

자동차 도장 공정의 셋업 감소 방법 모델링 및 시뮬레이션 분석

한용희^{1†}

Modeling and Simulation Analysis of the Setup Reduction Method in Automobile Painting Process

Yong-Hee Han

ABSTRACT

In this study we investigate the problem of reducing color change cost at painting operations in an automobile assembly plant. Changing control logic at conveyor junction points prior to the top coat line has been proposed and analyzed using the discrete event simulation model we developed using AutoMod. We also discussed the project which initiated this research as well as the details of painting operations. Simulation analysis showed that the grouping ratio increases from 1.8 to 2.5 if the proposed control logic change is applied to the plant. Contrary to other approaches such as using dedicated equipment for resequencing, our approach has the merit of less investment cost, no need for additional space consumption. We finally note that the grouping ratio can be further increased if our algorithms is implemented as well as CRS (Color Rescheduling Storage) is installed.

Key words : Simulation, Painting Process, Conveyor System, Setup, Paint Color Change

요약

본 연구에서는 자동차 도장 공장의 가장 큰 낭비 요소인 상도 공정의 세정 비용의 절감 및 환경 보호를 목적으로 상도 공정 이전의 각 컨베이어 연결점에서의 운영 알고리즘 변경시의 셋업 감소 효과를 시뮬레이션 모델링을 통해 분석하였다. 또한 본 연구의 동기가 된 도장 공정에서의 세정 비용 최소화 프로젝트 및 도장 공장 현황에 대해 설명하였다. 시뮬레이션 결과 컨베이어 연결점에서의 운영 알고리즘 개선시 현재 1.8대의 그룹화 효율을 2.5대 수준으로 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서 적용한 접근법을 사용할 경우 그룹화 효율 향상에 별도 설비 투자가 필요 없고, CRS(Color Rescheduling Storage) 설치와 병행 적용하여 그룹화 효율을 더욱 향상시킬 수 있는 이점을 가지고 있다.

주요어 : 시뮬레이션, 도장 공정, 컨베이어 시스템, 셋업, 도료 색상 변경

1. 서론

자동차 생산 프로세스는 여러 단계의 가공(Machining)과 조립공정 등을 포함하는 복잡한 과정이다. 자동차 생산 공장은 일반적으로 프레스 공장(stamping plant), 조립 공장(assembly plant), 엔진 및 구동장치(power train)를 가공하는 공장으로 구분될 수 있다. 그 중 가장 중요한 조

립 공장은 회사 내 프레스 공장 혹은 외주업체에서 생산되는 패널 등을 용접해서 차량의 골격을 만드는 차체 공정(body shop), 차체 공장에서 완성된 차체를 내부 / 외부 부식으로부터 보호하고 고객 / 대리점에서 주문한 색상으로 도장하는 도장 공정(paint shop), 그리고 엔진과 트랜스미션을 비롯한 구동 장치와 서스펜션, 브레이크, 시트, 타이어 등 각종 부품을 차체에 부착시키는 조립 공정(trim shop)으로 세분화된다.

본 연구의 대상인 도장 공정은 크게 전처리(pretreatment), 하도 / 전착(electro deposition), 중도(primer coat line), 상도(top coat line), 검사 / 수리(inspection and repair line) 공정으로 구분되는데, 하도 공정은 차체에 전착

2009년 8월 16일 접수, 2009년 9월 9일 채택

¹⁾ 삼성전자 Device Solution 부문

주 저자 : 한용희

교신저자 : 한용희

E-mail: hyhkorea@hotmail.com

도료를 부착시키는 과정이며, 중도 공정은 자동 도장기나 에어 스프레이건을 사용하여 도료를 부착하는 공정이고, 마지막으로 상도 공정은 자동차 차체의 색깔을 결정하는 공정으로 다양한 종류의 도료가 사용된다. 이 과정에서 중도 공정까지는 차체의 색깔에 상관없이 같은 도료를 사용하여 진행되는 데 반해 상도 공정에서는 고객 / 대리점에서 주문한 색상에 따라 사용되는 도료가 결정된다. 상도 공정의 경우 차량 도색 직전에 도장한 차량과 도장 대상 차량의 색상이 다를 경우 자동 도장기 내부의 잔류 도료를 신너를 이용하여 세정한 후 새로운 도료를 투입하여 도장 작업이 이루어진다(문덕희 등(2003)). 따라서 동일한 색상의 차종이 연속해서 상도 부스로 투입되지 않을 경우 잔류 도료의 세정(셋업) 비용이 발생하게 된다. 이러한 세정 비용을 줄이기 위해 일반적으로 상도 부스 진입 전에 생산 순서를 동일 색상별로 그룹화해주는 별도 저장 공간인 CRS(Color Rescheduling Storage, Selectivity Bank, 혹은 Color Selection Lane)를 설치 및 사용한다.

참고로 셋업 발생 빈도를 측정을 위해 총 세정 비용, 총 세정 횟수, 그룹화 효율(Grouping Ratio) 등 여러 지표 정의가 가능하지만, 본 연구에서는 CRS의 효율을 평가하는데 일반적으로 사용되는 그룹화 효율을 사용하기로 한다. 그룹화 효율은 통과 차량 수 / 세정 횟수로 정의되며, 알고리즘간 퍼포먼스 비교가 용이하고 자동차산업 외 기타 산업에도 적용 가능한 장점을 가지고 있다.

2. 관련 논문 조사

자동차 조립 및 도장 공정의 오랜 역사 및 해당 문제의 경제적 중요성 때문에, 많은 연구자들의 다양한 관점에서의 연구가 본 문제에 대해 행해졌다. 도장 공장의 셋업 최소화 문제는 설비의 유형과 규모, 입고 및 출고 방법 등의 다양한 요인에 의해 영향을 받으므로 최적화 해를 구하기가 쉽지 않다. 결과적으로 해당 문제를 다룬 대부분의 논문들은 시뮬레이션 기법을 사용하였다. 먼저 CRS의 설치 및 운영과 관련된 연구를 정리하면 다음과 같다. 국내 자동차회사를 대상으로 한 연구에는, CRS를 설치하고 운영하기 위한 소프트웨어 개발에 대한 연구(박혜규 등(1996)), CRS 레이아웃 및 운영 알고리즘을 변경시 그룹화 비율의 변화를 시뮬레이션으로 검토한 연구(문덕희 등(2004)), CRS 운영시 입고 및 출고 알고리즘에 대한 연구(문덕희 등(2004), 최원준 등(1997)), CRS 설치시의 투자 및 경제성 검토에 대한 연구(문덕희 등(2004))가 있다. 특히, 최원준 등(1997)은 3.77대 내외, 문덕희 등(2004)은 5~6대

의 그룹화 효율 달성이 보고되었다. 참고로 문덕희 등(2004)은 국내 D 자동차회사, 기타 연구는 모두 국내 H 자동차회사를 대상으로 수행되었다.

국외 자동차회사를 대상으로 한 연구에는 다음과 같은 논문이 있다. Jayaraman 등(1997)은 CRS를 설치할 때 고려해야 하는 설계 요인과 시스템 효율 평가 척도를 제시하고, 라인 당 6대씩 6개 라인으로 구성된 CRS에 대해 시뮬레이션을 이용한 사례 연구를 제시하였다. 하지만 이 논문에서는 상세한 입고/출고 알고리즘이나 그룹화 효율에 대한 시뮬레이션 결과는 제시된 바 없다. Han 등(2003)은 자동차회사 도장 공장에 대한 시뮬레이션 모델 구축 관련 상세 내용 및 효과 - 총 도료 세정 비용 절감 및 휘발성 유기물질(Volatile Organic Compounds) 배출량 감축 등 - 에 대해 보고하였다. Morley 등(1993) 및 후속 논문(Morley(1996), Morley 등(1998))은 트럭 조립 공장에서 트럭을 상도 부스에 할당시 총 makespan과 총 색상 변경 횟수를 최소화하는 알고리즘을 다루었다. 이들 논문은 시장 기반 경매 알고리즘을 미국 GM사의 조립 공장에 적용한 결과 적용 이전 대비 그룹화 효율이 평균적으로 100% 상승하였다고 보고하였다.

Campos 등(2001)은 Morley 등(1993) 및 후속 논문에서 제시한 시장 기반 경매 알고리즘과 개미 알고리즘 기반 threshold 알고리즘을 비교하였고, 유전자 알고리즘을 사용하여 이들 두 알고리즘상의 파라미터값을 계산하였다. Gambardella 등(2000)은 시장 기반 알고리즘 및 개미 알고리즘을 시뮬레이션하였으며, 각 알고리즘상의 일부 파라미터값은 목적함수의 변화와 거의 무관하므로 제거 가능함을 밝혔다. Atassi(1996)는 자동 창고를 이용한 동일 색상 차종을 그룹화에 대해 논하였다. 여기서 자동 창고는 일종의 random access 오프라인 버퍼의 역할을 하며, 도장 공정 이전에는 그룹화 효율을 올리는 역할 및 도장 공정 이후에는 자동 창고 이전의 차량 순서를 회복하는 역할을 수행한다. Park 등(1998)은 대규모의 동일 색상의 차량 블록의 형성 관련 연구를 논하였다. 구체적으로, 원하는 위치의 차량의 인입 및 인출이 자유로운 자동 창고를 이용시 간단한 블록 보호 규칙의 준수만으로도 셋업 개수를 상당히 줄일 수 있음을 시뮬레이션을 통해 보였다. 상기 언급된 논문(Morley 등(1993) 및 후속 논문, Campos 등(2001), Gambardella 등(2000), Atassi(1996), Park 등(1998))은 모두 인공지능 기법을 사용하였는데, 이러한 인공지능 기법을 이용한 접근 방법은 현장에 적용하기 쉽고 예기치 못한 공장 비가동 등의 시스템 변동에 효율적으로 대응 가능한 장점이 있는 반면, 해의 품질에

대한 보증이 불가능한 약점을 가지고 있다. 최적화 모델링 접근 방법은 Choe 등(1993)에서 최적해의 상한치(upper bound)를 얻기 위해 처음 사용되었으며, 그룹화 효율을 높이면서 부하의 쏠림 방지를 위해 자동 창고가 사용될 경우에 대해 시간 창을 가진 외판원문제로 모델링되었다.

컨베이어 시스템에서의 연결점을 이용한 셋업 감소는 SMT(surface mount technology, 표면 실장 기술) 조립라인 등의 다른 생산 라인에도 적용 가능하며, Jeong 등(2005)은 SMT 조립라인에서 bypass 연결점을 가진 경우의 셋업 감소 방법에 대해 다루었다.

유사한 셋업 최소화 문제는 철도의 차량 분류 기지(classification yard)에서도 발생한다(Siddiquee(1972), Yagar 등(1983), Daganzo(1986)). 철도의 차량 분류 기지에서의 셋업 최소화 문제와 본 논문에서 다룬 셋업 최소화 문제와의 가장 큰 차이점은 전자에서는 기정의된 화차간 순서를 100% 준수하는 것이 필요하며, 열차내 화차가 100% 정확한 순서로 정렬될 때까지 지속적으로 개별 화차는 정해진 라인을 순환(re-humping)하나, 후자에서는 셋업을 줄이기 위한 목적으로 정해진 라인을 순환하지 않는다. 차량 분류 기지에서의 셋업 최소화 문제에 대해서도 혼류 조립 라인(mixed assembly line) 관점에서 일부 연구가 이루어졌으나, 본 연구에서 서술한 환경과 관련된 연구는 없었다.

본 논문이 선행 논문들과 다른 점은 별도의 CRS 설치를 통해서가 아닌 기존에 생산 라인에 공통으로 존재하는 설비를 이용한 그룹화 효율 향상에 대해 다룬 점이다. 구체적으로, 컨베이어의 연결점(junction point)에서 어떤 차량을 먼저 인입 혹은 인출하는가에 따라 연결점 전과 연결점 후의 그룹화 효율이 바뀌는 사실을 이용하여, 상도 부스 이전의 여러 연결점에서의 적절한 컨트롤 로직의 변경을 통하여 CRS 설치와 관련한 추가 투자 없이 그룹화 효율이 향상될 수 있음을 보였다. 참고로 컨베이어 연결점은 분기점(diverging point, 1개의 인입 컨베이어에서 다수의 인출 컨베이어로 차량이 인출)과 수렴점(merging point, 다수의 인입 컨베이어에서 1개의 인출 컨베이어로 차량이 인출)으로 구분되며, 적용되는 알고리즘도 다르다.

이후의 본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 3장에서는 관련 프로젝트 및 현 도장 공정의 현황을 설명하고, 4장에서는 시뮬레이션 모델에 대해 설명한다. 5장에서는 운영 알고리즘 개발 및 검증에 대해 설명하며, 마지막으로 6장에서는 본 연구의 성과를 정리한다.

3. 현황 설명

3.1 본 연구 관련 현장 개선 프로젝트 설명

본 연구에서 다루진 도장 공정 상세 내용은 한 자동차 조립 공장과의 현장 개선 프로젝트를 통해 도출된 것이다. 프로젝트는 다음과 같이 진행되었다. 먼저, 현장 총책임자(프로젝트 발주자)와의 인터뷰를 통해 프로젝트의 목표(도장 공정의 색상 변경 횟수 최소화를 통한 비용 절감 및 환경 보호) 및 제약 사항(비용 및 공간 문제로 인한 CRS 신규 도입 불가)을 명확히 하고 현장 실무자들과의 지속적인 인터뷰를 통해서 현장 상황에 대한 이해도를 점진적으로 향상시켰다(현장 실무자들과의 인터뷰는 프로젝트 중반까지 지속적으로 수행됨). 정수계획법 모델을 통한 최적해 산출 및 현장 적용 가능성을 검증하기 위한 시뮬레이션 모델 구축을 병행하기로 최종 결정하고, 유사 사례에 대한 기존 연구 성과 검색, 시뮬레이션 모델 구축, 시뮬레이션 모델에 필요한 데이터 요청, 획득, 데이터 검증을 병행하였다. 또한 본 프로젝트에 대한 공장 내 담당자와의 정기적인 회의를 통해 프로젝트 진행 상황 공유, 담당자로부터의 피드백을 통한 시뮬레이션 모델의 정합성 향상, 현장 요구사항 갱신 및 현장에 필요한 사항 요청 등의 작업이 이루어졌다. 시뮬레이션 모델이 최종 완성된 후, 실제 공장 데이터를 사용시의 시뮬레이션 예상치와 실제 결과치와의 일치도 비교를 통해 시뮬레이션 모델의 정합성을 검증하고 프로젝트 고객의 시뮬레이션 모델에 대한 신뢰도를 향상시켰다. 프로젝트 마지막 단계로, 개발된 시뮬레이션 모델을 사용하여 개선 알고리즘 적용시의 예상 그룹화 효율과 기존 로직 적용시의 그룹화 효율을 비교하였다.

3.2 도장 공정 현황

본 연구에 사용된 데이터를 제공한 자동차 조립 공장 내 도장 공정의 레이아웃은 그림 1과 같다. 본 공장의 레이아웃은 최초 건설 이후 여러 차례의 확장을 통해 현재의 형태를 지니게 되었으며, 도장 공정의 경우 모두 power and free 컨베이어를 통해 차체가 이동된다. 참고로 하도 공정 등 sealer gel oven 이전의 공정과 PBS(Painted Body Storage, 도장을 마친 차량이 조립 공정에서의 엔진 및 내부 조립을 위해 대기하는 장소)는 도장 공정과 동일 건물에 위치하지 않으므로 그림 1의 레이아웃에 포함되지 않았다. 상도 공정은 동일한 설비(자동 도장기)가 2개의 라인으로 설치되어 있는데 prime scuff 공정(dry sanding 공정이라고도 부르며, 상도 공정에서의 도

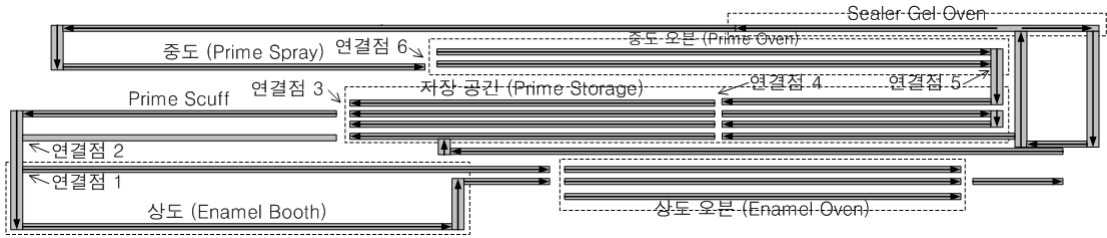


그림 1. 도장 공정 레이아웃

료의 차체 부착력을 향상시키기 위한 연마 작업 수행)을 마친 차량은 상도 라인 1과 라인 2에 교대로 투입되도록 컨트롤 로직이 프로그래밍되어 있다. 해당 공장의 경우 2 종류의 승용 차량의 각 2가지 모델(세단형, 왜건형)을 생산중이다. 해당 공장에는 별도 CRS가 설치되어 있지 않은 대신 CRS의 기능을 일부 수행할 수 있는 저장 공간(prime storage)이 중도 오븐 공정 이후에 배치되어 있다. 총 86대의 차량을 수용할 수 있는 본 저장 공간의 주된 기능은 중도 오븐에서 나오는 차량의 임시 보관 기능 및 도장 공정 전체의 완충 기능(즉, 도장 공정 이전의 차체 공정과 도장 공정 이후의 조립 공정간 완충 작용)이다. 참고로 본 공장에서는 shift당 9.5시간 근무중이며, 노조와의 협의사항에 의해 1 shift내 3회(회당 15분) 휴식이 주어진다. 해당 휴식 기간 동안 오븐 공정을 제외한 공정은 가동이 중지되는 반면, 중도 오븐 공정에 기 투입된 차체는 해당 공정의 특성 - 무인 동작 기능, 각 차체는 해당 공정에 특정 시간만 머물러야 함, 해당 공정이 전체 도장 공정 중 bottleneck공정임 - 때문에 휴식 시간 여부에 상관없이 공정을 완료하고 컨베이어를 통해 다음 공정으로 이동한다.

4. 시뮬레이션 모델

시뮬레이션 모델은 분석적 모델 대비 현장 상황 및 시간 제약, 컨트롤 로직, 동시 처리, 공용 자원, 다양한 확률 분포 등의 실행상의 제약 요소의 자세한 반영이 가능하다. 본 프로젝트의 목적 및 대상 공장의 레이아웃을 감안하여 시뮬레이션 모델링의 대상과 범위는 sealer gel 오븐에서 상도 오븐까지의 전 공정(sealer gel 오븐 → 중도 → 중도 오븐 → 저장 공간 → prime scuff → 상도 → 상도 oven)으로 설정하였다. 구체적으로는 컨베이어에 대한 모델링, 각 컨베이어 연결점에 대한 인입 및 인출 알고리즘, 상도 공정에서의 세정 여부 판단 및 세정 횟수를 산출하는 알고리즘 및 모델을 개발하였다.

4.1 시스템 입력 자료 수집

세정 횟수 감소를 위한 최적 알고리즘 검증 목적의 자동차 도장 공정의 시뮬레이션 모델 구축을 위해서는 컨베이어 위치 및 연결 방식, 차체 이동 순서, 각 컨베이어내 설비별 가공 시간, 현재의 컨베이어 컨트롤 로직, 컨베이어 이동 시간 등의 상대적으로 자세한 / 하위 레벨의 데이터가 필요하다. 따라서 본 연구에 기술된 시뮬레이션 모델을 위한 데이터의 수집 및 정합성 확보에 상대적으로 많은 시간이 소요되었다.

연구의 대상이 된 공장의 경우, 자동차 조립 공장에서도 일반적으로 집계되어지고 있는 데이터인 상도 공정 및 중도 공정에서의 각 차량별 입/출력 데이터가 집계되고 있지 않았다(정확히는, 센서에서 실시간으로 데이터가 생산 및 사용되지만 데이터베이스 형태로의 데이터 저장은 raw 데이터가 아닌 요약된 형태로 저장됨). 원인 확인 결과, 본 공장이 동사 내 여러 자동차 조립 공장 중 상대적으로 노후화된 공장인데다 경기 불황으로 인해 상당 기간 동안 생산에 필수 불가결한 부분에 대해서만 투자가 집행되었기 때문에 파악되었다. 하지만 정확한 시뮬레이션 결과를 위해서는 각 차량별 입/출력 시간 및 색상 데이터가 필수적이므로, 수동으로 총 24시간 동안 각 차량별 입/출력시 소요되는 시간 및 차량별 색상을 측정한 후 시뮬레이션 모델에 입력 데이터로 사용하였다. 참고로 본 도장 공정의 경우 표 1에서와 같이 총 10가지 색상의 도료를 사용중이며 차량 색상별 점유율은 그림 2에서와 같이 일부 구간을 제외하고는 시간 경과에 따른 경향성을 보이지 않았다. 따라서 24시간 이후의 구간에 대한 시뮬레이션 입력 데이터로는 표 1의 차량 색상별 평균 점유율 정보를 이용하여 이산형 확률분포에 의해 생성된 random 데이터를 사용하였다. 또한 차량간 시간 간격에 대한 시뮬레이션 입력 데이터로는 처음 24시간에 대해서는 수동으로 집계한 실적 자료를 사용하고, 이후 구간에 대해서는 생산라인 설계시 설정한 최대 JPH(Job Per Hour) 값의 역수를 최소값, 처음 24시간동안의 평균 JPH를 최빈

표 1. 차량 색상별 평균 점유율

code명	색상	평균점유율
DT	Matador Red	10.83%
RJ	True Blue	6.78%
FS	Spruce Green	13.16%
WT	Vibrant White	12.93%
TS	Silver Frost	17.38%
UA	Black	6.95%
LA	Royal Blue	1.37%
AQ	Arizona Beige	18.61%
CX	Dark Grey	11.44%
Mg	French Blue	0.55%

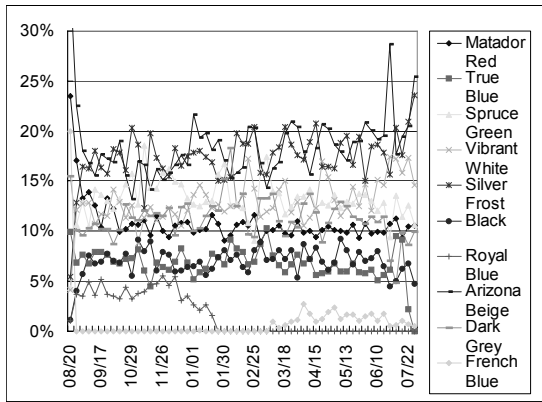


그림 2. 차량 색상별 점유율 변화 추이

값(이상치 제거를 위해) 공장 관리자에 의해 확인된 최소 JPH를 최대값으로 하는 삼각분포에 의해 random 데이터를 생성 후 사용하였다.

공장 도면 AutoCAD 파일 및 해당 공장에서의 생산 차량별(본 공장에서는 2종류의 차체 생산중) CATIA 파일을 각각 JPG 파일로 변환 후 AutoMod상에서 import

하여 사용함으로써 공장 레이아웃 및 차체 치수(dimension) 적합성을 확보하였다. 컨베이어에 의한 차체 운동거리 및 속도에 대해서도 공장 도면을 참조한 후 각 컨베이어 섹션별로 현장 운용 상태 및 데이터를 실제로 실측하여 시뮬레이션 모델의 입력 데이터로 사용하였다.

4.2 시뮬레이션 프로그래밍 상세 내용

시뮬레이션 모델 개발과 실행을 위한 소프트웨어로 AutoMod가 사용되었으며 컨베이어 컨트롤 로직 구현을 포함한 시뮬레이션 모델 customization은 AutoMod에서 제공하는 내부 프로그래밍 언어(Pascal과 유사)를 사용하여 작성되었다. AutoMod, ProModel 등의 전문 시뮬레이션 모델링 언어를 통한 시뮬레이션 모델 구축 및 적용은 사내 자체 솔루션(In-House Solution)에 비해 프로그래밍 시간 및 모델 개발 시간을 단축시켜 결과적으로 전체적인 프로젝트 완료 일정을 앞당기고 향후 유지 보수를 용이하게 하는 효과가 있다. 또한 3-D 효과, 애니메이션 효과 등의 강력한 시각화(Visualization) 능력을 통해 경영진의 의사결정 과정을 지원하고 프로젝트 추진시의 경영진의 지원을 얻는 데 유용하다. 그림 3은 개발된 시뮬레이션 모델이 실행되는 화면이다.

5. 운영 알고리즘 개발 및 시뮬레이션 모델을 통한 검증

3장에서 언급된 도장 공정상의 저장 공간은 총 4개의 라인으로 구성되어 있지만 가장 하단의 레인은 수리된 차체의 도장 공정 재진입 전용 목적으로 사용되고 있기 때문에 실질적으로 총 3개의 라인만 사용 가능하다. 일반적인 CRS는 4-6개 저장 라인 및 1개 회송 레인을 가지고 있음을 고려할 때, 셋업 비용을 줄이기 위한 차체간 순서 변화(resequencing)를 위한 CRS로서 해당 공정의 저장 공간을 사용시 셋업 감소 효과가 전용 CRS 대비 상대적

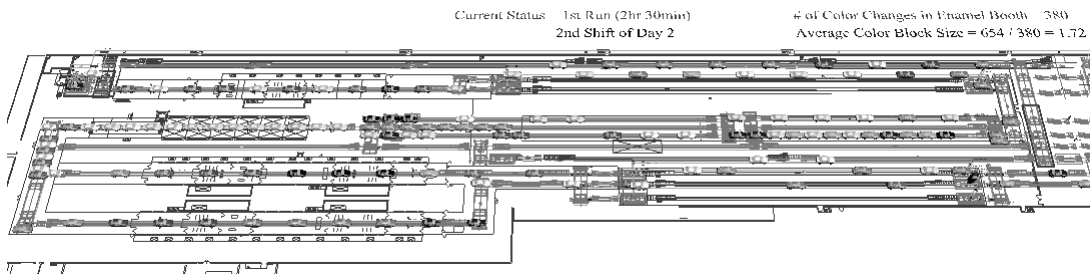


그림 3. 개발된 시뮬레이션 모델 실행 화면

으로 작다. 따라서 본 연구에서는 추가적인 셋업 감소 효과(즉, resequencing 유연성 추가 획득)를 위해 도장 공정 내 각 컨베이어 연결점에서의 운영 알고리즘 변화시의 예상 그룹화 효율 향상 효과를 검토하였다.

5.1 현 운영 알고리즘 검토 및 개선

그림 1에 표현된 해당 공장의 도장 공정에서는 총 6개의 연결점이 존재하며, 각 연결점에서 사용되고 있는 운영 알고리즘은 다음과 같다.

연결점 1, 6:

인출 라인별 교대로 투입한다.

연결점 4:

1단계 : 인입 컨베이어에서 인출 대기중인 차량의 색상 정보를 읽는다.

2단계 : 각 인출 컨베이어에서 가장 마지막에 인입된 차량의 색상과 인출 대기중인 각 차량의 색상과 비교하여, 색상이 일치하는 차량이 존재할 경우 해당 차량을 인출 후 해당 인출 컨베이어로 인입한다(두 개 이상 일치하는 인출 컨베이어 존재시 차량이 가장 적은 인출 컨베이어를 선택한다).

3단계 : 회송 라인(그림 1에서 연결점 4에 연결된 인입 컨베이어 바로 아래 위치한 ㄷ자 형 라인)으로 해당 차량을 인출한다.

4단계 : 회송 라인에 여유 공간이 없는 경우 차량이 가장 적은 인출 컨베이어로 해당 차량을 인출한다.

연결점 2, 3, 5:

선입 선출 원칙에 의거 차량 혹은 레인을 선택한다.

연결점 5는 중도 오븐 공정의 특성상 선입 선출 로직 변경이 불가능하고, 연결점 3, 4는 관련 연구(다수의 인입 컨베이어와 다수의 인출 컨베이어가 존재시의 알고리즘 연구)가 아직 미비하여 연결점 1, 2, 6에 대해서만 운영 알고리즘 개선시의 효과를 점검하였다. 구체적으로, 연결점 2는 수렴점이므로 인출 차량 선택 알고리즘은 문덕희 외(2003)에서 제시한 CRS로부터의 출고 알고리즘을 사용하였으며, 해당 알고리즘은 현재 연결점 4에 적용중인 알고리즘과 상당 부분 유사하므로 본 논문에서의 설명은 생략한다. 마지막으로 분기점인 연결점 1, 6에 대한 인출 컨베이어 선택 알고리즘은 Han(2004)에서 제시한 할당(assignment) 문제로의 모델링 방법을 사용하였다. 구

체적으로, 하기와 같이 변수를 정의한다.

$$\begin{aligned}
 x_{ij} &= \begin{cases} 1 & \text{특정 인출 컨베이어에서 차체 } j \text{가} \\ & \text{차체 } i \text{ 바로 뒤에 위치하는 경우} \\ 0 & \text{기타 경우} \end{cases} \\
 u_{iq} &= \begin{cases} 1 & \text{차체 } i \text{가 인출 컨베이어 } q \text{로} \\ & \text{최후에 인출되는 차체인 경우} \\ 0 & \text{기타 경우} \end{cases} \\
 v_{qj} &= \begin{cases} 1 & \text{차체 } j \text{가 인출 컨베이어 } q \text{로} \\ & \text{최초에 인출되는 차체인 경우} \\ 0 & \text{기타 경우} \end{cases} \\
 w_{q'q} &= \begin{cases} 1 & \text{인출 컨베이어 } q' \text{에는 차체가} \\ & \text{인출되지 않고 인출 컨베이어} \\ & q \text{에는 최소 1개 이상의 차체가} \\ & \text{인출되는 경우} \\ 0 & \text{기타 경우} \end{cases}
 \end{aligned}$$

C_{ij} = 차체 i의 인출 후 차체 j의 인출과 연관된 셋업 비용(즉, 차체 i와 j가 동일 색상이면 0, 다른 색상이면 세정 비용)

\overline{C}_q = 컨베이어 q 자체와 연관된 셋업 비용(설치비 등)

Q = 인출 컨베이어 개수

N = 차체 개수

해당 공장의 경우 각 컨베이어별 도장 부스의 처리 속도가 충분히 빨라 로드 밸런싱 고려(즉, 도장 부스의 capacity 고려)가 필요 없는 관계로 연결점 1, 6에서의 최적 인출 차량 선택 문제는 하기 할당 문제로 변환 가능하며, 해당 문제에 대한 최적해는 Hungarian 방법에 의해 $O(N^3)$ 의 복잡도(complexity) 계산이 가능하다(자세한 모델 설명은 Han(2004) 참조).

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N C_{ij} x_{ij} + \sum_{j=i+1}^N \overline{C}_q v_{qj} \\
 & \sum_{j=i+1}^N x_{ij} + \sum_{q=1}^Q u_{iq} = 1 \quad \forall i \\
 & \sum_{i=1}^{i-1} x_{ij} + \sum_{q=1}^Q v_{qj} = 1 \quad \forall j \\
 & \sum_{i=1}^N u_{iq} + \sum_{q'=1}^Q w_{q'q} = 1 \quad \forall q \\
 & \sum_{j=1}^N v_{qj} + \sum_{q=1}^Q w_{q'q} = 1 \quad \forall q \\
 & x_{ij}, u_{iq}, v_{qj}, w_{q'q} \geq 0 \quad \forall i, j, q, q'
 \end{aligned}$$

5.2 시뮬레이션 모델을 통한 실험 및 결과 분석

시뮬레이션 초기화 조건을 설정하는 데에는 일반적인 로 하기 두 가지 방법(문덕희 외(2003))을 사용한다. 첫

표 2. 최종 시뮬레이션 결과

항목	기존 알고리즘 사용시	개선알고리즘 적용시		
		연결점 1에 적용	연결점 1, 2에 적용	연결점 1, 2, 6에 적용
처리 차량 수	9340	9340	9340	9340
세정 횟수	5189	4043	3844	3736
그룹화 효율	1.80	2.31	2.43	2.5
JPH	68	66	65	65

번째 방법은 일정 시간 동안 시뮬레이션을 진행시킨 후 초기 단계의 결과치를 통계 자료 수집에서 제외시키는 방법으로, warm-up 기간을 설정하는 방법이다. 두 번째 방법은 시뮬레이션을 시작할 때 적당량의 개체(entity)를 자원에 미리 할당하는 방법이다. 두 번째 방법을 사용할 경우 사전에 할당해야 하는 개체 수량을 추정하기 어려우므로 본 연구에서는 첫 번째 방법을 사용하였으며, warm-up 기간으로 1 shift(=9.5시간), 시뮬레이션 수행 기간으로 10일(차량 대수 기준 9,340개)을 적용하였다. 시뮬레이션 분석은 연결점 1, 2, 6에 개선 알고리즘을 적용할 경우 각각에 대해 10회씩 시뮬레이션을 수행한 결과의 평균치를 사용하였으며, 그 결과가 표 2와 같다.

시뮬레이션 분석 결과, 별도의 설비 투자 없이 운영 알고리즘의 개선만으로 38%의 그룹화 효율 향상 효과가 있으며, 알고리즘 변경시 JPH의 감소도 거의 없음을 확인하였다. 또한 상도 공정에서 가까운 연결점일수록 알고리즘 개선에 의한 효과가 큰 반면, 상도 공정에서 먼 연결점일수록 알고리즘 변경에 의한 그룹화 효율 향상 효과는 미미한 것으로 나타났다. 알고리즘 변경에 따른 소프트웨어 개발비 산정이 곤란한 관계로 별도 경제성 평가는 실시하지 않았으나, 기존 연구에 의하면 도장 공장별 총 세정 비용이 연간 수익원대 - 24만대 생산 기준 5억 7천만원(문덕희 외(2003)) - 이고 세정 횟수 감소에 따른 부수 효과 - 불량 방지, 작업자 피로 감소, 불량 발생시의 라인 운영 유연성 증가 등 - 감안시 원안의 투자 자본 회수 기간은 매우 짧으리라(최대 1년) 예상된다.

6. 결론 및 추후 연구

본 사례연구 논문은 자동차 조립 공장의 도장 공정에서의 자동차 색상 변경 횟수 최소화를 통한 원가 절감 및 환경 보호를 목적으로 컴퓨터 시뮬레이션 모델 기법을 적용해 분석하였다. 또한 본 연구의 동기가 된 도장 공정에서의 색상 변경 최소화 프로젝트 및 도장 공장 현황에 대

해 설명하였다.

시뮬레이션 결과 컨베이어 연결점에서의 운영 알고리즘 개선시 현재 1.8대의 그룹화 효율을 2.5대 수준으로 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 선행 연구들의 사례에서 CRS를 설치할 경우 그룹화 효율이 3~5대 수준까지 향상되나, 본 연구는 컨베이어 운영 알고리즘의 변경만으로도 그룹화 효율의 향상 효과를 거두었고, CRS 설치와 병행 적용할 수 있는 이점을 가지고 있다. 아울러 상도 공정에서 가까운 연결점일수록 알고리즘 개선에 의한 효과가 큼을 확인하였다.

향후 추진 가능한 사안으로는 다수의 인입 컨베이어와 다수의 인출 컨베이어가 존재하는 컨베이어 연결점(그림 1의 연결점 4의 경우)에서의 적용 알고리즘 개선 및 컨베이어의 수렴점에서의 적용 알고리즘 개선(SOP 문제의 최적해 사용 등)을 통한 그룹화 효율 추가 향상을 기대할 수 있다. 또한 수리된 차체의 도장 공정 재진입 전용 목적으로 사용되는 저장 공간내 1개 레인을 CRS의 resequencing 목적으로 사용 가능한 지에 대해 시뮬레이션 모델 분석을 통한 검토가 필요하다.

참고 문헌

1. 문덕희, 김하석, 송 성, 김경완 (2003), “자동차 도장공장의 Color Rescheduling Storage 설치를 위한 시뮬레이션 분석”, *IE Interfaces*, Vol. 16, No. 2, pp. 211-221.
2. 박혜규, 최원준, 신현오 (1996), “자동차 도장공장의 Color Selection 시스템의 자동화”, *산업공학*, 9권, 2호, pp. 19-37.
3. 문덕희, 송 성, 하재훈 (2004), “자동차 공장에서 CRS와 PBS의 전용레인 설치에 관한 시뮬레이션 연구”, *한국시뮬레이션학회 '04 춘계학술대회 논문집*, pp. 77-82.
4. 최원준 외 (1997), “도장부스가 2개인 자동차 조립 공장의 생산 순서 계획 작성”, *한국 경영과학회 / 한국 산업공학회 '97 춘계 공동 학술 대회 논문집*, pp. 451-454.
5. Jayaraman, A., Narayanaswamy, R., and Gunal, A. (1997), “A Sortation System Model” *Proceedings of the 1997*

- Winter Simulation Conference*, eds. S. Andradottir, K. Healy, D. Withers, and B. Nelson, IEEE, Piscataway, N. J., pp. 866-871.
6. Han, Y., Zhou, C., Bras, B., McGinnis, L., Carmichael, C., and Newcomb, P. (2003), "Paint Line Color Change Reduction in Automobile Assembly Through Simulation", *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, IEEE, Piscataway, N.J., pp. 1204-1209.
 7. Morley, R. and Schelberg, C. (1993), "An analysis of a plant-specific dynamic scheduler," in Final Report, Intelligent, Dynamic Scheduling for Manufacturing Systems, pp. 115-122.
 8. Morley, R. (1996), "Painting trucks at General Motors: The effectiveness of a complexity-based approach," The Ernst & Young Center for Business Innovation, Cambridge.
 9. Morley, R. and Ekberg, G. (1998), "Cases in chaos: Complexity-based approaches to manufacturing," The Ernst & Young Center for Business Innovation, Cambridge.
 10. Campos, M., Bonabeau, E., Theraulaz, G., and Deneubourg, J. (2001), "Dynamic scheduling and division of labor in social insects," *Adaptive Behavior*, Vol. 8, pp. 83-92.
 11. Gambardella, L. and Dorigo, M. (2000), "An ant colony system hybridized with a new local search for the sequential ordering problem," *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 12, pp. 237-255.
 12. Atassi, F. R. (1996), Implementation of block painting in Ford's in-line vehicle sequencing environment, MS Thesis, System Design and Management Program, MIT.
 13. Park, Y., Matson, J., and Miller, D. (1998), "Simulation and Analysis of the Mercedes-Benz All Activity Vehicle (AAV) Production Facility", *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, eds. D. Medeiros, E. Watson, J. Carson, and M. Manivannan, IEEE, Piscataway, N.J.
 14. Choe, K. I., Sharp, G. P., and Serfozo, R. S. (1993), "Aisle-based order pick systems with batching, zoning, and sorting," *Material Handling Research*.
 15. Jeong, M. K., Perry, M., and Zhou, C. (2005), "Throughput Gain with Parallel Flow in Automated Flow Lines," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 2, pp. 84-86.
 16. Siddiquee, M. W. (1972), "Investigation of Sorting and Train Formation Schemes for a Railroad Hump Yard," in *Traffic Flow and Transportation*, G. F. Newell, Ed. New York: Elsevier, pp. 377-387.
 17. Yagar, S., Saccomanno, F. F., and Shi, Q. (1983), "An efficient sequencing model for humping in a rail yard," *Transportation Research*, Vol. 17A, pp. 251-262.
 18. Daganzo, C. F. (1986), "Static blocking at railyards: Sorting implications and track requirements," *Transportation Science*, Vol. 20, pp. 189-199.
 19. Han, Y. (2004) Dynamic sequencing of jobs on conveyor systems for minimizing changeovers, Ph. D. Thesis, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology.



한용희 (hyhkorea@hotmail.com)

1997 한양대학교 산업공학과 학사
 1998 Georgia Institute of Technology, 산업공학 석사
 2004 Georgia Institute of Technology, 산업공학 박사
 2005~현재 삼성전자 Device Solution 부문 책임연구원

관심분야 : 시뮬레이션, scheduling, 생산관리, SCM