

시뮬레이션을 이용한 도로포장 공정계획의 수립방안

An Application of Simulation Method to Planning of Road Pavement Operation

온 성 원* · 우 성 권** · 김 옥 기***

Ohn, Seong Won · Woo, Sungkwon · Kim, Ok Ki

요 약

공정관리는 일정 계획에 따라 공사의 진도를 관리하는 것뿐만 아니라 프로젝트를 주어진 공기 내에 완성하기 위하여 시공 방법 및 계획을 마련하고 이에 따른 장비, 자재, 인원 등에 대한 계획을 수립하는 것을 포함한다. 본 연구는 실제 고속도로 건설공사 중 포장공정의 계획 수립에 있어서 린 콘크리트 포장작업과 콘크리트 슬래브 포장작업을 대상으로 시뮬레이션 모델을 개발하고 이를 이용하여 공정계획을 수립하는 방안을 제시하고 있다. 또한, 시뮬레이션 모델을 이용하여 수립된 계획과 해당 현장의 기존 포장공정 계획을 비교함으로써 비용과 공기 측면에서 보다 생산적이고 효율적인 대안의 수립에 시뮬레이션 기법이 효과적인 방법론이 될 수 있음을 보여 준다. 결국, 본 연구를 통해 건설공사의 시공 계획을 수립하는 초기단계에서 시뮬레이션 모델을 구축하여 체계적이고 과학적인 분석을 수행하게 되면 보다 효율적이고 생산적인 건설공정 계획 및 관리가 가능하다는 사실을 확인하고 있다.

키워드 : 공정관리, 공정계획, 시뮬레이션 기법, 포장 작업

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

공정관리는 일정 계획에 따라 공사의 진도를 관리하는 것뿐만 아니라 프로젝트를 구성하고 있는 작업을 주어진 공기 내에 완성하기 위하여 공사에 관련된 정보를 분석한 후 시공방법 및 계획을 마련하고 이에 따른 장비, 자재, 인원, 외주계획 등을 수립하는 것을 포함한다. 이러한 요소들의 최적화와 공사가 진척되면서 발생하는 공기 지연 및 조기 완공 등 변경사항으로 인한 공기를 분석하고 설계변경에 따른 계획 수정을 함으로써 결과적으로 생산성 증대, 품질향상 및 공기 지연요소를 감소시키는 총체적인 과정을 수립하게 된다. 그런데 건설 공사는 각 공사마다 작업 조건 및 시공방법이 다르므로 각각의 특성을 고려한 의사결

정을 통하여 공정 계획이 결정된다.

효과적인 공정계획을 수립하기 위해서 공정 전반을 모델링한 후 실험을 통해 분석하는 시뮬레이션 기법이 이용될 수 있다. Shannon(1975)에 의하면 시뮬레이션이란 실제 시스템을 모델화하고 그 모델을 통하여 시스템의 거동을 이해하기 위하여 실험을 하거나, 그 시스템의 운영을 개선하기 위한 다양한 전략을 평가하는 과정을 말한다. 시뮬레이션은 실제 건설 사업을 수행하기 이전에 다양한 조건 하에서 건설 사업을 컴퓨터상에서 가상으로 수행해 봄으로써 많은 문제점을 사전에 예측하고 분석하며, 시간과 비용측면에서 최적의 계획을 가능하게 하는 공정관리에 있어서 강력하고 유용한 도구이다.(김경래 외 2005) 그러나 전문 인력의 부족, 복잡한 건설공정에 관한 모델을 구축할 경우 이를 실제와 같이 유사하게 모델 상에 표현하는데 어려움이 있으며 또한 보수적인 공사 진행 관행 등으로 새로운 기법의 적용에 장애가 있어 현재까지 실제 현장에서 시뮬레이션을 활용하는 사례는 국내뿐만 아니라 국외에서도 많지 않은 실정이다. 하지만, 많은 물량의 작업이 동일 과정의 반복을 통해 수행되는 경우에 작업 수행 효율의 최적화를 위한 계획 도구로 시뮬레이션을 활용한다면 전체 사업에서 막대한 시간과 비용의 절감 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

* 일반회원, 인천광역시도시개발공사 도시재생1팀, 공학석사, swohn@iudc.co.kr

** 중신회원, 인하대학교 토목공학과 조교수, 공학박사(교신저자), skwoo@inha.ac.kr

*** 일반회원, (주)메트로코로나 대표이사, 인하대학교 토목공학과 박사과정, ok4455@iudc.co.kr

따라서 본 연구에서는 이러한 시뮬레이션 기법의 효용성을 검증하기 위하여 국내 공사 중 현재 작업 중에 있는 도로 포장 공사의 한 공구를 대상으로 하여 불연속 사건 시뮬레이션 모델을 적용하여 장비 조합별 공정 계획을 제시함으로써 프로젝트 관리자가 예상 비용과 공사 시간을 기준으로 공정에 대한 의사 결정을 가능케 하고 실제 공사 수행 방법과의 비교를 통해 시뮬레이션 기법을 이용한 공정 계획의 비용과 예정 공기의 적정성을 검토하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 목적인 시뮬레이션 기법의 적용 효과를 검증하기 위하여 현재 수행 중인 김천-영동간 도로 확장 공사 현장 중 1개 공구를 사례로 채택하였다. 해당 건설공사는 크게 6개 공구로 이루어져 있으며 본 연구에서는 그 중 한 공구를 선택하여 린 콘크리트 포장 작업과 도로의 품질에 가장 큰 영향을 미치는 콘크리트 슬래브 포장 작업에 관하여 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 시뮬레이션 모델의 구축에는 범용 시뮬레이션 프로그램인 아레나(Arena)를 사용하였다.

우선, 공정에 관한 개요와 공사 관련 데이터는 직접 현장을 방문하여 수집하였으며 실무자와의 면담을 통하여 현장 조건 및 관련 공정의 세부 사항을 파악하였다. 또한, 현장 조사를 통한 수집된 실측 데이터를 바탕으로 확률 분포를 생성하여 시뮬레이션 모델을 구현하였다. 최종적으로는 개발된 시뮬레이션 모델을 활용하여 각각의 시나리오에 대한 결과를 비교하였으며, 프로젝트 관리자가 공정 계획에 대한 장비의 효율성과 생산성을 객관적으로 살펴봄으로써 각각의 프로젝트 수행 방법의 적정성을 검토할 수 있게 된다. 또한 각각의 공정에서 존재하는 확률적 특성을 고려함으로써 예정 공기를 검토할 수 있게 되고 공기를 단축시키기 위한 방안을 마련할 수 있게 될 것이다.

2. 관련 연구동향 분석

2.1 국내 연구 및 사례

김영현 등(1999)은 광명교의 타설 작업을 교량의 상류부분과 하류부분으로 나누어 레미콘 장비의 효율성을 파악하기 위하여 시뮬레이션 기법을 활용하였다. 이 연구에서는 시뮬레이션 소프트웨어 중 하나인 SIGMA를 이용하여 모델을 구현하였다. 시뮬레이션 모델링을 통하여 Batch Plant에서 최대 가용할 수 있는 차량은 65대이며 이러한 대수로 가용할 때 공사시간을 중심으로 비용에 계산되어야 함을 알 수 있다. 결국 이 연구에서는 시뮬레

이션 모델링을 통하여 장비에 관한 경비 절감을 이룰 수 있음을 말하고 있다.

김경주(2000a)는 시뮬레이션 시스템 활용에 대한 장애요인의 하나인 모델구축 작업의 어려움을 극복하기 위하여, 건설 공정에 있어 모듈에 의한 단계적인 시뮬레이션 모델 구축을 지원할 수 있도록 새로운 모델링 방법을 제시하고, 이러한 모델링 방법에 의한 모델 구축과정의 시연을 수행하였다. 즉, 보통 사건 중심의 모델 구축에서는 개체의 거동을 중심으로 하나 이 논문에서는 개체의 거동보다는 건설자원이 건설공정에서 경험하게 되는 기본적인 형태, 즉 자원을 할당받고 자원을 일정한 시간을 두고 활용하며 활용 후에는 다시 놓아주는 등의 활동을 기본 동작으로 설정함으로써 모델 구축 시 건설사업 관리자가 단지 하나의 자원에 대한 거동에 초점을 맞출 수 있도록 하여 모델 구축을 단계적으로 지원할 수 있는 환경을 제공하도록 하였다. 최종적으로 자원의 거동에 초점을 맞추어 장비에 대한 모델이 각기 독립적으로 구축될 수 있도록 이 연구 방식에 따른 모델을 제안하였다.

또한 김경주(2000b)는 시뮬레이션 모델의 구축에 있어 복잡한 건설현장의 다양한 상황을 표현하는데 있어 유용한 환경을 제공하는 사건중심(Event oriented)의 시뮬레이션 모델링 기법을 실제 건설사업을 대상으로 하여 적용하였으며 이를 통하여 시뮬레이션의 현장 적용성 및 활용 효과를 검증하고자 하였다.

또한 김경주(2004)는 대형 건설사업에서 현장 주변 교통흐름의 영향을 고려하여 공정계획을 수립할 수 있도록 지원하기 위하여 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 즉, 대량의 교통 혼잡이 예상되는 프로젝트에서 기존 교통량에 추가적으로 공사차량이 증가할 경우 공사차량의 효율성 평가 및 공기의 적정성 평가를 위한 시뮬레이션 모델을 구축하고 예상 공기가 불가능할 경우 공정계획의 대안에 대한 평가 방안을 제시하였다.

2.2 국외 연구 및 사례

Ioannou and Martinez(1996)는 댐에 관한 토공 작업을 STROBOSCOPE라는 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 모델링을 하였다. 주요 자원으로써 로더와 트럭을 다루었으며 관련 자원의 속성값을 확정값이나 확률값으로 정리하였다. 댐 건설공사에서의 토공 작업에 대한 기본적인 모델링을 시작으로 관련 데이터의 복잡함이나 분포 형태를 달리하면서 7개의 모델을 제시하고 해당 모델별 비용과 시간을 시뮬레이션 결과를 통해 도출하였다. 특히 작업 시 임시 교량의 설치 및 개수를 달리하여 작업 비용 및 시간을 비교 분석하였다.

Tommelein(1998)은 패스트트랙을 적용하는 플랜트 공정의

일부분인 파이프 연결 작업에 있어서 자원 공급과 설치 전 선행 작업의 불확실성을 고려한 시뮬레이션 기법을 적용함으로써 작업의 생산성 향상을 도모하였다. 이 연구는 시뮬레이션 기법을 이용하여 공사 기간, 진척율, 소요 자원을 분석한 결과 pull-driven scheduling이라는 린 건설의 개념을 이용한 모델이 다른 대안 모델과 비교해 볼 때 자원을 효율적으로 활용하고 있음을 보여 주었다.

Zayed and Halpin(2001)은 시뮬레이션을 이용하여 배치 플랜트 작업에서 의사 결정자가 자원 채취 장소와 장비 조합의 대안을 효율적으로 선택하도록 하고 있다. 이 연구에서는 먼저 관련 자료를 수집하여 베타 분석 및 회귀 분석을 통한 통계 처리를 한 후 MicroCYCLONE이라는 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하였다. 그 다음 시뮬레이션 결과 분석을 통해 비용과 생산성의 관계를 결정 지수(decision index)로 나타내어 의사결정자가 자원 채취의 거리에 따른 효율적 장비 조합을 선택할 수 있도록 하였다.

Nassar 등(2003)은 도로가 폐쇄된 상태에서 아스팔트 포장 작업이 이루어 질 때 어떠한 변수들이 작업의 생산성 및 비용에 영향을 미치는지 알아보기 위하여 해당 작업에 관한 공정을 시뮬레이션 모델링하였다. 시뮬레이션 결과들을 민감도 분석을 통해 분석한 결과 사용된 트럭 대수와 도로의 개방 시간이 생산성 및 비용에 가장 큰 영향을 끼친다는 것을 파악할 수 있었다. 이 연구에서는 건설 산업에서 널리 사용되는 시뮬레이션 프로그램인 STROBOCOPE와 공정의 애니메이션을 위한 SP4 소프트웨어를 사용하였다.

3. 사례 적용 및 분석

3.1 대상 공사의 개요 및 프로세스 분석

본 영동김천간 고속도로 확장공사(제3공구)에서 공사 구간의 시점은 충북 영동군 황간면 마산리(부산기점 222.57km)이며 종점은 충북 영동군 추풍령면 추풍령리(부산기점 215.65km)이다. 또한 연장은 6.92km이며 종전의 4차로를 6차로로 확대하는 공사로서 공사기간은 2001년 12월 10일부터 2006년 12월까지 약 1,200일에 걸쳐 진행될 예정이다. 본 연구에서는 도로 공사와 관련되는 작업 중에서 린 콘크리트 포장 작업과 도로의 품질에 가장 큰 영향을 미치는 최종 작업인 콘크리트 슬래브의 포장 작업에 관한 공정을 선택하여 이에 대한 시뮬레이션 모델을 구축하고 분석하는 것을 목적으로 한다.

린 콘크리트 포장 작업에 관한 프로세스 분석과 사이클 타임을 측정하기 위하여 직접 현장 방문을 실시하였다. 린 콘크리트 포장 작업은 선택층을 설치한 후 콘크리트 슬래브 포장을 하기

전에 이루어지는 작업으로서 여러 장비와 소규모의 인원으로 이루어져 진행되고 있었다. 작업 장소는 황간 터널에서 약 270m 떨어져 있는 곳으로 배치플랜트에서는 약 1km의 거리를 두고 있는 곳이었다. 린 콘크리트 포장 작업과 관련되는 공사량은 다음 표 3.1과 같다.

표 3.1 린 콘크리트 포장 작업관련 공사량

구분	공사량	구분	공사량
공사 차로	총 3개 차로	총 공사구간	270m
차로폭	10.8m (차로당 3.6m)	작업조	1조 운영
포장 두께	15cm	장비조합	아스팔트 피니셔 + 머캐덤 롤러 + 타이어 롤러 + 탠덤 롤러

린 콘크리트 포장 작업에 소요되는 장비비 및 노무비는 각각 다음 표 3.2, 표 3.3과 같다.

표 3.2 린 콘크리트 포장 작업에 소요되는 장비비

자원	시간당 장비비(원/hr)	자원	시간당 장비비(원/hr)
콘크리트 배치 플랜트	76,357	머캐덤 롤러	10,928
페이로더	15,385	타이어 롤러	13,986
덤프트럭(15ton)	13,741	탠덤 롤러	7,433
아스팔트 피니셔	26,363		

표 3.3 린 콘크리트 포장 작업에 소요되는 노무비

자원	시간당 노무비	자원	시간당 노무비(원/hr)
배치플랜트	33,513	머캐덤 롤러	14,085
플랜트 보조인원	14,056	타이어 롤러	14,085
페이로더	18,555	탠덤 롤러	14,085
덤프트럭	11,463	포설인건비	29,894.88
아스팔트 피니셔	18,555		

덤프트럭의 소요대수를 산정하기 위하여 배치플랜트의 생산량을 126m³/h, 트럭 적재량을 1대당 8m³/대로 가정하면 콘크리트 생산량에 의한 시간당 덤프 소요대수를 16대(=126/8)라고 할 수 있다. 그러나 트럭의 사이클 타임은 주행(5분)과 상하차(10분)를 합한 15분(1/4hr)이므로 결국 트럭 소요대수는 4대(=16/4)에서 여유대수 1대를 더한 5대로 볼 수 있다.

콘크리트 슬래브 포장 공정의 장비 사이클 타임을 측정하기 위하여 길이 619m의 황간 터널 내 포장 작업을 관측하였다. 이미 토공, 동상방지층 작업 그리고 린 콘크리트 포장 작업이 완료된 후였으며 마지막으로 포설, 분배, 다짐, 조면마무리 그리고 양생으로 이루어지는 콘크리트 슬래브 포장 작업이 진행되었다. 배치플랜트는 터널 입구로부터 약 250m 거리에 위치하였으며 트럭

1대의 고장으로 총 4대의 트럭으로 콘크리트를 운반하였다. 콘크리트 슬래브 포장 작업과 관련된 공사량은 표 3.4와 같다.

표 3.4 콘크리트 슬래브 포장 작업관련 공사량

구분	공사량	구분	공사량
공사 차로	총 3개 차로	총 공사구간	619m
차로폭	10.8m (차로당 3.6m)	작업조	1조 운영
포장 두께	33cm	장비조합	백호우 + 스프레더 + 슬립 폼 페이퍼 + 조면마무리기

콘크리트 슬래브 포장 작업에 소요되는 장비비 및 노무비는 각각 다음 표 3.5, 표 3.6과 같다.

표 3.5 콘크리트 슬래브 포장 작업에 소요되는 장비비

자원	시간당 장비비	자원	시간당 장비비
콘크리트 배치 플랜트	76,357	스프레더	96,091
페이로다	15,385	슬립 폼 페이퍼	116,980
덤프트럭(15ton)	13,741	조면 마무리기	31,334
백호우	10,938		

표 3.6 콘크리트 슬래브 포장 작업에 소요되는 노무비

자원	시간당 노무비	자원	시간당 노무비
배치플랜트	33,513	스프레더	11,463
플랜트 보조인원	14,056	슬립 폼 페이퍼	18,565
페이로다	18,555	조면 마무리기	11,463
덤프트럭	11,463	포설인건비	91,531.75
백호우	18,555		

여기서 소요 덤프트럭의 대수의 산정하기 위하여 린 포장과 같은 방법으로 하면 우선 배치플랜트의 생산량을 시간당 126m³, 덤프 용량의 적재량을 1대당 9m³로 가정하면 콘크리트 생산량에 의한 시간당 덤프 소요대수를 14대(=126/9)라고 할 수 있다. 그러나 덤프의 싸이클 타임은 주행시간(5분)과 상하차시간(10분)을 합하여 15분(1/4hr)이므로 최종 덤프 소요대수는 4대(=14/4)에서 여유대수 1대를 더한 5대로 볼 수 있다.

3.2 시뮬레이션 모델의 개발

3.2.1 데이터 수집 및 분석

(1) 린 콘크리트 포장 작업

해당 콘크리트 포장 공정에 관한 장비비, 자재비, 노무비 등 직접비에 관한 사항은 현장 자료를 통하여 수집하였으며 도로 폭과 포장 높이 및 트럭 당 적재량에 관한 사항은 현장 문답 및 배치플랜트 관리 자료를 통하여 수집하였다. 우선 본 포장 작업 역시 콘

크리트 슬래브 포장 작업과 같은 트럭 이동 경로를 이용하므로 콘크리트 슬래브 포장 작업시 측정된 트럭의 이동 속도를 그대로 반영하여 트럭의 이동 시간을 추정하였다. 그 외에 트럭의 하차 작업이 아스팔트 피니셔의 분배 작업과 연계되어 이루어지므로 동시에 이를 측정하는 것이 가능하였고 이러한 작업들과 동시에 머캐덤 롤러와 타이어 롤러의 다짐 작업이 진행되어 전체 작업의 사이클 타임에 크게 영향을 미치지 못하므로 이러한 다짐 작업에 대한 별도의 작업 시간을 체크하지 않았다. 그러나 탠덤 롤러의 마무리 다짐은 각 차로의 린 콘크리트 분배 그리고 1,2차 다짐 작업이 끝난 후에 진행되어 공기에 영향을 미치게 되므로 이 작업의 시간을 체크하여 모델링에 반영토록 하였다.

측정 결과를 바탕으로 하여 아스팔트 피니셔와 탠덤 롤러의 작업 시간에 대한 확률 분포를 아레나(Arena)에서 제공하는 입력 분석기(Input analyzer)통해 추정한 결과는 표 3.7과 같다. 기본적으로 자승 오차(Square error)가 가장 작은 확률 분포를 각각의 작업 시간에 관한 분포로 추정하였으며 두 번째 검증 작업으로 카이 제곱 검정(Chi square test)을 거쳤다. 우선 아스팔트 피니셔의 작업 시간에 관해 살펴보면 등(Uniform) 분포로 가정하였을 때 가장 작은 자승 오차를 보였으며 유의수준을 0.05로 하였을 때 p값이 유의수준 0.05보다 크므로 가정한 분포가 적합하다고 볼 수 있다. 탠덤 롤러의 작업 시간에 관한 확률 분포도 동일한 과정을 거치면 베타(Beta) 분포가 가장 작은 자승 오차를 가지나 p값이 유의수준 0.05보다 작아 적합한 분포로 볼 수 없으므로 그 다음으로 작은 자승 오차를 가지며 p값이 유의수준 0.05보다 큰 등분포가 가장 적합한 분포라고 할 수 있다.

표 3.7 관련 데이터의 확률 분포 1

	아스팔트 피니셔의 작업 시간	탠덤 롤러의 작업 시간	트럭의 상차 시간	트럭의 하차 시간	
샘플 개수	20	20	25	25	
측정 시간	2시간	30분	2시간30분	2시간30분	
Distribution	Uniform	Uniform	Exponential	Normal	
Expression	UNIF (45.5, 88.5)	UNIF (142, 162)	161 + EXPO(30.3)	NORM (32.8, 4.84)	
Square Error	0.035273	0.030000	0.029658	0.041782	
p - value (Chi square test)	0.667	> 0.75	0.184	0.24	
Sq error	Uniform	0.0353	0.03	0.0389	0.042
	Gamma	0.0411	0.0421	0.0298	0.0497
	Normal	0.0411	0.0378	0.0415	0.0415
	Weibull	0.0414	0.0401	0.0305	0.0452
	Erlang	0.0439	0.0422	0.0297	0.0502
	Exponential	0.0443	0.0457	0.0297	0.0599
	Lognormal	0.0454	0.048	0.0349	0.059
	Triangular	0.0494	0.0541	0.0341	0.0454
	Poisson	0.0595	0.0556	0.0607	0.0417
	Beta	0.0719	0.0269 (p-value < 0.005)	0.0457	0.0416

(2) 콘크리트 슬래브 포장 작업

트럭의 이동 시간은 각각의 트럭이 배치플랜트를 도착하는 시각, 떠나는 시각 그리고 덤프 작업장을 도착하는 시각, 떠나는 시각을 체크하여 산출하였으며 작업장에서의 콘크리트 분배기와 백호우의 작업 시간은 트럭의 이동 시간을 체크한 후 별도로 체크하여 그 분포를 추정하였다. 다음 이를 근거로 각각의 트럭의 이동 거리와 소요 시간을 이용하여 각각의 트럭 이동 속도를 왕복으로 나누어 분석하였다. 또한 트럭이 배치플랜트에서 상차하는 시간, 하차 장소에서 대기 하는 시간과 하차작업에 소요되는 시간도 각각 별도로 체크하였다. 측정 결과를 바탕으로 각각의 작업 시간 및 속도에 관한 확률 분포를 입력분석기를 통해 분석한 결과는 표 3.8과 같다. 분포의 적합도 판정은 아스팔트 피니셔와 탠덤 롤러의 작업 시간에 관한 확률 분포를 추정하는 과정을 동일하게 적용하였으며 결국 트럭의 상차 시간은 지수(Exponential) 분포에, 트럭의 하차 시간은 정규(Normal) 분포에, 트럭의 이동 속도(운반)는 와이불(Weibull) 분포에 각각 가장 적합하다고 볼 수 있다. 또한 트럭의 이동속도(공차)에 관한 확률 분포는 p값이 0.05보다 큰 삼각 분포가, 백호우 작업시간에 관한 확률 분포는 베타 분포가, 다우웰 바 설치 시간에 관한 확률 분포는 정규 분포가 각각 가장 적합하다고 볼 수 있다.

그러나 본 연구에서 측정 대상으로 한 작업 구간은 배치플랜트에서 멀지 않아 덤프 트럭이 비포장도로를 이용하여 이동하는 것이 가능하였으나 본 공구의 구간이 6.92km 달하며 각 작업

구간이 순차적인 공정으로 이루어지지 않는데 문제가 존재하였다. 즉, 공구 시점이나 종점으로 부터 토공 작업, 선택층 포설 작업, 린 콘크리트 포장 작업 그리고 콘크리트 슬래브 포장 작업이 차례대로 진행되는 것이 아니라 선택층 포설 작업을 위한 선행 작업인 터널공의 완료, 토공 작업을 위한 유용토의 확보 등 해당 공사 여건으로 인하여 각 층에 해당되는 작업이 일정한 작업 구간의 순서를 가지고 있지 않고 있다. 따라서 트럭의 이동 경로에 진행되고 있는 작업 구간이 있다면 덤프 트럭은 비포장도로가 국도를 따라 이동해야만 하며 대부분의 공사 구간이 이에 해당 될 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 배치플랜트에서 매일 작성, 보관하고 있는 콘크리트 출하일보를 중심으로 트럭의 사이클 타임을 조사하였다. 이와 같은 자료를 바탕으로 국도를 이용한 트럭의 운반 속도에 관한 확률 분포를 추정하기 위하여 전과 동일하게 확률 분포의 자승 오차 비교와 카이 제곱 검정을 거쳤다.

3.2.2 시뮬레이션 모델의 구축

현장에서 관측한 배치플랜트에서 수행되는 과정을 아레나(Arena)를 이용하여 시뮬레이션 모델링한 결과는 그림 3.1과 같으며 린 콘크리트 포장 작업 과정과 콘크리트 슬래브 포장 작업을 시뮬레이션 모델링한 결과는 각각 그림 3.2와 3.3과 같다. 그림 3.1에서 모듈 1~8에서는 트럭이 개체로 발생한 후 각각의 개체에 특성이 부여되며 모듈 9~17에서는 구간별 작업을 구분하는 과정을 거친 후 포장 작업 구간으로 보내는 작용을 하게 된다. 마지막으로 모듈 18~22에서는 회차된 트럭이 배치플랜트에서 대기하기까지의 과정이 묘사된다. 그림 3.2에서 모듈 1~4에서는 트럭이 작업 구간에 도착하여 하차 작업과 분배 작업이 진행된 후 다시 배치플랜트로 돌아가는 과정이 묘사되며 모듈 5~9, 11~12에서는 탠덤 롤러에 의한 다짐 작업과 아스팔트 피니셔의 이동 작업이 표현된다. 마지막으로 모듈 10, 13~14에서는 해당 구간에 대한 총 작업량을 체크한 후 완료되는 과정이 묘사된다. 그림 3.3에서 모듈 1~3, 5에서는 작업구간에 도착한 트럭의 하차작업이 완료된 후 다시 배치플랜트로 돌아가는 과정이 묘사되며 모듈 4, 6~11에서는 다우웰 바 설치 작업과 분배 작업이 묘사된다. 마지막으로 모듈 12에서는 해당 작업량이 완료된 후 개체가 소멸됨을 표현한다.

표 3.8 관련 데이터의 확률 분포 2

	트럭의 이동속도 (운반)	트럭의 이동속도 (공차)	백호우 작업시간	다우웰 바 설치 시간	트럭의 이동속도(국도)		
					린 콘크리트 포장	콘크리트 슬래브 포장	
Distribution	Weibull	Triangular	Beta	Uniform	Beta	Normal	
Expression	14 + WEB(12, 1.64)	TRIA(112, 139, 20)	34.5 + 31 * BETA(0.737, 1.35)	UNIF(120, 186)	5 + BETA(3.0, 7, 1.7)	NORM(0.03, 1.31)	
Square Error	0.033788	0.030034	0.020281	0.057851	0.017010	0.014817	
p - value (Chi square test)	0.428	0.511	0.0398		0.353	0.129	
So error	Uniform	0.0384	0.0394	0.0346	0.0579	0.0306	0.0266
	Gamma	0.034	0.0281 (p < 0.005)	0.0272	0.077	0.023	0.0193
	Normal	0.0377	0.0315	0.0434	0.0618	0.0197	0.0148
	Weibull	0.0338	0.0279 (p < 0.005)	0.0284	0.0668	0.0191	0.0149
	Erlang	0.0341	0.0237 (p < 0.005)	0.0228	0.0741	0.023	0.0196
	Exponential	0.0436	0.0444	0.0228	0.0741	0.049	0.0449
	Lognormal	0.0379	0.03 (p < 0.005)	0.0366	0.0923	0.0252	0.0237
	Triangular	0.0373	0.03	0.0327	0.0827	0.0365	0.0237
	Poisson			0.0545	0.0686		
	Beta	0.0353	0.0292 (p < 0.005)	0.0203	0.0606	0.017	0.0137(p=0.042)

3.3 시뮬레이션 결과 및 분석

이하에서는 시뮬레이션의 효율성을 검토하기 위하여 본 공구에서 활용되었던 약 한 달간의 린 콘크리트 포장과 콘크리트 슬래브 포장을 포함하는 공정계획에 관한 적정성을 검토하기로 한다. 원안의 포장 계획표에 따른 일정과 비용을 본 연구의 모델을

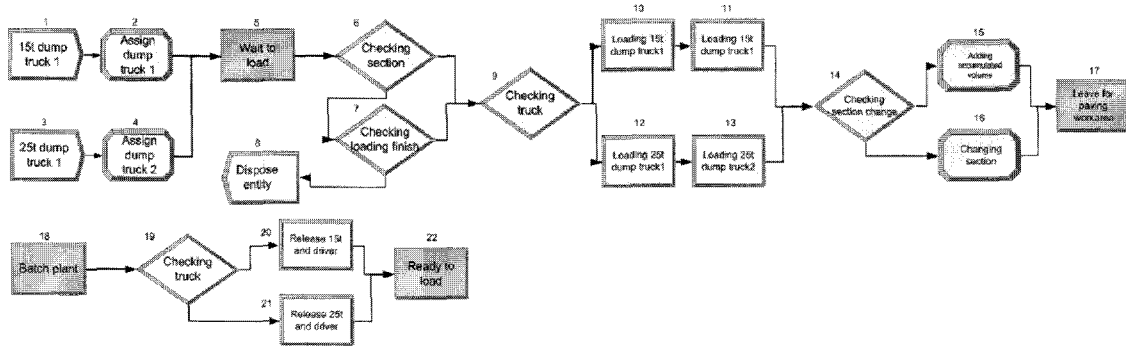


그림 3.1 배치플랜트

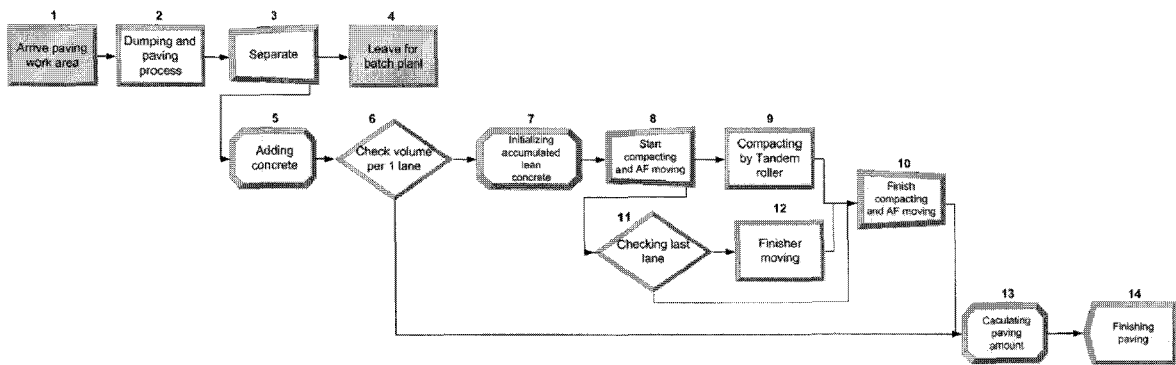


그림 3.2 린 콘크리트 포장 작업

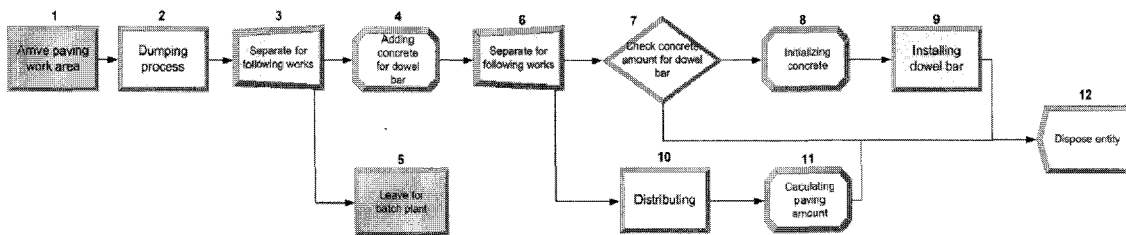


그림 3.3 콘크리트 슬래브 포장 작업

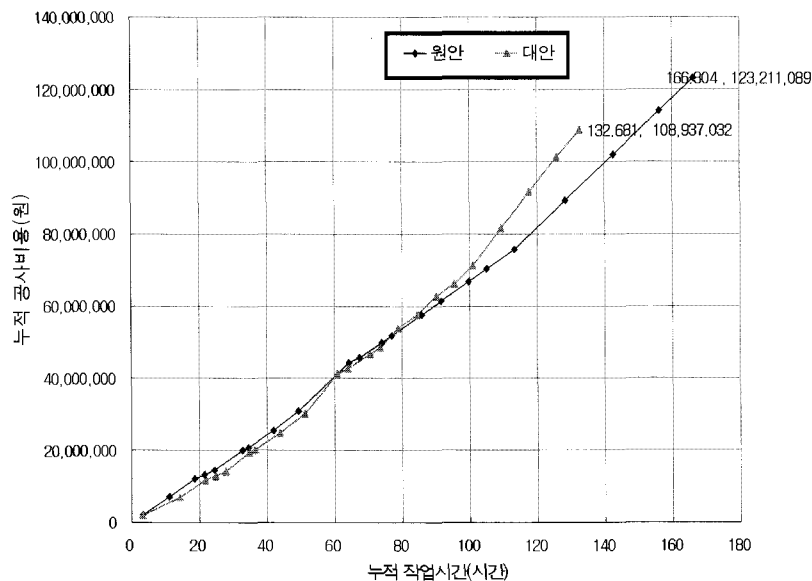


그림 3.4 원안 공정계획과 대안과의 비교(작업시간 기준)

표 3.9 원안 공정계획과 대안과의 비교

작업 순서	원 안			대 안		
	작업일	누적작업 시간	누적총비용	작업일	누적작업 시간	누적총비용
1	05.10.07	3.229	2,072,070	05.10.07	3.229	1,990,671
2	05.10.08	11.105	7,126,113	05.10.07	14.175	6,960,260
3	05.10.09	18.583	12,113,234	05.10.08	21.71	11,795,482
4	05.10.10	21.517	13,310,590	05.10.09	24.774	12,968,666
5	05.10.10	24.427	14,571,496	05.10.10	27.788	14,198,670
6	05.10.11	32.739	20,058,554	05.10.10	34.681	19,443,918
7	05.10.12	34.493	20,774,356	05.10.11	36.461	20,125,468
8	05.10.14	41.870	25,508,189	05.10.11	43.838	24,859,301
9	05.10.15	49.247	30,843,403	05.10.12	51.215	30,194,515
10	05.10.17	64.284	44,282,598	05.10.13	60.889	41,278,808
11	05.10.18	67.469	45,662,661	05.10.15	64.074	42,658,871
12	05.10.20	74.009	49,859,390	05.10.15	70.675	46,728,373
13	05.10.21	76.969	51,758,828	05.10.16	73.635	48,553,206
14	05.10.21	85.849	57,620,843	05.10.16	78.87	53,856,224
15	05.10.22	91.570	61,436,211	05.10.17	84.591	57,671,591
16	05.10.22	99.733	66,824,908	05.10.18	90.097	62,832,811
17	05.10.23	105.055	70,374,181	05.10.18	95.456	66,271,690
18	05.10.23	113.205	75,754,296	05.10.19	100.951	71,284,102
19	05.10.26	128.346	89,286,440	05.10.20	109.248	81,627,124
20	05.10.27	142.603	102,028,516	05.10.21	117.64	91,665,548
21	05.10.28	156.117	114,106,542	05.10.22	125.91	101,349,600
22	05.10.29	166.304	123,211,089	05.10.22	132.681	108,937,032

이용한 시뮬레이션 결과 도출한 최적 대안에 일정과 비용을 비교·분석한 결과는 표 3.8과 같으며 이를 비용과 작업 시간을 기준으로 나타내면 그림 3.4와 같다. 원안과 대안 모두 일일 작업 8시간을 기준으로 하였으며 표와 그림에서 나타난 작업 시간과 누적 작업시간은 이러한 실질적인 작업 시간을 의미한다. 또한 대안에서는 원안과 달리 시뮬레이션을 통한 최적 비용을 적용하고 해당 구간의 공사량이 완료되면 다음 구간의 공사를 연속하여 진행함으로써 공기를 최대한 단축시킬 수 있도록 하였다.

표 3.9에서는 실제 작업 시간뿐만 아니라 소요되는 일수까지 계산하여 예정 공기를 파악할 수 있도록 하였다. 그 결과 원안에서는 약 166시간의 작업 시간과 약 1억 2천만원의 공사 비용이 소요되며 10월 29일에 원안의 포장 계획표와 같이 공사가 완료됨을 알 수 있다. 대안에서는 약 133시간의 작업 시간과 약 1억 8백만원의 공사 비용이 소요되며 10월 22일에 공사가 완료됨을 알 수 있다. 즉, 한 달간의 포장 계획을 검토한 결과 시뮬레이션을 활용한 대안을 선택할 경우 약 7일간의 공기 단축과 약 1200만원의 공사 비용을 절감할 수 있음을 알 수 있다. 단, 본 포장 계획의 검토에서는 하루 8시간 작업을 하며 덤프 트럭이 비포장

도로를 이용할 경우 어떠한 장애 요소도 없다고 가정하였으므로 이와 다른 조건 및 기타 현장 장애 요소를 고려할 경우 향후 예정 공기 단축과 비용 절감을 위해서는 재검토가 요구된다고 할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 현재 국내에서 진행되고 있는 고속도로 포장 공정을 사례로 채택하여 시뮬레이션 기법을 공정 계획의 검토 및 수립을 위해 활용하고 그 효용성을 검증하고자 하였다. 시뮬레이션 모델을 구축하기 전에 사전 현장 조사 및 면담 조사를 통하여 포장 공정에 관한 일반 사항과 데이터를 수집하였으며 이를 기반으로 린 콘크리트 포장 작업과 콘크리트 슬래브 포장 작업에 대한 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 다음 실제 작업 데이터와 모델의 결과를 비교하는 검증 절차를 거쳤으며 린 콘크리트 포장 작업과 콘크리트 슬래브 포장 작업에 대한 각각의 작업 구간을 선정하여 트럭 대수에 따른 장비 조합을 변수로 하여 대안별 작업 시간과 비용을 기준으로 비교·분석하였다. 그 결과 현장에서의 트럭 대수 산정 방법과 달리 확률적 분포를 근거로 한 시뮬레이션 모델을 통해 최소 비용이 소요되는 장비 조합을 검토할 수 있었으며 최단 작업 시간을 위한 대안도 비용과 함께 제시하는 것이 가능하였다. 이러한 시뮬레이션 모델은 린 콘크리트 포장 작업과 콘크리트 슬래브 포장 작업으로 구별되며 모델의 적용에 있어서 트럭의 이동 경로가 비포장도로인지 국도인지를 검토하여 실제 공사 현장의 여건을 충실히 반영하도록 하였다.

시뮬레이션을 통하여 이러한 각각의 포장 작업에 대한 작업 시간과 비용에 대하여 살펴본 후에는 약 한 달간의 포장 계획에 대한 적정성을 검토하기 위하여 각각의 구간에 대한 작업을 본 연구에서 개발한 시뮬레이션 모델에 순차적으로 적용하였다. 원안의 포장 계획과 달리 대안에서는 일별로 예정되어있던 공사량이 완료되면 연속하여 다음 작업을 진행토록 하였고 현장 산정 방식에 의한 트럭 대수가 아닌 각각의 구간에 대한 시뮬레이션 검토를 통해 예정 공기에 영향을 미치지 않으면서 최소 비용이 요구되는 최적의 트럭 대수를 적용하였다. 그 결과 시뮬레이션을 통한 대안의 공정 계획을 통해 작업 시간을 단축시킬 수 있을 뿐만 아니라 비용도 절감할 수 있음을 알 수 있었다.

본 모델에 포함되는 콘크리트 상차 작업, 트럭의 이동 작업, 콘크리트 하차 작업, 아스팔트 피니셔 작업, 탠덤 롤러의 다짐 작업 등 각각의 작업에 소요되는 시간을 추정하기 위하여 수집된 데이터를 통한 확률 분포를 적용하였으나 부족한 데이터의 수량으로 인하여 확률 분포에 대한 정확성에 한계가 있다. 또한

공정 계획에 대한 검토를 하는 경우 하루 8시간 작업하며 덤프 트럭이 운반 경로로써 비포장도로를 이용할 경우 장애 요소가 없다고 가정하는 등 모델의 적용에 여러 제한 조건이 있다. 그러나 차후 충분한 데이터를 수집함으로써 작업 시간에 대한 확률 분포의 신뢰성을 확보하고 실제 현장 여건을 모델의 제한 조건으로 적용함으로써 이러한 한계점을 극복할 수 있을 것으로 예상된다. 결국 건설 과정에 시뮬레이션 기법을 적용함으로써 보다 정확한 결과를 예측케 하여 초기 기획단계서부터 효과적인 공정관리가 가능하게 되는데 큰 의의가 있다고 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

1. 김경래, 김성식, 김정길, 서상욱, 이상범, 이찬식, 이학기, 임남기, 현창택 (2005) "최신 건축공정관리학", pp.50-51.
2. 김경주(2000a) "건설 공정 시뮬레이션을 위한 독립 자원모델 구축방안 연구", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 20권, 제 4-D호, pp. 389-402.
3. 김경주(2000b) "여객기 터미널 포장공정의 생산성 향상을 위한 불연속 사건 시뮬레이션 적용연구", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 20권, 제 4-D호, pp. 403-412.
4. 김경주, 박찬혁(2004) "교통흐름을 고려한 장비 계획을 위한 시뮬레이션 모델 구축", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 24권, 제 3D호, pp. 423-428.
5. 김영현, 김경주, 이태식(1999) "시뮬레이션 모델링을 통한 건설공사의 효율화 방안에 대한 연구", 1999년도 학술발표대회 논문집, 대한토목학회, pp. 565-568.
6. Ioannou, P. G. and Martinez, J. C.(1996) "Simulation of complex construction process"
7. Nassar, Khaled , Thabet, Walid , Beliveau, Yvan(2003) "Simulation of asphalt paving operations under lane closure conditions", Automation in construction, Elsevier Science, Vol. 12, No. 5, pp. 527-541.
8. Shannon, R. E.(1975) "Systems simulation : the art and science", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
9. Tommelein, I. D.(1998) "Pull-driven scheduling for pipe-spool installation : simulation of lean construction technique", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, Vol. 124, No. 4, pp. 279-288.
10. Zayed, T. M. and Halpin, D. W.(2001) "Simulation of concrete batch plant production", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, Vol. 127, No. 2, pp. 132-141.

논문제출일: 2007.01.04

심사완료일: 2007.02.06

Abstract

Project management means usually managing the rate of construction progress. But it also contains preparing scheme of execution and establishing plan for equipment, material, labor force to finish project within expected duration. In this paper to establish effective project planning a road pavement operation is selected as a case and simulation method is used for analyzing it. Next probability distributions are created after analyzing collected data and these are reflected in simulation model. Simulated result is compared with real project planning using models of lean concrete pavement process and concrete slab pavement process to verify efficiency of this model. In the event we know that project planning using simulation is more effective than one of the field in the aspects of duration and cost. Meanwhile simulated result in this paper has a limitation in accuracy because various constraints of filed are not reflected in it. However if we reflect this constraints in model through examining field in future this limitation is expected to be improved.

Keywords : project management, project planning, simulation, road pavement operation