

## 사력댐의 안정성평가를 위한 표면파탐사(MASW)의 활용성 Safety Evaluation of Rock-Fill Dam by Seismic(MASW) Method

정해상<sup>1)</sup>, Hae-Sang Jeong, 오영철<sup>2)</sup>, Young-Chul Oh, 방돈석<sup>3)</sup>, Don-Suk Bang, 안상로<sup>4)</sup>, Sang-Ro Ahn

- 1) 한국시설안전기술공단 댐항만실 과장, Manager, Dam Safety Division, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation
- 2) 한국시설안전기술공단 지하시설실 과장, Manager, Underground Structure Safety Division, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation
- 3) 한국시설안전기술공단 댐항만실 차장, Manager, Dam Safety Division, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation
- 4) 한국시설안전기술공단 댐항만실 실장, Director, Dam Safety Division, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

**SYNOPSIS** : For safety evaluation of a rock-fill dam, it is often necessary to investigate spatial distribution of weak zones such as fracture. Both DC-resistivity survey and seismic(SASW) method are usually used for the purpose. Recently, Multichannel analysis of surface waves(MASW) method which makes up for the weak point of SASW method is developed and the site examination which is simple came to be possible comparatively. In order to obtain 2-D shear-wave velocity( $V_s$ ) profile along the dam axis that can be associated with dynamic properties of filled materials, MASW method was adapted. Then, DC-resistivity survey and drilling survey were performed to compare with each results. We confirmed that the MASW method and DC-resistivity survey show complementary result that correspond with drilling result. Therefore, MASW method is an efficient method for dynamic characterization of dam-filling materials and also the combination of related methods such as DC-resistivity can lead to an effective safety evaluation of rock-fill dam.

**Key words** : safety evaluation of a rock-fill dam, DC-resistivity method, SASW method, Multichannel analysis of surface waves(MASW) method, mapping 2-D shear-wave velocity( $V_s$ ) profile

### 1. 서 론

사력댐의 안정성 평가를 위해서는 댐체내 연약대에 대한 공간적 분포의 조사와 댐 구성재료에 대한 동적 물성치의 조사가 필요하다. 댐의 손상부를 조사하기 위한 비파괴적인 방법으로는 일반적으로 전기 비저항탐사가 적용되는데 이는 손상대에 대한 공간적 분포만을 제공하며 탐사현장이 대부분 수 백 m에 불과하므로 축선길이가 제한되어 있어 깊은 심도에 관한 정보획득에 필요한 충분한 양의 데이터를 얻는데 한계가 있다. 댐체의 동적 물성치를 조사하는 방법으로는 시추공을 이용한 조사방법이 있으나 이는 파괴조사법이므로 댐이라는 현장여건에 따라 적용하기 어려운 점이 있고 또한 그 조사결과가 시추공 주위만을 반영한다는 단점이 있다. 따라서 비파괴조사법이면서 지층의 전단파속도(shear wave

velocity)를 2차원적으로 작성할 수 있는 SASW(Spectral Analysis of Surface Wave)기법이 이용되었으나 두 개의 수진기를 사용하여 수 십 m의 심도를 파악하기 위해서는 현장시험이 매우 번거로운 단점이 있다. 최근에 SASW기법의 단점을 보완·개선된 MASW(Multi-channel Analysis of Surface Wave)기법이 개발되어 이용되고 있다.

본 고에서는 연약지반이나 성토지반에 탁월한 성능을 발휘하는 MASW탐사를 사력탐사에 적용하고 그 결과를 전기비저항탐사 결과 및 시추조사 결과와 비교, 검토하여 적용성을 파악하고자 하였다.

## 2. MASW탐사

모든 탄성파탐사시 발생하는 표면파(레이리파)가 가지고 있는 분산성질을 이용하여 지반의 횡파(S파) 속도구조를 비파괴적으로 조사하는 탐사법이다. 대부분의 압축파음원을 사용하는 표면 탄성파 탐사에서는 실제파 에너지보다 에너지가 2~3배 많은 그라운드롤(ground roll : 지표면 근처나 지표면을 따라 전파되는 표면파 에너지)이 발생하는데 표면파 각각의 주파수 성분은 지반의 전단파 속도구조에 따라 각각 다른 진행 속도(위상속도,  $C_p$ 라 불리는)를 갖게 되며 이를 분산(dispersion)이라고 한다. 따라서 획득한 표면파의 분산곡선(주파수 대 위상속도)을 구하고 이 분산곡선을 역산하면 지반의 전단파 속도구조를 구할 수 있게 되며 또한 지반의 탄성상수에 대한 정보를 얻을 수 있다.

표면파의 스펙트럼 분석(Spectral Analysis of Surface Wave; SASW)법은 1980년대 초반에 시작되었다(Nazarian et al., 1983). SASW는 한 지점에서 충격 또는 진동을 가하고 일정 거리만큼 떨어진 두 위치에서 충격이나 진동으로 인한 지반 및 구조물의 진동을 측정하여 두 위치에서 수신된 표면파의 위상각 차로부터 분산곡선을 결정한다. 만일 넓은 범위의 파장에 대하여 위상속도를 결정할 필요가 있을 때에는 수신기간의 거리를 여러 번 변화시켜 가면서 반복 측정한다. 이는 짧은 파장은 얇은 심도의 그리고 긴 파장은 깊은 심도 지반의 물성을 대표하기 때문이다. 따라서 깊은 심도까지 측정을 하려면 수신기의 간격을 변화시켜가면서 많은 횡수를 반복 측정한다. 또한 SASW탐사시 잡음은 조사지역의 지반특성에 따라 달라지므로 각 현장에서 양호한 자료가 획득되었는지의 판단은 경험적 기준에 의존해야 한다(Gucunski and Woods, 1991; Stokoe et al., 1994). 다중채널 표면파 분석법(Multichannel analysis of surface waves; MASW)은 SASW법이 가진 번거로운 현장 조사과정과 획득신호의 잡음에 관한 판단문제를 극복하기 위해 시도된 조사기법이다.

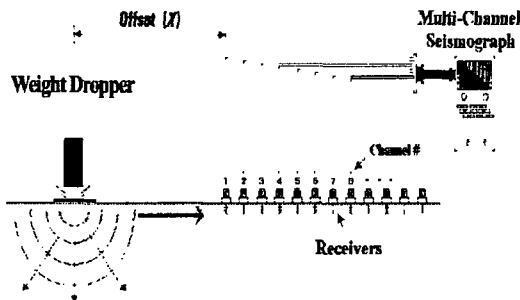


Fig. 1. MASW field set up(Xia J, 2002)

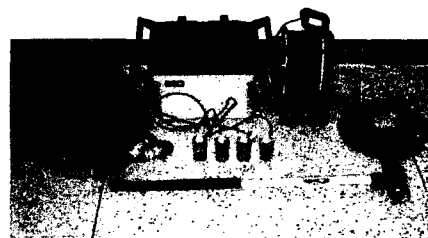


Fig. 2. MASW system

한 쌍의 수진기를 사용하는 SASW 기법에 비해 MASW기법에서는 일반적으로 24개의 수진기를 사용하여 한 번의 음원발생으로부터 얇은 심도의 정보를 가지고 있는 짧은 파장과 깊은 심도의 정보를 가지고 있는 긴 파장의 표면파를 동시에 획득한다. 표면파의 스펙트럼 분석을 통해 지반의 전단파속도를 얻기 위한 과정은 3단계로 진행된다. 첫째 단계는 최소한의 잡음을 포함하는 그라운드롤을 획득하여 기록하는 것이다. 전통적인 탄성파탐사에서 그라운드 롤은 잡음으로 인식되어 이를 최소화하는 방향으로 자료획득이 이루어졌지만 표면파를 이용하는 MASW탐사에서는 표면파를 포함하고 있는 양질의 그라운드롤을 획득하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 각 잡음(noise)의 상대적인 진폭은 주파수와 진원으로부

터의 거리(source offset)에 따라 변하므로 보통 각각의 잡음은 일관성 있는 패턴(다중채널 기록상에서 확인할 수 있는 독특한 속도와 감쇠 특성)을 가지고 있으므로 기록된 파를 swept frequency 형식으로 분해하면 대부분의 잡음을 식별할 수 있다. 두 번째는 기록된 표면파의 스펙트럼분석을 통해 표면파의 분산곡선(dispersion curve : 위상속도 대 주파수)을 계산하는 것이며 마지막 세 번째 단계는 계산된 분산곡선으로부터 역산(inversion)을 통해 전단파 속도단면을 결정하는 것이다. 역산과정은 현장에서 획득한 탐사자료로부터 계산된 분산곡선과 이론적으로 계산된 분산곡선이 서로 일치할 때까지 가정된 전단파 속도 단면을 바꾸어 가며 계속된다. 이 때 사용되는 변수는 층의 두께와 전단파속도이며, 포아송비와 밀도는 일반적으로 사전 정보 또는 합리적인 가정에 의해 결정된다.

### 3. 현장 적용사례

#### 3.1 조사지역 및 자료획득

본 조사에서는 2개(C댐, D댐)의 사력댐을 대상으로 하였으며 Fig. 3과 Fig. 4는 2개 댐의 표준단면도 및 탐사축선도이다. 각 축선에서 먼저 전기비저항탐사를 실시하여 댐체내의 대략적인 이상대 분포를 조사한 후 MASW 탐사를 실시하였다. 탐사에서 충격음원은 10 lb 의 슬래지햄머를 사용하였으며 24개 수신기의 간격은 1 m 로 결정하여 C댐에서는 100 m 를, D댐에서는 108 m 를 탐사하였다. 댐마루 표면이 2개댐 모두 아스팔트 포장이므로 탐사의 편리를 도모하기 위하여 수신기 모두를 가정용 장판위에 올려 놓고 이동시키는 방식으로 탐사하였다. 음원에서부터 수신기까지의 거리는 수 회의 시험조사와 현장분석으로부터 가장 양질의 그라운드 롤이 획득된 거리 각 10 m(C댐)와 20 m(D댐)로 결정하였다.

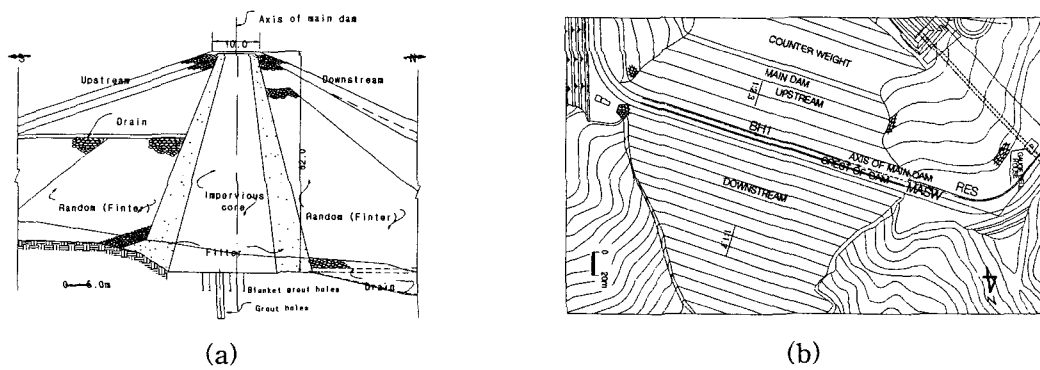


Fig. 3. (a) The cross section of C dam (b) Dam mapping and survey profiles

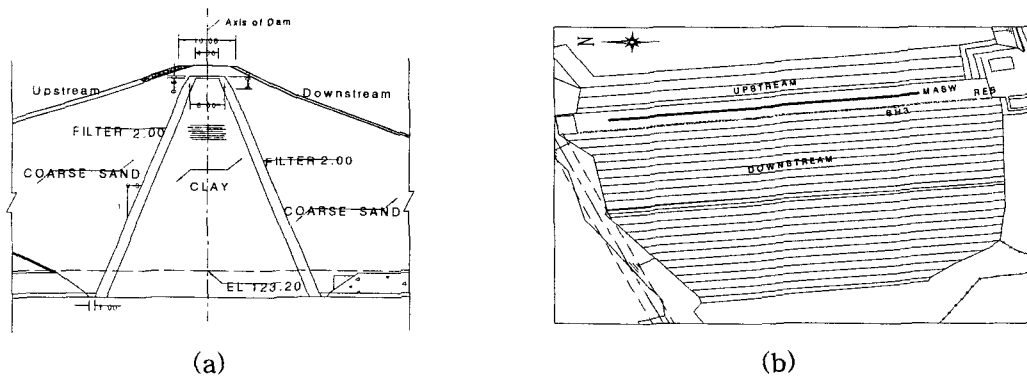


Fig. 4. (a) The cross section of D dam (b) Dam mapping and survey profiles

### 3.2 자료처리

획득된 자료는 muting, bandpass 필터 등을 적용하여 S/N비를 높이고자 하였으며 최종적으로 처리된 자료를 이용하여 위상속도 대 주파수의 일관성(coherence) 분석을 실시하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 C댐의 한 측정점에서 획득한 자료(Fig. 5a)의 처리과정을 보여준다. Fig. 5b에서 보면 fundamental mode는 higher mode에 비해서 동일한 주파수대역에서 위상속도가 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 분산곡선(Fig. 6a)을 구하기 위해서는 fundamental mode의 일관성이 높은 위상속도 대 주파수를 이용하는데 S/N 비가 높은 주파수대역은 10 Hz ~ 50 Hz로 이에 대응하는 위상속도는 210 ~ 350 m/s 이다. 이 분산곡선(Fig. 6a)의 역산을 통하여  $v_s$  단면을 구하였다(Fig. 6b).

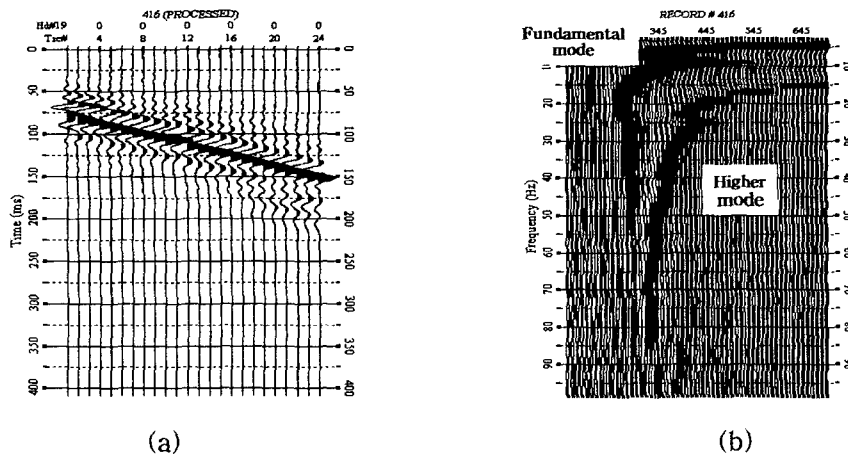


Fig. 5. (a) A 24-trace shot gather(dx=1m), C dam, (b) its corresponding dispersion curve image that shows the same resolution with the 24-trace shot gather

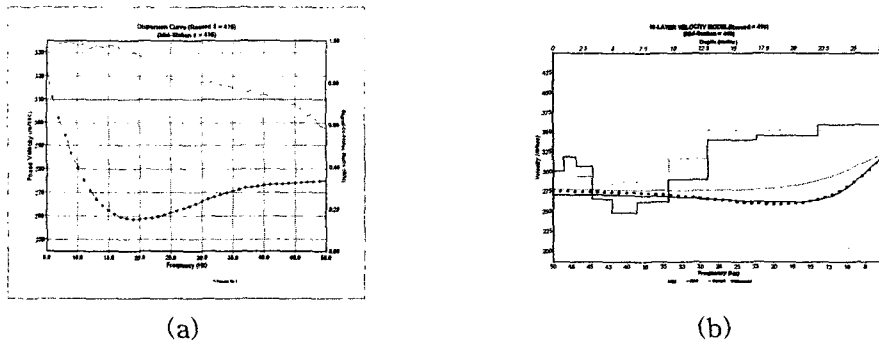


Fig. 6. (a) Dispersion curve in Fig. 5b, (b) The  $v_s$  profile obtained from the inversion of the dispersion curve.

자료처리 및 역산에 사용된 프로그램은 *Surfseis*(Kansas geological survey, 2002) 이며 상기의 자료 획득 및 처리는 한 측정점에 대한  $v_s$  수직단면을 구하기 위한 작업이므로 총 탐사측선 100 m 를 실시하기 위해서는 1 m 간격으로 101번의 자료획득 및 처리가 필요하며 이를 수행하였다. D댐에서 획득한 자료 역시 상기와 같은 109번의 과정을 거쳐  $v_s$  수직단면을 구하였다.

### 3.3 결과

C댐의 전기비저항 분포(Fig. 7)와 MASW탐사로부터 결정된 전단파 단면(Fig. 8)을 비교한 결과 전기

비저항분포에서 배경비저항치(50~500  $\Omega \cdot m$ )보다 높은 고비저항 이상대(1,000  $\Omega \cdot m$  이상, 110~125 m 구간과 150~170 m 구간)가 탐지되었으며 이 구간에서 전단파속도는 심도 15 m 부근에서 같은 심도 내 평균 전단파 속도보다 평균 50~150 m/s 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이로써 댐체의 상기구간에는 밀도가 상대적으로 낮으며 고비저항 특성을 나타내는 재료가 많이 포함되어 있는 것으로 판단된다. 축선 152 m 위치에서 실시한 시추조사 결과에 의하면 코어재는 자갈( $\phi=20\sim100$  mm)섞인 실트질 모래이며, 표준관입시험결과 심도 13.5m에서 N치가 최저(=14)인 것으로 나타났다. 따라서 10~17 m 구간은 코어의 다짐도가 약하다고 판단할 수 있으며 이러한 시추결과는 MASW 탐사 결과와 일치하고 있다.

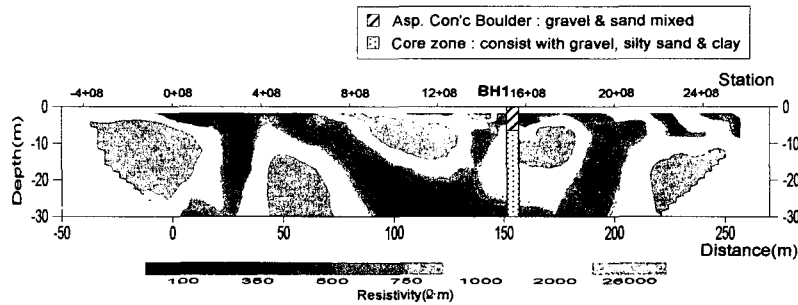


Fig. 7. Resistivity profile, downstream crest of the C dam.

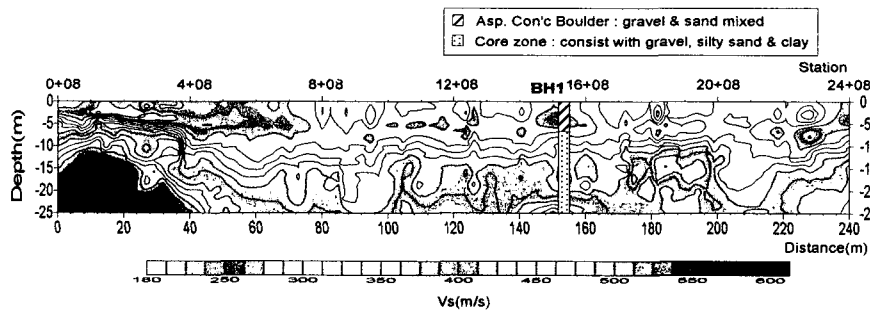


Fig. 8. 2-D contour image of  $v_s$  distribution obtained from the multiple number of  $v_s$  profiles assigned into a regular 2-D grid

다음으로 D댐에서 전기비저항 분포(Fig. 9)와 MASW탐사로부터 결정된 전단파 단면(Fig. 10)을 비교한 결과 대략 심도 13 m 를 경계로 상·하부층이 구분되는 것을 알 수 있으며 심도 15m 상부는 비저항치가 200  $\Omega \cdot m$  이상 그리고 하부는 200  $\Omega \cdot m$  이하이며 전단파속도는 상부층에서 200 m/s 내외 그리고 하부층은 250~440 m/s의 속도로 조사되어 두 탐사결과로부터 결정한 층상구조가 일치하고 있음을 알 수 있다. 시추조사 자료에 의하면 심부로 갈수록 코어재의 고결상태가 단단해지며 자갈의 함유율이 높아지고, 심도 13m 부근부터는 코어재에 다량의 자갈이 포함되어 있는 것으로 조사되어 전기비저항 탐사결과와 MASW 탐사결과가 시추조사와 일치하였다.

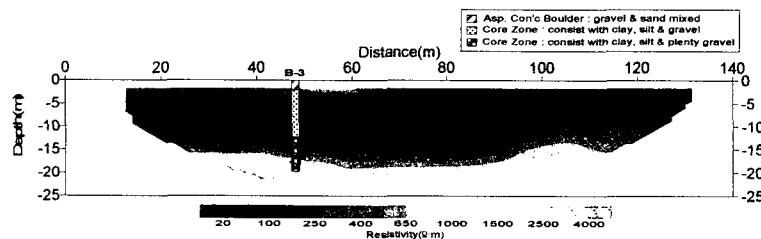


Fig. 9. Resistivity profile, downstream crest of the D dam.

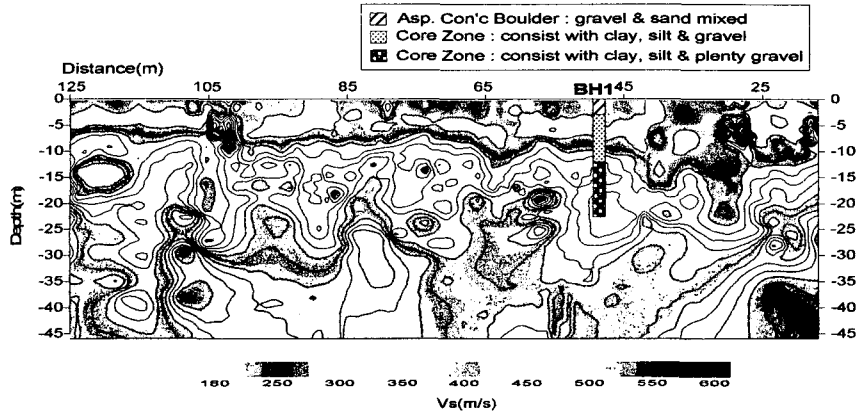


Fig. 10. 2-D contour image of  $v_s$  distribution obtained from the multiple number of  $v_s$  profiles assigned into a regular 2-D grid

#### 4. 결론

연약지반이나 성토지반에 탁월한 성능을 발휘하는 MASW탐사를 사력탐사에 적용하고 그 결과를 전기비저항탐사 결과 및 시추조사 결과와 비교, 검토하여 적용성을 파악하고자 2개 댐에 대하여 각 조사를 실시하였다.

MASW탐사는 댐체조사에 있어서 전단파속도를 조사하는데 매우 효과적이었으며 기존의 SASW탐사에 비하여 획득자료의 안정성이나 작업능률면에서 탁월한 성능을 발휘하였다.

댐 체체의 전단파속도는 심부로 갈수록 증가하는 것으로 나타났고 전단파 속도이상대와 전기비저항 이상대 및 시추결과가 일치하였다. 또한 전단파 속도단면으로부터 전기비저항단면에서는 얻을 수 없었던 댐체내의 다짐도 분포등에 관한 정보를 획득함으로써 전기비저항탐사만으로는 판단하기 힘들었던 댐 체체의 내부상태를 좀더 자세히 파악할 수 있었다. 따라서 MASW탐사법은 전기비저항탐사법과 조합하여 사용될 때 댐의 안정성 평가를 위한 신뢰성 있는 기초자료를 제공해줄을 확인하였다. 그러나 MASW 탐사 역시 비파괴조사법이므로 좀 더 정확한 자료를 얻기 위해서는 다른 탐사기법과 마찬가지로 직접조사인 시추공 탄성파탐사와 병행하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 안상로 외(1999), 사력탐사의 안정성 평가기법 개발, 한국시설안전기술공단, pp183-223
2. 박상욱(2001), 암버력층에서의 지반강성 결정을 위한 다중채널 표면파탐사의 적용사례, 한국표면파연구회, 제1회 학술발표회, 건설현장에 필요한 표면파기법, 서울, pp58-74.
3. 정희욱(1999), 표면파분석의 역산에 영향을 미치는 요인들에 관한 연구, Jour. Korean Earth Science Society, Vol. 20, No. 6, pp613-619.
4. Choon B. Park, Richard D. M. and Jianghai X.(1999), Multichannel analysis of surface waves, Geophysics, Vol. 64, No. 3, pp800-808.
5. Choon B. Park, Richard D. M. and Jianghai X.(2001), Offset and resolution of dispersion curve in multichannel analysis of surface waves(MASW), Procs. Symp. on the Appl. of Geophysics to Eng. and Environm. Problems, Denver, SSM-4.
6. Svensson M.,Bernstone C. and Dahlin T.(1999), The combination of the SASW method and DC-resistivity in characterization of old landfills, Procs. Symp. on the Appl. of Geophysics to Eng. and Environm. Problems, Oakland, pp123-131.