흄관매설 자동화 장비의 성능평가에 관한 연구

A Study on the Performance Evaluation of
a Tele-operated Hume Concrete Pipe Laying Machine

유 연 택* 박 상 준* 변 웅 호** 김 영 석*** 이 준 복****
Ryu, Yeon-Taek Park, Sang-Jun Byun, Woong-Ho Kim, Young-Suk Lee, Jun-Bok

요 약

건설 자동화 장비 개발의 성공여부를 판단하고 이를 실용화하기 위해서는 개발 장비의 성능평가 및 분석을 통해 재래식 방식과 비교하여 자동화 방식을 도입함으로써 얻을 수 있는 기대효과가 제시되어야만 한다. 본 연구에서는 최근 국내에서 개발된 흄관매설 자동화 장비의 성능분석을 위한 평가모델 및 방법론을 제시하고 수차례의 현장실험(field trials)을 통해 수집된 실험 데이터를 바탕으로 재래식 흄관매설 방식과 자동화 방식의 성능을 종합적으로 비교·분석함으로써 재래식 방식에 비해 자동화 방식의 도입을 통해 얻을 수 있는 정성적·정량적 기대효과를 제시하였다. 흄관매설 자동화 장비의 성능분석을 위해 본 연구에서 제시된 성능분석 프로세스 및 평가모델은 향후 건설자동화 관련 기술개발 시 자동화 장비의 성능분석 및 평가모델을 개발함에 있어 기본적 틀(template)을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

키워드 : 흄관, 성능평가, 생산성, 경제적 타당성, 건설 자동화, 로봇

1. 서론

최근 국내에서는 건설 자동화 기술개발을 위한 산·학·연 협동연구를 통해 재래식 흄관매설 작업이 가지고 있는 터파기 사면 붕괴, 흄관 추락 및 충돌로 인한 안전사고의 위험, 무리한 관이음에 의한 파손 및 접합상태 불량으로 인한 품질 확보의 어려움, 작업 생산성 저하와 인건비 상승으로 인한 채산성 확보의 어려움 등의 문제점을 해결하고자 흄관매설 자동화 장비가 개발되었다(한국건설기술연구원, 2003). 건설 자동화 기술개발의 성공여부를 판단하고 개발 장비를 실용화하기 위해서는 개발 장비의 성능 평가 및 분석(performance evaluation and analysis)을 통해 재래식 방식과 비교하여 자동화 방식을 도입함으로써 얻을 수 있는 정성적·정량적 기대효과(intangible and tangible benefits)에 대한 검증이 요구된다. 그러나 현재까지는 자동화 장비 개발을 위한 기초적 타당성 분석, 자동화 장비 개발 프로세스 및 최적대안 선정, 자동화 장비 모체 개발 등에 대한 연구는 다수 수행되었으나 개발된 자동화 장비의 성능(performance: 생산성, 안전성, 품질, 경제적 타당성 등의 측면에서 자동화 장비가 갖고 있는 성질이나 기능)을 종합적으로 분석할 수 있는 성능평가 모델 및 방법론(performance evaluation model and methodology)의 제시는 미흡했던 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 흄관매설 자동화 장비를 대상으로 개발 장비의 성능분석을 위한 성능평가 모델 및 방법론을 제시하고, 현장실험(field trials) 데이터를 바탕으로 재래식 흄관매설 방식과 자동화 방식의 성능을 종합적으로 비교·분석하였다. 도출된 성능분석 및 평가 결과는 개발 자동화 장비의 성공여부를 판단하고 실용화·상용화하기 위한 개발 주체 및 사용자(end user)의 기초 자료로 활용될 수 있다. 또한, 흄관매설 자동화 장비의 성능분석 및 평가를 위해 본 연구에서 제시된 성능평가 모델 및 방법론은 향후 건설자동화 관련 기술개발 시 자동화 장비의 성능분석 및 평가모델을 개발함에 있어 기본적 틀(template)을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

* 학생회원, 인하대학교 건축공학과 석사과정
** 학생회원, 인하대학교 토목공학과 석사과정
*** 종신회원, 인하대학교 건축공학과 조교수, 공학박사
**** 일반회원, 홍익대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

○ 이 연구는 건설교통부 산학연 공동연구 개발사업(과제번호: 2000지정 43-1) 과제 결과의 일부임.

2. 흄관매설 자동화 장비의 개발

2.1 흄관매설 자동화 장비의 개발

흄관매설 현장방문 및 각종 시방서 분석을 통한 국내 흄관매설공사의 표준작업과정은 그림 1과 같이 '터파기', '흄관설치', '되메우기' 공정으로 분류된다.

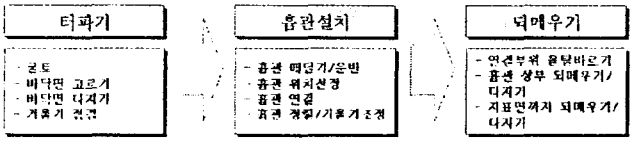

그림 1. 재래식 흄관매설공사 표준작업과정

본 연구에서는 설문조사 및 흄관매설공사의 자원투입 비율-자동화기술 도입지수에 관한 매트릭스(cost-concern matrix) 분석 결과(손석호, 2001)를 바탕으로 표준작업 과정 중 '흄관설치' 공정을 자동화 작업 대상으로 선정하여 그림 2와 같은 흄관매설 자동화 장비를 개발하였다.

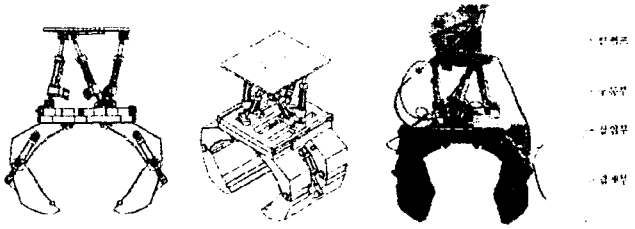

그림 2. 흄관매설 자동화 장비의 프로토타입

개발된 흄관매설 자동화 장비의 프로토타입(prototype)은 흄관설치 작업을 위해 요구되는 동작 및 성능을 모두 구현할 수 있도록 6 자유도 운동이 가능한 스튜어트 플랫폼

(SPM; Stewart Platform Manipulator)[1]을 기반으로 하고 있으며 그림 2와 같이 클램프 및 구동부, 삽입부, 집게부로 구성되어 있다(원영호외, 2002).

2.2 흄관매설 자동화 방식의 작업 프로세스 분석

1본의 흄관매설을 위한 재래식 작업 프로세스는 그림 3과 같이 1)흄관 적재장소까지 이동, 2)흄관 결속, 3)흄관 연결장소까지 운반, 4)흄관 위치선정, 5)흄관 연결(1차 정렬), 6)흄관 2차 정렬 및 기울기 조정 과정이 싸이클(cycle)로 반복된다.

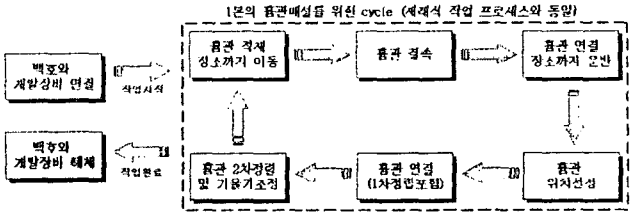

그림 3. 흄관매설 자동화 방식의 작업 프로세스

자동화 방식의 흄관매설 작업 프로세스는 재래식 방식의 작업 프로세스 외에 흄관매설 작업 시작 전에 백호(backhoe)의 버켓(bucket)을 해체하고 개발 장비를 연결하는 작업, 작업 종료 이후 백호와 개발 장비를 해체하고 버켓을 연결하는 작업이 추가로 요구된다. 이는 재래식 방식에서 백호의 버켓에 로프를 연결하여 흄관매설 작업을 수행하던 방법을 개발장비로 대체함으로써 발생되는 작업이다.

3. 흄관매설 자동화 장비 성능평가 모델 및 방법

3.1 생산성 측정모델

개발된 흄관매설 자동화 장비의 생산성을 측정하기 위해서는 흄관 1본을 매설하는데 소요되는 작업시간 측정이 선행되어야 하므로 그림 4와 같이 흄관매설 자동화 장비의 생산성 측정을 위한 모델을 개발하였다. 제안된 생산성 측정모델은 흄관매설 작업을 수행하는 자동화 장비의 이동시간, 흄관매설 작업시간, 자동화 장비 추가작업 소요시간을 바탕으로 흄관 1본을 매설하는데 소요되는 작업시간 측정이 가능하도록 구축되었다.

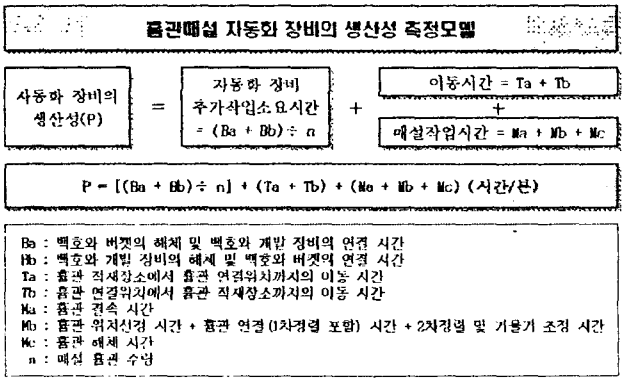

그림 4. 흄관매설 자동화 장비의 생산성 측정모델

한편, 생산성 데이터 수집 시 작업환경 및 여건의 차이에서 발생하는 영향 요소를 최소화하기 위해서는 재래식 방식의 생산성과 비교하여 자동화 장비의 시간단축(time saving) 및 시간지연(time loss) 요소를 고려해야 한다(그림 5).

1) 1965년 Stewart가 모의비행실험을 위해 고안한 장치로 공간상에서 6 자유도가 가능한 구조를 가지고 있는 병렬기구구조(parallel manipulator)의 대표적인 예임.

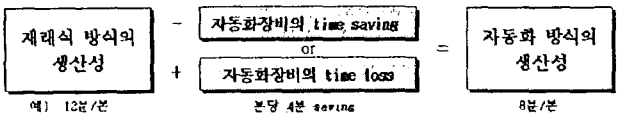

그림 5. 자동화 방식의 생산성 데이터 측정 개념

즉, 흄관매설을 위한 재래식 방식과 자동화 방식 모두 동일하게 소요되는 작업 시간은 배제하고 상이하게 소요되는 작업 시간들을 그림 6과 같이 비교함으로써 작업환경 및 여건의 차이에 의해 발생하는 영향 요소를 최소화하였다.

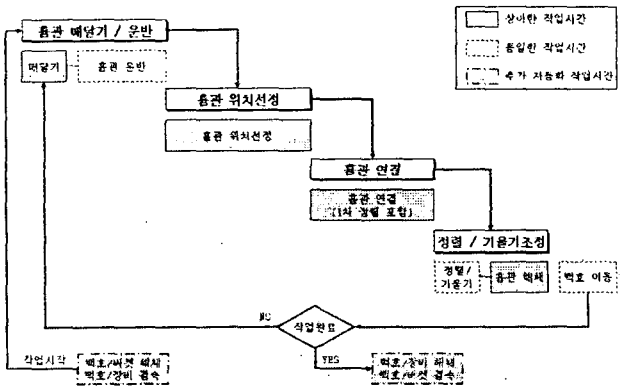

그림 6. 재래식 흄관매설 방식과 자동화 방식의 작업시간 유형

그림 6과 같이 두 방식의 작업시간 중 흄관 매달기, 위치선정, 연결(1차 정렬 포함), 해체 작업에 소요되는 작업시간은 재래식 방식과 자동화 방식간의 작업 방법 차이로 인해 상이하므로 소요시간을 직접 측정해야 한다. 그러나 흄관 운반, 백호 이동에 소요되는 시간은 동일한 작업환경 및 여건 하에서 작업이 수행된다면 이동거리가 동일하므로 소요작업시간이 동일하며, 정렬/기울기 작업의 경우 재래식과 자동화 방식 모두 육안이나 측량기 등을 통해 흄관을 정렬(2차 정렬)하고 기울기를 조정하는 작업이므로 동일한 시간이 소요된다. 따라서 흄관운반 및 백호 이동, 정렬/기울기에 대한 자동화 방식의 소요 작업시간을 직접 측정하지 않고 재래식 방식의 생산성 데이터와 동일한 값을 사용할 수 있다.

한편, 자동화 방식에는 백호/버켓 해체 및 백호/개발 장비 결속 시간과 백호/개발 장비 해체 및 백호/버켓 결속 시간이 추가로 소요되므로 이들 작업에 소요되는 시간을 측정해야 한다. 두 작업은 순서만 다를 뿐 동일한 작업의 반복이므로 두 작업 중 하나의 작업 소요시간을 측정하면 나머지 작업시간은 동일한 것으로 추정할 수 있다.

3.2 경제적 타당성 평가 방법

개발 자동화 장비의 경제적 타당성 분석은 자동화 장비를 사용함으로써 얻을 수 있는 투자의 효율성을 분석하고 자동화 장비 개발의 타당성을 확보하기 위한 것이다. 일반적으로 자동화 장비의 경제적 타당성 분석은 기존 재래식 방식과 비교하여 자동화 장비를 활용함으로써 추가적으로 소요되는 비용(costs)과 발생되는 편익(benefits)간의 비교·분석을 통해 수행된다(그림 7).

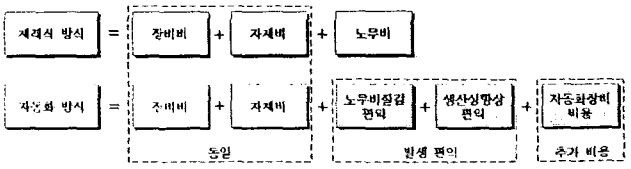

그림 7. 재래식 방식과 자동화 방식의 비용 및 편익 유형

본 연구에서는 개발 자동화 장비의 경제적 타당성을 분석하기 위해 기본적인 변수 및 가정을 설정하였고, 이를 바탕으로 자동화방식 도입에 따른 연간 발생편익 및 추가비용을 산정하였다. 또한, 산정된 발생편익 및 추가비용을 토대로 편익비용 비율(B/C ratio) 분석, 수익률(rate of return) 분석, 손익분기점(break-even point) 분석을 수행하였다. 한편, 설정된 변수나 가정 사항들은 각 업체나 현장마다 상이하므로 경제성 분석 결과 값이 다르게 산출될 수 있다. 따라서 특정 변수나 가정의 변화에 따른 경제성 분석 결과를 민감도(sensitivity) 분석을 통해 제고함으로써 각 업체의 다양한 환경에 맞는 경제성 분석 결과를 제공할 수 있다. 이러한 경제적 타당성 평가 방법을 도식화하면 다음과 같다(그림 8).

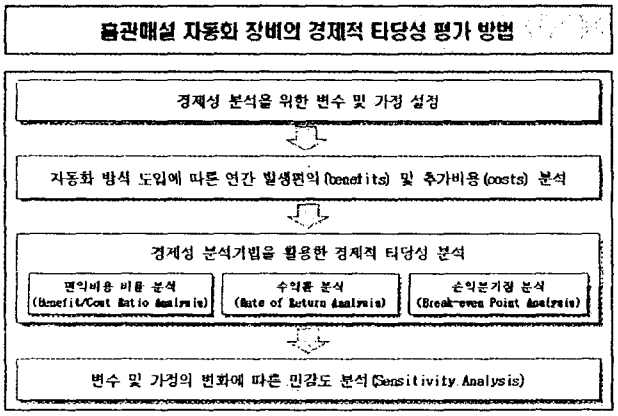

그림 8. 흄관매설 자동화 장비의 경제적 타당성 평가 방법

3.3 안전성 및 품질 분석 방법

자동화 장비의 성능 중 생산성과 경제적 타당성은 성능평가 모델 및 방법론 등을 통해 정량적으로 분석하고 평가하는 것이 가능하다. 그러나 안전성 및 품질은 비교·분석 대상 데이터의 부재 및 분석기준의 모호함, 주관성 개입 등의 문제점으로 인해 성능평가 모델 및 방법론을 구축하여 정량적으로 분석하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 재래식 흄관매설 방식과 비교하여 흄관매설 자동화 장비를 도입함으로써 얻을 수 있는 안전성 및 품질 향상 정도를 정성적인 측면에서 분석·평가하였다.

4. 흄관매설 자동화 장비의 성능평가

4.1 생산성 측정

재래식 흄관매설 방식의 경우, 백호 1대와 노무인력 6~8명이 투입되어 1일(8시간 작업기준) 평균 40본의 흄관을 매설하는 것으로 측정되었다(일당 생산성; 40본/일). 일당 생산성을 단위작업 생산성(시간/본) 즉, 1본의 흄관을 매설하는데 소요되는 작업시간으로 환산해보면 12분이 소요된다(손석호, 2001). 자동화 방식의 경우, 재래식 방식과 유사하게 조성된 작업환경 및 여건 하에서 수행된 현장실험[2] 결과, 자동화 방식으로 흄관을 매설할 때 1일 평균 66본의 흄관매설이 가능하므로 본당 7분16초의 시간이 소요되는 것으로 분석되었다(한국건설기술연구원, 2003).

다음 표 1은 재래식 방식과 자동화 방식의 생산성을 비교·분석한 것이다. 생산성 분석 결과, 흄관매설 작업에 자동화 방식(7분16초/본, 66본/일)을 도입할 경우 재래식 방식(12분/본, 40본/일)에 비해 65%의 생산성 향상효과(1본당 4분44초의 작업시간 단축, 일일 26본의 추가작업 가능)가 있는 것으로 분석되었다. 또한, 흄관매설 자동화 장비의 기술적 개선이나 투입 노무인력의 숙련도(learning curve)가 향상될 경우 자동화 방식의 도입으로 인한 생산성 향상효과는 더욱 증대될 것으로 예상된다.

표 1. 재래식 방식과 자동화 방식의 생산성 비교·분석

작업 공정	세부 작업 공정	각 방식별 작업시간		자동화방식의	
		재래식	자동화	saving	loss
흄관 매달기 및 운반	흄관 매달기	35초	15초	20초	-
	운반	2분43초	2분43초	0초	-
흄관 위치선정	흄관 위치선정	3분18초	23초	2분55초	-
흄관 연결	흄관 연결 (1차 정렬 포함)	2분51초	33초	2분11초	-
흄관 정렬 및 기울기조정	정렬 / 기울기 조정 (백호 이동 포함)	2분 21초	2분 21초	0초	-
	흄관 해체	12초	11초	1초	-
소계 (시간/본)		12분00초	6분26초	5분34초	-
추가 작업	백호-개발장비 연결	-	27분25초	-	27분25초
	백호-개발장비 해체		27분25초	-	27분25초
소계 (시간/일)		-	54분50초	-	54분50초
1본당 작업시간으로 환산(시간/본)		-	50초	-	50초
본당 생산성 (시간/본)		12분00초	7분16초	4분44초	-

4.2 경제적 타당성 평가

연구 단계에서의 경제적 타당성 분석은 자동화 장비의 상용화 이후 축적된 데이터들을 토대로 이루어지는 것이 아니므로 경제성 분석을 위한 변수 및 가정의 설정이 요구된다. 흄관매설 자동화 장비의 경제적 타당성 분석을 위해 설정된 변수 및 가정은 다음과 같다.

- 흄관매설 업체가 자동화 장비 1대를 활용하여 작업 수행
- 흄관매설 자동화 장비 1대 제작비용: 60,000,000원
- 흄관매설 자동화 장비 예상수명: 10년
- 흄관매설 자동화 장비 운용 및 유지·보수비용
  : 1~5년간 제작비용의 5%, 6~10년간 제작비용의 10%
- 연간 흄관매설 작업가능일수: 100일[3]
  (재래식 작업의 연간 흄관매설 물량: 100일 × 40본/일 = 4,000본)
- 흄관매설 자동화 장비 도입 시 1일 노무절감인원 : 보통인부 3명
- 1일 노무비 절감액: 157,449원[4] (= 52,483원 × 3명)
- 최소기대수익률(MARR): 10%

흄관매설 업체가 재래식 방식으로 연간 작업할 수 있는 흄관매설 물량은 4,000본이고 동일 물량을 자동화 장비를 이용하여 흄관매설 작업을 수행할 경우 61일(=4,000본÷66본/일)만에 작업을 완수할 수 있다. 이를 바탕으로 재래식 방식과 자동화 방식간의 연간 작업투입 비용을 산출하여 자동화방식 도입에 따른 연간 발생편익을 분석해보면 표 2와 같다.

표 2. 자동화 방식 도입에 따른 연간 발생 편익

재래식 방식 (연간 100일 작업)			자동화 방식 (연간 61일 작업)		
구분	일일 작업 투입비용(원)	연간 작업 투입비용(원)	구분	일일 작업 투입비용(원)	연간 작업 투입비용(원)
장비비	400,000	40,000,000	장비비	400,000	24,400,000
자재비	동일		자재비	동일	
노무비	351,603	35,160,300	노무비	194,154	11,843,394
계	751,603	75,160,300	계	594,154	36,243,394
자동화방식 도입에 따른 연간 발생편익 = 38,916,906원					

2) 흄관매설 자동화 장비의 기능 테스트를 위한 수차례의 실험실 실험 및 자동화 장비의 현장 적용성 검토 및 생산성 데이터 수집을 위한 3회의 현장 실험이 수행됨. 본 연구에서는 최종 20본의 흄관매설 작업 소요시간을 토대로 생산성을 측정하였음.

3) 국내 40개 흄관매설 업체와의 인터뷰 결과, 연간 작업가능일수는 100~250일(손석호, 2001). 본 연구에서는 최소 작업가능일수인 100일을 연간 흄관매설 작업가능일수로 가정함.

4) 대한건설협회의 '2003년 하반기적용 건설업 임금실태 조사 보고서' 중 보통인부에 대한 시중 노임 단가(52,483원)를 적용하였음.

한편, 자동화 방식 도입으로 인한 추가비용을 고려하지 않고 발생편익만으로 경제적 타당성을 분석하는 것은 불가능하므로 흄관매설 자동화 방식 도입에 따른 연간 발생편익과 자동화 장비의 연간 추가비용을 고려하여 현금 흐름도(cash flow diagram)로 도식화하면 그림 9와 같다.

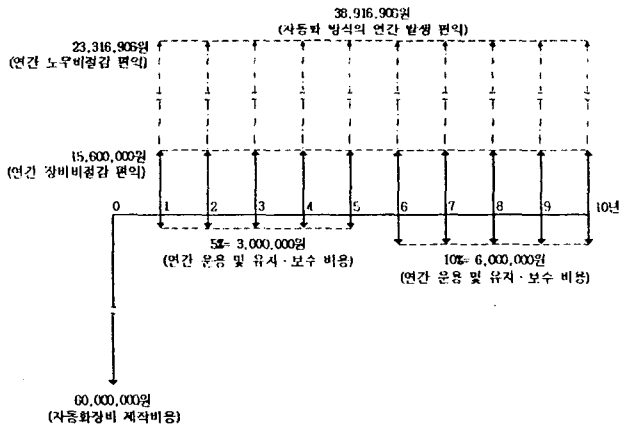

그림 9. 흄관매설 자동화 장비의 현금 흐름도

현금 흐름도를 바탕으로 경제적 타당성 평가 방법에서 제시되었던 경제성 분석기법들을 적용하여 흄관매설 자동화 장비의 경제적 타당성을 분석한 결과, 표 3과 같이 편익/비용 비율은 2.80으로 1보다 큰 값이 산출되어 자동화장비 개발의 타당성을 확보할 수 있었다. 또한, 수익률은 최소기대수익률 10%를 크게 상회하는 58.8%, 손익분기점은 2년 7개월로 산정되었다. 한편, 본 연구에서는 가정 및 변수를 최소로 산정하였기 때문에 개발 장비의 현장 적용 및 민감도 분석을 통한 개발 장비의 경제적 타당성 분석 결과는 표 3에 나타난 결과보다 더욱 긍정적일 것으로 기대된다.

표 3. 흄관매설 자동화 장비의 경제적 타당성 분석 결과

구분		산출값	분석 결과
경제적 타당성 분석	편익/비용 비율	2.80	1보다 큰 2.80이 산출되었으므로, 추가비용보다 더 큰 편익이 발생
	수익률	58.8%	최소기대수익률 10%보다 크게 상회하는 수익성 창출
	손익분기점	2년 7개월	손익분기점인 2년 7개월 이후부터는 자동화 장비 도입에 따른 순이익 발생
	민감도	-	연간 작업가능일수, 최소기대수익률, 자동화 장비 도입에 따른 노무절감 인원수를 변수로 설정하여, 다양한 업체의 특성에 맞는(즉, 변수 변화에 따른) 경제성 분석결과의 변화를 확인하는 것이 가능

4.3 안전성 및 품질 분석

재래식 흄관매설 방식은 노무자의 안전사고 위험을 항상 내재한 상태로 수행되고 있는 실정이나 자동화 장비를 이용하여 흄관을 매설할 경우 노무자가 터파기 내에 들어가지 않고 백호와 근접거리에서 작업을 수행하지 않기 때문에 흄관매설 작업상의 위험요소들이 근본적으로 배제된다. 또한 품질 측면에서는 흄관매설 자동화 장비를 이용할 경우 노무인력을 대체하는 자동화 시공에 의해 균일한 품질을 확보할 수 있고 무리한 관이음에 의한 접합부의 파손 및 불균등한 힘이 가해짐으로써 발생 가능한 접합상태 불량 등의 품질 저해요소를 제거할 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서 개발한 흄관매설 자동화 장비를 이용할 경우 재래식 방식에 비해 안전성 및 품질 향상을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 흄관매설 자동화 장비의 성능분석을 위해 성능평가 모델 및 방법론을 제시하였으며, 이를 바탕으로 재래식 흄관매설 방식과 자동화 방식을 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 생산성 측면에서 흄관매설을 자동화할 경우 재래식 방식보다 65%의 생산성 향상 효과가 있는 것으로 분석되었다.

2) 경제적 타당성 측면에서 재래식 방식과 비교하여 자동화 방식 도입 시 편익/비용 비율은 2.80, 수익률은 58.8%, 손익분기점은 2년 7개월로 분석되었다.

3) 안전성 및 품질 측면에서 자동화 방식은 안전사고 발생 원인을 근원적으로 제거하고 균일한 품질을 확보할 수 있으며 하자 발생을 미연에 방지할 수 있는 것으로 분석되었다.

4) 따라서, 흄관매설 자동화 방식은 재래식 방식보다 생산성, 경제성 타당성, 안전성 및 품질 측면에서 우수한 성능을 발휘할 수 있는 것으로 분석되었다.

본 연구에서 제시한 흄관매설 자동화 장비의 성능분석 결과는 추후 개발 주체의 마케팅(marketing) 분석 자료로 활용될 수 있으며, 성능평가 모델 및 방법론은 향후 건설 자동화 기술관련 연구개발의 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구 과제로써 안전성 및 품질 등의 정성적 성능을 정량화시키는 방법에 대한 연구가 요구된다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, "콘크리트하수관 매설용 원격조종장비개발", 최종연구보고서, 건설교통부, 2003
2. 손석호, "흄관매설 자동화 장비 개발을 위한 기술적·경제적 타당성 분석에 관한 연구", 석사학위논문, 인하대학교 건축공학과, 2001. 8
3. 윤영호 외, "흄관매설용 자동화 장비의 프로토타입 개발", 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 22권, 2호, 2002, p.p. 439~442
4. 이준복, "건설자동화시공 장비개발 및 성과평가에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 17권, 7호, 2001, p.p. 93~100

Abstract

A tele-operated hume concrete pipe laying machine has been developed to solve several problems on safety, quality, productivity, etc. It is required to propose a performance evaluation model and methodology in order to measure productivity, economic feasibility, quality and safety. The primary objective of this study is to propose a model and methodology for the performance evaluation of the developed tele-operated hume concrete pipe laying machine. Furthermore, this study evaluates its performance compared with the existing hume pipe laying work by using data which obtained in field trials. It is anticipated that the proposed model and methodology might be effectively used in analyzing the performance of other automation robots.

keywords : hume concrete pipe, performance evaluation, productivity, economic feasibility, construction automation, robot