

위성영상과 음영기복도를 이용한 오대산 지역 진앙의 위치와 선구조선의 관계 분석*

차성은¹ · 지광훈^{1*} · 조현우¹ · 김은지² · 이우균¹

The Relationship Analysis between the Epicenter and Lineaments in the Odaesan Area using Satellite Images and Shaded Relief Maps*

Sung-Eun CHA¹ · Kwang-Hoon CHI^{1*} · Hyun-Woo JO¹
Eun-Ji KIM² · Woo-Kyun LEE¹

요 약

본 연구에서는 LANDSAT 8호, KOMPSAT 2호 위성영상과 1/25,000 수치지형도를 기반으로 작성된 음영기복도를 이용하여 2007년 1월 20일 오대산 지역에서 발생한 약 4.8의 중규모 지진과 선구조선의 관계를 분석하였다. 대부분의 선행연구는 지체구조와 관련된 선구조선 분석 연구를 하였으며, 주로 2차원의 위성영상과 음영기복도를 활용하였기에 지형의 기복 등에 대한 판독이 어려워 선구조선 추출이 제한적이었다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위해 수치표고모델(Digital Elevation Model; DEM)을 기반으로 작성한 3차원 입체 영상과 수계망 분석을 통해 지형의 기복, 수계의 연결성 등을 판독해 선구조선을 추출하여, 2차원 영상에서 나타나는 시각적인 판독에 의한 오류를 최소화한 선구조선 판독도를 작성하였다. 또한 진앙에 대한 선구조선의 통계 요소별 밀도를 추정하기 위해 spline 내삽법을 이용하여 선구조선의 빈도, 교차점, 길이에 대한 밀도를 계산하였다. 그리고 진앙에서의 선구조선 밀도가 얼마나 밀집되어 있는지 정량적으로 표현하기 위하여 각 격자 내의 선구조선 밀도에 대해 최대 선구조선 밀도로 나누는 상대밀도 값(Value of the Relative Density; VRD)을 계산하는 알고리즘을 개발하여 밀도도(density map)를 작성하였다. 각 영상의 진앙에서의 VRD는 최소 약 0.60에서 최대 약 0.90으로 나타났지만, 각 영상별 광원의 고도각과 방위각이 차이가 있어 영상별 VRD보다 통계 요소별 VRD의 평균치를 사용하였다. 그 결과, 빈도의 평균 VRD는 약 0.85로 교차점과 길이의 평균 VRD보다 약 21% 높게 나타나, 선구조선의 빈도 요소가 진앙의 위치와의 관계가 가장 밀접함을 확인하였다. 이와 같이 3차원 영상의 선구조선 추출을 통한 밀도 분석 기술은 향후 지진 발생 가능 지역 분석에 기초자료로서의 의미가 있을 것으로 기대된다.

주요어 : LANDSAT 8호 위성영상, 음영기복도, 오대산 지진, 선구조선, 상대밀도 값(VRD)

2016년 6월 24일 접수 Received on June 24, 2016 / 2016년 7월 31일 수정 Revised on July 31, 2016 / 2016년 8월 29일 심사완료 Accepted on August 29, 2016

* 본 연구는 2015년도 한국기상산업진흥원 기상See-At기술개발 사업 지원으로 수행되었음 (과제번호: KMIPA2015-3093).

1 고려대학교 환경생태공학과 Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University

2 고려대학교 기후환경학과 Dept. of Climate Environment, Korea University

* Corresponding Author E-mail : khchi@korea.ac.kr

ABSTRACT

The purpose of this paper is to analyze the relationship between the location of the epicenter of a medium-sized earthquake (magnitude 4.8) that occurred on January 20, 2007 in the Odaesan area with lineament features using a shaded relief map (1/25,000 scale) and satellite images from LANDSAT-8 and KOMPSAT-2. Previous studies have analyzed lineament features in tectonic settings primarily by examining two-dimensional satellite images and shaded relief maps. These methods, however, limit the application of the visual interpretation of relief features long considered as the major component of lineament extraction. To overcome some existing limitations of two-dimensional images, this study examined three-dimensional images, produced from a Digital Elevation Model and drainage network map, for lineament extraction. This approach reduces mapping errors introduced by visual interpretation. In addition, spline interpolation was conducted to produce density maps of lineament frequency, intersection, and length required to estimate the density of lineament at the epicenter of the earthquake. An algorithm was developed to compute the Value of the Relative Density (VRD) representing the relative density of lineament from the map. The VRD is the lineament density of each map grid divided by the maximum density value from the map. As such, it is a quantified value that indicates the concentration level of the lineament density across the area impacted by the earthquake. Using this algorithm, the VRD calculated at the earthquake epicenter using the lineament's frequency, intersection, and length density maps ranged from approximately 0.60 (min) to 0.90 (max). However, because there were differences in mapped images such as those for solar altitude and azimuth, the mean of VRD was used rather than those categorized by the images. The results show that the average frequency of VRD was approximately 0.85, which was 21% higher than the intersection and length of VRD, demonstrating the close relationship that exists between lineament and the epicenter. Therefore, it is concluded that the density map analysis described in this study, based on lineament extraction, is valid and can be used as a primary data analysis tool for earthquake research in the future.

KEYWORDS : *LANDSAT-8 Satellite Image, Shaded Relief Map, Odaesan Earthquake, Lineament, Value of the Relative Density (VRD)*

서론

최근 일본의 구마모토, 네팔, 칠레 등 환태평양지진대를 따라 강력한 지진들이 발생하여 한반도의 지진 위험 가능성에 관련한 체계적인 연구가 요구되고 있다. 환태평양지진대는 지질학적으로 대규모의 선구조선 형태로 존재하며 선

구조선은 일반적으로 단층, 절리, 지질 경계선 등과 같은 지질 약선대로써 원격탐사 자료로부터 추출할 수 있다(Sabins, 1978).

지진과 선구조선과의 관련된 연구로서는 Arellano-Baeza *et al.* (2006)이 ASTER 위성 영상으로부터 지진 발생 전후 균열의 변위를 분석하여 균열이 지진 발생에 밀접한 관련이 있음을 보고한 바 있으며, Kyung *et al.* (2007)은 오

대산 지진이 선구조선으로 나타나는 월정사 단층 활동 때문에 발생한 것으로 보고한 것으로 보아, 지진과 선구조선이 관련이 있는 것으로 추정할 수 있다. 선구조선 추출 방법으로는 Won *et al.* (1998), Choi(2001), Bondur and Kuznetsova (2005)가 자동 추출 알고리즘을 이용하여 객관적인 선구조선 추출을 시도하였으나, 입력변수에 따라 노이즈 생성 및 길이의 연장성 등에서 부정확한 선구조선이 추출되는 문제 등이 있어 정밀한 선구조선 추출에 어려움이 있었다. 또한 자동 내지 반자동에 의해 추출된 선구조선도 최종 목적으로 사용하기 위해서는 결국 시각적 판단으로 재분석을 해야 하는 실정이다.

본 연구에서는 2007년 1월 20일 오대산 인근에서 발생한 지진과 관련하여 중·저해상도의 LANDSAT 8호 위성영상, 고해상도의 KOMPSAT 2호 위성영상과 1/25,000 수치지형도로부터 작성된 음영기복도 등과 같은 공간 정보들을 기반으로 3차원 입체 영상과 수계망도를 작성하였다. 이러한 영상들을 항공사진 판

독용 입체경을 통해 지형의 기복, 수계의 연결성 등을 판독하고 선구조선을 추출하여 진앙과의 관계를 분석하였으며, 이는 향후 지진 발생 가능 지역에 관련된 선행연구의 기초자료로서의 의미가 있다.

연구대상지 및 사용자료

본 연구의 대상 지역은 2007년 1월 20일 약 4.8의 중규모 지진이 발생한 강원도 평창군 진부면 일대로, 북북동-남남서 방향의 월정사 단층이 위치한다. 오대산 지진($M_L=4.8$)은 진원 깊이가 약 10km의 천발지진이며, 지진의 진앙은 오대산으로부터 약 10km 남남동 방향에 위치하고 지리적 좌표는 북위 37° 40'48.00"N 동경 128° 35'24.00"E이다(그림 1).

연구지역의 선구조선 분석을 위해 사용된 위성자료는 두 가지 요소를 고려하여 선정하였다. 첫 번째는 기상 요소에 해당하며, 운량이 10% 미만으로 지형의 기복 구조가 잘 드러날 수 있

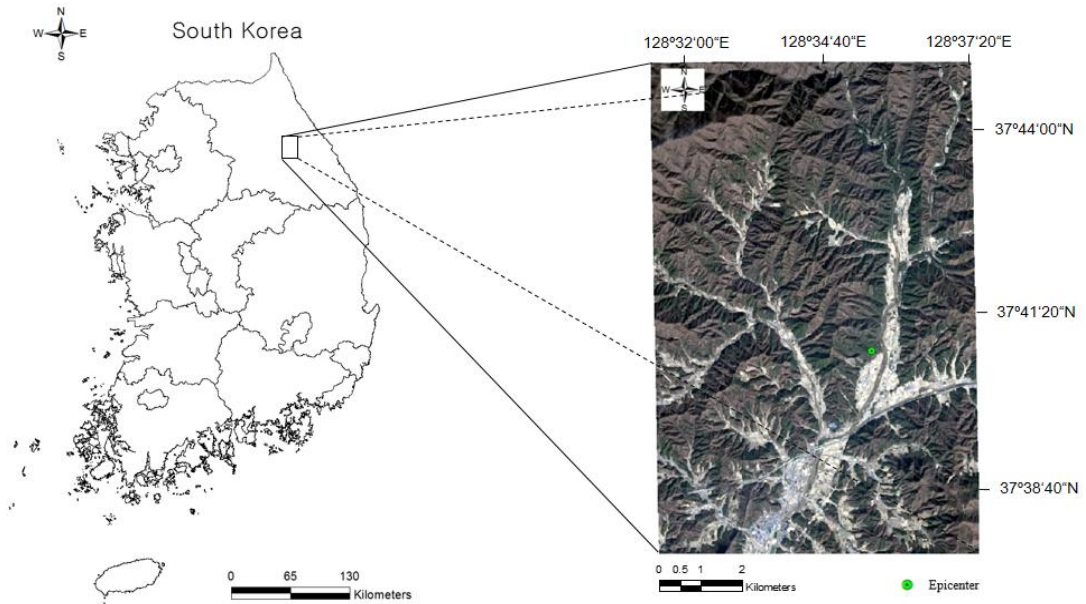


FIGURE 1. LANDSAT-8 image of the study area acquired on the 15th of November 2014 with the epicenter

어야 한다. 두 번째는 계절적 요소에 해당하며, 지형의 식생 영향이 적고 적설의 영향이 없는 초겨울이나 초봄 시기의 영상이어야 한다. 본 연구에서는 위의 두 가지 요소를 모두 고려하여 중·저해상도의 LANDSAT 8호의 경우, 2014년 11월 15일에 촬영되고 촬영시 태양의 고도각과 방위각이 각각 32.12° , 161.28° 인 영상을 사용하였으며, 고해상도의 KOMPSAT 2호의 경우 2015년 3월 23일에 촬영되고 촬영시 태양의 고도각과 방위각이 각각 46.14° , 141.66° 인 영상을 사용하였다. 또한 음영기복도의 작성을 위하여 축척 1/25,000의 오대산과 하진부 수치도형 도면을 사용하였다(KIGAM, 1975a; KIGAM, 1975b).

연구방법

1. 영상 전처리

LANDSAT 8호 위성영상은 비교 대상 자료인 1/25,000의 수치지형도의 해상도를 고려하고 데이터 자체가 가지고 있는 분광 특성의 왜곡과 노이즈를 최소화하여 판독의 가독성을 높이기 위해 30m 해상력을 가진 multispectral

band와 15m의 panchromatic band를 High pass filter(HPF) resolution merge 기법을 적용하여 융합하였다(Chavez *et al.*, 1991). KOMPSAT 2호 위성영상도 같은 방법으로 4m의 multispectral band와 1m의 panchromatic band를 융합하였으며, 선구조선의 정확한 위치를 추출하기 위하여 미분 편위수정(differential rectification)을 거쳐 촬영 당시 지형 기복에 의해 발생한 기하학적 왜곡을 정사보정 하였다(Rhee *et al.*, 2009).

음영기복도는 1/25,000 수치지형도로 작성한 수치 표고 모델(Digital Elevation Model; DEM)을 기반으로 작성하였으며, 광원의 위치가 한 방향으로 정해져 있는 위성영상과는 다르게 음영기복도에서는 태양의 방위 및 고도가 선구조선 판독 결과에 주된 영향을 끼치는 요인이기 때문에 태양 고도각을 20° 에서 45° 사이 중 5° 마다 변경하여 선구조선을 판독하였다. 그 결과, 태양 고도각 30° 의 영상이 적당한 음영에 의한 지형의 기복으로, 본 연구 지역을 판독하기에 가장 적합하다고 판단하였으며, 위성영상처럼 한쪽 방향에서만 선구조선이 강조되어 추출되는 것을 방지하기 위하여 태양 방위각을 45° , 90° 와 135° 로 설정한 세 방향의 영상을 합성하여 그림 2와 같이 음영기복도를 작성하였다.

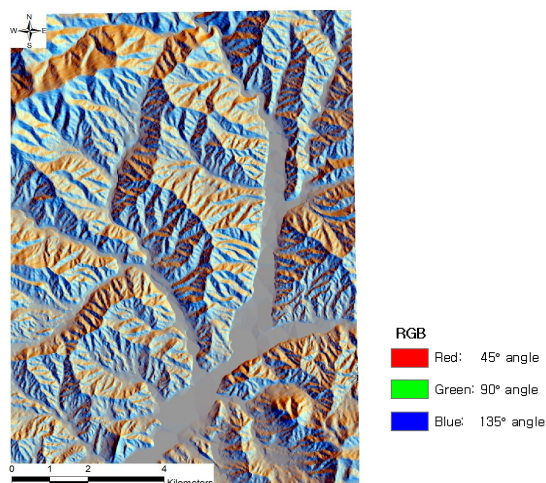


FIGURE 2. Shaded relief map produced by 30 degrees of the solar altitude and composition of 45, 90 and 135 degrees of the solar azimuth

2. 선구조선 추출

선구조선은 학자에 따라 정의가 약간씩 다르나, 본 연구에서는 O'Leary *et al.*(1976)가 정의한 “주변과 명확히 다른 패턴을 갖고 있고 직선 혹은 곡선으로 배열하고 있는 선상의 특징을 나타내는 것으로 지표면의 하부 상태를 반영하고 있다” 라고 광역적으로 해석한 것과 그림 3에 표시한 것처럼 “직선 혹은 완곡 형태의 지형 요소로써 단층, 파쇄대, 암맥, 습곡축, 절리 등의 지질구조와 지질경계이다” 라고 Sabins (1978)에 의해 정의된 것을 사용하였다. 이와 같이 선구조선은 지형 요소, 지질구조 등과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다(Jang and Seo, 2006; Kim *et al.*, 2005).

선구조선을 수치적으로 해석하면 보통 화소의 명암 차에 의해 구분할 수 있으나, 실제 위성영상에서는 완벽하게 이어져있는 연속적인

선이라기보다 지표상의 여러 가지 현상이나 인공지물들에 의해 차단된 파선과 같은 형태로 존재하고 있다(Choi *et al.*, 2003). 즉, 선구조선은 농도나 텍스처가 급격히 변화하는 불연속성의 엷지와 선의 형태로 구분할 수 있다(Chi and Seo, 1991).

따라서 이러한 지형 및 지질 요소를 추출하기 위해서는 지형의 기복, 수계의 연결성 등을 판독할 수 있어야하나, 그림 4의 (a)에 색깔별로 표시한 부분처럼 지형의 기복 등이 그림 4의 (b)에 비해 판독이 어려워 선구조선을 추출하기가 제한적이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 2차원 영상에 DEM을 이용하여 그림 4의 (b)와 같이 항공사진 판독용 입체경을 통해 지형의 기복, 수계의 연결성 등을 명확히 판독할 수 있는 3차원 입체 영상을 작성하였다.

Kang and Chi(1988)는 위성영상에서 나타

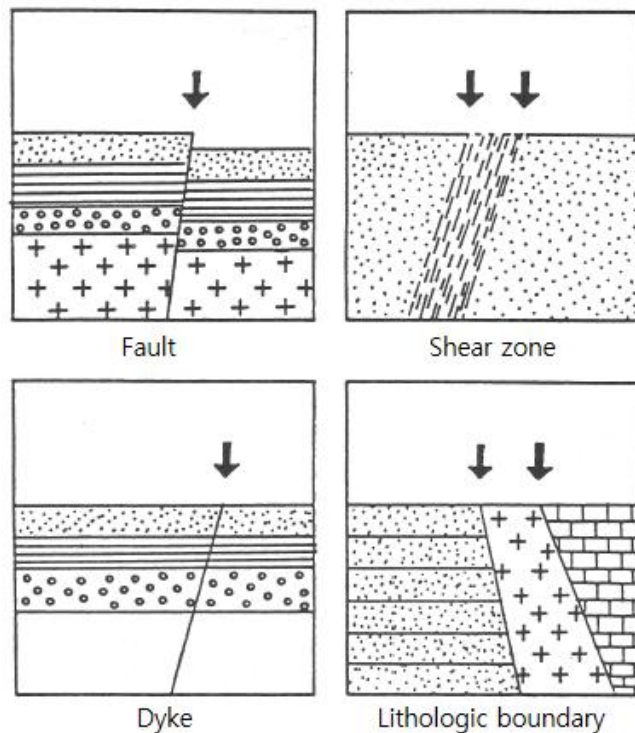


FIGURE 3. The geological features which are shown as a lineament(↓) on the surface (Chi and Seo, 1991)

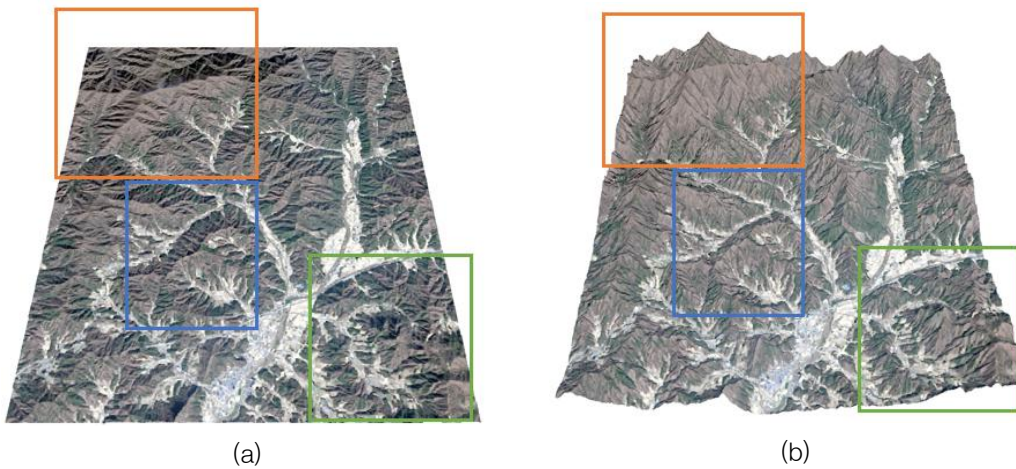


FIGURE 4. Comparison of LANDSAT-8 satellite images in boxed area representing the remarkable difference of topographical relief features (a) two-dimensional image (b) three-dimensional image

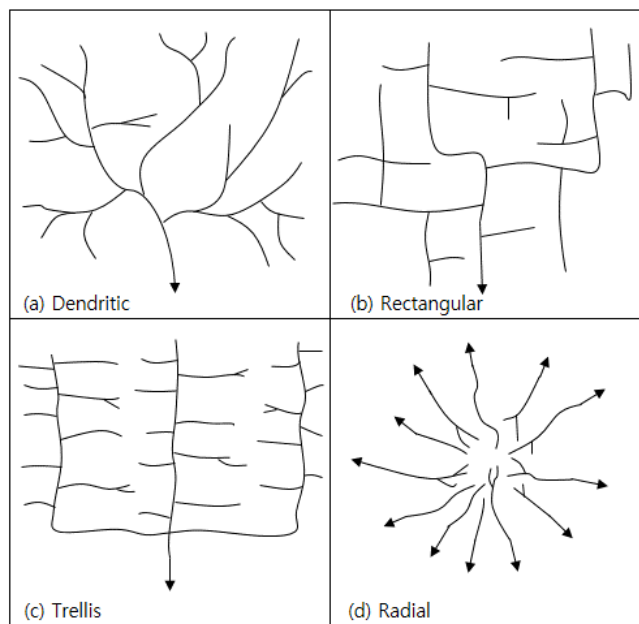


FIGURE 5. Four patterns of drainage network
(Source: Howard, 1967)

나는 수계의 패턴과 구성은 지형, 지질의 주요 관독 요소이기 때문에 선구조선의 추출에 있어서도 중요한 요소의 하나로 보고하였다. Howard (1967)는 수계망을 여섯 가지의 패턴으로 구분하

였지만, 그 중 선구조선이 잘 발달하는 네 가지의 패턴을 그림 5에 표시하였다. (a)는 coarse 텍스처의 dendritic 패턴으로 직선적으로 흐르는 수계를, (b)와 (c)의 rectangular과 trellis

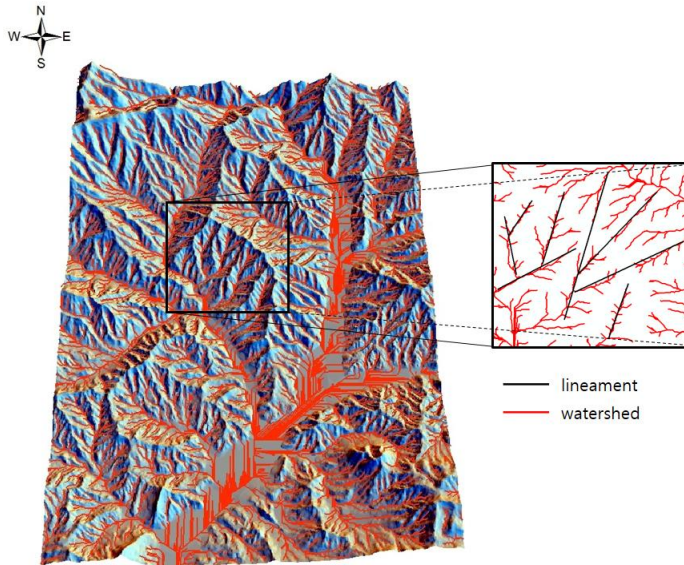


FIGURE 6. Criteria for visual interpretation of lineament considering drainage network and extensity of lineament on shaded relief map

패턴처럼 직각방향의 수계는 구조적인 지배를 많이 받아서 대체로 선구조선과 일치하는 경향이 있으며, (d)와 같은 radial 패턴은 주로 화산 지대나 반구형 모양의 지대처럼 중앙에서 바깥쪽으로 향하는 방사선의 패턴으로 존재한다(Kang and Chi, 1988). 이러한 판독 기준으로 1/25,000 수치지형도의 DEM으로부터 자동 추출한 수계망과 3차원 음영기복도를 기반으로 추출한 선구조선과의 관계의 예를 그림 6에 표시하였다. 선구조선의 판독은 길이가 1km 이상의 것만 대상으로 추출하였으며, 각 영상에 대하여 판독할 때마다 선구조선에 대한 차이를 최소화하기 위해 총 3회에 걸쳐 공통으로 판독된 선구조선만을 분석에 사용하였다.

3. 선구조선의 통계 요소별 분석을 위한 알고리즘

진앙에 대한 선구조선의 통계 요소별 밀도를 추정하기 위하여 Kriging, IDW, Spline 등의 내삽 기법 적용을 시도하였다. Kriging 기법은 포인트 데이터의 위치와 방향을 통계적으로 분석하여 내삽을 진행하는데 본 연구에서 사용한

데이터는 사각격자 내의 포인트가 등간격으로 분포하여 위치와 방향성을 고려한 모델의 필요성이 적었다. IDW 기법은 거리에 따라 역 가중치를 주는 기법으로 포인트가 많을수록 정확한 내삽이 이루어지지만 본 연구대상지는 포인트의 수가 적어 IDW 기법을 적용하면 데이터의 연속성이 떨어지는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 다른 격자 내삽 값에 주는 영향을 최소화하면서 국소적인 불규칙성도 반영시킬 수 있는 spline 내삽법을 적용하였다(Yu, 1992). 일례로 선구조선 빈도 자료에 spline 내삽법을 적용할 경우, 그림 7의 $x_1, x_2, x_3 \dots x_{n-1}, x_n$ 은 격자 내의 선구조선 수를 반영하는 각 점을 의미하고 $S_1, S_2, S_3 \dots S_{n-2}, S_{n-1}$ 이라는 구간별 방향식을 통해 $x_1, x_2, x_3 \dots x_{n-1}, x_n$ 에서 완만하게 미분 값들을 조정하여 추정값이 계산된다.

밀도도(density map) 작성에서 격자 크기는 진앙의 선구조선 밀도 값과 관련이 있으므로 기준이 필요하다. 본 연구에서는 각 영상에서 추출된 선구조선의 길이가 1km 이상인 것을 대상으로 하였기에 해상력이 15m인 LANDSAT

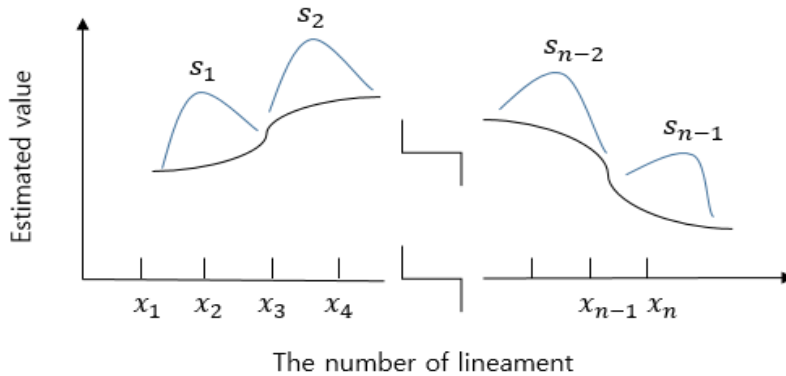


FIGURE 7. Descriptive graph of the spline function (Source: Kim,2009)

8호 위성영상에서는 100×100 화소를 기준으로 격자 크기를 1500m로 설정하였다. 해상력이 1m인 KOMPSAT 2호 위성영상은 오대산이라는 협소한 지형적 한계를 가지므로 100×100 화소를 기준으로 격자 크기를 100m로 설정하면 선구조선의 밀도가 선형으로 분석되는 문제와 최소 크기의 선구조선을 반영하지 못하는 문제가 발생한다. 이를 보완하기 위해 KOMPSAT 2호 위성영상이 DEM의 고도 합성을 통한 3차원 영상 판독을 진행한 점을 고려하여 해상력 10m의 수치지형도와 동일한 수준의 격자 크기인 1,000m로 설정하였다. 마찬가지로 음영기복도 또한 해상력 10m의 수치지형도를 기반으로 작성된 영상이므로, 격자 크기를 1,000m로 설정하였다.

그리고 진앙에서의 선구조선 밀도가 얼마나 밀집되어 있는지 정량적으로 표현하기 위해 다음과 같은 기준과 가정을 설정하여 선구조선 상대밀도 값(Value of the Relative Density; VRD)을 표현한 식(1)을 개발하였다.

첫째, 격자의 크기는 영상의 해상력과 선구조선 추출의 최소 길이를 기준으로 설정하였다.

둘째, 밀도도의 층(layer) 분류는 최대 밀도 값을 기반으로 하여 일정한 간격으로 표현하였다.

셋째, 격자 내에 선구조선이 많고 적음의 객관적인 기준을 정하기 어려우며 상대밀도 값(VRD)은 통계 요소별(빈도, 교차점, 길이) 선

구조선이 많을수록 지질학적으로 약선대 지역이므로 지진 발생과의 관계가 밀접하다고 가정하였다.

$$\begin{aligned} \text{Value of the Relative Density (VRD)} \\ &= \text{Lineament density of each grid} / \\ &\text{Maximum lineament density of whole grid} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)은 각 격자의 선구조선 밀도에 대해 최대 선구조선 밀도로 나누는 상대밀도 값으로 통계 요소별 밀도 값 분석의 의미는 VRD가 0에서 1까지의 범위를 갖으며, 1에 가까울수록 지진 발생과의 관계가 밀접하다는 의미를 갖고 있다.

결과 및 고찰

1. 선구조선 판독도 분석

선구조선을 판독한 결과를 그림 8의 2차원 영상에 판독도를 분석한 선구조선의 요소별 통계정보를 표 1에 표시하였다. 오대산 지역의 선구조선은 북북동-남남서 방향의 월정사 단층이 분포한 영향을 많이 받았는데, 이는 한국지질자원연구원(KIGAM)에서 발간된 오대산 지역의 수치지질도에 나타난 단층과 본 연구의 판독한

결과를 비교해보면 선구조선과 단층이 일치함을 그림 8에서 확인할 수 있다(KIGAM, 1975a; KIGAM, 1975b).

표 1에서 영상별 선구조선의 전체 빈도수와 총연장 길이를 비교 해보면 전체 빈도수는 음영기복도에 비해 LANDSAT 8호 영상에서 약 1.51배 높고 총연장 길이는 약 1.34배 높다. 그리고 KOMPSAT 2호 영상에 비해 LANDSAT 8호 영상의 선구조선의 전체 빈도수와 총연장 길이도 약 1.2배 높지만, 위성별 광원의 고도각 및 방위각 차이에 따라 강조되어 추출되는 선구조선이 다른 판독의 오차를 고려할 때 이러한 차이는 그렇게 크지 않다. 또한 빈도수 당 길이를 알기 위해 총 길이를 전체 선구조선의 빈도수로 나눠준 값인 각 선구조선의 평균 길이는 모든 영상에서 약 2km 정도로 비슷하다. 이러한 이유는

본 연구에 사용된 3차원 영상에서 지형의 기복 등의 영향을 적게 받은 선구조선의 연장성이 잘 나타나 영상별로 차이가 크지 않은 것으로 보여진다. 따라서 향후, 연구대상지역을 오대산 지역처럼 좁은 지역보다 한반도 전역처럼 광역적으로 대상을 확대할 때는 KOMPSAT 위성과 같은 고해상도 영상자료를 사용하기보다는 중·저해상도 위성영상을 사용하는 것이 시간, 비용, 인력 면에서 경제적인 수단으로 생각된다.

2. 밀도도의 VRD를 통한 진앙의 위치와 선구조선의 관계 분석

Spline 내삽법을 적용하여 작성한 밀도도를 영상별로 그림 9, 그림 10과 그림 11에 표시하였다. 또한 선구조선의 빈도, 교차점과 길이의 통계 요소별 VRD를 표 2에 표시하였으며 다음

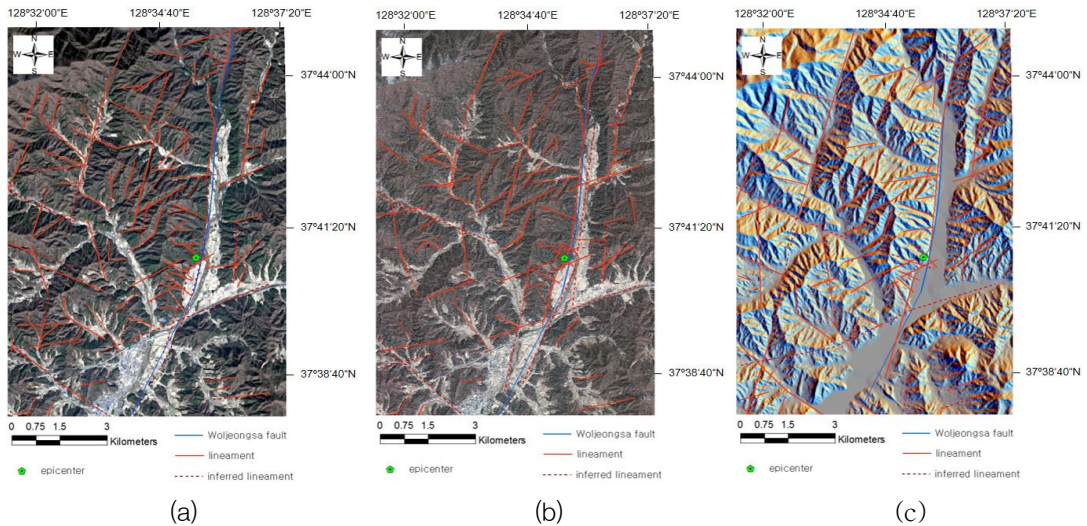


FIGURE 8. Lineament interpretation map with Woljeongsa fault and the epicenter
(a) LANDSAT-8 satellite image (b) KOMPSAT-2 satellite image (c) shaded relief map

TABLE 1. Detailed lineament information on satellite images and shaded relief map

Images	Frequency of lineaments(ea)	Total length of lineaments(m)	Total length / frequency(m/ea)
LANDSAT-8	124	262,225	2,115
KOMPSAT-2	100	204,561	2,046
Shaded relief map	82	195,091	2,379

과 같이 영상별 통계 값을 분석하였다.

첫째, LANDSAT 8호 위성영상의 VRD가 빈도 0.77, 교차점 0.62, 길이 0.83으로 빈도와 길이에서 0.77 이상으로 나타나서 진양에서 선구조선 교차점의 밀도보다 빈도와 길이와의 관계가 높은 것으로 보여진다.

둘째, KOMPSAT 2호 위성영상의 VRD는 빈도 0.88, 교차점 0.89, 길이 0.64로 빈도와 교차점에서 0.88 이상으로 나타나서 진양에서 선구조선 길이의 밀도보다 빈도와 교차점의 관계가 높은 것으로 보여진다.

셋째, 음영기복도의 VRD는 빈도 0.90, 교차점

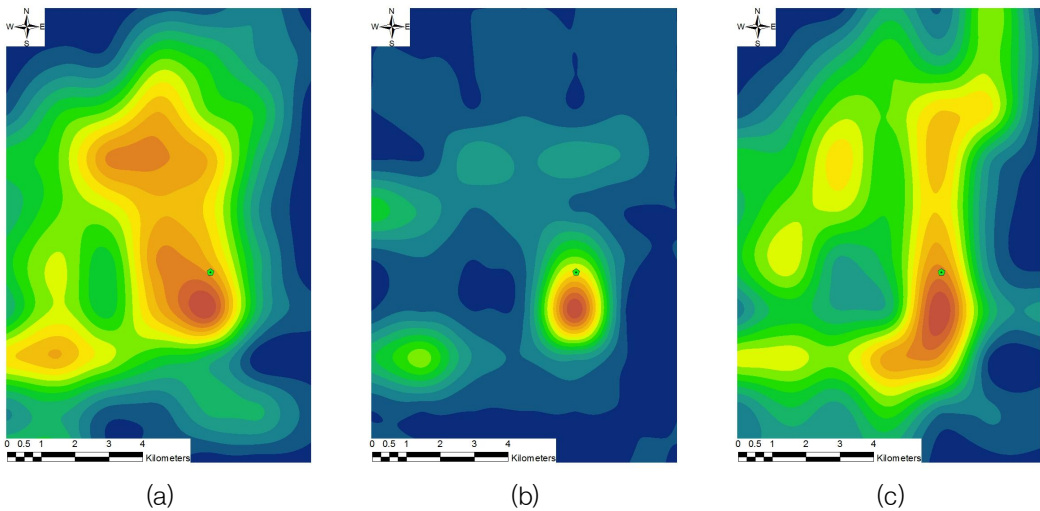


FIGURE 9. Density map of lineament produced by LANDSAT-8 satellite image using spline interpolation method with the epicenter(★) (a) frequency, (b) intersection, (c) length

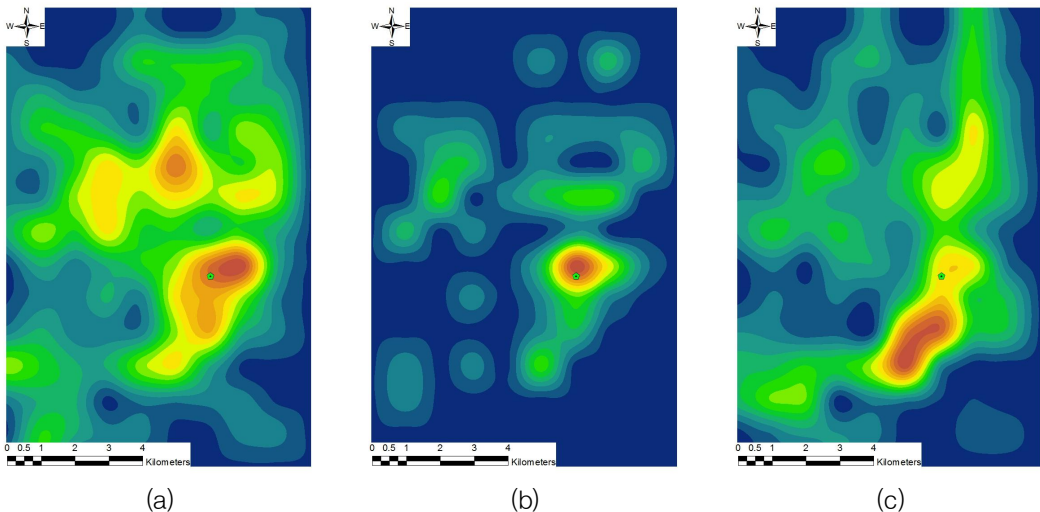


FIGURE 10. Density map of lineament produced by KOMPSAT-2 satellite image using spline interpolation method with the epicenter(★) (a) frequency, (b) intersection, (c) length

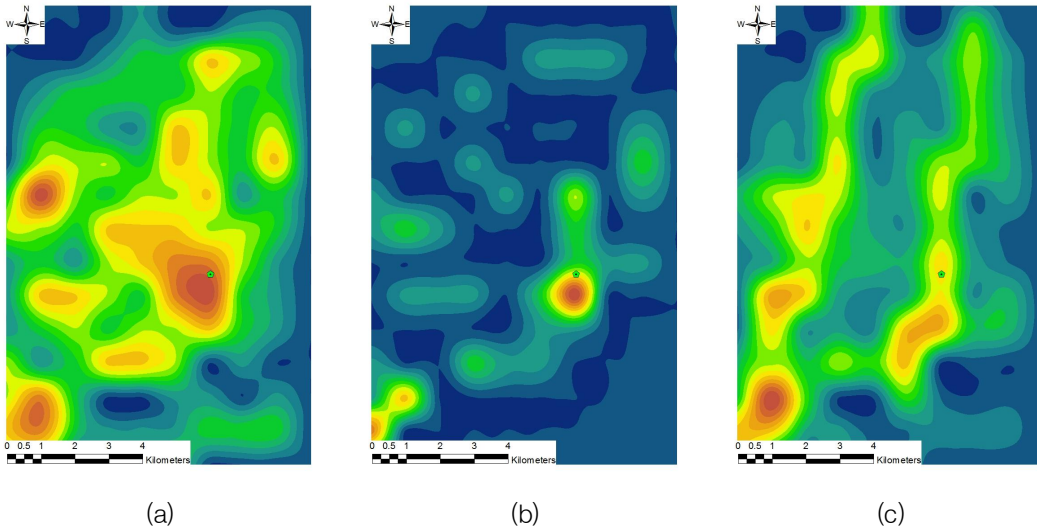


FIGURE 11. Density map of lineament produced by shaded relief map using spline interpolation method with the epicenter(📍) (a) frequency, (b) intersection, (c) length

TABLE 2. Respective Value (frequency, intersection and length) of the Relative Lineament Density (VRD) of satellite images and shaded relief map on the epicenter

Images	Frequency	Intersection	Length
LANDSAT-8	0.77	0.62	0.83
KOMPSAT-2	0.88	0.89	0.64
Shaded relief map	0.90	0.60	0.63
Average	0.85	0.70	0.70

0.60, 길이 0.63으로 빈도에서 0.90 이상으로 나타나서 진앙에서 선구조선의 교차점과 길이 밀도보다 빈도의 관계가 높은 것으로 보여진다.

결과적으로 각 영상의 진앙에서의 VRD가 최소 약 0.60에서 최대 약 0.90으로 나타났으며 각 영상별 광원의 고도각과 방위각에 차이가 있어 영상별 VRD가 일정치 않기에 통계 요소별 VRD의 평균치를 사용하여 분석을 실시하였다. 그 결과, 빈도의 평균 VRD는 약 0.85로 교차점과 길이의 평균 VRD인 0.70보다 약 21% 높게 나타났고 VRD가 0부터 1까지의 범위 중 1에 가까울수록 진앙과의 관계가 밀접하다는 의미를 갖고 있으므로 선구조선의 빈도 요소가 진앙의 위치와 가장 밀접한 관계가 있음을 확인하였다.

결론

본 연구에서는 중·저해상도의 LANDSAT 8호 고해상도의 KOMPSAT 2호 위성영상과 1/25,000 수치지형도를 기반으로 작성된 음영기복도와 같이 다양한 공간정보를 기반으로 선구조선을 추출하여 통계적 분석을 통해 오대산지역의 진앙과 선구조선이 밀접한 관계가 있음을 확인하였으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, 여러 가지 공간정보를 DEM을 기반으로 작성한 3차원 입체 영상과 수계망을 이용해 선구조선을 추출함으로써 지형의 기복, 수계의 연결성 등을 명확히 판독할 수 없는 2차원 영상에서 나타나는 판독 오류를 최소화하여 객관화하였다.

둘째, LANDSAT 8호 영상과 고해상도의

KOMPSAT 영상에서 추출한 선구조선의 빈도나 길이 등을 통계적으로 비교·분석해 볼 때, 위성별 광원의 고도 및 방위각 차이에 따라 강조되어 추출되는 선구조선이 다른 관독의 차이를 고려하면 그 차이가 크지 않아, 한반도 전역처럼 광역적으로 공간적인 규모를 확대할 때는 중·저해상도 위성영상을 사용하는 것이 시간, 비용, 인력 면에서 경제적인 수단으로 생각된다.

셋째, 진앙에서의 선구조선 밀도가 얼마나 밀집되어 있는지 정량적으로 표현하기 위해 각 격자의 선구조선 밀도에 대해 최대 선구조선 밀도로 나누는 선구조선 상대밀도 값 (Value of the Relative Density; VRD)을 개발하였다.

넷째, 선구조선의 통계 요소별 VRD의 평균치에 의하면 빈도의 평균 VRD 약 0.85로 교차점과 길이 보다 높게 나타났고, VRD가 1에 가까울수록 진앙과의 관계가 밀접하다는 의미를 갖고 있으므로 선구조선의 빈도 요소가 진앙의 위치와 가장 밀접한 관계가 있음을 확인하였다.

하지만 본 연구의 대상 지역이 협소하고 지진의 빈도가 적은 지역이라는 점과 이에 적용된 선구조선의 상대밀도 값을 계산하는 알고리즘을 한반도 전체에 적용하기에는 다소의 문제점이 있다. 그리고 지진은 선구조선이라는 하나의 요소로만 발생하는 것이 아니기 때문에 지진의 심도, 지체구조 등과 같은 다른 요소들도 고려하여 VRD 알고리즘을 보완할 필요가 있다. 또한 대상지역도 지진 발생 빈도가 높고 광역적인 지역을 대상으로 하는 연구가 필요할 것으로 생각된다. 다만 본 연구는 선구조선을 추출하여 진앙과의 관계를 분석하여 향후 지진 발생 가능 지역에 관련된 선행연구의 기초자료로서의 의미가 있다. **KAGIS**

REFERENCES

- Arellano-Baeza, A.A., A.T. Zverev and V.A. Malinnikov. 2006. Study of changes in the lineament structure, caused by earthquakes in South America by applying the lineament analysis to the Aster (Terra) satellite data. *Advances in Space Research* 37(4):690-697.
- Bondur, V. and L. Kuznetsova. 2005. Satellite monitoring of seismic hazard area geodynamics using the method of lineament analysis. *Proceedings of the 31th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Saint Petersburg, Russian Federation. pp.20-24.
- Chavez, P., S.C. Sides and J.A. Anderson. 1991. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data-Landsat TM and SPOT panchromatic. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57(3):295-303.
- Chi K.H. and S.Y. Seo. 1991. Remote sensing research. Rural Research Institute. p.95 (지광훈, 서상용. 1991. 遠隔探査試驗研究(원격탐사시험연구). 농어촌연구소. 95쪽).
- Choi, D.S. 2001. A study on the lineament detection by use of advanced lineament detect algorithm on Kwang-ju. Master's Thesis. Chonnam Nat'l Univ., Kwang-ju, Korea. p.43 (최동석. 2001. 개선된 선구조 추출 알고리즘을 적용한 광주지역 선구조추출 연구. 전남대학교 대학원 석사학위논문. 43쪽).
- Choi, E.Y., D.S. Choi, H.S. Choi, T.G. Lim, L.C. Jung and W.J. Yoon. 2003. A development of enhanced automatic lineament extraction algorithm and its application. *Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists* 6(1):7-12 (최은영, 최동석, 최현석, 임태근, 정래철, 윤왕중. 2003. 자동 선구조 추출 알고리즘의 개발과 적용사례. 지구물리와 물리탐사 6(1): 7-12).

Arellano-Baeza, A.A., A.T. Zverev and V.A. Malinnikov. 2006. Study of changes in the lineament structure, caused by

- Howard, A.D. 1967. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. AAPG Bulletin 51(11):2246-2259.
- Jang, H.S. and D.J. Seo. 2006. The analysis of underground utility tunnel positions using lineament and GPR. The Korean Association of Geographic Information Studies 9(4):142-150 (장호식, 서동주. 2006. 선구조와 지하 투과 레이더를 이용한 지하공동구 위치 해석. 한국지리정보학회지 9(4):142-150).
- Kang, P.J. and K.H. Chi. 1988. Remote sensing research report. Korea Institute of Energy and Mineral Resources. p.146 (강필중, 지광훈. 1988. 원격탐사시험연구보고서(遠隔 探查 試驗 研究報告書). 한국동력자원연구소. 146쪽).
- Kim, G.B., Y.C. Son, J.W. Kim and J.Y. Lee. 2005. Development of algorithms for the construction of hydrogeologic thematic maps using Avenue™ language in ArcView GIS. The Korean Association of Geographic Information Studies 8(3): 107-120 (김규범, 손영철, 김종욱, 이장룡. 2005. ArcView GIS의 Avenue (TM) Language 를 활용한 수문지질도 작성 알고리즘 개발 및 적용 사례 연구. 한국지리정보학회지 8(3):107-120).
- Kim, K.W. 2009. The spline interpolation method : theory and practice. Journal of Industrial Relations 34:1-16 (김건우. 2009. 이자율 결정에서 스플라인 보간법 (Spline interpolation) 이용 사례. 산연논총 34:1-16).
- Korea Institute of Geoscience And Mineral Resources (KIGAM). 1975a. Instructions of geological map, Odaesan, Korea (한국 지질자원연구원. 1975a. 지질도폭 설명서, 오대산, 대한민국).
- Korea Institute of Geoscience And Mineral Resources (KIGAM). 1975b. Instructions of geological map, Hajinbu, Korea (한국 지질자원연구원. 1975b. 지질도폭 설명서, 하진부, 대한민국).
- Kyung, J.B., S.Y. Huh, J.Y. Do and D.R. Cho. 2007. Relation of intensity, fault plane solutions and fault of the January 20, 2007 Odaesan earthquake ($M_L = 4.8$). Journal of Korean Earth Science Society 28(2):202-213 (경재복, 허서운, 도지영, 조덕래. 2007. 2007년 1월 20일 오대산 지진 (ML= 4.8) 의 진도, 단층면해 및 단층과의 관계. 한국지구과학회지 28(2): 202-213).
- O' Leary, D.W., J.D. Friedman and H.A. Pohn. 1976. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. Geological Society of America Bulletin 87(10):1463-1469.
- Rhee, S.A., J.H. Jeong and T.J. Kim. 2009. DEM generation from Kompsat-2 images and accuracy comparison by using common software. Journal of the Korean Society of Remote Sensing 25 (4):359-366.
- Sabins Jr, F.F. 1978. Remote sensing: Principles and interpretation. W. H. Freeman, San Francisco, CA, USA, pp.426.
- Won, J.S., S.W. Kim, K.D. Min and Y.H. Lee. 1998. A development of automatic lineament extraction algorithm from Landsat TM images for geological applications. Journal of the Korean Society of Remote Sensing 14(2):175-195 (원중선, 김상완, 민경덕, 이영훈. 1998. 지질학적 활용을 위한 Landsat TM 자료의 자동화된 선구조 추출 알고리즘의 개발. 대한원격탐사학회

지 14(2):175-195).
Yu, K.B. 1992. Geographic information systems. Sangjosa Co., Seoul, pp.267-300

(유근배. 1992. 지리정보론. 상조사, 서울, 267-300쪽). **KAGIS**