

# 자동차 생산계획 시스템에서 제약만족기법을 이용한 생산 시퀀스 모듈 구현

하영훈<sup>1\*</sup>·우상복<sup>1</sup>·안현식<sup>1</sup>·한형상<sup>1</sup>·박영진<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(주)인포미아 정보시스템연구소 / <sup>2</sup>(주)지엠대우자동차 생산기술연구소

## Implementation of a Vehicle Production Sequencing Module Using Constraint Satisfaction Technique for Vehicle Production Planning System

Young-Hoon Ha<sup>1</sup>·Sang-Bok Woo<sup>1</sup>·Hyun-Sik Ahn<sup>1</sup>·Hyung-Sang Hahn<sup>1</sup>·Young-Jin Park<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Information Systems Research Center., Informia Co. Ltd., Seoul, 150-877

<sup>2</sup>Manufacturing Engineering Center, GM Daewoo Auto & Technology, Inchon, 403-714

Vehicle manufacturing plant is a typical mixed-model production system. Generally it consists of three main shops including body shop, painting shop and assembly shop in addition to engine shop. Each shop contains diverse manufacturing processes, all of which are integrated in a form of flow line. Due to the high pressure from the market requesting small-volume large variety production, production planning becomes very critical for the competitiveness of automotive industry. In order to save costs and production time, production planning system is requested to meet some designated requirements for each shop: to balance the work load in body and assembly shops, and to minimize the number of color changes in painting shop. In this context, we developed a sequencing module for a vehicle production planning system using the ILOG Solver Library. It is designed to take into account all the manufacturing constraints at a time with meeting hard constraints in body shop, minimizing the number of soft constraints violated in assembly shop, and minimizing the number of color changes in painting shop.

**Keywords:** constraint satisfaction, car sequencing problem

### 1. 서론

오늘날 국내외의 자동차 업계는 매우 치열한 경영 환경에 처해 있다. 대외 개방의 가속화와 신규 참여 업체의 등장에 따른 기업 간 경쟁의 심화, 다양한 고객의 요구에 대한 신속한 반응의 필요성, 높은 품질과 생산비용 최소화 요구 등 여러 요건이 자동차 업계의 변화와 개선을 요구하고 있다. 이러한 변화에 신속하게 적응하기 위해 차량 생산순서를 결정하는 시스템은

다품종 적시/적량 생산과 최소의 리드타임을 갖는 민첩한 생산결정 시스템으로의 전환이 요구된다(Hwang *et al.*, 1996; Noh *et al.*, 2002). 이런 상황에서 자동차 생산 전 공장의 요구사항을 고려한 생산계획 수립의 효율성 제고가 중요한 문제로 인식되고 있다.

자동차 공장은 보통 차체공장, 도장공장, 조립공장으로 구성되어 있다. 차체공장은 프레스 패널을 용접하여 기본적인 차체를 생산하는 공정이다. 여기서는 차종별로 연속 생산할

\*연락처 : 하영훈 주임연구원, 150-877 서울시 영등포구 여의도동 24-5 (주)인포미아 정보시스템연구소, Fax : 02-6335-6704,  
e-mail : yhha@informia.co.kr

2003년 3월 접수, 1회 수정 후 2003년 8월 게재 승인.

수 있는 설비의 대수가 정해져 있기 때문에 설비 대수를 초과하여 연속으로 생산할 수 없다. 따라서 생산이 가능하도록 차종을 설비 대수에 맞게 분산하여 시퀀스(sequence)하여야 한다. 이는 설비 제약으로 꼭 지켜야 하는 hard constraint이다. 따라서 새로운 생산 시퀀스를 결정할 때는 이미 생산이 결정되어 차체공장에 생산중인 차량 생산순서를 고려하여야 한다. 차체공장을 거친 완성된 차체는 WBS(White Body Storage)라는 저장창고에 저장된 후 도장공장으로 이동한다.

도장공장은 차체공장에서 완성된 차체의 부식을 방지하고 차체의 외관을 보호하기 위하여 고객이 요구하는 색상으로 도장하는 공정으로 이루어진다. 연속적으로 투입되는 차체의 색상이 상이한 경우에는 스프레이 노즐 등에 남아있는 이전 차체의 도료를 세정하여야 하기 때문에 유실되는 도료 손실비용과 세정비용이 발생하게 된다. 즉, 도장할 차체의 색상이 직전에 투입되었던 차체의 색상과 상이하면 색상 변경에 따른 색상 변경 비용(color change cost)이 발생한다. 따라서 발생하는 색상 변경 비용을 줄이기 위하여 도장부스에 동일한 색상의 차체가 가능한 연속적으로 투입될 수 있도록 시퀀스에 반영하여야 한다(change over constraint). 도장공장을 거친 후에는 중간창고인 PBS(paint body storage)에 저장된 후 조립공장에 투입된다. WBS에서는 색상 변경 비용을 줄이기 위해 같은 색상별로 그룹화 하는 것이 특징이라면, PBS에서는 조립공장의 옵션 간 다양한 제약을 만족하기 위해서, 도장을 마친 차체를 제약(옵션)을 고려하여 옵션 간 분포를 평균화 하여 조립공장으로 이동시켜야 한다.

조립공장은 배선, 엔진, 배기장치, 트랜스미션, 서스펜션, 브레이크, 시트, 타이어 등 각종 부품을 차체에 부착시키는 공정으로 이루어져 있다. 조립공장에서는 작업자의 능력과 외부업체의 부품공급 능력을 고려하여 작업별로 제약이 주어진다. 여기서 고려하는 제약은 차체 공장에서의와 같이 hard constraint인 작업이 있고, 생산량에 따라 제약을 조정할 수 있는 작업이 있다(soft constraint).

자동차 시퀀스는 Car Sequencing Problem으로 많이 알려져 있으며, 주어진 계획 기간에 고려해야 할 차량 대수와 제약이 많기 때문에 매우 어려운 문제로 인식되어지고 있고, 이와 관련된 다양한 연구와 사례가 발표되고 있다.

도장공장에서 색상변경 비용을 줄이고 조립공장의 제약을 만족시키기 위해 Kim과 Seo(1996)는 여러 옵션을 갖는 제품의 순서 변환을 통한 그룹화 알고리즘을 자동차 도장공장에 적용하여 같은 색상을 가진 차체를 효율적으로 그룹화하여 색상 변환에 따른 비용발생과 품질 저하를 막을 수 있는 시스템을 제안하였다. 또한 자동차 전 공장의 특성을 고려하여 시퀀스를 수립하는 통합 시스템에 대한 최적화가 필요함을 언급하였다. Park *et al.*(1996)은 도장공장의 상도공정에서 색상변경 비용을 줄일 수 있도록 저장창고에서의 차체의 인입, 저장, 인출을 실시간에 제어하는 Color Selection 시스템을 자동화하여 성공적으로 운영하고 있는 사례를 소개하였다. Choi *et al.*(1996)은 도장

공장에서 생산 완료된 순서는 혼류 생산의 평균화 생산에 적합하지 않은 상태이므로 조립라인에의 투입순서를 실시간으로 재작성하여 운영하기 위한 알고리즘을 개발하고 사례를 소개하였다.

Choi(1996)는 자동차 공장 전체의 생산성을 높이기 위해 각 라인의 효율이 극대화되도록 후행 라인의 생산계획에 따라 선행 라인의 생산계획을 맞추는 고객-공급자 개념을 도입하여 일일 생산 시퀀스 결정 방법을 제시하였다.

Warwick *et al.*(1995)은 제약만족기법의 정의와 Car Sequencing Problem에 대해 자세히 정리하고, 제약만족기법과 유전자 알고리즘을 사용하여 제약을 어기는 위배비용을 최소화하는 방법으로 Car Sequencing Problem을 해결하였다. Bergen *et al.*(2001)은 조립공장을 대상으로 약 1개월 분량인 36,000대의 자동차 생산 시퀀스를 결정하기 위해 hard constraint, soft constraint, change over constraint를 고려하여 제약만족기법으로 문제를 모델링 하고 문제 크기를 하루 분량으로 나누어 branch and bound로 해결한 사례를 소개하였다.

본 논문의 사례와 유사하다고 볼 수 있는 Daimler Chrysler의 CVS(Centralized Vehicle Scheduler) 시스템은 대표적인 제약만족기법(CST: Constraint Satisfaction Technique)의 응용 사례로 볼 수 있다. CVS에서는 hard constraint와 soft constraint의 제약을 우선순위(priority)로 나누어 도장공장에서의 색상변경 비용 최소화에 중점을 두고, 전체 문제를 소규모로 나누어 우선순위가 높은 제약이 먼저 제약을 만족하도록 하여 문제를 해결했다. 이 시스템을 도입한 Daimler Chrysler사는 연간 도장공장에서의 페인트와 세정액 손실비용을 20% 감소시킬 수 있었다(ILOG Press Release, 1997).

본 논문에서 소개하는 시퀀스 모듈은 빠른 시간에 각각의 차량생산 공장의 특성을 고려한 시퀀스를 수립하여 생산계획 단계에서부터 실제 완성차가 나올 때까지 차량생산 흐름을 예측할 수 있고, 시스템 운영자가 다양한 조건으로 상황에 맞게 시퀀스를 수립할 수 있도록 제약만족기법을 이용한 ILOG Solver를 사용하여 문제를 모델링하였다.

제약만족기법은 주어진 제약조건을 만족하는 가능해를 찾는 방법의 총칭으로 여러 복잡한 조합의 제약으로 구성된 문제를 풀기에 적합한 방법이며 실제 생산 현장의 다양한 요구조건을 고려하여 문제를 해결하는 데 사용되어 좋은 효과를 보고 있는 방법 중 하나이다. 제약만족문제는 변수(variable), 변수에 할당 가능한 값의 집합(domain), 그리고 변수 간의 관계 또는 제약(constraint)으로 정의된다. 자동차 시퀀스 문제는 대표적인 제약만족문제로 표현된다. 제약만족기법으로는 제약전파(constraint propagation), 변수정렬(variable ordering), 값 정렬(value ordering), 탐색방법 등을 들 수 있다. 제약전파는 부분해를 이용하여 다른 변수가 가질 수 있는 가능한 값의 집합을 줄여주는 기법이다. 변수정렬은 일정계획의 대상이 되는 작업을 선택하는 방법이며, 값정렬은 작업의 작업순서, 시작시점(또는 종료시점)을 결정하는 방법이다. 탐색방법은 가능해를 발

견하지 못한 경우에 이전의 부분해로 돌아오는 backtracking 방법 등을 의미한다. 즉, 제약만족기법을 이용한 해법은 경영과학에서 널리 사용되어 온 분지한계방법과 유사하다(Kim et al., 2001).

실제 자동차 생산 공장별 다양한 생산조건을 동시에 반영하여 자동차 생산순서를 결정하기는 쉽지 않다. 앞에서 언급한 기존 연구의 내용은 색상변경 비용을 줄이기 위해 차체공장에서 WBS까지 동일 색상의 차량별로 그룹화하여 시퀀스를 수립하고, PBS에서는 조립공장의 생산조건을 맞추기 위해 제약 조건별로 평준화하여 조립공장으로서의 투입순서를 재조정하였다. 따라서 생산계획 단계에서의 시퀀스와 완성차가 나오는 순서가 일치하기 어려웠다. 또한 다양한 생산 현장의 요건에 대응한 시퀀스를 수립하는 데 많은 시간이 소요되었다.

본 논문에서는 자동차 생산 공장 각각의 특성을 동시에 고려할 수 있도록 제약만족기반의 ILOG Solver를 이용하여 문제를 모델링하고, 1개월 분량의 시퀀스를 수분 내에 수립하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘에서는 각 생산공장의 옵션 제약조건들을 동시에 고려하여 1개월 분량의 생산 데이터를 빠르게 시퀀스하기 위해 전체 시퀀스 문제를 분할하여 소규모로 반복해서 시퀀스를 수립함으로써 효율성을 높였다. 2장에서는 시퀀스 모듈 구조에 대해 알아보고, 3장에서는 문제 모형화 방법에 대해 소개하며 4장에서는 시퀀스 모듈의 실제 실행화면과 프로세스에 대해 설명한다.

## 2. 시퀀스 모듈 구조

### 2.1 시퀀스 모듈 개요

본 논문에서 소개하는 생산계획 수립 시스템의 시퀀스 모듈은 각 공장에서 요구되는 제약을 동시에 만족시켜 자동차 생산계획의 품질을 높이고, 자동차 생산관리를 보다 체계적으로 하는 데 그 목적이 있다. 자동차 시퀀스 모듈을 사용하여 얻을 수 있는 효과는 다음과 같다.

- 제조원가를 최소화할 수 있는 계획 수립(색상변경 비용 최소화).
- 다양한 옵션을 가진 주문의 특성을 고려하여 균형 있는 현장 작업부하 유지.
- 과도한 제약(over constraint)을 가지는 경우, 제약위반을 최소화하는 시퀀스 수립.
- 제약을 위반하는 작업 시점을 조기 경보하여 예측 가능한 생산계획 수립 지원.
- 1 일에서 1개월 시퀀스 수립이 수분 이내에 가능하여 돌발 상황에서의 신속한 대처가 가능하며 다양한 전략에 의한 작업계획의 대안수립 지원을 할 수 있다.

본 논문에서 소개하는 자동차 생산계획 시스템의 시퀀스 모

듈은 시퀀스를 수립하는 데 있어서 전체 자동차 생산 공장의 각 특징을 고려하여 시퀀스를 수립하기 때문에 생산계획 단계에서 생산 현장의 상황을 예측할 수 있고, 완성차가 나오는 시점까지 생산순서를 예측하는 데 용이하다.

<그림 1>은 개략적인 자동차 생산계획 시스템 구조도이다. 시퀀스할 데이터를 생성하기 위해 이미 확정된 생산정보, 재공정보, 주문정보(POB: Production Order Bank)와 각종 제약 데이터를 DB에서 추출하여 데이터를 가공/분석하여 생산대상 차량을 정한다. 생산이 확정된 생산 데이터는 선적일, 긴급 주문, 작업부하(workload) 등을 고려하여 생산 데이터 가공 모듈에서 상대적인 생산순서를 정한다. 이때 자동차 각 공장 특성에 따라 고려할 옵션의 제약을 정하고, 생산능력, 선적일과 같은 고객만족 수준을 결정한다. 이는 시퀀스 모듈의 입력 데이터가 된다. 시퀀스 모듈은 생산계획 시스템의 생산 데이터 가공 모듈에서 가공한 생산대상 차량 데이터와 고려할 제약 조건들을 입력받아 시퀀스를 수립한다. 시퀀스 모듈은 다양한 제약조건을 반영하여 what-if 시뮬레이션이 가능하다. 시퀀스 품질은 제약위배 사항과 색상비용을 분석하여 평가할 수 있고, 최종 생산계획 확정은 생산계획 분석 모듈에서 시퀀스 결과를 분석하여 결정한다. 생산계획 분석 모듈은 선적일, workload, 긴급 주문 등 중요한 사항을 고려하여 시퀀스 품질을 분석하고, 시퀀스 품질을 더 높이기 위해 시퀀스 모듈의 상위 단계인 생산 데이터 가공 모듈에서 상대적인 생산 데이터 순서를 변경하여 시퀀스를 할지 또는 시퀀스 모듈 단계에서 고려된 제약 수치를 변경하여 시퀀스할지를 판단한다. 시퀀스 품질에 이상이 없다면 시퀀스 결과에 따라 생산계획을 확정하고 이를 DB에 저장한다.

생산계획 시스템에서 시퀀스 모듈은 전체 자동차 각 공장들의 상반된 특성을 고려하여 1개월 시퀀스를 한 번에 수립할 수 있고, 여러 제약을 고려하여 다양한 상황에 대해서 what-if 시뮬레이션을 하여 시퀀스 결과를 비교할 수 있다.

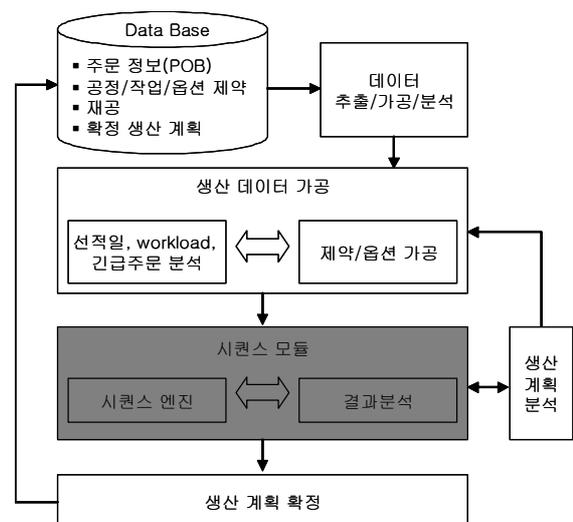


그림 1. 자동차 생산계획 시스템 구조도.

2.2 시퀀스 모듈 기능

<표 1>은 시퀀스를 수립할 때 자동차 공장별로 고려해야 할 사항을 정리한 것이다. 만약 차체공장에서 A 모델, B 모델 두 가지 모델이 같이 생산된다고 가정하고, A 모델은 3door, 4door, 5door 그리고 B 모델은 4door, 5door에 대한 대차(臺車)의 대수가 정해져 있다면 이는 설비제약으로 hard constraint이다. 즉 대차의 대수에 맞게 차량이 순서대로 투입되어 생산작업이 연속될 수 있어야 한다. 따라서 시퀀스를 진행할 때 반드시 모델별 옵션에 대한 대차의 대수를 어기지 않도록 시퀀스를 진행시켜야 하고, 새로운 시퀀스를 수립할 때에는 선행 시퀀스 결과 중 현재 차체공장에 생산중인 시퀀스 정보를 반영하여 새로운 시퀀스를 수립함으로써 대차 조건을 만족시켜야 한다.

표 1. 자동차 공장별 요구되는 기능

구분	요구 기능
차체공장	선행 확정된 시퀀스를 반영하여 새로운 시퀀스 진행 hard constraint 반영(대차 조건)
도장공장	색상 변경 최소화 색상 변경 시 동일 색상 그룹 내에서 변경 (색상 그룹 변경 최소화)
조립공장	옵션별 capacity 준수 capacity 변경 알고리즘
전체	시퀀스 진행률 최대화(수개월 분량 가능) 선적일 고려 시퀀스 진행 상황 모니터링(monitoring)

도장공장에서는 자동차 생산비용과 밀접한 관계가 있는 색상변경 비용을 최소화하여야 한다. 본 논문에서는 색상이 그룹별로 나누어져 있어서 색상변경을 가능한 최소화하고, 부득이 색상변경이 필요할 때는 같은 그룹 내에서 색상이 변경되도록 시퀀스에 반영하여 색상변경에 따른 도료 손실비용과 세척비용을 최소화하였다.

조립공장에서 수많은 작업이 이루어지지만 시퀀스 수립에서 반영되는 옵션은 시퀀스 담당자가 현장사정 또는 외부 부품공급업체의 능력을 고려하여 시퀀스에 반영되도록 하기 때문에 옵션의 개수가 정확히 정해져 있지 않고 사용자가 시퀀스할 때 고려할 옵션을 선택한다(약 20~30개). 또한 대부분은 soft constraint이지만 시퀀스 담당자가 판단하여 차체공장처럼 hard constraint로 지정하여 시퀀스할 수도 있다. soft constraint인 경우에는 시퀀스 수행 단위만큼 진행될 때마다 각 옵션별 여유값(slack)을 고려하여 시퀀스가 계속 진행될 수 있도록 제약 조건을 적절하게 완화해야 한다.

시퀀스 모듈은 생산계획 시스템에서 정한 시퀀스 분량(1개월 또는 2개월)을 시퀀스할 수 있어야 하기 때문에 각 공장별 요구사항을 만족하면서 시퀀스 진행률을 최대화시키고, 생산계획 수립 시스템에서 고려한 상대적인 생산순서를 반영하고,

시퀀스 진행상황을 모니터링 할 수 있도록 UI(User Interface)를 제공한다.

3. 제약만족기법을 이용한 시퀀스 엔진 모형화

CST는 주어진 제약조건들을 만족하는 범위에서 각 변수(시퀀스 할당 순서)들에 순차적으로 값(차종)이 할당된다. 값을 할당하는 과정에서 만약 불가능해가 나오게 되면 변수의 값을 다시 선택하는 backtracking 절차를 따른다. 이러한 해 탐색과정이 반복되면서 가능해를 구해 나가게 된다. 문제의 규모가 커짐에 따라 시퀀스 모듈은 탐색횟수와 범위가 기하급수적으로 늘어나기 때문에 효율적인 탐색 방법이 필요하다. 탐색의 효율성은 ① 탐색하는 변수의 순서(Variable Ordering), 즉 시퀀스 순서, ② 선택된 변수에 값을 할당하는 방법(Value Ordering), 즉 차종 선택 방법, ③ backtracking 방법에 의해 크게 영향을 받게 된다. 본 논문에서 탐색하는 변수는 처음부터 순서대로 하고, 선택된 변수에 값을 할당하는 방법은 각 공장의 특성을 고려하여 알고리즘으로 구현하고, 기본적인 backtracking 방법을 사용하였다.

일반적으로 수식에 의한 시퀀스 모형을 수립하기 위해서는 문제의 상황을 변수로 재해석하고 분석하는 과정이 요구된다. ILOG Solver는 제약만족기법에 대해 이미 만들어져 있는 클래스를 적절히 이용하여 간단하게 모형화 할 수 있도록 방법을 제공한다. ILOG Solver는 C++를 이용해서 개발되었으며 이용 방법 또한 C++ 이용방법과 동일하다. 이하에서는 자동차 전체 공장의 요구사항을 고려하여 시퀀스하기 위한 모델링 방법과 알고리즘에 대해서 간략히 설명한다.

3.1 문제 정의

시퀀스 모듈은 차체공장, 도장공장, 조립공장의 각 생산 특성을 고려하여 다양한 차종(configuration)을 생산할 수 있도록 시퀀스를 수립한다. 각 차종은 기본형에 다양한 옵션 또는 생산조건이 추가된 것이다. 즉 하나의 완성차는 특정 옵션들로 구성된 하나의 차종이라고 생각할 수 있다. 자동차 생산라인에 투입된 차에는 다양한 옵션이 추가될 수 있고, 생산라인은 처음 생산투입부터 최종 완성차량이 나올 때까지 연속공정으로 구성되어 있으며, 자동차 생산 시퀀스를 결정할 때에는 기존에 생산 시퀀스가 확정된 부분을 고려하여야 한다. 이론상으론 어떤 차종이라도 생산라인에서 생산이 가능하나 차체공장과 조립공장에서의 생산조건(예: 조립 난이도, 부품 소모량) 또는 생산환경(예: 비용, 시간, 고객만족)을 고려하여 주요 선택 사양(예: ABS, Sun Roof, 트랜스미션)의 차체를 연속하여 생산하지 않고 일정한 간격으로 옵션의 비율을 조정하여 생산하게 된다. 이런 제약을 옵션 간 capacity라 한다. 각 옵션별 capacity constraint는 작업부하, 외부 부품공급업체의 capacity 등 여

러 이유에 의해 차체공장과 조립공장에서 시퀀스할 때 고려해야 할 제약을 나타낸 것이다. 제약을 표시하는 방법은 p/q 형식으로 시퀀스 상의 어느 범위 q에서도 항상 p대 이하로 시퀀스 상에 나타나야 한다는 의미이다.

예를 들어 ABS 부품을 조립하는 작업은 외부업체의 공급 능력이 하루 생산 차량 대수의 40%임을 감안하여 ABS 작업에 대한 제약이 2/5로 정해졌다면, 임의 연속 5대의 차량 중에 ABS 옵션을 장착한 차량은 2대 이하가 되도록 시퀀스를 진행해야 한다(<그림 2>).

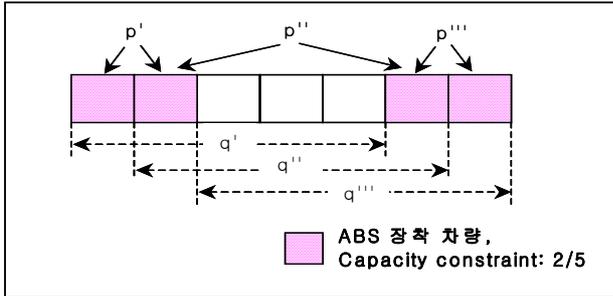


그림 2. capacity constraint를 만족하는 예제.

본 논문의 시퀀스 모듈에서는 생산대상인 차종별 차량대수에 맞춰 옵션 간 capacity constraint를 위배하지 않도록 각 차종의 생산투입 시퀀스를 정하는 것이다. 자동차 시퀀스의 결과는 고객의 주문 내용에 따라 다소 영향을 받지만 계획된 차종과 색상의 분포가 월간, 주간, 일별 자동차 생산계획에 고루 분포되어 있어야 한다. 또한 차량의 색상은 도장공장에서 페인트 손실을 줄이기 위해 가능한 한 같은 색상으로 구성되도록 자동차 생산계획을 해야 하며, 만약 같은 색상으로 생산계획을 수립하기 어려운 경우에는 같은 그룹의 색상이 시퀀스 되도록 한다.

### 3.2 입력 데이터

자동차 생산계획 시스템에서 가공한 생산대상 차량정보는 시퀀스 엔진에서 필요한 차종정보로 변경된다. 가공된 생산대상 차량정보와 변경된 차종정보에 대하여 설명하기 위해 간략히 나타내면 <표 2>, <표 3>과 같다.

<표 2>는 생산계획 시스템에서 가공하여 저장된 생산대상 차량 데이터의 예이다. 총 20대의 차량정보를 볼 수 있는데 처음 10대의 데이터는 이미 시퀀스가 확정된 데이터이고, 나머지 10대 정보는 시퀀스를 진행할 데이터로 생산계획 시스템에서 상대적인 생산순서를 미리 정해진 순서이다. 따라서 차체, 도장, 조립공장의 요구사항을 고려하여 되도록이면 입력 데이터 순서대로 시퀀스를 확정하는 것이 유리하다. 시퀀스가 확정된 10대는 차체공장의 hard constraint를 만족시키기 위해 시퀀스에 고려해야 한다. POB 번호는 생산차량의 고유번호이다. 고려된

옵션은 Sun Roof, ABS, 시트 A형 세 가지이고, 고유번호별로 옵션 고려 여부를 나타내었다. 색상은 A, B, C 세 종류가 있고 A와 B가 같은 1그룹이고, C는 2그룹이다.

표 2. 생산대상 차량 데이터의 간략한 예

POB 번호	Sun Roof	ABS	시트 (A형)	색상	색상 그룹	차종	fixed
0990	0	1	0	C	2	1	1
0991	0	0	1	C	2	2	1
0992	0	1	0	B	1	1	1
0993	0	1	0	B	1	1	1
0994	0	0	1	A	1	2	1
0995	0	1	0	A	1	1	1
0996	0	1	0	A	1	1	1
0997	1	0	0	A	1	3	1
0998	0	0	1	A	1	2	1
0999	1	1	0	A	1	4	1
1001	0	1	0	A	1	1	0
1002	0	0	1	B	1	2	0
1003	1	0	0	B	1	3	0
1004	0	0	1	A	1	2	0
1005	1	0	0	A	1	3	0
1006	1	1	0	A	1	4	0
1007	0	1	0	C	2	1	0
1008	0	1	0	B	1	1	0
1009	0	0	1	A	1	2	0
1010	0	1	0	A	1	1	0

<표 3>은 <표 2>의 데이터를 분석하여 시퀀스 엔진에서 사용할 수 있도록 가공된 정보이다. <표 2>의 데이터를 분석해 보면, 시퀀스할 차량대수는 시퀀스가 확정된 10대를 포함한 총 20대, 고려할 옵션은 3가지(sun roof, ABS, 시트 A형)이고, 차종은 4가지이다. 각 차종별 옵션 고려 여부는 0, 1로 표시했다. 1은 차종 j가 옵션 i를 필요로 한다는 의미이며, 0은 그렇지 않다는 의미이다. 또한 각 옵션 별 capacity와 시퀀스할 차종별 대수도 알 수 있다. 옵션 중 Sun Roof만을 필요로 하는 3번 차종은 3대, ABS 옵션만으로 구성되는 1번 차종은 9대, 시트 A형만 고려하는 2번 차종은 6대, Sun Roof와 ABS를 탑재하는 4번 차종은 2대이다. 각 차종별 필요대수의 합은 시퀀스할 총 차량대수와 일치해야 한다. 예를 들어 옵션 2(ABS)는 어떤 시퀀스 구간에서도 ABS 장착 차량이 3대 중 2대 이하로 시퀀스 되어야 함을 의미하고, 차종 1번과 4번에서 필요로 하는 옵션이다.

만약 <표 3>과 같은 옵션 제약을 고려하여 <표 2>의 입력 순서대로 시퀀스가 확정된다면 Sun Roof, ABS 옵션이 capacity constraint를 만족하지 못한다.

표 3. 시퀀스 엔진에서 필요한 가공된 차종 정보

옵션(i)	차종(j)				capacity constraint	
	1	2	3	4	p/q	
Sun Roof	1	0	0	1	1	1/2
ABS	2	1	0	0	1	2/3
시트 A형	3	0	1	0	0	3/5
차종별 필요대수	9	6	3	2		

표 4. capacity constraint를 만족하는 시퀀스에

시퀀스 순서	POB 번호	Sun Roof	ABS	시트 A형	색상	색상 그룹	차종
1	0990	0	1	0	C	2	1
2	0991	0	0	1	C	2	2
3	0992	0	1	0	B	1	1
4	0993	0	1	0	B	1	1
5	0994	0	0	1	A	1	2
6	0995	0	1	0	A	1	1
7	0996	0	1	0	A	1	1
8	0997	1	0	0	A	1	3
9	0998	0	0	1	A	1	2
10	0999	1	1	0	A	1	4
11	1001	0	1	0	A	1	1
12	1010	0	1	0	A	1	1
13	1003	1	0	0	B	1	3
14	1007	0	1	0	C	2	1
15	1008	0	1	0	B	1	1
16	1005	1	0	0	A	1	3
17	1002	0	0	1	B	1	2
18	1006	1	1	0	A	1	4
19	1004	0	0	1	A	1	2
20	1009	0	0	0	A	1	2

<표 4>는 <표 2>에서 이미 확정된 시퀀스를 반영하여 <표 3>의 각 옵션별 capacity를 만족하면서 시퀀스를 진행한 예이다. 시퀀스 순서는 생산에 투입되는 순서이다. 시퀀스 순서 1에서 10까지는 <표 2>에서 이미 시퀀스가 완료된 부분이며 11번부터 20번까지가 <표 3>의 capacity constraint를 고려하여 새로 시퀀스 한 부분이다. <표 4>의 시퀀스 결과를 보면 고려된 모든 옵션의 capacity constraint를 만족했지만 색상변경을 고려하지 않아서 색상변경 최소화의 관점에서는 좋은 시퀀스라 할 수 없다. 색상변경 최소화를 위해서는 같은 색상이 연속으로 시퀀스 되는 것이 좋다. <표 4>에서 11번부터 20번까지 시퀀스한 결과에서 색상은 차례로 A - A - B - C - B - A - B - A - A - A 로 색상변경 횟수가 6회였다(A - B - C - B - A - B - A). 그

러나 시퀀스 순서 13번째와 16번째의 위치를 변경하면 capacity constraint는 만족하면서 색상은 차례로 A - A - A - C - B - B - B - A - A - A가 되어 색상변경 횟수는 3회(A - C - B - A)로 변경 전보다 색상변경 횟수를 줄일 수 있다. 본 논문에서 구현하고자 하는 시퀀스 모듈은 차체, 도장, 조립공장에서 요구하는 모든 사항을 고려하여 시퀀스를 얻는 것이 목적이므로 전자보다 후자의 경우가 더 좋은 시퀀스라 할 수 있다.

### 3.3 모형화

#### 3.3.1 변수 정렬(Variable Ordering)

CST에서 변수의 선택순서는 가능해를 구하는 시간에 영향을 미친다. 시퀀스 모듈에서는 아직 차종이 시퀀스 되지 않은 변수부터 순서대로 선택하여 값을 정한다. 예를 들어 시퀀스 진행 단위가 10대이고 이미 확정된 시퀀스를 10대씩 고려하여 시퀀스를 진행한다면 시퀀스 모듈에서 고려되는 변수는 20개이고 가장 처음 선택될 변수는 11번째 변수부터 차종을 제약조건에 맞추어 확정시킨다.

#### 3.3.2 값 정렬(Value Ordering)

선택된 변수 인덱스에 값(차종)을 할당하는 방법도 해를 탐색하는 데 중요하다. 본 논문에서 소개하는 시퀀스 모듈에서는 다음과 같은 규칙들을 정의하여 적용하였다.

- 생산대상 차량 데이터에서 각 차종별로 아직 시퀀스가 확정되지 않는 차종 중에 가장 빠른 순서의 차종을 먼저 고려하여 시퀀스 한다(FIFO 지수). <표 4>에서 보면 1번 차종은 아직 시퀀스 되지 않은 순서 가운데 가장 빠른 순서가 11번째이고, 2번 차종은 17번째, 3번 차종은 13번째, 4번 차종은 18번째이다. 이를 오름차순으로 지수화하면 1번 차종은 1, 2번 차종은 3, 3번 차종은 2, 4번 차종은 4이다. 따라서 FIFO 조건을 고려하면 1, 3, 2, 4번 차종 순으로 선택하여 시퀀스하면 된다.
- 현재까지 확정된 시퀀스의 차종과 아직 시퀀스가 확정되지 않은 차종의 비율(시퀀스 참여율)을 계산하여 시퀀스에 반영되지 않은 차종이 되도록 먼저 시퀀스에 반영될 수 있도록 한다(시퀀스 참여율 지수). 이는 시퀀스에 특정 차종이 편중되어 시퀀스 되는 것을 방지하기 위함이다. <표 4>에서 보면 1번 차종은 총 9대 중에 아직 시퀀스에 반영되지 않은 대수가 4대이므로 아직 시퀀스에 반영되지 않은 비율이 4/9이고 2번 차종은 3/6, 3번 차종은 2/3, 4번 차종은 1/2이고 이를 내림차순으로 지수화하면 1번부터 4번 차종까지 차례로 3, 2, 1, 2이다. 따라서 시퀀스 참여율을 고려하면 3, 2, 4, 1 차종 순으로 선택하여 시퀀스에 반영한다.
- 각 옵션별 여유값을 계산하여 각 옵션을 필요로 하는 차종에서 가장 작은 여유값을 가지는 옵션을 차종별 선택 우선순위에 포함시켜 순위를 정한다(여유값 지수). 이는

critical 옵션을 먼저 고려함으로써 critical한 옵션의 capacity constraint를 가능하면 최대한 지키면서 시퀀스를 수행하기 위함이다. 여유값 계산은 식 (1)과 같다. 여유값이 0에 가까울수록 시퀀스에 우선적으로 반영해야 하는 옵션이며 만약 여유값이 음수이고 soft constraint이면 시퀀스 대상 차량대수만큼 제약 조건에 맞는 시퀀스를 생성할 수 없게 되므로 제약을 완화시켜 시퀀스를 진행해야 한다. 예를 들어 <표 4>에서 Sun Roof의 여유값은  $20 - 2((3+2) / 1) = 10$  이다. 마찬가지로 ABS의 여유값은 3.5이고, 시트 A형은 10이다. 각 차종이 갖는 옵션별 여유값 중에 여유값이 가장 작은 것을 반영하면 1번 차종은 ABS만 고려하므로 3.5이고, 마찬가지로 2번 차종은 10, 3번 차종은 10이며, 4번 차종은 Sun Roof와 ABS 옵션을 고려하므로 여유값이 작은 ABS의 여유값을 고려하여 3.5이다. 이를 1번 차종부터 4번 차종까지 오름차순으로 지수화하면 1, 4, 2, 3이 된다. 만약 여유값이 같을 경우는 옵션번호가 빠른 순으로 지수화하였다.

기호

- $n$ : 시퀀스 대상 차량대수
  - $m$ : 시퀀스에 고려하는 옵션 수
  - $k_i$ : 옵션  $i$ 를 갖는 차종대수
  - $p_i, q_i$ : 옵션  $i$ 의 제약
  - $s_i$ : 옵션  $i$ 의 여유값
- $$s_i = n - q_i(k_i/p_i), \forall i = 1 \dots m \quad (식 1)$$

위의 각 항목별 지수를 이용하여 Value Ordering 평가치(차종별 우선순위)를 구한다. Value Ordering 평가치를 구하는 방법은 식 (2)와 같다.

기호

- $F_j$ : FIFO 지수
  - $P_j$ : 시퀀스 참여율 지수
  - $S_j$ : 여유값 지수
  - $V_j$ : Value Ordering 평가치
- $$V_j = F_j * P_j * S_j, \forall j: \text{차종} \quad (식 2)$$

<표 5>는 앞의 예에서 각 항목별 지수를 이용하여 구한 Value Ordering 평가치 결과이다.

**표 5.** Value Ordering 지수

차종	1	2	3	4
FIFO 지수	1	3	2	4
시퀀스 참여율 지수	3	2	4	1
여유값 지수	1	4	2	3
Value ordering 평가치	3	24	16	12

3.3.3 색상 변경 최소화

시퀀스 엔진에서 각 옵션별 제약을 고려하여 시퀀스 진행 단위로 차종별 시퀀스가 결정되면 선행 시퀀스 확정 차량의 색상을 참조하여 색상이 변경되지 않게 색상이 같은 차종의 차량을 찾아 시퀀스를 확정한다. 만약 색상이 변경되어야 할 경우에는 같은 색상 그룹 내에서 시퀀스를 확정하고, 색상 그룹을 맞추지 못하면 색상을 변경하여 시퀀스를 확정한다.

<표 2>의 생산대상 데이터와 <표 3>의 각 옵션별 제약을 입력받아 본 논문에서 적용한 Variable Ordering, Value Ordering, 색상변경 최소화를 고려하여 시퀀스를 진행시킨 최종 결과는 <표 6>과 같다. <표 4>의 시퀀스 예제에서는 고려된 옵션별 제약은 만족되었지만 색상변경 최소화를 고려하지 못하여 색상변경 횟수가 6회(A-B-C-B-A-B-A)이다. 반면에 <표 6>의 최종 시퀀스 결과를 보면 고려된 옵션별 제약도 만족하면서 색상변경 횟수가 2회(A-B-C)로 <표 4>의 결과보다 색상변경 횟수가 상당히 감소하였다.

**표 6.** capacity constraint와 색상변경 최소화를 고려한 시퀀스 결과

시퀀스 순서	POB 번호	Sun Roof	ABS	시트 A형	색상	색상 그룹	차종
1	0990	0	1	0	C	2	1
2	0991	0	0	1	C	2	2
3	0992	0	1	0	B	1	1
4	0993	0	1	0	B	1	1
5	0994	0	0	1	A	1	2
6	0995	0	1	0	A	1	1
7	0996	0	1	0	A	1	1
8	0997	1	0	0	A	1	3
9	0998	0	0	1	A	1	2
10	0999	1	1	0	A	1	4
11	1001	0	1	0	A	1	1
12	1010	0	1	0	A	1	1
13	1004	0	0	1	A	1	2
14	1005	0	1	0	A	1	3
15	1009	0	1	0	A	1	2
16	1006	1	0	0	A	1	4
17	1008	0	0	1	B	1	1
18	1003	1	0	0	B	1	3
19	1002	0	0	1	B	1	2
20	1007	1	1	0	C	2	1

4. 시퀀스 모듈의 구현

<그림 3>은 시퀀스 모듈의 풀이 절차를 순서도로 나타낸 것이다.

① 제약 편집/시퀀스 방법 설정

시퀀스 방법은 FIFO 고려 여부, 도장변경 최소화 고려 여부, 도장변경 그룹 변경 최소화 고려 여부를 선택하여 시퀀스를 진행한다. 제약 편집은 데이터베이스에서 가져온 자료를 바탕으로 사용자가 시퀀스를 수행하기 전에 필요에 따라 제약 사항을 편집한다. 제약 사항에는 제약 고려 여부, 제약 조건(p/q) 변경, hard constraint 고려 여부 등을 수정할 수 있다.

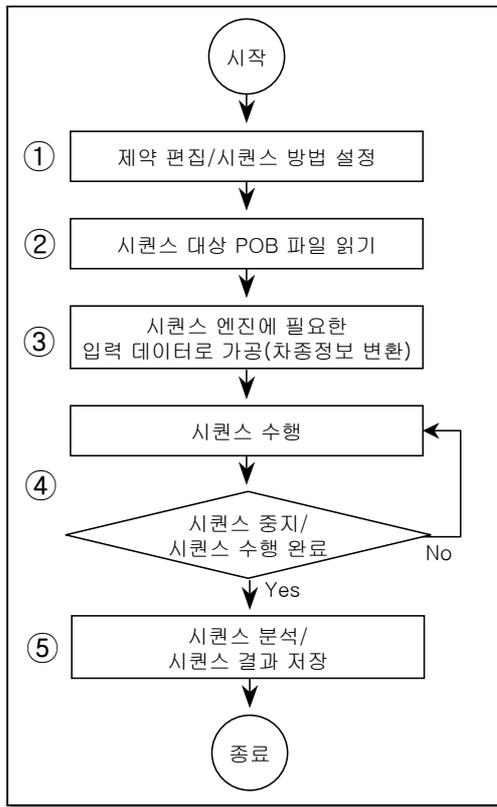


그림 3. 시퀀스 모듈 프로세스.

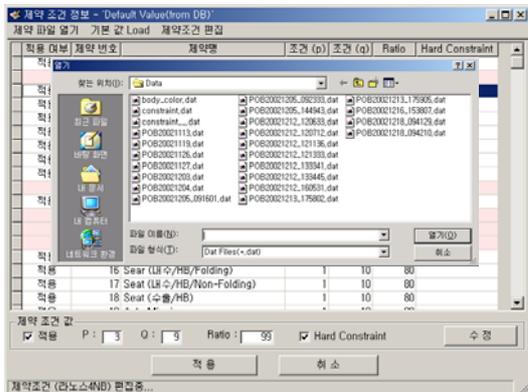


그림 4. 제약 조건 정보 화면.

<그림 4>는 제약 조건 정보 화면이다. 여기에서는 현재 진행할 시퀀스에서 각 해당 옵션의 적용 여부, capacity constraint,

hard constraint 여부를 편집할 수 있다. 제약 정보는 파일형태나 데이터베이스에서 읽어올 수 있다.

② 시퀀스 대상 POB 파일 읽기

시퀀스 모듈의 입력 데이터는 생산 데이터 가공에서 저장한 정보이다. 시퀀스 방법 설정에서 FIFO를 고려하여 시퀀스를 진행할 수도 있기 때문에 같은 후보 차량이라도 데이터베이스에서 가져온 자료를 생산계획 수립 시스템의 생산 데이터 가공 모듈에서 가공하기에 따라 다른 시퀀스 결과가 나올 수 있다.

③ 시퀀스 엔진에 필요한 입력 데이터로 가공(차종 정보 변환)

POB 파일은 단지 시퀀스 대상 차량에 대한 차량 정보를 가지고 있기 때문에 시퀀스 엔진에서 수행할 수 있는 정보로 변경해야 한다. POB 파일, 현재 제공 정보, 고려된 제약 조건을 고려하여 차종(configuration) 정보를 생성하여 시퀀스를 수행한다.

④ 시퀀스 수행 및 중지/완료

시퀀스를 수행하게 되면 ILOG Solver로 작성한 시퀀스 엔진에서는 ③번에서 가공한 차종 정보 데이터와 제약 조건을 기초로 사용자가 지정한 시퀀스 수행 단위만큼 시퀀스를 진행한다. 시퀀스 엔진은 soft constraint에 해당하는 옵션의 여유값을 확인하여 옵션별로 완화 조건에 해당하면 옵션 제약을 완화시키면서 시퀀스를 진행하고, 진행 정보는 시퀀스 수행 단위로 화면에 디스플레이 된다. 여유값과 완화 조건은 사용자가 조정할 수 있고 시퀀스 도중에 사용자에 의해 중지가 되거나 시퀀스가 완료될 때까지 시퀀스가 진행된다. 완료 조건은 대상 차량을 모두 시퀀스했거나 더 이상 고려한 제약을 만족하는 시퀀스를 만들지 못할 때이다.

<그림 5>는 시퀀스 실행 화면으로 시퀀스 화면은 시퀀스 진행 제어 관련 프레임(a), 시퀀스 진행 정보 표시 프레임(b), 시퀀스 진행 상황 표시 프레임(c), 시퀀스 요약 상황 프레임(d)으로 구분된다.

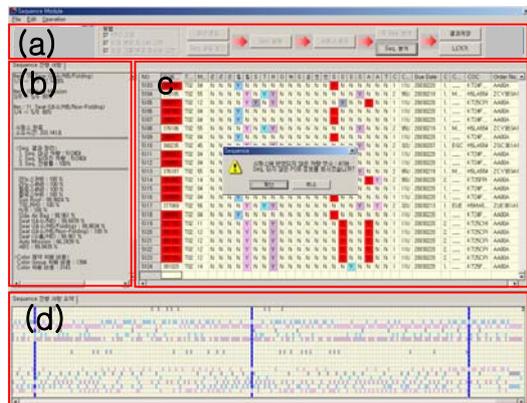


그림 5. 시퀀스 실행 화면.

(a)에서는 시퀀스 진행 방법을 설정하고 시퀀스 진행을 위한 버튼이 있는 부분이다. (b)에서는 시퀀스가 진행됨에 따라 시퀀스 엔진이 자동으로 수행하는 정보로서, 시퀀스 입력 데이터 분석, 시퀀스 진행 상황, 시퀀스 결과 분석 내용이 표시된다. (c)에서는 환경설정에서 지정한 시퀀스 진행 단위로 결정된 시퀀스 정보를 보여 주는 곳으로 차량의 세부 정보를 테이블 형식으로 보여 주고 시퀀스 분석 결과를 보여 준다. (d)에서는 시퀀스 진행 결과를 요약해서 보여주는 부분으로서, 시퀀스가 확정된 차량의 제약 조건을 보여준다.

##### ⑤ 시퀀스 분석/결과 저장

soft constraint의 경우에는 여유값을 확인하면서 만약 여유값이 음수가 되면, 옵션 제약을 완화해 가며 시퀀스가 진행되기 때문에 시퀀스가 진행됨에 따라 옵션 제약별로 최초 제약을 만족하지 못하는 구간이 나올 수 있다. 시퀀스 분석은 사용자가 이런 구간을 쉽게 볼 수 있도록 화면에 옵션별로 제약을 어긋 구간을 보여 주고 수치 정보도 제공한다. 시퀀스 결과는 시퀀스 순서대로 POB 번호가 저장되어 생산계획 수립 시스템에서 옵션별, 일별, 국가별 시퀀스 결과에 대해 다양하게 분석할 수 있고, 엑셀 파일로 저장하여 사용자가 엑셀에서 지원하는 기능을 사용하여 분석할 수도 있다.

## 5. 결론

자동차는 차체공장, 도장공장, 조립공장을 차례로 거쳐 생산된다. 차체공장과 조립공장은 옵션별 제약 조건을 만족하기 위해 제약 조건에 맞게 동일 옵션이 연속되지 않도록 분산시켜야 하며, 도장공장은 색상변경 비용을 줄이기 위해 동일 색상 차체의 연속생산을 선호하므로 생산순서 결정 시 서로 상충되는 점이 많다. 기존의 생산순서 결정 시스템은 생산 전 공장의 상반된 특징을 동시에 반영하지 못해서 각 공장에서 다음 공장으로 생산이 진행될 때마다 공장 특징별로 다시 시퀀스를 수립하여 최초 투입순서와 완성차 생산순서가 불일치하였다.

본 논문에서는 생산계획대로 투입된 차량이 차체, 도장, 조립공장의 각 공정을 차례로 거치면서 순서가 바뀌지 않도록 각 공장의 상반된 특성을 동시에 고려하여 시퀀스를 진행하였다. 따라서 전체 공장의 생산성을 높이고, 생산계획 단계에서 최종 완성차가 나오기까지 과정을 예측/관리하여 고객에게 약속한 날짜에 생산이 이루어지도록 할 수 있다. 이를 위하여 1개월 내외의 생산분량을 수분 내에 시퀀스할 수 있도록 ILOG Solver를 사용하여 시퀀스 모듈을 개발하였다.

자동차 생산계획 시스템의 시퀀스 모듈은 생산계획 시스템에서 가공한 생산 데이터를 입력받아 제약 조건을 고려하여

차종 데이터로 가공한 뒤 시퀀스 진행 단위별로 제약 조건을 최대한 만족시키면서 시퀀스를 진행한다. 시퀀스 모듈은 담당자가 다양한 생산조건을 고려하여 시퀀스를 할 수 있도록 하였고, 실제 자동차 공장에서 도입하여 생산 현장에 적용할 수 있도록 시퀀스 방법을 다양화하고 현장 요구에 맞게 시퀀스 엔진을 수정 보완하였다. 또한 자동화된 시퀀스 수립으로 시퀀스 시간을 크게 단축하고 정확한 현장 정보를 반영할 수 있다. 실제 20~25개의 옵션을 고려하여 5000여 대의 시퀀스를 수립했을 때 약 7.55분이 걸렸다. 또 주문에 대한 납기준수 여부 및 다양한 상황에 대한 시퀀스 결과를 신속하게 비교해볼 수 있기 때문에 기존의 시퀀스 수립 방식을 크게 개선할 수 있을 것으로 생각된다.

본 논문에서 개발한 시퀀스 모듈을 다른 지역의 공장에서도 사용할 수 있도록 공장마다 특정 상황을 고려할 수 있게 제약 고려 방법을 다양화하여 적용범위를 확대할 계획이다.

## 참고문헌

- Bergen, M. E., Beek, P. V. and Carchrae, T.(2001), Constraint-based Vehicle Assembly Line Sequencing, Lecture Notes in Computer Science, 2056, pp.88-99.
- Borrertt, J.E. and Tang, E.P.K.(2001), A Context for Constraint Satisfaction Problem Formulation Selection, Constraints, 6(4), pp.299-327.
- Choi, W. J., Park, H. K. and Shin, H. O.(1996), Automation of Real-time Production Sequencing System of an Automobile Assembly Line, IE Interface, 9(2), pp.47-59.
- Chase, T.(1998), Centralized Vhicle Scheduler An Application of Constraint Technology, <http://www.ilog.com/products/optimization/tech/research/cvs.pdf>.
- Choi, W. J.(1996), A Daily Production Sequencing system for the automobile assembly Plant, IE Interface, 9(2), pp.61-74.
- Hwang, H., Cha C. N., Sun, J.U., Hann, K.H., Moon, S.W., Lee, S. and Hong, S.P.(1996), Development of a Computer System for the Lot-sizing and Scheduling of the Side Frame Press Shop, IE Interface, 9(2), pp.3-17.
- ILOG Press Release(1997), ILOG drives productivity improvements at Chrysler, [www.ilog.com/success/chrysler/index.cfm](http://www.ilog.com/success/chrysler/index.cfm)
- Kim, K. D., Woo, S. B., and Hahn, H. S.(2001), A Study on the Erection Scheduling for Shipbuilding Considering Resource Constraints, IE Interface, 14(3), pp. 218-226.
- Kim, Y.M and Seo, Y.h.(1996) Grouping in a Mixed-model Assembly Line, IE Interface, 9(2), pp.39-45.
- Noh, S.D. and Kim, D.Y.(2002), Virtual Manufacturing for an Automotive Company(III)-Construction and Operation of a Virtual Paint Shop, IE Interface, 15(4), pp356-363.
- Park, H. K., Choi, W. J. and Shin, H. O.(1996), Automation of Color Selection System in the Automobile Painting Shop, IE Interface, 9(2), pp.19-37.
- Warwick, T. and Tsang, E. P. K.(1995), Tackling Car Sequencing Problems Using a Generic Genetic Algorithm Strategy, Evolutionary Computation, 3(3), pp. 267-298.



**하영훈**

단국대학교 산업공학과 학사  
한양대학교 산업공학과 석사  
현재: (주)인포미아 정보시스템연구소 주임  
연구원  
관심분야: SCM, 생산정보시스템



**한형상**

서울대학교 산업공학과 학사  
한국과학기술원 경영학과 석사  
Univ. of Wisconsin, Madison 산업공학과 박사  
현재: (주)인포미아 대표이사  
관심분야: 생산시스템공학, 시물레이션



**우상복**

서울대학교 산업공학과 학사  
서울대학교 산업공학과 석사  
서울대학교 산업공학과 박사  
현재: (주)인포미아 정보시스템연구소 수석  
연구원  
관심분야: 생산정보시스템, SCM, 스케줄링



**박영진**

한양대학교 기계설계학과 학사  
한양대학교 기계설계학과 석사  
한양대학교 기계설계학과 박사  
현재: GM DAEWOO Auto & Technology 생산기  
술연구소 차장  
관심분야: 생산시스템, 가상생산, PLM



**안현식**

서울대학교 기계설계학과 학사  
서울대학교 기계설계학과 석사  
현재: (주)인포미아 선임 연구원  
관심분야: 시물레이션, 제어, 가상현실