

중력추를 이용한 풍암분지 경계 부근에서의 고해상도 반사파 탐사

김현규* · 김기영*

High-resolution Seismic Study Using Weigh-drop at the Boundary of Pungam Basin

Hyoun Gyu Kim and Ki Young Kim

ABSTRACT : A high-resolution seismic survey was conducted at the northeastern boundary of Pungam basin, one of the Cretaceous sedimentary basins in Korea. A 100 kg weight was used as an energy source and was found to be better than a sledge hammer in mapping deeper geologic structures. Several processing techniques such as f-k filtering, predictive deconvolution, and time-variant filtering are useful to enhance the signal-to-noise ratio by suppressing unwanted seismic energy. Four seismic units are recognized where many vertical faults are developed. The boundary fault between sedimentary rocks and Precambrian gneiss is identified along with a fracture zone of approximately 30 m wide. Bedding planes of the sedimentary rocks dipping westward are interpreted to be limbs of a syncline or volcanic flow. These faults and tilted bedding planes indicate that the basin had undergone significant tectonic deformation.

서 론

고해상도 (high-resolution) 반사파 탐사는 전통적인 탄성파 탐사에 비해 높은 주파수 대역으로 기록하며, 특히 천부의 해상도를 높이기 위한 지구물리 조사법이다 (Sheriff, 1991). 따라서 자료획득, 처리, 해석과정도 석유나 가스 탐사를 목적으로 하는 반사파 탐사와는 차이가 있다. 이러한 고해상도 반사법을 이용한 탐사는 지난 80년대 이래 많은 발전을 이루었으며, 특히 육상 퇴적분지 및 단층대 등의 천부 지질구조 해석에 성공적으로 적용되어 왔다 (Jongerius and Helbig, 1988; Shedlock *et al.*, 1990; Bruner and Landa, 1991; Lee *et al.*, 1996). 국내에서는 탄성파 반사법 자료를 이용하여 김기영 (1995)이 춘천 하도의 현생 퇴적구조를 밝힌 예와 김기영 등 (1996, 1997a, 1997c, 1998)과 정성태 등 (1996)이 진안분지와 풍암분지 등의 육상 퇴적분지에 대해 수행한 일부 연구를 제외하면 거의 보고된 바 없으며, 중력, 자력, 지전기 등의 지구물리학적 방

법이 주로 사용되어 왔다. 최근에는 전자파 탐사방법을 이용하여 분지의 지질구조를 파악하고 단층을 해석하려는 연구가 민경덕 등 (1988), 송영수 등 (1992, 1994, 1996), 김지수 등 (1997)에 의해 시도된 바 있다.

이 연구는 풍암 퇴적분지 경계에서 12 채널 고해상도 반사파 탐사를 실시하여, 퇴적암과 주위의 기반암 및 화산암과의 경계를 밝히고 분지의 지하구조를 구명하는 데 목적을 두고 있다. 특히 파원으로 100 kg 중력추를 사용함으로써, 통상적인 해머 파원에 비해 강력한 에너지로 투과심도를 높여 하부층의 구조를 명확히 하고자 하였다.

일반 지질

풍암분지 (Fig. 1)는 한반도 중부의 강원도 홍천군과 횡성군 일부에 걸쳐 분포하고 있으며, 중생대 백악기에 대비되는 비교적 작은 규모의 퇴적분지로서, 한반도를 북동-남서 방향으로 가로지르는 주향이동 단층대를 따라 분포하고 있는 여러 육상 퇴적분지 중의 하나이다 (강필중, 진명식, 1972). 이 지역의 퇴적암층은 약 300~500 m의 두께로 7 km×20 km의 면적에 노출되어 있으며, 역암, 사암, 이암, 응회암, 화산력암 등의 쇄설성 퇴적암으로 구성되어 있다

* 강원대학교 지구물리학과 (Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 220-701, Korea), E-mail: hgkim@joel.hansang.ac.kr

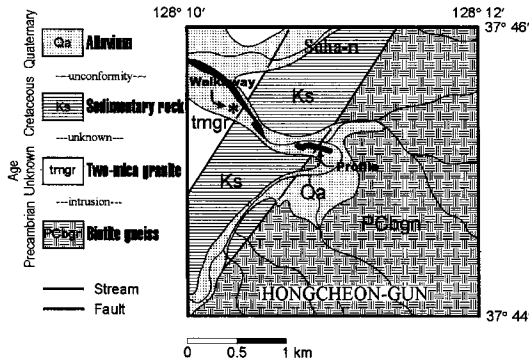


Fig. 1. Geologic map of the study area. The seismic profile and the walkway site are indicated with a solid line and an asterisk, respectively.

(정대교, 김경희, 1997). 이 퇴적암류는 기반암인 선캠브리아기 편마암류와 시대 미상의 복운모 화강암을 부정합적으로 덮고 있으며, 중생대 안산암 및 화강암류에 의해 관입되어 있다. 정대교와 김경희 (1997)는 퇴적암을 암종과 입도, 일차 퇴적구조 및 퇴적층 형태에 따라 12개의 퇴적상으로 분류하고, 퇴적 환경을 선상지 및 층적평원과 이에 인접한 호수 환경의 상부, 중부, 하부로 해석하였다. 분지 발달 과정에서 화산퇴적물이 가장 우세하였고 결국 퇴적층은 쇄설암으로부터 화산쇄설성 암석으로 변화되었다.

이회권 (1997)의 최근 연구에 따르면 풍암분지의 주요한 지질구조로서 고경사를 가지는 좌수향 주향이동 단층대인 풍암단층대가 있으며, 이의 주향은 분지의 남서부에서 북동부까지 N45°E, N53°E, N35°E로 변화한다. 또한 퇴적암 내에는 단층의 주향이동 운동에 의한 전단응력으로부터 생긴 많은 지질구조들이 발달되어 있으며, 이 전단대는 초기에는 연성이었다가 삭박에 의해 분지가 상승하면서 쇄설단층대로 전환되었다. 그는 풍암분지의 현재 기하학적 형태와 단층의 운동감각을 고려하여 압축형 주향이동 변형환경에서 생성된 단층연변침하지 (fault margin sag) 또는 횡압축분지 (transpressional basin)로 해석하였으며, 이 점에서 신장형 변형환경에 의해 생성된 인리형분지 (pull-apart basin)로 알려진 공주분지, 음성분지, 진안분지 등 동시대의 다른 분지들과는 차이를 보인다고 보고하였다.

소음 분석

반사파 조사시 적용할 최적 야외변수 결정을 위하여, 1996년 2월 강원도 홍천군 수하리 부근에서 위커웨이 방식을 이용한 지진파 소음분석을 실시하였다 (Fig. 1). 시험 위치는 반사파 측선으로부터 강을 따라 약 700 m 북

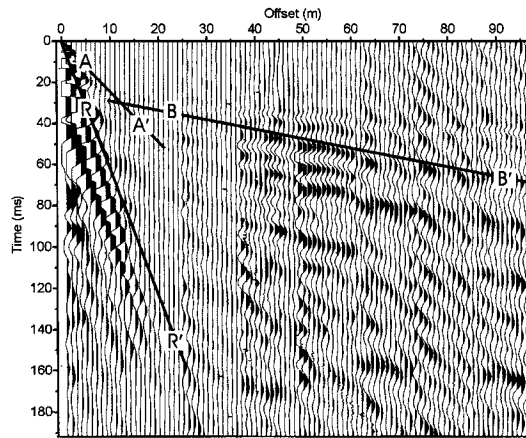


Fig. 2. Walkway noise data. Rayleigh, direct, and refracted waves are indicated with RR', AA', BB', respectively.

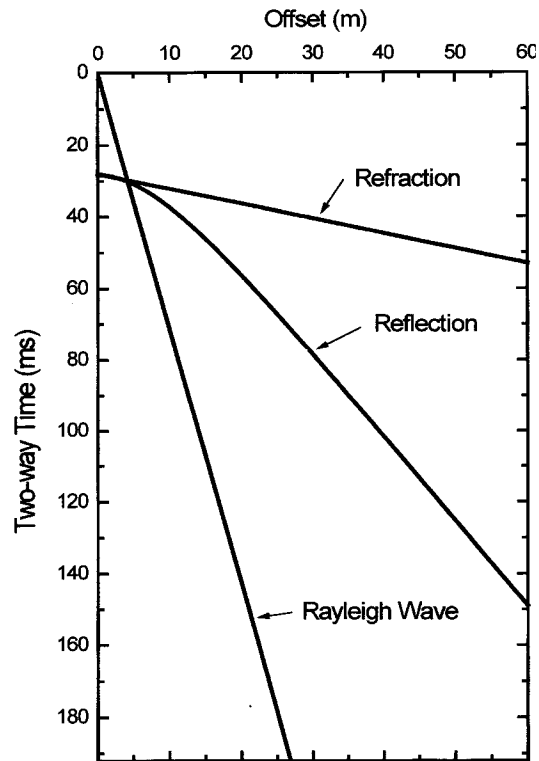


Fig. 3. Traveltime curves of various seismic waves. Maximum group velocity of the Rayleigh wave, refraction velocity, and RMS velocity of the reflection event are 410 m/s, 140 m/s, and 2400 m/s, respectively.

서쪽에 위치하며 1997년 8월 실시한 반사파 탐사와는 시간적으로 차이가 있다. 위커웨이 조사 위치는 화강암 지역에 놓여 있는 반면 반사파 측선은 퇴적암과 편마암 경계를 횡단하므로 풍화층의 두께에 차이가 있을 것으로 생

각되며, 계절적인 차이로 인해 지하수위도 차이가 있을 수 있을 것이 예상된다.

종파 (P wave)를 이용한 반사법을 실시할 때 신호대잡음비를 저하시키는 가장 중요한 요인인 레일리파 (Rayleigh wave)는 Fig. 2에서 최대 군속도 (maximum group velocity)가 140 m/s (RR')이며, 우세주파수가 약 50 Hz 인 것으로 분석된다. 한편 직접파 AA'의 속도는 410 m/s, 굴절파 BB'의 속도는 2,400 m/s, 절단시간은 28 ms로 측정된다. 수평 2 층 모델을 가정하면 미고결 퇴적물 (속도 410 m/s)이 5.8 m 두께로 쌓여 있고, 그 하부에는 암층 (속도 2400 m/s)이 존재하는 것으로 해석된다. Fig. 3은 이를 바탕으로 예상되는 지진파들의 주시곡선을 작성한 것이며, 대상 깊이를 150 ms까지로 할 경우 근거리 윌셋 15~20 m, 지오폰 간격 5~10 m, 50 Hz 고주파 통과필터, 기록 길이 192 ms가 이상적으로 판단되었다.

자료 획득

조사측선은 지질도 상에 퇴적암과 편마암의 경계로 추정되는 곳을 지나도록 설정되었으며 (Fig. 1), 주변에 하천이 흐르고 지표는 왕자갈 (boulder)로 덮여 있다. 자료 획득변수는 Table 1에 요약하였다. 측선 상의 3 m 간격 측정마다 광파거리 측량기를 이용하여 측정오차 ±3 mm/km 이내로 고도를 측정하였으며 (Geotronics AB, 1996), 측정자료는 자료처리 정보정 단계에 이용되었다. 100 kg 철구를 직경 40 cm, 두께 3 cm의 철판 위에 2.3

Table 1. Acquisition parameters.

Source	
Type	100 kg weight at 2.3 m Φ=40 cm, t=3 cm steel plate
Shot interval	3 m
Receiver	
Type	100 Hz geophone
Interval	3 m
Recorder	
Record length	192 ms
Sampling interval	0.2 ms
Analog filter	75~475 Hz (Butterworth)
Gain type	Programmed (6 dB/48 ms)
Layout	
Shooting method	End-on
Number of channel	12
Near-trace offset	18 m
CMP coverage	Nominal 600%

m 높이에서 자유낙하시켜 지진파를 발생시켰으며, 12 채널 Bison 8012A 장비를 이용하여 총 107개 기록을 얻었다. 타격 및 지오폰 간격을 모두 3 m로 하여 600%의 중심점 (CMP) coverage를 얻었다. 0.2 ms 간격으로 192 ms 동안 기록하였으며, 6 dB/48 ms의 계단형 이득함수를 사용하여 장비의 다이내믹 범위를 넓혔다. 고주파 성분을 많이 기록하기 위하여 파윈 및 수신 배열을 사용하지 않았으며, 근거리 윌셋을 18 m로 정하고 100 Hz 고주파 지오폰과 75 Hz 고주파 통과필터를 사용하여 레일리파가 최소한으로 기록되게 하였다.

자료 처리

자료처리는 Power Macintosh 7600에 설치된 Seismic Processing Workshop (SPW)을 이용하여 수행하였다. 처리순서는 일반적인 처리과정을 따랐으며 굴절파 제거 및

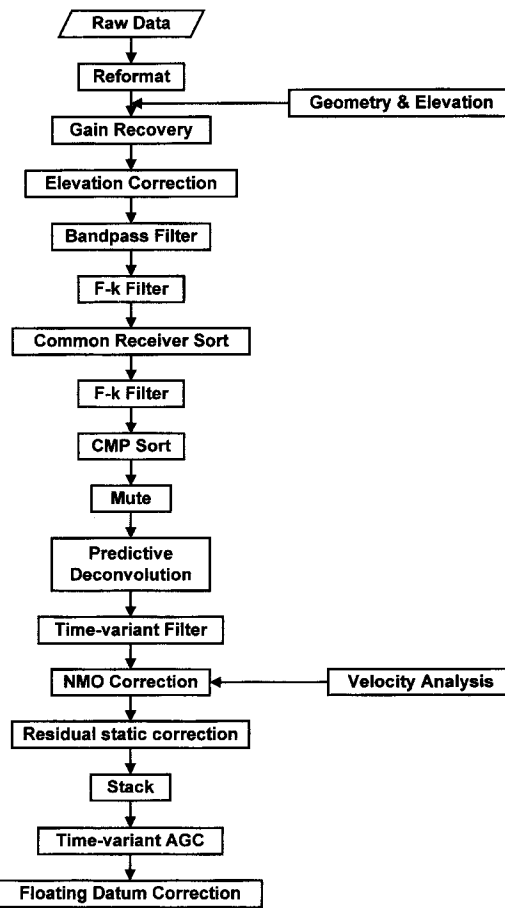


Fig. 4. Major processing sequence.

천부의 속도분석에 초점을 맞추었다 (Fig. 4). 표본자료에 대한 단계별 시험을 통하여 최적의 매개변수를 결정하였다.

포맷 변환

Bison 장비에서 PC로 전송된 자료는 레코드 단위로 저장되며 형식은 SEG-1 규약을 따른다 (Bison Instruments, 1985). 각 레코드는 260 바이트의 헤더 부분과 11700 바이트의 지진파자료 부분으로 기록되어 있으며, 자료처리를 위해 SPW의 내부포맷으로 변환시켰다. SPW 파일포맷은 지진파자료, 라인헤더, 트레이스헤더 부분으로 구성되어 있으며 처리 내력 및 색인까지 포함하고 있는 형식으로 되어 있다 (Parallel Geoscience Corporation, 1997).

실진폭 회수

자료획득 시에 적용하였던 계단형 이득함수를 제거하

여 주었고, 시간에 따른 파형의 변화를 방지하고 구면발산 및 흡수효과에 대한 보정을 하기 위하여 시간의 지수 형태로 증가하는 이득함수를 적용하였다. 지수값으로 1.5, 1.7, 2.0, 2.5를 시험하여 그 중 진폭이 비교적 균등화되는 2.0을 선택하였다 (Fig. 5).

부동 기준면보정 (floating datum correction)

조사지의 지표는 대체로 평탄하였으나 작은 양의 기복도 고해상도 방법에 미치는 영향이 크므로 정보정정이 요구된다. 측량기로 측정한 최대 고도차는 약 2.77 m로서, 표면층의 속도를 410 m/s로 하였을 경우 최대 정보정치는 6.76 ms에 이른다. 기록 길이가 짧으므로 최대한의 정보를 얻기 위해 수평 기준면보정보다는 부동 기준면보정을 실시하였다. 각 공심점에서 모든 발파점과 수신점 고도의 중앙값을 택하여 기준면을 정의하고, 이로부터 추점마다 보정치를 계산하여 공발점 자료에 적용하였다. 중합 후에

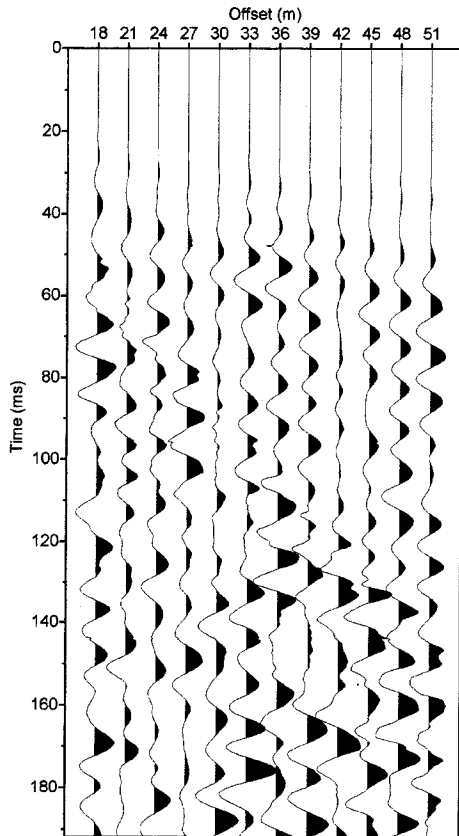


Fig. 5. Common shot gather at shot point 12. The process for true amplitude recovery was applied to the data.

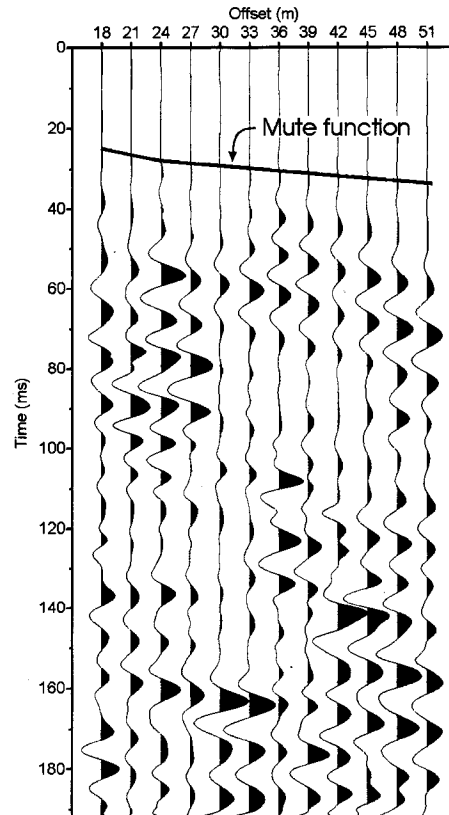


Fig. 6. The same shot gather with Fig. 5 after f-k filtering in both shot and receiver domains. The initial mute function is also defined.

는 각 공심점 트레이스에 대하여, 정의된 부동 기준면에 대한 정보정을 하였다.

주파수-파수 (f-k) 필터

자료획득 시 고주파 지오폰과 고주파 통과 필터를 사용했음에도 불구하고 레일리파는 여전히 신호보다 강한 에너지를 갖고 있고, 지하수면에서의 임계굴절파도 강하게 나타난다. 이렇게 불필요한 신호를 없애기 위하여 공통발파점 (common shot point) 및 공통수진점 (common receiver point) 자료에서 1500 m/s보다 작은 속도는 주파수-파수 영역에서 제거하였으며, 효과적으로 레일리파와 굴절파 에너지를 감소시켰다. Fig. 6의 115 ms, 135 ms 부근의 반사 이벤트들이 Fig. 5와 비교하여 잘 나타나 있음을 볼 수 있다. 그러나, 이렇게 높은 속도로 필터링하는 경우 낮은 속도를 갖는 상부의 반사파까지 영향을 받으므로 최종 중합단면에는 천부의 구조가 잘 나타나지 않을 수 있다.

뮤트 (mute)

직접파와 굴절파는 속도분석을 실시하기 전에 제거시켜 상속도 중합시 중합되지 않도록 해야 한다. 따라서 5 ms 구간에서 Hanning함수 형태의 경사함수 (taper function)를 갖는 초기뮤트를 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 적용하여 직접파와 굴절파를 소거시켰다.

중합전 디콘볼루션 (prestack deconvolution)

다중 반사파와 같이 지진파자료에 나타나는 여러 일관성 잡음 중, 주로 반향파를 없애기 위하여 중합전 디콘볼루션을 실시하였다. 신호대 잡음비가 높지 않은 자료에서는 스파이킹 디콘볼루션을 사용했을 경우 잡음성의 고주파를 많이 함유하게 되어 해상도를 떨어뜨리는 결과를 가져올 수 있다, 따라서 이 연구에서는 예측 디콘볼루션 (predictive deconvolution)을 적용하였다. 연산자길이는 입력자료의 자기상관 함수로부터 첫 번째 포락선의 길이인 88 ms로 정하였으며, 예측거리는 두 번째 영점 교차거리로부터 9 ms를 선택하였다. 연산자 계산시 안정을 위한 백색잡음 수준은 0.1%로 하였다.

시변대역필터 (time-variant filter)

시변대역필터는 두 가지 목적으로 적용하였다. 첫째는

고주파를 통과시켜 천부의 세밀한 구조를 찾아냄과 동시에 심부에 저주파를 통과시켜 보다 광역적인 구조를 보기 위한 것이고, 두 번째로는 디콘볼루션 과정에서 야기된 고주파 잡음을 배제하기 위함이다. 이를 위해 상부 구간에서는 100~350 Hz, 중부 구간에서는 75~150 Hz, 하부 구간에서는 50~150 Hz의 통과 주파수대를 설정하였다.

속도 분석

낮은 신호대 잡음비와 600%의 낮은 중합수는 속도분석에 있어 큰 장애 요인으로 작용하였고, 최대 51 m의 짧은 전계거리로 인해 수십 m 이하 깊이에 대하여는 충분히 정확한 속도 정보를 얻기가 어려웠다. 이에 따라 coherency를 이용한 방법이나 NMO 속도분석 방법은 적용하기 어려우므로 육상자료 처리시 일반적인 상속도 중합 (constant velocity stack)을 이용하여 속도분석을 수행하였다. 속도분석이 어려운 하부층의 속도는 김기영과 김현규 (1997b)가 이 퇴적분지 내의 시추공에서 수직탄성파 (VSP) 방법으로 측정된 결과를 이용하였다.

잔여정보정 (residual static correction)

기준면보정을 적용한 이후에도 지표의 기복, 풍화대 두께, 풍화대 속도 등의 급격한 변화로 인하여 주시곡선은 완전한 쌍곡선 궤도를 따르지 않는다. 이러한 자료들은 동보정을 거치게 되면 일직선 상에 배열되지 못한 신호들을 포함하게 되며, 이들은 중합단면의 질을 저하시키고 의사구조를 만들기도 한다. 이를 방지하기 위하여 중합전 잔여정보정을 실시하였으며 기준 반사면은 Fig. 8의 중합단면도 상에서 층군 1과 2의 경계면으로 하였다. 상호상관 구간은 15~25 ms, 최대 허용 이동량은 5 ms로 정하여 5번 반복 수행하였다.

해 석

Fig. 7은 위의 자료처리 과정을 통하여 얻은 중합단면도이다. 이로부터 4 개의 층군을 Fig. 8과 같이 해석하여 Table 2에 결과를 요약하였다. 단면도 전체에 걸쳐 경사가 거의 수직인 고경사 단층들이 많이 인지되며, 특히 퇴적암과 편마암의 경계인 CMP 190~210 부근에 30 m 정도의 폭을 갖는 파쇄대가 존재한다.

최상부의 층군 1은 2개의 지층으로 구성되어 있는 것으로 분석된다. 층군 1의 하부 경계 (경계면 1)에서 반사된 파는 평균 2500 m/s의 RMS 속도를 가진다. 지표는 속도

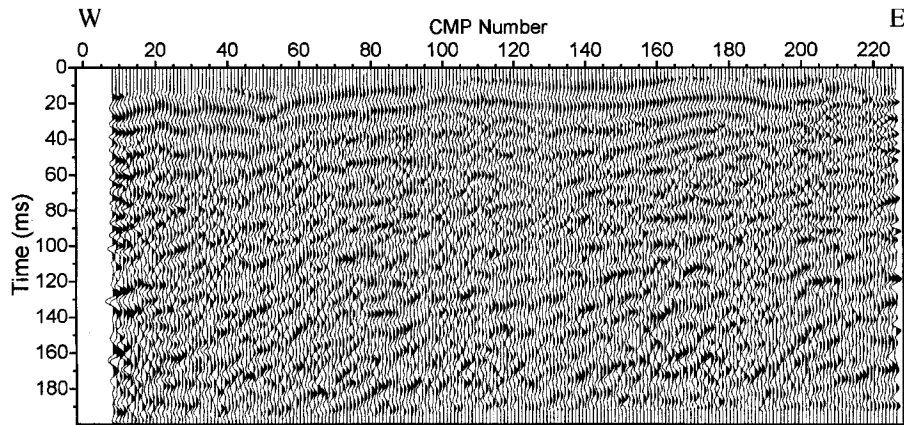


Fig. 7. Stack section after the floating datum correction.

Table 2. Interpretation summary.

Unit	Depth to the Top (m)		Ave. Vel. (m/s)	Lithology
	min	max		
1	-	-	1500	Unconsolidated
	4.5	17	3200	Slightly weathered
2	20	32	4098	Sedimentary
3A	46	209	5346*	Sedimentary
3B	213	413		
4	21	22	5083**	Gneiss (Basement)

* From VSP.

** From refraction velocity.

가 비교적 느린 미고결층으로 구성되어 있으나 두께가 얇고 무브아웃이 커서, 근거리 윗셋이 18 m인 자료의 경우에 경계면 1에서 반사된 이벤트보다 대부분 하부에 나타

나게 된다. 따라서 미고결층의 하부 경계는 깊이에 따라 증가하는 속도합수를 이용하여 종합할 경우에 잘 종합되지 않으며, 상속도 종합시에도 큰 무브아웃으로 인하여 이완 뮤트 (stretch mute)로 대부분 제거되어 종합 단면 도상에 나타나지 않는다. Fig. 9는 공발점 자료로서 'B'는 경계면 1에서 반사된 파이고 'A'는 표층 하부 경계에서 반사된 파이다. 반사 이벤트 'A'와 'B'의 RMS 속도는 각각 1200 m/s와 2400 m/s로 분석되며, 영점거리주시 (zero-offset traveltimes)는 각각 10 ms, 20 ms으로 구해진다. 이 값들을 이용하여 구한 두 반사면 사이의 구간속도는 3175 m/s 정도임을 알 수 있다.

측선 서부의 층군 2, 3A, 3B는 백악기 퇴적암으로서 층군 2의 속도는 평균 4098 m/s이며 층군 3의 속도는 VSP 자료로부터 평균 5346 m/s로 분석된다. 퇴적암의 속도가 이처럼 높은 이유는 이 지역의 화산암질 퇴적암이

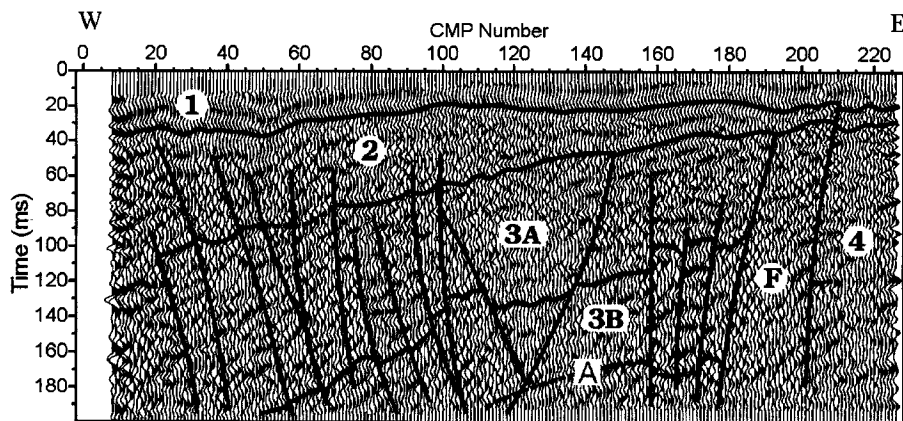


Fig. 8. Interpreted stacked section. The major boundary fault is located near CMP 210, and the fracture zone 'F' is approximately 30 m wide. To its west, sedimentary layers 2, 3A, and 3B are situated.

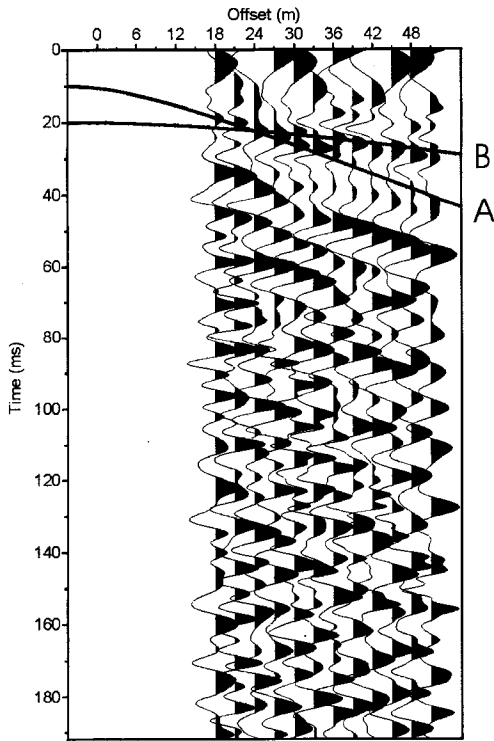


Fig. 9. Normal moveout velocities at shot point 38. Event 'B' represents the lower boundary of seismic unit 1, and event 'A' the lower boundary of unconsolidated layer. RMS velocities of events 'A' and 'B' are estimated to be 1200 m/s and 2400 m/s, respectively.

열적 변질을 받아 공극률이 감소된 때문인 것으로 분석된다 (김기영, 김현규, 1997b). 층 3A와 층 3B의 경계는 비교적 진폭이 크고 연장성이 좋은 반사면을 기준으로 하여 임의로 구분한 것이다. 이들 퇴적층들이 서쪽으로 경사지는 층상구조들은 향사의 익부 (limb)이거나 화산류 (volcanic flow)로 해석된다. 축선 동부에 분포하는 편마암의 속도는 CMP 220, 왕복주사 20 ms 부근에서 관측된 굴절파로부터 계산하였으며 약 5083 m/s이다. 편마암 층은 매우 울림 현상 (ringing)이 심한 특성을 보여주고 있는데, 이러한 특징은 이 분지 내의 편마암 지역에서 얻은 시험 축선에서도 역시 나타난다. 반사면 A를 음향 기저암의 상부 경계면으로 해석할 경우, 이 퇴적분지 퇴적암층의 두께는 약 350~400 m에 이를 것으로 생각된다.

퇴적층 내에는 많은 수의 단층을 인지할 수 있으며, 축선과 주구조선의 방향이 거의 직각이므로 이들의 겹보기 경사 (apparent dip)와 진경사 (true dip)와의 차이가 적을 것으로 생각되나 이차원 단면으로는 단층의 실제 주향을 판단할 수 없다. 축선의 중앙부에는 꽃구조 (flower struc-

ture)로 추정되는 구조도 발견되며, 이는 주향이동 단층대에 전형적인 것으로서 심부 탐사에서는 자주 발견되는 것이다. 천부 탐사에서도 Shtivelman 등 (1998)이 지하 150 m 이내에서 발견한 예가 있으므로 이 지역에 존재할 가능성은 충분히 있으나, 현재의 단면상에서는 단언하기 어렵다. 또한, 층리면의 진경사도 알 수 없고 기록 길이가 짧아 심부에서의 단층 양상을 확인할 수 없으므로 이들에 대한 정확한 구조 및 응력 환경 분석에는 한계가 있다.

결론 및 토의

풍암분지 경계부에서 중력추를 이용하여 고해상도 반사파 탐사를 실시하였으며, 이 백악기 퇴적분지의 경계 단층과 단층 파쇄대, 기타 수직 단층들이 많이 발달되어 있는 양상을 구명하였다. 기저암인 편마암과 퇴적암 사이에는 폭 약 30 m 가량의 단층 파쇄대가 존재하고, 퇴적층의 두께는 350~400 m에 이르는 것으로 해석되며 평균 4098 및 5346 m/s의 비교적 높은 범위의 속도를 보인다. 또한 이 퇴적층들이 서쪽으로 경사지는 층상구조들은 향사습곡의 익부 (limb)이거나 화산류 (volcanic flow)로 해석된다. 퇴적암 내에서 많은 고경사 단층을 인지할 수 있으나 이차원 자료로는 정확한 해석이 어려웠다. 음향기저암은 울림현상이 심한 특징을 보이는 편마암으로 굴절파로부터 구한 속도는 약 5083 m/s이다.

이 연구에 사용한 중력추는 소규모 육상 탐사에서 주로 쓰이는 해머에 비해 깊은 조사심도를 제공하여 심부 지층 해석을 가능하게 함으로써 우수한 파원임이 입증되었다. 그러나 풍암분지 퇴적암은 대부분 화산쇄설성 암석으로 구성되어 있어 연속성이 적은 반사면을 이루고 있으므로 선명한 지층 영상을 얻는데는 어려움이 있었다. 레일리파와 굴절파를 제거하기 위해 사용한 주파수-파수 필터는 하부 반사파 신호를 효과적으로 부각시켰으나, 상대적으로 상부 반사파 신호를 손상시킴으로써 중합단면에서 천부 지층에 대한 정보가 손실되는 문제점을 야기하였다.

사 사

이 논문은 한국과학재단에서 지원한 핵심전문연구 (과제번호 961-0403-010-2)의 일환으로 수행되었음을 밝히며, 강원대학교 자원개발연구소의 부분적 지원에 감사드립니다. 아울러 풍암 퇴적분지의 퇴적층서 및 지질구조에 관하여 좋은 의견 주신 강원대학교 지질학과 정대교, 이희권 교수님께 진심으로 사의를 표합니다. 끝으로 뜨거운 햇살 아래 무거운 중력추를 운반하며 함께 땀흘린 강원대

학교 지구물리학과 대학원 및 학부과정 학생들에게도 감사드립니다.

참고문헌

- 강필중, 진명식 (1972) 한국 지질도 (1:50,000) 풍암도폭 및 설명서. 국립 지질조사소, 31 p.
- 김기영, 정성태, 홍종국 (1996) 진안분지 경계 부근에서의 고해상도 반사파 조사 연구. 대한지질공학회 학술발표회 (확장 초록), p. 6-13.
- 김기영, 김현규 (1997b) 풍암분지 퇴적층의 지진파 속도 및 탄성계수 산출. 지질학회지, 33권, p. 111-116.
- 김기영, 김현규, 정미숙, 우남철 (1997c) 풍암 퇴적분지 어르리 경계 부근에서의 고해상도 반사파 조사 연구. 대한지질학회 제52차 학술발표회 (초록), p. 14.
- 김기영, 김현규, 우남철, 정미숙 (1998) 풍암분지 경계 부근에서 중력추를 이용한 반사파 탐사. 한국자원공학회 제70회 학술발표회 (확장 초록), p. 239-242.
- 김지수, 손호웅, 정승환, (1997) 음성분지의 전기 및 자기 전류학적 연구. 대한지질학회 제52차 학술발표회 (초록), p. 52.
- 민경덕, 전정수, 정승환 (1988) 옥천대내 신당-도전리 지역에 대한 ELF-MT 탐사 연구. 광산지질학회지, 21권, p. 277-285.
- 송영수, 정승환, 채효석 (1992) 지층의 수평적 구분 및 지질 구조 파악을 위한 VLF 탐사 결과 해석. 한국자원공학회지, 29권, p. 16-24.
- 송영수, 채효석, 이강석, 정승환, 이현구, 윤혜수 (1994) 안동 지역의 이천 단층에 대한 HLEM 및 VLF 전자탐사 연구. 한국자원공학회지, 31권, p. 333-337.
- 송영수, 이상규, 오세영, 송승엽 (1996) 제주도 서부 지역에서 구조선 파악을 위한 전기비저항 및 VLF 전자탐사. 한국자원공학회지, 33권, p. 484-493.
- 이희권 (1997) 강원도 홍천지역 풍암분지에 대한 구조지질학적 연구. 강원대학교, 춘천, 77 p.
- 정성태, 김기영, 홍종국 (1996) 고해상도 반사파를 이용한 진안분지 경계 해석 연구. 대한지질학회 제51차 학술발표회 (초록), p. 65.
- Bison Instruments (1985) GeoPro instruction manual, Minneapolis, 89 p.
- Bruner, I. and Landa, E. (1991) Fault interpretation from high-resolution seismic data in the northern Negev, Israel. Geophysics, v. 56, p. 1064-1070.
- Cheong, D. and Kim, K. (1997) Sedimentary basin analysis of the tectonic-controlled cretaceous Poogam basin in mid Korea. In Jang, B.A. and Cheong, D. (eds.), Crustal Evolution in Northeast Asia, 4th Korea-China Joint Geology Symposium. Chuncheon, p. 133-139.
- Geotronics AB (1996) Geodolite 506 user manual. Ekonomiprint AB, Sweden, 162 p.
- Jongerijs, P. and Helbig, K. (1988) Onshore high-resolution seismic profiling applied to sedimentology. Geophysics, v. 53, p. 1276-1283.
- Kim, K.Y. (1995) Shallow seismic profiling on Hah island in Chuncheon, Korea. AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., p. 401.
- Kim K.Y. and Kim, H.K. (1997a) High-resolution seismic survey in the Pungam sedimentary basin of Korea. AGU Spring Meeting, Baltimore, U.S.A., p. 210.
- Lee, T.C., Biehler, S., Park, S.K., and Stephenson, W.J. (1996) A seismic refraction and reflection study across the central San Jacinto Basin, Southern California. Geophysics, v. 61, p. 1258-1268.
- Parallel Geoscience Corporation (1997) Seismic Processing Workshop user's manual. Austin, 910 p.
- Shedlock, K.M., Brocher, T.M., and Harding, S.T. (1990) Shallow structure and deformation along the San Andreas Fault in Cholame Valley, California, based on high-resolution reflection profiling. Journal of Geophysical Research, v. 95, p. 5003-5020.
- Sheriff, R.E. (1991) Encyclopedic dictionary of exploration geophysics. 3rd (ed.), Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 376 p.
- Shitivelmal, V., Frieslander, U., Zilberman, E., and Amit, R. (1998) Mapping shallow faults at the Evrona playa site using high-resolution reflection method. Geophysics, v. 63, p. 1257-1264.

1998년 5월 6일 원고접수, 1998년 11월 21일 게재승인.