

SH 굴절파와 표면파탐사를 이용한 통도사 부근 양산단층의 횡파속도분석

조수제, 김기영

강원대학교 지구물리학과 (josj0602@hanmail.net)

(포스터발표)

1. 서론

한반도 남동부에 위치한 북북동-남남서 방향의 양산단층은 부산-경주-영덕에 이르는 약 200 km 길이의 주요 단층이다. 이 단층대 인접지역에서 Lee·Na(1983)는 미소지진과 역사지진 자료 분석을 통해 이 단층이 활성이라고 보고한 바 있으며, Lee·Jin(1991)은 서기 2년부터 1989년까지 발생한 126개 역사지진과 14개 계기지진 자료의 분석을 통해 양산단층이 활성일 가능성을 다시 강조하였다. 이렇게 양산단층대의 지진 활동성이 처음 제기된 이후, 이 단층대에 인접한 대도시, 원자력 발전소, 대규모 중화학 공업시설과 같은 중요 시설물들의 안전과 관련하여 사회적 관심이 집중되고 있다.

양산단층은 각종 지구물리학적 조사방법이 비교적 활발히 적용된 지역인데, 그 이유는 단층의 대부분이 지표에 노출되지 않고 골짜기를 채운 제4기 충적층 하부에 파쇄대 형태로 존재하므로 양산단층의 지하 지질구조 및 연장성 등을 파악하는데 지표의 노두조사만으로는 한계가 있기 때문이다. 이 지역에서 인공지진파를 이용한 연구로는 Kim et al.(1997)이 고해상도 탄성파 반사법을 이용하여 언양 부근의 양산단층이 속도 600 m/s 이내의 미고결층을 단절하고 있음을 영상화하고 이를 바탕으로 활성단층 가능성을 제시한 바 있다. 이 연구의 조사지역에서는 김기영·김동훈(2003)이 고해상도 반사파 및 굴절파 방법을 적용시켜 이 지역의 단층운동이 제4기까지도 계속되었을 가능성을 제시하였다.

이 연구는 경상남도 양산시 통도사 부근(Fig. 1)을 시험장소로 정하고 실시한 지진파탐사 종합연구의 일환으로 실시되었으며, SH 굴절법과 표면파조사를 통하여 양산단층의 지표부근 횡파속도구조와 주 단층의 경계를 밝히기 위하여 수행되었다.

2. 일반 지질

조사지역은 경상남도 언양시와 양산시 사이의 통도사 부근으로, 백악기 중엽에서 시작하여 제3기초까지 계속되었던 화산 및 심성활동 지역으로 분지발달 초기에 여러 종류의 화산암류가 분출 내지 관입한 후, 불국사화강암류로 알려진 심성암이 관입한 지역이다(민경덕

외, 1982). 1:50000 축척의 양산도폭(이민성, 강필중, 1964)에 의하면, 양산단층 계곡 내에 설정된 측선 주변에는 제4기 충적층, 신라계 주산안산암, 불국사계 흑운모 화강암이 존재한다 (Fig. 1). 조사지역 중앙부의 제4기 충적층은 양산천을 따라 그 주위에 발달하며, 주로 점토, 모래 및 자갈 등으로 구성되어 있는 하성퇴적층으로 하부의 화산암내지 화강암을 피복하고 있다. 조사지역 서측과 동측에 광범위하게 존재하는 불국사계 흑운모화강암은 일반적으로 중립질인 입상으로서 육안상 석영, 장석 및 흑운모 등의 조암광물이 식별된다. 주산안산암은 양산도폭상에서 서남부, 서북부, 중부, 중북부-동북부와 동남부-일대에 걸쳐 광범위하게 분포하며, 이들의 지리적인 분포 특징은 후기에 관입한 화강암류에 의한 것으로 판단된다. 양산 단층은 양산천의 방향과 일치할 것으로 생각되며, 이의 방향은 N15°E로서 남한의 일반적인 구조선방향에 근사한다. 양산단층은 화성암류들을 절단함으로써 확실한 구조적인 차이점을 찾을 수가 없으나, 지질분포상 단층임이 거의 확실시되며, 북쪽의 언양도폭, 남쪽의 동래도폭과 연장될 것으로 생각된다.

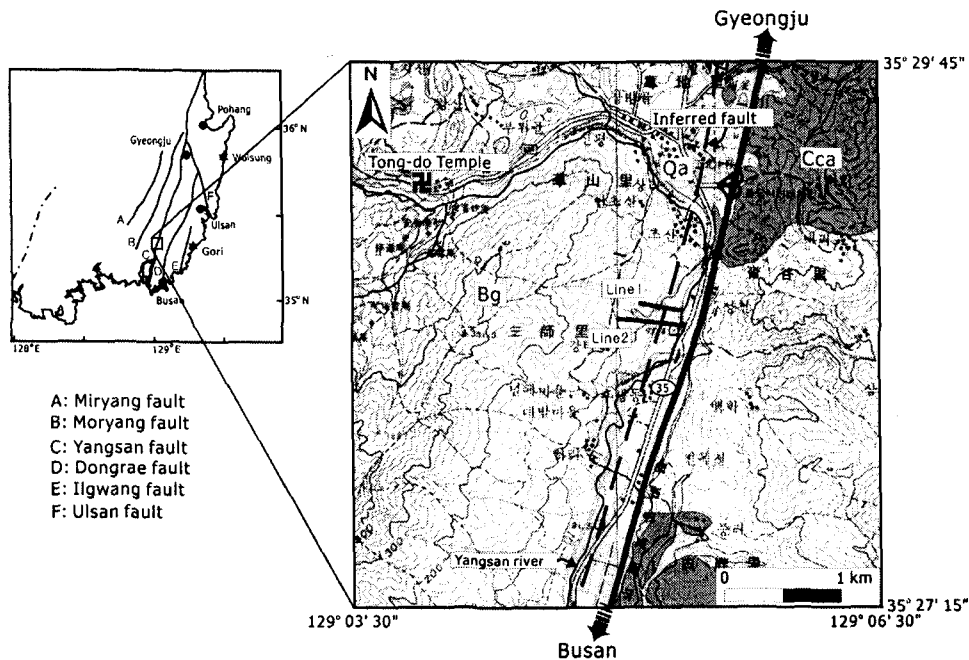


Fig. 1. Geologic map of the study area. Qa: alluvium, Bg: Biotite Granite, Cca: Chusan andesitic rock

최위찬 외(1998)는 조사측선과 가까운 양산군 하북면 박지리 부근에서 수행한 트렌치 조사를 통해 단층의 운동감각은 우수향을 지시하고 있고, 단층의 주향은 N20°E이며, 경사는 거의 수직으로 주향이동단층의 특성을 보여준다고 보고하였다. 또한, 각상 혹은 아원상의 안산암류 및 화강암류로 이루어진 제4기 자갈층이 단층에 의해 절단되고 있는 것으로 미루어 이 단층이 제4기에 발달한 것으로 판단하였으며, 부근의 지질 분포상태로 자갈층 하부에 불국사 화강암이 기반암으로 놓여있을 것으로 추정할 바 있다. 한편, 경재복 외(1999)는 양산 단층대 남부 언양일대에서 실시한 트렌치 조사와 지형분석을 통해 제4기 후기 고위 지형면 형성 후 5~12 m 정도 동측 상승의 수직변위를 동반하되 주향이동이 우세한 단층운동이 발생하였다고 주장하였다.

3. 표면파탐사 배경

표면파의 일종인 레일리파는 러브파에 비하여 훨씬 쉽게 발생시킬 수 있으며, 지표 부근 매질의 횡파속도에 관한 정보를 제공하므로, 최근 지반조사에 그 사용이 급격히 증가하고 있다. 현재 사용되는 표면파탐사 방법은 대부분 레일리파탐사로써, 레일리파탐사란 용어 대신에 표면파탐사라는 용어가 흔히 사용된다.

1980년대 초반에 지표 근처의 횡파 속도단면을 만들기 위한 SASW 분석법(Nazarian et al., 1983)이 처음 소개되었으며, 토목공학 분야에서 종파속도와 함께 포와송비를 구하는데 사용되어 왔다. 그러나 이 방법은 한 쌍의 수신기만을 사용하여 자료를 얻기 때문에, 보다 넓은 지역에서의 횡파 속도 변화를 알기 위해서는 수신기를 여러 번 옮겨서 신호를 발생시켜야 하므로, 많은 시간과 노력이 요구된다. 이러한 SASW 방법의 약점을 극복하기 위해 Park et al.(1999)은 다중채널 방식을 이용한 표면파 분석법(MASW)을 개발하였다. MASW 방법은, 현장에서 획득한 시간-공간(t-x) 영역 자료를 1차원 푸리에변환을 통하여 주파수-공간(f-x) 영역으로 변환한 후, 이를 위상이동 및 중합(phase shift and stack) 과정을 거쳐 위상속도와 주파수(c- ω)의 함수로 표현된 분산곡선으로 작성하고, 반복적 역산과정을 통하여 횡파 속도단면을 얻는 방법이다. 이 방법은 자료획득의 속도가 빠르고 전체적인 자료의 정확성이 높으며, 자료처리과정도 비교적 간단하다. 이 방법은 레일리파의 분산에 있어 다른 고차모드나 실체파들로부터 기본모드를 쉽게 구분 할 수 있으며 SASW 방법에서 나타나는 공간적 알리아싱을 피할 수 있다는 장점이 있다. Hayashi and Suzuki(2004)는 MASW 방법을 개선하여, 공중점 모음자료의 상호상관 함수값을 이용함으로써 위상속도 값을 대표하는 수평위치의 정확성을 높였다.

4. 자료획득

경상남도 양산시 하북면 통도사 부근에서 양산단층의 횡파속도구조를 밝히기 위하여 SH 굴절법과 표면파 조사를 실시하였다. 측선은 단층의 예상방향과 평행하게 놓여있는 35번 국도와 수직에 가깝게 거의 동서방향으로 설정하였다(Fig. 1). 360 m 길이의 측선 1과 그로부터 남쪽으로 약 150 m 떨어진곳에 위치한 600 m 길이의 측선 2는 동쪽으로 갈수록 낮아지는 계단형의 논을 가로질러 양산천까지 이른다. 각 측정점들의 상대고도를 ± 3 mm/km의 오차를 갖는 레이저측량기(Geotronics AB, 1996) 이용하여 정밀하게 측량하였다. 측선상의 최대 고도차는 측선 1은 서쪽 끝 측정점을 기준으로 295~305 m 부근에서 3.5 m로 비교적 평탄한 지형을 보이며, 측선 2의 경우 서쪽 끝 측정점을 기준으로 357 m 부근에서 5 m, 522~577 m의 양산천 부근에서는 주변 고도와 약 7 m의 비교적 큰 고도 차이를 보이고 있다. 측선 동쪽의 35번 국도는 교통량이 매우 많은 편으로 차량소음에 의한 잡음이 심하게 인지되었고, 바람이 많이 불어 조사하는데 어려움이 따랐다.

SH 굴절법탐사는 24채널의 수신기 전개로 측선의 중앙점, 중앙으로부터 15 m, 31.25 m, 51.25 m 지점과 이와 대칭되는 3개점 등 7개의 타격점에서 5 kg 해머를 이용하여, 30 cm \times 30 cm \times 80 cm의 원목으로 제작한 S파 발생용 침목을 타격함으로써 인공지진파를 발생시키는 방법으로 수행하였다. 침목은 측선방향에 수직하게 놓고, 좌, 우측 양쪽타격을 통해 P파

요소를 제거하였으며, 발파점에서 5회씩 타격하여 신호/잡음비를 높였다. 수신기는 S과 전용 8 Hz 지오폰을 사용하였으며, 2.5 m 간격으로 설치하였고, 수신된 아날로그 신호는 OYO사의 McSeis-SX 탄성과 기록계를 이용하여 0.5 ms의 샘플률로 아날로그 자료를 수치로 변환한 후 512 ms 동안 기록하였다(Table. 1).

Table 1. Acquisition parameters.

	SH Refraction survey	Surface wave survey
Source	5 kg Sledgehammer	5 kg Sledgehammer
Vertical Stack	500 %	500 %
Receiver	8-Hz Geophone	4.5-Hz Geophone
Receiver Spacing	2.5 m	5 m
Number of Channel	24	24
Recorder	OYO McSeis-SX	OYO McSeis-SX
Recorder Length	512 ms	2048 ms
Sampling Interval	0.5 ms	2 ms
Analog Filter	Not Applied	Not Applied
Shooting pattern	7 sources per spread	split-spread roll-along
Number of Record	42(Line1), 70 (Line2)	73 (Line1), 117 (Line2)

표면파탐사는 수신기 및 발파점 간격을 각각 5 m로 하였으며, 근거리 윗셋 2.5 m 의 양 측전개(split-spread)방식으로 실시하여, 측선 1에서는 73개, 측선 2에서는 117개의 공발점 모음자료(common shot gather)를 획득하였다. 5 kg 해머를 알루미늄 판에 수직으로 타격하여 인공적인 지진파를 발생시켰으며, 각 발파점마다 5회씩 타격하여 신호/잡음비를 높였다. 기록계는 SH 굴절법과 마찬가지로 OYO사의 McSeis-SX를 사용하였고, 24채널 4.5 Hz 지오폰에 수신된 신호는 2 ms 간격으로 총 2048 ms 동안 필터를 사용하지 않고 수치형태로 기록하였다(Table. 1).

5. 자료처리

SH 굴절법으로 기록된 자료는 OYO사의 상업용 소프트웨어인 SeisImager/2D를 이용하여 처리하였다. 원시자료를 자료처리용 소프트웨어 내부포맷으로 변환시킨 후, 타격점 및 수신기의 위치정보와 상대고도 정보를 입력하고 초동을 선택하였다. 초동선택은 자료처리 결과에 직접적인 영향을 미치는 매우 중요한 단계이므로, 양단주시 일치 및 주시곡선의 평행성에 유념하여 신중하게 선택하였다. 선택한 초동주시를 이용하여 주시곡선을 작성하였으며, 속도분석 과정을 통하여 표층속도와 기반암의 속도를 구간별로 구하였다. 측선 1과 2의 주시곡선에 대한 속도분석 결과, 표층속도와 기반암의 속도가 각각 0.1 km/s와 1.6 km/s 정도로 나타났다. 이러한 속도분석과정을 통하여 측선 1과 2의 역산 속도 범위를 0.1~2 km/s

로 정하였다. 역산수행을 위한 초기모델은 깊이가 깊어질수록 속도가 단순히 증가하는 모델로 설정하였다. 이 모델을 대상으로 페르마원리를 이용한 파선추적을 실시하여 주시를 계산한 후(Siato, 2001), SIRT(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique)방식의 역산을 10번 반복수행하여 평균제곱근 오차가 각각 1.96 ms와 2 ms 이내가 되도록 하였다.

표면과 조사방법으로 기록된 원시자료는 OYO사의 상업용 소프트웨어인 SeisImager/SW를 이용하여 처리하였다. SEG-2 포맷으로 기록된 원시자료를 자료처리용 소프트웨어 내부포맷으로 변환시킨 후, 파원 및 수신기의 위치 정보와 측정별 상대고도 등의 정보를 입력하였다. 이 소프트웨어는 Hayashi and Suzuki(2004)의 공중점 상호상관 분석법을 이용하는데, 이를 위해 전체 자료를 10m 간격의 공중점 모음자료로 분류하였다. 공중점 모음자료를 이용하여, 측선 1의 경우는 위상속도 0~1 km/s, 주파수 0~55 Hz 범위로 35개의 분산곡선을 구하였으며, 측선 2의 경우는 59개 분산곡선을 위상속도 0~1 km/s, 주파수 0~45 Hz 범위로 구하였다. 이 분산곡선들은 저주파범위에서 해상도가 급격히 떨어지므로 6.0 Hz 이하의 자료를 삭제하였으며, 6.0 Hz 이상의 주파수 구간에서도 잡음의 영향이 심한 부분은 편집하였다. 역산을 수행을 위한 초기모델을 100~1000 m/s 속도범위에서 하부로 갈수록 속도가 증가하는 10개 층으로 구성하였으며, 비선형 최소자승법으로 역산을 반복 수행하여 횡과 속도 단면을 얻었다(Xia et al., 1999). 역산은 관측된 분산곡선과 이론적인 분산곡선의 차를 최소화하기 위해서 10번 반복수행 하였고, 평균제곱근 오차는 측선 1과 2에서 각각 1.72 ms와 1.45 ms이다.

6. 자료해석

Fig. 2는 SH 굴절법 자료를 분석하여 얻은 횡과 속도단면으로, 가로축은 원점으로부터의 거리를 세로축은 깊이를 나타낸다. 측선이 거의 동서 방향으로 단면의 왼쪽과 오른쪽은 각각 서쪽과 동쪽을 나타낸다. 또한 가장 고도가 높은 원점을 깊이 0 m로 하고 각 쉘들의 상대 깊이를 도시하였다. 측선 1(Fig. 2a)에서 250 m/s 이하의 속도를 갖는 표층은 평균 1 m 미만의 두께로 분포하며, 측선의 서쪽 끝 측정으로부터의 거리 (이하 '원점거리') 180 m 부근 까지, 풍화대층으로 생각되는 속도 950 m/s 이하의 층이 평균 22 m 정도로 두껍게 분포하나, 원점거리 180-280 구간에서는 평균 8 m로 얇아지다가, 다시 280 m 동쪽 구간에서 두꺼워지는 것을 볼 수 있다. 측선 2(Fig. 2b)는 속도 250 m/s 이하의 표층이 평균 5 m 두께로 분포하며, 원점거리 300 m 부근까지, 속도 950 m/s 이하의 풍화대층이 평균 25 m 정도의 두께로 분포하나, 원점거리 300-430 m구간에서는 평균 10 m 미만으로 얇아지다가, 다시 430 m 지점에서 두꺼워진다. 계속해서 480 m, 530 m, 560 m 지점의 또 다른 경계를 지나면서 두께가 변하는 모습을 보인다.

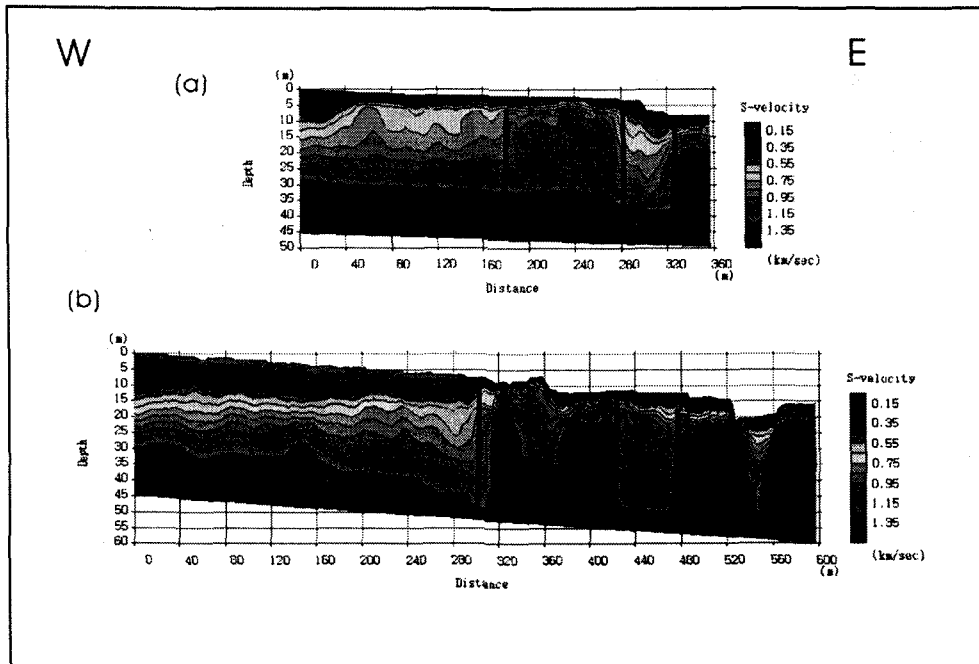


Fig. 2. Refraction velocity tomograms of SH waves for Lines (a) 1 and (b) 2.

Fig. 3은 표면파를 이용하여 얻은 횡파 속도단면으로, 측선 1(Fig. 3a)은 원점거리 160-180 m 부근을 경계로, 이보다 서쪽에서는 횡파속도 250 m/s 이하인 표층이 5 m 이하의 얇은 두께로 분포하나, 원점거리 180 m 보다 동쪽 구간에서는 나타나지 않는다.

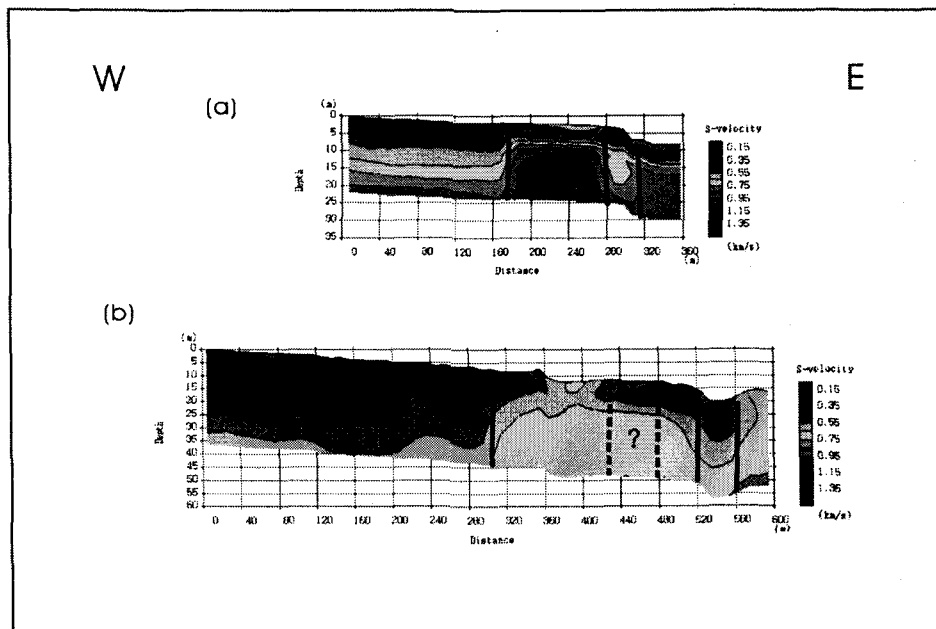


Fig. 3. S-velocity obtained from the dispersion curves of Rayleigh waves for Lines (a) 1 and (b) 2, respectively.

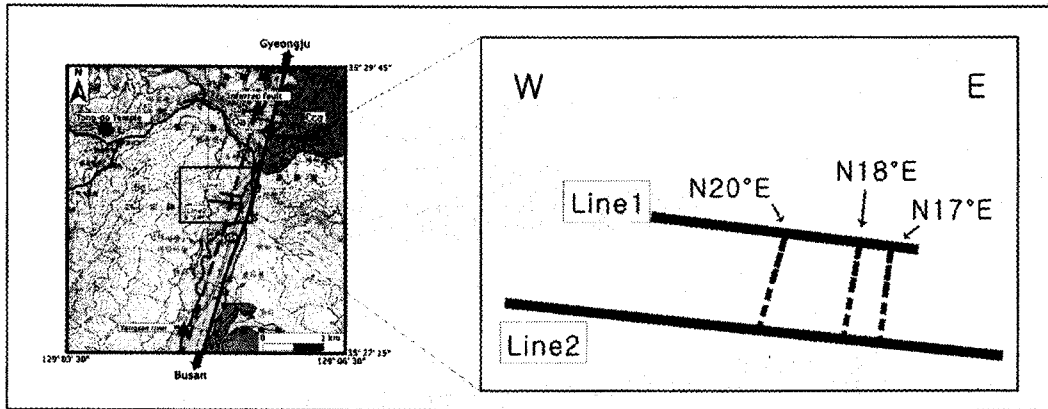


Fig. 4. Map view of fault locations on Lines 1 and 2. Possible continuation of the faults (dashed lines) and their corresponding strikes are indicated.

표면과 자료의 분해능이 떨어져 10 m 하부의 자료는 신뢰할 수 없으나, 측선 1의 SH 굴절과 단면에서 나타나는 원점거리 180 m와 280 m, 320 m의 경계가 표면과 단면에서도 나타남을 볼 수 있다. 측선 2(Fig. 3b)에서도 횡파속도 분포의 비슷한 양상을 보인다. 원점거리 300 m 부근을 경계로, 이보다 서쪽에서는 횡파속도 250 m/s 이하인 표층이 평균 8 m의 두께로 분포하나, 원점거리 300 m의 동쪽 구간에서는 나타나지 않는다. 측선 2의 SH 굴절과 단면에서 나타나는 원점거리 430 m와 480 m의 경계가 표면과 단면에서는 자료의 해상도가 떨어지는 관계로 나타나지 않았다.

따라서 양산단층의 주단층은 측선 1과 2의 속도가 높은 용기된 부분의 경계면일 가능성이 높은 것으로 판단된다. 특히 서쪽 경계가 뚜렷하며, 측선 1의 원점거리 300 m 부근과 측선 2의 180 m를 연결하는 선은 주향이 N20°E 정도이고, 동쪽 경계인 측선 1의 원점거리 430 m 지점과 측선 2의 280 m를 연결하는 선은 주향이 N18°E 정도로 계산된다(Fig. 4). 이 지역에서 양산단층 계곡의 주향이 N15~20°E 인 점을 감안한다면, 위자료의 2차원적 해석 내용이 신뢰할 만한 것으로 평가된다.

7. 결론

경상남도 양산시 통도사 부근에서 2개 조사측선을 따라 획득한 SH 굴절과 자료와 표면과 자료의 횡파 속도단면을 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

SH 굴절과에서 측선 1은 250 m/s 이하의 속도를 갖는 표층이 평균 1 m 미만의 두께로 분포하며, 원점거리 180 m 부근 까지, 풍화대층으로 생각되는 속도 950 m/s 이하의 층이 평균 22 m 정도로 두껍게 분포하나, 원점거리 180-280 구간에서는 평균 8 m로 얇아지다가, 다시 280 m 동쪽 구간에서 두꺼워지는 것을 볼 수 있다. 측선 2는 속도 250 m/s 이하의 표층이 평균 5 m 두께로 분포하며, 원점거리 300 m 부근까지, 속도 950 m/s 이하의 층이 평균 25 m 정도의 두께로 분포하나, 원점거리 300-430 m구간에서는 평균 10 m 미만으로 얇아지다가, 다시 430 m 지점에서 두꺼워진다. 계속해서 480 m, 530m, 560 m 지점의 또 다른 경계를 지나면서 두께가 변하는 모습을 보인다.

표면과 자료에서 측선 1은 원점거리 160-180 m 부근을 경계로, 이보다 서쪽에서는 횡파속

도 250 m/s 이하인 표층이 5 m 이하의 얇은 두께로 분포하나, 원점거리 180 m 보다 동쪽 구간에서는 나타나지 않는다. 측선 2에서는 원점거리 300 m 부근을 경계로, 이보다 서쪽에서는 횡파속도 250 m/s 이하인 표층이 평균 8 m 두께로 분포하나, 원점거리 300 m 보다 동쪽 구간에서는 나타나지 않는다. 측선 2의 SH 굴절과 단면에서 나타나는 원점거리 430 m 와 480 m의 경계가 표면과 단면에서는 자료의 해상도가 떨어지는 관계로 나타나지 않았다.

측선 1과 2에서의 결과를 종합해 보면, 양산단층의 주단층은 측선 1과 2의 속도가 높은 용기된 부분의 경계면일 가능성이 높은 것으로 판단되며, 서쪽 경계인 측선 1의 원점거리 300 m 부근과 측선 2의 180 m를 연결하는 선은 주향이 N20°E 정도이고, 동쪽 경계인 측선 1의 원점거리 430 m 지점과 측선 2의 280 m를 연결하는 선은 주향이 N18°E 정도로 계산된다. 이 지역에서 양산단층 계곡의 주향이 N15~20°E 인 점을 감안한다면, 위 자료의 2차원적 해석 내용이 신뢰할 만한 것으로 평가된다.

표면과 분석을 통해 얻은 횡파 속도단면은 분해능이 떨어지는 관계로 10 m 정도까지만 신뢰할 수 있다고 판단되나, 전체적인 횡파 속도변화의 양상과 주요 경계의 분포는 SH 굴절법 단면과 유사함을 보인다.

참고문헌

- 경제복, 이기화, 오까다 아쓰마사, 1999, 양산단층대의 고지진학적 연구-변위지형 분석 및 트랜치 조사, 지구물리학회 v. 2, n. 3, p. 155-168.
- 김기영, 김동훈, 2003, 통도사부근 양산단층대에서의 고해상도 탄성과 조사연구, 제6차 정기총회 및 학술발표회 초록집, 대한지구물리학회, p. 15
- 민경덕, 김옥준, 윤석규, 이대성, 주승환, 1982, 한국남부의 백악기말 이후의 화성활동과 광화작용에 대한 판구조론의 적용성 연구(I), 광산지질, 15권, 3 호, p. 123-154.
- 이민성, 강필중, 1964, 한국지질도(1:50,000), 양산도폭 및 설명서, 국립지질조사소.
- 최위찬, 류충렬, 기원서, 이봉주, 이병주, 황재하, 박기화, 최영섭, 최성자, 최범영, 조동룡, 김복철, 송교영, 채병곤, 김원영, 김중렬, 이상규, 조성준, 황세호, 황학수, 김유성, 현혜자, 박인화, 이희일, 이동영, 이창범, 김주용, 양동윤, 박덕원, 신성천, 김유숙, 김인준, 류장한, 진명식, 전명순, 지현철, 전정수, 신인철, 강익범, 신현모, 권무창, 오수정, 김상곤, 임무수, 김순길, 정향영, 1998, 양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가 최종보고서(1권), 한국자원연구소, 대전.
- Geotronics AB, 1996, Geodolite 506 user manual, EkonomiPrint AB, Sweden, p.162.
- Hayashi, K., Suzuki, H., 2004, CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data, Exploration Geophysics, 35, p.13-19.
- 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, p. 28-32.
- Lee, K. and Na, S.H., 1983, A study of micro-earthquake activity of the Yangsan fault, Journal of the Geological Society of Korea, v. 19, p. 127-135.
- Lee, K. and Jin, Y.G., 1991, Segmentation of the Yangsan fault system: Geophysical

- studies on major faults in the Gyeongsang Basin. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 27, p. 439-449.
- Lo, T. and Inderwiesen, P., 1994, *Fundamentals of Seismic Tomography*. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists, p.178
- Nazarian, S., Stokoe, K.H., and Hudson, W.R., 1983, Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems: *Transport. Res. Record*, 930, p.38-45.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 1999b, Multichannel analysis of surface waves: *Geophysics*, 64, p.800-808.
- Saito, H., 2001, *Seismic travelttime tomography for shallow subsurface explorations*. Ph.D. thesis, Hokkaido University, p.126.
- Xia, J., Miller, R.D., and Park, C.B., 1999, Configuration of near surface shear wave velocity by inverting surface wave: *Proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems' 99*, p.95-104.