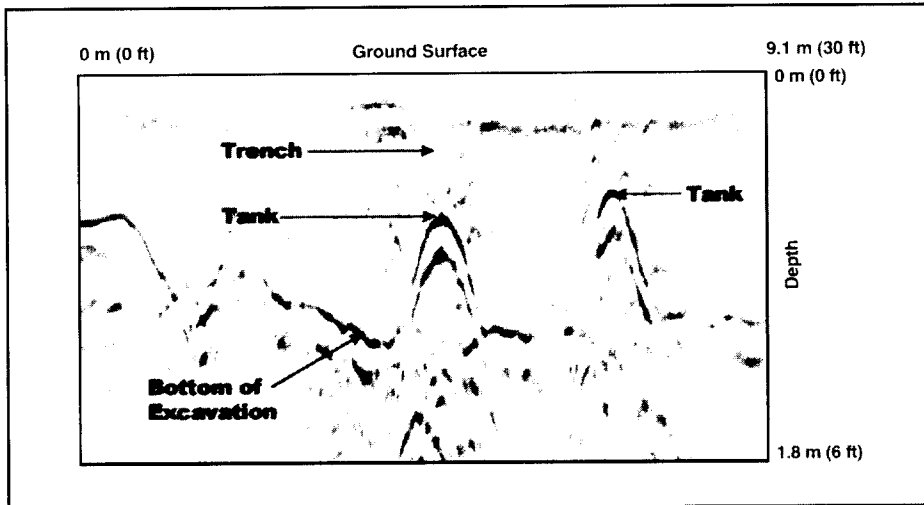


그림 3 레이더를 이용한 지하 매설물 탐사 결과