제 출 문

한국지질자원연구원 원장 귀하

본 보고서를 “가스하이드레이트 탐사자료를 이용한 반사계수와 파형요소의 정량 분석”의 보고서로 제출합니다.

2009. 11.

위탁연구기관명 : 한국해양연구원
위탁연구책임자 : 김 한 준
연 구 원 : 주 형 태
연 구 원 : 한 상 준
연 구 원 : 이 은 혜

요 약 문

I. 제목:

가스하이드레이트 탐사자료를 이용한 반사계수와 파형요소의 정량 분석

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 필요성

● 기술적 측면

- 탄성파 탐사를 이용해서 메탄 하이드레이가 분포하는 층을 찾기 위해 가장 보편적으로 확인하는 것은 BSR (Bottom Simulating Reflector)의 존재이다. 하이드레이트 BSR은 높은 속도의 하이드레이트 안정지역과 그 아래 자유가스 (free gas)가 존재할 수 있는 낮은 속도의 퇴적층의 경계면에서 발생하는 음향임피던스의 차이 때문에 발생한다. 따라서 탄성파자료로부터 지하의 정확한 반사계수를 추출하는 것은 가스하이드레이트 층의 존재와 그 아래 자유가스의 분포상황 그리고 지하 매질의 성질을 파악하는 데 있어 가장 중요할 수 있다. 탄성파 자료로부터 반사계수를 추출하기 위해서는 탄성파 자료에서 파형요소의 영향을 완전히 제거하는 방식의 디컨볼루션을 수행하여야 한다. 이러한 디컨볼루션 방법은 sparse spike 디컨볼루션으로 분류되며 탄성파 탐사자료에서 BSR의 반사계수의 진폭과 극성을 정확히 아는 장점이 있다. 탄성파 탐사자료의 디컨볼루션시 통상적으로 쓰이는 스파이킹 디컨볼루션이나 예측 디컨볼루션 (predictive deconvolution) 으로는 이러한 목적을 얻기 불가능하다.
- 대역이 제한된 자료의 sparse spike 디컨볼루션을 위해서 몇 가지의 방법이 제시되었다. 첫 번째가 선형프로 그래밍 (LP: linear programming) 방법

(Levy and Fullagar, 1981) 으로 탄성파 자료와 부합하는 최소 절대 norm (minimum absolute norm)을 이용하여 반사계수를 구하는 것이다. 두 번째 방법은 탄성파 자료의 스펙트럼을 복소 AR (autoregressive) 모델로 계산하는 것으로 (Lines and Clayton, 1977) 탄성파 자료의 실제 주파수대역으로 외삽하여 반사계수의 저주파 및 고주파 성분을 구한다. 하지만 LP 와 AR 방법은 파형요소 (wavelet)를 미리 알아야 하는 제약을 가지며 연산이 상대적으로 불안정하다.

- 최근에는 확률통계이론을 이용한 stochastic inversion에 의한 디콘볼루션 방법이 제시되고 있다. 이 방법은 Bayes의 조건부 확률이론을 기반으로 선형연산이 제대로 처리하지 못하는 주파수 대역이 제한된 자료로부터 파형요소를 추정하고 반사계수를 sparse spike의 형태로서 구하므로 퇴적층서가 복잡한 지역에 존재하는 가스수화물의 반사특성을 정량적으로 분석하는 데에 매우 효과적이다.
- 따라서 stochastic inversion을 이용해서 탄성파자료로부터 지하의 반사계수의 극성과 진폭을 완전히 복원하는 것은 가스하이드레이트층과 자유가스의 탐지와 물리적 특성을 이해하는 데에 매우 유용할 것이다.

2. 목적

- Stochastic inversion을 이용해서 탄성파자료로부터 지층의 반사신호를 분리하고 특성을 해석
- 한국지질자원연구원의 에어건 파형요소 추출

III. 연구개발의 내용 및 범위

- Stochastic inversion을 이용하여 한국지질자원연구원이 획득한 탄성파자료를 처리
- 가스하이드레이트층과 자유가스의 반사신호 특성 분석

- 한국지질자원연구원의 탄성파 탐사시 사용하는 에어건의 파형요소 추출

IV. 연구개발결과

탄성파 탐사자료로부터 가스 하이드레이트의 존재를 지시할 수 있는 BSR의 특성을 분석하기 위해 stochastic inversion 방법을 한국지질자원연구원이 가스 수화물 탐사를 위해 설정한 시추예정지점에서 획득한 탄성파 프로파일 자료에 적용하였다.

이번 연구에서 처리한 탄성파 자료는 2010년 심부시추에서 가장 우선순위가 높은 대륙사면으로서 BSR과 그 아래에 enhanced reflector가 매우 뚜렷하게 기록되어 있다. 자료를 처리한 결과는 파형요소의 영향을 완전히 제거함으로써 해저면과 그 아래에서 반사신호들을 완전히 분리하여 각각의 반사계수의 크기와 극성을 확인할 수 있음을 보여 주었다. 특히 BSR의 반사신호는 매우 잘 분리할 수 있었다. 조사지역의 BSR은 해저면 반사신호의 최대 4배의 정도로 진폭이 매우 크며 enhanced reflector도 음의 극성을 가지며 진폭이 매우 큰 반사계수를 가지고 있다. 이러한 점은 enhanced reflector가 BSR 아래 충진된 자유가스의 상부경계면임을 제시한다.

자료처리의 결과로서 구한 파형요소는 파형요소는 영위상(zero-phase)에 가까우며 잔향이 크거나 길지 않은 양호한 모습이다. 이것의 주파수 스펙트럼은 중심주파수가 50 Hz이며 약 30 - 80 Hz 대역의 성분이 우세함을 보여 준다.

V. 연구개발결과의 활용계획

1. 한국지질자원연구원에서 획득한 탄성파자료를 이용하여 가스 하이드레이트 유망구조를 해석하고 시추를 계획하는 작업에 이 연구의 결과를 적용할 수 있다.
2. 가스 하이드레이트와 그 아래 자유가스의 분포를 확인하고 이들과 관련된 지하의 물성을 유추하는 것은 탄성파 탐사자료 처리의 궁극적 목표이다. 이 연

구에서 수행한 방법은 탄성파 역산과 가스의 존재에 대한 자료 분석 등에 매우 중요하게 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

3. 탄성파 자료로부터 파형요소를 정확히 구할 수 있으면 AVO 분석과 모델링 등에 유용하게 적용될 수 있다.

SUMMARY

I. Title:

Quantitative analysis of reflectivity and source wavelet from gas hydrate exploration data

II. Necessity and Objectives of the Study

1. Necessity

● Technological aspects

- Identification of the BSR (Bottom Simulating Reflector) is one of the most widely used criteria to evaluate the existence of methane hyrates in sediments. The gas hydrate BSR results from a sharp acoustic impedance contrast between the high-velocity gas hydrate stability zone above and low-velocity sesiments below that can contain free gas. Therefore, recovery of acoustic impedance from seismic data can provide crucial information on the presence of gas hydrates, free gas below, and physical properties of the subsurface. Accurate reflectivity should be recovered by deconvolution from seismic data in order to extract acoustic impedance. The deconvolution method for this purpose is categorized as sparse spike deconvolution that computes amplitude and polarity of reflection coefficients as sparse spikes. While spiking deconvolution and predictive deconvolution are conventionally used, they do not provide such information.
- Several deconvolution methods to compute sparse reflectivity have been

inrtoduced. The first method is the linear programming (LP) approach (Levy and Fullagar, 1981). This method attempts to find the reflectivity series with the minimum absolute norm that remain constant with the data (Levy and Fullagar, 1981). The second approach (Lines and Clayton, 1977) fits a complex autoregressive (AR) model to the data spectrum and attempts to extrapolate the missing low and high frequencies. Nevertheless, these approaches require that the source wavelet be available and their computation is relatively unstable.

- Recently, stochastic inversion based on the probability theory has been introduced. This approach utilizes the conditional probability theory by Bayes and handles band-limited data to yield sparse spike reflectivity. Therefore, it is well suited for the quantitative analysis reflection characteristics of complex stratigraphy with gas hydrates.
- The complete recovery of subsurface reflectivity in terms of amplitude and polarity and the computation of acoustic impedance using stochastic inversion is highly efficient in the detection of gas hydrates and free gas the analysis of their physical properties.

2. Objectives

- Sparse spike deconvolution of seismic data to resolve reflectivity and quantitative interpretation of its characteristics using stochastic a method
- Interpretation of seismic characters of the BSR and the enhanced reflector

III. General Scope of the Study

- Processing of seismic data obtained by KIGAM to recover the sparse reflectivity series using stochastic inversion
- Analysis of signals from the BSR and the enhanced reflector

- Recovery of a source wavelet

IV. Results of the Study

In this study, stochastic inversion deconvolution was applied to seismic data obtained by KIGAM (Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources) for the purpose of analyzing the quantitative characteristics of the gas hydrate BSR and geologic structure of proposed drilling sites.

In this project, the seismic data from the continental slope area were processed that were given highest priority for the 2010 drilling expedition. The seismic data reveal a BSR and enhanced reflector below in a clear manner. The result of processing demonstrated that the sefloor and underlying reflected signals were completely resolved and amplitude and polarity of individual reflections were define by eliminating the averaging effect of the source wavelet. In particular, the reflection signal of the BSR was resolved very effectively. The BSR occurring in the study area is characterized by very high amplitude that maximally reaches four times that of the seafloor reflection. The enhanced reflector has negative polarity and a high reflection coefficient. These features suggest that the enhanced reflector is the top of free gas filling the stratigraphy below the BSR.

The source wavelet extracted from the data has a favorable waveform close to a zero-phase waveform with short-lived ringing. The amplitude spectrum shows that the main frequency is 50 Hz and the major frequency content ranges from 30 to 80 Hz.

V. Suggestions for Applications

1. The result of this study can significantly contribute to the correct interpretation of prospective gas hydrate structure on proposed drilling sites

using seismic data obtained by KIGAM.

2. The ultimate goal of seismic data processing is to identify gas hydrates and free gas below and address their physical properties. We expect that the method in this study will be used for seismic inversion and analysis of gas.
3. The source wavelet extracted from seismic data can be effectively applied to AVO analysis and seismic modeling.

CONTENTS

Summary ····· 2

Contents ····· 11

List of Figures ····· 12

Chapter 1. Introduction ····· 14

Chapter 2. Status of technology in Korea and overseas ····· 16

Chapter 3. Contents and Results of the Study ····· 17

1. Seismic data

2. Result of processing

Chapter 3. Plans for application ····· 31

Chapter 4. References ····· 32

Appendx Values of the extracted source wavelet ····· 33

목 차

요약문 …… 2

목차 …… 11

그림 및 표목차 …… 12

제 1 장 서 론 …… 14

제 2 장 국내외 기술개발현황 …… 16

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과 …… 17

제 1 절 탄성파 자료

제 2 절 처리결과

제 4 장 연구개발결과의 활용계획 …… 31

제 5 장 참고문헌 …… 32

부 록 파형요소값 …… 33

그림 목차

List of Figures

Fig. 1. MCS profile of the planned drilling site at the continental margin.

Fig. 2. Instantaneous frequency section of the MCS profile in Fig. 1. The frequency range is from 30 to 80 Hz.

Fig. 3. Three traces of CDP 301 ~ CDP 303 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

Fig. 4. Three traces of CDP 1102 ~ CDP 1104 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

Fig. 5. Three traces of CDP 1105 ~ CDP 1107 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

Fig. 6. Three traces of CDP 1108 ~ CDP 1110 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

Fig. 7. Three traces of CDP 1405 ~ CDP 1407 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

Fig. 8. Three traces of CDP 1408 ~ CDP 1410 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

Fig. 9. Three traces of CDP 1441 ~ CDP 1443 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

Fig. 10. Three traces of CDP 1444 ~ CDP 1446 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

Fig. 11. Three traces of CDP 1501 ~ CDP 1503 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

Fig. 12. Three traces of CDP 1504 ~ CDP 1506 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

Fig. 13. Three traces of CDP 1678 ~ CDP 1680 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

Fig. 14. Three traces of CDP 1681 ~ CDP 1683 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.
Fig. 15. Three traces of CDP 1702 ~ CDP 1704 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.
Fig. 16. Three traces of CDP 1705 ~ CDP 1707 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.
Fig. 17. A seismic source wavelet extracted from seismic data.
Fig. 18. Frequency spectrum of the seismic source wavelet extracted from seismic data.

제 1 장 서 론

동해의 울릉분지에서 얻은 탄성파 자료에서 가스수화물의 존재를 지시하는 것으로 해저면과 평행하게 나타나는 반사면 (BSR: bottom simulating reflector)이 많이 발견되고 있다. BSR은 속도가 높은 가스수화물층과 그 아래 정상적인 속도를 갖는 퇴적층간의 경계면으로 생각된다. 가스수화물 안정영역의 기저를 나타내는 BSR은 높은 반사진폭과 음의 극성 (negative polarity)을 가지는데 음향임피던스가 매우 감소하는 경계면임을 지시한다. 울릉분지의 경우, BSR은 해저면에서 약 250 ms 이내의 천부에서 나타난다. 천부의 퇴적물이 대부분 저탁류와 반원양성 퇴적물이므로 지층경계면이 매우 조밀하게 분포할 뿐 만 아니라 해저면과 비슷한 기울기를 가지므로 가스수화물에 의한 BSR이 지층경계면과 잘 구분되지 않는 경우가 많다. 이러한 지역에서 가스 수화물 BSR의 반사계수와 진폭을 구하기 위해서는 반사계수를 스파이크 형태로 계산하는 디컨볼루션 (SSD: sparse spike deconvolution)이 필수적이다. SSD를 이용하여 탄성파자료로부터 지하의 경계면에 해당하는 반사계수의 크기와 극성을 구한다면 매질간 음향임피던스의 대비가 큰 가스 하이드레이트층과 극성이 음인 가스하이드레이트 층의 기저, 그리고 그 아래 존재하는 자유가스의 존재를 파악하는 데에 매우 유용할 것이다. 하지만 많이 사용하는 스파이킹 디컨볼루션이나 예측 디컨볼루션을 성공적으로 적용하기 위해서는 탄성파 자료의 주파수 특성이 무색이고 부분적으로 파형요소 (source wavelet) 가 최소위상이어야 하지만 해양환경에서 이러한 조건을 제대로 만족하기가 어렵다. Wiggins (1978)가 제시한 최소엔트로피 디컨볼루션 (MED: Minimum Entropy Deconvolution)은 새로운 디컨볼루션 방법으로 예측 디컨볼루션에서 요구하는 제약조건이 필요하지 않다는 장점이 있다. 하지만 이러한 차이에도 불구하고 이들 두 가지 방법의 결과는 선형연산으로 구현되므로 스파이크 형태로 반사계수를 계산하기 힘들다.

탄성파자료로부터 스파이크 형태의 반사계수를 구하는 디컨볼루션으로는 탄성파 자료와 부합하는 최소 절대 norm (minimum absolute norm)을 이용하여 반사계수를 구하는 선형 프로그래밍 (LP: linear programming)방법과 Levy and Fullagar, 1981) 탄성파 자료의 스펙트럼을 복소 AR (autoregressive) 모델로 계산하여 반사계수의 저주파 및 고주파 성분을 구하는 방법이 (Lines and Clayton, 1977) 있다.

하지만 이들 역시 파형요소 (wavelet)를 미리 알아야 하는 제약을 가지며 연산이 상대적으로 불안정하다. Sacchi et al. (1994)가 제시한 FMED (MED with frequency domain constraints)는 새로운 방법의 MED로서 MED의 장점을 살리면서 반사계수 스펙트럼에서 손실된 주파수 대역에 관한 norm을 극대화하는 비선형 연산을 수행함으로써 선형연산이 제대로 처리하지 못하는 주파수 대역이 제한된 자료를 처리할 수 있다. 이 방법은 LP와 MED를 연결하는 특성을 갖지만 반사계수를 완벽한 스파이크의 형태로 구하지 못하는 단점이 있다.

최근에는 확률통계이론을 이용하는 stochastic inversion 방법의 SSD가 제시되고 있다. 이 방법에서는 구하고자 하는 반사계수를, 특정한 분포를 가지는 확률적인 변수로 고려함으로써 적절한 선험적 (a priori) 분포를 생각한다. 그 다음에 반사계수의 posteriori 확률밀도를 최대화하는 MAP (maximum a posteriori) 추정치에 의해 반사계수를 계산한다. 이렇게 구한 반사계수는 파형요소의 영향을 완전히 제거함으로써 지하의 가스하이드레이트와 그 아래 존재할 것으로 예상되는 자유가스층의 분포와 물성에 대한 정보를 제공할 수 있다.

이 보고서에는 stochastic inversion에서 가장 최근에 발표되어 우수한 것으로 평가받는 Kaaresen (1997)의 방법을 이용하여 한국지질자원연구원(KIGAM)이 2010년 동해의 울릉분지에서 시추할 지점중 가장 우선시되는 곳에서 획득한 탄성파자료를 deconvolve하여 반사계수와 파형요소를 구하여 가스하이드레이트와 자유가스에 관한 탄성파 특성을 분석하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

탄성파 자료로부터 지하의 물성을 유추할 수 있는 음향임피던스를 추출하는 기술은 탄성파 자료처리의 궁극적 목표이다. 이를 위해서 탄성파 자료로부터 정확한 반사계수를 추출하는 디컨볼루션을 이용하는 연구가 수행된 바 있다. 이렇게 구한 반사계수는 지하의 탄성파 속도와 밀도의 곱으로 표현되는 음향임피던스로 변환될 수 있으며 가스하이드레이트와 그 아래 존재할 것으로 예상되는 자유가스층의 분포와 물성에 대한 정보를 제공할 수 있다.

Levy and Fullagar (1981)은 탄성파 자료와 부합하는 최소 절대 norm (minimum absolute norm)을 이용하여 반사계수를 구하는 선형 프로그래밍 (LP: linear programming)방법을 제시하였으며 Lines and Clayton (1977)은 탄성파 자료의 스펙트럼을 복소 AR (autoregressive) 모델로 계산하여 반사계수의 저주파 및 고주파 성분을 구하는 방법을 제시하였다. 하지만 이들 방법에서는 파형요소(wavelet)를 미리 알아야 하는 단점이 있다. 탄성파자료에서 파형요소를 추정하는 것은 매우 어려운 문제이다. Sacchi et al. (1994)은 반사계수 스펙트럼에서 손실된 주파수 대역에 관한 norm을 극대화하는 비선형 연산을 수행함으로써 선형연산이 제대로 처리하지 못하는 주파수 대역이 제한된 자료를 처리할 수 있는 FMED (MED with frequency domain constraints)를 제시한 바 있다. 이 방법은 LP와 MED(minimum entropy deconvolution)를 연결하는 특성을 갖지만 반사계수를 완벽한 스파이크의 형태로 구하지 못하는 단점이 있다.

최근에는 확률통계이론을 이용하는 stochastic inversion 방법이 제시되고 있다. 이 방법에서는 구하고자 하는 반사계수를, 특정한 분포를 가지는 확률적인 변수로 고려함으로써 적절한 선험적 (a priori) 분포를 생각한다. 그 다음에 반사계수의 posteriori 확률밀도를 최대화하는 MAP (maximum a posteriori) 추정치에 의해 반사계수를 계산한다. Singh and Minshull (1994)도 stochastic inversion의 일환으로 global waveform inversion을 개발하여 가스하이드레이트 탐사에 직접 응용한 바 있다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 탄성파 자료

한국지질자원연구원이 동해의 울릉분지에서 2010년 시추할 지점중 가장 우선순위가 높은 지점의 탄성파 프로파일은 Fig. 1에 그려져 있다.

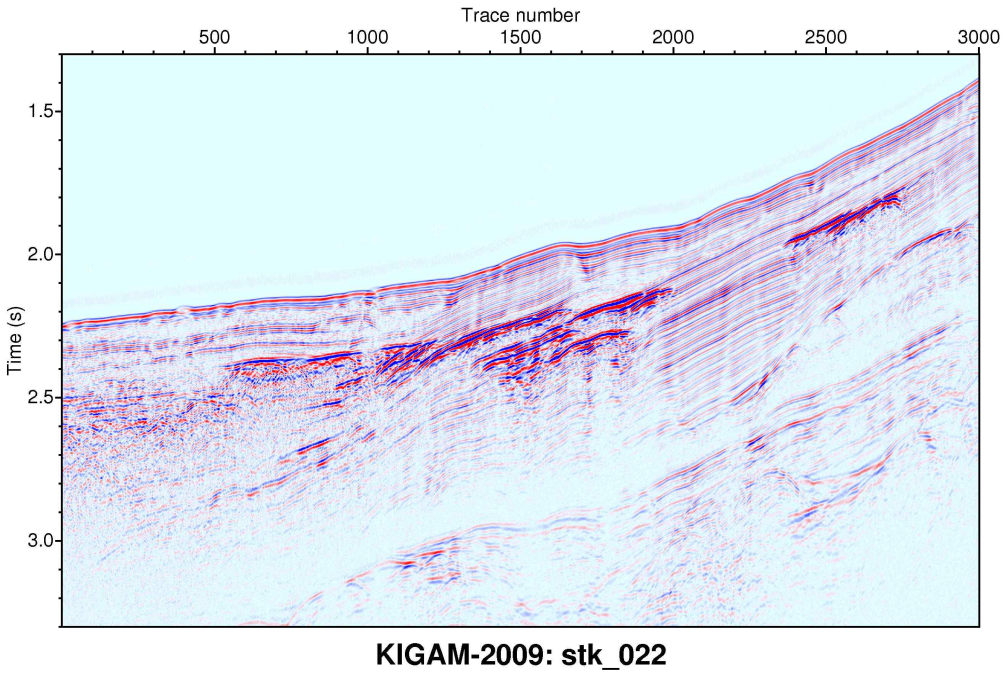

Fig. 1. MCS profile of the planned drilling site at the continental margin.

이 지점은 UBGH Expedition 01 동안 시험하도록 계획된 곳이다. 시추선의 특성, 해저면에서의 시추시설의 능력, 그리고 여러 가지 특성상 UBGH 01 동안 시추위치를 해저면의 경사가 덜 심하고 자유가스가 축적되어 있는 지점을 피할 수 있는 위쪽으로 옮겼다. 시추가 수행된 지점은 세립질 퇴저물이 우세하지만 가스하이드레이트가 최소한으로 분포할 것으로 예측되었다; 하지만 검층자료를 자세히 분석해 보면 투수율이 약간 증가한 것을 알 수 있는데 이것은 퇴적물의 입가가 커진 것을 지시한다. 탄성파 프로파일에서 일련의 연속된 매우 강한 반사신호가 나타나는

데 매우 잘 발달된 BSR 아래에 일련의 경사진 지층내에 가스가 충진되어 있는 것을 제시한다. 또한, 시추 목표점의 층서단면은 BSR을 따라 진폭이 변하고 있음을 보이는데 지층이 교호하는 (sand-shale일 가능성이 있음) 가능성이 있다고 해석된다. 지하의 구간속도가 증가하는 것은 가스하이드레이트가 분포할 가능성을 높여준다. 이 지점의 BSR은 울릉분지에서 유일하게 송수신 간격이 커짐에 따라 진폭이 감소하는 BSR의 예를 보이는데 BSR의 반사양상이 부분적으로 상부의 가스수화물(더 높은 S파 속도)의 영향에 의한 것임을 제시한다. 이 지점의 주된 관심사는 BSR 상부의 강한 진폭 혹은 진폭의 변화로서 탄성파 자료의 분해능에 미치지 못할 정도로 sand가 발달되어 있지 못함을 제시한다.

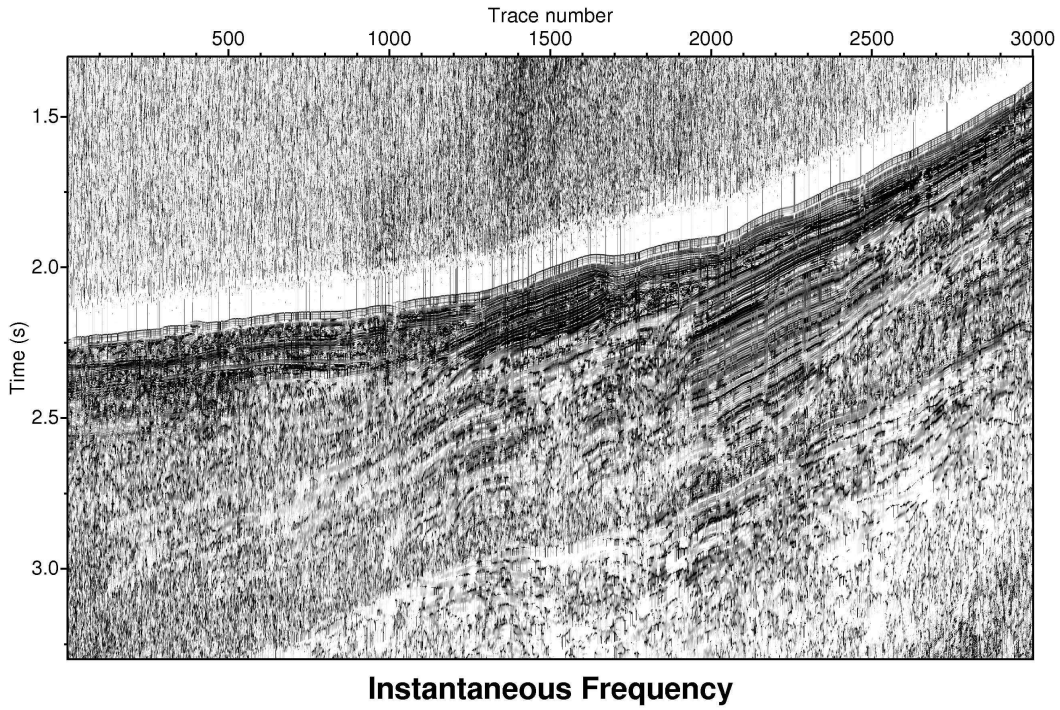

Fig. 2. Instantaneous frequency section of the MCS profile in Fig. 1. The frequency range is from 30 to 80 Hz.

Fig. 1의 프로파일에서 BSR은 트레이스 번호 500 - 2000의 구간에서 해저면에 거의 평행하게 잘 발달해 있으며 그 아래에 진폭이 강화된 반사면(ER: enhanced reflector)이 존재함을 볼 수 있다. BSR과 ER은 한 개 이상의 파형요소가 중첩되어 있을 가능성이 있다. BSR 상부의 탄성파상은 평행하고 연속성이 좋은 반사면으로

구성된다. 이에 비해 하부층은 부분적으로 반사신호의 진폭이 불규칙하며 ER 아래로 가면서 급격히 감소하는 특징을 보인다. 이 프로파일의 순간주파수 단면은 트레이스 번호 1300 - 2000 구간에서 주파수 감쇠가 상당히 발생하고 있음을 보여준다 (Fig. 2). 주파수 감쇠는 BSR 아래로 최대 0.3 초까지 발생한다.

탄성파 프로파일에서 가스 수화물 BSR처럼 눈에 띄는 정도로 신호의 극성이 반전된 반사면은 해저면 아래 약 220 ms에서 나타나며 트레이스 번호 1300 - 1900 구간에서는 BSR 아래에 강한 ER이 한 개 이상 나타난다. ER의 경우 극성이 반전되었는지는 확실하지 않다.

제 2 절 처리결과

BSR이 뚜렷이 나타나는 구간의 왼쪽 바깥에 있는 세 개의 트레이스 301 - 303과 이들의 반사계수는 Fig. 3이다. 처리전의 자료에서는 BSR이 뚜렷하지 않고 BSR이 발생할 것으로 예상되는 깊이에 많은 반사신호가 존재하므로 BSR의 존재여부를 판단하기가 곤란하다 (Fig. 3a). 디컨볼루션의 결과는 해저면의 반사신호와 극성이 반대인 BSR의 진폭이 주변의 반사신호보다 작지만 해저면 아래 220 msec에서 분리가 잘 되어 나타나고 있음을 보여 준다. 이 BSR의 진폭은 해저면 반사신호의 약 1/4 정도로 매우 미약하다.

BSR이 뚜렷하게 나타나는 구간내에 있는 세 개의 트레이스 1102 - 1104는 BSR로 추정되는 반사신호가 해저면에서 약 220 msec에서 나타남을 보여 주며 해저면과 BSR의 사이에서 acoustic blanking으로 해석할 수 있는, 반사신호가 감쇠된 현상이 있다 (Fig. 4a). BSR의 아래에 매우 큰 진폭의 ER이 보이지만 극성은 정확하게 정의할 수 없다. 이것을 디컨볼브한 결과는 BSR의 진폭이 해저면 신호 만큼 크며 그 아래 ER로서 해석할 수 있는 여러 개의 반사신호가 나타나며 그 중 일부의 진폭은 최대 해저면의 1.3배로 더 큼을 보여 준다. 하지만 음의 극성을 갖는 ER의 진폭은 상대적으로 BSR보다 작으며 그 40 msec 아래 양의 극성을 갖는 매우 큰 진폭의 반사계수가 나타난다. 만약 ER의 상부가 자유가스의 제일 상부 경계면에 해당한다면 이 40 msec의 두께만큼 자유가스층이 발달해 있을 것으로 볼 수 있다.

Figs. 5와 6은 더 오른쪽에 위치하는 트레이스들과 이들을 디컨볼브된 결과로서 비슷한 양상을 관찰 할 수 있다. 단, ER의 진폭은 트레이스 번호 500 - 2000의 구간의 중앙부분으로 갈수록 증가하는 것처럼 보인다.

Figs. 7과 8은 각각 BSR과 그 아래에 ER이 분리되어 나타나는 트레이스 1405에서 1407 그리고 1408에서 1411까지의 자료와 디컨볼브한 결과이다. BSR로 추정되는 음의 극성을 갖는 반사계수가 해저면에서 약 220 msec 아래에 나타나지만 그보다 훨씬 큰 양의 극성을 갖는 반사계수가 바로 아래에 나타난다. 이 트레이스들에서 신뢰할 만한 파형요소가 추출되지 않은 점으로 미루어 처리결과에 오류가 있을 가능성이 있다. 하지만 좀더 오른쪽으로 이동한 트레이스 1441 - 1443 구간 그리고 1444 - 1446 의 처리결과는 전체 시간에서 BSR의 진폭이 해저면 반사신호의 3배 이상으로 가장 크며 그 아래에 ER은 음의 극성뿐만 아니라 양의 극성을 갖는 여러 개의 반사신호로 구성되어 있음을 보여 준다 (Figs 9 and 10). ER이 시작하는 부분의 반사계수가 음의 극성을 가지므로 ER은 가스함유층의 상부경계면이며 가스를 함유한 부분과 상대적으로 가스가 함유되지 않은 지층이 연속해서 존재하는 것으로 해석할 수 있다.

트레이스 1501 - 1503 그리고 1504 - 1506과 디컨볼브된 결과는 각각 Fig. 11과 Fig. 12이다. 앞의 예와는 BSR의 진폭이 해저면 반사신호의 약 1.2배 정도로 감소하지만 트레이스 전체에서 ER의 진폭이 가장 큼을 보여 준다. BSR에서 ER 사이에 음의 극성을 갖는 반사계수가 여러 개 연속해서 나타나는 것은 가스의 함량이 증가하는 것을 지시할 수도 있다. 트레이스 1678 - 1680 그리고 1681 - 1683의 경우도 비슷한 양상을 보여 준다. 단, BSR의 진폭은 해저면 진폭보다 더 작은데 BSR 하부에 가스의 양이 적음을 시사할 수 있다. Fig. 15와 16은 각각 트레이스 1702 - 1704, 그리고 1705-1707의 예를 그린 것이다. 이 예에서는 BSR의 진폭이 해저면 반사신호의 약 4배 정도까지 크게 나타난다.

울릉분지의 사면 기저부에서 얻은 표층퇴적물은 점토함량이 80%이상으로 그 외 silt가 포함되어 있으며(한국해양연구원, 1998) 평균밀도는 1.35 g/cm^3 이다(Kim and Kim, 2001). 이러한 특성은 밀도와 속도가 각각 1.352-1.356 g/cm^{3}와 1503-1515 m/s로 측정된 심해평원의 점토와 silt의 혼합물과 잘 일치한다(Hamilton and Bachman, 1982). 바닷물에서의 속도($V_{p\ sea\ water}$) 와 밀도($\rho_{sea\ water}$)를 각각 1480 m/s 와 1.02 g/cm^{3}로 생각하면 해저면의 반사계수는 0.15로 계산되며 BSR의

반사계수는 최대 -0.6에 이를 만큼 높게 나타난다. 이렇게 높은 반사계수값은 페루의 부근에서 나타나는 BSR 반사계수보다(Miller et al., 1991) 더 크며 BSR 아래에서 구간 속도가 낮은 데서 유추할 수 있듯이 BSR 아래에 존재하는 자유가스 때문으로 해석된다. 또한 BSR의 아래에 나타나는 ER은 음의 극성을 갖는 큰 반사신호로 분리되므로 ER 아래에도 상당한 함량의 자유가스가 있다고 볼 수 있다.

탄성파 자료로부터 추출한 파형요소는 Fig. 17이다. 파형요소는 영위상(zero-phase)에 가까우며 잔향이 크거나 길지 않은 양호한 모습이다. 이것의 주파수 스펙트럼은 중심주파수가 50 Hz이며 (Fig. 18) 약 30 - 80 Hz 대역의 성분이 우세함을 보여 준다.

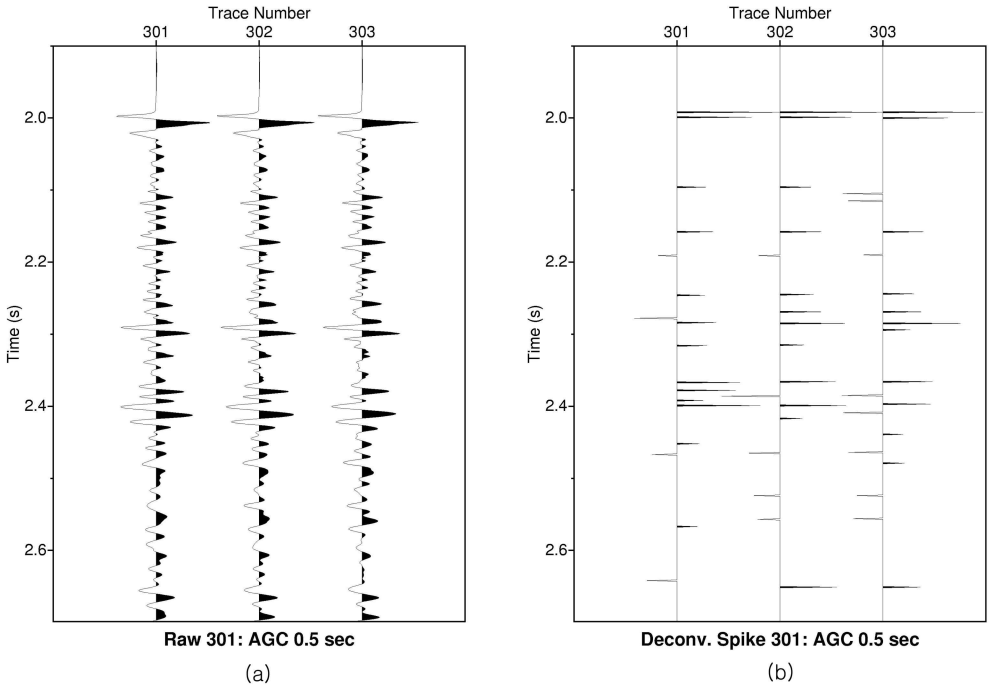

Fig. 3. Three traces of CDP 301 ~ CDP 303 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

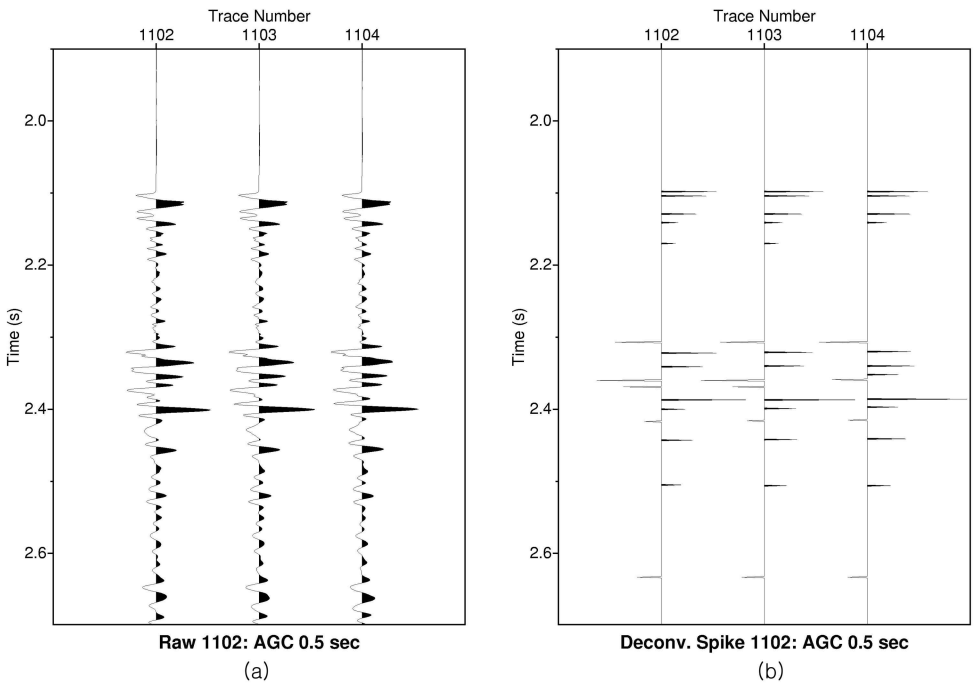

Fig. 4. Three traces of CDP 1102 ~ CDP 1104 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

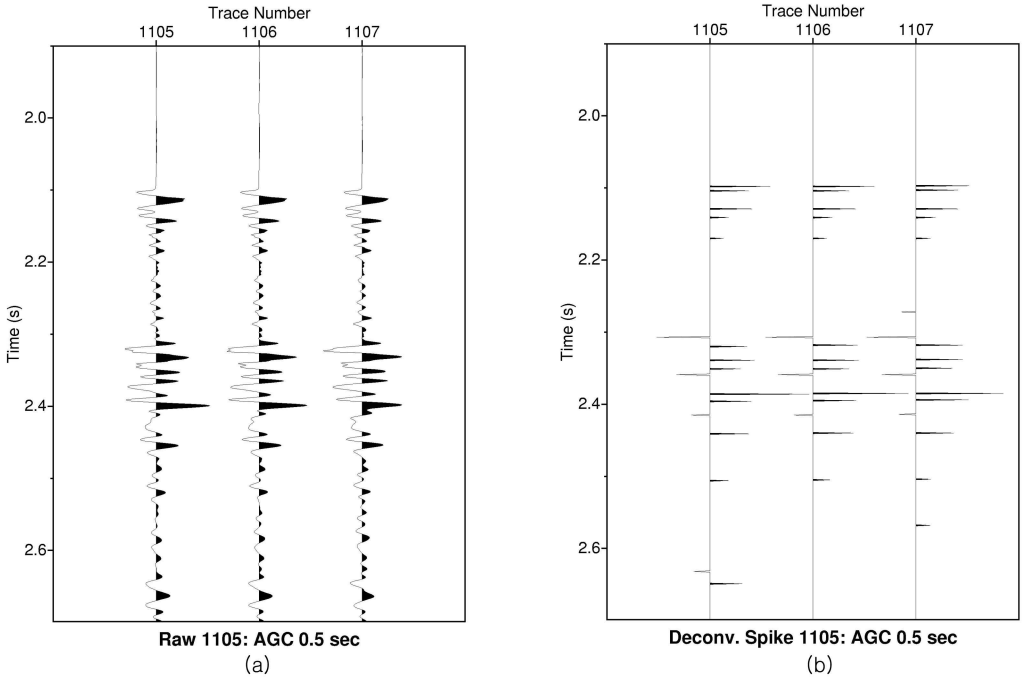

Fig. 5. Three traces of CDP 1105 ~ CDP 1107 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

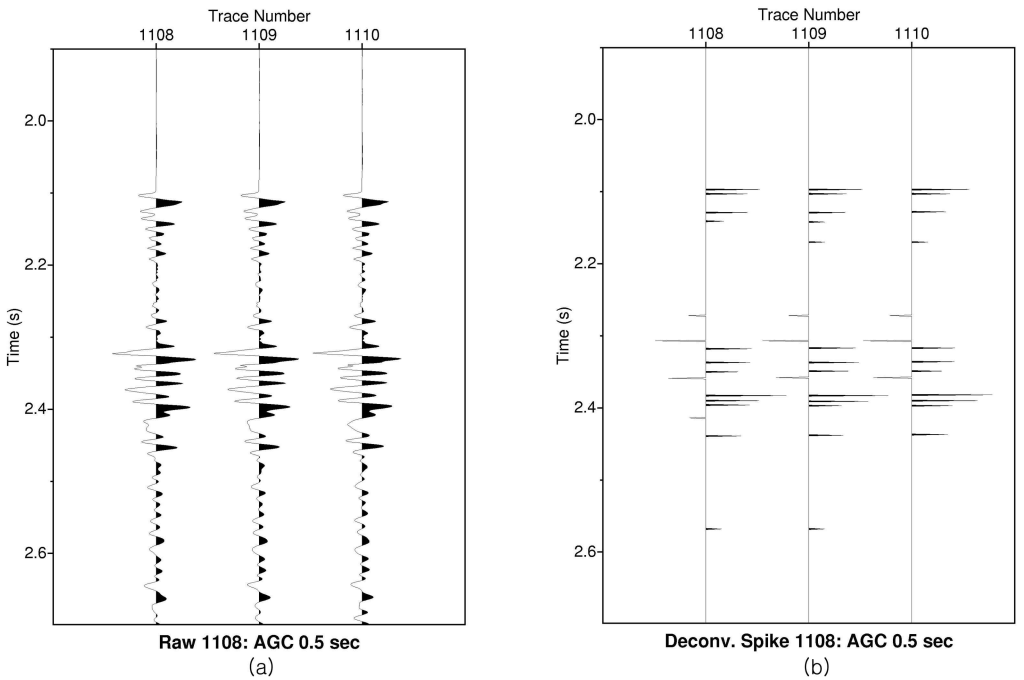

Fig. 6. Three traces of CDP 1108 ~ CDP 1110 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

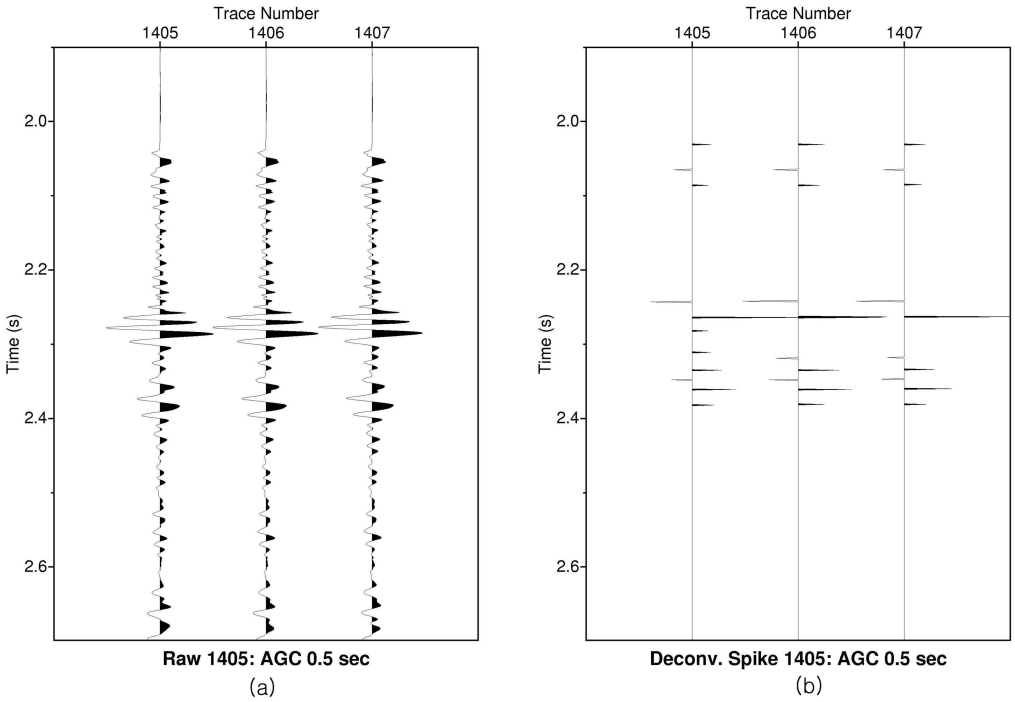

Fig. 7. Three traces of CDP 1405 ~ CDP 1407 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

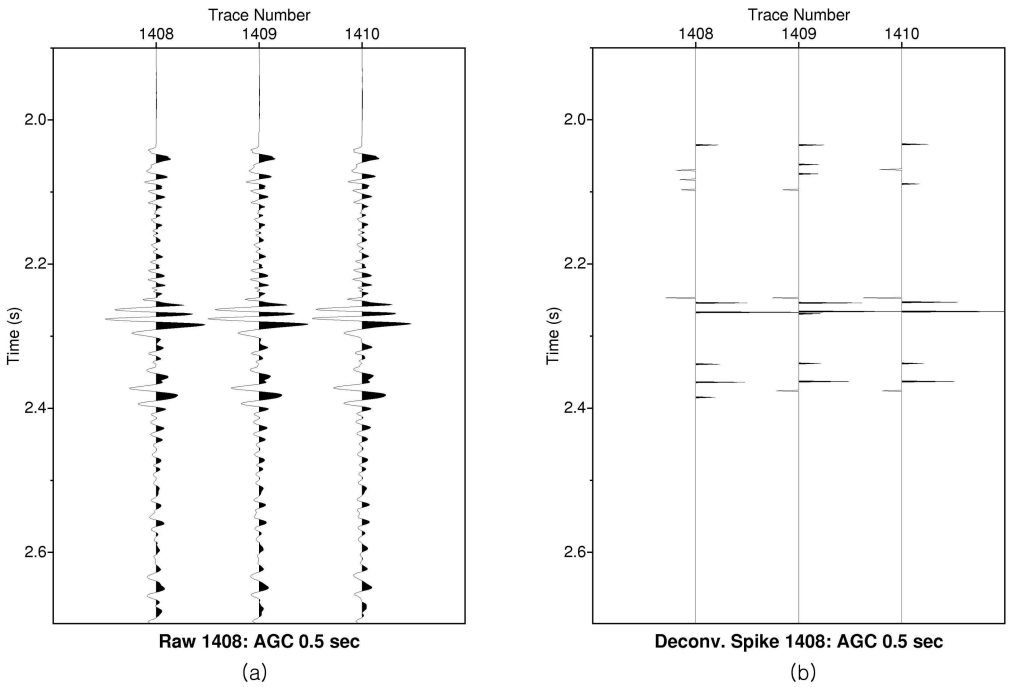

Fig. 8. Three traces of CDP 1408 ~ CDP 1410 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

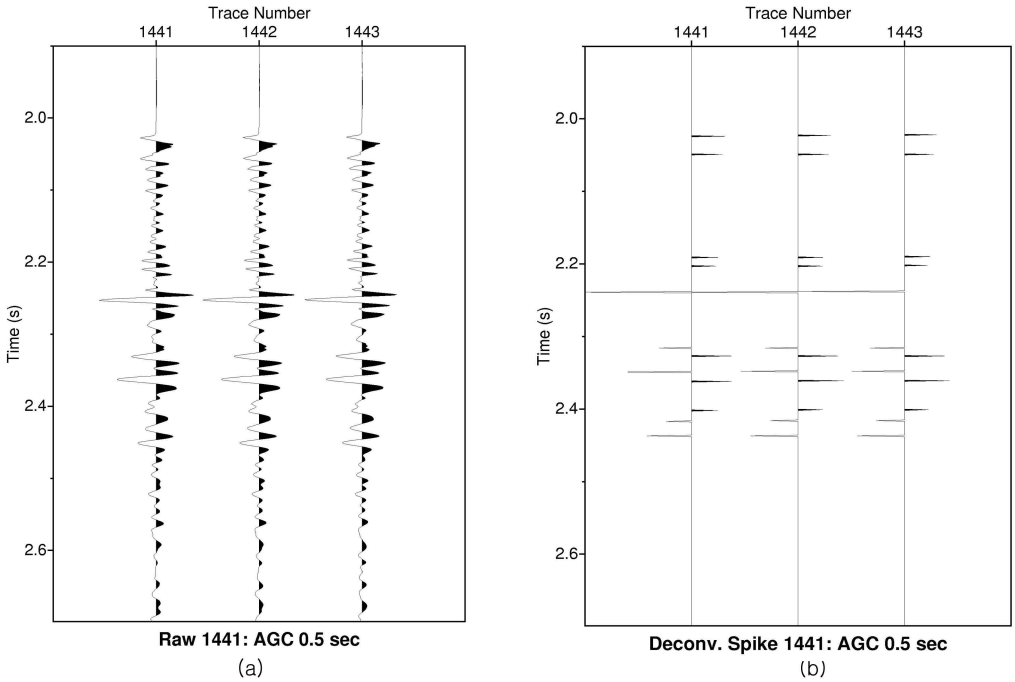

Fig. 9. Three traces of CDP 1441 ~ CDP 1443 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

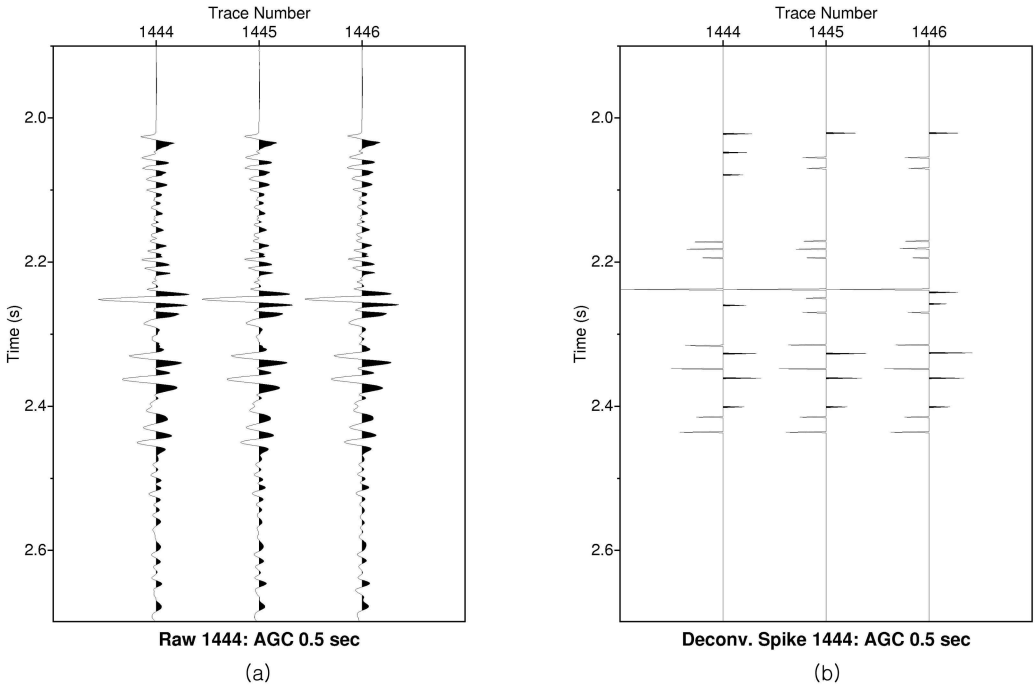

Fig. 10. Three traces of CDP 1444 ~ CDP 1446 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

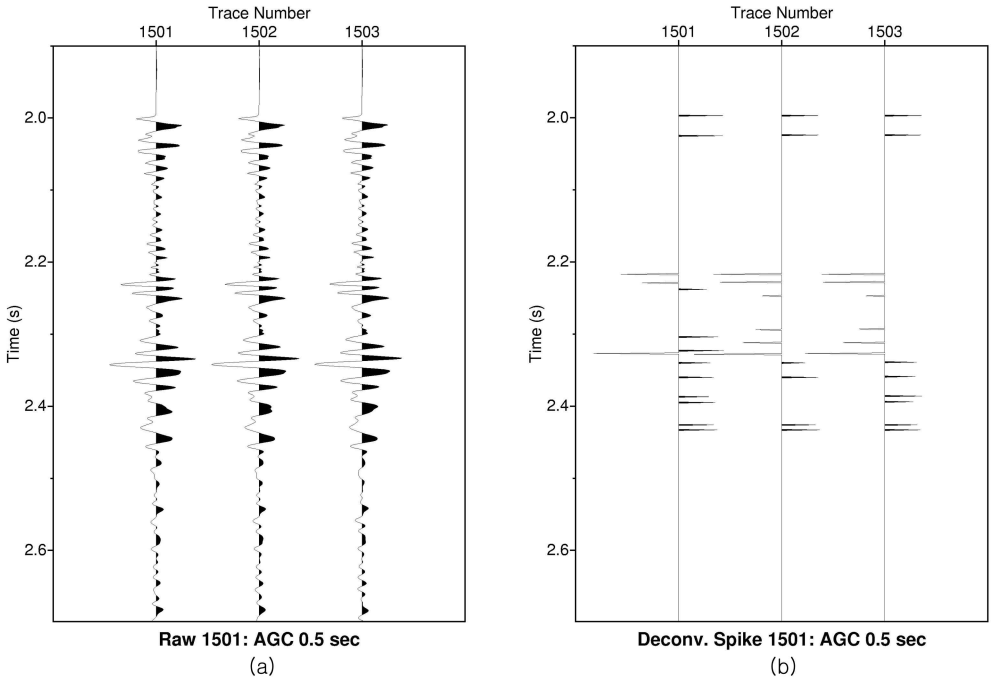

Fig. 11. Three traces of CDP 1501 ~ CDP 1503 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

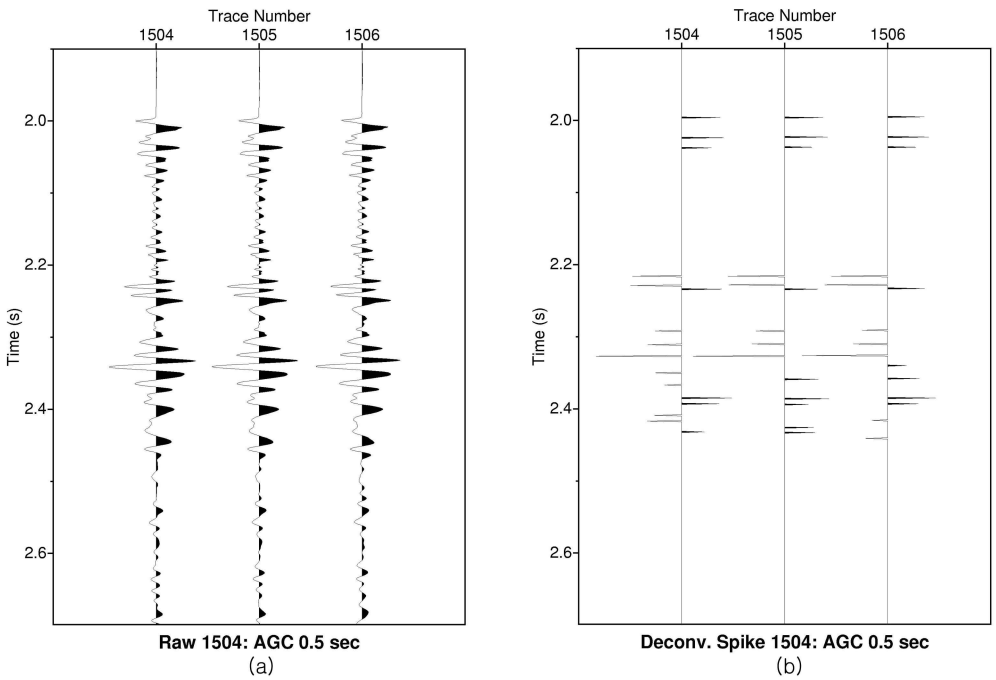

Fig. 12. Three traces of CDP 1504 ~ CDP 1506 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

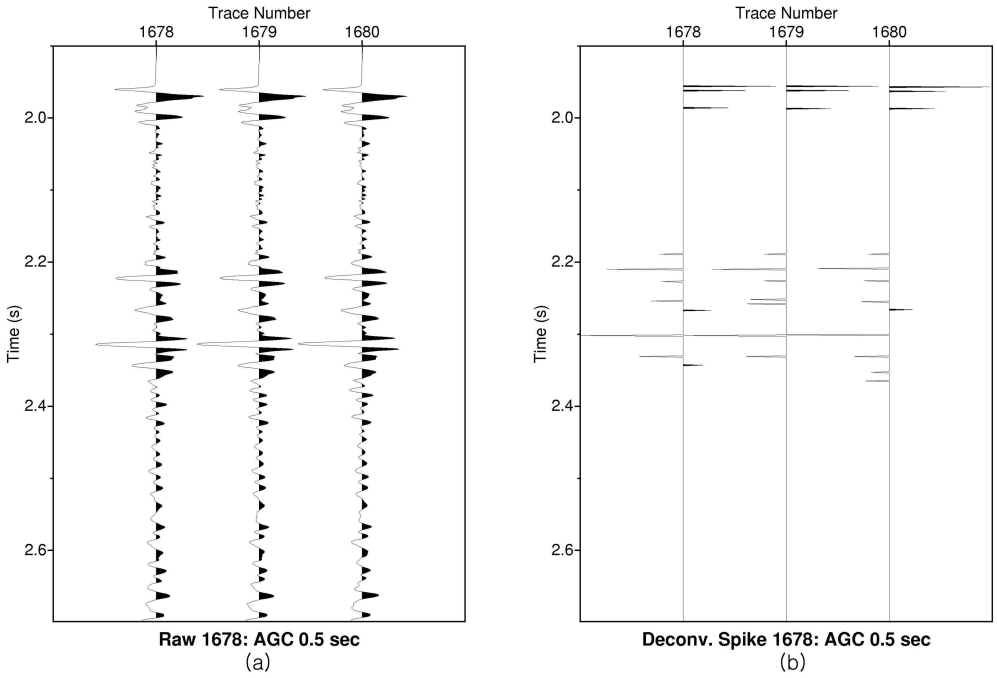

Fig. 13. Three traces of CDP 1678 ~ CDP 1680 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

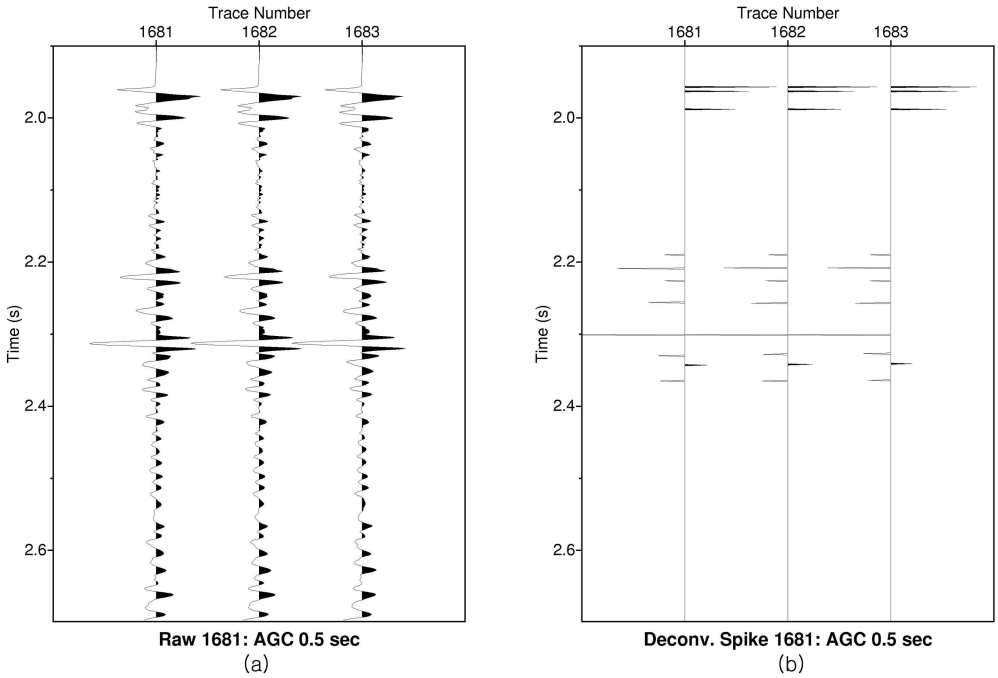

Fig. 14. Three traces of CDP 1681 ~ CDP 1683 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

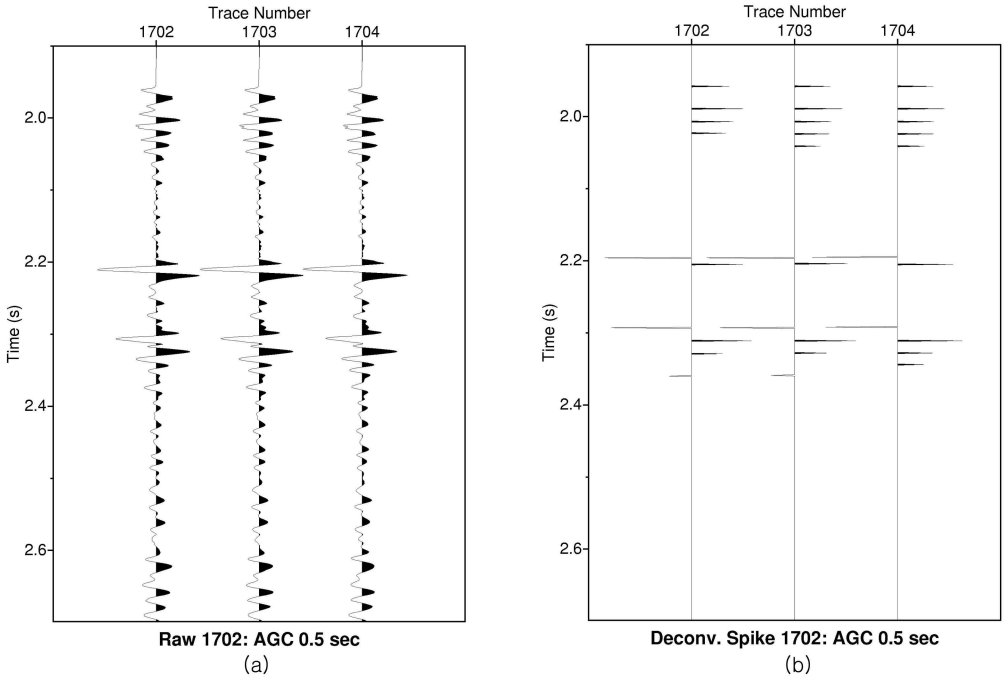

Fig. 15. Three traces of CDP 1702 ~ CDP 1704 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

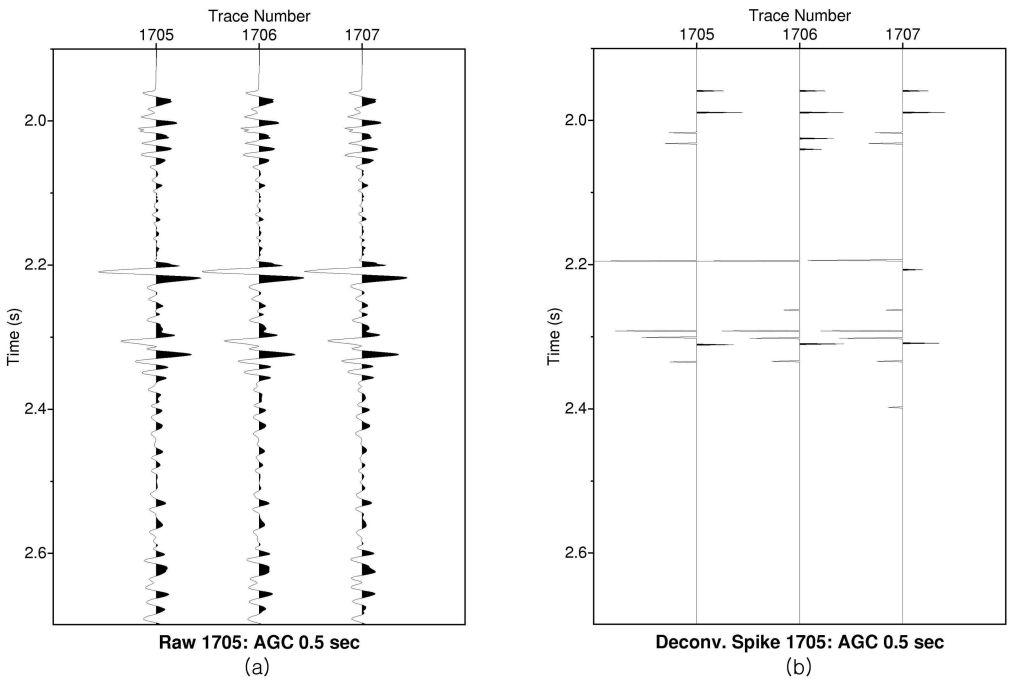

Fig. 16. Three traces of CDP 1705 ~ CDP 1707 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

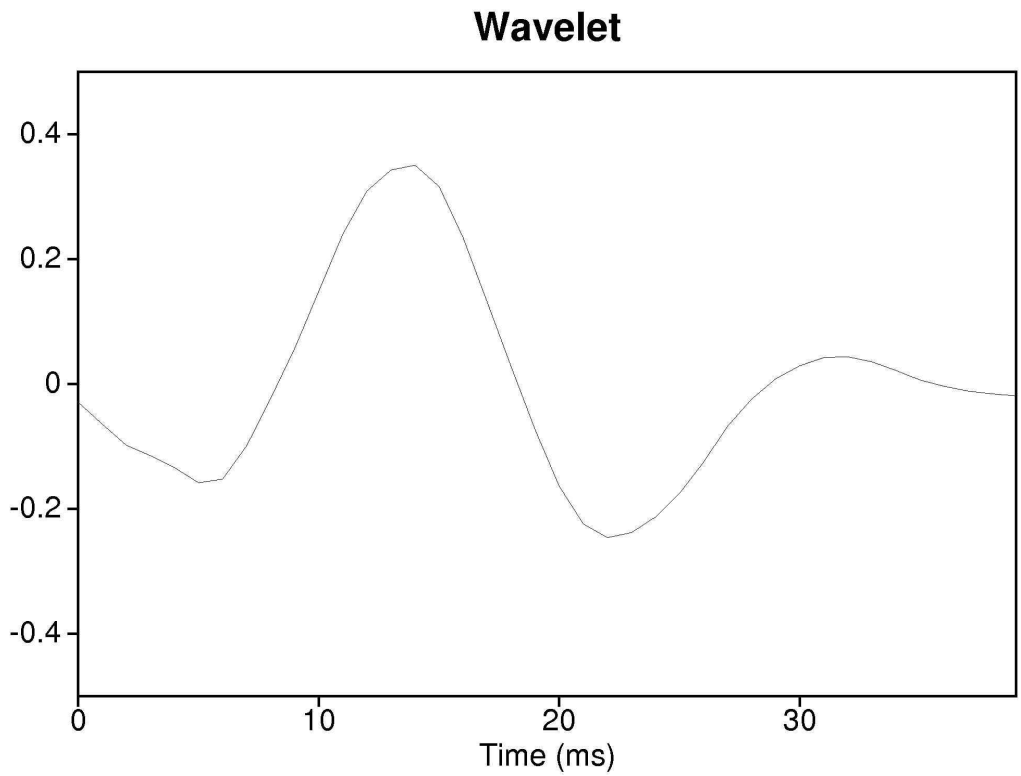

Fig. 17. A seismic source wavelet extracted from seismic data.

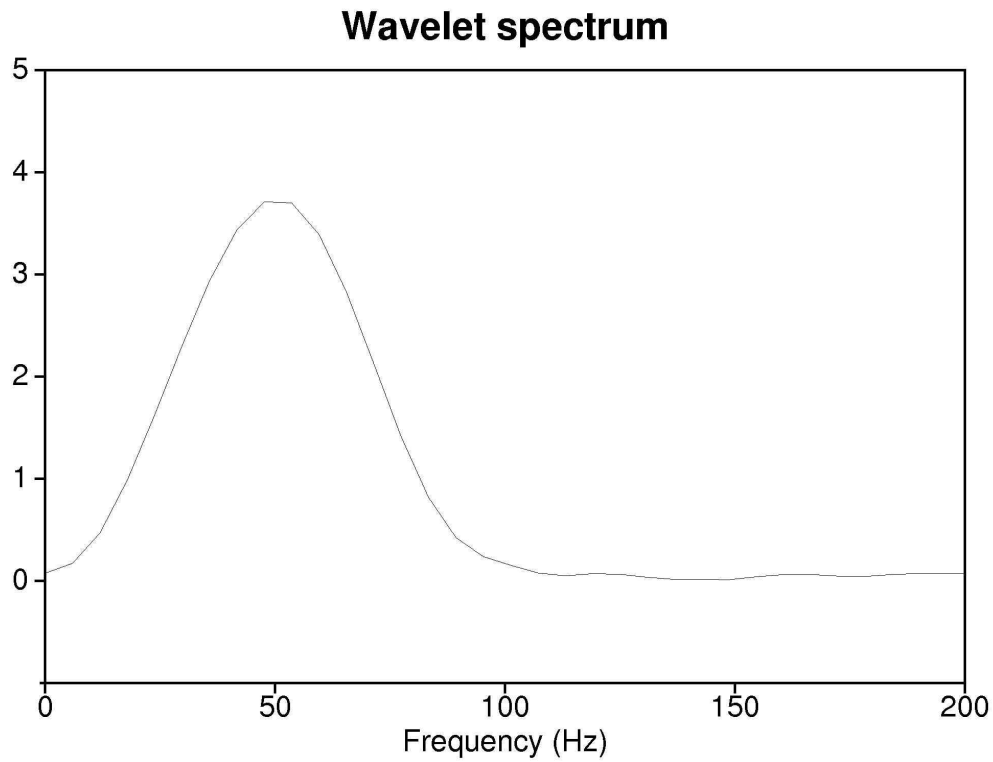

Fig. 18. Frequency spectrum of the seismic source wavelet extracted from seismic data.

제 4 장 연구개발결과의 활용계획

1. 탄성파 자료로부터 지하의 반사계수를 추출하는 것은 특히 가스 하이드레이트의 기저를 표현하므로 반사계수가 크고 극성이 음인 BSR의 탐지와 그 신호특성에 매우 유리하다. 이 연구에서는 stochastic inversion을 이용하여 한국지질자원연구원이 획득한 탄성파자료를 처리하여 가스수화물 탐사 시추예정지점에서 가스수화물과 관련된 BSR과 그 주변 지층들의 반사계수를 추출하였다.
2. 탄성파 자료로부터 지하의 음향임피던스를 복원하는 것은 가스 수화물의 안정영역과 그 아래 존재하는 가스층으로 이루어진 지질구조의 구명에 매우 유용하다. 이 연구에서 구한 반사계수들은 탄성파자료로부터 지하의 음향임피던스를 복원하는 데에 바로 이용될 수 있다.
3. 가스 하이드레이트 안정영역 아래에 가스가 존재할 경우 탄성파의 감쇠가 심하게 발생하므로 이것을 이용한 가스 하이드레이트 및 자유가스의 탐사가 중요하다. 이를 위해서는 파형요소를 아는 것이 필수적이다. 이 연구에서 구한 파형요소는 탄성파 역산과 가스의 존재에 대한 자료 분석 등에 매우 중요하게 사용될 수 있을 것을 기대한다.
4. 탄성파 자료에서 보이는 가스 하이드레이트 부존 구조에서 BSR과 그 아래 반사면의 성질을 해석할 수 있다. 이런 과정을 통하여 유망한 구조를 찾고 탐사의 성공율을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

제 5 장 참고문헌

Gorman, A.R., Holbrook, W.S., Hornbach, M.J., Hackwith, K.J., Lizarralde, D., and Pecher, I., 2002, Migration of methane gas through the hydrate stability zone in a low-flux hydrate province. Geology, v.30, p.327-330.

Kaaresen, K.F., 1997, Deconvolution of sparse spike trains by iterated window maximization. IEEE Trans. Signal Processing, v. 45, p.1173-1183.

Levy, S., and Fullagar, P.K., 1981, Reconstruction of a sparse spike train from a portion of its spectrum and application to high-resolution deconvolution: Geophysics, v.46, p.1235-1243.

Lines, L.R., and Clayton, R.W., 1977, A new approach to vibroseis deconvolution: Geophysics, v.25, p.417-433.

Robinson, E.A., and Treitel, S., 1980, Geophysical signal analysis: Prentice-Hall Inc.

Sacchi, M.D., Veils, D.R., and Cominguez, A.H., 1994, Minimum entropy deconvolution with frequency-domain constraints: Geophysics, v.59, p.938-945.

Singh, S. and Minshull, T.A., 1994, Velocity structure of a gas hydrate reflector at ocean drilling program site 889 from a global seismic waveform inversion: JGR, v.99, p.24,221-24,233.

Wiggins, R.A., 1978, Minimum entropy deconvolution: Geoexpl., v.16, p.21-35.

부 록

파형요소 값 (1 msec 간격임)

-0.00816775
-0.0418886
-0.0744667
-0.0984396
-0.122641
-0.149876
-0.154174
-0.121923
-0.0639104
0.010691
0.10108
0.194112
0.271935
0.32985
0.354444
0.328507
0.259478
0.172023
0.079222
-0.0230789
-0.123859
-0.201347
-0.242106
-0.248803
-0.229211
-0.191206
-0.138981
-0.0769885
-0.0163507
0.0297412
0.0543999
0.061375
0.0555067
0.039181
0.0139207

-0.0154552
-0.0414486
-0.0585133
-0.0645339
-0.0616361
-0.0525605
-0.0381176
-0.0183412
0.0031159
0.021762
0.0353531
0.0439012
0.0476129
0.0455809
0.0381701
0.0264468
0.0132329
0.00207626
-0.00511251
-0.00935923
-0.00976821
-0.00490253
0.00353004
0.0125138
0.0195265
0.0241483
0.0248836
0.0215067
0.0156593
0.0100654
0.00407211
-0.00107477
-0.00490743
-0.00751715
-0.0076012
-0.00561444
-0.0019231
0.00163766
0.00302943
0.00260894
0.00154302

0.00116751
5.05699e-007
-0.00124321
-0.00263399