



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

# 가변 심도 스트리머의 배열이 공간 알리아싱에 미치는 영향에 관한 연구

A study on comparison of spatial aliasing depending on the  
array of variable depth streamers in broadband seismic



지도교수 신 성 렬

2019년 2월

한국해양대학교 대학원

해양에너지자원공학과

김 대 철

본 논문을 김대철의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 정우근 (인)

위원 신성렬 (인)

위원 유경근 (인)

2019년 2월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iv
List of Figures .....	v
Abstract .....	viii

1. 서 론 .....	1
2. 이 론 .....	4
2.1 공간 알리아싱(spatial aliasing) .....	4
2.2 탄성과 축소모형 실험(seismic physical modeling) .....	6
2.3 광대역 탄성과 탐사(broadband seismic) .....	11
2.4 고스트(ghost) .....	14

3. 비교분석 .....	15
3.1 가변 심도 스트리머의 배열에 따른 공간 알리아싱 비교 .....	17
3.1.1 수신기 간격에 따른 공간 알리아싱 비교 .....	17
3.1.2 가변 심도 스트리머의 심도에 따른 공간 알리아싱 비교 .....	23
3.2 가변 심도 스트리머의 배열에 따른 주파수 성분 비교 .....	29
3.2.1 수신기 간격에 따른 주파수 성분 비교 .....	30
3.2.2 가변 심도 스트리머의 심도에 따른 주파수 성분 비교 .....	35
3.3 전통적인 해양 탄성과 탐사와 광대역 탄성과 탐사의 공간 알리아싱 비교 .....	40
4. 결 론 .....	50
감사의 글 .....	52
참고문헌 .....	53



## List of Tables

Table 1 The parameters of physical modeling and numerical modeling · 13



## List of Figures

Fig. 1	(a) aliased seismic data (b) is $f-k$ spectrum(Choi et al., 2014) ....	5
Fig. 2	Comparison of model size between seismic physical modeling and seismic survey .....	7
Fig. 3	3-axis precise positioning seismic physical modeling system .....	8
Fig. 4	The diagram of 3-axis precise positioning seismic physical modeling system .....	10
Fig. 5	NW Australia, comparison of legacy dataset (a) with the new broadband image (b)(Soubaras & Dowle, 2010) .....	11
Fig. 6	NW Australia, comparison of amplitude spectra of the legacy dataset with the new broadband data(Soubaras & Dowle, 2010) .....	12
Fig. 7	Over/under towed-streamer acquisition: pairs of streamers deployed at two different depths and in the same vertical plane(Moldoveanu et al., 2007) .....	13
Fig. 8	Ghost diagram in marine seismic survey .....	14
Fig. 9	A schematic of the seismic exploration in filed scale .....	15
Fig. 10	The schematic diagram of the streamer depending on the receiver interval .....	18
Fig. 11	Shot gather depending on receiver interval: (a) 12m(case 1), (b) 24m(case 2) and (c) 36m(case 3) .....	20
Fig. 12	$f-k$ spectrum depending on receiver interval(physical modeling): (a) 12m(case 1), (b) 24m(case 2) and (c) 36m(case 3) .....	21

<b>Fig. 13</b>	$f-k$ spectrum depending on receiver interval(numerical modeling): (a) 12m(case 1), (b) 24m(case 2) and (c) 36m(case 3) .....	22
<b>Fig. 14</b>	The schematic diagram of the streamer depending on the depth of the variable depth streamer .....	24
<b>Fig. 15</b>	Shot gather depending on streamer depth: (a) 28m(case 1), (b) 51m(case 2) and (c) 74m(case 3) .....	26
<b>Fig. 16</b>	$f-k$ spectrum depending on streamer depth(physical modeling): (a) 28m(case 1), (b) 51m(case 2) and (c) 74m(case 3) .....	27
<b>Fig. 17</b>	$f-k$ spectrum depending on streamer depth(numerical modeling): (a) 28m(case 1), (b) 51m(case 2) and (c) 74m(case 3) .....	28
<b>Fig. 18</b>	Frequency spectrum depending on receiver interval: (a) 12m(channel 6), (b) 12m(channel 12), (c) 12m(channel 18) and (d) 12m(channel 24) .....	31
<b>Fig. 19</b>	Frequency spectrum depending on receiver interval: (a) 24m(channel 6), (b) 24m(channel 12), (c) 24m(channel 18) and (d) 24m(channel 24) .....	32
<b>Fig. 20</b>	Frequency spectrum depending on receiver interval: (a) 36m(channel 6), (b) 36m(channel 12), (c) 36m(channel 18) and (d) 36m(channel 24) .....	33
<b>Fig. 21</b>	Frequency spectrum depending on streamer depth: (a) 28m(channel 6), (b) 28m(channel 12), (c) 28m(channel 18) and (d) 28m(channel 24) .....	36
<b>Fig. 22</b>	Frequency spectrum depending on streamer depth: (a) 51m(channel 6), (b) 51m(channel 12), (c) 51m(channel 18) and (d) 51m(channel 24) .....	37



<b>Fig. 23</b>	Frequency spectrum depending on streamer depth: (a) 74m(channel 6), (b) 74m(channel 12), (c) 74m(channel 18) and (d) 74m(channel 24) .....	38
<b>Fig. 24</b>	The schematic diagram of the streamer depending on the receiver interval: (a) 12m, (b) 24m and (c) 36m .....	42
<b>Fig. 25</b>	$f-k$ spectrum depending on receiver interval 12m(physical modeling): (a) broadband seismic and (b) conventional marine seismic .....	43
<b>Fig. 26</b>	$f-k$ spectrum depending on receiver interval 24m(Physical modeling) (a) broadband seismic and (b) conventional marine seismic .....	44
<b>Fig. 27</b>	$f-k$ spectrum depending on receiver interval 36m(physical modeling): (a) broadband seismic and (b) conventional marine seismic .....	45
<b>Fig. 28</b>	$f-k$ spectrum depending on receiver interval 12m(numerical modeling): (a) broadband seismic and (b) conventional marine seismic .....	46
<b>Fig. 29</b>	$f-k$ spectrum depending on receiver interval 24m(numerical modeling): (a) broadband seismic and (b) conventional marine seismic .....	47
<b>Fig. 30</b>	$f-k$ spectrum depending on receiver interval 36m(numerical modeling): (a) broadband seismic and (b) conventional marine seismic .....	48

# A study on comparison of spatial aliasing depending on the array of variable depth streamers in broadband seismic

KIM, DAECHUL

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

## Abstract

In order to acquire high quality seismic data from seismic surveys, exploration design such as sampling, source and receiver configuration is important. When performing seismic surveys, spatial aliasing may occur depending on the interval of the receiver. It is difficult to acquire high quality seismic data in the presence of spatial aliasing. In addition, problems may occur in the processing of seismic data such as frequency-wavenumber filtering migration.

In the broadband seismic, the technique using the variable depth streamer has different signal characteristics depending on the depth of the receiver. Therefore, the spatial aliasing characteristics will be different.

In the broadband seismic, spatial aliasing was compared depending on the receiver interval and the depth of the variable depth streamer.

The characteristics of the acquired signals are different when broadband seismic are compared with conventional marine seismic.

Therefore, space aliasing of broadband seismic and conventional marine seismic was compared. In addition, the broadband seismic, compared the ghosts depending on the receiver interval and the depth of the variable depth streamer.

In this study, broadband seismic data and conventional marine seismic data were acquired using the reduced seismic physical modeling. Numerical model data were used for verification.

**KEY WORDS:** Broadband seismic, spatial aliasing, seismic physical modeling



## 제 1 장 서 론

탄성과 탐사에서 고해상도의 탄성과 자료를 취득하기 위해서는 샘플링(sampling), 음원 및 수신기 구성과 같은 탐사 설계가 중요하다. 탄성과 탐사 수행 시 수신기의 간격에 따라 공간 알리아싱(spatial aliasing)이 발생할 수 있다. 공간 알리아싱이 존재할 경우 고해상도의 지하 매질 영상 획득이 어렵고  $f-k$  필터링, 구조보정과 같은 탄성과 자료처리 수행에 어려움이 발생한다(Yilmaz & Doherty, 2001).

최근 해상환경에서 고해상도의 지하 매질 영상 획득에 관한 연구와 탄성과 탐사 수행 시 많은 정보를 취득하기 위한 탄성과 탐사 기술 개발 연구가 활발하게 수행되고 있다. 그 중 하나의 탄성과 탐사 기술이 광대역 탄성과 탐사(broadband seismic)이다. 광대역 탄성과 탐사는 전통적인 탄성과 탐사와 비교하여 넓은 주파수 대역의 탄성과 자료를 취득하는 기술이다. 광대역 탄성과 탐사는 전통적인 탄성과 탐사와 비교하였을 때, 주파수 대역이 넓기 때문에 고해상도의 지하 매질 영상을 획득할 수 있으며, 얇은 층이나 트랩(trap)을 발견에 강점이 있다. 또한 고스트(ghost) 제거에도 효율적이다.

광대역 탄성과 탐사 기술로는 스트리머의 깊이를 변화시켜 광대역 탄성과 탐사를 수행하는 가변 심도 스트리머(variable-depth streamer)(Soubaras & Dowle, 2010), 두 개의 스트리머를 동일한 수직면에서 서로 다른 깊이로 배치하여 광대역 탄성과 탐사를 수행하는 기술인 over/under streamer(Moldoveanu et al., 2007), 스트리머의 배치는 전통적인 탄성과 탐사와 같지만 속도 성분 외에 압력 성분을 취득하는 기술인 dual-sensor streamer(Carlson et al., 2007) 등이 있다.

광대역 탄성과 탐사 중 가변 심도 스트리머를 이용하는 취득 기술은 수신기의 수심에 따라 취득되는 신호의 특성이 다르게 나타난다. 수신기의 수심이 변화함에 따라 탄성과 도달시간(travel time)이 변화하게 되고 도달시간의 변화로 인하여 탄성과 신호의 각도가 변하게 된다. 공간 알리아싱의 경우 수신기의 간

격과 탄성과 신호의 각도의 영향을 받는다. 따라서 가변 심도 스트리머를 이용한 광대역 탄성과 탐사에서 가변 심도 스트리머 배열에 따라 공간 알리아싱 현상이 다르게 나타날 것이라고 판단된다.

가변 심도 스트리머를 이용한 광대역 탄성과 탐사에 대한 연구는 전통적인 탄성과 탐사와의 지하 매질 영상 비교 분석 및 고스트 제거에 관한 연구가 주로 수행되어 왔으며, 광대역 탄성과 탐사 자료를 활용한 구조보정, 역산 등과 같은 탄성과 자료처리 연구가 선행되고 있다. 또한 가변 심도 스트리머 배열이 고스트 노치의 변화와 지하 매질 영상에 미치는 영향에 대한 연구가 Dhelie et al.,(2014)에 의해 선행되었다. 국외를 중심으로 연구가 수행되고 있으며, 국내에서는 광대역 탄성과 탐사에 대한 연구가 미비한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 가변 심도 스트리머 배열에 따른 공간 알리아싱 현상을 비교하였다. 가변 심도 스트리머의 배열은 수신기의 간격과 가변 심도 스트리머의 심도를 다르게 설계하였다. 선행된 연구는 주로 광대역 탄성과 탐사 자료를 현장자료 또는 탄성과 수치모형 실험 자료를 사용하였다. 현장 탐사는 시간적 경제적 제약이 있으며, 탄성과 수치모형 실험 현장 상황을 반영하기에는 어려움이 있다. 탄성과 축소모형 실험은 현장 탐사의 탐사 장비, 탐사 지역 등을 축소하여 수행하는 실내 실험으로 현장 탐사를 모사할 수 있다는 장점이 있다(Robert & Scott, 1989). 따라서 본 연구에서는 광대역 탄성과 탐사 자료를 생성하기 위해 탄성과 축소모형 시스템을 이용하여 탄성과 자료를 생성하였다. 탄성과 축소모형 실험을 통해 취득한 탄성과 자료의 검증을 위하여 seismic un\*x를 이용하여 탄성과 수치모형 자료를 취득하였다.

광대역 탄성과 탐사의 장점 중 하나는 고스트 노치의 다양함으로 인한 고스트 제거이다. 가변 심도 스트리머를 이용한 광대역 탄성과 탐사에서 수신기의 깊이에 따라서 노치가 각각 다르게 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 추가적으로 가변 심도 스트리머를 이용한 광대역 탄성과 탐사에서 수신기의 간격과 가변 심도 스트리머의 심도에 따른 주파수 성분과 고스트에 의한 노치를 주파수 영역에서 파악하였다. 탄성과 자료의 경우 파동방정식을 이용하여 탄성과 수치모형 실험 자료를 생성하였다.

가변 심도 스트리머를 이용한 광대역 탄성과 탐사와 전통적인 해양 탄성과 탐사의 경우 수신기의 깊이 차이로 인하여 취득되는 신호의 특성이 다르다. 따라서 가변 심도 스트리머를 이용한 광대역 탄성과 탐사와 전통적인 해양 탄성과 탐사에서 동일한 수신기 간격을 설정하여 탄성과 자료를 취득하였고 공간 알리아싱 현상을 비교하였다.



## 제 2 장 이 론

### 2.1 공간 알리아싱(spatial aliasing)

공간 알리아싱(spatial aliasing)은 수신기의 간격이나 탄성과 신호의 경사에 따라 발생한다. 공간 알리아싱은 나이퀴스트 샘플링 법칙(Nyquist sampling law)인 식 (1)에 따라 발생한다(Yilmaz & Doherty, 2001).

$$f_{\max} = \frac{v}{4\Delta x \sin\theta} \quad (1)$$

여기서  $v$ 는 매질의 속도,  $f_{\max}$ 는 최대주파수를 의미한다.  $\sin\theta$ 는  $\frac{v\Delta t}{2\Delta x}$ 이며,  $t$ 는 시간이다,  $\Delta x$ 는 수신기의 간격을 의미한다.

공간 알리아싱은 수신기의 간격과 탄성과 신호의 경사에 따라 나타난다. 수신기 간격이 넓어짐에 따라 공간 알리아싱이 존재하며, 탄성과 신호의 경사가 가파르면 탄성과 신호의 경사가 완만할 때 보다 공간 알리아싱이 발생할 확률이 높다. 공간 알리아싱이 존재할 경우 고주파수의 성분이 낮은 주파수 성분으로 나타나기 때문에 탄성과 자료처리 과정에 문제를 발생시킨다(Yilmaz & Doherty, 2001). 공간 알리아싱이 존재 할 경우 탄성과 자료에서 계단 모양처럼 연속성이 미흡하게 나타나며(Fig. 1(a)), 이를  $f-k$  영역에서 나타나면 Fig.1 (b)와 같다(Choi et al., 2014).

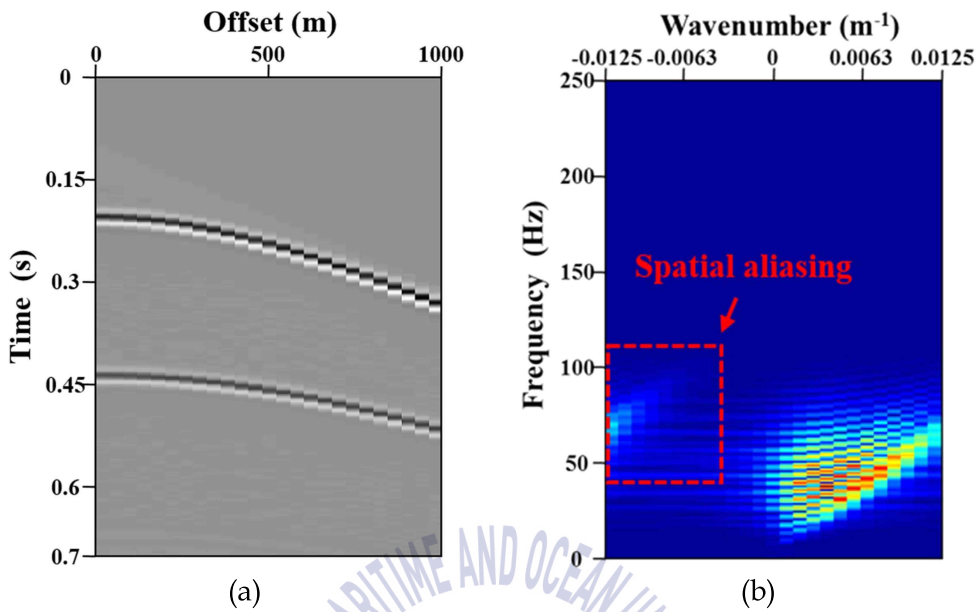
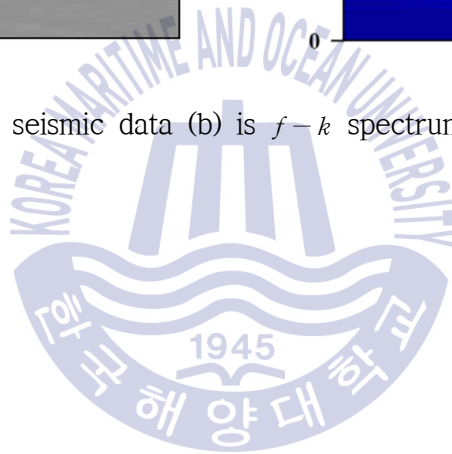


Fig. 1 (a) aliased seismic data (b) is  $f-k$  spectrum(Choi et al., 2014)





## 2.2 탄성과 축소모형 실험(seismic physical modeling)

현장에서 취득한 탄성과 탐사 자료를 자료처리 및 자료해석을 하기 위해서는 지하 매질의 특성, 지하 지질구조의 따른 탄성과 특성, 암석의 물리적 특성에 대한 선행 연구가 수행되어야 한다. 지하 매질의 특성, 지하 지질구조의 따른 탄성과 특성, 암석의 물리적 특성에 관한 연구를 수행하거나 탄성과 탐사 기술 개발, 개발된 탄성과 탐사 기술 검증에 관한 연구를 수행할 때 현장 탄성과 탐사는 시간 및 경제적인 측면에서 제한이 있다. 따라서 탄성과 모형 실험을 하는 것이 효율적이다. 탄성과 모형 실험은 탄성과 축소모형 실험과 탄성과 수치모형 실험으로 나눌 수 있으며, 탄성과 수치모형 실험은 지하 매질 내에서의 파의 거동을 수학적인 표현으로 나타내어 물리적인 현상을 다룬 실험이다 (Alterman & Karal, 1968; Achenbach, 1984; Virieux, 1984; Etgen & OBrien, 2007). 탄성과 축소모형 실험은 현장에서 일어날 수 있는 실제적이고 물리적인 현상을 다룬 실험실 규모의 실내실험이다. 탄성과 축소모형 실험은 실제 전파하는 탄성과와 탄성 매질을 사용하기 때문에 현장 탄성과 탐사를 모사할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 탄성과 축소모형 실험은 탄성과 3차원 지하 모델에 대한 탄성과 탐사를 수행할 때 탄성과 수치모형 실험보다 경제적이다. 그러나 사용한 가능한 트랜스 듀서에 의해 주파수 대역폭이 제한적이며, 제작할 수 있는 지하 모델의 재료에 대한 밀도 및 속도 변수가 제한적이라는 단점이 있다 (Robert & Scott, 1989; Shin et al., 2017).

탄성과 축소모형 실험은 현장 탄성과 탐사의 규모를 축소하여 수행하기 때문에 탐사 변수, 탐사 대상의 크기, 물성 등이 현장 탐사와 차이가 있으며, 축소비를 고려하여 현장 조건과 맞도록 설정하여야 한다. 축소비는 식 (2)와 같다 (Vogel et al., 1985).

$$\alpha_c = \alpha_f \cdot \alpha_\lambda \quad (2)$$

여기서  $\alpha_c$ 는 속도 변수,  $\alpha_f$ 는 주파수 변수,  $\alpha_\lambda$ 는 모델 크기 변수이다.

탄성과 축소모형 실험과 현장 탐사의 물리적 탐사환경의 크기는 다르기 때문에 실제의 현장상황을 고려하여야 한다. 속도 변수의 경우 현장 탄성과 탐사 조건과 맞도록 설정하기 어려움이 존재하기 때문에 본 연구에서는 주파수 변수와 모델 크기 변수를 설정하여 탄성과 축소모형 실험을 수행하였다. 현장 탐사와 축소모형 실험의 축소비를 1:10000으로 설정 하였으며, 현장 탐사의 조건에서 주파수가 100Hz인 음원을 모사하기 위하여 축소모형 실험에서는 주파수가 1MHz인 음원을 사용하였다. 모델 크기 변수는 탄성과 축소모형 실험에서 1mm는 현장 탐사 조건에서는 10m를 의미한다(Fig. 2).

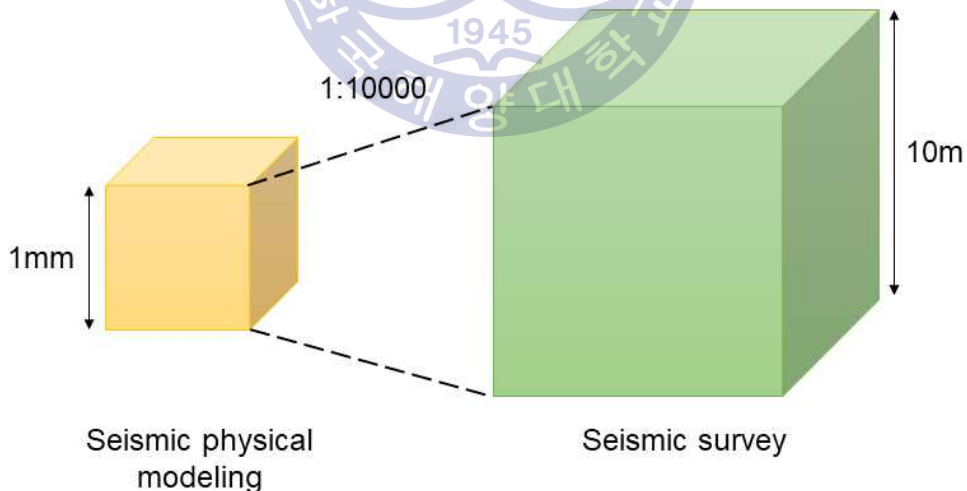


Fig. 2 Comparison of model size between seismic physical modeling and seismic survey

탄성과 축소모형 실험에서의 음원 및 수신기의 오차를 현장 탐사 조건에 반영한다면 현장 탐사에서 오차는 탄성과 축소모형 실험에서의 오차보다 크게 나타난다. 예를 들어 본 연구에서 설정한 축소비를 고려한다면 탄성과 축소모형 실험에서 1mm는 현장 탐사에서는 10m를 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 음원 및 수신기의 3축 위치가 정밀하게 제어 가능한 탄성과 축소모형 시스템을 활용하여 탄성과 축소모형 실험을 수행하였다(Fig. 3).



Fig. 3 3-axis precise positioning seismic physical modeling system

본 연구에서 사용한 탄성과 축소모형 시스템은 3축에 linear motor 및 rotary motor가 장착되어 있어 3축(x, y, z)방향으로 자동 위치제어가 가능하며, 각 축은 최소 0.1mm로 이동이 가능하기 때문에 음원 및 수신기의 정밀한 위치 제어가 가능하다는 장점이 있다. X, y축의 위치 정밀도는  $2\mu\text{m}$ , z축의 위치 정밀도는 0.05mm이다. 또한 3축의 자동 정밀위치제어가 가능하여 3D 탄성과 탐사, broadband seismic 등 최신 탐사기법의 모사가 가능하다는 장점이 있다. 음원

제어 부분은 waveform generator, pulser/receiver를 이용하여 음원 생성이 가능하며, amplifier, pre-amplifier를 사용하여 신호 증폭이 가능하다. 탄성과 신호는 A/D converter, oscilloscope로 취득이 가능하다(Fig. 4).



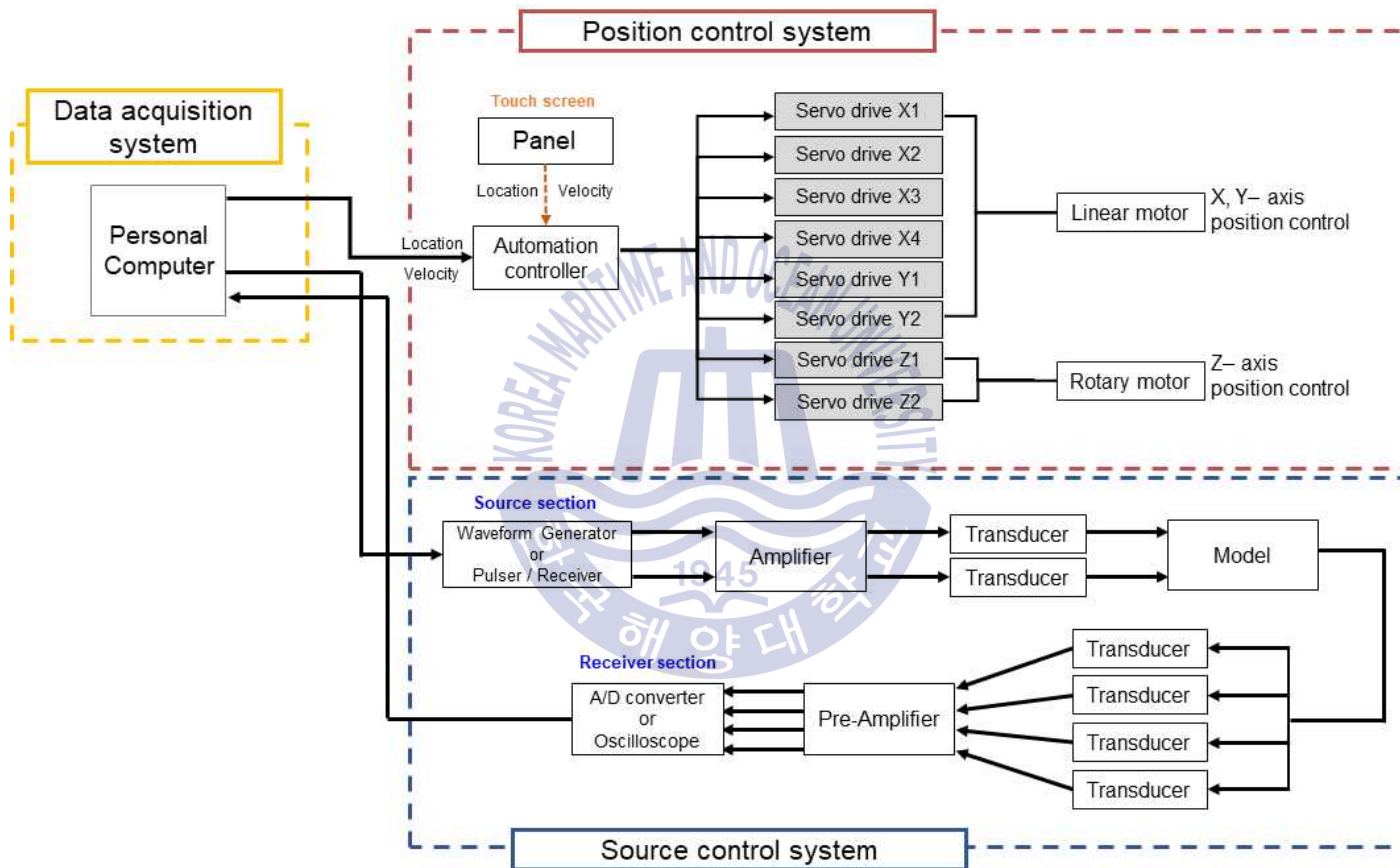


Fig. 4 The diagram of 3-axis precise positioning seismic physical modeling system

### 2.3 광대역 탄성과 탐사(broadband seismic)

광대역 탄성과 탐사(broadband seismic)은 전통적인 탄성과 탐사에 비해 넓은 주파수 대역의 탄성과 자료를 취득하는 탐사이다. 광대역 탄성과 탐사는 주파수 대역이 전통적인 탄성과 탐사에 비해 주파수 대역이 넓기 때문에 고해상도의 지하매질 영상을 획득할 수 있는 장점이 있다(Fig. 5). Fig. 6은 전통적인 탄성과 탐사의 주파수 대역과 광대역 탄성과 탐사의 주파수 대역을 비교한 것이다. 광대역 탄성과 탐사는 얇은 층이나 트랩(trap)을 발견에 용이하며, 낮은 주파수 성분으로 인하여 깊은 심도까지 탐사가 가능하다(Soubaras & Dowle, 2010). 광대역 탄성과 탐사 자료는 ghost 제거에 이점이 있으며, 역산 수행 시 보다 나은 안정성을 제공한다.

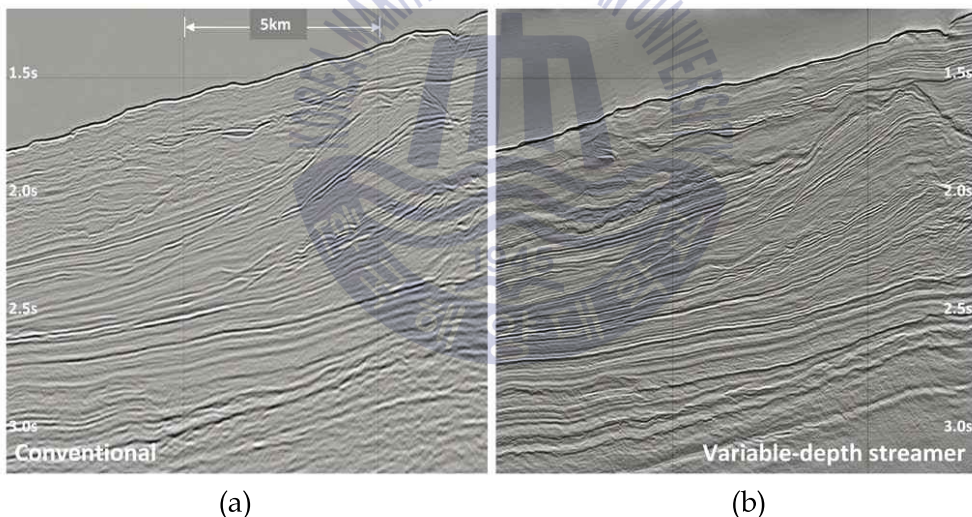
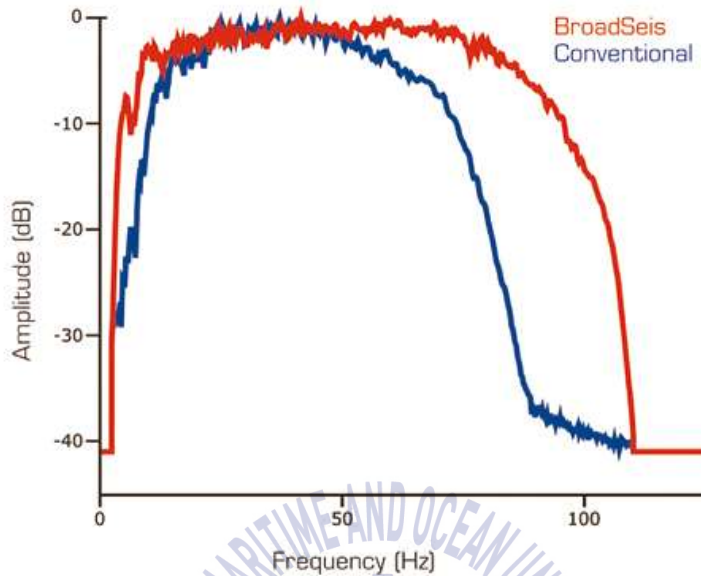


Fig. 5 NW Australia, comparison of legacy dataset (a) with the new broadband image (b)(Soubaras & Dowle, 2010)



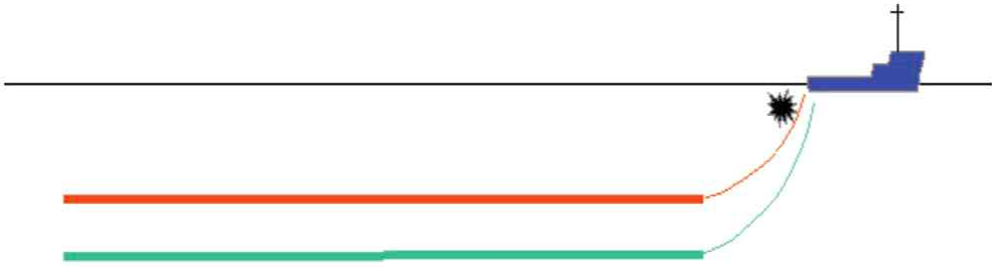


**Fig. 6** NW Australia, comparison of amplitude spectra of the legacy dataset with the new broadband data(Soubaras & Dowle, 2010)

Bearnth and Moore에 의해 1979년에 최초로 해양에서 경사 스트리머를 사용하여 자료를 취득하였으며, 해상환경에서의 광대역 탐사 기술은 지속적으로 연구가 수행되어 왔다. 광대역 탄성과 기술에는 가변 심도 스트리머(Soubaras & Dowle, 2010), 오버/언더 스트리머(Moldoveanu et al., 2007), 이중 센서 스트리머(Carlson et al., 2007) 등이 있다.

가변 심도 스트리머(variable depth streamer)는 스트리머를 평평하게 일정 깊이에 유지하여 탄성과 자료를 취득하는 전통적인 탄성과 탐사와 다르게 스트리머의 깊이를 변화시켜 광대역 탄성과 탐사를 수행하는 기술이다(Soubaras & Dowle, 2010).

오버/언더 스트리머(over/under streamer)는 두 개의 스트리머를 동일한 수직면에서 서로 다른 깊이로 배치하여 광대역 탄성과 탐사를 수행하는 기술이다(Moldoveanu et al., 2007). Fig 7.은 오버/언더 스트리머를 묘사한 그림이다.



**Fig. 7** Over/under towed-streamer acquisition: pairs of streamers deployed at two different depths and in the same vertical plane(Moldoveanu et al., 2007)

이중 센서 스트리머(dual-sensor streamer)는 스트리머의 배치는 전통적인 탄성과 탐사와 같지만 압력 성분 외에 속도 성분을 취득하는 기술이다. 복잡한 처리과정이 아닌 압력 성분과 속도 성분을 합성하여 고스트를 제거할 수 있다는 장점이 있다.





## 2.4 고스트(ghost)

고스트는 음원 고스트와 수신기 고스트로 나뉜다. 음원 고스트는 해상 탄성과 탐사 시 일정한 수심에 위치한 음원에서 파동이 생성될 때 파동이 해수면 방향으로 전파되고 해수면에서 반사된 신호가 수신기에 기록된 신호를 말한다. 수신기 고스트는 일정한 수심에 위치한 수신기에 지하 매질에서 반사된 신호가 수신기에 기록하기 전에 해수면에서 반사되어 기록되는 신호를 말한다. Fig. 8은 해양 탄성과 탐사에서 발생하는 고스트를 나타낸 그림이다.

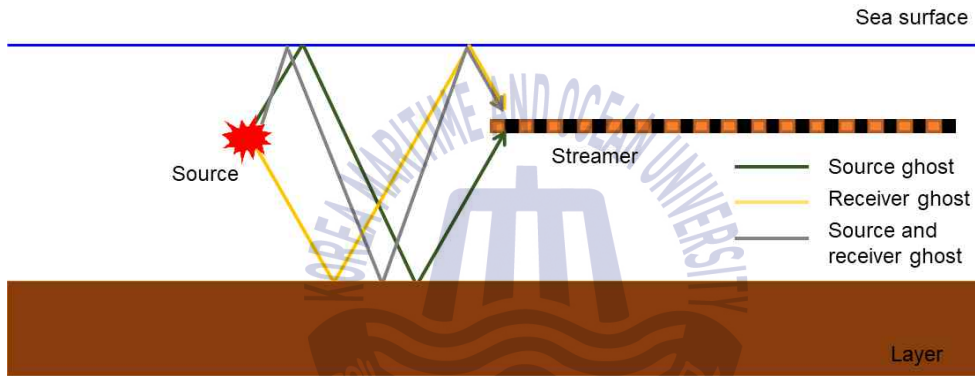


Fig. 8 Ghost diagram in marine seismic survey

고스트는 해수면의 반사 계수가 음의 값이기 때문에 역전된 위상을 가지며, 고스트는 특정 주파수에서 노치(notch)를 발생시켜 주파수 성분을 손실시킨다. 고스트에 의해 발생하는 노치 주파수는 식 (3)과 같다.

$$f = \frac{v}{2d\cos\theta} \quad (3)$$

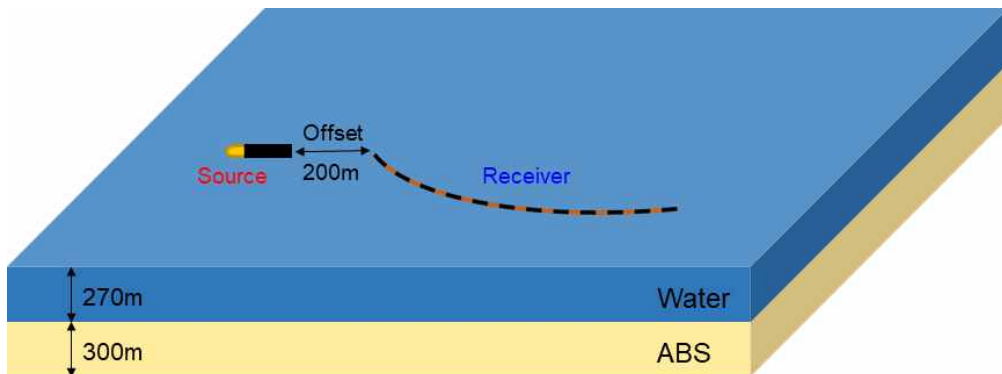
여기서  $f$ 는 노치가 발생하는 특정 주파수이며,  $v$ 는 수중 속도,  $d$ 는 음원 또는 수신기의 깊이,  $\theta$ 는 고스트의 입사각을 의미한다.

### 제 3 장 비교분석

본 연구에서는 가변 심도 스트리머를 모사하여 광대역 탄성과 탐사 자료를 취득하였다. 수신기의 수는 같으며 수신기의 간격, 가변 심도 스트리머의 심도를 다르게 설정하여 연구를 수행하였다. 탄성과 축소모형 실험과 수치모형 실험을 통해 자료를 취득하였으며, 취득 변수는 Table 2와 같다. 축소비는 식 (2)를 고려하여 설정하였으며, 수신기의 거리는 식 (1)을 바탕으로 공간 알리아싱이 발생하는 수신기 거리로 설정하였다. 수평 지층 모델에서 자료를 취득하였으며 취득 환경은 Fig. 9과 같다.

**Table 1** The parameters of physical modeling and numerical modeling

	Physical modeling	Numerical modeling
Frequency (Hz)	1,000,000	100
Scale	1 : 10,000	
Receiver interval (m)	0.0012, 0.0024, 0.0036	12, 24, 36
Number of channels	24	24
Inner offset (m)	0.020	200



**Fig. 9** A schematic of the seismic exploration in filed scale

본 연구에서는 탄성과 축소모형 자료 생성시 음원 제어를 위해 OLYMPUS사의 pulser/receiver인 5058PR을 사용하였으며, 음원으로는 OLYMPUS사의 주파수가 1MHz인 immersion type의 트랜스듀서(V303-SU)를 사용하였다. 신호는 oscilloscope를 사용하여 취득하였다.

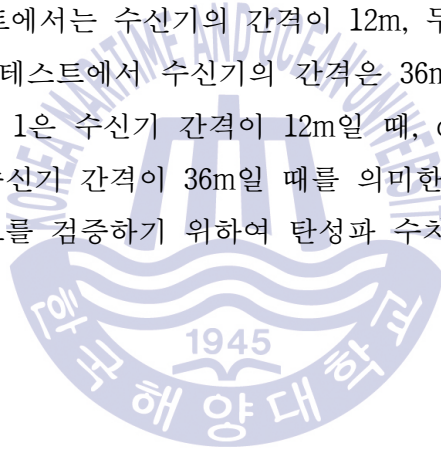
탄성과 수치모형 자료를 생성하기 위하여 파선추적법(ray tracing)을 사용하여 탄성과 자료를 생성하는 seismic un\*x를 사용하였다. 파선의 입사각은 65°로 설정하였으며, do-while loop 반복문을 이용하여 음원 및 수신기의 정보를 업데이트 하였다. Triseis 명령문으로 탄성과 트레이스를 생성하였으며, 명령문 suaddhead를 이용하여 트레이스 헤더 값을 생성하였고 명령문 sushw를 이용하여 트레이스 정보를 입력하였다.



### 3.1 가변 심도 스트리머의 배열에 따른 공간 알리아싱 비교

#### 3.3.1 수신기 간격에 따른 공간 알리아싱 비교

공간 알리아싱은 수신기의 간격에 따라 발생한다. 따라서 탄성과 축소모형 실험을 통해 수신기 간격에 따라 광대역 탄성과 자료 취득하였다. 취득한 탄성과 자료를  $f-k$  영역에서 공간 알리아싱을 비교하였다. 수신기의 간격은 12m, 24m, 36m로 설정하여 탐사를 수행하였으며, 해양 탄성과 탐사에서 보편적으로 사용하는 수신기 간격인 12m를 시작으로 수신기 간격은 식 (1)을 고려하여 공간 알리아싱이 발생하는 수신기 간격을 설정하였다. 수신기의 수는 24개로 동일하다. 첫 번째 테스트에서는 수신기의 간격이 12m, 두 번째 테스트는 수신기 간격이 24m, 세 번째 테스트에서 수신기의 간격은 36m이다. Fig. 10는 스트리머의 모식도이며, case 1은 수신기 간격이 12m일 때, case 2는 수신기 간격이 24m일 때, case 3은 수신기 간격이 36m일 때를 의미한다. 탄성과 축소모형 실험을 통해 취득한 자료를 검증하기 위하여 탄성과 수치모형 실험을 통하여 자료를 생성하였다.



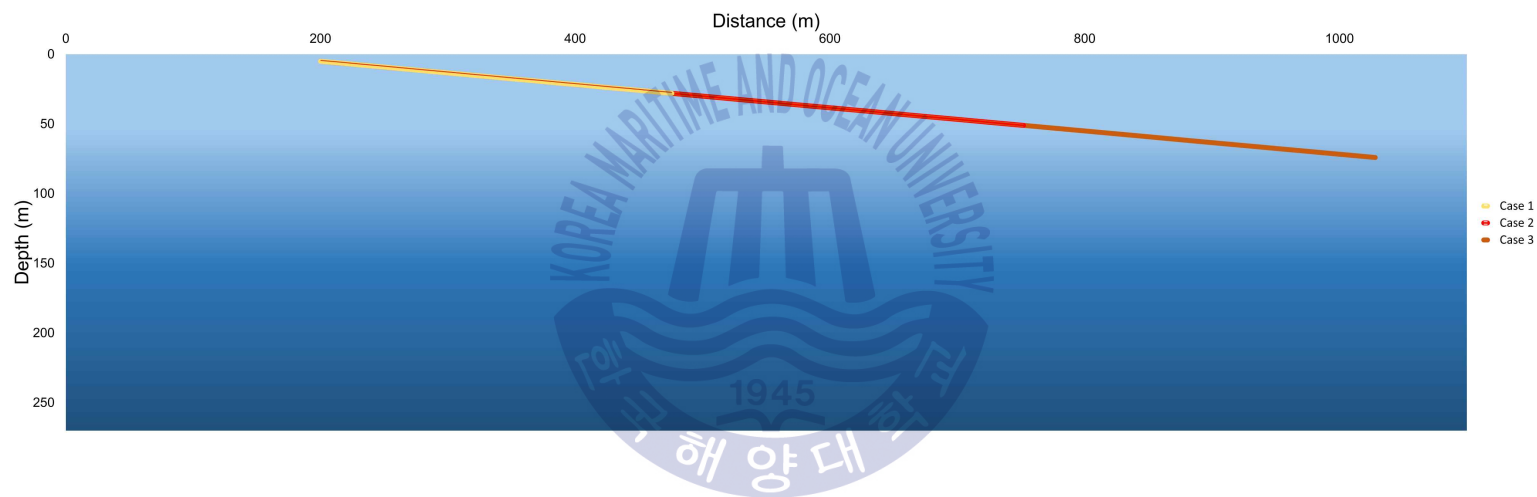


Fig. 10 The schematic diagram of the streamer depending on the receiver interval

Fig. 11은 수신기 간격이 12m, 24m, 36m일 때 shot gather이며, Fig. 12는 수신기 간격이 12m, 24m, 36m일 때  $f-k$  영역에서 공간 알리아싱을 비교한 그림이다. Fig. 11에서 0s부터 0.05s까지는 pulser/receiver의 전기적 잡음을 제거하기 위해 뮤팅을 실시하였다. 또한 탄성과 축소모형 실험에서 사용한 트랜스듀서의 빔이 수직 하부 쪽으로 방사하기 때문에 직접파는 미비하게 나타난다. Fig. 11에서 다중 반사파 및 ringing 현상으로 인하여 반사 신호 외에 잡음이 취득된 것을 확인할 수 있다. Fig. 12의  $f-k$  영역에서 빨간색 원으로 표시한 부분이 공간 알리아싱이 존재하는 부분이다. 수신기 간격 12m는 나이퀴스트 샘플링 법칙인 식 (1)에 따라 공간 알리아싱이 발생하지 않는 수신기 간격으로 Fig. 12 (a)를 보면 공간 알리아싱이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. Fig. 12에서 수신기의 간격이 증가함에 따라 공간 알리아싱 현상이 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 13은 수신기 간격이 12m, 24m, 36m일 때 탄성과 수치모형 실험을 통해 취득한 탄성과 자료를  $f-k$  영역에서 표현하여 공간 알리아싱을 비교한 그림이다. 탄성과 축소모형 실험과 같은 탐사 변수를 설정하여 수치 자료를 취득하였으나  $f-k$  영역에서 분포가 다르게 나타났다. 탄성과 축소모형 실험에 사용한 음원의 경우 저주파수 성분이 포함되어 있고 3차원 공간에서 빔 형태로 전파한다. 그러나 탄성과 수치모형 실험의 경우 2차원 공간에서 구형발산 한다. 이러한 음원의 차이로 인하여 탄성과 축소모형 실험 자료와 수치모형 자료가 정확하게 일치하지 않는다고 판단된다. 그러나 탄성과 축소모형 실험을 통해 취득한 자료와 같게 수신기 간격이 12m일 때 공간 알리아싱이 존재하지 않았으며, 수신기 간격이 증가함에 따라 공간 알리아싱 현상이 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

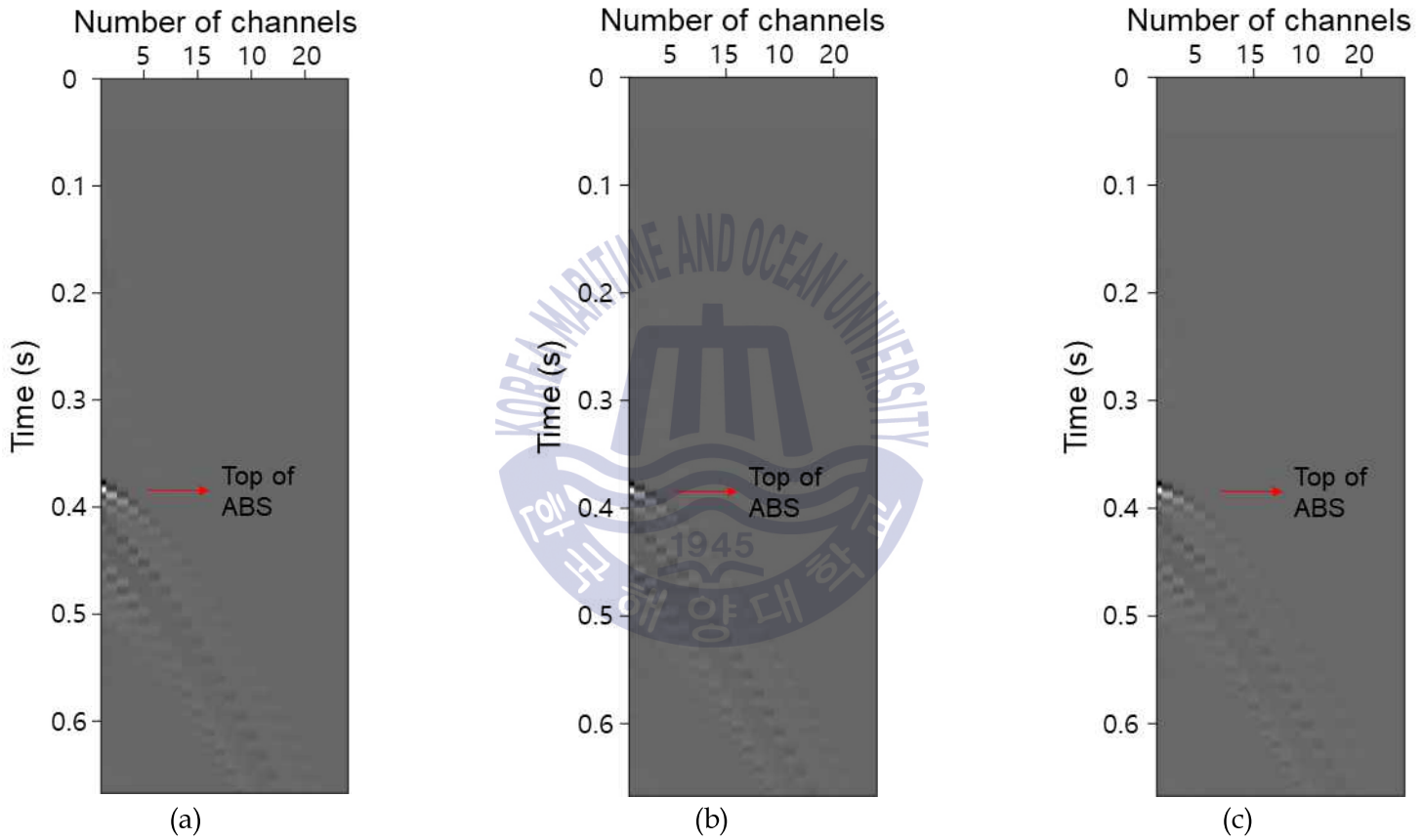
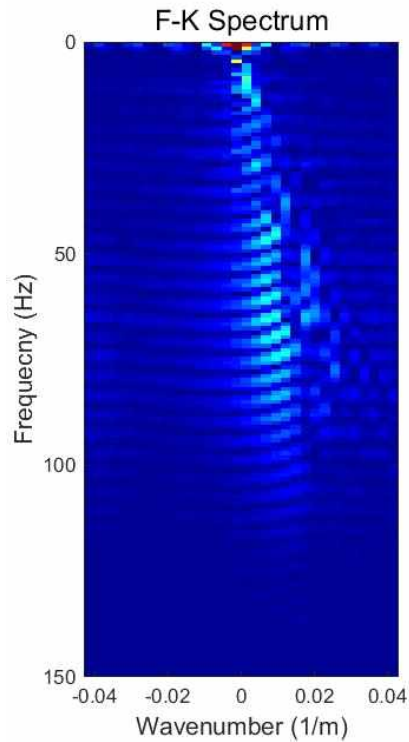
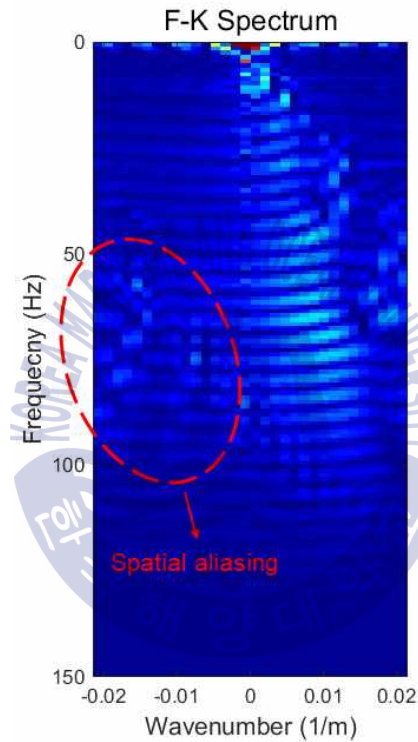


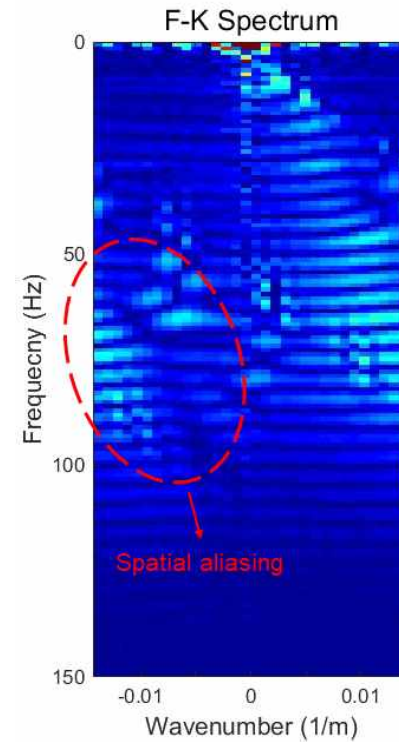
Fig. 11 Shot gather depending on receiver interval: (a) 12m(case 1), (b) 24m(case 2) and (c) 36m(case 3)



(a)



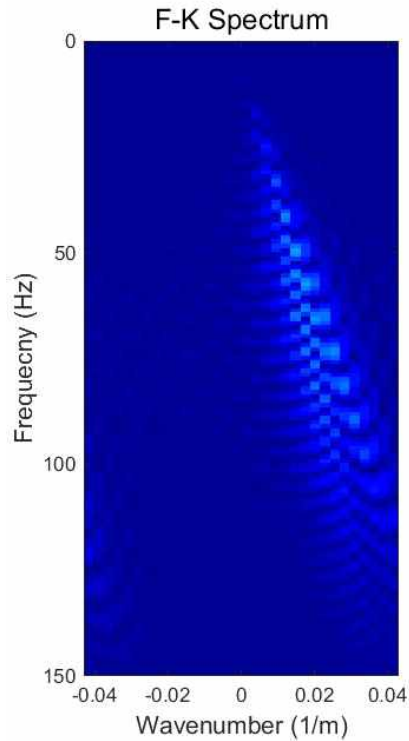
(b)



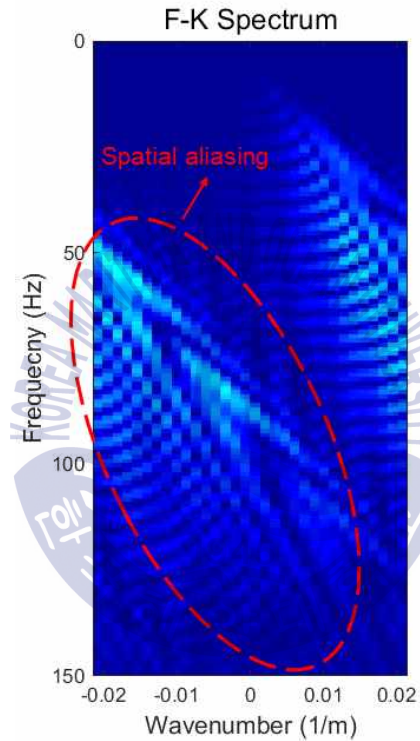
(c)

Fig. 12  $f-k$  spectrum depending on receiver interval(physical modeling): (a) 12m(case 1), (b) 24m(case 2) and (c) 36m(case 3)

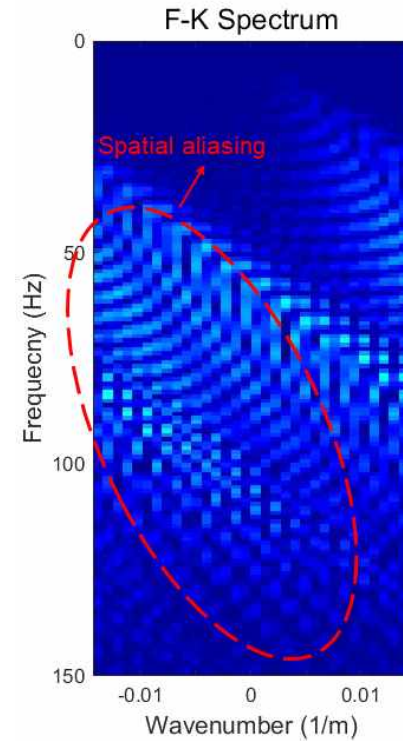




(a)



(b)



(c)

Fig. 13  $f-k$  spectrum depending on receiver interval(numerical modeling): (a) 12m(case 1), (b) 24m(case 2) and (c) 36m(case 3)

### 3.1.2 가변 심도 스트리머의 심도에 따른 공간 알리아싱 비교

가변 심도 스트리머를 이용하는 광대역 탄성과 탐사에서 스트리머의 심도에 따라 신호의 특성이 다르게 나타난다. 따라서 가변 심도 스트리머의 심도에 따른 공간 알리아싱을 비교하기 위하여 수신기의 수는 24개, 수신기의 간격은 36m로 동일하게 설정하고 가변 심도 스트리머의 최대 심도를 다르게 설정하였다. Fig. 14는 스트리머의 모식도이며, case 1은 가변 심도 스트리머의 최대 심도가 28m이고 가변 심도 스트리머의 심도 가변 구간은 5m에서 28m이다. Case 2는 가변 심도 스트리머의 최대 심도는 51m이고 가변 심도 스트리머의 심도 가변 구간은 5m에서 51m이다. Case 3은 가변 심도 스트리머의 최대 심도는 51m이고 가변 심도 스트리머의 심도 가변 구간은 5m에서 74m이다.

본 연구에서 이용한 탄성과 축소모형 시스템은 3축을 0.1mm 단위로 이동이 가능하다. 0.1mm는 실험에서 설정한 축소비를 고려하면 현장 단위에서 1m이다. 따라서 수신기를 z축으로 이동할 때는 1m 간격으로 이동이 가능하다. 광대역 탄성과 탐사에서 가변 심도 스트리머의 심도는 최대 60~70m이다. 따라서 수신기의 수가 24개 일 때 현장성을 반영한다면 z축으로 최대 3m씩 이동할 수 있다. x축 이동인 수신기의 간격을 36m 고정하였을 때 z축을 1m, 2m, 3m로 이동하면 가변 심도 스트리머의 최대 심도는 수심이 5m일 때 28m, 51m, 74m로 계산된다.

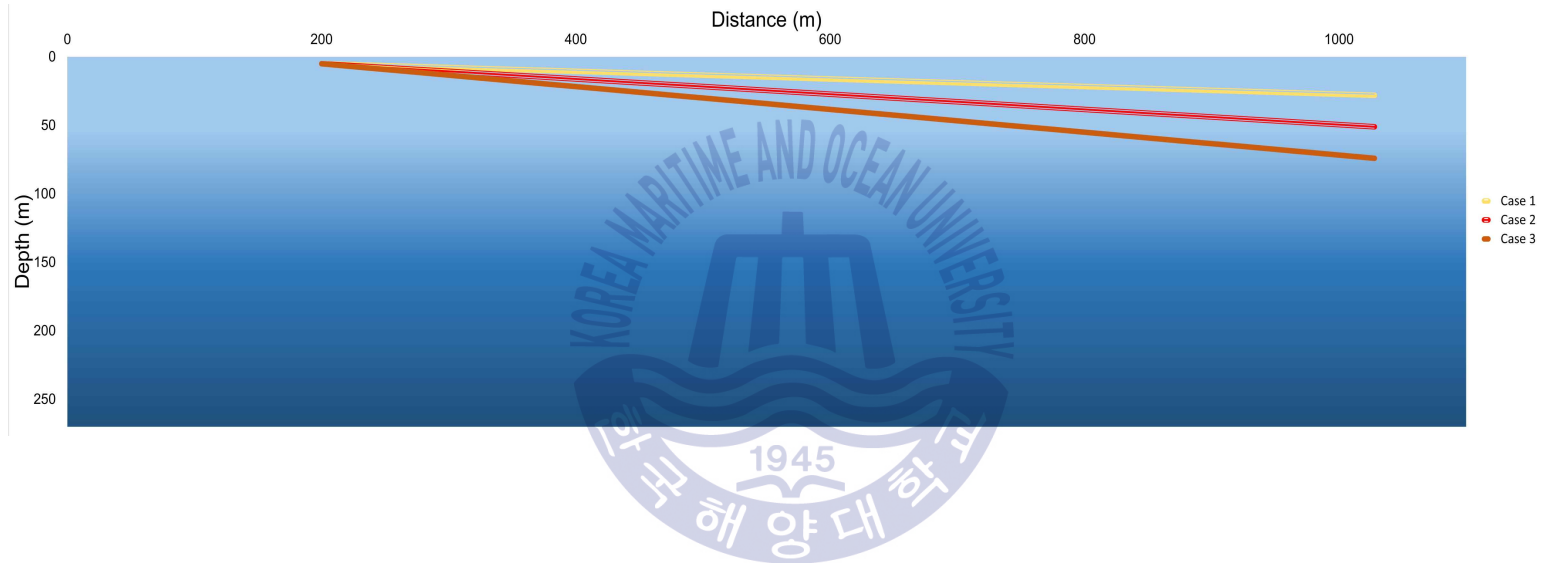
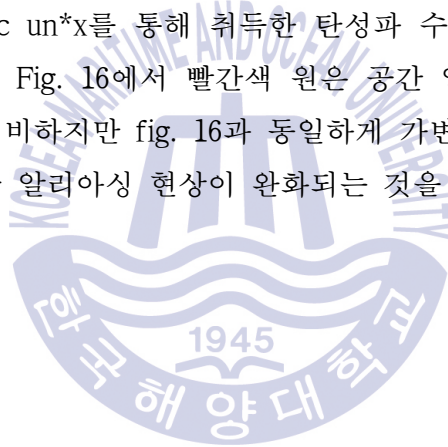


Fig. 14 The schematic diagram of the streamer depending on the depth of the variable depth streamer

Fig. 15는 가변 심도 스트리머의 심도가 각각 28m, 51m, 74m일 때 shot gather이며, Fig. 15는 가변 심도 스트리머의 심도가 각각 28m, 51m, 74m 일 때  $f-k$  영역에서 공간 알리아싱을 비교한 그림이다. Fig. 13에서 공간 알리아싱으로 인하여 탄성과 신호가 계산형식의 모양으로 연속성이 미흡하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 16의  $f-k$  영역에서 빨간색 원으로 표시한 부분이 공간 알리아싱이 존재하는 부분이다. 가변 심도 스트리머의 심도가 증가함에 따라 반사 신호의 도달시간(travel time)이 짧아진다. 따라서 가변 심도 스트리머의 심도가 증가하면서 shot gather에서 반사 신호의 각도가 완만하게 나타나고 공간 알리아싱 현상에 강점을 보인다. 또한 가변 심도 스트리머의 경사가 급경사일수록  $f-k$  영역에서 반사 신호가 파수 0에 근접하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 17은 seismic un\*x를 통해 취득한 탄성과 수치모형 자료를  $f-k$  영역에서 나타낸 것이다. Fig. 16에서 빨간색 원은 공간 알리아싱이 존재하는 부분을 표시한 것으로 미비하지만 fig. 16과 동일하게 가변 심도 스트리머의 심도가 증가함에 따라 공간 알리아싱 현상이 완화되는 것을 확인할 수 있다.



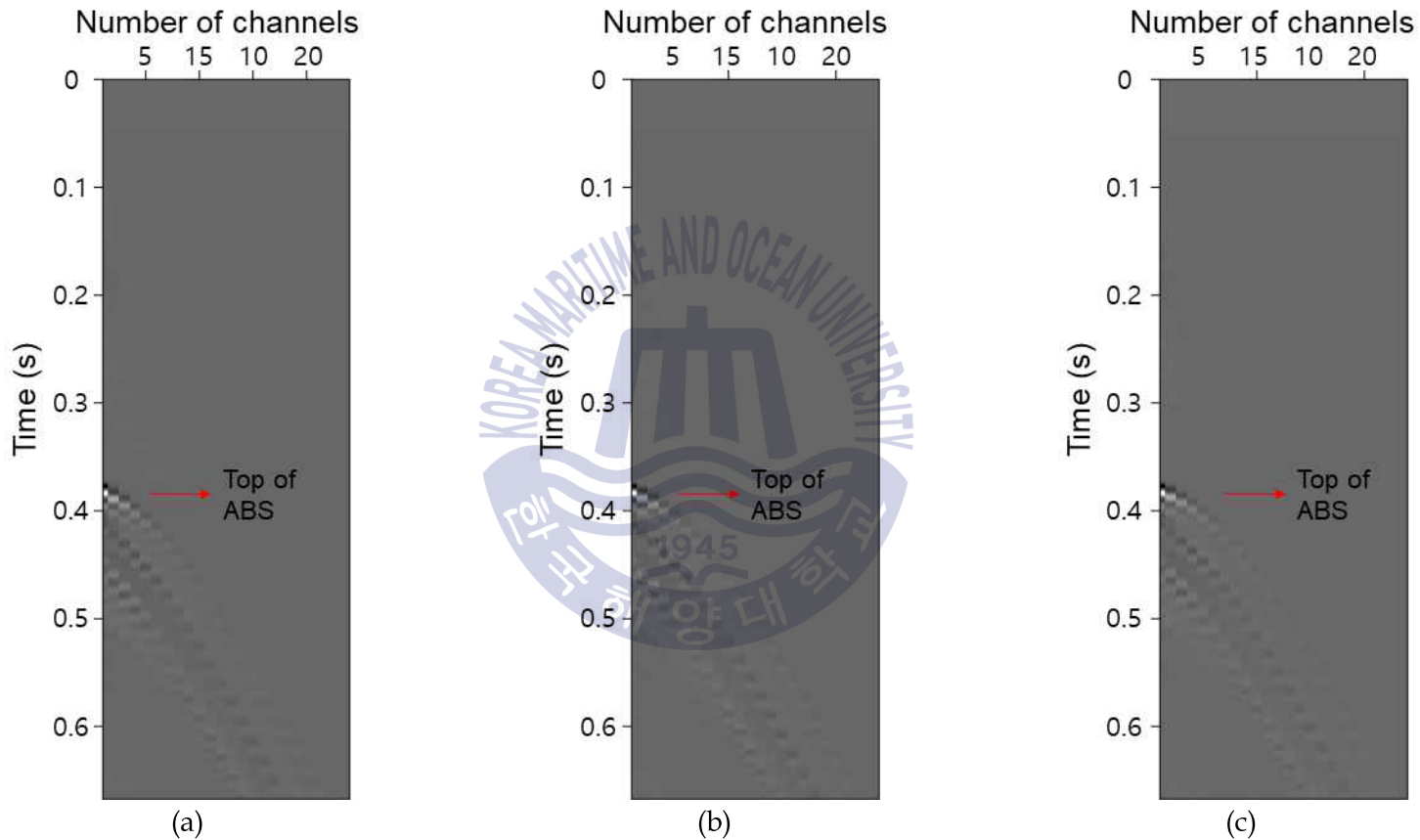
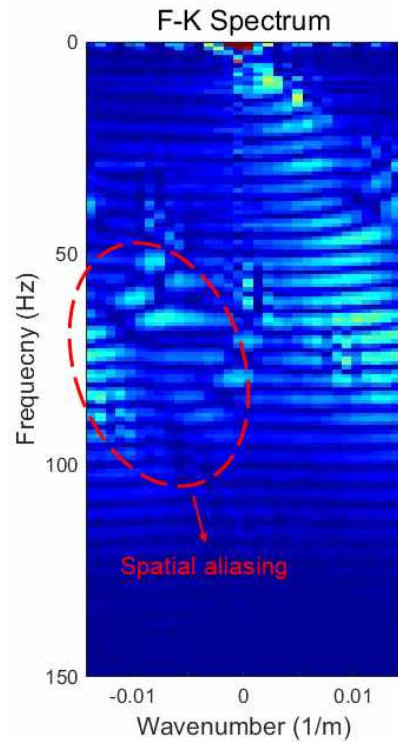
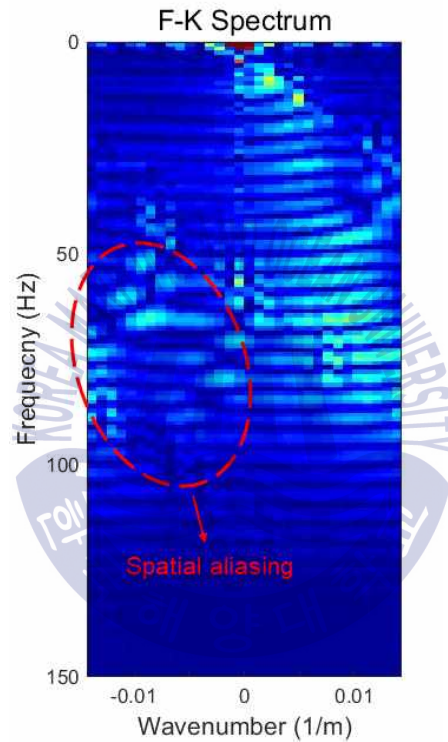


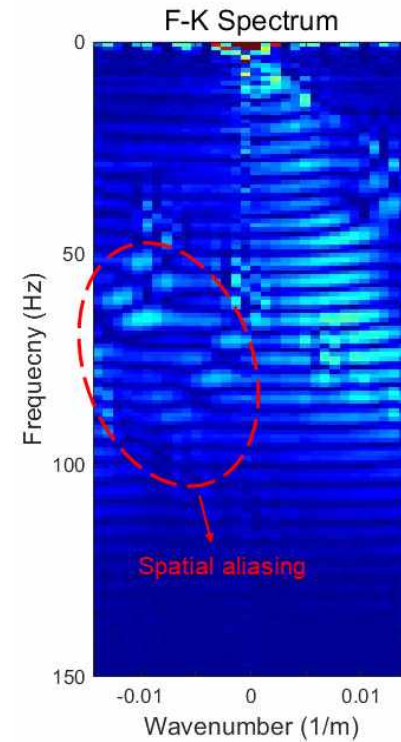
Fig. 15 Shot gather depending on streamer depth: (a) 28m(case 1), (b) 51m(case 2) and (c) 74m(case 3)



(a)

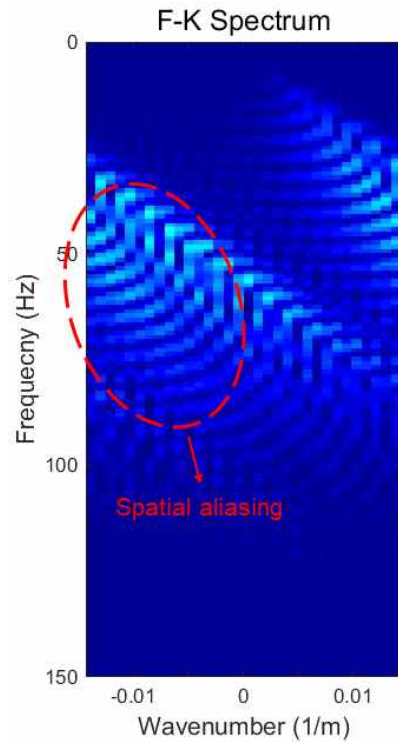


(b)

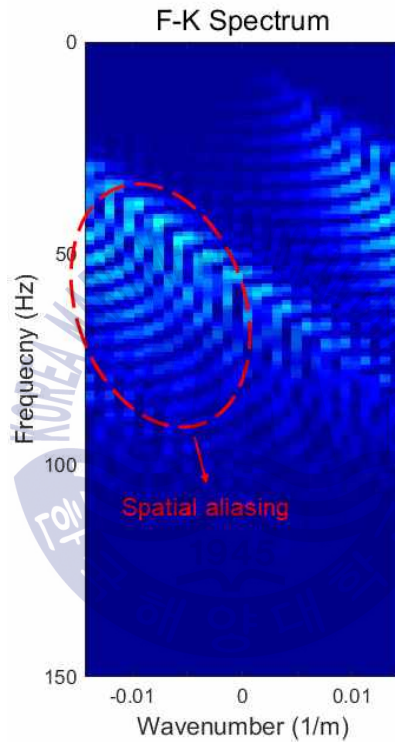


(c)

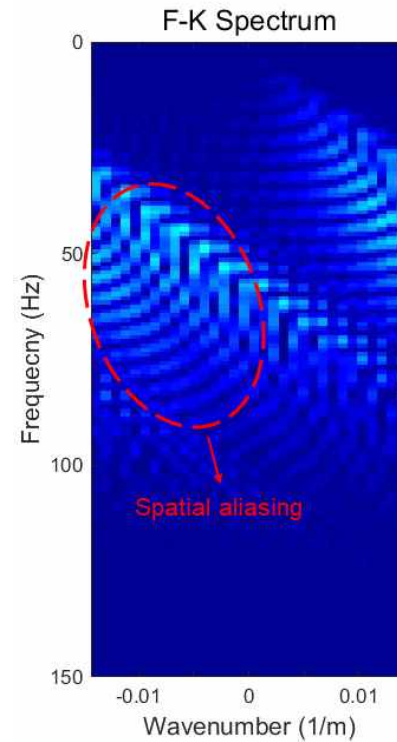
**Fig. 16**  $f-k$  spectrum depending on streamer depth(physical modeling): (a) 28m(case 1), (b) 51m(case 2) and (c) 74m(case 3)



(a)



(b)



(c)

Fig. 17  $f-k$  spectrum depending on streamer depth(numerical modeling): (a) 28m(case 1), (b) 51m(case 2) and (c) 74m(case 3)



### 3.2 가변 심도 스트리머의 배열에 따른 주파수 성분 비교

광대역 탄성과 탐사에서 가변 심도 스트리머의 심도, 수신기의 간격에 따라 공간 알리아싱을 파악하였다. 가변 심도 스트리머의 심도, 수신기의 간격에 따라 공간 알리아싱의 특성이 다르게 나타나는 것을 확인하였으며, 추가적으로 가변 심도 스트리머의 심도, 수신기의 간격에 따른 주파수 변화를 파악하기 위하여 주파수 영역에서의 주파수 성분을 비교해 보았다. 광대역 탄성과 탐사 방법에 따른 주파수 성분 비교를 위한 탄성과 자료는 파동방정식을 이용하여 탄성과 수치모형 실험으로 취득한 탄성과 자료를 사용하였다. 탐사 변수는 Table 1와 같으며, 탐사 모식도는 fig. 9과 같다.

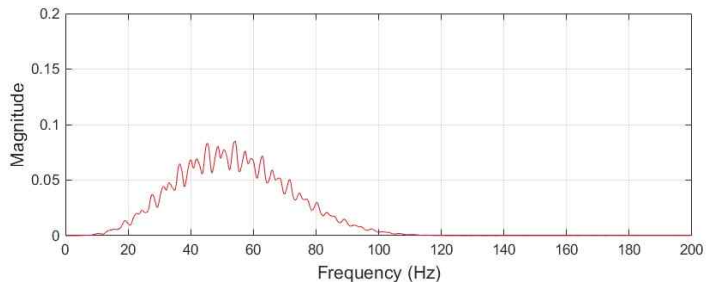




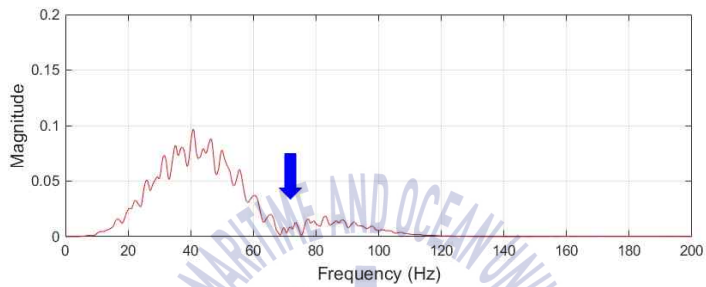
### 3.2.1 수신기 간격에 따른 주파수 성분 비교

광대역 탄성과 탐사에서 수신기 간격에 따른 주파수 성분 분석을 위하여 수신기의 간격은 12m, 24m, 36m로 설정하여 탐사를 수행하였다. 수신기의 수는 24개로 동일하다. 첫 번째 테스트에서는 수신기의 간격이 12m, 두 번째 테스트는 수신기 간격이 24m, 세 번째 테스트에서 수신기의 간격은 36m이다. Fig. 10은 스트리머의 모식도이며, case 1은 수신기 간격이 12m일 때, case 2는 수신기 간격이 24m일 때, case 3은 수신기 간격이 36m일 때를 의미한다.

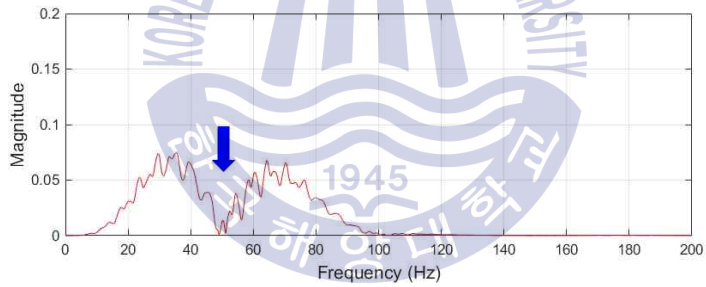




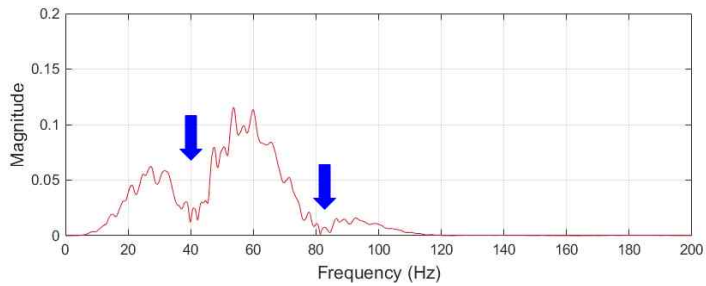
(a)



(b)

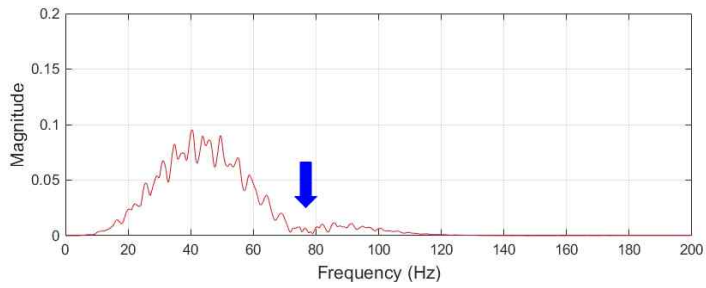


(c)

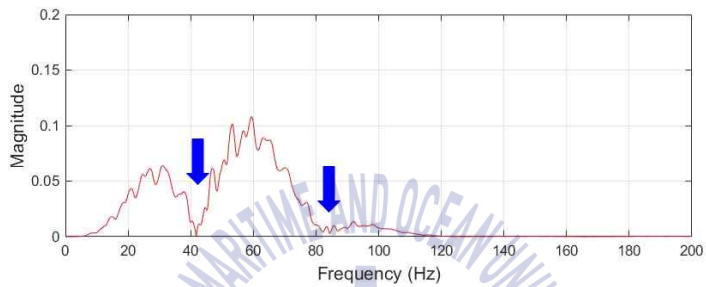


(d)

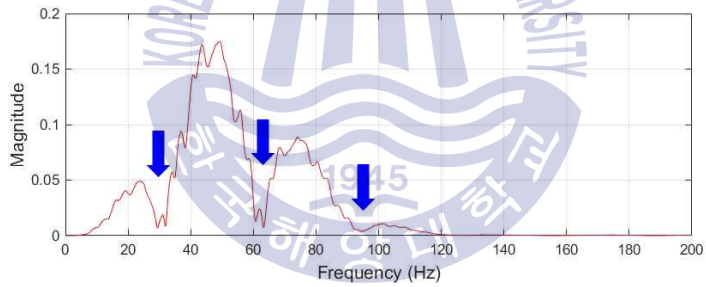
**Fig. 18** Frequency spectrum depending on receiver interval: (a) 12m(channel 6), (b) 12m(channel 12), (c) 12m(channel 18) and (d) 12m(channel 24)



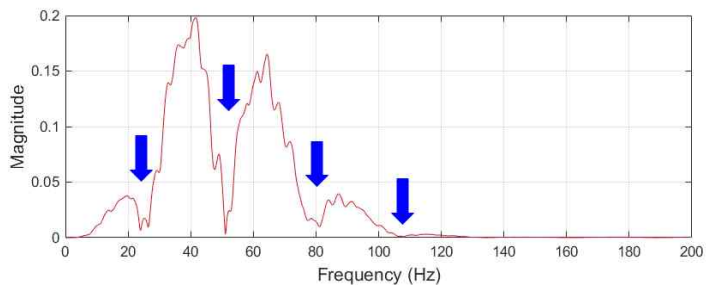
(a)



(b)

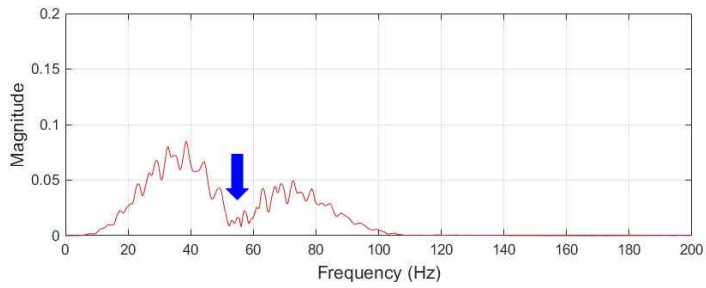


(c)

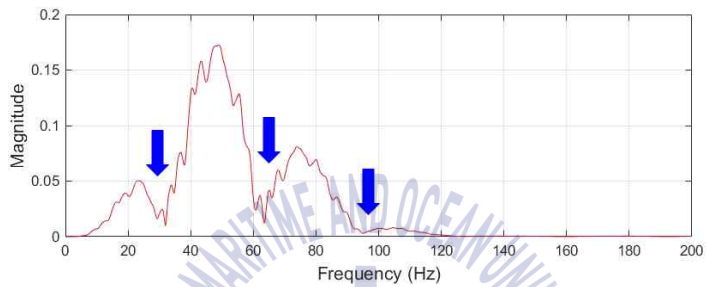


(d)

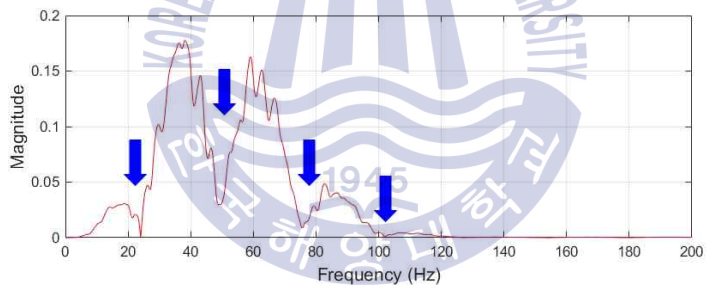
**Fig. 19** Frequency spectrum depending on receiver interval: (a) 24m(channel 6), (b) 24m(channel 12), (c) 24m(channel 18) and (d) 24m(channel 24)



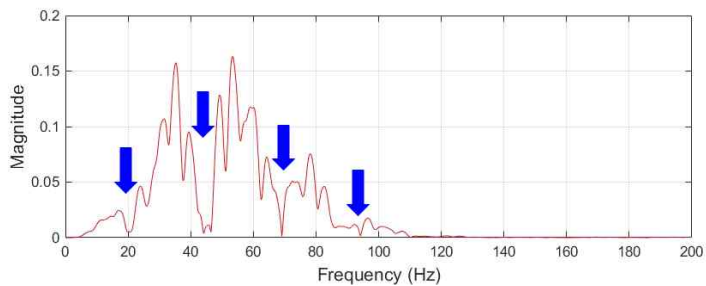
(a)



(b)



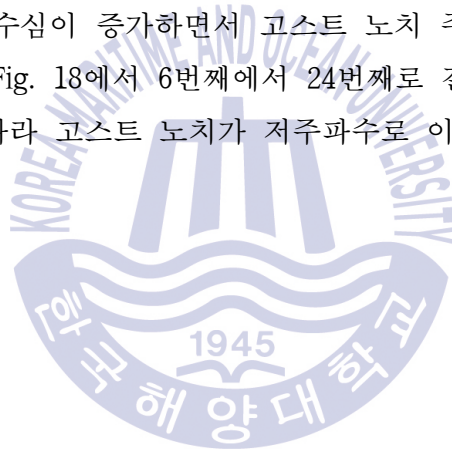
(c)



(d)

**Fig. 20** Frequency spectrum depending on receiver interval: (a) 36m(channel 6), (b) 36m(channel 12), (c) 36m(channel 18) and (d) 36m(channel 24)

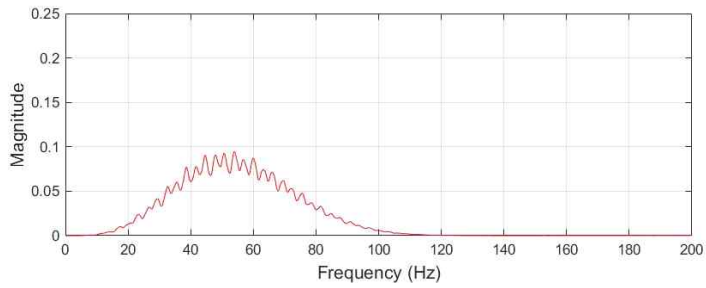
Fig. 18, 19, 20은 수신기 간격이 각각 12m, 24m, 36m일 때 6번째, 12번째, 18번째, 24번째 수신기에서 기록된 트레이스를 주파수 영역에서 나타낸 그림이다. Fig. 18, 19, 20에서 파란색 화살표 부분은 고스트(ghost)에 의하여 생긴 노치를 표시한 것으로 주파수 성분이 손실된 것을 확인할 수 있다. Fig. 18, 19, 20서 수신기의 간격이 증가함에 따라 노치의 수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 수신기 고스트의 지연시간과 고스트 노치 주파수의 관계는 역수 관계이다. 수신기 고스트의 지연시간이 증가하게 되면 고스트 노치 주파수는 감소하게 된다. 수신기 고스트의 지연시간은 수신기의 수심, 고스트의 입사각 $\theta$ , 수층의 속도의 영향을 받는다. 음원과 수신기의 간격인 오프셋과 수신기 간격이 증가함에 따라 수신기의 깊이인 수심도 증가하게 되며 고스트의 지연시간이 증가한다. 따라서 수신기의 수심이 증가하면서 고스트 노치 주파수는 저주파수로 이동하며 생기게 된다. Fig. 18에서 6번째에서 24번째로 갈수록 수신기의 깊이는 점점 깊어지며 이에 따라 고스트 노치가 저주파수로 이동하며 생기는 것을 확인할 수 있다.



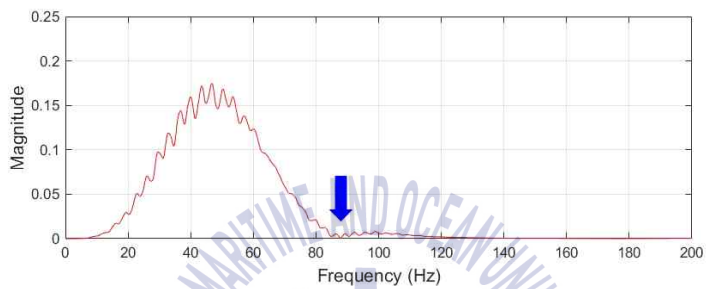
### 3.2.2 가변 심도 스트리머의 심도에 따른 주파수 성분 비교

앞서 가변 심도 스트리머의 심도에 따른 공간 알리아싱 특성을 파악하였다. 광대역 탄성과 탐사에서 스트리머의 가변에 따라 신호의 특성이 다르게 나타난다. 따라서 가변 심도 스트리머의 심도에 따른 주파수 성분을 비교하기 위하여 수신기의 수는 24개, 수신기의 간격은 36m로 동일하게 설정하고 가변 심도 스트리머의 심도가 28m, 51m, 74m일 때 탄성과 광대역 탐사를 수행하였다. Fig. 14는 스트리머의 모식도이며, case 1은 가변 심도 스트리머의 심도가 28m일 때, case 2는 가변 심도 스트리머의 심도가 51m일 때, case 3은 가변 심도 스트리머의 심도가 74m일 때를 의미한다.

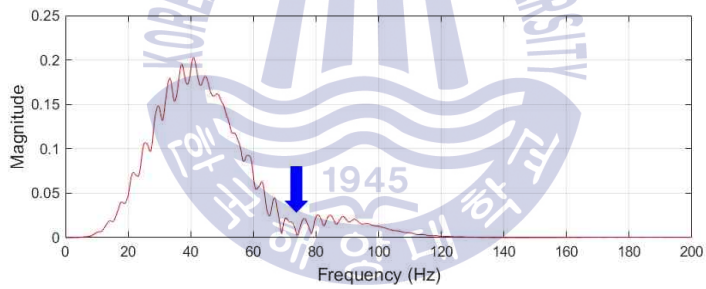




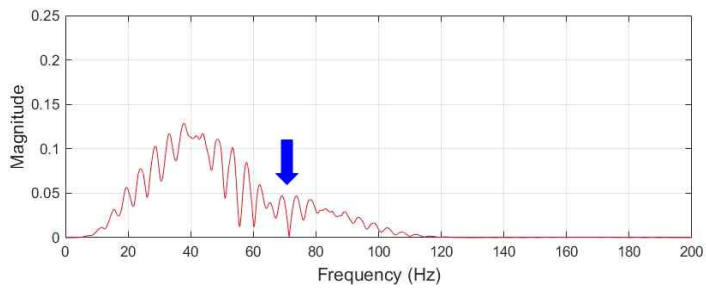
(a)



(b)

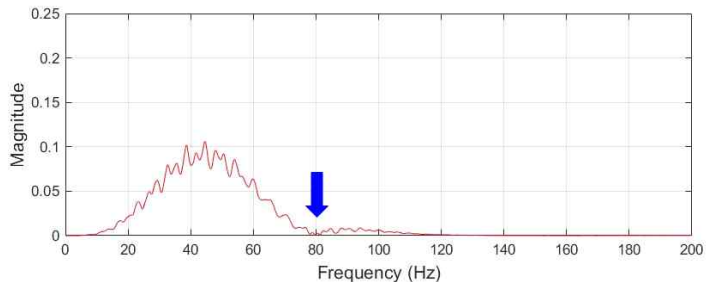


(c)

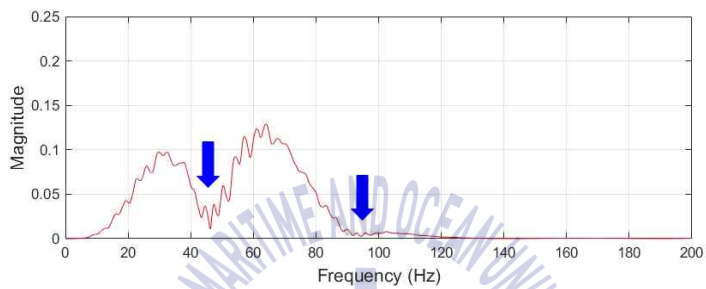


(d)

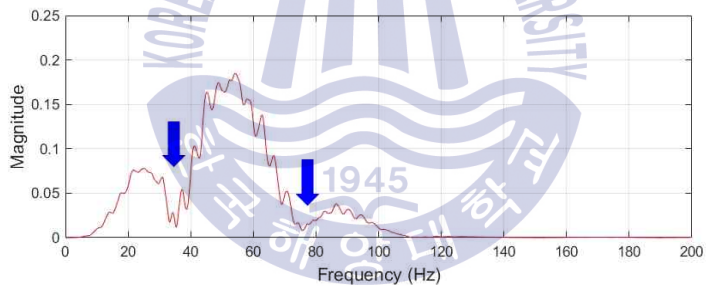
**Fig. 21** Frequency spectrum depending on streamer depth: (a) 28m(channel 6), (b) 28m(channel 12), (c) 28m(channel 18) and (d) 28m(channel 24)



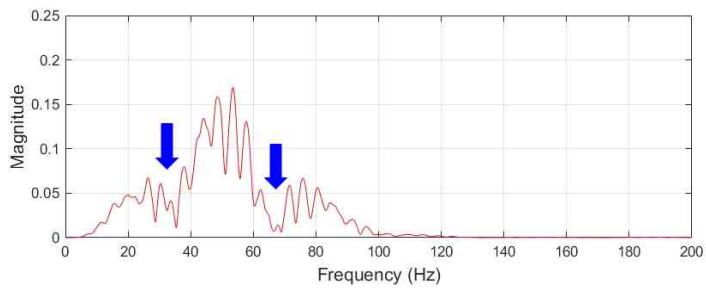
(a)



(b)



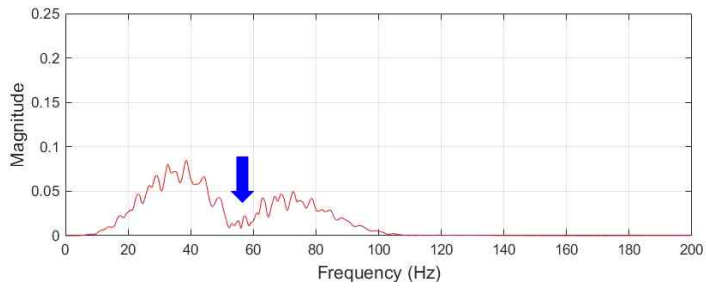
(c)



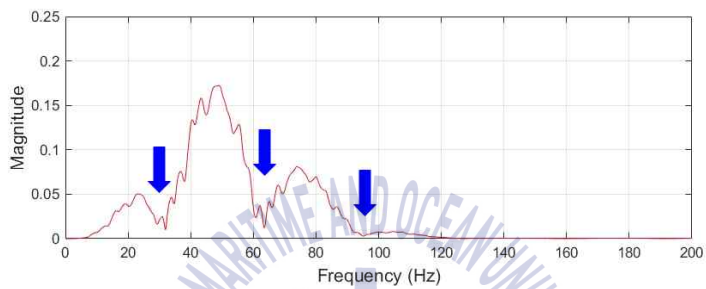
(d)

**Fig. 22** Frequency spectrum depending on streamer depth: (a) 51m(channel 6), (b) 51m(channel 12), (c) 51m(channel 18) and (d) 51m(channel 24)

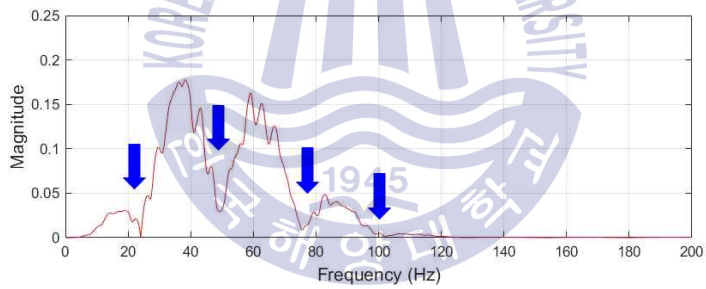




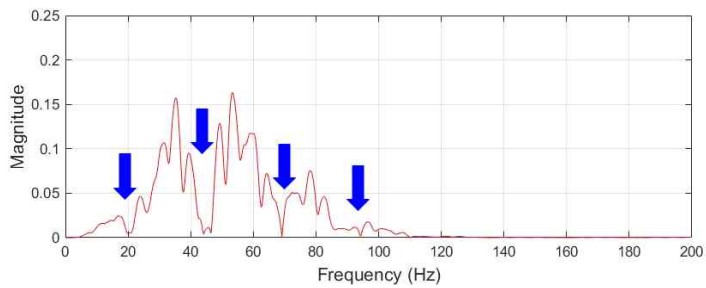
(a)



(b)



(c)



(d)

**Fig. 23** Frequency spectrum depending on streamer depth: (a) 74m(channel 6), (b) 74m(channel 12), (c) 74m(channel 18) and (d) 74m(channel 24)

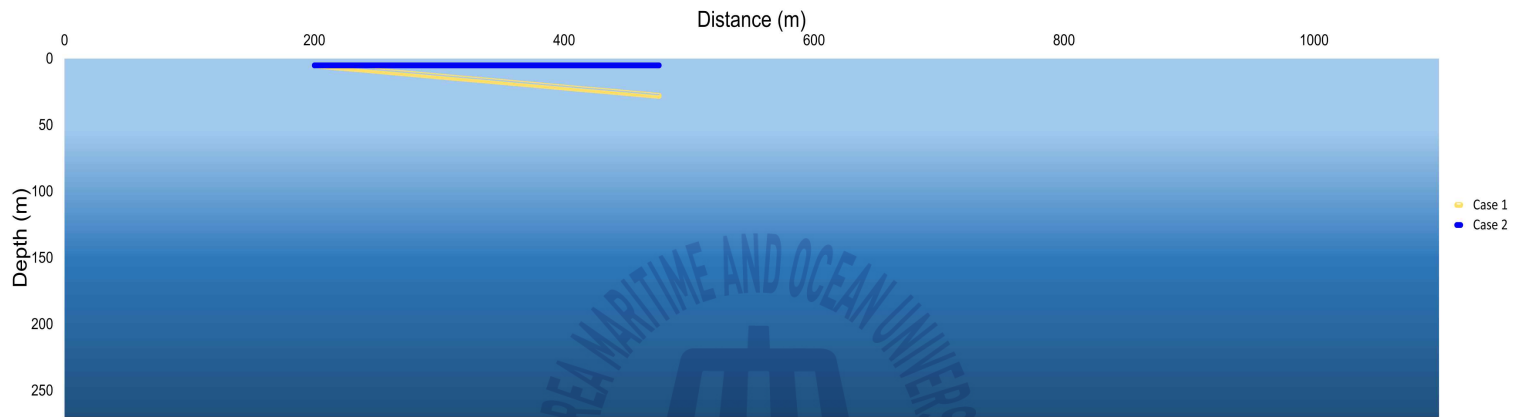
Fig. 21, 22, 23은 가변 심도 스트리머의 심도가 28m, 51m, 74m일 때 6번째, 12번째, 18번째, 24번째 수신기에서 기록된 트레이스를 주파수 영역에서 나타낸 그림이다. 각 그림에서 파란색 화살표는 고스트에 의한 노치를 나타낸 것으로 가변 심도 스트리머의 심도가 증가함에 따라 노치의 수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 고스트의 노치는 수신기의 심도에 영향을 받는다. 가변 심도 스트리머의 심도가 증가함에 따라 수신기의 심도가 깊어지게 되고 따라서 고스트에 의한 노치의 수가 증가하고 고스트에 의해 발생하는 노치의 주파수가 저주파수 쪽으로 이동하게 된다. Fig. 21, 22, 23에서 이와 같은 현상을 확인할 수 있다.



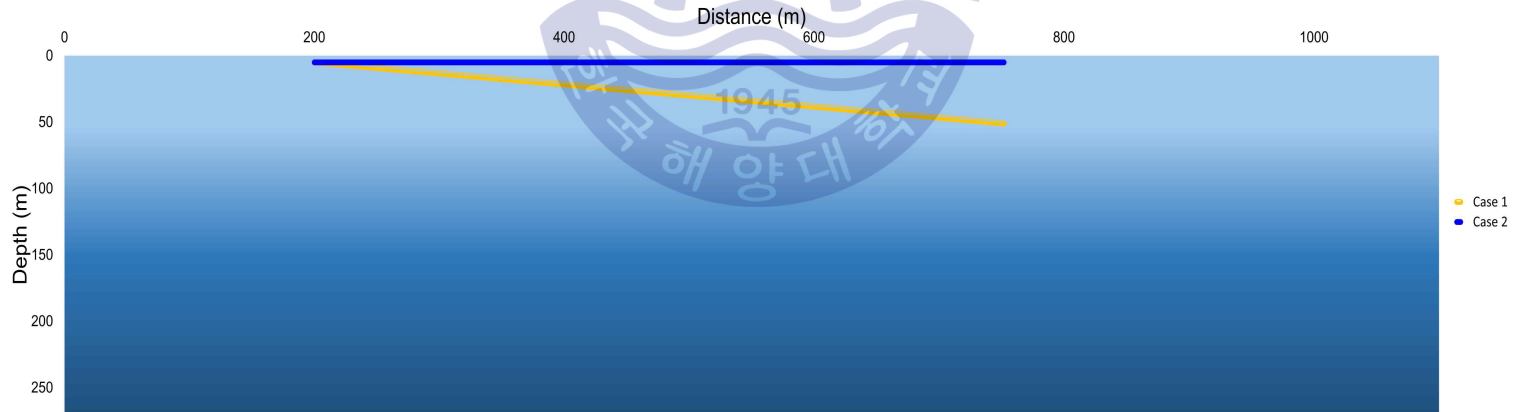
### 3.3 전통적인 해양 탄성과 탐사와 광대역 탄성과 탐사의 공간 알리아싱 비교

가변 심도 스트리머를 이용하는 광대역 탄성과 탐사와 전통적인 탄성과 탐사의 경우 취득되는 신호의 특성이 다르다. 따라서 광대역 탄성과 탐사와 전통적인 탄성과 탐사에서 동일한 수신기 간격을 설정하여 공간 알리아싱을 비교하였다. 또한 수신기의 간격이 변화함에 따른 공간 알리아싱을 파악하기 위해 수신기의 간격이 각각 12m, 24m, 36m일 때 전통적인 해양 탄성과 탐사와 광대역 탄성과 탐사의 공간 알리아싱을 비교하였다. 탄성과 자료는 탄성과 축소모형 실험과 탄성과 수치모형 실험을 통해 취득하였다. Fig. 24는 수신기 간격에 따른 수신기 모식도이며, 각각의 그림에서 case 1은 광대역 탄성과 탐사, case 2는 전통적인 해양 탄성과 탐사를 의미한다.

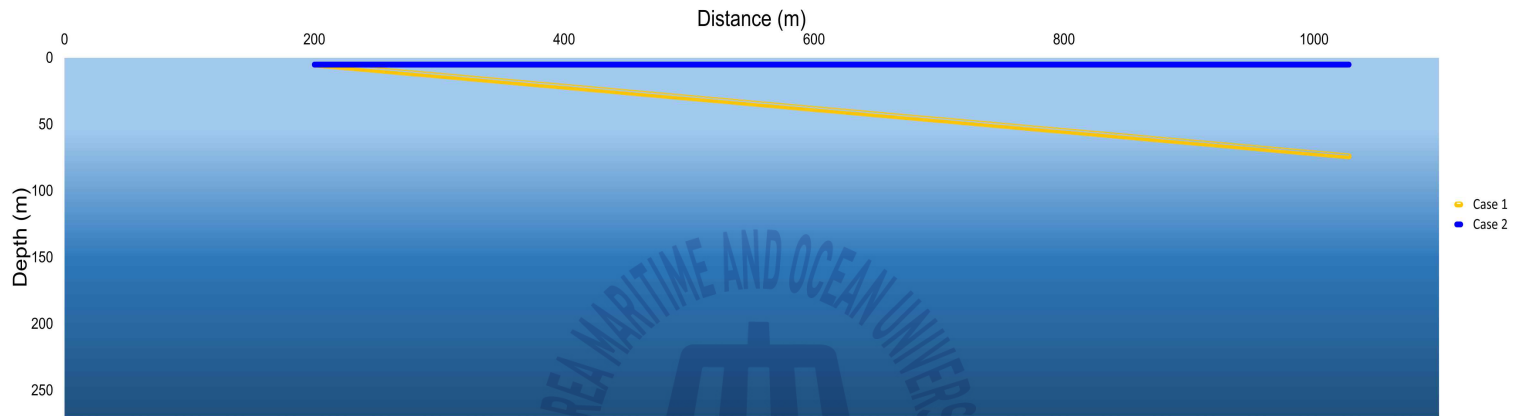




(a)

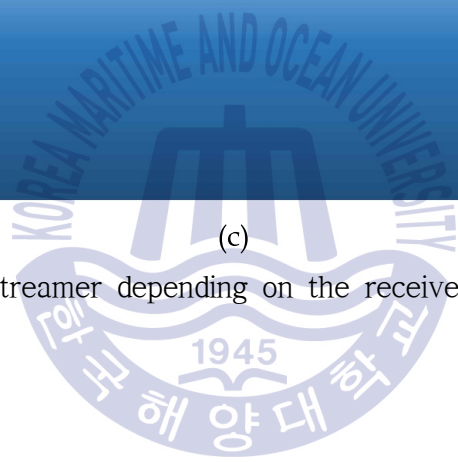


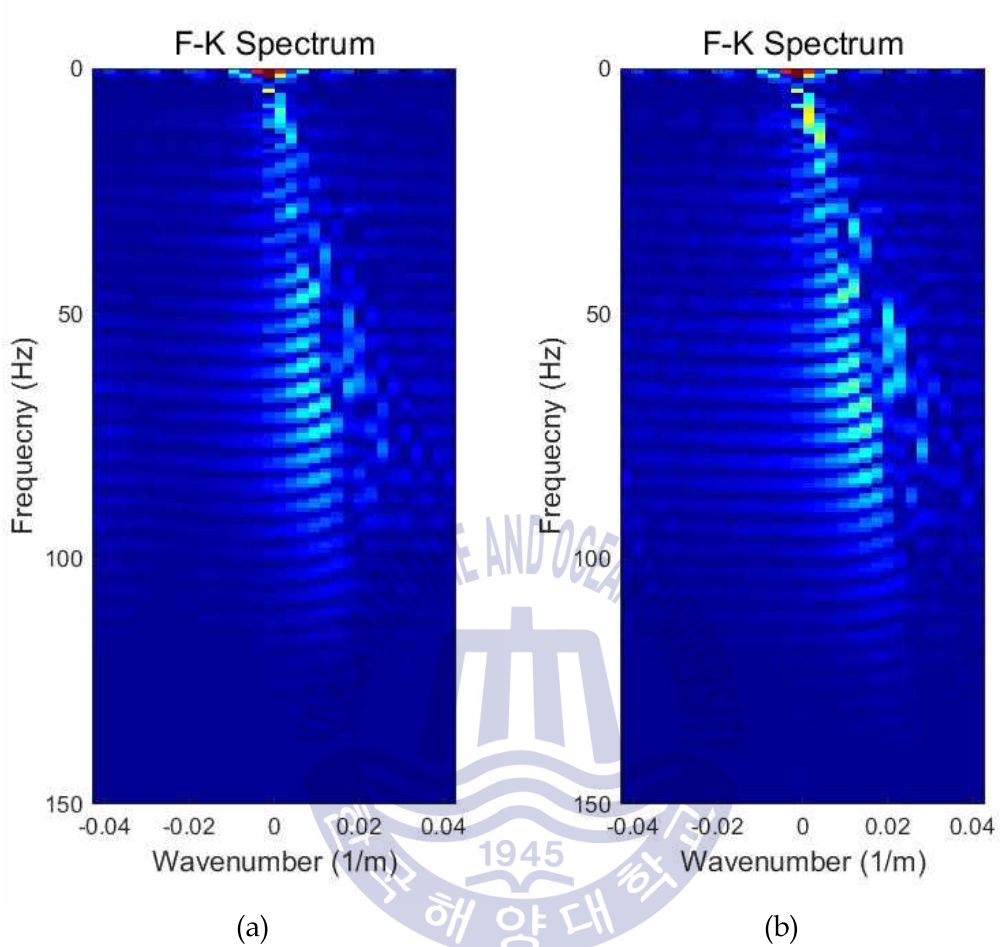
(b)



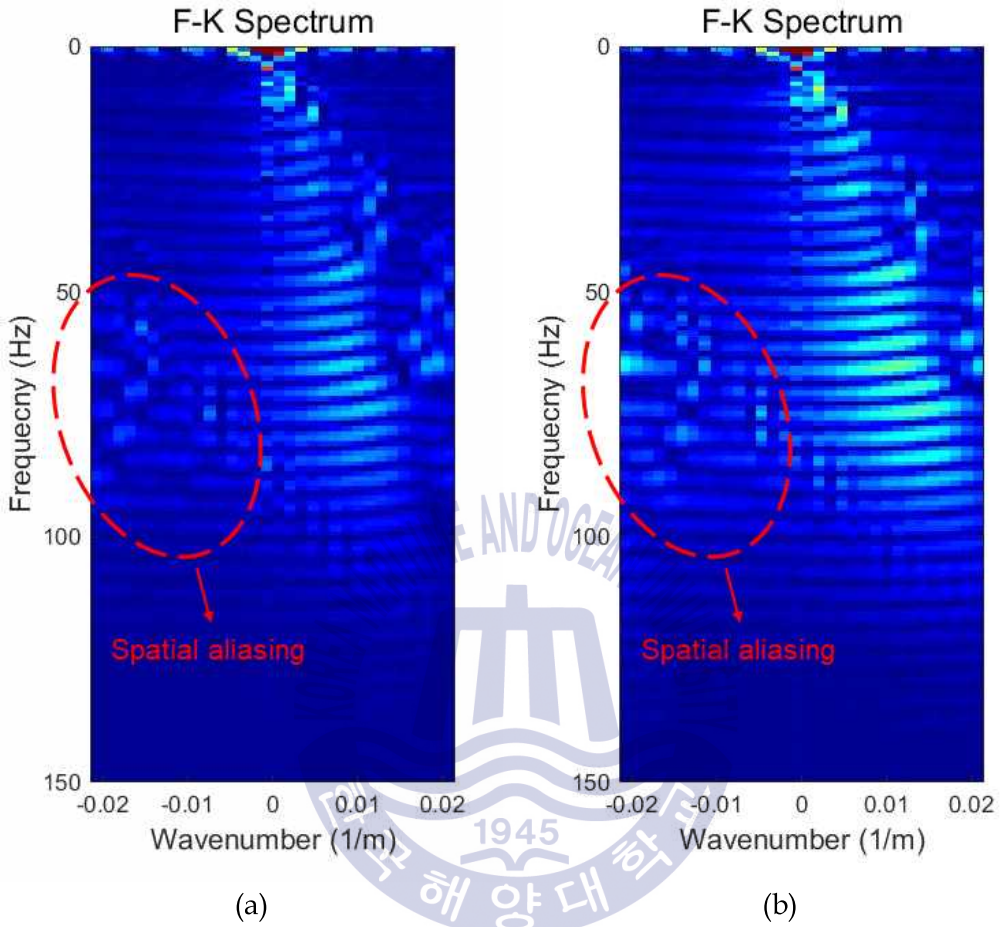
(c)

Fig. 24 The schematic diagram of the streamer depending on the receiver interval: (a) 12m, (b) 24m and (c) 36m

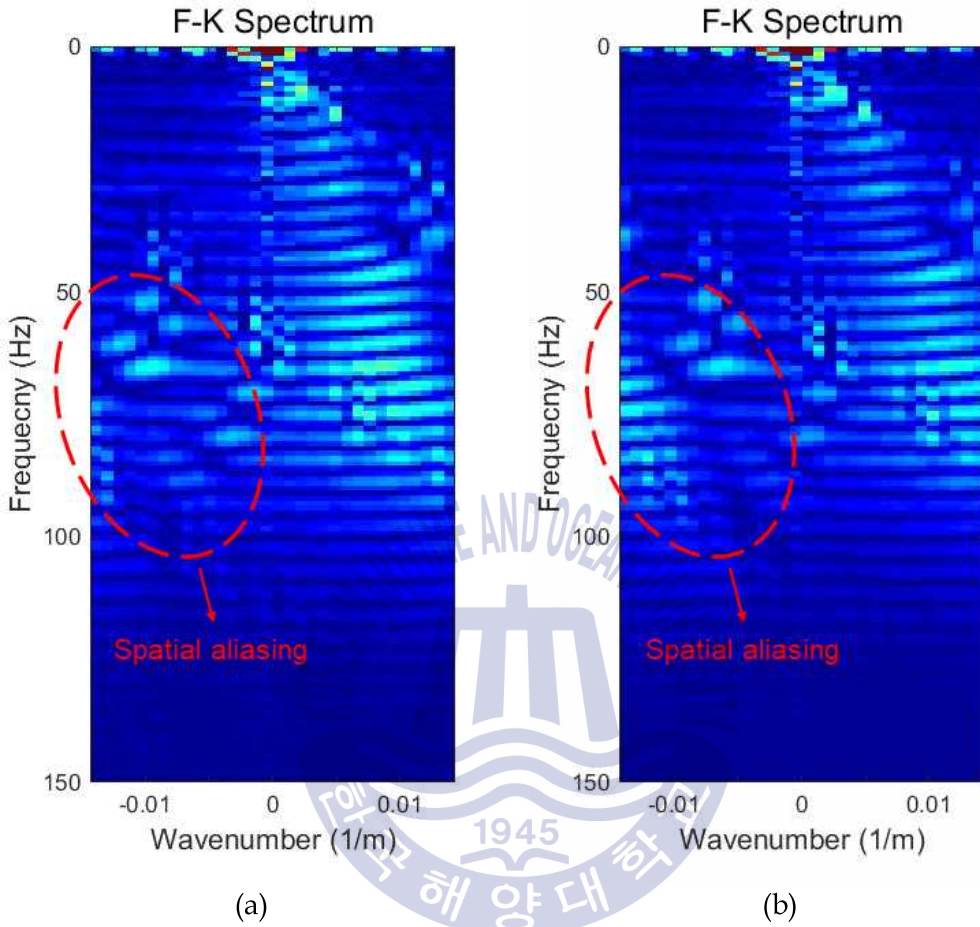




**Fig. 25**  $f-k$  spectrum depending on receiver interval 12m(physical modeling): (a) broadband seismic and (b) conventional marine seismic

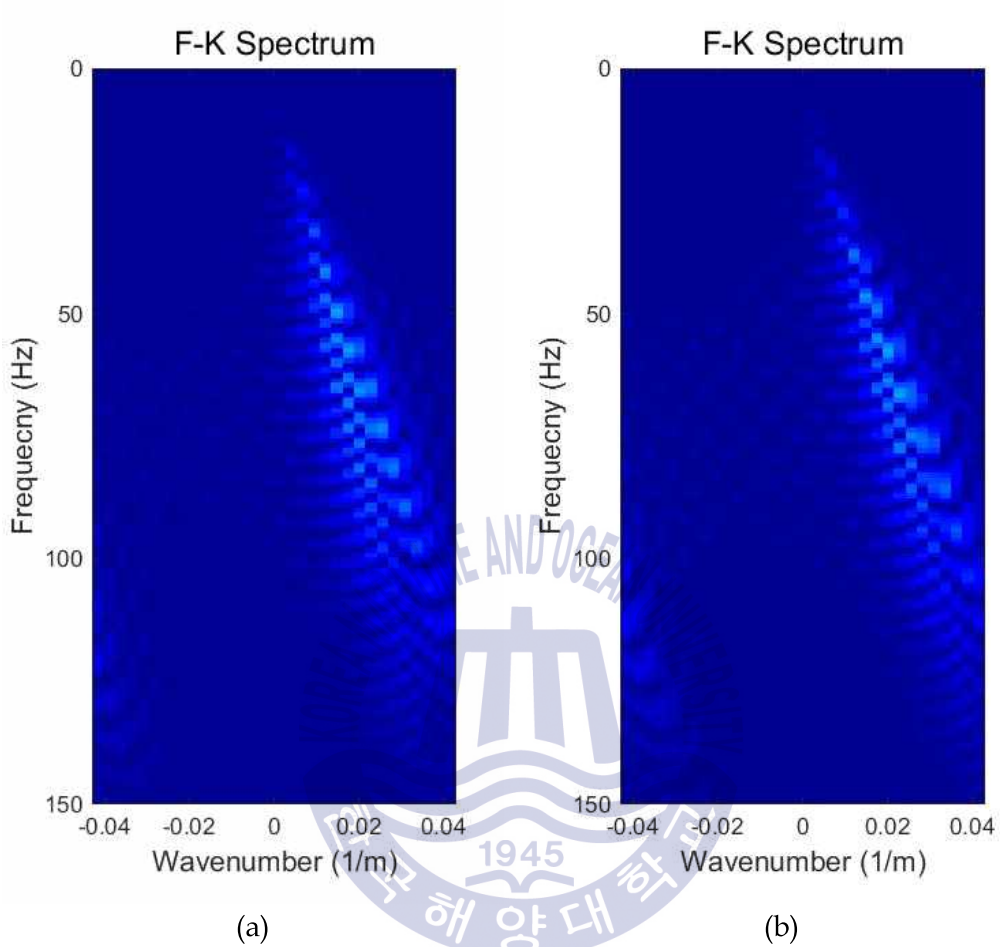


**Fig. 26**  $f-k$  spectrum depending on receiver interval 24m(physical modeling) (a) broadband seismic and (b) conventional marine seismic

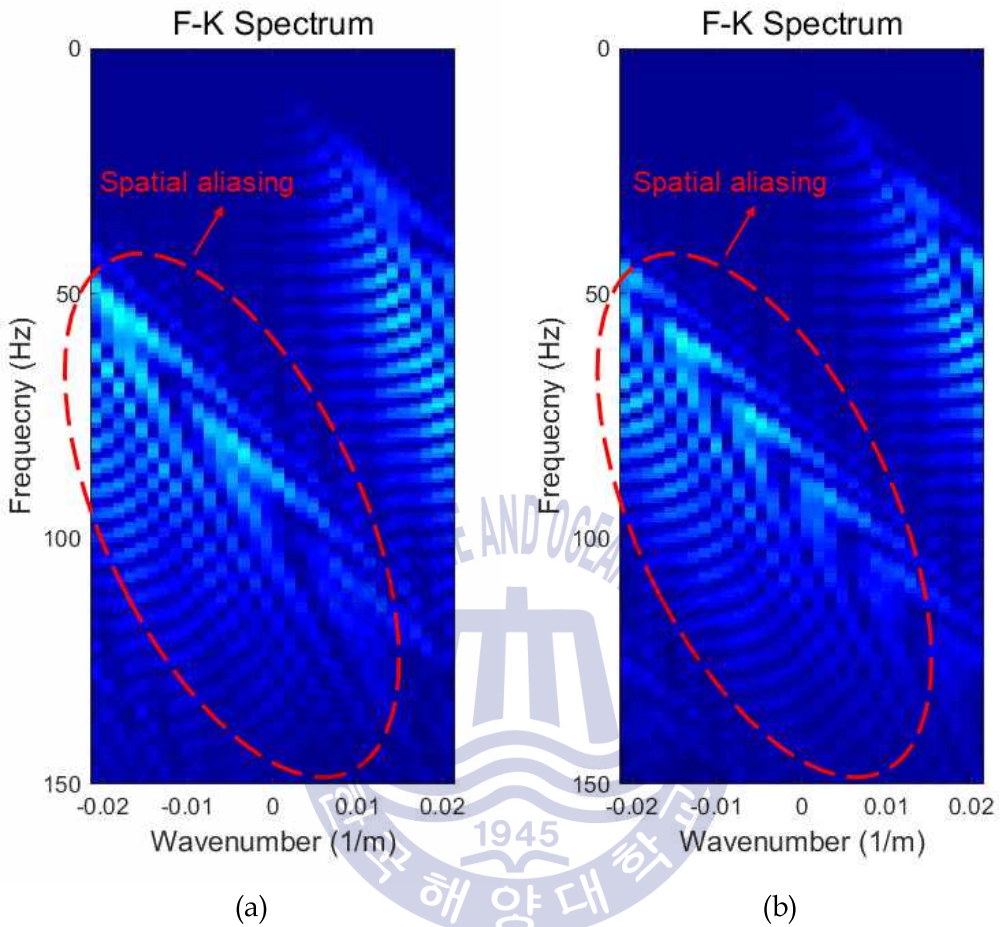


**Fig. 27**  $f-k$  spectrum depending on receiver interval 36m(physical modeling): (a) broadband seismic and (b) conventional marine seismic

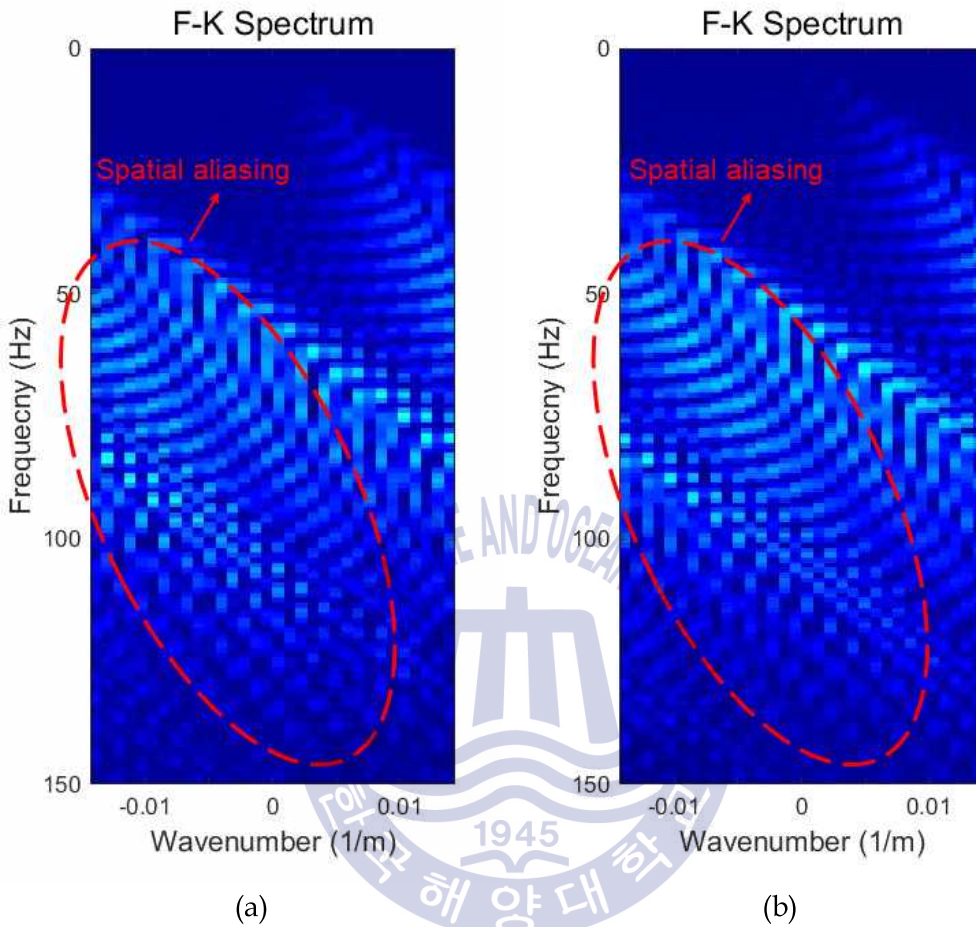




**Fig. 28**  $f-k$  spectrum depending on receiver interval 12m(numerical modeling): (a) broadband seismic and (b) conventional marine seismic



**Fig. 29**  $f-k$  spectrum depending on receiver interval 24m(numerical modeling): (a) broadband seismic and (b) conventional marine seismic



**Fig. 30**  $f-k$  spectrum depending on receiver interval 36m(numerical modeling): (a) broadband seismic and (b) conventional marine seismic

Fig. 25는 수신기 간격이 12m일 때 광대역 탄성과 탐사와 전통적인 해양 탄성과 탐사의 공간 알리아싱을  $f-k$  영역에서 비교한 그림이다. 수신기 간격 12m일 때 공간 알리아싱이 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 26은 수신기 간격이 24m일 때 광대역 탄성과 탐사와 전통적인 해양 탄성과 탐사의 공간 알리아싱을  $f-k$  영역에서 비교한 그림이다. 빨간색 원 부분이 공간 알리아싱이 존재하는 부분이며, 전통적인 해양 탄성과 탐사에서 공간 알리아싱이 더 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 27은 수신기 간격이 36m일 때 광대역 탄성과 탐사와 전통적인 해양 탄성과 탐사의 공간 알리아싱을  $f-k$  영역에서 비교한 그림이다. 빨간색 원 부분이 공간 알리아싱이 나타나는 부분이다. 광대역 탄성과 탐사보다 전통적인 해양 탄성과 탐사에서 공간 알리아싱이 더 나타난다.

또한 광대역 탄성과 탐사의 경우 수신기의 간격이 멀어짐에 따라 공간 알리아싱의 영향이 전통적인 해양 탄성과 탐사보다 적다는 것을 확인할 수 있다.

검증을 위하여 탄성과 수치모형 실험을 통해 취득한 탄성과 자료를 활용하였다. Fig. 28은 수신기 간격이 12m일 때 탄성과 수치모형 실험을 통해 취득한 탄성과 자료를 광대역 탄성과 탐사와 전통적인 해양 탄성과 탐사의 공간 알리아싱 비교를 위해  $f-k$  영역에서 나타낸 그림이다. 수신기 간격이 12m일 때 공간 알리아싱이 존재하지 않는 것을 확인할 수 있으며, 탄성과 축소모형 실험을 통해 취득한 자료와 같은 결과를 나타낸다.

Fig. 29와 Fig. 30은 각각 수신기 간격이 24m, 36m일 때 탄성과 수치모형 실험을 통해 취득한 자료를 광대역 탄성과 탐사와 전통적인 해양 탄성과 탐사에서의 공간 알리아싱을 비교하기 위하여  $f-k$  영역에서 나타낸 그림이다. 탄성과 축소모형 실험의 결과와 동일하게 광대역 탄성과 탐사에서 전통적인 해양 탄성과 탐사보다 공간 알리아싱에 강점을 보이는 것을 확인할 수 있다.

## 제 4 장 결 론

본 논문에서는 탄성과 축소모형 실험 및 탄성과 수치모형 실험을 통해 탄성과 자료를 취득하였다. 광대역 탄성과 탐사에서 수신기의 간격, 가변 심도 스트리머의 심도에 따라 공간 알리아싱을 비교하였으며, 광대역 탄성과 탐사와 전통적인 해양 탄성과 탐사에서 수신기 거리에 따른 공간 알리아싱을 비교하였다. 추가적으로 탄성과 수치실험을 통해 취득한 자료를 활용하여 광대역 탐사에서 수신기 거리 및 가변 심도 스트리머의 심도에 따른 주파수 성분을 비교하였다.

광대역 탄성과 탐사에서 수신기 간격에 따라 공간 알리아싱을 비교하였다. 공간 알리아싱은 수신기의 간격과 탄성과 신호의 경사에 따라 발생한다. 나이퀴스트 법칙에 따라 수신기의 간격이 증가할수록 공간 알리아싱은 존재할 가능성이 높아진다. 본 연구에서 탄성과 축소모형 실험을 통해 광대역 탄성과 탐사 자료를 취득하여 비교해 본 결과 수신기의 간격이 증가함에 따라 공간 알리아싱 현상이 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 검증을 위하여 탄성과 수치모형 실험을 통해 취득한 자료와 비교하였으며, 탄성과 축소모형 실험과 동일하게 나타났다.

광대역 탄성과 탐사에서 스트리머의 가변에 따라 신호의 특성이 변화하게 된다. 따라서 가변 심도 스트리머의 심도에 따른 공간 알리아싱 비교를 수행하였다. 가변 심도 스트리머의 심도는 28m, 51m 74m로 설정하였으며, 가변 심도 스트리머의 심도가 증가함에 따라 반사 신호의 도달시간(travel time)이 짧아지며, 가변 심도 스트리머의 심도가 증가하면서 shot gather에서 반사 신호의 각도가 완만하게 나타나고 이에 따라 공간 알리아싱에 강점을 보였다. 또한 스트리머 가변 구간의 경사가 급경사일수록  $f-k$  영역에서 탄성과 반사 신호가 파수 0에 근접하는 것을 확인할 수 있었다. 그렇기 때문에 광대역 탄성과 탐사에서 가변 심도 스트리머의 심도가 증가함에 따라 공간 알리아싱에 강점을 보인

다고 사료된다.

광대역 탄성과 탐사와 전통적인 해양 탄성과 탐사의 취득되는 신호의 특성이 다르기 때문에 광대역 탄성과 탐사와 전통적인 해양 탄성과 탐사에서 수신기 간격에 따른 공간 알리아싱 현상을 파악하였다. 수신기의 간격이 12m, 24m, 36m일 때 공통적으로 광대역 탄성과 탐사가 전통적인 해양 탄성과 탐사보다 공간 알리아싱에 강점을 보였다. 또한 광대역 탄성과 탐사와 전통적인 해양 탄성과 탐사에서 수신기의 간격이 멀어짐에 따라 공간 알리아싱을 비교하였을 때 광대역 탄성과 탐사가 수신기 간격에 따른 공간 알리아싱 영향이 적게 나타났다.

추가적으로 광대역 탄성과 탐사에서 수신기 간격 및 가변 심도 스트리머의 심도에 따른 주파수 성분을 비교하였다. 수신기 간격과 가변 심도 스트리머의 심도가 증가함에 따라 수신기의 깊이가 깊어지게 되며 수신기의 깊이가 증가함에 따라 고스트에 의한 노치의 수가 증가하고 고스트에 의해 발생하는 노치의 주파수가 저주파수 쪽으로 이동하게 된다. 본 연구를 통해 수신기 간격 및 가변 심도 스트리머의 심도가 증가하면서 고스트에 의한 노치의 수가 증가하는 것과 노치가 발생하는 주파수가 저주파수 대역으로 이동하는 현상을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 분석한 광대역 탄성과 탐사에서 수신기 간격, 가변 심도 스트리머의 심도에 따른 공간 알리아싱 분석 결과를 통해 광대역 탄성과 탐사 설계 시 배경 자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.



## 감사의 글



## 참고문헌

Achenbach, J.D., 1984, *Wave propagation in elastic solids*, Elsevier Science Publishing

Alterman, Z., & Karal, F.C., 1968, Propagation of Elastic Waves in Layered Media by Finite Difference Methods, *Bulletin of Seismological Society of America*, 58(1), pp. 367-398

Carlson, C., Long, A., Söllner, W., Tabti, H., Tenghamn, R. & Lunde, N., 2007, Increased resolution and penetration from a towed dual-sensor streamer, *First Break*, 25(12), pp.71-77

Choi, J.H., Byun, J.M. & Seol, S.J., 2014, Wavelet Based Matching Pursuit Method for Interpolation of Seismic Trace with Spatial Aliasing, *Geophysics and Geophysical Exploration*, 17(2), pp.88-94

Dhelie, P.E., Lie, J.E., Danielsen, V., Evensen, A.K. & Myklebostad, A., 2014, Broadband seismic - A novel way to increase notch diversity, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014*, pp. 148-152

Etgen, J.T. & OBrien M.J., 2007, Computational Methods for Large-scale 3D Acoustic Finite-difference Modeling: A tutorial, *GEOPHYSICS*, 72(5), pp.SM223-SM230

Moldoveanu, N., Combee, L., Egan, M., Hampson, G., Sydora, L. & Abriel, W., 2007, Over/under towed-streamer acquisition: A method to extend seismic bandwidth to both higher and lower frequencies, *The Leading Edge*, 26(1), pp.41-56



Robert R.S. & Cheadle, S.P., 1989, *Ultrasonic modeling of borehole seismic survey*, Calgary:CREWES Research Report

Soubaras, R. & Dowle, R., 2010, Variable-depth streamer - a broadband marine solution, *First Break*, 28(12), pp.89-96

Shin, S.R., Lim, C.H., Chung, W.K., Kim, D.C. & Ha, J.H., 2017, R&D Trend and Outlook of Seismic Physical Modeling, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 54(2), pp.171-184

Virieux, J., 1984, SH-wave Propagation in Heterogeneous Media: Velocity-stress Finitie-difference Method, *GEOFYSICS*, 49(11), pp.1933-1957

Vogel, J.A., Stelwagen, U. & Breeuwer, R., Seismic Analysis of Thin Beds Aided by 3D Physical Model Experiments, *Proceedings of 14th International Symposium of Acoustical Imaging*, 14, pp.53-67

Yilmaz, O. & Doherty, S.M., 2001, *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*, SEG Books