

工學碩士 學位論文

탄성파 반사법 및 굴절법을 이용한
천해저 지반조사에 대한 연구

*A Study on the Shallow Marine Site Survey using
Seismic Reflection and Refraction Method*

指導教授 辛 誠 烈

2007年 6月

韓國海洋大學校 大學院

海洋開發工學科

金 贊 洙

工學碩士 學位論文

탄성파 반사법 및 굴절법을 이용한 천해저 지반조사에 대한 연구

*A Study on the Shallow Marine Site Survey using
Seismic Reflection and Refraction Method*

指導教授 辛 誠 烈

2007年 6月

韓國海洋大學校 大學院

海洋開發工學科

金 贊 洙

本 論文을 金贊洙의 工學碩士
學位論文으로 認准함.

委員長 張 元 一 印

委 員 辛 誠 烈 印

委 員 尹 志 豪 印

2007年 6月

韓國海洋大學校 大學院

목 차

초 록	v
ABSTRACT	vi
1. 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	3
1.3 연구방법 및 내용	4
2. 자료 취득 시스템	5
2.1 천해저 탄성파탐사 자료취득 개요	5
2.2 자료 취득 시스템 구성	9
2.3 음원장치(Source)	11
2.3.1 반사법 해양 탄성파탐사 음원: 듀얼부머(Dual Boomer)	11
2.3.2 굴절법 해양 탄성파탐사 음원: 에어건(Air Gun)	11
2.4 수신 장치	12
2.4.1 반사법 해양 탄성파탐사: 단일채널 스트리머	12
2.4.2 굴절법 해양 탄성파탐사:OBC-type 스트리머	12
2.5 기록장치	15
2.5.1 반사법 해양 탄성파탐사: Chirp II workstation	15
2.5.2 굴절법 해양 탄성파탐사: Mcseis-SX	15
2.6 항측장치	16

3. 현장 적용	17
3.1 연구지역	17
3.2 자료취득변수	20
4. 자료 처리 및 해석	21
4.1 자료처리	21
4.1.1 반사법 자료처리	21
4.1.2 굴절법 자료처리	24
4.2 자료해석	27
4.2.1 반사법 자료해석	27
4.2.2 굴절법 토모그래피	31
4.2.3 굴절법 자료해석	32
4.3 탐사자료 통합해석	36
5. 결과 및 고찰	37
6. 결 론	40
참 고 문 헌	42
APPENDIX I	44

표 목 차

Table. 1. Data acquisition system	9
Table. 2. Specification of 24 channel OBC-type streamer	13
Table. 3. Data acquisition parameter	20

그 림 목 차

Fig. 1. Layout of shallow marine seismic survey: (a) reflection (b) refraction	8
Fig. 2. Schematic diagram of marine seismic system: (a) reflection (b) refraction ·	10
Fig. 3. A drawing of 24 channel streamer(OBC-type)	14
Fig. 4. 24 channel OBC-type streamer	14
Fig. 5. The GPS base station in Korea	16
Fig. 6. The geologic lineament (fault) of survey area, Busan	18
Fig. 7. Marine reflection survey: (a) survey area and (b) track chart of survey line	19
Fig. 8. Source-Receiver configuration(reflection)	20
Fig. 9. Flow chart of the single-channel seismic data processing	21
Fig. 10. Amplitude spectrum of a seismic traces: (a) before and (b) after filtering	22
Fig. 11. Band-pass filter effect of seismic reflection data for Line-002: (a) before and (b) after filtering low-cut filter of 200 Hz and high-cut filter of 1,500 Hz were applied.	23
Fig. 12. Amplitude spectrum of the obtained seismic data: (a) shot No. 4 and (b) shot No. 11	24
Fig. 13. The refraction seismic data: (a) shot No. 4 and (b) shot No. 11	25
Fig. 14. The travel time curve of the acquired seismic refraction data	26
Fig. 15. A seismic reflection data. Yellow solid line indicates sea bottom and green line basement boundary	28
Fig. 16. The map of (a) the sea bottom depth and (b) sediment thickness	29
Fig. 17. The 3D map of bedrock	30
Fig. 18. Flow chart of the seismic refraction tomography	33

Fig. 19. Initial velocity model for refraction tomography	33
Fig. 20. The travel time curve represented by the first arrival time of all shot	34
Fig. 21. Velocity tomogram through travel-time inversion of refracted P-waves	35
Fig. 22. Flow chart of the integrated seismic interpretation	36
Fig. 23. The comparison of reflection and refraction data	39

초 록

해양 탄성과 탐사를 이용하여 조사지역 지반의 물리적 특성을 평가하고 지질공학적 기반암 분포를 파악하는 것은 해양 토목 및 건설을 위한 지반조사 분야에서 매우 중요한 부분이다. 그러나 해양에서 이루어지는 조사들이 단일 방법으로 수행되는 경우 설계 및 시공 현장에 제공할 수 있는 자료에 한계가 있고, 획득한 자료의 신뢰성이 부족한 경우가 발생할 수 있다. 공학적 목적의 지반조사에 양질의 자료를 제공하기 위해서는 여러 가지 조사들이 동시에 수행되어야하고 또한 통합적인 해석이 필요하다.

본 연구에서는 천해저에서 지층 경계에 대한 분해능이 뛰어나며 지층 형태 파악이 용이한 탄성과탐사 반사법과 지층의 물리적 특성 가운데 중요한 성질인 탄성과 속도를 구할 수 있는 굴절법을 동시에 수행함으로써 보다 정확한 지질정보 획득을 시도하였다. 반사법 자료를 획득하기 위해서 음원과 수신기로서 듀얼부머와 단일채널 스트리머를 사용하였으며, 굴절법 자료를 획득하기 위해서 에어건 음원과 OBC(Ocean Bottom Cable)형태의 수신장치를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 OBC형 수신기는 24 채널로서 각 채널은 한 개의 하이드로폰과 전치증폭기로 구성되어 있으며 채널 간격은 4 m로 제작되었다.

본 연구에서 사용된 시스템을 검증하고 현장 적용성을 파악하기 위하여 부산 한국해양대학교 앞 바다에서 탐사를 실시하였고, 단일채널 탄성과탐사 반사법 및 OBC 형태의 해양 굴절법 탐사가 성공적으로 수행되었다. 취득한 반사법 탐사자료는 통상적인 전산처리과정을 통하여 해상도 및 품질이 향상된 2차원 고해상 탄성과 단면도를 얻었고, 굴절법 탐사자료는 토모그래피 방법을 통하여 속도 단면도를 구하였다. 두 가지 탐사 결과에 대한 통합적인 해석 단계로서 반사법 탄성과 단면도는 굴절법에서 얻은 속도정보를 이용하여 심도 전환된 단면도를 얻었고, 이로부터 3차원 기반암 심도 단면도와 퇴적층 두께 분포도 등에 대한 정보를 도출할 수 있었다. 천해저 지반조사 분야에 본 연구에서 제시한 방법을 이용하면 보다 정확하고 신뢰성 높은 지질정보가 파악될 것으로 사료된다.

주요어 : 천해저 지반조사, 탄성과 탐사 반사법 및 굴절법, OBC(Ocean Bottom Cable), 통합해석

ABSTRACT

It is very important to estimate the physical properties of survey area and delineate the geological basement in marine site survey for the design of offshore structures. If we make use of only one site survey technique, we have difficulty in getting the geologic information for the design and construction field. For the purpose of providing high quality data by means of engineering site survey, it is necessary to apply several survey technique and carry out the integrated interpretation to each other.

In this study, we applied single channel seismic reflection and OBC(Ocean Bottom Cable) type seismic refraction method in the site survey at shallow marine. As we can easily find the geological boundary and geometry by seismic reflection method, so can we extract the velocity distribution from seismic refraction method. We made use of the dual boomer-single channel streamer as a source-receiver in seismic reflection survey and airgun source-the developed OBC type streamer in seismic refraction survey. The developed OBC type streamer has 24 channels and channel interval is 4m. Each channel is composed of single hydrophone and preamplifier.

We tested the field applicability of the proposed method at the offshore area of Korea Maritime University and successfully acquired seismic reflection and refraction data. We applied the typical seismic data processing sequence to the obtained reflection data in order to enhance the data quality and image resolution. Seismic refraction tomography technique was applied to the refraction data to estimate the geological velocity distribution, and so we could perform time-to-depth conversion using the velocity information obtained from refraction data as an integrated interpretation. The proposed method could provide a reliable geologic information such as sediment layer thickness and 3D basement depth map.

Key word : shallow marine site survey, seismic reflection and refraction method, OBC(Ocean Bottom Cable), the integrated interpretation

1. 서 론

1.1 연구배경

인류가 활동분야를 넓혀 가면서 해양 분야에 많은 개발이 이루어지고 있다. 항만개발, 교량건설, 해저 케이블 매설, 원전수거물 저장고 건설 등 공공사업 분야에서 해양토목시공을 위하여 건설부지에 대한 보다 정확한 지층의 구조를 파악하여야 구조물의 안전성과 비용의 절감을 가져올 수 있다. 그리고 석유, 천연가스, 가스하이드레이트, 골재 자원 등 해저에 부존하는 자원을 예측하고 확인하여 자원개발 가능성을 높여 인류의 활동에 유용하게 사용될 수 있도록 해야 한다. 이러한 목적을 바탕으로 탐사자료의 품질을 향상시키기 위하여 많은 연구자들이 해양탐사기법을 개발하고 발전시켜 왔다(이호영, 1991; 이호영 외, 2002; 김현도, 2004; 김영준, 2005). 그 중에서도 해양 탄성파탐사가 가장 많이 사용되었으며, 앞으로도 그 활용도는 점차 증가할 것으로 보인다.

해양 탄성파탐사는 육상과 마찬가지로 반사법 탐사와 굴절법 탐사로 구분된다. 지층 경계에 대한 분해능이 높아 지하구조에 대한 단면을 정밀하게 나타낼 수 있는 반사법 탐사는 심부 탐사 분야에서 발전하여 다중채널의 디지털 기법을 이용하여 보다 높은 해상도의 탄성과 단면을 제작하여 왔고, 최근에는 인류의 생활공간으로 여겨지는 천해저에 적용되기 시작하여 좋은 성과를 거두고 있다(이호영 외, 2002). 지층의 물리적 특성인 속도를 파악할 수 있어 그 속도에 의한 지하영상화가 가능한 굴절법 탐사는 탐사 결과로부터 표토층 및 풍화대 깊이, 연암 또는 기반암의 심도, 단층 파쇄대나 연약지반의 위치 및 규모, 지질경계 등을 파악, 지하 속도분포를 도출함으로써 지반 공학적 특성의 정량적 평가가 가능하다(조창수, 2002) 해상 굴절법 탐사는 꾸준히 발전되어 왔으며 굴절법 기록의 해상도 향상, 해석 시 신속 정확한 굴절파의 추출 등에 관한 전산화가 이루어지고 있다(이호영 외, 1992). 또한 토모그래피 해석을 굴절법 탄성과 탐사에 적용시켜 지반의 속도구조를 상세히 파악하는 해석도 이루어지고 있다(고광범 외, 2002).

최근 들어 고주파수 음원을 사용하는 해양 탄성파탐사 분야에서 해저에서 반사된 신호를 탄성과 처리기법을 응용하여 음향특성을 분석함으로써 해저지반의 특성을 파악하는 연구들이 국내외적으로 이루어지고 있다. 이미 미국, 일본 등 선진국에서는 석유탐

사 및 유전평가 기술을 발전시키기 위하여 고해상 및 초고해상도의 3D 탄성파탐사 시스템을 개발하여 건설 및 환경 등 공학적 문제에 활발히 적용하고 있다(Missiaen et al., 2002; Henriet, 2002). 국내에서는 전통적인 자원탐사기술들이 토목 및 건설 분야의 공학적인 문제에 적용되고 있으나 주로 육상지역에 한정되어 있으며 해양 분야에서는 매우 미미한 실정이다.

해상구조물의 설치를 위한 정밀 지반조사를 경제적으로 수행하기 위해서는 해양 탄성파탐사 자료를 이용하여 부지특성을 파악할 수 있는 연구들이 진행되어야 한다. 그 중 탐사기술들을 엔지니어링 목적에 맞게 통합적으로 연구하고 효율적이면서도 소형화된 수진기를 개발하여 토목 구조물 기초지반 조사기술을 향상시키고자 한다.

1.2 연구목적

천해저에서 이루어지는 탄성과 반사법과 굴절법은 지층의 역학적 특성을 파악하기 위한 방법으로 상호보완 관계에 있다. 반사법 탐사는 지층에 대한 구조단면을 나타내는데 점에서 장점을 지니고 있으나 해석된 층의 물리적 특성을 알기가 어렵다. 반면 굴절법 탐사는 지층의 물리적 특성 중 하나인 탄성과 전파속도를 구할 수 있게 함으로써 지층을 구성하는 암석의 특성을 파악하는데 큰 도움을 준다(이호영 등, 1992; Cha et al., 2003). 그러나 천해저에 대한 지반조사 시 탐사경비와 관련된 경제적인 이유로 한 가지 방법으로만 조사가 진행되는 경우 정확한 지질정보를 도출하는데 한계를 가지게 된다.

해양 탄성과 탐사자료를 이용하여 조사지역 지층의 물리적 특성을 파악하고 지질공학적인 기반암 분포를 조사하는 것은 해양 토목 및 건설 분야에서 매우 중요하다. 천해저에서 탄성과 자료를 획득하기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔으며 고분해능 다중채널 탐사기술과 3차원 고분해능 탐사도 시도되고 있다. 그러나 해양에서 이루어지는 많은 조사들이 단일방법으로 수행되는 경우가 많아 공사현장에 제공할 수 있는 자료에 한계가 있고, 획득한 자료의 신뢰성이 부족해 공사 진행에 어려움을 줄 수가 있다. 따라서 엔지니어링 목적의 품질 좋은 자료를 제공하기 위해서는 여러 가지 탐사기술이 동시에 적용되고, 또한 탐사 결과에 대한 해석은 상호 연관성을 가지므로 통합적으로 진행되어야 한다.

탐사 기술과 전산 처리 기술 등은 선진국의 기술력에 비해 많은 차이점이 없는 것에 반해, 탐사 장비 개발에 관한 연구는 해외 선진국에 비해 많이 뒤쳐져 있는 실정이다. 탐사 장비는 거의 대부분을 수입에 의존하고 있고 그에 따라 장비의 확보와 수리 등에 많은 어려움을 겪고 있다. 본 연구에서는 OBC형태의 수신기를 이용한 굴절법 탐사를 실시하기 위하여 OBC-type 스트리머를 제작하였고, 이를 바탕으로 탐사 장비 개발에 대한 국내 기술 축적에 기여하고자 하였다.

1.3 연구방법 및 내용

해양 지반조사와 같은 엔지니어링 탐사를 목적으로 하는 천해저 탄성파탐사는 소형 선박을 이용하여 고주파 성분의 음원과 단일채널 또는 소규모의 다중채널 수신기 그리고 디지털 자료기록 시스템 등으로 자료를 취득하고 있다. 탄성파탐사 자료취득 시 현장조건에 적합한 자료취득 시스템을 구성하고 자료취득 변수를 적절히 선택하면 취득과정의 효율과 탐사자료의 품질을 높일 수 있다(Missiaen et al., 2002; 이호영 외, 2003).

본 연구에서는 반사법 자료를 획득하기 위해서 음원과 수신기로서 듀얼부머(dual-boomer)와 단일채널 스트리머(streamer)를 사용하였으며, PC를 기반으로 한 디지털 자료 취득 시스템을 운용하였다. 굴절법 자료를 획득하기 위해서 소형 에어건(air-gun)을 음원으로 사용하고 OBC-type의 제작된 수신기를 사용하였다. OBC 기술을 바탕으로 천해저에서 효율적으로 자료를 취득할 수 있도록 24개의 하이드로폰(hydrophone)을 4m 간격으로 배열하였고 다중채널 탐사가 가능하도록 수신기를 제작하였다. 일반적으로 굴절법 탐사이나 나타나는 굴절신호의 진폭은 크기가 매우 작으므로 자료의 품질을 향상시키기 위하여 각각의 하이드로폰에 전치증폭기(preamplifier)를 설치하여 신호증폭을 하였다.

본 연구에서 제안된 방법 및 개발된 시스템의 성능과 현장 적용성을 검증하기 위해 한국해양대학교 인근 앞바다에서 현장탐사를 수행하였다. 취득한 탐사자료를 기본 전산 처리하여 해상도 및 품질을 향상시킨 후 2차원 고해상 지층 단면도, 3차원 기반암심도 단면도와 속도 분포도 등을 작성하였다. 작성된 단면도를 해석하여 지질공학적 적용에 필요한 천해저 퇴적층의 두께 및 탄성파 전파속도 및 기반암심도 등을 구할 수 있었다.

2. 자료 취득 시스템

2.1 천해저 탄성파탐사 자료취득 개요

탄성파탐사는 지표면이나 수면 또는 지중에서 인위적으로 발생시킨 탄성파가 지하 매질을 통하여 전파하다가 음향임피던스 차이가 있는 지층경계에서 반사 또는 굴절되어 되돌아오는 파를 수신기로 기록하여, 지하 지질구조나 암석의 물리적 특성을 규명하고 지하에 매장되어 있는 석유, 가스 또는 광물 자원을 탐사하는 방법이다. 탐사 방법에 따라 탄성파탐사 반사법과 굴절법으로 크게 구분한다.

천해저 탄성파 반사법 탐사는 해수면 근처에서 전기적 에너지나 물리적 에너지를 이용하여 음파를 발생시키면, 음파는 매질의 속도와 밀도 차이로 인해 발생하는 음향 임피던스 경계면에서 반사되어 되돌아오고, 해수면 근처에 설치된 수신기를 통하여 음파의 신호를 수신한다. 이 과정을 일정 시간 간격으로 반복하는 동안 탐사선이 일정 속도로 이동하면서 반사파를 수신하여 기록지에 기록함으로써 해저 지층의 정보를 얻는다.

굴절법탐사는 일찍이 지진학자들이 지구 내부의 속도분포를 연구하는데 응용되었으며 최근에는 천부 지하를 대상으로 하는 지반조사에 사용되고 있다. 천해저 굴절법탐사는 해저지층을 P파 속도에 기초하여 분석하는 탐사법으로서 지층의 탄성파 속도라는 공학적 물성을 직접 제공해준다. 천해저에서 해저표층, 퇴적층 및 기반암에 대한 속도 측정은 매우 중요하다. 천해저 굴절법탐사의 수행방법은 육상에서 수행하는 굴절법 탐사와 방법상에서는 동일하다. 하지만 해상의 경우 탐사선을 타고 수신기, 음원, 케이블 등을 설치하는데 있어서 해수의 유동 및 탐사선의 불규칙한 움직임 때문에 정확한 위치에 설치하기가 어렵고 행동에 제약이 많아지게 된다.

일반적인 탄성파 탐사에 사용되는 장비를 살펴보면, 음원장치, 수신기, 기록장치로 나뉜다. 음원은 탐사심도와 해상도에 직접적인 관계를 가지고 있어 탐사에서 적절한 음원을 선택하는 것이 매우 중요하다. 음원의 주파수 대역이 높은 고주파수 음원을 사용하면 파장이 짧기 때문에 수직 해상도가 좋은 기록을 얻을 수 있는 반면에 파의 감쇠가 크므로 탐사 심도가 얕아진다. 반대로 주파수 대역이 낮은 저주파수 음원을 사용하면 파의 감쇠가 작아 투과심도는 크나 해상도가 떨어진다. 따라서 주파수와 탐사 심도를 충분히 고려하여 음원을 선정해야 한다. 대부분의 음원은 에너지가 클수록 낮은 저

주파 성분을 가지기 때문에 탐사 심도는 깊어진다.

음원을 분류하면 에너지를 발생시키는 원리에 따라 전기적인 에너지 발생 방식과 기계적인 에너지 발생 방식으로 구분된다. 먼저 전기적인 에너지 발생 방식은 휴대용 발전기를 이용하여 순간적인 고압의 전압을 주어 음원을 진동시켜 에너지를 발생시키는 방식이다. 이 방식의 음원은 이동성이 좋아 사용이 용이하나 에너지를 무한정 크게 할 수 없다는 단점을 가진다. 또한 음원 발생 에너지가 작아 주로 얕은 탐사심도의 고주파수 음원으로 많이 사용된다. 주파수 범위는 200 Hz ~ 10 kHz 범위를 가진다. 기계적인 에너지 발생 방식은 고압압축기와 같은 보조 장비가 필요하여 운용에 여러 가지 어려움이 따르며 규모가 커 이동성이 떨어진다. 하지만 에너지 크기를 전기적인 에너지 발생 방식에 비해 수배에서 수십 배까지 크게 할 수 있다. 이 방식의 음원은 발생 에너지가 커 저주파수 음원으로 사용되며 탐사 심도는 전기적 에너지 발생 방식에 비해 깊다. 주파수 범위는 수 Hz ~ 200 Hz 정도의 범위를 가진다. 일반적으로 해상탐사에서 사용하는 음원 가운데 부머, 스파커(sparker) 등은 전기적인 에너지를 이용하는 음원이며 에어건, 워터건(water-gun) 등은 기계적인 방식의 음원이다.

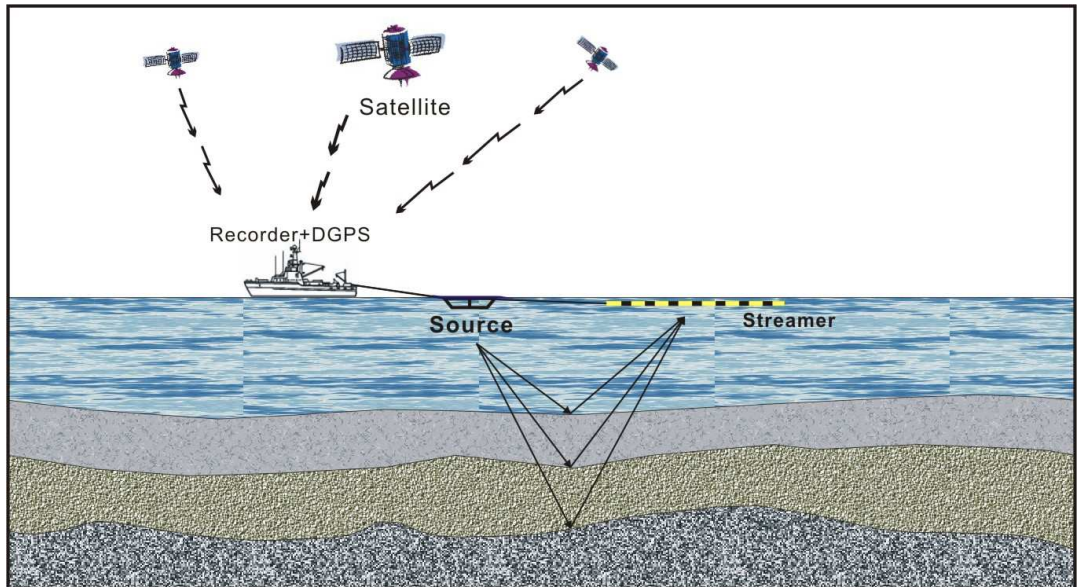
해양 탄성과 탐사 수신기로는 하이드로폰 또는 음원일체형 트랜스듀서(transducer)가 사용된다. 하이드로폰으로 구성되어 있는 수신용 스트리머를 채널 수에 따라 분류하면 단일채널 스트리머와 다중채널 스트리머로 구분된다. 각 채널은 여러 개의 하이드로폰을 하나의 그룹으로 직·병렬 연결하여 신호강도를 높인다. 일반적으로 천해저 지반조사에서는 단일채널 스트리머가 널리 사용되고 있으며, 다중채널의 경우에는 6채널 또는 8채널 스트리머 또는 수 km 이상의 길이를 갖는 수십 개 채널의 스트리머를 사용하기도 한다.

수진기에 수신된 신호는 미약하여 아날로그 신호처리거나 기록장치에 전달될 수 있을 만큼의 충분한 에너지를 가지지 못한다. 그래서 수진기의 각 채널에는 전치증폭기를 부착하여 수신 신호가 충분한 S/N비를 가질 수 있도록 한다. 그리고 음원에서 발생한 음파가 지층을 투과한 후 각 경계면에서 반사되어 수진기에 수신된 음파 신호는 지층의 정보를 포함하고 있지만, 우리가 원하지 않는 다른 잡음들로 많이 포함되어 있다. 따라서 기록장치에 기록하기 전에 어느 정도의 잡음을 제거하여야 한다.

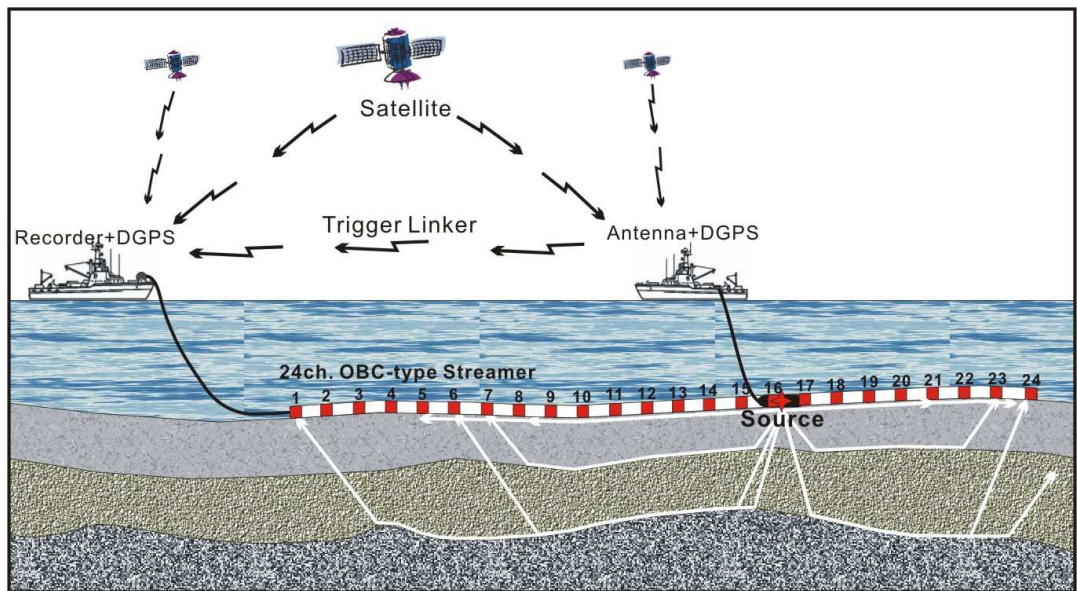
해양 탄성과탐사 자료취득 과정에서 수진기와 음원의 위치측정은 탐사에서 가장 기본적인 요소이며 매우 중요하다. 따라서 해양탐사에는 위치 파악을 위하여 일찍이 위성

측정장치(GPS)를 사용하여 왔으며, 최근에는 1m내외의 정확도를 얻기 위하여 DGPS(Differential GPS)법, RTK(Real Time Kinematic)법 등을 이용하고 있다(이호영 외, 2002).

천해저 반사법 탐사와 OBC 형태의 스트리머를 이용한 굴절법 탐사의 전반적인 과정을 Fig. 1a와 Fig. 1b와 같이 나타내었으며, 그 구성은 항측(navigation), 음원(source), 수신기(receiver), 그리고 기록장치(recorder)로 구분된다. 반사법 탐사는 소형선박을 이용하여 음원과 수신기를 탐사선 후미에 적당한 간격을 두고 견인하면서 탐사를 수행한다. 트리거 펄스는 에너지 발생장치에 보내져 발파를 유도하는데 음원 조절 장치나 기록장치의 소프트웨어에 설정된 발파간격에 따라 발생된다. 음원으로부터 발생한 탄성파는 지층 경계면에서 반사되어 하이드로폰에 수신되고 전치증폭기를 거쳐 A/D변환기에 의해 디지털 신호로 기록된다. 일반적인 해양 굴절법 탐사는 소노부이(Sonobuoy)를 이용한다. 작업과정은 먼저 고정된 위치에 소노부이를 투하한 다음 측선을 따라 탐사선이 이동하면서 음원을 발생시키고 소노부이의 하이드로폰에 수신된 신호는 무선장치를 통하여 탐사선에 전송되고 기록된다. 본 연구에서 사용한 굴절법 탐사 방식은 해저면에 음원과 수신기 케이블을 위치시키고 발파지점을 따라 음원을 이동시키면서 탐사를 수행하였다. 해수면에 음원과 수신기가 있을 때와 서로 비교하면 본 연구에서 사용한 방법이 전파거리가 짧아 굴절신호의 수신이 용이하고 수신기의 전개 길이가 상대적으로 짧아 현장작업이 쉬운 것이 장점이다. 자료의 품질을 향상시키기 위하여 시스템의 중합 기능을 사용하여 자료를 획득하며, 또한 탐사자료의 품질과 지층 분해능이 뛰어난 결과를 얻기 위해서는 음원과 수신부와의 트리거 송수신 정보, 음원과 각각의 수신부의 위치측량 정보 등을 정확히 기록해야 한다.



(a)



(b)

Fig. 1. Layout of shallow marine seismic survey: (a) reflection (b) refraction

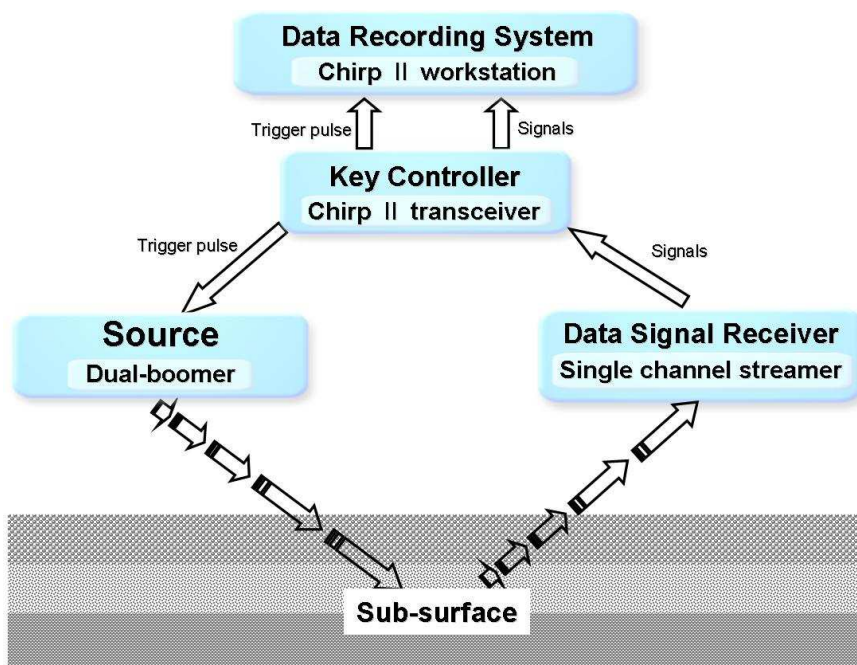
2.2 자료 취득 시스템 구성

본 연구에서 자료 취득을 위해 구성된 시스템은 Table. 1에 나타난 바와 같이 반사법 탐사장비와 굴절법 탐사장비로 나눌 수 있다. 반사법 탐사에 사용된 음원과 수신기는 듀얼부머와 단일채널 스트리머이며, 기록장치와 음원조절장치로 Chirp II Workstation과 Transceiver를 사용하였다. 굴절법 탐사에서는 수신기로 24채널의 OBC형 스트리머를 제작해 사용하였으며, 음원은 에너지의 세기가 비교적 큰 에어건을 사용하였다. 24채널의 중합처리가 가능한 기록계와 음원과 기록계의 동시 트리거를 가능하게 하는 무선장비를 사용하였다. 그리고 일정한 공기압을 제공하는 공기압축기와 해상에서 정확한 위치를 제공하는 DGPS 시스템을 사용하였다.

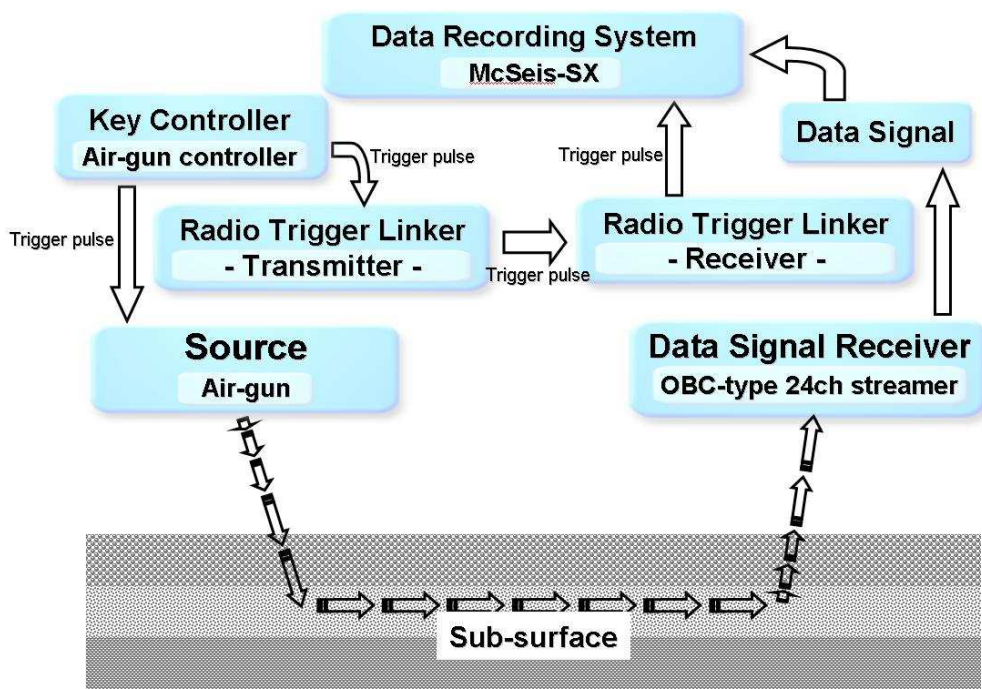
본 연구에서 자료취득 과정의 신호 흐름도는 Fig. 2a, 2b와 같고, 그림에서 보는 바와 같이 천해저 탄성과 탐사는 크게 세 부분으로 음원, 수신기 그리고 자료 기록 시스템으로 나뉜다. 그리고 해상에서의 탐사선의 정확한 위치를 항시 기록할 수 있는 항측장비를 갖추어야 한다.

Table. 1. Data acquisition system

Survey method	Reflection	Refraction
Receiver	Single channel streamer	24 channel OBC-type streamer (Hydrophone)
Source	Dual-boomer	Air-gun(10 in^3)
Recorder	Chirp II workstation	Mcseis-SX(24CH, OYO)
Source control system	Chirp II transceiver	Air-gun controller
Essential equipment		High Pressure Koder Compressor (200 kg/cm^2) & Radio Linker
Positioning system	Trimble DGPS(Navipac), Garmin DGPS(Fugawi)	



(a)



(b)

Fig. 2. Schematic diagram of marine seismic system: (a) reflection (b) refraction

2.3 음원장치(Source)

2.3.1 반사법 해양 탄성파탐사 음원: 듀얼부머(Dual Boomer)

본 연구의 천해저 반사법 탐사에 사용된 부머는 전압을 순간적으로 방전시킴으로써 에너지를 발생하는 음원으로 300~1500 Hz의 주파수 범위를 가지며 탄성과 단면도에 서 뚜렷한 반사면이 나타나는 매우 강한 반사파를 발생시킨다. 부머로부터 만들어지는 음향펄스는 코일에 전기를 흘려보내 발생된 와전류가 플레이트에 변형을 일으켜 발생 되게 된다. 듀얼부머는 기존의 쿼드펄서(quad-pulser)를 김영준(2005)이 천해저에서 사용이 용이하게 개발시킨 음원장치로 트랜스시버, 전원공급장치, 견인체, 전자식 음향 트랜스듀서 부분들로 구성되어 있다. 트랜스시버는 100~125 VAC, 60 Hz의 전원을 트랜스듀서에 공급하며, 네 개의 전원 공급 장치와 수신기가 결합하고 있다. 듀얼부머의 트랜스듀서는 1/4파장 간격으로 배치되어 있고 단일 트랜스듀서에서 발생하는 것보다 더 강력한 방향성의 음향펄스를 발생시킨다. 듀얼부머와 트랜스시버의 모델과 재원은 본 논문의 부록-2(Appendix I) Fig. 1과 Table. 1에 상세히 나타내었다.

2.3.2 굴절법 해양 탄성파탐사 음원: 에어건(Air Gun)

해양 굴절법탐사에서 사용되는 음원은 주로 저주파수의 에너지 세기가 큰 특성을 갖는 음원을 사용한다. 본 연구에서는 그 중 가장 많이 사용되는 에어건으로 탐사를 수행하였다. 기계적 에너지 방식인 에어건은 고압압축기와 같은 보조 장비가 필요하여 운용에 불편함이 있지만, 에너지 세기가 강하여 지층 투과력이 좋아 천해저 굴절법탐사에 효과적이다.

에어건은 고압의 압축공기를 순간적으로 방출하여 에너지를 발생시키는 음원으로 주파수 대역은 200~300 Hz 정도이다(이호영 외, 2002). 굴절법 탐사를 위한 음원의 종류는 목적하는 심도에 따라 결정되어야 하며 수십 미터정도의 천부층이 목적일 때는 비교적 저주파수 성분의 음원인 스파커나 압축실(chamber)의 부피가 작은 에어건이 바람직하며 그 이하의 심부층이 목적일 때는 압축실 부피가 40 in³이상인 에어건을 사용하는 것이 좋다(Geyer, 1983). 천해저 지역에서 이루어지는 본 연구는 공기 압축실 용량

이 10 in³인 에어건을 사용하였고, 에어건 조절장치(Air-gun controller)에 의해 발파를 하였다. 에어건에 일정한 압축공기를 공급하기 위하여 사용된 고압압축기는 최대 130 kg/cm²(1800 psi)까지 공기를 압축시킬 수 있다. 고압압축기의 방출되는 압력은 방출밸브를 통하여 조절할 수 있으며 음원에서 방출되는 에너지 세기를 강하게 하기 위하여 방출압력을 최대로 하였다. 본 탐사에 사용된 에어건과 고압압축기의 모델과 재원은 Appendix I Fig. 2와 Table. 2에 나타내었다.

2.4 수신 장치

2.4.1 반사법 해양 탄성파탐사: 단일채널 스트리머

천해저에서 사용되는 수신기는 채널 수에 따라 단일채널 스트리머와 다중채널 스트리머로 구분된다. 각 채널은 여러 개의 하이드로폰을 그룹으로 직·병렬 연결하여 신호 강도를 높인다.

본 연구의 반사법 탐사에 사용한 수신기는 단일채널 스트리머로서 해저지층에서 반사된 신호들을 수신하여 기록시스템에 송신하는 역할을 한다. 이 스트리머는 기름으로 채워진 10 m 튜브에 총 32개의 하이드로폰 소자가 1 피트 간격으로 장착되어 있다. 스트리머는 50 m의 견인 케이블에 연결되어 있으며 이 케이블은 트랜스시버의 signal part의 연결부에 결합된다. 또한 20 dB의 전치증폭기가 장착되어 수신되는 신호들을 증폭시켜 준다. 모델과 재원은 Appendix I Fig. 3과 Table. 3에 나타내었다.

2.4.2 굴절법 해양 탄성파탐사:OBC-type 스트리머

굴절법 자료취득에서 사용된 천해저 탐사용 다중채널 OBC형 스트리머는 고감도의 하이드로폰을 사용하며 퇴적층의 깊이를 고려하여 각 채널의 간격 및 스트리머 총길이를 결정하였다. 천해저 굴절법탐사에서는 24채널 이상의 다중채널 자료를 획득하도록 하며, 하이드로폰은 가능한 해저면에 위치시켜 굴절파 수신감도를 증대시킨다. 수신기에 수신된 신호가 미약하여 기록장치나 신호처리에 전달되지 않을 수 있고, 신호가 전달되더라도 잡음 에너지와 동일한 크기를 가져 신호로서 파악되지 않을 수 있다. 따라서 수신기의 각 채널에는 전치증폭기를 부착하여 수신 신호가 충분한 에너지와 세기

를 가질 수 있도록 한다.

다중채널 굴절법탐사에서 중요한 부분이 바로 수신기인 스트리머이다. 해양에서 사용되는 대부분의 장비가 그렇듯 탄성과 탐사 장비도 수입에 의존하고 있다. 고가의 탐사 장비를 수입하여 사용함에 따라 기술력 향상도 없을 뿐만 아니라 장비가 파손되었을 때 수리도 문제된다. 최근 국내에서는 소수업체가 굴절법 수신기를 자체 개발하고 있으나 미미한 실정이다.

본 연구에서는 천해저 굴절법 탐사를 위한 다중채널 스트리머를 설계 및 제작하여 현장자료를 취득하였다. 수신기는 채널 당 1개의 하이드로폰 소자와 전치증폭기를 한 그룹으로 연결하여 총 24채널로 설계 및 제작하였다. 각 채널의 간격은 4 m로 하였으며 센서가 장착된 스트리머의 총 길이는 92 m이고 케이블을 80 m로 제작하였다. 하이드로폰 소자는 국내 제작 기술이 없어 미국 Benthos사의 Geopoint Export 모델을 수입하여 사용하였으며, 나머지 필요부품들은 국내에서 구입하여 제작하였다. 그리고 기존의 육상용 기록장치를 그대로 해상에 적용하여 사용하기 때문에 제작된 수신기의 연결 부분(connector)을 고려하여 설계하였다. OBC형 수신기의 자세한 사양은 Table. 2에 나타내었다. 설계도는 Fig. 3과 같고 제작한 모델은 Fig. 4이다.

Table. 2. Specification of 24 channel OBC-type streamer

Hydrophone cell (Acoustic Sensitivity)	Geopoint Export(-194dB)
Preamplifier intensity(power)	20dB(Dual $\pm 12V$)
Frequency response	1Hz to 500Hz
Filling fluid	Silicone oil 100CS
Tubing	Polyurethane

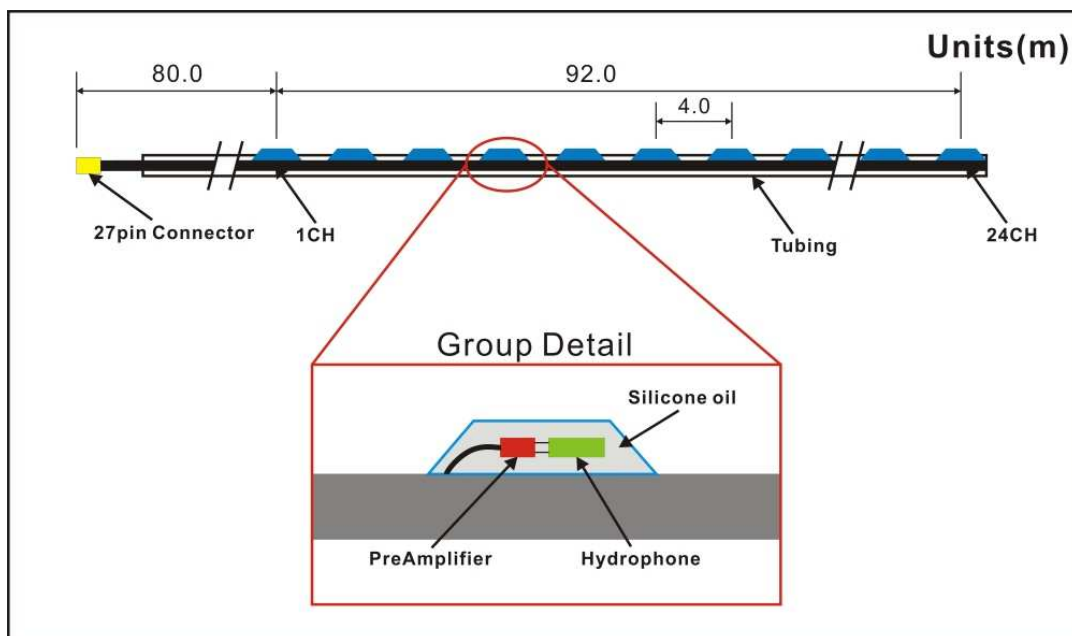


Fig. 3. A drawing of 24 channel streamer(OBC-type)



Fig. 4. 24 channel OBC-type streamer

2.5 기록장치

2.5.1 반사법 해양 탄성파탐사: *Chirp II workstation*

반사법 탐사에 사용된 기록장치는 CAP-6600 Chirp II Acoustic Profiling System으로써 SBP(Sub-Bottom Profiler)와 쿼드펄서를 사용할 수 있도록 두 개의 채널로 이루어져 있다. 이 시스템의 기록에 사용되는 소프트웨어는 Chirp2로써 SEG-Y 포맷 형식의 파일로 저장된다. Appendix I Fig. 4와 Table. 4에 모델과 재원을 나타내었다.

2.5.2 굴절법 해양 탄성파탐사: *Mcseis-SX*

굴절법 자료취득에서 사용된 기록장치는 OYO사의 굴절법탐사기인 Mcseis-SX이다. 일반적으로 육상에서 사용하나 해상에서도 똑같은 원리와 조건으로 탐사가 진행되기 때문에 본 탐사에 사용하였다. 이 기록장치는 최대 24채널의 신호를 수신할 수 있으며 한 점에서 다중발파 시 수신된 신호를 중합할 수 있는 자동 스택킹(stack) 기능이 있다. 또한 음원 발파 시 자동으로 트리거링(triggering) 되고 동시에 육안으로 수신된 신호를 확인할 수 있도록 모니터에 디스플레이 된다. 이득(gain)은 16~1024 배까지 조절할 수 있고 주파수 대역은 10~4600 Hz이다. 샘플링 비율(sampling rates)은 25~2000 μ s이며 자료 기록시간은 최대 250 ms까지 가능하다. 수신기의 배열과 발파지점에 따라 채널의 방향을 정방향(Forward direction) 또는 역방향(Reverse direction)으로 조정할 수 있다. 자세한 재원은 Appendix I Fig. 5와 Table. 5에 나타내었다.

2.6 항측장치

해상에서의 항측장비는 DGPS(Differential GPS)가 가능한 장비를 사용한다. 비콘(beacon)이 없는 일반 GPS의 정확도는 약 15 m이며 탐사목적으로는 적합하지 않다. 비콘이 달려있는 장비는 4 m이내의 정확도를 유지하며 위치정보를 제공해 준다. 또한 해안에 위치하는 GPS 기준점으로부터 수정된 신호를 위성신호와 함께 수신하여 좀 더 정확한 DGPS 자료를 얻을 수 있다. 이들로부터 얻어지는 위치정보는 탄성과탐사자료와 함께 항후의 자료처리와 해석에 사용된다. 우리나라의 해안은 거의 모두 GPS 기준국에서 송출되는 신호를 받을 수 있는 것으로 알려져 있다. Fig. 5는 우리나라에 설치된 GPS 기준국 현황을 나타낸 것이다. 본 탐사의 항측을 위해서는 1m내외의 정확도의 Garmin GPS와 GBR23 Beacon 수신기를 사용하였다. 이 항측장비 구성으로 1m이내의 정확도를 유지할 수 있었으며 기준국은 가장 가까운 영도 기지국을 선택하였다.

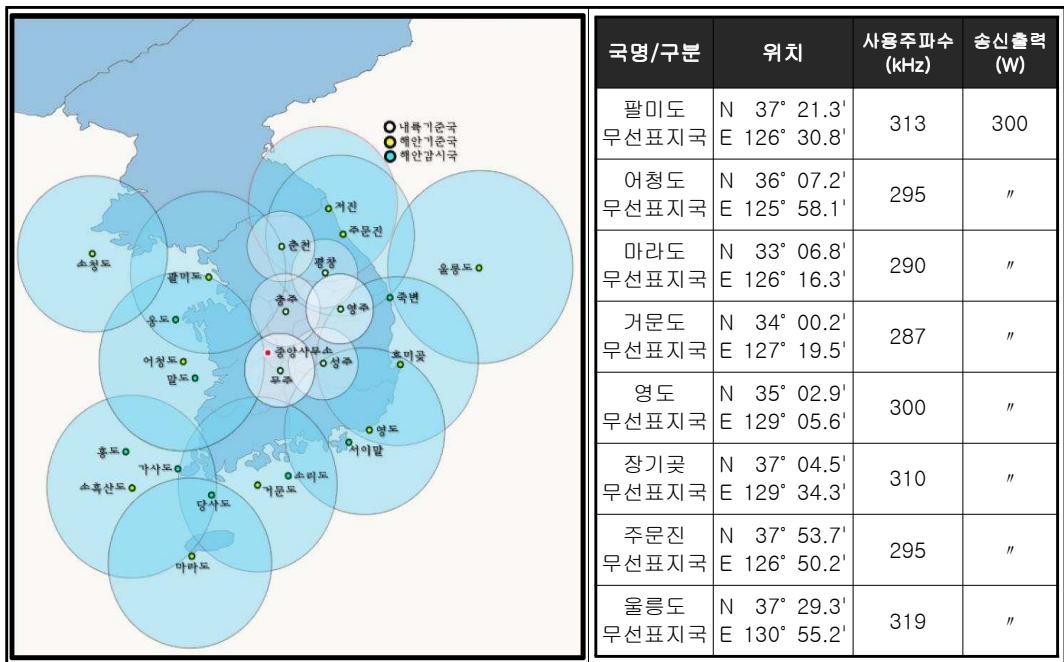


Fig. 5. The GPS base station in Korea

3. 현장 적용

3.1 연구지역

천해저 통합 탄성과 탐사를 위한 반사법과 굴절법 탐사를 현장에 적용해 보았다. 먼저 조사지역의 퇴적환경을 알아보기 위하여 반사법 탐사를 수행하였으며, 천해저 굴절법 탐사를 위해 제작된 천해저용 OBC형 수진기를 현장에 적용하여 보았다. 현장 시험 탐사를 위해 소형선박을 이용하여 부산항내 한국해양대학교 앞바다에서 탐사를 수행하였다. 이 지역의 지질학적 특성을 살펴보면 Fig. 6에서 보듯이 지질구조선이 연구지역을 북북동에서 남남서 방향으로 뻗어있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7a, 7b는 조사지역과 탐사측선에 대한 항적을 나타낸 그림이다. 탐사항적은 TM 좌표로 나타내었다. 이 지역은 수심이 7~12 m 정도이고 육지에서 멀어질수록 깊어지는 기반암 분포를 보이며 10~40 m의 심도를 나타낸다. 반사법탐사의 조사지역 크기는 300 m × 500 m이고 각 측선의 간격을 50 m로 선정하였다. 500 m 측선 7개와 300 m 측선 11개를 선정하였고 총 18개의 측선을 탐사하여 전체 6.8 km의 반사법 자료를 획득하였다.

굴절법탐사는 반사법 측선의 일부 측선을 선택하여 조사하였으며, Fig. 7a에 나타낸 바와 같이 측선을 파란색으로 표시하였다. 굴절법 측선의 길이는 개발된 굴절법 수진기의 길이와 비슷하게 각각 100 m로 설정하고 음원 발파지점을 측선앞뒤 100 m씩 연장하여 총 300 m의 탐사구역을 설정하였다.

천해저에서 반사법 자료를 취득할 경우 음원과 수진기의 위치와 거리를 적당히 유지하면 품질을 향상시킬 수 있다. 본 연구지역에서 품질향상을 위한 음원과 수진기의 적당한 오프셋(offset)은 10 m로 설정하였다. 이때 음원과 수진기는 일직선상에 놓고 견인해야 더 좋은 품질의 자료를 취득할 수 있다. Fig. 8에는 탐사선과 음원, 수진기의 상대적인 배치를 나타내었다.

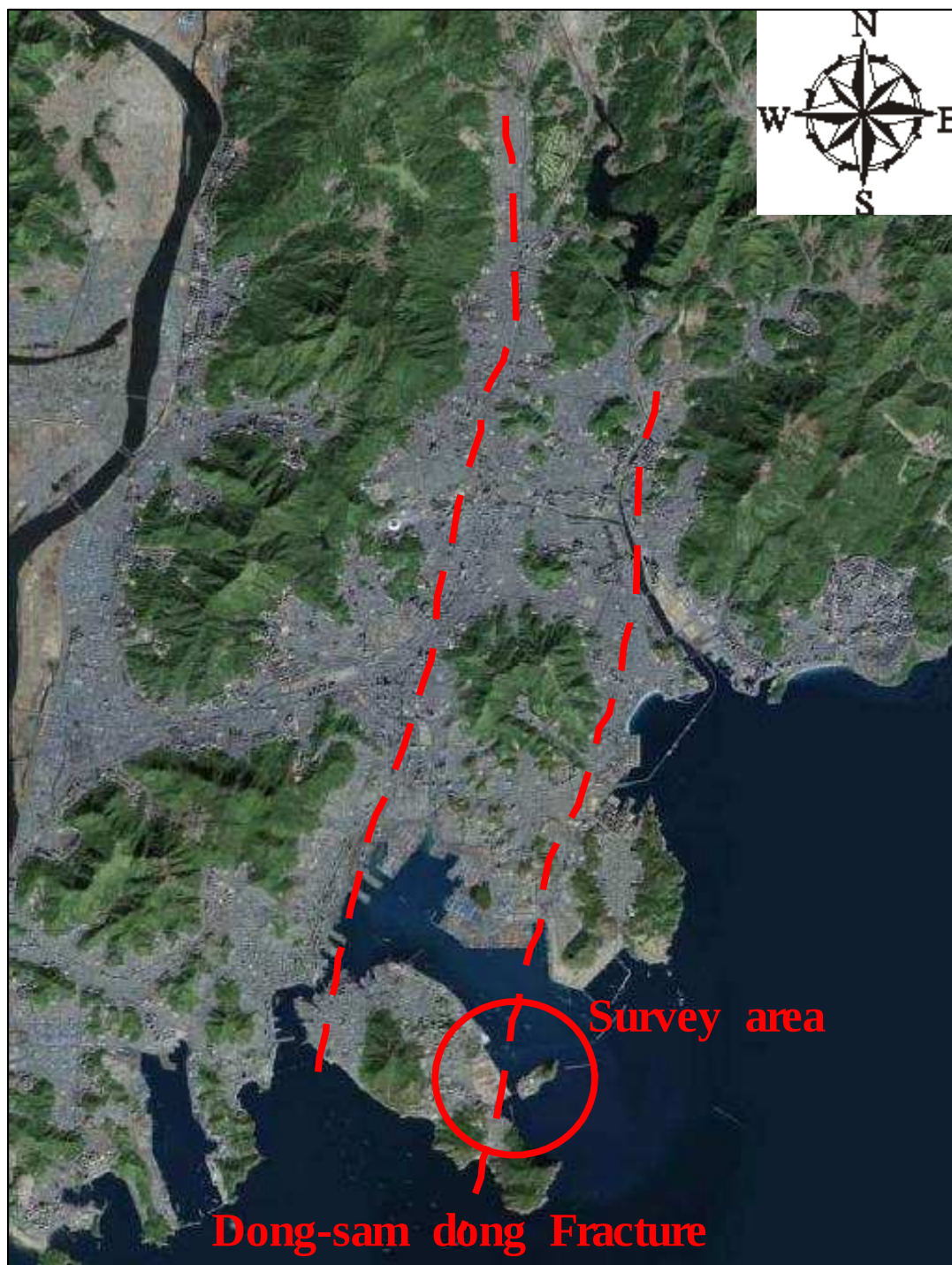
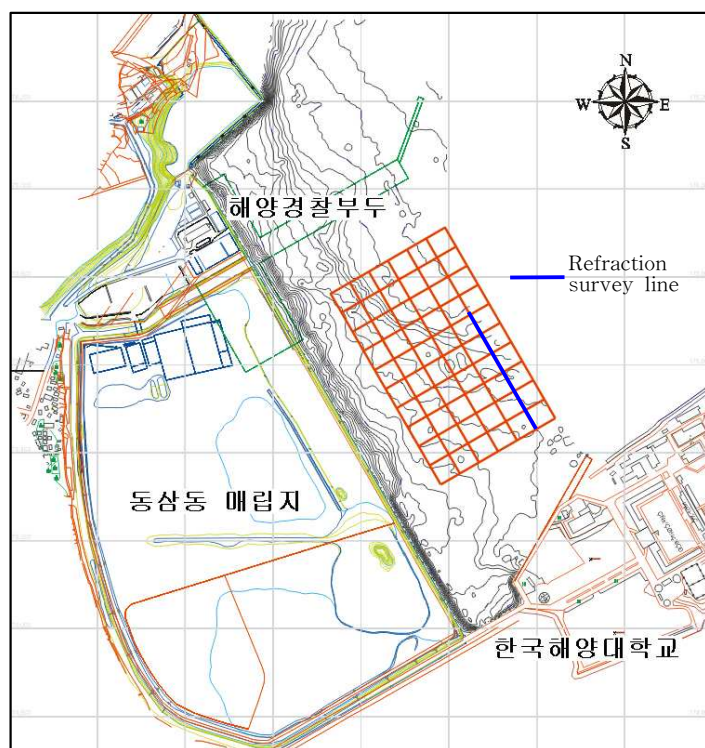
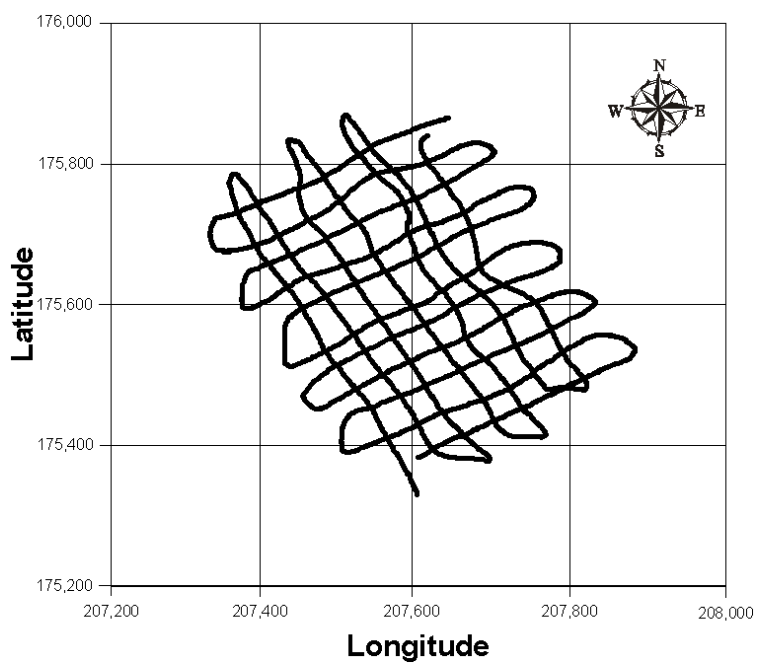


Fig. 6. The geologic lineament (fault) of survey area, Busan



(a)



(b)

Fig. 7. Marine reflection survey: (a) survey area and (b) track chart of survey line

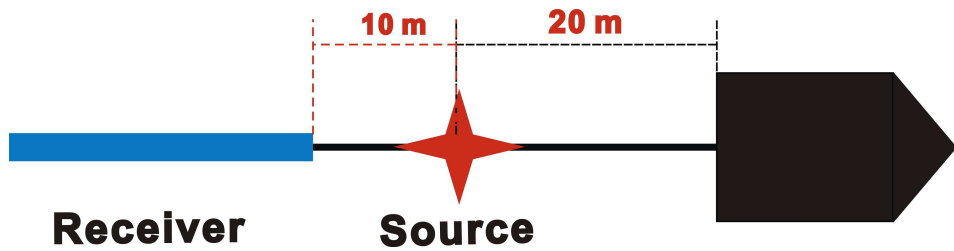


Fig. 8. Source-Receiver configuration(reflection)

3.2 자료취득변수

앞에서 설명한 바와 같은 자료 취득 시스템을 이용하여 현장 적용성 검증을 위한 탐사가 수행되었다. 반사법 탐사는 등거리 간격의 발파를 하기 위해서 탐사선의 속도를 가능한 일정하게 유지하고 등시간 간격으로 발파를 하였다. 현장 탐사에 사용한 자료취득변수는 Table. 3에 반사법과 굴절법으로 나누어 정리하여 나타내었다. 먼저 반사법에서는 발파 간격을 0.5 sec의 등시간 간격으로 하고 탐사속도를 약 2~3 노트(knots)로 유지함으로써 약 0.5~1 m 마다 발파가 이루어지도록 하였다. 자료추출간격은 0.122ms로 하였으며 기록시간은 0.5초(4096개)이다.

굴절법 탐사에서는 측선이 100 m이기 때문에 토모그래피 해석을 위해서 OBC형 수신기 전방 100 m에서 발파를 시작하여 20 m 간격으로 후방 100 m까지 총 300 m의 길이에 16개 지점에서 발파를 하였다. 자료의 품질을 향상시키기 위해서 한 점에서의 5번의 발파를 실시하여 자료를 중합하였다. 기록시간은 굴절과가 도달하는 시간을 고려하여 500 ms로 하였다.

Table. 3. Data acquisition parameter

Survey method	<i>Reflection</i>	<i>Refraction</i>
Survey area	Open Sea of the Dongsam-dong reclaimed land	
Source	Dual-boomer	Air-gun
Receiver	Single channel streamer	OBC-type 24CH streamer
Preamplifier	20 dB	20 dB
Record length	500 ms	500 ms
Sampling interval	0.1 ms	0.1 ms

4. 자료 처리 및 해석

4.1 자료처리

본 연구에서 취득한 반사법 자료는 이득회수, 디지털필터링, 동보정, 정보정 등의 자료처리를 하였고, 굴절법 자료는 P파의 초동주시를 사용하여 주시곡선 작성, 속도분석, 수심입력, 토모그래피 역산 등의 순으로 처리하였다.

4.1.1 반사법 자료처리

천해저라는 현장여건을 고려하여 기본적인 자료처리를 실시하였다. 취득한 단일채널 해양 탄성파탐사 자료의 처리과정은 Fig. 9와 같다. 취득한 현장자료에 FFT 주파수 스펙트럼 분석을 실시하여 디지털 필터링을 위한 주파수대역을 결정하고 지층단면도를 해석하여 기반암 심도 및 해저면 심도를 추출한다. 추출된 심도 정보를 이용하여 퇴적층 두께를 계산하고 수심정보와 결합시켜 최종적으로 기반암 분포도를 작성하게 된다.

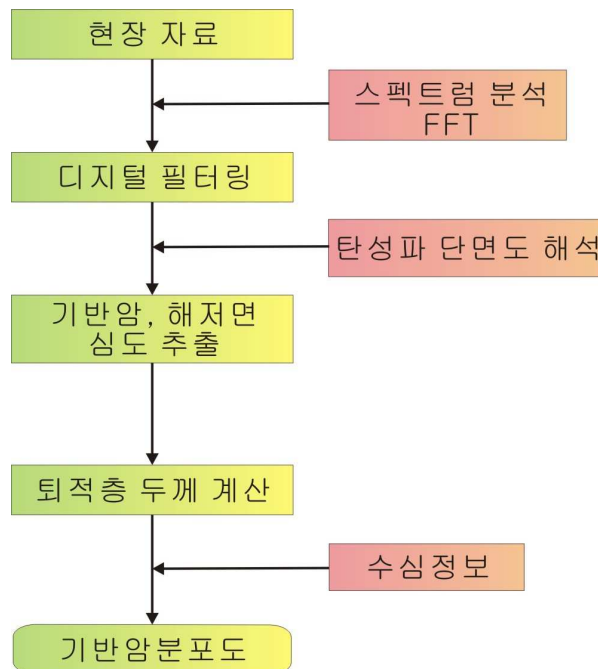
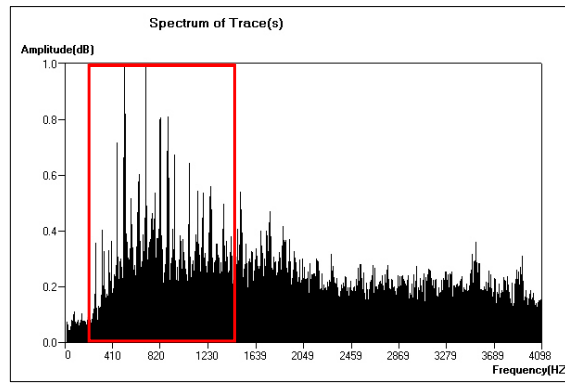
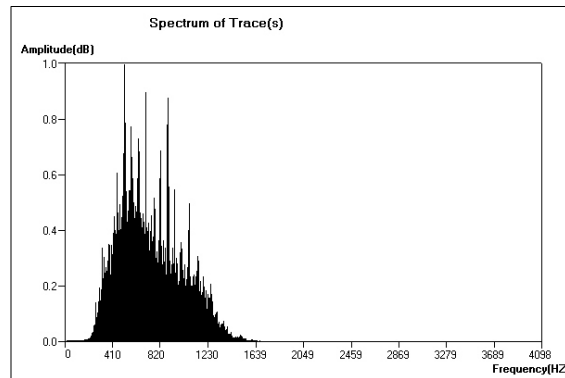


Fig. 9. Flow chart of the single-channel seismic data processing

일반적으로 탄성파탐사 자료는 어느 정도의 잡음을 포함하고 있어 디지털 필터링을 통해 신호 대 잡음비(S/N비)를 향상시킬 수 있다. 현장에서 자료를 취득할 때 아날로그 필터링을 적용하기도 하지만 자료의 왜곡을 막기 위해서 아날로그 필터링을 적용하지 않거나 필터링 대역을 크게 하여 탄성과 자료를 획득한다. 본 연구에서는 특정한 두 차단 주파수 사이에 있는 주파수 대역의 신호를 통과시키고 그 이외의 모든 주파수에 대해서는 감쇠시키는 대역통과필터(band-pass filter)를 실시하였다. 먼저 필터대역을 정하기 위하여 취득한 탐사자료의 주파수 스펙트럼 분석을 실시해 보았다. Fig. 10a는 현장자료의 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이고 Fig. 10b는 필터링을 사용한 후의 스펙트럼이다. 필터 대역은 200의 저주파수 차단 필터와 1,500 Hz의 고주파수 차단 필터를 사용하였다. Fig. 11a, 11b는 같은 이득(gain)을 준 자료에 필터링을 한 전과 후를 나타낸 지층단면도로 신호 대 잡음비가 향상되어 있는 것을 볼 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 10. Amplitude spectrum of a seismic traces: (a) before and (b) after filtering

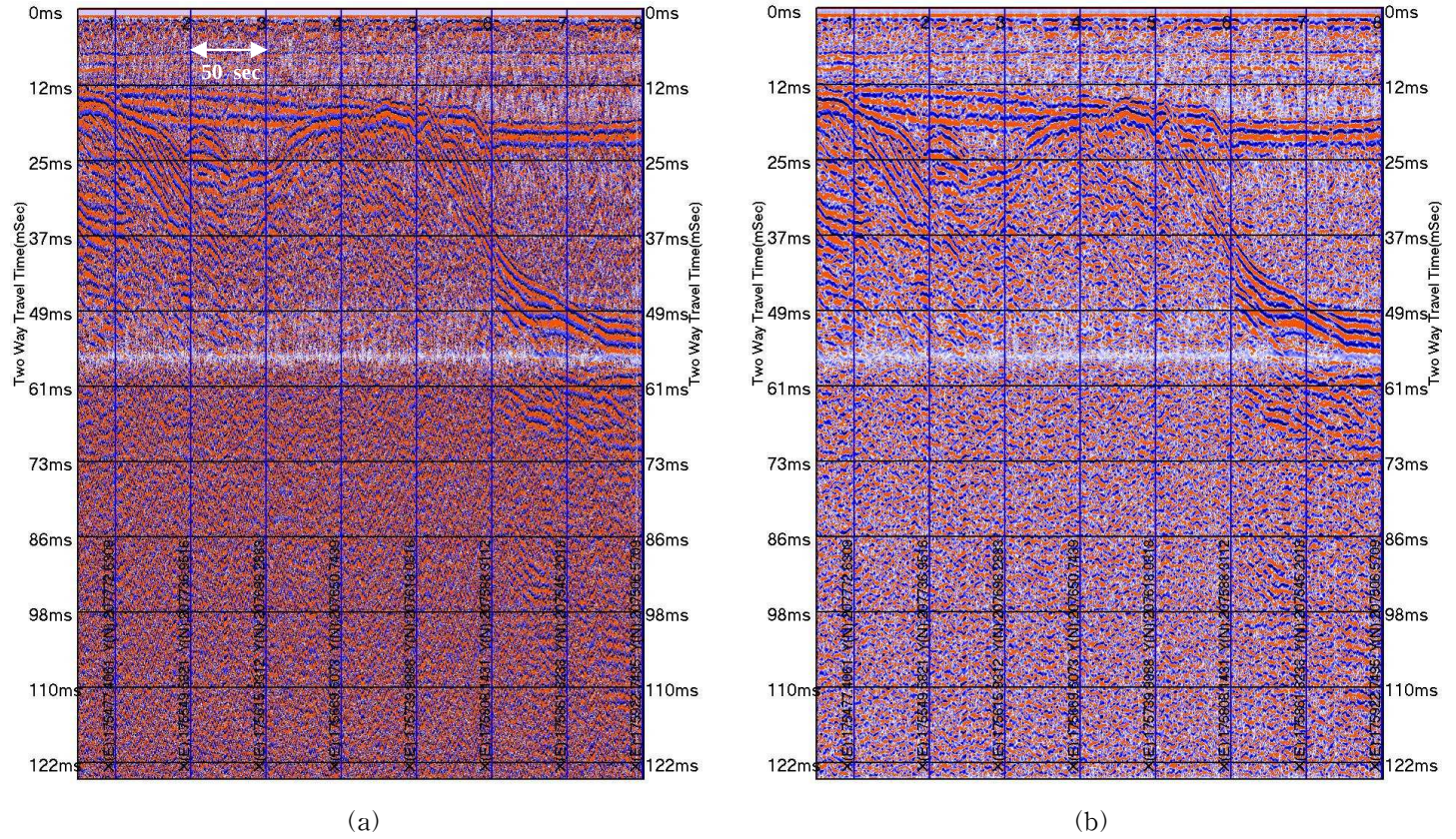


Fig. 11. Band-pass filter effect of seismic reflection data for Line-002: (a) before and (b) after filtering
low-cut filter of 200 Hz and high-cut filter of 1,500 Hz were applied.

4.1.2 굴절법 자료처리

굴절법 탐사는 초동주시를 발췌하여 자료해석을 한다. 그 전에 디지털로 기록된 굴절파 탐사자료는 굴절파 탐사기록으로 제작하기까지 간단한 자료처리과정을 거쳐야 한다. 기록된 자료를 트레이스별로 나누어주고 시간에 따라 약해지는 탄성과 신호를 이득회수(gain recovery)를 통하여 잘 나타나게 한다. 또한 디지털 필터링을 통하여 불필요한 주파수 대역대의 신호를 제거해 준다. 디지털 필터링을 위한 주파수대역을 설정하기 위하여 주파수 스펙트럼 분석을 실시하였다.

Fig. 12는 Fig. 13의 굴절법 자료에서 1~16번 채널까지의 트레이스에 대한 주파수 스펙트럼 분석을 한 것이다. 보는바와 같이 80 Hz 부근에서 최대 피크점을 보이고 있으며 신호로 판단되는 signal들이 50~250 Hz까지 분포하고 있다. 따라서 필터링하기 위한 주파수 대역을 50~250 Hz로 결정하였다. Fig. 13a, 13b는 연구지역에 획득한 대표적인 굴절법 탄성과 자료로서 초동을 발췌하여 선을 그어 나타내었다. 초동선을 보면 알 수 있듯이 직접파와 굴절파가 구분되어 나타난다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 14는 두 탄성과 자료에서 발췌한 초동을 이용하여 작성한 주시곡선도이다. 주시곡선도에서 직선의 기울기는 속도와 관계가 있다. 기울기의 역수를 취하면 각 층의 속도 값이 표현된다. 이 주시곡선도에서 계산되는 속도 값은 1층 속도가 약 1,550 m/s이고, 2층 속도가 약 2,100 m/s로 나타난다.

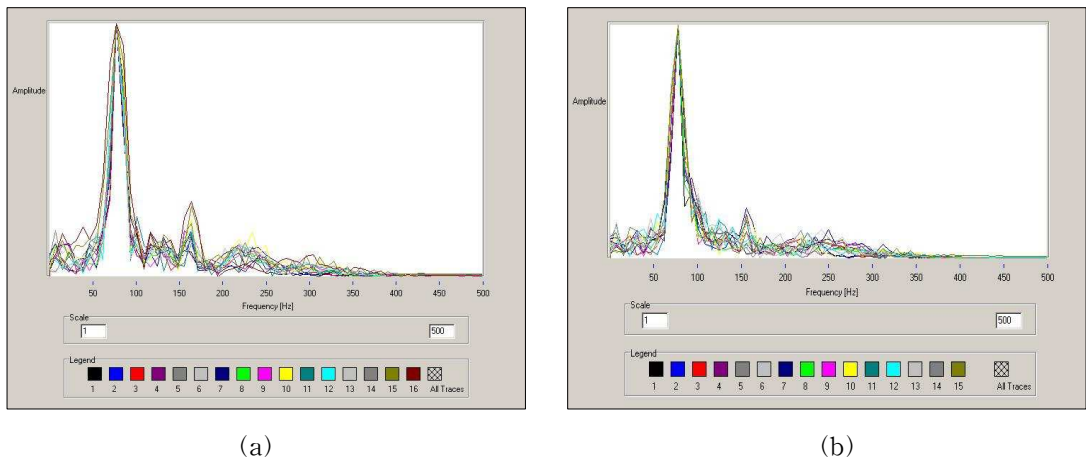
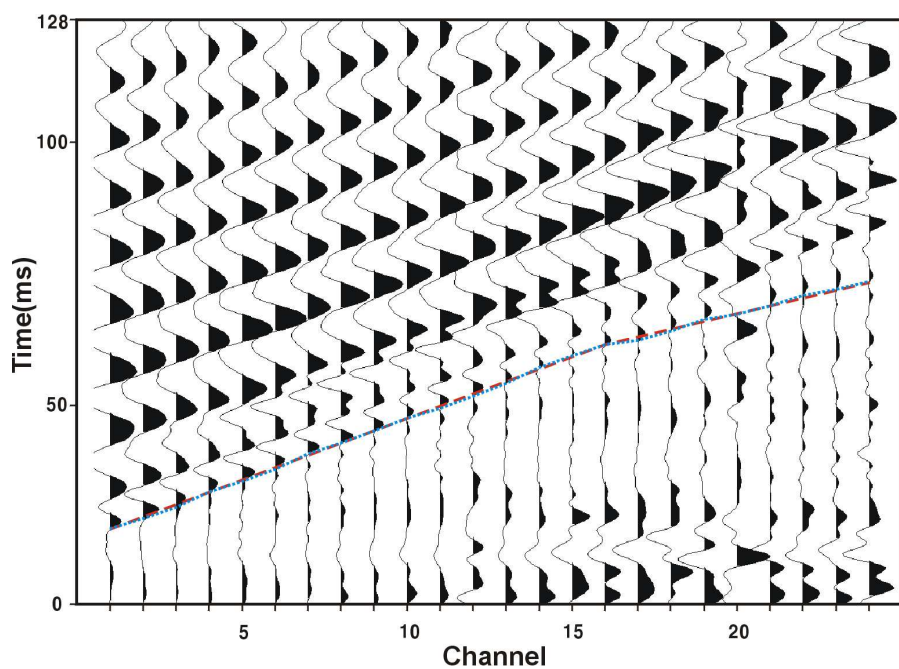
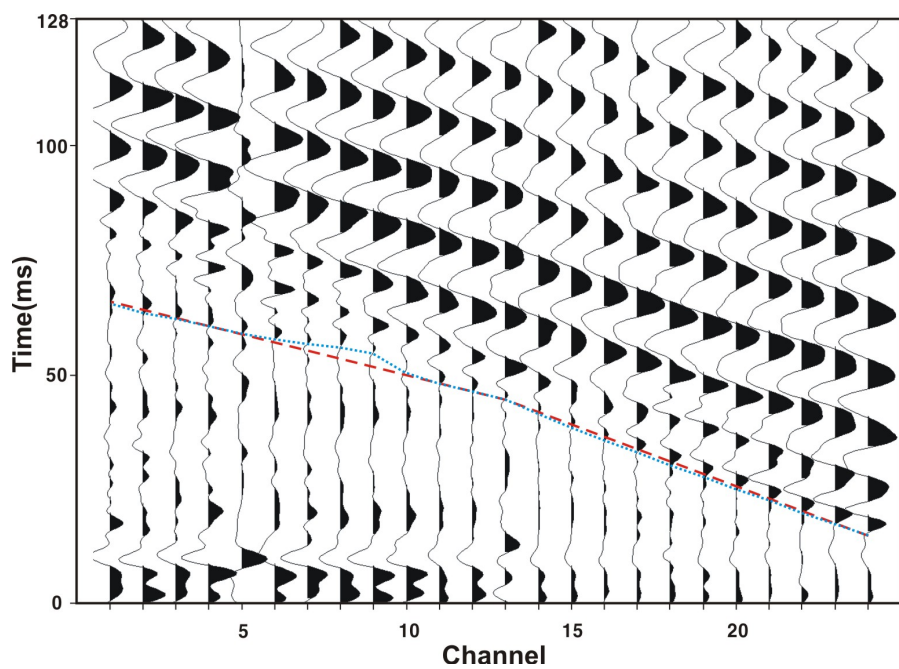


Fig. 12. Amplitude spectrum of obtained seismic data: (a) shot No. 4 (b) shot No. 11



(a)



(b)

Fig. 13. The refraction seismic data: (a) shot No. 4 and (b) shot No. 11

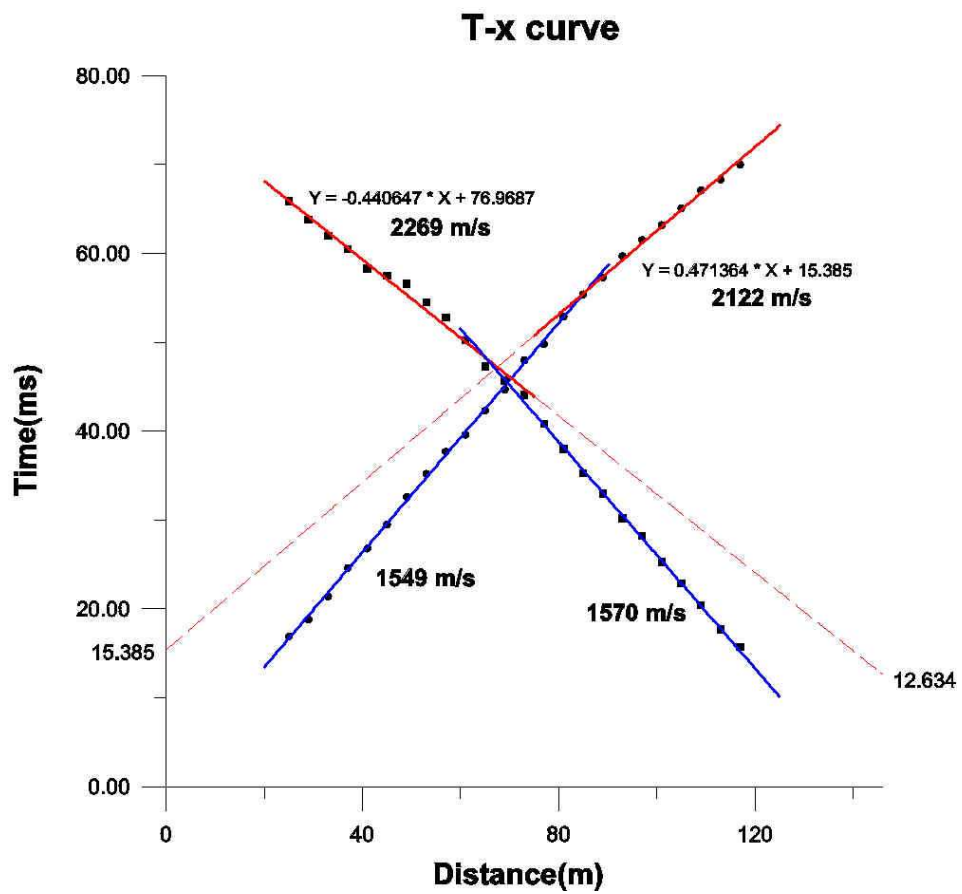


Fig. 14. The travel time curve of the acquired seismic refraction data

4.2 자료해석

4.2.1 반사법 자료해석

3D 기반암 분포도를 작성하기 위해서 해저면과 기반암 정보를 추출해야 한다. 본 연구에서는 지층 단면도에서 해저면과 기반암 경계면을 Fig. 15와 같이 설정하고 digitizing 기법을 이용하여 각 경계면을 디지털 자료로 추출하였다. 추출된 자료는 시간정보로 작성되기 때문에 심도정보로 변환해 주어야 한다. 또한 연구지역에 대한 각 층의 속도정보도 설정해 주어야 한다. 본 연구지역에 대한 속도정보는 Cha(2003)에 의해 연구된 사례를 적용하여 그 결과와 유사하게 각 층의 속도를 결정하였다. 해수층은 1,500 m/s, 퇴적층은 1,600 m/s, 기반암층은 2,000 m/s로 설정하였다. 총 18개 축선에 대한 자료를 처리하여, Fig. 16a, 16b와 같이 해저면과 퇴적층 두께에 대한 3D 단면도를 작성하였다. 해저면은 수심 약 5~12 m에 분포하였으며 퇴적층 두께는 약 0~30 m의 분포를 보이는 것으로 나타났으며, 동삼동 매립지에서 북북동으로 멀어질수록 수심이 깊어지고 퇴적층은 동삼동 구조선을 따라 두꺼워지는 것을 알 수 있다. Fig. 16b에서 흰색으로 나타난 부분은 기반암이 해저면 위로 솟아있는 곳으로 퇴적층이 거의 존재하지 않는다는 것을 의미한다.

D.L.(Draft Limitation:약최저저조면)을 기준으로 하는 정확한 기반암 심도를 계산하기 위하여 연구지역의 수심정보와 퇴적층 두께에 대한 정보를 결합하였다. Fig. 17에서 나타난 것과 같이 연구지역은 7~35 m 정도의 기반암 심도를 보인다. 기반암 분포도에서 북북동에서 남남서 방향으로 길게 뻗고 파란색으로 나타난 부분은 Fig. 6에서 보이는 지질구조선과 일치하는 것을 알 수 있다.

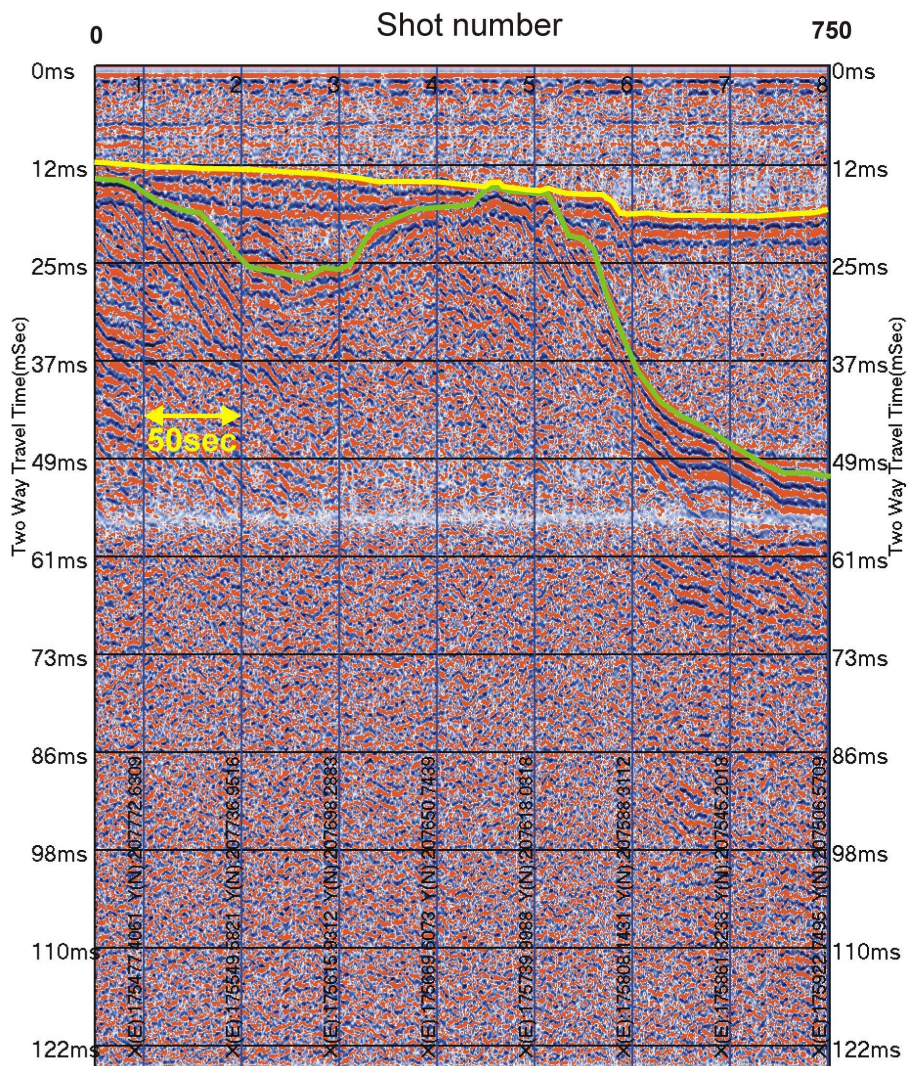
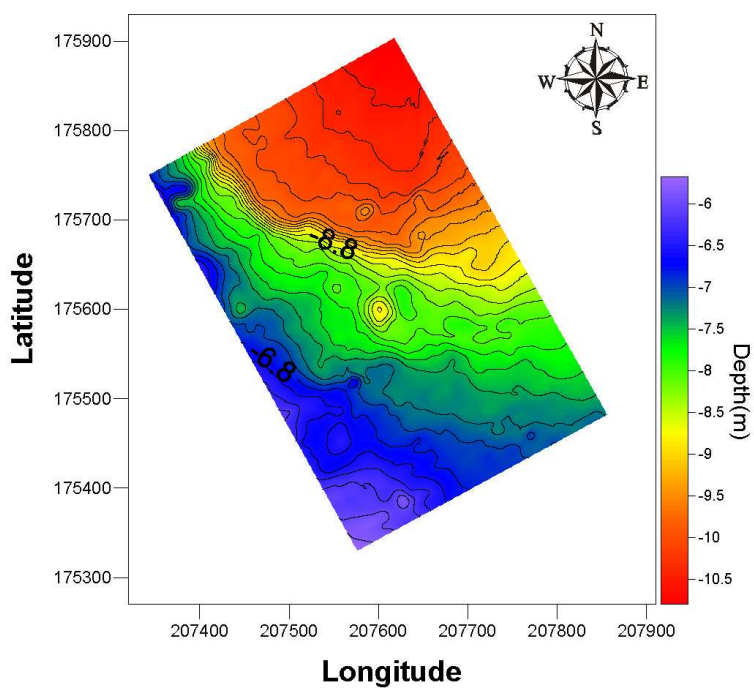
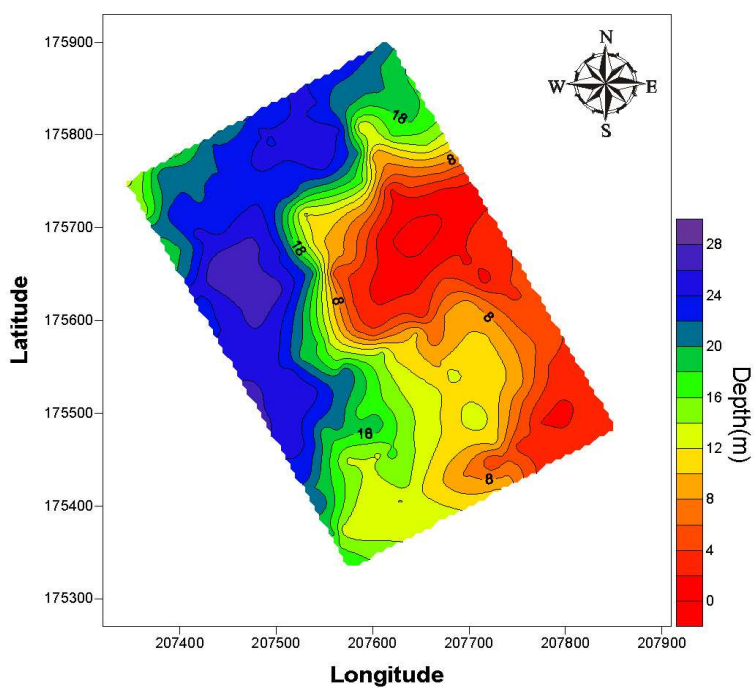


Fig. 15. A seismic reflection data. Yellow solid line indicates sea bottom and green line basement boundary



(a)



(b)

Fig. 16. The map of (a) the sea bottom depth and (b) sediment thickness

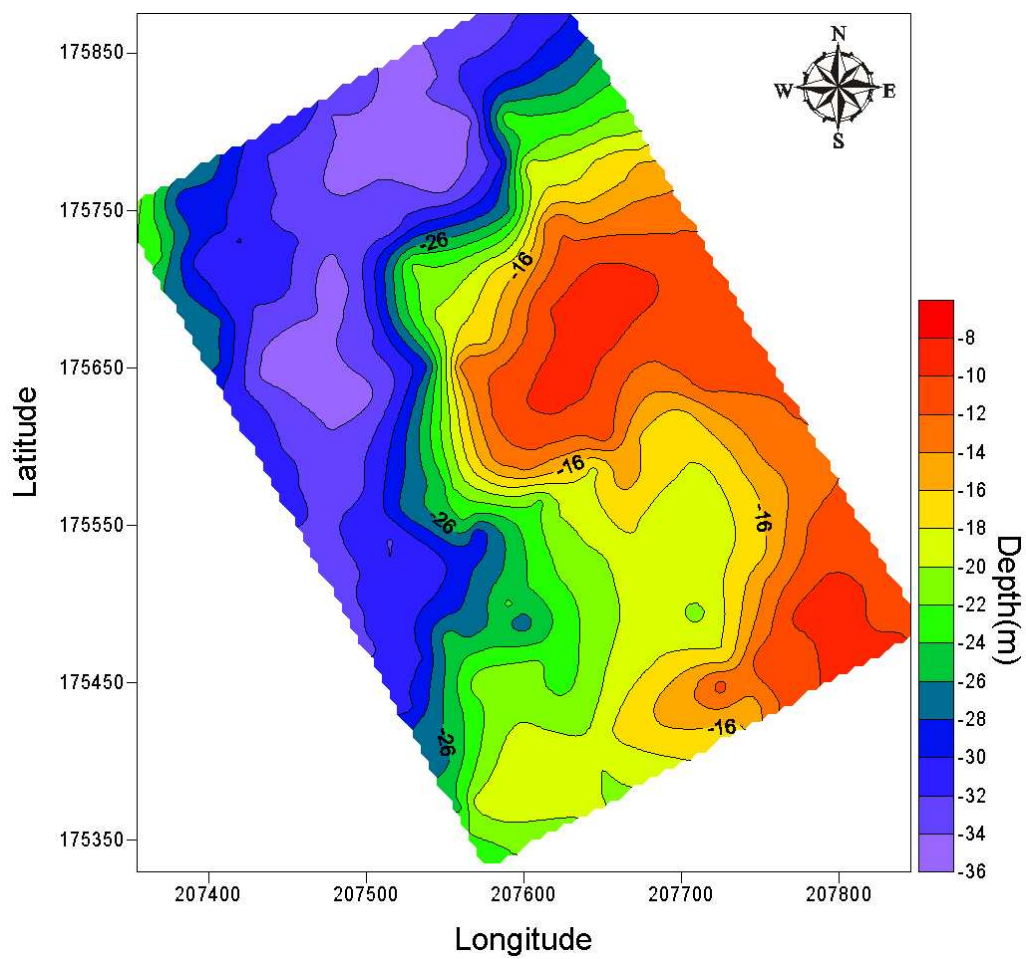


Fig. 17. The 3D map of bedrock

4.2.2 굴절법 토모그래피

본 연구에서 수행된 탄성과 굴절법 토모그래피는 탄성과 자료의 초동으로부터 이론적인 초동계산 및 역해법을 반복적으로 적용함으로써 대상 지하단면의 속도구조에 대한 정보를 영상으로 도출하는 파선토모그래피 기법이다. 파선토모그래피에서는 (4-1)식과 같은 연립방정식의 해를 구하게 되며 그 방법에 따라 반복적으로 해를 구하는 SIRT(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique; Dines & Lytle, 1979)법이나 CG(Conjugate Gradient)법, 직접 역행렬을 구하는 방법으로서 특이치 분해(SVD, Singular Value Decomposition)에 의한 일반화된 역행렬을 이용하는 방법이나 감쇠최소자승법(DLSQ, Damped Least Square Method; Ivansson, 1985) 등이 있다.

$$d_i = \sum_{j=1}^N A_{ij} S_j \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (4-1)$$

여기서, d_i : i 번째 파선의 도달시간(First arrival time)

s_j : j 번째 요소의 역속도(Slowness)

A_{ij} : i 번째 파선이 j 번째 요소를 통과하는 길이

직접 역행렬을 구하는 방법은 이론적으로 가장 정확한 해를 구할 수 있으나 컴퓨터의 기억용량과 계산시간이 거대하여 경제적이지 못한 단점이 있다. 반면에 반복적인 방법은 기억용량과 계산시간 면에서 경제적이며 PC로도 수행가능하다. 이중 CG법은 잡음이 많이 섞인 자료의 경우 그 결과가 좋지 않다고 알려져 있으며(이호영 외, 1990), 보통 감쇠최소자승법에서 역행렬을 반복적으로 구하는 방법으로 많이 이용되고 있다(Olsson 외, 1987).

본 연구에서 적용된 SIRT법은 원래 Kaczmarz(1937)가 제시한 사영법(Projection method)에 기초를 둔 ART(Algebraic Reconstruction Technique; Gordon, 1974)법을 변형시킨 것으로 ART법이 계산 과정 중에, 각 파선에 대한 식마다 각 요소의 역속도 보정치를 구하는데 비해 SIRT법은 일단 모든 파선에 대해 각 요소의 보정치를 구한 후 이들의 평균치를 보정해 주는 기법이다.

4.2.3 굴절법 자료 해석

기존의 굴절법 탄성과탐사가 지표면의 측선 상에 발파점과 수신점을 배치하여 측선 하부의 지반 속도구조를 구하는 것임에 반해, 탄성과 토모그래피는 대상으로 하는 지반을 둘러싸는 것과 같이 발파점과 수신점을 배열하는 탐사 방법이다. 따라서 굴절법 탄성과탐사의 적용 한계는 탄성과 토모그래피에서는 적용되지 않으며 굴절법 탐사와 비교하여 지반의 속도 분포를 높은 정밀도로 상세히 파악할 수 있다는 특징을 갖는다. 이러한 특징으로 탄성과 토모그래피는 예비조사보다는 정밀 조사 단계에서 이용되는 경우가 많으며 조사가 진행되는 과정에서 지질구조가 복잡하여 시추조사만으로는 지질해석이 곤란한 경우의 지질해석을 지원할 목적으로 실시되는 경우가 많다.

본 연구에서는 측정된 탄성과 기록으로부터 초동 주시를 Fig. 13과 같이 판독하고 발파점과 수신점의 위치를 측정하였다. 반복법의 초기 값으로 속도분포 모델을 실제지형과 유사하게 Fig. 19와 같이 나타내었다. 해수의 속도를 1,500 m/s, 기반암 위의 퇴적층 속도를 1,600 m/s, 기반암 속도를 2,000 m/s로 설정하였다. 속도분포 모델을 실제지반에 가깝게 설정할수록 반복 계산 횟수를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 최종 결과의 품질도 향상된다. Fig. 19와 같이 작성한 모델로 이론값의 초동 주시를 구하였다. Fig. 20은 각 음원 shot에 대한 초동 주시를 나타낸 주시곡선도이다. 이론주시의 계산에 있어서 내부의 속도 분포에 따른 굴절·회절의 영향을 고려하여야 한다. 이론주시와 측정 굴절법 탄성과 토모그래피는 불균질한 지반의 속도 분포를 재구성하기 위하여 반복 해석법이 사용된다. 따라서 본 연구에서는 반복에 의해 이론 주시와 측정주시의 오차를 순서대로 절감시키고, 그 오차가 최소화된 상태에서 해석을 종료하였다. 또한 오차의 수렴 상황은 초기 모델의 설정방법이나 속도 값을 수정한 알고리즘에 따라서도 다르기 때문에 전산처리 과정에서 순서대로 오차의 수렴 상황을 항상 확인하였다. 반복 해석법의 흐름도는 Fig. 18에 나타내었다. 이 기법에서는 먼저 초기 모델을 설정하고, 이 모델에 대해 모든 발파점·수신점의 쌍에 대해 주시를 계산하여 계산(이론) 주시와 실제의 측정 주시를 비교, 그 오차를 작게 하도록 순서대로 모델을 수정하였다.

주시의 차이를 계산하여 RMS(root-mean-square)오차를 최소화하면서 반복측정을 계속하였다. 본 연구에서는 RMS 오차를 5 %로 수렴하여 속도분포 단면도를 작성하였다. Fig. 21이 최종적으로 나온 속도분포 단면도이다.

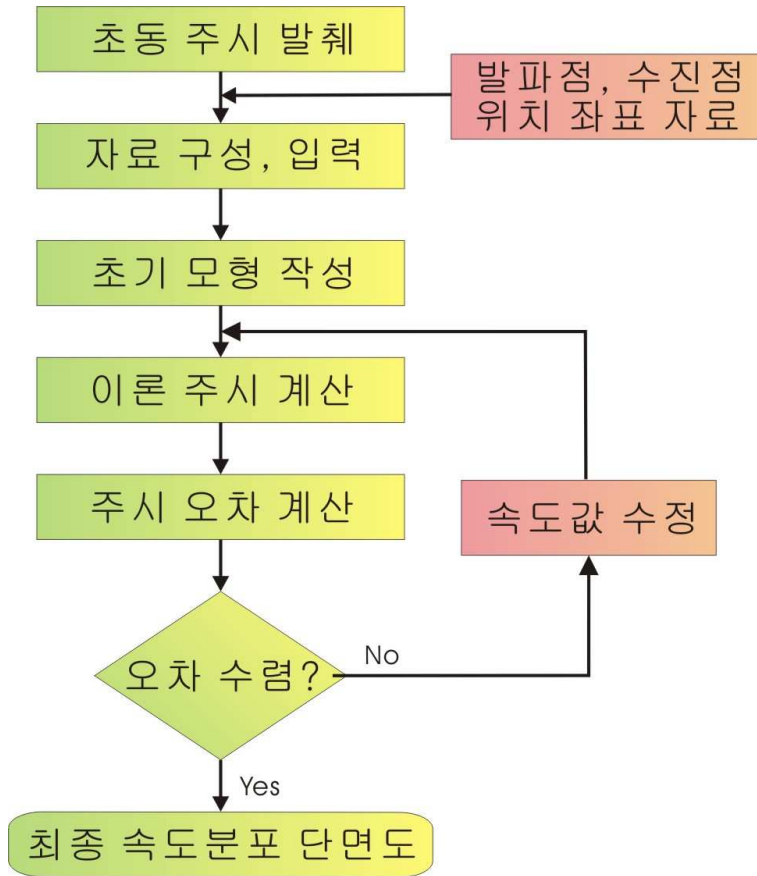


Fig. 18. Flow chart of the seismic refraction tomography

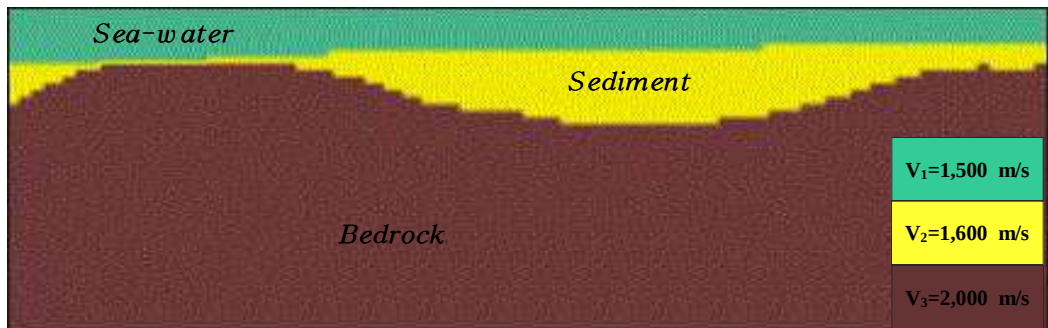


Fig. 19. Initial velocity model for refraction tomography

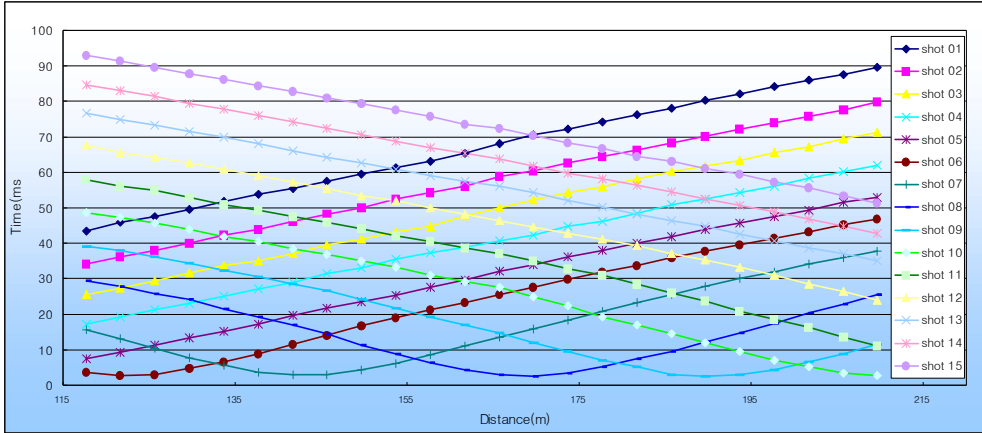


Fig. 20. The travel time curve represented by the first arrival time of all shot

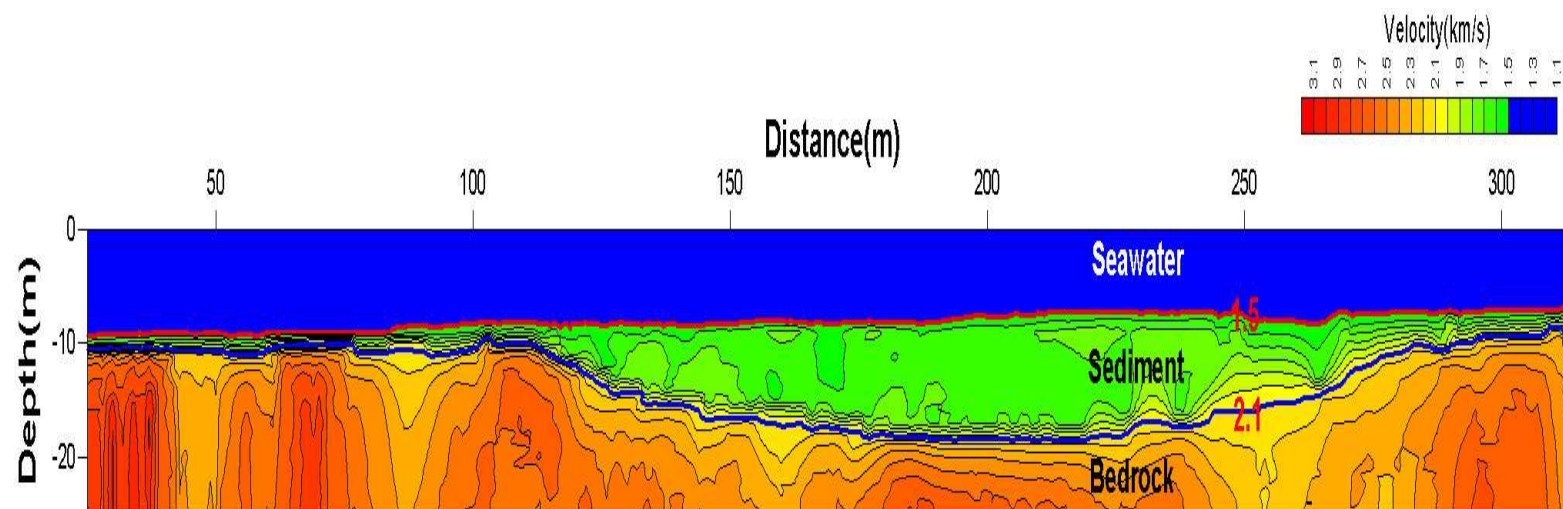


Fig. 21. Velocity tomogram through travel time inversion of refracted P-waves

4.3 탐사자료 통합해석

천해저에서 얻어진 반사법과 굴절법 자료들을 자료처리 및 해석하여 각각 퇴적층 두께 및 퇴적층 속도분포를 계산할 수 있었다. 본 연구에서는 그 두 자료를 이용하여 종합적으로 자료를 통합할 수 있다. 반사법 자료의 퇴적층 두께와 수심정보에 굴절법 자료의 퇴적층 속도분포를 적용하여 연구지역에 대한 최종적인 기반암 심도분포를 고품질로 구할 수 있다. Fig. 22는 천해저 반사법 및 굴절법 통합연구에 탐사자료 통합에 관한 흐름도를 나타낸 것이다.

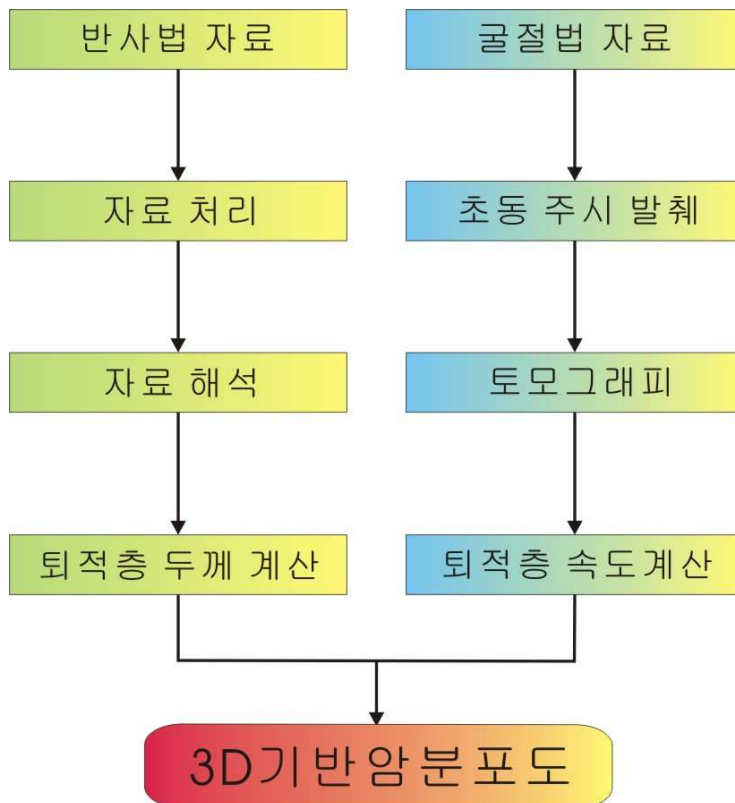


Fig. 22. Flow chart of the integrated seismic interpretation

5. 결과 및 고찰

해양 탄성과 자료를 이용하여 조사지역의 물리적 특성을 파악하고 지질공학적 기반암 분포를 조사하는 것은 해양 토목 및 건설 분야에서 매우 중요하다. 천해저에서 탄성과 자료를 획득하기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔으며 고분해능 다중채널 탐사기술과 3차원 고분해능 탐사도 시도되고 있다. 그러나 해양에서 이루어지는 많은 조사들이 단일방법으로 수행되는 경우가 많아 공사현장에 제공할 수 있는 자료에 한계가 있고, 획득한 자료의 신뢰성이 부족해 공사 진행에 어려움을 줄 수가 있다. 그래서 엔지니어링 목적의 품질 좋은 자료를 제공하기 위해서는 많은 연구 방법들이 동시에 적용되어 통합연구가 진행되어야 한다.

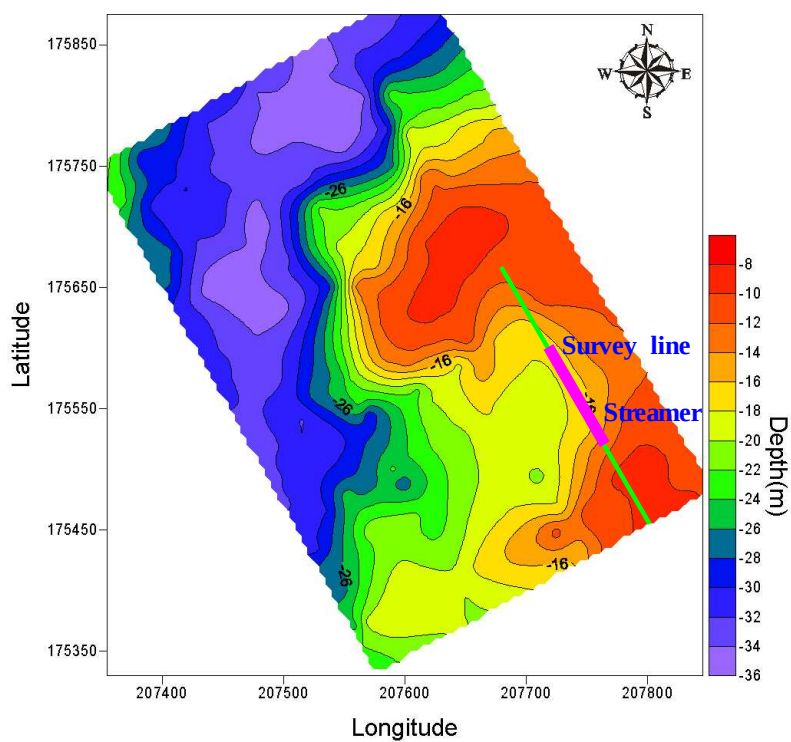
본 연구에서는 천해저에 많이 적용되는 탄성과 반사법 및 굴절법 탐사를 동시에 수행함으로써 지층경계에 대한 분해능이 뛰어난 반사법 자료와 지층의 물리적 특성 중 하나인 탄성과 전파속도를 구할 수 있게 하는 굴절법 자료를 획득하였다. 반사법 자료를 획득하기 위해서 음원과 수신기로서 듀얼부머와 단일채널 스트리머를 사용하였으며, 굴절법 자료를 획득하기 위해서 에어건 음원과 OBC-type의 제작된 수신 장치를 사용하였다. 제작된 수신기는 24채널로 설계·제작하였으며, 천해저에서 성공적으로 시스템 검증을 수행하였다. 수신기의 각 채널은 한 개의 하이드로폰과 전치증폭기로 구성되어 있으며 채널 간격은 4 m로 하였다.

반사법 자료를 이용하여 연구지역의 해저면의 심도 및 퇴적층 두께, 기반암 심도 등을 정확히 계산해 낼 수 있었다. 해저면 심도(Fig. 16a)는 기존의 수심도의 수심 분포와 거의 일치하는 5~11 m로 나타났으며 퇴적층의 두께(Fig. 16b)는 0~30 m로 퇴적 두께가 얇은 곳과 깊은 곳이 확연하게 차이를 보였다. 또한 기반암은 해수면으로부터 수심 6~36 m까지 나타났으며 동삼동 구조선을 따라 기반암 구조도 깊게 형성되어 있다는 것을 알았다. 그것으로 인해 퇴적층도 그 구조선을 따라 두껍게 쌓인 것으로 판단된다.

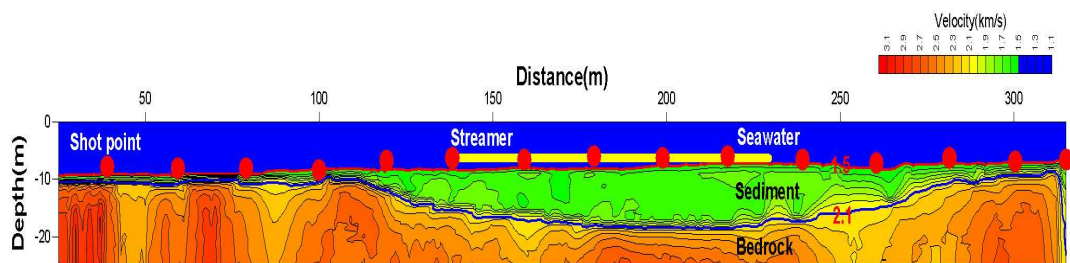
굴절법 자료를 획득하기 위해 개발된 수신기를 측선 상에 설치하고 음원을 일정한 간격으로 발파하여 해저 지층의 구조를 파악하려고 시도해 보았다. 비교적 많은 자료를 획득하지 못했지만 획득한 자료를 이용하여 굴절법 토모그래피(Fig. 21)에 성공했다. 굴절법 토모그래피는 측선 Line-002번상에서 얻은 자료를 활용하여, 단면도에서 해저

면과 기반암을 확인할 수 있었다. 측선 Line-002번의 반사법 자료(Fig. 11)와 굴절법 토모그래피 자료를 비교해보면 같은 위치에서 기반암이 해저면 위로 분포하는 것을 알 수 있었으며 속도분포도와 같은 형상으로 지층구조가 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

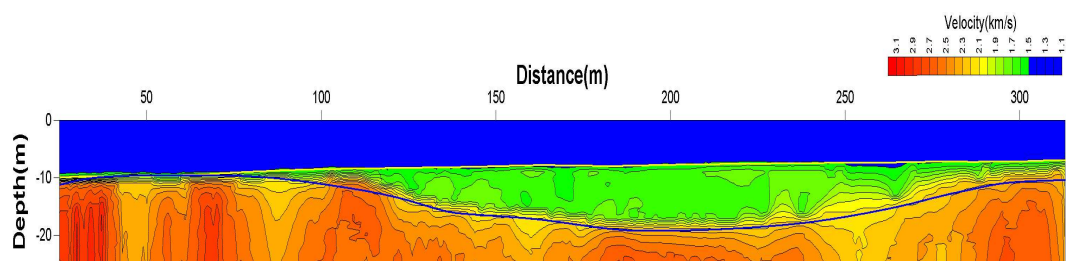
반사법 자료와 굴절법 자료를 Fig. 23에서와 같이 비교해 보았다. 먼저 3D 기반암 분포 자료에서 Fig. 23a에 나타낸 굴절법 탐사 측선과 같이 슬라이스(slice)로 수직단면 자료를 추출하였다. 그리고 Fig. 23c와 같이 토모그램 단면도에 겹쳐 보았다. Fig. 23b의 속도분포 곡선과 비교해 보면, 반사법 자료의 해저면과 기반암의 경계면이 굴절법 자료에 의해서 나타낸 속도분포 곡선과 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 비록 수진기 좌우측면에 자료들은 부분적으로 일치도가 떨어지나 수진기 바로 아래쪽 방향의 자료들은 매우 정확하게 일치하는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 23. The comparison of reflection and refraction data

6. 결 론

본 연구는 탄성과탐사 반사법 및 굴절법을 이용한 얇은 수심의 연안지역에서 실시하는 해양지반조사에 관한 내용으로, 지층의 형태 및 경계에 대한 분해능이 뛰어난 반사법과 지층의 중요한 물리적 특성인 탄성과 전파속도를 구할 수 있는 굴절법 탐사를 병행 실시하여 정확하고 신뢰성이 높은 지질정보를 얻고자 하였다. 특히 굴절법 탐사의 경우 굴절 신호 수신이 최대한 용이하도록 OBC-type의 수신장비를 제작하였고 현장에 직접 적용하여 탐사자료를 취득하였다. 반사법 및 굴절법 탐사자료의 전산처리 및 굴절법 토모그래피를 통하여 탄성과 단면도와 속도 단면도를 얻었고, 마지막으로 탐사결과에 대한 통합적 해석을 시도한 후 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 천해저 지층탐사에 반사법 및 굴절법 해양 탄성과탐사를 동시에 수행하여 지질 공학적 목적에 적합한 탐사자료를 획득하였으며, 취득한 탐사자료의 처리 분석한 결과를 통합적으로 해석함으로써 정확한 지질정보를 도출할 수 있었다.

둘째, 천해저에 적합한 OBC-type의 굴절법 해양 탄성과 탐사용 수신기를 설계 및 제작하였으며, 현장 시험탐사를 통하여 지층 경계의 굴절파 신호를 확인하였고 굴절법 해양 탄성과탐사를 성공적으로 수행하였다. 굴절법 탐사자료에 대하여 파선토모그래피 기술을 적용하여 속도단면도를 얻을 수 있었고, 퇴적층 및 기반암의 탄성과속도를 추정할 수 있었다.

셋째, 단일채널 탄성과탐사 반사법 자료에 대하여 전산처리과정을 통하여 퇴적층 및 기반암의 지층 경계면에 대한 해상도와 품질을 높일 수 있었고, 2차원 탄성과 단면도에 나타난 퇴적층 및 기반암 경계면을 발체하여 조사구역을 입체적인 3차원 분포도로 나타내면 지질구조적인 해석이 보다 용이하였다.

넷째, 반사법으로 얻은 탄성과 단면도와 굴절법 탐사자료의 파선토모그래피로부터 얻은 속도분포 단면도를 비교하였을 때, 두 단면도의 형태 및 기반암 심도, 퇴적층 두께가 매우 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통하여 천해저 탄성과 반사법·굴절법 탐사를 동시에 수행하는 것이 보다 신뢰할 수 있는 탐사자료를 제공할 수 있다는 것을 확인하였으며, 해양구조물 건설을 위한 지반조사 및 해양토목시공 분야에 보다 널리 사용될 필요가 있다. 또한 본 연구의 천해저용 굴절법 수진기 개발로 해양탐사 장비의 국산화를 위한 기술개발의 토대를 마련하였으며 앞으로는 다중성분(Multi-Components)을 측정할 수 있는 OBC의 개발 및 다중채널 소노부이를 이용한 굴절법탐사 등이 필요할 것이다. 또한 효율적인 천해저 탄성과탐사 굴절법 자료취득 운영기술의 개발과 통합해석에 대한 지속적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 고광범, 이두성, 2002, 「탄성과 굴절법 파선토모그래피에 의한 지반침하 해석」, 한국 자원공학회, Vol. 39, No. 4, pp. 293-288.
- 김영준, 2005, 「천해저용 음원 및 고분해능 다중채널 탄성과탐사 시스템 개발과 현장 적용」, 공학석사학위논문, 한국해양대학교.
- 김현도, 2004, 「PC기반의 GPS 연동 고해상 다중채널 해양 탄성과탐사 시스템 개발」, 공학박사학위논문, 동아대학교.
- 조창수, 2002, 「탄성과 굴절법 토모그래피를 이용한 지반의 속도분포 해석」, 한국지구 물리탐사학회, Vol. 5, No. 1, pp. 6-17.
- 이호영, 1990, 「CG, SIRT와 DLSQ방법을 이용한 지오토모그래피의 역산」, 자원공학회, Vol. 27, pp. 222-233.
- 이호영, 1991, 「마이크로 컴퓨터를 이용한 천해저 고해상 반사법 탄성과 탐사자료의 취득 및 처리에 관한 연구」, 공학박사학위논문, 서울대학교.
- 이호영, 김철민, 김원식, 조철현, 1992, 「디지털 技法을 利用한 淺海底 屈折法 彈性波 探查資料의 取得과 解析」, 한국해양학회, Vol. 27, No. 1, pp. 19-34.
- 이호영, 박근필, 구남형, 박영수, 김영건, 서갑석, 황규덕, 김종천, 2002, 「에어건과 6채널 스트리머를 이용한 고해상 천부 해저 탄성과 탐사」, 한국지구물리탐사학회 제4회 특별 심포지엄 “땅과 물이 만나는 곳에서의 물리탐사” 논문집, 한국지구 물리탐사학회, pp. 24-25.
- 이호영, 구남형, 박근필, 유동근, 강동효, 김영건, 서갑석, 황규덕, 김종천, 김지수, 2003, 「고해상 다중채널 탄성과탐사 자료취득변수에 따른 천부 해저지층영상의 해상도」, 한국지구물리탐사학회, Vol. 6, No. 3, pp. 126-133.
- Dines K.A. and Lytle R.j., 1979, 「Computerized geophysical tomography」, Proc. IEEE, Vol. 67, pp. 1065-1073
- Gordon, R., 1974, 「A Tutorial on ART」, IEEE Trans. Nuclear Science, NS-21, pp.

- Henriet J. P., 2002, 「Very high resolution marine 3D seismic method for detailed site investigation」, Technical report, Internet homepage <http://www.igremer.fr/vhr3d/tasks/tasks.htm>, Files: task1.pdf~task6.pdf.
- Ivansson, S., 1985, 「A study of methods for tomographic velocity estimation in the presence of low velocity zones」, Geophysics, Vol. 50, pp. 969-988
- Missiaen T., Versteeg W. and Hrnriet J. P., 2002, 「A new 3D seismic acquisition system for very high and ultra high resolution shallow water studies」, First Break, Vol. 20, No. 4, pp. 227-232.
- Olsson, O., Black, J., Cosma, C. and Phil, J., 1987, 「Crosshole investigations-Final report」, Sweden.
- Scales, J.A., 1987, 「Tomographic inversion vis the conjugate gradient method」, Geophysics, Vol. 52, pp. 179-185
- Young Ho Cha, Churl-Hyun Jo and Jung Hee Suh, 2003, 「Water bottom seismic refraction survey for engineering applications」, Geosystem eng., Vol. 6, No. 2, pp. 40-45.

APPENDIX I



(a)



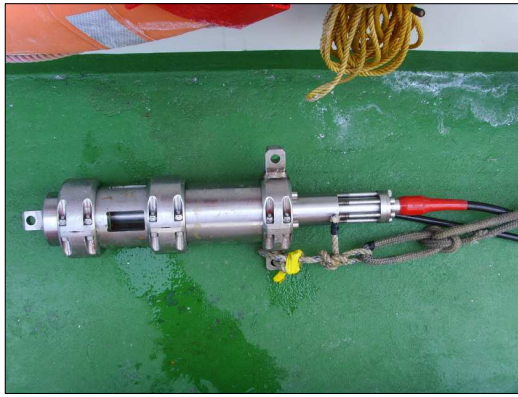
(b)

Fig. 1. Source system using shallow marine reflection method:

(a) dual-boomer (b) transceiver

Table. 1. Specification of dual-boomer

Model	Benthos SPR-1400 Dual-boomer
Frequency	Narrow band, 400 Hz pulse
Source level	205 dB re 1 μ Pa @ 1m
Tow cable length	50 m
Towing speed	3 ~ 5 knots



(a)



(b)

Fig. 2. Source system using shallow marine refraction method:
(a) air-gun (b) Compressor

Table. 2. Specification of air-gun and compressor

<i>Air-gun</i>		<i>Compressor</i>	
Model	Gun 2800A	Model	KDH-30N
Chamber	10 in ³	Engine type	3 Stage W-type
Frequency	200~300 Hz	Max pressure	130 kg/cm ²
		Revolution	1125 RPM
		Displacement	125 ℓ /min



Fig. 3. Single channel streamer

Table. 3. Specification of single channel streamer

Model	BPH-540 Hydrophone Streamer
Active section length	10 m
Leader cable length	50 m
Hydrophone array	32 element(space: 1 feet)
Preamplifier gain	20 dB



Fig. 4. Recording instrument for reflection survey

Table. 4. Specification of recording instrument for reflection survey

Size	558 × 558 × 558 (mm)
Weight	41 kg
Operating system	Window 98
Host CPU	Pentium
Memory	32MB RAM
A/D converter	16 bits
Screen resolution	1280 × 1024, 265 colors



Fig. 5. Recording instrument for refraction survey

Table. 5. Specification of recording system for refraction survey

Number of channels	Max. 24
Frequency band	10 ~ 4600 Hz
A/D resolution	18 bits
Trigger levels	settable to 100 ~ 1000 mV(step:100mV)
Sampling rates	25 ~ 2000 μ s
Data lengths	1024, 2048 words
Operating power supply	DC 12V, 3A max

감사의 글

드넓고 푸른 꿈을 안고 시골에서 내려왔을 때 세상을 다 가진 마냥 가슴이 벅차고 기뻐했습니다. 그런 제가 새로운 꿈을 향해 도전해 보겠다는 초심(初心)을 가지고 학교생활을 해온지 어느덧 9년이 지났습니다. 물리탐사공학실험실에 입실하던 2002년, 아무것도 모르고 교수님과 선배들을 따라 이곳저곳 다니며 실험·실습했던 그때가 새록새록 머리에 떠오릅니다. 실험실 생활을 마무리하는 지금, 지나온 5년이 너무나도 빠르게 지나가 마음 한 구석이 허전합니다.....

이제까지 학교생활을 잘 마치게 해주신 분들과 본 논문을 마치는데 도움을 주신 분들께 머리 숙여 감사의 마음을 전합니다. “감사합니다.”

먼저 부족한 저를 이끌어주시고, 언제나 따뜻한 관심과 격려를 아끼시지 않고 지도해주신 신성렬 교수님께 진심으로 감사드리며, 앞으로 더욱더 열심히 연구하는 모습 보여드릴 것을 다짐합니다. 또한 바쁘신 와중에도 틈틈이 격려해 주시고 저에게 관심을 가져주신 장원일 교수님, 윤지호 교수님, 임종세 교수님께 깊은 감사의 말씀 올립니다.

논문의 기초를 탄탄하게 해주시고 현장자료획득과 자료처리에 큰 도움을 주신 김현도 박사님께 감사의 말씀 전합니다.

그리고 실험실생활에 많은 도움을 준 실험실 선배 이정환, 김영준, 여은민 형님들에게 감사드립니다. 싫은 소리 한번 없이 탐사장비 설계 및 제작과 현장자료획득을 도와준 실험실 후배 상철, 영수, 수종, 순일, 상현, 현대, 송이에게 고마움을 전합니다. 또한 불철주야 자료획득에 도움을 준 (주)지오뷰 박정인 사원과 석유공학, 암석역학, 에너지 화학공학 실험실 선·후배들과 선박운항관련 공문제출 등 여러 가지 관심을 가져주신 황정주 조교님께 고마움을 전합니다.

어렸을 때부터 지금까지 언제나 옆에서 지켜보며 따뜻하고 깊은 관심을 가져준 사랑하는 누님에게 진심으로 감사의 말씀 올립니다. 그리고 저에게 든든한 후원자로 힘이 되어주신 매형에게 감사드리며, 제 인생에 많은 도움을 주셨던 가족·친지들에게 감사드립니다. 마지막으로 바쁘다는 핑계로 데이트 한번 제대로 못했는데도 싫은 내색하지 않고 항상 옆에서 배려해준 사랑하는 예비신부 강변에 양에게 사랑하는 마음 전합니다.

2007년 7월 3일, 김찬수 올림