

도로면 크랙실링 자동화 장비의 실용화를 위한 개념 디자인 및 기술적 타당성 분석에 관한 연구

A Study on the Conceptual Design and Technical Feasibility Analysis for
the Development of Automated Pavement Crack Sealer

이 원 재* 안 치 훈** 유 현 석*** 이 정 호**** 김 영 석*****
Lee, Won-Jae, An, Chi-Hoon Yoo, Hyun-Seok Lee, Jeong-Ho Kim, Young-Suk

요 약

도로면 크랙실링 공법은 도로면에 발생된 크랙을 초기에 효과적으로 보수함으로써 후속 크랙 방지 및 동결피해를 방지하고 도로 하부 구조를 보호하여 도로의 평균상태지수를 높일 수 있는 예방적 유지보수 공법이다. 그러나 재래식 도로면 크랙실링 공법은 작업의 특성상 교통량이 많은 대도시나 고속도로에서 대부분의 작업이 수행되므로 작업 노무자의 안전성을 확보하기 어렵고, 숙련공의 부족으로 인해 작업 생산성 및 품질이 저하되는 등 문제점을 지니고 있다. 1990년대 초반부터 북미 등 선진 외국에서는 재래식 도로면 크랙실링 공법을 자동화하기 위한 연구를 지속적으로 수행하고 있으며 국내에서도 2001년부터 2004년까지 도로면 크랙실링 자동화 장비를 개발하고 현장 실험을 수행한 바 있으나, 작업 품질, 제어의 복잡성, 고가의 장비 구입 가격 등은 개발 장비를 실용화함에 있어 문제점으로 지적되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 재래식 크랙실링 공법 및 국내외에서 연구 개발된 도로면 크랙실링 자동화 장비의 문제점을 해결하고 국내 도로 상황과 규정에 부합되는 도로면 크랙실링 자동화 장비의 최적 개념 디자인을 제안하고 원칙의(Full-scale) 장비 개발을 위한 제안 기술의 타당성을 분석하였다.

키워드 : 크랙실링, 자동화, 개념 디자인, 기술적 타당성 분석

1. 서론

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 있다(국토해양부, 2009). 도로면 유지보수는 크게 노면이 파손된 이후 재포장 하는 방식과 파손되기 이전에 부분적으로 보수하는 방식으로 구분된다. 미 연방도로국의 분석결과에 따르면, 예방적 차원에

서의 유지보수 공법이 재포장보다 경제적으로 유리할 뿐만 아니라 도로의 평균상태지수가 약 16%정도 높은 것으로 조사되었다(FHWA, 1999). 예방적 차원의 유지보수 공법으로는 크랙실링, 칩 실링, 소파보수, 덧씌우기 등이 있으며, 단위 길이 당 유지관리비용 분석 결과 크랙실링이 가장 경제적인 보수공법으로 조사되었다(Pavement Maintenance Manual, 2005). 또한 도로면 크랙실링 공법은 도로면에 발생된 크랙을 초기에 효과적으로 보수함으로써 후속크랙 방지 및 도로 하부 구조를 보호하여 동결피해를 방지하는 효과가 있다. 그러나 재래식 도로면 크랙실링 공법은 작업의 특성상 교통량이 많은 대도시나 고속도로에

* 일반회원, 인하대학교 대학원 건축공학과 석사과정, wonjae0202@naver.com

** 일반회원, 인하대학교 대학원 건축공학과 석사과정, an-chi-hoon@hanmail.net

*** 일반회원, 인하대학교 대학원 건축공학과 박사수료, hsyoo.inha@gmail.com

**** 일반회원, 인하대학교 산학협력단 원가공학연구센터, 공학박사, inhacmr@hotmail.com

***** 종신회원, 인하대학교 대학원 건축공학과 교수, 교신저자, youngsuk@inha.ac.kr

서 대부분의 작업이 수행되므로 작업 노무자의 안전성을 확보하기 어렵고, 숙련공의 부족으로 인해 작업 생산성 및 품질이 저하되고 있는 등 문제점을 지니고 있는 것으로 분석되었다.

이러한 기존 재래식 크랙실링 공법의 문제점을 해결하기 위해 선진 외국에서는 1990년대 초반부터 크랙실링 자동화 장비의 개발을 위한 연구를 지속적으로 수행하고 있으며 그 결과, TMR(R)(Tethered Mobile Router Robot), TTLS(The Transfer Tank longitudinal Sealer), OCCSM(Operator Controlled Crack Sealing Machine) 등의 자동화 장비가 연구 개발되었다. 국내에서도 2001년부터 도로면 크랙실링 자동화 장비인 APCS(Automated Pavement Crack Sealer)가 개발되어 2004년 개발 자동화 장비 프로토타입의 현장 실험이 수행되었다. 그러나 현재까지 국내외에서 연구 개발된 도로면 크랙실링 자동화 장비는 1)정밀 제어의 어려움, 2)관내 실런트 응고현상, 3)실런트 유량제어의 어려움, 4)제한된 작업영역과 사각지대(dead space)의 발생, 5)높은 장비 가격 등의 문제로 인해 실제 도로면 유지보수 작업에 폭넓게 사용되지는 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 재래식 크랙실링 공법 및 국내외에서 연구 개발된 도로면 크랙실링 자동화 장비의 문제점을 해결할 수 있고, 국내 도로 상황 및 규정에 부합되는 도로면 크랙실링 자동화 장비를 개발하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 현재까지 연구 개발된 크랙실링 자동화 장비 중 가장 진보된 기술을 지니고 있는 자동화 장비인 OCCSM, TTLS, APCS의 분석을 통해 크랙실링 자동화 장비 개발 시 요구되는 기술적 고려요소 및 일반적 고려요소 분석 결과를 토대로 도로면 크랙실링 자동화 장비의 개발을 위한 다양한 형태의 개념디자인을 제안하였다. 또한, 제안된 개념 디자인 중 최적 개념디자인을 선정하고 이에 대한 기술적 타당성을 분석함으로써 본 연구를 통해 개발된 크랙실링 자동화 장비의 실용화 가능성 및 범용성을 제고시킬 수 있도록 하였다. 크랙실링 자동화 장비의 개발을 통해 작업 노무자의 안전성 및 생산성, 품질을 향상시킬 수 있고, 도로면 유지보수에 소요되는 비용을 절감시킬 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 연구의 범위 및 방법

도로면 크랙실링 자동화 장비의 최적 개념 디자인 제시 및 기술적 타당성 분석을 위한 본 연구의 방법은 다음과 같다.

1) 평균상태지수 : 포장도로의 상태를 나타내는 미 연방도로국에서 규정하는 지수로서, 포장도로가 처음 시공되었을 때의 상태를 100으로 하고, 노후화되어 더 이상 사용할 수 없을 때의 상태를 0으로 하여 도로의 상태를 백분위 수치로써 평가한 것.

1) 재래식 크랙실링 공법 작업 프로세스 및 위험도 분석

문헌조사 및 현장에서 실측한 자료를 바탕으로 재래식 크랙실링 공법의 작업 프로세스 분석을 수행하고, 작업 프로세스에 따른 노무 투입 비율(부하) 분석을 수행하였다. 또한 현장 관리자 19명을 대상으로 한 설문조사를 통해 크랙실링 작업의 위험요인 분석을 수행함으로써 크랙실링 작업 프로세스 중 자동화 대상작업의 우선순위를 도출하였다.

2) 크랙실링 자동화 장비의 개발 현황 및 문제점 분석

본 연구에서는 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 주요 구성요소인 '실런트 맬터, 센싱 및 디지털 영상 처리, 머니플레이터, 말단장치 측면에서 분석하였다.

3) 도로면 크랙실링 자동화 장비의 요구조건 분석 및 개념 디자인 제시

본 연구에서는 현장 작업 모니터링 및 인터뷰, 기존 연구 분석 등을 통해 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발 시 필수적으로 고려되어야 하는 기술적 고려요소와 일반적 고려요소에 대해 분석함으로써 개발 자동화 장비의 실용화 가능성 및 범용성이 제고될 수 있도록 하였다. 또한 분석된 필수 고려요소를 바탕으로 3가지 형태의 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인을 제안하였다.

4) 최적 개념 디자인 선정 및 기술적 타당성 분석

제안된 3가지 형태의 크랙실링 자동화 장비 개념디자인에 대해 장단점 분석을 수행하고, 설문 및 AHP 분석 기법을 활용하여 제안된 크랙실링 자동화 장비에 대해 Trade-off analysis를 수행하여 최적 대안을 선정하였다. 또한 본 연구에서는 선정된 최적 개념디자인의 프로토타입 구축 시 발생가능한 문제점을 분석하고 해결 가능한 대안을 제시함으로써 기술적 타당성을 검토하였다.

2. 크랙실링 자동화 장비 개발의 필요성 및 개발 사례 분석

2.1 크랙실링 공법의 정의 및 작업 프로세스 분석

2.1.1 크랙실링 공법의 정의

크랙실링(균열보수) 공법은 도로면의 크랙부분에 물과 이물질을 제거하고 가열된 실런트(sealant)를 주입하여 추후 크랙의 확산 및 발생을 방지하는 공법으로써 도로의 수명을 늘리는 예방적 차원의 도로면 유지보수 공법이다. 크랙실링 공법은 논커팅

(non-cutting) 크랙실링 공법과 커팅(cutting) 크랙실링 공법으로 크게 구분된다. 도로면 크랙실링 시방 기준에 따르면 논커팅 크랙실링 공법은 폭 1cm, 깊이 1~2cm이내의 크랙을 커팅하지 않고 실링 작업을 수행하고, 커팅 크랙실링 공법은 폭 1~4cm이하, 깊이 5cm이하의 크랙을 대상으로 커팅장비를 이용하여 크랙면을 커팅한 후 실링하는 공법이다(도로균열보수공사 특별시방서, 2010). 그러나 국내에서는 논커팅 대상 크랙이라 하더라도 품질 향상을 위해 이를 대부분 커팅 크랙실링 공법으로 도로면을 유지보수 하고 있는 것으로 조사되었다. 도로면 포장에 발생할 수 있는 크랙의 종류는 종방향, 횡방향, 블록, 거북등 크랙이 있으나 거북등 크랙은 크랙실링 대상크랙이 아니고 덧씌우기나 절삭 덧씌우기 대상 크랙이므로 본 연구에서는 종방향, 횡방향, 블록 크랙을 대상으로 크랙실링 작업을 수행할 수 있는 자동화 장비를 개발하고자 한다.

2.1.2 크랙실링 공법의 작업 프로세스

크랙실링 시방 기준 및 현장 조사를 통한 커팅 크랙실링 공법의 작업 프로세스는 1)작업 구간의 확보를 위해 수신호 작업원이 현장 이동 차량의 차선변경을 유도하고, 작업 구간 밖에 라바콘을 설치하는 '현장작업 준비' 와 2)커팅장비로 크랙면을 폭: 1.5cm, 깊이 3cm로 커팅(cutting)하는 '크랙면 절단', 3)커팅 후 발생한 커팅면 주변의 파편을 수거하고 고압 공기청소기(compressor)로 커팅부위를 청소하는 '크랙면 청소(파편수거 및 먼지제거)', 4)청소된 커팅면을 히트랜서로 가열과 동시에 180~210℃로 용융된 실린트를 주입 및 압지하는 '크랙실링 작업', 5)양생면에 탈크를 도포하여 차량 소통을 조기에 수행할 수 있도록 하는 '양생작업', 6)작업구간 내 설치된 라바콘을 회수하면서 '작업 철수' 하는 과정으로 구성된다(그림 1).

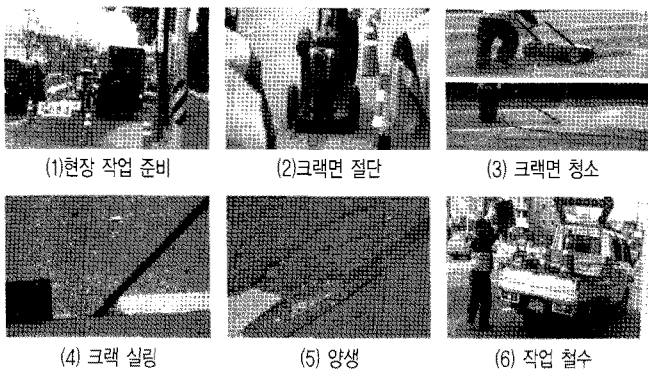


그림 1. 재래식 크랙실링 공법 작업 프로세스

2.2 재래식 크랙실링 공법의 위험공종 분석 및 자동화 필요성

재래식 크랙실링 공법은 도로상에서 수행되는 작업의 특성 상

많은 위험요인이 존재한다. 본 연구에서는 재래식 크랙실링 공법 작업 프로세스 중 가장 시급히 자동화가 요구되는 단위 작업을 노무부하와 위험도 측면에서 분석하였다. 노무부하는 현장 실측을 통해 작업 프로세스마다 투입되는 노무인원을 바탕으로 분석하였으며, 현장 관리자 19명을 대상으로 한 설문문을 통해 위험도 분석을 수행하였다. 현장 실측을 통해 재래식 크랙실링 작업을 분석한 결과, 재래식 공법의 투입 노무인력은 8인 1개조로 구성된다. 작업 프로세스 및 노무 역할에 따른 노무투입 비율 조사 결과, '크랙실링 작업' 공종에서 가장 높은 노무부하가 발생(87.5%)하는 것으로 분석되었다(표 1).

표 1. 재래식 크랙실링 공법 노무인력 구성

작업자	작업 프로세스					
	현장 작업준비	크랙면 절단	크랙면 청소	크랙 실링	양생	작업 철수
작업반장	공간확보	X	X	크랙면가열	X	X
숙련공1	X	크랙커팅	X	실린트분사	X	X
숙련공2	X	X	X	스퀴징	X	X
숙련공3	X	X	먼지제거	X	X	X
조공1	라바콘설치	X	파편수거	라바콘이동	X	라바콘회수
조공2	라바콘설치	X	파편수거	라바콘이동	탈크도포	라바콘회수
조공3	차량통제	차량통제	차량통제	차량통제	차량통제	차량통제
운전수	X	X	X	차량운전	X	X
노무부하	50%	25%	50%	87.50%	25%	37.50%

* 노무부하 산출공제(%) : (투입 노무인원 / 전체노무 인원)X100

본 연구에서는 크랙실링 작업 프로세스 중 위험성이 가장 높은 단위 공종을 우선적으로 자동화시키기 위해 표 2와 같이 현장관리자 19명을 대상으로 설문분석을 수행하였다. 설문 대상자는 크랙실링 단위 작업의 위험도를 5점척도(매우높음, 높음, 보통, 낮음, 매우 낮음)로 응답하도록 하였다. 그 결과 크랙실링 단위 작업 중 '크랙실링 작업'의 위험도(위험도 점수x응답계수)가 72점으로 가장 높게 도출되었다(표 2). 즉, 노무부하 및 위험도 분석 결과 '크랙실링 작업 공종'의 자동화가 가장 시급히 요구되는 것으로 분석되었다.

표 2. 재래식 크랙실링 공법의 최상위 위험 공종 분석

단위 작업	총 응답 계수	위험도										항목 점수합계 (위험도 점수 x 응답계수)
		매우낮음 (1점)		낮음 (2점)		보통 (3점)		높음 (4점)		매우높음 (5점)		
		응답 계수	항목 점수	응답 계수	항목 점수	응답 계수	항목 점수	응답 계수	항목 점수	응답 계수	항목 점수	
현장 작업 준비	19	1	1	2	4	4	12	10	40	2	10	67점
크랙면 절단	19	3	3	6	12	9	27	1	4	-	-	46점
크랙면 청소	19	7	7	9	18	3	9	-	-	-	-	34점
크랙실링	19	-	-	1	2	4	12	10	40	4	20	72점
양생	19	9	9	9	18	1	3	-	-	-	-	30점
작업철수	19	1	1	6	12	8	24	4	16	-	-	53점

2.3 국내외 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발 현황 및 기존 연구의 한계점 분석

2.3.1 국내외 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발 현황

재래식 크랙실링 작업의 문제점을 해결하기 위해 국내외에서는 크랙실링 관련 자동화 장비를 1990년대 초반부터 현재까지 지속적으로 개발해 오고 있다. 그 결과 2011년까지 약 10여종의 크랙실링 자동화 장비가 개발되었다(그림 2).

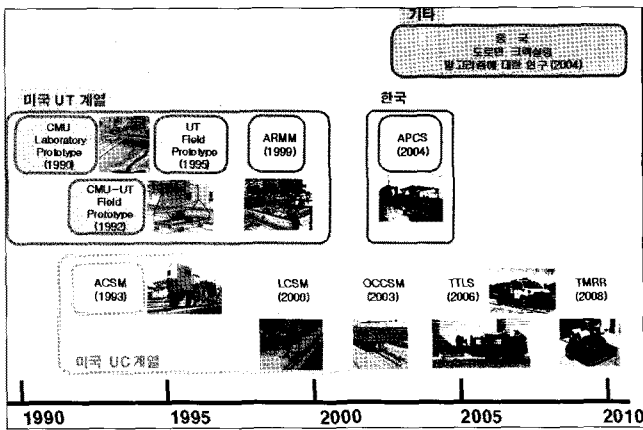


그림 2. 국내외 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발 현황

국외 크랙실링 자동화 장비는 크게 미국의 UT계열(University of Texas at Austin)과 UC계열(University of California at Davis)로 분류되며, UT계열의 크랙실링 자동화 장비에 대한 연구는 1990년대 CMU Laboratory Prototype을 시작으로 CMU Field Prototype(1992), UT Field Prototype(1995), ARMM(1999)으로 발전되었다. UC계열은 1993년 ACSM장비를 시작으로 LCSM(2000), OCCSM(2003)장비를 거쳐 2006년 TTLS장비로 발전되었다. 또한 무인자동화 개념의 도입으로 2008년 도로면 크랙 커팅 로봇(TMRR)이 개발되었다. 국내에서는 건설교통부의 연구비 지원으로 2002년에서 2004년까지 크랙실링 자동화 장비(Automated Pavement Crack Sealing Machine; APCS)가 개발되어 현장 실험 및 성능분석이 수행되었다. 아래 표 3은 현재까지 국내외에서 연구 개발된 도로면 크랙실링 자동화 장비를 비교분석한 결과이다.

UT계열의 크랙실링 자동화 장비는 X-Y머니플레이터 형태이며, 별도의 트레일러형 실린트 펌터를 장착한 분리형(Multi-Unit) 자동화 장비 형태로 개발되었다. UC계열의 크랙실링 자동화 장비는 다관절 암(Arm)형태의 머니플레이터로 실린트 펌터를 차량에 탑재시킨 일체형(Single-Unit) 자동화 장비이다.

표 3. 연구 개발된 도로면 크랙실링 자동화 장비 특성

장비명	국 외				국 내	
	미국 UT계열		미국 UC계열		인하대학교	
장비사진						
유닛 구성 및 대상 크랙	유닛 (트럭, 펌터, 크랙실러)	분리형 (멀티유닛)	분리형 (멀티유닛)	일체형 (싱글유닛)	일체형 (싱글유닛)	분리형 (멀티유닛)
실링가능 크랙 유형	종방향/횡방향/블록형 크랙	종방향/횡방향/블록형 크랙	종·횡방향 크랙	종방향 크랙 (Cold Joint)	종방향/횡방향/블록형 크랙	
머니플레이터	X-Y 머니플레이터	X-Y 머니플레이터	Multi-DOF 머니플레이터	Folding Arm	X-Y 머니플레이터	
센싱 및 제어부	실린트 제어	솔레노이드	솔레노이드	솔레노이드	볼 밸브	솔레노이드
크랙실링 작업 모니터링	있음	있음	있음	없음	있음	
경로계획	있음	있음	있음	없음	있음	
작업영역 내 영상획득 및 크랙인식	CCD 카메라+레이저 스캐너	CCD 카메라	CCD 카메라	육안인식	CCD 카메라	
응고방지책	없음	없음	없음	이중관 오일순환	관 외부 열선처리	
공기분사	있음	있음	있음	없음	있음	
스퀴즈 압지	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 미수행	3.73km/day	3km/day	5.15km/day	1.59km/day
장비가격	\$70,000	\$75,000	일수 없음	\$303,750	\$50,300	

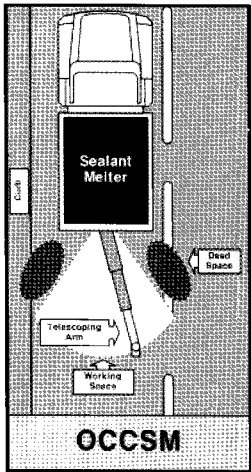
2.3.2 국내외 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발사례 및 기존 연구의 한계점 분석

본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비 개발 시 발생 가능한 문제점을 예방하고, 생산성 및 품질, 작업 안전성 등을 기존 자동화 장비보다 더 향상시킬 수 있도록 하기 위해 연구 개발된 10여종의 크랙실링 자동화 장비 중 가장 진보된 형태의 장비인 OCCSM 및 TTLS, APCS의 장단점 분석을 수행하였다. 3종류의 크랙실링 자동화 장비는 장비 주요 구성 부위인 '실린트 펌터, 센싱 및 디지털 영상처리, 머니플레이터, 말단장치(End-Effector)'의 영역으로 구분하여 분석되었다.

1) OCCSM(The Operator Controlled Crack Sealing Machine)

OCCSM장비(2003년)는 트럭에 실린트 펌터(약 240 Gallon)가 장착된 상차형 유닛으로써 일일작업생산성은 약 3km/day이다. 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 있다. 말단

장치에는 솔레노이드 밸브를 장착하여 실린트의 분사를 On/Off 제어하는 시스템으로 구성되어있다(그림 3).



장비 세부 사항	
장비	
구성	일체형 장비
일일작업생산성	약 5.15 km/day
실린트 펌터	
용량	360 Gallon
센싱 및 디지털 영상처리	
크랙탐지	육안인식
머니플래이더	
형태	Folding Arm
작업영역	1개 차선(직선방향)
말단장치	
실린트 제어	볼 밸브
말단 피봇기능	있 음
실린트 응고방지	이중관 오일순환

그림 3. OCCSM자동화 장비 개념도 및 세부사항

OCCSM 장비의 성능분석 결과를 살펴보면, 실링속도에 비해 실린트의 공급이 원활하게 이루어지지 않고 CCD 카메라 말단 붐의 처짐 및 흔들림으로 인해 영상이 왜곡되는 문제점이 있는 것으로 분석되었다. 또한 머니플래이더는 Steel-Arm으로 제작되어 부재중량에 의한 말단부 처짐현상이 발생하고, 이는 실링 품질저하의 원인이 되는 것으로 분석되었다. 또한 브러쉬 타입의 스퀴즈 사용으로 인해 실린트가 크랙 내로 밀실하게 침투되지 않았으며, 말단 피봇기능과 공기 분사 기능의 부재로 인하여 실링 품질이 저하되는 것으로 분석되었다(표 4).

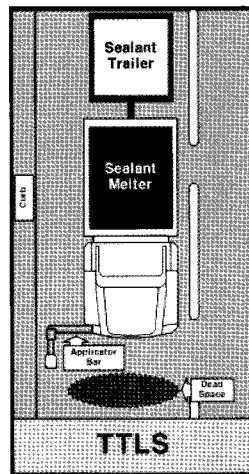
표 4. OCCSM자동화 장비 문제점 분석

장비구성	문 제 점
실린트 펌터	· 실링속도(0.91m/s)에 비해 실린트 공급량이 부족함 · 실린트 소진 후 추가 공급 시 어려움 발생(고체형 실린트를 녹이는데 소요시간 발생)
센싱 및 디지털 영상 처리	· CCD 카메라 붐 말단 처짐 및 흔들림으로 영상이 왜곡되어 고품질 영상획득의 어려움 발생 · 화면에 출력된 크랙을 인력으로 모델링해야 함
머니플래이더	· Arm의 길이가 길어 트럭의 약한 진동에도 말단장치에서는 진폭이 크게 발생됨으로 크랙실링 품질 저하 · Steel Arm사용으로 과다하중 발생(말단 처짐현상 발생) · 부채꼴 형상의 작업영역 형성으로 Dead Space 발생
말단장치	· 공기분사장비 미탑재(인력으로 수행) · 브러쉬 형의 스퀴즈 사용(실린트가 크랙에 밀실하게 침투되지 않음) · 재작업 시 브러쉬에 응고된 실린트 처리문제 발생 · 말단 피봇기능 부재(마감품질 저하) · 실링 후 실린트의 누액(떨어짐) 발생

2) TTLS(The Transfer Tank longitudinal Sealer)

TTLS장비(2006년)는 트럭에 실린트 펌터(약 360 Gallon)가 장착된 상차형 유닛으로써 일일 작업생산성은 약 5.15km/day로

매우 빠르나 종방향 크랙만을 대상으로 크랙실링 작업을 수행하도록 설계되어 있다. 따라서 도로면에 발생된 다양한 크랙의 유형(종방향, 횡방향, 블록형)을 고려해 볼 때 크랙실링보다는 조인트 실링에 보다 적합할 것으로 분석되었다. CCD 카메라를 이용해 실시간으로 획득된 영상은 운전석의 LCD모니터 화면으로 전송되고, 운전자는 차량의 움직임으로 영상 내 크랙을 추적한다. Folding Arm을 이용해 연속작업이 가능하도록 하였으며, 말단 장치에는 볼 밸브를 장착하여 실린트 분사의 실시간 제어가 가능하도록 하였다. 또한 말단 피봇기능으로 스퀴즈 면이 고르며, 실린트 응고방지 대책으로 관내 가열된 열매체를 순환하는 시스템을 가지고 있다(그림 4).



장비 세부 사항	
장비	
구성	일체형 장비
일일작업생산성	약 5.15 km/day
실린트 펌터	
용량	360 Gallon
센싱 및 디지털 영상처리	
크랙탐지	육안인식
머니플래이더	
형태	Folding Arm
작업영역	1개 차선(직선방향)
말단장치	
실린트 제어	볼 밸브
말단 피봇기능	있 음
실린트 응고방지	이중관 오일순환

그림 4. TTLS자동화 장비 개념도 및 세부사항

TTLS 장비는 종방향 크랙만을 작업 대상으로 하기 때문에 다양한 크랙의 종류에 대응할 수 없는 단점을 지니고 있으며, 영상을 기반으로 인력의 육안관찰에 의해 크랙을 탐지하고 실링 결과를 모니터링 함으로써 말단장치가 크랙 네트워크를 정확히 추적하여 실린트를 분사하지 못하는 단점 또한 지니고 있는 것으로 분석되었다. 또한 소진되는 실린트에 비해 실린트 공급이 원활하게 이루어지지 않기 때문에 트레일러 형식의 추가적인 실린트 공급원을 가지고 있으며, 공기분사 장비의 부재로 인하여 실링 시 마감 품질이 저하되는 것으로 분석되었다(표 5).

표 5. TTLS자동화 장비 문제점 분석

장비구성	문 제 점
실린트 펌터	· 실린트 소진 후 추가 공급 시 어려움 발생(추가적인 실린트 트레일러로 공급)
센싱 및 디지털 영상 처리	· 영상을 기반으로 운전자의 육안관찰에 의해 크랙 탐지
머니플래이더	· 제한적 범위의 크랙 실링(종방향 Cold Joint) / 인력에 의한 장비제어
말단장치	· 공기분사 장비 미탑재(실링 품질 저하)

3) APCS(automated pavement crack sealer)

APCS장비(2004년)는 트럭에 실린트 멜터(약 360 Gallon)를 별도로 부착한 트레일러 형식의 분리형 장비로써 일일 작업생산성은 약 1.59km/day로 OCCSM과 TTLS 장비에 비해 느린편이다. APCS는 CCD 카메라를 이용하여 영상을 획득하고, 자동 혹은 반자동화 방식으로 크랙 네트워크를 모델링할 수 있도록 설계되었다. APCS의 머니플레이터는 X-Y 테이블 형태로써 볼스크류 및 LM가이드를 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 공압 장치와 크랙 네트워크를 따라 말단장치가 회전할 수 있는 피봇 기능 및 일정한 압력으로 실린트를 압지하여 우수한 작업 품질을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 말단장치에는 솔레노이드 밸브를 장착하여 실린트 분사의 On/Off제어가 가능하도록 하여 실린트 누액 현상을 방지할 수 있도록 하였으며, 실린트 응고방지 대책으로 관 외부에 열선처리를 하였다(그림 5).

장비 세부 사항	
장비 구성	분리형 장비
일일 작업생산성	약 1.59 km/day
실린트 멜터 용량	360 Gallon
센싱 및 디지털 영상처리	크랙탐지 CCD Cam(정지 영상)
머니플레이터 형태	X-Y 머니플레이터
작업영역	1개 차선 미만
말단장치	실린트 제어 솔레노이드 밸브
말단 피봇기능	있 음
실린트 응고방지	관 외부 열선처리

그림 5. APCS자동화 장비 개념도 및 세부사항

APCS장비의 경우 X-Y머니플레이터 특성상 프레임 내부에서만 작업 수행이 가능하고, 프레임과 갠트리가 차지하는 면적으로 인해 협소한 실 작업영역을 가지고 있는 것으로 분석되었다. 또한, 트럭 및 실린트 멜터, 자동화 장비가 각각 분리/견인되어 구동되므로 이동상의 어려움 및 자동화 장비의 설치/해체에 많은 시간이 소요되어 일일 작업생산성이 다른 자동화 장비에 비해 낮은 단점이 있는 것으로 분석되었다. 실린트 on/off 제어를 위한 솔레노이드 밸브가 지상 약 80cm부분에 위치하여 관내에 남아 있는 잔여 실린트가 도로면에 흘러내려 실린트 누액 현상 또한 발생하는 것으로 분석되었다(표 6).

표 6. APCS자동화 장비 문제점 분석

장비구성	문 제 점
실린트 멜터	· 분리형 장비이기 때문에 작업 시작 및 종료를 위한 자동화 장비의 설치/해체 작업시간이 소요되어 일일 작업 생산성이 저하됨.
머니플레이터	· 머니플레이터 좌우측 양 끝단에 Dead Space 발생으로 작업영역이 협소함(차선을 벗어나는 경우 대처 불가능)
말단장치	· 실링 후 실린트의 누액(떨어짐) 발생 · 관 외부 열선처리를 하였으나 실린트 응고방지 대책의 미흡함.

3. 도로면 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인 제안

3.1 선행연구 분석을 통한 디자인 고려요소 분석

3.1.1 크랙실링 자동화 장비 개발을 위한 기술적 고려사항

본 연구에서는 현장 적용성 및 실용화 가능성이 높은 크랙실링 자동화 장비를 개발하기 위한 기술적 고려사항을 OCCSM 및 TTLS, APCS 장비 분석 결과를 바탕으로 표 7과 같이 제시하였다. 즉, 크랙실링 자동화 장비의 주요 구성 요소인 '실린트 멜터, 센싱 및 디지털 영상 처리, 머니플레이터, 말단장치' 4개 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. 센싱 및 디지털 영상 처리 부분에서는 3)정밀한 영상 확보 및 신속한 영상 처리 기술이 요구된다. 머니플레이터 제작 시에는 크랙실링 품질 향상을 위해 4)진동 및 처짐에 강한 머니플레이터의 설계가 요구되고, 5)1개차선 이상의 작업 영역을 확보함으로써 작업 생산성 확보 및 작업효율성 향상이 요구된다. 6)말단장치는 정밀제어가 가능하도록 설계하고, 7)말단 피봇기능 및 신속한 실린트 분사 on/off 제어 시스템을 구축함으로써 크랙실링 작업 품질을 향상시킬 수 있어야 한다(표 7).

표 7. 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발 시 요구되는 기술적 고려사항

장비구성	고 려 사 항
실린트 멜터	· 실린트의 관내 응고 방지를 위해 실린트가 순환할 수 있어야 함. · 실린트 양 제어를 통한 실린트의 적정량 공급
센싱 및 디지털 영상 처리	· 정밀한 영상확보가 가능해야함(센싱부 정확성 확보) · 신속한 영상처리가 요구됨.
머니플레이터	· 진동 및 처짐에 충분히 견딜 수 있어야 함. · 가능한 경량의 부재를 사용해 설계함. · 1개 차선 이상의 넓은 작업영역을 가지도록 하여 작업 생산성 및 효율을 향상시킬 수 있어야 함. · 가능한 Dead Space 발생이 없도록 해야 함.
말단장치	· 정밀 제어가 가능해야함 · 말단 피봇기능으로 실링 시 품질확보가 요구됨 · 실린트 분사량 조절이 빠르게 이루어져야 할(누액 및 과다 분사 문제 해결) · 관내 실린트가 응고되는 현상을 방지해야 함

3.1.2 크랙실링 자동화 장비 개발을 위한 일반적 고려사항

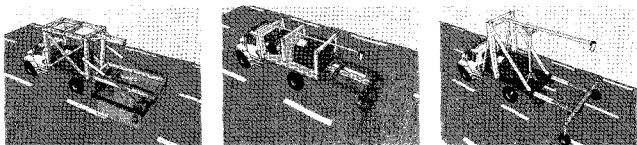
본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비의 현장 적용성 및 범용성 확보를 위해 크랙실링 자동화 장비의 구현에 있어 요구되는 일반적인 고려사항인 외기조건 및 작업환경, 법적 제한사항을 분석하였다. 즉, 크랙실링 자동화 장비는 연간 최대 기온폭(-15~35℃) 내에서 보관 및 구동 시 장비의 성능저하가 없어야 하며, 교통량이 많은 대도시나 고속도로에서 작업이 대부분 수행되므로 장비의 이동성이 좋아야 한다. 또한, 크랙실링 자동화 장비는 국내 법적 고속도로 차량제한 기준인 너비 2.5m 이내, 높이 4.2m 이내로 크기가 설계되어야 한다(표 8).

표 8. 일반적 고려사항

구분	고려사항
외기 조건	· 자동화 장비 이음부를 밀실하게 처리해서 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	· 크랙실링 작업이 주로 교통량이 많은 대도시나 고속도로에서 이루어 지므로 장비의 이동성이 좋아야 함.
법적	· 장비의 너비 및 높이는 고속도로 차량제한 기준(너비 2.5m 이내, 높이 4.2m 이내) 이내로 설계되어야 함.

3.2 도로면 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인의 제안

본 연구에서는 기존에 연구 개발된 크랙실링 자동화 장비의 분석을 통해 도출된 기술적 고려사항 및 일반적 고려사항을 바탕으로 3가지 형태의 크랙실링 자동화 장비 개념디자인(캔틸레버형, 유압 트러스형, 바퀴 확장형)을 제안하였다(그림 6).



(a) 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비(대안1) (b) 유압 트러스형 크랙실링 자동화 장비(대안2) (c) 바퀴 확장형 크랙실링 자동화 장비(대안3)

그림 6. 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인

3.2.1 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비

캔틸레버형 크랙실링 자동화장비는 실린트를 분사하기 위한 말단장치를 고정시키는 머니플레이터(그림 7의 (f))가 트럭적재함에 고정된 본체 프레임의 내외부로 랙엔피니언 또는 볼스크류, 유압 액추에이터에 의해 구동될 수 있으며(Y축 방향 운동), 머니플레이터 내부에서 X축 방향으로 말단장치가 움직일 수 있도록 제안되었다. 또한, 프레임 영역 이외에 존재하는 크랙 실링을 위해 가이드 레일(그림 7의 (g))을 따라 확장 프레임(그림 7의 (i))이 작업 영역을 확장할 수 있도록 설계되었다. 커팅된 크랙 내부의 공

기 청소 및 말단장치의 상하 이동을 위한 컴프레서가 탑재되어 있으며, 액추에이터 구동 및 실린트 공급관의 히팅을 위한 제너레이터와 실린트의 원활한 공급을 위한 실린트 펌터가 차량 적재함에 탑재된 일체형 장비로 고안되었다(그림 7).

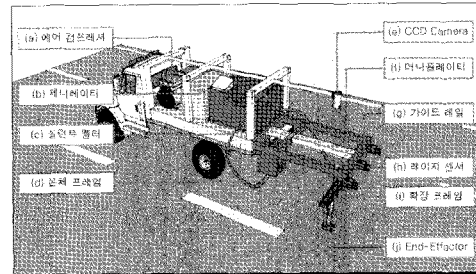


그림 7. 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인

캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비는 X-Y-X축 방향의 구동이 가능하도록 설계되었다. 즉, 머니플레이터 전체가 캔틸레버형으로 적재함 밖으로 빠져나오는 Y축 방향 구동(볼스크류, 랙엔피니언)과 가이드 레일을 따라 확장 프레임이 움직이는 X1축 방향(볼스크류), 말단장치가 확장 프레임을 따라 움직이는 X2축 방향으로의 구동(볼스크류)이 가능하도록 설계되었다(그림 8).



(a) Y축 방향 구동부 (b) X1축 방향 구동부 (c) X2축 방향 구동부

그림 8. 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비의 구동방식

작업 프로세스는 다음과 같은 순서로 이루어진다(그림 9).

- ① 작업구역 내 장비이동 : 작업이 시작되면 캔틸레버형 자동화 장비를 크랙이 발생된 위치로 이동시키며, 텔레스코픽 머니플레이터는 본체 프레임 내외부로 이동할 수 있도록 설계되었다.
- ② 작업영역 확보 : 운전자는 차량 후미에 설치된 영상획득용 CCD Camera(그림 9의 (a))를 이용하여 작업영역이 확보 될 수 있도록 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비를 이동시킨다. CCD Camera를 통해 획득된 영상은 운전석에서 실시간으로 확인할 수 있으므로, 운전자는 장비가 작업영역에 도달했는지를 용이하게 확인할 수 있다.
- ③ 텔레스코픽 머니플레이터 압 신장, 영상획득, 실링작업 : 작업영역이 확보된 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비는 텔레스코픽 머니플레이터 압이 신장됨과 동시에 크랙 탐지용 레이저 센서를 이용하여 영상을 획득하고, 획득한 영상을 바탕으로 실시간 실링작업을 수행한다. 이때 실시간 실링 작업은 1개의 종방향 크랙을 대상으로 한다.

④ 잔여 크랙 실링 : 크랙의 수가 1개 이상일 때는 텔레스코픽 머니플레이터 암이 신축되면서 실시간으로 잔여 크랙을 실링한다.

⑤ 구간이동 및 텔레스코픽 머니플레이터 암 축소 : 실링 작업이 끝난 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비는 다음 구간으로 이동하고, 장비가 이동함과 동시에 텔레스코픽 머니플레이터 암은 본체 프레임 내부로 신축되어 다음 작업을 준비한다.

⑥ 작업종료 및 장비이동 : 작업이 종료되면 다른 지역으로 장비를 이동시키며, 이때 텔레스코픽 머니플레이터 암은 본체 프레임 내부로 장착되어 이동성을 높인다.

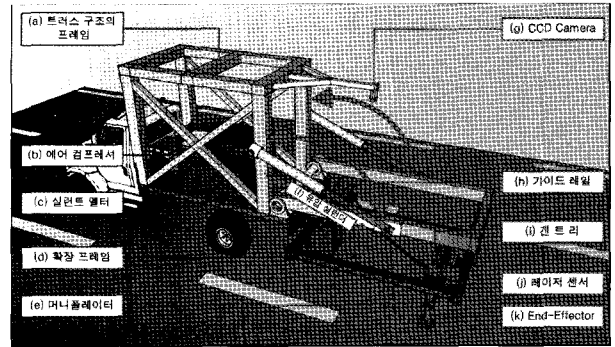


그림 10. 유압 트러스형 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인

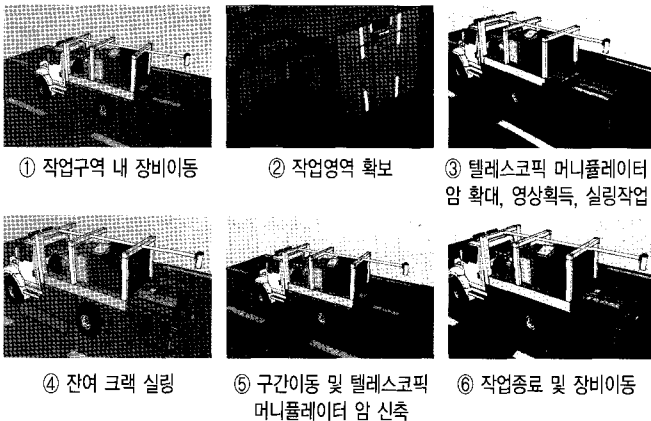
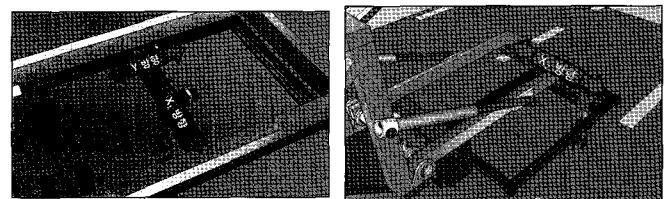


그림 9. 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비의 작업 프로세스

3.2.2 유압 트러스형 크랙실링 자동화 장비

유압 트러스형 크랙실링 자동화 장비는 트럭적재함에 머니플레이터(그림 10의 (e)) 지지를 위한 트러스 구조의 프레임(그림 10의 (a))이 설치되고 양 측단에 유압 실린더(그림 10의 (f))를 장착하여 머니플레이터가 상하로 움직일 수 있도록 하였다. 따라서 자동화 장비 이동시 머니플레이터를 들어올린 상태에서 이동함으로써 이동의 편의성을 높일 수 있도록 하였다. 그림 10의 (d)와 같이 가이드 레일을 따라 확장 프레임이 X축 방향으로 작업 영역을 확장할 수 있으며, 확장 프레임 내에서 볼스크류를 이용하여 겐트리(그림 10의 (h))에 장착된 말단장치가 Y축 방향으로 이동하며 크랙실링 작업을 수행할 수 있도록 하였다(그림 10의 (k)). 또한, 겐트리 축에 레이저센서(그림 10의 (j))를 부착하여 도로면내의 크랙을 인식할 수 있도록 하였다. 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비와 같이 유압 트러스형 크랙실링 자동화 장비도 커팅된 크랙 내부의 공기 청소 및 말단장치의 상하 이동을 위한 컴프레서가 탑재되어 있으며, 액츄에이터 구동 및 실린트 공급관의 히팅을 위한 제너레이터와 실린트의 원활한 공급을 위한 실린트 펌프가 차량 적재함에 탑재된 일체형 장비로 고안되었다(그림 10).

유압 트러스형 크랙실링 자동화 장비는 그림 11과 같이 볼스크류를 이용하여 X1-Y-X2축 방향으로 운동이 가능하므로 머니플레이터 내부 및 외부에 존재하는 크랙의 실링이 가능하도록 설계되었다.



· X1-Y축 구동부 · X2축 구동부
그림 11. 유압 트러스형 크랙실링 자동화 장비의 구동방식

작업 프로세스는 다음과 같은 순서로 이루어진다(그림 12).

① 작업구역 내 장비이동 : 작업이 시작되면 유압 트러스형 크랙실링 자동화 장비를 크랙이 발생된 위치로 이동시키며, 이동시 머니플레이터를 지면과 수직이 되도록 상승시켜 이동성을 높인다.

② 머니플레이터 하강 : 유압 트러스형 크랙실링 자동화 장비가 작업 구간에 도착하면, 유압장치를 이용하여 차량 후미에 장착된 머니플레이터를 지면과 수평이 되도록 하강시킴으로써 작업 준비를 완료한다.

③ 영상인식 및 실링작업 : 작업준비가 끝난 유압 트러스형 크랙실링 자동화 장비는 X축 프레임 전체가 Y방향으로 이동함과 동시에 레이저 센서를 이용하여 영상을 획득한다. 획득된 영상을 바탕으로 실시간 실링작업이 진행되며 이때의 실시간 실링 작업은 1개의 종방향 크랙을 대상으로 진행된다.

④ 잔여 크랙 실링 : 크랙의 수가 1개 이상일 때는 X축 프레임과 확장 프레임, 겐트리가 크랙면을 따라 이동하면서 잔여 크랙을 실링한다.

⑤ 머니플레이터 상승 : 작업이 종료되면 장비의 이동성을 높

이기 위해 유압장치를 이용하여 머니플레이터를 지면과 수직이 되게 상승시킨다.

⑥ 작업종료 및 장비이동 : 머니플레이터 상승이 완료되면 다른 지역으로 장비를 이동시킨다.

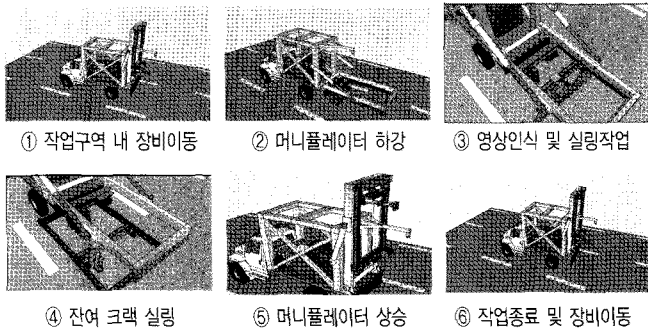


그림 12. 유압 트러스형 크랙실링 자동화 장비의 작업 프로세스

3.2.3 바퀴 확장형 크랙실링 자동화 장비

바퀴 확장형 크랙실링 자동화 장비는 텔레스코픽 머니플레이터 암(그림 13의 (h))의 확장에 의해 Y축 방향 운동이 가능하며, 가이드레일(그림 13의 (d))을 따라 확장 프레임(그림 13의 (e))이 움직일 수 있도록 함으로써 X축 방향 운동이 가능하도록 설계되었다. 또한, 텔레스코픽 머니플레이터 암 및 말단장치, 구동부 무게로 인해 텔레스코픽 머니플레이터 암이 처지는 문제점을 보완하기 위해 바퀴(그림 13의 (f))를 부착하였다. 크랙실링이 완료된 후 실린트가 응고되기 전 바퀴에 의해 실린트가 도로면에서 박리되는 현상을 방지하기 위해 바퀴를 작업영역 밖으로 확장시킬 수 있도록 설계하였다. 한편, 바퀴 확장형 크랙실링 자동화 장비는 크랙을 인식할 수 있는 수단으로 CCD카메라를 사용함으로써 영상 처리 시간 단축 및 비용을 절감시킬 수 있도록 하였다. 바퀴 확장형 크랙실링 자동화 장비는 실린트의 가열 및 공급을 위한 실린트 펌터를 탑재하고 있고, 커팅된 크랙내부의 공기 청소 및 말단장치의 상하 이동을 위한 컴프레서, 액츄에이터 구동과 실린트 공급관의 히팅을 위한 발전기를 트럭 적재함에 탑재하고 있다(그림 13).

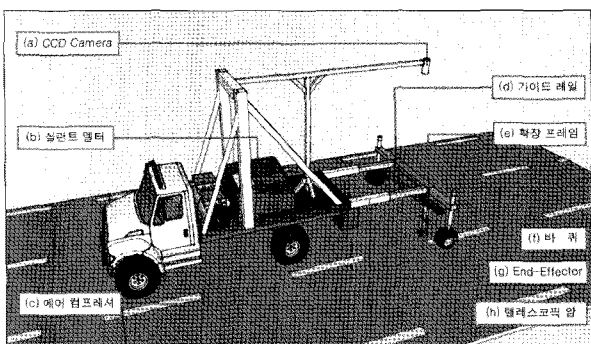


그림 13. 바퀴 확장형 크랙실링 자동화 장비 개념디자인

바퀴 확장형 크랙실링 자동화 장비는 X-Y-X축 방향 운동이 가능하도록 설계되었다. 즉, 텔레스코픽 머니플레이터 암이 프레임에서 빠져나오는 Y축 방향 운동과 가이드레일을 따라 확장프레임이 좌우로 움직이는 X1축 방향 운동이 가능하다. 또한, 말단장치가 확장프레임을 따라 이동할 수 있는 X2축 방향 운동이 가능하도록 설계함으로써 크랙실링 자동화 장비의 실작업 영역을 넓힐 수 있도록 고려하였다(그림 14).



그림 14. 바퀴 확장형 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인의 구동방식

작업 프로세스는 다음과 같은 순서로 이루어진다(그림 15).

① 작업구역 내 장비이동 : 작업이 시작되면 바퀴 확장형 크랙실링 자동화 장비를 크랙이 발생된 위치로 이동시킨다. 장비 이동 시 텔레스코픽 머니플레이터 암은 프레임 내부에 장착되어 이동성을 높일 수 있도록 설계되었다.

② 바퀴확장 : 장비가 작업구간에 도착하면 차량 후미에 장착된 2개의 바퀴를 양 옆으로 확장시켜 크랙실링 작업 완료 후 바퀴가 실링면을 밟지 않도록 한다(실린트 박리 방지).

③ 영상획득 : 작업 준비가 끝난 바퀴 확장형 크랙실링 자동화 장비는 차량 후미에 장착된 CCD Camera를 이용하여 노면의 영상을 획득한다. 획득된 영상은 영상처리 과정을 거쳐 크랙의 발생 위치를 파악한다.

④ 영상처리 및 텔레스코픽 머니플레이터 암 확장 : 획득된 영상이 크랙을 인식하는데 소요되는 시간은 약 4초이며, 영상이 처리되는 동안 텔레스코픽 머니플레이터 암이 최대 길이로 확대된다.

⑤ 크랙실링 작업 : 영상처리 및 텔레스코픽 머니플레이터 암의 확대가 완료되면, 텔레스코픽 머니플레이터 암과 확장 프레임

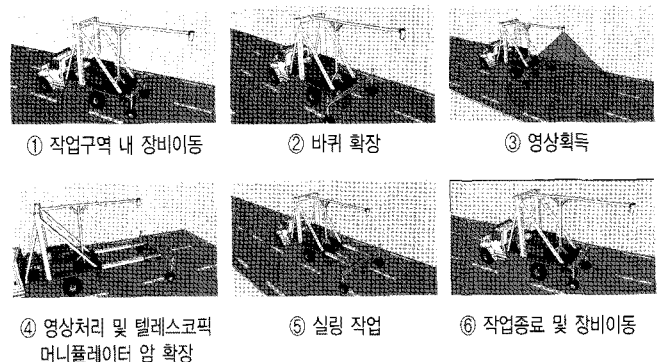


그림 15. 바퀴 확장형 크랙실링 자동화 장비의 작업 프로세스

에 부착된 말단장치가 크랙면을 따라 이동하면서 크랙실링 작업을 실시한다.

⑥ 작업종료 및 장비이동 : 실링 작업이 끝난 바퀴 확장형 크랙실링 자동화 장비는 다른 지역으로 이동된다. 이동 전 확장시킨 바퀴를 원래 상태로 축소시켜 장비의 이동성을 높인다.

4. 최적 대안 선정 및 기술적 타당성 검토

4.1 제안된 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인의 장단점 분석

본 연구에서는 3가지 형태의 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인 중 최적의 개념 디자인을 선정하기 위해 각 대안의 장단점 분석을 실시하였다. 장단점 분석 항목은 크랙실링 자동화 장비의 주요 구성 부분인 1)실린트 맬터, 2)센싱 및 디지털 영상 처리, 3)머니플레이터, 4)말단장치로 구성될 수 있다. 그러나 제안된 3가지 형태의 크랙실링 자동화 장비 개념디자인은 모두 동일한 실린트 맬터와 말단장치를 사용하므로 분석 범위를 '머니플레이터부'와 '센싱 및 디지털 영상 처리'로 한정하였다(표 9).

제안된 3가지 형태의 크랙실링 자동화 장비는 모두 1개 차선

표 9. 크랙실링 자동화 장비 개념디자인의 장단점 분석

구분	장점	단점
캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비	<ul style="list-style-type: none"> 장비의 경량화로 인한 이동성 향상 실린트 응고를 방지할 수 있는 구조인(실린트 순환) 레이저 스캐너를 이용하여 실시간 영상처리 및 실링작업이 가능함 영상 획득 시 프레임 등의 장애물에 의한 Dead Space의 발생이 없음 	<ul style="list-style-type: none"> 말단부 처짐에 대한 보완대책이 요구됨. 소요 면적의 영상을 획득하기 위해서는 고가의 레이저 스캐너 3대가 필요함 영상획득 및 처리 속도 : 약12cm/sec
유압 트러스형 크랙실링 자동화장비	<ul style="list-style-type: none"> 말단 처짐에 강함 레이저 스캐너를 이용하여 실시간 영상처리 및 실링작업이 가능함 영상 획득 시 프레임 등의 장애물에 의한 Dead Space의 발생이 없음 	<ul style="list-style-type: none"> 처짐을 방지하기 위한 보강장치(유압기, 트러스 구조의 프레임)로 인한 장비 자중 증가 장비 이동시 실린트 순환에 대한 대책이 없음(실린트 응고발생 우려) 소요 면적의 영상을 획득하기 위해서는 고가의 레이저 스캐너 3대가 필요함 영상획득 및 처리 속도 : 약12cm/sec
바퀴 확장형 크랙실링 자동화 장비	<ul style="list-style-type: none"> 말단 처짐에 강함 실린트 응고를 방지할 수 있는 구조인(실린트 순환) 영상획득 및 디지털 이미지 프로세싱에 소요되는 시간(약 4초)이 짧으며, 1대의 CCD Camera로 작업영역 전체의 영상을 획득할 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 확장형 바퀴로 인한 장비의 자중 증가 및 이동성 저하 영상처리 시 프레임 및 그림자, 속도 등에 영향을 받음

이상의 작업공간을 확보할 수 있으므로 작업 품질 및 생산성이 재래식 방식 및 기존 자동화 방식에 비해 크게 향상될 것으로 기대된다. 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비는 별도의 보강 장비 없이

머니플레이터가 적재함에 탑재된 프레임 속으로 왕복 운동을 할 수 있으므로 경량화 및 이동성 측면에서 유리할 것으로 판단된다. 그러나 머니플레이터가 최대로 확장했을 경우 말단 부분의 처짐이 발생할 것으로 예측되므로 이에 대한 대책이 수립되어야 한다. 유압트러스형 크랙실링 자동화 장비는 머니플레이터 말단부의 처짐을 방지하기 트러스 구조의 프레임 및 유압장치가 장착되어 처짐에 대한 우려가 적으나, 보강장치(유압기, 트러스 구조의 프레임)의 무게로 인해 장비의 자중이 증가하므로 이동성에 제약을 받을 것으로 분석되었다. 또한 장비 이동시 실린트 순환에 대한 적정 대안이 도출되지 않아 실린트 응고현상이 발생될 것으로 예상되었다. 바퀴 확장형 개념 디자인은 말단부 처짐현상을 해결하기 위해 확장형 바퀴 장착을 고안하였으나 그에 따른 자중이 증가되고 이동성이 저하될 것으로 분석되었다. 바퀴 확장형 크랙실링 자동화 장비에 사용되는 CCD 카메라는 획득된 영상을 처리하는데 약 4초 정도의 시간이 소요되며, 영상처리가 완료된 후에 실링 작업이 가능하므로 실시간 연속작업은 불가능한 것으로 분석되었다. 반면 캔틸레버형 및 유압 트러스형 크랙실링 자동화 장비에 사용되는 레이저 스캐너는 초당 12cm의 속도로 CCD 카메라보다 영상획득 및 처리 속도는 느린 것으로 조사되었으나, 획득된 영상이 실시간으로 처리되므로 크랙실링 연속작업이 가능한 것으로 분석되었다.

4.2 Trade-Off Analysis를 통한 최적대안 선정

본 연구에서는 제시된 개념 디자인의 장단점 분석 결과를 바탕으로 Trade-Off Analysis를 통해 최적대안을 선정하였다. 크랙실링 자동화 장비의 실용화 가능성 및 범용적 사용 측면에서 각 대안의 평가항목을 구성함으로써 최적 대안을 선정할 수 있도록 하였다. 즉, 본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비의 최적대안 선정을 위한 평가항목으로 '이동성, 안전성, 내구성, 정확성, 제어용이성, 제작용이성, 제작비용'으로 분류하였다. 각 평가항목별 가중치는 건설 및 기계관련 전문가 5명의 자문을 통해 AHP분석 기법을 활용하여 산정하였다(표 10).

표 10. AHP 분석 기법을 활용한 평가항목의 가중치

	이동성 (A)	안전성 (B)	내구성 (C)	정확성 (D)	제어용이성 (E)	제작용이성 (F)	제작비용 (G)
평가항목 가중치	0.11	0.17	0.12	0.27	0.22	0.08	0.03

AHP분석 결과 정확성이 27%로 가장 높은 중요도를 지니고 있는 것으로 분석되었고, 차순위로 제어용이성(22%), 안전성(17%), 내구성(12%), 이동성(11%), 제작용이성(8%), 제작비용(3%)으로 도출되었다. 본 연구에서는 평가항목의 가중치를 바탕으로 대안

별 평가점수를 산정하였다. 대안별 평가 점수 산정은 크랙실링 자동화 장비 연구개발 경험 및 관련 지식을 가지고 있는 10명의 연구자를 대상으로 설문을 실시하였으며, 평가 시 척도는 리커트 5점 척도로 하였다(표 11). 즉, 설문 응답자는 캔틸레버형 및 유압 트러스형, 바퀴 확장형 크랙실링 자동화 장비 각각에 대해 '이동성, 안전성, 내구성, 정확성, 제어용이성, 제작 용이성, 제작비용' 측면의 가치를 '5점 매우 높음, 4점 높음, 3점 보통, 2점 낮음, 1점 매우 낮음'으로 응답하였다. 설문응답자로부터 각 평가항목이 얻은 평균은 표 11과 같이 도출되었다.

표 11. 대안별 평가 점수 산정

구분	캔틸레버형(대안 1)						유압 트러스형(대안 2)						바퀴 확장형(대안 3)					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
응답자 A	3	4	3	4	4	5	4	2	4	4	2	2	2	2	3	3	2	3
응답자 B	5	5	5	4	5	5	4	4	5	4	5	4	3	3	4	5	4	5
응답자 C	4	3	4	4	5	4	3	2	3	3	3	3	2	3	2	3	4	3
응답자 D	5	4	5	4	4	5	4	4	4	4	5	4	4	4	5	5	4	4
응답자 E	5	5	5	5	4	5	4	5	5	4	4	5	4	4	4	4	4	5
응답자 F	4	3	4	2	4	4	3	3	5	5	2	4	4	3	3	3	2	2
응답자 G	4	2	3	3	3	3	4	4	4	2	4	3	3	3	3	2	2	2
응답자 H	5	5	5	4	5	5	4	4	5	4	5	4	3	3	4	5	4	5
응답자 I	4	4	5	4	5	5	3	4	5	4	5	3	3	3	4	5	4	3
응답자 J	3	4	3	4	4	4	3	3	3	4	4	3	2	3	4	3	4	3
평균	4.2	3.9	4.2	3.8	4.3	4.5	4.2	3.4	3.9	4.3	3.3	4.1	3.5	2.9	3.2	3.6	3.5	3.7

Trade-Off Analysis 결과 이동성은 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비가 0.462점을 획득하여 가장 우수한 것으로 분석되었으며, 안전성은 3장비 모두 동일(0.663)한 것으로 나타났다. 내구성은 도로면의 상태에 따라 민감한 영향을 받는 바퀴확장형이 가장 낮았으며(0.468), 장비정확성은 작업 사이클마다 유압장치를 사용하여 머니플레이터를 올리고 내리는 프로세스를 반복함으로써 작업 원점이 계속 변화될 가능성이 높은 유압 트러스형이 가장 낮은 것으로 분석되었다(0.891). 제어 및 제작 용이성, 제작 비용은 캔틸레버형이 각각 0.946, 0.36, 0.126으로 가장 높은 것으로 분석되었다. 3가지 형태의 크랙실링 자동화 장비 개념디자인의

표 12. 최적대안 선정을 위한 Trade-Off Analysis

	가중치	캔틸레버형(대안 1)		유압 트러스형(대안 2)		바퀴 확장형(대안 3)	
		Score	Total	Score	Total	Score	Total
이동성(A)	0.11	4.2	0.462	3.4	0.374	3.2	0.352
안전성(B)	0.17	3.9	0.663	3.9	0.663	3.9	0.663
내구성(C)	0.12	4.2	0.504	4.3	0.516	3.9	0.468
정확성(D)	0.27	3.8	1.026	3.3	0.891	3.5	0.945
제어용이성(E)	0.22	4.3	0.946	4.1	0.902	3.7	0.814
제작용이성(F)	0.08	4.5	0.360	3.5	0.280	3.5	0.280
제작비용(G)	0.03	4.2	0.126	2.9	0.087	3.4	0.102
총 점수		4.087		3.713		3.624	

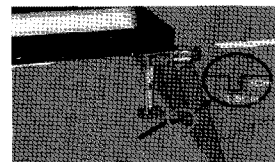
총 점수는 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인이 4.087점, 유압 트러스형 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인이 3.713점, 바퀴 확장형 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인이 3.624점으로 도출되어 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인이 최적 대안으로 선정되었다(표 12).

4.3 최적대안의 기술적 타당성 검토

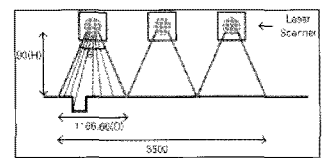
본 연구에서는 최적 대안으로 선정된 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비의 실용화 가능성 향상 및 건설 현장에서의 범용적 사용을 위해 기술적 타당성 검토를 수행하였다. 즉, 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비의 주요 구성 요소에 대한 기술 구현 가능성 및 발생 가능한 문제점에 대한 해결 방안을 제시하였다.

4.3.1 레이저 스캐너에 의한 크랙인식

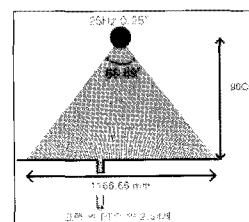
캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비의 가이드 프레임에 부착된 레이저 스캐너가 크랙실링 작업영역을 스캔할 경우 스캔각도에 의한 사각지대가 발생하여 크랙이 인식되지 않는 문제점이 발생할 수 있다(그림 16의 (a)). 기술적 타당성 검토 결과 초당 50번의 스캔을 하는 50Hz 레이저 스캐너의 스캔 분해각은 0.5°로 초당 541개의 포인트로서 스캔된다. 크랙을 보다 정밀하게 인식하기 위해 25Hz로 스캔 할 수 있는 레이저 스캐너를 사용할 경우 스캔 분해각이 0.25°로 1,082개의 포인트가 발생한다. 총 3개의 스캐너로 도로폭 3.5m를 90cm 높이에서 스캔할 경우 각 스캐너당 약 1.16m의 구역을 스캔해야 한다. 그림 16의 (c)와 같이 레이저 스캐너가 1.16m를 스캔하기 위해서는 65.89도 회전해야하고, 이때 레이저 포인트 수는 198개로 계산된다. 즉, 커팅 크랙폭 1.5cm 내에는 2.54개의 레이저 포인트가 형성되므로 매우 정밀한 크랙 인식이 가능 할 것으로 분석되었다(그림 16).



(a) 크랙의 사각지대 발생



(b) 레이저 스캐너 1대의 최소 스캔길이



(c) 25Hz 레이저 스캐너의 스캔영역

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{D}{H}\right)$$

$$65.89^\circ : x = 360^\circ : 1082(\text{pt})$$

$$15(\text{mm}) : y = 1166.66(\text{mm}) : 198(\text{pt})$$

x : 레이저 스캐너 1대의 포인트(pt) 개수
y : 폭 1.5cm로 커팅된 크랙내의 포인트(pt) 개수

(d) 크랙인식을 위한 소요 포인트 개수

그림 16. 레이저 스캐너의 크랙인식

4.3.2 실린트 누액현상 방지대책(실린트 on/off 제어)

OCCSM 및 APCS의 현장 실험 결과 크랙실링 작업 품질을 확보하기 위해서는 실린트를 분사하는 말단장치의 끝부분에서 실린트의 on/off를 제어해야 실린트의 누액현상이 방지될 수 있는 것으로 분석되었다. 그러나 열매체를 제어하는 일반적인 솔레노이드 밸브는 개폐속도가 약 6초이며, 밸브 및 액추에이터의 크기가 약 35cm 정도이다. 따라서 솔레노이드 밸브를 말단장치에 장착할 경우 신속한 실린트 분사제어가 어려우며, 말단장치에 과도한 하중이 작용할 것으로 예상된다. 실린트 on/off 제어를 위한 기술적 타당성 검토 결과 약 200℃정도인 열매체의 온도를 전달 수 있는 공압식 체크밸브를 사용하고, 공압호스를 소형컴프레서에 연결하여 공기압력을 이용한 신속한 분사제어가 가능할 것으로 분석되었다. 또한, 공압식 체크밸브는 길이 10cm, 높이 18.5cm로 솔레노이드 밸브보다 크기가 작으므로 말단장치에 미치는 하중의 영향을 감소시킬 수 있을 것으로 분석되었다(그림 18).

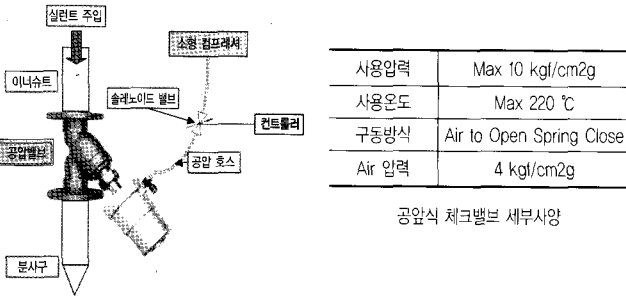


그림 17. 공압식 체크밸브 시스템

4.3.3 실린트 응고 방지 대책

크랙실링 작업에 사용되는 실린트는 실린트 멜터 내에서 약 200℃ 정도에서 액화되어 크랙실링 작업을 위해 도로면에 분사된다. 실린트 멜터에서 분출된 실린트는 상온에서 응고되는 성질을 가지고 있으므로 크랙실링 자동화 장비 배관(hose)내에서 응고될 경우 원활한 크랙실링 작업을 수행할 수 없다. 따라서 TTLS 장비의 경우 2중 배관을 사용하여 배관과 배관 사이에 가열된 오일을 사용함으로써 실린트가 응고되지 않도록 하였다. TTLS 장비는 종방향 크랙실링 전용장비로써 X-Y 축 방향으로 말단장치가 움직이지 않아 고정된 배관의 피복이 가능하였으나 OCCSM 및 APCS, 본 연구에서 개발 중인 크랙실링 자동화 장비는 말단장치가 X-Y 축 방향으로 지속적으로 움직이므로 2중 배관 및 가열된 오일을 사용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비 배관 내 실린트의 응고를 방지하기 위해 실린트를 계속 순환시키는 구조(실린트 회송호퍼(그림 18의 (d))를 통한 실린트 순환(그림 18), 이송관과 반송관을 통한 실린트 순환(그림 19)) 구

조로 자동화 장비를 설계하였으며, 작업 중 배관 배 응고가 발생했을 경우에는 배관을 착탈(그림 19의 (g))할 수 있도록 하였다. 즉, 실린트 응고가 발생된 배관을 분리하여 실린트 멜터 내에서 가열함으로써 응고된 배관을 녹인 후 다시 사용할 수 있도록 설계함으로써 크랙실링 자동화 장비 내의 실린트 응고 방지 대책을 수립하였다.

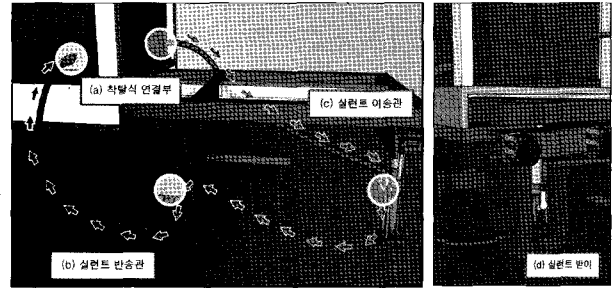


그림 18. 실린트 응고방지 대안 1

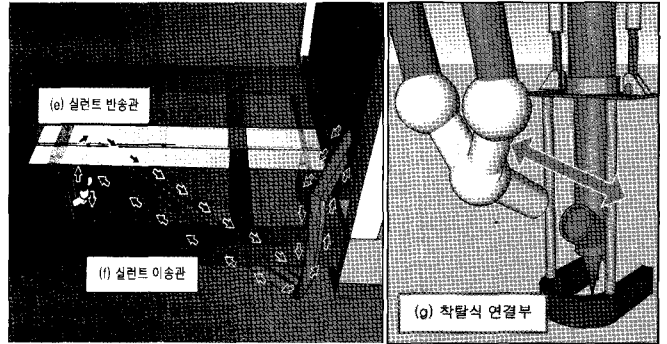


그림 19. 실린트 응고방지 대안 2

4.4 최적대안의 효용성 검토

최적대안으로 선정된 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비에 대한 효용성을 검토하기 위해 '하드웨어(이동성, 경량화), 크랙실링(작업영역, 크랙종류, 작업속도, 정확성, 압지능력, 피복), 실린트 제어(응고방지, 누액 방지, 실린트 유량제어)' 측면에서 기존 크랙실링 자동화 장비와 비교·분석을 수행하였다(표 13).

분석결과, 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비는 단일유닛 및 알루미늄재질의 프레임에 사용하여 이동성 및 경량화가 우수하고, 넓은 작업영역과 압지 및 피복기능을 탑재하고 있어 작업 생산성 및 품질 향상이 기대된다. 또한, 실린트 순환을 통한 응고방지과 말단에 위치한 분사노즐의 제어로 인해 실린트를 용이하게 제어함으로써 누액현상을 방지할 수 있어 기존 크랙실링 자동화 장비에 비해 매우 우수한 성능을 지니고 있는 것으로 판단된다.

표 13. 최적대안의 효용성 검토

장비속성	장비명	개발장비					최적대안 캔틸레버형 장비
		UT-Field	ARMM	OCCSM	TTLS	APCS	
		-1995	-1999	-2003	-2006	-2004	
하드웨어							
장비 이동성		×	×	⊙	⊙	○	⊙
장비 경량화		×	×	○	⊙	○	⊙
크랙실링							
작업영역크기(1개차선기준)		○	○	○	×	○	⊙
크랙종류에 대한 대처능력		⊙	⊙	⊙	×	⊙	⊙
말단작업속도		○	○	○	⊙	○	○
작업 정확성(머니플레이터)		○	○	×	×	⊙	⊙
업지능력		×	○	○	○	⊙	⊙
말단피봇		×	×	×	○	⊙	⊙
실린트 제어							
실린트 응고방지책		×	×	×	⊙	○	⊙
누액현상 해결		×	×	×	○	×	⊙
실린트 유량제어		×	×	×	○	×	⊙

(⊙ : 우수, ○ : 보통, × : 나쁨)

5. 결론

본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 재래식 크랙실링 공법의 작업 프로세스 및 위험도를 노무 투입에 따른 노무부하 분석과 설문조사를 통한 위험요인 분석결과, 크랙실링 작업 프로세스 중 ‘크랙실링 작업’의 노무부하가 87.5%, 위험도는 72점으로 가장 높게 도출됨으로써 ‘크랙실링 작업 (Blowing, Sealing, Squeezing)’ 공종의 자동화가 시급히 요구되는 것으로 분석되었다.

2) 크랙실링 자동화 장비의 개발 현황 및 문제점을 크랙실링 자동화 장비의 주요 구성 요소인 ‘실린트 펌터, 센싱 및 디지털 영상 처리, 머니플레이터, 말단장치 측면에서 분석한 결과, 국외 UT 계열의 자동화 장비는 X-Y 머니플레이터를 가지고 있는 분리형(트럭-펌터-자동화 장비)으로 개발되어 정확성 및 안정성 측면에서 장점을 지니고 있지만 이동성이 좋지 않은 단점을 지니고 있는 것으로 분석되었다. 반면 UC 계열의 크랙실링 자동화 장비는 다관절 암 형태의 머니플레이터를 가진 일체형 형태로 개발되어 이동성 측면에서는 유리하지만 정확성이 낮고 품질의 균일성 확보가 어려운 단점을 지니고 있는 것으로 분석되었다.

3) 본 연구에서는 현재까지 개발된 크랙실링 자동화 장비 중 가장 진보된 것으로 평가받고 있는 OCCSM 및 TTLS, APCS를 바탕으로 도로면 크랙실링 자동화 장비 개발을 위한 기술적 고려요소 분석하였으며, 그 결과 ①실린트 응고방지 기술 개발, ②실린트 누액현상 방지 기술 개발, ③정밀하고 신속한 영상처리 기술 개발, ④진동 및 처짐에 강한 머니플레이터 개발, ⑤1개 차선 이

상의 작업영역 확보, ⑥말단장치의 정밀한 제어, ⑦말단 장치의 피벗 기능 탑재 및 실린트 양 제어 기술의 개발 등이 주요 요구사항으로 도출되었다. 일반적 고려요소 분석결과, 현재 본 연구에서 개발하고자 하는 크랙실링 자동화 장비는 연간 최대 기온폭인-15~35℃내에서 보관 및 구동 시 장비의 성능저하가 없어야 하며, 작업 생산성 향상을 위해 장비의 이동성이 좋아야 하며, 국내 도로법 규정에 따라 자동화 장비의 최대 크기는 너비 2.5m 이내, 높이 4.2m 이내가 되어야 하는 것으로 분석되었다.

4) 본 연구에서는 국내외에서 현재까지 개발된 크랙실링 자동화 장비 개발 사례 및 기술적/일반적 고려사항을 반영하여 실용화 가능성 및 범용성이 높은 3가지 형태의 크랙실링 자동화 장비 개념 디자인을 제안하고, 설문조사 및 AHP분석 기법을 기반으로 한 Trade-off Analysis를 통해 캔틸레버형 크랙실링 자동화 장비를 최적 개념 디자인으로 선정하였다. 또한 최적 대안의 기술적 타당성 분석 결과 도로폭 3.5m를 스캔하기 위해 25Hz로 스캔할 수 있는 3대의 레이저 스캐너 사용이 요구되며, 머니플레이터의 구동속도는 최소 12.5cm/sec 이상 확보되어야 하는 것으로 분석되었다. 실린트 누액현상 방지를 위해 열매체온도 200℃ 이상에서 사용할 수 있는 공압식 체크밸브(길이 10cm x 높이 18.5cm)를 말단장치 끝에 부착사용하고, 실린트 순환구조 및 호스를 착탈식으로 설계함으로써 관내에서 실린트가 응고되는 현상을 방지될 수 있도록 설계하였다.

향후 본 연구 결과를 바탕으로 캔틸레버형 도로면 크랙실링 자동화 장비의 실물(full-scale) 제작이 요구되며, 현장 실험을 통해 개발된 자동화 장비의 문제점 분석을 바탕으로 한 수정보완, 현장 실험 데이터를 이용한 자동화 장비의 성능 분석 등이 요구된다.

감사의 글

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

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음. 감사드립니다.

참고문헌

- 김영석 · 이정호(2003), “건설 로봇의 연구개발 프로세스 모델 구축에 관한 연구”, 대한건축학회논문집, 19권 6호, 이정호 외 4인(2004), “도로면 크랙실링 자동화 로봇의 프로토타입 개발에 관한 연구”, 한국건설관리학회 논문집, 제5권

제2호.

Carl T. Haas, Kamel Sai와 3인(1999), Implementation of an Automated Road Maintenance Machine(ARMM), Bureau of engineering research the university of texas at Austin.

Todd L. Baker와 4인(1999), Development of the operator controlled crack sealing machine - The Long reach arm and control unit, Cambridge, University of California at Davis.

Andrew Hargadon와 2인 (2006), "Transfer Tank Longitudinal Crack Sealer Business Development

Case" Final Report, University of California - Davis

Carl Haas(1996), Evolution of an automated crack sealer: a study in construction technology development, Automation in construction.

Burlington Massachusetts Department of Public Works(2005), Pavement Management Instruction Manual

논문제출일: 2011.05.31

논문심사일: 2011.06.03

심사완료일: 2011.07.15

Abstract

Crack sealing is a maintenance technique commonly used to prevent water and debris penetration and reduce future degradation in pavement. In recent years, several systems for automatically routing and sealing pavement cracks have been developed in the highway construction and maintenance area. Automating pavement crack sealing can improve safety, productivity and quality, and reduce road user cost as well. The reduction in crew size and the increase in productivity of the automated sealing process will be translated directly into significant potential cost savings. The main objective of this study is to illustrate conceptual models for the development of the automated pavement crack sealer which meets domestic road condition and regulation, and to discuss its technical feasibilities. Conclusions are made concerning the applicability and the value of cantilever-typed pavement crack sealer which is selected as the most feasible alternative in both economical and technical aspects.

Keywords : *Crack Sealing, Automation, Conceptual Design, Technical Feasibility Analysis*
