

도로면 크랙 실링 자동화 장비 개발에 관한 연구

A Study on the Development of an Automated Pavement Crack Sealer

이 정 호[○] 이 재 권[□] 김 민 재[△] 김 영 석[◇] 조 문 영[▽] 이 준 복[×]

Lee, Jeong-Ho Lee, Jae-Kwon Kim, Min-Jae Kim, Young-Suk Cho, Moon-Young Lee, Jun-bok

요 약

도로면 유지보수를 시행함에 있어 노면의 파손정도에 따라 다양한 공법의 사용이 가능하나 크랙 실링 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 있고, 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 크랙 실링 공법의 이점 및 도로 유지보수 공사의 위험 요소를 인식하여 자동화 장비의 개발을 통한 안전성, 생산성 향상 및 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 크랙 실링 공법의 자동화를 통해 노무자의 안전사고를 방지하고, 품질 및 생산성 향상을 도모할 수 있는 크랙 실링 자동화 방안을 제시하고자 한다.

키워드 : 크랙, 크랙 실링, 도로 유지보수, 자동화

1. 서론

국내 도로 총 연장의 76.7%(70,146km; 2001년 12월 기준)를 차지하고 있는 포장도로는 유지보수를 위해 매년 막대한 예산을 투입하는 국가 기반시설이다. 그러나, 도로 유지보수에 적합한 예산 계획 및 효율적이고 종합적인 도로 관리기술의 부족, 일관성 있는 유지보수 공법 결정기준의 부재 등으로 인해 유지보수와 관련된 사업예산의 효율적 집행 및 관리는 미흡한 실정이다. 한편, 교통량이 많은 대도시나 고속도로에서 시행되는 도로면 유지보수 작업의 경우 노무자가 열악한 작업환경에서 작업을 수행해야하므로 안전성 확보가 어렵고, 도로면 유지보수 작업의 특성상 현장 노무자의 잦은 이직(labor turnover) 및 3D업종의 기피로 인한 숙련공 부족현상은 현 도로면 유지보수 작업의 생산성 및 품질저하를 가져오고 있다. 도로면 유지보수를 시행함에 있어 노면의 파손정도에 따라 다양한 공법의 사용이 가능하나 크랙 실링(crack sealing)공법은 예방적 차원에서 도로면에 발생된 크랙을 초기에 효과적으로 보수할 수 있는 방법으로 균열의 발전을 지연시킴으로써 후속균열을 방지하고, 방수효과로

도로 하부구조를 보호하여 동결 피해의 방지, 단층 방지 및 승차감 유지 등의 부수적인 효과를 얻을 수 있다. 따라서, 선진 외국의 경우 앞서 언급된 크랙 실링 공법의 이점 및 도로 유지보수 공사의 위험 요소를 인식하여 자동화 장비의 개발을 통한 안전성, 생산성 향상 및 경제성 확보에 다양한 연구 노력을 기울이고 있으나, 국내의 경우 도로면 유지 보수 공사를 위한 기술축적이나 자동화 장비 개발을 위한 시도는 미약한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 도로면 유지보수 공법 중 크랙 실링 공법의 자동화를 위한 프로토타입의 장비를 개발함으로써 노무자의 안전사고를 미연에 방지하고, 품질 및 생산성 향상을 도모할 수 있는 기술혁신(technology innovation) 방안을 제시하고자 한다.

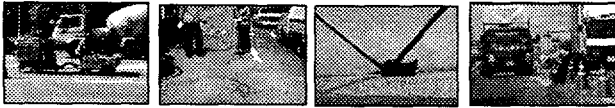
2. 크랙 실링 공법 및 자동화 기술 개발 현황

2.1 크랙의 유형 및 국내외 크랙 실링 공법

아스팔트 포장도로의 크랙 유형은 1)종방향(longitudinal), 2)횡방향(transverse), 3)블록(block), 4)거북등(alligator) 크랙으로 분류될 수 있으며, 이 중 덧씌우기가 요구되는 거북등 크랙을 제외한 종방향, 횡방향 및 블록 크랙은 크랙 실링 공법으로 유지보수가 가능한 크랙이다. 크랙 실링 공법은 크랙부분에 실런트를 주입하여 물과 이물질의 침투를 막아 후속 크랙이나 팻홀(pothole) 등을 방지함으로써 도로의 수명을 늘리는 예방적 차원의

* 학생회원, 인하대학교 건축공학과, 박사과정
** 학생회원, 인하대학교 건축공학과, 석사과정
*** 중신회원, 인하대학교 건축공학과 조교수, 공학박사
**** 중신회원, 한국건설기술연구원, 수석연구원
***** 중신회원, 홍익대학교 건축공학과 조교수, 공학박사
본 연구는 2001년 산학연 공동연구개발사업(과제번호 : E-01)의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임.

도로 유지보수 공법이다. 국내 재래식 크랙 실링 작업의 절차는 표준시방서 및 도로포장 유지보수 실무편람(건설교통부, 1999)에 따라 3mm이상의 크랙을 폭 1.2~2cm, 깊이 2~2.5cm로 커팅하고 공기 청소기를 사용하여 커팅된 크랙 부위를 청소한다. 크랙 내부의 이물질이 제거된 후 실런트 멜터기(sealant melter)에서 170~180℃로 용융된 실런트를 커팅 부위에 주입하고 스퀴즈를 사용하여 압제한 후 양생한다(그림 1).



① 크랙 절삭 ② 이물질 제거 및 공기청소 ③ 실런트 주입 및 스퀴즈 ④ 양생

그림 1. 크랙 실링 작업절차

미국 유타 도로국의 연구에 따르면 크랙 실링 공법은 추가적인 크랙의 발생과 팽출의 형성을 현저히 줄이며 크랙 실링을 한 경우 추가 크랙 및 팽출의 발생률이 1% 미만인 반면 크랙 실링을 하지 않은 경우 75~80%의 추가 크랙 및 팽출이 발생한 것으로 조사되었다. 한편, 온타리오 도로국의 연구에 따르면 크랙 실링 공법은 최소 4년간은 도로사정의 악화를 저지하고 내구성을 연장 시키는 것으로 분석되었다. 그림 2는 크랙 수명에 대한 PCI (Pavement Condition Index) 곡선으로써 크랙 실링을 수행한 도로의 수명이 실링을 하지 않은 도로 수명보다 약 2년 정도 연장되고 있음을 보여준다. (Ponniiah, 1995).

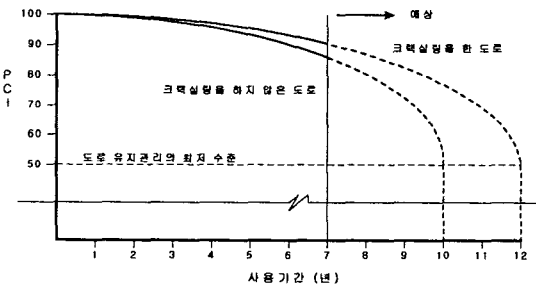


그림 2. 크랙 실링 공법의 효과

2.2 크랙 실링 공법의 자동화 기술개발 현황

선진 외국에서는 이미 오래 전부터 덧씌우기(patching)나 오버레이(overlay) 보다는 예방적 차원의 유지 보수 공법인 크랙 실링 공법을 선호하고 있으며 이를 자동화하기 위한 많은 연구노력을 기울이고 있다. 특히, 미국에서는 장기간에 걸쳐 CMU Laboratory Prototype(1990), CMU-UT Field Prototype(1992), CalDavis Field Prototype(1993), UT Field Prototype(1995), UT ARMM(1997, 1999) 등의 크랙 실링 자동화 장비를 연구·개발하여 상용화 단계에 이르고 있으며 표 1은 각 개발 장비의 주요 내용 및 문제점을 보여준다.

현재까지 개발된 크랙 실링 자동화 장비의 분석 결과, 성공적인 크랙 실링 자동화 장비의 개발을 위해서는 1)자

동화 장비의 생산성 및 품질을 확보하면서 실링되어질 도로면의 크랙을 정확히 탐지하고 맵핑할 수 있는 비전 알고리즘의 개발 및 2)개발 소프트웨어와 하드웨어간의 시스템 통합, 3)장비 개발 후 성능분석을 통해 개발 장비의 경제적 타당성을 확보하는 것이 실용화를 위한 주요 관건(major research problems)인 것으로 분석되었다.

표 1. 크랙 실링 자동화 장비 분석

구분	크랙 실링 자동화 장비	주요 연구 내용 및 문제점
CMU Laboratory Prototype (1990)		<ul style="list-style-type: none"> Machine vision과 Laser range scanner 간의 센서 퓨전(sensor fusion)을 활용한 크랙 탐지 및 맵핑 알고리즘의 개발과 비용 /X-Y 미니플레이터 형식의 하드웨어 제작 실링실 내에서 보형 크랙을 대상으로 크랙 실링 자동화 로봇의 기술적 타당성 및 개발 가능성 검증 작업영역 내의 크랙을 탐지하고 맵핑함에 있어 과다시간 소요
CMU-UT Field Prototype (1992)		<ul style="list-style-type: none"> X-Y 미니플레이터를 이용한 크랙 실링 자동화 로봇의 하드웨어 제작 및 컨트롤 소프트웨어의 개발 재래식 크랙 실링 공법의 완전 자동화를 부분적으로 실현 작업영역 내의 크랙을 탐지하고 맵핑함에 있어 과다시간 소요
CalDavis Field Prototype (1993)		<ul style="list-style-type: none"> 시속 16km의 속도로 크랙을 실링할 수 있는 multi-degree of freedom 미니플레이터 암(arm) 개발 및 현장실증을 성공적으로 완수 실링 대상 크랙의 제한성 및 크랙 탐지 및 맵핑 알고리즘의 정확성 결여 높은 시스템 판매가격(us \$600,000)으로 인한 기술이전 및 마케팅 실패
UT Field Prototype (1995)		<ul style="list-style-type: none"> 크랙 탐지 및 맵핑의 효율성/정확성 증진을 위해 인간과 기계간 작업분배(man-machine balance)를 기반으로 하는 remote-controlled, graphical control software)의 개발 및 적용 최적경로계획(optimal path plan) 알고리즘의 개발
UT Automated Road Maintenance Machine (ARMM)		<ul style="list-style-type: none"> Man-machine balanced graphical programming을 응용한 크랙 탐지, 맵핑, 컨트롤 소프트웨어의 개발 및 하드웨어와의 성공적 통합, 텍사스 5개 도시 및 8개 주에 걸친 현장실증 작업영역내의 그림자 문제, 양지 및 텍터스 크랙 기능을 포함한 발달장치의 개선, 베이킹 시스템, emergency stop, 야간작업 기능 추가 등이 문제점(lessons-learned)으로 지적됨.

3. 크랙 실링 자동화 장비의 개발

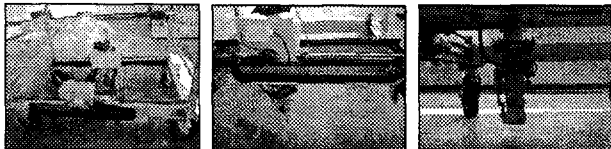
본 연구에서는 기존 문헌 고찰 및 유사 크랙 실링 자동화 장비의 개발사례 분석을 통해 도출된 문제점 및 개선사항을 토대로 경제성 확보가 가능하고 생산성 및 품질향상을 가져올 수 있는 크랙 실링 자동화 장비의 프로토타입을 개발하였다.

3.1 크랙 실링 자동화 장비의 개발

본 연구에서 제시하고 있는 크랙 실링 자동화 장비는 적외선 카메라로부터 입력된 영상을 이미지 프로세싱하고 크랙 탐지 및 맵핑 알고리즘을 통해 도로면의 크랙을 인식하며 경로 계획 알고리즘에 의해 XY 테이블을 효과적으로 이송시키면서 실런트 멜터로부터 공급받은 실런트를 크랙의 중심부를 따라 자동으로 분사하는 장비이다.

하드웨어는 크게 프레임 부, 갠트리 부, 카트 부, 터렛(말단장치)부로 구성되며, 효율적인 크랙 실링 작업을 위한 하드웨어 설계시 고려사항은 1) 프레임부 설계시 XY

테이블의 뒤틀림 방지, 2) 그림자 및 노면반사, 야간작업, 날씨에 대한 대책(암막장치 및 적외선 카메라 사용), 3) 원활한 굴곡면 실링을 위한 말단 장치의 회전 및 테레스코핑 기능(회전 제어 및 스퀴즈 실린더 사용) 4) 이동의 용이성 및 단차가 있는 도로면 이동(에어 실린더 사용), 5)효과적인 실링면 마무리를 위한 스퀴즈(U자형 스퀴즈 사용) 등이다. 본 연구를 통해 개발된 크랙 실링 자동화 장비의 프로토타입은 그림 3과 같다.



(1) 프레임 부 (2) 챌트리 및 카트 (3) 터렛

그림 3. 크랙 실링 자동화 장비

3.2 크랙 실링 자동화 장비의 운영 절차

(1) 인간 과 기계간 협업체제(man-machine balance)의 중요성

도로면에 존재하는 크랙은 많은 노이즈(오일 마크, 바퀴자국, 이미 실링된 크랙 등)와 함께 존재하고 다양한 유형을 가지고 있으므로 컴퓨터에 의해서만 자동으로 크랙을 탐지하고 맵핑하는 것은 특히 품질에 지대한 영향을 미치는 정확성면에서는 매우 도전적인 접근방법이다 (Haas, 2000). 본 연구에서는 장비의 생산성 및 품질을 향상하고 경제성 확보가 가능하며 크랙 실링을 자동화함에 있어 인간과 기계의 능력을 극대화 할 수 있도록 표 2와 같은 인간과 기계간의 협업체제를 구성하였다.

표 2 크랙 실링의 자동화를 위한 인간과 기계의 협업체제

크랙 실링 자동화를 위한 절차 및 기능(specific functions)	자동화 요소 (automated functions)	비 자동화 요소 (manual functions)
1. 이미지 획득 (image acquisition)	○	
2. 노이즈 제거 (noise elimination)	○	
3. 크랙 탐지 및 맵핑 (crack detection and mapping)		○
4. 크랙 네트워크 모델링 (crack network modeling)	○	
5. 경로 계획(path planning)	○	
6. 장비 제어(equipment control)	○	○

(2) 크랙 실링 자동화 장비의 효율적 운영절차

도로면에 크랙 실링 대상인 종방향, 횡방향, 블록 크랙이 존재하면 표준 시방서에 따라 노무자는 크랙을 폭 1.2~2cm x 깊이 2~2.5cm로 커팅한다. 트럭, 실린트 펌터, 크랙실러로 구성된 크랙 실링 자동화 장비가 커팅 크랙 부위를 지나면 크랙 실링 자동화 장비 상단에 부착된 적외선 카메라를 통해 크랙 이미지가 운전자의 터치 센서 터브 모니터에 실시간으로 나타난다. 이때, 운전자는 자동화 장비를 정지하고 앞서 언급된 인간과 기계간 협업체제를 기반으로 노이즈 제거, 크랙 탐지 및 맵핑, 크랙 네트워크 모델링 및 경로계획을 수행하고 그 결과를 토대로 크랙 실링 작업을 수행한다(그림 4).

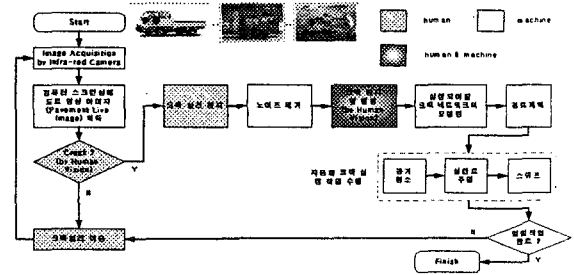


그림 4. 크랙 실링 자동화 장비의 운영절차

4. 크랙 실링 자동화 공법의 경제적 타당성 분석

본 연구에서는 크랙 실링 자동화 장비 적용시 예상되는 편익 및 경제적 타당성을 분석하기 위해 국내 재래식 크랙 실링 공법과 미국에서 개발된 크랙 실링 자동화 장비인 UT ARMM의 실적자료를 바탕으로, 개발 장비의 현장 적용 이전의 잠재적인 경제성 분석을 실시하였다. 재래식 크랙 실링 공법과 자동화 크랙 실링 공법의 경제성 분석을 위해 요구되는 비용 및 편익 요소는 그림 5와 같다.

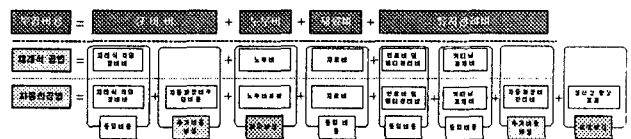


그림 5. 재래식 및 자동화 크랙 실링의 비용 및 편익 요소

4.1 분석을 위한 기본 가정 및 비용 요소

1999년 건설교통부 도로포장관리체계 조사 및 분석 자료에 따르면, 크랙 실링 공법으로 유지보수가 가능한 종방향, 횡방향, 블록크랙의 발생율은 약 4.5%이므로 2001년까지 포장된 전국 70,146km의 도로에 매년 3,156km의 크랙이 동일하게 발생한다는 가정하에 경제성 분석을 수행하였다. 또한, 생산성 및 일일 투입 노무인원, 연간 작업 일수, 장비 수명, 최소기대 수익률에 대해서도 현장조사 및 문헌고찰을 통해 표 3과 같이 가정하였으며, 1개 작업조를 대상으로 한 재래식 및 자동화 공법의 투입비용을 살펴보면 표 4와 같다.

표 3. 잠재적 경제성 분석을 위한 기본 가정

구분	재래식 공법	자동화 공법
작업 대상 구간	3,156km/년	
생산성	2.4km/일	3.7km/일
일 투입 노무인원	11명	6명
연간 작업 일수	175일	
장비 수명	10년	
최소기대 수익률	7%	

표 4. 재래식 및 자동화 공법의 투입비용 분석(1개 작업조)

구분		재래식공법	자동화공법
초기 투자비	장비비(1대)	57,000,000원	129,000,000원 (57,000,000+72,000,000)원
	일일 노무비	980,000원/일	560,000원/일
연간 소요 비용	재료비	동일 비용	
	커터날교체비	동일 비용	
	자동화 장비 유지관리비	-	1~5년차:3,600,000원/년 6~10년차:5,040,000원/년

4.2 자동화 공법 편익의 현재가치 분석

크랙 실링 공법으로 매년 3,156km를 유지보수 하기 위해서는 표 5와 같이 재래식 작업의 경우 8대의 장비가 요구되고 자동화 공법의 경우 5대의 장비가 필요하다.

표 5. 재래식과 자동화 크랙 실링 공법의 투입비용 (전체)

구분	재래식 공법	자동화 공법
투입장비 대수*	8대	5대
전체 장비비**	456,000,000원	645,000,000원
연간 노무비***	1,372,000,000원/년	490,000,000원/년
자동화장비 유지관리비****	-	1~5년차: 18,000,000원/년 6~10년차: 25,200,000원/년

* 3,156km/(공법 별 일일 생산성 x 연간 작업일수)
 ** 각 공법 별 장비비 x 투입장비 대수
 *** 공법 별 일일 노무비 x 연간 작업일수 x 투입장비 대수
 **** 공법 별 자동화 장비 유지관리비 x 투입장비 대수

그림 6은 재래식과 자동화 크랙 실링 공법의 투입비용 분석 결과를 바탕으로 현금 흐름도를 작성한 것이다. 자동화 공법 도입에 따른 편익의 현재가치(Present Value) 분석 결과 크랙 실링 자동화 장비의 수명주기인 10년 동안 약 58억원의 편익이 발생하는 것으로 분석되었으며 추후 국내 포장도로의 노후화, 품질 향상 및 안전성 확보, 재료낭비 및 야간작업으로 인한 사용자 간접비용(road-users cost)의 절감효과 등을 기대해 볼 때 개발 장비의 현장적용을 통한 경제적 기대효과는 막대할 것으로 사료된다.

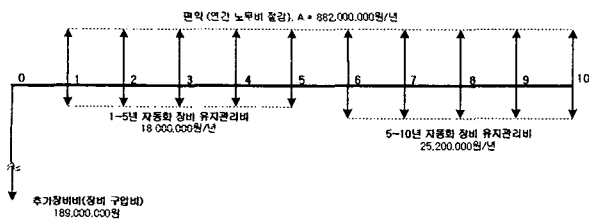


그림 6. 자동화 크랙 실링 공법의 현금 흐름표

$$PV(7\%) = \text{편익-장비 구입비-자동화 장비 유지관리비} \\ = 882,000,000\text{원} \cdot (P/A, 7\%, 10) - 189,000,000\text{원} - \\ 25,200,000\text{원} \cdot (P/A, 7\%, 10) + 7,200,000\text{원} \cdot \\ (P/A, 7\%, 5) = 5,858,341,920\text{원}$$

5. 결론

본 연구에서는 예방적 차원에서 크랙을 초기에 효과적으로 유지 보수할 수 있는 크랙 실링 자동화 장비의 개발을 위해 문헌 고찰 및 현장조사를 토대로 크랙 실링 작업 절차 및 크랙 실링 공법의 효용성에 대한 분석을 선행하였다. 또한, 국내외에서 개발된 관련 장비를 조사·분석함으로써 장비개발에 응용 가능한 최신 요소기술을 바탕으로 국내 도로실정에 적합한 크랙 실링 자동화 장비의 프로토타입을 완성하였으며 인간과 기계간 협업체제를 이용한 크랙 실링 자동화 장비의 효율적 운영 방안을 제시하였다. 마지막으로, 재래식 크랙 실링 공법과 자동화 크랙 실링 공법간의 잠재적 경제성을 비교·분석함으로써 현장적용 이전인 기획 및 개발단계(planning and development phase)에 있어 개발 장비의 경제적 타당성을 제시하였다. 추후, 현장적용을 통한 문제점 분석 및 개선사항 도출을 바탕으로 개발 장비의 수정 및 보완이 요구되며, 장비의 성능분석(performance evaluation)을 통한 보다 구체적인 경제성 분석(tangible benefit and intangible benefit)이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- Hass, C., Traver, A., Easter, G., Greer, R., Kim, Y. S. and Reagan, A.(1996). "Implement of an Automated Crack Sealer", The University of Texas at Austin.
- Kim, Y., Hass, 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.

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