

엔진블럭 가공라인 초기설계안 검증을 위한 시뮬레이션 사례연구^{T*}

문덕희^T, 성재현^T, 조현일^T

A Case Study on the Verification of the Initial Layout of Engine Block Machining Line Using Simulation⁺

Dug Hee Moon, Jae Heon Sung, Hyun Il Cho

Abstract

The major components of an engine are engine block (or cylinder block), cylinder head, crank shaft, connecting rod and cam shaft. Thus the engine shop usually consists of six sub-lines, five machining lines and one assembly line. Flow line is the typical concept of layout for machining these parts, especially for engine block. In order to design an engine block machining line, several factors should be considered such as yearly production target, working hours, machines, tools, material handling equipments and so on.

If the designers of manufacturing line were unaware of some factors those would be influenced on the system performance, it would make greater problems in the phase of mass production. Therefore the initial design of engine block machining line should be verified carefully. Simulation is the most powerful tool for analyzing the initial layout.

This paper introduces the major factors those should be considered for designing the machining line and their effects on the system performance. 3D simulation models are developed with QUEST. Using the simulation model developed the initial layout is analyzed, and we suggest some ideas for improvement.

Key Words: Engine Block, Machining Line Design, Layout, Simulation

^T 이 논문은 2002년도 한국대학교육협의회 대학교수 국내교류 연구비 지원에 의한 것임.

* 본 논문은 한국 시뮬레이션 학회 2003년 춘계학술대회에서 발표한 내용을 수정, 보완한 것임.

** 창원대학교 산업시스템공학과

*** 통일중공업(주) 메카트로닉스기계기술연구소

1. 서론

새로운 공장을 건설하는 과정에서 기업들은 많은 대안들을 검토한다. 만일 공장의 건설 단계에서 충분한 사전검토를 하지 않는다면 향후 생산단계에서 문제점이 발견되었을 때 많은 비용을 들여서 설비교체 및 설비배치(Layout) 변경을 해야 한다. 따라서 공장을 신축할 경우 일반적인 설비계획 절차에 따라 제품설계, 공정설계, 용량설계를 거쳐 설비배치설계로 이어지게 된다(Tomkins et al. 1996).

예를 들어 가공라인을 새로이 설계하는 경우에는 생산품의 도면을 분석하여 필요한 가공·조립·검사장비, 공구, 치구는 물론 Loading/unloading 장치, 운반장비, 소요인력, 공정간 재공품저장공간(버퍼, Buffer) 등을 총체적으로 설계해야 한다. 이렇게 설계된 생산라인이 현장에 설치되어 시운전을 통한 검증이 완료되어야 비로소 설계자들은 임무를 완수했다고 할 것이다. 이 때 설계단계에서 시스템 설계의 오류가 존재한다면 설치 후 상당한 문제점을 야기하게 된다. 이러한 설계오류는 모든 주변 상황을 확정적으로 보고 설계를 하는 경우에 자주 발생한다.

생산라인을 설계하고 운영하는 과정에서 발생할지 모르는 변동요인들이 시스템에 어떠한 영향을 미치며, 최적의 시스템이 어느 것인지 분석하기 위한 가장 유용한 도구가 시물레이션이다. Ulgen 등(1992)은 자동차 차체 및 도장공정을 설계할 때 시물레이션을 이용하여 검토해야 할 사항을 4개의 적용단계와 4가지 적용대상으로 구분한 바 있다. 이 논문에서 적용단계는 개념설계단계(Conceptual Design Phase), 상세설계단계(Detailed Design Phase), 설치단계(Launching Phase), 운영단계(Fully Operational Phase)의 4단계로 구분하였다. 또한 적용대상은 장비와 배치(Equipment and Layout), 변동관리(Variation Management), 제품조합과 투입순서(Product Mix & Sequencing), 상세운영방법(Detailed Operational Issues)으

로 구분하였다.

특히 본 연구의 대상인 자동차 엔진 제조 공정과 관련된 선행연구에는 다음과 같은 것들이 있다. Jayaraman과 Agarwal(1996)은 자동차용 엔진을 가공하고 조립하는 대형 공장을 설계할 때 어떠한 방법으로 시물레이션을 할 것인가에 대한 방법론을 제시하였다. 엔진 공장을 모델링하기 위해서는 주요 부품 가공 라인별로 상세시물레이션(Micro Level Simulation) 모델을 먼저 구축해야 하며, 이를 바탕으로 전체시물레이션(Macro Simulation) 모델을 구축하는 방법을 제시하였다.

Jayaraman과 Gunal(1997)은 자동차 엔진 조립공정을 설계할 때 시물레이션을 이용하는 연구를 발표하였다. 이 연구에서는 엔진조립라인의 특성과 왜 시물레이션이 필요한 지에 대해 설명하였고, 엔진조립라인 검사공정의 버퍼 운영에 대한 시물레이션연구를 사례로 제시하였다. 이 시물레이션에서는 복수의 검사기계로 투입하기 위한 버퍼운영 정책과 버퍼의 크기에 대한 4가지 조합에 대해 비교·검토한 바 있다.

오필범 외 2인(2000)은 자동차 엔진블럭 가공라인 설계개선을 위한 시물레이션연구를 수행하였다. 이 논문에서는 가공공정내용, 가공시간, 공정별 설비대수, 전체공정을 담당하는 작업자수는 확정된 상태에서 시스템 효율에 영향을 줄 수 있는 요인으로 공구교체주기, 공정간 버퍼 크기, 고장수리시간 단축을 선택하였다. 공구교체주기 증가를 위하여 세 종류의 공구를 비교하였으며, 전체 공정의 버퍼 크기를 고정시킨 상태에서 버퍼를 각 공정에 배분하여 최적화시키는 실험을 하였다.

한편 엔진블럭 가공라인과 같은 흐름라인(Flow Line)의 설계과정에서 각 공정별 기계대수의 설정 못지 않게 중요한 사항의 하나는 버퍼의 용량을 결정하는 것이다. 흐름라인에서 재공품이 없다면 기계의 정지는 라인 전체의 정지로 이어지기 때문에 생산성이 저하된다. 반면에 현실적으로 재공품을 무한정 허용할 수도 없다. 이와 같이 공정간 적정 버퍼의 크

기를 결정하는 문제에 대해서는 많은 연구들이 발표된 바 있는데 Park(1993)의 연구에 잘 소개되고 있다. 버퍼크기 결정문제를 접근하는 방법으로는 대기행렬망이론, 동적계획법, 시뮬레이션을 이용한 탐색방법 등 다양한 방법들이 적용되고 있다. 특히 라인 전체의 버퍼크기가 결정되어 있는 경우 공정별로 버퍼를 분배하는 문제는 NP-hard 문제로 알려져 있으며, Huang et. al. (2002)의 논문에 잘 정리가 되어 있다. 그러나 각 공정들의 공정시간 분포, 고장분포 등 시스템 환경이 일관성이 없는 경우에는 수리적 모형에 의해 접근하는 방법은 한계가 있으며, 가장 쉽게 적용할 수 있는 방법은 버퍼크기를 일정량씩 증가시켜가면서 생산량이 가장 많이 증가되는 공정을 찾아 버퍼를 할당하는 방법이다. 물론 이 방법을 이용할 때 당면하는 문제는 계산횟수가 증가된다는 점이다.

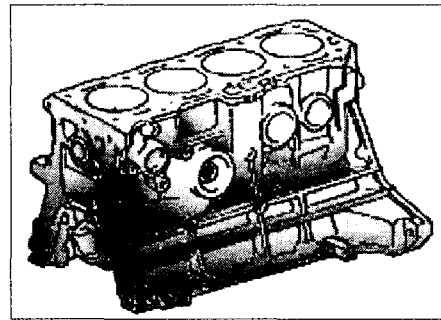
본 논문에서는 전형적인 흐름라인의 형태를 가지는 자동차용 엔진(실린더)블럭을 가공하는 가공라인을 설계할 경우 고려해야 할 요인들을 정리하고, 그 요인들이 시스템 성능에 미치는 영향을 시뮬레이션을 이용하여 분석한 사례를 소개하고자 한다. 따라서 2절에서는 엔진블럭 가공라인 설계 시 영향을 미치는 요인들의 상호 관련성에 대하여 검토하며, 3절에서는 사례에 대한 시뮬레이션 모델 및 분석결과에 대해 설명하도록 한다.

2. 엔진블럭 가공라인 설계와 시뮬레이션

자동차용 엔진은 크게 Cam Shaft, Crank Shaft, Cylinder Block(일반적으로 Engine Block이라 한다), Cylinder Head, Connecting Rod 등으로 구성이 된다. 따라서 일반적으로 엔진공장은 5개의 부품 가공라인과 1개의 조립라인 등 6개의 라인으로 구성되어 있다. 특히 승용차 엔진의 경우 일반적으로 연간 10만대 이상을 생산하는 대량생산시스템이기 때문에 가공라인의 배치는 전형적인 흐름라인 방

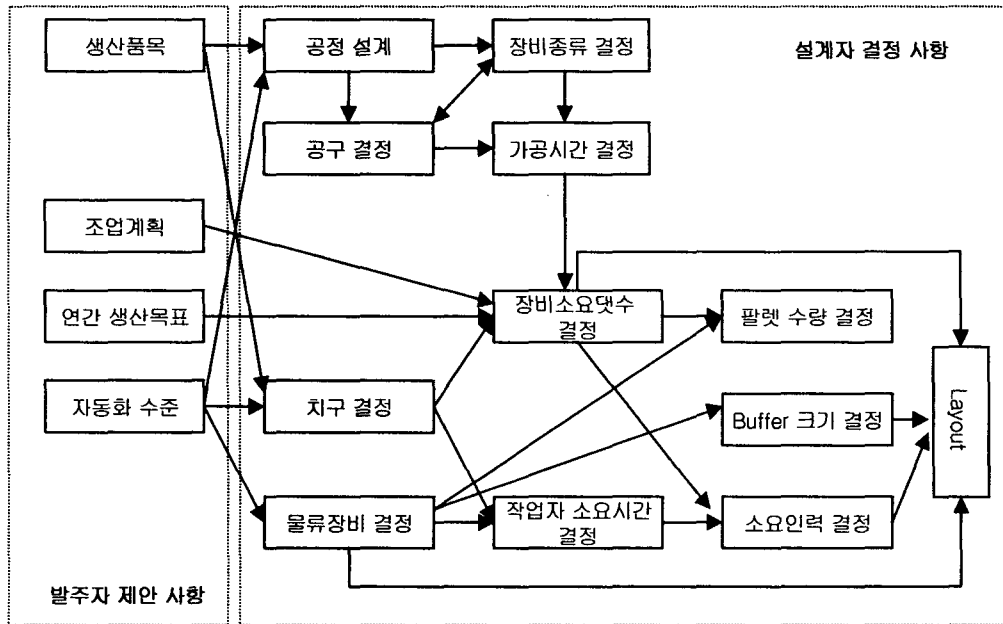
식을 채택하고 있다.

엔진블럭 가공라인은 크게 가공공정, 조립공정, 세척공정, 검사공정, 측정공정으로 구성된다. 주조된 제품이 라인에 투입되면 여러 단계의 가공공정을 거치고, 배어링캡 등 관련부품을 조립한 후 다시 가공공정을 거친다. 마지막으로 누유검사(Leak Test), 세척을 하고, 실린더 내경 등을 측정하여 공차 범위에 따라 구분을 하는 마킹(Marking)작업을 수행한 후 엔진 조립라인으로 보내진다. 하지만 이러한 공정순서들은 회사에 따라 약간의 차이가 있으며, 이것이 그 회사의 설계능력이라 할 수 있다. 다만 대부분의 회사에서 흐름라인이라는 틀은 유지하고 있다.



<그림 1> 엔진블럭의 예

<그림 1>은 특정 자동차의 엔진블럭을 보여주고 있다. 이러한 엔진블럭 생산라인을 설계하기 위해서는 Ulgen 등(1992)이 제시했던 바와 같이 개념설계단계(Conceptual Design Phase), 상세설계단계(Detailed Design Phase), 설치단계(Launching Phase), 운영단계(Fully Operational Phase)의 4단계 접근방법을 사용하는 것이 효과적이다. 이 중에서 생산라인을 처음 설계할 때에는 개념설계단계와 상세설계단계가 집중적으로 검토되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 <그림 2>에 있는 것과 같이 개발이 완료된 제품을 생산하기 위한 개념설계단계와 상세설계단계에서 설계자가 검토하고 결정해야 할 사항들과 상호 관련성을 먼저



<그림 2> 개념설계단계와 상세설계단계의 결정사항 관련도

설명하고자 한다.

2.1 사용자 요구사항이 설계에 미치는 영향

개념설계단계에서 중요한 역할을 하는 입력사항은 생산품목, 연간 생산목표량, 조업계획, 자동화 수준 등과 같은 사용자의 기본요구사항이다. 물론 이 이외에도 사용자가 생각하는 초기투자비의 규모도 설계에 중요한 역할을 한다.

☒ 생산품목

어떠한 제품을 생산할 것인지에 대한 요구사항은 가장 기본적인 정보이다. 특히 한 생산라인에서 한 종류의 제품만을 생산할 것인지 아니면 두 종류 이상의 제품을 생산할 것인지는 라인의 유연성(Flexibility)을 결정하는 사항이기 때문에 설계에서 가장 먼저 고려해야 한다. 엔진블럭 가공라인의 경우 대부분의 회사들이 전용라인방식을 채택하고 있으나 일부 회사에서는 혼용라인을 사용하기도 한다. 하지

만 혼용라인을 채택하는 경우는 유사한 엔진을 생산하는 경우에 제한적으로 사용한다. 예를 들어 3기통과 4기통 엔진처럼 기본 개념이 다른 경우에는 혼용라인 보다는 차라리 두 개의 전용라인을 별도로 설치하는 것이 일반적이다.

☒ 연간 생산 목표량

연간 생산목표량은 공정설계와 장비소요대수를 결정하는데 직접적인 영향을 미친다. 생산목표량이 충분하지 못하면 전용장비보다는 범용장비를 위주로 설계를 해야 한다. 또한 검사장비나 조립장비 같은 특정한 장비는 가동률이 저하되기 때문에 경제성도 결여되게 된다.

☒ 자동화 수준

자동화 수준도 개념설계의 중요한 변수로 특히 인건비의 수준에 따라서 발주자의 요구가 달라진다. 즉 인건비가 저렴한 국가의 업체에서는 자동화 수준을 낮게 요구하지만 인건

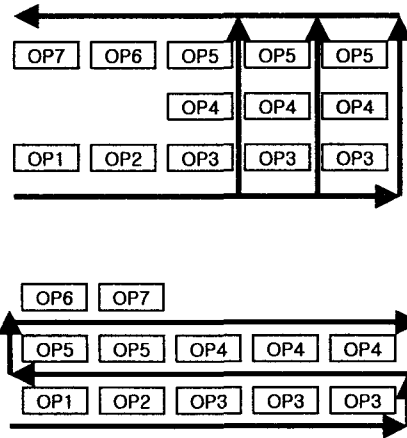
비가 비싼 국가의 업체에서는 고도의 자동화 수준을 요구하고 있기 때문이다. 엔진블럭 가공라인에 소요되는 가공장비들은 대부분 NC 장비를 사용하기 때문에 설계자가 결정해야 하는 자동화 수준은 APC(Automatic Pallet Change)와 같은 Loading/Unloading 장치의 도입여부, ATC(Automatic Tool Change)의 도입여부, 공구매거진(Tool Magazine)의 크기, 컨베이어, Gantry Loader, 무인운반차(AGV) 등 자동화된 물류장비의 도입여부, 자동창고 등 자동화 저장설비의 도입여부, 운영관리시스템의 자동화 등이다.

2.2 상세 설계단계의 결정사항

상세설계단계에서는 공정 설계 및 소요시간 산출, 공정별 소요장비 결정, 장비별 소요대수 산정, 치공구 결정, 물류장비의 결정, 버퍼 크기 및 팔레트 소요량 산정을 통하여 최종적으로 배치안(Layout)을 결정하는 작업을 수행한다. 아울러 전체 라인을 몇 명의 작업자가 담당하도록 할 것인지도 결정해야 한다.

일반적으로 생산제품이 결정되고 제품설계가 완료되면 공정설계가 이루어진다. 이때는 공정을 수행할 장비의 특성과 사용할 공구의 특성을 고려하여 공정시간을 산출한다. 이 과정에서 몇 개의 요소공정을 묶어서 하나의 장비에서 수행할 지를 결정한다 (장비 한 대에서 수행되는 요소공정들을 묶어서 단위공정이라 하자). 이 단계에서 중요한 결정사항은 어떠한 형태의 병렬라인 구조를 사용하는가에 대한 것이다. 일부업체에서는 단위공정별 병렬라인을 이용하기도 하며, 다른 업체에서는 단위공장 몇 개를 직렬라인으로 설계한 후 이러한 직렬라인을 병렬로 설치하는 방법을 사용하기도 한다. <그림 3>은 병렬공정을 배치하는 방법들인데 국내 A사에서는 첫 번째 유형으로, B사에서는 두 번째 유형으로 설계를 하고 있다. 첫 번째 방법은 물류장비 통제의 용이성 및 운반거리 단축 등 장점이 있는 반면

에 두 번째 방법은 각 공정별로 장비의 대수가 달라도 된다는 장점이 있다. 또한 장비 고장이 발생할 경우의 대응 유연성도 높다고 하겠다.



<그림 3> 병렬공정 편성방법의 예

이와 같이 라인 편성의 기본 개념이 정립되고 요소공정과 단위공정의 설계가 끝나면 단위공정별 장비의 소요대수를 산정하고, 장비사이를 연결해 줄 물류장비를 결정한다. 물론 이 과정에서 설계자들은 각 장비의 고장주기 및 수리시간, 공구교체 주기 및 공구교체시간, 기종변경주기 및 소요시간 등 설비의 비가동 요인에 대한 자료를 이용하여 소요대수를 결정한다. 그러나 많은 경우에 있어서 이러한 자료들을 확정적으로 처리하여 설계에 반영하고 있다. 하지만 실제로 이러한 요인들은 확률적인 변동요인들이다. 이러한 각종 변동요인들 때문에 초기설계안대로 라인을 설치하고 나면 예상하지 못하였던 문제점들이 발생하게 된다. 특히 위에서 언급한 변동요인들은 물류장비 및 제품저장공간(버퍼)의 규모 결정에 지대한 영향을 미친다. 따라서 초기 설계안이 결정되면 라인의 균형과 적정 설비대수를 확인하기 위한 시뮬레이션을 수행한다.

2.3 초기설계안의 검토내용

초기설계안이 마련되면 설계자들은 과연 설계안대로 생산이 진행될 수 있을 지 알고 싶어한다. 따라서 시뮬레이션을 이용하여 분석하는 주요 내용들은 다음과 같다.

- 생산량 : 일반적으로 Throughput이라 하며 일정 기간동안 생산을 하는 능력으로 정의되고 있다.
- 투입/산출비율 : 흐름라인의 경우 생산량 못지 않게 중요한 척도는 라인에 투입한 수량과 산출된 수량(불량품포함)의 비율이다. 이 척도는 라인이 막힘이 없이 정상적으로 진행이 되는지에 대한 평가척도로서 정상적으로 공정흐름이 유지된다면 투입/산출비율은 100%에 근접해야 한다.
- 장비 가동률
- 애로공정
- 공정간 버퍼의 크기
- 물류장비의 대수 및 기계적 특성
- 적정 팔레트 수량 : 엔진블럭 가공라인에서 특히 측정(Measuring) 공정 같은 경우는 기준점 문제 때문에 특수하게 제작된 팔레트에 블록이 놓여진 채로 공정이 진행된다. 따라서 이런 경우에 적정 팔레트 수량을 얼마로 할 것인지도 관심의 대상이다.

3. 사례연구

3.1 시스템의 개요

국내 공작기계 제조업체인 A사에서는 외국에 설치할 엔진블럭 가공라인을 설계하였다. 본 사례는 엔진블럭 가공라인 초기설계안을 시뮬레이션을 이용하여 검증한 사례로서, 이 라인은 1,500cc급 승용차 엔진을 연간 10만개 생산하는 것을 설계 목표로 하고 있다. 보통 소형 자동차 엔진라인을 설계할 때는 연간 20만개에서 30만개 생산규모로 전용장비,

Loading/ Unloading 장치 및 물류장치 등 자동화 수준을 매우 높게 설정하여 설계에 반영하지만, 본 사례의 경우는 의뢰국가의 고용창출이라는 정부정책에 따라 머시닝센터(양산용 Vertical & Horizontal Machining Center)를 많이 사용하여 작업자 수를 늘리고, 물류 등의 자동화 수준도 최소로 설정하여 설계에 반영하였다. 사용자가 요구한 주요 설계목표는 아래 <표 1>과 같다.

<표 1> 사용자 설계요구사항

요구사항	기준	비고
연간생산목표량	10만대	
연간조업일수	260일	
1일 작업시간	16시간	8시간 2교대
자동화수준	최소	특히 물류장비
작업자	기계당 1명 이상	정부고용정책
공장부지규모	가로 120m 이내	
재공품 저장 정책	별도의 재공품 저장창고 설치 최소화	

<표 2>는 개략적인 엔진블럭 제조공정도인데 크게 26개의 공정으로 편성을 하였다. 각 공정들에는 1대 혹은 그 이상의 기계들이 병렬라인으로 구성되어 있다. 각 공정별 가공/조립시간은 해당 업체의 사정에 의하여 상세한 자료를 밝히지 못하지만 <표 2>에 있는 것과 같다.

3.2 상세설계 단계의 주요 전제조건

상세설계 단계에서 반영한 주요 사항은 다음과 같다.

- 각 기계별로 작업자를 1명씩 배치
- 전체 라인 가동률을 80% 정도로 설정하여 공정별 소요시간(Cycle Time) 결정 (Tact Time을 1.99분으로 예상)
- 범용장비에는 20 혹은 24개의 ATC 장착
- Loading/Unloading 을 위해서는 기계별로 단일 팔레트 방식 적용

<표 2> 엔진블럭 제조공정 설계안

공정 번호	공정내용	설비명	설비갯수	공정 CT (min)
05	Locate Face Milling	전용기 1	1	1.xx
10	Fan Face Milling	전용기 2	1	1.xx
20	Hole Drilling & Reaming	범용기 1	1	1.xx
30	Fr. Rr Face Milling	전용기 3	1	1.xx
40	Cyliner Bore Boring	전용기 4	1	1.xx
50	Half Round Rough Milling	범용기 2	1	1.xx
60	Journal Cap Milling	전용기 5	1	1.xx
70	Oil Fan Face Machining	범용기 2	3	4.xx
80	Top Face Hole Machining	범용기 2	6	10.xx
90	Rr Hole Machining	범용기 1	4	7.xx
100	Fr Hole Machining	범용기 1	6	10.xx
110	Rr Hole Machining	범용기 1	2	2.xx
120	LH RH Hole Machining	범용기 1	3	5.xx
130	Inclined Plane Hole Machining	범용기 1	2	3.xx
140	Washing	전용기 6	1	1.xx
150	Assemble (Manual)	전용기 7	1	1.xx
160	Rough Line Boring	전용기 8	1	1.xx
170	Line Boring	전용기 9	1	1.xx
180	3-Way Finish Milling	전용기 10	1	1.xx
190	Cyl Bore Finish Boring	전용기 11	1	1.xx
200	Honing	전용기 12	1	1.xx
210	measure & Marking	전용기 13	1	1.xx
220	washing	전용기 14	1	1.xx
230	Assemble(Manual)	전용기 15	1	1.xx
240	Leak Test	전용기 16	1	1.xx
250	Final Inspect	작업자	1	1.xx

- 롤러 컨베이어와 컨베이어라인 끝 부분에 Auto Pusher장치를 장착하여 물류이동 수단으로 사용
- 별도의 저장장치를 사용하기보다 공정간 컨베이어 길이를 저장장치로 활용하였으며, 물류의 원활한 흐름을 위해 반송컨베이어를 적절히 설치

3.3 시뮬레이션 모델의 입력자료

엔진블럭 가공라인 기초 설계안 검증을 위한 시뮬레이션 모델의 입출력 자료는 다음과 같다.

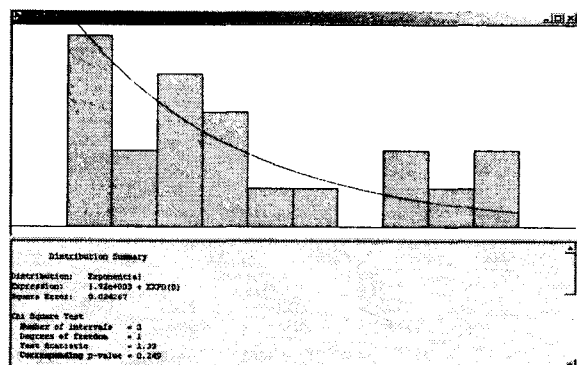
- 조업계획
- 공정도 및 공정별 소요시간(Cycle time)
 - 장비별 Loading/unloading 시간
- 배치안 도면
- 제조장비 리스트 및 소요 대수
- 각 장비의 비가동 원인별 주기 및 소요시간
 - 고장주기 및 수리시간
 - 공구교체 주기 및 교환시간
 - 미소정지 주기 및 복구시간
- 컨베이어의 종류 및 속도, 길이
- 공정별 불량률 등

☒ 장비 고장주기 및 수리시간

대상 라인에는 범용장비(머시닝센터) 2종류와 전용장비 16종류가 설치될 계획이다. 범용장비의 경우 과거의 고장 관련자료를 이용하여 고장주기와 수리시간의 분포를 추정하였으며, 전용장비의 경우 다른 회사 유사장비의 고장 이력을 참고로 하여 설정하였다.

<표 3> ARENA의 Input Analyzer를 이용한 범용장비 고장주기의 최적분포

기계	MTTF	Squared error	Chi Test
범용 장비 1	1.92e+003 + EXPO(2.98e+004)	0.024267	p-value = 0.249
범용 장비 2	1.92e+003 + EXPO(1.6e+004)	0.032727	p-value > 0.15



<그림 4> 범용장비 1의 분포예측화면

☒ 공구교체 주기 및 교체시간

공구의 교체는 공구가 마모되어 공구수명이 다 되었거나, 공구의 파손에 의해 발생한다. 본 사례에서는 공구의 파손은 고장으로 간주하여 미소정지 시간에 포함시켰으며 공구수명에 따라 교체시간을 추정하였다. 새로운 라인을 설계하는 경우에 공구의 수명을 정확히 예측하는 일은 어려운 일이다. 따라서 공구교체주기 및 공구교체 시간 추정을 위해 통상적 경험과 유사공정의 경험치를 참조하였다. 일반적으로 Insert Tip을 사용하는 공구는 Tip의 날(Edge) 한 개당 15분 정도 연속 가공되며, 드릴 및 엔드밀과 같은 공구류는 20분, 텡공구는 13분, 브로치공구는 60분, 호닝공구는 80분으로 알려져 있다.

공구교체의 방법은 공구를 장비의 스피들에 하나씩 수동으로 교체하는 개별교체방법과, 공구 매거진(Magazine)에 보관되어있는 공구를 한꺼번에 교체하는 세트교체방법 등 두 가지가 있다. 개별교체방법은 특수(전용)장비에서 사용되는데 공구대차에 종류별로 몇 개씩 보관하였다가 작업자가 직접 교환해야 하므로 교체주기가 짧다. 반면에 세트교체방법은 공구 매거진이 장착된 머시닝센터에서 사용되어진다. 이 방법은 머시닝센터의 공구매거진에 공구를 일정량 보관해 두었다가 ATC를 이용하여 매거진에 보관된 공구가 모두 마모되면 장비를 정지시킨 뒤 일괄교체를 하는 방법이다. 장비별 공구교체평균시간은 아래와 같은 방법으로 추정하였다. <표 4>는 개별교체와 세트교체의 공구교체주기를 계산한 예다. 여기서 단위공정 #05는 전용장비로 개별교체방식을 취하며, 단위공정 #20은 공구매거진 용량이 24개인 범용장비를 사용한다. 각 공정에서 공정소요시간(CT)와 공구별 가공시간의 합이 차이가 나는 것은 공정소요시간에 공구이송 등의 부대 시간이 포함되어 있기 때문이다.

• 공구수명당 가공수량 = 각 공구의 수명 ÷ CT당 해당공구사용시간 (1)

- 공구당 가용시간(기계가동시간 기준)
= 각 공정의 CT × (1) (2)
- 공구당 예상 소요량
= 해당장비의 공구중 가용시간이 가장 긴 것 ÷ (2) (3)
- 공구교환 주기 = 해당장비의 공구중 가용시간이 가장 긴 것 × 공구매거진용량 ÷ (3)의 합계 (4)

공구교체 시간은 하나의 공구를 교체하는데 평균 15초 정도 소요된다. 새로운 공구를 장비에 장착시킨 뒤에 공구 Offset 값을 변경시켜주는 작업시간은 공구 한 개당 평균 10초로 추정하였다. 따라서, 머시닝센터일 경우 공구 매거진에 공구를 교체하는 시간이 300초~360초이고, 장비의 컨트롤러에 공구 Offset 값을 변경시켜주는 작업시간은 공구 한 개당 10초이므로 20개의 공구매거진이 있는 머시닝센터는 500초, 24개의 경우 600초로 추정하였다. 특수(전용)장비의 경우는 개당 25초로 추정하였다.

<표 4> 공구교체주기 및 교체시간 평균계산 (단위:분)

공정 (CT)	공구	가공시간	(식1)	(식2)	(식3)	(식4)	교체시간
#05 (1.8)	1	1.0	15.0	27.0	2.5	19.3	0.416
	2	0.4	37.5	67.5	1.0		
	합계	1.4			3.5		
#20 (1.32)	1	0.2	100.0	132.0	1.0	792.0	10
	2	0.3	66.7	88.0	1.5		
	3	0.3	66.7	88.0	1.5		
	합계	0.8			4.0		

☒ 미소정지 주기 및 교체시간

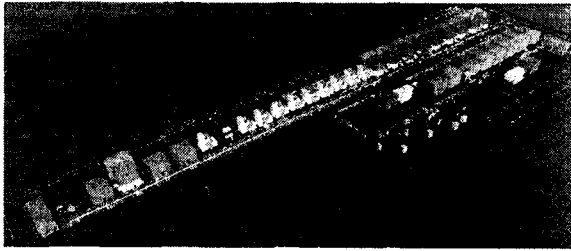
미소정지는 작업자가 5분 이내에 조치할 수 있는 간단한 고장 및 기계정지를 의미하는데 가공공장의 경우 전체 가동을 중 미소정지로 인한 손실은 2%~3%로 추정하는 것이 관례이다. 따라서 공정별로 평균 120분~192분의 지수분포로 주기를 설정하였으며, 복구시간은 공정별로 평균 3.5분~3.84분의 지수분포로 설정하였다.

☒ 불량률

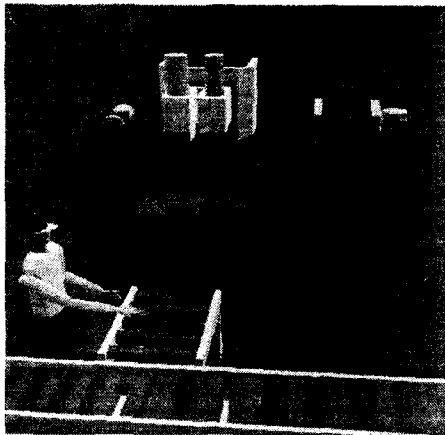
사례의 엔진가공라인과 유사한 가공라인의 경험치를 참고하여 수리 및 재사용이 곤란한 공정에서만 불량률이 발생하는 것으로 설정하였는데 누유검사 공정에서 4%, 최종검사 공정에서 1% 불량률이 발생하는 것으로 설정하였다.

3.4 시뮬레이션 모델링

시뮬레이션 모델은 QUEST를 이용하여 3차원으로 개발하였다. 가공장비 및 컨베이어는 CATIA와 Factory CAD를 이용하여 각각 작성한 후 WRL 형식으로 변환시켜 QUEST에서 사용하였다. <그림 5>는 개발된 전체 시스템의 3D 모델 화면이며, <그림 6>은 단위공정 #190의 작업장 화면이다.



<그림 5> 엔진블럭 가공라인 시뮬레이션 모델



<그림 6> 공정 190 모델 화면

3.5 시나리오 및 실험 결과

시스템이 정상적으로 작동하는 지에 대한 검증은 두 가지 측면에서 보았다. 첫 번째는 양품 목표생산량인 100,000대를 생산할 수 있는 가이며, 두 번째는 투입/산출비율이 100%에 접근하는 가이다. 목표생산량을 달성하더라도 투입/산출비율이 100%에 미치지 못한다면 결과적으로 재공품재고가 쌓인다는 의미다. 따라서 투입시간 간격(Tact Time)을 늘여도 목표달성에는 큰 문제가 없다고 볼 수 있다.

시스템의 최적화는 적정 투입시간간격과 공정간 버퍼의 적정수량을 찾아내는 것이다. 특히 발주자의 설계요구사항이 자동창고와 같은 별도의 저장공간을 설치하지 않는 것이므로 공장 사이를 연결하는 컨베이어 길이가 버퍼용량이 된다. 따라서 버퍼용량을 증가시킬 때도 기존의 장비 설치 간격을 늘이지 않으면서 컨베이어를 우회시킬 수 있는 범위 내에서 컨베이어 길이를 증가시켜야하는 제약이 있다.

따라서 최종안을 찾아내기 위하여 많은 실험을 수행하였으며, 의미가 있는 실험을 단계별로 정리한 것이 [표 6]에 있다. 각 실험은 1년간 10회 반복하였으며, Warm up period는 6일로 하였다.

☒ 1단계 (기본안)

당초 설계안에서 제시한대로 소재 투입시간 간격을 1.99분으로 정의하였다. 또한 각 공정별 버퍼크기를 무한대로 두고 시뮬레이션을 수행하였다. 실험 결과 평균 92.8%의 투입/산출비율을 보였다. 이 의미는 100개중에 7개는 재공품으로 계속 쌓여간다는 의미이기 때문에 투입시간 간격을 늘여 불필요한 재공품이 쌓이는 것을 방지할 필요가 있다.

☒ 2단계 (비교 1안, 2안)

투입/산출비율을 증가시키기 위하여 소재 투입시간 간격을 2.27분으로 연장하였다. 그 결과 평균 99.5%의 투입/산출비율을 보였으며,

양품의 수량도 당초 계획대로 연간 10만대 이상 생산이 가능하였다(비교 1안). 하지만 이 경우에 일부 공정의 버퍼의 평균 재고량이 적게는 10개부터 많게는 170여 개까지 쌓이는 경우가 있었다. 따라서 투입공정의 버퍼만 무한대로 설정하고 나머지 공정간에는 실제 컨베이어 길이에 의하여 버퍼용량을 제한하고 실험을 하였다(비교 2안). 그 결과 투입/산출 비율이 5% 정도 떨어졌으며, 생산량도 10만대에 미달하여 추가로 버퍼를 설치해야 할 필요성이 제기되었다. 이 때 투입/산출비율 감소분 5%의 대부분은 투입공정에 쌓여 있었는데 그 이유는 후속공정의 버퍼 용량이 다 찰 경우 선형 공정이 중단되는(Blocking) 현상이 연쇄적으로 발생하여 투입공정에서 첫 번째 공정으로 제품이 투입되지 못하기 때문이라 하겠다.

<표 5> 시나리오와 실험결과

	투입시간 간격	공정간 Buffer	장비 대수	투입/산출 비율	양품 생산량
기본안	1.99분	무한대	원안	92.8%	110,598
비교 1안	2.27분	무한대	원안	99.5%	103,990
비교 2안	2.27분	제한	원안	94.5%	98,758
비교 3안	2.27분	무한대	(-1,-1)	99.4%	103,906
비교 4안	2.27분	제한	(-1,-1)	94.1%	98,379
비교 5안	2.27분	제한	(-1, 0)	94.5%	98,754
비교 6안	2.27분	제한	(0,-1)	94.3%	98,620
비교 7안	2.27분	제한 + a	(-1, 0)	95.7%	100,019
비교 8안	2.27분	제한 + a	(0,-1)	95.7%	100,073
비교 9안	2.33분	제한 + b	(-1,-1)	99.1%	100,926

a : 공정 (30번,40번,130번,140번,200번,230번)에 버퍼를 각각 (10개,30개,10개,20개,10개,30개) 추가

b : a 이외에 단일기계로 구성된 13개 공정에 버퍼를 10개씩 추가 (표 7 참조)

☒ 3단계 (비교 3안, 4안, 5안, 6안)

3단계에서는 소재투입시간을 당초 1.99분에서 2.27분으로 증가시킴에 따라 80번 공정과 100번 공정에 각각 6대씩 병렬기계가 설치되었던 것을 각각 1대씩 줄여 5대로 하는 타당성 검토를 하였다. 그 결과 버퍼의 크기를 무

한대로 두었을 때(비교 3안)에는 각각 6대를 설치하였을 때(비교 1안)와 차이가 없었다. 또한 버퍼를 제한한 경우(초기 설계안의 컨베이어 길이로 제한)에도 6대를 운영한 경우(비교 2안)나 두 공정에서 각각 1대씩 2대를 동시에 삭감한 경우(비교 4안)에 기계 감소에 의한 차이는 없었다. 하지만 버퍼를 제한하였을 때는 생산목표량을 달성하지 못하였다.

따라서 이 단계에서 장비대수를 많게는 2대, 적게는 1대를 줄일 수 있다는 판단을 하였으며, 어느 기계가 시스템 성능에 더 영향을 미치는 지 알아보기 위하여 80번 공정의 기계와 100번 공정의 기계를 1대씩만 줄이는 실험을 하였다(비교 5안, 비교 6안). <표 6>에 제시된 바와 같이 비교안 4, 5, 6 사이에 유의차가 있는지 t-검정을 수행한 결과 투입/산출비율이나 양품생산량 모두 통계적으로 유의차가 없는 것으로 판명되었다. 하지만 기계 1대를 줄이는 것이 2대를 동시에 줄이는 것보다 생산량이 조금 늘어난다는 것은 직관적으로 볼 때 자명한 일이라 하겠다.

<표 6> 유한 버퍼 상황에서 기계대수를 삭감한 경우 t검정 결과 (p-value)

투입/산출비율	비교4안	비교5안	비교6안
양품생산량			
비교4안		0.145695	0.253682
비교5안	0.150725		0.358944
비교6안	0.237344	0.383455	

☒ 4단계 (비교 7안, 8안)

80번과 100번 공정 기계를 별도로 6대에서 5대로 감소시킨 상황 하에서 몇몇 공정의 버퍼를 증가시켜 생산목표량 10만대를 달성할 수 있는 방안을 강구해 보기로 하였다. 이를 위하여 버퍼를 무한대로 했을 때 비교적 재공품이 많이 쌓이는 6공정(30번, 40번, 130번, 140번, 200번, 230번 공정)을 선택하여 버퍼를 각각 10개씩 증가시키며 시스템 효율에 미치

는 영향을 살펴보았다. 그 결과 6개 공정에 각각 (10, 30, 10, 20, 10, 30) 등 총 110개의 버퍼를 추가한 상태에서 공정 80번의 기계만 감소시킨 경우 (비교 7안), 공정 100번의 기계만 1대 감소시킨 경우(비교 8안) 모두 생산목표량을 달성하였다. 하지만 시스템의 안정상태를 평가할 수 있는 투입/산출비율은 95.7%로서 목표치에 도달하지 못하였다.

㉠ 5단계 (비교 9안)

이 상태에서 투입/산출비율을 증가시키는 방법은 투입시간간격(Tact Time)을 증가시키는 것이다. 하지만 투입시간간격을 증가시키면 투입량이 줄어들기 때문에 양품생산량도 줄어들어 생산목표량을 달성하지 못한다. 따라서 버퍼 용량을 더 늘이던지 아니면 기계를 1대만 감소시키던지 두 방법 중 한 가지를 선택해야 한다. 이 문제를 해결하기 위해 기계를 2대 삭감한 상태에서 기계가 1대만 있는 13개 공정 (공정 5, 10, 20, 50, 60, 150, 160, 170, 180, 190, 210, 220, 250)에 각각 10개씩 추가로 버퍼를 할당하고, 투입시간간격을 2.33분으로 증가시켰다(비교 9안). 그 결과 투입/산출 비율도 99.1%로 증가하였으며, 양품생산량도 100,926개로 오히려 증가하여 시스템이 안정상태에 도달하였음을 확인할 수 있었다.

이러한 탐색 방법으로 설계목표를 달성하면서 시스템을 안정상태로 유지할 수 있는 방안을 도출하였다. 그 결과 버퍼는 240개를 추가로 설치해야 하는 반면에 장비를 2대 절감할 수 있었다. 버퍼의 크기를 증가시키기 위해서는 컨베이어의 길이를 증가시켜야 한다. 하지만 공정간 버퍼의 증가가 10개 정도이므로 기계 사이에 우회컨베이어를 설치하면 기계사이의 간격을 늘이지 않고서도 해결할 수 있었다. 또한 버퍼를 30개씩 늘인 40번 공정과 230번 공정에는 기계의 특성상 컨베이어를 추가 설치할 수 있는 충분한 공간이 있어서 큰 문제가 되지 않았다. 중요 대안에 대한 버퍼용량

은 <표 7>에 제시된 바와 같다.

<표 7> 공정간 버퍼 용량 및 재공품 현황

재공품위치	비교 1안 평균 재공품	비교 4안		비교 9안	
		버퍼 용량	평균 재공품	버퍼 용량	평균 재공품
소재생성-05	12.72	무한대	3402.59	무한대	288.97
05-10	7.42	11	3.81	11+10	7.09
10-20	2.27	11	3.60	11+10	7.44
20-30	8.67	11	5.01	11+10	10.3
30-40	91.31	11	5.17	11+30	11.69
40-50	62.05	10	4.55	10+10	18.96
50-60	5.59	10	3.23	10+10	5.08
60-70	1.42	11	4.11	11+10	5.1
70-80	1.88	47	17.39	47	19.55
80-90	7.13	65	19.30	65	22.98
90-100	3.54	68	28.76	68	30.35
100-110	1.93	66	30.01	66	33.85
110-120	5.33	27	12.47	27	13.18
120-130	14.92	35	19.47	35	22.01
130-140	54.68	22	8.70	22+10	11.25
140-150	28.23	10	3.15	10+20	14.86
150-160	25.19	46	13.23	46+10	15.51
160-170	16.48	15	4.65	15+10	9.13
170-180	3.98	12	4.28	12+10	9.48
180-190	10.19	10	4.47	10+10	11.11
190-200	7.47	12	5.05	12+10	12.00
200-210	188.39	8	3.88	8+10	12.01
210-220	10.75	9	2.40	9+10	5.16
220-230	10.18	12	2.29	12+30	5.12
230-240	68.47	10	2.77	10+10	12.93
240-250	0.85	4	0.54	4+10	1.00
총재공품	650.19	549	3,614.34	953	615.11

4. 결론

본 논문에서는 엔진블럭 가공을 위한 흐름라인을 설계할 때 영향을 미치는 요인들과 상호 연관성에 대해서 살펴보았다. 아울러 이를 토대로 국내 공작기계 제조업체의 설계 사례를 들어 초기 설계안이 도출되었을 때 시뮬레이션을 이용하여 검증하는 과정에 대해 소개하였다. 특히 시뮬레이션에 필요한 자료수집과

정 중 공구교체시간의 평균치를 예측하는 방법을 제시하였다.

CATIA를 이용하여 장비를 3차원으로 모델링 하였으며, Factory-CAD를 이용하여 각종 부대설비를 3차원 모델로 구축하였다. 이들을 QUEST라는 시물레이션 모델링 도구에 접목시켜 3차원 시물레이션 모델을 구축함으로써 기계와 기계사이의 공간, 기계와 작업자 사이의 공간, 컨베이어의 위치 등을 현실감 있게 검증할 수 있었다.

또한 투입/산출비율, 양품생산목표량이라는 시스템 평가척도를 이용하여 설계최적화 과정을 진행함으로써 투입시간 간격을 당초 설계값인 1.99분에서 2.33분으로 증가시켰고, 이를 토대로 머시닝센터를 2대 감소시켰다. 또한 공정간의 버퍼 용량을 현실적인 제약조건 하에서 240개 증가시켰으므로 설계목표를 달성하였다.

참고문헌

- [1] Choi, S.D. Kumar A.R. and Houshyar A. "A Simulation Study of an Automotive Foundry Plant Manufacturing Engine Blocks", 「Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference」, (2002) pp.1035-1040
- [2] Huang, M.G., Chang, P.L. and Chou, Y.C., "Buffer Allocation in Flow-shop-type Production Systems with General Arrival and Service Pattern", 「Computers & Operations Research」, Vol 29, (2002) pp.103-121
- [3] Jayaraman, A. and Agarwal A., "Simulating an Engine Plant", 「Manufacturing Engineering」, Vol.117, No.5, (1996) pp.60-68
- [4] Jayaraman, A. and Gunal, A. K. "Applications of Discrete Event Simulation in the Design of Automotive Powertrain Manufacturing Systems", 「Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference」, (1997) pp.758-764
- [5] Park, T. "A Two-phase Heuristic Algorithm for Determining Buffer Sizes of Production Lines", 「Int. J. of Production Research」, Vol.31, No. 3, (1993) pp.613-631
- [6] Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A., Frazelle, E.H., Tanchoco, J.M.A. and Trevino, J., Facilities Planning (2nd Ed), John Wiley & Sons, U.S.A. 1996.
- [7] Ulgen, O., Gunal, A., Grajo, E. and Shore, J., "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」, (1994) pp.124-128
- [8] 김상훈, 오필범, 송광섭, 이상복, 한형상, "엔진 블럭 가공라인의 물류분석", 「한국시물레이션학회 '99 춘계학술대회 논문집」, (1999) pp.105-109
- [9] 오필범, 임석철, 한형상, "시물레이션을 사용한 엔진생산라인의 설계개선", 「한국시물레이션학회 논문지」, Vol.9, No. 1, (2000) pp.1-8

주 작성자 : 문 덕 희

논문투고일 : 2003. 9. 20

논문심사일 : 2003. 10. 22

심사판정일 : 2003. 10. 22

● 저자소개 ●



문덕희

1984 한양대학교 공과대학 산업공학과 학사

1986 한국과학기술원 산업공학과 석사

1991 한국과학기술원 산업공학과 박사

1990~현재 창원대학교 산업시스템공학과 교수

관심분야: Facilities Planning, Scheduling, Simulation



성재헌

1994 경일대학교 공과대학 산업공학과 학사

2003 창원대학교 산업정보대학원 산업시스템공학과 석사

1994~현재 통일중공업 메카트로닉스기계기술연구소 근무중

관심분야: Manufacturing System Design



조현일

1997~현재 창원대학교 산업시스템공학과 학부 재학중

관심분야: 3D Simulation Modeling