

고해상 다중채널 탄성파탐사 자료취득변수에 따른 천부 해저지층영상의 해상도

이호영¹⁾ · 구남형¹⁾ · 박근필¹⁾ · 유동근¹⁾ · 강동호¹⁾ · 김영건¹⁾ · 서갑석¹⁾ · 황규덕¹⁾ · 김종천²⁾ · 김지수²⁾

Resolution of Shallow Marine Subsurface Structure Image Associated with Acquisition Parameters of High-resolution Multi-channel Seismic Data

Ho-Young Lee¹⁾, Nam-Hyung Koo¹⁾, Keun-Pil Park¹⁾, Dong-Geun Yoo¹⁾, Dong-Hyo Kang¹⁾, Young-Gun Kim¹⁾, Gab-Seok Seo¹⁾, Kyu-Duk Hwang¹⁾, Jong-Chon Kim²⁾ and Ji-Soo Kim²⁾

요 약 : 고해상 해저 탄성파탐사는 자원, 엔지니어링 탐사 그리고 제4기 해저지질조사에 활용되어 왔다. 해저지층영상의 해상도를 높이기 위하여 다중채널 디지털 탐사가 시도되었다. 해저지층영상의 품질은 수직 및 수평해상도, 신호대잡음비 등에 좌우되며 이는 현장자료취득 시 자료추출간격, 공통중간점(CMP)간격, 중합수 등과 같은 자료취득변수에 관계된다. 자료취득변수에 따른 해상도의 효과를 알아보기 위하여 여수근해에서 시험탐사를 수행하고 취득된 자료를 분석하였다. 음원은 30 in³의 소형 에어건을 사용하였고 수신장치로 그룹간격 5 m의 8채널 스트리머를 사용하였다. 2 s의 등시간 발파간격으로, 0.1 ms 자료추출간격의 디지털 자료를 취득하였다. 취득된 자료로부터 여러가지의 자료추출간격, CMP간격과 중합수에 대한 탄성파 단면도를 제작하고 그 해상도를 비교하였다. 탐사지역에서 나타난 두께 ~1 m, 경사 ~6°의 미세한 퇴적상의 재현을 위한 자료취득 변수를 분석한 결과, 0.2 ms보다 작은 자료추출간격, 2.5 m보다 작은 CMP 간격, 그리고 4 이상의 중합수를 사용하였을 때, 지층구분 해상도가 높고, 연속성이 좋으며 잡음이 적은 단면기록을 제작할 수 있었다. 천부 해저지층영상의 해상도는 현장자료취득변수에 관계되므로 탐사심도, 탐사지역의 범위 등 탐사목적에 따라 적절한 자료취득변수를 사용함으로써 목적에 부합하는 해저지층영상을 재현시킬 수 있다.

주요어 : 해상도, 자료취득변수, 추출간격, 수직해상도, 수평해상도, 발파간격, 그룹간격, 고해상 해저 탄성파탐사, 다중채널, 자료처리, 에어건

Abstract : High-resolution shallow marine seismic surveys have been carried out for the resources exploration, engineering applications and Quaternary mapping. To improve the resolution of subsurface structure image, multichannel digital technique has been applied. The quality of the image depends on the vertical and horizontal resolution and signal to noise (S/N) ratio which are associated with the data acquisition parameters such as sample interval, common midpoint (CMP) interval and CMP fold. To understand the effect of the acquisition parameters, a test survey was carried out off Yeosu and the acquired data were analyzed. A 30 in³ small air gun was used as a seismic source and 8 channel streamer cable with a 5 m group interval was used as a receiver. The data were digitally recorded with a shot interval of 2 s and sample interval of 0.1 ms. The acquired data were resampled with various sample intervals, CMP intervals and CMP folds. The resampled data were processed, plotted as seismic sections and compared each other. The analysis results show that thin bed structure with ~1 m thickness and ~6° slope can be imaged with good resolution and continuity and low noise using the acquisition parameters with a sample interval shorter than 0.2 ms, CMP interval shorter than 2.5 m and CMP fold more than 4. Because seismic resolution is associated with the acquisition parameters, the quality of the subsurface structure can be imaged successfully using suitable and optimum acquisition parameters.

Keywords : resolution, acquisition parameters, sample interval, vertical resolution, horizontal resolution, shot point interval, group interval, high-resolution marine seismic survey, multichannel, data processing, air gun

서 론

고해상 천부 해저 탄성파탐사는 골재, 가스하이드레이트 등 해저에 부존하는 자원탐사와 해저지층의 퇴적환경연구, 엔지

니어링 목적의 지반조사에 널리 활용되고 있다. 이러한 탐사에서는 해저지층을 높은 해상도의 영상으로 재현시켜 실제의 모양에 가까운, 정확하고 정밀한 지층구조를 파악하는 것이 중요하다. 이와 같은 목적을 달성하기 위하여 석유탐사에서 발전된

*2003년 4월 10일 접수

1) 한국지질자원연구원 석유해저자원연구부(Petroleum and Marine Resources Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM))

2) 충북대학교 지구환경과학과(Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University)

다중채널 디지털 탄성과 탐사법을 천부 고해상 탐사에 적용하는 연구가 시도되어 왔다(Lee *et al.*, 1996; 이호영, 1996; Mosher and Simpkin, 1999; Nissen *et al.*, 1999; Morend *et al.*, 2002; 이호영 외, 2002). 위의 연구에서 음원은 1~40 in³의 소형 에어건을 사용하였으며 자료추출간격은 0.1~0.5 ms가 사용되었고 중합수는 3~16이 사용되었다. 고해상 탐사는 석유탐사에 비해 수평 및 수직 해상도가 높게 고안된다. 즉 발파간격과 그룹간격을 작게 하여 수평해상도를 높이며, 고주파 성분이 많은 소용량의 음원을 사용하고 디지털 자료추출간격은 조밀하게 하여 수직해상도를 높인다. 이러한 자료취득변수는 탐사 대상 심도, 탐사목적, 탐사지역의 지질, 탐사 팀의 장비 여건 등에 따라 다양하게 적용된다.

본 연구에서는 현장자료취득 변수인 자료추출간격, 발파간격과 중합수에 따른 탄성과 단면 기록의 해상도 차이를 비교함으로써 정밀한 지층구조 영상화에 필요한 자료취득변수의 적절성을 분석해 보고자 한다. 본 연구를 위하여 여수 근해에서 240 L-km의 탐사자료를 취득하는 현장시험탐사를 수행하였다. 음원으로는 에어건을 사용하였고 8채널의 스트리머 그리고 PC기반의 자료기록 및 처리시스템을 이용하여 디지털 자료를 기록하고 전산처리하였다.

현장자료취득

현장시험탐사는 한국지질자원연구원의 탐해2호를 사용하여 여수근해에서 수행되었다. Fig. 1에는 탐사지역 및 측선을 나타내었다. 측선은 모두 7개로 총 240 L-km의 자료가 취득되었다. 현장탐사에서 음원은 에어건을 사용하였으며 수신장치는 8채널 고해상 스트리머를 사용하였다(Table 1). 탐사장비의 수중배열은 Fig. 2에, 탐사장비의 구성은 Fig. 3에 나타내

Table 1. Survey equipment and acquisition parameters

Survey vessel (tonnage)	Tamhae II (2000 ton)
Source	Bolt Air gun 30 in ³
Compressor	Hamworthy
Receiver	8 channel high-resolution streamer
Signal conditioning	Amplifier
Recording instrument	EPC graphic recorder, KDAPS v.1.0
Positioning system	TRINAV DGPS
Offset to 1 st ch	20 m
Group interval	5 m
Sampling interval	0.1 ms
Record length	1.0 s
Shot interval	2 s (~5 m)
Gun depth	~3 m

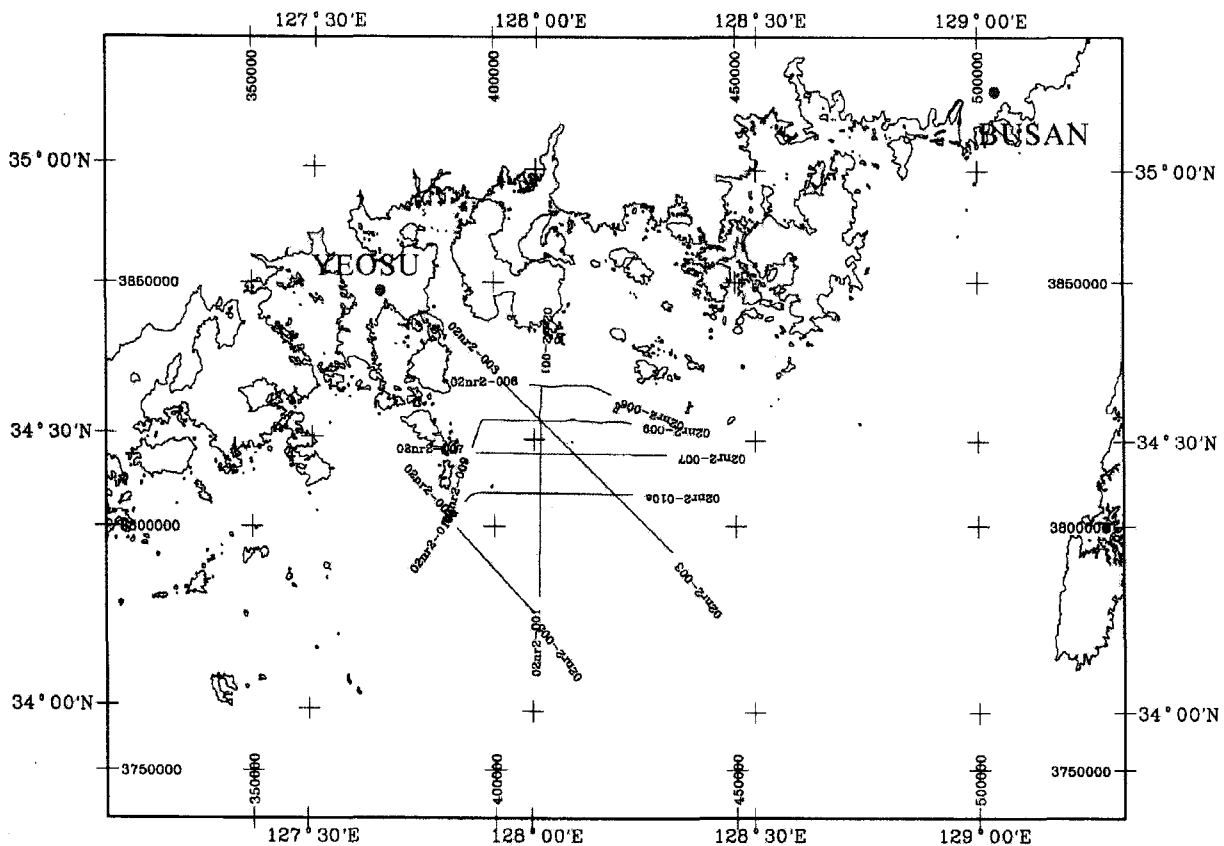


Fig. 1. Test field survey area off Yeosu and seismic track lines.

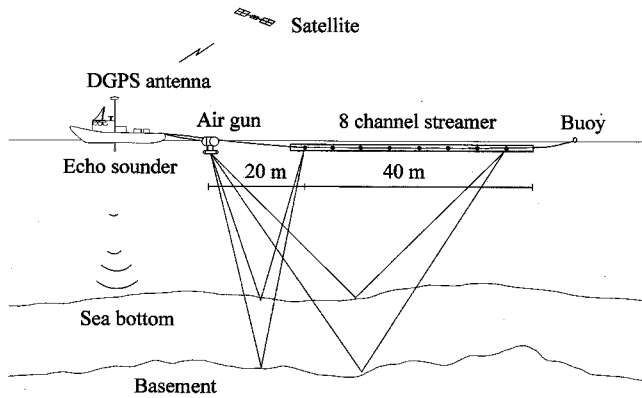


Fig. 2. Layout of the high-resolution seismic survey using an air gun and 8 channel streamer.

었다.

원래 정확한 발파점에서 발파가 이루어져야 하나 탐사선의 속도를 가능한 한 균일하게 하고 동시간 간격으로 발파함으로써 등거리 간격의 발파에 가까운 효과를 얻을 수 있다. 현장탐사에 사용한 자료취득변수(Table 1)는 발파간격은 2 s의 동시간 간격으로 하여 탐사속도를 ~9 km/hour(~5 노트(knots))로 유지함으로써 ~5 m마다 발파가 이루어지도록 하였으며, 자료추출간격은 0.1 ms, 기록시간은 1.0 s로 하였다. 자료추출간격과 발파간격은 자료취득변수 분석을 위하여 가능한 한 충분한 해상도를 갖도록 조밀하게 수행하였다. 음원과 수신장치의 첫째 채널과의 거리는 20 m로 하였으며 그룹간격은 5 m이다. 음원은 30 in³ 에어건을 사용하였다.

자료를 디지털로 기록할 경우, A/D 변환기의 분해능이 충분하면 강한 신호에서부터 미세한 신호까지 손실하지 않고 기록할 수 있다. 또한 디지털 기록의 가장 큰 장점은 디콘블루션, 정보정 등 자료처리를 통하여 해상도를 크게 향상시킬 수 있다는 점이다. 본 연구에서는 8채널의 디지털 자료기록을 위하여 16 bit의 분해능을 갖는 A/D 변환기를 장착한 PC기반의 자료기록 시스템을 사용하여 SEG-Y 형식의 디지털 자료를 취득하였다.

Table 2. Data processing flow

CMP sorting
Gain recovery
Deconvolution
Frequency filtering
NMO correction
Static corrections
Stacking

자료처리 및 탄성과 단면도 제작

자료취득변수에 따른 해상도 영향에 대한 분석에 앞서 자료추출간격 0.1 ms, 발파간격 5 m, 그룹간격 5 m로 취득된 탄성과 탐사자료를 그대로 활용하여 탄성과 단면도를 제작하였다. 탐사자료의 전산처리과정은 Table 2에 나타낸 바와 같이 공통중간점(CMP: common midpoint) 분류, 이득회수, 디콘블루션, 디지털 필터링, 동보정, 정보정, 중합 등 비교적 기본적인 과정만을 포함하였다.

취득된 자료중 축선 02nr2-010a에 대한 전산처리과정의 주요 전산처리결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 나타낸 부분은 축선중 일부 구간이며 평균탐사속도 ~8.2 km/h로 90분간 기록한 ~12.3 km 길이의 축선이다. Fig. 4a는 현장에서 열감응 기록지에 기록한 아날로그 기록을 나타낸 것이다. Fig. 4b는 디지털 기록의 1번 채널 자료로 제작한 단면도이다. Fig. 4b는 Fig. 4a의 아날로그 기록과 대체로 비슷한 형태를 나타낸다. Fig. 4c는 디콘블루션을 제외한 공통중간점 분류, 이득회수, 디지털 필터링, 동보정, 정보정, 중합을 한 결과로 발파간격 ~5 m, 그룹간격 5 m, 채널수가 8이므로 CMP간격은 2.5 m이며 중합수는 4이다. Fig. 4c는 Fig. 4b에 비하여 트레이스 간격이 1/2로 조밀하므로 수평해상도가 증가하였고 중합에 의하여 신호대잡음비가 향상되어 단면기록에서 지층 신호가 향상되었음을 보인다. Fig. 4d는 Fig. 4c의 과정 중 디지털 필터링 전에 스파이킹 디콘블루션 과정을 포함시켜 자료처리(Table 2)한 결과로 Fig. 4c에 비해 파형이 가늘어져 지층이 세밀하게 구분됨을 보여준다. Fig. 5a~Fig. 5d는 자료처리 효과 파악이 용이하도록

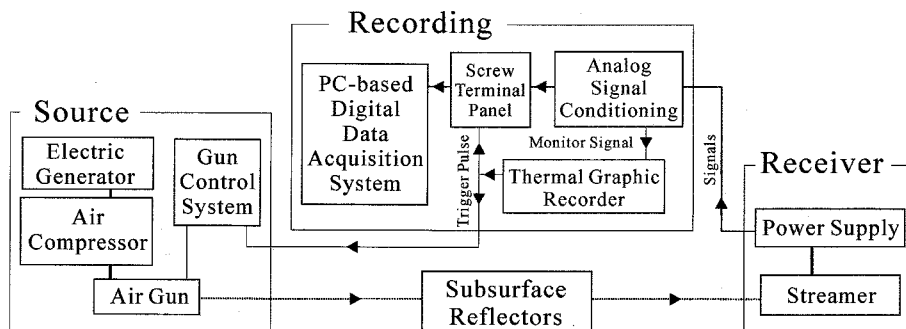


Fig. 3. Schematic diagram of seismic survey equipment.

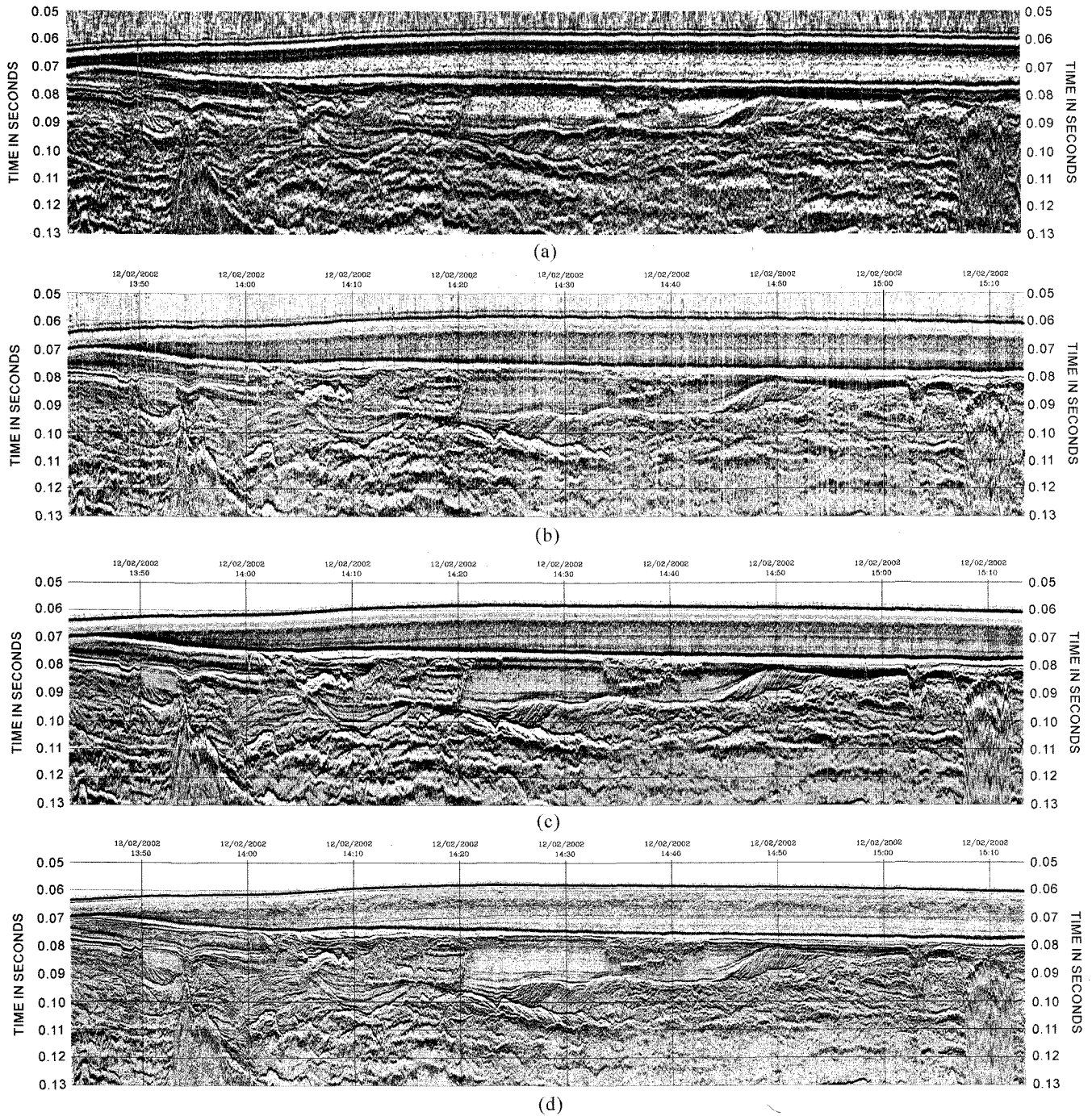


Fig. 4. Example processing steps of a portion (~12.3 km) of line 02NR2-010a in Yeosu survey. The seismic source is 30 in³ air gun. The receiver is 8 channel high-resolution streamer with a group interval of 5 m. Shot interval is ~5 m. (a) a field analog record. (b) a single (1st) channel digital section of the same portion of the analog section (a) after gain recovery, digital filtering and NMO correction.

각각 Fig. 4a~Fig. 4d의 일부분을 확대하여 나타낸 것이다. Fig. 5에 나타난 부분은 전체측선의 일부분으로 총 발파수가 300개이며 10분간 탐사한 자료이다. 평균탐사속도는 ~8.2 km/hour로 총 길이는 ~1.36 km이다.

자료취득 매개변수 효과 분석

자료취득변수에 따른 해상도 차이를 알아보기 위하여 Fig. 5에 나타난 탄성과 탐사자료로부터 자료추출간격, 발파간격, 중

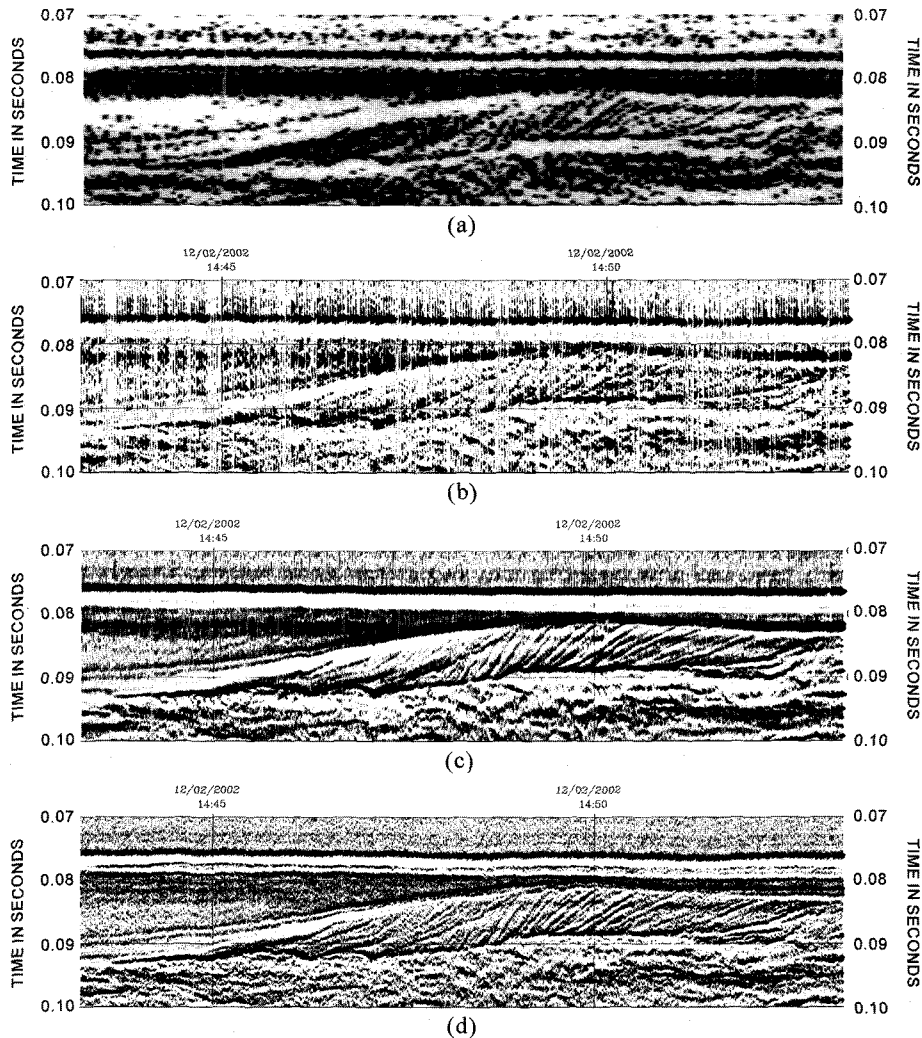


Fig. 5. A portion (between 14:43 and 14:53) of line 02nr2-010a (Fig. 4) was closed up. The length of line is ~ 1.36 km. The thickness of thin bed is ~ 1 m ($\sim 1 \sim 1.2$ ms) and the steepest slope is $\sim 6^\circ$ (horizontal distance is ~ 72 m within 10 ms (8 m assuming the velocity of 1600 m/s) vertical range). (a) a field analog record. (b) a single (1^{st}) channel digital section of the same portion of the analog section (a) after gain recovery, digital filtering and NMO correction. (c) an 8 channel 4 fold digital section after CMP sorting, gain recovery, digital filtering, NMO correction, static correction and stacking (without deconvolution). (d) same as (c) except including deconvolution before digital filtering.

합수를 다르게 적용하여 탄성파 단면도를 제작한 후 이를 비교하였다. 특히 이 부분에는 미세한 층리의 퇴적층이 발달되어 있는데 중앙에 얇은 급경사 지층은 ~ 1 m ($1 \sim 1.2$ ms)의 두께를 가지며, 수평거리 ~ 72 m에서 10 ms (1,600 m/s 속도 가정시 8 m)의 경사, 즉 $\sim 6^\circ$ 의 경사를 갖는다.

자료추출간격에 따른 수직해상도 비교

자료취득시에 0.1 ms의 자료추출간격으로 취득된 현장자료를 전산처리하여 Fig. 6a에 나타내었으며, 자료추출간격을 0.2 ms, 0.4 ms 그리고 0.8 ms로 재추출하여 자료처리한 결과를 각각 Fig. 6b, Fig. 6c와 Fig. 6d에 나타내었다. Fig. 6 자료의 CMP간격은 2.5 m이며 종합수는 4이다. 자료추출간격이 0.2 ms인 Fig. 6b는 0.1 ms인 Fig. 6a와 비교할 때 거의 차이를 보이지 않으나 자료추출간격이 0.4 ms와 0.8 ms인 경우는 수직

해상도가 현저히 저하됨을 볼 수 있다.

수직해상도는 신호의 주파수 성분과 관계되므로 진폭 스펙트럼을 분석하였다. Fig. 7은 현장자료(Fig. 5b)와 전산처리 후의 자료(Fig. 5d)에 대한 진폭 스펙트럼을 나타낸 것이다. 현장자료의 주파수는 100~600 Hz의 성분이 강하였으며 자료처리 후에는 500~1,200 Hz의 주파수성분이 증가되었다. Knapp (1986)에 따르면 자료추출간격을 $250/f_{\text{max}}$ (f_{max} 는 최대 주파수) 보다 작게 적용하는 것이 실제 응용에 적합하다. 즉, 주파수를 1,200 Hz로 볼때 ~ 0.2 msec 보다 작은 자료추출간격이 적절하며 위의 단면기록의 비교결과와도 일치한다.

CMP 간격에 따른 수평해상도 비교

수평해상도는 지층의 연속성을 파악하는데 중요하며 발파간격, 스트리머 그룹간격에 따라 좌우된다. 발파간격을 2 s 시

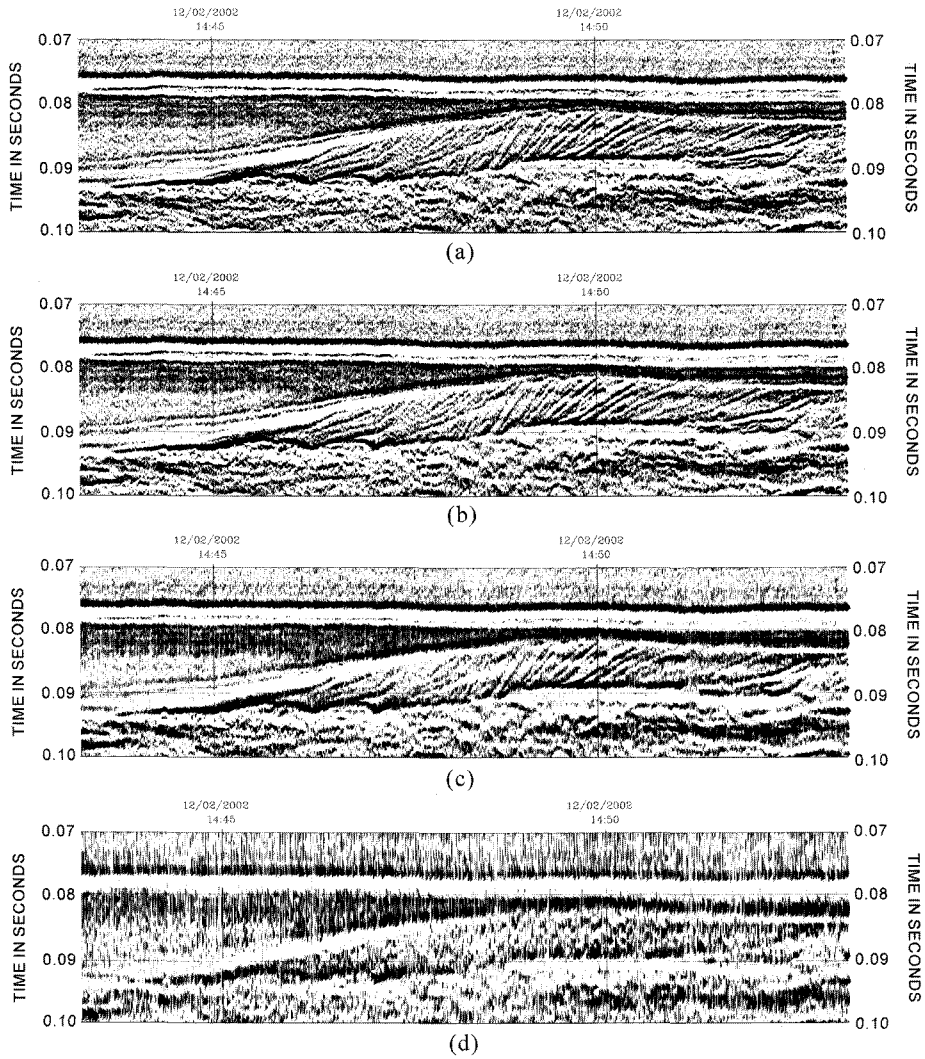


Fig. 6. Test of the sample interval. When the sample interval is less than 0.2 ms, the vertical resolution become higher. The CMP interval is 2.5 m and CMP fold is 4. (a) 0.1 ms. (b) 0.2 ms. (c) 0.4 ms. (d) 0.8 ms.

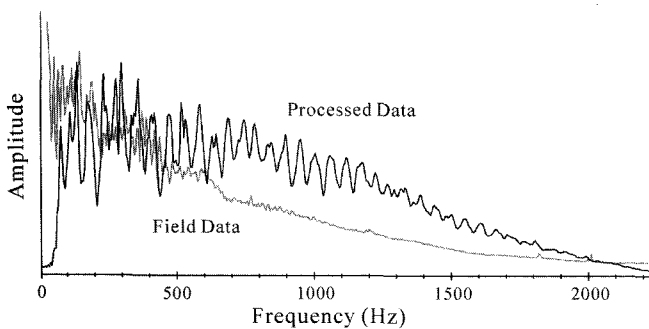


Fig. 7. Averaged amplitude spectra of field and processed data of line 02nr2-010a. 1500 samples between 0.0~0.15 s of 300 shot points were selected from the data shown in Fig. 5.

간격으로 하여 ~5 m 정도로 유지하였으며 스트리머는 그룹 간격이 5 m, 채널수가 8개이므로 취득한 자료를 전부 사용할 때 CMP간격은 2.5 m가 되고 중합수는 4가 된다. 수평해상도

는 얼마나 좁은 간격의 자료를 얻는가가 중요하므로 중합자료로부터 단순히 CMP간격을 다르게 트레이스를 추출하여 탄성파 단면기록을 제작하였다. CMP간격을 2.5 m, 5 m, 7.5 m 그리고 10m로 하여 각각 Fig. 8a, Fig. 8b와 Fig. 8d에 나타내었다. Fig. 8 자료의 자료추출간격은 0.1 ms이며 중합수는 4이다. CMP간격이 2.5 m인 Fig. 8a의 경우 지층의 연속성이 잘 나타남을 보이며 CMP간격이 증가됨에 따라 지층의 연속성이 점차 저하됨을 볼 수 있다.

중합수에 따른 신호향상효과 비교

중합수는 발파간격과 채널수, 그룹간격에 좌우된다. 중합수가 높으면 신호대잡음비가 커져 신호를 향상시킬 수 있다. 본 탐사의 중합수는 4이나 중합수에 따른 효과를 비교하기 위하여 CMP 모음(gather) 중 일부자료만 사용하여 중합수를 3, 2 그리고 1로 한 단면기록을 작성하여 비교하였다. Fig. 9a는 중

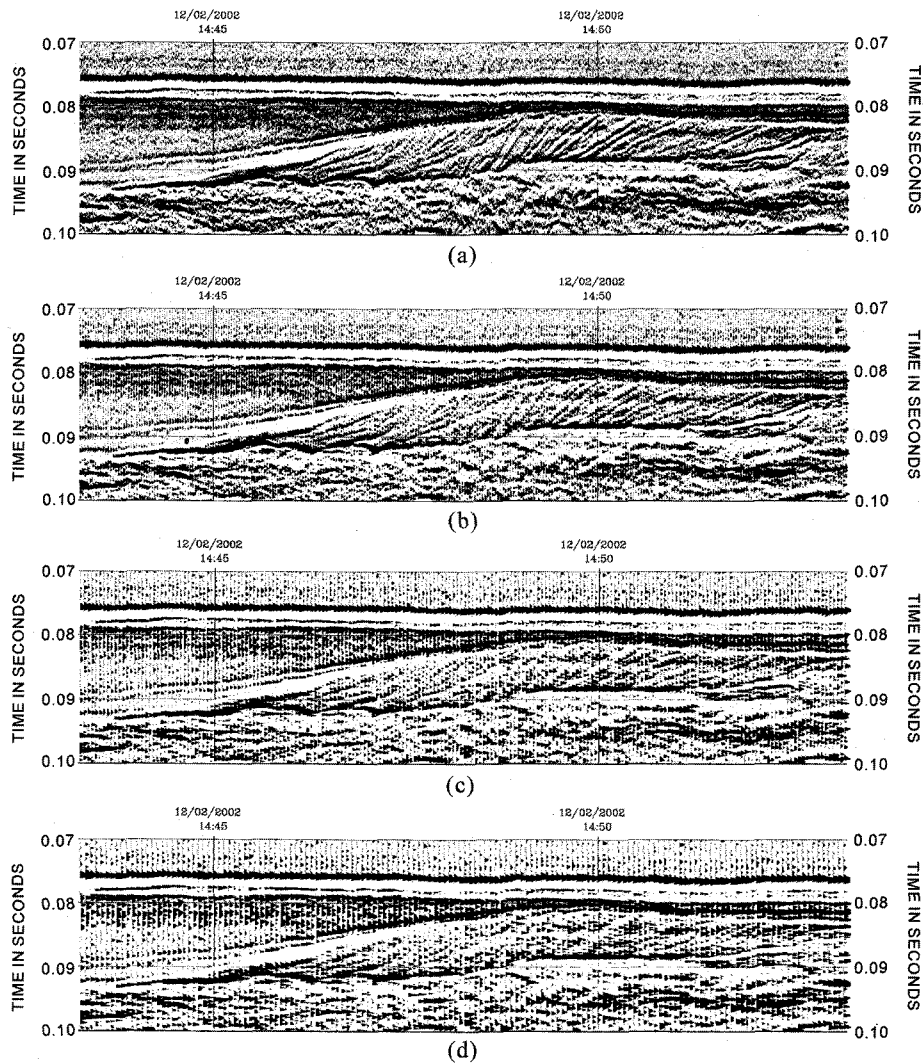


Fig. 8. Test of the CMP interval. As the CMP interval increases, the horizontal resolution become lower. The sample interval is 0.1 ms and CMP fold is 4. (a) 2.5 m. (b) 5 m. (c) 7.5 m. (d) 10 m.

합수가 4인 단면기록이며, Fig. 9b, Fig. 9c와 Fig.9d는 각각 중합수가 3, 2, 1인 단면기록이다. Fig. 9 자료의 자료추출간격은 0.1 ms이며 CMP간격은 2.5 m이다. 중합수가 4인 Fig. 9a의 단면기록의 지층 구분이 가장 뚜렷하며 중합수가 작을수록 잡음이 증가됨을 보인다.

결론

고해상 해저 탄성과탐사자료를 다중채널 디지털로 취득 및 전산처리함으로써 해상도가 향상된 단면기록을 얻을 수 있었다. 이는 수직 및 수평해상도 및 신호대잡음비의 향상에 기인한 것이며 자료취득변수와 밀접한 관계가 있으므로 현장자료를 취득하여 이를 분석하였다. 30 m³ 에어건을 음원으로, 그룹간격 5 m의 8채널 스트리머를 수신장치로 사용하였으며 발파간격은 ~5 m로 하여 시험탐사를 수행하였다. 자료는 0.1 ms의

추출간격으로 1 s를 기록하였다.

탐사지역내에 ~1 m의 두께를 갖고 ~6°의 경사를 갖는 지층의 탐사자료에 대하여 여러가지 자료취득변수를 적용하여 해상도 효과를 분석한 결과, 수직해상도와 관련되는 자료취득변수인 자료추출간격을 0.2 ms 보다 조밀하게 한 경우에 미세지층 구분이 용이한 탄성과 단면기록을 얻을 수 있었다. 수평해상도에 관계되는 CMP간격은 2.5 m 간격으로 한 경우, 그보다 큰 CMP간격의 단면기록에 비해 지층의 연속성이 잘 나타났다. 그리고 중합수가 4인 경우가 1인 경우에 비해 잡음이 감소되어 지층구분이 용이하였다.

천부 해저지층 영상의 수직 및 수평해상도는 현장자료취득변수에 따라 큰 차이를 보이므로 탐사심도, 탐사지역의 범위 등 탐사목적에 따라 적절한 자료취득변수를 사용하여 다중채널 디지털 해저 탄성과 탐사를 수행함으로써 목적에 부합하는 해저지층영상을 재현시킬 수 있다.

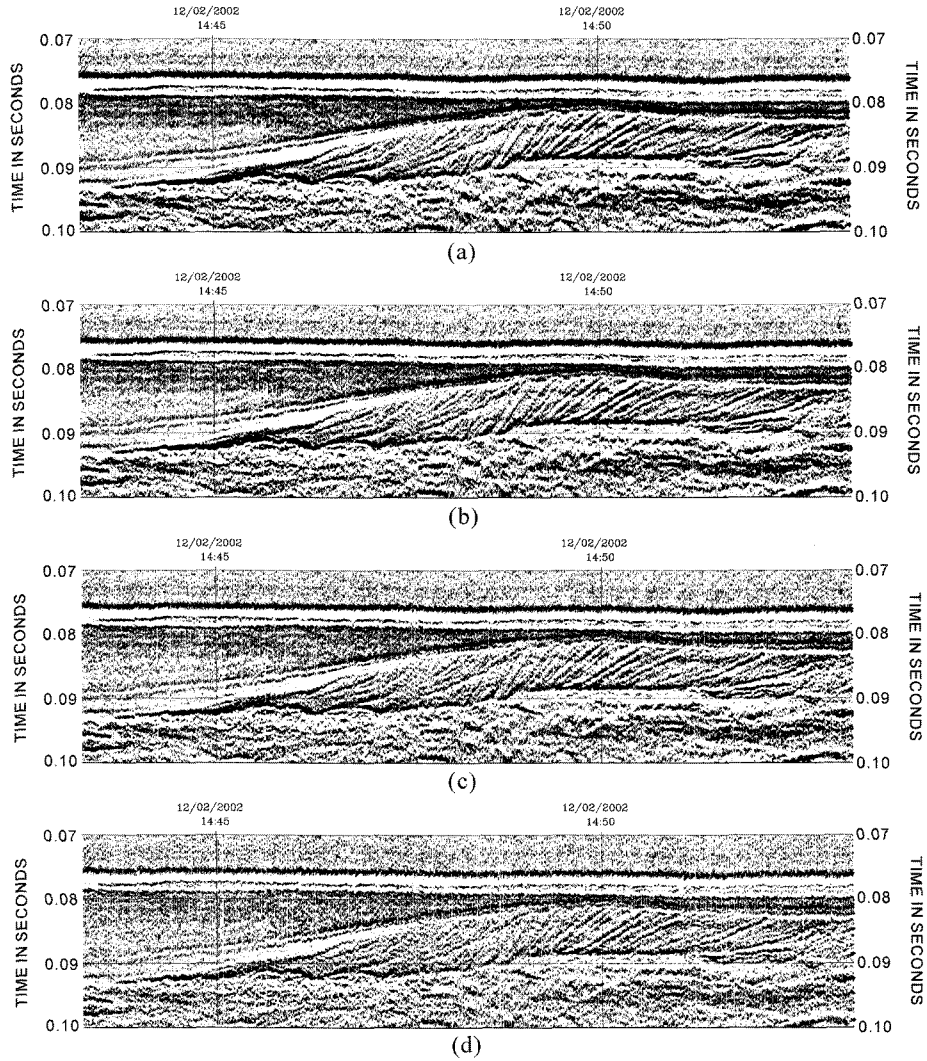


Fig. 9. Test of the CMP fold. As the CMP fold decreases, the signal is noisier. The sample interval is 0.1 ms and CMP interval is 2.5 m. (a) 4. (b) 3. (c) 2. (d) 1.

사 사

본 연구는 과학기술부(MOST)와 한국과학기술기획평가원(KISTEP)에서 지원하는 국가지정연구실(NRL) “고해상 디지털 해저 탄성과 탐사기술 개발”사업으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

이호영, 1996, PC를 이용한 6채널 천부해저 탄성과 탐사자료의 취득 및 처리: 한국자원공학회지, **33**, 128-132.
 이호영, 박근필, 구남형, 박영수, 김영진, 서갑석, 강동효, 황규덕, 김종천, 2002, 에어건과 6채널 스트리머를 이용한 고해상 천부 해저 탄성과 탐사: 한국지구물리탐사학회 제4회 특별심포지움 “땅과 물이 만나는 곳에서의 물리탐사” 논문집, 한국지구물리탐사학회, 한국과학기술회관, 2002년 9월 25일, 24-45.

Knapp, R. W., and Steeples, D. W., 1986, High-resolution common-depth-point reflection profiling: Field acquisition parameter design: *Geophysics*, **51**, 283-294.
 Lee, H.-Y., Hyun, B.-K., and Kong, Y.-S., 1996, PC-based acquisition and processing of high-resolution marine seismic data: *Geophysics*, **61**, 1804-1812.
 Morend, D., Pugin, A., and Gorin, G. E., 2002, High-resolution seismic imaging of outcrop-scale channels and an incised-valley system within the fluvial-dominated Lower Freshwater Molasse (Aquitainian, western Swiss Molasse Basin): *Sediment. Geol.*, **149**, 245-264.
 Mosher, D. C., and Simpkin, P. G., 1999, Status and trends of marine high-resolution seismic reflection profiling: Data acquisition: *Geoscience Canada*, **26**, 174-187.
 Nissen, S. E., Combes, J. M., and Nekut, A. G., 1999, Acquisition, processing, and analysis of shallow, high-resolution seismic data from the outer continental shelf and upper slope, offshore Louisiana: *J. Sediment. Res.*, **69**, 300-316.