진원과 수진기별 천부 고해상도 탄성과 자료 비교 연구

김형수¹ · 김영석^{2,*}

¹중원대학교 에너지자원공학부, 367-805, 충청북도 괴산군 문무로 85

²공주대학교 지질환경과학과, 314-701, 충청남도 공주시 공주대학로 56

A Comparison Study on Near-surface High-resolution Seismic Data by Different Source and Geophone Types

Hyoung-Soo Kim¹ and Youngseuk Keehm^{2,*}

¹Energy Resources Engineering, Jungwon University, Chungbuk 367-805, Korea

²Kongju National University, Department of Geoenvironmental Sciences, Chungnam 314-701, Korea

Abstract: Choosing a seismic source and geophone type including a coupling method can be the most important factor in shallow seismic surveys. We studied the characteristics of seismic signals by analyzing 6 different seismic data sets that collected from several sources and geophone conditions. Geophones attached to weight plate (1.8 kg) can be easily and economically installed on the paved road where geophones with spikes would cause the coupling problem. In addition, experiments in this study revealed that a small handy hammer can be used as a seismic source by striking the paved road to generate the seismic signals within 200 ms two-way travel time. Attaching weight plates to geophones may change the geophone response curve which generally depends on the geophone mass, but the change seems not to give significant differences in the first arrival of refracted wave and in the pattern of reflection events. Consequently, using weight plates on paved roads can be an efficient and cost-saving method in the near-surface high-resolution seismic surveys.

Keywords: high-resolution seismic survey, seismic source, geophones, weight plate, paved roads

요 약: 다양한 지표 상태, 수진기 고유 주파수, 진원 발생 방법 등을 달리하는 6종의 탄성과 자료 획득을 통해 각각의 조사 방식별 기록되는 탄성과 신호의 특성을 비교 연구하였다. 특히 포장도로와 같이 일반적인 쇠침 활용 수진기의 설치가 곤란한 조사 지역에 대하여 1.8kg의 원형 무게 판을 수진기에 부착하여 포장도로 위에 설치하는 방식은 조사 편이성은 물론 조사 시간을 단축할 수 있는 방법이 될 수 있음을 확인하였다. 또한 포장도로에서는, 진원을 1kg 내외의 소형 망치 가격으로 발생시켜도 왕복 주시 시간 200ms 혹은 그 이상의 탄성과 신호를 감지하는데 큰 문제가 없는 것으로 나타났다. 수진기에 무게 판을 부착하는 것은 자체 무게에 종속성이 있는 수진기 고유 응답 특성을 변화시킬 수 있을 것으로 추정되나, 실제 굴절파의 도달 시간을 변화시키거나 반사와 신호의 양상을 변화시켜 굴절파 방식 해석 결과 및 반사파 해석 단면을 실질적으로는 크게 왜곡시키지는 않는 것으로 나타났다. 따라서 천부 고해상도 탄성과 조사에 있어서 무게 판 부착 수진기를 활용한 포장도로에서의 탄성과 조사는 시간과 경비를 절약할 수 있는 방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 고해상도 탄성과 조사, 진원, 수진기, 무게 판, 포장 도로

서 론

최근 들어 응용 지질학, 수리 지질학, 환경 지질 및 토목 지질 등에 천부 고해상도 탄성과 조사(near-

surface high-resolution seismic survey)가 널리 활용되고 있다. 천부 고해상도 탄성과 조사의 경우, 적절한 수진기(geophone), 진원(source) 등의 선정은 원하는 지하 정보를 획득하기 위한 매우 중요한 요소이다(Knapp and Steeples, 1986). 이러한 조사 장비의 제원 변화에 따른 탄성과 신호의 특성을 파악하는 일은 자료처리 및 해석에 앞서 가장 주의 깊게 검토

*Corresponding author: keehm@kongju.ac.kr
Tel: +82-41-850-8517
Fax: +82-41-850-8953

Fig. 1. Site views of the survey areas. (a) Site 1: Sacheon City, Chukdong-Myeon. (b) Site 2: Geumsan-Gun, Boksu-Myeon.

되어야 할 부분이며, 특히 현장 여건에 효율적인 조사 장비의 개발은 현장 지구물리학의 중요한 과제라고 할 수 있다.

해외의 경우 많은 연구에서 수진기와 지표의 접촉 상태(Drijkoningen, 2000), 수진기에 가해진 무게(Spikes et al., 2001), 외부 틀에 연속적으로 고정된 수진기 설치 방식(Steeple et al., 1999; Schmeissner et al., 2001), 진원 발생 방법(Keiswetter and Steeples, 1995; Miller et al., 1986; Miller et al., 1992; Miller et al., 1994) 등 다양한 수진기, 진원 조건 변화에 따른 탄성과 신호 변화와 그 특성을 고찰하고 있다.

본 연구의 기본적인 목적은, 조사 대상 지역이 일반적인 쇠침(spike) 방식 지표 접촉이 곤란한 포장재로 덮여 있는 경우에 활용 할 수 있는 원형의 무게판(weight plate)을 제작하여 현장에 적용해 봄으로써, 무게 판 부착 수진기의 현장 자료 획득 효율성을 검증하고자 하였다. 또한 수진기의 고유 주파수 변화 및 진원으로 활용되는 망치의 규모 변화가 탄성과 신호에 미치는 영향을 알아보기 위한 부수적인 목적도 함께 가지고 있다.

연구 지역 개요

현장 자료 취득은 2개 시범 연구 지역에서 수행되었다. 1차 조사는 경상남도 사천시 축동면 가산리에서 수행되었으며, 탄성과 조사 측선 현장의 지표 조건은 시멘트로 포장된 농로였다(Fig. 1a). 2차 조사는 충청남도 금산군 복수면 목소리 지역으로 현장의 지

표 조건은 2차선 포장도로 및 그에 인접한 경작을 하지 않고 있던 밭이었다(Fig. 1b).

1차 조사 지역인 사천시 축동면의 지질은 하부 백악기 경상계 진주층에 해당되는 것으로 알려져 있으며, 조사 현장에서 서측으로 약 160 m 떨어진, 강변의 노두에서는 주로 사암, 연흔과 생물 흔적이 남아 있는 실트암 등이 관찰된다. 대부분 이들 지층은 대체로 평행한 형태를 보이며 간혹 탄산염 지층이 협재되어 나타난다. 조사 측선의 중앙부에서 수행된 시추 자료는 근접한 노두에서 나타나는 암질과 유사한 암질의 시료를 보여주었으나 노두에서 관찰되는 것과는 달리 거의 풍화를 받지 않은 상태를 나타냈다. 시추 조사 결과, 지표 토양층은 약 2 m 전후이며, 그 하부는 풍화된 퇴적암이 나타났다. 시추공에서 수행된 P파 및 S파 속도 검층 자료는 지표 하부 8 m부터 65 m까지 탄성과 P파의 속도는 4,500 m/sec 내외, S파의 속도는 2,000 m/sec 내외임을 보여주었다. 이러한 탄성과 속도는 조사 지점의 기반암이 대체로 높은 강도를 갖는 신선한 퇴적암임을 지시한다. 또한 채취된 시추 코어 자료는 사암과 실트암, 혹은 이암의 경계가 점이적인 형태를 가지고 있음을 보여주었다. 이러한 지질 구조는 사암과 실트암 혹은 이암의 경계에서 뚜렷한 반사와 신호가 발생하기 어려운 조건임을 시사하였다.

2차 조사 지역인 금산군 복수면 일대의 지질은 시대이상 옥천층군 변성퇴적암류에 해당되는 것으로 보고되어 있다. 특히 탄성과 자료 취득 지점인 목소리는 마전리층에 해당되는 지역이며, 마전리층은 주로 석회암, 결정질 석회암, 석회규산염암 등으로 구성되

Fig. 2. Schematic diagrams of the weight plate and geophone connections.

는 것으로 알려져 있다(이상만 외, 1980; 홍승호와 최위찬, 1978). 조사 축선의 동측 고개 부근에서는 채석 작업이 수행되고 있었으며, 이 지점에서 관찰된 지질은 주로 석회암 혹은 석회규산염암인 것으로 육안 관찰되었다. 탄성과 조사 축선은 전술한 바와 같이 일반 포장 도로 및 인접한 밭 지역에 운영되었으며, 조사 축선 하부의 기반암은 지표로부터 5 m 내의 깊이에 존재할 것으로 판단되었다.

현장 자료 취득 장비 제원 및 조사 방법

현장 자료 취득 장비 제원

현장 자료 획득 장치는 Geometrics사의 Geode 장치가 활용되었다. 본 장치의 동적 영역(dynamic range)은 144 dB로 기록 가능 최소 신호와 최대 신호의 비율이 1천 6백만 이상으로 현장 지층 조건, 기하학적 퍼짐 거리 등을 고려하지 않아도 대부분의 신호를 기록하는 데 문제가 없다. 따라서 현장 자료 취득시 특별한 동적 영역 조정 등은 수행되지 않았으며, 수신기와 진원 특성을 특별한 왜곡 없이 관찰하기 위하여 특별한 필터 등도 적용하지 않은 상태로 자료 획득 장치가 운영되었다.

탄성과 진원 발생은 기본적으로 4.7 kg 공사용 망치(sledge hammer)를 20 cm×20 cm 넓이, 2 cm 두께

의 알루미늄판을 수직 가격하는 형식과 1 kg 내외의 손 망치(handy hammer)를 직접 포장도로에 가격하는 형식으로 수행되었다. 이러한 망치를 사용한 진원 발생은 경제적인 측면뿐만 아니라 에너지 발생 측면에 있어서도 매우 우수한 방법으로 알려져 있다(Miller et al., 1986).

본 연구에서 사용된 수신 장치는 육상용 탄성과 속도 수신기(geophone, velocity or particle motion geophone)이다. 수신기의 고유주파수별 특성 비교를 위해 14 Hz 수신기와 100 Hz 수신기가 활용되었다. 보통 고유 주파수 이상의 신호는 주파수에 독립적으로 수신기에 반응을 보이므로 14 Hz 수신기의 경우도 100 Hz 이상의 신호를 탐지할 수는 있지만 100 Hz 수신기에 비해 상대적으로 저주파 신호에 민감하여 고주파 성분에 신호가 상대적으로 집중되어 있는 경우는 100 Hz 수신기의 사용이 추천된다.

한편, 적절한 진원 발생과 고유주파수의 수신기가 선정된 경우라도 현장에서 지표면과 수신기를 최대한 양호하게 접촉(coupling)시키지 못하였다면 지표면의 운동이 왜곡되어 수신기에 전해지므로 양질의 자료를 기대하기 어렵다. 본 연구에서는 특히 이러한 문제를 극복하고 포장도로 등과 같이 쇠침 방식 수신기의 설치가 어려운 지역에서 용이하게 자료를 획득하기 위한 방안으로 원형 무게 판을 별도 제작하여 조사를 수행하였다. 원형 무게 판 1개의 질량은 1.8 kg,

Table 1. Acquisition parameters and survey conditions of the six surveys

Acquisition Parameters\Survey Name	survey 1-1	survey 1-2	survey 1-3	survey 2-1	survey 2-2	survey 2-3
Natural frequency of geophone (unit: Hz)	14	100	100	100	14	14
Coupling type (Weight plate: W, Spike: S)	W	W	W	W	W	S
Surface conditions (Cement pavement: C, Asphalt pavement: A, Soil farm: S)	C	C	C	A	A	S
Source hammer type (Sledge: S, Handy: H)	H	H	S	H	H	S
Near offset (unit: m)	4	4	4	14	16	18
Number of channels (unit: ea.)	24	24	24	36	48	48
Interval of channel (unit: m)	0.4	0.4	0.4	0.8	0.8	1
Time sampling interval (unit: msec)	0.03125	0.03125	0.03125	0.125	0.125	0.125
Total record time (unit: msec)	300	300	150	600	600	600

직경은 10 cm, 두께는 3 cm로 양면에 각각 수나사와 암나사 형태를 만들어 쇠침을 제거한 수진기가 원형 무게 판에 부착될 수 있게 제작되었다. 또한 필요시 수진기가 부착된 원형 무게 판의 반대 면에 쇠침을 연결하여 무게 판 자중에 의한 지표 접촉과 쇠침에 의한 지표 접촉 효과를 동시에 활용할 수 있게 고안, 제작되었다(Fig. 2). 이러한 방식은 기존의 단순한 원형 무게 판 방식에 비해 보다 효율적인 지표면 접촉을 제공할 것으로 판단된다.

현장 조사 방법

탄성과 현장 조사는 기본적으로 반사법 탄성과 탐사에서 많이 활용되는 끝단 가격 전개 밀기(end-on shooting push the spreading) 방식으로 수행되었다. 이러한 기본 반사법 취득 방식은 일차적으로 탄성과 조사시 발생하는 반사파, 굴절파, 표면파, 공기파 등 대부분의 탄성과 신호를 모두 기록할 수 있어 탄성과 신호 특성에 가장 적합하며, 일련의 자료 처리 과정을 거쳐, 축선의 반사파 단면을 생성할 수 있는 장점도 있다. 한편, 적절한 최소 진원-수진기 이격 거리(near offset)와 수진기 간격(interval of geophone) 등을 결정하기 위하여 본격적인 조사에 선행하여 간단한 몇 차례의 워커웨이(walk-away) 시험 조사가 수행되었다.

사천시 축동면에서 수행된 1차 조사의 경우 3가지 방식으로 동일한 축선에서 탄성과 자료가 취합되었다. 1차 조사의 첫 번째 방식은 14 Hz 수진기를 무게 판에 부착하여 포장 도로에 설치하고, 소형 손 망치를 포장 도로에 직접 가격하여 진원을 발생시켰다("survey 1-1"로 명명). 두 번째 방식은 100 Hz 수진기를 무게 판에 부착하여 포장 도로에 설치하고, 소형 손 망치를 이용해 진원을 발생시킨 방식이며("survey 1-2"로 명명), 세 번째 방식은 두 번째 방식

과 수진기 설치 방식은 동일하지만 진원을 공사용 망치로 포장 도로 위의 알루미늄 판을 가격하여 발생시켰다("survey 1-3"로 명명).

금산군 복수면에서 수행된 2차 조사의 경우도 3가지 방식으로 탄성과 자료가 취합되었으나, 첫 번째 및 두 번째 방식은 포장 도로 위의 동일 축선에서 수행된 반면 세 번째 방식은 포장 도로 위의 축선에서 북측으로 약 4 m 정도 평행하게 이동한, 발 지역에 설정된 축선에서 탄성과 자료가 취합되었다. 첫 번째 방식 조사는 100 Hz 수진기를 무게 판에 부착하여 포장 도로에 설치하고, 소형 손 망치를 포장 도로에 직접 가격하여 진원을 발생시켰다("survey 2-1"로 명명). 두 번째 방식은 14 Hz 수진기를 무게 판에 부착하여 포장 도로에 설치하고, 소형 손 망치로 첫 번째 방식과 동일하게 진원을 발생시킨 방식이다("survey 2-2"로 명명). 세 번째 방식은 14 Hz 수진기를 쇠침을 이용하여 발 표면에 접촉 시키고, 진원을 공사용 망치로 발 위의 알루미늄 판을 가격하여 발생시켰다("survey 2-3"로 명명).

Table 1은 이들 조사 방식의 수진기, 진원 방식 및 기타 주요 자료 획득 변수인 최소 이격거리, 사용된 채널 수(number of channels), 수진기 간격, 기록 시간 간격(time sampling interval), 총 기록 시간(total record time) 등을 나타내고 있다.

취득 탄성과 자료 주파수 특성 비교

1차, 2차 조사를 통해 총 6가지 방식의 탄성과 자료가 취득되었다. 개별 조사의 탄성과 자료들은 전술한 바와 같이 진원, 수진기, 지표 접촉 방식, 지표 조건 등에 따라 다양한 방식으로 취득된 것이며, 이들 취득 조건에 따른 탄성과 신호들의 특성이 다음과 같이 비교되었다.

Fig. 3. Raw seismic shot gather (source shot position=40 m) data from Site 1. (a) Survey 1-1, (b) Survey 1-2, and (c) Survey 1-3.

1차 현장 조사 공통 진원 모음(common shot gather) 특성 비교

Fig. 3은 1차 조사 지역에서 취득된 현장 원시(raw) 공통 진원(진원 위치: 40 m 지점) 모음을 보여준다. 3가지 방식 모두 무게 판을 설치한 수신기에서 획득된 자료로 특별한 이득 조절 등이 수행되지 않은 상태에서는 왕복 주시 시간(two way travel time) 20 ms 내에 도달하는 초반 탄성과 자료들과 진폭은 크지 않지만 약 30 ms의 주기를 갖는 표면파가 관찰된다. 또한 상대적으로 14 Hz 수신기를 사용한 survey 1-1의 공통 진원 모음 탄성과 신호는 진원과 수신기의 거리가 멀어질수록 뚜렷하게 그 진폭이 줄어드는 현상이 관찰된다.

Fig. 4는 survey 1-1과 survey 1-2의 공통 진원 모음 탄성과 신호 중, 2번 채널 수신기(이격 거리: 4.4 m)와 23번 채널 수신기(이격 거리: 12.8 m)의 주파수 분석 결과를 보여준다. survey 1-1과 survey 1-2는 사용된 수신기의 고유 주파수만이 차이를 보일 뿐 모든 조건이 거의 같은 경우에 해당된다. 주파수 분석 결과에서 볼 수 있듯이 100 Hz 수신기를 사용한 survey 1-2의 자료가 상대적으로 다소 큰 진폭의 탄성과 신호를 보여주고 있음을 알 수 있으나, 14 Hz 수신기를 사용한 survey 1-1 자료에도 필요한 신호들은 미약하지만 대부분 기록되어 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 survey 1-1, 1-2 및 1-3 공통 진원 모음 원시 탄성과 신호의 전체 채널에 대한 주파수 분석의 상대 진폭을 보여준다. 현장 원시 자료에 대한 주파

Fig. 4. Frequency spectra of (a) Survey 1-1 and (b) Survey 1-2 using selected 2 traces (offset=4.4 m and 12.8 m) from raw shot gather (source shot position=40 m) data.

수 분석 결과, 특이한 사항은 일반적인 토양에 쇠침 방식으로 수신기를 설치하고 공사용 망치로 알루미늄 판을 가격하는 경우에 비해 현저하게 높은 주파수 신호가 나타나는 점이다. 이러한 현상은 약 30 cm 내외의 시멘트 포장층, 무게 판 그리고 손 망치를 이용한 포장 도로 직접 가격 등이 모두 높은 주파수 신호를 발생, 기록하는 요인으로 작용한 것으로 사료된다. 특히 Fig. 5의 survey 1-3 주파수 분석 자료에는

Fig. 5. Frequency spectra of (a) Survey 1-1 and (b) Survey 1-2 from all traces of the raw shot gather (source shot position=40 m) data.

50, 150 및 350 Hz에 상대적으로 큰 진폭의 신호가 나타남이 관찰되며, 이들 신호는 각각 표면파, 굴절 혹은 반사파 및 음향 연관파(air coupled wave) 등으로 추정되며, 1200 Hz의 고주파 신호는 알루미늄판이 가격과 함께 텅진 후 시멘트 포장 도로에 다시 떨어지면서 내는 소음과 연관될 가능성이 있으나 분명하지 않다.

공통 진원 모음 현장 원시 자료에 자동 이득 조절(시간창(time window) 10 ms 적용)을 처리를 수행한 결과는 Fig. 6에 주어져 있으며, 자동 이득 조절 결과에서 볼 수 있듯이 survey 1-1의 원시 자료에서 부각되지 않던 신호들이 survey 1-2의 결과와 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 왕복 주시 시간 50 ms 하부의 신호는 뚜렷한 표면파의 간섭을 받고 있는 것으로 판단되며, 특히 14 Hz 수진기(survey 1-1)와 공사용 망치 진원(survey 1-3)을 활용한 경우 이러한 현상이 분명하게 나타난다. Fig. 7은 survey 1-1, 1-2 및 1-3 공통 진원 모음 원시 탄성과 신호에 자동 이득 조절이 적용된 후의 탄성과 신호의 전체 채널에 대한 주파수 분석의 상대 진폭을 보여준다. 자동 이득 조절이 적용되기 전 주파수 분석 결과에 비해 저주파 신호들이 강조되는 현상이 뚜렷하게 관찰되며, 이는 자동 이득 조절에 의해 상대적으로 표면파 신호가 강조되어 나타나는 현상으로 판단된다.

2차 현장 조사 공통 진원 모음 특성 비교

Fig. 8은 2차 조사 지역에서 취득된 3가지 방식의 현장 원시 공통 진원 모음 탄성과 신호를 보여준다. 진원의 위치는 survey 2-1과 2-3의 경우, 기준점으로부터 50 m 지점이며, survey 2-2의 경우는 50.4 m에 해당된다. 전술한 바와 같이 survey 2-1 및 2-2는 무게 판을 부착한 수진기를 활용해 아스팔트 포장 도로 위에서 자료를 획득하였으며, survey 2-3은 쇠침

Fig. 6. Automatically-gained (time window=10 ms) shot gather (source shot position=40 m) data from Site 1. (a) Survey 1-1, (b) Survey 1-2, and (c) survey 1-3.

Fig. 7. Frequency spectrums of (a) Survey 1-1 and (b) Survey 1-2 from all traces of the automatically-gained shot gather (source shot position=40 m) data.

Fig. 8. Raw seismic shot gather data from Site 2. (a) Survey 2-1, (b) Survey 2-2, and (c) Survey 2-3.

방식으로 지표 토양(밭)에 수진기를 접촉시켜 자료를 획득하였다. 일차적인 주파수 분석은 공통 진원 모음 중 2개의 채널을 선별하여 수행되었으며, 이러한 주파수 분석 결과는 Fig. 9에 주어져 있다. 또한 전체 채널에 대한 주파수 분석 결과는 Fig. 10에 보여진다. Fig. 9의 주파수 결과에서 알 수 있듯이 이격 거리가 멀어질수록 진폭이 줄어드는 현상과 상대적으로 저주파 신호가 나타나는 일반적인 탄성파 신호 전달 특성이 관찰된다. 또한 Fig. 10에 주어진, 전체 채널에 대한 주파수 분석에서는 사용된 진원에 따라 뚜렷한 진폭 크기 변화와 수진기 고유 주파수에 따른

획득된 자료의 주파수 분포 특성이 잘 표현되고 있다.

주파수 분석 결과에서 볼 수 있듯이 1차 조사 지역에 비해 원시 자료의 주파수 대역이 저주파인 것을 알 수 있으며, 주로 수진기의 고유 주파수 영역에서 뚜렷한 신호를 갖는 현상이 관찰된다. 1차 조사 지역에 비해 상대적으로 낮은 신호를 갖는 원인은 기본적으로 최소 이격 거리가 2차 조사의 경우 1차 조사와 비교하여 약 4배 이상으로 고주파 영역의 신호가 기하학적 전달 과정에서 많이 감쇄되었을 가능성이 있으며, 또한 아스팔트와 콘크리트의 재료적 특성 및 시멘트 농도와 아스팔트 일반 도로의 시공 방

Fig. 9. Frequency spectrums of (a) Survey 2-1, (b) Survey 2-2 and (c) Survey 2-3 using selected 2 traces from the raw shot gather data.

식 차이 등에서 기인한 것으로 평가된다. 또한 상대적으로 survey 2-3의 주 신호 대역이 가장 낮은 주파수 범위를 보이고 있음을 알 수 있는데, 이는 활용된 진원의 크기와 수진기가 설치된 지표 조건의 차이(포장도로와 밭에서 연유하는 것으로 판단된다. 그러나 공사용 망치를 활용한 survey 2-3은 예상대로 가장 큰 에너지가 수진기로 전달된 현상을 관찰할 수 있다.

Fig. 11은, Fig. 8의 현장 원시 탄성과 자료에 대한 자동 이득 조절(시간창 10 ms)한 결과를 보여주며, 이 자료에 대한 전체 채널의 주파수 분석 결과는 Fig. 12에 주어져 있다. 자동 이득 조절을 수행한 자료는 굴절과 신호와 반사와 신호를 시각적으로 쉽게 구분할 수 있으나, 상대적으로 표면과 신호가 가장 크게 부각되어 전반적으로 저주파 영역으로 신호들이 이동한 형태를 보여준다. 또한 기본적으로 survey 2-1의 경우 100 Hz 수진기를 활용하여 상대적으로 다른 자료와 비교할 때 고주파 성분이 다소 크게 나타

Fig. 10. Frequency spectrums of (a) Survey 2-1, (b) Survey 2-2 and (c) Survey 2-3 from all traces of the raw shot gather data.

나는 일반적 현상이 나타난다. 한편 Fig. 11a의 survey 2-1 탄성과 자료에서 볼 수 있는 역 산란(back scattering) 현상은 차량 통과 등에 의한 잡음인 것으로 추정된다.

주파수 특성 분석 결과

취득 탄성과 자료의 분석을 통해 포장 도로에서 손 망치와 무게 판 부착 수진기로 충분히 고해상도 탄성과 자료를 효과적으로 취득할 수 있다는 것이 확인되었다. 그러나 시멘트 농로 포장 도로의 경우, 매우 높은 고주파 신호가 함께 기록되는 문제가 나타나 현장에서 일정 주파수 이하만 선별적으로 필터링하여 기록할 필요성도 있는 것으로 나타났다.

수진기의 고유 주파수는 아래 식 (1)에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다(Evans, 1997).

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{M}} \sqrt{K} \quad (1)$$

f_n : 고유 주파수, K : 용수철 계수, M : 수진기 무게

무게 판 부착 수진기는 자체 무게가 커짐에 따라 고유 주파수가 작아져 일부 신호를 왜곡시킬 수 있을 것으로 추정되지만 실제 고유 주파수 이상에 대해서는 거의 균일하게 반응하는 특성이 있어 충분한 동적 영역을 가진 탄성과 장비인 경우 자료 처리를 통해 대부분의 원하는 신호를 수신할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 11. Automatically-gained (time window=10 ms) shot gather data from Site 2. (a) Survey 2-1, (b) Survey 2-2, and (c) Survey 2-3.

반사파 예비 중합 단면 및 최적 이격 거리 단면 비교

천부 고해상도 탄성과 조사의 결과는 일반적으로 반사파 단면으로 처리되어 지하의 지층 구조를 파악하는데 활용된다. 이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 자료 취득 방식을 반사법 자료 처리를 염두에 두고 선정하여 탄성과 신호를 획득하였다. 본 연구에서는 몇 가지 다양한 방식에 대한 반사파 단면의 결과를 비교하기 위하여 1차 조사 지역 자료에 대해서는 예비 반사파 중합 단면(brute reflection stack section)을 만들었다. 또한 2차 조사 지역에서는 지질공학적인 측면에서 기반암 심도 결정 등에 많이 활용(Hunter et al., 1984)되는 최적 이격 거리 단면(optimum offset section)을 만들어 취득 방식별 반사파 단면을 비교하였다. 이러한 반사파 단면들은 상대적으로 실제 지하 단면을 정밀하게 구현하는 데는 불리할 수 있지만 탄성과 자료 처리 과정이 단순하고 자료 처리 방식에 의한 신호 왜곡 현상을 최소화할 수 있으므로 본 연구와 같이 장비 제원에 따른 탄성과 신호 특성을 비교하기 위한 연구에는 매우 적합한 방법이라고 판단된다.

1차 현장 자료 예비 중합 단면 생성 및 결과 비교

1차 현장에서 동일 측선에 대하여 획득된 3종의 탄성과 자료는 동일한 자료 처리 과정을 통해 예비

중합 단면으로 제공되었다. 주요 자료 처리 과정은, 공심점 정렬(common depth point sorting), 구간 주파수 필터링, 자동 이득 조절, 속도 분석, 동보정, 중합의 과정을 거쳐 수행되었다. 구간 주파수 필터링은 30-50-100-200 Hz 구간 영역이 적용되었으며, 자동 이득 조절의 시간 창(time window)은 10 ms가 적용되었다. 또한 속도 분석은 순차적인 일정 속도를 가정한 복수의 단면을 만들어 개략 결정하는 방식으로 진행되었다. Fig. 13은 1차 현장에 대한 예비 중합 단면을 보여준다. 전반적인 단면에서 보여주는 신호 양상은 유사하지만, 일부 단면 양상이 틀리게 나타나는 부분들이 관찰된다. 이러한 유사성과 차이점을 구체적으로 고찰하기 위해 전체 중합 단면 중 두 개의 영역(Fig. 13의 A 및 B로 표시)을 선정하였다. 영역 A는 CDP 20번부터 140번과 왕복 주시 시간 15 ms부터 105 ms에 해당되는 영역이며, 영역 B는 CDP 337번부터 387번과 왕복 주시 시간 20 ms부터 135 ms에 해당되는 영역이다.

이들 비교 영역의 반사 신호들을 관찰해 보면 survey 1-1과 1-3에서 관찰되는 반사 사건들은 모두 survey 1-2의 반사 사건에 동일한 CDP 및 왕복 주시 시간대에 나타남을 확인할 수 있다. 그러나 일부 survey 1-2의 반사 사건들(Fig. 13 비교영역 확대도에 화살표로 표시)은 survey 1-1 혹은 1-3에서 나타나고 있지 않음을 관찰할 수 있다. 이중 survey 1-2에서는 관찰되나 survey 1-1에서는 관찰되지 않는 반사파 사

Fig. 12. Frequency spectrums of (a) Survey 2-1, (b) Survey 2-2, and (c) Survey 2-3 from all traces of the automatically-gained shot gather data.

건은 14 Hz 수진기에 기록되지 않는 탄성과 신호들이 100 Hz 수진기에는 기록됨을 지시한다. 또한 survey 1-2에서는 관찰되나 survey 1-3에서는 관찰되지 않는 반사와 사건은 공사용 망치의 진원 발생 신호가 손 망치 발생 신호에서 발생 시키는 진원 신호에서는 구분 시킬 수 있는 지층 경계를, 상대적인 저주파 신호 때문에 구분하지 못하는 현상에서 기인한다고 판단할 수 있다. 이러한 현상은 기존의 쇄침 방식 수진기를 활용하는 육상 탄성과 조사에서 고주파 수진기와 작은 에너지의 진원이 더욱 고해상도의 결과를 보여준다는 잘 알려진 일반적 사실과도 부합되며, 무게 판을 장착한 수진기 방식의 육상 탄성과 조사에서도 동일한 결과를 보여주고 있음을 확인한 것이다. 한편, 무게 판을 장착한 수진기 방식이 수진기의 고유 주파수와 진원의 종류에 무관하게 저해상도 중합 단면에서 나타나는 대부분의 신호를 고해상도 중합 단면에서 모두 나타내 준다는 점은 이러한 수진 방식이 일관된 탄성과 신호를 측정하는 데 큰 문제가 없음을 간접적으로 시사한다.

1차 조사 지역의 예비 중합단면은 조사 지역의 지층이 대체로 수평적 구조를 보이고 있음을 보여준다. 그러나 이러한 수평적 지층 구조는 수평 위치 70 m 이후 상대적으로 잘 유지되지 않는 것으로 해석된다. 단층 현상이나 습곡 등 특이한 지질 구조는 조사 측선 하부에서는 나타나지 않을 것으로 판단되며, 특히 survey 1-3의 초반부와 중심부에서 수평적 연결성이 양호하게 나타나는 반사면은 암질이 뚜렷하게 변화하는 지층 경계로 해석된다.

2차 현장 자료 최적 이격 거리 단면 생성 및 결과 비교

2차 현장은 동일 측선에서 획득된 2종의 탄성과 자료와 인접부로 평행 이동된 측선에서 획득된 1종의 탄성과 자료에 대한 최적 이격 거리 단면을 생성하였다. survey 2-1과 2-3의 경우 최적 이격 거리를 42 m로, survey 2-2의 경우 최적 이격 거리를 41.6 m로 설정하여 탄성과 단면을 생성하였다. 실제 최적 이격 거리는 표면파 영향권에 포함되지 않고, 조사 대상 불연속면의 반사파는 생성되지만 굴절파는 생성되지 않는 구간을 말한다(Hunter et al., 1984). 그러나 본 연구에서는 특정 대상 불연속면을 조사하는 목적이 아니라 수진기 및 진원 방식별 신호의 특성을 비교하고, 제작된 무게 판을 활용한 탄성과 신호 측정의 효용성을 평가하기 위한 목적을 고려하여 가장 뚜렷한 반사파 신호가 나타나는 것으로 판단되는 구간을 선정하였다.

생성된 최적 이격 거리 단면은 Fig. 14에 나타나 있다. 생성 단면에서 포장도로에 무게 판을 부착하여 설치된 14 Hz 수진기 신호 자료(survey 2-2)가 발 토양에 쇄침 방식으로 설치된 14 Hz 수진기 신호 자료(survey 2-3)에 비해 고해상도의 탄성과 신호를 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 외견적 해상도 차이는 지표 조건 차이 및 진원 차이에서 기인하는 것으로 해석된다. 그러나 쇄침 방식으로 획득된 탄성과 자료의 신호들(Fig. 14 survey 2-3의 왕복 주시 50, 120 ms의 신호 등, 화살 표시 부위)이 무게 판 부착 방식으로 획득된 탄성과 자료의 신호(Fig. 14 survey 2-2, 화살 표시 부위)에서 유사하게 기록됨을 알 수 있으며, 이러한 결과는 무게 판 부착 방식의 자료 획득이, 본 조사 현장과 같은 조건에서 실제 활용에 문제가 없음을 시사한다. 결과적으로, 2차 현장에서 획득된 탄성과 자료를 최적 이격 거리 반사파 단면 양식으로 처리한 결과 역시 1차 현장에서의 유사하게 손 망치 진원과 무게 판 부착 수진기를 포장 도로에 설치한 탄성과 신호가 공사용 망치 지원과 쇄침 방식 수진기를 발 토양에 설치하는 방식에 비해 뚜렷한 탄성과 신호를 감지하고 있음을 보여준다.

2차 조사 지역의 최적 거리 이격 단면은 조사 측선 하부 지층이 조사 심도 범위내에서 2개의 탄성학적 경계를 가지고 있는 것으로 나타났다. 상부 경계는 주로 왕복 주시 시간 50 ms 내외로 지층 탄성과 속도를 고려할 때(RMS 속도 1,000 m/sec), 25 m 심

Fig. 13. Brute reflection seismic sections from Site 1 and detailed sections for comparing the results.

Fig. 14. Optimal offset seismic sections from Site 2.

도에 해당되며, 이 경계는 풍화를 받지 않은 기반암의 상부 경계로 추정된다. 또한 왕복 주시 시간 130 ms 부위에도 탄성과 반사면이 존재하고 있음이 관찰되며 이 경계는 상이한 물성을 갖는 지층 경계일 가능성이 높은 것으로 추정된다. 기점 거리 100 m 이후는 상대적으로 수평적 구조가 약해지고 있어 지층의 층상 구조가 상대적으로 유지되고있지 않을 가능성을 시사한다.

결론 및 토의

다양한 지표 상태, 수진기 고유 주파수, 진원 발생 방법 등을 달리하는 6종의 탄성과 자료 획득을 통해 이들 각각의 조사 방식별 기록되는 탄성과 신호의 특성을 비교 연구하였다. 특히 포장 도로와 같이 일반적인 쇠침 활용 수진기의 설치가 곤란한 조사 지역에 대하여 1.8 kg의 원형 무게 판을 수진기에 부착하여 포장 도로 위에 설치하는 방식은 조사 편이성은 물론 조사 시간을 단축할 수 있는 방법이 될 수 있음을 확인하였다. 또한 포장 도로의 경우, 진원을 1 kg 내외의 소형 망치 가격으로 발생시켜도 왕복 주시 시간 200 ms 혹은 그 이상의 탄성과 신호를 감지하는 데 큰 문제가 없는 것으로 나타났다.

수진기의 무게 판을 부착하는 것은 자체 무게에 종속성이 있는 수진기 고유 응답 특성을 변화시킬 수 있을 것으로 추정되나, 실제 굴절파의 도달 시간을 변화시키거나 반사파 신호의 양상을 변화시켜 궁극적으로 굴절파 방식 해석 결과 및 반사파 해석 단면을 크게 왜곡시키지는 않을 것으로 판단된다. 따라서 현장 효용성 및 경제성 등을 고려할 때, 포장 도로에서 무게 판 부착 수진기를 활용한 탄성과 조사는 많은 장점을 가질 것으로 기대된다.

실제 본 연구를 통해 수행된 현장 작업량과 시간, 경비 등을 고려하여 보면, 과거 수진기의 접촉 문제, 진원 발생 문제 등으로 많은 경우 조사를 포기 혹은 배제하였던 포장도로에서, 무게 판 부착 수진기와 소형의 손 망치 가격만을 통해서도 지표 아래 100 m 이내의 정보를 탄성과 신호를 통해 충분하고 간편하게 획득할 수 있는 것으로 밝혀졌다. 특히, 과거 드릴링 등을 통해 포장 도로에 수진기를 강제적으로 접촉시키거나, 모래 주머니 등으로 수진기를 눌러 설치하는 방식에 비해 무게 판을 활용하는 방식은 수배 혹은 수십 배 이상의 시간과 경비를 절약할 수

있을 것으로 기대된다.

본 연구를 통해 제작된 무게 판은 수진기 부착 배면에 쇠침도 설치 가능한 방식으로 모래 사장과 같이 자체 강성(stiffness)이 부족한 지표 조건 때문에 탄성과 신호 감지가 곤란한 경우, 무게 판과 쇠침을 동시에 활용하여 양호한 지면 접촉을 가능하게 하면 상대적으로 양질의 신호를 기록하는 데 도움이 될 것으로 사료된다. 따라서 향후 이와 관련된 추가 현장 실험 및 연구 등이 요구된다.

사 사

힘든 현장 조사에 참여하여 고생한 박병학씨를 비롯한 중원대학교 에너지자원공학부 학생들과 이민희씨를 비롯한 공주대학교 암석물리 연구실의 연구생들에게 감사드립니다. 또한 고가의 탄성과 조사 장비를 임대하여 주신 서울대학교 에너지자원공학과와 민동주 교수님과 강원대학교 지구물리학과와 김기영 교수님께도 감사드립니다. 원형 무게 판 제작과 특허 출원을 앞선해 준 (주)모음과나눔 박성민 대표와 현장 필요 물품 구매와 학생들의 출장 경비를 일부 지원하여 주신 한국지질자원연구원의 진재화 실장님께도 감사드립니다. 좋은 지적과 제안을 통해 논문의 질을 높일 수 있도록 세심한 심사를 하여 주신 주진 익명의 심사위원님들께도 진심으로 감사드립니다. 본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 2009201030001A).

참고문헌

- 이상만, 김형식, 나기창, 1980, 한국지질도 대전도폭, 자원개발연구소.
- 홍승호, 최위찬, 1978, 한국지질도 금산도폭, 자원개발연구소.
- Drijkoningen, G.G., 2000, The usefulness of geophone ground-coupling experiments to seismic data. *Geophysics*, 65, 1780-1787.
- Evans, B.J., 1997, A handbook for seismic data acquisition in exploration. *Geophysical monograph series 7*, Society of Exploration Geophysicists, 305 p.
- Hunter, J.A., Pullan, S.E., Burns, R.A., Gagne, R.M., and Good, R.L., 1984, Short Note: Shallow seismic reflection mapping of the overburden-bedrock interface with the engineering seismograph-Some simple techniques. *Geophysics*, 49, 1381-1385.

- Keiswetter, D.A. and Steeples, D.W., 1995, A field investigation of source parameters for the sledgehammer. *Geophysics*, 60, 1051-1057.
- Knapp, R.W. and Steeples, D.W., 1986, High-resolution common-depth-point seismic reflection profiling: Instrumentation. *Geophysics*, 51, 276-282.
- Miller, R.D., Pullan, S.E., Waldner, J.S., and Haeni, F.P., 1986, Field comparison of shallow seismic sources. *Geophysics*, 51, 2067-2092.
- Miller, R.D., Pullan, S.E., Steeples, D.W., and Hunter, J.A., 1992, Field comparison of shallow seismic sources near Chino, California. *Geophysics*, 57, 693-709.
- Miller, R.D., Pullan, S.E., Steeples, D.W., and Hunter, J.A., 1994, Field comparison of shallow P-wave seismic sources near Houston, Texas. *Geophysics*, 59, 1713-1728.
- Schmeissner, C.M., Spikes, K.T., and Steeples, D.W., 2001, Recording seismic reflections using rigidly interconnected geophones. *Geophysics*, 66, 1838-1842.
- Spikes, K.T., Steeples, D.W., Schmeissner, C.M., Prado, R., and Pavlovic, M., 2001, Varing the effective mass of geophones. *Geophysics*, 66, 1850-1855.
- Steeple, D.W., Baker, G.S., Schmeissner, C., and Macy, B.K., 1999, Geophones on a board. *Geophysics*, 64, 809-814.

2011년 8월 1일 접수
2011년 8월 23일 수정원고 접수
2011년 10월 1일 채택