

## 지질학적 활용을 위한 Landsat TM 자료의 자동화된 선구조 추출 알고리즘의 개발

원중선 · 김상완 · 민경덕 · 이영훈

연세대학교 지구시스템학과

### A Development of Automatic Lineament Extraction Algorithm from Landsat TM images for Geological Applications

J.S. Won, S.W. Kim, K.D. Min, and Y.H. Lee

Department of Earth System Sciences, Yonsei University

#### Abstract

Automatic lineament extraction algorithms had been developed by various researches for geological purpose using remotely sensed data. However, most of them are designed for a certain topographic model, for instance rugged mountainous region or flat basin. Most of common topographic characteristic in Korea is a mountainous region along with alluvial plain, and consequently it is difficult to apply previous algorithms directly to this area. A new algorithm of automatic lineament extraction from remotely sensed images is developed in this study specifically for geological applications. An algorithm, named as DSTA(Dynamic Segment Tracing Algorithm), is developed to produce binary image composed of linear component and non-linear component. The proposed algorithm effectively reduces the look direction bias associated with sun's azimuth angle and the noise in the low contrast region by utilizing a dynamic sub window. This algorithm can successfully accommodate lineaments in the alluvial plain as well as mountainous region. Two additional algorithms for estimating the individual lineament vector, named as ALEHHT(Automatic Lineament Extraction by Hierarchical Hough Transform) and ALEGHT(Automatic Lineament Extraction by Generalized Hough Transform) which are merging operation steps through the Hierarchical Hough transform and Generalized Hough transform respectively, are also developed to generate geological lineaments. The merging operation proposed in this study is consisted of three parameters: the angle between two lines( $\delta\beta$ ), the perpendicular distance( $d_{ij}$ ), and the distance between midpoints of lines( $d_n$ ). The

---

1998년 7월 31일 접수 : 1998년 9월 18일 수리.

test result of the developed algorithm using Landsat TM image demonstrates that lineaments in alluvial plain as well as in rugged mountain is extremely well extracted. Even the lineaments parallel to sun's azimuth angle are also well detected by this approach. Further study is, however, required to accommodate the effect of quantization interval(droh) parameter in ALEGHT for optimization.

**Keywords:** automatic lineament extraction, look direction bias, DSTA, ALEHHT, ALEGHT

## 요 약

위성영상으로부터 자동화된 선구조 추출 알고리즘은 지형적 특징에 따라 다양한 방법으로 개발되어 왔다. 국내 지형은 주로 산악지형에 가깝지만 충적층 지대가 함께 발달되어 있으며 이와 같은 충적층은 종종 단층과 같은 주요 선구조를 이루고 있다. 그러나 기존의 방법들은 이와 같은 복잡한 지형에 대해 적용하는데 여러 가지 문제점들이 있다. 이에 따라 본 연구에서는 이러한 지형적 특징을 나타내는 지역에 적용 가능한 새로운 알고리즘을 개발하였다.

위성영상으로부터 선구조 요소와 비 선구조 요소로 구분되는 이진영상을 생성하기 위해 DSTA(Dynamic Segment Tracing Algorithm)를 개발하였다. DSTA는 선구조 추출시 발생하는 태양방위각에 따른 선택적 증감효과를 제거하고 동적 소창문(dynamic sub window)의 사용에 의해 명암차가 낮은 지역에서의 잡음(noise)을 상당히 제거하였다. 또한, 충적층 처리 루틴은 충적층 지역에서 나타나는 잡음 대부분을 제거하여 효과적으로 선구조를 추출할 수 있었다. 이진영상으로부터 선구조의 양끝점을 결정하기 위해 일반 영상자료 처리에 이용되고 있는 Hierarchical Hough 변환 또는 Generalized Hough 변환을 지질학적 적용에 적합하도록 결합연산 과정을 결합한 ALEHHT(Automatic Lineament Extraction by Hierarchical Hough Transform) 및 ALEGHT(Automatic Lineament Extraction by Generalized Hough Transform) 알고리즘을 개발하였으며, 이를 이용하여 지질학적으로 이용 가능한 선구조를 구하였다. 본 연구에서 제안된 결합연산 과정은 두 선 사이의 사이각( $\delta\beta$ ), 수직거리( $d_{ij}$ ) 및 중점거리( $d_n$ )를 이용하였다. 개발된 알고리즘을 Landsat TM 자료에 적용하여 지질학적 선구조를 추출한 결과, 산악지역 및 충적층 지대에 발달한 선구조 모두 잘 추출되었으며 태양방위각에 평행한 서북서방향의 선구조 역시 잘 드러나고 있어 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 효과적으로 알고리즘을 사용하기 위해서는 적절한 입력변수의 사용이 필수적이며, 특히 ALEGHT의 입력변수 중 영상 정량화 간격(droh)에 의한 영향은 차후의 연구에서 수행, 보완되어야 할 것으로 사료된다.

## I. 서 론

선구조는 직선 혹은 완곡의 지형요소로서 인접한 표면 및 천부의 지형요소와 구분이 명확한 단층, 파쇄대, 습곡축 등의 지질구조선과 암석경계를 따라 나타나며, 이러한 요소들은 원격탐사자료에서 지형의 기복변화 및 화소의 명암차에 의해 구분이 가능하다(Sabins, 1978). 이에 따라 항공사

진, 위성영상자료 및 수치표고모형을 이용한 선구조 연구와 야외에서 조사된 절리, 단층들과 같은 불연속면에 대한 연구가 Mabee et al.(1994), Mah et al.(1995), Karnieli et al.(1996)와 같은 많은 연구자들에 의해 시행되어 왔다. 추출된 선구조는 실제로 기존 지질도상의 대규모의 단층, 습곡 등과 같은 구조적 불연속면을 잘 반영하는 것으로 알려져 왔다. 따라서, 선구조 분석은 광상탐사, 지하수탐사, 자연재해분석 및 구조해석에서 기초자료로 많이 활용되고 있다(Short and Lowman, 1973; Lee and Chi, 1995).

원격탐사자료로부터 선구조 추출은 추출 주체에 따라 크게 육안 판독 방법과 자동추출 알고리즘을 사용하는 방법 두 가지로 구분할 수 있는데, 지금까지 국내에서의 선구조 연구는 주로 육안 추출에 의존하였다. 위성영상으로부터 선구조 추출시 사용하는 자료의 축척에 따라 발생하는 축척 편차(이봉주 외, 1997)와 SAR 영상에서 센서의 관측방향과 Landsat 영상에서의 태양의 방위각에 따른 선택적 증감효과를 보정하여야 하는데(Gregory and Moore, 1975; Ford, 1980), 최근에는 육안 추출시 수치표고모형을 보조자료로 이용하는 방법들이 제안되어 왔다(김원균 외, 1996; 이봉주 외, 1997). 그러나 육안 선구조 추출은 자료를 얻는데 많은 시간이 요구될 뿐만 아니라 연구자의 연구 경험이나 연구목적에 따라 차이를 보인다(Siegal and Short, 1977). 따라서, 축척편차 및 태양방위각에 따른 방향편차를 보정하고 빠른 시간 내에 객관적으로 선구조를 추출하기 위해서는 자동 선구조 추출 알고리즘의 적용이 요구된다.

자동 선구조 추출 알고리즘은 지형적 특징, 특히 산악지역 또는 평지지역 여부에 따라 위성영상 자료에서 나타나는 선구조의 DN(Digital Number)값 특성이 매우 다르기 때문에 Wang and Howarth(1990), Koike et al.(1993), Fitton and Cox(1995) 등에 의해 다양한 방법으로 개발되어 왔다. 국내의 지형은 주로 산악지형에 가깝지만 층적층 지대가 함께 발달되어 있어 어느 한가지 방법만을 적용할 수는 없다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 지형적 특징을 나타내는 지역에 적용 가능한 새로운 알고리즘을 개발하고자 하였으며, 새로 개발된 알고리즘을 이용하여 선구조 추출에 시험 적용하였다.

## II. 기존의 선구조 추출 알고리즘

자동 선구조 추출 알고리즘은 방법에 따라 약간의 차이점은 있으나 다음과 같이 크게 두 단계로 구성된다(Sijmons, 1987). 첫 번째 단계는 일반적으로 영상처리기법에서 사용되는 Sobel, Canny, Laplacian 등과 같은 단순한 경계선 추출 필터를 이용한 필터링 또는 EFGS(Wang and Howarth, 1987), STA(Koike, 1993) 등과 같은 보다 발달된 알고리즘을 이용하는 방법 등에 의해 선구조 요소로 인정되는 화소와 비 선구조 요소 화소 두 가지로 구분되는 이진영상(binary image)을 만드는 부분이다. 이때, 선구조 요소로 인정되는 화소는 강도와 방향 등의 속성값을 가지기도 한다. 두 번째 단계에서는 앞에서 생성된 이진영상을 DSDA(Ochi et al, 1987) 또는 여러 가지 Hough 변환을 이용해 시작점과 끝점을 갖는 벡터화된 선구조를 구하는 것이다.

가장 일반적으로 널리 쓰이는 필터링은 Vanderbrug(1976), Carrere(1990), Qari(1991), Mah et al.(1995) 등에 의해 사용되었다. 필터링은 간단하고 빠른 시간 내에 수행할 수 있다는 장점이 있지

만 태양의 방위각에 평행하거나 낮은 명암대조를 이루고 있는 산 그림자 지역에서 선구조가 잘 추출되지 않는다는 단점이 있다. 또한 단순히 명암의 경계선만을 추출하므로 일반적으로 지질학적 선구조 추출시에 제외되는 능선까지도 포함된다는 문제점이 있으며, 지형적으로 복잡한 지역에서 선구조 요소들이 연속되지 못하고 단절된다는 단점이 있다.

Wang and Howarth(1990)는 지표 위에 구조적 힘에 의해 신장된 호수들이 발달되어 있는 영상과 같이 배경 명암 위에 특징적 구조를 가진 영상에서 경계만을 추출한 후 Hough 변환과 함께 단면도 분석을 이용해 선구조의 양끝점을 결정하였다. 이때 폭이 넓은 선은 두 개의 분리된 선으로 추출되는 단점이 발생한다. Fitton and Cox(1995)는 절리가 발달한 사암대지의 Landsat TM 영상에, 낮은 명암대조를 이루고 있는 지역에서의 명암차를 크게 확대시키는 장점을 가지고 있는 자동이득 조절(automatic gain control) 필터를 적용한 후 thinning을 이용해 폭이 넓은 선이 하나의 선구조로 인식되도록 하였다. Wang and Howarth(1990)와 Fitton and Cox(1995)의 알고리즘은 선구조 요소들이 단절되거나 낮은 명암지역에서 나타나는 문제점들을 다소 보완하고 있으나, 앞에서 언급한 방향편차에 의한 문제점은 반영하지 않고 있다. 따라서, 이런 방법들은 산악지역과 같이 지형의 기록에 의한 음영효과가 두드러지는 지역에 적용하기 어렵다.

Koike et al(1993)에 의해 제안된 STA(Segment Tracing Algorithm)는 태양의 방위각에 의한 선택적 증감효과를 수치표고모형을 이용한 모의 실험을 통해 얻은 가중함수를 이용해 보완하였다. 이 알고리즘은 수치표고모형에 가상의 태양방위각과 고도각을 주고 생성된 음영기록도(shaded relief image)의 특징을 이용한 것으로 수치표고모형자료 외에도 Landsat MSS, Landsat TM에 적용할 수 있다. 그러나 이 방법은 산악지대에서는 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있으나 충적층 지대에서는 많은 잡음이 발생하는 단점이 있다.

위의 알고리즘들 중 본 연구에서 개발된 새로운 알고리즘의 기초가 되는 STA(Koike et al, 1993)와 Hough 변환(Duda and Hart, 1972)은 다음과 같다. 또한, 기존 알고리즘과 본 연구에서 새로 제안된 알고리즘을 비교해 보기 위하여 충적층의 분포 특징에 따라 두 곳의 시험 적용 지역(400×400화소)을 Fig. 1과 같이 선정하여 비교하고자 한다. Fig. 1(a) 지역은 약간의 충적층을 포함하고 있지만 충적층의 폭이 비교적 일정하고 넓지 않은 지역이며, Fig. 2(b) 지역은 충적층이 넓게 분포하고 있으며 그 폭이 수~수십 화소로 다양한 경우이다.

## 1. STA

Koike et al(1993)가 제안한 STA의 가장 큰 특징은 산악지역에서 나타나는 DN값의 특성을 이용하여 태양의 방위각에 의한 선택적 증감효과를 보정한 알고리즘이라는 것이다. 즉, 국내에서와 같이 산악지형이 우세한 경우 이와 같은 보정은 필수적이다. STA는 총 4단계로 구성되어 있으며, 입력자료는 TM 밴드 중 지형적 특징을 가장 잘 나타내는 밴드로, 주로 밴드 4, 5번 또는 일차 주 성분 영상이 사용된다. 첫 단계에서 11×11 크기의 소창문을 이용해 중심 화소를 통과하는 사이각이 11.25°인 16개 방향을 설정한 후, 각 방향별로 중심 화소를 기준으로 분산값을 구해 분산값의 변화가 가장 작은 방향(kmin)을 그 소창문의 선구조 방향으로 인지한다. 중심점을 선구조 요소로 인정할 것인지를 결정하기 위해 두 번째 단계에서는 결정된 최소 분산값 방향의 직각방향(kmax)

화소의 이차 미분(L)을 구해 창값(threshold: T)과 비교한다. 이때 사용되는 창값 T는 태양방위각과 선구조방향의 관계에 따라 좌우되는 변수로 다음과 같은 식으로 구한다.

여기서, m은 이차 미분 L의 평균,  $\sigma$ 는 L의 표준편차,  $\phi$ 는 태양방위각과 kmax의 사이각이며 C1은

$$L_i = \sum_{i=-4}^4 (Z_{i-1} - 2Z_i + Z_{i+1})^2 / Z_i \dots\dots\dots (1)$$

$$T = m + C1 \times \left( \frac{1}{(1+\sin\phi)} - \frac{1}{2} \right) \times \sigma \dots\dots\dots (2)$$

상수이다. 따라서 T값은 태양방위각에 평행한 선구조일 때 가장 낮은 값을 갖게되며, 이를 이용하여 태양방위각에 따른 증감효과를 보정하게 된다.  $L_0 > T$  이면 일단 선구조 요소 화소로 인정된다. 세 번째 단계는 선구조 요소로 남아 있는 화소가 계곡인지 능선인지를 판단하여 능선일 경우에는 제거된다. 마지막으로 남아 있는 선구조 요소값들은 최종단계인 네 번째 단계에서 링크라는 과정을 통해 비슷한 방향을 가지고 있고 일정거리(D)안에 있는 요소끼리 서로 연결된다. D 역시 상수가 아닌 서로 연결되는 두 화소의 방향과 태양의 방위각 사이각에 의해 결정되는 동적 창값이다.

$$D = \frac{C2}{(1+\sin\theta)} + C3 \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $\theta$ 는 태양방위각과 kmin의 사이각이며 C2와 C3는 상수이다. Koike et al(1995)는 일본의 가을, 겨울철의 Landsat TM 영상에 시험 적용한 결과에 의해 C1, C2, C3값으로 5, 4, 8을 사용하였다. 본 연구에서도 국내의 가을철 Landsat TM 영상에 시험 적용 결과 역시 5, 4, 8값이 가장 적절한 것으로 판단되었다.

STA를 Fig. 1(a) 영상에 적용하여 Fig. 2(a)와 같은 결과를 얻었는데, 필터링과 같은 방법에서

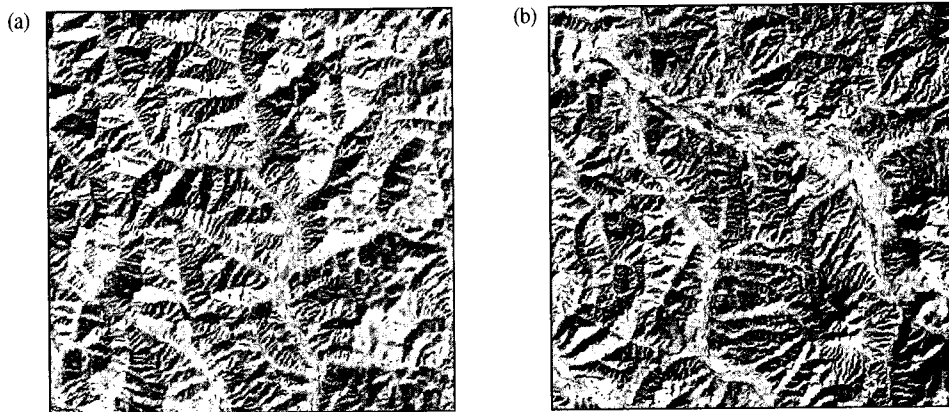


Fig. 1. Landsat TM band 4 images of each test sub image: characterized by (a) narrow alluvial plain, and (b) wide range of alluvial plain.

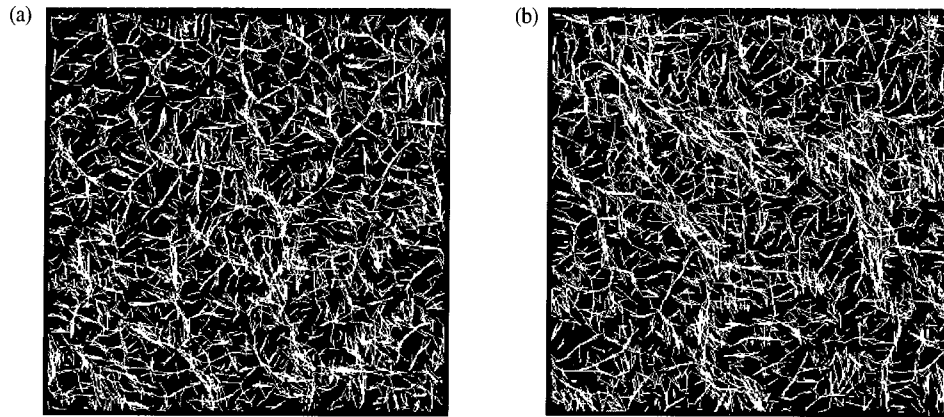


Fig. 2. Binary image corresponding to Fig. 1(a), (b), respectively, obtained by STA.

잘 나타나지 않았던 태양방위각에 평행한 영상중심 부근에서 서북서 방향으로 뻗어 나가는 선구조를 잘 나타내고 있으며 능선이 거의 모두 제거되었다. 하지만 화소의 명암차가 적은 Fig. 2(a)의 오른쪽 하단부와 같은 지역에서는 많은 잡음이 발생하였다. 이는 첫 단계에서 분산이 최소가 되는 방향을 선구조 요소 방향으로 정함에 있어서 총적층과 같이 평탄한 지형에서는 소창문 안의 화소의 명암차가 거의 없기 때문에 각 방향의 분산값 또한 차이가 거의 없음에도 불구하고 무조건 최소의 분산값을 갖는 방향을 선구조 요소방향으로 결정하기 때문에 발생된다. 또한, 수계망을 따라 선구조 요소가 보이기 는 하지만 특정한 방향성을 갖지 못하고 매우 복잡한 양상을 나타내고 있다. 이러한 수계망 즉 총적층 주변에서 발생하는 잡음은 Fig. 1(b) 영상에 적용결과인 Fig. 2(b)에서 더욱 뚜렷하게 나타난다. STA는 산악지형에서 화소값들의 명확한 대비를 갖는 화소의 연속성이 있는 경우는 선구조를 추출하는데 우수하나 폭이 넓은 총적층이 분포하는 지역에서는 계곡여부를 판단하는데 문제점이 발생한다. 즉, 태양방위각에 의한 효과를 보정함으로써 지질학적 선구조 분석에 효과적이긴 하나 총적층이 분포하는 경우에는 오차가 발생하는 단점이 있다.

## 2. Hough 변환과 선구조 양끝점 추출

영상으로부터 선구조를 추출하기 위한 테크닉 중 Hough 변환이 가장 널리 사용되고 있다. Hough 변환은 1962년 Hough에 의해 최초 개발되었는데 계산의 효율성을 높이기 위해 Duda and Hart(1972)는 영상에서의 각 화소의 위치  $(x, y)$ 를 Hough 공간상에서  $(\rho, \theta)$ 로 변환하는 방법을 제안하였다. Fig. 3의 한 직선은 Hough 변환을 통해 Hough 공간상에서 한 점으로 집중된다. 이때의  $\theta$  값은 직선의 방향을,  $\rho$ 는 영상의 중심으로부터 직선까지의 수직거리를 나타내며,  $\rho$ 의 범위는  $-R \leq \rho \leq R$ ,  $\theta$ 는  $0 \leq \theta < \pi$ 이다. Hough 변환의 변환식은 다음과 같다.

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \dots\dots\dots (4)$$

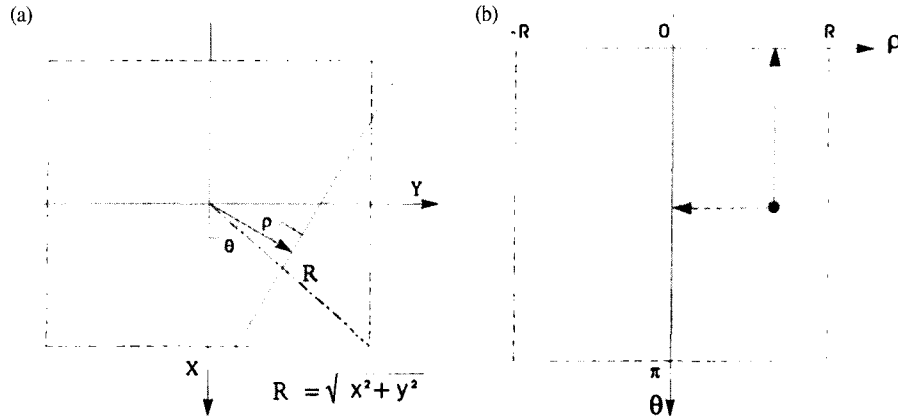


Fig. 3. Coordinates used for (a) the image space and (b) the Hough space.

이와 같은 Hough 변환은 영상의 직선이 잡음에 의해서 구별이 뚜렷하지 못하더라도 Hough 공간 상에서 한 점에 집중되므로 쉽게 구별이 가능한 장점이 있으며, 이에 따라 선구조를 찾는 데 흔히 적용되고 있다. 그러나 직선의 시작점과 끝점은 알 수 없다는 단점이 있다. 최근에는 이러한 Duda and Hart(1972)의 방법을 기초로 직선의 양 끝점을 알아내기 위한 알고리즘들이 Wang and Howarth(1990), Princen et al.(1990), Kang et al.(1991) 등 여러 연구자들에 의해 개발되어 왔다.

### III. 새로운 알고리즘

앞 절에 설명한 STA의 단점을 보완하고 또한 Hough 변환의 지질학적 선구조 추출을 위한 새로운 알고리즘을 개발하였다. 새로 제안되는 알고리즘은 이진영상을 생성하기 위한 DSTA (Dynamic Segment Tracing Algorithm)와 벡터화된 선구조 추출을 위한 ALEHHT(Automatic Lineament Extraction by Hierarchical Hough Transform), ALEGHT(Automatic Lineament Extraction by Generalized Hough Transform)로 구성되어 있다. DSTA는 앞서 설명된 STA의 개념을 변형한 것이며, ALEHHT와 ALEGHT는 각각 단순한 영상처리기법에 근거한 선 추출 방법인 Hierarchical Hough 변환(Princen et al., 1990)과 Generalized Hough 변환(Kang et al., 1991)을 기초로 하여 지질학적 선구조 추출에 이용할 수 있도록 작성된 알고리즘이다. Generalized Hough 변환은 Raghavan et al.(1995)에 의하여 지질학적 선구조 연구에 사용된 바 있다.

#### 1. DSTA

충적층은 선구조를 이루는 주요 요소 중 하나임에도 불구하고 앞의 시험 적용 결과에서 나타난 것처럼 STA에서는 많은 잡음이 발생되며, 또한 명암차가 적은 지역에서 11×11 소창문 안에서 강

제된 선구조 요소 방향에 의해서도 잡음이 발생하였다. 국내의 지형이 비록 산악지형이라고 할 수는 있으나 층적층이 고루 분포하고 있으며, 층적층의 폭 또한 작게는 수 화소에서 수십 화소에 이르기까지 다양하여 STA를 그대로 적용시키는 경우 많은 오차를 발생시킨다. 특히, 대규모 단층 지역에서는 침식으로 인하여 넓은 층적층의 발달이 일반적이며, 이에 대한 보완이 필수적이다. 이에 따라 STA에서 나타나는 문제점을 보완하여 새로운 알고리즘(DSTA)을 다음과 같이 개발하였다. Fig. 4는 DSTA 방법의 계통표를 보여주며, 이 중 step 1, 2, 3은 STA와 같다.

1) 동적 소창문

STA 방법의 두 번째 단계인 step 2에서 중심 화소를 기준으로 16방향의 분산 중 가장 작은 방향을 kmin이라 하고 kmin에 직각인 방향을 kmax로 놓으면, 명암차가 분명한 지역에서는 kmax 방향의 분산값(dmax)이 매우 크게 나타나지만 비교적 평탄한 지역에서의 dmax는 다른 방향과의 차이가 매우 작게 나타난다. 이렇게 dmax가 작을 때 설정된 kmin은 오차가 발생할 가능성이 매우 높다. 이를 보완하기 위해 DSTA에서는 일정값 이하의 dmax를 갖는 화소에서는 소창문의 크기를 변화시켜 다시 분산값을 계산함으로써 보다 신뢰도 있는 kmin을 결정하였다. 즉,

$$\frac{\sum_{i=-a}^a \cos(i \times \pi / (4 \times a)) (Z_0 - Z_i)^2}{Z_0} > threshold \text{ 이면 } \dots\dots\dots (5)$$

window size = window size + 2

여기서,  $Z_0$  는 중심 화소값,  $Z_i$  는 kmax 방향의 화소값들이다. 이러한 것은 특정 소창문의 크기 안에서 명암차가 작을 때 소창문의 크기를 늘려 주변 화소들의 값들과 비교함으로써 좀 더 넓은 범위에서의 영상 특징을 고려한다는 장점이 있다. 이때 사용되는 소창문의 크기는 11×11에서 17×17까지를 이용하였다. 11×11은 16방향으로 분산을 검색하기 위해 필요한 최소한의 크기이고, 너무 큰 소창문은 오히려 영상에서 경계부의 중첩과 방향의 변화를 초래할 수 있으므로 17×17까지로 제한하였다. 상대적으로 그림자 지역에서는 화소값의 변화가 작으므로 dmax가 작아질 수 있는데, 이러한 효과를 저감시키기 위해 식 (5)와 같이 dmax를 threshold 값과 직접 비교하지 않고 중심 화소의 DN값( $Z_0$ )으로 나눈 값을 이용하였다.

2) 층적층을 위한 segment tracing algorithm

앞서 설명한 것과 같이 층적층이 발달한 지역을 산악지형과 분리하여야 하며, 이를 위해 위성영상자료로부터 층적층의 분포를 구하는 과정이 필요하다. STA의 입력자료로 사용되는 TM 밴드 4 또는 5번은 층적층 내에 발달하는 수계 및 토양의 수분함량에 따라 DN값의 변화가 크기 때문에 층적층의 구분이 어려우며, 일차 주성분 영상 역시 DN값의 특징만을 가지고 쉽게 층적층을 구분할 수 없다. 따라서, 층적층을 구별하기 위해서는 다른 밴드의 사용이 요구된다. 일반적으로 영상자료의 특징을 이용한 층적층 추출은 감독분류(supervised classification)와 같은 분류법을 이용하지



만 이러한 방법은 상대적으로 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 광범위하게 총적층을 분류해 내는데, 이는 비교적 폭이 넓게 발달된 총적층에서 나타나는 STA의 문제점을 보완하기 위한 본 연구의 목적에도 잘 부합되지 않는다. 따라서, 단일 밴드를 사용한 다음과 같은 방법을 적용하였다.

밴드 1, 2, 3, 7에서 총적층은 높은 DN값을 갖는다. 하지만 밴드 3, 7번 경우에는 총적층뿐만 아니라 태양을 전면으로 바라보는 사면과 같은 지역에서도 높은 DN값을 나타내기 때문에 단순한 히스토그램 조정에 의해 구별이 용이하지 않다. 이러한 특징은 본 연구에서 사용된 영상 외에도 일반적으로 Landsat TM 영상에 나타나는 특징으로 다른 지역에도 적용 가능하다. 밴드 1, 2번 중 구분의 용이성을 위해 표준편차가 더 큰 밴드를 이용하여 적절한 창값을 주고 총적층으로 분류된 곳의 화소값은 0으로, 그 외는 1로 주었다. 추출된 총적층에서 잡음 즉 연속성이 없고 고립된 화소를 제거하기 위해 median 필터를 사용하였다. 이 결과는 총적층 내의 낮은 DN값을 갖는 수계에 의해 총적층의 폭을 가로지르는 방향에서 총적층이 단절되는 단점이 있지만 분류(classification)에

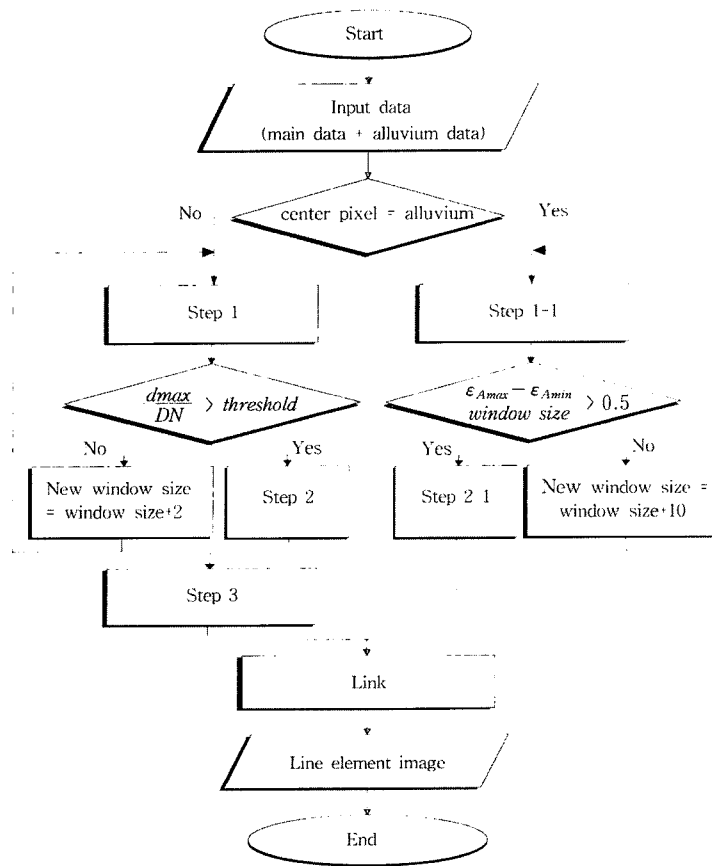


Fig. 4. Flow chart of DSTA: step1, step 2, and step 3 are the same as STA algorithm.

의한 방법보다 간편하고, 넓게 발달된 층적층만이 잘 나타나는 장점이 있다.

이렇게 구분된 층적층 내에 있는 화소들은 기존의 STA에 적용될 수 없으므로 선구조 요소의 연결을 하기 전에 새로운 방법에 의해 처리된 후 STA와 연계되어야 한다. 층적층을 처리하기 위한 방법은 다음 두 가지를 만족하여야 한다. 첫째는 선구조의 양끝점을 알아내기 위한 Hough 변환과 같은 2단계의 알고리즘에 적용되기 위해서는 층적층의 폭과 상관없이 일정 두께의 선으로 나타나야 한다. 둘째는 STA와 결합되기 위하여 최종적으로 남은 화소는 선구조방향에 대한 정보를 가지고 있어야 한다. 이를 위한 알고리즘은 다음과 같이 2단계로 구성되어 있다.

Fig. 4의 계통표 step 1-1에서 먼저 화소의 선구조 요소 방향을 결정하기 위해 16방향별로 화소값의 합을 구한다.

$$E_{dir} = \sum_{i=-a}^a DN_i \quad (dir=1, 2, \dots, 16)$$

$$a = \frac{(window\ size - 1)}{2} \dots\dots\dots (6)$$

여기서, 층적층의 화소값을 0으로 정의하였으므로  $E_{dir}$ 이 최소가 되는 방향이 선구조방향( $A_{min}$ )이 된다. 하지만 층적층의 폭이 매우 다양하므로 단일 크기의 소창문을 이용해 판단할 수는 없다.  $A_{min}$ 에 수직인 방향을  $A_{max}$ 라 했을 때 다음 수식을 만족할 때까지 소창문의 크기를 증가시켜 구한다.

$$\frac{(E_{A_{max}} - E_{A_{min}})}{window\ size} > 0.5 \dots\dots\dots (7)$$

식 (7)은 선구조 요소 방향을 판단하는 소창문의 크기가 층적층의 폭보다 최소 2배 이상이 되도록 유도하며 이러한 것은 소창문의 크기가 층적층의 폭보다 작아 발생하는 오류를 방지한다. 다음으로 step 2-1에서는 소창문의 중심 화소가 층적층 폭의 중심부에 있는지를 판단한다.  $A_{max}$  방향으로 다음 값을 구해

$$S_1 = \sum_{i=-a}^{-1} DN_i \quad S_2 = \sum_{i=1}^a DN_i \dots\dots\dots (8)$$

$|S_1 - S_2| < threshold$ 를 만족하면 최종적으로 선구조 요소 화소로 결정된다. 여기서, 창값(threshold)은 화소 단위로 thinning의 정도를 결정한다.

이상의 모든 과정들을 종합하여 새로 작성된 DSTA를 Fig. 1(a) 및 (b) 영상에 적용하여 얻은 결과는 Fig. 5(a), (b)이다. 기존의 STA 방법으로 얻어진 Fig. 2(a), (b)와 비교해 보면 새로 제안된 알고리즘이 특히 층적층 부분에 대하여 얼마나 개선되었는가를 뚜렷이 볼 수 있다. 층적층 주변에서 나타나는 잡음이 거의 대부분 제거되었으며, 동적 소창문의 사용에 의해 산악지역에서도 이진 영상이 상당히 개선되었다.

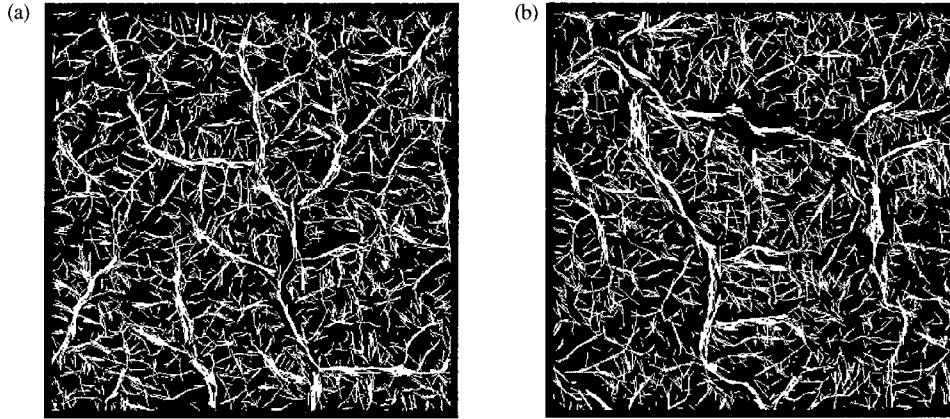


Fig. 5. The binary image of two test areas after the proposal DSTA algorithm.

## 2. 지질학적 선구조 추출을 위한 ALEHHT

일단 이진영상을 얻게되면 이로부터 선구조를 연결하는 과정이 필요하다. Hierarchical Hough 변환은 일반적인 화상자료 처리에 흔히 사용되는 방법으로, 전체 영상을 한번에 Hough 변환하지 않고 일정한 크기의 여러 소영상(sub image)으로 나눈 다음 각각을 Hough 변환한다. 가장 하위단계에서의 Hough 변환에 의해 구해진 선은 인접한 4×4 소영상을 모아 생성된 상위단계에서 서로 연결되어 나가며, 소영상의 크기가 전체영상과 같아지면 끝나게된다. 이 방법은 다양한 크기의 선과 분절되어 있는 긴 선을 찾을 수 있을 뿐만 아니라 선의 양끝점 위치를 결정할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

이진영상에 Hierarchical Hough 변환을 직접 적용한 결과는 선구조 요소 화소가 두꺼운 곳에서는 여러 개의 분리된 선으로, 완만한 곡선의 형태로 나타나는 선들은 여러 개의 근접한 각도를 이루면서 교차한 선들로 나타나고, 또한 연장성이 매우 짧은 선들이 산재해 나타난다. 그러나 지질학적 응용측면에서 인접한 선들은 합쳐지거나 연결되고 연구자의 목적에 따라 특정 길이 이하의 선들은 제거되는 과정이 필요하다. Raghavan et al.(1995)의 결합연산(merging operation)은  $d$ ,  $\delta\sigma$ ,  $\delta\beta$  세 매개변수(parameter)를 이용하였는데, 각 매개변수는 다음과 같은 식에 의해 구한다.

$$\begin{aligned}
 d &= \sqrt{(k_2 - k_1)^2 + (l_2 - l_1)^2} \\
 \sigma_1 &= \sqrt{(k_1 - k)^2 + (l_1 - l)^2} \\
 \sigma_2 &= \sqrt{(k_2 - k)^2 + (l_2 - l)^2} \dots\dots\dots (9) \\
 \delta\sigma &= |\sigma_1 - \sigma_2| \\
 \delta\beta &= |\beta_1 - \beta_2|
 \end{aligned}$$

여기서,  $(k_1, l_1)$ ,  $(k_2, l_2)$ 은 각 선들의 중점 좌표이고,  $\sigma_1$ 과  $\sigma_2$ 는 영상의 중심점( $k, l$ )에서 각 선의 중

점까지 거리,  $\beta_1$ 과  $\beta_2$ 는 각 선의 경사각이다.  $d$ ,  $\delta\sigma$ ,  $\delta\beta$ 에 창값을 주고 이 창값 이하의 값들을 만족 하는 한 쌍의 선은 결합된다. 하지만, 영상의 중심점과 선의 중심점을 연결하는 직선의 기울기를

$$\begin{aligned} \text{atan} \left( \frac{l-l_1}{k-k_1} \right) &= \beta_{1n} \\ \text{atan} \left( \frac{l-l_2}{k-k_2} \right) &= \beta_{2n} \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

이라 하였을 때  $|\beta_{1n} - \beta_1|$ 과  $|\beta_{2n} - \beta_2|$ 이 직각에 가까운 경우와  $|\beta_{1n} - \beta_1|$ 과  $|\beta_{2n} - \beta_2|$ 이 0에 가까운 경우에  $\delta\sigma$ 가 상충되는 문제가 발생한다. 즉,  $|\beta_{1n} - \beta_1|$ 과  $|\beta_{2n} - \beta_2|$ 이 직각에 가까운 경우의  $\delta\sigma$ 는 두 선 사이의 수직거리가 되며,  $|\beta_{1n} - \beta_1|$ 과  $|\beta_{2n} - \beta_2|$ 이 0에 가까운 경우의  $\delta\sigma$ 는 두 선 사이의 수평거리가 된다. 두 선 사이의 수직거리와 수평거리는 전혀 다른 영향을 미치기 때문에 동일한 값으로 사용할 수 없다. 따라서, 다음과 같은 새로운 결합연산을 사용하여 연구지역에 적용하였다. 크게 2가지 단계로 나뉘어지는데 첫 번째 단계에서 사용하는 조건은

$$\begin{aligned} \delta\beta &= |\beta_1 - \beta_2| < \text{threshold}(\delta\beta) \\ d_{12} \text{ and } d_{21} &< \text{threshold}(d_{ij}), \quad d_{ij} = i\text{선의 중점에서 } j\text{선의 수직거리} \dots\dots\dots (11) \\ dn &\leq |z_1 - z_2|, \quad dn = \text{두 선의 중점거리}, \quad z_i = (i\text{선의 길이})/2 \end{aligned}$$

이다. 식 (11-a)와 (11-b)는 두 선이 인접해 있다는 조건이고 식 (11-c)는 두 직선 중 하나가 다른 한 선을 완전히 포함하고 있다는 조건이다. 여기서 서로 인접해 있고 포함관계에 있는 선은 제거된다. 2단계에서는 1단계에서의 식 (11-a), (11-b)와

$$dn \leq z_1 + z_2 + \text{gap} \dots\dots\dots (12)$$

으로 식 (12)는 인접한 두 직선이 gap 이하만큼 서로 떨어져 있다는 조건인데, 여기서 gap은 특정 길이 이하를 제거하는 결합연산의 마지막 과정에서 단일 선구조가 특정길이 이하더라도 gap 이하만큼 떨어져 인접한 선이 존재할 때 두 선의 길이의 합의 연장성이 좋으면 제거되지 않은 과정에서 사용된다. dn이  $z_1 + z_2$ 보다 작으면 두 선은 연장된다. 두 선이 포함관계에 있지 않으면서 인접한 모든 선들은 이 단계에서 두 선의 교차점들을 이용해 서로 연장되고 제거된다. ALEHHT 알고리즘의 계통표는 Fig. 6과 같고 이진영상에 적용한 결과는 Fig. 7(a), (b)와 같다.

### 3. 지질학적 선구조 추출을 위한 ALEGHT

ALEGHT 알고리즘은 Generalized Hough 변환에 기초하여 작성되었다. 이 알고리즘은 다음과 같이 요약될 수 있다. 이진영상을 영상의 중심점을 기준으로 0°에서 90°까지 일정한 간격으로 회전시킨다. 이때 각 회전된 영상에서 수직방향과 수평방향으로 연속되는 선구조의 끝점을 조사해 나감으로써 수직 및 수평 선구조를 추출해낸다. 마지막으로 설정된 선구조는 다시 역회전시켜 원래 영상에서의 좌표를 구한다. Generalized Hough 변환은 선의 끝점의 좌표를 거의 정확하게 구할 수

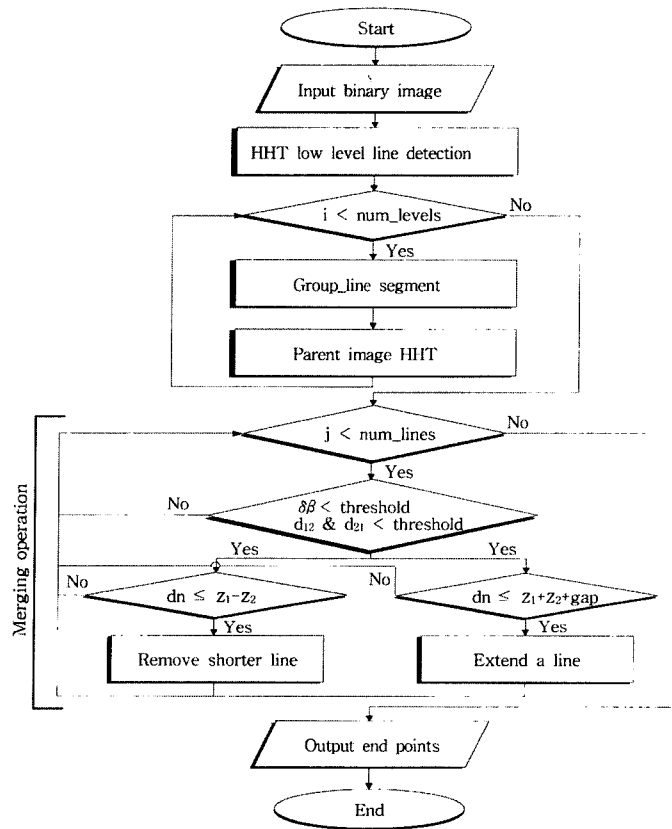


Fig. 6. Flow chart of ALEHHT.

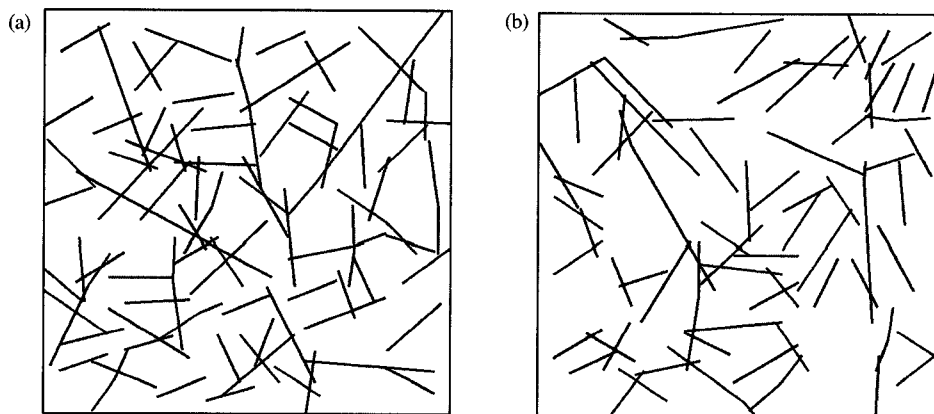


Fig. 7. The lineaments estimated through ALEHHT algorithm.

있다는 장점이 있지만, 다른 Hough 변환과는 달리 영상내의 잡음이 많을 때 결과가 좋지 않다는 단점이 있다. DSTA에 의한 이진영상은 지형적 불규칙성 영향에도 불구하고 양호한 연결성을 가지고 있기 때문에 Generalized Hough 변환의 적용이 가능하다. Fig. 8의  $\overline{AB}$ 는 X축에  $\theta$ 만큼 기울어져 있지만  $\theta$ 만큼 회전된 영상에서  $\overline{AB}$ 는  $\overline{A'B'}$ 로 X축에 평행한 선이 된다. 따라서,  $\overline{A'B'}$ 는 수평방향의 검색을 통해 쉽게 인지될 수 있다. 원래 영상에서의 각 화소는 다음 식에 의해 변환되고

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

추출된 선구조는 다음 식에 의해 역변환된다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

ALEGHT 알고리즘의 계통표(Fig. 9)에서 accumulator matrix의 크기는 초기 입력변수 중 정량화 간격(droh)에 의해 결정되는데, 이 droh는 다른 Hough 변환에서의  $\rho$ 와 유사한 의미를 갖는다. 추출된 선은 최종적으로 결합연산 과정을 통해 연결, 제거되지만 다양한 기울기를 가지고 있는 선들을 결합하는 과정은 매우 복잡하다. 따라서 본 알고리즘에서는 accumulator matrix의 각 행과 열마다 선의 연속성을 검색해 나가는 동안 최소 연장길이 이상의 선이 인지되면 그 선은 연속성이 종결될 때까지 연장되어 나간다. 또한,  $\theta$ 만큼 회전된 영상에서 추출된 선구조는 역변환되기 전에 일차적 결합과정을 통해 정리된다. Generalized Hough 변환에 의해 추출된 선들은 앞 절의 결합연산 과정을 거쳐 최종적인 선구조도(Fig. 10(a), (b))로 작성되었다.

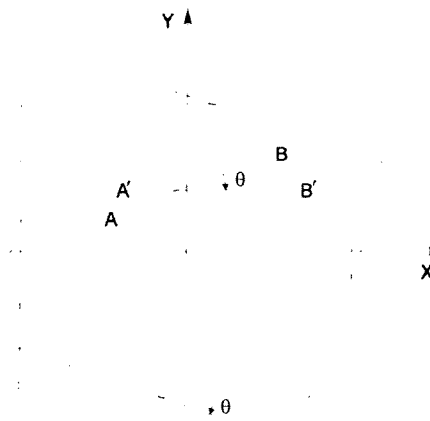


Fig. 8. Rotation of an image plane(Kang et al, 1991).

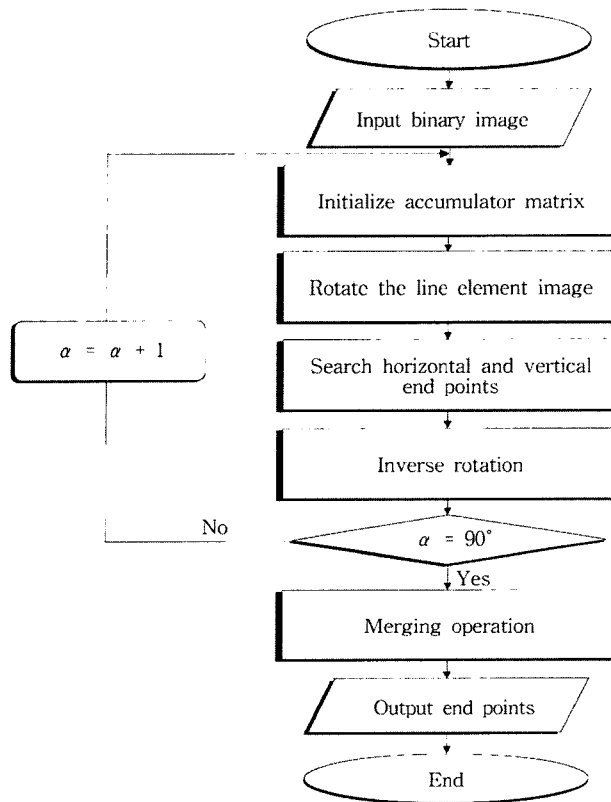


Fig. 9. Flow chart of ALEGHT.

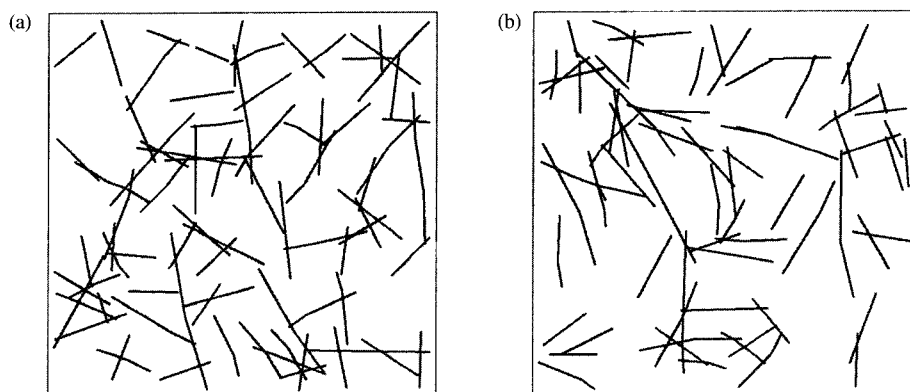


Fig. 10. The lineaments estimated through ALEGHT algorithm.

## IV. DSTA와 ALEIGHT 및 ALEHHT를 이용한 선구조 추출

### 1. 연구지역 및 자료

새로 제안된 알고리즘의 효율을 검토하기 위해 사용된 영상은 경상북도 의성지역(약 45km×55km)에서 1995년 11월 4일 얻어진 Landsat TM (114/35) 자료로 Fig. 11과 같으며, 당시 태양의 고도각은 31°이고 방위각은 144°NE이다.

다중 분광대역을 가지고 있는 Landsat TM 영상자료를 가지고 DSTA를 적용하기 위해서는 먼저 가장 지형적 특징을 잘 나타내는 분광대의 선정이 선행되어야 한다. 일반적으로 위성영상은 지표물질, 지형특징 그리고 대기에 의해 영향을 받지만 고도정보를 가지고 있는 수치표고모형을 이용하여 작성된 음영기복도(shaded relief image)는 지형적 특징만을 반영한다. 따라서, 수치표고모형에 본 연구에서 사용된 위성영상자료인 Landsat TM(114/35) 획득 당시의 태양고도각 31°와 방위각 144°NE를 주고 작성된 음영기복도와 Landsat TM 각 분광대간의 상관관계를 구해서 상관관계가 높은 밴드를 선구조 추출에 이용하였다.

연구지역의 음영기복도와 Landsat TM 각 밴드 및 TM 1, 2, 3, 4, 5 그리고 7번 밴드의 조합에 의한 일차 주성분 영상(first principal component image)간의 상관계수는 Table 1과 같다. 주성분 분석은 다중 파장대의 자료를 적은 밴드로 압축시키는 방법으로, 이러한 과정은 지표물질간의 공간 분별능력을 증진시킨다(Nalbant, 1995). 특히, 일차 주성분 영상은 지형학적 특징을 잘 반영하는 것



Fig. 11. Landsat band 4 image of the study area.

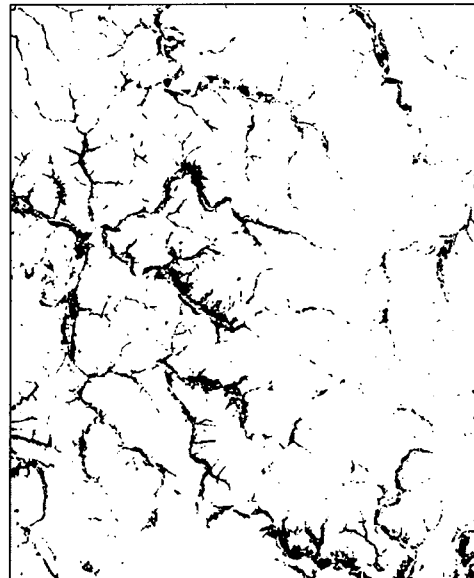


Fig. 12. Alluvial map obtained by a histogram adjustment of TM band 1.



Table 1. Correlation coefficients of shaded relief image with TM and first principal component(PC) images.

Image	Shaded relief image	TM_1	TM_2	TM_3	TM_4	TM_5	TM_7	PC
Shaded relief image	1.000	0.308	0.413	0.394	0.581	0.519	0.425	0.536

Table 2. Statistics of Landsat TM band 1 and band 2 over the test area.

	band 1	band 2
Mean	54.237	20.078
Standard deviation	6.327	4.415

으로 알려져 왔다. Table 1은 근적외선대(0.76~0.9 $\mu$ m)의 밴드 4번이 상관계수 0.581로 가장 높은 값을 보이고 있다. 따라서, 선구조 추출을 위한 기본 밴드로 TM 4번이 선택되어 히스토그램 평활화(histogram equalization)와 같은 영상증강을 거친 후 선구조 추출에 사용되었다.

Table 2는 밴드 1, 2번의 평균과 표준편차를 보여주고 있다. DSTA의 입력자료로 요구되는 층적층 분포자료는 표준편차가 더 큰 밴드 1번이 사용되었으며, 이때 창값은 62로 주었다. 이 값은 밴드 1이 반드시 정규분포를 한다고 볼 수는 없지만 편의상 정규분포로 가정하고 구한 상위 10%의 경계값이다. 7×7 median 필터를 이용하여 잡음을 제거한 결과는 Fig. 12와 같다.

## 2. 결과 및 토의

DSTA의 입력변수인  $d_{max}/DN$ 의 창값( $D_{min}$ )과 ALEGHT의 입력변수  $d_{roh}$  그리고 ALEHHT, ALEGHT 모두에서 사용되는 최소 선구조 길이( $L_{min}$ )는 연구지역의 선구조 추출을 위한 주요한 입력변수이다. 이들 중  $L_{min}$ 은 Landsat TM에서 하나의 화소가 30m의 해상도를 가지고 있기 때문에 약 1km 이상의 선구조만을 추출하기 위해 33화소로 주었다.  $D_{min}$ 과  $d_{roh}$ 의 값은 시험 적용 결과  $D_{min}$ 은 15~35,  $d_{roh}$ 는 1.5~1.7 정도가 적절한 값으로 나타나는데 이러한 값은 영상특징에 따라 달라진다. 일반적으로 영상에서 경계부의 명암차가 뚜렷한 경우에는  $D_{min}$ 을 낮은 값을 주고, 명암차가 낮은 지역이 많을 때는 높은  $D_{min}$ 을 사용하는게 더 좋은 이진영상을 얻을 수 있다.  $d_{roh}$ 는 이진영상에서 잡음이 적을수록 큰 값을 사용하고 잡음이 많을 때는 작은 값을 사용하는 것이 보다 나은 결과를 보인다. 따라서, 1490×1842화소 크기의 연구지역 전체를 단 한번에 DSTA와 ALEHHT, ALEGHT에 적용하는 것보다, 본 연구에서는 지역적 영상특징을 고려하여 보다 좋은 결과를 얻기 위하여 연구지역을 경계부가 겹치는 약 400×400화소 크기를 갖는 30개의 소영상으로 나누는 다음 각각의 소영상에 알고리즘을 적용하였다.  $D_{min}$ 의 값으로는 25가,  $d_{roh}$ 는 1.7이 가장 많이 사용되었다. Fig. 13은 30개의 소영상에 DSTA를 적용한 결과를 합한 영상으로 산악지역 및 층적층 지대에 발달한 선구조 모두 잘 나타나고 있으며, 태양의 방위각에 평행한 경계들 또한 잘 드러나 있다. 선구조의 양끝점 추출은 앞서 설명한 ALEHHT와 ALEGHT 두 방법 중 어느 한가지

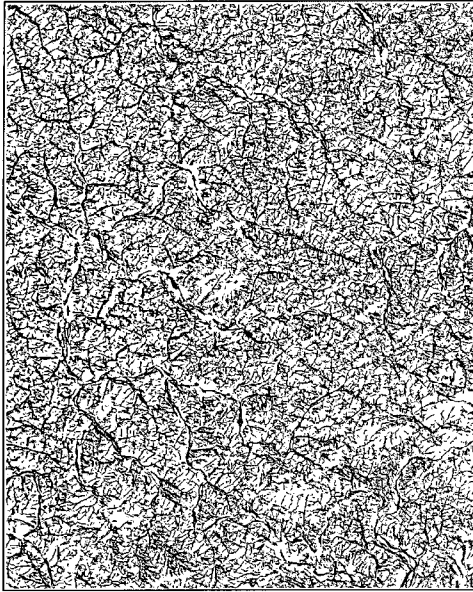


Fig. 13. Binary image generated by applying DSTA to Landsat band 4.



Fig. 14. The resulting lineament map of the study area estimated through the proposed algorithm.

만을 사용하여도 무방하지만 두 방법 모두 마지막 단계에서 인공구조물에 의한 선구조와 잡음이 많은 지역에서 발생할 수 있는 오류 때문에 다소 수동적인 조작도 필요하다. 본 연구에서는 ALEHHT와 ALEGHT 두 방법 모두를 적용하고, 그 결과를 TM 영상에 중첩시킨 다음 최종적으로 Fig. 14와 같은 벡터화된 선구조를 구하였다. Fig. 14에서 보는 것과 같이 본 연구에서 제안된 방법은 위성영상으로부터 매우 효과적으로 선구조를 추출할 수 있었다.

효과적으로 자동화된 선구조 추출 알고리즘을 이용하기 위해서는 지역적 특성에 따른 입력변수가 적절하게 선택되어야만 한다. 이러한 변수 중 General Hough 변환의  $d_{roh}$ 는 영상을 회전시킴에 따라 정수 좌표가 실수 좌표로 투영되면서 반드시 일대일 투영이 되지 않기 때문에 발생하는 오류를 줄이기 위한 일종의 영상척도 인자이다. 따라서,  $d_{roh}$ 는 영상 회전각  $\alpha$ 에 따른 함수로 주어지는 것이 더 타당하지만 결과에 미치는 영향이 미약하고 적절한 함수를 찾기 어려워 본 연구에서는 상수로 사용하였다. 그러나 특수한 경우에 낮은  $d_{roh}$ 에서 추출되던 선구조가 높은  $d_{roh}$ 에서 추출되지 않는 등 다소의 문제점이 남아있어 향후의 연구에서 좀 더 보완해야할 것으로 사료된다.

## V. 결 론

지금까지 위성영상자료로부터 빠른 시간 내에 객관적인 선구조의 추출을 위한 자동추출 알고리즘이 지형적 특징에 따라 다양한 방법으로 개발되어 왔다. 국내의 지형은 산악지역이 우세하지만

또한 층적층이 고루 분포하고 있어 산악지형에서 나타나는 특성 및 층적층 지대에서 나타나는 특성을 함께 고려하여야 한다. 하지만 기존에 개발된 알고리즘들은 산악지역 또는 평지지역 중 어느 한쪽에만 적용 가능한 방법이다. 이에 따라 본 연구에서는 자동 선구조 추출 알고리즘을 위해 DSTA, ALEHHT 및 ALEGHT를 개발하였다. 위성영상으로부터 이진영상 생성하는 DSTA는 산악지형에서 크게 작용하는 태양방위각에 따른 방향편차를 효과적으로 제거할 뿐만 아니라 동적 소창문의 사용에 의해 명암차가 낮은 지역에서의 잡음 역시 상당히 줄일 수 있어 기존의 STA 방법보다 우수한 것으로 나타났다. 또한, 층적층이 발달되어 있는 지역에 적용 가능하도록 추가된 새로운 루틴은 복잡하고 다양한 폭을 가진 층적층을 일정 두께의 단일한 직선으로 표현하여 최종적으로 산악지역 처리 결과와 결합되었다. 단순한 영상처리기법에 의한 벡터화된 선구조 알고리즘인 Hierarchical Hough 변환과 Generalized Hough 변환은 지질학적 선구조 추출에 사용되기 위해서는 적절한 결합연산 과정이 필요하다. Raghavan(1995)의  $d$ ,  $\delta\sigma$ ,  $\delta\beta$ 에 의한 결합연산은 영상의 중심점으로부터 직선의 중심점까지의 거리차인  $\delta\sigma$ 가 특이한 경우에 상충되는 문제가 발생한다. 따라서, 본 연구에서는 사이각( $\delta\beta$ ), 수직거리( $d_{ij}$ ), 중점거리( $d_n$ )를 이용한 결합연산을 제안하였으며, 수행 결과 만족할 만한 결과를 보였다. ALEHHT, ALEGHT 중 ALEHHT는 이진영상에서 선구조 요소의 연속성과 잡음에 영향을 적게 받는다는 장점이 있지만 ALEGHT는 연속성이 좋은 이진영상에서 보다 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

개발된 알고리즘을 이용한 경북 의성지역의 선구조 추출결과, 태양의 방위각에 평행한 서북서방향의 선구조가 잘 나타났으며, 또한 산악지역 및 층적층 지대에 발달한 선구조 모두 잘 드러나고 있어 매우 성공적이었다. 하지만, 알고리즘을 보다 효과적으로 사용하기 위해서는 적절한 입력변수의 사용이 필수적이며, 특히 ALEGHT의 입력변수인  $d_{roh}$ 에 의한 영향은 차후의 연구에서 수행, 보완되어야 할 것으로 생각된다.

## 사 사

본 연구는 연세대학교 기초과학연구소의 1997년도 교육부 특성화 연구비 (BSRI-97-5415)에 의해 수행된 연구 결과로서 이에 감사드립니다. 또한 연구 수행에 많은 조언과 도움을 아끼지 않으신 연세대학교 지구시스템과학과 원격탐사연구실의 모든 분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김종환, 강필중, 임정웅, 1976. Landsat-1영상에 의한 영남지역 지질구조와 광상과의 관계 연구, 지질학회지, 12(2):78-89.
- 김원균, 원중선, 김상완, 1996. 원격탐사자료와 수치표고모형을 이용한 지질학적 선구조 분석기술 : 경상분지 의성지역을 중심으로, 대한원격탐사학회지, 12(2):139-154.
- 이봉주, 최위찬, 강필중, 1997. 한반도 동남부지역의 선구조선, 지질학회지, 33(1):18-26.

- Carrere, V., 1990. Development of multiple source data processing for structural analysis at a regional scale, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(5):587-595.
- Duda, R.O. and P.E. Hart, 1972. Use of the Hough transform to detect lines and curves in pictures, *Communications ACM*, 15(1):11-15.
- Fitton, N. and S. Cox, 1995. Linear feature extraction in geoscientific data, Australian Geodynamics Cooperative Research Centre.
- Ford, J.P., 1980. Analysis of Seasat orbital radar imagery for geologic mapping in the Appalachian valley and ridge province, Tennessee-Kentucky-Virginia, radar geology, JPL publication.
- Gregory, A.F. and H.D. Moore, 1975. Role of remote sensing in mineral exploration with special reference to ERTS, Canadian Mining and Metallurgy Bulletin.
- Kang, C.W., R.H. Park, and K.H. Lee, 1991. Extraction of straight line segments using Rotation Transformation: Generalized Hough Transformation, *Pattern Recognition*, 24(7):633-641.
- Kang, P.C., 1984. *A study on remote sensing application for the tectonic-framework of the Korea Peninsula*, Ph D., Korea.
- Karnieli, A., A. Meisels, L. Fisher, and Y. Arkin, 1996. Automatic extraction and evaluation of geological linear features from digital remote sensing data using a Hough transform, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(5):525-531.
- Koike, K., S. Nagano, and M. Ohmi, 1995. Lineament Analysis of Satellite Images using a Segment Tracing Algorithm(STA), *Computers & Geosciences*, 21(9):1091-1104.
- Koike, K., S. Nagano, and M. Ohmi, 1993. Development and application of lineament extraction method using segment tracing algorithm. in Geoinform '93, Tokyo Univ., 19-20.
- Lee, K.W. and K.H. Chi, 1995. Spatial integration of multiple data sets regarding geological lineaments using fuzzy set operation, *Jour. Korean Soc. Remote Sensing*, 11(3):49-60.
- Mabee, S.B., K.C. Hardcastle, and D.U. Wise, 1994. A method of collecting and analyzing lineaments for regional-scale fractured-bedrock aquifer studies, *Groundwater*, 32(6):884-894.
- Mah, A., G.R. Taylor, P. Lennox, and L. Ballia, 1995. Lineament analysis of Landsat Thematic Mapper images, Northern Territory, Australia, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 61(6):761-773.
- Nalbant, S.S. and O. Alptekin, 1995. The use of Landsat TM imagery for analyzing lithology and structure of Korucu-Dugla area in western Turkey, *International Journal of Remote sensing*, 16(13):2357-2374.
- Ochi, M., J. Komai, K. Arai, H. Fujioka, T. Tokuo, and K. Ohatani, 1987. Photo geological appraisal of automatically extracted lineaments from Landsat data, *Mining Geology*, 37(2):99-108.
- Princen, J., J. Illingworth, and J. Kittler, 1990. A hierarchical approach to line extraction, *Computer Vision, Graphics, and Image Understanding*, 52:57-77.
- Qari, M.Y.H.T., 1991. Application of Landsat TM data to geological studies, Al-Khabt area, southern Arabian shield, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(4):421-429.

- Raghavan, V., S. Masumoto, K. Koike, and S. Nagano, 1995. Automatic lineament extraction from digital image using a segment tracing and Rotation transformation approach, *Computers & Geosciences*, (4):555-591.
- Sabins, Floyd F., Jr., 1978. *Remote Sensing-Principles and Interpretation*, W. H. Freeman and Company, USA. <sup>3</sup>
- Short, N.M. and P.D. Jr. Lowman, 1973. Mineral resources, geological structure and landform surveys, Proc. of third earth resources symposium, 2:147-168.
- Siegal, B.S. and N.M. Short, 1977. Significance of operator variation and the angle of illumination in lineament analysis on synoptic images, *Modern Geology*, 6(1):75-85.
- Sijmons, K., 1987. Computer-assisted detection of linear features from digital remote sensing data, *ITC J.*, 1:23-31.
- Vanderbrug, G.J., 1976. Line detection in satellite imagery, *IEEE Trans. on Geoscience electronics*, GE-14(1):37-44.
- Wang, J. and P.J. Howarth, 1990. Use of Hough transform in automated lineament detection, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 28(4):561-566.