

도로면 크랙실링 자동화 장비의 작업 생산성 분석에 관한 비교 연구

서원중* · 유현석** · 김영석***

Seo, Won-Jung*, Yoo, Hyun-Seok**, Kim, Young-Suk***

A Comparative Study on Productivity Analysis of Automated Pavement Crack Sealing Machines

ABSTRACT

Pavement crack sealing method, which is one of the methods to maintain and repair the road, prevents the extending of cracks by repairing cracks in its early occurrence and has already been applied to many roadworks in advanced foreign country for a long time. But in the conventional crack sealing method, traffic accidents occur frequently during the repair because it's commonly performed on the heavy traffic road or highway. It also has some difficulties in securing the safety of workers from the risk of burns caused by heated sealant. In an effort to solve these problems, automated pavement crack sealing machines such as ARMM, OCCSM, TTLS have been developed in advanced foreign country since early 1990s. Also APCS in 2004 and ACSTM in 2013 were already developed domestically. However, since these automated crack sealers developed from a number of research institutions have different test-bed conditions and productivity measurement models, it's difficult to compare and evaluate them objectively. In this study, the image processing time of the respective machines and the movement time of each motion on the work process were estimated by using fully autonomous mapping and semi-automatic mapping in order to measure the productivity in the same environmental conditions. In addition, the productivity measurement test-bed reflected domestic road characteristics was designed to estimate and compare the productivity of the automated crack sealing machines.

Key words : Productivity measurement model, Automated crack sealer, Test-Bed, Crack sealing

초 록

도로면 크랙실링 공법은 균열발생 초기에 도로면을 보수하여 균열의 확산을 예방하는 유지보수공법으로써 북미를 중심으로 한 선진 외국에서는 이미 오래전부터 많은 도로 보수 물량에 적용되어 왔다. 그러나 재래식 크랙실링 공법은 작업 특성상 교통량이 많은 일반도로나 고속국도에서 작업이 수행되므로 교통사고가 빈번하게 발생하고, 가열된 실런트를 도로면에 직접 분사하기 때문에 화상의 위험으로부터 노무자의 안전을 확보하기 어려운 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 선진 외국에서는 1990년대 초부터 ARMM, OCCSM, TTLS 등의 크랙실링 자동화 장비를 지속적으로 연구·개발해 왔으며, 국내에서도 2004년 APCS 장비와 2013년 ACSTM 장비를 개발 완료한 바 있다. 그러나 다수의 연구기관에서 서로 상이한 시기에 개발된 크랙실링 자동화 장비는 각기 다른 테스트베드 조건과 생산성 측정 방법을 사용하여 개발 장비의 작업 생산성을 측정, 표기함으로써 각 크랙실링 자동화 장비의 성능을 객관적으로 비교, 평가할 수 없는 문제점이 있었다. 이 연구에서는 동일한 환경 조건 내에서 크랙실링 자동화 장비의 생산성을 측정하기 위해 완전자동 맵핑 및 반자동 맵핑 방식에 따른 각 크랙실링 자동화 장비의 이미지 프로세싱 소요시간을 추정하고, 작업 프로세스상의 동작요소별 이동시간을 산정하였다. 또한 국내 도로환경이 반영된 생산성 측정 테스트베드를 설계하였으며, 이를 기반으로 국내외에서 개발된 크랙실링 자동화 장비의 생산성을 동일한 조건 내에서 측정하고 상호 비교, 분석하였다.

검색어 : 생산성 측정 모델, 크랙실링 자동화 장비, 테스트베드, 크랙실링 공법

* 인하대학교 건축공학과 석사과정 (Inha University · seo8695@naver.com)

** 정희원 · 인하대학교 건축공학과 연구교수, 공학박사 (Inha University · hsyoo.inha@gmail.com)

*** 정희원 · 교신저자 · 인하대학교 건축공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Inha University · youngsuk@inha.ac.kr)

Received February 27, 2014/ revised April 22, 2014/ accepted May 1, 2014

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

2012년 기준 국내 포장도로의 총 연장은 88,193km로 도로 총 연장(105,703km)의 83.4%를 차지하고 있으며, 이러한 포장도로의 유지·보수를 위해 2012년 한해에만 약 4521억원의 비용이 투입되었다. 이와 같이 도로는 매년 막대한 예산이 투입되는 중요한 국가기반 시설로 지속적이고 효율적인 유지관리를 필요로 한다.

포장도로의 유지보수 공법 중 크랙실링 공법은 균열의 확산을 초기에 효과적으로 예방하는 유지보수공법으로써, 미국, 프랑스, 독일과 같은 선진 외국에서는 이미 오래전부터 많은 도로 보수 물량에 크랙실링 공법을 적용하여 왔다. 그러나 재래식 크랙실링 공법은 200°C 이상 가열된 실린트를 크랙면에 노무자가 직접 분사하기 때문에 화상의 위험이 높고, 교통량이 많은 일반도로나 고속국도에서 작업이 수행되므로 노무자의 안전성을 확보하기 어려운 문제점이 있다. 이를 해결하기 위하여 1990년대 초부터 미국에서는 ARMM (Automated Road Maintenance Machine; Kim et al, 1999), OCCSM (The Operator Controlled Crack Sealing Machine; Baker et al, 1999; Feng et al, 2002), TTLS (The Transfer Tank Longitudinal Sealer; Bennett and Velinsky, 2006) 등의 크랙실링 자동화 장비를 지속적으로 개발하여 왔으며, 국내에서는 2004년 APCS (Automated Pavement Crack Sealer; Kim, 2004; Lee et al, 2006)의 개발을 시작으로 최근 ACSTM (Automated Crack Sealer with Telescopic Manipulator; Kim, 2013)의 개발을 완료한 바 있다.

이와 같이 국내외 다수의 연구기관에서 서로 상이한 시기에 개발된 크랙실링 자동화 장비의 성능을 객관적으로 비교·평가하기 위해서는 완전히 동일한 현장 조건에서 작업 생산성이 측정되어야 한다. 그러나 지역적으로 이동이 불가능하고 시간적으로 개발 및 운용 시기가 서로 다른 크랙실링 자동화 장비의 작업 생산성을 동일한 조건으로 직접 비교하는 것은 현실적으로 불가능하며, 서로 상이한 조건에서 측정된 생산성 측정결과를 해당 자동화 장비의 성능으로 평가하는 것은 신뢰성이 낮은 문제가 있다.

본 연구의 목적은 서로 상이한 지역적, 시간적 조건에서 개발된 크랙실링 자동화 장비의 작업 생산성을 동일한 조건 내에서 측정하여 상호 비교하는 것이며, 이를 위하여 본 연구에서는 도로공사 표준시방서 및 도로현황조서를 바탕으로 국내 도로 환경이 적절히 반영된 생산성 측정 테스트베드를 설계하였다. 또한 작업시간 산정을 위해 각 크랙실링 자동화 장비의 영상획득 및 크랙 네트워크 모델링 소요시간을 추정하고 작업수행에 따른 각 동작요소별 이동시간을 분석하여 동일한 조건 내에서 각 크랙실링 자동화 장비의 작업 생산성을 비교, 분석하였다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 현재까지 국내외에서 연구개발된 10여종의 크랙실링 자동화 장비 가운데 중방향과 횡방향 크랙을 모두 실링할 수 있고, 도로면 영상 카메라를 이용하여 완전자동(fully autonomous) 또는 반자동(semi-automatic) 방식으로 크랙을 인식하는 OCCSM, APCS, ACSTM 장비를 대상으로 생산성 측정을 수행하였으며 연구의 방법은 다음과 같다.

1.2.1 크랙실링 자동화 장비의 작업 프로세스 및 생산성 측정 모델 분석

본 연구에서는 국내외 크랙실링 자동화 장비의 개발현황을 분석하였으며, 현장실험 및 문헌조사를 바탕으로 크랙실링 자동화 장비의 작업 프로세스를 분석하였고, 이를 기반으로 크랙실링 자동화 장비의 생산성 측정 모델을 분석하였다.

1.2.2 크랙실링 자동화 장비의 이미지 프로세싱 시간 추정 및 동작요소별 이동시간 산정

본 연구에서는 말단장치의 이동경로 모델링 시 완전자동 맵핑(fully autonomous mapping) 및 반자동 맵핑(semi-automatic mapping) 방식에 따른 각 자동화 장비의 이미지 프로세싱 소요시간을 추정하였으며, 각 크랙실링 자동화 장비의 생산성 측정 모델 및 장비 제원을 토대로 생산성 측정을 위한 동작요소별 작업시간을 산정하였다.

1.2.3 크랙실링 자동화 장비 작업생산성 측정을 위한 테스트베드 설계

본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비의 생산성 측정에 있어 신뢰성 높은 결과를 도출하기 위해 2009년 도로공사 표준시방서 및 2013년 도로현황조서를 토대로 실제 크랙의 유형이 적절히 반영된 4차선 기반의 도로면 테스트베드를 설계하였다.

1.2.4 크랙실링 자동화 장비 작업 생산성 측정 및 결과 비교

본 연구에서는 각 크랙실링 자동화 장비의 제원 및 제안된 테스트베드를 토대로 각 동작요소별 작업 소요시간을 측정하였다. 또한 측정된 각 크랙실링 자동화 장비별 총 작업 소요시간을 토대로 작업영역별 작업 생산성을 도출하고 이를 8시간 기준의 일일 작업 생산성으로 환산하여 비교, 분석하였다.

2. 크랙실링 자동화 장비의 개발현황 및 생산성 분석 사례 고찰

2.1 크랙실링 자동화 장비 개발 현황

크랙실링 공법은 200°C 이상 가열된 고온의 실린트를 크랙면에

노무자가 직접 분사하기 때문에 화상의 위험이 높으며, 작업의 특성상 교통량이 많은 일반도로나 고속국도에서 작업이 수행되므로 교통사고에 대한 노무자의 안전성을 확보하기 어려운 문제점이 있다. 또한 국제사회의 근대화 이후 삶의 수준이 향상되면서 3D산업 기피현상이 두드러지게 나타났고, 이로 인한 기능공의 부족 및 고령화는 작업 생산성 및 품질 저하, 노무비 상승 등의 원인이 된다.

이와 같은 문제들을 해결하기 위하여 미국 카네기멜론 대학교(Carnegie Mellon University)와 텍사스 주립대(University of

Texas at Austin)에서는 1990년 CMU Laboratory Prototype의 개발을 시작으로 UT Filed Prototype, ARMM 등과 같은 X-Y 프레임 방식의 크랙실링 자동화 장비를 개발한 바 있다. 이에 반해 캘리포니아 주립대(University of California at Davis) 산하 AHMCT (Advanced Highway Maintenance & Construction Technology) 연구 센터에서는 ACSM (Automated Crack Sealing Machine)과 LCSM (Longitudinal Crack Sealing Machine), TTLS(The Transfer Tank Longitudinal Sealer) 등의 장비와 같이 운전자가 수동으로 레버를 조작하여 종방향 크랙만을 빠른

	1990	1995	2000	2005	2010	2013
CMU & UT at Austin	CMU Laboratory Prototype(1990)	CMU UT Field Prototype(1992)	UT Field Prototype(1996)	ARMM(1999)		
AHMCT UC Davis		ACSM (1993)	LCSM (2000)	OCCSM (2003)	TTLS (2006)	TMRR (2008)
INHA University				APCS (2004)		ACSTM (2013)

Fig. 1. Development History of the Automated Crack Sealing Machines

Table 1. Features of the Automated Crack Sealing Machines

The Name of Equipment		OCCSM	APCS	ACSTM
The Features of Equipment				
Unit configuration and Target crack	Unit	Integrated type(single-unit)	Separated type(multi-unit)	Integrated type(single-unit)
	Type of sealable crack	Longitudinal and Transverse crack	Longitudinal and Transverse crack	Longitudinal and Transverse crack
	Manipulator	Multi-DOF manipulator	X-Y manipulator	X1-X2-Y manipulator
Sensing and Control part	Path planning	○	○	○
	Image acquisition and Crack recognition	CCD Cam	CCD Cam	CCD Cam
Semi-automatic mapping			Fully autonomous and Semi-automatic mapping	Fully autonomous and Semi-automatic mapping
End effector	Air blowing	×	○	○
	Squeezing	Brush-type squeeze	U-type squeeze	U-type squeeze
	Pressing	Spring pressing	Air pressing	Air pressing

속도로 실링하는 크랙실링 장비를 주로 개발해왔으며, 2003년 횡방향 크랙까지 실링이 가능한 OCCSM (The Operator Controlled Crack Sealing Machine)을 개발한 바 있다. 국내에서는 2004년 국토교통부의 지원을 받아 X-Y 프레임 방식의 APCS가 성공적으로 개발되었고, 최근 2013년 X₁-X₂-Y 프레임 방식의 ACSTM이 개발되었다(Fig. 1).

현재까지 국내외에서 개발된 크랙실링 자동화 장비는 10여종에 이르나, 1)종방향 크랙과 횡방향 크랙을 모두 자동화 방식으로 실링할 수 있고, 2)머신 비전(machine vision)을 사용하여 도로면 영상에서 크랙을 완전자동(fully automatic) 또는 반자동(semi-automatic) 방식으로 인식할 수 있고, 3)실제 자동화 장비를 제작하여 크랙실링 현장에 적용된 크랙실링 자동화 장비는 국내외적으로 4종(ARMM, OCCSM, APCS, ACSTM)의 장비만이 존재한다. 이 가운데 미국에서 개발된 ARMM과 국내에서 개발된 APCS는 장비의 구동방식과 프레임의 크기, 구동속도 등이 유사하므로 본 연구에서는 OCCSM, APCS, ACSTM 장비의 개발현황을 분석하였다(Table 1).

2.1.1 OCCSM (The Operator Controlled Crack Sealing Machine)

2003년 캘리포니아 주립대에서 개발된 OCCSM 장비는 약 240 갤런(gallon) 용량의 실린트 펌터를 작업차량에 탑재시킨 일체형 자동화 장비이다. CCD 카메라를 이용하여 도로면에 발생한 크랙의 이미지를 획득하고 이를 바탕으로 해당 근로자가 실링 경로를 반자동 방식으로 맵핑하며, 다관절 암(multi-DOF arm) 방식으로 실린트 분사장치를 텔레스코핑하여 종방향 및 횡방향 크랙에 대한 실링작업을 수행한다. OCCSM 장비는 원통좌표형 머니플레이터를 이용하여 넓은 작업영역을 확보할 수 있으나 부채꼴 모양의 작업영역을 구성하므로 작업영역 내 데드 스페이스(dead space)가 존재하며, 스틸암(steel arm)으로 제작되어 부채 중량에 의한 말단부 처짐현상 및 실링면 품질저하 현상이 발생한다. 또한 공기 분사장치가 미 탑재되어 크랙면 청소 시 인력의 투입이 불가피하고, 브러쉬 타입의 스퀴즈를 사용하여 실링면의 품질이 현저히 저하되는 단점이 있는 것으로 분석되었다.

2.1.2 APCS (Automated Pavement Crack Sealer)

2004년 국토교통부의 지원으로 인하대학교 연구진에 의해 개발된 APCS 장비는 약 360 갤런 용량의 실린트 펌터를 탑재한 차량과 실링작업이 수행되는 말단장치가 장착된 차량으로 구성되는 트레일러 형식의 분리형 자동화 장비이다. 말단장치 장착 차량에 설치된 CCD 카메라를 이용하여 도로면에 발생한 크랙의 이미지를 획득하고, 완전자동 맵핑 또는 반자동 맵핑 방식으로 크랙을 인식하며,

종방향, 횡방향 및 블록형 크랙을 대상으로 실링작업을 수행한다. APCS 장비는 x, y, z 기반의 직교좌표형 머니플레이터로 볼스크류 및 LM가이드를 이용하여 갠트리에 부착된 말단장치가 X축 및 Y축 방향으로 이동할 수 있다. 또한 말단장치 내 공기분사장치를 장착하여 블로잉-실링-스퀴징의 3가지 주요 작업을 동시병행하여 수행할 수 있으며, U자형 스퀴즈를 사용하여 실링면의 우수한 품질을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다. APCS 장비의 실링작업은 X-Y 프레임 내부에서 수행되므로 작업의 정밀도 및 안정성이 우수하지만 작업영역이 프레임 내부로 한정되기 때문에 협소한 실 작업영역을 갖으며, 견인차량과 작업차량이 각각 분리/견인되어 구동되므로 이동상의 어려움 및 설치/해체에 많은 시간이 소요되는 것으로 분석되었다.

2.1.3 ACSTM (Automated Crack Sealer with Telescopic Manipulator)

2013년 개발완료된 ACSTM 장비는 상온식 실린트 펌터를 작업차량에 탑재시킨 일체형 크랙실링 자동화 장비이다. 최대 3mm의 논커팅 크랙을 인식할 수 있는 고성능 CCD 카메라를 이용하여 도로면에 발생한 크랙의 이미지를 획득하고, 획득한 이미지를 바탕으로 완전자동 맵핑 및 반자동 맵핑 방식에 의해 크랙 네트워크를 모델링하며, 종방향, 횡방향 및 블록형 크랙을 대상으로 실링작업을 수행한다. x, y, z 좌표를 기반으로 ACSTM 장비의 머니플레이터는 X₁-X₂-Y축 방향으로 이동하며, 베이스 프레임으로부터 볼스크류 및 LM가이드를 통해 동력을 전달 받아 차량 후면으로 확장하는 구조이다. ACSTM 장비는 블로잉-실링-스퀴징 작업을 동시병행하여 수행하며, X₁, X₂축에 의한 프레임 확장은 우수한 작업 정밀도 및 안정성과 함께 넓은 작업영역을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다.

2.2 크랙실링 자동화 장비의 생산성 측정 모델 분석

일반적으로 생산성의 개념은 투입자원에 대한 산출물의 비로 정의할 수 있는데, 크랙실링 자동화 장비의 경우 총 작업 소요시간 대비 실링된 크랙의 총 길이를 측정하여 생산성을 도출할 수 있다 (Kim, 2004). 크랙실링 자동화 장비의 작업 소요시간을 측정하기 위해서는 먼저 자동화 장비의 작업 프로세스를 구성하는 각 동작요소가 분석되어야 한다. 현장실험을 통해 크랙실링 자동화 장비의 작업 프로세스를 분석한 결과 자동화 장비의 작업 프로세스는 1)작업 크랙까지의 장비 이동, 2)크랙이 발생한 도로면의 영상 획득, 3)작업 크랙까지의 터렛 이동, 4)실질적인 실링 작업(블로잉-실링-스퀴징), 5) 작업 종료 후 터렛의 원점 복귀 등 5단계의 동작요소가 구성된다(Fig. 2).

크랙실링 자동화 장비의 생산성을 측정하기 위해서는 Fig. 2의

작업 프로세스를 토대로 하나의 작업영역에서 소요되는 각 동작요소별 작업시간이 측정되어야 하며, 크랙실링 자동화 장비의 생산성은 각 작업영역에서 실링작업을 수행하는데 소요되는 시간들의 총합 대비 실링된 크랙의 총 길이로 산출할 수 있다. 이 때 동작요소 중 작업 크랙까지의 장비 이동과 작업 종료 후 터렛의 원점 복귀 요소는 동시에 병행되는 작업이므로 작업시간 산정 시 측정값이 큰 요소만 생산성 측정에 반영되어야 한다. 따라서 자동화 장비의 생산성 측정 모델은 분석된 작업 프로세스를 토대로 Fig. 3과 같이 구성된다.

2.3 크랙실링 자동화 장비의 생산성 분석 사례 고찰 및 한계점 분석

자동화 장비의 성능 분석(performance analysis)은 생산성, 경제성, 안전성, 품질 등의 다양한 측면에서 수행될 수 있으며, 작업

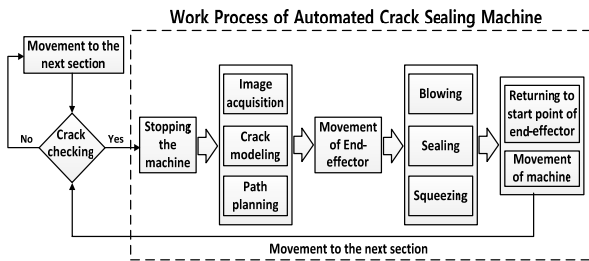


Fig. 2. Work Flow of the Automated Crack Sealing Machines

Productivity Measurement Model	
Productivity of Automated Crack Sealing Machine(P)	Total Length of Crack Sealed(L)
	Total operational time of each motion (Tb + Ta or Tc + I + S)
Ta : Machine 's movement time to the work area Tb : End-effector 's movement time to the target crack Tc : End-effector 's returning time to the starting point after the completion of task I : Pavement image acquisition time S : crack sealing time (Blowing-Sealing-Squeezing duration)	

Fig. 3. Productivity Measurement Model for the Automated Crack Sealing Machines

생산성 측면의 성능 분석은 장비의 실제 작업능력을 종합적으로 평가하는 중요한 성능 분석 요소이다. 각 자동화 장비의 생산성을 객관적으로 비교·평가하기 위해서는 완전히 동일한 현장 조건에서 작업 생산성이 측정되어야 한다. 그러나 현재까지 개발된 크랙실링 자동화 장비는 다수의 연구기관에서 서로 상이한 시기에 개발 및 운용되어 시간적, 공간적 차이가 존재하므로 동일한 현장 조건에서 비교가 불가능하며, 서로 상이한 조건에서 측정된 생산성 측정 결과를 해당 자동화 장비의 성능으로 비교하는 것은 신뢰성이 낮은 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 2004년 국내 APCS 개발 연구진은 Fig. 4와 같이 총 길이 34.9m의 크랙으로 구성된 40m 구간의 테스트베드를 설계하여 동일한 조건으로 크랙실링 자동화 장비의 생산성을 측정, 비교, 분석한 바 있다.

그러나 2004년 당시 수행된 생산성 분석은 1)생산성 측정이 수행될 테스트베드에 실제 도로의 형태가 적절히 반영되지 못하였으며, 2)크랙 발생 유형이 지나치게 단조롭고, 3)영상획득 및 크랙 네트워크 모델링을 자동으로 수행하는 국내 장비만을 대상으로 수행되었다. 따라서 실제 도로의 형태가 적절히 반영된 테스트베드를 설계하기 위해 크랙실링 작업이 수행되는 도로 조건 및 도로공사 표준 시방서를 분석하고 실제 발생 유형에 따른 테스트 크랙을 구성하여야 하며, 이를 토대로 국내외에서 개발된 크랙실링 자동화 장비의 생산성 측정이 수행되어야 한다.

3. 크랙실링 자동화 장비의 동작요소별 작업시간 분석 및 테스트베드 설계

3.1 말단장치 및 장비 이동시간 산정

크랙실링 자동화 장비는 실링작업을 수행하기 위해 크랙이 발생된 도로면을 해당 장비의 작업영역으로 분할하고, 분할된 각 작업영역에서 이미지 프로세싱, 장비 이동 및 실링작업 프로세스를 반복적으로 수행한다. 본 연구에서 작업 생산성 측정이 수행될 3종의 크랙실링 자동화 장비 OCCSM, APCS, ACSTM의 작업영역은 각각 3.7×4.0m, 1.55×0.9m, 2.4×1.4m이며, 각 크랙실링 자동화 장비의 작업 생산성을 측정하기 위해서는 각 장비의 작업영역으로

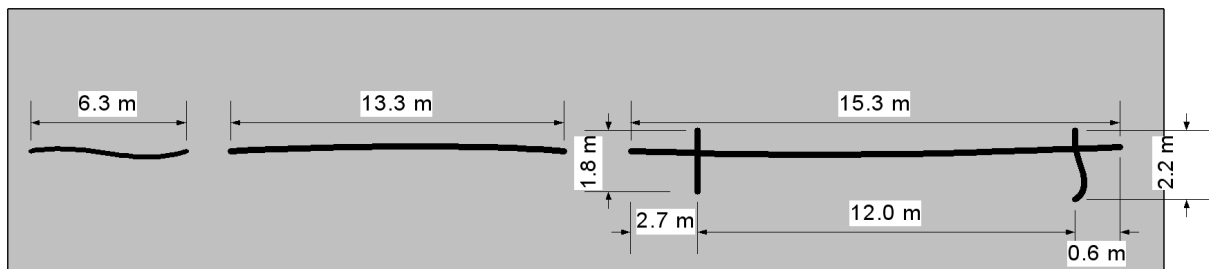


Fig. 4. Productivity Measurement Test-bed used for APCS (2004)

Table 2. Comparison of Work Area and Movement Speed

Classification		OCCSM	APCS	ACSTM
Work space	Width	3.7m	1.55m	2.4m
	Length	4.0m	0.9m	1.4m
Turret movement speed	When moving from the zero point to the starting point, When moving from the completion point to the zero point	0.18m/s	0.20m/s	0.21m/s
	Crack sealing work	0.16m/s	0.18m/s	0.18m/s
Vehicle travel speed		0.278 m/s		

분할된 범위 내의 크랙을 실링하기 위한 각 동작요소별 작업시간이 측정되어야 한다. 동작요소별 작업시간은 ‘시간=거리/속도’의 공식에 의해 산출될 수 있으며, 따라서 크랙실링 자동화 장비의 각 동작요소별 작업시간은 도로면에 발생된 크랙을 실링하기 위한 각 동작요소에서의 장비 이동거리를 장비의 이동속도로 나누어 산출된다.

본 연구의 대상이 되는 3종의 크랙실링 자동화 장비 중 2003년 미국 UC Davis에서 개발된 OCCSM 프로토타입 장비는 개발당시 실제 실링작업 수행에 따른 장비의 이동속도와 실링속도가 정확하게 알려져 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 프로토타입으로 개발된 OCCSM 장비의 현장실험 동영상을 토대로 스톱워치 기법을 이용하여 동작요소별 이동속도를 추정하였으며, 다음 Table 2는 본 연구의 측정 대상 장비인 OCCSM, APCS 및 ACSTM 장비의 작업영역 및 동작요소별 장비 이동속도를 비교한 결과이다.

3.2 이미지 프로세싱 시간 산정

도로면에 발생된 크랙의 실링작업을 수행하기 위해서는 실링작업이 수행될 도로면의 영상획득 및 크랙 네트워크 모델링이 선행되어야 한다. 크랙실링 자동화 장비의 크랙 네트워크 모델링은 수행방식에 따라 완전자동 맵핑, 반자동 맵핑 방식, 수동 맵핑으로 구분된다. 완전자동 맵핑의 경우 작업을 수행하는 노무자에 관계없이 장비 스스로 크랙을 찾아내고 모델링하므로 소요되는 시간이 비교적 일정하지만, 매뉴얼 맵핑 및 반자동 맵핑의 경우 획득한 도로면 영상을 바탕으로 작업자(운전자)가 직접 경로를 모델링하고 수정해야하므로 작업자의 숙련도 및 영상 내 크랙의 발생 정도에 따라 크랙 네트워크 모델링 프로세스에 소요되는 시간의 편차가 비교적 크다. 본 연구에서는 신뢰성 높은 생산성 측정 결과를 도출하기 위해서는 영상획득 및 크랙 네트워크 모델링에 소요되는 시간의 대푯값을 추정하고자 하였다. 모집단에서 추출한 표본자료를 이용하여 대푯값을 추정하는 방법에는 점추정(point estimation)과 구간추정(interval estimation)이 있다. 점추정은 표본에서 얻은 정보

Table 3. Comparison of Pavement Image Acquisition and Crack Network Modeling Time

Classification	OCCSM	APCS	ACSTM
Time of image acquisition and crack modeling	6.7 sec/image	0.9 sec/image	3.2 sec/image
95% confidence interval	[6.39, 6.99]	[0.86, 0.94]	[3.14, 3.26]

를 근거로 하여 알려져 있지 않은 모수의 진정한 값이라고 추측되는 값을 단일수치로 나타내는 것을 말하며, 구간추정은 표본을 통해 얻은 평균값으로 신뢰도에 따라 모집단의 평균값이 있을만한 구간을 추정하여 범위로 나타내는 것을 말한다. 본 연구에서는 모집단의 특성을 추정하기 위해 점추정 방법을 이용하였으며, 모평균의 추정을 위하여 최빈값 또는 중앙값 대신 일반적으로 사용되는 산술평균을 이용하였다.

본 연구에서 테스트베드를 이용하여 생산성 측정이 수행될 OCCSM 장비는 반자동 맵핑 방식으로 크랙 네트워크 모델링을 수행하며, APCS 및 ACSTM 장비는 완전자동 맵핑 및 반자동 맵핑 방식으로 크랙 네트워크 모델링을 수행한다. 본 연구에서 각 크랙실링 자동화 장비의 영상획득 및 크랙 네트워크 모델링 시간을 측정된 결과, OCCSM의 평균 모델링 소요시간은 6.7초이며 표준편차 1.5초, APCS의 평균 모델링 소요시간은 0.9초이며 표준편차 0.2초, ACSTM의 평균 모델링 소요시간은 3.2초이며 표준편차 0.3초인 것으로 측정되었고, 각각 정규분포를 따르는 것으로 분석되었다(Table 3).

또한 측정된 3가지 장비의 소요시간을 토대로 신뢰수준 95%에서 신뢰구간을 측정된 결과 OCCSM 장비의 신뢰구간은 [6.39, 6.99], APCS 장비의 신뢰구간은 [0.86, 0.94], ACSTM 장비의 신뢰구간은 [3.14, 3.26]인 것으로 나타났으며, 완전자동 맵핑 방식의 APCS, ACSTM 장비가 반자동 맵핑 방식의 OCCSM 장비와 비교하여 작업시간의 오차범위가 작고 작업 신뢰도가 높은 것으로 분석되었다.

3.3 크랙실링 자동화 장비의 작업 생산성 측정을 위한 테스트베드 설계

크랙실링 자동화 장비의 생산성 측정에 있어 신뢰성 높은 결과를 도출하기 위해서는 동일한 환경조건 하에서 자동화 장비의 생산성이 측정되어야 할 뿐만 아니라, 생산성 측정이 수행될 테스트베드가 실제 도로 환경에 발생한 크랙의 형상이나 빈도를 적절하게 반영하고 있어야 한다. 2009년 도로공사 표준시방서에 따르면 국내 도로의 차로폭은 설계속도 80km/h 이상의 일반도로 및 고속도로에서 최소 3.5m 이상으로 규정한다(Table 4).

또한 2013년 도로현황조서를 분석한 결과, 차로의 수는 일반국도의 경우 2차로(47.5%)와 4차로(46.4%)가 차지하는 비중이 가장 높았으며, 고속도로의 경우 4차로(69.9%)가 차지하는 비중이 가장 높은 것으로 분석되었다(Fig. 5).

따라서 본 연구에서는 2009년 도로공사 표준시방서 및 2013년 도로현황조서를 분석한 결과와 크랙실링 유지보수 전문가의 자문을 얻어 다음 Fig. 6과 같이 폭 3.5m의 4차선으로 구성된 테스트베드(42×14m)를 구성하였다. 도로공사 표준시방서 및 도로현황조서를 토대로 구성된 테스트베드 내의 측정대상 크랙은 국내 도로의

Table 4. Regulations for the Design Criteria of Road Width

Type of road		Minimum width of road (m)			
		Local area	Urban area	Road for compact car	
Highway		3.5	3.5	3.25	
General road	Design speed (km/h)	over 80	3.5	3.25	3.25
		over 70	3.25	3.25	3.00
		over 60	3.25	3.00	3.00
		under 60	3.00	3.00	3.00

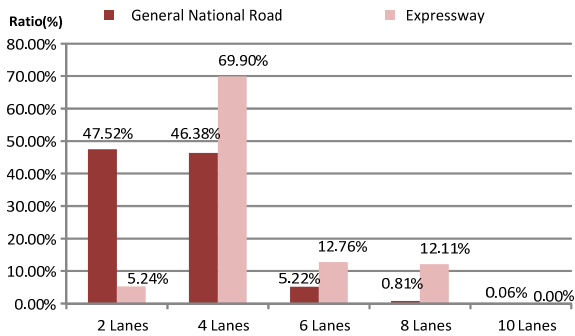


Fig. 5. Lane Status of Domestic Roads by the Grade

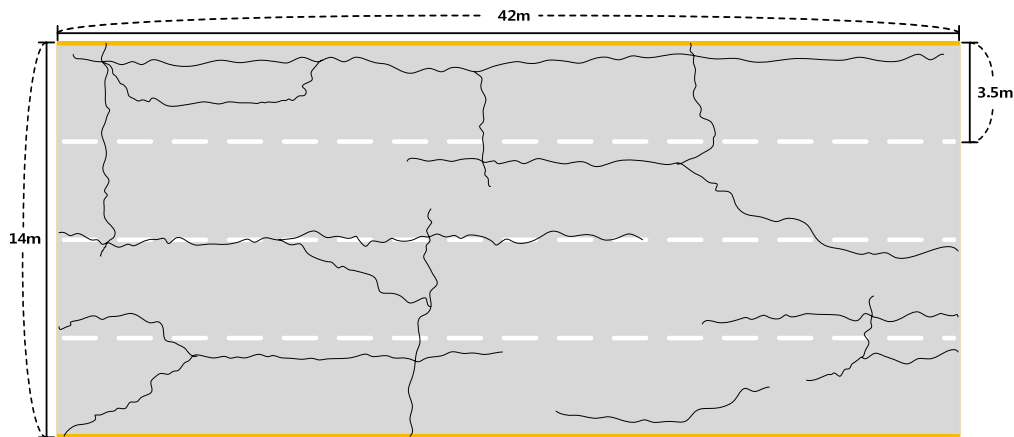


Fig. 6. The Design of Test-bed Reflected Domestic Road Characteristics

크랙발생 상황을 충분히 대표할 수 있어야 하며, 동시에 작업영역 내에 발생된 종방향, 횡방향 및 대각선 크랙 등 다양한 유형의 크랙에 대한 말단장치의 작업능력이 생산성 측정 시 반영되어야 한다. 국내 크랙실링 전문업체인 R사와의 인터뷰, 현장조사 및 문헌고찰 결과, 국내 도로상에 발생하는 크랙의 유형 중 종방향 크랙이 차지하는 비중이 가장 높은 것으로 분석되었으며, 따라서 본 테스트베드를 구성함에 있어 전체 크랙 유형 중 종방향 크랙이 차지하는 비중을 가장 높게 하였다. 또한 다양한 유형의 크랙에 대한 각 자동화 장비 말단장치의 작업능력을 생산성 측정 결과에 반영하기 위하여 국내 R사의 실제 도로면 크랙실링 사례를 바탕으로 전문가 자문을 얻어 테스트베드 내 14개 구간에서 종방향, 횡방향 및 대각선 크랙이 복합적으로 발생하도록 하였으며, 총 길이 161.34m의 측정대상 크랙을 구성하였다.

4. 크랙실링 자동화 장비 생산성 측정 및 결과 비교

4.1 크랙실링 자동화 장비의 작업 소요시간 측정

4.1.1 OCCSM 장비의 작업 소요시간 측정

OCCSM 장비는 4개 차로로 구성된 테스트베드 내의 총 길이 161.34m 크랙을 실링하기 위하여 3.7m×4.0m의 장비 작업영역을 기준으로 작업구간을 분할하며, 테스트베드 내 총 30개의 작업영역을 구성한다. 따라서 OCCSM 장비는 분할된 작업영역에서의 실링 작업 수행을 위해 30번 이동하고 정착하는 것으로 분석되었다(Fig. 7). OCCSM 장비 체원을 토대로 분할된 각 작업영역에서의 동작요소별 소요시간을 측정된 결과, 도로면 영상획득에 201초, 작업 크랙까지의 터렛 이동에 505.2초, 실질적인 실링작업에 1,010.2초, 터렛의 원점 복귀 및 다음 영역으로의 차량 이동에 750.9초가 소요되었다. 따라서 테스트베드 내 발생된 크랙의 총 실링작업 소요시간은 2467.27초인 것으로 분석되었다.

4.1.2 APCS 장비의 작업 소요시간 측정

APCS 장비는 동일한 테스트베드 내 총 길이 161.34m의 크랙을 실링하기 위하여 1.55m×0.9m의 장비 작업영역을 기준으로 작업구간을 분할하며, 테스트베드 내 총 161개의 작업영역을 구성한다. 따라서 APCS 장비는 실링작업을 수행하기 위해 총 161번 이동하고 정차하는 것으로 분석되었다(Fig. 8). 앞서 분석된 장비 제원을

토대로 해당 테스트베드 내에서 APCS 장비의 각 동작요소별 작업 소요시간을 측정된 결과, 도로면 영상획득에 144.9초, 작업 크랙까지의 터렛 이동에 551.0초, 실질적인 실링작업에 896.3초, 터렛의 원점 복귀 및 다음 영역으로의 차량 이동에 1525.2초가 소요되었다. 따라서 APCS 장비의 총 실링작업 소요시간은 3117.48초인 것으로 분석되었다.

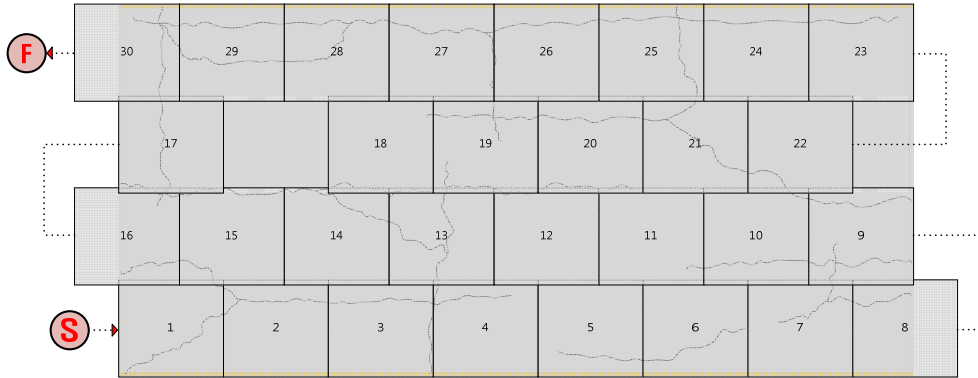


Fig. 7. Simulation Results of OCCSM Operation Within the Test-bed

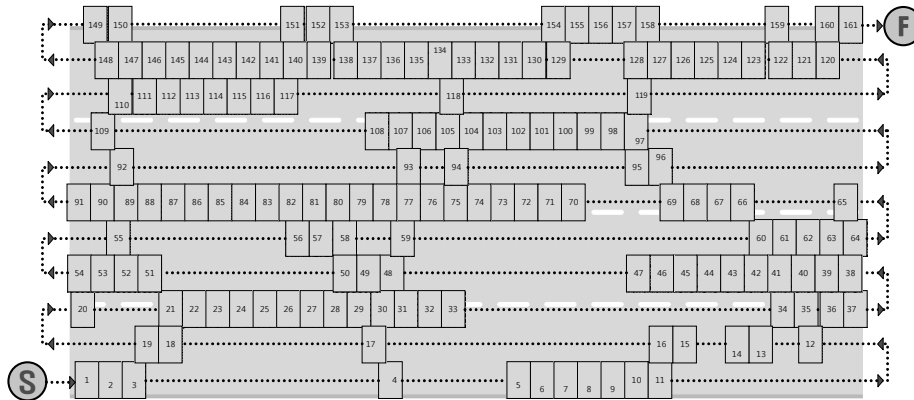


Fig. 8. Simulation Results of APCS Operation Within the Test-bed

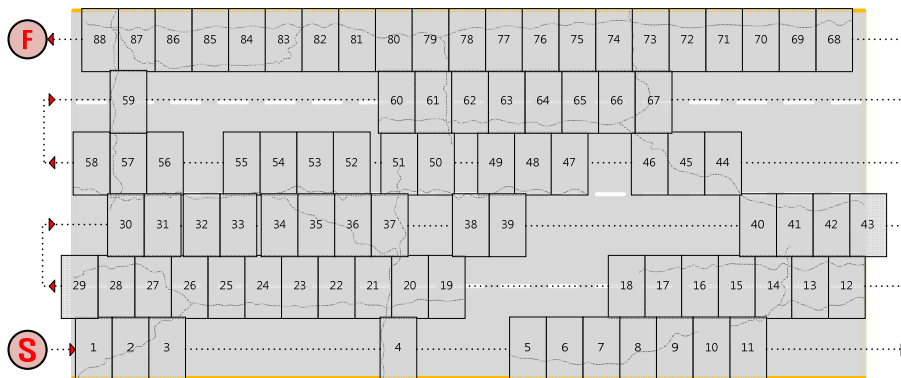


Fig. 9. Simulation Results of ACSTM Operation Within the Test-bed

4.1.3 ACSTM 장비의 작업 소요시간 측정

동일한 조건의 테스트베드에서 총 길이 161.34m 크랙의 실링 작업을 수행하기 위해 ACSTM 장비는 2.4m×1.4m의 장비 작업영역을 기준으로 작업구간을 분할하며, 테스트베드 내 총 88개의 작업영역을 구성한다. 따라서 ACSTM 장비는 실링작업을 수행하기 위해 총 88번 이동하고 정차하는 것으로 분석되었다(Fig. 9). 앞서와 동일한 방법으로 ACSTM의 각 동작요소별 작업 소요시간을 측정된 결과, 도로면 영상획득에 281.6초, 작업 크랙까지의 터렛 이동에 429.94초, 실질적인 실링작업에 896.3초, 작업종료 후 터렛의 원점 복귀 및 다음 영역으로의 장비 이동에 815.6초가 소요되었다. 따라서 ACSTM의 총 작업 소요시간은 2423.55초인 것으로 분석되었다.

4.2 대상 크랙실링 자동화 장비의 작업 생산성 측정 결과 비교

본 연구에서는 제안된 생산성 측정 테스트베드를 기반으로 OCCSM, APCS 및 ACSTM의 작업 소요시간을 측정된 결과 각각 2467.27초, 3117.48초, 2423.55초의 작업시간이 소요되는 것으로 계산되었다. 따라서 각 장비의 작업 생산성(P)은 크랙실링 자동화 장비의 생산성 측정 모델(Fig. 3)에 의해 다음 Table 5와 같이 계산될 수 있다. 이때 OCCSM 장비의 경우 가장 적은 수의 작업영역으로 분할되지만 각각의 작업영역에서 말단장치의 총 이동거리는 ACSTM 장비와 유사하며, 말단장치의 이동속도가 상대

적으로 느리기 때문에 ACSTM 장비와 비교하여 작업 생산성이 낮은 것으로 분석되었다.

이와 같이 계산된 각 장비의 작업 생산성을 8시간 작업기준의 일일 생산성($P_{day} = P \times 60 \times 60 \times 8 \text{ sec/day}$)으로 환산할 경우 OCCSM, APCS 및 ACSTM 장비 각각의 일일 작업 생산성은 1.883km/day, 1.491km/day, 1.917km/day인 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 Table 5에서 도출된 각 장비의 일일 작업 생산성을 토대로 각 크랙실링 자동화 장비의 생산성 달성 비율(Productivity Achievement Ratio; $PAR = \text{Actual Productivity} / \text{Obtainable Productivity}$)을 분석하였다(Table 6). 그 결과 2013년 개발된 ACSTM 장비의 일일 작업 생산성은 2003년 개발된 OCCSM 장비의 일일 작업 생산성 대비 약 1.81% 향상되었으며, 2004년 개발된 APCS 장비의 일일 작업 생산성 대비 약 28.57% 향상된 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구는 국내의 다수의 연구기관에서 개발된 크랙실링 자동화 장비의 작업 생산성을 서로 동일한 조건 내에서 측정하기 위하여 국내 도로 환경이 적절히 반영된 생산성 측정 테스트베드를 설계하고, 각 크랙실링 자동화 장비의 크랙 네트워크 모델링 소요시간과 작업수행에 따른 각 동작요소별 이동시간을 분석하였다. 이 연구에서는 OCCSM, APCS, ACSTM 장비를 대상으로 하였으며 이를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

Table 5. Work Productivity of the Automated Crack Sealers

Name of Equipment	OCCSM	APCS	ACSTM
Total sealed crack length (m)	161.34	161.34	161.34
Image processing time (sec)	201	144.9	281.6
End-effector's movement time (sec)	505.2	551.01	429.94
Crack sealing time (sec)	1010.16	896.34	896.33
End effector's Returning time to the zero point (sec)	623.35	916.87	593.57
Movement time to the next work area (sec)	558.56	1191.69	677.25
Total operational time (sec)	2467.27	3117.48	2423.55
Work productivity (m/s)	0.0654	0.0518	0.0666

Table 6. Productivity Achievement Rate (PAR) of the Each Automated Crack Sealing Machines (Unit : %)

AP \ OP	OCCSM (2003)	APCS (2004)	ACSTM (2013)
OCCSM	100.00	126.29	98.23
APCS	79.18	100.00	77.78
ACSTM	101.81	128.57	100.00

- (1) 본 연구에서 국내의 크랙실링 자동화 장비의 개발현황을 분석한 결과 미국에서는 CMU Laboratory Prototype, UT Filed Prototype, ARMM, ACSM, LCSM, TTLS, OCCSM 등의 크랙실링 자동화 장비가 개발된 바 있으며, 국내에서는 APCS와 ACSTM이 개발된 것으로 조사되었다. 현재까지 국내외에서 개발된 크랙실링 자동화 장비 중에서 중방향 크랙과 횡방향 크랙을 모두 자동화 방식으로 실링할 수 있고, 머신 비전을 사용하여 도로면 영상에서 크랙을 인식할 수 있으며, 실제 자동화 장비 일체가 제작되어 크랙실링 현장에 적용된 크랙실링 자동화 장비는 국내외적으로 4종(ARMM, OCCSM, APCS, ACSTM)의 장비가 존재하는 것으로 분석되었다.
- (2) 크랙실링 자동화 장비의 작업 프로세스를 분석한 결과 작업 크랙까지의 장비 이동, 크랙이 발생된 도로면의 영상획득, 작업 크랙까지의 터렛 이동, 실질적인 실링 작업(블로잉-실링-스퀴징), 작업 종료 후 터렛의 원점 복귀의 5가지 동작요소로 구성되는 것으로 분석되었다. 한편, OCCSM, APCS, ACSTM 3종의 크랙실링 자동화 장비의 동작요소별 이동시간을 분석한 결과 각 자동화 장비의 터렛 운동속도는 각각 0.18m/s, 0.20m/s,

0.21m/s인 것으로 분석되었으며, 원점 및 종료점 간 말단장치 이동속도는 각각 0.16m/s, 0.18m/s, 0.18m/s 인 것으로 분석되었다.

- (3) 본 연구에서 각 자동화 장비의 영상획득 및 크랙 네트워크 모델링 소요시간을 추정한 결과, OCCSM 장비는 반자동 맵핑 방식을 사용하여 평균 6.7초의 작업시간이 소요되는 것으로 분석되었다. APCS와 ACSTM 장비는 완전 자동화 맵핑 방식을 사용하여 각각 평균 0.9초와 3.2초의 작업시간이 소요되는 것으로 분석되었다.
- (4) 본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비의 생산성 비교를 위하여 국내 도로환경이 적절히 반영된 테스트베드를 설계하고자 하였으며, 2009년 도로공사 표준시방서 및 2013 도로현황조서를 토대로 실제 크랙의 형상이 적절히 반영된 폭 3.5m의 4개 차로로 구성된 테스트베드(42m×14m)를 제안하였다.
- (5) 본 연구에서 각 크랙실링 자동화 장비의 제원 및 제안된 테스트베드를 토대로 각 크랙실링 자동화 장비의 작업 생산성을 측정 한 결과, OCCSM, APCS, ACSTM 각 장비의 총 실링작업 소요시간은 2467.27초, 3117.48초, 2423.55초가 소요되는 것으로 분석되었다. 이를 8시간 기준의 일일 생산성으로 환산한 결과 OCCSM 장비는 1.883km/day, APCS 장비는 1.491km/day, ACSTM 장비는 1.917km/day의 생산성을 갖는 것으로 분석되었다. 따라서 가장 최근 국내에서 개발된 ACSTM 장비의 일일 작업 생산성은 OCCSM 장비 대비 약 1.81%, APCS 장비 대비 약 28.57% 향상된 것으로 분석되었다.

생산성 측면의 자동화 장비 성능 분석은 장비의 실제 작업능력을 평가할 수 있는 중요한 성능 분석 요소이다. 본 연구에서 제안한 크랙실링 자동화 장비 생산성 측정을 위한 테스트베드와 각 장비별 생산성 측정 방법은 서로 상이한 지역적, 시간적 조건에서 개발된 크랙실링 자동화 장비의 작업 생산성을 객관적으로 비교·평가할 수 있는 신뢰성 높은 분석 기법으로, 안전성, 품질, 경제성 등 다양한 측면의 종합적인 성능 분석을 위한 데이터로 활용될 수 있다. 특히 크랙실링 자동화 장비 도입으로 인한 경제성 분석 결과의 신뢰성을 향상시키고 이를 기반으로 자동화 장비의 개발투자자, 기술이전을 받은 민간기업, 자동화 장비를 구입하여 사용하게 될

전문 시공업체 등의 의사결정을 지원할 수 있는 중요한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2013R1A1A2058032). 이 논문은 인하대학교의 연구비 지원에 의하여 수행된 것임.

References

- Baker, T. L., Hemmerlin, B. D., Feng, X., Bennett, D. and Velinsky, S. A. (1999). *Development of the operator controlled crack sealing machine - The Long Reach Arm and Control Unit*, AHMCT Research Report No UCD-ARR-99-06-30-02, California AHMCT Research Center, University of California at Davis.
- Bennett, D. and Velinsky, S. A. (2006). *Development of the transfer tank longitudinal sealer*, Performing Organization Report No UCD-ARR-05-12-31-01, California AHMCT Research Center, University of California at Davis.
- Feng, X., Bennett, D. and Velinsky, S. A. (2002). *Vehicle intergration and testing of the operator controlled crack sealing*, AHMCT Research Report No UCD-ARR-02-06-30-06, California AHMCT Research Center, University of California at Davis.
- Kim, Y. S. (2004). *Development and implementation of an automated pavement crack sealer*, Report No. R&D E-01, Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (in Korean).
- Kim, Y. S. (2013). *Development of an automated pavement crack sealing machine based on telescopic manipulator*, Final Report No. NRF-2010-0026774, National Research Foundation (in Korean)
- Kim, Y. S., Hass, C. T., Boehme, K. and Cho, Y. K. (1999). *Implementation of an automated road maintenance machine (ARMM): Lessons from the Field*, Proc. of 16st ISARC, Madrid, Spain, pp. 459-464.
- Lee, J. H., Yoo, H. S., Kim, Y. S. and Cho, M. Y. (2006). *The development of a machine vision assisted, tele-operated pavement crack sealer*, Automation in Construction, Vol. 15, No. 5, pp. 616-626.