

도로공사 공정계획을 위한 공정 로직 및 건설장비 효율화 방안

송호정¹ · 최재현*

¹한국기술교육대학교 건축공학부

A methodology for an effective utilization of construction equipment for highway construction projects

Song, Hojeong¹, Choi, Jaehyun*

¹School of Architectural Engineering, Korea University of Technology and Education

Abstract : Highway construction is a combination of linear, repetitive, and highly equipment intensive operations. Various types of construction equipment are deployed to ensure uninterrupted performance of construction, and thus productivity improvement and cost-saving can be achieved through well-thought-out planning. The selection of construction equipment is dependent upon construction sequence, site conditions, and construction methods. In the process of planning, management should consider various types of construction methods per each type of construction operation. Also, management should map out proper construction equipment operation plan that takes the construction duration and cost measures into consideration. However, limited availability of historic data from the similar types of operations has been a stumbling block to proper construction planning, making the operations performed based upon experience and intuition guided by rules-of-thumb. As a consequence, the planning phase rarely provided an adequate validity in the implementation phase. The researchers developed a process logic for each construction type that management can utilize from early phase of highway construction planning process. Moreover, derived the construction equipment combination optimized for efficiency by using the process simulation technique. The developed method is expected to be useful for the decision-making process that aims to evaluate efficiency of various process plans and to ensure optimal selection of construction equipment for highway construction projects

Keywords : Highway Construction, Planning and Scheduling Equipment Combinations, Process Simulation

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

한국도로공사 2013년도 예산안에 따르면 도로 건설부분의 분야별 세출예산이 2012년도 대비 약 12% 증가된 28,416억 원으로 집행 되었으며, 유지관리비 및 시설개량의 해당 예산 또한 소폭 상승하였다. 이와 같이 도로 건설부분에 대한 투자가 확대 되면서 전체 도로 공사비의 높은 비중을 차지하는 건설장비의 효율적 운영과 투입에 대한 중요성이 증가되고 있는 추세이다.

도로공사는 선형적이고 반복적인 공사로 건설장비에 대한 의존도가 높기 때문에 장비운용방식에 의한 생산성 향상 및 공사비 절감 효과가 크다. 도로공사에서 사용되는 건설장비의 경우, 기종별 성능 및 규격이 다양한 고가의 자원이며 공사의 규모, 시공방법, 현장조건에 따라 다양한 장비조합이 가능하다. 또한 건설장비의 조합은 공사기간 및 공사비에 직접적인 영향을 미치기 때문에 프로젝트 성패와 직결되는 핵심적인 사항이다.

본 연구에서는 건설산업 중 도로공사 공정계획 수립을 위한 대상공종별 공정로직을 개발하고, 세부 공종별 건설장비조합을 분석하여 현장상황 및 공법에 맞는 효율적인 건설장비 운영계획을 수립하는데 적용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

도로공사는 공사의 유형 및 성격, 현장여건에 따라 세부 시공절차가 달라진다. 공사의 유형을 결정짓는 다양한 변수들이 존재하며 공사의 성격상, 용도와 기능별로 달리 투입되는

* Corresponding author: Choi, Jaehyun, School of Architectural Engineering, Korea University of Technology and Education, Cheon-an 330-708, Korea
E-mail: Jay.choi@koreatech.ac.kr
Received July 30, 2014; revised September 29, 2014
accepted October 10, 2014

건설장비는 다양한 조합이 가능하다. 도로공사에서의 세부 시공절차에 따른 효율적인 건설장비의 운용은 성공적 공사 수행의 필수조건이라 할 수 있다.

본 연구는 도로공사에서 건설장비의 활용도가 높고 공사비가 편중된 주요 대상공종을 선정하였다. 선정된 공종에 대해 도로공사의 시공절차 분석을 통한 공정로직의 개발 및 세부 로직별 효율적인 건설장비 운용방안에 대한 연구를 수행하였다. 연구절차 및 방법은 다음과 같다.

첫째, 도로공사 기존 연구고찰 및 관련 문헌을 분석하여 주요 공종별 세부 작업을 분류하고 작업 간 선·후행 관계를 토대로 기본 공정로직을 개발하였다.

둘째, 개발된 공정로직을 기반으로 구성된 공종들을 세분화하고 사용 건설장비조합을 파악하여 관리단위로 분할된 세부 공정로직을 개발하였다. 관리단위로의 분할은 세부공정로직을 프로세스 시뮬레이션 기법을 적용한 모델로 구축하기 위함이며, 공법과 시공순서의 선택에 따라 일반 및 대체가능 건설장비조합을 파악할 수 있다.

셋째, 도로공사의 대표공종 중 하나인 아스팔트 콘크리트 포장공사의 세부공종별 공정로직에 따른 프로세스 시뮬레이션 모델을 개발하여 예상되는 공사기간 및 공사비용을 산출하고, 시뮬레이션 소프트웨어 운용이 미숙한 사용자를 고려한 건설장비 운용시간 산정방안을 마련하였다.

넷째, 공사 완료된 도로 확장공사 사례를 시뮬레이션 모델에 적용함으로써, 모델의 현장 적용성을 검증하고 효율적인 건설장비 운용방안을 분석하였다.

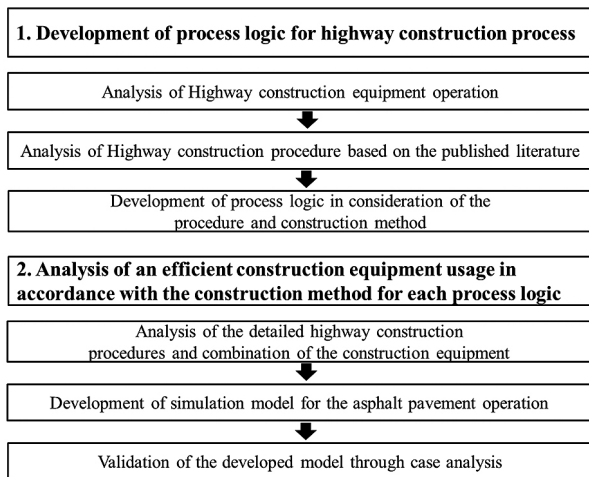


Fig. 1. Research method and procedure

2. 이론적 고찰

2.1 기존 연구 현황

국내연구 조사결과 기존연구는 건설 산업에서의 공정 및 공사비의 실용적 연계를 위한 연구와 시뮬레이션 적용을 통

한 장비의 생산성 향상에 관한 연구로 분류할 수 있다.

공정과 공사비의 통합관리를 위한 연구는 공정과 비용의 연계, 공사 진도관리, 시스템 구축과 관련하여 진행되고 있다. “공공 도로건설사업 공정·원가 통합관리 시스템 구축 연구”(Kim et al. 2001), “공정관리 적용에 관한 연구”(Lee et al. 2011), “공정-내역정보 연계를 위한 통합건설정보분류체계기반의 공통 WBS 활용방안”(Yun and Kim 2005) 등이 진행되었으나 공정관리 요소기술인 공정과 공사비 연계를 통한 디지털 수량산출 기준 마련과 공종별 작업조, 생산성 등에 관한 세부 작업들의 정보 습득을 위한 연구로 한정된다.

건설산업에서의 시뮬레이션 적용을 통한 생산성 향상에 관한 국내·외의 연구는 “BIM을 적용한 건설공사 중장비 투입 계획 방안”(Kang et al. 2007), “시뮬레이션을 활용한 건설현장에서의 중장비 운영 최적화 방안에 관한 연구”(Son et al. 2007)가 있으며, “토공장비 선정 및 조합을 위한 영향요인 연구”(Choi et al. 2010) 등의 시뮬레이션의 효율성 검토에 따른 건설장비의 선정과 조합에 관한 연구가 진행되었다. 또한, 건설장비 운용에 영향을 주는 다양한 제한 요소들의 분석을 통한 최소비용의 장비조합 모델 (Nizar et al. 2012), 토공유동에 따른 통합 객관화 기능(Objective function)을 활용한 최적화 모델(Moselhi et al. 2009) 등 최적 장비조합 선정 및 지원에 관련된 다양한 연구가 수행되었다.

기존에 수행된 연구들은 대상공종이 대부분 토공사에 한정되어 있으며, 공사수행 전 공정계획을 위한 체계적인 방안으로서의 표준 공정로직 개발과 세부 공종별 건설장비조합에 대한 시뮬레이션 적용은 미진한 단계이다.

2.2 프로세스 시뮬레이션의 개념

시뮬레이션은 프로세스의 본질에 대한 일반적인 통찰력을 제공하고 불확실성을 가진 대상에 대한 최적의 계획 수립을 가능하게 하는 대표적인 방법론이다. 시뮬레이션을 이용하여 실제 현장에서 발생할 수 있는 상황과 제한 조건들을 가상의 컴퓨터 공간에서 구현함으로써, 공정계획 및 비용을 포함한 공사 관리에서 최적의 방안을 계획할 수 있는 효과적인 관리 도구이다(Lee et al. 2007). 또한 실제 공사 수행 시에 발생할 수 있는 제한사항과 문제점을 예측하고 분석해볼 수 있는 기회를 제공한다.

다양한 시뮬레이션 도구 중 ARENA 시뮬레이션 소프트웨어는 미국 Rockwell Software사 제품으로 PC기반의 시뮬레이션 언어로 설명과 예측, 측정에 효과적이고, 효율적인 공사 수행에 도움을 주는 프로세스 시뮬레이션 도구이다. ARENA 시뮬레이션은 주로 산업공학 분야에 사용되어지며 경제성 향상에 목표를 두고 있다.

본 연구에서는 건설산업 중 도로공사에 프로세스 시뮬레이션을 적용함으로써, 시뮬레이션 모델 구축을 통한 건설장비

의 효율적 운영방안과 예상 공사비 및 공사기간을 산정하는 도구로 활용하고자 한다.

3. 도로공사 주요 공종의 공정로직 및 건설 장비조합 분석

3.1 도로공사의 주요 시공절차 분석을 통한 공정로직 개발

기존 도로공사에서는 세부공종 및 사용장비에 대한 기준과 정의가 문헌마다 상이하고, 공정계획을 위한 기초자료가 부족하여 시공자의 경험과 직관에 의존한 공사를 수행하고 있다. 따라서 주요 공종별 공정로직의 개발을 위한 도로공사의 시공절차 및 건설장비조합에 대한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 도로공사의 공종별 공사비 비중 및 공사기간을 고려하여 장비조합의 효율성을 높일 수 있는 주요 공종들을 선별하였다. 주요 공종으로 선별된 토공, 배수공, 포장공, 교통안전시설공을 대상으로 국토교통부에서 발간한 국도건설공사설계실무요령(2008)을 기준으로 세부작업을 분류하고 체계화하였다. 주요 공종 구성의 세부작업들을 Level 2부터 4까지 대, 중, 소 공종의 단위로 분류하였으며, 도로공사 표준시방서, 고속도로 실무설계지침서 등 다양한 문헌들의 시공절차를 분석하여 세부작업 간 선·후행 관계가 정립된 공정로직으로 개발하였다. 도로공사의 주요 시공절차 분석을 통한 주요 공종별 공정로직 개발은 Fig. 2, 3에 예시되어 있다. Fig. 3의 포장공사를 예로 들면, 공정로직은 공사를 구성하는 Level 2단위 대표 공종간 시공순서를 나타내며(그림 상부), 번호에 따라 관리단위별 구체적인 세부 공정로직

으로 분류 된다(그림 하부). 번호체계화 된 3-1은 쇄석골재 생산, 동상방지층, 보조기층의 상위공종으로 구성되며, 사용되는 재료에 따라 3-2, 3-3은 Type-A인 시멘트 콘크리트 포장공사, 3-4의 Type-B는 아스팔트 콘크리트 포장공사로 분류하여 시공절차에 따른 대표 공종 간 로직을 체계화하였다. 공정로직의 중·하부에는 대·중·소 공종의 레벨단위로 세분화하여 대표공종을 구성하는 세부 작업들 간의 시공순서에 따른 관계를 구체적으로 정립하였다. 세분화 된 공종은 Fig. 2, 3에 레벨 단위 별로 예시되어 있다. 또한 공정로직안의 접선은 상위 공종안의 하위공종을 나타내며, 적색 접선은 하나 이상의 공법 및 작업을 선별적으로 선택할 수 있음을 나타낸다.

개발된 공종별 공정로직을 이용하여 공종에 따른 세부작업의 구성 및 시공순서를 연계할 수 있으며, 세부 공정계획을 수립하기 위한 기초로 활용할 수 있다. 이와 동일한 형식으로 토공사의 일반로직을 개발 하였으며 그 예시는 Fig. 2와 같다.

3.2 주요 공종별 세부 공정로직에 따른 장비조합 분석

도로공사의 세부 공종들은 시공순서, 현장상황, 공법에 따라 다양한 선택이 가능하기 때문에 공정계획 시 공종별 연계에 따른 구체적인 작업 및 공법에 대한 다양한 고려가 필요하다. 시공자는 현장조건에 맞는 작업을 선택하고 투입되는 장비의 성능 및 특성, 수량 등을 사전에 파악 하여 건설장비 운용 계획에 의한 공사 기간 및 비용 절감방안을 고려해야 한다. 개발된 도로공사 공종별 공정로직에 따라 주요 공종별 하위 작업들의 공정순서를 고려하여 세부 관리단위로 분류 하

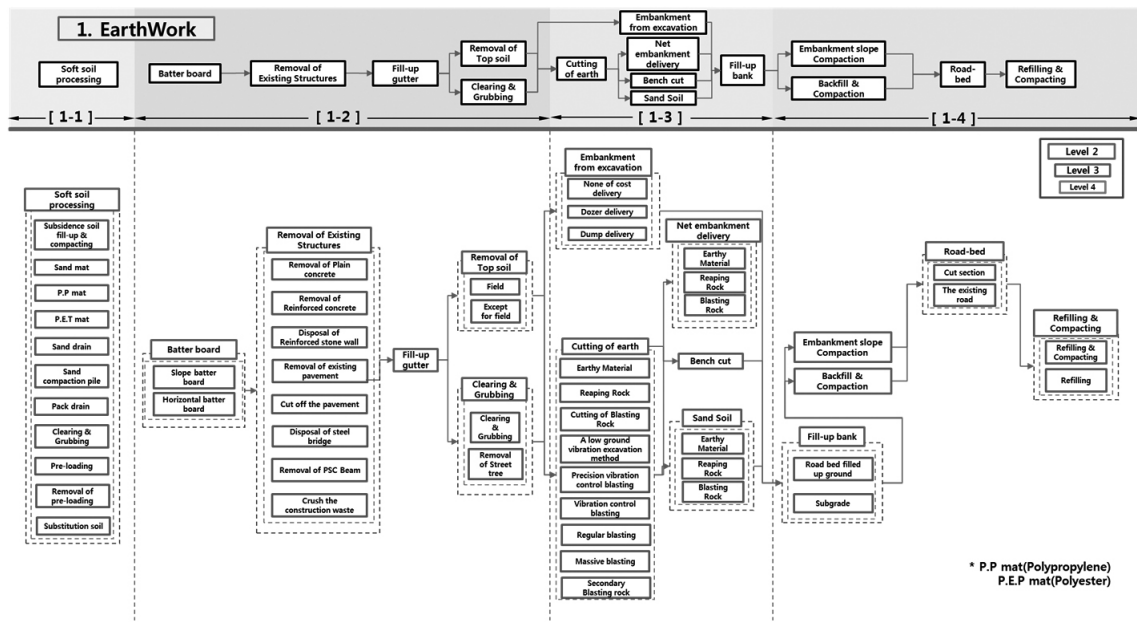


Fig. 2. Process Logic for Earthwork operation

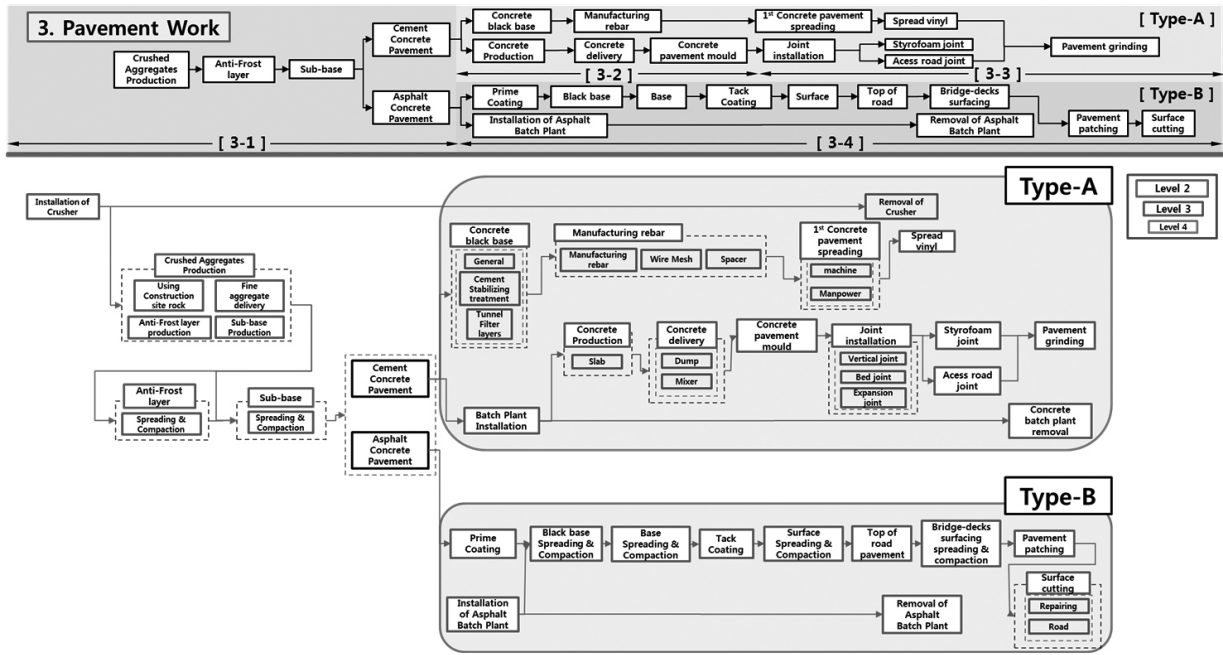


Fig. 3. Process Logic for Pavement operation

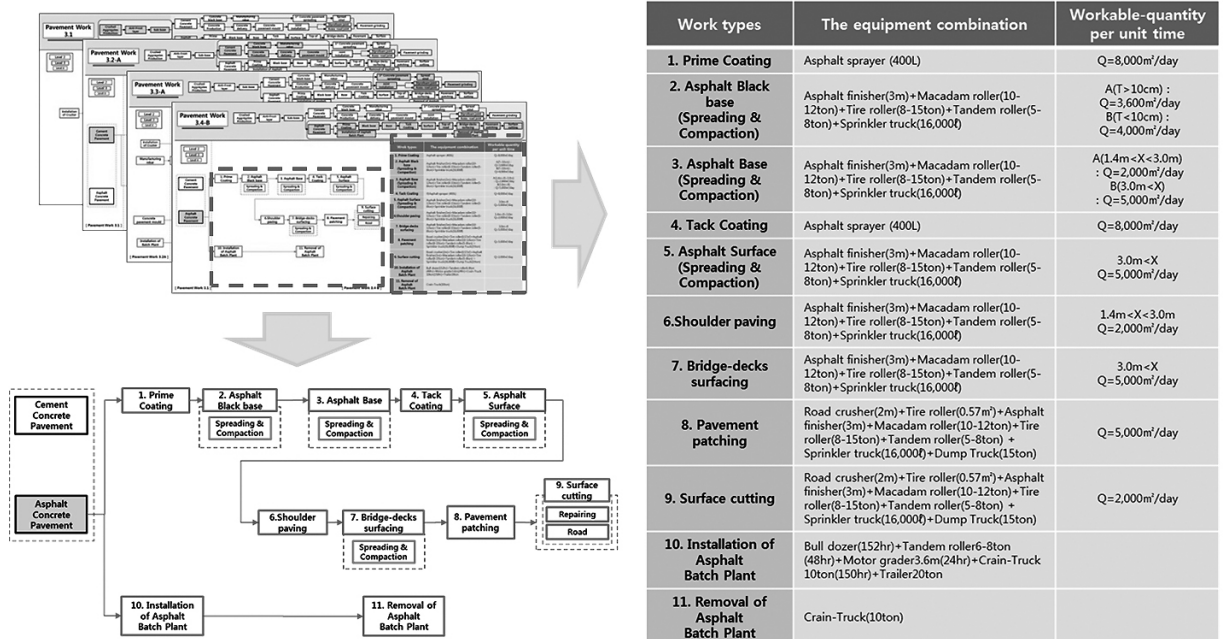


Fig. 4. Detailed process Logic for Pavement operation

였다. 관리단위별 세분화된 공종들 간의 연계를 통하여 현장 상황에 따른 공법 및 시공순서를 선택할 수 있도록 하였다. 또한 도로공사 관련 문헌을 기준으로 공종별 건설장비 조합을 분석하여 건설장비의 일반적인 시공 절차에 따른 주 공정의 장비조합과 대체 가능 장비조합으로 분류하여 상황에 맞

는 건설장비조합을 선별적으로 고려할 수 있게 하였다. 표준 품셈(2012)의 건설장비 작업량 산정식을 참고하여 건설장비의 개별 및 조합별 작업량(Q값)을 산정할 수 있게 하였으며, 선택된 공종에 따른 건설장비 작업량은 추후 프로세스 시뮬레이션 모델의 장비운용시간 산정을 위한 요소로 활용되어진

다. 개발된 포장공사의 세부 공정로직은 위의 Fig. 4와 같다. 포장공사는 총 4개의 관리단위로 분류되며, Fig. 4는 그 중 4번째 아스팔트 포장의 공정로직을 예시 한 것이다. 왼쪽 하단은 아스팔트 포장의 세부 공정로직을 확대 도식화 한 것이며, 오른쪽은 아스팔트 포장의 세부 공종별 사용되는 건설장비조합과 조합별 작업량을 나타낸 것이다.

주요 공종별 세부 공정로직에 따른 건설장비조합은 도로공사 수행에 있어 반드시 필요한 주요 장비들로 구성 되어있으며 장비를 선별적으로 선택할 수 있도록 기본 자료로 제시하였다. 시공자는 위의 도로공사 세부 공정로직을 활용하여 실제 자신이 수행하고자 하는 작업들을 구체적으로 선정하고 현장조건에 따른 다양한 건설장비를 조합하여 공정계획 초기부터 효율적인 건설장비 운용 방안을 수립할 수 있다.

4. 아스팔트 포장공사 공정로직 기반의 시뮬레이션 모델 개발

본 연구는 앞서 수행된 도로공사 주요 공종별 세부 공정로직 개발 및 건설 장비조합 분석을 토대로 도로공사의 대상 공종 중 아스팔트 콘크리트 포장공사를 대상으로 시뮬레이션 모델이 개발되었으며 상세절차는 아래와 같다.

4.1 아스팔트 포장공사의 시공절차 분석

공종마다 사용되는 건설장비의 조합이 비슷하고 동일한 작업을 반복 수행하는 특성을 가진 포장공사는 장비의 활용도가 높아 효율적인 공사 관리방안이 중요한 공종이다. 도로 포장은 일반적으로 포장 재료에 따라 시멘트 콘크리트 포장, 아스팔트 콘크리트 포장으로 구분되며, 세부공법 및 시공절차가 다양하게 변경된다. 아스팔트 콘크리트 포장공사의 경우, 아스팔트 혼합물 생산 및 운반, 동상방지층, 보조기층, 기층의 포설 및 다짐, 역청재 살포, 아스팔트 콘크리트 중간층, 표층의 포설 및 다짐의 세부 작업들로 구성되며 시공방법과 현장상황에 맞는 건설장비 조합을 선정하여 공사를 수행하게 된다.

아스팔트 포장공사의 시뮬레이션 모델 개발을 위해서는 세부 공정로직의 시공절차에 대한 분석과 도로 포장의 일반적인 작업방법 및 장비운용에 대한 실무적 지식을 전제로 하며, 그 전제하에 시뮬레이션 결과 값에 대한 정확성과 신뢰성이 확보된다. 아스팔트 포장공사 관련 문헌의 시공방법을 전제로 분석된 장비운용 방안은 아래 Table 1과 같다.

Table 1에 나타난 아스팔트 포장공사의 공종별 시공방법 및 건설장비조합은 도로공사 표준시방서(2009) 및 고속도로 설계실무 지침서(2008)를 토대로 아스팔트 포장공사의 시공방안이며, 이는 기존에 개발된 공정로직과 함께 시뮬레이션 모델 생성을 위한 기본 이론으로 적용되어진다.

Table 1. Construction methods and equipment combination for Asphalt pavement operation

Activities	Works	Construction method	Equipment combination
Anti-freeze layer, Subbase	Preparation	· Foreign material on surface	- Motor grader (3.6m)
	Spreading	· equality spreading of material · Spreading equipment concurrently	- Tire roller (8-15ton)
	Compaction	· Repeated compaction : Vibration roller(8 times), Tire roller(4 times)	- Vibration roller (10ton) - Sprinkler truck (16,000l)
Prime, Tack coat	Preparation	· Foreign material on surface	- Asphalt distributor (3000l)
	Spreading	· Field plot testing before construction · Equipment check-up, Spreading at one go	- Narrow place :Engine, Hand Sprayer(400l)
	Curing	· Curing: Prime coat(48hr), Tack coat(24hr)	
Asphalt concrete Base course, Intermediate layer, Surface course	Cleaning	· Foreign material on surface · Field plot testing before onstruction	- Asphalt finisher (3m)
	Spreading	· Superlevation section: Highway centerline · Direction parallel section: Shoulder→Highway centerline	- Macadam roller (10-12ton) - Tire roller (8-15ton)
	Compaction / Finish	· Steady speed of roller, Edge of repetitive compaction, Rotation control, Preparation 1(min) · Compaction : Macadam(3회), Tandem(10회), Tire(4회) · Curing	- Tandem roller (5-8ton) - Sprinkler truck (16,000l)

4.2 아스팔트 포장공사의 시뮬레이션 모델 구축

기존 연구방법에 소개된 바와 같이 프로세스 시뮬레이션 도구로서 상용화된 소프트웨어인 ARENA Ver.14.1을 사용하여 시공자 선택에 따른 공종 및 건설장비조합을 시뮬레이션 모델에 반영하였다. 또한 시뮬레이션상의 Visual Basic Application(VBA)과 Microsoft Excel을 연동하여 시공자의 건설장비 운용시간 산정에 대한 사용자 편의성을 향상하였다.

Table 1의 공종별 시공방법 및 건설장비조합을 적용하여 개발된 아스팔트 포장공사 시뮬레이션 모델은 Fig. 5와 같다. 이 모델은 Fig. 4의 포장공사 세부로직에 따른 공종별 건설장비의 사용과 시공방법을 반영한 것이다.

시뮬레이션 모델의 입력변수 중 장비의 시간당 작업경비는 건축공사 표준품셈(2012) 및 종합적산정보를 기준으로 규격별 재료비와 노무비, 경비의 합산으로 설정하였다. 전체 시뮬레이션 시간은 1일 작업시간인 8시간 기준으로 가정하였으며, 장비의 가동 유무에 따라 Busy Cost와 Idle Cost로 분류하였다. 유휴상태 비용인 Idle Cost의 경우는 가동상태 비용 Busy Cost에서의 재료비, 경비를 제외한 값으로 산정하였으며 시뮬레이션 전체 비용단위를 달러(\$)로 변환하여 입력하였다.

아스팔트 포장공사 시뮬레이션 모델의 경우, 대상 공사의 예상기간 및 비용 분석이 가능하며, 공종별 현장상황 및 물량에 따른 건설장비의 운용시간을 사용자가 직접 산정할 수 있다. 건설장비 운용시간을 산정하기 위해서는 시뮬레이션 모델안의 장비 및 공종별 작업시간을 직접 입력해야 하나 시뮬레이션 운용이 미숙한 사용자를 고려하였다. VBA(Visual Basic Application)를 활용하여 시뮬레이션 소프트웨어와 엑셀 스프레드시트가 연계된 운용시간 산정 양식으로 개발하였다(Fig. 6).

사용자 편의를 위한 건설장비 운용시간 산정 양식에서 기존에 선택한 세부 공정로직에 따라 현장상황을 고려한 공종 및 건설장비 조합을 선택한다. 선택된 공종의 건설장비를 작업량 산정식을 참고하여 작업량 산정을 위한 산정계수와 공종별 물량 수치를 양식에 직접 기입한다. 기입된 물량과 작업량 산정을 위한 변수 값은 수식으로 계산되어 각 장비별 운용시간이 산정되어진다. 이러한 방식으로 산정된 공종별 건설장비 운용시간은 시뮬레이션 모델 내 시간 산정모듈로 자동 입력되어진다.

5. 사례분석을 통한 프로세스 시뮬레이션 모델 적용

5.1 대상 사업의 개요 및 아스팔트 포장공사 장비 조합 계획

개발되어진 프로세스 시뮬레이션 모델은 실제 수행된 도로포장 확장공사를 대상으로 다양한 건설장비 조합들을 계획하여 아스팔트 포장 시뮬레이션 모델의 현장 적용성을 검증하였다. 대상 현장은 2003년 착수된 도로연장 5.13(Km), 전체길이가 9.92(km), 폭원 20(m) 4차선 도로확장 공사이다. 그 중 포장계획 STA.4+600.00 ~ STA.5+ 138.81에 해당하는 본선 차도부 약 1,500(m)를 적용대상 구간으로 선정하였다. 대상공정은 보조기층, 프라이م 코팅, 아스콘 기층, 텍코팅, 아스콘 중간층 및 표층, 교면포장이며, 도로공사 주요 문헌(국도건설공사설계실무요령, 도로공사 표준시방서, 실무 매뉴얼)에 명시되어 있는 일반적인 건설장비 조합을 활용하였다. 문헌을 기준으로, 도로공사 표층의 경우 굴삭기, 모터 그레이더, 아스팔트 피니셔 등의 포설장비로 작업을 수행하

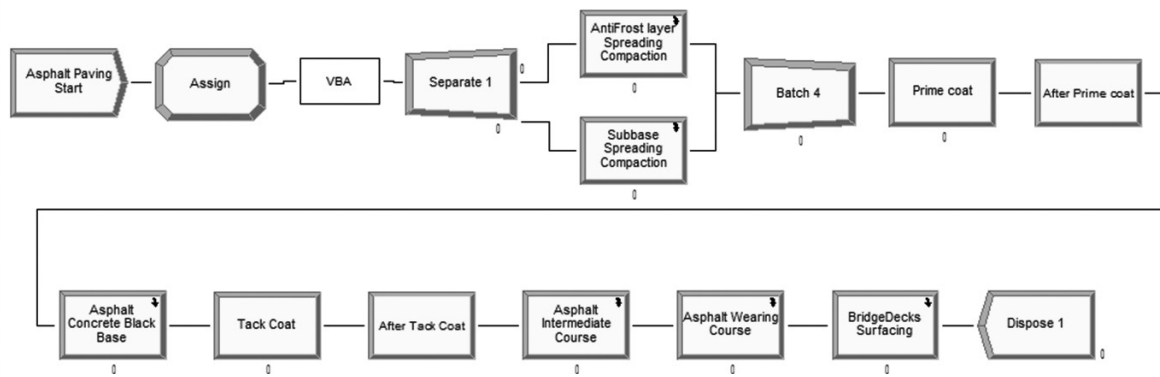


Fig. 5. Simulation model for the asphalt pavement operation

3. Pavement works	Level 2	Level 3	Equipment	Combination of Construction equipment	Workable-quantity per unit time(m3/hr)	Elements of Workable-quantity per unit time																
						q	k	f	E	CM	I	D1	H	p	V	W	N	Quantity(m3)	Work time(hr)			
3.1 Pavement work	3. Base course	Spreading & Compaction	Excavation equipment	Excavator	$Q=W*V*E*t*d$																	
				Motor grader	$Q=W*V*E*t*d$																	
			Compaction equipment 1	Macadam roller	$Q=W*V*E*t*d$																	
				Tire roller	$Q=W*V*E*t*d$																	
				Vibration roller	$Q=1000*V*W*E*t*d*/N$																	
				Blank																		
			Compaction equipment 2	Macadam roller																		
				Vibration roller																		
			Sprinkler equipment				$I*W*V*E*t*d$															
			4. Tack coat	Spreading	Spreading equipment	Blank																
	Blank																					
	Blank																					
	Blank																					
	Blank																					

Fig. 6. Input format for simulation model (MS Excel)

며, 머케덤, 진동, 텐덤, 타이어롤러 등의 장비들은 다짐작업에서 공통적으로 반복 사용되어진다. 또한 포장면의 결함을 개선시키기 위해 실시하는 프라임코팅, 텍코팅 작업은 역청 재료를 균일하게 살포할 수 있는 아스팔트 디스트리뷰터나 협소한 지역에 사용되는 포설장비인 아스팔트 스프레이어를 사용한다.

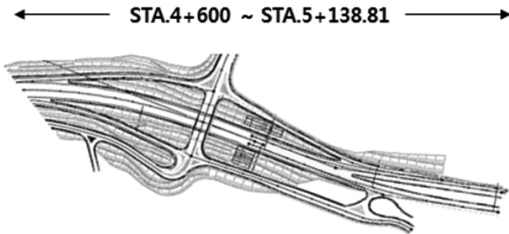


Fig. 7. Linear programming for Case study project

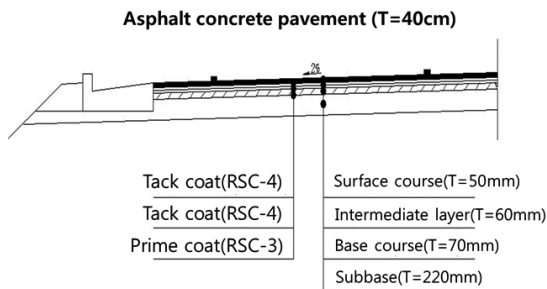


Fig. 8. Typical cross section for asphalt concrete pavement operation

Table 2. Quantity of pavement operation

Activities	Subbase	Prime Coating	Tack Coating	Base, Surface course, Intermediate, B-surfacing
Quantity	725.4(M ³)	3,297.32(M ²)	6,574.6(M ²)	3,297.32(M ²)

대상구간의 동일 물량을 시공한다는 조건하에 세부 작업 수행에 따른 건설장비의 기종, 대수, 규격을 달리하여 아스팔트 포장공사의 다양한 장비조합을 계획하였다. 해당 공종별 주요 장비의 요소들만 변경하였으며 공통적으로 반복 사용되어지는 보조 장비들은 조합 변경 계획에서 제외 하였다. 아스팔트 포장공사 주요 공종별 장비조합 계획은 Table 3과 같다. 기본 장비조합의 대수 및 조합은 실제 현장에서 사용된 장비조합을 기준으로 하였으며, 그 외의 다양한 장비조합들은 문헌을 기준으로 분석된 아스팔트 포장공사에 사용되는 주요 장비들이다. 모터 그레이더(3m), 아스팔트 디스트리뷰터(3,800l), 아스팔트 피니셔(3m) 등 주요 장비들을 변경하여 시뮬레이션 수행을 위한 대안들로 구성하였다.

Table 3. Main combination alternatives for construction equipment utilization

Activities	Subbase	Prime, Tack coat	Base Course, Surface course, Intermediate, Bridge-decks surfacing
Auxiliary Equipment	Vibration, Tire, Tandem roller, 1	-	Macadam, Tire, Tandem roller, 1
Basic Combination	Motor grader (3.6m), 1	Distributor (3,800l), 1	Asphalt finisher (3m), 1
Combination1	Motor grader (3.6m), 1	Distributor (3,000l), 1	Asphalt finisher (3m), 2
Combination2	Motor grader (3.6m), 1	Sprayer (400), 1	Asphalt finisher (3m), 1
Combination3	Motor grader (3.6m), 1	Distributor (3,800l), 1	Asphalt finisher (3m), 2
Combination4	Motor grader (3.6m), 1	Distributor (3,000l), 1	Asphalt finisher (3m), 1
Combination5	Motor grader (3.6m), 1	Sprayer (400), 1	Asphalt finisher (3m), 2
Combination6	Excavator (1m3), 1	Distributor (3,800l), 1	Asphalt finisher (3m), 1
Combination7	Excavator (1m3), 1	Distributor (3,000l), 1	Asphalt finisher (3m), 2
Combination8	Excavator (1m3), 1	Sprayer (400), 1	Asphalt finisher (3m), 1
Combination9	Excavator (1m3), 1	Distributor (3,800l), 1	Asphalt finisher (3m), 2
Combination10	Excavator (1m3), 1	Distributor (3,000l), 1	Asphalt finisher (3m), 1
Combination11	Excavator (1m3), 1	Sprayer (400), 1	Asphalt finisher (3m), 2

5.2 시뮬레이션 결과 분석

공사수행 현장 구간을 대상으로 Table 3의 아스팔트 포장공사 장비조합 계획을 시뮬레이션 모델에 적용하였으며 대기 시간, 공사기간, 비용 측면에서 결과 값을 비교 분석하였다. 다양한 장비조합 계획을 공정로직에 적용하여 기종 및 규격 변경에 따른 경제성 향상방안을 고려하였다.

결과 요소 중 Busy/Idle Cost는 장비 가동유무에 따른 비용의 총계이며 Wait Time은 작업 및 자원이 대기하여 발생한 불필요한 시간을 의미한다. Value added Time의 경우 생산성과 직접적으로 관계되는 부분으로 공종별 자원이 가동되는 실제 시뮬레이션의 수행 시간을 나타낸다. 생산성 최대화, 공사비 최소화, 대기시간의 최소화는 일반적인 목표로 설정하는 결과 요소들이지만 공사의 성격 및 상황에 따라 우선시 되어야 하는 요소들이 변경될 수 있기 때문에 다양한 측면을 고려한 결과 분석이 이루어져야 한다. 다양한 장비조합에 따른 시뮬레이션의 결과분석을 위해, 장비조합의 영향에 따른 결과요소들의 우선순위를 3가지 주요한 목적인 (1)생산성 최대화, (2)공사비 최소화, (3)유휴 시간 및 비용의 최소화로 설정하였다. 생산성은 투입된 자원에 대하여 산출된 생산량이 어느 정도인가를 대변하는 척도이다. 따라서 생산성이 높을수록 동일한 물량에 대한 자원의 처리속도가 향상되어 공사기간이 단축된다. 유휴시간이란 자원이 가동되지 않는 비생산

적인 시간, 현재 사용되고 있지 않으나 앞으로 사용될 자원에 대한 불필요한 시간을 뜻하며, 원활한 공사수행 저해와 비용 증가를 초래할 수 있다. 본 시뮬레이션에서의 유휴시간은 장비들 간의 비효율적인 간섭 또는 작업에 사용될 수 있는 한정된 장비 대수 이외의 자원들이 대기함에 따라 발생하게 된다.

Table 4. Result summary for alternative combinations

Scenario Properties	Value added Time(hr)	Busy/Idle Cost(\$)	Total Cost(\$)	Wait Time(hr)
Combination 9	288.50	20,713/25,747	46,460	162.49
Combination 3	290.64	20,841/25,144	46,985	164.63
Combination7	290.97	20,778/26,205	46,983	164.96
Combination1	293.11	20,906/26,602	47,508	167.13
Combination11	295.10	20,603/26,972	47,575	169.09
Combination5	297.24	20,732/31,372	52,104	171.23
Combination6	354.42	20,710/34,182	54,892	228.41
Basic Combination	356.56	20,838/34,529	55,367	230.55
Combination10	356.89	20,755/34,583	55,357	230.88
Combination4	359.03	20,903/34,930	55,833	233.02
Combination8	361.02	20,600/35,253	55,853	235.01
Combination2	363.16	20,728/35,600	56,328	237.15

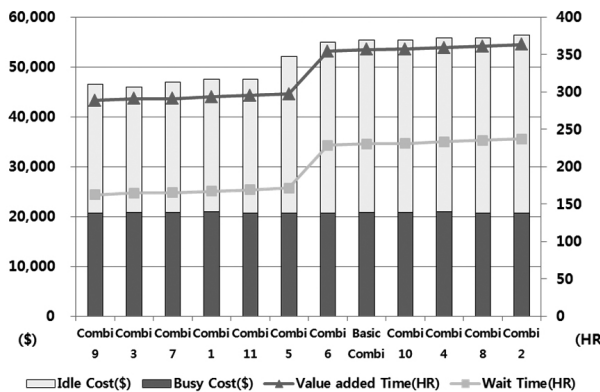


Fig. 9. The results of construction equipment utilization

Table 3의 12가지 장비조합을 토대로 시뮬레이션을 수행한 최종결과는 Table 4와 같다. 분석결과 장비조합 9의 생산성이 가장 높고 공사비가 최소인 것으로 나타났다. 최적으로 선정된 장비조합 9는 실제현장 조합 대비, 공사기간 20% 단축, 공사비용 17%의 감소된 결과로 제시되었다. 장비조합 3과 7의 경우에는 공사기간 및 공사비용의 유사함에 비해 장비의 유휴비용에 있어 큰 차이를 보여주었으며, 장비조합 11과 5 또한 거의 동일 장비를 사용하였음에도 장비운용에 대한 장비조합 11의 유휴시간이 보다 우수한 결과로 도출되었다. 장비의 일반적인 구성은 포장공사 물량에 따라 아스팔트 피니셔 2대 이상의 장비조합이 전체적으로 유리함을 나타내었으며, 건설장비의 대수 증가에도 불구하고 전체 공사비가 더욱 축소된 것은 장비의 유휴시간과 비용의 감소로 인한 영향으로 판단되어진다. Fig. 9는 Table 3의 내용을 그래프로 나타

낸 것이며, 비용차이가 크지 않은 Busy Cost를 기반으로 간섭에 따른 건설장비조합별 유휴시간의 증가로 인해 Idle Cost의 차이가 조합별 전체 비용 및 기간에 많은 영향을 미치고 있다는 결과를 보여주었다.

Table 3의 12가지 장비조합 계획에는 포함 되어있지 않으나 추가적인 장비조합을 조합 9와 같은 조건에서 아스팔트 피니셔 장비수량만을 4대로 증가시켜 시뮬레이션을 수행한 결과, 장비의 대수가 증가하더라도 장비들간의 비효율적인 간섭으로 인하여 생산성의 변화 없이 전체 공사비의 증가만을 초래하였다.

건설공사를 수행하는 시공자는 Table 3에서 계획한 주요 장비조합 뿐만 아니라, 공종별 다양한 장비조합 계획을 수립할 수 있으며 경제성 및 결과 요소들을 고려하여 효율적인 장비조합에 대한 의사결정을 내릴 수 있을 것이라 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 건설산업 중 도로공사 주요 공종을 대상으로 공정계획을 위한 공정로직을 개발하였으며, 시공절차 분석을 통한 세부 공정로직 별 효율적인 건설장비 운용방안을 분석하여 실제 건설 사업을 대상으로 현장적용의 타당성을 검증하였다. 이는 현장상황에 따른 공법 및 시공순서를 고려하여 계획단계에서의 다양한 공정계획 대안에 관한 효율성을 평가하고, 건설현장에서의 핵심요소인 공사비 및 공기 절감 방안에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 반복적인 건설산업의 특성상 현장상황에 맞는 주요 요인들을 변경하여 시뮬레이션에 적용함으로써 아스팔트 도로공사 뿐만 아니라 다양한 건설현장에서의 공정계획과 최적화된 자원 선정을 위한 의사결정에 도움을 줄 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부 건설기술혁신연구개발사업의 연구비지원에 의해 수행된 것임(11기술혁신A04).

참고문헌

- Choi, J. H., Lee, D. H., Kim., S. H. and Kim, S. K. (2010). "Factors Affecting Selection & Combination of Earthwork Equipment". *The Korean Institute of Building Construction*, 10(1), pp. 201-205.
- Goldenberg, M and Aviad Shapira, M. (2007). "Systematic Evaluation of Construction Equipment Alternatives: Case Study". *Korean Journal of Construction Engineering & Management*, 133(1), pp. 72-85.

- Hassan, M. M and Gruber, S (2008). "Simulation of Concrete Paving Operations on Interstate-74". *Korean Journal of Construction Engineering & Management*, 134(1), pp. 2-9.
- Hwang, J. H., Hwang, H. W. and Kim, B. S. (2009). "Conceptual Design of Optimization Model for Earthwork Equipment Combination Using Multiobjective Optimization Method". *Proceedings of KICEM annual conference*, KICEM, 9.
- Kang, K. H., Kim, S. H., and Kim, J. J. (2010). "Heavy Equipment Management Plan for BIM-Based Construction Project". *The Journal of Korea Institute of Building Construction*, The Korean Institute of Building Construction, 10(1).
- Kim, K. J., Kim, J. R., and Chin, K. H. (2001). "Integration of Cost and Schedule Control in Public Road Construction Projects". *The Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 21(5), pp. 703-712.
- Lee, K. S. and Park, H. S. (2011). "Implementation of Time Management; Based on Road Construction Projects". *The Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 31(3), pp. 451-456.
- Lee, S. W., Kim, O. K. and Woo, S. K. (2007). "Study on Development for Plan Model of Tunnel construction by using Arena-on focused NATM". *Proceedings of KICEM annual conference*, KICEM, 7, pp. 872-875.
- Markiz, N., Jarade, A. (2012). "A Decision-Support Model Utilizing a Linear cost Optimization Approach for Heavy Equipment Selection". *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, pp. 100-109.
- Moselhi, O. (2009). "Optimization of Earthmoving Operations in Heavy Civil Engineering Projects". *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, pp. 948-954.
- Ohn, S. W., Woo, S. K. and Kim, O. K. (2007). "An Application of Simulation Method to Planning of Road Pavement Operation". *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 8(1), pp. 124-131.
- Prasertrunguang, T and Hadikusumo, B.H.W. (2009). "Modeling the Dynamics of Heavy Equipment Management Practices and Downtime in Large Highway Contractors". *Korean Journal of Construction Engineering & Management*, 135(10), pp. 939-947.
- Son, H. J., Kim, C. W., Cho, S. Y. and Kim, Y. S. (2007). "Optimization of Heavy Equipment Operations on a Construction site Using Simulation". *The Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 27(5), pp. 579-588.
- Won, S. K., Kim, S. K. and Han, C. H. (2007). "A Combination Model of Earthwork equipment using System Dynamics". *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 8(2), pp. 194-202.
- Yun, S. H. and Kim, S. S. (2005). "Using the common-WBS based on the Construction Classification System for the integration of Schedule and Cost information". *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 6(6), pp. 107-114.

요약 : 도로공사는 선형적이고 반복적인 공사로 공사의 특성상 건설장비에 대한 의존도가 높기 때문에, 건설장비의 효율적 운용에 의한 생산성 향상 및 공사비 절감 효과가 크다. 또한, 도로공사는 시공순서, 현장상황, 적용 공법에 따라 다양한 건설 장비의 선택이 가능하기 때문에 공정계획 시, 공종 간 연계에 따른 세부 작업 및 공법을 고려하여야 한다. 시공자는 현장조건에 맞는 작업을 선택하고 투입될 장비의 종류 및 성능, 수량 등을 사전에 파악하여, 적절한 건설장비 운용계획의 수립을 통한 경제성 향상 방안을 마련해야 한다. 하지만 한정된 유사 공사의 실적정보 및 체계적인 공사계획 방법의 부재로, 적절한 공정계획 수립이 용이하지 않으며, 공법 및 건설장비의 선정에 있어 대부분 경험과 직관에 의존한 공사를 수행하고 있다. 그 결과 시공 이전 공정계획단계에서 수립된 계획은 실행단계에서의 충분한 타당성을 확보하지 못하여 그 활용도가 제한적이다. 본 연구는 일반적인 도로공사의 초기 공정계획 수립단계에서 적용가능한 주요 공종별 공정로직을 개발하고, 공종 별 세부 시공절차 분석을 통하여 현장상황 및 공종에 적용 가능한 건설장비 운용 방안을 제시하였다. 또한 공정로직에 따른 다양한 건설장비 대안들을 대상으로 프로세스 시뮬레이션을 활용하여 경제성 기반의 최적화 장비조합 방안을 개발하였다. 개발된 방법을 이용하여, 계획단계에서의 수립된 다양한 공정계획에 대해 효율성을 평가하고 최적의 자원 선정을 위한 의사결정에 도움을 줄 것으로 판단된다.

키워드 : 도로공사, 공정계획, 건설장비, 프로세스 시뮬레이션, 경제성