

## 제 출 문

한국지질자원연구원 원장 귀하

본 보고서를 “가스하이드레이트 시추예정지역 고해상 반사계수 분석”의 보고서로 제출합니다.

2007. 10.

주관연구기관명 : 한국해양연구원

주관연구책임자 : 김 한 준

연 구 원 : 주 형 태

연 구 원 : 김 주 미

# 요 약 문

## I. 제목:

가스하이드레이트 시추예정지역 고해상 반사계수 분석

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

### 1. 연구개발의 필요성

#### ● 기술적 측면

- 탄성과 탐사를 이용해서 메탄 하이드레이트가 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 음향 임피던스의 차이 때문에 발생한다. 따라서 가스 하이드레이트 BSR은 진폭이 크며 해저면과 비교했을 때 극성이 반전된 반사신호이다. 탄성과 탐사자료에서 BSR의 반사계수와 극성을 정확히 아는 것은 매우 중요하다. 이 목적을 위해 지금까지 스파이킹 디컨볼루션이나 예측 디컨볼루션 (predictive deconvolution)을 많이 사용하고 있지만 이 방법을 성공적으로 적용하기 위해서는 탄성과 자료의 주파수 특성이 무색이고 부분적으로 파형요소 (source wavelet)가 최소 위상이어야 한다. 하지만 대개의 경우 지층경계면을 정의하는 반사계수는 무색 스펙트럼을 가지지 못하고 파형요소를 정확히 아는 것 역시 매우 힘이 든다. Wiggins (1978)가 제시한 최소엔트로피 디컨볼루션 (MED: Minimum Entropy Deconvolution)은 새로운 방법의 디컨볼루션 기술이다. MED는 탄성과 자료와 부합하는 최소한의 개수의 큰 스파이크로 반사계수를 구하는 방법으로 앞의 방법들에서 요구하는 제약조건을 요구하지 않는 장점이 있다. 이러한 차이에도 불구하고 이들 두 가지 접근방법은 선형연산으로 구현된다. 다만, 두 방법 다 Toeplitz 행렬을 역산하지만 MED 필터는 반복적으로 Toeplitz 행렬을 역산하

여 구한다. 선형연산을 채용하는 경우에는 주파수 대역이 제한된 (band-limited) 탄성과 자료를 정확히 처리하기에 곤란하다.

- 대역이 제한된 자료의 디콘볼루션을 위해서 두 가지의 방법이 있다. 첫 번째가 선형프로 그래밍 (LP: linear programming) 방법 (Levy and Fullagar, 1981) 으로 탄성과 자료와 부합하는 최소 절대 norm (minimum absolute norm)을 이용하여 반사계수를 구하는 것이다. 두 번째 방법은 탄성과 자료의 스펙트럼을 복소 AR (autoregressive) 모델로 계산하는 것으로 (Lines and Clayton, 1977) 탄성과 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 탄성과자료를 처리하는 것이 BSR의 탐지와 반사특성을 이해하는 데에 매우 유용할 것이다.

## 2. 목적

- Stochastic inversion을 이용해서 탄성과자료로부터 BSR과 지층의 반사신호를 분리하고 특성을 해석
- 탄성과자료로부터 파형요소를 추출

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- Stochastic inversion을 이용하여 한국지질자원연구원이 획득한 탄성과자료를 처리
- BSR 반사신호의 특성 분석

- 탄성과자료로부터 파형요소를 추출하고 특성을 분석

## IV. 연구개발결과

탄성과 탐사자료로부터 가스 하이드레이트의 존재를 지시할 수 있는 BSR의 특성을 분석하기 위해 stochastic inversion 방법으로 한국지질자원연구원이 가스수화물 탐사를 위해 설정한 시추예정지점에서 획득한 탄성과 프로파일 자료에 적용하였다.

탄성과 프로파일에서 BSR은 해저면의 반사신호와 반대인 음의 극성을 가지고 있는 것으로 보이지만 여러 개의 신호가 중첩되어 뚜렷이 구분되지 않는 경우도 많다. 프로파일의 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 진폭의 변화가 매우 크며 BSR 아래에 상당한 진폭의 반사면이 존재하므로 BSR 하부에서 자유가스의 존재와 관련된 구조를 지시할 가능성이 있다. 시추예정지점 site 4와 14는 BSR이 잘 발달되어 있으며 그 아래에 가스의 존재를 지시하는 신호가 나타난다. Site 9와 10은 가스수화물 렌즈 혹은 chimney 구조에 해당하며 특히 site 10은 매우 유망한 특성을 보인다.

탄성과 프로파일의 자료로부터 구한 파형요소는 반향신호가 매우 효과적으로 억제되어 분해능이 우수한 것으로 판단된다. 파형요소의 중심 주파수는 50 Hz로서 가스 하이드레이트 탐사에 적합하다.

## V. 연구개발결과의 활용계획

1. 한국지질자원연구원에서 획득한 탄성과자료를 이용하여 가스 하이드레이트 유망 구조를 해석하고 시추를 계획하는 작업에 이 연구의 결과를 적용할 수 있다.
2. 가스 하이드레이트 안정영역 아래에 가스가 존재할 경우 발생하는 탄성과 감쇠를 구명하기 위해서는 파형요소를 아는 것이 필수적이다. 이 연구에서 구한 파형

요소는 탄성과 역산과 가스의 존재에 대한 자료 분석 등에 매우 중요하게 사용될 수 있을 것을 기대한다.

3. 탄성과 자료에서 보이는 가스 하이드레이트 부존 구조에서 BSR과 그 아래 반사면의 성질을 해석할 수 있다. 이런 과정을 통하여 유망한 구조를 찾고 시추의 성공율을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

# SUMMARY

## I. Title:

Analysis of high-resolution reflectivity of proposed drilling sites for gas hydrates

## 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 hydrates 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 sediments below that can contain free gas. Therefore, the gas hydrate BSR in the seismic profile is high in amplitude and shows reversed polarity with respect to the seafloor reflection. These features point to the importance of the correct knowledge of reflection coefficient and polarity of the BSR in seismic data. While spiking deconvolution and predictive deconvolution are conventional approaches to this goal, their implementation requires crucial assumptions that the spectrum of reflectivity is white and the source wavelet is minimum-phase. However, reflection coefficients that define the interfaces of the subsurface show a non-white spectrum and the source wavelet is not minimum-phase in most real cases. The minimum entropy deconvolution (MED) introduced by Wiggins (1978)

offers a different approach to seismic deconvolution; MED seeks the smallest number of large spikes that are consistent with the data. MED does not require the assumptions for spiking and predictive deconvolution methods. Despite these differences, both methods constitute a linear approach to seismic deconvolution. The spiking and predictive filters are obtained by inverting the Toeplitz matrix; the MED filter is calculated in an iterative procedure in which the Toeplitz matrix is inverted at each step. Because they are linear operators, none of them can handle band-limited data properly.

- Two main procedures to deconvolve band-limited data have been developed. 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.
- Stochastic inversion deconvolution is highly efficient in the detection of gas hydrates and analysis of their properties.

## 2. Objectives

- Deconvolution of seismic profiles to analyze from Separation of the BSR and its interpretation using FMED

- Extraction of the source wavelet

### III. General Scope of the Study

- Processing of seismic data obtained by KIGAM to recover the sparse reflectivity series using stochastic inversion
- Analysis of the BSR signal
- Extraction and analysis of the source wavelet

### IV. Results of the Study

The BSR provides indications of the presence of gas hydrates on seismic data. 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.

Although there are indications of the gas hydrate-related signals, complex stratigraphy creates superposed wavelets that are difficult to resolve. The result of deconvolution of seismic data demonstrates that the effect of the source wavelet was completely removed from the data. Consequently, amplitude and polarity of the reflections from the seafloor and subsurface interfaces was accurately resolved. In particular, this method was proved to be suited for resolving the BSR. The BSR in the survey area shows large variations in amplitude. Locally, occurrence of the significantly high normal polarity amplitude beneath the BSR can be positively associated with free gas underneath. Proposed drilling sites 4 and 14 are characterized by a well-imaged BSR followed by a signal suggestive of the existence of gas. Sites 9 and 10 demonstrate hydrate lens or chimney structure; in particular, site 10 is interpreted to be a promising prospect.

The source wavelet estimated from seismic data is estimated to provide



high resolution by efficiently suppressing reverberations. The main frequency of the source wavelet is 50 Hz, adequate for detection of gas hydrates.

## 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. It is imperative to know the source wavelet to investigate seismic attenuation when free gas is present below the gas hydrate stability zone. The estimated source wavelets can be very useful for seismic inversion and analysis of data to identify free gas.
3. The use of the method in this study can help properly address the characteristics of BSR and ensuing reflectors, thereby improving the discovery of prospective gas hydrate structure and the success rate of drilling.

# CONTENTS

Summary .....	2
Contents .....	11
List of Figures .....	12
<b>Chapter 1. Introduction .....</b>	<b>14</b>
<b>Chapter 2. Contents and Results of the Study .....</b>	<b>16</b>
1. Seismic data and results of processing	
1-1. Site 1	
1-2. Site 4	
1-3. Site 9	
1-4. Site 10	
1-5. Site 14	
2. Conclusions	
<b>Chapter 3. Plans for application .....</b>	<b>47</b>
<b>Chapter 4. References .....</b>	<b>48</b>

# 목 차

요약문 .....	2
목차 .....	11
그림 및 표목차 .....	12
제 1 장 서 론 .....	14
제 2 장 연구개발 수행내용 및 결과 .....	16
제 1 절  탄성과자료 및 처리결과	
1. Site 1	
2. Site 4	
3. Site 9	
4. Site 10	
5. Site 14	
제 2 절  결론	
제 3 장  연구개발결과의 활용계획 .....	47
제 4 장  참고문헌 .....	48

## 그림 목차

### List of Figures

- Fig. 2-1. MCS profile for site 1.
- Fig. 2-2. MCS profile for site 4.
- Fig. 2-3. MCS profile for site 9.
- Fig. 2-4. MCS profile for site 10.
- Fig. 2-5. MCS profile for site 14.
- Fig. 2-6. Part of MCS profile for site 1 (CDP 14628 ~ CDP 14688) (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.
- Fig. 2-7. Three traces of CDP 14658 ~ CDP 14660 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.
- Fig. 2-8. Three traces of CDP 14445 ~ CDP 14447 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.
- Fig. 2-9. Part of MCS profile for site 4 (CDP 13953 ~ CDP 14013) (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.
- Fig. 2-10. Three traces of CDP 13983 ~ CDP 13985 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.
- Fig. 2-11. A source wavelet computed from the seismic profile for site 04.
- Fig. 2-12. Part of MCS profile for site 9 (CDP 5885 ~ CDP 5945) (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.
- Fig. 2-13. Three traces of CDP 5915 ~ CDP 5917 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.
- Fig. 2-14. Part of MCS profile for site 10 (CDP 7273 ~ CDP 7333) (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.
- Fig. 2-15. Three traces of CDP 7303 ~ CDP 7305 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.
- Fig. 2-16. Part of MCS profile for site 14 (CDP 3352 ~ CDP 3412) (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

Fig. 2-17. Three traces of CDP 3382 ~ CDP 3384 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

Fig. 2-18. A source wavelet computed from the seismic profile for site 14.

# 제 1 장 서 론

동해의 울릉분지에서 얻은 탄성과 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 탄성과자료로부터 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 탄성과 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.

탄성과자료로부터 스파이크 형태의 반사계수를 구하는 디컨볼루션으로는 탄성과자료와 부합하는 최소 절대 norm (minimum absolute norm)을 이용하여 반사계수를 구하는 선형 프로그래밍 (LP: linear programming)방법과 Levy and Fullagar, (1981) 탄성과 자료의 스펙트럼을 복소 AR (autoregressive) 모델로 계산하여 반사

계수의 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 선형적 (a priori) 분포를 생각한다. 그 다음에 반사계수의 posteriori 확률밀도를 최대화하는 MAP (maximum a posteriori) 추정치에 의해 반사계수를 계산한다.

이 보고서에는 stochastic inversion에서 가장 최근에 발표되어 우수한 것으로 평가받는 Kaaresen (1997)의 방법을 이용하여 한국지질자원연구원(KIGAM)이 동해의 울릉분지에서 획득한 탄성파자료를 deconvolve하여 가스수화물 BSR의 탄성파 특성을 구하였다.

## 제 2 장 연구개발 수행 내용 및 결과

### 제 1 절. 탄성과 자료 및 처리 결과

한국지질자원연구원이 제공한 탄성과 프로파일은 14개로서 이 중 시추가 예정된 것은 5 개 사이트로서 Fig. 2-1에서 Fig. 2-5에 나와 있다. 프로파일에서 각 트레이스의 길이는 7 초로서 1 초당 1023 개의 샘플이므로 트레이스 전체는 7169개의 샘플로 이루어져 있다.

#### 1. Site 1

전체 프로파일은 해저면에서 약 210 ms의 깊이에 BSR이 나타나고 있음을 보여준다. 이 BSR은 CDP 13900부터 뚜렷하게 나타나며 CDP 14600 부근부터 진폭이 감소하고 경사진 퇴적층서와 섞이면서 잘 구분이 되지 않는다 (Fig. 2-1). 프로파일의 중간부터 오른쪽으로 수심이 알아지며 해저면 아래의 퇴적층은 두께가 매우 작은 많은 수의 얇은 층으로 이루어져 있다. 이 부분의 탄성과상은 저에너지의 저탁류로서 해석된다.

전체 프로파일의 CDP 14400에서 CDP 14600 구간에서는 BSR이 층서를 자르면서 발달한 것을 볼 수 있다 (Fig. 2-1). BSR 바로 아래의 층서들은 경사져 있으며 반사신호의 진폭이 상당히 크다. Fig. 2-6a 는 시추예정지점 site 1을 중심으로 CDP 14628 ~ CDP 14688까지 61개 트레이스를 그린 것이다. BSR로 추정되는 반사면은 제일 왼쪽의 CDP 14628에서 오른쪽으로 CDP 14640까지 다른 반사신호와 겹쳐서 나타나지만 그 이후에는 보이지가 않는다. 이것을 디컨볼브한 결과 (Fig. 2-6b) 에서 분명히 BSR 그리고 다른 반사신호의 특성을 볼 수 있다. 여기에서, CDP 14650 이후에는 BSR이 보이지 않는다. 또한 디컨볼루션 이전과 이후에서 BSR이 보이는 구간과 그 외의 구간에서도 BSR 상부에서 흔히 관찰되는 반사신호의 진폭이 약해진 acoustic blanking이 보이지 않는다. 대신 해저면에서 그 아래 약



240 ms 깊이까지는 작은 진폭의 신호가 매우 많이 나타나며 그 아래부터 강한 반사신호들이 겹쳐서 나타난다. 특히 BSR보다 더 깊이 해저면에서 230 ms 이상 아래에 극성이 반전된 매우 큰 값의 진폭을 갖는 반사신호가 그림의 전체에 걸쳐 존재하는데 그 진폭은 해저면 반사신호의 진폭보다 훨씬 크다. 진폭의 크기로 미루어 가스를 함유한 퇴적층의 상부경계면일 가능성이 있으나 자세한 해석이 필요하다.

시추예정지점에 해당하는 중앙의 CDP 14658에서 CDP 14660까지 세 개의 트레이스를 디킨볼브하여 반사계수를 자세히 살펴볼 수 있다 (Fig. 2-7). Fig. 2-1에서 CDP 14650 왼쪽에서 보이는 해저면 아래 210 ms에서 나타나는 BSR의 깊이에서 음의 극성을 갖는 반사계수는 존재하지 않는다. 대신, 해저면 아래 약 240 ms부터 여러 개의 반사신호가 큰 값의 진폭을 가지며 나타나는 구간에서, 앞에서 언급한 바와 같이 진폭이 큰 음의 반사계수가 구분된다. 이 음의 반사계수는 지층의 경계면일 수도 있지만 그 깊이 해저면 반사계수의 1.4배에 해당하므로 아래 가스층과의 경계일 가능성이 매우 크다. 가스층이 있음에도 불구하고 BSR이 형성되지 못한 것은 단층 등이 존재하지 않아서 가스가 위로 이동하여 수화물을 형성하지 못하였을 가능성을 지시할 수 있다. 혹은, 이 지역의 퇴적특성상 지열이 상대적으로 낮아서 가스수화물 BSR이 더 깊은 곳에서 형성되었을 수도 있다. 디킨볼브된 결과에서, 240 ms 위로 작은 진폭의 신호가 많이 보이지만 특정한 반사계수로 복원이 되지 않는다. 공발점 모음(shot gather)자료가 없어서 정확한 분석은 불가능하지만 이 구간에서 천부에 위치하는 이상체로 인한 회절등이 잡음으로 작용하여 동일한 위상을 갖는 파형요소를 보장시키는 정확한 중합이 제대로 수행되지 못하여 파형이 왜곡되었을 가능성이 있다. 이러한 특성 때문에 site 1의 자료는 다른 자료에 비해 전체적으로 디킨볼루션의 수행결과가 불량하였다고 판단된다.

연속된 3개의 CDP 14445에서 14447을 디킨볼브하여 반사계수와 파형요소를 구하였다 (Fig. 8). BSR은 해저면에서 205 ms 아래에 나타나지만 그 진폭은 해저면의 0.37~0.45 정도로 약하다. 하지만 그 아래에 해저면과 비슷한 크기의 진폭을 갖는 음의 반사계수들이 여러 개 나타나는데 가스의 존재를 지시할 수도 있다. BSR의 위쪽에서는 반사신호의 진폭이 매우 작게 나타나는데 가스수화물의 존재시 흔하게 관찰되는 acoustic blanking에 해당한다고 보여 진다.

## 2. Site 4

해저면과 그 아래의 퇴적층은 매우 평탄하게 발달되어 있다 (Fig. 2-2). 탄성파상(seismic facies)에 의해 해저면 아래 천부 퇴적층은 해저면 아래 약 240 ~ 260 ms에 나타나는 경계면에 의해 두 개의 층으로 나눌 수 있다. 프로파일의 오른쪽에서 상하부층의 경계는 여러 개의 파형요소가 겹쳐진 형태를 보여 준다. 상부층의 탄성파상은 평행하고 연속성이 좋은 반사면으로 구성된다. 이에 비해 하부층은 회절 등에 의한 불연속이 두드러지며 반사신호의 진폭도 불규칙하며 아래로 가면서 급격히 감소하는 특징을 보인다. 프로파일의 위치정보를 모르기 때문에 정확한 층서해석을 하기 어려우나 탄성파상으로부터 상부층은 distal turbidites 혹은 hemipelagic sediments로 해석되며 하부층은 밀도가 높은 저탁류 등에 의한 mass-transport deposits일 것으로 판단된다.

이 프로파일에서 가스 수화물 BSR처럼 눈에 띄는 정도로 신호의 극성이 반전된 반사면은 상부 층내 해저면 아래 약 170 ms에서 나타나는데 이것은 예상 심도보다 훨씬 낮은 값이다. 해저면 아래 240 ~ 260 ms에서 나타나는 상부층과 하부층의 경계부위에서 극성이 반전된 BSR의 특징을 보여주는 신호가 있는지는 알 수가 없다. Fig. 2-9a는 site 4에서 시추예정지점을 중심으로 CDP 13953 ~ CDP 14013 까지의 구간에서 2.4초에서 3.4초까지의 기록을 그린 것이다. 앞의 site 1과 달리 잡음으로 작용하는 신호들이 상당히 억제되어 있으며 해저면에서 약 170 ms아래에 해당하는 2.64초 부근에 해저면의 반사신호 정도의 큰 진폭을 가지며 극성이 반대로 나타나는 반사신호가 잘 발달되어 있으며 그 위에 짧은 시간동안 acoustic blanking처럼 반사신호가 약한 구간이 있음을 볼 수 있다 (Fig. 2-9a). 해저면에서 약 250 ms 아래에 해당하는 2.7초 부근에서 평탄하게 나타나는 상하층의 경계면은 여러 개의 파형이 중첩되어 반사계수를 구분하기 힘들다. Fig. 2-9b는 이 자료를 디컨볼브하여 sparse spike의 형태로서 반사계수를 복원한 것이다. 전체적으로 회절 등에 의한 잡음이 상당히 발생하지 않았으므로 탄성파 자료에서 파형요소가 왜곡되지 않았기 때문에 디컨볼루션이 잘 되었다고 볼 수 있다. 해저면에서 150 ms에서 나타나는 음의 극성을 갖는 반사신호는 해저면 반사신호보다 작은 진폭을 가지며 자료의 전체에 걸쳐 잘 정의된다. 하지만 울릉분지에서 수심 2000 m 가까이 지역에서 측정된 지열자료로부터 유추되는 가스수화물 BSR의 깊이가 해저면에서 대략 200 ~ 220 ms 인데 이 반사신호는 그 보다 훨씬 얕은 깊이에서 나타나

고 있으며 주변의 층서와 평행하게 나타나므로 가스 수화물 BSR인지 구명하기가 곤란하다. 상하부 층의 경계부에서 중첩된 파형들은 여러 개의 반사계수로 이루어져 있다. 이 부분에서도 신호의 극성이 음인 반사계수가 대체로 일관되게 나타나나 그 진폭이 매우 작다. 이 결과를 자세히 보기 위해 자료의 중앙부에 해당하는 CDP 13983 ~ CDP 13985의 세 개 트레이스를 디컨볼브 하기 전과 한 후로 나누어 Fig. 2-10에 그렸다. 2.64 s에서 보이는 극성이 반전된 반사계수는 그 크기가 해지면 반사계수 이상이다. 속도분석자료가 없어서 이 반사면 위의 지층의 구간속도를 알 수 없지만 이것이 가스수화물 BSR이면 그 위 가스수화물층의 구간속도가 상대적으로 높아서 velocity pull-up효과 때문에 시간영역에서 BSR이 위로 올라온 것으로 해석할 수 있다. 그 아래에서 상하부 층의 경계부에서 나타나는 음의 극성을 갖는 반사계수는 그 진폭이 해지면 반사계수의 1/4 정도밖에 되지 않아서 아래에 가스가 존재하는 가스수화물 BSR이라고 해석하기가 곤란하다. Fig. 2-11은 site 4의 프로파일에서 구한 파형요소이다.

### 3. Site 9

탄성과 프로파일에서 (Fig. 2-3) 해지면과 그 아래 상당부분까지 매우 평탄하고 연속성이 좋은 층서가 많이 나타나고 있다. 해지면에서 대략 260 ms 아래는 연속성이 떨어지고 내부 반사면이 혼탁한 (chaotic) 탄성과상을 보여주는 층서로 이루어져 있다. 상부층의 경우 모든 반사면이 굴곡이나 경사가 없이 평행하게 발달되어 있으며 중첩되어 있으므로 가스수화물 BSR이라고 해석할 수 있는 반사면을 분리하기가 불가능하다. 반사면이 뚜렷이 나타나지 않는 혼탁한 하부층은 투명한 음향상을 보여주며 회절신호가 강하게 나타난다. 이러한 회절은 반사면의 굴곡이나 매질의 변화 때문에 발생한다. 프로파일의 중앙부에 해당하는 CDP 5900을 중심으로 가스수화물 렌즈 (hydrate lens) 모양으로 위 아래로 볼록한 이상체가 보인다. 하지만 이 렌즈모양 이상체 내부에서 반사파의 진폭은 매우 감쇠되어 있으며 기저는 해지면에서 280 ~ 290 ms 아래로서 BSR의 예상 깊이보다 훨씬 깊으므로 가스수화물과 관련된 이상체일 경우 이에 대한 정확한 해석이 필요하다. 가스수화물 chimney에서 반사신호가 감쇠되어 나타나는 것은 자유가스지역으로부터 가스수화물지역으로 메탄가스가 방출되지 때문으로 해석한다 (Gorman et al., 2002).

Fig. 2-12a는 시추예정지점을 중심으로 CDP 5885 ~ CDP 5945 범위의 탄성과 트레이스를 자세히 그린 것이다. BSR이 있을 것으로 예상되는 해저면에서 약 210 ms 아래의 깊이에 극성이 역전된 반사신호가 왼쪽부터 CDP 5895 까지 낮은 진폭으로 나타나나 그 오른쪽에는 존재하지 않음을 볼 수 있다. 또한 해저면에 가까운 천부부분에서 (Fig. 2-12a) 이상체의 기저에 해당하는 반사신호가 왼쪽으로 오른쪽으로 가면서 위상이 변하는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 회절신호의 특징으로 해석된다.

#### 4. Site 10

Site 10의 경우, 탄성과 프로파일에서 보이는 층서와 특징은 site 9와 거의 비슷하다 (Fig. 2-4). 이 프로파일에서도 CDP 7300을 중심으로 가스수화물 렌즈나 chimney로 해석할 수 있는 구조가 나타난다. 이 렌즈모양의 이상구조는 site 9에 서보다 훨씬 얕은 깊이까지 올라와 있다.

Fig. 2-14a와 2-14b는 시추예정지점을 중심으로 CDP 7273 ~ CDP 7333의 자료와 이것을 디컨볼브한 것이다. 해저면에서 약 190 ms 아래에 해당하는 3 s 에서 음의 극성을 갖는 반사면이 시추예정지점을 중심으로 뚜렷하게 나타나며 그 아래에 3.1 s 부근에 강한 진폭의 양의 극성을 갖는 반사면이 존재한다. 3 s 에서 보이는 반사면은 해저면 반사계수의 약 반 정도되는 크기로 부분적으로 나타난다. 이 지역에서 해저면은 매우 평탄하고 3 s 에서 보이는 음의 극성을 갖는 반사면이 주변의 지층을 자르지 않고 전부 평행하게 발달해 있으므로 가스수화물 반사면인지는 전적으로 확인할 수 없다. 속도분석결과가 없어서 렌즈 혹은 chimney의 구간속도를 알 수 없으나 만약 이것이 가스수화물구조이면 chimney의 구간속도가 상대적으로 높기 때문에 velocity pull-up효과 때문에 시간영역에서 BSR 반사면이 더 위에서 나타난다고 볼 수 있다. 이 경우 그 아래에 매우 큰 양의 진폭을 갖는 반사면은 가스층의 기저에 해당하는 것으로 해석할 수 있다. 결론적으로 site 10은 매우 유망한 가스수화물지역으로 생각할 수 있다.

#### 5. Site 14

Site 14의 프로파일은 가스수화물과 관련된 것으로 해석되는 BSR을 가장 잘 보여 준다 (Fig. 2-5). 해저면과 그 아래의 층서는 매우 평탄하게 발달해 있으며 극성이 바뀐 BSR은 해저면에서 약 210 ms에 나타난다. 이 깊이는 울릉분지의 지열값과 대비할 때 예상되는 가스수화물 BSR의 깊이와 매우 일치한다. BSR의 위에는 반사신호의 진폭이 상당히 감소된 acoustic blanking이 나타난다. BSR이라고 해석되는 반사면의 아래에서 탄성과 자료는 연속성이 낮은 혼탁한 (chaotic) 탄성과상을 보인다. 시추예정지점 부근의 CDP 3352 ~ CDP 3412 구간의 자료를 살펴보면 해저면 반사신호는 하나보다 많은 반사계수로 이루어져 있으며 해저면에서 약 210 ms 아래에서 보이는 진폭이 큰 BSR을 중심으로 여러 개의 신호가 중첩되어 있음을 볼 수 있다 (Fig. 2-16a). 이 자료를 디컨볼브한 결과에서 (Fig. 2-16b) BSR로 해석되는 신호의 진폭은 해저면의 진폭보다 더 큰 것을 볼 수 있다. 특히 BSR 반사계수의 바로 아래에 보이는 양의 극성을 갖는 큰 진폭의 반사계수는 그 위에 가스층의 기저로서 해석할 수 있다. 시추예정지점인 CDP 3382 ~ CDP 3384 트레이스와 (Fig. 2-17a) 이것을 디컨볼브한 결과에서 (Fig. 2-17b) 이러한 특성을 자세히 볼 수 있다. Fig. 2-18은 site 14에서 얻은 탄성과자료로부터 계산한 파형요소이다.

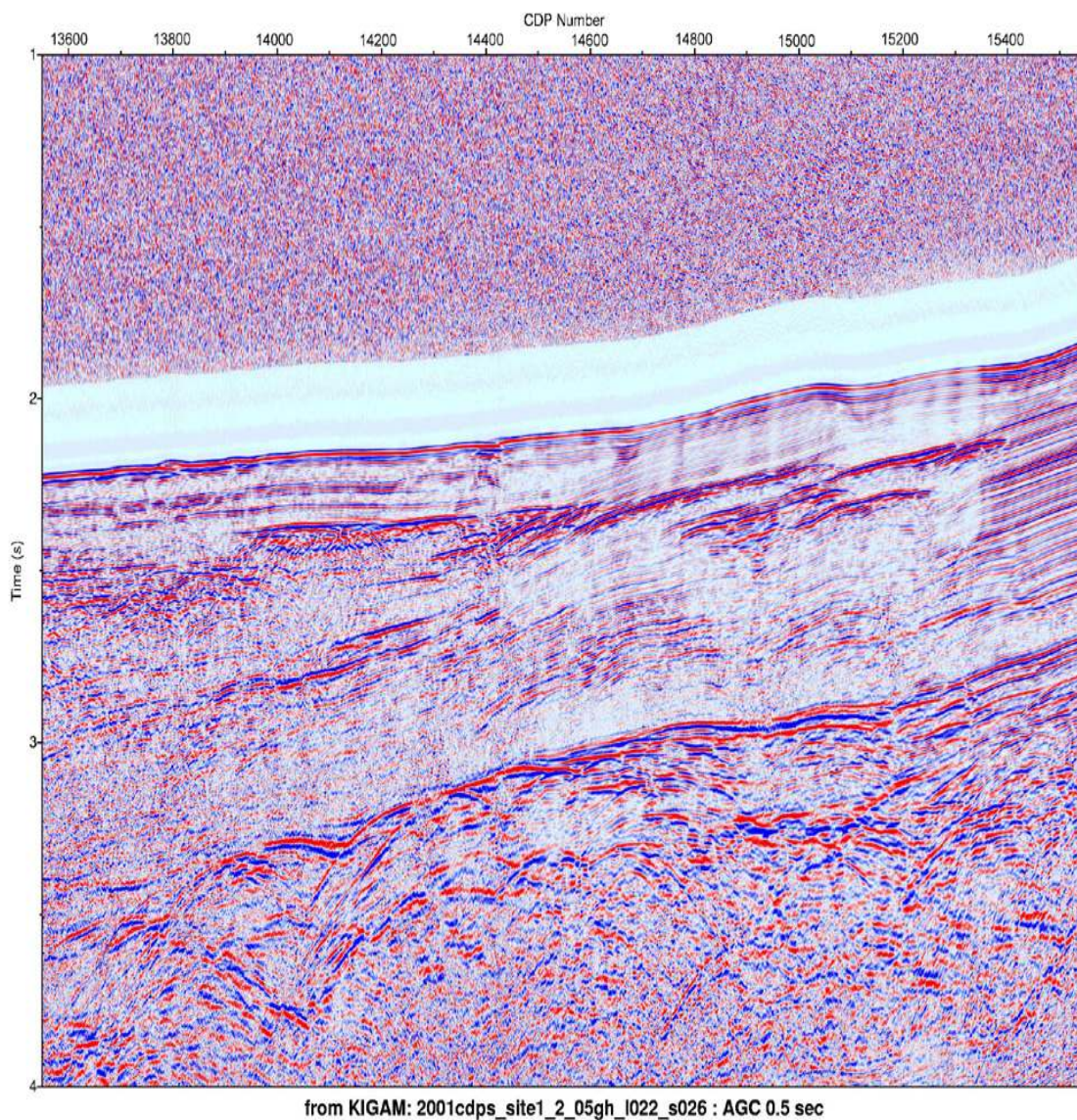


Fig. 2-1. MCS profile for site 1.

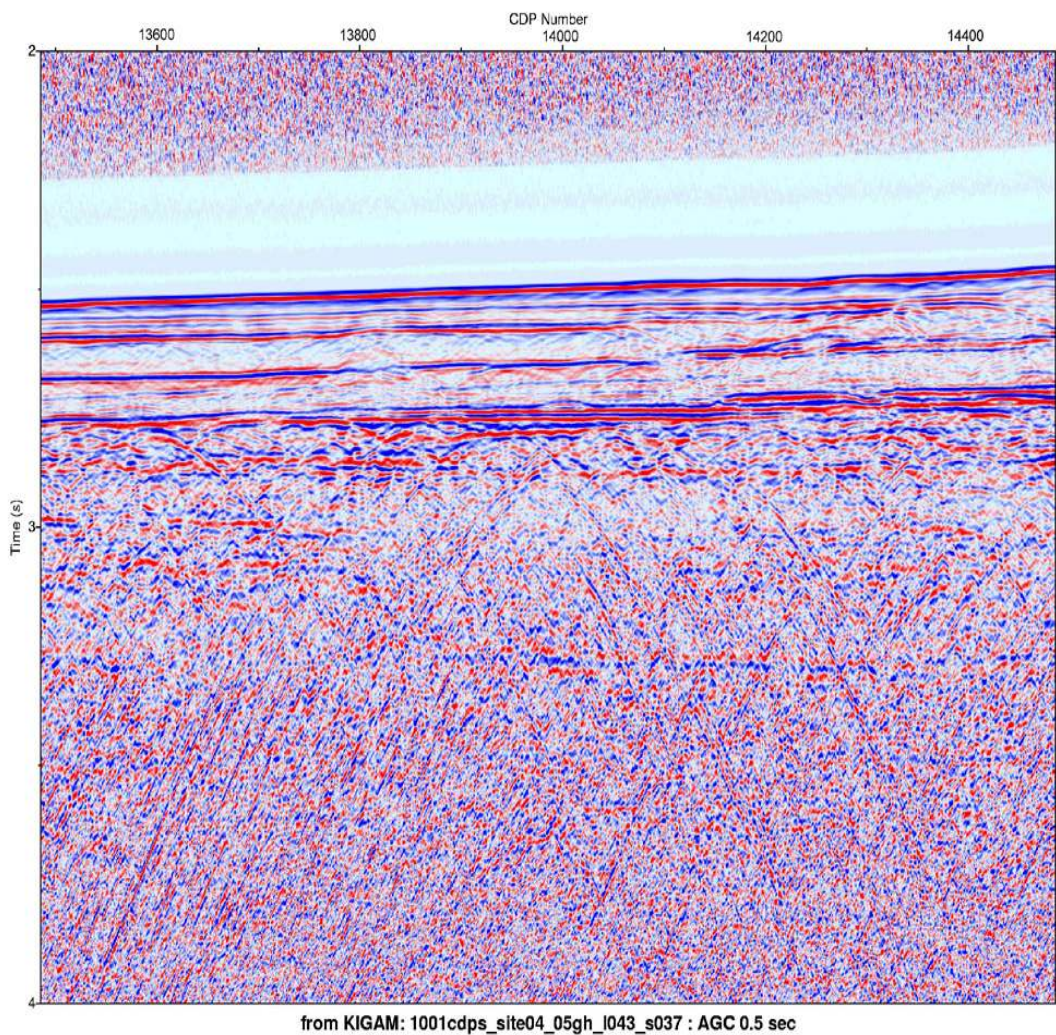


Fig. 2-2. MCS profile for site 4.

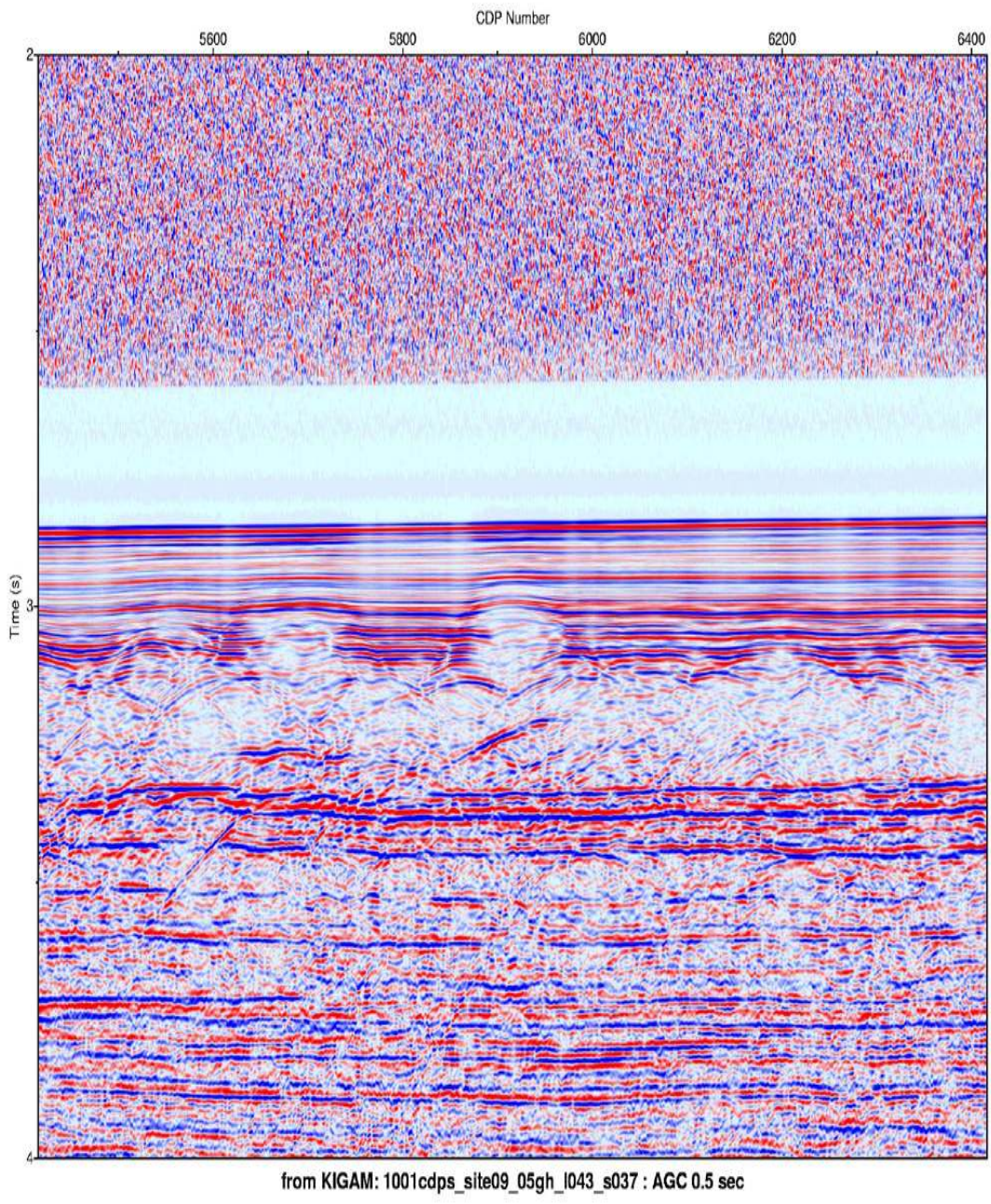


Fig. 2-3. MCS profile for site 9.



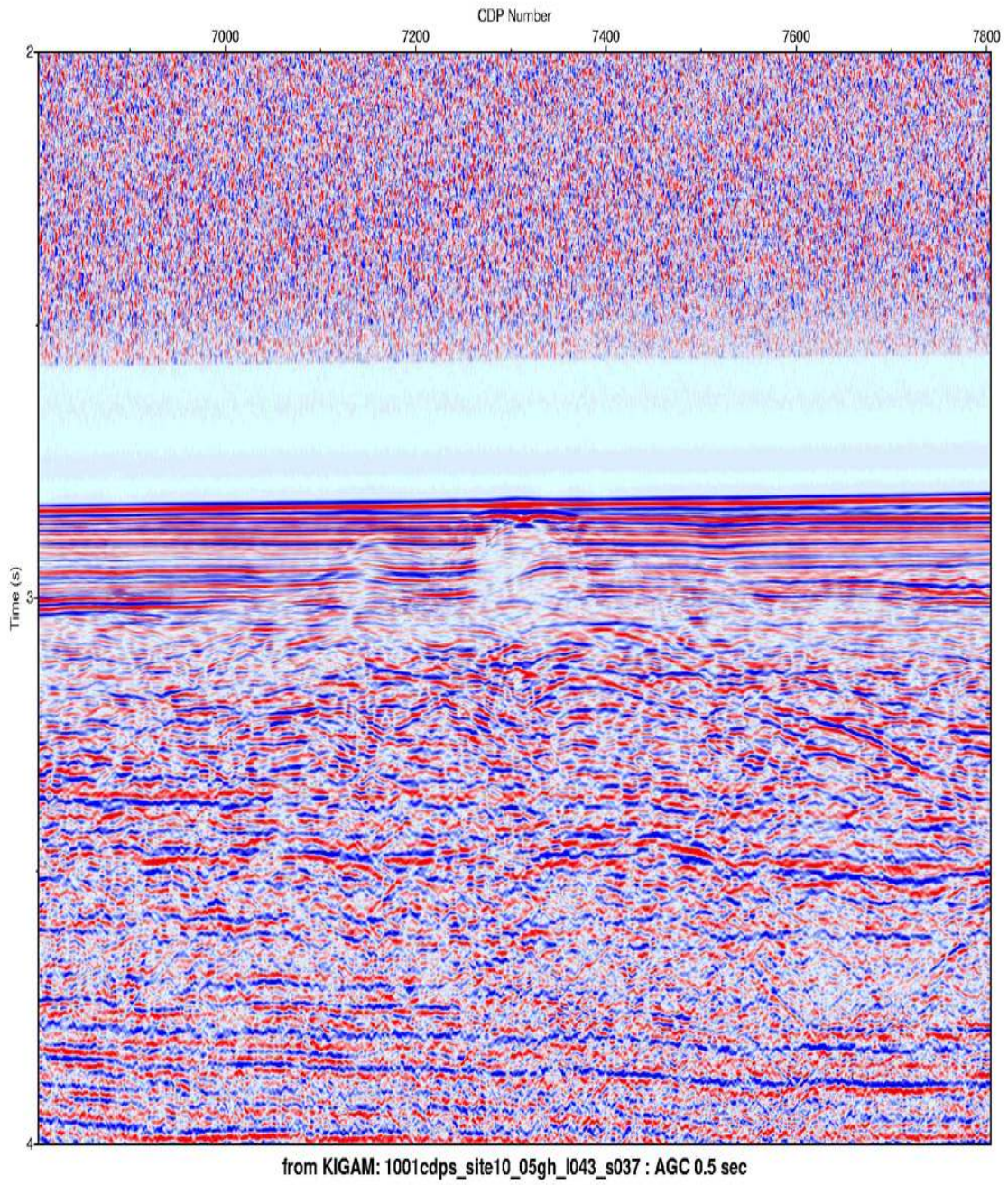


Fig. 2-4. MCS profile for site 10.

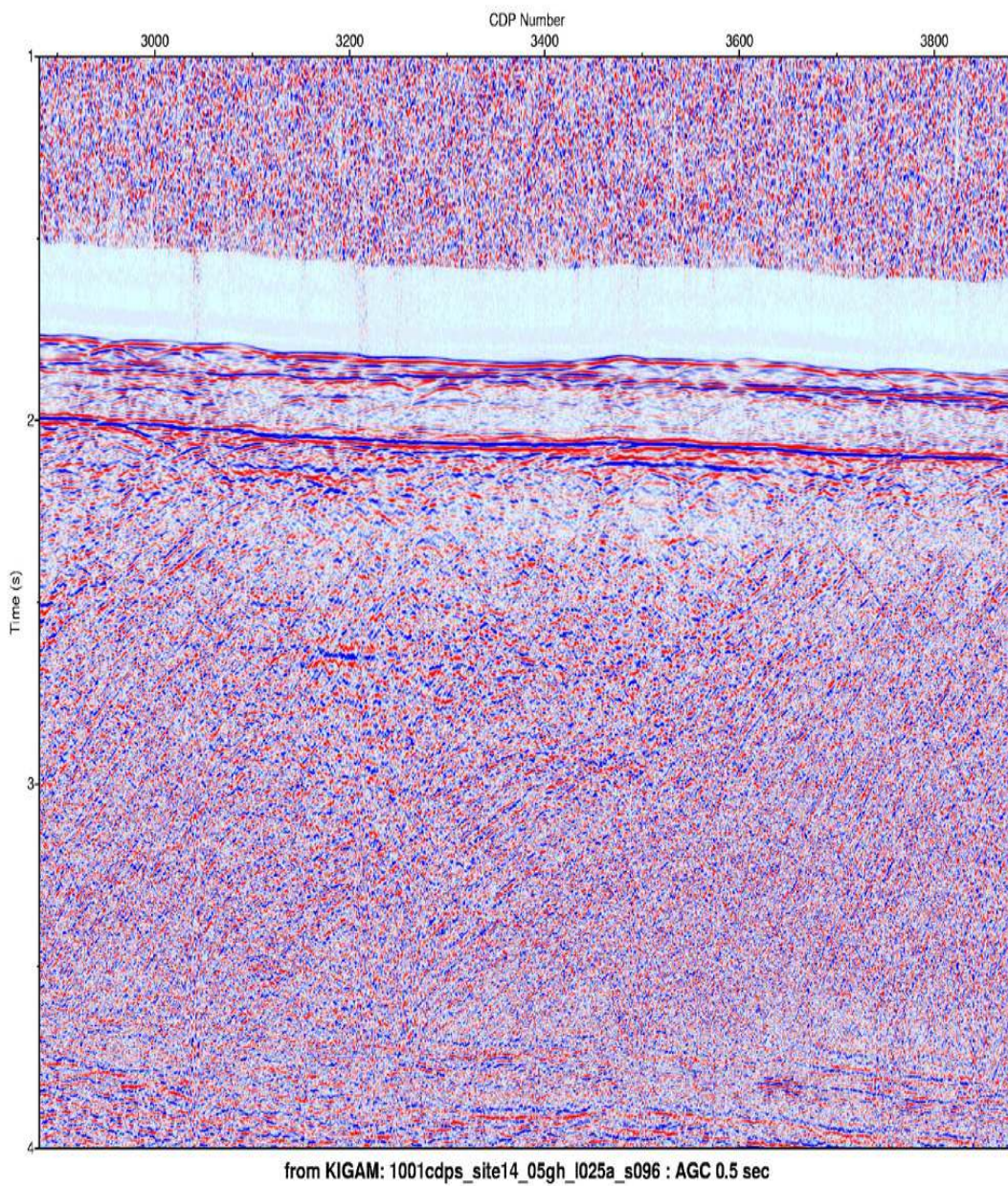


Fig. 2-5. MCS profile for site 14.

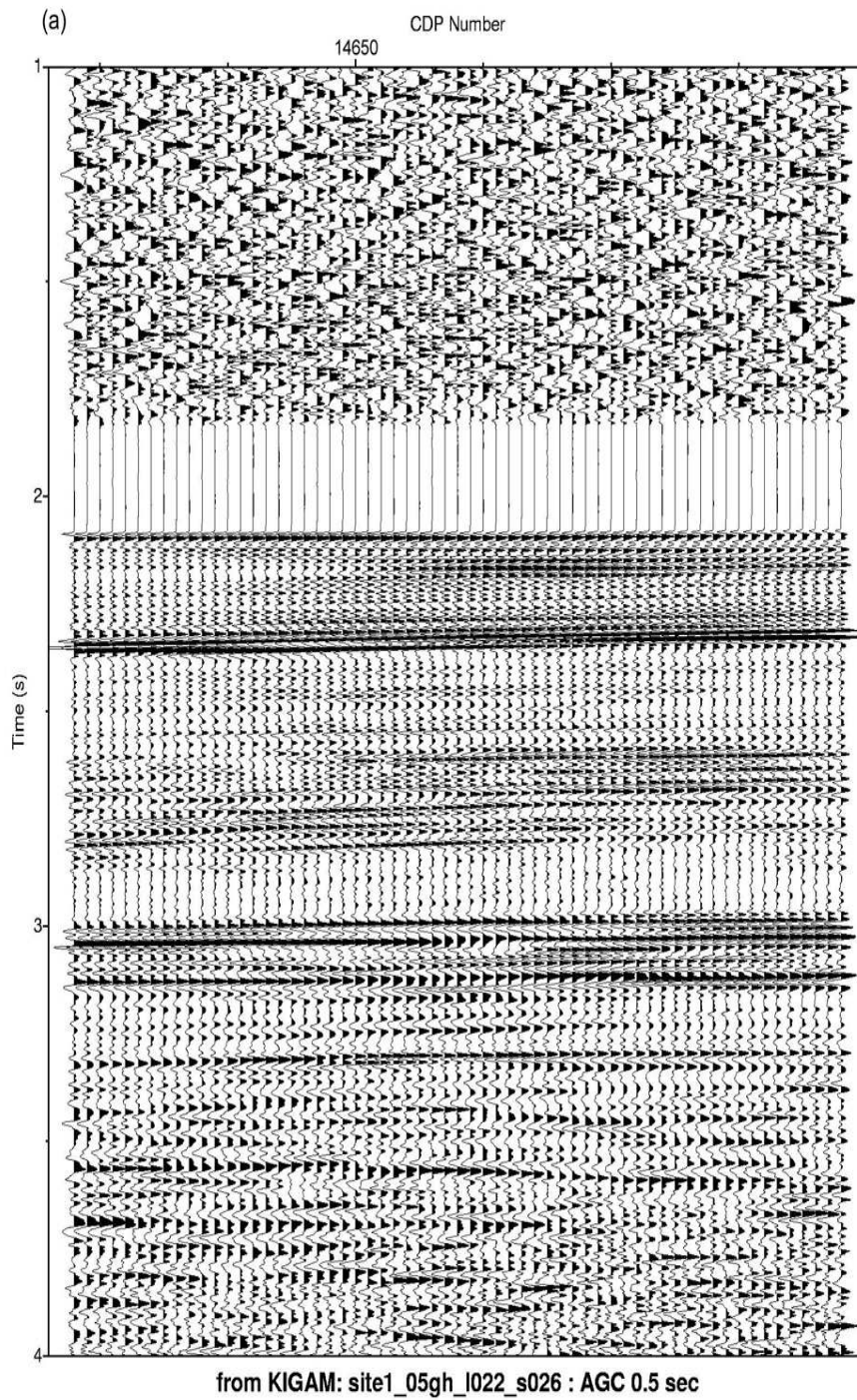


Fig. 2-6. Part of MCS profile for site 1 (CDP 14628 ~ CDP 14688) (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

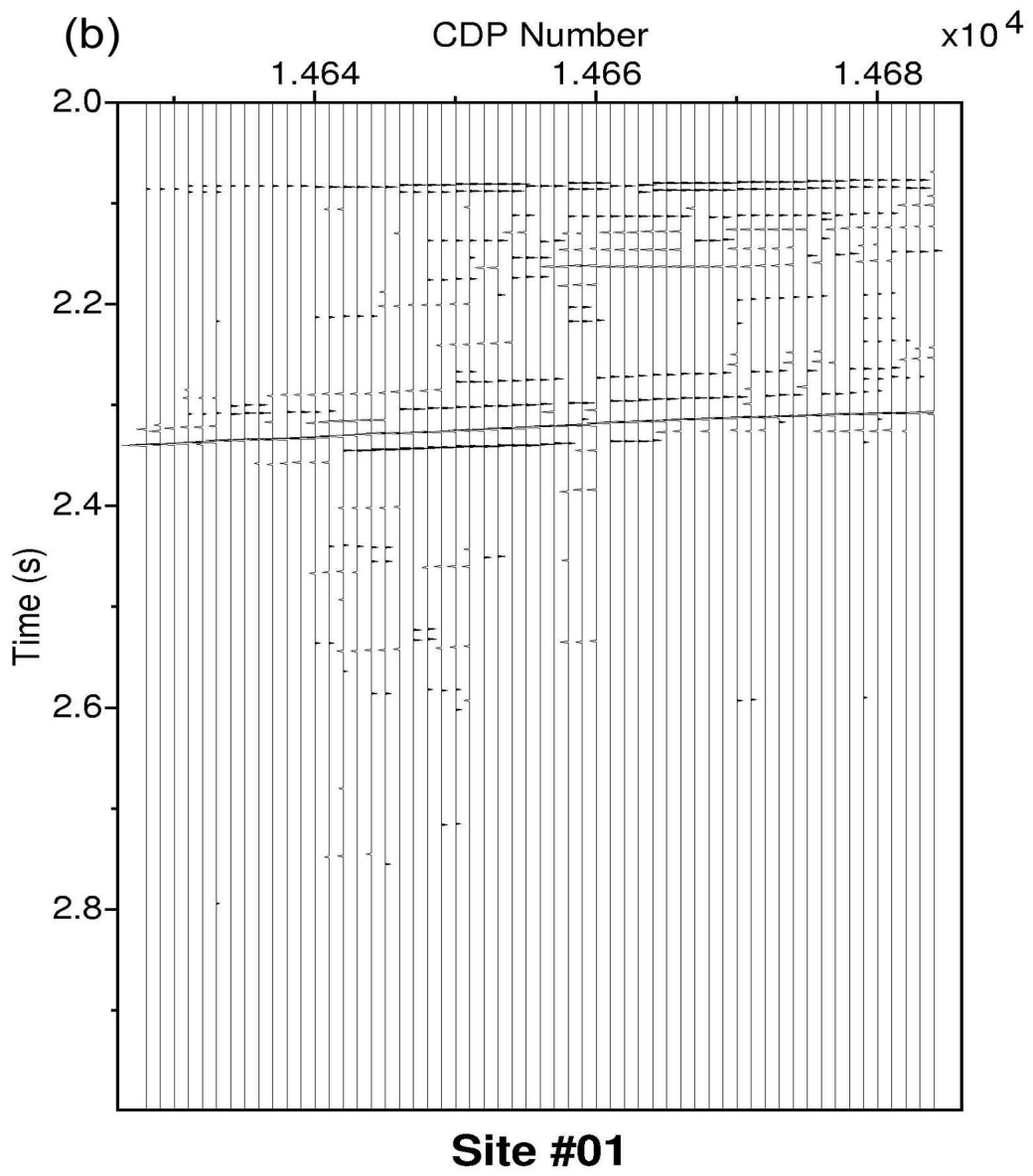


Fig. 2-6. (cont'd)

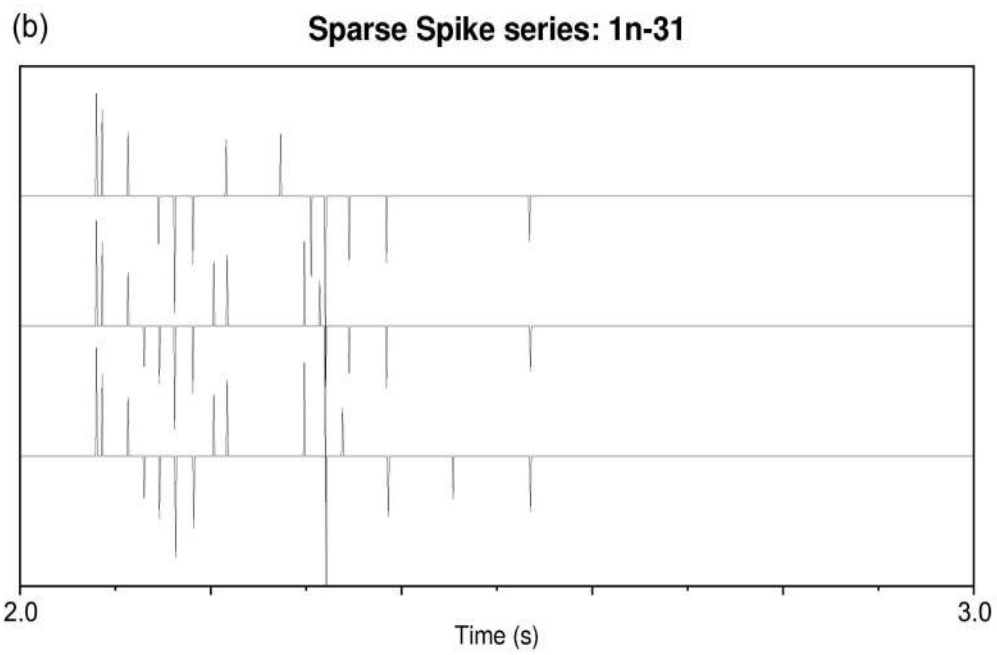
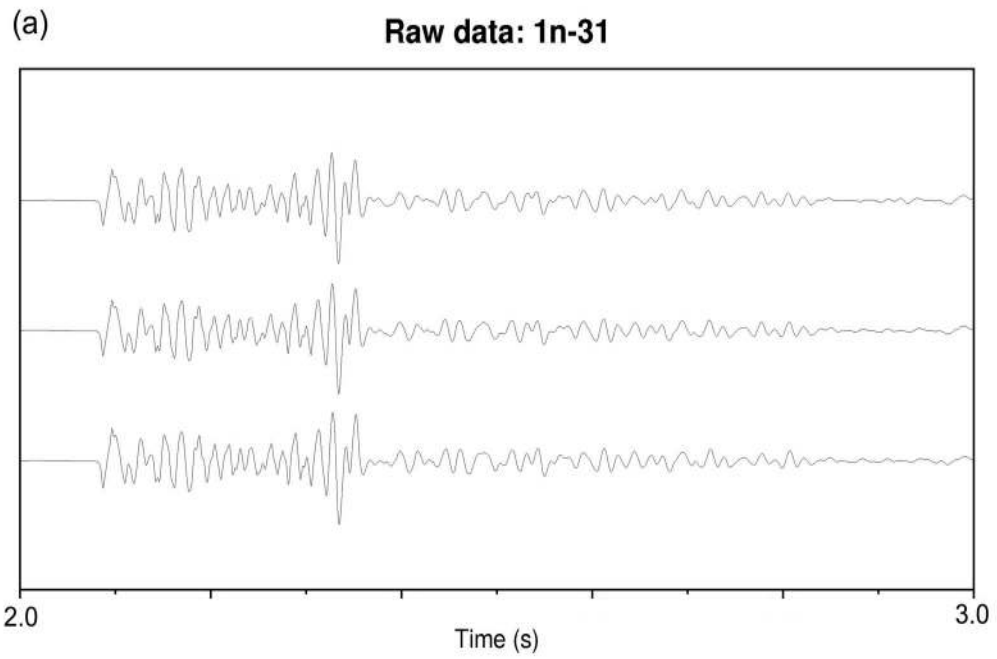


Fig. 2-7. Three traces of CDP 14658 ~ CDP 14660 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

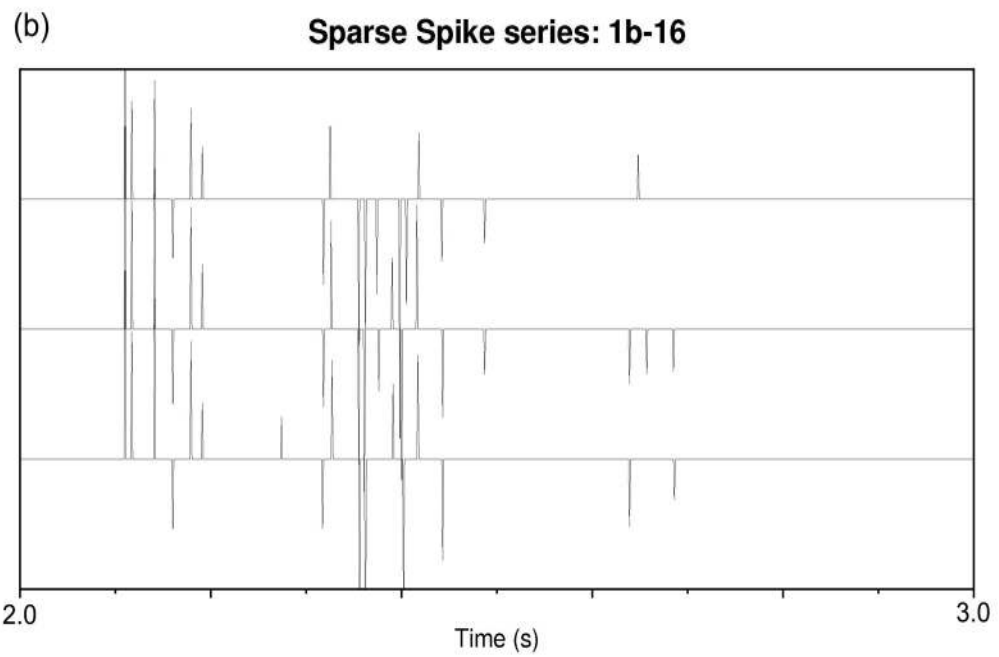
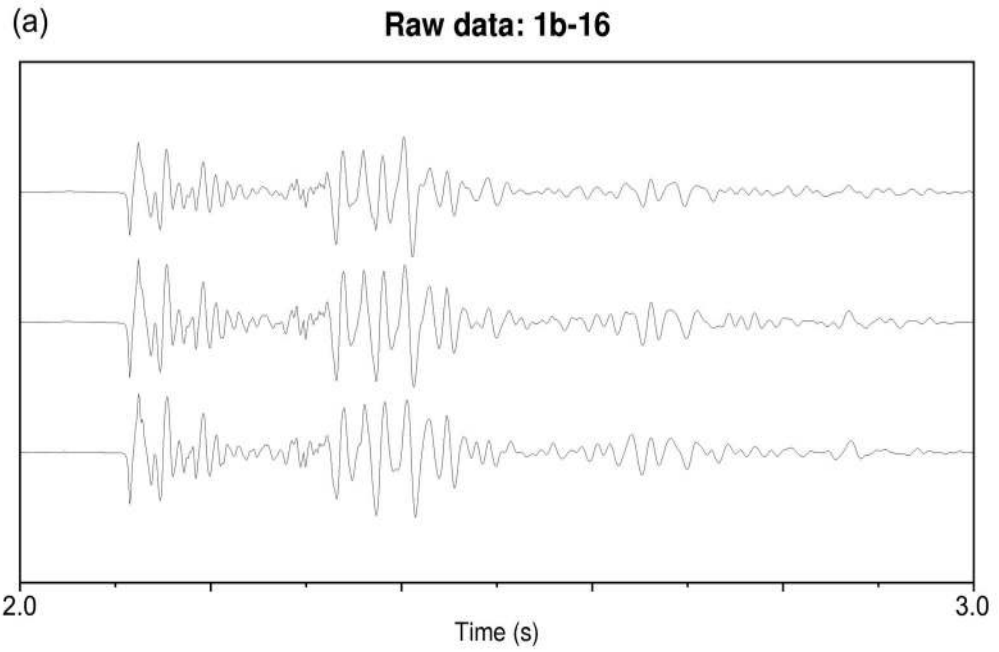


Fig. 2-8. Three traces of CDP 14445 ~ CDP 14447 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

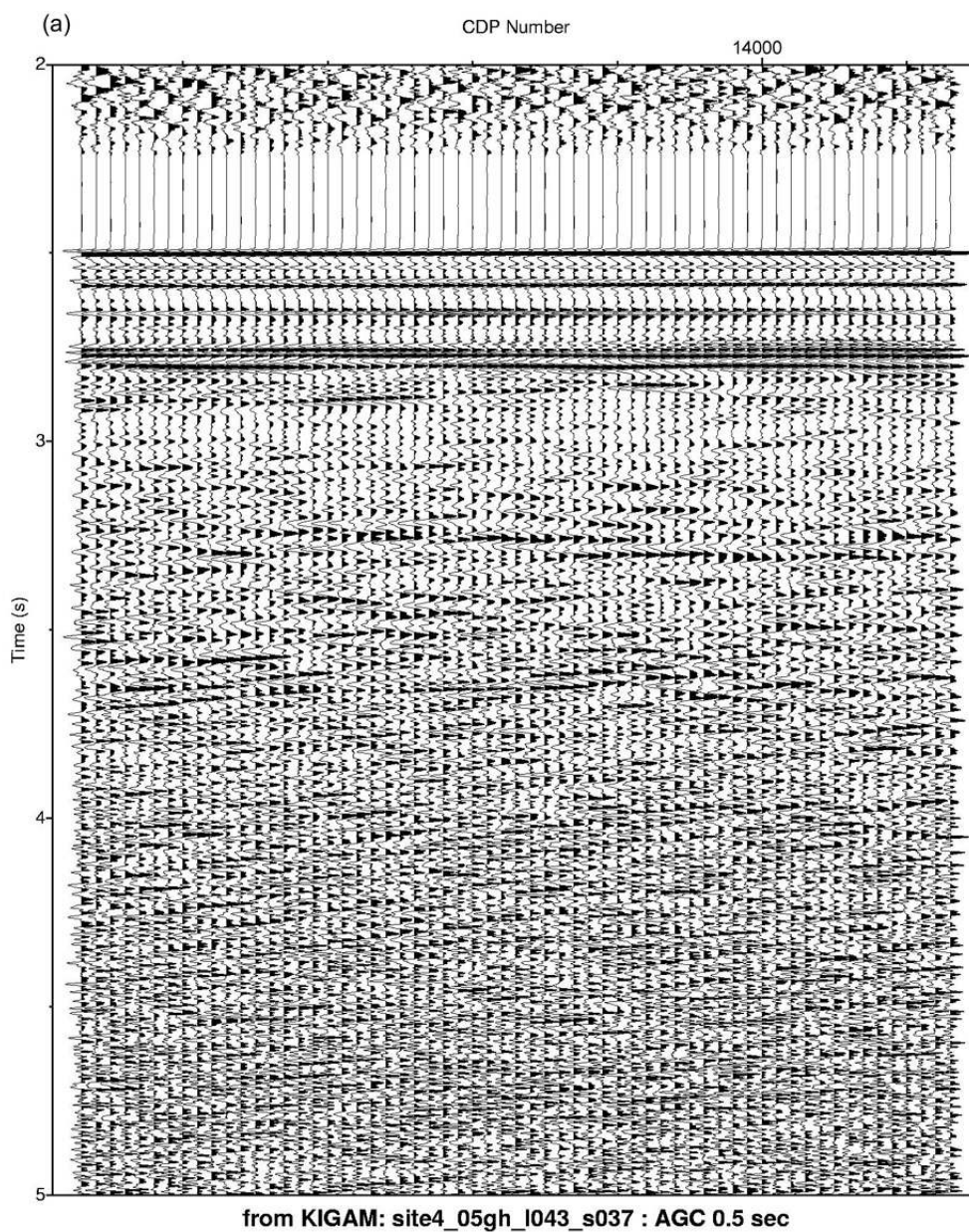


Fig. 2-9. Part of MCS profile for site 4 (CDP 13953 ~ CDP 14013) (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

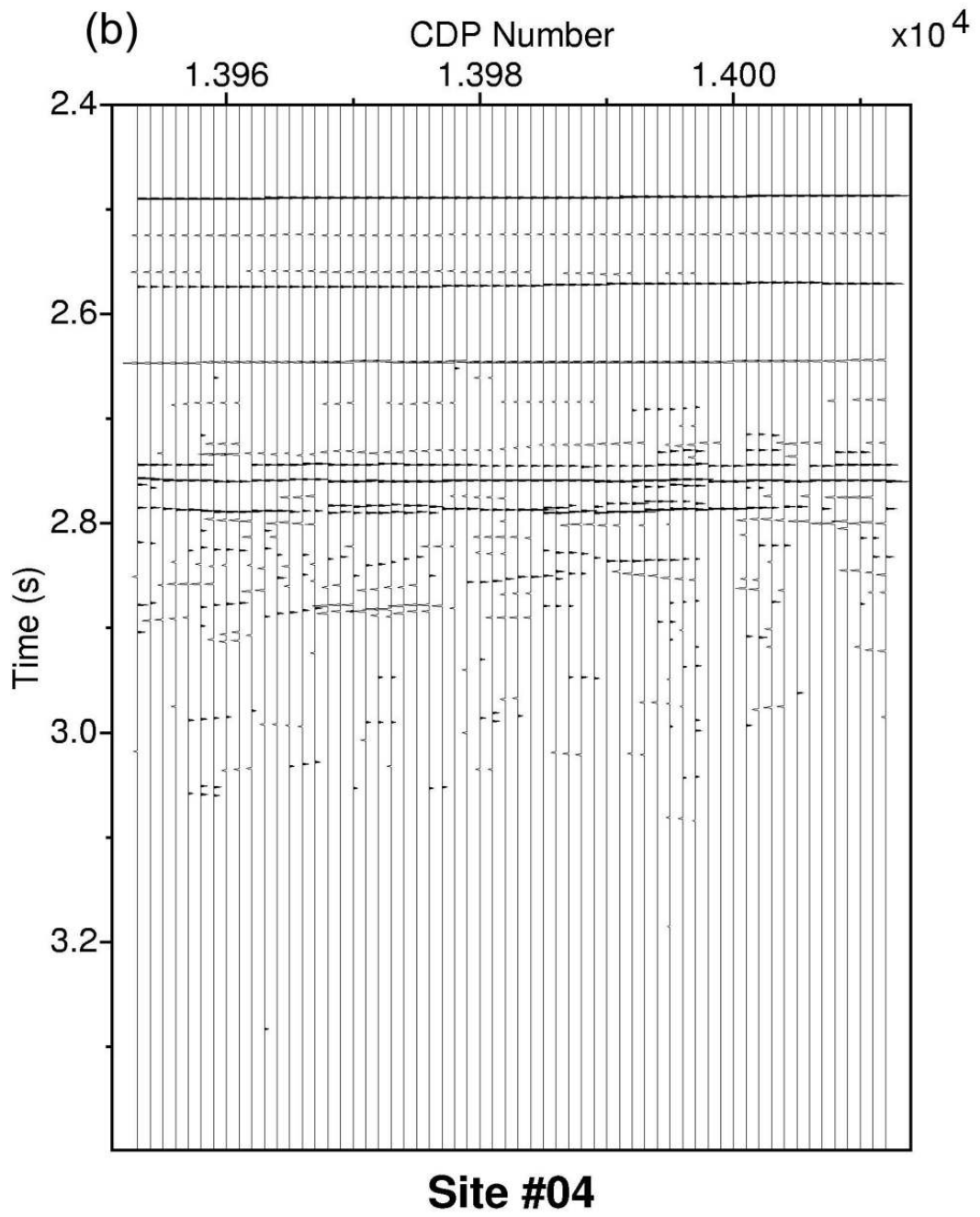


Fig. 2-9. (cont'd)



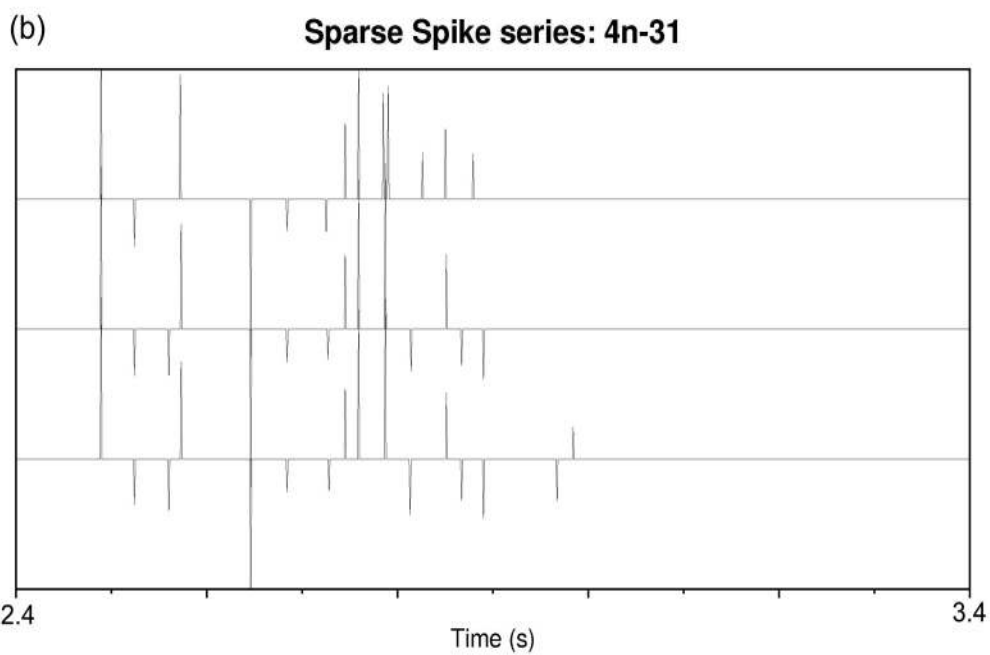
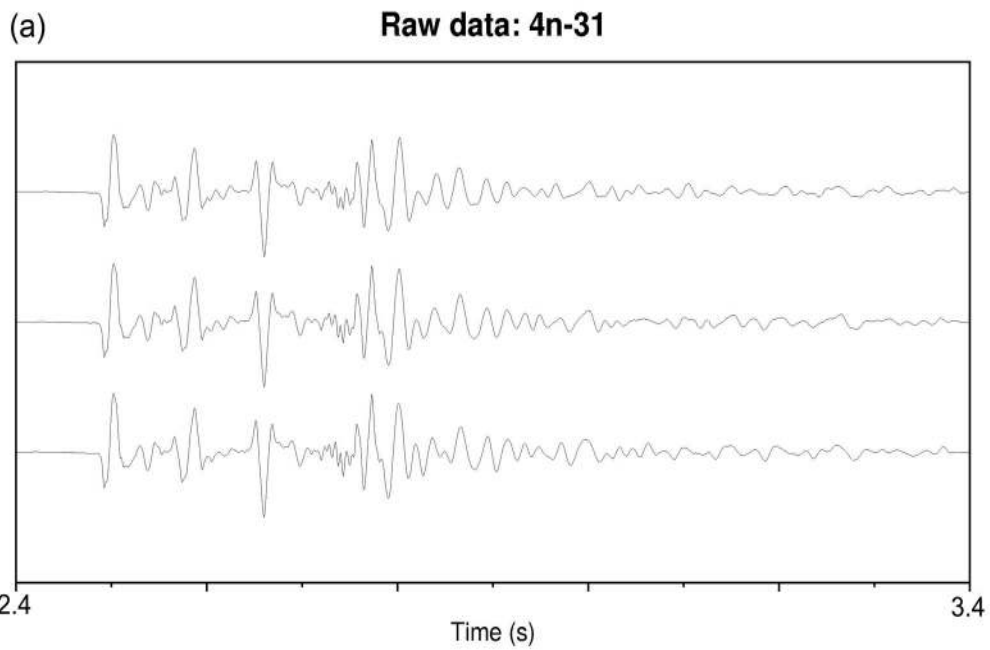


Fig. 2-10. Three traces of CDP 13983 ~ CDP 13985 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

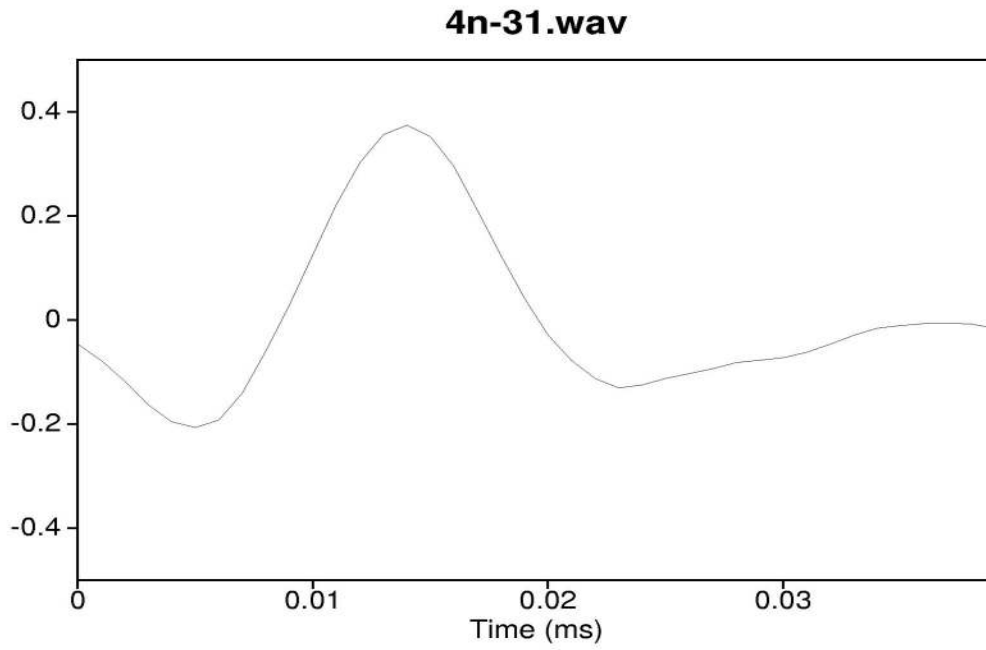


Fig. 2-11. A source wavelet computed from the seismic profile for site 04.

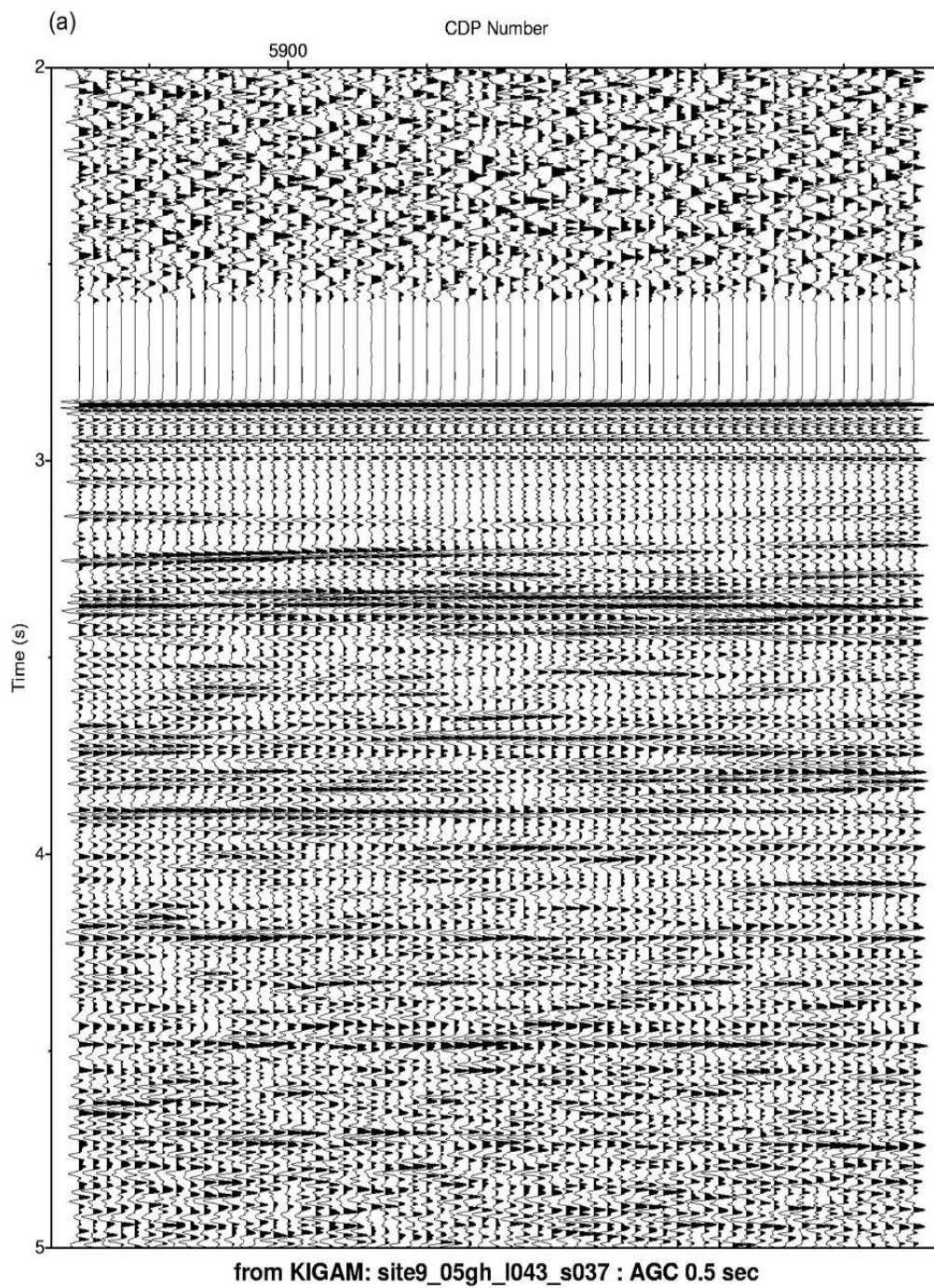


Fig. 2-12. Part of MCS profile for site 9 (CDP 5885 ~ CDP 5945) (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

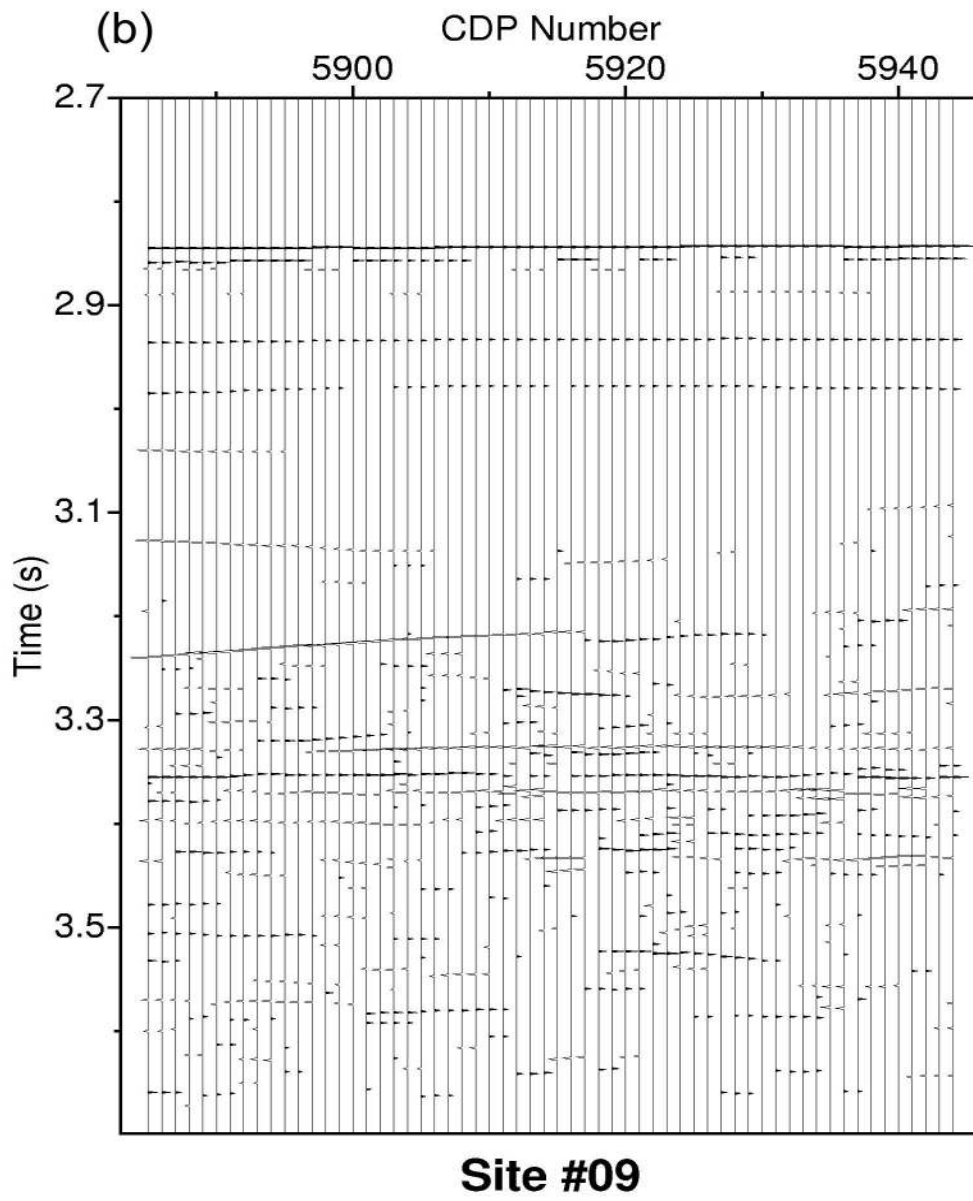


Fig. 2-12. (cont'd)

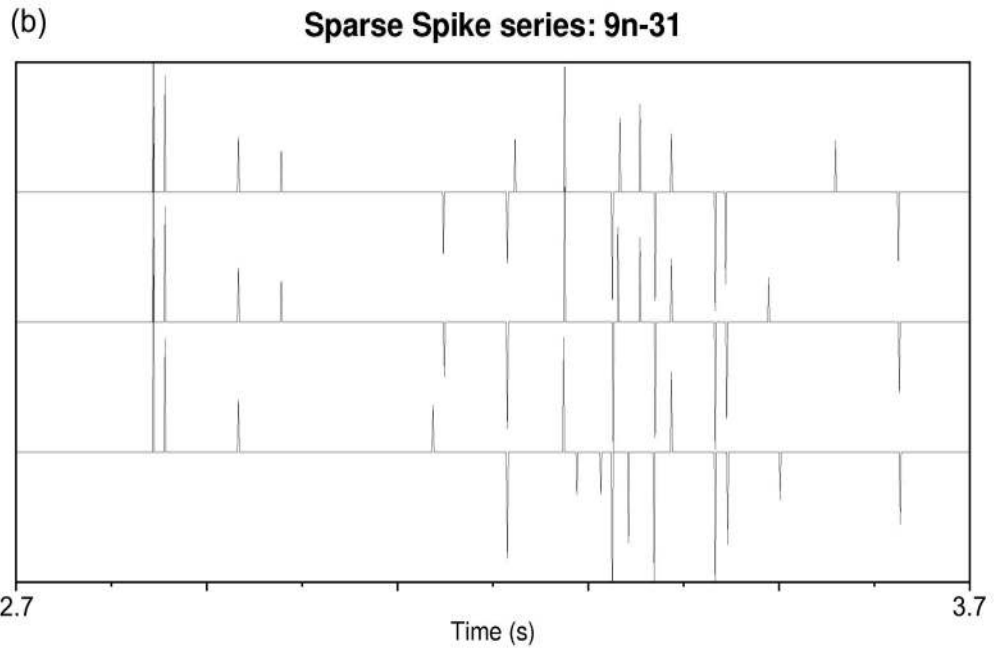
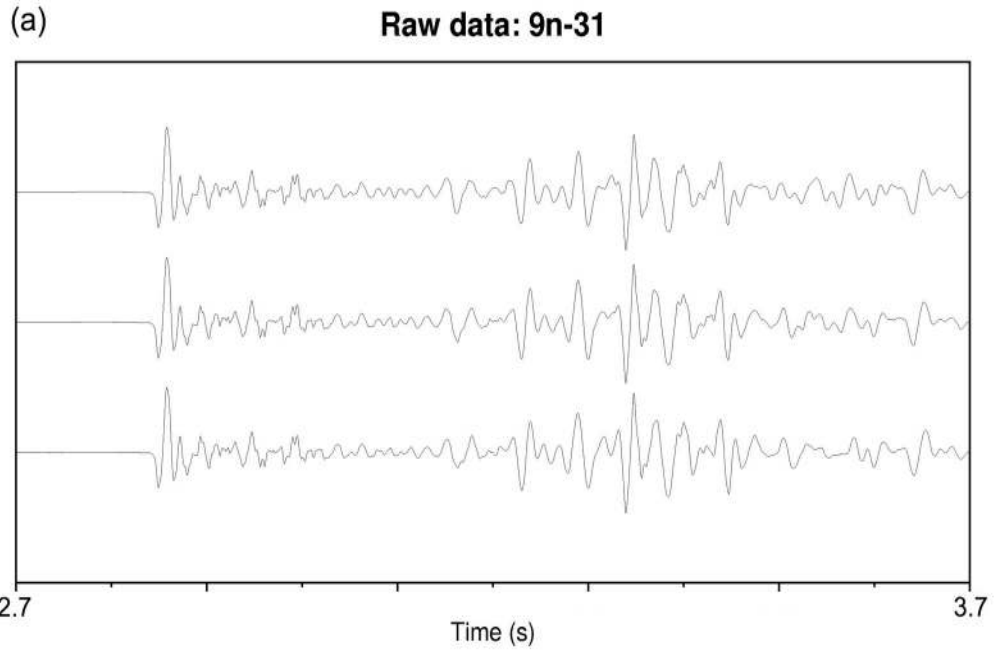


Fig. 2-13. Three traces of CDP 5915 ~ CDP 5917 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

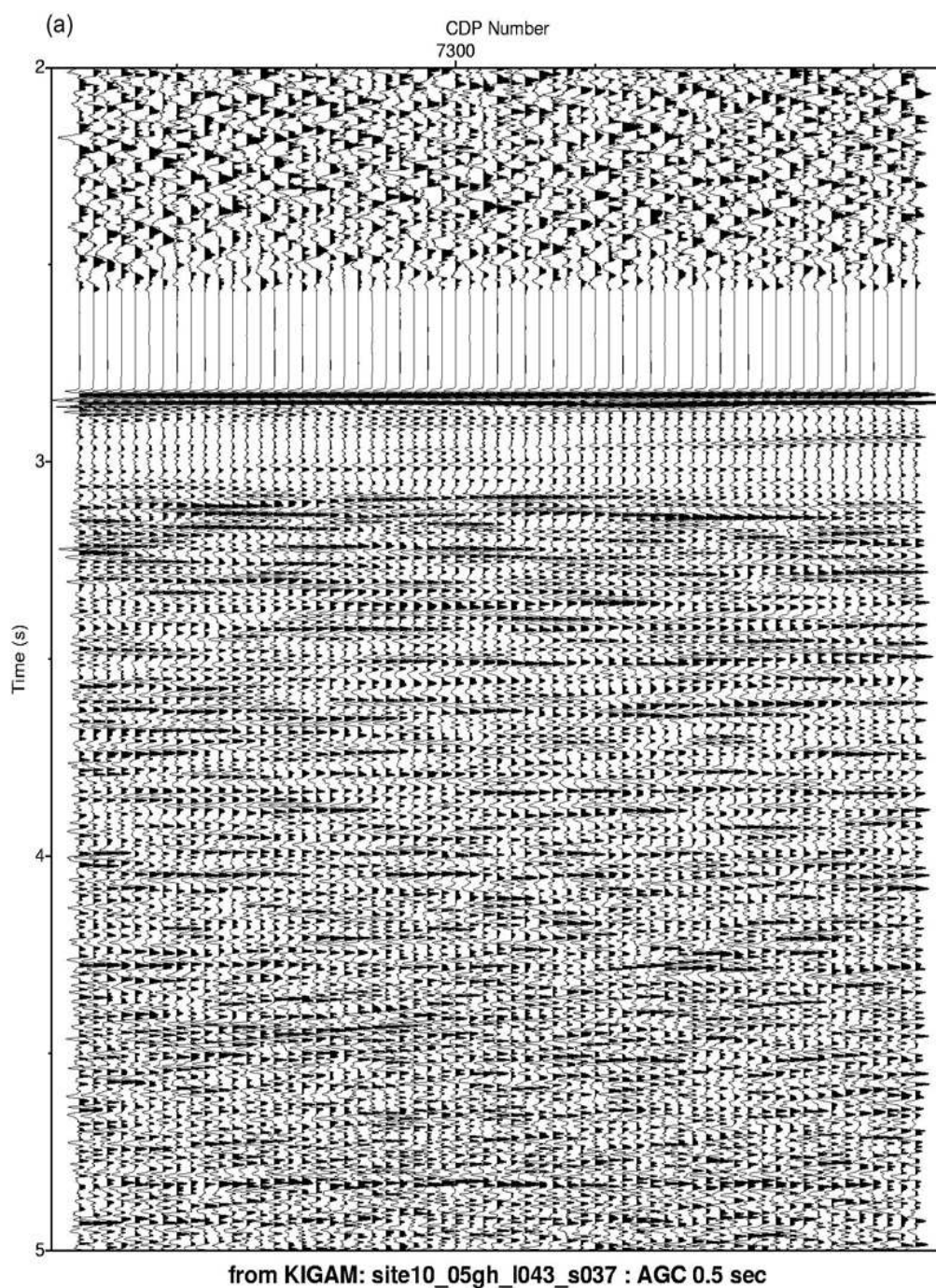


Fig. 2-14. Part of MCS profile for site 10 (CDP 7273 ~ CDP 7333) (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

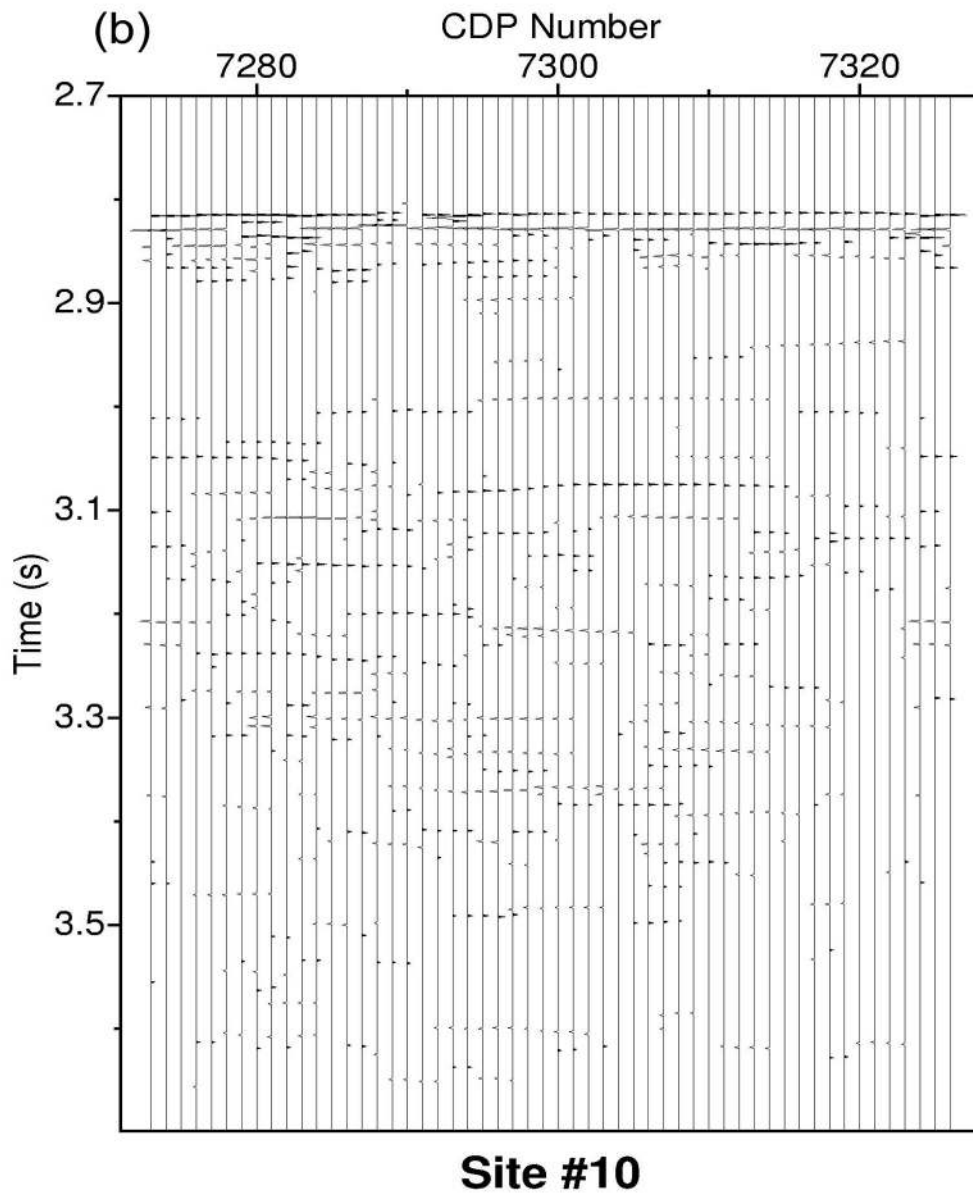


Fig. 2-14. (cont'd)

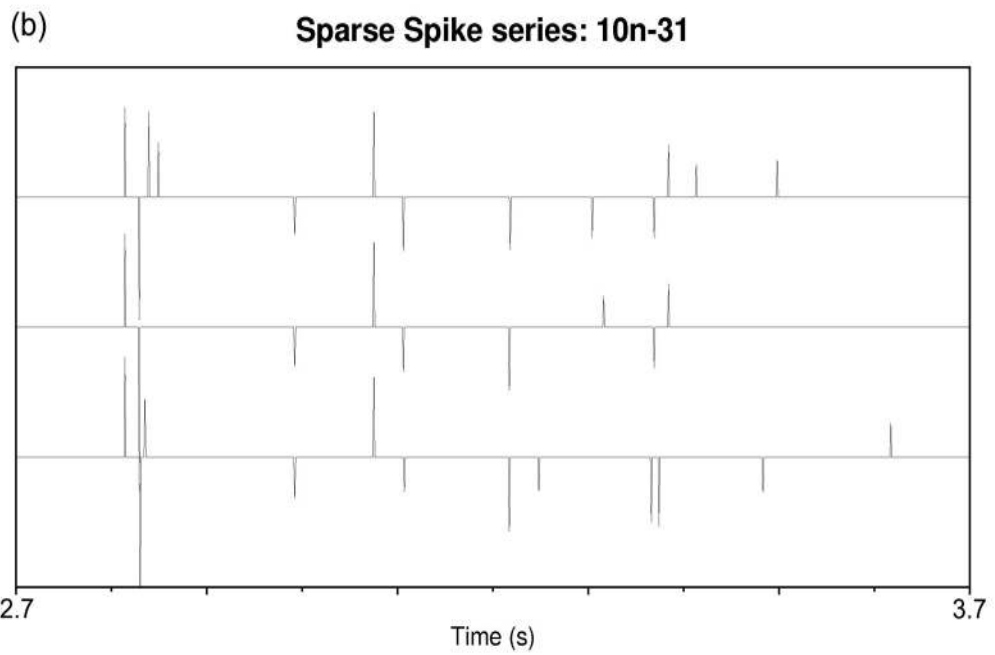
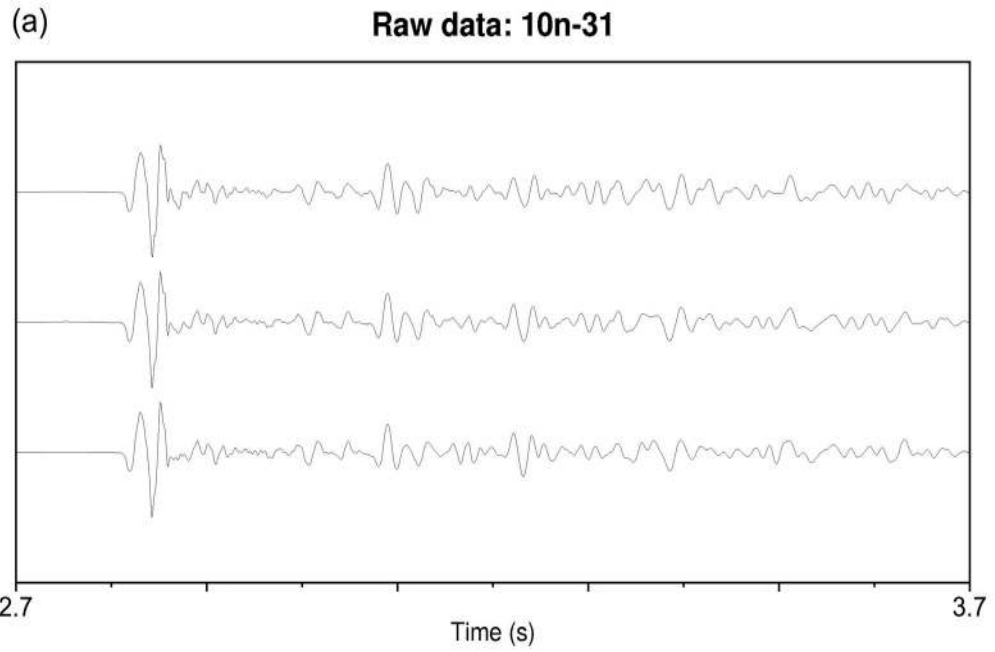


Fig. 2-15. Three traces of CDP 7303 ~ CDP 7305 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.



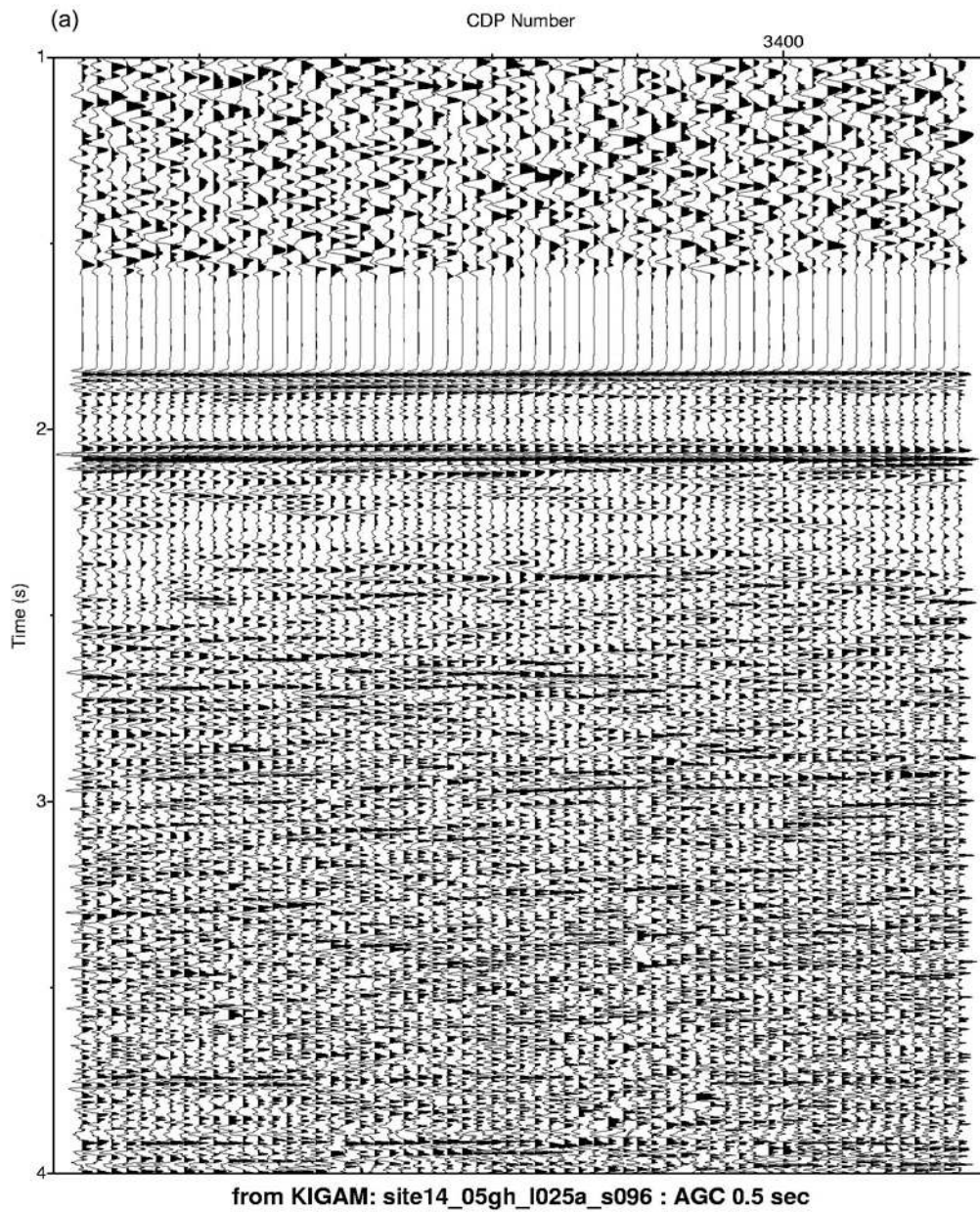


Fig. 2-16. Part of MCS profile for site 14 (CDP 3352 ~ CDP 3412) (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

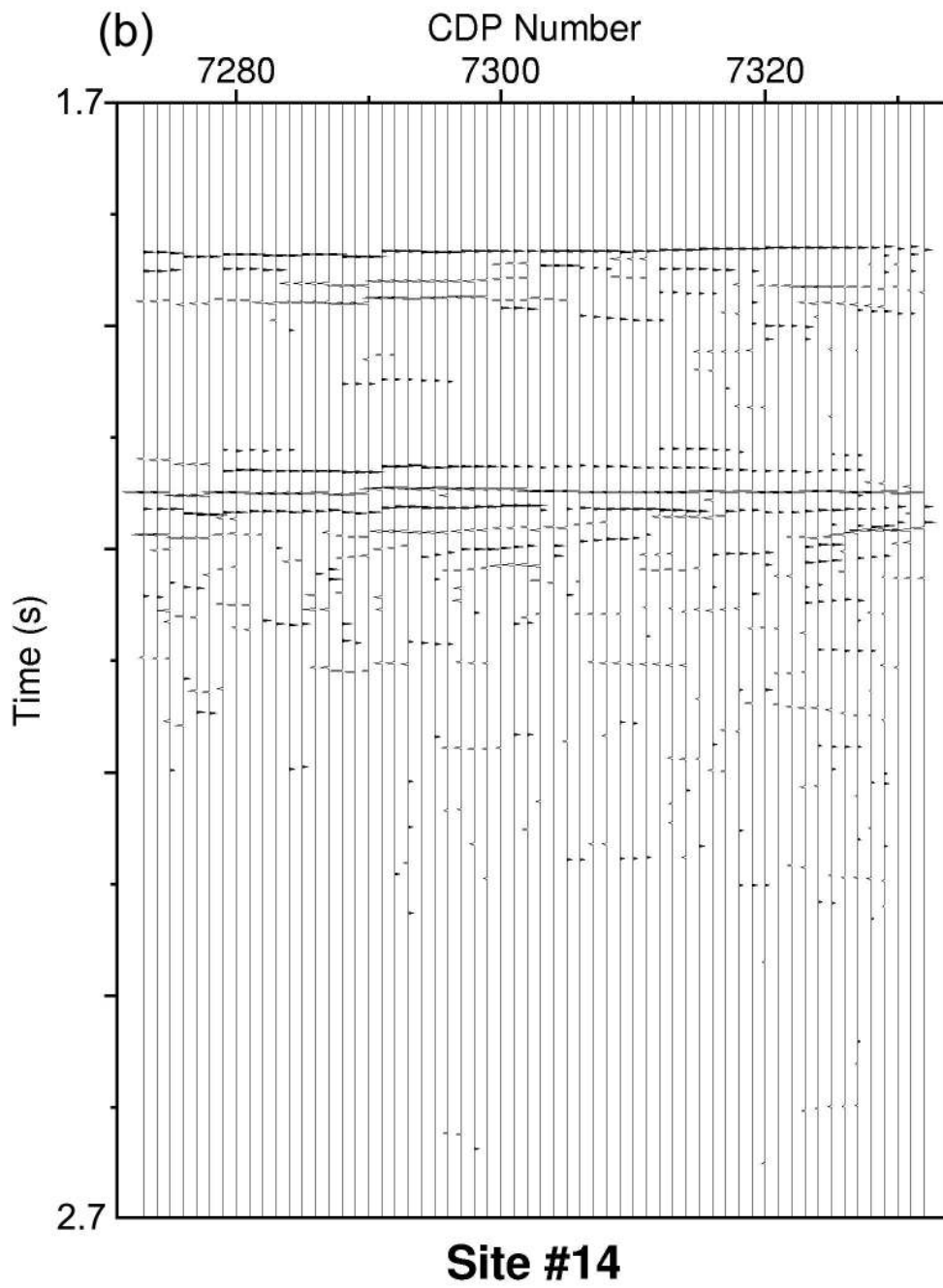


Fig. 2-16. (cont'd)

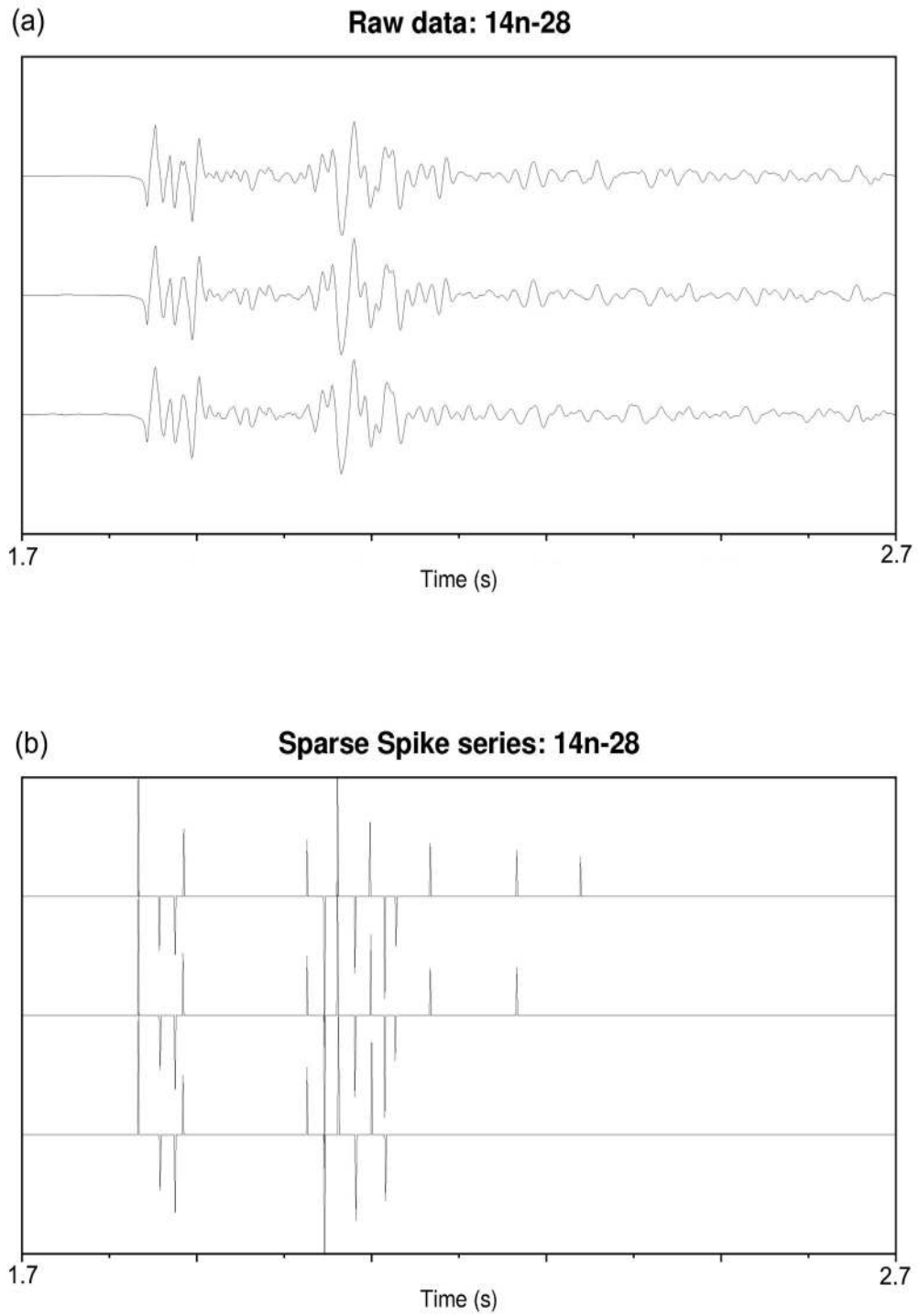


Fig. 2-17. Three traces of CDP 3382 ~ CDP 3384 (a) before and (b) after sparse spike deconvolution.

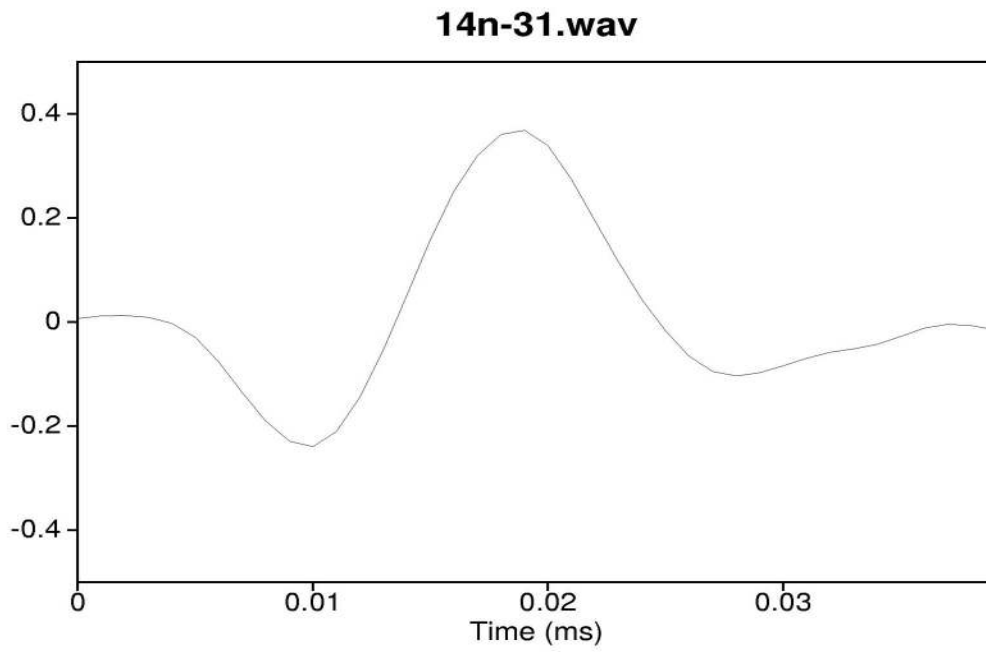


Fig. 2-18. A source wavelet computed from the seismic profile for site 14.

## 제 2 절. 결 론

Stochastic inversion 방법을 이용하여 한국지질자원연구원이 가스수화물 시추 예정지점에서 얻은 5개의 MCS 프로파일에 대해 해저면 아래의 반사계수에 해당하는 sparse한 스파이크의 급수를 추출하여 신호특성을 해석하였다. 탄성과 자료로부터 해저면과 그 아래 지층경계면에 해당하는 반사층의 반사계수의 크기와 극성을 구할 수 있었다. 시추예정지점 프로파일 각각에 대한 특성은 다음과 같다.

### (1) Site 1

BSR로 추정되는 반사신호는 프로파일의 왼쪽부분에서 부분적으로 나타나며 그 반사계수도 약하다. 시추예정지점에서는 가스수화물과 관련된 BSR이 보이지 않는다. BSR은 존재하지 않지만 그 아래에 매우 극성이 음인 매우 큰 값의 반사계수가 보이는데 가스의 존재를 지시한다. 가스수화물의 존재는 유망하지 않은 것으로 판단된다.

### (2) Site 4

해저면으로부터 약 170 ms 아래에 음의 극성을 가지는 반사계수가 매우 잘 발달되어 있다. 하지만 이 깊이는 시간영역에서 예상되는 가스수화물 BSR의 깊이보다 더 얕으므로 정확한 속도자료를 근거로 실제 깊이를 계산하여 해석해야 한다. 이 반사면이 가스수화물 BSR이라면 가스수화물 층에 의한 velocity pull-up에 의해 반사면이 시간영역에서 위로 올라온 것으로 해석할 수 있다. 전체적으로 이 반사면위에는 가스수화물의 존재시 흔히 관찰되는 acoustic blanking도 존재한다.

### (3) Site 9

이 지역의 프로파일에서는 내부에서 반사신호가 매우 감쇠된 가스수화물 렌즈 혹은 chimney로 해석할 수 있는 구조가 나타난다. 이 구조 내부에서는 가장 왼쪽 부분에서 가스수화물의 기저에 해당하는 BSR이 예상깊이에서 부분적으로 보이지만 나머지 부분에서는 보이지 않으며 그 아래에 가스의 존재를 지시하는 반사면도 부분적으로 나타난다.

(4) Site 10

Site 9와 마찬가지로 가스수화물 렌즈 혹은 chimney의 구조를 보여준다. 하지만 site 9에 비해 렌즈모양의 이상체가 해저면에 가까이 올라와 있으며 해저면 반사계수의 반 정도 되는 진폭의 BSR이 부분적으로 나타난다. 그리고 그 아래에 큰 진폭을 갖는, 가스층의 기저로서 해석가능한 반사면이 보인다. 따라서 가스수화물과 관련된 렌즈 혹은 chimney 구조로서는 매우 유망하다고 할 수 있다.

(5) Site 14

이 지역의 프로파일은 가스수화물과 관련된 것으로 해석되는 BSR을 가장 잘 보여 주며 BSR위에 반사신호의 진폭이 상당히 감소된 acoustic blanking이 나타난다. BSR은 해저면에서 약 210 ms 존재하며 그 진폭은 해저면 반사계수보다 크다. BSR 바로 아래에 보이는 양의 극성을 갖는 큰 진폭의 반사계수는 그 위에 가스층의 기저로서 해석할 수 있다.

(6) 파형요소

탄성과 프로파일의 자료로부터 구한 파형요소는 반향신호가 매우 효과적으로 억제되어 분해능이 우수한 것으로 판단된다. 파형요소의 중심 주파수는 50 Hz 이상으로서 가스 하이드레이트 탐사에 적합하다.

### 제 3 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 과형요소를 아는 것이 필수적이다. 이 연구에서 구한 과형요소는 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 4 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.
- Wiggins, R.A., 1978, Minimum entropy deconvolution: *Geoexpl.*, v.16, p.21-35.