

자동차 도장공장의 Color Rescheduling Storage 설치를 위한 시뮬레이션 분석

문덕희^{1*} · 김하석² · 송 성¹ · 김경완²

¹창원대학교 산업시스템공학과 / ²지엠대우자동차 생산기술연구소

A Simulation Analysis on the Validity of Color Rescheduling Storage in an Automobile Painting Shop

Dug Hee Moon¹ · Ha Seok Kim² · Cheng Song¹ · Kyung Wan Kim²

¹Department of Industrial and Systems Engineering, Changwon National University, Changwon, 641-773

²Production Engineering Center, GM Daewoo Auto and Technology Co. Ltd., Changwon, 641-120

This paper introduces a simulation study regarding the design for the installation of Color Rescheduling Storage (CRS) in an automobile factory. In the painting shop the colors of vehicles are changed frequently according to the assembly schedule. When the color of a vehicle is changed from one to another, the cleaning process of painting-gun is necessary and it generates costs. Therefore many of the automobile manufacturers equip the CRS in front of the Top Coat Booth of the painting shop. The major objective of CRS is to reduce the change over cost in the painting process by grouping vehicles having same color.

In this paper the configuration of CRS and the input/output algorithms are explained. The suggested system is verified using simulation models and experiments are conducted. Finally the best alternative is suggested by sensitivity analysis and evaluation of investment feasibility.

Keywords: color rescheduling storage, automobile, simulation, grouping ratio, painting process

1. 서론

자동차 생산공장은 일반적으로 크게 프레스(Stamping) 공장, 조립(General Assembly)공장, 엔진 및 구동장치(Power Train)를 가공하는 공장 등 세 종류로 구분된다. 그 중에서 가장 중추적인 역할을 하고 있는 조립공장은 회사 내 프레스 공장에서 생산되는 패널(Pannel)과 외주업체에서 공급하는 패널 등을 용접해서 차량의 골격을 만들어 주는 차체공장, 조립된 차체를 내·외부 부식으로부터 보호하고 고객의 취향에 맞도록 다양한 색상으로 꾸며 주는 도장공장, 그리고 여기에 엔진과 트랜스미션을

비롯한 구동장치와 주행, 조종 장치 그리고 운전자의 편의와 안전을 위한 장치 등을 부착하는 조립공장으로 구성되어 있다.

도장공정의 경우 크게 하도(혹은 전착, Electro Deposition), 중도(Primer Coat), 상도(Top Coat)의 세 가지 공정으로 구분되는데, 하도공정은 차체에 전착도료를 부착시키는 공정이며, 중도공정은 자동도장기나 Air Spray Gun을 이용하여 도료를 부착하는 공정이다. 상도공정은 자동차 차체의 색상을 결정하는 공정으로서 다양한 종류의 도료를 바르게 된다. 이 과정에서 중도공정까지는 차체의 색상에 관계없이 동일한 도료를 사용하여 진행되지만 상도공정에서는 소비자가 요구한 색상에 따라 사용

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것임.

*연락처 : 문덕희 교수, 641-773 경남 창원시 사림동 9 창원대학교 산업시스템공학과, Fax : 055-266-4464,

e-mail : dhmoon@changwon.ac.kr

2002년 11월 접수, 3회 수정 후 2003년 1월 게재 승인

하는 도료가 변하게 된다.

상도(Top Coat)공정의 경우 차량 도색 직전에 도장한 차량과 색상이 다르면 자동도장기 내부의 잔류 도료를 신너를 이용하여 세정한 후 새로운 도료를 투입하여 도장 작업이 이루어진다. 따라서 동일한 색상의 차종이 연속해서 상도 부스로 투입되지 않으면 항상 자동도장기 잔류 도료의 세정비용이 발생하게 된다. 이러한 세정비용을 줄이기 위하여 상도 부스 진입 전에 생산 순서를 동일 색상별로 그룹화해줄 수 있는 CRS(Color Rescheduling Storage, Color Selection Lane, Selectivity Bank 라고 표현하기도 함)를 설치할 필요가 있다.

이 경우에 동일한 색상의 차종이 연속적으로 몇 대가 투입되는지를 그룹화 효율(Grouping Ratio)이라 하는데, 이 지표가 CRS의 중요한 시스템 평가척도이다. 그 이유는 이 지표값이 높을수록 세정비용이 감소한다는 의미이기 때문이다. 일반적으로 그룹화 효율은 식 (1)과 같이 정의한다.

$$\text{그룹화 효율} = \frac{\text{통과 차량수}}{\text{세정횟수}} \quad (1)$$

이러한 문제를 다룬 대부분의 논문들은 시뮬레이션 기법을 사용하였다. 그 이유는 최적화 문제가 설비의 유형과 규모, 입고 및 출고방법 등 다양한 요인에 의해 영향을 받기 때문이라 하겠다. 이 분야에 관련된 기존 연구에는 다음과 같은 것들이 있다. 먼저 Ulgen *et al.*(1994)은 차체공장과 도장공장을 설계할 때, 공장의 설계부터 운영에 이르는 단계를 4단계로 구분하였고, 검토항목을 4가지로 분류하여 16가지 조합에 대해 세부적인 검토항목들을 제시한 바가 있다. 그리고 각 항목에 대해 시뮬레이션을 어떻게 이용할지에 대하여 언급하였다. Kim and Kim(1999)은 국내 D 자동차 도장의 도장공정을 대상으로 현재의 생산 대수를 증가시키기 위하여 설비의 변경 없이 어떻게 접근하면 되는 지에 대한 사례연구를 시뮬레이션을 이용하여 수행한 바 있다. 또한 Burns and Daganzo(1987)은 도장 라인에서 색상 변경시 세정비용이나 프레스 공장에서의 작업교체 준비(Setup)비용 등을 고려한 생산순서계획에 대해 연구한 바가 있으나 CRS의 운영과는 거리가 있다고 하겠다. 도장 라인의 물류를 담당하는 설비인 Power and Free 컨베이어를 설계하는데 있어 시뮬레이션을 이용한 연구로는 Graehl(1992), Williams and Sadakane(1997) 등이 있다.

CRS의 설치 및 운영과 관련된 연구로는 Park *et al.*(1996), Choi *et al.*(1996), Kim and Seo(1996), Jayaraman *et al.*(1997) 등이 있다. Choi *et al.*(1996)은 국내 H 자동차 공장의 도장공정에서 CRS를 운영할 때 입고 및 출고 알고리즘에 대한 연구를 수행한 바가 있는데, 개발한 알고리즘에 의하면 그룹화 효율은 3.77대 내외가 된다고 보고하였다. 또한 Kim and Seo(1996)의 연구에서는 역시 국내 H 자동차공장의 CRS를 대상으로 Layout 및 운영 알고리즘을 변경시켰을 때 그룹화 비율의 변화를 시뮬레이션을 이용하여 검토하였는데 그룹화 비율이 5대 이상이 된다고 주장하였다. 하지만 이에 대한 정확한 수치는 논문에서 제시된

바가 없다. 또한 Park *et al.*(1996)은 H 자동차회사에 CRS를 설치하고 운영하기 위한 소프트웨어를 개발하여 발표하였다. Jayaraman *et al.*(1997)은 CRS를 설치할 때 고려해야 하는 설계요인과 시스템 효율 평가척도를 제시하고, 레인 당 6대씩 6개 레인으로 구성된 CRS에 대해 시뮬레이션을 이용한 사례연구를 제시하였다. 하지만 이 논문에서는 상세한 입고/출고 알고리즘이라든가 그룹화 효율에 대한 시뮬레이션 결과는 제시된 바 없다.

본 논문의 적용 대상인 "D" 자동차공장에는 현재 CRS가 설치되어 있지 않았으나 낭비요소 제거와 품질 안정을 위해 상도 공정 앞에 CRS 설치를 적극 검토하게 되었다. 따라서 본 연구도 여기에 초점을 맞추어 현재의 공장 실정에 맞는 CRS의 Layout을 구성하고 효율적 운영을 위한 입고/출고 알고리즘을 개발하며, 시뮬레이션을 통해 최적화함으로써 상도 도장기의 세정을 위해 낭비되는 도료의 양을 최소화하여 원가절감을 도모하는 것을 목적으로 하였다.

본 논문이 선행 논문들과 다른 점은 회송만을 위한 별도의 레인을 설치하는 대신 회송 레인과 투입 레인을 공용으로 사용하도록 설계하였다는 점과 보완된 입·출고 알고리즘을 제시하였다는 점, 운영과정에서 동색 연속도장 대수의 상한을 제시하였고, CRS의 최대 체류시간 및 기본 그룹화 대수를 설정한 점 등이다. 또한 도장방식에 따라 세정위치 및 세정횟수가 다른 점도 고려하였다. 본 연구는 <그림 1>과 같은 절차에 의해 진행되었는데, 2장에서는 현재 도장공정의 현황을 설명하고, 3장에서는 현실적으로 설치가 가능한 CRS의 형태 및 규모를 결정한 과정에 대해 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션 모델링에 대해 설명하며, 5장에서는 실험 및 결과분석, 민감도 분석 등에 대해 논한다.

2. 도장공정의 현황 분석

2.1 도장공정의 개요

D 자동차 C 공장의 도장공장에는 현재 CRS가 설치되어 있지 않은 상태로 전반적인 도장공정의 Layout(배치도)은 <그림 2>와 같다. <그림 2>에서 WBS(Welded Body Storage)는 차체 조립 공정(용접공정)이 끝난 차량이 도장을 위해 대기하는 장소이며, PBS(Painted Body Storage)는 도장을 마친 차량이 엔진 및 내부 조립을 하기 위해 대기하는 장소다. 상도 부스는 동일한 설비가 2개의 라인으로 설치되어 있는데 중도공정을 마친 차량은 상도 부스 1과 부스 2에 교대로 투입되도록 설계되어 있다. 하지만 현실적으로 CRS 설치가 가능한 지역은 현재 보수(Repair)공정이 설치되어 있는 곳뿐이다. 따라서 <그림 2>에 있는 후보지에 CRS를 설치할 경우 물류흐름에 역류(Back tracking) 현상이 발생함에도 불구하고 다른 대안이 없기 때문에 CRS의 설치지역으로 결정하였다. 이 경우에 물류의 흐름은

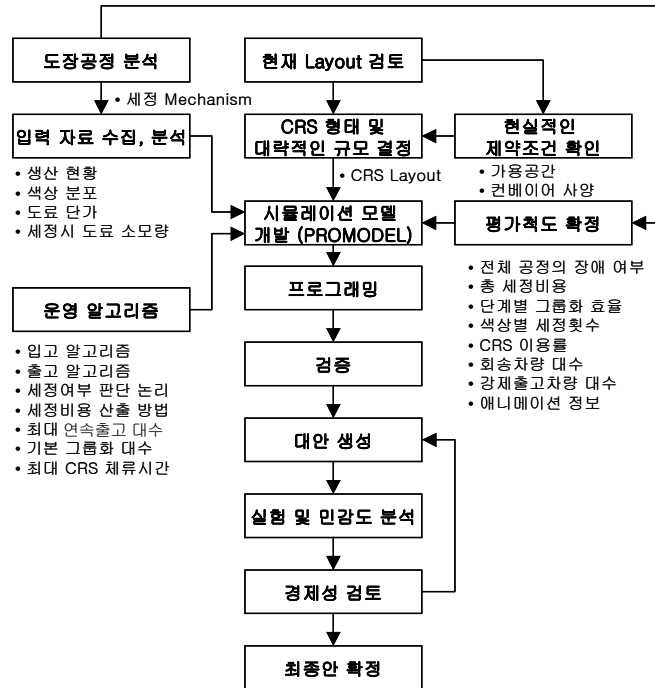


그림 1. 시뮬레이션 체계도.

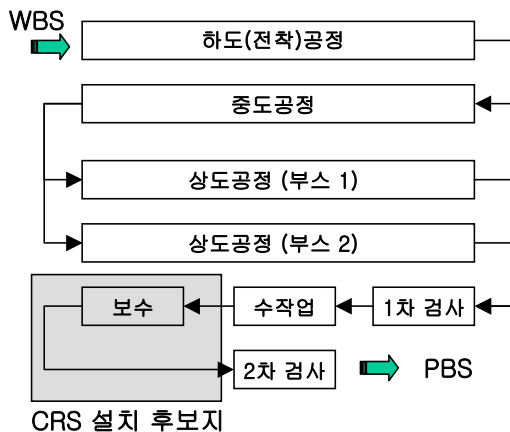


그림 2. 자동차 도장공정의 개요 (현재 상황).

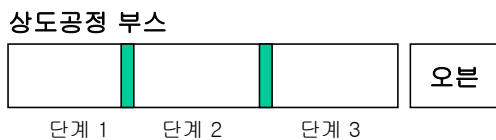


그림 3. 상도공정의 세부 구조.

<그림 4>에 있는 것과 같이 된다.

상도공정은 <그림 3>과 같이 3개의 단계(Stage)로 구성이 된다. 자동차에 도장되는 색상에 따라 3단계를 모두 거치는 경우도 있고, 1단계만 거치는 경우도 있다. 기존의 연구에서는 이러한 단계를 고려한 것이 없지만 D 자동차 도장공장에서는 색상 변경을 위한 세정비용 산정시 중요한 요소로 고려하고 있다.

2.2 자동차 색상 변경 현황

일반적으로 자동차 회사에 따라서 상도공정은 차이가 있다. D 자동차 회사의 경우 <표 1>과 같이 12가지 색상의 자동차를 생산하고 있는데 색상에 따라서 도장방법이 달라진다. 색상을 분류하면 도장방식에 따라 2C1B(2 Coat 1 Baking)와 1C1B(1 Coat 1 Baking)의 두 가지 유형이 있다. 2C1B의 경우에 단계 1과 단계 2에서 각각 70%, 30%의 비율로 도장을 하며, 단계 3에서는 팽택도료(Clear)를 도장한 후 오븐(Oven)에 투입된다. 반면에 1C1B의 경우에는 단계 1과 2는 거치지 않고 단계 3에서 바로 도장을 한다. 따라서 선행 연구들에서는 모두 색상이 변경되면 세정이 1번 일어난다고 가정을 한 반면에 본 연구에서는 선행 차량의 색상이 어떤 유형인가에 따라 후속 차량의 도장을 위한 세정횟수가 달라진다는 사실을 반영하였다.

따라서 상도공정 내부의 세정횟수는 선행 차량의 도장방식이 어떤 것인가에 따라서 <표 2>와 같이 달라진다. 즉 선행 차량의 도장방식이 1C1B이고 후속 차량의 도장방식이 1C1B라면 단계 1과 2에서는 세정이 일어나지 않으며 단계 3에서만 세정이 일어난다는 의미이다.

실제로 D 사의 생산실적을 분석해 보면, <표 3>과 같이 특정 기간 동안 9312대의 차량이 상도 부스를 통과했는데 모든 단계에서 2대에 1번꼴로 세정이 발생하고 있었음을 알 수 있었으며, 이 정도 생산량을 기준으로 할 경우 연간 세정비용이 2억 2천만원에 달하고 있었다. 만일 이 공장의 연간 생산능력인 24만대를 기준으로 한다면 연간 5억 7천만원이라는 막대한 세정비용이 발생한다.

표 1. 차량의 색상, 점유율 및 도장방식

No	차량 색상	도료 유형	도장 방식	적용 차종				색상별 점유율
				승용	상용	VAN	TRUCK	
1	Poly Silver	Metallic	2C1B	O				23.4%
2	Cyber Green	Metallic	2C1B	O				8.0%
3	Orange	Metallic	2C1B	O				4.4%
4	Stain Beige	Metallic	2C1B	O				2.0%
5	Orange Red	Mica	2C1B		O			0.3%
6	Casablanca White	Solid	1C1B	O	O	O	O	29.6%
7	Highway Yellow	Solid	1C1B	O				2.3%
8	Tropic Green	Metallic	2C1B	O	O			2.5%
9	Cobalt Blue	Solid	1C1B	O	O	O	O	9.6%
10	Dark Sapphire	Solid	1C1B	O				3.8%
11	Golden Yellow	Mica	2C1B	O				1.9%
12	Super Red	Solid	2C1B	O				12.2%
계				11	4	2	2	100%

3. 초기 CRS Layout 검토

일반적으로 CRS는 컨베이어를 이용한 레인(Lane)형태를 사용하고 있다. 이와 같이 레인형태의 CRS를 설계할 때 결정해야 하는 의사결정 변수들은 다음과 같다.

- ① 레인의 수 (n개)
- ② 한 레인에 포함되는 차량 대수 (편의상 m대로 가정하지만 실제로는 레인마다 동일하지 않아도 무관함)
- ③ 컨베이어 속도
- ④ 회송 레인의 설치 여부
- ⑤ 전용색상 레인의 설치 여부
- ⑥ 입고방법
- ⑦ 출고방법

이 중에서 ①~④까지는 하드웨어 측면의 설계사항이며, ⑤~⑦은 운영 측면의 설계사항이다. <그림 4>는 회송 레인이 설치된 경우 일반적인 CRS의 형태로서 m×n개의 저장용량을 가진다. 여기에서 회송 레인이란 CRS 레인의 인출지점에 적합한 색상의 차량이 없을 때 출고하여 다시 입고지점으로 돌려보내는 기능을 하는데, CRS 설치를 위한 공간의 크기가 고정되어 있다면 회송 레인을 설치하는 대신에 CRS 1개 레인을 축소해야 한다. 하지만 회송 레인을 설치함으로써 다음과 같은 운영상의 장점이 있다.

- ① 그룹화 효율의 증가
- ② 동일 색상의 로트(Lot) 불량 발생 시 제어 가능
- ③ 상도 부스 고장 발생 시 차체 제어 가능
- ④ 두 가지 색상(Two Tone Color) 특수 색상의 차체 그룹화 가능

Kim and Seo[1996]의 연구에서도 회송 레인을 설치하는 경우가 그룹화 효율이 높은 것으로 제시되었다.

표 2. 도장방식에 따른 단계별 세정 여부

구 분	단계 1	단계 2	단계 3
1C1B→1C1B	미세정	미세정	세정
1C1B→2C1B	미세정	미세정	세정
2C1B→1C1B	세정	세정	세정
2C1B→2C1B	세정	세정	미세정

표 3. D 자동차 회사의 특정 기간 동안 세정 현황

구 분		세정횟수(회)	그룹화 효율
상도 부스 1	단계 1	2,142	2.17
	단계 2	2,142	2.17
	단계 3	2,800	1.66
상도 부스 2	단계 1	2,200	2.12
	단계 2	2,200	2.12
	단계 3	2,767	1.68

D 자동차의 경우 기존 공장에 CRS를 설치하는 것이 목적이었기 때문에 CRS 설치공간에 대한 제약이 우선 고려되었다. 따라서 <그림 2>에 있는 것과 같이 보수부서를 다른 곳으로 이전하고 <그림 4>와 같이 CRS를 설치할 수밖에 없었다. 따라서 우선 CRS의 용량을 최대한 하는 설계안을 검토하였는데 1층 구조의 설계안과 2층 구조의 설계안을 작성하였다. 각각의 장·단점은 <표 4>와 같다. 이와 같은 2가지 대안 중에서 실무 검토를 하여 1층 구조를 사용하는 것으로 잠정적으로 결정하였으며, 이에 대한 시뮬레이션 모델을 구축하여 효율성 평가 및 타당성 검토를 하였다(시뮬레이션 결과에 의하면 44개 이하로도 운영이 가능함). 초기안은 6개의 레인으로 구성하였는

데 4개 라인에는 7대, 2개 라인에는 8대의 저장공간을 확보할 수 있어서 총 44대분의 용량으로 설계하였다. 이 경우에 상도 부스에 투입될 차량이나 회송되어 다시 투입될 차량 모두 회송 라인을 지나가는 특징이 있다.

라인형 CRS를 설치하기 위해서는 Power and Free 컨베이어를 사용하고 있는데 컨베이어의 속도는 조립라인 전체의 JPH(Job per Hour: 시간당 생산대수의 개념으로 역수를 취하면 Tact Time이 된다)와 상도 부스의 수, 상도 부스에 설치된 컨베이어의 속도 등에 의해 결정된다. CRS 저장지역과 부스 내 속도와 Pitch, 컨베이어 이동 중 차량 Pitch는 <표 5>와 같다.

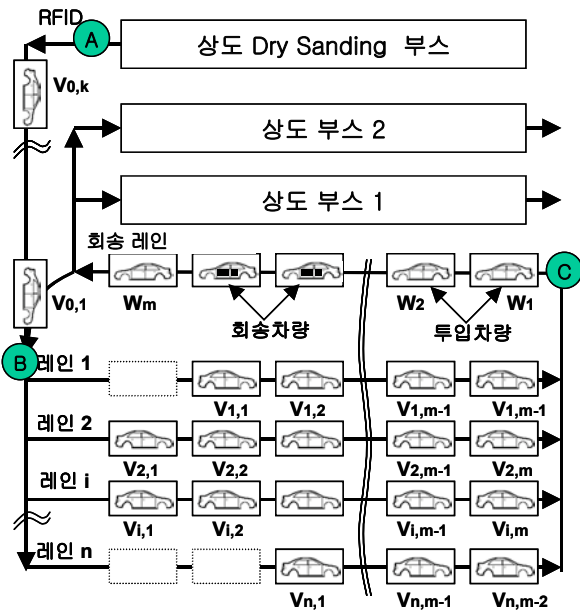


그림 4. CRS의 구조.

표 4. 1층 구조와 2층 구조의 타당성 비교

구분	2층 구조	1층 구조
수용대수	53대 (1층 23대/2층 30대)	44대
투자비(추정치)	2×A ₁ 억여 원 이상	A ₁ 억여 원
특징	<ul style="list-style-type: none"> - 수용대수가 많아 라인 운용 용이 - 설비투자비 많음 - 2층 구조에 따른 컨베이어용 오일 비산으로 도장표면 오염 예상 - 컨베이어 소음이 큼 	<ul style="list-style-type: none"> - 상대적으로 적은 투자비

표 5. 컨베이어 이동속도와 Pitch

구 간	속도(m/min)	Dolly Pitch (mm)	Dog Pitch (mm)	이동중 차량 Pitch (mm)
Transfer Line	18.6	4,600	1,633.6	4,900.8
상도 1, 2 Booth Lane	3.2	4,600	6,400	6,400

4. 시뮬레이션 모델

시뮬레이션의 대상과 범위는 CRS와 2개의 상도 부스 도장(단계 1~3)공정으로 설정하였다. 구체적으로는 Power and Free 컨베이어에 대한 모델링, 입고 알고리즘, 출고 알고리즘, 도장기 각 단계에서의 세정 여부 판단 및 세정횟수, 그리고 세정비용을 산출하는 알고리즘 등을 개발하였다.

4.1. 시스템 평가척도

본 연구에서 시스템 평가척도로 결정한 것은 <그림 1>에 있는 바와 같으며, 주요 척도는 다음과 같다.

- ① 그룹화 효율 : 그룹화 효율이란 상도 부스에서 동일색상 차량의 연속 도장대수 평균값을 의미하는데 단계 1, 2와 단계 3을 구분하여 다음과 같이 계산한다.

$$\text{단계별 그룹화 효율} = \frac{\text{통과 차량수}}{\text{단계별 세정횟수}} \quad (2)$$

- ② 총 세정비용 : 각 단계에서 색상별 세정비용을 색상별 세정횟수에 곱하여 합을 구함
- ③ CRS의 평균 차량 저장대수 및 이용률

4.2. 시스템 입력자료 수집

차량색상에 대한 분포는 <표 1>에 있는 색상별 점유율을 그대로 이용하여 이산형 확률분포로 처리하였다. 또한 RFID에 차량이 도착하는 시간 간격은 실적자료를 이용한 방법과 생산라인 설계시 설정한 최대 JPH 값의 역수를 이용하여 일정한 시간 간격으로 차량을 도착시키는 방법을 용도에 따라 선택적으로 사용하였다.

4.3 운영 알고리즘 개발

입·출고 알고리즘은 Park et al.(1996)에서 제시한 알고리즘을 변형하여 사용하였는데, 알고리즘을 설명하기 위하여 <그림 4>에 있는 바와 같이 다음과 같은 기호를 정의하도록 한다.

V_{ij} : CRS의 i 번 레인에서 투입구로부터 j 번째인 차량 ($i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,m$: 실제로는 각 레인의 용량이 같지 않아도 되지만 단순하게 표현하기 위하여 m 으로 표시하였음. 예를 들어 V_{11} 은 레인 i 에 가장 최근에 투입된 차량임)

V_{0j} : RFID를 통과한 후 CRS 입고 전 대기중인 차량($j=1,2,\dots,k$)으로 CRS 투입구에 가장 가까운 차량이 V_{01} 임.

W_j : CRS 출고 후 회송 라인을 따라 상도 부스 입고 대기중인 차량(회송중인 차량도 포함함)

1) 입고 알고리즘

- ① A지점에서 RFID를 통과한 차량의 색상정보를 읽는다.
- ② B지점에서 첫 번째 투입할 차량(V_{01})의 색상과 각 레인에 있는 마지막 차량(V_{i1})의 색상이 일치하는지 판단하여 일치하는 레인이 있으면 가장 재공대수가 적은 레인으로 투입한다.
- ③ 일치하는 레인이 없는 경우 각 레인의 마지막에서 두 번째 차량(V_{i2})의 색상과 일치하는지 판단하여 일치하는 레인이 있으면 가장 재공대수가 적은 레인으로 투입한다.
- ④ 마지막 두 번째 차량(V_{i2})의 색상과도 일치하는 레인이 없는 경우에는, RFID에서 읽은 나머지 차체($V_{02} \sim V_{0n}$)들의 색상과 각 레인의 V_{i1} 과 V_{i2} 의 색상이 일치하는지를 순차적으로 확인하고, 일치하는 색상의 차량이 없는 레인을 선택하여 입고한다. 이 경우에도 대상 레인이 2개 이상 있으면 재공대수가 가장 작은 레인으로 투입한다.
- ⑤ ②, ③, ④ 세 단계에서 해당되는 레인을 찾지 못한 경우에는 재공대수가 최소인 레인에 투입한다.
- ⑥ 모든 단계에서 대상 레인에 차량이 모두 차 있는 경우에는 해당 레인을 고려대상에서 제외시킨다.

입고 알고리즘에서 검색열을 2열로 제한한 이유는 다음과 같다. CRS의 목적이 동일색상의 차량을 연속적으로 도장 부스에 투입하는 것이므로 동일한 색상의 차량이 한 레인에 연속적으로 투입되면 효과적이다. 따라서 투입할 차량의 색상과 각 레인의 마지막 1열에 위치한 차량의 색상이 동일해 지도록 투입한다. 또한 상도공장 부스가 2개이고, 각 차량이 상도공정 부스에 교대로 투입되기 때문에 CRS에 투입될 차량의 색상과 각 레인의 마지막 2열에 위치한 차량의 색상이 동일하다라도 그룹화를 하는 데는 문제가 없다. 이러한 논리는 선형 연구에서도 적용된 바가 있다.

또한 단계 ④의 의미는 다음과 같다. 현재 투입하려고 하는 차량(V_{01})이 레인 말미에 있는 차량(V_{i1}, V_{i2})과 색상이 다르다.

따라서 현재 차량을 그룹화 하기가 곤란하다는 의미다. 이 경우에는 후속 차량($V_{02} \sim V_{0n}$)을 기준으로 볼 때 현재 각 레인 말미에 동일색상의 차량이 있으면 후속 차량을 위해 현재 차량을 해당 레인에 투입하지 않고 비워둔다는 의미다.

2) 출고 알고리즘

CRS에서 차체를 출고할 때는 동일한 상도 부스가 2개 있으므로 인출된 차량이 교대로 상도 부스에 투입되는 것으로 하였다.

- ① 저장된 각 레인의 모든 차량의 색상을 읽는다.
- ② 기 출고 된 2번째 차량(W_2 : 회송되는 차량은 제외하고 상도 부스에 투입될 차량만 고려)의 색상이 각 레인의 출고 대기중인 첫 번째 차량(표현의 편의상 $V_{i,m}$ 이라 한다)의 색상과 일치하는지 판단하여 출고한다. 이 경우 2개 레인 이상에서 같은 색상의 차량이 있는 경우는 출고 대기중인 두 번째 차량($V_{i,m-1}$)의 색상과 동일한지를 확인하고, 동일하지 않은 레인의 차량부터 출고한다.
- ③ 만일 W_2 와 $V_{i,m}$ 의 색상이 일치하는 레인이 없는 경우에는 각 레인의 $V_{i,m-1}$ 색상과 일치하는 레인이 있는지 조사하고, 있다면 $V_{i,m}$ 은 회송하고 $V_{i,m-1}$ 을 상도 부스에 투입하기 위해 출고한다.
- ④ 만일 W_2 와 $V_{i,m}, V_{i,m-1}$ 중에서 색상이 일치하는 레인이 없는 경우에는 각 레인의 $V_{i,m-2}$ 색상과 일치하는 레인이 있는지 조사하고, 있다면 $V_{i,m}, V_{i,m-1}$ 은 회송하고 $V_{i,m-2}$ 를 상도 부스에 투입하기 위해 출고한다(검색열 수 3열).
- ⑤ 모든 레인에서 출고 대기중인 첫 번째 차량($V_{i,m}$)부터 세 번째 차량($V_{i,m-2}$)까지의 색상이 W_2 차량의 색상과 일치하지 않을 경우 더 이상 그룹화를 하지 않고 새로운 색상을 선택한다. 이 때 전체 세 번째 열까지 있는 차량의 색상 중에서 가장 많은 색상의 차량을 출고하는 데 선택된 색상이 W_1 과 같은 색상이라면 두 번째로 많은 색상을 선택한다. 그 이유는 동일한 색상의 차량이 두 개의 상도 부스에 동시에 투입되는 것을 억제하기 위해서이다. 출고할 레인은 해당 색상의 차량이 가장 많은 레인을 선택하며, 해당 차체 앞에 있는 차량은 회송시킨다.

이외에 고려해야 할 사항으로는, 출고되는 모든 차량의 색상은 자동기 노즐 끝단의 칠 맺힘을 방지하기 위해 한 번에 최대 8대로 한정한다(동일 색상의 차량이 8대 지나가면 반드시 세정을 함). 기본 그룹화 대수는 5대로 하였는데 이 의미는 회송 여부를 결정할 때 5대 미만으로 그룹화가 되는 경우는 회송시키고, 5대 이상이 되었을 경우에는 회송시키지 않고 색상 변경을 한다는 것이다. 기본 그룹화 대수를 설정한 이유는 점유율이 적은 차량의 경우 8대를 그룹화하기 위해서 연속적으로 회송이 발생하여 도장 부스에 결품이 생기는 것을 방지하기 위해서이다. 아울러 특별히 지정한 차량(예: 특정 색상 불량, 특장차 등) 외의 색상으로서 그룹화가 되지 않아 투입하고 있지 못하고 있는 차체는 장기 적체방지를 위해 CRS 입고 후 5시간이 지

나면 도장 부스로 강제 투입하도록 하였다.

4.4 시뮬레이션 프로그래밍

시뮬레이션 모델을 개발하기 위해서 PROMODEL을 사용하였다. 각종 알고리즘은 PROMODEL에서 제공하는 도구를 이용하여 작성하였다.

차량이 RFID를 읽는 지점에 도착하면 색상정보를 읽고 컨베이어를 따라 CRS 입고지점으로 이동한다. 입고지점에 도착하면 입고 알고리즘에 의해 어느 라인으로 투입이 될지 결정한다. 차량은 CRS의 라인을 따라 출고지역으로 이동하며, 출고지역에서 출고 알고리즘에 의해 상도 부스로 투입이 결정되거나 회송라인을 따라 입고지역으로 회송된다. 이 때 최대 체류시간은 5시간이 초과하지 않도록 하며, 회송차량의 대수, 강제출고 차량대수에 대한 통계량을 수집한다. 상도 부스로 투입이 결정된 차량은 2개의 상도 부스에 교대로 투입된다.

차량이 상도 부스에 투입되면 각 부스에서 선행 차량의 색상 유형과 투입된 차량의 색상유형을 비교하여 각 단계별로 세정을 해야 하는지 여부를 결정한다. 또한 각 단계별로 통과한 차량의 수와 세정횟수를 계산하여 그룹화 효율을 계산한다. 동

시에 어떤 색상의 도료를 세정하였는지 판단하여 세정비용을 계산한다. 이와 같은 과정을 거쳐 3단계의 공정을 마친 차량은 시스템을 떠나게 된다.

<그림 5>는 색상 변경시 1, 2 단계에서의 세정 수행 여부를 판단하는 논리이며, <그림 6>은 개발된 모델을 이용하여 시뮬레이션이 수행되는 화면이다. 단계 3에서의 세정 수행 여부를 판단 논리도 유사하게 진행된다.

5. 실험 및 결과 분석

먼저 일차적으로 1개월 간 RFID에서 수집된 실제 생산실적자료(색상정보, 투입시간)를 이용하여 개발한 입고/출고 알고리즘에 대한 시뮬레이션 분석을 시행하였고, 초기화 조건과 강제출고 시간을 결정하였다.

5.1 초기화 조건 설정

시뮬레이션 초기단계의 불안정성을 제거하기 위하여 일반적으로 두 가지 방법을 사용한다. 첫 번째 방법은 일정시간 동

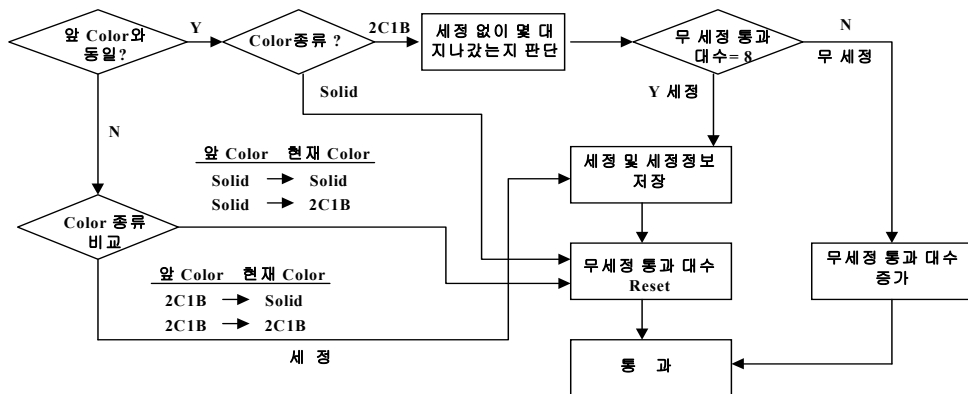


그림 5. 단계 1, 2의 세정 수행 여부 판단 논리.

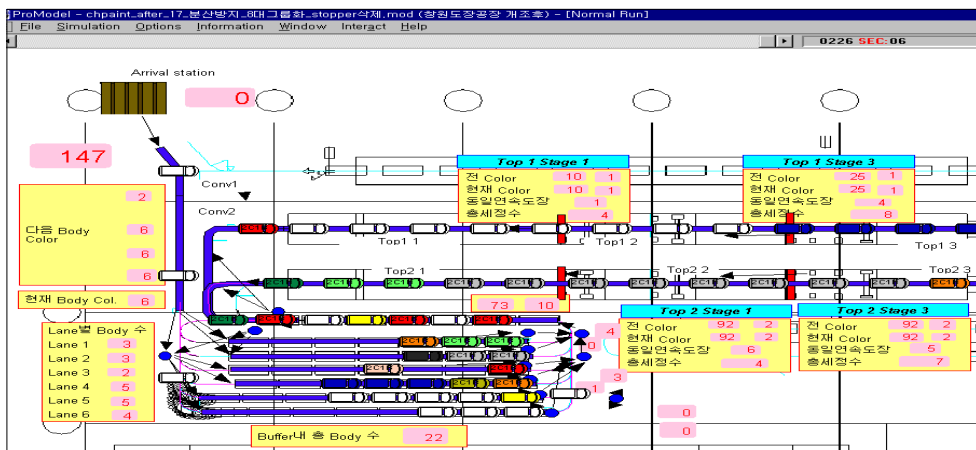


그림 6. 개발된 시뮬레이션 모델 화면.

안 시뮬레이션을 진행시킨 후 초기단계의 결과치를 통계자료 수집에서 제외시키는 방법으로 Warm Up Period를 설정하는 방법이다. 두 번째 방법은 시뮬레이션을 시작할 때 적당한 양의 개체를 자원에 미리 할당하는 방법인데 얼마나 많은 양의 개체를 사전에 할당해야 하는지를 추정하기 어려운 점이 있다.

본 연구대상인 CRS 시스템에서는 초기단계에서는 CRS가 비어 있기 때문에 입고된 차체가 그룹화 될 여유도 없이 바로 상도 부스로 빠져나가므로 Warm Up Period만 설정해서는 안정상태에 도달하지 못한다. 따라서 초기에 CRS에 적당한 양의 차체를 저장해 놓은 상태에서 상도 부스에 투입을 시작해야 그룹화가 원활하게 된다. 따라서 출고지연을 15분, 30분, 45분 세 가지 경우로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. <표 6>은 세 가지 경우에 대한 예비 시뮬레이션 결과인데 분석 결과 30분 정도의 출고 지연이 필요하다고 판단하였다. 이 표에서 재고량이란 RFID를 통과한 후 CRS에 체류하고 있는 차량의 수로서 CRS에 저장된 차량과 RFID를 통과한 후 CRS에 입고되기 위해 이동중인 차량을 포함한다.

5.2 강제 출고시간에 대한 민감도 분석

특수한 색상의 차량인 경우 그룹화를 위하여 CRS 내 장기저장을 방지하기 위해 일정한 시간이 지나면 강제로 출고하는데 실제 생산현장에서는 8시간(1 Shift)을 넘기지 않도록 규정하고 있다. 따라서 강제 출고시간을 얼마로 하면 좋은지에 대한 실험을 하였는데 그 결과는 <표 7>과 같다. 분석 결과 5시간으

로 하면 그룹화 효율도 증가시키면서 장기저장도 방지할 수 있는 것으로 판단하였다.

5.3 본 실험

본 실험을 위하여 차량의 색상분포를 <표 1>에 있는 것과 같이 이산형 확률분포로 하고, 출고지연시간을 30분으로, 강제 출고시간을 5시간으로 설정하였다. 또한 RFID를 통과하는 차량의 도착시간 간격을 60JPH를 기준으로 1분으로 설정하였는데, 실제 생산현장에서도 컨베이어에 의해 차량이 도착하므로 상수로 설정을 해도 큰 무리가 없을 것으로 판단하였다. 아울러 시뮬레이션 기간은 실적자료와 동일하게 1개월(9312대 생성)로 설정하였으며, 10회 반복실험을 하였다.

<표 8>에 제시된 바와 같이 실험 결과 그룹화 효율은 단계 1과 2에서는 평균 8.06대였으며, 단계 3에서는 5.61대였다. 당초 가정에서 동일색상의 차량이 8대 통과하면 세정을 한다고 했는데 단계 1과 단계 2에서 8이상의 수치가 나온 이유는 그룹화 효율을 계산하는 방법에 기인한 것이다. 그룹화 효율은 총 통과 차량수를 총 세정횟수로 나눈 값인데, 1C1B 색상의 차량은 단계 1과 단계 2에서는 도색을 하지 않고 통과한다. 이 때 1, 2 단계를 통과한 차량도 총 생산대수에 포함이 되기 때문에 그룹화 효율이 8보다 크게 나오는 것이다. 만일 총 생산대수에서 1C1B의 생산점유율(4개 색상 45.3%)을 제외한다면 그룹화 효율은 4.4대 정도 될 것이다. 또한 CRS에 저장중인 평균 차량대수는 22.13대로서 약 50%의 저장공간 활용률을 보이고 있다.

표 6. 초기 재고량에 따른 영향 분석 비교

초기 재고 (초기 출고지연)	최대 재고	평균 재고	세정비용 (천원)	그룹화 효율(대/회)		회송 대수	강제출고 대수	최대동색 연속출고
				단계 1, 2	단계 3			
45분	44	37	XXXX	8.6	5.95	1687	37	54
30분	29	22	XXXX	8.28	5.81	738	10	50
15분	14	7	XXXX	4.17	3.58	92	0	35

* 구체적인 세정비용은 사정상 생략하였음.

표 7. 강제출고 경과시간에 따른 분석

강제출고 경과시간	세정횟수(회) (상도 부스 평균)		그룹화 효율(상도 부스 평균)		총 세정비용 (천원)	회송 차량수	강제출고 차량수
	단계 1, 2	단계 3	단계 1, 2	단계 3			
1시간	723	974	6.4	4.8	XXX	571	1009
2시간	657	907	7.1	5.1	XXX	994	246
3시간	622	896	7.5	5.2	XXX	1167	83
4시간	605	886	7.7	5.3	XXX	1545	58
5시간	591	880	7.9	5.3	XXX	1471	32
6시간	610	869	7.6	5.4	XXX	1318	15
7시간	583	865	8.0	5.4	XXX	1330	6
8시간	605	876	7.7	5.3	XXX	1471	8

* 구체적인 세정비용은 사정상 생략하였음.

5.4. 적정 CRS 규모의 결정

당초 계획했던 6개 라인 44개 용량의 CRS 규모를 축소할 수 있는지 여부를 검토하기 위하여 아래와 같은 4가지 대안을 생성하였다. 생성된 대안에 대해 10회 반복 실험을 하여 얻은 결과는 <표 9>와 같다. 우선 원안과 대안 2를 비교해 보면 그룹화효율이나 평균재고량에 차이가 없음을 알 수 있다. 이것은 현재 6개 라인 44대(4개 라인 7대, 2개 라인 8대)로 설계된 CRS를 각 라인에서 1대씩 줄여도 성능에는 아무런 영향이 없다는

의미이다. 하지만 대안 3, 대안 4의 경우는 그룹화 효율이 떨어지며, 세정비용도 증가하므로 투자비와의 관계를 고려해야 한다. <표 10>은 원안과 4가지 대안에 대해 단계별 그룹화 효율의 차이를 t 검정을 하여 p-value를 구한 표이다.

두 번째 관점은 레인을 하나 축소하는 것이 좋은가, 아니면 각 라인에서 1대 혹은 2대씩 축소하는 것이 좋은가에 대한 비교다. 대안 1과 대안 3을 살펴보면 대안 3이 전체적인 용량이 4대 작지만 그룹화 효율이나 세정비용이 오히려 적음을 알 수 있다. 따라서 레인의 수를 늘리는 것이 CRS 운영에서는 보다 효

표 8. 색상 분포를 이용한 최종 시뮬레이션 결과

항 목		반복횟수										평균
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
그룹화 효율	단계 1,2	8.08	7.93	7.98	8.12	8.03	8.02	8.09	8.1	8.03	8.25	8.06
	단계 3	5.63	5.54	5.59	5.63	5.54	5.61	5.65	5.65	5.61	5.65	5.61
세정비용(천원)		XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
회송 차량수		743	777	836	762	782	806	740	739	719	710	761.4
강제출고 차량수		9	7	15	11	9	6	9	9	10	11	9.6
CRS 평균재고		22.11	21.81	22.73	22.81	22.41	22.04	22.1	21.72	22.39	22.13	22.13
최대 동색 연속 출고대수		51	45	42	43	55	48	31	45	59	44	46.30

* 구체적인 세정비용은 사정상 생략하였음.

표 9. 원안과 4개 대안의 시뮬레이션 결과 비교

항 목		원안	대안 1	대안 2	대안 3	대안 4
CRS 규모	라인 수	6	5	6	6	6
	저장대수	44	36	38	32	26
	특징		1라인 축소	1대씩 축소	2대씩 축소	3대씩 축소
그룹화효율 (대/회)	단계 1, 2	8.06	7.58	8.04	7.79	7.40
	단계 3	5.61	5.40	5.61	5.47	5.30
세정비용(천원)		A ₀	A ₃	A ₁	A ₂	A ₄
회송 차량수		761	1192	956	1421	1559
강제출고 차량수		10	9	11	10	9
CRS 평균 재고		22.13	22.00	22.83	23.53	19.36
최대 동색 연속 출고		46.30	45.20	46.80	45.10	40.30

* 평가척도 값은 10회 반복한 후 평균값을 구한 것임.

* 세정비용은 A₀가 가장 적고 A₄가 가장 많음.

표 10. 대안별 그룹화 효율 비교를 위한 t 검정 결과

p-value		단계 1, 2의 그룹화 효율 비교				
		원안	대안 1	대안 2	대안 3	대안 4
단계 3의 그룹화 효율 비교	원안		0.0000	0.2840	0.0018	0.0001
	대안 1	0.0000		0.0000	0.0053	0.2319
	대안 2	0.4451	0.0000		0.0109	0.0006
	대안 3	0.0010	0.0106	0.0007		0.0209
	대안 4	0.0000	0.0019	0.0000	0.0001	

울적이라는 것을 알 수 있다. 세정비용 측면에서 보면 원안, 대안 2, 대안 3, 대안 1, 대안 4의 순서로 적게 발생하였는데, 원안에 비해 대안 4의 세정비용이 8.4% 정도 많았다.

5.5. 투자비 및 경제성 검토

당초 예상한 대로 CRS 내 저장공간의 수가 많을수록 그룹화 효율이 상대적으로 높아져 세정비용이 줄어드는 것을 알 수 있으나 상대적으로 설비투자비가 증가할 것이므로 이를 비교하여 최적의 조건이 무엇인지 찾아야 할 것이다. 따라서 원안과 4가지 대안에 대하여 시뮬레이션을 통해 나온 결과와 각 경우에 해당되는 투자비를 산출하고 이를 비교하여, 투자에 따른 경제성을 검토함으로써 회사에서 요구하는 최저 요구수익률에 부합하는지 검토해 보았다.

새로이 CRS를 설치할 때 소요되는 투자비는 다음과 같은 항목들을 고려하여 계산하였다.

- 컨베이어, 대차, PLC 등 하드웨어 설치비
- 컴퓨터 및 소프트웨어 개발비
- 공사비
- 기존의 보수(Repair) 부서 이전 공사비

이와 같은 비용들을 투자비로 산정하고 10년간 세정비용 절감액을 추정하여 투자의 경제성 평가를 실시하였다. 이 때 세정비용은 향후 10년간 회사의 목표 생산량(24만대 설비용량의 65% ~ 80%)을 이용하여 추정하였는데 목표생산량은 상당히 보수적으로 추정한 것이다. 그 결과 원안의 투자자본 회수기간은 6.5년, 대안 4의 경우 6년으로 판명되었으며, 내부수익률(Inner Rate of Return)은 15% 가까이 되었다. 하지만 경제성 검토에서 사용한 이익은 세정비용 절감액만을 이용하였기 때문에 CRS의 설치로 얻을 수 있는 아래와 같은 부수적인 효과를 금액으로 환산한다면 투자의 경제성이 훨씬 높을 것으로 판단되었다.

- ① 중식시간에는 상도 부스 내 도장된 차체를 그대로 방치할 수 없어 중식시간 20분 전에 상도 부스로 차체의 투입이 중단되었으나, CRS를 이용하면 1C1B의 Solid 색상은 3단계에서만 도장이 이루어지므로 1, 2 단계까지 차체를 투입할 수 있어 하루 16대 정도 생산능력의 증대를 꾀할 수 있다.
- ② 색상별 로트 불량률이 발생할 경우 지금까지는 라인을 정지시키고 수작업으로 운영을 하였으나, CRS의 회송 레인을 이용하면 자동적으로 이들 차체의 투입 조절이 가능하다(200X년 4회 발생, 복구시간 평균 4시간 소요).
- ③ 각 색상마다 도료의 특성에 미묘한 차이가 있기 때문에 작업자들이 직접 수작업을 하는 차체 내부도장에서는 색상이 바뀌면 작업자들이 도장 Gun을 매번 바꾸면서 작업을 해야 한다. 따라서 그룹화 효율을 높이면 색상 변경에 따른 불량방지는 물론 작업자의 피로를 감소시킬 수 있다.

6. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 자동차 도장공장의 가장 큰 낭비요소인 상도공정의 세정비용을 절감하기 위하여 CRS를 설치·운영하기 위하여 시뮬레이션을 이용한 검토과정에 대해 설명하였다. 이를 위하여 D 자동차 공장을 대상으로 CRS 운영을 위한 입·출고 알고리즘을 제시하였고, 기본 설계에서부터 시뮬레이션 모델 개발, 대안 추출 및 민감도 분석을 거쳐 마지막으로 경제성 검토를 하였다.

시뮬레이션 결과 CRS를 신규로 설치하면 현재 2대 내외의 그룹화 효율을 5~6대 수준으로 끌어올릴 수 있음을 알 수 있었다. 또한 입·출고 알고리즘이 CRS의 구조, CRS의 용량, 색상의 분포 등 다양한 요인들에 의하여 영향을 받기 때문에 그룹화 효율 수치를 이용해 직접적인 비교를 할 수는 없었지만, 선행 연구들의 사례에서 그룹화 효율이 3~5대 정도인 것을 감안한다면 본 논문에서 제시한 입·출고 알고리즘의 효율성도 우수한 것으로 추정할 수 있다. 아울러 CRS의 적정 규모를 결정하기 위한 민감도 분석 결과, 동일한 규모라면 레인의 수를 늘리고 각 레인의 저장용량을 줄이는 것이 보다 효율적인 방법임을 규명하였다.

향후 연구과제로는 도료의 가격을 고려한 입·출고 알고리즘의 개발을 들 수 있다. CRS를 운영할 때 그룹화 효율을 높이는 것도 중요하지만 색상별 가격을 고려하여 총 세정비용을 최소화시키는 것도 중요하다. 따라서 그룹화 효율과 총 세정비용의 두가지 척도를 동시에 고려하는 운영 알고리즘의 개발이 필요하다고 하겠다.

참고문헌

- Jayaraman, A, Narayanaswamy, R. and Gunal, A. K. (1997), A Sortation System Model, *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, 866-871.
- Burns, L.D. and Daganzo, C.F. (1987), Assembly Line Job Sequencing Principles, *International Journal of Production Research*, 25(1), 71-99.
- Choi, W. J., Park, H. K. and Shin, H. O. (1996), Design and Application of an Efficient Color-Grouping Algorithm for a Painting Shop of an Automotive Industry, *Journal of the Korean Production and Operation Management Society*, 7(3), 67-96.
- Grahl D. (1992), Insights into Carrier Control : A Simulation of Power and Free Conveyor Through an Automotive Paint Shop, *Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference*, 925-932.
- Kim, W. K. and Kim, C. G. (1999), Analysis of the Productivity of Automobile Painting Process Using Computer Simulation, *Journal of the Korea Society for Simulation*, 8(2), 73-85.
- Kim, Y. M and Seo, Y. H. (1996), Model Grouping in a Mixed-Model Assembly Line, *IE Interfaces*, 9(2), 39-45.
- Park, H. K., Choi, W. J. and Shin, H. O. (1996), Automation of Color Selection System in the Automobile Painting Shop, *IE Interfaces*, 9(2), 19-37.
- Ulgen, O., Gunal, A., Grajo, E. and Shore, J. (1994), The Role of Simulation in Design and Operation of Body and Paint Shops in Vehicle Assembly Plants, *Proceedings of the European Simulation Symposium, Society of Computer Simulation*

International, 124-128.
Williams, E. J. and Sadakane, S. (1997), Simulation of a Paint Shop Power and

Free Line, *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, 727-732.



문 덕 회

한양대학교 산업공학과 학사
KAIST 산업공학과 석사
KAIST 산업공학과 박사
현재: 창원대학교 산업시스템공학과 교수
관심분야: 설비계획, 스케줄링, 시뮬레이션
현장 응용



송 성

중국 연변대학교 농기계학과 학사
창원대학교 산업시스템공학과 석사
현재: 창원대학교 산업시스템공학과 박사
과정 재학중
관심분야: 시뮬레이션, 스케줄링



김 하 석

인하대학교 기계공학과 학사
창원대학교 산업시스템 공학과 석사
현재: 지엠대우자동차 품질보증팀장
관심분야: 자동차 생산 시스템 / 물류 시스템



김 경 완

한양대학교 기계설계학과 학사
한양대학교 기계설계학과 석사
현재: 지엠대우자동차 생산기술연구소 선행
기술팀 대리
관심분야: 가상생산, 로봇 오프라인 프로
그래밍