도로면 크랙실링 자동화 장비 말단장치의 요구성능 분석을 통한 설계 · 제작 및 기술적 타당성 분석

The Development of an End-Effector in Automated Pavement Crack Sealer and Technical Feasibility Analysis

이정호* · 이원재** · 유현석*** · 김영석****

Lee, Jeong-Ho · Lee, Won-Jae · Yoo, Hyun-Seok · Kim, Young-Suk

Abstract

Crack sealing is a maintenance technique commonly used to prevent water and debris penetration and reduce future degradation in pavement. The conventional crack sealing operations are, however, dangerous, costly, and labor-intensive. Automating crack sealing will improve productivity and quality, and offer safety benefits by getting worker off the road. During the last two decades, several teleoperated and machine-vision assisted systems have been developed to automate the overall process of routing and sealing pavement cracks. However, the developed systems have not been commonly used in the construction sites because of the technical problems. Especially, the performance of end-effector, related to the productivity and quality improvement, is very important factor to improve the practical use of the developed systems. The main objective of this research is to develop an end-effector in automated pavement crack sealing machine and to analyze the technical feasibility of the developed end-effector.

Keywords : crack sealing, automation, end-effector, feasibility analysis

요 지

도로면 크랙실링 공법은 도로면에 발생된 크랙을 초기에 효과적으로 보수함으로써 후속 크랙 방지 및 동결피해 방지를 통해 도로의 평균상태지수를 높일 수 있는 예방적 차원의 유지보수 공법이다. 그러나 재래식 크랙실링 공법은 도로상에서 작업이 수행되므로 매우 위험하고, 노동 집약적이며, 노무자의 숙련도에 의해 작업 품질 및 생산성에 큰 영향을 받는 문제점이 있는 것으로 분석되었다. 따라서 국내외에서는 재래식 크랙실링 공법을 자동화하기 위해 다양한 형태의 자동화 장비를 개발해 오고 있으나 실용화 실적은 매우 제한적인 것으로 조사되었다. 크랙실링 자동화 장비의 실용화를 위해서는 말단장치의 성능(생산성, 품질 향상 측면)이 매우 중요한 요인이나 기존에 개발된 일부 크랙실링 자동화 장비의 말단장치는 크랙실링의 품질 제고를 위한 필수 작업 기능을 갖추고 있지 못하고 말단장치 내에서 실런트가 응고되는 등 문제점을 지니고 있는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 기존에 연구 개발된 크랙실링 자동화 장비 말단장치의 비교 분석을 통해 현장 적용성이 높고 품질 제고가 가능한 크랙실링 자동화 장비 말단장치의 설계안 및 실물(full-scale)제작을 통한 기술적 타당성을 제시하고자 한다.

핵심용어 : 크랙실링, 자동화, 말단장치, 타당성 분석

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

도로면 크랙실링 공법은 도로면에 발생된 크랙을 초기에 효과적으로 보수함으로써 후속 크랙 방지 및 동결피해 방지를 통해 도로의 평균상태지수를 높일 수 있는 예방적 차원의 유지보수 공법이다(국토해양부, 2004). 따라서 도로면 유지 보수 공법 중 크랙실링 공법의 활용도가 국내외적으로

높아지고 있으나 재래식 크랙실링 공법은 일반국도나 고속국도에서 작업이 수행되므로 매우 위험하고, 노동 집약적이며, 노무자의 숙련도에 의해 작업 품질 및 생산성에 큰 영향을 받는 단점을 지니고 있다. 1990년대 초반부터 북미 등 선진 외국에서는 재래식 도로면 크랙실링 공법을 자동화하기 위한 연구를 수행해 오고 있으며, 국내에서도 2000년대 초반에 도로면 크랙실링 자동화 장비를 개발하고 현장 실험을 수행한 바 있다(국토해양부, 2004). 상기와 같이 국내외

*정회원 · 인하대학교 원가공학연구소 · 공학박사 (E-mail : inhacmr@hotmail.com)

**인하대학교 건축공학과 · 공학석사 (E-mail : wonjae0202@naver.com)

***인하대학교 건축공학과 · 공학박사 (E-mail : hsyoo.inha@gmail.com)

****정회원 · 교신저자 · 인하대학교 건축공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : youngsuk@inha.ac.kr)

에서는 다양한 크랙실링 자동화 장비를 개발해 오고 있으나 실용화된 사례는 매우 제한적인 것으로 조사되었다. 크랙실링 자동화 장비의 실용화를 위해서는 자동화 장비 하드웨어 제작(견인트럭, 실린트 펌터, 실링 장비) 및 통합, 비전 소프트웨어의 개발 등도 중요하나 말단장치의 성능이 크랙실링 작업 생산성 및 품질에 결정적인 영향을 미치는 요인(core technology)으로 조사되었다. 그러나 기존에 개발된 크랙실링 자동화 장비의 말단장치는 다음과 같은 문제점을 가지고 있는 것으로 분석되었다. 즉, 크랙면 청소를 위한 공기 분사기능 미탑재로 인한 추가 인력 투입, 실린트 압지 문제 및 피봇기능 미탑재로 평탄한 실링 품질 확보의 어려움, 말단장치 내 실린트 응고 문제, 실린트 누액 현상 발생, 실링 대상 크랙의 제한성 등과 같은 문제점이 있는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 기존에 연구 개발된 크랙실링 자동화 장비 말단장치의 비교 분석 결과 및 국내 크랙실링 시공환경 등을 고려하여 현장 적용성이 높고 품질 제고가 가능한 크랙실링 자동화 장비 말단장치의 설계안 및 실물(full-scale) 제작을 통해 개발 기술의 타당성을 제시하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 도로면 크랙실링 자동화 장비의 생산성 및 품질 확보에 결정적인 영향을 미치는 말단장치의 개발로 연구의 범위를 한정하고자 한다.

본 연구에서 수행한 연구 방법은 다음과 같다.

1.2.1 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발 현황 분석

본 연구에서는 도로면 크랙실링 자동화 장비의 전반적인 개발 현황과 효율적인 말단장치 개발의 필요성을 제시하기 위해 현재까지 국내외에서 연구 개발된 도로면 크랙실링 자동화 장비의 개발 현황을 구성유닛, 작업 대상 크랙, 작업 기능, 생산성 및 품질 등의 측면에서 조사·분석하였다.

1.2.2 도로면 크랙실링 자동화 장비의 말단장치 비교분석

국내외에서 개발된 도로면 크랙실링 자동화 장비의 말단장치가 수행할 수 있는 기능을 분석하고, 말단장치 작업 프로세스 분석을 통해 현재 국내에서 개발 중인 도로면 크랙실링 자동화 장비(이원재, 2011)의 말단장치에 요구되는 기술적 고려사항과 해결 방안을 제시하였다.

1.2.3 말단장치 요구성능 분석 및 개발

본 연구에서는 기존 도로면 크랙실링 자동화 장비 말단장치의 비교분석을 통한 기술적 고려요소와 환경적 요구성능(국내 도로면 크랙실링 유지보수 시방 기준 및 도로 환경 분석 결과를 바탕으로 말단장치에 요구되는 성능) 분석 결과를 바탕으로 도로면 크랙실링 작업 기준 및 품질을 충족하고 생산성 제고가 가능할 수 있도록 하는 도로면 크랙실링 자동화 장비의 말단장치를 설계·제작하였다.

1.2.4 작업 프로세스 및 기술적 타당성 분석

제안된 도로면 크랙실링 자동화 장비 말단장치를 탑재한 자동화 장비의 작업 프로세스를 정의하고 말단장치가 반드시 갖추어야 할 기능(크랙실링 품질 확보, 실린트 응고 방지,

실린트 누액 현상 방지, 모체 및 말단 장치 이동의 효율성) 측면에서 제안된 도로면 크랙실링 자동화 장비 말단장치의 기술적 타당성을 분석하였다.

2. 크랙실링 자동화 장비의 국내외 기술개발 동향 고찰

2.1 국내외 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발 현황

2.1.1 UT Field Prototype(1996)

미국 텍사스 오스틴 대학에서 개발된 UT Field 프로토타입은 재래식 크랙실링 공법의 자동화를 위한 작업 프로세스 및 기능의 재 정의를 통하여 재래식 크랙실링 공법에 대한 반자동화의 필요성을 제시하였다. 작업영역 내에서 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링의 효율성, 정확성 증진을 위하여 인간과 기계의 장점을 살린 원격제어 반자동 그래픽 컨트롤 소프트웨어(man-machine balanced remote controlled graphical control software)의 개발 및 적용성을 검토하였다. 이 연구에서는 자동화 장비의 최적경로 계획(optimal path planning) 알고리즘의 개발, 토우 트럭, 실린트 펌터, 크랙실링 자동화 장비의 연결을 통해 일반도로에서의 현장실험을 수행하고, 인간과 기계의 장점을 활용한 원격제어 반자동 크랙실링 장비의 성공적 개발 가능성을 제시하였다(그림 1).

그림 1. UT Field Prototype

2.1.2 UT ARMM (Automated Road Maintenance Machine, 1999)

UT ARMM은 UT Field 프로토타입의 연구결과 및 축적된 기술을 토대로 원격제어 반자동 크랙실링 장비 개발을 위한 최적의 원격제어 반자동 크랙실링 컨트롤 프로세스(optimal man-machine balanced crack sealing control process)를 정립하였다. 또한 그래픽컬 프로그래밍을 응용한 크랙 탐지, 맵핑, 컨트롤 소프트웨어의 개발 및 성능 확인, 개발 소프트웨어와 하드웨어의 성공적 통합을 통한 원격제어 반자동 크랙실링 장비를 개발하였다. ARMM은 운반 장비인 1) 견인 트럭과 공기압축기, 실린트 펌터 등 크랙실링을 하기 위한 2) 부속 장비, 크랙실링 작업을 수행하는 3) 자동화 장비로 크게 세부분으로 구분할 수 있다. ARMM의 현장 실험을 통하여 경제성 분석 및 재래식 공법과의 생산성, 품질 등의 비교분석을 통해 개발된 자동화 기술의 경제적, 기술적 타당성이 입증되었다. 이 연구를 통해 인간과 기계의 장점을 활용한

원격제어 반자동 크랙실링 장비의 상용화를 위한 기술적 노하우 축적 및 성공적 개발 가능성이 확인되었다(그림 2).

그림 2. Automated Road Maintenance Machine (ARMM)

2.1.3 OCCSM(The Operator Controlled Crack Sealing Machine, 2003)

OCCSM 장비는 크랙실링 작업의 생산성, 품질, 안전성 향상을 목적으로 Multi-DOF Arm 형태의 머니플레이터를 사용한 것을 특징으로 한다. 이 장비는 트럭에 실린트 펌터(약 240 Gallon)가 장착된 상차형 유닛으로써 일일작업생산성은 약 3km/day이며, CCD 카메라를 이용해 영상을 획득 후 Multi-DOF Arm을 이용해 작업지역까지 텔레스코핑하여 1개 차선의 작업영역 내에 존재하는 종방향 및 횡방향 크랙의 실링 작업을 수행할 수 있도록 개발되었다. OCCSM 장비는 크게 차량부, 머니플레이터부, 실린트 펌터부로 구분할 수 있으며, 머니플레이터부는 크게 3가지(텔레스코핑 암, 동력전달 시스템, 차량장착 시스템)로 구분할 수 있다. 개발된 자동화 장비는 캘리포니아 도로교통국(Caltrans)의 지원하에 현장실험을 수행하였으며, 이를 통해 완전 자동화된 크랙실링 자동화 장비의 개발 가능성이 확인되었다(그림 3).

그림 3. The Operator Controlled Crack Sealing Machine (OCCSM)

2.1.4 TTLS(The Transfer Tank longitudinal Sealer, 2006)

TTLS장비 기준에 연구 개발된 종방향 균열 크랙실링 장비(LCSM)의 발전된 형태이다(그림 4). 트럭에 실린트 펌터(약 360 Gallon)가 장착된 상차형 유닛으로써 일일 작업생산성은 약 5.15km/day로 매우 빠르나 종방향 크랙만을 대상으로 크랙실링 작업을 수행하도록 설계되었다. 따라서 도로면에 발생된 다양한 크랙의 유형(종방향, 횡방향, 블록형)을 고려해 볼 때 크랙실링보다는 조인트실링에 보다 적합할 것으로 분석되었다. 개발된 자동화 장비는 캘리포니아 도로교통국(Caltrans)의 지원 하에 현장실험이 수행되었으나 실린트를 용해하기 위

그림 4. TTLS 및 TTLS Transfer Trailer

한 초기 가동시간(7-9시간)이 길어지는 문제점이 발견되었다. 따라서 현재 이를 개선하기 위한 연구가 수행되고 있는 것으로 조사되었으나, TTLS의 경우 조인트만을 대상으로 작업을 수행하고 있다는 점은 문제점으로 지적되고 있다.

2.1.5 APCS(Automated Pavement Crack Sealer, 2004)

APCS장비는 국내에서 개발된 최초의 크랙실링 자동화 장비이며, 트럭에 실린트 펌터(약 360 Gallon)를 별도로 부착한 트레일러 형식의 분리형 장비이다. APCS는 CCD 카메라를 이용하여 영상을 획득하고, 자동 혹은 반자동화 방식으로 크랙 네트워크를 모델링할 수 있도록 설계되었다. APCS의 머니플레이터는 X-Y 테이블 형태로써 볼스크류 및 LM 가이드를 이용하여 갠트리에 부착된 말단장치가 X축 및 Y축 방향으로 이동할 수 있다. 또한 도로면 러팅(상하굴곡)에 대응할 수 있도록 상하(Z축 방향)로 움직일 수 있는 공압장치와 크랙 네트워크를 따라 말단장치가 회전할 수 있는 피봇 기능 및 일정한 압력으로 실린트를 압지하여 우수한 작업 품질을 확보할 수 있도록 설계되었으며, 완전 자동화 기능을 탑재한 장비라 할 수 있다(그림 5).

그림 5. Automated Pavement Crack Sealer (APCS)

한편, 국내에서는 APCS연구의 후속연구로써 ‘도로면 크랙실링 자동화 장비의 실용화를 위한 개념 디자인 및 기술적 타당성 분석에 관한 연구(이원재, 2011)’가 수행되었다. 본 연구는 선행연구에서 제안한 크랙실링 자동화 장비 중 최적 대안으로 선정된 자동화 장비 모체 중 말단장치에 대해 다음과 같은 비교 분석 및 주요 고려요소 도출, 하드웨어 제작, 기술적 타당성 분석 등을 수행하고자 한다.

2.2 국내의 도로면 크랙실링 자동화 장비의 말단장치 비교분석

도로면 크랙실링 자동화 장비의 말단장치는 크랙실링 작업 생산성 및 품질에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 기존에 연구 개발된 10여종의 크랙실링 자동화 장비 중 가장 진보된 형태의 장비인 OCCSM 및 TTLS, APCS의 말단장치를 비교분석하고 개선 사항을 도출함으로써 현장 적용성, 생산성 및 품질제고가 가능한 도로면 크랙실링

자동화 장비의 말단장치를 제안하고자 한다.

2.2.1 OCCSM 자동화 장비의 말단장치 분석

OCCSM 장비의 말단장치는 크게 실린트 분사부, 실링부, 제어부로 구성되며, 구성요소는 아래와 같다(그림 6). 실린트 분사부는 실린트를 공급하는 실린트 공급관(그림 6의 (d))과 공급관의 개폐를 조절하는 실린트 분사노즐(그림 6의 (a))을 가지고 있다. 실링부는 크랙면 내 실린트를 밀설하게 실링하기 위한 압지장치(그림 6의 (c)) 및 말단장치 하단부에 위치하여 실링면의 마감품질을 높이기 위한 브러쉬형 스퀴즈(그림 6의 (g))를 가지고 있다. 제어부는 실린트 분사 및 공압장치를 제어하는 말단장치 제어박스(그림 6의 (e))로 구성되어 있다. 또한 실린트 분사 시 실링 작업을 알리는 작업 알림등(그림 6의 (b))이 장착되어 있다.

그림 6. OCCSM 자동화 장비의 말단장치 구성요소

OCCSM 자동화 장비 말단장치의 작업 프로세스는 아래와 같다(그림 7). 영상획득을 통한 크랙 네트워크 모델링이

그림 7. OCCSM 자동화 장비의 말단장치 작업 프로세스

완료되면 말단장치가 크랙 시작점의 수직 상단으로 이동하게 되며, 공압장치를 통해 장비를 지면과 밀착시킨다. 이후 실린트 노즐을 확장하며 실린트를 지면에 분사함과 동시에 크랙면을 따라 말단장치가 이동하며 실링작업을 수행하게 된다. 대상크랙의 실링 작업이 완료되면 실린트 분사종료와 동시에 공압장치를 상승시켜 크랙면 압지를 중단하게 되고, 말단장치를 장비의 원점으로 복귀시키는 것으로 작업이 완료된다.

OCCSM 자동화 장비의 구성요소 및 작업 프로세스 분석결과를 바탕으로 말단장치에 대해 문제점 분석을 실시하였다. 분석 결과, OCCSM 자동화 장비는 공기분사장비가 미 탑재되어 있어 크랙면 청소 시 이를 인력으로 대체해야 하는 문제점을 가지고 있었으며, 말단 피봇기능의 부재와 브러쉬 형의 스퀴즈 사용으로 인해 실링면의 마감 품질이 현저히 저하되고, 재작업 시 브러쉬에 실란트가 응고되어 이를 처리하는데 적지 않은 시간이 소요되는 문제점으로 있는 것으로 조사되었다. 또한 실린트 분사제어 노즐이 실린트 분사구 보다 높 이 위치하고 있어 실링 후 실린트의 누액현상이 심한 것으로 분석되었다.

2.2.2 TTLS 자동화 장비의 말단장치 분석

TTLS 자동화 장비의 말단장치는 크게 실린트 분사부, 실링부, 제어부로 구성되며, 구성요소는 아래와 같다(그림 8). 실린트 분사부는 관 외부에서 가열된 열매체를 순환시켜 실린트의 응고현상을 방지하고 관내부에서 실린트를 공급하는 실린트 공급관(그림 8의 (c))과 공급관의 개폐를 조절하는 실린트 분사노즐 및 실린트 분사구(그림 8의 (f))를 가지고 있다. 실링부는 크랙면 내 실린트를 밀설하게 실링하기 위한 U자형 스퀴즈(그림 8의 (g))와 크랙의 유형 변화에 대처가 가능한 말단의 피봇힌지(그림 8의 (e))로 구성되어 있다. 제어부는 실린트 분사 및 공압장치를 제어하는 말단장치 제어박스(그림 8의 (b))와 전력공급을 위한 전력 공급선(그림 8의 (a)), 장비의 구동을 위한 회전형 관절(그림 8의 (d))로 구성되어 있다.

그림 8. TTLS 자동화 장비의 말단장치 구성요소

TTLS 자동화 장비 말단장치의 작업 프로세스는 아래와 같다(그림 9). 최초 운전자는 육안을 통해 노면 위 균열을 확인하고 작업구간에 차량을 위치시킨다. 작업 준비가 완료 되면 다관절 암을 확장시켜 말단장치를 크랙 시작점의 수직

그림 9. TTLS 자동화 장비의 말단장치 작업 프로세스

상단으로 이동시킨 후 공압장치를 통해 장비를 지면에 밀착시킨다. 이 후 실린트 노출을 확장하며 실린트를 지면에 분사함과 동시에 크랙면을 따라 말단장치가 이동하며 실링작업을 수행하게 된다. 대상크랙의 실링 작업이 완료되면 실린트 분사종료와 동시에 공압장치를 상승시켜 크랙면 압지를 중단하게 되고, 다관절 암을 축소시켜 말단장치를 장비의 원점으로 복귀시키는 것으로 작업이 완료된다.

TTLS 자동화 장비 말단장치의 구성요소 및 작업 프로세스 분석결과를 바탕으로 문제점을 분석한 결과 TTLS 자동화 장비는 공기분사장비가 미탑재 되어 크랙면 청소 시 이를 인력으로 대체해야만 하는 문제점을 가지고 있었으며, 실린트 응고현상을 방지하기 위해 2중관 외부에 가열된 열매체를 순환시키는 구조로 인해 관경이 커져 실린트관의 유동성이 크게 저하되는 문제점이 지니고 있었다. 또한 노면 위 쿨드 조인트만을 대상으로 작업이 가능하여 도로면에 발생하는 다양한 형태의 크랙을 실링하지 못하는 태생적인 한계성을 지니고 있는 것으로 조사되었다.

2.2.3 APCS 자동화 장비의 말단장치 분석

APCS 장비의 말단장치는 크게 실린트 분사부, 실링부로 구성되며, 구성요소는 아래와 같다(그림 10). 실린트 분사부는 실린트를 공급하는 실린트 공급관(그림 10의 (d))과 공급관의 개폐를 조절하는 실린트 분사구(그림 10의 (e))로 구성되어 있다. 실링부는 크랙면 내 실린트를 밀실하게 실링하기 위한 단동 공압실린터(그림 10의 (c))와 이를 제어하기 위한 공압호스(그림 10의 (b)), 그리고 말단장치 하단부에 위치하여 실링면의 마감품질을 높이기 위한 U자형 스퀴즈(그림 10의 (f))를 가지고 있으며, 커팅된 크랙면 내 이물질 제거를 위한 공기분사구를 포함하고 있다(그림 10의 (g)). 또한 피봇힌지(그림 10의 (a))가 장착되어 있어 크랙의 형상 변화에 대처가 가능하도록 하였다.

APCS 자동화 장비 말단장치의 작업 프로세스는 아래와 같다(그림 11). 영상획득을 통한 크랙 네트워크 모델링이 완

그림 10. APCS 자동화 장비의 말단장치 구성요소

그림 11. APCS 자동화 장비의 말단장치 작업 프로세스

료되면 말단장치가 크랙 시작점의 수직상단으로 이동하게 되며, 공압장치를 통해 장비를 지면에 밀착시킨다. 이 후 크랙면에 공기를 분사하여 크랙면을 청소함과 동시에 실린트 노출을 이용하여 실린트를 지면에 분사하기 시작한다. 크랙면을 따라 말단장치가 이동하며 실링작업을 수행하게 되며, 대상크랙의 실링 작업이 완료되면 실린트 분사종료와 동시에 공압장치를 상승시켜 크랙면 압지를 중단하게 되고, 말단장치를 장비의 원점으로 복귀시키는 것으로 작업이 완료된다.

APCS 자동화 장비의 구성요소 및 작업 프로세스 분석결과를 바탕으로 말단장치에 대해 문제점 분석을 실시한 결과 APCS 자동화 장비는 실린트 분사제어 장치(on/off솔레노이드 밸브)가 실린트 분사구 보다 약 1m 상단에 위치하고 있어 실링 후 실린트 누액현상이 발생되었다. 또한 실린트 이송관 외부에 열선처리를 통해 관 내부 실린트 응고현상에 대처하였으나, 응고된 실린트를 녹이는데 적지 않은 시간이 소요되고 있는 것으로 분석되었다. 표 1은 현재까지 개발된 도로면 크랙실링 자동화장비 말단장치를 비교 분석한 것이다.

표 1. 기존 자동화 장비 말단장치의 문제점 분석

자동화 장비	말단장치 사진	문제점
OCCSM		<ul style="list-style-type: none"> • 공기분사기능 미탑재(인력으로 수행) • 브러쉬 형의 스퀴즈 사용(실런트가 크랙에 밀실하게 침투되지 않음) • 재작업 시 브러쉬에 웅고된 실런트 처리문제 발생 • 말단 피봇기능 부재(마감품질 저하) • 실링 후 실런트의 누액(떨어짐) 발생
TTLS		<ul style="list-style-type: none"> • 공기분사기능 미탑재(인력으로 수행) • 실런트 이송 환경이 커 제어에 어려움 발생(실런트 관 외부에 가열된 열매체를 순환하는 시스템) • 실링범위가 제한적임(조인트 실링에 적합)
APCS		<ul style="list-style-type: none"> • 실링 후 실런트의 누액(떨어짐) 발생 • 관 외부 열선처리를 하였으나 실런트 웅고방지 대책으로 미흡함

3. 도로면 크랙실링 자동화 장비의 말단장치 개발

3.1 말단장치 설계 시 주요 고려사항

본 연구에서는 기 개발된 3개의 도로면 크랙실링 자동화 장비(OCCSM, TTLS, APCS)의 말단장치에 대한 장단점 분석결과를 바탕으로 크랙실링 자동화 장비 개발을 위한 주요 고려사항을 표 2와 같이 분석하였다. 도출된 주요 고려사항은 1) 노무인력 절감 및 실링품질 향상을 위해 실링작업 이전에 크랙면 청소작업이 수행되어야하며, 2) 실런트가 크랙면에 밀실하게 침투되어야 한다. 또한 3) 재작업 시 스퀴즈에 웅고된 실런트를 효과적으로 처리할 수 있는 기술이 확보되어야 하며, 4) 실런트의 누액현상을 방지해야 하는 것으로 분석되었다. 5) 크랙의 형상 변화(굴곡)에 따른 신속한 대처가 이루어 져야하며, 6) 말단장치의 회전반경이 최소 360° 이상 확보되어야만 모든 형태의 크랙 형상에 대한 실링이 가능한 것으로 분석되었다. 7) 실런트 분사관의 환경을 가급적 축소 설계하여 말단장치의 이동에 따른 유동적인 움직임이 요구되며, 8) 작업 전 · 후 관내 실런트가 웅고되는

표 2. 크랙실링 자동화 장비 말단장치 개발을 위한 기술적 고려사항

설계 고려사항	해 결 방 안
1) 실링 품질향상을 위해 실링작업 이전단계에서 크랙면 청소작업이 수행되어야함	• 공기분사 기능 탑재
2) 실런트가 밀실하게 침투되어야함	
3) 재작업 시 스퀴즈에 웅고된 실런트가 효과적으로 처리되어야 함	• U자형 스퀴즈 사용
4) 실런트의 누액현상이 발생되지 않도록 함	• 실런트 분사구 상단에 개폐용 벨브 장착
5) 크랙의 형상 변화에 따른 대처가 가능해야함	
6) 말단장치의 작업 가능한 회전 반경이 커야함(최소 360°)	• 피봇기능 탑재
7) 실런트 환경을 가급적 축소 설계해야함	
8) 작업 전 · 후 관내 실런트 웅고현상이 발생되어서는 안됨	• 실런트 순환시스템 구축

현상을 방지해야 하는 것으로 분석되었다. 한편, 본 연구에서는 기존 연구 개발 사례 분석 결과 및 본 연구의 선행 연구인 APCS의 현장 실험 결과를 바탕으로 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발시 요구되는 주요 고려요소의 해결방안을 표 2와 같이 제시하였다.

3.2 말단장치 개발의 제반환경 분석

본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비의 말단장치가 국내 시방 기준을 만족하며 크랙실링 작업을 수행하기 위해 요구되는 초당 실런트 분사량을 도출하였다. 또한, 개발 자동화 장비의 이동 및 원활한 크랙실링 작업을 위해 국내 도로관련법을 분석하여 자동화 장비의 말단장치가 도로면으로부터 이격되어야 하는 거리를 분석하였다.

3.2.1 단위시간당 실런트 분사량 산정

노면 위에 발생한 크랙의 실링 작업 시 말단장치의 이동속도에 따라 실런트 분사속도가 결정된다. 말단장치의 이동속도에 비해 실런트가 과잉 공급 될 경우 실런트의 재료낭비 및 실링품질이 저하되고, 실런트가 부족하게 공급될 경우 크랙면 내 실런트의 밀실한 충전이 이루어지지 않으므로 재작업이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 크랙실링 작업의 생산성 확보를 위해 말단장치에 요구되는 작업속도(약 10cm/s)에 적합한 실런트의 초당 분사량을 도출하였다(그림 12). 국내 도로면 크랙실링 시방 규정에 의하면 노면 위 커팅 된 크랙의 깊이는 3cm(그림 12의 (d)), 두께는 1.5cm(그림 12의 (a))이며, 실링면 상단의 실링폭의 길이는 2cm(그림 12의 (b)), 두께는 0.5cm(그림 12의 (e))이다. 이를 바탕으로 노면 위 크랙실링 작업 시 분사되는 실런트의 양(크랙 단면적×단위시간당 이동길이)에 대한 산출식 및 요구되는 최소 분사량을 식 (1)과 같이 도출하였으며, 그 결과 말단장치에 요구되는 실런트 분사량은 최소 72.5cm³/s 이상인 것으로 분석되었다.

그림 12. 단위시간당 크랙면 내 실런트 분사량

$$\begin{aligned}
 &\text{단위시간당 실런트 분사량 산정식} \\
 &= (\text{크랙 단면적} \times \text{단위시간당 이동길이}) \\
 &= [(1.5 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}) + (5.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm})] \times 10 \text{ cm} \\
 &= 72.5 \text{ cm}^3
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

3.2.2 말단장치와 지면과의 거리

도로면 크랙실링 자동화 장비의 이동 및 작업을 위해서는

말단장치와 도로면과의 일정거리가 확보되어야 한다. 예상 가능한 노면의 변화는 반사재, 과속방지턱, 요철 등의 다양한 변화요인이 있으나 도로법 제 39조 및 도로의 구조/시설 기준에 관한 규정 제 30조에 의거하여 과속방지턱이 폭 3.6m(그림 13-①의 (a)), 높이 10cm(그림 13-①의 (b))로 노면위에 법적으로 설치 가능한 최대 구조물이다. 따라서 본 연구의 말단장치는 이동 시 최소 과속방지턱 상단의 높이에 위치해야하며 여유 높이 또한 필요한 것으로 분석되었다(그림 13). 본 연구에서는 과속방지턱 높이에 20cm의 여유높이를 더하여 도로면으로부터 말단장치의 높이를 산정하였다(식 (2)).

$$\begin{aligned} & \text{말단장치의 높이 산정식} \\ & = (\text{과속방지턱 높이} + \text{여유높이}) \\ & = (10 \text{ cm}) + (20 \text{ cm}) = 30 \text{ cm} \end{aligned} \quad (2)$$

① 과속방지턱 설치기준 ② 말단장치 높이 산정
그림 13. 공압실린더의 최소 공압 확장길이 산정

3.3 도로면 크랙실링 자동화 장비 말단장치 설계

본 연구에서는 기존에 연구 개발된 크랙실링 자동화 장비의 말단장치 장단점 분석을 통해 도출된 8가지 설계 고려사항 및 국내 도로 제반 환경 분석 결과를 바탕으로 도로면 크랙실링 자동화 장비의 말단장치를 그림 14와 같이 제안하였다. 제안된 말단장치의 개념디자인은 크게 압지, 말단 피봇, 크랙면 청소, 실린트 분사 및 순환기능을 포함한다. 압지

기능은 말단장치 상단에 장착된 단동공압실린더(그림 14의 (a))를 통해 장비를 지면에 밀착시키며, 노면의 미세한 형상 변화에 대처하여 실링면 품질향상을 위해 충격흡수용 스프링(그림 14의 (f))을 장착함으로써 실링품질을 향상시킬 수 있도록 설계하였다. 말단 피봇기능은 충격흡수용 스프링 상단에 부착된 피봇장치(그림 14의 (e))를 통해 이루어지며, 크랙의 형상변화에 따른 대처가 가능하도록 하였다. 크랙면 청소기능은 공기분사구(그림 14의 (i))에 연결된 공압호스를 통해 크랙면에 압축공기를 분사하는 것으로 이를 통해 크랙 내 이물질을 제거하여 밀실한 실링이 가능하다. 마지막으로 실린트 분사 및 순환기능은 실린트 분사구(그림 14의 (h)) 상단에 3방향 체크밸브(그림 14의 (b))를 장착하여 실린트 누액현상 및 on/off제어속도를 향상시킬 수 있도록 하였다. 또한, 실린트 이송관(그림 14의 (c))과 반송관(그림 14의 (d))을 3방향 체크밸브에 연결시키는 형태의 실린트 순환 시스템을 구축하여 관내 실린트가 응고되는 현상을 방지할 수 있도록 설계하였다.

4. 도로면 크랙실링 자동화 장비의 말단장치 작업 프로세스 및 기술적 타당성 분석

4.1 도로면 크랙실링 자동화 장비 말단장치의 작업 프로세스

제안된 자동화 장비의 말단장치 프로세스는 크게 4단계(말단장치 하강, 공기분사 및 크랙실링, 방향전환 및 스쿼즈 회전, 실링완료 및 장비복귀)로 구분되며, 각각의 프로세스에 대한 내용은 다음과 같다(그림 15-17).

① 말단장치 하강 : 일일 작업구간 내 도로면 크랙실링 자동화 장비를 위치시키며, 크랙실링 작업이 필요한 대상크랙이 존재하는 1개 작업 영역 내 크랙네트워크 모델링 작업을 수행한다. 말단장치를 크랙시작점의 수직상단에 위치시키

그림 14. 도로면 크랙실링 자동화 장비 말단장치

고, 공압실린더(그림 15-①의 (a))를 확장시켜 크랙 네트워크 상단에 말단장치의 end-effector를 위치시킨다(그림 15-①의 (b)).

② 공기분사 및 크랙실링 : 크랙 네트워크 상단에 말단장치의 end-effector가 위치하면 공압호스에 연결된 공기분사구(그림 14의 (i))를 통해 압축공기(그림 15-②의 (c))를 분사한다. 이를 통해 크랙면내에 존재하는 미세먼지 및 커팅파편 등이 제거되며 이와 동시에 실린트 분사구(그림 14의 (h))를 통해 크랙면 내부로 실린트를 분사(그림 15-②의 (d))한다.

이 때 실린트 분사는 실린트 분사구 상단에 장착된 3방향 체크 밸브(그림 14의 (b))를 통해 이루어지며 3방향 체크밸브에 실린트 분사를 위한 이송관(그림 14의 (c))과 분사종료 시 실린트가 반송될 수 있는 반송관(그림 14의 (d))이 부착되어있다. 실린트 분사와 동시에 말단장치가 크랙방향을 따라 이동하게 되며 이 때 U자형 스퀴즈를 통해 실링면을 압지(그림 15-의 (e))하여 실린트가 크랙 내에 밀설하게 충전될 수 있도록 한다. 또한 실링작업 시 노면의 미세한 변화

에 대응하기 위하여 노면의 충격을 흡수할 수 있는 스프링을 부착(그림 15-의 (f))하여 실링 품질이 제고될 수 있도록 설계하였다.

③ 방향전환 및 스퀴즈 회전 : 실링 시 크랙의 형상이 변화하게 되면 이를따라 스퀴즈를 회전(그림 16의 (g))시켜 실린트 분사 및 압지방향을 크랙방향과 일치시킨다. 이 때 스퀴즈 회전부에 위치한 피봇힌지 상단에 피봇 제어모터를 장착시켜 크랙형상 변화에 따른 스퀴즈의 회전을 제어한다.

④ 실링완료 및 장비 복귀 : 작업 구간 내 대상 크랙실링 완료 시 공압호스 내 압축공기의 공급을 중단(그림 15-②의 (c))하여 크랙면 내 공기분사를 종료한다. 또한 3방향 체크밸브제어(그림 14의 (b))를 통해 실린트 분사구에 전달되는 실린트를 실린트 반송관으로 보냄으로써 실린트 분사를 종료함과 동시에 실린트 순환이 이루어지도록 한다. 이후 공압실린터를 수축하여 end-effector를 지상으로 상승시킨다(그림 17의 ①, ②).

실링작업이 완료되면 말단장치는 텔레스코픽 암(telescopic arm)의 수축(그림 17-③의 i)으로 장비의 원점으로 복귀(그림 17-③)하게 된다. 작업영역 내 대상크랙실링 작업을 완료하고 다음 작업영역으로 이동하여 반복하여 수행한다.

① 말단장치 하강

② 공기분사 및 크랙실링

그림 15. 말단장치 하강 및 공기분사, 크랙실링 작업 프로세스

그림 16. 크랙형상 변화에 따른 스퀴즈 회전

① 크랙실링 완료

② end-effector 상승

③ 장비 복귀(텔레스코픽 암 수축 및 원점 이동)

그림 17. 크랙실링 작업 완료 및 장비 복귀

4.2 도로면 크랙실링 자동화 장비 말단장치의 기술적 타당성 분석

4.2.1 크랙실링 품질 확보 기술의 타당성

도로면 크랙실링 자동화 작업 시 작업면의 품질에 절대적 영향을 미치는 주요 요소는 ‘커팅 크랙 내에 분사된 실린트 양과 충전성’, ‘일정한 압력으로 분사된 실린트를 효과적으로 압지할 수 있는 능력’, ‘실린트 응고 및 누액현상 방지’, ‘도로면 크랙의 굴곡을 따른 말단장치의 피봇 기능’이라 할 수 있다. 본 연구에서 제안한 도로면 크랙실링 자동화 장비의 말단장치는 국내 도로면 크랙유지보수 시방 기준에 따라 초

당 72.5cm³의 실린트 분사 능력을 가질 수 있도록 실린트 배관(직경 20mm)이 설계되었으며, U자형 스퀴즈의 사용으로 분사된 실린트가 크랙 내부로 고르게 충전될 수 있도록 설계되었다. 또한, 그림 18의 (a)와 같이 U자형 스퀴즈 상단에 보조 스프링을 이용하여 스퀴즈가 일정한 압력으로 도로면을 압지할 수 있도록 설계되었다. 또한 그림 18의 (b)와 같이 커팅된 크랙의 굴곡을 따라 말단장치가 유연하게 360도 회전할 수 있는 피봇기능을 탑재하고 있으므로 크랙실링면의 품질을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

4.2.2 실린트 응고 방지 기술의 타당성

실린트 응고방지를 위해 기존 도로면 크랙실링 자동화 장비 중 TTLS는 실린트 배관 외부에 가열된 매체를 순환시키는 구조로 설계되었으나 배관 환경이 두꺼워 말단장치의 이동(제어)이 어렵고, APCS는 실린트 배관에 열선을 사용하였으나 현장에서 발전 용량의 한계로 인해 실린트의 응고를 방지하기 어려운 단점을 지니고 있었다. 따라서 본 연구에서 제안한 도로면 크랙실링 자동화 장비 말단장치는 그림 19의 (a)와 같이 3방향 체크밸브를 사용하여 작업 중에서는 실린트가 도로면으로 분사될 수 있도록 하고, 작업 외 시간에는 실린트가 실린트 펌터 내로 지속적으로 순환됨으로써 실린트의 관내 응고를 원천적으로 예방할 수 있도록 설계되었다. 본 연구에서 사용된 3방향 체크 밸브의 사용 범위는 -45도~300도까지 이므로 약 200도로 가열된 실린트의 사용에 적합할 뿐만 아니라 만일 관내에서 실린트가 응고될 수 있는 상황을 고려하여 모든 관을 착탈식으로 설계(그림 19의 (b))함으로써 관내 실린트를 용이하게 용융시킬 수 있도록 고안하였다. 따라서 본 연구에서 제안된 크랙실링 자동화 장비의 실린트 응

그림 19. 실린트 응고방지 기술(실린트 순환 및 착탈)

고 방지기술을 활용할 경우 관 내에서 실린트가 응고됨으로써 작업 생산성에 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

4.2.3 실린트 누액 현상 방지 기술의 타당성

실린트 누액 현상은 도로면 크랙실링 자동화 장비 말단장치의 실린트 분사구와 실린트를 on/off 할 수 있는 밸브 사이의 거리가 길 경우 관내에 남아 있는 실린트가 자중에 의해 도로면으로 흘러내려 실링 품질을 저하시키고 실린트의 낭비를 초래한다. 따라서 본 연구에서 제안한 도로면 크랙실링 자동화 장비의 말단장치는 그림 20과 같이 실린트 최종 분사구와 실린트 on/off제어를 할 수 있는 3방향 체크 밸브 사이 거리를 174mm로 설계함으로써 관내에 남아 있는 실린트의 양을 최소화시켜 실린트 누액 현상을 방지할 수 있을 것으로 사료된다.

그림 20. 실린트 누액 현상 방지 기술

4.2.4 모체 및 말단 장치 이동 기술의 타당성

국내 도로 관련법 분석결과, 도로에는 높이 최대 10cm의 과속 방지턱이 있는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서

그림 21. 말단 장치 이동 기술의 타당성

는 과속 방지턱의 높이와 크랙실링 자동화 장비 모체의 이동성을 고려하여 말단장치가 지면으로부터 약 30cm 이격되어야 하는 것으로 분석되었다. 제작된 도로면 크랙실링 자동화 장비는 그림 21과 같이 2개의 단동 공압실린더를 사용하여 0.5초 안에 말단장치의 end-effector를 지면으로 내릴 수 있으며, 이동 중에는 다시 지상 30cm 높이로 올릴 수 있는 기능을 탑재하고 있다. 따라서 크랙실링 자동화 장비 모체 및 말단 장치의 이동을 위해 제안된 기술은 기술적으로 타당한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발 현황 분석 결과, 국내 외에서는 크랙실링 모체 제작 및 도로면 크랙을 신속하고 정확히 실링하기 위한 비전 소프트웨어의 개발 등 다양한 형태의 도로면 크랙실링 자동화 장비가 개발되어 왔다. 특히, 개발된 크랙실링 자동화 장비 말단장치의 성능이 작업 생산성 및 품질에 매우 큰 영향을 미치고 있는 것으로 분석되었다.
2. 연구 개발된 도로면 크랙실링 자동화 장비의 말단장치 비교 분석 결과, 일부 기존 말단장치는 크랙면 청소를 위한 공기 분사 기능과 같은 필수 기능을 탑재하지 않아 추가적인 노무인력의 투입이 요구되고, 말단장치의 설계 오류로 인해 크랙실링면의 품질이 저하되는 문제점과 장비 구동의 어려움이 있는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구의 도로면 크랙실링 자동화 장비 말단장치는 재래식 크랙실링 작업 방식의 작업 프로세스인 ‘크랙내 공기 청소, 실린트 분사, 압지’의 필수 기능을 탑재해야 하며, 작업 생산성 및 품질을 향상시킬 수 있는 구조로 설계되어야 하는 것으로 분석되었다.
3. 기존에 연구 개발된 말단장치의 비교 분석 결과를 바탕으로 본 연구에서는 효율적인 말단장치 개발을 위해 기술적 고려요소를 도출하였다. 그 결과, 크랙면 공기 청소 기능 탑재, 실린트 분사 및 압지의 효율성 확보, 실린트 누액 현상 방지, 크랙 형태 변화에 따른 말단장치의 정확한 추적 및 압지, 판내 실린트 응고 방지 등이 주요 고려요소로 도출되었다. 한편, 본 연구에서는 도로면 크랙실링에 관한 국내 시방기준을 만족하며, 원활한 장비 이동을 위해 단위시간당 실린트 분사량과 말단장치와 지면과의 거리를 분석하였다. 그 결과, 단위시간당 실린트 분사량은 초당 72.5cm³로 도출되었고, 말단장치는 지면으로부터 약 30cm 이격되어야 하는 것으로 분석되었다.
4. 본 연구에서는 기존 연구 결과를 바탕으로 도출된 크랙실링 자동화 장비가 갖추어야 될 주요 기능과 말단장치 개발의 제반환경 분석 결과를 반영한 도로면 크랙실링 자동화 장비 말단장치를 설계·제작하였다. 제작된 말단장치의 기술적 타당성을 말단 장치에 요구되는 주요 성능(품질 확보, 실린트 응고방지, 실린트 누액 방지, 이동의 용이성) 측면에서 분석한 결과, 본 연구에서 제안한 도로면 크랙실링 자동화 장비 말단장치는 초당 72.5cm³의 실린트 분사 능력을 갖출 수 있도록 설계되었고 U자형 스퀴즈의

사용 및 피봇 기능 탑재로 분사된 실린트의 효율적인 충전 및 압지가 가능한 것으로 분석되었다. 또한 3방향 체크 밸브를 이용한 실린트 순환 시스템 및 착탈식 호스로 설계함으로써 실린트 응고 방지 대책을 수립한 것으로 판단된다. 실린트 누액 현상 방지를 위해 실린트 on/off 제어 밸브와 end-effector 사이의 거리를 174mm로 설계한 것은 판내에 남아 있는 실린트의 양을 최소화시켜 실린트 누액 현상을 효과적으로 방지할 수 있는 것으로 분석되었다. 즉, 본 연구에서 제안한 도로면 크랙실링 자동화 장비 말단장치는 국내 도로면 크랙실링 관련 시방 기준을 만족하며 기존에 개발된 자동화 장비의 말단장치에 비해 작업 품질 및 생산성 등의 측면에서 높은 기술적 성능을 지니고 있어 현장 적용성이 매우 우수할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 도로면 크랙실링 자동화 장비 말단장치의 요구기능 분석을 통해 하드웨어를 설계·제작하고, 요구기능 측면에서 개발 자동화 장비의 기술적 타당성 분석을 수행하였다. 따라서 개발 자동화 장비의 현장 실험을 통한 검증 이전단계의 연구를 수행하였으므로 향후 본 연구 결과를 바탕으로 현장실험을 통해 제작된 말단장치의 기술적 문제점 분석 및 종합적 성능 분석(안전성, 품질, 생산성 등)에 대한 연구가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2010-0026774).

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 이정호, 유현석, 김영석, 조문영, 이준복(2004) 도로면 크랙실링 자동화 로봇의 프로토타입 개발에 관한 연구, **한국건설관리학회 논문집**, 한국건설관리학회, Vol. 5, No. 2, pp. 162-171.
- 국토해양부(2004) “도로면 유지보수 자동화를 위한 원격조정 장비의 개발”, **건설교통부 한국건설교통기술평가원 연구보고서**.
- 이원재, 안치훈, 유현석, 이정호, 김영석(2011) “도로면 크랙실링 자동화 장비의 실용화를 위한 개념 디자인 및 기술적 타당성 분석에 관한 연구”, **한국건설관리학회 논문집**, 한국건설관리학회, Vol. 12 No. 5, pp. 103-114.
- Haas, C. T., Saidi, K., Cho, Y. K., Fagerlund, W., Kim, H. K., and Kim, Y. S. (1999) Implementation of an Automated Road Maintenance Machine (ARMM), Bureau of Engineering Research the University of Texas at Austin, pp. 1-92.
- Baker, T. L. (2003) Development of the operator controlled crack sealing machine - The Long reach arm and control unit, Cambridge, University of California at Davis.
- Hargadon, A., Olson, E., and Woodall, B. (2006) Transfer tank longitudinal crack sealer business development case, Final Report, University of California-Davis.
- Haas, C. T. (1996) Evolution of an automated crack sealer: a study in construction technology development, Automation in construction.

(접수일: 2012.3.6/심사일: 2012.4.6/심사완료일: 2012.4.20)