



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

천부 퇴적구조 분석을 위한 chirp 반응  
신호의 속성분석

Attributes of chirp signal response for shallow subbottom  
sedimentary structure analysis



지도교수 신 성 렬

2017년 2월

한국해양대학교 대학원

해양에너지자원공학과

임 채 현

공학석사 학위논문

# 천부 퇴적구조 분석을 위한 chirp 반응 신호의 속성분석

Attributes of chirp signal response for shallow subbottom  
sedimentary structure analysis



지도교수 신 성 렬

2017년 2월

한국해양대학교 대학원

해양에너지자원공학과

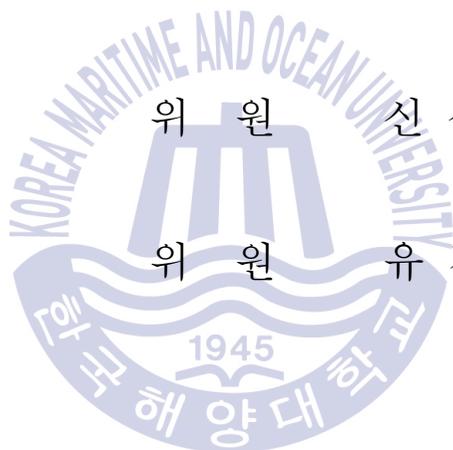
임 채 현

본 논문을 임채현의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장      정 우 근      (인)

위    원      신 성 렬      (인)

위    원      유 경 근      (인)



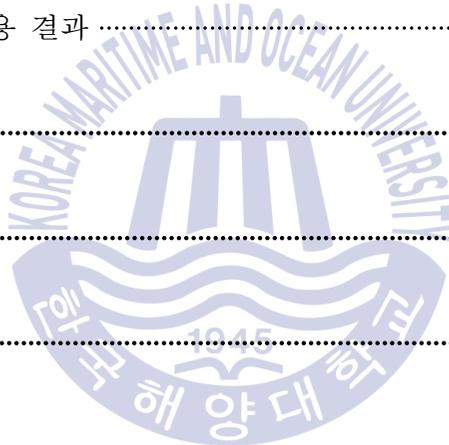
2017년 2월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iv
List of Figures .....	v
Abstract .....	viii
1. 서 론 .....	1
1.1 개요 .....	1
2. Chirp SBP 수치모델링 .....	4
2.1 Chirp SBP의 음원 .....	6
2.1.1 주파수 변조 펄스 .....	6
2.1.2 윈도우 함수의 종류 및 특성 .....	8
2.2 해수 및 해저 퇴적층에 따른 임펄스 반응 .....	14
2.2.1 음향 전파 함수 .....	14
2.2.2 음향 감쇠 .....	15
2.2.3 불연속면 층 .....	17
2.2.4 마찰 손실 .....	19
2.3 정합필터 과정 .....	20
3. 지질학적 모델에 따른 수치모형실험 .....	25
3.1 탄성과 속성분석 .....	25
3.1.1 엔벨로프 .....	25
3.1.2 순간 위상 .....	27
3.1.3 순간 주파수 .....	27

3.1.4 순간 대역폭 .....	28
3.2 실험방법 .....	29
3.3 실험결과 .....	30
3.3.1 얇은 층 .....	30
3.3.2 표층이 조립질 퇴적물로 구성된 수치모델 .....	36
3.3.3 퇴적층 내 천부가스 층이 포함된 수치모델 .....	41
3.3.4 퇴적층 내 불연속면 층이 포함된 수치모델 .....	46
4. Chirp SBP 현장자료의 속성분석에 따른 천부 퇴적구조 분석 .....	53
4.1 Chirp SBP 현장자료 취득 및 처리 .....	53
4.2 속성분석 적용 결과 .....	56
5. 결론 .....	61
감사의 글 .....	64
References .....	66
Bibliography .....	74



## List of Tables

Table 1	Parameters for generating Fig. 2 .....	7
Table 2	The formula of window function .....	12
Table 3	Parameters required for equation (6), (7) .....	16
Table 4	Parameters required for equation (8) .....	18
Table 5	Parameters required for equation (9), (10) .....	19
Table 6	Parameters for generating Fig. 8 .....	21
Table 7	Parameters required for equation (12) .....	26
Table 8	Parameters for generating Fig. 11 .....	32
Table 9	Parameters for generating Fig. 13 .....	38
Table 10	Parameters for generating Fig. 15 .....	43
Table 11	Parameters for generating Fig. 17, 18 .....	48
Table 12	Chirp SBP survey parameter .....	55

## List of Figures

Fig. 1	A schematic of acquiring data from a subbottom layer using Chirp SBP(Rakotonarivo, et al., 2011) .....	5
Fig. 2	(a) The instantaneous frequency using parameters of Table 1, (b) FM pulse with the characteristics of (a) .....	7
Fig. 3	10 Hz sine wave in (a) integer and (b) decimal period .....	9
Fig. 4	Power spectral density of 10 Hz sine wave in (a) integer and (b) decimal period .....	10
Fig. 5	Type(left) and power spectral density(right) of window functions : (a) rectangular window, (b) Hann window, (c) Hamming window, (d) Tukey window, (e) Blackman-Harris window .....	13
Fig. 6	Flowchart of Chirp SBP modeling .....	22
Fig. 7	A schematic of model composed of sea water, sandy silt, indurated mud and chalk in four horizontal layers : (a) P-wave velocity, (b) density, (c) impedance, (d) attenuation coefficient, (e) thickness of transitional layer, (f) roughness standard derivation ....	23
Fig. 8	Results of model composed of sea water, sandy silt, indurated mud and chalk in four horizontal layers : (a) chirp raw signal, (b) chirp signal response, (c) envelope of (b), red line : TWT with geometrical form .....	24
Fig. 9	Flowchart of experimental method in this study .....	30
Fig. 10	A schematic of wedge model : (a) P-wave velocity, (b) density ....	32
Fig. 11	Results of wedge model for TWT 25 ~ 30 ms : (a) chirp signal response, (b) envelope, (c) envelope derivative, (d) second derivative of envelope, (e) instantaneous phase, (f) instantaneous frequency, (g) instantaneous bandwidth .....	33

- Fig. 12** A schematic of model composed of coarse sediments in the surface layer : (a) P-wave velocity, (b) density, (c) impedance, (d) attenuation coefficient, (e) thickness of transitional layer, (f) roughness standard derivation ..... 38
- Fig. 13** Results of model composed of coarse sediments in the surface layer for TWT 25 ~ 28.3 ms(left), 30.7 ~ 34 ms(right) : (a) chirp signal response, (b) envelope, (c) envelope derivative, (d) second derivative of envelope, (e) instantaneous phase, (f) instantaneous frequency, (g) instantaneous bandwidth, red line : TWT with geometrical form ..... 39
- Fig. 14** A schematic of model containing a shallow gas layer in a sedimentary layer : (a) P-wave velocity, (b) density, (c) impedance, (d) attenuation coefficient, (e) thickness of transitional layer, (f) roughness standard derivation ..... 43
- Fig. 15** Results of model containing a shallow gas layer in a sedimentary layer for TWT 25 ~ 28.3 ms(left), 45.5 ~ 48.8 ms(right) : (a) chirp signal response, (b) envelope, (c) envelope derivative, (d) second derivative of envelope, (e) instantaneous phase, (f) instantaneous frequency, (g) instantaneous bandwidth, red line : TWT with geometrical form ..... 44
- Fig. 16** A schematic of model containing a transitional layer in a sedimentary layer : (a) P-wave velocity, (b) density, (c) impedance, (d) attenuation coefficient, (e) thickness of transitional layer, (f) roughness standard derivation ..... 48
- Fig. 17** Envelope of chirp signal response with thickness of a transitional layer for model containing a transitional layer in a sedimentary layer ..... 49

**Fig. 18** Results of model containing a transitional layer( $\Delta r=2m$ ) in a sedimentary layer for TWT 25 ~ 28.3 ms(left), 30.1 ~ 33.4 ms(right) : (a) chirp signal response, (b) envelope, (c) envelope derivative, (d) second derivative of envelope, (e) instantaneous phase, (f) instantaneous frequency, (g) instantaneous bandwidth, red line : TWT with geometrical form ..... 50

**Fig. 19** Flowchart of data processing using Chirp SBP field data ..... 55

**Fig. 20** (a) Chirp raw data (b) Final chirp data ..... 56

**Fig. 21** Attribute results of Final chirp data : (a) envelope, (b) envelope derivative, (c) second derivative of envelope, (d) instantaneous phase, (e) instantaneous frequency, (f) instantaneous bandwidth ..... 57



# Attribute of chirp signal response for a shallow subbottom sedimentary structure analysis

Chaehyeon Lim

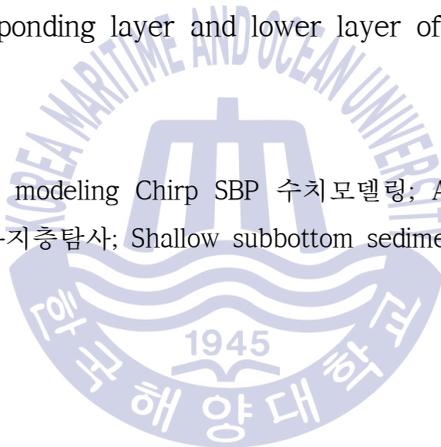
Department of Energy and Resources Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

A subbottom layer is composed of different types of sediments or the exposed rock, etc. It represents the different physical properties, depending on facies. Its physical properties and geological characteristic may be useful in the interpretation of geophysical data. Chirp SBP has been widely used to study a subbottom layer classification based on acoustic characteristics analysis. Generally, Chirp SBP provide the seismic data of the envelope type without polarity and phase information. Therefore, Envelope signal is limited to expressing subbottom sediments that represent the various physical properties because it ignores polarity and phase information. In this study, we analyzed attribute results of chirp signal response for a shallow subbottom sedimentary structure. We generated a FM pulse according to the frequency bandwidth, the sampling interval, the window function and composed numerical model using P-wave velocity, density, attenuation coefficient, thickness of transitional layer and roughness standard deviation. We conducted Chirp SBP

modeling and derived a chirp raw data. We conducted attributes analysis using a chirp signal response obtained after a matched filter process on the acquired chirp raw data. We confirmed the envelope signal of the corresponding layer and lower layer don't appear for the coarse sediment, subbottom gas, transitional layer. But, when various attribute methods such as instantaneous frequency and bandwidth were applied to the chirp signal response, the corresponding layer and lower layer could be confirmed. In the field survey, it is considered that the subbottom sediment structure should be analyzed by comparing the results of applying attribute methods such as the instantaneous frequency and bandwidth to the chirp signal response in the area where the corresponding layer and lower layer of envelope signal don't appear.

**KEY WORDS:** Chirp SBP modeling Chirp SBP 수치모델링; Attribute 탄성파 속성분석; Sub-bottom profiling 천부지층탐사; Shallow subbottom sedimentary 천부 퇴적구조.



# 제 1 장 서 론

## 1.1 개요

최근 세계적으로 해양 개발 사업의 증가로 인해 연안 지질조사, 해양 기초조사, 연약 암반 층 파악 등 해양 엔지니어링 탐사의 중요성은 점점 증가하고 있다. 엔지니어링 탐사는 구조물 설치를 위한 지역의 지반조사에 필요한 탐사를 의미하고 일반적으로 석유탐사에 비하여 얕은 수심과 좁은 면적을 대상으로 한다. 국내의 경우 엔지니어링 탐사를 이용하여 해양지하자원개발, 항만개발, 대형교량 건설, 해저 파이프 및 케이블 라인 설치, 해저저장시설 건설 등 공공사업 분야에서 많은 대형공사들이 수행되고 있으며 해양 플랜트와 같은 해양구조물들은 해양이라는 특성상 한번 설치되면 변경하기가 용이하지 않으므로 필수적으로 구조물 설치 위치를 선정하기 위해 천부 퇴적구조에 대한 정밀한 자료가 필요하게 된다(김찬수, 2015; 신성렬 등, 2008; 이호영 등, 2002).

주로 천해저에서 이루어지는 엔지니어링 탐사는 천부 퇴적층의 종류 및 물성을 파악하기 위해 일반적으로 그래프, 중력코어, 박스코어 등 샘플링 장비를 이용한 작업을 수행하고 있다. 샘플링 장비로 천부 퇴적층의 퇴적물을 채취할 경우 수심의 영향을 크게 받지 않는 반면에, 시료가 교란되거나, 회수하는 과정에서 유실될 가능성이 매우 크며, 지표면의 표층 시료만 채취되기 때문에 해당지역의 대표적인 퇴적층을 구분하기에도 어려움이 있다(김도희, 2007; 조성민, 2007).

이와 같은 이유로 오래 전부터 여러 학자들은 부머(boomer), 핑거(pinger), 스파커(sparker) 등을 이용하는 고해상 천부지층탐사(high-resolution sub-bottom profiling)를 통해 퇴적물 물성과 관계되는 음향특성 분석으로부터 해저면 퇴적물을 분류하는 많은 연구들을 수행하였다. 그 중, Chirp SBP(sub-bottom

profiler)는 특별한 자료 취득 및 처리 과정이 없는 편리성 때문에 엔지니어링 탐사회사 및 해양측량회사 등에서 많이 사용되고 있다(김영준 등, 2011). 국내의 경우 Chirp SBP의 음향학적 특성에 따른 해저면 분류 연구 (김한수 등, 2016; 유신, 2010; 윤석훈 등, 2001; 장재경과 양승진, 1999) 및 Chirp SBP 원시 자료 기록을 위한 취득시스템 구축 (김영준 등, 2013) 등의 자료취득관련 연구가 수행되었다. 전산처리 관련 연구의 경우 Chirp SBP 자료 해상도 향상을 위한 전산처리연구 (김영준 등, 2011) 및 이득회수(gain recovery)와 대역필터링(band-pass filtering) 관련 연구 (신성렬 등, 2009)가 수행되었다. 해외에서는 국내와 마찬가지로 1980년대 후반부터 Chirp SBP의 음향학적 특성에 따른 해저면 분류 연구가 수행되었다(Leblanc, et al., 1992a, b; Schock & LeBlanc, 1990; Schock, et al., 1986; 1989). 또한 최적의 Chirp SBP 전산처리과정을 제안하였으며 (Quinn, et al., 1998) 3차원 지층 구조 영상화 전산처리가 수행되기도 하였고 (Vardy, et al., 2008) Chirp SBP의 음원 과형(source signature) 변수에 따른 해상도 차이에 관한 연구 (Gutowski, et al., 2002)를 수행하였다. 일반적으로 Chirp SBP의 경우 취득된 신호는 해석의 용이함을 위하여 양의 극성(positive polarity)만 가지고 있는 엔벨로프(envelope) 형태로 기록됨으로써 천부 퇴적층 및 층서 구별하게 된다(Henkart, 2006; Quinn, et al., 1997a; 김영준, 2014).

하지만 일반적으로 Chirp SBP에서 취득된 신호는 해석의 용이함을 위하여 양의 극성만 가지고 있는 엔벨로프 형태로 기록함으로써 천부 퇴적층 및 층서를 구별하게 되는데(Henkart, 2006; Quinn, et al., 1997a; 김영준, 2014) 이 경우 극성과 위상(phase) 정보를 무시하기 때문에 (Bull, et al., 1998; 김영준 등, 2013) 다양한 물성을 나타내는 해저 퇴적층을 표현하는데 한계가 있다.

따라서 본 논문에서는 다양한 퇴적환경을 모사한 수치모델을 설정하고 Chirp SBP 수치모델링을 통해 수치모델에 따른 극성과 위상 정보를 가지고 있는 chirp 원시 자료(raw data)를 생성시키고 정합필터 과정(matched filter)을 적용시킴으로써 얻은 chirp 반응 신호(chirp signal response)에 다양한 탄성과 속성 분석들을 적용한 결과를 비교함으로써 천부 퇴적구조를 분석하고자 하였다. 또한, 현장에서 취득한 chirp 원시 자료를 정합필터 과정 및 디콘볼루션 등의 자료처리 기법을 이용하여 최종 chirp 자료를 얻었고 이를 보다 정확한 천부퇴적

구조를 분석하기 위해 다양한 탄성과 속성분석 방법들을 적용하였다.

Chirp SBP 수치모델링에서 사용되는 음원을 생성시키기 위해 스윙 형태에 따라 주파수 특성을 다르게 나타내는 주파수 변조 펄스를 생성시켰고 이에 주파수 손실(spectral leakage)의 영향을 최소화하기 위해 윈도우 함수를 적용시켰다. 또한, 해수 및 해저 퇴적층의 물성 값에 따른 음향 감쇠, 불연속면 층, 마찰 손실 등을 반영한 음향 전파 함수를 통해 임펄스 반응(impulse response)을 생성하였다. 그리고 앞서 생성된 음원과 임펄스 반응을 이용하여 Chirp SBP 수치모델링을 수행하였고 이를 통해 극성과 위상정보를 가지고 있는 chirp 원시 자료를 생성할 수 있었으며, 이 결과를 토대로 잡음을 제거시키고 관련 신호만 증폭시키기 위해 정합필터 생성 과정을 적용함으로써 chirp 반응 신호를 도출하였다. chirp 반응 신호를 통해 천부 퇴적구조를 분석하기 위해서 기존의 엔벨로프 신호뿐만 아니라 순간 위상, 순간 주파수 등의 다양한 속성분석 방법들을 적용된 결과들을 이용하여 비교하였다. 그리고 현장에서 취득된 chirp 원시 자료를 정합필터 과정과 역필터를 설계하여 적용하는 결정론적 디콘볼루션 등의 자료처리 기법을 이용하여 최종 chirp 자료를 얻었다. 이를 다양한 탄성과 속성 분석 방법들에 적용함으로써 에너지 흡수율 영향을 받는 지역에서의 물리적인 정보나 탄화수소-물 경계면, 해저 퇴적층의 두께, 미고결 모래층, 층의 급격한 변화 등에 따른 신호에 대해 보다 정확한 천부퇴적구조를 분석하였다.

## 제 2 장 Chirp SBP 수치모델링

Chirp SBP 수치모델링은 Chirp SBP에서 발생시키는 음파가 지하매질을 전파하는 거동을 모사하기 위한 수치해석적인 방법이다. Chirp SBP 수치모델링의 경우 국외에서 Chirp SBP 수치모델링을 통해 해저 퇴적층, 기하학적인 구조 등에 따른 영향을 분석하였고 (Rakotonarivo, et al., 2008) 수치모델링을 통해 얻은 자료를 이용하여 역산을 통해 층의 두께, 임피던스, 불연속면 층의 두께 등의 추정치를 입력한 물성 값과 비교 분석하는 연구 (Rakotonarivo, et al., 2011) 등이 수행되어 왔다. Fig. 1은 Chirp SBP를 통해 해저 퇴적층으로부터 자료를 취득하는 것을 모식도로 나타낸 그림이다(Rakotonarivo, et al., 2011). 신호를 송신하는 트랜스듀서와 반사된 신호를 수신하는 수신기가 예인체에 같이 포함되어있고 수직 입사의 형태로 신호가 송·수신되기 때문에 취득되는 신호를 통해 접근 가능한 퇴적물 파라미터에 한계가 있다. 따라서 Chirp SBP 수치모델링은 해저 퇴적물을 완벽하게 유추하기 위해 많은 수의 퇴적물 파라미터를 사용하는 것이 아닌 제한된 수의 파라미터를 이용함으로써 상대적으로 단순한 모델링을 요구한다. Fig. 1에서와 같이 정방향 및 역방향 전송계수( $T_{i-1}$ ,  $T'_{i-1}$ ), 반사계수( $V_i$ ), 해저 퇴적층에 따른 음향 감쇠( $H_i$ ), 불연속면 층에 의한 음향 감쇠( $H_{t,i}$ ) 등 실제 해저 퇴적물 파라미터에 비해 비교적 제한을 두어 Chirp SBP 수치모델링을 수행하였다. Chirp SBP 수치모델링을 통해 취득되는 chirp 원시 자료는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다(Rakotonarivo, et al., 2011).

$$y_j(t) = xt(t) * p_j(t) \quad (1)$$

여기서,  $y_j(t)$ 는 chirp 원시 자료를 나타내고  $xt(t)$ 는 Chirp SBP의 음원을 나타낸다.  $p_j(t)$ 는 해수 및 해저 퇴적층에 따른 임펄스 반응을 나타내며 \*는 콘볼루션 연산자를 의미한다.

Chirp SBP 수치모델링에서는 Chirp SBP의 구성 장비에 대한 잡음은 알려져있고 이는 모두 보정되었다고 가정한다. 따라서 Chirp SBP 수치모델링을 통해 얻은 자료는 해수와 해저 퇴적층의 영향만을 포함하고 있다.

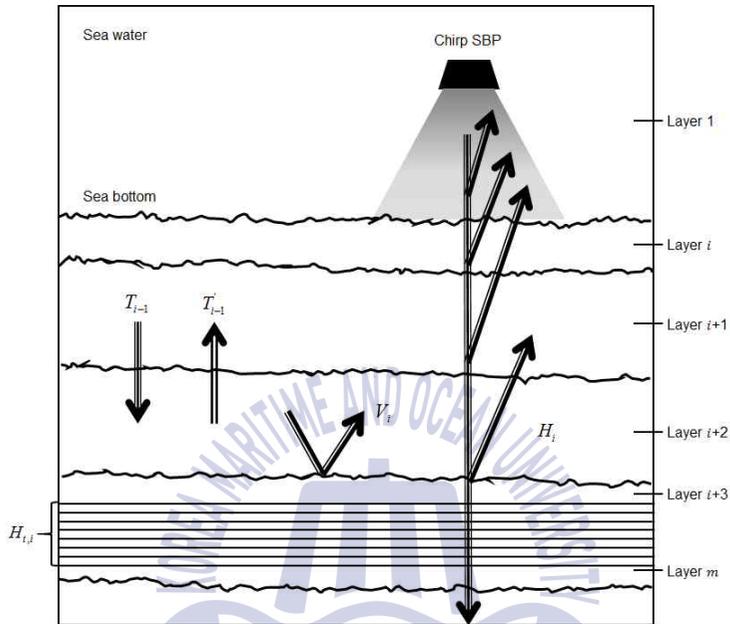


Fig. 1 A schematic of acquiring data from a subbottom layer using Chirp SBP(Rakotonarivo, et al., 2011)

## 2.1 Chirp SBP의 음원

### 2.1.1 주파수 변조 펄스

Chirp SBP는 단일 주파수 음원을 가지는 에어건(air-gun), 스파커, 버블펄서(bubble pulser) 등의 시스템과 달리, 시간이 증가함에 따라 주파수가 증가하는 선형의 주파수 변조(FM; frequency modulation) 펄스를 송신한다(Gutowski, et al., 2002; Quinn, et al., 1998; 김영준 등, 2013). 일반적인 주파수 변조 펄스는 20 ~ 50 ms의 펄스 길이에 1 ~ 10 kHz의 광대역폭을 가지는 스위프 형태로 송신되기 때문에 10 cm 정도의 고해상도와 약 100 m 이내의 깊이로 투과되는 해저 지층 자료를 얻을 수 있다(Henkart, 2006; LeBlanc, et al., 1992a; Quinn, et al., 1998; 신성렬 등, 2006).

주파수 변조 펄스는 스위프 신호라는 용어와 같이 사용되기도 하는데 스위프이란 일정 시간동안 주파수를 연속적으로 변화시켜 주는 것을 뜻한다. 주파수 변조 펄스의 경우 스위프 형태에 따라 주파수 특성을 다르게 나타낼 수 있는데 스위프 형태는 크게 선형, 로그 등이 있다.

본 논문에서는 시간이 증가함에 따라 주파수가 변화하는 형태를 weighting factor( $\alpha$ )를 통해 선형, 로그의 형태로 나타내었다. 스위프 형태에 따른 주파수 변조 펄스는 아래 식 (2)와 같다.

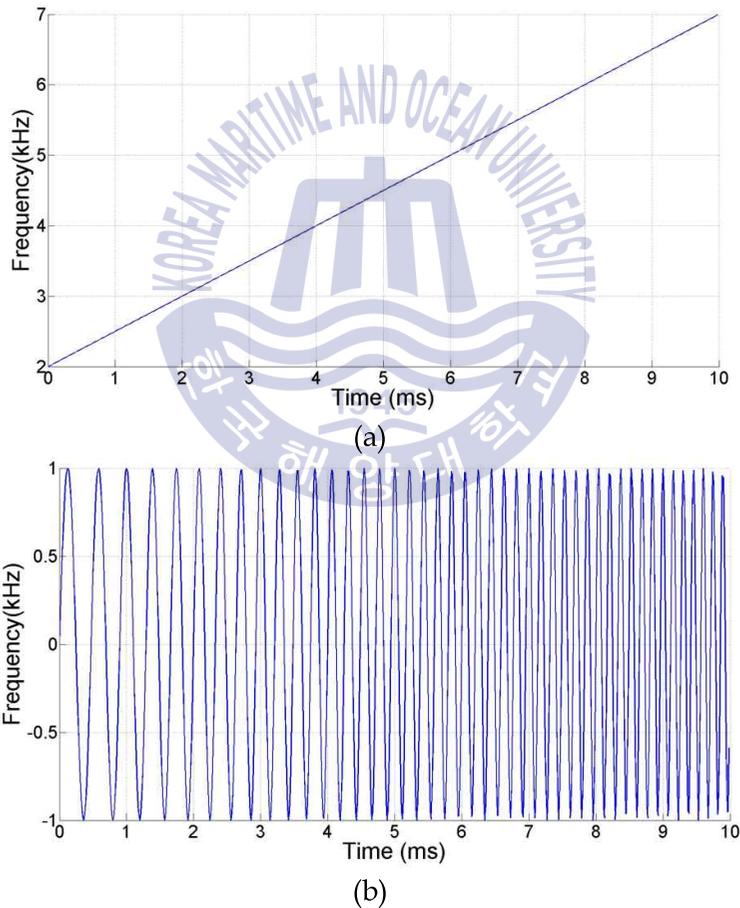
$$xt(t) = \sin \left[ 2\pi \left( f_1 t + \frac{f_2 - f_1}{2^\alpha p l^{2^\alpha - 1}} t^{2^\alpha} \right) \right] \quad (f_2 > f_1) \quad (2)$$

여기서,  $xt(t)$ 는 주파수 변조 펄스이고  $\alpha$ 는 weighting factor이며  $\alpha = 1$ 일 때 선형 형태의 주파수이고  $\alpha \neq 1$ 일 때 로그 형태의 주파수를 나타낸다.  $f_1$ 와  $f_2$ 는 각각 최소 및 최대 주파수(kHz)를 나타내며  $t$ 는 시간(ms),  $pl$ 는 펄스 길이(ms)를 나타낸다.

Fig. 2는 주파수 변조 펄스의 특성을 보여주는 그림으로서, Fig. 2(a)는 Table 1의 파라미터를 사용했을 때 순간 주파수를 보여준다. 이 때 순간 주파수는 시간이 증가함에 따라 주파수의 특성이 변하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)의 주파수 변조 펄스를 나타내었다.

**Table 1** Parameters for generating Fig. 2

Parameters	Frequency band	pulse length	Sampling frequency	Weighting factor
Value	2-7 kHz	10 ms	70 kHz	1



**Fig. 2** (a) The instantaneous frequency using parameters of Table 1, (b) FM pulse with the characteristics of (a)

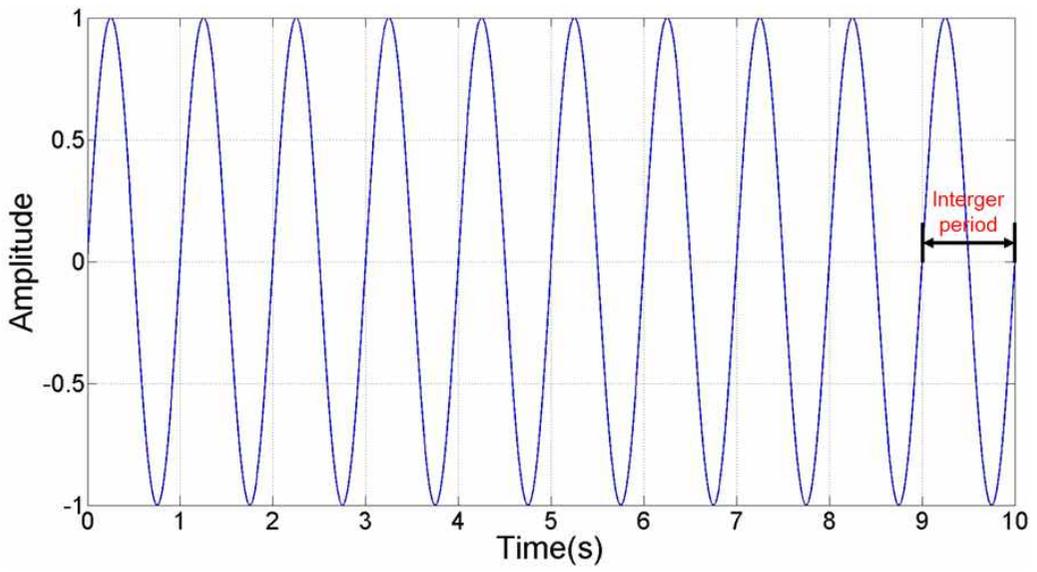
## 2.1.2 윈도우 함수의 종류 및 특성

이론적으로 아날로그 신호를 발생시켰을 때 Fig. 3(a)와 같이 일정한 주기를 두고 측정시간에 제한 없이 계속적으로 신호가 발생하게 되는데 일반적으로 탐사를 수행할 경우 Fig. 3(b)와 같이 측정시간에 제한을 두어 주기가 정확하게 반복하지 않을 경우 사용자가 원하는 주파수 요소의 에너지가 모두 표시되지 않는데 이를 주파수 손실(spectral leakage)이라고 한다.

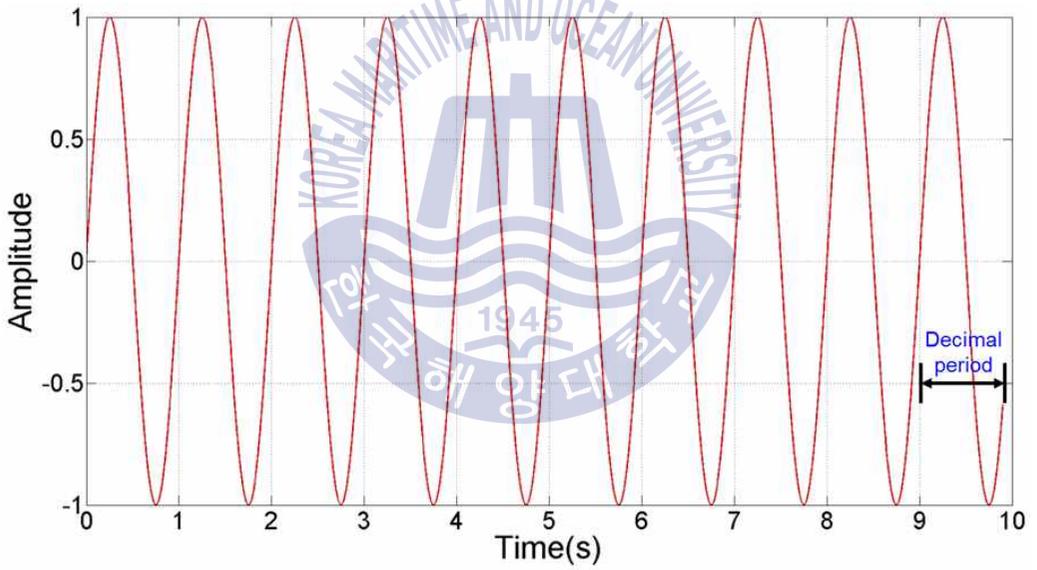
Fig. 4(a)는 주파수가 10 Hz인 사인파의 주기가 정수일 때의 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density)를 나타낸 것이고 Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)와 동일한 입력변수이며 주기가 소수일 때 생성되는 신호에 대해 파워 스펙트럼 밀도를 나타내는 결과를 비교한 그림이다.

Fig. 4(a)에서 신호의 주기가 정수일 때의 파워 스펙트럼 밀도는 사용 주파수인 10 Hz에서 주 로브(main lobe)가 관찰되었고 주 로브 주위에서 부 로브들(side-lobes)이 관찰되지만 그 수준(level)은 약 -350 dB로 아주 낮은 것으로 분석되었다. 하지만 Fig. 4(b)에서 신호의 주기가 소수일 때의 파워 스펙트럼 밀도는 Fig. 4(a)와 마찬가지로 사용 주파수인 10 Hz에서 주 로브가 관찰되지만 주위에 주 로브의 크기와 비슷한 부 로브들이 관찰되고 그 수준은 약 -80 dB로 아주 높은 것으로 분석되었다. 따라서 신호의 주기가 소수일 때가 정수일 때에 비해 더 많은 주파수 손실이 발생하는 것으로 판단하였다.

주파수 변조 펄스 역시 마찬가지로 펄스 길이에 따라 신호발생 시간에 제한을 두기 때문에 위와 같은 주파수 손실이 발생하게 되는데 이 때 윈도우 함수는 이 주파수 손실의 영향을 최소화하기 위해 적용되었다.

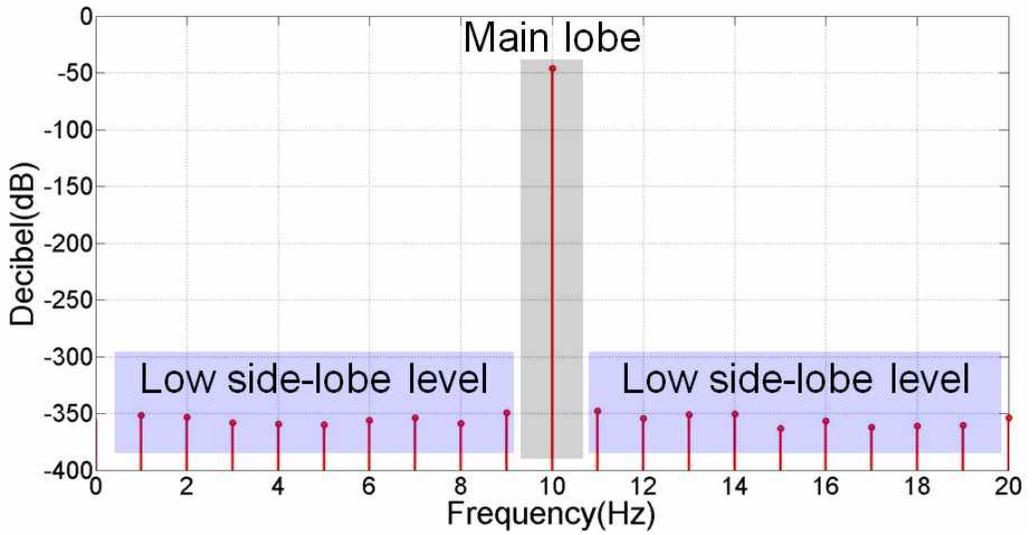


(a)

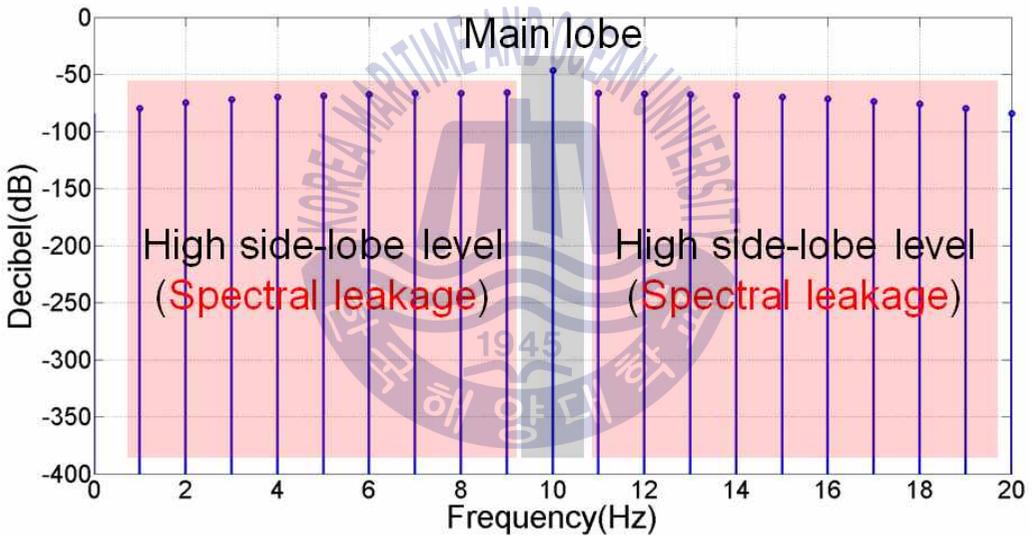


(b)

Fig. 3 10 Hz sine wave in (a) integer and (b) decimal period



(a)



(b)

Fig. 4 Power spectral density of 10 Hz sine wave in (a) integer and (b) decimal period

윈도우 함수는 약한 반사파, 얇은 층의 감지 그리고 해저 퇴적층을 유추하는데 방해될 수 있는 부 로브들을 감소시킬 수 있고(Schock, et al., 1986) 해저 퇴적층이 감쇠 매질일 때 오직 진폭의 크기만 감쇠할 뿐 전송되는 신호의 대역폭 및 파형을 유지시킬 수 있다는 장점이 있지만 측정되는 신호의 크기가 감소하고 반사파의 주 로브가 넓어서 공간해상도가 떨어진다는 단점이 있다(Cunningham, 1979; Schock, et al., 1994). 주파수 변조 펄스에 윈도우 함수를 적용하기 위한 공식은 아래의 식 (3)과 같다.

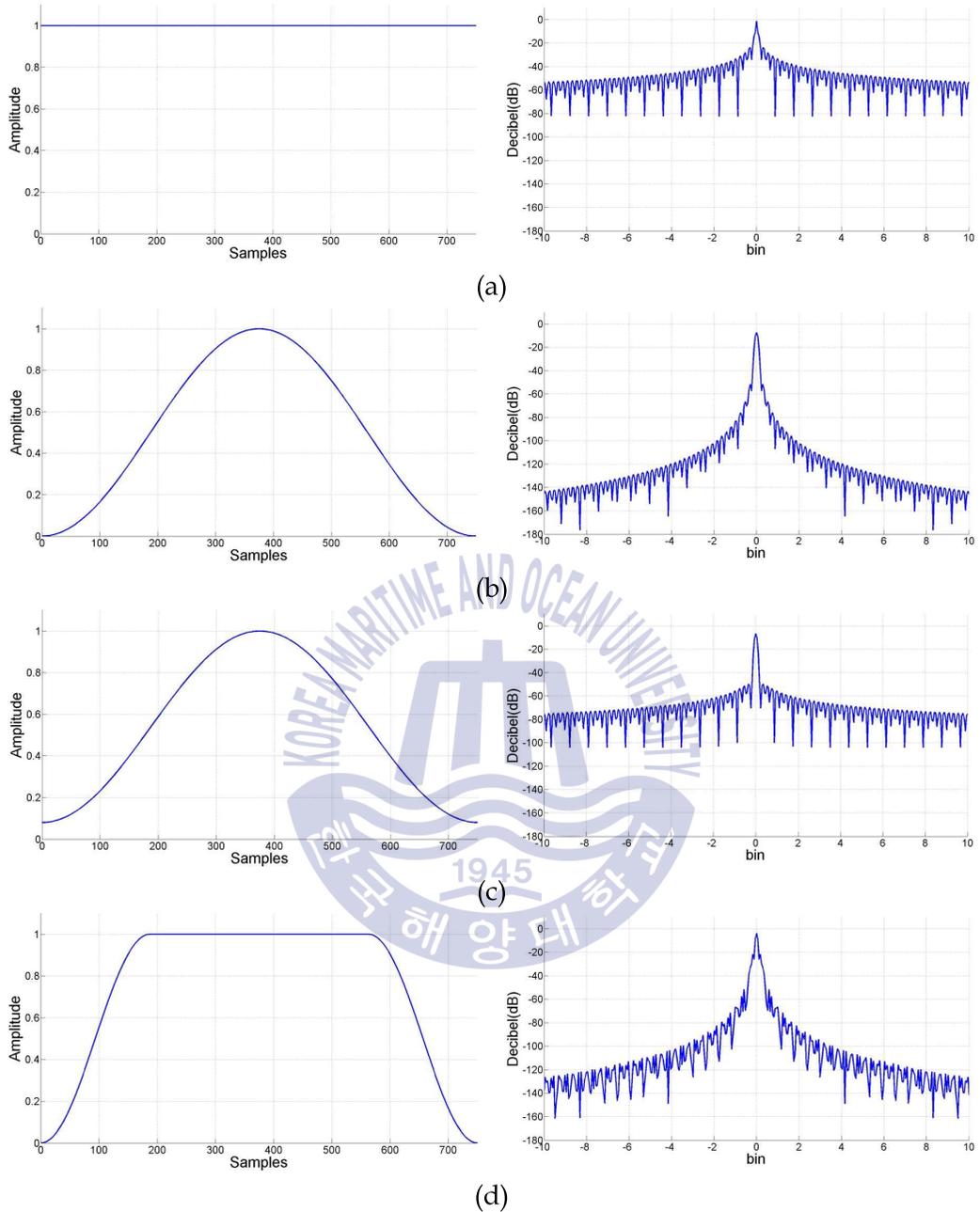
$$xtw(t) = xt(t) \times \omega(n) \quad (3)$$

여기서,  $xtw(t)$ 은 윈도우 함수를 적용한 주파수 변조 펄스이고  $\omega(n)$ 은 윈도우 함수를 나타내며  $n$ 은 샘플 수를 나타낸다. 윈도우 함수는 일반적으로 사각형, Hann, Hamming, Tukey, Blackman-Harris가 사용되는데 Table 2에 앞에 언급된 윈도우 함수의 공식을 정리하였고 Fig. 5에서 총 샘플 수가 751개 일 때 각각의 윈도우 함수와 파워 스펙트럼 밀도를 나타내었다.

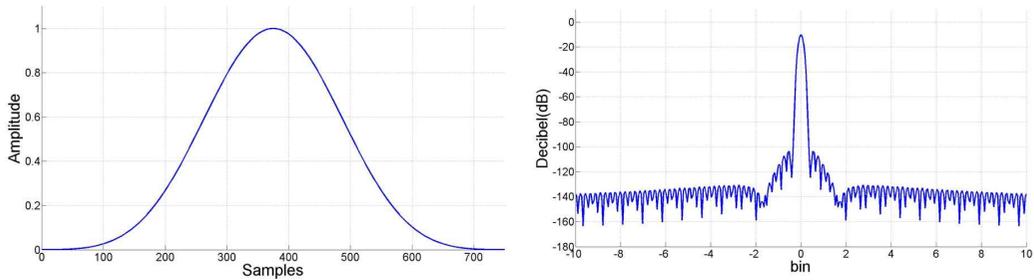


**Table 2** The formula of window function

Type	Formula
Rectangular	$\omega(n) = 1$
Hann	$\omega(n) = 0.5(1 - \cos(\frac{2\pi n}{N-1}))$
Hamming	$\omega(n) = 0.54 - 0.46\cos(\frac{2\pi n}{N-1})$
Tukey ( $\sigma = 0.5$ )	$\omega(n) = \begin{cases} \frac{1}{2} [1 + \cos(\pi(\frac{2n}{\sigma(N-1)} - 1))] & 0 \leq n \leq \frac{\sigma(N-1)}{2} \\ 1 & \frac{\sigma(N-1)}{2} \leq n \leq (N-1)(1 - \frac{\sigma}{2}) \\ \frac{1}{2} [1 + \cos(\pi(\frac{2n}{\sigma(N-1)} - \frac{2}{\sigma} + 1))] & (N-1)(1 - \frac{\sigma}{2}) \leq n \leq (N-1) \end{cases}$
Blackman-Harris	$\omega(n) = 0.35875 - 0.48829\cos(\frac{2\pi n}{N-1}) + 0.1412\cos(\frac{4\pi n}{N-1}) - 0.01168\cos(\frac{6\pi n}{N-1})$



**Fig. 5** Type(left) and power spectral density(right) of window functions : (a) rectangular window, (b) Hann window, (c) Hamming window, (d) Tukey window, (e) Blackman-Harris window



(e)

Fig. 5 Continued.

해저 퇴적층의 낮은 임피던스 차이로부터 취득되는 자료를 통해 퇴적물 또는 해저 퇴적층의 구조를 파악하기 위해 보장할 수 있는 최대 부 로브 수준은  $-80$  dB이다(Schock, et al., 1989). 따라서 본 논문에서는 부 로브 수준이  $-80$  dB 이하인 윈도우 함수 중 부 로브 수준이 가장 낮고 주 로브 폭이 가장 좁은 Blackman-Harris 윈도우를 선정하였다.

## 2.2 해수 및 해저 퇴적층에 따른 임펄스 반응

### 2.2.1 음향 전파 함수

음향 전파 함수(acoustic transfer function)에 따른 결과 값을 도출하기 위한 가정은 다음과 같다. 먼저, 음파가 수직입사로 전파할 때 S파 속도가 낮으면 P파에서 S파로의 전환율(conversion rate)이 낮기 때문에 해저 퇴적층을 수중 내에 음향감쇠가 이루어지는 매질로 가정함으로써 S파에 대한 정보를 무시하였다(Brekhovskikh & Lysanov, 1991; Ivakin & Jackson, 1998). 두 번째로 Chirp SBP의 방사 패턴(radiation pattern)이 해저 퇴적층과 수직일 때 해상도가 가장 좋기 때문에(Langli & LeGac, 2004) 해저 퇴적층의 구조는 모두 평행하다고 가정하였다. 세 번째로 Chirp SBP 탐사가 주 목적으로 하는 천부 퇴적층에서 음향 감쇠가 존재하고 각 층의 임피던스 차이가 낮기 때문에(Bowels, 1997; Hamilton,

1972) 해저 퇴적층 내에 다중 반사파는 무시하였다. 마지막으로 Chirp SBP의 음원을 발생시키는 트랜스듀서의 방사 패턴의 폭이 넓기 때문에 음파의 전파는 구형발산의 영향을 받는 것으로 가정하였다(Rakotonarivo, et al., 2011).

위의 가정으로부터 해수 및 해저 퇴적층에 따른 음향 전파 함수는 아래 식 (4)와 같다(Brekhovskikh & Lysanov, 1991; Panda, et al., 1994).

$$\tilde{p}(\omega) = p_0 D_\theta^2 \left[ \frac{e^{-j\omega\tau_1}}{c_1\tau_1} V_1 + \sum_{i=2}^{n-1} \left( \frac{e^{-j\omega\tau_i}}{c_i\tau_i} V_i \prod_{m=2}^i H_m^2 T_{m-1} T'_{m-1} \right) \right] \quad (4)$$

여기서,  $\tilde{p}(\omega)$ 는 주파수  $\omega$ 에 따른 음향 전파를 나타내고  $p_0$ 는 초기 입사파를 나타내며  $D_\theta$ 는 트랜스듀서의 방사패턴을 나타낸다.  $\tau_i$ 는 Chirp SBP 위치로부터  $i$ 번째 해저 퇴적층까지의 양방향 주시(s)를 나타내고  $c_i$ 는  $i$ 번째 해저 퇴적층의 P파 속도(m/s)를 나타내며  $c_i\tau_i$ 는 구형발산을 나타내는 계수이다.  $V_i$ 는  $i$ 번째 해저 퇴적층의 반사계수를 나타내고  $n$ 은 수층을 포함한 해저 퇴적층의 수,  $T_i$ ,  $T'_i$ 는 각각  $i$ 번째 해저 퇴적층의 정방향 및 역방향의 전송계수를 나타내며  $H_i$ 는 음향 감쇠를 나타내는 계수이다.

식 (1)에 나타나는 임펄스 반응은 식 (4)의 음향 전파 함수를 역 푸리에 변환을 통해 나타낸 것으로 식 (5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{p}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (5)$$

## 2.2.2 음향 감쇠

음파가 퇴적물 내에서 전파될 때 에너지 손실은 기하학적 확산 손실, 전달손실, 흡음 손실로 나눌 수 있다. 기하학적인 확산 손실은 음파의 전달과정 중 파면이 넓어지면서 단위면적 당 음파의 에너지가 감소하는 현상이며, 전달손실은 음향 임피던스가 다른 경계면에서 발생하는 음파의 반사 및 굴절 그리고 모드

변환 등과 같은 에너지 분배에 의해 발생하는 손실이다. 그리고 흡음손실은 퇴적물의 물리적 성질과 밀접한 관계를 가지며 음향감쇠로 정의된다(Hamilton, 1972; Stoll, 1977; 김한준 등, 1990).

음파가 퇴적물 내에서 전파될 때 음향감쇠현상은 아래의 식 (6)과 (7)로 표현할 수 있고 Table 3에 해당 식의 파라미터를 정리하였다(Jacobson, 1987; 장재경, 1999).

$$H_i(\omega) = e^{-\alpha_i(\omega)c_i \frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{2}} \quad (6)$$

$$\alpha_i(\omega) = \frac{\ln(20)}{10} (\omega/2\pi)k_{p,i} \quad (7)$$

**Table 3** Parameters required for equation (6), (7)

Parameter	Description
$\alpha_i$	The coefficient of attenuation by the acoustic attenuation to layer $i$ (Np/m)
$k_{p,i}$	The coefficient of effective attenuation by absorption, reflection, scattering, etc(dB/kHz-m)
$\omega$	Angular frequency

이 때, 동일한 매질에 대하여 음파의 주파수가 변하면 유효감쇠계수는 주파수에 따른 비례상수이므로 고 주파수일수록 감쇠계수는 증가하게 된다(Attwell & Ramana, 1966; 장재경, 1999).

주파수와 감쇠계수의 상관관계는 여러 학자들에 의해 이론적 모델로 제시되었다(Mavko & Nur, 1979; O'Connell & Budiansky, 1977; Walsh, 1966). 그 중 Biot(1956) 모델을 기초로한 Biot-Stoll 모델(Stoll & Bryan, 1970)과 실제 현장에서 측정된 자료들을 취합하여 분석한 Hamilton (1972)의 결과가 최근까지 많이 사용되고 있다.

Stoll (1977)은 세립질 퇴적물과 조립질 퇴적물에서 주파수에 따른 감쇠계수를

측정한 것을 나타내었다. 투과도가 낮은 세립질 퇴적물인 실트와 점토는 결합 구조에 의한 손실이 지배적으로 나타나고 있고 주파수 변화에 따른 감쇠현상이 거의 선형적으로 증가되고 있는 것을 볼 수 있다. 하지만 조립질 퇴적물인 모래와 저탁암은 큰 입자사이에 형성되는 공극에 의한 점성손실의 영향이 크기 때문에 주파수 변화에 따른 감쇠현상이 세립질 퇴적물에 비해 급격히 변화되는 것을 볼 수 있다.

Hamilton (1972)은 수년간에 걸쳐 다양한 퇴적환경에서 실측자료의 분석을 통해 주파수와 감쇠계수와 상관을 나타낸 것으로 Bennet (1967), Busby and Richardson (1957), Tullos and Reid (1969), Vasil' ev and Gurevich (1962) 그리고 Zemstov (1969)가 제시한 결과를 함께 비교 분석하였다.

$f^1$  직선은  $k_p = 10$ 일 때 주파수가 증가함에 따라 나타나는 감쇠계수를 나타내는 경우로 현장에서 각기 측정된 감쇠계수 값에 있어서는 변화의 폭은 있지만 기울기에 있어서는  $f^1$  직선과 거의 평행하므로  $k_p$  값은  $f^1$  직선과 같은 기울기를 유지하면서 오른쪽으로 이동된 모습을 볼 수 있다.

Stoll (1977)과 Hamilton (1972)의 결과에서 볼 수 있듯이 퇴적물 내에서의 음향감쇠 특성은 전파하는 음파의 주파수에 비례하며 퇴적물의 공극률, 밀도, P 파 속도, 평균입도 등과 같은 물성에 따라 결정된다.

본 논문에서는 실제 해저 퇴적층 자료와 가장 가깝게 수치 모델링을 수행하기 위해 Hamilton (1972)가 사용했던 방법을 이용하였고 실측자료는 Hamilton (1972)뿐만 아니라 Hamilton (1980), Zhou, et al. (1987) 등의 자료를 바탕으로 음향 감쇠모델을 구성하였다.

### 2.2.3 불연속면 층

임피던스의 연속적인 변화에 대한 영향을 모델링하기 위해 불연속면 층은 다른 해저 퇴적층과 별개로  $M$ 으로 구분하였다. 식 (4)의 음향 전파 함수에서 해저 퇴적층이  $i$ 일 때 불연속면 층의 영향을 받는 음향 전파 함수의 파라미터

$H_i$ 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있고 Table 4에 해당 식의 파라미터를 정리하였다(Rakotonarivo, et al., 2011).

$$H_i(\omega) = \sum_{k=i}^{M-i} \left( \frac{e^{-j\omega\tau_k}}{c_k\tau_k} V_{0,k} \prod_{m=2}^k H_m^2 T_{0,m-1} T'_{0,m-1} \right) \quad (8)$$

$(m = M-i)$

**Table 4** Parameters required for equation (8)

Parameter	Description
$V_{0,k}, T_{0,k}$	The reflection and transmission coefficients defined by the Snell-Descartes law for a smooth interface
$\tau_k$	The thickness of a transitional layer in terms of one-way traveltime( $\tau_k = \tau_m - \tau_i$ )

음파가 인접한 해저 퇴적층 사이에 있는 불연속면 층에 접근할 때, 전송계수 및 반사계수는 두 해저 퇴적층의 임피던스 차이와 불연속면 층 내의 연속적인 임피던스 변화에 따른다. 이 때 불연속면 층이 두꺼울 경우( $\lambda \ll \Delta r$ , 여기서  $\Delta r$ 은 불연속면 층의 공간적인 두께), 대부분의 음파는 불연속면 층 아래의 해저 퇴적층으로 전송되어진다. 불연속면 층이 매우 얇을 경우( $\lambda \gg \Delta r$ ), 불연속면 층의 영향은 거의 없다. 따라서 이 때 전송계수와 반사계수는 오직 인접한 해저 퇴적층의 물성에 의해 결정된다. 마지막으로 불연속면 층이 중간 두께일 때( $\lambda/4 \leq \Delta r \leq \lambda/2$ ), 전송계수에 비해 반사계수는 특히 영향을 받게 된다(Ainslie, 2005).

본 논문에서는 Chirp SBP 수치모델링을 통해 수 cm부터 수십 cm까지 불연속면 층 두께의 변화에 따른 chirp 반응 신호를 나타낼 수 있었다.

## 2.2.4 마찰 손실

2.2.2절에서 언급한 음향 감쇠의 원인은 크게 마찰 손실과 점성 손실로 나뉜다. 그 중 마찰 손실은 퇴적물의 결합구조와 관계되는 입자간의 접촉면에 의해서 일어나며 주로 모래 및 모래질 실트와 같은 큰 입자의 퇴적물에서 나타난다(Hamilton, 1972; Stoll, 1977; 김한준 등, 1990). 이 때 음파가 전파할 경우 산란(scattering)을 일으켜 음향 감쇠를 유발시키는데 이 때문에 전송계수 및 반사계수가 영향을 받게 된다.

실제 현장에서 무작위한 형태인 해저면을 가정할 때 마찰 손실은 해저면 높이의 평균 표준편차( $\sigma$ )와 해저면의 상관 길이( $l_c$ )에 의해 영향을 받는다. 이 때 가우시안 분배의 가설은 실제 현장에서 나타나는 결과와 수치모델링 결과와의 좋은 타협점을 제공하게 된다.

Chirp SBP가 송신기와 수신기가 하나로 구성되어 있고 수직 입사의 형태로 신호가 송·수신된다는 점을 고려해볼 때 가우시안 분배에 의해 마찰 손실에 따른 산란의 구체적인 방향을 추측할 수 있기 때문에 본 논문에서의 Chirp SBP 수치모델링은 구체적이지 않은 산란의 방향은 무시하였다.

Kirchhoff 가정( $l_c/\lambda \gg 1$ )에 따라 수직입사로 음파가 전파할 때 반사계수는 식 (9), (10)과 같고 Table 5에 해당 식의 파라미터를 정리하였다(Eckart, 1953).

$$V_i = V_{0,i} e^{\frac{-Q_{R,j}^2}{2}} \quad (9)$$

$$Q_{R,j} = 2k_i \sigma_i \quad (10)$$

**Table 5** Parameters required for equation (9), (10)

Parameter	Description
$\sigma_i$	The roughness standard deviation
$k_i$	The wave number
$Q_{R,j}$	The Rayleigh parameter

한편, Rakotonarivo, et al. (2011)은 실험을 통해 거친 해저면에서 반사계수에 비해 전송계수는 거의 영향받지 않는 것을 관찰하였다. 실험 결과를 통해 음파의 전파는 마찰 손실의 영향으로부터 무시될 수 있지만 반사계수는 마찰 손실에 의해 약 - 10 dB이 손실되었으므로 무시할 수 없다고 제안하였다. 따라서 본 논문에서는 전송계수의 경우 Snell-Descartes의 법칙에 따른 수치모델링을 위해 마찰 손실의 영향을 무시하였다.

## 2.3 정합필터 과정

수신된 Chirp SBP 신호의 자료처리는 육상 바이브로사이스(vibroiseis) 시스템의 자료처리와 유사하다. 즉, 취득된 음향 신호에서 잡음을 제거시키고 관련 신호만 증폭시키기 위해 송·수신된 Chirp SBP 신호를 이용하여 정합필터 과정을 수행하게 되고 관련 식은 아래의 식 (11)과 같다(Gutowski, et al., 2002; Schock, et al., 1989).

$$\gamma_j(t) = y_j(t) * e(t-\tau) \quad (11)$$

여기서,  $\gamma_j(t)$ 는 Chirp SBP에 의해 측정된 자료에서 정합필터 과정을 거친 자료를 나타내고  $e(t-\tau)$ 는 Chirp SBP 음원의 자기상관(autocorrelation) 자료를 나타낸다.

정합필터 과정을 수행하게 되면 펄스 길이가 아닌 대역폭에 따라 해상도를 유지시킴으로써 수신된 반사 신호에서 송신된 음원 신호와 상관성이 없는 잡음은 감쇠되고 해저 퇴적층에 반사된 신호는 증폭하게 된다. 또한, 길게 출력된 주파수 변조 신호는 압축되어 떨림(ringing) 효과를 감소시킬 수 있으며, 다중 반사파(multiple)를 제거할 수 있으므로 최종적으로 신호대 잡음비가 향상된 일 반적인 탄성과 신호의 형태가 된다(Quinn, et al., 1997b; Yilmaz, 2001).

Fig. 6은 Chirp SBP 수치모델링을 통해 chirp 반응 신호를 생성하기 위한 흐름도를 나타낸 그림이다. 그리고 Fig. 8은 Table 6의 파라미터를 사용하여 Fig. 6의 흐름도에 따라 각 과정들을 간략하게 도시한 것이다. Fig. 7에서 수치모델

은 수평 4층으로 각 층을 해수, 모래질 실트, 고결된 점토, chalk층로 모사함으로써 각 층에 해당하는 속도 및 기타 물성 값으로 설정하였고 모든 층에서 음향 감쇠, 불연속면 층, 마찰 손실은 배제하였다. Fig. 8(a)는 Blackman-Harris 윈도우를 적용한 주파수 변조 펄스와 Chirp SBP 수치모델링을 통해 취득한 임펄스 반응에 대해 곱말기(convolution)한 결과로서, 이는 chirp 원시 자료(chirp raw signal)를 나타냈으며 Fig. 8(b)는 Blackman-Harris 윈도우를 적용한 주파수 변조 펄스를 이용하여 Fig. 8(a)에 정합필터 과정을 적용한 결과인 chirp 반응 신호를 나타낸 것으로 Fig. 8(a)에서 길게 출력된 chirp 원시 자료가 압축되어 해저 퇴적층에 반사된 신호만 남은 것을 볼 수 있다. Fig. 8(c)는 Fig. 8(b)의 엔벨로프 형태로 나타낸 것으로 Fig. 8(b)와는 달리 양의 극성으로만 나타나게 되어 해석에 용이하도록 표현되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 8에서 빨간색 실선은 각 층의 깊이와 P파 속도에 따른 양방향 주시를 나타내었다.

**Table 6** Parameters for generating Fig. 8

Parameter	Frequency band	pulse length	Sampling frequency	Weighting factor
Value	2-10 kHz	10 ms	65 kHz	1

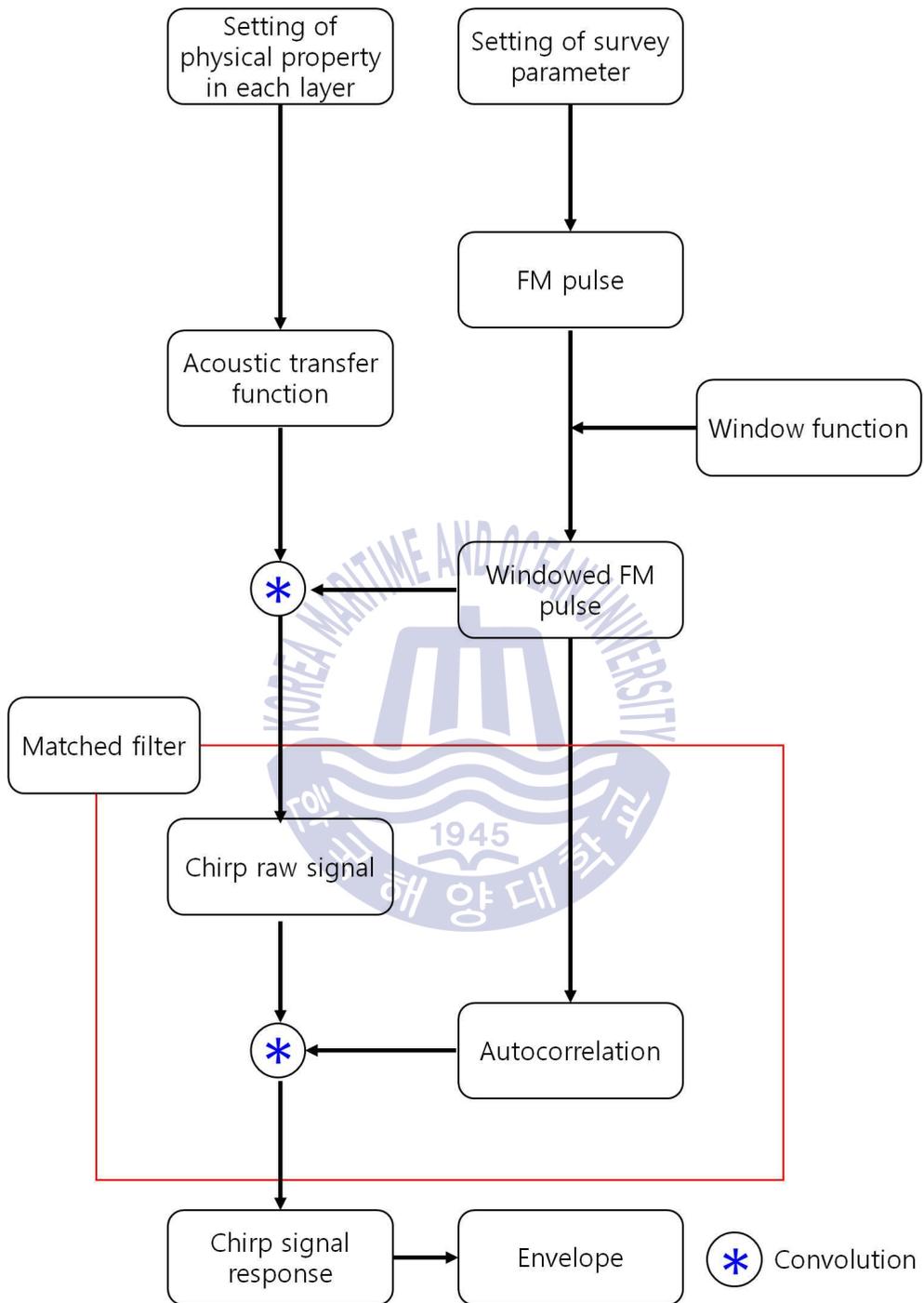


Fig. 6 Flowchart of Chirp SBP modeling

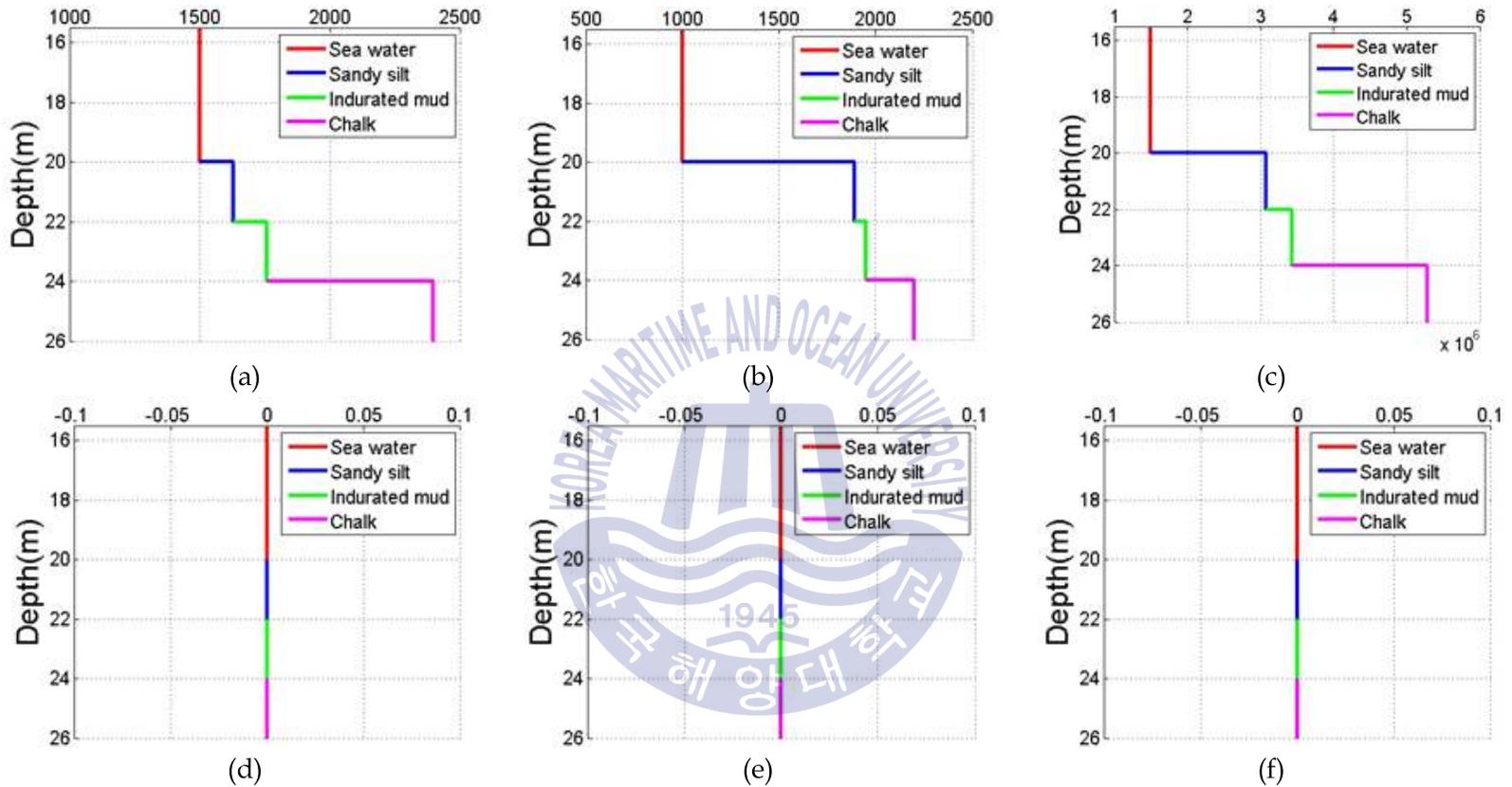
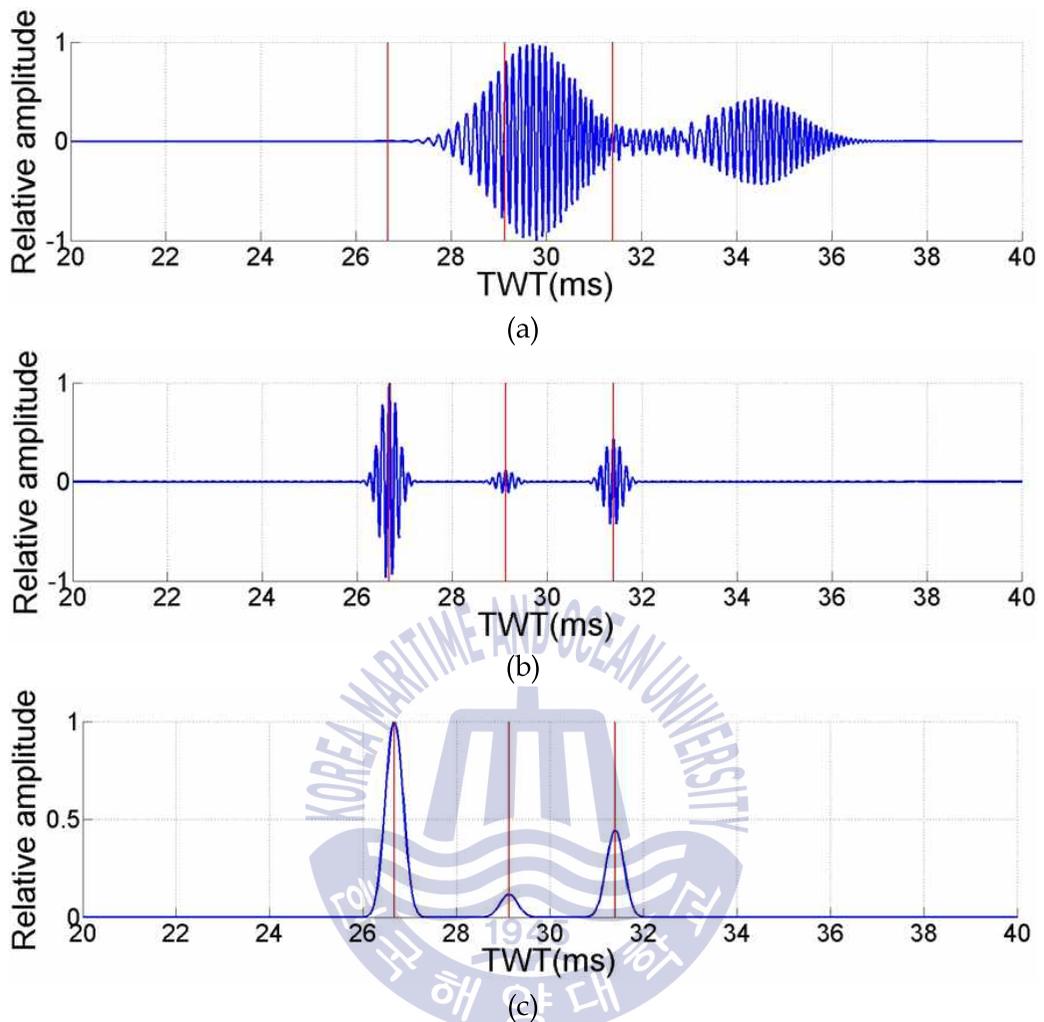


Fig. 7 A schematic of model composed of sea water, sandy silt, indurated mud and chalk in four horizontal layers :  
 (a) P-wave velocity, (b) density, (c) impedance, (d) attenuation coefficient, (e) thickness of transitional layer, (f)  
 roughness standard derivation



**Fig. 8** Results of model composed of sea water, sandy silt, indurated mud and chalk in four horizontal layers : (a) chirp raw signal, (b) chirp signal response, (c) envelope of (b), red line : TWT with geometrical form

## 제 3 장 지질학적 모델에 따른 수치모형실험

### 3.1 탄성과 속성분석

탄성과 탐사는 자료처리를 통하여 신호대 잡음비를 향상시킨 후 지질학 및 층서학에 기초한 해석이 수행된다. 이를 통해 석유 및 가스 등의 유망구조를 분석한 후 해당 자료에 대한 정밀 분석이 이루어지게 되는데, 이 때 탄성과 속성분석, AVO 등 다양한 분석기법이 적용된다. 탄성과 속성분석(seismic attribute)은 탄성과 상에서 특이 지점에 대한 정량적인 측정 방법이다(Chopra & Marfurt, 2005; Eastwood, 2002). 탄성과 속성분석은 1960년대 탄화수소의 공극 유체와 강한 진폭인 명점(bright spot)의 상관관계에 의한 진폭 측정을 계기로 시작하였으며 1970년대 초반 컬러 디스플레이에 의해 엔벨로프, 순간 주파수, 위상 및 구간 속도(interval velocity) 등 트레이스 복소 분석이 시작되었으며, 1980년대에는 해석용 워크스테이션이 개발되면서 다양한 속성분석 방법들이 개발되기 시작하였다(Chopra & Marfurt, 2005).

탄성과 반사자료로부터 물성변화에 따른 지질정보를 파악하기 위해서는 탄성과 진폭과 위상, 주파수 변화 분석이 필요하다. 이러한 순간 속성 값은 탄성과 자료로부터 지질정보를 획득할 수 있는 모든 값을 의미하는 것으로 본 논문에서는 Chirp SBP 수치모델링을 통해 얻은 chirp 반응 신호에 다양한 속성분석 방법을 적용하고 그 값을 도출함으로써 천부 퇴적구조를 분석하고자 하였다.

#### 3.1.1 엔벨로프

탄성과 복소 트레이스는 식 (12)와 같이 정의내릴 수 있고 Table 7에 해당 식의 파라미터를 정리하였다(Taner, et al., 1979).

$$F(t) = f(t) + ig(t) = A(t)e^{i\phi(t)} \quad (12)$$

Table 7 Parameters required for equation (12)

Parameter	Description
$F(t)$	Complex trace
$f(t)$	Seismic trace(real number of complex trace)
$g(t)$	Hilbert's transform of $f(t)$ (imaginary number of complex trace)
$A(t)$	Envelope
$\theta(t)$	Instantaneous phase

엔벨로프는 반사파 강도가 강한 지역들이 다른 방법에 비해 명확히 나타나기 때문에 상하지층간의 반사파 강도 변화를 분석할 수 있다. 반사파 강도의 최대는 트레이스 신호의 최대, 최소점보다 위상이 바뀌는 지점이나 특히 여러 개의 반사파 합성으로 이루어진 트레이스 지점에서 나타난다. 또한, 엔벨로프가 클 경우 암석학적 변화와 밀접한 관련이 있는데 명점, 부정합면, 해저면의 급격한 변화가 있는 층의 경계면, 단층을 가리키는 지역적인 변화, 특히 가스 부존지에서 나타난다(고휘경, 2013; 여은민, 2006; Tanner & Sheriff, 1977).

시간에 따른 1차 미분 엔벨로프 값(envelope derivative)은 엔벨로프의 시간 변화율( $= \frac{dA(t)}{dt}$ )로서 반사파의 에너지 변화에 대한 정보를 나타내는데 파쇄대 지역과 같은 에너지 흡수율 영향을 받는 지역에서의 물리적인 정보를 추정하는데 이용되며(장성형 등, 2005) 시간대별 반사이벤트의 에너지 변화를 통해 불연속면, 급격한 층의 정보나 에너지 흡수 효과를 감지하는데 사용한다.

시간에 따른 2차 미분 엔벨로프 값(second derivative of envelope)은 엔벨로프의 최대값( $= \frac{d^2A(t)}{dt^2}$ )을 나타내며 반사 경계면을 나타내는데 유용하다. 2차 미분 엔벨로프는 탄성과 파형 내에 존재하는 모든 반사 경계면을 보여주며 암석학적 급격한 변화를 보여준다(Tomecka-suchon & Marcak, 2015).

### 3.1.2 순간 위상

순간 위상  $\phi(t)$ 은 탄성과 복소 트레이스의 위상 성분 값으로 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다(Taner, et al., 1979).

$$\phi(t) = \tan^{-1}(g(t)/f(t)) \quad (13)$$

여기서, 순간 위상은 복소 트레이스의 최고점, 0, 최저점으로 나타나므로 모든 트레이스의 위상각을 표현할 수 있다. 또한, 순간 위상은 엔벨로프와 무관하므로 보다 약한 반사 신호를 좀 더 명확하게 한다(장성형 등, 2001).

순간 위상은 지층 경계면의 불연속성, 단층, 편치아웃, 서로 다른 경사층에서의 반사 신호 등을 나타낼 수 있어 탄성 퇴적 층서의 경계면을 구분할 때 효과적으로 활용된다. 따라서 탄성과 단면 해석할 때 음향공백대나 아주 약한 반사면들의 연속성을 분석하기 위해 상당히 용이하다(Payton, 1977).

### 3.1.3 순간 주파수

순간 주파수(instantaneous frequency)  $\omega(t)$ 는 시간에 따른 위상 변화율로써 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다(Taner, et al., 1979).

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \tan^{-1}(g(t)/f(t)) \quad (14)$$

식 (14)를 순간 위상 식 (13)에 대입하면

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \tan^{-1}\left(\frac{g(t)}{f(t)}\right) \quad (15)$$

$$\omega(t) = \frac{f(t) \frac{dg(t)}{dt} - g(t) \frac{df(t)}{dt}}{f^2(t) + g^2(t)} \quad (16)$$

식 (16)과 같이 나타내어 순간 주파수를 계산할 수 있다. 탄화수소-물 경계면, 해저 퇴적층의 두께, 미고결 모래층, 층의 급격한 변화에 따라 순간 주파수는 급격하게 변한다. 순간 주파수의 변화를 이용하여 가스 하이드레이트 또는 염수를 함유한 퇴적층으로부터 자유가스를 함유한 퇴적층을 구분하는 것이 가능한데 이는 가스가 단파장의 성분을 감쇠시키는 작용을 하기 때문이다 (Satyavani, et al., 2005).

### 3.1.4 순간 대역폭

순간 대역폭(instantaneous bandwidth)  $b(t)$ 은 시간에 따른 1차 미분 엔벨로프 값과 엔벨로프를 이용하여 구할 수 있고 이는 상대적인 진폭의 변화율을 의미하며 식 (17)로 나타낼 수 있다(Barnes, 1992).

$$b(t) = \left| \frac{dA(t)/dt}{2\pi A(t)} \right| \quad (17)$$

순간 대역폭은 취득한 신호에서 샘플 단위의 대역폭을 나타내며 항상 양의 값으로 표현된다. 즉, 취득한 신호의 상대적인 진폭의 변화율이 크면 순간 대역폭의 값이 크고 취득한 신호의 상대적인 진폭의 변화율이 작으면 순간 대역폭의 값이 작아지게 된다(Barnes, 1993). 순간 대역폭의 경우 전반적인 흡수율의 영향과 탄성과 특징 변화를 보여주는데 용이하다(Barnes, 1992). 그리고 암질(lithology)의 변화에 따른 미세한 진폭 변화를 나타내는데 용이하며 순간 대역폭이 0을 가리킬 경우 독특한 암질을 나타낸다. 따라서 순간 대역폭을 적용할 경우 정확한 암질을 파악하기 힘들지만 엔벨로프 등의 다른 속성 방법들과 비교함으로써 순간 대역폭에서 이상 신호로 나타나는 암질의 종류를 파악할 수 있다(Mahapatra, 2005).

### 3.2 실험방법

본 실험에서는 수평모델에 대하여 Fig. 6과 같이 최소 및 최대 주파수, 샘플링 간격, 윈도우 함수 등에 따라 생성된 주파수 변조 펄스를 통해 Chirp SBP 수치모델링을 수행함으로써 취득된 chirp 원시 자료에 정합필터 과정을 거친 후 얻은 chirp 반응 신호에 Fig. 9와 같이 6개의 탄성과 속성분석 방법을 적용하였다. 탄성과 속성분석의 경우 엔벨로프, 시간에 따른 1차 미분 엔벨로프, 시간에 따른 2차 미분 엔벨로프, 순간 위상, 순간 주파수, 순간 대역폭 등 총 6개의 방법을 적용하였다.

수치모형은 총 4개로 P파 속도, 밀도, 유효감쇠계수, 불연속면 층의 두께, 마찰손실 표준편차 등의 여러 가지 물리적인 요소를 변화시키면서 Chirp SBP 수치모델링을 수행하였다.

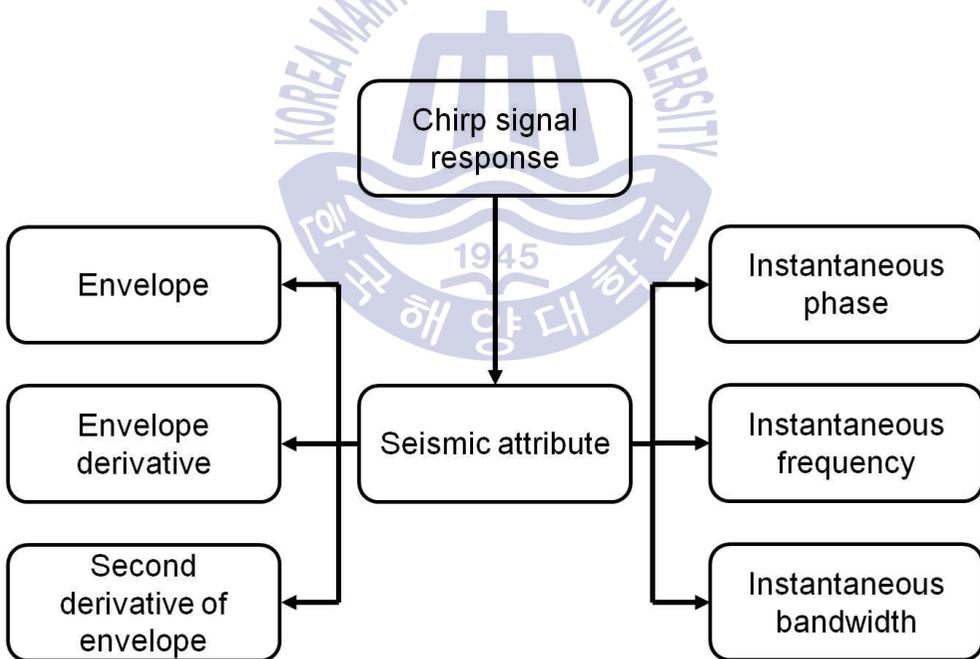


Fig. 9 Flowchart of experimental method in this study

### 3.3 실험 결과

#### 3.3.1 얇은 층

석유 산업에서 지난 30년 동안 저류층의 암질 및 유체 유형 또는 저류층 내 유체의 양을 추정하는 목적으로 저류층 내부의 소규모 퇴적구조를 영상화시키는 기술은 점진적으로 향상되어왔다. 이런 저류층의 특성 가운데 가장 기본적인 것은 층의 두께이다(Marfurt & Kirilin, 2001). Widess (1973)는 일찍이 얇은 층의 튜닝(tuning)효과에 대한 연구를 진행하였고 이들은 튜닝효과에 의해 해상도가 제한된다고 언급하였다. 또한, Robertson and Nogami (1984)는 얇은 층을 감지하기 위해 Ricker 파형요소를 이용해서 취득된 자료에 탄성과 속성분석 방법을 적용하여 분석하였다. 하지만, chirp signal을 이용해서 취득된 자료에 탄성과 속성분석 방법을 적용하여 얇은 층을 감지하는 연구는 없었다.

썰기 모델(wedge model)은 탄성과 축소모형 및 수치모형 실험에서 수행하는 기본적인 모델로써 핀치아웃(pinch-out) 구조, 얇은 암염침(salt pillow)의 가장자리, 불규칙한 영구동토(permafrost) 등 실제로 저류층에서 나타나는 퇴적구조를 모사한다. 이 때 썰기 모델은 얇은 층의 튜닝(tuning)효과에 대한 연구에 주로 사용된다(Cooper, et al., 2010). 따라서 본 연구에서는 튜닝효과에 가려지는 얇은 층을 감지하기 위해 Fig. 10의 썰기 모델에서 측정된 chirp 반응 신호에 다양한 탄성과 속성 분석 방법들을 적용시켜보았다.

모델은 3층의 썰기 모델로 설정하였고 각각의 층을 해수, 점토질 실트층, 굵은 모래층으로 모사하였다. 각 층의 물성 값은 관련 도서 및 논문에 게재된 값으로 설정하였고 해당 실험에 큰 영향을 미치지 않는 음향 감쇠, 불연속면 층의 두께, 마찰 손실 표준편차는 0으로 설정함으로써 배제하였다.

Fig. 11은 Table 8의 파라미터를 사용했을 때 양방향 주시 25 ~ 30 ms에서 Chirp SBP 수치모델링 및 탄성과 속성분석 적용 결과이다. Fig. 11(a)는 썰기 모델에 따른 chirp 반응 신호이며, Fig. 11(b) ~ (g)는 생성된 chirp 반응 신호에

각각의 탄성과 속성분석 방법을 적용한 결과이다.

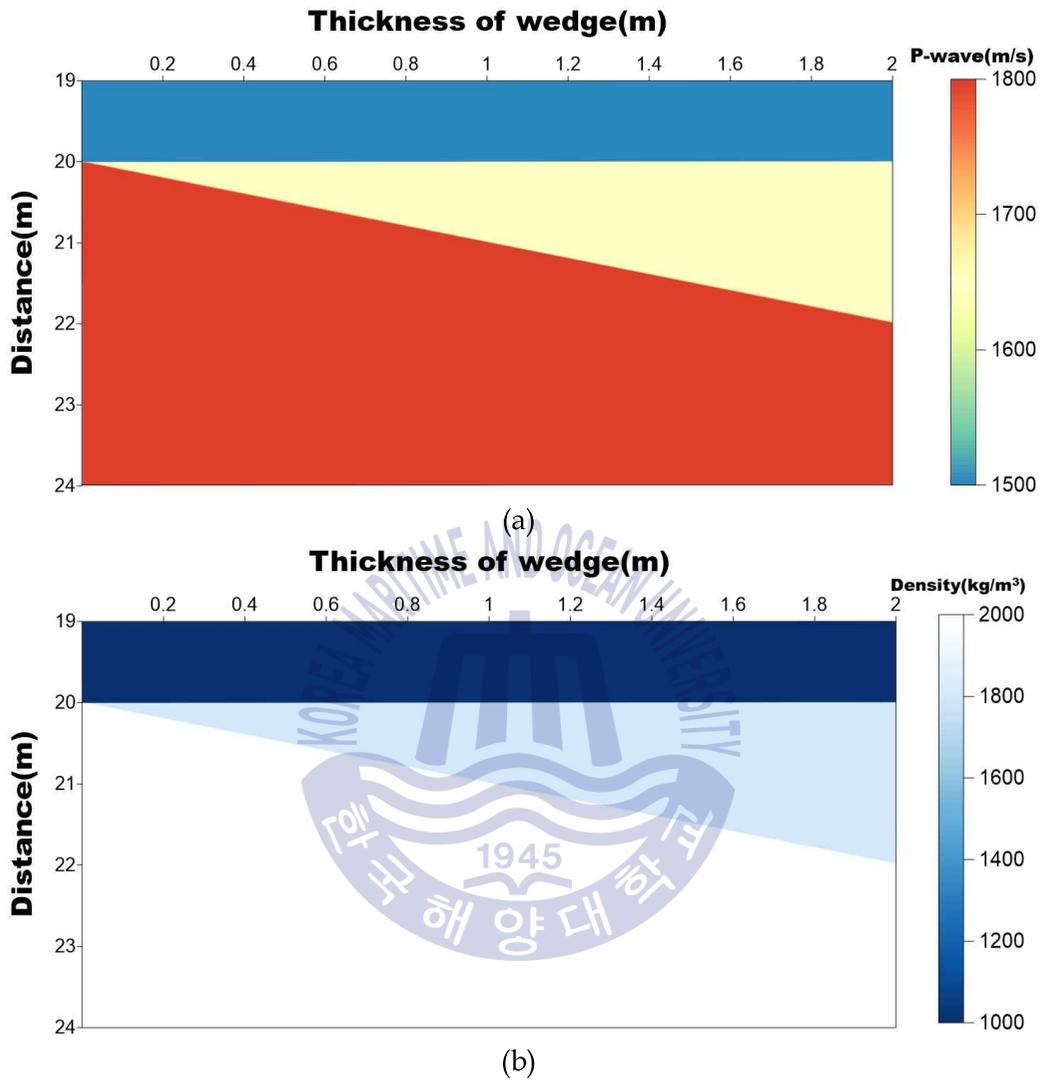
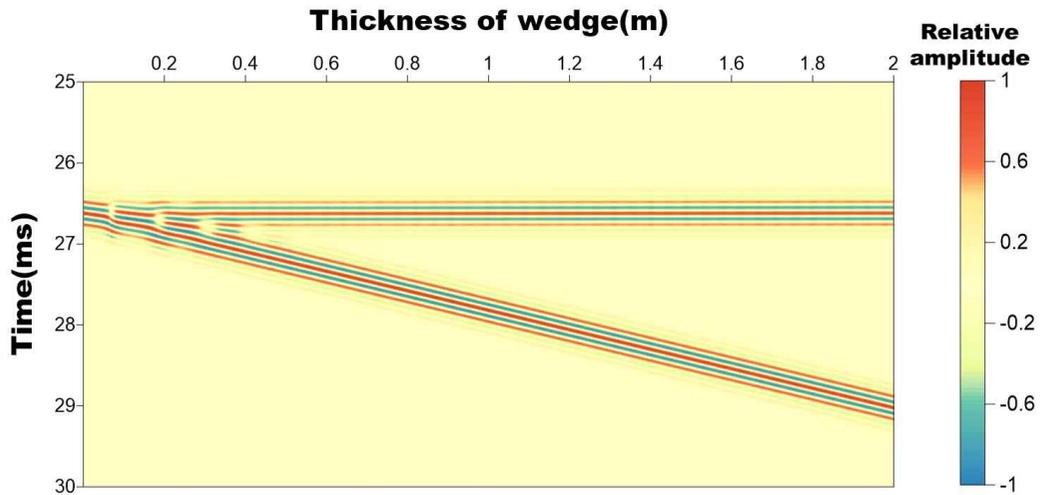


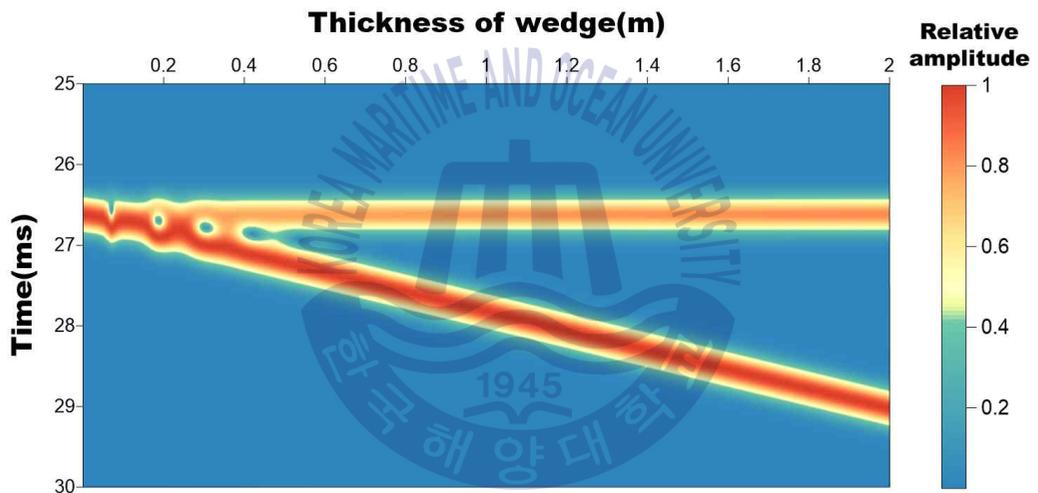
Fig. 10 A schematic of wedge model : (a) P-wave velocity, (b) density

Table 8 Parameters for generating Fig. 11

Parameter	Frequency band	pulse length	Sampling frequency	Weighting factor
Value	2-10 kHz	10 ms	64 kHz	1

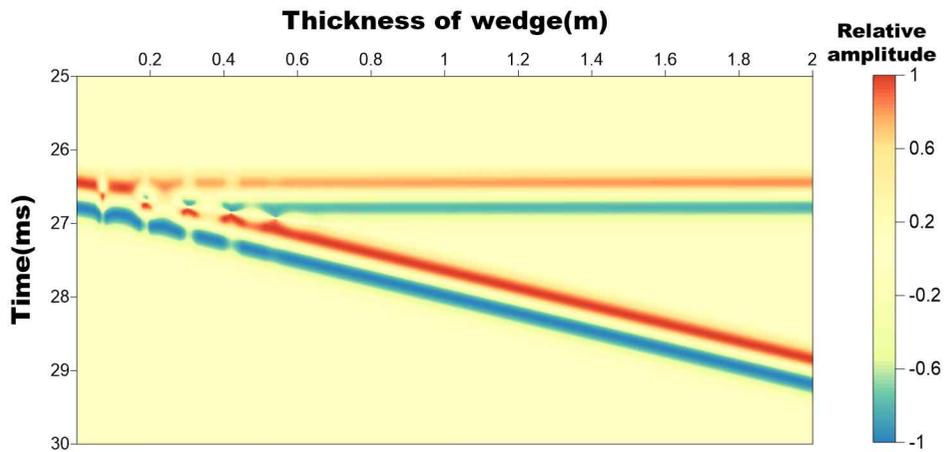


(a)

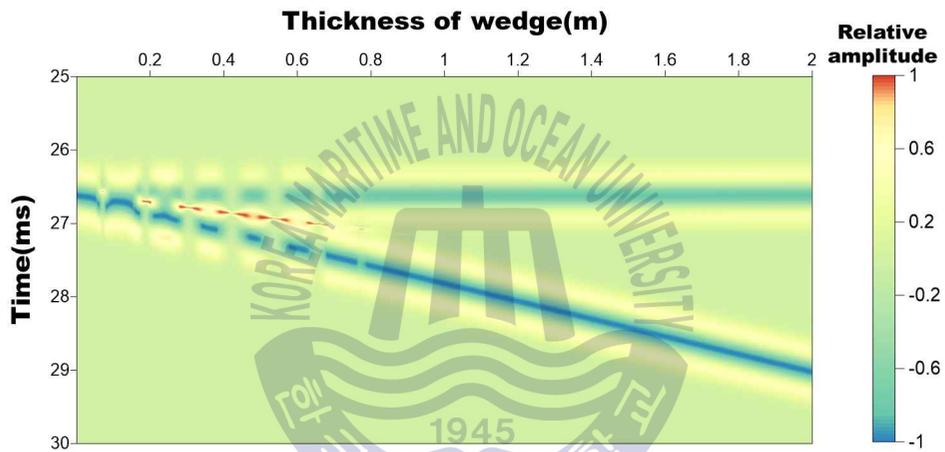


(b)

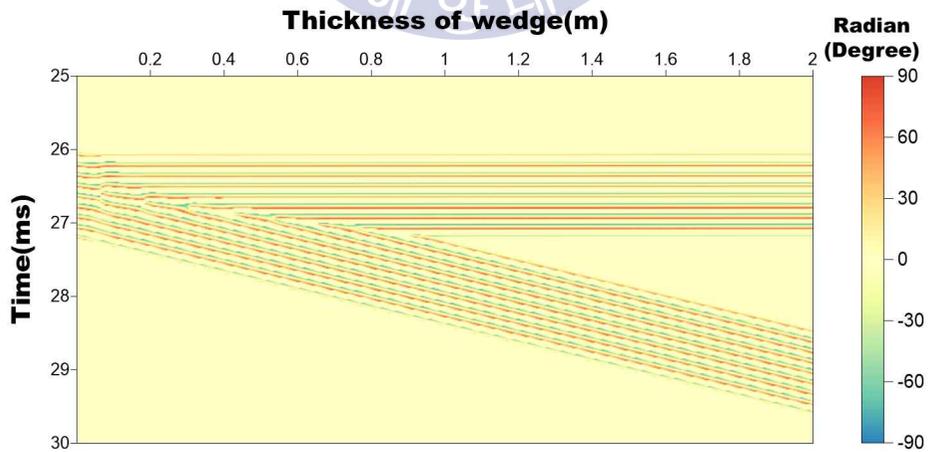
Fig. 11 Results of wedge model for TWT 25 ~ 30 ms : (a) chirp signal response, (b) envelope, (c) envelope derivative, (d) second derivative of envelope, (e) instantaneous phase, (f) instantaneous frequency, (g) instantaneous bandwidth



(c)

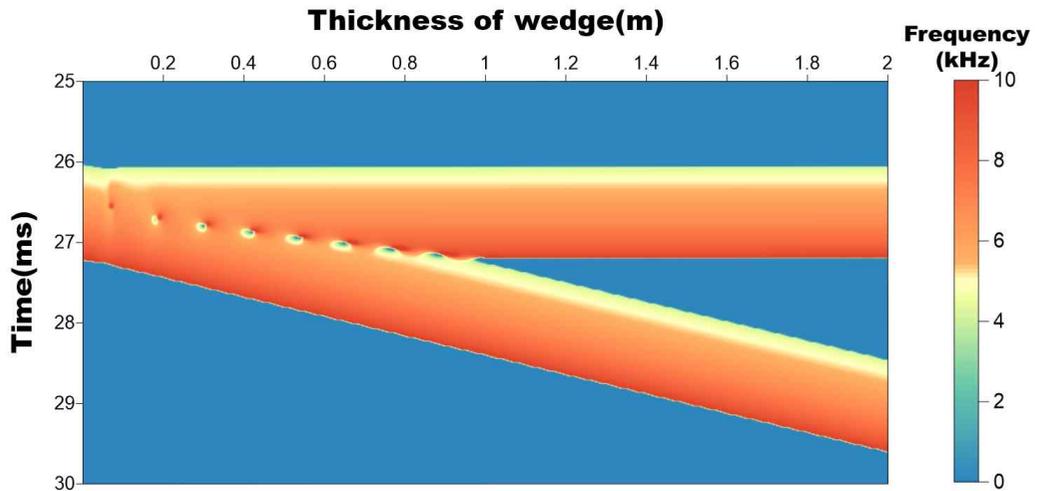


(d)

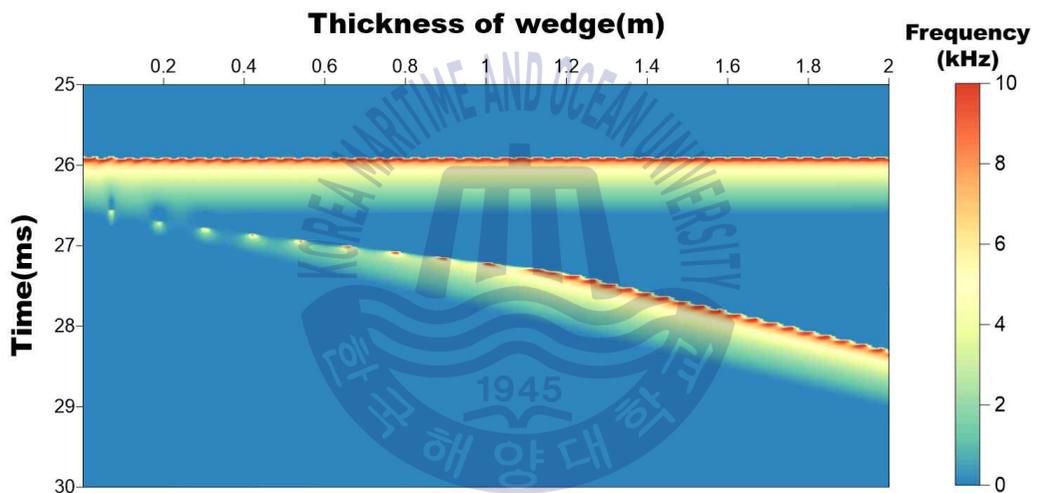


(e)

Fig. 11 Continued.



(f)



(g)

Fig. 11 Continued.

Fig. 11(a)는 썰기 모델에 따른 chirp 반응 신호의 단면도이다. 단면도의 가로 축을 썰기의 위와 아래의 차이인 썰기의 두께로 설정함으로써 썰기의 윗부분을 기준으로 아랫부분이 썰기 두께가 몇 m일 때까지 나타나는지 확인하였다. Fig. 11(a)에서 chirp 반응 신호는 주파수 변조 신호를 사용하기 때문에 일반적인 탄성과 트레이스와의 달리 스윙되어 나타남에 따라서 다양한 크기의 신호가 나타나며 단일 주파수에 의해 나타나는 반사파에 비해 폭이 상대적으로 큰 것을 확인

할 수 있다. 또한, 썰기의 두께가 0.4 m 이상일 때 썰기의 윗부분 및 아랫부분의 신호는 명확히 구분되어 지는 것을 확인할 수 있지만 썰기의 두께가 0.4 m 이하일 때 얇은 층의 튜닝효과에 의해 썰기의 윗부분 및 아랫부분을 구분하지 못하는 것을 확인할 수 있었다.

엔벨로프를 적용한 경우 Fig. 11(b)에서 각 층에 따른 엔벨로프 신호의 최대값을 기준으로 봤을 때 Fig. 11(a)의 chirp 반응 신호와 마찬가지로 썰기의 두께가 0.4 m 이상일 때 썰기의 윗부분 및 아랫부분을 명확히 구분할 수 있는 것을 볼 수 있었다. 하지만 0.2 ~ 0.4 m일 때 얇은 층의 튜닝효과에 의해 간헐적으로 구분되어 지는 것으로 나타났고 0.2 m 이하에서 완전히 구분하지 못하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 chirp 반응 신호에 비해 신호의 폭이 상대적으로 작기 때문에 수직해상도가 보다 좋은 것을 알 수 있고 이로 인해 더 낮은 썰기의 두께에 대해서 확인할 수 있었다.

1차 및 2차 미분 엔벨로프를 적용한 경우 Fig. 11(c), (d)에서 각각 양수로 나타나는 빨간색 신호와 음수로 나타나는 파란색 신호를 기준으로 봤을 때 썰기의 두께가 0.2 m 이상일 때 썰기의 윗부분 및 아랫부분을 명확히 구분할 수 있는 것을 볼 수 있었고 0.2 m 이하에서 완전히 구분하지 못하는 것으로 나타났다.

순간 대역폭을 적용한 경우 Fig. 11(g)에서 음원의 대역폭의 최솟값에서 주로 지층에 따른 신호가 발생하기 때문에 0 ~ 2 kHz에서 나타나는 신호를 기준으로 봤을 때 썰기의 두께가 0.3 m 이상일 때 썰기의 윗부분 및 아랫부분을 명확히 구분할 수 있는 것을 볼 수 있었고 0.2 ~ 0.3 m일 때는 얇은 층의 튜닝효과에 의해 간헐적으로 구분되어 지는 것으로 나타났지만 0.2 m 이하에서 완전히 구분하지 못하는 것을 확인할 수 있었다.

이는 1차 및 2차 미분 엔벨로프와 순간 대역폭의 경우 엔벨로프에 비해 신호의 폭이 크지만 각 층을 나타내는 신호를 한정적으로 봤을 때 수직해상도가 보다 좋거나 비슷한 것을 알 수 있고 이로 인해 더 낮거나 비슷한 썰기의 두께에 대해서 구분할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

순간 위상 및 주파수를 적용한 경우 Fig. 11(e), (f)에서 각각 썰기의 두께가

1.2 m, 0.8 m 이하일 때 얇은 층의 튜닝효과에 의해 썩기의 윗부분 및 아랫부분을 구분하지 못하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 각 층에 대한 신호의 폭이 크기 때문에 수직해상도가 안 좋은 것을 알 수 있고 이로 인해 다른 속성분석 방법에 비해 안 좋은 결과를 나타내는 것을 볼 수 있었다.

### 3.3.2 표층이 조립질 퇴적물로 구성된 수치모델

Chirp SBP를 이용하여 탐사를 수행했을 때 표층에 조립질 퇴적물이 있을 경우 음파의 투과 깊이가 알아지기 때문에 표면 반사파는 뚜렷하지만 하부 반사파는 나타나지 않는다(Chough, et al., 2002; 김한수 등, 2016). 일부 하부 반사파가 확인되기도 하지만 매우 불규칙하여 구별이 쉽지 않다(조민희 등, 2013). 따라서 일반적으로 Chirp SBP에서 사용하는 엔벨로프 신호가 아닌 다른 탄성파 속성분석 방법을 적용해봄으로써 보이지 않는 표층 하부에 대한 퇴적구조를 파악하고자 하였다.

조립질 퇴적물의 경우 굵은 모래(coarse sand)와 얇은 모래(fine sand)를 이용하여 모사하였고 조립질 퇴적물이기 때문에 마찰 손실이 일어났다고 가정함으로써 굵은 모래층과 얇은 모래층에는 마찰 손실 표준편차를 각각 설정하였다. Fig. 12에서 수치모델은 수평 4층으로 설정하였고 각각의 층을 해수, 굵은 모래, 얇은 모래, chalk층으로 모사하였다. 각 층의 물성 값은 기존의 도서 및 논문에서 게재된 값으로 설정하였고 해당 실험에 큰 영향을 미치지 않는 불연속면 층의 두께는 모든 층에 0으로 설정함으로써 배제하였다(Hamilton, 1972; Hughes, et al., 1990; Lurton, 2010; Zhou, et al., 1987).

Fig. 13은 Table 9의 파라미터를 사용했을 때 Chirp SBP 수치모델링 및 탄성파 속성분석 적용 결과이다. Fig. 13(a)는 표층이 조립질 퇴적물로 구성된 수치모델에 따른 chirp 반응 신호이며, Fig. 13(b) ~ (g)는 생성된 chirp 반응 신호에 각각의 탄성파 속성분석 방법을 적용한 결과이다. 그리고 Fig. 13에서 빨간색 실선은 각 층의 깊이와 P파 속도에 따른 양방향 주시를 나타내었다.

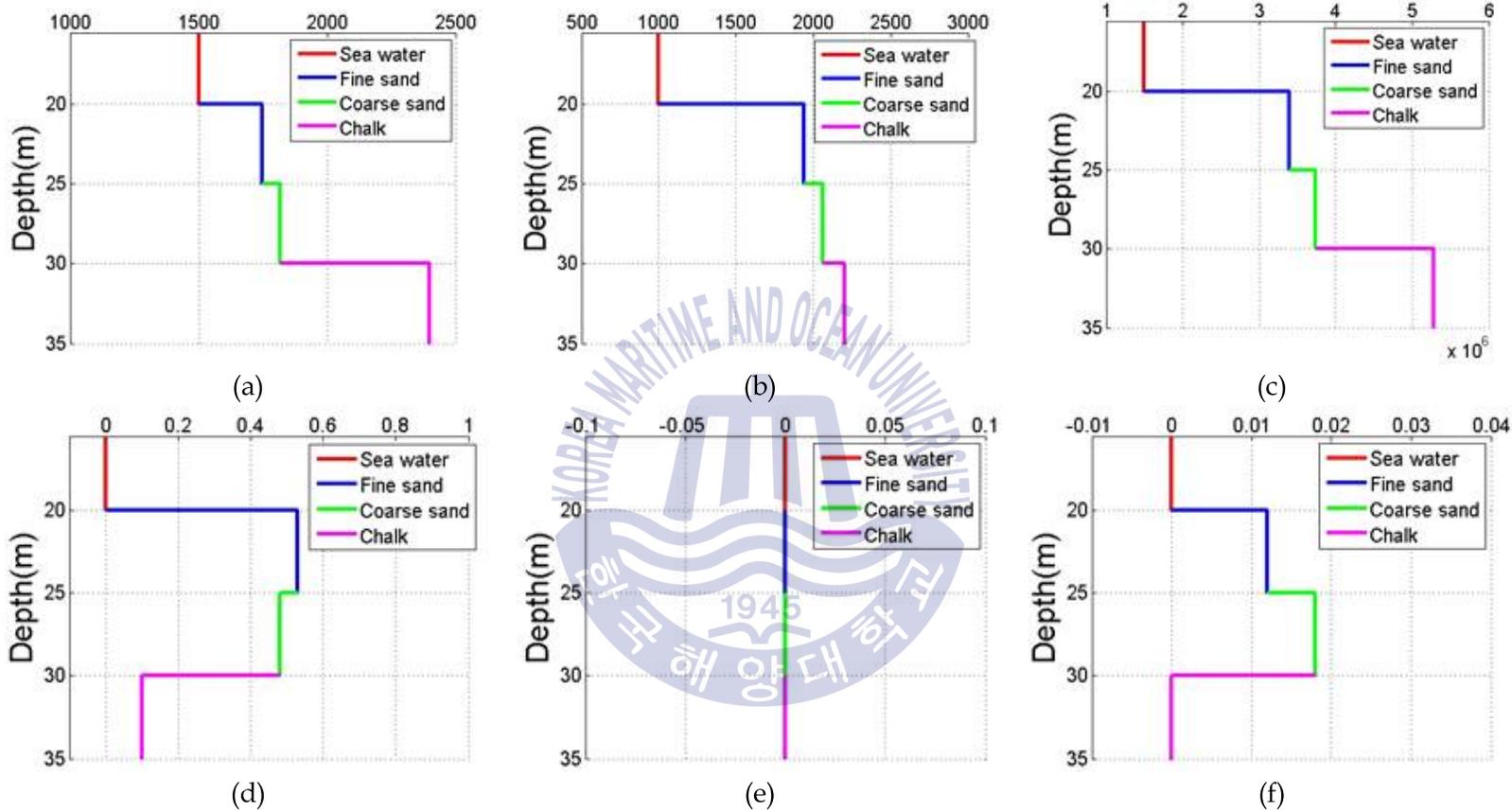


Fig. 12 A schematic of model composed of coarse sediments in the surface layer : (a) P-wave velocity, (b) density, (c) impedance, (d) attenuation coefficient, (e) thickness of transitional layer, (f) roughness standard deviation

Table 9 Parameters for generating Fig. 13

Parameter	Frequency band	pulse length	Sampling frequency	Weighting factor
Value	2-10 kHz	10 ms	70 kHz	1

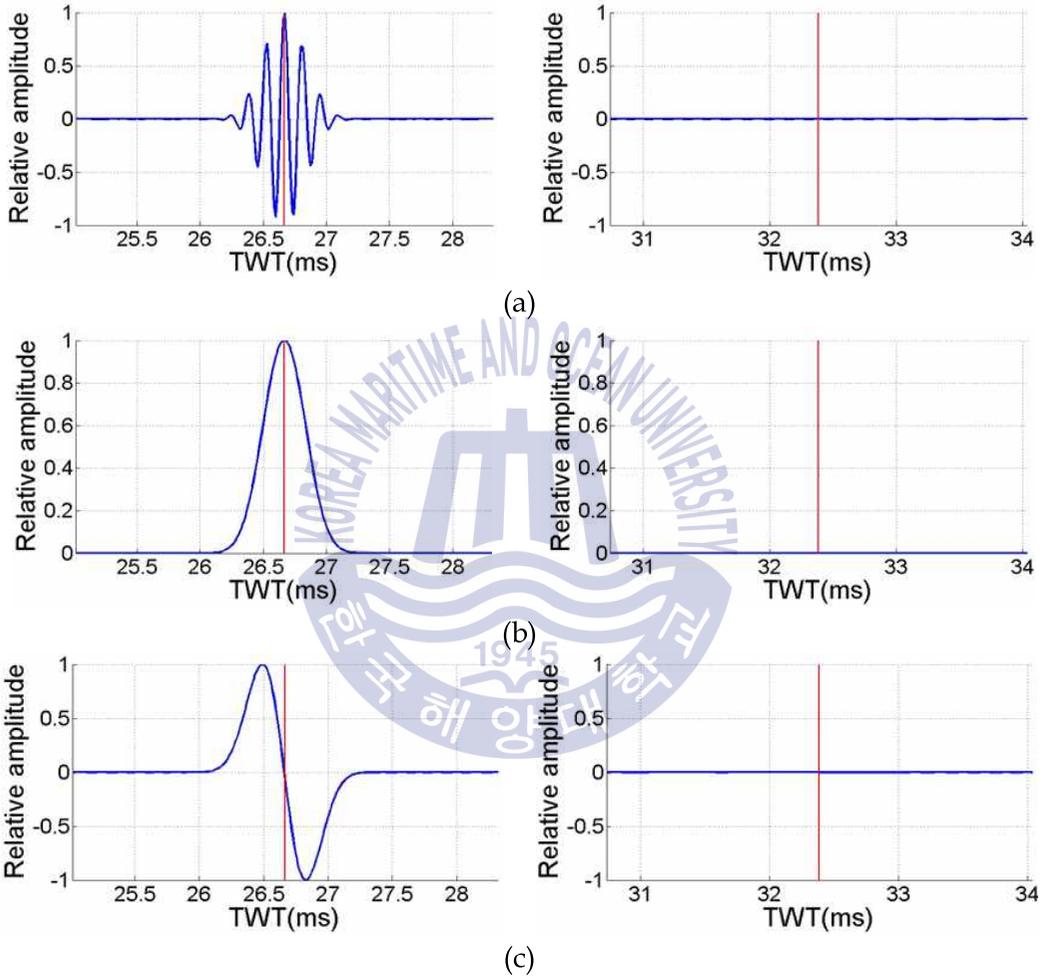
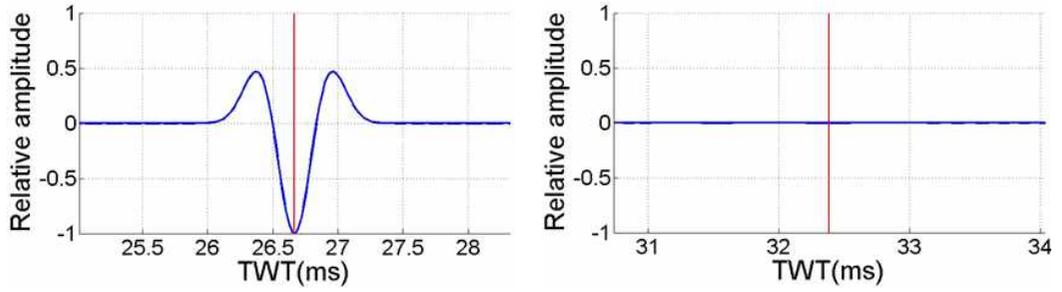
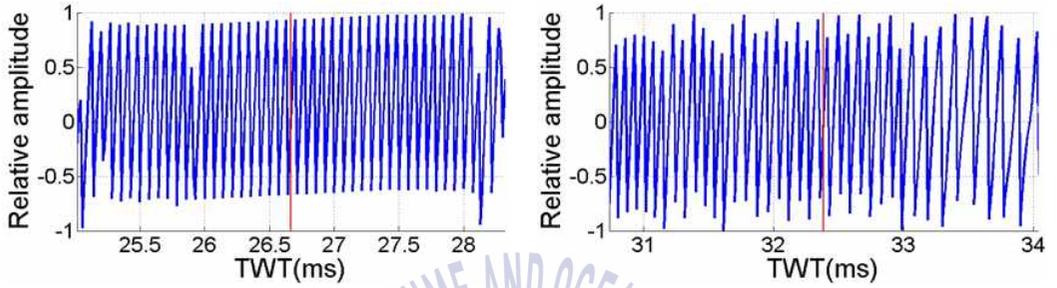


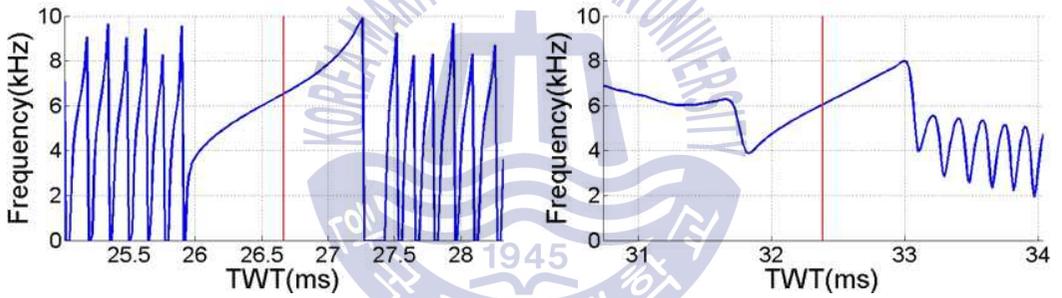
Fig. 13 Results of model composed of coarse sediments in the surface layer for TWT 25 ~ 28.3 ms(left), 30.7 ~ 34 ms(right) : (a) chirp signal response, (b) envelope, (c) envelope derivative, (d) second derivative of envelope, (e) instantaneous phase, (f) instantaneous frequency, (g) instantaneous bandwidth, red line : TWT with geometrical form



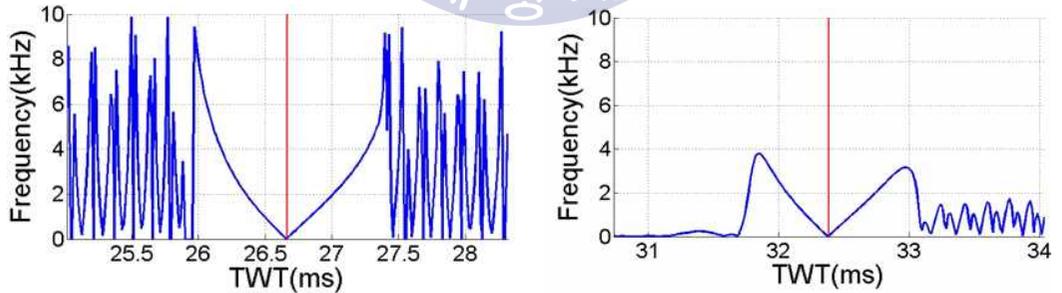
(d)



(e)



(f)



(g)

Fig. 13 Continued.

분석결과, 앞서 언급한대로 Fig. 13(b)의 왼쪽 그림에서 조립질 퇴적물인 얇은 모래층과 굵은 모래층으로 구성된 퇴적층의 1-2층에 해당되는 양방향 주시 25 ~ 28.3 ms의 경우 엔벨로프는 나타났지만 Fig. 13(b)의 오른쪽 그림에서 그 하부인 2-3층에 해당되는 양방향 주시 30.7 ~ 34 ms의 경우 엔벨로프가 나타나지 않는 것을 볼 수 있었다. 또한, Fig. 13(a)의 오른쪽 그림에서 chirp 반응 신호뿐만 아니라 Fig. 13(c), (d)의 오른쪽 그림에서 1차 미분 엔벨로프 그리고 2차 미분 엔벨로프 역시 2-3층의 엔벨로프 신호가 나타나지 않는 것을 볼 수 있었다.

순간 위상을 적용할 경우 Fig. 13(e)의 왼쪽 그림에서 1-2층에 의해 위상변화가 거의 일정한 신호가 나타나는 것을 확인할 수 있었지만 2-3층의 경우 Fig. 13(e)의 오른쪽 그림에서 해당 층의 양방향 주시와 비교했을 때 그 아래의 퇴적층에 대한 위상변화는 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

순간 주파수를 적용한 경우 Fig. 13(f)에서 순간 주파수는 설정된 주파수 변조 펄스의 스위프 형태와 같이 시간이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그리고 Fig. 13(f)의 왼쪽 그림에서 1-2층에 해당하는 순간 주파수는 2 ~ 10 kHz의 주파수 대역을 보이는 반면 Fig. 13(f)의 오른쪽 그림에서 2-3층에 해당하는 순간 주파수는 4 ~ 8 kHz의 주파수 대역을 나타내는 것을 볼 수 있었다. 결국 순간 주파수를 적용했을 때 표층이 조립질 퇴적물일 때 표층 하부의 퇴적층에 대한 정보를 확인할 수 있었고 표층의 경우 고주파수로 나타나지만, 표층의 하부에서는 저주파수로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

순간 대역폭을 적용한 경우 Fig. 13(g)의 왼쪽 그림에서 1-2층에 해당하는 순간 대역폭은 10 kHz 이하의 대역폭으로 나타났지만 Fig. 13(g)의 오른쪽 그림에서 2-3층에 해당하는 순간 대역폭은 4 kHz 이하의 대역폭으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 순간 대역폭은 역시 순간 주파수와 마찬가지로 표층이 조립질 퇴적물일 때 표층 하부의 퇴적층에 대한 정보를 확인할 수 있었고 표층의 경우 고주파수, 그 하부에서는 저주파수로 나타나는 양상을 볼 수 있었다.

### 3.3.3 퇴적층 내에 천부가스 층이 포함된 수치모델

천해지역에서 퇴적물 내의 천부가스는 퇴적물의 물성을 크게 변화시켜 퇴적물의 강도와 음파 속도를 감소시키고 감쇠와 산란을 증가시키는 특징을 가진다 (Anderson & Hampton, 1980; 김대철 등, 2012). 이 때 Chirp SBP를 이용하여 탐사를 할 경우 천부가스 층에 의해 음향이상대가 발생하게 되는데 이로 인해 천부가스 층 아래의 퇴적층 및 기반암에 대한 반사파는 나타나지 않게 된다(오진용 등, 2000). 따라서 일반적으로 Chirp SBP에서 사용하는 엔벨로프 신호가 아닌 다른 속성 분석 방법을 적용해봄으로써 음향이상대에 의해 나타나지 않는 천부가스 층 아래의 퇴적구조를 파악하고자 하였다.

Fig. 14에서 수치모델은 수평 6층으로 설정하였고 각각의 층을 해수, 점토질 실트, 모래-실트-점토, 천부가스, 실트질 모래, chalk층으로 모사하였다. 천부가스 층의 경우 김대철 등(2012)에 나와있는 물성 값을 토대로 설정하였고 나머지 각 층의 물성 값은 기존의 도서 및 논문에 게재된 값으로 설정하였다 (Hamilton, 1972; Hughes, et al., 1990; Lurton, 2010; Zhou, et al., 1987). 해당 실험에 큰 영향을 미치지 않는 불연속면 층 두께와 마찰 손실 표준편차는 0으로 설정함으로써 배제하였다.

Fig. 15는 Table 10의 파라미터를 사용했을 때 Chirp SBP 수치모델링 및 탄성과 속성분석 적용 결과이다. Fig. 15(a)는 Chirp SBP 수치모델링을 통해 취득된 chirp 원시 자료에 정합필터 과정을 거친 후 얻은 chirp 반응 신호이며, Fig. 15(b) ~ (g)는 생성된 chirp 반응 신호에 각각의 탄성과 속성분석 방법을 적용한 결과이다. 그리고 Fig. 15에서 빨간색 실선은 각 층의 깊이와 P파 속도에 따른 양방향 주시를 나타내었다.

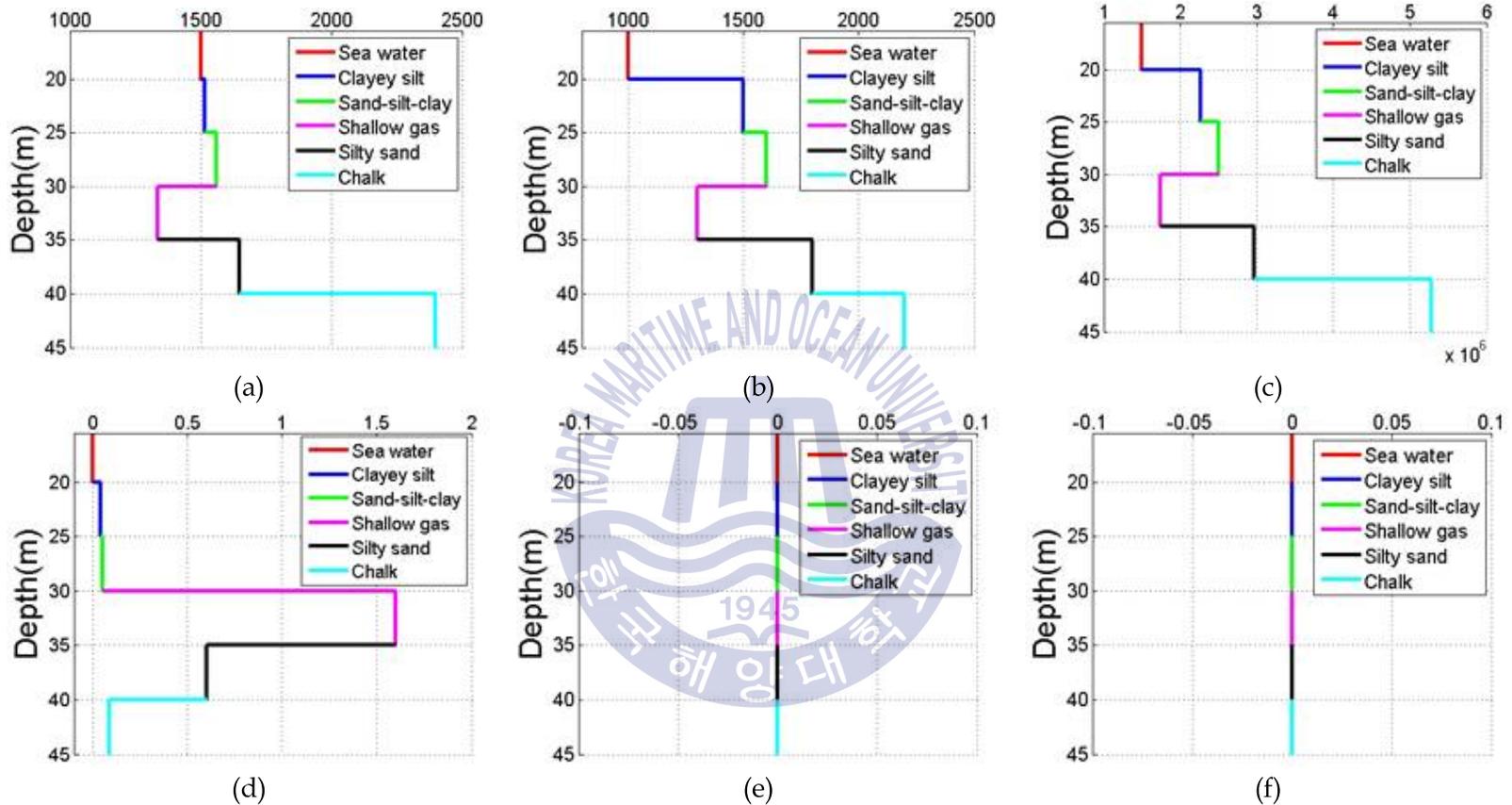


Fig. 14 A schematic of model containing a shallow gas layer in a sedimentary layer : (a) P-wave velocity, (b) density, (c) impedance, (d) attenuation coefficient, (e) thickness of transitional layer, (f) roughness standard derivation

Table 10 Parameters for generating Fig. 15

Parameter	Frequency band	pulse length	Sampling frequency	Weighting factor
Value	2-7 kHz	10 ms	64 kHz	1

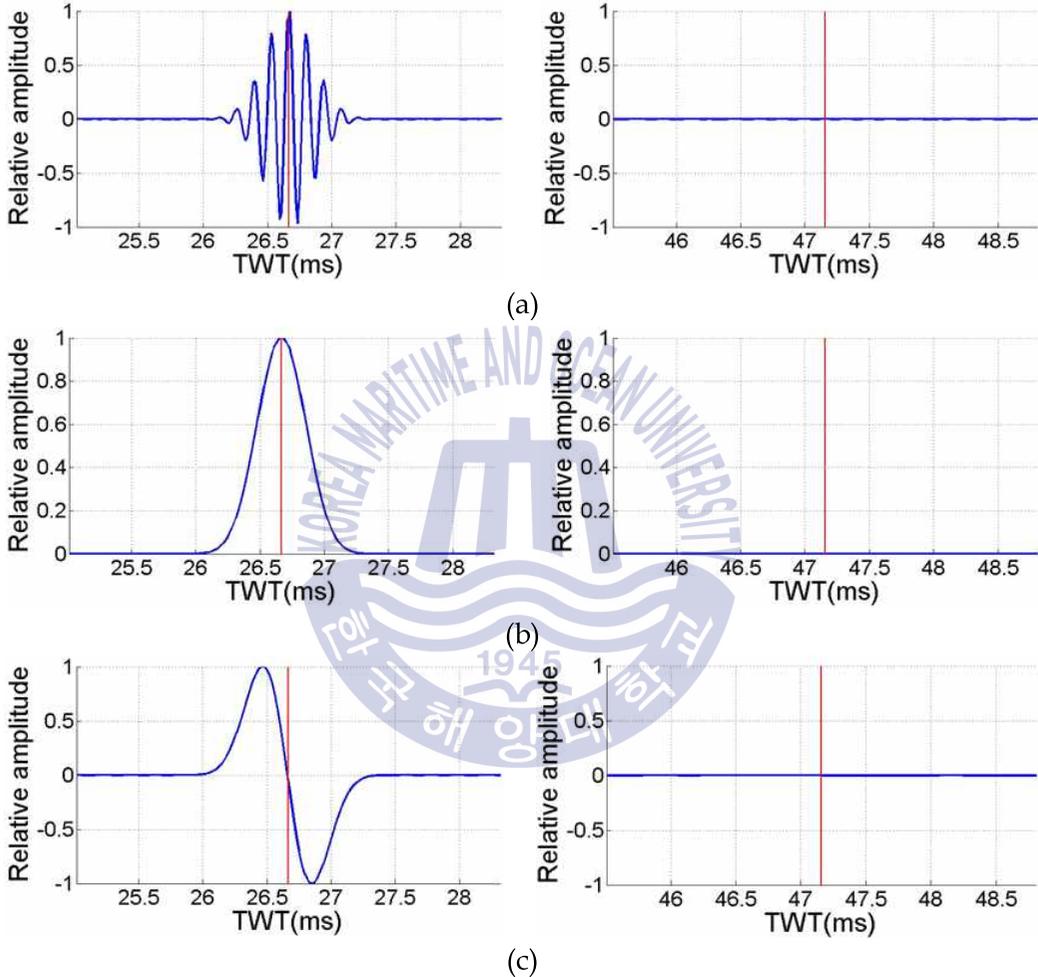
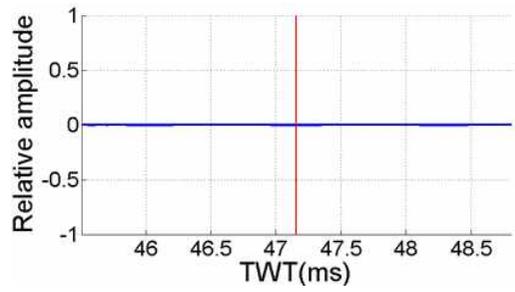
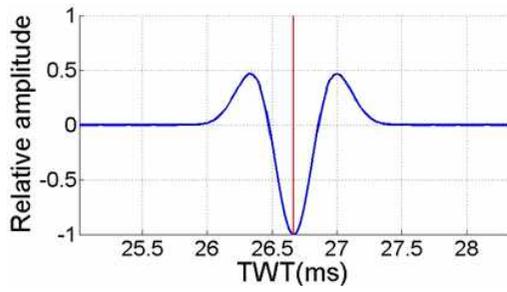
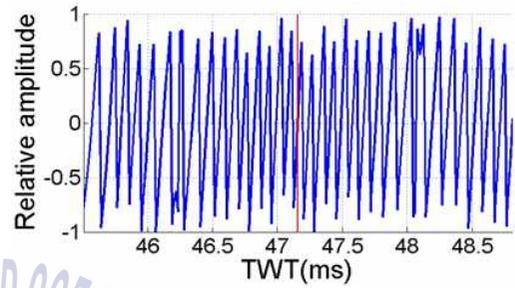
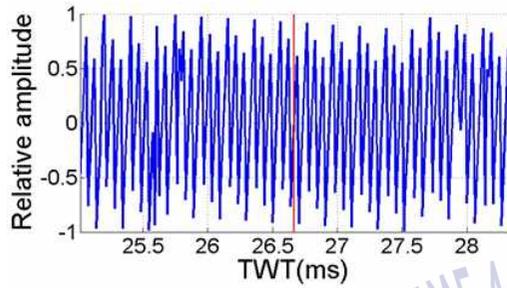


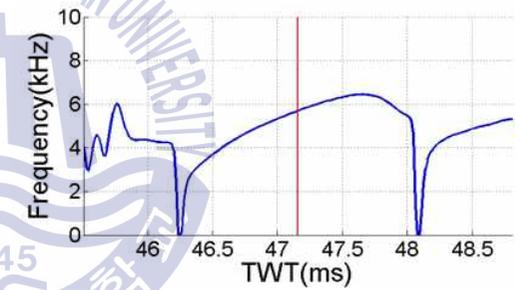
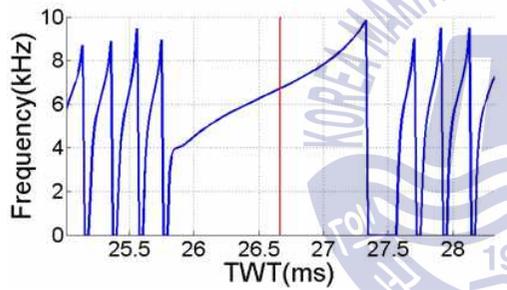
Fig. 15 Results of model containing a shallow gas layer in a sedimentary layer for TWT 25 ~ 28.3 ms(left), 45.5 ~ 48.8 ms(right) : (a) chirp signal response, (b) envelope, (c) envelope derivative, (d) second derivative of envelope, (e) instantaneous phase, (f) instantaneous frequency, (g) instantaneous bandwidth, red line : TWT with geometrical form



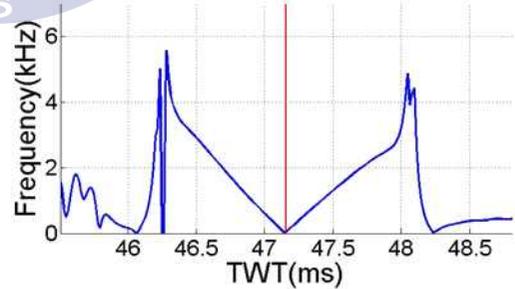
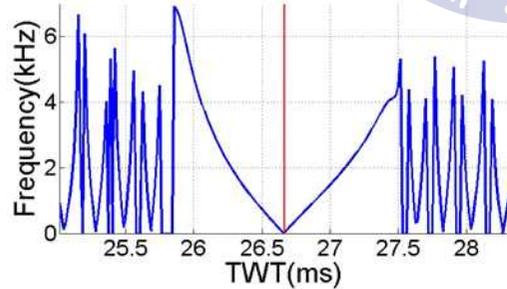
(d)



(e)



(f)



(g)

Fig. 15 Continued.

분석결과, 앞서 언급한대로 Fig. 15(b)의 왼쪽 그림에서 천부가스가 없는 1-2층에 해당되는 양방향 주시 25 ~ 28.3 ms의 경우 엔벨로프는 나타났지만 Fig. 15(b)의 오른쪽 그림에서 천부가스 층의 하부층에 해당되는 양방향 주시 45.5 ~ 48.8 ms인 4-5층의 경우 엔벨로프 신호가 나타나지 않는 것을 볼 수 있었다. 또한, Fig. 15(a)의 오른쪽 그림에서 chirp 반응 신호뿐만 아니라 Fig. 15(c), (d)의 오른쪽 그림에서 1차 미분 엔벨로프 그리고 2차 미분 엔벨로프 역시 4-5층의 경우 엔벨로프 신호가 나타나지 않는 음향공백대에서 신호가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

순간 위상을 적용할 경우 Fig. 15(e)의 왼쪽 그림에서 1-2층에 해당되는 주시의 약  $\pm 0.5$  ms 구간에서 위상변화가 높은 곳에서 낮은 곳으로 변화하는 신호가 연속적으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 반면, Fig. 15(e)의 오른쪽 그림에서 4-5층에 해당되는 주시의 약  $\pm 0.1$  ms 구간에서 위상변화가 높은 곳에서 낮은 곳으로 변화하는 신호가 일부 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 순간 위상을 적용할 경우 천부가스 층 하부의 퇴적층에 대한 정보를 확인할 수 있었다.

순간 주파수를 적용한 경우 Fig. 15(f)에서 순간 주파수는 설정된 주파수 변조 펄스의 스위프 형태와 같이 시간이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그리고 Fig. 15(f)의 왼쪽 그림에서 1-2층에 해당하는 순간 주파수는 4 ~ 10 kHz의 주파수 대역을 보이는 반면 Fig. 15(f)의 오른쪽 그림에서 4-5층에 해당하는 순간 주파수는 3 ~ 7 kHz의 주파수 대역을 나타내는 것을 볼 수 있었다. 결국 순간 주파수를 적용했을 때 천부가스 층 하부의 퇴적층에 대한 정보를 확인할 수 있었고 천부가스가 없는 퇴적층일 때는 고주파수로 나타나지만, 천부가스 층의 하부층에서는 저주파수로 나타나는 것을 볼 수 있었다.

순간 대역폭을 적용한 경우 Fig. 15(g)의 왼쪽 그림에서 1-2층에 해당하는 순간 대역폭은 7 kHz 이하의 대역폭으로 나타났지만 Fig. 15(g)의 오른쪽 그림에서 2-3층에 해당하는 순간 대역폭은 5 kHz 이하의 대역폭으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 순간 대역폭 역시 순간 주파수와 마찬가지로 천부가스 층 하부의 퇴적층에 대한 정보를 확인할 수 있었고 천부가스가 없는 퇴적층일 때는 고주파수, 천부가스 층의 하부층에서는 저주파수로 나타나는 양상을

볼 수 있었다.

### 3.3.4 퇴적층 내에 불연속면 층이 포함된 수치모델

불연속면 층은 해저에서 퇴적층의 침식 및 생물작용에 의해 발견할 수 있고 이에 따라 생물교란, 숨은 층 등이 생기게 된다. 해저 퇴적층 사이에 불연속면 층이 존재할 경우 불연속면 층에서 퇴적물의 물성이 연속적으로 변하기 때문에 음향의 전파에 영향을 미치게 된다(Schock & LeBlanc., 1990; Rakotonarivo, et al., 2008). 그리고 2.2.3절에서 언급했듯이 파장을 기준으로 불연속면 층의 두께에 따라 반사되는 신호에 영향을 미치게 된다(Ainslie, 2005). 따라서 해저 퇴적층 사이에 불연속면 층이 존재할 때 불연속면 층의 두께에 따른 chirp 반응 신호를 분석하였다.

Fig. 16에서 수치모델은 수평 5층으로 설정하였고 각각의 층을 해수, 점토질 실트, 실트질 모래, 굵은 모래, chalk층으로 모사하였다. 불연속면 층의 경우 세 번째 퇴적층인 실트질 모래층에 설정하였고 불연속면 층의 두께를 최소주파수에 따른 파장(0.825m), 최대 주파수에 따른 파장(0.165m), 해저 퇴적층의 두께(2m)로 설정함으로써 이 때 취득되는 엔벨로프 신호를 비교하였다. 각 층의 물성 값은 기존의 도서 및 논문에 게재된 값으로 설정하였고 해당 실험에 큰 영향을 미치지 않는 유효감쇠계수와 마찰 손실 표준편차는 0으로 설정함으로써 배제하였다(Hughes, et al., 1990; Lurton, 2010; Zhou, et al., 1987).

Fig. 17은 Table 11의 파라미터를 사용했을 때 Chirp SBP 수치모델링을 통해 취득된 엔벨로프 신호를 비교한 결과이다. 그리고 Fig. 17에서 검은색 실선은 각 층의 깊이와 P파 속도에 따른 양방향 주시를 나타내었다.

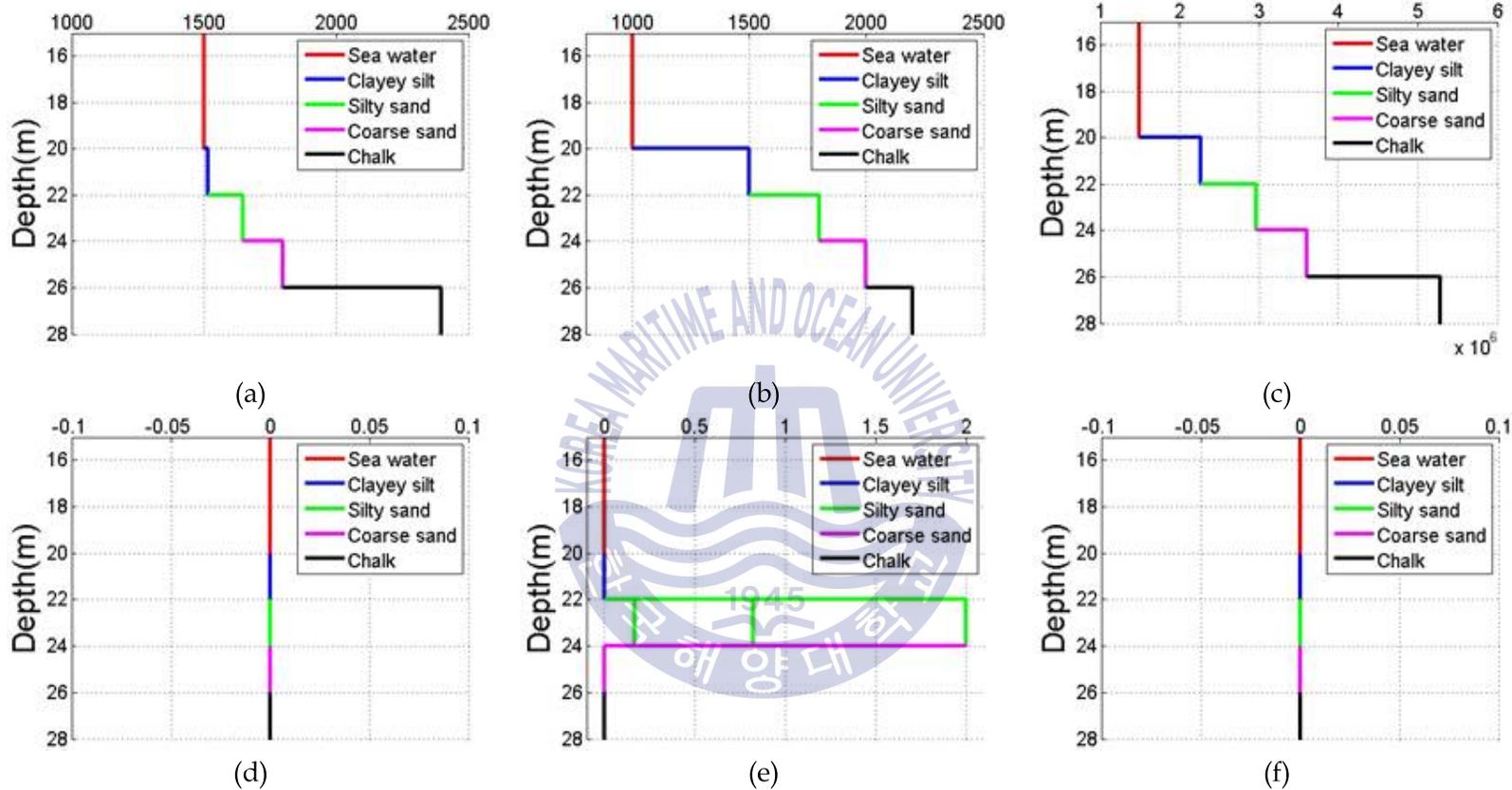


Fig. 16 A schematic of model containing a transitional layer in a sedimentary layer : (a) P-wave velocity, (b) density, (c) impedance, (d) attenuation coefficient, (e) thickness of transitional layer, (f) roughness standard deviation

Table 11 Parameters for generating Fig. 17, 18

Parameter	Frequency band	pulse length	Sampling frequency	Weighting factor
Value	2-10 kHz	10 ms	70 kHz	1

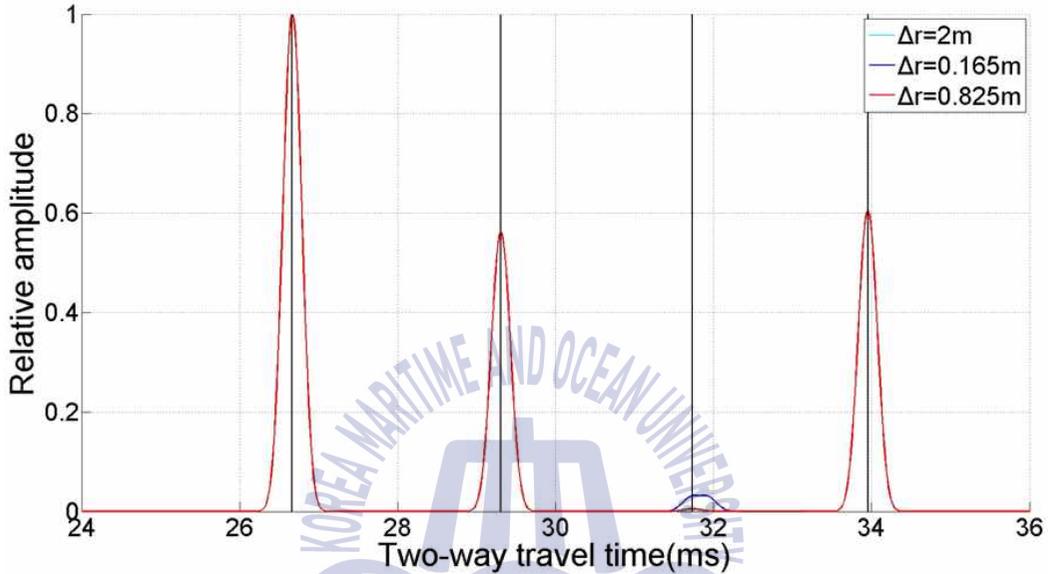
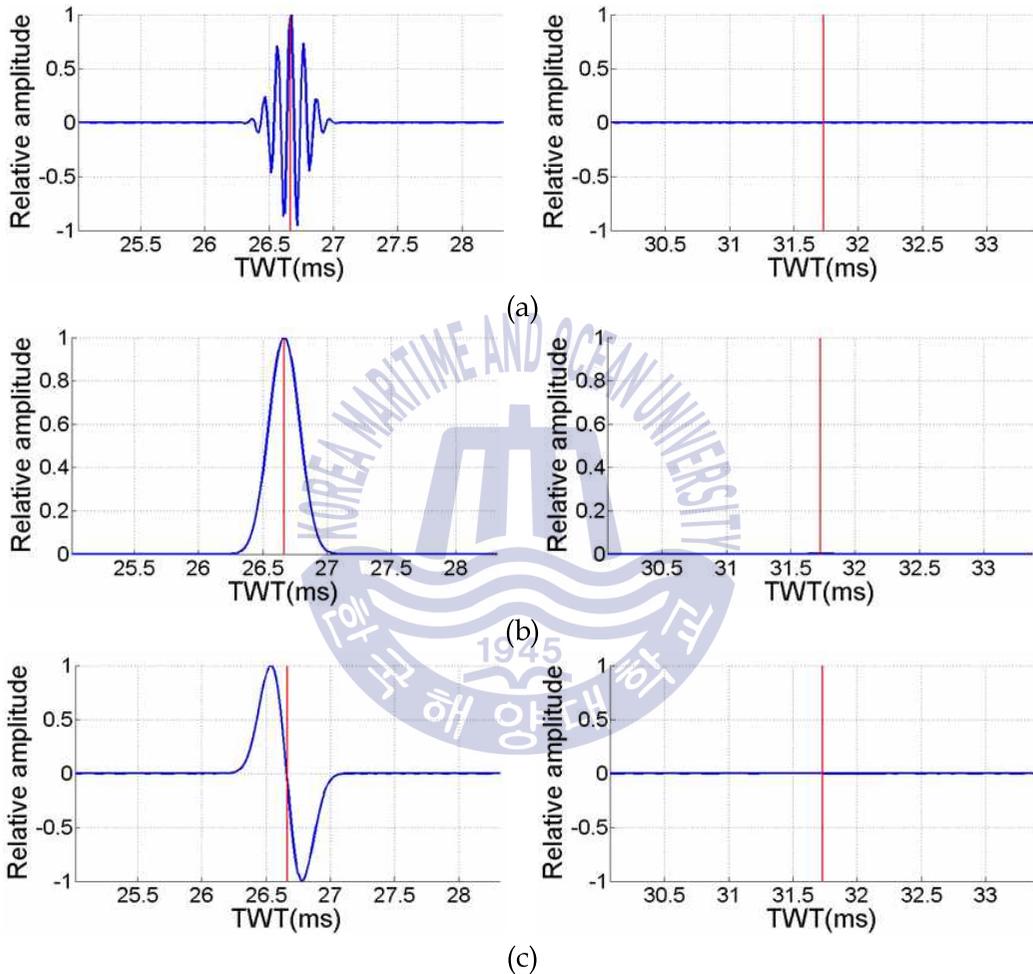


Fig. 17 Envelope of chirp signal response with thickness of a transitional layer for model containing a transitional layer in a sedimentary layer

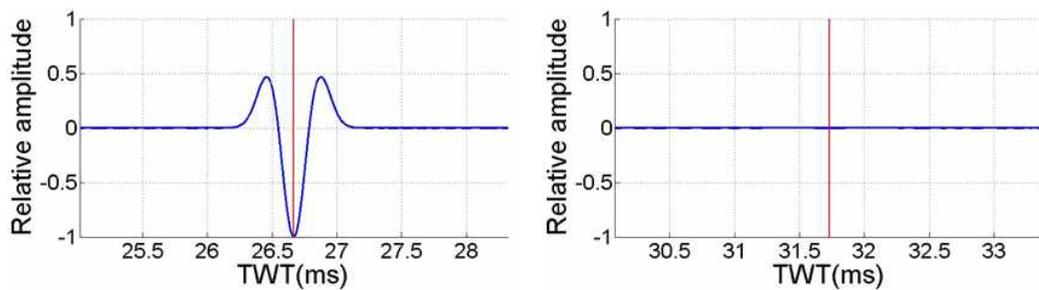
분석 결과, Fig. 17에서 불연속면 층의 영향으로 해당 층인 3-4층의 경우 엔벨로프 신호가 다른 퇴적층에서 취득된 엔벨로프 신호에 비해 매우 작은 것을 볼 수 있었다. 그리고 3-4층에 의해서 취득된 엔벨로프 신호를 불연속면 층의 두께에 따라 비교를 해보면 불연속면 층의 두께가 클수록 해당 퇴적층에서 취득된 엔벨로프 신호는 작아지는 것을 볼 수 있었고 특히, 불연속면 층의 두께가 2m일 때는 신호가 나타나지 않는 것을 볼 수 있었다. 따라서 불연속면 층의 두께가 2m일 때 해당 층에서 반사된 엔벨로프 신호가 나타나지 않으므로 탄성파 속성분석을 적용함으로써 불연속면 층의 영향을 파악할 수 있는지 분석해보았다.

Fig. 18(a)는 불연속면 층의 두께가 2m일 때 Chirp SBP 수치모델링을 통해 취

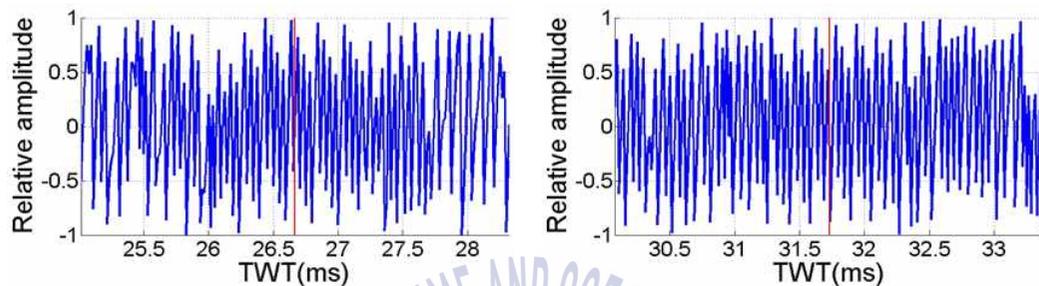
득된 chirp 원시 자료에 정합필터 과정을 거친 후 얻은 chirp 반응 신호이며, Fig. 18(b) ~ (g)는 생성된 chirp 반응 신호에 각각의 탄성과 속성분석 방법을 적용한 결과이다. 그리고 Fig. 18에서 빨간색 실선은 각 층의 깊이와 P파 속도에 따른 양방향 주시를 나타내었다.



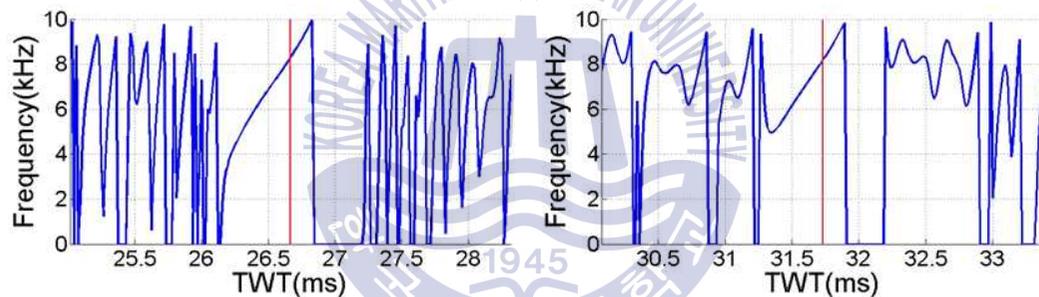
**Fig. 18** Results of model containing a transitional layer( $\Delta r=2m$ ) in a sedimentary layer for TWT 25 ~ 28.3 ms(left), 30.1 ~ 33.4 ms(right) : (a) chirp signal response, (b) envelope, (c) envelope derivative, (d) second derivative of envelope, (e) instantaneous phase, (f) instantaneous frequency, (g) instantaneous bandwidth, red line : TWT with geometrical form



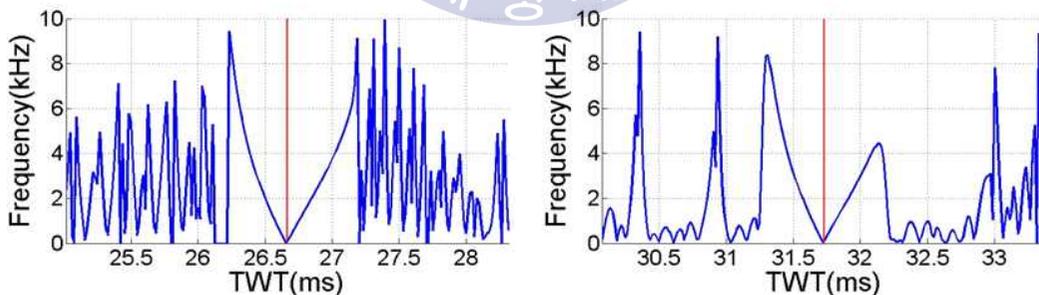
(d)



(e)



(f)



(g)

Fig. 18 Continued.

분석결과, 앞서 언급한대로 Fig. 18(b)의 왼쪽 그림에서 불연속면 층이 아닌 1-2층에 해당되는 양방향 주시 25 ~ 28.3 ms의 경우 엔벨로프는 나타났지만 Fig. 18(b)의 오른쪽 그림에서 두께가 2m인 불연속면 층에 해당되는 양방향 주시 30.1 ~ 33.4 ms인 3-4층의 경우 엔벨로프 신호가 나타나지 않는 것을 볼 수 있었다. 또한, Fig. 18(a)의 오른쪽 그림에서 chirp 반응 신호뿐만 아니라 Fig. 18(c), (d)의 오른쪽 그림에서 1차 미분 엔벨로프 그리고 2차 미분 엔벨로프 역시 3-4층의 경우 엔벨로프 신호가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

순간 위상을 적용할 경우 Fig. 18(e)의 왼쪽 그림에서 1-2층에 해당되는 주시의 약  $\pm 0.6$  ms 구간에서 위상변화가 높은 곳에서 낮은 곳으로 변화하는 신호가 연속적으로 나타나는 것을 확인할 수 있었고 Fig. 18(e)의 오른쪽 그림에서 역시 마찬가지로 3-4층에 해당되는 주시의 약  $\pm 0.5$  ms 구간에서 위상변화가 높은 곳에서 낮은 곳으로 변화하는 신호가 연속적으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 순간 위상을 적용할 경우 불연속면 층의 두께가 2m일 때의 정보를 확인할 수 있었다.

순간 주파수를 적용한 경우 Fig. 18(f)에서 순간 주파수는 설정된 주파수 변조 펄스의 스위프 형태와 같이 시간이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그리고 Fig. 18(f)의 왼쪽 그림에서 1-2층에 해당하는 순간 주파수는 2 ~ 10 kHz의 주파수 대역을 보이는 반면 Fig. 18(f)의 오른쪽 그림에서 3-4층에 해당하는 순간 주파수는 5 ~ 10 kHz의 주파수 대역을 나타내는 것을 볼 수 있었다. 결국 순간 주파수를 적용했을 때 불연속면 층의 두께가 2m일 때 해당 층에 대한 정보를 확인할 수 있었고 불연속면 층이 없는 퇴적층일 때는 고주파수로 나타나지만, 불연속면 층의 두께가 2m일 때는 저주파수로 나타나는 것을 볼 수 있었다.

순간 대역폭을 적용한 경우 Fig. 18(g)의 왼쪽 그림에서 1-2층에 해당하는 순간 대역폭은 10 kHz 이하의 대역폭으로 나타났지만 Fig. 18(g)의 오른쪽 그림에서 3-4층에 해당하는 순간 대역폭은 8 kHz 이하의 대역폭으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 순간 대역폭 역시 순간 주파수와 마찬가지로 불연속면 층의 두께가 2m일 때 해당 층에 대한 정보를 확인할 수 있었고 불연속면 층이 없을 때는 고주파수, 불연속면 층의 두께가 2m일 때는 저주파수로 나타나

는 양상을 볼 수 있었다.



## 제 4 장 Chirp SBP 현장자료의 속성분석에 따른 천부 퇴적구조 분석

### 4.1 Chirp SBP 현장자료 취득 및 처리

본 연구에서는 현장에서 취득된 Chirp SBP 탐사자료에 3.1절에서 언급한 탄성과 속성분석 방법들을 적용하였다.

현장자료취득이 이루어진 지역은 한반도 서남해 연안의 흑산 머드벨트 부근이며 해상에서 북서-남동 방향으로 Chirp SBP 탐사를 수행함으로써 취득한 탐사 자료이다. 그리고 취득한 자료는 Fig. 19와 같이 정합필터 과정, 디콘볼루션(deconvolution) 등의 자료처리 기법을 이용하여 최종 Chirp 자료를 얻었고 이를 탄성과 속성분석 방법들을 적용시켰다.

탄성과 기록은 지층의 반사계수함수와 파형요소(wavelet)의 콘볼루션으로 생각할 수 있다. 따라서 파형요소와 잡음의 특성을 알 수 있다면 디콘볼루션에 의하여 원하는 반사함수를 구할 수 있다. 이러한 디콘볼루션은 탄성과 기록의 파형요소를 압축시켜 떨림 효과를 감소시킬 수 있으며, 다중반사파를 제거할 수 있다.

디콘볼루션에는 탄성과의 주기적인 특성을 이용하는 예측 디콘볼루션(predictive deconvolution)과 파형요소를 직접 이용한 역필터(inverse filter)를 설계하여 적용하는 결정론적 디콘볼루션(deterministic deconvolution)가 있다.(Yilmaz, 2001).

본 연구에서는 울림현상을 감소시키기 위해 앞서 윈도우 함수 중 가장 좋다고 판단한 Blackman-Harris 윈도우를 적용한 주파수 변조 펄스의 자기 상관 자료를 이용하여 역필터를 설계하였다.

탐사 파라미터는 Table 12와 같이 기록시간 150 ms, 시간간격은 0.013 ms이고 주파수 대역은 2 ~ 7 kHz, 펄스 길이는 10ms, 발파 간격은 1 s로 설정하였다. 취득한 chirp 원시 자료는 Fig. 20(a)과 같으며, 자료처리 후 Fig. 20(b)와 같은 탄성과 자료를 얻었다.

Chirp 원시 자료는 실제 현장에서의 장비 및 파도 등 자료취득 과정에 포함된 잡음으로 인해 Fig. 20(a)에서 볼 수 있듯이 해저면 반사이벤트의 엔벨로프 시작지점, 형태, 크기 및 중심 등의 변화가 심하여 주시 발체가 용이하지 못한 것을 알 수 있다. 반면에 취득된 chirp 원시 자료에 정합필터 과정 및 역필터 등의 자료처리를 수행한 Fig. 20(b)의 최종 chirp 자료의 경우 해저면 및 기반암에 대한 반사이벤트가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고 탐사 수심은 약 55 m로서 단면에서 나타나는 바와 같이 북서쪽으로 갈수록 완만하게 수심이 깊어지는 경사를 가지고 있다. 그리고 100 ~ 110 ms 이후부터는 기반암에 의해 더 이상 신호가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 최종 Chirp 자료인 Fig. 20(b)에 일반적으로 사용되는 엔벨로프 신호뿐만 아니라 1차 및 2차 미분 엔벨로프, 순간 위상, 순간 주파수, 순간 대역폭 등을 적용하였다. 이를 통해 물성변화에 따른 다양한 지질정보를 포함하고 있는 현장자료에 다양한 탄성과 속성분석 방법들을 적용함으로써 에너지 흡수율 영향을 받는 지역에서의 물리적인 정보나 탄화수소-물 경계면, 해저 퇴적층의 두께, 미고결 모래층, 층의 급격한 변화 등에 대해 보다 정밀 분석을 하였다.

**Table 12** Chirp SBP survey parameter

Parameter	Value
Frequency band	2-10 kHz
Number of sample	15386
Sampling interval	0.013 ms
Pulse length	10 ms
Shot interval	1 s

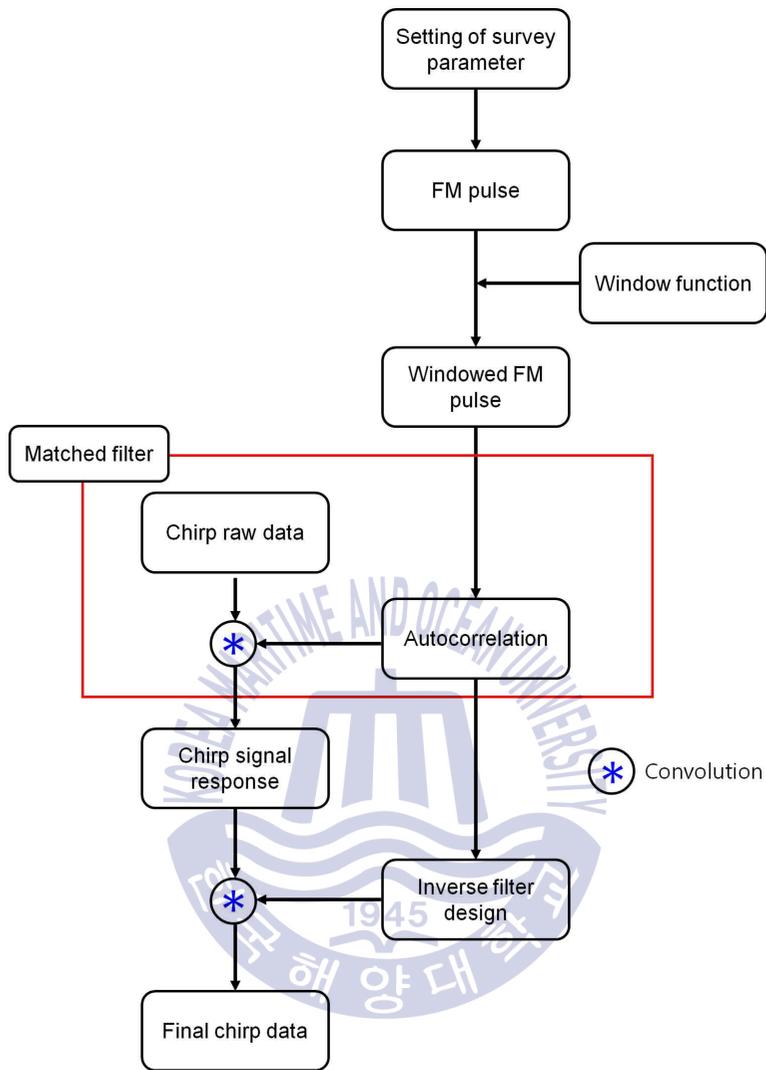
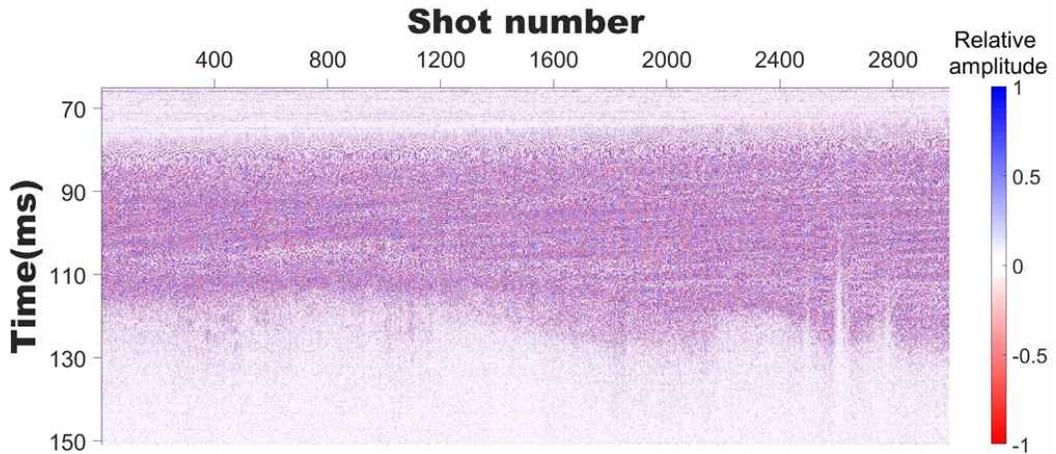
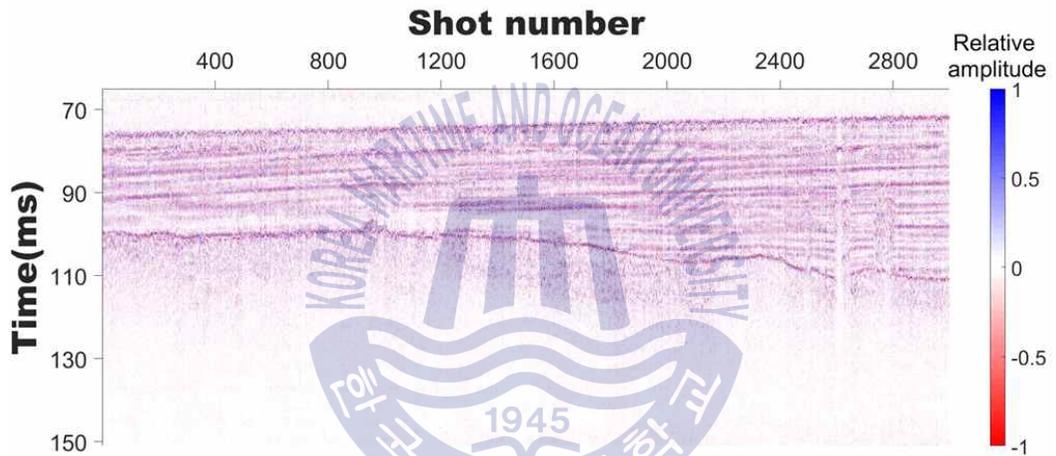


Fig. 19 Flowchart of data processing using Chirp SBP field data



(a)

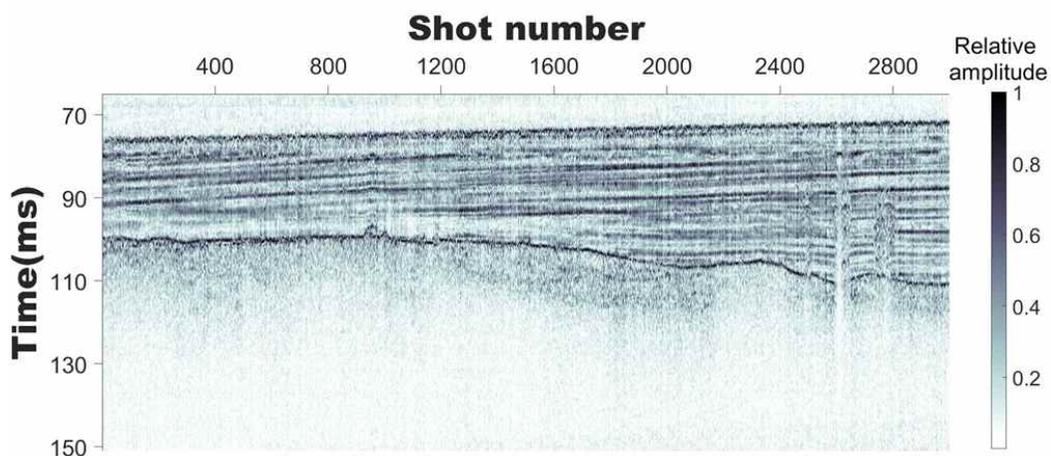


(b)

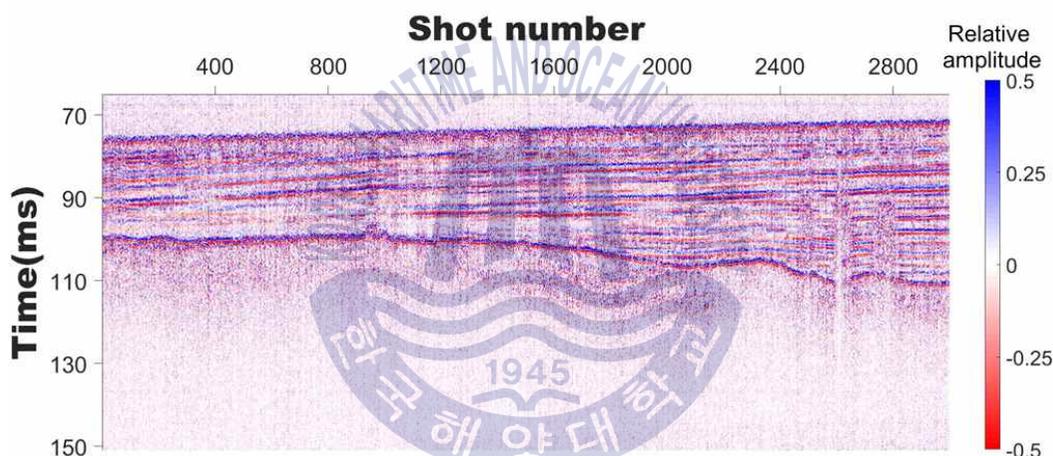
Fig. 20 (a) Chirp raw data, (b) Final chirp data

## 4.2 속성분석 적용 결과

현장에서 취득된 Chirp SBP 탐사자료에 대해 다양한 퇴적환경에 따라 보다 정확한 천부 퇴적구조를 분석하기 위해 3.1절에서 언급한 1차 미분 및 2차 미분 엔벨로프, 순간 위상, 순간 주파수, 순간 대역폭 등의 탄성과 속성분석 방법을 적용하였다. Fig. 21(a) ~ (f)는 앞서 자료처리를 수행한 최종 chirp 자료인 Fig. 20(b)에 각각의 탄성과 속성분석 방법을 적용한 결과이다.



(a)



(b)

**Fig. 21** Attribute results of Final chirp data: (a) envelope, (b) envelope derivative, (c) second derivative of envelope, (d) instantaneous phase, (e) instantaneous frequency, (f) instantaneous bandwidth

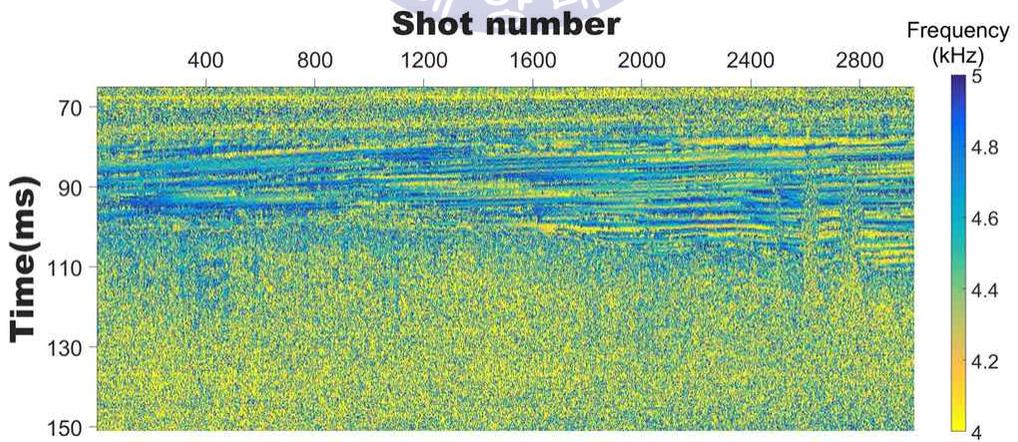
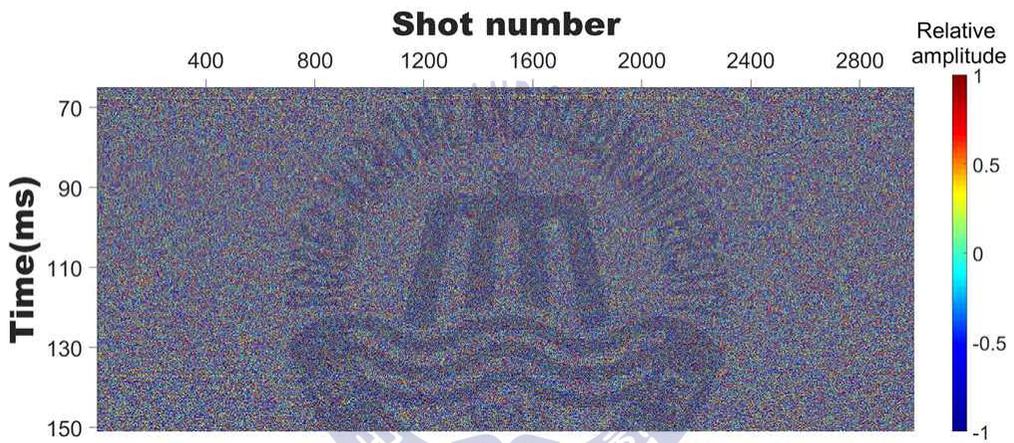
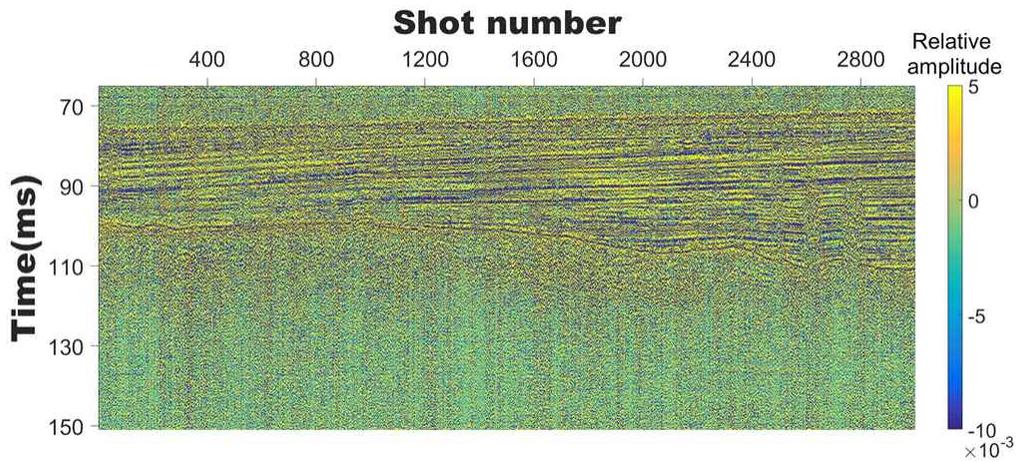


Fig. 21 Continued.

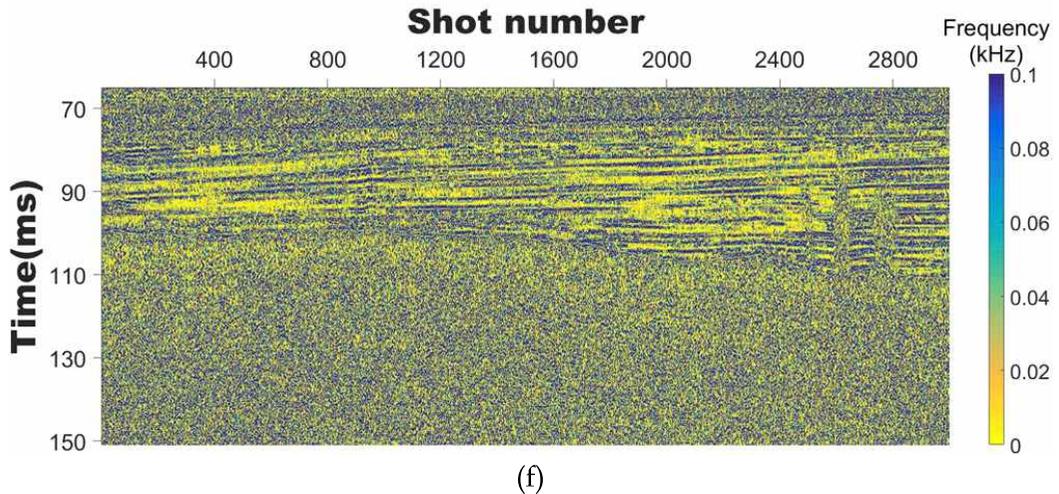


Fig. 21 Continued.

분석결과, 엔벨로프의 경우 Fig. 21(a)에서 75 ms 부근의 해저면과 100 ~ 110 ms 부근의 기반암에 의한 강한 진폭이 나타나는 것을 볼 수 있었다. 그리고 해저면과 기반암 사이의 지역에서는 다수의 반사 이벤트가 나타나는 것을 확인할 수 있고 해저면 및 기반암에 의해 나타난 강한 진폭에 비해서 상대적으로 약한 진폭을 확인할 수 있다.

1차 미분 및 2차 미분 엔벨로프를 적용한 경우 Fig. 21(b), (c)에서 엔벨로프와 마찬가지로 해저면 및 기반암에 의한 반사 이벤트가 명확히 나타나는 것을 볼 수 있었다. 1차 미분 엔벨로프의 경우 Fig. 21(a)의 엔벨로프에 비해 해저면 및 기반암 사이의 지역에서 상대적으로 다수의 이벤트가 명확히 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

순간 주파수는 사용된 음원의 주파수 대역에서 중심 주파수 부근에 지층에 대한 이벤트가 나타나기 때문에 Fig. 21(e)와 같이 4 ~ 5 kHz의 주파수 대역으로 제한하여 분석하였다. Fig. 21(e)에서 해저면 및 기반암 하부에서 4 kHz 이하의 주파수 대역으로 분포하는 것으로 나타났고 해저면과 기반암 사이의 지역에서는 4 ~ 5 kHz의 주파수 대역으로 주파수가 급격하게 변하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 해저면 및 기반암 사이의 지역의 경우 물성의 급격한 변화가 일어나는 것으로 사료되며 대부분 미고결 퇴적층으로 이루어졌을 것으로 판단

된다.

순간 대역폭은 사용된 음원의 주파수 대역에서 저 주파수 부근에 지층에 대한 이벤트가 나타나기 때문에 Fig. 21(f)와 같이 0 ~ 0.1 kHz의 주파수 대역으로 제한하여 분석하였다. Fig. 21(f)에서 해저면 및 기반암에 의한 반사 이벤트가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 도출된 순간 대역폭의 값이 작은 것으로 보아 상대적인 진폭의 변화율 역시 작은 것을 알 수 있고 해저면 및 기반암 사이의 지역에서 다양한 암질이 나타나는 것으로 판단된다.

순간 위상을 적용한 경우 음향공백대뿐만 아니라 다른 지층에서도 반사된 신호를 거의 관찰할 수 없었다.



## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 세 개의 수치모델에 대해 Chirp SBP 수치모델링을 통해 얻은 chirp 반응 신호에 다양한 탄성과 속성분석 방법을 적용하고 그 값을 도출함으로써 천부 퇴적구조를 분석하였다. 그리고 현장에서 취득된 chirp 원시 자료에 자료처리 기법을 이용하여 얻은 최종 chirp 자료를 얻었고 이를 탄성과 속성분석 방법을 이용함으로써 천부 퇴적구조를 분석하였다. 도출된 결과에 대하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. Chirp SBP를 이용한 현장탐사는 일반적으로 해석의 용이함을 위해 양의 극성만 가지고 있는 앤벨로프 형태의 자료를 제공하기 때문에 연구 활용 범위가 제한적이다. 따라서 위상 및 극성 정보를 포함하는 chirp 원시 자료를 생성할 수 있는 Chirp SBP 수치모델링을 수행하였다.

2. Chirp SBP의 음원을 생성하기 위해 최소 및 최대 주파수, 펄스 길이, 윈도우 함수, weighting factor 등의 파라미터에 따라 다양한 해저 퇴적층에 적합하게 적용할 수 있도록 음원 신호를 생성할 수 있었다. 또한, 음향 전파 함수에 음향 감쇠, 불연속면 층, 마찰 손실을 적용할 수 있도록 함으로써 실제 퇴적구조를 모사할 수 있도록 하였다.

3. Chirp SBP의 음원을 이용하여 정합필터 과정을 수행하여 chirp 원시 자료를 취득한 결과, 음원 신호와 상관성이 없는 잡음들은 감쇠되어 위상 및 극성 정보를 포함하는 일반적인 탄성과 신호가 되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 얇은 층에 대한 튜닝효과를 분석하는 연구를 수행하기 위한 대표적인 모델인 썸기 모델에 대해 Chirp SBP 수치모델링을 수행했을 때 일반적으로 사용되는 엔벨로프는 chirp 반응 신호에 비해 신호의 폭이 보다 작기 때문에 수직 해상도가 보다 좋은 것을 알 수 있고 이로 인해 더 낮은 썸기의 두께에 대해서 확인할 수 있었다.

5. 또한, 썸기 모델에 대해 다른 속성분석 방법인 1차 및 2차 미분 엔벨로프와 순간 대역폭을 적용했을 때 엔벨로프에 비해 신호의 폭이 크지만 각 층을 나타내는 신호를 일정 기준으로 제한했을 때 수직해상도가 엔벨로프보다 좋거나 비슷한 것을 알 수 있고 이로 인해 더 낮거나 비슷한 썸기의 두께에 대해서 확인할 수 있었다.

6. 조립질 퇴적층, 천부가스 층, 불연속면 층에 대해 Chirp SBP 수치모델링을 수행할 경우 일반적으로 많이 사용되는 엔벨로프와 1차 미분 및 2차 미분 엔벨로프의 경우 해당 층 또는 하부 반사파가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

7. 또한, chirp 반응 신호에 다양한 탄성과 속성방법을 적용했을 때 공통적으로 순간 주파수, 순간 가속도, 순간 대역폭의 경우 해당 층 및 하부 반사파를 확인할 수 있었고 순간 위상을 적용했을 때 불연속면 층에 대한 정보만을 확인할 수 있었다.

8. 현장에서 취득된 chirp 원시 자료에 자료처리 기법을 이용하여 얻은 최종 chirp 자료를 얻었고 이를 탄성과 속성분석 방법을 이용함으로써 에너지 흡수를 영향을 받는 지역에서의 물리적인 정보나 탄화수소-물 경계면, 해저 퇴적층의 두께, 미고결 모래층, 층의 급격한 변화 등에 대해 보다 정밀 분석을 하였다.

9. 최종 chirp 자료에 탄성과 속성분석을 적용한 경우 기존의 엔벨로프에 비해 1차 미분 엔벨로프의 경우 상대적으로 다수의 이벤트가 명확히 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 순간 주파수 및 순간 대역폭을 적용한 경우 물성의 급격한 변화가 일어나는 것으로 사료되며 대부분 미고결 퇴적층으로 이루어졌을 것으로 판단된다.

본 연구에서 분석한 Chirp SBP 수치모델링 및 현장자료에 따른 탄성과 속성 분석 결과는 향후 엔지니어링 목적의 천부 퇴적물 분류 및 퇴적구조 분석을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.



## 감사의 글

시간의 아쉬움을 느끼며 마치는 부족한 한편의 논문이지만 너무나도 많은 분들의 도움과 격려가 있었기에 이 글로써 감사의 마음을 전할까 합니다.

먼저, 연구실에서 연구에 전념할 수 있도록 물심양면으로 도와주시고 안식년 중에도 부족한 제자의 논문을 지도해주신 신성렬 교수님께 감사의 말씀을 드리 고자 합니다. 그리고 바쁘신 와중에도 저를 항상 걱정해주시고 논문이나 제가 나아갈 방향에 대해서 많은 조언을 해주신 정우근 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다. 두 분 교수님의 가르침 덕분에 제가 여기까지 올 수 있었던 것 같습니다. 그리고 좋은 수업과 많은 가르침을 주신 장원일 교수님, 임종세 교수님, 윤지호 교수님, 유경근 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

연구실에 들어왔을 때 아무것도 모르는 저를 지금까지 모든 면에 있어서 이 끌어주시고 논문을 쓸 수 있게 가장 많은 도움을 주신 하지호 박사님께 감사드립니다. 대학교 1학년 때부터 알고지내며 공학설계, 캡스톤디자인 등 굵직한 조별활동을 같이하고 연구보조원부터 석사과정 내내 같이 고생하고 고민을 나누 었던 준석이, 모자랐던 형에게 항상 밝은 모습으로 같이 문제를 해결하고 논의 했던 다운이, 연구실에 처음 들어와서 힘들었을텐데 연구실 막내로써 허드렛일 을 하면서 묵묵히 형들을 도와줬던 대철이, 힘든 작업에 힘든 내색 없이 도와 줬던 예리와 수윤이에게도 감사의 말을 전합니다. 그리고 대학원 생활을 하면서 도움을 주신 각 실험실의 선배님 및 후배님과 학교생활을 하는데 많은 편의 를 봐주신 숙현누나와 사업단 실장님에게도 감사의 인사를 드립니다. 고등학교 시절부터 같이 놀고 힘들 때 같이 도와주고 고민했던 영철이, 지환이, 성훈이, 상원이와 동기부여가 되어주고 저의 밑바닥부터 진심으로 걱정을 해주었던 죠ンさん에게도 감사의 말씀을 드리고 싶습니다.

물심양면으로 도와주시고 항상 내 새끼라며 걱정해주시는 고모분들과 외삼촌 내외분들에게 감사함을 전하고 싶습니다. 마지막으로 대학생활을 하며 도움을

주신 모든 분들께 감사의 인사를 전하며 말도 정말 안 듣고 고집이 센 아들이  
지만 언제나 제 편이 되어주고 저의 선택을 존중해주시는 어머니와 하늘나라에  
서 대장 역할을 하시면서 저를 지켜보고 계실 아버지께 이 논문을 바칩니다.



## References

- 고휘경, 2013. *싱글채널 해양 탄성파 탐사자료의 속성분석 및 정밀해석*. 공학석사학위논문. 부산:한국해양대학교.
- 김대철 등, 2012. 여수만 가스함유 퇴적물의 물성 및 음향 특성. *지질학회지*, 48(1), pp. 79-91.
- 김도희, 2007. 수 저층의 저질 조사 ( I ). *해양환경안전학회*, 13(1), pp. 93-102.
- 김영준, 김원식, 신성렬, 김진호, 2011. Chirp SBP 자료 해상도 향상을 위한 전산처리연구. *지구물리와 물리탐사*, 14(4), pp.289-297.
- 김영준 등, 2013. Chirp SBP 원시 자료 기록을 위한 취득시스템 구축 및 현장적용. *한국자원공학회지*, 50(4), pp.441-450.
- 김영준, 2014. *고해상 천부지층탐사를 위한 2차원/의사 3차원 Chirp 원시 자료의 현장 적용성*. 공학박사학위논문. 부산:한국해양대학교.
- 김찬수, 2015. *중소형 선박에서 운용 가능한 Portable 3D 해양탄성파탐사 시스템 개발*. 공학박사학위논문. 부산:동아대학교.
- 김한수 등, 2016. 제주도 차귀도 서북쪽 해역 내 퇴적 환경 및 퇴적물 조사. *한국해양환경·에너지학회지*, 19(2), pp.137-143.
- 김한준, 석봉출, 김성렬, 한상준, 1990. 한반도 주변해역 해저표층퇴적물의 음파 감쇠계수와 생물기원 기체함량. *한국해양학회지*, 25(1), pp. 26-35.
- 신성렬 등, 2006. SBP 탐사를 이용한 사석분포 Mapping. *한국지구시스템공학회지*, 43(3), pp. 194-205.
- 신성렬, 김찬수, 조철현, 2008. 탄성파 반사법 및 굴절법을 이용한 천해저 지반 조사에 대한 연구. *물리탐사*, 11(2), pp. 109-115.

- 신성렬, 임민혁, 김광은, 2009. 수중 인공구조물에 대한 사이드스캔소나 탐사자료의 영상처리. *한국마린엔지니어링학회*, 33(2), pp. 344-354.
- 여은민, 2006. *모델링 기술을 이용한 심해 가스 하이드레이트 탄성과 특성 연구*. 공학석사학위논문. 부산:한국해양대학교.
- 오진용, 이연규, 윤혜수, 김성렬, 2000. 광양만 여수해만의 가스함유 표층퇴적물의 3.5 kHz 탄성과 영상. *자연환경지질*, 33(3), pp. 239-246.
- 유신, 2010. *고해상도 탄성과 자료 해석을 통한 제주 남부 대륙붕의 퇴적환경 연구*. 공학석사학위논문. 부산:부경대학교.
- 윤석훈, 이용국, 한상준, 2001. 독도 화산군 주변 퇴적층의 고해상 탄성과상 분석. *한국해양학회지*, 6(2), p.103-113.
- 이호영 등, 2002. 에어건과 6채널 스트리머를 이용한 고해상 천부 해저 탄성과 탐사. *한국지구물리탐사학회 제4회 특별 심포지엄 논문집*.
- 장성형 등, 2001. 천연 가스 탐지를 위한 국내 대륙붕 탄성과자료 처리. *물리탐사*, 4(4), pp. 115-123.
- 장성형, 류병재, 서상용, 2005. BSR 확인을 위한 동해 가스 하이드레이트 탐사 자료 처리. *한국신·재생에너지학회 2005년도 춘계학술대회*.
- 장재경, 1999. *Chirp 신호의 감쇠특성 분석에 의한 해저면 퇴적물 분류 연구*. 공학박사학위논문. 서울:한양대학교.
- 장재경, 양승진, 1999. 광역주파수 음향반사자료의 감쇠특성 분석을 위한 지질 음향모델링 기법 연구. *물리탐사*, 2(4), p.202-208.
- 조민희 등, 2013. 한국 황해 백령도 주변해역 후 제4기 퇴적작용. *지구물리와 물리탐사*, 16(3), pp. 145-153.
- 조성민, 2007. 해상 지반조사 분야의 기술 동향. *한국지반공학회 2007 추계 학술발표회 논문집*.
- Ainslie, M.A., 2005. The effect of centimeter scale impedance layering on the normal-incident seabed reflection coefficient, in *Boundary influences in high*

- frequency shallow water acoustics, *University of Bath Press*. pp.423-430.
- Anderson, A.L. & Hampton, L.D., 1980. Acoustic of gas bearing sediments I, Background. *Journal of Acoustical Society of America*, 67, pp.1865-1889.
- Attwell, P.B. & Ramana, Y.V., 1966. Wave attenuation and internal friction as functions of frequency in rocks. *GEOPHYSICS*, 31(6), pp.1049-1056.
- Barnes, A.E., 1992. The calculation of instantaneous frequency and instantaneous bandwidth. *GEOPHYSICS*, 57(11), p.1520-1524.
- Barnes, A.E., 1993. Instantaneous spectral bandwidth and dominant frequency with applications to seismic reflection data. *GEOPHYSICS*, 58(3), p.419-428.
- Bennett, L.C., 1967. In situ measurements of acoustic absorption in unconsolidated sediments. *Trans. Am. Geophys. Union*, 48, pp.144
- Biot, M.A., 1956. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, I. Low-frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.*, 28(2), p.168-178.
- Bowles, F.A., 1997. Observations on attenuation and shear-wave velocity in fine-grained, marine sediments. *Journal Acoustical Society of America*, 101(1), pp.3385-3397.
- Brekhovskikh, L.M. & Lysanov, Y.P., 1991. Fundamentals of ocean acoustic. 2nd ed. Springer-Verlag.
- Busby, J. and Richardson, E.G., 1957. The absorption of sound in sediments. *GEOPHYSICS*, 22(4), pp.821-828.
- Bull, J.M., Quinn, R. & Dix, J.K., 1998. Reflection coefficient calculation from marine high resolution seismic reflection (Chirp) data and application to archaeological case study. *Marine Geophysical Researches*, 20, pp.1-11.
- Chopra, S. & Marfurt K.J., 2005. Seismic attributes - A historical perspective. *GEOPHYSICS*, 70(5), pp.3S0-28S0.
- Chough, S.K. et al., 2002. High-resolution acoustic characteristics of

- epocontinental sea deposits, central eastern Yellow Sea. *Marine Geology*, 188(3), pp.317-331.
- Cunningham, A.B., 1979. Some alternate vibrator signals. *GEOPHYSICS*, 44(12), pp.1901-1921.
- Cooper, J.K., Lawton, D.C. & Margrave, G.F., 2010. The wedge model revisited: A physical modeling experiment. *GEOPHYSICS*, 75(2), pp.T15-T21.
- Eastwood, J., 2002. The attribute explosion. *The leading edge*, Oct., p.994
- Eckart, C., 1953. The scattering of sound from the sea surface. *Journal Acoustical Society of America*, 25(3), pp.566-570.
- Floodgate, G.D. & Judd, A.G., 1992. The origins of shallow gas. *Continental Shelf Research*, 12(10), pp.1145-1156.
- Gutowski, M. et al., 2002. Chirp sub-bottom profiler source signature design and field testing. *Marine Geophysical Researches*, 23, pp.481-492.
- Hamilton, E.L., 1972. Compressional-wave attenuation in marine sediments. *GEOPHYSICS*, 37(4), pp.620-646.
- Hamilton, E.L., 1980. Geoacoustic modeling of the sea floor. *Journal Acoustical Society of America*, 68(5), pp.1313-1340.
- Henkart, P., 2006. Chirp sub-bottom profiler processing - a review. *Sea Technology Magazine*, 47(10), pp.35-38.
- Hughes, S. J., Ellis, D. D., Chapman, D. M. F., & Staal, P. R., 1990. Low-frequency acoustic propagation loss in shallow water over hard-rock seabeds covered by a thin layer of elastic-solid sediment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 88(1), P.283-297.
- Ivakin, A.N. & Jackson, D.R., 1998. Effects of shear elasticity on sea bed scattering: Numerical examples. *Journal Acoustical Society of America*, 103(1), pp.346-354.

- Jacobson, R.S., 1987. An investigation into the fundamental relationships between attenuation, phase dispersion, and frequency using seismic refraction profiles over sedimentary structures. *GEOPHYSICS*, 52(1), pp.72-87.
- Langli, B. & LeGac, J.C., 2004. The first results with a new multibeam subbottom profiler. *in Proc. OCEANS*, IEEE, pp.1147-1153.
- LeBlanc, L.R. et al., 1992a. Marine sediment classification using the chirp sonar. *Journal Acoustical Society of America*, 91(1), pp.107-115.
- LeBlanc, L.R., Panda, S., Schock, S.G., 1992b. Sonar attenuation modeling for classification of marine sediments. *Journal Acoustical Society of America*, 91(1), pp.116-126.
- Lurton, X., 2010. *An introduction to underwater acoustics - principles and applications*. 2nd Ed. Springer:Germany.
- Marfurt, K.J. & Kirlin, R.L., 2001. Narrow-band spectral analysis and thin-bed tuning. *GEOPHYSICS*, 66(4), pp.1274-1283.
- Mahapatra, S.N., 2005. *Determination of Heterogeneity by High-Resolution Seismic Reservoir Characterization in the Heavy Oil Temblor Reservoir of Coalinga Field, California*. Ph.D. Blacksburg:Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Mavko G.M. & Nur, A., 1979. Wave attenuation in partially saturated rocks. *GEOPHYSICS*, 44(2), pp.161-178.
- O'Connell, R.J. & Budiansky, B., 1977. Viscoelastic properties of fluid saturated cracked solids. *J. Geophys. Res.*, 82, pp.5719-5736.
- Panda, S., LeBlanc, L.R. & Schock, S.G., 1994. Sediment classification based on impedance and attenuation estimation. *Journal Acoustical Society of America*, 96(1), pp.3022-3035.
- Payton, C.E., 1977. *Seismic Stratigraphy - Applications to Hydrocarbon*

- Exploration. *A.A.P.G. Memoir*, 26, pp.205-212.
- Quinn, R., Bull, J.M. & Dix, J.K., 1997a, Imaging wooden artefacts using chirp sources. *Archaeological Prospection*, 4, pp.25-35.
- Quinn, R., Bull, J.M., Dix, J.K. & Adams, J.R., 1997b, The Mary Rose Site - geophysical evidence for palaeo-scourmarks. *The international J. of Nautical Archaeology*, 26(1), pp.3-16.
- Quinn, R., Bull, J.M. & Dix, J.K., 1998. Optimal Processing of Marine High-Resolution Seismic Reflection (Chirp) Data. *Marine Geophysical Researches*, 20, pp.13-20.
- Rakotonarivo, S., Legris, M., Desmare, R. & Jean, F., 2008. Theoretical justification of a coherent forward model for subbottom profiler data inversion. *9th ECUA, ACOUSTIC'S 08*. pp.219-214.
- Rakotonarivo, S. et al., 2011. Forward modeling for marine sediment characterization using chirp sonar. *GEOPHYSICS*, 76(4), pp.T91-T99.
- Robertson, J. D. and Nogami, H. H., 1984, Complex seismic trace analysis of thin beds. *GEOPHYSICS*, 49(4), p.344-352
- Satyavani, N., Thakur, N.K., Aravind Kumar, N. & Reddi, S.I., 2005. Migration of methane at the diapiric structure of the western continental margin of India - insights from seismic data. *Marine Geology*, 219(1), pp.19-25.
- Schock, S.G. & LeBlanc, L.R., 1990. Some applications of the chirp sonar. *OCEANS '90, Engineering in the Ocean Environment*. pp.69-75.
- Schock, S.G., LeBlanc, L.R. & Mayer, L., 1986. Sediment classification using a wideband, frequency-modulated sonar system. *Offshore Technology Conference*. pp.389-398.
- Schock, S.G., LeBlanc, L.R. & Mayer, L., 1989. Chirp subbottom profiler for quantitative sediment analysis, *GEOPHYSICS*, 54(4), pp.445-450.

- Schock, S.G., LeBlanc, L.R. & Panda, S., 1994. Spatial and temporal pulse design considerations for a marine sediment classification sonar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 19(3), pp.406-415.
- Stoll, R.D. & Bryan, G.M., 1970. Wave attenuation in saturated sediments. *J. Acoust. Soc.*, 47(4), pp.1440-1447.
- Stoll, R.D., 1977. Acoustic waves in ocean sediments. *GEOPHYSICS*, 42(4), pp.715-725.
- Taner, M.T. & Sheriff, R.E., 1977. Application of amplitude, frequency, and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon exploration. *Seismic stratigraphy-Application to Hydrocarbon Exploration. A.A.P.G. Mem*, 26, pp.301-327.
- Taner, M.T., Koehler, F. & Sheriff, R.E., 1979. Complex seismic trace analysis. *GEOPHYSICS*, 44(6), pp.1041-1063.
- Tomecka-Suchon, S. & Marcak, H., 2015. Interpretation of ground penetrating radar attributes in identifying the risk of mining subsidence. *Archives of Mining Sciences*, 60(2), pp.645-656.
- Tullos, F.N. and Reid, C., 1969. Seismic attenuation of Gulf Coast sediments. *GEOPHYSICS*, 34(4), pp.516-528.
- Vardy, M.E. et al., 2008. Decimeter-resolution 3D seismic volume in shallow water: A case study in small-object detection. *GEOPHYSICS*, 73(2), pp.B33-B40.
- Vasil' ev, Y. and Gurevich, G.I., 1962. On the ratio between attenuation decrements and propagation velocities of longitudinal and transverse waves, English translation. *Izv. Acad. Sci., USSR, Geophys*, Series 12, pp.1061-1074.
- Walsh, J.B., 1966. Seismic wave attenuation in rock due to friction. *J. Geophys. Res.*, 71(10), pp.2591-2599.

Widess, 1973, How thin is a thin bed. *GEOPHYSICS*, 38(6), p.1176-1180.

Yilmaz, O., 2001. *Seismic data analysis*. Society of Exploration Geophysicists: USA.

Zemstov, E.E., 1969. Effect of oil and gas deposits on dynamic characteristics of reflected waves. *Int. Geology Rev.*, 11(4), pp.504-509.

Zhou, J., Zhang, X., & Rogers, P. H., 1987. Effect of frequency dependence of sea-bottom attenuation on the optimum frequency for acoustic propagation in shallow water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 82(1), p.287-292.



## Bibliography

현병구, 1995. *물리탐사용어사전*. 선일문화사.

