

유연생산시스템에 있어서 부품의 다속성을 고려한 부품군 형성 방법

The formation method of part families considering multiple attributes of parts in flexible manufacturing systems

김진용* · 홍성조** · 최진영*** · 이진규**

Jin-Yong Kim* · Sung-Jo Hong** · Jin-Yeong Choi*** · Chin-Gyu Lee**

Abstract

In this paper we propose a new approach for part families considering multiple attributes of parts in the design and operating stage of flexible manufacturing systems. We first represent the relationship of parts and the relative attributes using fuzzy membership function, AHP method and normalization. As a result, more realistic nonbinary data of the relationship is obtained. Then we group parts into part families based on the nonbinary data using fuzzy α -cut and new similarity coefficient method. The performance of our method is compared numerically with others.

1. 서론

사회구조의 급속한 변화와 생활 수준의 향상에 따라 소비자의 요구가 다양해진 현대의 경제 사회는 소비자 위주의 시장 체제로 변화되었다. 이러한 사회 환경은 산업 구조를 무한 경쟁 체제의 경제 환경으로 전환시켰고, 이러한 산업 환경에 적응하기 위한 기업의 전략은 제품의 품질 향상, 종류의 다양화, 생산성 향상, 상황 변화에 대한 신속하고 탄력적인 적응을 목표로한 제조 시스템이 필요하게 되었다. 이 시스템은 세포형 제조시스템, 유연 생산 시스템, 컴퓨터 통합 제조시스템 등과 같은 첨단 제조시스템으로 단축된 제품 주기에 신속히 적응할 수 있어 단

기간 내에 생산 변환을 가능케 하고, 다양한 제품을 생산할 수 있으며, 일정한 작업량에 대한 시간 단축으로 다양한 제품을 생산할 수 있는 장점이 있다. 이의 성공적인 이행을 위해 부품의 형상의 유사성이나 제조 공정의 유사성에 따라 군집화하는 방식인 그룹테크놀로지(Group Technology; GT)가 그 핵심 과제중의 하나이며[18], 이러한 GT의 성공적 실행은 바로 부품군 형성에 달려 있다고 말할 수 있다.

특히, 이 기법을 적용함으로써 제품을 보다 효율적이고 합리적으로 설계할 수 있고, 공정 계획과 생산계획 및 통제를 단순화함으로써 준비시간(setup time), 주문배달시간(order delivery time) 등을 줄이고, 고가의 장비들을 효율

* 여주전문대학 공업경영과

** 동국대학교 산업공학과

*** 경기대학교 산업공학과

적으로 이용함으로써 제품의 품질 향상, 생산성을 향상시키며 비용의 감소를 도모할 수 있다.

이와같은 GT의 일반적인 접근 방법은 직관적 관찰법(eye-balling method), 부품 코딩 및 분류법(coding and classification method)과 생산흐름분석법(production flow analysis method; PFA), 기타 방법으로 분류할 수 있다.

첫째, 직관적 관찰법은 전문가의 주관적 관념이나 경험에 의존하는 방법으로 적은 수의 부품을 분류할 때 사용하는 기법이나, 비현실성이 많은 기법이다. 즉, 기하학적인 형상의 유사성에 따라 부품이 군집화되는 반체계적(semi-systematic) 절차로써, 이 방법은 사용자의 선호도에 좌우되기 때문에 부품의 수가 제한되어 있는 경우에만 활용될 수 있다[26].

둘째, 코딩 및 분류법은 부품의 속성에 중점을 두는 방법으로 부품의 특성치에 수치적 가중치를 할당하는 코딩 시스템을 이용하고 부품 분류 계획에 의해 부품군을 인식하는 것이다. 즉, 이 방법은 코드의 형식으로 한가지 부품에 관련된 여러 가지 정보를 제공한다[3, 14, 19].

셋째, 생산 공정 중심의 방법으로 앞의 2가지가 부품 속성 중심의 방법인데 반하여 생산 공정에 토대를 둔 GT 접근 방법으로, 공통적인 가공에 대한 요구를 갖는 부품을 인식하고 군집화하는데 그 목적이 있다. 이 방법을 적용하기 위해 최초로 요구되는 자료는 각 기계와 각 부품간의 가공 여부를 나타내는 관계 행렬(machine-part relationship incidence matrix)인데, 이를 경로표(route sheet)라고도 한다. 또한, 이를 토대로 하여 생산량(production volume), 생산 시간(production time), 기계 용량(machine capacity), 공정의 순서(sequence of operations)와 같은 생산에 관련된 각종 자료와 생산비용(production cost), 기계 투자 및 유지 비용(machine capital and maintenance cost), 셀간 이동 비용(cost of intercellular movement)과 같은 비용에 관련된 자료, 부품의 다른 가공 경로 등에 관한 자료와 연계하여 이 방법을 확장할 수 있다. 생산 공정 중심, 생산 흐름 분석을 통한 GT의 제조 시스템의 설계의 유형은 아래와 같이 행렬 형식(matrix formulation)[8, 21, 27, 29, 30, 39, 43], 수리 계획 모형(mathematical programming model)[10, 11, 17, 20, 40], 그래프 이론(graph theory)[14, 33, 41] 등으로 구분할 수 있다.

넷째, 신경망 모형(neural network model)[23, 31, 32], 퍼지 이론 모형(fuzzy theory model)[6, 19, 28, 44, 45], 시뮬레이티드 어닐링 모형(simulated annealing model)[7, 12], 유전자 알고리즘 모형(genetic algorithm model)[34, 42] 등이 있다.

위의 선행연구중에서 활용도가 높은 코딩 및 분류 시스템으로는 Opitz 시스템[16], STAT 시스템[2], MI-CLASS 시스템[21], CODE 시스템[21] 등이 있는데, 이중 대표적인 Opitz 시스템에서는 부품의 길이(L)와 지름(D)의 비 L/D 에 따라 분류를 위한 코드번호 C는 식 (1)에 의해 주어진다[15].

$$C = \begin{cases} 0, & L/D \leq 0.5, \\ 1, & 0.5 < L/D \leq 3, \\ 2, & 3 < L/D. \end{cases} \quad (1)$$

이와 같은 방식으로 군집화의 개체를 인식하고 분류하는 목적을 가지고 있는 제조 환경에서 부품을 군집화하는 방법의 하나로 많이 이용되고 있지만, L/D 가 각각 0.49, 0.51인 2개의 부품이 있다면, L/D 의 차이가 0.02로 근소함에도 불구하고 식 (1)로 부터 각각 0과 1의 다른 코드를 부여받게 되어 정확하지 못한 부품의 분류와 군집화를 유발하게 되는 원인이 될 수 있다. 즉, 이는 부품이 가지고 있는 속성을 정확하게 표현하지 못하고 일정한 간격에 의해 구분함으로써 발생할 수 있는 문제이다. 그리고 퍼지이론을 이용한 선행 연구는 '있다', '없다'의 0, 1이 아닌 그 속성의 정도를 [0, 1]사이의 값으로 표현한 것으로 부품이 가지고 있는 특징을 그대로 표현하여 실질적으로 표현하고자 하였다. 이 중에서 Leem and Jacob [28]은 기계-부품간의 관계를 도출하는 과정은 생략한 채 이미 형성된 비 2진 자료를 입력 정보로 하여 군집화의 효율성과 융통성만을 강조하였다. 또한, Zhang과 Wang [45]은 부품의 여러 가지 속성중 정량화하기 쉬운 한가지 속성인 가공 공차에 대한 기계와 부품간의 적합도를 구하기 위해 퍼지멤버십 함수(fuzzy membership function)를 이용하여 비 2진 자료를 도출하였고, 이를 토대로 군집 알고리즘으로 ROC(rank order clustering)을 변형한 Fuzzy ROC와 Fuzzy Linkage기법을 제안하였다. 즉, 기존 연구에서 코딩 및 분류 시스템의 한계라고 할 수 있

는 속성을 일정한 간격의 코드로 구분하여 정확하지 못한 속성을 표현하거나 표면 거칠기 등의 정성적 자료를 코드화하기 어려운 부품의 속성을 표현하는데 한계를 가지고 있고, 퍼지이론을 이용한 접근 중에서 비 2진 자료의 도출 과정을 생략하고 군집 알고리즘의 효율성만을 강조하거나 비 2진화 자료를 도출하는 과정에서 정성적 속성은 생략하고 정량적인 속성만을 고려하였다.

따라서, 본 연구에서는 이런 문제점을 개선하여 보다 실용적이고 융통성 있는 군집화를 위해 부품이 가지고 있는 여러 속성을 Groover[16]의 분류 방식에 의해 설계 속성과 제조 속성으로 분류하고, 분류된 속성과 부품간의 관계를 자료의 형태에 따라 [0, 1]사이의 단일화된 척도로 표현하는 방법을 제안하였다. 또한, 이를 토대로 하여 부품과 관련된 여러 속성을 동시에 고려하여 군집화함으로써 현실적이고 보다 효율적인 부품군 형성 방법도 제안하였고, 수치 예제를 통하여 본 연구의 우수성을 검증하였다.

2. 부품군 형성 과정

본 연구에서 제안한 부품군 형성 과정은 부품에 대한 속성을 정의하는 단계로부터 정의된 속성을 자료 형태에 따라 여러 가지 기법을 적용하여 [0, 1]사이의 단일화된 척도로 변형하고, 이를 토대로 새로운 유사계수 산정방법을 적용하여 부품군을 형성하는 과정으로 구성된다.

2.1 속성의 선별과 분류 및 부품과의 관계

부품은 여러 가지 특성, 즉 속성으로 표현되어지는데, 이와 같은 속성은 설계 속성과 제조 속성으로 구분되어진다[16]. 이들 속성은 다시 자료의 형태에 따라 2진 자료, 명목 자료, 비율 자료, 순위 자료 등의 정성적 속성과 정량적 속성으로 분류할 수 있다(표 1).

이런 속성에 대한 선별과 분류는 해당 영역 전문가(domain expert)에 의해 해당 현장에서 직접 추출하여야 하는데, 본 연구에서는 Groover[16]의 분류 방식을 참조하여 분류하였다.

기존의 선행 연구에서 부품군을 형성하는데 오직 설계 속성만 고려하거나 제조 속성만을 대상으로 하여 유사성

표 1. 부품의 설계 속성과 제조 속성

설 계 속 성	제 조 속 성
1. 기본 형상(회전/비회전)	1. 주치수
2. 재료의 형태	2. 공차
3. 길이	3. 주공정
4. 길이/지름의 비	4. 가공 기계
	5. 가공 시간
	6. 생산량
	7. 표면 처리

을 평가하였는데, 이는 동일한 설계 속성이 동일한 제조 공정을 갖는다는 것을 의미한다[13]. 즉, 설계 속성이 동일하다고 해서 반드시 제조 속성이 동일하다고 할 수 없기 때문에, 설계 속성이 무시되면 준비 시간이나 가공 기계나 공구 등을 군집하는 효과가 상실되고, 제조 속성이 배제된 상황에서 부품군을 형성하는 경우에는 비현실적인 기계셀을 구축하게 된다[13].

따라서, 본 연구에서는 부품이 가지는 고유 속성을 설계 속성과 제조 속성으로 분류하여 모두 고려함으로써 부품군 형성시의 설계 중심, 제조 중심으로 부품군을 형성할 수도 있고, 기계셀과 연결할 때 앞에서 언급한 군집의 효과와 비현실적인 기계셀의 문제를 해결할 수 있기 때문이다. 또한, 설계 속성과 제조 속성은 그 분류 기준이 형상과 크기 중심, 제조를 위한 중심 속성으로 분류되어, 사용자의 용도에 따라 설계 속성과 제조 속성이 통합되어 사용되기도 하고 속성의 중요도에 따라 선별하거나 가중치를 부여하여 사용할 수도 있다. 즉, 설계 속성을 중심으로 부품군을 형성하고 싶다면 설계 속성만을 대상으로 고찰하고, 제조 속성을 중심으로 부품군을 형성하고 싶다면 제조 속성만을 대상으로 부품군을 형성할 수 있는 유연성을 부여하기 위한 것이다. 또한, 가공비용 등의 비용 관련 인자, 부품의 생산 시간 등의 생산 관련 인자를 고려하여 부품군을 형성하고 싶으면, 기존 속성을 선별하여 운영적 속성으로 분류하여 기계셀과 연관되어 확장할 수도 있다.

한편, 표 2는 각 부품과 각 속성간의 관계를 예를 들어 나타낸 것이다.

표 2. 부품-속성 관계

부품 \ 속성	길이(mm)	길이/지름	표면 처리	기본 형상	허용공차
부품 1	10.00	2.35	최고	회전	0.027
부품 2	0.85	4.7	고	비회전	0.022
부품 3	6.25	2.5	중간	비회전	0.021
부품 4	3.75	3.00	최저	회전	0.023

2.2 속성에 관한 자료의 처리

부품이 가지고 있는 각 속성은 그 부품의 고유한 성질로 그 성질의 유무나 상태, 성질의 정도를 나타내게 되는데 이 자료는 정성적 혹은 정량적 자료로 되어 있다. 표 2와 같이 표현된 부품의 속성은 그 자료의 형태에 따라 다음과 같이 퍼지멤버십 함수, AHP법, 정규화 과정 등을 통하여 단일화된 척도로 변환할 수 있다.

(1) 2진 자료 및 명목 자료일 경우(4)

속성은 기본 형상의 경우와 같이 회전의 성질이 있느냐, 없느냐로 표현할 수 있다. 이와 같이 표현되는 속성은 그러한 성질이 있는 경우는 1, 없는 경우는 0으로 표현할 수 있는데, 이 값이 속성에 대한 소속값이 된다.

(2) 순위로 표현된 경우

속성이 표면 처리와 같이 그 처리 정도를 대, 중, 소와 같이 순위로 표현한 경우에는 그 정도를 표현한 단어를 2개씩 뽑아 쌍별로 비교하여 정량화와 정규화 과정을 거치는 AHP기법[6, 35]을 통하여 다음과 같이 처리된다.

① 속성 i 의 중요도를 d_i , 속성 j 의 중요도를 d_j 라 할 때 아래 식(2)와 같이 i 의 비를 구하여 각 ij 에 대하여 상대적 중요도를 나타내는 하나의 행렬 $A=[a_{ij}]$ 를 만든다. 또한, 행렬 A 에서 $a_{ij}=d_j/d_i=1/a_{ji}$ 의 성질을 갖는다.

$$a_{ij} = \frac{d_i}{d_j} \tag{2}$$

② 쌍별 판단의 일관성이 실제로 유지되기 어렵기 때

문에, 속성에 대한 정도(membership)를 나타내는 단어들에 대한 정량화를 위하여 식 (3)과 같이 b_i 를 구한다.

$$b_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \tag{3}$$

여기서 b_i 는 속성의 정도를 나타내는 언어적 표현 i 에 대한 정량화된 값을 의미하며, n 은 순위를 구분하는 수로 고, 중, 저인 경우는 3을 나타낸다.

③ 각 b_i 의 값을 식 (4)와 같이 최대치로 나누어 정규화하여 \bar{b}_i 를 구한다.

$$\bar{b}_i = \frac{b_i}{\max_i \{b_i\}}, (i = 1, 2, \dots, n) \tag{4}$$

④ 쌍비교가 정확히 실시되었는가를 확인하기 위해 일관성 비율(consistency ratio: CR)을 척도로 하여 다음과 같이 일관성 검사를 실시한다.

i) 식 (4)에 의해 구한 각 \bar{b}_i 를 $v_i = \bar{b}_i / \sum_{i=1}^n \bar{b}_i$ 로 정규화하고, 이를 요소로 하는 벡터 $V^T = (v_1, v_2, \dots, v_n)^T$ 를 구하고(여기서 어깨글자 T는 전치를 나타냄). 또한 행렬 A 의 각 열의 요소를 합하여 $w_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}$ 로 두고 이를 요소로 하는 벡터 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 을 구하여 다음 식에 의해 λ_{max} 를 구한다.

$$\lambda_{max} = V^T W \tag{5}$$

ii) 행렬 A 의 일관성 지수(consistency index; CI)를 아래의 식 (6)에 의해 구한다[6].

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

iii) 일관성 비율 CR을 다음 식 (7)에 의해 구하고, $CR < 0.1$ 이면 일관성이 있는 것으로 판정한다. 단, 임의 일관성 지수인 RC(random consistency index)는 표 3에서 구한다.

$$CR = \frac{CI}{RC} \quad (7)$$

표 3. 임의 일관성 지수

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RC	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

⑤ 일관성이 유지되면 언어적 표현 i 에 대한 정량화된 값으로 ③에서 얻은 \bar{b}_i 를 사용하고, 아니면 ①부터 ④까지 각 속성의 상대적 중요도를 다르게 하여 일관성이 유지되도록 반복 실행한다.

3) 부품의 속성이 정량적 자료로 표현된 경우[4]

정량적 속성치로는 길이, 주치수, 주공정, 생산량, 가공 시간 등이 해당된다. 이때 각 속성치 값을 그 속성의 최대 속성치로 나누어서 정규화한다.

이와 같이 하여 부품의 각 속성값이 [0, 1] 사이의 값을 갖게 되는데, 이를 부품이 가지는 속성의 정도를 나타내는 소속 값이라고 부른다.

한편, 속성이 허용공차처럼 그 정도가 수치로 표현된 경우는 퍼지멤버십 함수를 정의하여 다음과 같이 처리한다. 모든 부품은 가공되는 동안 여러 가지 공정의 기계를 거쳐게 되는데, 각 기계는 가공되는 동안 일정한 가공 공차와 처리 시간을 가지게 되고, 부품은 각 각 원하는 요구 공차와 처리 시간을 가지게 된다. 가공 기계가 요구 공차 수준으로 부품을 가공할 수 있는지의 정도를 나타내는 적합도는 각 기계에 대한 경험적 자료인 평균 공차와 공차 한계를 가지고, 식 (8)을 통하여 추정할 수 있다 [45]. 이때, 허용공차의 속성을 적합도로 표현하기 위해 식 (8)에 의해 추정된 기계들의 적합도 값을 퍼지이론의 최소값 연산의 통합 과정과 정규화 과정을 거쳐 [0, 1]사

이의 값으로 표현한다.

$$\mu_M(x_i) = \begin{cases} 1 + \frac{x_i - T_M(x_i)}{R_M(x_i)}, & T_M(i) - R_M(i) < x_i < T_M(i) \\ 1, & x_i = T_M(i) \\ 1 - \frac{x_i - T_M(x_i)}{R_M(x_i)}, & T_M(i) < x_i < T_M(i) + R_M(i) \\ 0, & \text{그외} \end{cases} \quad (8)$$

단, $\mu_M(x_i)$: 부품 i 에 대한 기계 M 의 적합도

x_i : 부품 i 의 요구 공차

$T_M(i)$: 기계 M 에서의 부품 i 의 평균 가공 공차

$R_M(i)$: 기계 M 에서의 부품 i 의 가공 허용공차

또한, 여러 대의 기계($M > 1$)에 의해 가공되는 경우 부품 i 의 속성 공차의 소속값은 각 기계 M 에 대하여 $\mu_M(x_i)$ 값중 최소치를 통합된 소속값으로 하고 통합된 각 소속 값 중에서 최대치로 각각의 통합된 소속값을 나누어 정규화한다.

2.3 새로운 유사 계수 산정식

유사 계수란 개체간의 유사성의 정도를 나타내는 측도로서 기존 방법은 대부분 2진화된 자료를 이용하여 계산하였다. 가장 많이 사용되는 기법은 McAuley[29]에 의해 제시된 유사 계수법으로 기계와 부품간의 가공 여부를 0, 1로 입력하여 가공의 유사성을 나타낸 것이다.

$$S_{ij} = \frac{a}{a+b+c} \quad (9)$$

단, S_{ij} : 기계 ij 간의 유사 계수

a : 기계 ij 모두를 거쳐가는 부품의 수

b : 기계 i 만을 거쳐가는 부품의 수

c : 기계 j 만을 거쳐가는 부품의 수

위의 식 (9)를 토대로 계산된 유사 계수를 군집화하는 알고리즘 Single Linkage Clustering법(SLINK)을 이용하여거나 Average Linkage Clustering법(ALINK)을 이용하여 군집화하면 SLINK 법[29]은 적합하지 않은 기계를 할당하는 연결의 문제점(chaining problem)이 발생되고, AL-

INK법[4, 37]은 SLINK의 연결의 문제점을 다소 완화할 수 있지만 새로운 군집을 형성할 때마다 새로이 유사 계수를 반복해서 계산해야 하는 복잡함이 있다[38].

본 연구에서는 위의 2가지 기법이 가지는 문제점을 보완하기 위해 부품의 가공 여부에 토대를 두고 기계간의 유사 계수를 구하는 방법[38]을 식 (10)과 같이 부품이 갖는 고유 속성에 토대를 두고 부품간의 유사 계수로 변형하여 부품 ij 간의 유사 계수 S_{ij} 를 아래와 같이 구한다.

$$S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K r_{ij} \cdot X_{ij}(k)}{\sum_{k=1}^K r_{ij} \cdot X_{ij}(k) + \sum_{k=1}^K Y_{ij}(k)} \quad (10)$$

S_{ij} : 모든 속성 k 를 고려한 부품 ij 의 유사 계수 값

$$r_j = \sum_{k=1}^K f_{ij}(k),$$

$$f_{ij}(k) = \begin{cases} 1, & \text{부품 } ij \text{에 대하여 속성} \\ & k \text{의 값이 모두 1인 경우} \\ 0, & \text{그외} \end{cases}$$

$$X_{ij}(k) = \begin{cases} 1, & \text{부품 } ij \text{가 속성 } k(k=1,2,\dots,K) \text{에} \\ & \text{대하여 모두 1의 값을 갖으면} \\ 0, & \text{그외} \end{cases}$$

$$Y_{ij}(k) = \begin{cases} 1, & \text{부품 } ij \text{중 하나의 부품만이 속} \\ & \text{성 } k \text{에 대하여 1의 값을 갖으면} \\ 0, & \text{그외} \end{cases}$$

식 (10)에 의해 얻은 결과 S_{ij} 는 부품이 가지고 있는 모든 속성의 유사 정도를 나타내는 [0, 1]사이의 값으로 유사 계수 행렬 $S=[S_{ij}]$ 로 나타내었다. 단, $i=j$ 이면, $S_{ij}=1$ 이다.

한편, 2.2절에서 얻은 부품의 각 속성에 대한 비 2진화된 자료에 대해 식 (10)을 이용하여 유사 계수를 계산하기 위해서는 먼저 fuzzy- α cut을 이용하여 2진화된 자료로 변형하는데, 이 과정은 유사 계수를 구하기 위해 잠시 동안 각 부품의 여러 속성 값들을 0, 1로 변환시켜 유사 계수를 구하게 된다. 이렇게 도출된 유사 계수 값을 토대로 하여 군집화를 실시하는데 유사성이 높은 부품끼리 군

집을 형성하게 되고 이때 원래 부품이 가지고 있는 [0, 1]사이의 여러 속성 값의 정보는 소실되지 않아 좀더 현실적인 표현을 가능하게 한다. 이때 사용되는 α 값은 사용자의 임의대로 결정할 수 있는데, α 는 군집화의 임계치와 같이 일정한 규칙이 있는 것은 아니고 [0, 1]사이의 중간인 보통 0.5로 정하는 것이 좋으나, 자료의 형태의 분포가 일정하게 분포되어 있지 않는 경우에는 그 해당 문제의 전체 자료의 값을 양분하는 값으로 정하는 것이 적절하다. fuzzy- α cut은 퍼지관계(fuzzy relation)에 있어서 관계의 정도(소속의 값)가 α 값 이상이면 1, 이하이면 0으로 처리한다.

2.4 군집화

군집화(grouping)는 유사 계수를 이용하여 높은 유사성을 갖는 부품끼리 군집화하는 것을 말하는 것으로 군집화는 계층적 군집화와 비계층적 군집화가 있다[4]. 계층적 군집화는 덴드로그램(dendrogram)과 같이 두 개체간의 유사성과 비유사성에 토대를 두고 통합과 분해의 2가지 과정을 통해 더 작은 군집을 형성하는 것이다. 비계층적 군집화는 개체의 집합을 몇 개의 군집으로 분리하는 분해 군집 방법을 말한다[4]. 본 연구에서는 계층적 군집화법인 덴드로그램을 유사 계수를 토대로 하여 군집화의 기준이 되는 임계치(threshold value)를 지정하고, 이를 기준으로 개체간을 통합하는 방법을 사용하였다. 즉, 부품과 속성은 각각 유사 계수 값이 임계치 이상 되는 부품과 속성끼리 군을 형성한다. 이때 사용되는 임계치는 일정한 방법이 있는 것이 아니고 사용자의 의도에 따라 큰 값을 가질 수도 있고 작은 값을 가질 수 있는데, 큰 값으로 임계치를 정하면 부품군의 수는 많아지고, 반대의 경우는 부품군의 수가 적어진다. 효율적인 군집화를 위해 부품간의 유사계수 값을 덴드로그램으로 작성한 후 임계치를 기준으로 사용자의 용도에 따라 부품군을 분류하여 형성할 수 있다. 군집화의 방법에는 비계층적 방법과 계층적 방법이 있는데, 본 연구에서는 계층적 군집화인 덴드로그램을 사용하여 부품군의 수를 쉽게 결정할 수 있도록 하였다.

2.5 성능 척도

선행 연구의 성능 척도를 보면 대개는 0, 1의 2진화된 자료에 대한 성능 척도를 위한 방법이 많이 제시되고 있으나, 비 2진화된 자료에 대한 성능 척도는 미흡한 상황이다. 일반적으로 사용되는 2진 입력 자료의 성능 척도로는 기계 이용률(machine utilization; MU), 설간 이동의 수, 연결 에너지(bond energy; BE), 군집 효율성(grouping efficiency; GE) 등이 있는데, 비 2진 입력자료의 성능 척도로는 사용할 수 없다.

본 연구에서는 부품군을 형성할 때 부품의 속성 값이 큰 개체가 동일 군에 포함되는 것이 바람직하고, 또한 선

행 연구에서 제시한 성능 척도도 부품 군내의 속성 값의 총합과 부품군외의 예외적 요소의 속성 값의 총합, 예외적 요소의 수 등[28]을 하였고 때문에 본 연구에서 제안한 기법을 선행 연구와 비교 분석하기 위해 동일한 문제를 평가하고 분석하는 척도로 사용한다.

3. 수치 예제 및 결과 분석

본 절에서는 앞에서 제시한 부품군 형성 과정에 따라 수치 예제 들어 그 과정을 설명하고 기존의 연구 모델과 비교 분석한다.

본 예제에서는 부품이 7개($N=7$)이고, 속성의 수는 7가

표 4. 부품과 속성의 관계

부품	속성	설 계 속 성		제 조 속 성				
		기본형상	길 이	공 차	주치수	가공시간	생산량	표면처리
부품 1	회전		2	0.027	1	1	900	최고
부품 2	비회전		10	0.022	0.3	0.3	100	고
부품 3	비회전		7	0.021	N/A	0.1	200	중간
부품 4	회전		1	0.023	0.7	0.7	300	저
부품 5	비회전		1	0.013	0.6	0.5	500	최저
부품 6	회전		2	0.014	0.7	0.8	1000	고
부품 7	비회전		10	0.020	N/A	0.8	100	최고

표 5. 기계 A, B에 대한 부품의 공차정보

부품	공차정보	부품의 요구공차	기계가공 여부		기계의 평균공차		기계의 공차한계	
			A	B	A	B	A	B
부품 1		0.027	○	×	0.02	0.02	0.006	0.008
부품 2		0.022	○	○	0.02	0.02	0.006	0.008
부품 3		0.021	○	○	0.02	0.02	0.006	0.008
부품 4		0.023	○	○	0.02	0.02	0.006	0.008
부품 5		0.013	×	○	0.02	0.02	0.006	0.008
부품 6		0.014	×	○	0.02	0.02	0.006	0.008
부품 7		0.020	○	○	0.02	0.02	0.006	0.008

지($K=7$), 즉 기본형상, 길이 등의 2가지 설계 속성과 공차, 주치수, 생산량, 가공 시간, 표면 처리 등의 5가지 제조 속성을 선택하여 표 4와 같이 분류하여 나타내었다. 여러 속성 중에서 먼저 기본 형상은 회전이나 비회전이나로 표현되고, 길이, 주치수, 가공 시간, 생산량은 계속 기로 실측된 정량적 자료로 구분할 수 있다. 표면 처리는 최고, 고, 중간, 저, 최저의 5등급으로 나누어 표현하였다.

제조 속성중 공차에 대한 자료는 부품의 요구 공차에 대한 기계의 적합도로 나타내었고, 가공 기계의 수 $M=2$ 대로 하여 부품에 대한 공차 정보를 구하여 표 5에 나타내었다. 특히, 속성에 해당되는 사항이 없는 경우(no applicable; NA)는 속성의 값이 없는 것으로 간주하여 0을 부여한다.

3.1 속성별 자료의 처리

위에서 얻어진 자료로부터 자료의 형태에 따라 각 속성치를 단일화된 척도로 변환한다.

- (1) 2진 자료인 기본 형상은 회전이면 1, 아니면 0을 부여하여 정량화한다.
- (2) 공차에 대한 속성값은 식 (8)로 부터 각 기계 A의 경우 (0, 0.67, 0.833, 0.5, 0, 0, 1), 기계 B의 경우에는 (0, 0.75, 0.875, 0.625, 0.125, 0.25, 1)이 되고, 통합한 소속값을 구하여 정규화하면 (0, 0.67, 0.833,

표 6. 표면 처리 대한 생비교

	최고(d_1)	고(d_2)	중(d_3)	저(d_4)	최저(d_5)
최고(d_1)	1	3	5	7	9
고(d_2)	1/3	1	3	5	7
중(d_3)	1/5	1/3	1	3	5
저(d_4)	1/7	1/5	1/3	1	3
최저(d_5)	1/9	1/7	1/5	1/3	1

표 7. 표면 처리 대한 정량화와 정규화

언어적 표현	정량치(b_i)	정규화한 값(\bar{b}_i)
최고	3.936	1.000
고	2.036	0.517
중간	1.000	0.254
저	0.491	0.125
최저	0.254	0.064

0.5, 0, 0, 1)이 얻어진다.

한편, 순위로 표현된 속성 표면 처리에 대한 소속 값을 구하기 위해 상대적 중요도의 척도를 1, 3, 5, 7, 9의 5점 척도로 하여 계산한다. 즉, 최고는 고에 비하여 상대적으로

표 8. 부품과 속성간의 소속 정도를 나타내는 비 2진 자료

부품 \ 속성	설 계 속 성		제 조 속 성				
	기본형상	길 이	공차	주치수	가공시간	생산량	표면처리
부품 1	1	0.2	0	1	1	0.9	1
부품 2	0	1	0.67	0.3	0.3	0.1	0.517
부품 3	0	0.7	0.833	0	0.1	0.2	0.254
부품 4	1	0.1	0.5	0.7	0.7	0.3	0.125
부품 5	0	0.1	0	0.6	0.5	0.5	0.064
부품 6	1	0.2	0	0.7	0.8	1	0.517
부품 7	0	1	1	0	0.8	0.1	1

로 3배의 중요도를 가진다고 하면 최고의 가중치 d_1 과 고의 가중치 d_2 의 비 $a_{12}=d_1/d_2=3$ 이 되고, $a_{21}=d_2/d_1=1/3$ 이 되고, 식 (2)에 의해 상대적 중요도를 나타내는 행렬 A를 구하면 표 6과 같다.

- ① 식 (3)에 의해 b_i 를 계산하고, 식 (4)에 의해 정규화된 값 \bar{b}_i 를 계산하면 표 7과 같다.
- ② 행렬 A로부터 벡터 $W=(1.7873, 4.6762, 9.533, 16.333, 25.00)$ 를 구하고 $V^T=(0.51, 0.2638, 0.1295, 0.0636, 0.0329)$ 이므로 식 (5)에 의하여 $\lambda_{max}=5.2429$ 가 된다.
- ③ 식 (6)으로부터 $CI=0.067$ 이므로 일관성 비율 $CR=CI/RC=0.0542 < 0.1$ 이다.

여기서 표 3으로부터 $RC=1.12$ 이고 쌍별 판단은 일관성을 유지하므로 표면 처리에 대한 정량화된 값으로 (최고, 고, 중, 저, 최저)=(1.000, 0.517, 0.254, 0.125, 0.064)를 그대로 소속 값으로 한다.

- (3) 정량적 자료중 길이, 주치수, 생산량, 가공 시간은 2.2절의 3)항에 의해 정규화하여 속성의 소속 값을 구하면 그 결과는 표 8과 같다.

3.2 새로운 유사 계수 산정식

유사 계수를 구하기 위해 표 8의 자료중 비 2진 자료에 대해 $\alpha=0.5$ 로 하여 fuzzy- α cut을 실시하여 2진화하

면 표 9와 같이 된다. 앞에서 언급 한대로 $\alpha=0.4$ 로 해도 동일한 결과가 도출되는데, 이때 $\alpha=0.4$ 나 0.5 는 부품에 대한 속성의 총 자료 수가 49개의 자료를 대략적으로 양분하는 값이 된다.

표 9의 자료로 부터 부품 i, j 간의 유사 계수 S_{ij} 를 식 (10)을 이용하여 구한다. 예를 들어, 부품 1, 2의 유사 계수를 구하면, 부품 1과 2의 속성 값은 $k=7$ 일 때 $f_{12}(7)=1$ 이고, $X_{12}(7)=1, Y_{12}(1), Y_{12}(2), Y_{12}(3), Y_{12}(4), Y_{12}(5), Y_{12}(6)$ 이 모두 1이므로 식 (10)에 입력하면, $S_{12}=1/(1+6) = 0.143$ 이 된다. 이와 같이 계산하여 행렬 S로 나타내면 다음과 같다.

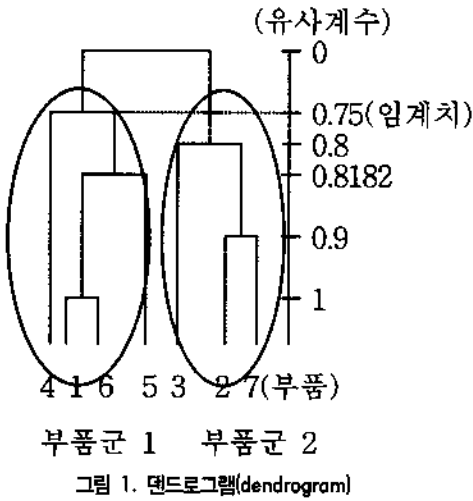
$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0.143 & 0 & 0.75 & 0.82 & 1 & 0.44 \\ 0.143 & 1 & 0.8 & 0.17 & 0 & 0.143 & 0.9 \\ 0 & 0.8 & 1 & 0.2 & 0 & 0 & 0.67 \\ 0.75 & 0.17 & 0.2 & 1 & 0.57 & 0.75 & 0.5 \\ 0.82 & 0 & 0 & 0.57 & 1 & 0.82 & 0.143 \\ 1 & 0.143 & 0 & 0.75 & 0.82 & 1 & 0.44 \\ 0.44 & 0.9 & 0.67 & 0.5 & 0.143 & 0.44 & 1 \end{bmatrix}$$

3.3 군집화

위의 유사 계수 행렬 S를 토대로 하여 아래의 그림 1과 같이 덴드로그램을 작성한 후 사용자의 용도에 따라 군집화의 임계값을 부여하여 군을 형성할 수 있다. 본 예제에서는 유사성의 임계치를 0.75로 하였고, 그 결과 표

표 9. fuzzy-0.5 cut을 실시한 자료

부품 \ 속성	설 계 속 성		제 조 속 성				
	기본형상	길 이	공 차	주치수	가공시간	생산량	표면처리
부품 1	1	0	0	1	1	1	1
부품 2	0	1	1	0	0	0	1
부품 3	0	1	1	0	0	0	0
부품 4	1	0	1	1	1	0	0
부품 5	0	0	0	1	1	1	0
부품 6	1	0	0	1	1	1	1
부품 7	0	1	1	0	1	0	1



10과 같이 부품 {1, 4, 5, 6}이 하나의 군으로, 부품군 {2,

3, 7}이 다른 하나의 군으로 구분되어 진다. 표 10을 보면 부품에 대한 속성의 소속 정도가 높은 부품끼리 군을 형성하고 있어(군내의 속성의 합 > 군외의 속성의 합) 높은 소속 값을 갖는 속성이 서로 같은 군을 형성하지 못하는 SLINK[4, 37]와 같은 부적합한 합당이 없고, 한번만 유사 계수를 계산하여 군집화하기 때문에 ALINK[38]와 같이 유사 계수를 반복적으로 계산하지 않아도 된다.

본 예제를 Leem 및 Jacob법[28]과 Zhang 및 Wang[45]이 제시한 Fuzzy Linkage, Fuzzy ROC의 3가지 기법에 적용하여 비교 분석하면 다음 표 11과 같은 결과를 얻을 수 있다. 이때 사용하는 성능 척도로는 예외적 요소의 수와 부품군 내의 속성값의 합, 부품군 외의 속성값의 합으로 한다.

표 11에서 보는 바와 같이 본 연구의 예제에서는 본 연구의 기법, Leem 및 Jacob의 기법이 Zhang 및 Wang의

표 10. 부품군-속성군의 형성

부품군		속성군		속성군 1				속성군 2		
		기본형상	주치수	가공시간	생산량	길이	공차	표면처리		
부품군 1	부품 1	1	1	1	0.9	0.2	0	1		
	부품 4	1	0.7	0.7	0.3	0.1	0.5	0.125		
	부품 5	0	0.6	0.5	0.5	0.1	0	0.064		
	부품 6	1	0.7	0.8	1	0.2	0	0.517		
부품군 2	부품 2	0	0.3	0.3	0.1	1	0.67	0.517		
	부품 3	0	0	0.1	0.2	0.7	0.833	0.254		
	부품 7	0	0	0.8	0.1	1	1	1		

표 11. 선행 연구와 제안 기법과의 성능 비교(1)

성능척도	Fuzzy ROC 기법	Fuzzy Linkage 기법	Leem 및 Jacob 기법	본 연구의 기법
예외요소 수	18	29	16	16
군내의 합	15.138	9.571	18.674	18.674
군외의 합	8.242	13.809	4.706	4.706
군의 수	2	5	2	2

기법보다 우수하였다. 임계치가 0.75일 때, Fuzzy Linkage 법은 군의 수가 {1,6}, {4}, {5}, {7}, {2,3}의 5개로 나타났다.

한편, Leem 및 Jacob, Zhang 및 Wang의 연구에서 취급하였던 자료는 부품-속성간의 관계가 아닌 기계-부품간의 관계이지만, 본 연구의 군집화에 대한 효율성을 입증하기 위해 각 방법에 의해 군집화한 결과는 표 12와 같다

표 12에서 보는 바와 같이 먼저, Leem 및 Jacob의 예제에서는 본 연구의 기법과 Leem 및 Jacob의 기법이 Zhang 및 Wang의 기법보다 모든 성능에서 우수하였다.

둘째로, Zhang 및 Wang의 예제의 경우는 4가지의 모든 기법의 성능이 동일하였다.

정량화와 정규화 과정을 거쳐 처리하는 방법을 제안하였고, 기존의 연구에서 많이 다루지 않았던 비 2진 자료로 표현된 속성 값을 부품군-속성군으로 분류하는 효율적이고 유연성있는 기법을 제안하였다. 즉, Opitz 시스템과 같은 코딩 및 분류법과 생산 흐름 분석법에 의해서는 다루기 어려웠던 정량적 자료에 대해서 뿐만이 아니라 정성적 자료에 대해서 퍼지멤버십 함수와 AHP기법 등을 사용하여 실질적인 속성의 소속 정도를 표현하는 단일 척도로 속성 값을 표현함으로써 보다 현실성을 갖게 되었고, 이를 토대로 하여 보다 실용성있고 효율적인 부품군과 속성군을 형성하였다. 특히, 군집화 방법에서 선행 기법과 비교하였을 때, 보다 효율적임을 입증하였다. 특히, 앞서 형성된 효율적인 부품군을 토대로 하여 제조시스템

표 12. 선행 연구와 제안 기법과의 성능 비교(2)

예제 \ 기법	성능척도	Fuzzy ROC 기법	Fuzzy Linkage 기법	Leem 및 Jacob 기법	본 연구의 기법
Leem 및 Jacob의 예제[28]	예외요소 수	48	48	33	33
	군내의 합	25	25	50.4	50.4
	군외의 합	36.8	36.8	11.4	11.4
Zhang 및 Wang의 예제[45]	예외요소 수	9	9	9	9
	군내의 합	17.2	17.2	17.2	17.2
	군외의 합	2.4	2.4	2.4	2.4

표 11, 표 12로 부터 본 연구에서 제안한 군집 알고리즘이 3가지 예제에서 최근까지 효율성이 가장 좋은 Leem 및 Jacob[28]의 기법과는 동일한 결과가 도출되었는데, Leem 및 Jacob의 기법은 유사 계수 값을 지속적으로 갱신하여야 하는 계산상의 복잡성을 가지고 있는 반면 본 연구에서 제시한 방법은 그럴 필요가 없는 장점이 있다.

4. 결론

본 연구에서는 기존의 기법 중에서 처리하기 어려웠던 부품의 속성을 설계 속성과 제조 속성으로 분류하여 각 부품이 가지고 있는 속성의 정도를 나타내는 소속 값을

을 설계하고 운용하면, 효율적으로 형성된 부품군과 그에 알맞게 할당된 제조 설비로 인하여 더욱 실용성있고, 효율성이 제고된 제조시스템이 형성될 수 있다.

그러나, 본 연구에서 제안한 방법의 전개과정중에는 속성의 정의와 그 속성의 값을 표현하는데 있어 인간의 한계라고도 할 수 있는 영역 전문가의 직관을 통해야 하고, 계산상의 복잡성, 유사 계수의 임계값에 따라 형성되는 부품군의 수가 변화되는 한계를 가지고 있다.

앞으로 부품과 속성간의 관계로부터 형성된 부품군을 토대로 부품군과 기계설의 관계로 확장시키는 보다 실용적인 연구가 진행중에 있다.

참고문헌

- [1] 김진용, 이진규, "퍼지이론을 이용한 유연생산시스템에서의 부품군 형성을 위한 새로운 접근방 법," '97 한국경영과학회/대한산업공학회 춘계공동학술대회 논문집, 1997, pp. 573-576.
- [2] Abou-Zeid, M. R., "Group Technology," *Industrial Engineering*, May, 1975, pp. 32-39.
- [3] Akturk, M. S. and H. O. Balkose, "Part-Machine grouping using a Multi-Objective Cluster Analysis," *International Journal of Production Research*, 1996, Vol. 34, No. 8, pp. 2299-2315.
- [4] Anderberg, M. R., *Cluster Analysis for Applications*, New York: Academic Press, 1973.
- [5] Bakanau, F. X., "Implementation and Maintenance of a Parts Coding and Classification System," *Proceedings of Computer Aided Manufacturing International: Seminar of CAPP Applications, CAM-1*, 1977, p. 77.
- [6] Ben-Arieh, D. and E. Triantaphyllou, "Quantifying Data for Group Technology with Weighted Fuzzy Features," *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 6, 1992, pp. 1285-1299.
- [7] Bector, F. F., "A Linear Formulation of the Machine-Part Cell Formation Problem," *International Journal of Production Research*, Vol. 29, No. 2, 1991, pp. 343-356.
- [8] Burbidge, J. L., "Production Flow Analysis," *The Production Engineer*, Vol. 50, 1971, p. 139.
- [9] Chandrasekharan, M. P. and R. Rajagopalan., "MODROC : An Extension of Rank Order Clustering for Group Technology," *International Journal of Production Research*, Vol. 24, No. 5, 1986, pp. 1221-1233.
- [10] Choobineh, F., "A Framework for the Design of Cellular Manufacturing Systems," *International Journal of Production Research*, Vol. 26, No. 7, 1988, pp. 1161-1172.
- [11] Co, H. C. and A. Araar, "Configuring Cellular Manufacturing Systems," *International Journal of Production Research*, Vol. 26, No. 9, 1988, pp. 1511-1522.
- [12] Chu, C. H. and W. L. Shih, "Simulated Annealing for Manufacturing Cell Formation," *Proceedings of National Decision Sciences Institute Conference*, 1993, pp. 1520-1522.
- [13] Kenneth, R. C. and R. C. Creese, "Justification of Cellular Manufacturing using Multi-Attribute Part Family Loading-MAPFLO," *Manufacturing Research and Technology*, Vol. 9, 1990, pp. 203-221.
- [14] De Witte, J., "The Use of Similarity Coefficients in Production Flow Analysis," *International Journal of Production Research*, Vol. 18, No. 4, 1980, pp. 503-514.
- [15] Felix O. O., "Application of Similarity Coefficient Method to Parts Coding and Classification Analysis in Group Technology," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 10, No. 6, 1991, pp. 442-448.
- [16] Groover, M. P., *Automation, Production Systems and Computer Integrated Manufacturing*, Prentice-Hall International Inc., 1987.
- [17] Gunasingh, K. R. and R. S. Lashkari, "Machine Group in problem in Cellular Manufacturing Systems: An Integer Programming," *International Journal of Production Research*, Vol. 27, No. 9, 1989, pp. 1465-1473.
- [18] Haiping, X. and P. W. Hsu, "Part Family Formation for GT applications based on Fuzzy Mathematics," *International Journal of Production Research*, Vol. 27, No. 9, 1989, pp. 1637-1651.
- [19] Houtzeel, A., "An Introduction to the MICLASS System," *Proceedings of Computer Aided Manufacturing International: Seminar of CAPP Applications, CAM-1*, 1975, pp. 159-178.
- [20] Han, C. P. and I. Y. Ham, "Multiobjective Cluster Analysis for Part Family Formations," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 5, 1986, pp. 223-230.
- [21] Harhalakis, G. R., R. Nagi, and J. M. Proth, "An Efficient Heuristic in Manufacturing Cell Formation for Group Technology Application," *International*

- Journal of Production Research, Vol. 28, No. 1, 1990, pp. 185-198.
- [22] Kamrani, A. K. and H. R. Parsaei, "A Methodology for Manufacturing Cells using Manufacturing and Design Attributes," Computers and Industrial Engineering, Vol. 23, No. 23, 1992, pp. 73-76.
- [23] Kaparthi, S. and N. C. Suresh, "A Neural Network System for Shaped-Based Classification and Coding of Rotational Parts," International Journal of Production Research, Vol. 29, No. 9, 1991, pp. 1771-1784
- [24] King, J. R., "Machine-Component Group Formation in Group Technology," OMEGA, Vol. 8, No. 2, 1980, pp. 193-199.
- [25] King, J. R. and V. Nakornchai, "Machine-Component Group Formation in Group technology : Review and Extention," International Journal of Production Research, Vol. 20, No. 2, 1982, pp. 117-133.
- [26] Kusiak, A., Intelligent Manufacturing Systems, Prentice-Hall, Inc., 1990, pp. 206-233.
- [27] Kusiak, A. and W. S. Chow, "Efficient Solving of the Group Technology Problem," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 6, No. 2, 1987, pp. 117-124.
- [28] Leem, C. W. and J. G. C. Jacob, "Fuzzys-set-based Machine-cell Formation in Cellular Manufacturing," Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 7, 1996, pp. 355-364.
- [29] McAuley, J., "Machine Grouping for Efficient Productions," The Production Engineer, February, 1972, pp. 53-57.
- [30] Moiser, C. and L. Taube, "Weighted Similarity Measure Heuristics for the Gruop Technology Clustering Problem," Omega, 13, 1985, pp. 577-579.
- [31] Moon, Y. B. and U. Roy, "Learning Group Technology Prat Families using Solid Models by Parallel Distributed Processing," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 7, 1992, pp. 109-118.
- [32] Moon, Y. B. and S. C. Chi, "Generalized Part Family Formation using Neural Network Techniques," Journal of Manufacturing System, Vol. 11, No. 3, 1992, pp. 149-159.
- [33] Rajagopalran, R. and J. L. Batra, "Design of Cellular Production Systems-A Graph Theoric Approach," International Journal of Production Research, Vol. 13, 1975, pp. 567-579.
- [34] Ricard, E. B. and B. Bidanda, D. Tate, "A Genetic Cluster Algorithm for the Machine-Component Grouping Problem," Journal of Intelligent Manufacturing, 1996, Vol. 7, pp. 229-241.
- [35] Satty, T. L., The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill Internation, 1980.
- [36] Shafer, S. and D. F. Rogers, "A Goal Programming Approach to the Cell Formation," Journal of Operations Management, Vol. 10, No. 1, 1991, pp. 28-43.
- [37] Seifoddini, H., "A note on the Similarity Coefficient Method and the Problem of Improper Machine Assignment in Group Technology Applications," International Journal of Production Research, Vol. 27, No. 7, 1989, pp. 1161-1165.
- [38] Seifoddini, H., "Comparative Study of Similarity Coefficients and Clustering Algorithms in Cellular Manufacturing," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 13, No. 2, 1994, pp. 119-127.
- [39] Seifoddini, H. and M. P. Wolf, "Application of the Similarity Coefficient Method in Group Technology," IEEE Transactions, Vol. 18, 1986, pp. 271-277.
- [40] Selvan, R. P. and K. N. Balasubramanian, "Algorithmic Grouping of Operation Sequences," Engineering Costs and Production Economics, Vol. 9, 1985, pp. 125-134.
- [41] Vannelli, A. and K. R. Kumar, "A Method for Finding Minimal Bottleneck Cells for Grouping Part-Machine Families," International Journal of Production Research, Vol. 24, No. 2, 1986, pp. 387-400.
- [42] Venugopal, V. and T. T. Narendran, "A Genetic Algorithm Approach to the Machine-Component Groeuping Problem with Multiple Objectives," Com-

- puter and Industrial and Engineering, Vol. 22, No. 4, 1992, pp. 469-480.
- [43] Waghdekar, P. H. and S. Sahu, "Machine-Component Cell Formation in Group Technology: MACE," International Journal of Production Research, Vol. 12, 1984, pp. 937-948.
- [44] Xu, H. and H. P. Wang, "Part Family Formation for GT Applications Based on Fuzzy Mathematics," International Journal of Production Research, Vol. 27, No. 9, 1989, pp. 1637-1651.
- [45] Zhang, C. and H. P. Wang, "Concurrent Formation of Part Families and Machine Cells based on the Fuzzy Set Theory," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 11, No. 1, 1992, pp. 61-67.
- [46] Zimmermann, H. J., Fuzzy Set Theory and its Applications, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 1991.

97년 6월 최초 접수, 97년 11월 최종 수정