

화상처리 및 입체사진측량학을 이용한 암반 절리 조사 시스템

류동우¹⁾ · 이유리²⁾ · 장윤섭³⁾ · 이회근⁴⁾ · 박형동⁴⁾

Rock Joint Survey System by image Processing and Stereophotogrammetry

Dong-Woo Ryu, Yuri Lee, Yoon-Seup Chang, Hi-Keun Lee and Hyung-Dong Park

ABSTRACT Rock joint survey consists of measurement of orientation and face mapping for trace informations. We have developed a new alternative approach called rock joint survey system by stereophotogrammetry and image processing to replace the conventional manual method. For the measurement of orientations and face mapping, we applied a stereophotogrammetry and developed two hybrid approaches using image processing techniques, respectively. These methods have advantages in making it possible to measure the orientations of joints and perform face mapping rapidly and objectively in unaccessible and dangerous areas.

Key words : rock joint survey, stereophotogrammetry, image processing, hybrid approach

초 록 암반 절리 조사는 크게 절리 방향 측정과 트레이스 정보 등을 얻기 위한 매핑으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 절리 방향 측정 및 트레이스 매핑을 위한 기존의 수작업을 대체하기 위하여 입체사진측량학과 화상처리 기법 등을 이용한 암반 절리 조사 시스템을 개발하였다. 절리 방향 측정을 위해 입체사진측량학을 적용하였으며, 트레이스 길이 및 빈도 등의 정보를 얻기 위해 화상 처리 기법을 이용한 두 가지 혼합 접근법(hybrid approach)을 고안하였다. 입체사진측량학을 이용한 절리 방향 측정 기법 및 화상 처리 기법은 접근이 어려운 지역에서의 원거리 측정 및 신속하고 객관적인 매핑이 가능하다는 장점을 가진다.

핵심어 : 암반절리조사, 입체사진측량학, 화상처리, 혼합접근법

1. 서 론

암반 절리는 암반의 역학적·수리적 거동에 많은 영향을 미치며, 암반 내 시공되는 지하구조물과 사면 등의 설계에 있어 중요한 인자로서 고려되어야 한다. 이와 같은 배경에서 암반 절리의 기하학적 정보의 취득을 위한 암반 절리 조사의 중요성에 대한 인식이 높아가고 있다. 절리 방향 측정 및 매핑 작업 외에 기타 절리 상태의 상세한 기록을 위해서는 전문가의 수작업에 의존할 수밖에 없지만, 조사면의 접근이 용이하지 않은 경우 및 작업의 효율성이 요구되는 경우 비접촉식 조사방법과 같은 대안적 방법이 요구된다. 따라서, 본 연구는 기존의 방법에 대한 대안적 방법으로서 입체사진측량학적 접근법과 화상처리기법을 이용한 암반 절리 조사 방법을 제안하는데 그 목적이 있다.

암반 절리 조사는 크게 절리 방향 측정과 트레이스 길이 및 빈도 등의 정보를 얻기 위한 매핑으로 구분할 수

있다. 본 연구에서는 절리 방향 측정을 위해 입체 사진측량학적 이론을 적용하였으며, 트레이스 길이 및 빈도 등의 정보를 얻기 위해 화상 처리 기법을 이용한 두 가지 혼합 접근법(hybrid approach)을 고안하였다.

절리 방향 측정과 관련하여 Hagan(1980)과 Wolf(1983) 등은 입체 사진 측량학적 접근법에 기초하여 절리 방향을 측정한 바 있으나, 아직 국내에서는 관련 연구 및 그 적용 사례가 미흡한 실정이다.

절리 트레이스 매핑과 관련한 대안적 방법으로 Franklin 외(1988), Tsoutrelis 외(1990) 그리고 Crosta(1997) 등은 타블렛(tablet)을 이용한 수치자료화(digitization) 과정을

- 1)정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사졸업
 - 2)학생회원, Ph.D course, Mechanical Engineering, University of Maryland
 - 3)학생회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정
 - 4)정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수
- 원고 접수일 : 2000년 8월 16일
원고 심사 완료일 : 2000년 8월 29일

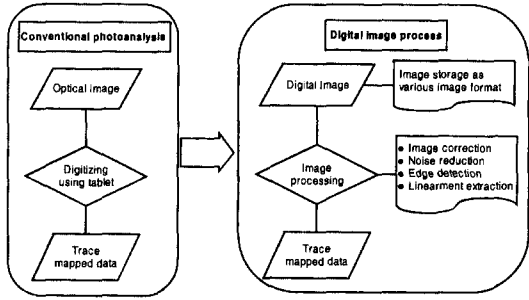


Fig. 1. Comparison between conventional photoanalysis and digital image process for joint trace extraction.

통해 절리 트레이스를 추출하였다. 이러한 연구들은 엄밀히 말해서 사진분석학적 접근법(photoanalysis approach)에 기초하며, 본 연구에서 다루고자 하는 방법론인 화상처리의 개념과는 다소 차이가 있다(Fig. 1). 사진분석학적 접근법은 절리 트레이스의 수학적 모델보다는 해석자의 판단에 기초하기 때문에 상당한 시간과 노력이 요구된다. 따라서, 이와 같은 단점을 보완하기 위한 대안적 방법으로서 디지털 화상 처리 기법을 이용하였으며, 본 연구에서는 절리 트레이스의 적절한 수학적 모델을 정의하고, 이에 기초한 두 가지 혼합 기법을 고안하였다. 또한, 현장 적용을 통한 활용성 및 장·단점을 분석하여 향후 개선 방향을 제시하였다.

절리의 기하학적 특성에 관한 정보를 포함하는 암반 노출면을 대상으로 근접 절리 조사가 어려운 경우 입체 사진 측량학적 접근법과 화상 처리 기법의 이용은 다음과 같은 여러 장점들을 지닌다.

- (가) 조사자의 안전성(safety)
- (나) 조사 자료의 객관성(objectivity)
- (다) 조사 기간의 단축(time-saving)
- (라) 조사 경비 절감(cost-saving)

2. 입체사진측량학에 의한 절리 방향 측정

2.1. 입체사진측량학의 개요

사진측량학은 대상체의 크기, 형태, 위치와 같은 기하학적 특성을 사진술(photography)을 이용하여 결정하는 기술 혹은 학문으로 정의한다(Hallert, 1960). 입체사진측량학(stereophotogrammetry)이란 동일한 피사체에 대해 시차(parallax)를 보이도록 촬영한 입체영상(stereoscopic

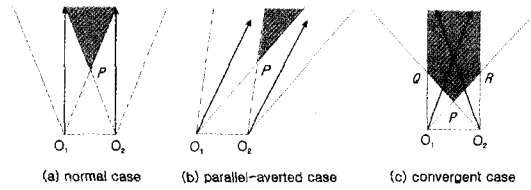


Fig. 2. Three different photography categories. The shaded surfaces are photographed in both pictures.

vision)을 이용하여 피사체의 내용 및 3차원 공간상 좌표에 대한 정보를 얻는데 이용하는 사진측량학(photogrammetry)의 한 분야이다. 입체사진측량학은 두 대의 카메라를 어떤 방향으로 조합하여 촬영하느냐에 따라 대표적인 세 가지 방법들이 있다(Fig. 2).

입체사진측량학에서 좌표 결정 수식들은 사진촬영이 어떻게 수행되느냐에 따라 달라지는데, 본 연구에서는 지표사진측량(terrestrial photogrammetry) 및 항공사진측량(aerial photogrammetry)에서 많이 이용되는 방법인 수직촬영법(normal case)에 의해 3차원 공간상 좌표를 설정하였다.

Fig. 2(a)의 수직촬영법의 경우 두 대의 카메라 방향이 평행하며 카메라 기선(base line or base)^{부록1)}에 수직하다.

Fig. 3은 카메라 축에 수직하게 자른 단면을 보여준다. 왼쪽 카메라의 위치를 원점으로 한 좌표계가 사용되었으며, O_1 에서 O_2 방향이 x 축의 양의 방향, 왼쪽 카메라축의 방향이 z 축의 양의 방향, 그리고 xz 평면에 수직하게 위로 향하는 방향을 y 축의 양의 방향으로 잡았다. 점 P_1 은 왼쪽과 오른쪽 화상에서 각각 좌표 (x_1', y_1') 와 (x_1'', y_1'') 로 나타나며, 이 때 각 시스템에서 원점은 화상에서의 카메라 중심(camera center or principal point)^{부록2)}이다. 카메라 상수 C 는 양쪽 화상에 있어서 같은 값을 가지고, 카메라 렌즈의 왜곡(distortion)이 없다고 가정하면 $O_1(P_1')$ 는 $O_2(P_1'')$ 와 평행하다. 실제 공간상에 위치한 점 P_1 의 좌표 (x_1, y_1, z_1) 는 다음과 같은 과정을 통해 얻을 수 있다.

삼각형 $P_1O_1O_2$ 와 삼각형 $P_1P_1'P_1''$ 의 닮음꼴 성질을 이용하여 정리하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$z = \frac{CB \cdot C}{P} \tag{1}$$

여기서, C 는 카메라 상수이며, CB 는 카메라 기선(base

하여 dz_p 에 영향을 미치기 때문에 가장 큰 오차 발생원이 된다.

수평 시차의 오차 dp 는 몇 개의 오차 원인에 의해 발생한다. 즉, 내부 방향(interior orientation)^{부록3)} and 외부 방향(exterior orientation)^{부록4)}, 분해능, 관측오차 등을 들 수 있다.

광학 카메라를 이용하는 경우의 계통오차^{부록5)}(systematic error)의 내재 원인으로서는 다음과 같은 인자들이 있다.

- (가) 카메라 시스템의 결함 - 렌즈의 왜곡, 카메라 배치 등
- (나) 확대시 시스템의 결함 - 렌즈의 왜곡, 카메라 배치 등
- (다) 필름 및 인화지의 수축 및 팽창
- (라) 사진 상에서의 측정과 관련한 계통오차 - 사진 중심의 지정 혹은 사진 상의 축방향 결정과 관련된
- (마) 카메라 기선에서 피사체까지의 거리 측정 오차

식(6)의 오차 발생원들 중에서 카메라 기선의 절대 크기가 z 좌표의 정확도에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 그러나, z 의 상대적 정확도와 기선비(base ratio), b/z 사이의 관계를 파악함으로써 오차 제어를 위한 첫 단계가 된다. 식(9)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dz}{z} = \frac{zdp}{CB \cdot C} \tag{10}$$

여기서, dz/z 는 상대 거리 오차이며, z/CB 는 기선비(base ratio)의 역수이며, dp/C 는 카메라 종류와 측정 방식에 의해 결정되는 항이다.

허용 가능한 상대 거리 오차의 최대치와 카메라 종류 및 측정 방식의 계수인 dp/C 를 결정하면, 최소 허용 기선 길이를 결정할 수 있다.

2.2. 카메라 시스템

입체사진측량학을 이용하여 암반 절개면 혹은 갱내에서 절리의 방향을 측정하기 위해 고안한 카메라 시스템은 크게 세 부분으로서 전체 카메라 시스템을 고정시키기 위한 삼각대(tripod), 입체사진 촬영을 위한 가변 기선축, 그리고 촬영각을 자유로이 조절할 수 있는 카메라 고정부로 구성된다(Fig. 4).

2.3. 해석 과정 및 모델 실험

Fig. 5는 입체사진으로부터 면의 경사와 경사방향을

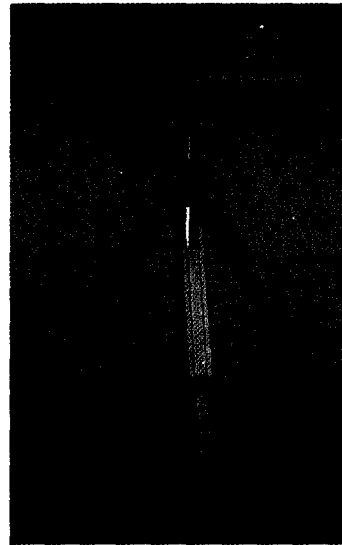


Fig. 4. Camera system.

구하기 위한 과정을 보여준다. u 는 카메라로부터 피사체까지의 평균 거리(average depth)이며, CB 는 카메라 기선 길이(camera base length)이다. x_{ji} 와 y_{ji} 는 각각 j 번째 평면상의 i 번째 점의 x 좌표와 y 좌표이다. 이와 같은 입력자료로부터 앞서 살펴본 입체사진측량학 이론에 기초하여 평면의 3차원 좌표를 얻을 수 있으며, 이로부터 평면 방정식을 정의할 수 있다. 오차를 줄이기 위해 일반적으로 한 평면 당 6개 이상의 점을 지정하여 계산한 후 최소자승법에 의해 평면방정식의 법선 벡터를 구한다.

- (가) 평균 피사체 거리(average depth)
- (나) 초점 거리(focal length)
- (다) 카메라 기선 길이(camera base length)
- (라) 카메라 방향(direction of camera base)

입체사진측량학을 이용한 절리 방향 측정의 정확성을 검증하기 위해 모델 실험을 수행하였다. 모델은 알루미늄 평판을 결합하여 제작하였으며, 각 다면체의 면에는 레이저 조각기를 이용하여 50 mm 간격의 격자망을 넣었다(Fig. 6). 클리노콤파스를 이용하여 반복 측정된 값들의 평균값을 각 면 방향의 진값으로 가정하였다(Table 1).

모델 실험을 통해 얻은 오차의 범위는 약 $\pm 5^\circ$ 정도로 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 오차 원인은 앞서 언급한 계통오차에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서, 오차를 줄이기 위한 방안으로는 휴대용 레이저 거리 측

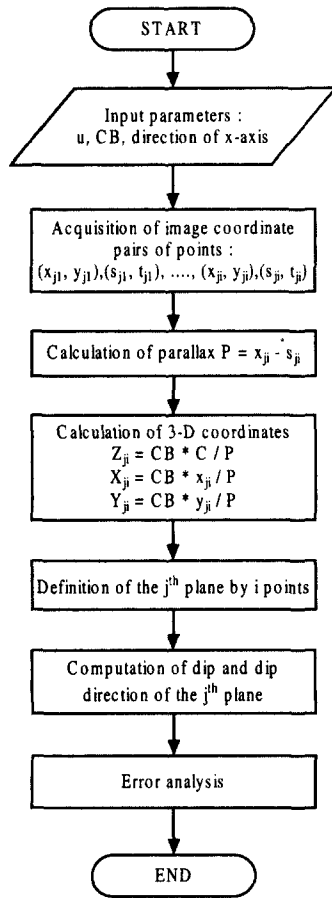


Fig. 5. Procedure for the determination of orientations of joints.

정장비(DISTO series)의 이용, 전체 필름(film full) 사이즈 현상^{부*6)}, stereoscope를 이용한 동일점 순서쌍의 지정 등을 제안할 수 있다.

현장 적용 자료에서 알 수 있듯이 절리면의 굴곡성으로 인해 일정하지 않은 측정값을 보인다(Table 2와 Table 3). 반면, 입체사진측량학적 접근법의 경우 절리면에서 추출된 6개 이상의 점으로부터 평균개념의 평면 방향을 결정하기 때문에 이와 같은 단점을 보완할 수 있는 효과를 부수적으로 얻을 수 있다.

3. 화상 처리 기법을 이용한 절리 트레이스 추출

3.1. 화상 처리 기법의 개요

화상 처리 기법을 이용한 절리 조사란 절리의 기하학

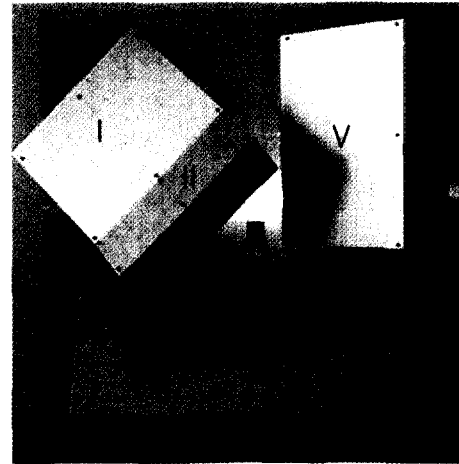


Fig. 6. Model planes for model tests.

Table 1. Results of model test(average depth: 3550 mm, focal length: 50 mm, and camera base length: 700 mm).

No. of plane	Orientation	Calculated (°)	Manual (°)	Relative errors(°)
Plane I	Dip	75.8	71	4.8
	Dip direction	147.7	148	-0.3
Plane II	Dip	57.6	59	-1.4
	Dip direction	164.9	165	-0.1
Plane III	Dip	88.2	90	-1.8
	Dip direction	173.2	170	3.2
Plane IV	Dip	61.3	57	4.3
	Dip direction	130.7	130	0.7
Plane V	Dip	47.9	46	1.9
	Dip direction	314.5	310	4.5

적 특성과 관련한 정보와 잡음을 모두 포함하고 있는 디지털 화상을 적절히 가공함으로써 유용한 절리 정보만을 추출하는 것으로 정의할 수 있다. 절리 트레이스를 명도 차이가 급변하는 경계로 정의할 때, 이를 검출하기 위해 적용할 수 있는 화상 처리 기법으로서 에지(edge) 검출 기법을 제안할 수 있다.

에지는 화상의 기본적 특징으로, 화상분석(image analysis), 대상인식(object identification) 그리고 화상 필터 적용 등을 위한 대상체의 경계부분에 관한 정보를 제공한다. 에지 검출은 디지털 화상 처리 및 분석에 있어서 매우 중요한 정보를 제공해 주고 있음에도 불구하고 아직 보편적이고 정확하게 적용할 수 있는 에지의 수학적 정의가 미흡한 실정이다.

Table 2. Results of field test at Mt. Kwanack, Seoul (average depth: 4159 mm, focal length: 50 mm, camera base length: 800 mm, and direction of camera base: N43°E).

No. of plane	Orientation	Calculated(°)	Manual(°)
Plane 1	Dip	80.0	78~85
	Dip direction	52.2	51~59
Plane 2	Dip	74.3	65~75
	Dip direction	50.8*	52~60
Plane 3	Dip	75.6	72~78
	Dip direction	50	48~54
Plane 4	Dip	19.4*	20~25
	Dip direction	236.5	235~252
Plane 5	Dip	88.7*	84~88
	Dip direction	226	224~229
Plane 6	Dip	27.5	23~28
	Dip direction	240	235~244

* Calculated value out of the range of the manual value.

Table 3. Results of field test at Mt. Kwanack, Seoul (average depth: 6000 mm, focal length: 50 mm, camera base length: 800 mm, and direction of camera base: N55°E).

No. of plane	Orientation	Calculated(°)	Manual(°)
Plane 1	Dip	79.7	80~84
	Dip direction	54.4	52~58
Plane 2	Dip	65.5	64~68
	Dip direction	38.2*	34~37
Plane 3	Dip	41.1	35~42
	Dip direction	350.9	348~354
Plane 4	Dip	87.6	86~88
	Dip direction	146.3	140~147
Plane 5	Dip	88.7	86~89
	Dip direction	136.7	135~145
Plane 6	Dip	85.4	84~88
	Dip direction	305.6	307~312

* Calculated value out of the range of the manual value.

에지 검출 기법(edge detector technique)들은 여러 문헌들에 제시되어 있다(Gonzalez와 Woods, 1993; Bässmann과 Besslich, 1995; Pitas, 1995). 에지 검출 기법은 대상 영역에 따라 크게 두 가지로 분류할 수 있다.

- (가) 국부적 에지검출(local edge detection) : 국부적 화상 주변 화소에 검출기를 사용하는 경우이다.
- (나) 전역적 에지검출(global edge detection) : 에지

정보를 얻기 위해 전역 정보와 필터링 방법을 사용하는 경우이다.

국부적 에지검출은 에지의 강도를 의미하며, 전역적 에지검출은 임계값 설정에 의한 필터링으로 국부적 에지를 제거하는 기법이다.

연산자의 형태에 따라 몇 가지 검출기로 구분되는데, Roberts 연산자, Prewitt 연산자 및 Sobel 연산자를 이용한 검출기가 대표적이다(Table 4). 그러나, 1차 미분 연산자를 이용하는 에지 검출기들은 공통적으로 굽은 에지를 검출한다는 단점을 가진다. 다른 접근법으로 라플라스 연산자(Laplace operator)를 이용하는 에지 검출기가 있다.

1차 미분 연산자는 국부적 강도(intensity)의 변화(기울기)로서 화상의 에지에서 최대 혹은 최소를 가진다. 반면, 2차 미분 연산자는 에지에서 영교차(zero crossing)를 가진다. 에지 검출을 위한 2차 미분 연산자는 그 적용대상에 따라 라플라시안(Laplacian), LoG(Laplacian of Gaussian), 그리고 DoG(Difference of Gaussian) 등으로 나뉘어진다(Table 5).

3.2. 혼합기법의 구성 및 알고리즘

다양한 에지검출과 관련한 화상처리 기법들은 각각의 사용목적과 장단점을 가지며, 단일 처리 기법만으로는 절리 트레이스 검출을 수행하는데 있어서 한계를 지닌다. 따라서, 본 연구에서는 절리 트레이스 추출을 위한 일괄 처리과정으로서, 개별 화상 처리 기법의 특성을 고려하여 에지 검출 기법과 선형성 추출기법을 형태학적 처리기법

Table 4. Various kernel masks for local edge detector and their characteristics. H_r and H_c are row detector and column detector, respectively.

	Mask (3×3)		Characteristics
	H_r	H_c	
Roberts	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	<ul style="list-style-type: none"> ● small kernel mask ● sensitive to noise
Prewitt	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	<ul style="list-style-type: none"> ● sensitive to horizontal and vertical edge
Sobel	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$	<ul style="list-style-type: none"> ● insensitive to noise ● sensitive to diagonal edge

Table 5. Various 2nd order differential operator for edge detector.

Operator	Mathematical form	Characteristics
$\nabla^2 f(x, y)^*$	$\frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2}$	● sensitive to noise
LoG(x, y)	$\frac{1}{\pi\sigma^4} \left[1 - \frac{x^2+y^2}{2\sigma^2} \right] e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$	● use Gaussian smoothing ● make thick edge
DoG(x, y)	$\frac{e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_1^2}}}{2\pi\sigma_1^2} - \frac{e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_2^2}}}{2\pi\sigma_2^2}$	● more effective than LoG

* Laplacian operator

및 세션화 기법과 결합한 두 가지 혼합적 접근법(hybrid approaches)을 고안하였다.

절리 트레이스를 다음과 같이 두 가지 특성을 지닌 영역으로 정의하였다.

- (가) 암반 노출면과 같은 대상 평면에서 명도의 변화가 급변하는 영역
- (나) 선형성과 같은 기하학적 특성을 지닌 영역

이와 같은 정의는 반드시 절리 트레이스만을 추출하는 완벽한 기준이 되는 것은 아니며, 몇 가지 보완적 처리가 필요하다.

본 연구에서는 형태학(morphology)의 팽창(dilation)과 축소(erosion) 연산자를 추가적으로 적용하였다. 추출된 영역(segment)의 폭이 2개 이상의 화소로 구성된 경우, 영역의 폭이 단일 화소를 가지도록 세션화(thinning) 처리가 필요하며, 이를 위해 skeleton 기법을 적용하였다.

Fig. 7은 본 연구에서 제시하는 두 가지의 혼합 접근법(hybrid approach)에 기초하여 작성된 코드 GeolImage의 흐름도이다.

3.2.1. Canny 에지 검출기법

에지 검출에 기초한 접근법에 사용한 에지 검출 기법은 Canny 에지 검출기를 이용하였다. Canny 에지 검출기는 Canny(1986)가 제시한 기법으로 처리과정은 Fig. 8과 같다.

Canny 에지 검출 기법은 2차 미분 연산자를 이용하기 때문에 잡음에 민감하다. 따라서, 잡음을 감소시키기 위해 가우스 회선(Gaussian convolution)을 이용하여 블러링 효과(blurring effect)를 발생시킨다.

본 연구에서의 Canny 에지 검출 기법에는 다음과 같

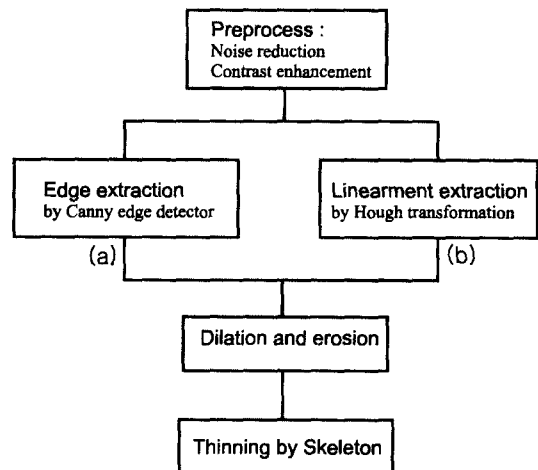


Fig. 7. Two hybrid approaches of image processing for joint trace extraction. (a) An edge detector based approach, (b) a hough transformation based approach.

은 세 개의 매개변수가 필요하다.

- (가) σ : Gaussian 마스크의 표준편차
- (나) H : 상한 임계값으로, $100 \times H$ 는 상한 임계값의 백분위 값이 된다.
- (다) L : 하한 임계값으로, 상한 임계값에 대한 비가 0.5 혹은 0.3333 정도가 되도록 선택한다.

여기서, H와 L은 에지의 상한 임계값과 하한 임계값으로, 범위를 나타낸다.

본 연구에서는 편의상 전역적 임계값을 이용하였으며, 이는 각 조건에 맞게 사용자 인터페이스를 이용하여 변화시킬 수 있도록 코드를 작성하였다.

3.2.2. Hough 변환법

Hough 변환은 이진 화상(binary image)에서 기하학적 형상(예를 들면 직선, 원 등)을 찾기 위해 적용할 수 있는 기법으로, 연산효율성을 높이기 위해 기하학적 형상에 대한 매개변수 표현을 사용한다. 직선의 극좌표 표현을 이용한 매개변수 모델은 다음 식과 같다.

$$r = x \cos \theta + y \sin \theta \tag{11}$$

이진 화상 공간 내 동일 직선 상에 있는 점 (x_i, y_i) 는 매개변수 공간 내 사인 곡선들의 교차점에 해당한다 (Fig. 9).

$N_1 \times N_2$ 크기를 가지는 이진 화상에 대해 사용할 수 있는 매개변수 (r, θ) 의 범위는 다음과 같다.

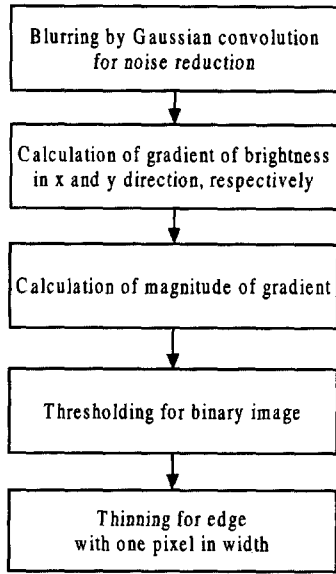


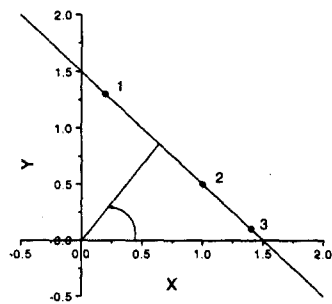
Fig. 8. Procedure for Canny edge detection.

$$-\sqrt{N_x^2 + N_y^2} \leq r \leq \sqrt{N_x^2 + N_y^2} \quad (12)$$

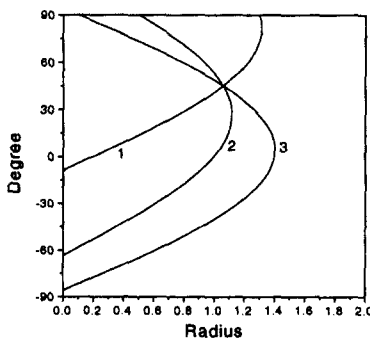
$$-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad (13)$$

Hough 변환법에 기초한 선형성 검출 과정은 Fig. 10과 같다.

이 방법의 정확도는 초기에 부여한 매개변수 a, b의 구간과 행렬 P(a, b)의 크기 K×L에 의존한다. 따라서, Hough 변환의 계산량은 최대 KN에 비례한다. 여기서, K는 매개변수 a의 소구간(subdivision)의 개수이며, N은 에지 검출 결과인 이진화상의 화소 개수이다. 따라서,



(a)



(b)

Fig. 9. Parameterization of straight line. (a) Cartesian coordinates in original plane, (b) polar coordinates (r, θ) in hough plane.

Hough 변환은 일반적인 직선 검출 알고리즘보다 훨씬 빠른 장점을 가진다.

Hough 변환 기법의 적용을 위해 필요한 세 가지 매개변수는 다음과 같다.

- (가) 기울기 임계값 (gradient threshold): 에지 검출을 위한 명도 기울기 임계값으로, Sobel 에지 검출 기법을 적용한다.
- (나) 직선 임계값 (line threshold): 직선으로 판단할 수 있는 최소 길이(픽셀 단위)
- (다) Hough 임계값: 직선 에지에 대한 임계값으로, 이는 매개변수 공간에서의 교차점의 개수에 대한 임계값이다.

3.2.3. 형태학적 접근법

형태학(morphology)의 이론에서 팽창(dilation)과 축소(erosion) 연산자는 다음과 같이 정의한다(Fig. 11).

(가) B에 의한 A의 팽창

$$A \oplus B = \bigcup_{b \in B} A_b \quad (14)$$

(나) B에 의한 A의 축소

$$A \ominus B = \bigcap_{b \in B} A_b = (A' \oplus B')' \quad (15)$$

여기서, B'는 B의 원점에 대한 대칭변환(reflection)이며, A'는 A의 여집합(complement)이다. A_b는 다음과 같이 정의한다.

$$A_b = \{a + b : a \in A\} \quad (16)$$

이와 같은 팽창과 축소 연산자의 결합을 통해 질리 트

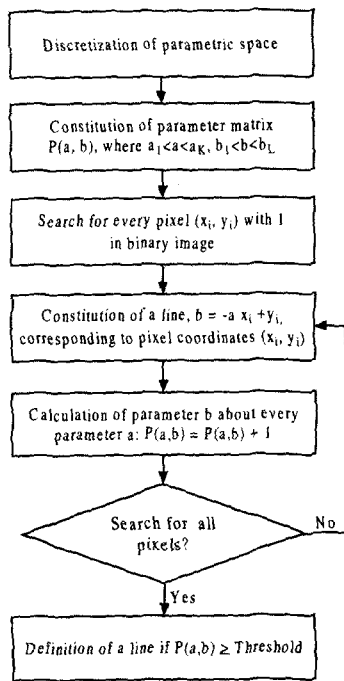


Fig. 10. Procedure for Hough transformation.

레이스가 아닌 부분을 효과적으로 제거할 수 있으며, 단절되어 있는 선분들을 결합하고, 평균 개념에서의 트레이스 성분을 추출할 수 있다. 팽창 연산자에 의해 두꺼운 영역들을 형성하기 때문에 skeleton 기법을 이용하여 세선화(thinning)처리를 해야 한다. 세선화를 위한 다양한 기법이 있으나, 본 연구에서는 Zhang-Suen skeleton 기법을 사용하였다(Ritter와 Wilson, 1996).

3.3. 현상 적용

본 연구에서 고안한 두 가지 혼합접근법의 적용성을 검토하기 위해 절리 트레이스를 포함하는 화소수(336×358)와 (266×226)인 24비트 칼라 화상(image)을 고려하였다(Fig. 12).

에지 검출 및 Hough 변환은 모두 256 그레이 스케일로 변환하였으며, 입력화상은 전체적으로 어두운 배경을 가진 화상으로 취득되었다. 따라서, 대상체인 절리 트레이스와 배경의 구분을 명확하기 위하여 사전 처리 과정인 명도대비 강조(contrast enhancement)를 적용하였다(Fig. 13).

두 가지 혼합기법의 효과를 비교·검토하기 위해, 일반적으로 사용되는 에지 검출 기법인 Sobel 에지 검출

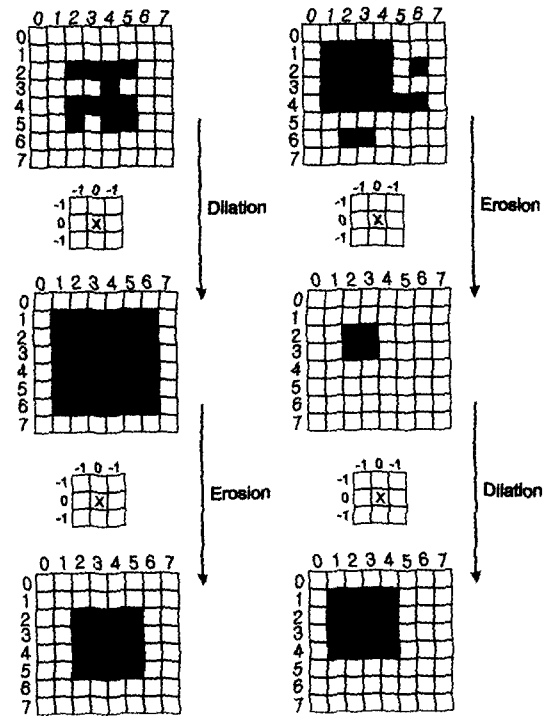


Fig. 11. Concepts of dilation and erosion. (a) A dilation-erosion scheme, (b) an erosion-dilation scheme.

기법과 Prewitt 에지 검출 기법을 동일 입력화상에 적용하였다(Fig. 14와 Fig. 15). Sobel 에지 검출 기법과 Prewitt 에지 검출 기법은 기울기 연산자, 즉 1차 미분 연산자에 기초한 국부적 에지 검출 기법이다. Sobel 에지 검출 기법은 대각선 방향의 에지에 민감한 연산자이며, Prewitt 에지 검출 기법은 수평 혹은 수직 방향의 에지에 민감한 연산자이다. 따라서, 상대적으로 대각선 방향의 절리 트레이스가 많은 입력 화상 Fig. 13(a)의 경우 Prewitt 에지 검출 기법 보다는 Sobel 에지 검출기법이 에지 강조 효과 측면에서 탁월하며, 반면 수직 및 수평 방향의 절리 트레이스가 많은 입력 화상 Fig. 13(b)의 경우 Sobel 에지 검출 기법이 에지 강조 효과가 크다. 또한, 1차 미분 연산자에 기초한 에지 검출의 경우 잡음에는 강한 반면 특정 방향에 대해 에지 검출 효과가 다르게 나타난다.

Fig. 16은 동일한 입력화상에 대하여 Canny 에지 검출 기법을 적용한 결과 화상으로 Sobel 에지 검출 기법과 Prewitt 에지 검출 기법과는 달리 에지의 폭이 1개의 화소인 에지를 검출한다. 에지에 대한 전역적 임계값 처리를 통해 이진 화상의 결과를 얻을 수 있다. Canny 에

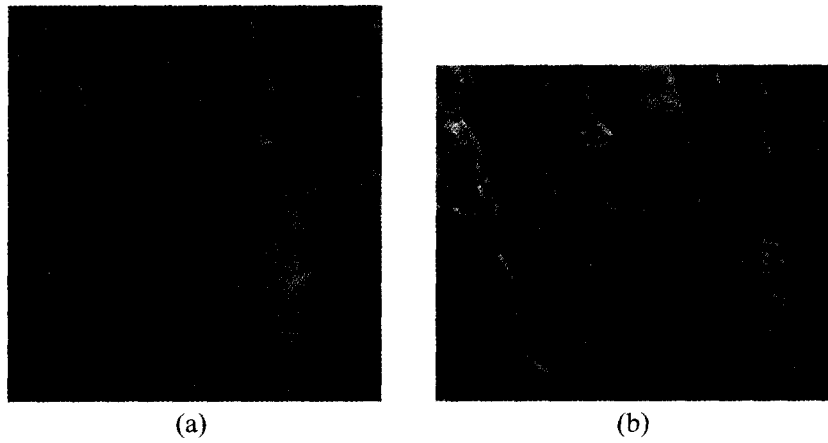


Fig. 12. Original images. (a) (336×358) pixels, 24bit colors, and (b) (266×226) pixels, 24 bit colors

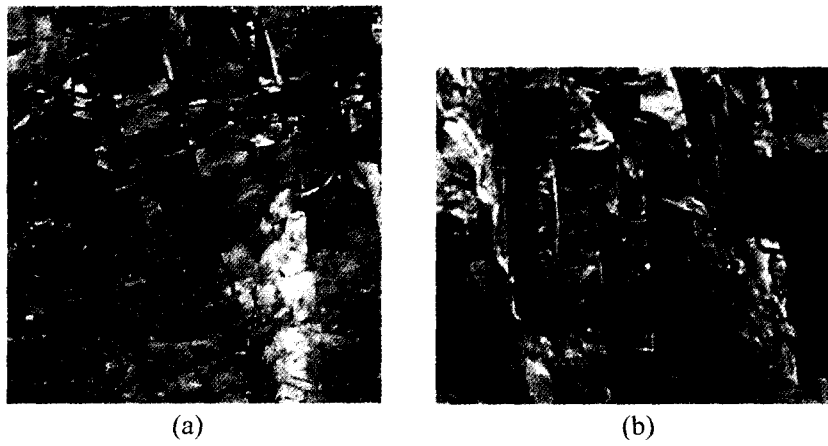


Fig. 13. Gray level adjusted images.

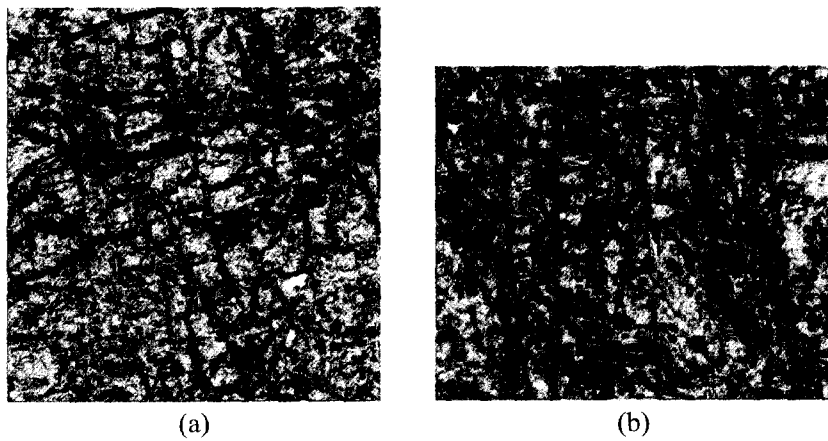


Fig. 14. Sobel edge detector outputs.

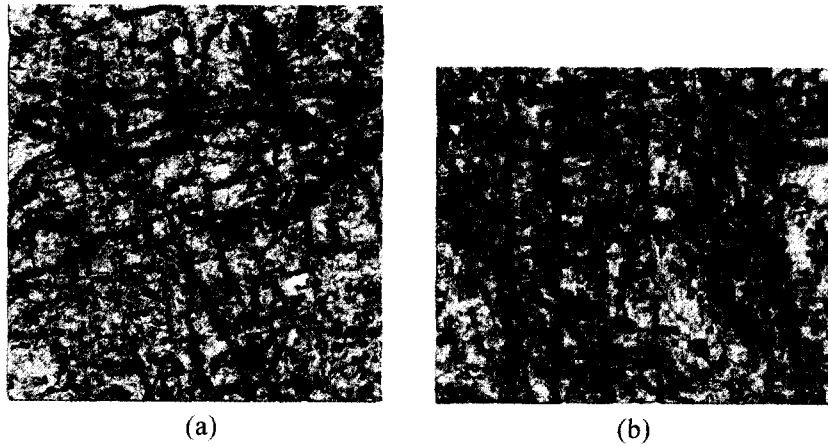


Fig. 15. Prewitt edge detector outputs.

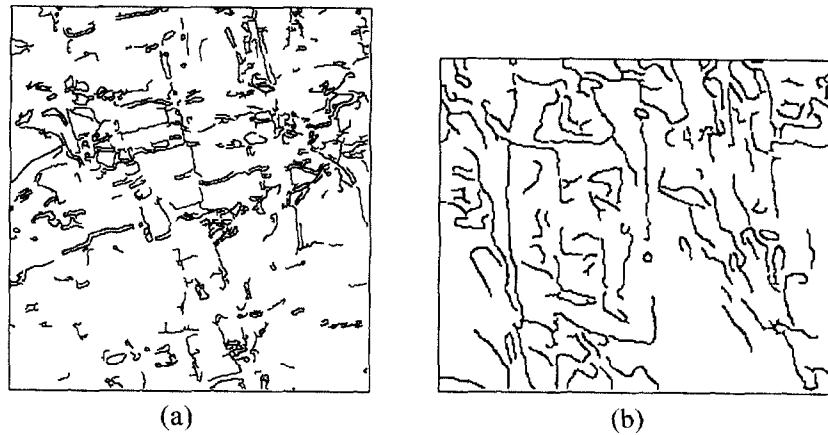


Fig. 16. Binary output images of Canny edge detector. (a) $\sigma = 0.9, L = 0.45, H = 0.90$, (b) $\sigma = 2.0, L = 0.5, H = 0.8$.

지 검출은 이차 미분 연산자를 이용하기 때문에 잡음에 민감한 단점이 있으며, 이를 보완하기 위한 사전 처리 과정으로 블러링 효과(blurring effect)를 주기 위한 가우스 연산자를 이용하였다. 하지만, 완전한 잡음 제거가 이루어지지 않기 때문에 Fig. 16(a)의 경우 단절된 에지, 즉 절리 트레이스를 추출하게 된다. 따라서, 이와 같은 단점을 보완하기 위해 형태학적 접근법인 팽창 및 축소 연산자를 연속적으로 적용하였다(Fig. 17). 이와 같은 처리는 두꺼운 에지의 경우 경계부 추출로 인해 단일 절리 트레이스에 대해 두 겹의 에지로 나타나는 경우에도 효과적임을 확인할 수 있다.

팽창 및 축소 연산자의 결과 화상은 단일 절리 트레이스로 근사된 에지를 추출하지만, 궁극적으로 폭이 1개의 화소로 구성되도록 하기 위해 추가적인 처리가 필요하다.

본 연구에서는 에지 검출 기법에 기초한 혼합 기법의 최종 단계로서 skeletonizing에 의한 세선화 처리를 수행하여 에지의 폭이 1개 화상인 결과 화상을 생성할 수 있었다(Fig. 18).

선형성 추출 기법인 Hough 변환 기법을 이용하여 절리 트레이스로 판단되는 에지를 추출하였다(Fig. 19). Hough 변환을 위해 필요한 기울기 임계값, 직선 임계값, 그리고 Hough 임계값 등 세 가지 매개변수는 각 입력 화상의 상태 및 절리 트레이스의 기하학적 성질(영속성)에 따라 다르게 설정되어야 한다. Hough 변환 기법은 이진화상에 적용하기 때문에, 적절한 임계값 처리를 통해 이진화상으로 변환하는 과정이 알고리즘 내에 내장되어 있다.

앞서 언급한 에지 검출의 경우와 같이 전역적 임계값

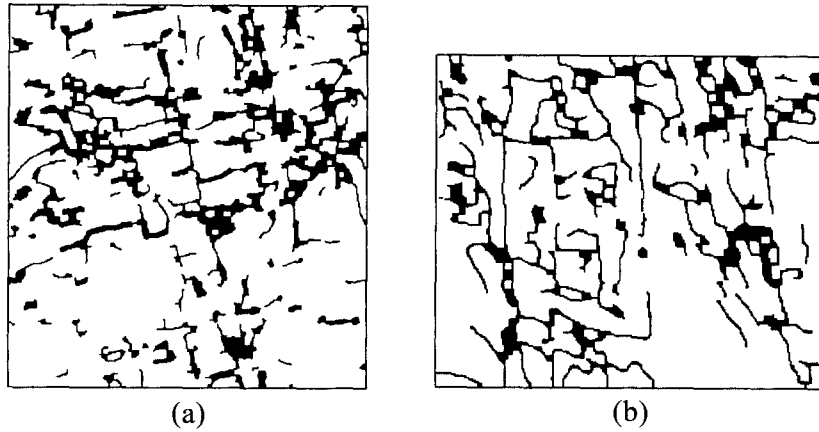


Fig. 17. Binary output images of dilation and erosion operator on Canny edge detector output images. (a) 5×5 mask, (b) 5×5 mask.

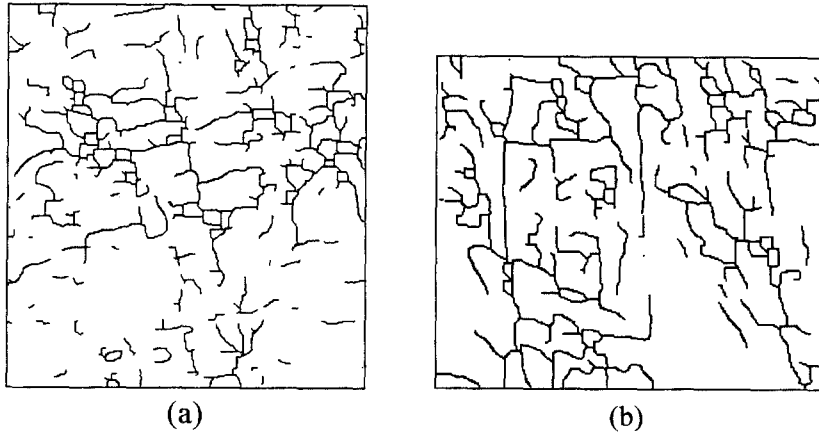


Fig. 18. Binary output images by Zhang-Suen skeletonizing transform of output images of Fig. 17.

으로 인하여 절리 트레이스로 판단될 수 있는 여러 에지를 추출하게 되며, 이로 인하여 Hough 변환 기법의 결과 화상은 여러 개의 직선 선분들로 구성되어 나타날 수 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해 팽창 및 축소 연산자를 적용하여 절리 트레이스로 판단되어지는 단일 에지로서 근사적으로 결합할 수 있다(Fig. 20). 최종적인 단계로서 에지 검출 기법에 기초한 혼합 기법의 경우와 같이 skeletonizing에 의한 세선화 기법을 적용하여 폭이 1개의 화소로 구성되는 절리 트레이스 결과 화상을 생성시켰다(Fig. 21).

두 가지 혼합기법을 비교하면, 일반적으로 선형적인 절리 트레이스가 지배적인 경우 Hough 변환 기법에 기초한 혼합기법이 나은 결과 화상을 보여주는 반면, 정확한 절리 밀도, 즉 단위 면적당 절리 트레이스의 길이를

추정하는 경우 에지 검출 기법에 기초한 혼합기법이 적합하다.

절리 트레이스에 대한 정확한 수학적 정의가 아직 존재하지 않으며, 본 연구에서 제시한 정의들도 두 가지 측면에서 한계성을 가진다.

(가) 두 가지 접근법 모두 에지 검출 기법을 포함하기 때문에 절리 트레이스를 제외한 암반의 기질(matrix) 부분에서 풍화나 기타 영향으로 인해 명도의 급격한 변화가 존재하는 부분을 하나의 에지로 판단할 가능성이 있다.

(나) Hough 변환에 기초한 접근법의 경우 절리의 선형성(linearity) 가정에 기초하기 때문에, 선형성이 낮은 절리 트레이스는 검출하기 어렵다.

두 가지 접근법은 공통적으로 전역적 매개변수, 즉 평

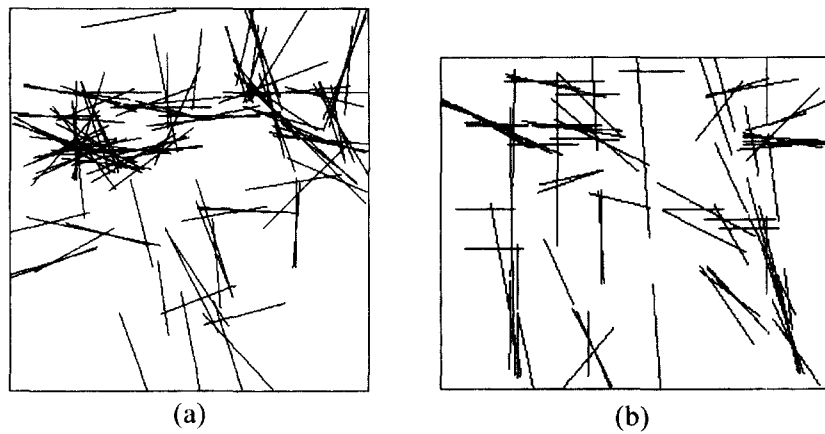


Fig. 19. Binary output images of Hough transform. (a) Gradient threshold = 14, Line threshold = 70, Hough threshold = 158, (b) Gradient threshold = 20, Line threshold = 40, Hough threshold = 180.

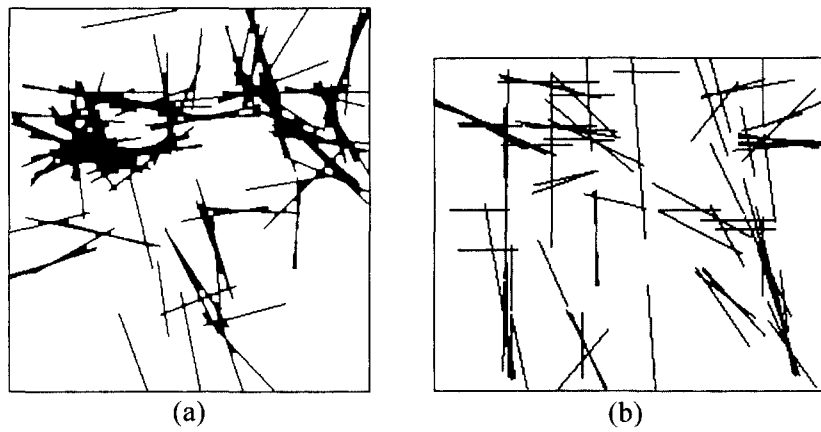


Fig. 20. Binary output images of dilation and erosion operator on Hough transform output images. (a) 5×5 mask, (b) 3×3 mask.

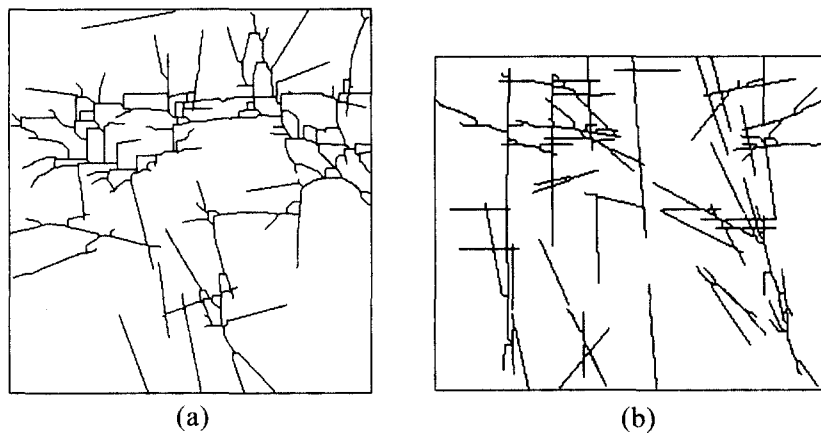


Fig. 21. Binary output images by Zhang-Suen skeletonizing transform of output images of Fig. 20.

균적으로 임계값을 설정하기 때문에 국부적으로 잘못된 결과 화상을 생성시킬 수 있다. 따라서, 상기 언급한 한계성은 이와 같은 전역적 매개변수의 설정에서 그 원인을 찾을 수 있다.

화상 전체 영역을 몇 개의 부영역(subregion)으로 분할하여 각 부영역에 해당되는 임계값의 적절한 설정을 대안적 방법으로 제시할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존 수작업에 의존하는 암반 절리 조사의 대안적 방법으로서 입체사진측량학적 접근법과 화상처리기법을 이용한 두 가지 혼합기법을 개발하였으며, 현장 적용을 통해 그 적용성 및 장단점을 분석하였다. 이상의 연구 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 암반 절리 조사 작업의 일괄처리를 위해 입체사진측량학적 접근법과 화상처리기법과 관련한 장비 및 프로그램을 개발하였다.

(2) 기존 수작업에 의한 절리 방향 측정시 절리면의 굴곡성에 기인하는 측정치의 변동과 같은 단점을 가지는 반면, 입체사진측량학적 접근법은 평균개념에 의해 절리면의 방향을 계산하기 때문에 합리적인 측정치를 얻을 수 있다는 장점을 가진다.

(3) 절리 트레이스 조사를 위해 개발한 두 가지 혼합 접근법을 적용한 결과, 팽창 및 축소 연산의 형태학적 접근법에 의해 비(非)트레이스 요소의 상당부분을 제거할 수 있었다.

(4) 선형성 검출을 위한 Hough 변환법에 기초한 접근법은 절리 트레이스의 기하학적 형태가 다소 왜곡되는 단점이 있으나, 에지 검출 기법에 기초한 접근법에 비해 개별 트레이스를 구분할 수 있다는 장점을 가진다.

사 사

본 연구는 한국학술진흥재단 자유공모과제연구비(1998-001-E01878)로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

부 록

- 1) 입체사진측량학에서 두 대의 카메라 사이의 직선거리
- 2) 카메라 중심은 카메라 중심에서 화상면에 내린 수

선과 만나는 점이며, 카메라 상수는 카메라 중심에서 화상면까지의 수직거리. 즉 주축 거리(principal distance)라고도 함.

- 3) interior orientation : 화상면에 대한 투영 중심(projection center)을 고정하는 값들에 의해 결정된다. (투영중심으로부터 화상면에 내린 수선의 발, 수선의 길이 등)
- 4) exterior orientation : 세 좌표와 세 각으로 결정된다.(exterior projection center의 좌표(x, y, z)와 카메라 방향을 결정짓는 두 개의 각, 그리고 카메라 방향에 대해 빛이 이루는 각)
- 5) 오차의 원인이 명확하여 보정할 수 있는 오차
- 6) 일반적으로 상품화된 인화지와 필름의 가로/세로비의 차이로 인해 현상시 필름의 일부분이 잘려져 나가는 것을 막기 위해 필름기준으로 인화하는 경우를 말한다.

참 고 문 헌

1. Bäsmann, H. and Besslich, P. W., 1995, Ad Oculos: Digital Image Processing, International Thomson Publishing, 431p.
2. Canny, J., 1986, A computational approach to edge detection, IEEE PAMI 8(6), 679-698.
3. Crosta, G., 1997, Evaluation of rock mass geometry from photographic images, Rock Mech. and Rock Eng., 30(1), 35-58.
4. Franklin, J. A., Maerz, N. H. and Bennett, C. P., 1988, Rock mass characterization using photoanalysis, Int. J. Min. Geol., 6, 97-112.
5. Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., 1993, Digital Image Processing, Addison-Wesley Publishing Company, 716p.
6. Hagan, T. O., 1980, A case for terrestrial photogrammetry in deep-mine rock structure studies, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., 17, 191-198.
7. Hallert, B., 1960, Photogrammetry-Basic Principles and General Survey, McGraw-Hill, 340p.
8. Pitas, I., 1995, Digital Image Processing Algorithms, Prentice Hall, 362p.
9. Ritter, G. X. and Wilson, J. N., 1996, Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra, 360p.
10. Tsoutrelis, C. E., Exadaktylos, G. E. and Kapenis, A. P., 1990, Study of the rock mass discontinuity system using photoanalysis, Rossmann(ed.), Proc. Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Wien, Balkema, Rotterdam, 103-112.
11. Wolf, P. R., 1983, Elements of Photogrammetry, McGraw-Hill, New York, 628p.

류 동 우



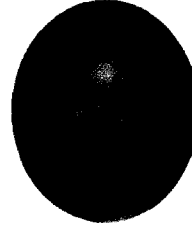
1994년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경
시스템공학부, 공학박사

Tel : 02-880-8701 (ext. 518)

E-mail : ryurock@rockeng.snu.ac.kr

현 재

이 유 리



1998년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사

Lab : 301-405-5471

E-mail : yurilee@glue.umd.edu

현 재 미국 Maryland대학 박사과정 재학중

장 윤 섭



1999년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사

Tel : 02-880-8283

E-mail : ychang@geo.snu.ac.kr

현 재 서울대학교 지구환경시스템공학부, 석사과정

이 회 근



1970년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1973년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사
1977년 일본 교오또대학(京都大學)
대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 02-880-7222

E-mail : irram@plaza.snu.ac.kr

현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

박 형 동



1988년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1990년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사
1994년 영국 런던 대학교 임페리얼
칼리지 박사

Tel : 02-880-8808

E-mail : ihpark@gong.snu.ac.kr

현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수
