

## 시간경과 탄성과 자료의 교차균등화를 위한 제약적 최적 맞춤필터링 방법

최윤경<sup>1\*</sup> · 지준<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한성대학교 지구환경자료처리실험실  
<sup>2</sup>한성대학교 정보시스템공학과

### A Constrained Optimum Match-filtering Method for Cross-equalization of Time-lapse Seismic Datasets

Yun Gyeong Choi<sup>1\*</sup> and Jun Ji<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Earth Environmental Data Processing Lab., Hansung University  
<sup>2</sup>Department of Information System Engineering, Hansung University

**요약:** 저류층 감시(reservoir monitoring)를 위해서는 시간경과(time-lapse) 탄성과 자료들을 비교하는 방법이 주로 사용되며, 시간경과 탄성과자료로부터 저류층에서의 변화에 의한 차이만을 추출해 내는 기술이 핵심이라 할 수 있다. 본 논문에서는 시간경과 탄성과자료로부터 저류층에서의 변화만을 추출하기 위한 방법으로 기존의 교차균등화(cross-equalization) 방법과 개선된 최적화 방법을 실험 및 비교해 보았다. 기존의 방법론으로는 주파수 띠틈 균등화(bandwidth equalization)와 위상보정(phase rotation)을 주파수 영역과 시간 영역 그리고 혼합영역에서 각각 구현하여 그 성능을 비교해 보았으며, 이러한 방법들이 갖고 있는 고주파수가 손실되는 한계를 극복할 수 있는 제약적 최적화 필터링(constrained optimum filtering) 방법론을 제안 및 실험해 보았다. 새로이 제안된 제약적 최적화 필터링 방법은 최적화된 맞춤필터를 구함으로써 저류층 변화성분의 주파수띠폭을 넓히는데 개선된 결과를 보여주었다.

**주요어:** 시간경과 탄성파, 교차균등화, 맞춤필터, 4차원 탄성파탐사

**Abstract:** The comparison between time-lapse seismic datasets is the most popular method in the reservoir monitoring. The method of extracting the changes only due to the change in the reservoir is the essential technique in the comparison of time-lapse seismic datasets. In the paper, the conventional cross-equalization approaches and an enhanced optimized approach have been tested and compared each other. As conventional approaches, the bandwidth equalization and phase rotation methods have been tested in frequency, time and mixed domains, respectively and their results were compared each other. In order to overcome the limit of the conventional approaches, which loses high frequency components, a new constrained optimum filtering method was proposed and experimented. The new constrained filtering method has shown the improvement in broadening the bandwidth of the components of reservoir changes by acquiring optimized match filter.

**Keywords:** time-lapse seismic, cross-equalization, match filter, 4D seismic

## 서론

시간경과(time-lapse) 탄성파 기술은 지하의 유체이동을 관찰하기에 유용한 도구로 인식되고 있다. 이 기술은 시간에 따른 지하의 물성변화는 오직 저류층생산과 관련된 것이라는 가정에 기초하고 있으며, 저류층에 대한 암석학적 지식을 바탕으로 다른 시기에 행해진 탄성파 자료로부터 포화도 변화를 유

추할 수 있게 된다. 과거에는 일반적인 퇴적암의 온도에 따라 민감하게 변하는 탄성파 속도(Wang and Nur, 1986)를 이용한 증기주입(steam injection)된 지역의 저류층 감시를 위한 최적의 목표였다(Lumley, 1995, 남명진과 김원식, 2011). 최근에는 유체 파라메타에 덜 민감하게 반응하는 탄성파 반응을 나타내는 물주입(water-flood) 감시(Johnstad *et al.*, 1992)를 위한 4D 탄성파 기법의 사용에 대한 관심이 높아지고 있다.

저류층 감시에서 공통된 문제는 자료들의 정확한 비교와 유체이동에 따른 변화를 식별하는 것이다. 단순한 비교는 자료관측의 재현이 가능할 경우와 그 변화가 유체에 의한 경우에만 적절하다. 하지만 이러한 경우는 없으며 다른 원인의 변화가 항상 개입되게 된다. 자료취득의 반복성을 최대화시키기 위한

2012년 1월 16일 접수; 2012년 2월 23일 수정; 2012년 2월 24일 채택;  
\*Corresponding author  
E-mail: yungyeong\_choi@hanmail.net  
Address: 104-604, Hyundai Apartment, Chodang-Dong, Gangneung, Korea

방법으로 영구적인 땅폰(geophone) 배열을 사용할 수도 있으나, 송신기 차이로 인해서 완전한 반복성을 실제적으로 얻기가 어려운 것이 현실이다. 탐사 획득 과정에서 나올 수 있는 비반복적 잡음의 원인으로는 서로 다른 측선배열 형태(격자의 방향, 단위 격자의 크기 (bin sizes), 별림거리(offset), 방위각 등); 다른 송신파형 또는 다른 송신원 발사방향; 다른 수신기 하드웨어 또는 다른 수신기 전개 방법; 케이블 페더링 등에 의한 송신원과 수신기의 위치 오차; 다른 탐사 장비와 다른 탐사 수행원; 해수면의 변화(날씨, 해수면, 조류, 모호한 잡음 등)이 있다. 탐사 처리 과정에서 나올 수 있는 비반복적 잡음의 원인으로는 다른 자료처리 회사, 다른 알고리즘 실행, 처리 중 자료의 위치 및 배열 표현의 오차, 처리 과정의 순서가 다르므로 인해 오는 차이, 자료 의존적 처리 과정, 서로 다른 도움 변수(속도 모델, 정적 초동 결정 등), 또는 새로운 처리 과정의 도입으로 인한 차이 등이 있다. Ross와 Altan(1997)은 곱풀기(deconvolution), 다중파제거, 그리고 축척과 같은 자료 의존적 연산자를 사용하면 처리 과정에서 오차를 크게 발생시킬 수 있다고 경고했으며, Porter-Hirsche와 Hirsche(1998)는 송곳 곱풀기와 같은 신호 향상 과정은 반복성을 해칠 수 있지만,  $f-x$  곱풀기와 같은 통계적 잡음 감쇠 알고리즘은 탄성파의 반복성을 향상시킬 수 있다고 주장하였다.

원치 않는 변화가 주어진 상황에서, 이를 어떻게 적절히 처리할 수 있을 지를 묻는 것은 당연하다. 교차균등화(cross-equalization)는 이러한 탐사들 간의 자료취득과 자료처리의 차이를 제거하는 방법들을 통틀어 지칭하는 용어이다. 교차균등화는 일반적으로 신호대 잡음비(SNR)가 비교적 높은 참반사 보정 겹쌓기 단면(migrated stack section)에 적용되며(Ross *et al.*, 1996) 유체에 따른 변화량 인식 여부에 집중된다. 여기에서 교차균등화는 다음과 같은 단계들을 순차적으로 적용하게 된다.

1. 탐사자료들을 공통좌표로 정렬
2. 탐사자료들의 시작 시간 일치화
3. RMS 에너지 균형화(balancing)
4. 주파수 띠틈 일치화
5. 위상 보정

교차균등화의 일반적인 접근법은 탐사자료의 일정부분을 취하여 물성변화가 없는 부분으로 간주하며, 변화가 있는 부분과 없는 부분 간의 동등한 상태를 가정하게 된다. 이는 물성변화가 없는 부분의 체계적인 변화가 목표 부분의 것과 같음을 의미한다. 따라서 교차균등화를 위한 매개변수는 물성변화가 없는 부분에서의 변화를 제거하기에 적합하도록 선택되며, 이를 관심지역에 적용하게 된다.

1980년대는 유전에 대하여 3D 탐사가 행해졌으며, 90년대에 들어 종종 자료취득이 다시 행해졌다. 이러한 경우에 대부분의 자료취득 변수가 전혀 다르게 되며, 일반적으로 최근의 자료가 좀 더 높은 주파수 띠틈을 갖게 된다. 따라서 교차균등

화 알고리즘에서는 서로 다른 주파수 띠틈의 자료를 같은 주파수 띠틈의 자료로 만들어 주는 것이 주된 목적이 된다. 본 논문에서는 Rickett (1997)이 제안한 시간 및 주파수 영역에서의 주파수 띠틈 평활화와 위상보정을 하는 방법들을 구현하여 시험하였으며, 주파수 띠틈이 좁은 자료의 띠틈을 확장하는 새로운 방법론을 제안하고 있다.

## 4D 모의 자료

본 연구에서는 교차균등화 알고리즘을 실험하기 위해서 ‘Qdome’ 모의자료(Claerbout, 1994)에 기초한 두 개의 시간경과 3D 자료(Fig. 1(a)와 1(c))를 사용하였다. 모의자료는 현장 자료의 복잡한 상황을 모두 나타낼 수 없는 한계를 갖는다. 현장에서의 여러 가지 복합적인 환경으로 인해 교차균등화 과정에서 문제가 발생할 수 있다. 모의자료는 현장의 모든 문제를 포함하지 못하지만, 복잡한 여러 가지 문제들을 독립적인 작은 부분으로 만들 수 있으며, 이런 특성으로 인해 알고리즘 검증에 위한 유용한 시험장을 제공할 수 있다. 본 연구는 띠틈평활화와 위상보정 문제만을 다루기 때문에, 교차균등화 전체 과정 중 위의 부분만을 다루기 위해 합성 자료를 사용한 것이다.

‘Qdome’으로 생성된 모의자료는 3D 돔모양의 지질구조를 기초로 하며, 두 개의 수평 부정합면을 경계로 상부의 수평층과 하부의 경사층, 그리고 중간에 가우시안 형태의 배사구조로 이루어져 있다. 가우시안을 나타내는 방정식은 다음과 같으며

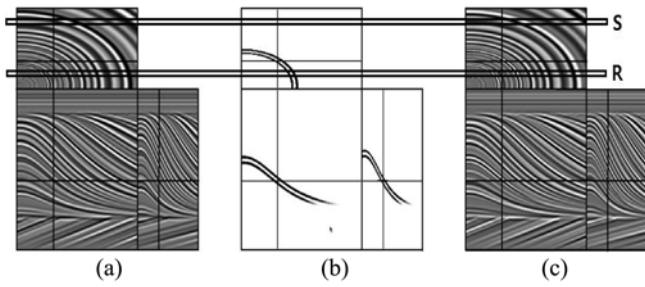
$$z(x,y,z) = e^{-(x^2+y^2)/t^2} \quad (1)$$

이를  $t$ 에 대해서 풀면

$$t(x,y,z) = \sqrt{\frac{x^2+y^2}{-\ln z}} \quad (2)$$

이다. 본 3차원 모형 생성 알고리즘은 먼저 난수 생성기를 이용하여 시간  $t$ 에 대한 일차원 임피던스 함수를 만든다. 모형의 각 공간점  $(x, y, z)$ 에서 그 점에 대응되는 시간  $t(x, y, z)$ 의 임피던스를 사용하고 마지막으로 임피던스의 로그 미분으로 반사계수를 정의한다. 모형의 복잡성을 증가시키기 위해, 시간 함수  $t(x, y, z)$ 에 미소 부가 상수를 더하여 임의의 3-D 부분 영역의 모서리를 따라 단층부가 생성되도록 하였다. cross-line의 측선간격을 in-line 측선간격의 두 배로 하였기 때문에 가우시안 돔의 수평 단면이 in-line 방향에 비해 cross-line 방향의 분해능이 떨어진다는 점을 감안해야 할 것이다. 유체의 유동을 모사하기 위해 중간층 배사구조의 아래 구간에 변화를 주었다. 시간경과 자료를 모사하기 위해, 앞에서 만든 3-D 모형에 0이 아닌 위상의 낮은 주파수 통과 필터(non-zero phase lowpass filter)를 적용하였으며, 이는 기초(base) 자료 모사에 해당된다. 최종적으로 가우시안 잡음을 첨가하였다.

위에서 언급한 바와 같이 먼저 감시(monitor) 자료에 해당되



**Fig. 1.** 3-D Qdome models : (a) base survey, (b) anomaly along the reservoir layer, and (c) monitor survey obtained by adding (a) and (b), and modifying frequency bandwidth and phase. Upper bar indicates the position of the training area and lower bar shows the position of the target area.

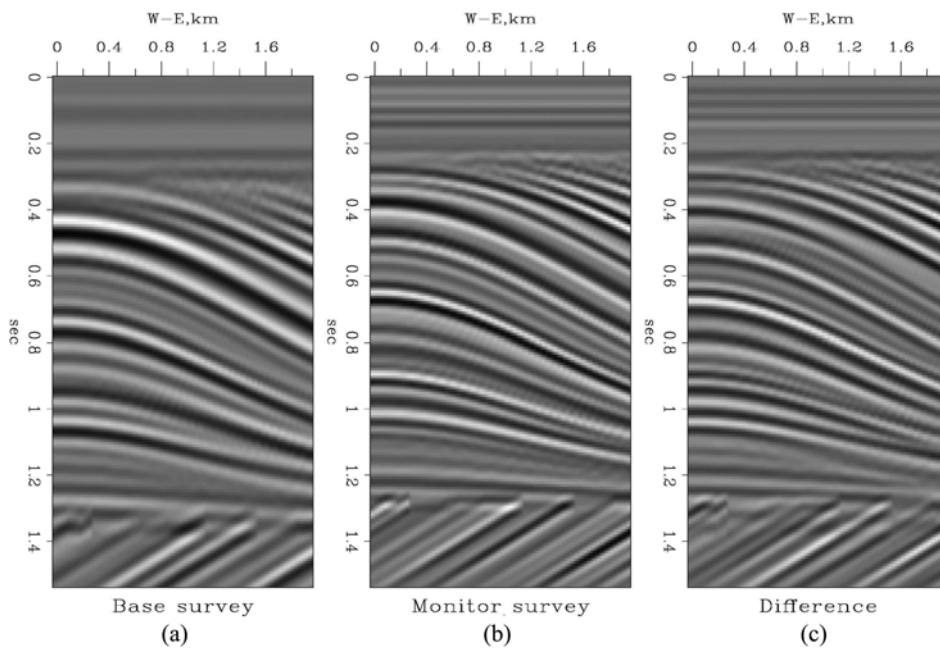
는 3D 탄성파기록을 생성한 후, 낮은 주파수 통과 필터를 적용하여 기초(base) 자료를 생성하였다(Fig. 1(a)). 저류층의 유입을 모사하는 탄성과 기록을 더하여(Fig. 1(b)) 감시자료를 만들었다(Fig. 1(c)). 저류층이 관통하지 않는 동일지역 수직단면을 훈련영역(training area)으로 선택하였는데, 이는 참반사 보정 겹쌓기 자료 중 시간경과에 따른 유체의 변화가 거의 없다고 가정할 수 있는 영역에 해당된다(Fig. 1의 S지역). 저류층을 관통하는 관심영역(target area)도 그림과 같이 선택하였다(Fig. 1의 R지역). Fig. 2와 3은 훈련지역의 시간경과에 따른 기초자료 단면 및 감시자료 단면과 그들의 차이와 관심지역의 기초자료 단면과 감시자료 단면 및 그들의 차이를 각각 보여주고 있다. 시간경과에 따른 지질구조적 변화가 거의 없다고 가정할 수 있는 두 훈련지역의 차이를 나타내는 단면이 탄성

파 탐사의 자료취득 및 처리과정의 비반복성에 의해 완전히 제거되지 않음을 볼 수 있다(Fig. 2(c)). 훈련지역과 관심지역의 차이가 생기는 이유는 교차균등화 과정을 거치지 않았기 때문이다. 한편, 이러한 두 지역의 시간경과 자료에 대한 스펙트럼을 비교하여 Fig. 4에 도시하였는데, 훈련지역과 관심지역의 주파수띠폭이 기초자료는 대략 0 ~ 25 Hz이며, 감시자료는 0 ~ 35 Hz로 일치하며, 훈련지역과 관심지역의 스펙트럼은 약간 다른 양상으로 분포되어 있다. 일반적으로 최근의 탐사일수록 주파수띠폭이 높아지므로 어느 정도 시간경과 모형자료를 모사한 것으로 생각된다. 저류층을 관통하는 관심지역에 대해서도 기초탐사 단면과 감시탐사 단면을 도시하였다(Fig. 4). 위의 시간경과 모형자료에 대해 훈련지역의 차이를 줄이는 맞춤필터링을 수행한 후 도출된 파라미터를 사용하여 관심영역에 적용할 것이다.

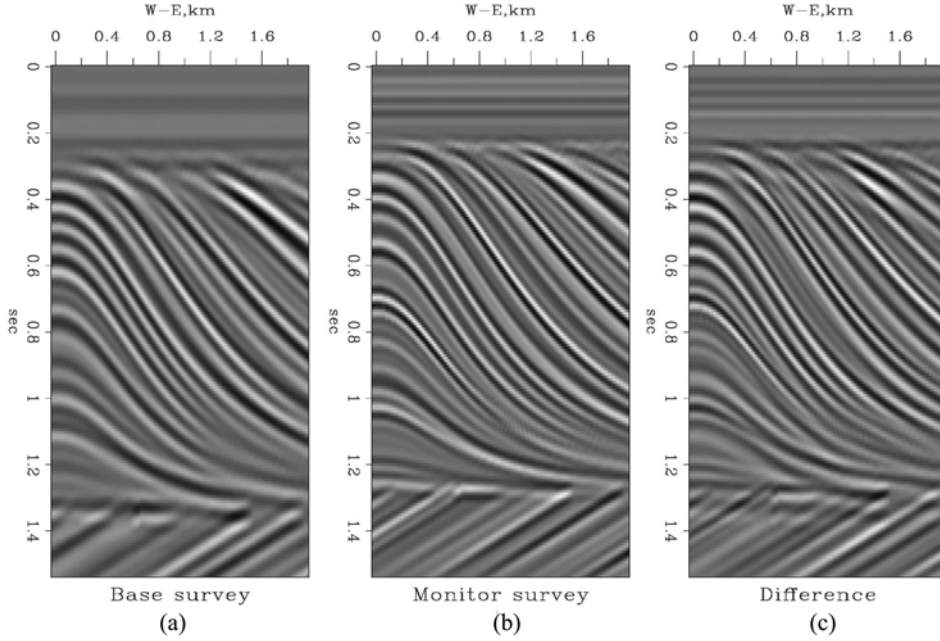
### 기존의 상호 평활화 기법

#### 주파수 영역 방법

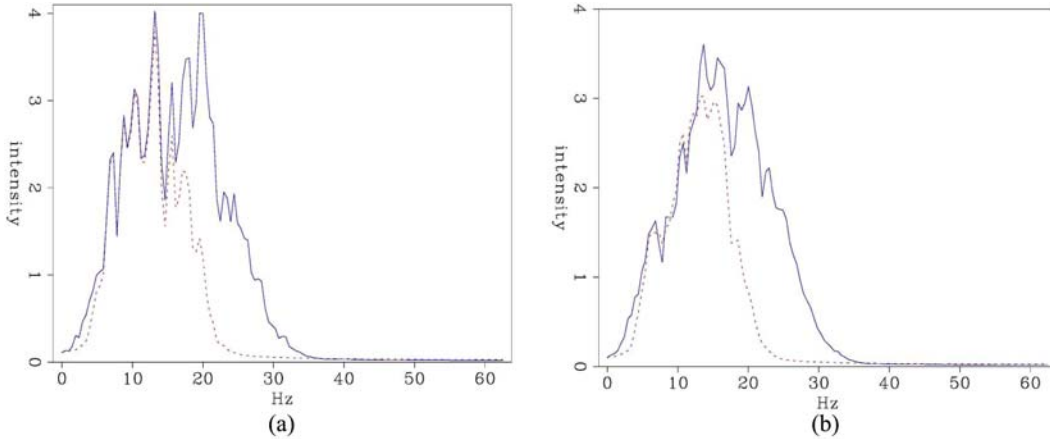
주파수 영역에서 복소수 형태로 주어지는 크기와 위상의 관계에 해당하는 주파수띠폭의 평활화와 위상매칭은 서로 직교(orthogonal) 관계에 있다. 따라서, 주파수띠폭 평활화와 위상매칭은 독립적인 순차적 적용이 가능하다. 우선, 주파수 띠틈폭의 평활화 단계를 적용하기 위해 훈련지역의 기초자료  $s_1$  과 감시자료  $s_2$  를 시간축에 대하여 푸리에 변환하여 스펙트럼  $S_1$  과  $S_2$  를 얻은 후, 모든 공간위치의 스펙트럼들을 더하여 줌으로써 평균 스펙트럼  $\hat{S}_1$  과  $\hat{S}_2$  를 다음과 같이 생성한다.



**Fig. 2.** The training windows of (a) the base survey and (b) the monitor survey at the same position, which is marked as S in Fig. 1. These slices are through synthetic cubes with no fluid movements. (c) The difference section shows the non-repeatability of seismic reflection survey.



**Fig. 3.** The target slices of (a) the base survey and (b) the monitor survey at the same position containing fluid movements, which is marked as R in Fig. 1. (c) The difference section shows the nonrepeatability of seismic reflection survey also.



**Fig. 4.** Spectra of (a) the training windows and (b) the target windows of the base survey (dashed line) and the monitor survey (solid line).

$$\hat{S}_i(\omega) = \sum_x |S_i(\omega, x)|^2, \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

그리고 두 개의 스펙트럼으로부터 각 주파수에서의 최소값을 취하여 목표 스펙트럼을 구하게 된다.

$$A(\omega) = \min(\hat{S}_1(\omega), \hat{S}_2(\omega)) \quad (4)$$

이렇게 구해진 필터를 관심영역의 스펙트럼 모양으로 바꾸는데 다음의 식을 이용한다.

$$S_i(\omega, x) = S_i(\omega, x) \frac{\sqrt{A(\omega)}}{|S_i(\omega)| + \epsilon}, \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

여기에서  $\epsilon$ 는 분모부분이 0이 되는 것을 방지하기 위하여 삽입된 작은 수이다.

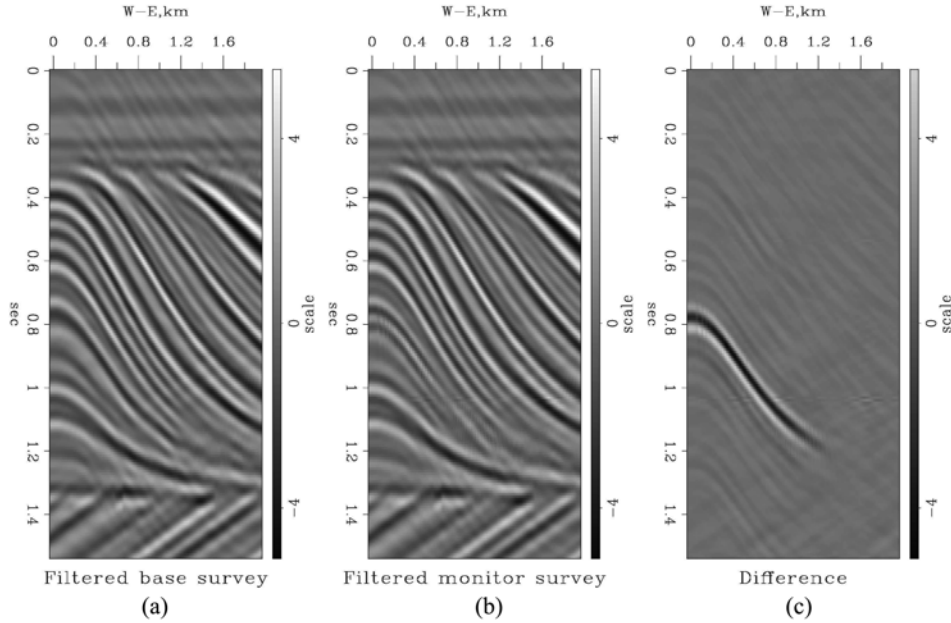
스펙트럼 연산자  $A(\omega)$  뿐만 아니라, 훈련지역 두 자료간의 각 주파수에 대한 평균 위상 차이  $\Theta(\omega)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\Theta(\omega) = \arg\left\{ \sum_x S_1(\omega, x) \right\} - \arg\left\{ \sum_x S_2(\omega, x) \right\} \quad (6)$$

이렇게 구해진 필터는  $S_2$ 를  $S_1$ 과 같은 주파수띠폭과 위상을 갖도록 매핑하는데 사용된다.

$$S_2(\omega, x) = S_2(\omega, x) e^{-i\Theta(\omega)} \quad (7)$$

위상과 주파수띠폭 보정이 직교하더라도 보정을 적용하는 순서는 문제가 될 수 있다. 이는 평균 위상으로 위상의 평균대신에 평균값의 위상을 사용했기 때문이다. 따라서 이러한 상황



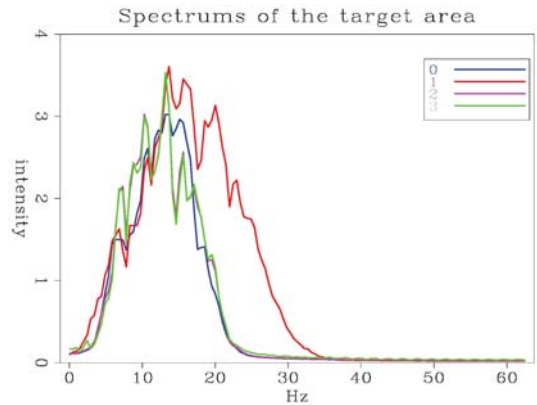
**Fig. 5.** Results of frequency-domain algorithm of the target slice. (a) filtered base survey using equation (5) and (7), (b) filtered monitor survey using equation (5) and (7), and (c) the difference between (a) and (b).

에서는 주파수띠폭 보정이 위상보정에 앞서는 것이 옳으며, 보정 순서를 지키는 것이 매우 중요하다(Rickett, 1997). 이렇게 처리된 주파수 영역에서의 교차균등화 결과가 Fig. 5에 보여지고 있다. (a)는 맞춤필터링을 적용한 관심지역의 기초자료  $\hat{r}_1$ , (b)는 맞춤필터링을 적용한 관심지역의 감시자료  $\hat{r}_2$ , (c)는 (b)에서 (a)를 뺀 차이단면(difference section)  $\hat{r}_2 - \hat{r}_1$ 이며, 절대적인 비교를 위해서 이후의 모든 알고리즘에 대해 차이단면은 동일한 스케일로 도시하였다. 교차균등화 이전에는 기초자료와 감시자료의 모든 부분에서 차이를 보였으나(Fig. 2), 교차균등화가 된 이후에는 실제로 변화가 발생한 저류층 부분에서만 명확한 차이를 보임을 알 수 있다(Fig. 5). 하지만 저류층 이외의 대부분지역에서도 상대적으로 작은 크기의 차이가 잡음으로 나타나고 있음을 관찰할 수 있다. 주파수 분석 결과 관심지역의 맞춤필터링을 적용한 기초자료  $\hat{r}_1$  (2번 보라색 실선)와 감시자료  $\hat{r}_2$  (3번 녹색 실선)의 주파수띠폭은 거의 일치하나, 저주파수 띠폭에서 기초자료  $r_1$  (0번 청색 실선)보다 높은 진폭이상을 보이는데, 이런 이유로 인해 잡음이 생긴 것으로 생각된다(Fig. 6).

**시간 영역 방법**

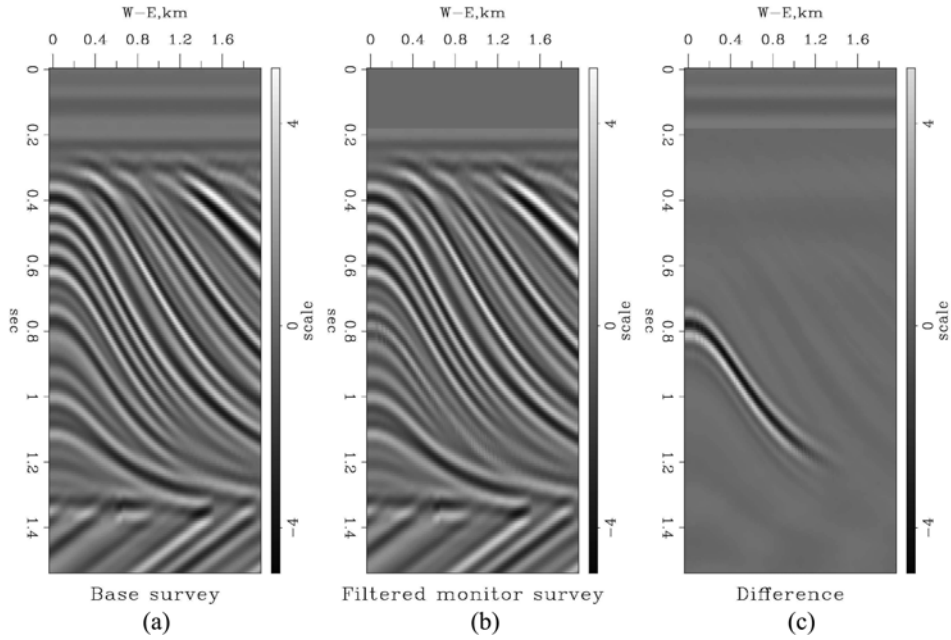
시간 영역에서는 시간영역의 필터의 위상을 제약하기 어렵기 때문에 주파수띠폭과 위상의 문제가 쉽게 분리되지 않는다. 그러나 훈련지역의 감시자료  $s_2$ 를 기초자료  $s_1$ 에 매핑하는 필터  $A$ 를 다음과 같은 회귀문제의 최소화를 통해서 얻을 수 있다.

$$As_1 - s_2 \approx 0 \tag{8}$$

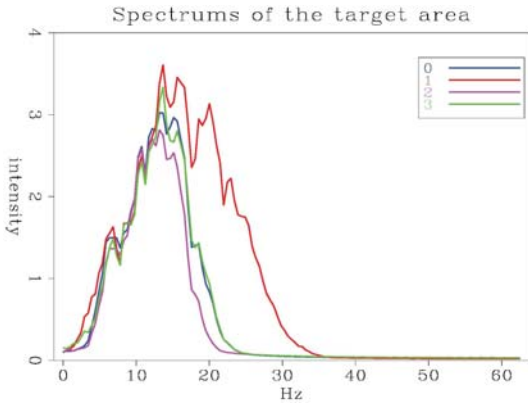


**Fig. 6.** Spectra of the target slices using the frequency-domain algorithm of the base survey (0: blue line), the monitor survey (1: pink line), the filtered base survey (2: purple line), and the filtered monitor survey (3: green line).

이러한 접근법에서는  $s_2$ 에 존재하는  $s_1$  성분을 찾는 데 효과적이다. 만약에 공통성분이 없다면  $A$ 는 “0”이 될 것이며 차이에 해당하는  $As_1 - s_2 = s_2$ 가 될 것이다. 이러한 매칭필터의 결과가 Fig. 7에 보여지고 있다. 이러한 접근법은 수백 개의 계수를 필요로 하는 주파수영역의 방법에 비하여 단지 14개의 필터계수만을 사용하여도 주파수 영역의 결과만큼 성공적인 결과를 나타낼 수 있다. 시간 영역 방법의 또 다른 장점은 무작위 잡음이 자연스럽게 제거된다는 사실을 Fig. 7로부터 확인할 수 있다. 관심지역의 기초자료  $r_1$  (0번 청색 실선)와 맞춤필터링된 감시자료  $Ar_2$  (3번 녹색 실선)의 주파수 띠폭이 매우 유사하며(Fig. 8), 이는 Fig. 7의 결과를 뒷받침한다.



**Fig. 7.** Results of time-domain algorithm of the target slice. (a) base survey, (b) the filtered monitor survey using the filter from equation (8), and (c) the difference between (a) and (b).



**Fig. 8.** Spectra of the target slices using the time-domain algorithm of the base survey (0: blue line), the monitor survey (1: pink line), the filtered base survey (2: purple line), and the filtered monitor survey (3: green line).

**혼합 영역 방법**

혼합영역방법은 주파수영역과 시간영역의 장점을 취하는 방법으로서, 주파수띠폭 평활화는 주파수 영역에서 수행하고, 위상매칭은 시간영역에서의 필터로 수행하는 방법을 말한다. 따라서, 주파수 띠폭을 제어할 수 있는 환경과 전띠폭통과(all-pass) 필터의 심하게 요동치는 위상의 문제를 걱정하지 않아도 되는 장점이 있다(Rickett, 1997). 이러한 혼합영역에서의 교차 균등화 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 시간영역 알고리즘과 비교하기 위해 관심영역의 기초자료와 맞춤필터링된 감시자료의 차이를 도시하였다(Fig. 9). 그러나 주파수영역 알고리즘에서 나타났던 잡음이 사라지지 않았고, 시간영역 알고리즘에 비해 크게 개선되는 것으로 보이지 않았다. 주파수 분석 결과 주파

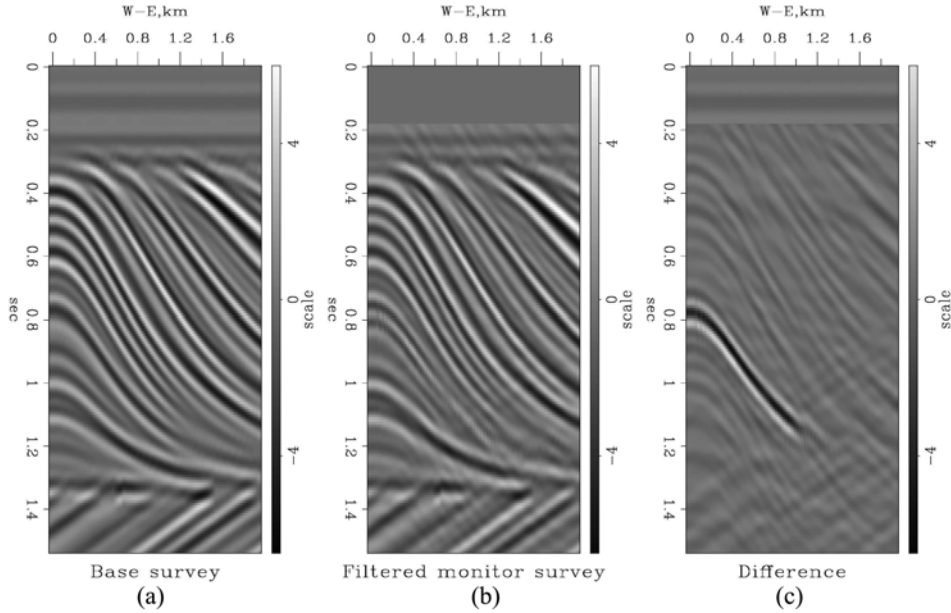
수영역 알고리즘과 유사하게 맞춤필터링을 적용한 관심지역의 기초자료  $r_1$  (2번 보라색 실선)와 감시자료  $r_2$  (3번 녹색 실선)의 주파수띠폭은 거의 일치하나, 저주파 띠폭에서 기초자료  $r_1$  (0번 청색 실선)보다 높은 진폭이상을 보인다(Fig. 10).

**제약적 최적 맞춤필터링  
(Constrained Optimum Matched-filtering)**

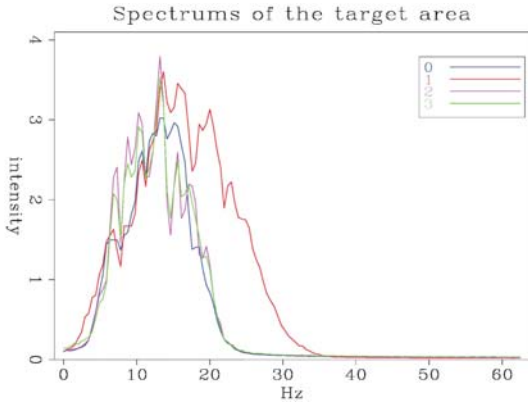
앞에서 살펴본 기존의 세 가지 방법들 모두 두 자료를 교차 균등화하는데 성공하였다고 볼 수 있다. 하지만 그들 모두 감시자료에 저주파 띠폭 통과필터를 적용하여 기초자료의 주파수 띠폭에 맞춘 결과라고 해석할 수 있다. 이러한 접근법은 물론 잡음을 키울 염려가 없다는 측면에서는 안전한 전략이라고 할 수 있다. 하지만 흥미로운 질문은 “고주파 자료에 포함된 정보를 저주파 띠폭 자료의 주파수 띠폭을 넓히는 데 활용할 수 있는가?” 이다. 이는 디콘벌루션과 유사하며, 잡음을 증폭하게 될 위험이 항상 존재하게 된다. 이를 위해서 제약조건을 갖는 최적화된 맞춤필터를 얻을 필요가 있으며, 두 가지 정도의 제약조건을 생각해 볼 수 있다.

**제약조건 I : 필터링된 자료가 감시자료와 유사하도록**

첫 번째 방법은 훈련지역의 두 자료  $s_1$ 과  $s_2$ 에 적용되었을 때 같은 결과  $m$ 을 낚는 필터  $A_1$ 과  $A_2$ 를 각각 찾는 방법으로서, 이때 추가적으로 고주파 성분이 가능하면 유지되도록 하는 것이다. 이를 위해서는 필터링된 결과  $m$ 이 고주파 성분을 더 많이 갖고 있는 감시자료  $s_2$ 와 같아야 한다는 조건을 다음과 같



**Fig. 9.** Results of mixed-domain match-filtering. (a) base survey, (b) time-domain filtered monitor survey using the filter from equation (8) to the filtered data using equation (5), and (c) the difference between (a) and (b).



**Fig. 10.** Spectra of the target slices using the mixed-domain algorithm of the base survey (0: blue line), the monitor survey (1: pink line), the filtered base survey (2: purple line), and the filtered monitor survey (3: green line).

이 추가하여, 이 식들을 회귀문제로 풀면 된다.

$$\begin{aligned} A_1 s_1 - m &= 0 \\ A_2 s_2 - m &= 0 \\ \lambda(s_2 - m) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

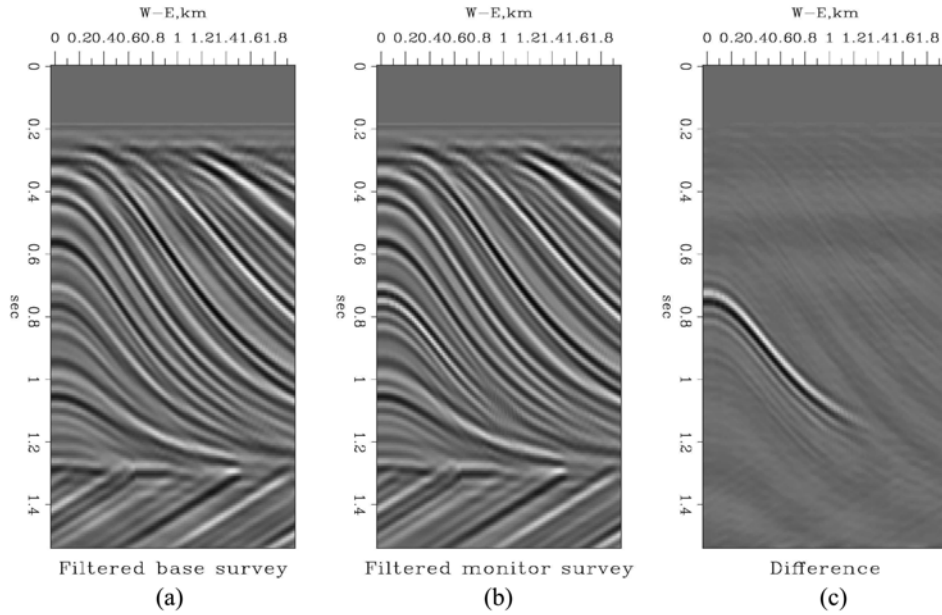
여기에서  $\lambda$ 는 상대적인 가중치를 주는 상수로서 사용자가 적절히 선택해야 한다. 위의 식 (9)를 미지의 값들인  $m, a_1, a_2$ 를 하나의 벡터로 구성하여 행렬식으로 다시 표현해 보면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} -I & S_1 & 0 \\ -I & 0 & S_2 \\ \lambda I & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \lambda s_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

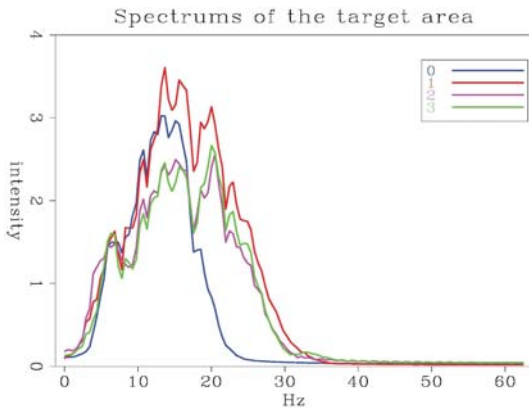
$\lambda$ 가 0에 가까워질수록  $m$ 이  $s_2$ 와 무관하게 되므로  $s_2$ 의 제약을 받지 않는 결과를 얻게 되며,  $\lambda$ 가 클수록  $m$ 이  $s_2$ 에 근접된 결과를 얻게 되는데, 이  $\lambda$ 값이 너무 커지면 맞춤필터링 결과가 좋지 않게 된다. 본 연구에서는  $\lambda$  값을 0.1로 하여 맞춤필터링을 수행하여 기존의 맞춤필터링 알고리즘과 같은 방식으로 도시하였다(Fig. 11). 식 (10)을 풀어 교차균등화를 적용하는 방법론은 1997년 Ricket의 논문에서 방법론은 제안되었으나 실제로 구현에 성공하지 못하였다. 본 연구에서는 이를 구현하는데 성공하였으며, 도시된 결과를 통해 기존의 방법보다 잡음은 더 억제하면서도 고주파수 성분이 보강된 저류층만의 변화를 추출 할 수 있음을 확인할 수 있다. 보강되어 얻어진 고주파수 성분은 Fig. 12에 도시된 스펙트럼에서 더욱 뚜렷이 보이고 있다. 주파수 분석 결과 필터링된 기초자료  $A_1 r_1$  (2번 보라색 실선)과 필터링된 감시자료  $A_2 r_2$  (3번 녹색 실선)의 주파수 분포가 전반적으로 일치하거나 비슷한 양상을 보였다. 저주파 띠폭(약 18 Hz 이하)에서는 거의 일치하였으며, 두 자료 모두 기존의 알고리즘의 결과에서는 볼 수 없었던 고주파수 성분이 존재하며, 이들 주파수 분포는 감시자료  $r_2$  (1번 적색 실선)의 고주파수 분포와 진폭은 다르지만 비슷한 양상을 보여주고 있다(Fig. 12).

**제약조건 II : 필터링된 자료가 더 많은 고주파를 포함하도록**

두 번째 방법은 첫 번째 방법과 유사하게 훈련지역의 두 자료  $s_1$ 과  $s_2$ 에 적용되었을 때 같은 결과  $m$ 을 낳는 필터  $A_1$ 과  $A_2$ 를 각각 찾는 방법이지만, 추가적인 고주파수 성분을 강화하기 위해 목적의 제약은 저주파수 띠폭 통과 필터  $L$ 을 적용한 결과가 최소화 되도록 제약을 주는 방법이다. 본 연구에서는 단



**Fig. 11.** Results of constrained optimum filtering approach - Constraint Type I. (a) the filtered base survey using matched-filter  $A_1$ , (b) the filtered monitor survey using matched-filter  $A_2$ , (c) the difference between (a) and (b).



**Fig. 12.** Spectra of the target slices using Constraint Type I algorithm of the base survey (0: blue line), the monitor survey (1: pink line), the filtered base survey (2: purple line), and the filtered monitor survey (3: green line).

순한 형태의 저주파수 띠틈 통과 필터  $L$ 로서 길이가 4인 삼각필터를 사용하였다. 이를 위해서는 필터링된 결과  $m$ 에 대한 저주파수 띠틈 통과 필터링 결과가 0이 되어야 한다는 조건을 다음과 같이 추가하여, 일련의 식들을 회귀문제로 풀면 된다.

$$\begin{aligned} A_1 s_1 - m &= 0 \\ A_2 s_2 - m &= 0 \\ Lm &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

앞의 경우와 같이, 위의 식 (11)를 미지의 값들인  $m$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ 를 하나의 벡터로 구성하여 행렬식으로 다시 표현해 보면 다음과 같다.

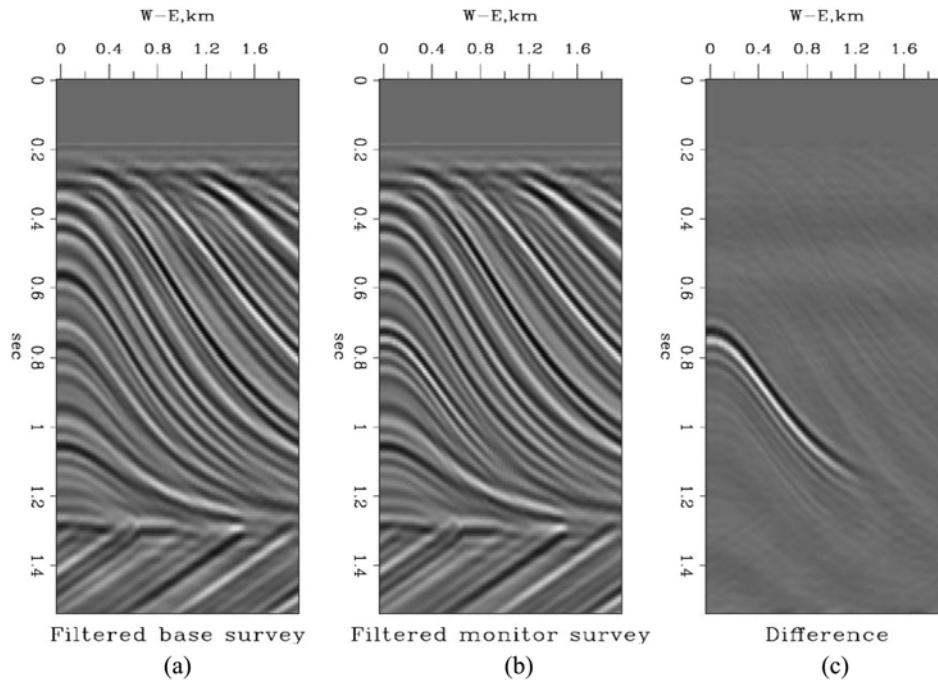
$$\begin{bmatrix} -I & S_1 & 0 \\ -I & 0 & S_2 \\ L & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Fig. 13에서 본 제약적 최적화 필터링 방법 또한 앞에 소개된 제약방법과 마찬가지로, 기존의 방법들보다 잡음은 더 억제하면서도 고주파 성분이 보강된 저주파수의 변화를 추출할 수 있음을 알 수 있다. 보강되어 얻어진 고주파 성분은 Fig. 14에 도시된 스펙트럼에서 더욱 뚜렷이 보이고 있다. 주파수 분석 결과는 전반적으로는 첫 번째 방법과 유사하였다. 저주파통과를 최소화하는 제약 때문에 저주파 띠틈의 진폭과 고주파 띠틈의 진폭을 비교하였을 때 저주파 띠틈의 진폭이 전반적으로 약간 줄어드는 양상을 보이기는 하지만, 필터링된 기초자료와 필터링된 감시자료의 주파수 분포가 전반적으로 일치하거나 비슷한 양상을 보인다(Fig. 14). 본 연구에서 제안하는 제약적 맞춤필터링 최적화 과정으로 시간경과 탄성과 자료를 감시하는 경우, 기존의 알고리즘에서 나타났던 저주파 필터로 인한 고주파 성분 손실을 최소화하는 고분해능의 결과를 얻을 수 있을 것이라 생각한다.

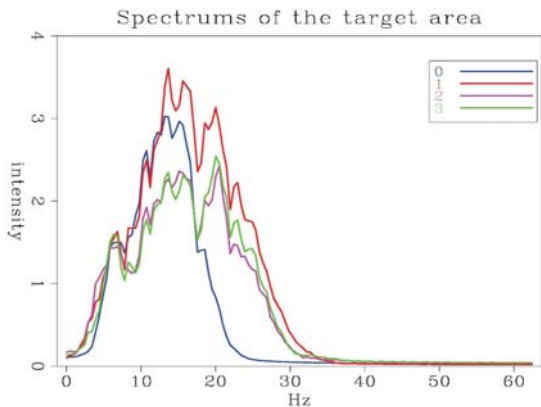
## 결론

시간경과 3차원 탄성과 모니터링을 수행하기 위해서는 탄성파탐사 결과의 비반복성으로 인해 탐사 획득 및 처리 과정에서 발생하는 차이를 최소화하는 교차균등화 과정이 필요하다. 교차균등화 과정은 매칭필터링, 진폭수정, 정적 보정 등의 여러 통계적 절차를 포함하는데, 맞춤필터링이란 주파수 띠틈 평





**Fig. 13.** Results of constrained optimum filtering approach - Constraint Type II. (a) the filtered base survey using matched-filter  $A_1$ , (b) the filtered monitor survey using matched-filter  $A_2$ , (c) the difference between (a) and (b).



**Fig. 14.** Spectra of the target slices using Constraint Type II algorithm of the base survey (0: blue line), the monitor survey (1: pink line), the filtered base survey (2: purple line), and the filtered monitor survey (3: green line).

활화와 위상회전을 통한 보정으로 이루어진다. 본 연구에서는 중합후 시간영역 참반사 보정 결과물로 간주할 수 있는 ‘qdomo’ 합성모형을 이용하여 맞춤필터링을 수행하였다. 먼저 기존의 방법으로 알려진 주파수영역 알고리즘, 시간영역 알고리즘, 혼합영역 알고리즘에 대해 저류층의 존재유무를 알려주는 탄성과 단면과 주파수 분석 스펙트럼을 비교 분석하였다. 주파수영역 알고리즘은 각 주파수의 최소값을 선택하고, 시간영역 알고리즘은 저주파 필터링을 수행하기 때문에 감시자료의 주파수띠폭을 기초자료의 주파수띠폭에 맞추게 되고, 이로 인해 감시자료에 포함된 고주파성분을 사용할 수 없게 되는 한계가 있다.

이를 극복하기 위한 방법으로 제약적 최적화 맞춤필터링 방법론을 제안 및 실험해 보았다. 시간영역 알고리즘에서는 하나의 필터만을 사용하였으나, 제약적 맞춤필터링에서는 두 개의 필터를 사용하였으며, 기초자료와 감시자료에 각각 필터를 적용하여 같은 결과를 얻도록 하였다. 같은 결과를 얻는 제약으로 첫 번째는 필터링된 자료가 감시자료와 비슷하도록 가중치를 주는 방법이며, 두 번째는 필터링된 자료가 고주파를 더 많이 포함하도록 제약을 주는 방법이다. 새로이 제안된 제약적 최적화 필터링 방법은 최적화된 맞춤필터를 구함으로써 저류층 변화성분의 주파수띠폭을 넓히는데 개선된 결과를 보여주었으며, 그 결과로 기존의 교차균등화 방법보다 더 고해상도의 저류층 변화를 얻을 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 한성대학교 교내연구비 지원으로 수행되어 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

남명진, 김원식, 2011, *시간경과 탄성과 저류층 모니터링 개론*, 지구물리와 물리탐사, **14**, 203-213.  
 Claerbout, J. F., 2012, *Image Estimation by Example: Geophysical Soundings Image Construction*, Stanford Exploration Project, <http://sepwww.stanford.edu/sep/prof/>.  
 Johnstad, S. E., Uden, R. C., and Dunlop, K. N. B., 1992, 3-D

- seismic reservoir monitoring, *62nd Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, **11**, 275-277.
- Lumley, D. E., 1995, 4-D seismic monitoring of an active steamflood, *65th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, **14**, 203-206.
- Rickett, J., 1997, Bandwidth-equalization and phase-matching of time-lapse seismic dataset, Report **94**, *Stanford Exploration Project*, 33-44.
- Ross, C. P., and Altan, M. S., 1997, Time-lapse seismic monitoring: Some shortcomings in nonuniform processing, *The Leading Edge*, **16**, 931-937.
- Ross, C. P., Cunningham, G. B., and Weber, D. P., 1996, Inside the cross-equalization black box, *The Leading Edge*, **15**, 1233-1240.
- Wang, Z., and Nur, A., 1986, Effect of temperature on wave velocities in sandstones and sands with heavy hydrocarbons, *46th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, **5**, 3-5.