산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제20권, 2000.
Journal of Industial Technoligy, Kangwon Nat'l Univ.,Korea, No. 20, 2000.

제천 석회석 지역의 탄성파 반사법의 적용

The application of shallow seismic reflection method for Chechon limestone area

서 백 수* 이 덕 재**
Suh, Beak-Soo Lee, Duk-Jae

Abstract

Seismic reflection method is applied to detect shallow location of limestone in Chechon area. The data using hammer source is compared with that of weight drop. Small size hammer and weight-drop are used as energy source and 100Hz geophones are used for data aquisition.

Data processing is conducted utilizing the available processing technique of "Geobit", which is seismic data processing software developed by KIGAM.

The result of above data processing, the velocity of topsoil layer is 1,250m/sec. The velocity of this area is higher than other area because loading trucks pass this area and make this layer compact. And in limestone area, hammer is proposed to energy source instead of weight drop because the energy propagates the layer very well.

키워드 : *반사법탐사, 파동원, 중력추*
Keywords : *Seismic reflection method, source, weight drop*

1. 서론

1970년대까지만 해도 지질공학 및 환경문제의 관심영역인 지하 100여 미터내의 천부 지하구조 해석에 대한 문제에는 주로 굴절법이 '정상적인' 탐사방법으로 이용되었다. 이러한 지반공학적 문제 및 지하수 응용에 있어서 반사법이 실용적 도구로 고려되지 않았던 주된 이유는 굴절법이 고가의 디지털 반사법 탐사장비에 비해 훨씬 저가의 아날로그 혹은 저성능 디지털 탐사장비로도 천부 구조 조사를 충분히 수행할 수 있었기 때문이며, 또한 육상에서의 천부 반사법 탐사에서는 지표의 미고결층에 의한 고주파 에너지의 심한 감쇄현상과 진원에 의해 발생되는 강한 표면파 잡음으로 인해 신호 대 잡음비가 매우 저하되어 고해상도의 반사단면 획득이 어렵기 때문이었다. 그러나, 1980년대부터의 급속한 디지털전자산업의 발전에 의하여 고성능의 저가격 디지털 탐사장비가 보급되고, 또한 높은 정밀도의 지하구조에 대한 요구가 증가되면서 육상천부에서의 반사법 탐사의 적용이 활성화되어 여러 가지 자료수집기법과 분석기법들이 본격적으로 개발되기 시작하였다.

본 논문에서는 반사법 자료들의 다양한 획득방법과 취득된 반사법 자료들에 자료처리를 적용하여 고해상도의 반사법 단면도를 획득, 천부 지각구조를 보다 정확하게 해석하는 방법을 제시하고자한다. 파동원(source)으로 해머를 사용할 경우와 중력추(weight-drop)를 사용할 경우를 비교하기 위하여 제천의 석회암지역에서 Geomerics사의 SmarSeis 12채널 탄성파 탐사기를 이용하여 천부 반사법 탐사를 실시하여 반사법 자료획득을 하고, 국내 최초의 반사법 자료처리용 소프트웨어인 Geobit을 이용하여 자료처리를 실시하였다.

* 강원대학교 지구시스템공학과 교수
** 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 석사과정

2. 현장측정

2.1. 개요

연구대상 지역은 제천시 두학동 대성광업소 제천광업소 사무실 일대를 중심으로 한 지역이다. 제천지역의 지질은 하부 고생대 오르도비스기의 영흥층과 하부 고생대에 해당되는 석탄기의 갑산층으로 구성된다. 영흥층은 하부의 문곡층을 정합으로 피복하며 상부 갑산층에 의하여 부정합으로 피복되어 있는 것으로 알려지고 있다. 영흥층 내에 협재하고 있는 석회암은 품위가 매우 높은 것으로 나타나며 이 층에는 엽층 상태의 세립 내지 중립의 돌로마이트를 포함하고 있다. 갑산층은 갑산에서 가창산 방향으로 연장된 북북서-남남동 방향의 대상 분포를 보인다. 갑산층은 구조변형작용에 의하여 매우 복잡한 지질구조를 보이며 층 두께의 변화 폭이 매우 크다. 이 층의 하부는 주로 적색의 조립사암과 실트암으로 구성되며 중부는 담회색 내지 백색의 석회암으로 이루어지고, 상부는 적색 이암 내지 담회색 석회암의 호층으로 나타난다. 이 암은 적색 내지 녹색을 띄며 석회암층 사이에 얇게 협재되어 있다. 이 지역의 석회석 광산은 대부분 중부에 발달한 석회암을 채굴대상으로 삼고 있다. 물리공층공 일대의 주 구성지질에 해당되는 갑산층 석회암의 특징은 세립질에 백색 회갈색 및 담갈색에 이르기까지 색깔이 다양하며 석영과 황철석을 포함하기도 한다. 특히 석영의 존재는 많은 박편으로부터 널리 그 존재가 인지되고 있는바 이는 심부에서의 속성작용에 의한 영향으로 판단된다(박수인외, 1998). 갑산층은 특히 중부에 품위가 높은 양질의 석회암이 발달하고 있는 것으로 나타나며 괴상 치밀질이며 주 구성광물은 반자형 내지 타형의 방해석으로 주로 모자이크 조직을 보인다.

2.2. 탐사방법

2.2.1. 제천 석회암 지역

제천 석회암 지역 탐사에서 사용한 에너지원으로서는 탄성파 에너지를 효과적으로 지하에 침투시키기 위하여 80Kg의 철봉을 폭파 너비가 각각 30cm, 두께 3cm인 철판 위에 높이 2.4m 상부에서 자유낙하시키는, 중력추를 이용하였다. 또한 에너지원의 크기에 따른 정량적인 비교를 위해 같은 조건하에서 해머에 의한 현장자료도 동시에 취득하였다.

2.2.1.1. 측선 설정

석회암을 채굴하기 위하여 산사면을 잘라내어 만든 약 70m의 연장과 5m 이상의 폭을 갖는 비포장 소도로의 일부를 측선 위치로 선정하였다. 측선이 설정된 구간은 지표면 기복이 없어 거의 평탄하다. 그러나, 석회암 파편과 가루로 다져진 도로면은 매우 단단하여 지진계를 설치하는데 어려움이 있었다. 측선의 기점은 기존의 시추공이 있는 곳을 기준으로 하였다(그림 1).

지오폰간의 간격은 2m이고 발파 위치는 처음 8번과 9번 지오폰 사이에서 시작하여 1m 간격으로 오프셋을 늘려가는 변형된 끝점전개(end-on spread)이며 총 46개의 공통 발파점 자료를 취득하였다. 이와 같은 측선전개법을 사용함으로써 단단한 지표면에 수진기 설치작업의 부담을 덜고 인력 및 시간이용 등에 있어서 탐사의 효율을 높이기 위함이다. 사용한 지오폰의 주주파수는 100Hz이며 현장자료를 획득할 시, 천부탐사법의 특징과 정밀조사를 목적으로 하였으므로 자료획득시 어떠한 필터링 기법을 적용하지 않았으며 심도에 따르는 이득조절도 주지 않았다.

2.2.1.2. 자료획득

측점자료 (또는 공발점 자료; shot gather)의 취득에 앞서 조사지역의 잡음특성을 파악하기 위하여 탄성파 잡음조사를 실시하였다. 잡음조사를 함으로써 개략적인 지질특성을 파악하고 수진기 배열을 결정하고 측점자료의 기록에 적용할 최적 야외변수를 지정할 수 있다. 적용방법은 측선 끝부분의 한 지점을 진원지로 선정하고 그곳으로부터 12개 수진기를 1m 간격으로 일직선 배열한 후 야외자료를 기록하였다. 그런 후 수진기를 이동시켜 원점으로부터 13m 되는 지점으로부터 12개의 수진기를 재배열하여 기록하고 같은 방법으로 한번 더 이동시켜 최대거리 36m되는 곳까지의 기록을 얻었다. 측점자료의 취득에 사용된 주요 변수와 기록장비에 대한 내용을 표 1에 제시하였다.

표 1. Recording parameters for survey lines of Chechon.

취득 변수		내 용
파동원	형태	80Kg 중력추 와 6Kg 해머
	공발점 간격	1 m
수진기	형태	100 Hz 수진기
	개수	12
	간격	2 m
	파동원-수진기 거리	0 m ~ 60 m
기록계	A/D변환	Geometrics의 SmartSeis (16 bit)
	녹음 양식	SEG2
	기록 시간	128ms (weight-drop), 256ms (hammer)
	기록 간격	0.125 μs
	아나로그 필터	적용 않음
	이득 형태	적용 않음

2.2.1.3. 측점자료 취득

지진파 발생은 2가지 방법을 사용하였다. 6Kg의 해머와 직접 제작한 중력추를 이용하여 각각 46개의 야외자료를 취득하였다. 트리거(trigger) 발생장치는 해머 탐사에서는 직접 해머에 부착하였으나 중력추 탐사에서는 타격판에 부착하였다. 연속타격에 의한 측점기록의 경우에는 수직중합에 의하여 자료의 질에 많이 낮아지는 경향이 있어 2가지 방법 모두 단일 타격에 의한 기록만을 저장하였다.

수진기 전개 방식은 변형된 끝점 전개(single-ended spread 또는 end-on spread)를 사용하였다(그림 1). 공심점(common depth point [CDP]) 탐사에 사용되는 전형적인 끝점전개에 의한 반사법 탐사는 파동원과 수진기 간의 간격을 일정하게 유지하면서 공발점 자료를 얻는다. 그러나, 이번 탐사에서는 수진기를 고정시키고 공발점을 연속적으로 이동시켜 수진기와 파동원 간격 (offset)을 넓히면서 탄성파자료를 취득하였다. 그 이유는 단단한 지표면에 수진기 설치 작업의 부담을 덜고 인력 및 시간 이용 등에 있어서 탐사의 효율을 높이기 위함이다. 수진기의 간격은 2m이며 공발점은 1m 간격을 유지하였다. 따라서, 최대중합수는 12가 되며 최대 진원-수진기 거리는 60m이다. 그리고, 공심점이 분포하는 측선 거리는 34.5 m이다.

공발점 자료의 기록시간은 중력추 탐사에서는 128㎳, 해머 탐사에서는 256㎳이며 모두 0.125㎲의 간격으로 기록하였다. 야외자료 기록과정에서 어떠한 필터도 적용하지 않았으며, 이득조절도 실시하지 않았다.

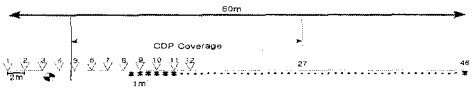


그림 1. Survey line in Chechon.

3. 현장자료처리

반사법 탐사자료의 전산처리는 Linux 운영체제를 기반으로 하는 PC에서 실시하였다. 자료처리 소프트웨어는 국내 최초의 체계화된 고유한 탄성파 자료처리 모델인 Geobit을 사용하였다. Geobit은 2차원 탄성파 자료처리가 가능하며 대화식 속도 분석 방법을 도입하여 속도분석, 동보정(Normal Moveout [NMO] correction), 뮤트, 중합을 같이 처리할 수 있어서 능률적인 자료처리를 할 수 있다. [1]

공심점 방법의 반사법 탐사자료를 위한 기본적인 전산처리 작업의 목적은 야외측점 자료로부터 중합단면도를 만드는 것이다. 세분하면 일차적으로 공발점자료로부터 공심점 분류를 한 후 속도분석을 통해 구한 속도를 이용하여 동보정하며 마지막으로 뮤트(mute) 시킨 공심점 자료를 중합한다. 그리고, 공심점 분류를 실시하기 전에 자료분석을 실시하며, 중합이전에는 필터링(filtering) 및 디콘(deconvolution) 등 여러 가지 자료처리에 필요한 변수를 결정하는 시험을 실시한다. 주요 단계로는 야외자료의 변환 및 분석, 공심점 분류, 필터링, 속도분석, 중합이다. 획득된 야외자료는 SEG2 양식이므로 SEG-Y 양식으로 변환시킨 후 Geobit 작업을 통해 측정자료를 입력하였다.

3.1. 제천 석회석 지역 자료처리

입력된 공발점 자료의 출력을 통해 불량한 측점 자료를 파악하고 기록된 야외정보를 확인한다. 또한, 공통수신기모음(common receiver gather) 등도 작성한다. 전형적인 끝점전개에 의한 탄성파자료는 공통거리모음 (common offset gather) 및 조사지역의 개략적인 지하구조를 나타내는 최단거리트레이스모음 (near-trace gather)의 작성이 가능하지만, 제천지역에서의 탐사는 변형된 방법을 사용하였으므로 제천 탐사와 능선자료 중 수진기를 고정시킨 자료는 그 결과를 얻지 못한다. 이 과정에서 주로 사용되는 분석 기법은 필터링과 자동이득조절 (Automatic Gain Control [AGC])이다.

그림 2는 파동원으로 중력추를 사용했을 때의 공발점 모음이다. 가로축은 shot 번호이며 세로축은 기록시간이다. 그림 3은 해머를 파동원으로 사용했을 경우의 공발점 모음이며 가로축은 파동원 번호이고 세로축은 기록시간이다. 중력추와 해머의 기록시간이 다른 이유는 자료취득을 먼저 해머로 실시하여 지질구조에 대한 파악을 하여본 결과 기록시간이 충분한 시간대가 128㎳이기 때문에 중력추를 사용할 때에는 기록시간을 128㎳로 하여 측정하였기 때문이다.

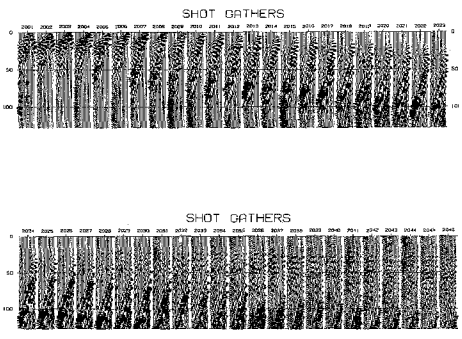


그림 2. 공발점 모음(중력추)

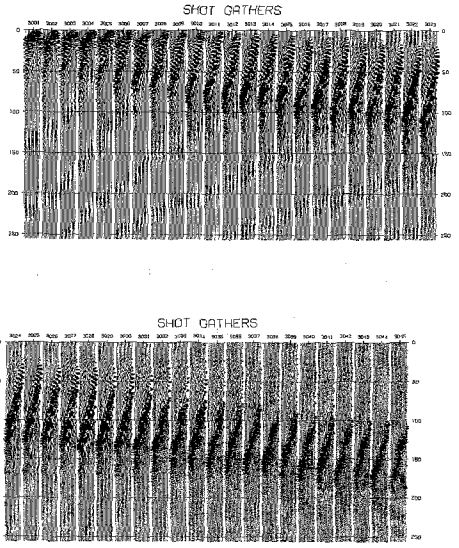


그림 3. 공발점 모음(해머)

그림 4, 5는 공통수진기 모음을 표시한 것이다. 각 트레이스를 수진기별로 모아서 수진기와 파동원 사이의 거리대로 순차적으로 표시한 것으로 수진기의 이상여부 또한 파악할 수 있다.

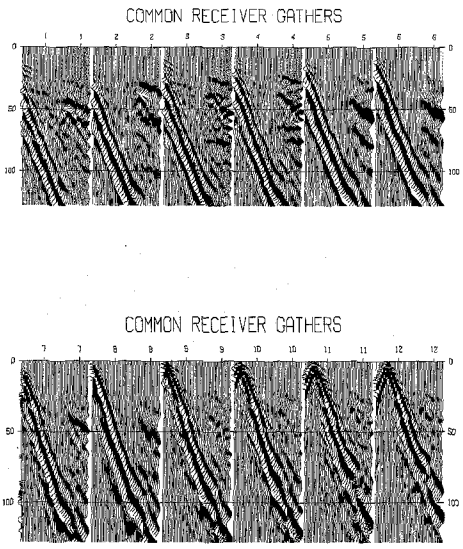


그림 4. 공통수진기 모음(중력추)

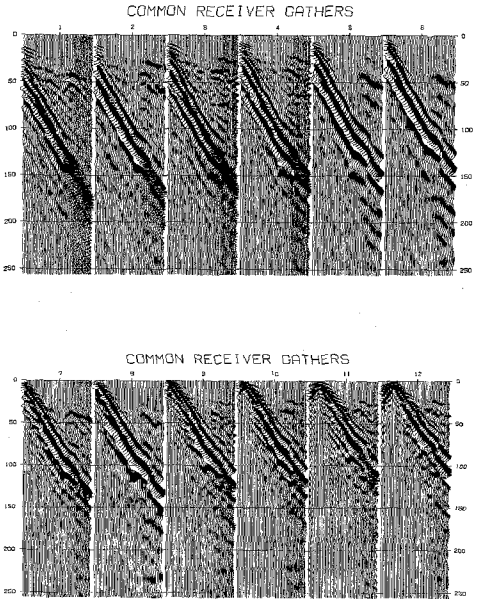


그림 5. 공통수진기 모음(해머)

3.1.1. 주파수-파수 (f-k) 필터링

현장 자료를 주파수-파수영역 (f-k domain)으로 변환하여 그림 6과 같이 f-k 그래프로써 표시할 수 있다. 그림 6에서 f-k사이의 일정한 비례관계 (즉, $f = vk$)를 나타내며, f-k 도로 변환하였을 때에 이벤트들이 속도별로 나열되는 것을 보여주는 것이다. 이때 기울기는 일정한 겉보기 속도를 나타낸다. 이러한 f-k 도는 상이한 종류의 파를 판별하고, 공간배열이나 주파수 필터링, 겉보기 속도 필터링을 설계하는 데에 커다란 도움을 준다. 따라서, 천부 반사법 탐사에서 해결해야 할 주요 사항인 표면파의 제압에 이용할 수 있다. 표면파는 강한 진폭의 기록으로 인하여 상대적으로 약한 진폭의 반사파들을 구별할 수 없게 만들기 때문이다. 그러나, 낮은 중합수의 공심점 자료에 나타나는 표면파를 제거하기 위한 심한 경사의 주파수-파수 필터링은 천부의 반사파를 포함하여 전반적으로 자료에 나쁜 영향을 주어 고해상의 중합단면도 작성이 어려울 수 있다. 그러나, 속도분석의 정확성을 위해서라면 표면파의 제압에 적절한 방법이 된다. 또한, 공발점모음 자료나 공통수신기모음 자료에서 여러 가지 도달파를 분해하는데 효과적으로 사용된다.[4]

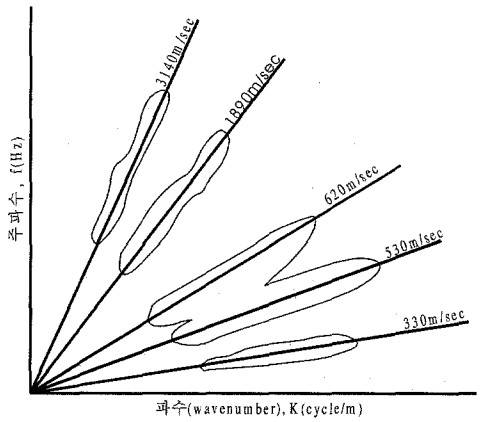
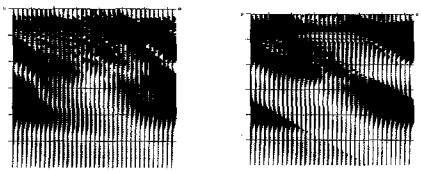


그림 6. 주파수-파수

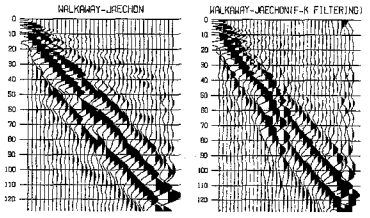
그림 7은 제천 현장자료의 f-k 분석도이며 (a)는 필터링 전 raw-data의 분석도이고 (b)는 필터링한 후의 분석도이다. 이 분석도에 따라 필터링을 실시한 것은 그림 8의 (a)와 (b)에 나타내었다.



(a) Before f-k filtering　　(b) After f-k filtering

그림 7. 주파수-파수 분석

그림 7 (a)와 (b) 그림 8 (a)와 (b)를 서로 연계하여 비교하면 그림 7의 (a)와 (b)에서 필터링 된 부분으로 그림 8 (b)에서 저속도인 신호의 세력이 많이 약화된 것을 볼 수 있다.



(a) Before f-k filtering　　(b) After f-k filtering

그림 8. 주파수-파수 필터링

다채널 탄성파 탐사의 주목적은 같은 공통반사점을 갖는 반사파 기록을 중합시킴으로써, 탄성파 단면도의 신호 대 잡음의 비를 향상시키는데 있으므로 공심점 분류를 위해서는 우선 각 측점자료의 각각의 트레이스에 수신기와 공발점과의 거리를 입력시켜야 한다. 이번 연구에서는 최대 12개의 트레이스(trace)가 하나의 공심점모음을 구성토록 하였으며, 공심점 간격은 0.5m 가 되도록 공심점 분류를 실시하였다. 생성된 공심점 자료는 그림 9, 10에 나타내었으며, 생성된 공심점자료를 속도분석 및 보정하고 중합하여 최종중합단면을 작성하게 된다.

3.1.2. 속도분석, 동보정, 뮤트

탐사 자료의 처리 과정에서 속도에 대한 정보는 중합, 구조보정, 시간-심도 전환 등의 작업을 수행하는 데 필수적이다. 지층의 실제 속도는 시추공을 이용하여 음파검층이나 속도조사(well velocity survey) 등을 실시하여 직접 구할 수도 있으나, 중합을 위한 속도는 보통 CDP 취합 자료의 NMO 관계를 이용하여 구하며, 이때 탐사 측선상의 일부 지점의 기록을 샘플로 택하여 속도분석(velocity analisys)을 실시하게 된다. 여기서 다시 한 번 강조할 것은 중합속도(또는 NMO 속도)는 지층의 실제 속도가 아니고, 단지 가장 우수한 중합 결과를 얻게 하여 주는 반사 이벤트의 정렬(align) 상태를 나타내는 파라미터이며, 지층의 실제 속도와는 간접적인 방법으로 관계시킬 수 있다는 점이다.

이러한 속도분석은 다음 네 가지의 방법이 주로 사용된다. 첫째, 특정 CDP 취합자료로부터 일차반사파로 생각되는 이벤트를 판별하고, 그 중 두 개의 트레이스상에서 각 반사 이벤트의 주행시간을 이용하여 속도를 구하는 방법과 둘째 하나의 상속도를 사용하여 CDP 취합 자료 전체에 대한 NMO 보정을 실시하여 검토하여 일련의 상속도를 적용한 모든 결과를 검토하여 가장 적절한 중합속도를 결정하는 '상속도 취합'법, 인접한 상속도 취합자료를 각각 중합한 후, 소형의 단면도를 작성하고 각 속도별로 순서적으로 진열한 후, 이 소형 단면도를 검토하여 보면 각 중합 트레이스에서 적절한 속도로써 보정이 된 이벤트를 제외하고는 모두 소멸되어 각 이벤트의 연속성이 가장 강하게 나타나는 지점과 그에 대응하는 속도를 취하여 시간에 따른 속도변화 즉 중합 속도함수를 결정하는 상속도 주사중합과 각 공심점(CDP)에서 중합 자료의 총 에너지와 각 트레이스 성분의 에너지 합과의 비로 정의되는 셈블런스(semblance)를 계산하여 도시하는 방법으로 도시된 도면에서 중합속도를 결정한다.[5]

위 네가지 방법중 하나로 적절한 속도함수가 결정되면 NMO 보정을 실시하며, NMO 보정후엔 뮤

팅 후 중합하게 된다.

CDP 취합자료의 t=0 로부터 시작하여 대응하는 속도를 속도함수로부터 찾아 NMO 방정식을 사용하여 적절한 쌍곡선 주시곡선을 작성하고, 이 쌍곡선상에 놓이는 각 트레이스의 점들을 출력 트레이스의 t=0에 옮겨 놓는다.

뮤팅은 트레이스상에서 제거하고 싶은 부분에는 0을 나머지 부분에는 1을 곱하는 방법으로 트레이스 상에서 직접파, 굴절파, 유도파 등의 잡음이 나타나는 부분을 제거하는 것을 말한다.

3.1.3. 중합

CDP 취합 자료에 대하여 NMO 보정과 뮤우팅을 시행하고 나면, 이들을 합하여 하나의 트레이스로 만드는 중합을 실시하게 된다. 다음 그림 9, 10은 공통반사점(CDP) 별로 모아서 기록한 자료로서 그림 9은 중력추를 이용하여 얻은 자료들이며 그림 10은 해머를 이용하여 얻은 자료이다. 다음의 자료를 NMO 보정하여 중합하게 된다.

다음의 공심점 분류를 속도분석, 뮤팅, 중합의 작업을 거쳐서 완성된 최종 중합단면이 그림 12, 13이며, 이러한 일련의 작업들은 Geobit 중 xva 프로그램으로 진행된다. 그림 11은 xva 프로그램을 사용하는 하나의 예이다.[2]

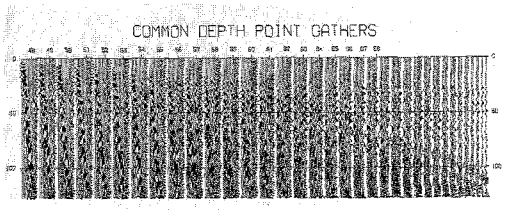


그림 9. 공심점 모음(중력추)

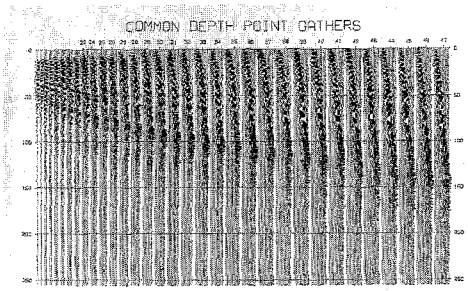


그림 10. 공심점 모음(해머)

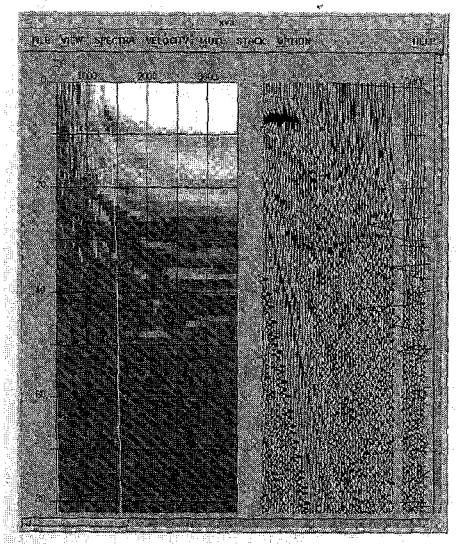


그림 11. 속도분석과 중합

그림 12는 중력추를 이용하여 획득한 자료의 최종중합단면이며, 그림 13은 해머를 이용하여 획득한 최종중합단면이다. 두 최종중합단면을 비교해 보면 source의 차이에 대해 큰 차이점은 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

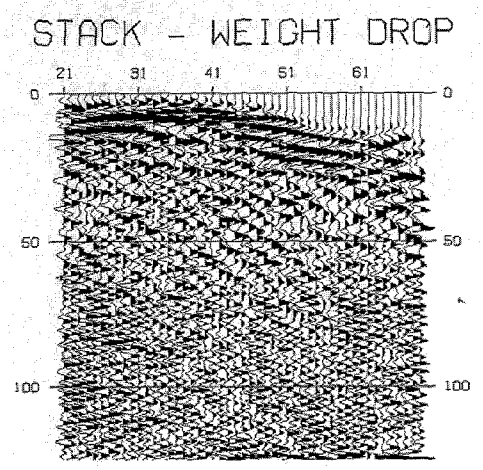


그림 12. 최종중합단면(중력추)

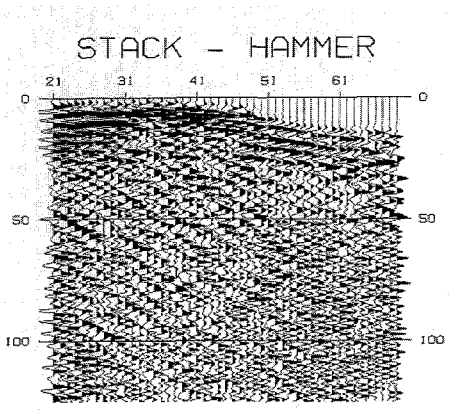


그림 13. 최종중합단면(해머)

4. 결론 및 토의

이상의 연구에 의해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 제천지역에서는 파동원의 차이에 대한 비교를 위해 실시하였으며, 최종중합단면을 비교해 보면 차이점을 발견하기 어렵다고 판단된다. 표토층의 속도는 1250 m/sec로서 다른 지역의 최상부 풍화대에 비해 비교적 높은 속도를 갖으며 그 이유는 석회암 파편과 가루로, 또한 화물차등의 교통로이기 때문에 파동원의 에너지 전파가 좋은 지층이기 때문이라고 판단된다. 또한, 석회암 지대의 특성상 에너지의 전파가 잘 되므로 굳이 고가의 장비인 중력추를 쓰지 않더라도 해머로도 충분한 에너지의 전파가 가능하기 때문이라고 생각된다.

참 고 문 헌

[1] 오진용, 서상용, 지오빗(Geobit) - "새로운 탄성파자료 전산처리 무른모", 한국석유지질학회지, vol. 2, no. 2, pp. 101-104, 1994

[2] 서상용, 정부흥, 장성형, "대화식 탄성파 속도분석", 한국자원연구소 연구보고서, KR-98(C)-35, pp. 9-52, 1998

[3] 김규한, 공영세, 오진용, 이정모, "반사법 탄성파 탐사를 이용한 천부 지질구조", vol. 2, No. 1, pp. 8-16, 1999

[4] 장성형, 서상용, 정부흥, 류병재, "Geobit을 이용한 가스 하이드레이트 탐사자료 처리", vol. 2, No. 4, pp. 184-190, 1999

[5] 민경덕, 서정희, 권병두, 응용지구물리학, pp. 546-665, 1999