

## 도로면 크랙실링(균열보수)을 위한 자동화 장비 개발 연구

김정렬, 한국건설기술연구원



조문영, 한국건설기술연구원



### 1. 서 론

아스팔트 포장도로는 도로 총 연장(91,396km; 2001년 12월 기준)의 76.7%인 70,146km에 이르고 있으며, 유지보수를 위해 매년 막대한 사업예산을 투자하고 있다. 또한, 교통량이 많은 대도시나 고속도로에서 시행되는 도로면 유지보수 작업의 경우 노무자가 열악한 작업환경 내에서 작업을 수행해야 하므로 안전성 확보가 어렵고, 도로면 유지보수 작업의 특성상 현장 노무자의 잦은 이직(labor turnover) 및 3D업종의 기피로 인한 숙련공의 부족현상은 현 도로면 유지보수 작업의 생산성 및 품질저하를 가져오고 있다. 선진 외국의 경우는 도로면의 유지관리에 있어서 파손 초기에 수행하는 예방적인 유지보수 방법을 선호하며, 이들 공법의 자동화 장비의 개발을 통해 안전성, 생산성 향상 및 경제성 확보에 다양한 노력을 기울이고 있다. 그러나 국내의 경우는 도로면 유지보수 공사를 위한 기술 축적이나 자동화 장비 개발을 위한 시도가 미약한 실정이다. 따라서, 본 고에서는 다양한 도로면 유지 보수 방법 중 예방적인 방법인 크랙실링(균열보수) 방법과 그 효과를 설명하고, 국내에서의 크랙 실링 공법의 프로토타입 자동화 장비의 개발 사례를 소개하고자 한다.

#### 1.1 크랙 실링(균열 보수) 공법

아스팔트 포장 도로의 유지보수를 수행함에 있어 노면의 파손정도에 따라 다양한 공법이 사용 가능하다. 그 중 크랙 실링 공법은 도로 크랙부분에 충전재를 주입하고 후속 크랙이나 팽해를 방지하여 물과 이물질의 침투를 막아 도로의 수명

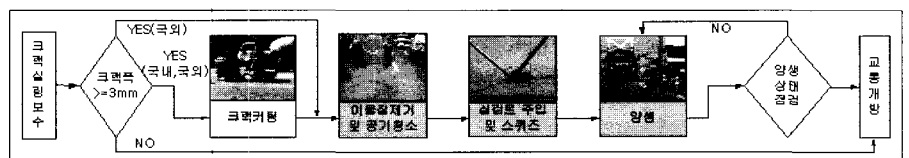
을 늘리는 예방적 차원에서의 경제적인 도로 유지보수 공법이다.

재래식 크랙실링 공법의 작업 절차는 '도로포장 유지보수 실무편람'과 시방서에 따르면 '홈 직투 방식'의 경우 다음 그림과 같이 폭이 3mm이상인 크랙을 대상으로 하며, 크랙을 폭 1.2~2cm, 깊이 2~2.5cm 정도로 커팅한 후 이물질을 제거하고, 충전재인 실런트를 주입하는 방법으로 수행하도록 되어 있다. 국외 크랙 실링 작업 절차 역시, 크랙 커팅 작업의 유무를 제외하고는 국내와 큰 차이점은 없다.

#### 1.2 크랙 실링(균열 보수) 공법의 효과

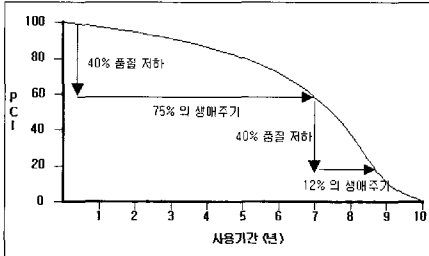
국내에서 가장 많이 사용하고 있는 아스팔트 포장 도로의 유지보수 방법은 '덧씌우기'로 전체의 약 62%를 차지하고 있다. 반면에 크랙실링, 슬러리실 등의 표면처리 방법은 도합 3% 정도이다. 물론 크랙실링과 덧씌우기는 서로 다른 성격의 유지보수 방법이나, 미국 등지의 국가에서는 전체의 유지/보수 방법의 26%정도를 크랙실링을 사용하여 저렴한 비용으로 초기 파손 확대의 방지 효과를 얻고 있다. 이러한 효과를 좀더 자세히 설명하면 다음과 같다.

다음 그림은 PCI(pavement condition index)지수로 본 도로의 생애주기 곡선이다. 전형적인 도로수명을 10년으로 가정하였을 경우 도로수명이 약 75%에 이르는 약 7년 동안 PCI지수가 40% 하락하고 추가적인 40%의 하락은 그 후 생애주기 12%동안에 발생하고 있다는 것을 보여준다. 또한 도로수명이 다된 시점인 약 9년이 경과된 후에 도로조건을 복원하려는 것은 도로수명의 75%인 7년에서 복구하려는 것보다 보통 4~5배의 비용을 소요하게 되며 유지 보수 비용의 절감을 위해서는 도로 하부구



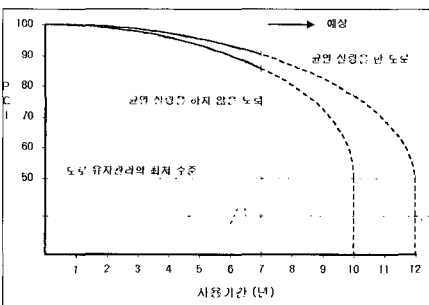
재래식 크랙 실링 작업 절차

조의 파손악화를 제한함으로써 PCI 범위를 60~90%로 유지해야 한다.



PCI 지수로 본 도로의 생애주기 곡선 (Shahin, 1990)

다음 그림의 PCI곡선은 크랙 실링을 수행한 도로수명이 실링을 하지 않은 도로의 수명보다 2년이 연장되는 것으로서 PCI곡선의 기울기가 완만해짐은 도로수명의 연장을 의미한다. 미국 유타 도로국의 연구에 따르면 크랙 실링 공법은 추가적인 크랙의 발생과 팽흔의 형성을 현저히 줄이며 크랙 실링을 한 경우 팽흔과 추가적인 크랙이 1%가 발생한 반면, 크랙 실링을 하지 않은 경우에는 75~80%가 발생한 것으로 나타났다. 또한, 온타리오 도로국의 연구에 따르면 크랙 실링 공법은 적어도 4년간은 도로사정의 악화를 저지하고 내구성을 연장하는 것으로서 크랙 실링 공법이 경제적이고도 효율적인 예방 유지보수공법이라는 것을 나타낸다.

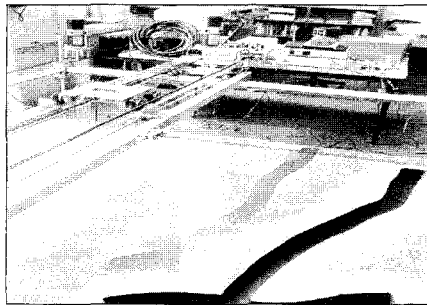


크랙 실링 공법의 효과(Ponniiah, 1995)

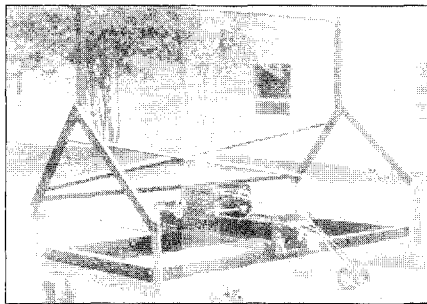
## 2. 크랙 실링 공법 및 기술 개발 현황

한편, 선진외국의 경우 이미 오래 전부터 크랙 실링 공법을 선호하여 크랙 실링을 자

동화 하기 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(1997)등의 크랙 실링 자동화 장비를 연구·개발하여 상용화 단계에 이르고 있다.

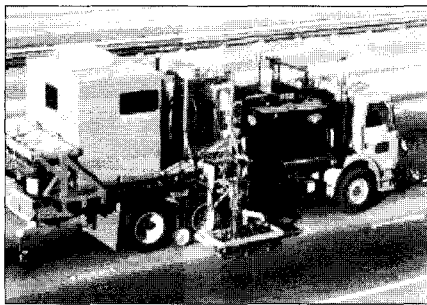


(a) CMU

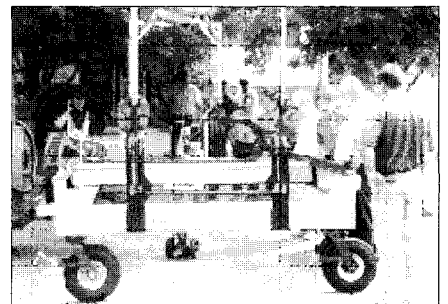
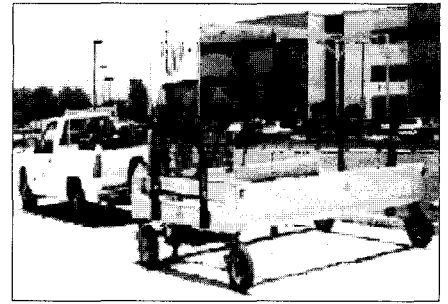


(b) CMU-UT

CMU Laboratory Prototype와 CMU-UT Field Prototype



CalDavis Field Prototype와 UT Field Prototype



Automated Road Maintenance Machine(ARMM)

## 3. 크랙 실링 자동화 장비의 개발

크랙실링 자동화 장비는 PMS(Pavement Maintenance System)를 위한 포장상태 조사장비와는 다른 개념의 장비로써 도로면에 발생한 크랙을 탐지하고 실시간으로 실링하는 장비이다. PMS를 위한 포장상태 조사장비와 크랙실링 자동화를 접목시켜 자동화 장비를 개발하는 것이 이상적이기는 하나, 생산성과 경제성을 보증하면서 두 장비의 역할을 모두 수행할 수 있는 장비를 제작하는 것은 경제적·기술적 측면에서 타당성이 없는 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 효율적으로 크랙 실링을 자동화 할 수 있는 장비의 개발에 초점을 맞추었다.

이러한 크랙 실링 자동화 장비의 요구 운동을 만족시킬 수 있는 장비구성요소는 크게 하드웨어(hardware)부와 소프트웨어(software)부로 구분할 수 있다. 이 때 하드웨어 부분은 장비의 구동을 위한 구동부와 제어를 위한 제어부로 구성되며 소프트웨어부분은 크랙탐지를 위한 센싱(sensing)과 장비 구동을 위한 영상(image) 조작 및 변환 작업, 크랙 실링 작업을 수행하는 컨

트롤(control)로 구분된다.

장비의 구동을 위한 매니플레이터로는 개발장비의 4 자유도를 만족시킬 수 있도록 X-Y 테이블의 3축 운동을 기본으로 하여 구 좌표형의 Z축 회전운동을 도입한 형태를 취했다. 그리고 말단장치인 터렛부는 크랙 청소를 위한 노즐과 실린트 타설량 조절을 위한 조절부, 타설된 실린트를 밀고 지나가는 스위즈, 작업간 실린트 응고방지를 위한 가열장치로 구성된다. 이러한 X-Y 테이블과 터렛부의 동력장치는 3개의 서보모터를 사용하여 장비의 요 구사항인 X, Y축 운동과 Z축 회전운동을 만족시키게 되며 스위즈 작업을 위한 텔레스코핑 기능은 지면에 대해 일정 압력을 가하는 스프링 실린더의 기계적 동작에 의해 이루어진다.

지금까지 언급된 하드웨어부 구성장비들은 열악한 작업환경에서도 구동 가능한 산업용컴퓨터에 의해 네트워크를 구성하고 조작하게 된다. 마지막으로 시스템 운영자가 최종 사용하게 될 입출력장치로는 운전석의 작은 공간에서도 사용이 가능한 터치 스크린을 사용하여 입출력 도구를 단일화한다.

센싱과 컨트롤로 나뉘는 소프트웨어부는 크랙탐지를 위한 영상획득의 방법으로 암막, 적외선 카메라, 조명으로 구성되어진 비전 시스템을 구성한다. 비전 시스템을 통해 획득된 영상은 노이즈제거 알고리즘을 통해 노이즈가 제거된 크랙 이미지를 이진화 영상으로 표현하게 되며 크랙탐지 및 맵핑 알고리즘을 이용하여 크랙이미지를 그룹핑하고 그룹별 중앙점 배열로 변환한다. 마지막 단계인 경로 계획 알고리즘은 크랙 탐지 및 맵핑 알고리즘의 맵핑 결과좌표를 작업을 위한 새로운 변환좌표로 재 조합한 후 그룹간의 연계를 통하여 크랙 실링을 위한 경로 계획을 수립한다. 이렇게 만들어진 경로 계획은 컨트롤 박스로 전달되어 장비를 구동하게 되고 크랙 실링 작업을 수행하게 된다.

즉 구동부는 크랙을 탐지 및 맵핑하고 크랙을 실링하기 위해 단위작업 영역(work space)을 물리적으로 설정하는 매니플레이터(manipulator)와 크랙 실링 작업을 수행하는 말단장치(end effector)로 구성된다. 그밖에 동력장치(power supply)와 제어장치(control box)가 하드웨어부의 주요 구성요소가 된다. 반면, 소프트웨어부는 크랙탐지를 위한 비전 시스템(vision system)의 센싱 기술과 탐지된 크랙의 노이즈 제거, 크랙 맵핑, 크랙 실링을 위한 경로 계획의 제어기술(control)의 요소기술로 구성된다. 그 세부 요소는 다음 그림과 같다.

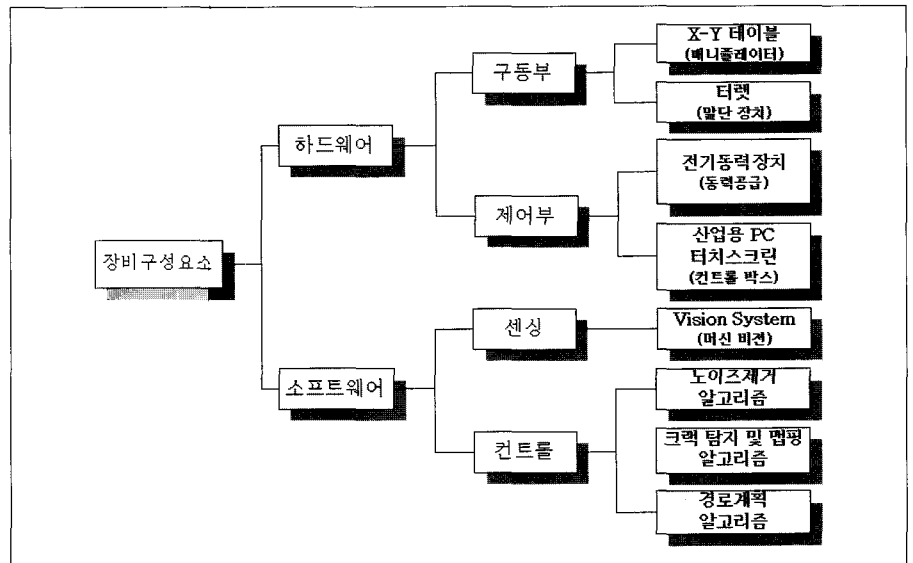
3.1 소프트웨어 개발

효율적으로 크랙 실링을 자동화하여 품질 및 생산성을 향상시키기 위해 다음 그

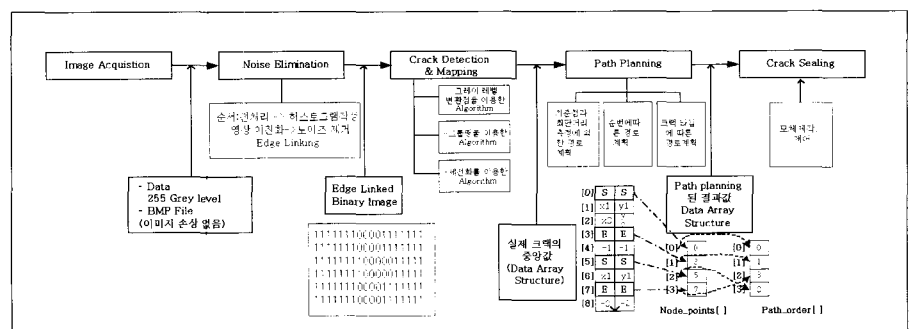
림과 같이 노이즈 제거 알고리즘, 크랙 탐지 및 맵핑 알고리즘, 경로계획 알고리즘을 개발하였다.

1) 노이즈 제거(Noise Elimination)

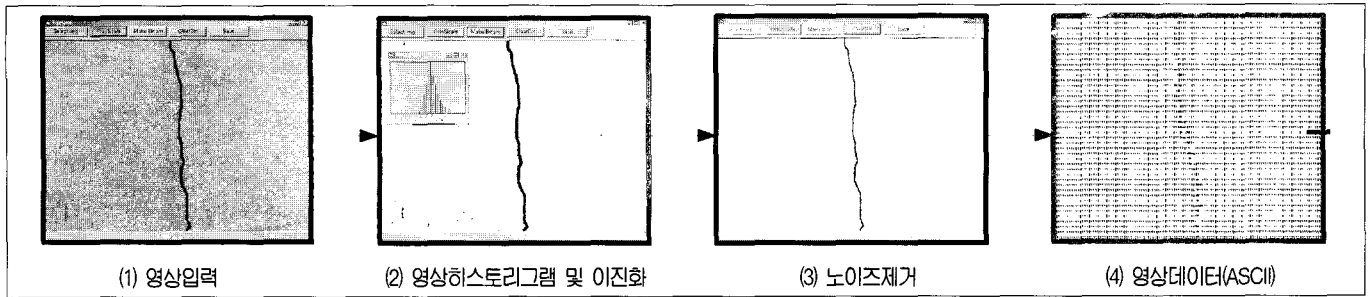
노이즈 제거는 CCD카메라로부터 입력된 영상을 바탕으로 크랙을 제외한 노이즈(타이어, 오일 마크, 기 실링된 크랙 등)를 제거하는 것이다. 크랙 실링 자동화 장비에 장착된 적외선 카메라를 통해 크랙을 포함한 영상신호(그림 (1))가 입력되면 히스토그램을 통해 영상의 명암도(gray level)분석을 수행한다. 명암도 분석을 통해 영상의 특징을 파악하고, 임계값을 설정해 0~255의 값을 갖는 흑백 영상을 검은색과 흰색 2가지 색만을 갖도록 변환하는 이진화를 수행(그림 (2))한다. 그 다음 연속성과 밝기 검사를 수행(그림 (3))하여 노이즈를 제거한다.



크랙 실링 자동화 장비의 최종 구성요소



소프트웨어 시스템의 구성



노이즈 제거 과정

2) 크랙 탐지 및 맵핑

크랙 탐지 및 맵핑 알고리즘은 노이즈 제거에 의해 얻어진 이진 영상을 바탕으로 크랙 실링 자동화 장비의 실린트 분사를 위한 말단장치(터렛)가 크랙의 중앙을 따라 실린트를 정확하게 분사시키기 위한 알고리즘으로써, 작업의 생산성 및 정확성, 품질에 결정적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 크랙 탐지 및 맵핑 알고리즘으로 라인 스냅핑 알고리즘, 변환점 서치 알고리즘, 라인 그룹핑 알고리즘 및 라인 세션화 알고리즘을 제안하였으며, 이 중 변환점 서치 및 라인 세션화 알고리즘이 크랙 탐지 및 맵핑에 가장 효과적인 방법으로 분석되었다.

a) 변환점 서치 알고리즘

디지털화된 이진화상의 각 픽셀은 흰색(1) 또는 검은색(0)의 그레이 레벨 값을 갖는다. 즉, 크랙(crack)은 검은색으로, 배경(background image)은 흰색으로 표현된다. 따라서 이진화된 크랙 이미지 위에 시스템 운영자가 매뉴얼 맵핑을 수행할 경우, 매뉴얼 맵핑 선상의 각 노드(node) 점을 중심으로 한 일정 크기의 바운딩 박스를 창출(creation)한다. 그리고 이를 법선 방향으로 바운딩 시키면서 각 박스에 포함된 모든 픽셀의 그레이 레벨 합이 변환(흑→백 또는 백→흑)되는 두 점을 찾는다면 크랙의 중심부로 매뉴얼 맵핑 선상의 노드점과 라인을 쉽게 이동시키는 것이 가능할 것으로 사료된다. 여기서, 그레이 레벨 합이 변하는 두 점이란 각 법선

방향에 있어 크랙의 가장자리(edges)를 의미한다.

변환점 서치 알고리즘의 크랙 탐지 및 맵핑 과정을 살펴보면 다음과 같다.

① 노이즈가 완전히 제거된 이진화된 크랙 이미지 상에 시스템 운영자가 실링 되어질 크랙에 대한 매뉴얼 맵핑을 수행한다.

② 매뉴얼 맵핑이 완성되면, 매뉴얼 맵핑 선상에 일정한 간격으로 n개의 노드점과 n-1개의 라인이 생성되며 맵핑 선상의 각 노드 점을 중앙점으로 하는 X \* Y 크기(예: 3 \* 3)의 바운딩 박스를 창출한다.

③ 생성된 바운딩 박스의 중앙점을 기준으로, 양측 라인 중 어느 하나의 법선 방향을 따라 박스를 위 혹은 아래로 바운딩 시키면서 박스의 그레이 레벨 합이 변환(예: 3 \* 3일 경우, 흑(0)→백(9) 혹은 백(9)→흑(0))되는 제 1차 변환점(X1, Y1)을 찾는다.

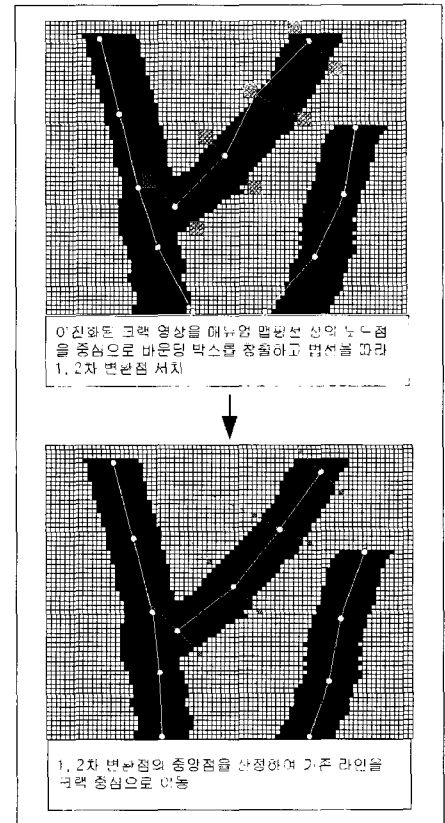
④ 1차 변환점이 선별되면, 다시 법선을 따라 바운딩 박스를 반대 방향으로 이동 시키면서 제 2차 변환(백(9)→흑(0) 혹은 흑(0)→백(9)) 점(X2, Y2)을 찾는다.

⑤ 상기 두 점의 평균점(X3, Y3)을 해당 법선에 있어 크랙의 중심부로 가정하고 기존 매뉴얼 맵핑선상의 노드점을 평균점으로 이동시킨다.

⑥ 생성된 매뉴얼 맵핑 선상의 모든 노드 점들에 대해 위 과정을 반복한다.

상기 알고리즘을 통하여 매뉴얼 맵핑시 시스템 운영자에 의한 human hand-

eye coordination 에러를 수정 및 보완할 수 있을 것으로 판단되며 매우 신속하고 정확하게 각각의 크랙 라인의 중심부를 찾아 나갈 수 있을 것으로 사료된다.



변환점 서치 알고리즘

b) 라인 세션화 알고리즘

세션화 알고리즘은 이진화상을 대상으로 하며 그 안에 포함되는 각각의 연결도형(object)에 대해 연결성(connectivity)을 잃는 경우가 없도록 도형의 중심선을 찾아 가늘게(보통 1 픽셀 폭) 처리하는 이미지 프로세싱 기술이다. 세션

화 알고리즘의 원리는 굵은 윤곽선 (crack)을 양측의 바깥쪽으로부터 순차적으로 삭제해 나가면서 1 픽셀의 굵기가 되었을 때 처리 과정을 마치는 것이다. 결국, 세선화 되어진 크랙 라인의 폭은 1 픽셀이 되고, 크랙의 위치는 커팅되어진 원래 크랙 너비의 거의 중심부에 온다. 또한, 크랙의 연결성이 보존되며 교차부에서도 선이 비뚤어지지 않기 때문에 크랙 탐지 및 맵핑에 대한 응용성이 뛰어나다고 볼 수 있다.

크랙 탐지 및 맵핑을 위한 응용 가능한 세선화 알고리즘은 다음과 같은 절차에 의해 수행될 수 있다.

1st 루프: 처리대상인 검은 픽셀  $I(i,j)$ 에 대해 다음과 같은 조건을 만족하면 지운다.

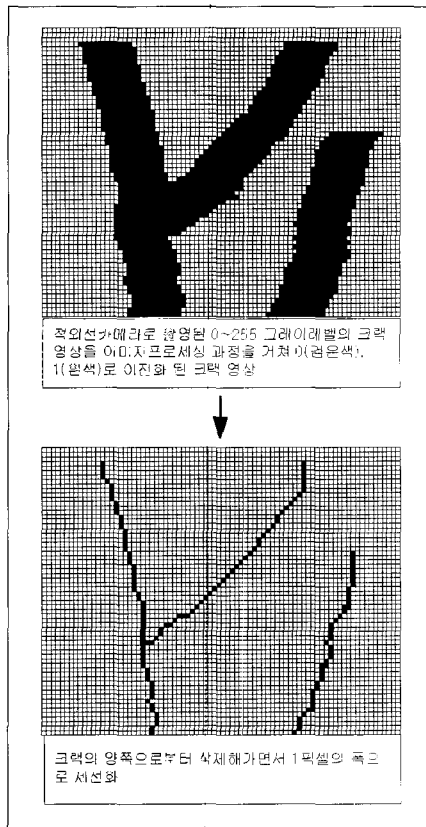
- ① 픽셀  $I(i,j)$ 에 대해 그 주위 픽셀 (adjacent pixels)들의 연결수 (connectivity)가 1이고,
- ② 픽셀  $I(i,j)$ 에 대해 그 주위 픽셀들 중 검은 픽셀이 적어도 2개에서 6개 사이에 있어야 하며,
- ③ 적어도 픽셀  $I(i,j+1)$ ,  $I(i-1,j)$ ,  $I(i,j-1)$  중 하나는 배경 픽셀, 즉 255이어야 하며,
- ④ 적어도 픽셀  $I(i-1,j)$ ,  $I(i+1,j)$ ,  $I(i,j-1)$  중 하나는 배경 픽셀, 즉 255이어야 한다.
- ⑤ 상기 조건에 맞으면 픽셀을 제거한다.

2nd 루프: 처리 대상인 검은 픽셀  $I(i,j)$ 에 대해서 다음과 같은 조건을 만족하면 지운다.

- ① 픽셀  $I(i,j)$ 에 대해 그 주위 픽셀들의 연결수가 1이고,
  - ② 픽셀  $I(i,j)$ 에 대해 그 주위 픽셀들 중 검은 픽셀이 적어도 2개에서 6개 사이에 있어야 하며,
  - ③ 적어도 픽셀  $I(i-1,j)$ ,  $I(i,j+1)$ ,  $I(i+1,j)$  중 하나는 배경 픽셀, 즉 255이어야 하며,
  - ④ 적어도 픽셀  $I(i,j+1)$ ,  $I(i+1,j)$ ,  $I(i,j-1)$  중 하나는 배경 픽셀, 즉 255이어야 한다.
  - ⑤ 상기 조건에 맞으면 픽셀을 제거한다.
- 위의 두 sub-iteration을 계속하여 더

이상 지울 픽셀이 남아 있지 않을 때까지 이를 반복한다.

이상과 같이 2개의 루프로 나뉘어져 있는 것은 방향성불 고려한 것으로, 노이즈를 제거하기 위해 다른 배열에 위치를 기록하고 이를 이용하여 1개의 루프가 끝나면 제거 루프를 돌린다. 만일 2개의 루프가 끝난 뒤 제거 루프를 돌리게 되면 양면이 동시에 제거되므로 픽셀이 짝수로 이루어져 있는 경우 마지막에 모든 픽셀이 제거되는 오류가 발생되므로 주의를 요한다.



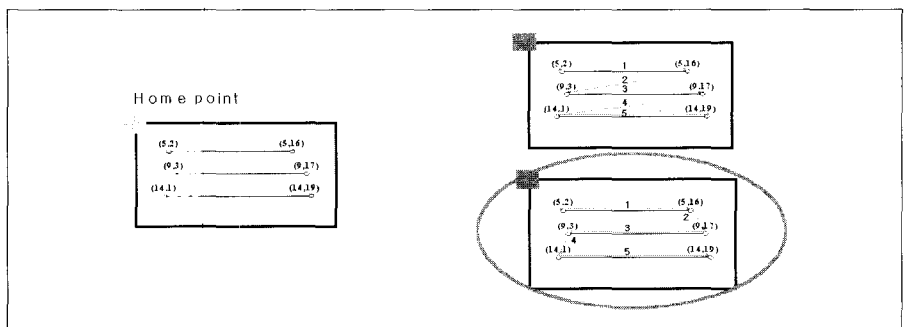
라인 세선화 알고리즘

### 3) 경로계획

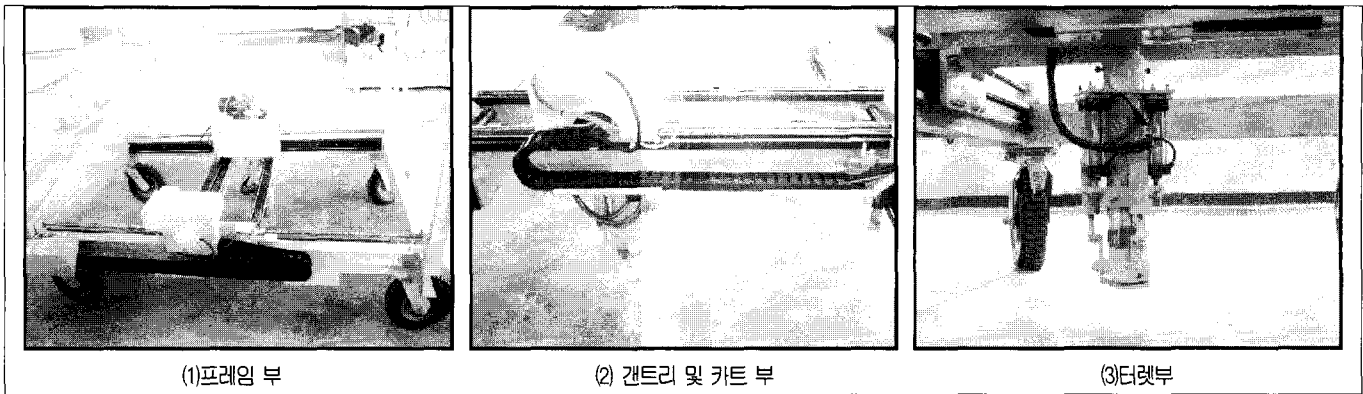
크랙 탐지 및 맵핑 알고리즘의 결과 값은 다수의 그룹으로 나누어진 크랙 중앙 점들의 좌표(x, y)로 이루어진 어레이 (array)들이 된다. 경로 계획 알고리즘은 크랙 실링 자동화 장비의 말단장치를 효과적으로 이동시키기 위해 도출된 좌표값 사이에서 최적의 경로를 탐지하여 크랙을 실링하는데 목적이 있다. 본 연구에서는 크랙 실링을 위한 최적 경로를 찾기 위해 최단거리 측정에 의한 그리디(greedy) 경로 계획 알고리즘을 개발하였다. 그리디 알고리즘은 작업 영역 내에 다양한 크랙이 존재할 경우 기준점(home point)으로부터 가장 근접한 크랙을 시작으로 실링 작업을 마치는 좌표값까지의 최단 거리를 측정하여 경로 계획을 세우는 방법이다

### 3.2 하드웨어 개발

크랙 실러 자동화 장비의 하드웨어 구성은 다음 그림과 같이 크게 프레임 부, 갠트리 부, 카트 부, 터렛 부로 이루어져 있다. 프레임 부는 모체의 골조 역할을 하는 부분으로써 뒤틀림 및 내구성을 고려하여 설계하였다. 갠트리 부는 터렛을 X축으로 이동시키는 역할을 하고, 카트 부는 터렛을 Y축으로 이동시키는 역할을 담당한다. 터렛부는 도로면 크랙 부위의 이물질 제거를 위해 에어 노즐을 설치하고, 터렛 내부 파이프 주위를 실리콘 히터로 감싸서 작업 중 실런트가 굳지 않도록 설계하였다. 분사된 실런트의 마무리 작업을 위하여 U자형 스퀴즈를 부착하고 하단



그리디 경로 계획 알고리즘



하드웨어 구성

부분에 고무 재질을 붙여 원활한 압지가 이루어지도록 하였다. 또한, 360 회전이 가능하여 굴곡면 작업이 가능하며 에어 실린더를 이용한 텔레스코핑 기능을 갖추어서 단차가 있는 도로면에서의 크랙 실링 작업이 가능하도록 설계하였다.

실링 자동화 장비의 전체적인 운영 프로세스를 나타낸 것이다. 흰색 부분은 완전 자동화로 작업을 수행하는 부분이며, 회색 부분은 사람이 개입하여 조작을 하는 부분이다.

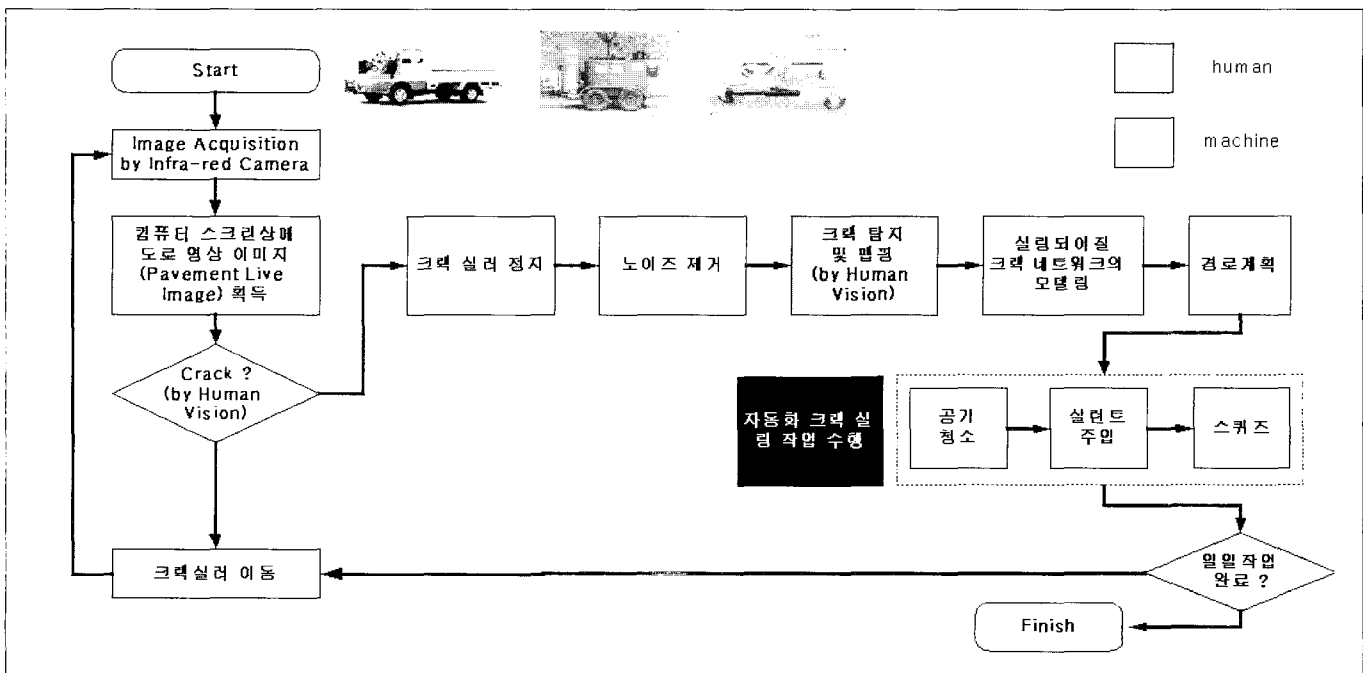
크랙 실링 공법과 ARMM의 자료를 토대로 기본가정을 실시 및 편익/비용 요소를 규명하였다. 경제성 분석을 수행한 결과, 자동화 크랙실링 도입시 재래식 공법과 비교해 노무비 절감 및 생산성 향상효과로 자동화 장비의 수명주기인 10년동안 약 60억원의 사업예산을 절감할 수 있는 것으로 분석되었다. 특히 현재 개발중인 장비는 ARMM과 비교해 볼 때 소프트웨어, 하드웨어가 진보된 개념의 장비라고 할 수 있으며, 야간작업이 가능하도록 설계 및 제작이 되었으므로 그에 따라서 생산성 향상 및 교통체증의 최소화를 통한 도로 이용자의 간접비 절감 효과 등이 기

### 3.3 크랙 실링 자동화 장비의 운영 절차

자동화 장비의 효율적인 운영을 위해서는 완전자동화(complete automation)보다 품질, 생산성, 비용 측면에서 man-machine balance를 이용한 반자동화(semi-automation) 방식이 보다 더 효율적인 것으로 판단된다. 다음 그림은 크랙

### 4. 크랙 실링 자동화 공법의 경제적 타당성 분석

자동화 크랙 실링 공법의 도입에 따른 경제적 타당성을 분석하였다. 대상구간은 도로포장 관리체계 조사 및 분석(건설교통부, 2000)결과에 따라서 3,156km로 하였으며, 현재 국내에서 수행중인 재래식



자동화 크랙 실링 장비 운영 절차

대되나 이를 현장 적용 이전 단계에서 정량화 하기에는 어려움이 있으므로 ARMM의 데이터를 적용하였다. 한편 향후 크랙 실링의 대상이 되는 크랙의 발생 빈도는 지속적으로 증가할 것으로 예상되며, 국외의 경우에서 볼 수 있듯이 예방적 유지보수 공법으로써의 크랙 실링 공법의 중요성 및 필요성(수요)이 대두될 것이므로, 크랙 실링 자동화 공법의 경제성은 향상될 것으로 사료된다. 향후 개발장비의 성능분석을 통해 정량적 편익과 정성적 편익에 대한 면밀한 조사·분석 후 이러한 데이터를 토대로 크랙실링 자동화 공법의 경제적 타당성을 검증해야 할 것이며, 크랙 실링 자동화 공법의 도입에 따른

경제성은 매우 높으리라고 예상된다.

## 5. 결론

본 연구의 최종 목적은 크랙 실링 작업시 노무자의 안전성을 확보하고, 품질 및 생산성 향상을 도모할 수 있는 크랙 실링 자동화 장비의 프로토타입을 개발하는데 있다.

본 연구의 수행 과정을 통하여 조사·분석된 결과는 다음과 같다.

- 1) 크랙의 종류 및 크랙 실링의 효과에 대해서 고찰하였으며, 전문업체를 방문하여 크랙 실링 현황에 대해서 분석하였다.
- 2) 현재까지 개발된 외국사례를 고찰하여 문제점을 분석하고 관련 최신기술을

조사·분석함으로써 본 연구에서 개발될 자동화 장비의 효율성을 도모하였다.

3) 본 자동화 장비에서 필요한 알고리즘(노이즈, 크랙 탐지 및 맵핑, 경로계획)을 개발하였다.

4) 장비 제작을 위해 개념 및 상세 설계가 이루어졌으며 이를 바탕으로 모체제작(프레임, 갠트리 및 카트, 터렛)을 완성하였다.

5) 재래식과 자동화 크랙 실링과의 경제성 분석을 실시하였으며, 그 결과 크랙 실링 자동화 장비를 개발하여 크랙을 유지보수 하는 것이 재래식 방식보다 경제적인 것으로 분석되었다.