

☒ 연구논문

셀 생산 방식에서 자기조직화 신경망을 이용한
기계-부품 그룹의 형성

- A self-organizing neural networks approach to machine-part
grouping in cellular manufacturing systems -

전 용덕*

Jeon, Yong Deok

강 맹규**

Kang, Maing Kyu

Abstract

The group formation problem of the machine and part is a very important issue in the planning stage of cellular manufacturing systems. This paper investigates Self-Organizing Map(SOM) neural networks approach to machine-part grouping problem. We present a two-phase algorithm based on SOM for grouping parts and machines. SOM can learn from complex, multi-dimensional data and transform them into visually decipherable clusters. Output layer in SOM network is one-dimensional structure and the number of output node has been increased sufficiently to spread out the input vectors in the order of similarity. The proposed algorithm performs remarkably well in comparison with many other algorithms for the well-known problems shown in previous papers.

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

전통적인 생산 방식인 대량생산방식은 생산계획을 경제적이며 동시에 합리적으로 수립하기가 비교적 쉽다. 대량생산방식에서는 제품의 질적 균등성을 유지하면서 시장성 있는 제품을 단종으로 대량생산하며, 그로 인해 적절한 기계와 공구를 설계하고 표준화할 수 있다.

그러나 오늘날 소비자의 기호는 매우 다양하고 빠르게 변화하기 때문에 제품의 수명주기도 더욱 짧아지고 있다. 이러한 변화에 적응하기 위한 생산방식이 많은 종류의 제품을 소량으로 생산하는 다품종소량생산방식이다. 다품종소량생산방식은 대량생산방식과는 달리 생산방식의 성격상 다음과 같은 많은 문제점을 가지고 있다.

(1) 생산해야 할 제품의 종류가 많고 생산량과 납기가 다양하다는 점이다.

(2) 소재로부터 제품까지의 변환과정이 복잡하고 생산공정이 개개의 제품에 따라 다르다.

* 한양대학교 산업공학과 박사과정

** 한양대학교 산업공학과

(3) 다양한 제품에 대한 수요의 동적 특성 때문에 설비의 과부족이 생기기 쉽다.

(4) 주문제품의 규격변경에 기인하는 공정계획이나 복잡한 재료흐름 때문에 일정계획이 어렵고 정확한 정보의 부족 때문에 작업견적을 세우기가 어렵다.

그러므로 다품종소량생산방식은 이러한 모든 요인들로 인하여 제품표준화에 의한 대량생산 방식에 비하여 비효율적이며 비경제적이다. 이와 같은 다품종소량생산방식의 어려운 문제점을 해결하고 대량생산방식의 장점을 살리기 위하여 그룹 테크놀로지(Group Technology: GT)개념이 도입되었다[10]. 셀 생산방식(cellular manufacturing)은 그룹 테크놀로지의 개념을 제조시스템에 적용한 것이다. 셀 생산방식 시스템의 개발과 시행을 위한 기본 단계로서의 셀 형성과정은 각각의 기계 셀에 할당된 부품군을 완전히 처리하는 상호 독립적인 여러 개의 셀들을 구성하여야 하며, 따라서 기계그룹 및 부품그룹의 형성 문제로 귀착된다[17].

기계-부품 그룹 형성(machine-part group formation) 문제는 위에서 설명한 셀 생산방식이나 유연생산시스템의 운영시에 발생하는 문제로서, 여러 가지 변형된 형태의 문제가 있으나 그 중 가장 기본적인 문제의 내용은 다음과 같다. 먼저 각 부품의 공정 경로 정보를 나타내는 0-1 기계-부품 빈도행렬(machine-part incident matrix)이 입력 데이터로서 주어진다. 이 빈도행렬에서 1 또는 0의 값을 가지는 요소는 기계 i 가 부품 j 를 처리하기 위하여 사용됨(또는 사용되지 않음)을 나타낸다. 이 때 주어진 각종 제약 조건들을 만족하면서, 가급적 모든 부품들이 할당된 군내에서만 처리되어 군(group)간 상호의존성이 최소화되도록 전체 부품 및 전체 기계를 각각 몇 개의 부품군(part family)과 기계군(machine cell)으로 할당하는 것이다. 이 문제는 NP-complete 문제로 알려져 있다[18]. 일반적으로 최초의 빈도 행렬이 주어졌을 때, 기계 셀이나 부품군은 잘 식별되지 않는다. 이 문제를 푼다는 것은 하나의 군집화 해법(clustering algorithm)을 사용하여 주어진 초기 빈도행렬을 가능한 한 블록대각(block diagonal)구조 형태로 전환시키는 것을 의미한다.

기계-부품 그룹 형성 문제는 지금까지 많은 연구자들이 연구하여 매우 다양한 해법이 제시되었다. 신경망(neural networks)은 학습 능력을 통하여 실제 생산 현장의 문제에 대하여 유연하고 적응력 있는 해를 제공한다. 자기조직화 신경망(Self Organizing feature Map: SOM)은 감독 없이 스스로 학습하는 자율 학습 능력을 통하여 패턴 분류에 효과적인 신경망이다. Kulkarni 와 Kiang[16]은 기계-부품 그룹 형성 문제에 SOM을 적용하여 해를 구할 수 있다는 가능성을 제시하였다. 그러나 실제로 기계-부품 그룹을 형성하는 알고리즘을 제시하지는 못했다.

본 연구에서는 SOM을 적용하여 실제로 그룹화하여 해를 구하는 알고리즘을 제시한다. 본 연구에서 대상으로 하는 문제는 애로기계(bottleneck machine)가 없는 문제이다. 애로기계란 상호독립적인 그룹형성을 방해하는 2개 이상의 기계-부품 그룹에 속하는 기계이다.

1.2 기계-부품 그룹 형성 문제의 기존 해법

기계-부품 그룹 형성 방법에 대하여 많은 방법들이 제시되었는데 크게 배열에 의한 방법, 유사계수법, 수리계획법, 유전해법, 금기탐색법(Tabu Search), 신경망을 이용한 방법 등으로 구분할 수 있다.

배열을 이용한 연구는 King[13], King과 Nakornchai[14], Chandrasekharan과Rajagopalan[4], Chan과 Milner[3], Kusiak과 Chow[20] 등에 의해 이루어 졌으며, 이 방법은 가공정보를 기계 부품 입력행렬을 이용하여 나타내고 부품군과 셀을 동시에 구성하는 절차이다. 가장 유명한 것은 King[13]의 ROC(Rank Order Clustering)방법인데 이 방법은 입력행렬의 각 행과 열에 2진 가중치(binary weight)를 주어서 클러스터링하는 방법이다. King과Nakornchai[14]은 기본적으로는 ROC 알고리즘과 동일하나 컴퓨터 기억용량을 줄이는 ROC2 알고리즘을 발표하였다.

Chandrasekharan and Rajagopalan[4]은 King[13]의 알고리즘이 입력행렬의 형태에 영향받는 것을 해결하였다. Chan과 Milner[3]의 DCA(Direct Cluster Algorithm)은 기계-부품 입력행렬에서 1의 총수에 따라 행과 열을 재배치하여 해를 구하였다. Kusiak과 Chow[20]의 CI(Cluster Identification Algorithm)은 행과 열에 차례로 가상의 선을 그리면서 상호독립적인 그룹을 찾아나가는 방법이다.

유사계수법은 기계사이의 공정상 유사성에 따라 유사계수를 구하여 이에 따라 클러스터링하는 방법으로서 McAuley[21]의 SLCA(Single Linkage Cluster Analysis)가 최초의 방법이다. Gupta와 Seifoddini[9]는 부품의 생산량과 각 부품에 대한 대안적인 공정계획을 고려하여 기계쌍(pair of machines)간 또는 부품쌍 간의 유사성을 계산하고 특정 임계값(threshold value)에 의해 셀 및 부품군을 구성하는 방법을 제시하였다.

수리계획법은 Viswanathan[26], Srinivasan 외[24], Crama와 Oosten[7]의 연구가 있다. Viswanathan[26]은 가중치의 개념을 도입하여 p-median모델의 약점을 보완하여 발전시켰다. Srinivasan 외[24]는 할당모델을 제시하였다. Crama와 Oosten[7]은 제약조건에 부품-기계, 기계-기계, 부품-부품간의 관계와 셀의 크기와 수를 추가한 수리모델을 제시하였다.

유전해법은 생태계의 적자생존 및 유전법칙에 그 원리의 바탕을 둔, 최적해에 대한 적응 탐색 알고리즘인 유전 알고리즘을 사용하여 문제를 해결한다. Gupta 외[8]는 유전 알고리즘을 이용하여 부품의 셀내 이동과 셀간 이동을 최소화하는 모델을 제시하였다.

금기탐색법은 부분최적에서 벗어나 최적해 또는 근사최적해를 구할 수 있는 탐색적 방법을 사용하여 문제를 해결한다. Sun 외[25]는 셀 형성문제를 그래프 분할 문제로 모델링하여 금기탐색법으로 알고리즘을 개발하였다.

신경망을 이용한 방법은 학습을 통하여 패턴을 인식하고 입력 데이터의 연관된 특징을 추출하는 신경망의 성질을 이용하여 문제를 해결한다. 신경망을 이용한 연구로는 Moon[22], Moon와 Chi[23], Kaparthi와 Suresh[11], Kaparthi 외[12], Kulkarni와 Kiang[16] 등 많은 연구가 있다. Moon[22]은 기계-부품 그룹 형성문제에 처음으로 경쟁 네트워크 개념을 도입하였고, Moon와 Chi[23]는 이 개념을 다른 생산 정보를 포함하는 유사계수의 계산에 확장 적용하였다. Kaparthi와 Suresh[11], Kaparthi 외[12]는 무감독 신경망의 일종인 ART(Adaptive Resonance Theory)를 적용하였다. Kulkarni와 Kiang[16]은 기계-부품 그룹 형성문제에 SOM의 적용 가능성을 처음으로 제시하였다.

2. 자기 조직화 신경망의 일반적 고찰

SOM은 비지도 학습(unsupervised learning)을 사용하는 신경망의 일종으로 Kohonen[15]에 의하여 제시된 경쟁학습 모델(competitive learning model)이다. 경쟁학습은 입력 패턴에 대해서 경쟁층의 노드중에서 승자 노드를 결정하여 승자 노드의 연결강도만을 입력 패턴에 대응하여 조절하는 학습방법이다. SOM은 학습과정에서 이웃(neighborhood)의 개념을 사용하는 것이 일반 경쟁학습모델과의 차이점이다. SOM에서는 승자 노드뿐만 아니라 승자 노드의 이웃 노드들의 연결강도도 함께 조절된다. 그 결과로 출력층에 입력 패턴의 유사성을 반영하는 지도를 스스로 형성한다. 즉, SOM은 입력 패턴들을 출력 노드들에 의한 위상학적인 공간으로 매핑(mapping)할 수 있는 능력을 가진다.

SOM의 일반적인 구조는 그림 2.1과 같다. SOM은 입력층(input layer)과 출력층(output layer)으로 두 개의 층으로 구성되어 있다. 입력층은 유클리디안 공간상의 m차원 벡터를 입력 벡터로 가질 수 있으며 일차원 또는 이차원의 격자(lattice) 출력층과 연결되어 있다. 입력벡터는 모든 출력노드와 연결되어 있고 연결선은 연결강도(weight)를 가진다. 승자노드의 결정은 입력벡터와 연결강도벡터의 거리를 계산하여 거리가 가장 작은 노드를 선택한다. 여기서 말하

는 거리는 유클리디안 공간상의 벡터의 거리(euclidean distance)를 말한다.

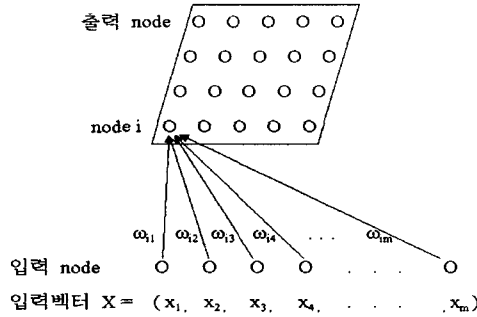


그림 2.1 SOM의 일반적인 구조

승자 노드를 결정하고 난 후에는 코호넨의 학습규칙에 따라 노드의 연결강도를 조정해야 하는데 이 규칙은 식 (2.1)으로 표현된다.

$$w(\text{new})_{ij} = w(\text{old})_{ij} + \alpha(x_i - w_{ij}(\text{old})) \tag{2.1}$$

여기서 $w(\text{new})_{ij}$: 신경세포 i, j 사이의 조절된 후 연결강도
 $w(\text{old})_{ij}$: 신경세포 i, j 사이의 조절되기 전 연결강도
 α : 학습률 ($0 < \alpha \leq 1$)
 x_i : 신경세포 i 의 활성화값

SOM에서 신경망을 학습시키는 과정은 다음과 같다.

- Step 1. 입력층에 입력패턴(입력벡터)을 제시한다.
- Step 2. 각 출력노드의 연결강도벡터와 입력패턴(입력벡터)의 거리를 구해서 가장 짧은 거리의 승자 노드(승자신경세포)를 구한다.
- Step 3. 승자신경세포와 이웃노드의 연결강도를 조절한다.
- Step 4. Step 1-3 과정을 모든 입력벡터에 대해 반복한다
- Step 5. 이웃의 범위와 학습률을 감소하면서 이웃의 범위가 자기 자신이 될 때까지 Step 4 과정을 반복한다.

SOM의 출력층은 해결하려고 문제의 특성에 따라 해를 구하는 데 있어서 1차원구조가 적합한 경우가 있고, 2차원구조가 적합한 경우가 있다. 문제에 따라서는 1차원구조와 2차원구조에 상관없는 경우도 있다.

3. 제안하는 기계-부품 그룹 형성 알고리즘

Kulkarni 와 Kiang[16]은 해를 구할 수 있다는 가능성만을 제시했지만 본 연구에서는 실제로 그룹화하여 해를 구하는 알고리즘을 제시한다. Kulkarni & Kiang[16]의 논문에서는 출력층을 그림 2.1과 같이 2차원구조로 하였다. 출력층이 2차원구조일 경우 SOM에 의하여 2차원 출력층의 출력노드에 클러스터링된 부품(입력패턴)을 다시 디스조인트하게 그룹화하여 기계 부품 그룹을 만들 수 있는 방법이 없다.

본 연구에서는 이와 같은 2차원 출력층이 가지는 한계를 극복하기 위하여 출력층을 그림 3.1과 같이 1차원구조로 하고, 부품 및 기계에 대하여 2단계로 SOM을 적용하였다. 출력층이 1차

원구조일 경우 출력노드의 수를 충분히 크게 만들면 입력데이터(부품)를 입력벡터(가공 기계)가 유사한 순서로 1차원 출력노드에 펼쳐놓을 수 있다. 이 상태에서 기계를 입력벡터로 하여 같은 방법을 적용하면 자동적으로 기계-부품 그룹이 형성된다.

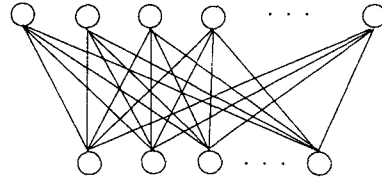


그림 3.1 출력노드가 1차원 구조인 SOM

3.1 알고리즘의 절차

- Step 1. 부품을 입력벡터로 하는 SOM을 구성한다.
- Step 2. 부품에 대하여 SOM을 학습시킨다.
- Step 3. Step 2의 결과에서 기계를 입력벡터로 하는 SOM을 구성한다.
- Step 4. 기계에 대하여 SOM을 학습시킨다.
- Step 5. 군집을 이루는 부품과 기계를 묶어 기계-부품 그룹을 형성한다.

3.2 수치예제

이 수치예제는 Carrie[2]에 있는 예제이다. 부품의 수는 35개이고 기계의 수는 20개이다.

	부품																																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
기계 1	1	1																																						
기계 2																																								
기계 3																																								
기계 4																																								
기계 5																																								
기계 6																																								
기계 7																																								
기계 8																																								
기계 9																																								
기계 10																																								
기계 11																																								
기계 12																																								
기계 13																																								
기계 14																																								
기계 15																																								
기계 16																																								
기계 17																																								
기계 18																																								
기계 19																																								
기계 20																																								

그림 3.1 Carrie 예제의 기계-부품 빈도 행렬

Step 1. 부품을 입력벡터로 하여 SOM을 구성하면 다음과 같다.

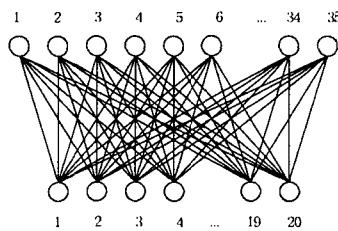


그림 3.2 부품을 입력벡터로 하는 SOM의 구성

Step 2. 부품에 대하여 SOM을 학습시킨 결과, 출력노드에 그림 3.3과 같이 입력벡터(가공기

계)가 유사한 순서로 펼쳐진다.

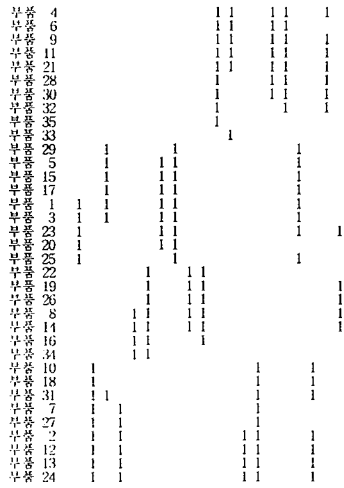


그림 3.3 부품에 대하여 학습시킨 결과

Step 3. 그림 3.3의 행렬에서 기계를 입력벡터로 하는 SOM을 구성하면 다음과 같다.

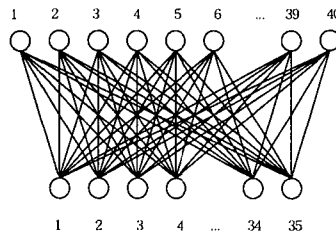


그림 3.4 기계를 입력벡터로 하는 SOM의 구성

Step 4. 기계에 대하여 SOM을 학습시킨 결과 그림 3.5를 얻는다.

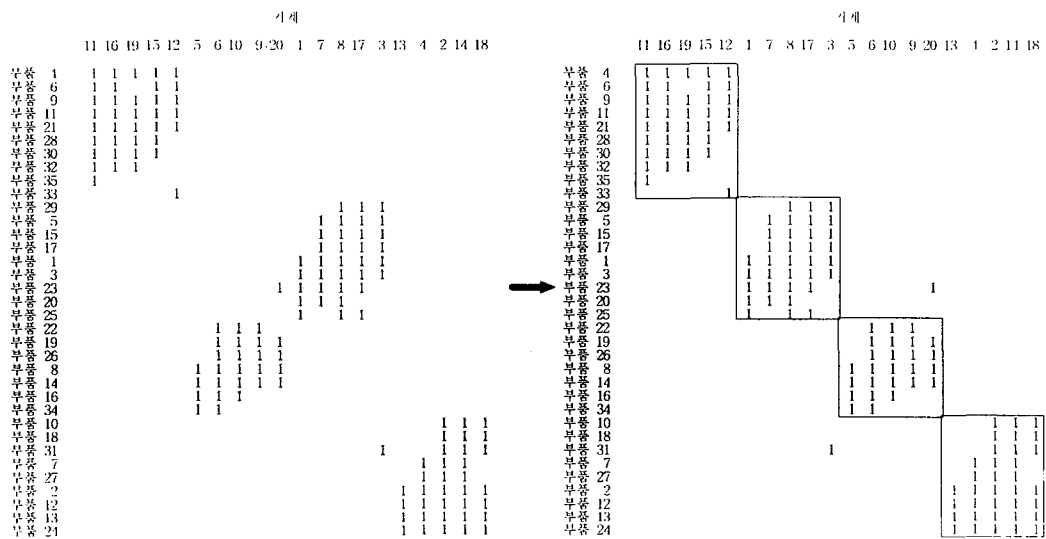


그림 3.5 기계에 대하여 SOM을 학습시킨 결과

Step 5. 그림 3.5의 왼쪽 그림에서 보는 바와 같이 '1'이 군집을 이루는 것을 볼 수 있다. 이것이 각각 하나의 기계-부품 그룹이다.

기존 논문에서 나타난 것처럼 블록대각구조의 형태로 나타내면 그림 3.5의 오른쪽 그림과 같다. 이 문제는 기존 논문에서 많이 인용되는 문제인데 그림 3.5가 가장 좋은 해로 알려져있다 [11].

4. 제안하는 해법의 성능 실험 및 분석

4.1 해법의 성능 평가 척도

본 연구에서는 성능 평가 척도로서 Kumar와 Chandrasekharan[17]이 정의한 그룹화 효율 (Grouping Efficacy: GE)을 사용한다. GE는 블록대각행렬에서 다음과 같이 정의한다.

$$GE = \frac{\text{블록대각구조내의 '1'의 수}}{\text{블록대각구조의 면적} + \text{블록대각구조밖의 '1'의 수}} \quad (4.1)$$

그룹화 효율은 클러스터링의 질(quality)을 평가하기 위한 척도로서 널리 사용되며, 블록대각구조의 밀집도를 나타낸다. GE 값은 0과 1사이의 범위를 가진다. 이 값이 클수록 클러스터링이 잘된 것이다.

4.2 실험 및 분석

기존 논문에서 많이 인용되는 문제중에서, 애로기계가 없는 문제를 대상으로 실험하였다. SOM의 학습률은 0.01, 이웃의 크기(이웃의 반경)는 처음에는 출력층의 모든 노드를 포함하도록 하다가 학습이 진행됨에 따라 하나씩 줄여나가 마지막에는 승자노드만 포함되도록 한다. 인용된 문제에 대하여 가장 좋은 해를 구한 해법과 제안하는 해법의 그룹화 효율을 비교한 결과는 표 4.1과 같다.

표 4.1에서 제안하는 해법의 그룹화 효율이 비교하는 해법의 그룹화 효율보다 크거나 같음을 알 수 있다. 비교하는 해법에 의한 해가 그 문제에 대하여 지금까지 구한 가장 좋은 해이므로 제안하는 해법은 기존의 여러 해법과 비교하여 성능이 우수함을 알 수 있다.

출력노드의 수는 일정수 이상이 되면 가장 좋은 해(그룹화 효율이 가장 좋은 해)가 도출되고 그 후에는 출력노드의 수를 증가시켜도 해에는 변화가 없었다. 또 처음으로 가장 좋은 해가 나오는 출력노드의 수는 입력데이터의 수의 2배를 넘지 않았다. 실험결과 출력노드의 수는 문제의 크기가 작을 경우(입력데이터의 수가 20이하일 경우)에는 입력데이터의 수의 2배, 문제의 크기가 클 경우(입력데이터의 수가 20이상일 경우)에는 입력데이터의 수의 1배 정도로 하는 것이 적당하다.

실험에 의하면 가장 좋은 해가 나오는 최소의 출력노드 개수는 학습률에 영향을 받는다. 일정범위의 학습률에서는 최소의 출력노드 개수가 변하지 않았다. 실험에 의하면 출력노드의 수를 적당히 증가시키면 학습률을 선택하는 데에 있어서 더 많은 유연성(flexibility)이 제공되고 좋은 해를 얻을 수 있다.

문제	문제의 출처	해법	해법의 GE	제안하는 해법의 GE
5x7	King and Nakornchai[14]	King and Nakornchai[14]	0.82	0.82
6x8	Kusiak and Cho[19]	Kusiak and Cho[19]	0.77	0.77
7x8	Kusiak and Chow[20]	Kusiak and Chow[20]	0.85	0.85
7x11	Kusiak and Chow[20]	Kusiak and Chow[20]	0.46	0.46
8x20	Chandrasekharan and Rajagopalan[4]	Crama and Oosten[7]	0.85	0.85
10x8	Ham, Hitomi, and Yoshida[10]	Ham, Hitomi, and Yoshida[10]	0.74	0.74
10x12	Ben-Arieh and Chang[1]	Viswanathan[26]	0.51	0.53
10x15	Chan and Milner[3]	Chan and Milner[3]	0.70	0.70
10x20	Srinivasan, Narendran, and Mahadevan[24]	Srinivasan, Narendran, and Mahadevan[24]	1.00	1.00
16x30	Srinivasan, Narendran, and Mahadevan[24]	Srinivasan, Narendran, and Mahadevan[24]	0.68	0.68
20x35	Carrie[2]	Kaparthi and Suresh[11]	0.75	0.75
24x40	Chandrasekharan and Rajagopalan[6]	Kaparthi, Suresh, and Cervený[12]	1.00	1.00
40x100	Chandrasekharan and Rajagopalan[5]	Chandrasekharan and Rajagopalan[5]	0.83	0.88

표 4.1 그룹화 효율의 비교

5. 결론

본 연구에서는 셀 생산방식에서의 기계-부품 그룹 형성문제에 SOM이라는 새로운 방법을 적용하여 해를 구하는 알고리즘을 제시한다. 기계-부품 그룹 형성문제에 SOM을 이용한 Kulkarni 와 Kiang[16]에서는 해를 구할 수 있다는 가능성만을 제시했지만 본 연구에서는 SOM을 적용하여 실제로 그룹화하여 해를 구했다. 본 연구에서는 SOM의 출력층의 구조를 1차원 구조로 하고 출력노드의 수를 충분히 크게 만들어, 1차원 출력노드에 입력벡터가 유사한 순서로 펼쳐질 수 있게 하였다. 이러한 과정을 2단계로 적용하여 자동적으로 기계-부품 그룹이 형성된다. 기존의 논문에서 많이 인용되는 문제에 대하여 가장 좋은 해를 구한 여러 해법과 성능을 비교한 결과 성능이 우수하다.

학습시간이 많이 걸리는 다른 신경망과는 달리 SOM은 학습이 매우 빨리 수행되기 때문에 실시간 처리에 적합하다. 더욱이 신경망 문제해결을 위한 병렬처리 컴퓨터가 사용될 경우 엄청난 계산속도를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 기계-부품 그룹 형성문제중에서 애로기계가 없는 문제를 대상으로 해법을 개발하였는데, 애로기계의 유무에 상관없는 더 범용적인 해법의 개발은 다음의 연구과제로 다루

려 한다.

참 고 문 헌

1. Ben-Arieh, D. and Chang, P. T., "An extension to p-median group technology algorithm," *Computers and Operations Research*, Vol. 21, No. 1, pp. 101-114, 1994.
2. Carrie, A. S., "Numerical taxonomy applied to group technology and plant layout," *International Journal of Production Research*, Vol. 11, No. 1, pp. 399, 1973.
3. Chan, H. M. and Milner, D. A., "Direct clustering algorithm for group formation in cellular manufacturing," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 65-75, 1982.
4. Chandrasekharan, M. P. and Rajagopalan, R., "MODROC: An extension of rank order clustering for group technology," *International Journal of Production Research*, Vol. 24, No. 5, pp. 1221-1233, 1986.
5. Chandrasekharan, M. P. and Rajagopalan, R., "ZODIAC: An algorithm for concurrent formation of part-families and machine-cells," *International Journal of Production Research*, Vol. 25, No. 6, pp. 835-850, 1987.
6. Chandrasekharan, M. P. and Rajagopalan, R., "Groupability: An analysis of the properties of binary data matrices for group technology," *International Journal of Production Research*, Vol. 27, No. 6, pp. 1035-1052, 1989.
7. Crama, Y. and Oosten, M., "Models for machine-part grouping in cellular manufacturing," *International Journal of Production Research*, Vol. 34, No. 6, pp. 1693-1713, 1996.
8. Gupta, Y. P., Gupta, M. C., Kumar, A., and Sundram, C., "Minimizing total intercell and intracell moves in cellular manufacturing: A genetic algorithm approach," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 8, No. 2, pp. 92-101, 1995.
9. Gupta, T. and Seifoddini, H., "Production data based similarity coefficient for machine-component grouping decisions in the design of cellular manufacturing system," *International Journal of Production Research*, Vol. 28, pp. 1247-1269, 1990.
10. Ham, I., Hitomi, K., and Yoshida, T., *Group Technology: Production Methods in Manufacture*, Kluwer-Nijhoff, Boston, MA, 1985.
11. Kaparthi, S. and Suresh, N. C., "Machine-component cell formation in group technology: A neural network approach," *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 6, pp. 1353-1367, 1992.
12. Kaparthi, S., Suresh, N. C., and Cervený, R. P., "An improved neural network leader algorithm for part-machine grouping in group technology," *European Journal of Operational Research*, Vol. 69, No. 3, pp. 342-366, 1993.
13. King, J. R., "Machine-component grouping in production flow analysis: An approach using a rank order clustering algorithm," *International Journal of Production Research*, Vol. 18, No. 2, pp. 213-232, 1980.
14. King, J. R. and Nakornchai, V., "Machine-component group formation in group technology: Review and extension," *International Journal of Production Research*,

- Vol. 20, No. 2, pp. 117-133, 1982.
15. Kohonen, T., "Self-organized formation of topologically correct feature maps," *Biological Cybernetics*, Vol. 43, pp. 59-69, 1982.
 16. Kulkarni, U. R. and Kiang, M. Y., "Dynamic grouping of parts in flexible manufacturing systems: A self organizing neural networks approach," *European Journal of Operational Research*, Vol. 84, No. 2, pp. 192-212, 1995.
 17. Kumar, C. S. and Chandrasekharan, M. P., "Grouping efficacy: A quantitative criterion for goodness of block diagonal forms of binary matrices in group technology," *International Journal of Production Research*, Vol. 28, No. 2, pp. 233-243, 1990.
 18. Kumar, K. R., Kusiak, A., and Vannelli, A., "Grouping of parts and components in flexible manufacturing systems," *European Journal of Operational Research*, Vol. 24, No. 3, pp. 387-397, 1986.
 19. Kusiak, A. and Cho, M., "Similarity coefficient algorithms for solving the group technology problem," *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 11, pp. 2633-2646, 1992.
 20. Kusiak, A. and Chow, W. S., "An algorithm for cluster identification," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-17, No. 4, pp. 696-699, 1987.
 21. McAuley, J., "Machine grouping for efficient production," *The Production Engineer*, Vol. 51, pp. 53-57, 1972.
 22. Moon, Y. B., "Forming part-machine families for cellular manufacturing: A neural-network approach," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 5, No. 4, pp. 278-291, 1990.
 23. Moon, Y. B. and Chi, S. C., "Neural networks for part family formation using neural network techniques," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 11, No. 3, pp. 149-159, 1992.
 24. Srinivasan, G, Narendran, T. T., and Mahadevan, B., "An assignment model for the part-families problem in group technology," *International Journal of Production Research*, Vol. 28, No. 1, pp. 145-152, 1990.
 25. Sun, D., Lin, L., and Batta, R., "Cell formation using tabu search," *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 28, No. 3, pp. 485-494, 1995.
 26. Viswanathan, S., "A new approach for solving the P-median problem in group technology," *International Journal of Production Research*, Vol. 34, No. 10, pp. 2691-2700, 1996.