

시뮬레이션을 이용한 작업자/복수기계 가동분석에 대한 사례연구*

문덕희¹⁾, 송성²⁾, 최미진³⁾, 정종윤⁴⁾

A Case Study on the Analysis of Man/Multi-Machine System Using Simulation

Dug Hee Moon, Cheng Song, Mi Jin Choi and Jong Yun Jung

Abstract

This paper deals with a case study of workload analysis of an operator in an automatic line for machining the race of ball bearing. Eleven machines and three hoppers are installed in the line which is operated by an operator. The elements of operation are separated into machine controlled elements, operator controlled elements and machine/operator controlled elements. In order to analyze the system, time and motion studies are used for gathering input data for the simulation model. The first objective of this study is to evaluate whether the workload of operator is reasonable or not. The second objective is to increase throughput by reducing tact time and the last one is to increase frequencies of inspection by reducing interval. Thus we suggest some ideas for improvement, and as a result, the throughput is improved about 9%. In spite of the increasing of throughput, the allowance of operator is also increased about 4%.

Key Words: simulation, workload, single operator, allowance, automatic machining line

* 본 연구는 2002년도 창원대학교 연구비와 과학기술부·한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술 연구센터의 지원에 의한 것임.

** 창원대학교 산업시스템공학과

*** (주)NewIT ERP사업부

1. 서론

기계, 작업자, 치공구 등과 같은 생산에 필요한 자원을 어떠한 방법으로 이용하는 것이 효율적인가 하는 문제는 지난 수십년간 많은 사람들에 의해 연구되어 왔다. 특히 생산성 향상이 기업경쟁력의 중요한 결정요인으로 대두됨에 따라 다양한 공정개선 및 공정재편성 활동들이 전개되었으며, 그 결과 과거에는 한 사람의 작업자가 한 대의 기계를 담당하던 관행에서 벗어나 이제는 한 사람의 작업자가 여러 대의 기계를 동시에 담당하는 것이 보편화되고 있다. 특히 자동화의 보급이 확산되면서 한 사람의 작업자가 담당할 수 있는 기계의 수도 지속적으로 증가하고 있는데 이것이 가능한 이유는 작업에서 작업자가 직접 담당해야 하는 시간보다 기계 스스로 작업하는 시간의 비율이 증가하고 있기 때문이다.

이러한 자동화 공정, 혹은 반자동화 공정의 특징은 세부 공정내용이 기계만의 공정, 작업자만의 공정, 기계/작업자가 공동으로 투입되는 공정의 세가지 부류로 구분할 수 있다는 것이다. 일반적인 기계가공 공정을 예로 든다면 자동 가공시간, 자동 착탈(Loading/unloading)시간 등은 기계만의 공정에 포함되며, 검사, 청소, 이동 등은 작업자만의 공정에 포함된다. 또한 작업교체 준비(Setup), 공구교체, 기계정비 및 수리 등은 작업자와 기계가 공동으로 투입되는 공정이라 할 수 있다. 물론 착탈(Loading/unloading)공정도 완전 자동화가 되어 있지 않다면 작업자와 기계가 공동으로 투입되는 공정으로 분류할 수 있다.

이와 같은 작업자와 기계가 동시에 고려되는 상황을 분석하는데 가장 널리 사용되는 분석기법이 작업자/기계 분석도(Man/Machine Chart)를 이용하는 방법이다. 이 방법은 한사람의 작업자가 동일한 복수의 기계를 담당할 때 비용이 최소가 되는 적정 기계대수를 구하는데 이용되고 있다. 즉 한 명의 작업자가 담당하는 기계대수가 증가하면 작업자가 바쁜 반면에 기계에 유휴시간이 발생하며, 역으로 기계대수가 감소하면 기계의 가동률은 증가하는 반면 작업자에게 유휴시간

이 발생한다는 논리이다.

이러한 상황을 다룬 또 다른 부류의 연구에는 여러 대의 기계가 임의로 고장날 때 작업자 한 사람이 수리를 담당하는 경우 기계간섭(Machine Interference)시간을 최소화하는 방문순서규칙에 대한 연구들이 있다. Palm[7], Conway 등[2], Mack 등[6], Ashcroft[1], Hodgson[4] 등이 이러한 문제를 연구하였는데 주로 동시에 여러 대의 기계에서 작업자의 서비스를 요청할 때 어느 기계부터 방문할 것인지를 결정하는 방문순서규칙(Dispatching Rule)을 이용해 시물레이션을 통한 분석을 하였거나, 아니면 대기행렬망이론(Queueing Network Theory)을 이용하여 접근을 하였다. 이 분야의 연구들은 Stecke 와 Aronson[9]의 논문에 잘 정리가 되어 있다. Gupta[3]는 무한한 고객으로부터 한가지 종류의 고장수리 요청이 들어오고, 작업자가 수리를 마치고 더 이상 할 일이 없으면 휴가(Vacation)를 떠나는 상황에서 기계간섭에 대한 논문을 발표하였다.

한편 Takine[10]은 복수의 도착계열(Arrival Stream)이 존재하고, 각 계열별로 서비스시간이 다른 분포를 가지는 단일 작업자 문제의 대기행렬 길이에 대해 연구를 하였는데 작업우선순위를 FIFO로 제한하였다.

위에서 언급한 선행연구들은 본 논문에서 다루고자 하는 상황의 일부만을 고려한 것이다. 즉 본 논문에서 고려하는 상황은 서로 다른 복수의 기계들이 존재하며, 각 기계에서도 검사, 공구교체, 운반 등 여러 가지 독립적인 원인에 의해 작업자의 서비스를 요청하고, 각각의 분포도 서로 다르며, 서비스 우선순위도 다르고, 고객의 서비스는 작업자의 서비스와 기계의 서비스를 동시에 고려해야 한다는 점이므로 문제가 더욱 복잡해진다고 하겠다. 또한 본 논문의 주요 연구목표도 작업자의 방문순서규칙을 결정하는 것이 아니라 방문순서규칙은 작업우선순위에 의해 결정이 되어 있는 상황에서 작업자가 과연 주어진 작업량을 소화해 낼 수 있는지를 분석하는 것이다. 만일 작업자에게 과부하가 걸린다면 서비스가 지연

될 것이고 검사주기나 공구교체주기를 맞추지 못하여 불량 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서 다루고자 하는 복잡한 상황을 대기행렬망이론과 같은 수리적 모형을 이용하여 접근한다는 것은 어려운 일이며 시물레이션을 이용한 분석이 쉽게 접근할 수 있는 방법이라 하겠다.

오피범 등[11]은 엔진블럭 가공라인을 대상으로 하여 이와 유사한 상황을 시물레이션을 이용하여 분석한 바 있다. 하지만 작업자의 여유율, 서비스 요청 후 서비스가 이루어질 때까지의 시간 등 작업자 활동에 대한 상세한 분석 결과는 이 논문에서 언급되지 않았다.

이러한 상황은 다음과 같은 사례에서 쉽게 발견할 수 있다. 볼베어링 케륜 선삭가공을 하고 있는 D사에서는 한사람의 작업자가 11대의 기계로 구성된 자동화라인을 담당하고 있는데 작업자는 검사, 공구교체, 운반 등 다양한 일들을 해야 한다. 따라서 작업자들은 자신들의 작업부하량이 과중하다는 견해를 가지고 있는 반면에, 회사 입장에서는 적절하다는 견해를 가지고 있었다. 따라서 생산주기를 단축시키고자 하는 노력이 교착상태에 빠진 상황이었다. 그 이유는 생산주기를 단축시키면 검사횟수, 공구교체횟수, 운반횟수 등 작업자가 해야 할 일이 증가하기 때문이다. 또한 검사주기도 제대로 지켜지고 있지 않지만 얼마나 늦어지는 지에 대한 자료를 확보하는 것도 곤란한 상태다. 따라서 본 연구에서는 현재 시스템이 과연 적절한 시스템인지를 평가하기 위하여 생산라인에 대한 분석을 수행하고 시물레이션 모델을 구축하여 작업자 및 기계의 부하를 요인별로 분석하였으며, 작업자의 불만을 야기하지 않으면서 생산주기를 단축시키기 위한 개선안을 제시하였다.

2. 연구대상 시스템의 개요

본 논문에서 다루고자 하는 시스템의 특징을 요약하면 다음과 같다.

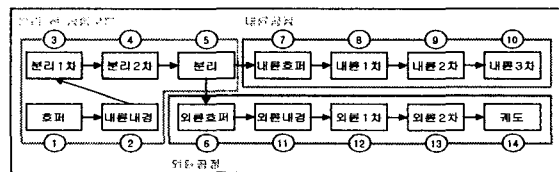
- ① 작업자 한 사람이 여러 대의 기계를 담당한다.

- ② 각 기계에서 작업자의 서비스를 요청하는데 요청하는 원인은 여러 가지가 있으며, 각각 독립적으로 발생한다.
- ③ 서비스 요청이 들어오면 작업자는 정해진 우선순위에 의해 해당 기계를 방문하여 서비스를 수행한다. 우선순위가 같은 서비스의 경우에는 FCFS를 적용한다.
- ④ 서비스 요청원인은 작업자가 도착할 때까지 가동중단상태를 유지하는 경우와 작업자가 도착할 때까지 가동을 계속하는 두 가지로 구분한다.

이와 같은 상황을 토대로 분석하고자 하는 시스템의 주요 평가척도는 아래와 같다.

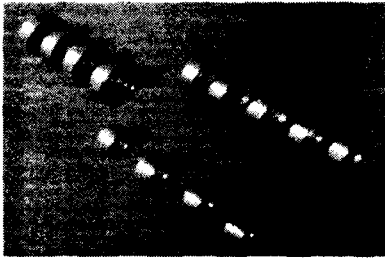
- ① 시스템의 생산능력
- ② 작업자의 원인별 가동률 및 여유율
- ③ 기계의 원인별 가동률
- ④ 서비스 요청후 작업자가 도착할 때까지의 평균소요시간과 최대 소요시간

본 논문에서는 볼베어링 케륜 선삭라인을 사례로 하여 문제 해결 과정, 시물레이션 수행과정, 분석 결과 등을 소개한다. 우선 사례연구 대상시스템인 볼베어링 케륜 선삭공정 자동화라인의 개요는 다음과 같다.



<그림 1> D사 베어링 케륜 선삭라인의 배치도

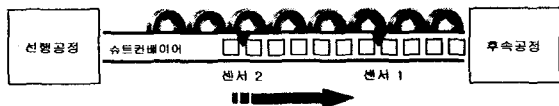
볼 베어링 형번 6205를 비롯한 몇몇 제품을 생산하는 D사의 자동화라인은 <그림 1>에서 보는 바와 같이 총 11대의 가공기계와 3대의 호피로 구성되어 있는데 작업자 한 명이 모든 기계를 담당하고 있다. 원자재가 분리공정을 거치면 내륜과 외륜으로 나누어져서 각각 다른 공정으로 흘러 간다. <그림 2>는 각 공정별로 생산되는 제품의 형상이다.



<그림 2> 공정별 생산품 사진

각 공정으로의 이동은 각 기계 사이에 설치된 슈트컨베이어(shute conveyor)를 통해 이루어지는데, 예외적으로 분리공정 후 외륜과 내륜라인으로 옮겨지는 과정만은 슈트컨베이어를 사용하지 않고 라인을 담당하는 작업자가 일정량이 모이면 직접 해당 호퍼로 옮기고 있다.

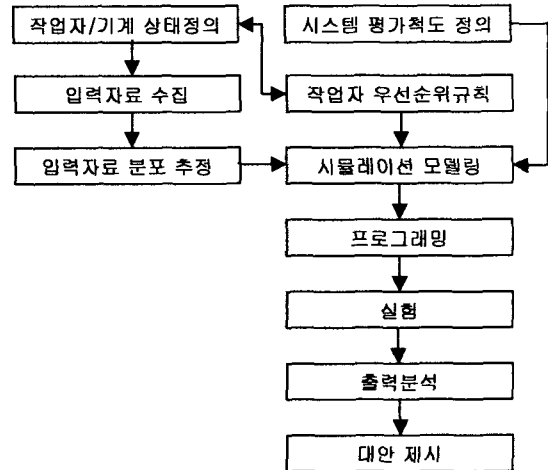
각 공정 사이에 설치된 슈트컨베이어에는 <그림 3>과 같이 2개의 센서가 부착되어 있다. 만일 재공품 재고의 수량이 센서 1에 미달하면 후속공정이 정지하며, 재공품재고의 수량이 센서 2를 초과하면 선행공정이 정지된다. 센서 2의 설치목적은 공정간에 지나치게 많은 재고가 쌓이는 것을 방지하는 것이다. 반면에 센서 1의 경우는 일반적으로는 설치하지 않아도 큰 문제는 없다. 그 이유는 슈트컨베이어에 재고가 없으면 당연히 후속공정이 정지하기 때문이다. 하지만 고려대상 라인의 경우 가공주기가 매우 짧고, 가공설비도 낙후되어 있는 관계로 결품인 발생했을 때 컨트롤 오류로 종종 기계가 작동하는 경우가 있다고 한다. 따라서 작업자의 편의와 안전 차원에서 센서 1을 설정하였다는 것이 작업자들의 주장이다. 이러한 작업자 주장의 옳고 그름을 떠나 본 사례연구는 작업장을 있는 그대로 구현해야 했으므로 센서 1을 설치한 것으로 하였다.



<그림 3> 재공품 통제를 위해 컨베이어에 설치된 센서

3. 시스템 분석 및 모델링

본 연구는 <그림 4>에 제시된 절차에 의해 수행하였다.



<그림 4> 연구 추진 절차

3.1 작업자/기계의 상태 정의

본 연구의 첫 번째 목적은 작업자 한 사람이 전체 공정을 정상적으로 담당할 수 있는지 여부를 점검하고, 생산성 향상을 위해서는 어느 부분을 개선해야 효과적인 것인지 판단하는 것이다. 특히 공정 분석을 하기 위해서는 어떠한 내용의 작업을 작업자나 기계가 수행해야 하는지를 파악할 필요가 있다. 따라서 작업자와 기계의 작업 내용별 상태를 다음과 같이 정의하였다. <표 1>은 작업내용을 작업자만의 작업, 기계만의 작업, 작업자/기계 공동작업으로 구분하여 상태를 정의한 결과다. 단 <그림 1>에서 ①,⑤,⑥,⑦번 기계인 호퍼, 분리, 내륜호퍼, 외륜호퍼는 공구교환을 하지 않으며 칩과 낙하품이 일어나지 않는 것으로 가정한다. 낙하품은 슈트컨베이어 및 기계의 노후로 인하여 가공품이 바닥에 떨어지는 것을 의미하는데 찍힘 불량 원인이 된다. 따라서 낙하품이 발생하면 작업자는 외관검사를 하여 불량

관정을 하든지 아니면 다시 라인에 투입한다.

<표 1> 작업자/ 기계의 작업상태

작업자만의 작업	작업자/기계 공동작업	기계만의 작업
<ul style="list-style-type: none"> • 검사 • 칩(Chip) 청소 • 낙하품 처리 • 완제품 운반 • 분리된 내·외륜 운반 • 이동 	<ul style="list-style-type: none"> • 작업교체준비 (Setup) • 공구교환 • 기계 수리 	<ul style="list-style-type: none"> • 가공 • 유티 • 센서 1에 의한 정지 • 센서 2에 의한 정지

3.2 입력자료 수집 및 분포 추정

시뮬레이션 모델에 입력정보로 필요한 자료는 회사에 규정되어 있는 것을 그대로 사용하였고, 그렇지 않은 자료는 시간연구를 하여 획득한 후 ARENA에서 제공하는 Input Analyzer를 이용하여 분포를 추정하였다. Input Analyzer에서는 입력자료를 지수분포를 포함한 11가지의 분포에 대해 적용(curve-fitting) 시킨 후 오차제곱합(sum of squared error)이 최소인 분포를 자동적으로 찾아준다. 하지만 분포 선정 과정에서 적합성에 큰 차이가 없는 경우 가급적 지수분포를 선택하였다. 생산제품, 불량품 정보 등은 지난 1년간의 실적 자료를 분석하여 모델에 포함될 자료의 형태로 가공을 하였다. 주요 입력자료의 내용은 아래와 같다.

1) 생산품목 정보

연구대상인 자동화라인에서 가공되는 품목은 10종류로서 거의 유사하다. 과거 실적을 조사하여 품목별 생산빈도, 매 회 생산 수량 등을 조사하였다. 시뮬레이션 모델에서 생산품목 관련자료는 이산적경험분포(DISC)를 사용하였다.

2) 작업시간

평일에는 11시간 2교대, 수·토요일에는 8시간

2교대, 휴일에는 8시간으로 라인에 작업자가 투입되는 시간은 주당 128시간, 월간 520시간으로 하였다.

3) 품목별 가공시간

각 품목에 대해 기계에서의 가공시간을 측정하였다. 이 가공시간에는 착탈시간>Loading/unloading Time)이 포함되어 있으며, 모든 공정은 자동화공정이므로 확정적(Deterministic)인 값으로 처리를 하였다. 호퍼는 단순히 가공품을 연속적으로 운반하는 기능을 하기 때문에 가공시간을 산정하지 않았다. <표 2>는 특정품목에 대한 가공시간이다.

<표 2> 특정 품목에 대한 기계별 가공시간

기계	②	③	④	⑤	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭
가공 시간(초)	6.6	6.0	6.0	1.2	5.4	5.4	5.4	4.2	4.8	5.4	4.8

4) 슈트컨베이어에 있는 센서의 위치

각 기계 사이를 연결하는 슈트컨베이어에서 재공품 재고 수량을 통제할 목적으로 설치한 센서의 위치는 아래 <표 3>과 같다. 본 연구에서는 이 센서의 위치에 대한 민감도 분석은 생략하였고, 이 센서 때문에 기계가 정지하는 비율만 추정하였다.

<표 3> 슈트컨베이어의 센서 위치

슈트번호	기계 ①-②	기계 ②-③	기계 ③-④	기계 ④-⑤	기계 ⑤-⑧	기계 ⑧-⑨	기계 ⑨-⑩	기계 ⑩-⑪	기계 ⑪-⑫	기계 ⑫-⑬
센서 1	5	5	4	20	15	20	4	8	8	
센서 2		60	25	40	40	45	11	14	12	

5) 작업교체준비(Setup) 시간

연구대상 작업장에서는 로트(Lot)생산방식을 취하고 있기 때문에 생산품이 바뀌면 작업교체준비(Setup)를 새로 해야 한다. 생산작업교체준비시간은 비교적 시간이 오래 걸리는 관계로 별도의 시간연구를 수행하지 않았으며 현장에서 제공한

자료를 그대로 사용하였다. 한 로트의 수량이 모두 생산되면 모든 기계가 정지된 상태에서 작업 교체준비 시작하도록 하였다.

6) 검사

회사의 규정에 의하면 검사는 모든 기계에서 수행되며, 품목별로 25분에서 35분 사이에 한번씩 표본검사를 하는 것으로 정해져 있다. 따라서 기계별 검사시간간격은 삼각분포인 TRIA(25, 30, 35)를 이용하였으며, 검사에 소요되는 시간은 시간추정에 의해 10+EXPO (55.5)초로 하였다.

7) 공구교체

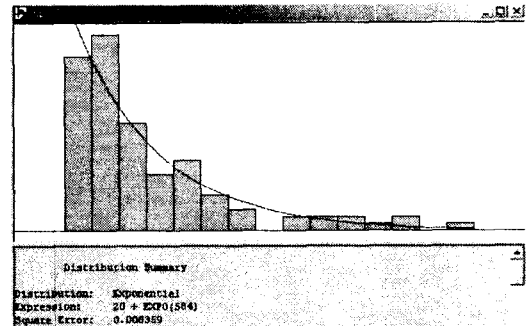
공구교체는 팁만 교체(회전)하는 경우와 공구 전체를 교체하는 경우가 있는데 하나의 공구에는 4개의 팁이 장착되어 있다. 따라서 발생비율은 1:3이며, 각 경우에 교체시간은 다르게 된다. 공구교체는 생산량이 2500개에서 3500개 사이에서 교체한다. 공구교체 소요시간은 팁교체인 경우 TRIA(40,60,90)초, 공구교체인 경우 UNIF(102,340)초로 시간추정 결과 정하였다.

8) 기타 입력자료

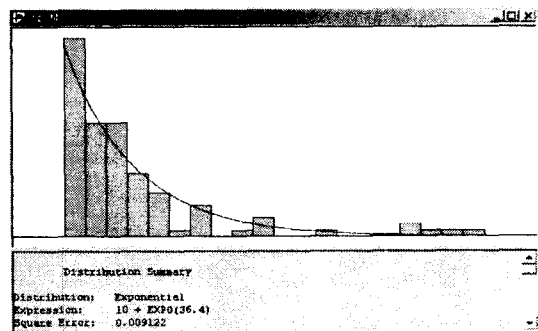
낙하품 처리, 칩 청소, 분리품 운반, 완제품 운반, 낙하품 및 칩에 의한 기계정지 등의 자료들은 <표 4>에 있는 바와 같이 시간추정에 의해 자료를 수집하였으며, <그림 5>에 있는 것과 같이 ARENA에서 제공하는 Input Analyzer를 이용하여 분포를 추정하였다. 완제품 처리 및 분리품 운반 시간간격은 규정에 근거하여 정하였기 때문에 분포 추정을 하지 않았다. 또한 시간추정 자료에 대한 히스토그램의 구간 수를 조정하여 오차제곱합과 Chi-square 검정 결과 얻어진 p-value 값이 적절한 값을 가지는 분포를 선택하였다. 물론 검사, 공구교체 등에 소요되는 시간도 시간추정을 해서 얻은 자료의 경우 ARENA의 Input Analyzer를 이용하여 가장 적합한 분포를 찾아낸 것이다.

<표 4> 기타활동의 입력자료에 대한 분포 추정 결과

항목	분포	SSE	p-value (Chi-Square Test)	
칩청소	시간간격	20+Expo(584)초	0.0084	0.289
	작업시간	10+Expo(36.4)초	0.0091	0.256
낙하품 처리	시간간격	60+Expo(698)초	0.0186	0.158
	작업시간	4.5+Expo(11.)초	0.0197	0.201
완제품 처리	시간간격	Tria(200,300,400)개	-	-
	소요시간	5.5+Expo(30.3)초	0.0076	0.217
분리품 운반	시간간격	50개	-	-
	소요시간	5.5+Expo(16.4)초	0.0025	0.47



a) 칩청소 발생시간간격 분포



b) 칩청소 소요시간 분포

<그림 5> Input Analyzer를 이용한 입력 자료의 분포 추정

3.3 시스템 평가척도

본 연구의 첫 번째 목적은 현재 상황에서 한사람의 작업자가 전체라인을 담당할 수 있는 지 여부를 평가하는 것이므로 작업자의 여유율이 첫 번째 평가척도다. 두 번째 평가척도는 월간 생산량이며, 세 번째 평가척도는 작업자의 서비스 요청 발생 후 서비스가 이루어 질 때까지의 소요시간이다.

<표 5> 의사결정변수가 시스템 평가척도에 미치는 영향

평가척도 의사결정변수	작업자 여유율	월간 생산량	작업자 서비스 대기시간
자동화를 통한 작업자 작업량 감소	증가	증가	감소
애로공정의 생산주기시간 단축	감소	증가	증가
검사시간간격 단축	감소	감소	증가

이와 같은 평가척도를 개선하기 위하여 결정해야 할 사항은 작업자가 수행하는 어느 작업을 자동화 할 것인지, 어느 공정의 생산주기시간을 단축시켜서 생산량을 증가를 달성할 것인지, 마지막으로 검사시간간격을 단축시킬 수 있는지에 대한 여부다. 물론 이 이외에도 슈트컨베이어에 설치된 2개의 센서 최적 위치, 작업우선순위규칙의 최적화 등도 의사결정변수로 다룰 수 있지만 본 연구에서는 고려하지 않았다. <표 5>는 본 연구에서 고려한 의사결정변수가 시스템 평가척도에 미치는 영향이다.

4. 시뮬레이션 모델 개발

4.1 작업자 서비스의 우선순위

본 연구의 대상 시스템에서는 한 사람의 작업자가 여러 대의 기계를 담당하며, 각 기계에서 다양한 이유로 작업자의 서비스를 요청하게 되므

로 작업자가 처리해야 할 일이 대기하고 있는 상태가 수시로 발생한다. 이런 경우에 작업자는 우선 순위에 의해 중요한 작업을 먼저 수행하게 되는데 다음과 같은 기준에 의해 우선 순위를 결정하였다.

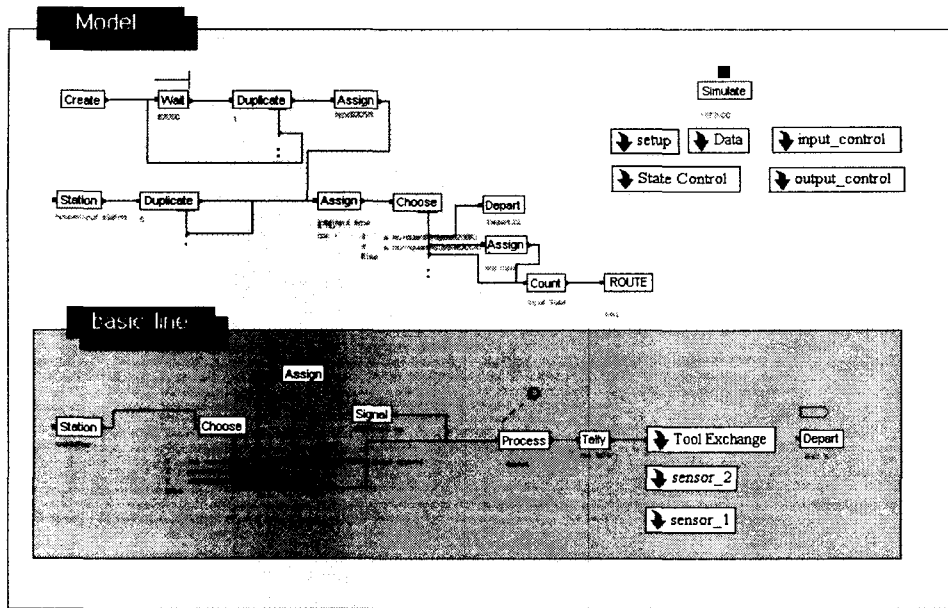
완제품의 처리나 칩청소, 낙하품 처리 등 기계의 가동과 직접적인 관계가 없는 것은 낮은 우선 순위를 부여한다. 공구교체나 기계수리 작업과 같이 작업요청 즉시 기계가 정지하는 항목은 작업이 늦어지면 늦어질수록 기계정지시간이 증가되어 생산량이 감소되게 된다. 따라서 빠른 작업처리를 요구하므로 높은 우선 순위 2를 부여한다. 분리품 운반작업 역시 빨리 이루어지지 않으면 외륜과 내륜의 공정의 흐름이 끊어지는 경우가 발생하여 후속공정이 정지되므로 우선순위 2를 부여한다.

검사작업은 일정한 시간간격 내에 한번씩 이루어져야 하는데 검사작업이 지연되었다고 해서 기계가동을 중단시키지는 않는다. 하지만 우선순위를 낮게 준다면 우선순위가 높은 작업에 밀려서 정해진 시간 내에 검사작업이 이루어지지 않게 된다. 이럴 경우 대량 불량 발생 가능성이 있기 때문에 검사작업도 우선순위 2를 부여한다.

우선순위가 가장 높은 작업은 작업교체준비(Setup)이다. 첫 번째 기계에서 목표생산량이 달성되면 신호를 발생시킴과 동시에 새로운 원자재의 투입을 중단한다. 작업자는 마지막 기계에서 목표생산량이 완성될 때까지 요청 중인 작업들을 수행하게 되며, 생산이 종료될 때까지 완료하지 못한 요청사항은 더 이상 수행하지 않고 작업교체준비작업을 시작한다.

결론적으로 작업자 서비스에 관한 우선순위를 요약하면 아래와 같다.

- 우선순위 1 : Setup
- 우선순위 2 : 검사, 공구교체, 정지수리, 투입작업
- 우선순위 3 : 완제품의 처리
- 우선순위 4 : 칩청소, 낙하품의 처리



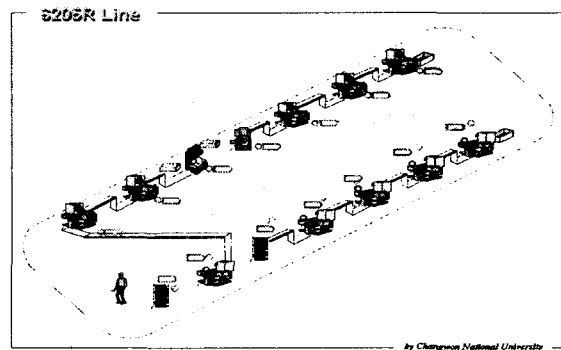
<그림 6> 전체 모델을 통제하는 기본 프로그램

4.2 작업자의 서비스 요청

각 기계는 여러 가지 원인에 의하여 작업자의 서비스를 요청한다. 또한 각각의 원인들은 상호 독립적으로 정해진 시간간격마다 작업자의 서비스를 요청한다. 기계에서 작업자의 서비스를 요청하게 되면 작업교체준비, 공구교환, 고장수리요청작업들은 기계를 즉시 정지시키고 작업자를 기다린다. 반면에 검사, 낙하품 처리, 운반작업들은 기계를 정지시키지 않고 계속 가동하면서 작업자의 서비스를 기다린다. 작업자의 서비스가 끝나면 그 때부터 일정시간이 지난 후에 다시 작업자의 서비스를 요청하게 되는데 요청간격은 시간기준과 수량기준 등 두 가지로 구성된다. 따라서 작업자의 서비스 요청이 발생한 후에 작업자가 도착할 때까지 소요되는 시간이 시스템 평가의 중요한 기준이 된다. 특히 검사작업의 경우 작업자의 서비스 지연이 대량불량의 원인이 될 수 있기 때문에 중요하다.

4.3 모델의 구현

시물레이션 모델은 ARENA Ver. 3.5를 이용하여 프로그래밍하였다. 모델은 기본프로그램과 8개의 부분 프로그램 구성되었는데 <그림 6>은 기본프로그램이며, <그림 7>은 애니메이션 화면이다. <표 6>은 기본프로그램과 8개 부분 프로그램의 기능을 설명하고 있다.



<그림 7> 애니메이션 화면

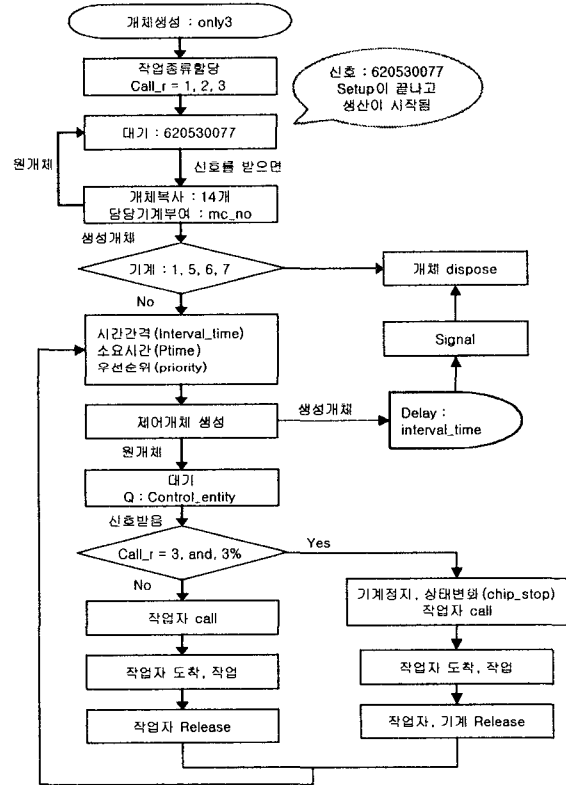
<표 6> 기본프로그램과 부분 프로그램의 기능

프로그램명	주요기능
Basic Line	모든 기계 및 작업자에 대한 통제
Tool Exchange	공구교환 통제
Sensor_1	재공품이 센서 1에서 지정한 양보다 적으면 해당기계 정지
Sensor_2	재공품이 센서 2에서 지정한 양보다 많으면 선행기계 정지
Setup	Lot 생산이 끝나면 작업교체준비 실시
State Control	검사, 낙하품처리, 칩청소 등에 관련된 작업자 통제
Input_control	분리 공정후 내·외물 반제품 투입공정 통제
Output_Control	완제품이 일정량 모이면 운반, 감시제어개체의 삭제
Data	모델에 포함되는 각종 자료를 관리

시물레이션 모델 프로그래밍 과정에서 가장 복잡한 부분은 작업자의 서비스를 요청하는 개체(entity)의 처리과정이다. 각 기계에 대해 작업자의 서비스 요청 원인별로 별도의 활동제어개체가 생성되어야 한다. 이러한 서비스제어개체는 원인별 시간간격에 따라 작업자의 서비스를 요청하고, 우선순위에 따라 작업자와 기계를 점유하며, 서비스가 완료되면 점유자원을 해제시키는 역할을 수행한다. 따라서 각 개체에 대해서는 원인별로 고유한 신호(Signal)를 설정하여 통제하였다. 특히 장시간이 소요되는 작업교체준비 도중에 서비스제어개체가 활동하는 것을 방지하기 위하여 각 기계에서 해당 로트의 생산이 완료되면 관련된 서비스제어개체는 삭제시키고 작업준비교체가 완료되어 생산이 시작되는 시점에 다시 개체를 생성시키는 방법을 사용하였다.

프로그래밍 과정에서 어려움을 겪었던 또 다른 부분은 공정 사이의 재공품을 통제하는 Sensor_1과 Sensor_2 부분이다. 새로운 품목의 생산이 개시되는 시점과 해당로트의 생산이 완료되는 시점에서는 해당 로트의 몇 번째 생산품인지 일일이 확인하여 설정된 한계수량의 통제기능을 삭제하

여야 한다. 그렇지 않으면 의도하는 바와는 달리 선후 공정이 강제적으로 비가동상태가 되어 시물레이션 수행시 무한루프에 빠지게 된다. 이 이외에도 모델에 대한 상당한 수준의 검증과정이 필요하였다. <그림 8>은 State Control에 관련된 작업자 서비스제어의 논리도다.



<그림 8> State Control의 작업자 서비스제어의 논리도

5. 실험결과 및 개선

5.1 현상 분석

개발된 모델을 이용하여 시물레이션을 수행하였는데 시물레이션 시간은 주 평균 128시간을 기준으로 하여 한달 평균 520시간(1,872,000초)으로 하였고, 10회 반복하였다. 그 결과 다음과

같은 평균값들을 얻을 수 있었다. <표 7>에 있는 바와 같이 시물레이션 결과에 의하면 현재 작업자 여유율은 28.55%로서 국제노동기구에서 정의한 여유율을 대상 작업자에 적용한 경우의 적정 여유율인 27%를 만족한다(<표 8> 참조, Salvendy[8]). 따라서 현재 상태에서도 작업자 한 사람이 전체 라인을 다루는 것은 큰 문제가 없다고 할 수 있다. 여기에서 여유율이란 작업자들이 작업 도중에 쉴 수 있는 시간(Idle Time)을 의미하는데 식사시간은 시물레이션 기간에서 제외시켰기 때문에 포함하지 않는다. 또한 점유율이란 각 작업을 수행하는데 소요되는 시간의 합이 전체 작업시간에서 차지하는 비율을 의미한다.

<표 7> 작업자 상태별 시물레이션 결과 (원래 상황)

작업자 상태		점유율 (%)	대기시간 (Sec.)	
			평균	최대
휴휴		28.55	-	-
가동	검사	30.93	57.5	782.3
	공구교체	5.47	55.9	659.3
	칠청소	6.58	158.3	1944.9
	분리품 운반	10.17	54.8	735.5
	낙하품 제거	1.79	160.0	1969.4
	완제품 운반	3.02	98.4	1614.7
	정지기계 수리	0.23	60.9	465.2
	이동	6.12	-	-
	Setup	7.13	-	-

하지만 이 분석과정에서 우리는 새로운 사실을 발견하였다. 검사작업의 경우 작업자 점유율이 30.93%에 달하고 있는데 작업자의 서비스를 요청한 후 작업자가 도착할 때까지 소요되는 평균 시간은 57.5초이지만 최대시간은 782.3초(13.04분)에 달한다는 것이다. 따라서 최대 대기시간 동안 생산되는 양은 130개에 달하며, 이것이 대량 불량률의 원인이 될 수 있다는 점이다. 그렇다고 해서 현실적으로 검사시간이 되었다고 하더라도 공구교체와 마찬가지로 기계가동을 정지시킬 수는 없다. 따라서 작업자의 검사요청주기를 단축시켜 검사주기 내에 검사가 이루어지도록 해야 한다는

것이다. 이 경우 검사빈도가 증가하기 때문에 현재 상황대로라면 작업자의 여유율이 기준에 미달한다는 역효과가 발생한다.

<표 8> ILO에서 정의한 작업자 여유율

		Working condition	Allowance (%)
Constant allowance	Personal allowance	-	5
	Basic Fatigue allowance	-	4
Variable allowance	Standing allowance	Standing	2
	Abnormal position allowance	slightly awkward	0
	Use of force	20 Ib/transportaion	3
	Bad light	Normal	0
	Atmospheric condition	Normal	0
	Close attention	Fairly fine work	0
	Noise level	High pitched loud	5
	Mental strain	Very complex	8
	Monotony	Low	0
	Tediousness	Rather tedious	0
Total			27

동시에 첫 번째 공정인 내륜내경 가공공정의 가공시간을 6.6초에서 6초로 단축하여 생산량의 증가를 추진하는 것도 공구교체를 비롯한 모든 작업자 활동의 주기가 단축되어 빈도가 증가하므로 현재 상황에서는 작업자를 1명 더 투입하지 않고는 불가능하다.

5.2 대안 검토 및 개선안 제시

당장 시급한 문제는 검사주기가 평균 30분으로 설정되어 있지만 작업자의 여유시간이 충분하지 못하기 때문에 자주 지연된다는 점이다. 또한 현재 6.6초인 주기를 6.0초 혹은 그 이하로 단축시켜 생산성 향상을 도모하겠다는 것이다. 하지만 시물레이션 결과 현재 상태에서는 두 가지 변수 중 어느 하나도 가능한 것이 없었다. 이 문제

<표 9> 개선안에 대한 원인별 기계 점유율

기계 상태	②	③	④	⑤	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭
가동	92.62	84.20	84.20	16.84	75.77	75.77	75.76	58.94	67.35	75.77	67.35
유휴	0.10	0.09	0.09	76.83	0.06	0.05	0.02	0.08	0.07	0.06	25.43
센서1에 의한 정지	0.05	0.31	0.86	-	0.27	0.23	-	2.82	1.76	-	-
센서2에 의한 정지	-	8.20	8.48	-	16.65	16.76	17.00	30.96	23.58	16.94	-
공구교체	0.86	0.83	0.86	-	0.87	0.83	0.85	0.82	0.87	0.86	0.85
기계수리	0.05	0.05	0.05	-	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04
Setup	6.33	6.33	6.33	6.33	6.33	6.33	6.33	6.33	6.33	6.33	6.33

를 해결하기 위해서는 작업자의 여유시간을 추가로 확보하는 방안을 찾거나 작업자를 한 사람 더 투입해야 한다. 현재 작업자의 점유율을 최대한 차지하고 있는 것은 검사작업과 분리품 운반작업이다. 이 중에서 검사작업의 점유율을 감소시키기 위해서는 자동화 검사장비의 전면적 도입이 필요한데 현실적으로 투자비가 증가되어 무리라고 판단하였다. 따라서 분리품 운반작업을 없애는 방향으로 접근을 하였다. 여러 가지 기술적 검토를 한 결과 내륜과 외륜이 섞이지 않도록 고안한 슈트 컨베이어를 설치함으로써 작업자의 분리품 운반작업을 제거하면 여유율을 10% 정도 추가 확보할 수 있다.

그 후에 내륜내경공정의 개선을 통하여 사이클타임을 6.0초로 단축하는 방안을 1차로 모색하였다. 동시에 검사작업의 평균주기시간을 30분에서 25분으로 단축시킴으로써 작업자를 기다리는 시간이 다소 증가하더라도 당초에 정해진 30분 검사주기가 유지될 수 있도록 하였다.

이와 같은 접근방법에 의해 아래와 같은 대안들을 검토하였고 현실적인 제약 및 경제성 검토를 통하여 대안 3을 개선안으로 확정하였다.

- 대안 1 : 내륜내경 설비개선을 통하여 CT(사이클타임)을 6.0초로 단축
- 대안 2 : 분리품 운반작업을 자동화
- 대안 3 : 분리품 운반작업을 자동화하고 CT를 6.0초로 단축
- 대안 4 : 분리품 운반작업을 자동화하고 CT를 5.4초로 단축
- 대안 5 : 원래 상태에서 작업자를 2명 투입

- 대안 6 : 작업자를 2명 투입하고 CT를 5.4초로 단축

<표 9>는 개선안에 대한 기계의 원인별 가동 시간 점유율이며, <표 10>은 작업자의 상태별 점유율이다. 이와 같은 방법으로 개선을 한 결과 작업자의 여유율은 오히려 4% 정도 증가하였으며, <표 11>에 있는 바와 같이 월간 생산량도 9% 정도 향상됨을 알 수 있었다. 검사대기시간의 경우 평균값이나 최대값은 원안과 크게 다르지 않았지만 검사작업 요청주기가 평균 30분에서 25분 간격으로 줄었기 때문에 검사주기가 5분 정도 단축되었다고 할 수 있다. 개선에 소요되는 투자에 대한 투자회수기간분석을 수행한 결과 6개월 정도면 투자비가 회수 될 것으로 분석되었다.

<표 10> 작업자 상태별 시뮬레이션 결과 (개선안)

작업자 상태		점유율 (%)	대기시간 (Sec.)	
			평균	최대
유휴		32.44	-	-
가동	검사	37.18	56.4	865.1
	공구 교체	6.24	61.5	664.4
	칩 청소	6.62	150.7	1851.6
	분리품 운반	0	-	-
	낙하품 제거	1.84	153.9	1931.3
	완제품 운반	3.28	97.2	1474.4
	정지기계 수리	0.23	57.2	420.8
	이동	5.14	-	-
Setup		7.03	-	-

<표 11> 개선 전후의 생산량 비교

	현재 상황	개선 상황
생산량	259,279 set/월	283,035 set/월
생산량 증가	9.2%	

6. 결론

본 논문에서는 작업자 한사람이 여러 대의 기계를 담당하는 자동화라인에서 작업자와 기계의 활동분석을 시물레이션을 이용하여 수행한 방법을 소개하였다. 이를 위해 베어링 선삭용 자동화라인을 사례로 선정하여 현재 라인 운영에 대한 자료를 수집하고, 이를 묘사하는 시물레이션 모델을 개발하였으며, 시물레이션 결과를 토대로 개선안을 제시하였다. 현상분석을 위하여 시간연구, 동작연구를 수행하였으며, 이 과정에서 얻은 데이터를 통계적으로 분석하여 시물레이션 모델의 입력자료를 얻었다.

시물레이션 모델은 ARENA 3.5를 이용하여 개발하였다. 개발된 시물레이션 모델을 이용하여 현재 상황을 분석해 본 결과 작업자의 유휴시간이 28.55%로 1라인에 1작업자 담당은 적절한 것으로 보였다. 하지만 작업자의 서비스 요청 후 평균대기시간을 보면 우선순위가 낮은 작업들은 작업자 요청 즉시에 작업이 불가능하며, 최악의 경우 작업자 요청 후 최장대기시간에서 우선순위가 높은 검사 같은 중요한 작업도 최대 10분 정도를 기다려야 하는 경우도 생긴다. 검사나 공구교체 등 작업을 제 때에 해 주지 못하면 불량 발생의 가능성이 커지게 된다. 따라서 1라인의 1작업자는 평균적으로는 큰 무리가 없지만 극단적인 경우 불량품을 양산할 수 있는 가능성이 있음을 알 수 있었다.

따라서 작업자의 검사 요청시간 간격을 평균 25분으로 단축시키기로 하였으며, 이를 위해서 분리 후에 내륜과 외륜공정에 투입하는 과정을 작업자가 수작업으로 진행하던 것을 자동화를 슈트로 개선하기로 하였다. 그 결과 작업자의 활동

중 투입작업에 해당하는 10%를 줄일 수 있고, 10%의 여유율이 생기는 만큼 다른 작업에 더 빠른 대응을 할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 주기시간을 6.6초에서 6.0초로 변경하더라도 작업자의 여유시간은 증가하였으며, 라인 운영에 큰 문제가 없는 것으로 분석되었다. 이러한 개선결과에 대해 경영진과 작업자 측 모두가 만족함을 표시하였으며, 생산량도 9%정도 증가하였다.

참고문헌

- [1] Ashcroft, H., "The Productivity of Several Machines under the Care of One Operator", *Journal of the Royal Statistical Society B*, Vol.12 (1950), pp.145-151.
- [2] Conway, R.W., Maxwell, W.L. and Sampson, M.W., "On the Cyclic Servicing of Semiautomatic Machines", *The Journal of Industrial Engineering*, Vol.13, No.2 (1962), pp.105-107.
- [3] Gupta S.M., "Machine Interference Problem with Warm Spares, Server Vacation and Exhaustive Service", *Performance Evaluation*, Vol.29, No.3 (1997), pp.195-211.
- [4] Hodgson, V., and Hebble, T.L., "Nonpreemptive Priorities in Machine Interference", *Operations Research*, Vol.15, No.2 (1967), pp.245-253.
- [5] Kelton, W.D, Sadowski, R.P and Sadowski, D.A. , *Simulation with Arena*, McGraw-Hill, U.S.A., 1998.
- [6] Mack, C., Murphy, T. and Webb, N.L., "The Efficiency of N Machines Uni-directionally Patrolled by One Operator When Walking Times and Repair Times are Constants", *Journal of the Royal Statistical Society B*, Vol.19, No.1 (1957), pp.166-172.

-
- [7] Palm, D.C., "The Assignment of Workers in Servicing Automatic Machines", *The Journal of Industrial Engineering*, Vol.9, No.1 (1958), pp.28-41.
- [8] Salvendy, G., *Handbook of industrial engineering*, John Wiley & Sons, New York. 1982.
- [9] Stecke, K.E. and Aronson, J.E., "Review of Operator/machine Interference Models", *International Journal of Production Research*, Vol.23, No.1 (1985), pp.129-151.
- [10] Takine, T., "Queue Length Distribution in a FIFO Single-Server Queue with Multiple Arrival Streams Having Different Service Time Distribution", *Queueing Systems*, Vol. 39, No.4 (2001), pp.349-375,
- [11] 오필범, 임석철, 한형상, "시뮬레이션을 사용한 엔진생산라인의 설계개선", *한국시뮬레이션학회논문지*, Vol.9, No.1 (2000), pp.1-8.

● 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

송성



1992 중국 연변대학교 농기계학과 학사
 2001 창원대학교 산업시스템공학과 석사
 2001~현재 창원대학교 산업시스템공학과 박사과정 재학중
 관심분야: Scheduling, Simulation

최미진



2002 창원대학교 공과대학 산업시스템공학과 학사
 2001~현재 (주)NewIT ERP사업부
 관심분야: Simulation, ERP

정종윤



1980 한양대학교 공과대학 산업공학과 학사
 1987 Ohio State University 산업공학과 석사
 1991 West Virginia University 산업공학과 박사
 1992~현재 창원대학교 산업시스템공학과 교수
 관심분야: CAD/CAM, 공장자동화