Journal of the Korean Institute
of Industrial Engineers
Vol. 19, No.3, September., 1993.

셀 형태의 생산 시스템의 유연성 측정 모형†

Flexibility Measurement Model for Cellular Manufacturing Systems†

정은경* · 전태보** · 김영휘*

Eun Kyung Jung* · Tae Bo Jeon** · Young Hui Kim*

Abstract

This paper suggests an approach to quantitative evaluation of a manufacturing flexibility in automated manufacturing systems. The flexibility of a cell is newly defined and evaluated in use of the environmental change factors which may influence flexibility for satisfying a manufacturing performance objective. The number of machines, the number of operations, machine breakdowns and processing times are considered for this cell flexibility measure. The cell flexibility measures the extent that the cell utilizes the processes to acquire high throughput. Simulation program written in SLAM System was used to help measure cell flexibility.

The proposed cell flexibility measure provides a prediction of the influence of the factors on throughput performance, and applies in case of comparison of existing system and a new system, changes in operation conditions of a cell, and comparison of rival machines. Therefore it can be used as decision making criteria for system justification.

1. 서 론

오늘날 제품에 대한 수요가 다양해지고 시장 상황이 급변함에 따라, 이에 대처하여 생산성을 향상시키고 시장에서의 경쟁력을 높이기 위하여 자동화된 생산 시스템의 도입이 보편화되고 있다. 특히 job shop보다는 적은 종류의 부품을, 전용라인보다는 적은 양을 생산하기 위하여 가공경로와 순서, 모양, 크기 등이 비슷한 부품들을 모아 생산하는 셀생산(cellular manufacturing systems)형태가 많이 도입되고 있다. 변화하는 시장 상황에 적응하기 위하여 생산형태를 수시로 완전히 바꾸는 것은 힘들며, 다만 어느 정도 예측된 상황을 흡수할 수 있도록 구성된 시스템이 시장수요의 변화에 얼마나 빠르고 경제적으로 대응하느냐 즉, 얼마나 유연성이 있느냐가 중요하게 되었다. 또한, 시장 상황의 변화에 따라 시스템의 타당성 평가에서 생산성과 마찬가지로 품질, 유연성 등의 정량

† 본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구 지원에 의하여 수행되었음.

* 고려대학교 산업공학과

** 강원대학교 산업공학과

화가 힘든 무형의 요소들이 시스템의 중요한 수행성능이 되어 유연성이 타당성 평가에서 중요한 성질로 부각되었다.

자동화 시스템의 타당성 평가에 관한 기존의 연구들은 시스템의 도입타당성 평가를 위해 DCF(discounted cash flow) 방법, 분석적 방법, 유연성의 전략적 가치를 다루는 재정적인 평가(financial justification) 방법을 주로 이용한다[18, 22]. 이러한 재정적 평가방법으로는 자주 변화하는 제조환경에 시스템이 얼마나 유연하게 대응하는지를 분석적으로 나타내는 것이 어렵다. 유연성의 다양한 성질을 개념적으로 분류하는 연구 [3, 5, 10, 12] 이래 유연성의 개념을 특정 시스템에서 체계화하려는 노력들이 있었다[2, 4, 6, 7, 9, 23]. 또한, 유연성의 가치를 정량적으로 표현하고자 한 연구들[1, 7, 8, 13, 14, 15, 21, 23]도 있으나, 대부분 유연성의 종류별로 척도를 구하였고 일부는 비용요소로써 척도를 표현하였다[21]. 유연성의 종류들은 상호의존적인 특성이 있어 [2, 23] 각각을 척도로 나타낼 경우 의사결정 과정에서의 척도사용에 문제가 있고 유연성의 일부 성질은 비용요소로의 표현이 곤란하다. 유연성을 시스템 총체적으로 표현하여 분석적으로 정량화한 연구는 거의 없는 실정이며 단지 Roll등[20]이 유연생산 셀(flexible manufacturing cell)에서의 processing flexibility를 정의하고 이에 대한 유연성 척도를 구해 셀에 대한 평가기준으로 제시하였다. 그들은 셀에서 생산가능한 부품에 대한 정보를 고려치 않은 상태에서 셀 내의 기계 댓수와 작업의 수로써만 유연성을 측정하였다.

본 연구에서는 자동화 시스템에서 생산활동의 중심이 되는 셀을 대상으로 기계 자체에서 나아가 셀 차원에서 유연성을 새로이 정의하고 이를 정량적으로 평가하는 척도를 개발하여 셀 형태의 생산 시스템에 대한 의사결정에 도움을 주고자 한다. 즉, 생산통제, 시스템 설계, 제품조합의 변화, 새로운 설비투자 등에 대한 의사결정시 이에 대한 기준으로 사용할 수 있는 정량적 척도를 제시한다.

2. 유연성 측정 골격(frame)

유연성을 보는 관점에 따라 저자마다 유연성을 다양하게 정의하고 있다. 유연성을 "환경의 변화에의 적응성"[16] 또는 "환경에 의해 초래되는 불안정성" [17]이라 폭넓게 정의하거나 "제조의 기능과 용량을 바꾸는 능력" [14]을 유연성의 주요 측면으로 보기도 하였다. 여기에서 공통적으로 고려되는 사항들은 환경에 의해 시스템에 변화가 일어나는 것과 시스템이 변화에 적응하는 것이다. 유연성의 분석에는 노동력, 생산, 전략, 조직구조 등 여러 측면을 고려할 수 있는데 본 연구에서는 생산의 유연성(manufacturing flexibility)에 촛점을 맞출 때 유연성이란 "제조환경의 변화에 시스템이 효과적으로 대응하는 능력"이라 할 수 있다.

시스템의 제조환경의 변화에 효과적으로 대응하는 능력으로서 유연성을 고려하는 것은 결국 시스템이 본연의 역할을 얼마나 큰 변동없이 잘 하느냐 즉, 시스템의 제조성능(manufacturing performance)을 얼마나 잘 유지시킬 수 있느냐를 보기 위함이다. 제조환경에 변화가 생기면 시스템은 그에 반응 내지는 적응하고 그에 따라 시스템의 제조성능이 영향을 받는다. 따라서 유연성의 척도에 제조성능이 잘 반영된다면 시스템을 설계하는데 큰 도움을 줄 수 있고 개념적인 유연성과 실제 운영상황과의 일치 여부를 확인 하는데에도 유용할 것이다. 따라서 시스템에 가해지는 변화와 이에 따른 제조성능의 변화의 관계로부터 시스템의 유연성을 측정하기로 한다.

시스템의 변화는 시스템 외적인 변화와 내적인 변화로 구별되며 각각은 단기, 중기, 장기의 여러 시간규모로 일어날 수 있다[11]. 셀은 생산부품의 종류 및 그 양에 따라 이미 그 구조가 결정되므로 생산량의 급격한 변화, 가공방법이 기존 제품과 완전히 다른 신제품의 도입 및 기존 제품의 단종 등의 장기적 변화는 고려에서 제외한다.

제조 시스템의 수행평가기준으로 흔히 고려

되는 것은 생산률(throughput rate), 시스템 체류시간, 공정이용율(machine utilization), 시스템 대기시간 등이다. 생산률은 단위시간당 생산량을 의미한다. 시스템이 제조환경의 변화에 효과적으로 반응하는 경우 높은 생산률을 유지할 수 있고 작업물의 시스템 체류시간을 줄일 수 있으며 공정이용율을 적절히 유지할 수 있다.

이러한 측면에서 이제 제조환경의 변화와 시스템, 그리고 제조성능 등의 관계를 그림으로 도시하면 그림 1과 같다. 이 그림에서 시스템 외적인 변화는 주로 시장수요와 관련된 변화들이다. 시스템 외부에서는 어떤 제품이 얼마나 자주, 얼마나 많은 양의 주문이 들어오는지 그리고 그 주문품이 얼마나 빨리, 언제까지 생산되어야 하는지에 대한 정보가 들어온다.

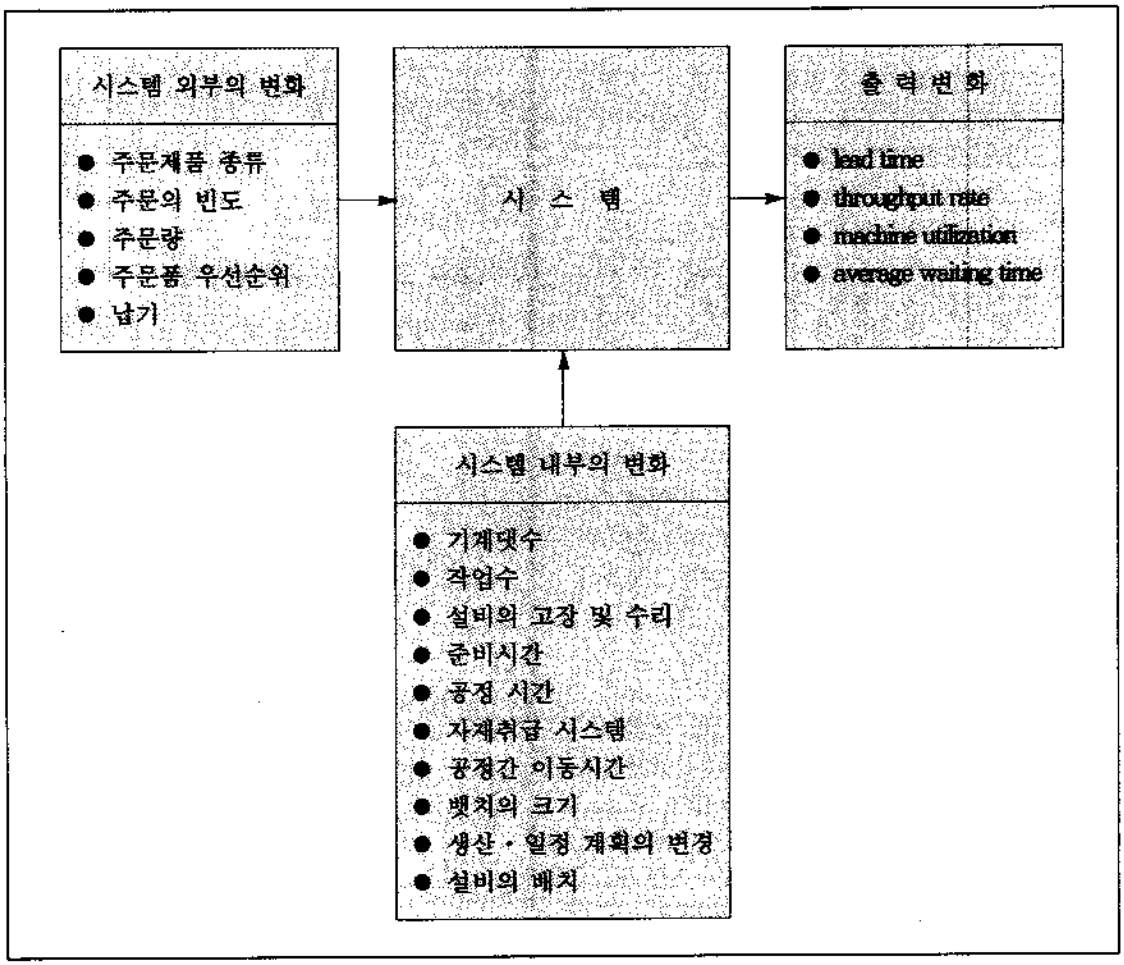

그림 1. 시스템과 제조환경의 변화요인들간의 관련도

시스템 내부의 변화요인은 크게 기계 및 설비, 자재취급 시스템, 생산 · 일정계획, 설비의 배치 등을 들 수 있다. 기계 및 설비에 대해서는 시스템 내의 기계 댓수와 그것들이 처리할 수 있는 작업의 수에 따라 시스템의 공정이 얼마나 효율적으로 이용되는가 그리고 경로가 얼

마나 많은가가 결정된다. 설비특성으로서 설비의 고장 및 수리, 기계 작업을 위한 준비시간, 작업물을 처리하는데 필요한 공정시간 등이 시스템의 공정처리 능력을 결정한다. 자재취급 시스템은 작업물의 공정간 이동을 담당하여 생산을 원활하게 하며 생산 • 일정계획의 변경은 생산부품의 종류나 부품의 생산순서를 변화시킨다. 뱃치 생산의 경우 뱃치의 크기는 스케쥴링의 문제와 연관되어 시스템의 제조성능에 영향을 미친다. 설비의 배치는 자재취급 시스템 운영이나 대안경로의 이용 가능성을 설명해 준다. 즉, 경로가 고정되어 있지 않은 경우 기계의 배치상태에 따라 다음 공정을 처리하는 기계를 선택하는 경향이 영향받을 수 있다.

출력의 변화는 제조성능과 깊은 관련이 있다. 시스템의 외부의 변화에 따라 시스템 성능에 변화가 생기는 예로서 주문제품의 종류가 바뀌면 시스템이 그것들을 처리한 결과로 lead time이 길어지거나 공정의 이용율이 낮아지는 경우를 보자. 제조성능의 변화는 시스템이 얼마나 효과적으로 대응했는지를 반영하는 것으로 제품종류의 변함에도 lead time이나 공정이용율이 일정수준을 유지하면 유연성이 있다고 볼 수 있다. 시스템 내부 및 외부의 변화에 대해 제조성능은 한가지 형태만 변화하는 것은 아니며, 똑같은 제조성능의 변화에 대해서도 시스템에 대한 변화의 원인이나 시스템의 반응과정에는 차이가 있을 것이다. 기계고장 등의 경우 공정이 정상적으로 운영되는가는 생산률에서 알 수 있다. 생산량의 변화 특히 생산량 증가시는 재공재고가 증가되고, 공정의 이용상태가 변화하여 공정이용율이 달라질 것이다.

유연성의 척도는 시스템이 만족해야 하는 제조성능에 가장 큰 영향을 미치는 변화요소들로써 표현하며 나머지 요소들은 고정시키거나 가정사항을 통해 그 변화의 영향을 반영한다. 본 연구에서는 유연성을 표현하기 위하여 생산률(throughput rate)을 기준으로 하여 시스템 내외의 변화에 따른 생산률의 변화를 유연성에 반영하도록 한다.

3. 셀 유연성 모형

3.1 셀 유연성의 정의

상술한 바와 같이 유연성의 특정종류나 시스템 내의 일부 구성요소에 국한하지 않는 시스템 차원의 관점에서 이제 셀 유연성은 특정 생산 셀에서 일정 부품군을 생산하는데 높은 생산률(throughput rate)을 얻기 위하여 공정을 효율적으로 운영할 수 있는 정도로 정의될 수 있다. 즉, 셀 유연성은 특정 부품조합을 생산하기 위해 셀의 용량이 허용하는 한도내에서 가능한한 적은 수의 기계로 여러 작업을 행하며 대안 경로를 적절히 활용하여 높은 생산률을 내는 정도를 의미한다.

3.2 셀의 운영특성 및 고려사항

셀은 자동화 및 무인화를 목표로 유사한 특성을 가진 부품을 가공하기 위한 가공기계 및 주변설비들이 통합되어, 생산성과 효율을 높이는 단위구조이다. 본 연구의 대상이 되는 셀은 한가지 또는 그 이상의 작업을 처리할 수 있는 여러 대의 기계로 구성되어 있고, 작업물과 공구의 교환 및 자재취급과 저장 등이 자동화되어 있다. 또한, 대상 셀은 다양한 공정경로를 이용하여 적은 수의 기계로 다양한 부품을 생산한다. 셀이 일단 구성되고 나면 셀에서 생산할 수 있는 부품 spectrum이 결정되므로 궁극적으로 셀에서 생산할 수 있는 부품조합 및 가공순서는 예측될 수 있다.

셀 유연성 평가를 위하여 고려되는 사항은 우선 셀을 구성하고 있는 기계의 수와 셀에서 처리할 수 있는 작업의 수로 그에 따라 셀에서 생산할 수 있는 부품의 종류 및 양이 결정된다. 또한 기계가 어떤 작업을 처리하는데 요구되는 공정시간은 셀의 생산률에 중요한 영향을 미친다. 즉, 같은 작업을 처리하는 기계가 여러 대인 경우에 각 공정시간의 차이는 기계의 용량 뿐만 아니라 공정의 경로를 어떤 것을 택하는가에도 영향을 미친다.

기계 댓수와 작업의 수, 공정시간 외에도 유연성을 평가하는데 중요한 영향을 미치는 여러 가지 특성들이 있다. 기계의 고장이나 유지 보수 등으로 인한 설비의 고장시간이 길수록 생산률은 더욱 떨어진다. 즉, 기계의 고장은 유연성에 영향을 미치는 요인이 된다. 작업물의 취급 시스템과 저장장소도 유연성에 영향을 미친다. 기계 간 또는 기계와 버퍼 간의 작업물 이동시에 작업물 취급 시스템이 원활하지 못하면 셀의 운영이 원활하지 못할 것이다. 기계 간 공정률의 불균형 또는 한대 이상의 기계고장으로 인한 재공재고를 흡수하기 위한 셀 내의 버퍼는 작업물을 필요할 때 로드시킬 수 있게 하여 load/unload 시간을 줄인다. 또한 셀 내의 스케쥴링 체재는 작업물을 여러 대안 경로 중 가장 좋은 경로에 할당할 수 있게 하여 생산률을 높인다.

이상의 고려사항들에 대하여 모형설정을 위한 전반적인 셀 운영에 관한 가정은 다음과 같다.

1) 작업물은 모든 기계와 버퍼에 접근 가능하며 취급할 수 있는 작업물의 용량은 충분히 크다. 즉, 자재취급이 셀 운영에 제한요건이 되지 못한다.

2) 공정간 이동시간은 극히 미미하다.

3) 버퍼의 용량은 적절하여 기계 간 부하의 불균형, 기계의 고장 등의 상태에서 셀 기능을 계속하는데 제한요건이 되지 못한다.

4) pull type scheduling rule을 따른다.

상술한 고려사항들로부터 셀 유연성을 평가하기 위하여 고려할 주요 요소는 기계댓수, 작업수, 기계의 고장, 공정시간 등이다.

3.3 셀 유연성 척도

이제 우리의 목표인 셀 유연성 척도를 모형화한다. 우선 척도의 모형화를 위해 이용할 기호들 및 수식의 의미는 다음과 같다.

N : 셀에서 처리할 수 있는 총 작업수
H : 셀에서의 총 예상 가동 기계댓수
H_j : 셀에서 작업 j를 할 수 있는 예상 가동 기계댓수
R_i : 기계 i의 가동율
t_{ij} : 기계 i가 작업 j를 하기 위하여 소요되는 공정시간
t_j^*: 작업 j의 공정시간 중 최소값

$$t_j^* = \min_i \{t_{ij}\}$$

w_k : 부품 k의 생산비율

$$I_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{기계 i가 작업 j를 할 수 있는 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$$

$$K_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{기계 i가 고장났을 때 제품 k의 처리가능한 경로가 존재하는 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$$

c_i : 기계 i의 잠재용량 $\quad u_i = (\sum_i C_i)/c_i$

$$v_i = u_i / \sum_i u_i$$

셀 유연성은 우선 셀 전체의 기계댓수 중에서 각 작업을 처리할 수 있는 평균 기계 댓수의 비로부터 평가될 수 있다. 이 때, 각 작업에 대하여 전체 기계댓수 중 그 작업을 처리할 수 있는 기계댓수의 비는 셀 유연성의 정도를 설명해 준다. 즉, 그 비가 높다는 것은 상대적으로 그 작업을 처리할 수 있는 대안경로가 많다는 것을 나타내준다. 실제로 기계의 고장상태를 고려할 때 예상 가동댓수로부터 그 비 H_j/H가 표현되어야 한다.

기계 i의 정상가동율 R_i가 주어지고 각 기계는 서로 독립적으로 고장이 발생한다고 할 때 셀 내의 기계 중 총 예상가동댓수 H는

$$H = \sum_i R_i$$

로써 표현된다. 또한, 작업 j를 처리할 수 있는 예상 가동 기계댓수는 마찬가지로 가동을 R_i를 고려할 때 $\sum_i I_{ij}R_i$로 나타낼 수 있다. 효율적인 생산을 위해서는 공정시간이 짧은 기계를 선택하는 것이 효과적이다. 따라서, 같은 작업을 하는 기계라 할지라도 공정시간이 긴 기계가 선택되는 것은 비효율적임을 반영하여 가장 짧은 공정시간에 대한 비로써 보정해 줄 때 셀에서

작업 j를 처리할 수 있는 예상 가동 기계댓수 H_j는

$$H_j = \sum_i I_{ij} R_i t_j^* / t_{ij}$$

이다. 작업을 할 수 있는 기계댓수 H_j는 한계효과를 가지므로 H_j/H비는 a(1인 a승으로 증가된다.

총 기계댓수 중 각 작업을 처리할 수 있는 평균 기계댓수의 비는 대안경로의 가용성에 대한 모든 부분을 설명해주지는 못한다. 왜냐하면 그 평균값이 크다고 하더라도 각 기계의 부하의 차이에 의하여 대안경로의 실제 활용능력이 영향받기 때문이다. 즉, 어느 한 기계에 부하가 많이 걸려서 그 기계가 대부분의 시간을 작업 중이라면, 어떤 한 부품의 다음 작업이 그 기계에서 처리될 수 있다고 하더라도 다음 작업을 위해 그 기계가 선택되지는 않을 것이기 때문이다. 이로부터 기계의 용량 및 부하에 관한 요소를 유연성의 평가에 반영한다. 기계의 용량은 뱃치생산에서의 뱃치크기나 가용경로, 공정시간 및 준비시간, 병목(bottleneck) 공정 등 여러 요소의 영향을 받으나 본 연구에서는 뱃치 크기 및 준비시간 등은 고려치 않으므로 주어진 공정시간표로부터의 공정시간정보를 이용하여 각 기계의 용량을 구하고 이를 셀 유연성을 평가하는 항목으로 고려한다. 즉, 기계 한 대가 고장날 경우 셀에서의 평균 부품처리 정도를 셀 유연성 척도에 반영한다. 부품조합과 각 부품의 작업순서 및 부품의 생산비율이 주어질 때, 기계 한 대가 고장날 경우 셀에서의 평균 부품처리 정도를 고려하자. 이는 기계 i가 고장났을 경우에 셀에서 부품을 처리하는 정도 T_i에 기계 i의 가중치 v_i를 곱하여 모든 기계에 대하여 더함으로써 구한다. 이 때, T_i는 다음과 같이 구한다. 부품의 작업순서가 주어지면 각 부품에 대한 가능한 작업경로(routes)가 결정된다. 기계 i가 고장났을 경우에 셀에서 부품 k의 가용경로의 존재 유무를 K_{ik}로 나타내면, T_i는 K_{ik}에 각 부품의 가중치 w_k를 곱하여 모든 부품에 대하여 더함으로써 구해진다. 즉,

$$T_i = \sum_K w_k K_{ik}$$

와 같이 나타낼 수 있다. 한편, v_i는 기호 및 수식에서 나타낸 바와 같이 구한다. T_i는 기계 i만이 처리할 수 있는 작업이 존재하는 경우에 작아지는 값이다. 셀에서 기계 한 대가 고장날 때의 평균 부품처리 정도를 구할 때 각각의 기계에 대한 부품처리 정도 T_i에 기계 i의 용량 및 부하에 역비례하는 가중치, v_i를 곱하는 것은 기계 i가 고장날 때의 부품처리 정도는 i 이외 기계의 용량한도 내에서 이루어져야 한다는 근거에서 구해진다. 즉, 기계 i에 부하가 크게 걸리면 기계 i의 부품처리 정도 T_i는 셀 전체의 부품처리 정도에 적은 영향 밖에 주지 못할 것이다. 이로부터 셀 유연성의 평가척도, F는

$$F = 1/N \sum_j (H_j/H)^a \sum_i v_i T_i$$
$$= [1/N(\sum_i R_i)^a] \sum_j (\sum_i I_{ij} R_i t_j^* t_{ij})^a$$
$$\sum_i v_i \sum_k w_k K_{ik},\ 0 < a \leq 1$$

이 된다.

3.4 셀 유연성 척도 계산예

셀 유연성의 평가를 위해 공정시간표를 고려하자. 도표 1은 네대의 기계가 다섯가지 작업을 할 수 있는 셀의 공정시간표이다(N=5) 이 도표에서 값이 주어진 칸은 각각의 기계가 해당 작업을 처리할 수 있음을 나타내고, 그 값은 그 기계가 해당 작업의 작업물 하나를 처리하는데 필요한 단위시간이며 같은 작업을 처리하는 데에도 기계마다 서로 다른 공정시간이 필요하다. 이 셀의 경우 각 작업을 처리할 수 있는 기계댓수는 각각 세대, 한대, 한대, 두대, 한대이다.

다음으로 기계의 고장비율이 도표 2와 같이 주어졌을 때,

$$H=\sum_i R_i=(1-0.05)\times 3+(1-0.10)=3.75$$

로 계산되고 H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 등은

$H_1=0.95\times 11/11+0.96\times 11/13+0.90\times 11/15=2.41$
$H_2=0.95\times 16/16=0.95$
$H_3=0.95\times 12/12=0.95$
$H_4=0.95\times 16/16+0.95\times 16/17=1.84$
$H_5=0.95\times 11/11=0.95$

와 같이 얻어진다.

도표 1

작업 / 기계	a	b	c	d	e
1	11				
2			12	16	11
3	13	16		17	
4	15				

도표 2

기 계	기계 고장 비율
1	0.05
2	0.05
3	0.05
4	0.10

이상의 총 기계댓수 중 각 작업을 처리할 수 있는 평균 기계댓수의 비는 대안경로의 가용성에 대한 모든 부분을 설명해주지는 못한다. 도표 3과 같은 공정시간표를 갖는 또 다른 셀을 고려하자. 기계고장비율은 도표 1의 셀과 같다고 할 때 총 기계댓수 중 각 작업을 처리할 수 있는 평균 기계댓수의 비는 서로 동일하다. 그러나 이들 두 셀의 생산률에는 차이가 있을 것이다. 즉, 기계 2에는 추가적인 부하가 걸려서 실제로는 작업 a나 d에 대한 대안경로를 선택하는 정도에 거의 기여하지 못할 것이기 때문이다.

도표 3

작업 / 기계	a	b	c	d	e
1	11				
2	13		12	16	11
3		16		17	
4	15				

도표 4와 같이 처리되는 부품조합에 관한 정보가 주어지는 경우에, A, B, C의 세가지 부품이 도표 1의 셀에 임의의 순서로 들어오며 각 부품의 주문량은 각각 40%, 25%, 35%의 비율을 갖는다고 가정하자. 이 경우 작업순서로부터 각각의 부품종류에 대한 가능한 경로들을 모두 고려할 수 있으며 그 결과는 도표 5와 같다. 다음으로 기계 1이 고장날 경우에 부품 A는 3-2-2, 4-2-2의 가능한 경로들이 존재한다. 즉, $K_{11}=1$이 된다. 마찬가지 방법으로 각각의 K_{ij}를 구하면 다음과 같다.

$K_{12}=1$, $K_{13}=1$
$K_{21}=0$, $K_{22}=0$, $K_{23}=1$, $K_{31}=1$, $K_{32}=1$,
$K_{33}=0$, $K_{41}=1$, $K_{42}=1$, $K_{43}=1$

이로부터 각 T_i를 구하면,

$$T_1=\sum_k w_k K_{1k}=0.4\times 1+0.25\times 1+0.35\times 1=1$$

$$T_2=\sum_k w_k K_{2k}=0.35$$

$$T_3=\sum_k w_k K_{3k}=0.65$$

$$T_4=\sum_k w_k K_{4k}=1$$

을 얻는다.

도표 4

부품종류	작 업 순 서	생산비율
A	a → c → e	0.40
B	a → c → d → e	0.25
C	a → b → d	0.35

도표 5

부품종류	가 능 경 로
A	1-2-2, 3-2-2, 4-2-2
B	1-2-2-2, 1-2-3-2, 3-2-2-2, 3-2-3-2, 4-2-2-2, 4-2-3-2
C	1-3-2, 1-3-3, 3-3-2, 3-3-3, 4-3-2, 4-3-3

한편, 도표 1의 공정시간표로부터 각 기계의 잠재용량과 그에 따른 각 기계의 가중치(v_i)를 구할 수 있다. 이 때 각 기계의 잠재용량은 실제 처리용량에 그 기계에서 처리할 수 있는 작업의 종류를 고려하여 계산한다. 예를 들면, 기계 2의 잠재용량은 작업 c, d, e에 대한 단위시간당 처리용량의 평균치에 처리할 수 있는 작업종류를 고려하여 $(1/12+1/16+1/11)/3\times 3=0.237$이다. 가중치, v_i는 기호 및 수식의 수식에서 구하며, 기계별 잠재용량 및 가중치의 계산결과는 도표 6과 같다.

도표 6

작업 / 기계	a	b	c	d	e	기계별 잠재용량 (c_i)	가중치 (v_i)
1	11					0.091	0.31
2			12	16	11	0.237	0.12
3	13	16		17		0.198	0.15
4	15					0.067	0.42

따라서 a=0.25라 할 때 도표 1의 셀 유연성은 다음과 같이 구해진다.

$$F=(1/5\times 3.75^{0.25})(2.41^{0.25}+0.95^{0.25}\times 3+1.84^{0.25})(0.31+0.12\times 0.35+0.15\times 0.65+0.42)=0.671$$

위의 셀 유연성 계산에 필요한 a값은 다음과 같이 결정된다.

다기능 기계를 포함하는 셀에서 다양한 경로를 통하여 생산률을 얻고자 하는 경우 다수의 작업을 수행할 수 있는 기계댓수가 많을수록 유리하다. 최선의 경우 모든 기계가 모든 작업을 처리할 수 있다면 가장 유연한 상태라고 볼 수 있다. 이렇게 가장 유연한 상태에서는 한 작업이 끝날 때마다 가능한 경로가 기계댓수만큼 주어지므로 경로 선택의 폭이 넓어져 그만큼 높은 생산률을 가질 것이다. 각 셀에 대한 가장 유연한 상태에서의 공정시간은 현 상태의 공정시간표로부터 임의로 구한다. 즉, 빈칸은 그 작업을 하는 모든 기계의 공정시간 중 최소값을 취함으로써 메꾼다. 예를 들면, 도표 1상의 셀에 대한 가장 유연한 상태의 공정시간표는 도표 7과 같다. 셀 유연성을 적은 수의 기계로 다양한 경로를 이용하여 높은 생산률을 얻는 정도라고 할 때, 그 정도는 생산률의 비로써 표현되어야 하며, 이 때 가장 유연한 상태가 현 상태(불완전한 유연상태)의 생산률에 대한 기준이 되어야 한다. 즉, 셀 유연성의 척도로부터 구해진 값은 현 상태의 생산률과 가장 유연한 상태의 생산률과의 비와 밀접한 상관관계를 가져야 한다. 따라서, 상수 a는 이러한 조건을 만족시키는 방향으로 정해진다.

실제로 원하는 범주의 셀 구성형태에 대한 자료와 셀 운영에 관한 방안이 확정되면 생산가능한 부품조합 및 가공순서가 결정되고, 이를 토대로 실험계획을 하여 셀 운영에 대한 모의실험을 한다. 즉, 셀의 기계댓수와 작업의 수가 주어지면 각 작업을 처리할 수 있는 기계에 대한 조합이 다양하게 얻어진다. 이 때 각 작업은 적어도 한대의 기계에서 처리되도록 한다. 각 조합에 대한 공정시간표는 편의상 공정시간이 10에서 20사이가 되도록 구성하였다. 각 조합에 대하여 모의실험을 하고, 각각 가장 유연한 상태에 대한 모의실험을 한다. 이로부터 기계-작업의 각 조합에 대하여 현 상태의 생산률과 가장 유연한 상태의 생산률과의 비가 나오며, 회귀분석을 통해 그 비와 셀 유연성 척도로부터 구해진 값과의 상관관계가 높도록 하는 a값을 추정하여 셀 유연성의 척도 계산에 적용한다. 본 연구에서는 모의실험을 위하여 SLAM System을 이용하였으며, 셀의 운영은 각 부품조합이 임의의 순서로 들어오고 pull

도표 7

기계 \ 작업	a	b	c	d	e
1	11	16	12	16	11
2	11	16	12	16	11
3	13	16	12	17	11
4	15	16	12	16	11

type scheduling rule을 적용하며 공정처리시 이전에 처리한 부품과 다른 종류의 부품을 처리해야 하는 경우에는 준비작업을 필요로 한다고 보았다. 각 작업을 하기 위한 기계로서 작업을 하고 있지 않은 기계들 중 공정 시간이 가장 짧은 기계를 선택한다.

4. 셀 유연성 적용

셀 유연성은 셀 형태의 제조 시스템의 수행도로서 다양한 적응력을 가질 수 있으며 구성요소에 차이가 있는 시스템들의 비교 척도로 사용될 수 있다. 셀 유연성을 이용하여 서로 다른 시스템 및 기존 시스템의 변화 상황를 비교하는 몇 가지 적용예를 보자.

(1) 기존 시스템과 도입 시스템 간의 비교

새로운 시스템의 도입이 고려되는 경우, 기존 시스템과 도입 시스템 간에 셀 차원의 유연성 비교를 하여 시스템의 도입결정에 기준으로 제공할 수 있다. 기존 시스템으로서 도표 1의 셀과 비슷한 부품군을 생산할 수 있는 job shop 시스템을 고려하자. 이 시스템의 각 기계는 한 가지 작업 밖에 할 수 없으며 다기능 기계에 비해 공정시간은 짧은 편이다. 작업 a를 수행할 수 있는 기계는 두대이고 나머지 작업을 하는 기계는 각 한대씩이다. 현재 이 시스템에서 생산할 수 있는 부품군은 도표 1의 셀에 비해 훨씬 다양하나 현재의 추세로 볼 때 미래에 생산할 부품군의 범위가 전략적 관점 또는 시장수요 추이로부터 특정 부품들로 좁혀질 것이 예상되는 경우, 현 시스템을 존속시키느냐 또는 새로운 시스템을 구성하느냐를 결정하는 문제가 대두된다. 기존 시스템의 공정시간표가 도표 8과 같다고 할 때, 앞 절의 계산과정에 의해 F=0.293으로 계산되어 셀 유연성의 관점에서 도표 1의 셀의 도입이 유리하다.

(2) 운영상태의 변화

또한 현재 운영되고 있는 시스템에서 처리작업의 변화나 추가 혹은 삭제 등의 경우에 셀의 유연성의 변화상태를 볼 수 있다. 도표 9와 같이 운영되는 셀에서 생산되고 있는 부품조합은 도표 10과 같다. 이 셀에서 작업 d를 더 처리할 경우 공정시간은 도표 11과 같다고 할 때, 생산할 수 있는 부품조합은 도표 12와 같이 변한다고 한다. 이 때 셀 유연성은 0.775에서 0.682로 감소되어 셀 유연성의 관점에서는 작업 d의 추가가 제고되어야 할 것이다. 이 경우 작업 c(기계 2)에 대한 부하가 커지므로 셀 유연성의 감소경향은 예측될 수 있다.

도표 8

기계	작업					고장비율
	a	b	c	d	e	
1	10					0.01
2	10					0.01
3		10				0.01
4			10			0.01
5				10		0.01
6					10	0.01

도표 9

기계	작업			고장비율
	a	b	c	
1	15	17		0.05
2	18		10	0.05
3		20		0.05

도표 10

부품종류	작업순서	생산비율
A	a → b	0.5
B	a → c	0.3
C	a → b → c	0.2

F=0.775

도표 11

기계	작업				고장비율
	a	b	c	d	
1	15	17			0.05
2	18		10		0.05
3		20		10	0.05

도표 12

부품종류	작 업 순 서	생산비율
A	a → b	0.40
B	a → c	0.25
C	a → b → c	0.15
D	a → b → c → d	0.20

F=0.682

(3) 기술 간 비교

서로 경쟁이 되는 기술 간의 비교를 통하여 의사결정에 도움을 줄 수 있다. 작업 a, b, c를 처리하는 셀에서 현재 작업 a, b, c를 하는 기계 한대가 있다. 작업 d를 처리하기 위해 두 가지 기계가 고려되고 있다. 기계 1은 작업 a와 d를 처리할 수 있고 기계 2는 작업 c와 d를 처리할 수 있다. 첫번째 대안에 대한 셀 유연성은 0.732이고 두번째 대안에 대한 셀 유연성은 0.598이라고 할 때, 셀 유연성 측면에서 기계 1이 기계 2보다 유리하게 채택될 것이다.

시스템의 변화상황에 대하여 셀의 생산률 유지가 특히 요구되는 경우 본 연구에서 구한 셀 유연성 척도가 유용하게 이용될 수 있다. 기존 시스템의 평가기준으로서 유연성을 측정해야 하는 경우 및 도입이 고려되고 있는 시스템과 기존 시스템의 셀의 유연성 평가를 통해 시스템 도입 여부를 결정해야 하는 경우, 셀 유연성 척도가 의사결정기준으로 이용될 수 있다. 또한 도입이 고려되고 있는 대안 시스템 간의 선택이 요구될 때 그 기준이 될 수도 있고, 새로운 시스템 구성시 기계나 작업의 추가 혹은 삭제 등의 과정을 통해 유연성을 증가시키는 구성을 할 수도 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 셀의 유연성을 평가하는 frame을 제시하고 그에 따라 생산률과 연관하여 셀 유연성을 측정하였다. 셀 유연성의 척도는 셀 내의 기계 댓수, 작업의 수, 기계의 고장상태, 공정시간 등으로 표현하는데 이 척도는 생산통제, 시스템 설계, 제품조합의 변화, 새로운 설비투자에 대한 의사결정시 기준으로 사용될 수 있다.

의사결정 과정에서 시스템의 평가에 생산률 이외의 수행성능이 중요한 목표가 되는 경우에는 의사결정 기준으로 위에서 구한 셀 유연성 척도만을 고려 할 수는 없다. 예를 들면 부품의 납기를 만족시키지 못함으로써 생기는 손해가 큰 경우에는 작업물의 시스템 체류시간이 중요한 수행성능 목표가 되어야 한다. 이러한 경우에는 시스템 체류시간을 반영할 수 있는 새로운 유연성 척도가 요구된다. 즉, 납기를 만족시키는 공정활용정도, 공정 이용율을 높이는 셀의 운영 등 다른 시스템 수행성능을 고려하여 유연성을 나타낼 수 있을 것이다. 이로부터 여러 수행성능을 동시에 반영하는 유연성 척도의 개발도 가능할 것이다. 또한, 본 연구에서 구한 셀 유연성 척도는 셀 각각에 대하여 적용할 수 있는데, 나아가 여러 셀로 구성된 시스템의 유연성 평가과정에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Azzone, G. and Bertele, U., "Measuring The Economic Effectiveness of Flexible Automation : A New Approach", *International Journal of Production Research*, Vol. 27. no. 5. pp. 735−746, 1989.
2. Barad, M. and Sipper, D., "Flexibility in

Manufacturing Systems:Definitions and Petri Net Modeling", *International Journal of Production Research*, vol. 26, no. 2, pp. 237－248. 1988.

3. Browne J., Dubois D., Rathmill K., Sethi S.P. and Stecke K. E., "Classification of Flexible Manufacturing Systems", *The FMS Magazine*, vol. 2, no. 2, pp.114－117, 1984.
4. Brill, P.H. and Mandelbaum, M., "On Measures of Flexibility in Manufacturing Systems", *International Journal of Production Research*, vol. 27, no.5, pp. 747－756, 1989.
5. Buzacott, J. A., "The Fundamental Principles of Flexibility in Manufacturing System", *Proc. 1st International Conference on FMS, Brighton*, pp.23－30, 1982.
6. Carter M. F., "Designing Flexibility into Automated Manufacturing Systems", *Proceedings of the 2nd ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems : OR Models and Applications*, Ann Arbor, Michigan, pp. 107－118, 1986.
7. Chatterjee, A., Cohen M. A., Maxwell, W. L., and Miller, L. W., "Manufacturing Flexibility : Models and Measurements", *Processdings of the 1st ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems*, Ann Arbor, Michigan, pp. 49－64, 1984.
8. Chung, C. H. and Chen, I. J., "A Systematic Assessment of the Value of Flexibility for an FMS", *Proceedings of the 3rd ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems : OR Models and Applications*, pp. 27－32, 1989.
9. Falkner, C. H., "Flexibility in Manufacturing Plants", *Proceedings of the 2nd ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems : OR Models and Applications*, Ann Arbor, Michigan, pp. 95－106, 1986.
10. Gerwin, D., "Do's and Dont's of Computerized Manufacturng", *Harvard Business Review*, vol. 50, no. 2, pp.107－116, 1982.
11. Gupta, D. and Buzacott, J. A., "A Framework for Understanding Flexibility of Manufacturing Systems", *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 89－97, 1989.
12. Gupta, Y. P. and Goyal, S., "Flexibility of Manufacturing Systems : Concepts and Measurements", *European Journal of Operational Research*, vol.43, pp.119－135, 1989.
13. Hutchinson, G. K. and Holland, J.R., "The Economic Value of Flexible Automation", *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 215－228, 1982.
14. Hutchinson, G. K. and Sinha, D., "A Quantification of the Value of Flexibility", *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 47－57, 1989.
15. Kulatilaka N., "Valuing the Flexibility of Manufacturing Systems", *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 35, no. 4, pp.250－257, 1988.
16. Mandelbaum, M., "Flexibility in Decision Theory : An Exploration and Unification", Ph.D. Dissertation, Department of Industrial Engineering, University of Toronto, Canada. 1978.
17. Mascarenhas, B., "Plannig for Flexibility", *Long Range Planning*, vol. 12, no. 5, pp.78－82, 1981.
18. Meredith, J. R. and Suresh, N. C., "Justification Techniques for Advanced Manufacturing Tech-nologies", *International Journal of Production Research*, vol.24, no. 1, pp.82－97, 1986.

19. Pritsker, A. A. B., "*Introduction to Simulation and SLAM* Ⅱ", Halsted Press, John Wiley & Sons, Inc., New York. 1986.
20. Roll Y., Karni R. and Arzi Y., "Measurement of Processing Flexibility in Flexible Manufacturing Cells", *Journal of Manufact-uring Systems*, vol. 11, no. 4, pp.258－268, 1992.
21. Son, Y. K. and Park, C. S., "Economic Measure of Productivity, Quality and Flexibility in Advanced Manufacturing Systems", *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 193－208, 1987.
22. Swamidass P. M. and Waller M. A., "A Classification of Approaches to Planning and Justifying New Manufacturing Technologies", *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 9, no. 3, pp.181－193, 1990.
23. Taymaz E., "Types of Flexibility in a Single-machine Production System", *Int. J. Prod. Res.*, vol. 27, no. 11, pp.1891－1899, 1989.
24. Venk S., "Strategic Optimization Cycle as a Competitive Tool for Economic Justification of Advanced Manufacturing Systems", *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 194－205, 1990.