도로면 크랙실링 자동화 장비의 모체 제작 및 구동 실험

The Development of the Manipulator and End-effector of Automated Pavement Crack Sealing Machine and Movement Test

이정호* · 이원재** · 유현석*** · 김영석****

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

Abstract

Crack sealing has been widely used in the pavement maintenance due to its advantage of repairing the cracks at the preliminary stages. However, it has been analyzed that the crack sealing work process is dangerous and labor intensive. Moreover, quality and productivity of crack sealing work are highly depended on labor experience and skills. Therefore, various crack sealing machines have been researched but revealed many limitations in practical application. This research analyses conventional crack sealing work process and previously developed crack sealing machines in order to develop an automated pavement crack sealing machine which can be practically and widely applied in the construction fields. This paper develops the previously proposed conceptual design by drawing detailed designs and fabricating the hardware(manipulator and end-effector) of the automated pavement crack sealing machine. The crack sealing machine suggested in this paper overcomes limitations of existing crack sealing machines and designed to meet the domestic road conditions and regulations. It is expected that automating the conventional crack sealing method contributes to the improvement of quality, economy and reduce accidents.

Keywords : *pavement, crack sealing, maintenance, automation, manipulator, end-effector*

요 지

도로면 크랙실링 공법은 도로면에 발생된 크랙을 초기에 효과적으로 보수할 수 있으므로 도로면 유지보수 공법의 하나로 폭넓게 활용되고 있다. 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. 이는 기존에 개발된 크랙실링 자동화 장비의 작업 대상 크랙이 한정적이며, 실작업 영역이 좁아 작업 생산성이 낮고, 말단장치의 성능이 현장 요구수준을 만족시키지 못했기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 재래식 크랙실링 공법 및 기존에 연구 개발된 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발 현황 분석을 통해 국내 건설 환경에 적합한 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발을 위한 고려사항을 도출하고, 도로면 크랙실링 자동화 장비 구성 요소 중 크랙실링 작업 공간 이동을 위한 핵심 하드웨어 기술인 본체 프레임(머니플레이터)과 공기 분사, 실린트 분사 및 압지 작업을 수행할 수 있는 말단장치에 대해 상세설계 및 하드웨어 제작을 수행하였다. 본 연구를 통해 제안된 도로면 크랙실링 자동화 장비 본체 프레임과 말단장치는 기존 시스템이 가지고 있는 문제점을 해결할 수 있고, 국내 도로 상황과 규정에 부합되도록 설계 및 제작되어 크랙실링 자동화 장비의 실용화 가능성과 범용성을 제고할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 도로면, 크랙실링, 유지보수, 자동화, 머니플레이터, 말단장치

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

2009년 기준 국내 포장도로의 총 연장은 약 82,937km로 1985년 이후 연간 약 5%의 증가를 보이고 있으며, 도로면의 유지보수 비용도 매해 약 9%씩 지속적으로 증가하고 있

다(국토해양부, 2009). 도로면 유지 보수 공법 중 크랙실링 공법은 도로면에 발생된 크랙을 초기에 효과적으로 보수함으로써 후속 크랙 방지 및 동결피해 방지를 통해 도로의 평균상태지수를 높일 수 있는 예방적 차원의 유지보수 공법으로 평가 받고 있다. 그러나 재래식 도로면 크랙실링 공법은 작업의 특성상 교통량이 많은 대도시나 고속도로에서 대부

*정회원 · 인하대학교 원가공학연구소 연구원 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)

본의 작업이 수행되므로 작업 노무자의 작업 안전성을 확보하기 어렵고, 숙련공의 부족으로 인해 작업 생산성 및 품질이 저하되고 있는 등 문제점을 지니고 있는 것으로 분석되었다. 기존 재래식 크랙실링 공법의 문제점을 해결하기 위해 선진 외국에서는 1990년대 초반부터 크랙실링 자동화 장비의 개발을 위한 연구를 지속적으로 수행하고 있으며, 국내에서도 2001년부터 2004년까지 도로면 크랙실링 자동화 장비인 APCS(Automated Pavement Crack Sealer)가 개발되어 프로토타입의 현장 실험이 수행되었다(국토해양부, 2004). 그러나 현재까지 국내외에서 연구 개발된 도로면 크랙실링 자동화 장비는 1) 작업 대상 크랙이 한정적이며, 2) 실작업 영역이 좁아 작업 생산성이 낮고, 3) 말단장치의 성능이 현장 요구수준을 만족시키지 못하고 있으며, 4) 높은 장비 가격 등과 같은 기술적/경제적 문제점으로 인해 실제 도로면 유지보수 작업에 폭넓게 사용되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 재래식 크랙실링 공법 및 기존에 연구 개발된 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발 현황 분석을 통해 국내 건설 환경에 적합한 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발을 위한 고려사항을 도출하고, 본 연구의 선행 연구를 통해 제시된 개념디자인(이원재, 2011)을 발전시켜 도로면 크랙실링 자동화 장비 구성 요소 중 크랙실링 작업 공간 이동을 위한 핵심 하드웨어 기술인 본체 프레임(머니플레이터)과 공기 분사, 실런트 분사 및 압지 작업을 수행할 수 있는 말단장치에 대해 상세설계 및 하드웨어 제작을 수행하였다. 본 연구를 통해 제안된 도로면 크랙실링 자동화 장비 본체 프레임과 말단장치는 기존 시스템이 가지고 있는 문제점을 해결할 수 있고, 국내 도로 상황 및 규정에 부합하도록 설계 및 제작되어 크랙실링 자동화 장비의 실용화 가능성과 범용성을 제고할 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 현재 국내에서 개발 중인 도로면 크랙실링 자동화 장비 주요 구성 중 크랙실링 작업 공간 이동을 위한 핵심 기술인 본체 프레임과 크랙실링 작업을 수행하는 말단장치를 “도로면 크랙실링 자동화 장비 모체”라 정의하고, 모체의 개발을 연구의 범위로 한정하고자 한다(그림 1).

그림 1. 도로면 크랙실링 자동화 장비의 주요 구성 및 연구의 범위

본 연구에서 수행한 연구 방법은 다음과 같다.

(1) 크랙실링 자동화 장비의 개발 현황 및 문제점 분석

도로면 크랙실링 자동화 장비 개발 시 기존에 연구 개발된 크랙실링 자동화 장비가 지니고 있는 장점을 활용하고, 문제점을 해결하기 위해 국내외에서 연구 개발된 크랙실링

자동화 장비의 개발현황을 분석하였다.

(2) 도로면 크랙실링 자동화 장비 모체 개발의 요구조건 분석

현장 작업 모니터링 및 인터뷰, 기존 연구 분석 등을 통해 도로면 크랙실링 자동화 장비 모체 개발 시 필수적으로 고려되어야 하는 기술적 고려요소와 일반적 고려요소에 대해 분석함으로써 개발하고자 하는 크랙실링 자동화 장비의 실용화 가능성 및 범용성이 제고될 수 있도록 하였다.

(3) 도로면 크랙실링 자동화 장비 모체 개념 디자인 및 상세설계, 구조적 안정성 분석

도로면 크랙실링 자동화 장비 모체 개발의 요구조건 분석 결과 및 본 연구의 선행 연구에서 제시된 도로면 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인(이원재, 2011)을 바탕으로 자동화 장비 모체를 상세설계하였다. 또한, 제시된 도로면 크랙실링 자동화 장비 모체 상세설계에서 발생할 수 있는 저점 관련 문제점에 대해서 구조적 안정성 분석을 수행하였다.

(4) 도로면 크랙실링 자동화 장비 모체 하드웨어 제작 및 구동실험

제시된 도로면 크랙실링 자동화 장비 상세설계를 바탕으로 원칙(Full-scale)의 크랙실링 자동화 장비 모체 하드웨어를 제작하였다. 또한, 제작된 모체의 실험실 구동 테스트를 통해 발생 가능한 문제점을 도출梳理逃白©, 향후 현장 적용 시 기술적 문제점이 발생하지 않도록 하였다.

2. 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발 현황 및 선행 연구 분석

2.1 국내외 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발 현황

도로면 유지보수 공법 중 크랙실링 공법의 자동화를 통해 노무자의 안전사고를 예방하고, 품질 및 생산성을 향상시키기 위해 국내외에서는 다양한 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발에 관한 연구를 수행하고 있다. 국외에서는 1990년대 CMU Laboratory Prototype을 시작으로 CMU Field Prototype (1992), ACSM(1993), UT Field Prototype(1995), ARMM (1999), LCSM(2000), OCCSM(2003), TTLS(2006)로 발전되어 왔으며, 개발된 일부 자동화 장비는 상용화 단계에 있는 것으로 분석되었다. 국내에서는 건설교통부의 연구비 지원으로 2002년에서 2004년까지 크랙실링 자동화 장비 (Automated Pavement Crack Sealing Machine; APCS)가 개발되어 현장 실험 및 성능분석이 수행되었다. 표 1은 현재까지 국내외에서 연구 개발된 주요 도로면 크랙실링 자동화 장비를 비교분석한 것이다.

현재까지 개발된 도로면 크랙실링 자동화 장비는 대부분 현장의 요구조건(작업 생산성 및 품질 향상)을 만족시키지 못하고 있으며, 기능상의 문제[1] 작업 대상 크랙이 제한적임, 2) 실작업 영역이 좁아 작업 생산성이 낮음, 3) 말단장치 설계 오류로 인한 실런트 누액 현상 발생으로 작업 품질 저하, 4) 관내 실런트 응고 현상 발생 등]와 경제적 타당성이 낮아 건설 현장에서 거의 사용되지 못하고 있는 실정이다. 즉, 기존 크랙실링 자동화 장비가 지니고 있는 하드웨어 측면의 주요 문제점은 작업 대상 크랙까지 말단장치가 이동할 수 있도록 하는 주요 기술인 본체 프레임(머니플레이터)

표 1. 도로면 크랙실링 자동화 장비(이원재, 2011)

장비명 장비속성		국 외				국 내
		미국 UT계열		미국 UC계열		인하대학교

		UT-Field(1995)	ARMM(1999)	OCCSM(2003)	TTLS(2006)	APCS(2004)
유닛구성 및 대상크랙	유닛 (트럭, 펌터, 크랙실러)	분리형 (멀티유닛)	분리형 (멀티유닛)	일체형 (싱글유닛)	일체형 (싱글유닛)	분리형 (멀티유닛)
	실링가능 크랙유형	종방향/횡방향/ 블록형 크랙	종방향/횡방향/ 블록형 크랙	종 · 횡방향 크랙	종방향 크랙 (Cold Joint)	종방향/횡방향/ 블록형 크랙
	머니플 레이터	X-Y 머니플레이터	X-Y 머니플레이터	텔레스코픽 머니플레이터	Folding Arm	X-Y 머니플레이터
센싱 및 제어부	실린트 제어	솔레노이드	솔레노이드	솔레노이드	볼 밸브	솔레노이드
	크랙실링 작업모니터링	있음	있음	있음	없음	있음
	경로계획	있음	있음	있음	없음	있음
	작업영역 내 영상획득 및 크랙인식 작업영역 내 영상획득 및 크랙인식	CCD 카메라+ 레이저 스캐너	CCD 카메라	CCD 카메라	육안인식	CCD 카메라
		자동(Auto)	반자동(MMI)	반자동(MMI)	수동	자동(Auto)/ 반자동(MMI)
말단장치	응고방지책	없음	없음	없음	이중관 오일순환	관 외부 열선처리
	공기분사	있음	있음	없음	없음	있음
	스퀴즈	사각판 압지	사각판 압지	Brush 형	U자형	U자형
	압지	없음	스프링	스프링	스프링	공기압지
	말단장치 피복	없음	없음	없음	있음	있음
경제성	일일작업 생산성	성능분석 미 수행	3.73km/day	3km/day	5.15km/day	1.59km/day
	장비가격	\$70,000	\$75,000	알수 없음	\$303,750	\$50,300

의 설계 · 제작상의 오류와 크랙실링 작업 품질에 결정적인 영향을 미치며 실질적인 크랙실링 작업을 수행하는 말단장치 설계 · 제작 상의 오류에 있는 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 기존 연구 사례 분석 및 도로면 크랙실링 자동화 장비 모체 개발을 위한 일반적/기술적 고려사항 분석 등을 통해 실용화 가능성이 높은 자동화 장비를 개발하고자 한다.

2.2 도로면 크랙실링 자동화 장비 모체 개발을 위한 고려사항 분석

2.2.1 크랙실링 자동화 장비 모체 개발을 위한 일반적 고려사항

본 연구에서는 도로면 크랙실링 자동화 장비 모체 구현을

표 2. 도로면 크랙실링 자동화 장비 모체 개발을 위한 일반적 고려사항

구 분	고 려 사 항
외기 조건	<ul style="list-style-type: none"> • 자동화 장비 모체 이음부를 밀실하게 처리하여 눈, 비, 먼지 등의 이물질에 의한 장비의 성능저하가 없어야 함. • 외기 온도의 다양한 변화(-15~35)에 의한 장비의 보존 및 구동 시 성능저하가 없어야 함.
작업 환경	<ul style="list-style-type: none"> • 크랙실링 작업이 주로 교통량이 많은 대도시나 고속도로에서 이루어지므로 장비의 이동성이 좋아야 함.
법적 제한	<ul style="list-style-type: none"> • 장비의 너비 및 높이는 고속도로 차량제한 기준(너비 2.5m 이내, 높이 4.2m 이내) 이내로 설계되어야 함.

위해 요구되는 일반적 고려사항을 외기조건 및 작업환경, 법적 제한사항 측면에서 분석하였다. 즉, 크랙실링 자동화 장비 모체는 연간 최대 기온 폭(-15~35) 내에서 보관 및 구동 시 장비의 성능저하가 없어야 하며, 교통량이 많은 대도시나 고속도로에서 작업이 대부분 수행되므로 장비의 이동성이 좋아야한다. 또한, 크랙실링 자동화 장비 모체는 국내 법적 고속도로 차량제한 기준인 너비 2.5m 이내, 높이 4.2m 이내로 크기가 설계되어야 한다(표 2).

2.2.2 크랙실링 자동화 장비 모체 개발을 위한 기술적 고려사항

본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비를 개발하기 위한 기술적 고려사항을 OCCSM 및 TTLS, APCS 장비 분석 결과를 바탕으로 표 3과 같이 제시하였다. 즉, 크랙실링 자동화 장비의 주요 구성 요소인 “실린트 펌터, 본체 프레임(머니플레이터), 말단장치” 3개 영역으로 구분하여 주요 고려사항을 도출하였다. 도출된 주요 기술적 고려사항은 1) 실린트가 순환하도록 함으로써 관내에서 실린트가 응고되는 현상을 방지하고, 2) 실린트 유량을 조절할 수 있는 기능을 탑재함으로써 크랙 네트워크 이외에 실린트가 도로면에 떨어지는 현상(누액 현상)을 방지할 수 있도록 해야 한다. 본체 프레임 제작 시에는 크랙실링 품질 향상을 위해 3) 진동 및 처짐에 강한 프레임의 설계가 요구되고, 4) 1개차선 이상의 작업 영역을 확보함으로써 작업 생산성 확보 및 작업효율성

표 3. 도로면 크랙실링 자동화 장비 모체 개발 시 요구되는 기술적 고려사항

장비구성	고 려 사 항
실린트 밸브	<ul style="list-style-type: none"> • 실린트의 관내 응고 방지를 위해 실린트가 순환할 수 있어야함. • 실린트 양 제어를 통한 실린트의 적정량 공급
모체	<ul style="list-style-type: none"> • 진동 및 처짐에 충분히 견딜 수 있어야 함. • 가능한 경량의 부재를 사용해 설계함. • 1개 차선 이상의 넓은 작업영역을 가지도록 하여 작업 생산성 및 효율을 향상 시킬 수 있어야 함. • 가능한 사각지대 발생이 없도록 해야 함.
말단장치	<ul style="list-style-type: none"> • 정밀 제어가 가능해야함. • 말단 피봇기능으로 실링 시 품질확보가 요구됨 • 실린트 분사량 조절이 빠르게 이루어져야 함. (누액 및 과다 분사 문제 해결) • 관내 실린트가 응고되는 현상을 방지해야 함.

향상이 요구된다. 5)말단장치는 정밀제어가 가능하도록 설계하고, 6)말단 피봇기능 및 신속한 실린트 분사 On/Off 제어 시스템을 구축함으로써 크랙실링 작업 품질을 향상시킬 수 있어야 한다(표 3).

2.3 도로면 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인

본 연구의 선행연구(이원재, 2011)에서는 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발을 위한 다양한 개념디자인을 제안하고, 그림 2와 같이 캔틸레버형 도로면 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인을 제안하였다. 제안된 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비는 트럭 적재함에 고정된 본체 프레임이 텔레스코픽 운동으로 하며 Y축 방향으로 확장과 축소될 수 있도록 설계되었다. 또한, 실린트를 분사하는 기능을 담당하고 있는 말단 장치의 작업영역을 확장하기 위해 그림 2의 (g), (i)와 같이 가이드 레일을 따라 확장 프레임이 움직이는 X1축 방향, 말단장치가 확장 프레임을 따라 움직이는 X2축 방향으로의 구동이 가능하도록 설계되었다.

한편, 제안된 캔틸레버형 도로면 크랙실링 자동화 장비는 커팅된 크랙 내부의 공기 청소 및 말단장치의 상하 이동을 위한 컴프레서(그림 2의 (a))가 탑재되어 있으며, 액츄에이터 구동 및 실린트 공급관의 히팅을 위한 제너레이터(그림 2의 (b))와 실린트의 원활한 공급을 위한 실린트 밸브(그림 2의 (c))가 차량 적재함에 탑재된 일체형 장비로 고안되었다(그림 2).

제안된 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비의 작업 프로세스

그림 2. 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인(이원재, 2011)

는 다음과 같다. 도로면 크랙이 존재하는 작업구역 내로 자동화 장비를 이동하고, 운전자는 차량 후미에 설치된 영상 획득용 CCD Camera(그림 2의 (e))를 이용하여 작업영역을 확보한다. 이때, CCD Camera를 통해 획득된 영상은 운전석에서 실시간으로 확인할 수 있으므로, 운전자는 장비가 작업영역에 도달했는지를 용이하게 확인할 수 있다. 작업영역이 확보된 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비는 텔레스코픽 프레임 암이 확대됨과 동시에 크랙 탐지용 레이저 센서(그림 2의 (h))를 이용하여 영상을 획득하고, 획득한 영상을 바탕으로 실시간 실링작업을 수행한다. 이때 실시간 실링 작업은 1개의 중방향 크랙을 대상으로 한다. 크랙의 수가 1개 이상 일 때는 텔레스코픽 프레임 암이 축소되면서 실시간으로 잔여 크랙을 실링한다. 실링 작업이 끝난 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비는 다음 구간으로 이동하고, 장비가 이동함과 동시에 텔레스코픽 프레임 암은 본체 프레임 내부로 축소되어 다음 작업을 준비한다.

3. 도로면 크랙실링 자동화 장비 모체 상세 설계 및 구조적 안정성 분석(처짐)

3.1 도로면 크랙실링 자동화 장비 모체 상세 설계

3.1.1 본체 프레임 상세설계

본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비 최적 대안으로 선정된 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비를 바탕으로 상세설계를 실시하였다(그림 3). 본 장비의 작업영역은 1톤 트럭 차량을 기준으로(1m 82cm×2m 69cm)으로 설계하였으며, 메인 프레임(텔레스코픽 프레임)의 설치 높이는 99cm로 차량의 상면고(75cm)보다 약 24cm정도 높다. 이는 자동화 장비의 원활한 이동을 위해 말단장치의 최하단을 지면에서 약 30cm정도 높이에 위치시키기 위함으로 말단장치에 장착된 공압장치의 길이를 고려한 것이다. 프레임부는 그림 3과 같이 Y-X1-X2 축 방향으로 움직이며, 베이스 프레임(그림 3의 (a)), 텔레스코픽 프레임(그림 3의 (b)), 말단장치 고정 확장프레임(그림 3의 (c))으로 구성되어 있다. 베이스 프레임은 견인트럭과 크랙실링 자동화 장비를 연결시켜 주는 역할을 수행한다. 텔레스코픽 프레임은 베이스 프레임으로부터 동력을 전달 받아 차량 후면으로 확장하는 구조로써 동력전달은 볼스크류와 LM가이드를 통해 이루어진다. 텔레스코픽 프레임의 동력원은 서보모터이며 동력전달 시 텔레스코픽 프레임이 볼스크류 말단으로 이탈하는 것을 방지하기 위해 볼스크류 양 끝단에 정지장치를 설치하였다.

텔레스코픽 프레임은 Y축 방향으로 그림 4와 같이 최대 2m 확장할 수 있으며, 말단장치 고정 확장 프레임의 프레임 두께 20cm를 제외하고 1m 80cm의 유효 확장 길이를 지니고 있도록 설계되었다.

도로면 크랙실링 작업의 생산성 향상을 위해 도로면 크랙실링 자동화 장비는 1회 주행으로 1개 차선 내에 존재하는 모든 크랙의 실링 작업을 수행해야 한다. 1톤 견인 트럭의 적재함 폭은 약 1.6m이므로 크랙실링 자동화 장비의 폭이 견인 트럭 폭과 같다면 1개 차선 내에 존재하는 크랙을 실링하기 위해 1회 이상 반복 작업을 수행해야 한다. 따라서 본 연구에서는 실린트를 분사할 수 있는 말단장치가 1개 차

그림 3. 도로면 크랙실링 자동화 장비 프레임 상세 설계

그림 4. 텔레스코픽 프레임 상세설계

선 폭 만큼 확장되며 크랙실링 작업을 수행할 수 있도록 그림 3의 (c), 그림 5와 같이 말단장치 고정 확장 프레임이 X1축 방향으로 1차 확장되며, X2축 방향으로 2차 확장될 수 있도록 설계하였다.

말단장치 고정 확장 프레임의 유효 확장길이는 X1축 좌측 방향으로 64cm, 우측 방향으로 77cm 1차 확장될 수 있으며, X2축 좌측방향으로 55cm, X2축 우측으로 76cm 2차 확장될 수 있도록 설계되어 X축 방향으로 총 2m 69cm의 유효 작업 영역을 지니고 있다. 말단장치 고정 확장 프레임의 양단에는 텔레스코픽 프레임과 동일한 이탈방지를 위한 정지장치를 설치하였으며, 말단장치 고정 확장프레임의 하부에 말단장치에 연결된 겐트리가 볼스크류 및 LM가이드를 따라 좌우로 이동하는 형태로 설계되었다(그림 5).

도로면 크랙실링 자동화 장비의 이동성을 확보하기 위해 X1축 확장 프레임의 하단은 지상에서 1m 19cm 높이에 위치하며, X2축 확장 프레임 하단은 지상에서 73m 높이에

그림 5. X축 확장 프레임부 상세설계

위치한다. 공압실린더는 실린더 길이 50cm, 공압실린더 내민길이 37cm를 사용하였다. 도로면에 분사된 실린트를 직접 압지할 수 있는 스퀴즈 길이는 압지용 보조스프링을 포함하여 13cm로 설계됨으로써(그림 6) 스퀴즈가 지상으로부터 30cm정도 이격된 상태로 자동화 장비가 이동될 수 있도록 하였다.

그림 6. X축 말단장치 고정 확장프레임의 높이

3.1.2 말단장치부 상세설계

말단장치부는 크랙 네트워크를 따라 크랙면 먼지제거를 위한 공기 분사작업과 동시에 실린트 분사 및 압지 기능을 가지고 있다. 이를 위해, 말단장치는 크게 공압장치부, 실린트 분사부, 스쿼즈부로 구성된다. 즉, 말단장치는 말단장치 양단에 설치된 공압실린더 및 공압에 의해 확장되는 부분을 포함한 공압장치부(그림 7의 (a))와 실린트 순환을 위한 이송구와 반송구, 실린트 분사구, 밸브제어를 위한 장비를 포함하는 실린트 분사부(그림 7의 (b)), 360° 회전이 가능한 스쿼즈와 이를 구동하는 제어장치를 포함하며 분사된 실린트를 압지할 수 있는 스쿼즈 부(그림 7의 (c))로 구성된다. 또한 스쿼즈 상단에 스프링을 부착하여 실린트 압지시 충격을 흡수 하면서 원활한 압지를 수행할 수 있도록 설계하였다.

3.2 상세 디자인의 처짐에 대한 구조적 안정성 분석

제안된 캔틸레버형 도로면 크랙실링 자동화 장비는 텔레스코픽 프레임이 최대로 확장된 상태에서 자동화 장비 자체 무게에 의한 처짐이 발생할 수 있다. 처짐이 발생할 경우 말단장치의 end-effector가 크랙 네트워크를 정확히 추적하며 크랙실링 작업을 수행할 수 없으므로 본 연구에서는 상세 설계된 도로면 크랙실링 자동화 장비의 도면과 사용된 자재 중량을 바탕으로 개발 장비의 텔레스코픽 프레임 말단에 발생하는 구조적인 처짐 값을 도출하였다(그림 8).

그림 7. 말단장치(End-effector)부 상세설계도

그림 8. 자동화 장비의 처짐 계산 개념도

그림 8과 같이 본 장비에 발생하는 처짐의 형태는 캔틸레버 보에 발생하는 최대 처짐과 같다고 할 수 있다. 따라서 캔틸레버 보에 발생하는 최대 처짐은 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\text{최대처짐값}(\Delta) = \frac{P(L)^3}{3EI} \quad (1)$$

P : 작용하중(3000N)

L : 부재의 내민길이(2000mm)

E : 부재의 탄성계수($2.15 \times 10^6 \text{N/mm}^2$)

I : 부재의 단면계수($13.06 \times 10^6 \text{mm}$)

여기서, 부재에 작용하는 작용하중(P)은 말단장치 및 프레임 포함하는 최대무게인 3000N이며, 부재의 최대 내민길이(L)는 장비의 최대 내민 설계길이인 2000mm, 부재의 탄성계수는 철의 탄성계수인 $2.15 \times 10^6 \text{N/mm}^2$ 이다. 속이 빈 사각형의 부재의 단면계수(I)는 아래의 계산 식 (2)을 이용해 산정하였다(그림 9).

위에서 도출된 작용하중, 내민길이, 부재의 탄성계수 및 단면계수를 이용하여 본 장비에 발생하는 처짐 계산결과, 최대 처짐값(Δ)은 약 0.27mm정도로 처짐이 거의 발생하지 않는

$$\begin{aligned} \text{단면계수}(I) &= \frac{b_1 h_1^3}{3} - \frac{b_2 h_2^3}{3} \quad \text{식 (2)} \\ &= \frac{75 \times (125)^3}{3} - \frac{67 \times (117)^3}{3} \\ &= 13.06 \times 10^6 \text{mm} \end{aligned}$$

그림 9. 도로면 크랙실링 자동화 장비 본체 프레임 부재의 단면계수 산정식

것으로 도출되었다. 따라서 본 크랙실링 자동화 장비는 구조적으로 처짐에 대해 안정성이 확보된 것으로 분석되었다.

4. 도로면 크랙실링 자동화 장비 모체 제작 및 구동 실험

본 연구에서는 도로면 크랙실링 자동화 장비 상세설계 도면을 바탕으로 자동화 장비의 모체를 제작하였다. 자동화 장비는 크게 4가지 부위로 구성되었다. 즉, 본 연구에서 제작한 도로면 크랙실링 자동화 장비의 주요 구성부위는 1)트럭 적재함 하부와 볼트 접합을 하여 자동화 장비 본체를 지지해 줄 수 있는 베이스 프레임(그림 10의 (a))과 2)Y축 방향으로 확장할 수 있는 텔레스코픽 프레임(그림 10의 (b)), 3)X축 방향으로 이동할 수 있는 말단 장치 고정 확장프레임(그림 10의 (c)), 4)실린트를 분사할 수 있는 장치를 갖춘 말단장치로 구성되었다(그림 10의 (d)). 베이스 프레임과 텔레스코픽 프레임은 강철을 주재료로 하였으며, 말단장치 고정 프레임과 말단장치는 무게에 의한 처짐을 고려하여 경량화를 위해 알루미늄으로 제작되었다. 자동화 장비의 총 무게는 알루미늄으로 제작된 말단장치부가 약 100kg이고, 강철로 제작된 프레임부의 무게는 약 200kg으로 총 약 300kg 정도로 제작되었다.

그림 10. 크랙실링 자동화 장비의 주요 구성

4.1 프레임부 하드웨어 제작 및 구동실험

4.1.1 Y축 방향 이동 메커니즘 제작 및 구동실험

도로면 크랙실링 자동화 장비는 작업 영역 내의 크랙을 실링할 수 있도록 견인 트럭이 정지한 후 텔레스코픽 프레임이 Y축 방향으로 확장할 수 있도록 제작되었다(그림 11). 텔레스코픽 프레임의 Y축 방향 확장을 위해 베이스 프레임 상단에 LM 가이드가 사용되어 텔레스코픽 프레임을 이동(슬라이딩)할 수 있도록 하였다. 텔레스코픽 프레임의 구동은 전동 서보모터와 볼스크류(그림 11의 (a))에 의해 수행된다.

한편, 제안된 자동화 장비의 처짐에 대한 구조적 안정성 분석 결과 텔레스코픽 프레임이 최대로 확장된 상태에서 약 0.27mm의 처짐이 발생하는 것으로 분석되었으나 보다 안정성을 확보하기 위해 본 연구에서는 텔레스코픽 프레임을 그림 12와 같이 텐션 롤러에 의해 압지하여 텔레스코픽 암의 처짐을 방지할 수 있도록 하였다.

제작된 크랙실링 자동화 장비 프레임의 구동실험 결과, Y

(a) 텔레스코픽 이전

(b) 텔레스코픽 이후

그림 11. 텔레스코픽 프레임의 Y축 방향 이동

그림 12. Y축 방향 이동 메커니즘(LM가이드, 볼스크류, 텐션롤러)

축 방향 텔레스코픽 프레임의 볼 스크류에 동력을 전달함에 따라 텔레스코픽 프레임은 LM가이드를 따라 Y축 방향으로 최대 2,000mm 확장 및 수축할 수 있으며, 기술적 문제점이 없는 것으로 분석되었다.

4.1.2 X축 방향 이동 메커니즘 제작 및 구동실험

X1 및 X2축 방향 확장을 위해 텔레스코픽 프레임의 Y축 확장을 위한 방식과 같이 LM가이드와 볼스크류가 X1축 확

(a) LM가이드와 볼스크류 (b) X축 프레임 압지용 롤러

그림 13. X축 방향 이동 메커니즘

장 프레임과 X2축 확장 프레임에 각각 사용되었다(그림 13의 (a)). 한편, 비틀림 방지 및 원활한 X축 방향 이동을 위해 그림 13의 (b)와 같이 롤러를 설치하여 X축 확장 프레임의 상하좌우를 압지할 수 있도록 하였다.

(a) 우측방향 X1축 이동

(b) 우측방향 X2축 이동

(c) 좌측방향 X1축 이동

(d) 좌측방향 X2축이동

그림 14. X축 방향 말단장치 이동

X축 방향 구동실험 결과, X1축 방향으로 좌우측으로 총 1,380mm 이동할 수 있으며, X2축 방향으로 좌측 550mm, 우측 760mm씩 LM가이드를 따라 자연스럽게 이동되는 것으로 실험되어 기계적인 문제점이 없는 것으로 분석되었다(그림 14).

4.2 말단장치부 하드웨어 제작 및 구동실험

본 연구에서는 기존에 연구 개발된 크랙실링 자동화 장비의 말단장치 장단점 분석 및 요구기능 분석(이정호, 2012)을 통해 도로면 크랙실링 자동화 장비의 말단장치를 그림 15와 같이 제안하였다. 제안된 말단장치는 재래식 방식과 같이 크랙면 청소, 실런트 분사, 실런트 압지 기능을 수행할 수 있도록 설계·제작되었다. 크랙면 청소기능은 공기분사구(그림 15의 (b))에 연결된 공압호스를 통해 크랙면에 압축공기를 분사하여 크랙 내 이물질을 제거할 수 있다. 실런트 분사는 실런트 분사구를 통해 실런트가 분사되며(그림 15의 (c)), 실런트 분사구 174mm 상단에 3방향 체크밸브(그림 15의 (d))를 장착하여 on/off제어를 함으로써 실런트 누액현상을 방지할 수 있도록 설계·제작하였다. 한편, 실런트 이송관과 반송관을 3방향 체크밸브에 연결시키는 형태의 실런트 순환 시스템을 구축하여 크랙실링 작업을 수행하지 않을 때 관내에서 실런트가 응고되는 현상을 방지할 수 있도록 설계하였다. 실런트 압지 기능은 말단장치 상단에 공압실린더(그림 15의 (a))를 장착하여 U자형 스퀴즈(그림 15의 (g))를 지면에 밀착시킬 수 있으며, 노면의 미세한 형상(단차)변화에 대처하여 실링면 품질향상을 위해 충격흡수용 스프링(그림 15의 (f))을 장착하여 실링품질 향상을 할 수 있도록 하였다. 또한 스퀴즈가 굴곡진 크랙 네트워크를 부드럽게 따라가며 압지할 수 있도록 피봇기능(그림 15의 (e))을 수행할 수 있도록 고안하였다.

스퀴즈를 지면과 밀착된 상태에서 Y축 방향으로 이동한 결과, 말단장치 이동이 부드럽게 수행되지 못하는 문제점이 발견되었다. 발생한 문제점은 실런트의 압지를 위해 사용된 보조 스프링의 강성이 높고, U자형 스퀴즈 하단에 장착된 고무의 탄성이 너무 낮아 지면에 굴곡(rutting)이 있을 경우 말단장치의 움직임을 방해하는 것으로 분석되었다. 이는 추후 말단장치 보조 스프링의 강성을 낮추고, 스퀴즈 고무를 부드러운 재질로 교체할 경우 발생한 문제점이 해결될 것으

그림 15. 도로면 크랙실링 자동화 장비 말단장치

그림 16. 말단장치 구동실험 결과 문제점 및 대처방안

로 사료된다(그림 16).

4.3 국내외 도로면 크랙실링 자동화 장비 비교

본 연구에서는 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발시 요구되는 기술적 고려요소를 바탕으로 표 4와 같이 기존에 국내외에서 개발 완료된 도로면 크랙실링 자동화 장비와 현재 본 연구를 통해 개발되고 있는 도로면 크랙실링 자동화 장비를 비교·분석하였다. 즉, 자동화 장비 이동 및 제어의 용이성을 위한 1) 유닛(트럭, 실린트 펌터, 크랙실러 본체) 통합과 2) 작업 가능한 대상 크랙, 작업 영역 및 작업 생산성에 큰 영향을 미치는 3) 머니플레이터의 구조와 4)1개 차선 이상 확장하여 크랙실링 작업 수행 가능 여부, 5)실린트 응고 방지 대책, 6) 실린트 누액 현상 방지 대책, 실링 품질 향상을 위한 7) 말단장치 기능 측면에서 기존 자동화 장비와 본 연구의 자동화 장비를 비교·분석하였다. 그 결과, 본 연구를 통해 개발되고 있는 도로면 크랙실링 자동화장비(APCS)는 표 4와 같이 모든 비교 영역에서 기존 자동화 장비에 비해 우수한 성능 및 기능을 수행할 수 있는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 도로면 크랙실링 자동화 장비의 모체에 대해 상세 설계 및 제작을 수행하고, 구동 실험을 통해 제작

된 하드웨어의 기술적 문제점을 도출하였다. 향후 하드웨어 제어 시스템의 개발 및 비전소프트웨어(크랙탐지, 크랙네트 워크 경로 계획)의 개발과 개발된 하드웨어와의 통합을 수행할 예정이다. 이를 통해 도로면 크랙실링 작업의 생산성 및 품질 향상을 기대할 수 있고, 자동화 시공으로 작업 노동자의 안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

1. 도로면 크랙실링 자동화 장비관련 기존 연구 및 선행 연구 분석 결과, 기존에 연구 개발된 자동화 장비는 기능상의 문제 및 경제적 타당성이 낮아 건설현장에서는 범용적으로 사용되지 못하고 있는 것으로 분석되었다.
2. 크랙실링 자동화 장비의 실용화 가능성을 향상시키기 위해 본 연구에서는 도로면 크랙실링 자동화 장비 모체 개발을 위한 일반적/기술적 고려사항을 분석하였다. 그 결과, 본 연구의 자동화 장비 모체는 이동성 및 내구성, 외기 온도에 따른 작업성 확보, 법적 기준에 따른 장비 크기(너비 2.5m, 높이 4.2m 이내)로 제작되어야 하는 것으로 분석되었다. 기술적 고려요소로는 실린트 응고 방지 및 진동/처짐에 대한 대처, 생산성 향상을 위한 작업 영역 확보, 누액 현상 방지 및 실링 품질 확보 등이 도출되었다.
3. 본 연구에서는 기존 연구 및 선행 연구 결과, 일반적/기술적 고려요소를 바탕으로 도로면 크랙실링 자동화 장비 모체를 상세 설계하고, 텔레스코픽 프레임의 처짐에 대한 구조적 안정성 분석을 수행하였다. 그 결과, 사용된 프레임 구조 및 형상, 무게 등을 고려했을 때 설계된 자동화 장비는 약 0.27mm의 처짐이 발생하는 것으로 분석되어 구조적으로 처짐에 대해 안정성이 확보된 것으로 분석되었다.
4. 본 연구에서는 상세설계를 바탕으로 도로면 크랙실링 자

표 4. 도로면 크랙실링 자동화 장비 비교

장비명 하드웨어 개발 고려요소		국 외				국 내	
		미국 UT계열		미국 UC계열		인하대학교	
		UT-Field (1995)	ARMM (1999)	OCCSM (2003)	TTLS (2006)	APCS (2004)	본 연구 APCS(2012)
유닛구성(트럭, 펌터, 크랙실러)	건인형	○	○	-	-	○	-
	통합형	-	-	○	○	-	○
작업 대상 크랙	종방향	○	○	○	○	○	○
	횡방향	○	○	○	-	○	○
	블록	○	○	○	-	○	○
머니플레이터		X-Y 머니플레이터	X-Y 머니플레이터	텔레스코픽 머니플레이터	Folding Arm	X-Y 머니플레이터	텔레스코픽 머니플레이터
1개 차선 이상 확장 크랙실링 가능여부		-	-	○	-	-	○
실린트 응고 대책		-	-	○	-	○	○
실린트 누액 방지 대책		-	-	-	-	-	○
말단장치	공기분사	○	○	-	-	○	○
	스퀴즈/압지	○	○	○	○	○	○
	피봇	-	-	-	-	○	○

동화 장비 모체를 제작하였다. 모체는 Y축 방향으로 이동할 수 있는 텔레스코픽 프레임과 X축 방향으로 이동할 수 있는 말단장치 고정 확장 프레임, 말단장치 부로 구성되어 제작되었다. 제작된 모체의 구동실험 결과, 말단장치는 Y축 및 X축 방향으로 원활히 구동되었다. 그러나 도로면에 굴곡이 있을 때 실런트 압지를 위한 보조 스프링의 높은 강성 및 스퀴즈 고무의 낮은 탄성으로 인해 말단장치 움직임이 원활하지 못한 것으로 분석되어 낮은 강성을 지닌 보조 스프링 및 부드러운 탄성을 지닌 고무 스퀴즈로의 대체가 요구되었다.

향후 제작된 도로면 크랙실링 자동화 장비 모체를 바탕으로 제어 및 비전 소프트웨어와의 통합과정이 요구되며, 현장 실험을 바탕으로 기술적 문제점 도출 및 수정·보완이 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.

- 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. (1996) Evolution of an automated crack sealer: a study in construction technology development, *Automation in construction*.
- Haas, C. T., Saidi, K., Cho, Y. K., Fagerlund, W., Kim, H. K., 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.

(접수일: 2012.4.23/심사일: 2012.5.9/심사완료일: 2012.5.22)