

工學碩士 學位論文

모델링 기술을 이용한
심해 가스 하이드레이트 탄성과 특성 연구

Seismic Characteristics of Gas Hydrate
in Deep Sea using Modeling Technique

指導教授 辛 誠 烈

2006年 6月

韓國海洋大學校 大學院

海洋開發工學科

余 恩 民

본 論文을 余恩民의 工學碩士
學位論文으로 認准함

委員長 林 鍾 世 (인)

委 員 辛 誠 烈 (인)

委 員 尹 志 豪 (인)

2004年 6月

韓國海洋大學校 大學院

海洋開發工學科 余 恩 民

초 록

본 연구에서는 가스 하이드레이트 부존 예상지역인 한반도 동해 지역의 탄성과 탐사자료 처리 및 해석결과를 근거로 하여 심해 가스 하이드레이트의 탄성과 탐사자료의 특성을 규명하기 위해서 탄성과 수치 및 축소모형 실험을 실시하였다. 탄성과 모형실험을 통하여 획득한 자료를 이용하여 복소분석을 적용하고 AVO(Amplitude Versus Offset)분석을 수행하여 입사각에 따른 반사계수의 변화를 확인하였다.

탄성과 모형실험 결과, staggered grid를 이용한 유한차분법은 P파, S파 그리고 밀도에 대한 변수를 자유롭게 적용할 수 있어 심해저 가스 하이드레이트의 부존상황에 대한 탄성과 모델링 적용이 용이하였다. 축소모형실험을 이용하여 가스 하이드레이트가 부존하는 심해 환경을 충분히 모사하였으며, 탄성과 수치 및 축소모형실험을 통하여 획득한 자료에서 가스 하이드레이트층과 자유가스(free gas)층 사이의 경계면에서 높은 임피던스 차이로 인한 큰 진폭의 반사파와 위상역전 현상을 관찰할 수 있었다. 또한 탄성과 복소분석을 적용하여 순간진폭 단면에서 음원과 수진기 거리에 따른 진폭의 변화를 관찰할 수 있었으며 탄성과 모형실험을 통하여 획득한 자료의 상대진폭과 Shuey의 근사식에 의해 구해진 반사계수가 거의 일치하였다.

주요어 : 가스 하이드레이트, 축소모형실험, 수치모형실험, 복소분석, AVO(Amplitude Versus Offset)분석

ABSTRACT

In this study, numerical and physical modeling were carried out to analyze seismic characteristics of gas hydrate with field data acquired in the East sea in 1998. A 2-D staggered grid finite difference seismic method was used to generate synthetic seismograms for multi-channel seismic survey, OBC(Ocean Bottom Cable) and VCS(Vertical Cable Seismic). We developed the seismic physical modeling system which simulates an environment of deep sea. and we acquired the seismic data for the various source-receiver geometry with a multi-channel seismic survey and deep tow survey. Seismic complex analysis and AVO(Amplitude Versus Offset) were applied to the obtained data.

The results of this study showed that the method using staggered grid yielded stable results and could be used to seismic imaging. The seismic properties of the modeling material agreed with the seismic velocities estimated from traveltimes of reflection events. Also the high amplitude and the phase reversal of reflections were confirmed at the interface between gas hydrate and free gas called BSR(Bottom Simulating Reflector) which is the evidence for existence of gas hydrate in seismic reflection data. In the reflection strength profile generated by seismic complex analysis, we could easily observe the amplitude variation corresponding to offset distance. Also the reflection coefficients acquired from the seismic modeling were in a good agreement with the reflection coefficients obtained by Shuey's equation for AVO analysis.

Key words : gas hydrate, seismic physical modeling, seismic numerical modeling, seismic complex analysis, AVO(Amplitude Versus Offset) analysis

목 차

초 록	i
Abstract	ii
1. 서 론	1
2. 탄성과 수치모형실험	3
2.1 이론 및 방법	3
2.2 탄성과 수치모형실험의 적용	5
2.2.1 다중채널 탄성과 탐사자료	5
2.2.2 OBC(Ocean Bottom Cable) 탐사자료	11
2.2.3 VCS(Vertical Csble Seismic) 탐사자료	14
3. 탄성과 축소모형실험	18
3.1 축소모형실험장치 구성	18
3.2 수평 모델	23
3.2.1 다중채널 탄성과 탐사자료	23
3.2.2 Deep tow(수진기) 탐사자료	27
3.2.3 Deep tow(음원·수진기) 탐사자료	31

3.3	침멸층 모델	35
3.3.1	공심점 분류	35
3.3.2	속도분석	36
3.3.3	중합단면도	37
4.	탄성과 복소분석 및 진폭특성	39
4.1	탄성과 복소분석	39
4.1.1	순간 진폭(Reflection Strength)	39
4.1.2	순간 위상(Instantaneous Phase)	40
4.1.3	순간 주파수(Instantaneous Frequency)	40
4.2	입사각에 따른 반사파 진폭특성	45
5.	결 론	51
	참 고 문 헌	54

표 목 차

Table 1 Elastic properties of water, pure hydrate, ice and gas	5
Table 2 Materials and their physical parameters used in physical modeling	21

그 립 목 차

Fig. 1 (a) A horizontal three layered model. The symbol ★ and ● denote source position and receiver position respectively	6
(b) A horizontal five layered model with a gas hydrate layer and a free gas layer	6
Fig. 2 A succession of snapshots based on the model shown in Fig. 1 (a). R is primary reflection, M is multiple, C is mode conversion, and D is direct wave	7
Fig. 3 A succession of snapshots based on the model shown in Fig. 1 (b)	8
Fig. 4 Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 1 (a)	10
Fig. 5 Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 1 (b)	10
Fig. 6 (a) A horizontal three layered model for OBC survey	11
(b) A horizontal five layered model for OBC survey	12
Fig. 7 Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 6 (a)	13
Fig. 8 Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 6 (b)	14
Fig. 9 (a) A horizontal three layered model for VCS survey	15
(b) A horizontal five layered model for VCS survey	16
Fig. 10 Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 9 (a)	16
Fig. 11 Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 9 (b)	17

Fig. 12	Diagram of the seismic physical modeling system	19
Fig. 13	(a) Radial pattern of 280 KHz spherical transducer and (b) frequency spectrum	19
Fig. 14	(a) Signal waveform of 1 MHz transducer and (b) frequency spectrum	20
Fig. 15	Photography of water tank	21
Fig. 16	Velocity graph of (a) Acrylic sheet, (b) Polyethylene sheet and (c) ABS sheet	22
Fig. 17	(a) P-wave velocities and (b) densities of horizontal three layered model	23
Fig. 18	(a) P-wave velocities and (b) densities of horizontal five layered model	23
Fig. 19	(a) The geometry of multi-channel seismic survey for horizontal three layered model(Water, Polyethylene, and Acrylic). The distances were scaled 1:10000(1mm=10m) for the experiment	24
	(b) The geometry of multi-channel seismic survey for horizontal five layered model(Water, Polyethylene, Acrylic, ABS, and Acrylic)	25
Fig. 20	(a) Multi-channel common shot gather data for horizontal three layered model and (b) A trace of channel No. 150	25
Fig. 21	(a) Multi-channel common shot gather data for horizontal five layered model and (b) A trace of channel No. 30	26
Fig. 22	(a) The geometry of Deep tow(receiver) seismic survey for horizontal three layered model(Water, Polyethylene, and Acrylic)	27
	(b) The geometry of Deep tow(receiver) seismic survey for horizontal five layered model(Water, Polyethylene, Acrylic, ABS and Acrylic)	28
Fig. 23	(a) Deep tow(receiver) seismic common shot gather data for horizontal three layered model and (b) A trace of channel No. 80	29
Fig. 24	(a) Deep tow(receiver) seismic common shot gather data for horizontal five layered model and (b) A trace of channel No. 10	30

Fig. 25 (a) The geometry of Deep tow(source · receiver) survey for horizontal three layered model(Water, Polyethylene and Acrylic)	31
(b) The geometry of Deep tow(source · receiver) survey for horizontal five layered model(Water, Polyethylene, Acrylic, ABS and Acrylic)	32
Fig. 26 (a) Deep tow(source · receiver) survey common shot gather data for horizontal three layered model and (b) A trace of channel No. 1	33
Fig. 27 (a) Deep tow(source · receiver) survey common shot gather data for horizontal five layered model and (b) A trace of channel No. 30	34
Fig. 28 The geometry of pinch-out model	35
Fig. 29 CDP gathers from 1100 to 1500 every 200 steps. Here horizontal direction shows CDP number	36
Fig. 30 (a)-(c) are the result of velocity analysis at CDP 1100, 1300 and 1500	37
Fig. 31 CMP stack derived from the NMO corrected CDP gathers	38
Fig. 32 Common offset gather data for pinch-out model	38
Fig. 33 Result of the complex analysis for Fig. 20.	
(a) Reflection strength	41
(b) Instantaneous phase	42
(c) Instantaneous frequency	42
Fig. 34 Result of the complex analysis for Fig. 21.	
(a) Reflection strength	43
(b) Instantaneous phase	43
(c) Instantaneous frequency	44
Fig. 35 Reflection strength section of common shot gather data for Deep tow(receiver) survey.	
(a) the horizontal, three-layered model	44
(b) the horizontal, five-layered model	45
Fig. 36 Amplitude variation versus incident angle at	
(a) the interface between sediment and gas hydrate layer	47
(b) the interface between gas hydrate layer and free gas layer	47
(c) the interface between free gas layer and sediment	48

Fig. 37 Amplitude variation versus incident angle at

- (a) the interface between polyethylene sheet and acrylic sheet · · 49
- (b) the interface between acrylic sheet and ABS sheet · · · · · 50
- (c) the interface between ABS sheet and acrylic sheet · · · · · 50

1. 서 론

가스 하이드레이트는 고압 저온 조건하에서 물과 메탄가스가 결합하여 형성된 고체상 화합물로 부존 가능 지역은 추운 극지방의 육지 및 대륙붕의 동토와 해수의 온도가 낮은 심해저 지역의 대륙사면 및 대륙대에 퇴적된 미 고결 퇴적층 등이다(Makogon, 1997). 이러한 가스 하이드레이트는 재래형 석유와 천연가스의 대체할 수 있는 미래의 에너지원으로 매우 중요하며, 또한 기후협약에 따른 청정 에너지원의 수요 증가로 인하여 높은 관심을 받고 있다.

가스 하이드레이트 안정영역은 하이드레이트가 형성되어 해리되지 않고 안정하게 존재할 수 있는 영역으로 안정영역 하한에서 BSR이 나타난다. BSR은 탄성과 단면도상에서 하이드레이트 포화된 퇴적층과 하부에 존재하는 가스 또는 물로 포화된 퇴적층 사이에 탄성과 속도 및 밀도 차이 때문에 상·하 음향계수가 차가 커서 생긴 큰 진폭을 나타내는 반사면으로 해저면과 평행하게 발달한 것을 말한다(Kvenvolden and Barnard, 1983).

가스 하이드레이트의 부존확인 방법으로는 탄성과 단면도상에 나타나는 BSR, AVO 해석(Ostrander, 1984) 그리고 시추자료로부터 직접 확인하는 방법 등이 있다. AVO 분석 결과는 BSR 상부에서 진폭감소현상, BSR 하부에는 가스에 의한 진폭증가 현상(Shipley et al., 1979; Andreassen et al., 1997)이 나타난다. 또한 가스 하이드레이트를 포함하는 퇴적층의 구간속도 증가가 나타나며, 증가하는 정도는 하이드레이트의 양에 비례하는 것으로 알려져 있다(Pearson et al., 1983). 이상에서와 같이 탄성과 탐사자료로부터 가스 하이드레이트를 탐지하기 위해서는 구간속도와 진폭이 중요한자임을 알 수 있다.

따라서 본 연구는 탄성과 모형실험을 통한 가스 하이드레이트로 포화된 층의 탄성과 진폭특성 규명 및 속도정보 파악을 중점을 두었으며 이를 위해서

staggered grid를 이용한 탄성과 수치모형실험을 통하여 자료를 획득하였으며 심해저 가스 하이드레이트 부존환경의 단순모델에 대한 모형을 제작하고 탄성과 축소모형실험을 통하여 자료를 획득하였다.

이와 같이 획득한 자료를 이용하여 물성변화에 따른 지질정보를 파악하기 위해서 탄성과 복소분석을 적용하였으며 AVO분석을 실시하여 음원과 수진기의 거리변화에 따른 진폭의 변화를 관찰하였다.

2. 탄성과 수치모형실험

탄성과 수치모형 실험은 주어진 파동방정식에 근거하여 물리적인 현상을 예측하는 방법으로 최근 컴퓨터의 기술의 급격한 발전으로 인하여 그의 응용성이 크게 넓어지고 있다. 본 연구에서는 1998년 한반도 동해의 탄성과 탐사 자료 처리 및 해석(장성형 등, 1999), 가스 하이드레이트의 탄성과 복소분석(장성형 등, 2005) 그리고 가스 하이드레이트 층에서의 탄성과 AVO 특성 연구(양승진 등, 2000)를 근거로 하여 지질모형을 설정하였고, 가스 하이드레이트가 부존하지 않는 수평 3층 모델과 가스 하이드레이트층과 자유 가스(free gas)층이 존재하는 수평 5층 모델에 대해서 수치 모형실험을 수행하였다. 각각의 모델에 대해서 다중채널 탄성과 모델링, OBC(ocean bottom cable) 또는 OBS(ocean bottom seismometer)모델링 그리고 VCS(vertical cable seismic)모델링을 적용하였다.

2.1 이론 및 방법

본 연구에서 사용한 수치모형실험 방법은 staggered grid를 이용한 유한차분법 탄성과 모델링 기법으로 이러한 staggered grid에 의한 유한차분법 모델링은 유체역학 분야 및 전자기파의 전파모델링에서 많이 사용되고 있으며, 특히 해양 탄성과 탐사와 유사한 상황인 유체-고체 매질인 경우에도 안정적인 해를 구할 수 있는 장점이 있다(신성렬 등, 1997).

2차원 직교좌표계(cartesian system)인 등방매질에서 P-SV의 탄성과동은 변위(displacement)에 관한 2차 편미분방정식으로 유도될 수 있으며 변위-응력(displacement-stress)관계일 때는 아래의 식을 만족한다.

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (2-1)$$

$$\tau_{xx} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

$$\tau_{zz} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_z}{\partial z} + \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x}$$

$$\tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \quad (2-2)$$

이 때, (u_x, u_z) 는 변위벡터이며 $(\tau_{xx}, \tau_{zz}, \tau_{xz})$ 는 응력텐서, $\rho(x, z)$ 는 매질의 밀도를 그리고 $\lambda(x, z)$ 와 $\mu(x, z)$ 는 Lamé의 상수이다. 변위벡터로 구성되는 탄성파동 방정식의 경우 음원(source) 항을 처리할 때 음원의 형태에 따라 파동방정식을 만족하는 해를 구해야 하지만 속도-응력에 대한 파동방정식을 staggered grid로서 수치 모델링하는 경우에는 음원에 τ_{xx} 와 τ_{zz} 및 τ_{xz} 항을 음원 파형에 더함으로써 편리한 방법으로 파동방정식의 해를 구할 수 있다.

파동방정식을 수치해석학적인 방법으로 해를 구할 때 모델의 인위적인 경계에서는 원하지 않는 반사파가 생기는 것을 방지하기 위해 음향 및 탄성파동방정식 모두 효과적으로 적용할 수 있는 스펀지 경계조건을 사용하였다. 변위에 관한 탄성파동방정식의 경우 이러한 인위적인 경계면 외에도 매질의 물성이 변하는 경계면에서 경계면 상하의 격자에서 변위 및 응력이 연속이라는 경계조건을 적용해야한다. 이러한 내부경계조건은 모델이 바뀌면 이에 상응하도록 내부경계조건 또한 바꾸어야한다는 매우 성가신 작업을 필요로 한다. 그러나 본 연구에서와 같이 staggered grid를 이용한 속도-응력에 대한 파동방정식의 경우 내부경계조건을 자동적으로 만족하여 별도의 작업이 필요하지 않기 때문에 실제 적용성 및 안정성이 매우 뛰어나다는 장점을 가지게 된다(신성렬 등, 1997).

2.2 탄성과 수치모형실험의 적용

2.2.1 다중채널 탄성과 탐사자료

순수 하이드레이트, 해수, 얼음과 가스의 탄성과 물성은 Table 1과 같으며 일반적으로 가스 하이드레이트가 포함된 지층에서의 P파 속도는 2010~4500 m/s, S파는 140~1250 m/s 그리고 밀도는 1.15~2.4 g/cm³으로 알려져 있다. 이러한 물성치를 이용하여 staggered grid에 의한 유한차분법 모델링을 Fig. 1(a)와 (b) 같은 수평 3층 모델과 수평 5층 모델에 대하여 적용하였다.

Table 1. Elastic properties of water, pure hydrate, ice and gas(Ecker, 1998).

Material	Vp[m/s]	Vs[m/s]	ρ [g/cm ³]
Water	1500	-	1
Pure hydrate	3450	1770	0.767
Ice	3310	1670	0.916
Gas	375	-	0.1

Fig. 1(a)에서 첫 번째 층은 해수층이며, 두 번째 층과 세 번째 층은 퇴적층으로 해당하는 탄성과 매개변수들은 그림에 나타난 바와 같다. Fig. 1(b)에서의 세 번째 층과 네 번째 층은 가스 하이드레이트와 자유가스층을 의미한다.

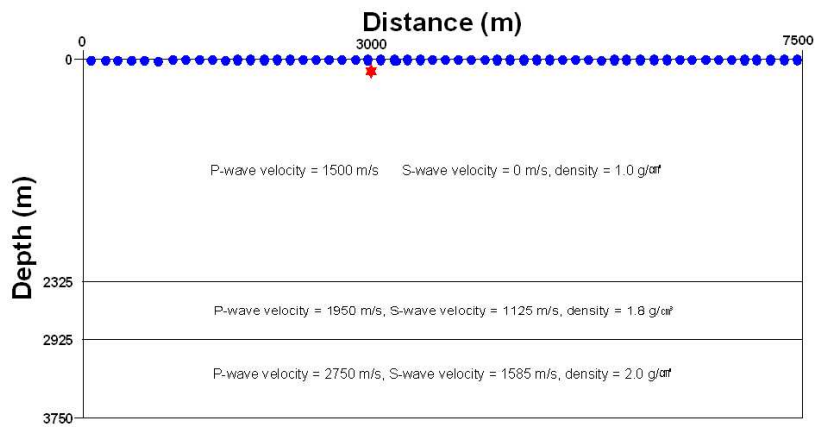


Fig. 1. (a) A horizontal three layered model. The symbol ★ and ● denote source position and receiver position respectively.

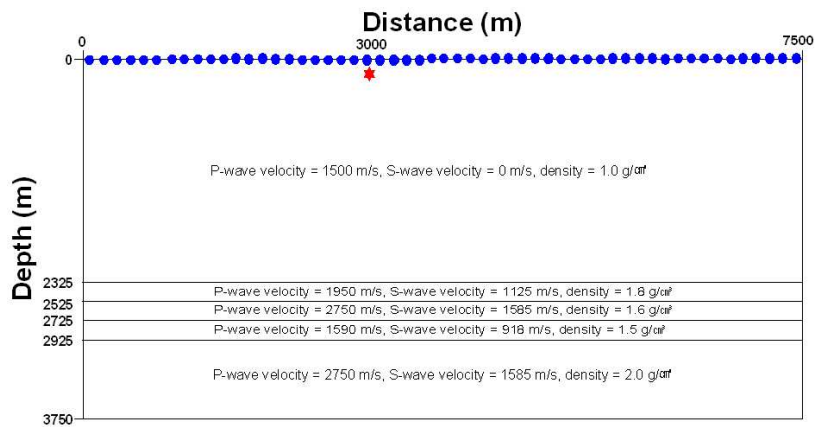
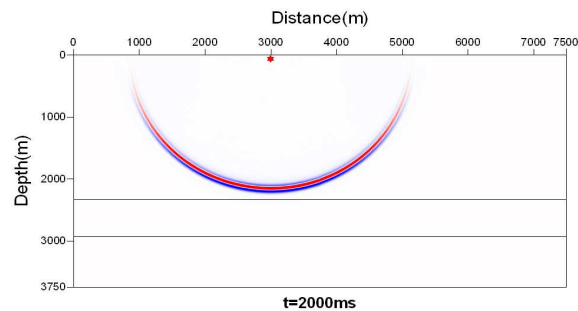


Fig. 1. (b) A horizontal five layered model with a gas hydrate layer and a free gas layer.

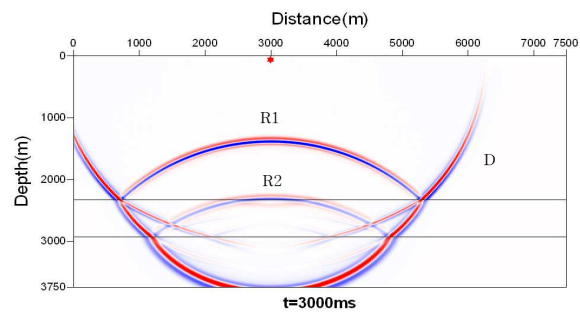
모델은 7500 m × 3750 m의 크기이며, 에어건(air gun)과 같은 P파 음원을 사용한 음원의 위치는 해수면 바로 하부지점(3000 m, 6 m)이다. 수신기의 위치는 일반적인 해양 탄성과 탐사를 위한 심도 6 m에 15 m 간격으로 500개를 설치하

였으며, 사용된 음원은 중심주파수가 25 Hz인 가우스 1차 미분 파형이다. 수평/수직 방향의 격자간격($\Delta x = \Delta z$)은 3 m이며, 시간간격은 750 μs 이다. 근사를 통한 유한차분법 모델링을 할 때 격자간격 및 시간간격의 크기에 따라 필연적으로 수치분산이 발생한다. 통상적인 유한차분법 모델링에서의 안정조건은 $\sqrt{V_p^2 + V_s^2} \frac{\Delta t}{\Delta x} < 1$ 이나 staggered grid의 경우 $V_p \frac{\Delta t}{\Delta x} < \frac{1}{\sqrt{2}}$ 이 된다. staggered grid의 경우, 안정조건을 만족시키기 위해서는 시간간격이 작아야 된다. 본 연구에서는 인위적인 반사파를 제거하기 위하여 모델의 좌우 및 하부에 격자 150개의 스펀지 경계대를 설정하였다.

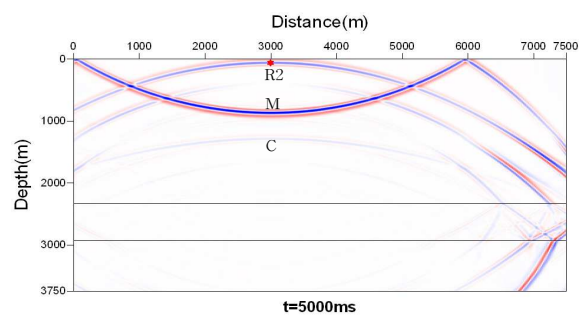
Fig. 2와 Fig. 3은 수평 3층 모델과 수평 5층 모델에 대한 시간의 진행에 따라 나타낸 순간포착사진(snapshot)을 나타낸 것으로 D는 직접파, R1은 첫 번째 층과 두 번째 층의 경계면에서의 반사파, R2는 두 번째 층과 세 번째 층의 경계면에서 반사파, R3는 세 번째 층과 네 번째 층의 경계면에서 반사파, R4는 네 번째 층과 다섯 번째 층의 경계면에서 반사파, M은 다중반사파 그리고 C는 모드 전환파(mode conversion wave)를 의미한다.



(a)

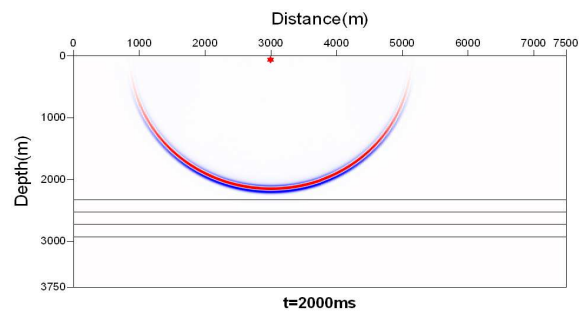


(b)

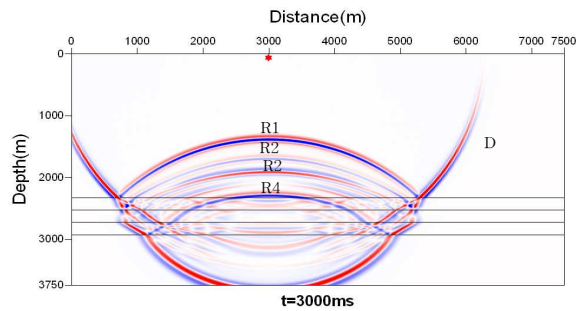


(c)

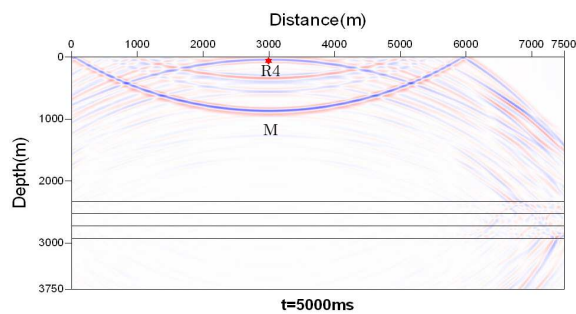
Fig. 2. A succession of snapshots based on the model shown in Fig. 1 (a). R is primary reflection, M is multiple, C is mode conversion, and D is direct wave.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. A succession of snapshots based on the model shown in Fig. 1 (b).

Fig. 4와 Fig. 5는 수평 3층 모델과 수평 5층 모델에 대한 인공합성 탄성파 기록이다. Fig. 4와 5에서 직접파와 1차 반사파, 다중반사파 그리고 모드 전환파 (mode conversion)등을 관찰할 수 있다. Fig. 4에서 PPSP 또는 PSPP는 두 번째 경계에서 모드 전환파이며, PPPPP는 첫 번째 퇴적층 내에서 생긴 단거리 다중 반사파(peg-leg), PPSPPP와 PSSSPP는 첫 번째 퇴적층 내에서 생긴 단거리 다중 반사파 가운데 모드 전환파이다. Fig. 5에서 PPPSSP, PSSSSPPP, PSSSSSSP는 단거리 다중반사파들로 모드 전환된 반사이벤트이다. Fig. 5에서 볼 수 있는 여러 가지 반사파 가운데 특히 R3는 BSR과 같은 가스 하이드레이트 층과 자유가스층 사이의 경계면에서 높은 임피던스 차이로 인한 큰 진폭의 반사

파로 위상역전 현상을 확인할 수 있다.

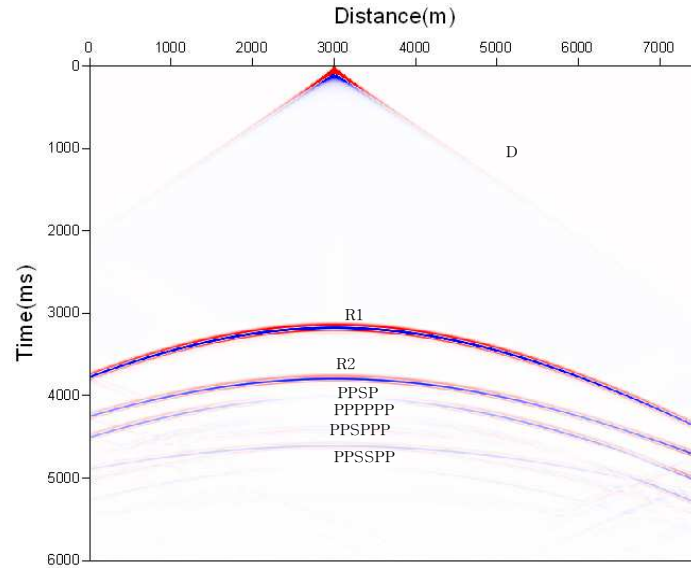


Fig. 4. Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 1 (a).

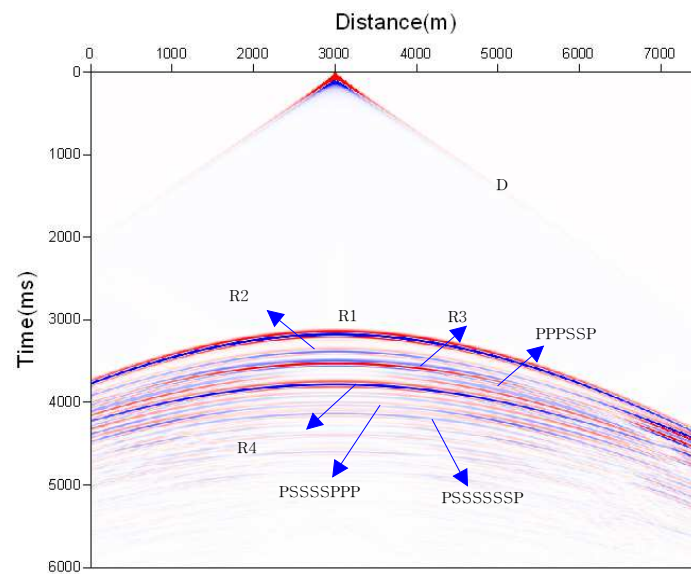


Fig. 5. Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 1 (b).

2.2.2 OBC(Ocean Bottom Cable) 탐사자료

Fig. 6(a)와 (b)와 같이 OBC 탐사형태로 수평 3층 모델과 수평 5층 모델에 대하여 유한차분법 탄성과 모델링을 적용하였다. 모델은 7500 m × 3500 m의 크기이며, 음원의 위치는 해저면 위(3000 m, 6 m)에 위치한다. 수신기의 배열은 OBC 탐사를 위하여 심도 2325 m에 15 m의 간격으로 500개를 설치하였다. 사용된 음원의 중심주파수는 25 Hz의 가우스 1차 미분파형이며, 격자의 간격($\Delta x = \Delta z$)은 3 m이고 시간 간격(Δt)은 750 μs 이다. 또한 인위적인 반사파를 제거하기 위해 모델 하부 및 좌우의 경계면에 150개의 스펀지 경계대를 설정하였다.

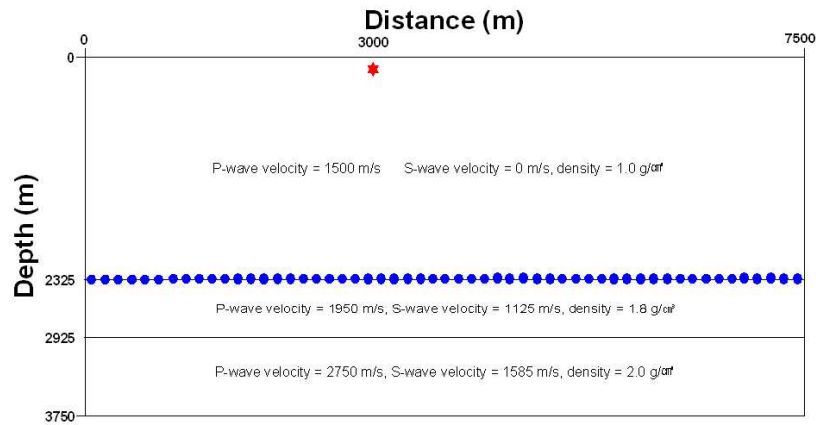


Fig. 6. (a) A horizontal three layered model for OBC survey.

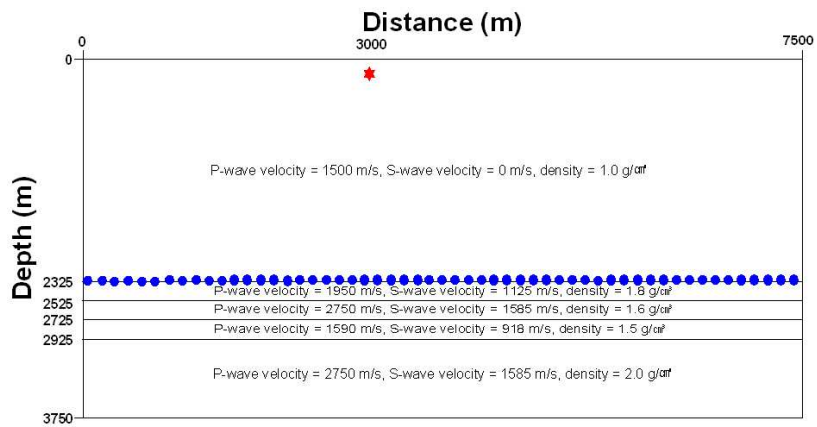


Fig. 6. (b) A horizontal five layered model for OBC survey.

Fig. 7과 Fig. 8은 OBC 탐사의 인공합성 탄성파기록으로 해저면에 설치된 수신기에서 직접파(D), 다중반사파, 모드 전환파 그리고 각층에 대한 반사 이벤트를 관찰할 수 있다. Fig. 7에서 해수와 첫 번째 지층의 임계굴절각은 약 50° , 두 번째 경계면에서의 임계굴절각은 약 45° 이기 때문에 직접파 D와 반사파 R1의 진폭이 음원으로부터 수신기의 거리가 멀어짐에 따라 반사파의 진폭이 감소하다가 각 층의 임계굴절각 부근에서부터 전반사로 인하여 진폭이 크게 됨을 관찰할 수 있다. PPS와 PSS는 모드 전환된 반사파이며 PPPPP는 지층 내에서 발생한 단거리 다중반사파, PPSPP는 모드 전환된 단거리 다중반사파이며, M1과 M2는 해저면과 지층경계에서 반사된 파가 해수면에서 다시 반사된 장거리 다중반사파이다. Fig. 8에서는 직접파 D와 각 지층에서의 반사파 R1, R2, R3 및 단거리 다중반사 및 모드 전환된 파를 관찰할 수 있고 4800 ms 이후에는 해수면에서 다시 반사된 장거리 다중반사파 군들이 나타난다. 반사파의 진폭은 음원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 감소하다가 지층들의 임계굴절각에 해당하는 음원으로부터의 거리에 설치된 수신기에서 전반사로 인한 진폭의 증가를 관찰할 수 있다. 또한 Fig. 8에서 가스 하이드레이트층과 자유가스층 사이 경계면에서 탄성

파 속도 및 밀도 차이에 기인한 위상역전 현상을 동반한 강진폭의 반사면을 확인할 수 있다. 그리고 통상적인 다중채널 탄성과 탐사를 통하여 획득한 인공합성 탄성파기록에 비하여 비교적 해상도가 높았으며 입사각에 따른 진폭의 변화가 큰 영역까지 확인이 가능하였다.

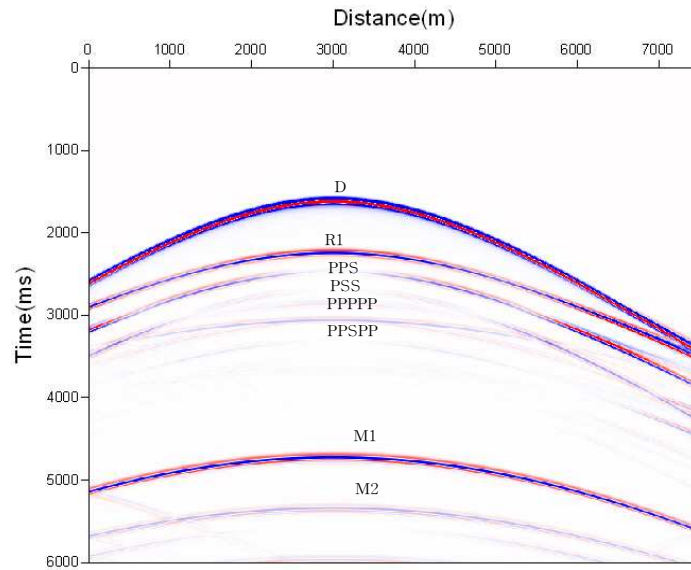


Fig. 7. Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 6 (a).

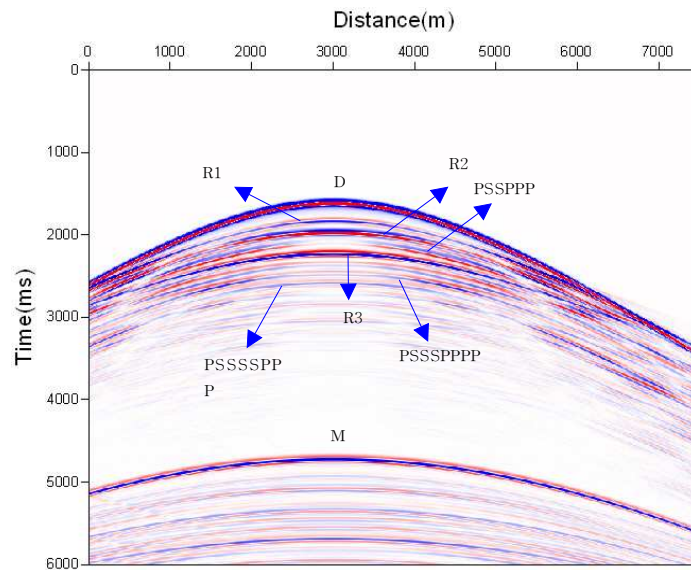


Fig. 8. Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 6 (b).

2.2.3 VCS(Vertical Cable Seismic) 탐사자료

통상적인 VSP탐사는 지표면에 음원을 설치하고 시추공에 수신기를 설치하거나 또는 이와 반대로 지표면에 수신기를 시추공에 음원을 설치하여 지층의 수직적인 탄성과 속도를 파악하는 탐사방법이다. 본 연구에서는 심해에서의 탐사라는 환경조건이기 때문에 수신기의 한 끝단을 해저에 고정시키고 수직으로 수신기를 설치하여 해수면과 지층경계면 사이에서 직접 물성을 측정할 수 있는 탐사방법인 VCS(Krail, 1994) 탐사에 대하여 실험하여 보았다. Fig. 9(a)와 (b)는 VCS 탐사를 수평 모델에 적용한 그림으로 모델의 크기 및 음원의 위치는 OBC 경우와 동일하게 탐사매개변수를 설정하였다. 수신기의 배열은 음원에서 50 m 떨어진 곳(3050 m)에 15 m의 간격으로 수직으로 155개를 설치하였다. 이러한 VCS 탐사를 이용하여 수평 3층 모델과 수평 5층 모델에 대하여 staggered grid

에 의한 유한차분법 탄성과 모델링을 적용하였다. Fig. 10은 이때의 인공합성 탄성과 기록을 나타낸 것으로 D는 하향의 직접파, R1은 해저면에서 상향 반사파, R2는 첫 번째 지층과 두 번째 층의 경계면에서 상향 반사파, PPSP와 PSSP는 첫 번째 지층과 두 번째 층의 경계면에서 모드 전환된 상향의 반사파, PPPPP는 첫 번째 지층과 두 번째 층의 경계 안에서 생긴 단거리 다중반사파 (inter-leg), M은 해수면에서 다시 반사된 장거리 다중반사파이다. Fig. 11에서도 Fig. 10과 동일한 반사파와 모드 전환과 및 다중반사파를 확인할 수 있으며, R3는 가스하이드레이트 층과 자유가스층 사이에서 만들어진 반사파이며, R4는 자유가스층과 하부 지층 경계면에서 반사파이며, 모드 전환과 및 단거리 다중반사파가 매우 복잡한 양상으로 나타나고 있다. 특히 R3 반사파는 다중채널 탐사 및 OBC 탐사의 인공 합성 탄성과 기록과 같이 가스 하이드레이트층과 자유가스층 사이 경계면에서 탄성과 속도 및 밀도 차이에 기인한 위상역전 현상을 동반한 강진폭의 반사면을 확인할 수 있다.

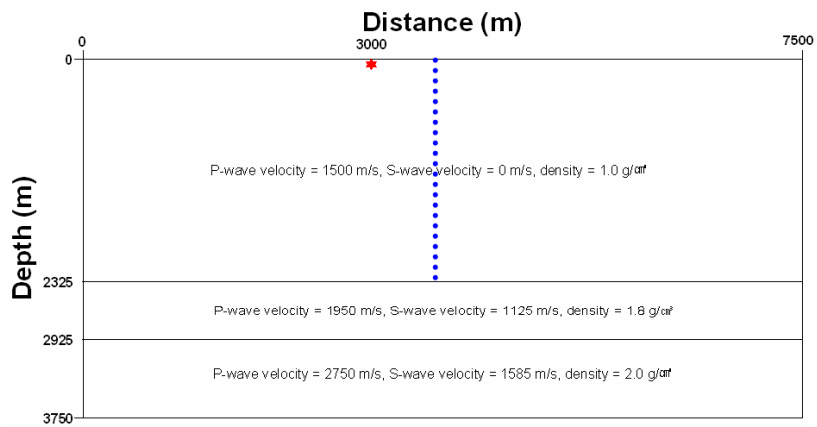


Fig. 9. (a) A horizontal three layered model for VCS survey.

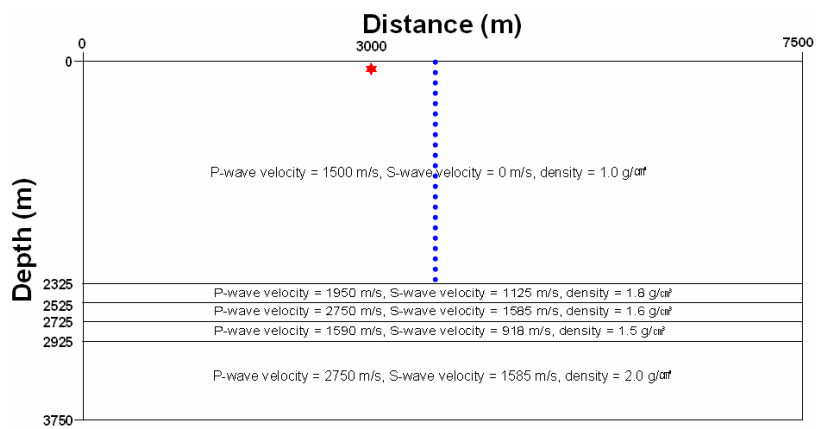


Fig. 9. (b) A horizontal five layered model for VCS survey.

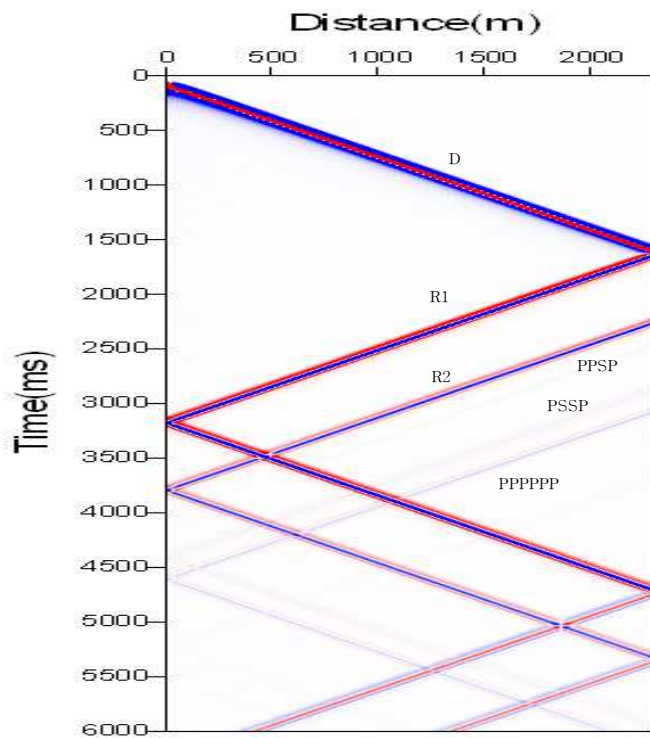


Fig. 10. Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 9 (a).

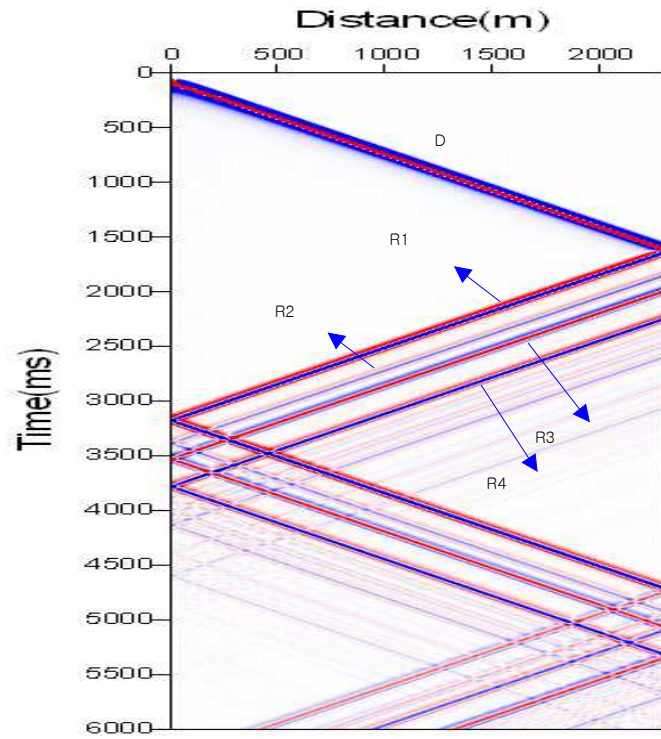


Fig. 11. Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 9 (b).

3. 탄성과 축소모형실험

탄성과 축소모형실험은 탄성과 전파현상의 규명, 음원 및 수신기의 다양한 배열과 지하지질구조에 따른 탄성과 진폭 등의 반응을 파악함으로써 탄성과 탐사 자료를 보다 정량적으로 해석하기 위해 이용되어 왔다. 이러한 축소모형실험은 실제 탄성과와 매질을 이용함으로써 수치모형실험의 단점을 보완할 수 있다 (Stewart et al., 1989). 탄성과 축소모형실험은 음원과 수신기의 공간 위치, 모델의 기하학적 구조, 지질모델의 매질 등의 여러 가지 제한이 있지만 축소모형실험에 의해서 획득한 자료는 신뢰성이 높으며, 이벤트의 상대진폭(relative amplitudes)을 이용하여 매질의 특성을 파악할 수 있다.

본 연구에서는 심해저 가스 하이드레이트의 탄성과 진폭특성 연구를 위하여 3차원 수평 3층 모델과 수평 5층 모델 그리고 첨멸층 모델에 대하여 탄성과 축소모형실험을 수행하였다.

3.1 축소모형실험장치 구성

탄성과 모형실험장치는 Fig. 12에 나타난 바와 같이 1)탄성과 또는 신호를 발생시키고 반사신호를 수신하여 저장하는 부분, 2)초음파 트랜스듀서를 원하는 위치로 움직이는 위치제어부분, 3)수조 및 지질모형, 4)컴퓨터제어 프로그램 부분으로 나눌 수 있다.

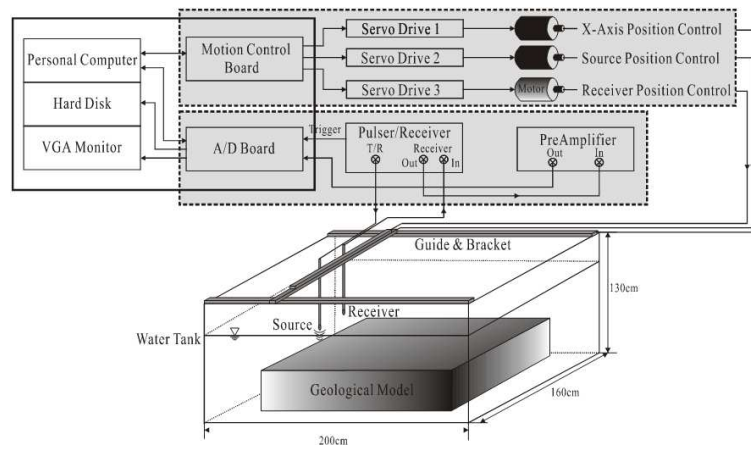


Fig. 12. Diagram of the seismic physical modeling system.

탄성과 모형실험에서 가장 중요한 부분이 발생원과 관련된 사항이며, 본 연구에서 ITC사의 중심 주파수가 280 KHz 트랜스듀서(ITC-1089D)와 Panametrics사의 중심 주파수가 1 MHz인 트랜스듀서(V303-SU)를 사용하였다. Fig. 13는 280 KHz 트랜스듀서의 방사 패턴(radial pattern)과 주파수 스펙트럼이며 Fig. 14는 1 MHz 트랜스듀서의 파형과 주파수 스펙트럼이다.

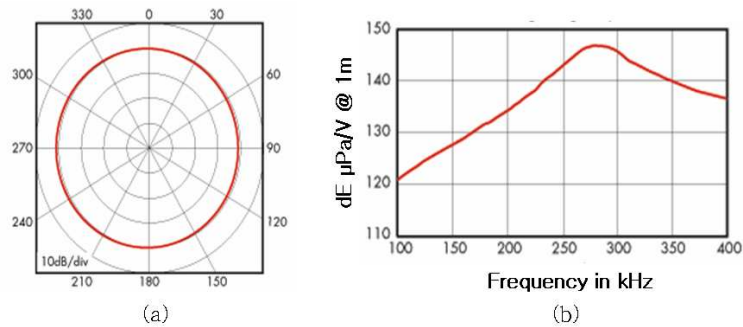


Fig. 13. (a) Radial pattern of 280 KHz spherical transducer and (b) frequency spectrum.

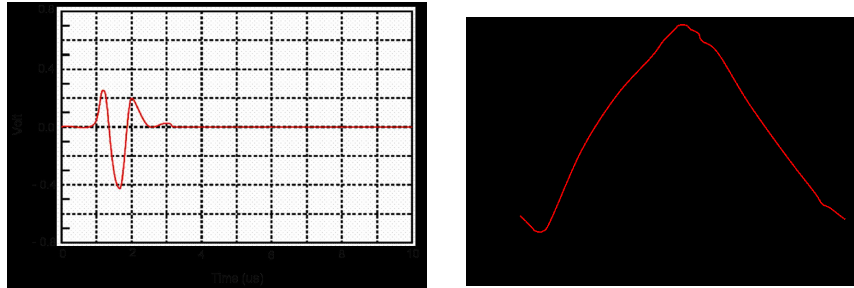


Fig. 14. (a) Signal waveform of 1 MHz transducer and (b) frequency spectrum.

Fig. 15는 본 연구에서 사용한 수조의 사진으로 크기는 가로×세로×높이가 2.0 m×1.6 m×1.3 m이다. 현장에서의 탐사 영역크기와 실내 수조실험 간에는 크기가 다르기 때문에 축소 모형을 제작한 다음 지질모델의 크기, 구조 및 물성이 실제의 현장상황을 정확히 반영할 수 있어야 한다(신성렬 등, 2001). 고려할 수 있는 축소비(scale factor)는 3가지로 속도 변수(a_c), 모델의 크기 변수(a_λ), 주파수 변수(a_f)이며 이 3가지는 다음 식(1)과 같은 조건을 만족하여야 한다(Vogel et al., 1985).

$$a_c = a_f \cdot a_\lambda \quad (3-1)$$

실제로 재료의 속도비는 1~2 범위값으로 변화시키기 어려우나 중심주파수의 변화는 용이하므로 주파수를 변화시켜 모델 축소비에 따라 크기를 결정할 수 있다. 본 연구에서 사용한 모델의 축소비는 1:10000이다.

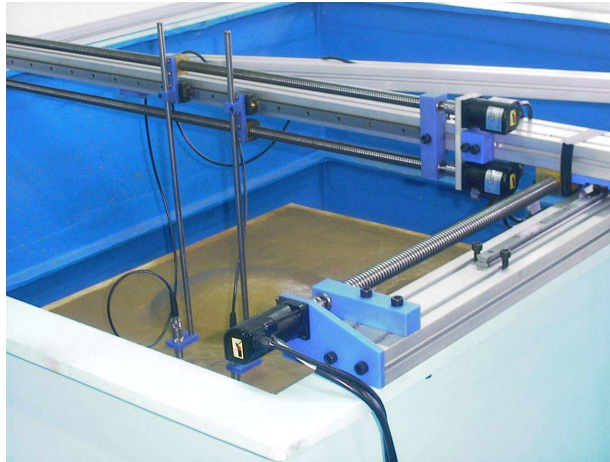


Fig. 15. Photography of water tank.

모형제작에 사용되는 통상적인 재료는 합성수지, 금속재료 그리고 고무재료 등이 사용되며, 본 연구에서는 아크릴, Bakelite, 폴리에틸렌, ABS과 같은 합성수지를 사용하였다. 초음파 탄성과 속도계를 이용하여 축소모형실험에서 사용한 재료의 탄성과 속도를 측정하였으며 전자저울을 이용하여 재료의 밀도를 측정하였다. Fig. 16은 각 재료의 P와 속도그래프를 나타낸 것이며 각 재료의 P와 속도와 밀도는 Table 2와 같다. ABS수지의 경우 1624 m/s와 1.304 g/cm³으로 나타났으며 아크릴수지는 2281 m/s, 1.195 g/cm³이며 폴리에틸렌수지는 2245 m/s, 0.935 g/cm³으로 측정되었다.

Table 2. Materials and their physical parameters used in physical modeling.

Material	V _p (m/s)	ρ(g/cm ³)
Acrylic	2281	1.195
Polyethylene	2245	0.935
ABS	1624	1.033

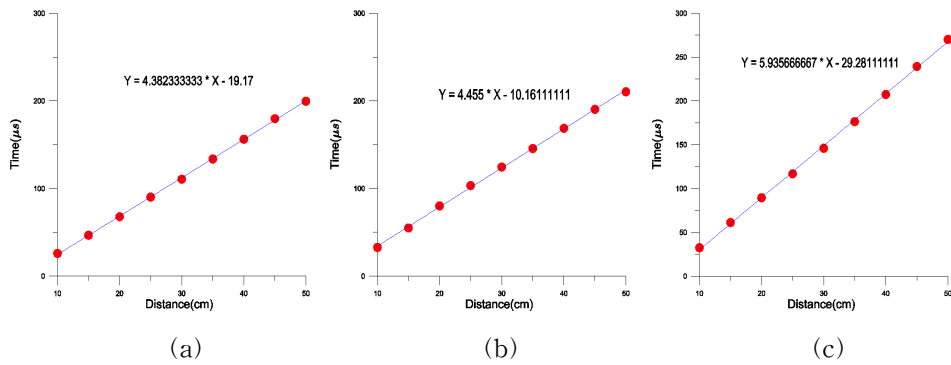
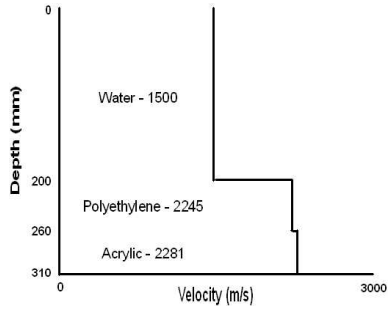
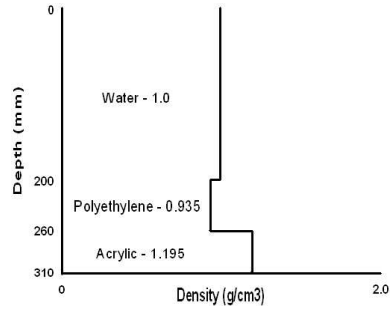


Fig. 16. Velocity graph of (a) Acrylic sheet, (b) Polyethylene sheet and (c) ABS sheet.

Fig. 17 (a)와 (b) 그리고 Fig. 18 (a)와 (b)는 수평 3층 모델과 (물-폴리에틸렌-아크릴) 그리고 5층 모델(물-폴리에틸렌-아크릴-ABS-아크릴)의 P와 속도와 밀도를 나타낸 것이다. 3층 모델의 경우 폴리에틸렌판은 상부의 퇴적층을 나타내고 아크릴판은 하부의 퇴적층을 나타낸다. 그리고 5층 모델의 경우 상부의 아크릴판은 가스 하이드레이트층, ABS판은 자유가스층 그리고 하부의 아크릴판은 자유가스층 아래의 퇴적층을 의미한다. 일반적으로 퇴적층은 1.0 g/cm^3 이상의 밀도 값을 가지고 있지만 본 연구에서는 축소모형실험을 수행하기 위하여 0.935 g/cm^3 의 밀도를 가지는 폴리에틸렌판을 사용하였다.

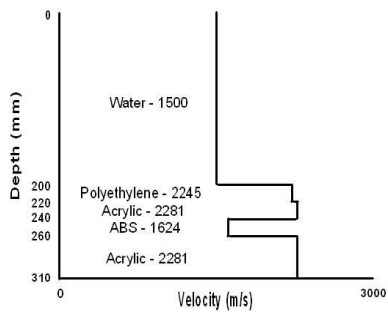


(a)

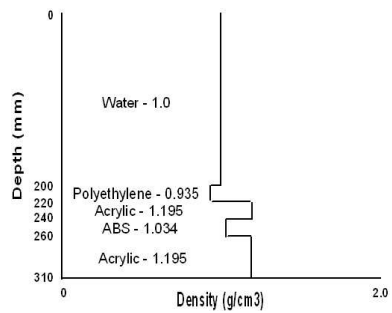


(b)

Fig. 17. (a) P-wave velocities and (b) densities of horizontal three layered model.



(a)



(b)

Fig. 18. (a) P-wave velocities and (b) densities of horizontal five layered model.

3.2 수평 모델

3.2.1 다중채널 탄성과 탐사자료

Fig. 19(a)와 (b)와 같이 3층 모델 그리고 5층 모델에 대하여 통상적인 다중채

널 탄성과 탐사자료를 모사하였다. 트랜스듀서는 수면에서 얇은 깊이로 잠기게 하였으며, 트랜스듀서로부터 폴리에틸렌판의 거리는 200 mm 이다. 음원과 첫 번째 수신 트랜스듀서의 거리는 20 mm이고, 수신 트랜스듀서를 1 mm 씩 이동하여 총 301채널의 공발점 모음(common shot gather) 자료를 획득하였다. 샘플링 간격(sampling rate)는 5 MHz이고 샘플수(sampling number)는 2500개이다. Fig. 20 (a)와 (b) 그리고 Fig. 21 (a)와 (b)는 이때의 탄성과 기록 자료와 트레이스를 나타낸 것으로 D는 직접파, R1은 폴리에틸렌판에서의 반사파, R2는 폴리에틸렌판과 아크릴판에서의 반사파, R3는 아크릴판과 ABS판에서의 반사파, R4는 ABS판과 아크릴판에서의 반사파, 그리고 M은 해수면에서 다시 반사된 장거리 다중반사파를 의미한다. 탄성과 기록에서 직접파의 심한 링잉(ringing)현상은 음원과 수신기가 이상적인 점 음원(point source)과 점 수신기가 아닌 어느 정도의 크기를 가지고 있기 때문에 발생한 것으로 사료된다. 그리고 Fig. 21 (a)와 (b)를 통하여 가스 하이드레이트층과 자유가스층 사이의 경계면에서 큰 진폭의 반사파와 위상역전현상을 확인할 수 있었다.

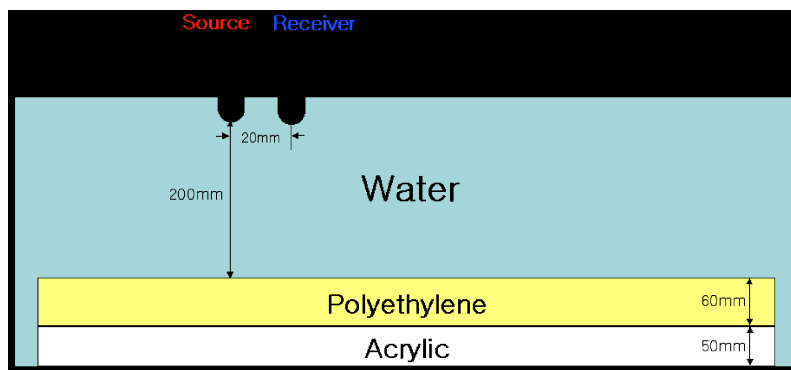


Fig. 19. (a) The geometry of multi-channel seismic survey for horizontal three layered model(Water, Polyethylene, and Acrylic). The distances were scaled 1:10000(1mm=10m) for the experiment.

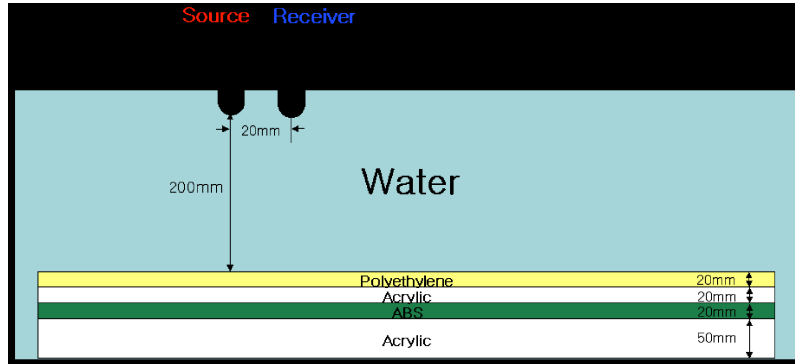
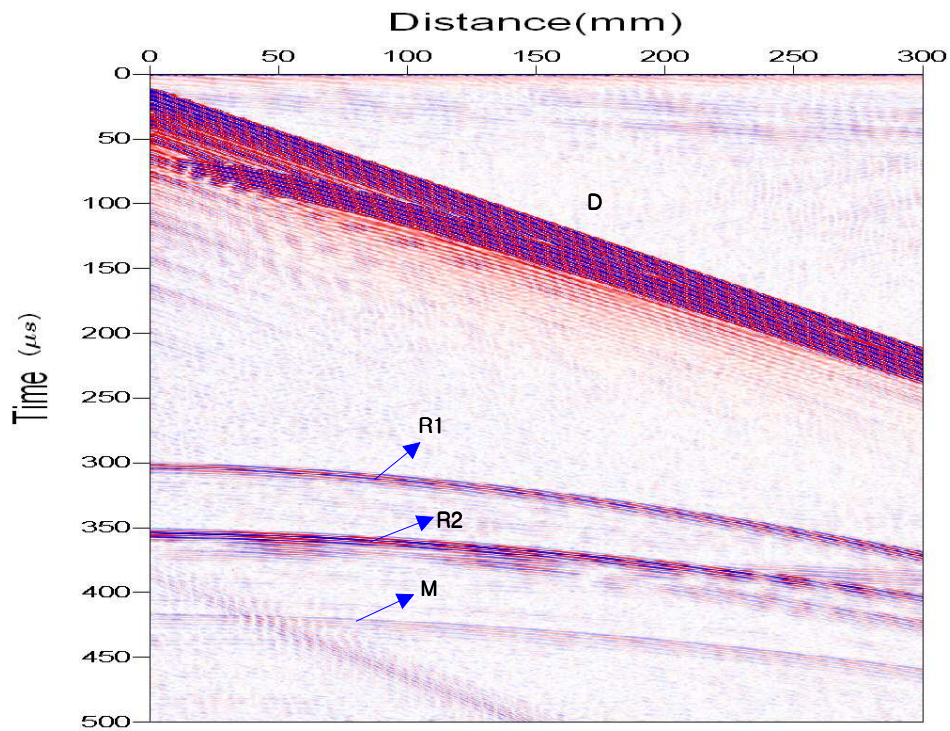
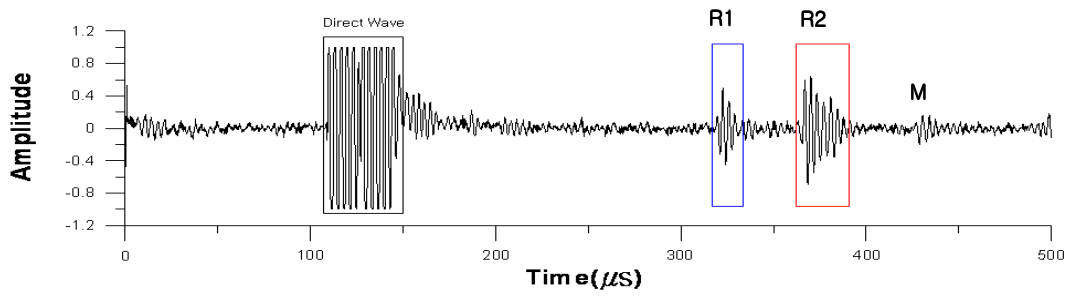


Fig. 19. (b) The geometry of multi-channel seismic survey for horizontal five layered model(Water, Polyethylene, Acrylic, ABS, and Acrylic).

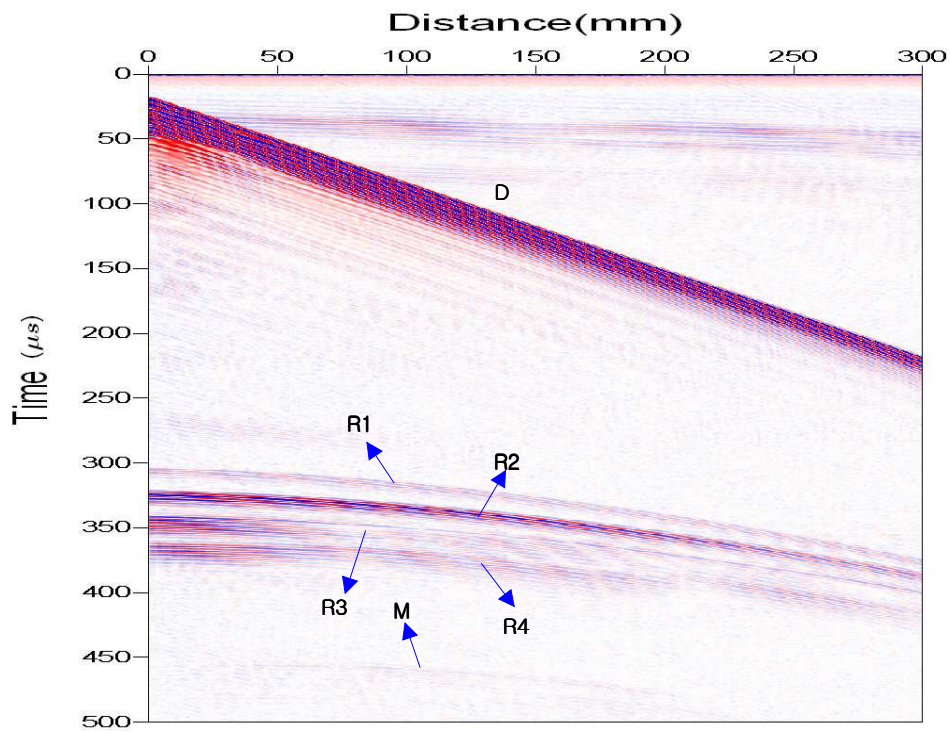


(a)

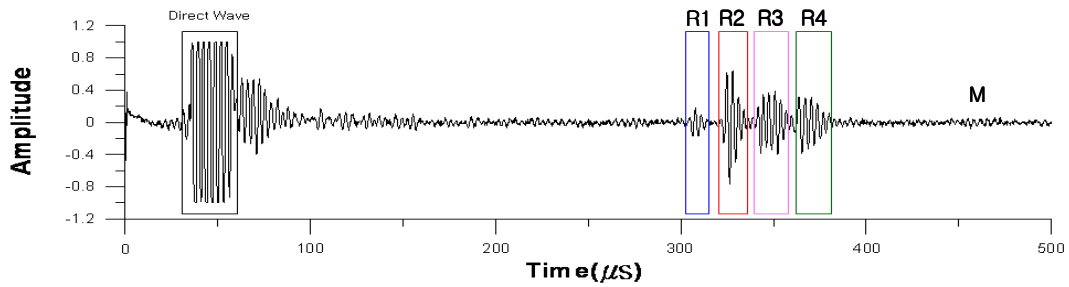


(b)

Fig. 20. (a) Multi-channel common shot gather data for horizontal three layered model, (b) A trace of channel No. 150.



(a)



(b)

Fig. 21. (a) Multi-channel common shot gather data for horizontal five layered model, (b) A trace of channel No. 30.

3.2.2 Deep tow(수진기) 탐사자료

Deep tow(수진기) 탐사의 자료획득을 모사하기 위해서 음원은 얇은 깊이로 수침시키고 수진 트랜스듀서는 150 mm의 수심에 잠기게 하였다. 수진 트랜스듀서와 폴리에틸렌 관 사이는 50 mm이고, 수진 트랜스듀서를 1 mm 씩 이동하면서 총 301채널의 공발점 모음 자료를 획득하였다. 샘플링 간격은 5 MHz이고 샘플수는 2500개이다. Fig. 22(a)와 (b)는 deep tow 탐사의 모형도이며, Fig. 23 (a)와 (b) 그리고 Fig. 24 (a)와 (b)는 각 모델의 탄성과 기록 자료와 트레이스를 나타낸 것이다. 통상적인 다중채널 탄성과 탐사자료에 비하여 직접파의 링잉현상이 다소 약하게 발생하였고 1차 반사파들의 관찰이 용이하였다. 또한 Fig. 24 (a)와 (b)에서 볼 수 있는 여러 가지 반사파 중 R3는 BSR과 같은 가스 하이드레이트층과 자유가스층 사이의 경계면에서 큰 진폭의 반사파와 위상역전 현상을 확인할 수 있었으며 왕복주사 400 μ s 아래의 많은 다중 반사파들을 관찰할 수 있었다.

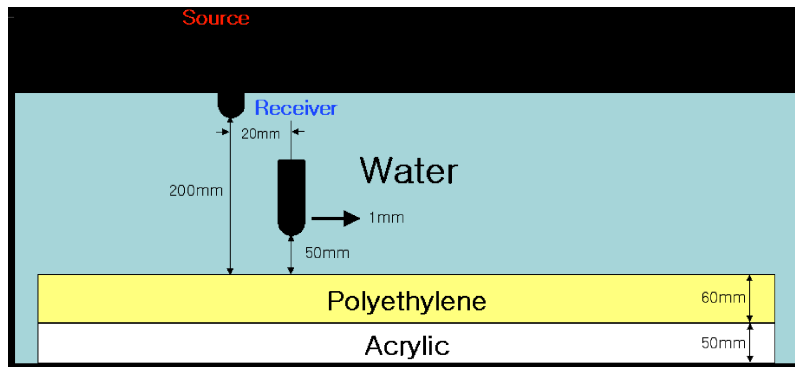


Fig. 22. (a) The geometry of Deep tow(receiver) seismic survey for horizontal three layered model(Water, Polyethylene, and Acrylic).

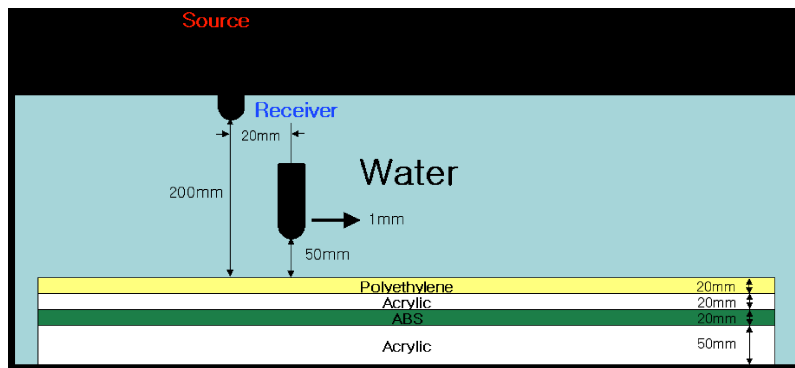
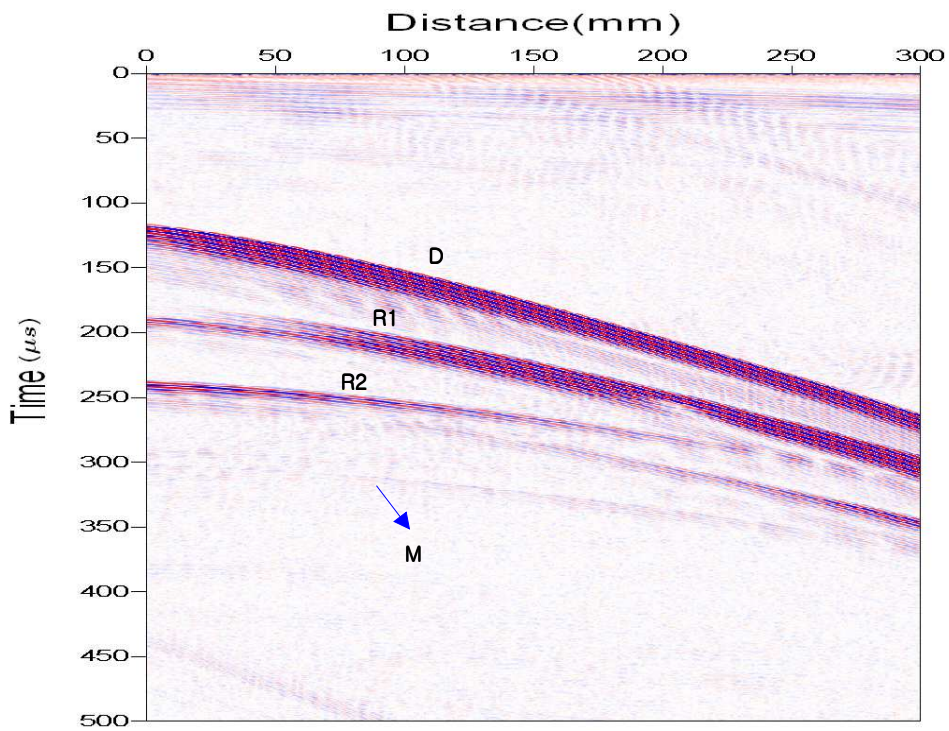
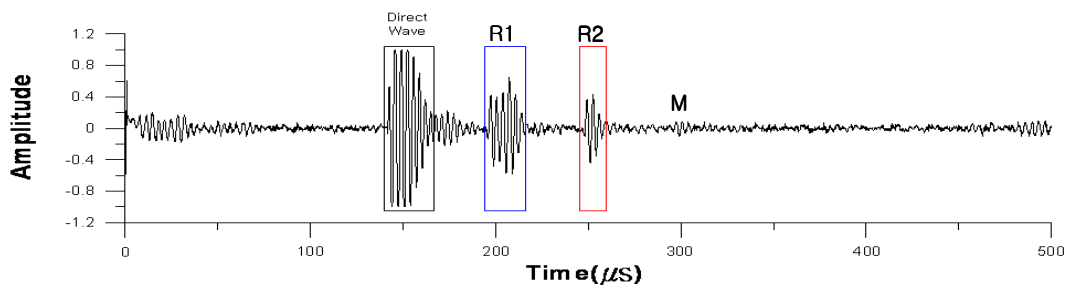


Fig. 22. (b) The geometry of Deep tow(receiver) seismic survey for horizontal five layered model(Water, Polyethylene, Acrylic, ABS and Acrylic).

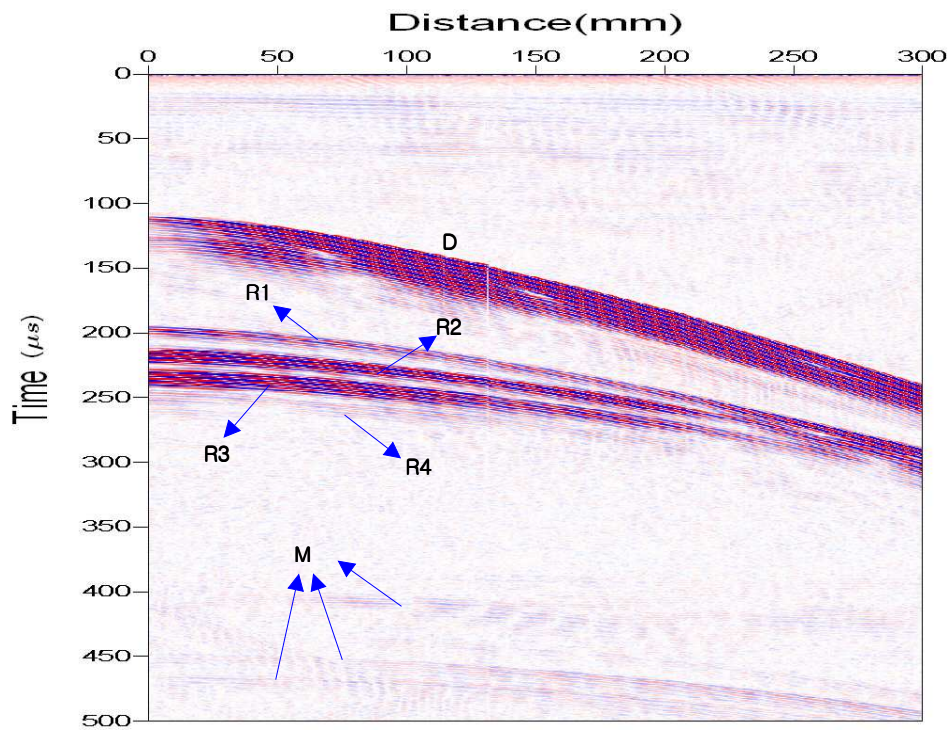


(a)

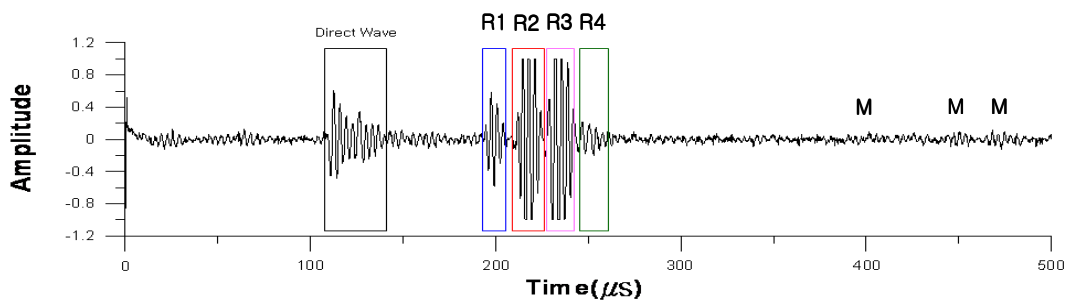


(b)

Fig. 23. (a) Deep tow(receiver) seismic common shot gather data for horizontal three layered model, (b) A trace of channel No. 80.



(a)



(b)

Fig. 24. (a) Deep tow(receiver) seismic common shot gather data for horizontal five layered model, (b) A trace of channel No. 10.

3.2.3 Deep tow(음원 · 수신기) 탐사자료

수평 3층 모델과 수평 5층 모델에 대한 deep tow(음원 · 수신기) 탐사자료의 획득하기 위해서 Fig. 25(a)와 (b)와 같이 음원과 수신 트랜스듀서를 모두 150 mm 깊이로 수침 시켰다. 수신 트랜스듀서와 폴리에틸렌 판 사이의 거리는 50 mm이며, 음원과 첫 번째 수신 트랜스듀서의 거리는 20 mm이고, 수신 트랜스듀서를 1 mm 씩 이동하여 총 301채널의 공발점 모음 자료를 획득하였다. 샘플링 간격은 10 MHz이고 샘플수는 2500개이다. Fig. 26 (a)와 (b) 그리고 Fig. 27 (a)와 (b)는 이때의 탄성과 기록 자료와 트레이스를 나타낸 것으로 직접파, 1차 반사파, 다중반사파 등이 비교적 잘 나타났지만 다중채널 탄성과 탐사 자료와 같이 직접파의 링잉현상이 심하게 발생하였다. 또한 Fig. 27 (a)에서 자유가스층과 하부의 퇴적층 사이의 반사파는 파의 감쇠 현상으로 인하여 잘 나타나지 않았지만 다중채널 탄성과 탐사 자료와 수신기가 deep tow인 탐사 자료와 마찬가지로 Fig. 27 (a)와 (b)에서 가스 하이드레이트층과 자유가스층 사이의 경계면에서 큰 진폭의 반사파와 위상역전 현상을 확인할 수 있었다.

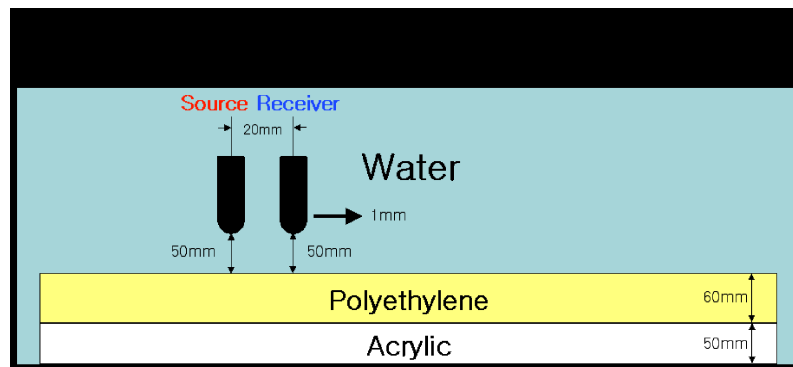


Fig. 25. (a) The geometry of Deep tow(source · receiver) survey for horizontal three layered model(Water, Polyethylene and Acrylic).

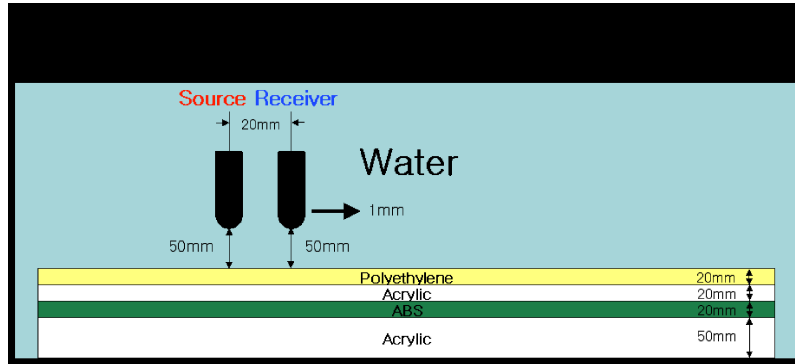
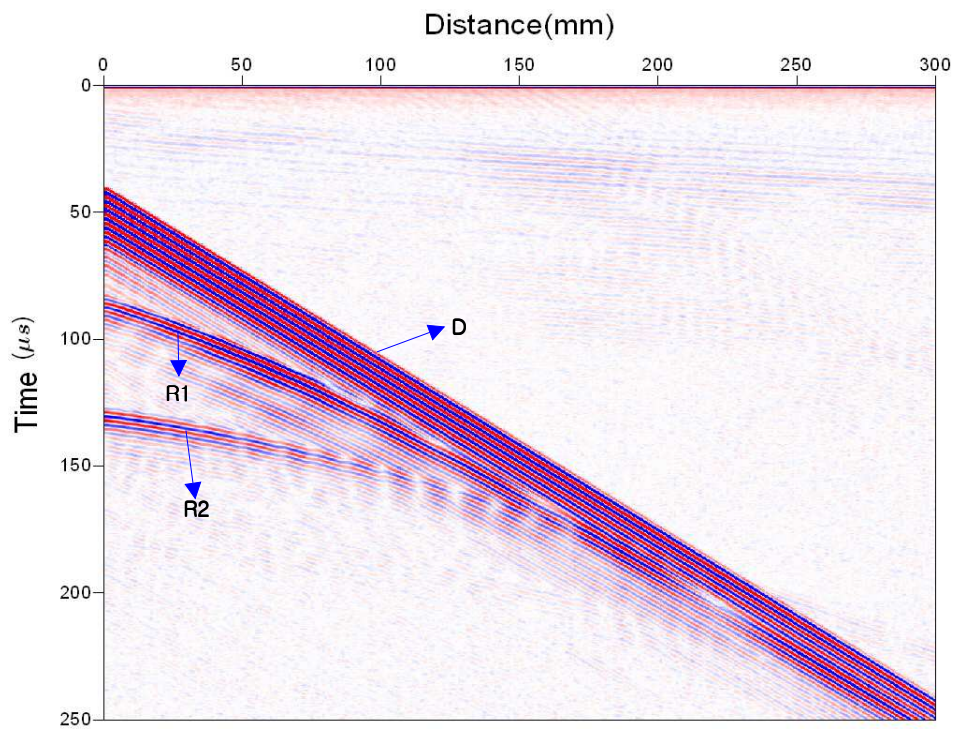
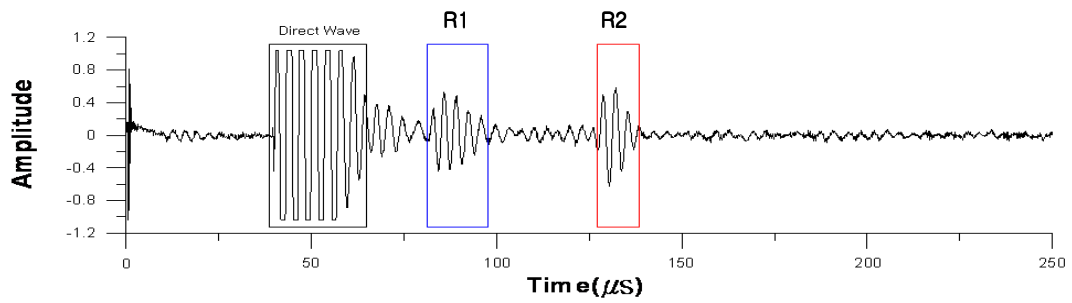


Fig. 25. (b) The geometry of Deep tow(source · receiver) survey for horizontal five layered model(Water, Polyethylene, Acrylic, ABS and Acrylic).

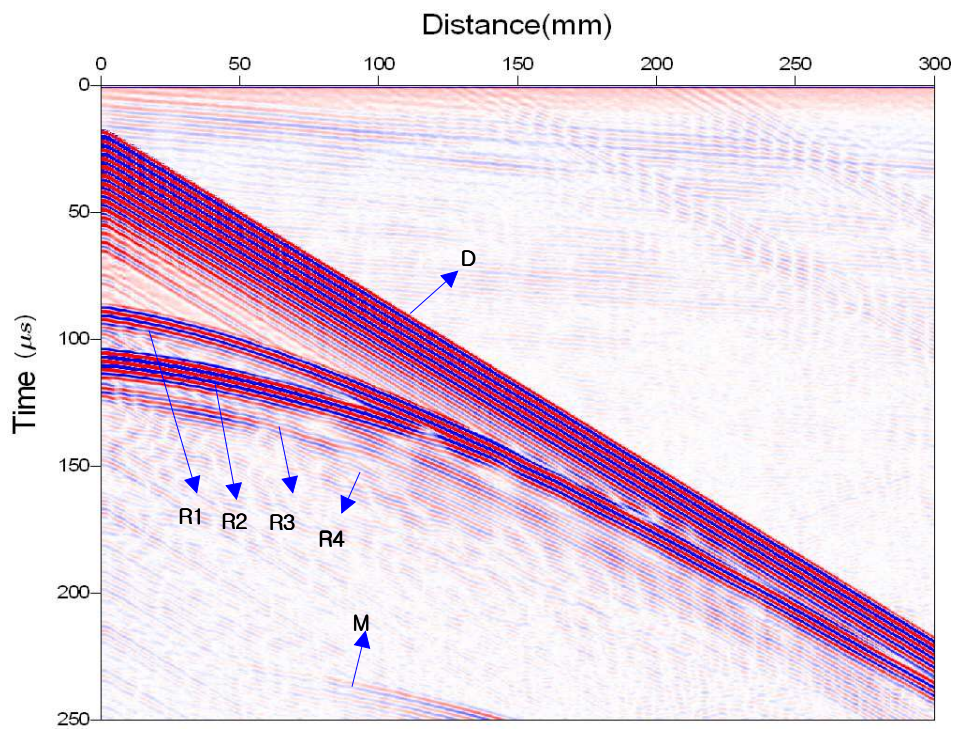


(a)

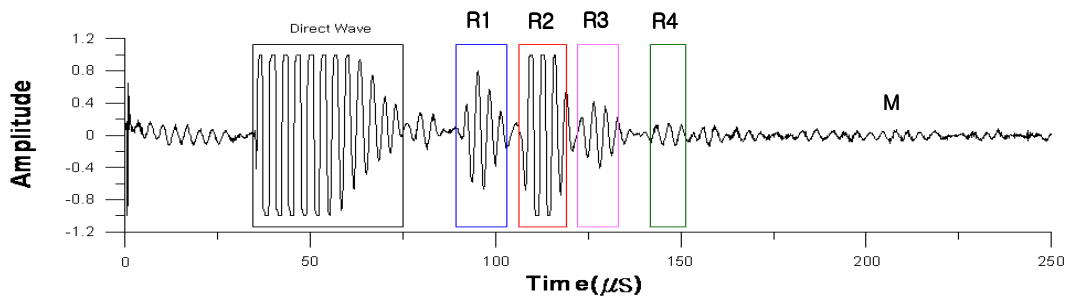


(b)

Fig. 26. (a) Deep tow(source · receiver) survey common shot gather data for horizontal three layered model, (b) A trace of channel No. 1.



(a)



(b)

Fig. 27. (a) Deep tow(source · receiver) survey common shot gather data for horizontal five layered model, (b) A trace of channel No. 30.

3.3 침멸층 모델

Fig. 28과 같이 침멸층 모델에 대하여 탄성과 탐사 자료 획득 상황을 모사하였다. 301채널로 구성된 음원-수진 트랜스듀서 배열을 일정간격(1 mm)으로 이동하여 총 300 mm 이동하면서 자료를 획득하였다. 그리고 이때의 샘플링 간격은 5 MHz, 샘플수는 2500개로 하였다. 획득한 자료에 대해서 공심점 분류, 속도분석, NMO 보정과 중합공정을 적용하였다.

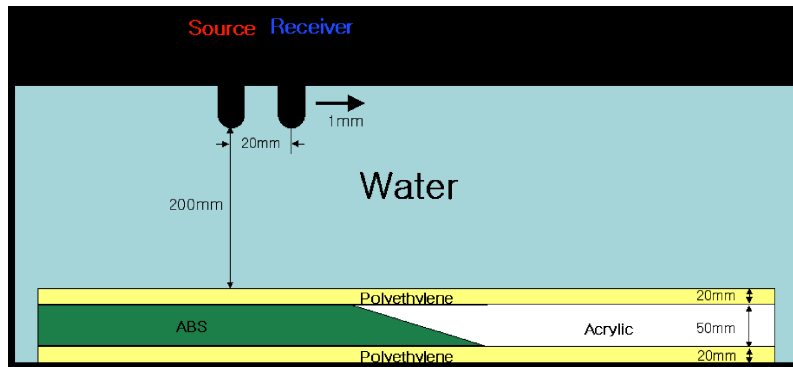


Fig. 28. The geometry of pinch-out model.

3.3.1 공심점 분류(CDP sorting)

속도분석과 NMO 보정을 위하여 공발점 취합도에 대한 공심점 분류를 해야 한다. 같은 공통반사점을 갖는 기록을 중합시킴으로써, 탄성과 단면도의 신호대 잡음의 비를 향상 시킬 수 있다. 공심점 분류는 반사파의 파형요소 특성을 변화시키지 않고 최종 중합전까지의 전산처리 목적에 맞게 공심점 별로 재분류하는 과정이다. Fig. 29는 공심점 모음 단면도를 CDP 1100에서 1600까지 CDP 200 간격으로 도시한 것으로 50폴드를 이루고 있음을 보여준다.

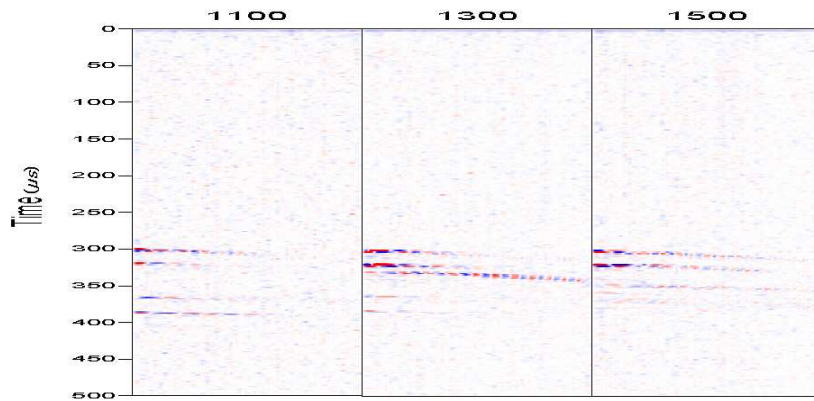


Fig. 29. CDP gathers from 1100 to 1500 every 200 steps. Here horizontal direction shows CDP number.

3.3.2 속도분석

공심점 분류가 완료되면 탄성과 중합속도 결정을 위한 속도분석이 필요하다. 자료처리과정에서 속도함수를 결정하는 속도분석 공정은 중합단면도에 직접 영향을 주므로 매우 중요한 공정이다. 모든 공심점 취합도에 대해 속도분석을 실시하는 것은 많은 시간과 노력이 필요하기 때문에 본 연구에서는 5개의 공심점 취합도를 선택하여 속도 스펙트럼을 계산하여 중합속도를 결정하였다. Fig. 30은 NMO 보정 후의 속도 스펙트럼을 결과를 나타낸 것이다. Fig. 30(a)와 (b) 그리고 (c)는 CDP 1100과 CDP 1200 그리고 CDP 1300에서 속도분석한 결과로 심도에 따른 속도 변화 양상을 보여준다.

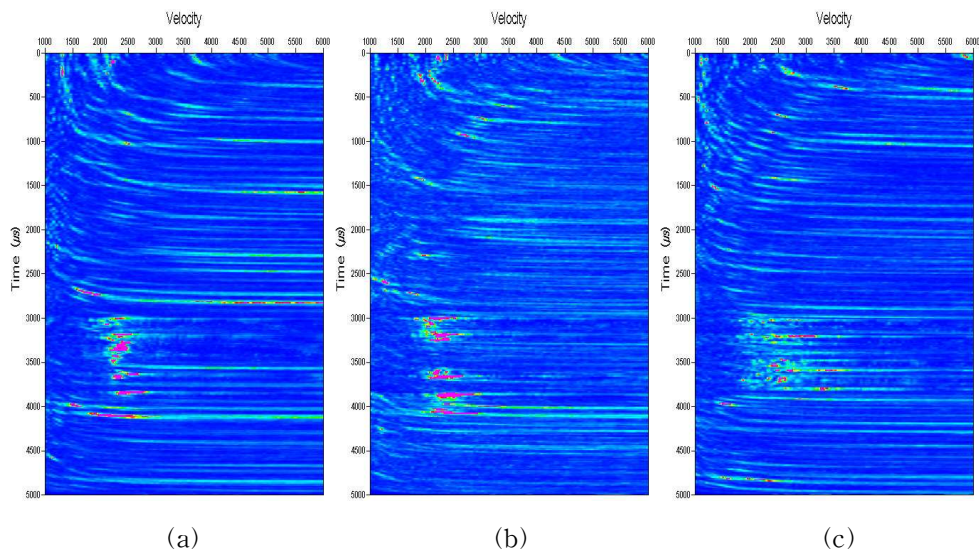


Fig. 30. (a)-(c) are the result of velocity analysis as CDP 1100, 1300 and 1500.

3.3.3 중합단면도

속도분석이 끝난 후 결정된 중합속도는 NMO 보정에 이용되어 중합단면도가 완성된다(Fig. 31). Fig. 31는 CDP 1100에서 1600까지, 왕복주시를 0에서 500 μ s 까지의 지층단면도를 도시한 것이다. Fig. 32는 공통 오프셋 자료(common offset gather)이며 Fig. 31과 Fig. 32를 비교했을 때 전체적인 해상도가 향상되었으며 침멸되는 부분의 반사파와 매질의 속도에 의한 반사파의 주시차이를 명확하게 구별할 수 있었다.

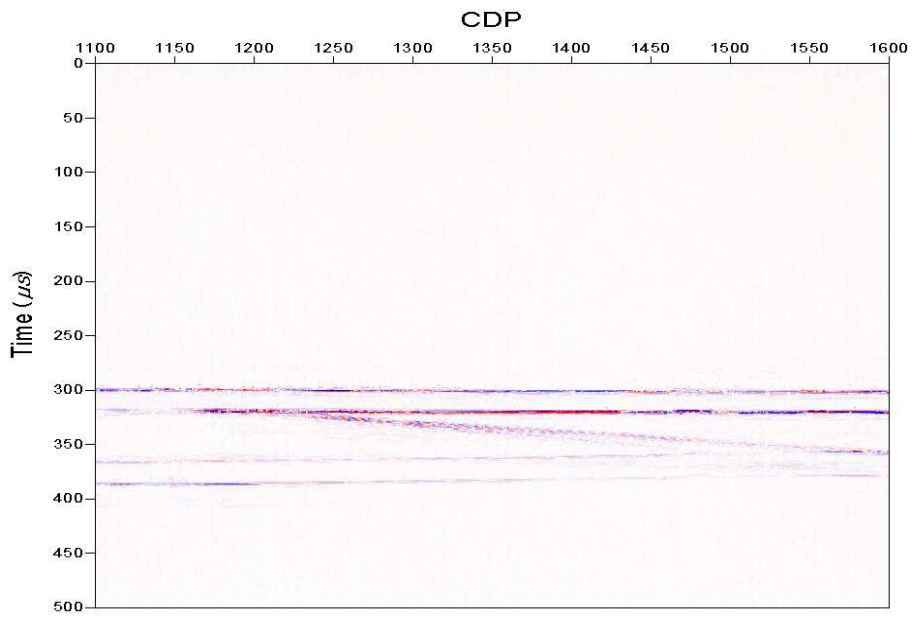


Fig. 31. CMP stack derived from the NMO corrected CDP gathers.

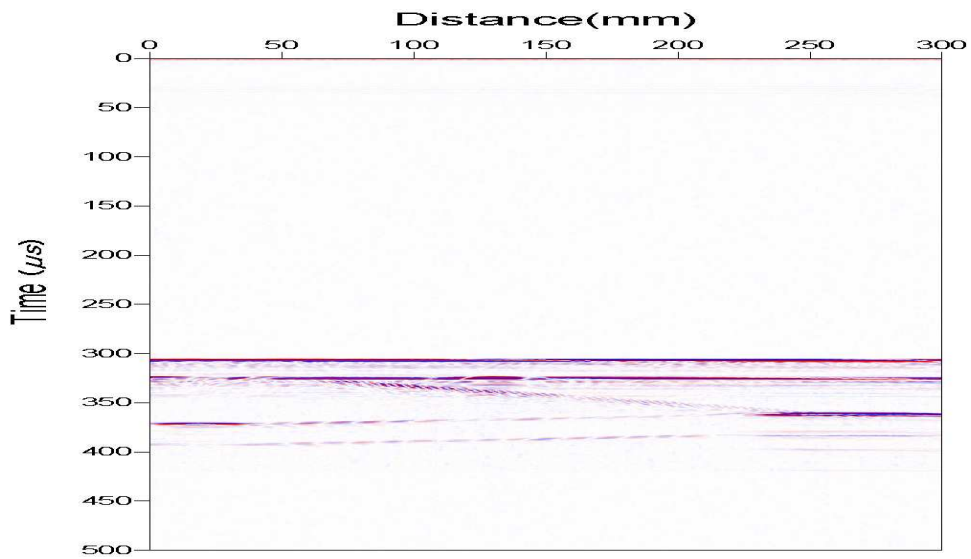


Fig. 32. Common offset gather data for pinch-out model.

4. 탄성과 복소분석 및 진폭특성

4.1 탄성과 복소분석

탄성과 복소분석은 탄성과 반사 자료로부터 물성변화에 따른 지질정보를 파악하기 위해서 사용되는 분석 방법으로 진폭, 위상 그리고 주파수 변화 분석이 필요하다. 이러한 탄성과 복소분석은 주로 지진파 신호분석, 탄성과 중합단면도에 대한 순간 특성 값, 중합 단면도상에서의 박층 규명에 응용되어 왔다(Tarner and Sheriff, 1977).

4.1.1 순간 진폭(Reflection Strength)

탄성과 복소 트레이스 $F(t)$ 는 탄성과 트레이스 $f(t)$ 를 복소 트레이스의 실수(real part)로 간주하고 트레이스 $f(t)$ 에 대한 힐버트 변환을 허수로 간주하여 $F(t) = f(t) + ig(t)$ 로 나타낸다. 실수영역 탄성과 트레이스 $f(t)$ 를 시간함수로 된 진폭과 위상으로 나타내면 $f(t) = A(t)\cos \theta(t)$ 이고, 허수영역 트레이스 $g(t)$ 는 $g(t) = A(t)\sin \theta(t)$ 이다. 따라서 복소 트레이스는

$$F(t) = f(t) + ig(t) = A(t)e^{i\theta(t)} \quad (4-1)$$

이 된다. $f(t)$ 와 $g(t)$ 로부터 순간진폭(reflection strength) $A(t)$ 와 순간위상(instantaneous phase) $\theta(t)$ 를 구할 수 있다. 즉 순간진폭은,

$$A(t) = \sqrt{f^2(t) + g^2(t)} = |F(t)| \quad (4-2)$$

으로 상하지층간의 반사파 강도의 변화를 분석할 수 있다. 반사파 강도의 최대는 트레이스 신호의 최대, 최소점보다 위상이 바뀌는 지점이나 특히 여러 개의 반사파 합성으로 이루어진 트레이스 지점에서 나타나며, 강한 순간진폭강도는

암석학적 변화와 밀접한 관련이 있는데, 부정합면, 해저면의 급격한 변화가 있는 경계면, 특히 가스가 존재하는 곳에서 나타난다(Tarner and Sheriff, 1977).

4.1.2 순간 위상(Instantaneous Phase)

탄성과 복소 트레이스 식(1)로부터 순간위상 값은

$$\theta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{g(t)}{f(t)} \right) \quad (4-3)$$

이 된다. 위상 단면도는 지층 경계면의 불연속성, 다층, 핀치아웃, 서로 다른 경사층에서 반사 신호 등을 효과적으로 나타낼 수 있어 탄성 퇴적층서 경계면을 구분할 때 효과적으로 활용된다.

4.1.2 순간 주파수(Instantaneous Frequency)

시간에 따른 위상 변화율은 식(3)으로부터

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = w(t) \quad (4-4)$$

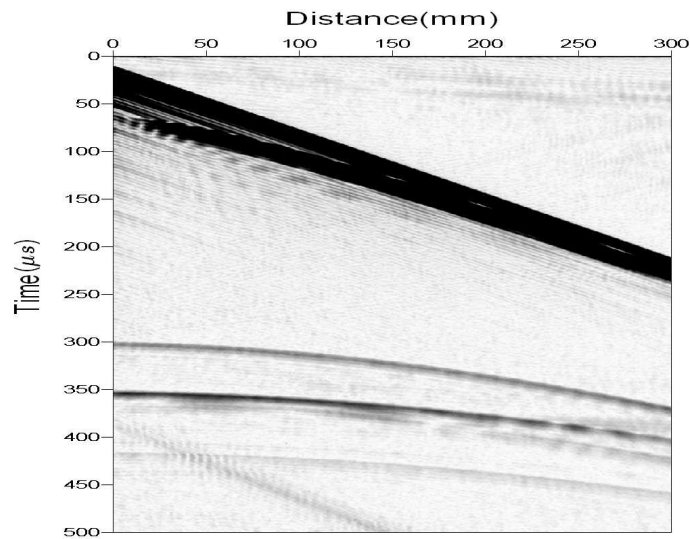
이므로 순간 위상을 대입하면

$$w(t) = \frac{d}{dt} \tan^{-1} \left(\frac{g(t)}{f(t)} \right) \quad (4-5)$$

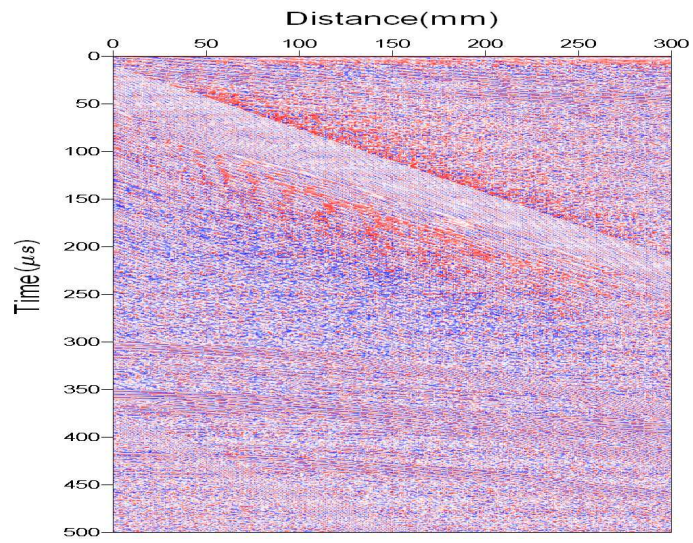
$$w(t) = \frac{f(t) \frac{dg(t)}{dt} - g(t) \frac{df(t)}{dt}}{f^2(t) + g^2(t)} \quad (4-6)$$

되어 순간 주파수를 계산할 수 있다. 순간 주파수는 순간위상 단면도처럼 시간 영역에서 한 점에 대한 순간 주파수를 나타낸다. 핀치아웃, 탄화수소-물 경계면 같은 곳에서 순간 주파수는 급격하게 변한다. 이와 같이 순간 특성값들은 중합 단면도로부터 진폭과 주시에 대한 정보뿐만 아니라 탄성과 반사자료에서 지하 지질구조의 물성을 파악하는데 중요한 역할을 한다. 축소모형실험을 수행하여

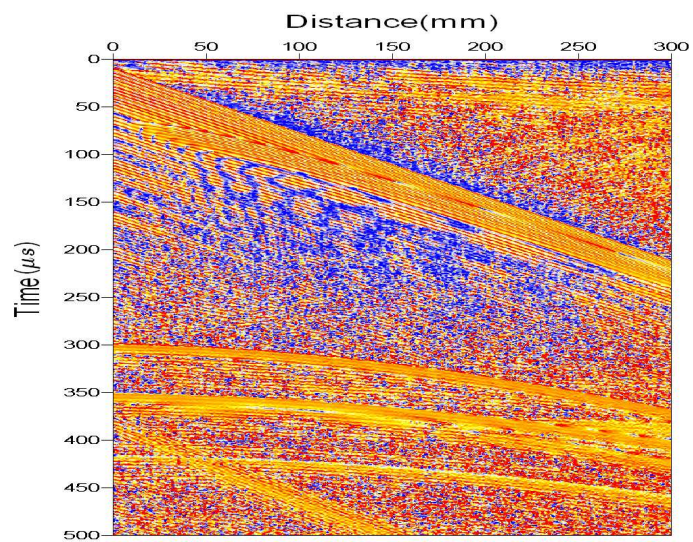
획득한 다중 채널 탄성파의 공발점 자료에 대한 트레이스 복소분석을 통해 순간 진폭, 순간 위상, 순간 주파수를 분석하였다. Fig. 33 (a), (b) 그리고 (c)는 가스 하이드레이트가 부존하지 않는 수평 3층 모델을 이용하여 획득한 공발점 모음 자료의 순간 진폭 단면도, 순간 위상 단면도 그리고 순간 주파수 단면도이다. Fig.34 (a), (b) 그리고 (c)는 가스 하이드레이트가 부존하는 수평 5층 모델을 이용하여 획득한 공발점 모음 자료의 순간 진폭 단면도, 순간 위상 단면도 그리고 순간 주파수 단면도이다. Fig. 35 (a)와 (b)는 Deep tow(수진기)의 탐사 자료에 대한 순간 진폭 단면도로써 음원과 수진기의 거리가 0~150 mm일 때는 반사파의 진폭변화가 거의 없지만, 거리가 150 mm 이상으로 증가할 때는 입사각의 증가와 전반사 등으로 인하여 진폭의 변화가 커지는 것을 확인할 수 있었다.



(a)

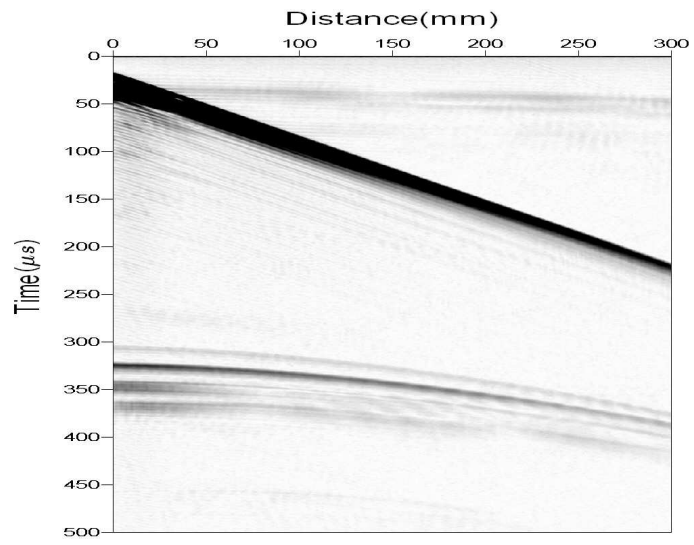


(b)

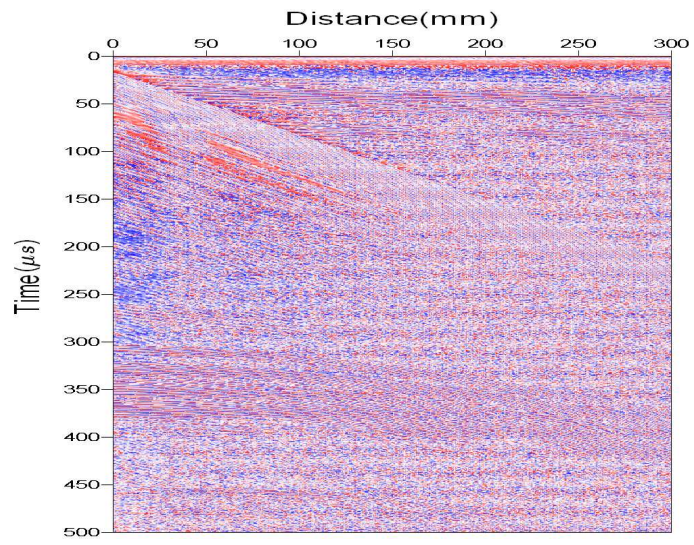


(c)

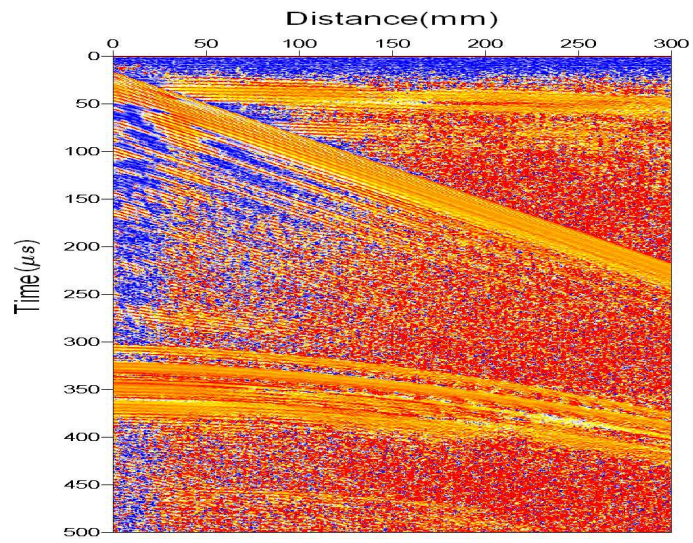
Fig. 33. Result of the complex analysis for Fig. 20.
 (a) Reflection strength, (b) Instantaneous phase and
 (c) Instantaneous frequency.



(a)

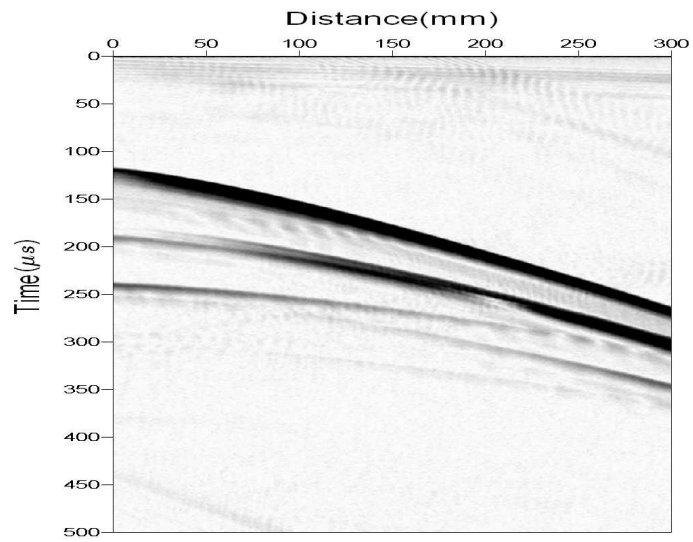


(b)

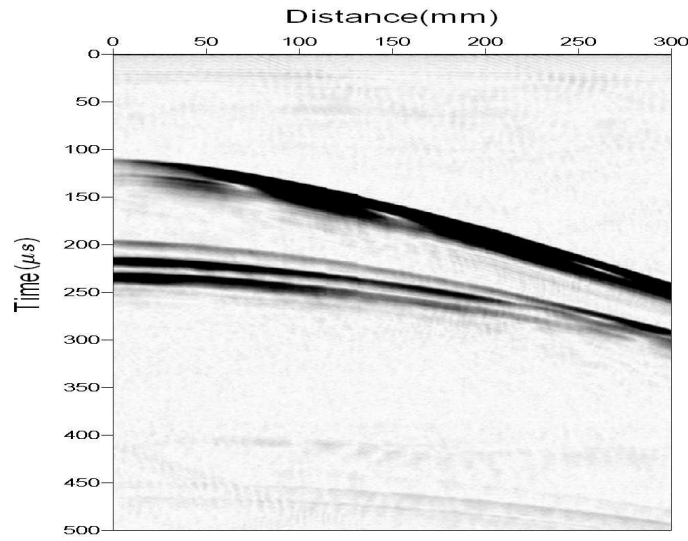


(c)

Fig. 34. Result of the complex analysis for Fig. 21.
 (a) Reflection strength, (b)Instantaneous phase and
 (c)Instantaneous frequency.



(a)



(b)

Fig. 35. Reflection strength section of common shot gather data for Deep tow(receiver) survey. (a) the horizontal three-layered model and (b) the horizontal five-layered model.

4.2 입사각에 따른 반사와 진폭특성

입사각 또는 음원-수진기 거리에 따른 반사와 진폭은 반사면의 반사계수에 의해 결정된다. Shuey(1985)는 Zoeppritz(1919)식을 반사계수와 지층 물성과의 관계를 고찰해 보기 위해서 다음과 같이 근사하였다.

$$R_{pp}(\theta) \approx R_p + (A_0 R_p + \frac{\Delta\sigma}{(1-\sigma)^2})\sin^2\theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_{p1}}(\tan^2\theta - \sin^2\theta) \quad (4-7)$$

여기서

$$\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1, \quad \sigma_a = (\sigma_2 + \sigma_1)/2,$$

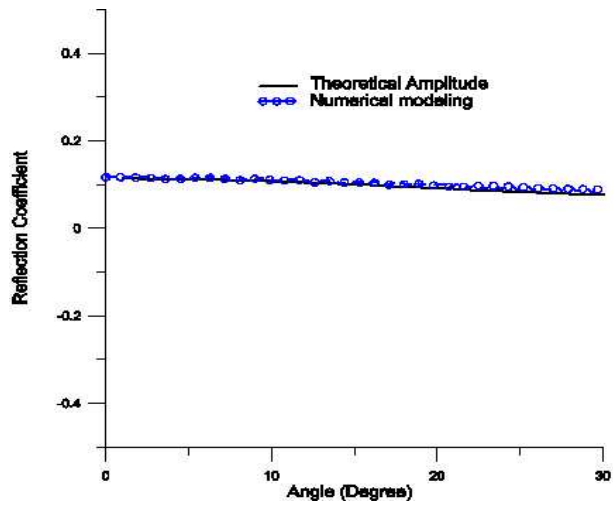
$$\Delta V_p = V_{p2} - V_{p1}, \quad V_{pa} = (V_{p2} + V_{p1})/2$$

$$R_p = (\rho_2 V_{p2} - \rho_1 V_{p1}) / (\rho_2 V_{p2} + \rho_1 V_{p1}) \quad (4-8)$$

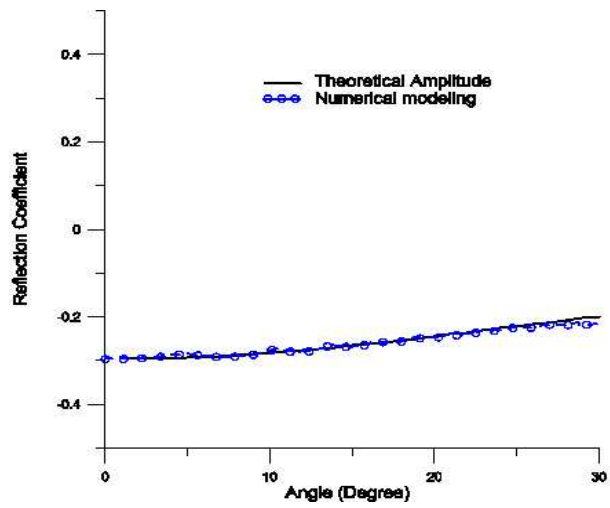
$$A_0 = B_0 - 2(1 + B_0) \left(\frac{1 - 2\sigma}{1 - \sigma} \right)$$

$$B_0 = \frac{(\Delta V_p / V_{p1})}{(\Delta V_p / V_{pa}) + (\Delta \sigma / \sigma_a)} \quad (4-9)$$

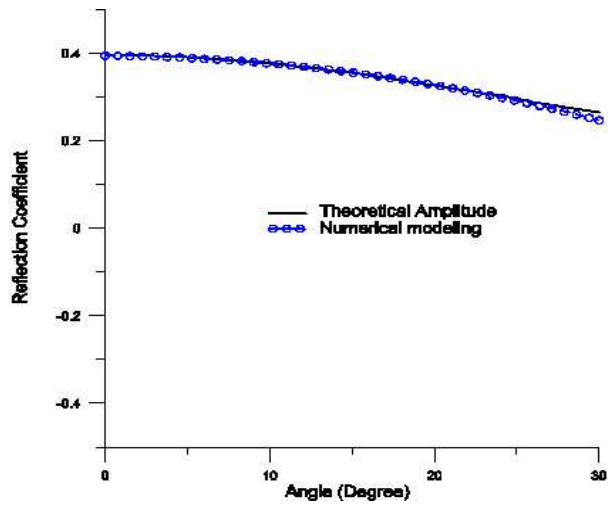
이다. 위 식에서 θ 는 P파의 입사각, V_{p1} 및 V_{p2} 는 제 1층 및 제 2층의 P파 속도, ρ_1 과 ρ_2 는 제 1 및 제 2층의 밀도, σ 는 포아송 비이다. 가스 하이드레이트층에서의 탄성과 AVO(Amplitude Versus Offset) 특성은 가스 하이드레이트층과 상·하 지층의 P파 및 S파 그리고 밀도의 차이에 의하여 결정된다. Fig. 36 (a), (b) 그리고 (c)는 입사각에 따른 진폭의 변화를 Shuey의 근사식을 이용하여 계산한 반사 진폭과 수치 모형실험을 통하여 획득한 OBC 탐사자료의 반사 진폭을 비교한 그림이다. Fig. 36 (a)는 가스 하이드레이트층과 가스 하이드레이트층 상부 퇴적층의 경계면에서의 입사각에 따른 반사계수를 나타낸 것으로 입사각이 증가함에 따라서 반사계수는 약 0.1을 나타냈으며 근사식에 의한 반사계수와 실험을 통하여 획득한 반사계수가 매우 유사하다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 Fig. 36 (b)는 가스 하이드레이트층과 자유가스층 경계면에서의 입사각에 따른 반사계수를 나타낸 것으로 -0.2 ~ -0.3의 반사계수를 나타내는 것을 확인할 수 있었으며 입사각이 증가함에 따라서 반사계수도 점진적으로 증가하였다. 그리고 Fig. 36 (c)는 자유가스층과 하부퇴적층 경계면에서의 입사각에 따른 반사계수로서 입사각이 증가함에 따라 반사계수의 값이 비교적 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

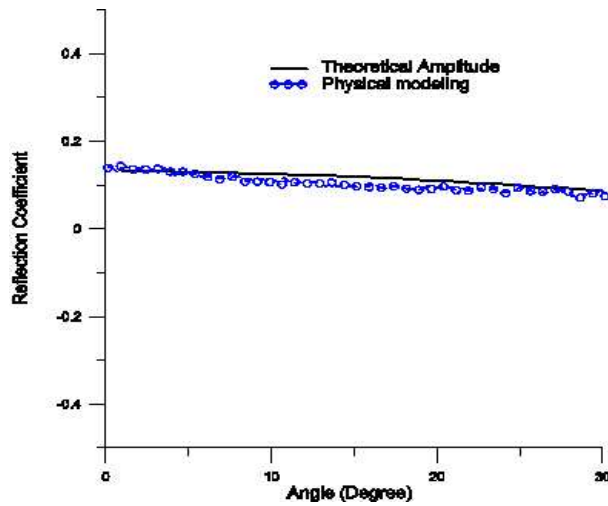


(c)

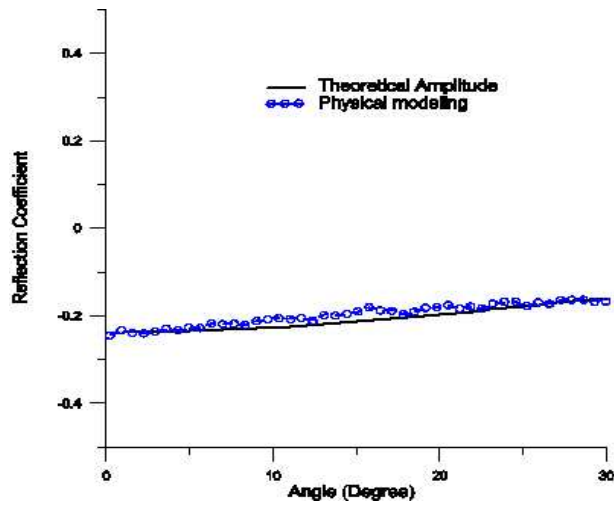
Fig. 36. Amplitude variation versus incident angle at (a) the interface between sediment and gas hydrate, (b) the interface between gas hydrate and free gas, and (c) the interface between free gas and sediment. Solid line represents the theoretically estimated coefficients, and circle(○) indicates relative amplitudes obtained in numerical modeling data.

Fig. 37 (a), (b) 그리고 (c)는 입사각에 따른 진폭의 변화를 Shuey의 근사식을 이용하여 계산한 반사계수와 축소모형실험을 통하여 획득한 통상적인 다중채널 탄성과 탐사자료의 반사계수를 비교한 그림이다. Fig. 37 (a)는 폴리에틸렌판과 아크릴판 경계면에서의 입사각에 따른 반사계수를 나타낸 것으로 반사계수는 약 0.12의 값으로 입사각이 증가함에 따라 반사계수가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 Fig. 37 (b)는 아크릴판과 ABS판의 경계면에서의 입사각에 따른 반사계수를 나타낸 것으로 입사각이 증가함에 따라서 반사계수가 음의 값을 가지며 증가하였다. 또한 Fig. 37 (c)는 ABS판과 아크릴판에서의 입사각에 따른 반사계수로서 입사각이 0~30°로 증가할수록 각각의 반사계수가 감소한다는 것

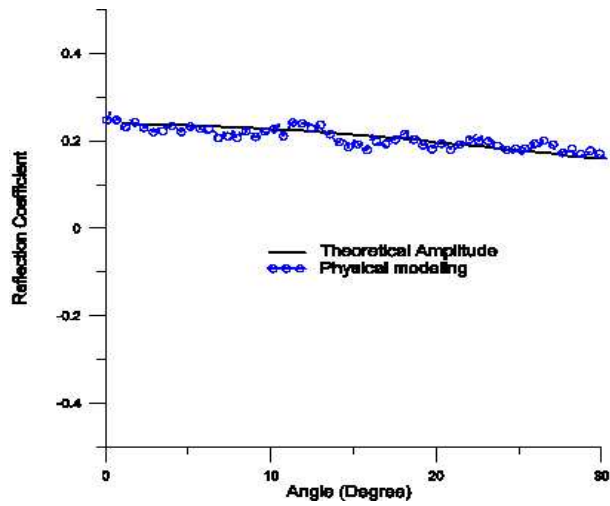
을 확인할 수 있었으며, 근사식에 의한 반사계수와 실험을 통하여 획득한 반사계수의 차이는 축소모형실험으로 획득한 공발점 자료에서 잡음과 모드 전환 등으로 인한 간섭현상에 의한 것으로 사료된다. 통상적인 다중채널 탄성파탐사를 실시할 때 음원과 수신기 최대 이격거리가 어느 정도 제한적일 수 밖에 없는 실정이고 수심이 약 2000 m 이상인 심해저에 부존된 가스 하이드레이트 탐사의 경우 입사각이 제한되기 때문에 최대 30°의 입사각 범위에서 분석을 하는 것이 타당할 것이다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 37. Amplitude variation versus incident angle at (a) the interface between polyethylene sheet and upper acrylic sheet, (b) the interface between upper acrylic sheet and ABS sheet, and (c) the interface between ABS sheet and lower acrylic sheet. Solid line represents the theoretically estimated coefficients, and circle(\circ) indicates relative amplitudes obtained in physical modeling data.

5. 결 론

가스 하이드레이트 부존이 예상되는 수심 2000 m 이상의 심해저 탄성과 탐사 자료를 근거로 하여 가스하이드레이트가 부존하지 않는 수평 3층 모델과 가스 하이드레이트 부존하는 수평 5층 모델 및 침멸층에 대하여 탄성과 축소 및 수치 모형실험을 실시하여 획득한 탄성과 자료에 대한 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. Staggered grid를 이용한 유한차분법 탄성과 모델링 기법으로 통상적인 다중채널 탄성과 탐사, OBC 탐사 그리고 VCS탐사에 대하여 적용하였으며, 이러한 방법은 P파, S파 그리고 밀도에 대한 변수를 자유롭게 적용할 수 있고 심해저 가스 하이드레이트의 부존상황에 대한 탄성과 수치모형실험이 용이하였다.
2. 탄성과 축소모형실험에서 가스 하이드레이트가 부존하는 심해저 조건을 충분히 모사하였으며, 축소모형장치를 이용하여 다중채널 탄성과 탐사 그리고 deep tow 탐사 방법으로 자료를 획득하였다. 획득한 자료는 직접파, 반사파, 다중 반사파 등의 파동전파현상을 정확하게 반영하였다.
3. 탄성과 수치 및 축소모형실험을 통하여 가스 하이드레이트층과 자유가스 층이 존재하는 수평 5층 모델의 경우, 두 층사이의 경계면에서 탄성과 속

도 및 밀도 차이에 의한 반사파의 위상역전 현상을 관찰할 수 있었다.

4. 침멸층 모델에 대한 축소모형실험을 통하여 획득한 탄성과 자료에 대한 공심점분류, 속도분석, NMO보정과정을 거쳐 최종 중합단면도를 완성하였다.

5. 축소모형실험을 통하여 획득한 자료를 이용하여 탄성과 복소분석을 실시한 결과, 순간진폭단면에서 음원과 수신기 거리에 따른 진폭의 변화 관찰이 용이하였다.

6. 탄성과 모형실험으로부터 얻은 반사 진폭과 Shuey의 근사식에 의해 구해진 반사계수의 값이 거의 일치하였으며, Shuey의 근사식을 이용한 가스 하이드레이트 AVO분석 방법이 유용하다는 것을 확인할 수 있었다.

7. 심해조건에서의 탄성과탐사는 입사각이 제한적이고 또한 입사각에 따른 반사파 진폭의 변화율이 작으므로 AVO분석 시 진폭을 매우 주의 깊고 세심하게 취급하여야 한다.

따라서 이 논문을 통한 실험과 분석 기술은 심해 가스 하이드레이트 부존 지역에 대한 탄성과 진폭특성 규명 해석기술의 기초가 될 것으로 생각된다.

향후 축소모형 실험을 위한 다양한 재료의 확보와 정확한 물성 측정이 필요하

며 복잡한 지질구조 모델에 대한 수치모형 실험이 이루어져야 한다고 생각된다.

참 고 문 헌

- 신성렬, 신창수, 서정희, 1997, Staggered Grid를 이용한 유한차분법 탄성파 모델링, 한국자원공학회지, Vol. 34, pp. 2168-174.
- 신성렬, 신창수, 장원일, 임종세, 2001, 3차원 탄성파탐사 모형실험장치 개발, 한국자원공학회지, Vol. 37, pp. 213-223.
- 양승진, 서태공, 유해수, 장재경, 2000, 하이드레이트 층에서의 탄성파 AVO 특성 연구, 한국자원공학회지, Vol. 37, No. 3, pp. 213-223.
- 허대기, 2005, 가스하이드레이트 기술개발현황, 한국자원공학회지, Vol. 42, pp. 206-213.
- Andreassen, K., Hart, E. H. and MacKay, M., 1997, Amplitude versus offset modeling of the bottom simulation reflection associated with submarine gas hydrate, Marine Geology, pp. 25-40.
- Ecker, C., 1998, Seismic characterization of methane hydrate structure, Stanford Exploration Project(1/21/1998).
- Krail, P.M., 1994, Vertical cables as a subsalt imaging tool, The Leading Edge, Vol. 48, pp. 885-887.

- Kvenvolden, K.A., and Barnard, L.A., 1983, Gas hydrate of the Blake Ridge Outer Ridge, Site 533, Deep Sea Drilling Project Leg 76, In Sheridan R. E. and Gradstein F.W. et al. eds., Initial Report, DSDP 76, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., pp. 353-365.
- Makogon, Y.F., 1997, Hydrate of hydrocarbon, PennWellPubl, Tulsa, Oklahoma, US., pp. 482.
- Ostrander, W.F., 1984, Plane wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence, Geophysics, Vol. 49, pp. 1637-1648
- Pearson, C.F., Halleck, P.M., McGulre, P.L., Hermes, R. and Mathews, M., 1983, Natural gas hydrate : a review of in H_2O properties, J. Phys. Chem., Vol. 87, pp. 4180-4185.
- Shipley, T.H., Houston, M.H., Buffler, R.T., Shaub, F.J., McMilen, K.J., Ladd, J.W. and Worzel, J.L., 1979, "Seismic evidence for widespread possible gas hydrate horizons continental slopes and rises", AAPG GeoBull., Vol. 63, pp. 2204-2213.
- Shuey, R.T., 1985, A simplification of Zoeppritz equations, Geophysics, Vol. 50, pp. 609-614.
- Stewart, R.R and Cheadle, S.P., 1989, Ultrasonic modeling of borehole seismic survey, CREWES Research Report.

Tarner, M.T., and Sheriff, R.E., 1977, Application of amplitude, frequency, and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon exploration, C.E. Payton Ed., AAPG Memoir 26, Tulsa, Am. Assn. Petroleum Geologists, pp. 301-327.

Vogel, J.A., Stelwagen, U., and Breeuwer, R., 1985, Seismic analysis of thin beds aided by 3D physical model experiments, Pro. of the 14th international Symposium of Acoustical Imaging, Vol. 14, pp. 53-67

Zoeppritz, K., 1919, Erdbebenwellen VIII B, On the reflection and propagation of seismic waves, Gottinger Nachrichten, pp. 66-84.

감사의 글

지난 6년간의 대학생활 동안 너무나도 부족한 점이 많았기에 많은 분들의 사랑과 은혜를 입었습니다. 이제 부족하나마 그 동안의 조그만 노력을 한편의 논문으로 묶어내면서 그분들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저 논문이 완성되기까지 많은 가르침과 함께 관심으로 보살펴 주신 신성렬 교수님에게 진심으로 감사드립니다. 그리고 끊임없이 충고와 격려를 해주신 장원일 교수님, 임종세 교수님, 윤지호 교수님, 김성윤 교수님에게 깊은 감사를 드립니다.

항상 관심과 조언을 아끼지 않으셨던 이정환 선배님에게 감사를 드리며, 논문의 시작에서 끝까지 깊은 관심을 가지고 많은 도움을 준 영준이에게 고마움을 전합니다. 또한 바쁜 와중에도 미소와 편의를 아끼지 않으셨던 과사무실 황정주 조교님에게도 감사를 드립니다.

2년 이상의 동고동락으로 이제는 눈빛만으로도 서로를 이해할 수 있게 된 대학원 후배 찬수에게도 고마움을 전합니다. 그리고 항상 곁에서 도움을 준 97학번 민혁이와 물리탐사공학 실험실의 영수, 순일, 명훈, 수종, 상현, 현대, 송이에게도 고마움을 전합니다.

어려운 여건 속에서도 자식들 뒷바라지를 하시며 격려와 용기를 주신 부모님에게 감사드리며, 제 인생에 있어 든든한 후원자가 되어준 누나에게도 감사를 포함합니다.

끝으로 하나밖에 없는 여자친구에게 사랑을 전하며 지금까지 보살펴 주신 모든 분들에게 감사의 뜻과 함께 이 논문을 바칩니다.