

## 영상 처리를 이용한 암석 절리 궤적의 추적

이효석<sup>1)</sup>, 김재동<sup>2)\*</sup>, 김동현<sup>3)</sup>

### Rock Joint Trace Detection Using Image Processing Technique

Hyo-Seg Lee, Jaedong Kim and Dong-Hyun Kim

**Abstract** The investigation on the rock discontinuity geometry has been usually undergone by direct measurement on the rock exposures. But this sort of field work has disadvantages, which are, for example, restriction of surveying areas and consuming excessive times and labors. To cover these kinds of disadvantages, image processing could be regarded as an alternative way, with additional advantages such as automatic and objective tools when used under adequate computerized algorithm. This study was focused on the recognition of the rock discontinuities captured in the image of rock exposure by digital camera and the production of the discontinuity map automatically. The whole process was written using macro commands builtin image analyzer, ImagePro Plus. ver. 4.1(Media Cybernetic). The procedure of image processing developed in this research could be divided with three steps, which are enhancement, recognition and extraction of discontinuity traces from the digital image. Enhancement contains combining and applying several filters to remove and relieve various types of noises from the image of rock surface. For the next step, recognition of discontinuity traces was executed. It used local topographic features characterized by the differences of gray scales between discontinuity and rock. Such segments of discontinuity traces extracted from the image were reformulated using an algorithm of computer decision-making criteria and linked to form complete discontinuity traces. To verify the image processing algorithms and their sequences developed in this research, discontinuity traces digitally photographed on the rock slope were analyzed. The result showed about 75~80% of discontinuities could be detected. It is thought to be necessary that the algorithms and computer codes developed in this research need to be advanced further especially in combining digital filters to produce images to be more acceptable for extraction of discontinuity traces and setting seed pixels automatically when linking trace segments to make a complete discontinuity trace.

**KeyWords:** Image processing, Rock joint, Joint trace detection, Joint map

**초 목** 불연속면의 기하학적 특성 조사는 일반적으로 조사자가 암반 노출면에서 직접 측정 작업을 수행하여 자료를 획득한다. 이러한 방법은 조사 범위에 대한 제약이 있을 수 있고, 자료의 획득과 처리에 많은 비용과 시간을 소요하게 되는 단점이 있다. 이를 극복하기 위하여 디지털 영상 분석은 현장 측정에 대한 대안적인 방법으로 제시될 수 있으며, 자동화된 측정과 분석을 제공한다는 장점이 있다. 본 연구는 디지털 사진기에 의해 촬영된 암반 노출면 영상으로부터 절리의 궤적을 인식하기 위한 목적으로 수행되었으며, 결과적으로 부존하는 절리맵을 자동화된 방법으로 작성하고자 하였다. 이를 위하여 개발된 해석 과정은 Media cybernetic사의 ImagePro Plus ver 4.1의 매크로 명령을 사용하여 프로그램으로 작성하였다. 본 연구에서 수행된 영상처리 과정은 영상처리, 절리 인식, 절리 궤적 추적 단계로 구분된다. 영상 처리 단계는 암반 사면 영상에 나타나는 노이즈를 제거하거나 완화시키기 위한 단계로서 영상 필터들을 조합하여 적용하였다. 절리 인식단계는 암반과 절리의 명도차에 의한 국부적인 절리 궤적을 인식하는 과정이다, 인식된 절리는 절리 궤적 추적 단계에서 수치적 의사 결정이 가능한 구조로 재구성된 후 서로 연결되어 절리맵으로 완성된다. 암반 사면의 원 영상과 이러한 영상 처리 알고리즘에 의한 일련의 과정을 거쳐 작성된 절리맵을 비교한 결과, 75~80% 정도의 불연속면들이 인식된 것으로 나타났다. 본 연구와 관련하여 앞으로는 절리 궤적 추적에 더욱 적합한 영상을 획득하기 위한 영상 필터의 조합부분과 절리 궤적의 연결과정에서 seed pixel을 자동적으로 선택할 수 있는 부분을 보다 집중적으로 연구할 필요가 있을 것으로 생각한다.

**핵심어:** 영상처리, 암석절리, 절리궤적인식, 절리맵

<sup>1)</sup> 강원대학교 대학원 지구시스템공학과(현 한라엔지니어링)

<sup>2)</sup> 강원대학교 지구환경공학부 교수

<sup>3)</sup> 삼성중공업(주) 부장

\*교신저자(Corresponding Author): jdkim@kangwon.ac.kr

접수일: 2003년 8월 13일

심사 완료일: 2003년 10월 8일

## 1. 서 론

암반은 수많은 불연속면들이 내재되어 있는 불연속체로서, 절리 암반의 거동과 관련하여 불연속면의 특성은 사면, 터널, 기초 등의 설계나 안정성 해석에서 입력변수로 매우 중요하다. 불연속면의 방향, 연속성, 간격, 상태 등과 같은 불연속면의 기하학적 특성(Priest, 1993)에 대한 조사는 geological compass, clinometer, measuring tape 등을 사용하여 현지에서 직접적으로 이루어지며, 조사 작업은 지지되지 않은 불안정한 암반 노출면에서 이루어지므로 매우 위험한 작업이 될 수 있다. 또한 암반 노출면의 많은 부분은 사람이 접근하기 어려우므로 조사범위에 제약을 받게 되며, 수작업에 의한 측정 작업은 자료의 획득과 처리에 대해 많은 비용과 시간을 소요하게 된다. 따라서 암반 사면에 대한 디지털 영상 분석은 현지 측정에 대한 대안적인 방법으로 제시된 바 있으며, 불연속면의 기하학적 특성 측정에 대하여 자동화된 측정과 분석을 제공한다는 장점을 가진다.

암반 사면의 디지털 영상 분석은 영상 처리(image processing) 및 컴퓨터 비전(computer vision) 분야에서 발전된 기술을 기초로 하고 있다. 영상처리(Baker & Hearn, 1986; Boyle et al., 1993)는 영상의 복원과 강화에 관련한 분야이고, 컴퓨터 비전(최형일, 1997)은 2차원 영상 자료로부터 여러 가지 유용한 정보들을 얻는 것으로서 의료분야에서의 CT 단층 촬영, 이동로봇에서의 스테레오 비전, 위성자료에 대한 기상 예측 등의 여러 분야에서 사용되고 있다. 이들 분야는 최근 컴퓨터 성능의 향상과 더불어 급속한 발전을 하였으며, 본 연구에서는 지문 인식 방법(Mehre et al., 1997), 명도 문자 영상의 특징 추출 방법(Wang and Pavlidis, 1993; 이성환과 김영준, 1995) 등을 채용하여 암반 사면 영상에서 절리 부분을 분석하고 인식하는데 이용하고자 하였다.

암석역학 분야에서 영상을 이용한 불연속면의 기하학적 특성조사에 관한 연구로는 지하공간 및 시추공에서 촬영한 절리 암반 사진에 임의로 선정한 조사창과 디지털 타이핑(digitizing)기술을 사용한 절리 암반의 기하학적 특성 해석에 관한 연구가 발표된 바 있다(Tsoutrelis et al., 1990; 김재동과 김종훈, 1998; Ord & Cheung, 1991). 영상처리를 이용한 절리맵의 작성과 관련한 연구로는 화상 처리 기법을 이용한 절리 트레이스 추출(류동우 외, 2000) 방법이 발표되었으며, 암반 노출면의 디지털 영상에 대한 반자동화된 절리 궤적 추적 방법이 제시된 바 있다(Reid and Harrison, 2000).

영상처리에 의한 암반사면 조사는 원격측정이므로 자

료획득에 대해 안전성을 높일 수 있으며, 접근 불가능한 조사면의 자료 수집이 가능하다는 장점을 가진다. 또한 영상의 수치적 정보를 이용한 자동화된 자료처리가 가능하며, 조사창 조사법(window sampling)에 의한 조사범위의 확장으로 자료의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

따라서 본 연구는 원격에 의한 불연속면 특성 조사 연구 경향과 절리맵의 작성에 의한 자동화된 자료처리를 고려하여, 목표를 암반 사면 영상의 절리 궤적 위치에 부합하는 절리 맵을 자동화된 방법으로 작성하는데 두었다. 이를 위하여, 암반 사면 영상을 영상 처리 단계와 절리 인식 단계, 절리 궤적 추적 단계로 구분하여 처리함으로써 절리맵을 완성하도록 구성하였다. 영상 처리 단계는 암반 사면 영상에 나타날 수 있는 노이즈 제거를 목적으로 하고 있으며, 절리 인식 단계는 국부적인 이웃 화소간의 관계만을 고려한 절리 영역 추출 단계이다. 이러한 국부적인 요소는 절리 궤적 추적 단계에서 수치적 의사 결정 구조로 재형성되며, 각각의 절리 궤적에 대하여 개별적으로 추적되어 절리맵을 완성하도록 하였다. 이러한 전체 과정은 영상 분석기(image analyzer)(Media cybernetics, 1997)의 매크로 명령을 사용하여 프로그래밍 하였다.

작성된 절리맵은 3차원 모델링 기술의 개발과 더불어 암반 불연속면에 대한 정량적인 평가에 이용될 수 있으며, 암반 사면에 대한 해석과 결과 추정에 신뢰할 수 있는 정보를 제공하게 될 것이다. 더불어 각종 건설공사에서 암반사면에 대한 최소비용과 시간으로 공학적 구조 설계가 가능할 것으로 사료된다.

## 2. 영상 획득 장비 및 절리 추적 알고리즘

### 2.1 디지털 영상

디지털 영상이란 색을 가지고 있는 사물의 수치적 표현이고, 영상처리는 원본 영상으로부터 원하는 정보를 얻는 과정으로, 영상의 전환 과정 동안 발생할 수 있는 정보의 손실을 최소화하는데 있다(권준식 외, 2000). 디지털 영상은 우선 그림을 화소(pixel element) 또는 픽셀(pixel)이라는 아주 작은 구성요소로 나누어 수평 수직 분할되며, digital-grid 또는 비트맵에 의해서 표현된다. 비트맵에서 각각의 화소들은 수치화 된 행과 열의 값을 가지게 됨으로써 그 위치정보를 가진다(Gonzalez, 1992; 김희승, 1993).

획득된 영상이 분할되면 각각의 화소들은 독립적으로 정의되고 정량화 된 화소의 밝기(brightness or darkness)가 측정된다. 따라서 이러한 수치들은 각 화소에 대한

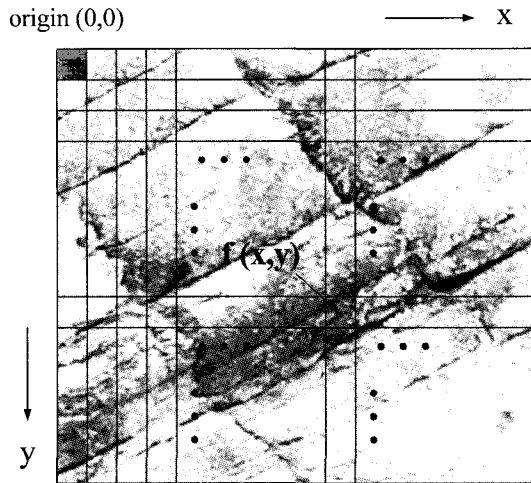


Fig. 1. Representation digital image by pixel bitmap.

기초적인 정보를 나타내게 된다. 명도 영상(gray scale image)은 화소의 밝기를 0(흑)~255(백)단계의 회색을 영으로 표현한 것으로(이문호 외, 1996), 본 연구에서는 8 bit gray scale image(0부터 255단계의 회색을영으로 표현된 영상)를 사용하였다. 이러한 명도 영상은 Fig. 1 과 같이 각 화소들의 밝기에 의하여 입체적인 특징을 가지며, 칼라 영상(color image)에 비하여 적은 계산량을 가진다는 장점이 있다.

**2.2 장비 구성**

본 연구에서 사용된 영상 획득 장비로는 Polaroid사의 PDC-2000 디지털 카메라(digital camera)를 사용하였으며, 해상도(resolution)는 1600×1200화소이다.

획득한 암반 사면 영상으로부터 절리 궤적을 추적하기 위한 영상분석기로는 Media Cybernetic사의 Image Pro Plus ver 4.1을 사용하였으며, 영상처리에 사용되는 각종 필터와 해석기구를 내장하고 있다. 이 영상 분석기는 PC의 windows환경에서 구동되며, 자동화된 절리 맵을 작성하기 위하여 처리과정을 영상분석기의 매크로 명령을 이용하여 프로그램화하였다. Fig. 2는 영상처리 순서에 따른 장비 구성을 나타낸 것이다.

**2.3 절리 추적 알고리즘의 구성**

암반 사면 영상으로부터 절리맵의 작성은 영상 처리 (image processing), 절리 인식(joint recognition) 및 절리 궤적 추적(joint trace extraction)의 3단계로 구성되며, 전체적인 흐름은 Fig. 3과 같다.

단계 1은 영상 처리 단계로 절리 궤적 추적 시 발생할

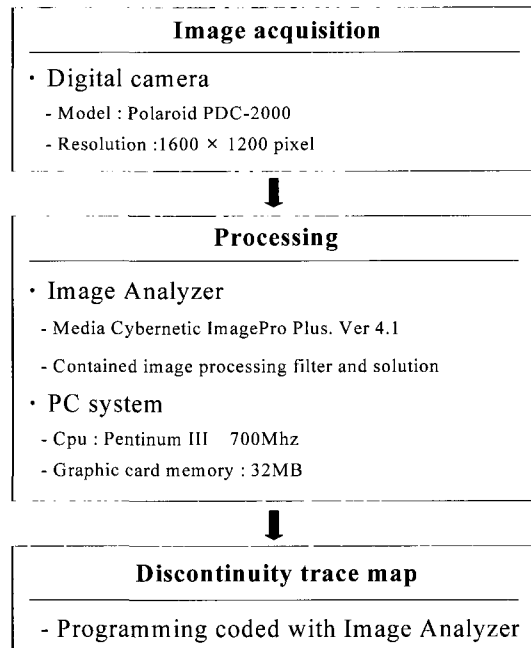


Fig. 2. Equipments used according to the procedure of digital image processing.

수 있는 노이즈의 제거를 목적으로 한다. 암반 사면 영상은 절리의 기하학적 특성과 관련된 정보와 여러 노이즈를 포함하고 있으며, 이러한 노이즈는 절리추출과 절리궤적 추적에 대하여 정보의 손실 또는 왜곡된 결과를 유도하므로 암반 사면 영상에 대하여 적절한 영상필터의 적용이 이루어져야 한다. 따라서 전처리 과정으로 암반 사면 영상에 포함된 노이즈에 대하여, 가우시안 (Gaussian), Sharpen 등과 같은 영상 강화 필터를 적용함으로써 제거하고자 하였다.

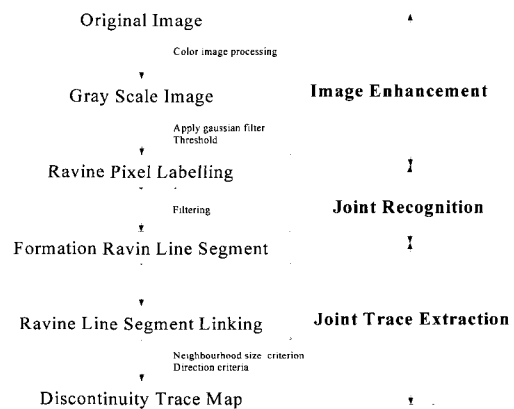


Fig. 3. Flow chart of overall image processing.

단계 2는 명도 영상의 지형적 특징 추출 방법을 이용한 절리 구성 화소(ravine pixel labelling) 추출 부분이다. 이러한 방법은 에지 추적 방법과 달리 명도 영상의 지형적 특징을 이용함으로써 절리 궤적에 대한 정보 손실을 최소화 할 수 있으며, 동시에 불필요한 특징 추출을 방지할 수 있다.

단계 3은 인식된 절리 구성 화소들로부터 절리 궤적을 추적하는 단계로, 추출된 절리 구성 화소 영상은 필터링을 통하여, 절리 궤적 추적이 가능한 구조인 절리 구성 선분(ravine line segments)으로 재형성된다. 이러한 절리 구성 선분들은 연결 조건에 의하여 추적됨으로써 절리맵을 완성하게 된다.

### 3. 영상 처리

암반 사면 영상에서 절리 궤적은 암반 표면과 서로 다른 밝기를 가진다는 조건을 가지며, 이러한 조건은 명도 영상에서의 지형적 특징 추출에 대한 충분한 접근성을 보여준다. 그러나 암반 사면 영상은 절리의 기하학적 특성과 관련된 정보와 여러 가지 형태의 노이즈를 포함하고 있으며, 이러한 노이즈는 절리추출과 절리궤적 추적에 대하여 정보의 손실 또는 왜곡된 결과를 유도하므로 암반 사면 영상에 대하여 적절한 영상필터의 적용이 이루어져야 한다. 암반 사면 영상에 나타나는 대표적인 노이즈로는 절리와 유사한 밝기의 그림자, 암반표면의 얼룩 등이 있다.

영상처리 필터의 적용은 각 필터의 특징에 따라 암반

사면 영상에 대하여 장단점을 가지게 되며, 단 하나의 필터로는 양호한 암반 사면 영상을 준비하기가 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 암반 사면 영상에 대하여 가우시안 필터(gaussian filter)의 적용, 강도값 변환(intensity value change), 히스토그램 평활화(histogram equalization) 등을 복합적으로 적용하였으며, 반복적인 적용과 조합을 통하여 절리 궤적 추적에 대하여 양호한 영상을 준비하고자 하였다. 이러한 영상 강화 필터들의 조합 및 적용은 모든 종류의 사면 영상에 대하여 최적이라고 단언할 수는 없으나, 반복적인 적용을 통하여 양호한 영상에 접근하였다. 따라서 본 장에서는 각 기법들의 특징 및 적용결과를 검토하였다.

#### 3.1 가우시안 필터

가우시안 필터는 가우스 함수를 사용하여 영상에서 고주파 성분을 부드럽게 하거나 제거 할 때 사용된다. 또한 날카로운 경계값을 흐릿하게 만듦으로 영상 내에 나타나는 노이즈를 완화시킬 수 있다. 이러한 특징을 이용하여 본 연구에서의 절리 구성 화소 추출 단계에서 발생할 수 있는 노이즈를 완화 시켰다. Fig. 4는 본 연구에서 사용한 암반 사면 영상 중 일부분을 샘플링 한 후 가우시안 필터를 적용한 영상을 나타낸 것이다.

#### 3.2 강도값 변환

화소의 강도값으로는 밝기(brightness), 대비(contrast) 및 감마( $\gamma$ )계수가 있다. 밝기는 영상의 전체적인 밝기를 의미하며, 전반적으로 어두운 영상에 사용하여 영상의

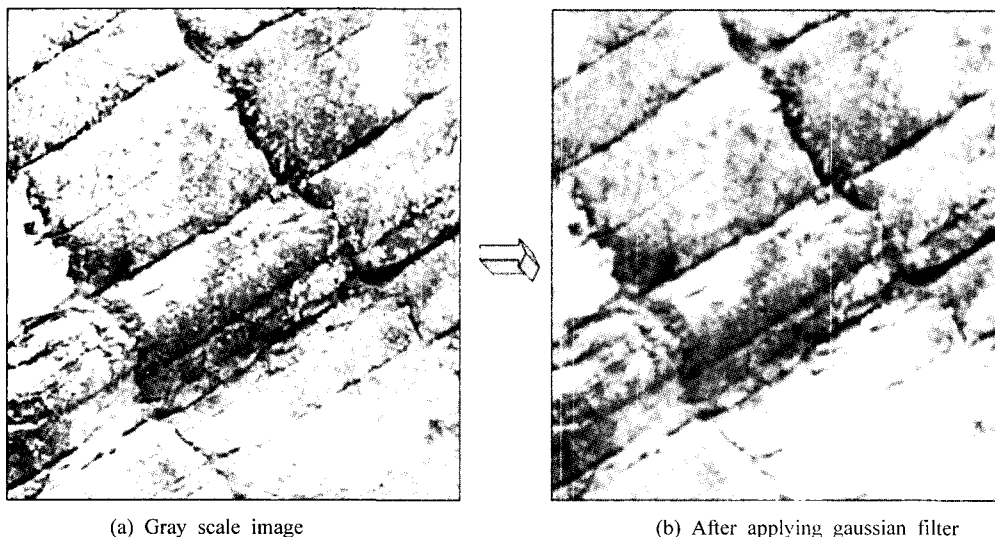


Fig. 4. An example of the effect after applying 3×3 gaussian filter.

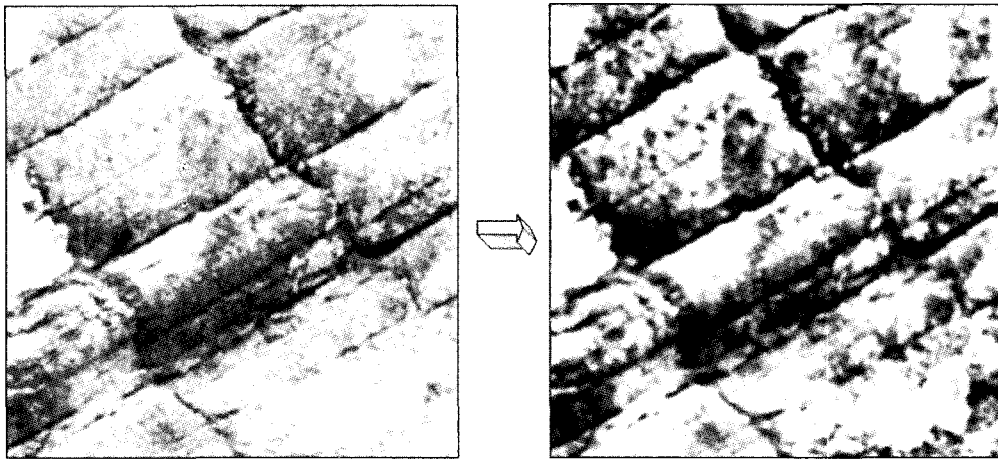
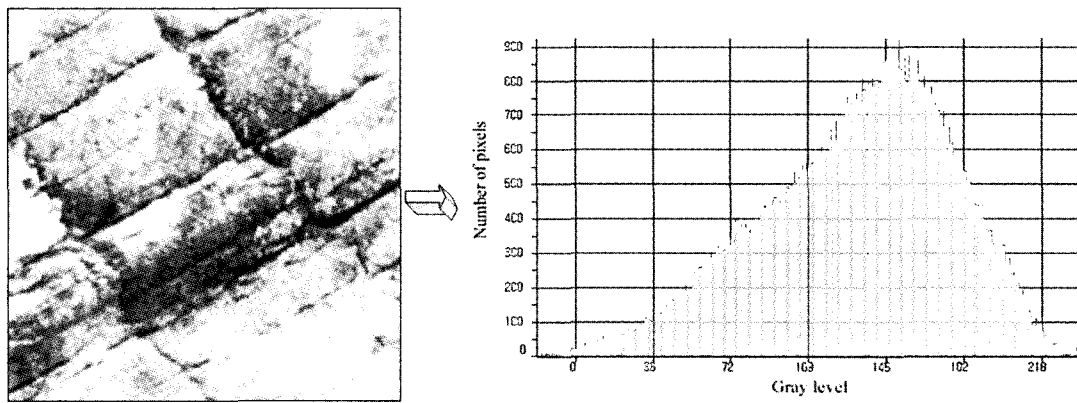
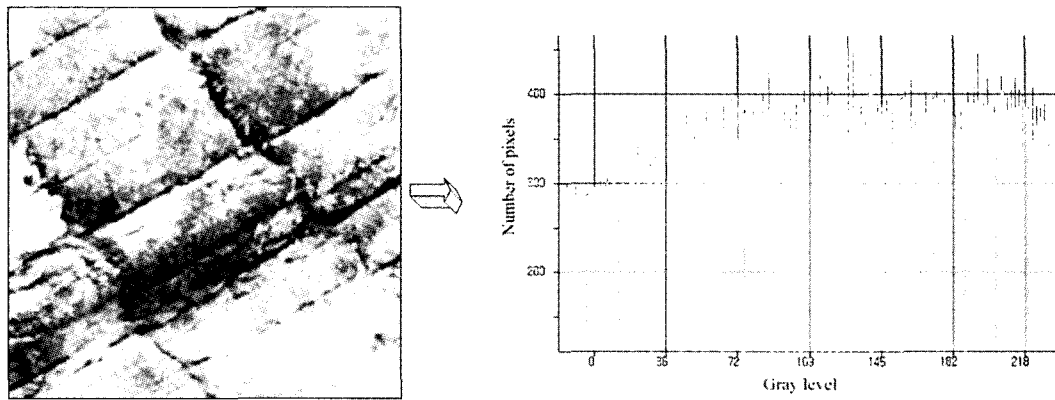


Fig. 5. An example of image after applying intensity value change (B:45%, C:55%,  $\gamma$ :1.5).



(a) Histogram of brightness for an image before equalization



(b) Histogram of brightness of image after equalization

Fig. 6. An example of the effect of histogram equalization.

질을 높일 수 있다. 대비는 영상에서 가장 밝은 부분과 어두운 부분의 차이를 의미하며, 히스토그램으로 나타냈을 때 종모양의 분포도를 가지는 것이 좋은 영상이라고 할 수 있다. 또한 감마계수 보정은 영상에서 지나치게 밝은 부분이나 어두운 부분의 휘도차를 크게 함으로써 영상의 질을 높이는 방법이다. 이러한 명도, 대비, 감마계수의 적절한 보정에 의해 압반 절리 영상에 대해 나타나는 노이즈를 제거하거나 완화시킴으로써 절리 궤적을 부각시킬 수 있다.

Fig. 5는 명도, 대비, 감마 계수를 보정하여 절리 궤적을 부각시킨 영상을 나타낸 것이다. 절리 궤적을 부각시킴과 동시에 암반표면의 얼룩과 같은 노이즈가 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, 강도값 변환과 같은 영상 강화 필터의 이러한 특징은 다른 영상 필터의 적용을 요구하게 된다.

### 3.3 히스토그램 평활화

히스토그램 평활화란 밝기 분포를 재분배함으로써 일정한 분포를 가진 히스토그램을 생성하는 것으로 평활화를 수행한 히스토그램은 보다 균일한 분포를 가지게 된다. 히스토그램 평활화는 절리와 유사한 밝기의 그림자, 암반표면의 얼룩 등에 양호한 결과를 얻을 수 있다. Fig. 6은 히스토그램 평활화를 수행한 영상을 나타낸 것으로, 원영상에 대하여 일정한 분포를 가지는 히스토그램을 나타낸 것이다.

## 4. 절리 인식

영상 처리에서 에지(edge)는 영상을 특징짓는 선 요소라고 말할 수 있으며, 사전적 의미로는 물체의 외곽을 나타내는 선으로 정의된다. 이러한 에지추출은 영상의 밝기와 색의 급격한 변화가 있는 부분에 대하여 이루어진다(이문호, 1996). 에지추출 기법들의 이러한 특징은 인위적인 영상이 아닌 암반 사면과 같은 자연 영상의 경우에 있어서는 윤곽으로 추출 가능한 부분도 밝기의 변화량이 급격한 변화가 없기 때문에 상당히 어려운 부분으로 간주되고 있다.

본 연구에서는 암반 사면 영상의 절리 인식 방법으로 명도 영상의 지형적 특징 추출방법을 사용하였으며, 암반 사면 영상에서의 절리 궤적이 암반 표면과 서로 다른 밝기를 가진다는 조건에 의하여 절리 궤적을 절리 구성 화소(ravine pixel)라는 위치에서 추출하였다.

### 4.1 명도 영상의 지형적 특징 추출 방법

명도 영상으로부터 지형적 특징 추출에 관한 연구는

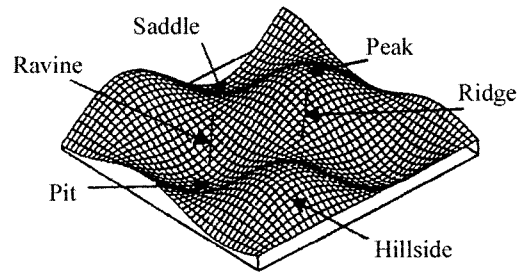


Fig. 7. Topographic primal sketch (After Haralick, 1984).

명도 영상의 위상적 정보를 보존하며 이진화로 인한 영상 정보의 손실을 최소화하는 방안으로 연구되었다. Wang과 Pavlidis (1993)의 특징 추출에 관한 연구에서는 명도 영상을 하나의 평면으로 간주하고 원래 영상의 형태 특징을 Fig. 7과 같이 Haralick(1984)등에 의해 정의된 지형적 특징으로 대응시킴으로써 영상의 각 화소에 대해 지형적 특징을 할당하였다. 이 방법에서는 해당 화소에 대한 1, 2차 미분값을 구하고 Hessian행렬의 고유값 및 고유 벡터를 구하여 기울기 변화량을 계산함으로써 특징을 할당하였다.

또한, 이성환과 김영준(1995)은 고유값과 고유벡터의 계산과정을 거치지 않고 주 곡률 방향을 빠른 시간 내에 찾는 효과적인 지형적 특징 추출 방법을 제안하였다. 이 방법에서는 인접화소에 대한 기울기 계산을 통하여 기울기의 변화율을 계산하며, 수평·수직 방향, 사선·역사선 방향의 주곡률 방향을 결정하고 특징 할당 시 고려되는 4개의 인접 화소인 주직교 성분을 결정한 후 기울기의 영교차(zero crossing)조건에 의해 특징을 할당함으로써 지형적 특징 추출의 성능을 향상시키고, 불필요한 특징 추출을 방지하였다.

그러므로 본 연구에서는 이성환과 김영준(1995)에 의해 제안된 방법을 암반 사면 영상에 적용하여, 절리 궤적을 구성하는 절리 화소 추출에 사용하였다.

### 4.2 절리 인식 방법

암반 사면 영상을 하나의 평면으로 간주하고 원래 영상의 밝기 특징을 지형적 특징으로 대응시킴으로써, 절리 부분과 암반 부분의 차이를 구분할 수 있다. 따라서 암반 사면 영상의 절리 궤적은 Fig. 8과 같이 밝기에 의한 지형적 특징으로 나타나며 명도 영상의 지형적 특징 추출 과정을 통하여 절리 궤적을 구성하는 화소들의 위치를 찾을 수 있게 된다.

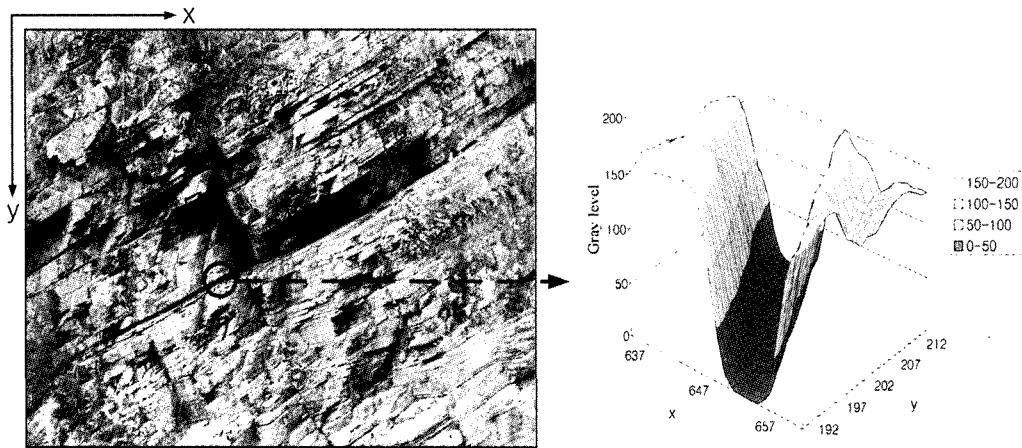


Fig. 8. Topographic feature of joint trace based on image brightness.

본 연구에서는 원영상의 히스토그램 분석과 라인 프로파일 분석(line profile analysis)을 통하여 절리 궤적에 대한 밝기 경계값을 설정한 후, 명도 영상의 지형적 특징 추출 방법으로부터 절리 구성 화소를 추출하였다. Fig. 9는 절리 구성 화소를 추출하기 위한 순서도를 나타낸 것이다.

(1) 절리 영역의 경계값 설정

절리 구성 화소를 추출하는 과정에서는 영상의 각 화소의 밝기에 대한 고려가 필요하며, 이러한 밝기에 대한 고려는 영상에서 절리 궤적의 밝기 범위를 파악함으로써 계산과정을 간편화시키게 된다. 또한 암반 사면 영상이 가지는 불규칙한 특성으로부터 추출될 수 있는 불필요한 특징 추출을 방지 할 수 있다. 절리 영역의 경

계값 설정은 영상의 히스토그램 분석과 라인 프로파일 분석을 통하여 확인할 수 있다.

① 히스토그램 분석

히스토그램은 그 영상의 밝기와 대비에 대한 정보를 보여 주며, 이러한 정보는 영상의 질을 향상시키기 위해 어떤 조작을 해야 하는가에 대한 판단의 지침을 제공하게 된다. 명도 영상의 히스토그램 분석을 통하여 절리 부분의 밝기와 암반 부분의 밝기 범위를 확인할 수 있다. Fig. 10의 경우, 절리 궤적 부분의 밝기 범위는 0~83이며, 암반 부분은 149~255이다.

② 라인 프로파일 분석

암반 사면 영상에서 절리 궤적의 밝기 범위를 파악하는 추가적인 방법으로 라인 프로파일 분석을 적용하였다. 라인 프로파일 분석은 명도 영상 내에서 절리 부분을 가로지르는 라인 프로파일을 설정함으로써 절리 영역의 밝기 범위를 분석하는 것이다. Fig. 11은 암반 사면 영상의 절리 부분을 가로질러 설정된 선을 따라 각 픽셀 위치에서 밝기가 변하고 있음을 보여주고 있다. 그림의 라인 프로파일 구성에서 x축은 영상에서 라인 프로파일의 위치를 나타낸 것이며, y축은 각 위치에 대한 픽셀들의 밝기이다.

(2) 인접화소와의 기울기 계산

암반 사면 영상의 모든 화소에 대해 3×3 마스크(mask)를 적용하며, 적용된 마스크는 Fig. 12와 같이 표현할 수 있다.

이러한 마스크의 중심화소가 절리 영역의 밝기 범위에 포함될 경우 인접 화소와의 기울기는 식 (1)과 같이 계산한다.

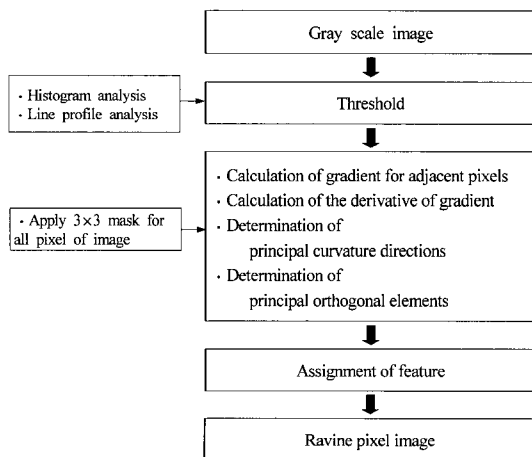


Fig. 9. A flow chart of ravine pixel extraction method.

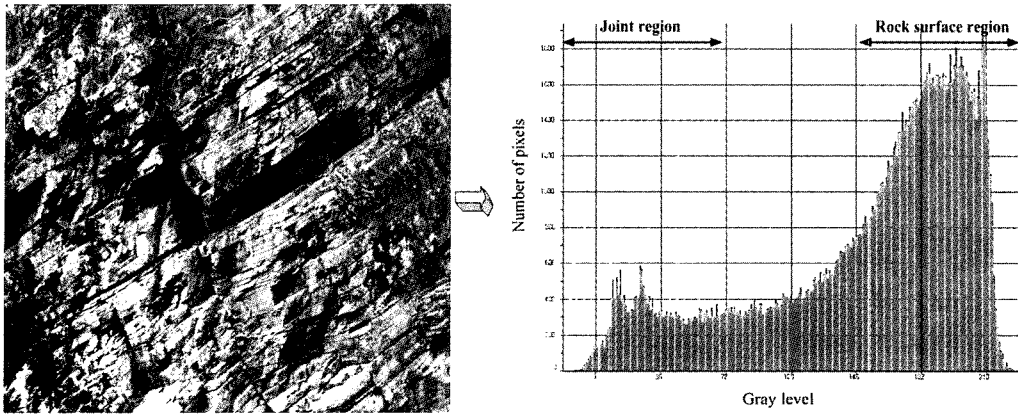


Fig. 10. Histogram analysis.

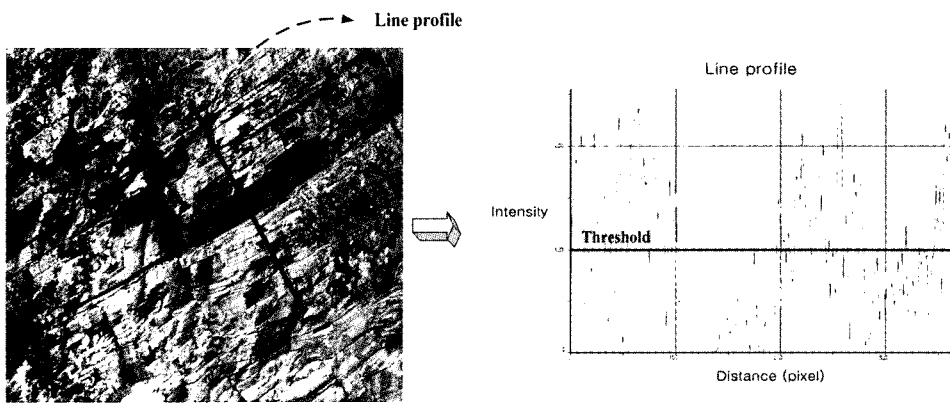


Fig. 11. Line profile analysis.

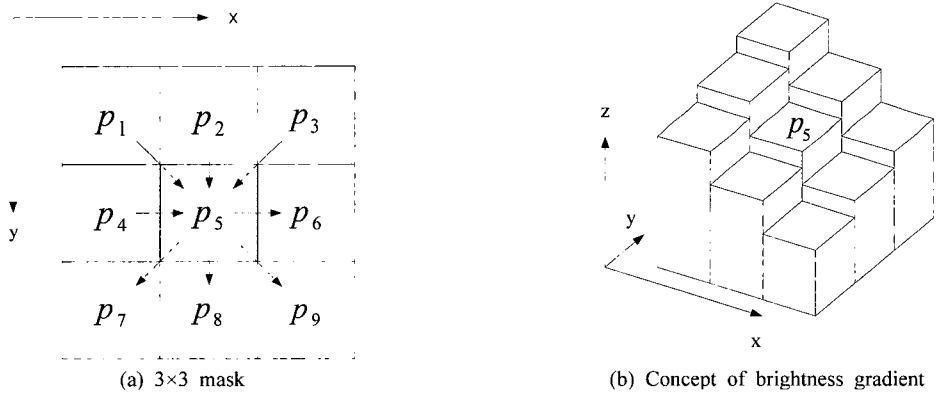


Fig. 12. Four directions in gradient calculation.

$$m_i = \frac{\text{인접화소와의 밝기 차이}}{\text{거리 증분}} = \frac{\Delta I_i}{\Delta S}$$

- (1) 여기서,  
 $i = 1,2,3,4$  일 경우에  $\Delta I_i = I(P_5) - I(P_i)$   
 $i = 6,7,8,9$  일 경우에  $\Delta I_i = I(P_i) - I(P_5)$



$P_i$ 가 수평, 수직 방향의 인접한 화소일 경우  $\Delta S = 1$   
 $P_i$ 가 사선, 역사선 방향의 인접한 화소일 경우  $\Delta S = \sqrt{2}$

(3) 기울기 변화를 계산

중심 화소  $P_5$ 에서 4방향으로의 기울기의 변화를  $m_k$ ,  $k=H, V, R, L$ 은 거리 증분 1에 대하여 식 (2)와 같이 계산된다.

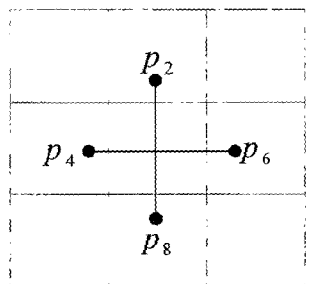
$$\begin{aligned} m_H &= m_6 - m_4 \\ m_V &= m_8 - m_2 \\ m_R &= m_9 - m_1 \\ m_L &= m_7 - m_3 \end{aligned} \tag{2}$$

(4) 주곡률 방향 결정

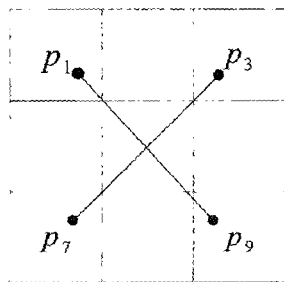
주곡률 방향은 수평·수직 방향, 사선·역사선 방향으로 제한한다. 이 때,  $|m_H - m_V| \geq |m_R - m_L|$  인 경우, 주곡률 방향은 수평·수직 방향이 되며, 그렇지 않은 경우 즉,  $|m_H - m_V| < |m_R - m_L|$  이면 주곡률 방향은 사선·역사선 방향이 된다.

(5) 주직교 성분 결정

주직교 성분은 지형학적 특징 할당 시 고려되는 4개의 인접 화소를 의미하며 수평·수직방향으로의 주직교 성분과 사선·역사선 방향으로의 주직교 성분이 있다. Fig. 13은 각 방향에 대한 주직교 성분을 나타낸다.



(a) horizontal & vertical directions



(b) right-diagonal & left-diagonal directions

Fig. 13. The principal orthogonal elements.

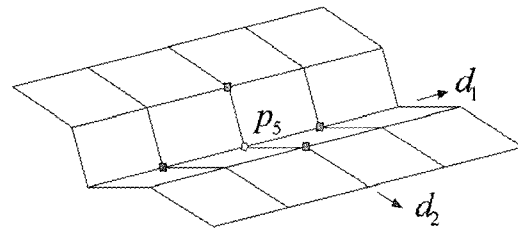


Fig. 14. Assignment of topographic features- the case in which  $P_5$  is a ravine.

(6) 특징 할당

암반 절리 영상에서 원하는 특징은 절리 궤적을 구성하는 화소이므로 본 연구에서는 절리 구성 화소만을 할당하였다. 절리 구성 화소와 같은 지형적 특징 할당 방법은 Fig. 14에 나타난 것과 같이,  $d_1$  과  $d_2$ 를 중심 화소  $P_5$ 의 주직교 성분에 대한 방향이라고 할 때, 주곡률 방향 중 한 방향으로 기울기가 감소하다가 증가하는 경우에 대하여 절리 구성 화소로 할당된다.

이러한 과정을 거쳐 암반 사면 영상으로부터 절리 구성 화소 영상을 획득할 수 있다. Fig. 15는 절리 구성 화소 영상을 나타낸 것으로 원영상의 절리 궤적 위치에서 추출된 절리 구성 화소를 확인할 수 있다.

5. 절리 궤적 추적

절리맵의 작성은 절리 구성 화소들을 보다 개념적인 형태로 전환하여 이루어지게 된다. 추출된 절리 구성 화소 영상은 필터링을 적용하여 양 끝단(end pixels)을 가지며 한 개의 화소 폭을 가진 선분으로 재형성된다. 이러한 선분들은 절리 구성 분할선(ravine line segments)이라 하며, 수치적 의사 결정이 가능한 구조로 자동화된 절리 궤적 추적에 이용된다. 선택된 절리 구성 분할선들은 절리 궤적 내에 포함되며, 각각의 절리 구성 분할선들 사이의 상호 각을 비교하고 제어함으로써 자동화된 절리 궤적 추적이 이루어지도록 구성하였다. 따라서 추적된 절리 궤적은 원영상의 절리 궤적 위치에 나타나게 되고, 이러한 과정은 각각의 절리 궤적에 대하여 반복적으로 적용되어 절리맵을 완성하도록 하였다. Fig. 16은 절리 궤적 추적에 대한 전체적인 순서도를 나타낸 것이다.

5.1 필터링

필터링이란 특정 픽셀들 주위에 있는 픽셀들의 값을 변화시킴으로써 원하는 효과를 얻는 과정을 의미하며,

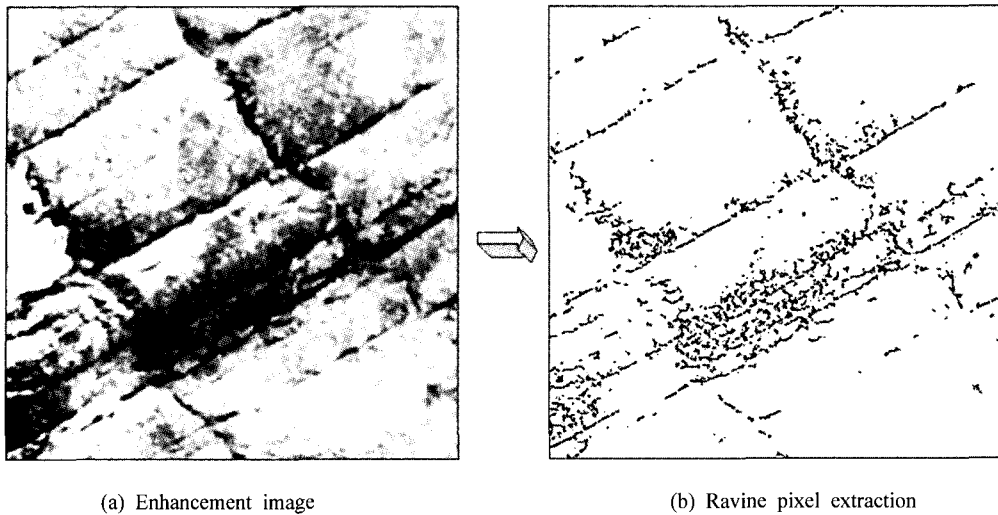


Fig. 15. Ravine pixel labelling.

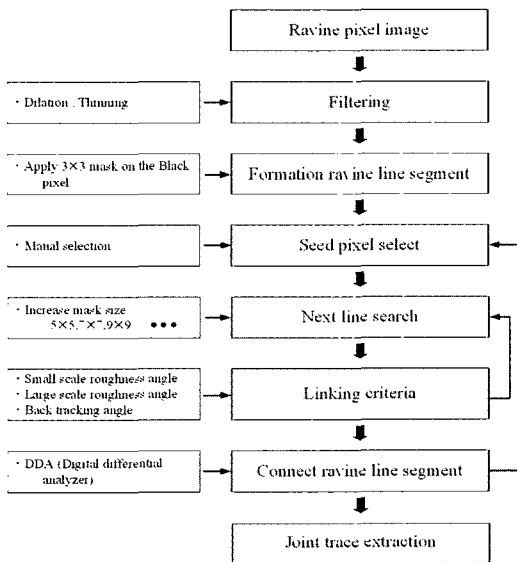


Fig. 16. A flow chart of joint trace extraction.

절리 구성 화소 영상에 대하여 필터를 적용하여 한 개의 픽셀 폭을 가지며, 연속적인 체인 구조로 형성된 절리 구성 화소 영상을 형성하게 된다.

절리 구성 화소들(절리 구성 화소 영상의 black 화소들)은 하나 또는 두 개 이상의 white 화소에 의해 분리되어 있으므로 black 화소들을 확장(dilation)시킴으로 분리된 절리 구성 화소들을 연결하여 연속적인 구조로 형성시킬 수 있다. 확장으로 연결된 절리 구성 화소들의 경계는 모서리가 있는 형태를 이루게 되므로 절리

궤적과 유사한 선형성을 형성하기 위하여 중간값 필터(median filter)를 적용하게 된다. 이러한 과정을 거친 영상은 black 화소들의 폭을 증가시키게 되므로 세선화(thinning) 방법에 의하여 한 개의 픽셀 폭을 가진 영상으로 전환하게 된다. 따라서 필터의 적용은 dilation filter, median filter, thinning의 과정으로 구성되었으며, Fig. 17에서 이러한 과정의 영상들을 확인할 수 있다.

### 5.2 절리 궤적 추적

필터링을 거친 영상은 양 끝단을 가지며 한 개의 픽셀 폭을 가진 절리 구성 선분 영상으로 변환된 후, 절리 구성 분할선 연결 조건에 의하여 절리 궤적을 추적하게 된다.

#### (1) 절리 구성 분할선 형성

절리 구성 분할선은 자동화된 절리 궤적 추적을 위한 선행 조건으로, 필터링을 거친 영상의 black pixel에 대하여 3x3 마스크가 적용되어 각 픽셀들의 사이의 연결성을 확인하게 되며, 연결성이 3 픽셀 이상인 경우 중심 픽셀이 제거됨으로써 절리 구성 분할선을 형성하게 된다. 여기서, 3x3 마스크의 연결성이 1인 경우는 구성 분할선의 양 끝단 화소를 의미하며, 연결성이 2인 경우는 구성 분할선 내의 연결 화소들을 의미한다. Fig. 18은 연결성 확인을 위한 마스크의 적용 예를 나타낸 것으로 A는 연결성이 1이며, B는 3, C는 2의 연결성을 나타낸 것이다. 그림에서 B의 경우가 연결성 조건에 해당하므로 제거된다.

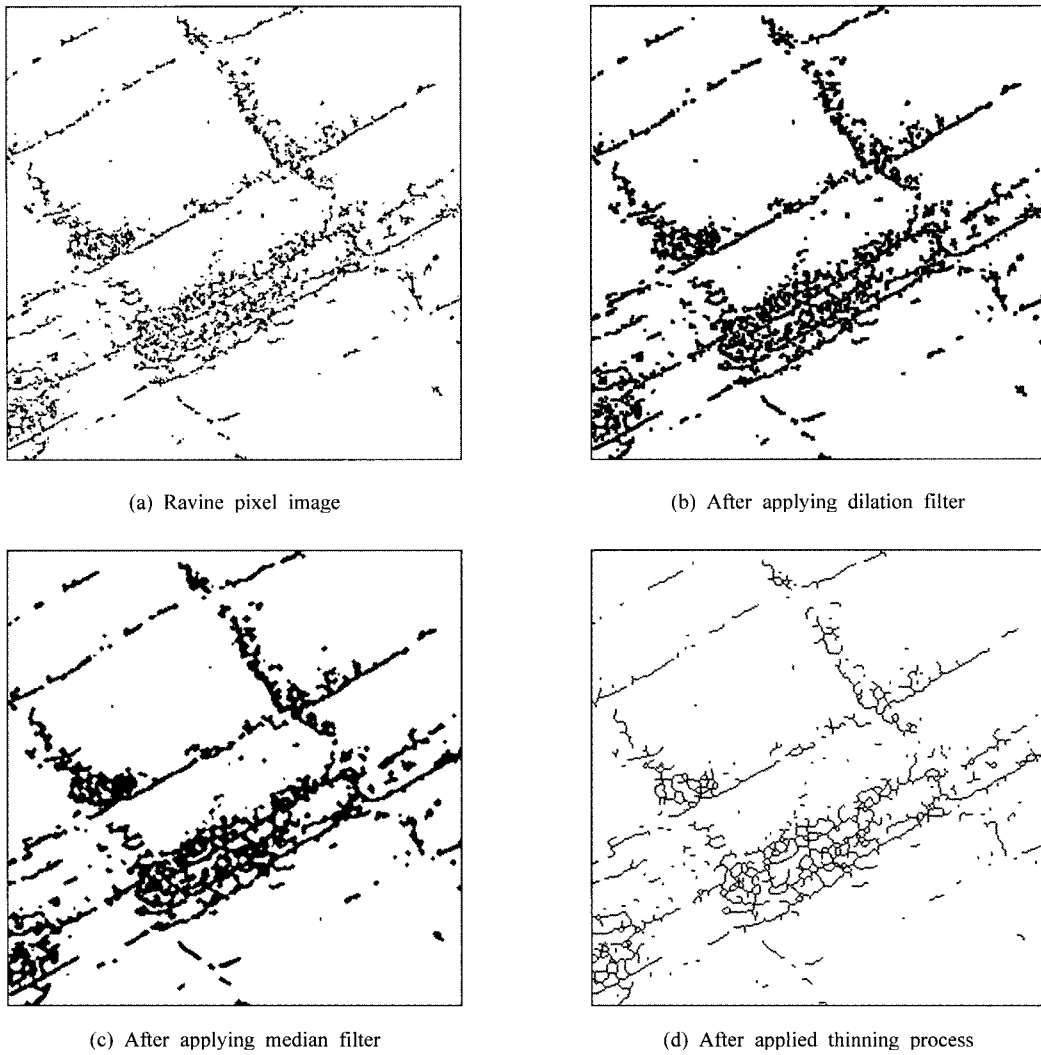


Fig. 17. Filtering for joint trace extraction.

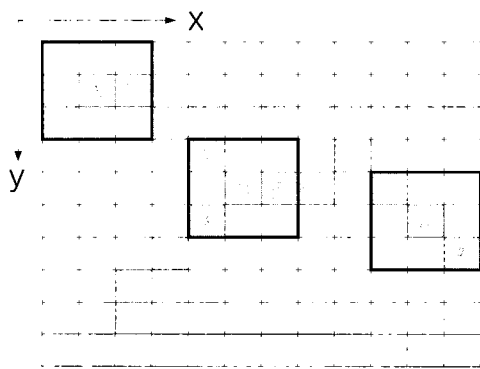


Fig. 18. 3×3 mask used to verify the connectivity of black pixels.

Fig. 19는 세션화된 영상에 대하여 3×3 마스크를 적용하여 추출한 절리 구성 분할선 영상을 나타낸 것으로 형성된 수많은 절리 구성 분할선을 확인할 수 있다.

(2) 연결 분할선 검색

선택된 seed pixel로부터 첫 번째 절리 구성 분할선을 인식하고, 연결 가능한 분할선을 검색하는 단계로, 첫 번째 절리 구성 분할선의 end pixel로부터 마스크 영역을 확장함으로 검색이 이루어진다. Fig. 20은 seed pixel이 선택된 경우, 첫 번째 절리 구성 분할선의 다른 끝에 대해 화소 B로 인식되고, B화소를 중심으로 다음 절리 구성 분할선을 확장하기 위해 사용될 수 있는 또

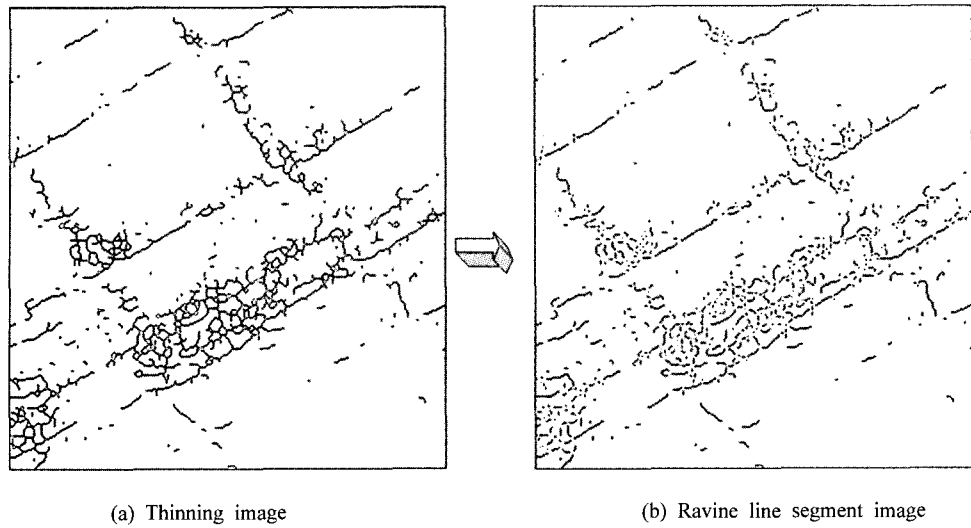


Fig. 19. Ravine line segment formation.

다른 절리 구성 분할선의 시작 화소를 찾기 위한 확장 검색의 예를 나타낸 것이다. B화소를 중심으로 마스크 영역을  $5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9, \dots$  으로 확장하면서 주위의 절리 구성 분할선을 검색하게 된다.

(3) 절리 구성 분할선 연결

찾아진 4개의 end pixel(Fig. 20에서 A, B, C, D)들의 좌표를 사용하여, 선택된 절리 구성 선분이 적용가능한 절리 궤적인지를 확인하게 된다. 확인 조건은 small scale roughness angle, large scale roughness angle,

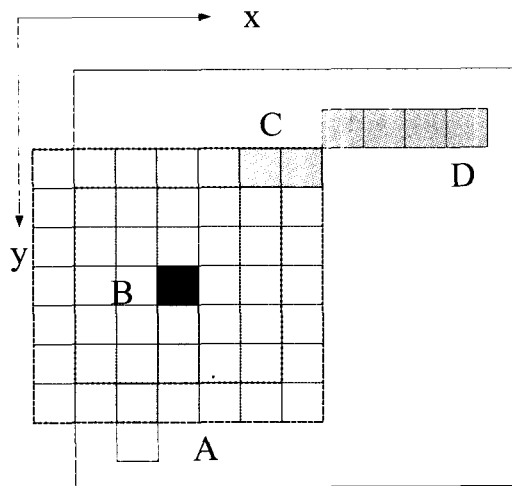


Fig. 20. Search of next ravine line segment (increase mask  $5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9, \dots$  end pixels are labelled A~D).

back tracking angle이며, 각 조건에 만족될 경우 디지털 미분 해석기 알고리즘(digital differential analyzer)에 의해 두 개의 절리 구성 화소들은 연결된다. 이러한 확인 조건은 Fig. 21과 같다.

각각의 조건은 경계값을 가지고 연결 과정 동안 계속 유지되며, 몇 번의 시행착오를 거쳐 결정될 것이다. Back tracking angle에서  $\delta_4$ 의 경우는 첫 번째 seed

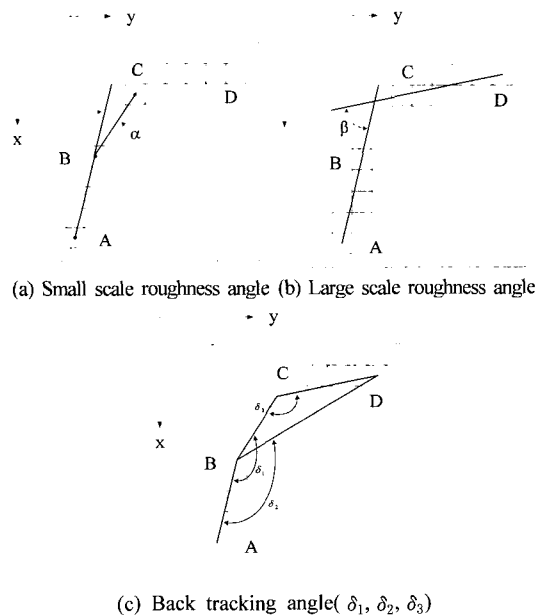


Fig. 21. Determination of direction criteria.

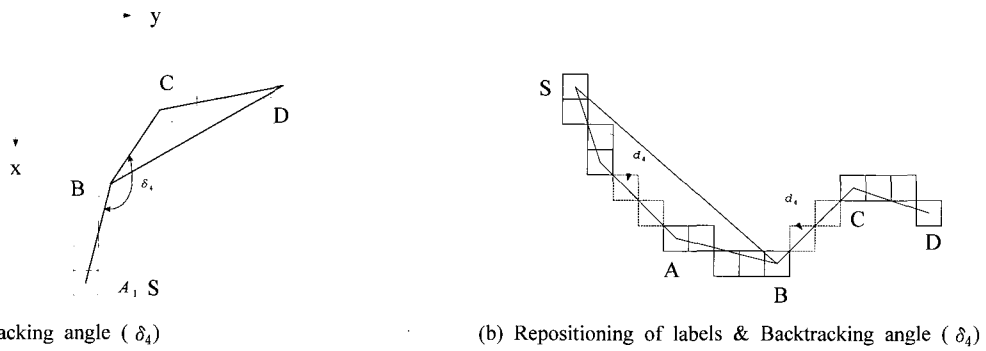


Fig. 22. Back tracking angle.

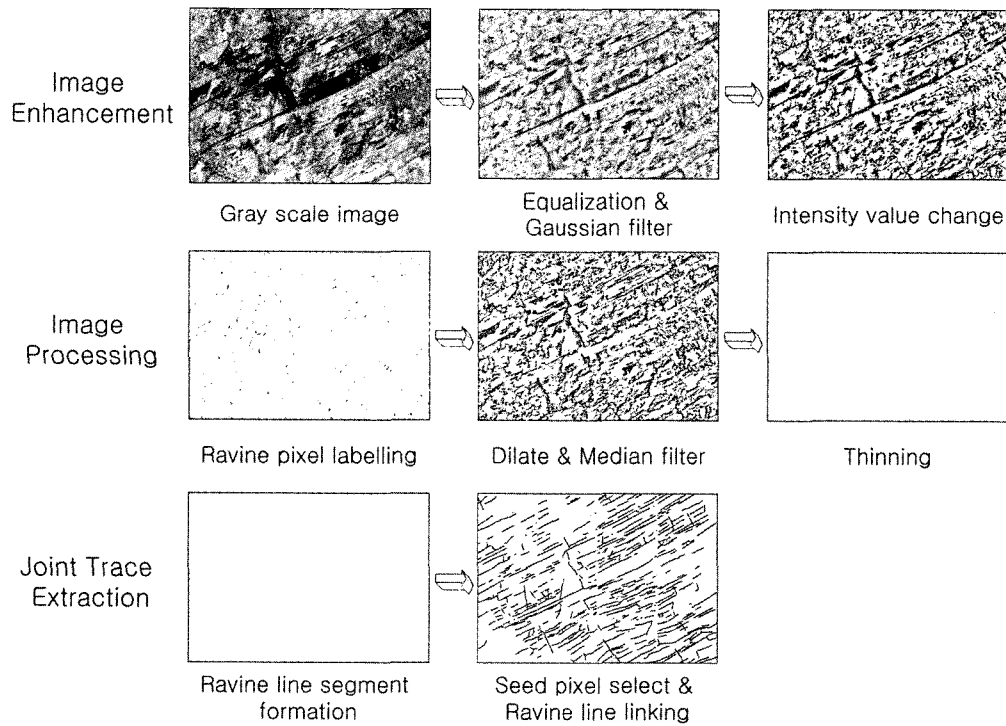


Fig. 23. Overall sequence of image processing.

pixel을 포함하여 계산된다. 설명된 예에서 seed pixel은 pixel A와 일치하므로, 처음의  $\delta_4$ 는  $\delta_1$ 과 같게 된다. 그러므로  $\delta_4$ 의 결정은 Fig. 22와 같이 계산된다.

이러한 조건을 만족하면 두 분할선은 연결되고, pixel C는 pixel A로 다시 인식되며, pixel D는 pixel B로 인식하게 된다. 연결 알고리즘은 이후 계속적으로 반복되며, 더 이상의 연결 가능한 분할선이 없을 때까지 진행된다. 이러한 과정을 거쳐 절리맵은 완성된다.

## 6. 결과 및 고찰

Fig. 23은 영상에 의한 절리 궤적 인식을 위하여 본 연구에서 이루어진 전체적인 영상 처리 과정을 요약하여 나타낸 것으로 각 단계별로 적용된 영상 처리 기법을 확인 할 수 있다. 이들 과정은 영상분석기에 내장된 매크로 명령어들을 이용하여 프로그래밍 되었으며 입력값이 필요한 일부 단계를 제외하면 자동화되어 처리

되도록 하였다.

본 연구에서 연구 결과의 검증을 위하여 채택된 암반 사면 영상은  $1600 \times 1000$  픽셀이며, 영상에서 사면의 크기는 대략적으로 폭 6 m, 높이 4 m 이다. Fig. 24는 디지털 사진기로 촬영된 원영상이며, Fig. 25는 원영상으로부터 본 연구에서 제시한 과정들을 거쳐 얻은 절리맵이다.

Fig. 26에서는 원영상과 절리맵의 영상을 중첩하여 비교한 그림으로 원영상의 절리 궤적 부분에서 인식된 결과를 확인할 수 있다. 인식된 절리선들의 수는 약 450 여개로 원영상에서 육안으로 확인할 수 있었던 절리 수의 약 75~80% 수준인 것으로 분석되었다. 이 차이는 암반 영상에 나타난 그림자나 부분적인 노이즈 등에 관계된 절리들이 영상변조 과정에서 왜곡되거나 무시된



Fig. 24. Original image captured by digital camera ( $1600 \times 1000$  pixels, gray scale).

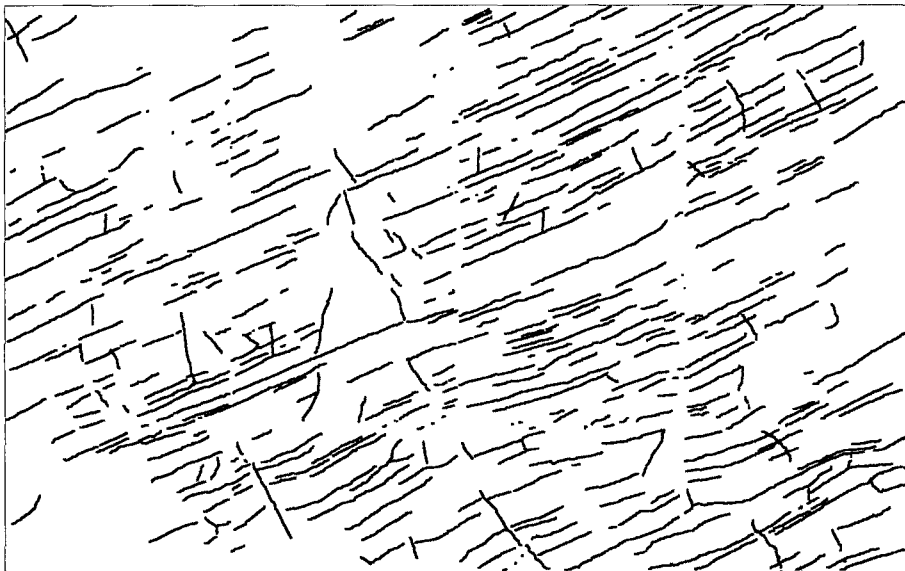


Fig. 25. Discontinuity trace map obtained after joint trace detection procedure.

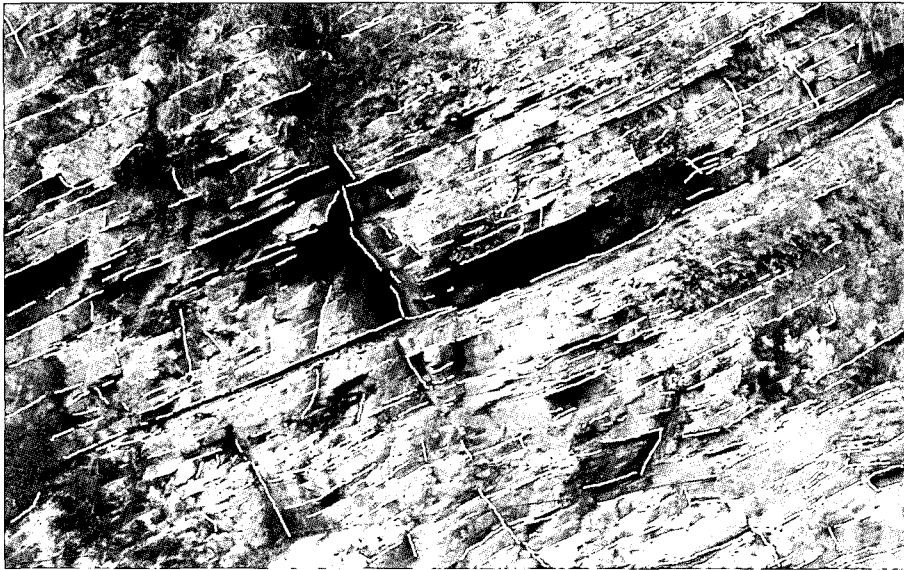


Fig. 26. Overlap view of original and discontinuity trace images.

영향으로 보인다. 본 연구에서는 시간상의 제약으로 인하여 많은 경우의 영상에 대한 분석을 시도하지 못하였으나 앞으로 영상의 촬영기법을 향상시킨다면 보다 양호한 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각한다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 암반 사면의 영상으로부터 부존하는 절리들의 궤적을 추적하기 위한 알고리즘을 개발하고자 하였으며 그 과정은 영상 처리 단계와 절리 인식 단계, 절리 궤적 추적 단계로 구분되어 이루어졌다. 이러한 과정을 거침으로 암반 사면에 존재하는 절리들의 절리맵을 작성하였으며, 각 과정들과 최종적으로 얻어진 절리맵을 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 절리맵의 작성을 위하여 암반 사면 영상에 대한 절리 궤적 부가, 절리 인식, 절리 궤적 추적의 과정을 각각 모듈화한 프로그램을 작성하였다.
- 2) 암반 사면 영상에 대하여 여러 가지 영상 처리 필터를 적용함으로써 영상 내에 나타나는 노이즈를 제거하거나 완화시킬 수 있었다. 이러한 영상 처리 필터의 적용은 노이즈 제거의 효과는 얻을 수 있으나 화소들의 밝기, 대비 등을 변화시키므로 영상의 왜곡이 발생할 수 있으므로 주의가 필요하다. 또한 암반 사면 영상이 가지는 불규칙한 특징은 영상 강화 필터의 반복적인 적용을 통하여 이루어 져야 할 것이다.
- 3) 명도 영상의 지형적 특징 추출 방법을 이용함으로써 절리 궤적을 인식하였으며, 인식된 절리 궤적은 수

치적인 의사 결정 구조로 구성되어 자동화된 절리 궤적 추적이 가능하도록 하였다. 또한 작성된 절리맵의 절리 궤적들은 수치적인 정보를 포함하고 있으므로 절리의 기하학적 특성 분석이 가능할 것으로 예상된다.

- 4) 분석 대상 사면의 영상으로부터 인식된 절리선들의 수는 약 450여개로 원영상에서 육안으로 확인할 수 있었던 절리 수의 약 75~80% 수준인 것으로 분석되었다. 이 차이는 암반 영상에 나타난 그림자나 부분적인 노이즈 등에 관계된 절리들이 영상변조 과정에서 왜곡되거나 무시된 영향으로 보인다. 대상 사면은 절리가 심하게 발달된 경우에 해당한다고 할 수 있으므로 이 결과는 상당히 양호한 것으로 판단하였다.

본 연구를 통하여 불연속면의 특성 조사에서 자동화된 자료의 수집과 처리의 가능성을 파악할 수 있었으며, 앞으로 영상처리, 컴퓨터 비전 분야 등의 급속한 발전에 힘입어 본 연구 결과는 2차원적 특징뿐만 아니라 3차원적 특징을 포함한 불연속면 특성 조사에 기여할 수 있을 것으로 보인다.

## 감사의글

본 연구는 삼성중공업(주)에서 지원된 연구과제 “영상분석을 이용한 암반 사면 절리구조 및 역학적 특성 해석기법 개발”의 연구 결과 중 일부로서 삼성중공업 관계자들에게 심심한 감사를 드린다.

**참고문헌**

1. 권준식, 김동욱, 김진태, 김태은, 송호근, 차국찬, 최종호, 최종수, 2000, 디지털 영상처리 이론 및 응용, 에드텍, 1-80.
2. 김재동, 김종훈, 1998, 시추공벽 영상을 이용한 암반내 절리구조 해석, 한국암반공학회지, 제8권 4호, 342-350.
3. 김희승, 1993, 영상인식: 영상처리, 컴퓨터비전, 패턴인식, 신경망, 생능출판사, 120-188.
4. 류동우, 이유리, 장윤섭, 이희근, 박형동, 2000, 화상처리 및 입체사진측량학을 이용한 암반 절리 조사 시스템, 한국암반공학회지, 제10권 3호, 329-343.
5. 이문호, 염재훈, 1996; C언어를 이용한 영상신호 처리, 대영사, 25-90.
6. 최형일, 1997; 컴퓨터 비전 입문, 홍릉과학 출판사, 1-120.
7. Baker, M.P. & D. Hearn, 1986, Computer graphics. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall International, 425p.
8. Boyle, R., V. Hlavac & M. Sonka, 1993, Image processing, analysis and Machine vision. International Thomson Publishing Inc., 555p.
9. Gonzalez, R.C. & R.E. Woods, 1992, Digital image processing, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, 716p.
10. Haralick, R.M., 1984, Digital step edges from zero crossing of second directional derivatives, IEEE Trans. Pattern Analysis Mach. Intell. Vol.6, pp.58-68.
11. Lee, S.W. & Y.J. Kim(이성환과 김영준), 1995, Direct extraction of topographic features for gray scale character recognition. IEEE Trans Pattern Anal. Machine Intell, 724-729.
12. Media cybernetics, 1997; Auto-pro guide for windows
13. Media cybernetics, 1997; Image-pro plus reference guide for windows, 551p.
14. Mehre, B.M., M.S. Kankanhalli & W.F. Lee, 1997, A Comparison of Shape Measures for Content Based Image Retrieval, Information Processing and Management Vol. 33(3), 319-337.
15. Ord, A. & C.C. Cheung, 1991, Image analysis techniques of determining the fractal dimensions of rock joint and fragment size distributions., Computer methods and advances in geomechanics, Beer, 87-91.
16. Priest, S.D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, 1-62.
17. Reid, T.R. & J.P. Harison, 2000, A semi-automated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures, Int. J. of ISRM, 1073-1089.
18. Tsoutrelis, C.E., G.E. Exadactylos & A.P. Kapanis, 1990, Study of the rock mass discontinuity system using photoanalysis, Rock mechanics, Tilleson & Wawesik, 767-774.
19. Wang, L. & T. Pavlidis, 1993, Direct gray-scale extraction of features for character recognition. IEEE Trans Pattern Anal. Machine Intell, 1053-1067.

**이 효 석**



2000년 강원대학교 지구시스템공학과 공학사  
2002년 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 공학석사

Tel: 011-9720-8627  
E-mail: comodo75@hanmail.net  
현재 한라엔지니어링(주)

**김 재 동**



1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1983년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
1988년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 033-250-6256  
E-mail: jdkim@kangwon.ac.kr  
현재 강원대학교 지구환경공학부 교수

**김 동 현**



1980년 서울대학교 자원공학과 공학사  
1982년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사

Tel: 02-3457-7291  
E-mail: hyun7679@unitel.co.kr  
현재 삼성중공업(주) 기술연구소 부장