

## 모델 제약조건이 적용된 MWNI (Minimum Weighted Norm Interpolation)를 이용한 트레이스 내삽

최지현<sup>1,2</sup> · 송영석<sup>1</sup> · 최지훈<sup>1,3</sup> · 변중무<sup>1\*</sup> · 설순지<sup>1</sup> · 김기영<sup>4</sup> · 이정모<sup>5</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 자원환경공학과

<sup>2</sup>SK E&S

<sup>3</sup>(주)희송지오테크

<sup>4</sup>강원대학교 지질 · 지구물리학과

<sup>5</sup>경북대학교 지구시스템과학부 지질학전공

## Trace Interpolation using Model-constrained Minimum Weighted Norm Interpolation

Jihyun Choi<sup>1,2</sup>, Youngseok Song<sup>1</sup>, Jihun Choi<sup>1,3</sup>, Joongmoo Byun<sup>1\*</sup>,  
Soon Jee Seol<sup>1</sup>, Kiyong Kim<sup>4</sup>, and Jeongmo Lee<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

<sup>2</sup>SK E&S

<sup>3</sup>Heesong Geotek Corporation Ltd.

<sup>4</sup>Department of Geophysics, Kangwon National University

<sup>5</sup>Department of Geology, Kyungpook National University

**요약:** MWNI (Minimum Weighted Norm Interpolation)를 이용한 내삽 방법은 고차원으로 확장이 용이하고 상대적으로 계산 속도가 빠르다는 장점을 가지고 있으나 알리아스 효과가 존재하는 자료의 내삽에 취약하다. 이런 문제의 개선을 위해 제안된 방법이 모델제약(model-constrained) MWNI이다. 이 논문에서는 MWNI를 이용한 방법과 모델제약 MWNI 방법의 두가지 모듈을 개발한 후 알리아스 효과가 존재하는 자료의 내삽 결과를 비교하였다. 시공간 영역( $t-x$  domain)과 주파수-과수 영역( $f-k$  domain)의 결과 그림을 통해서 모델제약 MWNI를 적용했을 때의 결과가 더 효과적임을 확인할 수 있었다. 동해 울릉분지의 가스 하이드레이트 부존 지역의 현장 자료에 내삽을 적용한 결과, 가스침니 구간 전후로 진폭이 급격하게 변하는 자료에서도 내삽이 가능함을 확인할 수 있었다. 또한 매우 불규칙하고 넓은 구간에서 누락된 인공지진과 자료의 정규화를 통해 신호의 연결성 향상이 가능함을 보일 수 있었다. 결과적으로 이 논문에서 개발된 모듈은 현장의 다양한 여건에 의해 불규칙하거나 넓은 간격으로 얻어진 탄성과 자료의 정규화나 내삽에 효율적으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

**주요어:** MWNI, 모델제약 MWNI, 내삽, 정규화, 알리아스 효과

**Abstract:** For efficient data processing, trace interpolation and regularization techniques should be antecedently applied to the seismic data which were irregularly sampled with missing traces. Among many interpolation techniques, MWNI (Minimum Weighted Norm Interpolation) technique is one of the most versatile techniques and widely used to regularize seismic data because of easy extension to the high-order module and low computational cost. However, since it is difficult to interpolate spatially aliased data using this technique, model-constrained MWNI was suggested to compensate for this problem. In this paper, conventional MWNI and model-constrained MWNI modules have been developed in order to analyze their performance using synthetic data and validate the applicability to the field data. The result by using model-

constrained MWNI was better in spatially aliased data. In order to verify the applicability to the field data, interpolation and regularization were performed for two field data sets, respectively. Firstly, the seismic data acquired in Ulleung Basin gas hydrate field was interpolated. Even though the data has very chaotic feature and complex structure due to the chimney, the developed module showed fairly good interpolation result. Secondly, very irregularly sampled and widely missing seismic data was regularized and the connectivity of events was quite improved. According

Received: 9 March 2017; Revised: 17 April 2017; Accepted: 17 April 2017

\*Corresponding author

E-mail: jbyun@hanyang.ac.kr

Address: Dept. of Earth Resources & Environmental Eng., Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, Korea

©2017, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

to these experiments, we can confirm that the developed module can successfully interpolate and regularize the irregularly sampled field data.

**Keywords:** MWNI, model-constrained MWNI, interpolation, regularization, aliasing

## 서론

현장에서 탐사자료를 취득 할 때 기계적인 결함 또는 지형적인 장애물로 인하여 자료에 크고 작은 손실이 생길 수 있다. 또한 최근에는 무선 탄성과 탐사(cable-free seismic exploration)가 이루어짐에 따라 공간적으로 불규칙한 자료가 얻어지는 경우가 많다. 일반적으로 자료처리에 사용되는 방법들 중 푸리에 변환(Fourier transform)을 이용하는 자료처리 방법들은 그 입력 값이 규칙적인 간격을 가지는 자료일 때 효과적인 사용이 가능하다. 따라서 취득된 자료의 효과적인 자료처리를 위해서는 트레이스(trace)의 내삽(interpolation)과 정규화(regularization)가 선행되어야 한다.

불규칙한 간격을 가지는 자료의 내삽에 관한 연구는 MWNI (Minimum Weighted Norm Interpolation) 방법(Liu and Sacchi, 2004; Naghizadeh and Sacchi, 2010; Chiu, 2014), POCS (Projection Onto Convex Sets) 방법(Abma and Kabir, 2006; Kim *et al.*, 2015), ALFT (Anti-Leakage Fourier Transform) 방법(Schonewille *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2010) 등 활발한 연구가 수행되어왔다. 세 가지 방법 모두 푸리에 변환 기반의 내삽 방법으로 자료취득의 불규칙한 간격으로 인해 주파수-파수 영역에서 발생하는 작은 진폭의 에너지 누출(leakage)을 최소화 하는 방식으로 내삽을 한다. POCS는 에너지 누출에 문턱 값(threshold)을 반복해서 적용하여 큰 에너지 값을 가지는 성분만 역 푸리에 변환을 하는 방식으로 자료가 규칙적으로 손상되었을 경우 적용이 어렵다(Abma and Kabir, 2006). ALFT는 큰 에너지 값을 가지는 성분만 반복적으로 뽑아 역푸리에 변환을 하는 방식으로 고차원으로 확장할 경우 컴퓨터 계산 시간 및 비용이 굉장히 증가한다(Xu *et al.*, 2010).

반면에 MWNI는 역산에서 불충분한 정보를 가진 문제(underdetermined problem)에 제약조건(constraints)을 주어 해를 구하는 방식으로 고차원으로 확장이 쉽고 상대적으로 계산 속도가 빠르다. 최근 3차원 탄성과 탐사나 방위각(azimuth)에 따른 탐사 등 탐사자료가 고차원으로 획득되는 추세 때문에 이러한 장점을 바탕으로 현장에서 얻은 자료의 내삽에 MWNI가 널리 사용되고 있다(Liu and Sacchi, 2004; Trad, 2009). 하지만 알리아스 효과(aliasing)가 원 자료의 주파수-파수( $f-k$ ) 스펙트럼을 왜곡시키는 자료의 경우에는 MWNI로 완벽한 내삽 결과를 기대하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 Chiu (2014)는 내삽 시 사용되는 가중치 행렬의 초기값을 새로운 제한조건으로 계산하여 알리아스 효과가 있는 자료에서도 어느 정도 내삽이 가능한 모델제약(model-constrained) MWNI를 제안하

였다.

이 논문에서는 MWNI와 모델제약 MWNI 모듈(module)을 각각 개발하고 내삽 성능을 비교 검증하였다. 특히 알리아스 효과가 있는 자료에서 MWNI와 모델제약 MWNI 두 방법의 결과를 비교 분석하였다. 또한 개발된 모듈의 현장 적용성을 확인해 보기 위해 침니구조로 인해 트레이스 간 진폭변화가 큰 가스 하이드레이트 현장자료의 내삽과 매우 불규칙한 간격을 가진 인공지진과 현장자료의 정규화에 개발된 모듈을 적용하였다.

## MWNI (Minimum Weighted Norm Interpolation)

### 역산을 이용한 내삽

내삽 기법은 현장에서 충분히 얻어지지 못한 자료를 규칙적인 간격의 완전한 자료로 만드는 데 쓰이는 기법이다. 여기서 내삽을 통해 얻어야 할 자료를 미지수로 하는 역산의 개념을 적용할 수 있다. 관측된  $N$ 개의 자료를  $\mathbf{d}_{obs}$ 라고 하고 내삽을 통해 최종적으로 얻고자 하는  $M$ 개의 자료를  $\mathbf{m}$ , 이 둘을 연결해주는 샘플링 행렬을  $\mathbf{T}$ 라고 하면 다음과 같이 표현할 수 있다(Liu and Sacchi, 2004).

$$\mathbf{d}_{obs} = \mathbf{T}\mathbf{m} \tag{1}$$

이때 샘플링 행렬  $\mathbf{T}$ 는 관측된 자료가 있을 경우에는  $T_{ij} = 1$  값을 가지고 자료가 없을 경우에는  $T_{ij} = 0$ 을 가지며, 행렬로 예시를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_3 \\ d_5 \\ d_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \end{pmatrix} \tag{2}$$

위와 같은 문제는, 찾아야 할 미지수  $\mathbf{m}$ 의 개수보다  $\mathbf{d}_{obs}$ 가 적은 정보를 가지므로( $M > N$ ), 유일한 해를 결정하지 못하는 '불충분한 정보를 가진 문제'이다. 따라서 유일한 해를 얻기 위해서는 사전 정보(a priori information)와 같은 제약조건이 필요하다.

### MWNI을 이용한 내삽

MWNI는 가중치 최소길이해(weighted minimum length

solution)를 구하는 방법과 마찬가지로 역산으로 얻을 수 있는 여러 가지 해 중에서 주파수-과수 영역에서의 스펙트럼에 가중치를 준 값을 최소화하는 해를 구하는 방법이다. 이를 통해서 불충분한 정보를 가지는 문제에 대한 해를 구할 수 있다. 이때, MWNI의 목적함수는 다음과 같다(Liu and Sacchi, 2004).

$$\phi = \lambda^T (\mathbf{T}\mathbf{m} - \mathbf{d}_{\text{obs}}) + |\mathbf{x}_w^2| \quad (3)$$

$|\mathbf{x}_w^2|$ 은 시간영역에서 내삽이 되어야 할 부분에 영 트레이스(null trace)를 끼워 넣은 관측자료 모음을 나타내는  $\mathbf{x}$ 의 가중치 놈(norm)을 의미하며  $\lambda$ 는 자료오차와 가중치 놈 사이의 트레이드 오프(trade-off)를 나타내는 라그랑지승수 벡터를 의미한다.  $|\mathbf{x}_w^2|$ 는 다음의 식과 같이 표현된다.

$$|\mathbf{x}_w^2| = \sum_{k \in \kappa} \frac{X_k^* X_k}{P_k^2} \quad (4)$$

이때  $X$ 는  $\mathbf{x}$ 의 푸리에변환 결과이고,  $P_k^2$ 은 주파수-과수 스펙트럼에서의 가중치로 내삽 결과 얻어질 신호의 스펙트럼과 비슷한 형상을 만들어 주는 역할을 한다. 식 (4)에서  $k \in \kappa$ 가 의미하는 바는  $P_k^2$ 의 값이 존재하는 곳에서만 가중치를 준다는 의미이며 신호의 대역 폭을 제한하는 역할을 한다.

이 제약조건을 통해 식 (3)를 만족하는 많은 해 중에서 스펙트럼의 분포 영역을 최소화하는 sparseness를 부과하여  $|\mathbf{x}_w^2|$ 를 최소로 하는 해를 구한다. 취득된 자료에 잡음이 존재할 경우에는 최소제곱법을 적용함으로써 잡음의 영향을 줄일 수 있다.

$$\phi = \|\mathbf{T}\mathbf{m} - \mathbf{d}_{\text{obs}}\|^2 + \rho^2 |\mathbf{x}_w^2| \quad (5)$$

이때  $\rho^2$ 은 자료오차와 가중치 놈 사이의 트레이드 오프 매개변수이다. 식 (5)의 목적함수를 최소화하는 최소제곱해를 구하기 위해 이를 다음과 같은 식을 통해 최적해를 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{T} \\ \rho \mathbf{W} \end{pmatrix} \mathbf{m} \approx \begin{pmatrix} \mathbf{d}_{\text{obs}} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서  $\mathbf{W} = P_k^{-1} \mathbf{F}$ 이며  $\mathbf{F}$ 는 이산 푸리에 변환행렬을 의미한다. 식 (6)에서  $\mathbf{z} = \mathbf{W}\mathbf{m}$ 으로 치환하여 다시 정리하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{T}\mathbf{W}^\dagger \\ \rho \end{pmatrix} \mathbf{z} \approx \begin{pmatrix} \mathbf{d}_{\text{obs}} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$\mathbf{W}^\dagger$ 는  $\mathbf{W}$ 의 겹치레 역행렬(pseudo inverse matrix)를 나타낸다. 이와 같은 치환에 의해  $\rho$ 값은 0으로 정의될 수 있고 켈레 기울기(conjugate gradient)법이나 특이값 분해(Singular value decomposition)법과 같은 방법으로 문제를 해결할 수 있다. 즉, 위의 식은 다음과 같은 식으로 단순화 된다.

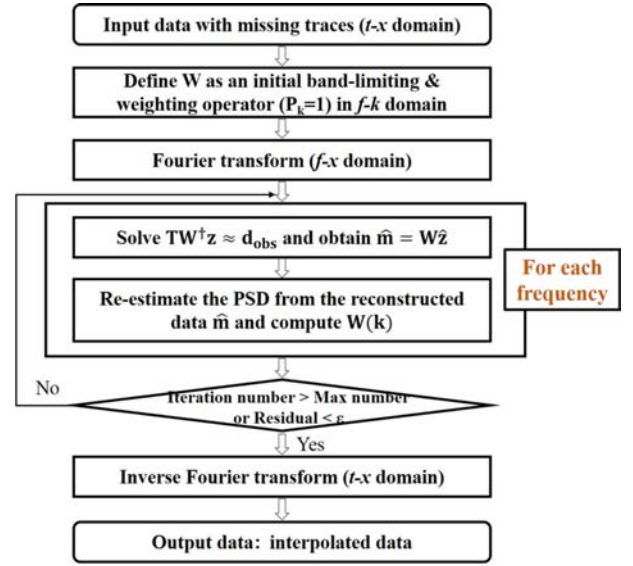


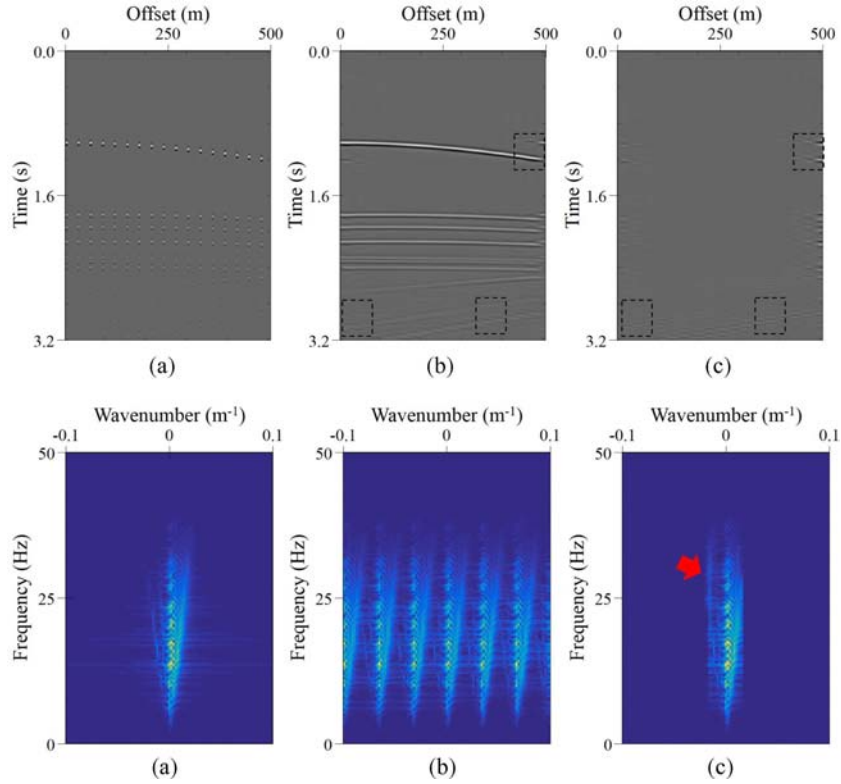
Fig. 1. A flowchart of conventional MWNI. PSD indicates the power spectrum density.

$$\mathbf{T}\mathbf{W}^\dagger \mathbf{z} \approx \mathbf{d}_{\text{obs}} \quad (8)$$

결과적으로 MWNI는 식 (8)의 해를 구하여 불규칙한 구간에서 누락된 자료를 포함하는 관측된 자료  $\mathbf{d}_{\text{obs}}$ 를 통해 규칙적인 간격의 내삽 결과  $\mathbf{m}$ 을 얻을 수 있다.

이 논문에서 개발된 MWNI 모듈의 순서도(flowchart)는 Fig. 1과 같다. 대역을 제한하는 가중치 행렬(band-limited weighting matrix)의 초기값을 1로 설정하고, 자료가 있는 곳에만 값을 준다. 손상된 자료를 푸리에 변환하여 주파수-거리 영역으로 넘긴다. 각 주파수마다 새롭게  $\mathbf{m}$ 을 구하고, 이 때 가중치 행렬을 다시 계산하기 위해 이전 주파수에서 얻은  $\mathbf{m}$ 을 통해 파워 스펙트럼 밀도(power spectrum density)를 구한다. 이를 반복해서 해를 구하고 반복 횟수가 최대 반복 횟수에 도달했을 때 또는  $\|\mathbf{T}\mathbf{m} - \mathbf{d}_{\text{obs}}\| < \epsilon$ 를 만족할 때 알고리즘(algorithm)을 멈춘다.

일반적인 MWNI는 알리아스 효과가 있는 자료의 내삽이 어렵다(Chiu, 2014). 자료가 규칙적으로 누락되어 있어 주파수-과수 영역에서 스펙트럼이 반복되더라도 알리아스 효과가 없다면 대역 폭을 제한하는 가중치를 줌으로써 복구가 가능하다. 하지만 자료에 알리아스 효과가 있을 경우, 주파수-과수 영역에서 주 에너지와 비슷한 크기를 갖기 때문에, 대역 폭을 제한하더라도 그것을 극복할 수 없다. Fig. 2(a)는 매 6번째의 트레이스만을 남겨두고 자료를 손상시킨 것이다. 이를 MWNI로 복구한 것이 Fig. 2(b)이고 원 자료와의 차이가 Fig. 2(c)이다. 알리아스 효과로 인해 점선으로 표시된 박스에서 자료가 완전하게 복구되지 못했다. 이 결과를 주파수-과수 영역에서 확인해보면, Figure 2(e)와 같이 알리아스 효과가 존재하여 MWNI로 자료를 복구하더라도 Fig. 2(f)에서 빨간 화살표로 표시한



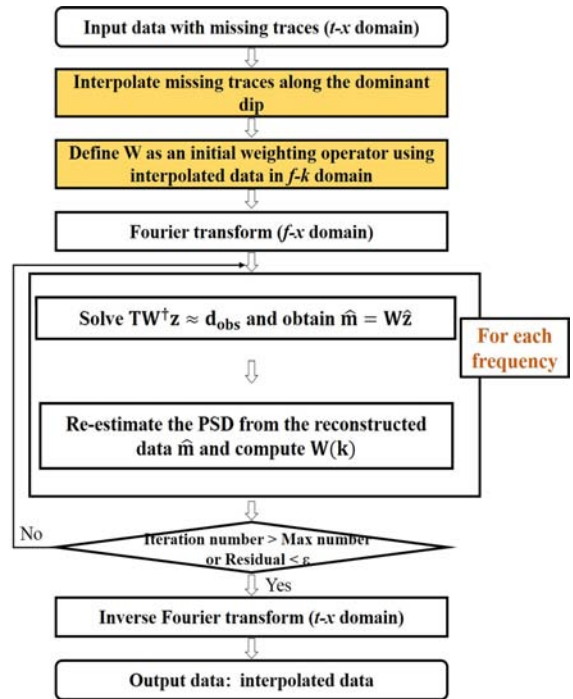
**Fig. 2.** Spatially aliased synthetic data for evaluating the performance of the developed conventional MWNI module. (a) Decimated data with the decimation factor 6. (b) Conventional MWNI result. (c) The difference between original data and conventional MWNI result. In the dashed boxes, the result shows aliasing artifacts. (d)  $f$ - $k$  spectrum of original data. (e)  $f$ - $k$  spectrum of decimated data with the decimation factor 6. (f)  $f$ - $k$  spectrum of conventional MWNI result. The red arrow indicates the aliasing effect which cannot be recovered.

바와 같이 알리아스 효과가 영향이 남게 된다.

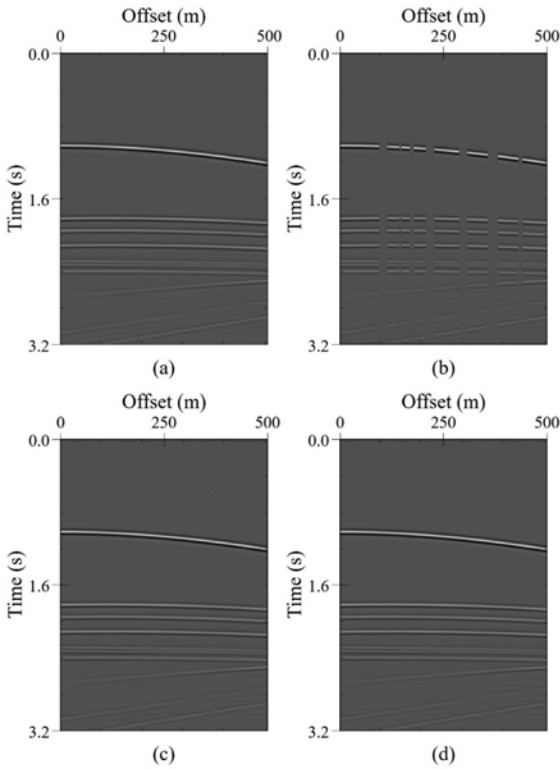
### 모델제약 MWNI

MWNI는 불규칙적인 샘플링 간격으로 인해 생기는 주파수-과수 영역의 낮은 에너지 누출을 sparseness를 줘서 주성분만 따라가게 내삽을 하는 방식이다(Liu and Sacchi, 2004). 따라서 자료에 알리아스 효과가 있을 경우에는 신호의 주파수-과수 스펙트럼에서 에너지 누출이 아닌 주성분과 같은 에너지를 가지기 때문에 좋은 내삽 결과를 기대할 수 없다(Naghizadeh and Sacchi, 2010; Chiu, 2014). 내삽 시 이러한 알리아스 효과로 인한 문제점을 극복하기 위해 Chiu (2014)는 모델제약 MWNI를 제안하였다.

Fig. 3은 모델제약 MWNI의 순서도이다. 기존의 MWNI에서는 내삽 결과로 얻고자 하는 자료의 스펙트럼을 모르기 때문에 가중치 행렬의 초기값을 1로 설정하고  $\Delta f$ 의 간격이 크지 않을 때 스펙트럼이 비슷하다는 가정을 통해서 저주파수부터 시작해 고주파수까지 내삽을 진행하였다. 하지만 이 방법은 앞 장에서 보았듯이 알리아스 효과가 존재하는 자료를 다룰 수 없었다. 순서도에서 노란색으로 표시한 부분을 보면, 기존의 방법과 달리 MWNI를 수행하기 전 가중치 행렬의 값을 다



**Fig. 3.** A flowchart of model-constrained MWNI. The yellow colored boxes indicate the added steps for constraining the inverted model.

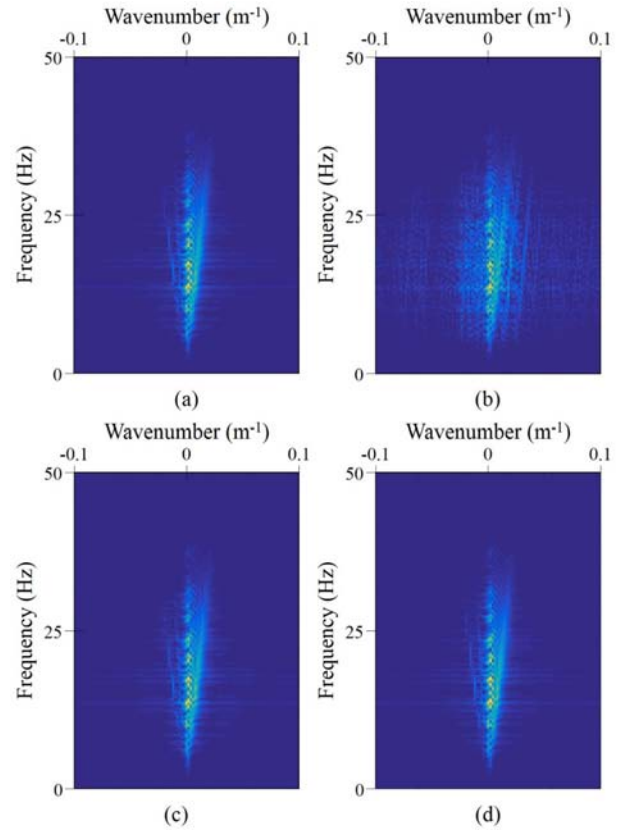


**Fig. 4.** The comparison of the reconstructed results of the synthetic data: (a) Original data. (b) Randomly decimated data. (c) Reconstructed data by using conventional MWNI. (d) Reconstructed data by using model-constrained MWNI. In the case of randomly decimated data, the results of conventional MWNI and model-constrained MWNI are almost the same.

른 방법으로 설정한다. 누락이 있는 자료의 시공간 영역에서 주요 이벤트(event)를 따라 시간 축과 거리 축으로 작은 창(window)을 움직이며 구역별로(piece-wise) 선형 내삽을 한다. 이렇게 얻은 누락이 없는 규칙적인 자료를 가지고 MWNI에 사용할 초기 가중치 행렬의 값을 결정한다. 이 값은 첫 번째 반복(iteration)에만 사용되고, 가중치 행렬은 반복 횟수가 증가할 때 새롭게 얻은 내삽 결과를 가지고 다시 계산된다.

구역별로 선형 내삽된 자료로부터 얻어진 가중치 행렬 값은 초기값으로만 사용되기 때문에 높은 정확도가 요구되지 않는다. 그리고 초기에 주요 이벤트를 선택할 수 있으므로 알리아스 효과로 인한 주파수 영역에서의 두루마리 현상(wrap around)을 없앨 수 있다.

개발된 모델제약 MWNI 모듈 검증을 위해 기존의 MWNI 결과와 비교를 해보았다. 불규칙한 간격으로 누락된 자료의 경우, 원래 자료와 비교했을 때(Fig. 4a), 기존의 MWNI 내삽 결과(Fig. 4c)와 모델제약 MWNI 내삽 결과(Fig. 4d)가 거의 일치하며 두 경우에서 모두 자료의 누락이 완벽하게 복구되었다. Fig. 5에서 주파수-파수 영역의 결과를 비교해 볼 때도 불규칙한 누락으로 인한 스펙트럼 상의 작은 진폭의 에너지 누출이(Fig. 5b) 내삽 후에는 사라지고 주 에너지만 남는 것을 확인

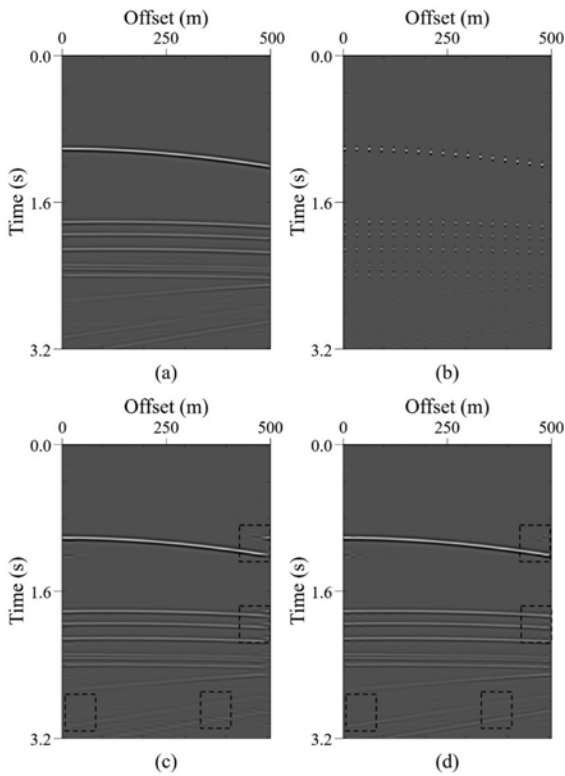


**Fig. 5.** The comparison of the reconstructed results of the synthetic data in  $f$ - $k$  domain: (a) Original data. (b) Randomly decimated data. (c) Reconstructed data by using conventional MWNI. (d) Reconstructed data by using model-constrained MWNI. In the case of randomly decimated data, the reconstructed  $f$ - $k$  spectra of conventional MWNI and model-constrained MWNI are almost the same.

할 수 있다(Fig. 5c, d).

반면에 매 6번째의 트레이스만을 남겨두고 규칙적으로 손상시킨 자료의 내삽 결과를 비교해보면 모델제약 MWNI의 내삽 결과(Fig. 6d)가 훨씬 좋은 것을 알 수 있다. 특히, 검정색으로 표시한 점선의 박스 안에서 MWNI 내삽 결과(Fig. 6c)는 알리아스 효과가 완벽하게 사라지지 않아서 자료가 완벽하게 복구되지 않았지만, 모델제약 MWNI 내삽 결과(Fig. 6d)에서는 알리아스 효과의 영향이 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 내삽 결과의 주파수-파수 스펙트럼을 비교해 볼 때도 빨간색 화살표로 표시된 부분을 비교했을 때, MWNI 내삽 결과(Fig. 7c)에서는 대역 폭을 제한하여 알리아스 효과의 영향을 최대한 없애려고 하였으나 내삽 시 이전 주파수에서 얻은 결과로 가중치 행렬을 구하기 때문에 이를 제거하기가 어렵다. 하지만, 모델제약 MWNI는 시공간 영역에서 구역별로 선형 내삽을 한 자료로 가중치 행렬의 초기값을 결정하므로 가중치 행렬의 초기값을 1로 설정하는 것과 비교하여 알리아스 효과를 줄일 수 있다.

Fig. 6b의 구역별 선형 내삽의 결과는 Fig. 8a와 Fig. 8b에서



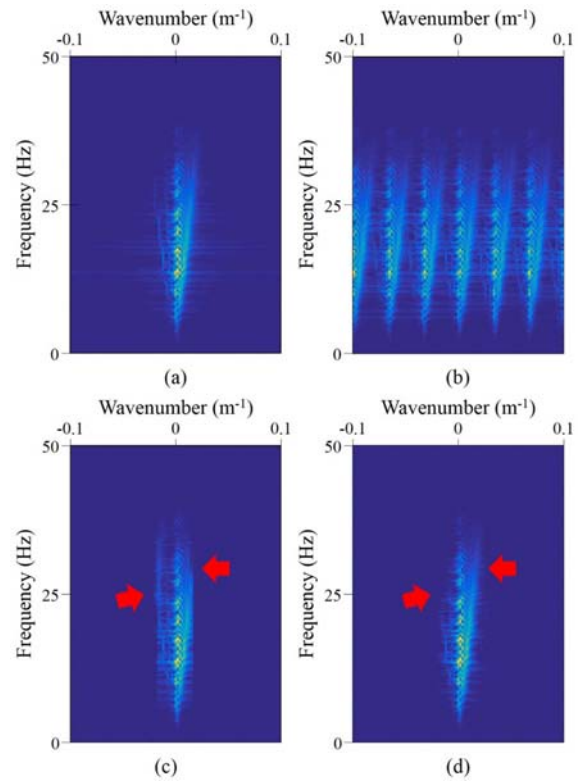
**Fig. 6.** The comparison of the reconstructed results of the synthetic data: (a) Original data. (b) Decimated data with the decimation factor 6. (c) Reconstructed data by using conventional MWNI. (d) Reconstructed data by using model-constrained MWNI. Model-constrained MWNI shows better reconstruction results than conventional MWNI in the black dashed boxes.

확인할 수 있다. 이 예제의 경우는 연결성이 좋은 이벤트들로 이루어져 그림에서 볼 수 있듯이 선형내삽만으로도 어느정도 구조의 연결성을 보여준다. 그러나 일부분을 확대해본 Fig. 8c를 보면 일정구역내에서만 연속이고 구역구역별로 연속성이 끊어지는 결과를 볼 수 있다. 이에 반해 이 자료의 파워 스펙트럼 밀도(Fig. 8b)를 이용해 가중치를 주는 행렬을 만들어 모델제약 MWNI를 수행한 결과인 Fig. 7d의 같은 부분을 확대한 Fig. 8d를 보면 알리아스 효과가 거의 사라지고 연속성도 거의 완벽하게 복원되었음을 알 수 있다.

### 트레이스 내삽 적용사례

#### 가스 하이드레이트(Gas hydrate) 현장자료

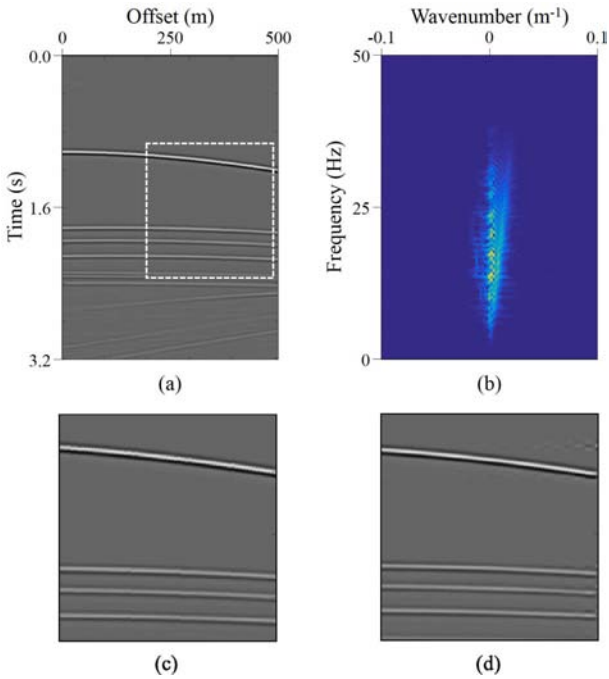
개발된 모듈의 현장자료 적용성을 검증하고자 사용된 첫 번째 자료는 우리나라 동해바다의 남서쪽에 위치한 울릉분지의 가스 하이드레이트가 매장되어 있는 지역에서 얻은 탄성과 자료이다. 2007년과 2010년에 수행된 울릉분지 가스 하이드레이트 시추 탐사(Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition, UBGH) 프로젝트를 통해 울릉분지 중앙부의 12 km × 25 km



**Fig. 7.** The comparison of the reconstructed results of the synthetic data in  $f$ - $k$  domain: (a) Original data. (b) Decimated data with the decimation factor 6. (c) Reconstructed data by using conventional MWNI. (d) Reconstructed data by using model-constrained MWNI. Model-constrained MWNI shows better reconstruction results than conventional MWNI especially for the regions indicated by red arrows.

에 대해 3차원 탄성과 탐사 자료를 얻었다. 자료는 샘플링 간격 1 ms로 기록되었으며, 길이 3 km, 그룹간격 12.5 m, 채널 수 240의 수신기를 사용하여 자료가 기록되었다(Kang *et al.*, 2013). 이 때 얻은 3차원 자료의 2차원 단면을 Fig. 9에 나타내었다.

다중채널 탄성과자료 해석에 의하면 동해 울릉분지에는 가스 하이드레이트 부존가능성을 시사해주는 해저모방반사면(Bottom Simulating Reflector, BSR), 탄성과 침니(seismic chimney), 음향 공백대(acoustic blanking zone), 증폭 반사면(enhanced reflection), 가스 분출(gas seepage) 구조와 같은 5가지 탄성과 지시자가 존재한다(Yoo *et al.*, 2008). 그 중 침니형 구조에는 크게 자유가스나 가스 하이드레이트가 존재하며 일부 탄성과 침니 구조는 내부 반사면의 풀업(pull-up) 구조와 수직적인 음향 공백대가 나타나는 특징을 보여준다(Kang *et al.*, 2013). Fig. 9b에는 2차원 단면 중 가스 하이드레이트 침니 구조를 확대해서 나타내었는데 보이는 바와 같이 침니형 구조 내부는 진폭이 주변보다 낮으며 굉장히 무질서한(Chaotic) 특성을 보인다.

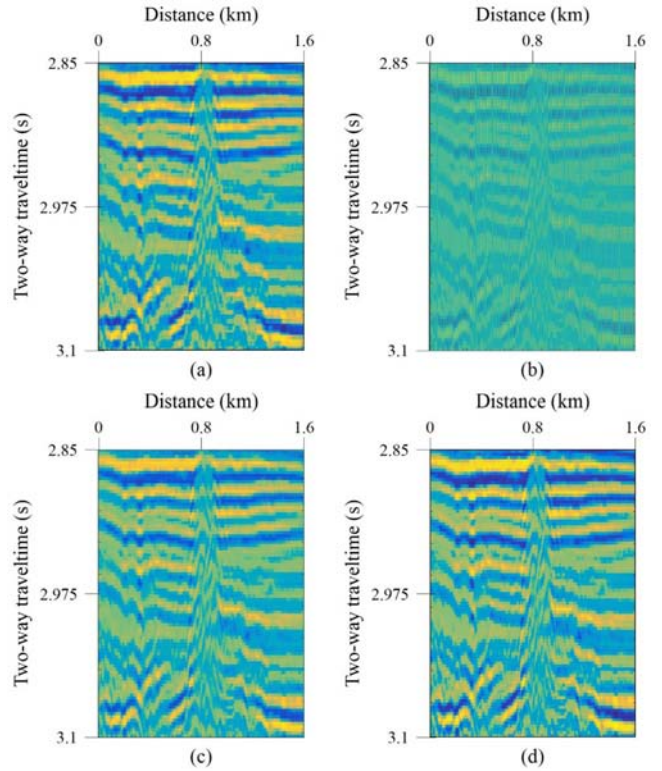


**Fig. 8.** The results of piece-wise linear interpolation along the dominant dips. (a) The reconstructed data of decimated data with the decimation factor 6. (b) The  $f$ - $k$  spectrum of the reconstructed data which was used as the initial value of weighted matrix in model-constraint MWNI. (c) The enlarged section of the white dashed rectangle in (a) to show the characteristic of piece-wise continuity in detail. (d) The enlarged section of the same area in Fig. 7(d). The continuities of events were improved by model-constrained MWMI.

**현장자료 내삽**

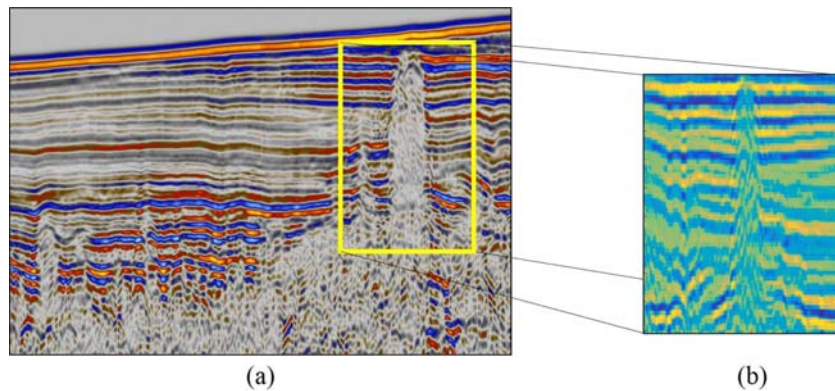
침니형 구조를 가지는 탄성과 자료는 다른 자료들과는 달리 침니 구조 내외의 진폭의 급격한 변화와 침니 내부의 무질서한 양상, 침니 주변의 풀업 구조 등 내삽에 굉장히 어려운 조건을 갖는다. 이런 자료에 대한 내삽 성능을 확인해보기 위해 Fig. 9b 자료를 사용하였다.

12.5 m의 간격을 가지는 자료를 6.25 m 간격을 가지는 자

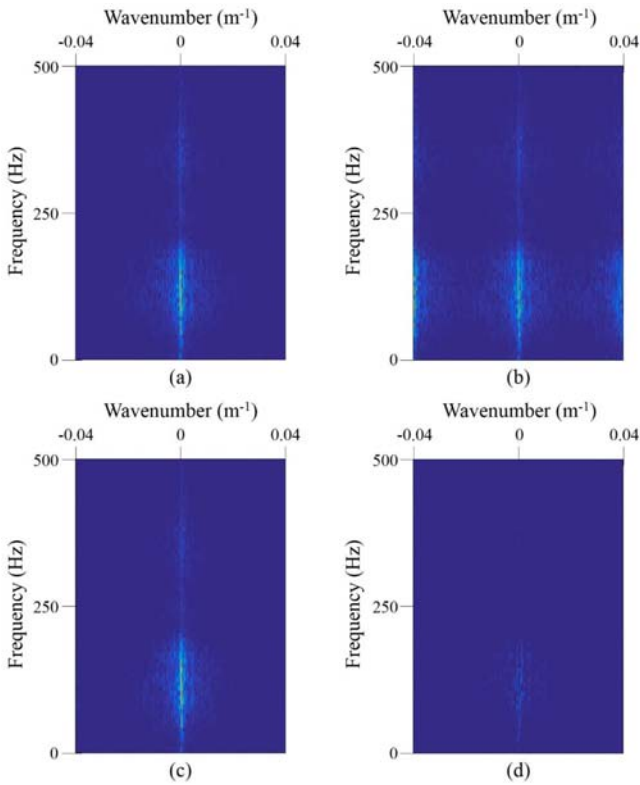


**Fig. 10.** (a) Original seismic chimney data filled with gas hydrate with an interval of 12.5 m. (b) Seismic section with a null trace between two adjacent original traces (6.25 m interval). (c) Seismic section obtained by piece-wise linear interpolation along the dominant dips. (d) The interpolated section by using model-constrained MWNI with an interval of 6.25 m.

료로 내삽을 수행하기 위해 Fig. 10b와 같이 6.25 m 간격의 정규화된 격자에서 12.5 m의 배수가 되는 위치에 기존의 자료들을 채워 넣고 나머지 트레이스는 널(null) 값을 채워 넣었다. 초기 가중치 행렬을 구하기 위해 구역별로 선형 내삽을 한 자료는 Fig. 10c에 도시하였다. 이 자료는 가중치 행렬을 구하기 위한 초기값으로만 사용되므로 완벽한 계산 값을 요하지 않는다. 이를 통해 얻어진 내삽 결과는 Fig. 10d와 같다. 가스 하



**Fig. 9.** (a) 2D section of original 3D seismic data of Ulleung Basin (modified from Kim *et al.*, 2016). (b) Seismic chimney filled with gas hydrate.



**Fig. 11.** The  $f-k$  spectra of seismic data shown in Figs. 10(a), (b), and (d) and the difference of  $f-k$  spectra between Figs. 10(a) and (d). (a) Original seismic chimney data filled with gas hydrate with an interval of 12.5 m. (b) Seismic section with a null trace between two adjacent original traces (6.25 m interval). (c) The interpolated data by using model-constrained MWNI with an interval of 6.25 m. (d) The difference between original data and interpolated data.

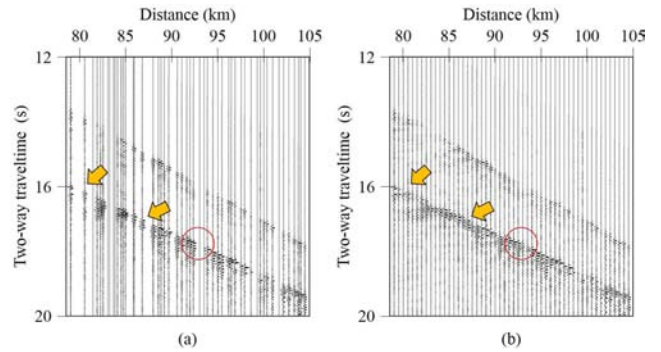
이드레이트가 존재하는 침니 내부의 굉장히 복잡한 구조도 비교적 잘 내삽이 되었음을 알 수 있다. 주파수-과수 영역에서 원래의 자료(Fig. 11a)와 내삽된 자료(Fig. 11c)의 차이를 보여주는 Fig. 11d에서도 매우 작은 오차만 있으므로 내삽이 잘 되었다고 할 수 있다.

### 트레이스 정규화(trace regularization) 적용사례

#### 한반도 인공지진파 자료

2000년 이후 좀 더 정밀한 한반도 지각구조 규명을 위하여 2002년에 처음으로 한반도 지각연구팀(The Korean Crust Research Team, KCRT)에 의해 대규모 인공지진파를 이용한 한반도 지각구조 연구가 진행되었다(Kim *et al.*, 2010). 그 이후 2004년, 2008년에도 대규모 인공지진파를 이용한 연구가 진행되었다.

논문에서 사용한 자료는 2008년도에 수행된 탐사에서 얻은 자료로 총 축선길이는 299 km이며 송신기 개수는 8개, 수신기 개수는 593개, 샘플링 간격은 4 ms로 기록되었다. 공통 송신점 모음은 총 8개의 자료가 있었지만, 그 중에서 가장 많은



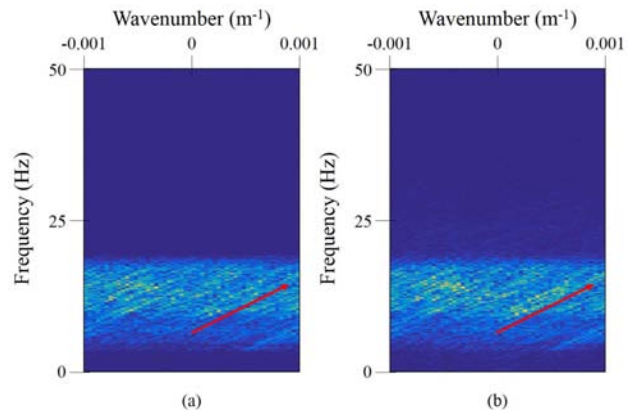
**Fig. 12.** (a) Before trace regularization with the average interval of 500 m. (b) After regularization with the interval of 500 m. The yellow arrows indicate irregular parts with large gaps and red dashed circle indicates the removed signals in the preprocessing steps because of severe noise contamination.

폭약을 발파하여 직접파와 반사파가 뚜렷한 송신원 모음 1번 자료를 사용하였다.

평균적으로 500 m의 간격을 가지는 자료의 정규화를 위해 전처리 과정으로는 신호가 제대로 기록되지 않은 13개의 트레이스를 제거하고 트레이스 간의 에너지 레벨을 맞춰주었다. 그 다음 띠통과 필터(bandpass filter)를 사용해 신호 대 잡음비를 높여주었고 직접파를 뮤팅(muting)하였다.

#### 현장자료 정규화

Fig. 12a는 공통 송신점 모음 1번 자료에서 불규칙성이 두드러지는 일부를 확대한 그림이다. 그림 상에서 상부에 나타난 이벤트는 P파 직접파의 영향을 나타내며 하부에 나타난 이벤트는 모호면의 반사파이다. 수신기의 접근성에 의한 불규칙한 배열로 인해 전체적인 자료가 모두 불규칙한 간격을 가졌으나 노란색 화살표로 표시한 곳은 특히 간격이 큰 위치의 트레이스를 나타내며, 빨간색 점선 원으로 나타낸 곳은 잡음이 많아



**Fig. 13.** (a)  $f-k$  spectrum of the data before trace regularization with the average interval of 500 m. (b)  $f-k$  spectrum of the regularized data after regularization with the interval of 500 m. The energy level of the spectrum parallel to red arrow in (b) is higher than (a).



전처리 과정에서 지워진 트레이스를 나타낸다. Fig. 12a에서 트레이스의 간격은 최소 74 m에서부터 최대 1516 m로 평균 500 m의 간격을 가진다.

일반적인 다양한 탄성과 자료처리를 적용하기 위해서는 탄성과 자료 모음이 일정한 간격을 가지는 자료로 정렬되어야 한다. 이런 과정을 정규화라고 한다. Fig. 12a를 정규화를 하기 위해 500 m 간격의 격자를 만든 후 각 격자의 위치에 트레이스가 있거나 100 m 범위 안에 트레이스가 있으면 이를 이동시켜 넣고 그렇지 않으면 널 값을 넣은 정규화된 초기자료들 만든 후 내삽을 수행하였다.

정규화 결과인 Fig. 12b를 보면 노란색 화살표로 표시한 곳의 트레이스들이 규칙적인 간격을 가지고, 빨간색 점선 원으로 표시한 곳의 자료가 내삽된 것을 확인할 수 있다. 물론 초기에 불규칙하게 얻어진 자료의 정규화를 할 때 격자에 정확하게 위치하는 자료가 없을 경우 일정 범위 안에 있는 트레이스로 근사 한다는 점에서 완벽하다고는 할 수 없다. 하지만 모호면의 속도를 7.8 km/s (Kim *et al.*, 2010)라고 할 때 거리로 100 m 차이가 나는 것은 시간 축에서 약 0.01 s 차이가 나는 것으로 약 2개의 샘플 정도 차이가 나는 것이므로, 정규화 결과를 신뢰할 수 있다. 또한, 주요 신호인 모호면 반사파의 정규화 이후 주파수-과수 스펙트럼을 비교해보면, 정규화 후(Fig. 13b) 빨간색 화살표와 평행하게 진폭이 강해진 것을 확인할 수 있으며 이는 시공간 영역에서 신호의 연속성이 증가하여 나타난 결과이다. 즉, 신뢰할만한 자료의 정규화 결과를 얻을 수 있었다.

## 결 론

Liu and Sacchi (2004)에 의해 제안된 기존의 MWNI 방법은 알리아스 효과가 존재하는 자료의 내삽에 취약하다는 단점을 가지고 있었다. 이를 극복하고자 Chiu (2014)는 모델제약 MWNI 방법을 제안하였다. 이는 MWNI 방법으로 내삽을 하기 전 시공간 영역에서 구역별로 선형 내삽을 한 자료로 가중치 행렬의 초기값을 구함으로써 알리아스 효과의 영향을 줄이는 내삽 방법이다.

이 논문에서는 기존의 MWNI 방법과 모델제약 MWNI 방법의 모듈을 개발하고 알리아스 효과가 없을 때와 있을 때의 내삽 결과를 비교하였다. 불규칙하게 손상되고 알리아스 효과가 없는 자료에서는 기존의 MWNI 방법과 모델제약 MWNI 방법에서 모두 내삽이 잘 되는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 알리아스 효과가 있는 자료에서는 모델제약 MWNI를 적용한 결과가 시공간 영역에서 구역별로 선형 내삽을 한 자료로 가중치 행렬의 초기값을 결정하므로 가중치 행렬의 초기값을 1로 설정하는 MWNI를 적용한 결과와 비교했을 때 알리아스 효과에 더 강한 결과를 보였다.

다음으로 개발된 모듈의 현장 적용성을 검증하기 위해 트레

이스 내삽과 트레이스 정규화의 두 가지 경우에 적용해보았다.

첫 번째로 동해 울릉분지의 가스 하이드레이트 부존 지역의 탐사자료에 내삽을 적용해 보았다. 가스 하이드레이트 부존의 지시자 중 하나인 침니형 구조는 침니 구조 내외의 진폭이 급격하게 변하고, 침니 내부가 굉장히 복잡한 구조를 가지고 있어 내삽에 굉장히 어려운 자료이다. 이 자료를 12.5 m 간격에서 6.25 m의 간격을 가지도록 내삽을 수행하였고, 내삽 결과 침니 내부의 무질서한 양상까지도 잘 내삽된 것을 확인할 수 있었다.

두 번째로 한반도 지각구조 탐사를 위한 인공지진파 자료를 정규화 하였다. 299 km나 되는 긴 축선에 일정한 간격으로 수신기를 설치하는 것은 거의 불가능하여 자료가 모두 불규칙한 간격을 가지며 굉장히 넓은 간격을 갖는 경우도 존재하는 자료이다. 자료의 정규화 결과 불규칙한 간격을 가졌던 트레이스들이 규칙적인 간격을 가지며 신호의 연속성이 증가하였다. 이에 따른 영향으로 주파수-과수 영역에서 신호 방향의 진폭이 강해진 것을 확인할 수 있었다. 이 논문에서 개발된 모듈은 현장 적용성 검증을 통해 알 수 있었던 바와 같이 현장의 다양한 여건에 의해 불규칙하거나 넓은 간격으로 얻어진 자료의 정규화나 내삽에 효율적으로 활용될 수 있을 것이다. 또한 MWNI의 가장 큰 장점인 차원 확장의 유용성을 기반으로 고차원으로 확장한 모듈을 개발한다면 좀 더 응용분야를 넓힐 수 있으리라 기대한다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 「기상·지진See-At기술개발연구」(KMIPA2015-7012)의 지원과 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 KETEP의 지원을 받아 수행된 연구 과제입니다(No. 20164010201120).

## References

- Abma, R., and Kabir, N., 2006, 3D interpolation of irregular data with a POCS algorithm, *Geophysics*, **71**, 91-97.
- Kim, B., Jeong, S., and Byun, J., 2015, Trace interpolation for irregularly sampled seismic data using curvelet-transform-based projection onto convex sets algorithm in the frequency-wavenumber domain, *J. Appl. Geophys.*, **118**, 1-14.
- Kim, K. Y., Lee, J. M., Baag, C.-E., Jung, H., Hong, M. H., and Kim, J., 2010, Seismic velocity structure along the KCRT-2008 profile using traveltimes inversion of first arrivals, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **13**, 153-158.
- Liu, B., and Sacchi, M. D., 2004, Minimum weighted norm interpolation of seismic records, *Geophysics*, **69**, 1560-1568.
- Naghizadeh, M., and Sacchi, M. D., 2010, On sampling functions and Fourier reconstruction methods, *Geophysics*, **75**, 137-151.
- Schonewille, M., Klaedtke, A., and Vigner, A., 2009, Anti-alias

- anti-leakage Fourier transform, *79th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys. Expanded Abstract*, 3249-3253.
- Trad, D., 2009, Five-dimensional interpolation: Recovering from acquisition constraints, *Geophysics*, **74**, 123-132.
- Xu, S., Zhang, Y., and Lambaré, G., 2010, Antileakage Fourier transform for seismic data regularization in higher dimensions, *Geophysics*, **75**, 113-120.
- Yoo, D. G., Kang, D. H., Koo, N. H., Kim, W. S., Kim, G. Y., Kim, B. Y., Chung, S. H., Kim, Y. J., Lee, H. Y., Park, K. P., Lee, G. H., and Park, S. C., 2008, Geophysical evidence for the occurrence of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea, *J. Geol. Soc. Korea*, **44**, 645-655 (in Korean with English abstract).
- Kang, D. H., Chun, J. H., Yoo, D. G., Kim, J. S., Koo, N. H., Kim, W. S., Yi, B. Y., and Lee, H. Y., 2013, Seismic characteristics of the gas hydrate chimney in the Ulleung Basin, East Sea. *J. Geol. Soc. Korea*, **49**, 605-615 (in Korean with English abstract).
- Chiu, S. K., 2014, Multidimensional interpolation using a model-constrained minimum weighted norm interpolation, *Geophysics*, **79**, 191-199.