지구물리와 물리탐사 Geophysics and Geophysical Exploration
Vol. 20 No. 3, 2017, p. 176~184 https://doi.org/10.7582/GGE.2017.20.3.176

ISSN 1229-1064 (Print)
ISSN 2384-051X (Online)

모서리 반응을 이용한 효과적인 Structure-Oriented Filter-Edge Preserving (SOF-EP) 기법

김보나 · 변중무* · 설순지

한양대학교 자원환경공학과

Efficient Structure-Oriented Filter-Edge Preserving (SOF-EP) Method using the Corner Response

Bona Kim, Joongmoo Byun*, and Soon Jee Seol

Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

요 약: 탄성파 탐사 영상에 적절한 평활화 기법을 적용하게 되면 무작위 잡음이 제거되고 신호의 연속성이 증가되어 보다 정밀한 해석을 할 수 있다. 자료의 특성을 해치지 않으면서 효율적으로 탄성파 탐사자료를 평활화 하기 위해서 최근까지 활발하게 연구 및 사용되고 있는 방법 중 하나가 SOF-EP (Structure-Oriented Filter-Edge Preserving) 기법이다. 이 기법은 자료의 진폭이 큰 곳에서 작은 곳으로 확산되는 원리를 이용하며, 수평층과 같은 연속성이 있는 구조에서는 층을 따라 확산 혹은 평활화가 일어나게 해줌으로써 층 내의 연속성을 증가시키고 무작위 잡음을 제거하는 효과를 가져온다. 또한, 단층과 같은 불연속적인 주요 구조 경계에서의 확산 혹은 평활화를 막기 위하여 연속성 결정 인자를 설정함으로써 평활화 기법의 정밀성을 높일 수 있다. 하지만, 연속성 결정인자를 계산하기 위하여 사용되어 온 구조지향 닮음(structure-oriented semblance) 기법의 경우, 사용하는 필터의 크기나 자료의 양에 따라 많은 시간이 소요되기 때문에 효율성이 떨어지는 한계를 가진다. 이 연구에서는 먼저 SOF-EP 기법을 구현하고, 현장자료에 단계적으로 적용함으로써 그 효용성을 확인하였으며 다음으로 효율적으로 연속성 결정인자를 계산할 수 있는 모서리 반응 기법(corner response method)을 제안 및 적용하여 기존의 방법과 비교하였다. 그 결과 약 6000배 이상 계산 시간을 단축할 수 있음을 확인하였다.

주요어: 평활화, 필터, 구조지향, 구조 텐서, 모서리 반응, 확산

Abstract: To interpret the seismic image precisely, random noises should be suppressed and the continuity of the image should be enhanced by using the appropriate smoothing techniques. Structure-Oriented Filter-Edge Preserving (SOF-EP) technique is one of the methods, that have been actively researched and used until now, to efficiently smooth seismic data while preserving the continuity of signal. This technique is based on the principle that diffusion occurs from large amplitude to small one. In a continuous structure such as a horizontal layer, diffusion or smoothing is operated along the layer, thereby increasing the continuity of layers and eliminating random noise. In addition, diffusion or smoothing across boundaries at discontinuous structures such as faults can be avoided by employing the continuity decision factor. Accordingly, the precision of the smoothing technique can be improved. However, in the case of the structure-oriented semblance technique, which has been used to calculate the continuity factor, it takes lots of time depending on the size of the filter and data. In this study, we first implemented the SOF-EP method and confirmed its effectiveness by applying it step by step to the field data. Next, we proposed and applied the corner response method which can efficiently calculate the continuity decision factor instead of structure-oriented semblance. As a result, we could confirm that the computation time can be reduced by about 6,000 times or more by applying the corner response method.

Keywords: Smoothing, Filter, Structure-oriented, Structure Tensor, Corner response, Diffusion

Received: 10 July 2017; Revised: 19 August 2017;
Accepted: 21 August 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.

서 론

탐사자료를 처리 하는 과정에서 자료에 필터 등을 적용하는 평활화(smoothing) 기법들은 무작위 잡음을 제거하고 자료의 연속성을 증가시키기 위하여 사용되어 왔다. 기존에 자료를 평활화 하기 위하여 일반적으로 많이 사용되는 방법으로는 이동평균법(moving average) 등이 있으며, 이 방법을 적용할 경우 무작위 잡음을 효과적으로 제어하고, 주변 신호와의 연속성을 증가시킬 수 있다. 이러한 자료처리 과정은 무작위 잡음이 포함되어 있는 자료를 이용하여 해석을 할 경우, 보다 안정적인 해석을 할 수 있게 도움을 준다.

그러나, 기존의 방법들은 자료 전체에 동일한 필터가 적용되기 때문에 단층(fault)이나 암염돔(salt dome) 혹은 가스 침니(chimney)와 같은 불연속적인 구조들이 있는 자료에 적용하게 될 경우, 구조들의 경계가 불명확해지면서 정확한 해석을 어렵게 할 수 있다. 특히나, 최근 해석 기술들의 발전으로 자동 추적(auto-tracking) 기법들을 이용하여 층의 경계를 분석하는 등 다양한 자동화 기법들이 개발되고 있기 때문에, 중요한 지질학적 구조를 유지하며 자료 처리할 수 있는 기술들의 필요성이 급증하고 있다.

Weickert (1998)는 방향성을 고려한 평활화 기법인 이방성 확산 기법을 가장 먼저 자료처리 분야에 적용 및 제안하였으며, 그 후, Fehmers and Hocker (2003)는 SOF-EP (Structure-Oriented Filter-Edge Preserving) 혹은 반 고흐 필터(Van Gogh filter)로 불리는 기법을 제안하였다. 이것은 탄성파 탐사자료에서 경계를 분석하여 주요 경계를 유지하면서 방향성을 고려한 확산을 통해 평활화 결과를 얻는 방법이다. 이때, 경계의 위치에서 확산의 연속성을 결정하는 인자를 계산하는 다양한 방법이 있으며, 주로 닮음(semblance)이나 결맞음(coherency)이 이용되었다(Gersztenkorn and Marfurt, 1999). 특히, Hale (2009)은 보다 정확한 연속성 결정 인자를 계산하기 위하여 구조지향 닮음(structure-oriented semblance) 기법을 제안 및 적용하였고, 최근까지 활발하게 사용되고 있다(Zhou *et al.*, 2014). 그러나 이 방법은 사용하는 필터의 크기나 자료의 양에 따라 많은 시간이 소요되기 때문에 방대한 3차원 탄성파 탐사 자료에 적용하기에는 효율성이 떨어지는 한계를 가진다.

이 연구에서는 Fehmers and Hocker (2003)가 제안한 SOF-EP 기법을 소개하고 그 효율성을 검증하고자 한다. SOF-EP 기법을 소개하기 위하여 먼저 위치에서의 방향정보를 얻기 위한 기법인 구조 텐서(structure tensor)에 대해 소개하고, 추출된 방향을 기반으로 탐사자료를 평활화 하기 위한 기법인 SOF (Structure-Oriented Filter)에 대해 수식적으로 설명한 후, 최종적으로 자료로부터 불연속한 구조를 추출하기 위한 기법인 구조지향 닮음을 적용한 SOF-EP 기법에 대해 소개한다. 마지막으로 소개된 방법들을 알고리듬으로 구현하여 현장 자료에 단계적으로 적용 및 비교해 봄으로써 그 효과를 확인하고 가장 시간이 많이 걸리는 연속성 결정 인자를 보다 빠르게 계산해 주는 모서리 반응 기법(corner response method)을 도입 및 적용하여 기존의 방법을 개선하고자 한다.

Structure-Oriented Filter-Edge Preserving (SOF-EP)

구조 텐서

탄성파자료를 방향에 따라 분석할 때 가장 많이 사용되며, 쉽게 사용될 수 있는 방법이 자료의 기울기 벡터(gradient vector)를 구하는 것이다. 각 자료의 임의의 위치에서 공간과 시간 방향으로 1차 변화율을 계산하는 것과 동일하며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{g} = [g_x, g_z]^T, \tag{1}$$

여기서, g_x와 g_z는 각각 x 방향과 z 방향(시간방향)으로의 1차 변화율을 의미한다.

하지만, 기울기 벡터는 크게 두 가지의 한계를 가지게 된다. 첫 번째로 기울기 벡터는 특정 위치에서 평균적인 방향성을 정확하게 계산할 수 없다. 예를 들어 Fig. 1과 같이 속도가 하부로 갈수록 증가하는 층서구조에 의한 반사면이 있을 때, 반사면 위쪽에서는 파란색 화살표와 같이 아래쪽 방향으로 기울기 벡터가 계산되며, 반사면 아래쪽에서는 빨간색 화살표와 같이 위쪽 방향으로 기울기 벡터가 계산된다. 이때, 그림에서 보여지는 점선 영역에 대한 평균적인 방향성을 계산하게 되면, 두 벡터가 상쇄되어 국부적으로 방향성이 있음에도 불구하고 방향성이 없는 것으로 계산이 되게 된다. 두 번째로, 잡음이 존재하는 자료에서 기울기 벡터는 한계를 가진다. 예를 들어 Fig. 2(a)와 같이 잡음이 없는 깨끗한 자료에서 빨간색 화살표 방향으로 신호를 추출하게 되면, Fig. 2(b)와 같다. 여기서 기

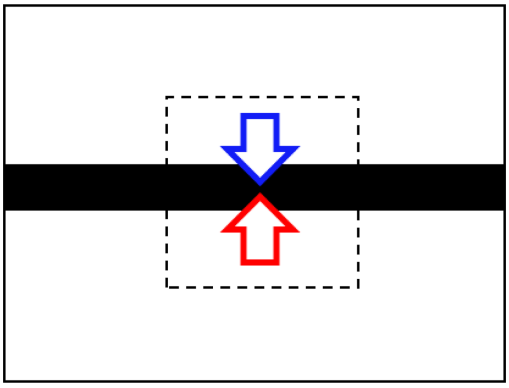


Fig. 1. Example illustration for explaining the limitation of gradient vector when calculating average direction. Blue arrow indicates the gradient vector at the upper location from the horizontal reflection and the red one indicates that at the lower location from it. The dashed box represents the area where we calculate the average direction.

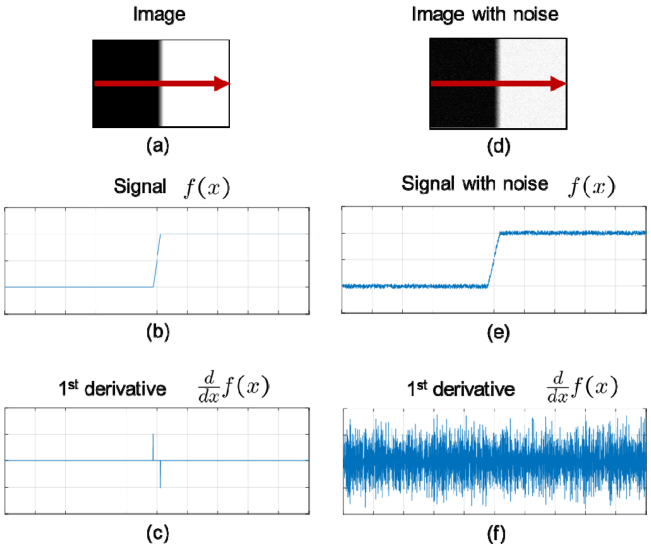


Fig. 2. Example for showing limitation of gradient vector in the noisy data: (a) input image, (b) signal extracted from (a) along the red arrow, (c) the 1st derivative of (b), (d) input image with random noise, (e) signal extracted from (d) and (f) the 1st derivative of (e) (modified from lecture note of Robert Collins, http://www.cse.psu.edu/~rtc12/CSE486/ lecture06.pdf).

울기 벡터인 1차 미분 값을 계산하게 되면, Fig. 2(c)와 같은 결과를 얻을 수 있으며, 이를 통해 신호가 변화하는 위치를 명확하게 확인할 수 있다. 하지만, Fig. 2(d)와 같이 무작위 잡음이 섞여 있는 자료에서 빨간색 화살표 방향으로 신호를 추출하게 되면, Fig. 2(e)와 같으며, 여기서 기울기 벡터인 1차 미분값을 계산하게 되면, Fig. 2(f)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 잡음의 영향으로 인하여 정확한 변화 위치를 확인할 수 없다. 결과적으로 기울기 벡터는 무작위 잡음에 큰 영향을 받으며, 무작위 잡음이 있는 경우, 정확한 기울기 변화를 계산할 수 없고, 계산 결과를 통한 해석이 불가능하게 된다.

이러한 한계를 보완할 수 있는 방법이 기울기 벡터의 곱으로 표현되는 구조 텐서(structure tensor)를 이용하는 것이다. 구조 텐서는 영상 처리 및 컴퓨터 비젼 등 다양한 분야에서 자료의 방향성을 안정적으로 분석하기 위하여 활용되어 왔으며, 임의의 위치 i에서의 2차원 구조텐서, $\mathbf{T}[i]$는 다음과 같이 수식적으로 표현된다(Harris and Stephens, 1988).

$$\mathbf{T}[i] = \begin{bmatrix} t_{xx} & t_{xz} \\ t_{zx} & t_{zz} \end{bmatrix}$$

$$t_{xx} = \sum_r w[r](g_x[1-r])^2$$

$$t_{zz} = \sum_r w[r](g_z[1-r])^2$$

$$t_{xz} = t_{zx} = \sum_r w[r]g_x[i-r]g_z[i-r], \quad (2)$$

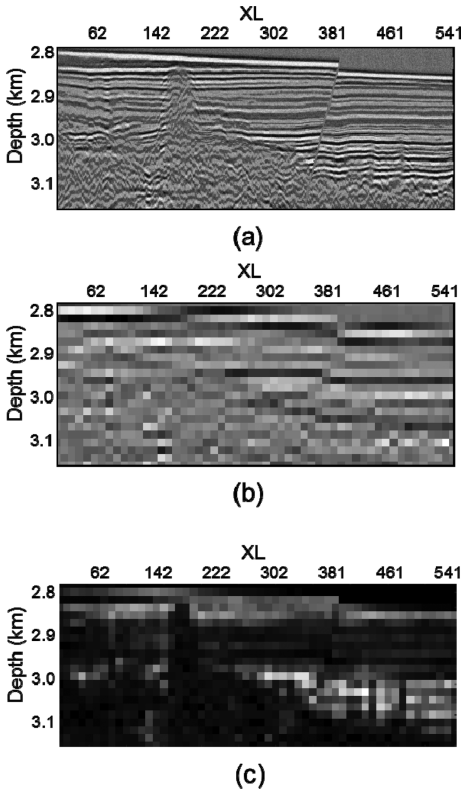


Fig. 3. (a) Original seismic section (No. of time samples = 201 and No. of traces = 486). Average orientation sections (b) calculated using gradient and (c) calculated using structure tensor approach (No. of time samples = 23 and No. of traces = 54).

여기서, $w[r]$은 r 값에 따른 거리 가중치를 의미한다. 주어진 범위에서 합이 1이 되게 설정되며, 일반적으로 가우시안 함수가 많이 사용된다.

구조 텐서의 효과를 앞서 언급한 기울기 벡터의 한계와 비교해보면 다음과 같다. 첫 번째로 평균적인 방향성을 효과적으로 분석할 수 있다. 예를 들어 Fig. 3(a)와 같이 단층과 가스 침니와 같은 특이구조를 포함하는 탄성파 탐사 단면이 있을 때, 201개의 시간샘플과 486개의 트레이스에서 23개의 시간샘플과 54개의 트레이스에서의 평균 방향벡터를 계산해보았다. 이때, 기울기 벡터를 기반으로 g_x와 g_z의 합성벡터 방향을 도시하면, Fig. 3(b)와 같이 주요한 구조가 손상된 방향 정보를 얻게 되지만, 구조 텐서를 기반으로 평균적인 방향성을 계산하여 주 고유벡터 방향에 대해 도시하면, Fig. 3(c)와 같이 단층과 주요한 구조를 유지하면서 방향성에 대한 정보를 추출할 수 있다. 따라서, 구조텐서를 이용할 경우, 특정 위치에서 평균적인 방향성을 기울기 벡터를 이용할 경우 보다 정확하게 계산할 수 있다. 다음으로 잡음이 있는 자료에서 계산된 1차 미분값을 기반으로 분석하는데 한계가 있었던 예시(Fig. 2(f))에서 가우시안 필터를 적용한 후, 1차 미분을 구하게 되면 Fig. 4와 같은 결과를 얻을 수 있다. 앞서 분석이 불가능했던 결과와 달리 변화되는 위치의 정보를 확인할 수 있다. 이것은 구조

텐서를 구할 때, $w[r]$을 이용하여 거리에 따른 가중치를 주는 것과 동일한 효과로 생각할 수 있으며, 무작위 잡음이 있는 자료에서 방향성 분석을 가능하게 해준다.

이러한 특성을 가지는 구조 텐서를 분석하는 방법은 크게 2가지로 정리할 수 있다. 첫번째 방법은 구조 텐서의 고유값 분석을 통해 고유값 및 고유벡터를 계산하고 이를 바탕으로 자료의 방향성을 분석 하는 것이다. 각각의 구조 텐서 마다 고유값 분석을 실시해야 하기 때문에 많은 시간이 소요되지만, 자료의 위치마다 정확한 방향 정보를 얻을 수 있다. 다른 하나의 방법은 모서리 반응(corner response)이라고도 불리우는 R 값을 계산하여 자료를 분석하는 방법이다. 이때의 모서리 반응은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$R = \det \mathbf{T} - k(\mathrm{trace}\mathbf{T})^2, \tag{3}$$

여기서, $\det \mathbf{T}$은 식 (2)에서 계산된 $\mathbf{T}$ 행렬의 행렬식(determinant) 값을 의미하며, $\mathbf{T}$ 행렬의 두 개 고유값의 곱인 $\lambda_1\lambda_2$와 동일한 값을 가진다. $\mathrm{trace}\,\mathbf{T}$은 $\mathbf{T}$ 행렬의 대각합(trace)을 의미하며, $\mathbf{T}$ 행렬의 두 개 고유값을 더한 $\lambda_1+\lambda_2$와 동일한 값을 가진다. 또한 k는 자료에 따라 경험적으로 적용되는 값으로 이 연구에서는 평면에 해당하는 부분이 0에 가까운 값을 가지도록 설정하였다. 따라서, 모서리 반응은 고유값 분석 없이 단시간 안에 계산이 가능하며, R 값을 기준으로 R이 0에 가까운 값을 가지면 평면(flat), R이 음의 값을 가지면 선형 경계(linear edge), 그리고 R이 양의 값을 가지면 모서리(corner)로 자료를 분류할 수 있다. 추가적인 자세한 분류 원리에 대한 설명은 Kim *et al.* (2017)에서 찾아볼 수 있다.

Structure-Oriented Filter (SOF)

SOF 기법은 열의 전도나 유체의 확산 등을 표현하는 확산의 개념을 자료 내의 진폭의 확산으로 표현하여 자료를 평활화 하는데 적용하였으며 수식적으로 그 원리를 자세하게 설명하면 다음과 같다. 먼저, Fick's law (Fick, 1855)를 기반으로 탄성파 탐사의 진폭이 큰 곳에서 작은 곳으로 확산됨을 다음과 같이 표현할 수 있으며,

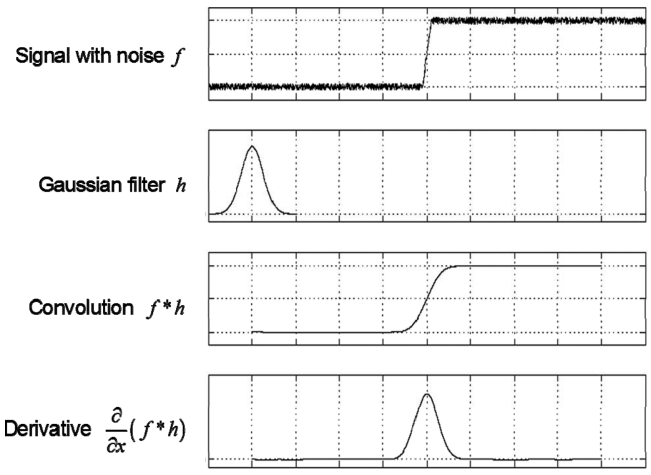


Fig. 4. (a) Signal with random noise, (b) gaussian filter, (c) signal after applying convolution with gaussian filter, and (d) 1st derivative of (c) (modified from lecture note of Robert Collins, http://www.cse.psu.edu/~rtc12/CSE486/lecture06.pdf).

$$\mathbf{j} = -\mathbf{D}\nabla u, \tag{4}$$

여기서 $\mathbf{j}$는 유속벡터(flux vector)를 의미한다. 이때, $\mathbf{D}$는 확산 텐서(diffusion tensor)를 의미한다. $\mathbf{D}$는 앞서 소개된 구조 텐서를 기반으로 계산되며, $\mathbf{D}$의 형태에 따라 확산의 형태가 결정된다. 그리고 ∇u 는 탄성파 탐사 자료 진폭의 기울기를 의미한다.

다음으로, 진폭의 평균값은 변하지 않는다는 연속 방정식을 기반으로 다음과 같이 수식적으로 표현할 수 있으며, 이는 열역학에서 사용되는 에너지 보존의 법칙과 유사하다.

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = -\nabla \mathbf{j}. \tag{5}$$

여기서, τ는 확산시간(또는, 확산단계)과 관련된 변수로 탄성파 탐사 기록 시간과는 무관하며, 확산시간이 경과될수록(확산단계가 진행될수록) 자료 내 진폭의 확산이 많이 일어남을 의미한다. 즉, τ가 클수록 더 많은 평활화 효과를 얻을 수 있게 된다. 식 (4)를 식 (5)에 대입하여 정리하게 되면, 다음과 같은 최종 확산 방정식을 얻을 수 있다:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \nabla(\mathbf{D}\nabla u). \tag{6}$$

이때, 확산시간의 변화량($\partial\tau$)만큼 확산단계가 거듭되면서 확산이 일어나는 정도가 달라지기 때문에 작은 확산시간 변화량을 이용할수록, 확산이 진행되면서 일어나는 변화를 보다 세밀하게 분석할 수 있다. 또한, 앞서 언급한 바와 같이 확산의 형태는 확산 벡터, $\mathbf{D}$의 형태에 따라 크게 좌우된다. 예를 들어 Fig. 5(a)와 같은 자료가 있을 때, $\mathbf{D}$가 스칼라(scalar) 값을 가지며 탄성파 탐사 자료 모든 위치에서 동일한 값을 가진다면, Fig. 5(b)와 같이 모든 영역에서 모든 방향으로 동일하게 확산이 진행되면서 전체적으로 진폭이 감쇄되는 것을 확인할 수 있다. 다음으로 만약 $\mathbf{D}$가 스칼라 값을 가지며, 탄성파 탐사 자료의 위치에 따라 다른 값을 가지게 되면, 임의의 위치에서 모든 방향으로 확산이 동일하게 일어나지만 위치마다 확산의 정도가 다르게 되어 Fig. 5(c)와 같은 결과를 얻게 된다. Fig. 5(b)와 달리 진폭이 보전되면서, 잡음이 줄어든 것을 확인할 수 있다. 위치마다 다른 정도의 확산이 일어나긴 하지만, 여전히 등방성 확산이 발생하기 때문에 추가적으로 확산시간이 경과되면 층서 구조가 손상됨을 예측할 수 있다. 마지막으로 $\mathbf{D}$가 자료의 위치마다 값이 다르며, 텐서의 형태를 가지게 되면, 자료의 위치마다 이방성 확산이 발생하게 되어 Fig. 5(d)와 같

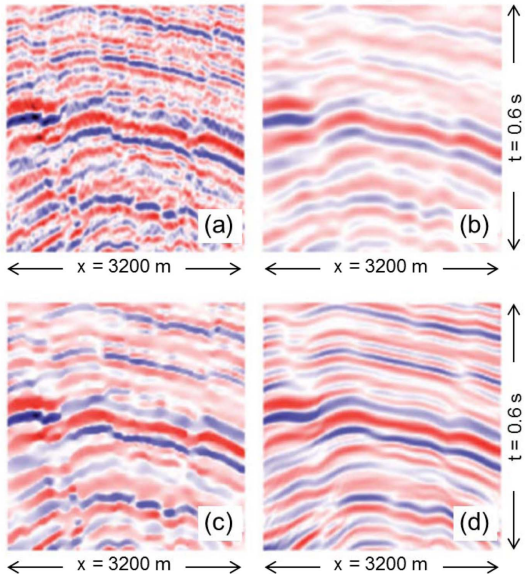


Fig. 5. Different kinds of diffusions applied to seismic data: (a) input, (b) linear diffusion, (c) nonlinear isotropic diffusion (Perona and Malik, 1990), and (d) nonlinear anisotropic diffusion (taken from Fehmers and Hocker, 2003).

은 결과를 얻을 수 있게 된다. Fig. 5(c)와 비교해 보았을 때, 자료의 형태를 유지하면서 층서 구조를 따라 확산이 일어나기 때문에 효과적으로 잡음이 제거되면서 평활화 되는 것을 확인할 수 있다.

그러나 여기서 주목할 점은 Fig. 5(a)의 자료에서 수직적으로 존재하는 단층의 구조들을 확인할 수 있음에도 불구하고, SOF 기법이 적용된 Fig. 5(d)의 경우 단층을 고려하지 않고 평활화 되었기 때문에 단층에 대한 해석이 불가능하게 된다. 따라서, 이를 보완하고 단층과 같은 구조를 유지하면서 평활화를 적용하기 위하여 제안된 방법이 SOF-EP 방법이다.

Structure-Oriented Filter-Edge Preserving (SOF-EP)

단층과 같은 주요 구조를 유지하면서 탄성파 탐사 자료를 평활화 하기 위해서는 자료로부터 단층의 위치를 미리 추출한 뒤, SOF 기법을 적용해 주어야 한다. 이를 위해서 Fehmers and Hocker (2003)는 식 (6)에 연속성 결정 인자인 ε 항을 추가해 주어 그 효과를 얻고자 하였으며, 수식적으로 표현하면 식 (7)과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \nabla(\varepsilon \mathbf{D} \nabla u), \tag{7}$$

여기서, 연속성 결정 인자, ε는 0 부터 1 사이의 값을 가지며, 단층과 같은 불연속 구조에서는 0에 가까운 값을 가지며 수평층과 같은 연속적인 구조에서 1에 가까운 값을 가진다.

ε 값을 계산하는 방법들에는 다양한 방법이 있지만 주로 닮음이나 결맞음을 계산하여 적용해주는 방법들이 대부분이었으며, 최근에는 정확한 닮음 값을 적용하기 위하여 구조지향 닮음 기법이 개발 및 적용되었다(Hale, 2009, Zhou *et al*., 2014). 구조지향 닮음은 가중 닮음(weighted semblance)의 일종으로 가중 닮음은 식 (8) 또는 식 (9)과 같이 일반화하여 수식적으로 표현할 수 있다.

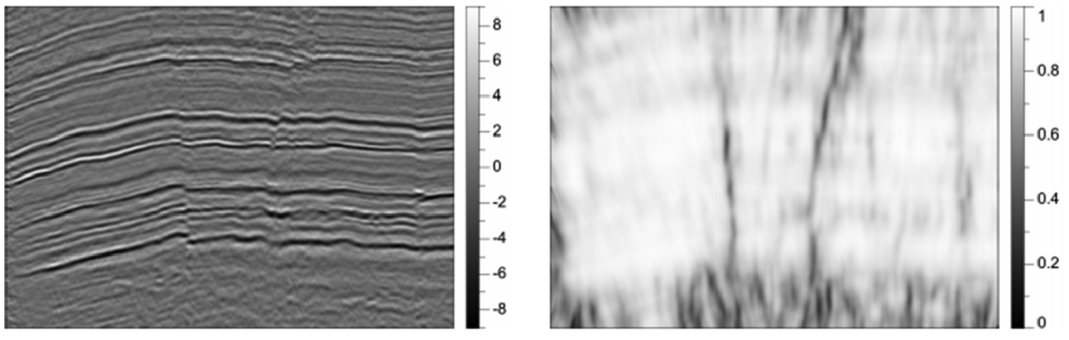
$$\varepsilon[i] = \frac{(\Sigma_j h[i;j] f[j])^2}{\Sigma_j h[i;j] (f[j])^2}, \tag{8}$$

$$\text{또는, } \varepsilon = \frac{\langle f \rangle^2}{\langle f^2 \rangle}, \tag{9}$$

여기서, f는 탄성파 탐사 자료와 같은 입력 자료를 의미하며, j는 입력자료의 위치 인덱스를 의미한다. 또한, h와 $\langle \cdot \rangle$는 평활화 필터를 의미하며, i는 필터의 위치이동 량을 의미한다. 이때, 고유벡터의 방향으로 고려하여 필터를 적용해주는 방법이 구조지향 닮음이며, 식 (10)와 같이 표현된다.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{2,1} = \frac{\langle \langle f \rangle_2^2 \rangle_1}{\langle \langle f^2 \rangle_2 \rangle_1}. \tag{10}$$

예시를 통하여 그 효과를 확인하면 Fig. 6(b)와 같다. 그림에서 보이는 바와 같이 단층이 있는 위치에 값이 0 가까운 값으로 계산되며, 반대로 연속성이 있는 층서 부분에서 1에 가까



(a) (b)

Fig. 6. (a) Input data and (b) result of structure-oriented semblance (taken from Hale, 2009).

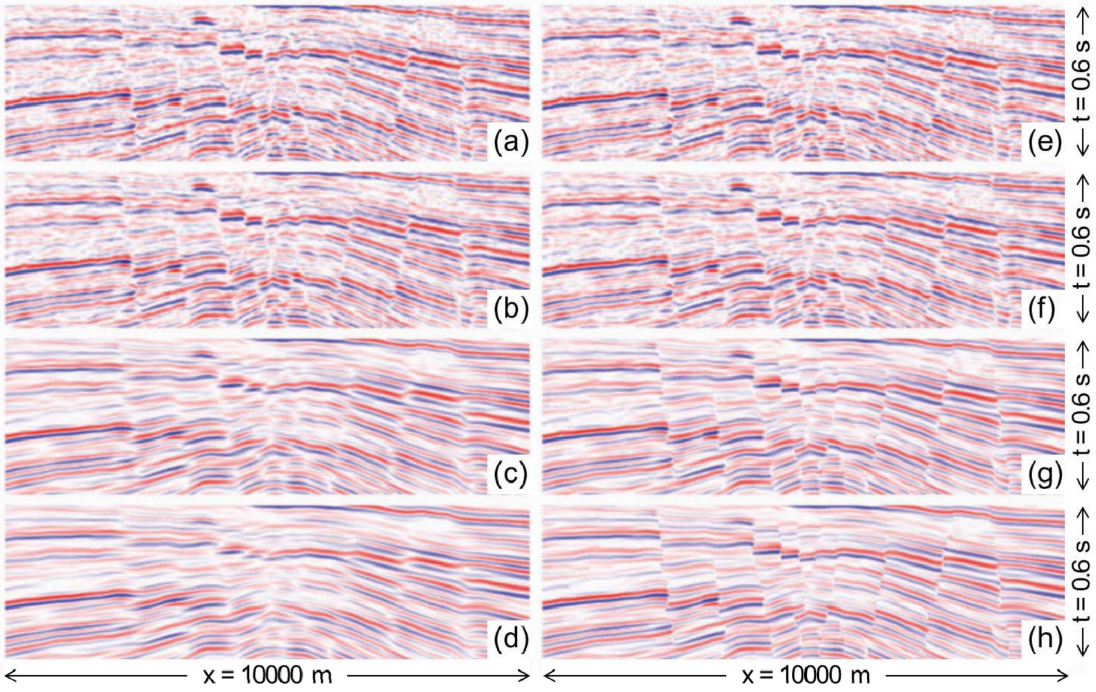


Fig. 7. Anisotropic diffusion on 3D seismic without (a-d) and with (e-h) edge preservation. From top (a and e) to bottom (d and h): 0 (input), 1, 4, and 9 diffusion steps, respectively. By applying more diffusion steps, undulating reflections are gradually straightened and random noises vanish (taken from Fehmers and Hocker (2003)).

운 값으로 계산되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이렇게 계산된 닮음 값을 고려한 SOF 기법에 적용해 주면, 단층과 같은 불연속적인 구조를 유지하면서 잡음을 제어하고 연속성을 향상시키는 SOF-EP의 결과를 얻을 수 있게 된다. 마지막으로 예를 통해 이러한 SOF-EP의 효과를 확인해보면 Fig. 7과 같다. Fig. 7(a) 혹은 (e)와 같이 단층이 존재하는 입력자료에 단순히 SOF 기법을 적용하게 되면, 확산단계가 증가하면서 Fig. 7(b) ~ (d)와 같이 평활화된 결과를 얻을 수 있으며, Fig. 5(d)와 같이 전체적으로 잡음이 제어되고, 연속성이 증가한 결과를 얻을 수 있다. 하지만, 앞서 보였던 예시들과 마찬가지로 단층의 위치에서도 수평층 방향으로 확산이 일어나기 때문에 경계를 정확하게 해석할 수 없게 된다. 그에 반해 계산된 닮음 값을 이용하여 경계를 보존하면서 SOF-EP 기법을 적용하게 되면, 확산단계가 증가하면서 Fig. 7(h)와 같이 효과적인 평활화 결과를 얻을 수 있게 된다. 초기 입력자료인 Fig. 7(e)와 비교하였을 때, 확연하게 잡음이 제거되고, 연속성이 향상된 것을 확인할 수 있으며, Fig. 7(d)와 비교하였을 때, 주요한 단층의 정보가 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있다.

현장자료 적용 및 효과적인 ε값 추출 방법 제안

이러한 장점을 가지는 SOF-EP 기법의 알고리듬을 구현하고 그 효과를 확인하기 위하여 탄성파 탐사자료에 적용해보았다. 알고리듬 적용에 사용된 탄성파 탐사자료는 Fig. 8(a)로 수평적으로 퇴적된 층이 발달되어 있으며, 큰 단층과 가스 침니와 같은 불연속적인 구조가 존재하는 자료를 이용하였다. 이 자료에 가장 일반적으로 사용되는 평활화 기법인 이동평균기법과 방향성을 고려하지 않은 확산 기법, 그리고 방향성을 고려한 확산 기법(SOF 기법)을 적용하여 그 결과와 효과를 비교 분석하였다. 가장 먼저 Fig. 8(b)와 (c)는 이동평균기법을 적용한 결과로 각각 윈도우 크기를 5개, 7개 사용한 결과이다. 이동평균기법의 경우 윈도우 크기가 커질수록 강력한 평활화 효과를 가져오며, 결과를 통해 알 수 있듯이 평활화를 강하게 적용할수록 잡음이 제거됨과 동시에 전체적으로 뭉개 지며, 자료의 진폭 또한 주변의 진폭과 상쇄되면서 작아지게 된다. 다음으로 확산 텐서 **D**를 스칼라 값을 가지며 모든 공간에 대해 일정한 값을 갖도록 설정한 등방성 선형 확산 방정식을 이용하여 방향에 대한 고려 없이 자료에 적용하게 되면, Fig. 8(d) 혹은 8(e)와 같은 결과를 얻을 수 있다. Fig. 8(d)와 8(e)는 각각 100번째와 200번째 확산단계에서의 결과이다. 이동평균기법과 비교하였을 때, 유사하게 전체적으로 확산이 일어난 것을 확인할 수 있으며, 확산이 많이 진행될수록 기존에 존재하던 가스 침니와 같은 구조가 사라지고 전체적으로 진폭이 작아지면서 평활화된 결과를 가져오게 된다. 하지만, 확산 텐서 **D**를 텐서의 형태를 가지며, 공간에 따라 다른 값을 갖도록 설정한 이방성 비선형 확산 방정식을 적용하게 되면, 유사한 진폭을 가지는 구조를 따라 확산이 일어나기 때문에 Fig. 8(f) 혹은 (g)에서와 같이 앞선 결과들에 비하여 진폭이 유지되면서, 주변의 무작위

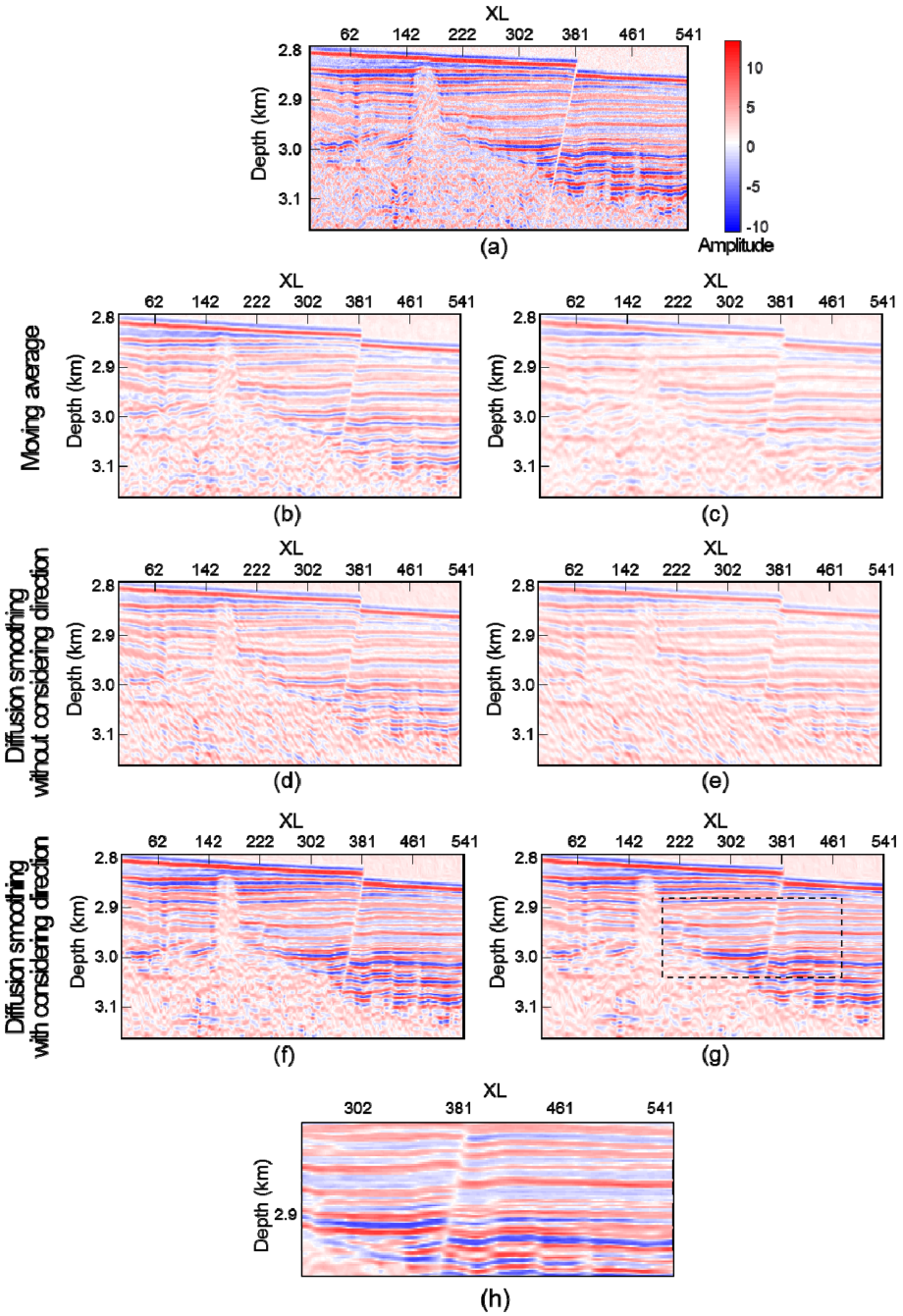


Fig. 8. (a) Input data, (b) moving average with window size 5, (c) moving average with window size 7, (d) diffusion smoothing without considering direction when the 100th diffusion step, (e) diffusion smoothing without considering direction when the 200th diffusion step, (f) diffusion smoothing with considering direction when the 100th diffusion step, (g) diffusion smoothing with considering direction when the 200th diffusion step, and (h) enlarged section of the dashed box marked in (g).

잡음들이 제거되는 것을 확인할 수 있다.

그러나, Fig. 8(g)를 확대한 Fig. 8(h)를 통해 확인할 수 있듯이 단층이 존재함에도 불구하고 방향성만을 고려한 확산 방정식을 적용하게 되면, 필터 적용 후 단층에서 연속성이 생기게 된다. 이 자료를 가지고 자동 추적 기법과 같은 자동 분석 시스템을 적용하게 되면 단층이 있음에도 불구하고 연결된 층으로 해석되는 결과를 얻을 수 있다. 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위하여 연속성을 결정하는 인자인 ε 값을 이용하는 SOF-EP 기법을 구현 및 적용해 보았다. 먼저 ε 값을 얻기 위하여 자료로부터 구조 텐서를 추출하여 고유벡터를 획득하였으며, 이를 기반으로 방향을 고려한 윈도우를 설정하고 거리에 따른 가중을 설정하여 닮음 값을 구한 결과는 Fig. 9와 같다.

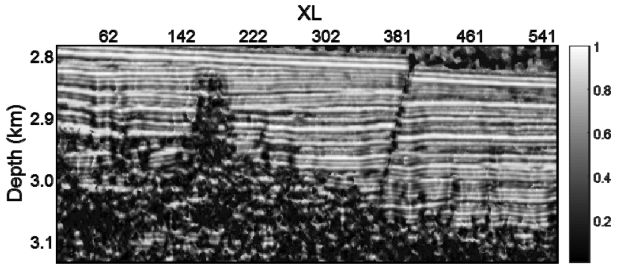


Fig. 9. The structure-oriented semblance of Fig. 8(a).

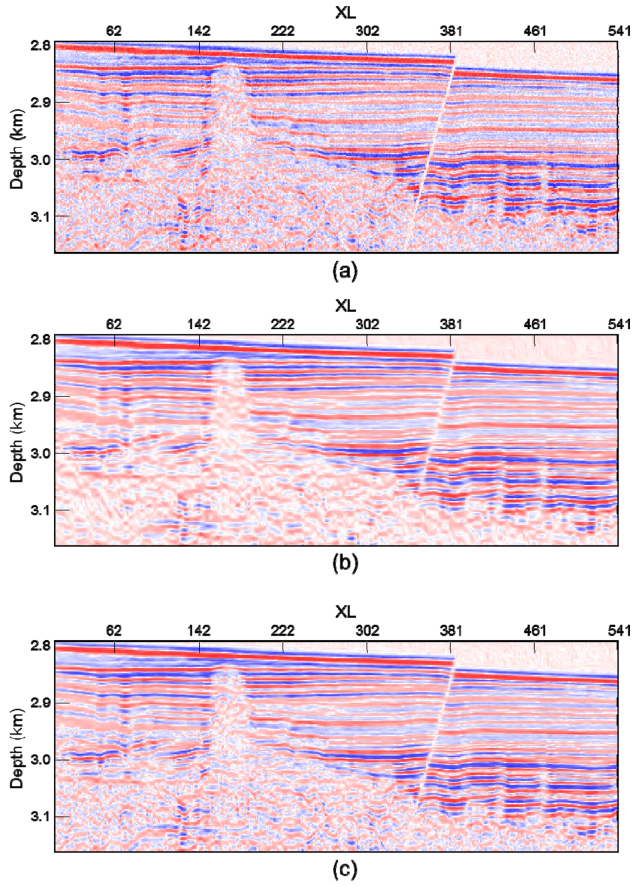


Fig. 10. (a) Input data and results of anisotropic diffusion on the seismic section (b) without and (c) with edge preservation.

단층 및 불연속적인 영역에서는 0에 가까운 값이 대응되며, 연속성이 큰 영역에서는 1에 가까운 값이 대응되는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 최종적으로 획득된 ε 값을 이용하여 이방성 확산 방정식(Anisotropic diffusion, or SOF-EP)을 적용해보았다. Fig. 10(a)는 필터를 적용하기 전의 자료이며, Fig. 10(b)는 연속성을 결정하는 인자를 고려하지 않고 확산 방정식을 적용한 결과이고, Fig. 10(c)는 연속성을 결정하는 인자를 고려하여 확산 방정식을 적용한 결과이다. 연속성을 결정하는 인자를 고려하지 않은 결과와 비교해 보았을 때, 명확하게 단층과 침니 구조를 유지하면서 전체적인 주변 잡음을 효과적으로 제거할 수 있음을 확인할 수 있다.

그런데 구조지향 닮음 기법을 이용하여 ε 값을 계산할 경우, 먼저 각 위치에서의 방향성을 분석한 후, 각 위치마다 방향에 따른 윈도우를 설정하여 닮음 값을 계산해 주어야 하기 때문에 상당히 많은 시간이 소요된다. 특히나, 윈도우의 크기가 커지거나 자료의 크기가 큰 경우, 더욱 많은 시간이 소요되게 된다. 이에 유사한 효과를 가져오며 효율적으로 단시간에 ε 값을 계산하기 위한 방법이 필요하다고 판단하였으며, 이 연구에서는 앞서 기술한 구조 텐서를 분석하는 방법 중에 하나인 모서리 반응값을 이용하였다. 이 방법의 경우, 구조 텐서의 고유값 분석과정 없이 행렬식과 대각합 성분 만으로 평면, 경계, 모서리를 구분할 수 있기 때문에 단시간에 자료를 분석할 수 있는 장점을 가진다. 특히나, 우리가 얻고자 하는 불연속적인 구조들은 자료에서 모서리와 같은 특징을 가지기 때문에 효과적으로 적용이 가능함을 예상할 수 있다. Fig. 10(a)에서 보이는 입력자료를 바탕으로 모서리 반응을 계산한 결과는 Fig. 11과 같다. 앞서 예상한 바와 같이 단층 및 불연속적인 구조들이 모서리로 분류되어 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 연속성이 있는 층서 경계들은 선형경계나 평면으로 분류되어 나타남을 확인할 수 있다. 이때, 계산된 모서리 반응의 값을 연결성 인자로 활용하기 위해서는 0과 1사의 값으로 변환해주어야 한다. 이를 위하여 R 값이 모서리로 분류되는 값을 기준으로 모서리에 해당하는 값이 0에 가까운 값을 갖도록 설정하고 나머지 영역은 1로 설정하여 연결성 결정 인자, ε 값으로 사용한 결과

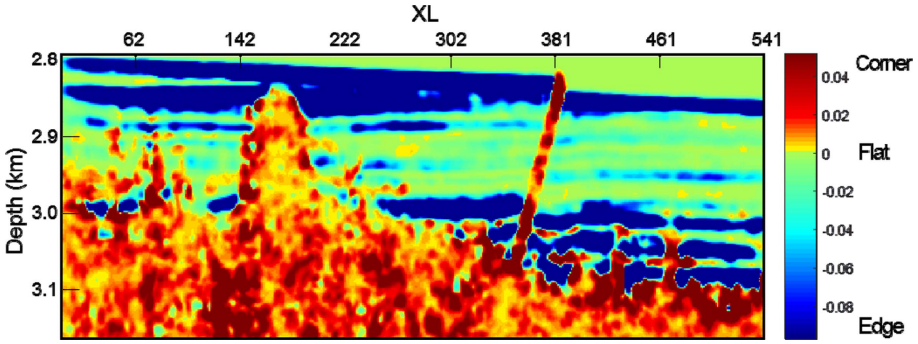


Fig. 11. The corner response of Fig. 10(a).

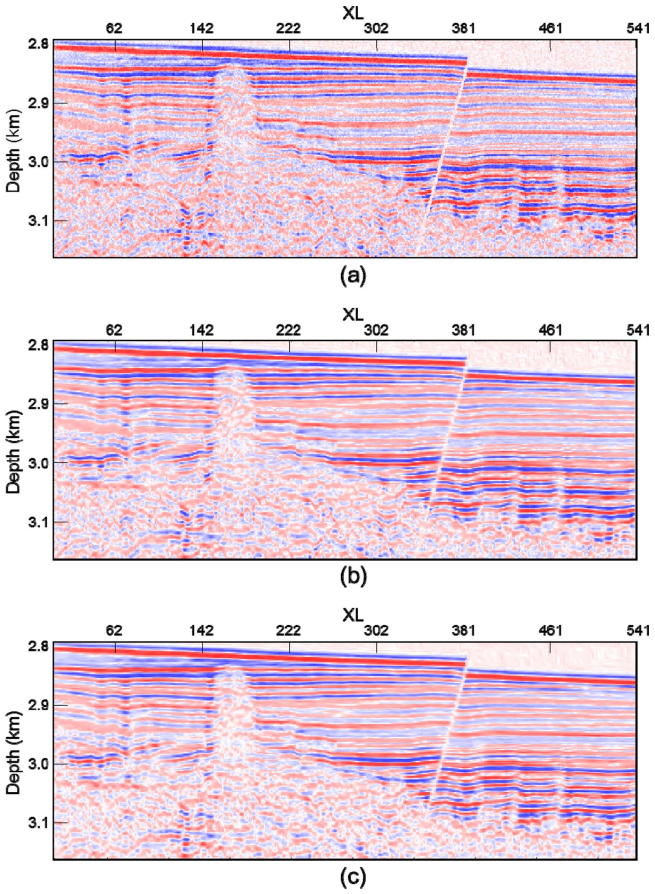


Fig. 12. (a) Input data and smoothing results of Structure-Oriented Filter-Edge Preserving when continuity factor, ε is calculated (a) using the structure-oriented semblance and (b) using the corner response.

는 Fig. 12(c)와 같다. 구조지향 닮음을 통하여 계산된 결과(Fig. 12(b))와 마찬가지로 단층과 가스 침니 및 하부 불연속적인 구조들을 유지하면서 수평적으로 발달한 층서구조에서의 잡음만을 효과적으로 제거한 것을 확인할 수 있다. 이때, 주목할 점은 동일한 프로세서에서 계산한 결과 201개의 시간샘플과 486개의 트레이스를 갖는 Fig. 12(a)의 자료에 대하여 구조지향 닮음을 계산하는데 약 1796.63초 (≈ 30분) 정도의 시간이 소요된 반면, 모서리 반응 값을 계산하는데 약 0.27초 정도 밖에 걸리지 않았고, 결과적으로 약 6000배는 빠르게 계산 결과를 도출할 수 있었다.

결 론

이 연구에서는 탄성파 탐사자료를 효과적으로 평활화하기 위해 개발된 SOF-EP 방법에 대해 소개하였으며, 이론을 바탕으로 구현한 알고리듬을 현장자료에 순차적으로 적용함으로써 그 효과를 확인하였다. 그 결과, 방향성을 고려하지 않은 기존의 방법들과 달리 방향성을 고려한 SOF 기법의 경우, 잡음을 효과적으로 제거하면서 이벤트 내의 연속성을 증가시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 연속성 결정인자를 확산 방정식에 추가함으로써 단층과 같은 불연속적인 구조의 경계를 효과적으로 유지하면서 평활화되는 것도 확인할 수 있었다. 하지만 연속성 결정인자를 계산하기 위하여 기존에 사용된 구조지향 닮음 기법의 경우 시간이 너무 많이 소요되어 3차원탄성파자료와 같은 대용량의 자료에 적용하기에는 비효율적이라고 판단할 수 있었으며, 이를 개선하기 위하여 구조 텐서의 분석 방법 중 하나로 알려진 모서리 반응값을 이용하여 연속성 결정인자를 계산 및 적용하였다. 그 결과, 기존의 구조지향 닮음 방법을 사용했을 때와 유사한 효과를 얻으면서 시간을 효과적으로 단축할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20164010201120).

References

Collins, R., CSE 486 slides, Penn State University, http://www.cse.psu.edu/~rtc12/CSE486/ (July 05, 2017 Accessed).

Fehmers, G. C., and Hocker, C. F. W., 2003, Fast structural interpretation with structure-oriented filtering, *Geophysics*, **68**, 1286-1293.

Fick, A., 1855, On liquid diffusion, *Philos. Mag. J. Sci.*, **10**, 31-39.

Gersztenkorn, A., and Marfurt, K. J., 1999, Eigenstructure-based coherence computation as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping, *Geophysics*, **64**, 1468-1479.

Hale, D., 2009, Structure-oriented smoothing and semblance, CWP Report, **635**, http://inside.mines.edu/~dhale/papers/Hale09StructureOrientedSmoothingAndSemblance.pdf (July 05, 2017 Accessed).

Harris, C., and Stephens, M., 1988, A combined corner and edge detector, *In Proc. of 4th Alvey Vision conf*, 147-151.

Kim, B., Seol, S. J., and Byun, J., 2017, Application of image processing techniques to GPR data for the reliability improvement in subsurface void analysis, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **20**, 61-71 (in Korean with English abstract).

Perona P. and Malik. J., 1990, Scale space and edge detection using anisotropic diffusion, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, **12**, 629-639.

Weickert, J., 1998, *Anisotropic diffusion in image processing*, Teubner Verlag.

Zhou, J., Revil, A., Karaoulis, M., Hale, D., Doetsch, J., and Cuttler, S., 2014, Image-guided inversion of electrical resistivity data, *Geophys. J. Int.*, **197**, 292-309.