

건설기계 조립라인의 동영상 기반 시뮬레이션 입력 모델링 절차 연구*

A Study of a Video-based Simulation Input Modeling Procedure in a Construction Equipment Assembly Line

김호영¹ · 이태훈¹ · 강봉권¹ · 이주호² · 홍순도^{3*}

부산대학교 산업공학과 산업데이터공학융합전공¹, (주)현대제뉴인², 부산대학교 산업공학과³

요 약

불확실성과 복잡성이 존재하는 제조시스템의 생산성 분석과 의사결정을 위하여 시뮬레이션 기법이 활용될 수 있다. 이러한 시스템의 시뮬레이션을 위해 대상의 특성을 반영하는 입력 모델링 과정이 필요하다. 하지만 건설기계 조립라인과 같은 수작업 중심과 긴 리드타임을 가지는 복잡한 환경에서는 시뮬레이션에 활용할 데이터의 수집이 제한된다. 본 연구는 입력 데이터의 수집이 어려운 환경에서 동영상 데이터를 이용한 시뮬레이션 입력 모델링 절차를 제안한다. 동영상 데이터 기반 작업분석을 통해 측정시간을 정미시간과 표준시간으로 산정하고, 시뮬레이션의 입력 분포로 활용할 수 있다. 제안하는 절차로 산정된 확률분포를 시뮬레이션에 이용하여 대상 시스템의 주요 생산성 지표를 분석하였다. 본 연구에서 제안하는 절차는 데이터가 적은 상황에서 시뮬레이션을 활용한 생산성 분석으로 의사결정 보조에 도움을 줄 것으로 기대된다.

■ 중심어 : 시뮬레이션, 입력 모델링, 건설기계 조립라인, 동영상 데이터

Abstract

A simulation technique can be used to analyze performance measures and support decision makings in manufacturing systems considering operational uncertainty and complexity. The simulation requires an input modeling procedure to reflect the target system's characteristics. However, data collection to build a simulation is quite limited when a target system includes manual productions with a lot of operational time such as construction equipment assembly lines. This study proposes a procedure for simulation input modeling using video data when it is difficult to collect enough input data to fit a probability distribution. We conducted a video-data analysis and specify input distributions for the simulation. Based on the proposed procedure, simulation experiments were conducted to evaluate key performance measures of the target system. We also expect that the proposed procedure may help simulation-based decision makings when obtaining input data for a simulation modeling is quite challenging.

■ Keyword : Simulation, Input modeling, Construction equipment assembly line, Video data

2022년 05월 09일 접수; 2022년 06월 14일 수정본 접수; 2022년 06월 16일 게재 확정.

* 본 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2020R1A2C2004320)

† 교신저자 (soondo.hong@pusan.ac.kr)

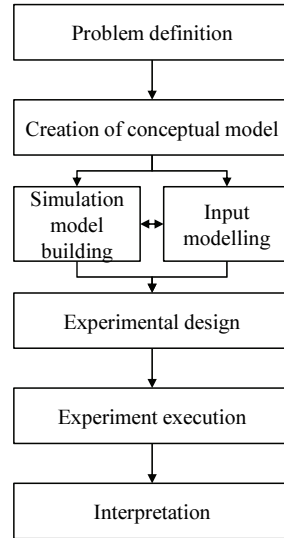
I. 서론

최근 건설기계산업은 전 세계 각국의 대규모 인프라 투자로 인하여 건설기계 수요의 증가와 건설기계 제조사들의 매출 규모가 증가하고 있다 [1]. 건설기계 제조사는 제품별 다양한 옵션을 구성하여 고객별 작업환경에 적합한 제품들을 생산한다. 제품별 옵션의 다양화는 동일 제품이라도 고객이 주문한 옵션에 따라 세부 작업과 공정시간에 차이가 발생한다. 이로 인하여 공정별 복잡성은 증가하였으며 효율적인 생산계획 및 생산관리가 요구되고 있다[2].

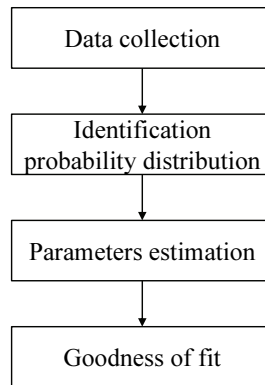
대기행렬과 같은 수리모형과 시뮬레이션 방법론은 시스템의 생산계획 및 관리를 위한 생산성 분석에 활용되고 있다[3]. 공정별 불확실성과 복잡성이 높은 시스템 대상의 생산성 분석과 의사결정을 위한 보조도구로써 주로 시뮬레이션 방법론을 활용한다[4].

일반적인 시뮬레이션 모델링 절차는 크게 네 단계로 설명할 수 있다. 첫째, 분석하고자 하는 대상 시스템의 문제를 정의한다. 둘째, 시뮬레이션의 구조, 운영정책 등을 고려한 개념 모델을 설계한다. 셋째, 개념 모델 바탕의 상세 설계한 모델과 입력 모델링을 바탕으로 대상 시스템의 특성을 반영한 시뮬레이션 모델을 구축한다. 마지막으로 실험 설계 후 시뮬레이션 실험을 통한 결과 해석을 수행한다. 시뮬레이션 모델링 절차를 상세히 나타내면 <그림 1>로 표현된다[5].

시뮬레이션 모델링 절차 내 입력 모델링은 입력 데이터의 특성을 반영하는 분포를 선정하는 과정으로 중요하다[6]. 입력 모델링은 네 가지 절차로 구성된다. 실제 시스템의 ‘데이터 수집’ → 입력 데이터를 표현할 수 있는 ‘확률분포 가설 수립’ → 분포를 위한 ‘모수(parameter)선택’ → ‘적합도 검정’을 통한 분포와 모수 평가로 이루어진다. 입력 모델링 절차를 요약하면 <그림 2>와 같다[7].



<그림 1> General simulation modeling procedure(modified from Rossetti, 2015)



<그림 2> Simulation input modeling procedure (modified from Banks et al., 2005)

본 과정을 통해 대상 시스템의 특성을 반영한 확률분포를 선택하여 시뮬레이션에 활용한다. 그러나 입력 모델링 과정은 데이터 수집이 어려운 환경에서 제한적이기 때문에 최소한의 데이터로 대상 시스템을 모사해야 한다. 예를 들어 정규 분포 또는 로그 정규 분포로 가정할 경우 평균과 분산이라는 모수가 있어야 하지만, 데이터가 1개 또는 없는 경우는 위의 일반적인 절차의 시행이 제한된다.

본 연구의 대상인 국내 제조사의 건설기계 조립라인은 수작업 위주의 공정으로 구성되어 있다. 현장에서는 수작업으로 진행되는 공정 특성상 시뮬레이션을 위한 데이터 취득이 어려운 환경이다. 공정시간은 일일작업시간을 일일생산량으로 나누어 해당 작업시간을 구할 수 있지만 다음과 같은 문제가 존재한다. (1) 복수의 제품이 혼류 생산 되는 경우 공정별 정확한 시간 추정이 어렵다 (2) 작업을 관측할 때마다 작업순서 변경, 반복 등의 변동이 발생하여 정확한 작업 구분이 어렵다.

본 연구에서는 현장관리자의 동의를 구하고 생산 제품별 1회의 동영상 촬영 데이터를 확보하였다. 촬영한 동영상 데이터를 이용하여 제안하는 입력 모델링 과정을 거쳐 시뮬레이션에 활용하도록 한다.

이어서 기술할 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 시뮬레이션의 응용 및 입력 데이터 수집에 관한 기존 연구에 대해 열거한다. 3장은 문제정의로서 대상 건설기계 조립라인의 소개와 데이터 수집의 문제점에 대해 소개한다. 4장은 동영상 기반 시뮬레이션 입력 모델링 절차에 대해 설명한다. 5장은 대상 조립라인을 시뮬레이션으로 구현 후 실험 결과에 대한 해석을 다룬다. 6장은 본 연구 결과에 대한 토의와 추가 연구 사항에 대해 논의한다.

II. 문헌 연구

시뮬레이션의 입력 모델링과 관련하여 선행연구들이 수행되었다. 본 절에서는 시뮬레이션을 위한 입력 모델링과 시뮬레이션에서 입력 모델링을 위한 데이터의 관점으로 기존 연구에 대해 고찰한다.

Billar and Gunes (2010)는 연속 랜덤 변수에 대해 분포를 적합시키고 적합의 우수성을 평가하는 기법을 제시하였다. 또한 입력 모델이 데이터의 주요 특성을 나타내지 못할 수 있는 경우를 고려

하고, 시간에 따라 변화하는 프로세스를 위해 개발된 유연한 입력 모델, 다변량 입력 모델을 제시하였다[6]. Law (2013)는 시스템 무작위성을 나타내기 위한 두 가지 주요 접근 방식, 즉 이론적 분포 적합과 경험적 분포 사용에 대해, 각 접근법을 사용해야 하는 방법에 대해 논의하였다[8]. Zouaoui and Wilson (2002)은 시뮬레이션 결과 분포에 대한 추론을 위해 사전 정보와 실제 시스템의 샘플 데이터를 사용하는 시뮬레이션 입력 모델링에 대한 베이지안 접근법을 제안하였다[9]. 기존 수행된 입력 모델링과 관련된 연구는 복수의 데이터를 이용하여 데이터의 특성을 반영한 분포적합에 관한 내용을 다루었다. 입력 모델링을 위한 데이터가 없는 경우는 전문가의 의견을 참조하도록 제안하였다[6, 9, 10].

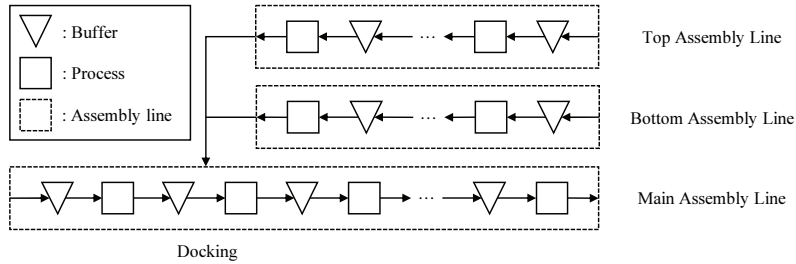
일반적인 시뮬레이션을 위한 입력 데이터 수집 방법은 실적자료법, 워크샘플링, 스톱워치법 등이 있다[11]. 실적자료법은 과거의 경험이나 보유중인 자료를 바탕으로 공정시간을 결정하는 방법이다. 워크샘플링은 관측 대상에 대한 임의 관찰을 수행 후 활동 비율을 추정하여 공정시간을 결정한다. 스톱워치법은 가장 고전적인 방법이며 공정시간을 스톱워치로 측정하여 비교적 세부적인 작업까지 공정시간을 기록할 수 있다. 위 방법들을 활용하여 다양한 연구에서 시뮬레이션의 입력 데이터 수집으로 활용되고 있다.

정태준 외 2인 (2020)은 의료 서비스 검사 과정의 대기 시간을 단축하기 위해 대기 행렬이론 (queuing theory)을 설계하였다. 이후, 시뮬레이션을 이용하여 기존안과 개선안의 비교·분석 및 개선안을 제시하였다. 시뮬레이션의 입력 데이터로 외래환자의 도착 분포와 서비스 진행 시간을 워크샘플링을 이용하여 추출하였다. 데이터 표본은 150명의 외래 환자를 대상으로 접수, 검사 시작, 검사종료 시각을 관찰하여 표본을 수집한 후에 적합도 검정을 통해 푸아송분포와 지수분포로 설정하였다[12].

이남수 외 3인 (2020)은 이산 사건 시뮬레이션 모델을 이용하여 화장품 포장공정을 대상으로 연구를 수행하였다. 스톱워치법을 이용하여 작업자와 공정의 시간을 수집 후 시뮬레이션 구현을 통해 병목공정 파악과 라인 밸런싱 개선안을 제시하였고, 생산성 향상의 효과를 거두었다[13]. 이지환 외 3인 (2020)은 석유화학 창고 시스템을 대상으로 물류 흐름 개선을 위한 트럭 간섭 최소화 모형을 제시하였다. 스톱워치를 이용하여 차량의 속도를 측정하여 데이터로 활용하였다. 측정된 데이터를 시뮬레이션에 이용하여 4가지 모형에 대한 대안 평가를 진행하였다[14].

최용희, 황승준 (2019)은 주문생산방식 (MTO, make-to-order) 방식을 취하는 판유리 제조 공정을 대상으로 연구를 수행하였다. 생산계획 의사결정을 위하여 MTO 방식의 제조 공정의 특성을 반영한 체계적인 시뮬레이션 설계 프로세스를 제시하였다. 이를 위해 시뮬레이션 입력 데이터로는 사례 대상기업의 주문량, 구매량 등의 생산데이터를 제공 받아 수행되었으며, 공정시간은 삼각분포를 가정하여 수행되었다[15]. 정호연 (2021)은 이동식 목욕차량 탑 박스 판넬 조립 고정 시스템을 대상으로 연구를 수행하였다. 대상 시스템의 생산성과 설계의 적정성 분석을 목적으로 시뮬레이션을 구현하였다. 시뮬레이션을 위해 주요 입력 파라미터는 레이아웃 정보, 프로세스, 운영 로직 등을 반영하여 분석을 하였다. 실험 수행 결과 산출량을 최대화 시키는 입력 파라미터의 값을 확인하였다[16]. 김덕현 외 2인 (2018)은 시뮬레이션을 이용하여 유연 생산 시스템(FMS, flexible manufacturing system)을 대상으로 운영 문제를 다루었다. 공장 내 공정별 최적 팔레트 수량 결정 문제를 위해 시뮬레이션 개발 절차와 생산성 평가를 진행하였으며, 실제 공장의 운영성과와 시뮬레이션을 비교하여 개선 방안을 도출하였다. 주요 입력 데이터로 제품의 사양, 레이아웃 정보, 투입 순서, 근무 시간 등이 사용되었다. 본

연구에서는 장비의 고장이나 통신 오류 등의 불확실한 영향을 반영하지 못한 점을 한계점으로 지적했다[17]. 김승남, 임석철 (2006)은 시뮬레이션을 이용하여 신규 제조라인을 대상으로 산출량 극대화를 위한 공정 용량 조정 실험을 진행하였다. 본 연구는 반복 실험을 수행하여 개선의 여지가 있는 공정을 확인하였고, 공정 용량 조정을 위한 절차를 제시하였다. 시뮬레이션 모델링을 위해 공정 용량(capacity)와 사이클타임(cycle time)이 이용되었고, 평균치 $\pm 10\%$ 를 따르는 삼각분포를 가정하였다[18]. 이태훈 외 3인 (2020)은 DAS (digital assorting system)을 대상으로 작업자 운송 로봇의 운영 정책이 생산성에 미치는 영향을 분석하였다. 시뮬레이션을 이용하여 시나리오별 대안 분석을 하였고 이를 통계적으로 검증하였다. 주요 입력 데이터는 셀 레이아웃 정보와 거래처수 등을 이용하였으며, 운송 로봇 작업할당을 위하여 제품을 인기도 별로 분할하였다. 이때 인기도에 따라 일양분포를 이용하여 확률분포를 적용하였다[3]. 김보성 외 3인 (2018)은 레일 기반 컨테이너 터미널(rail-based container terminal)을 대상으로 재정돈을 위한(buffer)의 위치 결정 정책을 제안하였다. 버퍼 위치 결정을 위해 시뮬레이션을 이용한 정책 별 생산성을 비교하였고, 실효성을 입증하였다. 대상 터미널의 운영 특성상 플랫폼과 외부트럭이 이용되므로, 도착분포를 주요 파라미터로 이용하였다. 플랫폼의 도착분포는 로그 정규분포를 가정하였고, 외부 트럭의 도착분포는 과거 데이터를 기반으로 와이블 분포를 도출하였다[19]. 채준재 외 3인 (2020)은 공항 수하물 시스템을 대상으로 하였다. 제한된 공간에서 공항 소화물 시스템의 목표 성능 산출을 위해 시나리오 평가와 검증을 진행하였다. 입력 데이터는 체크인 카운터와 보안검색실, 캐로셀에서 수집된 실적 데이터를 바탕으로 구성되었다[20]. 최준혁, 신광섭 (2021)은 풀필먼트(fulfillment)센터를 대상으로 자동화 장비인 AGV와 ARM도입을



〈그림 3〉 Schematic diagram of the construction equipment assembly line

위한 의사결정 지원을 위한 시뮬레이션을 활용하였다. 실험을 통해 최적의 장비 투입 대수 결정을 제안하였다. 입력 데이터로 국내 업체의 제품을 batch단위, 주문 수 SKU 수 등을 활용하였다. 실제 현장 적용을 위해 수요의 변동성이나 다양한 시나리오 구성이 추가로 요구되었다[21].

다양한 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 이용한 연구들이 진행되었다. 대부분의 연구들이 생산성 평가 및 대안 제시에 초점을 맞추었고, 데이터 수집이 어렵거나 없는 상황에 입력 데이터의 구성에 관한 절차 연구는 상대적으로 부족하였다. 활용된 입력 데이터는 실적자료 또는 다수의 데이터가 존재하는 상황에서 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 본 연구는 반복적인 데이터 수집이 어려운 환경을 대상으로 동영상 데이터 기반 시뮬레이션 입력 모델링 절차를 제안함으로써 기존 연구와 차이를 보인다.

III. 문제 정의

3.1 연구 대상

본 연구의 대상 업체인 A사는 중소기업으로 굴삭기, 중장비 등의 건설기계 제품들을 고객 요청에 따른 제품을 생산하는 original equipment manufacturer(OEM) 방식을 취하고 있다. 대상 업체의 건설기계 조립라인의 레이아웃은 <그림 3>과 같다. 대상 건설기계 조립라인은 상부 조립라인(top assembly line), 하부 조립라인(bottom as-

sembly line) 그리고 메인 조립라인(main assembly line)으로 구성되어 있다. 제품은 상부 조립라인에서 건설기계의 상체 부분이, 하부 조립라인에서 하체 부분이 조립된다. 상하부에서 조립이 완료된 후 메인 조립라인의 도킹(docking) 공정을 통하여 상하부가 결합된다. 메인 조립라인의 각 공정에서 추가적인 부품을 결합하는 조립이 수행된다. 각 공정 사이는 제품이 이동하면서 선행 공정의 상황에 따라 대기가 발생하게 되므로, 버퍼(buffer)로 표현한다. 대상 업체의 요청으로 공정은 일부만 표시되어 있다.

3.2 데이터 취득이 제한되는 환경

대상 업체는 건설기계 조립라인의 시뮬레이션 구현을 통해 스케줄링을 검증하고자 하였고, 대상 업체의 시뮬레이션 입력 모델링을 위한 데이터 수집은 다음과 같은 한계 사항들이 존재하였다.

(1) 제조실행시스템(MES, manufacturing execution system)의 미구축 : MES의 구축 및 자동화된 설비 보유로 실시간 모니터링을 통해 수동 측정에 비해 상대적으로 빠른 데이터 수집이 가능하다. 대상 업체를 포함한 대부분의 중소기업은 비용, 기술적 문제, 전문인력의 부재 등으로 MES구축이 쉽지 않은 실정이다.

(2) 고중량 및 고부피 제품으로 인한 수작업 중심의 환경: 제품들이 수작업으로 생산되므로, 작업자의 동작 측정이 어렵다. 측정을 위해서는 해당 공정의 지식을 보유한 전문인력이 필요하다.

(3) 주기적인 작업자 교체: 작업자 교체로 인해 동일한 공정에서도 공정시간에 대한 변동이 발생한다. 작업자 숙련도 차이와 작업 순서의 차이로 인해 작업 표준화가 어려운 환경이다.

(4) 긴 리드타임: 제품당 생산에 10시간 이상 소요되므로, 수작업 측정시 상시적으로 공정시간을 수집하기 어렵다.

(5) 다양한 종류의 제품 생산: 대상 건설기계 조립라인은 3가지 타입의 제품 혼류생산한다. 본 연구에서는 제품들의 이름을 간략하게 A, B, C라 정의한다. 제품 A, B는 주행장치가 궤도형태인 크롤러(crawler)로 이루어진 모델이며, 조립 부품 크기의 차이가 존재한다. 제품 C는 휠(wheel)로 구성된다. 부품의 크기와 타입에 따라 조립시 소요되는 공정시간은 모두 상이하며, 공정시간 차이로 인한 병목 공정이 발생한다.

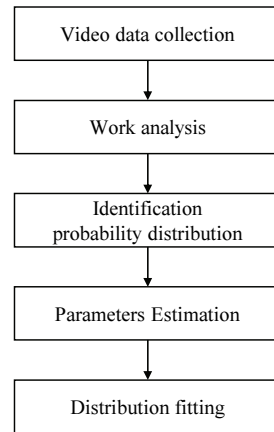
상기와 같은 이유로 기존의 입력 데이터 수집이 쉽지 않은 실정이다. MES 미구축으로 인한 실적자료의 부재, 제품 별 긴 리드타임으로 인한 스톱워치법 사용이 어려우며, 작업자와 제품 교체 등의 환경 변화로 인해 워크샘플링 방법도 제한된다.

본 연구에서는 현장의 상황과 측정에 소요되는 시간을 고려하여, 동영상 촬영을 통해 데이터를 수집한다. 3가지 제품 모두 동시에 생산되는 일자를 선정하였고, 각 제품별 전공정이 측정된 데이터는 제품별 1회 측정된 표본이므로 평균 및 분산 추정이 제한된다. 기존 입력 모델링에 활용된 절차는 복수의 데이터를 활용하여, 분포를 생성하였다. 현 상황에서 기존 입력 모델링 절차 활용은 제한되므로, 본 연구에서는 동영상 촬영을 통해 취득한 1회의 공정시간 데이터를 활용하여 공정시간의 분포를 생성하고자 한다.

IV. 동영상 데이터를 활용한 입력 모델링 절차

본 장은 동영상 기반 데이터를 활용한 시뮬레

이션 입력 모델링 절차를 소개한다. <그림 4>는 제안하는 절차를 보여준다. 제안된 절차는 데이터의 수집, 작업분석, 확률분포 설정, 모수 추정 그리고 분포 적용 과정을 설명한다. 각 단계에서 제시하는 방법을 이용하여 시뮬레이션의 입력 데이터로 활용한다.



<그림 4> Proposed simulation input modeling procedure

4.1 동영상 데이터 수집

동영상기반 데이터를 이용한 분석은 기존 측정 방법인 스톱워치법과 워크샘플링의 한계와 실적자료부재를 보완하기 위해 필요하다. 동영상 기반의 데이터를 활용한 측정법은 다음과 같은 세 가지 장점이 있다.

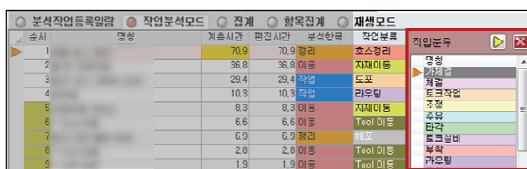
첫 번째는 공정시간과 함께 요소작업들의 작업시간 수집이 가능하다. 공정에 대한 동영상 촬영으로 공정시간을 포함한 해당 공정과 관련된 작업 데이터가 수집된다. 두 번째는 동영상 데이터 보관의 영구성이다. 공정을 촬영한 동영상 데이터는 디지털 데이터로 데이터 보관과 데이터 이동 및 가공이 용이하다. 마지막으로 동영상 데이터는 반복 관찰이 가능하다. 동영상 데이터는 원하는 시점에 대한 선택적 재생이 가능하며 해당 시점에 대하여 반복적인 관찰이 가능하다. 반

복 관찰은 해당 시점의 작업에 대하여 상세분석과 작업 개선에 기여한다.

대상 조립라인은 총 3가지 제품들이 정해진 일정계획을 따라 생산되는 혼류 생산 방식으로 운영된다. 공정시간 데이터는 제품의 생산 흐름대로 촬영하여 수집한다. 전체 공정시간은 제품이 메인 라인에 투입되는 시점부터 마지막 공정이 끝나는 시점까지의 동영상 촬영을 통해 확보한다. 현장의 사정으로 제품별 전체 공정시간은 1회 측정 되었고, 본 과정을 통해 동영상으로 기록된 작업 데이터는 작업분석 과정을 진행한다.

4.2 작업분석

본 연구에서는 동영상 촬영으로 획득한 공정별 공정시간을 측정시간(measurement time)이라 한다. 동영상 분석 툴을 이용하여 공정별 측정시간을 각각 요소작업(task)으로 구분한다. 요소작업은 공정을 세분화한 작업 단위로서, 더 이상 나눌 수 없는 최소한의 완전한 활동을 의미한다. 본 연구에서 요소작업들은 가체결, 체결, 토크작업 등의 총 25개 항목으로 구분한다. <그림 5>는 동영상 분석 툴을 활용하여 측정시간을 요소작업으로 구분하는 예시를 나타낸다.



<그림 5> Example of using the video analysis tool

요소작업으로 분할하는 이유는 (1) 작업내용을 보다 명확하게 파악할 수 있고, (2) 같은 유형의 요소작업으로부터 표준자료로 활용할 수 있으며 (3) 특정 공정에서 일부 작업의 작업방법 변경 시, 변경된 부분을 중점으로 검토할 수 있다[22].

공정 별 측정시간은 요소작업들의 시간으로 구성된 순수 공정시간인 정미시간(normal time)과 낭비시간(waste time) 합으로 표현된다. 정미시간은 일반적으로 숙련된 작업자가 보통의 속도로 작업을 수행하는 데 소요되는 시간으로 정의된다[23]. 낭비시간은 작업자의 실수로 인한 작업 반복, 이동 실수, 부품 선택의 실수 등으로 정의한다. 본 연구에서는 작업 수행 시간의 정확한 측정을 위해, 측정시간을 요소작업 단위로 구분 후 낭비 시간을 제거하는 과정을 거쳐, 순수 공정시간과도 같은 정미시간을 산출한다. 정미시간 산출을 위한 낭비시간 구분은 현장 전문가의 자문을 받아 수행되었다. 본 연구에서 정미시간은 작업자가 수행할 수 있는 최선의 공정시간 의미로 사용한다. 제시된 과정을 수리적인 기호로 표현하면 다음과 같다.

Indices and parameters

- P, p Set of processes and its index $p \in P$.
- T_p, t_p Set of tasks for process p and its index $t_p \in T_p$
- AR Allowance rate

Variables

- mt_p Measurement time of process p
- nt_p Normal time of process p
- wt_p Waste time of process p
- mt_{p,t_p} Measurement time of task t_p for process p
- nt_{p,t_p} Normal time of task t_p for process p
- wt_{p,t_p} Waste time of task t_p for process p
- st_p Standard time of process p

본 건설기계 조립라인은 전체 공정의 집합 P 와 인덱스 p , 각 공정의 요소작업 집합 T_p 와 인덱스 t_p 로 구성된다. 임의의 공정 p 의 측정시간(mt_p)은 정미시간(nt_p)과 낭비시간(wt_p)의 합이며

로 식(1)과 같이 정의한다.

$$mt_p = nt_p + wt_p. \quad (1)$$

공정 p 는 $|T_p|$ 개의 요소작업들이 순차적으로 이루어지므로, 세부 단위로 분할하면 다음 식(2)와 같다.

$$mt_p = nt_p + wt_p = \sum_{t_p=1}^{|T_p|} (nt_{p,t_p} + wt_{p,t_p}). \quad (2)$$

동영상 분석 틀을 이용하여 wt_p 에 해당하는 부분을 삭제하였으므로, nt_p 이 산출된다. 임의의 공정 p 의 nt_p 은 식(3)과 같다.

$$nt_p = \sum_{t_p=1}^{|T_p|} nt_{p,t_p}. \quad (3)$$

산출된 nt_p 을 활용하여 표준시간(st_p)을 가정할 수 있다. 일반적인 st_p 은 생산계획의 수립 또는 의사결정에 활용되는 시간이라 정의된다[22]. 표준시간은 작업자의 여유시간을 더하여 산정한다. 여유시간은 불가피한 지연 등으로 인한 손실 등을 보정하기 위해 더하는 값이다. 본 연구에서는 크게 여유시간으로 작업자의 개인적 요구(personal needs)와 기본 피로 여유(basic fatigue)를 사용하였다. 개인적 요구는 작업자의 일반적인 욕구 만족을 위해 중단되는 지연이다. 작업자가 화장실을 가거나, 물을 마시는 등의 상황이 포함된다. 개인적 요구에 대한 표준은 아직 마련되지 않았지만, I.Lazarus (1968)에 의하면 nt_p 의 약 5.00%가 적절하다고 보고되었다. 기본 피로 여유는 작업을 수행할 때 단조로움이나 지루함을 완화하기 위해 필요한 여유를 말한다[24]. G.Kanawaty(1992)에 의하면 nt_p 의 약 4.00%가 적절하다고 하였다[25]. 이에 본 연구에서는 두 연

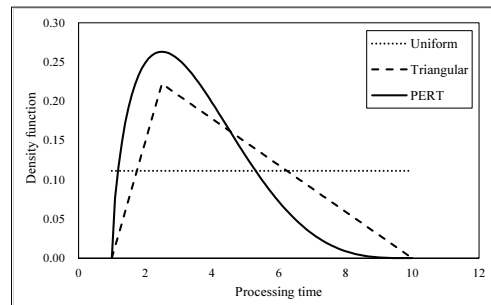
구를 바탕으로 nt_p 대비 9.00%를 여유율(AR)로 가정하였다. 공정 p 의 st_p 은 nt_p 에 AR을 반영하여 계산되며 다음 식(4)와 같다.

$$st_p = nt_p \times (1 + AR) = nt_p \times (1.09). \quad (4)$$

작업분석 과정을 통해 측정시간인 mt_p 를 이용하여 nt_p 과 st_p 을 산정하였다.

4.3 확률분포 설정

일반적으로 데이터가 없는 경우 구간에서 모든 사건의 발생확률이 동일한 일양분포(uniform distribution) 또는 가장 발생 가능성이 높은 값인 최고가능성값(most likely)에 발생확률의 가중치를 부여하는 삼각분포(triangular distribution)를 사용한다[5]. 일반적으로 삼각분포는 모수 최빈값(mode)을 사용하지만, 데이터가 없는 상황에서는 최고가능성값으로 해석할 수 있다[6]. 삼각분포와 유사한 형태의 분포로 PERT(program evaluation and review technique)분포가 있다. PERT분포는 데이터가 적은 경우 작업의 불확실성 효과를 추정하기 위해 사용되며, beta분포의 특수 케이스이다[26]. 삼각분포와 마찬가지로 최고가능성값에 가중치를 부여하지만, PERT 분포는 최고가능성값에 멀어질수록 확률이 감소하는 곡선을 그린다. <그림 6> 일양분포, 삼각분포, PERT분포의 예시를 나타낸다.



<그림 6> Example of distributions

본 연구에서는 3개의 모수인 최솟값, 최대값, 최고가능성값을 사용하는 확률분포인 삼각분포와 PERT분포를 시뮬레이션의 확률분포로 가정한다.

4.4 모수 추정

상기 4.2절에서 제시된 절차에 따라 제품별 전 공정에 대한 1회의 측정시간 데이터를 요소작업으로 분할하였고, 이를 바탕으로 2개의 이론적 시간인 nt_p 과 st_p 을 도출하였다. 또한 4.3절에서 시뮬레이션에 활용될 확률분포를 삼각분포와 PERT분포로 가정하였다. 가정된 두 분포의 모수는 최솟값, 최고가능성값, 최댓값 3개의 모수를 활용된다. 분포의 모수로 본 연구에서는 nt_p , mt_p , st_p 을 활용한다.

nt_p 은 wt_p 을 제거하여 산출한 값이므로, 작업자가 수행할 수 있는 가장 이상적인 공정시간이라 가정한다. 즉, 가장 작은 공정시간이 되므로 분포의 최솟값으로 사용한다. mt_p 는 전문가의 확인과정을 거쳐 얻은 값이므로 최고가능성값으로 가정하였다. st_p 은 nt_p 의 AR이 반영된 값이지만, 대부분 mt_p 가 st_p 보다 적은 값을 보였으므로, 최댓값을 st_p 로 가정한다. 식(5)의 μ_t 는 삼각분포의 평균을 의미하며, a는 최솟값, b는 최댓값, m은 최고가능성값을 나타낸다.

$$\mu_t = \frac{a + m + b}{3} = \frac{nt_p + mt_p + st_p}{3}. \quad (5)$$

식(6)은 σ_t^2 는 삼각분포의 분산을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \sigma_t^2 &= \frac{a^2 + m^2 + b^2 - am - ab - mb}{18} \\ &= \frac{nt_p^2 + mt_p^2 + st_p^2}{18} \\ &\quad - \frac{nt_p mt_p + nt_p st_p + mt_p st_p}{18}. \end{aligned} \quad (6)$$

PERT분포도 동일한 모수를 이용하여 평균과 분산을 산출할 수 있다. PERT분포의 평균 μ_p 는 식(7)과 같다.

$$\mu_p = \frac{a + 4m + b}{6} = \frac{nt_p + 4mt_p + st_p}{6}. \quad (7)$$

식(8)은 σ_p^2 는 PERT분포의 분산을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \sigma_p^2 &= \frac{(b-a)^2}{36} = \frac{(st_p - nt_p)^2}{36} \\ &= \frac{st_p^2 - 2st_p nt_p - nt_p^2}{36}. \end{aligned} \quad (8)$$

PERT분포는 분포의 모양을 결정하는 형상모수 α 와 β 가 있으며, 이는 최솟값, 최고가능성값, 최댓값으로 표현가능하다. 형상모수 $\alpha + \beta$ 가 식(9)에 나타나며, 식(10)과 식(11)은 각각 α 와 β 를 나타낸다[27, 28].

$$\begin{aligned} \alpha + \beta &= 4 + 16 \left(\frac{(m-a)(b-m)}{(b-a)^2} \right) \\ &= 4 + 16 \left(\frac{(mt_p - nt_p)(st_p - mt_p)}{(st_p - nt_p)^2} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \left(\frac{b + 4m - 5a}{6(b-a)} \right) \\ &\times \left[1 + 4 \left(\frac{(m-a)(b-m)}{(b-a)^2} \right) \right] \\ &= \left(\frac{st_p + 4mt_p - 5nt_p}{6(st_p - nt_p)} \right) \\ &\times \left[1 + 4 \left(\frac{(mt_p - nt_p)(st_p - mt_p)}{(st_p - nt_p)^2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \beta &= \left(\frac{5b - 4m - a}{6(b-a)} \right) \\ &\times \left[1 + 4 \left(\frac{(m-a)(b-m)}{(b-a)^2} \right) \right] \\ &= \left(\frac{5st_p - 4mt_p - nt_p}{6(st_p - nt_p)} \right) \\ &\times \left[1 + 4 \left(\frac{(mt_p - nt_p)(st_p - mt_p)}{(st_p - nt_p)^2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

4.5 분포 적용

모수들을 이용하여 확률분포를 생성하였고, 시뮬레이션의 입력 데이터로 활용한다. 각 공정마다 최솟값, 최고가능성값, 최대값을 활용하여 삼각분포 또는 PERT분포 내의 난수를 생성하여 시뮬레이션 내의 공정시간을 활용한다.

V. 시뮬레이션 실험

5.1 시뮬레이션 모델링

4장에서 산출된 모수들을 시뮬레이션 입력 데이터로 활용하여 대상 건설기계 조립라인의 생산성을 분석한다. 선행 절차를 통해 PERT분포와 삼각분포의 모수인 최솟값으로 mt_p , 최대값으로 st_p 가 고정되었으므로, 최고가능성값의 선택이 중요하다. 본 실험에서는 삼각분포와 PERT분포의 주요 모수 최고가능성값의 변화에 따른 생산성에 미치는 영향을 확인하고자 한다. 임의의 공정에 대해 mt_p 를 분포의 최고가능성값으로 가정하였고, 비교 실험을 위해 최솟값과 최대값 사이 범위의 25%, 50%, 75%에 해당하는 가상의 측정시간을 생성하였다. 즉, 분포의 모수로 실제 측정시간인 mt_p 와 가정한 3개의 최고가능성값을 비교한다.

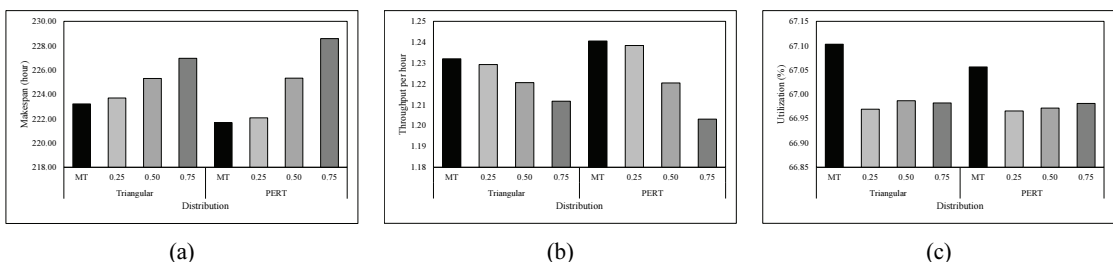
대상 건설기계 조립라인의 구현과 생산성 분석을 위한 개발 도구로 Tecnomatix Plant Simulation 16 (64-bit, Version 16.0.0)를 활용하였다. 시뮬레이션 실행 환경은 Intel(R) Core(TM)

i5-1135G7 CPU @ 2.40GHz 메모리(RAM) 16.0GB이다. 시뮬레이션 내 제품들의 투입은 실제 스케줄링을 반영하였고, 레이아웃은 메인 조립라인을 대상으로 구현하였다. 시뮬레이션 총 소요시간(makespan)은 시스템 내 스케줄링의 투입 제품이 모두 완료된 시간으로 정의한다.

5.2 실험 결과

실험은 삼각분포와 PERT분포의 모수인 최고가능성값의 변화를 줄 때 주요 생산성 변화를 분석하기 위해 구성되었다. 메인 조립라인의 모든 공정을 구현한 후 전체 생산성을 나타내었다. <그림 7>-(a), <그림 7>-(b), <그림 7>-(c)는 총 소요시간, 시간당 산출량, 가동률을 나타낸다. <그림 7>에서 가로 축은 최고가능성값이며 그림의 MT는 측정시간인 mt_p 를 나타낸다. 0.25, 0.5, 0.75는 각각 최솟값과 최대값 사이 범위의 25%, 50%, 75%에 해당하는 가상의 측정시간 값을 나타낸다.

실험결과 최고가능성값이 최대값에 가까울수록 총 소요시간은 증가하였다. 삼각분포와 PERT분포는 평균 0.5%의 차이를 보였다. 시간당 생산량은 모수 최고가능성값이 증가함에 따라 감소하였으며, 두 분포는 평균 0.5%를 보였다. 전체 공정의 평균 가동률의 경우 두 분포의 차이는 평균 1.7%였다. 가동률은 병목공정의 영향을 많이 받으므로, 최고가능성값에 따른 변화가 일정하지 않았다. 3가지 생산성 지표는 삼각분포와 PERT



<그림 7> Experiment results of simulation: (a) makespan; (b) throughput per hour; (c) utilization

분포 모두 최고가능성값에 따라 비슷한 결과를 보였으며, 이는 두 분포가 형상모수를 제외하고 동일한 모수를 사용했기 때문이다.

입력 모델링의 과정을 거쳐 생성된 모수와 확률분포를 이용하여 시뮬레이션에 적용하였고, 주요 생산성 지표를 확인하였다. 본 실험결과를 도출한 시뮬레이션 모델은 현장 전문가를 통해 공정 분석 시 사용이 가능함을 확인을 받았다.

VI. 결 론

본 연구는 데이터 취득이 어려운 건설기계 조립라인에서 이용할 수 있는 시뮬레이션 입력 모델링 절차를 제안하였다. 동영상 촬영을 통해 제품별 전 공정에 대해 공정시간을 수집하였고, 작업분석 과정을 통하여 측정시간을 정미시간과 표준시간으로 산출하였다. 3가지 모수를 이용하는 삼각분포와 PERT분포의 주요 모수로 측정시간과 산출된 정미시간, 표준시간으로 설정하는 과정을 제시하였다. 시뮬레이션을 이용한 실험은 공정별 입력 데이터를 삼각분포와 PERT분포로 나누어 진행하였고, 분포의 모수인 최고가능성값을 mt_p 와 가정한 3가지 측정시간과 비교하였다. 측정시간에 따라 정미시간과 표준시간 사이의 구간을 파악할 수 있었다. 향후 측정시간에 대한 최고가능성값의 위치를 바탕으로 작업자의 숙련도 등의 평가로도 활용 가능할 것으로 기대된다.

추후 연구로는 극소량의 측정시간 데이터가 있을 때 근사적으로 시뮬레이션 입력 모델링의 연구, 동일한 요소작업의 공정시간 변동성 분석 및 요소작업별 분포 추정 연구, 기존 모델의 사용 부품들과 요소작업과 공정시간 데이터를 활용하여 신규 제품에서 사용하는 부품을 기반으로 신규 제품에 대한 공정 구성 및 공정 별 공정시간 추정 연구를 수행하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] 정만태, 세계 건설기계산업의 최근 시장·기업 동향과 시사점, KIET 산업경제, 2020.
- [2] 김기동, 최호식, “건설기계 조립 라인 투입 순서를 고려한 제관 공정 생산 스케줄링에 관한 연구”, 산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제27권, 제A호, pp.69-76, 2007.
- [3] 이태훈, 김영주, 이정만, 홍순도, “작업자추종 운송 로봇을 활용하는 디지털 어소팅 시스템 시뮬레이션 분석”, 로지스틱스연구, 제28권, 제1호, pp.47-58, 2020.
- [4] R. R. Barton, L. W. Schruben, “Resampling Methods for Input Modeling”, Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference, pp.272-378, 2001.
- [5] M. D. Rossetti, Simulation Modeling and Arena, John Wiley & Sons, 2015.
- [6] B. Biller, C. Gunes, “Introduction to Simulation Input Modeling”, Proceeding of the 2010 Winter Simulation Conference, pp.49-58, 2010.
- [7] J. Banks, Discrete event system simulation, Pearson Education India, 2005.
- [8] A. M. Law, “A tutorial on how to select simulation input probability distributions”, 2013 Winter Simulations Conference (WSC), pp.306-320, 2013.
- [9] F. Zouaoui, J. R. Wilson, “Accounting for Parameter Uncertainty in Simulation Input Modeling”, IIE Transactions, Vol.35, Issue 9, pp. 781-792, 2003.
- [10] B. Biller, B. L. Nelson, “Answers to the top ten input modeling questions”, Proceedings of the Winter Simulation Conference 2002, pp.35-40, 2002.
- [11] 문일경, 김병수, 김훈태, 서용원, 이철웅, 정병도, 생산 및 운영관리, 생능, 2016.
- [12] 정태준, 윤진숙, 유선국, “외래환자 대기시간 단축에 대한 시뮬레이션 모델 연구”, 멀티미디어학회논문지, 제23권, 제3호, pp.460-467, 2020.

- [13] 이남수, 이재용, 조은현, 이동형, “아레나 시뮬레이션을 이용한 화장품 포장공정의 개선사례 연구”, 산업경영시스템학회지, 제43권, 제2호, pp.72-28, 2020.
- [14] 이지환, 조재영, 채규태, 장성용, “석유화학 창고 시스템 내 물류 흐름 개선을 위한 시뮬레이션 분석”, 산업경영시스템학회지, 제43권, 제3호, pp.77-86, 2020.
- [15] 최용희, 황승준, “주문생산 방식의 생산계획 수립을 위한 시뮬레이션 모델 설계 : 관유리 제조공정을 중심으로”, 산업경영시스템학회지, 제42권, 제1호, pp.64-73, 2019.
- [16] 정호연, “이동식 목욕차량의 조립시스템에 대한 시뮬레이션 분석”, 산업경영시스템학회지, 제44권, 제2호, pp.93-101, 2021.
- [17] 김덕현, 이인수, 차춘남, “시뮬레이션 기법을 이용한 항공기 부품 가공 유연생산시스템의 팔레트 수량 결정”, 산업경영시스템학회지, 제41권, 제4호, pp.59-69, 2018.
- [18] 김승남, 임석철, “신규제조라인의 목표생산용량 달성을 위한 비용효과적 시뮬레이션 절차”, 대한산업공학회지, 제32권, 제2호, pp.104-117, 2006.
- [19] 김보성, 김정환, Y. F. Henohk, 홍순도, “레일기반 컨테이너 터미널의 재정돈버퍼 위치 결정 모델 연구”, 로지스틱스연구, 제26권, 제3호, pp.1-16, 2018.
- [20] 채준재, 강수민, 최원균, 구동혁, “시뮬레이션분석을 통한 공항 수하물시스템 설계 지원 - 공항의 수화물 시스템 확장-”, 로지스틱스연구, 제28권, 제5호, pp.47-56, 2020.
- [21] 최준혁, 신광섭, “시뮬레이션 기반 풀필먼트센터 최적 AGV 및 AMR 운영 계획 수립”, 한국빅데이터학회지, 제6권, 제2호, pp.17-28, 2021.
- [22] 심창건, 변재현, “다품종 극소량생산시 표준시간 자료의 산정방법 및 적용사례”, 산업공학(IE interfaces), 제11권, 제2호, pp.191-197, 1998.
- [23] A. Freivalds, B. Niebel, Niebel's Methods, Standards, and Work Design, Mcgraw-Hill higher education, 2013.
- [24] I. Lazarus, Inaccurate Allowances are Crippling Work Measurement, Factory, 1968.
- [25] G. Kanawaty, Introduction to Work Study, International Labour Organization, 1992.
- [26] D. G. Malcolm, J. H. Roseboom, C.E.Clark, W. Fazar, “Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation”, Operations research, Vol.7, No.5, pp.646-669, 1959.
- [27] E. Ragnier, “Activity Completion Times in PERT and Scheduling Network Simulation, PartII, DRMI Newsletter, pp.4-9, 2005.
- [28] R. Davis, “Teaching Note-Teaching Project Simulation in Excel Using PERT-beta Distributions”, INFORMS Transactions on Education, Vol.8, No.3, pp.139-148, 2008.

저자 소개



김 호 영 (Hoyoung Kim)

- 2021년 2월 : 금오공과대학교 산업공학부 디자인공학전공 (공학사)
- 2021년 3월~현재 : 부산대학교 산업공학과 산업데이터공학융합전공 석사과정
- 관심분야 : 제조물류시스템, 시뮬레이션, 최적화



이 태 훈 (Taehoon Lee)

- 2017년 2월 : 금오공과대학교 산업공학부 산업경영공학전공 (공학사)
- 2019년 8월 : 부산대학교 산업공학과 (공학석사)
- 2019년 9월~현재 : 부산대학교 산업공학과 산업데이터공학융합전공 박사과정
- 관심분야 : 제조물류시스템, 시뮬레이션, 최적화



홍 순 도 (Soondo Hong)

- 1994년 2월 : 포항공과대학교 산업공학과 (공학사)
- 1996년 2월 : 포항공과대학교 산업공학과 (공학석사)
- 2010년 8월 : Texas A&M University 산업공학과 (공학박사)
- 2014년 3월~현재 : 부산대학교 산업공학과 교수
- 관심분야 : 제조물류, 자가조직 물류시스템, 시뮬레이션 최적화



강 봉 권 (Bongwon Kang)

- 2019년 8월 : 부산대학교 산업공학과 (공학사)
- 2019년 9월~현재 : 부산대학교 산업공학과 산업데이터공학융합전공 석박사통합과정
- 관심분야 : 제조물류시스템, 시뮬레이션, 머신 러닝, 메타휴리스틱



이 주 호 (Juho Lee)

- 2004년 2월 : 연세대학교 컴퓨터산업공학부 컴퓨터산업공학전공 (공학사)
- 2007년 2월 : 연세대학교 정보산업공학과 (공학석사)
- 2017년 4월~2021년 8월 : 현대건설기계 선행생산기술팀 책임연구원
- 2021년 3월~현재 : 부산대학교 산업공학과 산업데이터공학융합전공 박사과정
- 2021년 9월~현재 : 현대제뉴인 기능품생산부 책임매니저
- 관심분야 : 제조물류시스템, 머신 러닝