

# 쾌속조형 공정 비교실험 및 공정 선정에 관한 연구

이일량\*, 정일용#, 최병욱\*, 김영탁\*\*

## Benchmark Study of Rapid Prototyping Processes and the Development of Decision-support System to Select Appropriate RP Process and Machine

Il Lang Yi\*, Il Yong Chung#, Byung Wook Choi\* and Young Tag Keum\*\*

### ABSTRACT

In this paper, benchmark tests of Rapid Prototyping(RP) are presented to evaluate characteristics of various RP Systems and Processes, and several decision-support systems are developed to select RP Machine/Process suitable to user's requirements. Results of the RP benchmark tests are applied to the recently developed RP machines for the purpose of analyzing attributes such as dimensional accuracy, surface roughness, build cost, build time, and etc. Decision-making support systems are also developed, which contain not only new LCE (Linear Confidence Equation) algorithm but also modified PRES and MDS algorithm. Those algorithms are proved to be effective in that reasonably acceptable results are obtained on several cases of different inputs.

**Key Words** : Rapid prototyping(쾌속조형), Benchmark test(벤치마크 실험), Decision-support system(의사결정 지원 시스템), LCE algorithm(선형판별식법), Modified MDS algorithm(수정된 다차원최도법)

### 1. 서론

쾌속조형(RP) 기술은 1980 년대 말에 상용화되어 3 차원 CAD 기술의 사용과 함께 SL, SLS, FDM, LOM, 3DP 등의 여러 공정 기술이 개발되어 제품 개발 기술을 한 단계 향상시켰다. RP 기술은 설계 검증을 위한 형상검증용 파트, 기능성 시험을 위한 기능성 파트, 쾌속금형 제작을 위한 마스터모델용 툴링 파트, 소량의 실제 부품으로 사용하기 위한 제품 파트 등에 사용되고 있으며 자동차 부품, 가전 등의 소비재 제품, 의료, 보석, 신발, 예

술 분야 등에 다양하게 응용되고 있다. 최근에는 마이크로 RP 혹은 마이크로 스테레오리소그라피 기술개발로 MEMS, micro 3D fabrication 분야에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>1</sup>

RP 기술을 이용하는 응용분야가 다양해짐에 따라 각 RP 공정의 장단점 및 특성을 비교하여 적절한 RP System 및 공정을 선정하기 위한 RP 공정의 비교실험과 의사결정 지원 시스템에 관한 연구가 진행되어 왔다.

RP 기술이 대두되기 시작한 1990 년대 초기에 Hornberger<sup>2</sup> 는 Santa Clara 대학에서 전반적인 RP

접수일: 2005 년 2 월 11 일; 게재승인일: 2005 년 9 월 9 일  
\* 한국생산기술연구원 생산정보팀  
# 교신저자: 한국생산기술연구원 생산정보팀  
Email: cij@cupid.kitech.re.kr Tel. (041) 589-8434  
\*\* 한양대학교 기계공학과

공정에 대한 정보를 제공하는 교육용 프로그램을 개발하였으며, Childs<sup>3</sup> 는 네 가지 공정에 대해 정밀도만을 고려한 RP 공정에 대해 비교실험을 시행하였다. Ippolito<sup>4</sup> 는 자체 테스트 모델을 개발하여 다섯 가지의 공정을 정밀도와 표면거칠기에 대하여 RP 공정 비교실험을 시행하고 그 결과를 상대적인 비교 그래프로 표현하였다. Muller<sup>5</sup> 는 MS-Access 프로그램을 이용하여 장비선정 보다는 조형물의 형상 선정이나 조형위치 결정을 돕는 프로그램을 개발하였다. Phillipson<sup>6</sup> 은 Santa clara 대학의 RP 프로그램을 벤치마킹하여 만든 시스템으로 역시 MS Access 를 이용하여 Database 프로그램을 개발하였으며 자료수집은 사용자와의 인터뷰를 통하여 이루어졌다. Loose 와 Nakagawa<sup>7</sup> 는 일본 RP 장비에 대한 형상 정밀도 및 제작 시간, 비용 등을 비교 실험하였고, Shellabear<sup>8</sup> 는 여섯 가지의 RP 제작 공정을 정밀도와 표면거칠기에 대해 반복 실험을 실시한 후 데이터베이스화하였다. Helsinki 대학팀은 웹상에서 RP 장비 선정을 돕는 간단한 프로그램을 개발한 적도 있다. 이관행<sup>9,10</sup> 은 자체 테스트 모델과 쾌속제품 개발을 위한 측정 시스템을 개발하여 네 가지 공정에 대해 정밀도를 비교와 공정평가를 실시하였다. Masood<sup>11</sup> 는 전세계 39 개의 장비를 포함한 RP 장비 선정을 위한 규칙기반의 전문가 시스템을 개발하였다.

본 논문에서는 채택된 테스트 모델을 대상으로 서로 다른 공정을 가진 RP 장비에 대한 공정비교 실험을 수행하였으며, 실험결과를 토대로 사용자가 원하는 RP 공정을 선정할 수 있는 의사결정 지원시스템을 개발하였다.

## 2. 쾌속조형 공정 비교실험

### 2.1 대상공정과 테스트 모델

쾌속조형 비교실험의 대상공정으로는 국내에서 많이 사용되고 있는 최신의 장비 위주로 대상을 선정하였다. Table 1 은 비교실험 대상장비 및 공정재료를 나타낸 것이다. 본 실험에서 고려한 비교실험 및 공정선정을 위한 속성값은 정밀도(Accuracy in x-y & z direction), 표면거칠기(Surface roughness), 조형시간 및 비용(Build Time & Cost), 인장강도(Tensile strength)이다.

본 실험에서는 IMS 국제 과제에서 제안한 IMS\_T2 모델(Fig. 1)을 채택하였다.<sup>12</sup>

Table 1 RP system for the benchmark test

Model Name	Company	Process	Material
FDM TITAN	Stratasys(USA)	FDM	Polycarbonate
EOSINT P380	EOS GmbH(Germany)	SLS	Polyamide
Quadra™	Objet Geometries(Israel)	Inkjet	Acrylate
Viper si2	3D Systems(USA)	SL	Epoxy
SOUP II 600GS	CMET(Japan)	SL	Epoxy

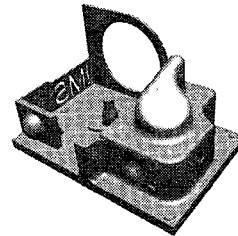


Fig. 1 Test model for the benchmark test

### 2.2 테스트 모델 조형 및 측정

테스트 모델은 많은 경험을 가지고 있는 업체나 기관에 제작 의뢰하였으며 Fig. 2 는 각 장비에 의한 조형 결과를 나타낸 것이다.

비교실험을 위한 치수정밀도를 측정하기 위해 ㈜덕인사의 ASTRO 543C (Reinshaw TP6 A Probe 장착) 접촉식 3 차원 측정기를 이용하였고 표면거칠기의 측정은 Federal 사의 Surfalyzer TM4000 표면조도측정기를 사용하여 Ra 와 Rz 를 측정하였다.

형상 정밀도를 평가하기 위해 선형 거리와 곡면, 각도 등을 포함하는 총 25 곳을 측정하였고, 표면 거칠기를 평가하기 위해 x, y, z 방향으로 총 5 곳을 측정하였다. Table 2, 3 은 각각 형상 정밀도와 표면거칠기를 측정하기 위한 세부 항목을 나타낸 것이다. Fig. 3 은 각 항목에 대한 테스트 모델의 측정 부위를 표시한 그림이다.

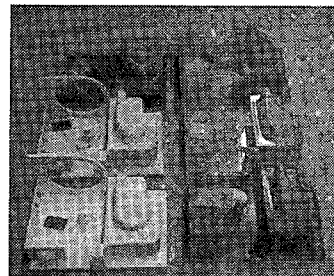


Fig. 2 Test models built by each process

Table 2 Measuring items for the accuracy

No.	ITEM	No.	ITEM
1	Base Length (X)	14	Roof thickness
2	Base Width (Y)	15	Roof height
3	Base thickness	16	Protrusion angle
4	Height (Z)	17	Small Cylinders Diameter
5	Round Hole Diameter	18	Small Cylinders height
6	Round Hole thickness	19	Centre upper Cylinder Dia.
7	Thickness of Wall 1	20	Centre upper Cylinder height
8	IMS letters Height	21	Centre lower Cylinder Dia.
9	Thickness of Wall 2	22	Centre Cylinder Base height
10	Thickness of Slop1 at Wall 2	23	Pillar Length (X)
11	Thickness of Slop2 at Wall 2	24	Pillar width (Y)
12	Angle of Slop1 at Wall 2	25	Pillar height (Z)
13	Angle of Slop2 at Wall 2		

Table 3 Measuring items for the surface roughness

No.	ITEM	No.	ITEM
S1	TSB X direction	S4	SSB Y direction
S2	TSB Y direction	S5	SSP Z direction
S3	FSB X direction		

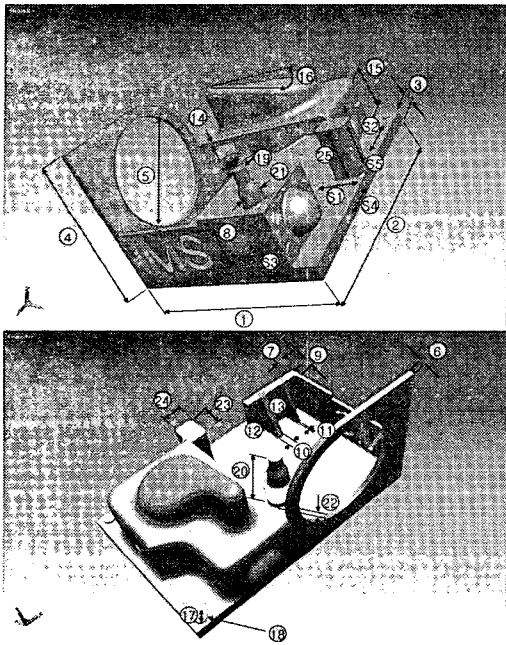


Fig. 3 Measurement points on the test model

2.3 측정 결과 및 검토

각 RP 공정에 따라 조형된 테스트 모델을 이용하여 정해진 측정 범위 내에서 정밀도, 표면거칠기, 조형 시간, 조형 비용을 측정하였다. 또한 이러한 측정 결과는 RP 공정 선정을 위한 의사결정 지원 시스템의 기본데이터로 사용된다.

2.3.1 치수 정밀도

정밀도는 제품의 품질을 평가할 수 있는 가장 중요한 항목 중의 하나이다. 본 연구에서는 조형된 테스트 모델을 총 25 곳에서 선형적인 요소, 곡면 요소, 각도, 미세 형상 등이 제대로 되었는지 측정하고 분석하였다. 또한 조형 방향(z direction)과 스캔 방향(x-y direction)에 따른 치수 정밀도를 비교하였다. Table 4 는 측정 부위에서 각 장비의 편차를 나타낸 것이고, Fig. 4 는 z 방향 측정항목을 측정값에 따라 5, 15, 30, 100 mm 의 4 가지로 분류하여 각각의 백분율 편차를 계산하여 그래프로 표현한 것이다.

Table 4 Measurement result - dimensional deviation

No.	T	E	Q	V	S	No.	T	E	Q	V	S
1	0.386	-0.099	-0.119	-0.048	-0.048	14	0.137	-0.007	-0.043	-0.110	-0.142
2	0.331	-0.262	0.174	0.117	0.298	15	0.150	-0.184	0.215	-0.140	0.060
3	-0.021	-0.165	0.038	0.042	-0.298	16	-0.326	-0.029	0.100	0.083	-0.234
4	-0.019	-0.338	-0.743	-0.198	-0.258	17	0.036	0.145	0.153	0.103	0.094
5	0.217	-0.420	0.037	0.148	-0.066	18	-0.004	0.054	-0.018	-0.142	-0.009
6	-0.028	0.062	-0.225	-0.026	0.076	19	0.071	0.161	-0.081	0.031	0.040
7	0.032	0.099	0.079	0.069	0.040	20	-0.002	0.050	-0.081	0.062	0.021
8	0.000	-0.169	0.016	0.084	0.119	21	-0.136	-0.326	-0.463	-0.176	-0.301
9	0.059	0.198	-0.265	0.002	0.016	22	-0.019	0.128	-0.012	0.005	-0.015
10	0.030	0.118	-0.095	0.034	0.016	23	0.121	0.270	-0.341	0.075	0.058
11	-0.033	0.126	-0.083	0.021	0.031	24	0.076	0.366	-0.162	0.095	0.070
12	-0.046	-0.136	-0.713	-0.030	0.124	25	-0.053	0.034	0.032	0.090	0.108
13	-0.144	0.517	-0.980	-0.143	0.251						

※ T: Titan(FDM), E: EOS(SLS), Quadra(Inkjet), Viper si2(SLA).

Soup(SLA)

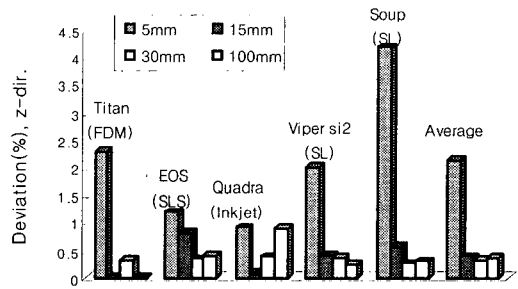


Fig. 4 Relative percentage error in z-direction

Inkjet 공정의 Quadra 장비에서 오차 편차가 비교적 크게 나타났는데, 이는 지지층(support layer)을 떼어내는 부분에서 비교적 큰 오차가 발생한 것으로 사료된다. 반면에 SL 공정의 Viper, Soup 장비를 이용하여 조형한 테스트 모델은 모든 측정 위치에서 고르고 낮은 오차 편차를 보였다.

Table 5 는 각 RP 장비에 따른 절대 오차의 평균 편차값과 이를 백분율로 나타낸 것이다.

Table 5 Average deviation of each RP system

Model	Process	Avg. dev.( $\mu\text{m}$ )	Accuracy(%)
TITAN	FDM	99.1	0.79
EOSINT	SLS	178.4	1.97
Quadra™	Inkjet	210.6	1.77
Viper si2	SL	83	1.16
SOUP	SL	117.8	1.03

### 2.3.2 표면거칠기

RP 조형의 특성상 조형물의 표면 조도는 일반 기계가공에 비해 상대적으로 떨어진다. 이를 극복하기 위해 대부분 마무리 후처리 공정을 다시 거치게 되는데 본 연구에서는 이런 후처리 공정을 거치지 않은 테스트 모델을 측정하였다.

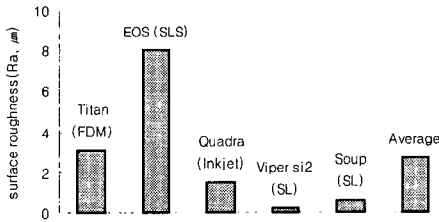


Fig. 5 Surface roughness associated with each process

Fig. 5 는 표면거칠기의 정도를 나타낸 것으로 대체적으로 SL 이나 Inkjet 공정이 좋은 결과를 보여주었다.

### 2.3.3 조형 시간 및 조형 비용

RP 파트를 제작하기 위한 비용은 RP 장비의 재료비뿐만 아니라 전처리 및 후처리 작업에 드는 비용과 인건비를 포함하는 제작에 필요한 제반 비용을 말한다. 조형 시간은 파일변환, 에리체크 등과 같은 전처리 작업 시간과 실제 조형 시간, 후처리 작업 시간으로 나누어 계산하였다.

Fig. 6, 7 은 각각 조형 시간과 비용을 비교한 그래프이다. 두 속성에서 Inkjet 공정의 Quadra 장비가 좋은 결과를 나타냄을 볼 수 있다.

### 2.3.4 기계적 성질

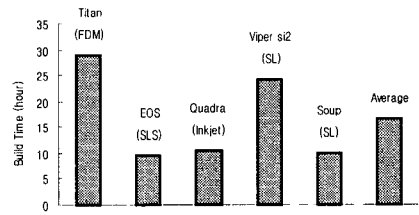


Fig. 6 Build time associated with each process

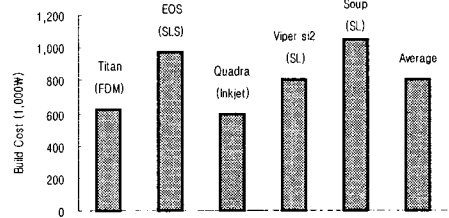


Fig. 7 Build cost associated with each process

RP 조형물의 용도 중 많이 사용되고 있는 분야중의 하나가 부품의 기능성 테스트이다. 이러한 요구 조건에 만족하기 위해서는 시제품 또한 인장 강도나 연신율 등과 같은 적합한 기계적 성질을 갖추어야 한다. 이를 위해 각 공정에서 사용하고 있는 재료의 인장 강도를 조사하여 의사결정시스템의 기본데이터로 활용하였다.

## 3. 쾌속조형 공정 및 장비 선정

### 3.1 의사결정 지원시스템 알고리즘

앞 절의 벤치마크 테스트 결과를 기본데이터로 활용하여 RP 공정선정을 위한 의사결정지원시스템을 개발하였다. 본 논문에서는 행정 업무의 우선순위를 결정하고 평가하기 위해 개발한 PRES 알고리즘<sup>13</sup> 과 이득과 비용에 관한 근접도를 구하는 MDS 알고리즘<sup>14,15</sup> 을 RP 공정선정 문제에 확장하여 적용하였으며, MDS 알고리즘의 문제점을 보완하기 위하여 LCE 알고리즘을 개발하였다.

#### 3.1.1 Extended PRES Algorithm

사용자가 지정한 각 속성별(정밀도, 표면거칠기, 조형시간, 조형비용 등) 가중치와 정규화된 기본데이터를 이용하여 하나의 대안(RP 공정)을 다른 대안과 비교하여 우월한 정도를 표현하는 행렬식을 구한다. 이 행렬식의 각 행 요소의 합은 그

대안이 다른 대안들에 대해 갖는 우월한 크기를 나타내고 각 열의 요소의 합은 다른 대안에 대한 그 대안의 열등을 나타낸다. 이 두 값의 비를 이용하여 값이 큰 순서로 대안을 선정한다. 확장된 PRES 알고리즘의 순서는 다음과 같다.

**STEP 1. Normalize Raw Data Matrix, Valuation Matrix,**

$$G(g_j(x))$$

서로 값이 다른 속성들을 비교하기 위해 벤치마크 결과의 기본데이터(raw data)를 정규화 한다.

$$g_j(i) = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n d_{ij}^2}} \quad (1)$$

여기서  $d_{ij}$ 는 raw data 의 한 요소를 말한다.

**STEP 2. Determine Domination Matrix,  $T(t_{ij})$**

우월행렬(Domination matrix)이란 하나의 대안  $i$ 를 다른 대안  $j$ 와 비교하여 우월한 정도를 나타내기 위한 행렬 표현식이다. 두 대안의 속성 별 차이의 절대값에 가중치를 곱하여 합한 값으로써 다음과 같이 표현된다.

$$t_{ij} = \sum_{k=1}^n w_k |g_k(i) - g_k(j)|$$

where  $i, j = 1, 2, 3, \dots, m$  (2)

$$t_{ij} = 0 \quad \text{where } i = j$$

여기서  $w_k$ 는  $k$  번째 속성의 가중치를 나타내며, 이  $k$  번째 속성이 이득 요소라면  $t_{ij}$ 는  $g_k(i) > g_k(j)$ 인 경우만 고려하고 비용 요소라면  $t_{ij}$ 는  $g_k(i) < g_k(j)$ 인 경우만 고려하여 절대값을 적용한다.

**STEP 3. Calculate PRES Index,  $I_i$**

$$I_i = \frac{\sum_{j=1}^m t_{ij}}{\sum_{i=1}^m t_{ij}} \quad (3)$$

본자 항은 대안  $i$ 가 다른 대안들에 대해서 얼마나 우월한지를 나타내는 값이고, 분모 항은 반대 개념을 갖는다. 따라서  $I_i$  값이 1에 근접할수록 다른 대안들에 대한 대안  $i$ 의 우월/열등한 정도가 비슷해짐을 의미하고, 1보다 크다면 명확하게 우월함을 나타낸다. 분모 값이 0일 경우 인덱스 값은 무한대를 취하는데 이는 어떤 대안에도 지배당하지 않음을 나타내는 것이고 최적의 대안 이 된다.

**STEP 4. Rank Preference Order**

위에서 구한 PRES Index 값이 큰 순서대로 사용자가 입력한 가중치에 맞는 대안을 선택한다.

**3.1.2 Modified MDS Algorithm**

사용자의 입력 값을 이상해(Ideal Solution)로 취급하여 공정 수인  $m$  차원의 유클리디안 거리 값을 이용하여 가장 가까운 공정을 선정한다. 수정된 MDS 알고리즘의 순서는 다음과 같다.

**STEP 1. Get User's Input Vector,  $A(a_j)$**

사용자의 속성별 상대적 가중치와 함께 희망 속성값을 입력 받는다.

**STEP 2. Normalize Raw Data Matrix & User Input Vector,  $D^*(d_{ij}^*)$**

서로 값이 다른 속성을 비교하기 위해 첫 번째 과정에서 입력 받은 벡터 값을 raw data 의 마지막 행으로 하여 정규화 한다.

**STEP 3. Weight Normalization data matrix**

사용자의 속성별 상대적 가중치를 고려한다.

$$\begin{aligned} d_{ij}^{**} &= w_j d_{ij}^* \\ a_j^{**} &= w_j a_j^* \end{aligned} \quad (4)$$

**STEP 4. Calculate Separation Measure**

사용자의 입력과 공정과의 유클리디안 거리를 계산한다.

$$\begin{aligned} (p_{ij}^{\min})_{d_j > a_j} &= |d_{ij}^{**} - a_j^{**}|, & (p_{ij}^{\min})_{d_j \leq a_j} &= \left| \frac{d_{ij}^{**} - a_j^{**}}{g} \right| \\ (p_{ij}^{\max})_{d_j \leq a_j} &= |d_{ij}^{**} - a_j^{**}|, & (p_{ij}^{\max})_{d_j > a_j} &= \left| \frac{d_{ij}^{**} - a_j^{**}}{g} \right| \end{aligned} \quad (5)$$

요소  $p_{ij}^{\min}$ ,  $p_{ij}^{\max}$ 로 이루어진 근접도 행렬 (Proximity Matrix)이 만들어지며  $p_{ij}^{\min}$ 은 비용과 관련된 속성,  $p_{ij}^{\max}$ 은 이득과 관련된 속성에 대한 근접도이다. 식(5)의 왼쪽 부분은 사용자 입력 보다 나쁜 속성, 오른쪽 부분은 좋은 속성에 해당된다. 여기서  $g$ 는 사용자 입력보다 좋은 속성일지라도 값 차이가 너무 많이 날 경우 적절한 공정에서 멀어지게 하기 위한 상수 값이다.

**STEP 5. Calculate Proximity**

비용과 관련된 속성이  $m$ 개, 이득과 관련된 속성이  $(n-m)$ 개이고, 각각의 좋은 속성이  $k$ , 1개라면 근접도(proximity)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$m_i = \left[ \sum_{j=1}^{k-1} (P_{ij}^{\min})^2_{d_j > a_j} + \sum_{j=k}^m (P_{ij}^{\min})^2_{d_j \leq a_j} \right]^{1/2} + \left[ \sum_{j=(n-m)}^{l-1} (P_{ij}^{\max})^2_{d_j \leq a_j} + \sum_{j=l}^n (P_{ij}^{\max})^2_{d_j > a_j} \right]^{1/2} \quad (6)$$

**STEP 6. Rank Preference Order**

위에서 구한  $m_i$  값이 작을수록 사용자가 입력한 요구 사항에 맞는 공정이 된다.

**3.1.3 Linear Confidence Equation (LCE) Algorithm**

LCE 알고리즘은 각 속성별 가중치( $w_j$ )와 희망하는 속성값( $a_j$ )의 선형관계식을 고려한다. 사용자에게 의해 부여된 속성별 가중치와 희망 속성값을 기준으로 좋은 대안(공정)을 선정하기 위해 Fig. 8 과 같은 선형 그래프를 고려하였다. Type 1 은 나쁜 속성 구간의 기울기와 크기는 같고 부호는 다르기 때문에 앞 절에서 설명한 MDS 알고리즘과 같은 경향의 결과를 산출하게 된다. Type 3 의 경우는 속성별 가중치만을 고려하여 계산하는 것과 같으므로 앞 절의 PRES 알고리즘과 같이 희망 속성값이 없는 것과 동일한 경향을 보이게 된다. 본 논문에서 사용한 Type 2 는 사용자가 입력한 희망 속성값과 같거나 좋은 속성을 가진 대안에 대해서는 모두 같은 확신값(CV)을 부여함으로써 희망 속성값에 있어서 나쁜 속성값 방향 보다는 좋은 속성값 방향으로 선정될 수 있도록 유도된다.

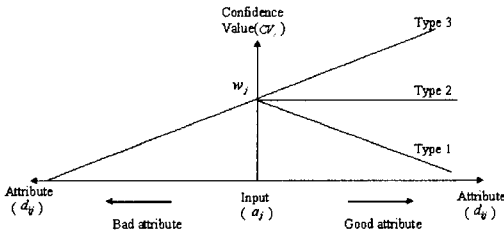


Fig. 8 Linear graphs to generate confidence values

Fig. 9 는 각 대안 별로 확신값을 결정한 후 최종 대안을 선정하는 LCE 알고리즘의 데이터 처리 과정을 보여준다. 구체적인 LCE 알고리즘의 처리 순서는 다음과 같다

**STEP 1 & 2.** Get User's Input Vector,  $A(a_j)$ , Normalize Raw Data Matrix & User Input Vector,  $D^*(d^*_{ij})$

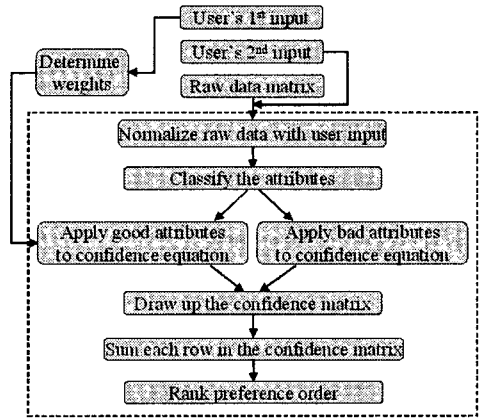


Fig. 9 Flow-chart of a LCE algorithm

앞절의 M-MDS 알고리즘과 동일하며 정규화는 아래와 같은 수식을 이용할 수 있다.

$$d^*_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_{ij}^2 + a_j^2}} \quad (7)$$

**STEP 3. Apply Confidence Equation to the Normalized Data Matrix**

본 논문에서 사용한 Type 2 는 사용자가 부여한 희망 속성값과 같거나 좋은 속성을 가진 대안에 대해서는 모두 같은 확신값을 부여한다.

0 Good attribute area

$$CV_{ij} = w_j \quad (8)$$

0 Bad attribute area

$$CV_{ij} = \begin{cases} \frac{w_j}{a^*_j} d^*_{ij} & , \text{if } d^*_{ij} < a^*_j \\ \frac{w_j}{(1-a^*_j)} (1-d^*_{ij}) & , \text{if } d^*_{ij} > a^*_j \end{cases} \quad (9)$$

**STEP 4. Sum Confidence Values**

$$CV_i = \sum_{j=1}^n CV_{ij} \quad (10)$$

**STEP 5. Rank Preference Order**

위에서 구한  $CV_i$  값이 큰 순서대로 사용자가 입력한 요구 사항에 맞는 대안이 된다.

**3.2 알고리즘 비교 및 시스템 검증**

**3.2.1 세가지 알고리즘 비교**

앞에서 언급한 Extended PRES 는 각 속성(정밀도, 표면거칠기, 조형시간/비용 등)에 가중치를 부여하고 정규화하여 비교하는 알고리즘이며, Modified MDS 는 속성별 가중치와 더불어 사용자의 희망 속성값을 받아들여 만족하는 정도가 가까운 근접도를 비교하는 알고리즘이다. 그러므로 PRES 알고리즘은 사용자의 가중치 입력만으로 간단하게 대안을 찾아주지만, 사용자의 요구조건에 보다 근접한 대안을 찾기 위해서는 MDS 알고리즘을 고려할 필요가 있다. 그러나 MDS 알고리즘의 이득과 비용적 요소에 있어 근접도만으로 대안을 비교하게 되므로 이득과 함께 비용의 근접도가 적용되므로 보편해가 선정 결과에서 멀어지는 문제가 발생할 수 있다.

자체 개발한 LCE 알고리즘은 이러한 단점을 보완하기 위해 부여된 희망 속성 값과 가중치의 비를 기울기로 갖는 선형관계식을 고려한다. 희망 속성을 기준으로 좋은 속성과 나쁜 속성을 구분하고, 좋은 속성 구간에서 서로 다른 관계식을 적용함으로써 적용 알고리즘이 간단해지며, MDS 알고리즘의 단점인 일반적 보편해가 결과에서 멀어지는 문제를 방지할 수 있도록 하였다.

### 3.2.2 의사결정 지원시스템의 검증

의사결정 지원시스템의 유효성을 검증하기 위하여 각 속성(정밀도, 표면거칠기, 강도, 조형시간, 비용)에 임의의 가중치(1<sup>st</sup> input: Case 1, 2, 3)와 희망 속성값(2<sup>nd</sup> input: Input A, B)을 부여해 보았다.

Table 6 은 이것을 정리한 입력표인데, Case 1 은 정밀도와 표면 거칠기에 가중치를 높게 부여한 경우이며, Case 2 는 조형 비용과 시간에, Case 3 은 조형비용과 조형물의 강도에 각각 가중치를 높게 부여한 경우로 속성별 가중치는 합해서 1 이 되도록 부여한다.

Table 6 Input table of weights and requirements

User's Input		A	R	C	T	S
1 <sup>st</sup> Input (Weights)	Case 1	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1
	Case 2	0.1	0.1	0.4	0.3	0.1
	Case 3	0.1	0.1	0.4	0.1	0.3
2 <sup>nd</sup> Input (Requirements)	Input A	50	0.1	400	5	150
	Input B	138	2.7	810	16.6	53.1

※속성 A:Accuracy, R:Roughness, C:Cost, T:Time, S:Strength

희망 속성값은 사용자가 원하는 속성값으로 Input A 는 앞 절의 공정 비교실험 결과에서 나온 가장 좋은 값들만 입력해 본 경우이고, Input B 는 비교실험 결과의 평균값을 부여해 본 경우이다.

앞 절의 기본데이터에 대해서 Table 6 의 입력 값을 각 알고리즘에 적용하여 RP 공정을 선정하였으며 그 결과에 따른 RP 공정 선정 순위를 Table 7 에 나타내었다.

E-PRES 알고리즘은 가중치만 입력 받고, M-MDS 와 LCE 알고리즘은 가중치와 함께 사용자의 희망 속성값을 받아들여 의사결정을 지원한다.

Table 6 의 Case 1 을 입력한 경우, 세 알고리즘에서 모두 동일한 선정 결과를 보였다. Case 2 와 Input A 의 경우에는 Inkjet 공정이 세 알고리즘에서 동일하게 우선 선정되었으나, Input B 를 입력한 경우에는 M-MDS 에서는 Inkjet, LCE 에서는 SLA\_S 가 선정되었다. 이는 MDS 알고리즘의 특성상 근접도에 의해 순위를 결정하는 영향인 것으로 보이며 MDS 알고리즘 보다는 LCE 가 희망 속성값을 잘 반영하는 것으로 보인다. Case 3 의 Input B 에서도 동일한 경향을 보여주고 있다.

이는 LCE 알고리즘이 M-MDS 알고리즘에 비해 간단하면서 RP 공정의 의사결정에 있어 더 향상된 결과를 보여주고 있다.

Table 7 Application results

Input		Results		
1 <sup>st</sup> Input	2 <sup>nd</sup> Input	E-PRES	M-MDS	LCE
Case 1	Input A	1.SLA_V 2.SLA_S 3.FDM	1.SLA_V 2.SLA_S 3.FDM	1.SLA_V 2.SLA_S 3.FDM
	Input B	1.SLA_S 2.SLA_V 3.FDM	1.SLA_S 2.SLA_V 3.FDM	1.SLA_S 2.SLA_V 3.FDM
Case 2	Input A	1.Inkjet 2.SLA_S 3.SLA_V	1.Inkjet 2.SLA_S 3.SLS	1.Inkjet 2.SLA_S 3.SLA_V
	Input B	1.Inkjet 2.SLA_S 3.SLA_V	1.Inkjet 2.SLA_S 3.SLA_V	1.SLA_S 2.Inkjet 3.SLA_V
Case 3	Input A	1.SLA_S 2.FDM 3.SLA_V	1.FDM 2.SLA_S 3.SLA_V	1.FDM 2.SLA_S 3.SLA_V
	Input B	1.SLA_V 2.FDM 3.SLA_S	1.SLA_V 2.FDM 3.SLA_S	1.FDM 2.SLA_V 3.SLA_S

#### 4. 결론

본 논문에서는 다양한 RP 조형 특성을 가진 테스트 모델을 선정하여 각 공정의 비교실험 및 측정 방법에 대한 전략을 수립한 후, 정밀도, 표면 거칠기, 조형 비용 및 시간 등에 대해서 비교 실험을 수행하였다. 비교실험 결과 치수정밀도와 표면거칠기는 SL 공정이, 조형 시간 및 비용 등에서는 FDM 및 Inkjet 공정이 다소 좋은 결과를 보여주었다. 그러나 이러한 결과는 같은 공정의 장비 일지라도 사용 재료와 공정 변수, 사용자의 숙련 정도에 따라 다소 영향을 받을 수 있다.

공정 비교실험의 결과를 기본 데이터로 하여 자체 개발한 알고리즘을 포함한 총 세 가지의 알고리즘에 적용하여 RP 공정 선정을 위한 의사결정 지원시스템을 개발하였으며 각 알고리즘을 비교, 검증하기 위해 RP 공정 선정 문제를 적용하여 알고리즘을 검증하였다. 가중치 입력에 대한 결과는 세 알고리즘 모두 동일하게 적합한 결과를 보였으며, 희망 속성에 대한 의사결정 결과는 수정된 MDS 알고리즘 보다 LCE 알고리즘이 더 합리적인 결과를 보여주고 있음을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 논문은 산업자원부에서 시행한 국제 IMS 프로그램 연구개발사업의 기술개발 결과의 일부입니다.

#### 참고문헌

- Vijay, K. Varadan, Xiaoning, Jiang and Vasundrar, V. Varadan, "Microstereolithography and other Fabrication Techniques for 3D MEMS," JOHN WILEY & SONS, LTD, pp. 103-108, 2001.
- Hornberger, L.E., "Rapid prototyping program," Santa Clara University, California, 1993.
- Childs, T. H. C. and Juster, N. P., "Linear and geometric accuracies from layer manufacturing," Annals of the CIRP, Vol. 43, pp. 163-166, 1994.
- Ippolito, R. and Luliano, L., "Benchmarking of rapid prototyping techniques in terms of dimensional accuracy and surface finish," Annals of CIRP, Vol. 44 pp. 157-160, 1995.
- Muller, H., Bauer, J. and Klingenberg, H. H., "Computer-based rapid prototyping system selection and support," TCT'96 Conference pp. 8, 1996.
- Phillipson, D. K., "Rapid prototyping machine selection program," M. Sc. Thesis, Arizona State University, 1996.
- Loose, K. and Nakagawa, T., "Benchmarking various methods of layer manufacturing systems in Rapid Prototyping," 1998.
- Shellabear, M., "Benchmark study of accuracy and surface quality in RP models," Brite-EURam project BE-2501; RAPTEC, 1999.
- Byun, H. S., Shin H. J. and Lee, K. H., "Design of benchmarking part and selection of optimal rapid prototyping processes," Progress in Rapid Prototyping and Rapid Manufacturing; ICRPM 2002, pp. 469-477, 2002.
- Kwan, H. Lee, Son, Seokbae and Park, Hyunpung, "Measurement Systems for Rapid Product Development," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 10, pp. 26-34, 2000.
- Masood, S. H. and Soo, A., "A rule based expert system for rapid prototyping system selection," Robotics and Computer Integrated Manufacturing (RCM : 325), pp. 267-274, 2002.
- Choi, B. W., Chung, I. Y. and Yi, I. L., "IMS Rapid Product Development Project 3<sup>rd</sup> Report," pp.19-26, 2003.
- Aragones, P., Gomez-Senent, E. and Paster, J. P., "Ordering the Alternatives of a Strategic Plan for Valencia(Spain)," Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, Vol. 10, pp. 153-171, 2001.
- Triantaphyllou, E., "Multi-Criteria Decision Making Methods: A comparative Study," Kluwer Academic Publishers, 2000.
- Saaty, T. L., "Multi-criteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process," RWS PWS Publications, Pittsburgh, 1990.
- Marvin, Schaefer, "A Mathematical Theory of Global Program Optimization," Prentice Hall, 1973.