

3차원 탄성과 자료로부터 불연속면 자동 추출기법

지 준¹⁾

An Automatic Discontinuity Extraction Method from 3D Seismic Data

Jun Ji¹⁾

요 약 : 물리탐사분야에서 탄성과 기술의 최종 목적은 지하매질의 공간적 특성을 규명하는데 있으며 이를 위해 전문해석가들은 영상화된 탄성과 자료로부터 이벤트들의 연속성을 검토하여 불연속적인 면을 해석하게 된다. 본 논문에서는 지하구조 해석에 사용되는 3차원 탄성과 이미지로부터 불연속면을 자동으로 추출하는 기법을 소개하고 있다. 본 논문에서 소개된 방법은 세 단계를 통해 수행된다. 첫번째 단계는 3차원 자료로부터 이벤트의 연속성을 coherency cube 형태로 계산하는 과정이며, 두번째 단계는 이러한 coherency cube로부터 불연속면의 존재 가능성이 높은 지역을 3차원적인 형상의 이진영상(binary image)으로 표현하는 과정이다. 세번째 단계는 앞에서 얻어진 이진영상으로부터 불연속면의 위치 및 연장성에 대한 정보를 찾는 단계로서 앞에서 얻어진 이진 영상을 세선화 과정을 통해 3차원 평면형태의 불연속면을 결과물로 얻게된다.

Abstract : The final goal of the seismic method is to verify the spatial characteristic of subsurface media. For this purpose, professional interpreters interpret the discontinuities of seismic events from seismic image. This paper introduces a method for automatic discontinuity extraction from 3D seismic image. The method consists of three steps. The first step is for estimating coherency of seismic events from seismic data. The second step is to express the potential region where discontinuities may exist in the form of binary image. The third step is to locate the discontinuities by thinning the region found in the second step.

Keywords : 불연속면, coherency, 세선화(thining), 자동추출

서 론

탄성과 자료처리 기술은 석유/천연가스의 탐사와 개발의 매장량 평가에 필수 요소로서 현재 국내·외 석유개발 업계에서 유전평가를 위한 탄성과 단면작성, 저류층 모델작성 등의 공정에서 널리 사용되고 있으며, 최근에 들어서는 대형 구조물 설치 예정지에 대한 지반조사 용도로도 활발히 사용되어 응용대상분야가 점차로 확대되고 있는 실정이다.

일반적으로 탄성과 기술이 최종적으로 제공하는 정보는 지하매질의 공간적 분포 특성이라 할 수 있다. 이러한 지하매질의 공간적 분포 특성 중에서 매질의 탄성과 전달속도는 자료처리 과정에서 얻어지며, 매질들 사이에 존재하는 불연속면에 대한 정보는 자료처리를 통해 얻어지는 탄성과 이미지를 전문해석가(interpreter)가 추가적인 지질정보와 연계하여 가한 해석을 통해서 얻어지게 된다.

현재 탄성과 자료처리 기술은 대부분이 프로그래밍화 되어 처리결과의 정확도는 사용된 알고리즘의 한계에 따르는 경향

이 있으나, 단층과 같은 지하구조 형태에 대한 해석 결과는 다분히 주관적일 수가 있으며, 해석가의 경험 및 해석에 사용되는 탄성과 이미지의 정확도에 따라 서로 다른 결과를 낳을 우려가 있다. 특히, 기존의 탄성과 이미지 표현 방식인 Wiggle trace 형식이나 Raster 형식들은 보는 방향에 따라 탄성과 이벤트의 불연속성이 다르게 보여질수 있으며, 3차원 이미지의 경우에는 특히 많은 어려움이 존재하게 된다.

최근에 들어 이러한 3차원 자료의 해석에 어려움을 해결하고자 개발된 coherency cube 기술이 탄성과 이벤트들의 연속성에 대한 정보를 보다 명확하게 제공해 주고 있다. 여기에서 coherency란 임의의 지점에서의 자료와 인접한 자료들과의 유사도 또는 연속성을 말하며, 이러한 coherency 값은 공간적으로 차이를 나타낸다. 어떤 지하 구조의 acoustic impedance가 주변지역과의 차이가 충분히 클 경우, 이러한 자료의 3차원 coherency cube는 탄성과 자료로부터 단층 부분을 효과적으로 찾아내는데 도움을 준다(Bahorich and Farmer, 1995, Marfurt, 1998, Kirilin, 1999). 이러한 coherency cube를 이용하

*2001년 7월 24일 접수

1) 한성대학교 정보시스템공학과 (Hansung University, Dept. of Information System Engineering)

면 해석과정의 효율을 높일 수 있으며, 고환경(paleoenvironment)에서의 채널이나 선상지 등의 지질구조를 파악하는데 큰 도움이 된다. 이러한 coherence 기술은 탄성과 이벤트들의 연속성에 대한 정보를 보다 정량적으로 제공함으로써 해석가들의 주관적인 차이는 크게 줄일 수 있는 도움을 주고 있으나, 해석해야 할 자료의 방대함으로 인해 많은 어려움이 아직 있다고 할 수 있다.

본 논문에서는 3차원 탄성과 자료로부터 불연속면에 대한 위치 및 연장성 정보를 자동적으로 구하는 기법을 소개하고자 한다. 본 논문에서 소개된 방법은 세 단계를 통해 수행된다. 첫 번째 단계는 3차원 자료로부터 이벤트의 연속성을 coherence cube 형태로 계산하는 과정이며, 두 번째 단계는 이러한 coherence cube로부터 불연속면의 존재 가능성이 높은 지역을 3차원적인 형상의 이진영상(binary image)으로 표현하는 과정이다. 세 번째 단계는 앞에서 얻어진 이진영상으로부터 불연속면의 위치 및 연장성에 대한 정보를 찾는 단계로서 앞에서 얻어진 이진 영상을 세선화 과정을 통해 3차원 평면 형태의 불연속면들을 결과물로 얻게 된다.

본 논문에서는 이러한 각 단계들에 대한 설명과 함께 실제 자료에 대한 적용 예를 설명하고 있으며, 이 때 사용된 탄성과 자료는 미국 north-central Texas의 Fort Worth Basin에 위치한 Boonsville 천연가스 field 에서 얻어진 자료이다. 탄성과 자료는 미국 에너지성(DOE)과 가스연구소(Gas Research Institute)의 기금으로 2차 가스회수(secondary gas recovery) 기술개발 프로그램의 일환으로 획득되었으며, 일반에게 공개된 데이터이다. Hardage(1996) 보고서에 의하면 이 지역에서 취득한 탄성과 기록은 5.5 m²의 full fold time migrated 기록이며, bin의 크기는 110×110이다. 3차원 탄성과 자료는 97개 line(crossline)으로 한 inline이 113개의 트레이스(inline)로 구성되어 있고,

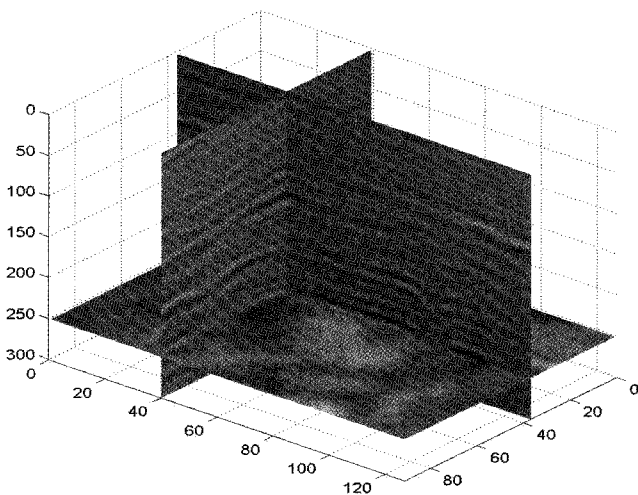


Fig. 1. Selected sections of Boonsville 3D Seismic Data. (time slice at t=250 ms, the 37th crossline section, the 40th inline section).

대표적인 단면을 표시하면 Fig. 1과 같다.

탄성과 이벤트의 연속성 계산

탄성과 자료로부터 이벤트들의 연속성을 추정하기 위해서는 coherency 계산 기술이 널리 사용되고 있으며, 이를 구현하는데는 crosscorrelation(Bahorich and Farmer, 1995) 이나 semblance(Marfurt *et al.*, 1998) 등의 방법이 이용되고 있는데, 본 연구에서는 잡음에 대해 보다 안정적이라고 알려진 semblance를 이용하여 coherency를 구하는 방법을 선택하였다. semblance를 이용한 coherency는 단지 몇 개의 시간 샘플만을 이용하므로 crosscorrelation을 이용한 방법에 비해 얇거나 미세한 지질의 수평 변화에 더 민감하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 coherency 계산 기법으로 1998년 Marfurt 등이 제안한 방법을 사용하였으며, 그에 대한 구현과정을 간단히 살펴 보면 다음과 같다. 우선 3차원 탄성과 자료로부터, coherency를 측정하려는 지점 주위의 J개의 트레이스가 지나는 타원의 면을 정의한다(Fig. 2). Fig. 2과 같이 주어지는 각각의 타원면에서 coherency를 측정하려는 점을 원점으로 보고, 각 트레이스의 위치를 (x, y)로 정의하면 각 경사방향에 대한 semblance를 다음과 같이 정의할 수 있다(Marfurt *et al.*, 1998).

$$c(t,p,q) = \frac{\sum_{k=-K}^K \left[\sum_{j=1}^J u(t+k\Delta t - px_j - qy_j, x_j, y_j) \right]^2 + \left[\sum_{j=1}^J u^H(t+k\Delta t - px_j - qy_j, x_j, y_j) \right]^2}{J \sum_{k=-K}^K \sum_{j=1}^J \left\{ [u(t+k\Delta t - px_j - qy_j, x_j, y_j)]^2 + [u^H(t+k\Delta t - px_j - qy_j, x_j, y_j)]^2 \right\}} \quad (1)$$

여기서 p는 타원면의 x축 방향의 경사(ms/m)이며, q는 y축 방향의 경사(ms/m)이므로, (t, p, q)는 시간 t에서 경사가 각각 x 방향으로 p, y방향으로 q인 타원면을 의미한다(Fig. 3). 또한

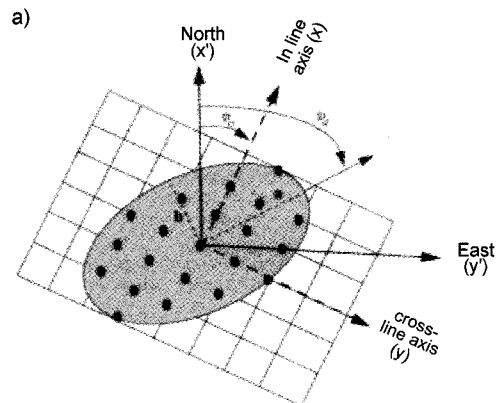


Fig. 2. Elliptical analysis window centered about an analysis point includes J traces (Marfurt *et al.*, 1998).

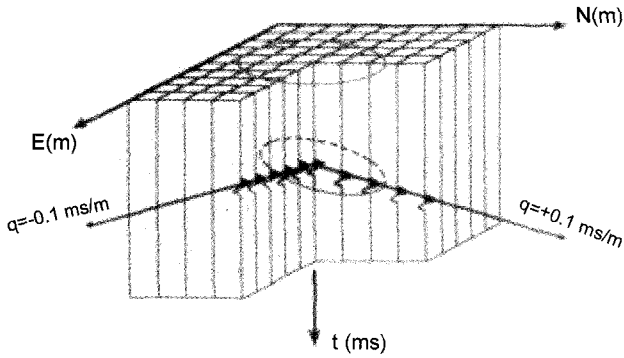


Fig. 3. Calculation of coherency over an elliptical analysis window with apparent dips $(p, q) = (0.1 \text{ ms/m}, -0.1 \text{ ms/m})$ (Marfurt et al., 1998).

윗첨자 H 는 힐버트변환을 나타낸다. 그리고 zero-crossing과 같은 부분에서 높은 coherency가 나타나는 것을 억제하기 위해 평균 semblance를 계산하게 되며 이를 위해 coherency 측정 시간 t 의 위와 아래로 K 개의 시간 샘플을 계산에 포함시키게 된다. Δt 는 시간 샘플의 간격이다.

Coherency 분석을 하고자 하는 지점에서 각각의 경사에 대하여 평균 semblance를 구하게 되는데, 모든 경사에 대해 계산을 수행할 수는 없으므로 최대의 경사를 안다고 가정하고 그 영역을 적절히 분할하여 일정한 개수의 경사에 대해서만 계산을 수행하게 된다. 이때 필요한 경사들의 조합을 분할하는데에는 rectangular, radial, chinesechecker과 같이 3가지 방법을 적용할 수 있는데, 본 연구에서는 이들 중 가장 균일한 분포를 갖는 chinesechecker 분할을 사용하였다. 임의의 지점에서의 탄성과 이벤트의 coherency는 앞에서와 같이 계산된 여러 경사에 대한 semblance 값들 중에서 최대값을 선택하여 결정된다.

$$\text{coh}(t, x, y) = \text{Max}_{p,q} c(t, x, y, p, q) \quad (2)$$

이러한 coherency 계산을 Boonseville 자료에 적용하는데 사용한 parameter의 값들은 다음과 같으며, 결과로 얻어진 coherency cube 를 보면 Fig. 4와 같다.

- INLINE SAMPLE INTERVAL : 12.5m
- CROSSLINE SAMPLE INTERVAL : 12m
- TIME SAMPLE INTERVAL : 1 ms
- TIME WINDOW : 5 samples
- HALF OF MAJOR AXES : 30m
- HALF OF MINOR AXES : 30m (즉, 21개의 트레이스가 계산에 사용되었다.)
- MAX DIP : 0.25 ms/m
- X DIP interval : 0.05 ms/m
- Y DIP interval : 0.05 ms/m

Coherency cube(Fig. 4) 에서는 검은 부분이 coherency가 낮

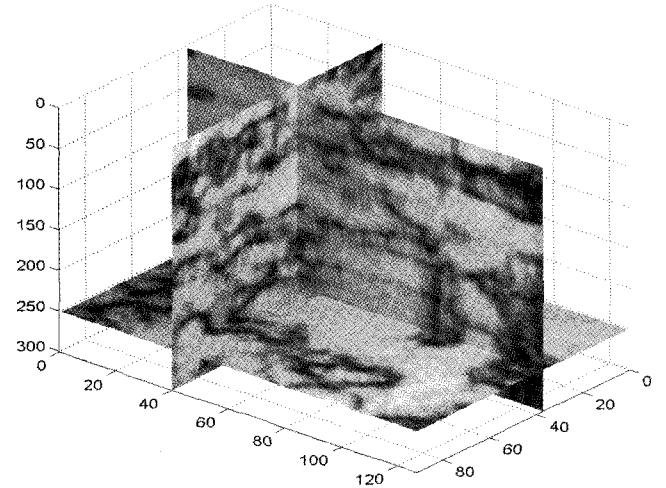


Fig. 4. Selected sections of coherency cube of the Boonville data.

은 부분으로 즉 탄성과 반사 이벤트의 연속성이 현저히 낮은 지역으로 fault 또는 channel이 발달된 지역으로 간주될 수 있다. Fig. 4 에서는 기존의 탄성과 자료(Fig. 1)에서 해석이 가능한 수직방향의 불연속면은 물론이고, 기존의 탄성과 자료(Fig. 1)에서는 잘 식별되지 않는 여러 다른 지역에서의 불연속면을 확인할 수 있다. 특히 Time slice에서는 이상대의 위치가 뚜렷하게 구분되지 않던 것이 coherency cube에서는 그 이상대의 위치가 뚜렷하게 구분되는 것을 발견할 수 있다.

불연속면 존재 지역 설정

앞 절에서 설명한 이벤트의 연속성 계산으로부터 coherency cube를 얻게되며, 이는 3차원적인 탄성과 이벤트의 연속성 분포를 0에서부터 1까지의 값으로 연속성의 정도를 표현하는 자료가 된다. 기존의 해석방법들은 이러한 자료를 다양한 시각화 방법을 통해서 연속성이 낮은 지역에 대한 구조를 분석하게 된다.

불연속면의 존재 가능 지역은 당연히 연속성이 낮은 지역에 위치하게 될 것이며, 불연속면의 존재 형태 또한 연속성이 낮은 지역의 형태를 따르게 될것이다. 따라서 불연속면 존재 지역의 대략적인 3차원적인 형태는 coherency cube 값들을 임계값 처리하여 얻어지는 영역을 이진영상(binary image)으로 표현이 가능하게 된다.

$$B(t, x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{coh}(t, x, y) \leq \text{coh}_{th} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

이때 사용하는 임계값, coh_{th} 의 설정은 경험적으로 할 수 있으나, 0부터 1까지에 해당되는 coherency 값들이 불균질하게 분포하고 있어서, 적절한 임계값을 결정하기 위해서는 coherency 값들이 일정 갯수가 되도록 양자화(quantization)가 필요하다. 본 연구에서는 coherency 값들이 0.01의 배수에 해당되는 값

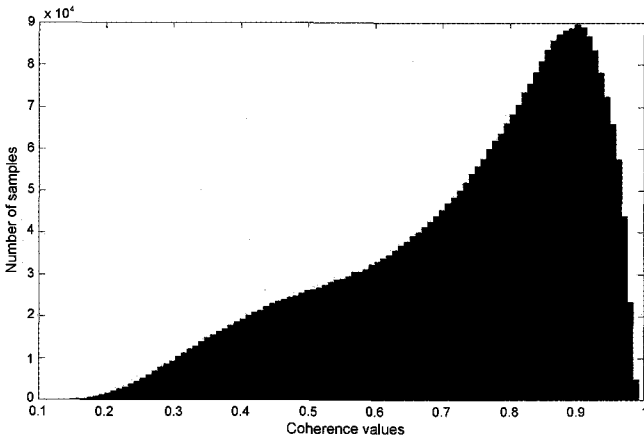


Fig. 5. Histogram of the quantized coherency cube.

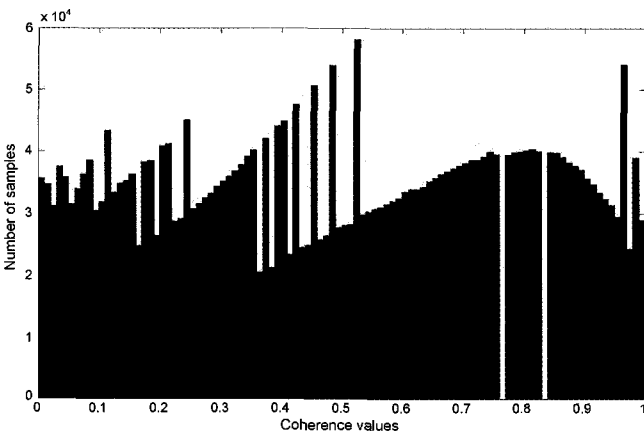


Fig. 6. Histogram of the quantized coherency cube after histogram equalization.

을 갖도록 양자화를 시켰으며, 또한 임계값 변화시 결과로 얻게되는 이진 영상의 양상을 적절히 변화시키기 위해서 히스토그램 평활화(histogram equalization)를 실시하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 양자화된 coherency 값들의 히스토그램과 이에 대한 평활화 결과를 각각 보여주고 있다. 이와 같은 양자화 및 평활화를 거친 coherency cube를 살펴보면, Fig. 7과 Fig. 8에서와 같이 평활화가 coherency 들간의 contrast를 높혀서, 그다지 뚜렷하게 나타나지 않던 불연속한 부분도 보다 명확해짐을 확인할 수 있다. 따라서, 평활화 되기 이전의 coherency 값들은 0과 1사이에서 균질하지 못한 분포를 가짐으로 인해 임계값 변화시에 얻어지는 이진영상의 양상의 변화 또한 불균질하지만, 평활화된 coherency 값에서의 임계값 변화는 적절하게 이진영상에의 변화를 반영되는 것을 확인할 수 있다(Fig. 9, 10, 11). 이진영상에서 1의 값은 검은색으로 그리고 0의 값은 흰색으로 각각 표현하였다.

불연속면 추출

앞에서 얻어진 3차원 이진영상은 불연속면의 존재 가능성이

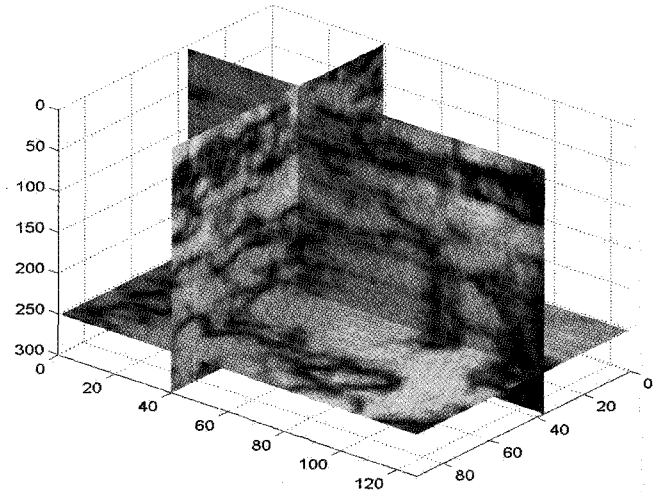


Fig. 7. The coherency cube after quantization applied with 0.01 quantization level.

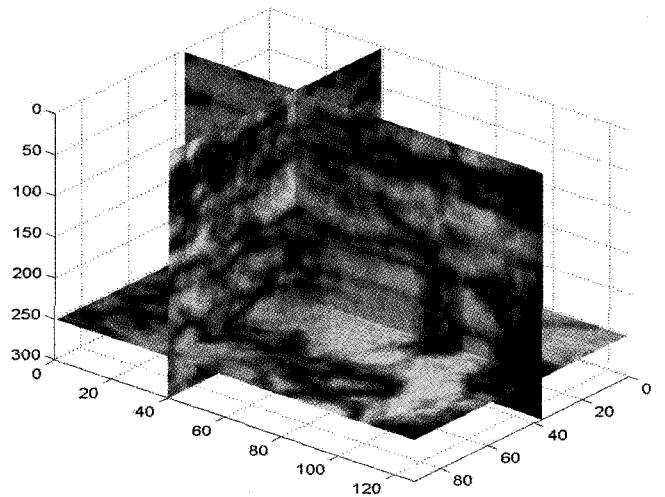


Fig. 8. The coherency cube after the histogram equalization applied.

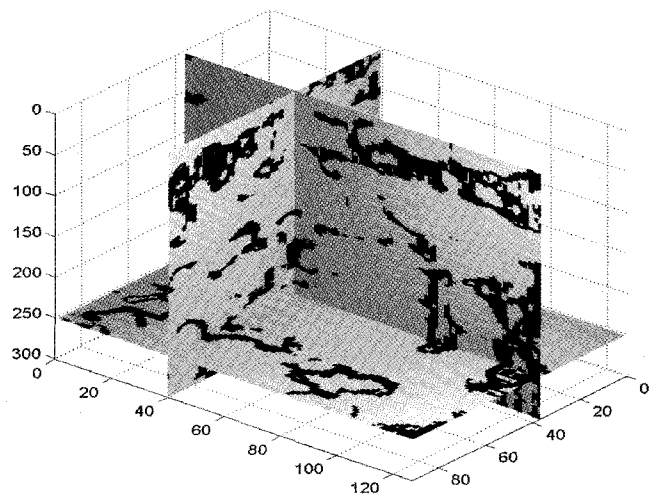


Fig. 9. Binary image obtained by selecting image points whose values are less than 0.2 from the histogram equalized coherency cube.

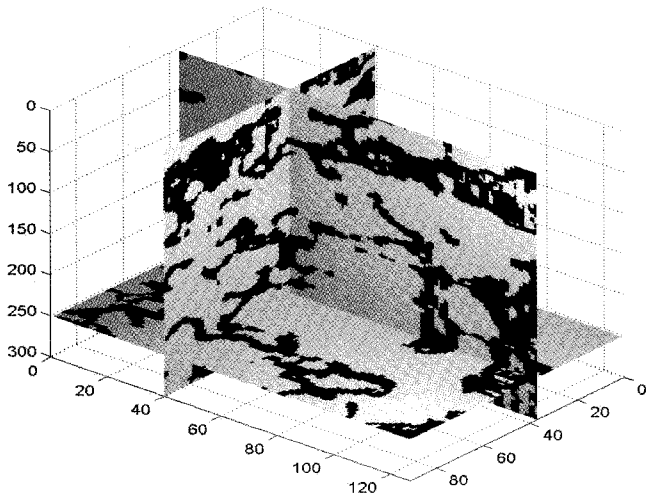


Fig. 10. Binary image obtained by selecting image points whose values are less than 0.3 from the histogram equalized coherence cube.

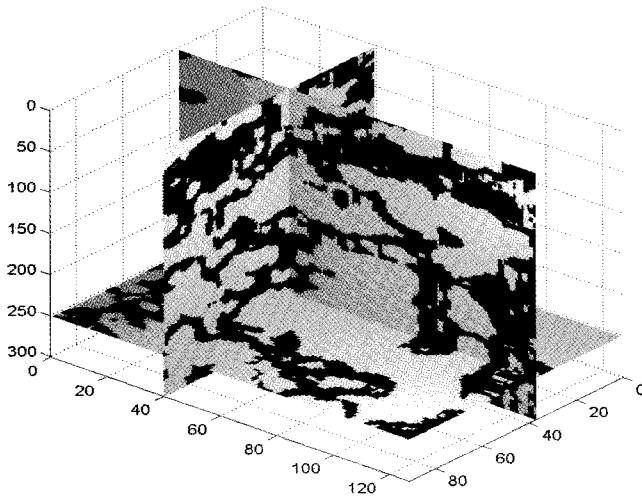


Fig. 11. Binary image obtained by selecting image points whose values are less than 0.4 from the histogram equalized coherence cube.

높은 지역을 3차원적 형태로 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 정확한 불연속면의 위치는 이러한 3차원 이진영상의 내부에 위치하며, 이진영상에 대한 세선화(thining) 과정을 거쳐 얻게 된다.

본 연구에서 사용한 세선화 알고리즘은 영상처리분야에서 형태 분석에 널리 사용되는 2차원 세선화 알고리즘을 응용하여 사용하였다. 기존의 2차원 세선화 알고리즘은 이진 영상에 대하여 값을 1로 갖는 임의의 위치의 픽셀 주변이 식 (4)과 같이 주어지는 구조요소(structuring element)들 중의 하나에 해당되면 그 지점의 값을 0으로 치환하게 된다. 이러한 치환과정을 더 이상 변화가 없을 때까지 반복하게 되면 결과적으로 임의의 면적을 갖던 2차원 이진영상이 하나의 선 또는 점의 형태로 남게된다. 2차원 세선화에 사용되는 구조요소들은 다

음의 식과 같이 주어지며

$$L1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ * & 1 & * \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad L2 = \begin{bmatrix} * & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ * & 1 & * \end{bmatrix} \dots \quad (4)$$

여기에서 중앙에 위치하는 1이 적용하고자 하는 해당 픽셀이 되며, *는 사용되지 않는 값을 의미하고, 나머지 6개의 다른 요소들은 이들을 각각 회전시켜서 사용하게된다(Sonka *et al.*, 1999)

이러한 세선화 알고리즘을 3차원적으로 적용하게 되면 결과는 3차원 선의 형태로 나타나며(Ma and Sonka, 1996), 이러한 극단적인 세선화는 불연속면을 찾고자하는 우리의 목적에 적합하지 않으므로, 3차원 면의 형태로 결과를 얻을수 있도록 2차원 세선화과정을 반복적으로 적용하는 알고리즘을 본 연구에서는 적용해 보았다.

우선 3차원 이진영상의 형태를 (x, y, z) 라 하면 모든 (x, y) 면과 모든 (y, z)면, 그리고 모든 (x, z)면에 대한 2차원적인 세선화 과정을 각각 한번씩 적용을 한 후에, 적어도 2개 이상의 방향에서 세선화 과정을 통해 삭제가 수행된 점들 만을 유효한 삭제로 간주하는 3차원적인 세선화를 수행하게 된다. 이러한 3차원적인 세선화 과정을 반복적으로 적용하여, 이전의 결과와 비교하여 이진 영상에 변화가 없을 때까지 수행하게 되며, 그 결과로 불연속 면에 대한 위치 정보만을 갖게 된다. 이러한 과정을 pseudo-code 형태로 요약하면 다음과 같다.

```
old_data(x,y,z) = binary_data(x,y,z)
condition = 1
do while ( condition .eq. 1 )
{
temp1(x,y,z) = 2D thinning along the every (x,y)
plane on old_data(x,y,z)
temp2(x,y,z) = 2D thinning along the every (y,z)
plane on old_data(x,y,z)
temp3(x,y,z) = 2D thinning along the every (x,z)
plane on old_data(x,y,z)
new_data = (temp1 .and. temp2) .or. (temp2 .and.
temp3) .or. (temp1 .and. temp3)
if( new_data .eq. old_data ) { condition == 0}
else {old_data(x,y,z) = new_data(x,y,z)}
}
```

위와 같은 3차원 세선화 알고리즘을 앞에서 얻은 이진영상, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11에 적용해 본 결과를 보면 각각 Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 와 같이 얻어진다. 이들 결과를 비교해 보면 이진영상을 얻을 때 사용된 임계값이 커질수록 주된 불연속면의 위치정보에는 그다지 변화를 주지 않으면서 미세한 불연속면들이 추가로 찾아지는 것을 확인할 수 있다. 또한 찾아진 불

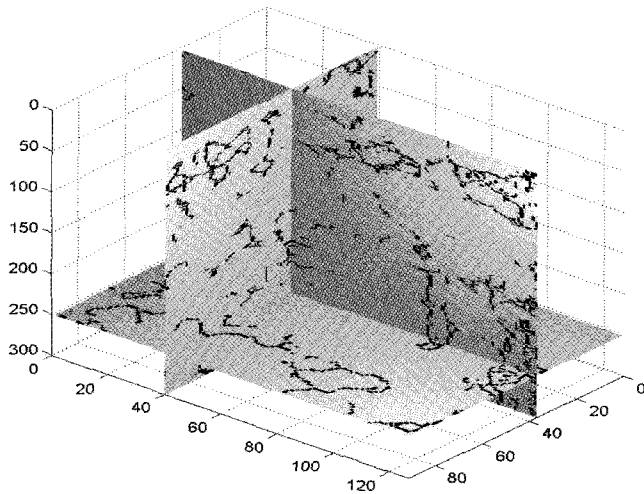


Fig. 12. Discontinuities found by thinning the binary image with thresholding value of 0.2.

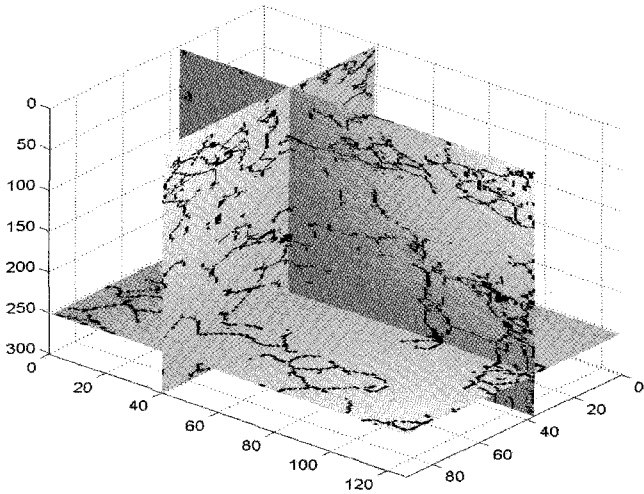


Fig. 13. Discontinuities found by thinning the binary image with thresholding value of 0.3.

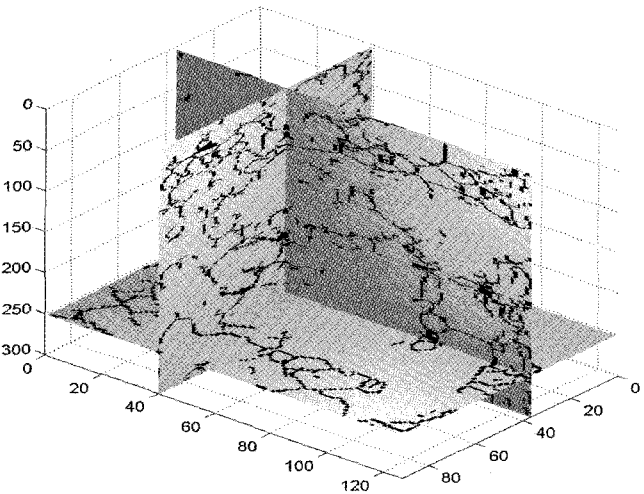


Fig. 14. Discontinuities found by thinning the binary image with thresholding value of 0.4.

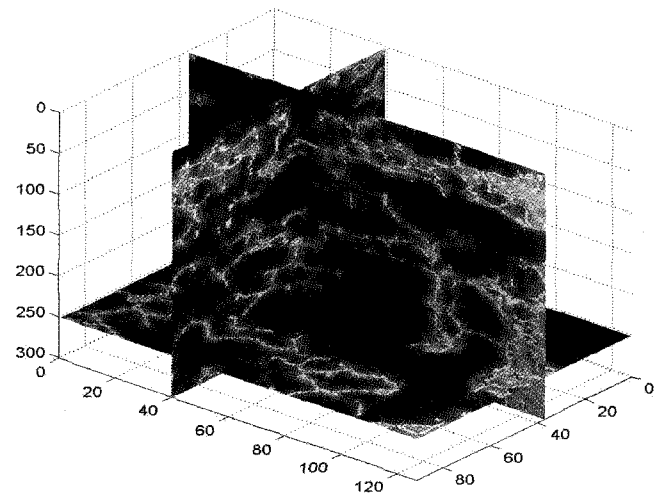


Fig. 15. Discontinuities with thresholding value of 0.3 are overlapped with coherence cube to examine the accuracy of the location. To visualize the location of the discontinuities, low values in the coherence cube are expressed in bright gray and high values are expressed in dark gray.

연속면의 위치정보의 정확도는 Fig. 15와 같이 불연속면을 coherence cube와 겹쳐보게 되면 불연속면의 위치가 주변에 비하여 연속성이 낮은 부분과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

결 론

본 논문에서는 3차원 탄성과 자료로부터 불연속면을 자동 추출할 수 있는 방법을 소개하였다. 소개된 방법은 세 단계를 통해 수행되며, 첫번째 단계는 coherence 계산 과정으로 semblance에 기초한 이벤트의 연속성을 계산하여 coherence cube를 만들게 된다. 두번째 단계는 이러한 coherence cube로부터 불연속면의 존재 가능성이 높은 지역을 3차원적인 형상의 이진영상으로 표현하는 과정으로 연속성 값들을 임계값 처리후 이진화(binimize) 하여 수행된다. 세번째 단계는 두번째 단계에서 얻어진 이진 영상으로부터 불연속면의 위치를 찾는 단계로서 앞에서 얻어진 이진 영상을 2차원 세선화 과정을 반복적으로 적용하여 3차원 평면형태의 불연속면을 얻게된다.

본 논문에서 소개된 방법을 실제 탄성과 자료에 적용해 본 결과 대체로 만족스러운 결과를 얻어 실제 적용가능성을 충분히 확인할 수 있었으나, 최종으로 얻어지는 3차원 평면들의 연장성등에 대한 해석을 위해서는 segmentation 또는 merging 같은 영상처리기법 등을 도입한 연구가 더 수행되어야 할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 2000년도 한성대학교 교내연구비 지원과제임.

참 고 문 헌

- Bahorich, M. and Farmer, S., 1995, 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube, *The Leading Edge*, p. 1053-1058.
- Greenlee, S. M., Gaskins, G. M., and Johnson, M. G., 1994, 3-D seismic benefits from exploration through development: An Exxon perspective. *The Leading Edge*, **13**, 30-736.
- Hardage, B. A., 1996, Boonsville 3-D data set: *The Leading Edge*, **15**, 7, p.835-837.
- Kirlin, R. L. and Done, J. W., 1999, Covariance analysis for seismic signal processing, SEG..
- Ma, M. C. and Sonka, M., 1996, A Fully Parallel 3D Thining Algorithm and Its Applications, *Computer vision and image understanding*, **64**(3), 420-433.
- Marfurt, K., Kirlin, R., Farmer, S., and Bahorich, M., 1998, 3-D seismic attributes using a semblance based coherency algorithm, *Geophysics*, **63**, 1150-1165.
- Sonka, M., Hlavac, V., and Boyle, R., 1999, *Image processing, analysis, and machine vision*, 2nd-edition, PWS Publishing.