

매설파이프 감지를 위한 지하 투과 레이더 모래 모형조 실험

김 형 수

한국수자원공사 수자원연구소

요 약

지하 투과 레이더를 이용한, 지하 매설물의 감지 여부 및 반사 신호 특성을 규명하기 위하여 모래 모형조 실험을 수행하였다. 매설물의 직경과 매립 심도의 비율은 최대 24%, 최소 4%로 다양하게 설정되었으며, 매설물의 재질은 금속제, 합성수지 및 목재가 사용되었다. 실험 결과, 지하수면이 매설물 하부에 위치한 경우, 목재를 제외한 모든 매설물이 심도와 직경에 상관없이 강한 반사파를 보여 주었다. 한편, 지하수면이 매설물 상부에 위치한 경우, 지하레이더를 이용한 매설물 감지가 매우 어려웠다. 그러나 이 경우에도 모형 탱크의 바닥에서의 반사 신호는 뚜렷이 감지되었으며, 이는 단순히 전자기파의 감쇠 이외에 타 요소가 매설물의 반사파 신호 발생을 저하시키는 것으로 사료된다. 본 실험 결과, 현장에서 단순히 매설물의 수평적인 위치를 감지하려고 할 경우, 수직 반사 방식의 지하레이더 조사가 경제적, 시간적으로 효율적이지만, 매설물의 수직위치, 지층의 전자기파 투과 속도, 지하수면 조사 등, 정밀한 지하 정보 획득을 목적으로 하는 경우, 적어도 부분적인 공심점 자료를 획득할 수 있는 방식의 조사가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

주요어: 지하 투과 레이더, 매설파이프, 모래 모형조, 지하수

Kim, Hyoung-Soo, 1998, Ground penetrating radar testing in a sand tank for detection of buried pipes, *Journal of the Korean Geophysical Society*, v. 1, n. 1, p. 59-68.

ABSTRACT: Ground penetrating radar (GPR) experiments were performed in a sand tank to study the ability of detection of buried pipes and to characterize the signal of the reflection wave. The ratios of diameter of buried pipes to the depth were set 4 up to 24% and materials were metal, synthetic resin, and wood. In case of groundwater table below buried materials, strong reflection signals were observed irrespective of diameter and depth except for wood. While it is very difficult to detect the reflection signals in case that the groundwater table is set to higher than buried materials. The reflection signals from the bottom of the sand tank, however, were clearly observed even in case of higher groundwater table. This implies that the weak reflection signals from the buried materials are not all due to the wave attenuation. The vertical reflection profiling method is recommended in case that the object of the survey is to find horizontal position of buried material because this method has the advantage in cost and time of survey. However, the full or partial CMP gather method is recommended in case that the objects of the survey are to get the detailed subsurface information, i.e. the depth to buried material, interval velocity of geological layer, and mapping the groundwater table.

Key words: Ground penetrating radar, Buried pipe, Sand tank model, Groundwater

(Kim, Hyoung-Soo, Water Resources Research Institute, Korea Water Resources Corporation, 462-1 Jonmin-Dong, Yusung-Gu, Taejeon, 305-390, Korea. email: hskim@kowaco.or.kr)

1. 서 론

19세기 말 이론적인 전자기파도 빛과 유사하게

금속체나 유전체에 대해 반사한다는 사실이 밝혀진 이후, 전자기파의 이러한 성질을 응용하기 위한 연구가 부분적으로 수행되었으나, 레이더

(RADAR; Radio Detection and Ranging)기술의 본격적인 응용은, 2차 대전 당시에 군사적인 목적으로 수행되기 시작하여 오늘에 이르고 있다. 지질 조사에 레이더를 응용하고자 하는 초창기의 시도는 극지의 빙하 혹은 영구동토 관련 조사를 위해 항공기 등에서 레이더를 이용한 지구물리탐사를 들 수 있다(Annan · Davis, 1976; Annan · Davis, 1978; Kovacs · Morey, 1978; Kovacs · Morey, 1985). 그러나 극지의 빙하처럼 전자기파의 감쇠를 적게 일으키는 물질은 일반적으로 지구표면에 흔하지 않아 항공 레이더 탐사와 같이 간접적인 접촉을 통해 지표 하부를 조사하는데는 한계가 있었다. 1980년대 이후 전자 기술 및 전자 계산기의 급격한 발달에 힘입어, 야외 현장에서 손쉽게 레이더 신호의 송수신이 가능하게 되어 인공 구조물 및 근접 지표부위의 지질정보를 레이더 신호를 통해 획득할 수 있게 되었다.

일반적으로, 지하 레이더(Ground Penetrating Radar; 이하 GPR) 탐사는 직접 지표면에서 전자기파를 출력하여 이를 송신하는 방법을 일컬으며, 보통 수십 미터 이내의 지표 근접 지질조사 및 매설물 조사에 응용된다. GPR 탐사가 사용하는 주파수 대역은 보통 수십에서 수천 MHz로 이러한 전자기파는 대기중에서, 수십 센티미터에서 수십

미터 정도의 파장을 가지며, 지하 매질의 전기전도도에 따라 차이가 있지만, 보통 수내지 수백 미터정도를 투과할 수 있다. 최근 들어 각광받고 있는 지하 레이더 탐사는 원격 탐사 등에서 사용하던 전자기파 대역(광파 포함)보다는 상대적인 저주파 대역을, 전통적인 전자기 탐사법에 비해서는 상대적으로 고주파 대역인 전자기파 신호를 사용한다. 또한 전통적인 전자 탐사법이 주로 전자기 유도 현상을 이용하는데 반해, 지하 레이더 탐사는 전자기파의 전파 특성인 반사, 투과 등을 이용하여 지하의 매체를 영상화하므로 기본적인 탐사 개념 및 처리 과정이 탄성파 반사법 탐사와 매우 유사하다. 현재 지하 레이더 탐사는 일반적인 지질조사 이외에도 대형 토목 공사의 안정성 조사, 지하수 조사, 환경관련 조사, 누수 조사, 관로 탐지 조사 등에서 활발히 사용되고 있다(Annan · Davis, 1997).

본 연구의 목적은 실내에 마련된 모래 채움 모형조(sand tank)에서 인위적으로 형성된 매설파이프에 대한 GPR 탐사를 수행하여 GPR 탐사의 효용성 여부 및 매설 조건에 따른 매설파이프의 신호 특성을 분석하는데 있다.

2. 본 론

Table 1. Grain size of filling material.

Grain Size (unit:mm)	Sample #1 (unit:g)	Sample #2 (unit:g)	Sub Total (unit:g)	Percentage (%)
Over 4.76	12.8	23.3	36.1	2.19
3.35 ~ 4.76	6.5	24.0	30.5	1.85
2.38 ~ 3.35	1.1	2.8	3.9	0.24
1.19 ~ 2.38	67.5	170.4	237.9	14.45
0.71 ~ 1.19	68.5	202.8	271.3	16.47
0.59 ~ 0.71	37.9	119.5	157.4	9.56
0.50 ~ 0.59	51.6	154.6	206.2	12.52
0.425 ~ 0.50	36.0	282.1	318.1	19.32
0.355 ~ 0.425	15.2	39.2	54.4	3.30
0.297 ~ 0.355	23.3	93.9	117.2	7.12
0.149 ~ 0.297	47.9	107.6	155.5	9.44
Under 0.149	16.7	41.7	58.4	3.55
Total Sum	385.0	1,261.9	1,646.9	100.0

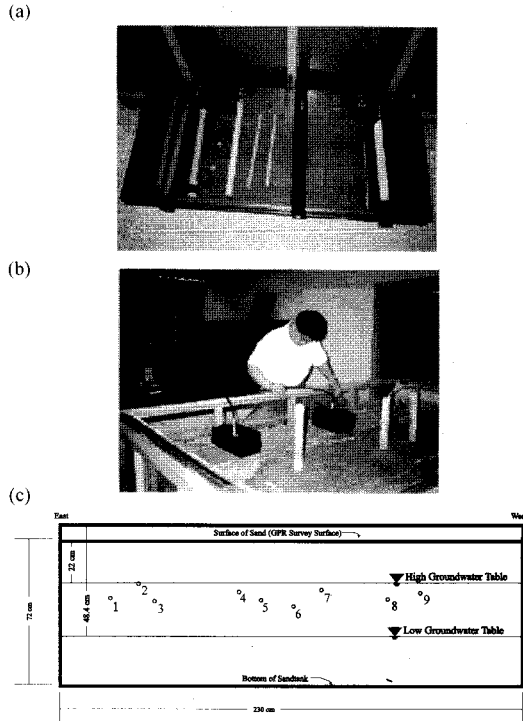


Fig. 1. (a) Buried materials used in the study: 1. Square wood bar, 2. Stainless rod, 3. Acryl pipes, 4. Tin pipe (63.9 Φ), 5. Tin pipes (23.5 Φ), 6. Iron pipe, 7. PVC pipes. (b) View of the sand tank model. (c) Schematic diagram of the experiment. The locations of the buried materials are marked with circles. The inverted triangles indicate the groundwater tables of experiment.

2.1 실험 환경 일반

실험에 사용된 모형조는 외부에서 실험 과정 및 지하수면, 매설물 등을 직접 관찰할 수 있도록 하기 위하여 투명 아크릴(10T)로 제작되었다. 모형조의 규격은, 전체규격이 240×150×100 cm (L×W×H)이며, 지질시료를 채워 넣을 내부 공간의 규격은 230×150×100 cm이다. 모형조의 양쪽 끝 부분에는 실험에 사용될 용액의 수위를 조절하기 위한 밸브를 5조씩 설치하였고, 내부 공간과 용액 저장 공간 사이에는 토양의 출입을 방지하고 용액의 이동만이 가능하도록 하기 위하여, 균일한 직경과 간격의 구멍을 배치한 투명 아크릴 판에 200 mesh 망(눈금크기 0.075 mm)을 부착하여 칸막이로 사용하였다. 또한 아크릴판의 접합부위에는 누수를 방지하기 위하여 실리콘 접착제를 사용하였다.

본 지하 레이더 실험을 위해서 사용된 모형조의 채움 재료로는, 전체 시료의 약 80 % (중량비)가 Friedman · Sanders (1978)의 입도 등급중 ϕ 값 2~-1에 해당되는 중립사(medium sand) 내지 왕모래(granule)에 해당되며, 약 10 % 안팎의 시료는 직경 0.297 mm 이하의 가는 입자로 구성되어 있다(Table 1 참조). 매립된 파이프의 재질은 스테인레스, 주철, 양철, 아크릴, PVC, 나무이며, 외경은 최소 12부터 최대 64 mm까지 다양하며, 매설 심도 역시 관의 크기에 대해 최소 4배에서 25배까지 다양하게 설정되어 매설되었다. Table 2는 실험을 위해 설정된 매설파이프에 대한 상세 정보이며, Fig. 1은 실험에 사용된 매설물, 모래 채움 모형조 및 실험 개괄도를 보여준다.

2.2 자료 획득 및 처리

실험에 사용된 지하 레이더 장비는 Sensors & Software Inc.의 pulseEKKO 1000이다. 본 장비는 시스템 성능(System performance Q; 송신기의 출력전압과 수신기의 잡음감지 한계전압의 비율)은 133 dB, 최소 자료획득 간격은 0.01 ns, 최대 기록 시간은 32,767 ns, 사용 가능 송신기의 주파수는 110, 225, 450, 900 및 1,200 MHz 등이며, 모든 자료는 디지털(digital) 형태로 노트북 컴퓨터에 저장되므로 자료 획득 후 정량적인 자료처리가 가능하다(Sensor & Software, 1996). 본 장비는, 기본적으로 일정한 송수신기 거리(offset)를 유지한 상태에서 수직 반사 방식(Vertical Reflection Profiling; 이하 VRP 방식)으로 자료를 취득하지만, 송신기와 수신기를 분리하여 운용할 수 있으므로 필요에 따라서는 송신기 취합 방식(transmitter gather/shot gather) 또는 공심점 취합 방식(common mid-point gather; 이하 CMP 방식)으로도 자료를 획득할 수 있다.

모형조에서의 매설물 조사 실험은 크게 두 가지로 구분되어 수행되었다. 첫 번째 실험은 모든 매설물이 지하수면 상부에 존재하는 상태에서 자료획득이 수행되었으며, 두 번째 실험의 경우는 모든 매설물이 지하수면 하부에 존재하도록 수위를 조절하여 조사를 수행하였다. 첫 번째 실험의 경우, 자료획득 방법은 고정된 송수신기 거리에 대해 반사파를 취합하는 수직 반사 방식과 송신기 위치를 고정시킨 후 수신기의 위치를 이동시키면서 고정된 단일 송신기의 위치에 대해 36개의 수

Table 2. Information of buried pipes in sand tank.

Kinds of Buried Material	Status	Horizontal Position (Reference : East end of tank)	Vertical Position (Reference : Survey surface)	Inner diameter or horizontal size	Outer diameter or vertical size
1 Stainless rod	-	250	295		12.0
2 Tin pipe	void	390	225	21.8	23.5
3 Acryl pipe	water filled	470	310	15.8	21.0
4 Tin pipe	free ends	890	265	61.0(?)	63.9
5 Acryl pipe	void	1000	305	15.8	21.0
6 Square Wood bar	-	1160	335	25.1	34.2
7 Iron pipe	water filled	1300	255	25.5	34.3
8 PVC pipe	water filled	1630	300	35.7	42.0
9 PVC pipe	void	1790	270	35.7	42.0

- * Unit : mm.
- * Horizontal position increases westward direction.
- * Vertical position increases downward direction.
- * Vertical position has some errors about $\pm 10\text{mm}$ because of irregularity of survey surface.
- * Total thickness of sand layer is about 720 mm.

신자료가 획득되는 송신기 취합방식이 적용되었으며, 두 번째 실험은 VRP 방식만을 이용하여 자료를 획득하였다. GPR 탐사 실험 수행 시에 사용된

자료 획득 변수에 대한 상세 정보는 Table 3에 보여진다. 본 연구의 자료처리는 pulseEKKO 1000 장비와

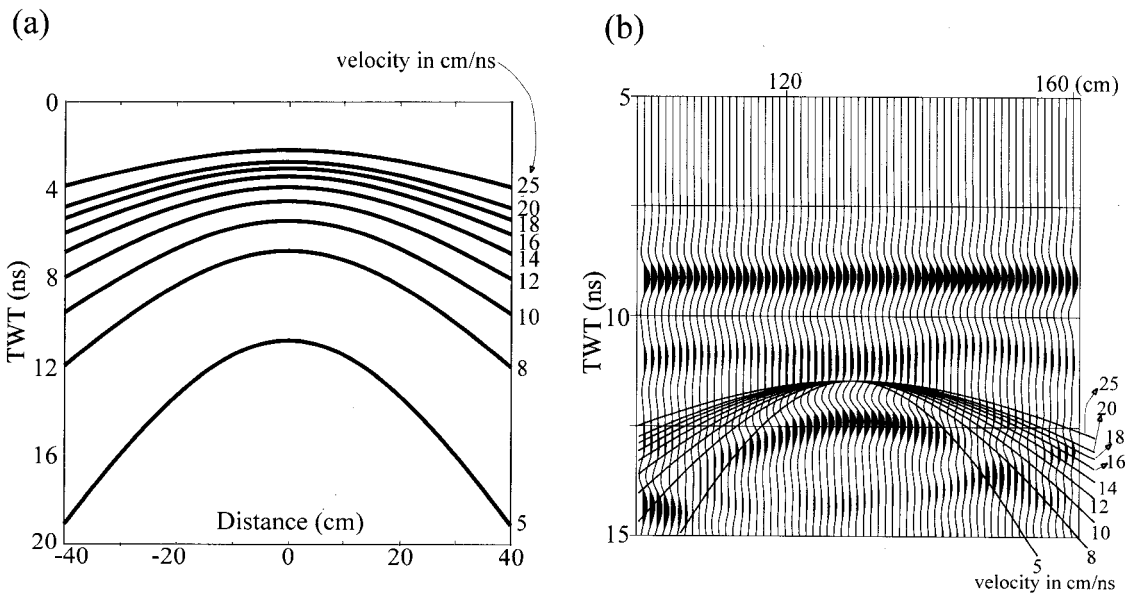


Fig. 2. (a) Travel-time curves according to radar velocities where a point reflector is located at 25.5 cm depth. (b) Comparison of obtained data with computed travel-time curves.

Table 3. Acquisition parameters for ground penetrating radar tests.

Survey Name	LABPPLOW SNG900	LABPPLOW CMP900	LABPPHGH SNG900
	Groundwater Table :484mm below the surface		Groundwater Table :220mm below the surface
NUMBER OF TRACES	192	2826	190
NUMBER OF PTS/TRC	1200	1200	1200
TIMEZERO AT POINT	154	151(tr#1 ~ 1152) 159(tr#1153 ~ 2826)	159
TOTAL TIME WINDOW (ns)	60	60	60
STARTING POSITION (m)	0.17	0.17	0.17
ENDING POSITION (m)	2.08	2.07	2.06
STEP SIZE or INTERVAL (m)	0.01	0.02	0.01
SEPARATION OF Tx-Rx (m)	0.17	from 0.18 to 0.88 in steps of 0.02	0.17
NOMINAL FREQUENCY (MHz)	900	900	900
PULSER VOLTAGE (V)	200	200	200
NUMBER OF STACKS	32	32(tr#1 ~ 1152) 8(tr#1153 ~ 2826)	32
SURVEY MODE	VRP	Shot Gather	VRP

함께 공급되는 S/W인 EKKO 프로그램과 스탠포드 대학에서 최초 개발된 후, 콜로라도 광산대학교에서 보완 개발, 보급되는 공개용 프로그램인 CWP/SU release 31 (Cohen · Stockwell, 1997)을 이용하여 수행되었다. 또한 기타 자료 변환 및 부수적인 처리 등이 필요한 경우, FORTRAN과 C언어를 사용해서 자체적으로 작성된 프로그램을 사용하였다.

2.3 매설파이프 감지 조사

지하수면 상부에 존재하는 매설파이프를 감지하기 위한 조사는 크게 두 가지 방식으로 수행되었다. 첫 번째 조사 방식은 VRP 방식으로 송신기와 수신기의 거리차(offset)를 17 cm로 고정한 상태에서 조사의 중심점을 1 cm씩 이동하는 방식이며, 두 번째 조사 방식은 송신기 취합 방식으로 송신기와 수신기의 거리차를 18 cm부터 2 cm씩 증가시켜 총 36개의 자료를 획득한 후, 송신기를 2 cm 이동시키는 방식이다.

우선적으로 채움 재료의 전자기파 투과 속도를 추정하기 위해 가장 뚜렷한 신호를 보여주는 주철

관의 반사파에 대한 주시 곡선을 작성하여 이를 실제 관측자료와 비교하여 채움 매질에 대한 투과 속도를 추정하였다. Fig. 2의 (a)는 25.5 cm 하부에 매립된 물체로부터 관측되는 반사파의 주시 곡선 형태를 보여준다. 이때, 심도 25.5 cm는 주철관(매설물 7)의 심도에 해당되며, 매질의 전자기파 투과속도는 5부터 25 cm/ns로 설정하였다. 주시 곡선 값을 구하기 위해서 실제 관측 시에 사용된 송신기와 수신기의 간격인 17 cm로 송수신기 거리 고정 시켰으며, 조사 중심 위치는 1 cm씩 간격으로 설정하였다. 그러나 매립 물체의 직경은 주시곡선 계산에 고려치 않았으며, 단순 점원(point source)형태로 가정하였다.

탄성파 탐사와는 달리 GPR의 경우, 신호가 실제 송신된 정확한 시각을 수신된 신호의 형태로부터 판단해야 하므로 절대적인 시간을 알아내기 위해서는 송신시각을 여러 정보를 통해 정확히 추정해야 한다. 일반적으로 송수신기의 연결케이블, 기록장치까지의 연결케이블 등이 신호발생 명령이후부터 실제 신호 발생시간, 신호 기록시간 등을 좌우하게 되며, 한번 특정한 연결상태가 설정되면

일반적으로 최초 신호 발생 명령부터 실제 신호 발생까지의 시간은 일정하게 유지된다고 볼 수 있다. 즉 조사가 수행되는 동안 어떤 이유로 해서 연결 케이블을 교체하거나 확장시키는 경우 절대적인 기준시각에 대한 보정이 필요하게 된다. 이처럼 절대적인 영점 시간(zero time)을 설정해야 하는 원인 때문에 주시곡선의 절대적 시간을 직접 사용할 때는 많은 주의가 요구된다. 그러나, 절대적 시간이 아닌 상대적인 시간을 정보로 사용하는 경우에는 영점시간이 문제가 되지 않으므로 포물선의 형태는 매질에 대한 전자기파 투과 속도에 좋은 정보를 제공한다.

Fig. 2의 (b)는 주철관에서 반사신호와 계산된 주시곡선을 동일한 축척으로 설정하여 실제 신호와 계산 값을 비교한 결과를 보여주고 있다. 이때 모든 주시곡선의 변곡점이 실제 신호의 변곡점과 일치되도록 하여 포물선의 형태만을 통해 속도를 추정할 수 있도록 하였다. 결과에서 볼 수 있듯이 관측된 신호는 14 내지 12 cm/ns의 매질 속도를 갖는 경우의 주시곡선에 잘 부합되어 지하수에 포화되지 않은 채움 재료의 전자기파 투과 속도가 약 13 cm/ns인 것으로 추정되었다. 이 값은 추후에 언급될 CMP 분류 방식 자료의 결과와도 잘 부합되는 값이며, 기존의 연구 결과에서 밝혀진 마른 상태의 모래 내에서의 전자기파 속도인 15

cm/ns (Annan, 1992)보다는 다소 작은 값을 보여 주고 있다. 또한 매체의 전자기파 투과속도가 13 cm/ns인 경우 포물선의 꼭지점까지의 시간이 매설물의 심도인 25.5 cm를 감안하면, 3.9 ns로 계산되므로 절대적인 영점 시간은, 관측된 꼭지점의 시각 11.5 ns에서 3.9 ns 이전인 7.6 ns 전후임을 알 수 있다. 이후 영점 시각은, 이러한 근거를 토대로 8 ns로 설정하여 동보정(NMO correction) 등을 위한 시간 보정에 이용되었다.

Fig. 3은 지하수면 상부에 매설물이 존재하는 경우, 송신기 취합방식으로 획득된 자료(Table 3의 LABPLOW CMP900)를 CMP 분류한 자료이다. 본 CMP 분류 자료는 CMP 순차번호 76부터 85(수평위치 92~101 cm)에 해당되는 자료로 4번 철통관 매설물 상단 부위에 해당되며, 시간폭(time window) 4 ns의 자동 이득 조절(automatic gain control) 처리를 수행한 자료이다. 이때 CMP 분류 자료는 후에 처리하게될 동보정을 위해 실제로 파가 발생된 영점 시간을 8 ns로 설정하여 시간축에 대한 보정을 수행하였다. CMP 분류 자료에서 나타나는 대표적인 신호는 공기층을 따라 직접 도달하는 공기파(air wave; Fig. 3의 a로 표시), 채움 모래의 표면 직하부를 따라 전달되는 직접파(Fig. 3의 b), 매설물에 의해 반사된 파(Fig. 3의 c), 지하수면에서 반사된 파(Fig. 3의 d) 및 모형조

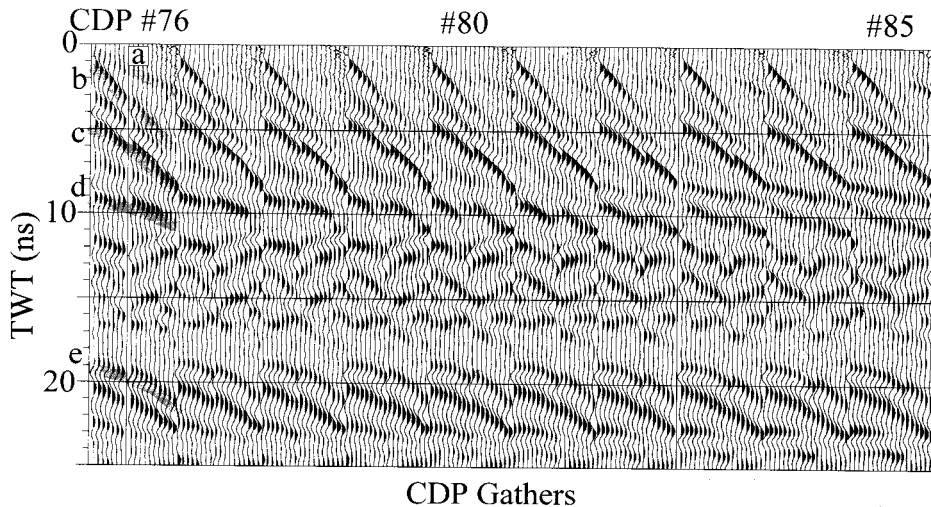


Fig. 3. CDP gathers (#76~85) of GPR data. An automatic gain control with a 4 ns window is adopted to the data.

의 바닥에서 반사된 파(Fig. 3의 e)를 들 수 있다. 이러한 반사파 신호 양상은, 기존 연구인 Dai · Young (1997)의 이론 수치 연구 결과와도 잘 부합된다. CMP 분류된 자료는 VRP 방식으로 취합된 자료의 신호를 구체적으로 해석하는 과정 및 매질에 대한 속도 정보를 획득하는데 보다 많은 이점을 가지고 있는 반면, 탐사 수행에 시간과 비용이 많이 든다는 단점을 갖고 있다. 실제 공기파의 경우 속도는 약 30 cm/ns로 광속에 해당되며, 채움 모래의 표면 직하부를 따라 전파된 직접파의 경우 약 13 cm/ns로 평가되었다. CMP 분류 자료의 경우, 위에 언급한 반사파 이외에도 또 다른 신호들이 관측되는데 이들은 채움 재료의 포화 정도 차이 또는 다중 반사파 및 채움 재료의 불균질성 등에 따른 신호로 사료된다. 왕복 주시 시간 (two-way travel time; 이후 TWT) 12부터 15 ns 사이에 나타나는 송·수신기 거리 증가에 대해 반대 방향으로 형성된 파는 5번이나 7번 매설물에서 반사된 신호로 추정된다.

매립 파이프와 바닥에서 반사된 신호의 NMO (normal move out) 속도를 추정하기 위해 일정 속도에 대한 NMO 보정이 연속적으로 수행되었다 (Fig. 4). 일반적으로 탄성파의 경우, 지하 방향으로 속도가 증가하지만, 전자기파의 속도는 이와 반대로 자유공간에서 가장 빠르고 지하 방향으로 감소하는 특성이 있으므로 속도는 빠른 전자기파 속도에서부터 느린 전자기파의 속도로 변화시키면서 NMO 보정의 결과를 관측하였다. NMO 속도를 15 cm/ns로 설정하여 보정을 수행하였을 경우는 파이프, 지하수면, 모형조바닥의 반사파 모두 보정 부족(undercorrection) 형태를 보이며, 10 cm/ns로 보정한 결과는 파이프의 반사파의 경우 보정 과잉(over correction) 형태를, 모형조 바닥의 반사파의 경우는 보정 부족 형태를 보임을 알 수 있다. 8 cm/ns로 보정한 경우, 모형조 바닥의 반사파 신호가 대체로 잘 정렬되는 형태를 보임을 알 수 있으며, 지하수에 포화된 모래층의 구간 속도(interval velocity)는 약 6 cm/ns 전후의 값을 갖는 것으로 분석되었다.

Fig. 5는 지하수면 상부에 매설물이 존재하는 경우에 대한 VRP 방식 실험의 결과를 보여주고 있다. Fig. 5의 (a)는 GPR 탐사 장비로부터 획득된 자료에 일체의 처리를 가하지 않은 상태이며, (b)의 경우는 시간폭 4 ns의 자동 이득 조절을 수행한 결과이다. VRP 방식으로 취합된 자료는 영점

시간에 대한 보정이 수행되지 않은 상태로 영점 보정이 수행된 CMP 방식 자료와는 8 ns 만큼의 시간축 차이를 가지고 있다. 이득조절이 수행되지 않은 경우나 수행된 경우 모두 매설파이프에 의한 반사파를 감지할 수 있으나, 상대적으로 이득조절이 수행된 경우의 자료에서의 반사파 신호 감지가 보다 용이함을 알 수 있으며, 매설파이프의 수평 위치 및 상대적인 수직 위치를 정확히 인지할 수 있다. 그러나 아크릴관과 나무각목(매설물 3, 5, 6; Table 2 참조)은 다른 파이프에 의한 신호에 가려져 상대적으로 감지가 어려움을 알 수 있다. PVC 관의 경우, 관 내부에 물이 채워져 있는 경우(매설물 8)가 관, 내부가 비어있는 경우(매설물 9)보다 상대적으로 깊은 심도임에도 불구하고 뚜렷한 신호를 보여주어 같은 종류의 매설물일지라도 내부의 채움 상태에 따라 반사 정도가 다를 수 있다. VRP 방식으로 획득된 자료의 경우, CMP 분류 자료와는 달리 지하수면에 의한 반사 신호를 분별하기가 곤란하였다.

지하수면 하부에 존재하는 매설파이프를 감지하기 위한 조사는 VRP 방식으로만 수행되었다. 이때, 송신기와 수신기의 거리차는 17 cm, 조사 중심점 이동은 1 cm씩으로 설정하여 지하수면 상부에 존재하는 매설파이프 조사시의 VRP 방식과 동일하게 실험을 수행하였다. Fig. 6은 지하수면 하부에 존재하는 매설파이프에 대한 VRP 방식 조사 결과를 보여준다. 자료는 이득조절을 하지 않은 경우와 시간폭 4 ns의 자동 이득 조절을 한 경우로 나누어져 주어졌다. 자료에서 볼 수 있듯이, 매설물이 지하수면 상부에 있을 때는 매우 뚜렷이 나타나던 반사 신호가, 본 자료에서는 뚜렷하지 않다. 이득 조절을 수행한 경우도 특정 파이프 매설 위치에서 신호로 의심되는 형태가 나타나지만 뚜렷하지 못하므로 파이프 감지 여부를 판단하기에는 곤란하다. 파이프의 반사신호가 뚜렷하지 않은 반면, 모형조의 바닥 신호는 상대적으로 뚜렷이 나타남을 관찰할 수 있다. 모형조 바닥의 신호가 잘 감지되는 현상은 송신된 레이더 신호가 채움재를 투과·반사되어 수신기에 잘 감지되고 있음을 의미하며, 결국 매설물의 반사 신호가 감지되지 않는 원인은 레이더 신호의 감쇠 효과만으로는 설명하기 곤란하다. 또한 매설물 재료가 금속이던 합성수지이던 상관없이 거의 반사파를 발생시키지 않는 점도 주의 깊게 검토되어야 할 것이다. 실제로 금속의 경우, 거의 무한대의 상대 유전율

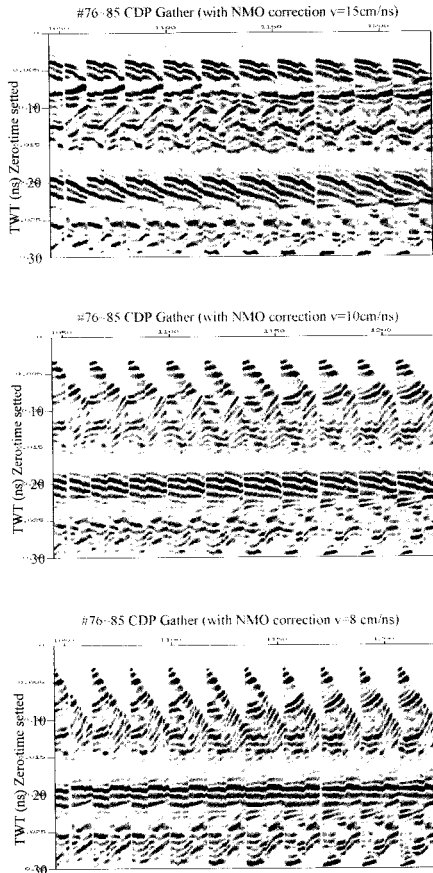


Fig. 4. NMO-corrected CDP gathers of GPR data. Constant velocity is used in the NMO correction.

(relative permittivity)를 가지므로(Annan, 1992) 주변 물질이 포화된 모래층이던 비포화된 모래층이던 상관없이, 수직 입사를 가정하는 경우에는 거의 -1에 가까운 반사 계수를 갖게 되므로 강한 반사 신호가 기대되었지만 포화된 모래층 내의 금속관의 경우, 실제조사에서는 거의 반사 신호를 발생시키지 않는 것으로 관찰되었다. 이에 대한 뚜렷한 원인을 본 연구에서는 규명하지 못하였다.

Fig. 7은 지하수면 하부에 존재하는 매설파이프에 대한 조사자료를 속도 필터를 이용해 속도가 광속의 절반이 넘지 않는 자료들만 추려낸 후, 시간폭 12 ns의 자동 이득 조절을 수행한 자료이다. 역시 뚜렷한 반사신호를 구분하기는 곤란하였으나 거리 80 cm 전후, TWT 17 ns를 꼭지점으로 하는 반사신호(Fig. 7의 점선 표시 부위)가 상대적으로

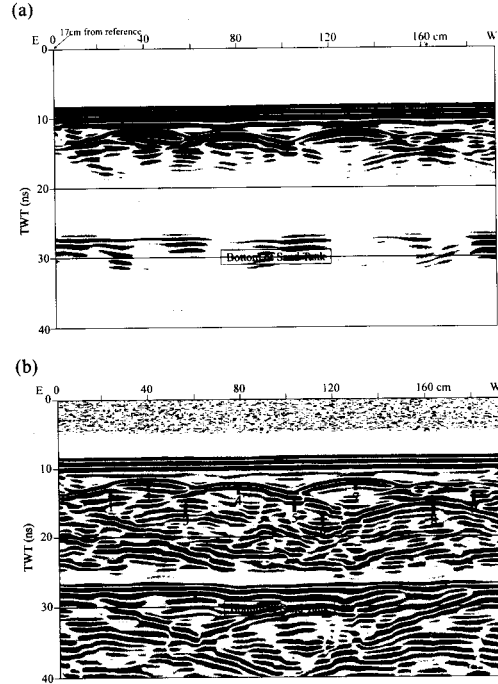


Fig. 5. (a) Unprocessed GPR data using VRP mode where groundwater table is lower than the buried materials. (b) Automatic gain controlled (time window=4 ns) GPR data using VRP mode where the groundwater table is lower than the buried materials.

부각되어 있다. 이 신호는 매설물 4번에 의한 것으로 판단된다. 그러나, 지하수면 하부의 매설파이프는 전반적으로 파이프의 매설위치를 정확히 감지하기가 매우 어렵다고 판단된다. 지하수면 상부 매설물에 대한 탐지 실험 수행 시에는 매설물 하부에 지하수면을 설정한 후 약 12시간 이상의 시간이 지난 후 실험이 수행된 반면, 지하수면 하부 매설물에 대한 탐지 실험 수행은 수면을 상승시킨 후, 충분한 수위 안정 및 모래 채움재의 다짐이 없이 곧바로 실험을 실행한 점도 불량한 신호와 연관이 있을 것으로 사료된다.

3. 결론 및 의견

매설물 감지를 위해 모래 채움 모형조에서 수행된 지하레이다 탐사는 파이프 형태의 매설물이 지하수면보다 상부에 존재하는 경우, 매우 정확하고도 간편하게 매설물의 위치와 상대적인 심도를 탐

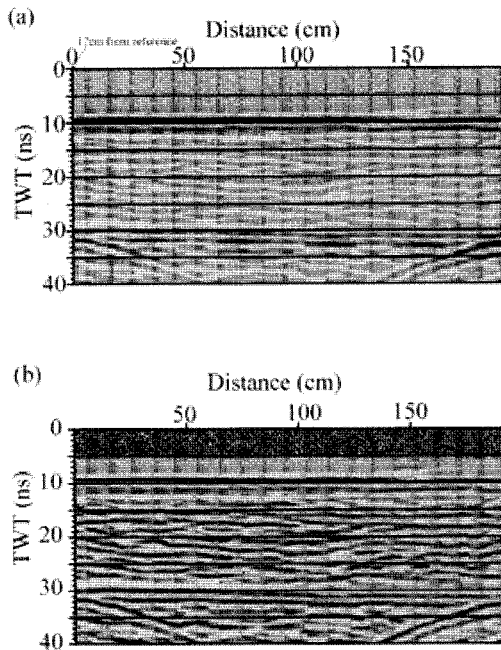


Fig. 6. (a) Unprocessed GPR data using the VRP mode. The groundwater table is higher than the buried materials. (b) Automatic gain controlled (time window=4 ns) GPR data using the VRP mode. The groundwater table is higher than the buried materials.

지 할 수 있음을 보여준다. 그러나, 매설물이 완전 포화된 지층내에 존재하는 경우는 상대적인 전자기파의 신호 감소 문제뿐만 아니라, 매설물에 대한 전자기파의 반사정도도 현저히 감소하므로 이러한 문제를 극복했을 때, 매설물 감지 효과를 기대할 수 있다고 사료된다.

같은 종류의 재질과 모양을 가진 매설파이프인 경우, 파이프 내부의 상태에 따라 반사 정도에 차이가 있는 것으로 관측되었으나 이에 대한 정량적인 평가는 추후 좀 더 정밀한 실험을 통해 확인되어야 할 것으로 판단된다. 또한 금속관이라고 해도 지하수에 완전 포화된 지층 내에서는 충분히 전자기파를 반사시키지 못하는 것으로 본 연구에서는 관측되었다. 그러나 이러한 현상이 모든 포화 지층 내에서도 일반적인 것인지에 대해서는 알 수 없다.

매설파이프에 대한 감지 여부만을 목적으로 하는 경우에는, 상대적으로 적은 노력과 시간, 경비가 소요되는 VRP 방식에 의해 자료를 획득하여도

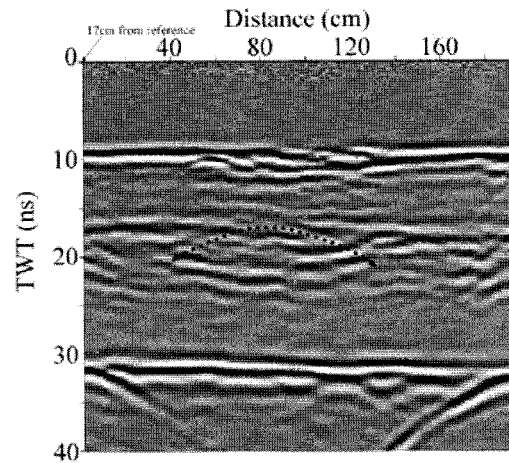


Fig. 7. GPR data after application of dip filtering and automatic gain control. The groundwater table is higher than the buried materials.

간단한 이득조절과 필터링 등의 기존 탄성파 자료 처리 방식들을 적용하여 목적을 달성할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 매설물의 절대적인 심도, 지층 경계 및 속도, 지하수면 등 정밀한 지하 정보 획득을 위해서는 CMP 방식 혹은 송신기 취합 방식의 조사가 부분적이라도 병행되어야 유용한 정보를 획득 할 수 있으며, 실제 반사파 신호여부도 객관적으로 판별할 수 있다고 사료된다.

특히, 뚜렷한 물성 경계로 추정되었던 지하수면이 VRP 방식 GPR 조사에서 뚜렷이 규명되지 못한 점은 지하 모형 설정시의 채움 모래를 균질하게 다짐하지 못하였던 점, 지하 수위 설정 후 충분한 시간동안 안정 상태로 유지하지 못한 점 등이 원인일 수 있으며, 실제로 본 모형조의 지하수위 경계가 점이적인 포화도 변화를 보여 뚜렷한 반사 신호의 발생이 곤란한 물리적인 특성을 가지고 있을 가능성 등도 배제할 수 없다. 현재, 지하수면에서의 레이더 반사 신호에 대한 충분한 특성 규명을 위해 추가적인 실험 및 분석이 수행 중이며(한국수자원공사, 1998), 이에 대해서는 추후 보완하여, 독립적인 연구 결과로 보고될 예정이다.

4. 사 사

본 연구는 한국수자원공사 수자원연구소의 1997년도 연구과제인 “정밀 지질·지하수 조사를 위한

고해상도 지구물리탐사법 개발에 관한 연구, 1차년도(WRRI-GG-97-3)의 일환으로 수행되었음을 밝혀둔다. 연구비를 지원해 준 한국수자원공사측에 감사드리며, 원활한 연구 수행을 위해 협조해 준 수자원연구소의 안경환, 백건하, 한찬 연구원과 관련 직원들에게도 진심으로 감사드린다. 또한 pulsEKKO 장비 및 관련 S/W를 협조해 준 (주)삼보지오테크측에도 감사드리며, 논문 심사에 수고한 편집 위원장님과 심사 위원님들께도 감사드린다.

참 고 문 헌

한국수자원공사, 1998, 정밀 지질·지하수 조사를 위한 고해상도 지구물리탐사법 개발에 관한 연구, 2차년도 WRRI-GG-98-1 (인쇄중).

Annan, A. P., 1992, Ground Penetrating Radar Workshop Notes, Sensors & Software Inc.

Annan, A. P. and Davis, J. L., 1976, Impulse radar soundings in permafrost, Radio Science, II, 383-394.

Annan, A. P. and Davis, J. L., 1978, High frequency electrical method for the detection of freeze-thaw interface: 3rd International Conference on Permafrost, Edmonton, Alberta, Proceedings, 496-500.

Annan, A. P. and Davis, J. L., 1997, Ground Penetrating Radar -Coming of age at last, Explorations 97, Sensors

& Software Inc.

Cohen, J. K. and Stockwell, Jr. J. W., 1997, CWP/SU: Seismic Unix Release 31 : a free package for seismic research and processing, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.

Dai, Renshou and Young, Charles T., 1997, Transient Fields of a Horizontal Electric Dipole on a Multilayered Dielectric Medium, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 45, 1023-1031.

Friedman, G. M. and Sanders, J. E., 1978, Principles of Sedimentology, Wiley, NY.

Kovacs, A. and Morey, R. M., 1978, Remote detection of massive ice in permafrost along the Alyeska pipeline and the pump station feeder gas pipeline: ASCE Pipelines Division Specialty Conference, Pipelines in adverse environments, Proceedings, 268-279.

Kovacs, A. and Morey, R. M., 1985, Impulse radar sounding of frozen ground: Workshop on permafrost geophysics, US Army Corps of Engineers, Proceedings, 28-40.

Sensors & Software, 1996, pulseEKKO 1000RUN, User's Guide, Version 1.2.

1998년 9월 15일 원고접수

1998년 12월 10일 원고채택