柔軟性 效果-機械設備 · 人力 · 部品을 中心으로-

南 益 鉉*

《目 次》

Ⅰ. 序 言

아담 스미스가 제시한 유명한 예로 핀을 제조하는 공장이 있다. 예로 든 공장에서는 핀 제조를 위한 필요 공정을 여럿으로 나누어 각 공정별로 담당자를 배치하고 있다. 이렇게 함으로써 전문화(Specialization)가 생산성을 매우 증가시킨다는 예를 제시한다. 이와 같은전문화 논리는 그 후 줄곧 생산 합리화과정에 중요한 기본원리가 되어 왔고 실제로 수많은 분야에 적용되어 왔다. 본 논문에서는 어떤 면에서는 엄격한 분석없이 받아들여졌던 전문화의 원리가 과연 현대의 경영 상황에도 최적의 대안이 되는지를 검토하고자 한다. 전문화의 개념과 대비하여, 여기서는 유연성(Flexibility)의 원리를 도입하여 유연성이 생산성 향상에 어떤 역할을 할 수 있는지를 살펴본다.

우선 개념의 모호성을 줄이기 위해 본 논문에서 쓰이는 유연성의 개념에 대해 정의하자. 어떤 기계 설비, 혹은 작업자가 유연하다고 하는 것은 그렇지 못한 경우에 비해서 보다 여러 가지의 다양한 작업을 수행할 수 있음을 나타낸다. 가령 기계 1은 A 작업만을 수행할 수 있는데 반해 기계 2는 A,B 작업을 수행할 수 있을 때, 기계 2는 기계 1보다 유연하다고 한다. 이러한 정의에서 알 수 있듯이 유연성의 개념은 유연생산시스템

* 서울大學校 經營大學 敎授

(Flexible Manufacturing System)에서와 같이 기계·설비, 운용소프트웨어 뿐만이 아니라, 작업 내지는 필요 서비스를 제공해 주는 인력(Human Resource)에도 적용되는 개념이라는 점에 유의할 필요가 있다. 실제 유연성을 증대 내지는 도입하는 방법은 경우에 따라 다르다. 기계 설비의 경우 설계시 유연성 도입을 고려해야하고, 인적 자원의 경우 상호 훈련(Cross Training) 등을 통해 다양한 작업을 수행할 수 있는 능력을 배양해야 한다. 인적 자원의 상호 훈련의 경우는 직무 만족도를 증대시키기 위한 직무 충실화(Job Enrichment)와 직무 확대(Job Enlargement)와 관련되는 것으로, 본 논문에서는 유연성으로 인한 기대 효과를 계량적으로 분석하는데 그 의의가 있다고 할 수 있다. 또한 본문에서 사용하는 유연성의 정의는 다른 의미에서의 유연성(예를 들어 생산능력을 단시간내에 증대 혹은 단축, 공장 layout의 변경가능성)과 구별된다는 점을 언급해 두고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 수평적 유연성과 수직적 유연성을 살펴 보고 이들 간의 효과에 있어서의 차이를 분석한다. 그리고 유연성 효과를 전문화 효과와 비교하여 상대적 우열을 결정지어 주는 항목들을 살펴 본다. 마지막으로 부품의 공유를 유연성의 개념으로 파악하여 재고 관리와 관련하여 어떠한 효과를 주는지 따져 본다.

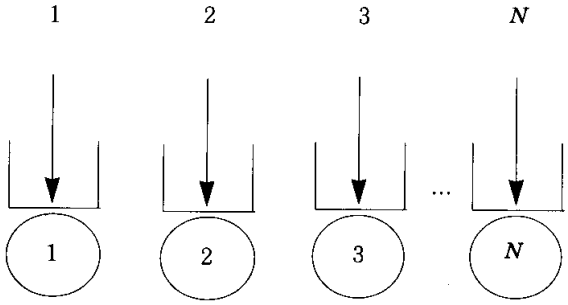
Ⅱ. 수평적·수직적 유연성

본 장에서는 생산공정의 유형을 크게 수평적 공정과 수직적 공정으로 나누고 각 경우에 유연성을 도입했을 때 나타나는 효과를 검토해 본다. 분석방법으로는 대기행렬이론(Queueing Theory)을 사용하기로 한다.

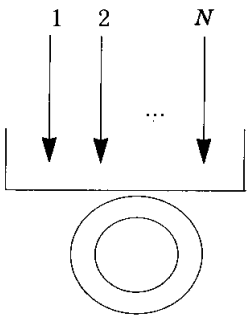
1. 수평적 유연성

〈그림 1〉에서 나타나듯이 N종류의 필요한 작업들이 각각 해당 생산설비에서 처리순서를 기다리는 대기행렬(queue)을 이루는 시스템을 상정해 보자. 이 경우에서는 기계 i가 작업 i를 수행할 수 있는, 작업별로 전문화되어 있는 시스템이다. 이러한 시스템과 대응하는 유연시스템을 살펴보자. N개의 개별 기계대신에 N종류의 모든 작업들을 수행할 수 있는 유연성있는 기계 한 대를 도입한다고 하자(〈그림 2〉참조).

동일 조건하에서의 상호 비교를 위해 이러한 유연기계의 작업처리 능력은 N개의 개별 기계들의 처리능력을 합한 것과 동일하다고 가정하자. 대기행렬이론을 이용한 분석을 위해 다음을 가정하도록 하자.



〈그림 1〉



〈그림 2〉

① 작업 i의 도착이 포아송확률과정(Poisson Process)을 따르게 되며 도착률은 λ이다.

② 작업 i의 필요처리시간은 지수분포(Exponential Distribution)를 따르며 작업처리율(Service Rate)은 μ이다.

③ 유연기계의 작업율은 $N\mu$이다.

④ 유연기계에서의 작업전환시간(Switch-over Time)은 0이다.

이들 가정중 세번째 가정이 의미하는 바는 유연기계가 기존의 N개 기계들의 처리능력의 합인 $N\mu$의 처리능력을 갖는다는 것이며 이는 유연기계가 개별 기계의 N배 속도로 일을 처리한다는 것을 의미한다. 마지막 가정은 유연기계가 작업 i를 마치고 작업 j를 시작하려 할 때 $(i \neq j)$, 이를 위한 작업 전환 준비시간이 소요되지 않는다는 가정이다. 이에 대한 구체적인 고려는 나중으로 미루기로 하자. 기존의 시스템 〈그림 1〉과 이에 대응하는 새로운 유연시스템 〈그림 2〉을 비교할 때 평가기준으로는 각 시스템별 평균 대기고객의 숫자와 고객의 평균 대기시간을 고려하기로 한다.

기존시스템에서의 기계 i를 고려해 보자. 그러면 이는 전통적 대기행렬이론의 $M/M/1$ 시스템으로 고객도착율은 λ, 작업처리율은 μ가 된다. 따라서 고객의 평균 시스템 체류시간(Mean Throughput Time) 은 $T_0 = \dfrac{m}{1-\rho}$ 이 된다.

여기서 m은 $\dfrac{1}{\mu}$ 이고 이는 고객 한명을 처리하기 위한 평균작업시간을 나타내며, 교통혼잡도(Traffic Intensity) 는 $\rho = \lambda m$으로 표시한다. 유연시스템은 고객도착율이 $N\lambda$이고 작업처리율이 $N\mu$인 $M/M/1$시스템이 되는데, 이 경우 고객의 평균시스템 체류시간은 $T_F = \dfrac{m}{N(1-\rho)}$ 이 된다.

따라서 두 시스템 간의 평균시스템체류시간을 비교해 보면 $\dfrac{T_0}{T_F} = N$ 으로 유연성을 도입함으로써 고객의 평균체류시간을 $1/N$로 줄일 수 있음을 알 수 있다. 또한 리틀의 법칙

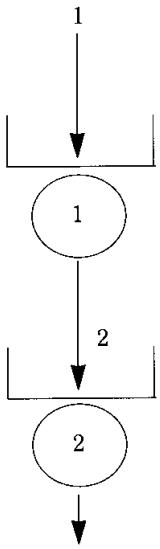
(Little's Law)을 이용하면 시스템 내의 평균 고객수(Mean Number of Waiting Customers)도 $1/N$로 줄일 수 있음을 알 수 있다. 즉 수평적 유연시스템의 경우 고객의 평균 시스템 체류시간과 평균 고객수를 줄일 수 있는데, 개선비율은 원래 시스템의 기계 대수인 N이 된다.

〈정리 1〉

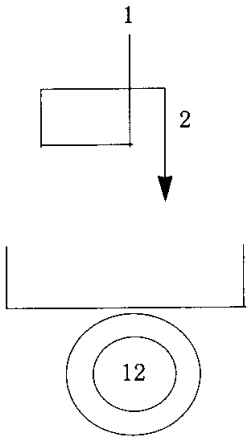
N개의 동일한 $M/M/1$ 시스템에 유연성을 부가하여 수평적 유연 시스템을 구성하면 고객의 평균 시스템 체류 시간을 $\frac{1}{N}$로 줄일수 있다.

2. 수직적 유연성

여기서 수직적 생산 공정은 완제품생산을 위해서 N개의 공정을 순차적으로 거쳐야 하는 경우를 말한다(〈그림 3〉참조). 앞에서와 마찬가지로 여기서도 유연성을 도입한다함은 N개의 공정작업을 모두 처리할 수 있는 대용량의 기계설비로 N개의 개별기계들을 대체함을 의미한다. 수직적 유연시스템을 그림으로 표시하면 〈그림 4〉와 같은데, 외부에서 일단 일거리가 들어오면 N개의 필요작업들을 순차적으로 모두 마친 뒤 완성품이 되어 나가게 되므로 〈그림 4〉에서 보듯이 N-1번의 피드백이 있게 된다. 수평적 유연시스템에서 이용한 가정들 모두를 여기에서도 받아들이도록 하자.



〈그림 3〉



〈그림 4〉

이러한 수직적 유연시스템에는 수평적 유연시스템과 확연히 다르게 나타나는 요소가 있다. i-1번째 작업을 마치고 i번째 작업을 받아야 되는 일거리를 계층(Class) i라고 할 때, 수직적 유연시스템에는 $1, 2, \cdots, N$으로 표시되는 N개의 복수의 계층별 고객(Multi-Class Customer)이 존재하게 된다. 따라서 수직적 유연생산시스템에서는 이들 N개의 계층별 고객들 중 어떤 순서로 작업처리를 할 것인가(sequencing)하는 스케쥴링상의 최적화문제가 제기된다. 이러한 작업순서를 고객 계층별로 정하는 것은 수평적 유연생산시스템에는 불필요했던 것인데, 수직적 유연생산시스템에서는 고객 계층별 Sequencing을 활용하여 추가적인 개선이 가능하게 된다. 이러한 수직적 유연생산시스템에서 최적인 sequencing rule은 평균 잔여 작업시간(Mean Remaining Work)이 적은 고객 계층을 우선적으로 처리해 주는 것이다(Klimov). 계층 i에 속하는 반제품이 완제품이 되기 위해서 받아야 할 평균잔여작업량은 $(N-i)m$이므로, 최적 sequencing rule은 $(N//N-1//\cdots//1)$이다. 이러한 표시가 의미하는 바를 설명하면 다음과 같다. $(\cdots//i//j//\cdots)$은 계층 j의 고객은 시스템 내에 계층 i를 비롯하여 j왼쪽으로 표시되어 있는 계층의 고객들이 존재하지 않을 때에 비로소 작업처리에 들어갈 수 있다. 그러므로$(N//N-1//\cdots//1)$은 계층 N, 즉 마지막 공정만을 남겨놓은 계층의 고객들을 최우선으로 처리해 주고 계층 N이 없을때 계층 N-1을 처리해 주는 등으로 처리우선순위를 정하는 것이다.

그러면 처리용량이 $N\mu$인 유연생산기계에$(N//N-1//\cdots//1)$의 우선순위를 적용시킨 시스템을 상정해 보자. 실제로 $(N//N-1//\cdots//1)$의 우선 순위하에서 이러한 수직 유연 시스템은 $M/E_N/1$의 시스템이 됨을 각자 확인해 보기 바란다. 고객의 도착율은 λ이고 작업처리시간은 N개의 지수분포의 합으로 평균 필요 작업시간이 Nm인 Gamma 혹은 Erlang 분포를 따른다. 따라서 sequencing rule을 적용하기 전에는 N개의 고객계층이 있는 대기행렬시스템이었으나 최적 sequencing rule인 $(N//N-1//\cdots//1)$을 적용하면 고객이 도착하여 필요한 N종류의 작업공정을 순차적으로 마치게 되는, 실제로는 단일계층(Single Class)모형이 된다.따라서 $M/G/1$에 해당하는 Pollaczek-Khinchine 공식을 이용하면 수직적 유연시스템에서 고객의 평균시스템 체류시간을 계산할 수 있다.(Kleinrock)

$$T_F = \frac{m[N(2-\rho)+\rho]}{2N(1-\rho)}$$

수직적 유연성이 도입되기 이전의 시스템에서는 각 단계를 거치는데 평균 체류시간이 $\frac{m}{1-\rho}$ 이기 때문에 N 단계를 모두 마치는데 걸리는 시간은 Jackson의 정리를 이용하면 다음과 같다.

$$T_0 = N\left(\frac{m}{1-\rho}\right)$$

따라서 수직적 유연성을 도입함으로써 고객의 평균 시스템체류시간을

$$\frac{T_0}{T_F} = \frac{2N^2}{N(2-\rho)+\rho}$$

만큼 감소시킬 수 있다.

〈정리 2〉

N개의 수직적 혹은 순차적 공정(Serial Processing)을 N개의 $M/M/1$ 시스템이 연결된 것으로 표시할때, 이에 대응하는 수직적 유연 시스템은 고객의 평균 시스템 체류 시간을

$\dfrac{2N^2}{N(2-\rho)+\rho}$ 만큼 감소시켜 준다.

〈따름정리 1〉

$$f(N) = N$$

$$g(N) = \frac{2N^2}{N(2-\rho)+\rho}$$

여기서 $f(N)$은 수평적 유연시스템에서의 개선비율을 나타내고 $g(N)$은 수직적 유연시스템의 개선비율을 나타낸다.

(1) $N \geq 2$에서 $g(N) > f(N)$

(2) 큰 숫자 N에 대해 $g(N) \approx \dfrac{2}{2-\rho} f(N)$

(3) 고밀집(Heavy Traffic)의 경우, 즉 $\rho \to 1$의 경우, 큰 숫자 N에 대해 $g(N) \approx 2f(N)$.

증 명:

(1) $$g(N) - f(N) = \frac{2N^2 - 2N^2 + \rho N^2 - \rho N}{N(2-\rho)+\rho}$$

$$= \frac{\rho N(N-1)}{N(2-\rho)+\rho} > 0 \quad (N > 1\text{에 대해})$$

(2) $$\frac{g(N)}{f(N)} = \frac{2N}{N(2-\rho)+\rho}$$

$$\lim_{N\to\infty} \frac{g(N)}{f(N)} = \frac{2}{2-\rho}$$

(3) $\lim_{\rho \to 1} \frac{g(N)}{f(N)} = \lim_{\rho \to 1} \frac{2N}{2N + (1-N)\rho} = \frac{2N}{N+1}$

$\lim_{N \to \infty} \frac{2N}{N+1} = 2$

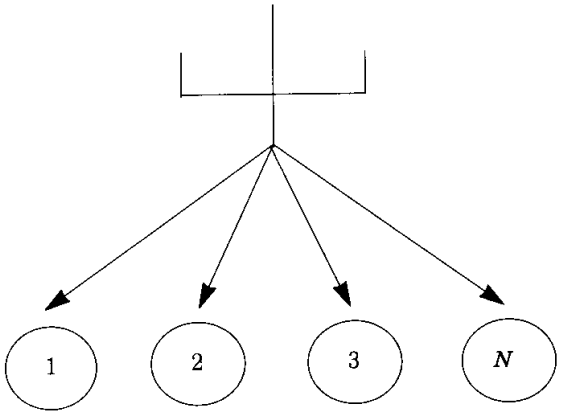
이 따름정리가 의미하는 바를 살펴보자.첫번째 결과는 수직적 유연시스템으로부터 얻는 효과가 수평적 유연시스템의 효과보다 크다는 것을 나타낸다.두번째 결과는 N이 커짐에 따라 수직적 유연시스템은 수평적 유연시스템보다 $\frac{2}{2-\rho}$배만큼 고객의 평균 체류시간을 감소시킴을 보여준다.

세번째 결과는 교통혼잡도 ρ가 1에 근접해 가고, N이 커짐에 따라 수직적 유연시스템은 수평적 유연시스템에 비해 두 배 가량 개선해줄 수 있다는 사실을 나타낸다.

3. 유연성 효과의 원천

지금까지 수평적 유연성과 수직적 유연성을 도입함에 따라 고객의 평균 체류시간을 현격히 줄일 수 있었음을 보여 주었다. 그렇다면 과연 유연성으로 인해 어떤 새로운 여력이 생기며, 어떻게 하여 시스템 효율을 증대시킬 수 있게 되는지 그 원인을 파악해 보자. 먼저 수평적 유연시스템을 살펴보자. N종류의 작업을 전문적으로 수행하는 N대의 기계 대신에 처리능력이 $N\mu$이고 N종류의 작업모두를 처리할 수있는 유연기계 1대를 도입한 경우, 우리는 고객의 평균 체류 시간을 N배 줄일 수 있었다.이는 두 가지 효과가 복합적으로 결합되어 나타난 것이다. 첫번째 효과는 순수한 의미에서의 유연성 도입효과로서,만약 N개의 개별기계에 유연성을 부가할 경우 〈그림 5〉와 같이 $M/M/N$시스템이 된다. 이 경우 대기고객이 있는 한 유휴기계(Idle Server)는 존재하지 않게 되므로 기계의 사용율(Usage Rate)을 크게 할 수가 있다. 유연성을 도입하기 이전에는 전문화로 인해 어떤 기계에는 대기고객이 많으면서 다른 기계는 놀고 있는 경우가 발생하는데, 그러한 경우가 유연시스템의 경우에는 발생하지 않는다. 따라서 기존시스템에 비해 유연성을 도입함으로써 기계를 보다 효율적으로 사용할 수 있게 된다.

이러한 효과가 순수한 의미에서(기계 수를 일정하게 고정한 상태로) 유연성 도입효과인데, 유연성으로 인해 여러 대의 기계를 모두 사용할 수 있다는 측면에서 이를 자원공유효과(Source Pooling Effect)라 부르기로 하자. 그런데 앞에서 우리가 다루었던 수평적 유연시스템은 작업처리능력이 $N\mu$인 한대의 대형기계를 상정하였다.(〈그림 2〉) 그러면 이것과 방금 언급된 $M/M/N$시스템은 어떤 관계가 있는가?



〈그림 5〉

대용량(처리능력 $N\mu$)인 유연기계 1대를 갖고 있는 수평적 유연시스템이 처리능력이 μ인 유연기계 N대를 갖고 있는 시스템보다 효율적 처리능력을 보유한다. 그 이유는 시스템 내 고객의 숫자가 N보다 적은 경우를 상정해 보면 알 수 있다. N보다 적은 고객이 있을 때 유연기계 N대중 일부는 유휴상태이고, 따라서 처리능력 사용에 손실이 발생한다. 하지만 대용량 유연기계 1대가 있는 경우 항시 처리능력 $N\mu$를 모두 사용할 수 있기 때문에 보다 효율적으로 기계처리능력을 이용할 수 있다. 이렇게 용량이 적은 기계 여러 대보다 대용량 기계 한 대가 보다 효율적인데, 이 때 발생하는 효과를 용량합성효과라 부르기로 하자.

따라서 앞서 수평적 유연시스템의 경우 고객의 평균시스템체류시간을 N배만큼 줄일 수 있다 하였는데, 이는 실제로 자원공유효과와 용량합성효과 둘을 합친 것이다. 이들 두 효과를 개별적으로 계산하기 위해서는 $M/M/N$에 해당하는 식을 이용하면 쉽게 구할 수 있는 바, 본 논문에서는 이를 생략하도록 한다.

그러면 수평적 유연성의 효과는 위의 두 종류의 효과로부터 발생한다고 하는데, 수직적 유연성은 왜 수평적 유연성의 경우보다 더욱 고객의 평균 시스템 체류시간 절감효과를 크게 하는가? 수직적 유연시스템의 경우에는 앞서 언급된 자원공유효과와 용량합성효과 뿐만이 아니라 추가적으로 우선순위제공효과(Priority Sequencing Effect)가 발생하기 때문이다. 수직적 시스템에 유연성을 도입하면 여러 계층의 고객들이 존재하게 되는데, 이들의 작업순서를 단순히 선입선출법(FIFO)에 따르는 것이 아니고 고객의 평균시스템 체류시간을 최소화하기 위해 우선순위를 적절히 사용함으로써, N이 크고 ρ가 1에 근접할 경우 수평적 유연시스템보다 거의 두 배에 가까운 효과를 얻게 된다. 이 경우에는 우선순위

제공효과가 자원공유효과와 용량합성효과를 합한 것에 해당하는 대기시간 절감효과를 가져 온다는 것을 의미한다.

그러면 실제 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 지금까지 언급한 유연성효과들에 대해 살펴보기로 하자. 시뮬레이션을 위해 사용한 소프트웨어는 SIMAN IV이다. 도착간시간 및 서비스시간은 지수분포를 따르는 경우에 한정하여 시뮬레이션을 하였다. 다음은 $\lambda = 1$, $m = 0.95$인 개별 $M/M/1$ 시스템이 4개 존재하던 것에 수평적 유연성을 도입한 경우에 대한 결과이다. 이 시뮬레이션은 105,000단위 시간 동안 진행되었고 초기 5,000단위 시간의 결과는 초기효과제거를 위해 무시되었다. 따라서 그 이후 55,000단위 시간에서 나오는 결과를 5,000단위 시간씩 11개로 분리하여 평균체류시간에 대한 95% 신뢰구간을 계산하는데 사용하였다.

시스템	평균체류시간(95% 신뢰구간)	평균 고객수
4개 개별 $M/M/1$	15.40(0.12)	57.4
$M/M/4$유연시스템	5.22(0.02)	17.1

이 결과에 의하면자원공유효과로서 $\frac{15.40}{5.22} = 2.95$ 배만큼 평균체류시간을 줄일 수 있었고 $4 - 2.95 = 1.05$ 만큼의 용량합성효과가 발생하였다는 것을 알 수 있다.

다음에는 4개의 $M/M/1$시스템이 순차적으로 연결되어 있는 수직시스템 (Serial Queueing Network)을 살펴보자. 외부로부터의 고객도착율은 1, 평균서비스시간은 0.95로서 지수분포를 따른다고 하자. 그러면 유연성 도입이전의 시스템은 〈그림 3〉과 같이 $M/M/1$시스템 4개가 연결된 것이 된다. 이러한 원래 시스템과 비교할 대상은 수직적 유연성은 도입하되 개별기계 4대를 갖고 있는 $M/G/4$시스템이다. 유연성 도입으로 고객 계층별 우선순위를 (4//3//2//1)로 줌으로써 도착고객의 서비스시간은 $\sum_{i=1}^{4} X_i$, 여기서 $X_i \sim$ 지수분포(0.95)이 된다.

시스템	평균고객수	$g(N = 4)$
수직시스템	61.94	6.21
$M/G/4$ 유연시스템	10.11	

이 예에서는 $\frac{61.94}{10.11} = 6.13$ 배 만큼 평균 고객수와 평균 시스템 체류시간을 줄일 수 있었다. 즉 자원공유효과와 우선순위 제공효과가 결합하여 6.13의 개선비를 주었고 나머지 6.21 − 6.13 = 0.08은 용량합성효과로 볼 수 있다.

Ⅲ. 전문화에 대한 고려

그러면 항상 지금까지 언급된 유연생산시스템이 전문화생산시스템보다 효율적인가? 이러한 질문에 대답하기 위해 여기서는 전문화에 따른 학습효과와 유연생산시스템에서 발생하는 작업전환시간(Switch-over Time)에 따른 손실을 고려해 보자. 분석의 편의를 위해 이들 두 효과를 합쳐서 유연시스템에 비해 전문화시스템에 속한 기계의 작업처리능력이 본래의 μ가 아니고 $\alpha\mu$ ($\alpha > 1$)가 된다고 상정하자. 우리는 여기서 전문화에 따른 α의 크기에 따라 유연시스템이 좋은지 전문화시스템이 유리한지를 구별할 수 있게 된다.

1. 수평적 유연시스템과 비교

이 경우 전문화시스템에서는 고객의 평균 시스템체류시간이

$$T_0 = \frac{m}{\alpha - \rho}$$

$$\frac{T_0}{T_F} = \frac{N(1-\rho)}{\alpha - \rho}$$

$$\frac{T_0}{T_F} > 1 \leftrightarrow N(1-\rho) + \rho > \alpha$$

따라서 전문화에 따른처리능력 증진 효과인 α가 $\alpha < N(1 - \rho) + \rho$인 범위에서는 수평적 유연 시스템이 전문화 시스템보다 유리하고 그 이외의 범위에서는 전문화 시스템이 보다 효율적이다.

2. 수직적 유연 시스템과의 비교

이 경우 전문화 시스템에서는 각 단계별 담당 기계의 처리 능력이 $\alpha\mu$가 되므로 고객의 평균 시스템 체류 시간은

$$T_0 = \frac{Nm}{\alpha - \rho}$$ 가 된다.

따라서 $\frac{T_0}{F_F} = \frac{2N^2(1-\rho)}{(\alpha-\rho)[N(2-\rho)+\rho]}$

$$\frac{2N^2(1-\rho)}{N(2-\rho)+\rho}+\rho > \alpha$$

따라서 α가 $\frac{2N^2(1-\rho)}{N(2-\rho)+\rho}+\rho$ 보다 작을 경우에는 수직적 유연 생산 시스템이 전문화 시스템보다 유리하고, 그 이외의 범위에서는 전문화 시스템이 유리하다.

전문화시스템을 수평적 유연시스템, 수직적 유연시스템과 비교할 때 기준이 되는 $N(1-\rho)+\rho > \alpha$와 $\frac{2N^2(1-\rho)}{N(2-\rho)+\rho}+\rho > \alpha$ 모두 ρ가 1에 근접해 감에 따라 1의 값을 취한다. 따라서 이 경우에는 전문화시스템 ($\alpha > 1$)이 유연시스템보다 유리하다. 이러한 결과가 도출되는근거는 ρ가 증가함에 따라 고객의 평균시스템체류시간이 볼록증가(convex increasing)하여 ρ가 1에서는 ∞값을 취하기 때문이다.

Ⅳ. 부품 공유(Commonality of Parts)

여러 제품 제조에 필요한 부품들을 설계하는데 지금까지 다루어온 유연성의 개념을 도입하여 보고 그에 따른 효과가 어떠한지를 살펴보자.

제품 i'를 제조하는데 부품 i가 필요하다고 하자($i = 1, 2, 3, \cdots, N$). 이때 부품들의 집합 $\{1, 2, 3, \cdots, N\}$에 유연성을 도입한다는 것은 부품 재설계를 통해 N종류의 별도의 부품을 사용하는 대신에 모든 제품에 사용될 수 있는 공통 부품을 개발한다는 것이다.

이는 부품의 공유(Commonality of Parts)라고도 불리우는데, 그로써 한 가지 제품에만 맞는 기능을 하던 부품을 여러 제품의 필요성을 충족시킬 수 있도록 개조한다는 면에서 유연성의 개념을 도입할 수 있다. 이해를 돕기 위해 다음 예를 살펴 보자. 두 가지 모델의 도구를 만드는 회사가 있는데, 하나는 A형의 볼트와 너트를 사용하도록 설계되어 있고, 다른 하나는 B형의 볼트와 너트를 사용하도록 설계되어 있다고하자. 이런 경우 두 모델을 설계한 팀들간의 협조하에서, 필요한 볼트와 너트를 기존의 것과 유사한 역할을 하는 C형으로 공통적으로 쓸 수 있도록 설계할 수 있다. 그러면 부품 설계에 유연성을 도입함으로써 부품공유를 할 수 있는 바, 이로 인한 효과가 어떠한지를 전형적인 재고 관리 모델 중의 하나인 Newsboy Model의 경우를 통해 살펴 보자.

1. Newsboy Model

Newsboy Model은 제품 수요에 대한 불확실성이 존재할 때, 즉 제품 수요가 어떤 확률분포를 따를때 최적 재고 보유량을 결정하는 재고관리 모형이며, 이는 단일기간(single period)에 적용할 수 있다. h를 제품 한 단위를 단위시간 동안 보유할 때 발생하는 재고유지 비용, p를 제품 한 단위가 수요를 충족시키지 못할 때 발생하는 기회비용인 재고 부족 비용, c를 제품 구입 단가라고 하자. 또한 단위기간 동안 해당 제품에 대한 수요는 평균이 μ, 분산이 σ^2인 정규분포를 따른다고 가정하자. 표준 정규분포의 확률분포 함수를 ϕ으로, 그리고 누적 확률분포 함수를 Φ으로 나타내도록 하자. 그리고 임계 비율(Critical Fractile) ζ를 $\frac{p-c}{p+h}$ 라 할때 다음 결과는 최적 재고주문에 따른 비용을 나타낸다.

정 리 3

$z = \Phi^{-1}(\zeta)$라 할때 최적 재고수준은 $S^* = \mu + z\sigma$ 이고 최적 재고 주문에 따른 기대 비용은 $C^* = c\mu + [(c+h)z + (p+h)I(z)]\sigma$ 인데 여기서 $I(z)$는 손실 함수(Loss Function)라고 불리우며 $I(z) = \int_z^\infty \phi(t)dt$ 로 정의된다.

그러면, 위 정리를 바탕으로 부품 공유의 효과를 살펴보자.

2. 부품 공유 효과

부품 i에 대한 수요는 제품 i'에 대한 종속 수요(Dependent Demand) 인데 부품 1, 2, …, N에 대한 수요는 N차원 정규분포를 따른다고 가정하자. 또한 부품 i의 수요에 대한 평균은 μ_i, 분산은 σ_i^2으로 표시하자. 분석의 간편성을 위해 모든 종류의 부품에 해당하는 구입단가 c, 재고 유지 비용 h, 재고 부족 비용 p는 공통이다. 이 때 각 제품별로 각기 다른 부품을 사용하는 경우 최적 재고수준은 부품 i의 경우 $S_i^* = \mu_i + z\sigma_i$ 이고 부품 i에 대해 발생하는 최적 기대비용은 $C_i^* = c\mu_i + [(c+h)z + (p+h)I(z)]\sigma_i$이다.

따라서 시스템 전체의(모든 부품에 관한) 최적 기대 비용은

$$\begin{aligned} C_0^* &= \sum_{i=1}^{N} C_i^* \\ &= c\sum_{i=1}^{N}\mu_i + [(c+h)z + (p+h)I(z)]\sum_{i=1}^{N}\sigma_i \end{aligned}$$

이제 앞서 언급한 부품 유연성을 도입하여 N종류의 제품 모두에 대해 공통의 부품을

사용할 수 있도록 하였다고 하자. 이때 최적 기대비용이 어떻게 될 것인지 살펴보자. 원래의 시스템(부품 유연성 도입 이전의 시스템)에서 부품 i에 대한 수요를 D_i라 표시하자. 그러면 부품 유연성을 도입한 경우 공통 부품에 대한 수요는 $\sum_{i=1}^{N} D_i$ 가 된다.

$\sum_{i=1}^{N} D_i$ 는 평균이 $\sum_{i=1}^{N} \mu_i$ 이고 분산이 $\sum_{i=1}^{N} \sigma_i^2 + 2\sum_{i<j} \mathrm{cov}_{ij}$ 인 정규 분포를 따른다(Mood p.164 참조).

따라서 공통 부품에 대한 최적 재고수준과 그에 따른 최적 기대비용은

$$S_F^* = \sum_{i=1}^{N} \mu_i + z\sqrt{\sum_{i=1}^{N} \sigma_i^2 + 2\sum_{i<j} \mathrm{cov}_{ij}}$$

$$C_F^* = c\sum_{i=1}^{N} \mu_i + [(c+h)z + (p+h)I(z)]\sqrt{\sum_{i=1}^{N} \sigma_i^2 + 2\sum_{i<j} \mathrm{cov}_{ij}}$$

그러면 가장 기본적인 경우로 부품 수요들이 상호 독립적인 경우 공통 부품을 사용함으로써 발생하는 비용절감 효과를 살펴보자. 상호독립인 경우에는 $\mathrm{cov}_{ij} = 0$이 되므로 기대비용 절감은

$$C_0^* - C_F^* = [(c+h)z + (p+h)I(z)]\left(\sum_{i=1}^{N} \sigma_i - \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \sigma_i^2}\right)$$

$\sum_{i=1}^{N} \sigma_i \geq \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \sigma_i^2}$ 이므로 $C_0^* - C_F^* \geq 0$ 은 자명하다.

정 리 4

위에서 언급되었듯이 N종류의 부품에 대한 수요가 정규분포를 따른다고 보고 각종 표시(Notation)을 받아 들이자.

(1) 부품 공유에 따라 기대 비용이 절감된다. 즉, $C_0^* \geq C_F^*$이 성립한다.

(2) 기대 비용 절감 효과 $C_0^* - C_F^*$는 부품공유 대상항목 수 N 이 커짐에 따라 증가한다.

〈증 명〉

(1) 이미 증명이 되었다.

(2) $\sum_{i=1}^{N} \sigma_i = A$, $\sum_{i=1}^{N} \sigma_i^2 = B$ 라 표시하면

N종류 부품의 경우 $C_0^* - C_F^* = [(c + h)z + (p + h)I(z)] \quad (A - \sqrt{B})$

새로이 한 종류의 부품을 (분산이 d^2) 공통부품 사용범위에 추가하여 보자.

그러면, $C_0^* - C_F^* = [(c+h)z + (p+h)I(z)](A + d - \sqrt{B+d^2})$

$$(A + d - \sqrt{B+d^2}) - (A - \sqrt{B})$$

$$= d + \sqrt{B} - \sqrt{B+d^2}$$

그런데,

$$(d+\sqrt{B})^2 - (B+d^2) = 2d\sqrt{B} > 0 \text{ 이므로}$$

$$d + \sqrt{B} - \sqrt{B+d^2} > 0$$

따라서 기대 비용 절감 효과 $C_0^* - C_F^*$는 N에 대해 단조 증가한다.

그런데 상당수의 기업현실에서는 자사의 여러 제품에 대한 수요는 음의 상관 관계(Negative Correlation)가 있을 경우가 많다. 예를 들어 스웨터 제조업체의 경우 적색 스웨터에 대한 수요는 청색 스웨터에 대한 수요와 음의 상관 관계가 있기가 쉽다. 이런 경우, 공통 부품을 사용할 때 발생하는 수요에 대한 표준편차는 $\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\sigma_i^2 + 2\sum_{i<j}\mathrm{cov}_{ij}}$ 로서 $\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\sigma_i^2}$ 보다 작게 되며, 따라서 원래의 시스템에 비해 기대비용 절감효과가 더욱 커지게 된다.

V. 結 言

우리는 본 논문에서 기계 설비 및 인력에 유연성을 도입함으로써 작업이 수행되는데 걸리는 평균 시간을 현격히 줄일 수 있음을 보았고, 또한 부품 설계시에 유연성 개념을 도입함으로써 재고관리상에도 큰 이득을 얻을 수 있음을 보여 주었다. 그런데 유연 생산시스템을 분석할 때의 가정 중 하나가 한 종류의 작업을 수행하다가 다른 종류의 작업으로 변환할 때 발생하는 Switch-over 시간이 없다는 것이다. 실제로는 이것은 간단한 가정으로 끝나는 문제가 아니고, 어떻게 Switch-over 시간을 줄일 수 있도록 생산공정 및 준비작업(Set-up)을 개선해 나가야 하는가가 큰 연구 주제이다. 이러한 준비작업시간의 단축은 유연 생산시스템이 제 역할을 하기 위한 전제 조건이기도 하다. 이는 또한 토요타 생산방식에서 말하는 SMED(Single Minute Exchange of Die)에 그 원천을 둔다고 할 수 있는데 Switch-over Time 에 대한 보다 구체적인 분석이 앞으로의 과제라 볼 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

Kleinrock, L.(1975). *Queueing Systems*, Vol.I and II, John Wiley and Sons.

Klimov, G.P.(1974). *Time Sharing Service Systems I,* Theory of Probability Applications, 19, 532-551.

Mood, A.M., Graybill, F.A., and Boes, D.C.(1974). *Introduction to the Theory of Statistics,* McGraw Hill.

Nam, I.H.(1993). *Flexibility in Manufacturing: Dynamic Scheduling and Resource Pooling,* Ph.D. Thesis, Graduate School of Business, Stanford Univ.

Porteus, E.L.(1988). *Stochastic Inventory Theory, Research Paper No. 1029,* Graduate School of Business, Stanford Univ.