

제조시스템의 유연성 정의 및 분류에 관한 연구 —Flexibility : Definition and Classification in Manufacturing Systems—

李 昌 燮*
河 正 鎮**

Abstract

Flexibility has become a key objectives in the design of manufacturing systems and a critical measure of total manufacturing performance. The need for flexibility is increasing due to some environmental change such as changing technical characteristics of the products and the changing nature of market demands. Most importantly, flexibility embodies competitive value for a manufacturer. Although the importance of flexibility has stressed in the various research, very few attempts have been made to synthesize the literature dealing with definitions and measure of flexibility. It is this issue that have motivated us to search for the definition and classification of flexibility.

1. 서 론

유연성은 제조시스템의 설계에서 중요한 목적 중의 하나이고 전체 제조 성과의 측도로도 중요하게 사용되어지고 있다. 기업의 생존 여부는 입증되지 않는 변화환경에 얼마나 잘 적응하는지의 여부에 달려있다. 특히, 오늘날의 기업환경은 증가되는 기술변화율과 신제품, 신자재, 신공정 등의 새로운 출현, 짧아지는 제품의 수명주기(life cycle), 날마다 시장에 침투되어지는 새로운 경쟁자 등으로 인하여 매우 동적이라고 할 수 있다. 노동, 판리, 서비스, 제조공정, 정보시스템들이 국내외와 동적인 상황에서 경쟁을 하기 위해선 새로운 환경에 빠르고도, 적은 비용으로 잘 적응할 수 있어야 한다. 특히, 변화하는 경쟁환경으로 인하여 생산시스템의 유연성을 증가시켜야 한다는 암박은 유연성에 대한 관심을 더욱 고조시키고 있다. 그러나, 유연성의 중요성에 관해서는 활발하게 논의되고 있으나, 유연성의 개념에 대한 일치된 정립과 측도에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 현재까지 발표된 유연성 개념을 시간체제와 형태별로 분류하여 설명함으로써 유연성 측도의 기초 자료로 삼고자 한다.

2. 연구배경

유연성에 대한 연구는 지난 10여년동안 다양하게 시도되고는 있지만 현재까지 유연성을 정의하거나 분류하는데 있어서는 일치된 기준은 없다. Mandelbaum[1]은 유연성을 행위(action)와 상태(state)로 정의하고 제조시스템 내적과 외적 상황으로 구분하여 설명하였고, Zelenovic[2]은 설계타당성의 값인 적용(application)유연성과 시스템 적용의 필요시간량인 적응(adaption)유연성으로 설명하였다. Buzacott[3]는 시스템 외적변화와 내적 변화의 효과를 직무(job)와 기계(machine)유연성으로 Slack[4]은 변화의 범위와 변화를 만들기 위하여 필요한 시간 및 비용의 구조에 따라 신제품, 제품 조합, 품질, 생산량, 납기 등의 5가지 유연성으로 정의하였고 Gustavsson[5]은 유연성 수준을 계산하는 방법을 제품 및 공정의 관점에서 수요, 기계, 제품유연성을 각각 정의하였다. 그리고 Chatterjee 등 [6]은 제조 계획 통제와 대체 공정 기술비용 및 혜택평가에 사용하기 위한 제조 시스템 유연성의 계산측도를 개발하였다. Frazelle[7]은 유연성을 정의하고 유연 창고시스템, 정보시스템을 약속하면서 Gerwin[8]과 같이 5가지 형태의 유연성을 제시하였다. Carter[9]는 분석과 설계를 보조하기 위하여 6가지 형태의 유연성을 정의하였고 Yilmaz 등[10]은 유연성을 시간기준으로 분석하였다. Son과 Park[11]

* 동의공업전문대학 공업경영과 전임강사

** 동아대학교 산업공학과 부교수

접수: 1991. 10. 11.

은 생산기간이 주어질 때 4가지 형태의 유연성 측도를 제시하였으며 Barad 등[12]은 기계준비, 공정, 절차, 생산량, 작업 유연성 외에 이동(transfer) 유연성을 정의하고 있다. Brill 등[13]은 확률이론을 근거로 유연성의 측도를 정의하기 위한 분격을 제시하였으며 Hutchinson 등[14]은 제조임무와 용량을 변화시키는 능력에 따라 2가지 측면으로 유연성을 설명하고 있다. 이와 같이 수년동안 발표된 유연성을 포함한 문현들은 일치되 정의는 없으나 대부분은 Browne 등[15]이 정의한 8가지 유연성 분류 범주에 속할 수 있음을 파악할 수 있다. Gupta 등[16]은 유연성을 Browne 분류에 따라 유연성 형태별로 분류하고 있다. 본 연구에서도 Browne의 분류에 따라 문현을 정리하면 표 1과 같다.

Table 1. Classification of Flexibility

	Machine	Process	Product	Routing	Volume	Expansion	Process Sequence	Production
Mandelbaum		Action						State
Zelenovic		Adaptation						Application
Buzacott	Machine	Job						State
Gerwin		Design	Parts	Routing	Volume			Mix
Frazelle		Design	Parts	Routing	Volume			Mix
Slack		Quality	New Product		Volume			Product Mix
Gustavsson			Product		Demand	Machine		
Chatterjee et al		Part Specific	Part Mix	Routing				
Carter	Machine	Mix	Mix Change	Routing		Expansion		Production
Son & Park	Process		Equipment		Demand			Product
Barad & Sippe	Machine set-up	Process		Routing	Volume		Operations	

3. 유연성 정의

유연성이란 용어는 “굽힐 수 있는(bendable)”이라는 뜻을 가진 라틴어(Latin word)에서 나왔다. 이를 다른 표현하면 “조절할 수 있는(adjustable)”, “용통성(mobile) 있는”이라는 뜻이 된다. 그리고 웹스터 사전에 의하면 유연성은 “변동 혹은 새로운 상황에 적응하거나 반응의 능력을 가지는 성질”으로 정의되어 있다. 기업 이론에서 유연성이라는 개념은 1939년 Stigler에 의하여 처음 도입되었는데 그는 단기(short-run) 평균비용곡선으로 유연성을 연구하였다. 특히, 변화하는 환경에 효율적으로 적응하기 위한 능력이라고 표현될 수 있는 유연성은 산업과 기업에서는 새로운 상황과 변화에 신속하고도 경제적으로 적응하고 반응하기 위한 능력으로 정의 할 수 있다. 이러한 유연성은 확률 모집단으로 설명 가능하다. 셀(cell)의 조합인 i ($i=1, \dots, n$)개 대안들 중에서 하나를 선택할 수 있는 확률 모집단이 있다고 할 때 x_i 는 선택의 여러 가지 환경 조건과 모집단의 자유도를 반영하고 있다고 한다. 즉, 선택할 수 있는 자유도(freedom)는 x_1, x_2, \dots, x_n 의 조합으로 표현 가능하다. 그러므로, 유연성은 여러 가지 대안들 중에서 하나를 선택할 선택권이라고 표현할 수 있다. 따라서, 대안의 조합에 관련된 모집단의 유연성은 채택 가능한 대안의 수에 의존할 뿐만 아니라, 특정 환경에 의하여 결정되는 선택의 분산 범위에 의존한다고 볼 수 있다. 유연성에 대한 예는 그림 1과 같다.

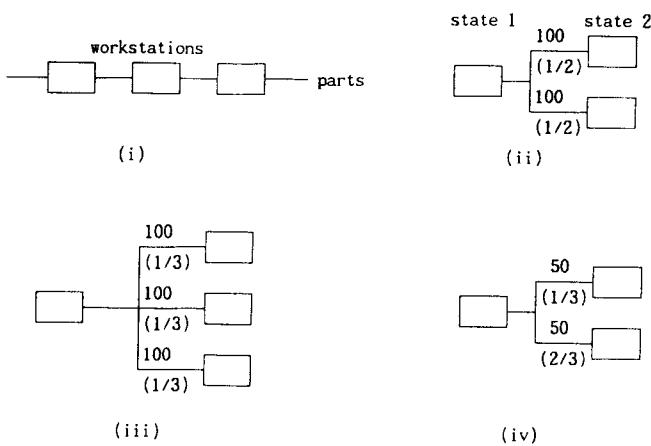


Fig 1. An Example of Options and their Freedom

I)에서 다음 작업을 위한 기계의 선택에 관한 한 보험상의 유연성은 0이며 분산은 없다. II), III)는 동일한 선택성을 가진 작업기계가 있는 경우로 어떤 경로로도 작업 가능하며, IV)의 경우는 선택도가 서로 다른 기계를 가진 경우를 나타낸다.

II), III)을 비교하면 III)이 유연성이 높다고 할 수 있으며, II)와 IV)를 비교하면 둘다 선택권은 2가지가 존재하지만 II)는 동일한 자유도를 가지고, IV)는 자유도가 동일하지 못하므로 II)과 IV)보다 유연성이 높다고 할 수 있다. 따라서 유연성은 부분들로 표현되어 각각 대안들을 선택할 자유도가 동일하여야 함을 알 수 있다.

4. 유연성의 분류

4.1 시간체제에 따른 유연성 분류

다양한 형태의 유연성은 생산과정동안의 시간 관점에 따라 유연성을 분류할 수 있다. 시간 규모에 따른 유연성 이해의 중요성은 운영문제(operational problems), 전술적문제(tactical problems), 전략적문제(strategic problems)를 단기(short term), 중기(medium term), 장기(long term)로 각각 구분하여 설명한 Gustavsson [5]에 의하여 먼저 인식되기 시작하였다. 그리고, Frazelle[7]은 시간규모를 단기와 장기로 구분하여 설명하였고, Carter[9]는 “유연성의 여러가지 형태는 다양한 시간 체제(time frame)로 생산에 영향을 끼친다.”고 주장하면서 유연성을 이해하기 위해서는 시간 체제를 사용한 것을 강조하고 있다. 특히, Carter는 시간 체제를 초단기(very short term), 단기(short term), 중기(medium term), 장기(long term)의 4가지로 세분하여 설명하였다.

Yilmaz와 Davis[10]는 시간에 따른(at time), 시간 경과(after a time), 시간 초과(overtime)의 3가지 특성으로 분류하여 유연성을 정의하였다. 그외, Taymaz[17], Buzacott[3]와 Gupta 등[16]도 유연성을 시간 규모(time scale)로 분석하고 있다.

본 연구에서는 이러한 시간 규모를 일반적인 분류 방법인 단기, 중기, 장기로 나누어 유연성을 설명하고자 한다.

1) 단기 유연성

운영 중인 생산계획의 유연성으로 일곱데미 몇 분(minutes)에서 몇 시간(hours)까지의 시간에도 영향을 미친다. 또한 처리시간(processing time)과 같은 다른 모수들에 의존하면서 여러가지 산업에서 여러가지 시간모수를 포함할 수 있다.

단기 유연성은 중기 혹은 장기 유연성 보다도 전체 제조 시스템에 적은 영향을 미침에도 불구하고 매우 빈번히 발생되며, 시스템에 효율적으로 반영되지 않으면 중요한 생산상의 손실을 일으킬 수 있다.

요하다. 따라서 단기 유연성은 생산구성요소 수준이라고 할 수 있고, 기업경영에서는 전술적인 문제 즉, 예측하지 못한 원재료의 품질 혹은 치명적인 기계 고장에 대처하기 위한 적응력이라 할 수 있다.

2) 중기 유연성

새로운 제조설비의 획득 또는 제품을 재설계(re-design)하기 위한 리드타임의 범위로 몇 일(days)에서 몇 달 까지의 범위를 가지는 시간 규모를 가진다.

Carter는 중기의 규모를 전형적으로 6달에서 2년의 범위를 가진다고 규정하였다. 중기 유연성은 생산 용량과 장기 평균 수요가 변화하지 않는 특정 제품의 수요 변화에 의하여 결정되는데 이러한 변화는 시장 변동이나 수요예측 오류에 의하여 일어난다. 또한 주요 기계 혹은 자재을 반 설비의 고장에 의하여도 결정된다.

3) 장기 유연성

장기 유연성은 생산 계획을 변화시키기 위한 것으로 매우 빈번히 발생되지는 않는다. 시간 규모로는 몇 달(months)에서 몇 년(years)까지의 범위를 가진다.

특히 Carter는 장기 유연성의 범위를 새로운 시장 혹은 설계의 개발과 신공장을 건설하기 위하여 필요한 리드타임의 범위로서 잠재적으로 5년 이상의 범위를 가진다고 규정하고 있다. 장기 유연성의 결정요인으로는 신제품의 도입, 현재 생산되고 있는 제품의 폐지, 새로운 천연자원의 개발, 기계 공구 및 생산공정 형태의 새로운 개발 등이 있다. 따라서 장기 유연성은 새로운 제조 과정으로 전환하는데 따르는 노력 및 비용에 의하여 측정되어진다.

위와 같이 분류한 유연성을 종합하여 보면 단기 유연성은 기계 수준에 의존하며, 중기 유연성은 조절장치에 의존하고, 장기 유연성은 제조 기업의 목적과 전체 조직에 영향을 미치는 변화를 다루므로 경영자의 의사결정에 의존한다고 할 수 있다. 따라서 단기 유연성은 단기 변화의 영향이 모형화되어 수행도(performance)문제로 결정되며, 중기 혹은 장기의 변화의 시스템에 영향을 미칠 때에는 문제에 관련된 민감도(sensitivity)와 안정도(stability)로 중기 유연성 및 장기 유연성이 결정된다고 할 수 있다.

4.2 형태에 따른 유연성 분류

1) 기계 유연성(Machine Flexibility)

기계 유연성은 공정 및 조립 작업의 다양화를 추구하기 위한 기계의 능력이라고 할 수 있다. 또한 기계가 작업장에서 내적변화와 외적변화에 대응하기 위한 시스템의 능력으로, 주어진 부품 형태의 조합을 생산하기 위하여 필요한 전환의 용이성으로 정의할 수 있다. 여기서 내적 변화란 기계고장, 처리시간의 다양성(variability), 품질 문제 등을 들 수 있고, 외적 변화란 시스템에 할당된 직무의 양, 필요한 대상물의 조합, 형태, 처리에 있어서의 변동을 말한다. 일반적으로 기계 유연성은 외적변화 보다 내적 변화로 측정되는데, 이에 따른 정의는 서비스와 공구 고장과 같이 부품처리 도중에 발생되는 여러가지 변화에 대한 시스템의 적응 능력이 기계 유연성이라고 할 수 있다. 특히 기계 유연성의 측정 방법으로 기계에 의하여 수행되어 질 수 있는 과정들, 가능한 차수(dimension)범위, 변화를 하는데 필요한 비용과, 다양한 작업을 위하여 변화하는 데 필요한 시간 등이 있다. 기계가 시스템에 대하여 적응능력이 낮으면, 많은 재공품 재고를 (WIP)를 발생시킨다. 그리고 재시된 속도가 시간이라고 할 때 재공품 재고는 대기 시간에 비례하고 대기시간은 부품처리비용에 비례한다고 할 수 있다. 따라서 기계 유연성의 적절한 속도는 대기시간이 있을 때의 기대 생산율과 대기시간이 없을 때의 기대 생산율과의 비(ratio)를 말한다.

2) 절차 유연성(Routing Flexibility)

부품을 기계에 신속하고 경제적이며 동적으로 할당할 수 있는 시스템의 능력인 절차 유연성은 제조에 사용된 기계가 무능력(incapacitated)하게 되어졌을 때 주어진 부품을 재순회(reroute)하기 위한 시스템의 능력으로 정의된다. 따라서 절차유연성은 기계 순회순서(visitation sequence)를 변화시키는 능력을 사용하여 주어진 부품 형태의 조합을 계속 생산 가능하게 한다. 이 능력은 실행할 수 있는 처리 절차가 여러가지이고, 각 작업이 하나 이상의 기계로 수행되어질 수 있을 때 존재하므로(alternative) 기계 및 대체 순서 혹은 대체 자원을 가지고 작업을 수행하기 위한 시스템의 능력이라고 할 수 있다. 즉, 절차유연성은 서비스고장 그리고 불량 원재료 혹은 공구들의 낭비 저항 등의 상태 하에서도 생산을 용이하게 한다. 그러므로 절차유연성은 제품 조합 유연성, 공정

유연성을 달성하는 하나의 수단이 된다. 이러한 절차유연성의 측도는 완전 가동 시스템의 생산량과 제조시스템의 기대생산량(expected production) 비(ratio)로서 측정된다.

3) 공정 유연성(Process Flexibility)

시스템 공정의 다양성으로 정의되며 주어진 부품 형태의 조합에서 제품 변화를 운영하기 위한 시스템의 능력을 말한다. 공정 유연성은 안정 상태의 작업 방법으로 복수제품을 동시에 혹은 정기적으로 생산하기 위한 시스템의 능력으로 여러가지 제품 생산에 기계를 공동 사용 가능하게 함으로서 과잉 투자를 최소화시키는 것이다. 공정 유연성은 시스템에서 생산되어질 수 있는 여러가지 부품의 수, 효율적인 생산이 유지되는 동안 변하여 질 수 있는 제품 조합의 범위, 기계의 평균 사이클 타임과 비교한 교체비용과 교체에 필요한 평균시간으로 측정 가능하다. 그리고 공정 유연성은 특정 부품의 공학적 설계변경을 빠르고 적은 비용으로 가능하게 하는 것으로 특정 부품의 기술적 설계 변경에 빠르게 적응하기 위한 시스템의 능력이라고도 할 수 있다. 공정 유연성이 직무과정의 변화에 적응하기 위한 시스템의 필요시간으로 성의될 때 공정 유연성의 측도는 준비시간(set-up time)이라고 할 수 있다.

4) 제품 유연성(Product Flexibility)

어떤 새로운 제품을 만들기 위한 시스템의 능력으로 정의된다. 제조 시스템이 생산할 수 있는 제품의 범위는 공정 기술의 능력에 의하여 결정된다. 제품 변화의 비용 및 시간은 공정능력, 설계과정, 자재운반 시스템의 능력, 직무 설계의 유연성 등에 의하여 영향을 받는다. 제품 유연성은 신제품을 생산하기 위하여 발생된 기대비용으로 최소비용으로 신제품을 생산하기 위한 시스템의 능력이라고도 할 수 있다. 따라서 제품 조합, 생산량, 공정 절차, 공정설계에서의 변화들이 경제적이고 신속하게 흡수됨을 필요로 하며 시장 수요 변화 등에도 빠른 적응을 필요로 하는 유연성이라고 할 수 있다. 제품 유연성은 원재료에 가치를 부여하기 위한 설비의 기회를 측정하는 것을 설비유연성(equipment flexibility)이라고도 불리며 설비유연성은 제조시스템의 물리적 산출량과 설비의 유휴비용(idle cost)과의 비(ratio)로서 정의된다.

5) 생산량 유연성(Volume Flexibility)

주어진 부품의 양적인 변화에 대한 시스템의 적응력인 생산량 유연성은 생산량을 변화시키기 위한 시스템의 능력으로 정의된다. 또한 수요감소로 인하여 발생되어진 운영 한계점까지 운영을 가능하게 하기 위한 시스템의 능력이라고 말할 수 있다. 생산량 유연성은 기계공구의 삽입 및 첨부를 용이하게 하기 위하여 유연성이 있는 배치를 필요로 한다. 또한 모듈 및 유연성 있는 자재운반 시스템을 필요로 하기도 한다. 생산량 유연성은 수요 유연성(demand flexibility)이라고도 하며, 수요유연성은 기간동안의 수요변동 가능성에 대한 적응력이라고 할 수 있다. 이것은 완제품과 원재료에 대한 재고비용으로 측정되어질 수 있는데, 보다 높은 재고회전율로 인한 재고비용 감소는 원재료와 완제품에 대한 공급과 수요 사이의 차의 감소를 의미한다. 즉 외적 및 내적수요에 대한 적절한 적응력을 의미한다.

6) 공정순서의 유연성(Process Sequence Flexibility)

각 부품에 대한 여러가지 작업순서를 상호교환하기 위한 능력으로 정의된다. 공정순서의 유연성을 운영활동의 유연성(operational flexibility)이라고 하며, 이것은 한 시스템의 유연성에 가장 관련이 있는 특성으로서 고려되어지고 있다. 따라서 운영활동의 유연성은 작업동안에 변화하기 위한 시스템의 적응능력으로 정의할 수 있다. 이러한 유연성을 측정하기 위하여 제시된 측도는 시스템의 적응에 필요한 시간으로 정의된다.

7) 확장 유연성(Expansion Flexibility)

확장 유연성은 생산용량의 증가와 제품종류 범위에서의 변화를 취급하기 위한 시스템의 능력을 말하며, 시스템의 새로운 기계를 도입함으로써 생산할 수 있는 제품조합의 수로서 정의된다. 확장 유연성은 원래 설계에서 일어날 수 있는 가능성을 나다내는 것으로 기계를 부가하거나 삭제를 용이하게 한다. 따라서 확장 유연성은 처음 시스템 설계시 포함되어 있어야 한다. 그러므로, 생산시스템에서 계획된 변화와 관련이 있고, 변화범위로는 새로운 기계 및 생산방법, 새로운 시스템(전산화) 등을 포함하고 있어야 한다. 확장 유연성의 유연화는 수요에 따라 추가되고 세거될 수 있는 병렬생산라인에 의한 병렬생산원리를 이용함으로써 달성되어질 수 있다. 확장 유연성의 측도는 고유투자에 대한 다음 생산모형을 위하여 남겨진 잔여 투자의 비(ratio)로서 정의된다.

8) 생산형태의 유연성(Production Flexibility)

주요 자산설비를 추가할 필요가 없이 다양하게 변하는 제품을 생산할 수 있는 능력을 말하며 제조시스템이 생산할 수 있는 부품조합의 크기로 정의된다. 이것은 형태와 절차 등이 거의 관련이 없는 여러가지 부품의 조합을 동시에 처리하기 위한 시스템의 능력이라는 의미에서는 제품조합 유연성(mix flexibility)이라고도 한다. 그리고, 주어진 시스템이 여러 가지 다른 환경에서 잘 운영될 수 있는 상황과 관련지어, 만약 변화에 대응할 수 있는 능력이 시스템 내부에 있다면, 시스템 상태의 유연성(state flexibility)이라고도 한다. 생산형태의 유연성은 기계의 동일 조합으로 신제품을 생산할 수 있는 시스템의 확률로 측정할 수 있는데, 주어진 생산시스템의 구조가 주어진 설계모수의 범위내에서 환경조건과 공정필요량에 자체적으로 적응할 확률인 설계타당성(design adequacy)으로 나타내면 적용유용성(application flexibility)으로 생산형태의 유연성을 정의될 수 있다.

앞에서 정의한 7가지의 유연성 형태는 생산형태의 유연성을 존재시키기 위하여 필요하다. 시간체계와 형태에 따라 분류한 유연성의 정의는 그림 2와 같이 각각의 유연성 상호간의 관계를 파악할 수 있다.

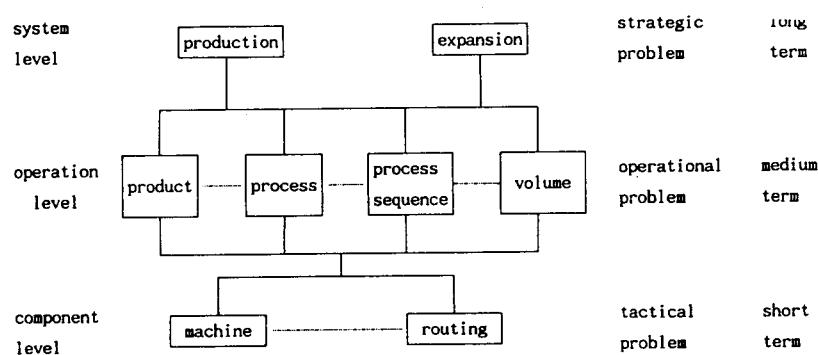


Fig 2. Hierarchical Structure of Flexibility and Their Relation to one Another.

그림 2의 계층적 구조로 유연성 값을 측정하는 문제는 다음의 가정에 의하여 부분문제(subproblem)로 분할되어 진다.

- 가정 1) 주어진 부분 문제보다 시간 규모가 큰 경우에서의 상태 변수들은 일정하다고 가정되어 질 수 있고, 따라서 시간 규모가 낮은 경우의 문제에서는 모형의 변수로 작용할 수 없다.
 가정 2) 주어진 부분 문제들 보다 낮은 시간 규모에서 일어나는 모든 상태 변수들의 변화는 총괄되어 질 수 있다.

이러한 가정에 의하여 앞에서 정의한 유연성의 측도는 전략적인 문제와 전술적인 문제 2가지로 구분하여 전체 시스템의 유연성을 측정 가능하다. 여기서 전략적인 문제는 시스템 수준에서의 유연성 측도를 의미하며 전술적인 문제는 운영 수준과 구성요소 수준을 나타낸다. 전략적 문제는 생산형태의 유연성과 확장 유연성을 고려하여 해결 할 수 있고 전술적인 문제는 제품, 공정, 공정순서, 생산량, 기계 절차 유연성을 고려함으로써 해결 할 수 있는데, 전략적 문제의 상반 관계(trade-off)를 고려하여 전체 시스템의 유연성을 평가하여 결정을 내리는 것이 중요한 과제이다.

5. 결 론

여러가지 환경변화에 적응하기 위한 적응능력이라는 의미의 유연성 개념에 대하여서는 일치된 개념과 측도는 거의 없다. 특히, 유연성은 정성적인 개념으로 정량화시키기에는 어려운 특성을 가진다. 이러한 유연성은 개념을 본 연구에서는 공통적인 정의로 유도하고 전략적 측면과 운영적 측면, 전술적 측면으로 분류하여 각각의 유연성 상호간의 관계를 계층적 구조를 사용하여 밝혔다.

그러나, 유연성 자체가 의사 결정자의 판단에 따라 전체 시스템에 영향을 미치는 요인들을 중심으로 의사 결정에 반영하기 때문에 전체 제조시스템 평가에서는 본 연구에서 정의한 유연성을 모두 고려하여 평가하는 것보다 고려중인 생산시스템의 특성과 목적을 정확하게 파악하여 이에 맞는 적절한 유연성의 적용이 무엇보다도 중요하다.

그리고, 유연성을 적용하여 제조시스템 설계시 여러 대안에 대한 평가 및 설계를 하는 방법의 연구가 앞으로의 연구 과제가 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Mandelbaum, M., "Flexibility in Decision theory : An Exploration and Unification," Ph. D. Dissertation, Department of Industrial Engineering, University of Toronto, Canada, (1978)
- [2] Zelenovic, D. M. "Flexibility-A Condition for Effective Production Systems," *Int. J. Prod. Res.*, 20(3), pp. 319-337, (1982)
- [3] Buzacott, J. A., "The Fundamental Principles of Flexibility in Manufacturing Systems," *Proc. of 1st International Conf. on FMS*, Brighton, pp. 23-30, (1982)
- [4] Slack, N., "Flexibility as a Manufacturing Objective," *Int. J. Prod. Management*, 3(3), pp. 4-13, (1983)
- [5] Gustavsson, S., "Flexibility and Productivity of Complex Processes," *Int. J. Prod. Res.*, 22(5), pp. 801-808, (1984)
- [6] Chatterjee, A., Cohen, M., Maxwell, W., and Miller, L., "Manufacturing flexibility : Models and Measurements," *Proc. 1st ORSA / TiMS Special Interest Conference on FMS*, Ann Arbor, MI, pp. 49-64, (1984)
- [7] Frazelle, E. H., "Flexibility : A Strategic Response In Changing Times," *Industrial Engineering*, 18(3), pp. 17-20, (1986)
- [8] Gerwin, D., "Do's and dont's of Computerized Manufacturing," *Harvard Business Review*, 60(2), pp. 107-116, (1982)
- [9] Carter, M. F., "Designing Flexibility into Automated Manufacturing Systems," *Proc. 2nd ORSA / TiMS Conerence on FMS*, Ann Arbor, Mi, pp. 107-118, (1986)
- [10] Yilmaz, O. S., and Davis, R. P., "Flexible Manufacturing Systems : Charateristics and Assessments," *Engineering Management International*, 4(3), pp. 209-212, (1987)
- [11] Son, Y. K. and Park, C. S., "Economic Measure of Productivity, Quality, and Flexiblity in Advanced Manufacturing. Systems," *Journal of Mamufacturing Systems*, 6(3), pp. 193-206, (1987)
- [12] Board, M., and Sipper, D., "Flexibility in Manufacturing Systems : Definition and Petri Net Modeling," *Int. J. Prod. Res.*, 26(2), pp. 237-248, (1988)
- [13] Brill, P. H., and Mandelbaum, M., "On Measures of Flexiblity in Manufacturing Systems," *Int. J. Prod.*, 27(5), pp. 747-756, (1989)
- [14] Hutchinson, G. K., and Sinha, D., "A Quantification of the Value of Flexibility," *Journal of Manufacturing Systems*, 8(1), pp. 47-57, (1989)
- [15] Browne, J., Dubois, D., Rathmill, K., Sethi, S. P., and Stecke, K. E., "Classification of Flexible Manufacturing Systems," *The FMS Magazine*, 2, pp. 114-117, (1984)
- [16] Gupta, Y. P., and Goyal, S., "Flexibility of Manufacturing Systems : Concepts and Measurement," *European Journal of Operational Research*, 43, pp. 119-135, (1989)
- [17] Taymaz, E., "Types of Flexibility in a Single-Machine Production System," *Int. J. Prod. Res.*, 27(11), pp. 1891-1899, (1989)