

크랙실링 자동화 장비의 개발 및 경제적 타당성 분석

Development of an Automated Pavement Crack Sealing Machine and Its Economic Feasibility Analysis

이 정 호* · 김 영 석** · 이 준 복*** · 정 명 훈 ****

Lee, Jeong-Ho · Kim, Young-Suk · Lee, Jun-Bok · Jeong, Hyung-Hoon

요 약

선진 외국에서는 1990년대 초반부터 재래식 도로면 크랙실링 작업의 생산성 및 안전성, 품질을 향상시키고, 도로 이용자의 간접 비용을 줄이기 위한 하나의 기술적 접근방법으로 도로면 크랙실링 자동화 장비를 개발하기 위해 다양한 연구노력을 수행해 오고 있다. 최근 국내에서도 도로면 크랙실링 공법의 효용성을 인지하고 재래식 크랙실링 작업을 자동화하기 위해 도로면 크랙실링 자동화 장비(APCS)를 개발해 오고 있다. 본 연구에서는 개발된 크랙실링 자동화 장비의 현장 시험시 재래식 방식과 자동화 방식의 생산성을 효과적으로 비교·측정할 수 있는 생산성 측정 모델을 개발하고, 이를 통해 도출된 생산성 데이터를 바탕으로 경제성 분석 기법(편익/비용 비율 분석, 수익률 분석, 손익분기점 분석, 민감도 분석)을 활용하여 자동화 방식을 도입·적용함으로써 얻을 수 있는 경제적 타당성 분석을 수행하고자 한다. 또한, 재래식 크랙실링 방식을 자동화 함으로써 얻을 수 있는 사회적 편익 즉, 교통 혼잡 비용의 감소로 인한 경제적 편익을 시뮬레이션 기법을 활용하여 분석하고자 한다. 이를 통해, 재래식 방식과 비교한 자동화 크랙실링 방식의 경제적 타당성 및 사회적 편익을 정량적으로 분석·제시함으로써 개발된 크랙실링 자동화 장비의 실용화 가능성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

키워드 : 포장도로, 크랙실링, 자동화, 타당성 분석

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

선진 외국에서는 예방적 차원의 도로면 유지보수 방법인 크랙실링 공법의 이점 및 도로면 유지보수 공사의 위험 요소를 인식하여 1990년대 초반부터 크랙실링 자동화 장비의 개발을 위한 다양한 연구를 수행하고 있다. 최근 국내에서도 크랙실링 공법의 효용성에 대한 인식의 전환이 이루어 지고 있으며, 2001년부터 도로면 크랙실링을 위한 자동화 장비를 개발해 오고 있다. 한편, 크랙실링 자동화 장비의 실용화를 위해서는 현장 실험을 통해 도출된 성능 분석 데이터를 바탕으로 자동화 장비 개발로 기

대되는 편익에 대한 분석이 중요하다. 건설자동화 장비 개발 완료 후 재래식 방식과 비교하여 자동화 방식으로 작업 수행 시 시공업체가 얻을 수 있는 경제적 가치와 연계된 성능 분석을 수행하는 것은 개발된 자동화 장비의 실용화 및 확대·보급에 커다란 영향을 줄 수 있다. 그러나 현재까지는 크랙실링 자동화 장비 구동을 위한 하드웨어 및 소프트웨어 측면의 연구개발이 주로 수행되었으며, 자동화 장비 개발로 인해 얻을 수 있는 성능 분석에 대한 연구는 미약한 실정이었다.

따라서 본 연구에서는 개발된 크랙실링 자동화 장비의 현장 시험시 재래식 방식과 자동화 방식의 생산성을 효과적으로 비교 측정할 수 있는 생산성 측정 모델을 개발하고, 이를 통해 도출된 생산성 데이터를 바탕으로 경제성 분석 기법(편익/비용 비율 분석, 수익률 분석, 손익분기점 분석, 민감도 분석)을 활용하여 자동화 방식을 도입·적용함으로써 얻을 수 있는 경제적 타당성 분석을 수행하고자 한다. 또한, 재래식 크랙실링 방식을 자동화 함으로써 얻을 수 있는 사회적 편익 즉, 교통 혼잡 비용의 감소로 인한 경제적 편익을 시뮬레이션 기법을 활용하여 분석하고자 한다. 이를 통해, 재래식 방식과 비교한 자동화 크랙실링 방식의 경제적 타당성 및 사회적 편익을 정량적으로 분석·제시 함으로

*일반회원, 인하대학교 건축학부, 공학박사, inhamr@hotmail.com
 **중신회원, 인하대학교 건축학부 부교수, 공학박사(교신저자), youngsuk@inha.ac.kr
 *** 중신회원, 경희대학교 건축학부 조교수, 공학박사, leejb@khu.ac.kr
 ****일반회원, 인하대학교 건축학부, 공학석사, kasazzang77@hotmail.com
 이 연구는 건설교통부의 연구비 지원에 의한 연구 수행 결과의 일부임(과제 번호: R&D 제안 E-01).

써 개발된 크랙실링 자동화 장비의 실용화 가능성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서 수행한 연구의 범위 및 방법은 다음과 같다.

(1) 크랙실링 자동화 장비 개발 현황 분석

크랙실링 자동화 장비의 생산성을 측정할 수 있는 기초자료를 확보하기 위해 국내에서 개발된 크랙실링 자동화 장비의 개발 현황 즉, 자동화 장비의 구성 요소 및 운영 절차 등에 대한 분석을 선행하였다.

(2) 생산성 측정 모델 개발

재래식 방식과 비교한 크랙실링 자동화 방식의 생산성을 측정하기 위해 자동화 방식의 작업 절차에 따라 소요되는 시간(자동화 장비의 이동시간 및 이미지 프로세싱 시간, 크랙실링 작업소요시간)을 정의하였으며, 분(min)당 작업거리(m)를 측정할 수 있는 생산성 측정 모델을 개발함으로써 일일 생산성을 측정할 수 있도록 하였다.

(3) 경제성 분석

본 연구에서는 자동화 방식의 생산성 도출 결과를 바탕으로 재래식 방식과 비교하여 증감된 일일 투입 노무비 및 장비비를 비교·분석하고, 자동화 장비의 개발로 인해 추가적으로 투입되는 비용을 분석하였다. 증감된 편익과 비용을 바탕으로 편익/비용 비율, 수익률, 손익분기점, 민감도 분석을 수행함으로써 자동화 장비 개발로 인한 경제적 타당성을 제시할 수 있도록 하였다.

(4) 사회적 편익(교통 혼잡비용 감소) 분석

본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비 개발 및 사용으로 인한 투입 노무비 및 장비비의 감소로 얻을 수 있는 경제적 가치뿐만 아니라 크랙실링 작업 시간의 단축으로 인해 얻을 수 있는 교통 혼잡비용 감소(차량운행비용 절감, 통행 시간 절감 편익) 효과를 시뮬레이션 기술을 활용하여 도출할 수 있도록 하였다.

2. 크랙실링 자동화 장비의 기술개발 및 현장 실험

2.1 크랙실링 자동화 장비의 개발 현황

북미나 유럽과 같은 선진 외국에서는 크랙실링을 자동화하기 위해 산학연을 중심으로 크랙실링 자동화 장비의 모체 개발과

크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 알고리즘, 경로계획 알고리즘 등을 개발하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 특히, 미국에서는 CMU Laboratory Prototype(1990), CMU-UT Field Prototype(1992), CalDavis Field Prototype(1993), UT Field Prototype(1995), UT ARMM(1999) 등과 같은 크랙실링 자동화 장비를 연구·개발하여 상용화 단계에 이르고 있는 것으로 분석되었다.

국내에서는 도로면 유지보수 공법 중 크랙실링 공법의 자동화를 통해 노무자의 안전사고를 예방하고, 품질 및 생산성을 향상시키기 위해 2001년부터 2004년 중반까지 산학연 공동연구개발 사업으로 도로면 크랙실링 자동화 장비(APCS: Automated Pavement Crack Sealer)의 프로토타입을 개발하였다(그림 1). APCS는 그림 1과 같이 1)견인 및 장비 제어를 위한 컴퓨터와 모니터가 탑재된 이동차량, 2)170~180℃의 실런트(Sealant)를 공급해 주는 실런트 멜터 및 3)실질적인 크랙실링 작업을 수행하는 모체(크랙실러)로 구성된다. APCS는 국내 도로면 크랙실링에 관한 시방 규정에 따라 도로면에 3mm 이상 크랙이 존재할 경우, CCD 카메라를 통해 입력된 도로면 영상을 이진화 및 노이즈 제거 알고리즘을 이용하여 크랙 이외의 노이즈를 완벽하게 제거할 수 있다. 또한 APCS의 발단장치(Turret)가 크랙의 중앙(Spine)을 따라 일정량의 실런트를 신속하고 정확하게 분사하도록 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 알고리즘, 패스 플래닝(Path Planning) 알고리즘을 개발하였다.

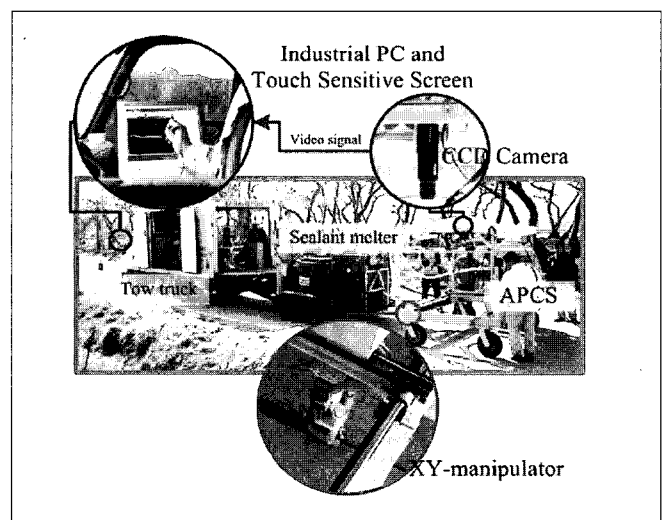


그림 1. 국내 도로면 크랙실링 자동화 장비(APCS)

한편, APCS는 다음과 같은 운영절차에 의해 도로면에 발생된 크랙을 효과적으로 크랙실링 할 수 있도록 개발되었다(그림 2).

1) 도로면에 크랙실링 대상인 종방향, 횡방향, 블록 크랙이 존재하면 노무자는 시방서 규정에 따라 크랙을 폭 1.2~2cm × 깊

이 2~2.5cm로 커팅한다.

2) 크랙실링 자동화 장비 상단에 부착된 CCD 카메라를 통해 도로 및 크랙 이미지가 획득(Image Acquisition)되며 이는 시스템 운영자의 모니터 상에 컴퓨터 내의 프레임 그레버(Frame Grabber)를 통해 실시간으로 입력된다.

3) 시스템 운영자는 실시간으로 입력된 모니터 상의 도로 영상에서 크랙의 유무를 파악하여 크랙이 존재하면 크랙실링 자동화 장비를 정지시킨다.

4) 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링을 완전 자동으로 수행하기 위해 이진화 및 노이즈 제거 알고리즘을 이용하여 크랙 이외의 노이즈를 완벽하게 제거한다. 한편, 반자동으로 크랙 맵핑 및 네트워크 모델링을 수행할 때에는 이진화 과정만을 수행한다.

5) 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링 알고리즘을 이용하여 크랙 네트워크의 중앙선을 추출하고, 크랙실링 자동화 장비의 말단장치 위치를 모델링 결과에 따라 구동시키기 위해 크랙 네트워크의 좌표를 일정간격으로 컴퓨터 메모리에 저장한다.

6) 컴퓨터는 크랙 네트워크 모델링 결과로부터 얻어진 좌표값을 토대로 최적의 경로계획을 자동으로 수립한다.

7) 최적의 경로 계획에 따라, 크랙실링 자동화 장비의 말단장치는 공기청소, 실런트 주입, 스퀴즈 작업을 동시에 수행하며 위 과정은 해당 일의 크랙실링 작업이 완료될 때까지 반복된다.

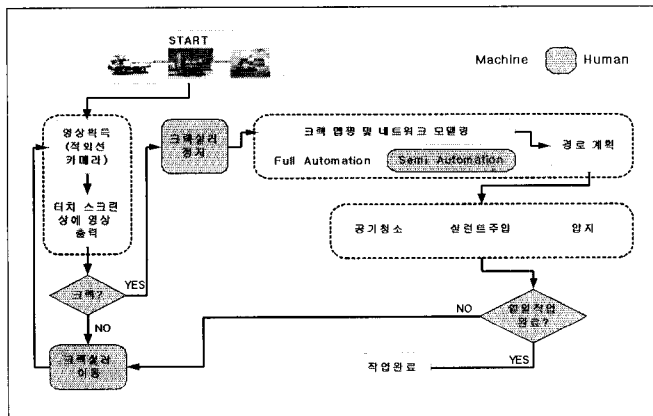


그림 2. 크랙실링 자동화 장비의 운영 절차

국내외에서 개발된 도로면 크랙실링 자동화 장비의 실용화 및 확대·보급을 위해서는 현장실험을 통해 얻은 생산성 데이터를 바탕으로 재래식 방식과 비교한 자동화 방식 성능의 우수성을 입증하는 것이 요구된다. 이를 위해 본 연구에서는 재래식 방식과 자동화 방식의 생산성을 측정할 수 있는 생산성 측정 모델의 개발 및 도출된 생산성 데이터를 바탕으로 재래식과 자동화 방식의 경제적 타당성을 분석할 수 있도록 하였다.

2.2 현장 실험을 통한 크랙실링 자동화 장비의 생산성 측정 모델 개발

본 연구에서 제시하고 있는 크랙실링 자동화 방식의 생산성 측정 모델은 크랙실링 작업을 수행하는 자동화 장비의 작업(동작)요소에 따라 분류된 그림 3의 세 가지 구성요소를 기반으로 각 단위 작업에 소요되는 작업시간을 측정할 수 있도록 구성되었다.

(1) 이동시간

이동 시간(Component 1)은 크랙실링 작업구간 내에서 자동화 장비가 이동하는데 소요되는 모든 시간이다. 자동화 장비의 이동시간(T)은 작업영역과 작업영역 간의 이동시간(Ta), 작업영역 내에서 터렛이 원점으로부터 실링되어질 첫 번째 크랙 라인까지 이동하는 시간(Tb)과 크랙실링 작업이 완료된 후 종료점에서 터렛이 원점으로 복귀하는데 소요되는 시간(Tc)이다. 한편 작업중 차량 이동시간(Ta)과 터렛의 원점복귀시간(Tc)은 동시에 발생하는 시간이므로 크랙실링 자동화 방식의 생산성 측정을 위해 길게 소요되는 작업 시간만을 고려될 수 있도록 하였다.

■ 이동시간(Component 1)

만약 $Ta > Tc$ 라면, 이동시간(T) = $Ta + Tb$

만약 $Ta < Tc$ 라면, 이동시간(T) = $Tb + Tc$

(2) 이미지 프로세싱 시간

이미지 프로세싱 시간(Component 2)은 크랙실링 자동화 장비로 크랙실링 작업을 수행하기 위해 선행되는 작업 시간으로 도로면 영상 이진화 및 노이즈제거, 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링, 경로계획에 소요되는 시간이다. 이미지 프로세싱 시간(I)에는 도로면 이미지 촬영시간(Ia) 및 촬영한 이미지를 영상처리(이진화, 노이즈제거, 크랙 네트워크 맵핑 및 모델링)하는 시간(Ib), 경로계획 시간(Ic)이 포함된다.

■ 이미지 프로세싱 시간(Component 2)

$$I = Ia + Ib + Ic$$

(3) 크랙실링 작업소요시간

크랙실링 작업소요시간(Component 3)은 크랙실링 자동화 장비가 직접 크랙을 실링하는 데 소요되는 작업시간이다. 재래식 크랙실링 작업의 경우 크랙 네트워크를 고압의 공기로 블로잉하고 실런트를 주입하며, 주입된 실런트를 스퀴징하는 과정이 시간적인 흐름에 의한 순차작업이었으나, 자동화 크랙실링 방식의 경우 상기의 모든 작업이 하나의 터렛에 의해 동시 병행작업으로

로 수행된다. 이때 소요되는 작업시간(S)은 크랙실링 자동화 장비의 기계적인 운동성능 즉, 터렛의 이동속도에 따라 영향 받는다.

■ 크랙실링 작업소요시간(Component 3)

S = 블로잉, 실링, 스쿼징 작업시간

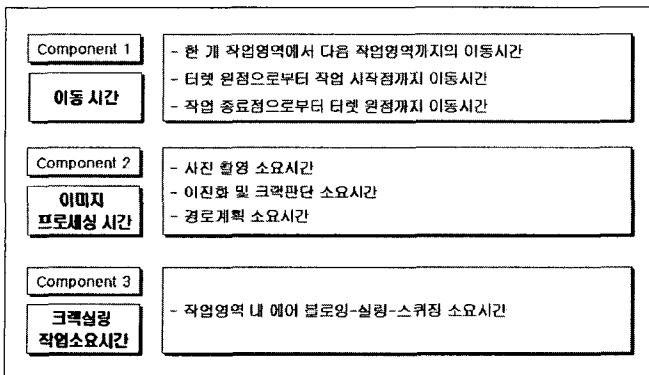


그림 3. 자동화 크랙실링 방식 생산성 측정모델의 구성요소

(4) 크랙실링 자동화 장비의 생산성 측정모델(Productivity Measurement Model)

개발된 크랙실링 자동화 장비의 생산성을 측정하기 위해서는 하나의 작업영역에 속해있는 크랙들을 실링하는 데 소요되는 시간이 측정되어야 한다. 작업영역의 크랙들을 실링하는 데 소요되는 작업시간은 앞서 제시한 각 구성요소(이동시간, 이미지 프로세싱 시간, 크랙실링 작업 소요시간)를 수행하는데 소요되는 시간들의 합으로 산출될 수 있다. 본 연구에서는 개발된 크랙실링 자동화 장비의 생산성을 측정하기 위해 그림 4와 같은 생산성 측정모델을 구축하였다. 크랙실링 자동화 장비의 일일 생산성은 작업영역 생산성에서 도출된 단위시간(분)당 생산성에 일일 작업시간을 곱하여 산출될 수 있다.

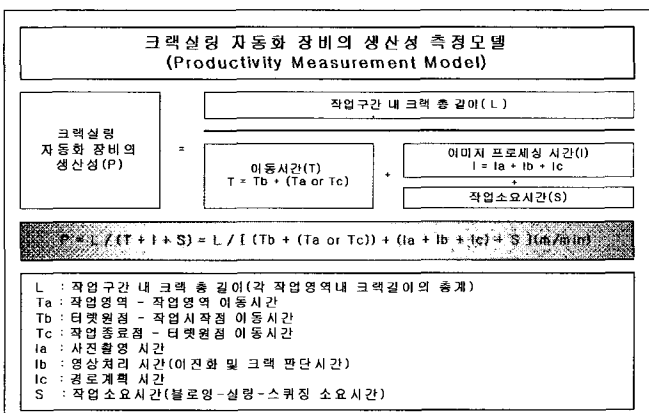


그림 4. 크랙실링 자동화 장비의 작업영역 생산성 측정모델

2.3 크랙실링 자동화 장비의 현장 실험 및 생산성 측정

(1) 재래식 크랙실링 방식의 생산성

2차례에 걸친 현장 생산성 측정결과, 재래식 크랙실링 방식의 작업 팀은 일반적으로 차량 2대, 실린트 펌터 1대, 노무자 12명으로 구성되며, 표 1과 같이 작업 1팀이 1일 8시간의 작업시간 동안 평균 1.21km 정도의 크랙실링 작업을 수행하는 것으로 조사되었다(일당 생산성 1.21km/일). 또한, 크랙실링 전문시공업체의 인터뷰 결과, 1일 1.0~1.2km의 작업물량을 수행하고 있는 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구에서는 자동화 크랙실링 방식과 비교·분석하기 위한 재래식 방식의 생산성을 1.2km/일로 산정하였다.

표 1. 재래식 크랙실링 방식의 현장 생산성 측정결과

구분	1차 현장 생산성	2차 현장 생산성	평균 생산성
작업영역 생산성	2.58m/min	2.46m/min	2.52m/min
일당 생산성	1.24km/day (=2.58m/min×480min/day)	1.18km/day (=2.46m/min×480min/day)	1.21km/day

(2) 자동화 크랙실링 방식의 생산성

생산성 데이터는 날씨 및 장소, 주변현황 등과 같은 측정 환경이나 기타 여건에 따라 많은 영향을 받으므로 본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비의 생산성 측정을 위해 재래식 방식의 현장 생산성 측정 시의 노면 상태나 날씨 조건 등과 유사하게 작업 환경과 여건을 설정하였으며, 자동화 장비가 프로토타입 장비라는 점과 현장실험 참여자와 노무자의 안전성 등을 고려하여 교통량이 비교적 적은 국도를 실험구간으로 선정하였다.

크랙실링 자동화 장비의 생산성 측정을 위해 현장실험에 투입된 노무자 및 장비의 구성은 표 2와 같다.

표 2. 크랙실링 자동화 장비의 생산성 측정 시 투입자원 구성

노무자(명)		투입장비(대)	
차량 운전자	1	견인차량	1
커팅 노무자	1	실린트 펌터	1
청소 및 잔재처리	1	자동화 장비	1
실린트 펌터 담당자	1	기타 장비	
탈크	1		
작업반장	1		
총 계	6		

현장실험을 위한 테스트 크랙의 총 길이는 가로방향 4.0m, 세로방향 34.9m이며, 세로방향 크랙의 마지막 테스트 구간에서는 세로방향 크랙과 겹치는 가로방향 크랙을 두 개소에 설치하여 크랙이 중첩되는 구간에서의 생산성 측정을 함께 수행하였다(그림 5).

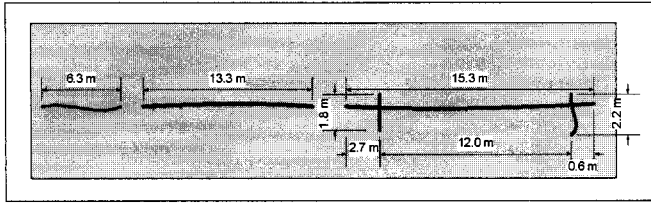


그림 5. 현장실험을 위한 테스트 크랙 형태

현장실험에 사용된 자동화 장비의 실 작업영역은 가로 1.55m × 세로 0.9m이며, 다양한 크랙들의 이미지 프로세싱에 소요되는 시간을 측정된 결과, 최대 평균 이미지 촬영에 0.1초, 영상처리에 0.5초, 경로계획에 0.3초가 소요되는 것으로 측정되었다. 또한, 사전 제어실험 및 현장실험 결과, 시공 품질을 만족시키면서 작업을 수행할 수 있는 터렛의 이동속도는 0.18m/sec, 비작업시(원점-작업시작점, 작업종료점-원점 이동 시) 터렛의 이동속도는 0.20m/sec인 것으로 분석되었다. 현장실험 결과, 크랙실링 자동화 장비를 견인하는 작업차량의 운전자가 머신비전 및 제어 시스템을 통해 크랙 이미지를 인식하면서 다음 작업영역으로 이동하는 속도는 크랙 연속구간에서 약 1.0km/hour인 것으로 측정되었다. 현장실험에 투입된 크랙실링 자동화 장비의 제원(parameter) 및 처리속도는 표 3과 같다.

표 3. 현장실험에 투입된 크랙실링 자동화 장비의 제원

항 목		제원 및 처리속도
실 작업영역	가로	1.55m
	세로	0.90m
이미지 프로세싱	이미지 촬영	0.1sec/image
	영상처리	0.5sec/image
	경로계획	0.3sec/image
	계	0.9sec/image
터렛 이동속도	원점-작업시작점 이동	20cm/sec
	작업종료점-원점 이동	
	크랙실링 작업	18cm/sec
차량 이동속도		1.0km/hour
원점-작업 크랙간 거리		0.78m
원점복귀 작업거리		1.19m

크랙실링 자동화 장비의 현장 생산성 측정결과, 크랙길이 38.9m(가로방향 4.0m, 세로방향 34.9m)를 작업하기 위하여 자동화 장비는 총 44번의 정차를 하였으며, 44개 작업영역의 평균 생산성은 제안된 생산성 측정모형을 토대로 3.3m/min로 측정되었다.

■ 크랙실링 자동화 장비의 작업영역 생산성(P)

$$P = L / (T + I + S) = L / [(T_b + (T_a \text{ or } T_c)) + (I_a + I_b + I_c) + S]$$

$$= 38.9m / [(173 + 262) + 40 + 216]$$

$$= 38.9m / 691sec$$

$$= 0.057m/sec \rightarrow 3.3m/min$$

작업영역 생산성을 일일 생산성으로 환산하면 1.59km/일 (=3.3m/min × 480min/day)이 산출되며, 재래식 방식의 생산성인 1.2km/일과 비교해볼 때 0.39km/일(1일 390m 추가 작업 가능)가 높은 것으로 분석되었다.

3. 현장 실험을 통한 크랙실링 자동화 장비 개발의 경제성 분석

3.1 경제성 분석을 위한 투입 비용 분석

(1) 노무비

재래식 방식의 경우 크랙실링 시공업체와의 인터뷰 결과, 작업방식과 품질기준, 작업여건 등에 따라 약12~13명의 노무자가 투입되는 것으로 조사되었으나 본 연구에서는 최소 투입인원을 기준으로 하여 작업반장(포장공) 1명, 커팅 및 잔재처리를 수행하는 특별인부(숙련공) 1명과 보통인부 1명, 차량 운전원 2명, 실린트 펠터 담당자 1명, 공기청소를 수행하는 특별인부(숙련공) 1명, 실린트 주입자(포장공) 1명, 스쿠즈 담당자(포장공) 1명, 양생 작업 보통인부 1명, 교통통제를 수행하는 보통인부 2명, 총 12명이 투입되는 것으로 설정하였다. 반면, 크랙실링 자동화 방식의 노무인원은 작업반장(포장공) 1명, 커팅 및 잔재처리를 수행하는 특별인부(숙련공) 1명과 보통인부 1명, 실린트 펠터 및 자동화 장비가 연결된 차량을 운전하며 맵핑 및 제어 프로그램을 조작하는 운전원 1명, 실린트 펠터 담당자 1명, 양생을 위해 크랙실링 면에 탈크를 뿌리는 보통인부 1명 총 6명으로 구성된다. 따라서 크랙실링 자동화 장비의 활용을 통해 재래식 크랙실링 작업에 투입되는 12명의 노무자 중 6명을 절감할 수 있다. 이로 인

표 4. 재래식 크랙실링 방식과 자동화 방식의 노무비용 비교·분석

구분	재래식 방식			자동화 방식		
	인원(명)	단가(원)	비용(원)	인원(명)	단가(원)	비용(원)
포장공	3	83,276	249,828	1	83,276	83,276
건설기계 운전기사	1	78,015	78,015	1	78,015	78,015
운전원	2	63,443	125,886	1	63,443	63,443
특별인부	2	66,051	132,102	1	66,051	66,051
보통인부	4	52,374	209,496	2	52,374	104,748
소계	12	-	795,327	6	-	395,533

자동화 크랙실링 방식의 1일 노무비 절감액 = 795,327 - 395,533 = 399,794원

한 노무비 절감액은 대한건설협회에서 매년 상·하반기에 발표하는 '2004년 상반기 적용 건설업 임금실태 조사 보고서' 중 포장공, 건설기계운전기사(실린트 펌터 담당자), 운반차 운전원, 특별인부(숙련공), 보통인부의 시중노임 단가를 적용한 결과 표 4와 같이 399,794원/일로 산출되었다.

(2) 장비비

한편, 재래식 크랙실링 방식에 투입되는 장비로는 실린트 펌터, 공기청소를 위한 에어 컴프레셔와 발전기를 탑재하고 실린트 펌터를 견인하는 3.5톤 트럭, 차량통제용 싸인보드(Sign Board)를 가동하기 위해 발전기가 탑재된 2.5톤 트럭이 요구된다. 그러나 자동화 크랙실링 방식의 경우, 자동화 장비가 노무인원을 대체하기 때문에 안전성 확보를 위해 투입되었던 차량통제용 2.5톤 트럭이 요구되지 않는다. 따라서 재래식 크랙실링 방식과 비교하여 자동화 방식의 경우 표 5와 같이 250,000원/일의 장비비 절감효과가 있는 것으로 분석되었다.

표 5. 재래식 크랙실링 방식과 자동화 방식의 장비 비용 비교·분석

구분	재래식 방식			자동화 방식		
	수량 (대)	단가 (원/일)	비용 (원/일)	수량 (대)	단가 (원/일)	비용 (원/일)
2.5톤 트럭	1	120,000	120,000	-	120,000	-
3.5톤 트럭	1	150,000	150,000	1	150,000	150,000
실린트 펌터	1	250,000	250,000	1	250,000	250,000
발전기	2	130,000	260,000	1	130,000	130,000
에어 컴프레셔	1	150,000	150,000	1	150,000	150,000
소계			930,000			680,000
자동화 크랙실링 방식의 1일 장비비 절감액 = 930,000 - 680,000 = 250,000원						

3.2 경제성 분석

(1) 경제성 분석을 위한 기본 가정 및 변수 설정

본 연구에서는 현장 조사 결과를 바탕으로 재래식 방식과 자동화 방식의 경제성 분석을 위해 요구되는 기본적인 가정 및 변수를 표 6과 같이 설정하였다. 이를 바탕으로 경제성 분석 기법인 편익/비용 비율 분석 및 수익률 분석, 손익분기점 분석, 민감도 분석을 수행하여 개발된 크랙실링 자동화 장비의 경제적 타당성 분석을 수행하였다.

(2) 크랙실링 자동화 장비 도입에 따른 연간 발생편익 분석

현장실험을 통한 생산성 측정 결과, 재래식 방식은 1.2km/일, 자동화 방식은 1.59km/일의 생산성 결과가 도출되었으며, 변수

표 6. 경제성 분석을 위한 변수 및 가정

변수 및 가정	설정값	설정 근거
연간 최소 작업 일수	100일 (1개 현장 작업/일)	• 크랙실링 전문업체와 인터뷰를 통한 연간 작업물량 및 강수일 수 고려
예상 수명	10년	• 개발업체 전문가와의 인터뷰
제작 비용	72,000,000원	
유지보수 비용	1-5년 제작비용의 5% 6-10년 제작비용의 10%	• 자동화 장비 수명을 기준으로 초기에는 5%, 중·후기에는 10%적용
최소기대수익률	10%	• 시공업체의 최소기대수익률

및 가정에서 연간 작업 가능일수를 100일로 설정하였다. 따라서 크랙실링 시공업체가 재래식 방식으로 연간 작업할 수 있는 크랙실링 물량이 120km(=100일×1.2km/일)이고, 시공업체가 자동화 장비를 이용하여 크랙실링 작업을 수행할 경우 약75일(=120km÷1.59km/일)만에 동일 물량의 작업을 수행할 수 있다. 따라서 재래식 방식과 자동화 크랙실링 방식의 연간 투입비용을 분석한 결과 표 7과 같이 자동화 장비 도입에 따라 91,867,725원의 편익이 발생하는 것으로 분석되었다.

표 7. 재래식 방식과 자동화 방식의 연간 작업투입비용 비교·분석

구분	재래식 방식			자동화 방식		
	수량 (대)	단가 (원/일)	비용 (원/일)	수량 (대)	단가 (원/일)	비용 (원/일)
2.5톤 트럭	1	120,000	120,000	-	120,000	-
3.5톤 트럭	1	150,000	150,000	1	150,000	150,000
실린트 펌터	1	250,000	250,000	1	250,000	250,000
발전기	2	130,000	260,000	1	130,000	130,000
에어 컴프레셔	1	150,000	150,000	1	150,000	150,000
소계			930,000			680,000
자동화 크랙실링 방식의 1일 장비비 절감액 = 930,000 - 680,000 = 250,000원						

(3) 편익/비용 비율 분석

자동화 크랙실링 방식의 추가비용을 고려하지 않고 발생편익만으로 경제적 타당성을 분석할 수 없으므로 크랙실링 자동화 장비 도입에 따른 연간 발생편익(91,867,725원)과 크랙실링 자동화 장비의 연간 추가비용을 상호 비교·분석하였다. 자동화 방식의 연간 추가비용은 자동화 장비 제작비용과 연간 유지보수 비용으로 이루어진다. 변수 및 가정에서 크랙실링 자동화 장비 1대 제작비용은 72,000,000원, 연간 유지보수 비용은 1~5년간 3,600,000원(제작비용의 5%), 6~10년간 7,200,000원(제작비용의 10%)이 소요되고 예상수명 10년이 경과한 후 크랙실링 자동화 장비의 처분가치 및 잔존가치는 없는 것으로 설정하였다. 그림 6은 크랙실링 자동화 방식의 연간 추가비용과 발생편익을

현금 흐름도(cash flow diagram)로 나타낸 것이다.

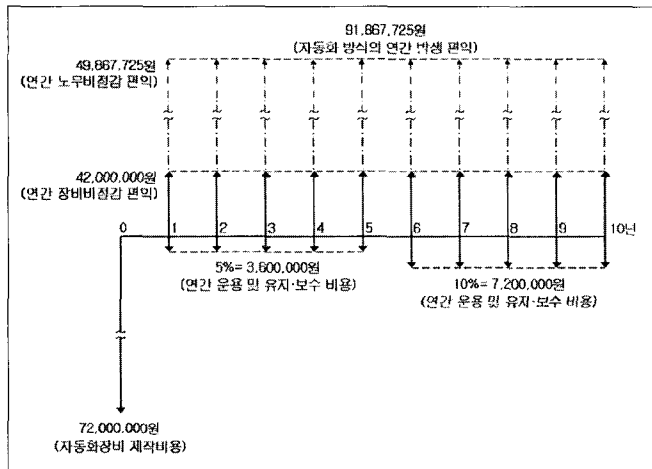


그림 6. 크랙실링 자동화 방식의 현금 흐름도

편익/비용 비율(benefit/cost ratio) 분석이란 투자 대안에 따라 발생하는 편익의 현재가치(PW; Present Worth)와 소요되는 비용의 현재가치와의 비율 즉, 편익/비용 비율을 산출하여 경제적 채산성을 판단하는 일반적인 경제성 분석방법이다. 발생편익이 소요비용보다 클 경우 즉, 편익/비용 비율이 1보다 클 경우 그 투자 대안은 충분히 경제적 타당성이 있다고 판단할 수 있다.

자동화 크랙실링 방식의 경제성 분석을 위해 현금 흐름도를 바탕으로 편익/비용 비율을 산출하면 다음과 같다.

- 발생편익의 현재가치(PW of benefits)

$$= 91,867,725(P/A, 10\%, 10) = 91,867,725 \times 6.1446$$

$$= 564,490,423\text{원}$$
- 추가비용의 현재가치(PW of cost)

$$= 72,000,000 + 3,600,000(P/A, 10\%, 5) + (7,200,000(P/A, 10\%, 10) - 7,200,000(P/A, 10\%, 5))$$

$$= 72,000,000 + 7,200,000(P/A, 10\%, 10) - 3,600,000(P/A, 10\%, 5)$$

$$= 72,000,000 + (7,200,000 \times 6.1446) - (3,600,000 \times 3.7908)$$

$$= 102,594,240\text{원}$$
- 편익/비용 비율(Benefit/Cost Ratio)

$$= \text{PW of benefit} \div \text{PW of cost}$$

$$= 564,490,423 \div 102,594,240$$

$$= 5.50 > 1$$

편익/비용 비율 분석 결과, 편익/비용 비율이 1보다 큰 5.50이

산출되었다. 따라서 크랙실링 자동화 장비를 도입하는 경우 추가 소요되는 비용보다 발생하는 편익이 더 크므로 경제성을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다.

(2) 수익률 분석

수익률(투자회수율) 분석은 사업이나 투자안에 대한 편익과 비용의 현재가치의 차이 즉, 순 현재가치(net present worth)를 0으로 만드는 할인율인 수익률을 구하는 경제성 분석 방법이다. 크랙실링 자동화 장비에 대한 투자 가치를 지니기 위해서는 수익률이 최소기대 수익률인 10% 이상이 되어야 한다.

■ 수익률(I)

$$NPW = \text{PW of benefits} - \text{PW of cost}$$

$$= 91,867,725(P/A, I, 10) - (72,000,000 + 7,200,000(P/A, I, 10) - 3,600,000(P/A, I, 5))$$

$$= 84,667,725(P/A, I, 10) + 3,600,000(P/A, I, 5) - 72,000,000 = 0$$

$$\therefore I = 122.5\% > 10\%(MARR)$$

결과적으로, NPW=0을 만족하는 수익률은 122.5% 이므로 가정 및 변수에서 설정한 최소기대수익률인 10%를 크게 상회하는 것으로 분석되었다.

(3) 손익분기점 분석

손익분기점 분석은 자동화 장비 개발을 위한 투자 후 얼마 만에 손익 분기점에 도달하는지를 파악하는 분석 방법으로 자동화 장비 개발로 인한 총이익이 자동화 장비 개발을 위해 투입된 총 투자분을 초과하는 시점(PW of cost = PW of benefit)을 의미한다. 즉, 자동화 장비 개발을 위한 총 투자 비용의 현재가치와 이익의 현재가치가 같아지는 n 값이 손익분기점이 된다. 크랙실링 자동화 장비의 제작비용과 연간 유지 보수비용의 현재가치는 102,594,240원으로 분석되었으므로 최소기대수익률을 10%라고 할 때 약 15개월 만에 투자한 자본을 회수하고 이익이 발생하는 것으로 분석되었다.

■ 손익분기점(n)

$$\text{PW of cost} = \text{PW of benefits}$$

$$102,594,240 = 91,867,725(P/A, 10\%, n)$$

$$(P/A, 10\%, n) = 102,594,240 \div 91,867,725 = 1.1168$$

$$\therefore n = 1.24 \rightarrow 1\text{년 } 3\text{개월}(15\text{개월})$$

(4) 민감도 분석

자동화 장비 개발의 타당성 분석 시 경제성 분석 결과 값은 설

정된 가정 및 변수의 변화에 따라 영향을 받는다. 설정된 가정 및 변수는 자동화 장비 개발 및 도입 업체의 연간 작업 물량과 여건에 따라 차이가 발생할 수 있으므로 가정 및 변수의 변화에 따른 경제성 분석 결과 값의 변화를 분석할 수 있는 민감도 분석(Sensitivity Analysis)이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 설정된 가정 및 변수 중 최소기대수익률이 10%일 때 경제성 분석 결과 값에 크게 영향을 미치는 연간 작업가능일수(50~200일)와 노무 절감 인원(5~7인)의 변화에 따른 편익/비용 비율 및 수익률, 손익분기점의 변화에 대한 민감도 분석을 표 8과 같이 수행하였다.

표 8. 최소기대수익률이 10%일 때, 연간 작업 가능일수와 노무절감 인원 변화에 따른 민감도 분석

연간 작업 가능 일수 (일)	5인 절감				6인 절감				7인 절감			
	편익/비용 비율	공사비 절감율 (%)	수익률 (%)	손익분기점 (개월)	편익/비용 비율	공사비 절감율 (%)	수익률 (%)	손익분기점 (개월)	편익/비용 비율	공사비 절감율 (%)	수익률 (%)	손익분기점 (개월)
50	2.60	31.0	54	34	2.72	33.3	57	33	2.84	35.6	60	31
60	3.16	34.8	68	28	3.30	37.1	71	26	3.44	39.4	74	25
70	3.65	36.7	79	24	3.82	39.0	83	23	3.99	41.3	87	22
80	4.21	38.9	92	20	4.40	41.1	97	19	4.59	43.4	101	19
90	4.71	39.9	104	18	4.92	42.1	109	17	5.13	44.4	114	17
100	5.27	41.3	117	16	5.50	43.6	122	15	5.74	45.8	128	15
110	5.76	41.9	128	15	6.02	44.2	135	14	6.28	46.5	141	13
120	6.32	42.9	141	13	6.60	45.2	148	13	6.88	47.5	155	12
130	6.81	43.3	153	12	7.12	45.6	160	12	7.43	47.9	167	11
140	7.37	44.1	166	11	7.70	46.3	174	11	8.03	48.6	181	11
150	7.87	44.3	177	11	8.22	46.6	186	10	8.58	48.9	194	10
160	8.43	44.9	190	10	8.80	47.2	199	10	9.18	49.5	208	9
170	8.92	45.1	202	9	9.32	47.4	211	9	9.72	49.7	220	9
180	9.48	45.6	215	9	9.90	47.9	225	9	10.33	50.1	234	8
190	9.97	45.7	226	9	10.42	48.0	237	8	10.87	50.3	247	8
200	10.53	46.1	239	8	11.00	48.4	250	8	11.47	50.7	261	7

한편, 그림 7~9와 같이 연간 작업 일수와 노무 절감 인원의 변화에 따른 편익/비용 비율 및 수익률, 손익분기점 변화를 도표화함으로써 설정된 가정 및 변수(작업가능일수 50~200일, 노무인원 5~7인 절감) 이외 값들의 변화에 따른 결과 값을 예측·분석할 수 있도록 하였다.

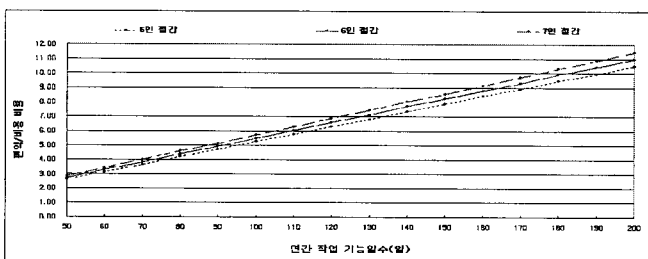


그림 7. 연간 작업 일수와 노무 절감 인원의 변화에 따른 편익/비용 비율 변화

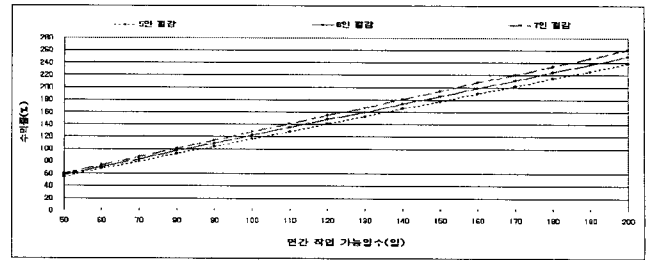


그림 8. 연간 작업 일수와 노무 절감 인원의 변화에 따른 수익률 변화

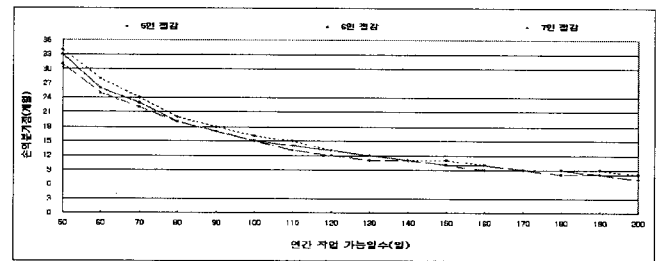


그림 9. 연간 작업 일수와 노무 절감 인원의 변화에 따른 손익분기점 변화

4. 크랙실링 자동화 장비 도입에 따른 사회적 편익(혼잡비용) 분석

교통 혼잡비용(traffic congestion cost)이란 도로를 주행하는 차량들이 교통 혼잡으로 인해 정상속도(교통 혼잡비용 추정 기준속도) 이하로 운행하게 됨으로써 발생하는 차량 운행비용 증가와 시간가치비용 손실 등과 같이 추가적으로 발생하는 비용을 의미한다. 즉, 교통 혼잡비용은 도로 차량정체로 인해 추가적으로 발생하는 사회적 한계비용(social marginal cost)의 합으로 교통량이 도로 용량 한계를 넘는 도로에 추가적으로 진입하는 한 대의 자동차가 다른 차량에 끼치는 운행비용 및 시간비용의 한계적 증가분(marginal increment)을 의미한다.

교통개발연구원(KOTI)은 2002년 전국 도로를 기준으로 교통 혼잡비용이 22조1천3백56억원으로 국내 총생산(GDP)의 3.71%에 달한다고 발표하였다. 이는 그림 10과 같이 1991년 4조6천5백40억원에 비해 약 5배 증가한 값이며, 지난 10여 년간 전국 교

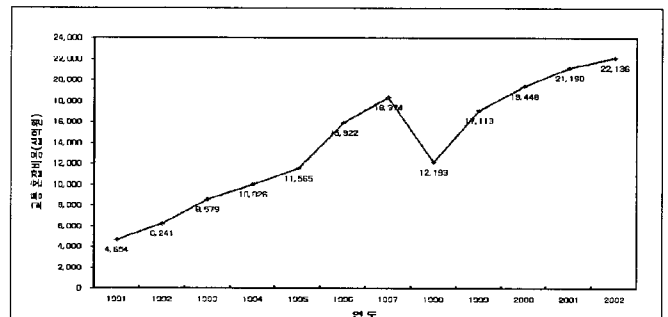


그림 10. 전국 교통 혼잡비용 변화 추이

통 혼잡비용은 지속적인 증가 추세에 있는 것으로 조사되었다. 도로 차량정체로 인한 교통 혼잡은 시간가치의 손실, 유류소비 증대, 대기오염 등 막대한 사회적 손실 비용을 초래하는 주요 원인이 된다.

크랙실링 자동화 장비의 실험 결과를 바탕으로 측정된 생산성 결과와 같이 크랙실링 자동화 장비를 도입할 경우 재래식 크랙실링 방식에 비해 작업시간을 크게 단축할 수 있으므로 교통 혼잡비용을 절감할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비 도입에 따라 사회적으로 발생하게 될 편익 즉, 교통 혼잡비용의 절감액 산출을 통해 크랙실링 자동화 장비 개발 및 사용의 경제적 타당성을 제시하고자 한다.

4.1 교통혼잡 비용 분석범위 설정

본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비의 개발 및 사용으로 예상되는 교통 혼잡비용 감소를 예측하기 위해 교통혼잡 비용의 구성요소를 그림 11과 같이 분류하였다. 교통혼잡 비용은 크게 차량 운행 비용과 시간가치 비용으로 구분될 수 있다(교통개발연구원, 1992).

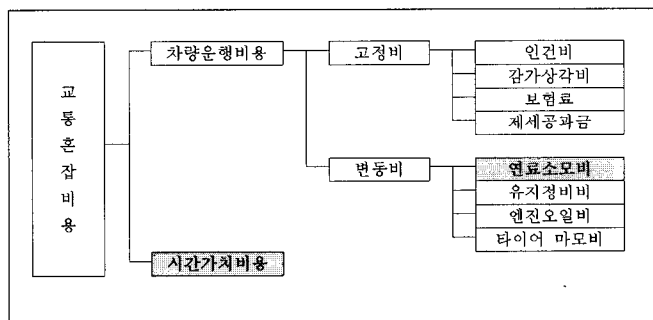


그림 11. 교통 혼잡비용의 구성요소

그림 11과 같이 차량운행비용은 세부적으로 고정비(인건비, 감가상각비, 보험료, 제세공과금)와 변동비(연료소모비, 유지정비비, 엔진오일비, 타이어 마모비)로 구성되고, 시간가치비용은 교통 혼잡으로 인해 발생하는 통행시간비용(시간손실비용)을 의미한다. 차량운행비용의 변동비 중 유지정비비, 엔진오일비, 타이어 마모비는 정확하게 계산하기가 곤란하고 전체 비용 중 큰 비중을 차지하지 않으므로 일반적으로 교통 혼잡비용 계산에 포함시키지 않는다. 또한, 크랙실링 작업시간 단축은 고정비 항목들의 변동요인이 되지 않으므로 교통 혼잡비용 계산에서 고정비를 포함시키지 않았다. 따라서 본 연구에서는 교통 혼잡비용 분석을 위해 그림 11에 제시된 항목들 중 차량운행비용의 연료소모비와 시간가치비용만을 고려하였다.

4.2 교통 혼잡비용의 산정방법 및 절차

(1) 교통 혼잡비용 산정방법

도로상에 어떤 변화가 생겼을 때의 교통상황 변화나 교통사업 시행에 따른 영향 정도를 분석하고자 할 때 실제 도로상에 적용하는 것은 현실적인 제약이 따르고 많은 비용이 소요되므로 그 대안으로 시뮬레이션(Simulation) 방법이 흔히 이용된다. 본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비의 사용으로 인한 교통 혼잡비용 감소를 산정을 위해 여러 시뮬레이션 모형 중 미시적(Microscopic) 시뮬레이션 모형인 Paramics를 채택하였다. Paramics는 영국 Quadstone사에서 개발하여 교통 부문에서 상용화되어 널리 이용되고 있는 대표적인 교통 시뮬레이션 모형이다. 또한, Paramics는 개별 차량의 관점에서 교통 상황을 모사하는 미시 시뮬레이션 모형으로 각 운전자의 경로선택, 차로 변경뿐 아니라 차량 간의 상호작용까지도 구현하는 등 교통 상황을 매우 세밀히 모사할 수 있다. 따라서 Paramics를 사용할 경우 차량의 움직임 및 각 링크의 소통상황, 교차로에서의 대기행렬 등을 관찰할 수 있으며 도로 일부구간의 변화가 교통상황에 미치는 영향도 자세히 분석할 수 있는 장점을 가지고 있다(그림 12).

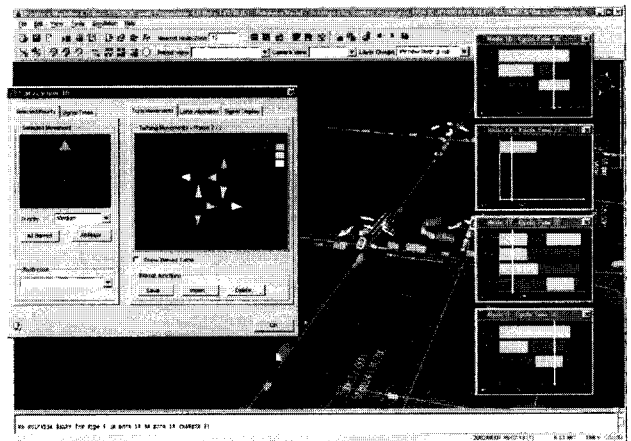


그림 12. Paramics 시뮬레이션 화면

Paramics를 이용한 교통 분석을 위해서는 도로 기하구조 및 교통 수요, 신호운영계획 등을 입력하여 네트워크(Network)를 구축하는 과정을 선행해야 한다. 이를 토대로 운전자 특성 및 차량특성, 교통상태 등 여러 요소의 확률적 성질을 고려하여 모의 실험이 수행되며 전체 네트워크, 개별 링크(Link), 기종점 통행 경로, 교차로 등에서 통행시간, 통행속도, 통행량 등의 다양한 지표를 얻을 수 있다.

(2) 교통 혼잡비용 산정 절차

Paramics를 이용한 교통 혼잡비용 산정을 위해서는 재래식 크랙실링 방식과 자동화 크랙실링 방식을 비교하기 위한 시나리오 및 시뮬레이션 결과 값(효과척도)의 종류를 설정한 후 네트워크를 구축하고 관련 자료를 입력해야 한다. 설정된 각각의 시나리오에 맞게 시뮬레이션을 수행함으로써 필요한 효과척도¹⁾가 산출될 수 있으며, 이를 바탕으로 교통 혼잡비용 산정을 위한 차량 운행비용 절감편익 및 통행시간 절감편익이 계산될 수 있다. 그림 13은 Paramics 시뮬레이션을 이용한 교통 혼잡비용 산정 절차를 정리한 것이다.

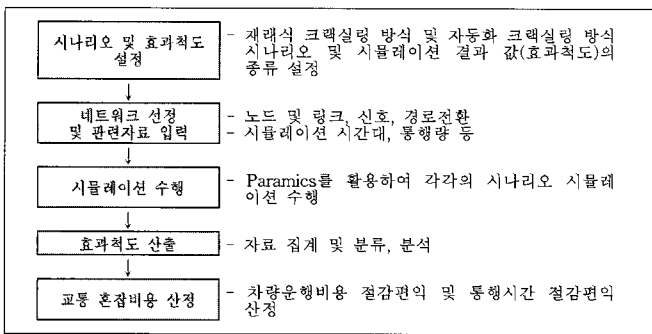


그림 13. 크랙실링 자동화 장비 도입에 따른 교통 혼잡비용 산정절차

4.3 파라믹스 시뮬레이션 기술을 활용한 교통 혼잡비용산정

본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비 도입에 따른 사회적 편익 즉, 교통 혼잡비용 절감액을 산출하기 위해 크랙실링 작업이 도로의 임의 구간에서 수행되는 것으로 가정하고 재래식 방식과 크랙실링 자동화 방식에 의해 크랙실링 작업이 수행될 경우로 구분하여 Paramics 시뮬레이션을 활용하여 각각의 교통 혼잡비용을 산정하였다.

(1) 시나리오 및 효과척도 설정

현장조사 결과 재래식 크랙실링 방식의 경우 오전 9시부터 오후 6시까지 9시간 동안(점심식사 1시간, 실 작업시간 8시간) 작업이 이루어지고 있었으며, 자동화 방식의 경우 현장 생산성 측정결과 재래식 작업시간과 비교하여 1일 1시간 57분²⁾의 작업 시

1) 효과척도(Measure of effectiveness; MOE)란 교통시설 사용자에게 제공되는 서비스의 질을 정량화하여 나타낸 지표로서 교통관련 분석 시 유용하게 활용된다.
 2) 재래식 방식의 생산성: 1.2km/일
 자동화 방식의 생산성: 1.59km/일
 작업 단축시간: 8시간 - [(1.2 ÷ 1.59) × 8시간] = 1.96시간 → 1시간 57분(≈2시간)

간을 단축할 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서 자동화 크랙실링 방식의 작업 단축시간을 오후 4시부터 오후 6시까지 2시간으로 설정하였다. 그러나 교통 혼잡이 발생한 후 일반적으로 2시간 정도 교통 혼잡으로 인한 영향이 지속되므로 본 연구에서는 오후 4시부터 오후 8시까지의 교통 혼잡비용 절감분을 산출하였다. 크랙실링 작업 단축시간과 교통 혼잡영향 해소를 고려하여 작성된 교통 혼잡비용 산정 시나리오는 그림 14와 같다.

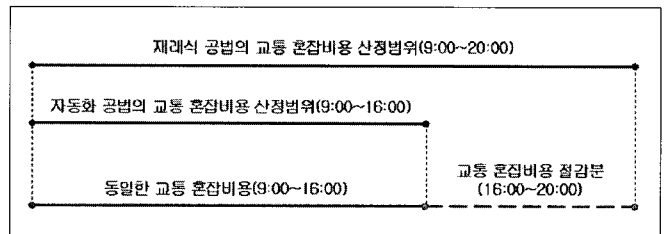


그림 14. 자동화 크랙실링 방식의 교통 혼잡비용 산정 시나리오

그림 14와 같이 오전 9시부터 오후 4시까지의 교통 혼잡비용은 동일 구간, 동일 시간대에 크랙실링 작업이 수행되면 재래식 방식과 자동화 방식 모두 동일한 값이 산출된다. 따라서 크랙실링 작업 단축시간과 교통 혼잡영향 해소를 고려하여 오후 4시부터 8시까지 4시간 동안 발생하는 각 공법별 교통 혼잡비용을 시뮬레이션을 활용하여 산출·비교함으로써 자동화 크랙실링 방식의 교통 혼잡비용 절감분을 산정할 수 있다.

Paramics로부터 얻을 수 있는 효과척도는 네트워크 전체에 대한 총 통행량 및 총 통행시간, 총 통행거리, 차량평균 통행시간, 평균속도, 기종점별 통행시간, 링크별 통행량 등 매우 다양하다. 통행시간 단축 및 연료소모량 감소에 따른 편익을 산출하기 위해서는 각 링크의 교통량으로부터 통행속도 및 시간, 거리 등이 계산되어야 한다. 따라서 크랙실링 자동화 장비 도입에 따른 교통 혼잡비용을 산정하기 위해 필요한 효과척도는 차량평균 통행시간, 평균속도, 총 통행거리, 총 통행시간이다. 이러한 효과척도들은 Paramics를 통해 1분 단위로 제시되므로 앞서 제시한 교통 혼잡비용 산정 시나리오에 맞춰 시간대별로 재 집계하였다.

(2) 네트워크 선정 및 관련자료 입력

Paramics 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 대상으로 네트워크를 선정한 후 도로 위치와 형태 및 위계, 차로 수와 차단되는 차선, 구간연장 등의 네트워크 기하구조를 입력해야 한다. 또한, 시뮬레이션 초기화 및 종료를 고려한 시뮬레이션 시간대와 시간대별 교통량 등을 입력해야 한다.

본 연구에서는 그림 15와 같이 재래식 크랙실링 작업이 실제

로 수행된 양재대로 중 과천에서 양재로의 유입구간 2km를 시물레이션 네트워크 대상구간으로 선정하였다. 또한 선정된 대상구간에서 4개차로 중 1개차로(4차선 중 두 번째 차선)를 차단하고 공사를 수행하는 것으로 가정하였으며, 대상구간이 교차도로나 인접도로에 미치는 영향과 대상구간에서 다른 도로로의 경로 전환은 분석에 포함하지 않았다.

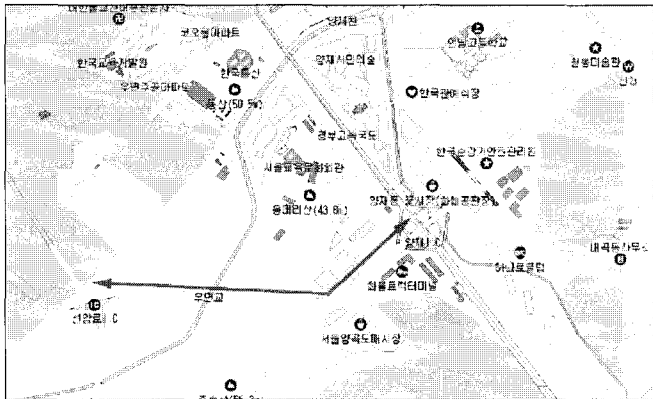


그림 15. 시물레이션 네트워크 대상구간(양재대로 유입구간)

시물레이션은 네트워크 초기화를 위해 크랙실링 작업시작 1시간 이전부터 구동하여 크랙실링 작업으로 인한 교통 혼잡영향 해소를 반영하기 위해 작업 종료 2시간 후까지 구동되었다³⁾. 한편, 2002년 서울지방경찰청이 주관하여 서울시 117개 지점에서 차량검지기 및 교통량 측정기를 통해 도로별/지점별/방향별로 조사한 '서울시 교통량 조사' 자료 중 양재대로 유입구간에 대해 조사된 7일평균 교통량을 시물레이션 시간대별 교통량 입력 자료로 활용하였다(표 9).

(3) Paramics 시물레이션 수행

Paramics 시물레이션 모형은 통행의 확률적 변동성을 고려하여 차량의 네트워크 진입 및 주행을 모사하므로 입력하는 무작위 시드 값(random seed⁴⁾)에 따라 다소 다른 결과가 도출될 수 있다. 따라서 재래식 방식과 자동화 방식의 시물레이션 수행 시 동일한 시드 값 입력 및 시물레이션 환경을 설정함으로써 외부 영향이 발생하지 않도록 제어하였으며 이를 통해 신뢰성 있는 시물레이션 결과 값을 도출하였다(그림 16).

- 3) 크랙실링 자동화 장비 도입에 따른 교통 혼잡비용 절감분을 산정하기 위해서는 16:00~20:00 시간대의 시물레이션 결과만 필요로 하나, 작업시작 시 차량이 투입되어 있어야 하는 점과 작업종료 시 차량 정체의 영향이 반영되어야 하는 점을 고려하면 실제 시물레이션은 08:00~20:00 시간대에서 수행되어야 한다.
- 4) 시드 값은 난수 발생기가 무작위로 난수를 발생시킬 때 이용하는 초기값으로, 시드 값이 일정할 경우에는 난수 발생기에서 발생하는 난수가 동일하게 된다.

표 9. 양재대로 유입구간의 교통량(차량 대수) 자료

시간대	10.25. 목	10.26. 금	10.27. 토	10.28. 일	10.29. 월	10.30. 화	10.31. 수	5일평 균	7일평 균
00-01	1,310	1,394	1,471	1,095	1,030	1,266	1,336	1,267	1,272
01-02	986	1,077	1,153	865	689	957	996	941	960
02-03	723	751	967	566	442	708	752	675	701
03-04	663	660	755	537	427	576	632	592	607
04-05	614	655	783	448	566	636	613	617	616
05-06	1,011	1,012	1,058	589	1,000	993	946	992	944
06-07	3,026	2,913	2,626	1,147	3,241	2,822	2,763	2,953	2,648
07-08	4,664	4,421	4,352	1,673	4,697	4,573	4,610	4,593	4,141
08-09	4,020	4,291	4,777	2,667	4,128	3,961	4,070	4,094	3,988
09-10	3,538	4,214	4,239	2,849	4,164	3,495	4,098	3,902	3,800
10-11	4,313	4,165	4,136	3,622	3,951	3,751	4,171	4,070	4,016
11-12	3,753	3,938	4,067	3,440	3,619	3,921	3,784	3,803	3,789
12-13	3,015	3,198	3,867	3,344	3,046	3,387	3,207	3,171	3,295
13-14	3,320	3,494	3,704	3,491	3,510	3,359	3,388	3,414	3,467
14-15	3,524	3,877	4,013	3,473	3,702	3,772	3,818	3,739	3,740
15-16	3,724	3,685	3,841	3,522	3,776	3,690	3,823	3,740	3,723
16-17	3,595	4,056	3,645	3,903	3,865	3,735	3,130	3,676	3,704
17-18	4,126	3,939	4,172	4,174	3,974	3,854	3,511	3,881	3,964
18-19	3,848	3,914	3,941	4,334	3,975	3,995	3,618	3,870	3,946
19-20	3,437	3,612	3,398	3,739	3,331	3,448	3,783	3,522	3,535
20-21	2,656	2,856	2,800	2,799	2,515	2,726	2,812	2,713	2,738
21-22	2,393	2,500	2,346	2,560	2,426	2,463	2,330	2,422	2,431
22-23	2,123	2,215	1,935	2,116	2,050	2,089	2,088	2,113	2,088
23-24	1,708	1,899	1,739	1,729	1,675	1,704	1,798	1,757	1,750
합계	66,09	68,73	69,78	58,68	65,79	65,88	66,07	66,51	65,86
평균	0	6	5	2	9	1	7	7	4
평균	2,754	2,864	2,908	2,445	2,742	2,745	2,753	2,772	2,744

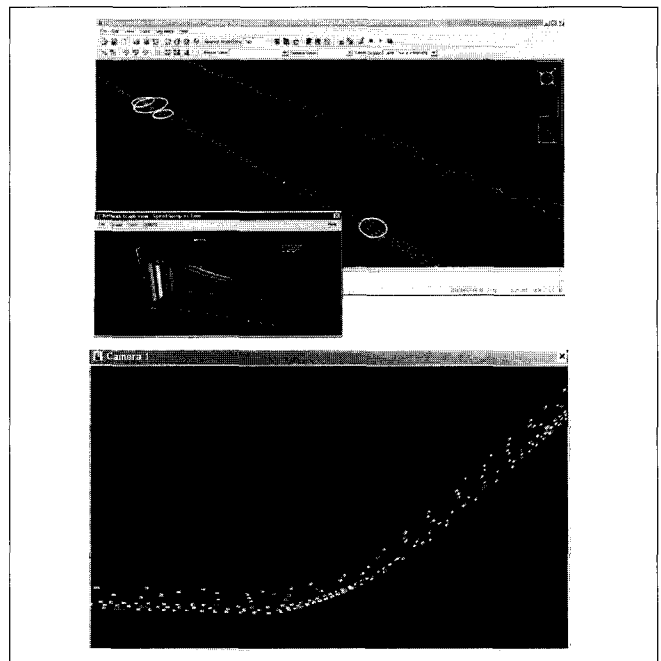


그림 16. Paramics 시물레이션 수행(양재대로 유입구간)

Paramics를 통해 1분 단위로 산출되는 자료 중 오전 8시부터 오전 9시까지의 네트워크 초기화를 위한 시간과 재래식 및 자동화 크랙실링 방식의 동일한 작업시간(오전 9시부터 오후 4시까지)을 혼잡 비용 비교 대상에서 제외하였고, 오후 4시부터 오후

8시까지의 자료를 효과적으로 분석하여 교통 혼잡비용 산정에 이용하였다.

(4) 효과척도(자료 집계 및 분류, 분석) 및 교통 혼잡비용 산정

교통 혼잡비용 산정을 위해 시뮬레이션 수행 후 산출되는 효과척도는 차량평균 통행시간 및 총 차량대수, 통행 평균속도, 총 통행거리(Vehicle Kilometers Traveled; VKT), 총 통행시간(Vehicle-Hours of Travel; VHT) 등이다. 표 10과 표 11은 시뮬레이션 수행 후 도출된 재래식 및 자동화 크랙실링 방식의 효과척도이다.

표 10. 재래식 크랙실링 방식의 시뮬레이션 효과척도

시간대	차량평균 통행시간(초)	총 차량대수 (대)	통행평균속도(km/h)	VHT (hour)	VKT (km)
09:00~16:00 (작업 중)	753.5	50,004	25.36	10,466.16	265,421.82
16:00~18:00 (작업 중)	1,061.7	14,423	18.26	4,785.28	87,379.21
18:00~20:00 (작업종료 후)	1,419.2	16,355	13.72	7,253.44	99,517.20

표 11. 자동화 크랙실링 방식의 시뮬레이션 효과척도

시간대	차량평균 통행시간(초)	총 차량대수 (대)	통행평균속도(km/h)	VHT (hour)	VKT (km)
09:00~16:00 (작업 중)	753.5	50,004	25.36	10,466.16	265,421.82
16:00~18:00 (작업종료 후)	971.6	15,371	20.78	4,667.02	96,980.68
18:00~20:00 (작업종료 후)	329.2	15,090	60.08	1,552.38	93,266.99

본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 도출된 효과척도와 조사된 관련 데이터를 활용하여 시간가치비용과 차량운행비용 중 연료소모비의 합으로 교통 혼잡비용을 산정하였다.

- 교통 혼잡비용 = 시간가치비용 + 연료소모비
- 시간가치비용 = 총 통행시간(VHT) × 재차인원 × 평균 시간가치

평균 시간가치를 산정하는 방식에는 여러 가지가 있으나 교통 관련 분석에서는 일반적으로 통행목적별 시간가치를 이용한다. 통행 목적은 통근, 통학, 업무, 쇼핑, 사고 및 여가 등으로 분류할 수 있다. 이와 같은 통행 목적을 업무통행과 비업무통행으로 구분하여 각 통행목적별 비율과 시간가치를 토대로 평균 시간가치를 산출하는 방법이 통행목적별 시간가치 방식이다. 본 연구

에서도 평균 시간가치를 산정하기 위해 '2003 건설교통 통계연보(건설교통부, 2003)'에서 제시된 통행목적별 시간가치 값을 적용하였다. 또한, 통행목적별 통행분포는 시간대에 따라 차이가 있으므로 '2002 서울시 가구통행실태 조사(서울특별시, 2003)'의 서울 및 수도권 시간대에 따른 통행목적별 통행분포를 활용하였다. 서울시 조사결과를 토대로 분석대상 시간대인 오후 4시부터 오후 8시까지의 업무통행, 비업무통행 비율과 통행목적별 시간가치를 적용하여 평균 시간가치를 산출하고 이를 통해 시간가치비용을 계산하였다.

한편, 차량운행비용 중 연료소모비는 다음과 같이 계산될 수 있다.

■ 연료소모비 = 총 통행거리(VKT) × 해당 속도별 연료소모율 × 연료비

연료소모비의 산출 방법은 매우 다양하게 연구된 바 있으나 본 연구에서는 가장 많이 이용되는 방법의 하나인 해당 속도별 연료소모율을 활용하는 방법을 선택하였다. '도로사업 투자분석 기법정립(국토연구원, 1999)' 연구에서 차량 속도에 따른 연료소모율을 제시하고 있으므로 재래식 및 자동화 방식의 해당 속도별 연료소모율을 적용하여 연료소모비를 산출하였다.

(5) 교통 혼잡비용 산정

차량속도가 변화하는 경우 운전자와 차량에 동승하고 있는 인원(이하 재차인원)에게도 통행시간이 달라지는 결과를 가져온다. 차량속도가 향상되면 재차인원의 통행시간은 절감되어 다른 목적에 시간을 사용할 수 있는 반면, 교통 혼잡으로 차량속도가 낮아지면 재차인원에게는 더 많은 통행시간이 소요된다. 이 경우 절약 혹은 추가되는 시간이 어떤 목적에 사용될 것인가는 통행목적에 따라 결정된다. 즉, 업무통행의 경우 통행시간 절약은 그만큼 업무시간의 증가 즉, 생산 활동을 위한 시간의 증가를 가져오며, 비업무통행의 경우 통행시간 절약은 여가활동을 위한 시간의 증가를 가져올 수 있으므로 통행목적에 대한 분석이 수행되어야 한다. 건설교통부가 2003년 발표한 '건설교통 통계연보'에는 업무통행과 비업무통행별 시간가치가 제시되어 있으며 서울특별시가 2003년 수행한 '서울시 가구통행실태 조사'에 시간대별 통행비율이 정리되어 있다. 이를 토대로 분석대상 구간의 시간대별 평균 시간가치를 산출하면 표 12와 같다.

표 12. 분석대상 구간의 시간대별 평균 시간가치 산출

구분	업무통행	비업무통행	평균 시간가치 산출
통행목적별 시간가치	11,993원	3,921원	-
16:00~18:00 통행비율	15.53%	84.47%	$(11,993 \times 0.1553) + (3,921 \times 0.8447) = 5,175$ 원
18:00~20:00 통행비율	4.06%	95.94%	$(11,993 \times 0.0406) + (3,921 \times 0.9594) = 4,249$ 원

표 12의 서울시 분석대상 구간 시간대별 평균 시간가치를 기준으로 총 통행시간(VHT)과 재차인원을 감안하여 시간가치비용을 산출할 수 있다. 차량당 평균 재차인원은 일반적으로 교통 관련 연구시 사용되는 1.3인으로 설정하였으며 표 12에서 산출된 평균 시간가치와 평균 재차인원을 시뮬레이션 결과 도출된 총 통행시간에 적용하여 크랙실링 작업시간 단축에 따른 통행시간 절감편익(=시간가치비용 절감)을 분석하면 표 13과 같다.

표 13. 크랙실링 자동화 장비 도입에 따른 통행시간 절감편익 분석

시간대	재래식			자동화		
	VHT (hour)	평균 시간가치	시간가치 비용	VHT (hour)	평균 시간가치	시간가치 비용
09:00~16:00	동일					
16:00~18:00	4,765	5,175	32,191,088	4,667	5,175	31,397,243
18:00~20:00	7,253	4,249	40,063,396	1,552	4,249	8,572,782
계	12,038	-	72,254,484	6,219	-	39,970,025
통행시간 절감편익(시간가치비용 절감) = 72,254,484 - 39,970,025 = 32,284,459원/일						

연료소모비를 산출하기 위해서는 분석대상 구간에 통행하는 각 차량종류별(승용차, 화물트럭, 택시, 버스 등) 통행거리와 통행속도가 필요하다. 그러나 본 연구에서는 관련자료 수집의 한계와 시뮬레이션 수행 소요시간을 고려하여 통행차량을 모두 승용차로 가정하고 총 통행거리와 시간대별 평균 통행속도를 산출하였다. 이를 바탕으로 국토연구원이 1999년 수행한 '도로사업

표 14. 크랙실링 자동화 장비 도입에 따른 차량운행비용 절감편익 분석

시간대	재래식			자동화		
	VKT (km)	연료소모율 (ℓ/km)	연료소모비 (원)	VKT (km)	연료소모율 (ℓ/km)	연료소모비 (원)
09:00~16:00	동일					
16:00~18:00	87,379	0.081	10,616,549	96,981	0.081	11,783,192
18:00~20:00	99,517	0.081	12,091,316	93,267	0.052	7,274,826
계	186,896	-	22,707,864	190,248	-	19,058,018
차량운행비용 절감편익(연료소모비 절감) = 22,707,864 - 19,058,018 = 3,649,847원/일						

투자분석 기법정립' 연구에 따라 승용차평균 속도별 연료소모율에 시뮬레이션 결과로 나타난 평균속도 근사값을 적용할 경우 속도가 24km/h일 때 0.081ℓ/km, 64km/h일 때 0.052ℓ/km인 것으로 분석되었다. 따라서 연료비용을 1,500원/ℓ으로 설정하여 적용하면 표 14와 같이 차량운행비용 절감편익을 산출할 수 있다.

표 13의 통행시간 절감편익과 표 14의 차량운행비용 절감편익을 합산한 총 사회적 편익 즉, 교통 혼잡비용 절감액은 35,934,306원/일(=32,284,459+3,649,847)으로 산출되었다. 따라서 연간 100일의 작업일수를 가지고 있는 크랙실링 전문 업체 한 곳마다 연간 약 36억원의 교통 혼잡비용 절감효과가 있을 것으로 예상된다. 한편, 자동화 장비의 예상수명 10년 동안의 교통 혼잡비용 절감효과를 현재가치로 환산하면 약 220억원의 교통 혼잡비용을 절감할 수 있을 것으로 분석되었다. 전체 크랙실링 업체를 대상으로 교통 혼잡비용 절감액을 산출할 경우 크랙실링 자동화 장비를 도입함으로써 얻을 수 있는 사회적 편익은 막대할 것으로 기대된다.

■ 교통 혼잡비용의 현재가치(PW of benefits)

$$= 3,593,430,600(P/A, 10\%, 10) = 3,593,430,600 \times 6.1446 = 22,080,193,665$$

본 연구를 통해 개발된 크랙실링 자동화 장비는 야간에도 작업이 가능하며 주간과 동일한 품질을 기대할 수 있다. 야간작업으로 발생하는 교통 혼잡비용은 주간보다 감소하는 것이 일반적이므로 크랙실링 작업이 자동화 장비에 의해 야간에 수행될 경우 재래식 방식과 비교하여 교통 혼잡비용 절감효과는 더욱 증대될 것으로 예상된다.

5. 결론

본 연구를 통해 얻을 결론은 다음과 같다.

(1) 크랙실링 자동화 장비의 개발 현황 분석 결과, 국내에서는 현장 요구조건 및 시방 기준에 적합한 크랙실링 자동화 장비를 개발하고 있으며, 개발된 프로토타입 장비를 실용화시키기 위해 연구노력을 기울이고 있는 것으로 분석되었다.

(2) 재래식 방식과 비교한 자동화 방식의 생산성 향상 정도를 측정하기 위해 크랙실링 자동화 장비의 생산성 측정 모델을 개발하였다. 이를 바탕으로 개발된 크랙실링 자동화 장비 프로토타입의 생산성 측정 결과 1.59km/일의 작업이 가능하므로 재래식 방식(1.20km/일)에 비해 1일당 약 390m의 추가 작업이 가능

한 것으로 분석되었다.

(3) 크랙실링 자동화 장비의 개발 및 사용으로 인한 생산성 정 보를 바탕으로 투입 노무비 및 장비비의 증감 정도를 비교·분 석하였다. 이를 바탕으로 경제성 분석을 수행한 결과, 편익/비용 비율은 5.5, 수익률은 122.5%, 손익분기점은 1년 3개월로 도출 되었다. 따라서, 크랙실링 전문시공업체가 개발된 크랙실링 자 동화 장비를 도입·사용할 경우 큰 경제적 가치를 확보할 수 있 는 것으로 분석되었다.

(4) 본 연구에서는 크랙실링 자동화 장비의 개발로 인한 사회 적 편익(교통 혼잡비용 감소)을 측정하기 위해 시뮬레이션 기술 을 적용한 결과, 크랙실링 자동화 장비 1대의 사용으로 인해 차 량통행시간 절감비용으로 약 32,284,459원/일, 차량운행비용 절감편익으로 약 3,649,847원/일이 절감되어 연간 100일의 작 업일수를 가지는 전문시공업체 한 곳마다 연간 약 36억원의 교 통 혼잡비용 절감효과가 있는 것으로 분석되었다. 따라서 자동 화 장비의 예상수명 10년 동안 현재가치로 약 220억의 비용을 절감할 수 있는 것으로 기대된다.

본 연구에서 도출된 경제성 분석 결과 값 및 사회적 편익은 개 발된 크랙실링 자동화 장비 프로토타입의 현장 실험 결과를 바 탕으로 도출된 것이므로 향후 시제품을 대상으로 한 경제성 분

석이 요구된다. 또한, 본 연구 결과를 바탕으로 개발된 자동화 장비 프로토타입을 실용화 하기 위한 연구 노력이 요구된다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2004), "도로면 유지보수 자동화를 위한 원격조 정 장비의 개발 연구보고서"
2. 건설교통부 (2003), "2003 건설교통 통계연보"
3. 국토연구원 (1999), "도로사업 투자분석 기법정립"
4. 교통개발연구원 (1992), "교통 혼잡비용 예측 연구"
5. 교통개발연구원 (2002) "도시교통혼잡지표의 개발 및 활용방 안"
6. 교통개발연구원 (2003), "2001 전국 교통혼잡비용 산출과 추 이 분석"
7. 서울지방경찰청 (2002), "서울시 교통량 조사"
8. 서울특별시 (2003), "2002 서울시 가구통행실태 조사"

논문제출일: 2006.07.24

심사완료일: 2006.11.27

Abstract

Numerous efforts are currently underway to automate pavement crack and joint sealing activities. Productivity improvements, improved safety and quality, and reduced road user costs motivate these developments. Recently, an automated pavement crack sealing machine has been developed to automate the process of sealing pavement cracks and joints in Korea. This paper mainly describes the results of the economic feasibility analysis revealed through its overall performance evaluation and field tests. Finally, it is concluded that the automated machine exceeds the performance in terms of productivity, safety, and quality required in conventional method, thus making the machine economically feasible.

Keywords : Pavement, Crack Sealing, Automation, Feasibility Analysis