

BSPN 00226-730-5

다중채널 해양반사파 자료의 처리기술 개발(Ⅲ)

A Study on the Digital Processing Technique
for Multichannel Marine Seismic Data (Ⅲ)

1994. 9.

연 구 기 관
한국해양연구소

과 학 기 술 처



제 출 문

과학기술처 장관 귀하

본 보고서를 “다중채널 해양반사파 자료의 처리기술 개발”사업의 제 3차년도 최종보고서로 제출합니다.

1994. 9.

주관연구기관명 : 한국해양연구소

위탁연구기관명 : 강원대학교

참여연구기관명 : 경인에너지(주)

총괄연구책임자 : 김한준

연 구 원 : 홍종국 유해수

주형태 한삼준

박진태

김기영 박영규

공은영 김남희

박홍준

연 구 조 원 : 장남도 김성애

요 약 문

I. 제목

다중채널 해양 반사파 자료의 처리기술 개발 (Ⅲ)

II. 연구개발의 중요성 및 목적

다중채널 탄성파 탐사법은 지하 깊이 위치하는 탐사대상으로부터 직접 반사되어 돌아온 탄성파를 자료로 이용하므로 지하의 구조 및 층서를 지질 단면의 형태로서 상세히 얻을 수 있을 뿐만 아니라 지하의 물성을 깊이에 따라 파악할 수 있는 장점을 가진다. 지금까지 한국대륙붕내의 석유자원의 탐사는 전부 외국의 석유 회사들에 의해 수행되어 왔으며 이로 인해 국내의 경우 단편적인 자료처리 분야외에는 기술축적이 거의 이루어지지 못하였다.

한국해양연구소에서 1992년 종합조사선 온누리호를 건조하면서 96채널 탄성파 탐사장비를 탑재함으로써 국내에서도 독자적인 탄성파 탐사기술의 개발이 가능하게 되었다. 이에 따라 본 연구의 1차년도 사업에서는 다중채널 탄성파자료의 표준 처리기술을 개발하였다. 제2차년도에서는 온누리호를 이용한 96채널 탄성파 탐사를 한국대륙붕 제6광구에서 수행하여 다중채널 탄성파자료의 획득부터 처리까지의 전과정을 체계적으로 확립한 바 있다. 이러한 취지에서 이번의 3차년도 연구에서는 해양 고해상 탄성파 탐사기술을 개발하여 심부 탄성파 탐사로써 얻기 힘든 천부지질의 퇴적층서 및 퇴적상 구명, 그리고 대륙붕의 정밀탐사 등에 활용하고자 한다. 고해상 탄성파탐사는 특히 석유 시추지점 주변의 지질 위험요소의 파악뿐만 아니라 조간대 지역의 정밀층서 구명을 통한 퇴

적환경 연구 등에도 직접 활용될 수 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 한국해양연구소의 종합조사선 온누리호에 탑재된 에어 건과 12채널 스트리머를 활용하여 다중채널 고해상 탄성파자료의 획득부터 처리까지의 단계를 개발하였다. 개발된 기술의 검증용 위하여 한국 대륙붕 제6광구에서 실제의 탐사를 수행하였으며 여기에서 획득한 자료를 처리하여 최종 정밀 지질 단면도를 작성하였다.

세부 심층연구과제로서 에어 건의 용적과 깊이에 따른 원거리장 파형의 특성을 시간 및 주파수 영역에서 분석하였다. 이 연구를 통해 해저면하 1 km 심도 이내 지층의 고해상 탄성파 탐사에 적합한 탄성파를 발생시키기 위한 에어 건의 제반 변수들을 결정할 수 있었다. 다음에는 온누리호를 이용하여 한국 대륙붕해역에서 12채널 고해상 탄성파 탐사를 실제로 수행하여 자료의 획득 및 처리를 위해 적합한 변수를 선정하였다. 자료처리시에는 고해상 탄성파 탐사자료의 처리체통을 확립하기 위한 연구와 더불어 탄성파 단면의 분해능을 향상시키기 위한 연구가 수행되었다. 최종적으로, 이 연구에서 얻은 대륙붕의 고해상 탄성파 단면을 동일 지역에 대해 얻은 96채널 탄성파 단면과 비교하여 연구결과를 검증하였다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

“다중채널 해양 반사파 자료의 처리기술 개발”의 3차년도 과제로서 수행된 이 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 고해상 탄성파 탐사를 위한 기초 연구

- 전산모형실험을 통한 에어 건의 최적 구성변수 파악
- 원거리장 파형의 시간 및 주파수 영역 신호 특성 분석

(2) 한국 대륙붕 지역의 고해상 탄성파 탐사

- 12 채널 고해상 탄성파 자료 획득
- 최적 자료들 얻기 위한 획득변수 시험 및 선정
- 고해상 탄성파 자료의 처리계통 확립
- 탄성파 단면의 분해능을 높이기 위한 자료처리 기법 연구
- 96채널 탄성파 단면과의 비교를 통한 연구결과의 검증

3차년도에 연구를 통하여 확립한 고해상 탄성파 탐사기술로써 통상적인 탄성파 탐사에 비해 수평 및 수직 성분의 분해능이 향상된 지질단면을 얻을 수 있다. 따라서 고해상 탄성파 탐사기술은 한반도 주변해역의 신생대 지층의 퇴적환경 분석과 같은 학술적 분야뿐만 아니라 대륙붕 시추지점 주변의 정밀 지질구조 및 층서조사, 연안역 구조물 설치를 위한 지반조사, 그리고 폐기물 투기지역 조사 등과 같이 산업적으로도 폭넓게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

SUMMARY

I. Title of the Study

A Study on the Digital Processing Techniques for Multichannel Marine Seismic Data (III)

II. Objectives and Significance of the Study

The multichannel seismic method utilizes seismic waves propagating directly to the subsurface objects, thus it provides not only the structure and stratigraphy but also information on physical properties of the subsurface geology. In Korea, multichannel seismic surveys have been conducted by foreign contractors mainly in search for hydrocarbon resources in the continental shelves. As a result, the technical capabilities of Korea have not fully grown except for a limited area of data processing.

With the installation of 96 channel seismic survey facilities on the R/V Onnuri, a newly constructed research vessel of KORDI (Korea Ocean Research and Development Institute), the need for the development of the seismic survey technique on a domestic base was raised. For this purpose, the standard processing techniques of multichannel seismic data were developed through the first year's accomplishment of this study. As the second year's task, an exploration framework comprising acquisition and

processing of seismic data was established in a systematic way. The second year's task was materialized with the successful 96 channel seismic survey of the selected continental shelf area of Korea using the equipments installed on the R/V Onnuri. In this context, the present study as the third year's project aims at the development of the high-resolution seismic method. Compared to the normal seismic method limited in both horizontal and vertical resolution, the high-resolution seismic method provides the detailed sedimentary structure and stratigraphy of the shallow subsurface, thus it can be effectively used in precise exploration of the continental shelf areas. The high-resolution method has a variety of applications such as the site survey for detecting geohazards in the vicinity of the well site for oil exploration and the study of the depositional environment of the tidal flats through the investigation of sedimentary morphologies.

III. Contents and Scope of the Study

The high-resolution seismic method has been developed in this study utilizing the seismic survey facilities installed on the R/V Onnuri such as air guns and 12 channel streamer. This method comprises acquisition and processing of high-resolution seismic data. A selected area in Korean Continental Shelf Block VI was surveyed by the high-resolution seismic method. The seismic section showing the detailed sedimentary structure was produced as a final result.

As specified research topics, the far-field signature was primarily analyzed in the time and frequency domains from measurements under various configurations of volume and depth of the air gun source. This specific research resulted in the determination of air gun parameters for generating seismic pulses suited for the high-resolution survey of the sub-bottom geology to a depth of 1 km. Secondly, the 12 channel seismic experiment was performed in the continental shelf of Korea to achieve parameters of acquisition and processing of high-resolution seismic data. Emphasis was placed on the establishment of processing sequences of high-resolution seismic data and the improvement of resolution of the seismic sections. Finally, the results of the present study were verified by comparison of the high-resolution seismic section with the 96 channel seismic section of the same continental shelf area.

IV. Results of the Study and Further Suggestions

As the results of the third year's commitment of "A Study on the Digital Processing Techniques for Multichannel Marine Seismic Data", we have achieved the followings:

- (1) A preliminary study for high-resolution marine seismic reflection surveys
 - Derivation of optimum system parameters of air guns through computer modelling

- Analysis of far-field signatures in the time and frequency domains
- (2) High-resolution seismic survey of the continental shelf area of Korea
- Acquisition of 12 channel high-resolution seismic reflection records
 - Test and design of acquisition parameters
 - Establishment of processing sequences of high-resolution seismic data
 - Improvement of resolution of the seismic section with the application of a MED-type deconvolution method
 - Verification of the study results by comparison of high-resolution seismic section with 96 channel seismic section

The high-resolution seismic survey technique was established in the present study as the third year's commitment. This technique can be effectively used to obtain the seismic section showing a great improvement in horizontal and vertical resolution over the conventional survey method. Accordingly, the high-resolution seismic method is expected to offer the scientific opportunity to study the detailed depositional environment of the Cenozoic era around the Korean Peninsula. In addition, this technology can be applied to the offshore industry such as the survey of the drilling well site for oil exploration in continental shelves, the investigation of seabed geology for offshore construction, and the survey of the waste dump area in the ocean.

CONTENTS

Chapter 1.	Introduction	21
Chapter 2.	Preliminary Study for High-Resolution Marine Seismic Survey	27
Section 1.	Analysis of far-field signature	29
1-1.	Analysis in the time domain	30
1-1-1.	Near-field signature	30
1-1-2.	Simulation of far-field signatures	30
1-1-3.	Peak-to-peak amplitude of primary	34
1-1-4.	Primary-to-bubble ratio	34
1-1-5.	Bubble period	36
1-1-6.	Effects of reflectivity at sea surface	39
1-2.	Analysis in the frequency domain	41
1-2-1.	General features of amplitude spectra	41
1-2-2.	Maximum amplitude	44
1-2-3.	Dominant frequency	47
1-2-4.	Notch frequency	48
1-3.	Conclusion	48
Section 2.	Characteristics of streamer	49
2-1.	Horizontal resolution	49
2-2.	Signal-to-noise ratio	49
2-3.	Array response	50
2-4.	Conclusion	52

Section 3.	Other acquisition parameters	52
3-1.	Record length	52
3-2.	Sample interval	53
3-3.	Shot interval	53
Section 4.	Simulated far-field signatures	54
4-1.	Time domain	54
4-2.	Frequency domain	55
Section 5.	Discussion	56
Section 6.	Conclusions	107

Chapter 3.	12 Channel High-resolution Marine Seismic Survey of the Continental Shelf of Korea	109
Section 1.	Acquisition of test data	111
1-1.	Location of acquisition	111
1-2.	Survey equipments	111
Section 2.	Design of acquisition parameters	117
2-1.	Air gun volume	117
2-2.	Offset from gun to streamer	117
2-3.	Other parameters	119
Section 3.	High-resolution data processing	121
3-1.	Standard processing phase	121
3-2.	Application MID to improve resolution	122
Section 4.	Comparison with 96 channel seismic section	130
Section 5.	Conclusion	132

Chapter 4. General Conclusion	135
References	141

차 례

제 1 장	서	론	21
제 2 장	고해상 탄성파 탐사를 위한 기초 연구		27
제 1 절	원거리장 파형분석		29
1-1.	시간영역에서의 분석		30
1-1-1.	근거리장 파형		30
1-1-2.	원거리장 파형계산		30
1-1-3.	주신호 진폭		34
1-1-4.	주신호대 기포의 진폭비		34
1-1-5.	기포주기		36
1-1-6.	해수면 반사계수 효과		39
1-2.	주파수 영역에서의 분석		41
1-2-1.	진폭 스펙트럼		41
1-2-2.	최대 진폭		44
1-2-3.	우세 주기		47
1-2-4.	노치 주파수		48
1-3.	소결론		48
제 2 절	스트리머 특성 분석		49
2-1.	수평 해상도		49
2-2.	신호대 잡음비		49
2-3.	배열 반응		50
2-4.	소결론		52

제 3 절	기타 획득 변수	52
3-1.	기록 길이	52
3-2.	샘플 간격	53
3-3.	발파 간격	53
제 4 절	원거리장 파형	54
4-1.	시간영역	54
4-2.	주파수 영역	55
제 5 절	문제점 및 토의사항	56
제 6 절	결론	107
제 3 장	12채널 시스템을 이용한 고해상 탄성파 탐사	109
제 1 절	시험자료의 획득	111
1-1.	자료획득 위치	111
1-2.	탐사장비 및 배열	111
제 2 절	자료획득 변수의 선정	117
2-1.	에어 건 용량	117
2-2.	진과 스트리머의 거리	117
2-3.	기타 변수	119
제 3 절	자료 처리	121
3-1.	표준처리	121
3-2.	해상도 향상을 위한 MID의 적용	122
제 4 절	96채널 탄성파 탐사결과와의 비교	130
제 5 절	결론	132

제 4 장 종합 결론	135
참고문헌	141

List of Figures

- Fig. 2-1. Computer-simulated near-field signatures for (a) 0.16 l , (b) 0.33 l , (c) 0.66 l , (d) 1.15 l , (e) 1.64 l , (f) 2.46 l sleeve guns, respectively. The signature (g) is for the cluster comprising two 2.46 l sleeve guns separated by 0.46 m. 31
- Fig. 2-2. Computer-simulated far-field signatures for (a) 0.16 l , (b) 0.33 l , (c) 0.66 l , (d) 1.15 l , (e) 1.64 l , (f) 2.46 l sleeve guns, respectively. The signature (g) is for the cluster comprising two 2.46 l sleeve guns separated by 0.46 m. For the simulation using the corresponding near-field signatures in Fig.2-1, source depth and reflectivity at the sea surface were assumed to be 2 m and -0.8, respectively. 33
- Fig. 2-3. (a) Peak-to-peak amplitude P_a , (b) primary-to-bubble ratio P_a/P_b , and (c) bubble period T_b of far-field signatures as a function of source depth. The gun volumes from (1) to (6) indicated on the right of each curve are 0.16 l , 0.33 l , 0.66 l , 1.15 l , 1.64 l , and 2.46 l , respectively. The curve (7) is for the cluster comprising two 2.46 l sleeve guns separated by 0.46 m. The reflectivity at the sea surface was assumed -0.8 to synthesize far-field signatures from a normal sea surface. 35
- Fig. 2-4. (a) - (c) the same as for Fig.2-3. The reflectivity at the sea surface was assumed -1.0 to synthesize the far-field signatures for an ideal sea surface. 39
- Fig. 2-5. (a) - (c) the same as for Fig.2-4. The reflectivity at the sea

	surface was assumed -0.6 to synthesize the far-field signatures for a rough sea surface.	40
Fig. 2-6.	Amplitude spectra for far-field signatures in Fig.2-2. The corresponding gun volumes from (a) to (g) are the same as for Fig.2-2.	42
Fig. 2-7.	(a) Peak amplitude A_p and (b) dominant frequency F_p as a function of source depth for the range of 1-5 m at 1 m interval. The other descriptions are the same as for Fig.2-4.	45
Fig. 2-8.	Array response curves for the (a) 96 channel and (b) 12 channel streamers on the R/V Onnuri. The number of hydrophones per channel and the hydrophone spacing of the 96 channel streamer are 24 and 0.97 m, respectively. For the 12 channel streamer, the number of hydrophones per channel and the hydrophone spacing are 8 and 0.74 m, respectively.	51
Fig.s A-1 to A-15.	Far-field signatures simulated in the time domain as a function of the reflectivity at the sea surface and the source depth. The gun volumes corresponding to curves from (a) to (g) are the same as for Fig.2-1.	57
Fig.s B-1 to B-35.	Amplitude spectra of far-field signatures as a function of volume and depth of gun. The curves (a) to (c) in each figure corresponds to $R=-1.0$, -0.8 , and -0.6 , respectively.	72
Fig. 3-1.	Ship's track chart for seismic data acquisition in the East Sea using a 12 channel streamer.	112
Fig. 3-2.	Field geometry of the 12 channel seismic survey using the R/V	

Onnuri.	116
Fig. 3-3. (a) Computed far-field signatures for the cluster comprising two 2.46 t sleeve guns and (b) its amplitude spectra.	118
Fig. 3-4. Part of the multiple-suppressed stack section with near trace offset of (a) 50 m and (b) 90 m.	120
Fig. 3-5. Part of stack section (a) before and (b) after multiple suppression using predictive deconvolution.	123
Fig. 3-6. Final migrated section of the 12 channel seismic survey.	124
Fig. 3-7. A shot gather from the 12 channel streamer (a) before and (b) after MID.	126
Fig. 3-8. (a) MID filter coefficients calculated for the nearest channel of the shot gather shown in Fig.3-7 and (b) the computed wavelet as the inverse of the MID filter.	127
Fig. 3-9. Spiking deconvolution filter coefficients calculated for the nearest channel of the shot gather shown in Fig.3-7 and (b) the computed wavelet as the inverse of the spiking deconvolution filter.	128
Fig. 3-10. High-resolution seismic section after predictive deconvolution and MID.	129
Fig. 3-11. Migrated section from the 96 channel seismic survey. The survey line is the the same as that of the 12 channel high-resolution seismic survey.	131

List of Tables

Table 2-1. Characteristics of source signatures in the time domain. . . .	36
Table 2-2. Characteristics of source signatures in the frequency domain. . . .	46
Table 3-1. Field parameters for the 12 channel high-resolution seismic survey in the continental shelf of Korea conducted in 1993. . . .	121
Table 3-2. Field parameters for the 96 channel seismic survey in the continental shelf of Korea conducted in 1992.	130

제 1 장

서 론



제 1 장 서 론

다중채널 탄성파 탐사는 지하의 매질 경계면에서 직접 반사되어 온 탄성파 자료로부터 지하의 지질구조를 얻을 수 있으므로 여러 가지 물리탐사 방법중 가장 정확한 탐사결과를 제공한다. 이것은 에어 건 등의 강력한 파원과, 수신기로 다중채널 스트리머를 이용하여 자료를 획득하고, 획득된 자료는 대용량의 컴퓨터를 이용하여 처리하므로 지하 수 km까지의 구조와 층서, 그리고 정량적인 물성을 얻을 수 있기 때문이다. 더우기 최근에는 탄성파가 전파한 매질의 물성을 직접 알 수 있는 자료처리 기법도 개발되고 있다. 이에 비해 파원의 주파수가 아주 높은 일반적인 지질음향탐사(acoustic profiling)나 스파키 등의 파원을 이용하는 단채널 지층탐사는 탐사심도가 해저면으로부터 수십 m 아니면 수백 m에 국한되며 탐사결과로서 기하학적 보정이 되지 않은 지질구조를 정성적으로 밖에 보여줄 수 없다. 따라서 탄성파 탐사는 비용이 많이 요구됨에도 불구하고 지하 깊은 심도의 지질학적 정보를 정량적으로 얻고자 하는 모든 분야에 널리 쓰이고 있다(이 보고서에서 탄성파 탐사는 다중채널 탄성파 탐사를 지칭함). 탄성파 탐사는 크게 탄성파 자료의 획득, 처리 그리고 해석의 세 단계로 구성되며 이와 관련된 이론 및 기술은 대부분 석유 탐사를 위해 선진국의 주요 석유회사들과 대학들에 의해 개발되어 왔다.

국내의 경우 한반도 주변 대륙붕에서 석유개발을 위해 막대한 자금을 들여 탄성파 탐사를 꾸준히 수행하고 있으나 작업의 전량을 외국의 기술에 의존해 왔으므로 자료처리의 일부 분야외에는 기술축적을 이룰 수 없었다. 1990년 한국해양연구소에서 탄성파 탐사자료의 표준처리기술을 개발하고, 1992년 종합조사선 온누리호를 건조하면서 96채널 탄성파 탐사장비를 탑재함에 따라 국내에서도 독자적인 탐사의 계기가 마련되었다. 이에 따라 본 연구과제의 1차년도에서는 탄성파자료의 표준처리 기법을 향상함과 함께 특수처리 기법을 개발

하였으며 2차년도에서는 은누리호의 탄성과 탐사장비를 이용하여 한국대륙붕에서 실제로 96채널 탄성과 탐사를 수행하고, 자료를 처리함으로써 탄성과 탐사의 체계를 확립한 바 있다.

이번의 3차년도 연구에서는 일반적인 심부 탄성과 탐사에서 얻기 힘든 해지면하 약 1-2 km 심도까지의 천부지질의 퇴적층서 및 퇴적상을 구명하는 고해상 해양 탄성과 탐사기술 (high-resolution marine seismic method)을 개발하고자 한다. 고해상 탄성과 탐사는 특히 대륙붕의 석유개발과 관련하여, 개발단계와 생산설비의 설치시에 필수적으로 수행해야 하는 중요성을 가진다. 이때 이 방법으로 얻을 수 있는 것으로는 천부지질내 가스층의 존재여부, 단층이나 함몰대와 같은 구조적인 위험요소, 그리고 천부의 퇴적층서 등이 있다 (Bays and Blasco, 1986). 또한 산업적으로 고해상 탄성과 탐사는 램, 밤조개, 그리고 교량 등의 해안 구조물의 설치를 위한 지질 기반구조탐사를 위해 활용될 수 있으며 학술적으로는 조간대를 비롯한 신생대 퇴적층 지역의 정밀층서 구명을 통한 퇴적환경 연구 등에도 직접 활용된다. 고해상 탐사시에는 특별히 소용량의 에어 건, 스파커, 혹은 다른 전기·기계적 장치를 사용하여 일반적인 탄성과 탐사시보다 더 높은 주파수의 탄성과를 발생시켜 자료의 수직 분해능을 향상시키며 그룹간격이 작은 소형 스트리머를 사용하여 탄성과 자료를 수신함으로써 수평 분해능을 높인다. 따라서 고해상 탄성과 탐사를 위해서는 탐사목적에 따라 적합한 자료획득 및 자료처리 변수를 지하 수 km까지를 대상으로 하는 일반적인 탄성과 탐사법과 다르게 설정하여야 한다.

이 연구에서는 먼저, 은누리호에 탑재되어 있는 12채널 스트리머, 에어 건, 그리고 기록장비를 활용하여 지하 약 1 km까지의 지질구조를 명확히 구명하기에 적합한 고해상 탄성과 탐사장비들 구성하고 자료획득변수를 결정하였다. 이 목적을 위한 에어 건의 내부용적 (이하 '건 부피'라 부름)과 발파심도는 전산모형실험을 통해 원거리장 파형 (far-field signature)의 특성을 시간

및 주파수 영역에서 분석하여 결정하였다. 이어서 온누리호를 이용하여 한국 대륙붕해역에서 12채널 고해상 탄성파 탐사를 실제로 수행하면서 기타의 자료 획득 변수들을 선정하였다. 현장에서 자료획득 변수를 선정할 때에는 여러 가지 서로 다른 획득변수의 조합으로 자료들 획득한 후 이를 분석 및 평가하는 방법을 채용하였다. 다음으로는 일반적인 탄성파 자료보다 수직 및 수평방향의 분해능이 높은 고해상 탄성파 자료의 처리를 위한 표준처리 계통을 확립하고자 하였다. 이와 함께 최종 지질단면도의 분해능을 향상시키기 위해 최소 정보 디컨볼루션 (minimum information deconvolution)을 적용하는 연구를 수행하였다. 최종적으로, 이 연구에서 얻은 대륙붕의 고해상 탄성파 단면은 동일 축선에서 얻은 96채널 탄성파 단면과 비교하여 연구결과를 검증하였다.

제 2 장

고해상 탄성파 탐사를 위한 기초연구

제 2 장 고해상 탄성파 탐사를 위한 기초연구

제 1 절 원거리장 파형특성 분석

고해상 해양 반사파 탐사에 적합한 파원은 (1) 주신호 진폭 (P_s)이 크고, (2) 주신호대 기포의 진폭비 (P_s/P_b)가 크며, (3) 긴 기포주기 (T_b)를 갖는 이상적인 수중파원으로서의 기본적인 특징 이외에도 수직 및 수평 해상도 (resolution)를 높이기 위해서는 (4) 고주파 에너지를 많이 포함하도록 넓은 대역의 주파수를 가지며, (5) 발파점 사이의 거리, 즉 발파간격이 짧아야 한다.

온누리호에 부착되어 있는 슬리브 건들의 원거리장 파형 (far-field signature)에 관한 자료로는 Cotton and Monk (1990)가 많은 시험기록자료에 바탕을 두고 주파수영역에서의 전산모의계산 과정을 통하여 구한 전산모형자료와 김 기영 외 (1993a, 1993b)가 남극해역에서 해저면 반사파로부터 추출한 실제기록자료가 있다. 그러나 이러한 원거리장 파형은 파원의 깊이를 일정하게 고정시킨 상태에서 계산하거나 기록한 자료이므로, 발파심도별 원거리장 파형 분석을 위하여는 우선 수중 해수면반사에 의한 고스트 (ghost)를 원거리장 파형으로부터 분리하여야 한다. 원거리장 파형의 절대진폭계산, 해저면 반사시 위상변화 등 원거리장 파형으로부터 근거리장 파형을 추출하는 과정에서 발생할 수 있는 여러 계산상의 오류 가능성을 고려하여, 이 연구에서는 많은 실제 관측자료에 바탕을 두고 전산모형계산으로 구한 근거리장 파형을 직접 이용하여 발파심도별 원거리장 파형을 구하였다.

1-1. 시간영역에서의 분석

1-1-1. 근거리장 파형

Fig.2-1은 HGS (Halliburton Geophysical Service)사가 Cotton and Monk (1990)의 방법으로 구한 근거리장 파형으로, 내부용적이 각각 (a) 0.16 l, (b) 0.33 l, (c) 0.66 l, (d) 1.15 l, (e) 1.64 l, (f) 2.46 l인 슬리브전을 대상으로 계산한 것이다. 또한 Fig.2-1g는 0.46 m 간격의 2.46 l 전 두개로 구성되어 있는 cluster의 근거리장 파형을 보여준다. 기록시간 0 ms 부근의 주신호 전폭과 40-120 ms 정도의 기포주기가 전부피의 증가에 따라 뚜렷이 증가하는 양상을 보인다. 또한 주신호의 정전(peak)은 예리하고 큰 양(+)의 값을 갖는 반면에 정곡(trough)은 비교적 완만하고 작은 음(-)의 값을 갖는 특징을 보인다. 전산모형 계산시 사용한 주요 변수로는 샘플수 512개, 샘플율 1 ms, 대역필터 범위 0-500 Hz, 전 내부압력 13.8 MPa (2000 PSI), 발파심도 5 m, 수중음파속도 1480 m/s 등이다.

1-1-2. 원거리장 파형 계산

원거리장 파형 $F(t)$ 는

$$F(t) = N(t) + R \cdot N(t - \tau) \quad (1)$$

와 같이 근거리장 파형 $N(t)$ 를 τ 만큼 지연시키고 수중 해수면 반사계수 R 을 곱하여 구한 값인 고스트에 원래의 근거리장 파형 $N(t)$ 를 합한 형태로 표시된다. 이 때 지연시간 τ 는

$$\tau = 2 d \sin \theta / V_w \quad (2)$$

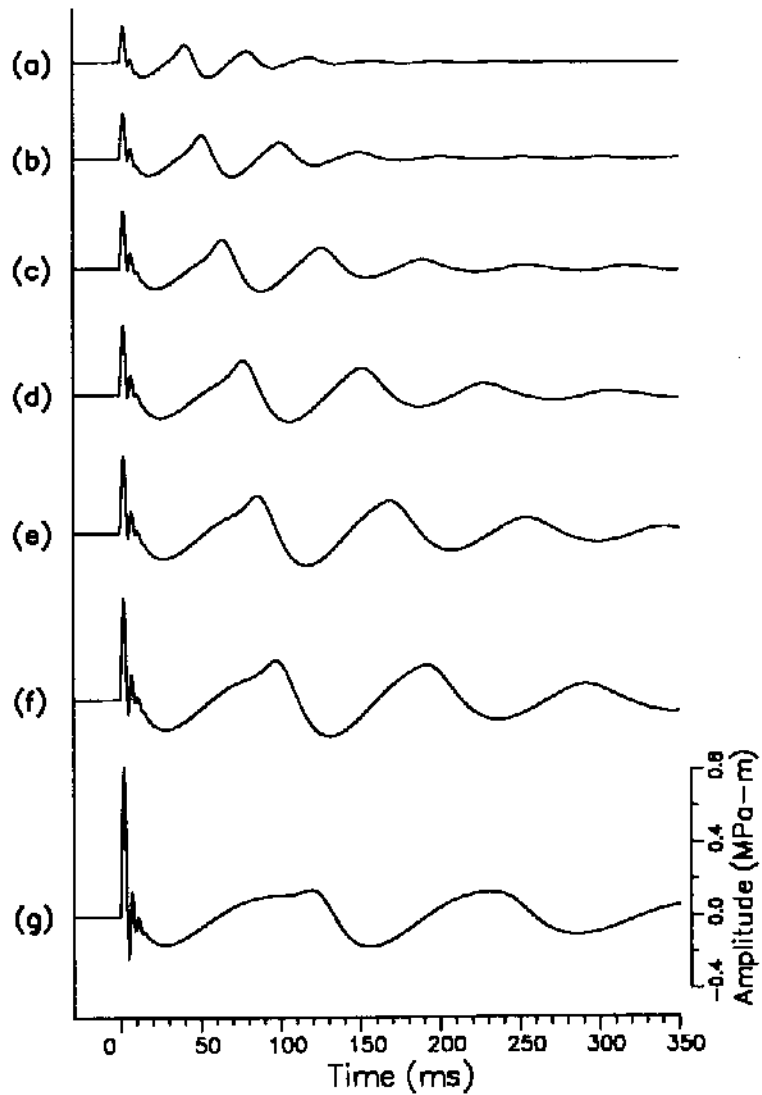


Fig. 2-1. Computer-simulated near-field signatures for (a) 0.16ℓ , (b) 0.33ℓ , (c) 0.66ℓ , (d) 1.15ℓ , (e) 1.64ℓ , (f) 2.46ℓ sleeve guns, respectively. The signature (g) is for the cluster comprising two 2.46ℓ sleeve guns separated by 0.46 m .

으로 d , θ , V_r 는 각각 발파심도, 파선이 해수면과 이루는 각도, 수중음파속도를 뜻한다.

이와 같이 원거리장 파형은 Fig.2-1의 근거리장 파형에 해수면반사 고스트를 추가하여 계산되기 때문에 고스트 지연시간 τ 와 관련된 d , θ , V_r 외에도 고스트 진폭과 관계되는 해수면 반사계수 R 에 따라 그 특성이 결정된다. 발파심도 d 는 시간영역에서의 주신호 진폭 P_s , 주신호와 기포의 진폭비 P_g/P_s , 기포주기 T_b 등에 영향을 미치며, 주파수영역에서의 노치 (notch) 주파수를 결정짓는 중요한 획득변수이다. 파원의 깊이에 따른 노치주파수 f_n^m 은

$$f_n^m = \frac{V_r}{2 m d \sin \theta} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

로서 (Parkes and Hatton, 1986), 이 때 위첨자 m 은 차수를 뜻한다. 여기서 1480 m/s의 속도로 수직입사한 경우, 즉 $V_r=1480$ m/s이고 $\theta=0^\circ$ 인 경우, 1차 노치주파수 f_n^1 은 발파심도 d 만의 함수인

$$f_n^1 = 740 / d \quad (4)$$

이 된다. 따라서 고해상도 탄성파탐사시 필요로 하는 50-200 Hz 구간에서 평탄한 스펙트럼을 갖기 위해서는 d 가 3.7 m를 넘지 않아야 함을 알 수 있다. 한편 수중 해수면 반사계수 R 은 해상상태에 따라 결정되며, 잔잔한 바다의 경우 -0.95 정도에 이르고 거친 바다는 -0.6보다도 작을 수 있다 (Verma, 1986).

Fig.2-2는 해상상태가 보통일 경우를 가정하여 $R=-0.8$, $d=2$ m, $V_r=1480$ m/s로 설정하여 은누리호에 설치되어 있는 6개 독립 건 및 1개 cluster의 원거

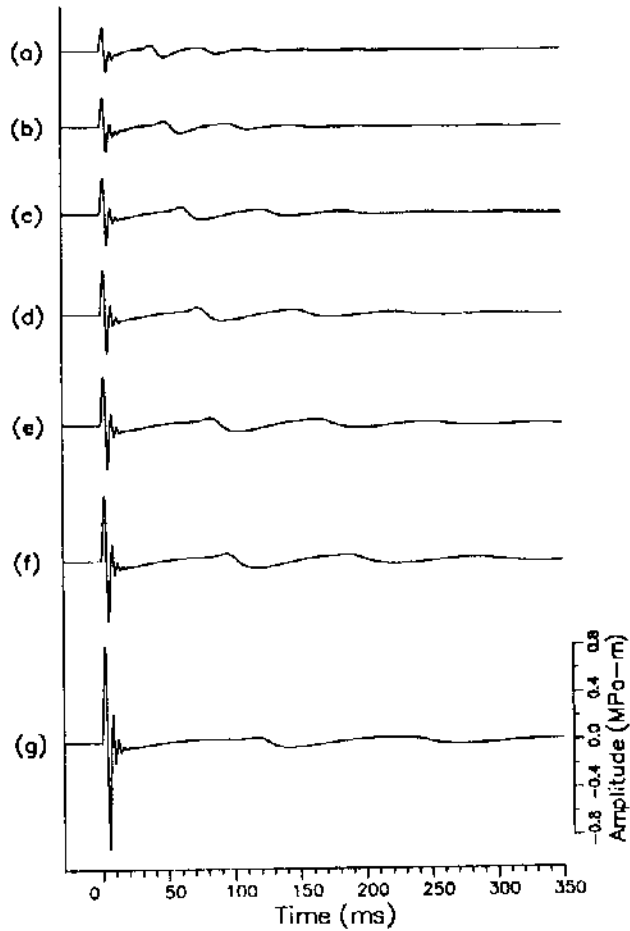


Fig. 2-2. Computer-simulated far-field signatures for (a) $0.16 t$, (b) $0.33 t$, (c) $0.66 t$, (d) $1.15 t$, (e) $1.64 t$, (f) $2.46 t$ sleeve guns, respectively. The signature (g) is for the cluster comprising two $2.46 t$ sleeve guns separated by $0.46 m$. For the simulation using the corresponding near-field signatures in Fig.2-1, source depth and reflectivity at the sea surface were assumed to be $2 m$ and -0.8 , respectively.

리장 파형을 구한 것이다. Fig.2-1의 근거리장 파형의 경우와 마찬가지로 건부피 증가에 따라 주신호 진폭, 기포주기 등이 증가하는 양상을 보인다. Fig.2-1의 근거리장 파형과 상이한 점은 주신호가 예리하고 큰 양(+)의 값을 갖는 0 ms 부근의 정점과 아울러 수 ms 부근의 정곡 역시 예리하고 절대값이 큰 음(-)의 값을 갖는 것으로, 이는 수중에서의 해수면 반사계수가 -1에 가까운 값 -0.8을 갖는데 기인한다.

1-1-3. 주신호 진폭

Fig.2-3a는 1 m에서 5 m까지 1 m 간격으로 발파심도를 변화시키며 발파심도에 따른 원거리장 파형의 주신호 진폭 P_a 를 나타낸 그림으로, 각각 (1) 0.16 t, (2) 0.33 t, (3) 0.66 t, (4) 1.15 t, (5) 1.64 t, (6) 2.46 t의 독립 건과 (7) 0.46 m 간격의 2.46 t 건 두개로 구성되어 있는 총부피 4.92 t cluster를 대상으로 구한 것이다. 각 건들의 발파심도별 P_a 값들을 MPa-m의 단위로 Table 2-1에 표시하였다.

200 Hz 미만의 주파수영역에서 노치가 생기지 않는 3.7 m 이내 범위에서의 발파심도별 P_a 는 건부피와 무관하게 2 m의 경우에 최대치를 가지며, 건부피의 증가에 따라 단조증가하는 양상을 보인다. 발파심도 2 m에서는 P_a 값이 0.16 t 건의 경우 0.37 MPa-m에 비하여 총부피 4.92 t의 cluster 경우는 1.70 MPa-m로 약 4.6배 증가한 값이다. 이는 이론치 (Nootboom, 1978) 및 관측치 (김 기영 외, 1993a)로부터 각각 계산하여 구한 값인 3.1배와 3.0배보다 약간 큰 값이다.

1-1-4. 주신호와 기포의 진폭비

Fig.2-3b는 1 m에서 5 m까지 1 m 간격으로 발파심도를 변화시키며 발파심도에 따른 원거리장 파형의 주신호와 기포의 진폭비 P_a/P_b 를 나타낸 그림으로,

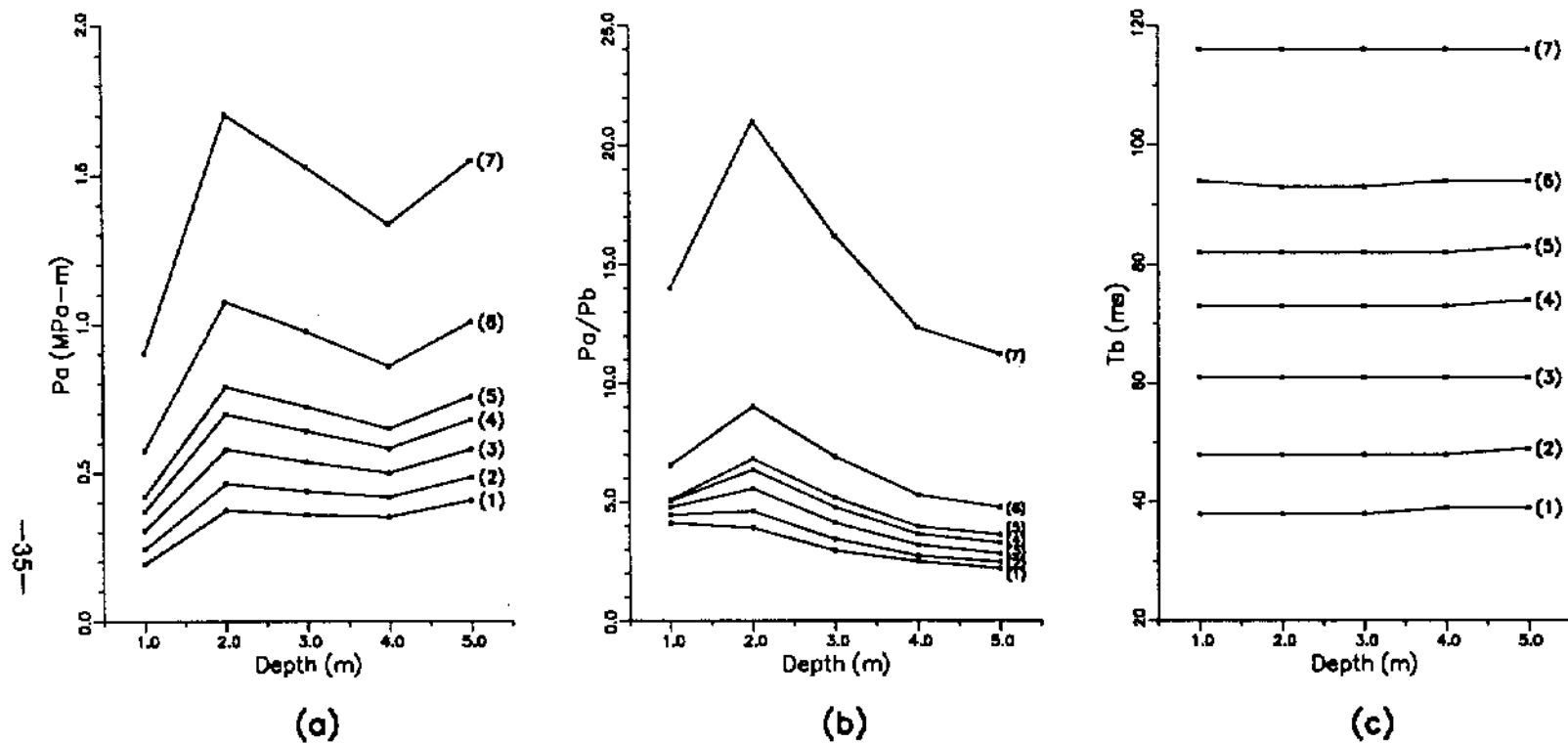


Fig. 2-3. (a) Peak-to-peak amplitude P_a , (b) primary-to-bubble ratio P_a/P_b , and (c) bubble period T_b of far-field signatures as a function of source depth. The gun volumes from (1) to (6) indicated on the right of each curve are 0.16 l , 0.33 l , 0.66 l , 1.15 l , 1.64 l , and 2.46 l , respectively. The curve (7) is for the cluster comprising two 2.46 l sleeve guns separated by 0.46 m. The reflectivity at the sea surface was assumed -0.8 to synthesize far-field signatures from a normal sea surface.

각 그래프 번호별 건부피는 Fig. 2-3a의 경우와 동일하다. 각 건들의 발파심도별 P_a/P_b 의 수치값 역시 Table 2-1에 표시하였다. 발파심도별로는 cluster 경우를 제외하고는 건부피와 무관하게 1 m의 경우에 최대치를 가지며, 건부피의 증가에 따라 단조증가하는 양상을 보인다. 특히 cluster의 경우는 P_a/P_b 값이 10.0을 넘어, 기포효과가 미약한 양호한 파원임을 지시한다.

1-1-5. 기포주기

Fig. 2-3c는 1 m에서 5 m까지 1 m 간격으로 발파심도를 변화시키며 발파심도에 따른 원거리장 파형의 기포주기 T_b 를 나타낸 그림으로, 각 그래프 번호별 건부피는 Fig. 2-3a의 경우와 동일하다. 각 건들의 발파심도별 T_b 수치값 역시 Table 2-1에 표시하였다. 발파심도와와의 상관관계는 매우 작은 편이나, 건부피의 증가에 따라서는 규칙적으로 단조증가하는 양상을 보인다. 최소자승법을 이용하여 구한 이들 사이의 관계는 T_b 가 건부피 V 의 0.326승에 비례함을 보이며, 이는 이론치인 0.33 (Nooteboom, 1978) 및 김 기영 외 (1993a)의 관측치인 0.35와 잘 일치한다.

Table 2-1. Characteristics of source signatures in the time domain.

	$R_{obs} = 0.6$			$R_{obs} = 0.8$			$R_{obs} = 1.0$			
	V (ℓ)	d (m)	P_a (MPa-m)	P_a/P_b	T_b (ms)	P_a (MPa-m)	P_a/P_b	T_b (ms)	P_a (MPa-m)	P_a/P_b
0.16	1	.1870	2.479	39.0	.1938	4.125	38.0	.2271	7.066	38.0
0.16	2	.3346	3.275	39.0	.3745	3.920	38.0	.4143	4.611	38.0
0.16	3	.3198	2.660	39.0	.3597	2.952	38.0	.3996	3.252	38.0

0.16	4	.3171	2.277	39.0	.3532	2.500	39.0	.3893	2.614	38.0
0.16	5	.3688	2.090	39.0	.4086	2.202	39.0	.4485	2.324	39.0
0.33	1	.2308	2.457	49.0	.2436	4.465	48.0	.2841	8.642	47.0
0.33	2	.4145	3.538	49.0	.4651	4.615	48.0	.5158	5.331	47.0
0.33	3	.3877	2.882	49.0	.4382	3.447	48.0	.4887	3.982	48.0
0.33	4	.3734	2.422	49.0	.4194	2.738	48.0	.4655	3.003	48.0
0.33	5	.4362	2.269	49.0	.4867	2.484	49.0	.5373	2.628	49.0
0.66	1	.2859	2.474	62.0	.3062	4.787	61.0	.3558	11.100	60.0
0.66	2	.5163	3.741	61.0	.5798	5.566	61.0	.6433	6.795	60.0
0.66	3	.4745	3.091	61.0	.5380	4.134	61.0	.6015	4.781	60.0
0.66	4	.4425	2.591	61.0	.5003	3.201	61.0	.5581	3.542	60.0
0.66	5	.5177	2.535	62.0	.5812	2.830	61.0	.6446	3.084	61.0
1.15	1	.3439	2.560	75.0	.3709	5.053	73.0	.4276	13.569	72.0
1.15	2	.6225	4.070	74.0	.6981	6.357	73.0	.7737	8.281	72.0
1.15	3	.5660	3.409	74.0	.6415	4.790	73.0	.7171	5.782	72.0
1.15	4	.5148	2.841	74.0	.5830	3.653	73.0	.6512	4.196	72.0
1.15	5	.6033	2.791	74.0	.6789	3.298	74.0	.7545	3.581	73.0
1.64	1	.3909	2.548	84.0	.4210	5.111	82.0	.4837	15.694	81.0
1.64	2	.7063	4.145	83.0	.7909	6.815	82.0	.8756	9.567	81.0
1.64	3	.6391	3.511	83.0	.7237	5.188	82.0	.8084	6.648	81.0
1.64	4	.5739	2.920	83.0	.6496	3.971	82.0	.7269	4.773	81.0
1.64	5	.6738	2.935	83.0	.7584	3.629	83.0	.8431	4.061	82.0
2.46	1	.5384	3.219	95.0	.5752	6.557	94.0	.6535	21.678	92.0
2.46	2	.9652	5.305	94.0	1.0763	9.036	93.0	1.1875	13.376	92.0
2.46	3	.8663	4.496	94.0	.9775	6.913	93.0	1.0886	9.148	92.0
2.46	4	.7604	3.697	94.0	.8608	5.310	94.0	0.9719	6.676	93.0
2.46	5	.8978	3.840	95.0	1.0090	4.794	94.0	1.1201	5.552	93.0
4.92	1	.8626	6.893	117.0	.9033	13.998	116.0	1.0318	56.965	115.0
4.92	2	1.5407	11.640	116.0	1.7041	21.003	116.0	1.8674	33.898	114.0

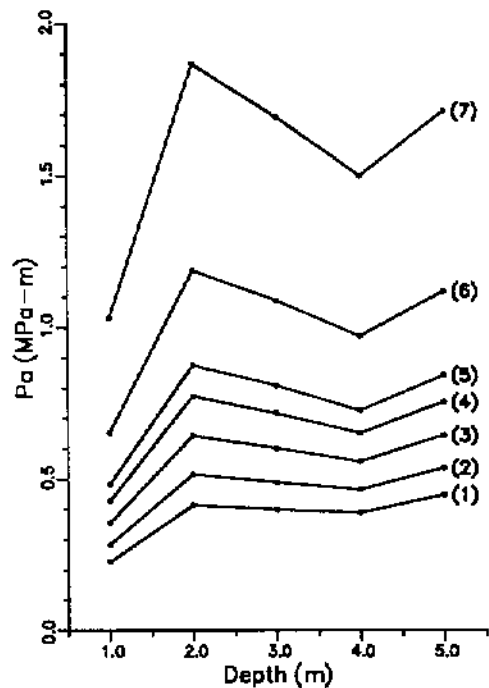
4.92	3	1.3665	9.906	116.0	1.5299	16.202	116.0	1.6932	23.396	115.0
4.92	4	1.1737	8.143	117.0	1.3370	12.348	116.0	1.5004	16.572	115.0
4.92	5	1.3862	8.548	117.0	1.5496	11.247	116.0	1.7130	13.923	116.0

1-1-6. 해수면 반사계수 효과

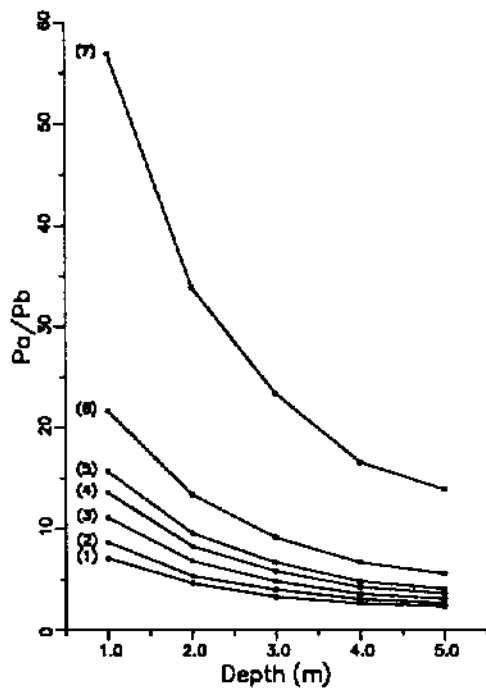
Fig.2-4 및 Fig.2-5는 해상상태가 극히 양호한 이상적인 환경과 극히 불량한 상태를 나타내기 위하여 해수면 반사계수 R 을 각각 -1.0 과 -0.6 으로 설정하여 계산한 원거리장 파형들로서 발파심도에 따른 특성을 보여준다. 각 그래프 번호에 해당하는 건부피는 Fig.2-3의 경우와 동일하다. $R=-1.0$ 및 $R=-0.6$ 인 경우의 P_a , P_a/P_b , T_b 의 수치자료는 Table 2-1에 함께 요약하였다.

Fig.2-4a와 Fig.2-5a에 도시된 발파심도와 건부피에 따른 수신호 진폭 P_a 의 변화 양상은 $R=-0.8$ 인 Fig.2-3a의 경우와 유사하다. 즉, 200 Hz 미만의 주파수영역에서 노치가 생기지 않는 3.7 m 이내의 범위에서의 발파심도별 수신호 진폭 P_a 는 건부피와 무관하게 2 m의 경우에 최대치를 가지며, 건부피의 증가에 따라 P_a 는 단조증가하는 양상을 보인다. Table 2-1은 발파심도가 2 m인 cluster의 경우, P_a 는 $R=-0.8$ 인 때에 비하여 $R=-1.0$ 및 $R=-0.6$ 일 때 각각 9.6% 증가 및 9.6% 감소함을 보인다.

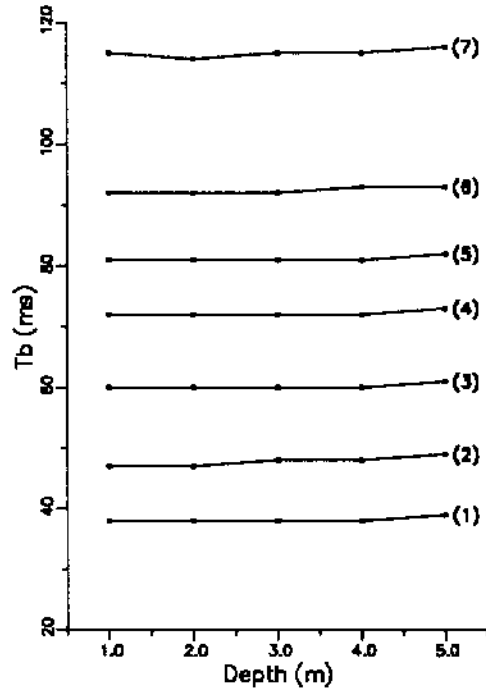
$R=-1.0$ 인 Fig.2-4b와 $R=-0.6$ 인 Fig.2-5b는 수신호와 기포의 진폭비 P_a/P_b 가 $R=-0.8$ 인 Fig.2-3b의 경우와 유사하게 건부피의 증가에 따라 단조증가하는 양상을 보인다. Fig.2-4b의 경우는 2 m의 경우 최대치를 갖지 않고 발파심도에 따라 단조감소하는 반면, Fig.2-5b에서 0.16 t 건을 제외한 모든 경우에 2 m의 경우 최대치를 갖는 대조적인 모습을 보인다. 특히 cluster 경우, Fig.2-4b는 P_a/P_b 비가 13.9-57.0 인 반면, Fig.2-5b는 11.2-21.0 의 값을 나타내어, P_a/P_b 는 해수면 반사계수에 따라 민감하게 변하는 특징이 있음을 보인다.



(a)

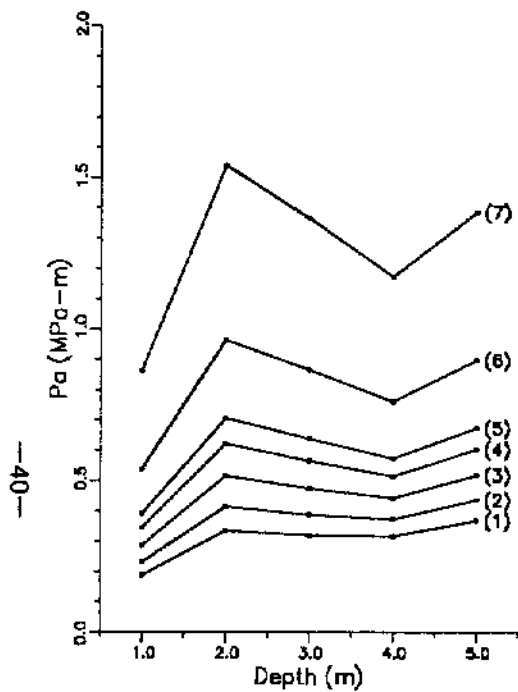


(b)

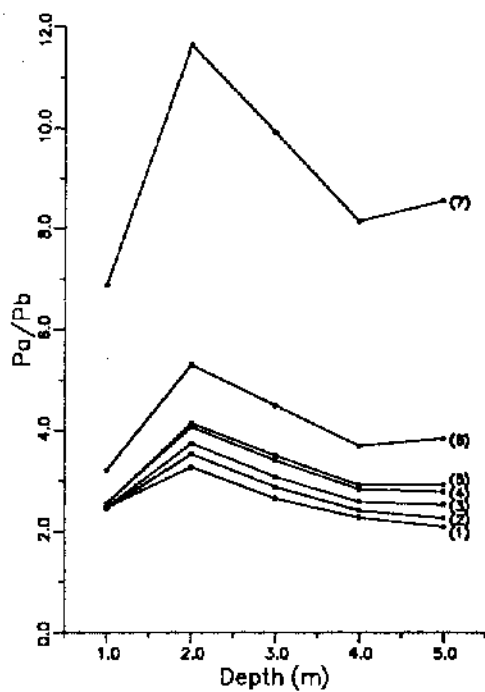


(c)

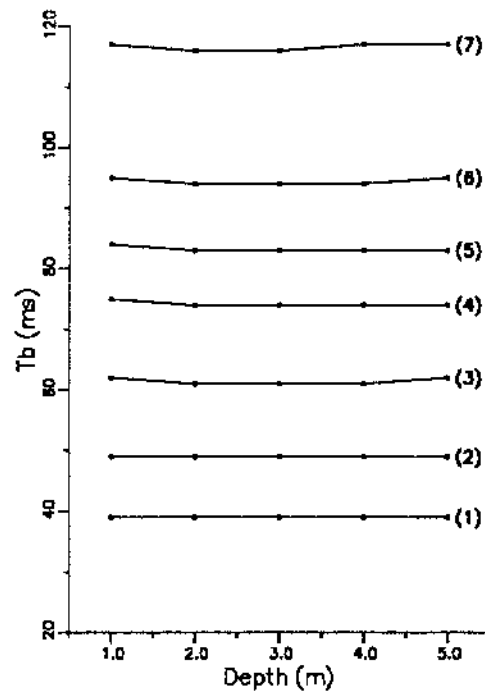
Fig. 2-4. (a) - (c) the same as for Fig.2-3. The reflectivity at the sea surface was assumed -1.0 to synthesize the far-field signatures for an ideal sea surface.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2-5. (a) - (c) the same as for Fig.2-4. The reflectivity at the sea surface was assumed -0.6 to synthesize the far-field signatures for a rough sea surface.

다. Table 2-1은 발파심도 2 m인 cluster의 경우, P_a/P_b 는 $R=-0.8$ 인 때에 비하여 $R=-1.0$ 및 $R=-0.6$ 일 때 각각 61 % 증가 및 45 % 감소함을 보인다.

Fig. 2-4c 및 Fig. 2-5c는 발파심도 및 건부피에 따른 기포주기 T_b 를 나타낸 것으로, 발파심도와 상관계수는 매우 작은 편이나, 건부피의 증가에 따라서는 규칙적으로 단조증가하는 양상을 보여 Fig. 2-3c의 결과와 흡사한 양상을 보인다. 해수면 반사계수 R 이 -0.6에서 -1.0으로 절대크기가 증가함에 따라 T_b 는 항상 감소하는 모습을 보이거나 그 정도는 매우 미약하다. Table 2-1은 발파심도 2 m인 cluster의 경우, T_b 는 $R=-0.8$ 인 때에 비하여 $R=-1.0$ 및 $R=-0.6$ 일 때 각각 1.7 % 감소 및 6.0 % 증가함을 보인다.

1-2. 주파수영역에서의 분석

1-2-1. 진폭 스펙트럼

Fig. 2-6은 Fig. 2-2의 원거리장 파형들의 진폭 스펙트럼을 구한 것이다. 즉, 해상상태가 보통일 경우를 가산하여 해수면 반사계수를 -0.8로 설정하고 발파심도 2 m, 수중 음파전달속도를 1480 m/s로 가정하여 온누리호에 설치되어 있는 6개 독립 건 및 1개 cluster의 원거리장 파형을 주파수영역에서 나타낸 것이다. SEG 기술표준위원회 (Johnston et al., 1988)가 표준으로 제시한 바에 따라, 가로축은 주파수를 Hz로, 세로축은 주파수별 절대진폭을 $1 \mu\text{Pa}\cdot\text{m}/\text{Hz}$ 기준 dB값으로 나타내었다.

건부피 증가에 따라 진폭 스펙트럼의 절대크기는 증가하고, 기포주기 효과는 오히려 감소하여 0.16 l 건의 경우 100 Hz 이상까지 뚜렷하게 미치던 영향이 2.46 l 건의 경우에는 70 Hz 부근까지만 가시적으로 나타난다. 이는 시간영역에서 건부피의 증가에 따라 주신호대 기포의 진폭비가 감소하는데 기인한다. 그러나 가장 부피가 작은 건인 0.16 l의 경우 기포주기의 배수로 나타나

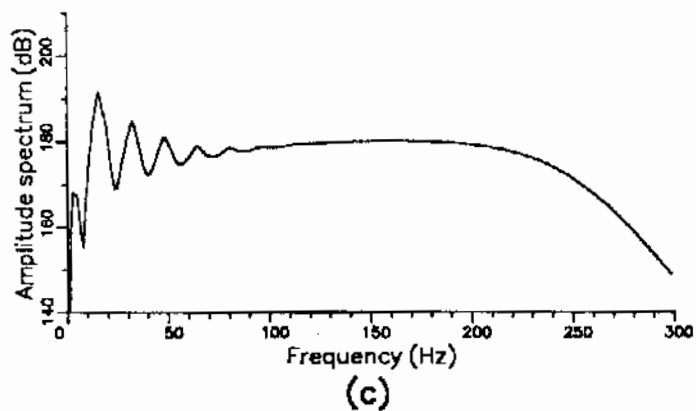
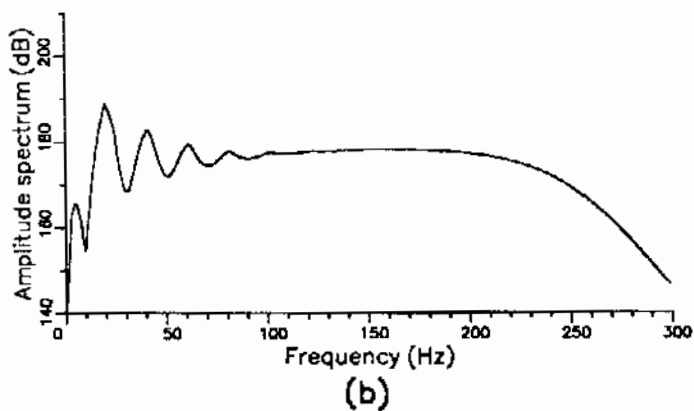
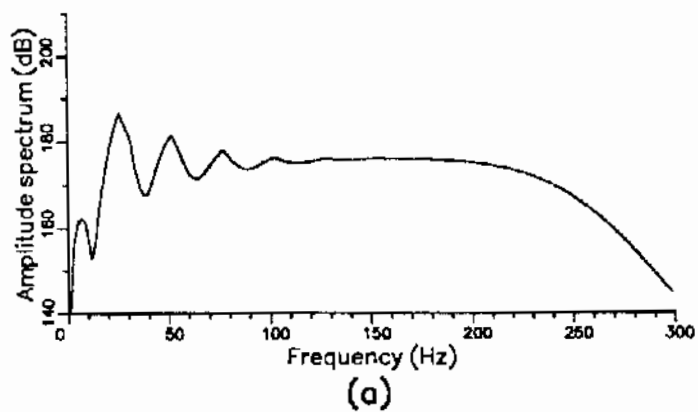
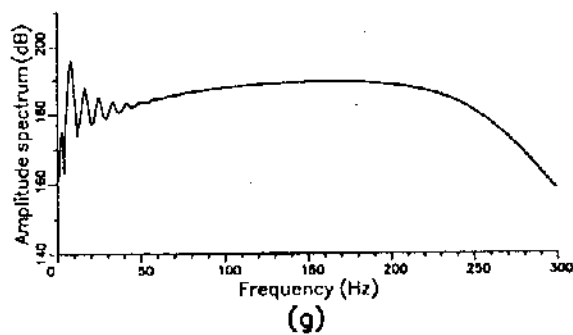
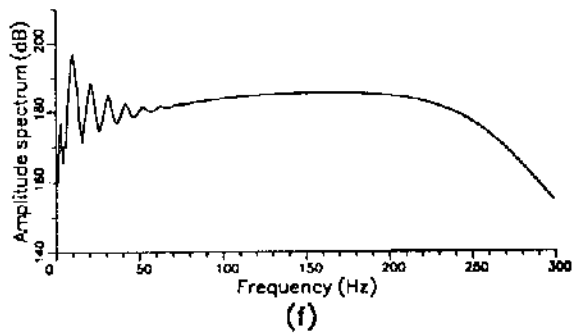
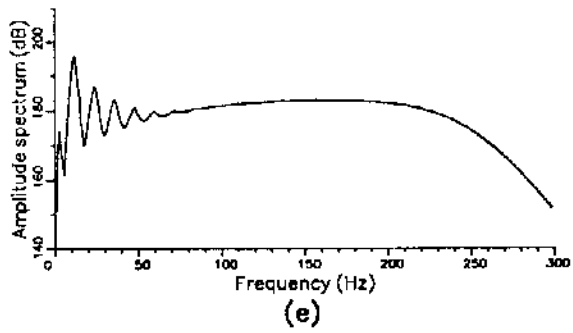
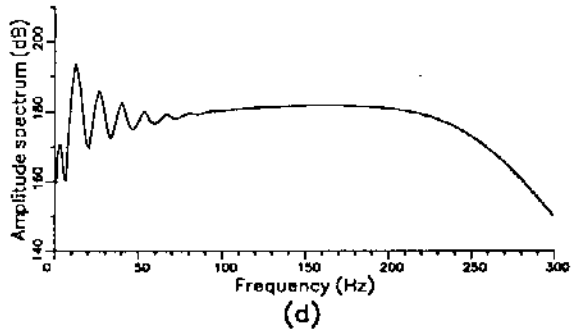


Fig. 2-6. Amplitude spectra for far-field signatures in Fig.2-2. The corresponding gun volumes from (a) to (g) are the same as for Fig.2-2.

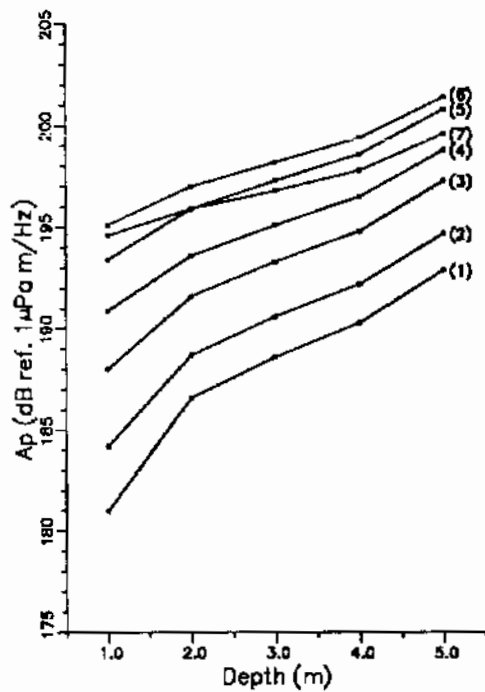


(continued)

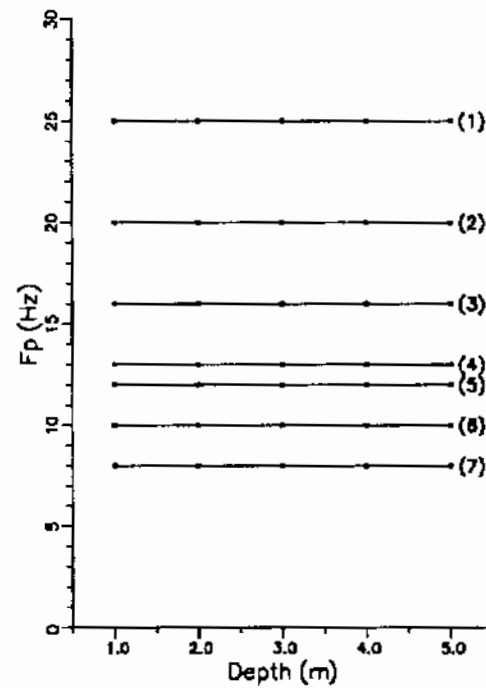
는 정점이 6개 정도 인지되는 반면, 가장 부피가 큰 2.46 ℓ의 건 두개로 구성 되어 있는 cluster 경우는 9개까지도 정점이 인지된다. 이러한 현상들은 시간 영역에서 건부피에 따른 기포주기의 증가가 주파수영역에서 정점간의 간격을 감소시키기 때문이다. 한편 식 (3)을 이용하여 구한 고스트에 의한 노치 주파수는 375 Hz로서, 300 Hz 미만의 구간에서는 노치가 나타나지 않으며, 비교적 평탄한 스펙트럼 양상을 보인다.

1-2-2. 최대 진폭

Fig. 2-7a는 원거리장 파형들의 발파심도에 따른 스펙트럼 최대치 A_p 를 나타낸 그림으로, 각 그래프 번호에 해당하는 건부피는 Fig. 2-3의 경우와 동일하다. 노치 주파수 이내 범위에서의 발파심도별 스펙트럼 최대치 A_p 는 건부피와 발파심도에 따라 단조증가하는 양상을 보인다. 다만 그래프 (6)의 2.46 ℓ 건보다 이 부피의 건 두개로 구성된 그래프 (7)의 cluster 경우, 예외적으로 A_p 값이 다소 작은 모습을 보인다. 이는 cluster를 구성하고 있는 두 건 사이의 간섭현상에 의해 기포발생이 오히려 억제되었기 때문이다 (김 기영 외, 1993b). 주파수영역에서의 스펙트럼 최대치 A_p 가 발파심도에 따라 단조증가하는 양상은, 시간영역에서 주신호 진폭 P_0 가 발파심도 2 m에서 최대치를 갖는 점과 일치하지 않는 것처럼 보인다. 이는 A_p 가 주로 기포효과에 영향을 많이 받으며 (김 기영 외, 1993a) 발파심도가 깊을 수록 일정한 주파수 범위내에서의 노치수가 증가하기 때문에 노치 이외의 주파수 범위에 상대적으로 많은 에너지가 분포하게 되기 때문이다. Table 2-2는 1 μ Pa-m/Hz 기준 dB값의 단위로 표시한 각 건들의 발파심도별 A_p 값들을 보여준다. 발파심도 1 m인 0.16 ℓ 건의 경우 181 dB 정도에서, 발파심도 5 m인 2.46 ℓ 건의 경우 201 dB 정도로 20 dB 정도의 차이가 있음을 보인다.



(a)



(b)

Fig. 2-7. (a) Peak amplitude A_p and (b) dominant frequency F_p as a function of source depth for the range of 1-5 m at 1 m interval. The other descriptions are the same as for Fig.2-4.

Table 2-2. Characteristics of source signatures in the frequency domain.

		$R_{APV} = -0.6$			$R_{APV} = -0.8$			$R_{APV} = -1.0$		
V (ℓ)	d (m)	A_p	F_p (Hz)	F_n (Hz)	A_p	F_p (Hz)	F_n (Hz)	A_p	F_p (Hz)	F_n (Hz)
[A_p] = (dB ref μ PA-m/Hz)										
0.16	1	185.6	25	-	181.0	25	-	177.2	25	-
0.16	2	187.8	25	332	186.6	25	334	186.7	25	333
0.16	3	189.1	25	255	188.6	25	252	189.1	25	250
0.16	4	190.3	25	201	190.3	25	201	190.9	25	200
0.16	5	192.4	25	143	192.9	25	143	193.6	25	143
0.33	1	189.3	20	-	184.2	20	-	178.8	20	-
0.33	2	190.8	20	332	188.7	20	333	188.3	20	333
0.33	3	191.8	20	255	190.6	20	252	190.7	20	250
0.33	4	192.8	20	201	192.2	20	201	192.6	20	200
0.33	5	194.6	20	143	194.7	20	144	195.4	20	143
0.66	1	193.4	16	-	188.0	16	-	181.1	16	-
0.66	2	194.5	16	332	191.6	16	334	190.6	16	333
0.66	3	195.2	16	255	193.3	16	252	193.0	16	250
0.66	4	196.0	16	200	194.8	16	201	195.0	16	200
0.66	5	197.6	16	143	197.3	16	143	197.8	16	143
1.15	1	196.5	13	-	190.9	13	-	182.3	13	-
1.15	2	197.2	13	333	193.6	13	333	191.8	13	334
1.15	3	197.8	13	255	195.1	13	252	194.3	13	250
1.15	4	198.4	13	200	196.5	13	200	196.2	13	200
1.15	5	199.7	13	144	198.8	13	143	199.1	13	143
1.64	1	199.0	12	-	193.4	12	-	184.2	12	-
1.64	2	199.7	12	336	195.9	12	334	193.7	12	332

1.64	3	200.2	12	255	197.3	12	252	196.2	12	250
1.64	4	200.7	12	201	198.6	12	201	198.1	12	200
1.64	5	201.9	12	143	200.8	12	143	201.0	12	143
2.46	1	200.9	10	-	195.1	10	-	184.5	10	-
2.46	2	201.3	10	334	197.0	10	334	194.0	10	332
2.46	3	201.7	10	255	198.2	10	252	196.5	10	250
2.46	4	202.1	10	201	199.4	10	200	198.4	10	200
2.46	5	203.1	10	143	201.4	10	144	201.3	10	143
4.92	1	200.4	8	-	194.6	8	-	182.1	8	-
4.92	2	200.7	8	333	195.9	8	333	191.7	8	332
4.92	3	201.0	8	255	196.8	8	252	194.2	8	250
4.92	4	201.3	8	200	197.8	8	200	196.1	8	200
4.92	5	202.0	8	144	199.6	8	144	199.0	8	143

1-2-3. 우세주기

Fig. 2-7b는 원거리장 파형들의 발파심도에 따른 우세주파수 F_p 를 나타낸 그림으로, 각 그래프 번호에 해당하는 건부피는 Fig. 2-7a의 경우와 동일하다. 발파심도별 우세주파수 F_p 는 건부피에 따라 감소하나, 발파심도와는 무관하게 일정함을 보인다. Table 2-2는 Hz 단위로 표시한 각 건들의 발파심도별 F_p 값들을 보여준다. 발파심도 및 해수면 반사계수와는 무관하게 0.16 t, 0.33 t, 0.66 t, 1.15 t, 1.64 t, 그리고 2.46 t 건들의 우세주기가 각각 25 Hz, 20 Hz, 16 Hz, 13 Hz, 12 Hz, 그리고 10 Hz로 나타난다. 한편 cluster의 경우는 8 Hz에 스펙트럼의 최고치가 놓인다. 이 결과는 김 기영 외 (1993a)가 발파심도 5 m의 해저면 반사파를 이용하여 구한 동일한 파원들의 기포주기로부터 계산한 기포주파수 27 Hz, 22 Hz, 16 Hz, 14 Hz, 12 Hz, 11 Hz, 8 Hz 등과 비교적 잘 일치하는 경향이 있으며, 이는 원거리장 파형의 우세주기가 주로 기포주기

에 영향을 받고 있음을 지시한다.

1-2-4. 노치 주파수

Table 2-2의 노치 주파수는 식 (3)에 수중음파속도 1480 m/s을 이용하여 구한 발파심도 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m에서의 노치주파수 740 Hz, 370 Hz, 247 Hz, 185 Hz, 145 Hz와 최대 37 Hz 정도까지의 차이를 보인다. 스펙트럼 계산범위를 초과하여 나타나지 않는 발파심도 1 m의 경우를 제외하고는, 발파심도가 얇을 수록 계산치와의 차이가 커지는데, 이 오차는 수중 해수면 반사에 의한 고스트 지연시간이 ms 단위로 정확히 떨어지지 않는 데 주로 기인한다. 1 ms 단위로 수치화되어 있는 근거리장 파형을 내삽 (interpolation) 과정을 통하여 이 오차를 줄일 수는 있으나 노치 주파수는 너무 자명하게 계산이 가능하므로 이 연구에서 더 이상의 시도는 없었다. 기타 근거리장 파형 계산시 추가한 백색잡음도 계산치와 모형이 정확히 일치하지 않는 하나의 요인으로 지적될 수 있다.

1-3. 소결론

이상의 결과에서, (1) 주신호의 진폭 P_a , (2) 주신호와 기포의 진폭비 P_a/P_b , (3) 기포주기 T_b 가 모두 크며, (4) 300 Hz 미만의 주파수 대역에서 비교적 평탄한 스펙트럼을 보이는, 2.46 l의 건 두개의 cluster를 2 m의 깊이에서 발파할 경우가 분석대상 파원중에서는 가장 이상적인 원거리장 파형을 발생한다는 것을 알 수 있다. 다만 건 내부압력 11.8 MPa (약 1710 PSI), 발파심도 5 m의 경우 이 건들의 평형반경 0.31 m와 2.4배인 0.73 m로 두 건 사이의 간격을 변화시킬 경우 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있음을 김 기영 외 (1993b)는 밝힌 바

있다.

제 2 절. 스트리머 특성분석

고해상 반사파 탐사자료 수신에 적합한 스트리머는 수평 해상도 (horizontal resolution)를 높이기 위해 수신채널간격이 충분히 작아야 하며, 고주파 신호를 효과적으로 감지할 수 있어야 한다. 온누리호에 설치되어 있는 다중채널 지진파 수신장치로는 96 채널 스트리머와 12 채널 스트리머가 있으며, 전자는 수 km 깊이의 깊은 지질구조 구멍에 적합하도록 제작된 것이고 후자는 수백 m 깊이에 적합하게 고안된 것이다.

2-1. 수평 해상도

온누리호의 96 채널 스트리머와 12 채널 스트리머의 채널당 길이는 각각 25 m와 6.25 m이다. 따라서 발파간격이 채널간격과 동일하도록 공심점 (Common Depth Point) 자료를 획득할 경우, 수평해상도는 각각 12.5 m와 3.125 m가 되어 12 채널 스트리머 이용시 96 채널 스트리머에 비하여 4 배 높은 수평해상도를 얻을 수 있다.

2-2. 신호대 잡음비

스트리머의 주파수별 감용도는 지진파의 진행방향과 수신배열 구성요소인 수중수신기의 특성 및 기하학적 배열 등에 따라 다르게 된다. 96 채널 스트리

머는 길이 25 m의 각 수신채널별로 240 V/MPa 감용도의 수중수신기 (AMG사 제작 HC202 hydrophone) 24개가 0.957 m의 등간격으로 일직선으로 배열되어 있다. 한편 12 채널 스트리머는 채널당 동종의 수중수신기 8개가 약 0.74 m의 등간격으로 배열되어 있다. 반사파의 진행방향이 거의 수직인 점을 감안할 때, 96 채널 스트리머는 12 채널 스트리머에 비하여 수중수신기 감용범위내에서 신호의 주파수 대역에 상관없이 채널당 $\sqrt{3}$ 배 높은 신호대 잡음비 (signal-to-noise ratio)를 얻을 수 있는 장점이 있다.

2-3. 배열반응

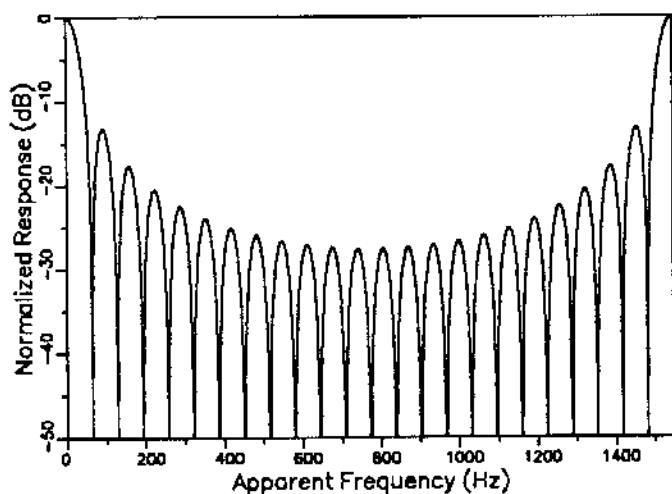
수신기 배열반응 R_{array} 은

$$R_{array} = \frac{\sin(n\pi D/\lambda_a)}{n \sin(\pi D/\lambda_a)} \quad (5)$$

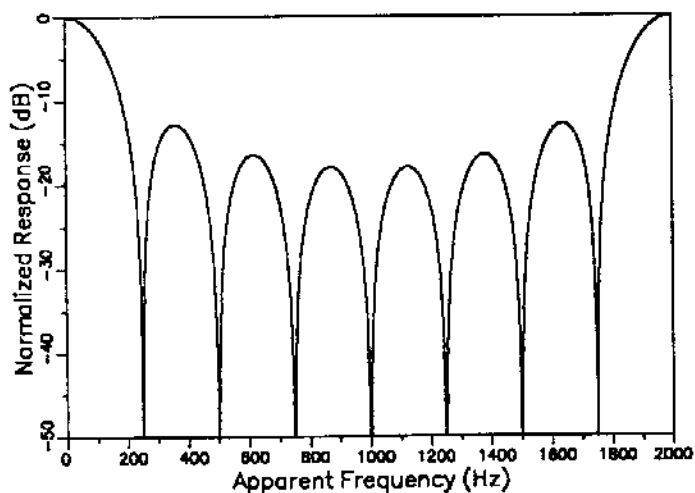
의 식으로 표시될 수 있는데 (민 경덕 외, 1987), 이때 n 은 채널당 수신기 숫자, D 는 수신기 간격, λ_a 는 겹보기 파장을 각각 뜻한다. 겹보기 파장 λ_a 는

$$\lambda_a = \frac{f}{V_p \cos \alpha} \quad (6)$$

의 식으로 표시되며, 이때 f 는 주파수, V_p 는 수중 음파전달속도, α 는 파선과 지표면 (혹은 수면)이 이루는 각도를 각각 뜻한다. 수평방향으로 진행하는 직 접도달파 및 스크류 잠음 등의 경우는 겹보기 파장과 참 파장이 일치되며, Fig. 2-8의 수신배열 반응곡선 (receiver-array response curve)에 도시된 바와



(a)



(b)

Fig. 2-8. Array response curves for the (a) 96 channel and (b) 12 channel streamers on the R/V Onnuri. The number of hydrophones per channel and the hydrophone spacing of the 96 channel streamer are 24 and 0.97 m, respectively. For the 12 channel streamer, the number of hydrophones per channel and the hydrophone spacing are 8 and 0.74 m, respectively.

같이 주파수 (혹은 파장)에 따라 그 배열반응이 다르게 나타난다. 96 채널 스트리머 경우는 Fig. 2-8a에서와 같이 첫번째 노치가 60 Hz 부근에 나타나며, 이는 수중 음파전달속도가 1480 m/s일 경우, 결보기 파장 25 m 정도의 일관성 잡음 (coherent noise)을 효과적으로 감쇠시킴을 알 수 있다. 반면에 12 채널 스트리머 경우는 Fig. 2-8b에서와 같이 첫번째 노치가 250 Hz 부근에 나타나며, 이는 결보기 파장이 6 m 정도의 단파장 잡음의 감쇠에 효과적임을 지시한다.

2-4. 소결론

이상의 결과를 요약하면, 교해상도 지진파탐사에 적합한 12 채널 스트리머는 96 채널 스트리머에 비하여, 4배 높은 수평해상도를 얻을 수 있는 반면에 S/N 비가 $\sqrt{3}$ 배 감소하는 단점이 있다. 또한 12 채널 스트리머의 경우, 파원으로부터 수신채널까지의 길이가 짧아 moveout이 매우 작은 특징이 있으며, 이로 인하여 NMO 보정 (normal moveout correction)시 야기되는 이완 (stretch)이 작게 되어 고주파 신호를 효과적으로 얻을 수 있다. 그러나 이는 자료처리 과정중에서 속도분석 및 moveout 차이를 이용한 다중반사파 제거 (김 기영과 정 귀금, 1991; 김한준 외, 1993)등을 효과적으로 실행하기 어려운 문제점도 예상된다.

제 3 절 기타 획득변수

3-1. 기록길이

기록시간은 대상심도 및 그 깊이까지의 평균속도 등에 따라 결정된다. 최대 대상심도를 1 km까지 하고, 이 깊이까지의 평균속도 2,000 m/s를 가정할 경우, 기록시간은 1 s 이상이 되어야 한다.

3-2. 샘플간격

또한 200 Hz까지의 신호를 기록하기 위해서는 샘플간격이 2.5 ms보다 작아야 한다. 실질적으로 aliasing 방지용 아날로그 필터의 모서리 주파수가 Nyquist 주파수의 절반 정도인 경우를 가정할 때, 샘플간격은 1.25 ms 보다 작아야 한다. 한편 자료처리용 소프트웨어가 일반적으로 1 ms 이상의 샘플간격을 허용하는 경우가 많은 점을 감안할 때, 샘플간격은 1 ms이 이상적이다.

3-3. 발파간격

발파간격은 스트리머와 함께 수평해상도를 결정짓는 중요한 변수이며, 사용하는 파원의 압력과 부피, 콤프레샤 용량, 스트리머의 채널간격, 그리고 기록시간 및 샘플간격과 유기적으로 밀접한 관계를 갖는다. 또한 기록계의 기록속도 역시 고려하여야 할 제한요소중의 하나이다. 온누리호에 부착되어 있는 장비중 고해상도 지진파 탐사시 바람직한 것은 용량이 13.8 MPa (2000 PSI) 기준 12 m³/min인 콤프레샤 2 대와 2.46 l의 건 두개로 구성되어 있는 cluster, 채널간격 6.25 m의 12 채널 스트리머이다. 이와 함께 주요 획득변수로는 건의 작동압력 13.8 MPa (2000 PSI), 기록시간 1 s, 샘플간격 1 ms, 조사선속도 4-6 knot로 할 경우, 발파간격은 3.125 m나 혹은 6.25 m가 적당할 것이다.

제 4 절 원거리장 파형

여기에서는 에어 건의 용량, 해수면의 반사계수, 그리고 발파 심도의 변화에 따른 여러가지 경우에 대해 원거리장 파형을 전산 모형실험을 통해 구하여 예시하였다.

4-1. 시간 영역

시간 영역에서 계산된 원거리장 파형은 Fig.A-1에서 Fig.A-15에 예시하였다. 전체 그림에서 에어 건 용량은 (a) 0.16 l, (b) 0.33 l, (c) 0.66 l, (d) 1.15 l, (e) 1.64 l, 그리고 (f) 2.46 l로 나타내었으며 2.46 l 에어 건 두개로 구성된 cluster의 파형은 (g)에 예시하였다. 아래 표는 파형을 계산할 때 설정한 반사계수 R과 에어 건 깊이 d를 그림별로 분류한 것이다.

Fig.	R	d (m)
A-1	-1.0	1
A-2	-0.8	1
A-3	-0.6	1
A-4	-1.0	2
A-5	-0.8	2
A-6	-0.6	2

A-7	-1.0	3
A-8	-0.8	3
A-9	-0.6	3
A-10	-1.0	4
A-11	-0.8	4
A-12	-0.6	4
A-13	-1.0	5
A-14	-0.8	5
A-15	-0.6	5

4-2. 원거리장 파형 (주파수영역)

주파수 영역에서 나타낸 원거리장 파형의 스펙트럼은 Fig.B-1에서 Fig.B-35에 예시하였다. 전체 그림에서 해수면의 반사계수는 (a) -1.0, (b) -0.8, 그리고 (c) -0.6 의 세가지로 고려하였으며 이때 그림별 에어 긴 용량 V 와 깊이 d 는 아래 표와 같다.

Fig.	$V(\ell)$	$d(m)$	Fig.	$V(\ell)$	$d(m)$
B-1	0.16	1	B-19	1.15	4
B-2	0.16	2	B-20	1.15	5
B-3	0.16	3	B-21	1.64	1

B-4	0.16	4	B-22	1.64	2
B-5	0.16	5	B-23	1.64	3
B-6	0.33	1	B-24	1.64	4
B-7	0.33	2	B-25	1.64	5
B-8	0.33	3	B-26	2.46	1
B-9	0.33	4	B-27	2.46	2
B-10	0.33	5	B-28	2.46	3
B-11	0.66	1	B-29	2.46	4
B-12	0.66	2	B-30	2.46	5
B-13	0.66	3	B-31	2x2.46	1
B-14	0.66	4	B-32	2x2.46	2
B-15	0.66	5	B-33	2x2.46	3
B-16	1.15	1	B-34	2x2.46	4
B-17	1.15	2	B-35	2x2.46	5
B-18	1.15	3			

제 5 절 문제점 및 토의사항

발파심도 5 m를 가정한 전산모형을 발파심도 1-5 m 사이의 원거리장 파형을 구하기 위해 사용할 경우 발생하는 오차는 매우 작아 무시할 수 있다. 주 신호 진폭 및 기포진폭 등에 영향을 주는 압력 $P_d(t)$ 는 건 내부압력 $P_m(t)$ 와 건 외부압력 $P_{air}(t)$ 의 차이, 즉

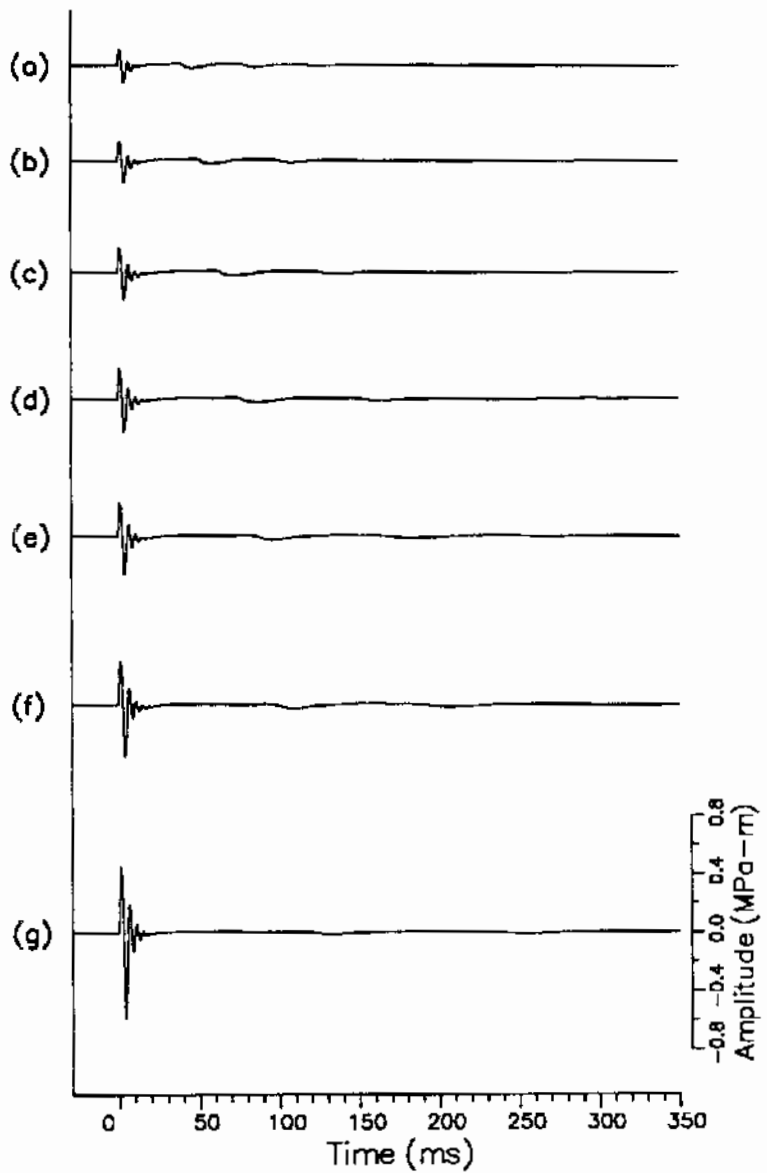


Fig. A-1.

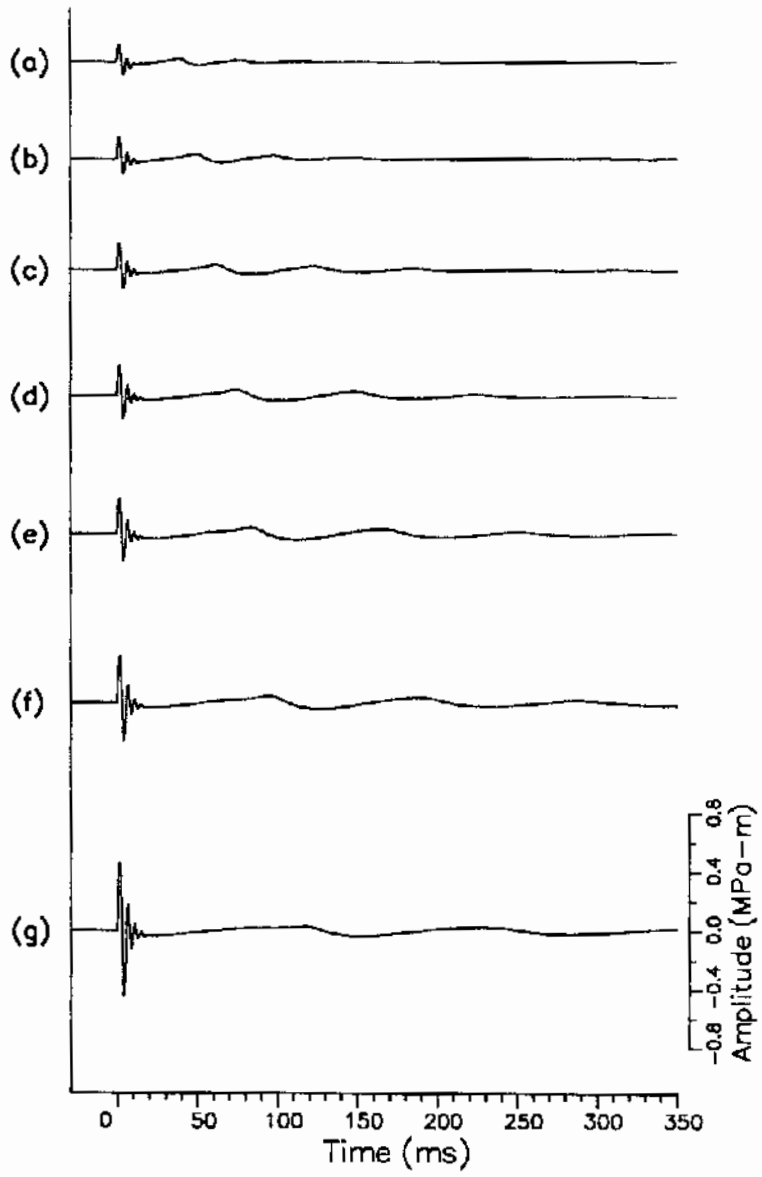


Fig. A-2.

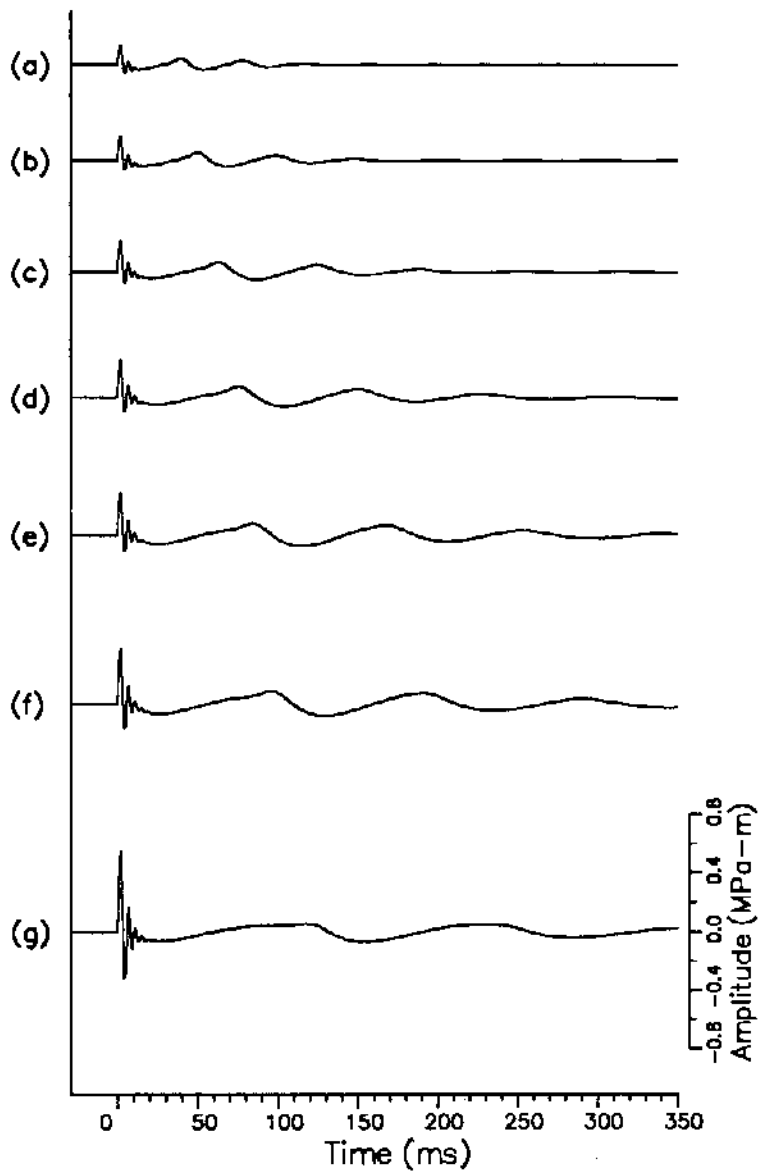


Fig. A-3.

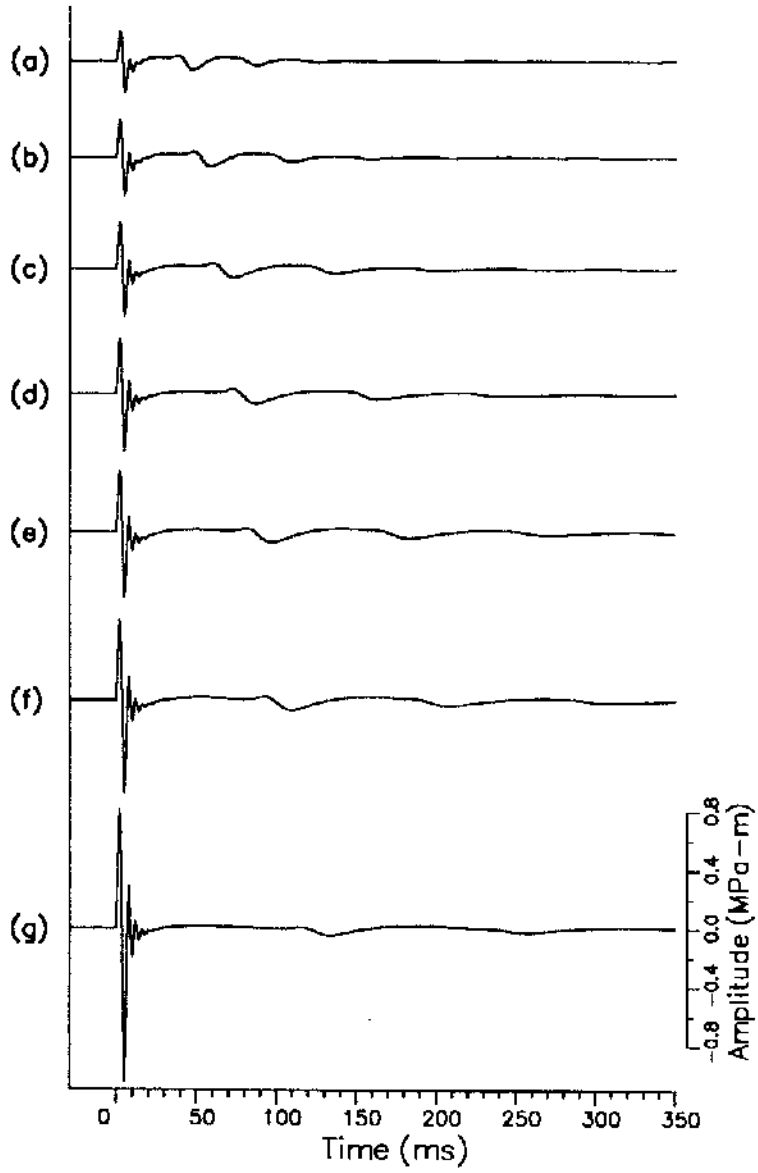


Fig. A-4.

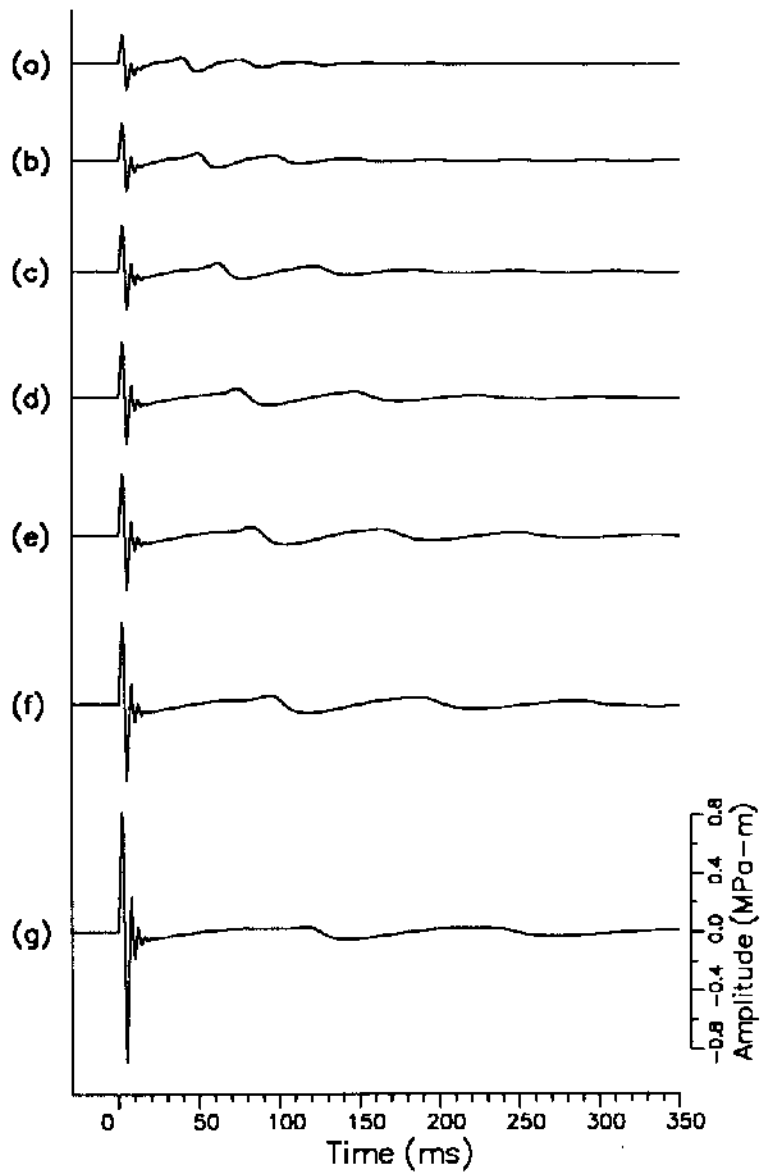


Fig. A-5.

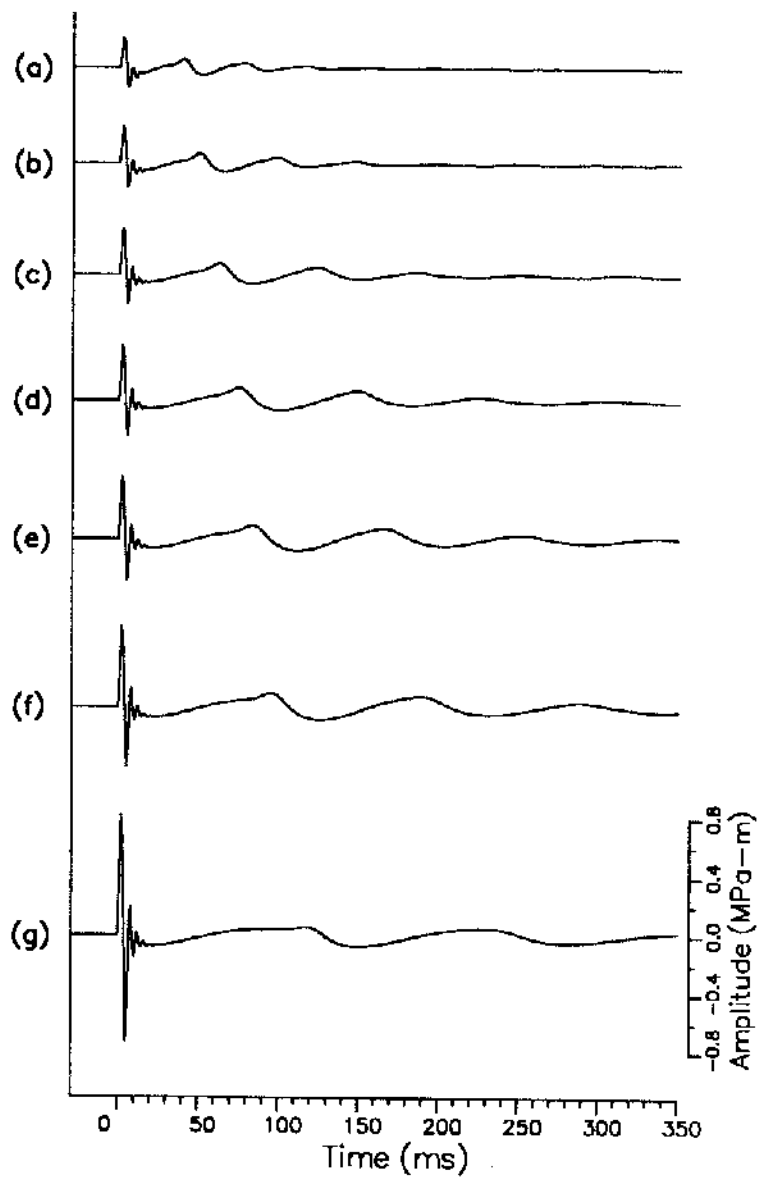


Fig. A-6.

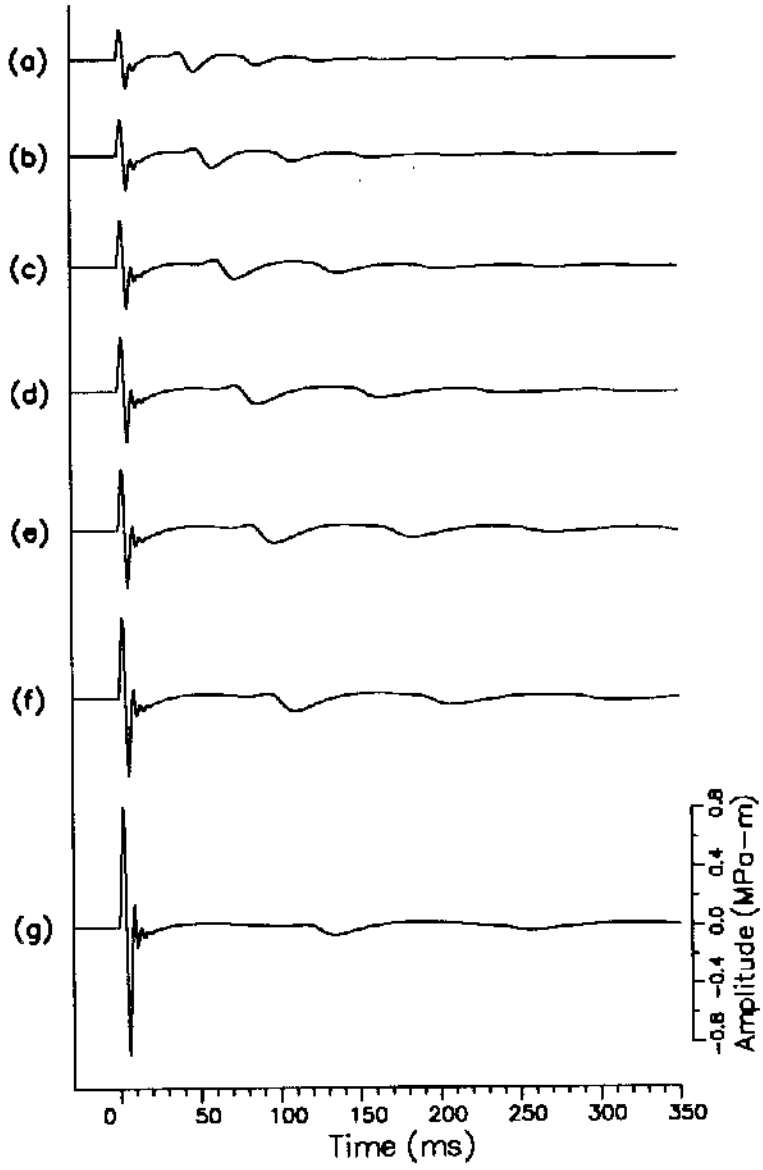


Fig. A-7.

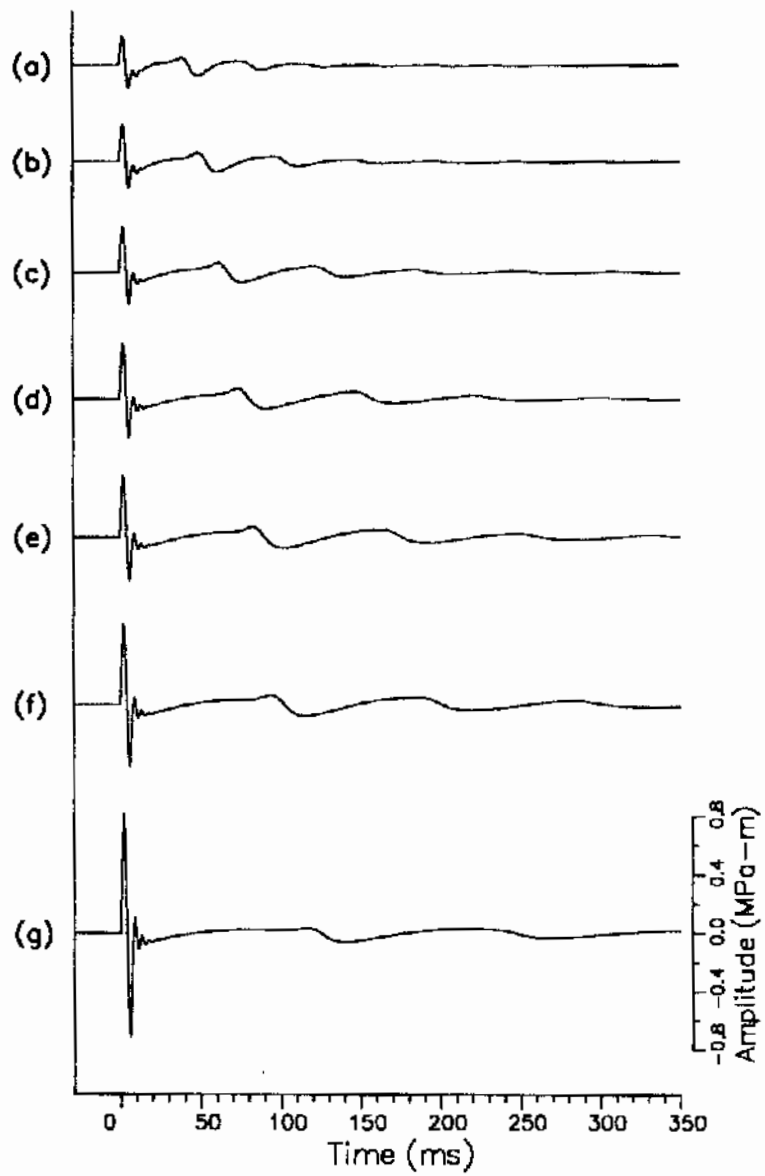


Fig. A-8.

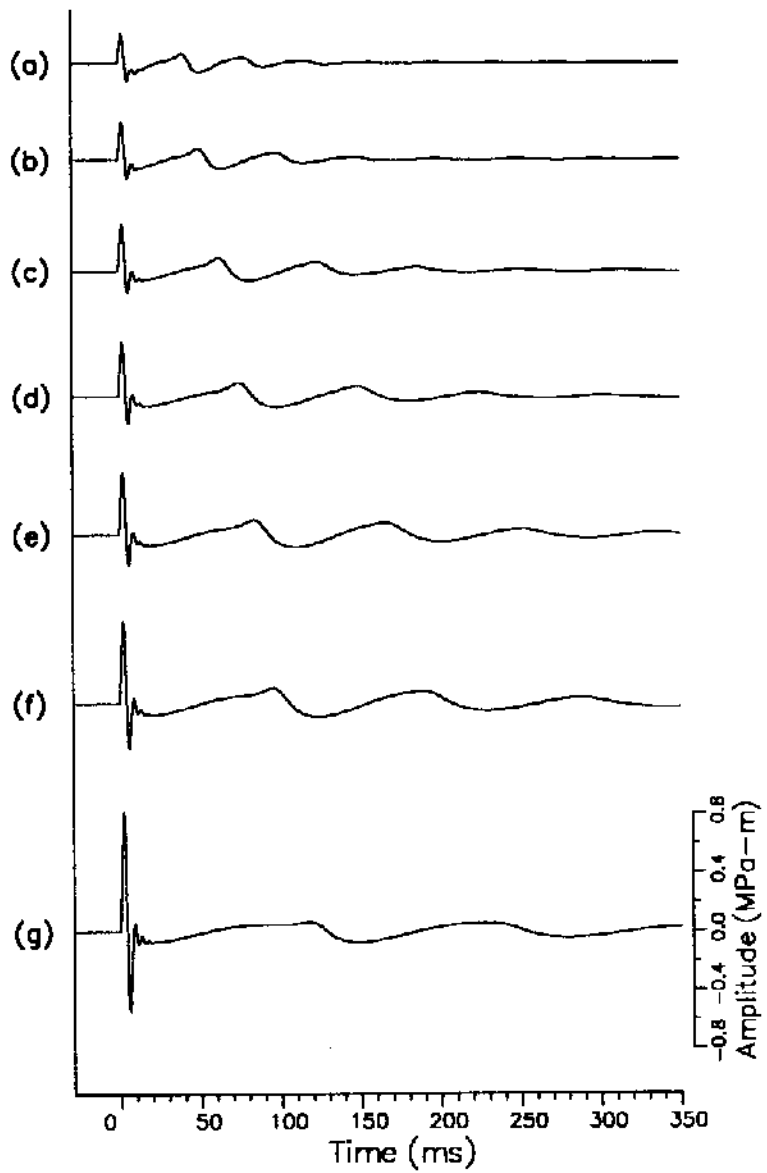


Fig. A-9.

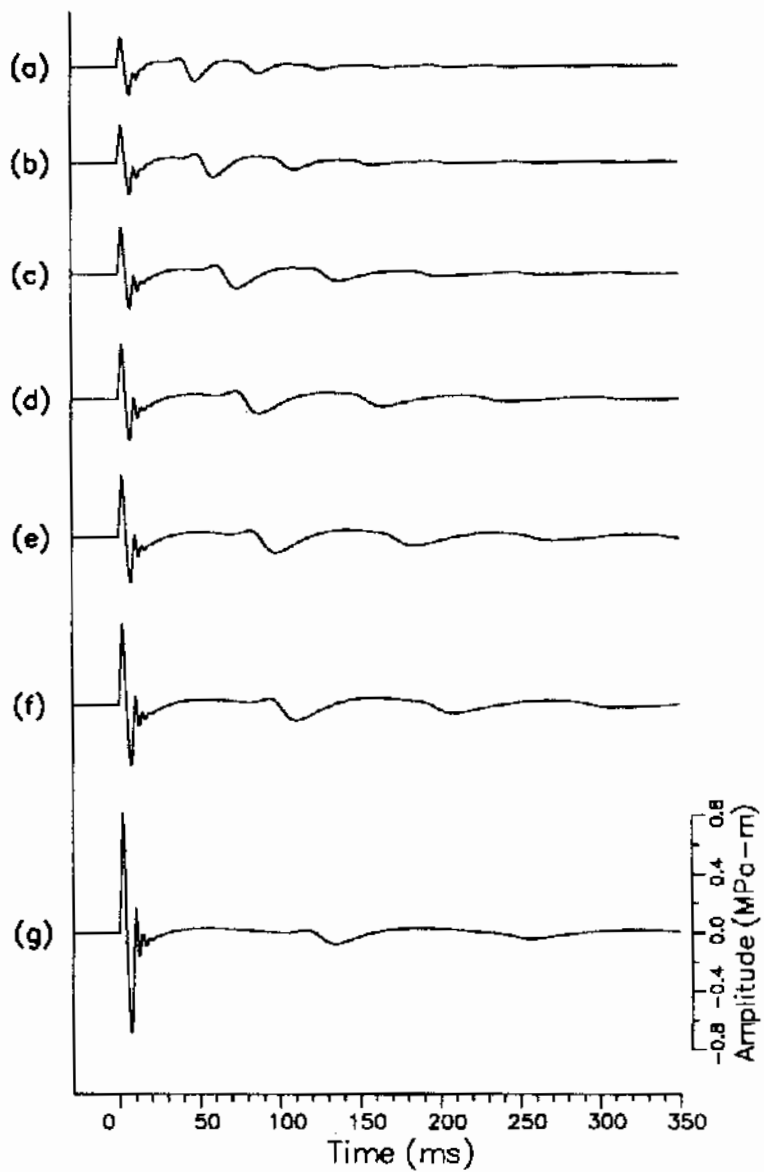


Fig. A-10.

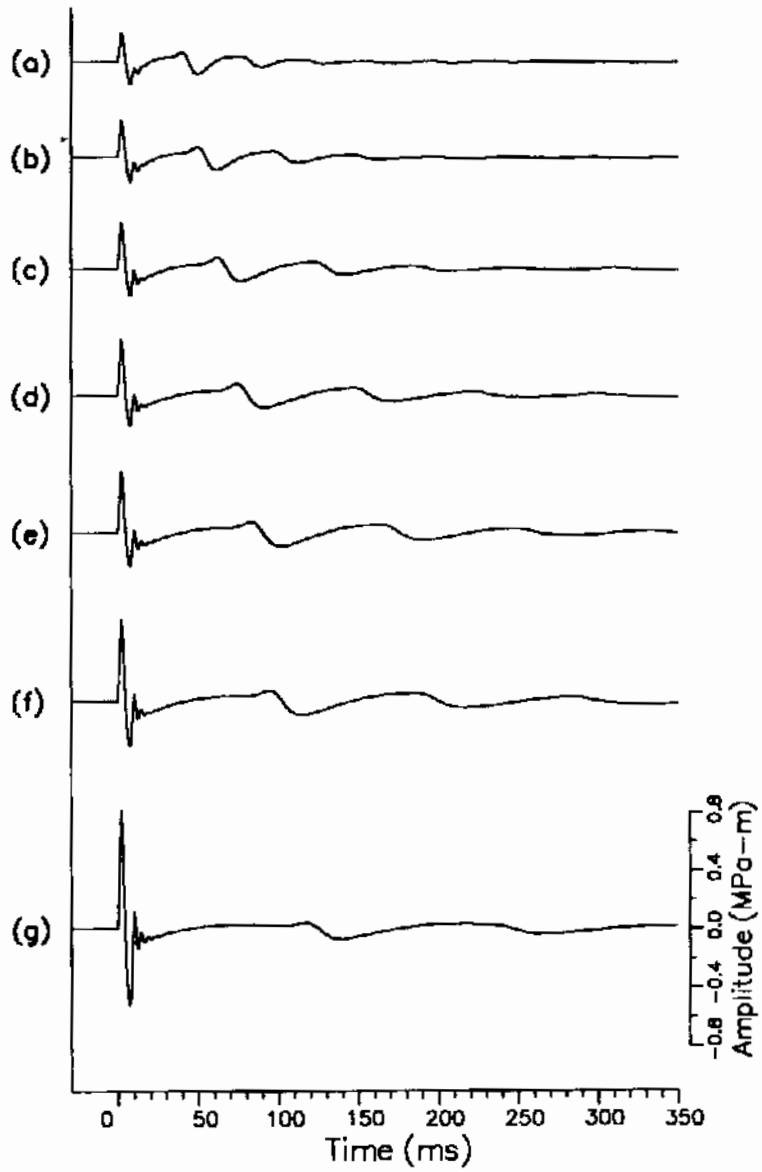


Fig. A-11.

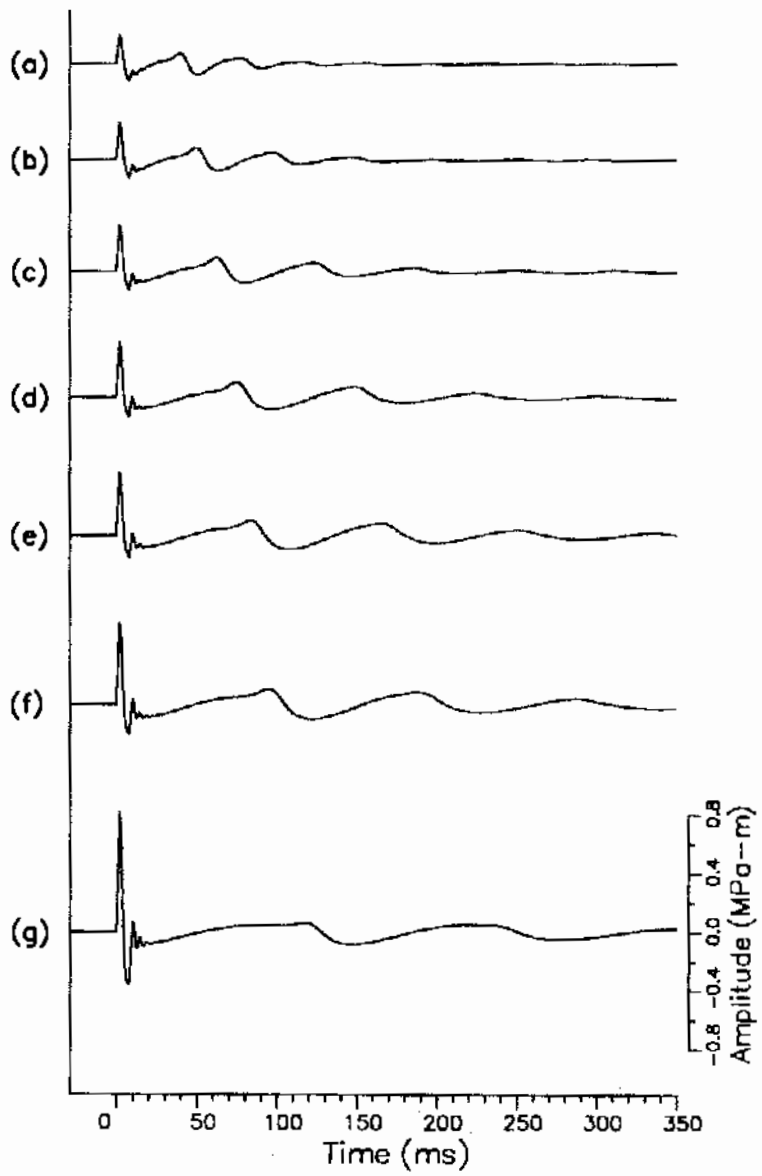


Fig. A-12.

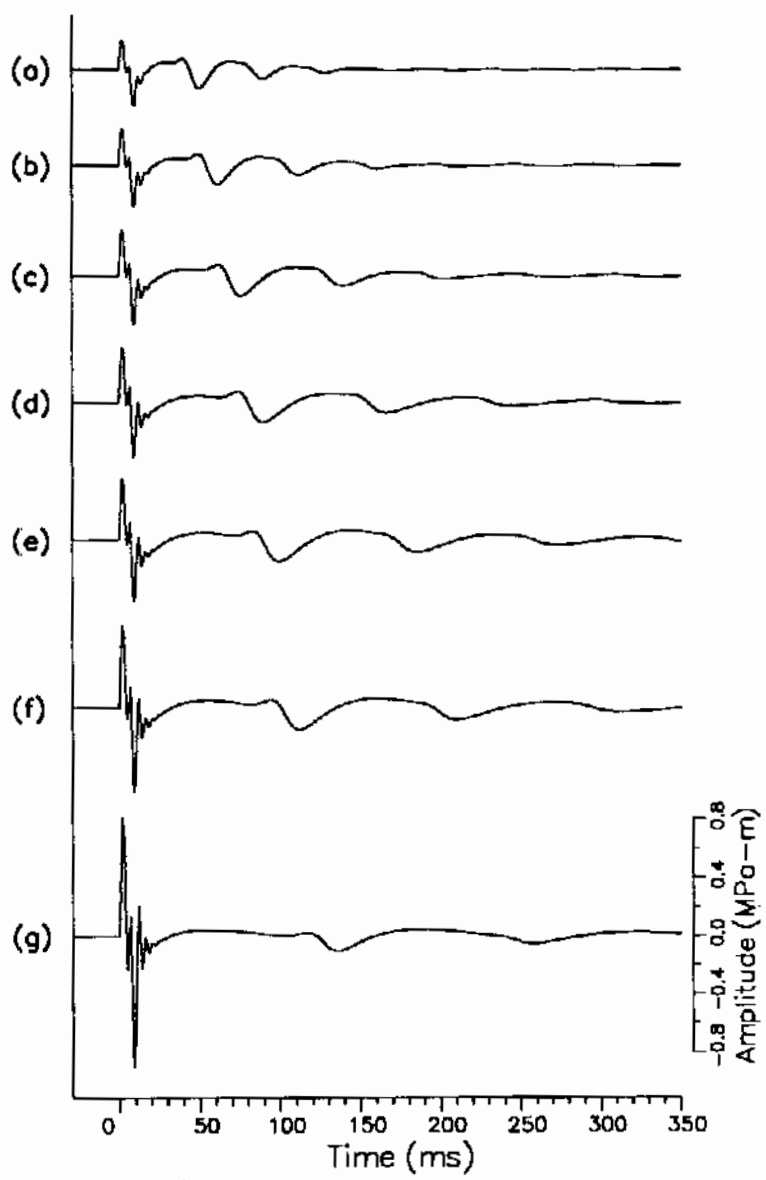


Fig. A-13.

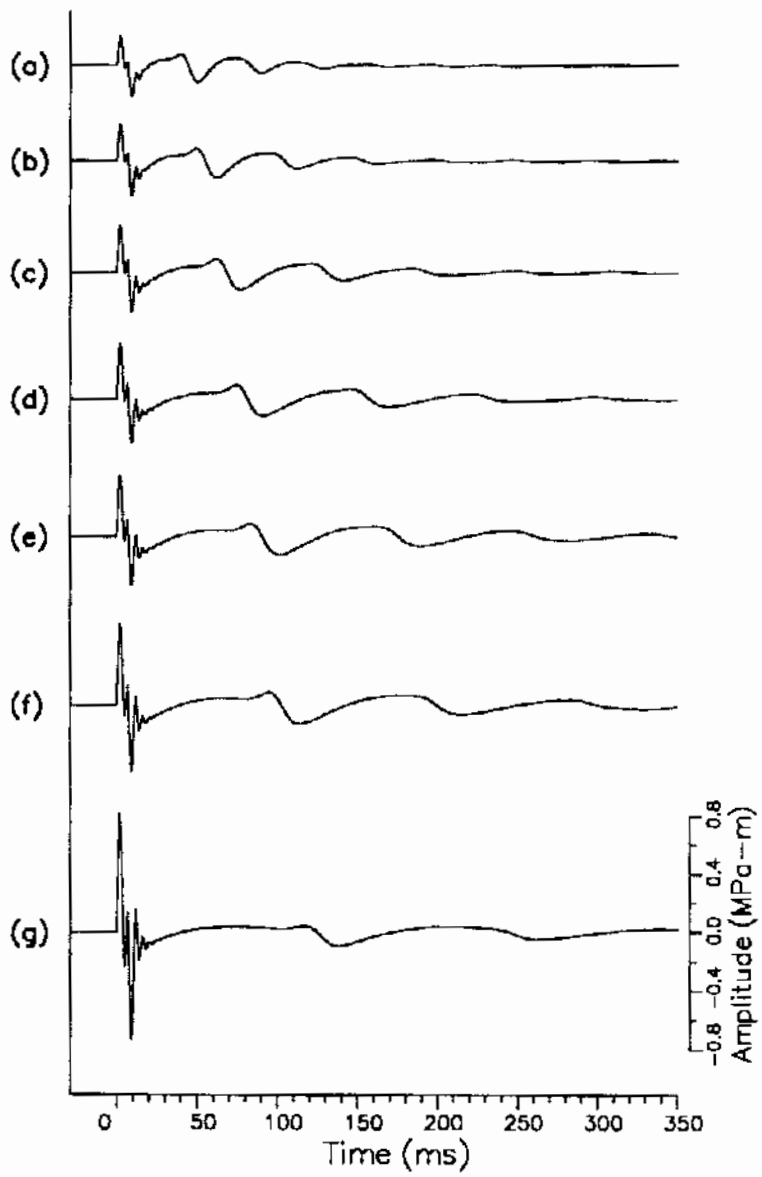


Fig. A-14.

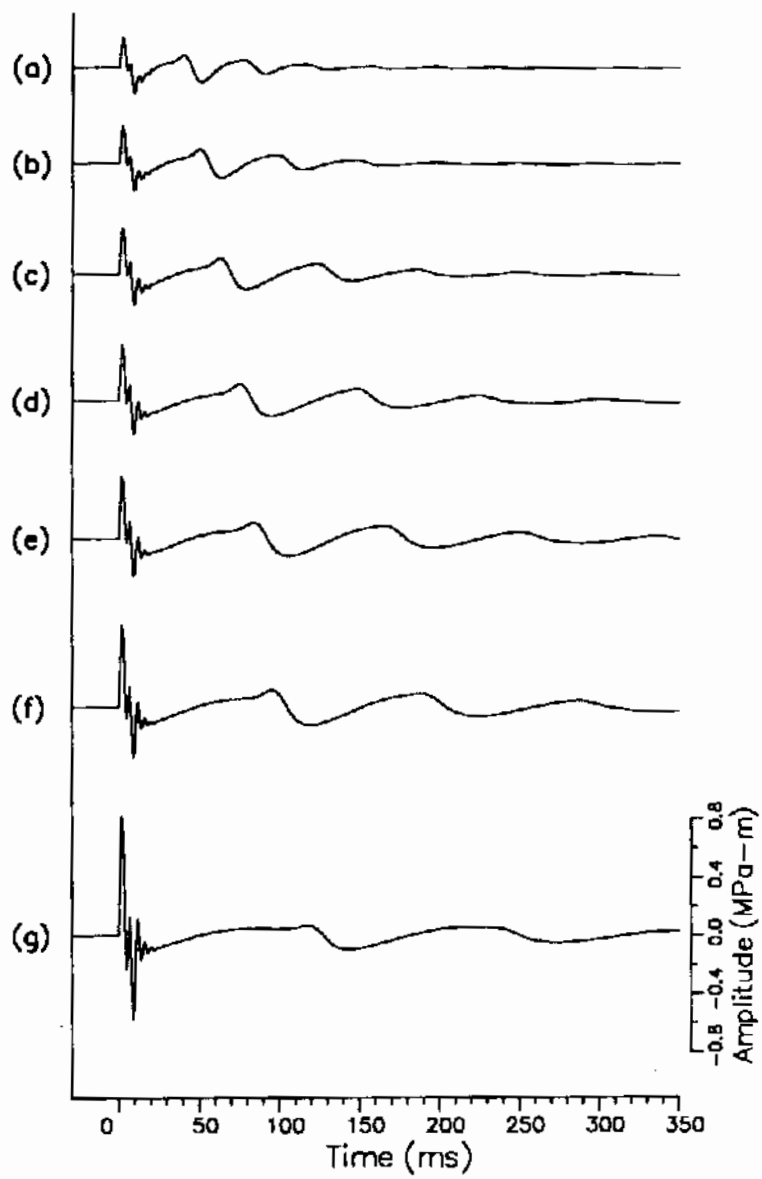
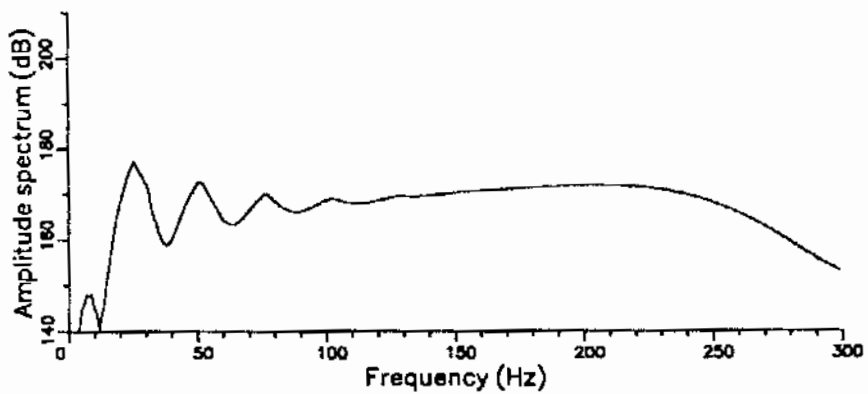
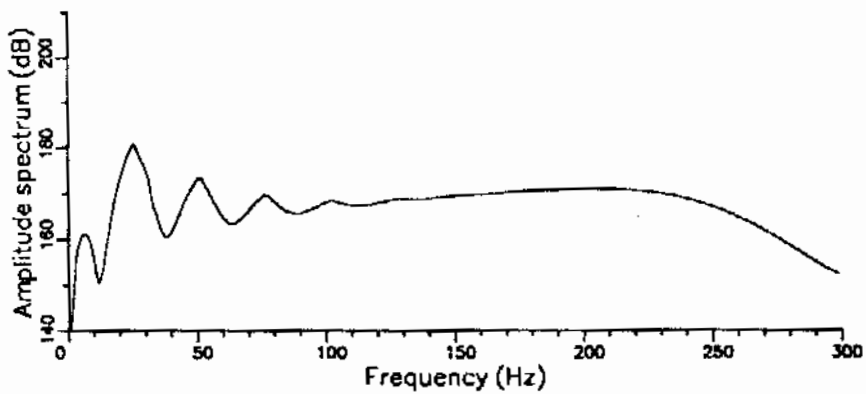


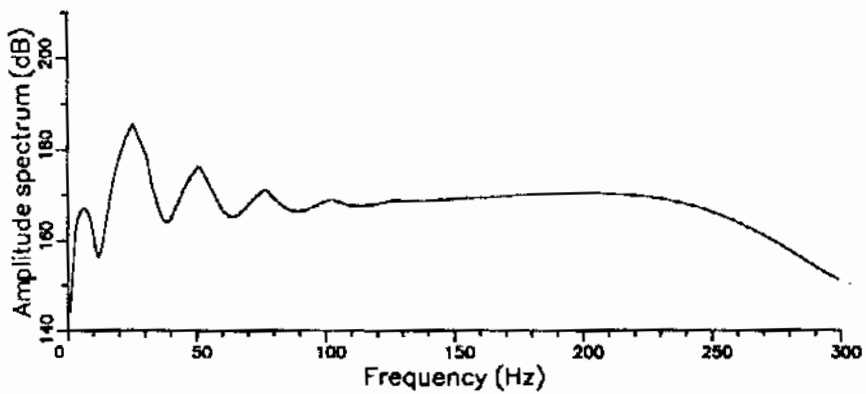
Fig. A-15.



(a)

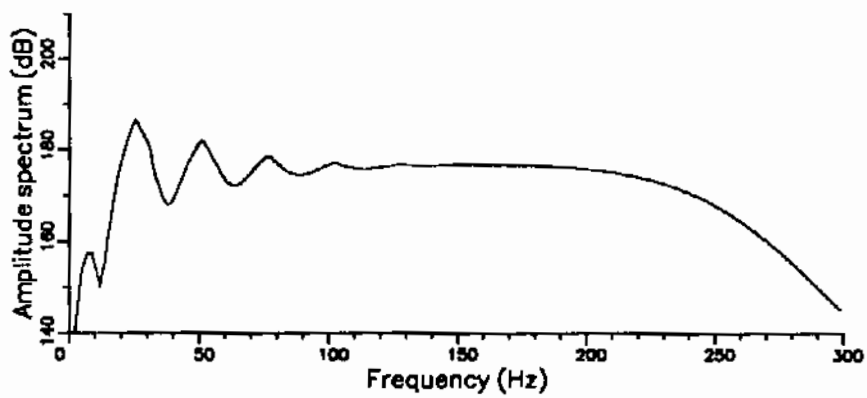


(b)

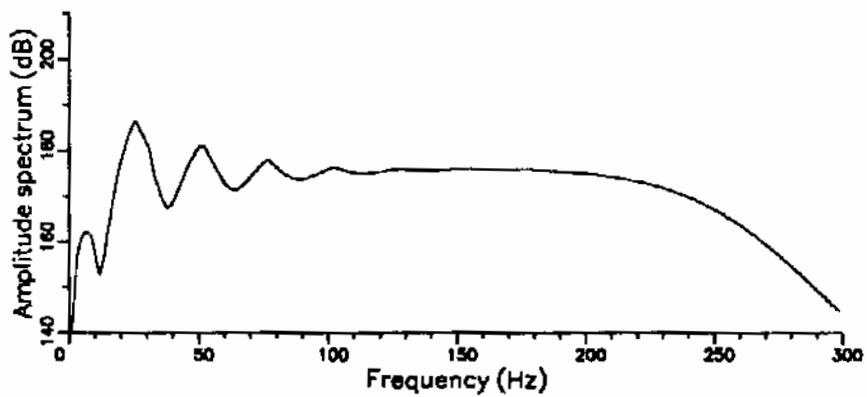


(c)

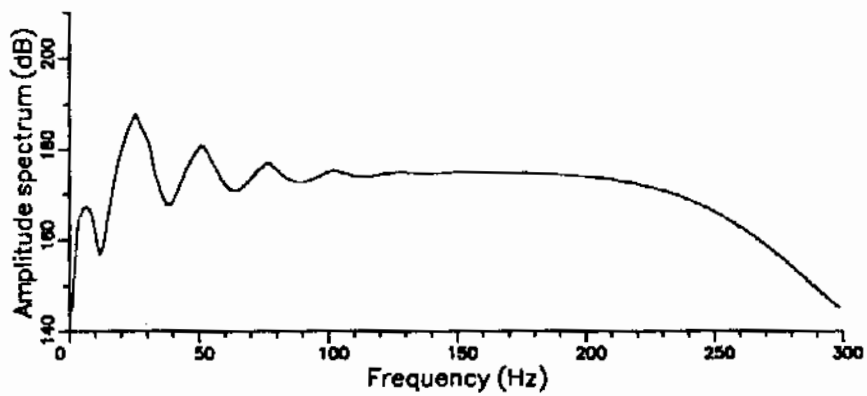
Fig. B-1.



(a)

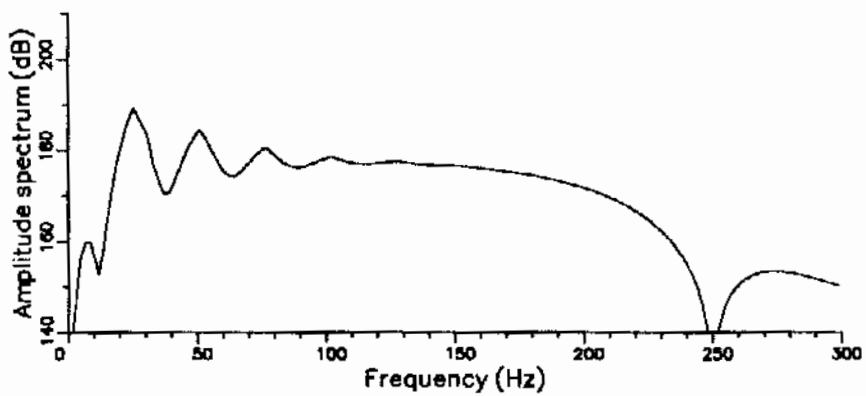


(b)

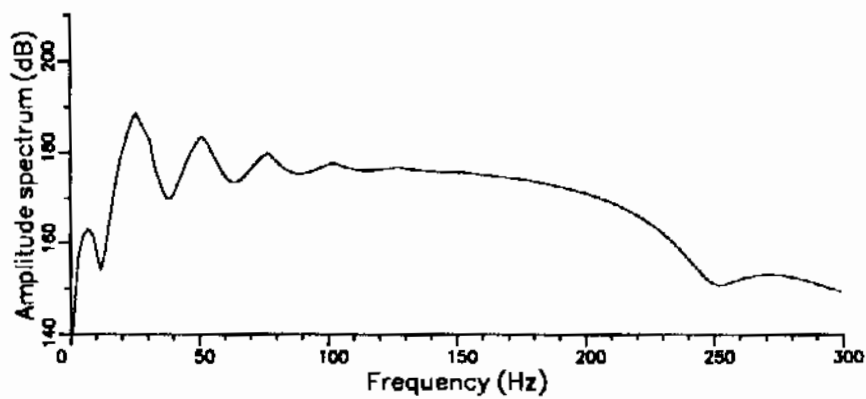


(c)

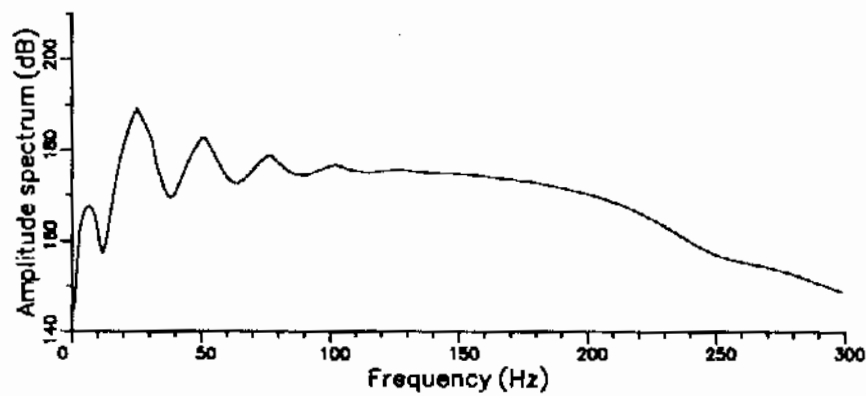
Fig. B-2.



(a)



(b)



(c)

Fig. B-3.

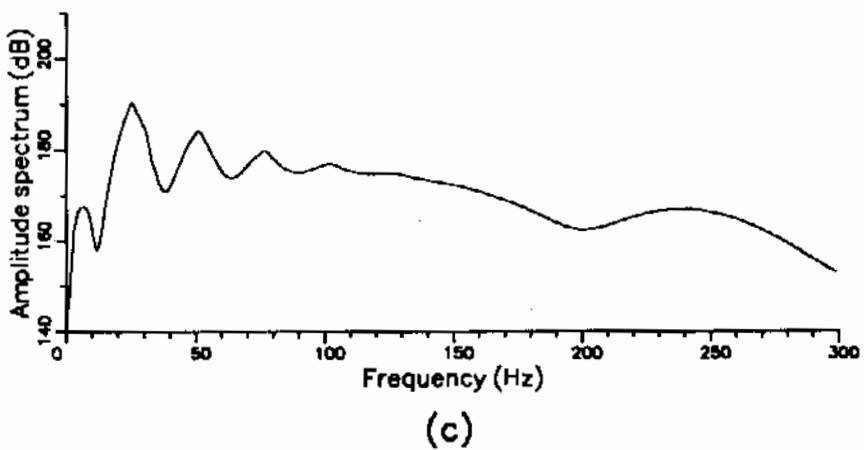
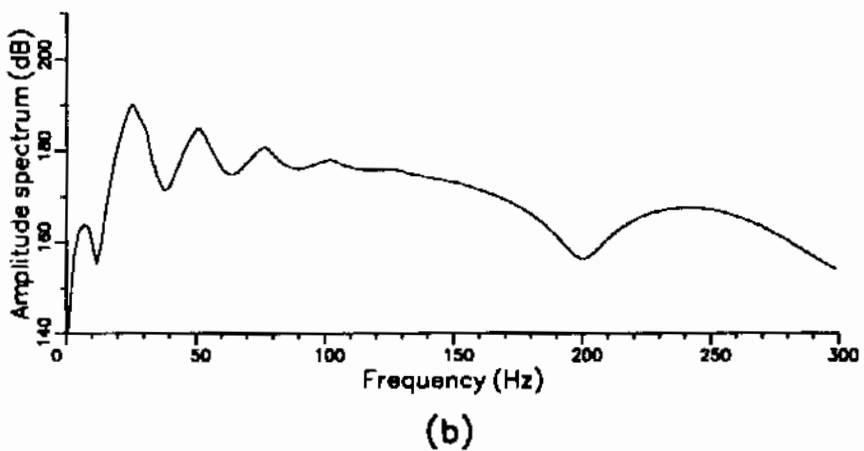
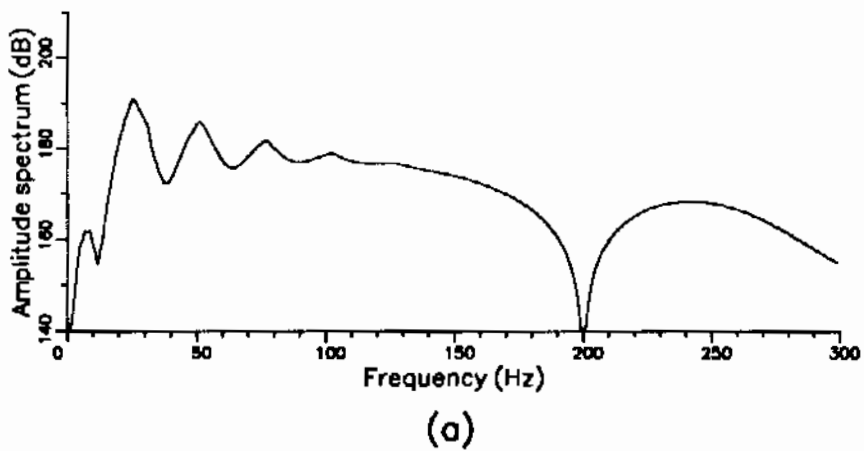
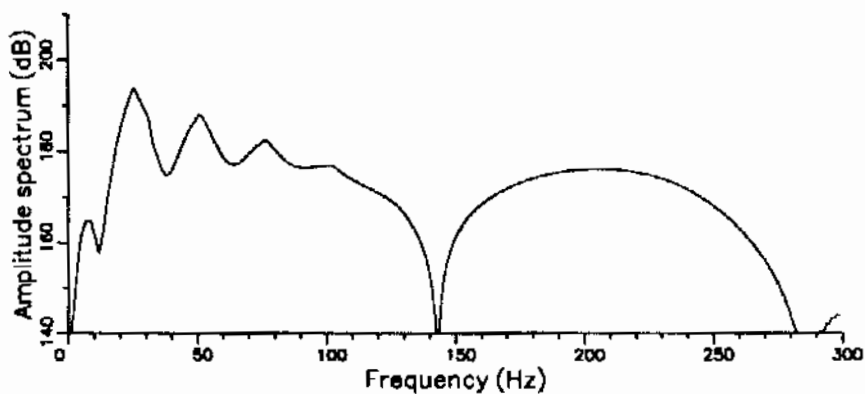
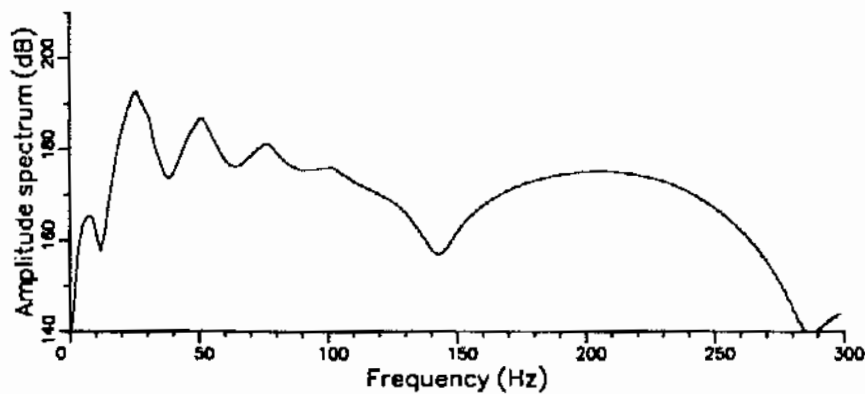


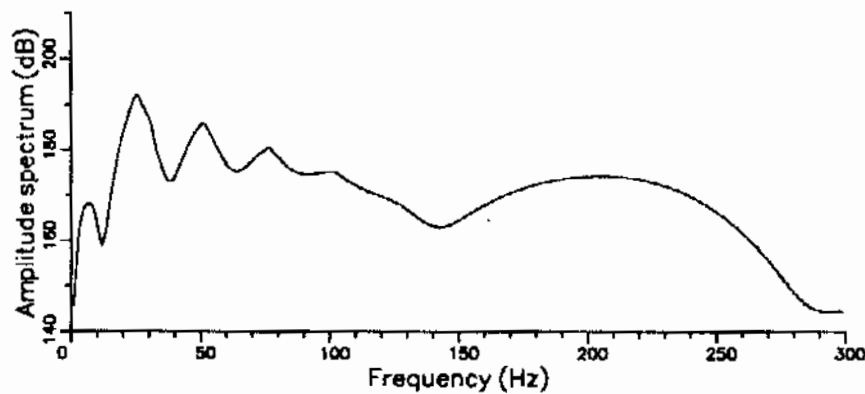
Fig. B-4.



(a)

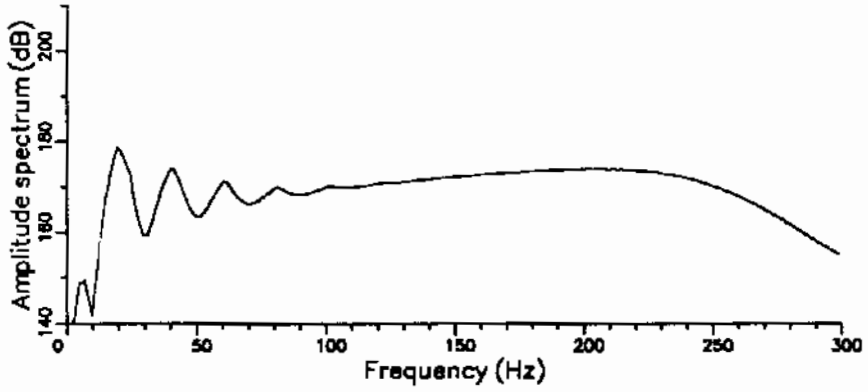


(b)

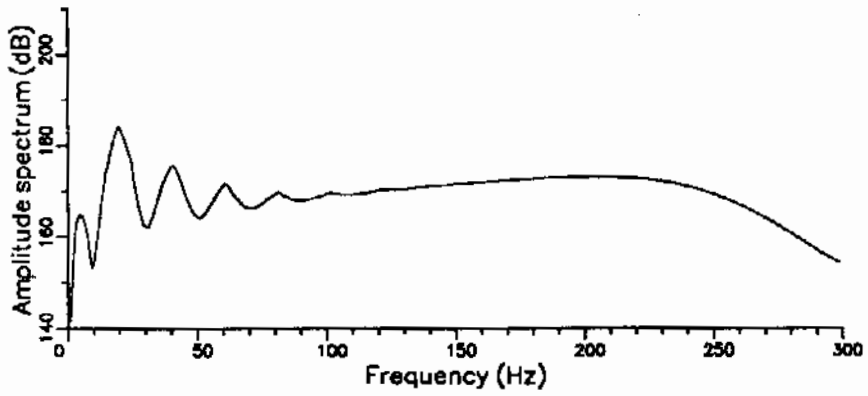


(c)

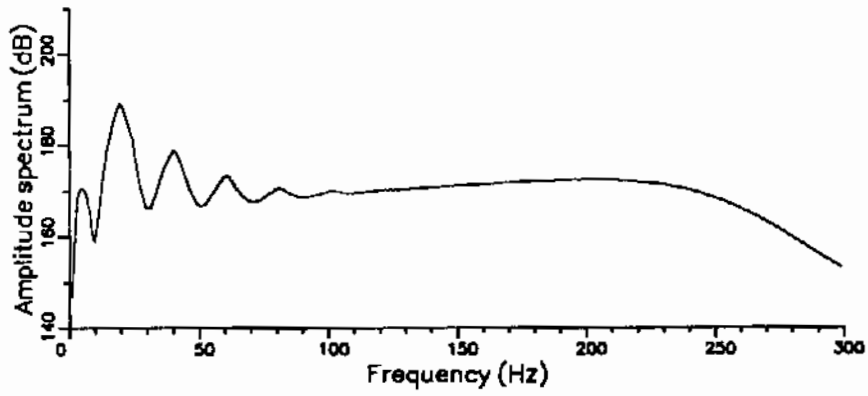
Fig. B-5.



(a)

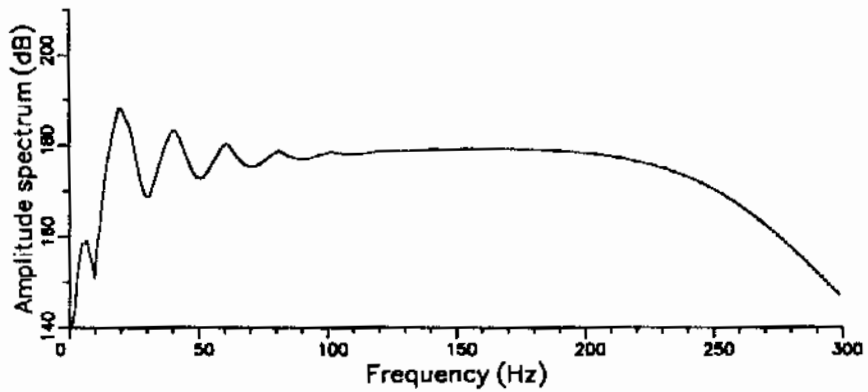


(b)

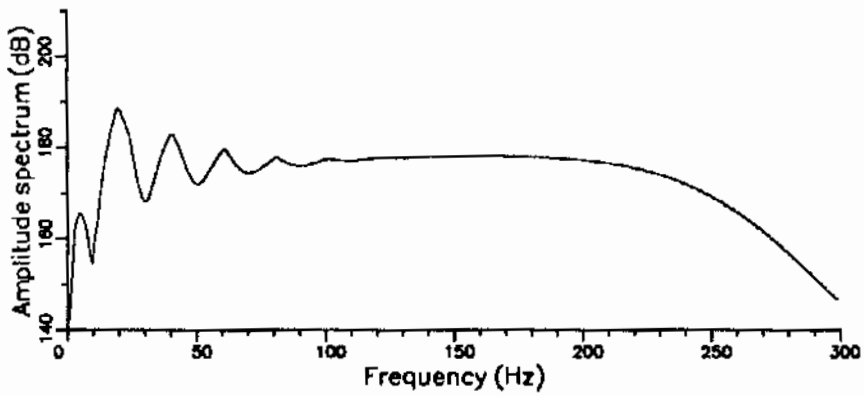


(c)

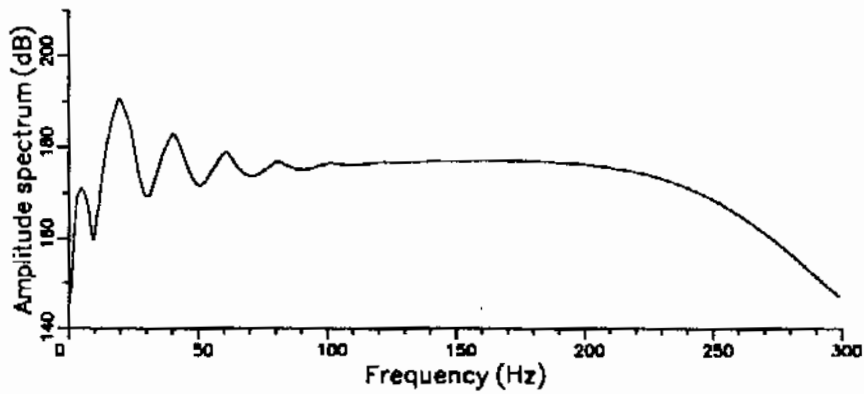
Fig. B-6.



(a)

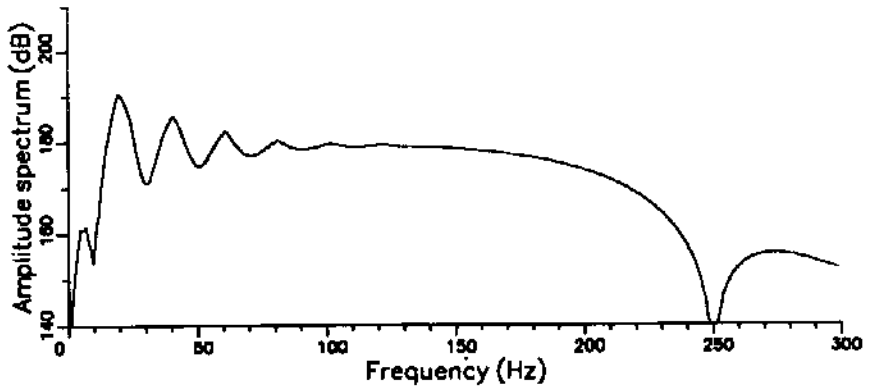


(b)

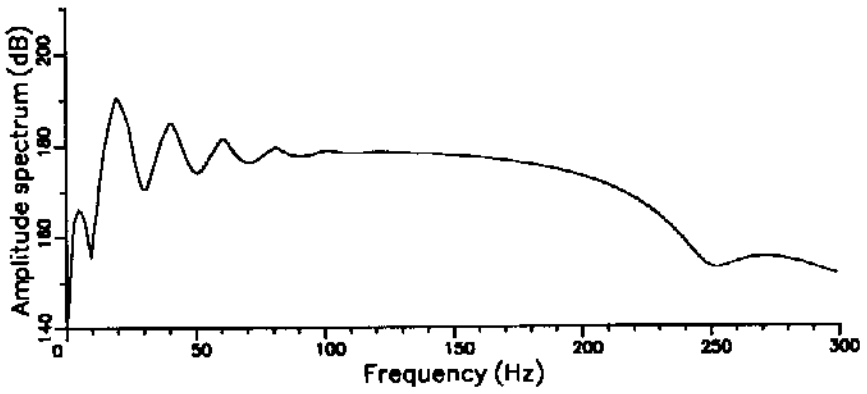


(c)

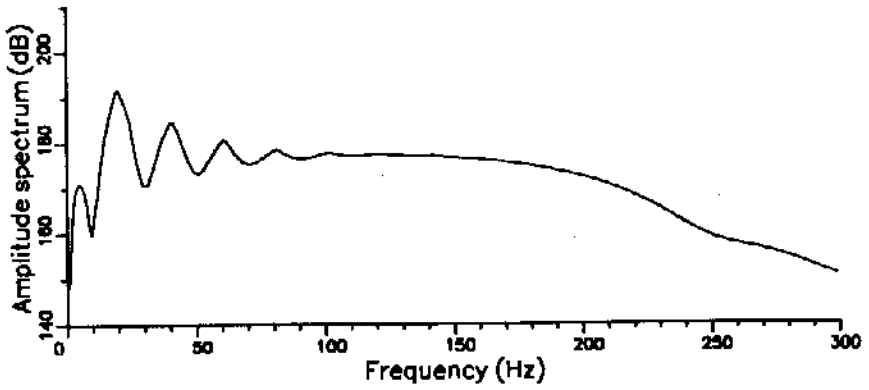
Fig. B-7.



(a)

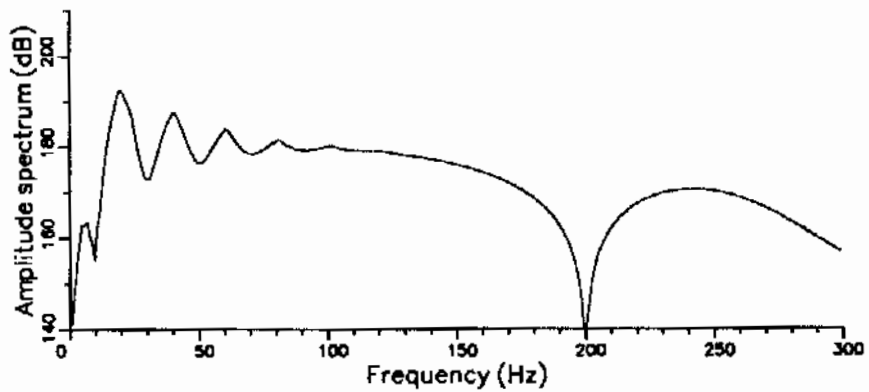


(b)

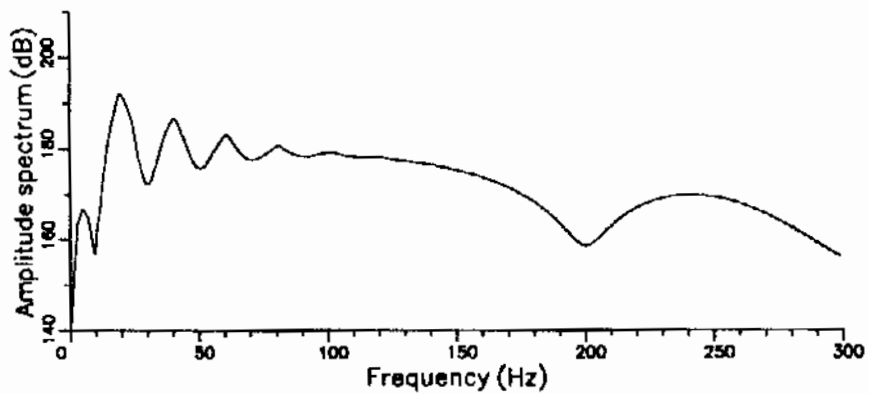


(c)

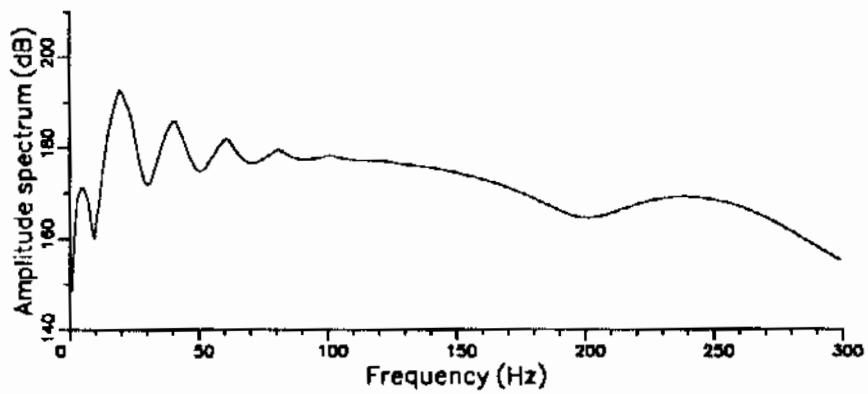
Fig. B-8.



(a)

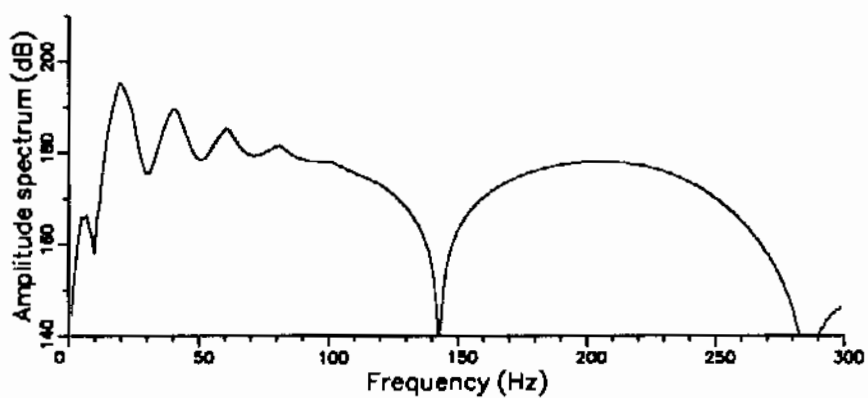


(b)

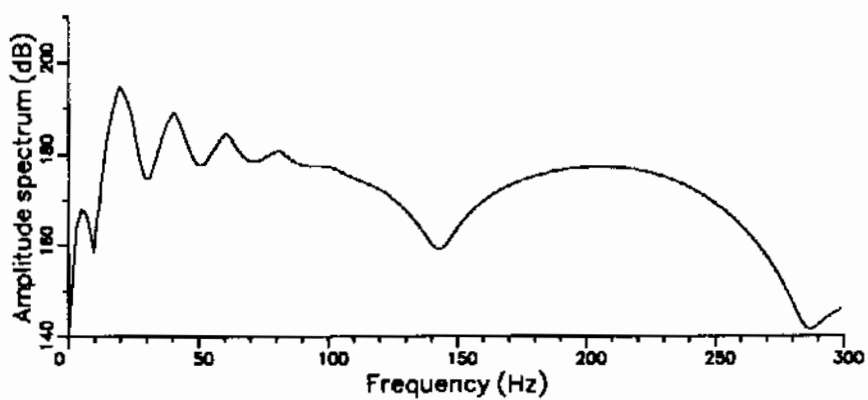


(c)

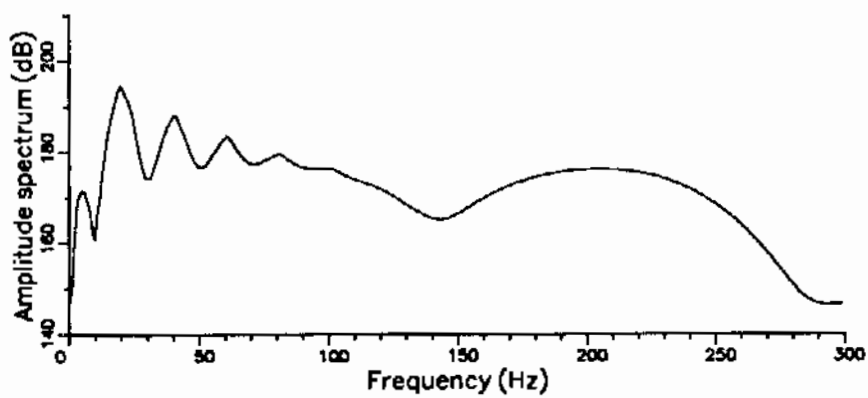
Fig. B-9.



(a)

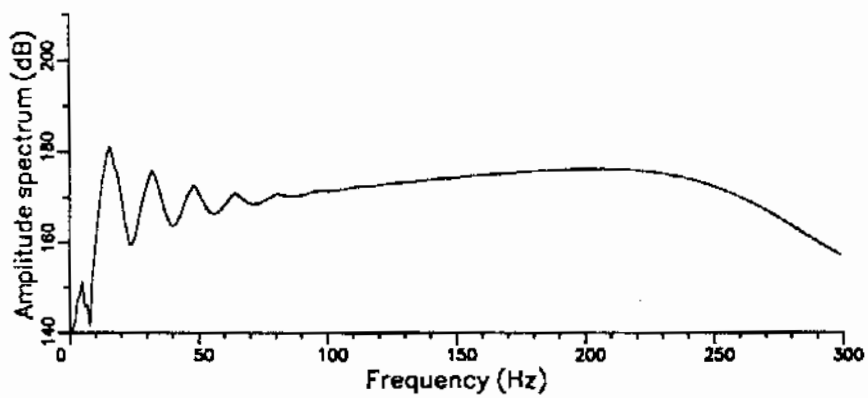


(b)

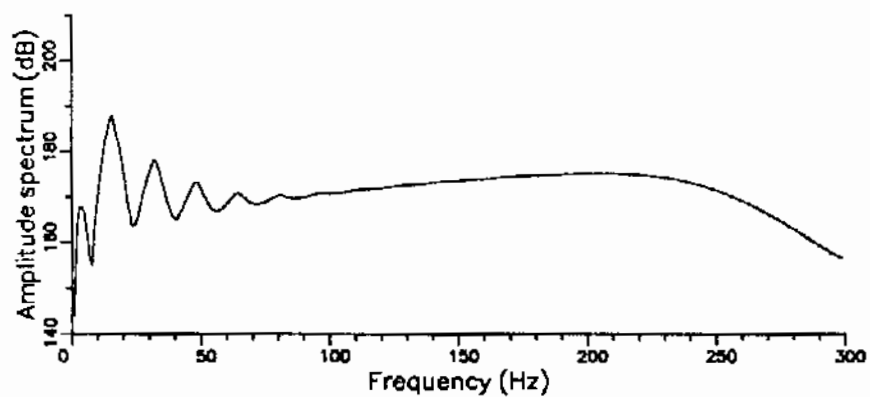


(c)

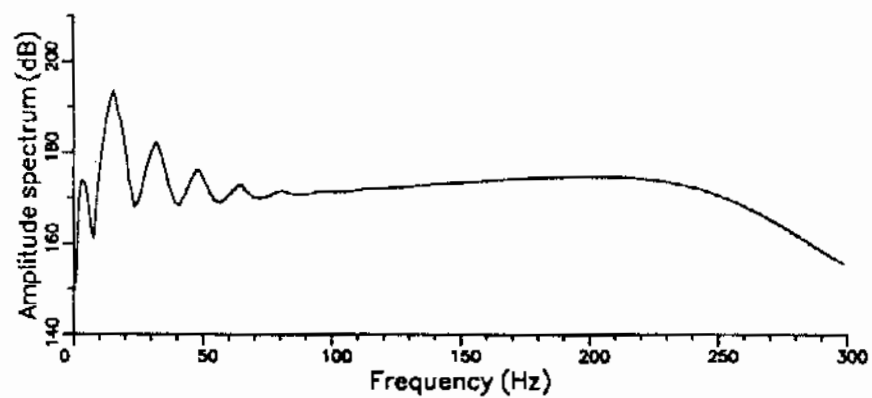
Fig. B-10.



(a)

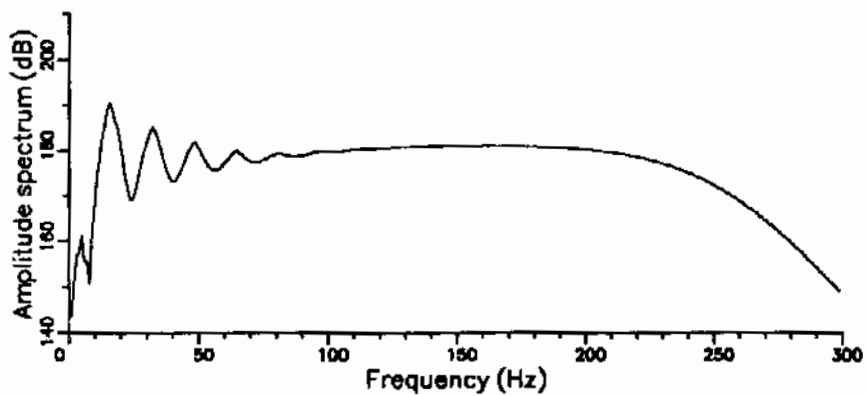


(b)

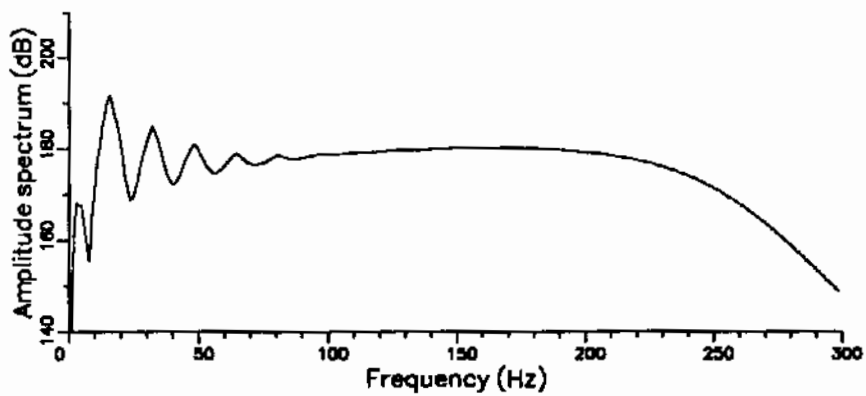


(c)

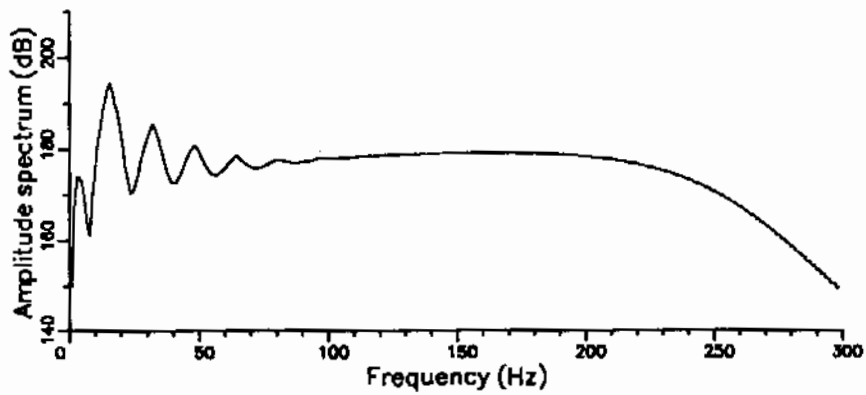
Fig. B-11.



(a)

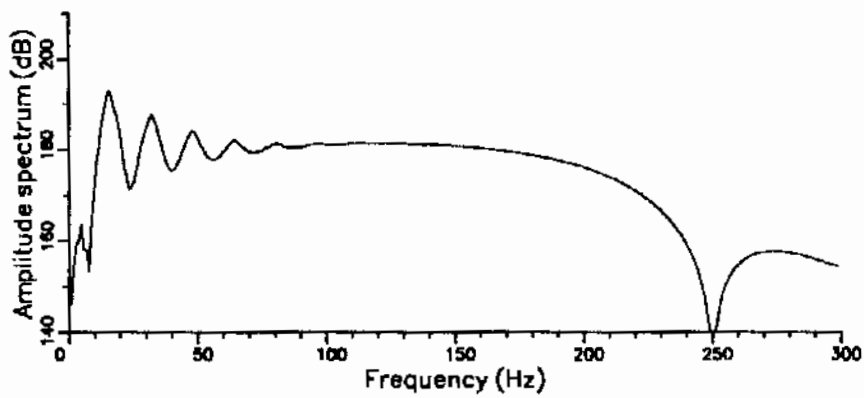


(b)

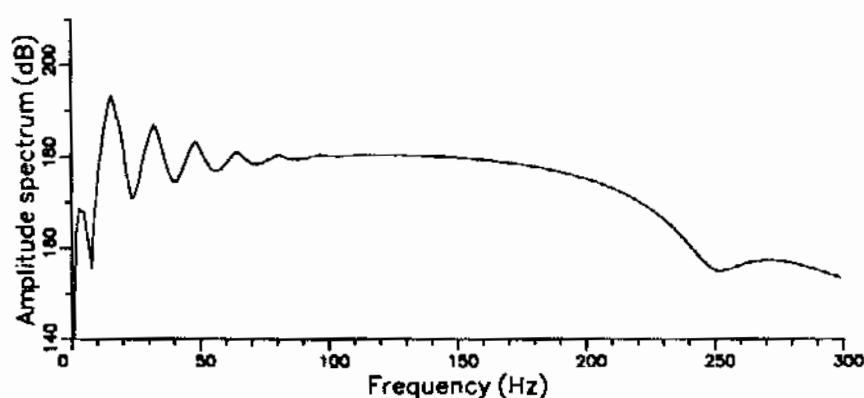


(c)

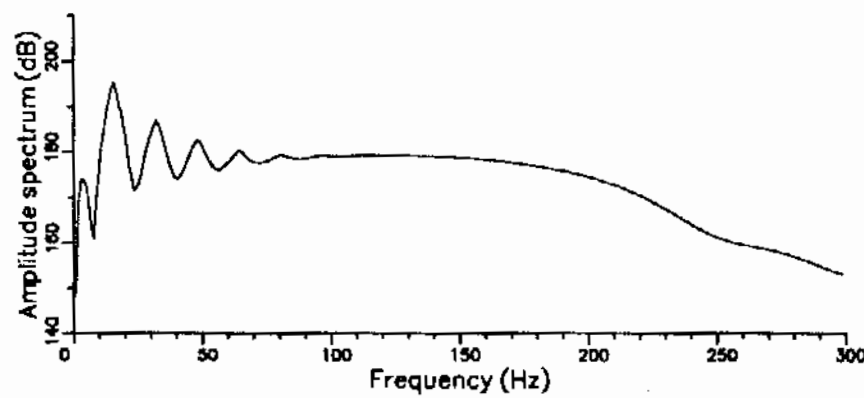
Fig. B-12.



(a)

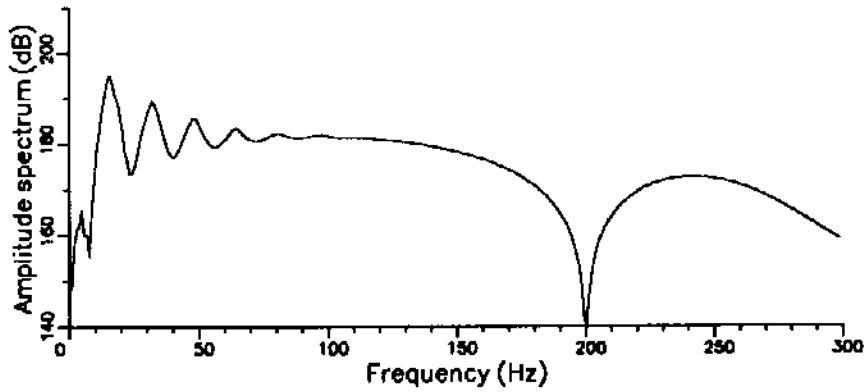


(b)

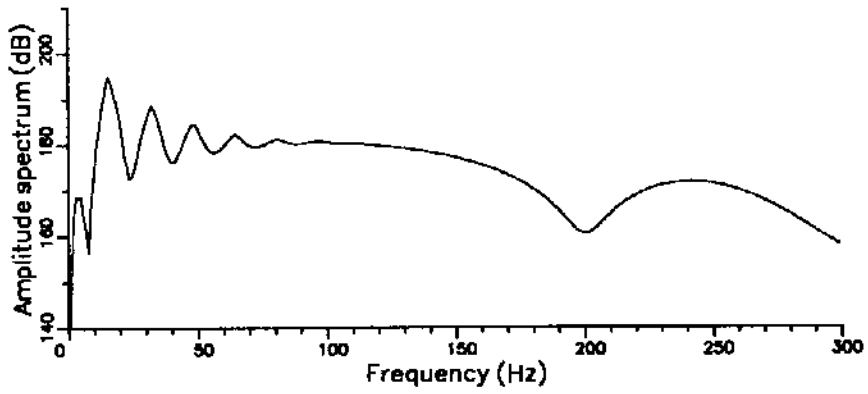


(c)

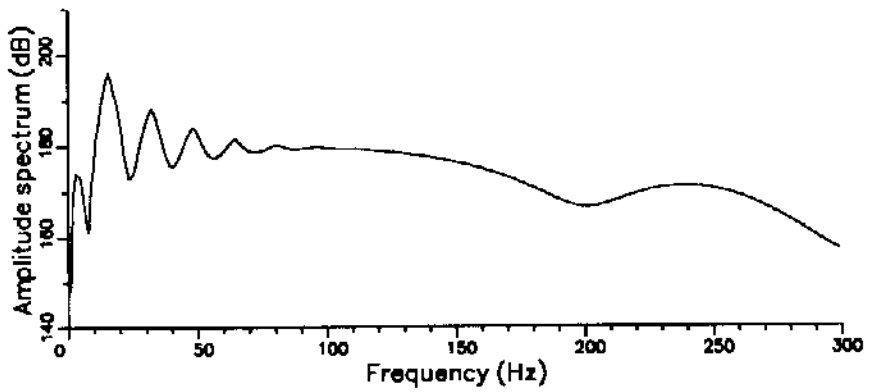
Fig. B-13.



(a)

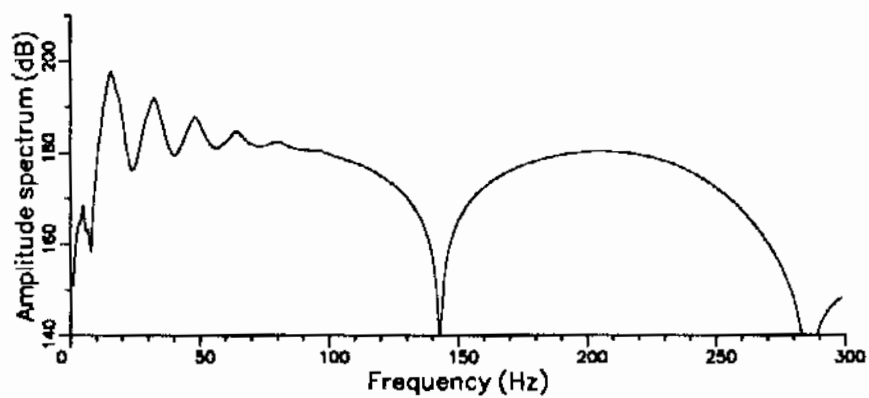


(b)

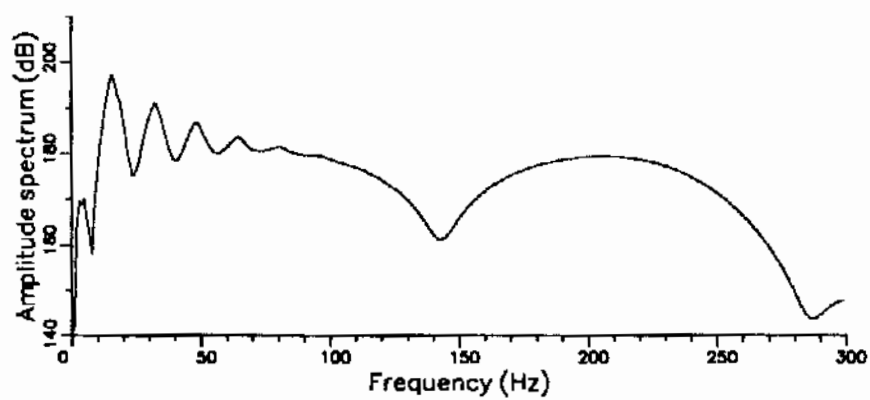


(c)

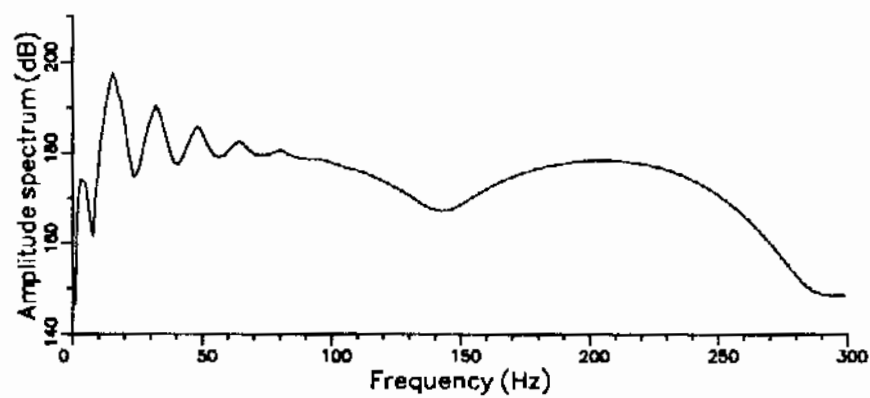
Fig. B-14.



(a)

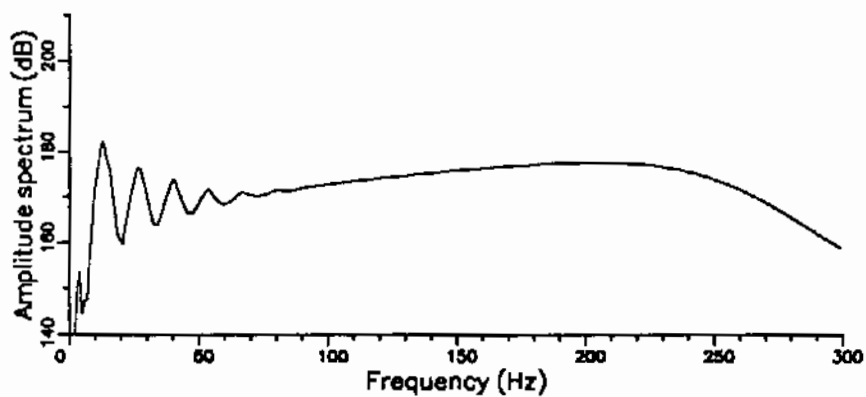


(b)

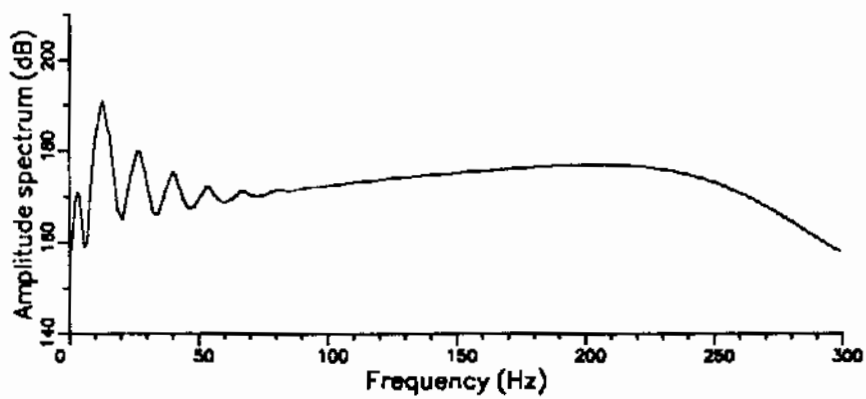


(c)

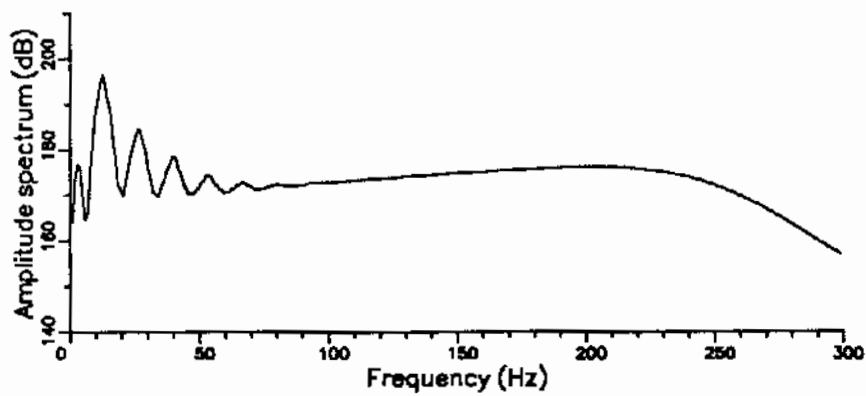
Fig. B-15.



(a)

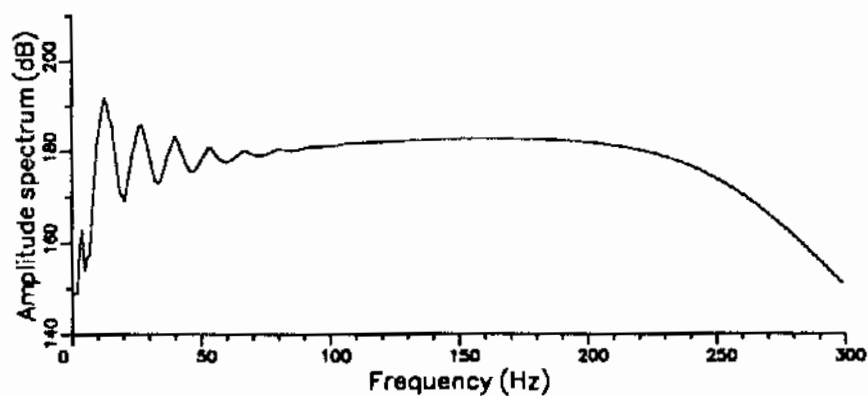


(b)

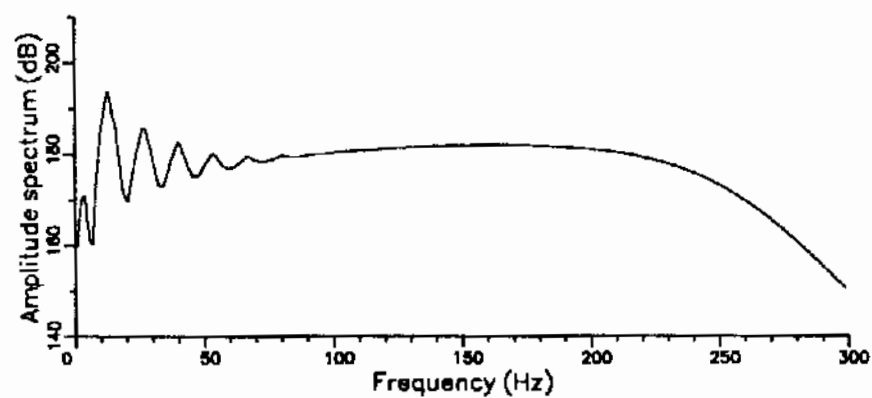


(c)

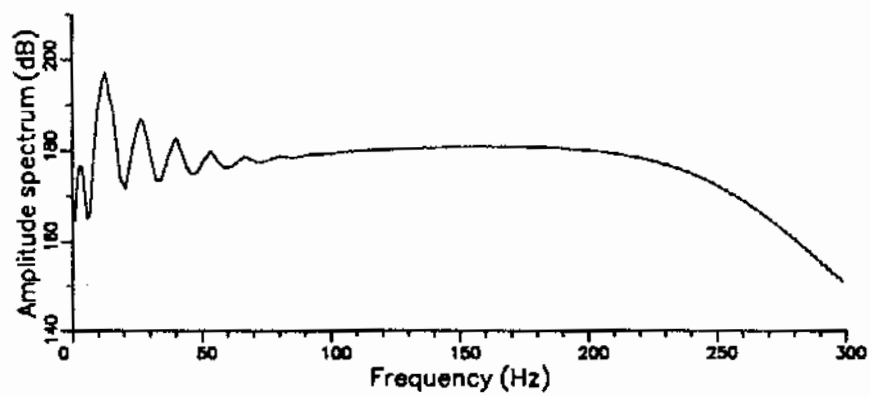
Fig. B-16.



(a)

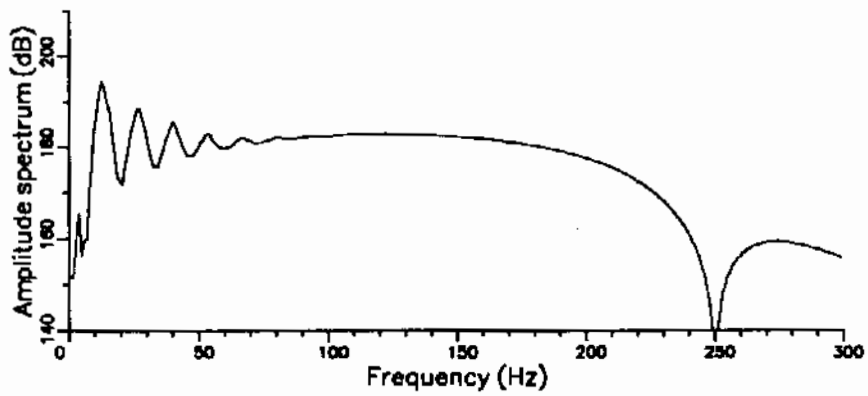


(b)

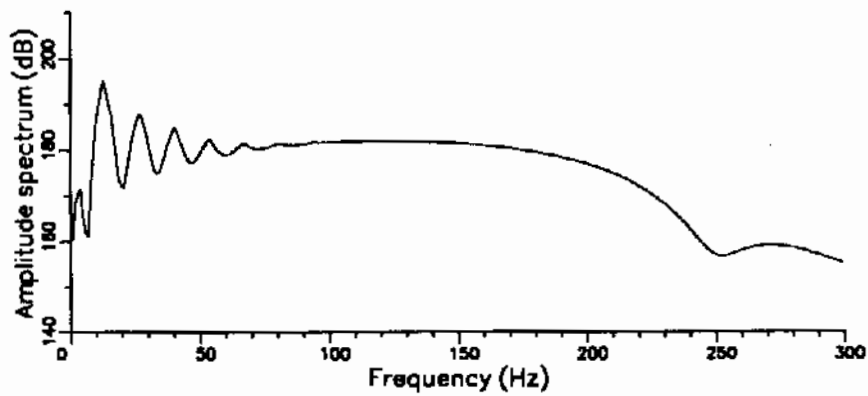


(c)

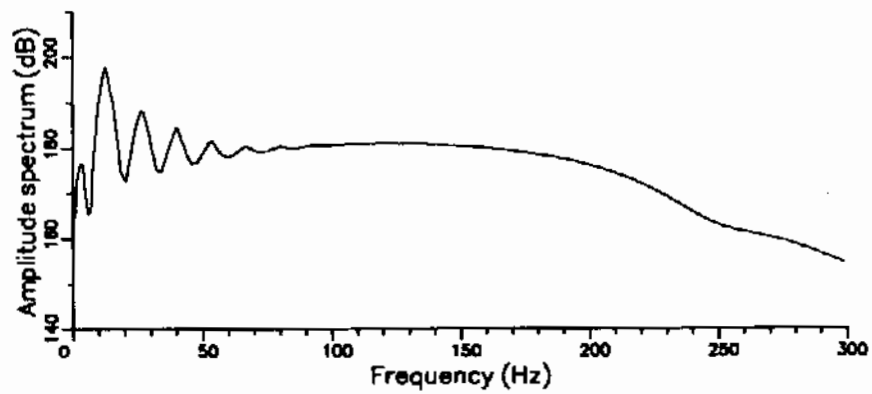
Fig. B-17.



(a)

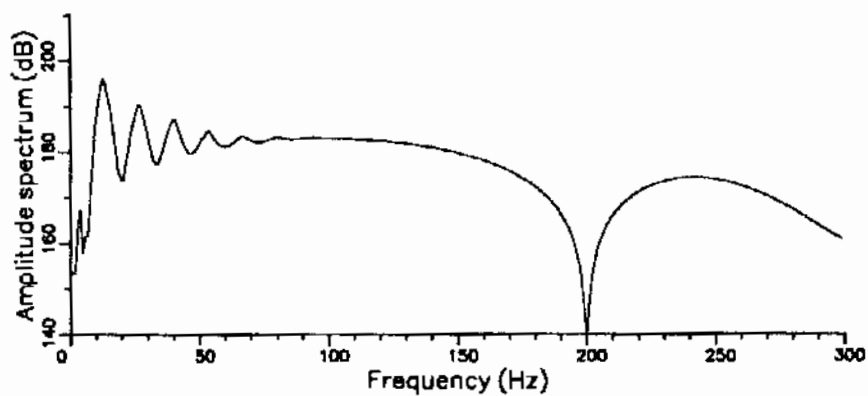


(b)

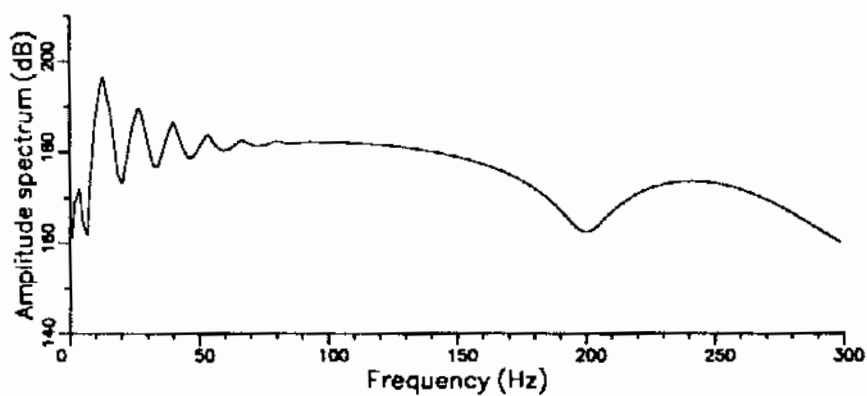


(c)

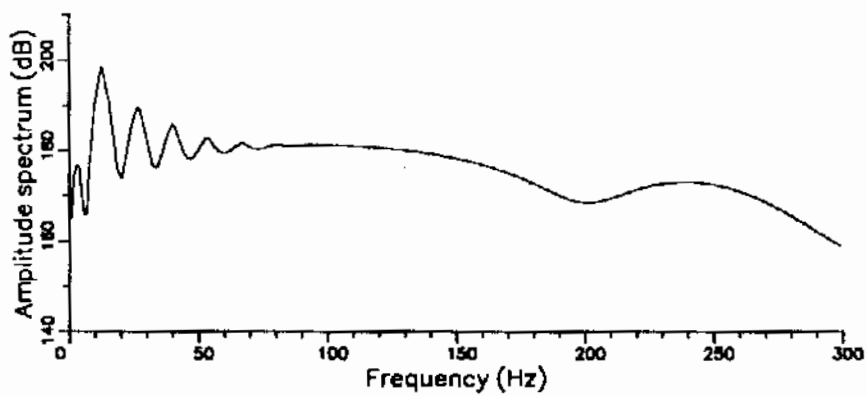
Fig. B-18.



(a)

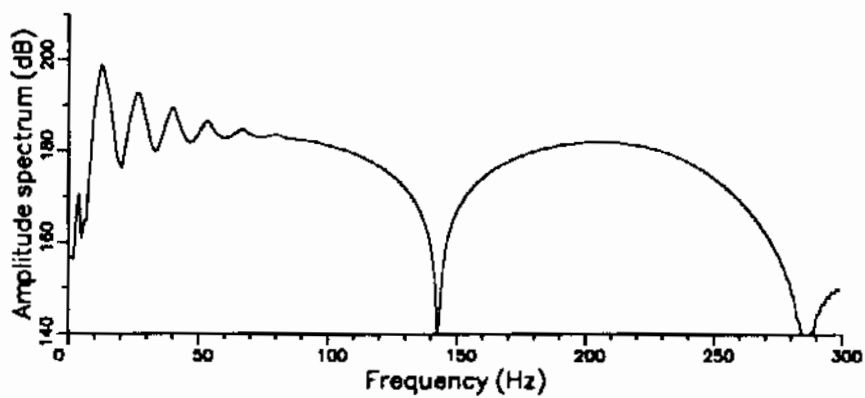


(b)

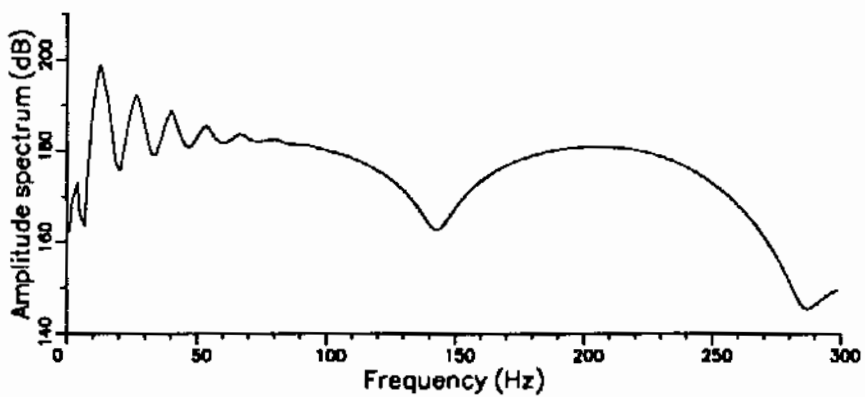


(c)

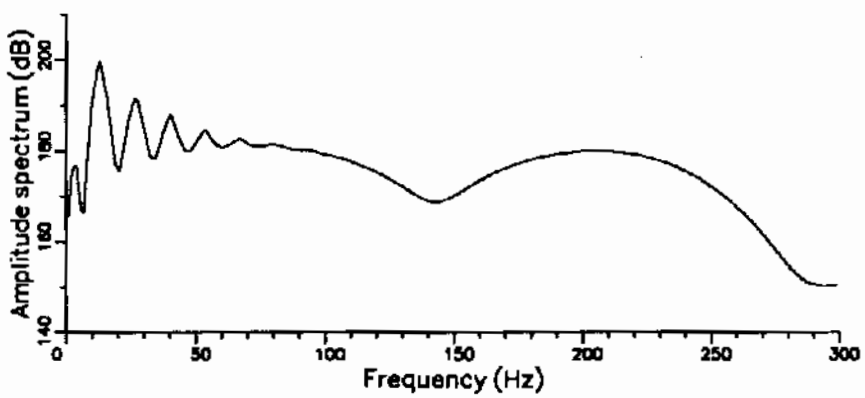
Fig. B-19.



(a)

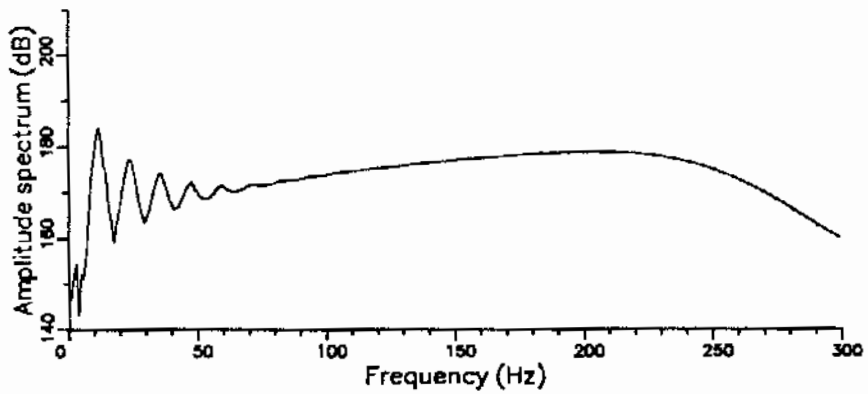


(b)

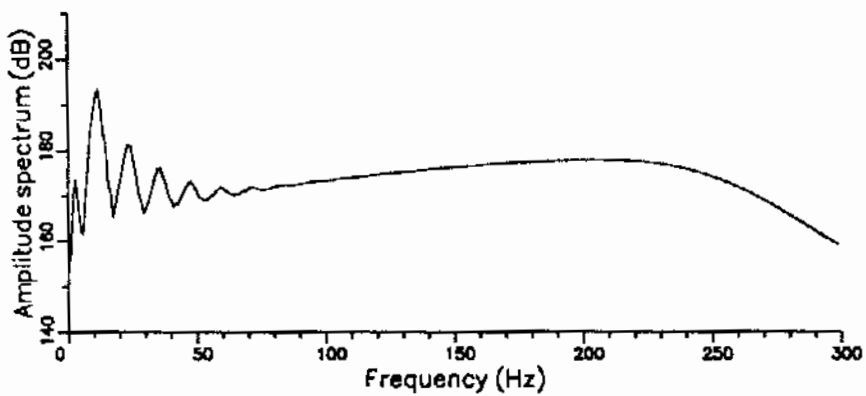


(c)

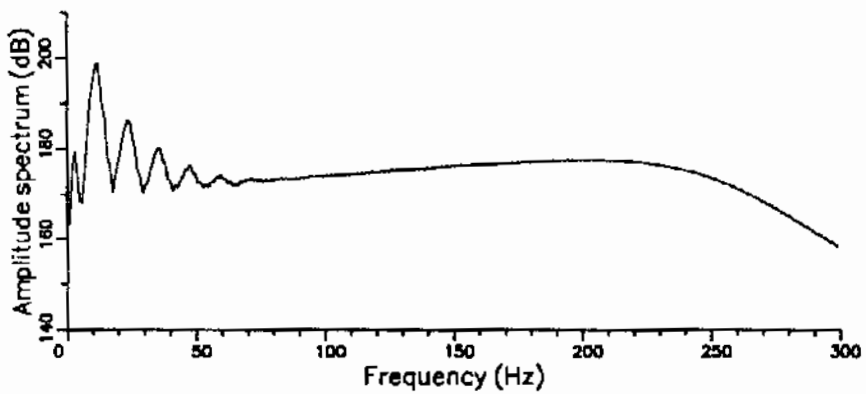
Fig. B-20.



(a)

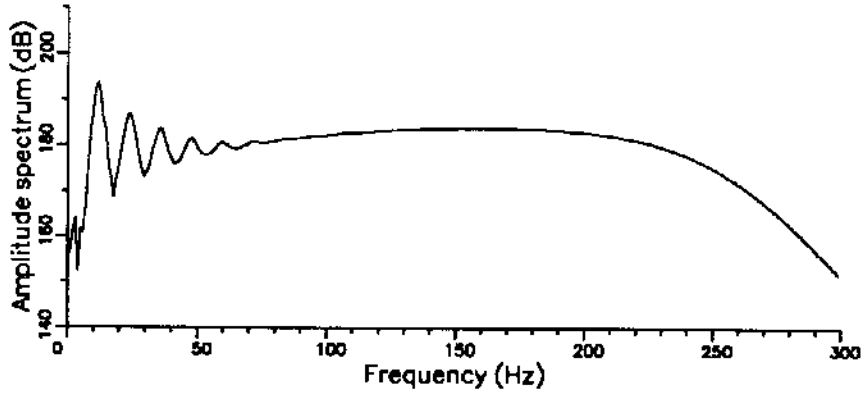


(b)

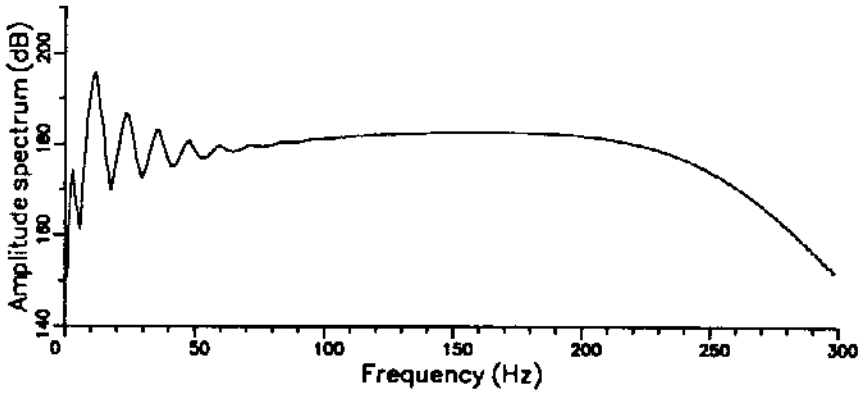


(c)

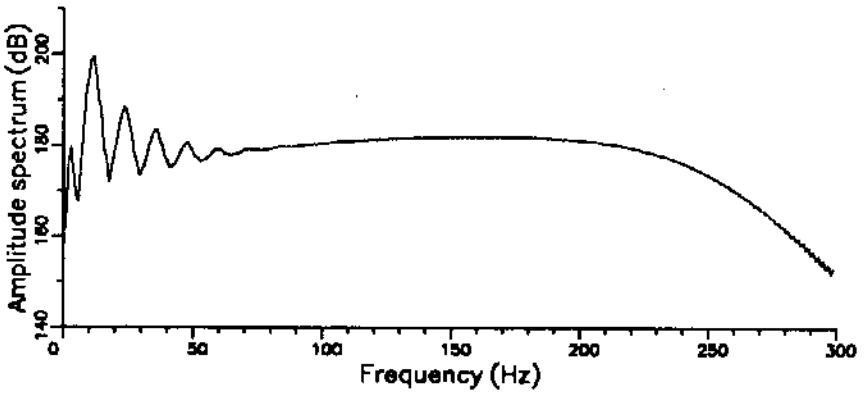
Fig. B-21.



(a)

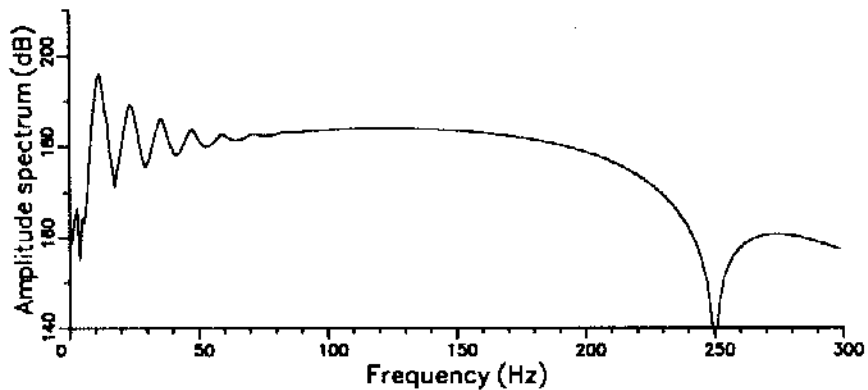


(b)

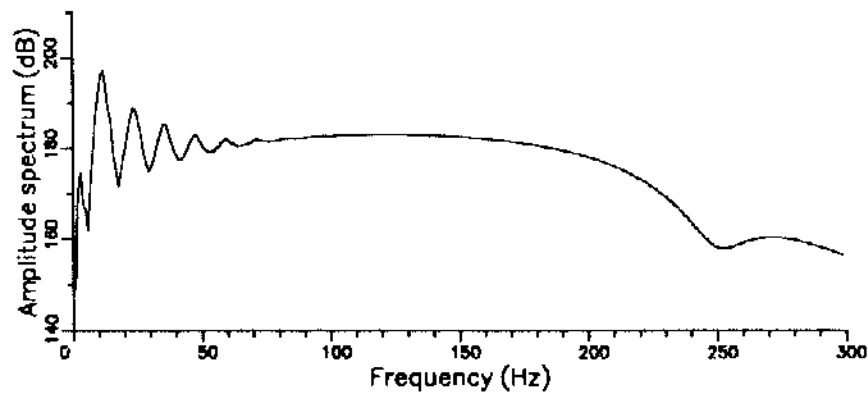


(c)

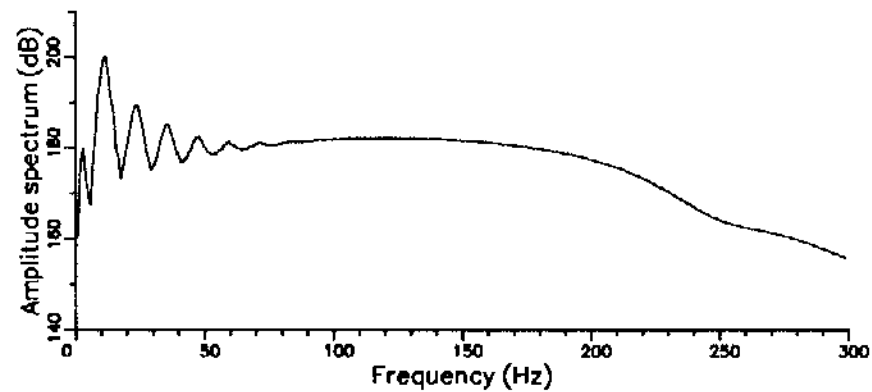
Fig. B-22.



(a)

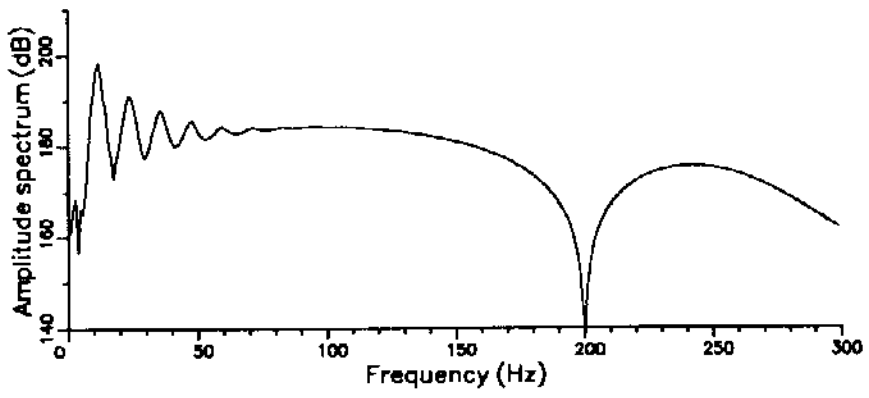


(b)

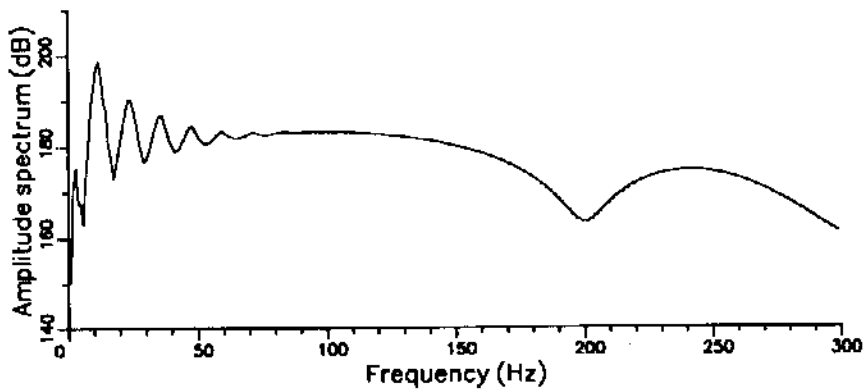


(c)

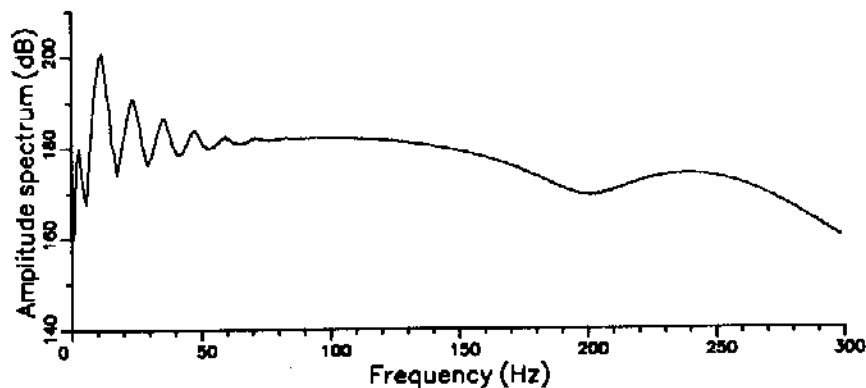
Fig. B-23.



(a)

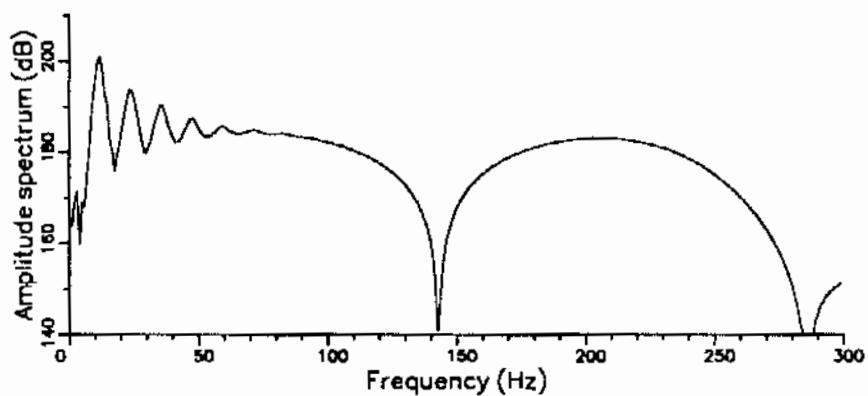


(b)

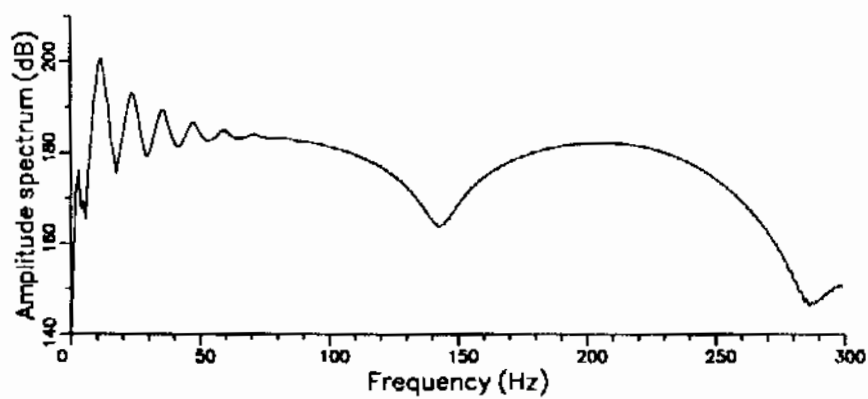


(c)

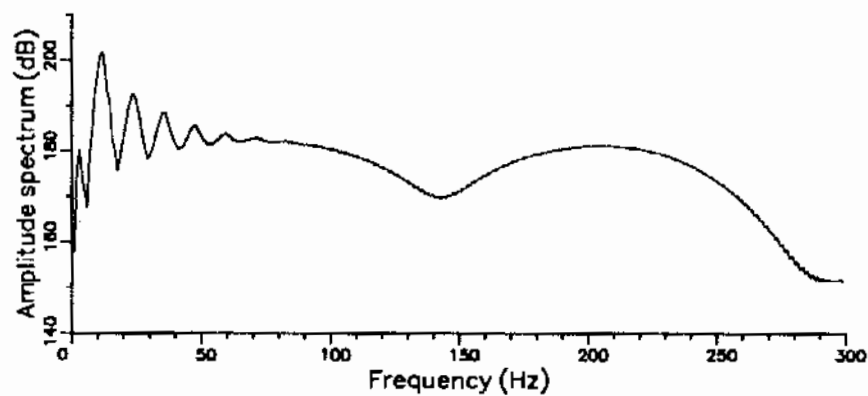
Fig. B-24.



(a)

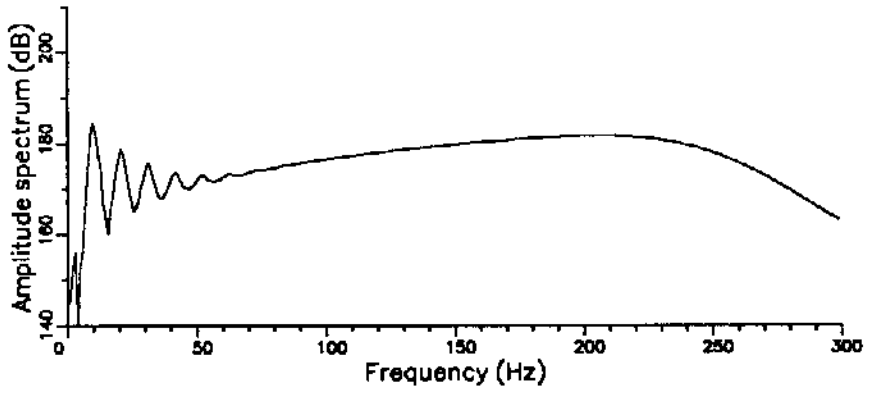


(b)

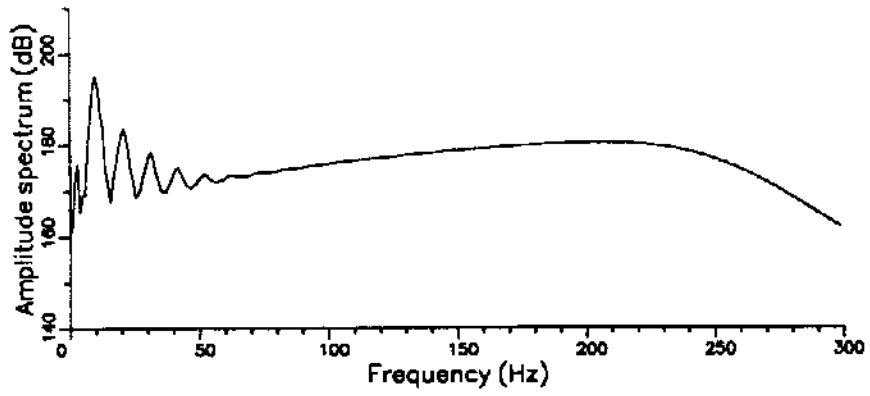


(c)

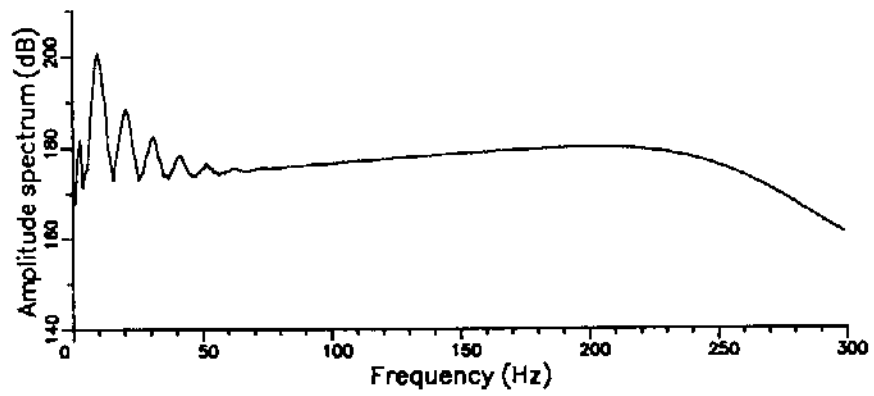
Fig. B-25.



(a)

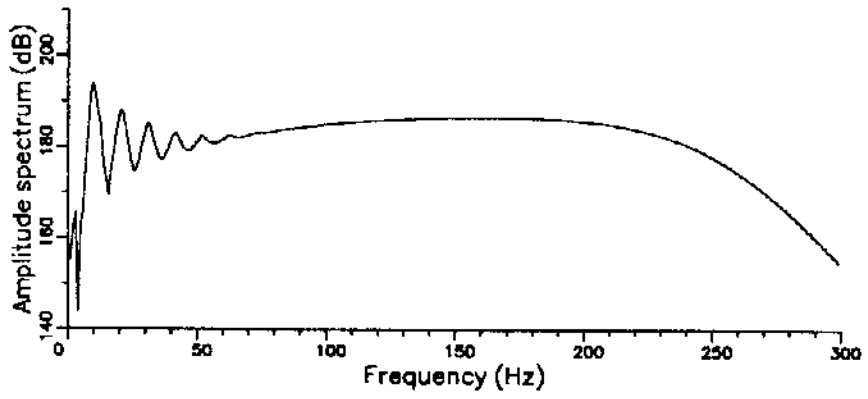


(b)

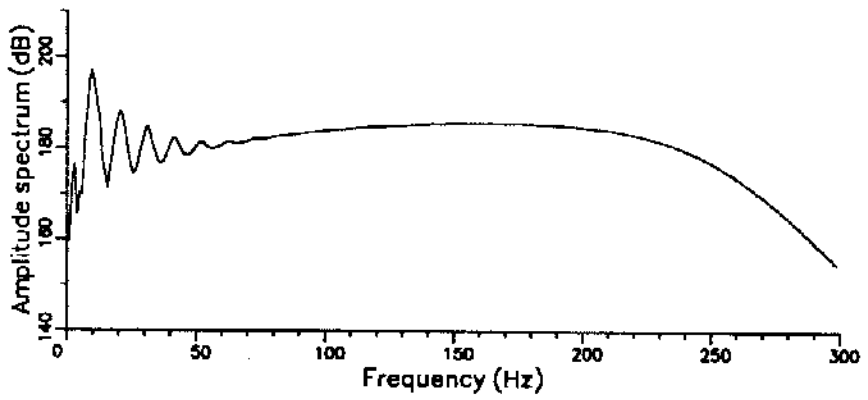


(c)

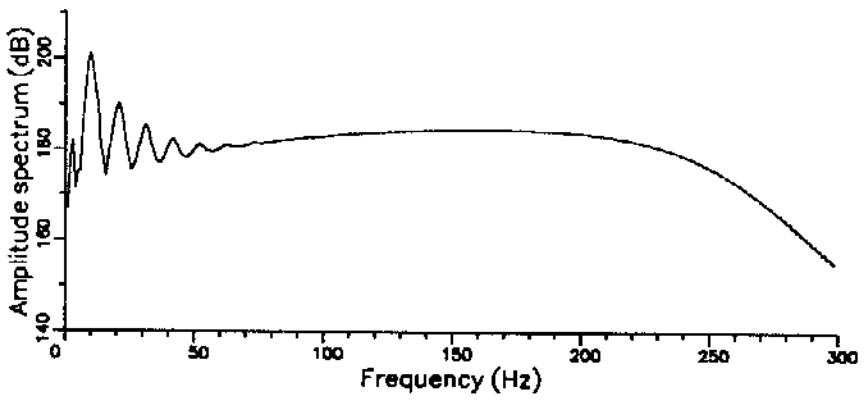
Fig. B-26.



(a)

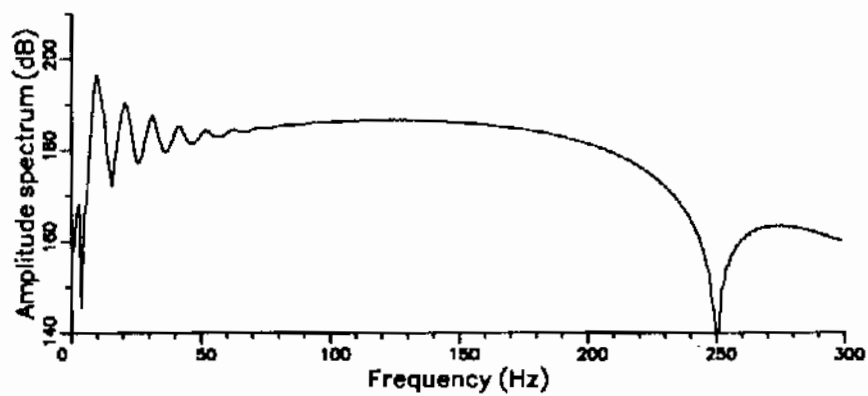


(b)

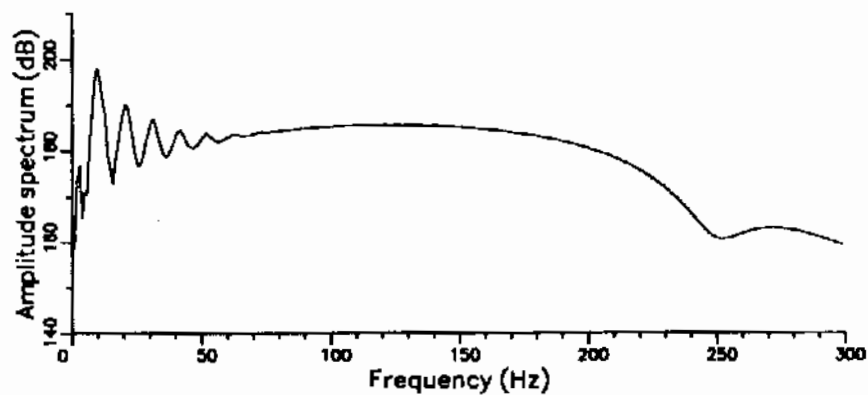


(c)

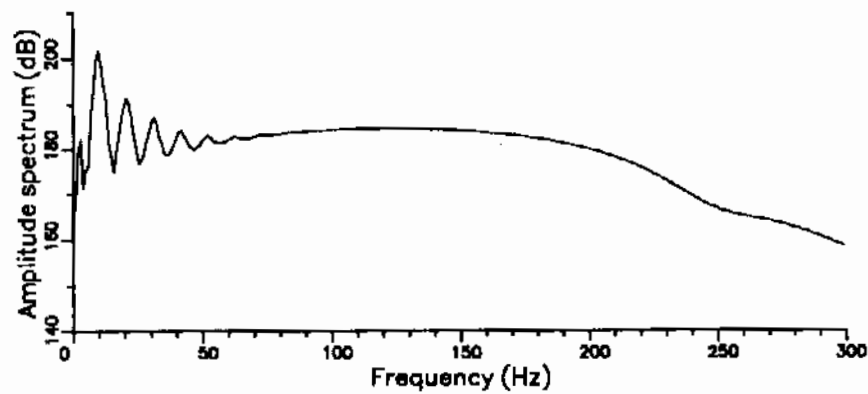
Fig. B-27.



(a)

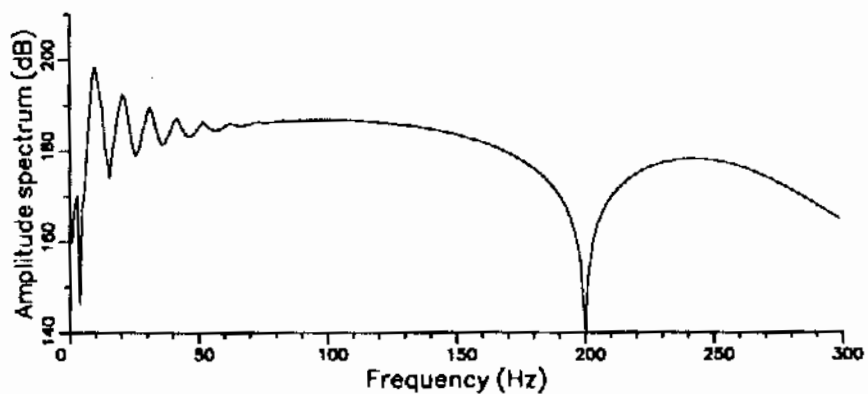


(b)

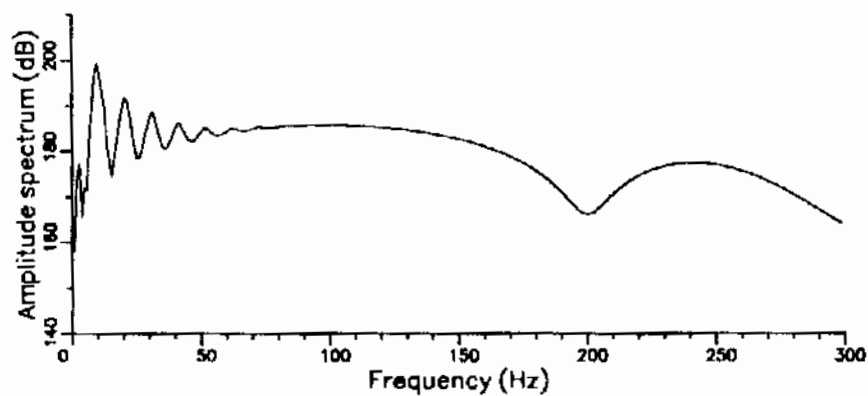


(c)

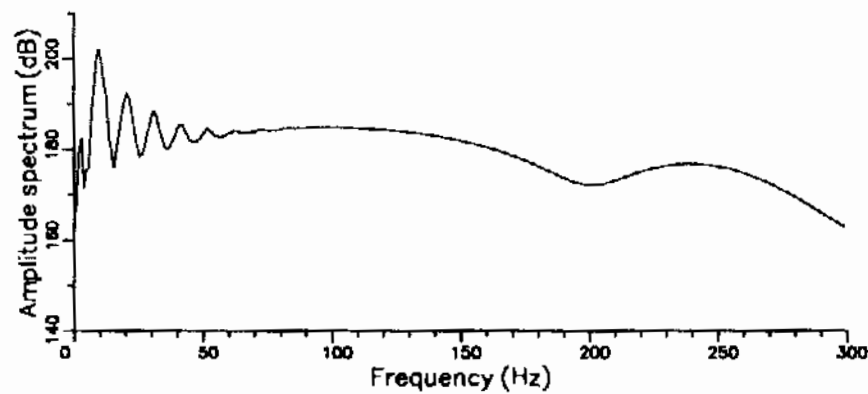
Fig. B-28.



(a)

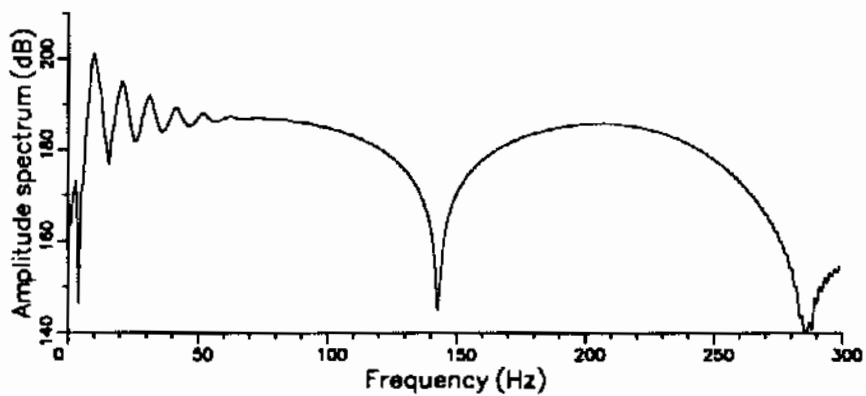


(b)

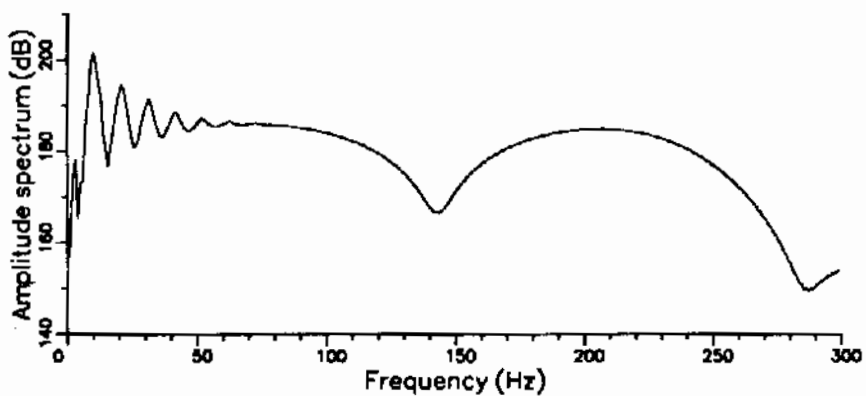


(c)

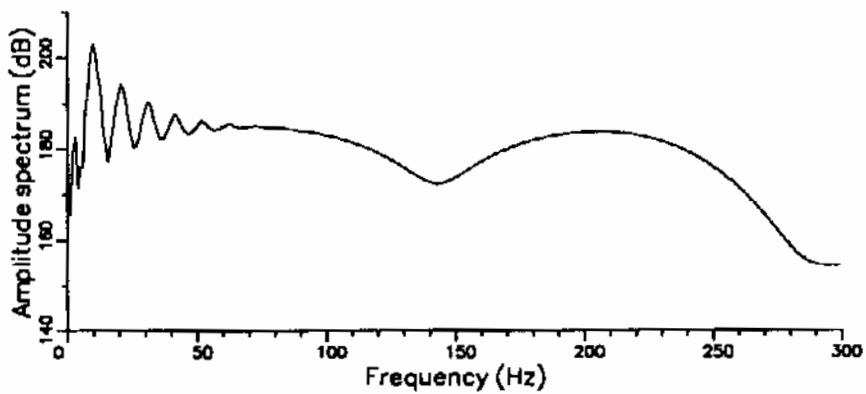
Fig. B-29.



(a)

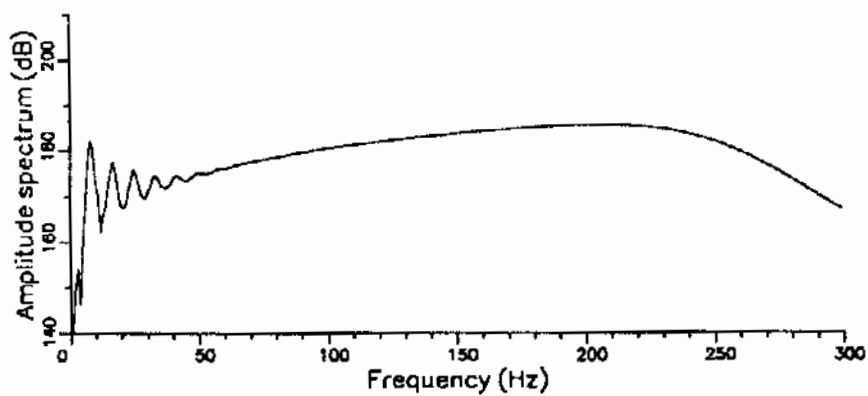


(b)

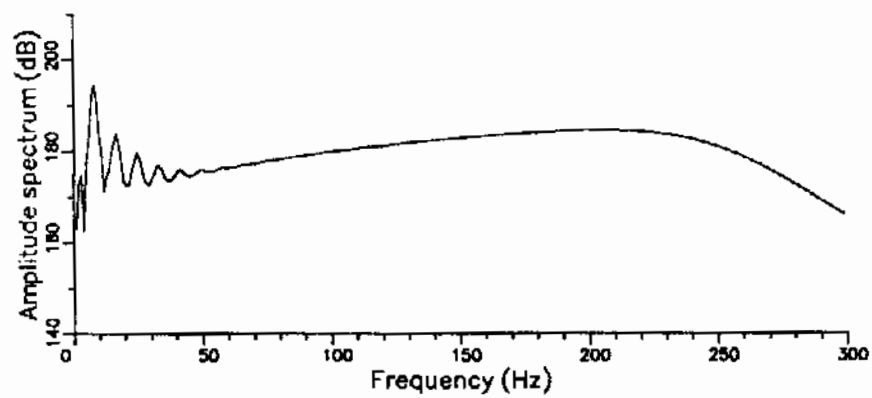


(c)

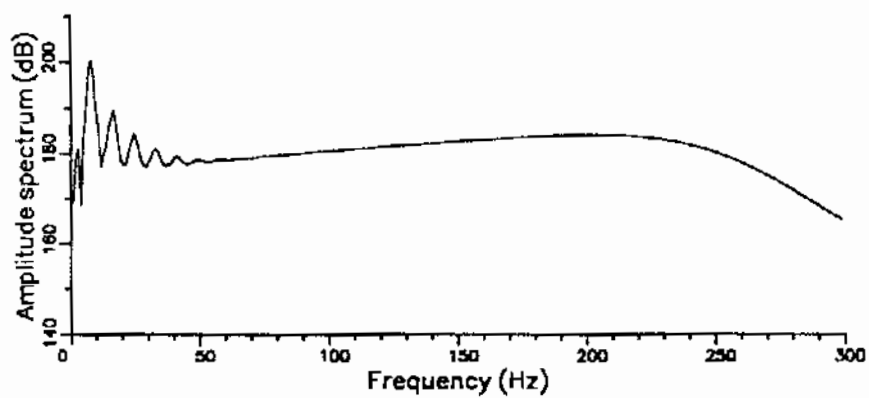
Fig. B-30.



(a)

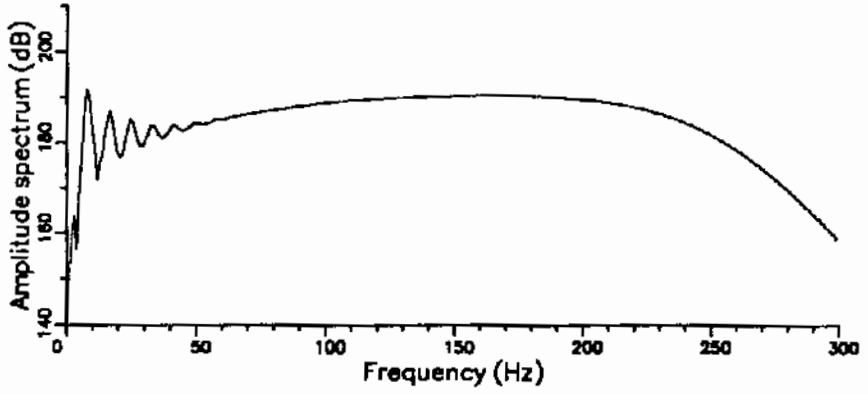


(b)

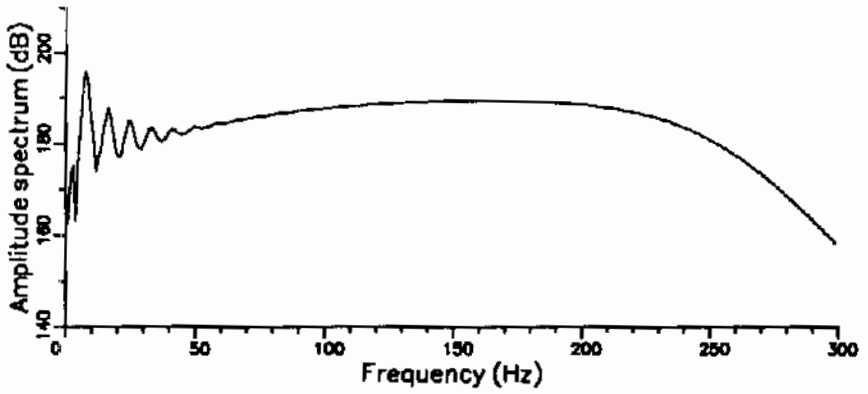


(c)

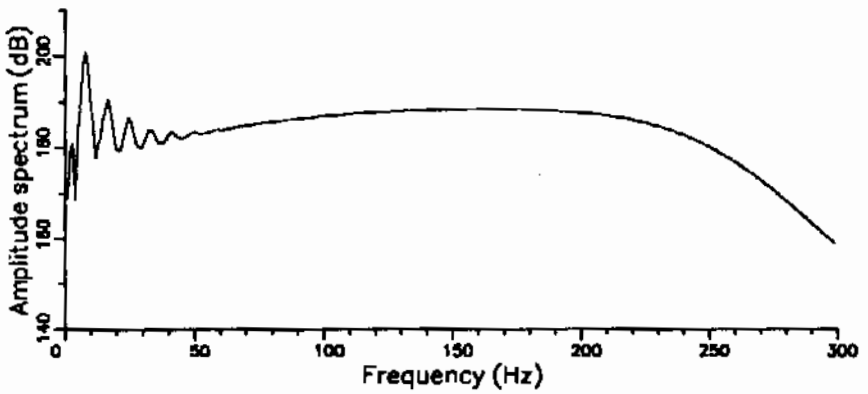
Fig. B-31.



(a)

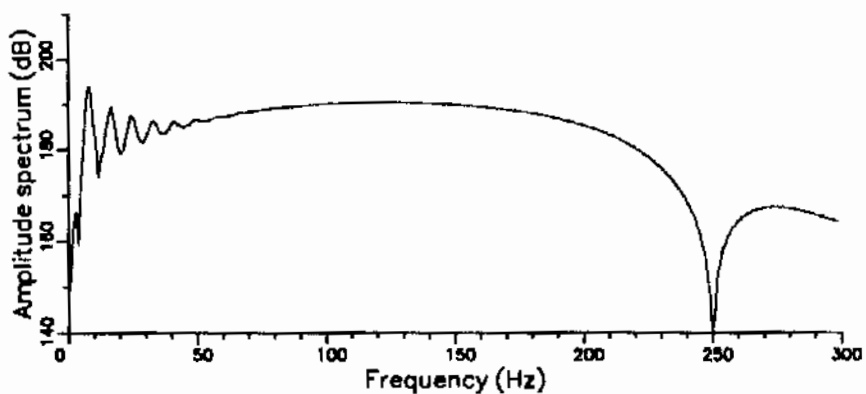


(b)

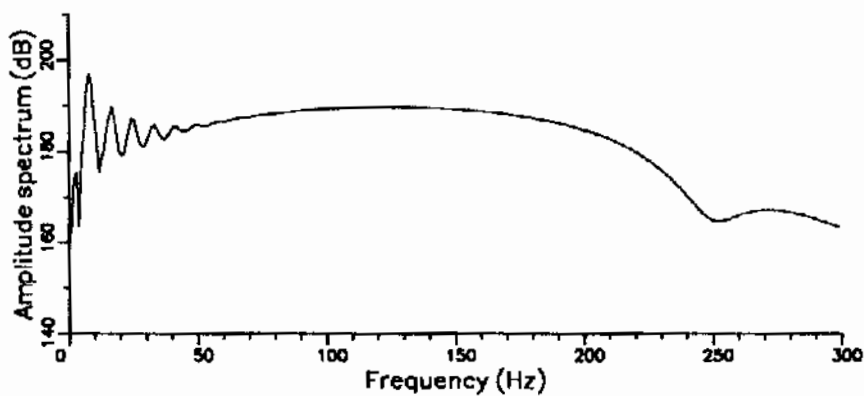


(c)

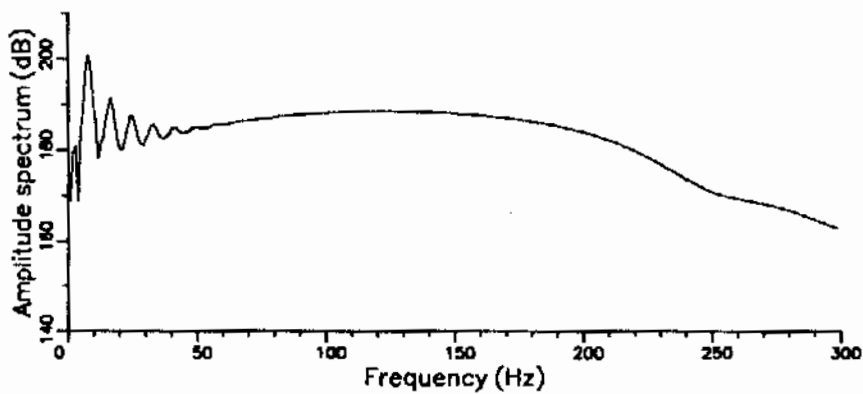
Fig. B-32.



(a)

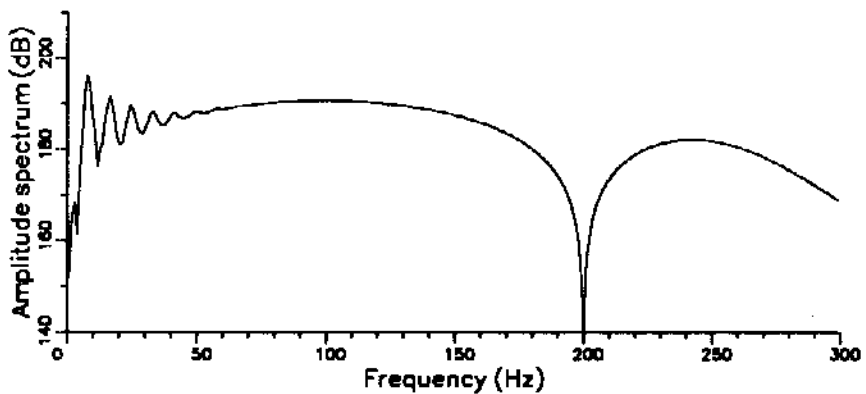


(b)

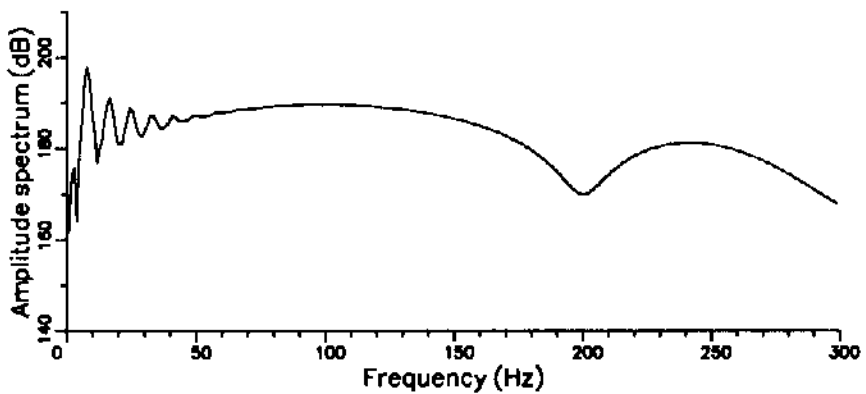


(c)

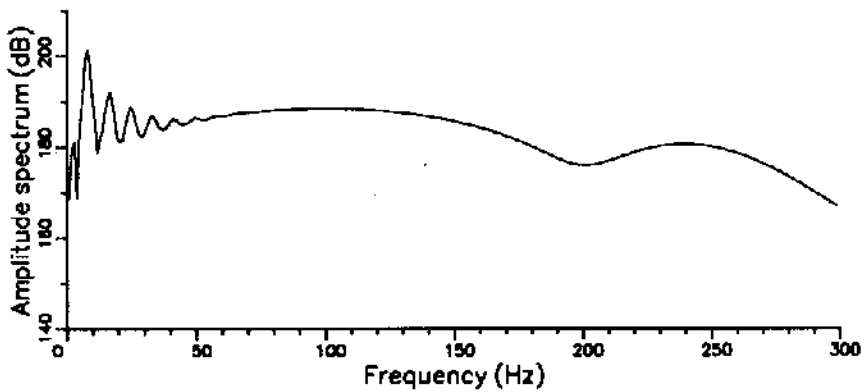
Fig. B-33.



(a)

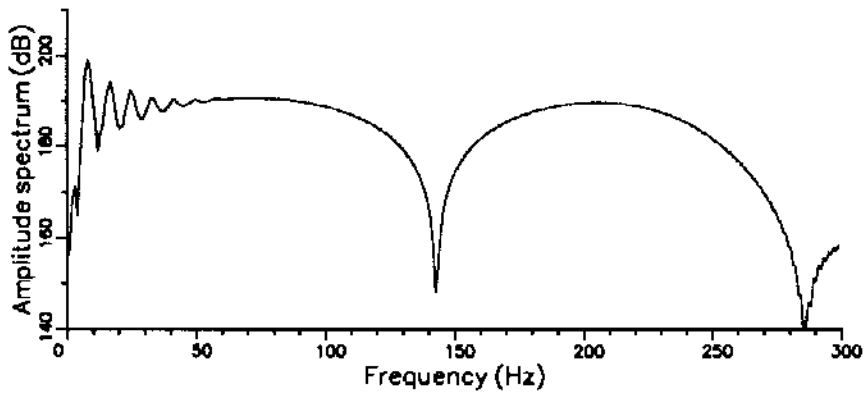


(b)

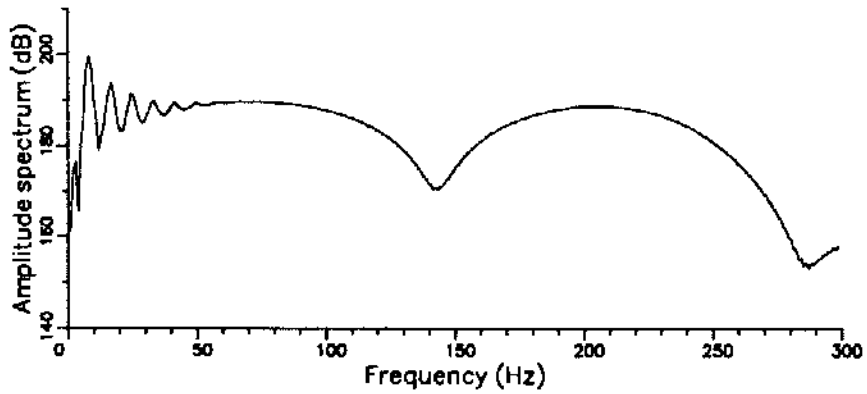


(c)

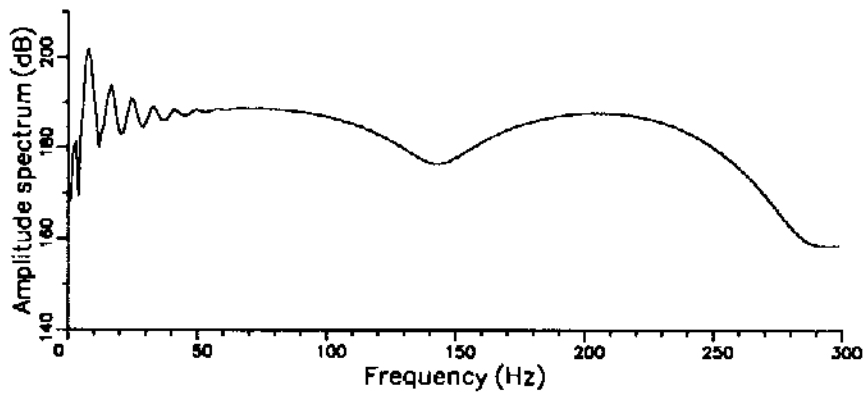
Fig. B-34.



(a)



(b)



(c)

Fig. B-35.

$$P_d(t) = P_{in}(t) - P_{out}(t) \quad (7)$$

의 식으로 표시될 수 있다 (Parkes and Hatton, 1986). 여기서 $P_{in}(t)$ 는 최대치가 138 기압 (13.8 MPa)이고, $P_{out}(t)$ 는 약 1.0-1.5 기압으로 발파심도에 따라 일정하다. 근거리장 파형이 심도 5 m를 대상으로 계산된 것이므로 $P_{out}(t)$ 는 약 1.5 기압이 되며, 오차가 최대가 되는 발파심도 0 m (즉 해수면 발파)의 경우도 $P_{out}(t)$ 는 약 1 기압으로 $P_d(t)$ 의 변화율은 0.36 % 정도로 극히 미약하다. 따라서 발파심도 5 m를 가정하여 계산된 근거리장 파형의 전산모형을 이용하여 발파심도 5 m까지의 원거리장 파형을 계산하여도 이로 인한 오차는 극히 미약하여 무시될 수 있다.

제 6 절 결 론

대상심도 1 km 이내의 비교적 천부 해저지질구조 구명을 위한 고해상도 반사파탐사에 적합한 자료획득 변수를 결정하기 위하여 온누리호의 탐사장비를 대상으로 한 전산모형시험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 원거리장 파형을 시간 및 주파수영역에서 분석한 결과, 분석대상으로 삼은 전산 모형중, 내용적 2.46 l의 슬리브진 2 개로 구성된 cluster를 2 m 정도의 깊이에서 발파할 경우에 주신호 진폭, 주신호대 기포의 진폭비, 기포주기 등이 가장 크고, 200-300 Hz까지의 진폭스펙트럼이 비교적 평탄한 이상적인 원거리장 파형이 발생된다.
2. 온누리호에 있는 스트리머중, 12 채널 스트리머는 96 채널 스트리머에 비하여, 수직으로 입사하는 지진파의 S/N 비가 $\sqrt{3}$ 배 작은 반면에 4배 높은

수평해상도를 얻을 수 있다. 또한 상대적으로 작은 moveout으로 인한 높은 수직해상도도 얻을 수 있어 고해상도 반사파 탐사에 더욱 효과적이다.

3. 대상심도, 주파수범위, 건부피, 스트리머 채널수, 콤프레샤 용량 등 제한 요소를 고려할 때, 기록시간 1 s, 샘플간격 1 ms, 발파간격 3.125 m 혹은 6.25 m가 적당한 것으로 판단된다.

제 3 장

12채널 시스템을 이용한 고해상 탄성파탐사

제 3 장 12채널 시스템을 이용한 고해상 탄성파탐사

제 1 절 시험자료의 획득

1-1. 자료획득 위치

한국대륙붕 제 6광구에서 동서방향의 측선을 설정하여 1993년 10월에 12채널 고해상 탄성파 탐사들 온누리호를 이용하여 수행하였다. 탐사측선의 위치는 Fig.3-1과 같다. 이 측선에 대해서 1992년 11월에 96채널 탄성파 탐사들 수행한 바 있으므로 동일측선에서 얻은 96채널 및 12채널 탐사결과를 비교하여 고해상 탄성파 탐사결과를 검증할 수 있다.

1-2. 탐사장비 및 배치

온누리호에 탑재되어 있는 탄성파 탐사장비는 크게 나누어 파원으로 8개씩 2배열로 이루어진 총 1380 in³의 슬리브 건 (sleeve gun: 개량형 에어 건), 수신기로 그룹간격 25 m의 96채널 스트리머 및 그룹간격 6.25 m인 12채널 스트리머, 디지털 테이프 기록장치가 부착된 SN-358 DMX 기록장비, 그리고 자료의 품질검색을 위한 시스템의 4부분으로 구성된다. 각 장비별 주요 사양은 아래와 같다.

(1) 에너지원 (Energy Source)

Source type	: HGS (Halliburton Geophys. Sev.) high pressure sleeve gun array
Source configuration	: 8 guns/string x 2 strings

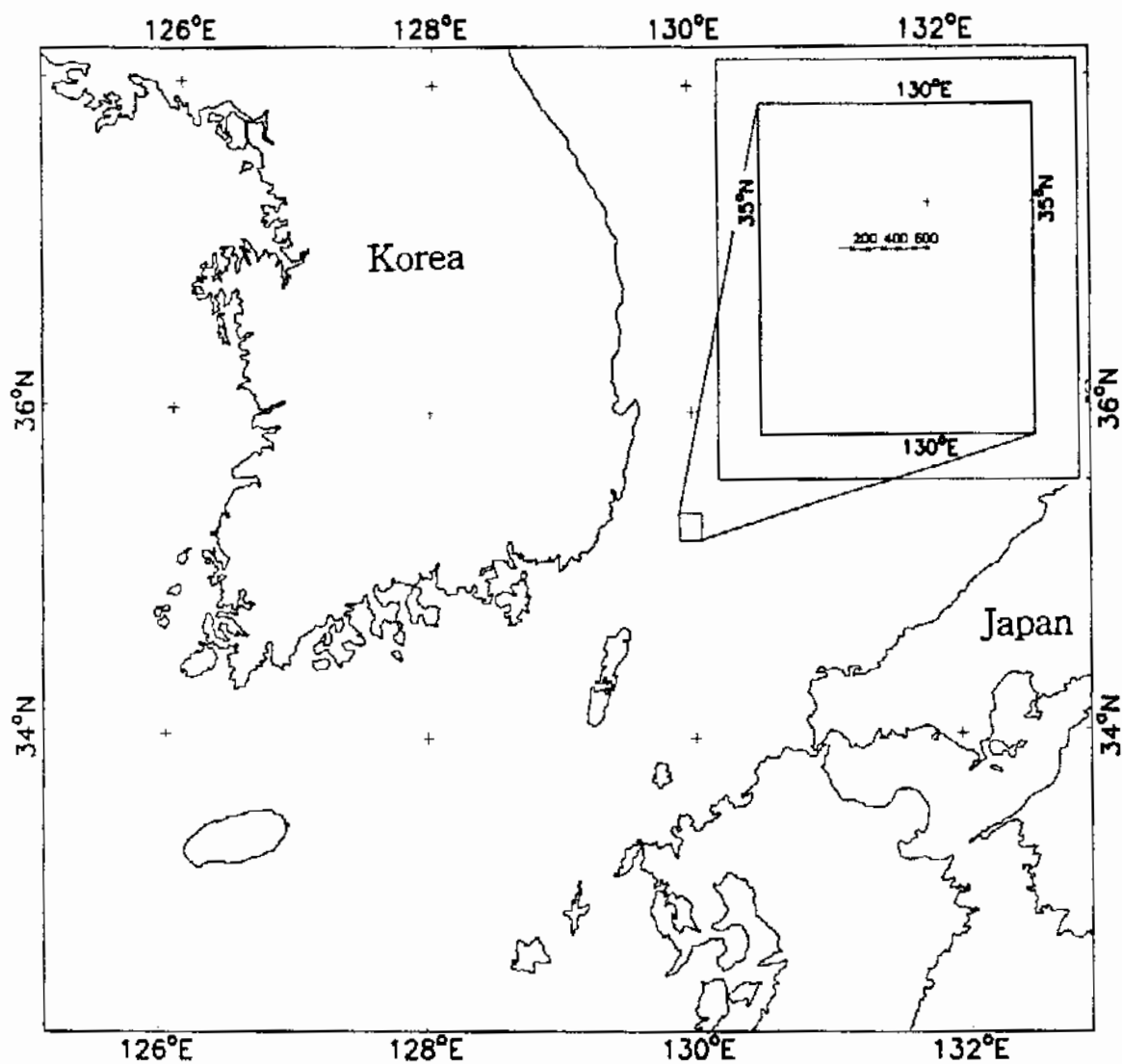


Fig. 3-1. Ship track chart for seismic data acquisition in the East Sea using a 12 channel streamer.

Lead-in cable : 100 m

(3) 12채널 스트리머 케이블 (Streamer Cable)

Type : AMG 37/43
Low noise level : 1 μ bar RMS
Diameter : 43 mm
Length : 75 m
Number of channels : 12
Number of hydrophones : 8 per channel
Frequency response : 3-1000 Hz
Hydrophones : Model HC201
Sensitivity : -92 dB re 1V/ μ bar
Max. Oper. Depth : 100 m
Oper. Temp. : -5° C to 40° C
Buoyancy fluid : Aromatic kerosene (Shell SOL K)
Breaking strength : 4000 kg
Cable depth controller : CUS-8301
Cable depth leveller : RCL-3
Lead-in cable : 150 m

(4) 기록장비 (Recording Instrument)

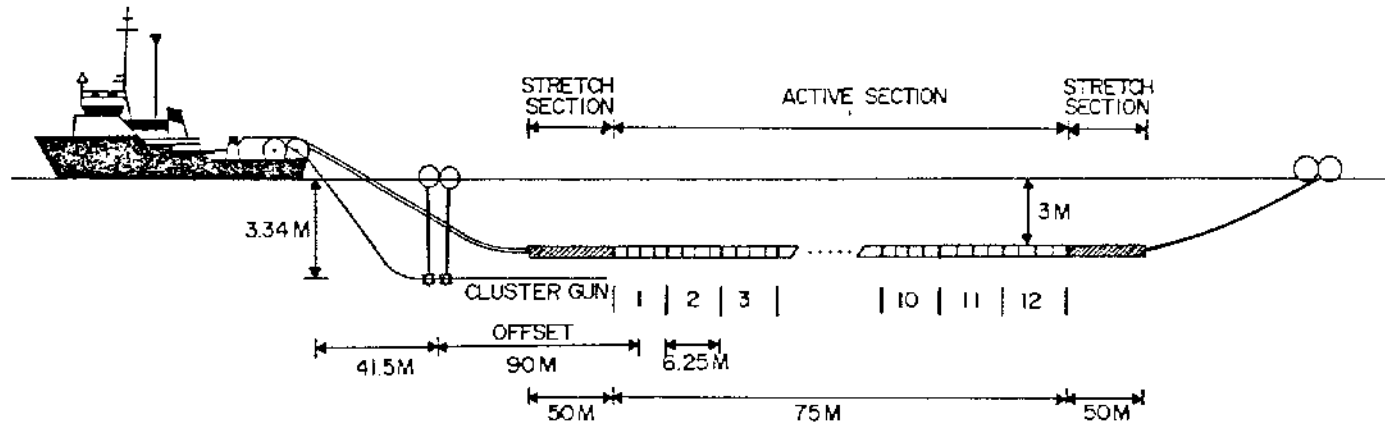
Model : SN-358 DMX
Software : M2-C, M3-C
Recording format : SEG-D, 6250 BPI
Sampling interval : 0.25 ms (12 ch.) to

4 ms (246 ch.)

(5) 자료검색 장비 (Quality Control Device)

Trace monitor : DFM 480 oscilloscope
EPC(9071/T), Epson printer
MicroMAX System : PC 386 based
Tape drive (STC)
132 column dot-matrix printer
1 monochrome monitor

이 중 이 연구의 교해상 탄성파 탐사를 위해 사용된 12채널 스트리머는 프랑스 AMG사에서 제작한 것으로 선미의 스트리머 원치로부터 200 m 길이의 유도 구간, 50 m 길이의 연결구간, 75 m 길이의 수신구간, 그리고 50 m 길이의 연결구간으로 구성된다. 이 스트리머는 채널 간격이 6.25 m로서 수평방향의 분해능이 높은 자료를 얻을 수 있으므로 교해상 탐사에 적합하다. 수신구간내 1개 채널의 감응도는 10-200 Hz의 주파수 대역에서 6V/bar의 일정한 값을 갖는다. 스트리머의 배열반응(array response)은 240 Hz 조화주파수에서 반응곡선이 최대로 떨어지도록 설계되어 있다. 파원으로는 은누리호 좌현 프레임에 고정설치된 2.46 l 용적의 슬리브진 2개를 사용하였으며, 압축공기는 LMF사 air compressor를 이용하여 2000 psi로 일정하게 공급하였다. 에어 건은 자체 제작한 제어 (trigger) 시스템을 이용하여 3 초 간격으로 발파하였다. 이때 사용된 탐사장비의 배치는 Fig.3-2와 같다.



Field geometry of the acquisition system

Fig. 3-2. Field geometry of the 12 channel seismic survey using the R/V Onnuri.

제 2 절 자료 획득 변수의 결정

탄성과 탐사에서 획득 변수는 탐사의 목적 및 지하매질의 특성에 따라 다르게 결정된다. 해상에서 실시하는 고해상 탄성과 탐사시 고려되는 주요 획득 변수는 (1) 건부피, (2) 발파심도, (3) 스트리머의 종류, (4) 발파간격, (5) 기록 시간, (6) 기록시 샘플율, (7) 수신 심도, (8) 조사선에서 건까지의 수평거리, (9) 건과 스트리머의 거리, (10) 기록시 주파수 필터의 설정, (12) 조사속도 등이다. 이중 처음 2개의 변수는 앞장에서 전산 모델링을 통해 구명된 바 있으므로 여기에서는 실제 고해상 탄성과 탐사시 선정할 변수에 관하여 주로 논의하고자 한다.

2-1. 건 부피 및 깊이의 결정

앞장에서 온누리호를 이용하는 고해상 탄성과 탐사에 적합한 최적의 건 부피는 2.46 I의 건 두개로 구성되어 있는 cluster이고 이 때의 건 깊이는 2 m임을 밝힌 바 있다. 그러나 온누리호의 에어 건 배열 프레임은 심부탐사용으로 설계가 되어 있어 건을 3.34 m 이내의 깊이로 위치시킬 수가 없다. Fig. 3-3a 및 3-3b는 각각 cluster 건을 3.4 m 깊이에서 발파할 경우에 대해 컴퓨터 모의 실험으로 얻은 원거리장 파형을 시간 및 주파수 영역에서 도시한 것이다. 주파수 영역의 결과에서, 주파수 성분이 50-200 Hz 구간에서 평탄하게 유지되는 양호한 특징을 보이므로 12채널 고해상 탄성과 자료 획득시에는 cluster 건을 3.4 m의 깊이에서 발파시켰다.

2-2. 건과 스트리머의 거리

고해상 12채널 스트리머의 전체 수신구간은 75 m이므로 수심이 깊을 경우 CDP 자료에서 트레이스간의 무브아웃(moveout) 차이가 작게 된다. 그 결과 속

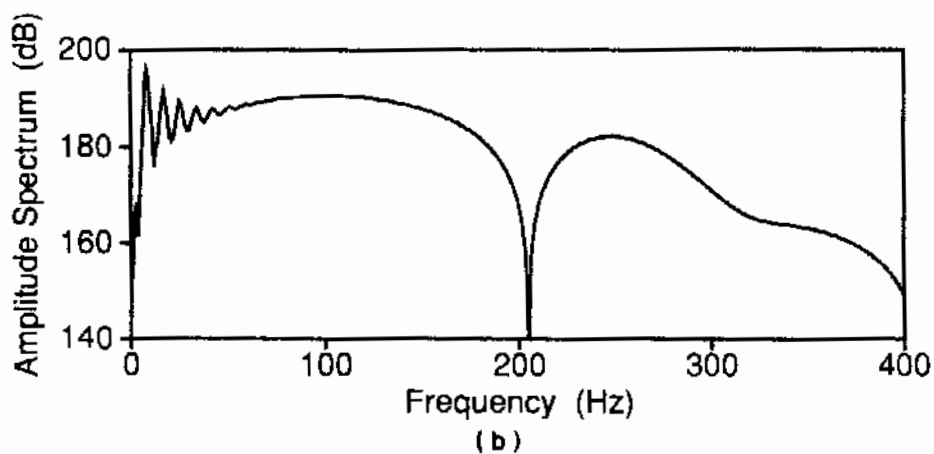
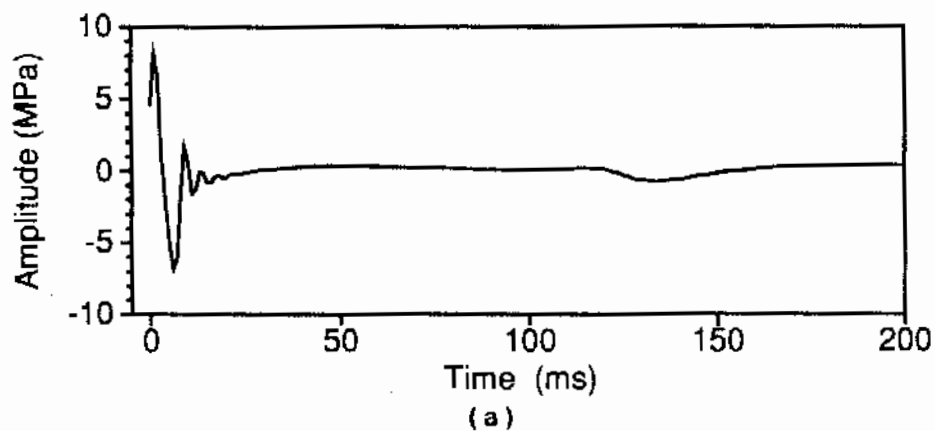


Fig. 3-3. (a) Computed far-field signatures for the cluster comprising two 2.46 I sleeve guns and (b) its amplitude spectra.

도함수를 정확히 구하기가 곤란하여 탄성과 속도들 이용한 지층해석이 어려워지며 중합에 의한 다중반사 에너지의 감쇠효과가 적어 다중반사파가 강하게 나타난다.

온누리호를 이용하여 12채널 탄성과 탐사들 수행할 때 건과 스트리머간의 거리(offset)는 최대 90 m 정도이다. 따라서 거리에 따른 획득자료의 변화를 확인하기 위하여 거리 50 m 및 90 m의 두 경우에 자료획득을 각각 실시하여 중합단면도를 작성하였다. 거리가 50 m인 경우 중합단면도(Fig.3-4a)에서, 예측 디컨볼루션을 적용하여 다중반사를 제거한 후에도 0.36초 부근에서 다중반사파가 강하게 나타나는 것은 볼 수 있다. 이에 비해 거리가 90 m일 경우에는 (Fig.3-4b) 다중반사가 효과적으로 제거되었음을 알 수 있다. 따라서 거리를 90m로 하여 얻은 자료를 이용하여 최종 탄성과 단면도를 작성하였다.

2-3. 기타 획득변수

일반적으로 조사선과 건의 간격이 멀 수록 조사선에서 발생하는 각종 잡음을 감쇠시킬 수 있다. 온누리호의 탄성과 탐사장비는 건땃줄 (umbilical cable)의 제약으로 건과 조사선의 거리를 41.5 m로 유지하였다. 기록시 주파수 필터는 50-200 Hz 부분의 에너지가 보존되는 대역통과 필터를 적용하였다.

12 채널 스트리머를 이용한 탄성과 탐사의 경우에는 스트리머 간격과 발파 간격이 같을 때 중합도가 최대 600%가 된다. 따라서 최대 중합도를 갖게 하기 위하여 스트리머 간격과 같은 6.25 m 마다 건을 발파하여 자료를 획득하였는데 이에 상응하는 조사선의 속도 및 발파간격은 각각 4노트 및 약 3초이다. 획득 자료는 SN358 DMX 기록시스템을 이용하여 SEG-D 포맷으로 기록하였으며, 42 dB의 일정 이득값을 취하였다. 고해상 탄성과 탐사에 이용된 주요 획득 변수는 Table 3-1에 기재하였다.

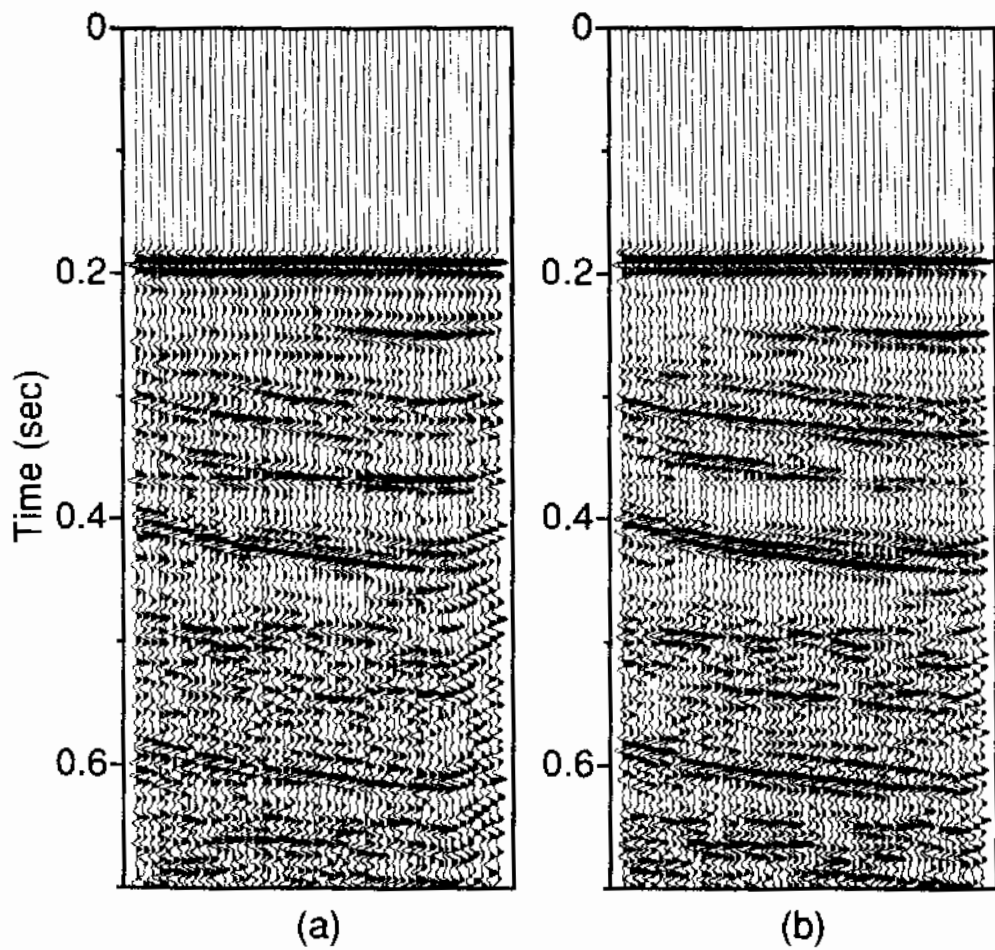


Fig. 3-4. Part of the multiple-suppressed stack section with near trace offset of (a) 50 m and (b) 90 m.

Table 3-1. Field parameters for the 12 channel high-resolution seismic survey in the continental shelf of Korea conducted in 1993.

건 깊이	3.34 m
건 부피	2.46 l
음원의 공기압력	2000 PSI (138 기압)
스트리머의 깊이	3 m
발파간격	6.25 m
기록시간	1 s
샘플간격	1 ms
필터 고주파통과필터	64 Hz 18 dB/oct
저주파통과필터	309 Hz 53 dB/oct
기록포맷	SEG-D 8015 format
건과 스트리머의 길이	90 m
채널간격	6.25 m

제 3 절 자료처리

3-1. 표준처리

탄성파 자료는 MicroMax 시스템을 주로 이용하여 처리하였으며 필요시 자체적으로 전산프로그램을 제작하였다. 탄성파 자료를 전산처리하기 위한 첫번째 시도로 SEG-D 포맷으로 기록된 현장기록 자료를 MicroMax에서 처리하기 위하여 내부 포맷으로 변환시켰다. 잡음이 심한 자료의 편집이 완료된 후 이를 중심점 분류 (CDP sorting) 하였다.

이미 기술한 바와 같이 12 채널 스트리머의 수신 길이가 75 m에 불과하여 트레이스간의 무브아웃차이가 작아 속도분석이 곤란하였으므로 12채널 자료의 중합시에는 동일 축선상에서 획득한 96채널 자료로부터 구한 속도값을 이용하

였다. NMO 보정후의 자료는 평균값으로 종합하였다. 에어 건과 스트리머가 각각 수심 3.4 m 및 3 m에 위치하므로 이를 해수면상에 일치시키기 위하여 종합후의 자료에 대하여 4 ms의 정보정(static correction)을 하였다.

해저면의 다중반사파를 제거하기 위하여 수층의 왕복주시와 같은 길이인 180 ms를 예측지연 (prediction lag)으로 선정하여 예측 디컨볼루션을 수행하였다. Fig. 3-5a 및 3-5b는 각각 디컨볼루션 적용 전후의 단면이다. 다중반사파 제거전의 단면(Fig. 3-5a)에서 1차 다중반사파가 0.36초 부근에 강하게 나타나고 0.54초 부근에 2차 다중반사파가 나타남을 볼 수 있다. 또한 0.60초 부근에서 나타나는 경사진 이벤트는 0.4초 부근의 경사면의 층간 다중반사(peg-leg)이다. 예측 디컨볼루션을 적용한 후(Fig. 3-5b), 1차 및 2차 다중반사파는 양호하게 제거되었지만 층간 다중반사는 제거되지 못하였다.

다중반사파가 제거된 자료의 구조보정 (migration)을 위하여 Stolt f-k 구조보정법을 이용하였다. 이 방법은 반사면이 수평인 복잡하지 않은 지층에 잘 적용되므로 (Yilmaz, 1987) 이 연구에서와 같이 반사면의 경사가 완만한 자료에 효과적이다. 이때 이완요소 (stretch factor)는 0.5, 최대 허용주파수는 250 Hz로 설정하였으며, 경계면에서 4 트레이스를 테이퍼링(tapering) 하였다. Fig. 3-6은 구조보정 후의 결과이다.

3-2. 해상도 향상을 위한 MID

반사면의 경계를 보다 명확히 나타내기 위하여 탄성파 자료처리에서 많이 쓰이고 있는 예측 디컨볼루션 (Peacock and Treitel, 1969) 방법은 반사계수의 함수가 가우스 분포를 갖는 무작위 급수이며 최소위상 (minimum phase)의 파형요소를 가정하지만, 실제의 자료에서는 반사계수의 비가우스 분포특성이 인지되고있으며 해상 탄성파 탐사시의 파형요소도 최소위상이 아니다 (Walden, 1985). 예측디컨볼루션과 달리 반사계수의 비가우스 분포특성을 고려한 디컨볼

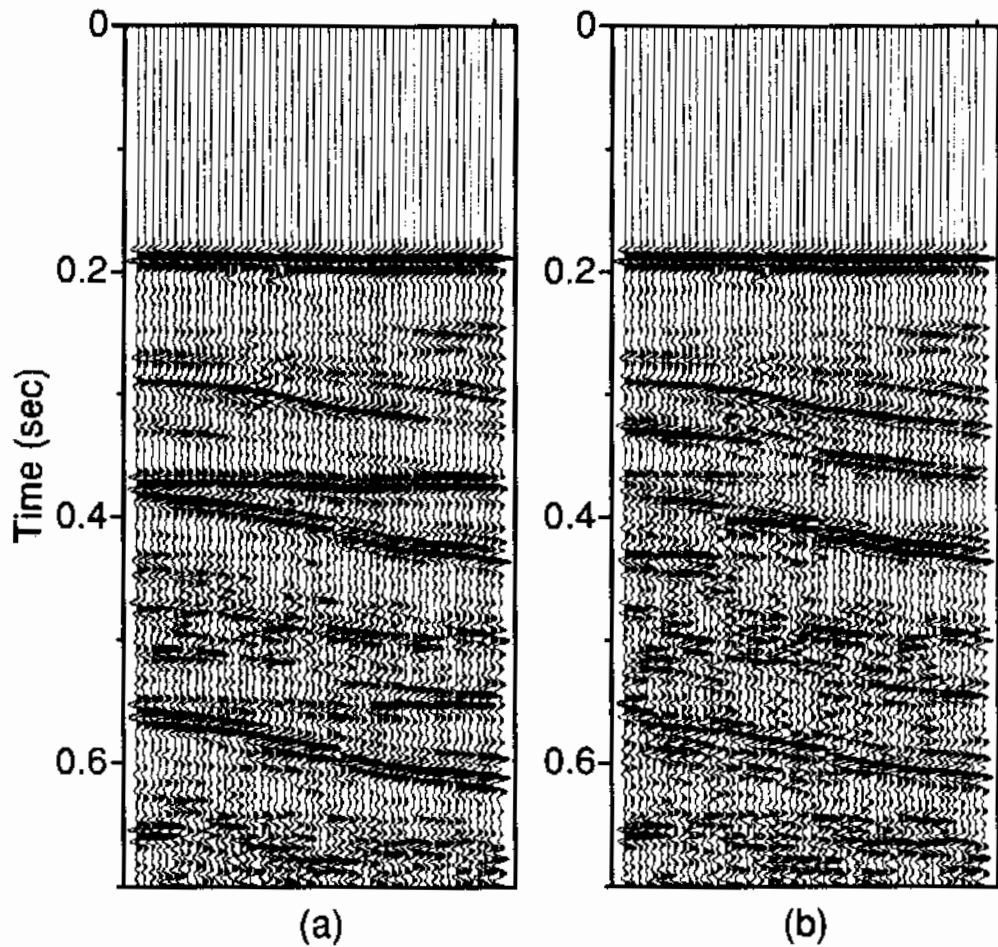


Fig. 3-5. Part of stack section (a) before and (b) after multiple suppression using predictive deconvolution.

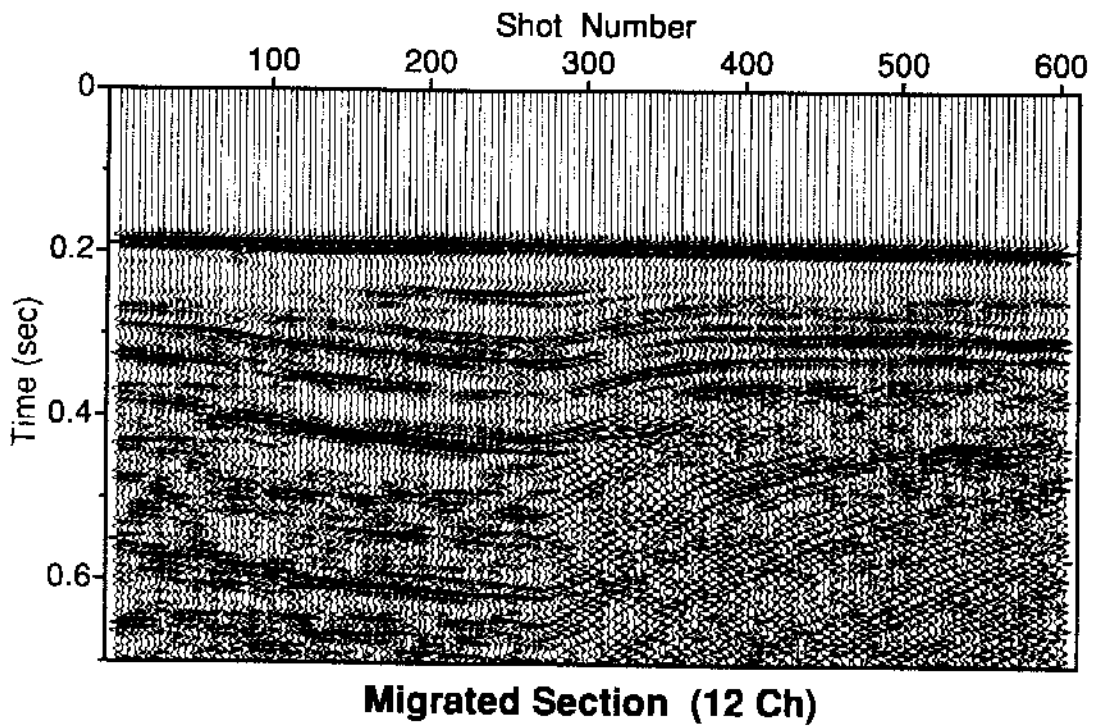


Fig. 3-6. Final migrated section of the 12 channel seismic survey.

루션 방법들을 “MED-형 (minimum entropy deconvolution - type)”이라 분류하는데 이중 MID (minimum information deconvolution) 방법은 Claerbout (1978)에 의하여 처음으로 제시된 이후 여러가지 MED 방법 중에서 가장 안정된 해를 보이는 방법으로 알려져 있다 (김한준 외, 1992).

내부용적 2.46 l인 cluster 건을 이용하여 획득한 하나의 발파자료 (shot gather)에 대하여 시험적으로 MID 필터를 적용하고 적용 전, 후의 단면을 각각 Fig.3-7a 및 3-7b에 도시하였다. Fig.3-7b에 나타난 바와 같이 MID 필터 적용 후에 bubble이 소멸되고 wave train이 축소되어 기록의 분해능이 향상되었음을 볼 수 있다. MID 필터는 자료를 스파이크(spike)화 시키므로 필터의 역으로 발파자료의 파형을 구할 수 있다. MID 필터 및 이를 이용하여 복원한 파형을 Fig.3-8에 도시하였다. Fig.3-9는 예측 연산방식을 이용한 스파이킹 디컨볼루션 필터 및 이를 이용하여 구한 파형이다. MID 필터를 이용한 파형은 스파이킹 디컨볼루션 필터를 이용하여 구한 것보다 해저면 반사파의 파형과 더 유사하게 나타난다. 그러나 MID 필터를 이용하여 구한 파형은 컴퓨터 모의실험으로 구한 파형 (Fig.3-3)과는 많은 차이를 보인다. 이것은 컴퓨터 모의실험시에는 실제 상황에서 발생하는 위상변위와 감쇠 등을 고려하지 못하기 때문인 것으로 생각된다.

다중반사파가 제거된 중합자료를 대상으로 반사면의 경계를 명확히 찾기 위하여 MID를 적용하였다. MID 필터의 길이는 128 ms, 트레이스당 디컨볼루션 연산을 위한 단위 시간대역(window)은 180 ms이며, 필터계수를 안정화 시키기 위하여 3 개 트레이스를 중합하여 MID 필터를 계산하고 이를 전체 중합자료에 적용하였다. Fig.3-10에 제시된 MID 적용 후의 결과는 발파번호 200을 중심으로 0.36초 부근은 실제 반사파 이벤트도 다중반사파와 함께 다소 감쇠되는 단점도 있지만, 왕복주시 0.3초 이내에 존재하는 지층의 경계면을 상세하게 구분하였으며 전체적으로 반사면의 위치를 명확히 나타내 주었다. 또한 발파점 300번부

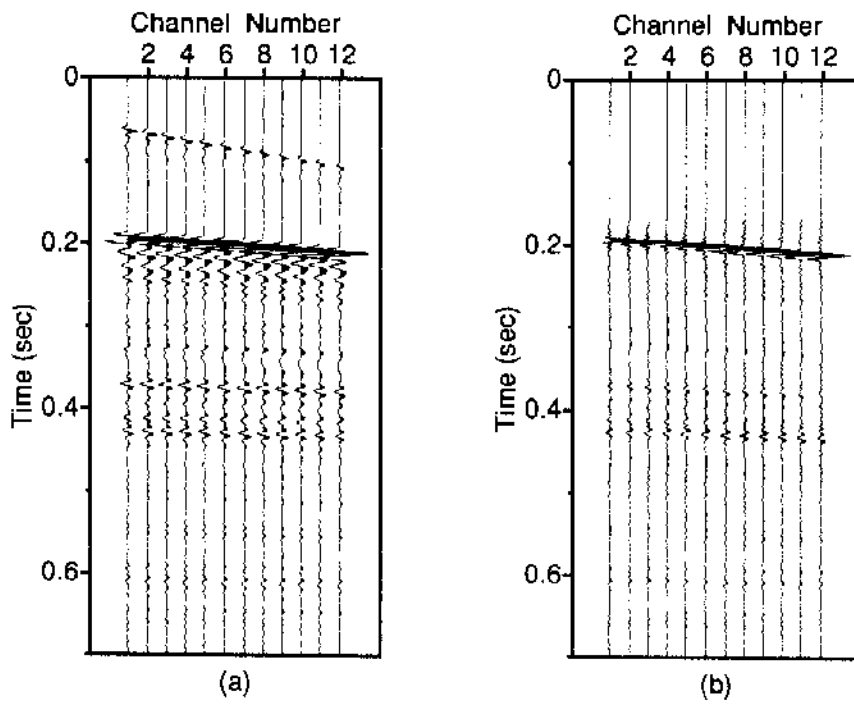


Fig. 3-7. A shot gather from the 12 channel streamer (a) before and (b) after MID.

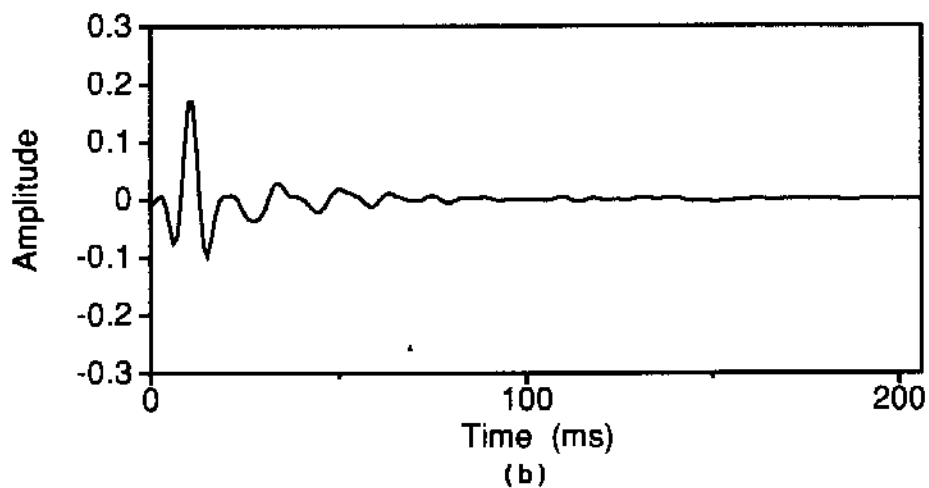
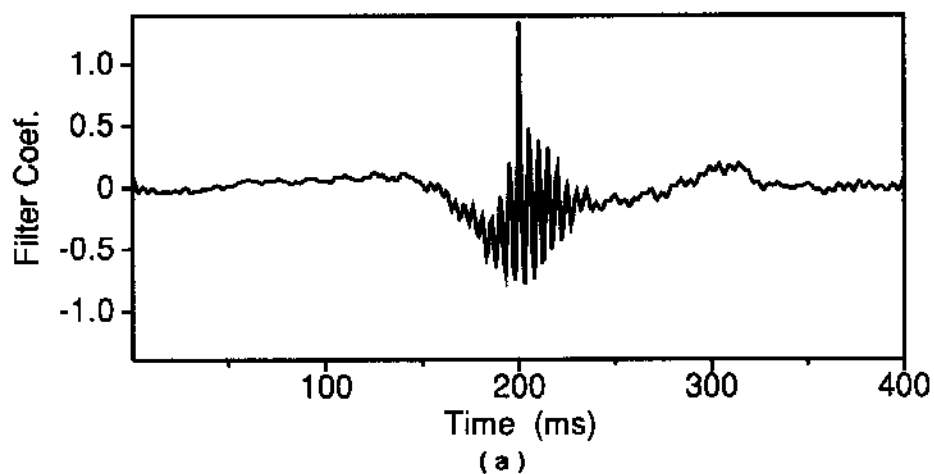


Fig. 3-8. (a) MID filter coefficients calculated for the nearest channel of the shot gather shown in Fig. 3-7 and (b) the computed wavelet as the inverse of the MID filter.

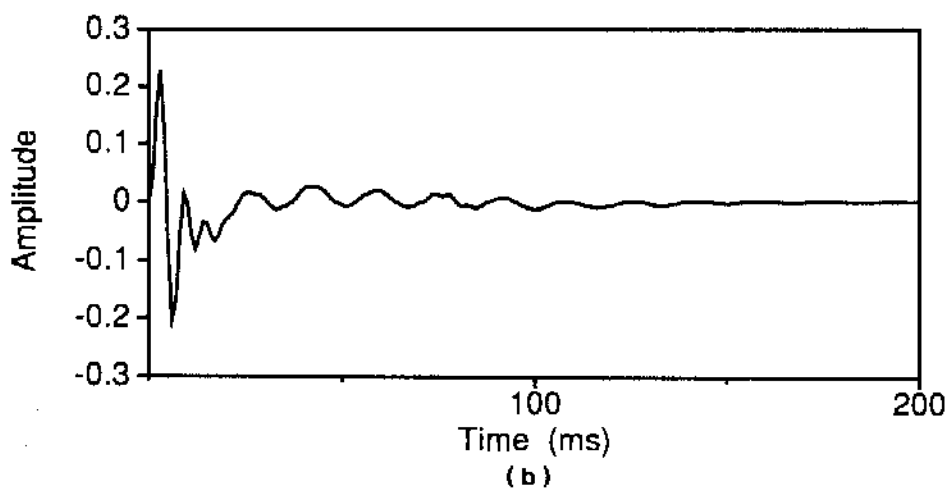
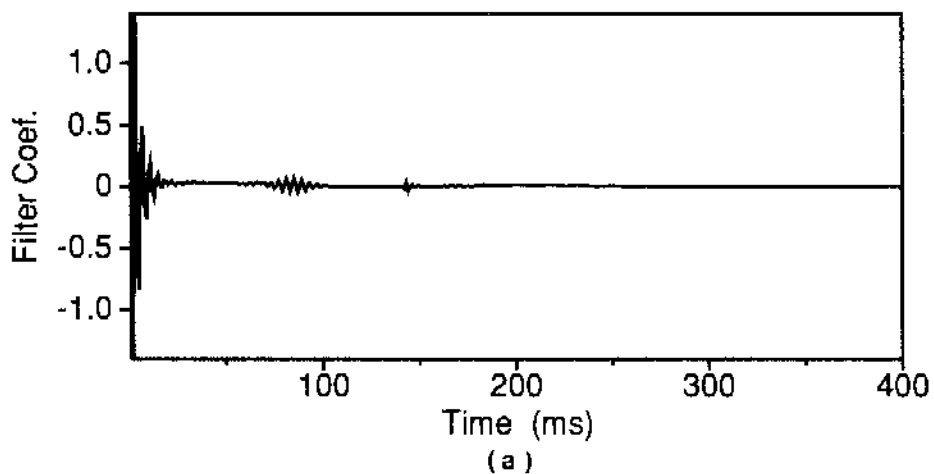


Fig. 3-9. Spiking deconvolution filter coefficients calculated for the nearest channel of the shot gather shown in Fig. 3-7 and (b) the computed wavelet as the inverse of the spiking deconvolution filter.

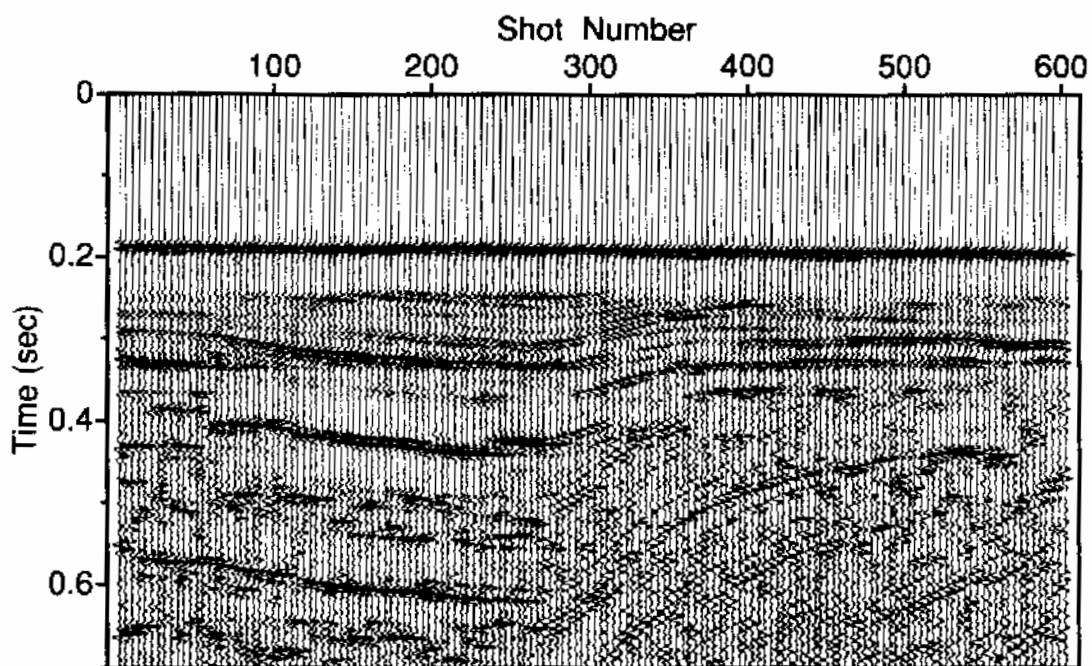


Fig. 3-10. High-resolution seismic section after predictive deconvolution and MID.

터 800번 사이의 탄성과 단면 우측 부분의 경계면들이 매우 명확해 졌음을 보여준다.

제 4 절 96 채널 탄성과 자료와의 비교

이 연구의 2차년도 연구에서, 온누리호에 탑재된 96채널 탄성과 탐사장비의 시험 및 획득변수 결정을 위한 탄성과 탐사가 1992년도 11월에 수행된 바 있다 (김기영외, 1993). 탐사시 25 m 간격으로 건을 발파하여, 샘플간격 2 ms로 자료를 5 초간 기록하였으며, 시스템공학연구소에 설치되었던 탄성과 자료처리용 소프트웨어 GEOVECTEUR를 이용하여 자료를 전산처리하였다. 탐사를 위해 선정된 주요 자료획득변수는 Table 3-2에 기재되어 있다. 따라서 96채널 탄성과 탐사가 수행된 측선에 대해, 12채널 고해상 탄성과 탐사들 다시 한번 수행하여 두 가지 경우에 대해 얻은 최종 탄성과 단면을 비교해 봄으로써 고해상 탄성과 탐사의 결과를 검증할 수 있다.

Table 3-2. Field parameters for the 96 channel seismic survey in the continental shelf of Korea conducted in 1992.

건용량	1380 in ³
발파간격	25 m
채널간격	25 m
기록시간	5 s
채널수	96
샘플간격	2 ms
건과 스트리머의 거리	122 m
건깊이	6 m
스트리머의 깊이	6 m

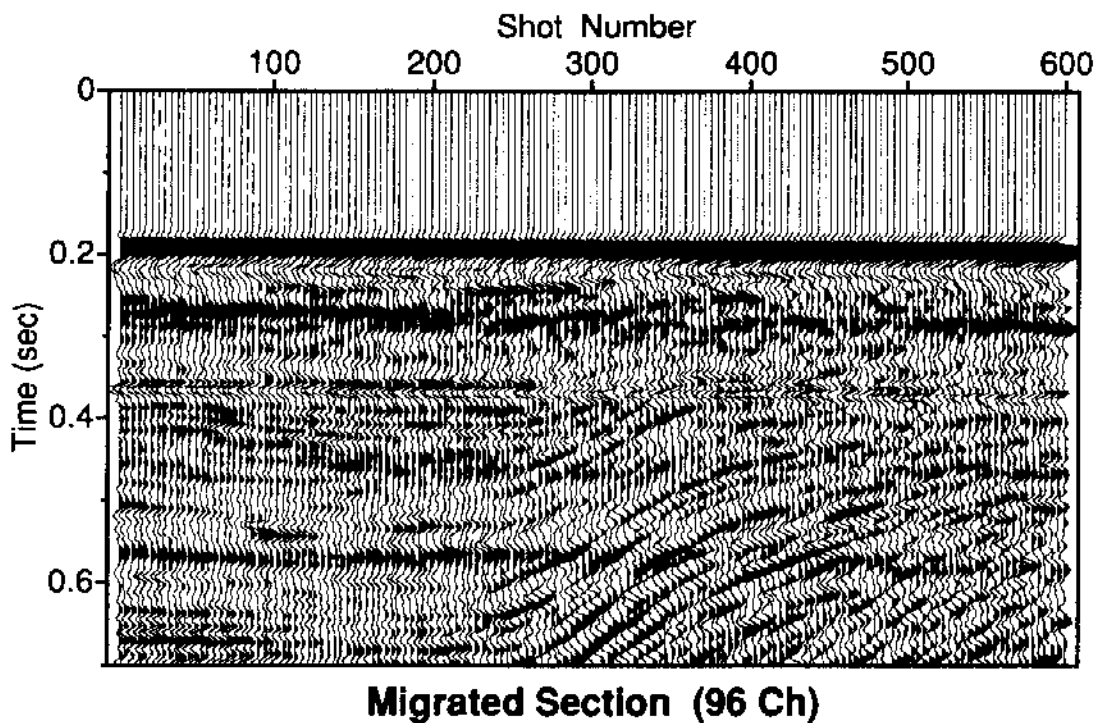


Fig. 3-11. Migrated section from the 96 channel seismic survey. The survey line is the same as that of the 12 channel high-resolution seismic survey.

Fig. 3-11은 96채널 탄성파 자료의 최종 구조보정 단면으로 0.7 s 까지 도시하였다. 도면의 트레이스 간격은 25 m로 12 채널자료와 도면의 트레이스 간격을 같게 유지하였다. 12 채널 자료의 최종단면인 Fig. 3-6 및 Fig. 3-10과 비교하여 보면, 왕복주시 0.4 s 내에 있는 천부 지층이 잘 나타나지 않으며 하부에 존재하는 지층도 경계면이 불분명하게 나타난다. 다중반사파가 0.36 s 부근에 강하게 잔류하는데 이는 NMO 보정시 파형이 이완되어 예측 디컨볼루션에 의하여 제대로 제거되지 못했기 때문이다. 위의 탄성파 단면들을 비교해 보면, 이 연구에서 개발한 고해상 탄성파 탐사기법이 심부 지질탐사를 위한 일반적인 다중채널 탄성파 탐사에 비해 천부지층의 탐사에 매우 적합함을 알 수 있다.

제 5 절 결 론

종합조사선 은누리호에 탑재된 12 채널 탄성파탐사 시스템을 이용하여, 천부 지층 탐사에 적합한 고해상 탄성파 탐사기법을 개발하였다. 이를 위하여 시험지역에서 자료획득을 수행하고 이를 처리하는 시스템을 구축하였다.

실제 자료획득시에는 고해상 탄성파 탐사에 적합한 탐사획득변수를 결정하기 위한 실험을 수행하였다. 먼저 건과 스트리머의 거리를 정하기 위하여 거리 50 m와 90 m인 경우에 대하여 시험적으로 자료를 획득하여 중합단면을 작성하였다. 거리 90 m인 자료의 중합단면은 거리 50 m인 경우보다 다중반사에너지가 적게 나타나 이를 획득변수로 결정하였다.

트레이스간의 무브아웃 차이가 작아 12 채널 자료를 이용하여 속도분석을 수행할 수 없었으나 중합에 필요한 속도정보는 동일 측선에서 획득한 96 채널 자료로부터 구하였다. 중합후 단면에는 다중반사파가 강하게 나타나 이를 제거

하기 위하여 예측 디컨볼루션을 적용하였다. 예측 디컨볼루션 적용후의 결과는 해저면의 다중반사파가 많이 제거되었지만 peg-leg성 다중반사파는 제대로 제거되지 않았다.

반사계수의 비가우스 분포특성을 고려한 MED-형 디컨볼루션의 일종인 MID 방법을 적용하여 반사면의 정확한 경계면을 구하고자 하였다. MID 필터는 기존의 디컨볼루션 필터보다 실제의 파형을 잘 반영하고 있으며, MID를 적용함으로써 지층의 경계가 명확히 구분된 탄성파단면을 얻을 수 있었다.

고해상 탄성파탐사의 결과로 얻어진 구조보정단면은 동일한 축선에서 획득한 96 채널 탐사결과와 비교하여 볼 때 수직 및 수평해상도가 향상되어 천부의 미세한 지층까지 명확히 구명하였다.

제 4 장

결 론

제 4 장 결 론

이 보고서는 “다중채널 해양반사파 자료의 처리기술 개발”과제의 3차년도 연구성과를 수록한 것이다. 이 연구에서는 1차 및 2차년도 연구에서 확립한 다중채널 심부 탄성과 탐사기술에 이어, 해저면하 약 1 km 심도까지의 지질을 대상으로 하는 고해상 탄성과 탐사기술을 개발하였다. 이번의 3차년도에서는 우선 세부연구과제로서 고해상 탄성과 탐사에 적합한 탄성파를 발생시키기 위한 에어 건의 구성 및 발파심도를 컴퓨터 모델링을 통해 분석하였다. 중점 연구과제로서 한국 대륙붕 해역에서 한국해양연구소의 조사선 은누리호를 이용하여 12채널 고해상 탄성과 탐사자료를 획득하고 이 자료를 처리하는 체계를 확립하였다. 3차년도 연구의 연구성과 및 결론은 다음과 같다.

1. 고해상 탄성과 자료의 획득을 위한 기초 연구

- ① 원거리장 파형을 시간 및 주파수영역에서 분석한 결과, 분석대상으로 삼은 천산 모형중, 내용적 2.46 l의 슬리브건 2 개로 구성된 cluster를 2 m 정도의 깊이에서 발파할 경우에 주신호 진폭, 주신호대 기포의 진폭비, 기포주기 등이 가장 크고, 200-300 Hz까지의 진폭 스펙트럼이 비교적 평탄한 이상적인 원거리장 파형이 발생된다.
- ② 은누리호에 있는 스트리머중, 12 채널 스트리머는 96 채널 스트리머에 비하여, 수직으로 입사하는 지진파의 S/N 비가 $\sqrt{3}$ 배 작은 반면에 4배 높은 수평해상도를 얻을 수 있다. 또한 상대적으로 작은 moveout으로 인한 높은 수직해상도도 얻을 수 있어 고해상도 반사파 탐사에 더욱 효과적이다.

2. 고해상 탄성파 탐사

- ① 한국 대륙붕 해역에서 "온누리호"에 탑재된 12 채널 탄성파탐사 시스템을 이용하는 고해상 탄성파 탐사를 성공적으로 수행함으로써 고해상 탄성파 자료획득 기술을 개발하였다.
- ② 시험 탐사를 통해 기록시간 1 s, 샘플간격 1 ms, 그리고 에어 건과 스트리머의 거리 90 m 의 획득변수로서 양호한 탄성파 자료를 얻을 수 있었다.
- ③ 상기 자료의 표준처리 기술을 개발하여 탐사 측선에 대한 최종 지질단면을 작성하였다. 표준처리는 (1) 탄성파 자료의 내부 포맷 변환, (2) 동보정 및 정보정, (3) 중합, (4) 예측 디컨블루션을 이용한 다중반사 제거, 그리고 (5) 구조 보정으로 구성된다.
- ④ 최소정보 디컨블루션 방법을 적용하여 지질 단면의 분해능을 높일 수 있었다. 이 때 파형요소를 복원함으로써 디컨블루션 필터의 길이 및 단위 처리 범위를 정할 수 있었다.
- ⑤ 고해상 탄성파탐사의 결과로 얻어진 탄성파 단면은 동일한 측선에서 획득한 96 채널 탐사결과와 비교할 때, 수직 및 수평 해상도가 향상되어 지하 약 1 km 심도까지 미세한 지질구조를 명확히 구명할 수 있었다.
- ⑥ 이번의 3차년도 연구를 통해 고해상 탄성파 탐사기술을 개발함으로써 1차 및 2차년도의 연구성과와 함께 종합적으로 국내에서 탄성파 탐사의 전 분야를 수행할 수 있는 체계를 이룩하였다.

3차년도의 연구를 통하여 확립한 고해상 탄성파 탐사기술은 통상적인 탄성파 탐사에 비해 수평 및 수직 성분의 분해능이 향상된 지질단면을 얻을 수 있다. 따라서 고해상 탄성파 탐사기술은 한반도 주변해역의 신생대 지층의 퇴적 환경 분석과 같은 학술적 분야뿐만 아니라 대륙붕 시추지점 주변의 정밀 지질

구조 및 층서조사, 연안역 구조물 설치를 위한 지반조사, 그리고 폐기물 투기 지역 조사 등과 같이 산업적으로도 폭넓게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

참 고 문 헌

- 김기영, 정귀금, 1991, 무브아웃 차이를 이용한 다중반사파 제거법에 관한 고찰, 지질학회지, v.27, p.604-613.
- 김기영 외, 1993, 다중채널 해양반사파 자료의 처리기술 개발 (II), 한국해양연구소 보고서, PNW 193-595-5.
- 김기영, 유해수, 주형태, 김예동, 1993a, 해저면 반사파를 이용한 슬리브건의 원거리장 파형분석 연구 (I) - 독립발파의 경우를 중심으로-, 한국자원공학회지, v.30, p.327-340.
- 김기영, 유해수, 주형태, 김한준, 1993b, 해저면 반사파를 이용한 슬리브건의 원거리장 파형분석 연구 (II) - 여러개의 슬리브건을 동시에 발파한 경우, 한국자원공학회지, v.30, p.430-438.
- 김한준, 현병구, 서정희, 1992, Gradient Descent 연산방식에 의한 MED-형 디컨볼루션 방법의 통일, 한국자원공학회지, v.29, p.32-38.
- 김한준 외, 1993, 온누리호 탄성파 자료의 신호대 잡음비 향상 연구 (Karhunen-Loeve 변환을 이용한 다중반사 제거), 한국해양연구소 보고서, BSPE00324-534-5, 44p.
- 민정덕, 서정희, 권병두, 1987, 응용지구물리학, 우성문화사, 571p.
- Alan, B. and Steve, B., 1986, A new high-resolution digital marine acquisition system, leading edge, v.10, 1986.
- AMG, 1991, AMG 96-120 Trace Streamer Technical Manual, AMG, France.
- Bays, A. and Blasco, S., 1986, A new high-resolution digital marine acquisition system, Leading Edge, v.10, p.51-54.

- Butler, D.K., Llopis, J.L., Dobecki, T.L., Wilt, M.J., Corwin, R.F., and Olhoeft, G. 1990, Comprehensive geophysics investigation of an existing dam foundation, *The Leading Edge*, v. 9, n. 9, p.44-53.
- Clearbout, J.F.. 1978, Minimum information deconvolution : Stanford Exploration Project, v.15, p.109-122
- Cotton, W.R. and Monk, D.J., 1990, Modeling airgun signatures for statistical evaluation of airgun array performance, presented at the 60th annual int'l mtg. of SEG, San Francisco, California, U. S. A.
- Donoho, D., 1981, On minimum entropy deconvolution, in Findley, D. Ed., *Applied Times Series Analysis II* : Academic Press Inc.
- Johnston, R.C., Reed, D.H., and Desler, J.F., 1988, Marine seismic energy source standards (special report), *Geophysics*, v. 53, p. 566-575.
- Jongerius, P. and Helbig, K., 1988, Onshore high-resolution seismic profiling applied to sedimentology, *Geophysica*, v. 53, p. 1276-1283.
- Nooteboom, J.J., 1978, Signature and amplitude of linear airgun arrays, *Geophysical Prospecting*, v. 26, p. 194-201.
- Parkes, G. and Hatton, L., 1986, *The marine seismic source*, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht.
- Peacock, K.L. and Treitel, S., 1969, Predictive deconvolution : Theory and Practice : *Geophysics*, v.34. p.155-169
- Steeple, D.W., Knapp, R.W., and McElwee, C.D., 1986, Seismic reflection investigations of sinkholes beneath interstate highway 70 in Kansas, *Geophysics*, v. 51, p. 295-301.

- Verma, R.K., 1986, Offshore Seismic Exploration, Gulf Pub. Co., Houston.
- Walden, A.T., 1985, Non-Gaussian reflectivity, entropy, and deconvolution
: Geophysics, v.50, p.2862-2888

주 의

1. 이 보고서는 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

