엔진블럭 가공라인 설계 지원을 위한 시뮬레이션 모델

문덕희* · 성재헌**

A Simulation Model for Supporting the Design of Engine Block Line

Dug Hee Moon* · Jae Heon Sung**

Abstract

자동차 엔진블럭을 생산하는 라인은 대표적인 흐름생산 방식의 가공라인이다. 자동차 제조업체에서는 새로운 차종을 개발하면 엔진가공라인을 새롭게 설계해야 할 필요성이 생긴다. 엔진가공라인을 설계하기 위해서는 연간생산목표량을 비롯한 여러 가지 요인들을 고려하게 되는데 설계단계에서 발생하는 오류는 향후 라인설치가 완료되어 양산에 들어가면 많은 문제점을 발생시킨다. 따라서 초기 설계안이 확정되면 검증절차를 거치게 되는데 이때 가장 유용한 도구가 시뮬레이션이다.

따라서 본 논문에서는 자동차 엔진블럭 가공라인 설계를 할 때 반영해야할 요인들과 설계안 검토시 고려해야 할 요인들을 고찰하고, 시뮬레이션을 이용한 실제 검증사례를 소개하고자 한다.

Key Words : 엔진블럭, 가공라인, 설계, 시뮬레이션

Ⅰ. 서론

새로운 공장을 건설하는 과정에서 기업들은 많은 대안들을 검토한다. 만일 공장의 건설단계에서 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, 공정 설계, 용량설계를 거쳐 설비배치 설계로 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, 재공품 저장공간(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 주변상황을 확정적으로 보고 설계를 하는 경우에 자주 발생한다.

생산라인을 설계하고 운영하는 과정에서 발생

이 논문은 과학기술부·한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것임.

* 창원대학교 산업시스템공학과

** 통일중공업(주) 메카트로닉스기계기술연구소

할 지 모르는 변동요인들이 시스템에 어떠한 영향을 미치며, 최적의 시스템이 어느 것인지 분석하기 위한 가장 유용한 도구가 시뮬레이션이다. Ulgen 등(1992)은 자동차 차체 및 도장공정을 설계할 때 시뮬레이션을 이용하여 검토해야 할 사항을 4개의 적용단계와 4가지 적용대상으로 구분하한 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), 관리(Variation Management), 제품조합과 투입순서(Product Mix & Sequencing), 상세운영방법(Detailed Operational Issues)으로 구분하였다.

특히 본 연구의 대상인 자동차 엔진 제조공정과 관련된 선행연구에는 다음과 같은 것들이 있다. Jayaraman과 Agarwal(1996)은 자동차용 엔진을 가공하고 조립하는 대형 공장을 설계할 때 어떠한 방법으로 시뮬레이션을 할 것인가에 대한 방법론을 제시하였다. 엔진공장을 모델링하기 위해서는 주요 부품 가공라인별로 상세시뮬레이션(Micro Level Simulation) 모델을 먼저 구축해야 하며, 이를 바탕으로 전체시뮬레이션(Macro Simulation)·모델을 구축하는 방법을 제시하였다.

Jayaraman과 Gunal(1997)은 자동차 엔진 조립공정을 설계할 때 시뮬레이션을 이용하는 시뮬레이션 연구를 발표하였다. 이 연구에서는 엔진조립라인의 특성과 왜 시뮬레이션이 필요한지에 대해 설명하였고, 엔진조립라인 검사공정의 버퍼 운영에 대한 시뮬레이션연구를 사례로 제시하였다. 이 시뮬레이션에서는 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 시뮬레이션연구를 수행하였다. 이 논문에서는 가공공정내용, 가공시간, 공정별 설비대수, 전체공정을 담당하는 작업자수는 확정한 상태에서 시스템 효율에 영향을 줄 수 있는 요인으로 공구교체주기, 공정간 버퍼 크기, 고장수리시간 단축을 선택하였다. 공구교체주기 증가를 위하여 종류의 공구를 비교하였으며, 전체 공정의 버퍼 크기를 고정시킨 상태에서 버퍼를 각 공정에 배분하여 최적화 시키는 실험을 하였다.

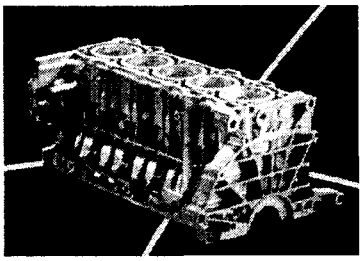
본 논문에서는 자동차용 엔진의 엔진(실린더) 블럭을 가공하는 가공라인을 설계할 경우 고려해야 할 요인들을 정리하고, 그 요인들이 시스템 성능에 미치는 영향을 시뮬레이션을 이용하여 분석하는 사례를 소개하고자 한다. 따라서 2절에서는 엔진블럭 라인설계 시 영향을 미치는 요인들의 상호 관련성에 대하여 검토하며, 3절에서는 사례에 대한 시뮬레이션 모델 및 분석결과에 대해 설명하도록 한다.

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.

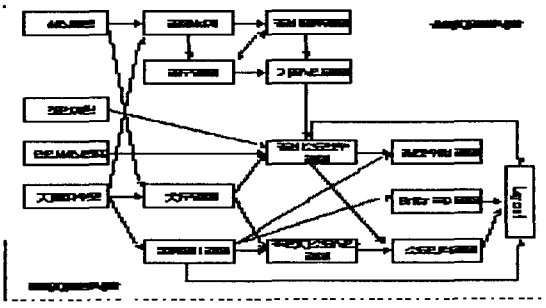
엔진 블럭 가공라인은 크게 가공공정, 조립공정, 세척공정, 검사공정, 측정공정으로 구성된다. 주조된 제품이 라인에 투입되면 여러 단계의 가공공정을 거치고, 베어링캡 등 관련부품을 조립한 후 다시 가공공정을 거친다. 마지막으로 누유검사(Leak Test), 세척을 하고, 실린더 내경 등을 측정하여 공차 범위에 따라 구분을 하는 마킹(Marking)작업을 수행한 후 엔진 조립라인으로 보내진다. 하지만 이러한 공정순서들은 회사에 따라 약간의 차이가 있으며, 이것이 그 회사의 설계능력이라 할 수 있다. 다만 대부분의 회사에

서 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 설명하고자 한다.



〈그림 2〉 개념설계단계와 상세설계단계의 결정사항 관련도

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 정보다. 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. 하지만 혼용라인을 채택하는 경우는 유사한 엔진을 생산하는 경우에 제한적으로 사용하며, 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 해야한다. 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 인건비가 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, Tool Magazine의 크기, 컨베이어, Gantry Loader, 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, Buffer 크기 및 팔레트 소요량 산정을 통하여 최종적으로 Layout을 결정하는 작업을 수행한다. 아울러 전체 라인을 몇 명의 작업자가 담당하도록 할 것인지도 결정해야 한다.

일반적으로 생산제품이 결정되고 제품 설계가 완료되면 공정설계가 이루어진다. 이때는 공정을 수행할 장비의 특성과 사용할 공구의 특성을 고려하여 공정시간을 산출한다. 이 과정에서 몇 개의 공정을 묶어서 하나의 장비에서 수행할 지를 결정한다. 이 단계에서 중요한 결정사항은 어떠한 형태의 병렬라인 구조를 사용하는가에 대한 것이다. 일부업체에서는 단위공정별 병렬라인을 이용하기도 하며, 다른 업체에서는 직렬라인을 병렬로 설치하는 방법을 사용하기도 한다.

이와 같이 세부 공정의 설계가 끝나면 장비의 소요대수를 산정하고, 장비 사이를 연결해 줄 물류장비를 결정한다. 물론 이 과정에서 설계자들은 각 장비의 고장주기 및 수리시간, 공구교체주기 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 재공품 저장공간의 규모 결정에 지대한 영향을 미친다. 따라서 초기 Layout이 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.

- Throughput : Throughput은 라인이 막힘이 없이 정상적으로 진행이 되는지에 대한 평가척도다. 정상적으로 공정흐름이 유지된다면 Throughput은 100%에 근접해야 한다.
- 장비 가동률
- Bottleneck 공정
- 공정간 재공품 저장장소의 규모
- 물류장비의 대수 및 기계적 특성
- 적정 팔레트 수량 : 엔진블럭 가공라인의 경우 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 연간 10만대 생산을 설계 목표로 하고 있다. 사용자가 요구한 설계목표는 아래 〈표 1〉과 같다. 〈표 2〉는 개략적인 엔진블럭 제조공정도인데 크게 26

개의 공정으로 구성되어 있다. 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.

〈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	

3.2 상세설계단계의 주요 전제조건

상세 설계시 반영한 주요 사항은 다음과 같다.

- 각 기계별로 작업자를 1명씩 배치
- 전체 라인 가동률을 80% 정도로 설정하여 Cycle Time 결정
- 범용장비에는 20~24개의 ATC 장착
- Loading/Unloading 을 위해서는 기계별로 단일 팔레트 방식 적용

〈표 2〉 엔진블럭 제조공정 설계안

공정번호	공정내용	설비명	설비댓수	공정CT (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

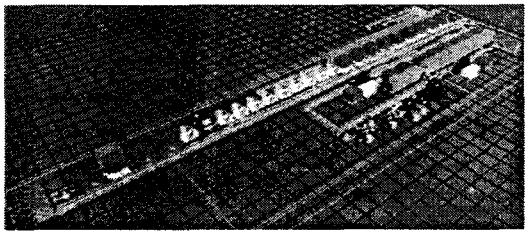
3.3 시뮬레이션 모델의 입력자료

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

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

3.4 시뮬레이션 모델링

시뮬레이션 모델은 QUEST를 이용하여 개발하였다. 가공장비 및 컨베이어는 CATIA와 Factory CAD를 이용하여 작성한 후 WRL 형식으로 변환시켜 QUEST에서 사용하였다. 〈그림 3〉은 개발된 3D 모델 화면이다.



〈그림 3〉 엔진블럭 가공라인 시뮬레이션 모델

3.5 시나리오 및 실험 결과

시스템이 정상적으로 작동하는 지에 대한 검증은 다음과 같은 단계를 통하여 수행되었다. 각 실험은 1년간 10회 반복하였으며, Warm up period는 6일로 하였다.

□ 1단계

당초 설계안에서 제시한대로 소재 투입시간 간격을 1.99분으로 정의하였다. 또한 각 공정별 Buffer를 무한대로 두고 시뮬레이션을 수행하였다. 실험 결과 평균 92.8%의 throughput을 보였다. 이 의미는 100개중에 7개는 재공품으로 계속 쌓여간다는 의미이기 때문에 투입시간 간격을 조절할 필요가 있다.

□ 2단계

소재 투입시간 간격을 2.16분으로 연장하였다. 그 결과 평균 99.6%의 throughput을 보였으며, 양품의 수량도 당초 계획대로 연간 10만대 이상 생산이 가능하였다. 하지만 이 경우에 일부 공정의 Buffer 평균 재고량이 적게는 10개부터 많게는 170여개까지 쌓이는 경우가 있었다. 실제로 Buffer의 규모를 정할 때는 평균재고 보다는 순간적인 최대재고량을 일부공정에서는 300개 이상의 재고가 쌓인 경우도 있었다.

□ 3단계

3단계에서는 투입주기 2.16분을 사용하여 공정간 재공품 재고의 허용량을 제한하였다. 장비별로 Loading/Unloading을 위한 Buffer 각 1개와 컨베이어에 놓여질 수 있는 제품의 수량을 합하여 공정간 재공품 허용량으로 정하였다. 재공품 허용 규모는 [표 3]에 있는 바와 같다. 그 결과 Throughput은 94.4%로 2단계에 비해 5% 이상 산출량이 감소함을 알 수 있었다. 나머지 5.6%의 대부분은 첫 번째 공정의 Buffer에서 대기하고 있었는데 그 이유는 후속공정의 Buffer 용량이 다 찰 경우에 선행 공정이 중단되는 현상이 연쇄적으로 발생하여 투입공정에서 첫 번째 공정으로 제품이 투입되지 못하기 때문이라 하겠다. 하지만 생산량은 당초 목표인 10만대를 달성하였다. 이 결과 우리는 당초 설계안이 제시된 바와는 다르게 상당히 여유 있게 작성되었음을 알 수 있었다.

□ 4단계

4단계에서는 목표생산량인 10만대를 달성하면서 재공품 규모를 줄이기 위한 방법을 찾기 위해 일부 공정 사이에 저장공간을 확보하기로 하였다. 따라서 단계 3보다 6공정 사이에 저장공간을 추가하였고, 소재 투입 주기를 2.16분에서 2.26분으로 증가시켰다.

그 결과 투입한 소재의 수가 3단계의 115,556개에서 109,474개로 줄었다. 하지만 양품과 불량품을 포함한 산출량은 3단계의 109,082개에서 109,331개로 오히려 다소 증가했으며, throughput도 94.4%에서 99.8%로 증가하여 시스템이 안정상태로 접어들었음을 알 수 있었다.

〈표 3〉 대안별 공정간 재공품 현황

재공품위치	단계2 (평균 재고)	단계 3		단계 4	
		설정	평균 재고	설정	평균 재고
소재생성-05	11.47	무한대	3.182	무한대	97.9
05-10	7.10	11	3.76	11	1.69
10-20	2.78	11	3.56	11	1.20
20-30	8.99	11	5.00	11	1.89
30-40	64.89	11	5.14	11+40	15.66
40-50	52.65	10	4.56	10+30	12.64
50-60	5.79	10	3.20	10	3.23
60-70	1.91	11	4.42	11	1.90
70-80	6.24	47	14.35	47	6.79
80-90	9.52	136	40.29	136-71	13.10
90-100	8.43	78	37.96	78	17.92
100-110	2.08	156	66.84	156-90	19.12
110-120	7.57	27	19.84	27	8.91

120-130	28.04	46	24.36	35	13.01
130-140	36.68	23	7.79	23+20	13.40
140-150	29.60	10	3.45	10+20	7.96
150-160	19.59	46	13.27	46	5.20
160-170	15.51	15	4.84	15	1.87
170-180	3.47	12	4.40	12	1.40
180-190	12.05	10	4.53	10	2.09
190-200	9.03	12	5.15	12	1.97
200-210	176.15	8	3.92	8+150	45.30
210-220	14.51	9	2.43	9	2.04
220-230	19.03	12	2.38	12	1.79
230-240	70.93	10	2.83	10+50	12.41
240-250	0.85	4	0.55	4	0.55
총재공품	624.86		3,470.82		310.94

4. 결론

본 논문에서는 엔진블럭 가공을 위한 흐름라인을 설계할 때 영향을 미치는 요인들과 상호 연관성에 대해서 살펴보았다. 아울러 이를 토대로 초기 설계안이 도출되었을 때 시뮬레이션을 이용하여 검증하는 과정에 대해 소개하였다.

특히 국내 공작기계 제조업체의 설계 사례를 들어 라인을 설계할 때 시뮬레이션이 기여할 수 있는 가능성을 제시하였다. 현재 초기 설계안의 시뮬레이션 결과를 반영하여 최적 Buffer의 크기와 배분량을 찾고 있는 중이다. 이러한 배분이 확정되면 일부 공정에 대해 Layout을 변경할 계획이다.

참고문헌

[1] Choi, S.D. Kumar A.R. and Houshyar A. "A Simulation Study of an Automative Foundry Plant Manufacturing Engine Blocks", *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, pp.1035-1040, 2002.

[2] Jayaraman, A. and Agarwal A., "Simulating an Engine Plant", *Manufacturing Engineering*, Vol.117, No.5, pp.60-68, 1996.

[3] 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*, pp.758-764, 1997.

[4] Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A., Frazelle, E.H., Tanchoco, J.M.A. and Trevino, J. (1996), *Facilities Planning (2nd Ed)*, John Wiley & Sons, U.S.A.

[5] 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*, pp.124-128, 1994.

[6] 김상훈, 오필범, 송광섭, 우상복, 한형상, "엔진블럭 가공라인의 물류분석", 한국시뮬레이션학회 '99 춘계학술대회 논문집, pp.105-109, 1999.

[7] 오필범, 임석철, 한형상, "시뮬레이션을 사용한 엔진생산라인의 설계개선", 한국시뮬레이션학회 논문지, Vol.9, No. 1, pp.1-8, 2000.