

퇴적분지 및 해저지형 해석을 위한 탄성파 및 음향자료의 분석기법 연구

Seismic and Acoustic Data Analysis Methods for
Seafloor and Basin Structure Interpretation

1997. 12

한국해양연구소

제 출 문

한국해양연구소장 귀하

본 보고서를 "퇴적분지 및 해저지형 해석을 위한 탄성파 및 음향자료의 분석기법 연구" 과제의 보고서로 제출합니다.

1997년 12월

연구책임자: 주형태

연 구 원:

유해수, 김한준, 장재경, 홍종국,
박건태, 조현무, 김창환, 허식

연 구 조 원:

장남도, 호정란, 이유진

요 약 문

1. 제목

퇴적분지 및 해저지형 해석을 위한 탄성과 및 음향자료의 분석기법 연구

2. 연구개발의 필요성 및 목적

최근 여러 가지 기기의 발달로 현장에서 얻는 지구물리자료의 정밀도 및 해상도가 증가되고 있으며, 이의 효과적인 처리를 위한 새로운 처리 및 해석기법의 개발이 요구되고 있다. 이 연구는 해양지구물리 탐사의 중요 부분을 차지하고 있는 탄성과 및 음향자료에 대한 획득 및 처리에 관한 새로운 기법을 개발하여 해석의 정확성을 높이려고 하는 데 있다. 이 연구는 크게 탄성과자료 처리 및 음향자료 처리의 두 부분으로 나누어지며 연구의 주요 목적은 다음과 같다.

- (1) 광대역 주파수 음향자료의 통계학적 처리를 통한 해저면 분류
- (2) 중합전 자료처리 기법을 이용한 중합단면도의 신호대 잡음비 향상
- (3) 해저면지진계 (OBS) 자료의 무자위 잡음제거 및 신호 향상을 위한 spectral balancing 및 비선형 신호탐지 방법 구현
- (4) 온누리호 탄성과 획득 장비인 sleeve-gun의 특성분석

3. 연구개발의 내용

- (1) 광대역 주파수 음향자료의 matched filtering 및 K-L 변환을 이용한 해저면의 특성분류
- (2) 표준처리 및 중합전 자료처리를 이용한 탄성과 지질단면도 작성 및 해석
- (3) 탄성과 스펙트럼의 기하학적 평균을 이용한 spectral balancing 방법 및 탄성과자료의 유사도를 이용한 비선형 신호탐지 방법을 OBS 자료처리에 적용
- (4) 온누리호 음원 진폭 특성 및 beam pattern 고찰

4. 연구개발의 결과

- (1) Chirp 자료를 이용한 해저면 분류는 core, grab, 그리고 side scan sonar에 의한 sediment facies map의 결과와 높은 상관성을 가진다.
- (2) DMO를 이용해 최종 작성된 구조보정 단면은 표준자료처리보다 보다 나은 해석을 가능하게 해준다.
- (3) Spectral balancing 및 비선형 신호탐지 방법을 이용하여 OBS자료에 존재하는 무작위 잡음과 공명잡음이 효과적으로 제거되었으며, 특정한 위상을 갖는 신호의 응집도가 향상되었다.
- (4) Sleeve-gun의 특성변수가 계산되었다.
- (5) Sleeve-gun array의 beam pattern은 array 형태보다는 배열간격에 더 큰 영향을 가진다.

5. 활용에 대한 건의

- (1) 현장상태에서의 보다 정확한 해저면 특성 분류가 가능하게 됨에 따라 해저건설 및 해양방위를 위한 기본 자료 제공
- (2) 복잡한 구조의 반사이벤트를 가진 탄성파자료의 처리에 중합전 처리기법의 적용이 가능함.
- (3) Spectral balancing 및 비선형 신호탐지 방법을 동해에서 획득되는 해저면지
- (4) 탄성파 탐사시 최적의 획득변수 선정에 따른 양질의 탐사자료 획득 가능

SUMMARY

1. Title of Study

Seismic and Acoustic Data Analysis Methods for Seafloor and Basin Structure Interpretation

2. Significance and Objectives of the Study

The precision and resolution of geophysical field data have been much improved recently in accordance with the development of geophysical equipment. For the accurate interpretation of the data, the processing techniques well suited for the equipment should be applied. The major objective of this study is to develop the new techniques of seismic and acoustic data analysis for the interpretation of seafloor and basin structures. This study mainly deals with the processing techniques of seismic data and acoustic data with the following objectives:

- (1) Analysis of sleeve-gun signature characteristics
- (2) Implementation of spectral balancing and SSD (spatial signal detection) to remove incoherent noise and enhance signals in OBS (ocean bottom seismometer) data
- (3) Signal to noise ratio improvement using prestack processing technique for the accurate interpretation of seismic data
- (4) Classification of seafloor sediments by the analysis of chirp sonar data

3. Contents of the study

- (1) Processing of chirp sonar data by matched filtering and K-L transform to classify the seafloor characteristics
- (2) Development of similarity index for seafloor sediment classification
- (3) Processing of seismic data to produce stacked and migrated sections by standard and pre-stack methods and comparative interpretation of those sections.
- (3) Analysis of beam patterns of sleeve-guns and characteristics of gun signature

- (4) Implementation of spectral balancing using the geometric mean of spectra of seismic traces and implementation of SSD using coherency for the application to OBS data

4. Results of the Study

- (1) The seafloor sediment classification by a similarity index is in good agreement with that of sediment facies map from core, grab, and sidescan sonar data.
- (2) Migrated section is improved by incorporating DMO-processing.
- (3) Incoherent noise and resonant noise in OBS data are suppressed efficiently and coherency of signals with particular phases are improved.
- (4) The characteristic parameters of sleeve-gun are calculated.
- (5) Beam pattern is more affected by the distance between guns than by the type of gun array.

5. Suggestions for Applications

- (1) The methods developed in this study can be applied to OBS data with a view to the construction of a tectonic framework of the East Sea of Korea and improvement of the quality of multichannel seismic data
- (2) The seafloor classification can be very useful as a fundamental for applications including marine constructions and national marine defense
- (3) The results from gun signature analyses can be very helpful for the determination of seismic acquisition parameters.
- (4) The prestack techniques can be applied to the seismic data with complex reflection structures for better interpretation.

목 차

그림 목 차	11
표 목 차	15
제 1 장 서 언	17
제 2 장 음향자료의 처리	21
제 1 절 서 론	23
제 2 절 Chirp Sonar System	25
2.1. CAP6000W Chirp Sonar System	25
2.2. Chirp Sonar System의 원리	26
제 3 절 해저면 퇴적물의 음향특성	32
3.1. 음향임피던스	32
3.2. 음향감쇠	34
제 4 절 퇴적물의 분류	37
4.1. K-L 변환	37
4.2. 유사도지수	39
제 5 절 현장자료의 처리 및 분석	41
5.1. Chirp sonar 자료의 처리	41
5.2. 유사도지수에 의한 해저면 퇴적물의 분류	41
제 6 절 결론	43
참고문헌	44
제 3 장 탄성파자료의 처리 및 해석	83
제 1 절 서론	85
제 2 절 시험자료	85
제 3 절 표준처리	86
3.1. 중합전 처리	86
3.2. 중합후 처리	87
제 4 절 중합전 특수처리	88
4.1. DMO 기법	88

4.2. 중합전 구조보정	88
제 5 절 결과 토의	89
참고문헌	91
제 4 장 해저면 지진계 자료 분석	111
제 1 절 서론	113
제 2 절 비선형 신호탐지 필터	113
2.1. SSD의 방법	114
2.2. Spectral balancing	115
제 3 절 적용예	116
제 4 절 결론	117
참고문헌	118
제 5 장 음원신호분석	127
제 1 절 서론	129
제 2 절 이론	130
2.1. 해수면 반사파 및 직접파	130
2.2. 자료획득 변수	130
2.3. 자료획득 및 처리	131
2.4. 배열간격에 따른 빔 패턴	131
2.5. 선형 간섭	132
2.6. 최적 음원 간격	133
제 3 절 음원 배열 특성	134
3.1. 배열 효과	134
3.2. 송이배열 특성	135
3.3. 폭배열 특성	135
제 4 절 원거리장 파형분석	135
제 5 절 결론	136
참고문헌	138

CONTENTS

List of Figures	11
List of Tables	15
Chapter 1. Introduction	17
Chapter 2. Processing of acoustic data	21
Section 1. Introduction	23
Section 2. Chirp Sonar System	25
2.1. CAP6000W Chirp Sonar System	25
2.2. Principles of Chirp Sonar System	26
Section 3. Acoustic Properties of seafloor sediments	32
3.1. Acoustic impedance	32
3.2. Acoustic attenuation	34
Section 4. Classification of sediments	37
4.1. K-L transform	37
4.2. Similarity index	39
Section 5. Processing and analysis of field data	41
5.1. Processing of chirp sonar data	41
5.2. Classification of seafloor sediments by similarity index	41
Section 6. Conclusions	43
References	44
Chapter 3. Processing and interpretation of seismic data	83
Section 1. Introduction	85
Section 2. Test data	85
Section 3. Standard processing	86
3.1. prestack processing	86
3.2. poststack processing	87
Section 4. Prestack techniques	88
4.1. DMO processing	88

4.2. Prestack migration	88
Section 5. Results and discussions	89
References	91
Chapter 4. Analysis of OBS data	111
Section 1. Introduction	113
Section 2. Nonlinear signal detection filter	113
2.1. SSD technique	114
2.2. Spectral balancing	115
Section 3. Application examples	116
Section 4. Conclusions	117
References	118
Chapter 5. Analysis of source signature	127
Section 1. Introduction	129
Section 2. Theory	130
2.1. Water bottom reflections and direct waves	130
2.2. Acquisition parameters	130
2.3. Data acquisition and processing	131
2.4. Beam patterns	131
2.5. Linear interference	132
2.6. Optimum source distance	133
Section 3. Gun array characteristics	134
3.1. Array effects	134
3.2. Cluster array	135
3.3. Wide array	135
Section 4. far-field signature analysis	135
Section 5. Conclusions	136
References	138

List of figures

Fig. 2-1. DataSonics CAP6000W Topside system	56
Fig. 2-2. (a) Transducers and Hydrphone, (b) TTV-190 Tow vehicle	57
Fig. 2-3. Chirp sonar system components of DataSonics CAP6000W	58
Fig. 2-4. (a)a sweep signal in time domain, (b)a frequency spectrum of sweep signal, (c)an autocorrelation of sweep signal	59
Fig. 2-5. (a)a linear FM chirp signal in time domain, (b)a frequency spectrum of chirp signal, (c)an autocorrelation of chirp signal	60
Fig. 2-6. (a)a typical return signal obtained in Sungsanpo area, (b)a matched filtered of bottom signal in square, (c)an envelope of (b)	61
Fig. 2-7. (a)a chirp signal with bandwidth 1kHz, 30kHz, (b)a frequency spectrum of (a), (c)a reflectivity model, (d)a matched filtered of return signal, (e)an envelope of (d)	62
Fig. 2-8. (a)a quadrature filter in time domain, (b)a quadrature filter in frequency domain	63
Fig. 2-9. Hamilton's and Faas's empirical equation for reflection coefficient compared	64
Fig. 2-10. Attenuation versus frequency. The measurements are for natural saturated sediments and sedimentary strata: ●, sands (all grades) ; ■, clayey silt, silty clay ; ▲, mixed sizes (e.g.,silty snad, sandy silt, snad-silt-clay) ; sand data at 500 and 100kHz. Low frequency data : line A land, sedimentary strata ; line B Gulf of Mexico coastal clay-sand ; line C sea floor, reflection technique (Hamilton, 1972.).	65
Fig. 2-11. Attenuation coefficient k . Porosity(%) and k (in $\alpha = k$). Dashed lines are estimates of the upper and lower limits of attenuation. Solid symbols are averaged values for data off San Diego; open symbols are data in averages; different symbols are for different sets of data: ◆ 1966-1970, ▲ -1956, ▼ -1962, ● Shumway(1960); × are selected values from literature.	66
Fig. 2-12. Attenuation measurements adjusted to equivalent relaxation time values and plotted as a function of mean grain size	67
Fig. 2-13. (a)5-traces with same signal components and different amplitude, (b)the K-L transformed traces of (a) using σ_1 , (c)the plot of singular values.	68

Fig. 2-14. (a)5-traces with same signal components but time shifted, (b)the K-L transformed traces of (a) using σ_1 , (c)the plot of singular values.	69
Fig. 2-15. (a)a near-by 8 traces reflected from sea bottom,, (b)the reconstructed traces with high correlated reflection signal components, (c)the reconstructed traces with scattering signal components, (d)the reconstructed traces with noise components, (e) the plot of relative singular values.	70
Fig. 2-16. (a)a near-by 10 traces reflected from rocky bottom, (b)the traces after time-shifted, (c)the reflected signal component after K-L transform, (d)the scattered signal and noise component after K-L transform, (e)the plot of relative singular values and similarity index	71
Fig. 2-17. (a)a near-by 10 traces reflected from sandy bottom, (b)the traces after time-shifted, (c)the reflected signal component after K-L transform, (d)the scattered signal and noise component after K-L transform, (e)the plot of relative singular values and similarity index	72
Fig. 2-18. (a)a near-by 10 traces reflected from muddy bottom, (b)the traces after time-shifted, (c)the reflected signal component after K-L transform, (d)the scattered signal and noise component after K-L transform, (e)the plot of relative singular values and similarity index	73
Fig. 2-19. The track chart of survey line in Sungsanpo area, Cheju island	74
Fig. 2-20. The flow chart of post signal processing for calculate S.I.	75
Fig. 2-21. The grab and diving station map in Sungsanpo area, Cheju island (S: grab station, D: diving station)	76
Fig. 2-22. The seafloor image map constructed from side scan sonar records and grab sample analysis	77
Fig. 2-23. The plot of similarity index	78
Fig. 2-24. The subbottom profile (Line #7) by Chirp sonar system	79
Fig. 2-25. The subbottom profile (Line #2) by Chirp sonar system	80
Fig. 2-26. The seafloor image map by similarity index	81
Fig. 3-1. Location map of seismic lines shot for the 1994 BASAPES experiments in the East Sea (한 상준외, 1994)	92
Fig. 3-2. Typical shot gathers of test seismic data at shot point number (a) 4900 and (b) 5200.	93

Fig. 3-3. Near trace gather of test seismic data.94

Fig. 3-4. Standard processing sequences for test seismic data.95

Fig. 3-5. NMO-corrected Near trace plot for picking water bottom.
Picked water bottom values are shown by thin lines
above water bottom reflections.96

Fig. 3-6. Typical NMO-corrected CDP (Common Depth Point)
gatherers at CDP number (a) 60 and (b) 560.97

Fig. 3-7. Near trace gather after deconvolution. The deconvolution
filter is 110ms long, with 20ms prediction lag and 0.5%
whitening noise.98

Fig. 3-8. Stacked section from standard processing sequence.99

Fig. 3-9. Migrated section from standard processing sequence.101

Fig. 3-10. DMO processing flowchart (Yilmaz, 1987).103

Fig. 3-11. Stacked section from DMO processing.105

Fig. 3-12. Migrated section from DMO processing.107

Fig. 3-13. Final stacked section of migrated common offset data.109

Fig. 4-1. Multichannel seismic data (a) before and (b) after SSD
(from Kong et al., 1985).119

Fig. 4-2. Location map of wide-angle seismic profiles. Circles indicate
the OBSs that returned with seismic signals to enable
crustal modeling. Bathymetric contour interval is 200 m.120

Fig. 4-3. (a) Part of record section of OBS-12. Arrows indicate noisy
traces of resonant character. (b) The same section as in
Fig.4-3a after spectral balancing and SSD filtering.
Note a significant improvement in data quality.121

Fig. 4-4. (a)-(f) Record sections of OBS-4, 6, 12, 13, 19 and 22,
respectively.122

Fig. 4-5. (a)-(f) Record sections in Fig.4-4 after spectral balancing
and SSD filtering. Processed data parts are underlined.124

Fig. 5-1. Configuration of the source array on the R/V Onnuri.
The array is composed of two identical sub-arrays,
each with 3 x 150 in³ sleeve-guns.141

Fig. 5-2. Three-dimensional radiation pattern with distance for the
cluster array comprising two 2.46 ℓ guns.142

Fig. 5-3. Beamwidth for the cluster array with distance at 154 Hz
(dotted line). The heavy solid line indicates the gun
distance of 0.46, 2.44 and 2.9m.143

Fig. 5-4. Three-dimensional radiation pattern with distance for the wide array comprising four 2.46 ℓ guns with distance at 154 Hz. 144

Fig. 5-5. Descriptive parameters with distance for the cluster comprising two 2.46 ℓ guns with distance at 154 Hz. 145

Fig. 5-6. An idealized sleeve-gun signature. The symbols used in the figure are as follows : $V^{1/3}$ (gun volume^{1/3}), P_a (peak-to-trough amplitude of primary), T_b (primary-to-bubble period), P_b (peak-to-trough amplitude of bubble), P_{2b} (2nd peak-to-trough amplitude of bubble), T_g (peak-to-trough Time), P/B (primary-to-bubble ratio), P_d (zero-to trough pulse amplitude), $-P_d$ (negative zero-to trough pulse amplitude), P_{bd} (zero-to trough amplitude of bubble), $-P_{bd}$ (negative zero-to trough amplitude of bubble), P_{2bd} (2nd zero-to trough amplitude of bubble), $-P_{2bd}$ (2nd negative zero-to trough amplitude of bubble). 146

Fig. 5-7. Variations in (a) $V^{1/3}$ (gun volume^{1/3}), (b) P_d (zero-to trough pulse amplitude), (c) $-P_d$ (negative zero-to trough pulse amplitude), (d) P_b (peak-to-trough amplitude of bubble) as functions of gun volume. The solid and heavy solid lines represent the theoretical lines and least-square fits, respectively. 147

Fig. 5-8. Variations in (e) $-P_{bd}$ (negative zero-to trough amplitude of bubble), (f) P_{2bd} (2nd zero-to trough amplitude of bubble), (g) $-P_{2bd}$ (2nd negative zero-to trough amplitude of bubble), (h) P_{3bd} (3rd zero-to trough amplitude of bubble) as functions of gun volume. The solid and heavy solid lines represent the theoretical lines and least-square fits, respectively. 148

Fig. 5-9. Variations in (i) $-P_{3bd}$ (3rd negative zero-to trough amplitude of bubble), (j) P_a (peak-to-trough amplitude of primary), (k) P_a/P_b (amplitude of primary/amplitude of bubble), (l) T_b (primary-to-bubble period) as functions of gun volume. The solid and heavy solid lines represent the theoretical lines and least-square fits, respectively. 149

Fig. 5-10. Variations in (m) P_a/P_{2b} (amplitude of primary)/ (2nd amplitude of bubble), (n) P_a/P_{3b} (amplitude of primary)/ (3rd amplitude of bubble), (o) P_b/P_{2b} (amplitude of bubble)/(2nd amplitude of bubble), (p) P_b/P_{3b} (amplitude of bubble)/(3rd amplitude of bubble) as functions of gun volume. The solid and heavy solid lines represent the theoretical lines and least-square fits, respectively. 150

List of tables

Table 2-1. DataSonics CAP6000W System specification.	47
Table 2-2. DataSonics CAP6000W Topside system specications.	48
Table 2-3. DataSonics CAP6000W Tow vehicle specification.	49
Table 2-4. Sharp SX-D200 Analog DAT Record specification.	50
Table 2-5. Sediment reflection coefficient and bottom loss for continental terrace (Hamilton, 1970).	51
Table 2-6. Notation of parameters and related equations (LeBlanc, 1992).	51
Table 2-7. The relationship of porosity and attenuation coefficient η - porosity (Hamilton, 1972).	52
Table 2-8. Attenuation coefficient of sediments around the Korea Peninsula compared with Hamilton(1972) (after Kim et al., 1990).	52
Table 2-9. Average relaxation time for different sediment types.	53
Table 2-10. The Grab and Diving position in Sungsanpo area, Cheju island (S:Grab D:Diving).	54
Table 2-11. The result of bottom sediment analysis in Sungsanpo, Cheju island (S:grab, D:diving).	55
Table 5-1. Equilibrium radii and minimum separation distances for the linear interaction of sleeve-guns on the R/V Onnuri.	139
Table 5-2. Acquisition parameters employed for the far-field signature tests.	140

제 1 장 서 언

1980년 중반 이후에 들어 우리나라의 해양과학은 국가적 차원에서의 지원에 힘입어, 멀리 남극과 태평양 심해까지 그 연구 및 조사영역을 확장하는 본격적인 발전단계에 접어들었다. 특히 최근에 종합해양조사선인 온누리호와 이어도호의 건조 그리고 여러 가지 탐사기기의 발달로 현장에서 얻는 지구 물리자료의 정밀도 및 해상도가 증가되고 있으며, 이의 효과적인 처리를 위한 새로운 처리 및 해석기법의 개발이 요구되고 있다. 본 연구는 해양지구물리 탐사의 중요 부분을 차지하고 있는 탄성과 및 음향자료에 대한 획득 및 처리에 관한 새로운 기법을 개발하여 해석의 정확성을 높이고자 하는데 있다. 탄성과자료의 획득 및 처리분야는 1992년도 종합조사선 온누리호를 건조하면서 96채널 탄성과 탐사장비를 탑재와 더불어 탄성과 자료처리 소프트웨어인 Geoveteur의 도입함으로써 국내에서도 독자적인 탄성과 탐사기술의 개발과 처리가 가능하게 되었다. 그리고 고주파 음원을 사용하는 천부탄성과 분야에서도 광대역폭 주파수변조 신호를 음원으로 사용하는 Chirp sonar system의 도입으로 반사신호의 음향특성을 분석하여 해저면 퇴적물을 분류하는 연구체계를 확립할 수 있는 여건이 마련되었다. 본 연구에서는 이러한 여건에 맞추어 퇴적분지 및 해저지형 해석을 위한 탄성과 및 음향자료의 분석기법을 개발하였다. 탄성과 탐사장비를 이용한 자료의 획득시 그 기본적인 장비운영체계는 완비가 된 상태이지만 아직도 자료획득기술은 매우 낮은 실정이다. 따라서 획득자료에 직접적인 영향을 주는 슬리브건의 특성분석이 필요하다. 즉, 슬리브건을 동시에 발파한 경우, 건 간격이 증가함에 따라 빔 패턴과 실험치가 부합되는지를 분석할 필요가 있다. 또한 컴퓨터 모의 제작한 원거리장 파형을 건 부피의 증가에 따라 주신호의 진폭 및 기포주기, 주신호와 기포의 진폭비등을 시간영역에서 분석하고자 하였다. 일반적으로 탄성과 자료는 표준 자료처리 과정을 따라 수행된다. 그러나 복잡한 구조의 반사이벤트들이 복합적으로 나타나는 자료에서는 표준처리만으로 좋은 결과를 낼 수 없다. 이때 중합전 자료처리는 해법을 제공한다. 동해에서 얻어진 자료 중에서 시험자료를 선택하여 중합전 처리방법을 적용시켜 지질단면도를 작성하고 표준자료처리 결과와 비교해 보고자 하였다. 또한 동해에서 얻어진 해저면 지진계 자료에 spectral balancing 및 비선형 신호탐지 기법을 적용하여 신호대 잡음비를 높이고자 시도하였다.

광대역 주파수변조 신호를 사용하는 Chirp sonar system은 음원발생시 정밀한 출력파형 제어를 통하여 해저면에서 반사된 음향신호를 정량적으로 획득하여 자료처리가 가능한 시스템이다. 그러므로 탄성과 자료처리기법을 이용한 후처리과정을 통하여 음향임피던스와 감쇠계수와 같은 반사자료의 음

항특성을 분석함으로써 퇴적물의 물성을 유추하여 해저면을 분류할 수 있다. 본 연구에서는 다중채널탄성과 처리기법의 하나인 K-L 변환을 이용하여 해저면 퇴적물 성분의 음향학적 거침도를 반영하는 유사도지수를 고안하여 근접한 트레이스간 상호상관도에 따른 통계학적 처리방법을 사용하여 해저면 퇴적물을 분류하고자 시도하였다.

제 2 장 음향자료의 처리

제 1 절 서 론

해저면은 퇴적물 혹은 노출된 암반으로 구성되어 있으며, 이들은 지역에 따라 서로 다른 물성 (physical properties)을 갖는다. 따라서 해저면은 유형에 따라 지역적으로 각기 다른 음향반응 (acoustic response)을 보인다. 따라서 지구물리학적 방법에 의해 해저면에서 얻은 음향자료를 분석함으로써 해저면에서의 음파의 반사, 굴절 및 산란 그리고 감쇠특성을 규명할 수 있고 퇴적물의 지질학적, 지질공학적 특성을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 지진과 관련된 연구에도 기여할 수 있다. 이와같이 해저면에서 획득된 반사자료의 음향특성을 이용하여 해저면을 분류하는 연구는 선진국들의 경우 20세기 이후 개발되기 시작한 음향장비를 군사용 목적뿐만 아니라 해양자원개발 분야에도 널리 활용함으로써 크게 발전을 하고 있다. 우리나라의 경우 해양자원탐사를 목적으로 1970년대부터 한국해양연구소 및 기타 연구기관에서 음파를 이용한 해양조사를 수행해오고 있지만 방대한 자료에도 불구하고 퇴적물의 물성에 따른 음향특성연구는 소홀한 상태이다. 따라서 음향탐사법을 이용하여 광범위한 지역에서 짧은 시간내에 자료를 획득하고, 이들 음향자료를 분석하여 해저면 퇴적물을 분류하는 연구체계를 확립할 필요성이 있다. 이러한 방법은 해양공간자원의 활용계획 수립, 국방에 관련된 수중음향, 그리고 해양환경에 따른 음향학적 분류를 위해 음향자료의 활용가치를 증대시킬 것으로 기대된다.

음향탐사방법은 조사목적에 따라 특정한 주파수대역을 갖는 음파를 사용하여, 해저정밀지형, 해저면의 형태 그리고 해저지층구조 등을 파악할 수 있다. 정밀측심을 위해 사용되는 음향측심기 (echo-sounder)는 33 - 220 kHz 정도의 주파수대역을 사용하며, 해저면의 형태를 파악하기 위한 side scan sonar는 110 ± 10 kHz 대의 고주파를 사용한다. 그리고 심부지질구조를 조사하기 위해서는 주로 1 kHz 이하의 Air Gun, Sparker, Sleeve exploder, Bubble pulser 등과 같은 음원을 사용하며, 천부의 퇴적층 두께나 정밀 해저지형 탐사를 위해서는 1 - 30 kHz 정도의 고주파 음원을 사용한다. 특히, 최근들어 천부지층탐사 분야에서 수 kHz대의 대역폭을 가진 다중주파수 (multi-frequency) 음원을 사용한 Chirp sonar system과 같은 해저지층탐사 장비가 많이 사용되고 있다. 다중주파수 음원을 사용한 천부지층탐사 장비는 단주파수 (single frequency) 음원을 사용하는 것 보다 여러 가지 면에서 장점을 가진다. Chirp sonar는 시간증가에 따라 주파수가 증가하는 Sweep signal을 음원으로 사용함으로써 적은 에너지로 투과심도를 깊게 할 수 있고,

심도에 관계없이 일정한 분해능을 유지시킬 수 있다. 또한 수신신호의 자료 처리 과정을 통하여 신호대 잡음비의 향상과 더불어 인접한 반사 이벤트를 압축시켜 더욱 정밀한 퇴적층간 구별이 가능하다. 그리고 다중채널탄성과 처리기법을 이용한 해저면 퇴적물의 물성에 따른 수신신호의 음향특성을 분석함으로써 퇴적물 분류에도 이용할 수 있다. 즉, 해저면에서 반사된 음향 자료는 해저면을 구성하는 물질에 따라 음파의 음향임피던스 (acoustic impedance)와 음향감쇠 (acoustic attenuation)가 달라진다. 이들 음향학적 특성은 퇴적물의 입자크기 (grain size), 공극율 (porosity), 강성률 (rigidity) 그리고 체적밀도 (bulk density)와 밀접한 관계를 가지고 있어 해저면 퇴적물의 종류와 분포상태를 유추할 수 있는 중요한 단서를 제공하기 때문이다.

한국해양연구소에서는 1993년 DataSonics사의 Chirp sonar system인 CAP6000W 모델을 구입하여 여러 연구사업에서 사용해 오고 있다. 본 연구에서는 Chirp sonar system의 음원발생, 수신신호의 처리과정, 그리고 퇴적물의 물성과 음향특성 사이의 관계를 고찰하고, 현장에서 Chirp sonar system을 이용하여 획득한 음향자료의 처리를 통하여 해저면 퇴적물의 분포 상황을 분류하였다. 현장자료는 1995년도 제주-육지간 광케이블 매설을 위한 해양조사사업에서 수심, 해저면 및 해저지층조사 그리고 해저퇴적물 채취와 잠수조사가 비교적 잘 이루어진 성산포 천해지역의 10개 조사라인으로부터 Chirp 자료를 획득하였다. 그리고 이들 자료를 다중채널 탄성과 자료처리 기법의 하나인 K-L (Karhunen-Loeve)변환을 이용하여 근접한 트레이스들 사이의 공통된 반사신호성분과 퇴적물의 물성에 따른 산란신호성분 및 잡음성분으로 재구성하였다. 그리고 공통된 반사신호성분비로부터 해저면 퇴적물의 균질성 (homogeneity), 입자크기 (grain size), 그리고 굳기 (hardness)등에 따른 음향학적 거침도 (roughness)를 반영하는 유사도지수 (similarity index)를 고안하여, 이로부터 분석된 결과와 side scan sonar 와 퇴적물 채취자료로부터 분석된 해저면 퇴적물의 분포상황과의 상관성을 규명하여 보았다.

제 2 절 Chirp Sonar System

Chirp sonar system은 광대역폭 주파수변조 (Wide-band FM) 신호를 음원으로 사용하는 깊은 투과력을 지닌 고해상도의 해저지층 탐사장비로 마이크로 컴퓨터에 의해 음원의 발생 및 신호의 수신 그리고 정량적으로 획득된 자료를 실시간 처리하여 해저면의 특성을 파악할 수 있다. Chirp sonar system은 해저면 퇴적물의 분류를 위하여 미국 ONR (Office of Naval Research)의 지원으로 Rhode Island 대학의 LeBlanc과 Dalhousie 대학의 Mayer에 의해 개발되었다 (Mayer and LeBlanc, 1983 ; Schock et al., 1986). Chirp sonar라는 명칭은 심부구조와 층서구조 그리고 탄화수소 유망구조 (hydrocarbon traps)을 찾기위한 Marine vibroseis system과 같은 FM sonar와 구별하기 위하여 사용되었다. 일반적으로 Vibroseis system은 500Hz 이하의 주파수를 사용하여 투과심도가 깊은 반면에 Chirp sonar system은 1kHz 이상의 고주파를 사용함으로써 해저면 퇴적물의 특성 분류를 위하여 설계되었다 (Schock,1989). 한국해양연구소에서는 DataSonics사의 CAP6000W 모델의 Chirp sonar system을 구입하여 운영하고 있다.

2.1. CAP6000W Chirp sonar system

한국해양연구소에서 보유하고 있는 DataSonics사의 CAP6000W 모델의 Chirp sonar system은 Intel사의 80486 micro-processor가 장착된 PC에 AT&T사의 DSP-32C Digital signal processor가 내장된 자료처리부 (DSP-601)와 음원의 발생과 신호의 수신 그리고 외부장치와의 연결을 위한 접속부가 포함된 송수신부 (DSP-602) 그리고 모니터 부분 (DSP-603)이 본체를 이루고 있다 (Fig.2-1). 그리고 9개의 AT-471 저주파송신부 (low-frequency transducer)와 AT-1000R8T 선형 수신기 배열 (linear hydrophone array)이 장착된 Tow vehicle (TTV-190) 부분으로 구성되어 있다 (Fig.2-2). 본체와 Tow vehicle은 Deck cable로 연결하며, off-line 상태에서 저장된 자료의 재생이 가능하다. 주요사양은 Table 2-1에 나타내었다.

2.1.1. 본체부분

본체의 송수신부에서는 Tow vehicle과 Deck cable로 연결하여 조사지역의 수심에 따라 적당한 Key를 조절하여 음원발생 간격을 선택한다. 혹은 외부 Trig.를 주어 다른 장비와 동조시켜 음원을 발생시킬 수도 있다. 또한 본

체의 접속부는 표준 NEMA-183 항해시스템 접속부 (navigation system interface)를 포함하고 있어, 항해시스템으로부터 위치자료, 배의 속도, 방위 각등을 실시간 전송 받을 수 있다. 그리고 수신된 원시자료는 이 항적자료와 함께 외부 Analog DAT tape 에 저장할 수 있고 저장된 원시자료를 자료처리부를 통하여 재생할 수도 있다. 또한 Graphic recorder를 통하여 해저단면을 출력할 수 있다. 자료처리부는 Windows 환경하의 운영소프트웨어에서 음원발생시 음원의 펄스길이 (pulse length), 음압강도 (power level)등을 조절하고, 수신된 신호의 실시간 자료처리과정과 Hardware gain, Bottom tracking, Profile display threshold, TVG등을 조절하여 해저단면도를 모니터로 보내어 표시하고, 칼라 프린터를 통하여 해저단면을 출력한다. 또한 최종 처리된 자료를 Exabyte tape cartridge에 SEG-Y 형태로 저장시킬 수 있다. 본체부분의 주요사양은 Table 2-2에 나타내었다.

2.1.2. Tow Vehicle 부분

음원발생 장치인 송신부 (transducer)는 9개의 DataSonics사의 AT-471 low frequency 모델로 구성되어 있고, 2-7kHz의 대역폭을 가지고 있다. 그리고 수신장치인 선형 수신기 배열 (linear hydrophone array)은 DataSonics사의 AT-100R8T 모델이며, 500Hz-30kHz 대역의 주파수반응을 가진다. 그리고 이들 Sonar가 장착된 Tow-fish인 TTV-190 모델은 Deck cable로 본체부분과 연결되어 있다. 주요사양은 Table 2-3에 나타내었다.

2.1.3. 자료의 저장과 도출부분

수신된 원시자료는 항적자료와 함께 2채널로 Analog DAT tape에 저장된다. 저장장치는 Sharp SX-D200 모델을 사용한다. 그리고 Analog Graphic Recorder를 이용하여 해저단면을 출력할 수 있다. Sharp SX-D200의 주요 사양은 Table 2-4.에 나타내었다.

2.2. Chirp Sonar System의 원리

Chirp sonar system은 마이크로 컴퓨터에 의해 음원의 발생과 신호의 수신이 제어되고, 정량적으로 획득된 자료를 실시간 영역에서 자료처리를 수행하여 해저면의 특성을 파악할 수 있다. Chirp sonar system의 주요 구성도는 Fig.2-3에 도시하였다.

2.2.1. 음원의 발생

음원의 출력은 마이크로 컴퓨터에 의해 디지털 방식으로 조절되어 기존의 짧은 펄스를 음원으로 사용하는 3.5kHz 해저지층탐사기 (short pulse system)에서 음원발생시 일반적으로 나타나는 음원잔향 (source ringing) 현상을 방지한다. Chirp sonar에서의 음원파형은 마이크로 컴퓨터의해 2-10kHz 대역폭의 Chirp 신호로 형성된다. 그리고 음원출력시 정밀한 음원파형의 제어를 위하여 시스템의 주파수반응에 따른 위상과 진폭이 보정된다. 이와같은 정밀한 음원파형의 제어는 수신된 자료의 처리과정에서 분해능을 향상시키는 요인이 되기 때문이다. 그리고 D/A과정을 거쳐 1.2KW의 Power amplifier로 보내어 증폭시킨후 음원을 발생시킨다. Chirp 신호는 주파수 영역에서 가우시안 (Gaussian) 스펙트럼 형태로 음원발생시 Side-lobe를 감소시키고, 해저면에서 반사·투과된후에도 음원의 에너지는 감소되나 그 대역폭은 유지된다. 그러므로 자료처리과정을 통하여 심도에 관계없이 일정한 수직분해능 (vertical resolution)을 유지시킬 수 있다 (Schock and LeBlanc, 1990). Fig.2-4와 Fig.2-5는 Chirp 신호의 형성 과정을 시간 및 주파수 영역에서 나타낸 그림이다. Fig.2-4 (a)와 (b)는 1-10kHz 대역폭의 Sweep signal을 시간과 주파수 영역에 도시한 그림이며, Fig.2-4 (c)는 자기상관 (autocorrelation)을 실시한 그림으로 음원발생시 Side-lobe가 형성되어 수신된 신호의 인접한 반사이벤트 구분을 어렵게 하여 분해능을 감소시키는 요인으로 작용한다. Fig.2-5 (a)는 Sweep signal에 Blackman-Harris Window 함수를 적용시켜 Chirp 파형을 만들어 Fig.2-5 (b)와 같이 주파수 영역에서 Gaussian 형태의 스펙트럼을 형성하여 Fig.2-5 (c)에서와 같이 Side-lobe를 감소시켜 해저면에서 수신된 신호의 분해능을 향상시킬 수 있다.

2.2.2. 신호의 수신 및 자료처리

해저면에서 반사되어온 신호는 Programmable amplifier에서 증폭된후, 16-bit로 A/D변환된다. 변환된 신호는 컴퓨터에 내장된 DSP-32C 자료처리 기에서 Matched filtering 과정을 통하여 해저면에서 반사된 신호성분중 음원신호와 상관성이 없는 잡음성분은 제거하고 상관부분을 Klauder 파형으로 압축시켜 신호대 잡음비의 향상과 더불어 수직분해능을 향상시킨다. 그리고 Hilbert 변환에 의해 Envelope가 계산되고 전달거리에 따른 확산손실 (spreading loss)이 보정된후, 반사계수가 계산된다. 또한 계산된 반사계수의 크기에 따라 색상등급을 주어 해저단면을 모니터와 칼라 프린터로 출력하게 된다. 처리된 정량적인 값들은 Exabyte tape에 SEG-Y 형태로 저장시킬 수

있다. 또한 자료처리전 원시자료는 항적자료와 함께 Analog DAT tape 저장하여 각종 parameter를 재조정하여 재생시킬 수 있고, 후처리과정에 이용할 수 있다. Fig.2-6 (a)는 해저면에서 반사되어온 수신신호로 사각형 부분은 해저면에서 반사된 신호 (bottom reflection)를 나타낸다. 신호성분은 반사된후에도 Chirp 파형과 대역폭을 유지하고 있음을 알 수 있다. Fig.2-6 (b)는 사각형 부분의 반사신호성분을 Matched filtering 과정을 통하여 신호대 잡음비를 높인 것으로, 중첩되었던 근접한 반사 이벤트들을 Klauder 파형으로 압축시켜 분해능이 향상되었음을 볼 수 있다. 그리고 Fig.2-6 (c)는 반사신호성분을 파형의 극성과 위상에 관계없이 진폭을 측정하기 위해 에너지 envelope로 표현한 그림이다.

다음은 수신신호의 자료처리에 이용된 Matched filtering 과 Envelope 이론에 대해 간단히 설명하였다.

1) Matched Filtering

해저면에서 반사된 신호성분중 음원신호와 상관성이 없는 잡음성분은 제거하고 상관부분을 압축하여 신호대 잡음비를 향상시키는 처리기법이다. Matched filtering은 Fourier 변환을 이용하여 주파수 영역에서 필터 $H(\omega)$ 를 설계하여 수행할 수 있다. 즉, $X(\omega)$ 가 입력신호 $x(t)$ 의 Fourier 변환한 것이고, $Y(\omega)$ 가 Matched filtering 과정을 거친 출력신호의 Fourier 변환이라면 아래식으로 표현할 수 있다 (Kino, 1987).

$$X(\omega) = FFT[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \tag{2-1}$$

$$Y(\omega) = X(\omega)H(\omega) \tag{2-2}$$

여기서 Matched filter $H(\omega)$ 는 주파수 영역에서 $X(\omega)$ 의 complex conjugate인 $X^*(\omega)$ 를 이용하여 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$H(\omega) = \alpha X^*(\omega)e^{-j\omega T_d} \tag{2-3}$$

여기서 α 는 상수이며, T_d 는 필터링에 따른 지연시간 (delay time)으로 $t = T_d$ 에서 출력신호의 최대치를 나타낸다. 따라서 Matched filtering에 의한 출력신호는 주파수 영역에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y(\omega) = \alpha X(\omega)X^*(\omega)e^{-j\omega T_d} \quad (2-4)$$

그리고 matched filtering을 통한 최대 신호대 잡음비는 아래식으로 구할 수 있다.

$$(S/N)_{\max} = \frac{2 \int_{-\infty}^{\infty} X(f)X^*(f)df}{N_0} = \frac{2E}{N_0} \quad (2-5)$$

여기서 N_0 는 Noise power spectral density (W/Hz)이고 E 는 Total energy이다. Matched filtering에 의한 신호대 잡음비의 향상은 펄스길이 (pulse length)와 대역폭 (bandwidth)에 관계되고, 이를 처리이득 (processing gain)이라 하며 아래식으로 표현할 수 있다 (Schock, 1990).

$$S/N(out) - S/N(in) = 10\text{Log}(TBW) \quad (2-6)$$

여기서, T 는 음원신호의 펄스길이 (msec)이며, BW 는 대역폭 (kHz)이다. 이와같이 Matched filtering 과정을 통하여 신호대 잡음비가 향상되고 음원신호와 상관성이 있는 신호성분은 압축되어 해저지층단면의 수직분해능을 향상시키는 요인이 된다. 수직분해능 (vertical resolution)은 근접한 층간 경계를 구분할 수 있는 최소한의 거리를 의미하며 단주파수 (single frequency) sonar system에서는 분해능의 한계가 펄스길이와 주파수에 의해 결정되지만 Chirp sonar와 같은 다중주파수 (multi-frequency) sonar system에서는 대역폭에 의해 결정된다. 즉, 대역폭이 클수록 음원신호와 상관성이 있는 신호성분의 압축률이 증가되어 더욱 세밀한 층간구별이 가능하다. 주파수 대역폭에 의한 이론적 수직분해능은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Vertical Resolution} &= \text{Transmitted Pulse Length} \times \text{Sound Speed}/2 \\ \text{Pulse Length} &= 1 / \text{Bandwidth} \end{aligned}$$

예를들어, 주파수 대역폭이 10kHz라면 펄스길이는 1/10,000 즉, 0.1msec 이고 음파의 속도가 1540m/sec 라면 이론적 수직분해능은 8cm가 된다. 그러나 수직분해능은 빔폭 (beam width), 수심, 그리고 자료처리시 전자기적 영향등에도 영향을 받는다. Fig.2-7은 10msec의 펄스길이와 1kHz의 대역폭을 가진 음원신호와 20msec의 펄스길이와 50kHz의 대역폭을 가진 음원신호를 단순

한 수평층모델과 컨벌루션 (convolution)하여 대역폭에 따른 수직분해능을 비교한 그림이다. Fig.2-7 (e)에 나타난 Envelope 결과를 보면 30kHz 대역폭의 음원이 1kHz에 비하여 Fig.2-7 (c)의 반사모델을 더 잘 표현하고 있음을 알 수 있고, 40ms 부근의 두 반사이벤트의 간격은 30kHz 대역폭의 수직분해능을 초과하고 있어 하나의 신호로 나타나고 있음을 볼 수 있다.

2) Envelope 함수의 계산

시계열 (time series)로 표현되는 음향반사신호는 Hilbert 변환을 이용하여 반사에너지를 파형의 극성 (polarity)과 위상 (phase)에 관계없이 Envelope 함수로 표현 할 수 있으며, 이는 진폭을 측정하는데 사용된다. 음향반사신호를 $x(t)$ 로 표시하면 $x(t)$ 의 에너지 Envelope $e(t)$ 는 다음과 같이 구할수 있다 (Claerbout, 1976).

$$e(t) = [x^2(t) + y^2(t)] \quad (2-7)$$

여기서 $y(t)$ 는 $x(t)$ 를 90° 만큼 위상변위 시킨 것으로 $q(t)$ 가 $x(t)$ 를 90° 만큼 위상변위 시키는 Quadrature filter라면 $y(t)$ 는 $x(t)$ 와 $q(t)$ 의 컨벌루션 (convolution)으로 표현된다. 즉,

$$y(t) = x(t)*q(t) \quad (2-8)$$

이다. 따라서 (2-8)식은 $x(t)$ 의 Hilbert 변환에 상응한다. 그러므로 $x(t)$ 의 Envelope $e(t)$ 를 구하기 위해서 복소함수인 $u(t)$ 를 다음과 같이 정의하여

$$u(t) = x(t)+iy(t) = x(t)+i[x(t)*q(t)] \quad (2-9)$$

$$\overline{u(t)} = x(t)-iy(t) = x(t)-i[x(t)*q(t)] \quad (2-10)$$

로 나타낸다. 그리고 (2-9)식을 z -Transform을 한다면,

$$U(Z) = X(Z)+iY(Z) = X(Z)+i[X(Z) \cdot Q(Z)] \quad (2-11)$$

$$= [1+iQ(Z)] \cdot X(Z) \quad (2-12)$$

로 표현되며, (2-12)식에서 $[1+iQ(Z)]$ 는 Quadrature filter이며 다음과 같이 시간과 주파수 영역에서 표현할 수 있다 (Fig.2-8).

$$q(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} Q(\omega) \cdot e^{-i\omega t} d\omega = \frac{i}{2\pi} \int_{-\pi}^0 e^{-i\omega t} d\omega - \frac{i}{2\pi} \int_0^{\pi} e^{-i\omega t} d\omega \quad (2-13)$$

$$= \frac{i}{2\pi} \left[\frac{e^{-i\omega t}}{-it} \Big|_{-\pi}^0 - \frac{e^{-i\omega t}}{-it} \Big|_0^{\pi} \right] = \frac{1}{2\pi t} (-1 + e^{i\pi t} + e^{-i\pi t} - 1) \quad (2-14)$$

$$= \begin{cases} 0 & (t \text{ is even}) \\ \frac{2}{\pi t} & (t \text{ is odd}) \end{cases} \quad (2-15)$$

Quadrature filter 의 푸리에 변환 (Fourier transform)은 아래식과 같다.

$$Q(\omega) = -i \frac{\omega}{|\omega|} = \begin{cases} \frac{1}{i} & (\omega \geq 0) \\ -\frac{1}{i} & (\omega < 0) \end{cases} \quad (2-16)$$

$$iQ(\omega) = \begin{cases} 1 & (\omega \geq 0) \\ -1 & (\omega < 0) \end{cases} \quad (2-17)$$

$$1+iQ(\omega) = \begin{cases} 2 & (\omega \geq 0) \\ 0 & (\omega < 0) \end{cases} \quad (2-18)$$

$$e(t) = u(t) \cdot \overline{u(t)} \quad (2-19)$$

위의 식을 살펴보면 $x(t)$ 를 푸리에 변환한 후, 주파수 영역에서 총계함수인 (2-18)식을 곱한 후, 시간영역으로 푸리에 역변환 (inverse Fourier transform)하여 얻게되는 $u(t)$ 와 $\overline{u(t)}$ 를 곱하여 (2-19)식과 같이 최종적으로 Envelope를 구할 수 있다.

제 3 절 해저면 퇴적물의 음향특성

해저면은 퇴적물 혹은 노출된 암반으로 구성되어 있으며, 이들은 지역에 따라 서로 다른 물성 (physical properties)을 갖는다. 따라서 해저면은 유형에 따라 지역적으로 각기 다른 음향반응 (acoustic response)을 보인다. 음향 반사자료로부터 얻을 수 있는 임피던스와 감쇠계수와 같은 음향특성은 퇴적물의 물성인 입자크기 (grain size), 공극율 (porosity), 강성률 (rigidity), 그리고 체적밀도 (bulk density)와 밀접한 관계를 가지고 있어 이들로부터 해저면 퇴적물의 종류와 분포상황을 유추할 수 있다. 다음은 Chirp sonar system을 이용하여 획득한 수신자료의 분석을 통해 음향특성인 임피던스와 감쇠계수를 구하고, 퇴적물의 물성을 유추하는 이론을 간단히 정리하였다.

3.1. 음향 임피던스 (Acoustic Impedance)

음향학적 임피던스는 음파가 한 매질에서 다른 매질로 통과할 때 한 표면에서의 부피 변화량에 대한 압력의 비를 의미하며 매질의 밀도 (bulk density)와 압축파속도 (compressional wave velocity)의 곱으로 표현된다.

$$Z_b = \rho_b \cdot c_b \quad (gm/cm^2 \text{ sec}) \quad (2-20)$$

여기서 Z_b 는 해저면의 음향임피던스, ρ_b 는 매질의 밀도, c_b 는 매질의 압축파속도를 나타낸다. 그리고 이러한 음향임피던스는 해저면의 반사특성을 결정하게 된다. 따라서 해저면을 구성하는 물질에 따라 음파의 반사강도가 달라지게 된다. 이와같은 반사강도를 나타내는 반사계수는 서로 다른 매질의 경계면에서 반사할 때 입사파의 진폭에 대한 반사파의 진폭비로 상·하층의 음향임피던스에 의해 계산될 수 있다 (Ewing and Jardetzky, 1957).

$$R = \frac{A_2}{A_1} \quad (2-21)$$

$$= \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (2-22)$$

여기서 A_1 은 입사파의 진폭, A_2 는 반사파의 진폭, Z_2 는 하층의 임피던스, Z_1 은 상층의 임피던스 이고, ρ_2, c_2 는 각각 하층의 밀도와 압축파 속도, ρ_1, c_1

은 각각 상층의 밀도와 압축파 속도이다. 그리고 반사계수는 음파의 전달거리
 에 따른 기하학적 확산손실 (geometric spreading loss)을 보정한 후
 Decibel 단위의 해저면손실 (bottom-loss)로 나타내며, 이는 아래식과 같이
 계산할 수 있다.

$$B.L. = -20\text{Log}(R) \quad (2-23)$$

Table 2-5는 Hamilton (1970)에 의한 대륙 테라스 (continental terrace)에서
 퇴적물의 종류에 따른 반사계수와 해저면손실의 값들을 표시한 도표이다. 따
 라서 반사계수 혹은 해저면손실을 이용하여 해저면의 반사특성을 정량적으
 로 결정함으로써 해저면 퇴적물의 종류와 분포 특성을 파악할 수 있다.

Chirp sonar system은 음원발생시 정밀한 출력파형 제어를 통하여 사전
 에 음원의 파형과 최대진폭의 크기를 알수있으므로 해저면에서 반사된 수신
 신호의 반사계수를 (2-21)식에 의해 구할 수 있다. 따라서 다음과 같은 방
 법으로 해저면 퇴적물의 물성을 유추하여 볼 수 있다 (LeBlanc, 1992).

$$Z_b = Z_w [(1+R)/(1-R)] = \rho_b c_b \quad (2-24)$$

$$= Z_w \left\{ \frac{\eta + \rho_R(1-\eta)}{\eta + \beta_R(1-\eta)} + \frac{4}{3} \mu \beta_w [\eta + \rho_R(1-\eta)] \right\}^{1/2} \quad (2-25)$$

$$c_b = c_w \left\{ \frac{1}{[\eta + \beta_R(1-\eta)][\eta + \rho_R(1-\eta)]} + \frac{4/3\mu\beta_w}{[\eta + \rho_R(1-\eta)]} \right\}^{1/2} \quad (2-26)$$

$$\rho_b = \rho_w \eta + \rho_g(1-\eta) \quad (2-27)$$

여기에서 사용된 수식의 변수들과 퇴적물 물성에 따른 관계식 및 경험식은
 Table 2-6에 나타내었다. 따라서 위의 식들을 이용하여 퇴적물의 물성을 유
 추하는 과정은 우선 (2-24)식에서 반사계수를 이용하여 해저면의 음향임피던
 스를 구할 수 있다. 그리고 (2-25)식과 (2-26)식을 이용하여 해저면 퇴적물
 의 공극율과 음파속도를 평가할 수 있고, (2-27)식을 이용하여 밀도를 계산
 한다. 그리고 퇴적물 물성에 따른 관계식과 각종 경험식 (empirical equation)
 을 통하여 강성율, 평균입도등을 계산하여 이들 물성들로부터 해저면 퇴적
 물의 종류를 정량적으로 해석할 수 있다. Fig.2-9는 Hamilton (1970)과 Faas
 (1969)에 의한 공극율과 반사계수와의 관계를 나타낸 곡선으로 선형적인 경
 향이 강하게 나타난다. 반사계수가 공극율에 관계되는 것은 Urick (1947)이
 최초로 입증하였으며, Breslau (1967)는 여기에 퇴적물의 평균입도와 공극율
 사이에서 관측한 관계를 더하여 음향반사 자료로부터 퇴적물의 입도를 예측

하였다 (Hamilton, 1970).

3.2. 음향감쇠 (Acoustic Attenuation)

음파가 퇴적물내에서 전파될 때 에너지의 손실은 기하학적 확산손실 (geometric spreading loss), 전달손실 (transmission loss), 그리고 흡음손실 (absorption loss)로 나뉘어 진다. 기하학적인 확산손실은 음파의 전달과정중 파면이 넓어지면서 단위면적당 음파에너지가 감소하는 현상이며, 전달손실은 음향 임피던스가 다른 경계면에서 발생하는 음파의 반사 및 굴절 그리고 Mode 변환등과 같은 에너지 분배에 의해 발생하는 손실로 위의 두가지 손실은 퇴적물의 특성과는 상관이 없다. 그러나 흡음손실은 퇴적물의 물리적 성질과 밀접한 관계를 가지며 음향감쇠 (acoustic attenuation)로 정의된다. 음향감쇠의 원인은 퇴적물의 결합구조와 관계되는 입자간의 접촉면에서 마찰손실과 결합구조상에 존재하는 해수의 점성에 의한 점성손실로 크게 나뉘어 진다. Sand 및 Sandy silt와 같은 큰 입자의 퇴적물에서는 마찰손실에 의한 것이며, Clay와 같은 세립퇴적물에서는 입자 상호간의 전기화학적 (electrochemical) 결합에 기인된 것으로 추정하고 있다 (Stoll, 1977). 음향감쇠 (acoustic attenuation)는 음파가 거리 r 을 진행하였을때 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_r = P_0 \cdot e^{-\alpha r} \quad (2-28)$$

$$\alpha \equiv k \cdot f^m = 8.686 \alpha_e \quad (2-29)$$

여기서 P_0 는 감쇠되지 않은 음압이며, P_r 은 거리 r 에서의 감쇠된 음압이다. 그리고 α 는 음향감쇠 (attenuation)로 dB/m 단위로 표시되고, α_e 는 α 를 $20 \log e$ 로 나눈 값으로 nepers/m 단위로 표시된다. f 는 kHz 단위의 음파의 주파수이며 Hamilton (1972)은 자연포화된 퇴적물에서의 실험으로 음파의 주파수 f 와 음향감쇠 α 는 거의 비례관계에 있다는 관계를 보여주어 $m=1$ 로 가정하였다 (Fig.2-10). 그리고 k 는 주파수의 함수로써 dB/kHz-m의 단위를 갖는 유효감쇠계수 (effective attenuation coefficient)로써 해저면에서의 흡수 (absorption), 반사 (reflection), 굴절 (refraction) 그리고 산란 (scattering)에 의한 실질적인 에너지의 손실을 의미한다. 감쇠계수 k 는 Hamilton에 의해 퇴적물 종류에 따른 공극율로부터 감쇠계수를 정의할 수 있다 (Table 2-7).

Fig.2-11은 공극율과 감쇠계수와의 관계를 나타낸 그림이다. Table 2-8는 김한준 등 (1990)이 한반도 주변해역의 표층퇴적물에 대하여 구한 감쇠계수를 Hamilton (1970)이 제시한 결과와 함께 정리한 것으로 퇴적물의 유형별 감쇠 특성을 보여주고 있다. 해저면 퇴적물의 음향감쇠계수는 일반적으로 세립질 모래 (fine sand)에서 조립질 실트 (coarse silt) 사이의 입도에서 최대이고, 조립질 모래 (coarse sand) 와 실트에서 감소하여 세립질 실트와 clay에서 최저의 특성을 보인다. 특히, 감쇠계수는 세립질 모래에서 조립질 모래에 해당되는 음속 1,550m./sec-1,600m/sec 사이에서 최대가 된 후, 감소하는 경향을 보이고, 퇴적물 물성 상호간에 선형적으로 높은 상관관계를 보여준다. 감쇠계수가 최대인 퇴적물내에서는 강성율도 최대인 것으로 알려져 있다 (Hamilton, 1970).

Chirp sonar system에서는 음원으로 사용된 신호가 시간에 따라 주파수가 증가하는 Sweep signal의 형태로 수kHz대의 대역폭을 가진다. 따라서 해저면 퇴적물의 감쇠정도에 따라 중심주파수 (center frequency)의 변화가 일어난다. 중심주파수의 변화는 신호의 고주파성분이 저주파성분보다 빨리 감쇠되기 때문이다. 이와 같은 특성을 주파수영역에서 가우시안 형태의 펄스 스펙트럼 (pulse spectrum) 함수 $X(f)$ 로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다 (LeBlanc, 1991).

$$X(f) = A \cdot e^{-b(f-f_c)^2} \quad (2-30)$$

여기서 A 는 진폭, f 는 주파수, f_c 는 중심주파수이며, $b = (1/2)\sigma^2$ 으로 σ 는 표준편차 (standard deviation)이다. 그리고 퇴적물의 감쇠 스펙트럼 (attenuation spectrum)을 정의하면 다음과 같다.

$$H(f) = e^{-2kf_x} \quad (2-31)$$

여기서 k 는 감쇠계수이며, x 는 거리이다. 따라서 퇴적물에서 반사되어 감쇠된 스펙트럼 (attenuated spectrum)은 다음과 같이 정의된다.

$$Y(f) = X(f)H(f) = A \cdot e^{-b(f-f_c)^2 - 2kf_x} \quad (2-32)$$

여기서 B 를 감쇠된 진폭이라 한다면 $B = A \cdot e^{-b(f_c^2 - \bar{f}_c^2)}$ 로 구할 수 있고, \bar{f}_c

가 변화된 새로운 중심주파수라면 $\bar{f}_c = \left(\frac{bf_c - kx}{b}\right)$ 로 구할 수 있다. 따라서 (2-32)식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$Y(f) = B \cdot e^{-b(f-\bar{f}_c)} \quad (2-33)$$

여기서 (2-33)식을 가우시안 형태의 펄스 스펙트럼인 (2-30)식과 비교하면 진폭과 중심주파수만 변화했을 뿐 가우시안 형태의 스펙트럼은 여전히 유지되고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 중심주파수 변화율로부터 퇴적물의 형태를 분류하기 위해서는 이완시간 (relaxation time)이라는 개념이 도입된다. 이완시간이란 갑작스런 압력이 주어졌을 때 밀도가 변화하는데 필요한 시간을 의미하며, 음향감쇠가 큰 퇴적물일수록 이완시간이 길어진다. 그리고 중심주파수와 이완시간과의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = -\frac{2}{\omega^2 t} \ln \frac{P_r}{P_o} = -\frac{2}{(2\pi f)^2 t} \ln \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (2-34)$$

여기서 ω 는 각주파수이며, t 와 r 은 각기 시간과 거리이며, P_o 는 감쇠되지 않은 음압, P_r 은 감쇠된 음압을 나타낸다. 그리고 $X(f)$ 와 $Y(f)$ 는 각각 이들의 주파수영역에서의 스펙트럼이다. 그리고 이완시간과 음향감쇠와의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$a = \frac{\omega^2 \tau}{c} \quad (2-35)$$

여기서 τ 는 이완시간, c 는 퇴적층에서 음파의 속도이다. 따라서 퇴적층에서의 이완시간을 구하므로써 음향감쇠를 평가할 수 있고 이로부터 해저면 퇴적물의 종류를 유추할 수 있다. Table 2-9는 퇴적물 형태에 따른 이완시간을 (2-35)식에 의해 구한 값을 나타낸 도표이다 (LeBlanc, 1992). 또한 이완시간은 경험적으로 아래식과 같이 퇴적물 성분의 평균입도에 의해 결정된다 (Fig.2-12).

$$\tau = a(\phi - b)e^{-c(\phi - b)^d} \quad (2-36)$$

여기서 a, b, c, d 는 평가상수, ϕ 는 평균입도이다. 따라서 이로부터 해저면 퇴적물의 형태를 분류할 수 있다 (LeBlanc, 1991; Panda, 1994).

제 4 절 퇴적물의 분류

해저면 퇴적물의 물성을 결정하기 위해서 일반적으로 코아 (core)와 그랩 (grab) 혹은 잠수조사등과 같은 방법을 통해 채취된 퇴적물 샘플을 분석하였다. 그러나 이러한 방법은 비용면에서나 자료의 양에 있어 몇몇 지점에 국한되는 경우가 많다. 그러므로 광범위한 지역에서 전체적으로 해저면 퇴적물을 분류하는 데에는 어려움이 많았다. 이러한 이유에서 최근들어 고주파 음원을 사용한 천부탄성과 분야에서 많은 연구들이 이루어지고 있다. 즉, 음향반사 자료로부터 구해지는 음향임피던스와 감쇠계수는 해저면 퇴적물의 물성인 입자크기 (grain size), 공극율 (porosity), 체적밀도 (bulk density), 그리고 강성을 (rigidity)과 밀접한 관계를 가지고 있어 퇴적물 분류에 중요한 단서를 제공하기 때문이다. (Schock et al., 1992). Bolus et al. (1982)은 반사신호의 크기와 위상분석을 통해, Coco-Parra and Ranz-Guerra (1989)는 주파수 영역에서 반사자료의 역산 (inversion)을 통해 해저면의 음향임피던스를 유도하였다. 또한 Panda (1994)는 가중최소자승법 (weighting least-squares fitting)을 이용하여 퇴적층에서의 임펄스반응 (impulse response)을 결정하고, 순간주파수 (instantaneous frequency)를 이용하여 중심주파수 (center frequency)의 변화정도로부터 감쇠계수를 평가하여 해저면 퇴적물의 분류와 물성을 예측하였다 (Panda, 1994). 이와같이 반사자료의 음향특성을 이용한 해저면 분류연구는 다중채널탄성과 자료처리기법을 응용함으로써 많은 성과를 거두고 있다.

본 연구에서는 다중채널탄성과 처리기법의 하나인 K-L변환을 Chirp sonar system을 이용하여 획득한 음향반사자료에 적용시켜 근접한 트레이스들 사이에서의 공통된 해저면에서의 반사신호성분과 퇴적물의 물성에 따른 산란신호성분 및 잡음성분으로 재구성하였다. 그리고 공통된 반사신호성분비로부터 해저면 퇴적물의 균질성 (homogeneity), 입자크기 (grain size), 그리고 굳기 (hardness)등에 따른 음향학적 거침도 (roughness)를 반영하는 유사도지수를 새로이 고안하여 해저면 퇴적물의 상황을 분류하였다.

4.1. K-L 변환 (Karhunen-Loeve Transform)

K-L 변환은 오래전부터 영상자료처리에 활용되어온 신호처리 기법 (Ahmed and Rao, 1975)으로 탄성과 자료처리시 잡음을 제거하고 공통된 반사신호를 추출하는데 사용되었다. K-L 변환은 여러 가지 방법중 Freire and

Urlych (1988)가 제안한 특이치분해 (singular value decomposituon)에 의한 유도식이 많이 이용되고 있다. 이 방법은 전체적으로 일관된 신호를 갖는 근접한 트레이스들을 선형적인 유사도가 최소한의 성분으로 압축표현되는 주 성분 (principal component)들의 집합과 유사도의 크기를 나타내는 특이치 (singular value)들로 분해한다. 그리고 특이치의 범위를 지정하여 신호들을 재구성하고 특정 신호성분만을 추출할 수 있는 변환기법이다. 즉, 입력자료 X를 N개의 샘플을 가진 M개의 트레이스로 구성된 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$X = [x_{ij}] , i=1,2,\dots,M ; j=1,2,\dots,N \quad (M < N) \quad (2-37)$$

(2-37)식을 특이치 분해하면,

$$X = \sum_{i=1}^r \sigma_i u_i v_i^T \quad (2-38)$$

로 분해된다. 여기서 r은 행렬 X의 rank, u_i 는 XX^T 의 i번째 고유벡터 (eigenvector), v_i^T 는 $X^T X$ 의 i번째 고유벡터의 transpose 그리고 σ_i 는 X의 i번째 특이치 ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_M$)로 Covariance 행렬 $X^T X$ 의 고유치 (eigenvalue)의 제곱근과 같다. 그리고 $u_i v_i^T$ 는 X의 주성분으로 특이치의 범위 (1~r)를 지정하여 특정 신호성분만을 추출하여 재구성할 수 있다. 즉, K-L 변환은 트레이스 자료들의 상관성이 없는 주성분들의 집합으로 분해한다. 그리고 i번째 특이치의 크기는 i번째 주성분내에 존재하는 상관된 에너지의 양에 상응하므로 상당히 큰 특이치만으로 재구성된 신호들은 트레이스 자료중에서 상관성이 높은 신호만을 추출하는 효과를 가진다. 만일 트레이스 자료가 크기만 다를 뿐 동일한 기본신호들로 이루어 졌다면 Covariance 행렬 $X^T X$ 의 모든 특이치는 σ_1 을 제외한 나머지는 0이 되며 첫 번째 주성분은 기본신호의 진폭만 변화시킨 것이다. 그리고 트레이스들 사이에 상관성이 없다면 $X^T X$ 는 대각성분만을 가지게 되며 K-L 변환의 효과는 없게된다. 트레이스 자료들의 특성에 대한 K-L 변환의 결과를 시험해 보기 위하여 신호성분은 같고 진폭과 시간에 차이를 가진 각각의 8개의 트레이스 자료를 K-L 변환하여 보았다. Fig.2-13은 신호성분은 같고 진폭이 서로 다른 8개의 트레이스 자료를 K-L 변환한 그림이다. 그 결과 첫 번째 특이치를 제외한 나머

지는 0이 되고, 첫 번째 특이치를 이용하여 추출한 트레이스 자료는 완벽한 재구성이 되었다. 따라서 K-L 변환은 근접한 트레이스들 사이의 진폭차이에 는 영향을 받지 않음을 알 수 있다. Fig.2-14는 신호성분은 같고 각각 시간 이 지연된 8개 트레이스 자료들을 K-L 변환한 그림이다. 그 결과 특이치 곡 선을 보면 선형적인 상관관계가 매우 적음을 볼 수 있다. 따라서 K-L 변환 을 시행하기 전에 반드시 반사이벤트들을 특정 시간대로의 정렬이 우선되 어야 한다. Fig.2-15은 K-L 변환된 음향자료의 예를 보여주기 위하여 근접 한 8개의 트레이스 자료를 K-L 변환하여 특이치 곡선의 양상을 통해 범위 를 지정하여 재구성한 자료들이다. Fig.2-15 (a)는 근접한 8개 트레이스 자료 중 해저면에서의 반사신호 (bottom reflection)을 추출하여 시간상 정렬을 시 킨 자료이며, Fig.2-15 (b)는 특이치의 범위를 1-2로 하여 전체 트레이스 자 료중 선형적인 상관도가 가장 큰 반사신호성분만을 추출한 것이고, Fig.2-15 (c)는 선형적인 상관도가 급격히 떨어지는 특이치 범위 3-6으로 하여 산란신 호 및 잡음성분을 추출한 것이고, 그리고 Fig.2-15 (d)는 선형적 상관도가 거 의 없는 특이치 범위 7-8의 잡음성분이다. 그리고 Fig.2-15 (e)는 상대적인 유사도 크기를 나타내는 특이치 값들의 곡선으로 전체 트레이스 자료들의 선형적인 상관성 양상을 보여주고 있다.

4.2. 유사도지수 (Similarity Index)

해저면에서 반사된 음향반사자료는 해수와 지층경계면의 임피던스차이에 의한 반사신호성분과 퇴적물 성분의 물성에 따른 산란신호성분 및 무작위 잡음성분으로 구성되어 있다. 따라서 해저면에서 반사된 신호성분을 K-L 변 환하여 근접한 트레이스들 사이에 선형적인 유사도가 가장 큰 첫 번째 특이 치를 사용하여 재구성된 신호성분비는 해저면 퇴적물의 비균질성, 입자크기 , 그리고 균기등에 따른 음향학적 거침도 (roughness)를 반영한다고 볼 수 있다. 이를 유사도지수 (similarity index)라 정의하고 아래식으로 표현할 수 있다.

$$S.I. = \frac{\sigma_1^2}{\sum_{k=1}^r \sigma_k^2}, \quad (0 < S.I. \leq 1) \quad (2-39)$$

유사도지수는 0에서 1사이의 값을 가지며, 퇴적물 성분이 균질할수록, 입자 크기가 작을수록, 그리고 연한 퇴적층일수록 1에 가까운 값을 가진다.

Fig.2-16에서 Fig.2-18은 코아분석된 지점에서 획득된 특정 퇴적층지역에서의 음향반사자료를 K-L 변환하여 트레이스 자료들을 재구성하고 유사도지수를 계산한 그림이다. 암반지역에서는 유사도지수가 0.4이하이고, 사질퇴적물 지역에서는 0.5-0.7, 그리고 니질퇴적물 지역에서는 0.7이상의 높은 값을 나타낸다. 그러나 유사도지수는 해저면 퇴적물의 종류에 따라 정해진 값은 아니며 퇴적물내의 혼합물질과 미세한 지형적 굴곡등에 영향을 받는다. 또한 K-L 변환은 근접한 트레이스간 선형적인 유사도에의한 통계학적 처리방법으로 신호들의 시간상 정렬상태에 크게 영향을 받는다. 따라서 정확한 계산을 위해서는 반사 이벤트들의 정확한 정렬이 우선 되어야 한다.

제 5 절 현장자료의 처리 및 분석

유사도지수에 의한 해저면 퇴적물 분류를 현장자료에 적용해 보기 위하여 1995년도 제주도 성산포 지역과 육지를 잇는 해저광케이블 매설을 위한 해양조사사업중 성산포 천해지역에서 얻어진 자료를 이용하였다. 이 지역에서는 수심, 해저면 및 해저지층조사 그리고 해저퇴적물 채취 와 잠수조사가 비교적 잘 이루어졌으며, Chirp sonar system을 이용한 음향반사자료는 10개의 조사측선으로 부터 획득하였다. 각 조사측선의 길이는 약 3.5km이며 조사측선간의 간격은 100m 이다 (Fig.2-19). 조사지역은 수심이 100m 이하의 천해지역으로 Chirp 음원의 발생간격을 0.25sec로 하고, 조사선의 속도를 5노트로 하여 한 조사측선에서 총 6000개의 트레이스를 획득하였다.

5.1. Chirp sonar 자료의 처리

현장에서 획득된 Chirp 자료는 아날로그 DAT 저장장치에 48kHz 샘플링 간격으로 저장되었으며, 자료처리를 위해 16 bit A/D 변환한 후 트레이스당 10,000개의 샘플을 0.02msec 간격으로 취합하였다. 그리고 무작위 잡음제거와 신호대 잡음비 향상을 위하여 대역필터링 (band-pass filtering)과 Matched filtering을 수행하였다. 해저면에서의 신호만을 추출하기 위하여 정밀측심자료를 이용하여 해저면을 추적한후 그 시간영역내의 자료를 추출하여 일정시간대로 정렬하였다. 그리고 근접한 트레이스간 K-L 변환을 실시하여 선형적인 유사도가 최대가 되는 해저면에서의 반사신호성분 그리고 산란신호성분 및 잡음성분으로 재구성한 후, 유사도지수를 계산하였다. Fig.2-20는 자료처리과정을 나타낸 그림이다.

5.2. 유사도지수에 의한 해저면 퇴적물의 분류

제주도 성산포 천해지역의 해저면 퇴적물의 분포상황은 side scan sonar 기록 그리고 그래프와 잠수조사에 의해 채취된 퇴적물 샘플로부터 해석되었다. Fig.2-21은 그래프채취기 (grab sampler)와 잠수조사를 시행한 각각 15개 및 9개 정점의 위치를 나타낸 그림이다. 그리고 Table 2-10에 각 정점의 위치를 표시하였다. 그리고 Table 2-11은 퇴적물의 분석결과를 나타낸 도표이다. 분석결과에 의하면 해저면 퇴적물의 분포는 대부분의 지역이 모래 (sand)로 구성되어 있고, 수심이 깊어지면서 세립질 퇴적물인 뿔질모래 (muddy sand)로

변한다. 퇴적물의 평균입도는 3 ϕ 이하의 지역이 대부분이며 외해쪽으로 가면서 평균입도는 5 ϕ 로 증가하여 세립질 퇴적물이 나타난다. 퇴적물의 분급도는 해안에서 외해쪽으로 진행할수록 0.7 이하에서 5로 점차 증가하는데 이는 외해쪽으로 갈수록 세립질 퇴적물이 모래와 혼합된 결과이다. 표층퇴적물 내의 탄산염 함량은 50% 이상으로 높게 나타나며 특히 신양리층이 나타나는 지역에서는 화산재로 구성된 단단한 퇴적물과 그 주변에는 거의 모든 퇴적물이 조개껍질로 구성되어 있다. 또한 정점 12번과 13번 사이에서는 화산암이 돌출된 암반지역이 나타난다. Fig.2-22는 이들 분석결과로부터 조사지역의 해저면 퇴적물의 분포상황을 영상화한 그림이다. 퇴적물 채취에 의한 해저면 퇴적물의 분석결과와의 상관성을 규명해 보기위하여 유사도지수에 의해 해저면 퇴적물의 분포상황을 분석하여 보았다. 우선 조사측선을 따라 계산된 유사도지수는 FFT filtering 방법으로 smoothing 시킨후, 항적자료에 투입시켜 해저면 퇴적물의 분포양상을 분석하였다. Fig.2-23은 각 조사측선별 유사도지수의 양상을 나타낸 그림으로 조사지역 안쪽에서는 해저면 퇴적물이 균질하고 가는 입자의 사질 퇴적물로 유사도지수가 0.8 정도의 높은 값을 나타낸다. 그리고 화산암이 돌출되어 있는 측선6번에서 측선 10번까지의 E126.957° 부근에서는 유사도지수가 0.4 이하로 급격히 감소하는 양상을 보이고 그 주변의 퇴적물은 자갈과 조개껍질을 함유한 사질퇴적물로 유사도지수를 다소 감소시키고 있다. Fig.2-24는 조사측선 7번의 E126.956°-E126.961° 지역에서 획득된 Chirp 기록으로 암반의 돌출부분을 보여주고 있다. 그리고 조사측선 1번에서 조사측선 3번사이의 E126.96° 부근에서는 반고화된 퇴적층이 나타나 유사도지수를 감소시킨다. Fig.2-25는 조사측선 2번의 E126.956°-E126.961° 지역에서 획득된 Chirp 기록으로 주변의 퇴적물과는 달리 강한 반사파를 보이고 있다. 또한 화산재로 구성된 단단한 퇴적물 지역인 측선 1번의 E126.935° 부근에서도 유사도지수는 낮은 값을 보이고 있다. Fig.2-26은 유사도지수에 의한 해저면 퇴적물의 분포상황을 영상화한 그림이다. 이 그림에서 보면 Fig.2-22에서 나타난 암반돌출지역, 화산재로 이루어진 단단한 퇴적층인 신양리층, 그리고 자갈과 조개껍질로 구성된 사질퇴적층 지역이 잘 나타나고 있다. 또한 Fig.2-22에는 나타나 있지 않은 E126.96° 부근에서는 반고화된 퇴적층과 혼합물질 혹은 입자크기에 따른 사질퇴적층 지역이 보다 세밀하게 분류되어 있음을 알 수 있다. 따라서 유사도지수에 의한 근접한 트레이스간 상호상관도에 따른 통계학적 처리를 통하여 실시간 영역에서 광범위한 지역의 해저면 퇴적물의 특성을 분류할 수 있는 가능성을 입증하였다.

제 6 절 결 론

Chirp sonar system은 광대역 주파수변조 신호를 음원으로 사용하는 해저지층탐사장비로 음원발생시 정밀한 출력파형의 제어를 통하여 해저면에서 반사된 음향신호를 정량적으로 획득하여 자료처리가 가능한 시스템이다. 그러므로 다중채널탄성과 자료처리기법을 이용한 후처리과정을 통하여 음향임피던스와 감쇠계수와 같은 반사자료의 음향특성을 분석함으로써 퇴적물의 물성을 유추하여 해저면을 분류할 수 있다.

본 연구에서는 다중채널탄성과 처리기법의 하나인 K-L 변환을 응용한 유사도지수의 평가를 통하여 해저면 퇴적물의 불균질성, 입자크기, 그리고 굳기등에 따른 반사신호의 음향특성을 분석하여 퇴적물의 분포상황을 분류하여 보았다. 코아를 통하여 분석된 특정 퇴적층 지역에서 획득된 Chirp 자료를 K-L 변환한 결과 특이치 곡선의 양상과 재구성된 반사신호성분비로부터 계산된 유사도지수는 암반지역에서 0.4 이하의 값을 나타내었고, 사질퇴적층 지역에서는 0.5-0.7 사이의 값을 나타내었다. 그리고 니질퇴적층 지역에서는 0.7 이상의 높은 값을 나타내었다. 따라서 유사도지수에 의한 해저면 퇴적물의 분류 가능성을 보여 주었다. 그리고 제주 성산포 천해지역에서 Chirp sonar system을 이용하여 획득한 음향반사자료를 처리하여 유사도지수에 의해 분석된 결과는 이 지역에서 Side scan sonar 기록과 채취된 퇴적물 분석에 의해 해석된 암반돌출지역, 균질한 사질퇴적층지역, 자갈과 조개껍질을 함유한 사질퇴적층지역 그리고 화산재로 구성된 단단한 퇴적층지역의 양상을 잘 반영해 주고 있다. 따라서 유사도지수에 의한 근접한 트레이스 간 상호상관도에 따른 통계학적 처리를 통하여 실시간 영역에서 넓은 지역의 해저면 퇴적물의 특성을 분류할 수 있는 가능성을 입증하였다. 그러나 유사도지수에 의한 해저면 퇴적물의 분석은 넓은 지역에서 퇴적물의 양상이 변화하는 분포상황 분류에는 효과적이었지만 퇴적물의 정량적인 물성의 분석은 불가능하였다. 따라서 특정 퇴적물 양상을 나타내는 지역에서의 보다 많은 자료의 획득과 자료처리를 통한 분석에 의해 경험적으로 유사도지수와 퇴적물 물성과의 상관관계의 정립이 필요하다. 또한 해저면 모델링에 의한 방법도 생각해 볼 만 하다. 그리고 퇴적물의 물성과 직접적인 관계가 있는 음향임피던스와 감쇠계수에 대한 심도있는 연구가 필요하며, 퇴적물 물성을 유도할 수 있는 새로운 지표의 음향특성 연구가 계속되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 김성렬 외, 1985, 한반도 주변해역 표층퇴적물에서의 음파전달속도와 감쇠계수 : 한국해양학회지, v.20, p.10-21.
- 김성렬 외, 1991, 한반도 주변해역 해저퇴적물의 음향학적 특성연구 (III) - 감쇠계수 특성 : BSPG 00123-378-5, 해양연구소.
- 김한준 외, 1990, 한반도 주변해역 해저표층퇴적물의 음파감쇠계수와 생물기원 기체 함량 : 한국해양학회지, v.25, p.26-35.
- 한상준 외, 1989, 한반도 주변해역 해저퇴적물의 음향학적 특성연구 (I) - 후방산란 특성 : BSPG 00075-229-5, 해양연구소.
- 한상준 외, 1990, 한반도 주변해역 해저퇴적물의 음향학적 특성연구 (II) - 음향반사 특성 : BSPG 00107-297-5, 해양연구소.
- Ahmed, N. and Rao, K. R., 1975, Orthogonal transforms for digital image processing : Verlag J. Springer, p.189-224.
- Akal, T., 1972, The relationship between the physical properties of underwater sediments that affect bottom reflection : Marine Geology, v.13, p.251-266.
- Bachman, R. T., 1985, Acoustic and physical property relationships in marine sediments : J. Acoust. Soc. Am., v.78, p.616-621.
- Berge, A. M., Drivenes, G., and Kanestrom, R., 1986, Acoustic modeling of the seafloor : Geophy. Pros., v.34, p.11-29.
- Biot, M. A., 1956, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, I. Low-frequency range : J. Acoust. Soc. Am., v.28, p.168-178.
- Bolus, R. L., 1982, Subbottom acoustic impedance profiles from magnitude and phase analysis of echoes : IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, GE-20, p.338-342.
- Breslau, L. R., 1967, The normally incident reflectivity of the sea floor at 12kc and its correlation with physical and geological properties of naturally occurring sediments : Woods Hole Oceanographic Inst., Ref. p.67-16.
- Claerbout, J. F., 1976, Fundamentals of geophysical data processing : McGraw-Hill Book Co. Inc., New York.
- Clarence, S. C., 1977, Acoustical Oceanography : Principles and Applications : John Wiley and Sons Inc., New York.
- Cobo-para, P. and Ranz-Guerra, C., 1989, Impedance profile and overall attenuation estimation of layered sea bottoms from their normal incidence acoustic reflection response : J. Acoust. Soc. Am., v.85, p.2388-2393.

- Ewing, W. M. and Jardetzky, W. S., 1957, Elastic waves in the earth : McGraw-Hill Book Co. Inc., NewYork.
- Faas, R. W., 1969, Analysis of the relationship between acoustic reflectivity and sediment porosity : *Geophysics*, v.34, p.546-553.
- Freire, S. L. M. and Ulrych, T. J., 1988, Application of singular value decomposition to vertical seismic profiling : *Geophysics*, v.35, p.591-600.
- Hamilton, E. L., Shumway, G., and Menard, H. W., 1956, Acoustic and other physical properties of shallow-water sediments off SanDiego : *J. Acoust. Soc. Am.*, v.28, p.1-15.
- Hamilton, E. L., 1970, Reflection coefficients and bottom losses at normal incidence computed from Pacific sediment properties : *Geophysics*, v.35, p.995-1004.
- Hamilton, E. L., 1972, Compressional wave attenuation in marine sediments : *Geophysics*, v.37, p.620-646.
- Hamilton, E. L., 1979, Sound velocity gradients in marine sediments : *J. Acoust. Soc. Am.*, v.65, p.909-922.
- Hamilton, E. L. and Bachman, R. T., 1982, Sound velocity and related properties of marine sediments : *J. Acoust. Soc. Am.*, v.72, p.1891-1904.
- Hemon, C. H. and Hunt, B. R., 1978, Use of Karhunen-Loeve transformation in seismic data processing : *Geophy. Prosp.*, v.26, p.600-606.
- Hess, R. A., 1971, A high-power computer controlled marine Vibroseis system : *Inst. Electr. Electron. Eng., Trans. Geosci. Electron.*, GE-9, p.90-95.
- Jones, I. F., 1985, Application of the Karhunen-Loeve transform in reflection seismology : Ph'D Thesis, Univ. of British Columbia.
- Klauder, J. R., Price, A. C., Darlington, S., and Albersheim, W. J., 1960, The theory and design of chirp radars : *The Bell Sys., Tech. J.*, v.39, p.745-808.
- Klema, V. C. and Lamb, A. J., 1980, The singular value decomposition : its computation and some application : *Inst. Electr. and Electron. Eng. Trans. Automatic Control*, AC-25, p.164-176
- Knott, S. T., Hoskins, H., and LaCasce, E. O., 1981, Estimation of the seabed acoustic impedance structure from normal incident reflections : *J. Geophy., Res.*, v.86, p.2935-2952.
- LeBlanc, L. R., Schock, S. G., and Panda, S., 1991, Pulse and aperture design consideration for a marine sediment classification Chirp sonar : *Proceedings of the marine technology society conference*, Nov. 91, v.II, p.820.

- LeBlanc, L. R., Mayer, L. A., and Rufino, M., 1992, Marine sediment classification using the chirp sonar : J. Acoust. Soc. Am., v91, p107-115.
- LeBlanc, L. R., Panda, S., and Schock, S. G., 1992, Sonar attenuation modeling for classification of marine sediments : J. Acoust. Soc. Am., v91, p.116-126.
- Mayer, L. A., and LeBlanc, L. R., 1983, The chirp sonar : a new quantitative high-resolution profiling system : in Pace, N. G., Ed., Acoustics and the seabed, Bath Univ. Press.
- Panda, S., 1994, Sediment classification based on impedance and attenuation estimation : J. Acoust. Soc. Am., v96 (5), p.3022-3035.
- Schock, S. G., LeBlanc, L. R., and Mayer, L. A., 1986, Sediment classification using a wideband, frequency-modulated sonar system : Proc., 18th Ann. Offshore Tech. Conf., p.389-398.
- Schock, S. G., LeBlanc, L. R., and Mayer, L. A., 1989, Chirp sub-bottom profiler for quantitative sediment analysis : Geophysics, v54, p.445-450.
- Schock, S. G. and LeBlanc, L. R., 1990, Chirp sonar : New technology for sub-bottom profiling : Sea Tech., p.35-43.
- Schock, S. G. and LeBlanc, L. R., 1992, Sediment classification using the Chirp sonar : 24th Ann. OTC in Huston, Texas, May 4-7, p.363-368.
- Schock, S. G., LeBlanc, L. R., and Mayer, L. A., Sediment classification using a wideband, frequency-modulated sonar system : Proc., 18th ann. offshore Tech. Conf., p.389-398.
- Stoll, R. D., 1977, Acoustic waves in ocean sediments : Geophysics, v42, p751.
- Stoll, R. D., 1985, Marine sediment acoustics : J. Acous. Soc. Am., v77, p.1789-1799.
- Turin, G. L., 1960, An introduction to matched filters : IRE Trans. on Information Theory IT-6, p.311-329.
- Urick, R. J., 1947, A sound velocity method for determining the compressibility of finely divided substances : J. Appl. Phys., v18, p.983-987.
- Ursin, B. and Zheng, Y., 1985, Identification of seismic reflections using singular value decomposition : Geophy. Prosp., v33, p.773-779.

Table 2-1. DataSonics CAP6000W System specification.

Operating Frequency	2 to 10 kHz, FM Sweep
Output Power	2 KW
Pulse Width	5, 10, 20, 50, or 60 msec
Repetition Rate	0.25, 0.50, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0 sec or External (positive going TTL)
System Resolution	3 to 6 inches
Depth Measurement Accuracy	0.1% of depth or 3 inches with known sound velocity
Subbottom Penetration	To 100 m dependent on sediment type (4096 samples @ 30.0 kHz)
System Control	MS-DOS (via Keyboard in drawer) Windows (via mouse)
Display	Super VGA
Disk Drives	130 MB Hard Drive 1.44 MB 3.5" floppy drive
Storage Temperature	-40 to 70 °C
Operating Temperature	0 to 40 °C

Table 2-2. DataSonics CAP6000W Topside system specifications.

Configuration	DataSonics DSP601 Chirp Sonar Processor DataSonics DSP602 Transceiver DataSonics DSP603 Sonar Display Monitor
CPU	Intel 80486 processor
Operating System	Microsoft DOS running Microsoft Windows
User Input	Mouse, extended Keyboard
Host Disk Adapter	SCSI
Sonar Display Monitor	15" 1280x1024 pixel Resolution, 0.28mm dot pitch
Signal Processing	Digital Signal Processor with 16-bit A/D Converter
Hard Drive	High-capacity IDE or SCSI drive
Diskette Drive	3.5" high-density, 1.44M
Digital Storage	Tape Cartridge : 8mm, helical scan ; Exabyte 8205 connected via SCSI interface other mass storage options available
Analog Storage	External Digital Audio Tape (DAT) drive records raw Analog Data
Hard copy Printout	Hewlett-Packard Model 3630A Color InkJet Printer Other Hardcopy output options available
System I/O Ports	Industry standard navigation serial Input, NEMA 183 compatible Key Output, 100usec, 5VDC External Key Input Hydrophone Output Correlated Subbottom Data Output Generic Analog Data Input Heave Compensator Input, Delay Key
Input Power	110VAC,60Hz using supplied stepdown Transformer
Power Amplifier	Power Output up to 2KW Output Power Level is digitally controlled via the graphical user interface from 0dB to -21dB in 3dB increments

Table 2-2. (Continued).

Sonar Operations	
Transmit Rate	4 pings/sec, Max. : user set
Transmit Pulse Length	5 msec to 50msec, user set
Programmable Gain	0dB to 90dB in 6dB increments
Physical Characteristics	
Dimensions	Each Enclosure : 502mm x 384mm x 546mm
Weight	MonitorCase : 30Kg

Table 2-3. DataSonics CAP6000W Tow vehicle specification.

Model	TTV-190 Tow vehicle
Operating Depth	600m (2,000ft)
Sonar Transmitters	
Configuration	DataSonics AT-471
Frequency	Standard: 2kHz-7kHz; other chirp band avilable
Beam Angle	80° conical
Power Output	Max. of 4KW@3.5kHz (source lebe = 210dB)
Sonar Reception	
Configuration	DataSonics AT-100R8T
Frequency	500Hz - 30kHz

Table 2-4. Sharp SX-D200 Analog DAT Record specification.

DAT System	Rotary head type digital audio tape deck
Dimensions (Cassette Tape)	73mm x 10.5mm x 54mm
Recording System	Rotary head helical scanning
Recording Sampling Frequency	48kHz, 44.1kHz, or 32kHz
Playback Sampling Frequency	48kHz, 44.1kHz, or 32kHz
Quantization System	16-bit linear or 12-bit compression
Tape Speed	12.225mm/sec (wide track mode) 8.15mm/sec (standard track mode) 4.075mm/sec (long play mode)
Recording/Playback Freq. Response	10 to 22,000Hz (+/- 0.5dB), Fs=48kHz 10 to 20,000Hz (+/- 0.5dB), Fs=44.1kHz 10 to 14,500Hz (+/- 0.5dB), Fs=32kHz
Digital Optical Input Terminal	Signal format : IEC 958
Digital Optical Output Terminal	Signal format : IEC 958
Digital Coaxial Input Terminal	Impedance 75ohms/0.2Vp-p, BNC type
Digital Coaxial Output Terminal	Impedance 75ohms/0.5Vp-p, BNC type

Table 2-5. Sediment reflection coefficient and bottom loss for continental terrace (Hamilton, 1970).

Sediment type	Average reflection coefficient	Bottom loss (dB)
Coarse sand	0.4098	-7.8
Fine sand	0.3749	-8.5
very Fine sand	0.3517	-9.1
Silty sand	0.3228	-9.8
Sandy silt	0.2136	-13.4
Sand-silt-clay	0.2504	-12
Clayey silt	0.1767	-15
Silt clay	0.1586	-16

Table 2-6. Notation of parameters and related equations (LeBlanc, 1992).

Z_w : the impedance of bottom water	$Z_w = (\rho_w/\beta_w)^{\frac{1}{2}} = 1.549 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$
c_w : the compressional wave velocity of water	$c_w = \sqrt{1/\beta_w \rho_w} = 1.504 \times 10^3 \text{ m/s}$
ρ_b : bulk density	$\rho_b = \rho_w \eta + \rho_g(1-\eta)$
ρ_g : density of the solid material (grain density)	$\rho_w \approx 1025 \text{ kg/m}^3 \text{ at } 1\text{atm}, 23^\circ\text{C}$
ρ_w : density of bottom water	$\rho_R = \rho_g/\rho_w$
β_b : the bulk compressibility of the water saturated sediment	$\beta_b = \beta_w \eta + \beta_g(1-\eta)$
β_g : the compressibility of solid material (grain compressibility)	$\beta_w \approx 42.94 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N} \text{ at } 1\text{atm}, 23^\circ\text{C}$
β_w : the compressibility of water	$\beta_R = \beta_g/\beta_w$
η : the porosity of sediments	$\eta = (\rho_g - \rho_w)/(\rho_g - \rho_b)$
μ : the bulk modulus of rigidity	$\mu = \mu_o(\rho_b/\rho_w - 1)^\eta$
μ_o : the rigidity constant	

Table 2-7. The relationship of porosity and attenuation coefficient
 η - porosity (Hamilton, 1972).

Sediment Type	Porosity	Attenuation coefficient (dB/kHz-m)
Coarse, medium, fine sand	36 - 46.7%	$k=0.2747+0.00527(\eta)$
Very fine sand and lower porosity mixed sizes	46.7 - 52%	$k=0.04903(\eta)-1.7688$
Mixed sizes	52 - 65%	$k=3.3232-0.0489(\eta)$
Silt, clays	65 - 90%	$k=0.7602-0.01487(\eta)+0.000078(\eta)^2$

Table 2-8. Attenuation coefficient of sediments around the Korea Peninsula
 compared with Hamilton(1972) (after Kim et al., 1990).

Sediment Type	k(dB/kHz-m)	
	Kim et al. (1990)	Hamilton (1972)
Sand - coarse	0.66	0.23 - 0.51
medium	-	0.25 - 0.60
fine	0.52	0.29 - 0.71
very fine	0.42	0.35 - 0.83
Silt - coarse	0.58	0.22 - 0.84
medium	0.35	0.08 - 0.82
fine	0.20	0.05 - 0.33
very fine	0.13	0.04 - 0.21
Clay	0.16	0.02 - 0.17

Table 2-9. Average relaxation time for different sediment types.

Sediment type	Relaxation time (μ s)
Medium sand	0.15
Fine sand	0.17
Coarse silt	0.13
Medium silt	0.06
Fine silt	0.03
Clay	0.02

Table 2-10. The Grab and Diving position in Sungsanpo area, Cheju island (S:Grab D:Diving).

Sample No.	Location		Water Depth(m)
	Latitude (N)	Longitude (E)	
S-01	33° 26.94'	126° 55.82'	12.8
S-02	33° 26.71'	126° 55.76'	12.5
S-03	33° 26.55'	126° 55.89'	15.0
S-04	33° 26.52'	126° 56.30'	24.6
S-05	33° 26.85'	126° 56.27'	19.5
S-06	33° 26.99'	126° 56.25'	17.3
S-07	33° 26.93'	126° 56.61'	24.8
S-08	33° 26.75'	126° 56.54'	26.3
S-09	33° 26.58'	126° 56.68'	33.0
S-10	33° 26.50'	126° 57.14'	58.6
S-11	33° 26.71'	126° 57.06'	50.0
S-12	33° 26.96'	126° 57.11'	48.8
S-13	33° 26.89'	126° 57.60'	90.3
S-14	33° 26.69'	126° 57.57'	91.2
S-15	33° 26.57'	126° 57.89'	91.1
D-01	33° 27.00'	126° 55.42'	-
D-02	33° 26.48'	126° 55.41'	-
D-03	33° 26.34'	126° 55.43'	10.7
D-04	33° 26.35'	126° 56.08'	20.0
D-05	33° 26.83'	126° 56.21'	19.8
D-06	33° 27.01'	126° 56.30'	20.9
D-07	33° 26.57'	126° 56.47'	30.7
D-08	33° 26.50'	126° 56.45'	30.2
D-09	33° 26.39'	126° 56.38'	30.6

Table 2-11. The result of bottom sediment analysis in Sungsanpo, Cheju island (S:grab, D:diving).

Sample No.	Sediment Texture (%)				Type	Mean(ϕ)	St. De
	Gra.	Sand	Silt	Clay			
S-01		99.94	0.06	-	S	2.12	0.64
S-02		99.92	0.08	-	S	2.43	0.59
S-03		99.88	0.12	-	S	2.06	0.70
S-04	2.16	97.63	0.21	-	(g)S	2.31	1.06
S-05	0.27	99.57	0.16	-	(g)S	1.93	0.82
S-06		99.78	0.22	-	S	2.18	0.69
S-07		99.82	0.18	-	S	2.17	0.64
S-08		99.78	0.22	-	S	2.27	0.64
S-09		99.50	0.50	-	S	2.35	0.65
S-10	0.19	99.67	0.14	-	(g)S	1.46	0.83
S-11		99.89	0.11	-	S	2.16	0.67
S-12	52.77	46.77	0.46	-	sG	-0.98	1.68
S-14	36.22	35.08	8.23	20.47	msG	2.39	4.92
S-15	7.90	47.64	15.09	29.36	gmS	4.68	4.57
D-02	0.08	99.75	0.17	-	(g)S	2.29	0.77
D-03		99.90	0.10	-	S	2.44	0.60
D-04		99.86	0.14	-	S	2.19	0.62
D-05		99.95	0.05	-	S	2.22	0.65
D-06		99.95	0.05	-	S	1.97	0.70
D-07		99.93	0.07	-	S	2.01	0.69
D-08		99.83	0.17	-	S	2.34	0.61
D-09		99.95	0.05	-	S	2.24	0.64

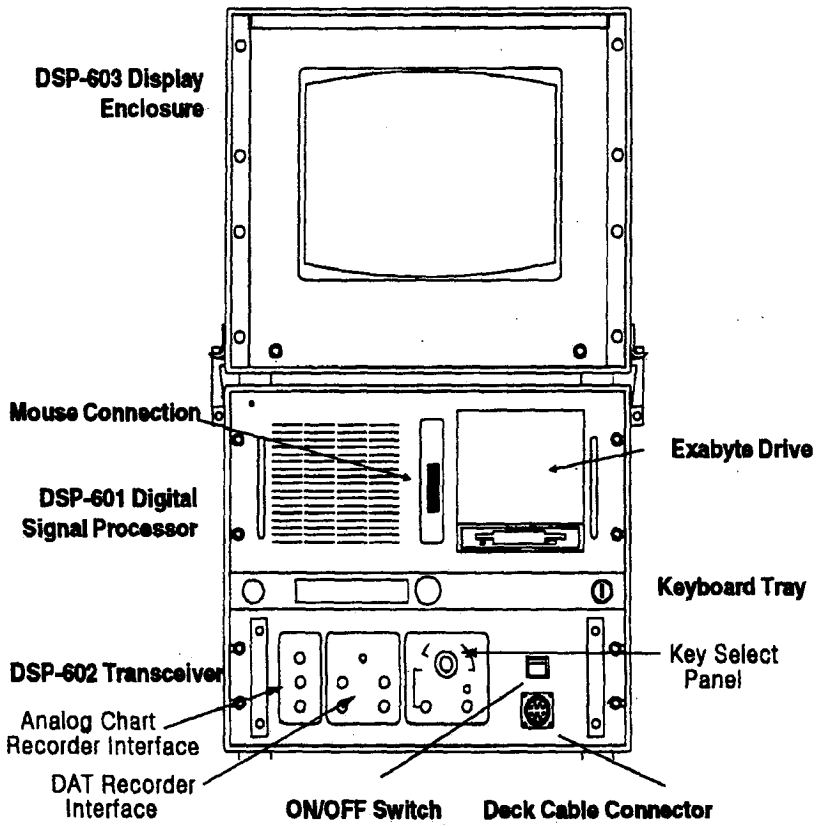
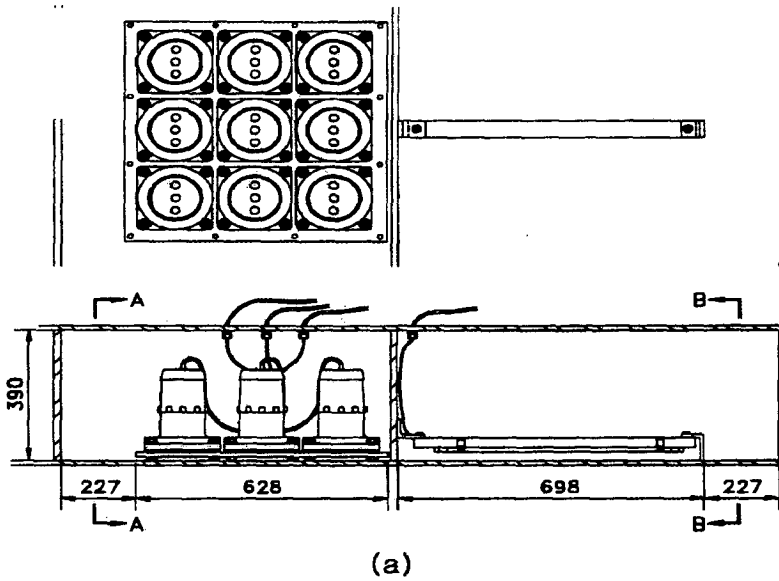
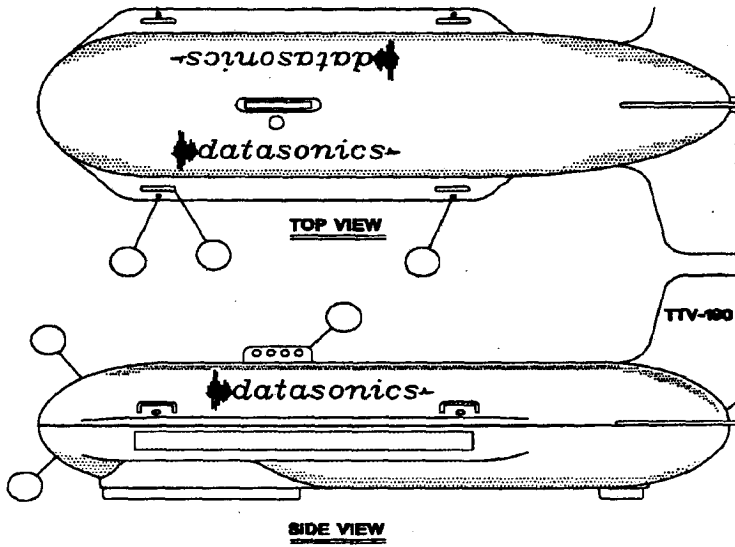


Fig. 2-1. DataSonic CAP6000W Topside system



(a)



(b)

Fig. 2-2. (a) Transducers and Hydrphone, (b) TTV-190 Tow vehicle

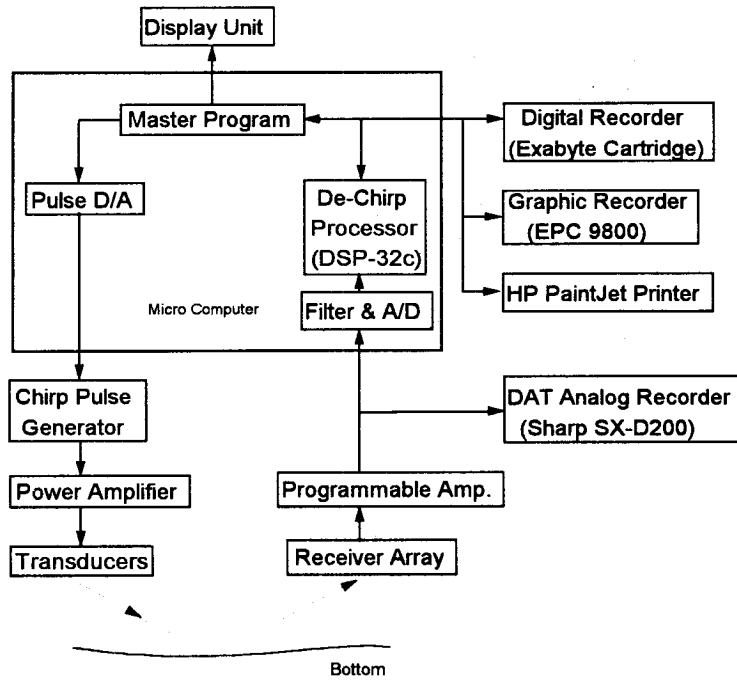


Fig. 2-3. Chirp sonar system components of DataSonics CAP6000W

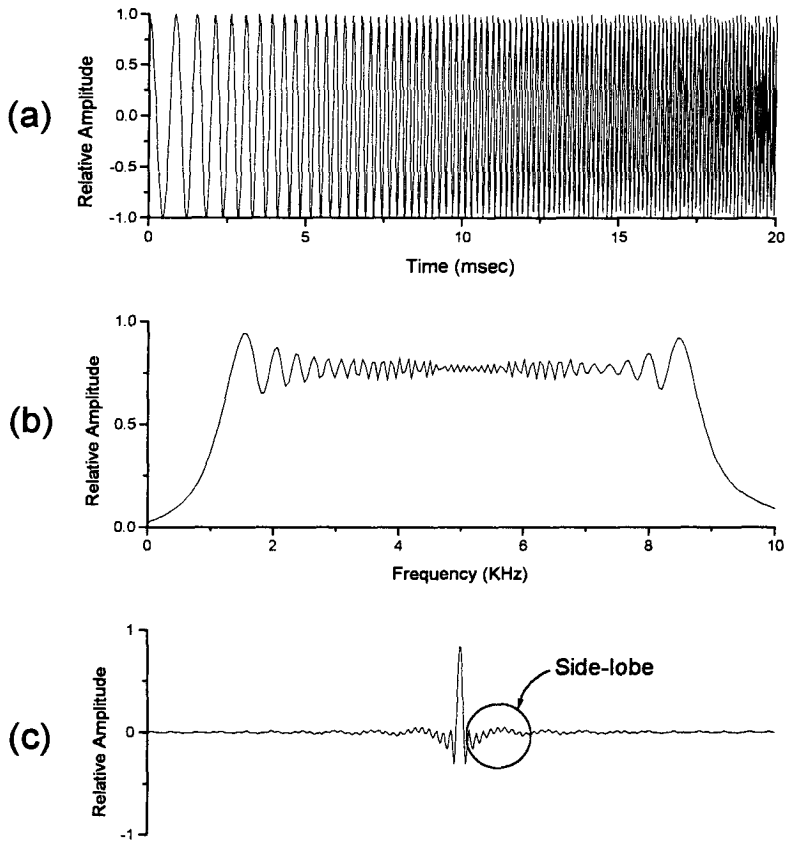


Fig. 2-4. (a) a sweep signal in time domain, (b) a frequency spectrum of sweep signal, (c) an autocorrelation of sweep signal

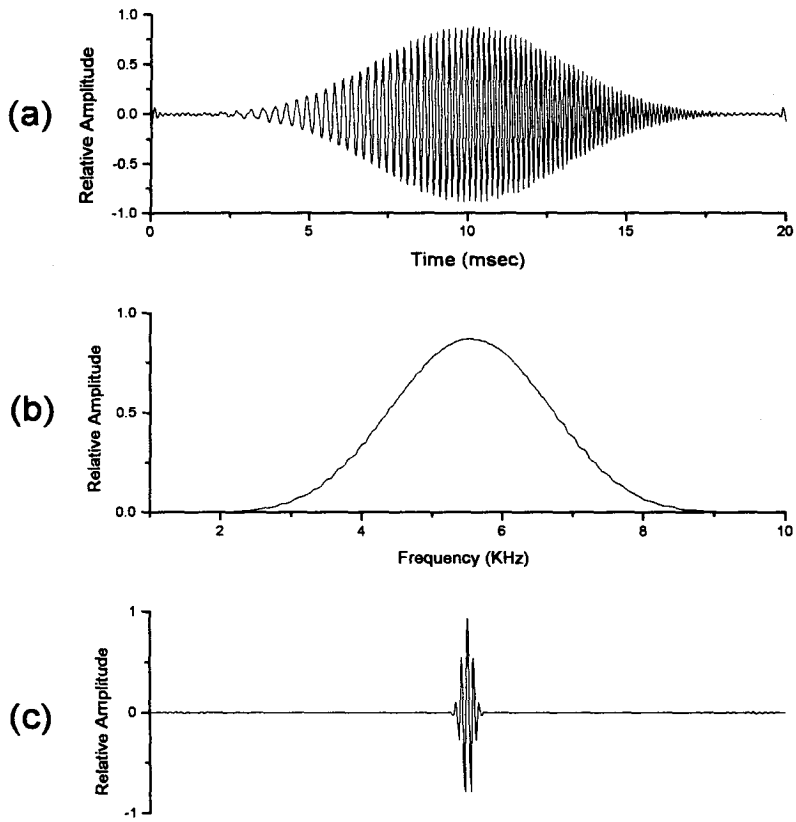


Fig. 2-5. (a) a linear FM chirp signal in time domain, (b) a frequency spectrum of chirp signal, (c) an autocorrelation of chirp signal

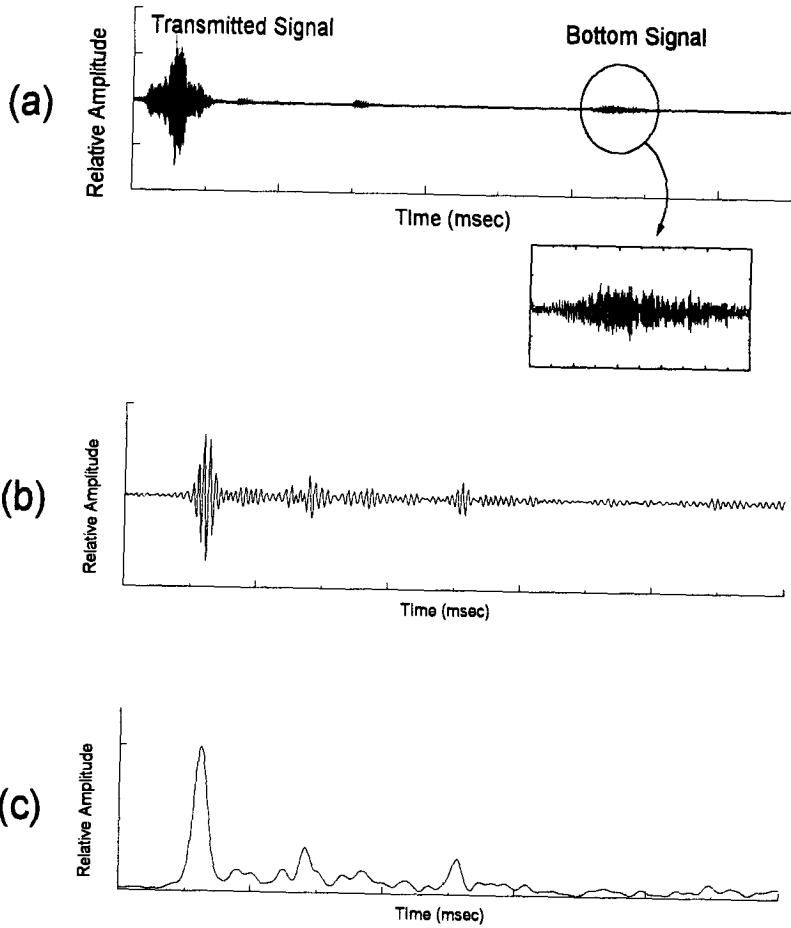


Fig. 2-6. (a) a typical return signal obtained in Sungsanpo area, (b) a matched filtered of bottom signal in square, (c) an envelope of (b)

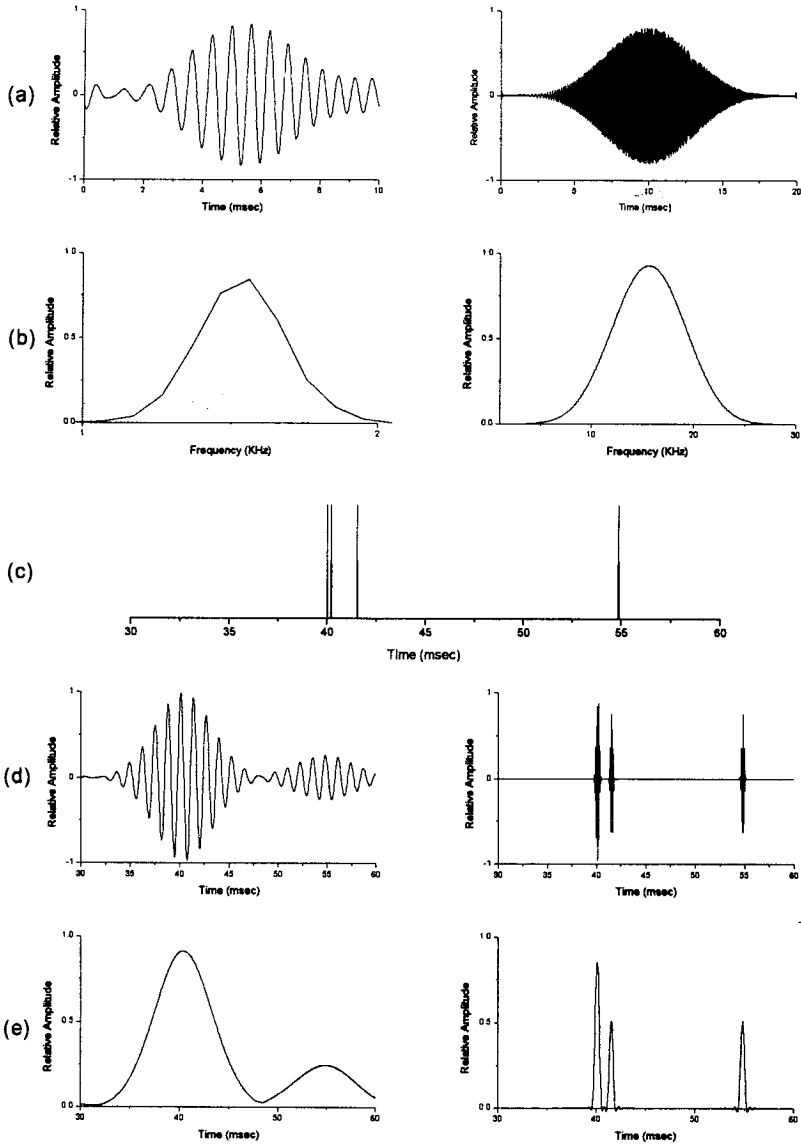


Fig. 2-7. (a) a chirp signal with bandwidth 1kHz, 30kHz, (b) a frequency spectrum of (a), (c) a reflectivity model, (d) a matched filtered of return signal, (e) an envelope of (d)

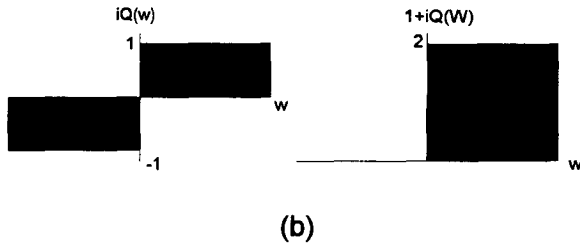
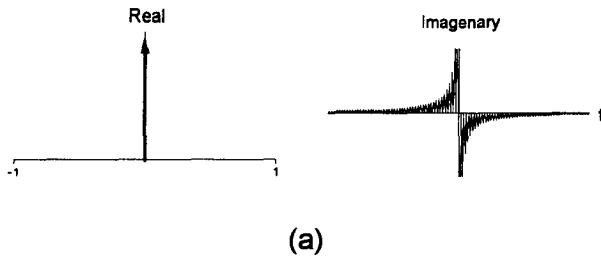


Fig. 2-8. (a) a quadrature filter in time domain, (b) a quadrature filter in frequency domain

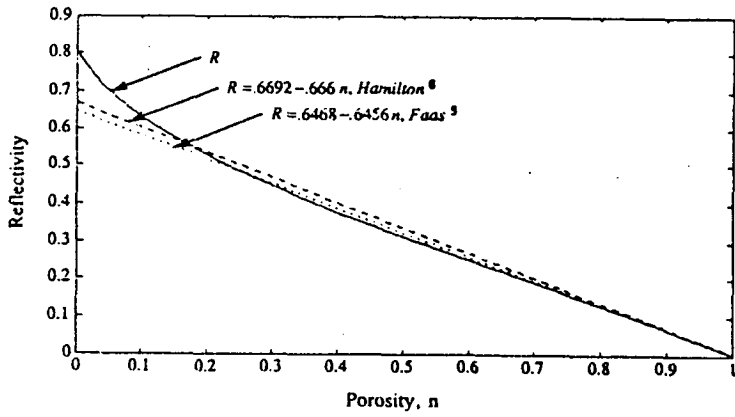


Fig. 2-9. Hamilton's and Faas's empirical equation for reflection coefficient compared

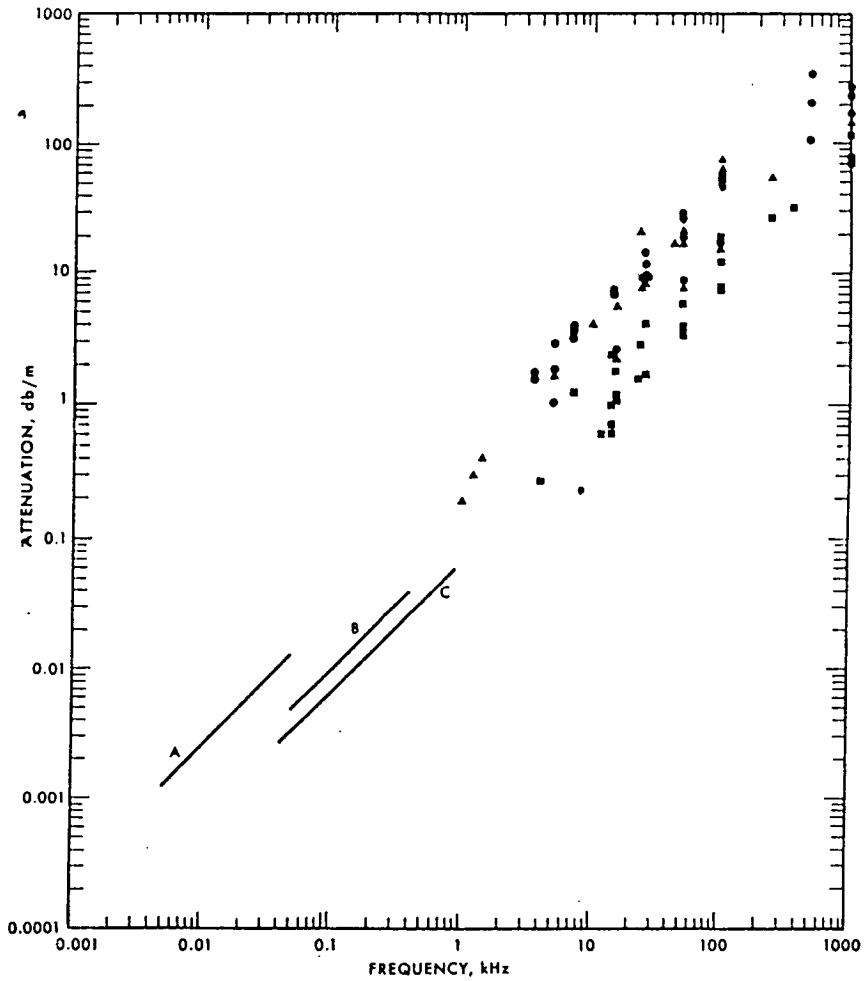


Fig. 2-10. Attenuation versus frequency. The measurements are for natural saturated sediments and sedimentary strata: ●, sands (all grades) ; ■, clayey silt, silty clay ; ▲, mixed sizes (e.g., silty sand, sandy silt, sand-silt-clay) ; sand data at 500 and 100kHz. Low frequency data : line A land, sedimentary strata ; line B Gulf of Mexico coastal clay-sand ; line C sea floor, reflection technique. (Hamilton, 1972.)

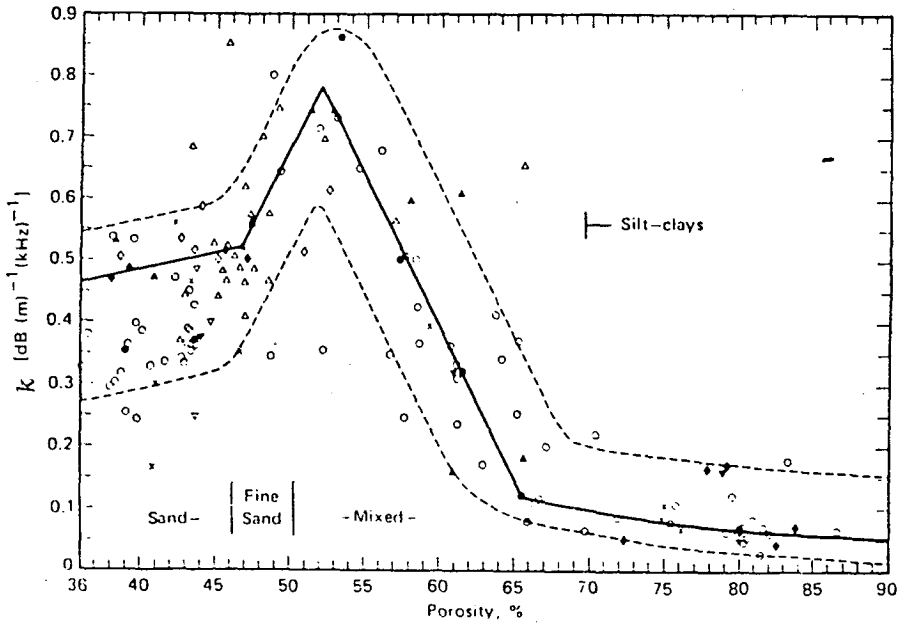


Fig. 2-11. Attenuation coefficient k . Porosity(%) and k (in $\alpha = kf$). Dashed lines are estimates of the upper and lower limits of attenuation. Solid symbols are averaged values for data off San Diego; open symbols are data in averages; different symbols are for different sets of data: \blacklozenge 1966-1970, \blacktriangle -1956, \blacktriangledown -1962, \bullet Shumway(1960); \times are selected values from literature.

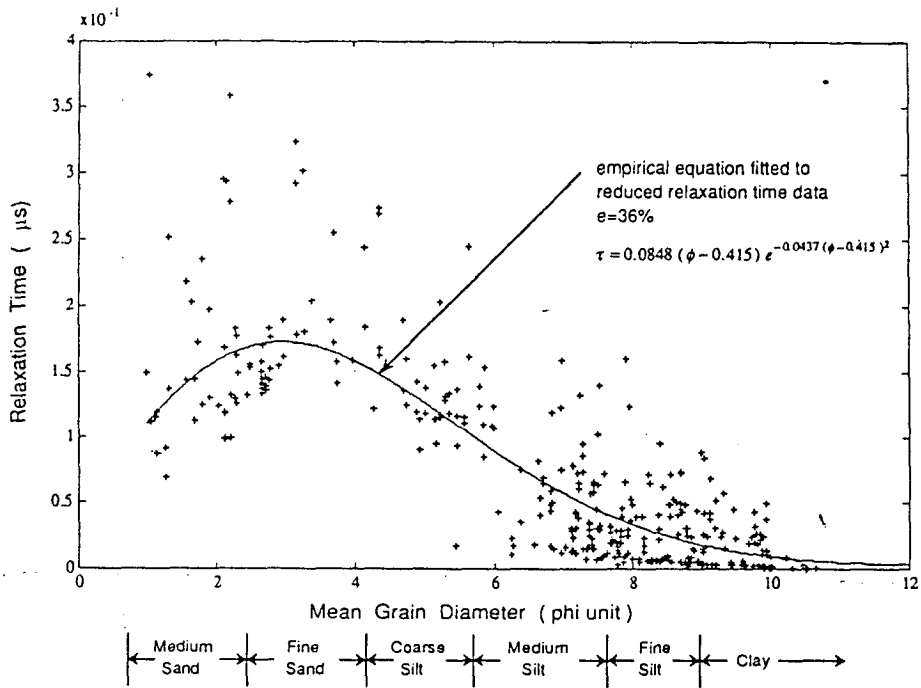


Fig. 2-12. Attenuation measurements adjusted to equivalent relaxation time values and plotted as a function of mean grain size

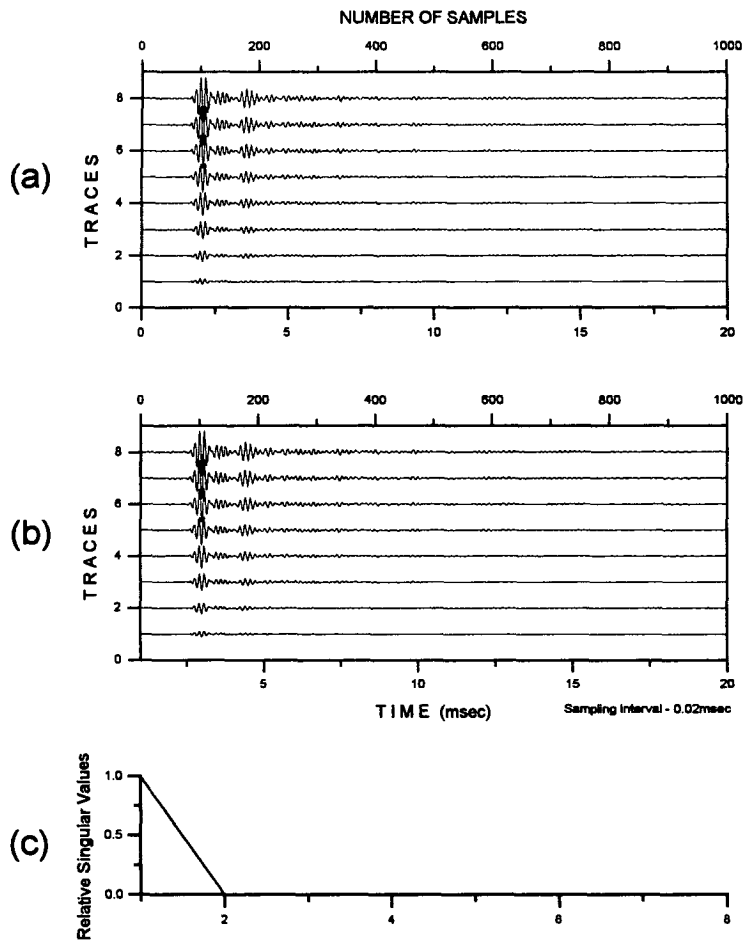


Fig. 2-13. (a)8-traces with same signal components and different amplitude, (b)the K-L transformed traces of (a) using σ_1 , (c)the plot of singular values.

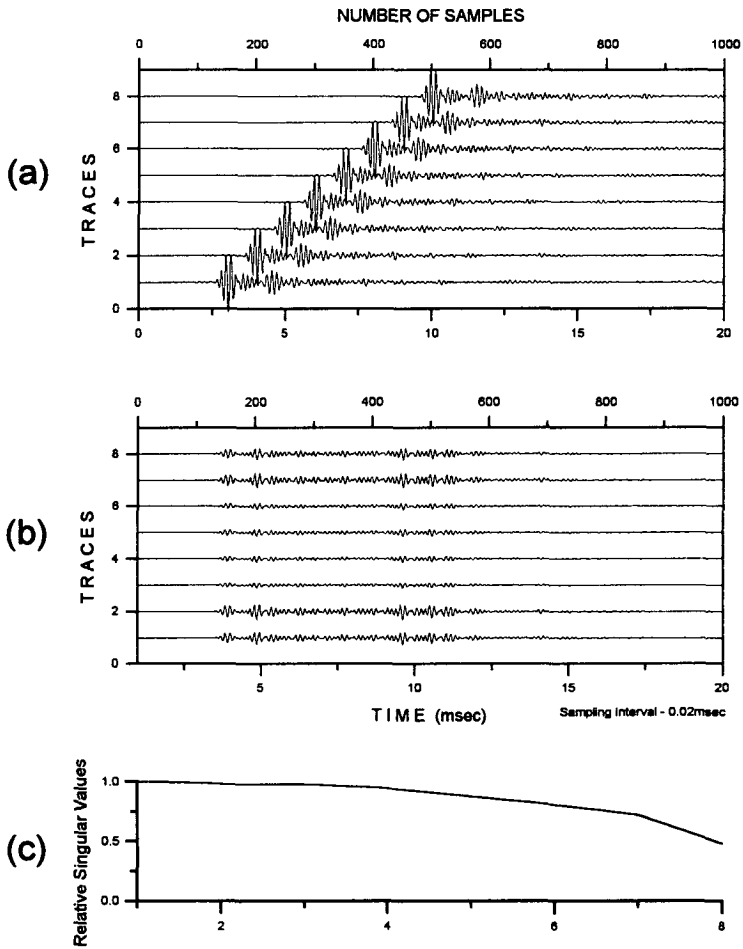


Fig. 2-14. (a)8-traces with same signal components but time shifted, (b)the K-L transformed traces of (a) using σ_1 , (c)the plot of singular values.

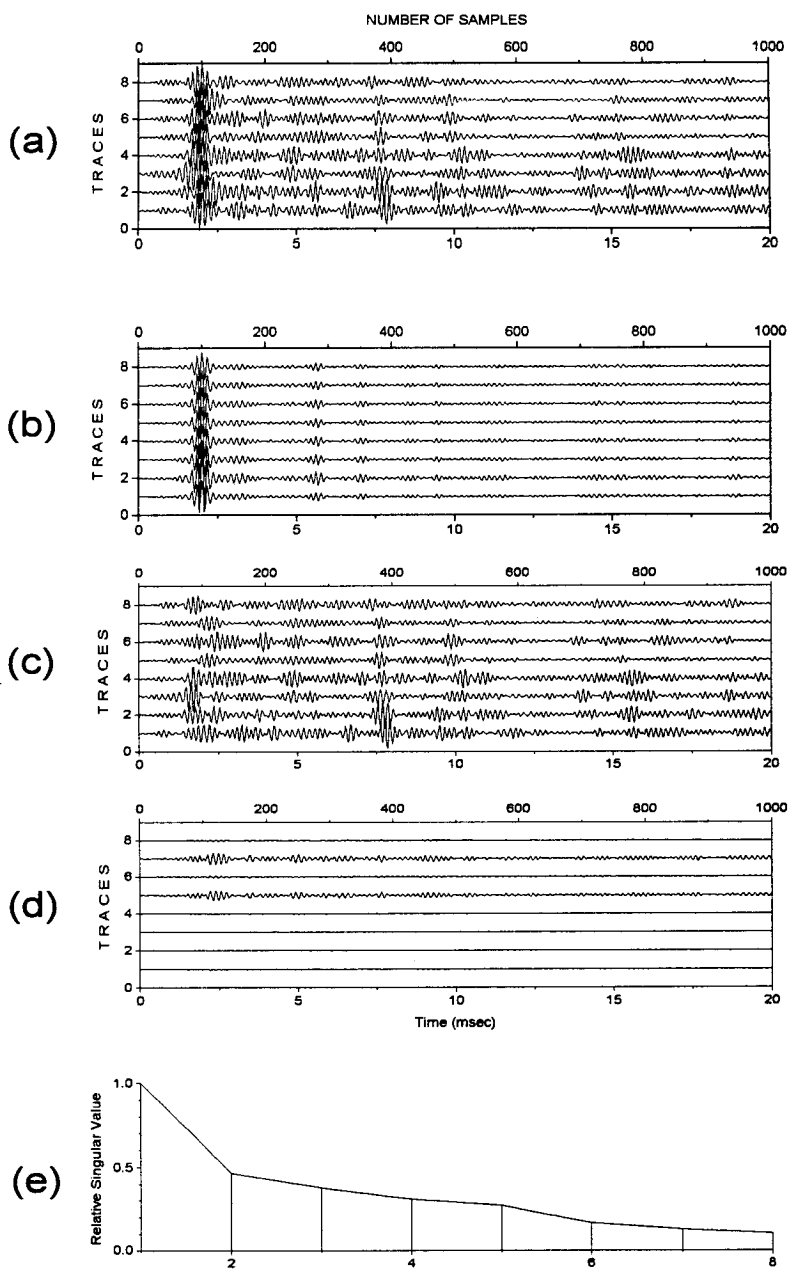


Fig. 2-15. (a) a near-by 8 traces reflected from sea bottom,, (b) the reconstructed traces with high correlated reflection signal components, (c) the reconstructed traces with scattering signal components, (d) the reconstructed traces with noise components, (e) the plot of relative singular values.

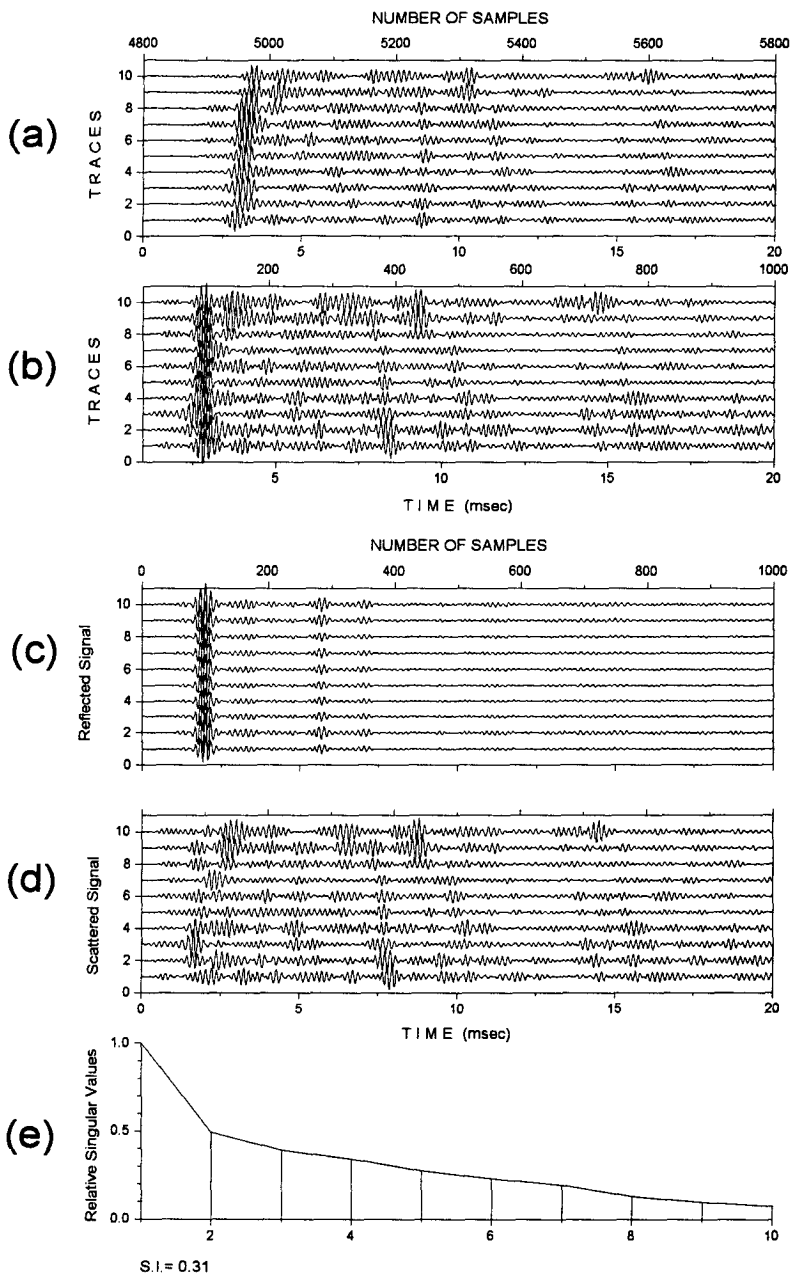


Fig. 2-16. (a) a near-by 10 traces reflected from rocky bottom, (b) the traces after time -shifted, (c) the reflected signal component after K-L transform, (d) the scattered signal and noise component after K-L transform, (e) the plot of relative singular values and similarity index

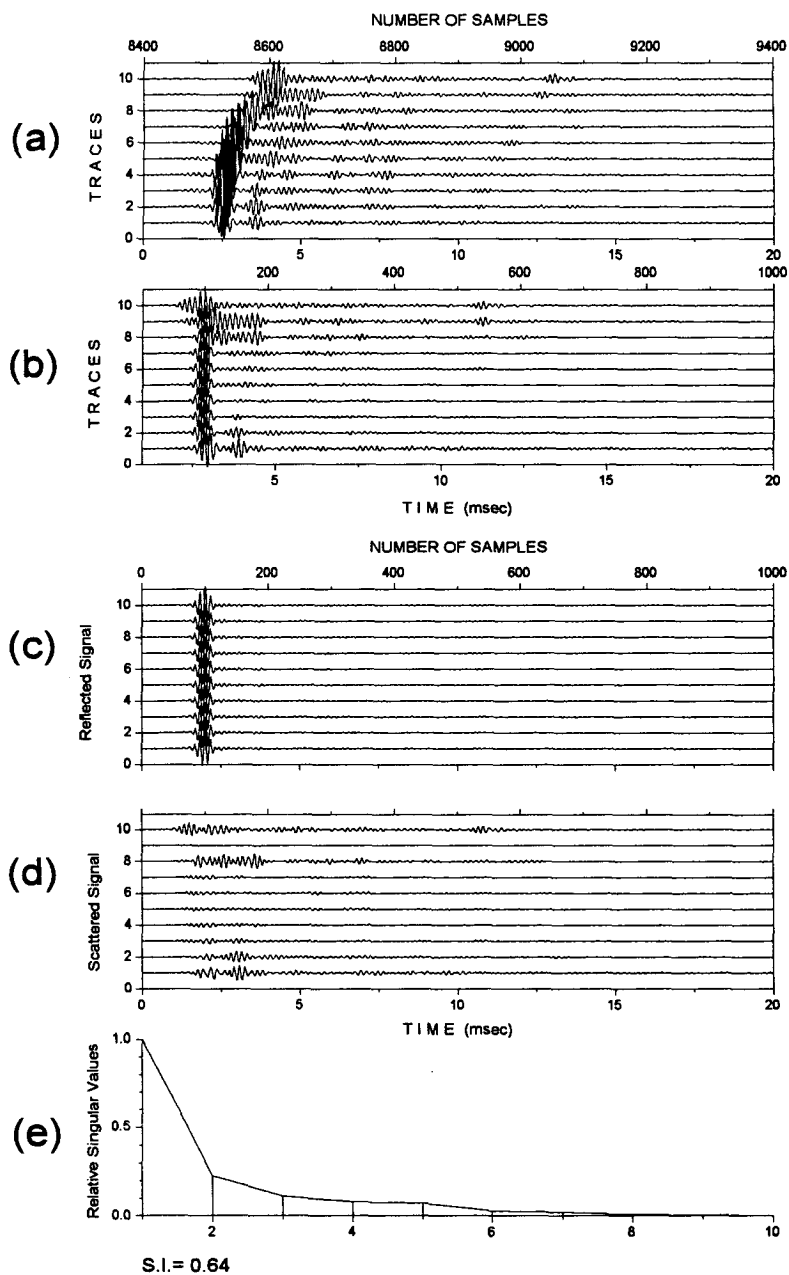


Fig. 2-17. (a) a near-by 10 traces reflected from sandy bottom, (b) the traces after time-shifted, (c) the reflected signal component after K-L transform, (d) the scattered signal and noise component after K-L transform, (e) the plot of relative singular values and similarity index

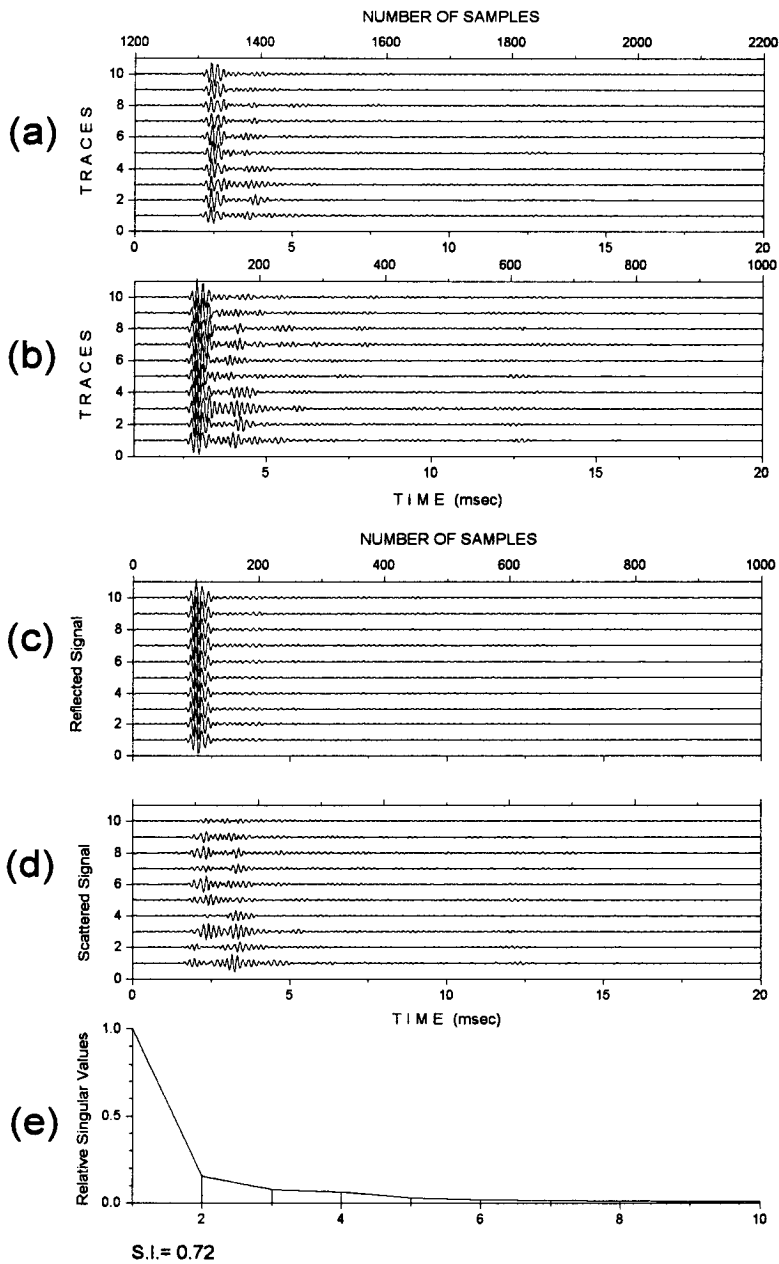


Fig. 2-18. (a) near-by 10 traces reflected from muddy bottom, (b) the traces after time-shifted, (c) the reflected signal component after K-L transform, (d) the scattered signal and noise component after K-L transform, (e) the plot of relative singular values and similarity index

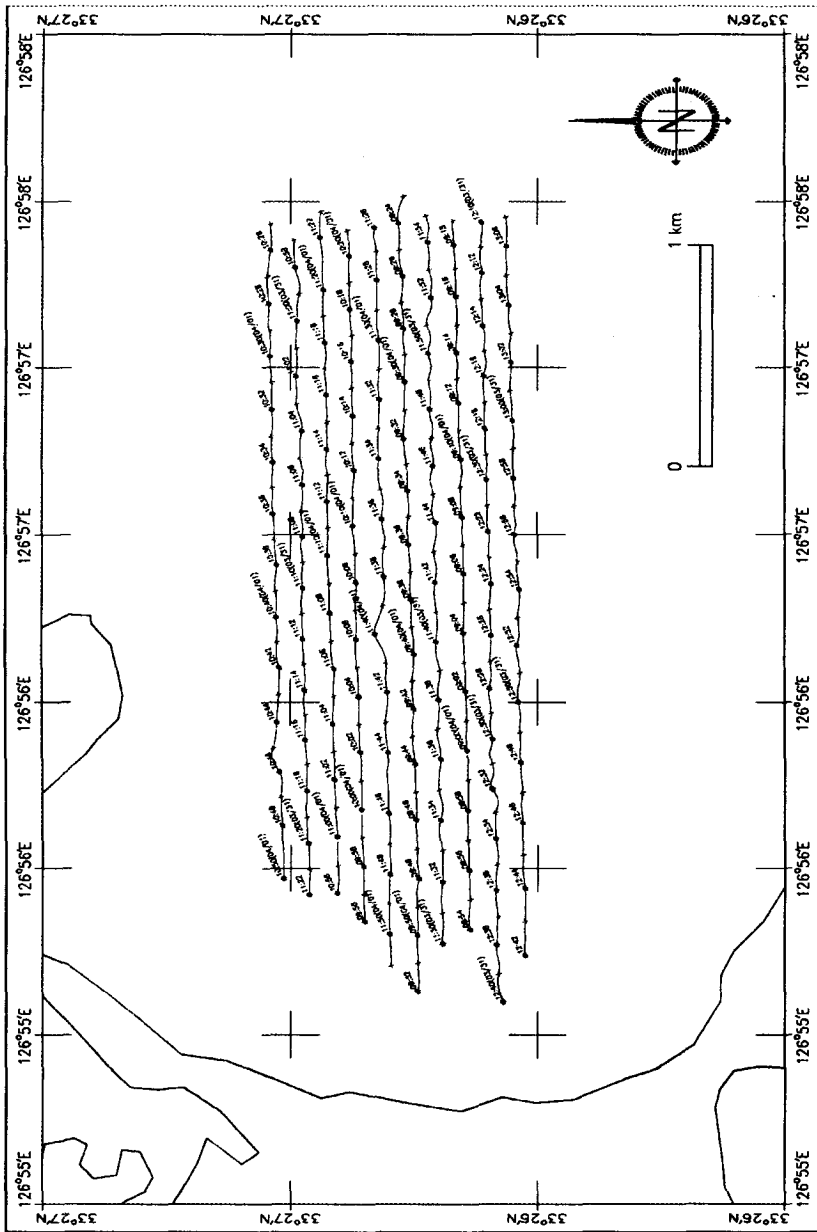


Fig. 2-19. The track chart of survey line in Sungsanpo area, Cheju island

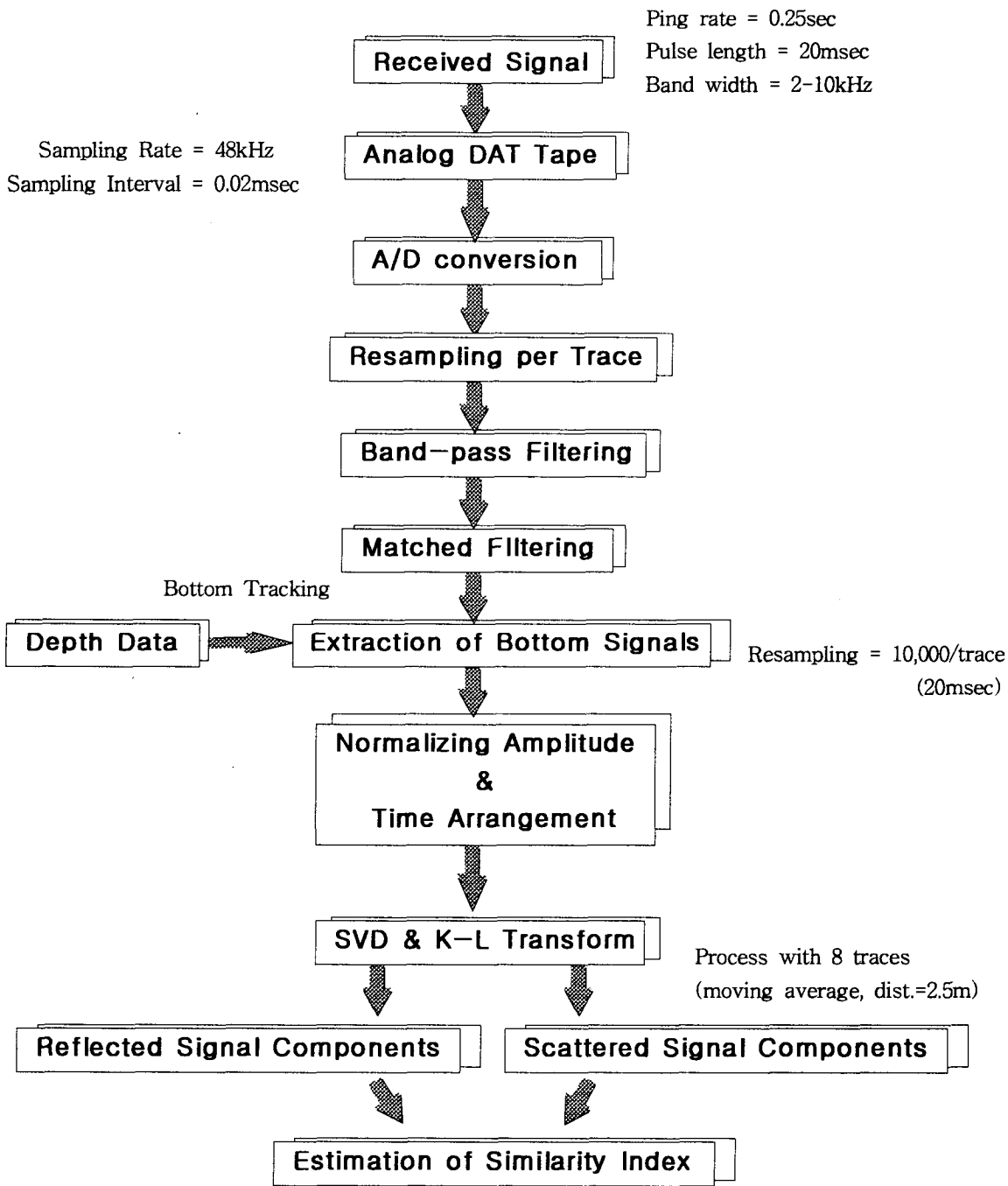


Fig. 2-20. The flow chart of post signal processing for calculate S.I.

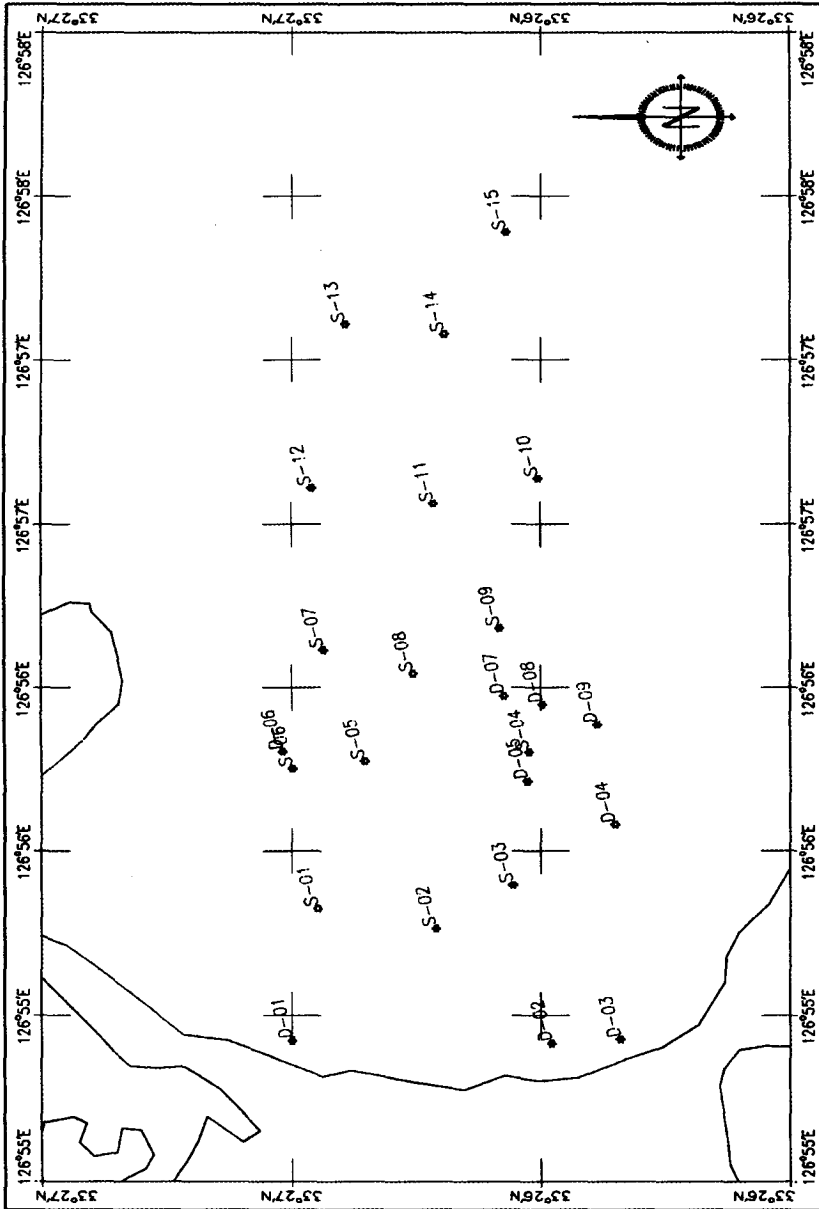


Fig. 2-21. The grab and diving station map in Sungsanpo area, Cheju island (S: grab station, D: diving station)

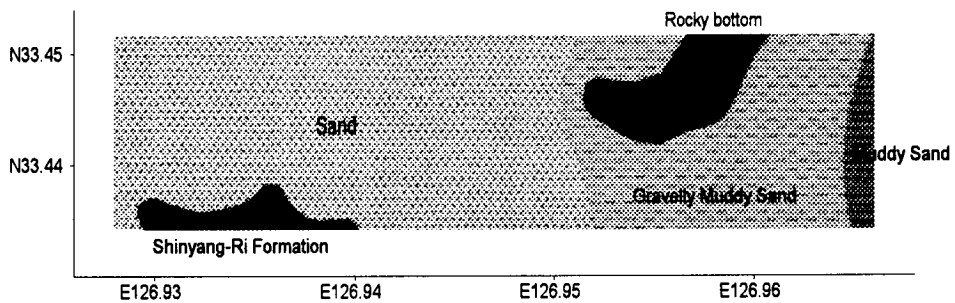


Fig. 2-22. The seafloor image map constructed from side scan sonar records and grab sample analysis

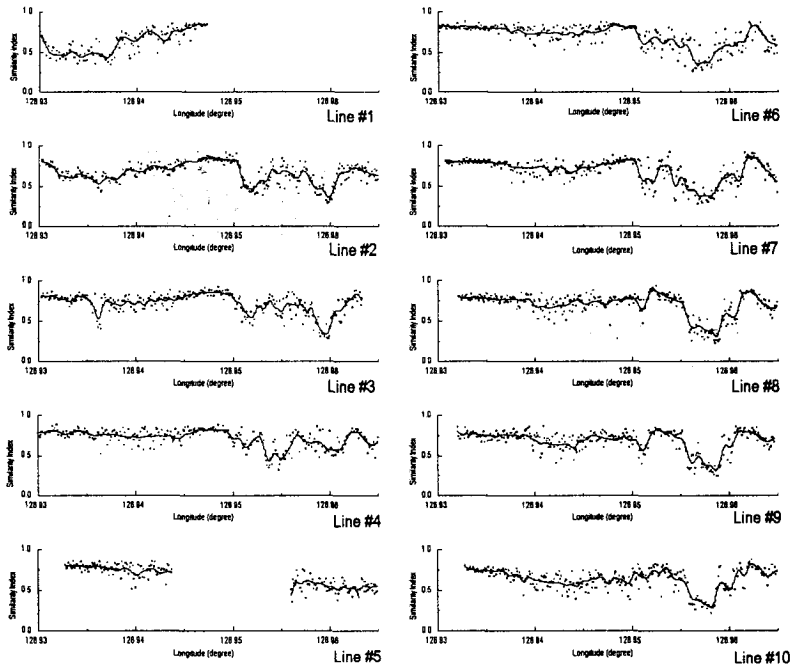


Fig. 2-23. The plot of similarity index

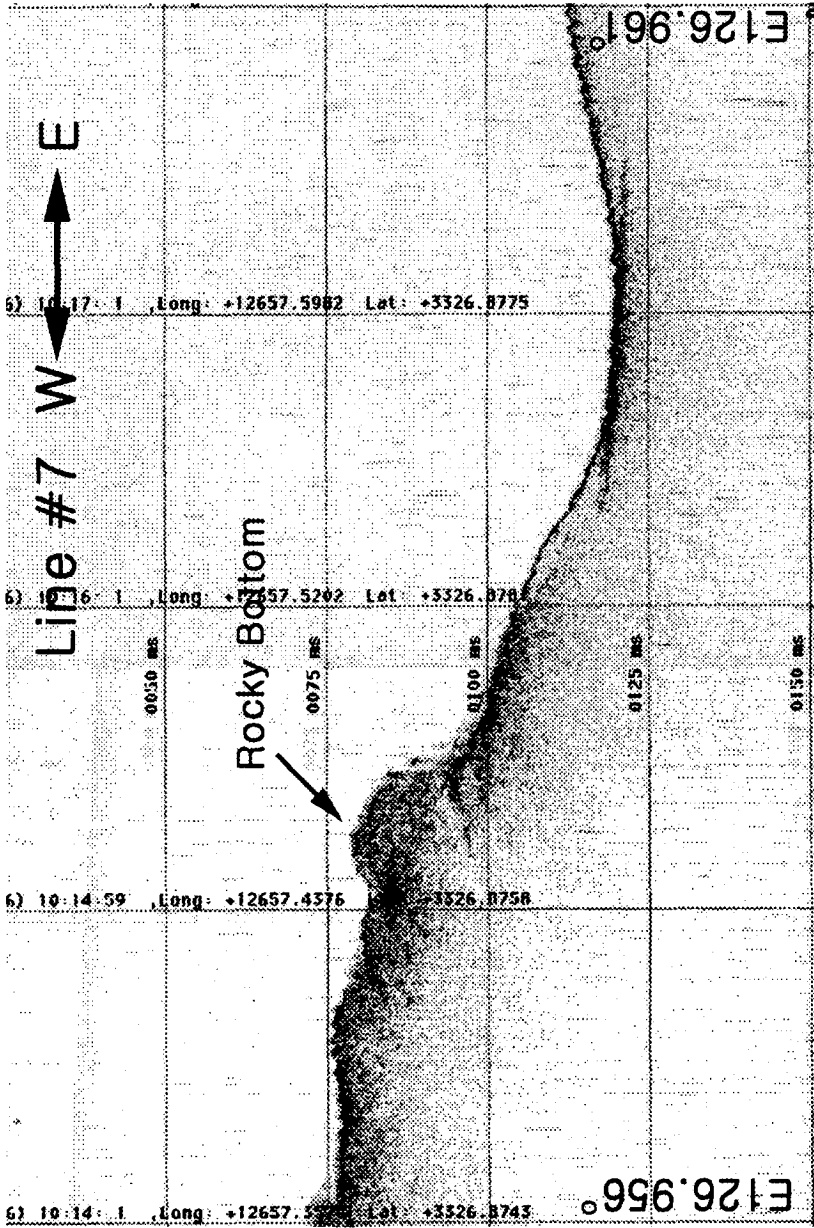


Fig. 2-24. The subbottom profile (Line #7) by Chirp sonar system

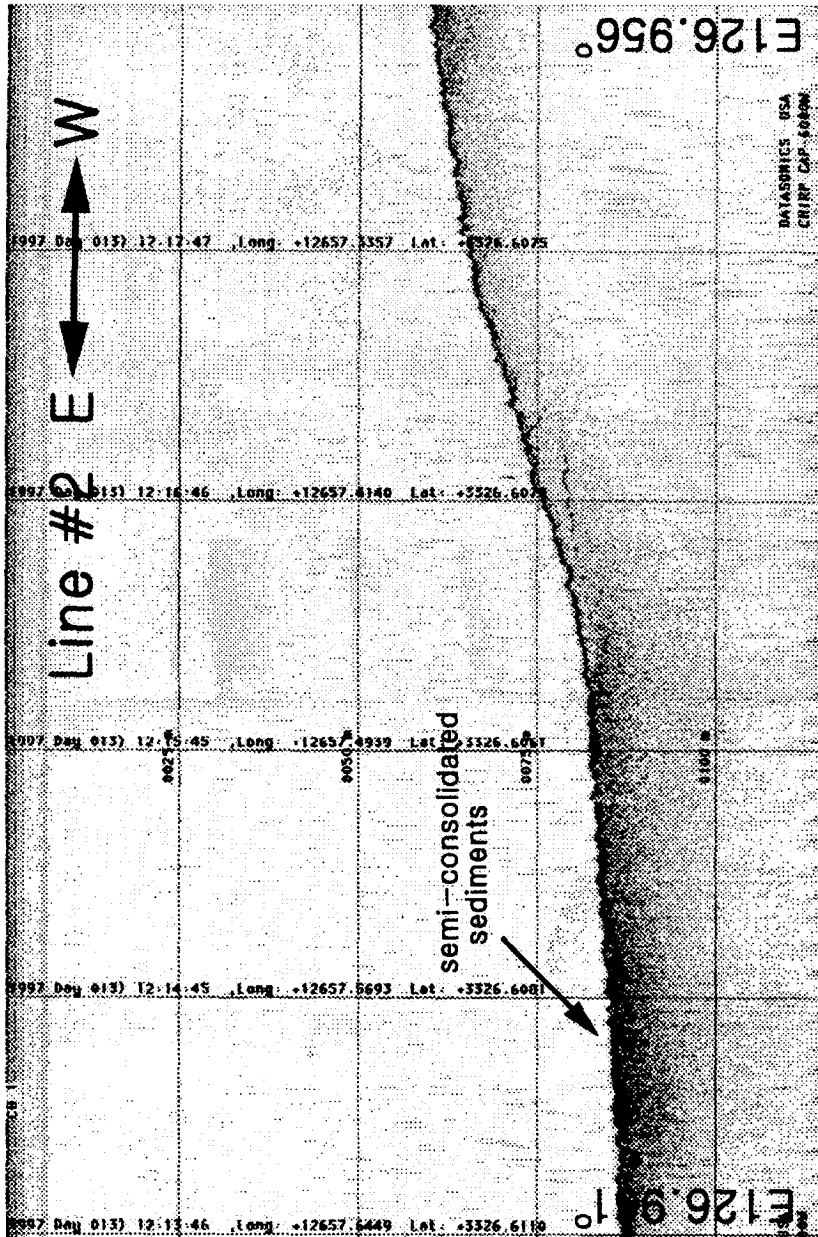


Fig. 2-25. The subbottom profile (Line #2) by Chirp sonar system

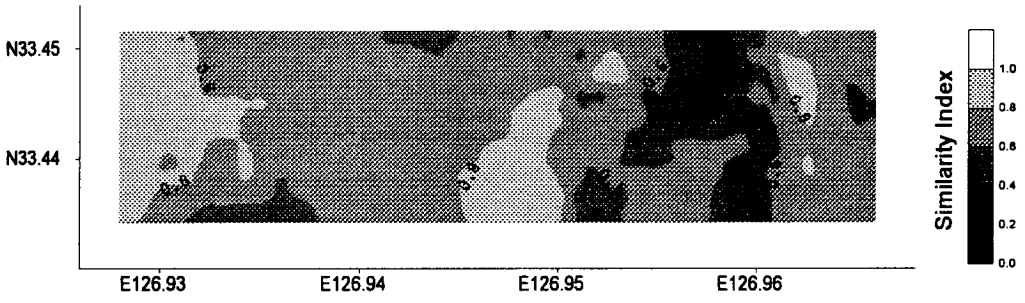


Fig. 2-26. The seafloor image map by similarity index

제 3 장 탄성파자료의 처리 및 해석

제 1 절 서 론

다중채널 탄성파탐사자료의 표준처리는 전처리-속도분석-NMO보정-중합-구조보정 등의 과정을 따라 수행된다. 이 때 신호대 잡음비를 높이기 위해 중합전 혹은 중합후에 디컨벌루션, 주파수 필터링, f-k 필터링 등 여러 기법을 적용시키게 된다. 중합전 처리는 각 윗셋에 따른 트레이스의 파형이 일정치 않아 어려움이 따르고 처리 자료의 양도 많기 때문에 계산시간도 많이 걸리는 단점을 가지고 있어 간편하고 효율적인 중합후 처리가 많이 사용된다. 그러나 중합후 처리의 경우, 일단 중합한 후의 자료를 사용하므로 중합전 혹은 중합과정에서 발생하는 왜곡은 보정시키지 못하는 단점이 있다.

중합전 처리는 크게 두가지 부류로 나누어 지는데, 그 첫째는 자료처리의 수순은 표준처리과정을 따르고 단순히 중합전에 여러 종류의 2-D 변환을 이용하여 신호대 잡음비를 높이는 방법이다. 이 방법은 적용이 간편한 반면, 표준자료 처리의 과정을 그대로 따르고 있어, 앞에서 언급한 중합과정 자체에서 생기는 문제점들은 해결하지 못한다. 두번째 방법은 파동방정식에 근거하여 중합전에 공발점 자료 혹은 공통거리자료에서 직접 구조보정을 실시하는 방법이다. 이 방법은 공심점자료의 NMO보정시 나타나는 여러 왜곡 현상을 방지할 수 있는 장점을 가진다. 즉, 습곡 단층 등에 의한 여러 가지 경사 이벤트가 복합적으로 나타나는 공심점 모음자료에서 지하 공통반사점 가정 자체가 많은 오차를 가지며, NMO보정 또한 제대로 이루어지지 않기 때문에 중합결과에 왜곡을 야기시킨다. 이러한 경우 그 적용이 다소 힘들고 계산시간이 많이 걸리는 단점에도 불구하고 중합전자료처리는 그 해법을 제공한다. 이 연구에서는 계산시간이 다소 많이 걸리고 적용이 다소 힘들지만, 경사지역에서의 NMO보정의 왜곡을 보정할 수 있는 중합전 구조보정 방법을 선택하여 시험자료에 적용시켜 보았으며, 그 결과를 고찰하였다. 시험자료는 94년 동해 대륙사면 지역에서 얻어진 자료를 선택하였다.

제 2 절 시험자료

중합전 자료처리의 적용을 위하여 선택된 자료는 1994년 한국해양연구소에 의해 동해 삼척 근해 대륙사면 지역에서 얻어진 자료이다 (한 상준외, 1994). 이번 시험자료 지역은 수심은 750m에서 1200m 정도로 다소 완만한 경사를 이루는 지역이나 그 해저반사면은 다소 복잡하게 변화하는 양상을 보이는 지역이다. 이 자료는 56 채널, 공심점 중첩도 28인 자료로 야외자료

의 샘플율은 2 ms 이며, 실제 자료처리시는 효율을 위해 4 ms로 하여 사용하였다. 시험자료는 Fig. 3-1에 나타낸 축선 중 제1축선의 발파점 4900에서 5200까지의 자료를 선택하였다. 그림 Fig. 3-2는 발파점 번호 4900, 5183인 시험자료의 대표적인 두 개의 공발점 자료를 보여 주고 있다. 그림을 살펴보면, 전형적인 해양탄성과 자료의 모습을 보여주고 있으며, 수층반사, 일차반사 이벤트들이 뚜렷이 보이고 있으며, 수층 다중반사 이후로는 명확히 구분할만한 반사이벤트는 눈에 띄지 않고 있다. 채널 9번의 자료는 잡음이 상당히 심하게 나타나고 있으며, Fig. 3-2 (b)의 왕복주시 2.2초 부근에서는 윗셋 거리에 따라서 주시가 거꾸로 짧아지는 역으로 전파된 에너지들도 보인다. Fig. 3-3은 근거리 트레이스 자료이며, 이를 살펴보면, 수층은 1초 이후에서 나타나며, 그 아래로 퇴적양상이 보이고 음향기저면은 발파점 4950 부근에서 2초 정도에 발파점 5170에서는 1.45초 부근으로 여겨진다. 기록상에서 수심이 완만하게 알아지고 있으나, 퇴적층 및 음향기저면이 상당히 급격하게 변하고 있음을 알 수 있다. 특히 발파점 4950 부근에서는 습곡 혹은 단층이벤트 등에 의한 음향기저면의 급격한 변화에 따라 반사기록이 단절 되는 등 전체적으로 탄성파기록이 지하구조를 제대로 반영하고 있지 못하다. 이 자료는 표준자료처리를 통하여 각 반사이벤트의 신호대 잡음비를 향상시키고, 중합단면에서의 왜곡된 지하구조를 구조보정을 통해 실제 지하반사면으로 보정시키게 된다. 그러나 복잡한 구조의 반사이벤트는 서로 간섭하게 되어 일반적인 자료처리를 통한 구조보정후에도 실제 지질구조로 보정되지 않는 등 왜곡현상이 여전히 남아 있게 된다. 다음 절에 이러한 여러 가지 복잡한 지하구조에 의한 급경사의 여러 지하 반사면이 존재하는 탄성과 시험자료를 표준처리, DMO 그리고 중합전구조보정을 이용해 처리하여 보았다.

제 3 절 표준처리

3.1. 중합전 처리

이번 시험자료에 적용한 표준자료처리 과정을 Fig. 3-4에 나타내었다. 먼저 자료편집은 잡음이 심한 트레이스를 제거하는 과정이며, 이번 자료의 처리에서는 Fig. 3-2의 발파점에서 보듯이 잡음이 심한 9번 채널을 제거하였다. 다음으로 탄성과 신호의 전파과정에서 발생하는 진폭감소를 보정하기 위해 시간에 대한 이득보정 함수 (권병두, 1988; 한상준, 1998)를 사용하였다. 수심변화가 심한 지역에서의 탄성과 자료처리는 수심의 변화에 의해 그 처

리변수가 크게 좌우되는 경우가 많다. 이러한 경우 보다 효율적인 처리를 위해 자주 이용되는 방법은 우선 탄성과 기록자료에 의한 수심 값을 미리 입력하는 방법이다. 즉 전처리 단계에서 미리 수심에 의한 왕복주기를 picking 하는 과정이며, 보통 근거리 트레이스자료를 수층반사파의 rms속도에 맞게 NMO보정한 자료, 즉 중첩도 1인 brute 중합자료를 이용한다. Fig. 3-5에 이 지역의 NMO보정된 근거리 트레이스자료에 대한 수층 왕복주기 picking과정을 표시하였다. 이 수심 자료는 mute, 속도분석, deconvolution 등에 보조자료로 이용된다. 또한 geometry 정보 및 이에 의한 CDP 번호를 자료의 헤더에 입력한 다음, CDP 번호별로 재 분류하여 공심점자료를 얻었다. Fig. 3-6에 mute function 및 NMO보정된 공심점 자료를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 원거리 자료에 의한 이완현상이 심하지 않고 수층 반사파 전에 도달하는 선두파도 없어 외부 mute는 단순히 수층반사이전의 잡음만 제거하는데 그쳤다. 이 때 각 mute function은 수층 왕복 주기값 1403, 1257, 1160, 1053 ms에 대하여 정하였으며, 그 사이의 값은 수심의 변화에 따라 보간하여 사용하였다. 이번 자료처리에서는 또한 파형의 압축을 시도하여 해상도를 높이고자 중합전 디컨벌루션을 적용시켰다. Fig. 3-7은 Fig. 3-3에 나타낸 근거리 트레이스에 필터길이 110ms, 지연 20ms, 그리고 백색잡음 0.5%의 디컨벌루션을 적용시킨 자료이다. 그림을 살펴보면, 약간의 파형압축에 의한 해상도의 향상이 눈에 띄고 있음을 알 수 있다. 앞에서의 mute함수 및 디컨벌루션을 적용시킨 공심점자료를 이용하여 속도분석을 실시하였다. 속도분석은 매 공심점 100 마다 실시하였다. 속도분석을 통해 얻어진 rms 속도를 이용하여 NMO보정을 실시한 다음 중합을 실시하였다.

3.2. 중합후 처리

이번 표준처리에서 중합후에 적용시킨 처리는 이득회수, 디컨벌루션, 시변스케일 등이 있다. 먼저 중합후 후기시간대의 추가적인 이득회수를 위해 확산보정을 실시하였다. 확산보정시 수층 왕복주기의 정보 및 지하속도값이 고려되어 수층 통과 순간부터의 확산에 의한 실제 진폭감소 효과가 보정된다. 그런 다음 수층에 의한 다중반사를 제거하기 위해 수층왕복주기를 지연으로 하는 디컨벌루션을 실시하였다. 이때의 적용변수는 필터길이 120ms, 그리고 백색잡음 0.5% 등이다. 최종도면 출력을 위한 시변스케일은 300 ms 윈도우 AGC (Automatic Gain Control)를 사용하였다. 이와 같은 표준처리 과정을 통한 최종 중합단면은 Fig. 3-8에 나타내었다. Fig. 3-9는 최종 중합자

료를 종합시 사용된 속도함수를 사용하여 구조보정한 구조보정단면이다.

제 4 절 종합전 특수처리

4.1. DMO

습곡 및 단층 등에 의해 반사구조가 복잡하게 중첩되는 탄성과 자료를 처리하기 위해 가장 널리 쓰이는 종합전 특수처리 방법은 DMO (Dip MoveOut) 기법이다. 이는 종합전에 경사면에 대한 효과를 제거하여 종합 및 구조보정시 왜곡을 최소화하는 방법이다 (Yilmaz, 1987). DMO의 일반적인 과정은 Fig. 3-10에 나타내었다. DMO의 첫 번째 과정은 주어진 자료를 먼저 수평반사면 가정에 의한 속도를 이용해 NMO보정을 실시하는 것이다. 이 때 사용되는 속도는 나중의 DMO 과정에서의 부분 구조보정시에도 영향을 미치기 때문에 속도분석을 이용한 정확한 속도를 사용하는 것이 중요하다. 그 다음 본격적인 DMO보정을 수행하게 되는데, DMO보정을 요약하면 NMO보정된 자료를 윗셋거리자료로 재취합한 다음 부분 구조보정 (Yilmaz, 1987)을 실시하는 과정이다. 이 때 계산의 효율을 위하여 공심점 자료에서 부분종합을 실시하여 자료의 양을 줄이는 것이 보통이다. 이러한 부분 종합은 계산시간을 단축시켜 줄 뿐 아니라 DMO의 가장 중요한 과정인 부분 구조보정시 입력자료의 신호대 잡음비를 높게 되어 구조보정의 안정성을 높이는 장점도 가진다. 이러한 공통 윗셋자료에서의 부분 구조보정은 공통윗셋 자료상에서의 경사 반사이벤트를 보정하는 효과를 가진다. 이러한 부분 구조보정 과정을 거친 자료는 역NMO보정을 실시한 다음 다시 공심점 자료로 재분류한다. 바로 이 공심점자료가 반사면의 경사효과가 DMO에 의해 제거된 자료가 된다. 이 공심점자료를 이용하여 속도분석을 실시한 다음 종합하게 된다. DMO를 적용한 종합단면을 Fig. 3-11에 나타내었으며, Fig. 3-12는 이를 구조보정한 단면이다.

4.2. 종합전 구조보정

종합전 구조보정은 공심점 자료의 종합과정을 거치지 않고 종합전에 구조보정을 실시하는 방법이다. 여러 가지 종합전 구조보정 방법 중 여기서 적용한 방법은 적용방법이 비교적 간편한 윗셋영역 구조보정이다. 이 방법은 앞에서 서술한 DMO과정이 상당히 복잡한 반면 간단한 이론에 의한 손쉬운

적용과정이 장점이다. 또한 부가적인 속도보정이 필요없는 반면 중합단면의 결과는 얻을 수 없는 단점이 있다. 때때로 여러 가지 인공적인 잡음이 포함된 구조보정보다는 실제 단면해석시 중합단면을 선호하는 경향이 있음을 생각하면, 이 것은 무시 못할 단점 중 하나이다. 윙셋영역 구조보정법은 주어진 속도정보에 따라 NMO보정을 실시하고 각 윙셋별로 분류하여 중첩도 1인 중합단면을 채널 수만큼 얻게 된다. 이제 각 윙셋별로 구조보정을 실시하게 되는데, 구조보정을 채널수 즉 윙셋 종류 수만큼 실시하게 되어 아주 많은 계산 시간이 소요된다. 계산 시간을 줄이고 윙셋자료의 구조보정시 안정된 연산을 위해 사용될 입력 자료를 대부분 부분 중합하게 된다. 여기서는 계산의 편의를 위해 DMO과정을 거친 공심점자료를 입력자료로 이용하였다. 이제 구해진 공통윙셋 구조보정자료를 중합하게 되면 원하는 최종 구조보정 단면을 얻게된다. Fig. 3-13은 중합전 윙셋별 자료의 구조보정 기법을 이용한 최종 구조보정 단면이다.

이제 다음절에서 표준자료처리, DMO, 공통 윙셋자료 구조보정법 등에 의한 최종 구조보정 단면을 비교해 보고자 한다.

제 5 절 결과 및 토의

표준 자료처리에 의한 구조보정 단면인 Fig. 3-9를 살펴보면 앞에서 언급한 음향기저면 하부에 위층과 평행한 반사이벤트들이 연속적으로 나타나고 있는 것이 보인다. 이러한 이벤트들은 실제 반사이벤트라기 보다는 peg-leg 다중반사 및 coherent 잡음 등의 복합적인 원인에 의한 가상이벤트로 여겨진다. 이 표준 구조보정단면의 발과점 4950부터 5000사이에서 습곡으로 여겨지는 부분의 구조가 제대로 처리되지 못하고 회절된 반사점들의 단편들로 표시되어져 나타나고 있다. 이렇게 표준자료처리에서 왜곡되어 나타나는 이유는 첫째로 습곡에 의한 급격한 반사면의 존재 때문이다. 이러한 급한 경사의 반사면은 공심점 중합의 가정이 어긋나게 되며, 이는 결국 중합단면의 왜곡을 가져오는 것이다. 두 번째로 생각해 볼 수 있는 것은 이 부근에서의 여러 복잡한 구조로 인하여 공심점 상에서 서로 다른 속도를 가진 이벤트가 동시에 존재하는 경우이다. 이러한 모순된 상황은 습곡이나 단층 등이 존재하는 지역에서 흔히 나타나는데 경사에 의한 반사이벤트와 주변 회절점에 의한 반사이벤트가 동시에 존재하게 되는 경우이다. 이 지역은 이러한 두 가지 이유가 복합적으로 작용된 것처럼 여겨진다. 이제 발과점 4950부터 5000

사이의 구조에 집중하여 DMO과정을 통한 구조보정 단면의 결과와 비교해 보고자 한다.

Fig. 3-12의 DMO처리과정을 통한 구조보정 단면을 살펴보면, 표준처리의 Fig. 3-9에 비해 반사이벤트의 연속성에서 향상된 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 먼저 발파점 4950의 다소 완만한 음향기저면 부근을 살펴보면, DMO처리후의 결과단면이 음향기저면의 경계를 훨씬 뚜렷이 보여주고 있으며, 층의 연속성도 나아져 해석에 도움을 주고 있다. DMO처리후의 단면이 보여주듯이 이 부근은 다소 다른 종류의 반사이벤트들이 섞여 있음을 알 수 있다. 발파점 4980 부근의 급한 경사의 습곡 부분을 살펴보면, 역시 연속성이 향상되었으며, 실제 습곡구조에 가깝게 표현되고 있음을 알 수 있다. 그러나 여전히 회절현상이 많이 남아 있는데 이는 급한 경사의 반사면은 DMO를 통해서도 완벽하게 재생 불가능함을 알 수 있다. 이는 DMO 과정에서 적용시키는 부분 구조보정이 거의 직각에 가까운 급한 경사를 제대로 보정시켜 주지 못하는 데 기인하며, NMO보정을 통한 중합과정을 거치는데도 영향이 있다. 이제 Fig. 3-13에 나타낸 공통 윗셋자료의 구조보정된 자료의 중합 단면을 살펴보면, DMO처리 과정을 거친 구조보정 단면인 Fig. 3-12와 거의 같은 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 단지 음향기저면 하부에서 다중반사 이벤트들의 과다 구조보정현상이 다소 감소한 것이 나타날 뿐 실제 자료해석에는 아무 영향을 줄 수 없을 정도로 미약한 차이를 보이고 있다. 이는 계산시간의 단축을 위해 이미 DMO를 거친 자료를 공통 윗셋자료로 이용했기 때문에 거의 같은 결과를 보이고 있는 것으로 생각된다. 또한 이 결과는 DMO처리의 효율성을 입증하는 것이며, Yilmaz (1987)가 언급한 대로 DMO과정을 거친 구조보정단면은 중합전 full-time migration과 같은 개념이라는 말과 상응된 결과이다.

참 고 문 헌

권병두, 민경덕, 서정희, 1988, 응용지구물리학, 성문문화사, 773p.

한상준외, 1994, 한국 대수심해역의 지구적 해저환경연구 (1차년도), 과학기술처,

한상준외, 1998, 동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화연구 (1차년도), 해양수산
부, 657p.

Yimaz, 1987, Seismic data processing, Society of Exploration Geophysicists, 526p.

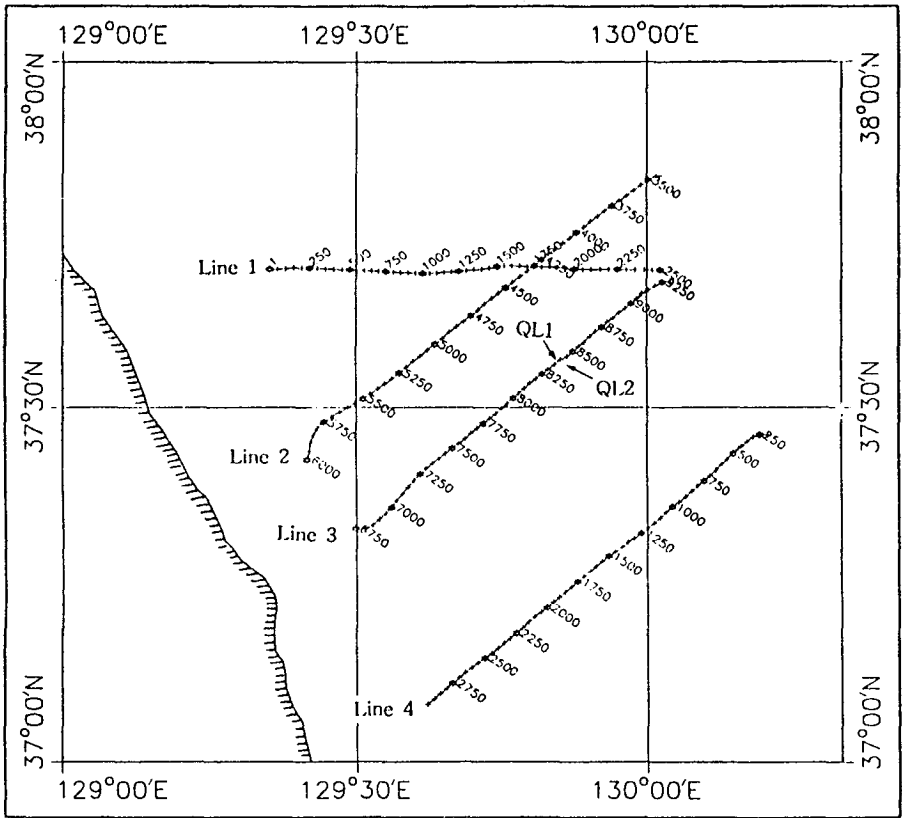


Fig. 3-1. Location map of seismic lines shot for the 1994 BASAPES experiments in the East Sea (한 상준외, 1994)

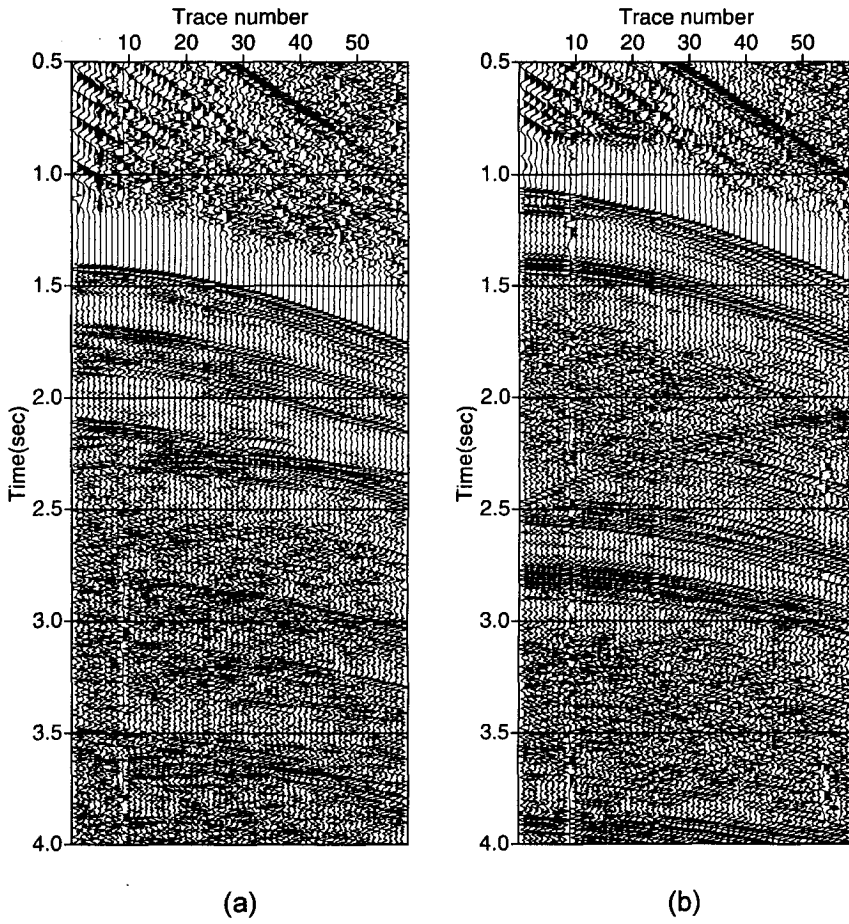


Fig. 3-2. Typical shot gathers of test seismic data at shot point number (a) 4900 and (b) 5200.

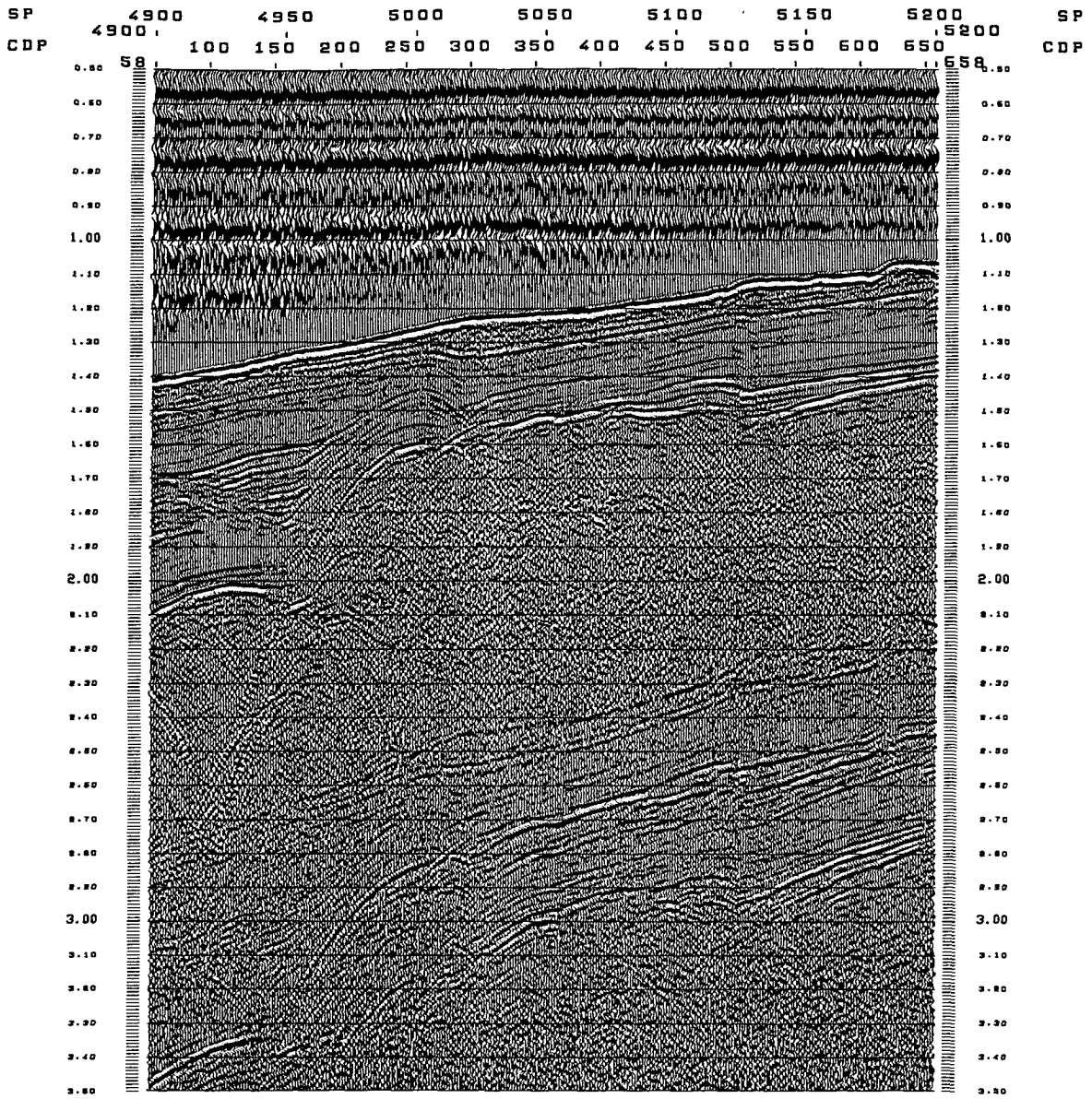


Fig. 3-3. Near trace gather of test seismic data.

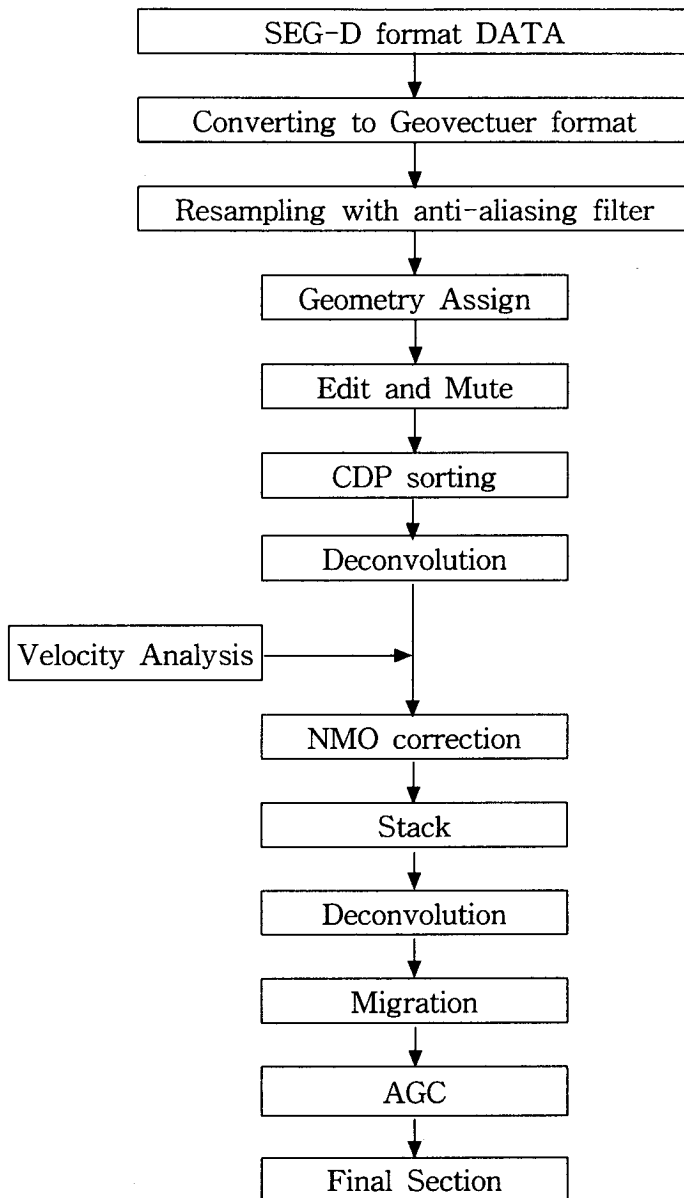


Fig. 3-4. Standard processing sequences for test seismic data.

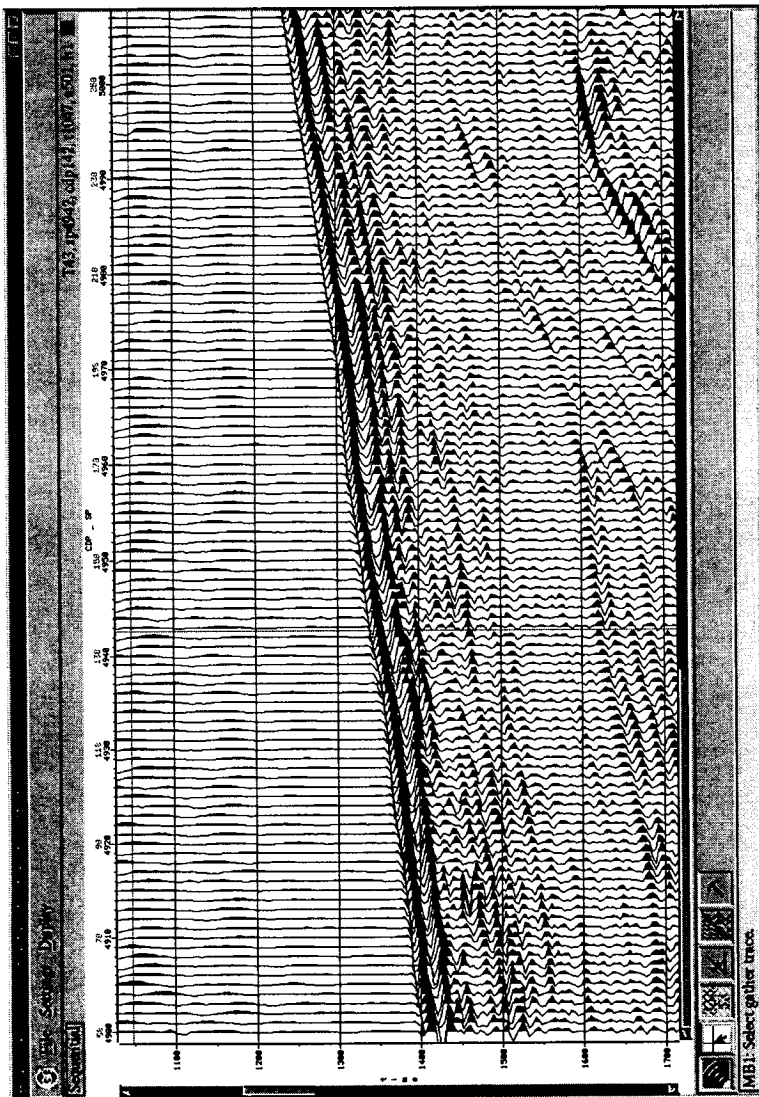
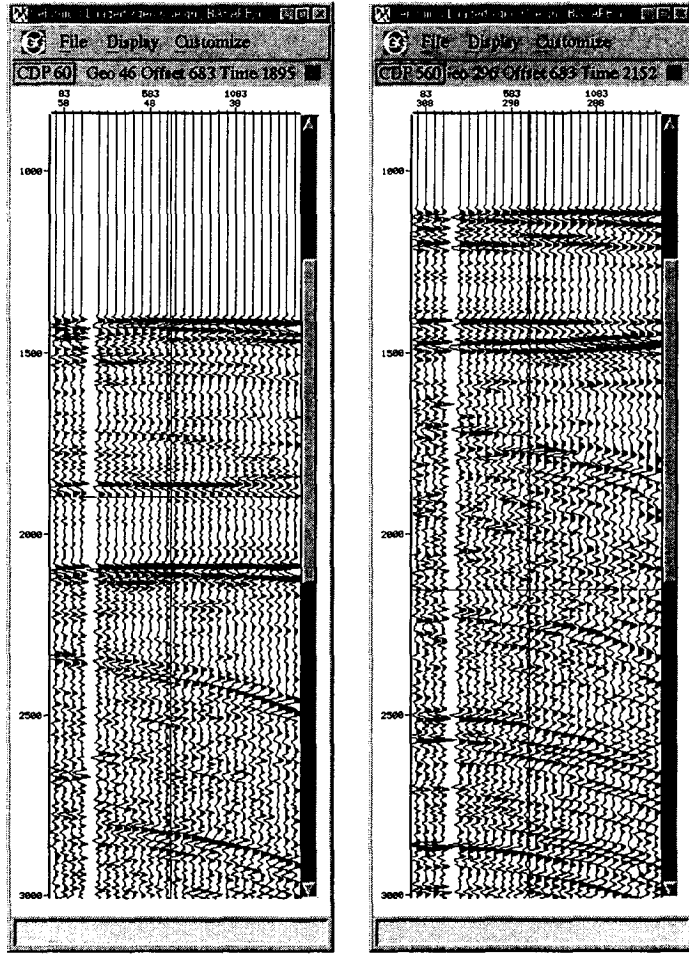


Fig. 3-5. NMO-corrected Near trace plot for picking water bottom. Picked water bottom values are shown by thin lines above water bottom reflections.



(a)

(b)

Fig. 3-6. Typical NMO-corrected CDP (Common Depth Point) gathers at CDP number (a) 60 and (b) 560.

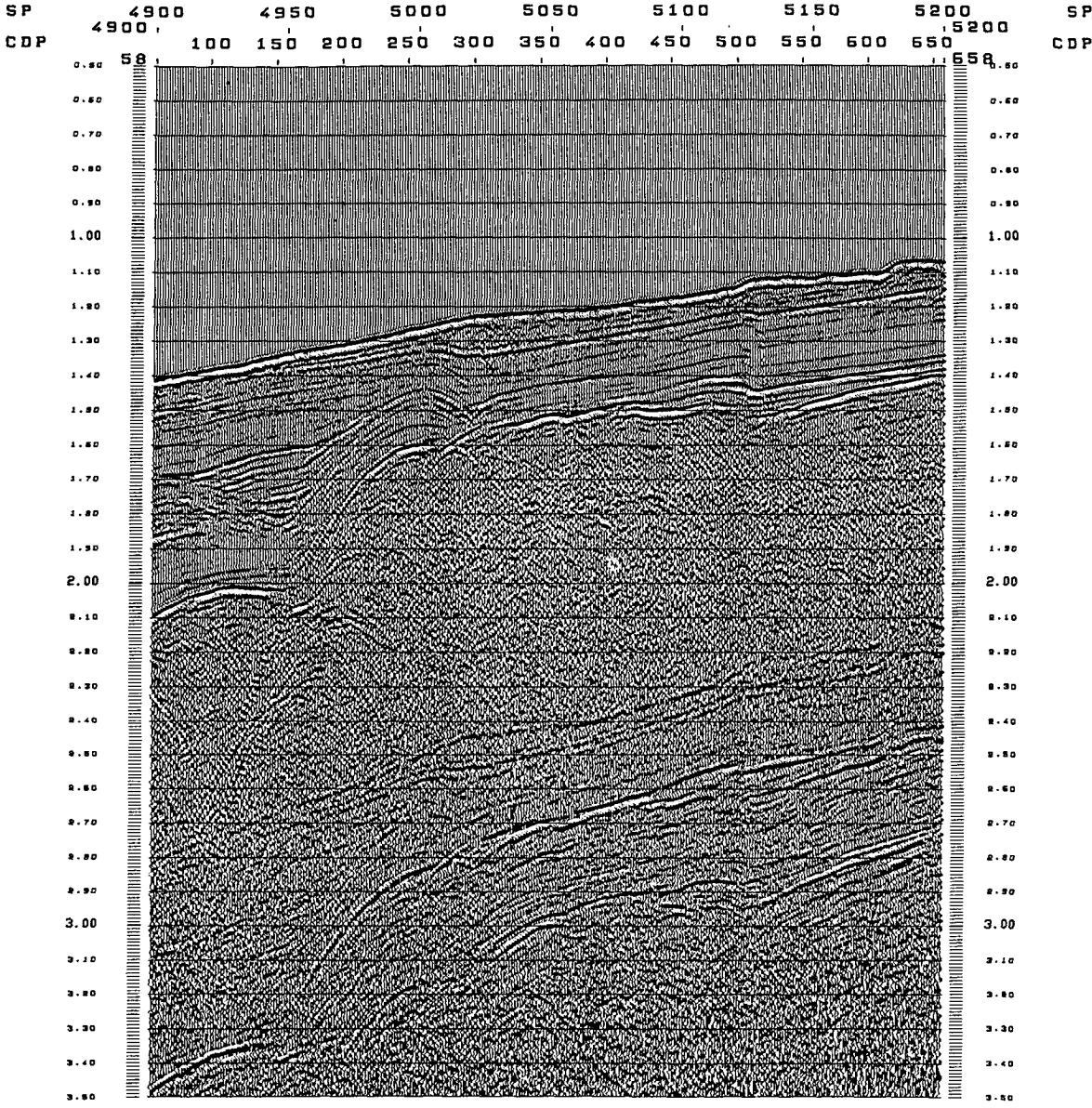


Fig. 3-7. Near trace gather after deconvolution. The deconvolution filter is 110ms long, with 20ms prediction lag and 0.5% whitening noise.

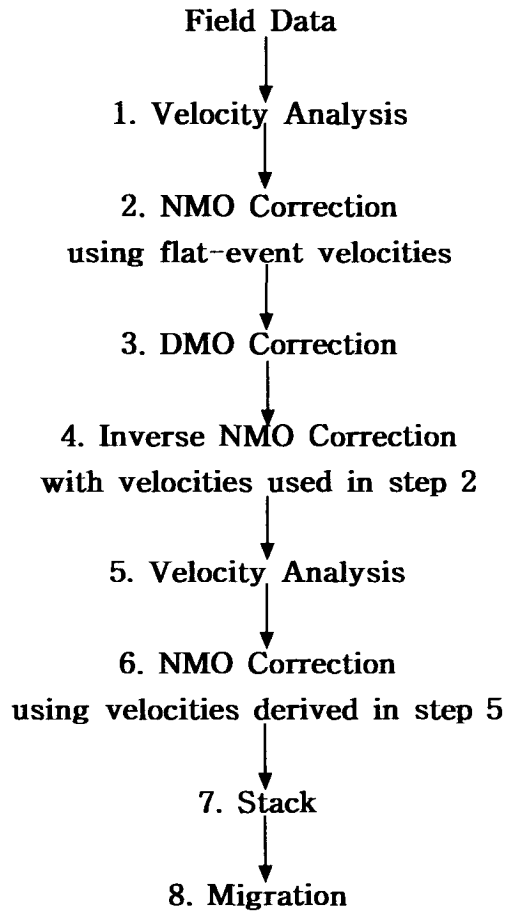


Fig. 3-10. DMO processing flowchart (Yilmaz, 1987)

제 4 장 해저면 지진계 자료 분석

제 1 절 서 론

해저면지진계 (OBS: ocean bottom seismometer)에서 기록되는 탄성파 자료는, 다중채널 탄성파 자료와는 달리 어느 송.수신 거리에 대해 하나뿐인 신호 트레이스만으로 구성되므로 잡음의 감소 혹은 제거에 어려움이 따른다. 일반적으로 지하 수십 km까지의 구조를 파악하기 위해 획득한 OBS자료에는 지하의 경계면에서 반사된 반사파뿐만 아니라 지하 매질의 속도에 해당하는 기울기를 갖는 굴절파가 동시에 존재하며 경우에 따라서는 OBS의 특성상 공명현상 (resonance)을 보이는 잡음이 섞여있기도 한다.

OBS자료의 해석시 단순히 굴절파의 기울기를 측정하여 지하의 구조를 얻었던 과거에는 자료의 잡음이 심각한 문제를 제기하지 않았다. 하지만 각각의 경우 탄성파 속도가, 단순히 몇 개의 대표적인 값으로 정의되는 것이 아니라 깊이에 따라 비교적 연속적으로 증가하며 속도의 증가율 (velocity gradient)이 중요한 변수로 등장함에 따라 자료로부터 속도구조에 관해 가능한 한 많은 정보를 얻을 필요성이 대두되기 시작하였다. 이를 위해서는 잡음을 제거하면서 특정의 속도값을 갖는 위상의 응집도 (coherency)를 향상시키는 필터링 기법이 필요하다. 이 연구에서는 다중채널 탄성파 자료처리에서 사용되는 spectral balancing 방법과 비선형 신호탐지 방법 (nonlinear signal detection)을 구현하여 OBS자료의 질을 향상시키고자 한다.

제 2 절 비선형 신호탐지 필터 (nonlinear signal detection filter)

일반적인 탄성파 자료처리는 선형연산 (linear operations)을 기초로 하는데 그 예는 중합과 컨볼루션 등이 있다. 결과적으로, 탄성파자료의 해석시에는 반사면의 구조적 파악이 수행되는데 이경우에는 자료처리를 통해 신호감지가 이루어졌다고 가정한다. 이러한 선형 자료처리와 달리, 탄성파신호의 잡음을 없애고 일관성있는 신호를 강조하는 데에는 비선형연산방법들이 더욱 효과적일 경우가 많다. Kong et al. (1985)은 유사도 (coherency)를 slant stack과 결합하여 특정의 평면파 속도를 갖는 신호를 강조하고 유사도가 떨어지는 잡음을 없애는 비선형 연산방법을 고안하여 탄성파 신호탐지 (SSD: seismic signal detection)로 명명하였다.

OBS자료에서 우세하게 나타나는 굴절파들은 굴절된 층의 탄성파속도에 상응하는 기울기를 가지고 있으므로 잡음을 줄이고 신호를 보강하는 데에

Kong et al. (1985)의 SSD가 매우 효과적으로 이용될 수 있다.

2.1. SSD (Spatial Signal Detection) 의 방법

SSD의 연산방법은 slant stack을 이용하여 탄성과 기록단면에서 정해지는 slant line들을 따라 유사도를 계산하는 것이다. 이 과정에서 forward 및 backward tau-p변환이 요구되는데 이 변환이 비선형의 연산이다. 이 보고서에서 채용하는 유사도는 Taner and Koehler (1969)가 제시한 것으로 다중채널 탄성과 자료의 속도분석에서 이용되고 있다.

간단한 예로서, N개 트레이스로 이루어진 탄성과자료 $\Phi(x,t)$ 를 생각해 보자. 이 자료는 slant stack (invertible Radon transform)에 의해 slowness와 intercept time ($p-\tau$)의 영역으로 변환될 수 있다. 새로운 독립변수인 slowness p 는 탄성과 기록단면에서 특정한 slant line의 경사에 해당한다. 탄성과 기록단면을 이렇게 $p-\tau$ 영역으로 변환하는 것은 slant stack lines을 따라

$$\Psi(p_i, \tau_j) = \sum_{k=1}^N \Phi(X_k, \tau_j + p_i x_k) \quad (4-1)$$

을 계산하는 것으로 수행된다.

탄성과자료의 유사도 특성은 다음과 같이 $p-\tau$ 영역에서도 나타낼 수 있다.

$$S(p_i, \tau_j) = \frac{\left[\sum_{k=1}^N \Phi(X_k, \tau_j + p_i x_k) \right]^2}{N \sum_{k=1}^N \Phi^2(X_k, \tau_j + p_i x_k)} \quad (4-2)$$

이 유사도값은 smoothing에 의해 안정시킬 수 있다. Taner and Koehler (1969)는 time gate에 대해 (4-2)식의 유사도를 평균화하여 안정성을 얻었다. 이 연구에서도 τ 축을 따라 단순한 running average을 이용하였는데 gate의 길이를 W 라 하면 smooth된 유사도는

$$S'(p_i, \tau_j) = \frac{1}{W} \sum_{k=-W/2}^{W/2} S(p_i, \tau_j + k) \quad (4-3)$$

로서 계산된다. 이 유사도를 $p-\tau$ 자료와 곱하여 깨끗이 정리된 $p-\tau$ 영상

$$\Psi'(p_i, \tau_j) = \Psi(p_i, \tau_j) S'(p_i, \tau_j) \quad (4-4)$$

을 얻게 된다. 다음에 inverse tau-p 변환

$$\Phi'(p_i, \tau_j) \frac{d}{dt} H \sum_{i=1}^{NP} \Psi'(p_i, \tau_j - p_i x_k) \quad (4-5)$$

을 수행함으로써 처리된 x-t 단면을 얻게된다. 여기에서 NP는 p- τ 영역에서 slowness 트레이스의 수이며 H는 Hilbert 변환 연산자이다. Fig.4-1은 다중채널 탄성파자료에서 SSD를 적용한 예이다.

만약 탄성파 자료단면내에 주위와 다른 튀는 잡음이 존재하면 이러한 잡음의 값들은 tau-p변환을 위한 더하기 연산에 영향을 주게 된다. 튀는 잡음의 영향을 없애기 위해 일반적으로 잡음이 존재하는 트레이스들을 골라내어 버리는데 이런 방법은 다중채널 탄성파자료에서는 크게 문제가 되지 않지만 동일한 송.수신 거리에 대해 하나의 트레이스밖에 얻지 못하는 OBS자료에서는 자료의 손실이 심각할 수 있다. 따라서 나쁜 트레이스를 골라내어 버리는 대신 이것들이 tau-p변환시 영향을 최소로 미칠 수 있는 자료처리 방법이 필요하다. 이 연구에서는 튀는 잡음을 효과적으로 억제하기 위해 spectral balancing 방법을 이용하였다.

2.2. Spectral Balancing

탄성파 트레이스들이 전부 같은 스펙트럼을 가지고 있다면 그 스펙트럼이 balance되었다고 정의한다. Spectral balancing은 때때로 디컨볼루션(whitening)과 band-pass filtering을 수행함으로써 얻을 수 있는데 이 처리 결과는 탄성파 자료가, 적용된 band-pass filter의 스펙트럼을 갖는다는 것이다. 여기에서 이용하는 spectral balancing 방법은 처리후 얻는 스펙트럼이 원래 탄성파자료의 스펙트럼의 기하평균이 되도록하는 것 (Tufecic et al., 1981)이다. spectral balancing을 위한 가장 쉬운 방법은 스펙트럼의 산술평균을 구하는 것이지만 기하평균의 특성이 특히 탐성과 자료처리시 더 우수함은 쉽게 짐작할 수 있다. 기하평균이 산술평균보다 우수한 점은 단일채널에서 발생하는 공명잡음이 억제되며 또한 스펙트럼에서 큰 잡음에 의한 영향을 더욱 효과적으로 감소시킬 수 있다는 점이다.

스펙트럼의 기하평균을 이용하는 balancing 방법은 다음과 같다.

$X_k(Z)$ 가 k번째의 탄성과 트레이스이고 $Y_k(Z)$ 가 이것의 balance된 trace라면 가장 간단한 balancing 방법은 다음과 같다:

$$Y_k(Z) = X_k(Z) \frac{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N X_i\left(\frac{1}{Z}\right) X_i(Z) \right]^{1/2}}{\left[X_i\left(\frac{1}{Z}\right) X_i(Z) \right]^{1/2}} \quad (4-6)$$

기하평균을 사용하면 (4-1)식은

$$Y_k(Z) = X_k(Z) \frac{A_k(Z)}{A_{ave}(Z)} \quad (4-7)$$

가 된다. 위의 계산과정은 Fourier 변환을 이용하여 쉽게 수행된다.

시간영역에서 이 과정은 각 탄성과 트레이스를 대칭필터와 컨볼브하는 것에 상응하므로 (4-7)식을 기하평균 스펙트럼의 k번째 prediction error filter $A_k(Z)$ 와 prediction error filter $A_{ave}(Z)$ 를 이용하여 다음과 같이 고칠 수 있다:

$$Y_k(Z) = X_k(Z) \frac{\prod_{i=1}^N |X_i(Z)|^{1/N}}{[X_k(Z)]} \quad (4-8)$$

제 3 절 적용예

1991년 동해의 울릉분지에서 한국해양연구소와 러시아의 IMG&G (Institute of Marine Geology and Geophysics)가 공동으로 심부 탄성파자료를 획득한 바 있다. 이때 60 liter 용량의 에어건을 파원으로 사용하여 2개 축선의 27개 지점에서 전체 약 550 km의 OBS자료를 획득하였다 (Fig.4-2). OBS내에 내장된 아날로그 테이프에 기록된 신호들은 digitize하여 발파점별 트레이스 포맷으로 정리하였다. 기록된 자료의 스펙트럼을 보면 탄성파의 에너지가 대부분 8-10 Hz대역에 집중되어 있으므로 우선 6-12 Hz의 대역필터링을 수행하여 잡음을 제거하고자 하였다. Fig.4-3a는 이 단계까지 거친 후 얻은 OBS-12의 기록단면중 일부이다. 여기에서, 탄성파 에너지가 60 km range이상까지 전파되었으나 송.수신 거리에 따른 진폭감쇠를 보정해주기 위

한 이득의 적용 때문에 먼 거리에서 잡음이 증폭되었음을 볼 수 있다. 또한 일부 트레이스들에서 큰 진폭의 공명잡음이 나타남을 볼 수 있는데 이러한 잡음은 τ -p 변환시 주변의 값들에 영향을 미치게 된다. 따라서 τ -p 변환 전에 이러한 공명잡음을 없애기 위해 spectral balancing을 적용할 필요가 있다. Fig.4-3b는 spectral balancing과 SSD를 거친 후 얻은 Fig.4-3a의 자료이다. 여기에서 유사도가 높은 신호성분이 상당히 강화된 반면 그렇지 않은 잡음은 효과적으로 제거되었으며 공명잡음도 많이 없어졌음을 볼 수 있다.

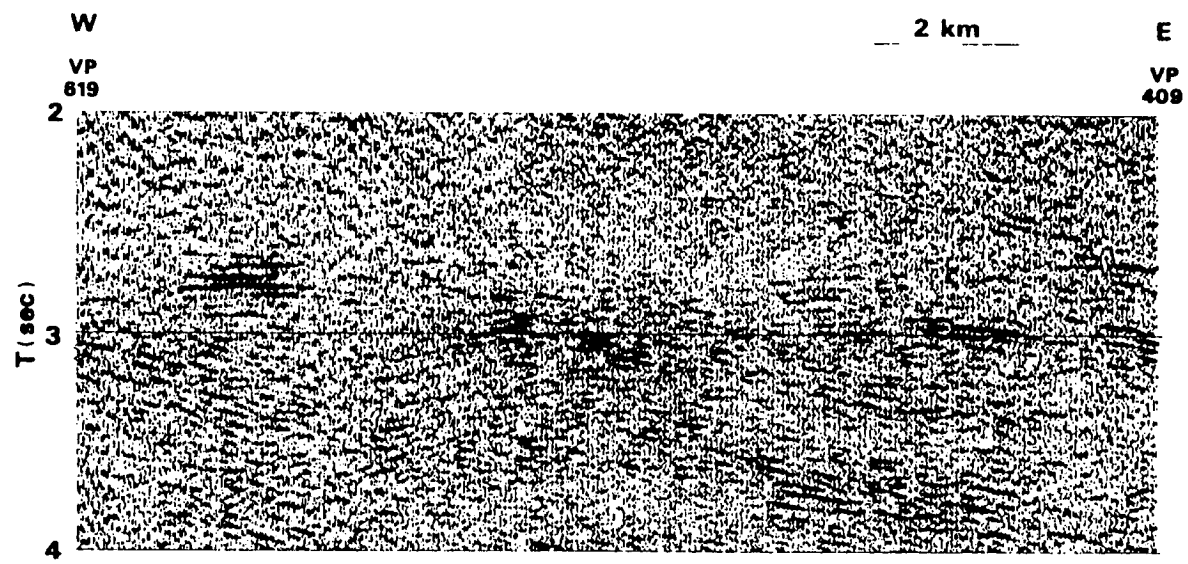
Fig.4-4은 OBS-4, 6, 12, 13, 19, 그리고 22의 기록단면이다. 가까운 range에서는 최초도달파가 확연히 나타나지만 먼 range에서는 도달파들간의 구분이 힘들뿐만 아니라 잡음의 영향이 커서 해석에 어려움이 따름을 짐작할 수 있다. 또한 공명잡음이 우세한 트레이스들이 다수 있어서 이들을 적절하게 제어할 필요가 있다. Fig.4-5는 spectral balancing과 SSD로써 처리한 기록단면들이다. 처리후 기록단면에서 일관된 위상을 갖는 신호성분이 보강된 반면 잡음이 효과적으로 제거되었으며 공명잡음도 상당히 감소되었음을 볼 수 있다. 처리된 자료에서는 심부지각구조의 해석을 위한 탄성과 위상들이 깨끗이 나타나는데 여기에서 P1, P2, 그리고 P3는 각각 퇴적층, 상부지각, 그리고 하부지각에서 굴절되어온 탄성과 위상이며 PmP는 모호면에서 반사되어온 기록이다. 그리고 먼 range에서 나타나는 Pn은 모호면하부의 맨틀에서 굴절되어 온 것들이다.

제 4 절 결 론

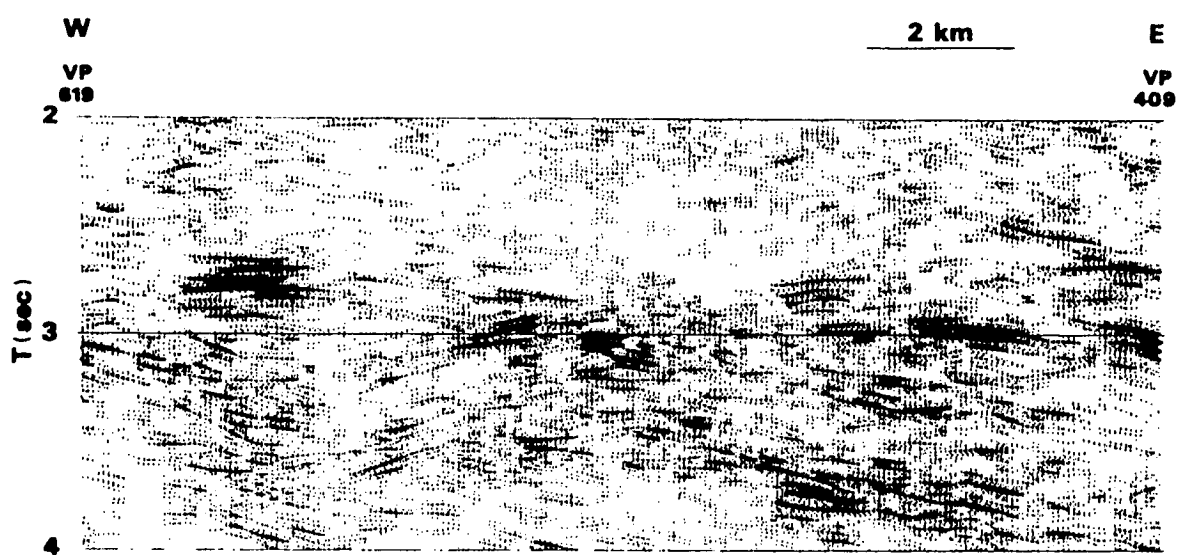
이 연구에서는 해저면지진계자료의 정확한 해석을 위해 기록자료의 잡음을 억제하고 신호를 보강하는 자료처리 기법을 구현하였다. 다중채널 탄성과 자료와는 달리 해저면지진계 자료는 어느 송.수신 거리에 대해 하나의 탄성과 트레이스만 얻으므로 잡음의 제거가 쉽지 않다. 이 연구에서는 다중채널 탄성과자료의 처리시 사용되는 spectral balancing과 SSD (spatial signal detection)를 연속하여 사용함으로써 해저면지진계자료내의 잡음을 효과적으로 없애고 신호성분을 강조시킬 수 있었다.

참 고 문 헌

- Kong, S.M., Phinney, R.A., and Roy-Chowdhury, K., 1985, A nonlinear signal detector for enhancement of noisy seismic record sections: *Geophysics*, v.50, p.539-550.
- Taner, M.T., and Koehler, F., 1969, Velocity spectra-Digital computer derivation and applications of velocity functions: *Geophysics*, v.34, p.859-881.
- Tufekcic, D., Claerbout, J.F., and Rasperic, 1981, Spectral balancing in the time domain: *Geophysics*, v.46, p.1182-1188.



(a)



(b)

Fig. 4-1. Multichannel seismic data (a) before and (b) after SSD (from Kong et al., 1985).

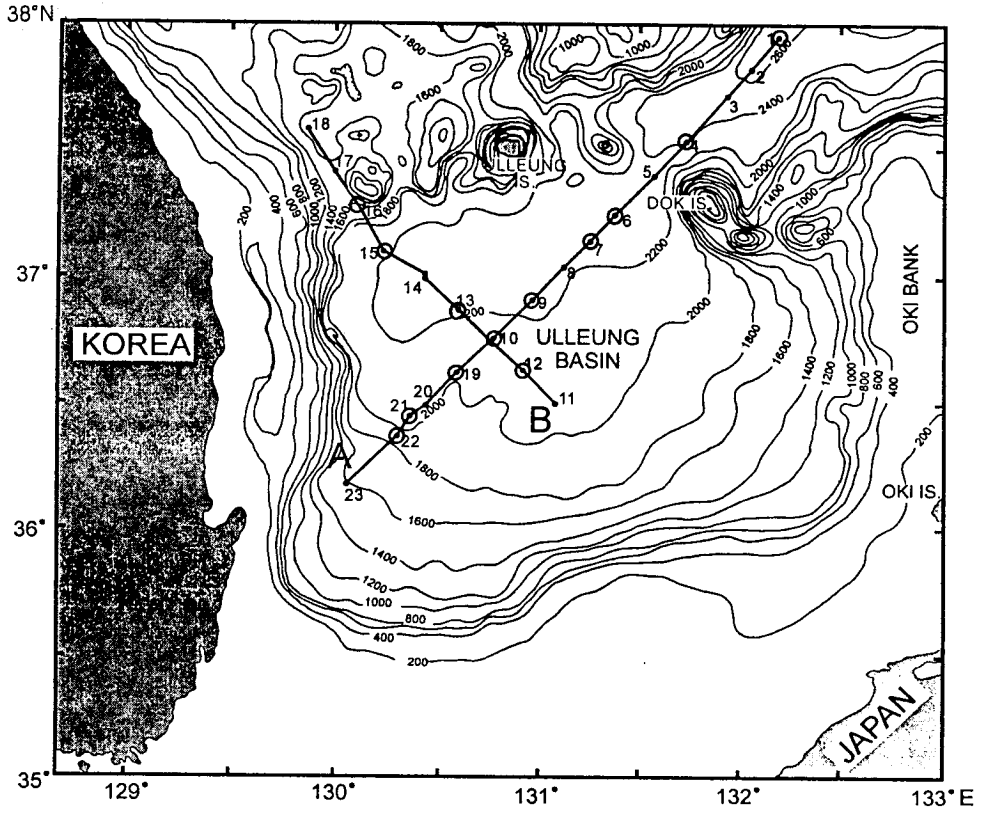


Fig. 4-2. Location map of wide-angle seismic profiles. Circles indicate the OBSs that returned with seismic signals to enable crustal modeling. Bathymetric contour interval is 200 m.

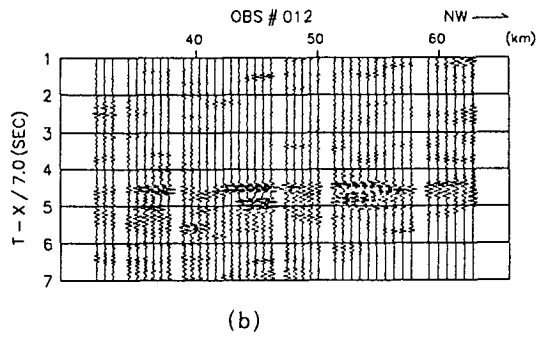
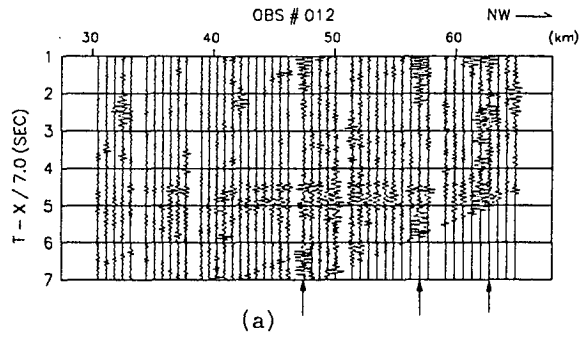
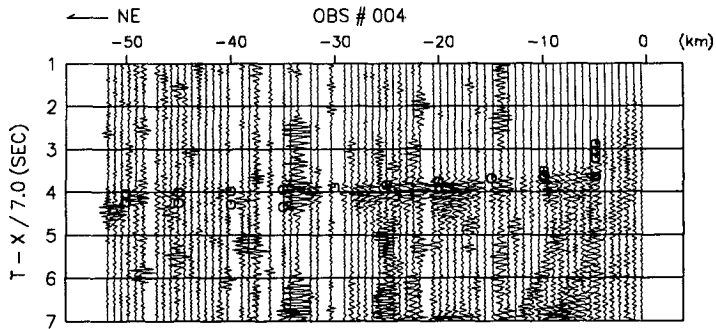
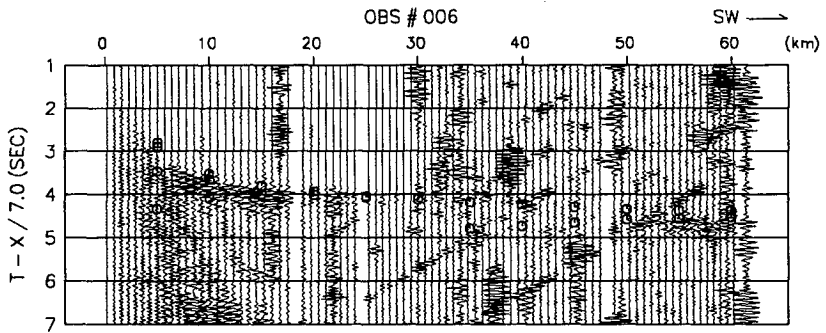


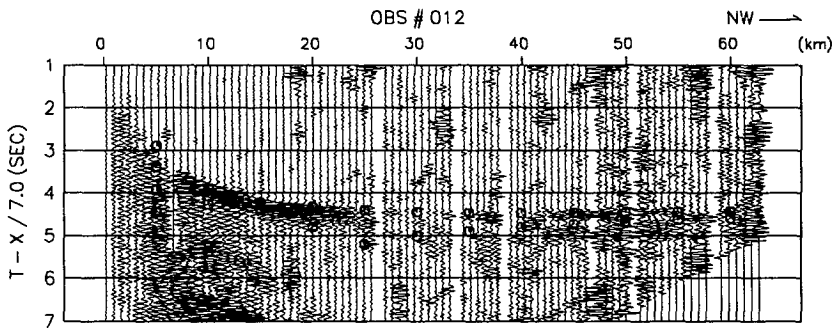
Fig. 4-3. (a) Part of record section of OBS-12. Arrows indicate noisy traces of resonant character. (b) The same section as in Fig.4-3a after spectral balancing and SSD filtering. Note a significant improvement in data quality.



(a)

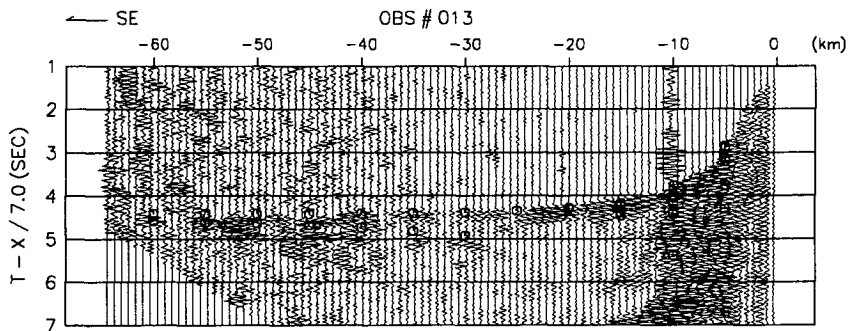


(b)

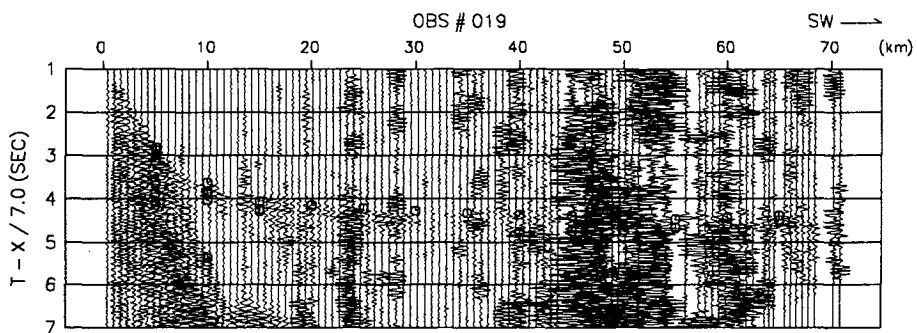


(c)

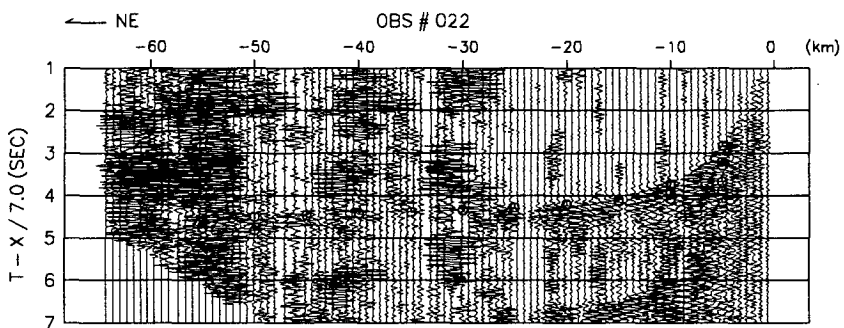
Fig. 4-4. (a)-(f) Record sections of OBS-4, 6, 12, 13, 19 and 22, respectively.



(d)



(e)



(f)

Fig. 4-4. (Cont'd)

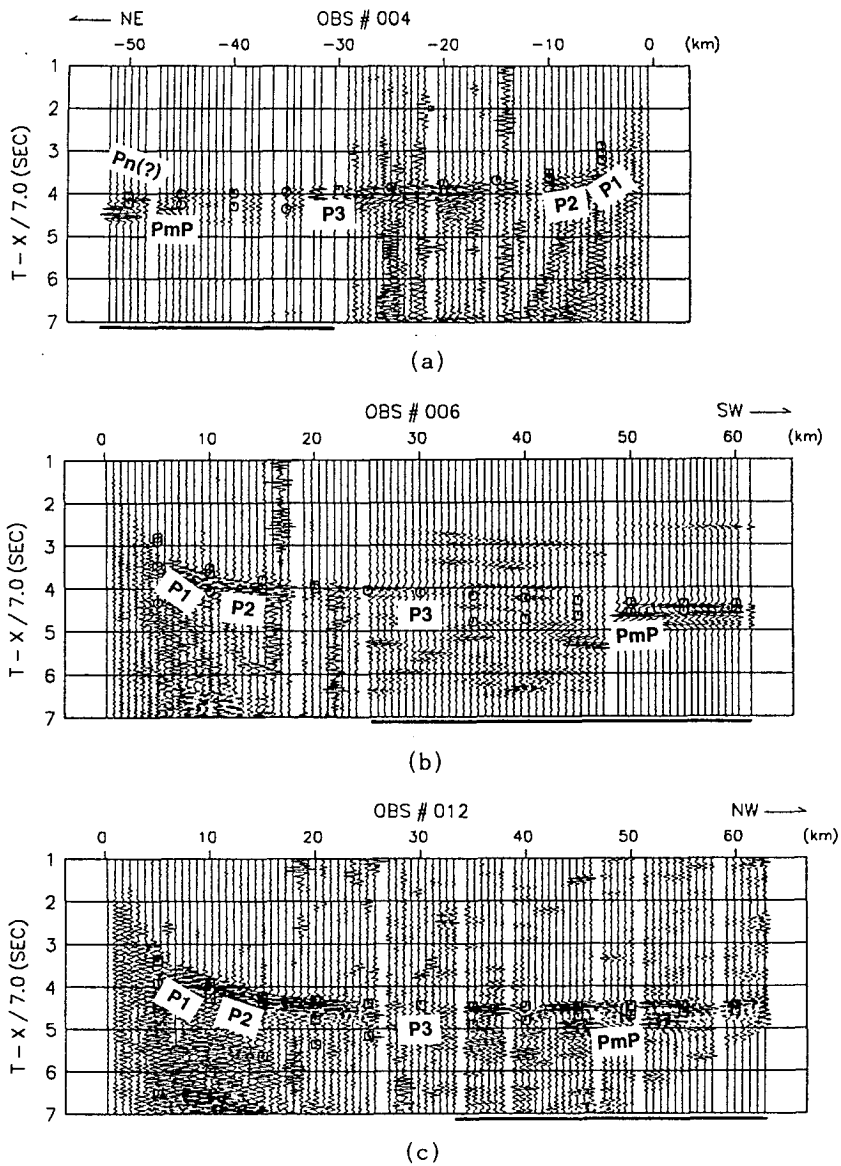
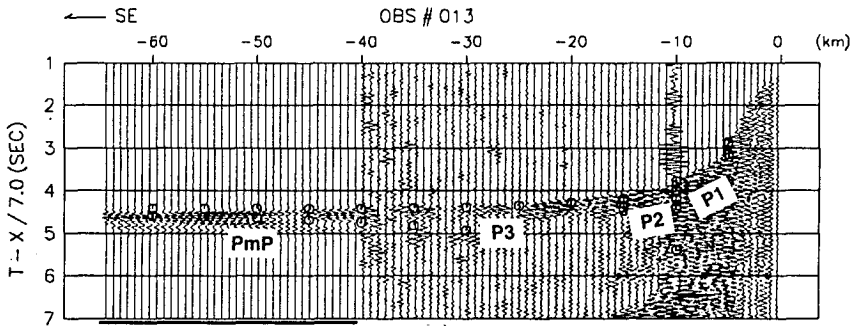
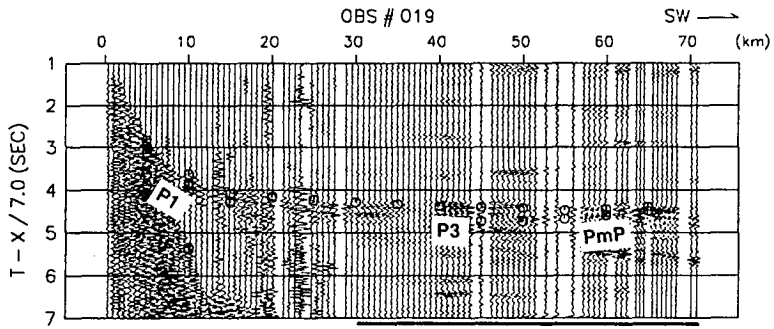


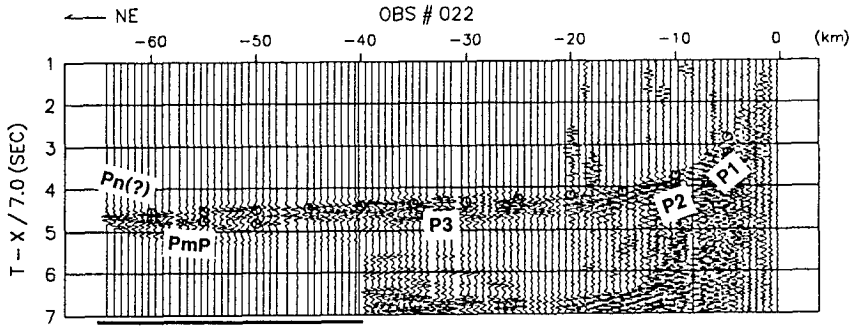
Fig. 4-5. (a)-(f) Record sections in Fig.4-4 after spectral balancing and SSD filtering. Processed data parts are underlined.



(d)



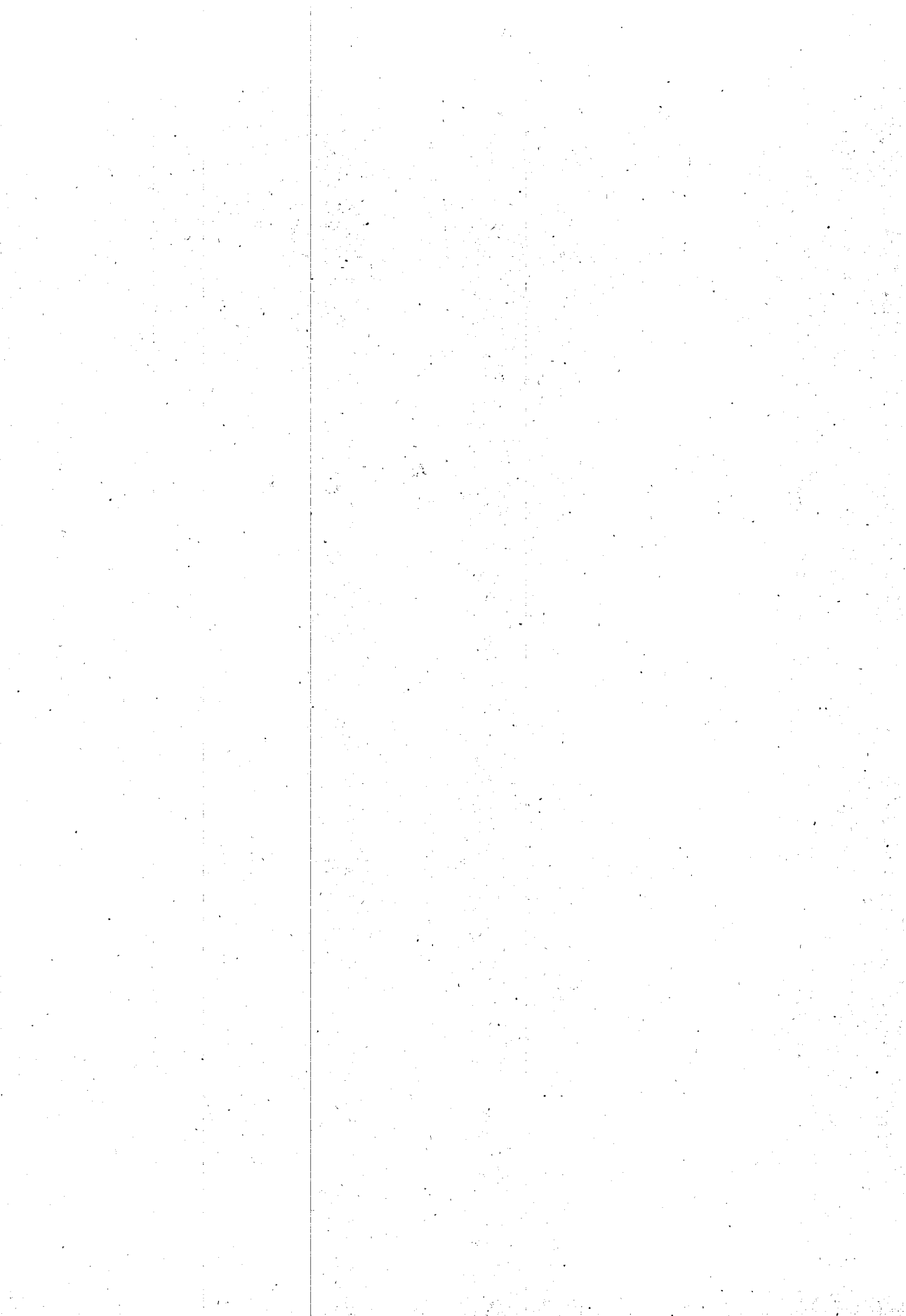
(e)



(f)

Fig. 4-5. (Cont'd)

제 5 장 음원신호분석



제 1 절 서 론

해상에서 탄성과 탐사는 많은 경비와 인원이 투입되므로 사전에 탐사 장비의 설계 특성을 정확히 이해하여 탐사 목적에 맞게 적용하는 것이 자료의 질을 결정하는 중요한 변수가 된다. 탄성과 음원으로 사용하는 슬리브건은 그룹이나 배열로 전개하여 사용하는데 이는 음원의 에너지를 증가시키고 잡음의 원인이 되는 기포를 감쇄시키기 위함이다. 이러한 목적으로 지난 수년간 신뢰성 있는 해상음원을 개발하기 위하여 많은 노력이 이루어졌다. 특히 송이배열구조는 가장 넓게 사용되고 있는데 이는 단순히 음원간격을 최적화하여 기포 진동을 상당히 억제함으로써 보다 나은 신호 파형을 얻기 때문이다. 이러한 음원들의 빔 패턴은 주로 배열길이, 음원간격, 주파수, 용량분포 등에 따라 그 특성이 결정된다. 음원을 배열로 사용할 때에는 건사이의 간섭현상이 문제가 될 때는 건과 건 간격을 멀리 떨어뜨리는 방법을 사용하였으며, Safar (1976a, 1976b) 및 Nooteboom (1978) 등은 간섭이 무시될 수 있는 건 간격을 산출하는 경험식을 구하였다. 그러나 Vaage et al. (1984)은 실제 관측을 통하여 선형 중첩으로 구한 방법이 건 배열의 원거리장 파형과 일치하지 않음을 실험으로 증명한 바 있다. 마찬가지로 Laws (1988)는 간섭현상이 있을 때 파동 방정식의 선형 중첩이 부당함을 주장한 바 있다. 한편 Stranden et al. (1992)은 송이배열의 건 간격을 최적화 하여 기포를 줄이므로써 양호한 신호 파형이 발생됨을 확인하였으며, Stranden and Vaage (1992)는 건 간격을 최적화하고 주신호 진폭, 주신호와 기포 진폭의 비, 기포 주기 등의 주요 인자들과 건 간격과의 관계를 많은 관측을 통하여 밝힌 바 있다.

본 논문에서는 온누리호에 장착된 탄성과 음원들이 음원 간격에 따라 모형 시험을 통하여 구한 빔 패턴 등이 실제 현장 조사에서 획득된 자료를 이용하여 구한 음원특성값과 비교하였다. 그 결과 어떠한 양상을 나타나는지 확인함으로써 그 특성값에 대한 신뢰성을 확인하여 현장탐사에 적용하고자 한다. 또한 모형 시험을 통해 현장조사 목적에 맞게 음원 설계가 되었는지 사전 파형을 예측함으로써, 탐사 효율을 높여 양질의 자료를 획득하고자 한다.

제 2 절 이론

2.1. 해수면 반사파 및 직접파

해수면 아래 H m에 위치한 음원 배열에서 θ , φ 각과 구형 대칭으로 전달되는 음파는 Mikavica et al. (1992)의 배열 이론을 응용하여 표현할 수 있는데, 직접파와 해수면에서 $\tau=2H \cos(\varphi)/c$ 함수식으로 시간 지연된 해수면 반사파의 합성파는 총 빔 패턴 함수로 표현할 수 있다 (유해수, 1996). 총 빔 패턴 $A_{tot}(\theta, \varphi)$ 는

$$\begin{aligned} A_{tot}(\theta, \varphi) &= A_d(\theta, \varphi) + A_r(\theta, \varphi) \\ &= [F_\theta(\theta, \varphi) + F_\theta(\pi - \theta, \varphi)e^{\frac{-j2H\cos\theta}{c}}] \theta_0 + \\ &\quad [F_\varphi(\theta, \varphi) - F_\varphi(\pi - \theta, \varphi)e^{\frac{-j2H\cos\theta}{c}}] \varphi_0 \end{aligned} \quad (5-1)$$

이며, 여기서 $F_{\theta/\varphi}(\theta, \varphi) = f_{\theta/\varphi}(\theta, \varphi)F(\theta, \varphi)$, $F_{\theta/\varphi}(\pi - \theta, \varphi) = f_{\theta/\varphi}(\theta, \varphi)F(\pi - \theta, \varphi)$, c 는 수중음파 속도인 1500 m/sec이다. 이 음원의 빔 패턴은 시간 영역 (time domain)에서 진폭으로 표시되며 주파수 영역 (frequency domain)에서는 위상과 신호 진폭으로 표현된다.

2.2. 자료 획득 변수

1993년 1월 남극의 Drake Passage에서 온누리호에 탑재된 96 채널 탄성파 장비를 이용하여 건 간격에 따른 간섭 효과를 고찰하기 위하여 원거리장파형 자료를 획득하였다. 시험 자료의 위치는 Elephant 섬 북서 방향과 King George 섬 북쪽 방향으로 거의 같은 거리에 위치한 지점에서 획득한 자료중 24 개 발파 자료와 Western Atlas사에서 컴퓨터 모의 과정으로 제작한 8 개 자료를 사용하였다.

Fig.5-1에 까맣게 표시된 부피 2.46 ℓ의 건들을 배열로하여 두 개 혹은 네 개씩 발파하여 기록한 것으로 P1 건과 P2 건, P1 건과 P3 건, P3 건과 S3 건 등을 각각 골라 동시에 발파한 자료를 기록하였다. 각 자료 별로 10 초씩 기록하였으며, 수직 중합을 위하여 같은 작업을 10 회 반복하였다.

2.3. 자료획득 및 처리

배열 특성을 분석하기 위한 자료는 Mikavica et al. (1992)의 배열이론식을 이용하여 빔 패턴을 구하였으며 해수면 반사파의 영향은 식 (5-1)을 적용하였다. 이때 적용된 필터는 온누리호 탄성과 탐사장비에 내장된 고주파 필터인 154Hz를 사용하였다. 자료 처리에 사용된 각 음원들의 가중치 (weighting)는 측정 결과 음원 부피에 따라 주 신호 진폭인 Pa (peak-to-trough amplitude of primary)의 세기가 비례하지 않는다. 따라서 탐사에서 음원 부피에 따라 획득된 자료 중 Pa 값 (유해수, 1996)을 사용하였다. Fig.5-2와 Fig.5-4는 송이배열과 폭배열을 0 ~ -10dB까지 나타낸 3차원 에너지 분포도이다. 이 때 식별이 용이하도록 $\theta(0-180^\circ)$, $\phi(0-270^\circ)$ 부분만 도시하였다.

2.4. 배열 간격에 따른 빔 패턴

빔 패턴은 음원간격과 신호 파장의 비에 의해 많은 영향을 받고 있다. 음원간격에 따라 에너지 손실을 나타내는 부엽의 발생이 최소가 되고 에너지가 집중되어 빔폭이 좁은 이상적인 빔 패턴의 특성변화를 분석하였다. Fig.5-2는 온누리호 좌현에 설치되어 있는 건 배열에서 건 간격에 따라 배열이론을 적용할 때 154 Hz에서 빔폭의 변화를 나타내고 있다. 건 부피가 2.46 ℓ의 동일한 부피를 갖고 있는 송이배열의 P1과 P2 그리고 인접한 P3 건을 대상으로 건 간격이 각각 (a) 0.46 m, (b) 2.44 m, (c) 2.9 m인 경우를 분석하였다. 그 결과는 전반적으로 건 간격에 따라 빔의 형태에 큰 변화는 없으나 건 간격이 가까울수록 빔폭이 넓어져 주신호의 강도 (primary strength)가 약해지는 반면 음원 간격이 멀수록 빔폭이 좁아 주신호의 강도가 증가하는 경향을 나타내고 있는데 Dragoset (1984)는 건 배열 간격이 가까울수록 주신호의 강도가 감소된다는 주장과 서로 잘 부합되고 있다. 건 간격이 비교적 가까운 P12와 P23 건 사이의 경우에는 빔폭이 크게 변하지 않으나 건 간격이 2.9 m인 P13 건 사이에서는 급격히 좁아지는 양상을 나타낸다. 이러한 양상에 대해 좀 더 정확한 빔폭의 변화를 확인하기 위하여 일정 간격에서 배열 이론을 이용한 모형 시험 결과를 Fig.5-3에 도시하였다.

굵은 실선은 온누리호에 설치된 2.46 ℓ 송이배열 건의 빔폭을 나타내며 점선은 2.46 ℓ 건이 1 m 간격으로 일정하게 변할 때의 빔폭을 나타낸다. 건 간격이 2.43 m 까지는 빔폭의 변화가 없으나 그 이상에서는 급격히 좁아지

는 양상을 나타내고 있다. Fig.5-4는 폭배열에 대해 Fig.5-2에 적용한 건 간격과 마찬가지로 건 부피가 2.46 ℓ 인 P1과 S1, P2와 S2 그리고 인접한 P3과 S3 등 4 개 건을 P12와 S12, P23과 S23, P13과 S13 등을 조합해서 분석하였다. 그 분석 결과 송이배열과 폭배열은 동일한 건 부피와 간격에서는 빔폭 변화가 일치하고 있음을 나타내고 있다. 따라서 기포에 의한 영향보다 주 신호의 강도만을 고려할 경우 가능한 건 간격을 멀리하는 것이 빔폭이 좁고 양호한 파형을 얻을 수 있다.

2.5. 선형 간섭

건사이의 간섭은 건 간격이 무한대일 때 완전히 사라지나, 건 배열 설계시 현실적으로 건 간격을 무한대로 하기는 불가능하다. 따라서 실질적으로 선형 간섭이 무시될 수 있는 건 간격 D_s 에 관한 많은 연구가 수행되었으며, 대표적인 경험식으로는 Safar (1976b)가 구한 식

$$D_s = 6.2 V^{1/3} (P_i/P_o)^{1/3.23} \quad (5-2)$$

와 Nooteboom (1978)의 경험식

$$D_s = 5.1 V^{1/3} (P_i/P_o)^{1/3} \quad (5-3)$$

등이 있다. 여기서 V , P_i , P_o , D_r 은 각각 건 내부 부피, 건 내부 압력, 건 외부 압력 (수압), 건 내부 직경을 뜻한다. 식 (5-2)와 (5-3)만을 이용하여 건사이의 선형 간섭이 무시될 수 있는 거리를 구하였다. 온누리호에 설치된 준배열상의 건을 대상으로 구한 D_s 값을 건 부피 별로 Table 5-1에 나타내었다. 각 건의 평형 반경 R_e 는 Avogadro의 이상 기체에 관한 식을 변형하여 구한

$$R_e = \left(\frac{3VP_iT_o}{4\pi P_oT_i} \right)^{1/3} \quad (5-4)$$

를 이용하여 구하였다. 여기서 V , P_o , P_i , T_o , T_i 는 각각 건 부피, 건 깊이에 따른 수압, 건 내부 압력, 수온, 건 내부 온도를 뜻한다. 서로 이웃하는

두 건 사이의 간격 D_g 와 두 건의 평균 평형 반경 \bar{r} 의 비는 건 간격 0.46 m의 2.46 ℓ 건 2 개로 구성되어 있는 송이배열를 제외한 대부분의 건들의 경우, 6.5~8.5 사이의 값을 갖는다 (김기영, 1993b). 이는 식 (5-2) 및 (5-3)을 이용하여 구한 선형 간섭이 무시될 수 있는 최소 거리와 평형 반경의 비 D_s/Re 가 각각 10.23과 9.35인 점을 고려할 때, 선형 간섭의 범위에 위치하도록 설계되어 있음을 알 수 있다. 그러나 건 간격 0.46 m의 2.46 ℓ 건 2 개로 구성되어 있는 송이배열를 제외한 대부분의 건들은 선형 간섭이 그리 크지 않은 거리에 위치하고 있어 그 간섭 효과는 다소 미약할 것으로 판단된다. 이러한 은누리호의 건 배열은 제한된 공간에서 주신호 진폭을 최대한으로 유지하면서, 동시에 건 부피에 따른 기포 주기의 상이성을 이용한 기포 진폭을 억제하도록 고안되어 있음을 알 수 있다.

2.6. 최적 음원 간격

Fig.5-5는 남극 Drake Passage에서 건 깊이 6.5 m, 건 내부 압력 11.8 MPa 에서 2.46 ℓ 건이 선형간섭을 일어날 때 원거리장 파형 자료를 획득하였으며 자세한 변수는 Table 5-2에 수록하였다. 이것은 Fig.5-1의 P1 건과 P2 건, P1 건과 P3 건, P3 건과 S3 건을 동시에 발파한 자료이며, 이 때 건 간격은 각각 0.46, 2.90 7.0 m이다. 전체적으로 건 간격이 증가할수록 주신호 진폭인 P_a 는 따라 증가하며, 건 간격이 0.46 m인 송이배열 건의 P_a 값은 Stranden and Vaage (1992)의 관측치와 비교적 잘 일치한다 (김기영, 1993b). 건 간격이 증가할수록 기포 에너지가 강하게 증가하는 사실은 Fig.5-5의 정성적인 관찰에서도 알 수 있다. 특히 2.46 ℓ 건들이 건 간격에 따라 선형간섭을 일으키지 않고 주신호 진폭이 증가되어 빔폭이 좁아질 때 구한 이론값이 Safar (1976b)는 3.126 m이며 Nooteboom (1978)은 2.857 m로 배열 이론에 의해 구한 2.43 m와 비교하면 Nooteboom (1978)의 식이 더 근접하게 접근한다. 따라서 Fig.5-5에서 건 간격이 2.9 m 이하되는 P1, P2는 선형간섭을 일으키는 간격 범위 내에 있어 주신호 진폭 증가가 미약하나 건 간격이 7 m에서는 급격히 증가하는 양상을 나타낸다. 물론 P3와 S3는 폭배열에 속하나 단일건으로 테스트 자료를 획득할 경우에는 간격이 큰 송이배열에 속하게 된다. 또한 예상한 것보다 P_a 값이 크게 나타나는데, 이는 건에서 공기가 배출되는 방향과 건이 놓인 상대적인 위치도 다른 여러 요인들과 함께 주요 원인이 될 것으로 생각된다. 슬리브건은 공기 배출구가 360° 열리므로 방향성(directionality)이 다른 에어건에 비하여 매우 우수하여 건 대칭

축의 수직 방향으로 원형에 가까운 운동을 하는 것으로 보고된 바 있다 (Harrison and Giacomia, 1984). 그러나 기포의 운동이 건 대칭축 방향으로는 상대적으로 미약하므로, 온누리호 준배열의 경우와 같이 건 대칭축이 탐사축 선과 수직으로 놓여 있을 때는 건에서 발생하는 기포가 동일한 준배열상의 다른 건에 미치는 간섭이 큰 반면에, 건 대칭축 방향에 위치하는 다른 준배열상의 건에 미치는 간섭 효과는 상대적으로 작게 된다. 따라서 건 대칭축이 일직선상에 놓인 P3 건과 S3 건의 경우는 탐사 축선 방향으로 놓인 동일한 준배열의 경우보다 그 간섭 효과가 적게 되며, Pa 값이 상대적으로 크게 나타나게 된다.

제 3 절 배열 특성 분석

3.1. 배열 효과

송이 및 길이 배열에서 음원 간격이 ΔL 일 때 효율이 최대가 되는 것 즉, 빔폭이 좁고 power가 커지는 조건은 $\Delta L = \lambda/2$ 로 표시되며 (Johnson and Dudgeon, 1993) 배열 전체 길이에 대한 효율이 최대가 되는 주파수는 각각 1630Hz와 69Hz 이내이다 (유해수, 1996). 이때 길이 배열에서 이웃하는 음원에 대한 최대 효율 주파수 범위는 파장 λ 와 주파수 f 에 대해서 각각 0.92-21.64m, 352-1630Hz에 속하는 광대역 주파수이다.

폭배열인 경우 빔의 양상이 주파수별로 양호한 특성을 가지려면 준배열 간격은 $\lambda/2$ 이상 되어야 한다 (김정기, 1994). 따라서 온누리호 좌현 및 우현의 준배열 간격이 7m으로 배열 효과를 얻는 시점 즉, 부엽이 나타나지 않는 시점의 주파수가 108 Hz 미만이 되어야 한다. 일반적으로 폭배열에서 배열 길이와 준배열 간격은 같게 사용된다 (Parkes and Hatton, 1986). 따라서 현재 배열길이가 10.82 m, 준배열간격이 7m 로 탐사 자료 획득 시에는 가능한 준배열 간격을 지금보다 3.82m 더 넓게 사용되어야 할 것으로 생각된다. 이것은 폭배열 중앙 $\lambda/2$ 지점에서 음파 강도가 최대가 되며 MRA (main response axis)가 형성되는데 이때부터 빔 모양의 양호한 빔 패턴을 형성하기 때문이다.

3.2. 송이배열 특성

송이배열은 방위각 φ 가 0° 이며 공간적인 연장이 기본적으로 in-line ($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$) 평면으로 구성된다 (Fig.5-1 참조). 적용된 가중치는 동일한 진폭 분포로써 정규화 (normalization) 시킨 수치이며 전형적 송이배열인 Fig.5-2에서 빔폭은 179.5로 넓게 생성되어 탄성과 탐사에 필요한 좁은 빔폭이 생성되지는 않는다. 따라서 빔폭이 전반적으로 매우 넓어 방향성의 효과가 크게 기대 되지는 않는다.

3.3. 폭배열 특성

일반적으로 폭배열 전개 방법은 가로 및 세로 길이가 같은 폭으로 설계 (Parkes and Hatton, 1986)를 하는 것이 보통이나 온누리호 경우에는 설계 특성상 제한된 길이 $7\text{m} \times 10.82\text{m}$ 에 16개 건으로 구성된다. 에너지 진폭이 이산 분포를 갖는 폭배열의 빔 패턴을 나타내는 Fig.5-4에서 폭배열의 빔폭 특성은 고주파로 갈수록 빔폭이 지수함수 형태로 감쇄하는 양상을 보여 저주파수대에서 빔폭이 급격히 좁아져 저주파수대 심부지층 탄성과 탐사에 적합한 것으로 분석된다 (유해수, 1996).

제 4 절 원거리장 파형 분석

컴퓨터 모의 제작 자료는 Western Atlas사에서 제공된 자료로서 건 깊이가 5 m이며 샘플 율이 1 ms 일 때 계산된 경우의 원거리장 파형을 나타낸다. 이때 원거리장 파형은 모서리 주파수 (corner frequency)가 256 Hz인 역알리아싱 필터를 적용하였다. 시간 영역에서의 건 특성에 대한 주요 변수들을 Fig.5-6에 도식적으로 설명한 Pa (peak-to-trough amplitude of primary), Tb (primary-to-bubble period), Pb (peak-to-trough amplitude of bubble), Pa/Bb (primary-to-bubble ratio), Pd (zero-to trough pulse amplitude), -Pd (negative zero-to trough pulse amplitude), Pbd (zero-to trough amplitude of bubble), -Pbd (negative zero-to trough amplitude of bubble), P2bd (2nd zero-to trough amplitude of bubble), -P2bd (2nd negative zero-to trough amplitude of bubble), P3b (3rd peak-to-trough amplitude of bubble), P3bd (3rd zero-to trough amplitude of bubble), -P3bd (3rd negative zero-to trough amplitude of bubble) 등을 채택하였다.

Fig.5-7은 컴퓨터 모의 자료인 원거리장 파형을 나타내며 건의 부피가 각각 0.16 l (10 in³), 0.33 l (20 in³), 0.66 l (40 in³), 1.15 l (70 in³), 1.64 l (100 in³), 2.46 l (150 in³), 4.92 l (300 in³), 11.31 l (690 in³), 22.61 l (1380 in³)인 경우에 상기 변수에 따른 변화양상을 나타내었다. 단위는 가로축이 건부피에 따라 자연로그를 취한 값이며 세로축은 bar-meter이다. 근사치로 최소자승법으로 피팅한 도표에서 다음과 같은 일반적인 특징을 발견할 수 있다. 첫째, 건 부피가 증가할수록 V1/3, Pb, P2b, P3b, Tb, Pb/P2b도 직선 형태로 증가하고, 둘째, -Pd, -Pbd, -P3bd, Pb/P3b는 음의 직선 방향으로 감소한다. 셋째, Pd, Pa, Pa/Pb, Pa/P2b, Pa/P3b는 지수함수 형태로 증가하며, 넷째, -P2b만이 유일하게 포물선 형태로 변하는 특색을 갖는다.

제 5 절 결 론

본 논문에서는 음원간격에 따라 배열 이론 적용시 빔 패턴 변화와 남극해에서 획득한 탐사 자료를 이용하여 온누리호 슬리브건들의 배열특성을 연구하였다. 각 각에 대한 결과를 서로 비교하여 분석값에 대한 신뢰성을 높였으며 주요 분석 결과는 다음과 같다.

1. 배열 이론을 이용한 빔의 형태는 건 간격에 따라 큰 변화는 없으나 간격이 넓어질수록 빔폭이 좁아지는 경향을 갖는다.
2. 송이배열에서 건 간격이 2.43 m 미만은 빔폭의 변화가 없으나 그 이상에서는 급격히 빔폭이 좁아지는 양호한 상태를 나타낸다.
3. 송이배열의 2.46 l 건들이 선형 간섭을 일으키지 않고 주신호 진폭이 증가되어 빔폭이 좁아질 때의 건 간격을 구하는 함수식은 Safar (1976b) 보다는 Nooteboom (1984)의 이론식이 배열 이론과 잘 부합된다.
4. 길이 및 폭배열은 동일한 건 부피와 간격에서는 빔폭 변화가 일치한다. 따라서 기포에 의한 영향을 고려하지 않을 경우 가능한 건 간격을 멀리하는 것이 빔폭이 좁은 양호한 파형을 얻을 수 있다.
5. 남극해 탐사 자료에서 건 간격이 증가됨에 따라 기포 에너지가 상당히 강하게 증가하는 반면, 주신호 진폭이 약간 증가하는 양상을 보이며 이것은 빔 패턴 변화와 잘 일치하고 있는데 빔 패턴에서는 주신호 뿐만 아니라 기포도 같은 에너지로 보기 때문이다.

6. 컴퓨터 모의제작 자료인 원거리장파형의 변수 별 변화는 건 부피가 증가할수록 $V1/3$, Pb , $P2b$, $P3b$, Tb , $Pb/P2b$ 는 직선 형태로 증가하는 반면에 $-Pd$, $-Pbd$, $-P3bd$, $Pb/P3b$ 는 반대로 감소한다. Pd , Pa , Pa/Pb , $Pa/P2b$, $Pa/P3b$ 는 지수함수 형태로 증가하며 $-P2b$ 는 유일하게 포물선 형태로 변하는 특색을 갖는다.

참 고 문 헌

- 김기영, 유해수, 주형태, 김예동, 1993b, 해저면 반사파를 이용한 슬리브건의 원거리 장 파형 분석 연구 (II) -여러개의 슬리브건을 동시에 발파한 경우-: 한국자원공학회지, v.30, No. 5, p.430-438.
- 김정기, 1994, 방송 안테나와 전파·전파: 우신출판사, p.135.
- 우만식, 1995, 안테나 공학: 크라운 출판사, p.119.
- 유해수, 1995, 다중채널 반사파 탐사를 위한 획득장비 특성분석 및 야외변수 최적화 연구: 박사논문, p.188.
- 유해수, 양승진, 1996, 해양탄성과 탐사에서 슬리브건 배열의 방향특성: 한국해양학회지, v.15, No.1.
- Dragoset, B., 1984, Seismic data processing technical papers, A Comprehensive method for evaluating the design of airguns and airgun arrays: Western Research.
- Harrison, E.R., and Giacomini, L. M., 1984, A new generation airgun: Presented at the 54th annual intl. mtg. of SEG, Atlanta, Georgia, U. S. A.
- Johnson, D. H., and Dudgeon, D. E., 1993, Array signal processing, Concepts and Techniques: PTR Prentice-Hall, Inc, p.84-106.
- Laws, R. M., Parkes, G., and Hatton, L., 1988, Energy-interaction: The long-range interaction of seismic sources: Geophysical Prospecting, v.36, p.333-348.
- Mikavica, M., and Nestic, A., 1992, CAD for linear and planar antenna arrays of various radiating elements: Artech house, INC., p.160.
- Nooteboom, J. J., 1978, Signature and amplitude of linear airgun arrays: Geophysical prospecting, v.26, p.194-201.
- Parkes, G. E., and Hatton, L., 1986, The marine seismic source: D. Reidel Publishing Co, p.114.
- Safar, M. H., 1976a, The radiation of acoustic waves from an air-gun: Geophysical Prospecting, v.24, p.756-772.
- Safar, M. H., 1976b, Efficient design of air-gun arrays: Geophysical Prospecting, v.24, p.773-787.
- Strandenes, S., and Vaage S., 1992, Signatures from clustered airguns: First break, v.8, p.306-312.
- Vaage, S., Ursin, B., and Haugland, K., 1984, Interaction between airguns: Geophysical Prospecting, v.32, p.676-689.

Table 5-1. Equilibrium radii and minimum separation distances for linear interaction of sleeve-guns on the R/V Onnuri.

V (ℓ)	Re (m)	D _g (m)	$D_g/\overline{R_e}$	Safar's D _s (D _s /Re=10.23) (m)	Nooteboom's D _s (D _s /Re=9.35) (m)
0.16	0.124			1.267	1.158
		0.92	6.57		
0.33	0.156			1.597	1.460
		1.22	6.91		
0.66	0.197			2.012	1.839
		1.52	7.00		
1.15	0.237			2.424	2.216
		2.13	8.45		
1.64	0.267			2.730	2.496
		2.13	7.43		
2.46	0.306			3.126	2.857
		2.44	7.97		
2.46	0.306			3.126	2.857
		0.46	1.50		
2.46	0.306			3.126	2.857

Table 5-2. Acquisition parameters employed for the far-field signature test.

Description	Antarctic survey (1993)
Location	Drake Passage
Survey vessel	R/V Onnuri (1442 ton)
Recording Instrument	SN358/DMX
Recording Polarity	SEG Normal
Digital Tape Format	SEG-D 8015, 6250 BPI
Record Length	10 sec
Sampling Interval	2 msec
Energy Source	22.61 l (1380 in ³) tuned sleeve-gun array operating at 13.3 MPa (1929 psi) and 11. MPa (1711 psi)
Gun Number	16
Shot Delay	50 msec
Source Depth	6.5 m
Streamer Length	2400 m
Number of Groups	96
Group Interval	25 m

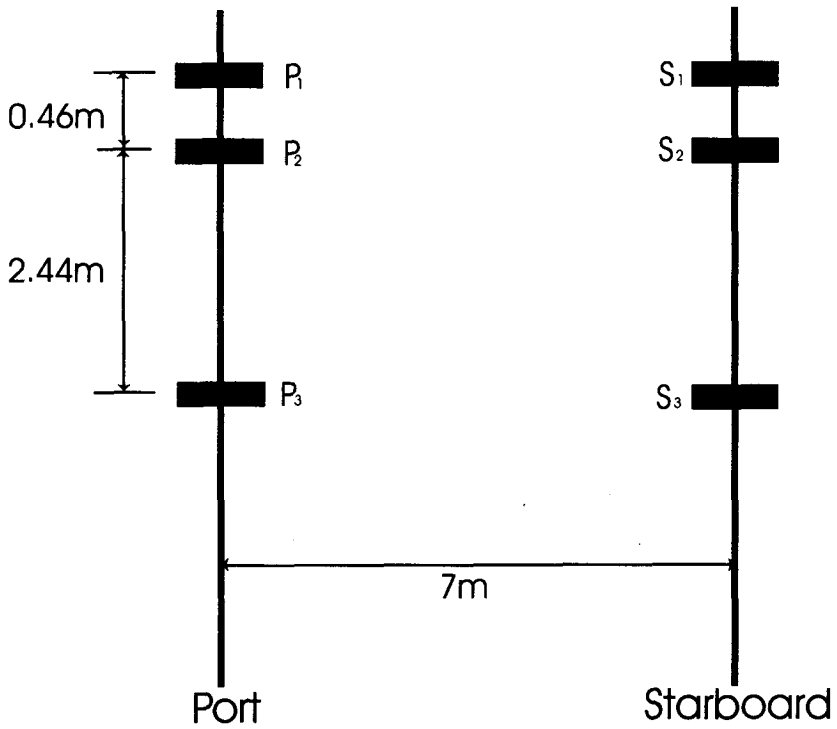


Fig. 5-1. Configuration of the source array on the R/V Onnuri. The array is composed of two identical sub-arrays, each with 3 x 150 in³ sleeve-guns.

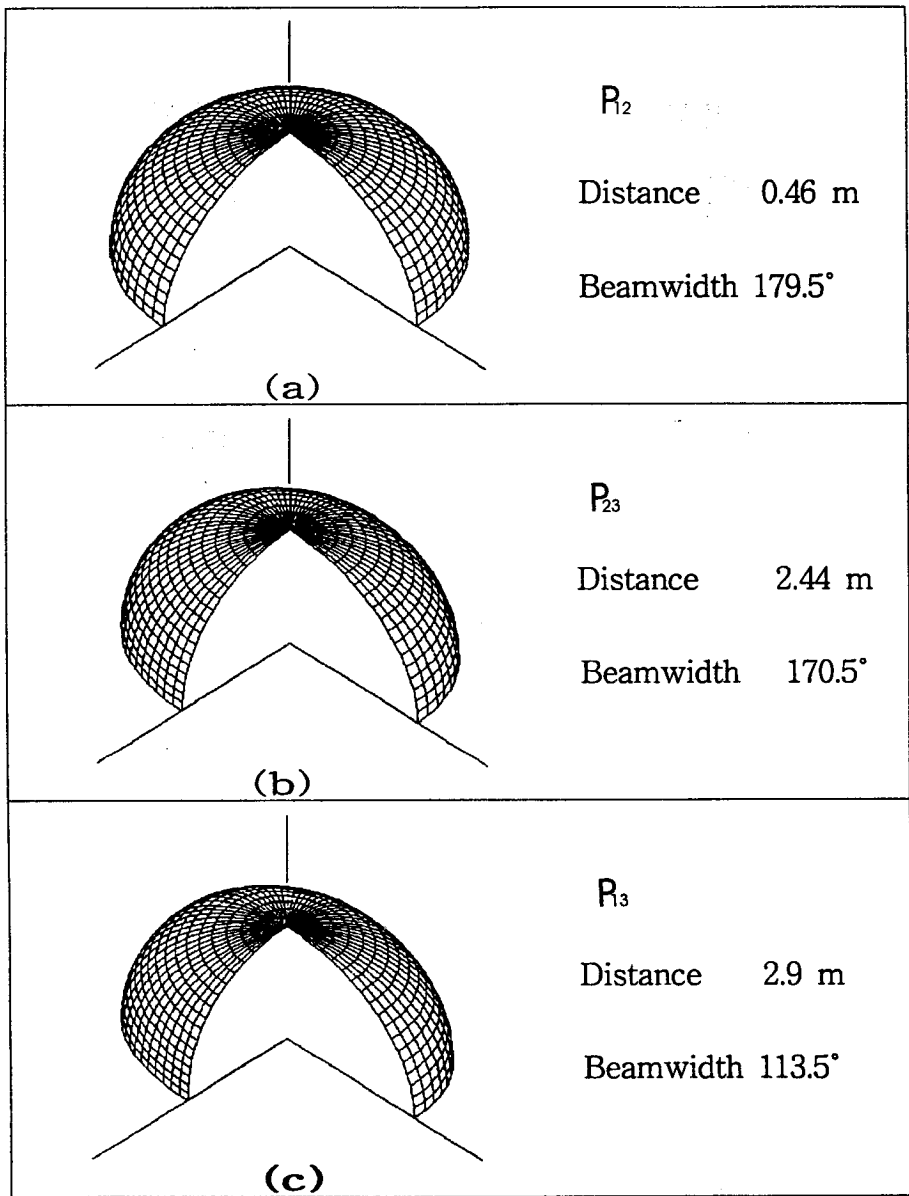


Fig. 5-2. Three-dimensional radiation pattern with distance for the cluster array comprising two 2.46ℓ guns.

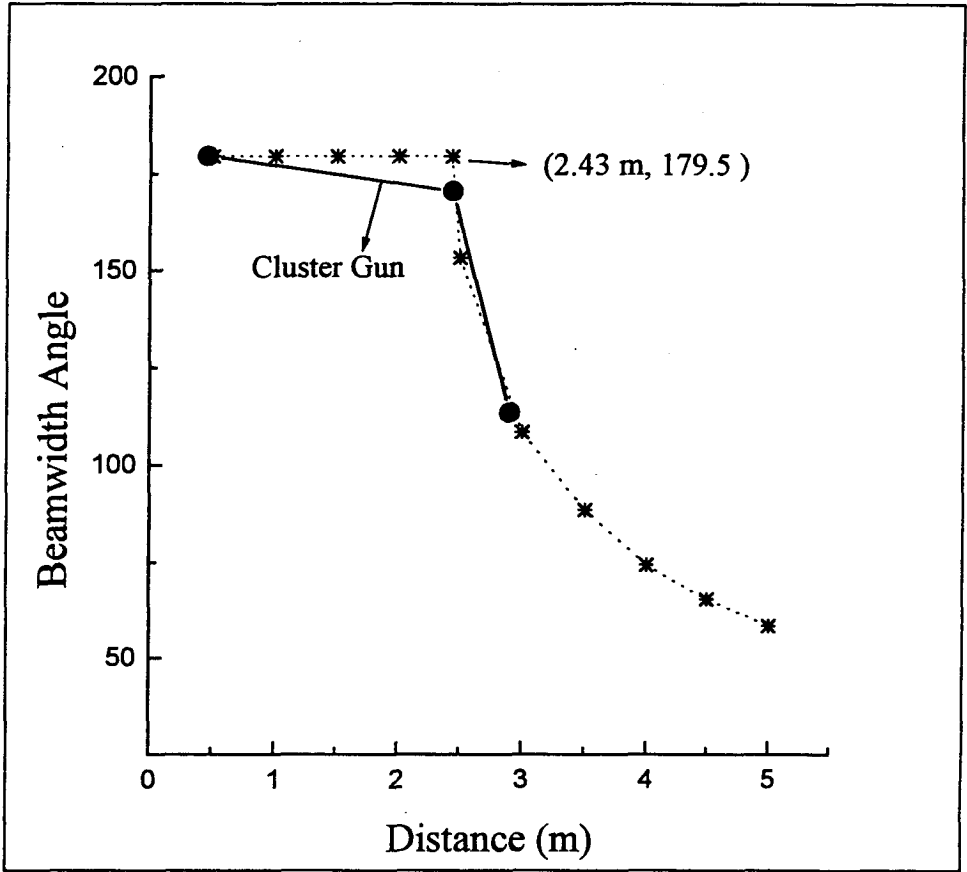


Fig. 5-3. Beamwidth for the cluster array with distance at 154 Hz (dotted line). The heavy solid line indicates the gun distance of 0.46, 2.44 and 2.9m.

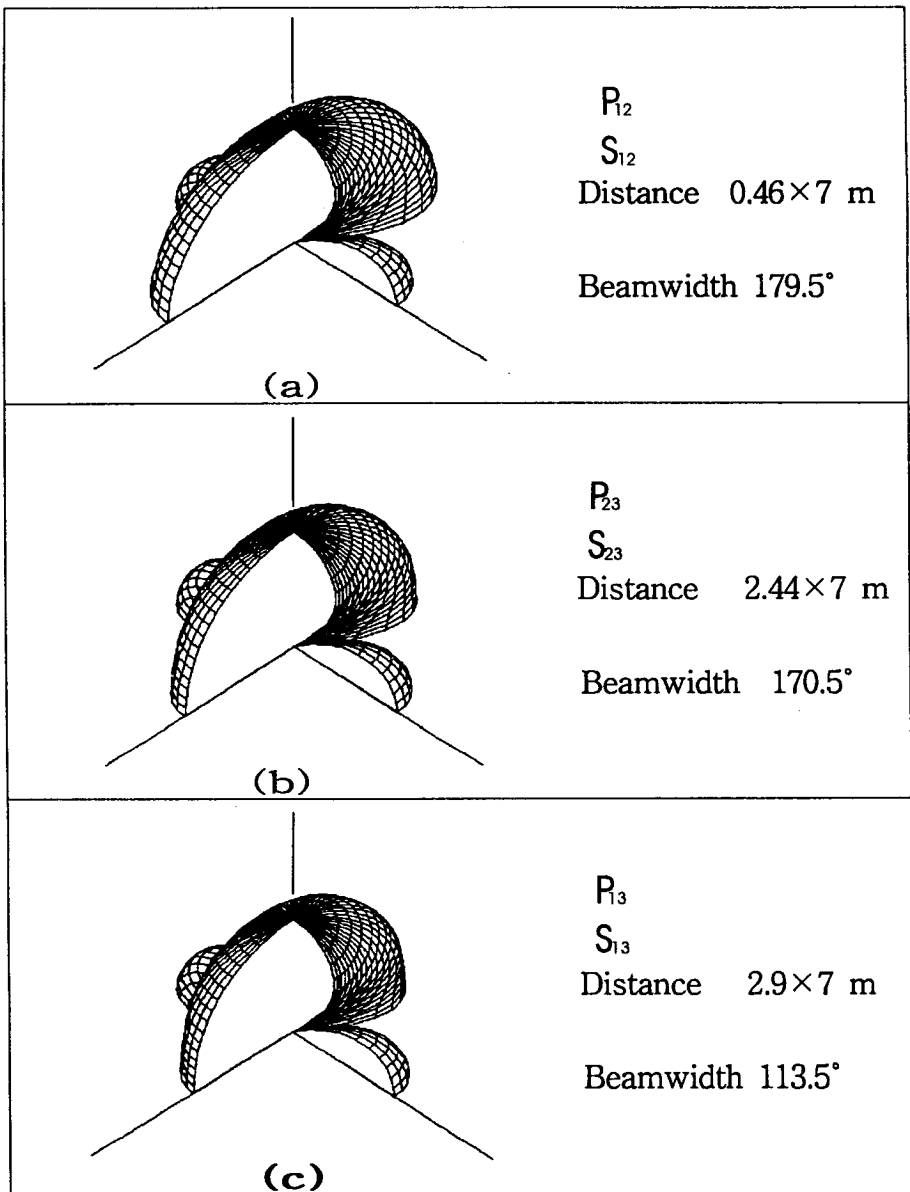


Fig. 5-4. Three-dimensional radiation pattern with distance for the wide array comprising four 2.46ℓ guns with distance at 154 Hz.

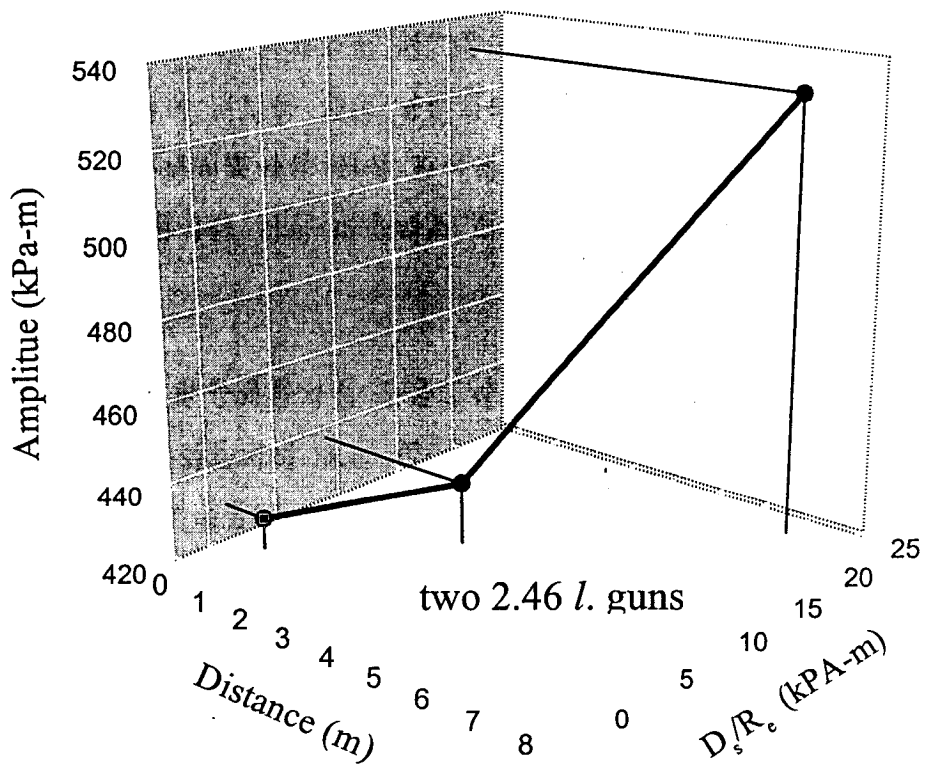


Fig. 5-5. Descriptive parameters with distance for the cluster comprising two 2.46 l guns with distance at 154 Hz.

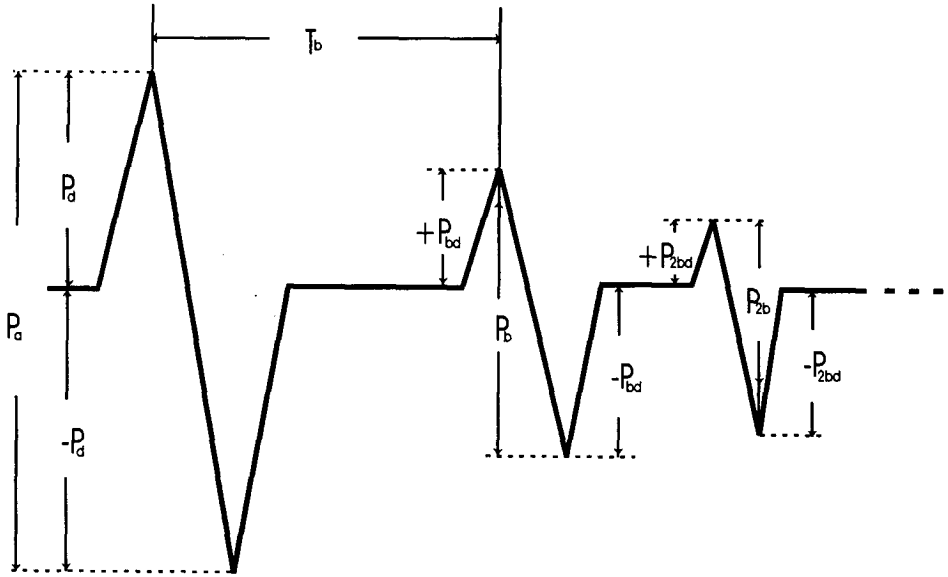
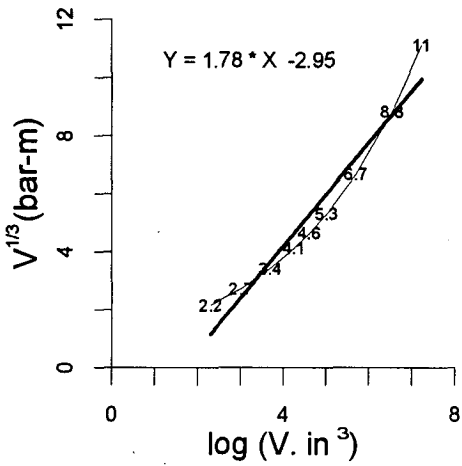
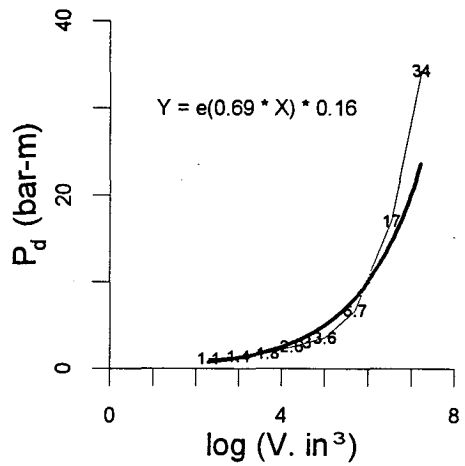


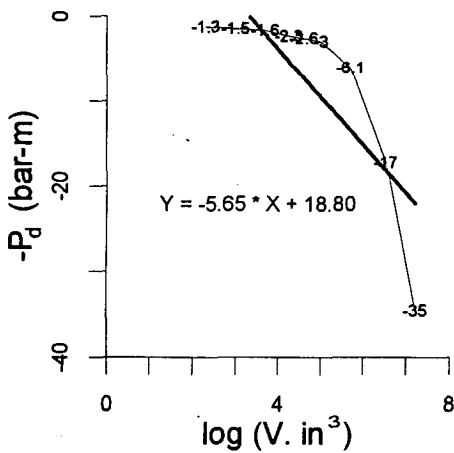
Fig.5-6. An idealized sleeve-gun signature. The symbols used in the figure are as follows : $V^{1/3}$ (gun volume^{1/3}), P_a (peak-to-trough amplitude of primary), T_b (primary-to-bubble period), P_b (peak-to-trough amplitude of bubble), P_{2b} (2nd peak-to-trough amplitude of bubble), T_g (peak-to-trough Time), P/B (primary-to-bubble ratio), P_d (zero-to trough pulse amplitude), $-P_d$ (negative zero-to trough pulse amplitude), P_{bd} (zero-to trough amplitude of bubble), $-P_{bd}$ (negative zero-to trough amplitude of bubble), P_{2bd} (2nd zero-to trough amplitude of bubble), $-P_{2bd}$ (2nd negative zero-to trough amplitude of bubble).



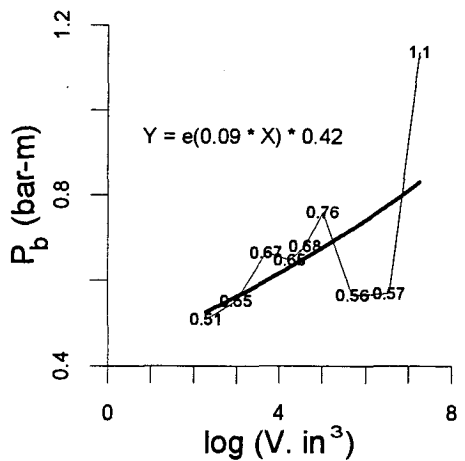
(a)



(b)

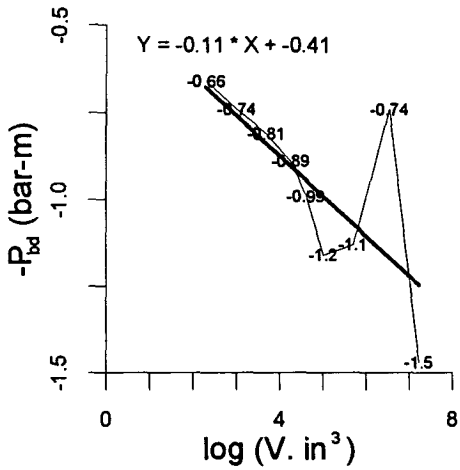


(c)

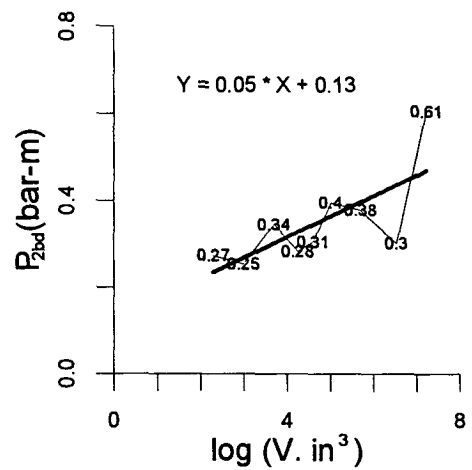


(d)

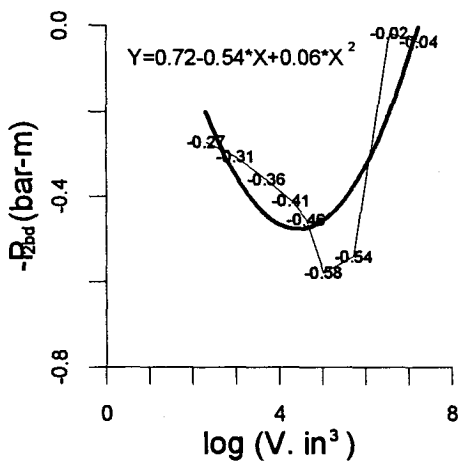
Fig. 5-7. Variations in (a) $V^{1/3}$ (gun volume^{1/3}), (b) P_d (zero-to trough pulse amplitude), (c) $-P_d$ (negative zero-to trough pulse amplitude), (d) P_b (peak-to-trough amplitude of bubble) as functions of gun volume. The solid and heavy solid lines represent the theoretical lines and least-square fits, respectively.



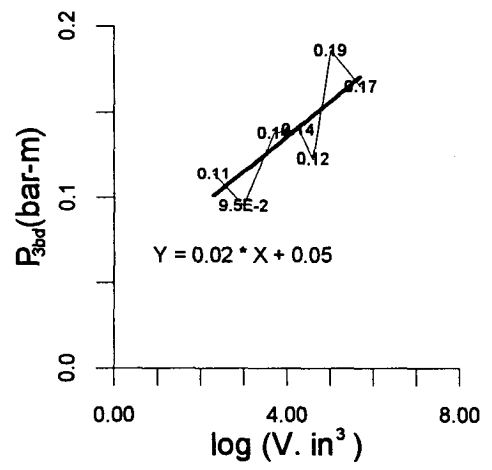
(e)



(f)

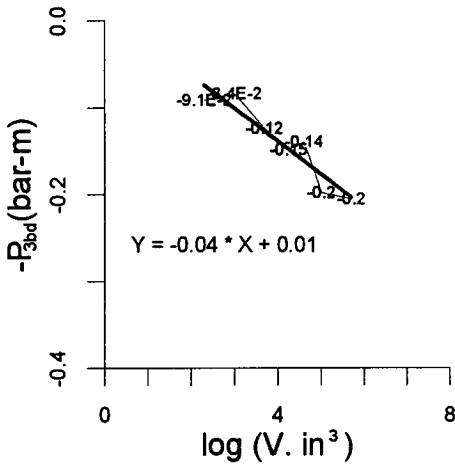


(g)

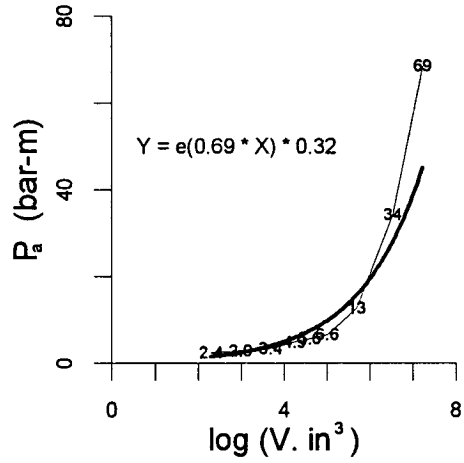


(h)

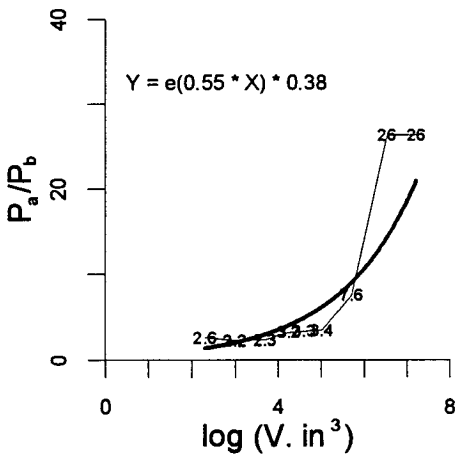
Fig. 5-8. Variations in (e) $-P_{bd}$ (negative zero-to trough amplitude of bubble), (f) P_{2bd} (2nd zero-to trough amplitude of bubble), (g) $-P_{2bd}$ (2nd negative zero-to trough amplitude of bubble), (h) P_{3bd} (3rd zero-to trough amplitude of bubble) as functions of gun volume. The solid and heavy solid lines represent the theoretical lines and least-square fits, respectively.



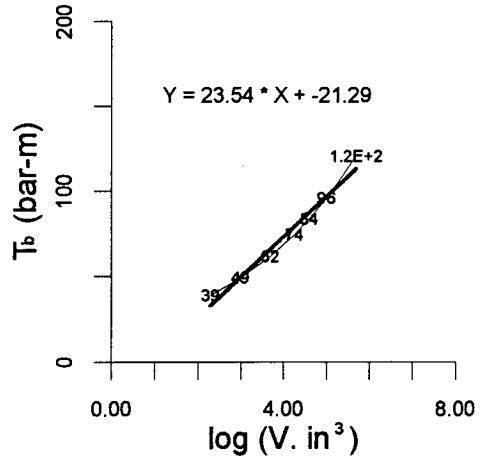
(i)



(j)

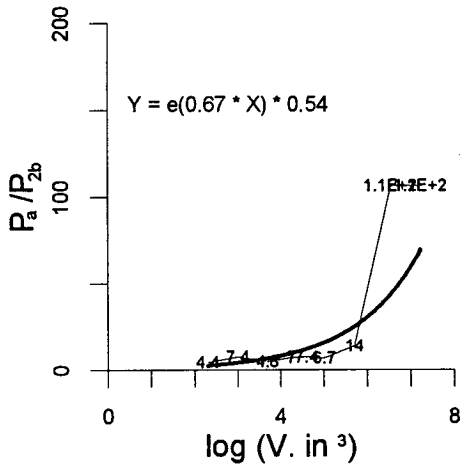


(k)

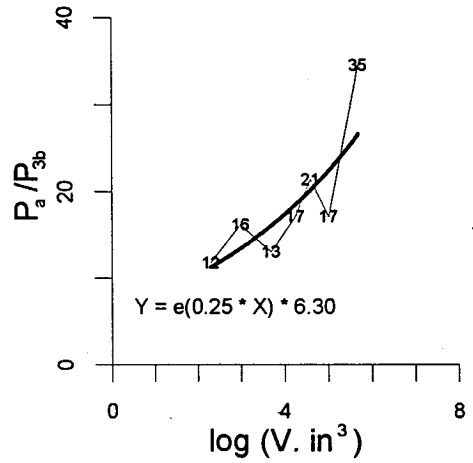


(l)

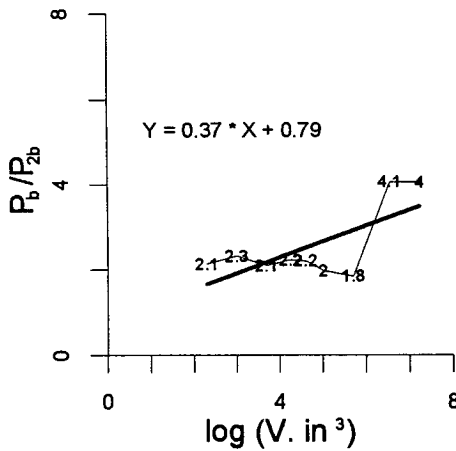
Fig. 5-9. Variations in (i) $-P_{3bd}$ (3rd negative zero-to trough amplitude of bubble), (j) P_a (peak-to-trough amplitude of primary), (k) P_a/P_b (amplitude of primary/amplitude of bubble), (l) T_b (primary-to-bubble period) as functions of gun volume. The solid and heavy solid lines represent the theoretical lines and least-square fits, respectively.



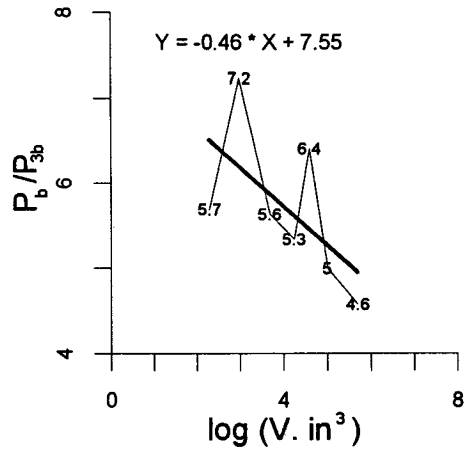
(m)



(n)



(o)



(p)

Fig. 5-10. Variations in (m) P_a/P_{2b} (amplitude of primary)/ (2nd amplitude of bubble), (n) P_a/P_{3b} (amplitude of primary)/ (3rd amplitude of bubble), (o) P_b/P_{2b} (amplitude of bubble)/(2nd amplitude of bubble), (p) P_b/P_{3b} (amplitude of bubble)/(3rd amplitude of bubble) as functions of gun volume. The solid and heavy solid lines represent the theoretical lines and least-square fits, respectively.