

비고결 퇴적물에서 다운홀 탄성파 탐사, MASW, SCPT로 구한 횡파 속도 단면과 시추결과 비교 연구

김진후* · 김현도

동아대학교 공과대학 토목해양공학부, 604-714, 부산광역시 사하구 하단동 840

Comparison of S-wave Velocity Profiles Obtained by Down-hole Seismic Survey, MASW, and SCPT with a Drilling Log in Unconsolidated Sediments

Jin Hoo Kim* and Hyun Do Kim

Division of Civil and Ocean Engineering Department, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

Abstract: Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW) and Seismic Cone Penetration Test (SCPT) have been recently developed to obtain S-wave velocity profiles which were conventionally investigated by a down-hole seismic survey. For unconsolidated sedimentary sites, we studied these three methods, and compared the results with a drilling log. All the methods showed that the changes in the S-wave velocities were consistent with the changes in the sedimentary facies. In addition, the SCPT was most sensitive to changes in sedimentary facies among the three profiles. The results of the SCPT showed that there exists a low velocity zone, which is mainly composed of clayey sand, at the depth of 8~12 m in the sediments.

Keywords: S-wave profile, down-hole seismic survey, multi-channel analysis of surface waves (MASW), seismic cone penetration test (SCPT)

요약: 지반의 횡파 속도 단면은 주로 다운홀 탄성파 탐사에 의존해 왔으나 최근에 MASW와 같은 표면파 탐사방법과 SCPT와 같은 탄성파 콘 관입시험법 등이 개발되어 사용되고 있다. 본 연구에서는 비고결 퇴적물에서 다운홀 탄성파 탐사, MASW, SCPT 등을 사용하여 횡파 속도 단면을 구하고 이들을 시추조사 결과와 비교하였다. 그 결과 퇴적물상의 변화와 횡파 속도 변화는 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었으며, 세 가지 횡파 속도 단면 중 SCPT가 퇴적물상의 변화에 가장 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었다. SCPT 결과 퇴적층 내 약 8~12m 깊이에 주로 점토질 모래로 구성되어 있는 저속도 층이 있음을 알 수 있었다.

주요어: 횡파 속도 단면, 다운홀 탄성파탐사, 다중채널 표면파 분석법(MASW), 탄성파 콘 관입시험(SCPT)

서론

지반의 물성, 특히 동탄성계수를 구하기 위해서는 종파 뿐만아니라 횡파 속도 단면 및 밀도(또는 단위 중량) 분포를 알아야 한다. 지금까지 종파 및 횡파의 속도 단면은 주로 다운홀 탐사나 크로스홀 탐사에 의존했다. 다운홀 탄성파 탐사에서 얻은 속도 단면은

굴절법, 반사법 및 표면파 탐사 등의 결과에 대한 신뢰를 평가하는데 사용될 수 있으며, 지반의 탄성계수나 층서를 구분하는 데에도 효과적으로 사용되고 있다(Chang et al., 1999). 다운홀 탄성파 탐사에 있어서 종파의 주시는 비교적 정확하게 결정할 수 있으나 횡파의 주시는 종파와 기타 잡음에 의한 간섭으로 인하여 결정하는 데 어려움이 따른다. Kim and Park(2002)은 횡파의 분극 방향을 고려해 횡파의 주시를 결정하는 방법을 제시하고 있으며, Lee et al. (2000)은 복소 트레이스 분석을 통해 횡파를 효과적으로 판별하는 방법을 제시하였다. 다운홀 탐사나 크

*Corresponding author: jkim@donga.ac.kr

Tel: 82-51-200-7790

Fax: 82-51-200-7795

로스홀 탐사를 수행하기 위해서는 시추공이 사전에 설치되어야 하며, 특히 크로스홀 횡파 탐사를 수행하기 위해서는 2개 이상의 시추공이 필요하다. 또한, 시추공의 수직도를 정확히 측정하여 이를 횡파 속도 계산에 적용하여야 하는 번거로움이 따른다.

1990년대에 들어와 탄성파탐사에 있어서 많은 에너지를 포함하고 있는 표면파를 이용해 지반의 횡파 속도 단면을 구하고자 하는 연구가 본격적으로 수행되기 시작했다. Stokoe et al.(1994)와 Joh and Stokoe(1997) 등은 표면파의 스펙트럼 분석방법(SASW; Spectral Analysis of Surface Waves)을 이용하여 지반의 횡파 속도 단면을 구하는 방법과 표면파의 위상속도를 결정하는 방법 등을 제시하였다. SASW는 두 개의 수진기를 이동시키며 각 주파수에 대한 위상속도를 구하는 데 과정이 복잡하여 넓은 지역에 대한 연속적인 횡파 속도 단면을 구하는데 많은 어려움이 따른다. 1990년대 후반에 이르러 SASW의 단점을 보완하는 방안으로 다중 채널 자료를 이용하여 표면파의 분산곡선을 구하고 위상속도를 산출하는 다중채널 표면파 분석법(MASW; Multi-channel Analysis of Surface Waves)이 Park et al. (1999), Xia et al.(1999), 정희욱(2000) 등에 의해 제시되었다. Xia et al.(2000)은 표면파 분산곡선을 역산하여 구한 횡파 속도구조와 시추공을 이용하여 구한 횡파 속도구조를 비교한 결과 약 9~15% 오차 내에서 속도구조가 일치함을 보였다.

1990년대에 들어와 표면파를 이용하려는 노력과 더불어 비고결 퇴적물의 횡파 속도 단면을 구하기 위하여 탄성과 콘 관입시험(SCPT; Seismic Cone Penetration Test)이 Tanaka et al.(1994)에 의해 개발되었다. 탄성과 콘 관입시험은 그 원리가 다운홀 탄성파탐사와 같이 매우 간단한 반면 시추공이 필요 없는 장점을 지니고 있어 토목 현장시험에 널리 활용되고 있으나, 암반이나 미고결 퇴적물 중에서도 자갈로 구성되어 있는 지반에 대해서는 적용할 수 없는 단점이 있다. Tanaka and Tanaka (1998)는 탄성과 콘 관입시험으로 얻은 전단 탄성계수가 기존의 콘 관입시험이나 수평 재하시험 등으로 얻은 탄성계수와 매우 높은 상관관계를 가지고 있음을 밝힌 바 있다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 건설현장에서는 지반의 횡파 단면을 얻기 위한 다양한 노력을 하고 있으나 아직 연구결과가 많이 축적되어 있지 않은 상태

이다. 본 연구에서는 미고결 퇴적물로 구성되어 있는 낙동강 델타지역을 대상으로 3가지 지구물리학적 탐사법을 이용하여 횡파 속도 단면을 구하고 이들을 시추 결과와 비교하고자 한다. 이를 통해서 미고결 퇴적물의 경계를 가장 잘 분간할 수 있는 방법을 찾아보고, 퇴적물 특성에 따른 횡파 속도 단면의 변화 양상을 고찰해 보고자 한다. 이러한 비교연구는 각 탐사 결과의 신뢰성과 해상도를 밝혀주고 탐사방법 및 자료처리에 관한 보다 좋은 방법을 찾는 데 많은 기초 자료를 제공해 줄 것으로 생각된다.

연구 방법

Fig. 1에 표시된 연구지역은 한반도에서 삼각주와 시추의 발달이 양호한 곳으로, 평균 60m 이상의 두꺼운 현생 퇴적층으로 이루어져 있다. 이 지역의 퇴적환경에 대해서는 이전부터 비교적 많은 연구가 수행되었으며, 이들 연구결과를 종합해 볼 때 이 지역의 퇴적환경은 충적세 이후의 해수면 변화와 밀접한 연관이 있는 것으로 알려져 있다(김석운과 하정수, 2001; 이유대 외, 1990; Lee, 1993). 대부분의 퇴적물은 낙동강에 의해 뜬짐, 도약 이동, 그리고 밀짐의 형태로 운반되었으며, 해침과 해퇴에 따른 퇴적상의 변화가 관찰되고 있다. 시추조사 결과에서도 퇴적층의 상부는 주로 실트질 모래와 점토질 모래로 구성되어 있고, 하부는 실트질 점토와 자갈질 모래로 구성되어 있음을 확인할 수 있었다.

이와 같이 낙동강 하구에 발달한 삼각주 지역의 미고결 퇴적물을 대상으로 다운홀 탄성파 탐사, MASW 및 SCPT를 수행하였다. 각 탐사방법에 따른 자료획득과 자료처리 과정은 다음과 같다.

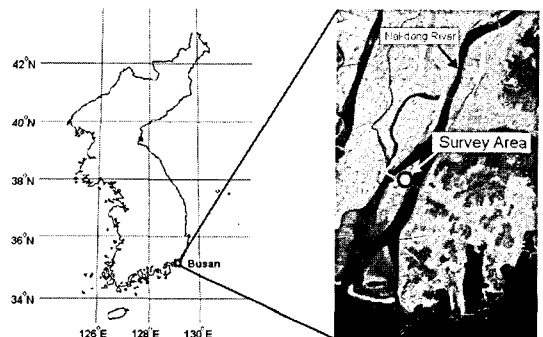


Fig. 1. The location map of the survey area.

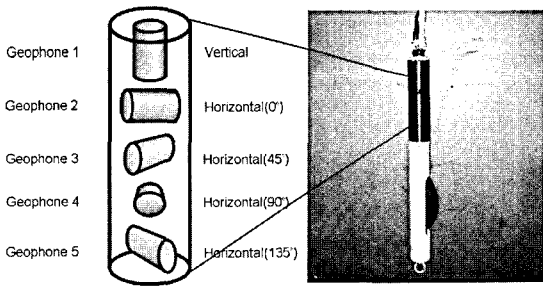


Fig. 2. The arrangement of 5 geophones (left) and external appearance of the borehole geophone (right).

다운홀 탄성과 탐사

다운홀 탄성과 탐사를 위하여 NX 크기(직경 76 mm)의 시추공을 굴착하였으며 PVC 파이프를 케이싱 처리하였다. 횡파 신호원은 양단에 철판을 부착한 목재 빔(L1800×W200×H200 mm)을 타격판으로 사용하였다. 수신되는 파형에서 횡파를 효과적으로 분간하기 위하여 타격판의 양단을 번갈아 타격하여 180°의 위상 차이를 보이는 bow-type의 신호가 수신되도록 하였다. 탄성과의 수신은 공벽에 밀착되는 5축 지오폰을 이용하였다. 5축 지오폰은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 1개의 수직성분과 4개의 수평성분을 감지할 수 있도록 설계되어 있어 타격방향과 지오폰 축 방향과의 차이를 최소화시킴으로써 3축 지오폰을 사용했을 경우보다 횡파의 주시를 정확하게 발체할 수 있는 장점을 지니고 있다(김진후와 김현도, 2002). 타격판과 시추공간의 거리는 2m로 하였으며, 깊이 16m부터 매 1m씩 지오폰을 이동시키면서 탄성과 자료를 획득하였다. 샘플링 간격은 0.1msec, 기록시간은 200 msec로 설정하였으며, 아날로그 필터는 사용하지 않았다.

횡파 단면을 구하기 위하여 우선 주시 발체 프로그램인 DownPro(Kim and Park, 2002)를 이용하였는데, 이는 다운홀 탄성과탐사에서 얻은 자료를 타격방향과 나란한 방향으로 축 변환하는 알고리즘을 이용하여 횡파 주시결정의 정확도를 높일 수 있는 장점이 있다. 탄성과 기록에서 횡파 주시 발체 후, 주시 토모그래피 역산을 수행하였다. Fig. 3은 다운홀 탄성과탐사에서 얻은 자료를 축 변환한 후 깊이에 따라 도시한 것이다. 각 깊이별 횡파의 주시를 검은색 실선으로 표시하였다.

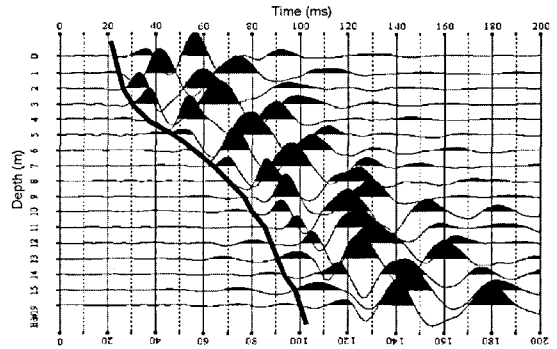


Fig. 3. Seismic record obtained by a down-hole seismic survey. The expected S-wave arrivals are connected by a black solid line.

표면파 탐사(MASW)

본 연구에서는 MASW 방식을 이용한 표면파 탐사가 수행되었으며, 이는 자료획득, 분산곡선 산출 및 분산곡선의 역산으로 이루어진다.

MASW의 신호원-수진기 배열과 자료 획득 방법은 공발점 모음 탄성과 탐사의 자료획득 방법과 동일하다. 그러나 표면파 탐사를 위한 자료획득 과정에서는 특히 수진기의 고유 주파수, 음원의 종류, 음원 오프셋 등의 인자 선택에 신중을 기할 필요가 있다. 표면파 분산곡선의 저주파 영역은 조사 심도와 직결되기 때문에 가능한 한 고유주파수가 낮은(10 Hz 이하) 수진기를 사용하는 것이 보통이다. 본 연구에서는 28 Hz의 고유주파수를 갖는 수진기를 사용하였는데, 이는 본 연구의 계획 조사심도가 낮을 뿐 아니라, 높은 고유주파수의 수진기를 이용한 표면파 탐사의 가능성을 타진해 보기 위함이다. 음원 오프셋은 walkaway 식으로 획득한 자료로부터 굴절파나 반사파의 영향이 최소화 되도록 결정하는데, 본 연구에서는 10 m 오프셋의 자료를 이용하여 분석하였다. 탄성과 음원으로는 무게 20 kg의 weight drop 형 현장 조립식 음원을 사용하여 가능한 한 낮은 주파수 영역의 탄성과가 많이 발생하도록 하였다. Fig. 4는 10 m 오프셋으로 얻은 탄성과 자료이며, Fig. 5는 Fig. 4의 탄성과 자료에 대한 진폭스펙트럼을 보여준다. 높은 고유주파수의 수진기를 사용한 관계로 10 Hz 이하의 신호는 거의 얻을 수 없었으나 10~60 Hz의 신호는 표면파 분석에 이용할 수 있을 것으로 보인다. MASW를 위한 자료취득 인자는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Data acquisition parameters used for MASW

Parameters	Values
Channels	12 ch.
Shot Offset	10 m
Geophone Spacing	0.5 m
Sampling Interval	0.25 msec
Recording Length	500 msec
Low Cut	4 Hz
High Cut	2,000 Hz

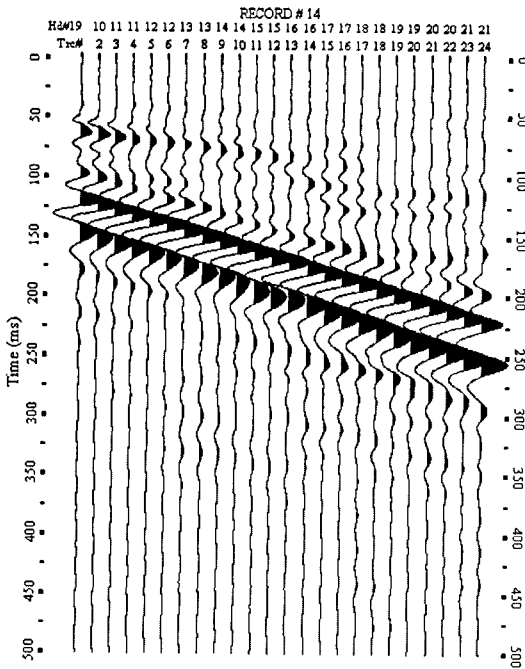


Fig. 4. Seismic records obtained for surface wave analysis. Offset is 10 m, and geophone spacing is 0.5 m.

탄성과 콘 관입시험(SCPT)

본 연구에서 사용한 탄성과 콘 관입시험기(seismic cone penetrometer)는 Tanaka et al.(1994)에 의해 개발된 것으로 관입시험기 하부에는 피에조콘 유니트와 1 m 간격으로 2개의 3축 지오폰이 설치되어 있다.

탄성과 콘 관입시험의 모식도는 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 탄성과 콘 관입시험기는, 주입기(thrust machine)에 의해 지반 내로 관입되는 콘의 선단 저항과 지반의 탄성과 속도를 동시에 측정할 수 있도록 구성되어 있다. 횡파 속도, V_s 는 지상에서 발생시킨 횡파를 오실로 스코프를 이용하여 샘플링 간격 0.05 msec로 측정 한 후, 두 파형의 주시 차를 이용하여 산출하였다. 두 지오폰 사이의 간격이 1 m이므로

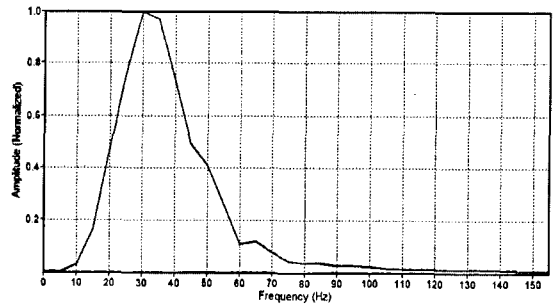


Fig. 5. Amplitude spectrum of the seismic records shown in Fig. 4.

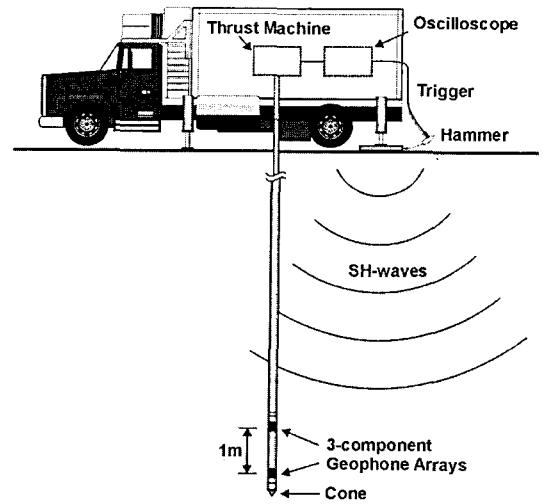


Fig. 6. A schematic diagram of the seismic cone penetration test (SCPT).

$$V_s = \frac{1}{t_2 - t_1} \tag{1}$$

이다. 여기서 t_1 및 t_2 는 신호원에서 상부 및 하부 지오폰까지의 주시이다. 횡파는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 철제 빔으로 제작된 타격판을 콘 주입기를 탑재한 차량의 무게로 지면 방향으로 누른 상태에서 해머로 타격판의 측면을 타격하여 발생시켰다. 한 위치에서의 측정이 끝나면 콘 관입 시험기를 지하로 추가 관입하여 다음 위치에서의 측정을 하게 되는데, 매 0.5 m마다 이러한 과정을 되풀이 하면서 횡파 속도 단면을 구하였다.

일반적으로 SCPT는 미고결 퇴적물로 구성되어 있는 현장의 동전단탄성계수, G_d 를 구하기 위하여 수행된다. 동전단탄성계수는

$$G_d = \rho V_s^2 \tag{2}$$

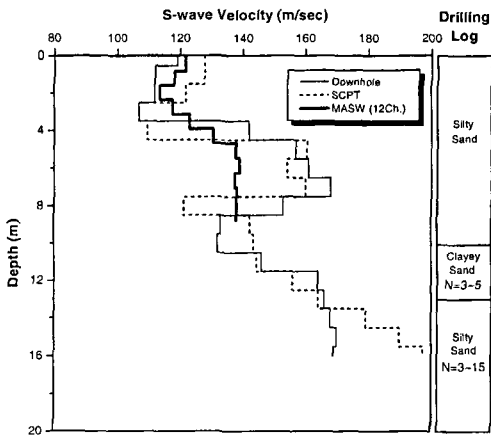


Fig. 7. Comparison of the S-wave profiles obtained by downhole seismic survey, MASW, and SCPT with a drilling log. The N-values on the drilling log are obtained by a Standard Penetration Test (SPT).

에 의해 구할 수 있으며, 여기서 ρ 는 흙의 밀도이다. V_s 의 단위를 [km/sec], ρ 의 단위를 [g/cm³]로 할 때 G_s 의 단위는 [GPa]이 된다.

결과 및 고찰

다운홀 탄성과 탐사, MASW 및 SCPT에 의해 얻어진 결과를 Fig. 7에 시추 주상도와 함께 도시하였다.

다운홀 탄성과 탐사에서 얻은 횡파 속도 단면을 살펴보면, 지표부근에 110~120 m/sec의 속도 층인 제1층이 나타나고 그 하부에 140~170 m/sec의 속도 층인 제2층이 약 5 m 두께로 나타난다. 제2층 하부에는 130~140 m/sec의 저속도층인 제3층이 약 3 m 두께로 나타나며, 저속도층 하부에서는 횡파 속도가 다시 170 m/sec 까지 서서히 증가하는 제4층이 나타난다. 이를 시추 주상도와 비교하여 보면 제1층과 제2층은 주로 실트질 모래로 구성되어 있으며, 제3층은 점토질 모래, 제4층은 실트질 모래로 구성되어 있음을 알 수 있다. 다운홀 탄성과 탐사결과 각 지층 경계의 심도는 시추 주상도상의 지층 경계 심도에 비해 약 1~1.5 m 정도 낮게 나오고 있으나, 제3층인 점토질 모래층의 두께는 두 결과에서 모두 3 m 정도로 같게 나오고 있다. 한편, 점토질 모래층에서 표준관 입시험을 통해 N=3~5값을 얻었는데, 이는 실트질 모래층에서의 N치인 8~15에 비하여 상대적으로 낮은 값을 보이고 있다. 이상의 결과로 볼 때, 제3층에 나

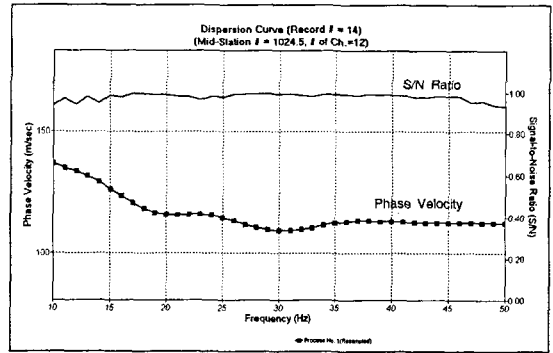


Fig. 8. Dispersion curve obtained by MASW survey with 12 channels of geophones.

타나는 저속도층은 실트질 모래층에 협재되어 있는 점토질 모래층에 기인한 것으로 보이며, 본 연구지역에 분포하고 있는 점토질 모래층은 실트질 모래층에 비해 강성이 떨어져 N치의 변화와도 잘 대비가 되는 것으로 판단된다. 저속도층이 포함되어 있는 지층의 다운홀 탄성과탐사 주시곡선의 특징은 기울기의 값이 큰 값에서 작은 값으로, 다시 큰 값으로 변하는 복잡한 양상을 띤다. 이 지역의 주시곡선(Fig. 3)에서도 이러한 복잡한 양상의 일부가 깊이 8 m 이하에서 관찰되고 있다.

MASW를 이용한 표면파 탐사자료 분석을 위하여 SURFSEIS 프로그램(Kansas Geological Survey, 2002)을 이용하여 분산곡선을 구하고 이의 역산을 수행하였다. 분산곡선을 구하기 위하여 각 주파수마다 위상속도 변화에 따른 다중채널 신호의 에너지 강도를 계산하여 표현하고, 여기서 최대 에너지를 갖는 속도를 위상 속도로 결정하는 방법을 사용하였다. 이렇게 구한 분산곡선 중에서 S/N 비가 80% 이상인 10~50 Hz 구간의 분산곡선을 역산에 이용하였다. 12 채널의 자료를 이용해 얻은 분산곡선은 Fig. 8에서 보는 바와 같으며, 위상속도는 50 Hz에서 113 m/sec의 속도가 30 Hz에서 109 m/sec로 다소 감소하다가 10 Hz에서 138 m/sec로 다시 증가하는 양상을 보인다. 깊이에 따른 S파 속도의 변화에 따라 위상속도는 10 Hz 이하에서 많은 변화가 있을 것으로 예상되나 본 연구에서는 높은 고유주파수를 갖는 지오폰을 사용한 관계로 10 Hz 이하의 낮은 주파수 영역에서는 신뢰성 높은 분산곡선은 얻을 수 없었다. 표면파 탐사에서 얻은 횡파 속도 단면을 살펴보면, 지표부근에 약 120 m/sec의 속도 층인 제1층이 나타나고 그 하

부에 100~110 m/sec의 속도 층인 제2층이 약 2.4 m 두께로 나타난다. 제2층 하부에는 120~140 m/sec의 제3층이 나타난다. 이를 시추 주상도와 비교하여 보면 3개의 층은 모두 실트질 모래로 구성되어 있음을 알 수 있으며, 이를 다운홀 탄성파 탐사결과와 비교하여 보면 제1층 및 제2층은 다운홀 탄성파 탐사결과와 제1층과 대비되고, 제3층은 다운홀 탄성파 탐사결과와 제2층과 대비된다. 제3층의 횡파 속도가 다운홀 탄성파 탐사결과나 SCPT 탐사 결과에 비해 약 20~30 m/sec 정도 작게 나타나고 있는데, 이는 다운홀 탄성파 탐사나 SCPT에서의 주시결정 오차, MASW에서의 분산곡선 산출 및 역산 알고리즘의 다양성, 그리고 고주파수의 고유 진동수를 갖는 지오폰을 사용하여 결정된 반무한 공간의 횡파 속도의 정확성 등 여러 가지 요인을 고려해 볼 수 있으나, 이에 대한 원인을 정확히 분석하기 위해서는 더 많은 자료 수집과 분석이 필요한 실정이다.

SCPT는 두 쌍의 지오폰을 이용하여 S파의 구간속도를 산출하기 때문에 역산과정이 필요치 않으며, 따라서 주시 결정이 정확하다면 유일 해를 얻을 수 있는 장점을 지니고 있다. 그러나 이 방법은 콘 관입에 의존하기 때문에 비고결 퇴적층에서만 사용 가능한 단점을 지니고 있다. SCPT에서 얻은 횡파 속도 단면을 살펴보면, 지표부근에 110~130 m/sec의 속도 층인 제1층이 나타나고 그 하부에 약 160 m/sec의 속도 층인 제2층이 약 3 m 두께로 나타난다. 제2층 하부에는 120~140 m/sec의 저속도층인 제3층이 약 4 m 두께로 나타나며, 저속도층 하부에서는 횡파 속도가 다시 160~200 m/sec까지 서서히 증가하는 제4층이 나타난다. 이를 시추 주상도와 비교하여 보면 제1층과 제2층은 주로 실트질 모래로 구성되어 있으며, 제3층은 점토질 모래, 제4층은 실트질 모래로 구성되어 있는 것으로 보이며, 이는 다운홀 탄성파 탐사결과와도 잘 일치하고 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 SCPT에서 얻은 횡파 속도 단면이 다운홀 탄성파 탐사나 MASW의 횡파 속도 단면보다 속도 변화가 크게 나타나고 있는데, 이는 SCPT가 역산과정을 거치지 않기 때문에 퇴적물상의 변화에 더욱 민감하게 반응하는 것으로 보인다.

결 론

본 연구에서는 미고결 퇴적물로 구성되어 있는 낙동

강 델타지역을 대상으로 다운홀 탄성파 탐사, MASW, SCPT 등 세 가지 지구물리학적 탐사법을 이용하여 횡파 속도 단면을 구하고, 이들을 시추 주상도와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 다운홀 탐사에서 5 성분 지오폰을 사용함으로써 매질의 운동 방향과 지오폰의 운동 방향의 차이를 최소화 시킬 수 있었으며, 축 변환 알고리즘을 이용하여 횡파 주시결정의 정확도를 높일 수 있었다. 깊이 16 m까지 실시한 다운홀 탐사 결과 지층은 4개의 층으로 구분되어 있으며, 제2층은 실트질 모래층으로 횡파 속도 범위는 약 140~170 m/sec이다. 제3층은 점토질 모래층으로 횡파 속도는 약 130~140 m/sec 이고 두께는 약 3 m에 달하고 있다. 점토질 모래층 하부에 다시 실트질 모래층이 분포하고 있으며 횡파 속도는 다시 증가하고 있다. 다운홀 탐사를 통하여 주위 지층에 비해 상대적으로 저속도층인 점토질 실트층이 협제되어 있음을 알 수 있었으며, 지층 내 점토의 분포가 횡파 속도를 저하시키고, 결국 지반의 강성을 저하시키는 요인으로 작용하고 있는 것으로 판단된다.

둘째, 높은 고유주파수(28 Hz)를 갖는 지오폰과 저주파를 발생시킬 수 있는 중추식 음원(20 kg)을 이용하여 표면파 탐사를 수행한 결과 10~50 Hz 대역의 분산곡선을 얻을 수 있었으며, 역산을 통하여 약 5 m 깊이까지 횡파 속도 단면을 얻을 수 있었다. 지층의 매질에 따라 다소 차이는 있을 것으로 예상되나 약 5 m 이내의 얇은 지층에 대한 표면파 탐사에서는 높은 고유주파수를 갖는 지오폰의 사용도 가능할 것으로 보인다.

셋째, SCPT를 이용하여 얻은 미고결 퇴적물의 횡파 속도 단면으로부터 지층을 4개의 층으로 구분할 수 있었으며, 다운홀 탄성파 탐사결과와 마찬가지로 점토질 모래층에서 횡파 속도가 감소하는 경향을 보이고 있다. SCPT는 역산 과정을 거치지 않기 때문에 유일 해를 얻을 수 있으며, 퇴적물상의 변화에도 가장 민감하게 반응하는 것으로 보인다. 그러나 자갈질 퇴적물이나 암반층에는 사용할 수 없는 단점이 있다.

넷째, 본 연구를 통하여 다운홀 탄성파 탐사, MASW 및 SCPT 등은 저속도층이 협제되어 있는 지층에서 횡파 속도 단면을 얻는데 효과적으로 사용될 수 있음을 알았다. 또한 지층 내 점토의 함유가 횡파 속도에 어느 정도 영향을 미치는 것으로 판단되는데, 이에 대한 효과를 정확히 분석하기 위해서는 더 많

은 자료 수집과 분석이 필요한 실정이다.

사 사

이 논문은 2001학년도 동아대학교 학술연구조성비(국외연구과건)에 의하여 연구되었습니다. 또한 이 논문을 성의를 다하여 심사해 주신 세분의 심사위원께도 심심한 감사를 표합니다.

참고 문헌

- 김석윤, 하정수, 2001, 낙동강 하구와 주변 연안역의 표층 퇴적상 및 퇴적환경 변화. 한국수산학회지, 34, 268-278.
- 김진후, 김현도, 2002, 5성분 지오폰의 다운홀 탄성파탐사 적용 가능성에 관한 연구. 연구논문집, 동아대학교 해양자원연구소, 14, 53-59.
- 이유대, 김창원, 김동윤, 박병남, 이기종, 1990, 낙동강 하구역의 해양환경 연구: 퇴적작용 및 중금속 분포. 한국물환경학회지, 6, 1-7.
- 정희옥, 2000, 표면파 역산을 이용한 2차원 S파 속도구조에 대한 연구. 한국지구과학회지, 21, 675-682.
- Chang, H.S., Lim, H.R., and Hong, J.H., 1999, Borehole seismics: Review and its application to civil engineering. In symposium on the application of geophysical technologies to engineering problems, The 2nd Conference of Korean Society of Exploration Geophysicists, p. 176-201.
- Joh, S.H. and Stokoe, K.H., II, 1997, Impulse Response Filtration Technique for the determination of phase velocities from SASW measurements. Journal of the Korean Geotechnical Society, 13, 111-121.
- Kansas Geological Survey, 2002, SURFSEIS Ver. 1.20.
- Kim, J.H. and Park, C.B., 2002, Processing of downhole S-wave seismic survey data by considering direction of polarization. Journal of the Korean Geophysical Society, 5, 321-328.
- Lee, S.Y., Kim, K.Y., and Kim, H.J., 2000, Seismic studies on ground motion using the multicomponent complex trace analysis method. Journal of the Korean Geophysical Society, 3, 37-48.
- Lee, Y.D., 1993, A study on the characteristics of submarine geology in Pusan Bay: Sedimentation processes in the Nakdong River Estuary, Korea. Journal of the Korean Earth Science Society, 14, 67-74.
- Park, C.B., Miller, R., and Xia, J., 1999, Multimodal analysis of high frequency surface waves. 1999 Conference Proceedings, The Annual Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society, 115-121.
- Stokoe, K.H. II, Wright, S.G., Bay, J.A., and Rosset, J.M., 1994, Characterization of geotechnical sites by SASW method. in Geophysical characterization of sites, ISSMFE Technical committee #10 edited by R. D. Woods, Oxford publishers, New Delhi.
- Tanaka, H., Tanaka, M., and Iguchi, H., 1994, Shear modulus of soft clay measured by various kinds of test. Prefailure Deformation of Geomaterials (Shibuya, S. *et al.* eds.), Balkema, 1, 235-240.
- Tanaka, H. and Tanaka, M., 1998, Characterization of sandy soils using CPT and DMT, Soils and Foundations. Japanese Geotechnical Society, 38, 55-65.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., 1999, Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. Geophysics, 64, 691-700.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Hunter, J.A., and Harris, J.B., 2000, Comparing shear wave velocity profiles from MASW with borehole measurements in unconsolidated sediments, Fraser River Delta, B.C., Canada. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 5, 1-13.

2004년 1월 28일 원고 접수
2004년 3월 19일 수정원고 접수
2004년 3월 20일 원고 채택