

시간차 보정을 적용한 Matching Pursuit 내삽 기법 연구

이재강¹ · 변중무^{1*} · 설순지¹ · 김영창²

¹한양대학교 자원환경공학과
²YK Geophysics

A Study on Matching Pursuit Interpolation with Moveout Correction

Jaekang Lee¹, Joongmoo Byun^{1*}, Soon Jee Seol¹, and Young Kim²

¹Dept. of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang Univ.
²YK Geophysics

요약: 탄성과 내삽 기법의 최근 연구방향은 공간적 알리아싱이 존재하는 자료에서의 내삽을 효과적으로 수행하는 것이다. 다양한 내삽 기법 중 기저함수를 정의하여 트레이스를 가장 잘 복원할 수 있는 기저함수의 조합을 찾아내는 Matching Pursuit 내삽 기법이 개발된 바 있다. 그러나 이 방법은 공간적 알리아싱 문제를 해결하지 못하는데 이를 해결하기 위해 다성분 Matching Pursuit 방법이 제안되었고 또한 시간차 보정(moveout correction) 방법도 소개된 바 있다. 다성분을 이용한 방법은 P파만을 갖는 다성분 자료가 획득되어야 하는데 해저면에서 다성분을 측정하는 OBC (Ocean Bottom Cable) 자료의 경우에는 P파 성분만을 분리하는 작업이 어려워 현장자료 적용이 힘들게 된다. 따라서 이 연구에서는 P파와 S파가 혼재하고 공간적 알리아싱이 존재하는 OBC 탐사 자료에서의 효과적인 단일성분 Matching Pursuit 내삽 기법을 다룬다. 이를 위해 시간차 보정을 포함하는 리커 요소파 기반의 단일성분 Matching Pursuit 내삽 기법 작업흐름도를 제안하고 그 효과를 체계적으로 살펴보았다. 이 작업흐름도는 내삽을 적용하기 전에 시간차 보정을 적용하고 다시 역 시간차 보정을 적용하여 공간적 알리아싱 문제를 해결하였다. 제안한 작업흐름도를 OBC 측정을 가정한 합성탄성파탐사 자료에 적용하여 그 효과를 검증하였고 현장자료에 적용함으로써 공간적 알리아싱이 심한 경우에도 내삽이 가능함을 확인하였다.

주요어: 시간차보정, Matching Pursuit, 내삽, OBC

Abstract: The recent research aim of seismic trace interpolation is to effectively interpolate the data with spatial aliasing. Among various interpolation methods, the Matching Pursuit interpolation, that finds the proper combination of basis functions which can best recover traces, has been developed. However, this method cannot interpolate aliased data. Thus, the multi-component Matching Pursuit interpolation and moveout correction method have been proposed for interpolation of spatially aliased data. It is difficult to apply the multi-component Matching Pursuit interpolation to interpolating the OBC (Ocean Bottom Cable) data which is the multi-component data obtained at the ocean bottom because the isolation of P wave component is required in advance. Thus, in this study, we dealt with an effective single-component matching Pursuit interpolation method in OBC data where P-wave and S-wave are mixed and spatial aliasing is present. To do this, we proposed the Ricker wavelet based single-component Matching Pursuit interpolation workflow with moveout-correction and systematically investigated its effectiveness. In this workflow, the spatial aliasing problem is solved by applying constant value moveout correction to the data before the interpolation is performed. After finishing the interpolation, the inverse moveout correction is applied to the interpolated data using the same constant velocity. Through the application of our workflow to the synthetic OBC seismic data, we verified the effectiveness of the proposed workflow. In addition, we showed that the interpolation of field OBC data with severe spatial aliasing was successfully performed using our workflow.

Keywords: Moveout correction, Matching Pursuit, Interpolation, OBC

Received: 24 April 2018; Revised: 29 May 2018; Accepted: 29 May 2018

*Corresponding author

E-mail: jbyun@hanyang.ac.kr

Address: Dept. of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang Univ, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, Korea

©2018, 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.

서론

탄성과 자료의 획득에 있어, 지형적 접근성이나 기계적 결합 등에 의해 부분적으로 자료를 획득하지 못하여 불규칙한 자료의 빠짐이 발생하거나 수신기의 간격이 넓을 경우 공간적 알

리아싱(aliasing)이 발생한다. 이 때, 주어진 자료만을 가지고 빠진 위치의 자료 또는 자료들 사이의 자료를 생성해 내는 기술을 트레이스 내삽(trace interpolation)이라고 한다. 불규칙하게 빠진 자료나 공간적 알리아싱이 존재하면 구조보정(migration), 탄성과 역산(seismic inversion) 등과 주파수 영역에서 계산되는 여러 탄성과 자료처리를 효율적으로 적용하는데 문제를 발생시키기 때문에 효율적인 트레이스 내삽 기법이 필요하다.

탄성과 트레이스 내삽은 규칙적으로 취득된 자료에 대한 내삽인 선형예측(linear prediction)기법(Spitz, 1991; Porsani, 1999)에서부터 연구가 시작되었으나 최근에는 공간적으로 불규칙하게 측정된 자료가 공간주파수 영역에서 갖게 되는 특성을 이용한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적인 예로 ALFT (Anti-Leakage Fourier Transform) 기법(Schonewille *et al.*, 2012), POCS (Projection Onto Convex Sets) 기법(Kim *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012), MWNI (Minimum Weighted Norm Interpolation) 기법(Liu and Sacchi, 2004; Naghizadeh and Sacchi, 2010) 등이 이에 속한다. 그러나 이런 기법들은 트레이스 간격의 불규칙성에서 기인한 잡음이나 공간적 알리아싱을 일으키는 고파수의 에너지가 공간주파수 영역에서 낮은 에너지를 갖는 잡음으로 나타나게 된다는 특성에 기초하여 내삽을 수행하기 때문에 다른 특별한 제약조건을 이용하지 않으면 규칙적인 자료 사이를 채우는 내삽은 불가능하다. 이에 반해 Ozbek *et al.* (2009)에 의해 제안된 Matching Pursuit 내삽 기법은 정현파(sinusoidal wave)를 기저함수로 사용하여 취득된 자료를 가장 잘 맞추는 기저함수의 조합을 찾아내는 방법으로 규칙적으로 취득된 자료는 물론 불규칙적으로 취득된 자료에 대한 내삽이 모두 가능하다는 장점을 가지고 있지만, 공간적 알리아싱이 존재하는 자료의 경우에는 정확한 내삽이 불가능하다. 이를 보완하기 위해 Choi *et al.* (2014)은 리커 요소파(Ricker wavelet)를 기저함수로 사용하는 Matching Pursuit 내삽 기법을 개발하였다. 리커 요소파는 주파수-파수 영역에서 주요 파수(main wavenumber)의 3배까지 너비를 가지기 때문에 정현파를 기저함수로 사용했을 때 보다 공간적 알리아싱 문제 해결에 유리할 수 있다. 하지만 공간적 알리아싱이 심하게 존재하면 이 방법 또한 정확한 내삽이 불가능하다. 이에 Vassalo *et al.* (2010)과 Choi *et al.* (2016)은 각각 정현파 및 리커 요소파 기반의 다성분 탐사자료를 이용한 Matching Pursuit 내삽 기법을 사용하여 공간적 알리아싱 문제를 해결하는 방법을 제안하였다. 하지만 이 기법들의 경우, 압력 성분(pressure component) 이외에 내삽 방향의 P파 성분만 기록된 입자가속벡터(particle acceleration vector)를 동시에 사용해야 한다는 단점을 지니고 있다. Vassalo *et al.* (2010)의 경우는 해상탐사에서 스트리머로 측정되는 압력성분 이외에 P파만을 포함하는 입자가속벡터의 측정을 가정하여 합성탄성과탐사 자료에 적용한 예제를 제시하였다. 그러나 주로 입자가속벡터가 측

정되는 환경인 OBC (ocean bottom cable)자료의 경우는 입자가속벡터에 P파 외에 S파가 혼재되어 나타나므로 S파를 완벽히 제거하기 전에는 이 방법의 적용이 어렵게 된다.

Matching Pursuit 내삽 기법 이외에도 규칙적으로 자료 사이를 채워야 하는 내삽에서 공간적 알리아싱은 가장 해결하기 어려운 문제 중의 하나로 알려져 왔다. 이러한 문제 해결의 한 방법으로 Robertsson *et al.* (2008)는 싱크함수(sink function)를 이용한 내삽 방법에 시간차 보정(moveout correction)을 적용하여 공간적 알리아싱을 완화시키는 연구를 수행한 바 있다. 또한 Kamil *et al.* (2014)는 P파 성분만이 존재하는 스트리머 자료의 공간적 알리아싱을 완화시키기 위한 방법으로 시간차 보정을 적용한 뒤, 다성분 Matching Pursuit 내삽 기법을 적용하여 더욱 효과적으로 공간적 알리아싱 문제를 해결한 바 있다.

이 연구에서는 시간차 보정을 통해 공간적 알리아싱을 완화시키는 장점을 리커 요소파 기반의 단일성분 Matching Pursuit 내삽 기법과 결합하여 P파와 S파가 혼재하는 OBC탐사 자료에서 공간적 알리아싱이 존재하는 탄성과 탐사 자료의 효율적이고 정확한 내삽을 수행하는 작업흐름도를 제안하였다. 제안된 작업흐름도를 합성탄성과 자료에 적용시켜 그 효율성을 확인하여 보았고, 마지막으로 현장자료에 적용함으로써 공간적 알리아싱이 심한 경우에도 내삽이 가능함을 확인하였다.

Matching Pursuit 내삽 기법을 적용한 탄성과 트레이스 내삽

Matching Pursuit 기법은 신호를 적합한 기저함수들의 조합으로 표현할 수 있다는 원리를 이용하는 기법으로 신호처리분야에서 Mallat and Zhang (1993)에 의해 처음 소개되었다. 구성하고자 하는 신호를 $f(x)$ 라 한다면 이 기법은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f(x) = \sum_{i=1}^N a_i g(x; \theta_i) \quad (1)$$

여기서 a_i 는 스칼라 가중 계수 혹은 진폭, $g(x; \theta_i)$ 는 기저함수, θ_i 는 기저함수의 변수, x 는 별립(offset), N 은 기저함수의 개수를 의미한다. Ozbek *et al.* (2009)은 탄성과 탐사 자료의 내삽에 이를 적용하기 위해 정현파를 기저함수로 사용하였다. 그리고 Choi *et al.* (2014)는 공간적 알리아싱 문제를 완화시키기 위해 주파수-파수 영역에서 주요파수의 3배까지 넓이를 가지는 리커 요소파를 기저함수로 사용하였으며 다음과 같이 표현 가능하다.

$$g(x; \theta_i) = (1 - 2\pi^2 k_i^2 (x - \tau_{x,i})) \exp(-\pi^2 k_i^2 (x - \tau_{x,i})^2) \quad (2)$$

여기서 k_i^2 는 주요 파수, $\tau_{x,i}$ 는 공간지연을 의미한다. 이 때, 효율적으로 기저함수를 찾기 위해서 먼저 구성하고자 하는 신호를 표현할 수 있는 기저함수의 변수에 대한 범위를 정한다.

다음으로 정규화 되지 않은 기저함수를 벡터화하여 하나의 기저함수벡터의 집합(dictionary)을 구성하고 각각 크기가 1인 단위벡터로 변환한다. 이렇게 구성된 기저함수벡터의 집합은 구성하고자 하는 신호와 내적을 수행하여 신호를 가장 잘 표현하는 스칼라 가중 계수를 얻을 수 있다. 또한 구성하고자 하는 신호를 잘 표현하는 기저함수일수록 큰 내적 값을 나타내게 되므로 신호를 가장 잘 표현하는 기저함수를 순차적으로 구할 수 있다. 예를 들어 Fig. 1과 같이 구성하고자 하는 신호의 벡터를 $\vec{f}(x)$ 라고 한다면, 기저함수벡터 \vec{x}_1 과 \vec{x}_2 는 내적을 통해 각각 A_1 과 A_2 의 스칼라 가중 계수를 얻을 수 있어 신호를 잘 표현하는 기저함수를 구할 수 있게 된다.

리커 요소과 기반의 Matching Pursuit 내삽 기법은 이렇게 찾아진 기저함수를 다시 조합하여 이산신호로 표현된 탄성파 트레이스 사이에 트레이스를 삽입하는 과정을 추가적으로 고려한다. 따라서 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$f_{in,j+1}(x) = f_{in,j}(x) - \langle f_{in,j-1}(x), \vec{x}_j \rangle h \vec{x}_j \quad (3)$$

$$f_{out,j+1}(x) = f_{out,j}(x) + \langle f_{out,j-1}(x), \vec{x}_j \rangle h \vec{x}_j \quad (4)$$

여기서 f_{in} 와 f_{out} 은 각각 입력자료와 출력자료, j 는 반복횟수, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 는 내적 연산자를 의미한다. 또한 앞서 기저함수벡터를 단위벡터로 만들었기 때문에, 기저함수와 기저함수벡터의 진폭을 맞추기 위해 단위벡터로 만들 때 나누어 주었던 값인 h 를 곱해 주었다.

마지막으로 기저함수벡터 \vec{x}_j ($j = 1, 2, \dots$)는 내삽 전에 트레이스 별림에 맞게 이산신호화 하기 때문에 추후 내삽을 위해서는 연속적인 함수로 표현되어야 한다. 따라서 연속적인 함수를 \vec{g}_j 라 하면 Matching Pursuit 내삽 기법의 입력자료와 출력자료는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_{in,j+1}(x) = f_{in,j}(x) - \langle f_{in,j-1}(x), \vec{g}_j \rangle h \vec{g}_j \quad (5)$$

$$f_{out,j+1}(x) = f_{out,j}(x) + \langle f_{out,j-1}(x), \vec{g}_j \rangle h \vec{g}_j \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)을 통해 구해진 입력자료와 출력자료는 반복

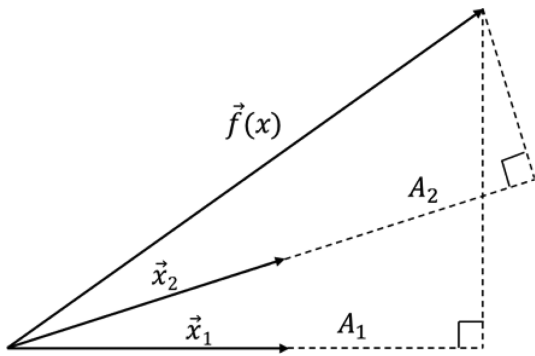


Fig. 1. The inner product of signal $\vec{f}(x)$ and basis vectors \vec{x}_i ($i = 1, 2$). Each dashed line of A_1 and A_2 corresponds to the scalar weighting factors of \vec{x}_1 and \vec{x}_2 in $\vec{f}(x)$, respectively.

적으로 사용되게 되며, 입력자료의 에너지가 미리 설정해 둔 값보다 작아질 때까지 반복 수행하게 된다. 이를 통해 최종적으로 출력자료로 내삽된 자료를 얻을 수 있다.

공간적 알리아싱이 존재하는 자료의 Matching Pursuit 내삽

먼저 공간적 알리아싱이 심하게 존재할 때, 리커 요소과 기반의 단일 Matching Pursuit 내삽 기법을 적용하면 발생하는 문제를 확인하기 위해 수신기 간격이 비교적 넓은 OBC (Ocean Bottom Cable)를 가정한 속도모델을 Fig. 2와 같이 구성하고 2차원 유한 차분 모델링 코드(Han et al., 2012)를 이용하여 합성탄성파탐사자료를 만들었다. 이 때 사용한 탐사변수는 Table 1과 같다. 공간적 알리아싱이 존재할 경우의 내삽 결과를 비교하기 위해 사용한 자료는 공통발파점모음(Common Shot Gather)으로, Fig. 3(a)는 공간적 알리아싱이 없는 수신기 간격 12.5 m인 시간 영역 자료이고, Fig. 3(b)는 공간적 알리아싱이 존재하는 수신기 간격 25 m인 시간 영역 자료이다. Fig. 3(c)와 (d)는 각각의 주파수-파수 영역의 진폭자료이다. Fig. 3(c)와는 달리 (d)의 주파수-파수 영역자료에서는 빨간선의 나이퀴스트 파수 (nyquist wavenumber)를 넘는 영역에 반복적으로 나타나는 진폭의 에너지가 나이퀴스트 파수 안쪽으로 겹쳐져 나타나는 것을 통해 공간적 알리아싱이 존재함

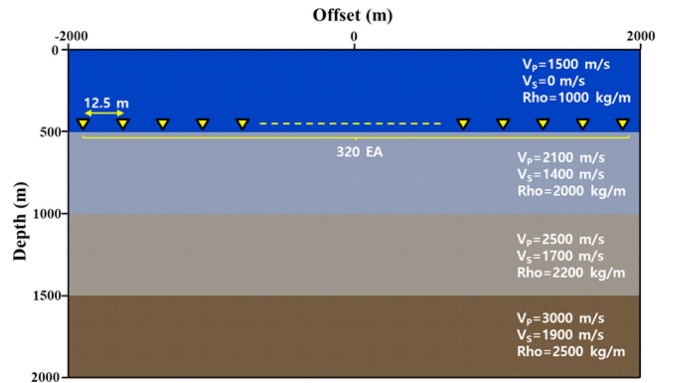


Fig. 2. Multi-layered velocity model used for testing of Matching Pursuit interpolation.

Table 1. Parameters used in numerical modeling with the velocity model shown in Fig. 2.

Parameters	Value
Number of shot	1 ($x = 0 \text{ m} / z = 5 \text{ m}$)
Source wavelet	Ricker wavelet ($f_{min} = 30 \text{ Hz}$)
Number of receivers	320 EA
Receiver depth	501 m
Receiver interval	12.5 m
Sampling interval	2 ms
Recording time	1.8 sec

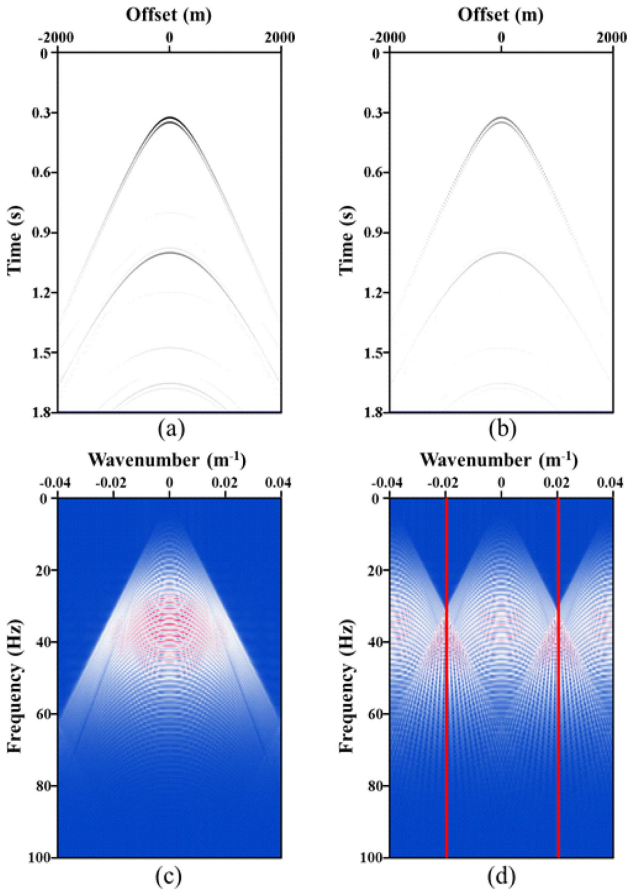


Fig. 3. Common shot gathers of pressure component obtained at the sea bottom. Receiver intervals of (a) and (b) are 12.5 m and 25 m, respectively. The red lines indicate Nyquist wavenumber.

을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 공간적 알리아싱이 존재하는 수신기 간격 25 m 자료를 입력자료로 사용하여 수신기 간격 12.5 m로 만들기 위해 내삽을 적용한 결과로, Fig. 4(a)와 (c)는 내삽 결과의 시간 영역과 주파수-파수 영역 진폭을 나타내고 Fig. 4(b)와 (d)는 실제 수신기 간격 12.5 m 자료와의 차이를 나타낸다. 결과를 살펴보면 Fig. 4(b)와 같이 공간적 알리아싱을 일으키는 급경사인 직접파나 상부층의 반사파 이벤트 들은 정확한 내삽이 수행되지 않은 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 4(c)와 (d)의 주파수-파수 영역의 결과를 보면 공간적 알리아싱을 해결하지 못하여 잘못된 진폭을 만들게 됨을 알 수 있다.

결국 공간적 알리아싱이 약간 존재할 경우에는 리커 요소와 기반의 Matching Pursuit 내삽 기법을 적용하여 문제를 해결할 수 있으나(Choi et al., 2014) 공간적 알리아싱이 심하게 존재할 경우에는 문제를 충분히 해결하지 못하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 공간적 알리아싱을 줄여주는 전처리가 필요하다.

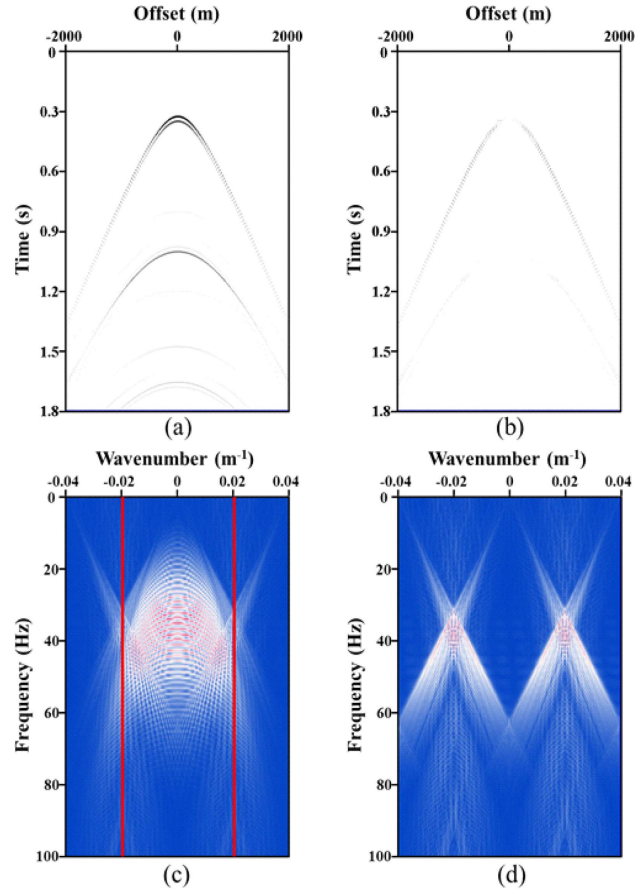


Fig. 4. Result of Ricker wavelet based Matching Pursuit interpolation for fairly spatial aliased data. (a) is the interpolation result and (b) is the difference between input data and (a). (c) and (d) are their $f-k$ spectrums, respectively. The red lines indicate Nyquist wavenumber.

공간적 알리아싱을 줄이기 위한 시간차 보정

시간차 보정은 보통 유한한 별림으로 기록된 자료를 영 별림으로 기록된 자료와 유사하게 만드는데 사용되는 방법으로 속도분석, AVO분석, 공간적 알리아싱 문제 해결 등 다양한 탄생과 자료처리에 사용된다(Robertsson et al., 2008). 수평층서 구조에서 반사파를 이용한 가장 간단한 시간차 보정은 수직 시간차 보정(normal moveout correction)으로 송신원과 수신기 거리가 x 일 때, 각각의 수신기에 기록된 반사파 주행시간(T_x)과 영점거리주시(zero offset travel time)의 차이(ΔT)를 말한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta T = T_x - T_0 = \sqrt{T_0^2 + \frac{x^2}{v^2}} - T_0 \tag{7}$$

Fig. 5는 수평 2층 구조에서 반사파의 이동경로와 이에 대한 주시곡선을 보여준다.

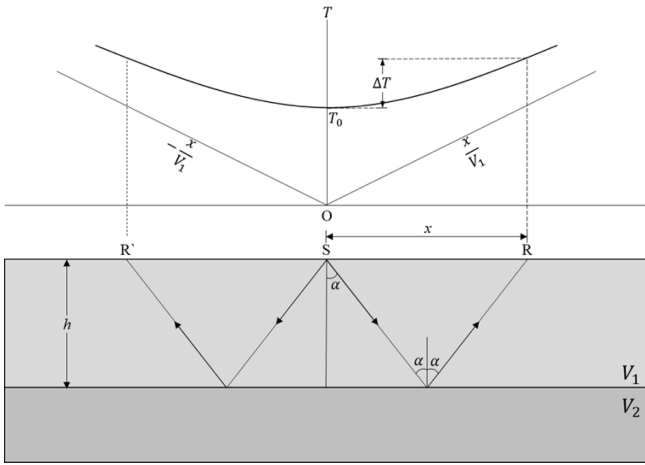


Fig. 5. Ray-path of reflection event for two-layer model and its travel-time curve.

이러한 시간차 보정의 경우, 보통 공통중간점(common midpoint, CMP) 속도 분석 결과의 신뢰성을 판단하는 과정에 주로 사용되어 속도에 기초한 영 벌림 자료의 정확한 연산이 필요하다. 하지만 공간적 알리아싱을 감소시키기 위해 사용하는 경우에는 직접파와 반사파의 경사를 줄이기 위한 용도로만 사용되고 다시 역 시간차 보정을 하기 때문에 정확한 속도 정보가 필요하지 않고 stretch 효과 또한 고려하지 않아도 된다. 따라서 완벽하게 영 벌림을 맞출 필요가 없고 먼 벌림(far

offset)에서 발생하는 stretch에 대한 고려 또한 하지 않아도 되는 장점이 있다. 이러한 장점을 이용하면 시간차 보정을 적용하여 공간적 알리아싱의 영향을 줄여준 뒤, 내삽을 적용하여 공간적 알리아싱 문제를 해결할 수 있고 역 시간차 보정을 적용하면 최종적으로 내삽된 결과를 얻을 수 있다. 이에 Robertsson *et al.* (2008)과 Kamil *et al.* (2014)은 다성분의 스트리머 자료에 대해서 각각 싱크함수를 이용한 내삽 기법과 정현파 기반의 Matching Pursuit 내삽 기법에 시간차 보정을 적용하여 공간적 알리아싱 문제를 해결하는 내삽 기법을 개발한 바 있다. 특히 다성분을 이용하는 경우에는 압력 성분 이외에 내삽 방향의 P파 성분만 기록된 입자가속벡터 동시에 사용하여 공간적 알리아싱 문제를 보다 효과적으로 해결하지만 OBC 탐사의 경우에는 P파와 S파가 혼재하기 때문에 적용하기 어렵다.

따라서 P파와 S파가 혼재하는 OBC 탐사 자료에 대해서도 공간적 알리아싱 문제를 해결하는 방법으로 리커 요소와 기반의 단일성분 matching Pursuit 내삽 기법에 시간차 보정을 적용하는 방법을 적용하는 작업흐름도를 Fig. 6과 같이 구성하고 적용성을 확인해 보았다. 시간차 보정을 통해 앞서 공간적 알리아싱이 심한 Fig. 3(b)의 자료에 대해 내삽을 수행한 결과는 Fig. 7(a)와 같다. 시간차 보정을 적용할 때 사용된 상속도는 공간적 알리아싱을 완화시키기 위하여 매질의 최저속도보다 약간 높은 값인 1600 m/s로 설정하였다. 그림에서 볼 수 있듯

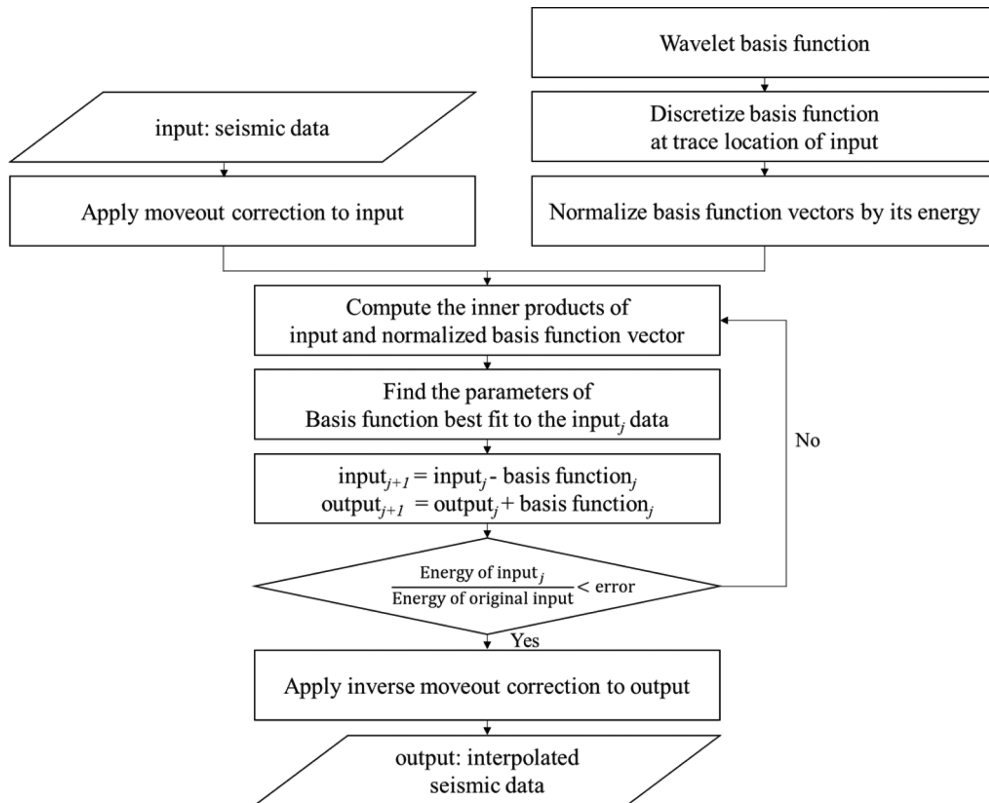


Fig. 6. Flow chart of wavelet based Matching Pursuit interpolation method with moveout correction.

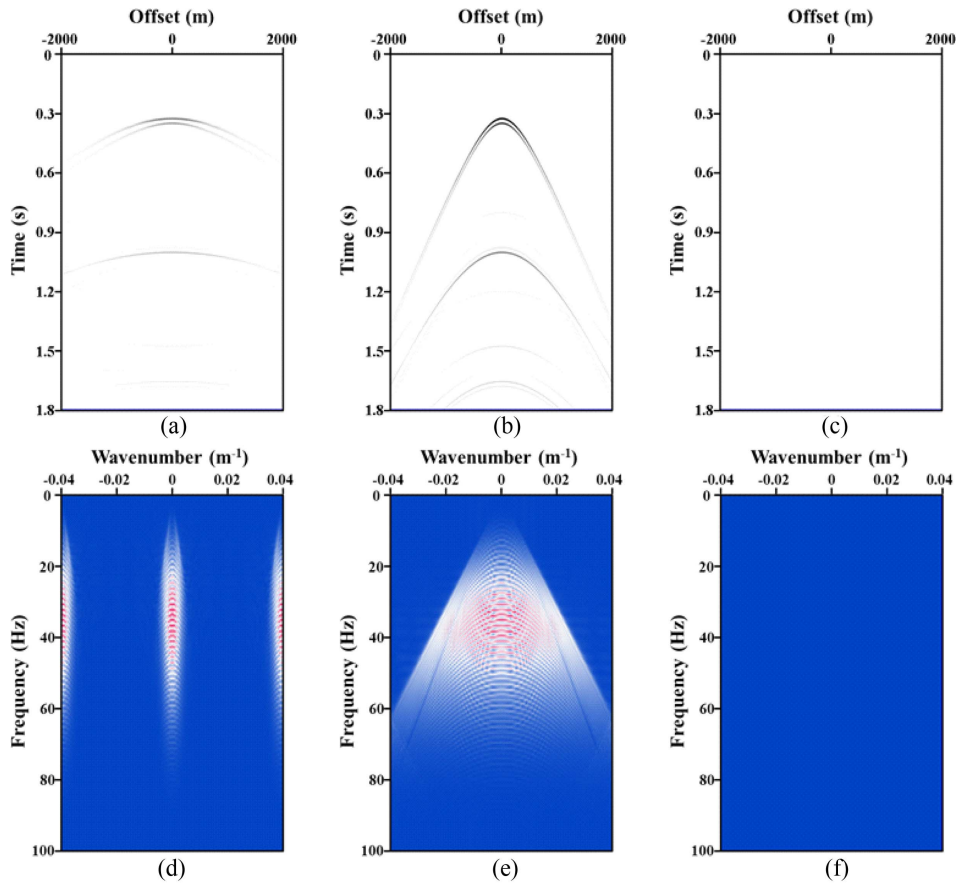


Fig. 7. Result of Ricker wavelet based Matching Pursuit interpolation using moveout correction for fairly spatial aliasing existing case shown in Fig. 4(b). (a) is t - x domain data after applying moveout correction and (b) is its inverse moveout corrected result after interpolation. (d) and (e) are their f - k spectrums, respectively. (c) and (f) show the difference between interpolation result and original 12.5 m interval data.

이 시간차 보정을 통해 입력자료의 직접파 및 반사파의 기울기가 완만하게 변화하였음을 확인 할 수 있고 Fig. 7(d)는 이에 따른 주파수-파수 영역의 진폭 자료로 앞서 Fig. 3(d)에 비해 공간적 알리아싱의 영향이 명확하게 줄어든 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(b)와 (e)는 각각 시간차 보정된 자료에 내삽을 수행하고 역 시간차 보정을 통해 내삽 된 결과를 시간-공간 및 주파수-파수 영역의 자료로 나타낸 것으로, 나이퀴스트 파수인 0.02 m^{-1} 이상에서 발생했던 공간적 알리아싱 문제를 완전히 해결한 것을 볼 수 있다. Fig. 7(c)와 (f)는 각각 수신기 간격 12.5 m의 원래 자료(Figs. 4a, 4c)와 내삽된 결과(Figs. 7b, 7e)의 차이를 나타낸 시간 영역과 주파수-파수 영역의 자료이며 이를 통해 내삽이 완벽히 수행된 것을 다시 한 번 확인할 수 있다. 합성자료를 이용한 실험 결과로부터 알 수 있듯이 앞서 내삽만을 수행한 경우에는 해결하지 못했던 공간적 알리아싱 문제가 시간차 보정을 통해 해결된 것을 알 수 있다.

현장자료를 통한 내삽 결과 비교

시간차 보정을 적용한 리커 요소파 기반의 단일성분

Matching Pursuit 내삽 알고리즘의 현장자료 적용성을 확인하기 위하여 사용된 현장자료는 OBC 탄성과 탐사 자료의 공통

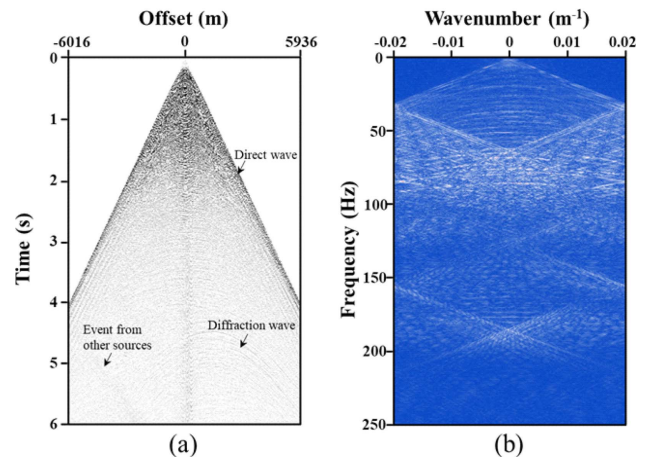


Fig. 8. Common shot gathers of pressure component (a) and its f - k spectrum (b) obtained by OBC system installed at the sea bottom. This data contains not only direct waves, reflections and diffractions but also events from another shot in the lower left part. In f - k spectrum, high order aliasing is presented clearly.

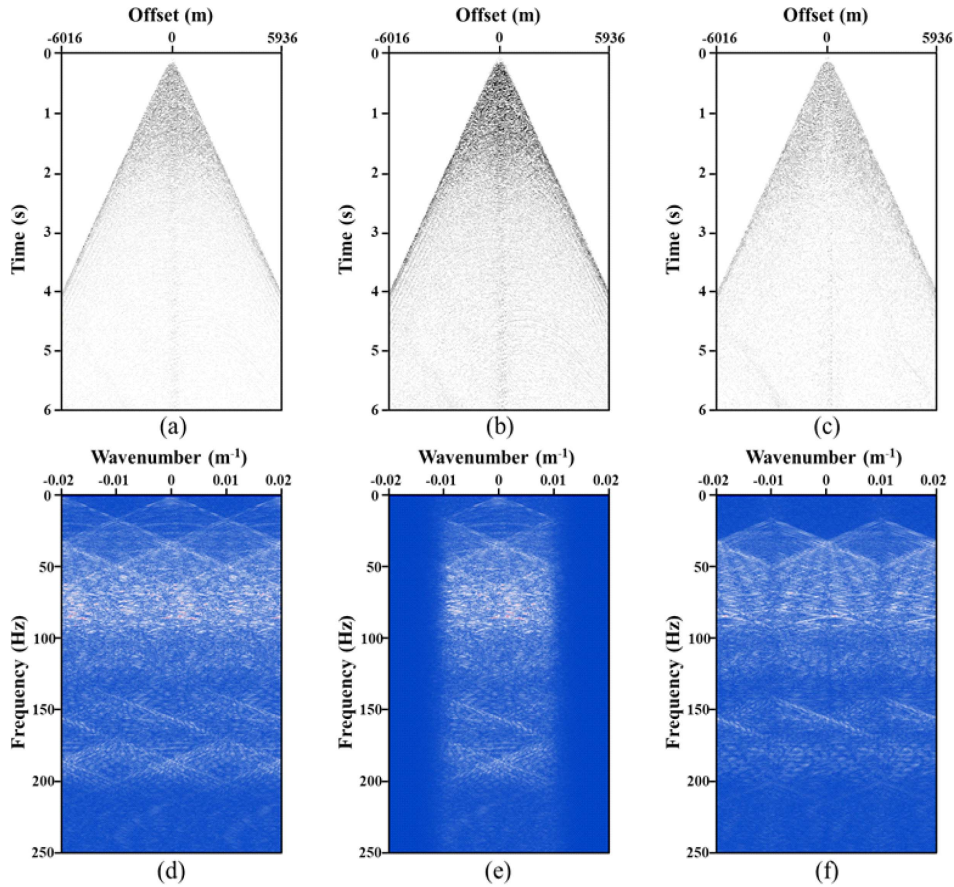


Fig. 9. Result of Ricker wavelet based Matching Pursuit interpolation for high order spatial aliasing existing case. (a) and (d) are decimated input data and its f - k domain data (receiver interval = 50 m). (b) and (e) are their interpolation. (c) and (f) show the differences between interpolation result and original 25 m interval data.

송신원모음으로 압력성분(pressure component)만을 사용하였다. 수신기는 수심 200 ~ 250 m 하부인 해저면에 480개가 위치하였고, 수신기의 간격은 약 25 m로 다른 탐사에 비해 상대적으로 넓은 수신기 간격을 가지고 있다.

압력성분의 공통송신원모음 자료(Fig. 8(a))를 보면 직접파, 반사파, 4초 이후에 회절되어 들어온 회절파, 그리고 다른 송신원에 의한 이벤트들이 좌측 트레이스들의 4.5초 이후에 확인할 수 있고, Fig. 8(b)의 주파수-파수 진폭 스펙트럼으로부터 공간적 알리아싱이 많이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 여기서 직접파보다 먼저 기록된 굴절파와 상부의 기계적 잡음의 경우 추후 자료처리를 진행하는데 있어 불필요하기 때문에 뮤팅(muting)을 통해 사전에 제거하였다.

현장 자료는 사이의 값을 내삽하는 경우 정답이 없기 때문에 개발된 작업흐름도의 성능을 검증하기 위해 우선 25 m 자료의 홀 수 번째 트레이스만을 빼내어 수신기 간격이 50 m인 자료를 만들었다. Fig. 9(a)와 (d)는 수신기 간격을 50 m로 넓은 시간 영역과 주파수-파수 영역의 자료로 내삽의 입력 자료로 사용되며, 주파수-파수 영역의 진폭 스펙트럼을 보면 Fig. 8의 본래 자료보다 심한 알리아싱을 나타내는 것을 확인할 수

있다. Fig. 9(b)와 (e)는 기존의 방법을 통해 25 m간격으로 내삽을 수행한 결과 각각 시간 영역과 주파수-파수 영역이며 입력자료의 나이퀴스트 파수인 0.01 m^{-1} 까지만 파수를 찾게 되고 공간적 알리아싱 문제를 전혀 해결하지 못하는 것을 볼 수 있다. 또한 본래자료(Fig. 8)와의 차이를 보여주는 Fig. 9(c)와 (f)를 통해 공간적 알리아싱을 일으키는 기울기가 큰 이벤트와 함께 다른 송신원으로부터 들어오는 이벤트에 대해서 내삽이 제대로 수행되지 않는 것을 볼 수 있다.

반면 Fig. 10(a)와 (c)는 개발된 작업흐름도를 기반으로 내삽을 수행한 결과로 각각 공간영역과 주파수-파수영역으로 나이퀴스트 파수인 0.01 m^{-1} 이상의 파수를 복구하며 내삽을 수행한 것을 볼 수 있다. 또한 본래자료(Fig. 8)와의 차이를 보여주는 Fig. 10(b)와 (d)를 통해 잡음 이외의 이벤트가 거의 없이 내삽이 수행된 것을 확인할 수 있고 내삽을 통해 잡음을 제거하는 효과도 얻을 수 있음을 알 수 있다. 실제로 잡음은 Fig. 10(d)와 같이 주파수-파수영역에서 작은 크기의 산발적인 에너지 분포를 갖는다는 특성을 이용하여 많은 최신 내삽 기법들이 현장자료의 잡음제거에도 이용되고 있다(Xu *et al.*, 2005; Vassallo *et al.*, 2010). 하지만 다른 송신원으로부터 들어오는

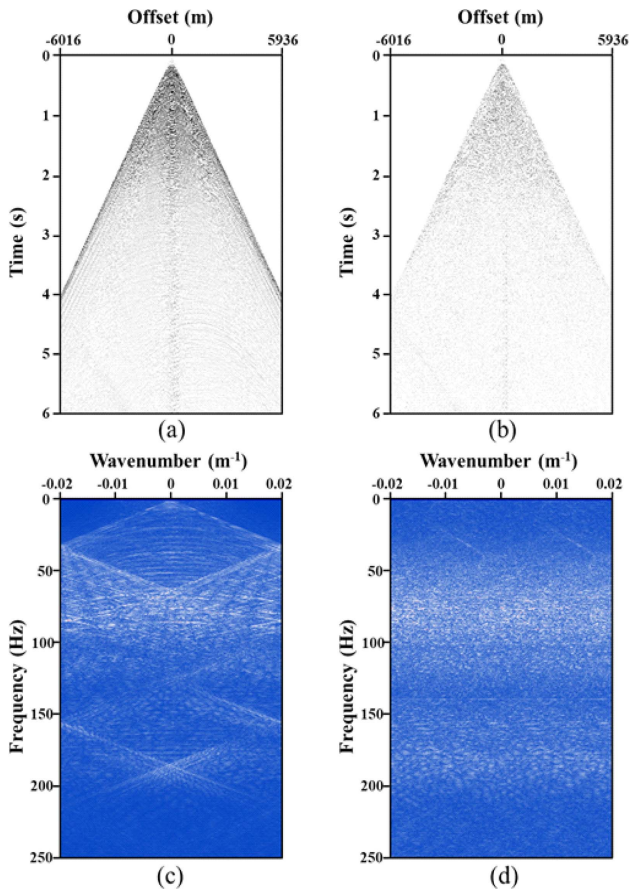


Fig. 10. Result of Ricker wavelet based Matching Pursuit interpolation using moveout correction for high order spatial aliasing existing case (Fig. 9a, 9b). (a) and (b) are their inverse moveout correction results after interpolation. (b) and (d) show the differences between interpolation result and original 25 m interval data.

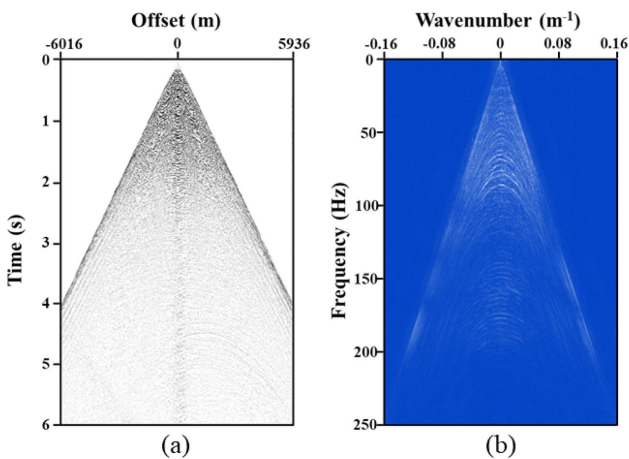


Fig. 11. Result of Ricker wavelet based Matching Pursuit interpolation using moveout correction for the 25 m spacing OBC data which has spatial aliasing. In order to remove aliasing, we interpolate input data to 3.125 m. (a) and (b) show that spatial aliasing is clearly disappeared.

이벤트 같은 경우에는 일반적인 신호와 반대되는 기울기를 가져 시간차 보정을 적용하면 기울기가 더욱 증가하여 공간적 알리아싱이 남아있기 때문에 내삽이 수행되지 못하는 한계를 나타내었다.

마지막으로 공간적 알리아싱이 존재하지 않는 자료를 만들기 위하여 원래의 현장자료인 25 m의 자료사이를 수신기 간격 3.125 m로 내삽을 수행하여 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11(b)의 주파수-파수 영역을 보면 공간적 알리아싱이 존재했던 나이퀴스트 파수인 0.01 m^{-1} 이상의 파수를 모두 복구하였고 입력 자료에서 확인이 잘 되지 않았던 100 Hz 이상의 주파수 영역의 이벤트 또한 제대로 확인이 가능하였다. 하지만 마찬가지로 다른 송신원으로부터 에너지가 들어온 부근과 같은 경우는 내삽이 매끄럽게 수행되지 못하는 한계를 나타내었다.

결론

일반적으로 사용되는 시간차 보정의 경우에는 정확한 속도 정보가 필요하고 stretch에 대한 고려를 해야 한다. 하지만 수신기에 기록된 파의 기울기를 줄여 공간적 알리아싱의 영향을 감소시키는 용도로 시간차 보정이 사용될 경우에는 정확한 속도 정보가 필요하지 않을 뿐만 아니라 stretch에 대한 고려를 하지 않아도 되는 장점이 있다. 이러한 장점을 통해 Kamil *et al.* (2014)은 P파 성분만이 존재하는 다성분의 스트리머 자료에서 시간차 보정을 적용한 정현파 기반의 다성분 Matching Pursuit 내삽 기법을 통해 효과적으로 공간적 알리아싱 문제를 해결하였다. 하지만 OBC 자료의 경우에는 P파와 S파가 혼재되어 있어 앞서 제안된 방법을 그대로 적용하는 것이 제한된다. 따라서 이 연구에서는 OBC 자료에서의 공간적 알리아싱 문제를 해결하기 위한 방법으로 시간차 보정을 적용한 리커 요소파 기반의 단일성분 Matching Pursuit 내삽 기법에 대한 작업흐름도를 제안하였다.

제안한 기법의 효용성을 확인하기 위해 수신기 간격이 비교적 넓어 공간적 알리아싱이 발생하는 OBC 탐사를 가정한 합성 탄성과 자료로 만들어 기존의 Matching Pursuit 내삽 기법과 시간차 보정을 적용한 Matching Pursuit 내삽 기법을 비교하였다. 그 결과, 시간차 보정을 적용한 경우 효과적으로 공간적 알리아싱 문제를 해결하며 내삽을 수행할 수 있었다. 또한 OBC 현장 자료에 적용한 결과, 시간차 보정을 적용함에 있어 오프셋이 증가하는 방향으로 기울기가 커지는 경우에는 이벤트의 기울기가 더욱 커지기 때문에 공간적 알리아싱을 줄이지 못하는 부분이 발생한다. 이를 제외하고는 공간적 알리아싱이 심한 직접파 뿐만 아니라 반사파와 회절파에 대해서도 내삽을 성공적으로 수행할 수 있었다. 또한 현장자료에 존재하는 무작위 잡음도 내삽 시 효과적으로 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 2016년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다 (No. 20164010201120, 20162010201980). 그리고 이 연구를 위해 OBC 탐사 자료를 제공하고 게시할 수 있는 권한을 허락해 주신 TGS에게 감사의 말씀을 드립니다.

References

- Choi, J., Byun, J., and Seol, S. J., 2014, Wavelet Based Matching Pursuit Method for Interpolation of Seismic Trace with Spatial Aliasing, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **17**(2), 88-94 (in Korean with English abstract).
- Choi, J., Byun, J., Seol, S. J., and Kim, Y., 2016, Wavelet-based multicomponent matching pursuit trace interpolation, *Geophys. J. Int.*, **206**(3), 1831-1846.
- Han, B., Seol, S. J., and Byun, J., 2012, Elastic modelling in tilted transversely isotropic media with convolutional perfectly matched layer boundary conditions, *Explor. Geophys.*, **43**(2), 77-86.
- Kamil, Y. I., Vassallo, M., Brouwer, W., Nichols, D., Cowman, M., and Özbek, A., 2014, Joint crossline reconstruction and 3D deghosting of shallow seismic events from multi-measurement streamer data, *76th Ann. Internat. Mtg., EAGE Expanded Abstracts*, doi: 10.3997/2214-4609.20141450.
- Kim, B., Jeong, S., Byun, J., and Seol, S. J., 2012, Curvelet transform-based POCS in fk domain, *82nd Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 1-5.
- Liu, B., and Sacchi, M. D., 2004, Minimum weighted norm interpolation of seismic records, *Geophysics*, **69**(6), 1560-1568.
- Mallat, S. G., and Zhang, Z., 1993, Matching pursuits with time-frequency dictionaries, *IEEE Trans. Signal process*, **41**(12), 3397-3415.
- Naghizadeh, M., and Sacchi, M. D., 2010, Seismic data reconstruction using multidimensional prediction filters, *Geophys. Prospect*, **58**(2), 157-173.
- Schonewille, M., Klaedtke, A., and Vigner, A., 2009, Anti-alias anti-leakage Fourier transform, *79th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 3249-3253.
- Spitz, S., 1991, Seismic trace interpolation in the FX domain, *Geophysics*, **56**(6), 785-794.
- Özbek, A., Özdemir, A. K., and Vassallo, M., 2009, Interpolation by matching pursuit, *79th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 3254-3258.
- Porsani, M. J., 1999, Seismic trace interpolation using half-step prediction filters, *Geophysics*, **64**(5), 1461-1467.
- Robertsson, J. O., Moore, I., Vassallo, M., Özdemir, K., van Manen, D. J., and Özbek, A., 2008, On the use of multi-component streamer recordings for reconstruction of pressure wavefields in the crossline direction, *Geophysics*, **73**(5), A45-A49.
- Vassallo, M., Özbek, A., Özdemir, K., and Eggenberger, K., 2010, Crossline wavefield reconstruction from multi-component streamer data: Part 1—Multichannel interpolation by matching pursuit (MIMAP) using pressure and its crossline gradient, *Geophysics*, **75**(6), WB53-WB67.
- Xu, S., Zhang, Y., Pham, D., and Lambaré, G., 2005, Antileakage Fourier transform for seismic data regularization, *Geophysics*, **70**(4), V87-V95.
- Yang, P., Gao, J., and Chen, W., 2012, Curvelet-based POCS interpolation of nonuniformly sampled seismic records, *J. Appl. Geophys.*, **79**, 90-99.