

## S파를 이용한 고해상도 탄성파 반사법 탐사 : 지반표층부에 대한 적용사례

### High Resolution Seismic Reflection Method Using S-Waves : Case Histories for Ultrashallow Bedrocks

김 성 우<sup>1</sup> Kim, Sung-Woo

우 기 한<sup>2</sup> Woo, Ki-Han

한 명 자<sup>2</sup> Han, Myung-Ja

장 해 동<sup>3</sup> Jang, Hae-Dong

최 용 규<sup>4</sup> Choi, Yong-Kyu

공 영 세<sup>5</sup> Kong, Young-Sae

#### Abstract

This paper demonstrates the feasibility of using shallow S-wave, high-resolution seismic reflection surveys to characterize geological structure and stratigraphy of basement rocks for civil engineering purposes. S-wave seismic reflections from depths less than 20 m were recorded along the top of steep roadcut slopes. Seismic reflection data were recorded using a standard CDP acquisition method with a 24-channel seismograph and a sledge-hammer SH-wave source. The data were acquired using a split-spread source-receiver geometry with a 2 m shot-and-receiver interval, and then were processed to enhance S/N ratio of the data, to improve resolvable power of the seismic section, and to get velocity information of the basement rock. The final seismic reflection profiles using the CDP technique has imaged surfaces as shallow as less than 1 m and resolved beds as thin as 1m. The migrated reflection sections possess sufficient quality to correlate the prominent reflection events to the bedding planes and faults identified on the roadcut outcrops. Similar S-wave reflection surveys could also be used to produce the necessary details of a geological structure of shallow bedrocks to pinpoint optimum locations for monitor wells of civil engineering purposes.

#### 요 지

이 논문에서는 S파 탄성파 반사법의 토목공학용 지반조사에의 적합성을 검토하기 위한 연구를 다룬다. 높이 약 20m 미만의 암반사면에 대한 S파 탄성파 반사법 탐사를 시행하였다. 탄성파 자료취득에는 표준적인 공심점 기법이 사용되었으며 24채널의 탄성파탐사기와 SH파의 진원으로서 해머가 사용되었다. 수진기 전개는 양측전개가 채택되었고 진원점 및 수진점 간격은 각각 2m 이었다. 취득된 자료는 전산처리 과정을 거친 결과 신호대 잡음비가 향상되고 단면의 해상도가 향상되었으며 기반암의 속도정보가 얻어졌다. 최종 S파 반사단면은 1m 미만의 얇은 심도까지 반사파를 보여 주며 해상도는 1m 미만의 초고해상도를 보인다. 구조보정된 단면에서는 야외의 사면노두에서 확인된 층리면 및 단층에 잘 대비되는 뚜렷한 반사파 신호를 보여준다. 이와 같이 S파 탄성파 반사법을 이용하여 천부 지반 지질구조의 정밀한 반사 단면의 작성이 가능하므로 토목공학용 최적 시추공 위치의 결정에 이 방법이 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.

**Keywords** : Bedrock, High resolution, Seismic reflection survey, S-wave

1 부경대학교 환경탐사공학과 대학원 (Environmental Exploration Engrg., Dept., Pukyong National Univ., mongzi@empal.com)

2 부경대학교 환경탐사공학과 대학원 (Environmental Exploration Engrg., Dept., Pukyong National Univ.)

3 (주)지원E&C 대표이사 (Jeewon E&C Co. LTD.)

4 정희원, 경성대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Faculty of Construction and Environmental Engrg., Kyungsoong Univ.)

5 부경대학교 환경탐사공학과 교수 (Environmental Exploration Engrg., Dept., Pukyong National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

일반적으로 토목분야에서는 공사구간 내에 실시하는 광범위한 시추조사를 통하여 지반의 상세정보를 얻는다. 반면 본 연구에서 적용한 물리탐사법인 탄성파반사법 탐사는 이러한 시추조사 결과를 대체할 수는 없으나 시추조사의 횟수를 줄이거나 적절한 시추조사 위치를 결정하는데 유용하게 쓰일 수 있다. 시추조사는 시추공에 대한 수직방향으로의 지반물성의 상세변화에 대한 정보를 주는데 비해, 탄성파반사법 탐사는 연속적인 수평방향으로의 지반 물성변화 상세정보를 제공할 수 있다. 탄성파반사법 탐사가 시추결과와 대등한 수준의 역할을 수행하기 위해서는 토목분야에서 빈번하게 시추조사가 이루어지는 극천부 구간에 대한 반사법단면의 해상도를 대폭 향상시킬 필요가 있으며, 이러한 초고해상도 반사단면을 획득할 경우 시추결과에 근접한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

지반표층부에 대한 극천부반사법 단면을 획득할 수 있는 방법으로서 최근에 시도되고 있는 탐사법이 초고해상도 S파(전단파) 반사법탐사이다. S파 반사법은 종래의 P파(압축파) 반사법에 비해 고해상도를 얻을 수 있는 방법으로서, 지반표층부 탐사에서도 성공사례가 발표되었다(Zhang, 1990; Goforth and Hayward, 1992; Dasios et al., 1999; Deida and Ranieri, 2001; Holzschuh, 2002; Ghose and Goudswaard, 2004). 그러나 이러한 사례 연구는 대부분이 암반내부 구조를 대상으로 한 것이 아니고 암반상부를 피복하는 퇴적물, 매립층, 풍화대 등의 연약층을 대상으로 하거나, 단순조건에서의 실험적인 탐사인 경우가 대부분이다.

본 연구에서는 실제 토목현장 조건에서 S파를 이용하여 상부피복층 및 지하암반의 극천부 지질구조를 고해상도로 규명할 수 있음을 보이고자 하였다. 일부지역을 제외한 대부분의 한반도의 지질은 단층, 습곡작용을 받은 복잡한 구조를 보인다. 따라서 본 연구에서는 종합전구조보정 등의 실내 전산자료처리를 시행하여 암반내부 지질구조의 복잡성을 해결하고 이를 통해 지하암반의 구조를 정확하게 알아내고자 하였다.

## 2. 탄성파 반사법

탄성파 반사법은 지하의 반사계수를 영상화하는 탐사 방법으로서 기본적 원리는 음향측심의 원리와 같다. 음

향측심이란 선박에 하나의 수신 및 진원장치(transducer)를 부착, 관측선을 일정 속도로 이동시키면서 연속적으로 음파를 발진함과 동시에 그 반향을 수신함으로써 해저면의 영상을 얻을 수 있다.

현재의 탄성파 반사법은 음향측심법에서 매우 복잡, 정교하게 변화하여, 동시에 많은 수의 발진 및 수신기를 사용하는 기법으로 발전하였다. 즉, 전 측선상에 등간격으로 N개의 수신기가 설치되어 각 수신점에서 순차적인 진원의 발진이 이루어지는 개념의 다중채널 탐사기법으로 진보하였다.

이러한 다중채널 탐사기법을 통해 두 가지 이점을 얻을 수 있다. 첫째, 지하매질 고유의 전파속도를 얻을 수 있다는 것으로, 다중채널 수신기를 사용함으로써 임의의 반사점에서 N개의 반사 기록을 얻게 되고, 따라서 N개의 서로 다른 진원-수진점 간격(offset)에 대한 주시(travel time)의 변화(그림 1의  $t_1, t_2, t_3$ 가 이루는 쌍곡선의 기울기)로부터 지하매질의 전파 속도 값을 산출할 수 있는데 이것은 사물의 원근을 파악하는 원리와 동일한 것이다. 둘째, 반사파 신호가 크게 증강된다는 것이다. 이것은 지하 반사계수를 영상화하는데 매우 중요한 것으로서 실제 수신기에 기록되는 에너지의 상당 부분은 굴절파, 표면파, 직접파 등의 강한 노이즈인데 반해, 반사파 에너지는 상대적으로 매우 미약하고 이러한 노이즈에 혼재되어 있어 구별이 어렵다(Keary and Brooks,

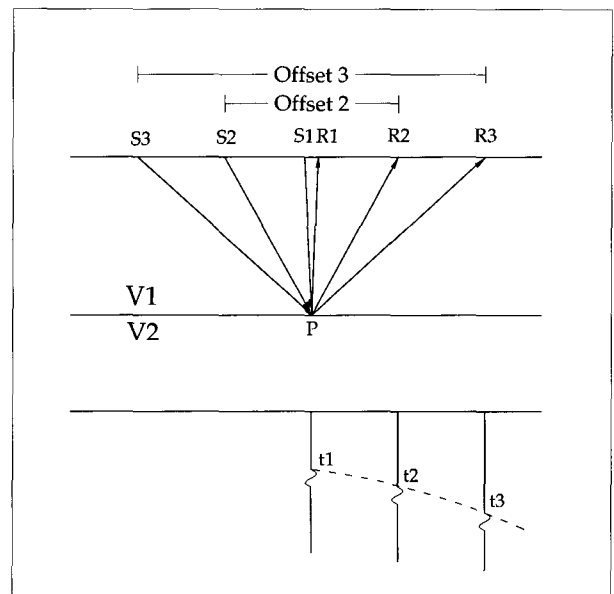


그림 1. 진원~수진점간격에 대한 주시( $t$ )의 변화(S: 진원점, R: 수신점, V: 속도, t: 주시), 지하의 한 점 P에서 나온 반사파는 아래의 반사단면에서 쌍곡선 형태를 그린다.

1991, p. 48). 그러나 그림 1처럼 N개의 자료를 이용하여 이들을 적절한 시간지연(time delay)에 대해 보정한 후, 중첩함으로써 잡음은 감소되고 반사 신호는 크게 증강된다( $\sqrt{N}$ 배로 신호 대 잡음비 향상).

이러한 두 가지 이점 때문에 공심점 중첩법(CDP법, Common Depth Point법)은 탄성과 반사법 탐사의 기본 개념이 된다. 그러나 실제 탐사에서는 전 측선에 수진기를 고르게 설치한다는 것은 실현 불가능하며, 그 대안으로 24개, 48개, 96개 등 제한된 수진채널을 사용하는 방식을 채택하게 되었다. 따라서 수진점 및 진원점의 간격을 조정하고, 수진기들을 진원 발진점 부근에만 배치하는 등의 적절한 탐사방법이 필요하다. 이 과정이 야외 자료취득 설계과정으로서, 탐사목적과 가용자원 및 장비, 그리고 현장조건 등에 맞는 최적의 자료취득 방식을 결정하게 된다.

탄성과 반사법은 석유탐사를 주목적으로 발전해왔으나 1980년대에 들어서면서 토목공학 분야 등에도 육상 탄성과 반사법이 사용되기 시작하였다. 이것이 심도 수십m 미만을 탐사영역으로 하는 천부 반사법탐사(shallow seismic reflection)이다. 여기에는 석유탐사와는 달리 소형이면서 이동이 간편한 탄성과 기록장비와 함께 진원으로서 해머와 같은 소형 진원이 주로 사용된다. 천부 반사법에서 사용되는 파동의 대부분은 P파(압축파)인데 이는 해머를 이용 받침판을 상하방향으로 타격함으로써, 파동의 전파 방향으로 매질의 입자가 진동하는 강력한 P파를 쉽게 발생할 수 있기 때문이다.

이에 반해 파동의 진행방향에 직각으로 매질의 입자가 진동하는 S파는 지표면에 평행하게 발생시켜야 되기 때문에 강한 파동을 얻기가 P파에 비해 상당히 어렵다. 이러한 이유로 단면의 신호 대 잡음비가 낮아지는 단점 등이 있어 사용이 어려웠다. 그러나 토목공학 분야에서 극천부에 대한 고해상도의 지반정보가 점차 필요해짐에 따라 S파를 이용한 극천부 반사법탐사법이 최근에 활발히 연구되고 있다. 특히 S파의 속도는 퇴적층 및 매립층을 포함하는 극천부에서  $V_p/V_s \geq 5 \sim 7$ 의 값을 가지므로(Ghose and Goudswaard, 2004) P파를 이용한 반사법 결과에 비해 수배의 고해상도 반사단면을 획득할 수 있다(예를 들어 진원의 중심 주파수가 모두 100Hz라고 가정할 때 P파와 S파의 속도가 각각 1000m/s, 200m/s이면 파장은(속도/주파수)이므로 각각 10m, 2.5m이고 해상도(파장의 1/4; Sheriff, 2002)는 각각 2.5m, 0.5m가 되어 S파에서 약 5배의 해상도 향상을 기대할 수 있다).

또한 시추조사의 주요 결과인 표준관입시험치(N치)와의 대비에서도 P파보다 우수한 결과를 보인다 (Imai and Tonouch, 1982). 그리고 P파는 지하수의 영향을 받는 반면 S파는 지하수의 영향이 없고 값 자체가 직접 지반물성치(예, 내진해석)로 사용될 수 있다.

### 3. 야외자료취득

강원도의 고생대 석회암 암반지대에서 절개사면을 선택하여 101m, 153m와 107m의 3개 측선에 대해 S파 반사법탐사를 시행하였다. 탐사측선 1은 사진 1과 같은 사면 상단에 전개하였다. 이 사면은 높이 12m, 길이 101m이며 절개면이 노출되어있다. 탐사측선 2와 3은 도로를 중앙으로 60m간격으로 평행한 2개의 측선으로서, 절개사면의 소단에서 S파 반사법탐사를 시행하였으며, 각각 사면의 높이는 18m 및 15m로서, 측선 2의 사면 노두는 노출된 반면(사진 2) 측선 3의 절개면은 피복되어있었다.

자료취득에 사용한 탄성과 탐사장비는 지오메트릭사가 제작한 스트라타뷰 R24 로서 24채널 기록계, 그리고



사진 1. 측선 1의 절개사면

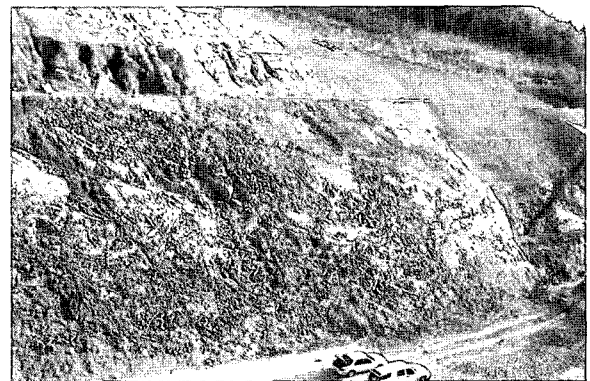


사진 2. 측선 2의 절개사면

고유주파수 40Hz의 수평수진기(측선 1)와 100Hz의 수평수진기(측선 2 및 3) 두 종류를 이용하였다. SH파의 진원으로는 받침대와 쇠퇴머(약 6Kg)를 사용하였는데 받침대로는 판목(측선 1)과 철제받침대(측선 2 및 3)의 두 종류를 사용하였다. 받침대 바닥에 수십 개의 못을 부착하여 지면과의 밀착을 높이고자 하였다. 진원인 해머를 이용, 모두 같은 방향(SH파이므로 측선에 직각인 방향)으로 받침대를 열 번 내외로 타격한 후 중합하여 사용하였다.

이 연구에서는 중합단면을 얻고자 하였으므로 자료 취득 방법으로는 공심점취득법을 채택하였다. 진원점 간격은 2m로 하였다. 수신점 배열은 진원점을 중심으로 양측으로 수신점을 전개하는 양날개법(Kearny and Brooks, 1991)을 택하였으며 수신점의 간격은 2m로 하였다. 따라서 전 측선을 2m 간격으로 진원을 터뜨리면서 이동하는데 이때 진원점의 양측으로 모두 24개의 수신점이 배치되어서 같이 이동하게 된다. 수신기를 여러 개 직렬 혹은 병렬로 연결해서 하나의 수신점을 구성할 수도 있으나(detector array) 이 연구에서는 수신점 당 하나의 수신기를 사용하였다. 최소오프셋은 1m, 최대오프셋은 35m이다.

탐사측선의 지면 상태나 소음환경은 대체로 양호한 편이었으며, 탐사측선은 사면의 소단 상단이었으므로 지형은 평탄하였다. 측선 1의 경우는 잔디높이의 풀이 피복되어 있어 수신이나 발전 시 다소 나쁜 영향을 미쳤을 것으로 보인다. 탐사 시기는 겨울철이었고 탐사대상 사면은 지하수면 상부에 위치해 있었다.

#### 4. 자료전산처리

탐사자료는 실내에서 공영세 등(1995)이 제시한 일련의 반사법 전산 자료처리 과정을 거쳤다. 이는 야외자료를 검토 및 수정하고, 몇 종류의 보정을 시행하고, 그리고 반사파신호를 증강하고 노이즈를 제거, 억제할 목적 등으로 시행되는 일련 과정이다. 탄성파의 반사자료는 최종적으로 반사단면으로 표현되어야 한다. 그러나 원시 자료는 각각 서로 다른 지형고도와 위치관계, 서로 다른 시점에서 취득되므로 이를 동일 고도(기준면에 맞춘 고도보정 등), 동일 시점(동보정, 정보정)의 자료로 변환한 뒤 반사단면에 정렬할 필요가 있다. 이 과정들이 보정과정이다. 또 탄성파 원시 자료는 반사파 이외에도 직접파, 표면파, 굴절파, 음파, 주변 환경에서 들어오는 소음 및 진동 등 여러 가지 파동들의 집합체이다. 반사법

자료처리 과정에서는 이 원시자료에서 반사파만을 선별할 필요가 있다. 이 과정들이 잘 수행되면 반사단면의 품질이 향상된다. 반사파와 노이즈로 취급되는 파동의 특성은 변화가 심하고 매우 자료 의존적이다(예를 들어 각 파동의 주파수나 속도처럼). 따라서 자료처리 시 사용되는 최적 매개변수도 매번 자료의 특성을 분석한 뒤에야 얻을 수 있게 되므로 반사법 자료처리는 길고 지루한 특성 분석 과정이 필요하게 된다. 일반적인 반사법 자료처리 과정은 편집, 이득조정(gain recovery), 주파수필터링, 디콘볼루션(deconvolution), 정보정(static correction), 속도분석, NMO보정(Normal MoveOut correction), 중합(stacking), 구조보정(migration)으로 구성되며, 각 과정이나 기법에 대해 간략히 설명하면 다음과 같다.

##### (1) 편집(editing)

탄성파 원시기록 중 결락된 부분이나 지나치게 잡음이 많은 트레이스(trace) 등은 전체 자료 질에 나쁜 영향을 미치지 않도록 적절히 수정하거나 제거하여야 한다. 또한 트레이스의 초기 주시(travel time)에 나타나는 굴절파 혹은 직접파 등의 부분적 제거를 위하여 뮤팅(muting)처리를 시행한다. 또한 뮤팅은 주파수 필터링 후에 발생할 수 있는 고주파 잡음 등을 제거하거나 NMO 보정후의 파형의 왜곡이 심하게 나타나는 부분을 제거할 때에도 사용된다.

##### (2) 이득조정(gain recovery)

탄성파 트레이스는 주시와 더불어 진폭이 급격히 감소한다. 이것은 스케일의 문제로서 주시에 따라 적절히 스케일을 변화시켜줌으로서 진폭은 보상된다. 여기에서는 자동 이득보정법(auto gain recovery)을 사용하였다. 즉, 이것은 일정길이의 창을 이동시키면서 평균값이 같아지게 조정하는 방법이다. 또한 트레이스의 반사신호가 없는 부분에서 노이즈가 증폭되는 것을 막기 위해 일정 기준 진폭 이상의 값에만 적용되게 하였다. 창의 길이는 트레이스 길이의 1/8~1/4로 하여 적용하였다.

##### (3) 주파수필터링

신호와 노이즈의 주파수가 다를 경우 주파수필터링에 의해 간단히 노이즈를 제거할 수 있다. 스펙트럼분석을 통해 각 트레이스의 주파수 특성을 파악한 뒤 주파수필터링을 시행하였다. 디콘볼루션 등의 자료처리 후 생기는 인위적인 고주파 노이즈(약 700Hz이상)가 고역차

단필터에 의해 제거되었다.

#### (4) 디콘볼루션(deconvolution)

진원에서 발생한 탄성파가 지구 내부로 전파될 때 밀도 및 속도가 각기 다른 암석층들을 통과하게 된다. 이러한 밀도 및 속도가 다른 암석층들의 경계면에서 탄성파에너지의 일부는 반사되어 지표로 되돌아와 지표상의 기록계에 반사파 트레이스로서 기록된다. 이 때 진원에서 발생한 탄성파를 기본파형요소(basic wavelet)로 보면, 기록된 반사파 트레이스는 지하의 경계면의 반사계수열과 기본파형요소와의 콘볼루션(convolution) 연산으로 나타낼 수 있다. 그러나 지하 지층은 일반적으로 다수의 얇은 층으로 구성되어 있으므로 기본파형요소는 서로 중첩되어 나타나게 되어 기록된 원시 트레이스 자체로는 지층의 상세한 경계면을 판별하기 힘들다. 따라서 지하구조를 정밀한 상으로 나타내기 위해서 수행하는 것이 디콘볼루션 처리이다. 디콘볼루션은 기본파형요소를 압축하고 주기적인 노이즈성분을 제거하며 일부 다중반사 잡음을 억제하는 효과를 거둠으로서, 결과적으로 탄성파 단면도의 수직방향 해상도를 증대시킨다. 디콘볼루션의 결과는 미리 주어지는 디콘볼루션 필터 설계를 위한 몇 가지 매개변수(필터 길이, 예측지연의 길이, prewhitening값 등)에 크게 좌우된다. 따라서 본 연구에서는 여러 시험을 통해서 가장 적합한 매개변수를 선정한 뒤 적용하였다.

#### (5) 중합(stack)

중합처리는 반사파신호를 증강하고 노이즈를 억제하는 처리 중 가장 중요한 처리 기법이며 반사법의 성공을 담보하는 중심 기법이다. 따라서 일반적으로 자료취득이나 장비 선정 단계에서 이미 중합처리를 우선으로 고려한 자료취득 설계에 따라 탐사를 수행하게 된다. 중합처리를 위하여서는 다음의 몇 가지 연관된 단계를 거쳐야 한다.

공심점취합(CDP gathering) : 발진점 모음(shot record)에서 공심점 모음으로 자료를 취합하는 작업이다. 공심점 모음은 모두 동일한 지하 지점에 대한 서로 다른 진원-수진기 간격의 트레이스로 구성된다.

속도분석 : 후속 자료처리 단계인 NMO보정 적용 시 지하의 속도구조에 대한 정보가 필요한데 이는 다중채널 시스템의 공심점 모음 자료를 이용해서 구할 수 있다. 이렇게 얻어진 속도를 중합속도라고 부른다. 중합속

도의 정확성을 높이기 위해서는 진원-수진기 간격이 길어지고 중합도가 높아야 한다. 속도분석에서 얻어진 속도값을 이용하여 진원-수진기 간격(오프셋)에 대한 시간 지연을 계산해서 NMO보정을 실시한다.

NMO보정 : 공심점 모음이 트레이스를 진원~수진기 간격이 영일 때의 자료(zero offset)인 것처럼 재구성하여 중합처리 과정을 수행할 수 있도록 하는 것이 NMO(normal moveout)보정 혹은 동보정이다.

중합 : NMO보정된 공심점 모음 내의 모든 트레이스를 합하는 과정이다.

#### (6) 구조보정(migration)

이 연구에서는 중합전 시간 구조보정(prestack time migration) 처리가 추가로 시행되었는데, 그 이유는 탐사 대상인 암반의 지질구조가 매우 복잡하여 탄성파반사 단면이 왜곡된 지질구조를 나타내게 되므로 구조보정 처리 과정을 통하여 반사 결과단면의 지하이미지를 재구성할 필요가 있기 때문이다. 일반적으로 구조보정 처리는 계산 시간, 비용 등의 문제로 계산복잡도가 낮은 중합후 구조보정 과정(post-stack migration)을 선호하지만 본 연구에서 수행한 극천부 탄성파반사법 탐사는 석유탄사에 비해 자료의 규모가 작기 때문에 보다 엄밀한 이미지 재구성이 가능한 중합전 구조보정처리를 실시하였다. 그 결과 구조보정 되지 않은 자료의 중합과정에서 일어나는 상반되는 경사문제(conflicting dips problem: 단층면, 층리면, 회절 에너지 등이 서로 다른 중합속도를 가지므로 그 중 하나에 처리를 맞추면 다른 반사 이벤트가 없어지는 문제)가 궁극적으로 해결되며, 반사면 중합속도의 경사의존 효과가 제거되고, 중합도와 오프셋이 증대되어 정확한 속도 분석이 가능해지며, S/N비(Signal/Noise ratio)가 증대되어, 결과적으로 보다 선명한 초고해상도의 반사 이미지를 얻을 수 있게 된다(Claerbout, 1985; Bancroft et al., 1998; Yilmaz, 2001).

## 5. 결과분석

그림 2는 공심점모음 자료의 예(그림 2(a)는 축선 1, 그림 2(b)는 축선 3의 예)를 보여준다. 수진점은 양날개 전개를 하였으므로 중앙의 수진점에서부터 양측으로 음파(0~0.1초)가 나타나며, S파 직접파와 굴절파 등이 직선형태로 분포하는 모습을 볼 수 있다(트레이스 간격은 2m). 축선 3의 경우 S파 반사신호는 이러한 노이즈의

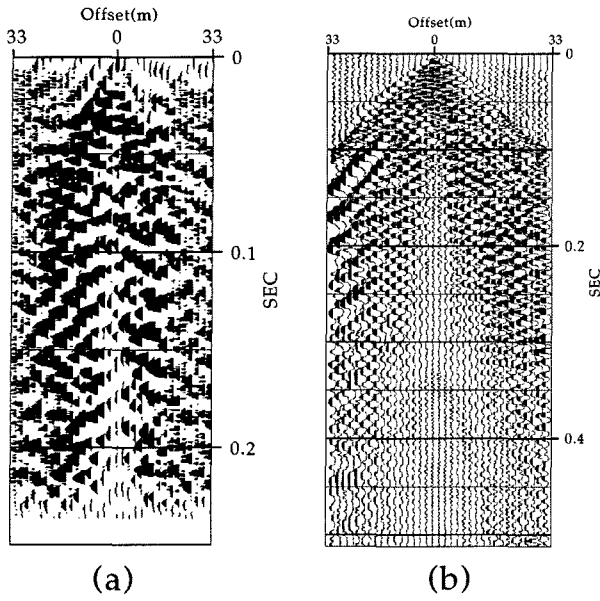


그림 2. CDP 모음의 예. (a) 측선1, (b) 측선3

아래쪽에서 대부분 쌍곡선형태로 약 0.5초까지 분포한다. 쌍곡선의 형태가 다소 왜곡되어 있는 것은 암반의 지질이 단층이 중첩된 복잡한 구조인 탓으로 단절되거나 구부러진 쌍곡선형태의 반사신호로 나타나기 때문이다(그림 2(b)). 이에 따라 정확한 중합처리가 이루어지기 힘든 경우가 발생하며, 이것이 바로 중합전 구조보정 처리를 필요로 하는 대표적 이유 중의 하나이다. 측선 1의 반사파는 측선 3의 반사파에 비해 다소 저주파인데 그 이유는 40Hz의 고유주파수 성분의 수신기와 판목을 진원으로 사용하였기 때문으로 판단된다(측선 2 및 3의 경우는 100Hz수신기와 철제진원을 사용하였음).

그림 3은 그림 2와 같은 공심점모음 자료를 NMO보정 후 중합한 단면들이다. 이들 중합단면은 복잡한 지질구조의 영향으로 정확한 중합이 이루어지지 못하여 왜곡된 지층구조를 나타내는 부분이 많음에 따라, 본 중합 결과만으로는 정확한 지질구조 해석이 어렵다. 구조보정 되지 않은 반사단면 및 중합단면에 나타나는 왜곡된 지층구조의 대표적인 예가 쌍곡선 형태의 반사파이다(그림 3(a) 및 (c)). 그림 1과 같이 지하의 한 점에서 오는 반사파가 반사단면에서는 쌍곡선 형태의 곡선을 그리게 된다. 반사단면이 지하구조를 왜곡 없이 제대로 보여줄 수 있다면 반사단면에서도 한 점으로 나타나야 할 것이다. 그러나 그렇지 못한 이유는 수신기에 기록되는 반사파는 수신기 직하부에서만 들어오는 것이 아니고 모든 방향에서 들어오는 데에도 불구하고, 반사단면에 도시될 때에는 수신점의 직하부에 표시되기 때문이다.

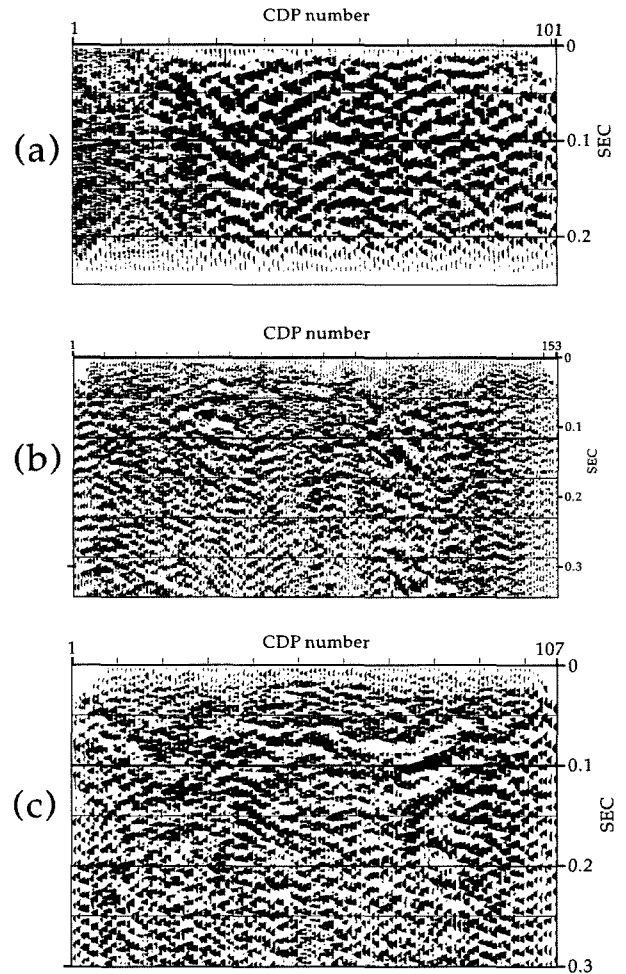


그림 3. 중합단면. (a) 측선1, (b) 측선2, (c) 측선3. 그림 7의 0.05-0.08초 사이에 나타나는 단층들로 절단된 수평층들이 (c)의 0.05-0.08초 사이에 가로로 길게 굴곡된 반사파로 왜곡되어 나타난다. (c)의 CDP번호 37과 0.1-0.17초 사이의 쌍곡선 6개도 역시 왜곡된 구조이다.

이러한 이유로 해서 모든 반사단면은 근본적으로 다소간의 왜곡된 지하구조를 보일 수 밖에 없으며, 따라서 지하구조가 복잡하고 경사층이 많을수록 반사단면에 대한 구조보정 처리가 필수적으로 요구되게 된다.

그림 4는 중합전 구조보정의 중간처리 단계에서 만들어진 공통산란점 모음(Common Scatter Point Gather)의 한 예이다(트레이스 간격은 1m). 그림 4에서는 S파 반사신호가 공심점 모음(그림 2)에 비해 더욱 쌍곡선형태를 유지하는 것을 볼 수 있다. 이것은 지하의 임의의 점에서 반사 및 회절된 에너지를 모든 가능한 진원점~수진점 조합에서 수집해 놓은 단면이기 때문이다. 따라서 본 공통산란점 모음에서는 오프셋(진원점~수진점 간격)과 신호 대 잡음비도 증대되어 있다. 공통산란점 모음으로 구한 S파 반사파의 속도는 상당히 낮아서 120~350m/s 사이의 값을 가지는데 본 속도값은 중합전 구조

보정된 값으로서, 이는 반사면의 경사의존 효과가 제거된 속도값이다.

그림 5는 구조보정이 시행된 측선 1의 최종 결과단면(a)과 그 해석단면(b)이다. 우선 그림 5(a) 단면을 보면 짧은 토막 모양의 반사면 만이 모여 있는 것처럼 매우 복잡해 보인다. 그러나 자세히 살펴보면 연결성을 가진 상당히 긴 반사면이 4~5개 있음을 알 수 있다. 즉, 그림 5(b)의 해석단면에 45° 정도의 경사로 그려져 있는 5개의 선에 해당하는 위치에 있는 반사면이 그것이다. 이 5개의 반사면이 야외의 절개사면에서 확인된 겹보기 경사 약 30°의 단층면에 해당하는 것으로 보인다. 그 이유는 단층 간의 간격(10~15m)과 단층의 기울기(그림 5의 단면은 수직방향으로 과장되어 있어 약 45°로 보이지만 단면에서의 경사는 실제 20~30°)가 단면과 노두에서 대부분 일치하며, 단면에서 단층반사면이 수평반사면을 절단하는 형태로 나타나기 때문이다. 다음은 층리반사면을 해석해야하는데 그림 5(a) 단면의 아래쪽(0.2초 부근)에서 다소 연결성이 좋은 수평반사면이 나타나므로 이들을 아래쪽부터 하나씩 연결하면 대체로 그림 5(b)와 같은 해석이 가능한, 수평에 가까운 구불구불한 층리

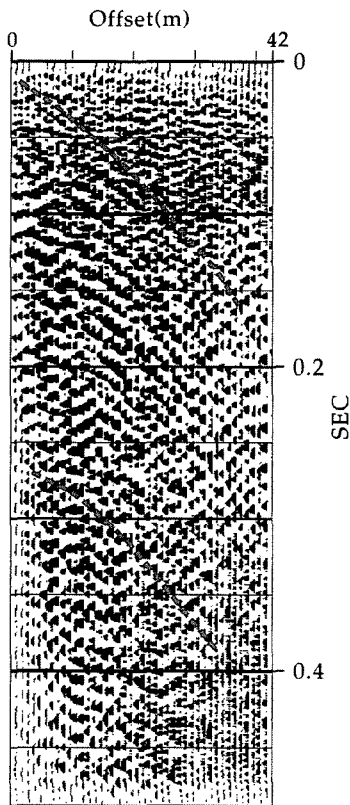


그림 4. CSP 모음의 예(측선3의 공통산란점 모음), 점선은 쌍곡선의 모양을 나타낸다.

반사면이 그려지게 된다. 물론 여러 개의 층리반사면을 더 그릴 수 있으나 심도를 고려했을 때 사진 1의 백색 띠 모양의 지층에 해당되는 반사면을 표시하기 위해 2개 층만을 해석한 것이다. 그 결과 단면의 좌측에 솟아 오른 듯한 작은 배사 구조가 사진 1에서의 백색층과 유사하며, 심도도 2개 반사면의 중간과 거의 일치함으로써 대체로 인정할 수 있는 해석이라 할 수 있다. 물론 여타 단층도 더 있을 수 있으며 층리면도 더 그을 수 있겠지만, 이와 같이 복잡한 암반 구조에서 더 자세하고 엄밀한 해석은 큰 의미를 가질 수 없다.

그림 6은 구조보정 처리 후 측선 2의 최종 결과단면(a)과 그 해석단면(b)이다. 최종단면에서 심도 1~11m 구간(0.03~0.2초 구간)에 4개의 큰 진폭을 가지는 특징

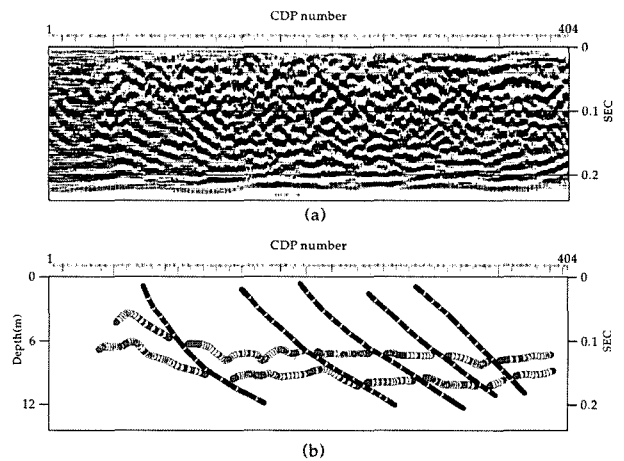


그림 5. 구조보정이 시행된 측선1의 최종 결과 (a) 결과단면, (b) 해석단면

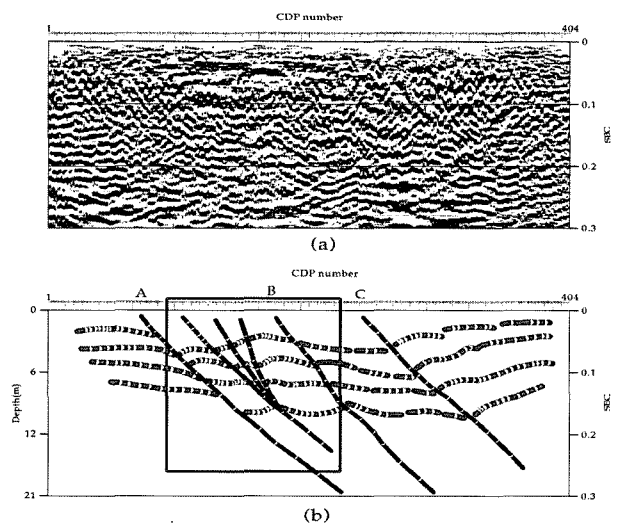


그림 6. 구조보정이 시행된 측선2의 최종 결과 (a) 결과단면, (b) 해석단면

참조: 단층 B를 중심으로 한 시각부분은 사진 3의 탐사범위를 나타냄

적인 층리반사면이 있으며, 이 지층들의 형태는 수평내지 매우 완만한 경사를 보이는 향사구조를 이룬다. 진폭이 강한 이러한 층리반사면은 다수의 단층에 의해 절단되어 있으며, 그 중 낙차가 비교적 뚜렷한 3개의 단층을 표시하면 그림 6(b)의 A~C이다. 그리고 단층은 여러 곳에서 단층면 반사신호를 나타낸다. 이러한 단층의 겹보기 경사각은 20~30°로서 저각도 단층이다.

측선 2와 60m의 간격을 두고 평행하게 달리는 측선 3의 최종단면에서도 특징적인 4개의 층리반사면이 심도 1~10m사이(0.02~0.18초 구간)에 분포한다(그림 7). 이 반사면들은 대표적인 고품질 S파 반사이미지를 보여주고 있으며, 측선 2와 마찬가지로 수평 내지 아주 완만한 향사구조를 가진다. 이러한 층리반사면들은 경사각 20~30°의 저각도 단층에 의해 절단되어있다(그림 7(b)). 그리고 특징적인 층리반사면 4개와 이를 절단하는 저각도 단층의 양상이 양 측선 간에 흡사한 것으로 보아 두 측선이 유사한 지질구조를 가진 것으로 추정된다.

사진 3은 측선 2의 사면노두에서 관찰되는 주요 단층과 층리면을 표시한 것이다. 측선 2의 단면(그림 6(b))상에 사각형으로 사진의 범위를 표시하였다. 청회색 석회암 중에 협재된 4~5개의 회백색 박층(두께 10~40cm)으로 인하여 층리면이 사진에서도 식별이 가능하며, 노두사진(사진 3)과 결과단면(그림 6(b))의 해석이 일치하는 것을 볼 수 있다. 표시된 단층 외에도 서로 다른 각도의 소규모 단층이 다수 발달해 있음이 노두와 탄성파 단면 모두에서 관찰되었다. 반사단면은 측선 하부방향

의 수직면을 나타내는데 반해 사면노두는 60° 정도의 경사면으로 동일한 면이 아닌데도 불구하고 일치하는 구조를 보이는 것은 단층면과 층리면의 주향경사가 측선에 대한 직각방향으로의 변화가 심하지 않음을 나타낸다.

S파 반사단면에서는 극천부(0~3m)의 구조가 잘 나타나 있으며, 이 구간은 구조보정 노이즈가 없는 중합단면에서 더 잘 보이고(그림 3), 암반 피복층은 무반사의 패턴을 보이는데 반해 암반 내부에는 뚜렷한 반사파가 나타남으로써 피복층과 암반의 경계가 세밀하게 잘 드러난다. 더욱이 그 깊이가 아주 얇아서 지표에 매우 가까움에도 불구하고 반사신호가 잘 나타난다(그림 5(b) 우반부 및 그림 5(a)). S파 반사법의 이러한 특성은 P파 반사법과 상반되는 것으로서, 표면파 등의 노이즈에 의해 극천부 구조가 나타나지 않는 P파 반사법에서는 기대할 수 없는 S파 반사법의 장점이라 할 수 있다(Miller et al., 1989; Deida and Ranieri, 2001).

최종 결과단면에 나타난 반사파의 주파수는 80Hz(측선 1) 내지 100~150Hz(측선 2와 3)로서 수직방향으로 하나의 반사파가 나타내는 간격은 0.5~0.8m를 보여줌으로, 수직해상도는 전 측선에서 1m미만의 초고해상도임을 알 수 있다.

각각의 측선에 대해 중합단면(그림 3)과 최종단면(구조보정단면, 그림 5~7)을 비교함으로써 중합전 구조보정의 효과를 쉽게 발견할 수 있는데, 중합전 구조보정 처리에 의해 회절 에너지는 원래의 산란점으로 수렴됨으로 해서 정확한 중합이 이루어지고 결과적으로 경사진 반사면과 단층면의 반사신호들이 동시에 강화되었다. 그리고 신호 대 잡음비가 향상되고 오프셋이 늘어남

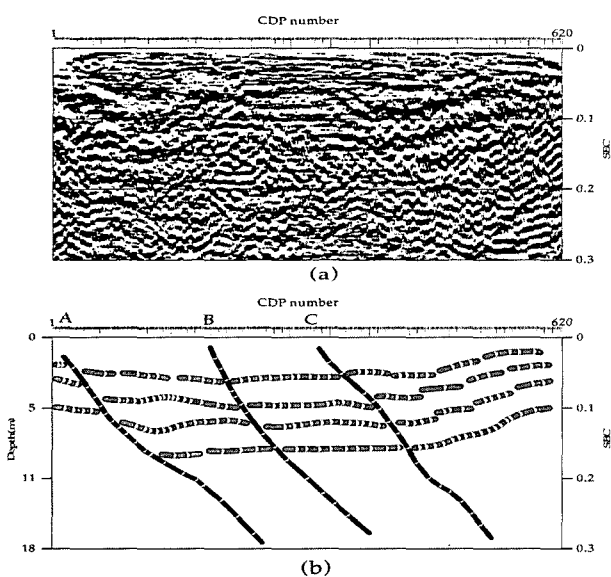


그림 7. 구조보정이 시행된 측선3의 최종 결과 (a) 결과단면, (b) 해석단면

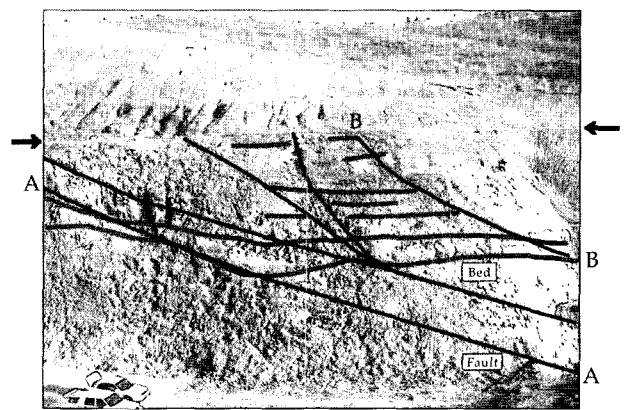


사진 3. 측선 2의 절개사면에 나타나는 층리면 및 단층(화살표는 측선 전개 위치)



으로서 보다 정확한 중합속도분석이 가능하게 되었다. 속도분석의 결과 이들 측선에서의 S파 속도는 120~350m/s범위를 가진다. 구조보정 처리에 의하여 생기는 노이즈는 해석에 영향을 줄 정도로 크지는 않은 것으로 판단된다.

## 6. 결론 및 제언

고생대 석회암으로 구성된 암반사면 상부에서 S파를 이용한 탄성파반사법을 시행한 결과 심도 약 0~20m 사이에 대해 1m미만의 해상도를 가지는 초고해상도의 반사이미지와 S파 속도값을 얻을 수 있었다. 결과단면의 반사파 신호는 지표표층부인 지표부근부터 20m이상 심도까지 나타나며, 반사면의 수직방향의 해상도는 0.5~0.8m로서 초고해상도를 나타내었다. 본 반사단면에 나타나는 주요 단층면과 층리면들은 현장의 절개면 노두와 대부분 일치하는 것이 확인되었다. 그리고 복잡한 지질구조를 가지는 암반의 반사법 자료에 대해 시행된 다양한 전산 자료처리 기법이 단면의 해상도를 향상하고 지하구조가 보다 정확하게 재현되는 데에 기여한다는 것을 확인하였다.

측선 1의 결과단면에 나타나는 0.15초 구간의 반사면이 사면노두에 보이는 회백색층과 대비되며 단면 좌측에서의 국지적인 배사구조와도 일치하였다. 또 저각도 단층도 단면과 노두에서 모두 확인되었다. 측선 2의 단면에서 0.03~0.2초 사이의 4개의 큰 진폭을 가진 환경사 층리반사면이 노두에서는 탐사면 하부 약 1~11m 심도에서 역시 완만한 경사 내지 수평층으로 나타나는 것이 확인되었다. 이들을 절단하는 20~30°의 저각도 단층도 단면과 사면노두 양측에서 서로 대응되는 위치에서 발견되었다. 측선 3의 단면에서 0.02~0.18초 사이에 4개의 층리반사면과 이와 연관된 저각도 단층들이 측선 2와 유사하게 분포하였다. 이러한 현장적용 결과를 통해 S파 반사법탐사는 토목공학 분야에서 시추조사와 함께 지표표층부 극천층에 대한 지반구조 및 물성 분포를 상세하게 밝히는데 매우 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2002학년도 부경대학교 발전기금재단의 지원에 의하여 연구되었으며, 이 지원에 대해 감사드린다. 두 분의 심사위원(익명)의 지적과 고견에 의하여 논문의 내용이 크게 개선될 수 있었다고 생각하며 이에 깊이 감사드린다.

## 참고 문헌

1. 공영세, 김국주, 김성우, 이호영, 김원식, 김희준 (1995), "PC기반의 친해저 다중채널 탄성파 자료의 전산처리", *한국해양학회지*, 제30권, 2호, pp.116-124.
2. Bancroft, J.C., Geiger, H.D., and Margrave, G.F. (1998), "The Equivalent Offset Method of Prestack Time Migration", *Geophysics*, Vol.63, No.6, pp.2042-2053.
3. Claerbout, J.F. (1985), *Imaging the Earth's Interior*, Blackwell Scientific Publications, pp.173-182.
4. Dasios, A., McCann, C., Austin, T.R., McCann, D.M., and Fenning, P. (1999), "Seismic Imaging of the Shallow Subsurface: Shear-wave Case Histories", *Geophysical Prospecting*, Vol.47, pp.565-591.
5. Deidda, G.P. and Ranieri, G. (2001), "Some SH-wave Seismic Reflections from Depths of Less than Three Metres", *Geophysical Prospecting*, Vol.49, pp.499-508.
6. Ghose, R. and Goudswaard, J. (2004), "Integrating S-wave Seismic-reflection Data and Cone-penetration-test Data using a Multiangle Multiscale Approach", *Geophysics*, Vol.69, No.2, pp.440-459.
7. Goforth, T. and Hayward, C. (1992), "Seismic Reflection Investigations of a Bedrock Surface Buried under Alluvium", *Geophysics*, Vol.57, No.9, pp.1217-1227.
8. Holzschuh, J. (2002), "Low-cost Geophysical Investigations of a Paleochannel Aquifer in the Eastern Goldfields, Western Australia", *Geophysics*, Vol.67, No.3, pp.690-700.
9. Imai, T. and Tonouch, K. (1982), "Correlation of N-value with S-wave Velocity", *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*, The Hague, The Netherlands, pp.67-72.
10. Keary, P. and Brooks, M. (1991), "An Introduction to Geophysical Exploration", Blackwell Scientific Publication, pp.254.
11. Miller, R.D., Steeples, D.W., and Bannan, M. (1989), "Mapping a Bedrock Surface under Dry Alluvium with Shallow Seismic Reflections", *Geophysics*, Vol.54, No.12, pp.1528-1534.
12. Sheriff, R.E. (2002), "Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics", 4th ed., Society of Exploration Geophysicists, pp.429.
13. Yilmaz, O. (2001), "Seismic Data Analysis", Vol. I, Society of Exploration Geophysicists, pp.725-775.
14. Zhang, S.H. (1990), "Shallow SH-wave Seismic Exploration for Subway Construction in Shanghai", *Geotechnics* Vol. I, Society of Exploration Geophysicists, pp.175-179.

(접수일자 2005. 11. 4, 심사완료일 2006. 4. 20)