

도로면 크랙실링 자동화 로봇의 프로토타입 개발에 관한 연구

A Study on the Development of an Automated Pavement Crack Sealer

이 정 호* · 유 현 석** · 김 영 석*** · 이 준 복**** · 조 문 영*****

Lee, Jeong-Ho · Yu, Hyun-Seok · Kim, Young-Suk · Lee, Jun-Bok · Cho, Moon-Young

요 약

도로면 유지보수를 시행함에 있어 노면의 파손정도에 따라 다양한 공법의 사용이 가능하나 크랙실링 공법은 예방적 차원에서 도로면에 발생된 크랙을 초기에 효과적으로 보수할 수 있는 방법이다. 그러나 교통량이 많은 대도시나 고속도로에서 시행되는 도로면 유지보수 작업의 경우 노무자가 열악한 작업환경 내에서 작업을 수행해야 하므로 안전성 확보에 문제가 있는 것으로 분석되었다. 또한, 도로면 유지보수 작업의 특성상 현장 노무자의 잦은 이직(labor turnover) 및 3D업종의 기피로 인한 숙련공 부족현상은 현 도로면 유지보수 작업의 생산성 및 품질 저하를 가져오고 있다. 선진 외국의 경우 크랙실링 공법의 이점 및 도로 유지보수 공사의 위험 요소를 인식하여 자동화 장비의 개발을 통해 안전성 및 생산성 향상, 경제성 확보에 다양한 연구 노력을 기울이고 있으나 국내의 경우 도로면 유지보수 공사를 위한 기술축적이나 자동화 장비 개발을 위한 시도는 매우 미약한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 도로면 유지보수 공법 중 크랙실링 공법의 자동화를 통해 노무자의 안전사고를 방지하고, 품질 및 생산성 향상을 도모할 수 있는 크랙실링 자동화 장비의 프로토타입을 개발하고자 한다.

키워드 : 크랙, 크랙실링, 도로면 유지보수, 건설 자동화

1. 서론

국내 도로 총 연장의 76.7%(70,146km; 2001년 12월 기준)를 차지하고 있는 포장도로는 유지보수를 위해 매년 막대한 예산을 투자하는 국가 기반시설이다. 그러나 도로 유지보수에 적합한 예산 계획 및 효율적이고 종합적인 도로관리기술의 부족, 일관성있는 유지보수 공법 결정기준의 부재 등으로 인해 유지보수와 관련된 사업예산의 효율적 관리는 미흡한 실정이다. 한편, 교통량이 많은 대도시나 고속도로에서 수행되는 도로면 유지보수 작업의 경우 노무자가 열악한 작업환경에서 작업을 수행해야 하므로 안전성 확보가 어렵고, 도로면 유지보수 작업의 특성상 현장 노무자의 잦은 이직 및 3D업종의 기피로 인한 숙련공의 부족현

상은 현 도로면 유지보수 작업의 생산성 및 품질저하를 가져오고 있다. 도로면 유지보수를 시행함에 있어 노면의 파손정도에 따라 다양한 공법의 사용이 가능하나 크랙실링(crack sealing) 공법은 예방적 차원에서 도로면에 발생된 크랙을 초기에 효과적으로 보수할 수 있는 방법으로써 균열의 발전을 지연시켜 후속 균열을 방지하고 방수 효과로 도로 하부구조를 보호하여 동결 피해를 방지할 수 있다. 또한, 단층 방지 및 승차감 유지 등과 같은 부수적인 효과도 얻을 수 있다. 선진 외국의 경우 크랙실링 공법의 이점 및 도로면 유지보수 공사의 위험 요소를 인식하여 90년대 초반부터 크랙실링 자동화 장비 개발을 위한 연구를 진행하여 현재 실용화 단계에 있으나 국내의 경우 도로면 유지보수 공사를 위한 기술축적이나 자동화 장비 개발을 위한 시도는 극히 미약한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 도로면 유지보수 공법 중 크랙실링 공법의 자동화를 통해 노무자의 안전사고를 예방하고, 품질 및 생산성 향상을 도모할 수 있는 크랙실링 자동화 장비의 프로토타입을 개발하고자 한다. 이를 위해, 기존 문헌 및 현장조사를 통해 크랙실링 공법의 현황 분석을 선행하였으며, 기존 크랙실링 자동화 장비의 개발 현황 및 문제점, 최신 기

* 학생회원, 인하대학교 건축공학과 박사과정

** 학생회원, 인하대학교 건축공학과 석사과정

*** 중신회원, 인하대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

**** 중신회원, 홍익대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

***** 중신회원, 한국건설기술연구원 연구위원, 공학박사

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

술 동향 등을 분석하여 국내 현실에 적합한 크랙실링 자동화 장비의 모체 제작 및 운영절차를 제안하였다. 또한, 효과적으로 크랙실링 자동화 작업을 수행할 수 있도록 비전 알고리즘(크랙 네트워크 맵핑 및 모델링, 경로계획 알고리즘) 및 제어 알고리즘을 개발하고 이를 하드웨어와 통합함으로써 크랙실링 자동화 장비의 프로토타입을 완성하였다.

2. 크랙실링 자동화 장비 개발을 위한 주요 연구내용 및 관련 기술개발 동향

2.1 크랙의 유형 및 크랙실링 자동화 장비의 구성

(1) 크랙의 유형 및 크랙실링 공법

아스팔트 포장도로의 크랙 유형은 1)종방향(longitudinal), 2)횡방향(transverse), 3)블록(block), 4)거북등(alligator) 크랙으로 분류할 수 있으며(그림 1), 이 중 종방향, 횡방향 및 블록 크랙은 크랙실링 공법으로 유지보수가 가능한 크랙이나 거북등 크랙은 크랙실링 공법이 아닌 덧씌우기 대상 크랙이다.

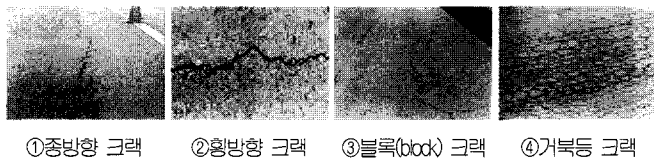


그림 1. 크랙의 종류

크랙실링 공법은 크랙부분에 실런트를 주입하여 물과 이물질의 침투를 막아 후속 크랙이나 팟홀(pothole)등을 방지함으로써 도로의 수명을 늘리는 예방적 차원의 도로면 유지보수 공법이다. 국내 재래식 크랙실링 작업 절차는 표준 시방서 및 도로포장 유지보수 실무편람(건설교통부, 1999)에 따라 3mm이상 크랙을 폭 1.2~2cm, 깊이 2~2.5cm로 커팅하고 공기 청소기를 사용하여 커팅된 크랙 부위를 청소한다. 청소를 마친 후 실런트 멜티기(sealant melter)에서 170~180℃로 용융된 실런트를 커팅 부위에 주입하고 스퀴즈(squeeze)를 사용하여 압지 한 후 양생한다(그림 2).



그림 2. 크랙실링 작업 절차

2.2 크랙실링 자동화 장비 개발을 위한 주요 연구내용

크랙실링 작업을 자동화하기 위해 가장 중요한 요소는 실런트 분사를 위한 말단장치(turret)가 크랙의 중앙(spine)을 따라 일정량의 실런트를 신속하고 정확하게 분사하도록 함으로써 작업의 생산성 및 품질을 확보하는 것이다. 따라서 크랙실링 자동화 장비의 성공적인 개발을 위해서는 다음과 같은 알고리즘의 개발이 필수적으로 요구된다.

(1) 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 알고리즘(crack network mapping and modeling algorithm)

디지털 CCD 카메라를 통해 모니터 상에 나타난 도로면 이미지는 실제 크랙과 함께 많은 노이즈(oil marks, skid marks, previously sealed cracks, inherent noise 등)가 내포되어 있으므로 도로면 영상으로부터 노이즈를 효과적으로 제거하고 크랙만을 추출할 수 있는 알고리즘의 개발이 요구된다. 또한, 컴퓨터는 중간 처리과정 없이 크랙 네트워크의 위치 정보를 알 수 없으므로 크랙실링 자동화 장비의 말단장치가 크랙 네트워크의 중앙을 따라 움직이며 크랙을 실링하기 위해서는 크랙 네트워크를 모델링하여 크랙 네트워크 중앙의 좌표를 인식할 수 있도록 하는 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 알고리즘의 개발이 선행되어야 한다.

(2) 경로계획 알고리즘(path planning algorithm)

크랙실링을 위한 크랙 네트워크의 형태 및 개수는 다양하므로 작업생산성은 크랙실링 자동화 장비 말단장치의 이동경로에 따라 크게 영향을 받는다. 즉, 크랙실링 자동화 장비의 말단장치가 한 개의 크랙 네트워크에 대한 실링 작업을 마친 후 다음 실링 작업을 위해 어느 크랙 네트워크로 이동해야 할지에 대한 경로계획을 수립해야 한다. 따라서, 시간 효과적으로 크랙실링 작업을 수행하기 위한 최적의 경로계획 알고리즘의 개발이 요구된다.

(3) 제어 메커니즘(control mechanism)


크랙실링 자동화 장비의 말단장치가 크랙 네트워크를 따라 움직이며 실링작업을 수행하기 위해서는 4가지 운동방식(4 degrees of freedom)이 요구된다. 도로 진행방향에 대한 X축 및 Y축 방향의 기본적인 운동과 도로면의 단차나 장애물에 대비하기 위해 도로면과 수직방향인 Z축 운동이 요구된다. 또한, 굴곡면 실링작업을 위해 크랙실링 자동화 장비의 말단장치는 회전 운동을 하며 크랙 네트워크를 실링할 수 있어야 한다. 한편, 분사 주입될 실런트의 정확한 양을 산정하기 위해서는 레이저 레인지 스캐너(laser-range scanner)와 같은 고가의 장비를 이용해 크랙의 프로파일(profile) 분석을 통한 볼륨 계산(volume

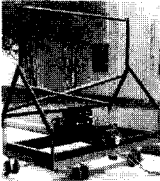



calculation)을 수행해야 하나 비전 센서로부터 발생하는 데이터와 레이저 레인지 스캐너로부터 발생하는 데이터간의 통합(sensor fusion)은 과다 시간이 소요(time-consuming process)될 것으로 예상된다(Haas, 1997). 또한, 볼륨 계산결과를 토대로 크랙 내부에 실린트를 완벽하게 충전시키기 위해서는 크랙의 볼륨 이외에도 1)말단장치의 속도, 2)실린트의 점도, 3)기후여건, 4)실린트 펌터의 flow rate, 5)크랙의 길이방향 내부 profile 단면의 높낮이, 6)크랙 내부 aggregate의 거칠기(roughness) 등 다양한 요소(factor)들을 동시에 고려해야만 한다. 결국 많은 비용과 시간을 투입하여 크랙의 볼륨을 계산하고 이를 충전하는 실린트 분배 메커니즘을 개발한다 하더라도 그 결과는 매우 미약할 것으로 사료된다. 따라서 실린트의 점도 및 흐름 속도(flow rate)를 다양한 실험을 통해 사전에 세팅(pre-setting)함으로써 충분한 양의 실린트가 크랙 중심부를 따라 내부로 충전 및 압지될 수 있도록 하는 것이 작업생산성 및 경제성 측면에서 크랙을 효과적으로 실링할 수 있는 것으로 분석되었다.

2.3 관련 기술개발 동향 및 한계점

북미나 유럽과 같은 선진 외국에서는 크랙실링을 자동화하기 위해 산학연을 중심으로 크랙실링 자동화 장비의 모체 개발과 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 알고리즘, 경로계획 알고리즘 등을 개발하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 특히, 미국에서는 CMU Laboratory Prototype(1990), CMU-UT Field Prototype(1992), CalDavis Field Prototype(1993), UT Field Prototype(1995), UT ARMM(1999) 등과 같은 크랙실링 자동화 장비를 연구·개발하여 상용화 단계에 이르고 있는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 국내 현실에 적합한 크랙실링 자동화 장비를 개발하기 위해 표 1과 같이 현재까지 개발된 크랙실링 자동화 장비의 주요 연구 내용 및 문제점, 고려사항 등을 분석하였다.

표 1. 기존 크랙실링 자동화 장비의 분석

크랙실링자동화 장비	주요 연구 내용 및 성과	문제점 및 고려사항
 <p>CMU Laboratory Prototype(1990)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 자동화 크랙실링의 경제적, 기술적 타당성 분석 ○ 재래식 크랙실링 공법의 완전 자동화(complete autonomy)를 위한 소프트웨어 및 하드웨어의 개념/상세 디자인 ○ Machine vision과 Laser range scanner(센서 퓨전)를 활용한 크랙 탐지 및 맵핑 알고리즘의 개발과 적용/하드웨어 제작 ○ 실험실 내에서 모형 크랙을 대상으로 크랙실링 자동화 로봇의 기술적 타당성 및 개발 가능성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 작업영역 내의 크랙을 탐지하고 맵핑함에 있어 과다시간 소요 ○ 하드웨어의 불안정한 조립 및 개발 소프트웨어와 하드웨어의 통합 실패에 따른 크랙실링 결과의 정확성 결여

크랙실링자동화 장비	주요 연구 내용 및 성과	문제점 및 고려사항
 <p>CMU-UT Field Prototypel(1992)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 센서 퓨전을 활용한 크랙 탐지 및 맵핑 알고리즘의 보완 ○ 로봇의 경로계획(path planning) 알고리즘 개발 ○ XY 매니퓰레이터를 이용한 크랙실링 자동화 로봇의 하드웨어 제작 및 컨트롤 소프트웨어의 개발 ○ 개발 소프트웨어와 하드웨어의 통합 ○ 재래식 크랙실링 공법의 완전 자동화를 부분적으로 실현 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 작업영역 내의 크랙을 탐지하고 맵핑함에 있어 과다시간 소요 ○ 개발된 하드웨어의 한계성으로 인하여 실링 작업만을 로봇의 성능실험 대상으로 한정
 <p>CalDavis Field Prototypel(1993)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 디지털 이미지 프로세싱을 이용한 크랙 탐지 및 맵핑 알고리즘(histogram based machine vision algorithm)의 개발 및 적용 ○ 화물트럭을 개조하여 시속 16km의 속도로 크랙을 실링할 수 있는 multiple manipulator arm을 고안하였으며 일반도로에서의 현장 실험을 성공적으로 완수 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 크랙 탐지 및 맵핑 알고리즘의 정확성 결여 ○ 실링 대상 크랙을 횡방향으로 한정(시장성 결여) ○ 높은 시스템 판매 가격 (U S \$600,000)으로 인해 마케팅 실패
 <p>UT Field Prototypel(1995)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 재래식 크랙실링 공법의 성공적 자동화를 위한 작업 프로세스 및 기능의 재 정의 ○ 재래식 크랙실링 공법에 대한 반자동화의 필요성 인식 ○ 작업영역 내에서 크랙 탐지 및 맵핑의 효율성/정확성 증진을 위한 man-machine balanced, remote controlled, graphical control software의 개발 및 적용성 검토 ○ 연결(Linked) 데이터 구조를 활용한 로봇의 경로 계획(path planning) 알고리즘 개발 ○ 토우 트럭, 실린트 펌터, 크랙실링 로봇의 연결을 통해 일반 도로에서의 현장실험을 성공적으로 완수 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 개발 소프트웨어와 하드웨어간 통합 실패에 따른 주요 연구성과물의 독립적 성능만을 확인
 <p>ARMM(1999)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 인간과 기계의 협업체제(Man-machine balance)를 활용한 크랙 실링 제어 프로세스 정립, 반자동 크랙실링 자동화 장비의 상용화를 위한 기술적 노하우 축적 및 실용화 가능성 확인 ○ 그래픽 프로그래밍을 응용한 크랙 탐지, 맵핑, 컨트롤 소프트웨어의 개발 및 성능확인 ○ 배열(array) 데이터 구조를 활용한 그리드 경로계획 알고리즘의 개발 ○ 개발 소프트웨어와 하드웨어의 성공적 통합 ○ 개발된 자동화 기술의 경제적, 기술적 타당성 입증 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 품질의 균일성 확보를 위해 U 자형 압지장치의 설계 및 말단장치의 상하 운동이 요구됨 ○ 그림자나 음영의 민감도에 따른 영향이 최소화될 수 있도록 비전 알고리즘의 개선이 요구됨 ○ 갠트리 및 커트 이송장치의 개선이 요구됨 ○ Calibration, onboard electronics의 개선 ○ 야간작업이 가능할 수 있도록 하드웨어와 소프트웨어의 개선이 요구됨

위 표 1에서 볼 수 있듯이, 기존 크랙실링 자동화 장비 분석 결과 초기 크랙실링 자동화 장비는 하드웨어의 불완전한 조립 및 크랙실링 작업을 자동화하기 위해 반드시 요구되는 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링, 경로계획 알고리즘상의 정확성이 결여되었으며, 개발 소프트웨어와 하드웨어의 통합 실패로 인해 크랙실링 자동화 장비가 원활히 작동하지 못하는 문제점을 가지고 있었다. 가장 진보된 크랙실링 자동화 장비인 UT-ARMM의 경우에 있어서도 개발된 비전 알고리즘이 그림자의 영향을 받으며 말단 장치의 설계 오류 및 작업영역에 대한 조정(calibration) 미흡 등으로 인해 크랙실링 자동화 작업을 효과적으로 수행하지 못하는 것으로 분석되었다. 한편, 현재까지 개발된 자동화 장비의 비전 알고리즘은 논커팅(non-cutting) 크랙을 대상으로 개발된 것이나 국내의 경우 크랙실링을 위해 표준 시방서 및 도로 포장 유지보수 실무편람(건설교통부, 1999)에 따라 크랙을 반드시 커팅하도록 규정하고 있으므로 커팅 크랙을 대상으로 크랙 네트워크의 중앙(spine)을 따라 모델링하고 실링할 수 있는 비전 알고리즘의 개발이 요구된다.

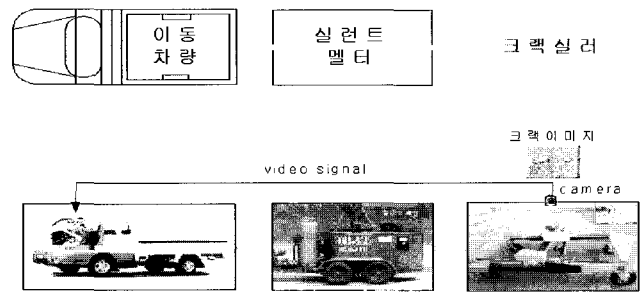


그림 3. 크랙실링 자동화 장비의 구성

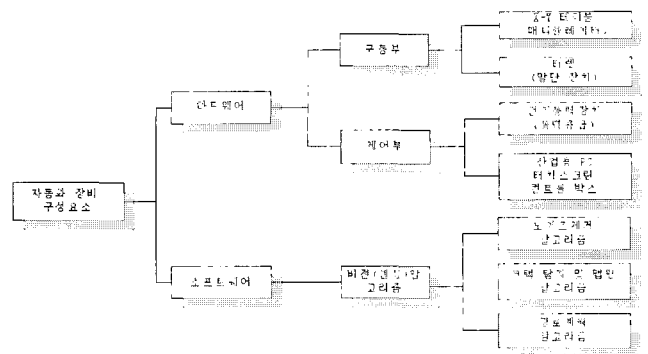


그림 4. 크랙실링 자동화 장비의 세부 구성요소

3. 크랙실링 자동화 장비의 설계 및 운영절차

3.1 크랙실링 자동화 장비의 개발

본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비를 개발하기 위해 문헌고찰 및 기존 크랙실링 자동화 장비의 주요 연구내용, 문제점 분석 결과 등을 토대로 최신 요소기술을 분석하였다. 또한, 자동화 장비 개발을 위해 반드시 수행되어야 하는 하드웨어 및 소프트웨어 측면의 고려사항을 분석하여 크랙실링 자동화 장비를 설계하고 프로토타입을 제작하였다.

(1) 크랙실링 자동화 장비의 구성

크랙실링 자동화 장비는 포장도로의 파손률을 분석하여 포장도로의 유지 보수 시기 및 방법을 제시하기 위한 포장관리시스템(Pavement Management System; PMS)과는 비전 및 제어 알고리즘의 개발 측면에서 매우 상이한 개념의 장비이다. 즉, 크랙실링 자동화 장비는 도로면에 존재하는 크랙의 정확한 탐지, 맵핑(mapping) 및 모델링(modeling) 과정을 통해 크랙 네트워크의 중앙을 따라 실린트를 분사하여 크랙을 효과적으로 실링할 수 있도록 하는 장비이다. 본 연구를 통해 개발된 크랙실링 자동화 장비

는 그림 3과 같이 1)전인 및 장비 제어를 위한 컴퓨터와 모니터가 탑재된 이동차량, 2)170~180°C의 실린트(sealant)를 공급해 주는 실린트 맬터 및 3) 실질적인 크랙실링 작업을 수행하는 모체(크랙실러)로 구성된다.

또한, 크랙실링 자동화 장비의 세부 구성요소는 그림 4와 같이 크랙실링 작업을 직접적으로 수행하는 구동부와 이를 제어하기 위한 전기동력 장치 및 산업용 PC, 터치스크린, 컨트롤 박스

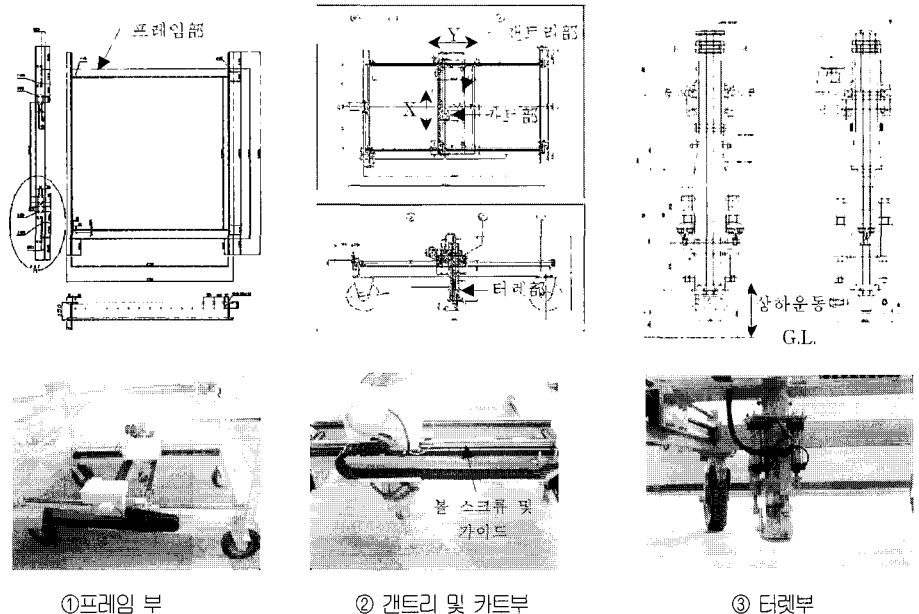


그림 5. 연구 개발된 크랙실링 자동화 장비의 프로토타입

등의 하드웨어로 구성된다. 또한, 도로면 크랙을 정확히 탐지하고 이를 효과적으로 실링할 수 있도록 하는 소프트웨어(비전 시스템)로 구성된다.

(2) 자동화 장비 개발을 위한 고려사항

본 연구에서는 기존 문헌 및 크랙실링 자동화 장비의 분석 결과를 바탕으로 안전성 및 내구성, 정확성, 경제성 등을 고려한 크랙실링 자동화 장비를 개발하기 위해 요구되는 주요 고려사항을 분석하였다. 즉, 1)크랙실링 작업은 지면의 단차를 가지고 있는 도로상에서 수행되는 작업환경을 가지고 있으므로 프레임부 설계 시 XY 테이블의 뒤틀림을 방지 할 수 있어야 하며, 2)크랙을 탐지하고 모델링하는 비전알고리즘은 그림자 및 노면의 반사에 크게 영향을 받으므로 그림자 및 노면반사에 대한 대책이 있어야 한다. 또한, 3)크랙실링 작업은 혼잡비용(road-user cost)의 감소를 위해 야간에도 수행될 수 있어야 하므로 야간작업에 대한 대책 및 4)크랙 네트워크의 형태가 굴곡면을 가지고 있을 경우 원활한 굴곡면 실링을 위해 말단장치가 회전되어야 한다. 5)이동의 용이성 및 단차가 있는 도로면 실링을 위해 자동화 장비는 텔레스코핑(telescoping) 기능을 갖추어야 하고, 6) 효과적인 실링면 마무리 작업을 할 수 있도록 말단장치가 설계되어야 한다.

(3) 세부 구성요소의 설계 및 프로토타입 장비의 제작

크랙실링 자동화 장비의 개발을 위한 주요 고려사항 분석결과를 바탕으로 그림 5와 같이 크랙실링 자동화 장비의 모체역할 및 수평이동(X축)을 담당하는 프레임과 갠트리부, 말단장치의 부착 및 수직이동(Y축)을 담당하는 카트부, 실린트를 분사하는 역할을 수행하는 터렛부를 설계하였다. 프레임은 내구성 및 뒤틀림 방지를 위해 ㄷ형강을 사용하였고(그림 5-①), 갠트리부의 X축 이동을 위해 볼 스크류 및 가이드를 설치하였다. 또한, 갠트리부에도 볼 스크류 및 가이드가 설치되어 말단장치인 터렛부의 탑재를 위한 카트부가 Y축으로 움직일 수 있도록 설계하였다(그림 5-②). 터렛은 단차가 있는 도로면 이동 및 비 크랙실링 작업(idle path) 시 제어신호에 따라 상하로 움직임으로써 도로면과 일정간격을 유지 할 수 있도록 하였으며, 효과적인 실링면 마무리 작업을 위해 U자형의 스퀴즈를 부착하였다(그림 5-③).

3.2 크랙실링 자동화 장비의 운영절차

본 연구에서는 개발된 크랙실링 자동화 장비의 운영을 위해 국내 표준 시방서 상의 규정에 따라 커팅 크랙을 대상으로 크랙실링 자동화 장비의 효율적인 운영 절차를 다음과 같은 7단계로 제안하였다(그림 6).

- 1) 도로면에 크랙실링 대상인 종방향, 횡방향, 블록 크랙이 존재하면 노무자는 시방서 규정에 따라 크랙을 폭 1.2~2cm × 깊이 2~2.5cm로 커팅한다.
- 2) 크랙실링 자동화 장비 상단에 부착된 CCD 카메라를 통해 도로 및 크랙 이미지가 획득(image acquisition)되며 이는 시스템 운영자의 모니터 상에 컴퓨터 내의 프레임 그레버(frame grabber)를 통해 실시간으로 입력된다.
- 3) 시스템 운영자는 실시간으로 입력된 모니터 상의 도로 영상에서 크랙의 유무를 파악하여 크랙이 존재하면 크랙실링 자동화 장비를 정지시킨다.
- 4) 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링을 완전 자동으로 수행하기 위해 이진화 및 노이즈 제거 알고리즘을 이용하여 크랙 이외의 노이즈를 완벽하게 제거한다. 한편, 반자동으로 크랙 맵핑 및 네트워크 모델링을 수행할 때에는 이진화 과정을 수행한다.
- 5) 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 알고리즘을 이용하여 크랙 네트워크의 중앙선을 추출하고, 크랙실링 자동화 장비의 말단장치를 모델링 결과에 따라 구동시키기 위해 크랙 네트워크의 좌표를 일정간격으로 컴퓨터 메모리에 저장한다.
- 6) 컴퓨터는 크랙 네트워크 모델링 결과로부터 얻어진 좌표 값을 토대로 최적의 경로계획을 자동으로 수립한다.
- 7) 최적의 경로 계획에 따라, 크랙실링 자동화 장비의 말단장치는 공기청소, 실린트 주입, 스퀴즈 작업을 동시에 수행하며 위 과정은 해당 일의 크랙실링 작업이 완료될 때까지 반복된다.

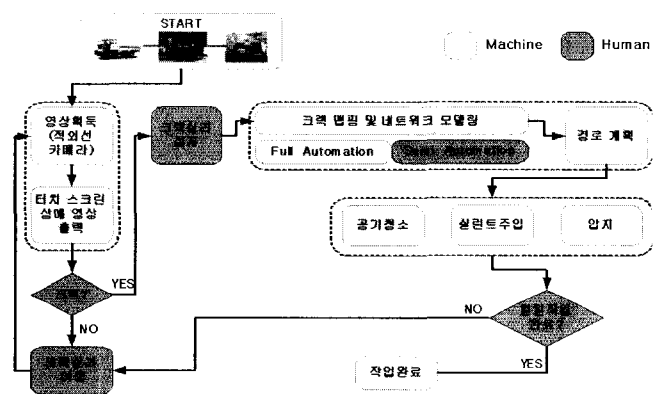


그림 6. 크랙실링 자동화 장비의 운영 절차

4. 크랙실링 자동화를 위한 비전알고리즘의 개발

4.1 이진화 및 노이즈 제거 알고리즘

크랙실링 자동화 장비가 크랙 네트워크의 중앙을 따라 말단장치를 움직이며 실린트를 분사하기 위해서는 노이즈가 존재하는

도로면 영상으로부터 크랙 네트워크만을 추출하여 이를 모델링 하기 위한 이진화 및 노이즈 제거 알고리즘의 개발이 필수적으로 요구된다. 이진화란 입력 영상(그림 7-①)을 바탕으로 0~255사이의 명도값 범위 내에서 임계값(threshold value)을 정하여 임계 값 이하의 픽셀은 0(black)의 값을 부여하고, 임계 값 이상의 픽셀은 255(white)값을 부여하여 목적물(크랙)을 용이하게 분리하는 기법이다(그림 7-②). 본 연구에서는 이진화를 통해 입력 영상에서 크랙 네트워크를 개략적으로 분리한 후 노이즈 제거 과정을 통해 크랙과 노이즈를 완전히 분리하였다. 노이즈 제거는 1)이진화된 결과 영상(그림 7-②)에서 각각의 픽셀을 그룹핑(grouping)하여 서로 인접한 픽셀을 하나의 개체로 묶어주는 과정, 2)각각의 개체들에 대하여 기하학적인 특성(feature)을 구하는 과정, 3)실험에 의해 구해진 기준에 따라 크랙과 노이즈를 판별하고 노이즈를 삭제하는 과정을 거침으로써 수행된다. 이진화된 결과 영상에서 각각의 개체를 그룹핑하고 라벨을 부여함으로써 각 개체의 특성을 확보할 수 있으며, 라벨링된 각각의 개체들은 평균 명도 및 면적, 둘레, 둘레-면적 비율, 직경, 얇기(직경/면적), 원형도($4 \times \pi \times A/L^2$)에 따라서 노이즈로부터 크랙 네트워크를 완벽하게 분리할 수 있다(그림 7의 ③). 그러나 일반적으로 도로면 영상에 적용된 노이즈 제거 알고리즘으로부터 추출된 크랙은 그 경계(edge)가 매우 거칠며 내부에 공극을 지니게 되므로(그림 7-③) 실링 되어질 크랙 네트워크의 정확한 모델링을 위해서는 팽창 연산이 필연적으로 요구된다. 팽창 연산은 3×3픽셀 크기의 마스크를 사용하여 마스크 내에 하나의 화소라도 흑화소가 있으면 모두 흑화소로 바꾸는 연산 과정이다. 이와 같은 팽창 연산을 통해 각 크랙 개체들은 전

체적으로 확대되어 공극을 매우게 되고 크랙 경계는 평활화(smoothing) 된다(그림 7의 ④). 또한, 노이즈 과정에서 발생된 크랙 정보의 손실 부분(그림 7-③의 a, b, c)은 추후 설명되어질 에지링킹(edge linking) 과정을 통하여 연결성(connectivity)이 확보된다.

4.2 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 알고리즘

디지털 CCD 카메라를 통해 입력된 크랙 네트워크의 존재 유무 및 실링 위치를 인식하고 크랙 네트워크의 중앙을 따라 크랙 실링 자동화 장비의 말단 장치를 구동하기 위해서는 크랙 네트워크 중앙의 좌표 값을 정확히 산출 할 수 있는 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 알고리즘의 개발이 요구된다. 이는 작업생산성 향상 측면에서 완전 자동으로 개발하는 것이 바람직하나 본 연구에서는 주변 환경이 영상처리 결과에 미치는 잠재적인 영향을 고려하여 반자동화 방식과 완전 자동화 방식으로 크랙 네트워크를 맵핑 및 모델링할 수 있는 비전 알고리즘을 개발하였다.

1) 완전자동에 의한 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링

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 기술게(보통 1픽셀 폭) 처리하는 디지털 영상처리 기술이다. 세선화 알고리즘의 원리는 크랙 네트워크의 외곽을 순차적으로 삭제하면서 중심 뼈대(skeleton)만을 추출하는 것으로서 1픽셀의 굵기가 되었을 때 처리 과정을 마친다. 결과적으로 세선화된 크랙 네트워크의 폭은 1픽셀이 되고 그 결과 값은 커닝 크랙너비의 중심부에 위치한다. 그러나 문자 인식용으로 개발된 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 8과 같이 3×3 마스크를 기반으로 하고 있으며 임의의 화소 p는 X1~X8에 해당하는 8개의 이웃 화소를 갖는다(그림 8-①). 가중치는 임의의 흑화소에 있어서 8-이웃에 위치한 흑화소의 개수이고, 그림 8의 ②와 ③은 입력된

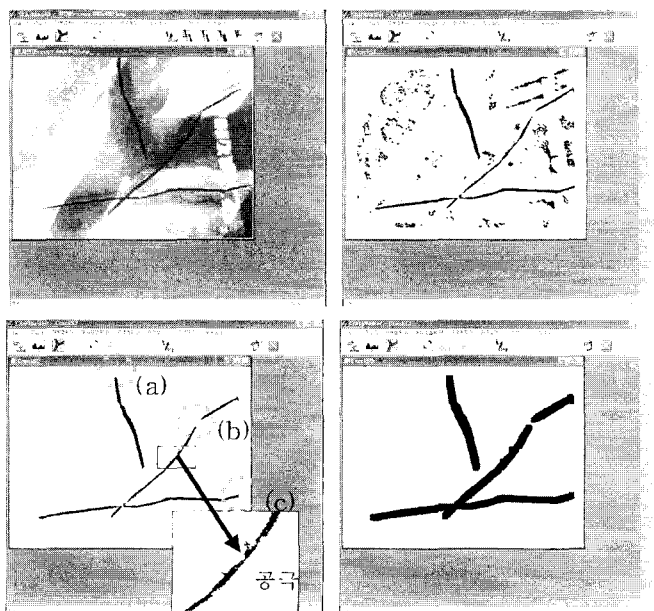
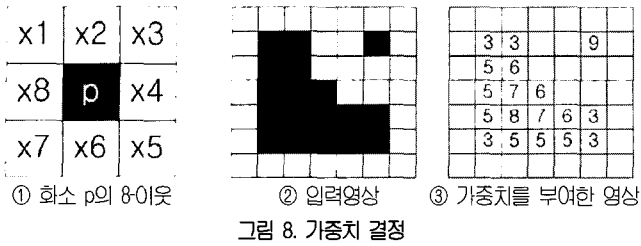


그림 7. 이진화 및 노이즈제거, 팽창과정

이진영상의 흑화소에 가중치를 부여한 것이다.



본 연구에서는 임의의 화소 p가 흑화소일 때 p를 백화소로 변환할 것인가를 결정하기 위해 임의의 화소 p의 가중치를 결정한 후 그림 9와 동일한 조건일 때는 p를 백화소로 변환하고 그림 9와 상이한 조건일 때는 p를 흑화소로 보존함으로써 크랙 네트워크를 효과적으로 세선화하였다.

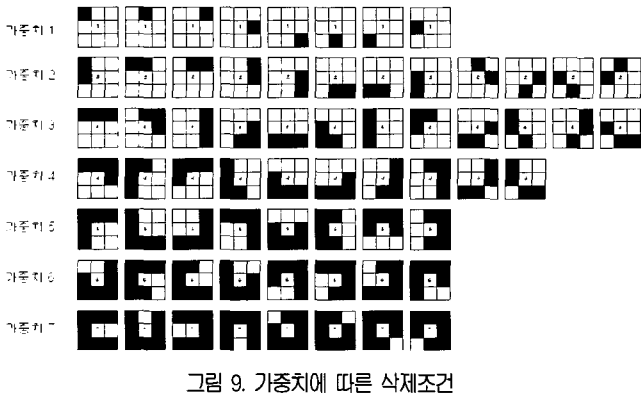
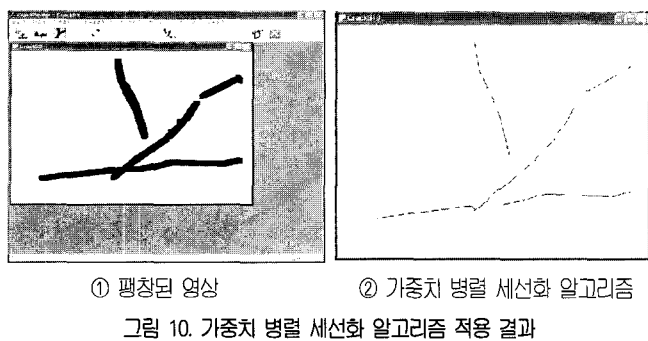


그림 10은 노이즈 제거 과정을 거쳐 팽창된 영상을 입력하여 개발된 가중치 병렬 세선화 알고리즘을 적용한 결과이다.



세선화 알고리즘을 수행한 영상(그림 10-②)은 크랙 네트워크의 중심선을 의미하는 1픽셀 두께의 수 개의 선으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비의 말단장치를 세선화 결과에 따라 구동시키기 위해 세선화된 크랙 네트워크를 개체로 추출하여 큐 형태의 메모리 구조에 저장하는 모델링 과정을 거

쳤다. 또한, 장비 운영자가 맵핑 및 모델링한 결과를 직접 확인하고 오류를 수정하기 위해 노이즈가 제거된 입력 영상에 크랙 개체의 좌표를 오버레이(overlay)하여 화면에 표시하였다(그림 11-②). 한편, 앞서 언급된 바와 같이, 입력영상을 이진화하고 노이즈를 제거하는 과정에서 크랙 네트워크의 끊김 현상(그림 7-③)이 발생할 수 있으므로 이에 대한 연결성을 확보하기 위해 에지링킹(edge linking) 과정을 수행하였으며(그림 11-③), 크랙 네트워크 모델링 결과를 텍스트 형태로 출력(그림 11-④)하여 장비 제어 프로그램에 전송할 수 있도록 하였다.

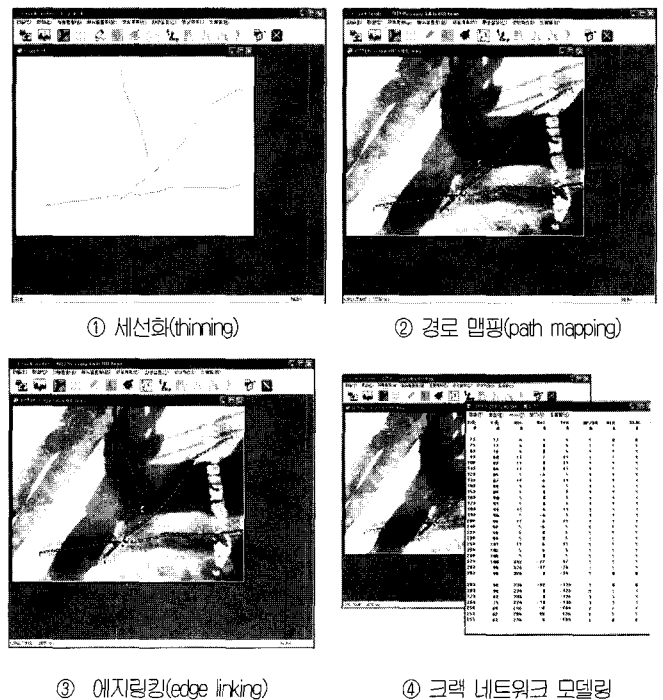


그림 11. 큐를 사용한 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링

2) 반자동에 의한 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링

앞서 언급된 바와 같이 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 결과는 주변 환경에 민감할 수 있으므로 본 연구에서는 장비 운영자가 편의에 따라 완전 자동화 방식과 반자동화 방식을 선택적으로 운영할 수 있도록 하였다. 반자동화 방식에 의한 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 과정은 그림 12와 같이 장비 운영자가 스타일러스 펜을 이용하여 1)크랙 네트워크를 따라 선을 드로잉(drawing)하면, 2)컴퓨터는 드로잉 선상에 일정간격으로 노드점을 생성하고, 3)노드점을 중심으로 5×41 픽셀 크기의 박스를 생성한다. 또한, 4)생성된 박스 내에서 지역 이진화(local thresholding)를 통해 0(배경)과 1(크랙)로 구성된 이진데이터를 추출하고 1로 구성된 집합의 무게중심으로 노드점을 이동시킴으로써 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링을 완료한다. 이와 같은 반자동에 의한 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 알고리즘은 주변환경 및 노이즈의 영향을

1) 큐는 선입선출(FIFO, First-in, First-out) 방식에 따라 데이터를 입출력하는 데이터 저장구조

적게 받는 장점을 가지고 있으나 완전자동화 방식에 비해 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링을 위해 소요되는 시간이 많은 단점을 가지고 있다. 따라서, 장비 운영자가 효과적인 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링을 위해 주변환경을 고려하여 완전 자동화 방식과 반자동화 방식을 선택적으로 사용할 수 있도록 설계하였다.

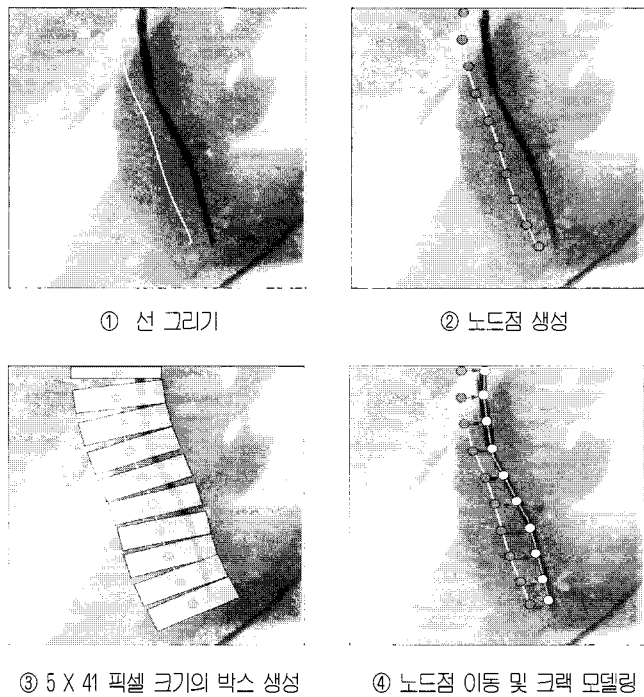


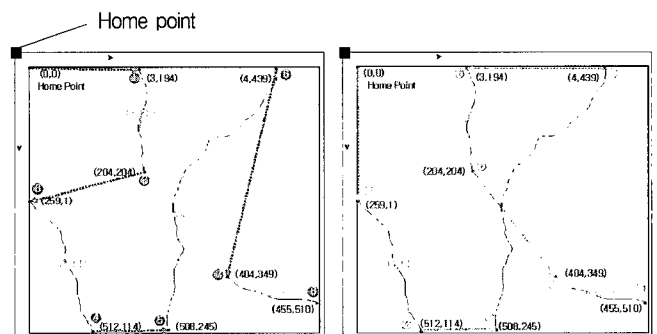
그림 12. 반자동에 의한 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 과정

4.3 최적 경로계획 알고리즘

경로 계획이란 영상 내에 존재하는 다수의 크랙 네트워크에 대하여 크랙실링 자동화 장비의 말단장치가 이동할 경로를 계획하는 것이다. 하나의 영상에 다수의 크랙 네트워크가 존재하는 경우 $2n \times n!$ 가지의 경로가 존재한다. 기존에는 도로면 크랙실

링을 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 13의 ①).

그러나 그리디 경로계획 알고리즘은 항상 최적의 경로를 찾지 못하는 단점을 가지고 있으므로 본 연구에서는 크랙 네트워크를 경로의 수만큼 직접 방문 연산하여 가장 적은시간이 소요되는 경로를 찾아내는 최적 경로계획 알고리즘을 제안하였다. 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 네트워크의 수가 6개 이하일 때는 최적 경로계획 알고리즘을 사용하고, 6개를 초과할 때는 기존 그리디 경로계획을 컴퓨터가 자동으로 판단하여 사용될 수 있도록 설계하였다. 그림 13은 4개의 크랙 네트워크에 대해 그리디 경로계획 알고리즘과 최적 경로계획 알고리즘(그림 13의 ②)을 적용한 결과를 비교한 것이다.



① 그리디 경로계획 알고리즘 ② 최적 경로 계획 알고리즘

그림 13. 기존 그리디 경로계획 및 최적 경로계획 알고리즘

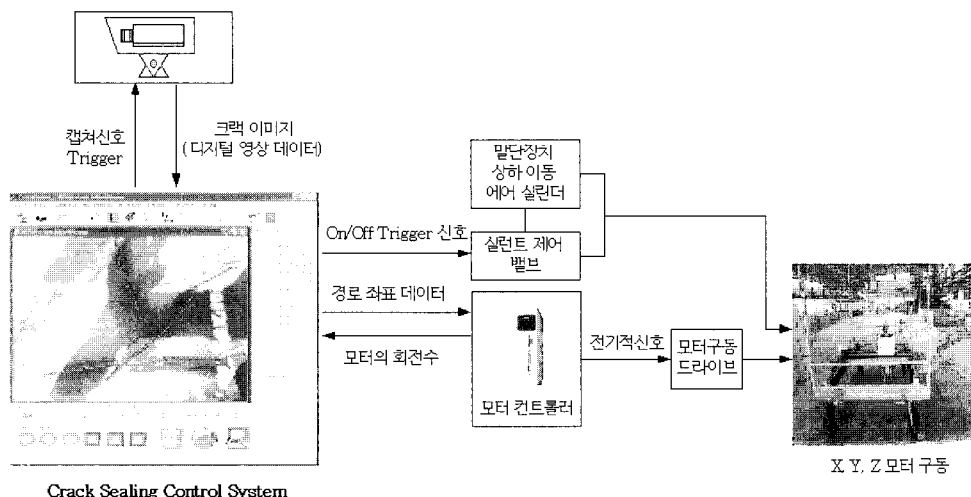


그림 14. 하드웨어와 소프트웨어의 통합

5. 시스템 통합 및 크랙실링 자동화 장비의 실험

(1) 하드웨어와 소프트웨어의 시스템 통합

카메라로부터 도로 영상이 실시간으로 모니터에 입력되면 비전 소프트웨어를 통해 크랙 맵핑 및 모델링, 경로계획이 수행된다. 크랙실링 자동화 장비가 경로 계획된 좌표 값에 따라 정확히 구동되기 위해서는 개발된 비전 소프트웨어와 장비 구동을 위한 제어 소프트웨어간의 통합이 이루어져 크랙실링 자동화 장비 모체를 제어해야 한다.

따라서, 본 연구에서는 크랙실링 통합 시스템을 그림 14와 같이 개발하여 크랙실링 자동화 장비에 적용하였다. 크랙실링 통합 시스템은 X, Y, Z 축 제어를 위해 경로 계획된 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 결과 값을 전기적 신호로 컨트롤러를 통해 모터 구동드라이브로 전송할 수 있으며, 말단 장치 상하이동 및 실린트 펄터로부터 공급되는 실린트를 크랙 네트워크의 시작점과 끝점에 따라 자동으로 제어할 수 있도록 on/off 트리거 신호를 전송할 수 있도록 개발되었다.

(2) 크랙실링 자동화 장비의 실험

시스템 운영절차를 바탕으로 제시된 비전 알고리즘과 하드웨어의 가동상태 및 문제점 분석, 개선사항 등의 도출을 위해 다수의 실험실 실험을 수행하였다. 실험결과 X축 이동을 담당하는 갠트리부와 Y축 이동을 담당하는 카트부는 제어 신호에 따라 3000RPM이하에서 약 20cm/sec로 원활히 구동되었고 작업 영역이탈 방지를 위한 리미트 스위치(limit switch)도 정상적으로 작동하였다. 터렛부는 비 실링 작업구간 이동을 위해 on/off 트리거 신호에 따라 상하 운동이 가능하여 크랙 네트워크 실링작업 시 지면과 밀착되어 작업하고 비 실링작업 시 지면과 이격되어 구동되었다. 또한, 실린트 경화 방지를 위해 설치된 실리콘 히터는 실린트 용융점인 180℃까지 온도가 상승되었고, 압지장치인 스퀴즈는 크랙의 굴곡을 따라 회전되어 크랙 네트워크를 원활히 압지하며 실링 작업을 수행할 수 있는 것으로 분석되었다. CCD 카메라를 통해 도로면 영상을 촬영·입력하여 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링을 위해 개발된 비전 알고리즘을 실험한 결과 640×480 픽셀 크기로 입력된 영상은 이진화 및 노이즈제거, 크랙 맵핑 및 모델링, 최적 경로계획의 순과정을 약 0.5초 이내에 수행하였고 약 87%이상의 정확도를 갖는 것으로 분석되었다. 그러나 실험 결과 크랙 네트워크 교차점에서는 경우에 따라 크랙 모델링 결과에 오류가 발생되어 장비 사용자에게 의한 매뉴얼 에디팅(manual editing)작업을 추가함으로써 정확한 크랙실링 작업이 수행될 수 있도록 알고리즘을 수정·보완 하였다.

6. 결론

본 연구에서는 예방적 차원의 도로면 유지 보수 공법인 크랙실링을 자동화하기 위한 크랙실링 자동화 장비의 프로토타입 및 효과적인 크랙실링 작업을 위한 노이즈 제거 알고리즘, 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 알고리즘, 최적 경로계획 알고리즘을 개발하였다. 본 연구를 통해 도출된 연구결과는 다음과 같다.

(1) 자동화 기술 개발 현황 분석

본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비 개발을 위해 요구되는 기술 중 응용 가능한 최신 요소기술을 분석하기 위해 현재까지 개발된 자동화 기술 개발 현황을 조사·분석하였다. 특히, 미국에서 연구 개발된 CMU Laboratory Prototype(1990), CMU-UT Field Prototype(1992), CalDavis Field Prototype(1993), UT Field Prototype(1995), UT ARMM(1999) 등의 크랙실링 자동화 장비를 분석하여 응용가능한 기술과 문제점 등을 도출하였다.

(2) 크랙실링 자동화 장비의 프로토타입 개발

본 연구에서는 현재까지 연구 개발된 크랙실링 자동화 장비의 개발 현황 및 문제점, 크랙실링 자동화 장비 개발을 위한 주요 고려사항 분석 결과를 바탕으로 국내 현실에 적합한 크랙실링 자동화 장비의 프로토타입을 개발하였다. 이를 통해, 노무인원의 감소 및 노무자의 안전성 확보, 품질 및 생산성 향상을 통한 공기단축과 원가절감 등의 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 노이즈 제거 알고리즘 개발

커팅된 크랙 네트워크의 맵핑 및 모델링을 위해 도로면 영상을 히스토그램으로 분석하고 임계 값을 자동으로 산출하여 도로면 영상을 이진화 하였다. 이진화된 영상을 바탕으로 개체화 및 특성 추출 기법을 이용한 노이즈 제거 알고리즘을 개발하여 실험한 결과 도로면 영상으로부터 크랙과 노이즈를 완전히 분리할 수 있었다.

(4) 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링, 경로계획 알고리즘 개발

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. 본 연구를 통해 개발된 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 알고리즘은 장비 운영자가 반자동/완전자동으로 시스템을 운용하여 주변 환경의 영향 없이 실링 품질의 균일성을 확보할 수 있도록 하였

다. 또한, 본 연구에서는 경로계획을 위해 입력 영상에 존재하는 모든 크랙 네트워크에 대한 경우의 수만큼을 방문하여 연산 거리의 상호 비교분석을 통해 가장 짧은 경로를 도출하는 최적 경로계획 알고리즘을 개발 하였다. 최적 경로계획 알고리즘 실험 결과, 한 화면에 존재하는 크랙 네트워크의 수가 6개 이하일 때 항상 최적의 경로를 찾아내어 기존 방식에 비해 크랙실링에 소요되는 작업시간을 단축할 수 있었다.

향후 상기와 같은 연구 내용을 바탕으로 크랙실링 자동화 장비의 현장 적용을 통한 문제점 분석, 개선사항 도출 및 실용화에 대비한 개발 장비의 수정·보완이 요구된다. 또한, 개발된 크랙실링 자동화 장비를 바탕으로 재래식 크랙실링 공법과 자동화 크랙실링 공법간의 경제성(tangible and intangible benefits) 및 생산성, 품질 등의 비교·분석을 통해 자동화 크랙실링 공법의 실용성 및 효율성을 입증하고 실용화 방안의 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부(1999), "도로포장 유지보수 실무편람".
2. 한낙희, 이필규, (1997), "가중치를 이용한 병렬 세션화 알고리즘", 공학석사학위논문, 인하대학교.
3. 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.
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. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Kim, Y. S. (1997), "Man-machine Balanced Control for Automation of Infrastructure Crack Sealing", The University of Texas at Austin.
10. Hall R. W. (1989), "Fast parallel thinning algorithms: Parallel speed and connectivity preservation", Commun. Assoc. Comput. Mach, vol. 32, no. 1, pp.124-131.
11. 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.
12. Guo, Z. and Hall, R. Q. (1989), "Parallel thinning with two-subiteration algorithms", Commun. Assoc. Comput. Mach, vol. 32, no. 3, pp.359-373.

Abstract

Crack sealing is a maintenance procedure that is commonly used to reduce pavement degradation. If cracks in pavements are not sealed, surface water penetration can reduce the strength of the sub-base layers, which can result in increased deflections of the pavement. Reduced strength of the sub-base also accelerates the deterioration of the surface, due to development of greater cracking and potholes. Crack sealing is performed to reduce water and debris penetration, thereby helping to maintain pavement structural capacity and limiting future degradation. The process of sealing cracks in pavements is however dangerous, costly, and labor-intensive operation. Labor turnover and training are increasing problems related to crack sealing crews, and as traffic volumes increase. Automating crack sealing can reduce labor and road user costs, improve work quality, and decrease worker exposure to roadway hazards. The main objective of this research is to develop an automated system for sealing cracks in pavement. Extension of the algorithms and tools presented in this research is also recommended for future study.

Keywords : Crack, Crack sealing, Road maintenance, Automation