

## 경북 포항시 일월동 택지개발지구의 지반상태 파악을 위한 탄성파탐사

서만철

공주대학교 자연과학대학 지질환경과학과

### 요 약

경북 포항시 일월동 지역에서 482 m 길이의 동서 방향의 측선에 대한 탄성파 굴절법 및 반사법 탐사를 실시하였다. 자료수집에서 지오폰 간격과 오프셋은 각각 2 m로 설정하였으며, 발파는 끝점 발파 배열 방법을 이용하여 한 발파점마다 24채널을 기록하였다. 발파 간격은 2 m로 하여 측선의 전구간에서 탄성파 자료를 취득하였다.

굴절법탐사 자료의 해석은 수평다층구조 이론을 적용하여 실시하였으며, 반사파 자료 처리는 트 레이스 편집, 이득조정, 공심점 분류, 수직경로시차 보정, 뮤트 과정을 거친 후 동일 오프셋 모음을 취하여 단일중첩 탄성파 단면을 작성하고 필터링을 거친 후 해석에 이용하였다.

굴절법탐사 자료 해석결과 조사 측선 구간의 천부지반은 크게 2층으로 구분되는데, 상부층은 267~566 m/s 의 P파 속도 분포를 보여 대체로 미고결 퇴적층이며, 하부층은 1096~3108 m/s 의 P파 속도 분포를 보여 풍화암~경암의 암반으로 구성되어있음을 알 수 있다. 상부 미고결층은 수평 적으로 큰 변화를 보이고 있는 바, 측선의 동측 구간에는 평균 400 m/s 의 P파 속도를 보이는 미 고결 사암층이 3~5 m 두께로 발달되어 있으며, 측선의 서측 구간은 평균 340 m/s 의 P파 속도를 갖는 매립토층이 8~10 m 두께로 발달된 것으로 해석된다.

반사파 단면도에서 조사구간에 3개의 고각의 단층대가 분포하며, 이들 단층대를 경계로 기반암 이 나누어져 있으며 단층대 사이의 구간은 비교적 안정된 지반으로 해석된다. 대형 건물의 위치는 단층대를 피하여 안정된 지반 구간에 위치해야 함을 고려할 때, 그 기초를 3~10 m 깊이 하부에 위치하는 기반암 내에 설치되도록 설계되어야 할 것이다.

주요어: 탄성파탐사, 굴절법, 반사법, P파 속도, 단층대

**Suh, Mancheol, 1999, Seismic exploration for understanding the subsurface condition of the Ilwall-dong housing construction site in Pohang-city, Kyongbook. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 2, n. 1, p. 45-56.**

**ABSTRACT:** Seismic refraction and reflection surveys were conducted along an E-W trending track of 482 m long in Ilwall-dong, Pohang. End-on spread was employed as source-receiver configuration with 2 m for both geophone interval and offset. Seismic data were acquired using 24 channels at every shot fired every 2 m along the track. Refraction data were interpreted using equations for multi-horizontal layers. Reflection data were processed in the sequence of trace edit, gain control, CMP sorting, NMO correction, mute, common offset gathering, and filtering to produce a single fold seismic section.

There are two layers in shallow subsurface of the study area. Upper layer has the P-wave velocities ranging from 267 to 566 m/s and is interpreted as a layer of unconsolidated sediments. Lower layer has P-wave velocities of 1096-3108 m/s and is interpreted as weathered rock to hard rock. Most of the lower layer classified as soft rock. Upper layer has lateral variations in both P-wave velocity and thickness. The upper layer in the eastern part of the seismic line is 3-5 m thick and has P-wave velocity of 400 m/s in average. The upper layer in the western part is 8-10 m thick and has P-wave velocity of 340

m/s in average. The eastern part is interpreted as unconsolidated beach sand, while the western part is interpreted as infilled soil to develop a construction site.

Three fault systems of high angle are imaged in seismic reflection section. It is interpreted that the area between these fault systems are relatively safe. Large buildings should be located in the safe ground condition of no fault and footings should be designed to be in the basement rock of 3-10 m deep below the surface.

**Key words:** Seismic exploration, Refraction method, Reflection method, p-wave velocity, Fault syster

(Suh, Mancheol, Department of Geoenvironmental science Kongju National University, Kongju, 314-701, Chungnam, Korea. email: mcsuh@knu.kongju.ac.kr)

## 1. 서 론

연구지역인 포항시 일월동 지역은 제3기 분지인 포항분지와 장기분지의 경계부에 위치하는 오천단층이 통과하는 지역으로 추정되어(Yun, 1986) 지반안정성에 대한 조사가 필수적이다. 그러나 이 지역이 제4기 해안퇴적물과 충적층으로 피복되어 있어 정확한 경계부 확인은 불가능하다. 이러한 경우 지구물리탐사 방법이 적용되어야 하며 탄성파탐사가 단층의 존재파악에 매우 유용하다. 연구 지역의 단층들은 포항분지와 서쪽의 경상분지와 경계를 이루는 양산단층계와 연관된 단층들로서, 양산단층의 활동성이 현재 한국 지질학계의 초미의 관심사인 점을 고려할 때 연구지역의 단층들의 활동성 또한 간과할 수 없다.

탄성파탐사를 이용한 지반조사는 현재 광범위하게 수행되고 있다. 연약지반 및 매립지반의 연구 등에 적용된 바 있으며(정희욱, 1995; 김팔규 외, 1995; 정희욱, 1997), 터널지반의 조사, 건설현장에서의 암종의 구분, 각종 규모의 지반조사에서의 사용이 일반화되어 있다. 현재 수행되고 있는 지반조사에서의 탄성파탐사는 주로 굴절법 탄성파탐사(seismic refraction method)로서, 기반암의 심도 결정과 기반암의 암종구분, 탄성계수를 비롯한 기반암의 물성파악 등에 이용되고 있다(김기영·김현규, 1997). 한편, 지반조사에 있어서 반사파탐사(seismic reflection method)는 소요시간과 비용 및 기술상의 어려움 등으로 인하여 거의 수행되지 못하고 있는 실정이다. 최근에 언양부근의 양산단층에 대한 고해상도 탄성파 반사법이 성공적으로 수행된 바 있다(Kim *et al.*, 1997). 탄성파 굴절법을 이용한 탐사의 결과들은 지반의 탄성파 속도와 각층의 층후로서 이를 근거로 암종의 구분, 기초

의종류와 심도, 지반의 탄성계수 및 지지력 등의 지질공학적으로 매우 유용한 정보를 얻을수 있고, 지하의 상세한 지질구조를 영상화하는 데는 반사법 탄성파탐사 결과가 더욱 유용하다. 그러므로 지반조사에 있어서 굴절법 탄성파탐사와 반사법 탄성파탐사를 병행하여야만 올바른 지하정보를 얻을 수 있다.

본 연구지역 부근의 연구로서는, 최근에 포항분지들을 포함한 한국 동남부 퇴적분지들에 대한 전기비저항탐사, 중자력탐사 및 탄성파탐사를 포함하는 지구물리탐사가 이루어져 있는 상태이다(김종수 외, 1968; 민경덕·정종대, 1985; 김영화 외, 1990; 이현구 외, 1992). 분지 경계부에 대한 지질구조의 연구는 제3기 퇴적분지들이 메커니즘을 밝히는데 필수적이며, 분지 형성의 메커니즘을 밝히는데 있어서 분지 내에 발달되어 있는 단층계를 정확하게 파악하는 것이 무엇보다 중요하다.

이 연구에서는 포항분지와 장기분지의 경계부에 해당하는 오천단층계 내부에서 지형적으로 탄성파탐사가 가능한 지형을 선택하여 지하구조에 대한 영상화를 시도하였다. 탄성파 굴절법을 이용하여 지반의 지질공학적 특성에 관한 연구를 수행하여 지반 내의 연약대를 파악하였다. 또한 반사법 탄성파탐사를 수행하여 지하 지질구조를 규명하고 단층 파쇄대의 정확한 위치를 파악하고자 하였다.

## 2. 일반지질

한반도 동남부에 위치하는 소규모의 제3기 분지인 포항분지와 장기분지의 경계는 오천단층에 의하여 구분되는 것으로 보고된 바 있으며(Yun, 1986), 연구지역인 포항시 일월동 지역은 오천단층이 통과하는 지역으로 추정된다(Fig. 1). 그러나 이

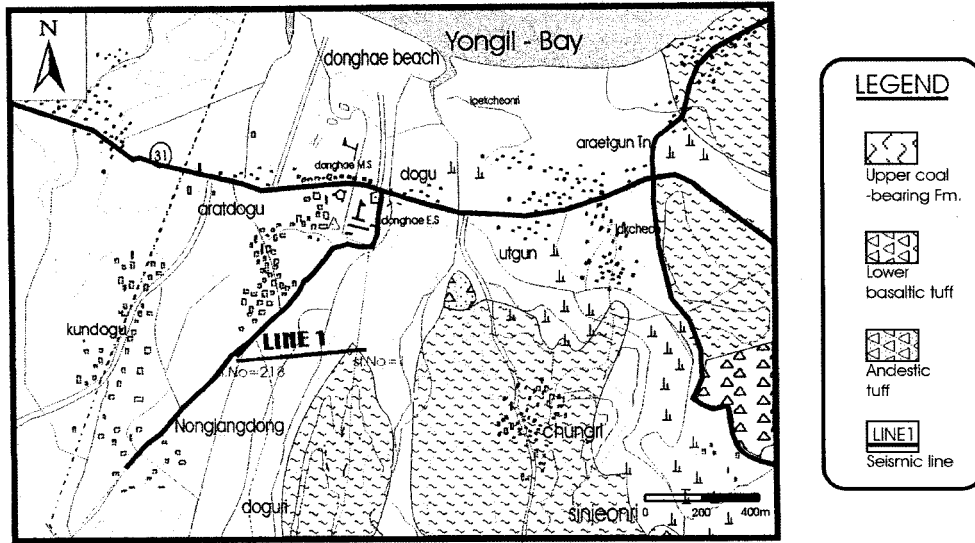


Fig. 1. Topographic map of the study area. Seismic track is denoted with an E-W trending straight line.

지역이 노두를 발견하기 어렵고 지표면이 층적층으로 피복되어 있어 정확한 경계부 확인은 불가능하다.

포항분지에는 제3기 마이오세에 퇴적된 연일층군이 존재하며 서쪽에서 동쪽으로 천북역암층, 학전층, 두호층이 동측 경사의 단사(monocline) 구조 형태로 존재한다(Yoon, 1975). 연일층군은 초기-중기 마이오세의 해성 퇴적환경에서 퇴적된 역암, 사암 및 셰일로 구성되며(노진환, 1994) 연구 지역에서는 제4기 층적층에 대부분 덮여 있는 상태이다. 연일층군 하부에는 백악기 화강암 및 제3기 초에 형성된 응회암이 부정합 관계를 이루며 존재한다.

장기분지의 지질은 제3기 퇴적암류 및 화성암류와 이들을 부정합으로 피복하고 있는 제4기 층적층으로 구성되어 있다. 제3기 퇴적암류는 하위 오천층과 상위 망해산층으로 구분되는데 오천층은 주로 사암, 이암의 호층으로 구성되어 렌즈상 또는 켜기상이며 층후는 수 m에서 최대 150 m까지 연속성이 불량하다. 망해산층은 오천층을 중심으로 부정합으로 피복하고 있으며, 본 층의 최하부는 화산력을 집괴암으로 이 집괴암층 위에 얇은 용결 진주암질 응회암 또는 진주암류가 놓여 있

다. 용결 진주암질 응회암과 진주암류는 망해산층의 간층이 되며 본 층의 상부에는 두꺼운 화산력 응회암이 놓인다.

### 3. 탄성파 자료수집

탄성파탐사에 이용된 에너지원-지오폰 배열방식은 끝점 발파 배열(off-end push spread) 방법을 이용하였으며, 지오폰 간격과 오프셀 간격을 각각 2 m로 하였다. 발파는 매 측정마다 실시하였으며 각 발파점에서 24채널을 기록하여 굴절법 및 반사법 자료로 활용하였다(Fig. 2). 즉, 2 m 간격의 48개의 측정점(station)에 수신기를 설치하고 탄성파 기록기에 모두 연결한 다음 소프트웨어를 이용하여 한 발파점에서 24채널을 선택하여 기록하였다. 이러한 과정을 측선의 동쪽 끝부터 시작하여 서쪽 끝으로 진행하면서 발파 시작점인 측정 100부터 끝 발파점인 측정 317까지 매 측정마다 반복 실시하여 218개의 공발점기록(shot gather)을 수집하였다(Fig. 2). 사용된 에너지원은 14 kg sledge hammer 이었으며 1-3회 타격 후 도달된 파형을 관찰하여 굴절파를 확실하게 관찰할 수 있는 자료를 기록하였다. 연속타격의 기록들을 중합하여 신호대잡음

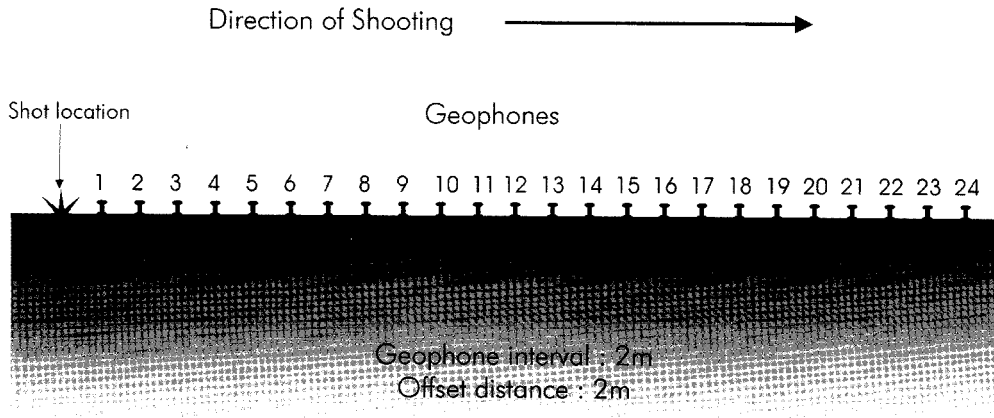


Fig. 2. Source-geophone configuration used in the acquisition of seismic data.

비(S/N ratio)를 향상시키려 노력하였으나, 대부분의 경우 수직중합(vertical stack)에 의하여 자료의 질이 더욱 교란되었기 때문에 수직중합은 실시하지 않았다. 수신기는 고유주파수가 14 Hz인 OYO Geospace사의 지오폰을 사용하였으며 탄성과 기록은 OYO Geospace사의 DAS-1 system (48 channel)을 사용하였다. 야의 기록시에는 주파수 10-400 Hz 구간의 대역통과 필터(bandpass filter)를 이용하였다. 총 기록시간은 1024 ms, 샘플링 간격은 250  $\mu$ s을 이용하였다. 그러므로 트레이스마다 4096개의 샘플이 기록되었으며 동일 공발점기록

(shot gather)에는 98304개의 디지털 자료가 기록되었다.

#### 4. 탄성과 자료처리

##### 4.1 굴절파 자료처리

현장에서 기록된 탄성과 자료는(Fig. 3) 디지털 자료로 저장하여 각종 분석을 용이하게 하였다. 실험실 내에서 대형 크기로 플롯팅하여 각 채널별

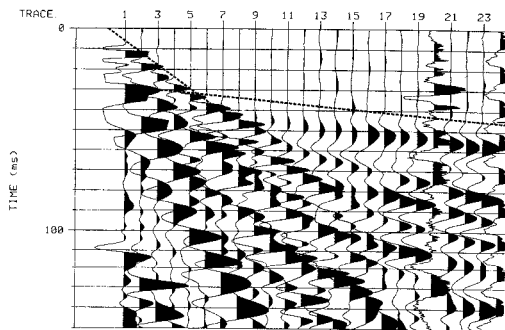


Fig. 3. Shot gather at station 255.

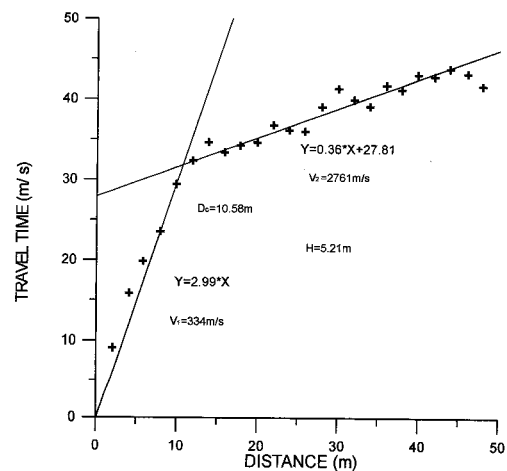


Fig. 4. Time-distance curve for the shot gather shown in Figure 3 and its interpretation.

초동시각을 수치화하여 주시곡선을 작성하여(Fig. 4) 측정별로 작성된 주시곡선상에서 기울기가 달라지는 구간을 나누어 최소자승법을 이용한 최적 직선식을 찾아 각 직선의 기울기와 시간절편 (intercept time)을 구하였다. 기울기의 역수를 취하여 각층의 탄성과 전파속도를 구하였으며 탄성과 속도와 시간절편 값을 이용하여 각 층의 두께를 구하였다(Table 1).

탄성과 굴절법 자료해석시 이용된 이론적 수식은 지하의 암반을 수평다층구조로 가정하고 전개하였다. 지하에 수평한 n개의 층이 존재할 경우 탄성파원-지오폰간의 거리 X에 따른 탄성과 도달 시간  $T_x$ 는 다음의 함수로 나타낼 수 있다(Al Chalabi, 1974 ; 서만철 · 이원국, 1992).

$$T_x = \frac{X}{V_n} + T_{i_{n-1}}, \quad (1)$$

$$T_{i_{n-1}} = 2 \sum_{m=1}^{n-1} \frac{Z_m}{V_m} \left[ 1 - \left( \frac{V_m}{V_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

위의 식을 이용하여 n = 1, 2, 3 ...의 경우를 각각 나열하면 1층 구조, 2층 구조, 3층 구조... 경우의 T-X 관계식이 되며 아래와 같다.

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{X}{V_1}, & n &= 1 \\ T_2 &= \frac{X}{V_2} + T_{i_1}, & n &= 2 \\ T_3 &= \frac{X}{V_3} + T_{i_2}, & n &= 3 \end{aligned} \quad (2)$$

Table 1. Interpretation of seismic refraction data.

St. No	File No	Layer1			Layer2	
		Velocity (m/s)	Thickness (m)	Classification	Velocity (m/s)	Classification
100	001	311	5.38	fine grained soil	2219	good rock
110	011	334	5.21	fine grained soil	2761	good rock
120	021	412	4.68	fine grained soil	1096	weathered rock
130	031	273	3.10	fine grained soil	3518	hard rock
140	041	552	3.42	fine grained soil	1819	soft rock
151	052	560	2.24	fine grained soil	1274	soft rock
160	061	368	2.90	fine grained soil	2909	good rock
170	071	327	1.77	fine grained soil	1467	soft rock
180	081	565.6	2.66	fine grained soil	1757	soft rock
190	091	409	2.98	fine grained soil	1733	soft rock
200	101	429	2.36	fine grained soil	1668	soft rock
211	112	417	3.83	fine grained soil	1444	soft rock
220	121	296	2.86	fine grained soil	1260	soft rock
230	131	273	4.43	fine grained soil	1582	soft rock
240	141	347	8.61	fine grained soil	2625	good rock
250	151	342	8.87	fine grained soil	1974	soft rock
259	160	335	9.23	fine grained soil	2998	good rock
271	172	402	9.42	fine grained soil	1844	soft rock
280	181	267	5.62	fine grained soil	3108	hard rock
290	191	369	6.83	fine grained soil	2356	good rock
301	202	335	3.87	fine grained soil	1923	soft rock
310	211	325	3.90	fine grained soil	2140	soft rock

이들 관계식들은 모두 시간절편과 기울기가 다른 1차 함수들로서 각 직선의 기울기를 구하여 역수를 취하므로써 각층의 속도  $V_1, V_2, V_3$ 를 구할 수 있고 각 직선의 절단 시간을 이용하여 각 층의 두께  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{n-1}$ 을 구할 수 있게 된다(Fig. 5).

4.2 반사파 자료처리

반사법 탄성파탐사 자료의 처리는 트레이스 편집, 이득조정, 공심점 분류(CMP sorting), 속도분석, 수직경로시차 보정(NMO correction), 뮤트(mute), 중합(stack), 주파수분석, 필터링의 과정을 거쳤다. 그러나 탄성파 중합단면이 단일 중첩 단면(single channel section)보다 오히려 해석이 어려운 경우가 대부분이었다. 이는 중합당시 속도 불균질을 고려하여 정밀한 속도분석을 통하여 해결할 수도 있을 것으로 사료된다. 본 연구에 있어서는 속도분석을 매 50 m 마다 굴절법 자료를 이용하여 수행하였으나 더욱 정밀한 속도분석을 실시할 필요가 있는 것으로 판단된다. 이러한 천부지반의 불균질성을 해소하기 위하여 중합과정 이전에 매우 정밀한 속도분석과 이를 이용한 등보정이 필요하나 이는 지질공학목적의 조사에서는 현실적으로 어렵다. 또한 탄성파 에너지를 줄 때 타격에

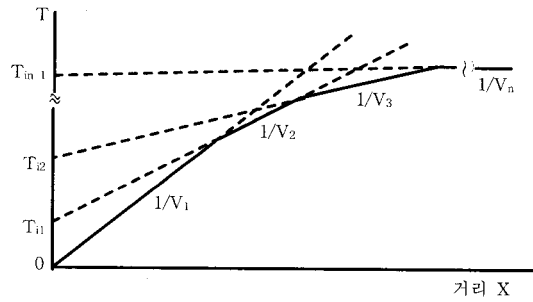


Fig. 5. Schematic time-distance diagram for n horizontal layers.

의존하므로 매 타격시 지반과 햄머 철판과의 결합에 의하여 천부의 파형이 상당히 좌우되는 현상을 발견할 수 있었는데, 이러한 현상도 중합단면의 질을 저하시키는 요인이 된 것으로 판단된다.

트레이스 편집(trace edit) 과정에서는 취득점 공발점기록(shot gather)을 매 30개마다 플롯팅하여 돌출 트레이스는 백지화하였다. 이득조정(gain control) 과정에서는 적용구간을 변화시키면서 자동이득조정(AGC)을 적용하여 본 결과를 토대로

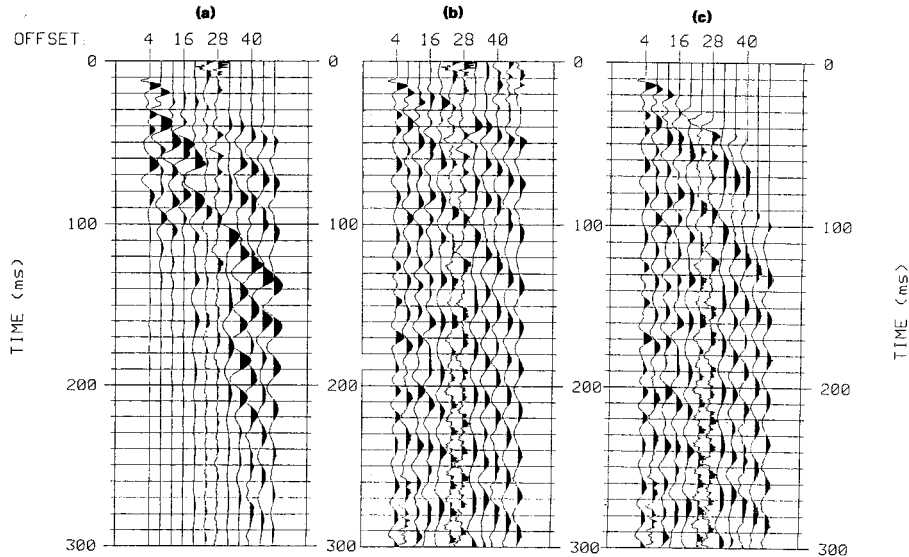


Fig. 6. Example of products of seismic data processing in this study : (a) raw CMP gather, (b) automatic gain control with a 40 ms window on (a), and (c) NMO correction with stretched mute applied to (b).

40 ms 구간을 평균하여 상대적인 진폭변화를 나타내도록 이득조절을 실시하였다(Fig. 6).

지하 지질정보를 많이 가진 주파수 대역의 탄성파 신호를 주로 사용하여 공발점 모음(shot gather)을 선택하여 0-300 ms 구간의 주파수 분석을 하여 본 결과, 23-90 Hz 사이의 신호가 우세하였으며 그 중에서도 30-43 Hz 구간이 가장 우세하였다(Fig. 7). 한편 100 ms 구간별 주파수 분석을 실시하여 본 결과 0-100 ms 구간에서는 30-90 Hz 구간이, 100-200 ms 구간에서는 24-60 Hz, 200-300 ms 구간에서는 27-53 Hz 구간이 우세하여 전파시간이 길어짐에 따라 고주파 성분이 급격히 감소하는 일반적인 경향을 보이고 있다. 이를 바탕으로 필터링 과정에서는 시변 필터링(time-variant filtering) 과정을 적용하였다(Table 2). 본 연구에서는 상기의 자료처리를 거친 후, 중합과정은 생략하였으며 동일 오프셋 단면도(common offset gather)를 작성하여 해석에 이용하였다.

## 5. 탄성파 자료해석

### 5.1 굴절법 자료해석

굴절과 분석으로부터 구한 지반의 탄성파(P파) 속도의 분포와 층의 두께를 분석해 보면 조사구역은 대체로 2개의 층으로 구성되어 있음을 알 수 있다(Fig. 8). 상부층은 대체로 267-566 m/s의 P파 속도분포를 보여 대체로 미고결 층의 탄성파 속도를 갖는다. 상부층은 수평적으로 다시 2부분으로 나누어지는데, 축선의 0-260 m 구간의 동부구간은 대체로 311-566 m/s의 속도 범위를 보이는 한편, 축선의 260-450 m 사이의 서부구간은 267-347 m/s의 낮은 속도 범위를 보여 대조적인 현상을 나타낸다. 현장 탐사시 수행한 지표지질조사에 의하면 축선의 동부구간은 높은 지형을 깎은 부분이었으며 이 부분의 지질은 주로 미고결의 제4기 해변 모래가 층리를 이루고 있었다. 축선의 서부구간은 지형이 낮은 관개로 택지개발을 위하여 매립을 실시한 것으로 판단되며 주요 구성 토질은 부분적으로 쇄설이 포함된 황토층이다.

하부층은 탄성파 P파 속도가 1096-3108 m/s의 범위를 보여 상부층보다 월등히 탄성파 속도가 높아 기반암으로 해석된다. 탄성파 속도분포로 볼 때 이 지역 기반암은 퇴적암인 것으로 판단되며 실제 이 지역은 제3기 퇴적분지가 발달된 지역이다. 탄성파 속도분포로부터 해석된 지하구조 모델

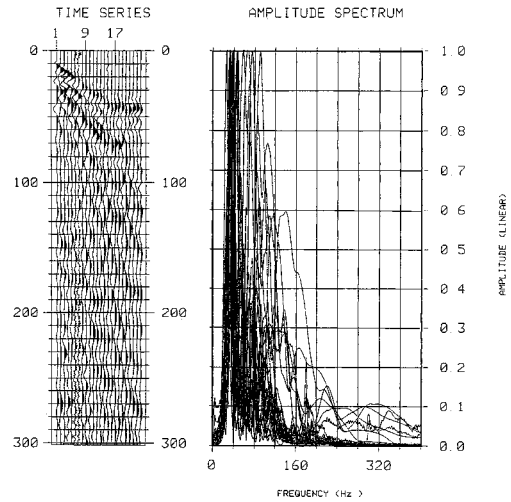


Fig. 7. Frequency analysis of the shot gather acquired at station 150.

은 축선의 280 m 지점을 경계로 축선의 동측부는 3-5 m 두께의 미고결층 하부에 기반암이 존재하고 축선의 서부는 단층경계에 의해 기반암층이 약 8 m 낮아져 존재하는 것으로 해석된다(Fig. 8).

### 5.2 반사파 단면도해석

탐사 축선에서 취득한 공발점기록(shot gather)에 대한 트레이스 편집을 거친후 공심점 분류(CMP sorting)를 거쳐 공심점 모음(CMP gather)에 대하여 속도 자료를 이용하여 NMO보정된 각각의 공심점 모음에서 일정한 오프셋(12 m)을 갖는 트레이스들을 선택하여(common offset gather) 단일 중

Table 2. Time variant filter applied in the filtering of common offset gather in this study.

Time(ms)	F1	F2	F3	F4
0-100	25	30	90	95
100-200	20	25	60	65
300-600	15	20	40	45
600-1000	10	15	30	35

첩 탄성과 단면을 작성하여 해석에 사용하였다. Figure 9는 동일 오프셋을 갖는 트레이스들을 각각의 공심점 모음에서 선택하여 실제의 진폭대로 도시한 것이다.

진폭의 상대적인 변화는 지하 경계면에서의 반사계수를 반영하여 진폭이 작은 경우는 상하층간의 밀도 및 속도 변화가 비교적 작으며 진폭이 큰 경우는 상하층간의 밀도 및 속도 변화가 매우 큰 것을 의미한다. 공심점 120 지점의 경우 28 ms 부근에서 큰 진폭의 지층경계면이 나타난다. 이 부근(Fig. 8의 40 m 부근)의 굴절법 속도분석으로부터 P파 속도가 약 330 m/s인 상부층과 P파 속도가 2761 m/s의 비교적 강한 암반층이 약 5 m 하부에 존재하는 것으로 분석되어(Fig. 8) 반사파 단

면으로부터 얻어진 강한 반사면의 존재와 잘 일치되고 있다. 이 반사면에서의 반사계수를  $R = (V_2 - V_1) / (V_2 + V_1)$ 을 이용하여 계산하면 그 값은 약 0.79이다. 반사에너지의 양을 고려하면, 에너지의 경우 반사계수의 제곱관계이므로 입사된 에너지의 62%가 상부방향으로 반사되고 나머지 38%만이 경계면 하부로 전파되기 때문에 실 진폭 단면도에서는 경계면 하부의 반사현상이 거의 관측되지 않는다(Fig. 9). 탄성과 측선을 따라 기반암 상부에서의 반사계수는 전반적으로 약 0.6을 보이고 있다.

공심점 번호 157-171 사이의 28 m 구간과 공심점 번호 194-203 사이의 18 m 구간은 왕복주사 160 ms 깊이까지 탄성과 에너지가 투과한 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 이들 구간이 다른 구

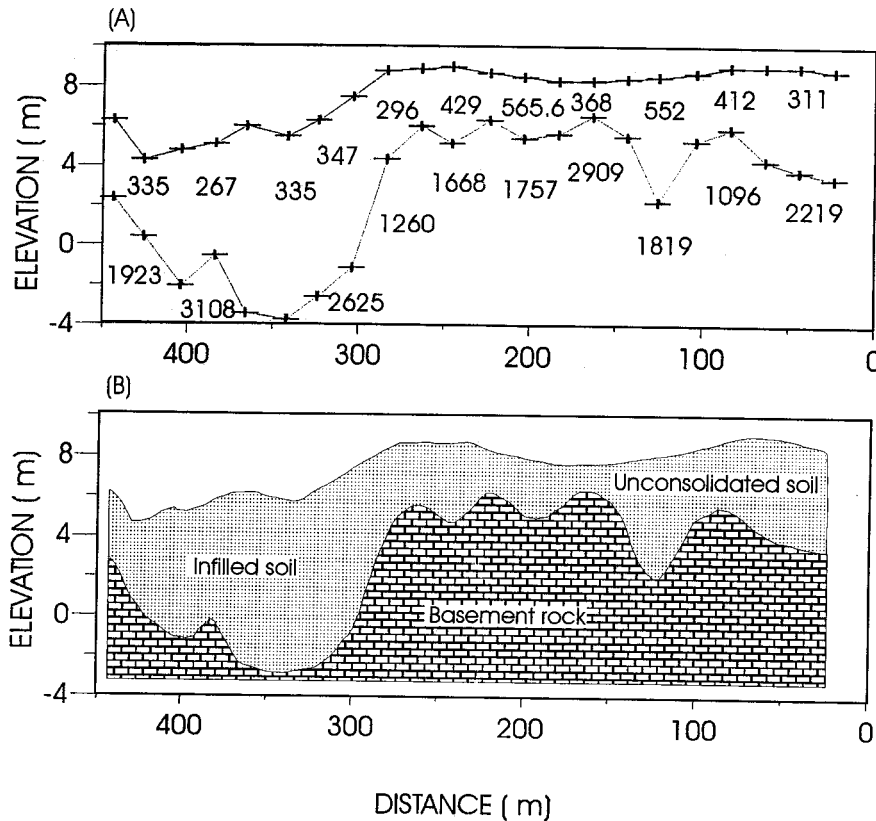
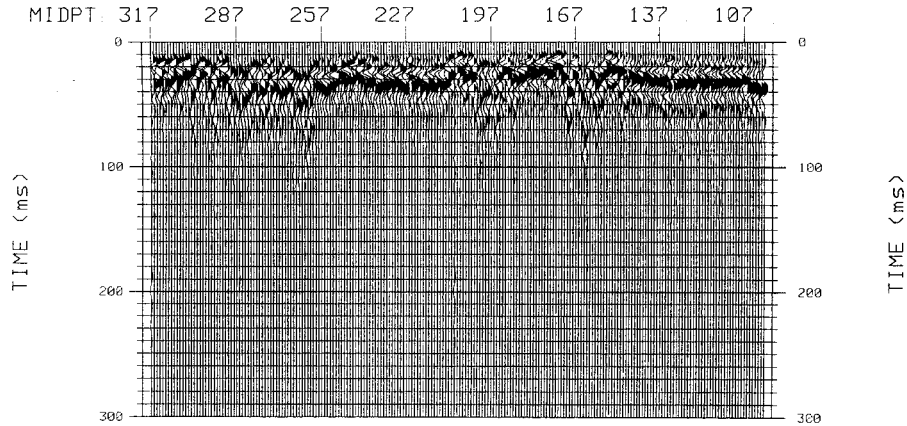


Fig. 8. Distribution of P wave velocity the and subsurface structural model along the seismic line; (A) P-wave velocities in m/s, (B) subsurface geologic model.





**Fig. 9.** Real amplitude seismic reflection section. The high amplitude reflector is interpreted as the interface between the upper layer of unconsolidated sediments and the basement rock. Seismic energy penetrates deeper in the fault zone near midpoints of 160, 197, and 265.

간에서처럼 강한 반사면이 존재하지 않기 때문에 탄성파 에너지가 깊이까지 침투하여 나타나는 현상으로서 이들 구간들이 단층 작용에 의한 파쇄대임을 나타내는 것으로 판단된다. 굴절법 탐사로부터 구한 탄성파 속도 분포를 볼 때 탄성파의 침투가 160 ms 까지 뚜렷한 125m 부근(공심점 번호 157-171 구간)에서 미고결층이 가장 깊이까지 존재하는 현상과 일치한다. 또한 공심점 번호 258-289 사이의 62 m 구간에서도 탄성파 에너지가 왕복주사 약 100 ms 까지 비교적 깊게 침투한다(Fig. 9). 이들 구간 역시 단층 파쇄대일 가능성이 높을 것으로 해석된다.

기반암 상부의 천부 지질구조는 실진폭 탄성파 단면도를 통해서도 명확히 알 수 있다(Fig. 9). 그러나 상부미고결층과 하부 기반암 사이의 경계면에서 대략 50% 이상의 에너지가 반사되므로 하부 구조를 파악하기 어렵다. 그래서 실진폭 자료를 자동이득조절(automatic gain control)과정을 수행하고 시변 필터링(time variant filtering)과정을 거치면 하부구조를 비교적 잘 나타낼 수 있다(Fig. 10). 자동이득조절 및 필터링 과정을 거친 탄성파 단면을 보면 조사측선은 전구간에 걸쳐 4개의 반사면이 잘 발달되어 있으며 이들 반사면의 단절 현상을 근거로 단층의 해석이 가능하다. 조사구간은 크게 A, B, C, 로 표기된 3개의 교각의 단층대에

의해 파쇄되어 있음을 알 수 있다(Fig. 11). 단층대 A 구간은 굴절법 탄성파 자료해석 모델에서도 측선 동쪽 끝에서 125m 부근에 미고결층이 가장 두껍게 발달된 것으로 표현된다. 특히 단층대 C 구간은 굴절법 탄성파 자료해석 모델에서도 쉽게 인지될 수 있는 단층대이다. 단층대 B 구간은 반사파 단면(seismic reflection section)에서 뚜렷이 인지되나 굴절법 자료해석에서는 잘 인지되지 않고 있다. 전반적으로 반사파 단면도를 이용하여 안정된 지반 구간과 단층에 의한 불안정 지반 구간을 명확히 구분할 수 있다(Fig. 11).

## 6. 지질공학적 해석

탄성파 속도 분포에 의하여 조사지역은 미고결층인 상부층과 퇴적암으로 구성된 기반암층인 하부층으로 구분된다. 상부층의 P파 속도분포는 267 m/s에서 566 m/s의 범위로서 전형적인 미고결층이다. 측선의 동측부에 해당하는 0-280 m 구간은 P파 속도가 비교적 높아 311-566 m/s의 범위를 보이는 반면 측선의 서측부인 280-484 m 구간은 P파 속도가 월등히 낮은 267-347 m/s의 범위를 보여 측선의 동쪽 부분은 원지반으로 해석되며 서측부는 매립토층으로 해석된다. 한편 하부층은 P파 속도가 1096-3518 m/s의 범위를 보여 자연상태에

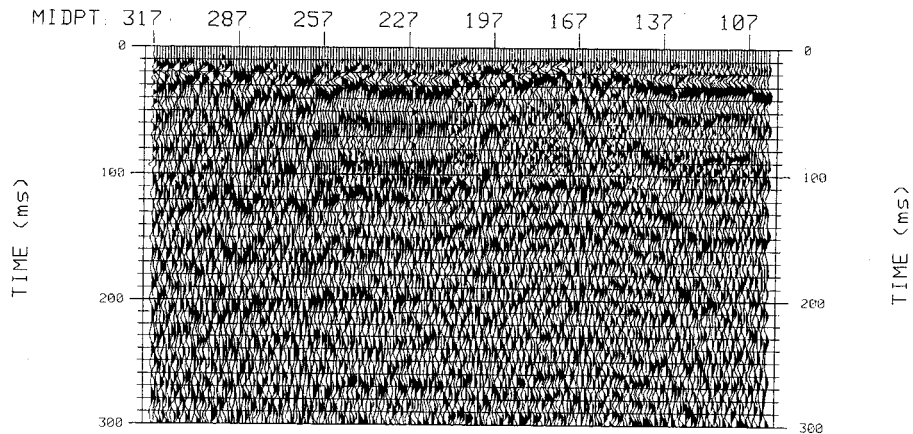


Fig. 10. Single-fold seismic section after simple data processing.

서의 P파 속도에 의한 암반등급 구분 기준에 따라 (전인식, 1992) 풍화암에서 경암까지의 분포를 보이고 있다.

이와 같은 미고결층에 대한 P파 속도와 S파 속도의 통계적 관계는

$$V_s = 0.21V_p \quad (3)$$

로 밝혀진다(物理探查學會, 1990). 또한 흙의 S파 속도( $V_s$ )와 표준관입시험의 N값 사이에는

$$N = 0.91V_s^{0.337} \quad (4)$$

의 관계가 성립됨이 경험적으로 밝혀졌다(物理探查學會, 1990). 이러한 관계를 본 조사지역에 적용하면, 최상부 미고결층의 S파속도 분포는 56-119 m/s의 저속도를 보이며 N치는 3-5의 낮은 값을 갖는다.

하부층은 대부분의 경우 연암으로 구분된다 (Table 2). 연암에 있어서는 P파 속도, S파 속도, N치 사이에

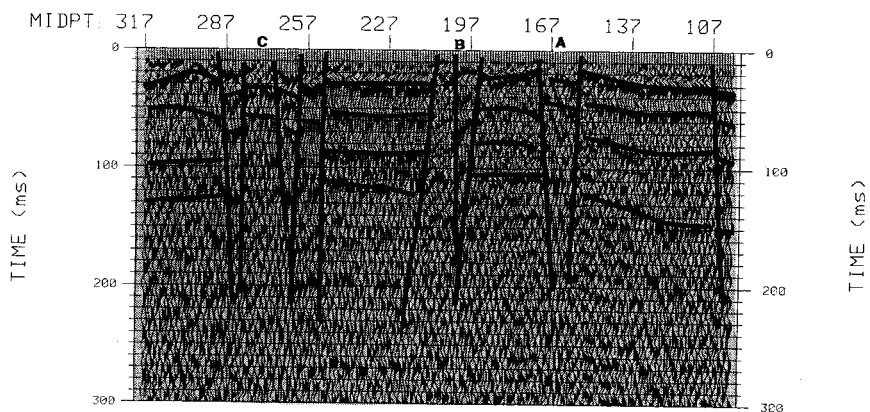


Fig. 11. Interpreted seismic section. Three fault systems (A, B, C) are imaged clearly and four reflectors are traced across fault systems.

$$V_s = 0.35V_p \quad (5)$$

$$\log N = 1/0.34489(\log V_s - 1.9897) \quad (6)$$

관계가 경험적으로 알려져 있으므로(物理探査學會, 1990), 하부연암의 S파 속도는 최소 384 m/s 이상이 되며 N치도 최소 52 정도가 될 것으로 판단된다.

굴절법탐사 결과에 따른 지하구조 모델과 반사법탐사에 의한 영상화된 지하 지질구조에 근거하면, 조사구역은 4개 구간에서 지반의 안정성을 보이며 이들은 고각의 단층대에 의해 분리되어 있음을 알 수 있다. 이와 같은 단층대를 가로질러 건물이 위치한다면, 부동침하로 인하여 건물이 기울어지는 현상이 발생할 것으로 예상된다. 그러므로 아파트와 같은 대형건물의 위치는 단층대를 고려하여 배치되어야 할 것이며 단층대에 대한 지반강화 공법이 필요한 것으로 판단된다.

### 7. 결론

경북 포항시 일월동 택지개발지구에 대한 굴절법 및 반사법 탄성파탐사를 484 m 길이의 동서 방향으로 설정된 탐사 축선을 따라 실시한 결과 천부지반에 대한 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 탄성과 굴절법탐사 결과 조사구역은 크게 두 구간으로 나누어지는데, 축선의 동측 0-280 m 구간은 평균 400 m/s의 P파 속도를 보이고, 축선의 서측부에 해당하는 280-482 m 구간은 평균 340 m/s의 P파 속도를 보인다. 전자는 미고결 사암층이며 3~5 m의 층후를 보이고, 후자는 매립토층으로서 약 8~10 m 정도의 두께를 갖는다.

2. 그 하부는 평균 약 1900 m/s와 평균 약 2400 m/s의 P파 속도를 보여 퇴적암층으로된 기반암으로 해석되며, 암반등급은 풍화암~경암의 범주를 보이거나 대부분은 연암으로 해석된다.

3. 탄성과 반사법탐사 결과 3개의 고각의 단층대에 의해 기반암이 나누어져 있으며 단층대와 단층대 사이의 구간은 비교적 안정된 지반으로 해석된다. 단층대의 위치는 축선의 동쪽끝으로부터 125 m, 185 m, 310 m, 370 m 지점 부근으로 나타난다.

4. 미고결 사암층 및 매립토층과 기반암층의 경계면에서의 반사 계수는 약 0.6으로서, 대부분의 에너지가 반사되며 파쇄대 구간에서는 탄성과

너지가 깊이까지 침투하는 현상을 보인다.

5. 굴절법 및 반사법 탄성과 자료해석은 지질공학적으로 매우 중요한 정보를 제공하는 바, 지반의 안정구간과 불안정구간을 비파괴적인 방법으로 파악할 수 있었다. 대형건물의 위치를 단층대를 피하여 안정된 지반 구간에 위치하여야 하며 불안정 지반 구간에 대한 지반강화 공법이 필요한 것으로 판단된다. 또한 대형건물의 경우 그 기초를 지표하 3~10 m 하부에 존재하는 기반암내에 설치되도록 설계하여야 할 것이다.

### 사 사

이 연구는 교육부에서 지원하는 기초과학연구소 지원 프로그램(BSRI-98-5419)에 의한 연구결과임을 밝히며 재정적 지원에 감사드립니다. 탄성과 자료획득 및 자료처리에 수고한 공주대학교 지질환경과학과 류제라, 김성배, 유영희 대학원생에게 고마움을 표합니다. 또한, 본논문을 세밀하게 심사하여 논문의 질을 높여 주신 지구물리학회 박춘병 이사께도 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- 김기영, 김현규, 1997, 풍암분지 퇴적층의 지진파 속도 및 탄성계수 산출, 지질학회지, 33, 111-116.  
 김영화, 이기화, 성일경, 1990, 경북 북쪽에 있어서의 양산단층의 구조에 관한 지진기학적 연구, 지질학회지, 26, 393-403.  
 김중수, 구자학, 양승진, 서정희, 1968, 포항지구 탄성파탐사 보고서, 국립지질조사소, 물리 탐사 보고, 2, 211-217.  
 김팔규, 송무영, 김연천, 1995, 서산간척지 연약지반의 토질역학과 물리탐사 비교연구(II), 지구과학회지, 16, 292-298.  
 노진환, 1994, 제3기 연일층군의 층서, 암상 및 속성광물상, 석유지질학회지, 2, 91-99.  
 민경덕, 정종대, 1985, 중력탐사에 의한 경상층군내 왜관-포항간의 지하구조 연구, 광산지질학회지, 18, 321-329.  
 서만철, 이원국, 1992, 탄성파자료 속도분석에 관한 연구, 공주대학교, 논문집, 30, 81-88.  
 이현규, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤희수, 1992, 포항 및 장기분지에 대한 고지자기, 층서 및 구조연구: 화산암류의 K-Ar 연대, 광산지질학회지, 25, 337-349.  
 전인식, 1992, 건설 표준 품셈, 건설연구사, 60-61.  
 정희욱, 1995, 탄성파탐사를 이용한 매립지반의 천

- 부지반 구조연구, 지구과학회지, 16, 352-357.
- 정희옥, 1997, 표면파 분석에 의한 천부지반의 지반 공학적 성질에 관한 연구, 지구과학회지, 18, 420-425.
- 物理探査學會, 1990, “土と岩” の 彈性波速度 - 測定と利用 -, 日本物理探査學會(SEGJ), 327.
- Al Chalabi, M., 1974, Analysis of stacking, RMS, average and interval velocity, Geophysics, 22, 458-475.
- Kim, K. Y., Woo, N. C., Kim, H. K., and Jung, M. S., 1997, Seismic reflection studies near Eonyang in the Yangsan Fault System of Korea; in Lee Y. and Kim J. H. eds., Tectonic Evolution of Eastern Asian Continent; GSK 50th Anniversary International Symposium, Geological Society of Korea, 28-32.
- Yun, H. S., 1986, Emended stratigraphy of the Miocene formation in the Pohang Basin, Journal of Paleontologic Society of Korea, 2, 54-69.
- Yoon, S., 1975, Geological and Paleontology of the Tertiary Pohang Basin, Pohang district, Korea, Part 1., Journal of Geological Society of Korea, 11, 187-214.
- 

1998년 10월 14일 원고접수

1999년 2월 26일 원고채택