

지표레이다(GPR) 탐사에 의한 하상퇴적물 조사

장현삼 · 정성태
(주)쓰리텍이엔지

요 약

지표레이다(GPR)를 이용하여 하상 퇴적물 조사를 수행하였다. 조사지역은 수심이 약 2.5 m 정도로 얇고, 물이 흐르지 않는 호수이며, 조사대상인 뺨(mud)층의 두께가 얇아 GPR이 매우 효율적인 탐사방법이다. 조사결과 수심하부 층서구조, 즉 mud층, 모래층, 자갈 및 기반암의 구조를 확실하게 파악할 수 있었다. 특히 mud층의 분포 및 총 퇴적량은 향후 이 지역에서의 준설을 위한 기초자료로 매우 중요하게 사용될 수 있을 것이다.

주요어: 지표레이다, 하상 퇴적물, 뺨층, 준설

Hyun-Sam Chang and Seong-Tae Jeong, 2002, Survey of underwater deposits using ground penetrating radar. Journal of the Korean Geophysical Society. v. 5, n. 1, p. 51-62

ABSTRACT: Investigation of underwater sedimentary layers has been carried out with GPR(Ground Penetration Radar) survey. GPR survey has been proved to be very satisfactory since the target area has shallow water depth of about 2.5 m, is a lake with no water flow, and the thickness of mud layer, which is a main survey target, is relatively thin. The results clearly showed the underwater sedimentary layers, which includes mud, sand, gravel and basement layer. Specially, the distribution and total amount of mud layers from the survey results can be used as a basic data for the dredging of mud layer in the area.

Key words: GPR, underwater sedimentary layers, mud layer, dredging

(Hyun-Sam Chang and Seong-Tae Jeong, ThreeTECH Eng. Co., Ltd, 501 Hyang Jeong Plaza, 185-7, Gumi-Dong, Bundang-Gu, Seongnam-Si, Kyunggi-Do, 463-810, Korea (e-mail: schang@unitel.co.kr, jeongst@3tek.co.kr))

1. 서 론

본 조사는 미사리 조정경기장 하부의 퇴적토량 및 이의 분포를 파악하여 경쟁 경기장으로의 전환시 필요한 준설계획을 수립하고자 수행되었다. 일반적으로 하상 퇴적물의 탐사를 위해서는 음파탐사, 탄성파탐사 및 레이다탐사를 생각 할 수 있다. 본 조사 지역의 경우 수심이 약 3m 이내로 매우 얇고, 하상 퇴적물의 두께 역시 50cm 이내로 매우 얇아 탄성파 탐사의 경우 그 적용성에 한계가 있는 것으로 생각되었다. 음파탐사의 경우 고주파수의 SBP(Sub-bottom profiler)를 생각하였으나, 수심이 너무 얇아 tow-fish를 수중에 유지하기가 매우 힘들 것으로 판단되었다.

지표레이다(GPR)는 주로 육상에서 천부의 지층 구조 파악, 구조물 비파괴 검사 및 지하매설물 탐사 등에 주로 사용되어 왔으나(김학수 외, 1999, Annan, 1992, Davis and Annan, 1989), 하상 혹은 호상의 퇴적물 및 수심 조사를 위해서도 빈번히 사용되고 있다. 특히 지표레이다의 경우 본 지역과 같이 수심이 얇고, 비교적 높은 분해능이 요구되는 지역의 경우 그 효용성이 뛰어나고 매우 경제적으로 사용될 수 있다(장현삼 외, 2001).

조사의 주 목적은 조정경기장 건설당시 조성된 바닥면, 즉 모래층 상부에 한강물의 유입으로 형성된 뺨층의 분포 및 총 퇴적량을 파악하여 향후 수행될 준설작업의 기초자료를 제공하는데 있다.

2. 조사지역

본 조사가 수행된 지역은 경기도 하남시 미사동 3-1 일원의 미사리 조정경기장 및 위밍업장으로 조정경기장의 경우 2200m x 108m 규모로 총면적은 237,600 m²이다. Fig. 1은 조사지역의 항공사진을 보여주고 있다.

3. 지표레이다 탐사의 원리

전자파를 이용하는 레이더(Radar; Radio Detecting Ranging)는 원래 1940년대 이후 미국에서 적의 비행기나 군함 등의 탐지를 위해 군사 분야에서 처음 사용되기 시작하여 현재는 군사용뿐만 아니라 항공 분야를 비롯해 여러 상업적 용도로 광범위하게 사용되고 있다. 이러한 레이더를 지상이 아닌 지하에 적용시켜 지하의 대상물을 탐지하는 것을 지표레이다(GPR; Ground Penetrating Radar) 탐사법이라고 한다. 일반적으로 알고있는 지상레이다의 원리는 송신안테나에서 파가 방사된 후 공기중의 반사체에 반사되어 수신안테나를 통해 기록되는 수신파의 시간간격으로부터 반사체의 거리, 방향과 같은 정보를 파악하게 된다.

지표레이다의 기본원리는 지상레이다와 같지만 차이점은 지상레이다의 경우 파의 전달 매질이 균질한 공기이고 탐지 목적이 단순히 탐지대상의 공간상의 위치파악에 있지만 지표레이다에서는 지반의 구성이 아주 불균질한 매질이기 때문에 매우 정밀한 자료처리 및 해석기법이 필요하고 탐사목적도 단순히 대상물의 위치를 파악하는 것뿐 아니라 연속적인 탐사를 통해 연속적인 지하 단면의 영상(reflection image) 및 관련 정보를 획득하는데 있다.

지표레이다 탐사는 조사심도 및 목적에 맞는 안테나를 선택한 후 미리 설계된 탐사축선을 따라 이를 이동시키면서 자료를 얻게된다. 이때 송신 안테나에서 전송된 송신파는 매질을 전파하다가 매질의 경계면을 만나면 일부의 에너지가 반사되어 돌아오게 되는데, 이렇게 반사된 반사파를 수신안테나로 기록하고 이를 분석함으로써 대상 매질에 대한 정보를 얻게된다. Fig. 2는 지표레이다 탐사의 기본적인 원리를 보여주고 있다.

탐사자료의 처리 및 해석에 영향을 미치는 전자파의 전달 속도는 유전상수의 영향을 받으며 파의 감쇠(attenuation)는 주로 전기전도도에 영향을 받는다. 파의 전달 속도는 유전상수의 제곱



Fig. 1. Aerial photograph of the survey area.

근에 반비례하며 감쇠는 전기전도도에 비례하고 유전상수에 반비례하는 특성을 가진다. 일반적으로 전기전도도는 매질내 수분함량과 전도성 물질의 함량에 영향을 받으며 유전상수는 매질이 균

질한 경우 수분함량과 공극율에 영향을 받게 된다. Table 1은 콘크리트, 물 등을 포함한 지반을 구성하는 대표적인 물질들의 전기적 특성과 전자파 전파 속도의 범위를 나타내고 있다.

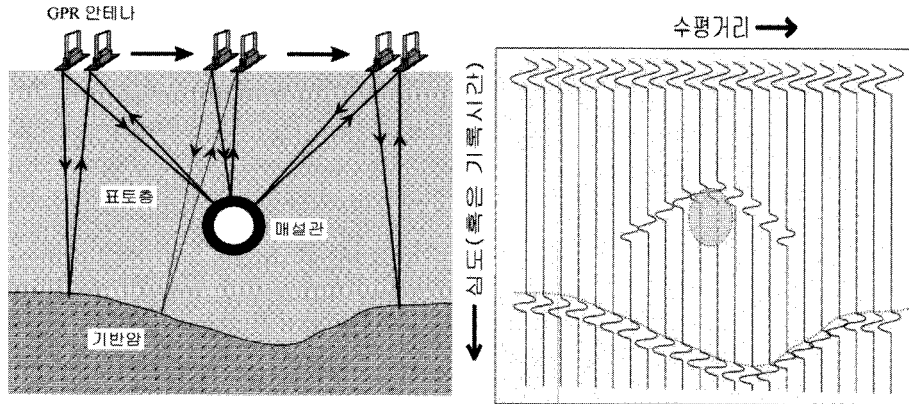


Fig. 2. Principle of GPR survey.

Table 1. Electromagnetic characteristics of common materials.

매질명	유전상수	전기비저항(Ωm)	전파속도(m/ns)
공기	1	∞	0.3
맑은물	81	100	0.033
바닷물	81	0.00033	0.033
얼음	3-4	100	0.15-0.17
화강암(건조)	5	10^8	0.13
화강암(습윤)	7	1000	0.11
현무암(건조)	8	10^6	0.1
현무암(습윤)	12	10000	0.087
점토	5-40	1-10	0.047-0.13
실트	5-30	0.01-1	0.054-0.13
모래(포화)	30	0.1-1	0.054
모래(건조)	4-6	100	0.12
세일	5-15	10-1000	0.075-0.13
석회암	4-8	$50-10^7$	0.11-0.17
사암	6	$1-10^8$	0.12
흙(사질, 건조)	2.5	7000	0.18
흙(사질, 습윤)	25	100	0.06
흙(점토질, 건조)	2.4	3000	0.18
흙(점토질, 습윤)	15	20	0.075
흙(롬)	2.5-19	50-10000	0.07-0.18
흙(동결)	3-6	100-10000	0.12-0.17
콘크리트	4-10		0.09-0.12

지표레이다 시스템은 현재 여러 시스템이 상용화되어 사용중인데 제작회사에 따라 장비의 형태 및 사양이 다르지만 기본적인 구성은 모두 유사하다. 지표레이다 시스템은 크게 송신부, 수신부 송수신부를 제어하는 제어부 그리고 자료의 기록, 처리를 담당하는 컴퓨터부로 나눌 수 있다. 제어부(control console)에서는 전원을 조절하며 디지털 프로세싱과 송수신부에 전원공급, 타임 시퀀싱(time sequencing) 및 컴퓨터와의 통신을 조절하는 기능을 담당한다. 송신부는 송신기(transmitter)와 안테나로 구성되며 제어부에서 송신신호와 전원 공급을 받아 펄스(pulse)형태의 전자파를 발생시켜 지반으로 방사시키는 기능을 가진다. 수신부는 수신기(receiver)와 안테나로 이루어지며 제어부에서 전원 공급과 수신시간의 제어를 통해 지하의 반사체에서 반사된 신호를 수신 받아 디지털 형태로 변환시킨 후 제어부로 전송하는 역할을 담당한다. Fig. 3은 GPR 시스템의 한 예로 pulseEKKO 1000A의 시스템 구성을 나타내는데 이 시스템에서는 225, 450, 900, 1200 MHz의 중심 주파수(center frequency)를 갖는 안테나가 있어 탐사 목적에 따라 선택적으로 사용된다(Annan and Cosway, 1994).

GPR탐사는 탐사의 주목적 및 두 안테나의 배열 형태에 따라 반사법(reflection type), CMP/WARR법(common mid point/wide angle reflection & refraction), 및 투과법(transillumination

type)의 3가지 형태로 구분된다(Annan, 1992, Annan and Cosway, 1992).

반사법은 땅속 반사면에 대한 정보를 얻기 위해 실시되며 기준점을 기준으로 송수신 안테나가 동시에 이동하게 되는데 대부분의 탐사에서 적용되는 방법이다. CMP법은 기준점을 중심으로 송수신 안테나를 각각 반대방향으로 일정하게 이동시켜 탐사를 수행하는 방법으로 지층에서의 전자파의 속도 추정에 사용된다. 투과법은 주로 분리된 구조물을 대상으로 대상체에서 파의 투과 특성을 연구하는 분야에서 부분적으로 적용되는 방법이다. Fig. 4는 각각의 방법들을 도식적으로 나타내고 있다.

하상에서의 지표레이다 탐사는 일반적으로 보트 혹은 소형선박 등을 이용하여 수행하게 된다. 이 경우 정해진 조사축선을 유지하기가 쉽지 않으므로 보통 위치정보(GPS) 시스템을 이용하여 조사 위치를 파악하고, 조사축선을 유지하게 된다. 또한 지표레이다 안테나를 선박 위에 위치시킬 경우 안테나와 선박 바닥면사이 공간에서의 에너지 손실이 심하므로 부이나 튜브 등에 탑재하여 수면과 밀착 상태를 유지함이 유리하다.

일반적인 지표레이다 탐사 자료의 경우 탄성파 탐사 자료에 비해 많은 자료처리 과정이 필요치 않다. 특히 수상 탐사자료의 경우 지형보정도 필요치 않아 계획된 탐사축선만 유지될 경우 거의

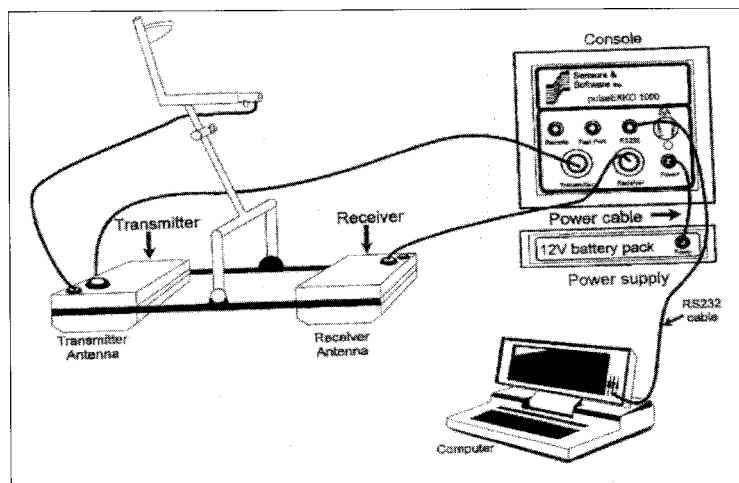


Fig. 3. Example of GPR system (pulseEKKO, Canada).

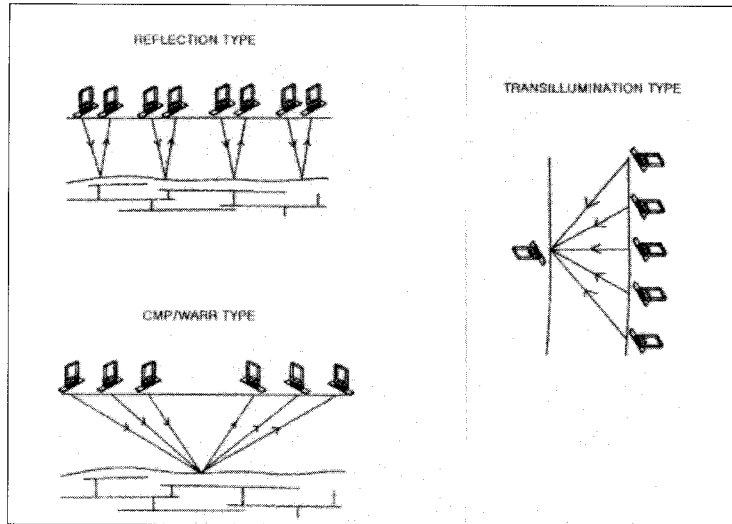


Fig. 4. Schematic of GPR survey types.

Table 2. GPR systems used for the survey.

장비명	사용안테나	제조사	자료처리 Software
Zond-12c	500 MHz	Radar Systems, Inc. (Latvia)	Prism for Windows
pulseEKKO 1000	450 MHz	Sensors & Softwares (Canada)	pulseEKKO S/W

원자료 그대로 해석이 가능하다는 잇점이 있다.

Fig. 5는 지표레이다를 이용한 하상 퇴적물 탐사 자료의 예를 보여주고 있다. 일반적으로 수상 레이더 탐사자료에서는 수면과 하저면 사이에서의 강한 다중반사(multiple reflection) 패턴이 나타나게 된다. 하저의 굽은 자갈들은 강한 회절(diffraction) 형태를 보이며, 모래층의 경우 매우 강한 반사면을 형성하고 뛰어난 연속성(continuity)을 보인다. 일반적으로 퇴적층 최상부에 존재하는 뿔층의 경우 물과의 반사계수 차이가 적어 상대적으로 약한 반사강도를 보이게 된다.

4. 조사장비

본 호저 퇴적물 조사에 사용된 지표레이더 시스템은 'Zond-12c' 와 'pulseEKKO 1000' 시스템이다. 현재 몇 종류의 지표 레이더 시스템이 상업적으로 사용되고 있고, 조사대상, 지질조건 및 주변환

경에 따라 장단점을 보이고 있다. 본 지역의 경우 상기 두 종류의 GPR 시스템을 시험하여 보았는데, 'Zond-12c' 시스템이 투과심도 및 분해능에서 우수해 이를 주로 사용하였다. Table 2는 두 시스템을 비교한 것이고, Fig. 6은 이들 시스템의 사진이다.

5. 조사방법

조정경기장의 경우 조정경기장을 위한 부표 레인이 설치되어 있어 이를 기준으로 종방향의 총 6개 조사 축선을 설정하였다. 횡방향 축선의 경우 250m 간격의 거리 표시점을 기준으로 총 9개의 조사축선을 설정하였다. Fig. 7은 조정경기장의 퇴적도 조사를 위한 탐사축선 분포를 보여주며, Fig. 8은 현장조사 장면을 보여주고 있다.

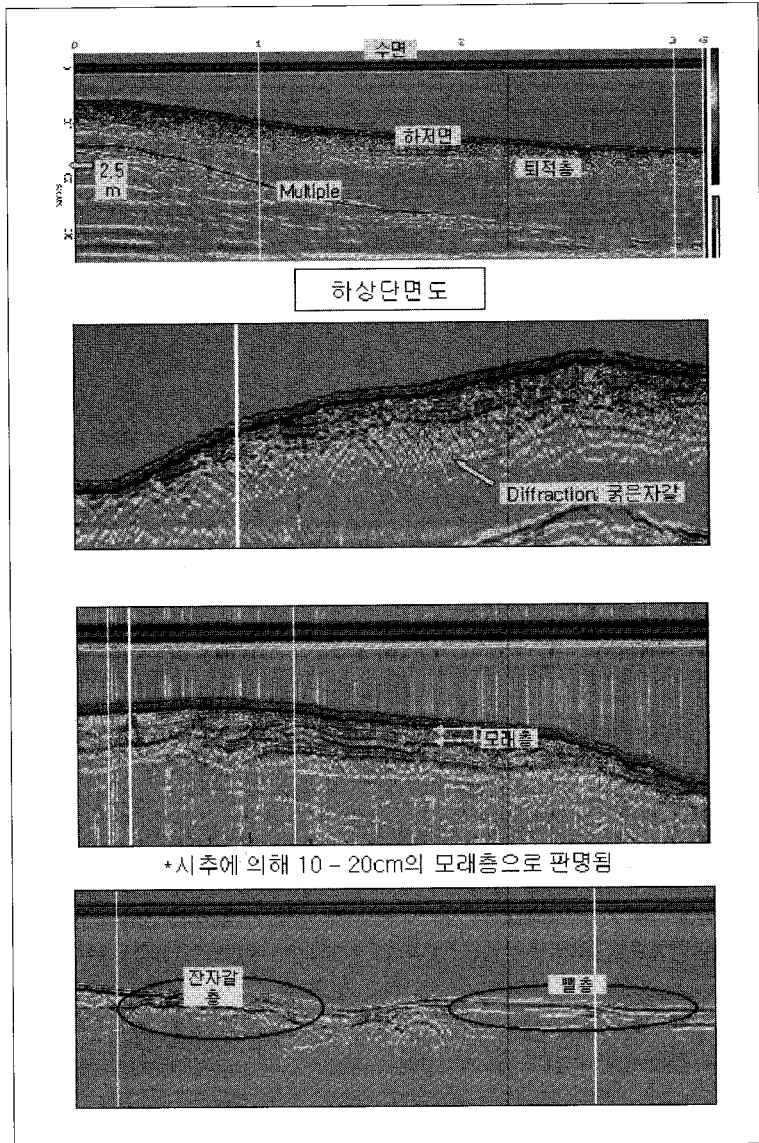


Fig. 5. Examples of GPR data from lakes.

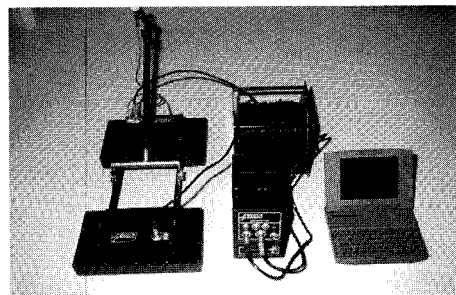
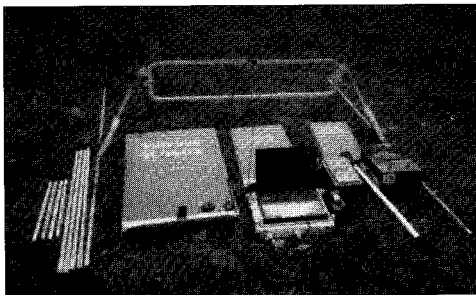


Fig 6. Pictures of GPR system used. (left) Zond-12c, (right) PulseEKKO 1000.

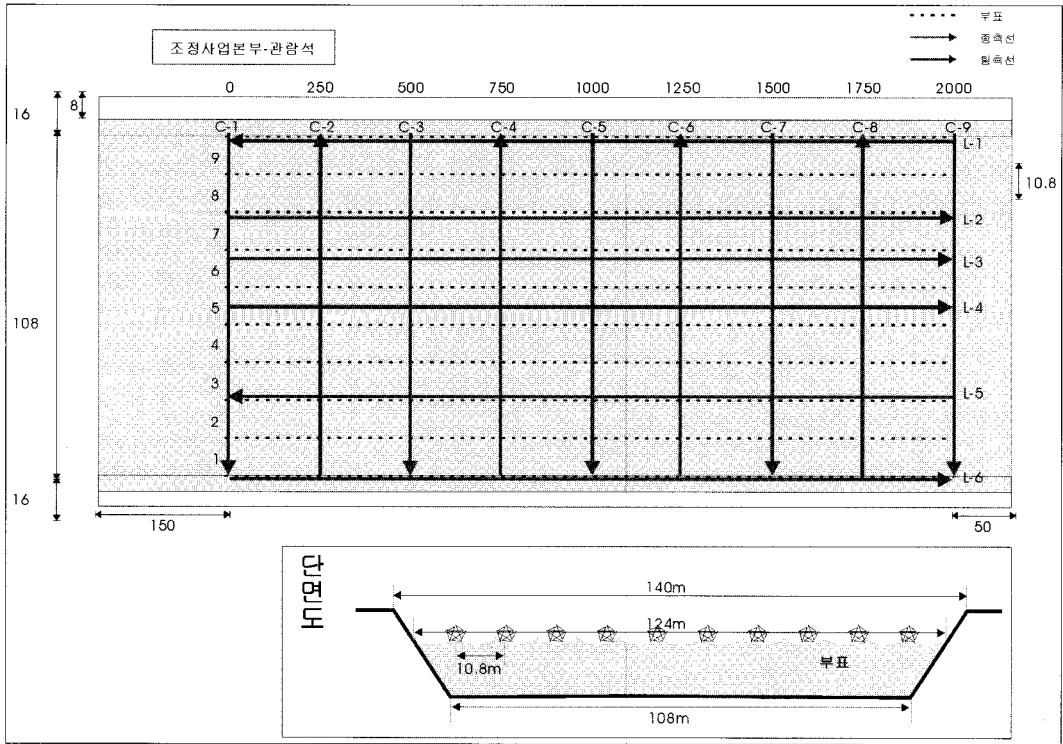


Fig 7. Distribution of GPR survey lines.

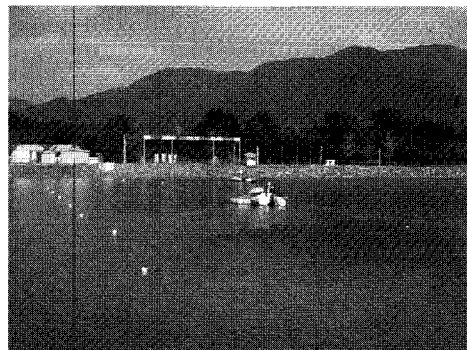
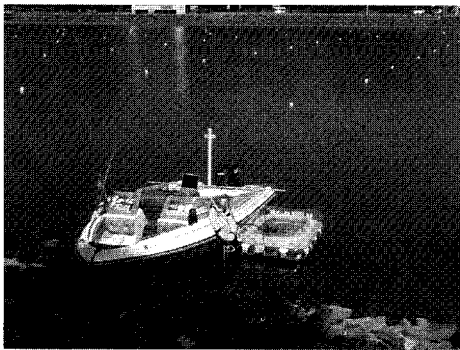


Fig 8. Photographs of survey boat and field work.

6. 자료처리 및 해석

탐사자료의 처리 및 해석에 영향을 미치는 전자파의 전달 속도는 유전상수의 영향을 받으며 파의 감쇠(attenuation)는 주로 전기전도도에 영향을 받는다. 파의 전달 속도는 유전상수의 제곱근에 반비례하며 감쇠는 전기전도도에 비례하고 유전상수에 반비례하는 특성을 가진다. 일반적인

로 전기전도도는 매질내 수분함량과 전도성 물질의 함량에 영향을 받으며 유전상수는 매질이 균질한 경우 수분함량과 공극율에 영향을 받게 된다.

보통 전기적 성질이 서로 다른 두 매질의 경계부에 안테나가 위치할 경우 에너지의 많은 부분이 상대적으로 유전상수가 큰 매질로 방사된다. 유전상수는 그 매질이 전기를 함유할 수 있는 축전기

의 용량과 같은 의미로 이해할 수 있다. 조건이 양호한 지반에서 공기와 지반의 경계면에서 방사가 일어날 때 약 90% 정도의 에너지는 지반 즉 땅속으로 전파된다. 식(1)-(3)은 지표레이다 탐사에서 파의 전달속도, 반사면 심도 등의 값을 구하는데 사용되는 기본적인 식들을 나타낸 것이다.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{1000c}{f\sqrt{\epsilon}} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (3)$$

- v : 전자파의 전달속도 (m/ns)
- λ : 파장 (m)
- R : 반사계수
- ϵ : 유전상수
- f : 주파수
- c : 공기중에서의 전자파속도 ($0.3m/ns$)

식에서 보는 바와 같이 전자파의 전달 속도는 매질의 유전 상수에 의해 결정되며 매질이 균질한 경우 유전상수는 매질의 수분함량과 비례 관계를 가진다. 반사계수(reflection coefficient)는 전체 방사 에너지에 대한 반사 에너지의 비를 나타내는 것으로 반사파 강도(진폭)에 영향을 준다. 인접한 두 매질에서 유전상수의 차와 반사 계수는 비례 관계를 가지는데 주 매질과 반사체와의 유전상수 차이가 클수록 반사체로부터 반사 신호의 강도는 증가하게 된다.

조정경기장의 수직구조는 물-퇴적층(뺨층)-모래층-자갈층 순으로 이루어져 있는데, 지역에 따라 퇴적층, 모래층, 자갈층 등은 부분적으로 존재하지 않기도 한다. Fig. 9는 조사대상 지역의 지층 분포를 나타낸 것이다.

Table 3은 조정경기장의 구성물질의 전기적 성질을 보여주고 있다. 매질 내에서 전자파의 속도는 반사시간으로 기록되는 현장자료를 심도 자료로 변환 시 사용되므로 매우 중요하다. 본 지역의 경우 구성물질들이 물에 완전히 포화되어 있는 상태이므로 일반적으로 표현되는 속도에 비하여 다소 낮은 속도를 보일 것으로 생각되는데, 특히 물과 경계를 이루는 퇴적 뺨층의 경우 거의 물의 속도에 가까운 전자파 속도를 보일 것으로 생각되므로 퇴적층의 심도 계산시 물속도($0.033 m/ns$)를 사용하였다.

본 조사시 Zond-12c 시스템의 500 MHz 안테나를 주로 사용하였는데, 실제 획득한 자료의 중심 주파수는 감쇠(attenuation)로 인하여 300 MHz 이하를 보이고 있다. 중심 주파수 300 MHz를 가정할 경우의 각각의 매질에서의 파장이 Table 3에 계산되어 있다. 표에서 보면 물에서의 파장은 약 11 cm이고, 점토(clay)층의 경우 16-45 cm인데,

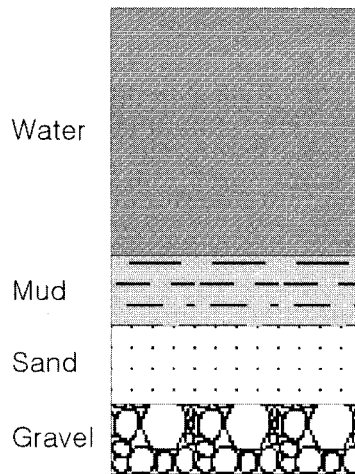


Fig 9. Substructure of the lake bottom.

Table 3. Electromagnetic characteristics of sub-bottom materials.

구분	유전상수	전기비저항 (Ωm)	속도 (m/ns)	파장(cm) (f=300 MHz)	비고
물	81	100	0.033	11	
Clay	5-40	1-10	0.047-0.13	16-45	뺨층
모래(포화)	30	0.1-1	0.054	18	
Granite(습윤)	7	1000	0.11	38	자갈층

Table 4. Reflection coefficients of the sub-bottom materials.

매질 1	유전상수	매질 2	유전상수	반사계수
물	81	Clay	40	0.17
물	81	모래(포화)	30	0.24
물	81	Granite	7	0.55
Clay	40	모래(포화)	30	0.07
Clay	40	Granite	7	0.41
모래(포화)	30	Granite	7	0.33
모래(포화)	30	Clay	40	-0.07
Granite	7	Clay	40	-0.41
Granite	7	모래(포화)	30	-0.35

본 조사지역 뺨층의 경우 물에 완전 포화된 상태이므로 16 cm의 파장을 가정하더라도 약 4 cm 이하 두께의 경우 구분이 어려울 것으로 생각된다. 그러나 분해능을 높이기 위하여 더 높은 주파수의 안테나를 사용 할 경우 감쇠가 심하여 심도가 깊어질 경우 호저면의 확인이 불가능 할 수 있다. 실제 테스트 결과 900 MHz 안테나의 경우 약 2 m 이상 깊이의 호저면을 확인 할 수 없었다.

자료의 해석시 또 다른 중요한 문제는 각 층의 경계를 구분하고 확인하는 것이다. 이를 위해서는 먼저 반사면을 구분하여야 하는데 이때 반사파의 연속성, 극성(polarity)의 변화, 반사파의 강약(amplitude), 회절형태(diffraction pattern), 주변잡음 등을 종합적으로 판단 하여 결정하여야 한다. Table 4는 조정경기장의 구성물질 상호간의 반사계수(매질 1에서 매질 2로 전파할 경우)를 나타낸 것이다. 표에서 보면 물과 퇴적층(clay층) 경계면에서의 반사계수가 물과 모래층 경계면에서의 반사계수에 비해 약 1/2 정도이므로 퇴적층에서의 반사면이 모래층에서의 반사면에 비해 약 0.5 배정도 약하게 나타남을 예상할 수 있다. 또한 자갈층의 경우 타 물질과의 경계면에서 매우 큰 반사계수를 보이고, 본 지역의 경우 자갈의 크기가 매우 커 강한 회절양상을 보여준다.

Fig. 10은 조정경기장에서 취득한 탐사자료 중 특징적인 부분들을 발췌한 자료해석의 예를 보여주고 있다. 호저면과 그 하부의 지층분포에 따라

다양한 반응들이 나타나고 있는데 일반적으로 모래층의 경우 강한 반사대를 보여주고 있으며, 축선 방향으로의 연속성(continuity) 또한 매우 뚜렷하다(Fig. 10 (a), (e)). 앞서 언급하였듯이 퇴적층의 경우 모래층에 비해 약한 반사대를 형성하고 있고, 퇴적층 하부의 모래층도 반사계수의 감소로 약한 반사대를 보여주고 있다(Fig. 10 (b), (c)). 자갈층의 경우 Fig. 10 (d)의 축소 그림에서는 미약하게 확인되나 부분적으로 확대할 경우 수많은 회절양상으로 그 존재를 확인할 수 있다. 조정경기장의 경우 조정경기장을 위한 부표 레인의 설치를 위하여 종방향으로 수중 케이블이 존재하는데, 이들의 반응은 횡방향 탐사축선에서 매우 선명하게 확인되었다(Fig.10의 (f)).

퇴적층의 두께 계산을 위해서는 먼저 호수 바닥면(수심)과 모래층의 심도 분포를 확인하여야 한다. 이를 위하여 지표레이더 단면으로부터 물-퇴적층 및 퇴적층-모래층의 경계를 추출하고(Fig. 11) 이의 수평위치 및 심도를 디지털이징하여 수치화 하였다.

이렇게 축선별로 수치화된 2차원 자료를 내삽(interpolation)하여 수심 및 모래층의 분포를 3차원적으로 도출하고 이로부터 퇴적층의 두께를 산출하였다. Fig. 12는 조정경기장의 수심분포(바닥면)를 등고선도 및 입체도이며, Fig. 13은 mud층 바닥면의 등고선도 및 입체도이고, Fig. 14는 mud층 두께의 등고선도 및 입체도이다.

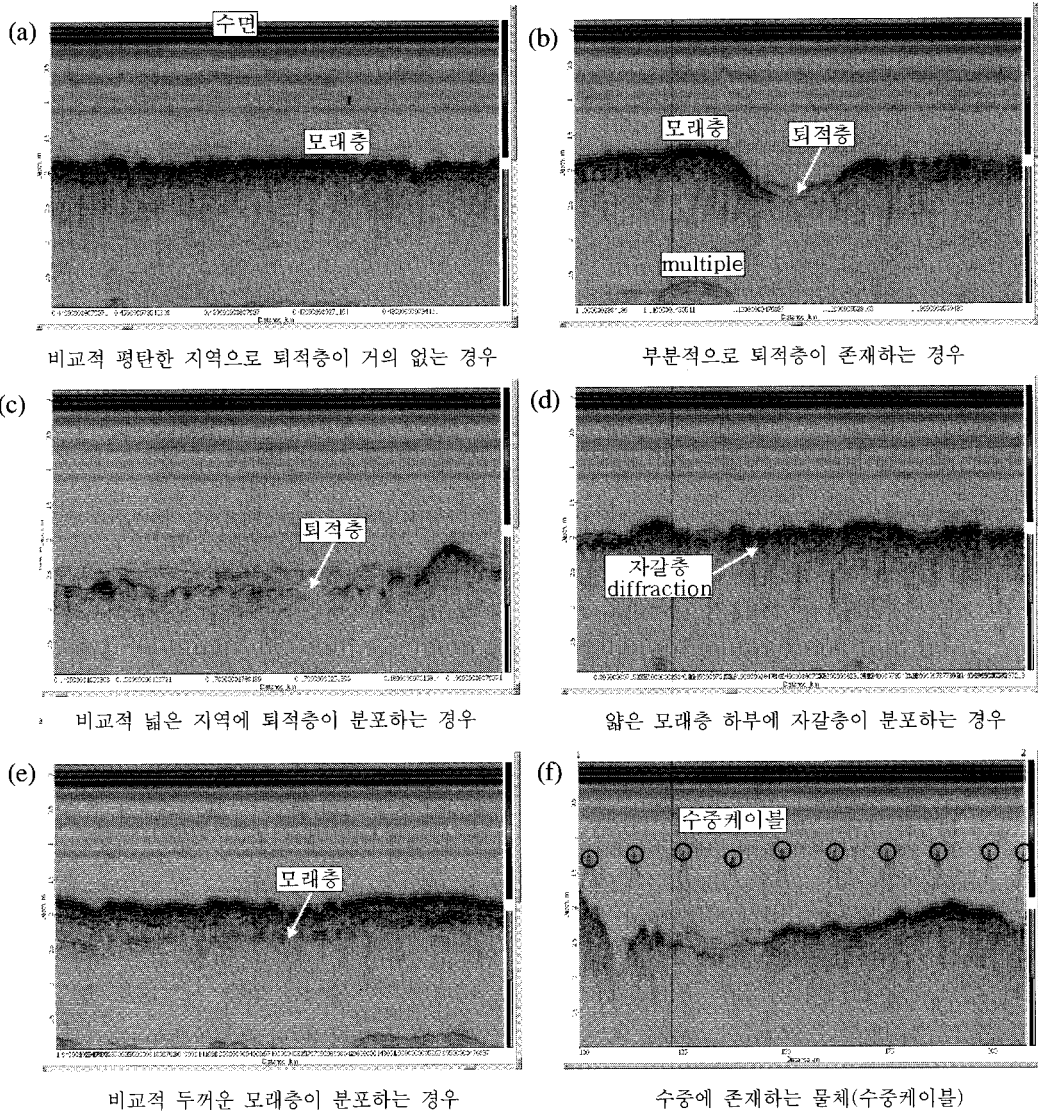


Fig. 10. Examples of GPR data analysis from the survey area.

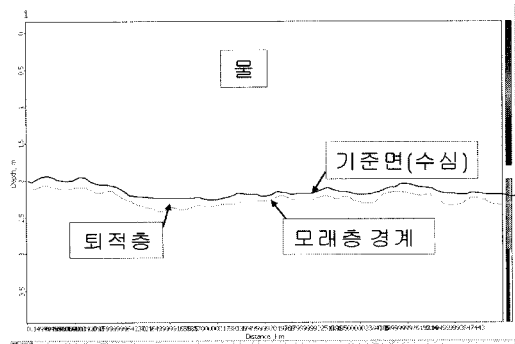


Fig. 11. Example of boundary picking.

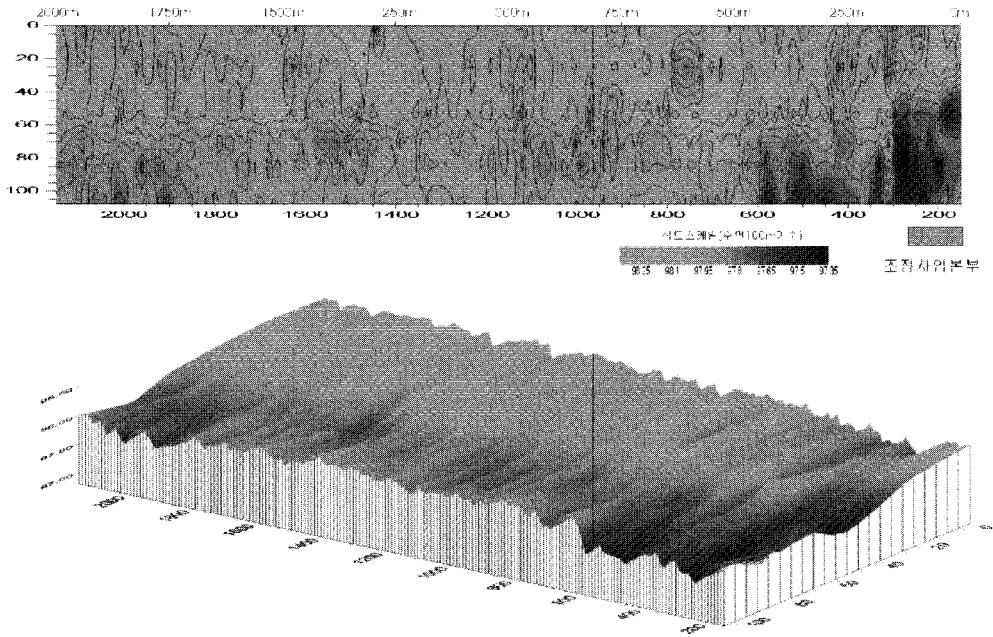


Fig. 12. 2- and 3-D presentation of the lake bottom.

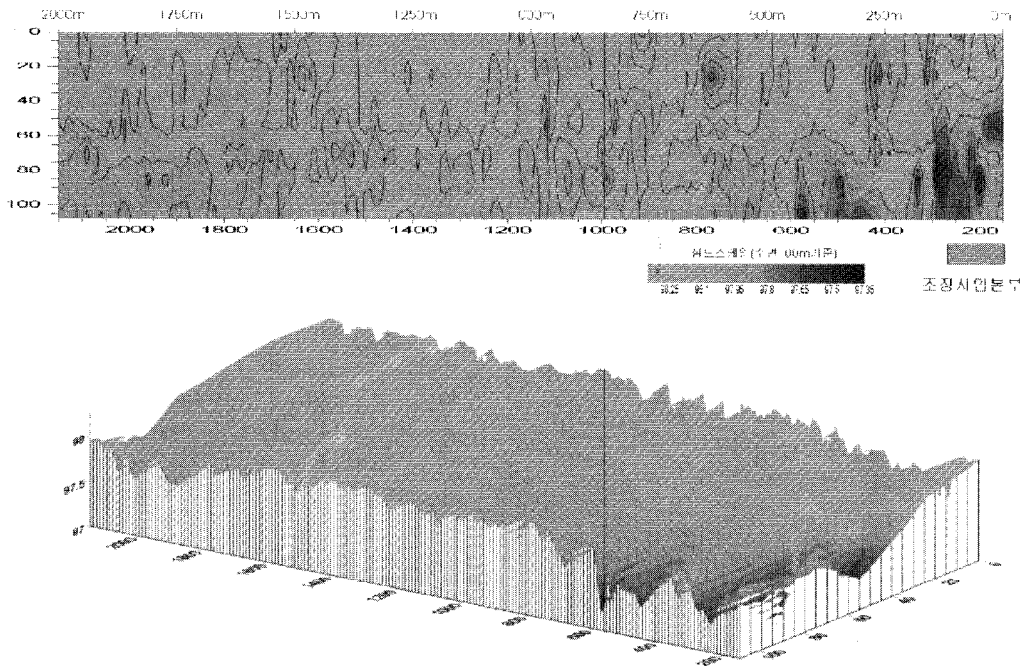


Fig. 13. 2- and 3-D presentation of the bottom of mud layer.

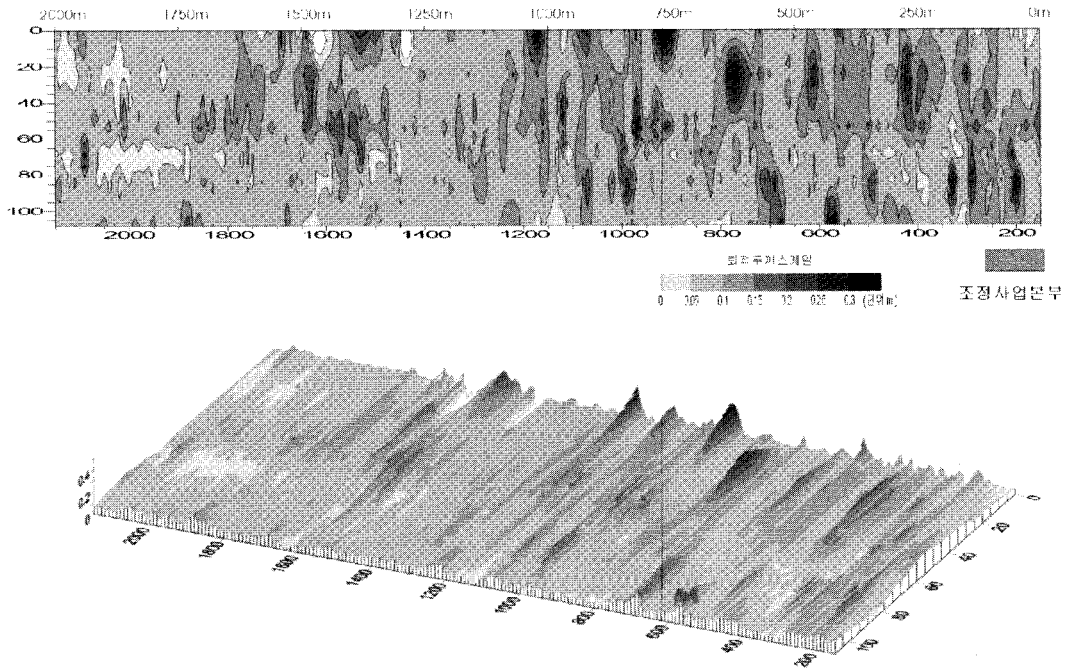


Fig. 14. 2- and 3-D presentation of the thickness of mud layer.

6. 결론

일반적으로 수상 탐사시 대상 지역의 정확한 현장자료를 얻기 위해서는 미리 계획된 탐사측선을 유지하여야 한다. 본 조사지역의 경우 직선상으로 설치된 부표가 있어 비교적 정확한 탐사측선을 유지할 수 있었으나 보트의 위치정보를 보다 정확히 파악할 수 있는 GPS 시스템을 갖추지 않아 조사결과에 다소 오류가 있을 것으로 판단된다.

조사가 이루어진 조정경기장 면적, 즉 2000m X 108 m(215,000 m²)에서의 퇴적토량은 약 19,330 m³로 계산되었으며, 같은 비율로 조정경기장 전체면적 2200 m X 108 m(237,600 m²)에 대하여 계산하면 전체 퇴적토량은 약 21,400m³으로 추정되었다.

참고문헌

김학수 외, 1999, GPR에 의한 지반 구조물 탐사, 건설현

장에 필요한 물리탐사기술 심포지움, 한국지구물리탐사학회 제2회 학술발표회.
 장현삼 외, 2001, 미사리 조정경기장 준설토 물리탐사 보고서, 국민체육진흥공단. 조정사업본부.
 Annan, A.P., 1992, Ground Penetrating Radar Workshop Notes, Sensors & Softwares, Canada.
 Annan, A.P. and Cosway, S.W., 1992, Ground Penetrating Radar Survey Design, Proc. of Symp. on the Application of Geophysicist to Engineering and Environmental Problems.
 Annan, A.P. and Cosway, S.W., 1994, GPR Frequency Selection, 4th International Conference on Ground Penetration Radar.
 Annan, A.P. et al., 1975, The Electromagnetic Response of a Low-loss, 2-Layer, Dielectric for Horizontal Electric Dipole Excitation, Geophysics, Vol. 40, No.2.
 Davis, J.L. and Annan, A.P., 1989, Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy, Geophysical Prospecting.

2002년 2월 4일 원고접수

2002년 3월 25일 원고채택