

# 도로면 크랙실링 자동화를 위한 머신비전 알고리즘의 개발

## The Development of a Machine Vision Algorithm for Automation of Pavement Crack Sealing

유 현 석\* · 이 정 호\*\* · 김 영 석\*\*\* · 김 정 렬\*\*\*\*

Yoo, Hyun-Seok · Lee, Jeong-Ho · Kim, Young-Suk · Kim, Jung-Ryeol

### 요 약

크랙실링 자동화 장비는 도로면에 존재하는 크랙 네트워크의 위치를 정확히 탐지 및 맵핑(mapping)하고 이를 모델링(modeling)한 후 경로 계획(path planning) 과정을 통해 크랙 네트워크의 중앙(spine)을 따라 실런트(sealant)를 분사하여 크랙을 효과적으로 실링할 수 있도록 하는 장비이다. 따라서 실링될 크랙 네트워크의 정확한 위치를 모델링하기 위한 디지털 영상처리 알고리즘 및 최적 경로계획 알고리즘의 개발은 품질 및 생산성, 경제성 측면에서 크랙실링 자동화 장비의 성공적 개발을 위한 핵심 연구 주제로 인식되어 왔다. 기존 국외 도로면 크랙실링 자동화 장비에 적용된 디지털 영상처리 알고리즘은 크랙을 탐지하고 모델링하는 일련의 과정을 전적으로 컴퓨터에 의존하는 완전자동화 방식과 인간과 컴퓨터 간의 협업체제를 이용한 반자동화 방식으로 양분되어 개발되었다. 그러나 도로면에 존재하는 다양한 노이즈 및 그림자 등을 포함한 작업영역 내에서의 열악한 영상처리 여건 등으로 인해 만족할 만한 성과를 제시하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비를 개발함에 있어 디지털 영상처리 기술을 기반으로 한 완전자동화 방식과 그래픽 프로그래밍을 활용한 반자동화 방식이 지닐 수 있는 강점만을 혼용하여 신속하고도 정확하게 크랙 네트워크를 모델링하고 최적 경로계획을 바탕으로 크랙실링 작업을 수행할 수 있는 머신비전 알고리즘을 제시하고자 한다.

키워드 : 크랙, 크랙실링, 맵핑, 모델링, 경로계획, 디지털 영상처리, 머신비전

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

교통량이 많은 대도시나 고속도로에서 수행되는 도로면 유지보수 작업의 경우 노무자가 열악한 작업환경에서 작업을 수행해야 하므로 안전성 확보가 어렵고, 숙련공 부족 및 현장 노무자의 잦은 이직은 현 도로면 유지보수 작업의 생산성 및 품질저하를 가져오고 있다. 일반적으로 도로면 유지보수 공사는 노면의 파손정도에 따라 다양한 공법의 사용이 가능하나 크랙실링(crack sealing)공법은 예방적 차원에서 도로면에 발생된 크랙을 초기

에 효과적으로 유지보수 할 수 있는 방법이다. 최근 국내에서도 도로면 크랙실링 공법의 효용성이 인지되어 연간 작업 물량이 지속적으로 증가하는 추세이다. 선진 외국의 경우 크랙실링 공법의 이점 및 도로면 유지보수 공사의 위험 요소를 인식하여 1990년대 초반부터 크랙실링 자동화 장비의 개발을 위한 연구를 수행하여 현재 실용화 단계에 있고, 국내에서도 2001년부터 도로면 크랙실링을 위한 자동화 장비를 개발해 오고 있다. 한편, 크랙실링 자동화 장비는 포장도로의 파손률(deterioration rate)을 분석하여 유지보수의 시기 및 방법을 제시하는 포장관리시스템(PMS)과는 그 속성은 유사하나 비전 및 제어 알고리즘의 개발 측면에서 매우 상이한 개념의 장비이다. 즉, 크랙실링 자동화 장비는 도로면에 존재하는 크랙 네트워크의 위치를 정확히 탐지 및 맵핑(mapping)하고 이를 모델링(modeling)한 후 경로 계획(path planning) 과정을 통해 크랙 네트워크의 중앙(spine)을 따라 실런트(sealant)를 분사하여 크랙을 효과적으로 실링할 수 있도록 하는 장비이다. 따라서 실링되어질 크랙 네트워크의 정

\* 학생회원, 인하대학교 건축공학과, 석사과정

\*\* 학생회원, 인하대학교 건축공학과, 박사과정

\*\*\* 종신회원, 인하대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

\*\*\*\* 일반회원, 한국건설기술연구원, 연구원

○ 이 연구는 건설교통부 2001년 산학연 공동연구 개발사업(과제번호: 제안 E-01) 결과의 일부임.

확한 위치를 모델링하기 위한 디지털 영상처리 알고리즘 및 최적 경로계획 알고리즘의 개발은 품질, 생산성, 경제성 측면에서 크랙실링 자동화 장비의 성공적 개발을 위한 핵심 연구 주제라 할 수 있다.

특히, 현재까지 기존 국외 도로면 크랙실링 자동화 장비에 적용된 디지털 영상처리 알고리즘은 크랙을 탐지하고 모델링하는 일련의 과정을 전적으로 컴퓨터에 의존하는 완전자동화 방식과 인간과 컴퓨터 간의 협업체제를 이용한 반자동화 방식으로 분류할 수 있다. 그러나 도로면에 존재하는 다양한 노이즈(oil marks, skid marks, previously sealed cracks, inherent noise) 및 그림자 등을 포함한 작업영역(workspace) 내에서의 열악한 영상처리 여건 등을 고려해볼 때 두 방식 모두가 만족할 만한 성과를 제시하지 못했으며 이는 정확성(품질)이나 작업생산성 관점에서 개발 장비의 실용화를 저해하는 주요 원인으로 지적되어 왔다. 따라서 본 연구의 목적은 크랙실링 자동화 장비를 개발함에 있어 디지털 영상처리 기술을 기반으로 한 완전자동화 방식과 그래픽컬 프로그래밍을 활용한 반자동화 방식이 지닐 수 있는 강점만을 혼용하여 신속하고도 정확하게 크랙 네트워크를 모델링하고 최적 경로계획을 바탕으로 실링 작업을 수행할 수 있는 머신비전 알고리즘을 제시하는 것이다.

1.2 연구의 범위 및 방법

도로면 크랙실링 작업의 자동화를 위해 요구되는 머신비전 알고리즘의 개발을 위해 본 연구에서 수행한 연구의 범위 및 방법은 다음과 같다.

- 1) 국외에서 개발된 기존 도로면 크랙실링 자동화 장비의 개발 현황을 고찰하고 장비 개발을 위해 필수적으로 요구되는 머신비전 알고리즘의 주요 구성 요소 및 중요성을 분석하였다.
- 2) 기존 자동화 장비에 적용된 주요 디지털 영상처리(digital image processing) 알고리즘을 분석하여 문제점을 도출하고 완전, 반자동 방식을 혼용한 알고리즘 개발의 필요성을 제시하였다.
- 3) 크랙 네트워크의 정확한 탐지를 위한 이미지 전 처리(pre-processing) 작업으로, 도로면 크랙 네트워크 영상의 이진화 및 노이즈 제거 알고리즘을 제안하였다.
- 4) 크랙실링 자동화 장비의 말단 장치(turret)가 크랙 네트워크의 중앙을 따라 신속·정확히 움직이며 실린트를 분사할 수 있도록 하는 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 알고리즘을 제안하였다.
- 5) 크랙실링 자동화 장비의 작업 생산성 향상을 위해 시간 효과적으로 크랙실링 작업을 수행하기 위한 최적 경로계획

알고리즘을 개발하였다.

- 6) 제안된 머신비전 알고리즘을 현재 개발 중인 크랙실링 자동화 장비에 적용하여 정확성 및 생산성을 측정함으로써 머신비전 알고리즘의 타당성과 효용성을 검증하였다.

2. 크랙실링 자동화 장비의 개발 사례 및 머신비전 알고리즘의 중요성

2.1 크랙실링 자동화 장비의 개발 현황 및 비전알고리즘의 중요성

북미나 유럽과 같은 선진 외국에서는 산·학 협동 연구를 통해 크랙실링 자동화 장비의 모체 및 머신비전 알고리즘의 개발을 위한 연구 노력을 기울이고 있다. 특히, 미국에서는 연방교통국(FHWA)의 지원 하에 CMU Laboratory Prototype(1990), CMU-UT Field Prototype(1992), CalDavis Field Prototype(1993), UT ARMM(1999), UC Davis-LCSM(2002) 등과 같은 크랙실링 자동화 장비가 개발되어 현재 실용화 단계에 이르고 있는 것으로 분석되었다(그림 1).


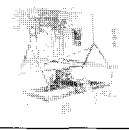
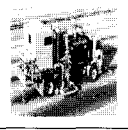
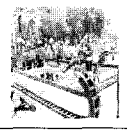

				
CMU Laboratory Prototype(1990)	CMU-UT Field Prototype(1992)	CalDavis Field Prototype(1993)	ARMM(1999)	UC Davis-LCSM(2002)

그림 1. 크랙실링 자동화 장비의 개발 사례

도로면 크랙실링 자동화 장비를 개발함에 있어 필수적으로 요구되는 머신비전 알고리즘은 일반적으로 크랙 네트워크의 탐지, 맵핑 및 모델링 작업을 포함하는 디지털 영상처리 알고리즘(이하 영상처리 알고리즘)과 개발 장비가 크랙을 시간 효과적으로 실링해 나갈 수 있도록 하는 최적 경로계획 알고리즘으로 구성된다(그림 2). 영상처리 알고리즘은 다시 이미지 전 처리 작업인 이진화 알고리즘과 도로면에 발생된 크랙 이외의 노이즈를 완전히 제거하는 노이즈 제거 알고리즘(noise elimination algorithm), 개발 장비의 말단장치가 크랙 네트워크의 중앙을 따라 움직이며 실린트를 분사할 수 있도록 하는 맵핑 및 모델링 알고리즘(mapping and modeling algorithm)으로 구성된다. 다음으로 최적 경로계획 알고리즘은 개발 장비의 말단장치가 크랙 네트워크 중 원점(home point)으로부터 가장 가까운 크랙 라인에 대한 실링 작업을 마친 후 다음 실링 작업을 위해 어느 크랙 라인으로 이동해야 할지에 대한 작업 생산성 향상 관점에서 의 최적 경로를 제공하는 것이다. 따라서 크랙실링 자동화 장비

를 개발함에 있어 이러한 머신비전 알고리즘의 정확성, 신속성(데이터 처리 속도) 및 편의성을 고려한 사용자 인터페이스 설계 등은 개발 장비의 품질, 작업 생산성 및 실용화에 지대한 영향을 미치는 핵심 요소기술이다.

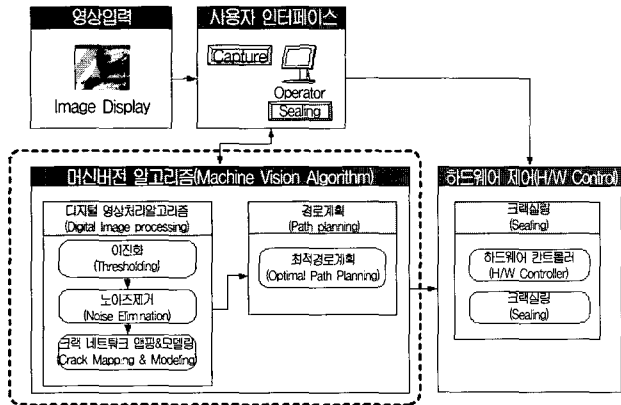


그림 2. 크랙실링 자동화 장비의 머신비전 알고리즘

## 2.2 크랙실링 자동화를 위한 주요 디지털 영상처리 알고리즘의 분석

본 연구에서는 기존 크랙실링 자동화 장비에 적용된 Haas(1990)와 Kim(1997)의 영상처리 알고리즘을 분석하여 응용 가능한 기술과 문제점을 도출하고 완전, 반자동화 방식의 강점을 혼용한 디지털 영상처리 알고리즘 개발의 필요성을 제시하고자 한다.

### (1) Haas의 멀티 레이어 쿼드트리(multi-layer quadtree) 알고리즘

Haas의 멀티 레이어 쿼드트리 알고리즘은 CCD 카메라와 레이저 레인지 스캐너(laser-range scanner)로부터 입력된 크랙 네트워크 영상과 프로파일(profile) 데이터 간의 합성(sensor fusion) 및 영상처리 과정을 통해, 실링되어질 크랙 네트워크를 탐지하고 맵핑하는 완전자동화 방식의 영상처리 알고리즘이다(그림 3). Haas가 제안한 영상처리 알고리즘은 다음과 같은 7단계의 과정으로 이루어져 있다.

- ① 카메라를 통해 입력된 크랙 네트워크 영상의 이진화(thresholding)
- ② 미디언 필터링(median filtering)에 의한 노이즈 제거
- ③ 골격화(skeletonization)
- ④ 4-connecting을 통한 객체 연결(edge linking)
- ⑤ 멀티 레이어 쿼드 트리 변환
- ⑥ 결합(union) 및 교차(intersection) 연산을 통해 노이즈 컴

포넌트(small component) 제거

- ⑦ 레이저 영상과 컴포넌트 데이터 간의 합성 및 비교를 통한 데이터 수정 및 크랙 네트워크 데이터 도출

Haas의 경우, 크랙 실링 자동화 장비를 개발하는 초기단계에 있어 완전 자동화를 시도하였으며 부분적으로 그 실현 가능성을 제시하였다는 점에서는 매우 혁신적인 영상처리 알고리즘을 개발하였다고 볼 수 있다. 그러나 고가의 레이저 레인지 스캐너를 활용하여 영상 데이터와 프로파일 데이터 간의 합성을 시도하였음에도 불구하고 결국 도로면(background)과 크랙 네트워크(object)간의 미세한 명암 차이, 그림자, 기후 조건에 따른 영상의 밝기 변화, 도로면에 존재하는 다양한 노이즈 등의 요인으로 인해 모델링 결과(크랙 인식률)의 정확성이 떨어지고 영상처리에 과다 시간이 소요되었다는 것은 실용화 관점에서 문제점으로 분석되었다.

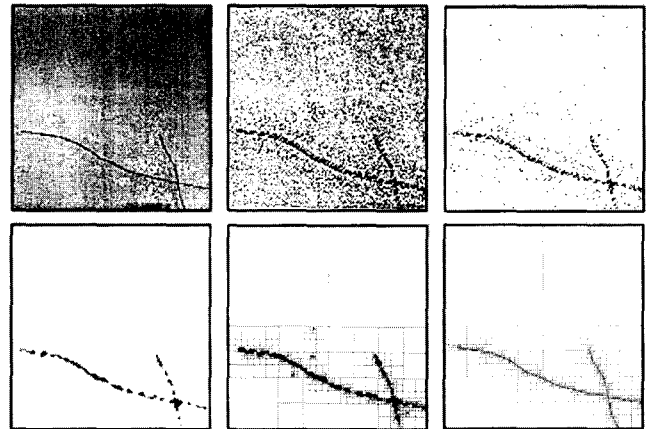


그림 3. 멀티 레이어 쿼드트리를 이용한 도로면 크랙 네트워크의 추출 과정(Haas, 1990)

### 2) Kim의 매뉴얼 맵핑(manual mapping) 및 라인 스냅핑(line snapping) 알고리즘

Kim은 Haas의 선행 연구 및 기존 포장관리시스템의 개발을 위해 적용된 영상처리 알고리즘의 분석을 통해 완전자동화 방식에 의한 크랙 네트워크 모델링의 문제점을 인식하고 그래픽컬 프로그래밍 기술을 응용한 반자동 형식의 영상처리 알고리즘을 제안하였다.

인간과 컴퓨터 간의 협업체제를 활용한 Kim의 영상처리 알고리즘 절차는 다음과 같다

- ① 카메라를 통해 터치 모니터(touch-sensitive monitor) 상에 도로면 영상이 입력되면 장비 운영자는 크랙 네트워크를 육안으로 확인함과 동시에 펜(stylus)을 이용하여 실링되어질 크랙 라인에 대한 맵핑(manual mapping) 작업을 수행

- ② 컴퓨터는 장비 사용자가 입력한 라인 데이터를 기반으로 로컬 서치(local search)를 수행하고 크랙 중심부를 자동으로 탐지하여 매뉴얼 맵핑 라인을 보정(line snapping)해 줌으로써 장비 사용자에게 의한 오류(human hand-eye coordination errors)를 수정하고 크랙 네트워크의 1차 모델링 완성
- ③ 컴퓨터에 의한 라인 스냅핑 결과에 오류가 발생되었을 경우 장비 사용자에게 의한 라인 에디팅(line editing with rubber banding capability) 작업을 통해 최종 크랙 네트워크 모델링 완성

특히, Kim의 라인 스냅핑 알고리즘은 사용자에게 의한 매뉴얼 맵핑의 오류를 신속히 보정할 수 있고 기존 완전 자동화 방식에 비해 크랙 네트워크의 정확한 모델링이 가능하며 주변 환경 요인으로 인한 영향을 거의 받지 않는 장점이 있다. 그러나 모델링을 위해 장비 운영자가 직접 펜으로 작업을 수행하므로 크랙 네트워크가 복잡할 경우 매뉴얼 맵핑을 위해 소요되는 시간이 긴 단점을 지니고 있는 것으로 분석되었다.

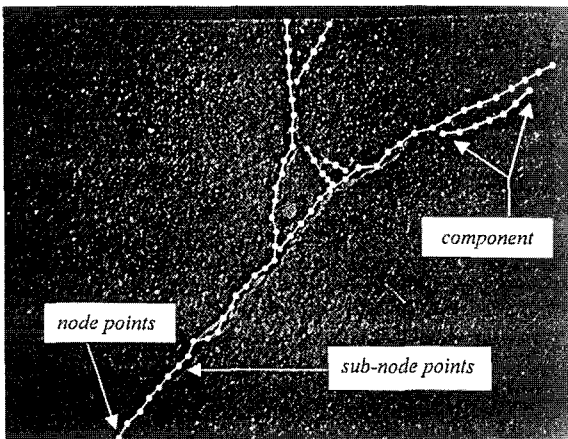


그림 4. 라인 스냅핑 알고리즘(kim, 1997)

문헌 및 기존 영상처리 알고리즘을 고찰해 본 결과, 앞서 언급된 바와 같이 완전자동화 및 반자동화 방식 모두 실용화 관점에서 개선의 여지가 있었으며 다음과 같은 장단점을 지니고 있는 것으로 분석되었다. 먼저 완전자동화 방식의 경우, 영상처리 알고리즘의 완성도(completeness)나 컴퓨터의 연산처리 속도를 고려해 볼 때 크랙 네트워크의 신속한 모델링은 가능하나 도로면에 존재하는 다양한 노이즈 및 작업영역 내에서의 열악한 영상처리 조건으로 인해 모델링 결과에 있어 오류의 발생 가능성이 매우 크다는 것이다. 반면, 그래픽 프로그래밍 기술을 기반으로 한 반자동화 방식의 경우 크랙 네트워크의 정확한 모델링은 가능하나 작업 생산성 관점에서 매뉴얼 맵핑 작업을 수행하는데 적지 않은 시간이 소요될 수도 있다는 단점을 지니고 있다. 따라서 본 논문에서는 완전자동화 방식과 반자동화 방식이 지닐 수 있는 강점만을 혼용하여 신속하고도 정확하게 크랙 네트워크를 맵핑하고 모델링할 수 있는 영상처리 알고리즘을 제안하고자 한다.

### 3. 크랙실링 자동화를 위한 머신비전 알고리즘의 개발

앞서 언급된 바와 같이, 크랙실링 작업의 자동화를 위한 머신비전 알고리즘은 영상처리 알고리즘과 경로계획 알고리즘으로 구성된다. 크랙 네트워크의 맵핑 및 모델링을 위한 영상처리 알고리즘은 크랙 네트워크 탐지를 위한 전 처리 작업으로 이진화 및 노이즈 제거 과정을 선행하며, 팽창 연산(dilation process) 및 세선화 과정(thinning process)을 통해 크랙 네트워크의 중앙(spine)을 따라 뼈대(skeleton)를 구성하여 이를 일정간격으로 모델링하고 영상처리 과정에서 끊어진 크랙을 이어주는 에지링킹(edge linking)과정을 포함한다. 실링되어질 크랙 네트워크의 모델링이 완성되면 크랙실링 자동화 장비의 말단 장치를 효과적으로 이동시키기 위한 최적 경로 계획이 수립된다(그림 5).

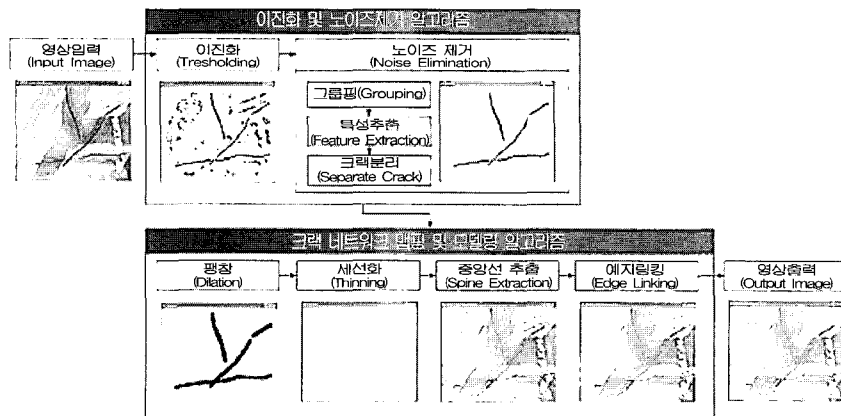


그림 5. 크랙실링 자동화를 위한 머신비전 알고리즘의 구성요소 및 처리 절차

3.1 이진화 (thresholding)

CCD 카메라에 의해 촬영된 영상은 프레임 그래버 보드 (frame grabber board)를 통해 디지털 신호로 변환된다. 일반적으로 사용되는 8비트 그레이 영상(8bits gray image)은 M(가로)×N(세로)개의 픽셀로 구성되어 있으며 각 픽셀에 대한 영상 데이터는 2차원 배열(array)에 저장된다. 또한, 각 픽셀에 대한 영상 데이터는 명도값(intensity value)을 나타내는 0(흑)~255(백) 사이의 정수 값을 가지고 있다.

이진화란 디지털 영상을 흑(0)과 백(255) 두 개의 값으로만 표현하는 기법으로써 0과 255사이의 임의의 값으로 임계값(threshold)을 정하고 해당 픽셀의 명도값이 임계값보다 작으면 흑(0)으로, 임계값보다 크면 백(255)으로 변환하는 기법이다. 본 연구에서는 도로면 영상에서 크랙 네트워크와 도로면을 분리하기 위해 이진화 기법을 사용하였으며, 도로면 영상의 특성을 분석하여 임계값을 동적으로 찾기 위해 히스토그램(histogram)을 이용하였다. 히스토그램은 그림 6과 같이 영상을 이루고 있는 각 픽셀의 명도값에 대한 빈도수를 나타낸 그래프로 물체와 배경을 구분하기 위해 사용된다.

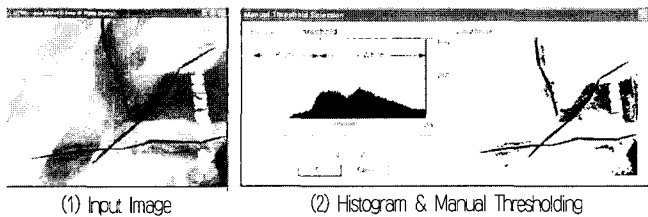


그림 6. 히스토그램과 이진화

이진화 방법에는 여러 가지가 있으나 크게 전역적 이진화 방법(global thresholding)과 지역적 이진화 방법(local thresholding)으로 구분된다. 전역적 이진화란 화소 (i,j)의 명도값을  $g(i,j)$ 라 하고,  $b(i,j)$ 를 이진화된 값이라고 하면, 전역적 이진화 방법은

$$b(i,j) = \begin{cases} 1, & \text{if } g(i,j) \geq T \\ 0, & \text{if } g(i,j) < T \end{cases} \quad \text{식 (1)}$$

식 1과 같이 표현된다. 여기서 T는 전역적 임계값으로 전체 영상에 대하여 획일적으로 적용되므로 이진화 결과는 T의 값에 따라 좌우된다. 전역적 이진화로 가장 대표적인 방식은 명도값으로 히스토그램을 분석하여 두 개의 봉우리 사이의 골짜기를 찾는 방법(Rosenfeld, 1974)이다. Rosenfeld의 전역적 이진화 방식은 두 개의 봉우리가 하나는 배경(white), 다른 하나는 추출하고자 하는 목적물(black)에 해당한다는 가정을 이용한 것이다.

반면, 지역적 이진화 방법은 이진화하고자 하는 화소의 주변 화소들의 명도값까지 함께 고려하여 임계값을 결정하는 방법이다. 지역적 이진화 방식의 기본적인 원리는 마스크<sup>1)</sup>의 중심화소가 주변보다 어두우면 흑(0)으로, 주변보다 밝으면 백(255)으로 변환하는 것이다. 지역적 이진화 방법은 영상의 지역적인 특징을 잘 반영할 수 있는 장점이 있지만 실행속도가 느린 단점이 있다.

본 연구에서는 기존 영상 처리 분야에서 일반적으로 사용되고 있는 이진화 방법(average method, mode method, p-tile method, iterative method, otsu method, local average method, local p-tile method)들을 도로면 영상을 대상으로 하여 적용 실험을 수행하였다. 또한, 이진화된 결과의 성능을 판단하기 위해 반드시 만족되어야 할 세 가지 조건을 다음과 같이 설정하였다.

- ① 크랙의 손실(loss)이 없어야 한다.
- ② 노이즈로 인해 크랙이 확장되어서는 안된다.
- ③ 다양한 영상에 대해 동적으로 임계값을 판단 할 수 있어야 한다.

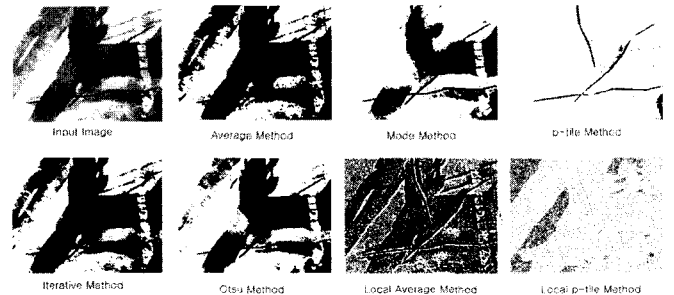


그림7. 기존 이진화 알고리즘 적용결과

그림 7과 같이 기존 이진화 알고리즘에 도로면 영상을 적용한 결과 대부분의 알고리즘이 상기 세 가지 조건을 만족하지 못하였다. 특히 전역적 이진화 방법의 경우 히스토그램 분석결과 도로면과 크랙을 완전하게 분리할 수 있는 임계값이 존재하지 않았다.

따라서, 일반적인 영상에서 사용되는 기존 전역적 이진화 알

1) 마스크란 어떤 화소 p(i,j)를 중심으로 특정 영역에 대하여 중심화소와 이웃 화소의 범위를 의미한다.

(i-1,j-1)	(i,j-1)	(i+1,j-1)
(i-1,j)	<b>p(i,j)</b>	(i+1,j)
(i-1,j+1)	(i,j+1)	(i+1,j+1)

3×3마스크

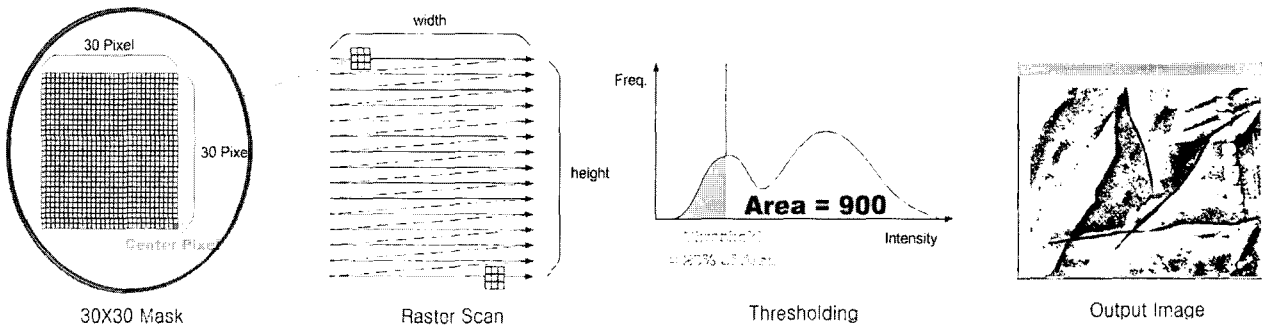


그림 8. 마스크의 크기변화와 중심화소의 이동에 따른 결과

고리즘을 도로면 영상에서 크랙과 노이즈를 분리하기 위해 적용할 수 없는 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 크랙의 형태를 보전하며 이진화를 수행하기 위해 새로운 방식의 지역적 이진화 알고리즘을 개발하였다. 지역적 이진화 방식은 전역적 이진화 방식에 비해 노이즈가 심하지만 크랙 개체의 형태가 비교적 온전히 유지되는 장점이 있다. 본 연구에서 제안한 지역적 이진화 알고리즘은 그림 8과 같이 30×30 픽셀 크기의 마스크를 생성하고 검사 대상 화소의 위치를 모서리의 한 점으로 정한 다음 래스터 스캔(raster scan) 방식으로 마스크 검사를 수행한다. 마스크는 모두 900(30×30)개 화소의 명도값을 가지게 되고 검사 대상 화소의 명도값이 마스크에 대한 히스토그램의 상위 20% 내에 존재하면 흑(0)으로 기록한다. 그림 8의 '30×30 마스크' 영상과 같이 마스크의 우-하단 픽셀을 검사 대상 화소로 정하여 이진화한 결과는 모든 크랙 네트워크의 우측방향 노이즈가 완벽히 제거된 그림 8의 'Output Image'와 같다. 또한, 크랙 네트워크 좌측, 상부, 하부에 존재하는 노이즈를 제거하기 위해 마스크의 나머지 세 개 모서리에 대해 같은 연산을 수행하고 이진화가 수행된 4개의 영상

을 합성하면 그림 9와 같은 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 이미지 합성 과정에서 임의의 화소  $p(i,j)$ 에 대해 4개 영상 모두 흑(0)이면 흑(0)으로 기록하고 나머지 모든 경우는 백(255)으로 처리하였다. 본 연구에서 제안한 이진화 알고리즘을 적용한 결과 이진화가 수행된 도로면 영상은 노이즈를 많이 포함하고 있지만 크랙 네트워크의 형태를 비교적 온전하게 유지하였다(그림 9의 'Output Image'). 또한, 다양한 영상에 대하여 일관된 결과를 보이는 장점이 있는 것으로 분석되었으나 이진화 작업을 위해 연산 시간이 과다한 단점을 가지고 있었다. 따라서, 본 연구에서는 이진화를 위한 연산 시간의 단축을 위해 큐(queue)형식의 마스크와 버퍼(buffer)를 사용하였다. 큐(queue)는 데이터 저장 구조로서 선입선출(FIFO, first-in first-out)방식으로 입출

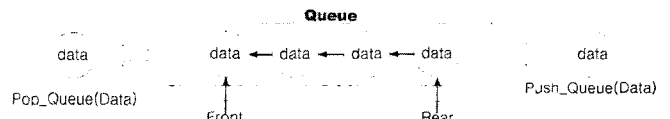


그림 10. 큐의 구조

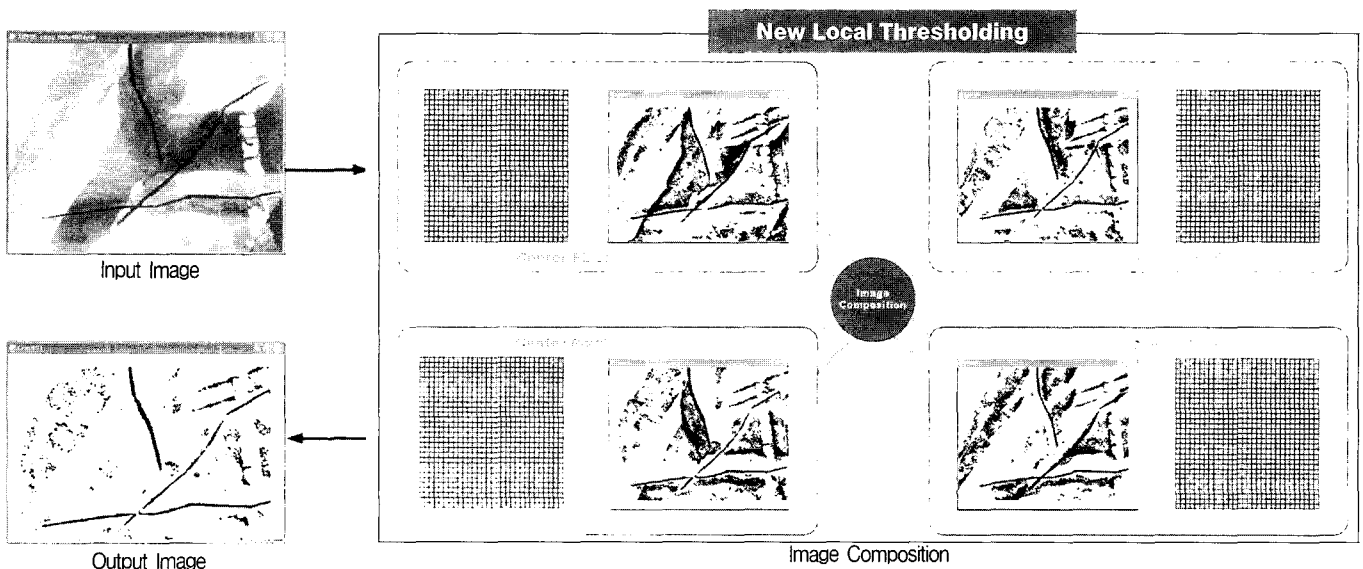


그림 9. 마스크의 중심화소 이동과 합성

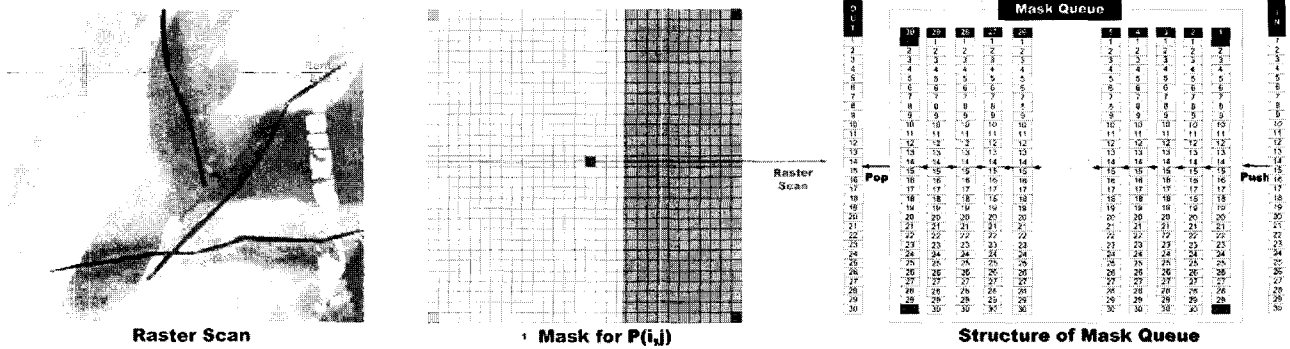


그림 11. 마스크의 입출력

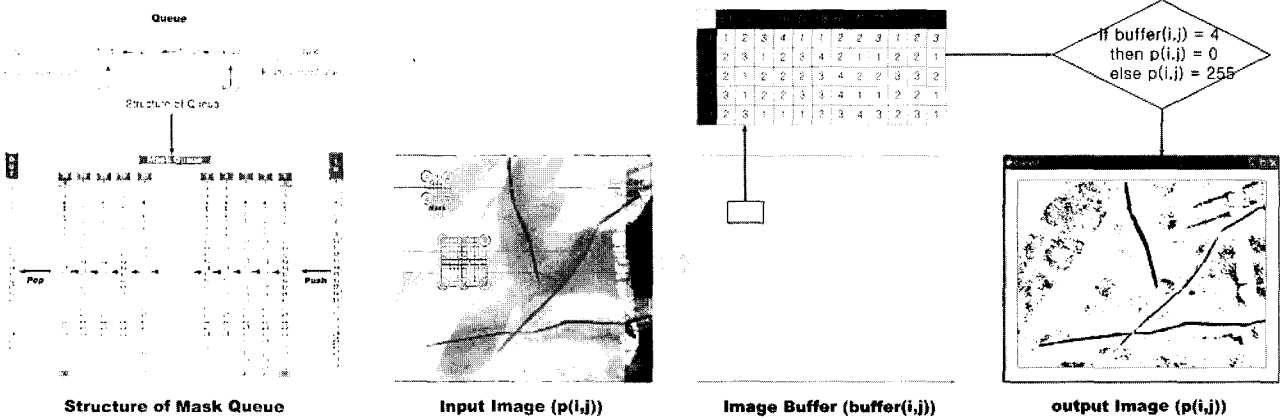


그림 12. 고속연산을 이용한 이진화 알고리즘

력 되는 구조이다(그림 10). 큐는 2개의 포인터(front, rear pointer)를 가지고 있는데 첫 번째 포인터(front pointer)는 처음 입력된 데이터를 가리키고 두 번째 포인터(rear)는 마지막에 입력된 데이터를 가리킨다.

큐에 임의의 데이터 d를 입력(push\_queue(&d))하면 마지막 데이터를 가리키던 포인터(rear pointer)는 d를 가리킨다. 또한, 큐에 있는 데이터를 출력(pop\_queue(&d))하면 첫 번째 포인터(front pointer)가 가리키고 있던 데이터가 출력되고 포인터는 다음 데이터를 가리킨다. 본 연구에서는 큐형태의 자료구조를 사용함으로써 마스크에 해당하는 영역의 명암값을 로드(load)하는 시간을 단축하였다. 그림 11과 같이 래스터 스캔 방식의 마스크 연산에서 임의의 화소 p(i,j)에 대해 마스크는 900(30×30)개의 명암 값을 로드해야 한다. 그러나 임의의 화소 p(i,j)에 대한 마스크와 다음 화소 p(i, j+1)에 대한 마스크 비교 결과 중복하여 로드해야 하는 데이터가 840(30×28)개 존재한다. 즉, 래스터 스캔 방식에 따라 한 픽셀을 이동하면서 스캔을 수행할 때마다 30개의 데이터가 새로 마스크에 포함되고 기존 30개의 데이터가 삭제된다. 이 때 입출력 데이터(큐 상의 rear 30, front 30 픽셀)를 제외한 나머지 데이터(rear 30픽셀과 front 30픽셀을 제외한 840픽셀)는 동일하다. 따라서, 30개의 명암값을 저장한 배

열(array)을 하나의 데이터로 하는 큐 형태로 바꾸고 입출력되는 데이터만 히스토그램에 반영함으로써 이진화 작업을 고속으로 수행할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 이진화 작업의 보다 빠른 수행을 위해 영상과 같은 크기의 데이터 임시저장 공간인 버퍼(buffer)를 사용하였다. 버퍼를 사용한 이미지 처리 과정은 마스크의 네 모서리를 검사대상 화소로 설정하고 기존과 같은 방식으로 히스토그램의 임계값을 설정한 다음 마스크의 각 모서리 픽셀이 임계값보다 낮으면 해당 버퍼에 1의 값을 가산하고 임계값보다 높으면 0을 가산한다. 즉, 각 마스크마다 네 모서리 값을 한 번씩 버퍼에 기록하게 되므로 전 영역에 대한 마스크 연산을 래스터 스캔방식으로 수행하면 해당 버퍼는 0에서 4사이의 값을 가지게 된다. 버퍼의 각 픽셀 중 4의 값을 가지는 픽셀만은 흑(0)으로 나타낼 경우의 결과는 그림 9의 4가지 영상을 합성한 결과와 일치한다. 상기와 같이 본 연구에서는 버퍼를 사용함으로써 중심화소의 위치에 따라 4번의 래스터 스캔을 수행해야만 하는 과정을 한 번의 래스터 스캔으로 처리할 수 있도록 함으로써 이진화를 위한 연산시간을 단축하였다.

큐 자료구조와 버퍼를 사용한 이진화 연산의 전체적인 과정은 그림 12와 같으며, 이진화 수행을 위해 소요된 평균 연산 시간은 0.23초이다.

3.2 노이즈 제거 (noise elimination)

그림 12와 같이 이진화 과정을 마친 영상은 크랙네트워크 주변을 제외하고 많은 노이즈가 존재하므로 이진화 과정에서 분리하지 못한 노이즈를 삭제(elimination)하기 위한 알고리즘의 개발이 요구된다. 본 연구에서는 이진화된 도로면 영상에서 서로 연결된 인접 흑화소 영역을 그룹핑(grouping)함으로써 각각의 객체(object)로 설정하였다. 또한, 각 객체에 일정한 라벨을 부여(labeling)하고, 각 객체의 기하학적인 특성을 추출(feature extraction)함으로써 크랙 네트워크와 노이즈를 분리할 수 있도록 하였다.

그림 13은 그룹핑 과정을 통해 서로 인접된 흑화소를 하나의 객체로 인식(identification)한 것이다.

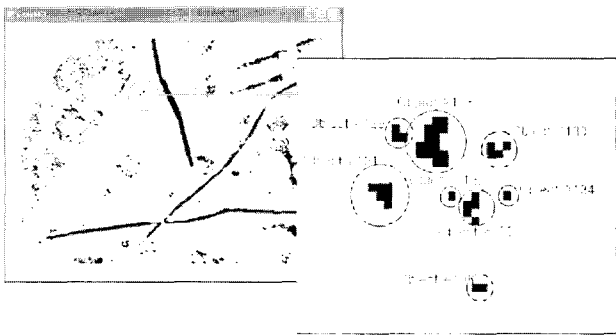


그림 13. 인접 화소의 그룹핑

본 연구에서는 그룹핑된 각 객체의 특성을 추출하기 위해 라벨링(labeling) 알고리즘을 사용하였다. 라벨링 알고리즘은 서로 인접한 흑화소 영역을 값이 동일한 하나의 번호로 변환하는 알고리즘으로 탐색, 라벨링, 중심 이동의 3가지 단계를 반복적으로 수행한다. 라벨링 알고리즘을 통해 인접 흑화소 영역을 번호로 변환하면 객체로 쉽게 인식할 수 있고 각 객체의 면적이나 중심 좌표와 같은 기하학적인 특성을 추출할 수 있다. 그림 14와 같이 3×3화소 크기의 마스크를 기반으로 래스터 스캔 방식의 탐색을 수행하고, 마스크가 흑화소(0)를 만나면 해당 흑화소를 1로 라벨링한다. 1로 라벨링된 화소의 위치로 마스크의 중심 위치를 이동한 후 마스크 내에서 흑화소를 탐색하여 인접한 흑화소가 없을 때까지 상기 세 단계를 반복함으로써 그림 14와 같이 각

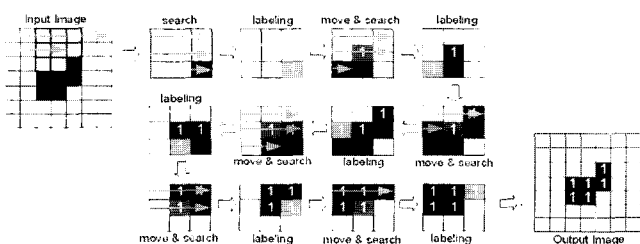


그림 14. 라벨링 과정



그림 15. 모든 인접화소가 라벨링 되지 않는 경우

각의 객체를 라벨링할 수 있다.

그러나 그림 15와 같은 경우 모든 인접화소가 라벨링 되지 않을 수도 있다. 즉, 그림 15의 ⑦ 마스크는 탐색 종료 조건(탐색, 라벨링, 중심이동)을 만족하지만 결과 영상에는 아직 라벨링이 수행되지 않은 화소가 존재한다.

일반적으로 라벨링 알고리즘은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위해 재귀호출(recursive call)이나 스택(stack)을 사용하며 본 연구에서는 스택을 사용하였다. 스택은 큐(queue)와 유사한 데이터 구조로서 후입선출(LIFO, Last-In First-Out) 방식으로 데이터를 입출력한다(그림 16). 스택은 큐와는 달리 하나의 포인터(top pointer)를 가지고 있고 이 포인터는 항상 가장 나중에 입력(push)된 데이터를 가리킨다. 예로써, 스택에 어떤 데이터 d를 입력(push\_stack(&d))하면 포인터는 가장 나중에 입력된 데

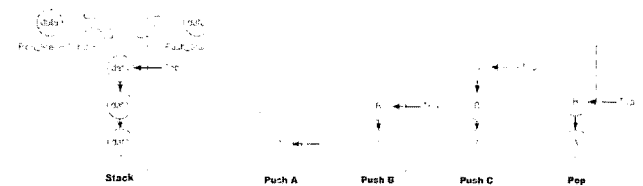


그림 16. 스택의 구조

이터 d를 가리키게 되고 스택의 길이는 늘어난다. 반대로 스택의 데이터를 출력(pop\_stack(&d))하면 포인터(top)가 가리키고 있던 데이터를 출력하고 포인터는 다음 데이터를 가리킨다.

스택을 사용한 라벨링 알고리즘은 마스크 탐색 중 새로운 흑화소를 발견하면 해당 화소를 라벨링하고 스택에 좌표를 입력(push)한다. 마스크내에 새로운 흑화소가 발견되지 않으면 스택에 저장된 데이터를 출력(pop)하여 마스크의 중심 위치를 출력

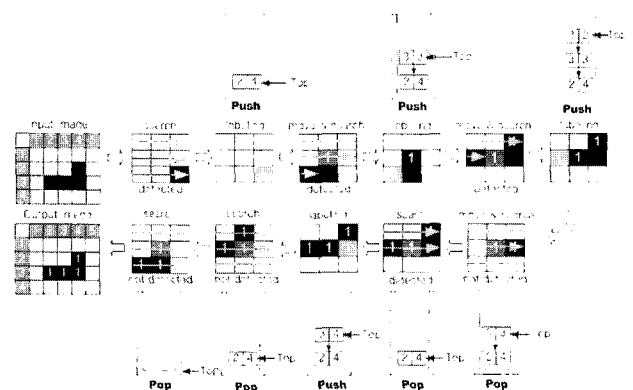


그림 17. 스택을 이용한 라벨링 알고리즘



된 좌표로 이동하고 다시 탐색을 수행한다. 그림 15의 입력 영상을 스택을 이용하여 라벨링 알고리즘을 수행하면 그림 17과 같이 각각의 객체에 대해 완벽하게 라벨링할 수 있다.

라벨링 알고리즘을 통해 도로면 영상의 인접 흑화소들을 모두 정수 형태의 ID(identification)를 가진 객체로 구분될 수 있고, 각 객체는 기하학적 특성을 갖게 된다. 본 연구에서는 객체 기반의 노이즈 제거 알고리즘을 사용하여 각 객체의 기하학적인 특성을 추출(feature extraction)함으로써 크랙 객체와 노이즈 객체를 구분할 수 있도록 하였다. 크랙 객체와 노이즈 객체를 구분하기 위해 사용된 객체의 형태적 특성은 표 1과 같다.

표 1 객체의 형태적 특성

특 성	내 용
평균명도	객체 영역에 해당하는 모든 화소의 명도 평균
면적	객체 영역에 해당하는 화소의 개수
둘레	객체 영역에 외접하는 화소의 개수
직경	객체의 경계에 존재하며 가장 멀리 떨어진 화소간의 거리
둘레-면적비율	둘레 / 면적
직경-면적비율	직경 / 면적
원형도	객체의 형태가 원에 가까운 정도를 나타내는 척도 $4\sqrt{\pi} \times A / L^2$

본 연구에서 사용한 객체의 7가지 특성 중 평균 명도와 면적은 라벨링 알고리즘을 수행하는 과정에서 구할 수 있다. 즉, 객체의 면적은 라벨링한 화소 개수를 합이고, 평균 명도값은 라벨링한 화소의 명도값을 모두 더하여 면적으로 나누어 구할 수 있다.

또한, 본 연구에서는 나머지 5가지 특성 중 각 객체의 둘레와 직경을 구하기 위해 경계선 추적 알고리즘(chain code algorithm)을 사용하였다. 영역의 경계선 추적이란 이진화된 영상에서 일정한 명도값을 가지는 영역의 경계를 추적하여 경계 픽셀의 순서화된 정보를 얻는 것이다. 경계선 추적 알고리즘은 라벨링 알고리즘과 마찬가지로  $3 \times 3$  마스크 연산을 기반으로 하고 있으며 스택을 사용한다. 경계선 추적 알고리즘의 실행 과정은 탐색, 저장 및 표시, 중심 이동의 세 단계로 이루어진다. 그림 18과 같이 래스터 스캔 방식으로 영상을 탐색하여 임의의 흑화소  $p(i,j)$ 를 만나면  $p$ 의 위치를 스택에 입력(push)하고  $3 \times 3$  마스크를 생성한다. 이 마스크는 라벨링 알고리즘에서 사용된 마스크와는 달리 항상 시계 방향으로 다음 흑화소를 검색한다. 첫 번째 마스크에서 시계 방향 검색의 시작점은 중심 화소  $p(i,j)$ 를 기준으로  $p(i, j-1)$ 이다. 마스크의 기준점부터 시계 방향으로 검색하여 첫 번째 흑화소  $f$ 를 만나면  $p$ 를 1(counter)로 표시(marking)하고 마스크의 중심을  $f$ 로 이동한다. 두 번째 마스크

부터 시계 방향 검색의 시작점은 스택의 포인터(top)가 가리키고 있는 위치( $p$ )를 기준으로 하여 경계선 추적을 반복 수행한다. 마스크에서  $p$ 가 경계선 추적의 시작점과 일치하면 경계선 추적을 중단하고 스택에 저장된 화소를 하나씩 출력하여 결과 영상에 표시한다. 이 때 스택이 출력하는 화소의 수를 이용하여 객체의 둘레를 구할 수 있다. 또한, 경계선 추적 알고리즘에서 직경은 스택에 하나의 화소가 입력될 때마다 저장된 모든 화소들의 거리를 측정하고 그 중 가장 큰 값이 된다.

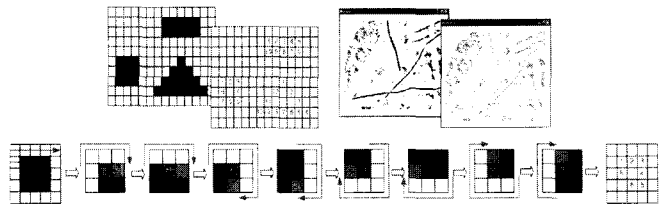


그림 18. 경계선 추적 알고리즘

둘레-면적비율 및 직경-면적비율, 원형도는 산출된 면적 및 둘레, 직경을 이용하여 구할 수 있다. 그림 19는 본 연구에서 사용한 도로면 영상을 기준으로 객체의 특성을 추출한 결과이다.

번호	면적	둘레	직경	원형도	평균명도	분류
10-1	166	88	0.530170	0.266736	0.329545	MAX 0.5151
10-2	236	93	0.397686	0.329810	0.344080	MAX 0.5151
10-3	6	7	0.146447	1.527920	0.000000	MAX 0.5151
10-4	30	28	0.928973	0.489617	0.321429	MAX 0.5151
10-5	3	4	1.333333	2.355000	0.250000	MAX 0.5151
10-6	30	31	1.000000	0.516667	0.323232	MAX 0.5151
10-7	1	1	1.000000	12.540000	0.000000	MAX 0.5151
10-8	2	3	1.500000	2.291111	0.000000	MAX 0.5151
10-9	76	32	0.420267	0.90454	0.342540	MAX 0.5151
10-10	40	26	0.700000	0.527522	0.264780	MAX 0.5151
10-11	1	1	1.000000	12.540000	0.000000	MAX 0.5151
10-12	1	1	1.000000	12.540000	0.000000	MAX 0.5151
10-13	7	7	1.000000	0.296812	0.181818	MAX 0.5151
10-14	18	18	1.000000	0.822222	0.250000	MAX 0.5151
10-15	1	1	1.000000	12.540000	0.000000	MAX 0.5151
10-16	2	3	1.000000	2.355000	0.250000	MAX 0.5151
10-17	11	8	0.818182	1.786279	0.000000	MAX 0.5151

그림 19. 객체의 특성 추출 결과

본 연구에서는 객체의 특성에 따라 크랙과 노이즈를 분리하기 위해 실험을 통해 크랙 객체와 노이즈 객체가 가지는 특성 값을 측정하여 객체 판별 기준을 표 2와 같이 정의하였다.

표 2 객체 판별 기준

특성	전체 명도값 분포의 상위 50%	분류
평균명도		
면적	50 이하	51~600, 601 이상
직경	-	35이상, -
둘레-면적 비율	0.60이하	0.60이하, 0.60이하
직경-면적 비율	-	0.20이상, -
원형도	0.30이하	0.50이하, 0.30이하

도로면 영상으로부터 크랙객체와 노이즈 객체를 판별하는 과정은 각 객체의 평균 명도값을 기반으로 상위 50%에 해당하는 객체를 크랙 객체로 1차 분리하고 표 2의 객체 판별 기준 조건을 모두 만족하는 객체를 2차 분리하였다. 그림 20은 평균 명도값

에 의한 크랙의 1차 분리와 면적, 직경, 둘레-면적 비율, 직경-면적 비율, 원형도에 의한 크랙의 2차 분리 과정이다. 그 결과, 노이즈가 많이 포함된 도로면 영상으로부터 크랙 객체만을 완벽하게 분리 하였다.

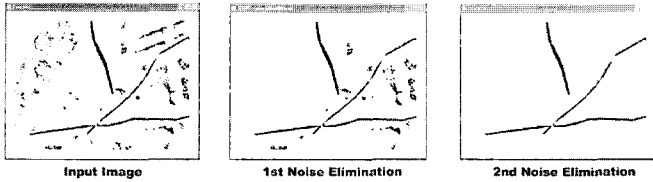


그림 20. 노이즈 제거 과정

3.3 팽창 연산 (dilation operation)

본 연구에서는 노이즈 제거 과정을 통해 분리된 크랙 네트워크(객체)의 중심선을 추출하기 위해 세선화 알고리즘(thinning algorithm)을 사용하였다. 세선화 알고리즘은 크랙 네트워크의 외곽을 순차적으로 제거하여 중심 뼈대(skeleton)만을 추출하는 기법으로 크랙 네트워크의 중심선을 추출하기 위해 효과적으로 이용 가능한 영상 처리 기법으로 사료된다. 도로면 영상에 적용된 노이즈 제거 알고리즘으로부터 추출된 크랙 네트워크의 경계(edge)는 매우 거칠며 내부에 공극을 지니게 되므로(그림 21-①), 이를 세선화하면 그림 21의 ②와 같이 많은 잡음과 크랙 네트워크의 끊김 현상이 발생한다. 따라서, 실링 되어질 크랙 네트워크의 정확한 모델링을 위해 세선화의 전처리 과정으로 팽창 연산이 요구된다. 팽창 연산은 3×3픽셀 크기의 마스크를 래스터 스캔방식으로 검사를 수행하여 마스크 내에 하나의 화소라도 흑화소가 있으면 주변 8개 화소를 모두 흑화소로 바꾸는 연산 과정이다. 이와 같은 팽창 연산을 통해 각 크랙 네트워크들은 전체적으로 확대되어 공극을 메우게 되고 크랙 경계는 평활화(smoothing) 된다(그림 21-③).

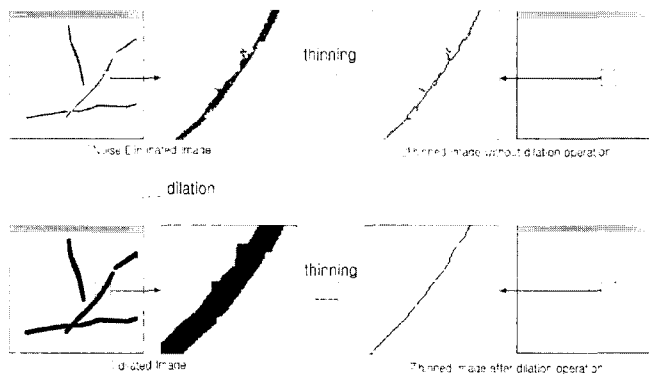


그림 21. 팽창(dilation)연산에 따른 세선화 결과 비교

3.4 세선화 (thinning)

본 연구에서는 이진화 및 노이즈 제거, 팽창과정을 거쳐 추출된 크랙 네트워크를 맵핑하고 모델링하기 위해 세선화 알고리즘을 사용하였다. 세선화 알고리즘은 이진영상을 대상으로 영상에 포함되어 있는 각각의 크랙 네트워크에 대해 연결성(connectivity)을 잃는 경우 없이 크랙 네트워크의 중심선을 찾아 기늘게(보통 1 픽셀 폭) 처리하는 디지털 영상처리 기술이다. 세선화 알고리즘의 원리는 크랙 네트워크의 외곽을 순차적으로 삭제하면서 중심 뼈대(skeleton)만을 추출하는 것으로서 1 픽셀의 굵기가 되었을 때 처리 과정을 마친다. 결과적으로 세선화된 크랙 네트워크의 폭은 1 픽셀이 되고 그 결과 값은 커팅 크랙너비의 중심부에 위치한다. 그러나 대부분의 기존 세선화 알고리즘(Suen(1986), Wang(1986), Guo(1989) 및 Hall(1989) 등)을 크랙 네트워크에 적용한 결과 크랙 네트워크 외곽의 거칠기에 민감하게 반응하여 많은 오류를 발생시켰으며, 크랙 네트워크 외곽의 단일 화소를 처리할 수 있는 Jang(1992)의 알고리즘은 연산 시간이 긴 단점을 가지고 있었다. 따라서, 본 연구에서는 기존 세선화 알고리즘 중 크랙 네트워크 외곽의 거친 정도에 민감하게 반응하지 않고 연산시간이 짧은 “가중치를 이용한 병렬 세선화 알고리즘(한낙희, 1997)”을 응용하여 크랙 네트워크 세선화 알고리즘을 개발하였다. 가중치 병렬 세선화 알고리즘은 그림 22와 같이 3×3 마스크를 기반으로 하고 임의의 화소 p는 X1~X8에 해당하는 8개의 이웃 화소를 갖는다(그림 22-①). 가중치는 임의의 흑화소에 있어서 8-이웃에 위치한 흑화소의 개수이고, 그림 22의 ②와 ③은 입력된 이진영상의 흑화소에 가중치를 부여한 것이다.

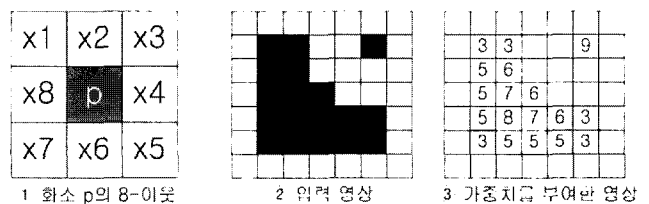


그림 22. 가중치 결정

본 연구에서는 임의의 화소 p가 흑화소일 때 p를 백화소로 변환할 것인가를 결정하기 위해 임의의 화소 p의 가중치를 결정 한 후 그림 23과 동일한 조건일 때는 p를 백화소로 변환하고 그림 23과 상이한 조건일 때는 p를 흑화소로 보존함으로써 크랙 네트워크를 효과적으로 세선화하였다.

가중치를 이용한 병렬 세선화 알고리즘의 단계별 과정은 다음과 같다.

- 1 단계 : 각 흑화소의 가중치를 결정한다.
- 2 단계 : p의 가중치에 해당하는 삭제 조건을 검색하여 p 변환

(가중치 9 삭제)

3 단계 : 각 흑화소의 가중치를 결정한다.

4 단계 : p의 가중치에 해당하는 삭제 조건을 검색하여 p 변환  
(가중치 9 유지)

5 단계 : 삭제 조건을 더 이상 만족하는 p가 없을 때까지 3단계와 4단계를 반복한다.

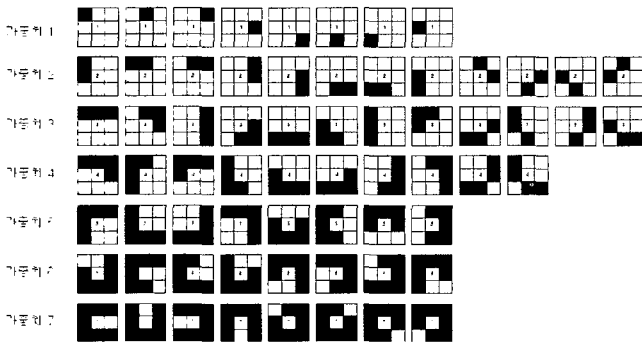
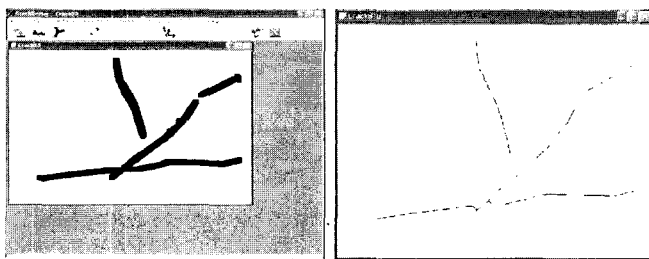


그림 23. 가중치에 따른 삭제조건

그림 24는 640 × 480 크기의 영상을 대상으로 가중치 병렬 세선화 알고리즘을 수행한 결과이다. 실험결과, 크랙 네트워크 중심 뼈대만을 남겨놓고 나머지 부분은 원활히 삭제되었으며, 처리시간은 약 0.058초로 측정되었다.



① 평정된 영상

② 가중치 병렬 세선화 알고리즘

그림 24. 가중치 병렬 세선화 알고리즘 적용 결과

### 3.5 중심선 추출(spine extraction)

컴퓨터는 중간 처리과정 없이 크랙 네트워크의 위치 정보를 알 수 없으므로 크랙실링 자동화 장비의 말단장치가 크랙 네트워크의 중앙을 따라 움직이며 크랙을 실링하기 위해서는 세선화된 크

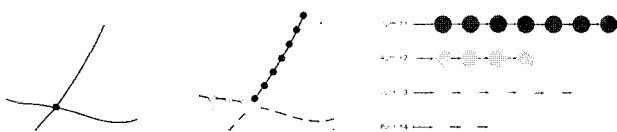


그림 25. 크랙 네트워크 분리과 좌표 저장

랙 네트워크를 모델링하여 크랙 네트워크 중앙의 좌표를 인식할 수 있도록 해야 한다. 이를 위해, 그림 25와 같이 교차되어 있는 크랙 네트워크를 모두 분리하고 각 크랙 네트워크의 위치정보를 연속된 좌표 형태로 메모리에 저장하는 과정이 요구된다.

교차되어 있는 크랙 네트워크를 선형으로 분리 위해서는 전체 도로면 영상에서 크랙 네트워크의 교차점을 검색하여 삭제해야 한다. 교차점 삭제를 위해 그림 26과 같이 3가지 형태의 마스크를 사용할 수 있다.

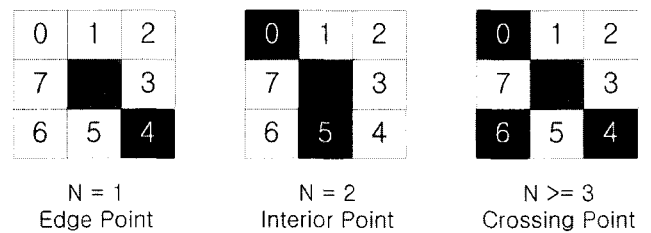


그림 26. 세선화 영상의 마스크 종류

그림 26에서 임의의 화소 p에 대해 이웃 흑화소의 개수를 N이라고 하면 N=1인 점은 크랙의 끝점(edge point)이고 N=2인 점은 크랙 내부의 점이며 N=3이상이면 교차점이 된다. 따라서, 도로면 영상을 래스터 스캔 방식으로 마스크 검사를 수행하여 교차점을 모두 삭제하는 과정을 통해 N=3이상인 점이 더 이상 존재하지 않으면 크랙 네트워크는 모두 분리된다. 도로면 영상에서 교차점을 모두 삭제하면 각각의 크랙 네트워크를 독립적으로 추출할 수 있다. 각각의 크랙 네트워크를 추출하는 과정은 그림 27과 같이 래스터 스캔 방식으로 3×3픽셀 크기의 마스크 검사를 수행한다. 마스크 검사 과정 중 시작점에 해당하는 임의의 흑화소 p를 만나면 p에 대해 주변 8-이웃화소를 시계방향으로 검사하고 마스크 내에서 또 다른 흑화소가 발견되면 시작점에 대한 좌표를 큐(Path[0])에 저장(push)한다. 다음 과정은 시작점의 명도값을 255(백)으로 바꾸고 마스크의 중심을 새롭게 발견된 흑화소로 이동한다. 마스크에서 주변 8-이웃화소가 모두 백

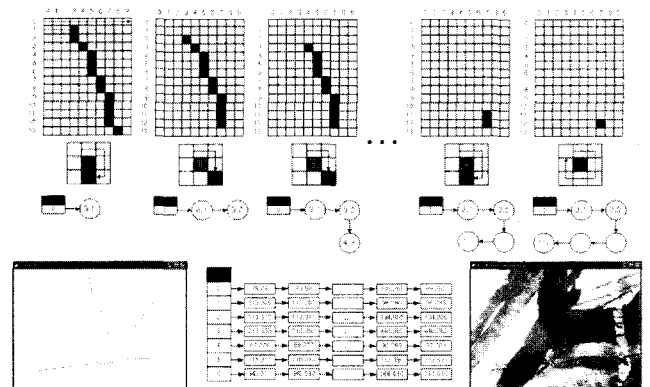


그림 27. 크랙 네트워크 중심선 추출 및 모델링 결과

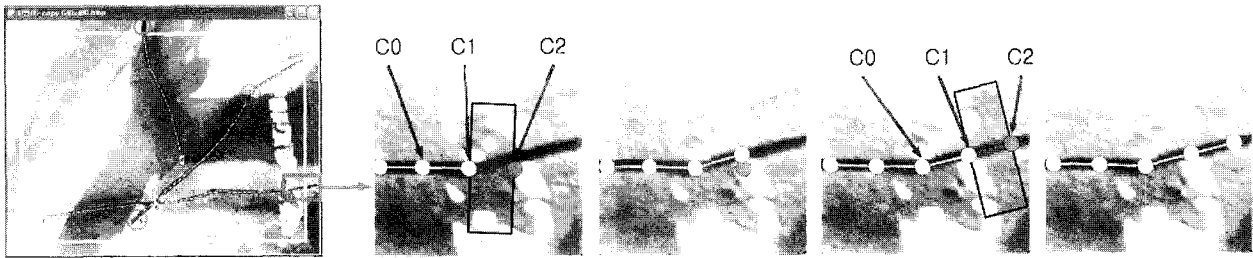


그림 28. 영상의 불안전 맵핑지역과 에지 링킹(edge linking)

화소가 될 때까지 마스크 검사를 지속적으로 반복한다. 이 과정에서 한 개의 크랙 네트워크 중심선은 모두 큐 형태의 데이터로 메모리에 저장되고 실제 영상에서는 삭제된다. 중심선을 추출하는 과정에서 더 이상 흑화소가 존재하지 않으면 추적을 시작한 위치에서 영상 내에 다른 크랙 네트워크가 존재하는지 계속 검사를 수행한다. 그림 27은 1개의 크랙 네트워크의 중심선 좌표를 큐 형태의 메모리에 저장하는 과정과 맵핑 및 모델링한 결과에 대한 오류를 수정하기 위해 크랙 네트워크의 맵핑 및 모델링 결과 값을 입력 영상에 오버레이(overlay)하여 표현한 것이다.

### 3.6 에지 링킹 (edge linking)

세션화된 영상에서 각 크랙 네트워크의 좌표를 추출하여 원본 영상에 맵핑한 결과 그림 28과 같이 불안전하게 맵핑된 부분이 발생하였다. 이는 이진화 과정에서 30×30 화소 크기의 마스크를 사용하였기 때문에 영상의 테두리 30개 화소는 영상 처리 영역에서 제외되었고, 이진화와 노이즈 제거 과정에서 부분적으로 크랙 네트워크의 손실이 발생하였기 때문이다. 본 연구에서는 이와 같이 불안전하게 맵핑된 부분을 보완하기 위해 에지 링킹을 수행하였다. 에지 링킹의 첫 번째 과정은 그림 28과 같이 한 크랙 네트워크의 끝점에서 가상의 한 점 C2를 정하고 로컬 탐색(local search)을 수행할 영역을 설정하는 것이다. 맵핑 및 모델링 처리된 끝점을 C1이라고 하고, C1의 전점(前點)을 C0라고 하면 C2는 C1을 중심으로 C0에 대칭이 되도록 설정하였다. 이 때 C2의 위치는 C0와 C1사이의 거리와 기울기(m)를 이용하여 구할 수 있다. C2의 위치가 결정되면 C1과 C2사이의 기울기 m과 수직 기울기 m'를 구한 다음 C1과 C2사이에 로컬 박스(local box)를 생성한다. 로컬 박스를 생성한 후 박스 내에서 크랙을 탐색하여 가상의 점 C2를 크랙 네트워크가 탐지된 위치로 이동한

다. 상기와 같은 과정을 반복하여 더 이상 크랙 네트워크가 인식되지 않을 때까지 에지 링킹 과정을 수행한다. 그림 29는 에지 링킹 과정을 통해 끊김 현상이 발생한 크랙 네트워크를 보정(補正)한 결과이다.

### 3.7 경로계획 알고리즘

경로 계획이란 영상 내에 존재하는 다수의 크랙 네트워크에 대하여 크랙실링 자동화 장비의 말단장치가 이동할 경로를 계획하는 것이다.

경로 계획을 수립하기 위해 요구되는 기본 조건은 다음과 같다.

- ① 원점의 좌표는 (0,0)이고 영상의 좌상단 끝점에 위치한다.
- ② 모든 크랙은 한 번씩 실링된다. 즉, 한 번 실링된 크랙은 다음 이동 경로 대상에서 제외된다.
- ③ 하나의 크랙은 2개의 끝점을 가지며 그 중 한 점으로 진입하여 실링 작업을 시작하고 반드시 다른 한 점에서 실링 작업을 종료한다. 실링 작업을 종료하는 지점은 다른 크랙으로 이동하기 위한 시작점이 된다.
- ④ 모든 크랙 네트워크에 대하여 실링 작업을 종료한 후 원점으로 복귀하는 거리는 경로 계획에 포함하지 않는다.

하나의 영상에 n개의 크랙 네트워크가 존재할 경우 2n x n!가지의 경로가 존재한다. 기존에는 도로면 크랙실링을 자동화하기 위한 경로계획으로 원점에서 가장 가까운 크랙 네트워크를 찾아 실링하고, 실링된 지점에서 가장 가까운 크랙 네트워크를 찾아 실링하는 과정을 반복하는 그리디 경로계획 알고리즘(greedy path planning algorithm)이 개발되어 사용되었다(그림 30-①).

그러나 그리디 경로계획 알고리즘은 크랙 네트워크의 수 n이 많아질수록 최적의 경로를 찾을 확률이 낮아지는 단점을 가지고 있으므로 본 연구에서는 크랙 네트워크를 경우의 수만큼 직접 방문 연산하여 가장 적은시간이 소요되는 경로를 찾아내는 최적 경로계획 알고리즘을 개발하였다. 실험결과 최적 경로계획 알고리즘은 크랙 네트워크의 수가 6개 이하일 때 최적의 성능을 발휘하였고, 6개를 초과할 때는 연산시간이 기존 그리디 경로계획 알고리즘보다 많이 소요되는 것으로 분석되었다. 따라서, 크랙 네트

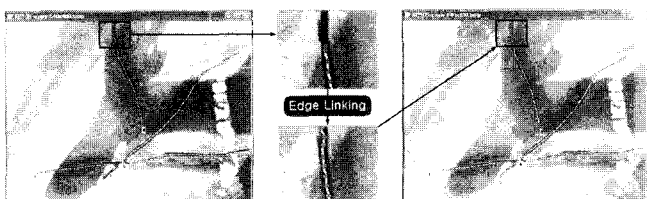
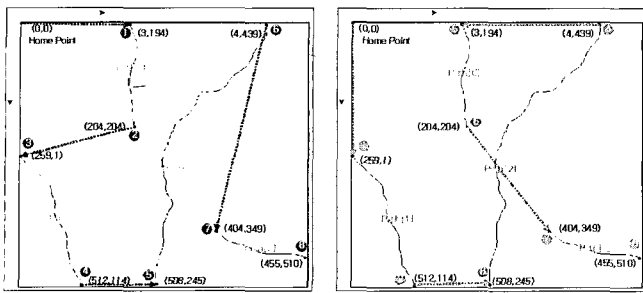


그림 29. 에지 링킹 결과



① 그리드 경로계획 알고리즘      ② 최적 경로 계획 알고리즘

그림 30. 기존 그리드 경로계획 및 최적 경로계획 알고리즘

워크의 수가 6개 이하일 때는 최적 경로계획 알고리즘을 사용하고, 6개를 초과할 때는 기존 그리드 경로계획을 컴퓨터가 자동으로 판단하여 사용될 수 있도록 설계하였다. 그림 30은 4개의 크랙 네트워크에 대해 그리드 경로계획 알고리즘과 최적 경로계획 알고리즘(그림 13-②)을 적용한 결과를 비교한 것이다.

#### 4. 개발된 머신비전 알고리즘의 적용

본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비의 효율적 운영을 위해 크랙 맵핑 & 제어 프로그램을 그림 31과 같이 MS Visual C++ 6.0을 이용하여 영상캡처 및 크랙맵핑, H/W제어 3부분으로 구성된 윈도우 어플리케이션으로 개발하였다.

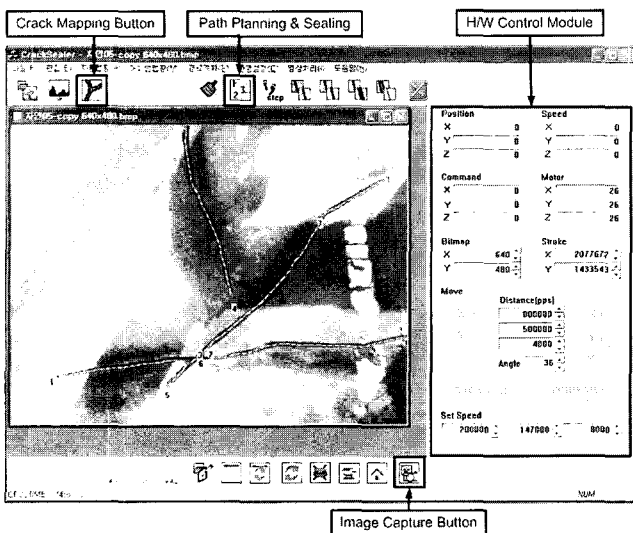


그림 31. 크랙 맵핑 & 제어 프로그램

개발된 크랙 맵핑 & 제어 프로그램을 이용하여 제안한 영상 처리 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 결과의 정확성과 처리 속도를 측정하였다. 또한, 여러 가지 주변 환경에 따른 영상 처리 알고리즘의 정확성을 분석하

기 위해 1)재래식 크랙실링 작업 현장에서 촬영한 영상 30장, 2)그림자를 포함하고 있는 도로면 영상 10장, 3)야간 촬영 영상을 포함한 밝기가 서로 다른 도로면 영상 20장을 대상으로 실험하였다.

표 3은 상기와 같은 총 60장의 도로면 영상에 대한 영상처리 알고리즘의 실험 결과이다.

표 3. 영상처리 알고리즘 적용 실험 결과

	오류 없음	A	B	계
현장 영상	27	2	1	30
그림자 영상	7	1	2	10
밝기차 영상	18	1	1	20
계	52	4	4	60
비율	86.6%	6.7%	6.7%	100%

A:부분적으로 크랙을 탐지하지 못한 경우

B:부분적으로 노이즈를 크랙으로 인식한 경우

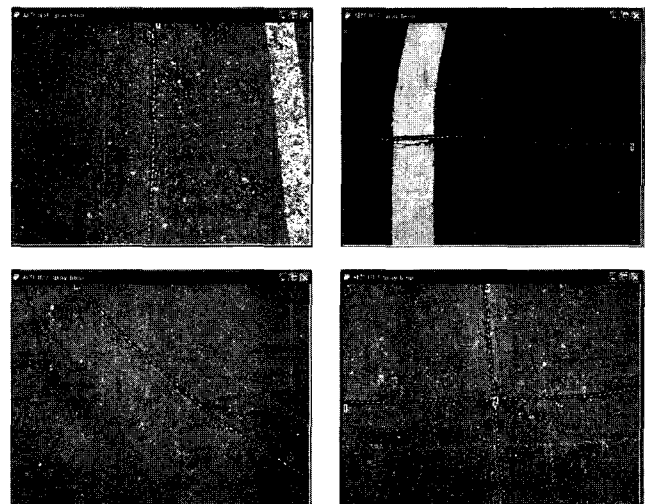


그림 32. 재래식 작업 현장 이미지 맵핑 결과

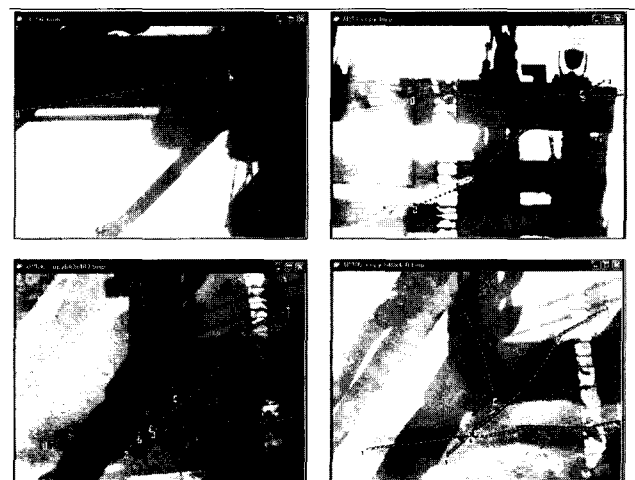


그림 33. 그림자가 있는 영상의 크랙 맵핑 결과

영상처리 알고리즘 실험 결과, 재래식 크랙실링 작업 현장에 서 촬영한 30장의 도로면 영상은 그림 32와 같이 대부분 정확한 결과를 보였으나 2개의 영상에서 부분적으로 크랙을 인식하지 못하는 영역이 발생하였고 1개의 영상에서 노이즈 부분을 크랙으로 인식하는 오류를 발생하였다(그림 32).

그림 33과 같이 그림자가 있는 영상에서는 10개의 영상 중 7개 영상에서 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링이 성공하였으나 2개의 영상에서 그림자를 크랙으로 인식하였다. 또한, 1개의 영상에서는 부분적으로 크랙을 탐지하지 못하는 경우가 발생하였다. 오류의 원인 분석 결과, 정오와 같이 그림자와 도로면의 명도 편차가 매우 큰 경우 크랙 네트워크와 비슷한 형태의 그림자는 크랙 네트워크로 인식되어 오류를 발생하였다. 따라서, 크랙실링 자동화 장비에 그림자의 영향을 차단할 수 있는 반투명 암막과 같은 장치가 요구된다.

그림 34와 같이 영상의 밝기가 서로 다른 영상에서는 20개의 영상 중 18개 영상이 성공적으로 맵핑 및 모델링 되었다. 그러나 부분적으로 크랙 네트워크를 탐지하지 못하는 1개 영상과 노이즈를 크랙 네트워크로 인식하는 1개 영상이 발생하였다. 따라서, 본 연구에서 제안한 영상처리 알고리즘은 밝기 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다. 특히, 야간에 촬영한 영상 5장에서 전혀 오류가 발생되지 않았으므로 제안된 영상처리 알고리즘을 이용하여 크랙실링 자동화 작업을 야간에도 원활히 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 영상처리 알고리즘 적용 결과 발생된 오류(13.3%)에 대해 장비 사용자에게 의한 매뉴얼 에디팅(manual editing)작업을 추가함으로써 정확한 크랙실링 작업이 수행될 수 있도록 알고리즘을 수정·보완 하였다.

한편, 본 연구에서는 개발된 영상처리 알고리즘의 도로면 영상 처리 시간(CPU time)을 측정하기 위해 이진화 및 노이즈 제거, 팽창 연산, 세션화, 크랙 맵핑 및 모델링, 에지링킹, 디스플레이에 소요되는 시간을 ms (milisecond, 1000분의 1초) 단위로

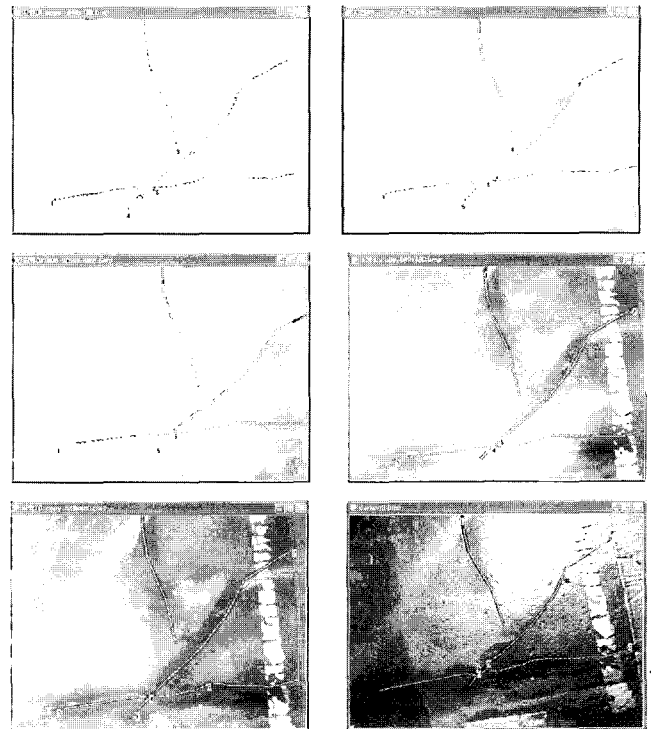


그림 34. 영상의 밝기 변화에 따른 영상처리 결과

측정하였다. 표 4는 30장의 영상을 대상으로 각 영상처리 과정을 위해 소요되는 시간을 측정하여 평균 값을 산출한 결과이다. 본 연구에서 제안한 영상처리 알고리즘이 하나의 도로면 영상처리를 위해 소요되는 시간은 평균 0.46초가 소요되는 것으로 분석되었다.

이상과 같은 실험 결과, 본 연구를 통해 개발된 영상처리 알고리즘은 기존 알고리즘 이상의 정확성 및 생산성을 갖고 있는 것으로 분석되었으며 장비 사용자에게 의한 라인 에디팅 작업을 추가함으로써 정확한 크랙 네트워크 모델링이 가능하도록 하였다. 향후 신경망이나 퍼지(fuzzy) 기반의 패턴인식 기법을 통해 제시된 영상처리 알고리즘의 정확성 및 생산성을 보다 더 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 예방적 차원의 도로면 유지 보수 공법인 크랙실링을 자동화하기 위해 요구되는 머신비전 알고리즘인 이진화 및 노이즈 제거 알고리즘, 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 알고리즘, 최적 경로계획 알고리즘을 개발하였다. 본 연구를 통해 도출된 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 크랙실링 자동화 장비의 머신비전 알고리즘 개발 현황 분석  
본 연구에서는 국내 현실에 적합한 크랙실링 자동화 장비의

표 4. 개발된 영상처리 알고리즘의 처리시간 (단위: ms)

영상 처리	측정시간	비율
이진화	226	48%
노이즈 제거	49	10%
팽창 연산	37	8%
세션화	58	12%
크랙 맵핑 및 모델링	12	3%
에지링킹	64	14%
디스플레이	22	5%
합 계	468	100%

측정환경 : Intel Pentium4 3.0C, 512 RAM

머신비전 알고리즘을 개발하기 위해 미국에서 개발된 Haas(1990)의 멀티 레이어 쿼드트리(multi-layer quadtree) 알고리즘과 Kim(1997)의 매뉴얼 맵핑 및 라인 스냅핑(line snapping) 알고리즘을 분석하여 응용가능 한 기술과 문제점 등을 도출하였다.

**(2) 크랙실링 자동화를 위해 요구되는 머신비전 알고리즘 및 이미지 처리 프로세스 분석**

본 연구에서는 기존 선행연구 및 타 산업 분야에서 사용되고 있는 이미지 프로세싱 기술을 바탕으로 크랙실링 작업을 자동으로 수행하기 위해 요구되는 이미지 프로세싱 절차를 분석하였다. 분석 결과, 크랙실링 자동화 장비의 말단장치가 크랙의 중앙을 따라 실린트를 정확히 분사하기 위해서는 이진화 및 노이즈 제거, 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링, 경로계획 알고리즘의 개발이 요구되었다.

**(3) 이진화 및 노이즈 제거 알고리즘 개발**

본 연구에서는 커팅된 크랙 네트워크의 맵핑 및 모델링을 위한 전처리 작업으로 이진화 및 노이즈 제거 알고리즘을 개발하였다. 개발된 큐를 사용한 지역적 이진화 알고리즘으로 도로면 영상을 히스토그램으로 분석하고 임계값을 자동으로 산출하여 도로면 영상을 성공적으로 이진화하였다. 또한, 이진화된 영상을 바탕으로 객체화 및 특성 추출 기법을 이용한 노이즈 제거 알고리즘을 개발하여 실험한 결과 도로면 영상으로부터 크랙 네트워크와 노이즈를 완전히 분리할 수 있었다.

**(4) 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 알고리즘 개발**

본 연구에서는 크랙 네트워크를 맵핑하고 모델링하기 위해 가중치 병렬 세션화 알고리즘을 응용하여 크랙 네트워크의 중앙선을 추출하고, 일정 간격으로 모델링하여 크랙실링 자동화 장비의 말단장치가 크랙 네트워크의 중앙을 따라 정확히 움직일 수 있도록 하였다.

**(5) 최적 경로계획 알고리즘 개발**

본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비의 말단장치가 시간 효과적으로 움직이며 실린트를 분사할 수 있도록 하기 위해 입력 영상에 존재하는 모든 크랙 네트워크에 대한 경우의 수만큼 방문하여 연산 거리의 상호 비교분석을 통해 가장 짧은 경로를 도출하는 최적 경로계획 알고리즘을 개발하였다. 최적 경로계획 알고리즘 실험결과, 한 화면에 존재하는 크랙 네트워크의 수가 6개 이하일 때 항상 최적의 경로를 찾아내어 기존 방식에 비해 크랙실링에 소요되는 작업시간을 단축할 수 있었다.

**(6) 개발된 머신비전 알고리즘 적용**

본 연구에서는 재래식 작업 현장 영상 및 그림자를 포함하고 있는 영상, 밝기 변화를 가지고 있는 영상을 대상으로 개발된 영상처리 알고리즘의 효율성을 실험하였다. 실험 결과, 개발된 영상처리 알고리즘의 정확도는 약 86.6%이며, 1개의 영상 처리를 위해 약 0.46초의 시간이 소요되어 기존 알고리즘에 비해 우수한 성능을 발휘하는 것으로 분석되었다.

향후 상기와 같은 연구 내용을 바탕으로 보다 다양한 도로면 영상을 대상으로 개발된 머신비전 알고리즘의 실험 및 정확성과 속도를 향상 시킬 수 있는 방안에 대한 연구가 지속적으로 요구된다.

**감사의 글**

본 연구는 2001년 건설교통부 산학연 연구과제(제안 E-01)로 수행되었으며 연구 지원에 감사드립니다.

**참고문헌**

1. 건설교통부(1999), "도로포장 유지보수 실무편람".
2. 한낙희, 이필규, (1997), "가중치를 이용한 병렬 세션화 알고리즘", 공학석사학위논문, 인하대학교.
3. Guo, Z. and Hall, R. Q. (1989), "Parallel thinning with two-subiteration algorithms", Commun. Assoc. Comput. Mach, vol. 32, no. 3, pp.359-373.
4. Haas, C., Kim, Y. and Greer, R. (1997), "A Model for Imaging Assisted Automation of Infrastructure Maintenance", ASCE Proc., of 2nd International Conference on Imaging Technologies: Techniques and Applications in Civil Engineering, Davos, Switzerland, May, pp.108-117.
5. Hall R. W. (1989), "Fast parallel thinning algorithms: Parallel speed and connectivity preservation", Commun. Asoc. Comput. Mach, vol. 32, no. 1, pp.124-131.
6. Jang, B. K. and Chin, R. T. (1992), "One-Pass Parallel Thinning: Analysis, Properties, and Quantitative Evaluation", IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell., vol. PAMI-14, no. 11, pp.1129-1149.
7. Joan S. Weszka and Azriel Rosenfeld, "Histogram modification for threshold selection," IEEE Trans. Systems, Man and Cybernet. SMC-9, Jan. pp38~52,

- 1979.
8. Kim, Y. and Haas, C. (2000), "A Model for Automation of Infrastructure Maintenance Using Representational Forms", *Journal of Automation in Construction*, Vol. 10, No. 1., pp57-68.
  9. Kim, Y., Haas, C., and Greer, R. (1998), "Man-Machine Balanced Crack Sealing Process for the UT Automated Road Maintenance Machine", ASCE, 5th International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering, Newport Beach, CA., April, pp.114-123.
  10. Kim, Y., Haas, C., and Greer, R. (1998), "Path Planning for a Machine Vision Assisted, Tele-operated Pavement Crack Sealer", *ASCE Journal of Transportation Engineering*, Vol.124, No.2, pp.137-143.
  11. Kim, Y. S. (1997), "Man-machine Balanced Control for Automation of Infrastructure Crack Sealing", The University of Texas at Austin.
  12. Suen, C. Y. and Chu, Y. K. (1986), "An Alternative Smoothing and Stripping Algorithm for Thinning Digital Binary Patterns", *Signal Processing*, vol. 11, no. 3, pp.207-222.
  13. Wang, P. S. and Lu, H. E. (1986), "A comment on a fast parallel algorithm using thinning digital pattern", *Commun. ACM*, vol. 29, no. 3, pp.239-243.

---

### Abstract

Machines for crack sealing automation have been continually developed since the early 1990's because of the effectiveness of crack sealing that would be able to improve safety, quality and productivity. It has been considered challenging problem to detect crack network in pavement which includes noise (oil marks, skid marks, previously sealed cracks and inherent noise). Moreover, it is required to develop crack network mapping and modeling algorithm in order to accurately inject sealant along to the middle of cut crack network. The primary objective of this study is to propose machine vision algorithms (digital image processing algorithm and path planning algorithm) for fully automated pavement crack sealing. It is anticipated that the effective use of the proposed machine vision algorithms would be able to reduce error rate in image processing for detecting, mapping and modeling crack network as well as improving quality and productivity compared to existing vision algorithms.

**Keywords :** Crack, Crack sealing, Mapping, Modeling, Path planning, Digital image processing, Machine vision

---