

지하레이더를 이용한 지하매설물 모형탐사 연구

A Study on Detecting Underground Utilities at Test Site Using GPR

신민호, MIN-HO SHIN*, 이선복, SUN-BOK LEE**, 남옥현, WOOK-HYUN NAHM***, 오영철, YOUNG-CHUL OH***

* 정회원, 금호건설 기술연구소 지반연구실장, Ph.D. Kumho Institute of Construction Technology

** 정회원, 금호건설 기술연구소 주임연구원, Researcher, Kumho Institute of Construction Technology

*** 정회원, 금호건설 기술연구소 연구원, Researcher, Kumho Institute of Construction Technology

SYNOPSIS: GPR data with fidelity are increasingly needed for the expansive application of GPR to various fields. Thus, the factors which control the characteristics of GPR response to different subsurface conditions must be understood. A controlled test site was constructed to study the factors. Artificial barriers were buried both in homogeneous sandy soil and in heterogeneous sandy soil containing irregular-sized boulders. We treated the data in several ways to find out a better method for acquiring and processing the data from the site. In this survey, we identified that proper frequency selection and data processing were necessary for successful analyses.

1 서론

지하레이더 탐사법은, 전자기파를 지표면에서 지하로 방사시킨 후 고유 유전특성이 서로 다른 두 매질의 경계면에서 반사되어 온 신호를 연속적으로 수신하여 각 매질의 위치와 형상을 파악하는 방법이다. 이는 다른 비파괴 시험방법과 비교하여 대상물의 형상에 따른 조사범위에 제한이 없고, 조사자의 의도에 따라 심도조절이 가능하며, 또한 현장실험이 신속하게 이루어지고, 탐사자료가 영상으로 처리되어 객관적인 자료를 제공할 수 있다는 것 등 장점이 많아 신뢰성있는 탐사법으로 최근 주목을 받고 있다.

여러 종류의 지하매설물 중에서도 근년에 가장 문제가 되는 것은 지하매설관으로서, 특히 상하수도관, 가스관 등이 지하 천부에 매설되어 있어 각종 건설공사에서 그 위치를 확인하는데에 많은 어려움이 있으며, 매설관의 유지, 보수에도 문제가 발생한다.

본 연구는, 지하매설물 종류, 크기 및 위치 등의 탐사에 있어서 지구물리탐사법의 한 종류인 지하레이더 (Ground Penetrating Radar, GPR) 탐사법의 효용성을 검증하고 그 한계성을 규명하는 데에 그 목적이 있으며, 균질 매질과 불균질 매질의 부지를 조성하여 크기와 위치를 이미 알고 있는 모형 지하매설물을 실제 현장과 유사한 조건 및 이상적인 조건에서의 탐사결과를 확인하고, 앞으로 실제 현장에서 지하매설물을 탐사할 때의 지침을 마련하고자 시행하였다. 또한 지하매설관에서 물, 소금물, 기름 등이 새어나올 경우 누수현상이 지하레이더 탐사에서 어떤 형상으로 나타나는지를 알아보기 위하여, 누수현상을 임의로 조절하면서 탐사를 실시하였다.

2 연구동향

전자기파를 이용하여 매설관을 탐지하고자 한 노력은 Geophysical Survey Systems, INC. (1974)에 의한 현장실험 기록을 볼 수 있을 정도로 오래되었다. (그림 1)이 그 기록으로서, 매설관에 의한 전형적인 반사쌍곡선을 뚜렷이 볼 수 있다. 이렇게 명료한 기록은 주변 매질이 깨끗한 모래이고, 최대매설 심도가 1 m를 크게 상회하지 않았기 때문에 가능하였을 것이다.

일본의 응용지질주식회사 (1994)는, 지하레이더 탐사법에서는 높은 주파수의 에너지를 이용하는 관계로, 지반에서의 감쇠가 심하여 可探深度가 크게 떨어진다고 보고하였다. 일반적으로 도로 아래 매설관의 가탐심도는 1.5 m 정도이고, 이보다 깊은 심도에서는 탐사능력이 크게 떨어진다고 하였다. 좋은 조건에서 심도 1.5 m 이내의 탐사기록은 중심주파수 500 MHz의 안테나를 사용한 것인데, (그림 2)에서 보는 바와 같이 반사쌍곡선의 곡률이 크고 명료하다. 이에 반하여 1.5 ~ 3 m 정도의 심도에서는 (그림 3)과 같이 반사쌍곡선의 곡률이 크게 줄어들었고, 반사쌍곡선의 윤곽 역시 다소 모호하다. 깊은 심도의 탐사를 위하여 100 MHz의 낮은 중심주파수의 안테나를 사용하여 분해능 역시 떨어지져 있다.

매설물 안이 비어있는 경우와 모래로 충전되어 있는 경우에 대해서는, Al-Shayea 등 (1994)에 의한 보고가 있다. 실험 모형은 직경 7 m, 길이 2 m의 강철 상자를 깨끗한 실리카모래로 충전한 것으로서, 하부는 천연 지반과 접하고 있다. 그 안에 스티로폴로 된 공동을 31.8 cm로 낮은 심도에 설치하였다. 이 공동을 역시 주변의 모래와 같은 것으로 채웠는데, 모래는 비중 2.65인 분급이 매우 좋고 깨끗한 것으로서 다져진 상태에서 이 모래의 밀도는 16 kN/m^3 이며, 사용한 안테나의 중심주파수는 500 MHz이다. 공동이 비어있을 때는 높은 진폭의 다중반사파가 보다 두드러지는 특징을 보인다. 여기서는 별도의 자료처리 없이도 공동을 구별해 낼 수 있었다. (그림 4)는 모래로 충전되어 있는 경우이다. 공동을 70%, 100% 충전한 경우에는 디콘블루션 처리 없이는 구별하기 어려웠다고 한다. 그리고 두 경우 모두 구조보정에 의하여 자료의 질을 향상시킬 수 있었다.

매설관의 직경을 탐지하기 위한 시도로 구조보정을 이용하는 방법이 보고되어 있다. 독일의 Christian-Albrechts 대학교 지구물리탐사연구소의 Stolte 등 (1994)은 반사쌍곡선의 기하학적 특성이 매설관의 직경만의 함수라는 사실에 착안하여 수치이심률 (NE, numerical eccentricity)이라는 지표를 제안하고, 소위 E-구조보정이라고 하는 처리기법을 개발하였다. E-구조보정은 지하의 구조를 보정시킨다기 보다는 매설관에 의한 반사신호만을 개선시킨다는 점에서 기존의 구조보정과 차이가 있다. (그림 5)는 현장기록이고 (그림 6)은 E-구조보정된 그림을 나타낸다. 이 연구는, 지금까지는 정량적인 추정이 어려웠던 매설관의 크기를 정량적으로 해석하였다는 점에서 주목할만 하다고 하겠다.

매설관 탐지는 이미 오래 전부터 거론되어 왔던 문제이나, 의외로 정량적인 해석을 비롯한 자세한 문제에 들어가는 보고된 연구가 그다지 많지 않다. 매설관 규모 및 종류 추정, 매설관 충전여부 및 충전정도 추정, 충전물의 종류 추정, 지하수면의 위치에 따른 기록 변화, 매설관 누수여부 및 누수지점 탐지 등 많은 문제를 모형실험과 수치해석 등 본격적인 연구를 통하여 풀어가야 하겠다.

3 지하매설물 탐사 모형실험

3.1 탐사 부지의 조성

지하레이더 탐사의 효과적인 모형탐사를 위하여는 잘 계획된 실험부지의 조성이 선행되어야 한다. 캐나다 토론토대학교의 Pettinelli, Redman 등 (1994)는 다음과 같은 실험부지의 조성기준을 제시하고 있다.

- (1) 탐사 대상체의 모양은 단순하여야 한다.
- (2) 탐사 부지내의 매질의 조성은 일정하여야 한다.
- (3) 지표는 최대한 수평을 유지하여야 한다.

(4) 탐사 부지에 접근이 용이하고, 지속적인 유지가 가능해야 한다.

(5) 지표 부근의 전기적 특성이 쉽게 측정될 수 있어야 한다.

본 연구에서는 위와 같은 기준을 충분히 고려하여 첫째, 균질 매질의 탐사 부지와 둘째, 실제 현장에서 볼 수 있는 불균질 매질의 탐사 부지를 각각 조성하였다. 탐사 부지는 인천광역시 산곡동의 금호타운 아파트 신축공사 현장의 일부 부지에 조성하였다.

탐사 부지의 구성에 있어 지하수위는 매우 중요하다. 수위 조정은 매설물보다 높게 하거나 낮게 할 수 있는데, 매설물보다 수위를 높게 조성하면 조성된 부지내의 환경이 降雨 등 외부요인에 쉽게 영향을 받지 않으므로 일정한 조건을 유지하기에 좋다. 그러나 지하수위 이하로 매설물을 설치해야 하므로 지속적이고 규모가 큰 배수작업이 선행되지 않고는 탐사부지의 굴착이 불가능하다. 다른 한가지 방법은 지하수위 상부에 매설물을 설치하는 방법으로, 이를 위해서는 조성 부지내의 매질을 배수가 잘되는 물질로 하여야 한다. 실험부지의 지하수위는 지표에서 4~5 m 정도 심도에 형성되어 있어, 굴착심도 1.2 m 보다 3 m 정도 하부가 된다.

각각의 매설물로부터 반사되어 돌아오는 신호가 서로 중첩되지 않게하기 위해서는 매설물의 크기를 고려하여 충분한 간격을 유지시켜야 한다. (그림 7), (그림 9)의 탐사부지의 조성도에서 보는 것과 같이, 본 모형탐사의 경우 2.5 m에서 6 m 정도의 간격을 유지하였다. 매설물의 매설심도는 일반적으로 매설관의 경우 깊이가 대개 1.2 m 내외이므로 지표면에서 매설물의 상부 정점 까지의 거리를 1~1.2 m로 유지하였다.

3.2 균질 매질내의 매설관

부지를 길이 11.3 m, 너비 2.4 m, 깊이 2.5 m로 굴착한 후 파이프를 매설하고, 매설물에서 반사된 신호를 잘 수신하기 위해 잡음이 일어날 소지가 적고 전파의 전달이 용이한 균질하고 입경이 고른 건조한 모래를 포설하여 탐사부지를 조성하였다. 그리고, (그림 7)에 보인 바와 같이 총 5개의 원형파이프를 매설하였으며, (표 1)에 매설물의 크기와 형상을 나타내었다. 본 모형탐사에 사용된 총 5개의 PVC관 중 3개의 관은 직경이 60 cm로 비교적 커서 탐사결과를 쉽게 획득할 수 있으며, 심도에 따른 탐사결과를 비교할 수 있게 하였다. 나머지 2개의 관은 (그림 8)에서 보는 것과 같이 일정량의 물과 기름이 새어나올 수 있도록 설치하여 관의 누수에 대한 탐사가 가능하게 하였다.

(표 1) 균질 매질의 매설물의 형상 및 크기

형 상	직경 (cm)	길이 (cm)	매설심도 (m)
플라스틱관	60	200	1.7
플라스틱관	60	200	1.3
플라스틱관	60	200	0.9
플라스틱관	15	200	0.9
플라스틱관	15	200	0.9

3.3 불균질 매질내의 매설관

부지를 길이 32 m, 너비 2.5 m, 깊이 1.2 m로 굴착한 후 파이프를 매설하고, 굴착한 흙이 잔자갈을 소량 함유한 실트질 모래로서 실제 현장에서 많이 사용하는 흙이어서, 현장 재현을 위해 이를 잘 혼합하여 사용하였고 소형진동 다짐기로 지표다짐 작업을 실시하였다. 그리고, (그림 9)에 보인 것과 같이 총 7개의 원형파이프와 사각 나무상자를 매설하였다. (표 2)에 매설물의 크기와 형상을 나타내었고, 직경이 16 cm 이하의 비교적 작은 관을 사용하여 안테나 중심주파수에 따른 탐사한계를 알아 보고자 하였으며, 직경이 각기 다른 관을 동일 심도에 매설하여 직경에 따른 탐사결과 차이를 비교하였다.

(표 2) 불균질 매질의 매설물의 형상 및 크기

형상	직경 (cm)	길이 (cm)	매설심도 (m)	관내수위 (cm)
플라스틱관	16	200	1.04	8
플라스틱관	16	200	1.04	3
플라스틱관	16	200	1.04	-
플라스틱관	12	200	1.08	-
플라스틱관	7	200	1.13	-
플라스틱관	5	200	1.15	-
철관	10	170	1.10	-
나무상자	40	200	1.20	-

3.4 탐사방법

탐사장비는 스웨덴 Mala Geoscience社의 RAMAC/GPR을 사용하였다. 이 장비는 탐사심도에 따라 50, 100, 200, 400 MHz의 중심주파수를 갖는 쌍극자안테나를 교환하여 사용한다. 송수신안테나 사이의 간격 및 배열방향, 안테나와 지면의 접촉 등의 변화가 탐사결과에 크게 영향을 미치므로, 좋은 신호를 얻기 위해서는 이들 조건의 정확한 적용이 필요하다. 모형탐사에서는 Mala Geoscience社에서 제시한 표준탐사조건을 기준으로, 0.5 m의 간격으로 나란히 배열된 송신안테나 및 수신안테나를 지면에 밀착하여 매설관에 수직한 방향으로 탐사축선을 유지하며 탐사간격을 조정하면서 수행하였다.

(표 3)에서 보는 것과 같이 본 모형탐사에서는 균질 매질내의 매설관 탐사, 불균질 매질내의 매설관 탐사, 그리고 누수관 탐사로 구분하여 각각의 탐사목적에 고려하여 각기 안테나의 종류와 탐사간격을 달리하여 다양한 탐사결과를 얻을 수 있도록 하였다.

(표 3) 탐사부지의 종류 및 대상체에 따른 탐사방법

탐사부지	사용안테나 (MHz)	탐사간격 (cm)	탐사목적
균질 매질	200, 400	2, 5, 10, 25	각기 다른 심도에 매설된 동일 직경의 매설관을 탐사하여 안테나 주파수 및 탐사간격에 따른 탐사결과 비교
불균질 매질	200, 400	5	동일 심도에서의 매설관의 형상, 종류, 직경에 따른 탐사결과 비교
누수관	400	2, 5	누수관내 매질의 차이에 따른 탐사결과 비교

4 탐사결과 분석 및 고찰

4.1 자료처리

(1) 균질 매질 매설관의 탐사결과 자료처리

(그림 10), (그림 11)은 각각 200, 400 MHz의 안테나를 이용하여 얻은 자료에서 시간에 따른 감쇠를 보정한 모형탐사 결과이다. 매질의 상대투수율은 강자성체를 제외한 보통의 유전체에서 1, 매질의 속도는 속도분석을 통하여 얻은 0.13

m/ns, 빛의 속도는 0.3 m/ns이므로 매질의 상대유전율을 구하기 위하여 이용한 식은 다음과 같다.

$$V_m = \frac{C_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (1)$$

(V_m : 매질의 속도, C_0 : 빛의 속도, μ_r : 상대투자율, ϵ_r : 상대유전율)

이렇게 계산된 건조한 모래 매질의 상대유전율은 5.3이다. 플라스틱관의 상대유전율은 3이므로, 매질과의 상대유전율과 전기전도도의 차이가 거의 없고 그 두께가 얇기 때문에 감쇠정도가 비교적 약하다. 그러나 상대유전율의 차이에 의하여 그 경계에서 반사가 일어난다. 그리고 상부매질과 하부매질의 경계, 즉 지층의 경계면에서 뚜렷한 반사가 일어남을 볼 수 있다. 즉 이것은 상대유전율과 전기전도도는 반사강도와 감쇠정도를 변화시킨다는 이론을 입증하고 있다. (그림 11), (그림 12)의 A, B, C에서 보는 바와 같이 직경 60 cm의 플라스틱관은 심도 1.7, 1.3, 0.9 m에서 반사쌍곡선이 뚜렷하게 나타났다. 그러나 심도 0.9 m, 직경 15 cm 플라스틱관의 (그림 11)의 D, E에서 보는 바와 같이 심도 0.9 m에서 반사쌍곡선이 뚜렷하지만 (그림 10)의 D, E에서는 200 MHz, 즉 분해능이 낮은 안테나를 이용했기 때문에 반사쌍곡선을 거의 볼 수 없다. 결국 분해능을 감안할 때 매질관의 직경이 비교적 작을수록 고주파수 안테나의 선택이 필요함을 알 수 있다.

(2) 불균질 매질 매설관의 탐사결과 자료처리

(그림 12), (그림 14)은 시간에 따른 감쇠를 보정한 모형탐사 결과이다. 이 결과를 보면 분해능은 400 MHz 안테나의 경우가 더 우수하나, 매설물의 구분은 오히려 200 MHz 안테나의 경우가 우수하다. 이는 지반조성시 흙에 포함시킨 전석들이 매설물 상부에 위치하고 있어, 400 MHz의 경우 많은 반사쌍곡선들이 간섭을 일으켜 오히려 매설물의 구분을 어렵게 하기 때문이다. 따라서, 매설물 탐사와 같은 정밀한 탐사에서는, 가탐심도 뿐만 아니라 탐사지반의 상태도 고려하여 알맞은 탐사 주파수를 선택하여야 한다.

(그림 13), (그림 15), (그림 16)은 자료처리 후의 결과이다. 본 탐사에서는 주파수대역 필터와 디콘볼루션을 사용하였다. 이 결과에서도 400 MHz의 경우 보다는 200 MHz의 경우가 신호처리 후 결과가 더 좋았다. 이는 탐사결과의 해석에 있어 원탐사 자료의 질의 중요성을 다시 한번 보여주고 있다.

2.5 m와 5 m 지점의 하부에 매설된 플라스틱관은 각각 관내에 물이 1/2, 1/4들어있는 관이다. 관내에 물이 많을수록 반사쌍곡선의 구별이 쉬웠다. 또한 관내에 형성된 수면에 의한 반사도 보인다. Ulriksen (1982)은 관내의 물에 의한 탐사 결과의 변화를 정확히 알기위해 수중에 설치된 관에 물의 양을 변화시키며 탐사를 하였다. 이 결과를 보면 관내의 물의 양이 증가할수록 전체적으로 신호가 약해지는 것을 보여주고 있다. 이는 본 실험과 반대의 결과로, 전자기파의 전파매질과 탐사대상체와의 유전율의 차이에서 기인한다. 이러한 사실을 종합하면, 지하에 매설된 관에 대한 정보를 어느 정도 미리 알고 있고, 전파매질, 매설관 및 매설관내의 물질과 유전율의 차이가 커서 좋은 신호를 얻을 수 있는 경우, 관내의 상황을 미리 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다.

(그림 17)는 관의 종류 및 관내 물질에 대한 응답신호의 진폭에 대한 비교이다. 강관의 경우가 다른 관에 비해 큰 진폭을 보이며, 같은 종류의 관에서도 관내 물질의 변화에 따라 다른 응답신호를 보이고 있다. 전파매질과 탐사대상체와의 유전율의 차이가 클수록 큰 진폭을 갖는 양호한 응답신호를 얻을 수 있었으며, 이러한 사실은 지하레이더 탐사의 이론과도 잘 일치하고 있다.

(3) 누수관의 탐사결과 자료처리

(그림 18)부터 (그림 21)까지 400 MHz의 안테나를 이용하여 얻은 자료에서 시간에 따른 감쇠를 보정한 모형탐사 결과이다. (그림 18)의 D, E는 직경 15 cm의 빈 플라스틱관으로 반사쌍곡선이 뚜렷이 나타나지 않는 것으로 보아 반사강도가 비교적 약함을 알 수 있다. (그림 19)는 플라스틱관 E에 물, (그림 20)은 플라스틱관 D에 소금물, (그림 21)은 플라스틱관 E에 기름을 주입하고 누수되고 있는 중에 탐사를 실시하여 획득한 결과이다.

빈 플라스틱관일 때보다 물질이 차 있을 때 반사쌍곡선이 뚜렷하게 나타났다. 상대유전율은 기름이 낮고 전기전도도

는 소금물에서 가장 높기 때문에, 소금물에서 감쇠정도가 제일 심하면서 반사강도도 제일 강한 반면, 기름에서는 감쇠정도가 약하면서 반사강도도 약하다. 그리고 전파속도는 상대유전율에 반비례하여 공기>소금물>물>기름의 순이 되며, 공기에서는 전파속도가 빠르므로 비어있는 매질관 바닥에서 반사되는 쌍곡선의 정점이 상부로 이동하며 곡률반경은 커진다. 반면, 기름에서는 상대적으로 전파속도가 느리기 때문에 반대현상이 나타난다. (그림 22)는 관내의 물질에 대한 응답 신호의 진폭에 대한 비교이다. 각 물질의 반사강도, 즉 진폭이 관이 비어 있을 때 가장 작게 나타나고 소금물에서 가장 크게 나타남을 볼 수 있다.

4.2 전파속도 분석

반사체의 깊이를 알기 위해서는 지중에서의 전자기파의 전파속도를 알아야 한다. 앞의 2장에서 설명한 바와 같이, 지하레이더 탐사에서 사용하는 전파속도 결정방법은 첫째, 매질의 유전율을 직접 측정하는 방법, 둘째, 공통 수심점 탐사 방법, 셋째, 실측된 반사쌍곡선에 의한 방법 등이 있다. 본 연구에서는 공통 수심점 탐사 방법과 반사쌍곡선 방법으로 지중에서의 전자기파의 전파속도를 결정하였다.

균질 매질에서는 점반사원에서 반사된 쌍곡선 방법을 이용하는 데, 먼저 점반사원을 선택하고 그 점반사원을 CDP하여 상부지층의 전파속도를 구하였다. 400 MHz 안테나를 이용하여 플라스틱관의 최상부점을 점반사원으로 이용하여 얻은 탐사결과를 안테나의 거리와 왕복주기를 구하고 이것을 이용하여 0.13 m/ns 전파속도를 얻었다.

불균질 매질에서는 주파수-파수 구조보정을 실시하여 쌍곡선이 구조보정되어 직선으로 퍼지는 0.13 m/ns의 속도를 전파속도로 결정하였다. 주파수-파수 구조보정을 실시하였을 경우 직접파와 표면굴절파인 직선부분을 제외한 첫번째의 쌍곡선이 수평으로 퍼지며 구조보정이 되었는데, 이때의 주파수-파수 구조보정 속도를 상부지층의 전파속도로 사용하여 반사면의 깊이를 산출하였다. 또한, 매질한 파이프중 응답신호가 양호한 쌍곡선을 선택하여, 반사쌍곡선 방법을 사용하여 전자기파의 전파속도를 계산하였으며, 그 결과 평균속도는 0.13 m/ns로 공통 수심점 탐사에서 얻은 값과 일치하였다. (그림 23)은 균질 매질에서 실시한 탐사결과이고 (그림 24)는 불균질 매질에서 실시한 탐사결과와 주파수-파수 구조보정의 결과이다.

5 결론

본 연구는, 불균질 매질과 균질 매질, 그리고 매질관의 종류 및 내용물의 종류와 양에 따른 전자기파의 전달형태를 비교·분석하고 그 차이점을 인지하여 실제 현장에서 매질물을 탐사할 때의 지침을 마련하고자 수행하였으며, 이상의 실험에서 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 균질 매질에서는 200 MHz보다 400 MHz 안테나를 사용하였을 경우가 탐사분해능이 더 좋았으며, 불균질 매질에서는 400 MHz보다 200 MHz의 안테나를 사용하였을 경우가 탐사결과가 더 좋았다. 이는 균질한 매질의 지반에서도 탐사 목적에 따라 탐사분해능과 지반상태를 감안하여 적절한 안테나의 주파수를 선택해야 한다는 것을 의미한다.

(2) 반사강도는 매질의 임피던스 차이가 클수록 강하고, 감쇠정도는 매질의 상대유전율이 클수록, 전기전도도가 높을수록 심하다. 따라서 높은 분해능을 위해 안테나의 주파수를 선택하는데 있어서, 매질의 상대유전율과 전기전도도에 따른 감쇠정도와 반사강도를 감안해야 한다.

(3) 매질관에 물, 소금물, 기름 등을 채우게 되면 비어있을 때보다 반사신호가 더 우수하였고, 매질관내에 형성된 수면에 의한 반사파도 탐지되었다. 또한 그 반사파는, 전파매질과 매질관내 물질과의 상대유전율 및 전기전도도 차이가 클수록 큰 진폭을 갖는다는 것을 확인할 수 있었다. 매질관내의 물질 종류에 따라 전파속도가 변하는데, 전파속도

가 빠를 때에는 매설관 바닥에서 반사되는 쌍곡선의 정점이 상부로 이동하며 곡률반경은 커지면서 꼬리는 짧아진다. 반면 전파속도가 느릴 때에는 반대현상이 나타난다.

(4) 매설관에서 누수가 되면 반사쌍곡선의 꼬리부분이 달라지기 시작한다. 그리고, 매질로 누수된 물질은 일정한 경계로 퍼져나가는 것이 아니기 때문에, 누수면을 정확히 찾기는 어려우며, 단지 그 부분에서 반사강도가 약화되어 있음을 확인하였다.

이상에서 볼 수 있는 바와 같이, 향후 실제 현장에서 탐사를 실시할 때에, 현장의 제반조건을 충분히 이해하고 안테나 주파수를 선택하여야 하며 신중하게 탐사 계획을 한다면 지하레이더 탐사법은 지하매설물을 찾는 데에 훌륭한 방법이 될 수 있을 것이다. 또한 더욱 심층적인 모형연구와 수치모델링연구를 통하여, 매설관과 물질의 정보를 획득할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

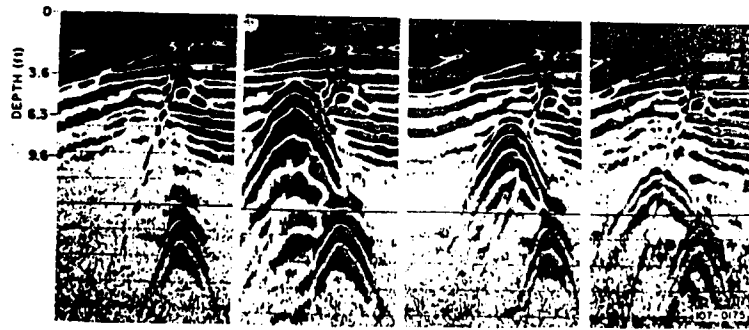
본 연구 수행에 많은 도움과 조언을 주신 인하대학교 자원공학과 조동행 교수님께 깊은 감사의 뜻을 전합니다. 또한 현장모형실험에 협조를 아끼지 않으신 금호건설 인천광역시 산곡동의 금호타운 아파트 신축공사 현장의 김상기 소장님 이하 관계자 여러분께도 심심한 사의를 표합니다.

참고 문헌

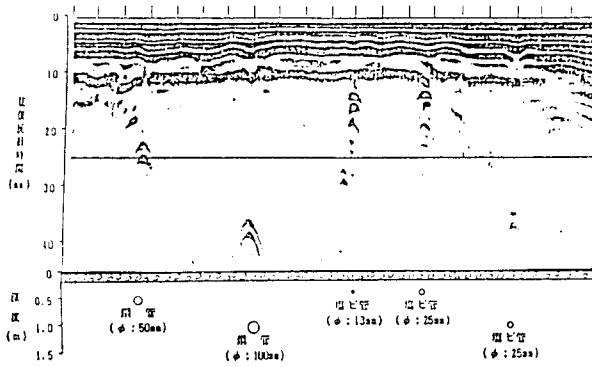
- 배성호, 윤은상, 김학수 (1995) GPR 기술의 지반조사 및 구조물 진단 분야 활용. 비파괴 시험 기법을 이용한 지반조사와 토건구조물의 안전진단 및 품질관리. 경희대학교. pp. 157-174.
- 윤은상, 배성호, 김병철, 김학수 (1995) 전도성 층적지반의 지질 및 하부 기반암 조사를 위한 지하레이더 (GPR)의 적용. 터널과 지하공간. Vol. 5, pp. 114-122.
- 정연문, 이명성, 이영남, Kong, F. (1995) Georadar를 이용한 터널 지반조사. 대한토목학회 1995년도 학술발표회 논문집. Vol. 3, pp. 10-13.
- 應用地質株式會社 (1993) 地下レーダ (最新の開發成果と適用事例). 第20回 OYO展 세미나-A-1. 1993.12.1.
- 應用地質株式會社 (1994) 地中レーダ-による各種調査事例-SIRシステムを中心にして. 第21回 OYO展, 세미나-B-1, 1994.12.1.
- 菅野朝次, 有岡良祐, 永島裕二, 増田順一, 河野貞男 (1991) 電磁波法による地下埋設物探知技術. 土木工學における非破壊評價シンポジウム論文集. pp. 175-180.
- 松平雄三, 永島裕二, 菅野朝次, 津田芳文, 増田順一 (1991) 電磁波法によるコンクリート内鐵筋位置探知技術. 土木工學における非破壊評價シンポジウム論文集. pp. 181-185.
- 鷲巢征行, 佐藤務, 奥村幹也 (1991) 電磁波法による地中探査ロボット“てんとう蟲”の地中探査例. 土木工學における非破壊評價シンポジウム論文集. pp. 169-174.
- 渡邊廣勝 (1993) 地中レーダ-による遺跡調査. 寫眞測量とリモートセンシング. Vol. 32, pp. 32-35.
- 小池賢司 (1993) 路面下の空洞調査. 地質と調査. No. 2, pp. 31-37.
- 鈴木務 (1993) 電波による埋設パイプの探知. 地質と調査. No. 2, pp. 25-30.
- 保國光敏, 阿部裕, 土弘道夫, 五十嵐寛昌 (1985) 電波探査技術を利用した淺層地盤調査法. 土と基礎. Vol. 33, pp. 33-36.
- 金子誓, 官津義文, 關元治 (1994) 鋪裝下における路盤・路床變狀把握. 土と基礎. Vol. 42, pp. 37-40.
- 小島圭二 (1994) 地中の可視化. 土と基礎. Vol. 42, pp. 1-6.

- Abem AB, INC. (1990) Ground probing radar as an investigation tool in connection to construction work - experience and potential. R&D Report. Abem AB, INC. Stockholm, Sweden.
- Al-Shayea, N., Gilmore, P. and Woods, R. (1994) Detection of buried objects by the GPR method. Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar. Vol. 1, pp. 1-19.
- Annan, A. P. and Cosway, S. W. (1994) GPR frequency selection. Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar. Vol. 2, pp. 747-760.
- Ballard, R. F. Jr. (1983) Cavity detection and delineation research. Technical Report. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Basson, U., Enzel, Y., Amit, R. and Ben-Avraham, Z. (1994) Detecting and mapping recent faults with a ground penetrating radar in the alluvial fans of the Arava Valley, Israel. Proceedings of the 5th International conference on Ground Penetrating Radar. Vol. 2, pp. 777-788.
- Fisher, S. C., Robert, R. S. and Harry, M. J. (1994) Processing ground penetrating radar data. Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar. Vol. 2, pp. 661-675.
- Geophysical Survey Systems, INC. (1974) Continuous Subsurface Profiling by Impulse Radar. R&D Report. Geophysical Survey Systems, INC. USA.
- Mala Geoscience and KIGAM (1995) RADPRO : radar processing software for RAMAC/GPR. Users manual.
- Nick, K. P., Cimiotti, T., Papziner, U., Kleinmann, L. and Laugks, J. (1994) Signal and image classification in georadargrams. Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar. Vol. 2, pp. 711-722.
- Pettinelli, E., Redman, J. D., Endres, A. L. and Annan, A. P. (1994) A test site for quantification of GPR responses. Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar. Vol. 1, pp. 153-162.
- Stolte, C. and Nick, K. P. (1994) Eccentricity-migration : a method to improve the imaging of pipes in radar reflection data. Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar. Vol. 2, pp. 723-734.
- Ulriksen, C. P. F. (1982) Application of impulse radar to civil engineering. Doctoral Thesis. Lund University of Technology.
- Young, R. A. and Sun, J. (1994) Recognition and removal of surface scattering in GPR data. Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar. Vol. 2, pp. 735-746.

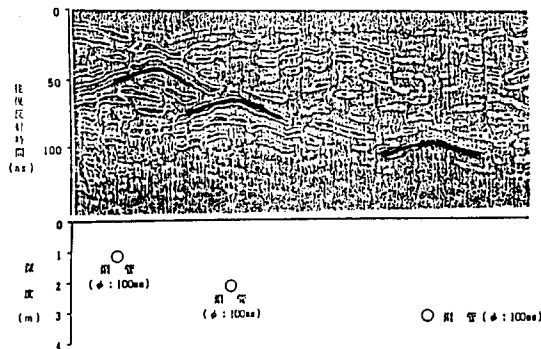
PIPES IN SAND



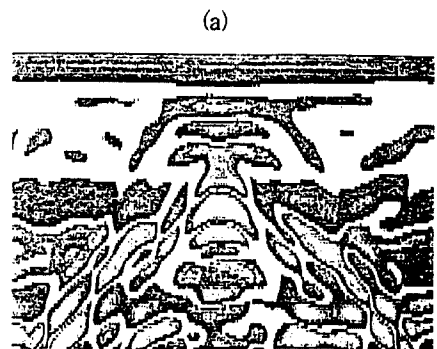
(그림 1) 1974년 Geophysical Survey System Inc. 에 의해 수행된 매설물 탐사 결과



(그림 2) 천부 매설관 탐사 예(일본 응용지질, 1994)



(그림 3) 심부 매설관 탐사 예(일본 응용지질, 1994)

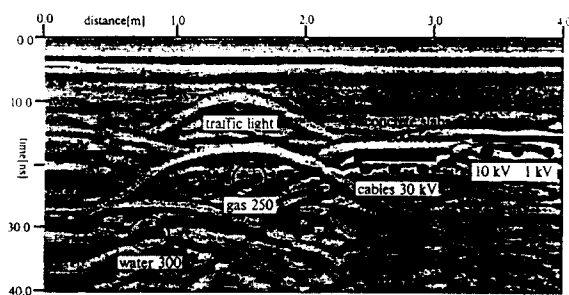


(a)

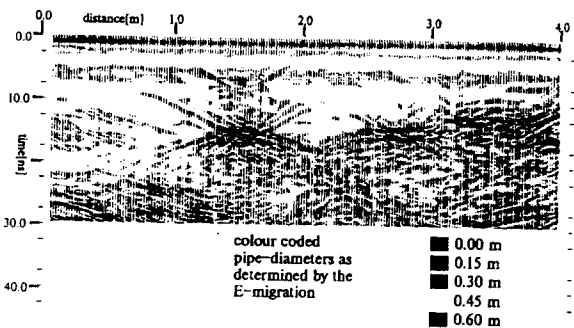


(b)

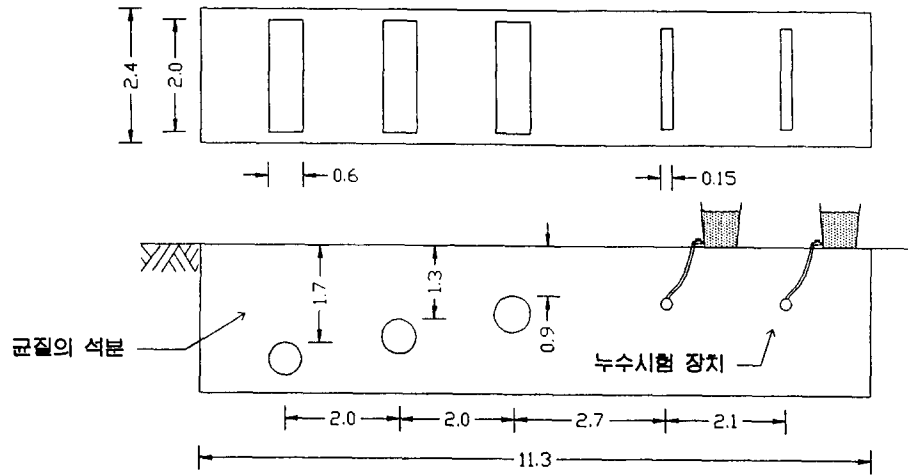
(그림 4) 지표하 31.8 cm에 스티로폼로 만든 공동을 탐사한 결과
(전파매질: 균질한 세사, 사용안테나: 500 MHz, Al-Shayea, 1994)
(a) 비어 있는 공동 (b) 모래로 충전된 공동



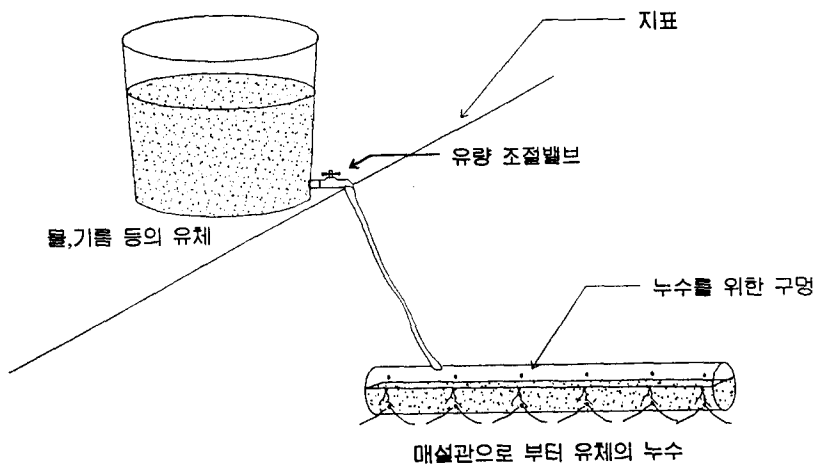
(그림 5) 매설물에 대한 탐사기록의 원형태



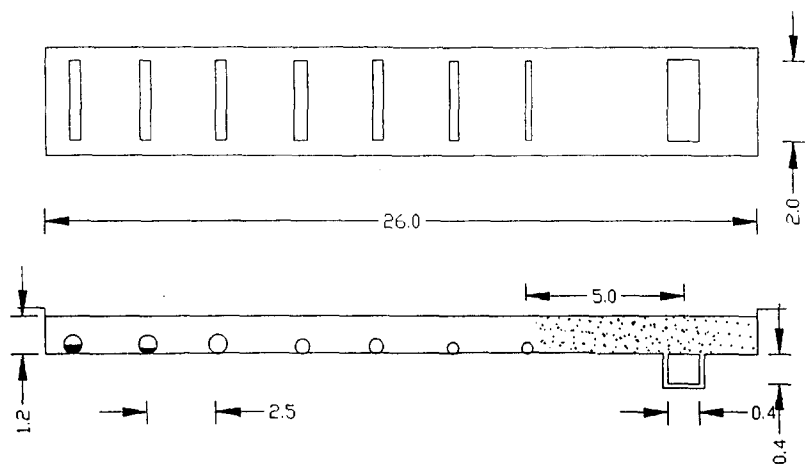
(그림 6) E-마이그레이션 처리후의 탐사기록



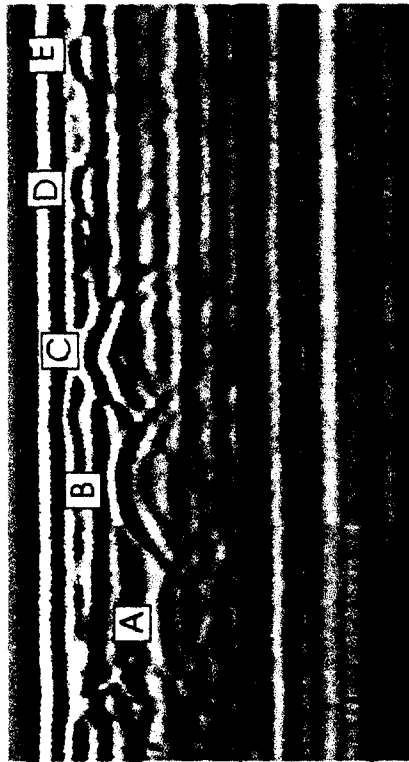
(그림 7) 탐사부지 조성 및 매설물의 배치(균질 매질내의 매설관)



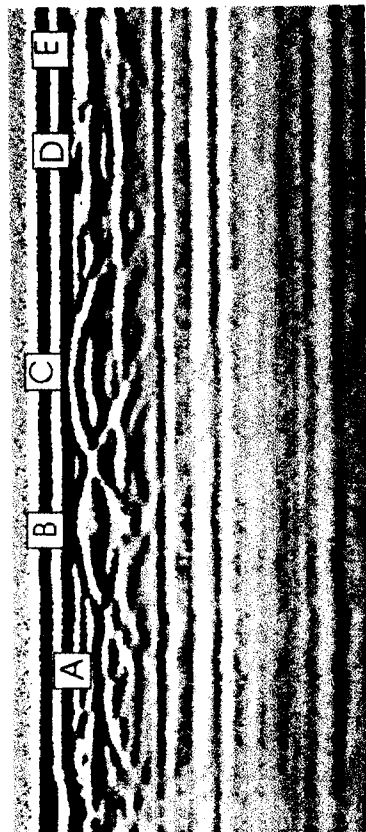
(그림 8) 매설관의 누수모델 탐사



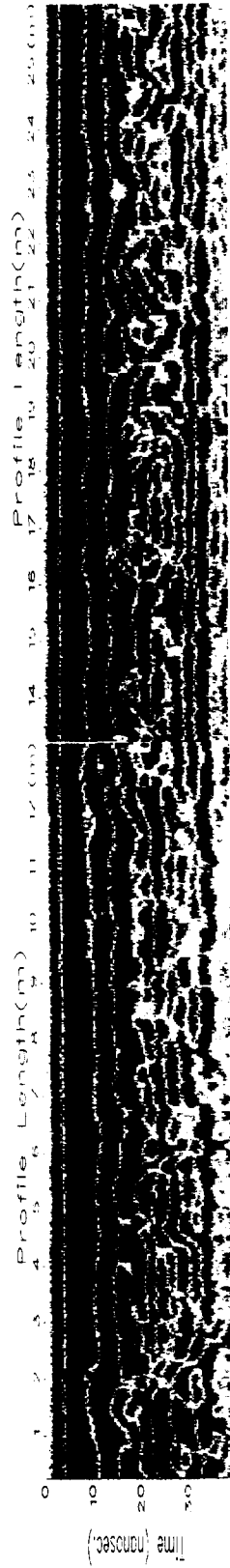
(그림 9) 탐사부지 조성 및 매설물의 배치(불균질 매질내의 매설관)



(그림 11) 400 MHz 안테나를 사용한 탐사결과(시간이득 후)



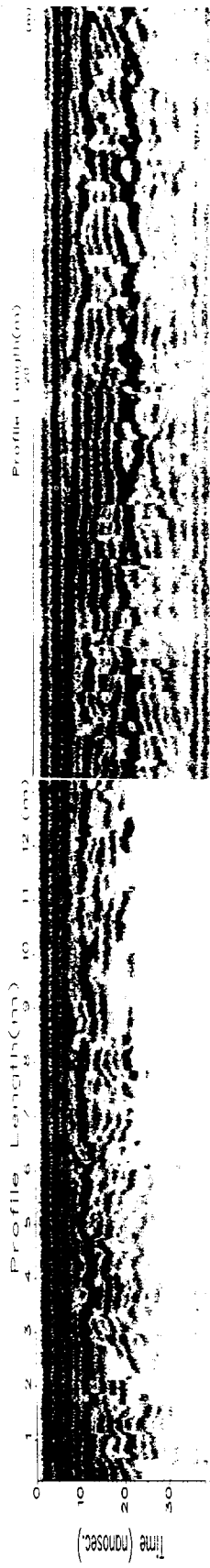
(그림 10) 200 MHz 안테나를 사용한 탐사결과(시간이득 후)



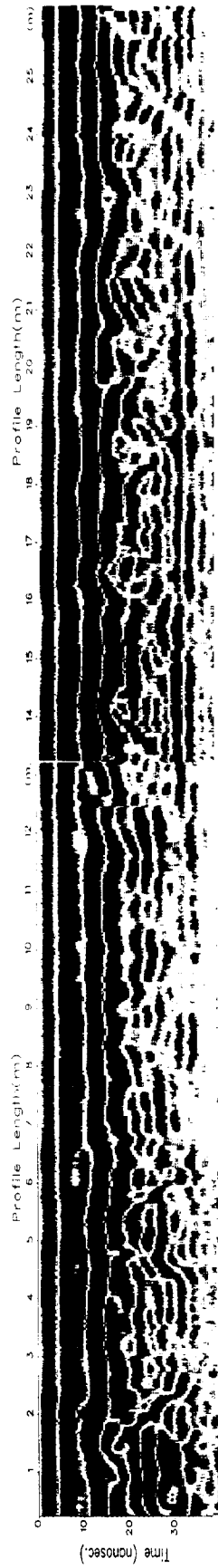
(그림 12) 400 MHz 안테나를 사용한 탐사결과(시간이득 후)



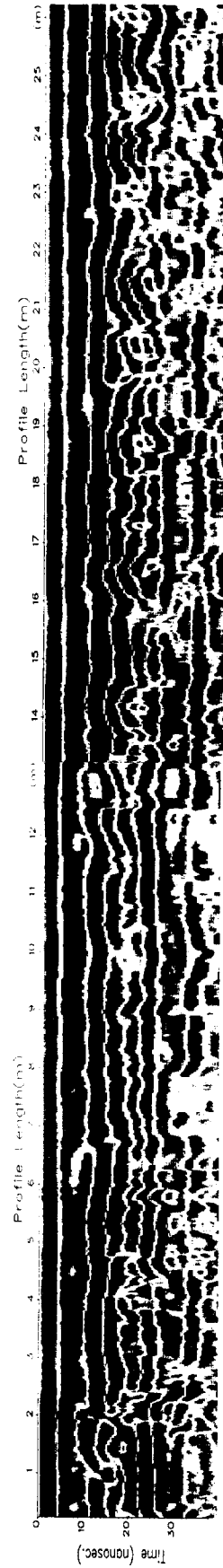
(그림 13) 400 MHz 안테나를 사용한 탐사결과(자료처리 후)



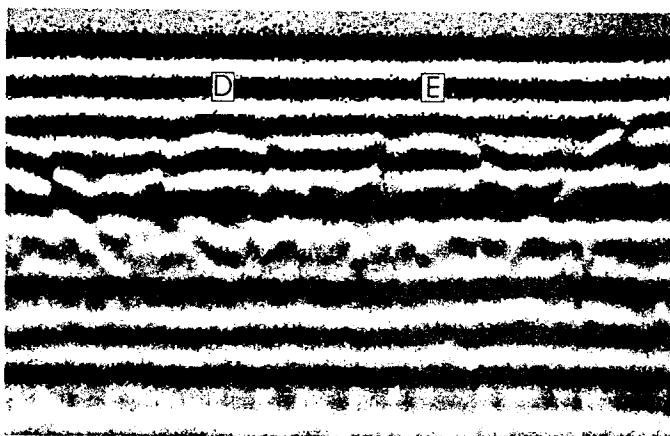
(그림 14) 200 MHz 안테나를 사용한 탐사결과(시간이득 후)



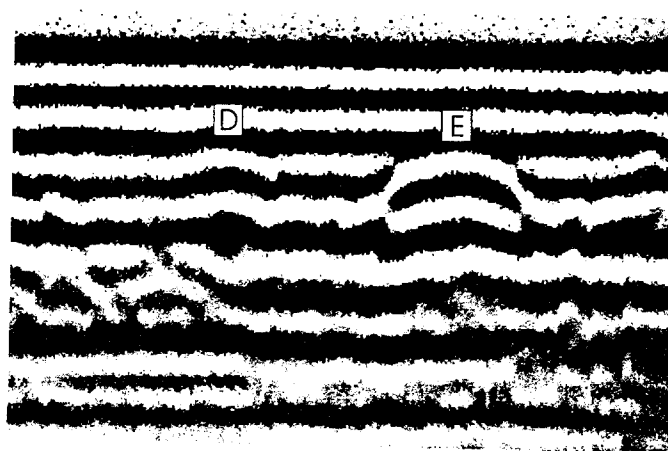
(그림 15) 200 MHz 안테나를 사용한 탐사결과(대역통과필터 후)



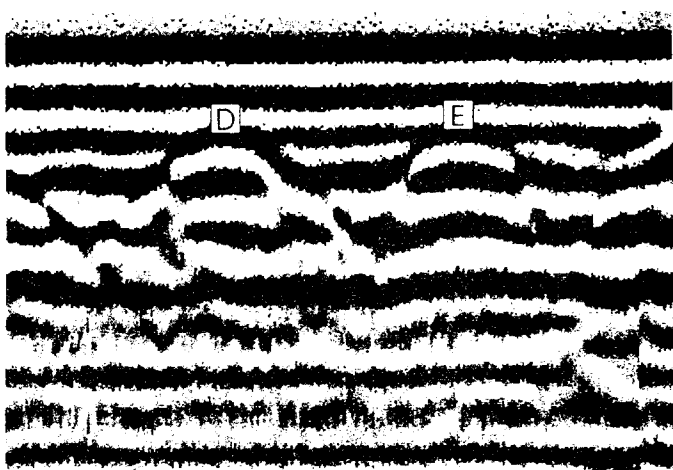
(그림 16) 200 MHz 안테나를 사용한 탐사결과(디콘볼루션 후)



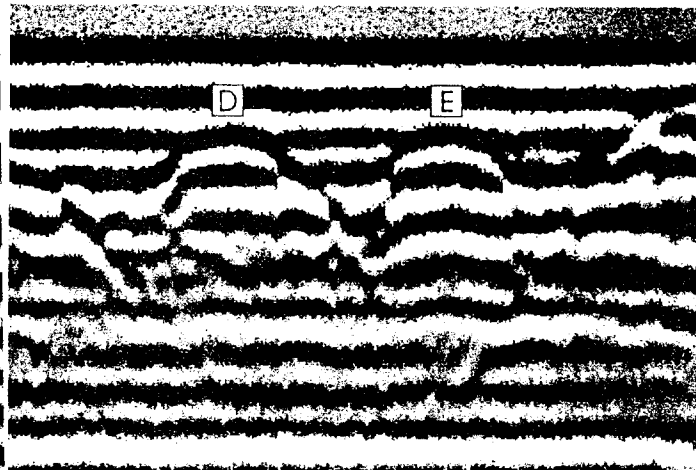
(그림 18) 400 MHz 안테나를 사용한 탐사결과(시간이득 후)
 D : 빈 플라스틱관(직경 15 cm)
 E : 빈 플라스틱관(직경 15 cm)



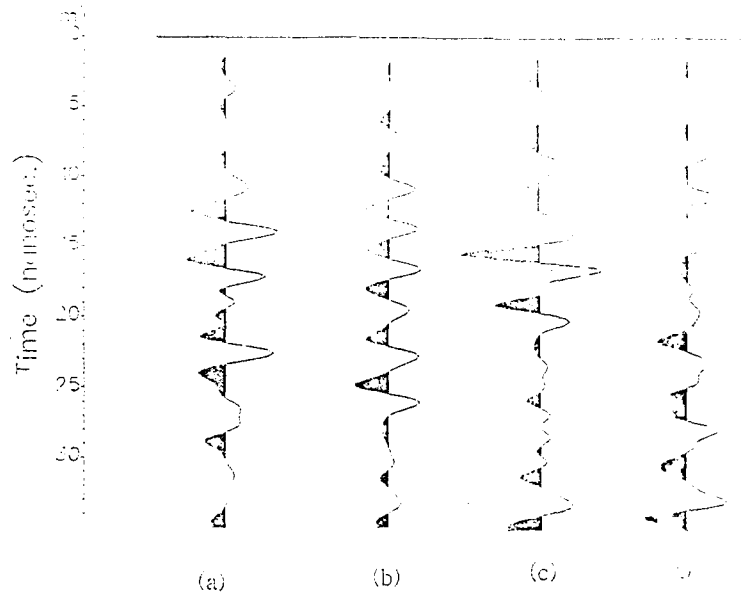
(그림 19) 400 MHz 안테나를 사용한 탐사결과(시간이득 후)
 D : 빈 플라스틱관(직경 15 cm)
 E : 플라스틱관(직경 15 cm, 물)



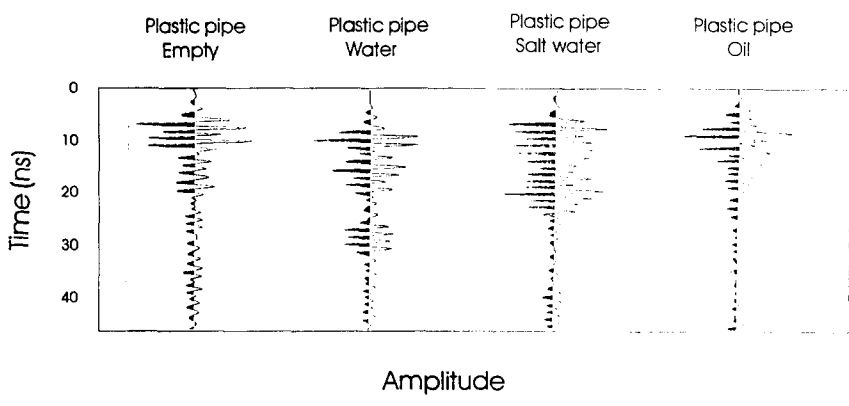
(그림 20) 400 MHz 안테나를 사용한 탐사결과(시간이득 후)
 D : 플라스틱관(직경 15 cm, 소금물)
 E : 플라스틱관(직경 15 cm, 물)



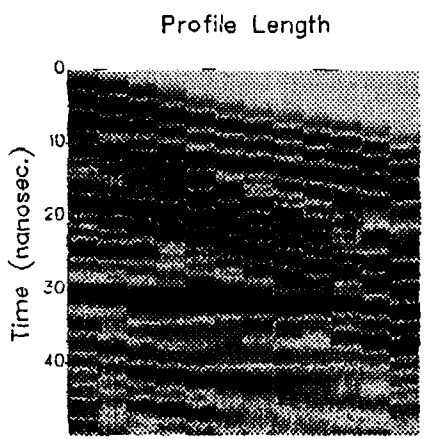
(그림 21) 400 MHz 안테나를 사용한 탐사결과(시간이득 후)
 D : 플라스틱관(직경 15 cm, 소금물)
 E : 플라스틱관(직경 15 cm, 기름)



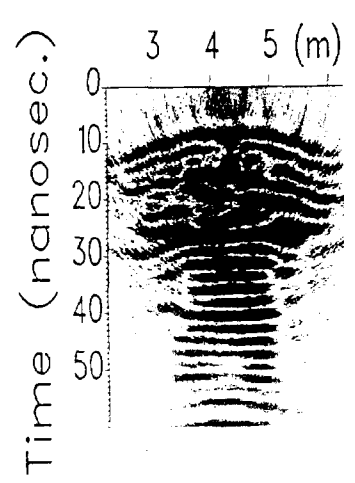
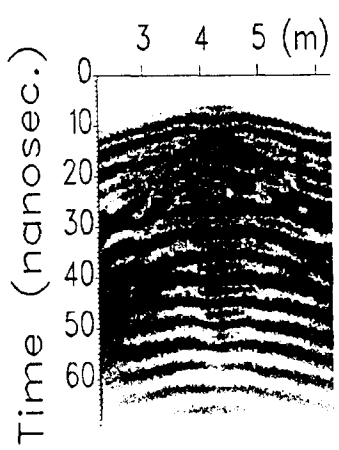
(그림 17) 단일 트레이스간의 진폭 비교
(불균질 매질내의 매설관)



(그림 22) 단일 트레이스간의 진폭 비교
(균질 매질내의 매설관)



(그림 23) 균질 매질에서의 전파속도 분석



(그림 24) 불균질 매질에서의 전파속도 분석