

총적층 지하수면 및 그 하부의 풍화암/연암의 경계면 파악을 위한 복합 지구물리탐사

주현태¹ · 이철희^{1,2} · 김지수^{1*}

¹충북대학교 지구환경과학과, ²(주)아시아지오

Geophysical Imaging of Alluvial Water Table and the underlying Layers of Weathered and Soft Rocks

Hyeon-Tae Ju¹, Chul-Hee Lee^{1,2}, and Ji-Soo Kim^{1*}

¹Dept. of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University
²ASIAGEO Co., Ltd.

Received 20 June 2015; received in revised form 23 July 2015; accepted 3 August 2015

물리탐사의 대표적인 한계는 위아래 지층의 물성이 크게 차이하지 않을 경우 취득 신호가 작다는 점이다. 이 경우에는 서로 다른 물성에 기인하는 여러 가지 탐사들을 수행하고 그 결과들을 복합적으로 해석하여 그 효율성을 높인다. 레이더 및 고분해능 탄성파반사법 탐사는 천부 지질구조 및 매질 구조물을 신속하고 정확하게 찾아낼 수 있는 방법으로서 각각 유전율 경계면과 속도 경계면을 찾아내는데 효과적이다. 특히 이 연구에서는 전기적인 성질에 크게 반응하는 레이더 이벤트와 탄성적인 성질에 기인하는 탄성파 이벤트를 단일 단면도에 통합적으로 재건하는 기법을 모델링자료를 통해 구축하고 이를 바탕으로 청주 화강암부지의 얕은(3 m) 깊이의 지하수면, 그 하부의 풍화암, 연암 경계면을 효과적으로 파악하였다. 지반 강성에 중요한 인자인 밀립 탄성률(강성률)을 평가하기 위해 검증 자료를 통해 얻은 S파 속도를 여러 채널 S파 분석(MASW)과 공중점 교차상관 기법(CMPCC)에서 나온 값과 비교한 결과, 일반적인 MASW보다 이상대의 정확한 지점과 높은 SN을 목적으로 고안된 CMPCC를 통해 얻은 속도가 실제 검증 자료에 보다 접근하였다.

주요어: 유전율 경계면, 속도 경계면, 여러 채널 S파 분석, 공중점 교차상관

Although geophysical methods are useful and generally provide valuable information about the subsurface, it is important to recognize their limitations. A common limitation is the lack of sufficient contrast in physical properties between different layers. Thus, multiple methods are commonly used to best constrain the physical properties of different layers and interpret each section individually. Ground penetrating radar (GPR) and shallow seismic reflection (SSR) methods, used for shallow and very shallow subsurface imaging, respond to dielectric and velocity contrasts between layers, respectively. In this study, we merged GPR and SSR data from a test site within the Cheongui granitic mass, where the water table is ~3 m deep all year. We interpreted the data in combination with field observations and existing data from drill cores and well logs. GPR and SSR reflections from the tops of the sand layer, water table, and weathered and soft rocks are successfully mapped in a single section, and they correlate well with electrical resistivity data and SPS (suspension PS) well-logging profiles. In addition, subsurface interfaces in the integrated section correlate well with S-wave velocity structures from multi-channel analysis shear wave (MASW) data, a method that was recently developed to enhance lateral resolution on the basis of CMP (common midpoint) cross-correlation (CMPCC) analysis.

Key words: dielectric interface, velocity interface, MASW, CMP cross-correlation

*Corresponding author: geop22@cbnu.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

지반환경 및 지질토목 분야에서 지구물리탐사 및 시추검층 자료를 이용하여 얇은 깊이의 지하 단면도를 작성하는 것은 매우 필수적인 작업이다. 최근 탐사 시스템의 하드웨어 및 소프트웨어의 급속한 발전으로 상대적으로 비용이 많이 드는 시추공 조사를 대신하여 비파괴적인 방법인 지표탐사를 통하여 지하 정보를 얻는 것이 일반화되었다. 그러나 물리탐사의 대표적인 한계는 위아래 지층의 물리적 성질들이 크게 차이하지 않으므로 한 가지 방법만으로는 관심 지역의 지하 정보(구조 및 속성)를 파악할 수 없는 경우가 많다. 따라서 서로 다른 물성에 기인하는 여러 가지 탐사들을 수행하고 그 결과들을 복합적으로 해석하여 그 효율성을 높인다.

이 연구에서는 지하수면이 약 3 m 깊이로 매우 얇은 청주 화강암체 지역(Lee et al., 2010)에서 시추검층 및 시추코어 자료에서 해석된 그 하부의 풍화토, 풍화암, 연암의 분포대를 레이더, 탄성과반사법, 전기비저항, 표면과 탐사 자료를 추가 해석하여 그 상관성을 알아보고자 하였다.

고분해능 탄성과 레이더 탐사는 천부 지질구조 및 매설 구조물을 신속하고 정확하게 찾아낼 수 있는 방법으로서 레이더 탐사법(GPR; ground penetrating radar)과 천부 탄성과 반사법(SSR: shallow seismic reflection)은 각각 유전율 경계면과 속도 경계면을 찾아내는데 효과적이다(Kim et al., 1994; Cardimona et al., 1998; Miller and Xia, 1998; Porsani et al., 2006; Kim et al., 2007; Kim et al., 2008). 이 연구에서는 전기적인 성질(유전율, 전도도)에 크게 반응하는 레이더 이벤트와 탄성적인 성질(속도, 밀도)에 기인하는 탄성과 이벤트를 단일 단면도에 통합적으로 재건하는 방법(Baker et al., 2001; Sloan et al., 2007)을 활용하여 물리검층자료가 기록된 청주 화강암체의 좁은 구간(Lee et al., 2010)에

서 지하수면, 풍화암, 연암의 분포를 효과적으로 파악하고자 하였다. 진동수가 높아 극천부 지질에 효과적인 레이더 자료와 이보다 상대적으로 깊게 투과하는 고분해능 탄성과 자료의 각 파장을 최대한 접근하도록 조절하여 단면도의 성능을 높게 하였다.

지반 강성에 중요한 인자인 밀립 탄성률(강성률)을 측정하기 위해 비용이 많이 들고 S/N이 작은 S파 탐사 대신, 반사파를 가리는 가장 큰 잡음인 표면파를 이용한 여러 채널 S파 분석(MASW: multichannel analysis of shear waves)(Park et al., 1999)을 수행하여 도출된 S파 속도 구조를 특히 지하수면을 기준으로 레이더/탄성과 반사 이벤트와 전기비저항 지하구조와 비교하였다. 또한 공중점(CMP)의 겹 수 빈곤으로 탐사 축선의 양단에서 나타나는 낮은 수평분해능을 극복하기 위해 고안된 공중점 상호상관(CMPCC: common mid-point cross-correlation) 기법(Hayashi and Suzuki, 2004; Tatsunori et al., 2013)을 사용하였다.

배경 이론 및 모델링 자료

음향임피던스, 유전율 경계 및 통합 단면도

탄성과 반사법과 레이더 탐사는 수리물리학적으로 파동방정식의 해에 근거하여 지하구조를 반사영상으로 해석하는 물리탐사 방법이다. 수직으로 입사하는 탄성과 반사와 레이더 반사의 세기는 각각 경계면 위아래 층의 음향임피던스(밀도 ρ 와 속도 V 의 곱) 대비와 유전율 ϵ 대비로 계산되는 반사계수 R 로 그 크기가 결정된다(Fig. 1).

$$R_{seismic} = \frac{V_2\rho_2 - V_1\rho_1}{V_2\rho_2 + V_1\rho_1} \quad (1)$$

$$R_{radar} = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \quad (2)$$

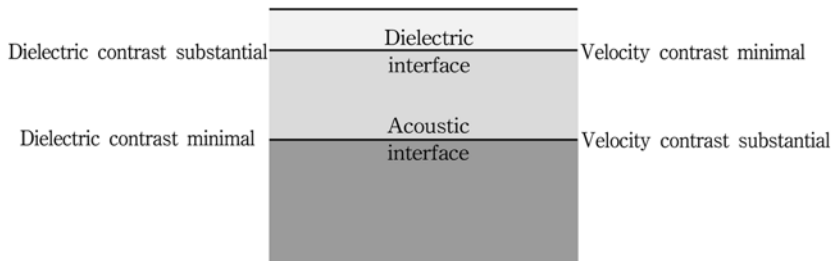


Fig. 1. Dielectric and acoustic interfaces.

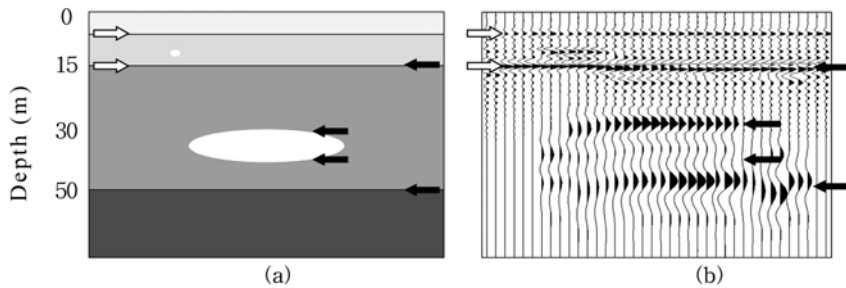


Fig. 2. (a) Dielectric and velocity interfaces. Open arrow indicates the dielectric interface; solid arrow indicates the velocity interface. (b) Integrated section using coincident SSR and GPR data.

일반적으로 지하수면은 각각 풍화토/불포화대와 수분 포화대의 경계가 되는 관계로 임피던스와 유전율 대비가 충분히 커서 두 개의 반사에너지가 크게 나타난다. 유전을 대비가 충분히 큰 얇은 깊이의 지하수면과 속도 대비가 큰 보다 깊은 깊이를 고려한 기반암 표면에 대한 모델링 자료(Schlumberger Ltd., 2010a)를 대상으로 성공적으로 작성된 통합 단면도(Fig. 2, Ju and Kim, 2014)의 적용성을 이번 현장 자료에 적용시켜 보았다. 이 때 중요한 점은 두 자료에서 크게 차이 나는 진동수의 범위 및 고르기 간격(sampling interval)을 고려하여 복합 연산이 가능하도록 파장을 최대한 비슷하게 조절하는 것이다.

MASW-CMPCC 기법

일반적인 MASW의 자료 모음은 공통 발파점(common shot gather) 자료의 벌림거리(offset)의 중앙점에 대한 프로파일(깊이에 따른 1차원 S파 속도)를 대표한다(Fig. 3a). 지오폰 간격이 1m인 24채널 시스템의 경우 총 전개 거리는 23m가 되며 지오폰 1에서 발파한 모음자료의 1차원 역산 결과는 중앙점 위치 11.5m의 정보로 해석한다. 다음 지오폰으로 이동하여 같은 방법으로 실시하면 거리 12.5m의 프로파일이 얻어진다. 차례차례 반복적으로 수행하여 얻은 각각의 1차원 프로파일들을 모아 2차원 S파 속도 단면을 얻는다. 그러나 S/N, 특히 가장자리에서의 수평 분해능이 낮고 전개 거리에 걸친 역산결과를 중앙점에 대한 정보로 해석하기 때문에 이상대의 지점을 정확히 반영할 수 없다는 점에서 이를 극복하기 위해 Hayashi와 Suzuki (2004)가 CMPCC 방법으로 마치 탄성파반사법의 공중점(CMP)에 대한 겹쌓기(stack)와 같은 개념으로 각 발파자료의 벌림거리별로 교차상관을 시도하여 수평분해능을 높였다.

MASW 자료의 CMPCC 분석은 다음과 같은 과정으

로 수행된다(Fig. 3b).

- ① 발파자료에서 n 번째와 n 번째의 두 트레이스를 교차 상관시킨다. 예를 들어 트레이스 [1, 11], [2, 12], [3, 13], ...와 같이 벌림거리가 10m인 트레이스들을 각각 교차상관한다. 따라서 24채널인 경우 총 $276(=_{24}C_2)$ 번의 교차상관 값이 계산된다.
- ② 모든 발파자료에서 ①의 과정을 수행하여 그 결과를 수신기 배열의 중앙점 CMP 번호로 지정한다. 벌림거리별로 같은 CMP 위치에 해당하는 트레이스들을 겹쌓기(stack) 한다.
- ③ 그 다음 벌림거리가 11m, 12m, 13m, ...인 트레이스들을 ①, ②와 같은 방법으로 차례대로 수행하여 각 해당 CMP 위치에 대한 겹쌓기 단면도(stack section)를 얻는다.
- ④ 일반적인 MASW와 같은 방법으로 위상속도를 분석한다.

$$U(c, \omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega, x) e^{i\omega x/c} dx \right| \quad (3)$$

현장 자료

탄성파/레이더 자료

청주 화강암체에 속하고, 약 40m 떨어진 두 개의 시추공에 대한 검증자료가 존재하는 시험조사 지역은 건물, 울타리로 둘러싸여 부득이 60m × 60m의 매우 좁은 구간에서 탐사를 수행하였다(Fig. 4). 또한 연중 지하수위가 매우 얇은 범위(약 3m)에 분포하는 점에서 반사에너지가 충분하고, 지표훼손을 고려하여 레이더 및 해머 천부탄성과 탐사를 수행하였다.

탄성파탐사의 수집 인자는 24 채널의 ABEM Mark6 시스템, 5-겹쌓기 해머링, 0.5m 간격의 100 Hz 지오폰, 고르기 간격 1ms, 기록시간 512ms로 탄성파 자료를

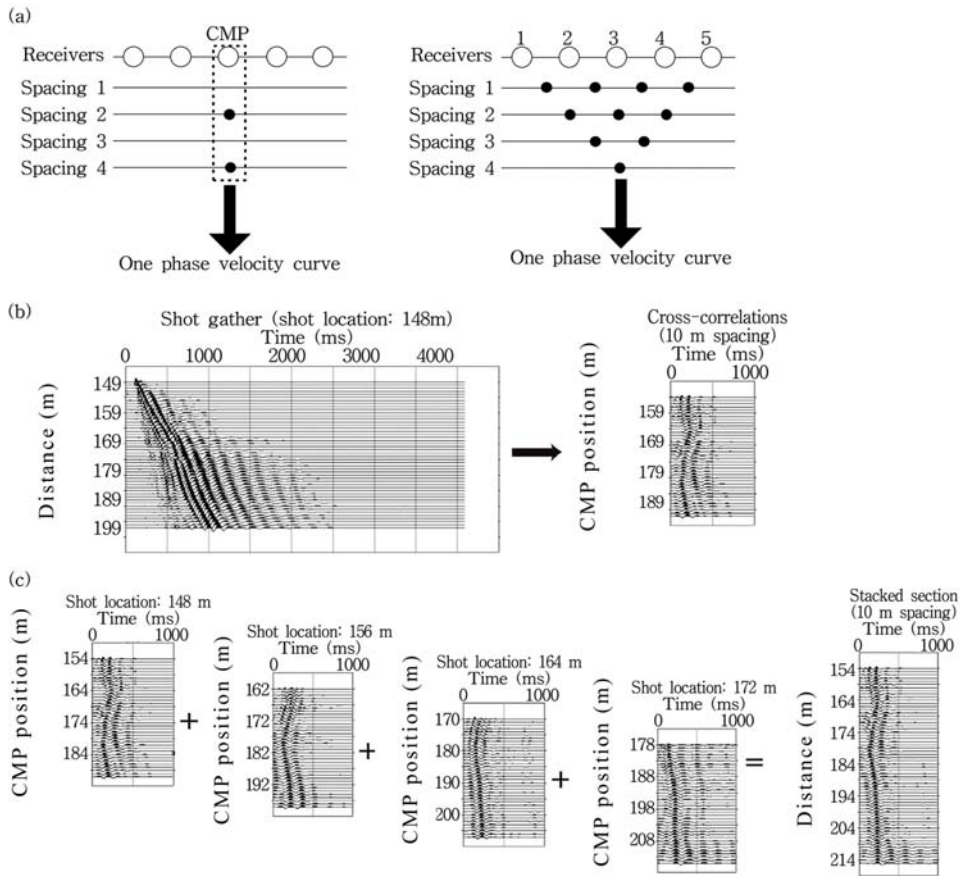


Fig. 3. (a) Concept of the MASW-CMPCC method. Open circles indicate receiver locations and the solid circles indicate the midpoints of cross-correlation. (b) Calculation of cross-correlation from one shot gather (i. e., shot position 148 m and trace spacing 10 m). (c) Stacking of cross-correlations that have identical spacing (i. e., 10 m) (modified from Hayashi and Suzuki, 2004).

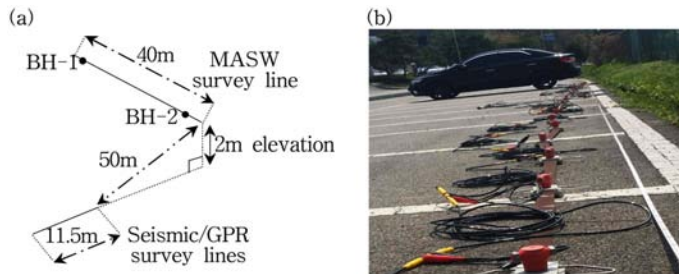


Fig. 4. (a) Survey lines for the site. (b) Land streamer (4.5 Hz geophone) deployed in the MASW survey.

수집하였다. 같은 축선에서 PulseEKKO 1000 계열 중 225 MHz 안테나, 고르기 간격 0.33 ns, 기록 시간 100 ns으로 레이더 기록을 얻어 Table 1에 정리하였다.

발파모음 자료(Fig. 5)는 16 비트 시스템, 짧은 전개 거리의 극천부 육상자료에서 예상되는 표면파 진폭 값

의 포화로 인한 클립(clipped) 현상을 보인다. 굴절파의 속도는 약 1450 m/s로서 2-3 m 깊이에 있는 지하수면에 기인한 것으로 해석되며, 지하수면의 반사파는 장과장의 표면파 간섭을 넘는 구간(약 6 m 이상)에서 관찰된다. 반사 이벤트가 거의 수평으로 나타나는 것은 얇은 깊이

Table 1. Data acquisition system.

	SSR	GPR
System	ABEM Mark6	PulseEKKO 1000 series
Receiver	100 Hz geophone	225 MHz antenna
Sampling interval	1 ms	0.33 ns
Record time	512 ms	100 ns
Number of stack	5	1
Spacing	0.5 m	0.2 m

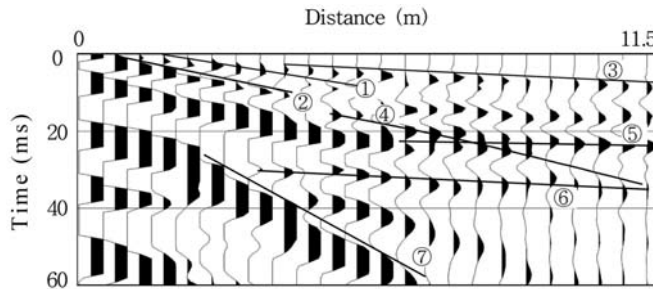


Fig. 5. Field record showing the waveforms of ① the direct wave (approximately 1100 m/s), ② the air wave (330 m/s), ③ water table refraction (approximately 1450 m/s), ④ water table reflection, ⑤ weathered rock reflection, ⑥ soft rock reflection, and ⑦ the surface wave.

의 지하수 층의 P파 속도가 1100 m/s으로 큰 반면 전개길이 매우 작아(약 12 m) 수직시간차(NMO 시간)이 매우 작기 때문이다. 같은 이유로 전개길이 후반부의 약 20 ms, 30 ms의 수평 이벤트는 각각 풍화대와 연암 경계면과 관련된 것으로 해석된다.

탄성과 자료처리는 AGC(30 ms), 대역 필터(10-15, 55-60 Hz), 표면파를 완화하기 위한 f/k 필터, 속도 분석, NMO 보정, CMP 중합, 시간 대 깊이 변환을 적용하였다. 발파자료에서 낮은 신호의 지하수면 반사이벤트는 표면파의 제거 및 NMO 스트레치로 수반되기 쉬운 인공잡음을 고려하여 수행된 초기시간대의 뮤팅으로 나타나지 않았다. 깊이 변환을 위한 정보는 천부의 낮은 S/N로 샘플런스 분석 등이 어려워 직접파와 굴절파, 검층 자료로부터 파악되는 구간 속도를 참고하였다. 레이더 자료는 전기전도도가 비교적 높아 레이더 신호가 심하게 감쇠되고, 높은 진동수(225 MHz) 안테나 사용으로 평탄한 지하수면 이하의 지하 구조를 규명하는데 투과 한계가 있어 특별한 처리는 가급적 하지 않고, 디와우(dewow), 영시간 보정, 직접파 뮤팅과 AGC(20 ns)만을 적용하였다(Schlumberger Ltd., 2010b).

부지 및 작업 환경의 제약으로 해머링 탄성과 탐사를 수행한 관계로 레이더 탐사와 중복되는 이벤트의 부재로 시간/깊이 전환의 기준선을 잡기 어려워, 두 단면도

를 단순히 속도 정보만을 이용하여 깊이 단면도로 변환시켜 통합하였다(Fig. 6). 중앙 부분의 침하 이벤트는 구조물 신축 이전에 지표 언덕에서 관찰된 맥상 관입에 의한 파쇄 효과인지 부정확한 속도 정보로 인한 시간차인지 확인할 수 없었다. 레이더 이벤트는 콘크리트 도로 아래의 모래층에 의한 강한 반사파와 지하수면에서 반사되는 상대적으로 약한 반사파로 해석된다. Figure 6에서 레이더 자료를 통한 1.2 m 깊이의 지하수면과 탄성파 자료를 통한 약 12 m 깊이의 풍화암 경계면, 약 22 m 깊이의 연암 경계면이 관찰된다.

표면파 자료

표면파 탐사는 탄성과/레이더 탐사 측선으로부터 50 m 떨어진 곳으로 고도차는 약 2 m이다(see Figure 4a). 탄성파반사법에서 사용하였던 ABEM Mark6 시스템을 그대로 사용하였고, 지오폰(4.5 Hz) 23채널의 육상 스트리머, 1 m 간격의 해머 타격으로 고르기 간격 0.5 ms로 1024 ms 동안 기록하고 5 m의 오프셋 거리로 1 m씩 이동시켜 총 21개의 발파자료를 얻었다(Fig. 7a). 따라서 CMPCC 단면에서 가장자리에서는 공중점 겹수(coverage)가 적어 해상도가 낮아지지만, 대체로 공중점 겹수가 많아(Fig. 7b) 그 만큼 높은 해상도를 보인다.

Figure 8a, 8b는 각각 일반적인 MASW 방법과

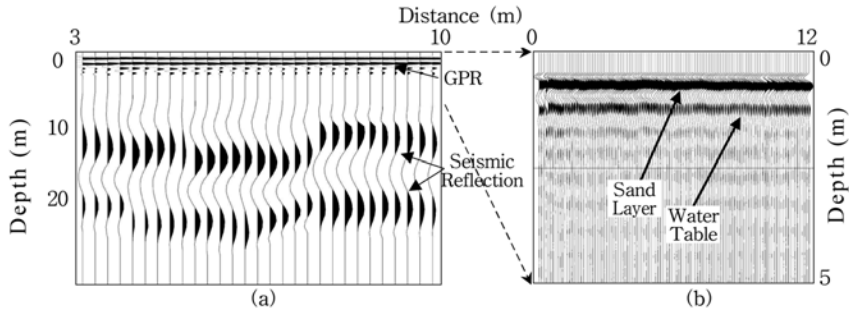


Fig. 6. (a) Interpreted SSR/GPR section. (b) Expanded GPR section down to 5 m depth.

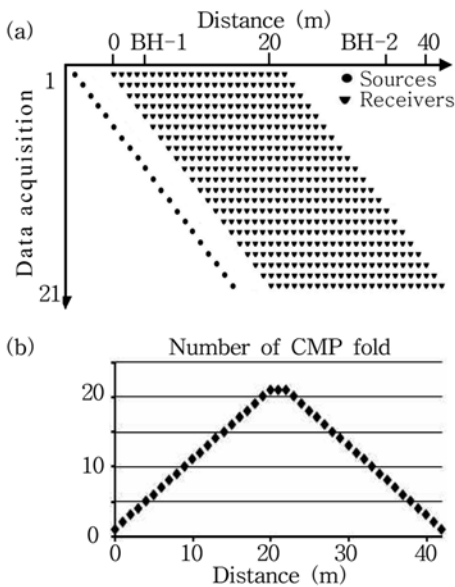


Fig. 7. (a) Source-receiver geometry for CMP analysis. (b) Number of CMP folds.

CMPCC 방법을 통해 분석한 단면도이다. 일반적인 MASW 분석 단면도에서 나타나는 낮은 수평분해능과 이상대 지점의 불확실성 문제점이 CMPCC 분석 단면도에서는 나타나지 않는다. 왜냐하면 교차상관 기법을 이용하여 수평 분해능을 높였기 때문이다. 지하수면을 국한시켜 볼 때도 일반적인 MASW 단면(Fig. 8a)에 비해 CMPCC 단면(Fig. 8b)에서 해석된 지하수면 영상이 시추공에서 매월 측정된 지하수위 2.5-3m에 근접한다. 0-3 m 깊이의 속도가 5-7 m 깊이의 속도 200 m/s와 같이 높게 나타난 것은 도로 포장으로 인한 다짐 효과 때문으로 해석된다. CMPCC 단면에서 보이는 2.5-3 m 깊이의 지하수면이 탄성파/레이더 자료(Fig. 6)에서 1.2 m 깊이로 나타난 것은 표면파 탐사 지역의 높이가 약 50 m 떨어진 탄성파/레이더 탐사지역에 비해 상대적으로 2 m 정도 높기 때문이다(Fig. 4a).

전기비저항 및 검층 자료

전기비저항 자료는 탄성파 측선에서 ABEM SAS 300 시스템을 이용하여 21채널, 1 m 간격으로 수평 분해능을

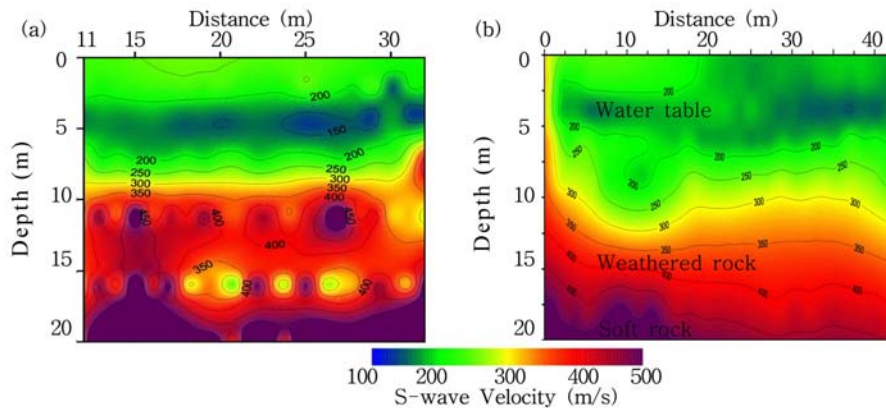


Fig. 8. (a) Conventional MASW section, (b) CMP cross-correlation section.

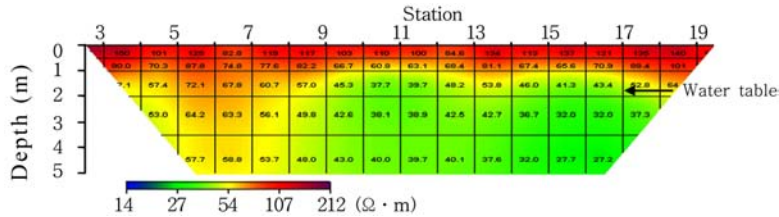


Fig. 9. Electric resistivity section.

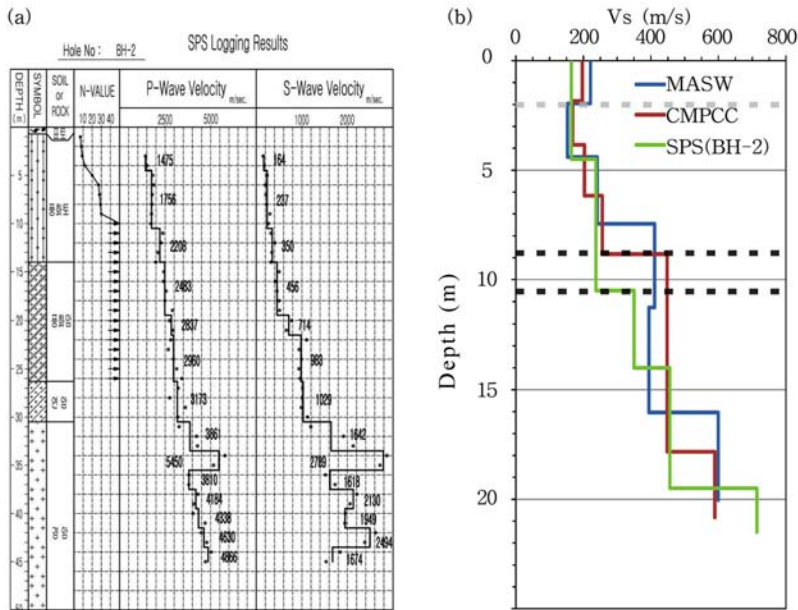


Fig. 10. (a) Suspension PS logging profile (after Lee et al., 2010). (b) S-wave velocity profile from MASW, CMPCC and SPS logging (BH-2). Light gray bar indicates the location of the water table, whereas the dark bars represent the top of weathered rock, as determined using the SPS and CMPCC methods.

높이기 위해 웨너 배열을 이용하였다(Fig. 9). 깊이 약 2m에서 나타나는 저비저항대는 지하수면으로 해석되는데 이는 탄성파/레이더 자료(Fig. 5)와 시추공(BH-1, BH-2)을 통해 매월 측정된 지하수위 자료와 잘 부합된다.

시추공(BH-2) 지역에 대한 Suspension PS 검층을 통해 얻은 S파 속도 프로파일(Fig. 10a, Lee et al., 2010)을 일반적인 MASW와 MASW-CMPCC 방법을 통해 획득한 S파 속도와 비교하였다(Fig. 10b). 다짐효과로 인해 2-4 m 부분에서 속도가 상대적으로 작고 지하수면을 지나면서 다시 속도가 증가하는 양상을 보인다. 검층 자료에서 보이는 풍화암 표면의 깊이 10.5 m는 MASW-CMPCC에서의 깊이 9 m와 차이가 있지만 일반적인 MASW에 비해 CMPCC가 분해능이 좋다는 점을 알 수 있다.

결론

탄성파/레이더 자료를 통해 작성된 통합단면도에서 3 m 깊이의 지하수면, 풍화암, 연암 경계면이 효율적으로 해석되었다. 이것은 전기비저항 자료와 시추공에서 나타난 자료와도 부합하였다.

표면파 탐사를 실시하여 얻은 지하 단면도에서 기존의 MASW 방법이 갖는 낮은 S/N과 수평 분해능의 문제점은 CMPCC 방법으로 해결되었다.

검층 자료를 통해 얻은 S파 속도와 표면파 탐사를 통해 얻은 S파 속도 프로파일이 비슷한 양상을 보이고 있다. 특히 MASW를 통해 얻은 속도보다 CMPCC를 통해 얻은 속도가 실제 검층 자료에 접근하였다.

검층자료와 MASW-CMPCC 자료에서 해석된 S파

속도의 감소는 지하수로 인한 강성률의 감소로 해석된다.

사 사

이 논문은 2012년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A1A2041933). 논문을 건설적으로 지적해주신 익명의 심사자 3분에게도 감사드립니다.

References

- Baker, G. S., Steeples, D. W., Schmeissner, C., Pavlovic, M., and Plumb, R., 2001, Near-surface imaging using coincident seismic and GPR data. *Geophysical Research Letters*, 28(4), 627-630.
- Cardimona, S., Clement, W. P., Kadinsky-Cade, K., 1998, Seismic reflection and ground penetrating radar imaging of a shallow aquifer, *Geophysics*, 63, 1310-1317.
- Hayashi, K. and Suzuki, H., 2004, CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data, *Exploration Geophysics*, 35, 7-13.
- Ju, H. T. and Kim, J. S., 2014, Complementary Integration of Shallow Seismic Reflection and GPR Data, Joint Conference of the Geological Science & Technology of Korea, 327.
- Kim, H. S. and Kim, J. Y., 2008, High-resolution profiling of alluvial aquifer in potential riverbank filtration site by use of combining CMP refraction and reflection seismic methods, *Journal of Applied Geophysics*, 66, 1-14.
- Kim, J. H., Yi, M. J., and Song, Y., 2007, Application of geophysical methods to the safety analysis of an earth dam, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 12, 221-235.
- Kim, J. S., Moon, W. I., Lodha, G., Serzu, M., and Soonawala, N., 1994, Imaging of reflection seismic energy for mapping shallow fracture zones in crystalline rocks, *Geophysics*, 59(5), 753-765.
- Lee, S. J., Kim, J. S., Lee, C. H., and Moon, Y. S., 2010, Fast Delineation of the Depth to Bedrock using the GRM during the Seismic Refraction Survey in Cheongju Granite Area, *Economic and Environmental Geology*, 43(6), 615-623 (in Korean with English abstract).
- Miller, R. D. and Xia, J., 1998, Large near-surface velocity gradients on shallow seismic reflection data, *Geophysics*, 63(4), 1348-1356.
- Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J., 1999, Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, 64(3), 800-808.
- Porsani, J. L., Sauck, W. A., and Jnior, A. O. S., 2006, GPR for mapping fractures and as a guide for the extraction of ornamental granite from a quarry: A case study from southern Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, 58, 177-178.
- Schlumberger Ltd., 2010a, OMNI3D Workshop Seismic Survey Design & Modeling, USA.
- Schlumberger Ltd., 2010b, VISTA 2D/3D Full PRO Seismic Processing Software, USA.
- Sloan, S. D., Tsolfias, G. P., Steeples, D. W., and Vincent, P. D., 2007, High-resolution ultra-shallow subsurface imaging by integrating near-surface seismic reflection and ground-penetrating radar data in the depth domain. *Journal of Applied Geophysics*, 62, 281-286.
- Tatsunori, I., Takeshi, T., and Toshifumi, M., 2013, Window-controlled CMP crosscorrelation analysis for surface waves in laterally heterogeneous media, *Geophysics*, 78(6), EN95-EN105.

주현태

충북대학교 지구환경과학과
28644, 충북 청주시 서원구 충대로1
Tel: 043-261-3201
E-mail: loginer-kool@hanmail.net

이철희

충북대학교 지구환경과학과
28644, 충북 청주시 서원구 충대로1
Tel: 043-261-3201
E-mail: geolee78@gmail.com

김지수

충북대학교 지구환경과학과
28644, 충북 청주시 서원구 충대로1
Tel: 043-261-3201
E-mail: geop22@cbnu.ac.kr