

## 쾌속조형(RP)공정 비교분석을 위한 벤치마킹

김태범\*, 이일랑, 정일용, 최병욱(한국생산기술연구원)

### A Benchmarking Comparison of Rapid Prototyping Processes

T. Kim\*, I. Yi, I. Chung, and B. Choi (Korea Institute of Industrial Technology)

#### ABSTRACT

Requirements of a benchmarking for rapid prototyping systems and process usually include manufacturing time, cost (including system price), and dimensional accuracy. This paper deals with a benchmarking comparisons to investigate the functional requirements of RP system. A special designed IMS\_T2 test part with dimensional, geometrical, and surface roughness features has been used in the inspection of RP processes. IMS\_T2 test part was built on 5 commercially available RP machines which are relatively new model in Korea.

**Key Words** : Rapid Prototyping (쾌속조형), Benchmarking (벤치마킹), Test Part (테스트파트/시험부품), Worksheet (웍시트)

#### 1. 서론

쾌속조형(RP: Rapid Prototyping) 기술은 장비의 발달과 함께 그 응용분야가 광범위하게 확장되고 있다. Concept Modeler 기능에서 출발한 RP 기술은 쾌속급형(RT: Rapid Tooling)의 기능으로 급속하게 발달되고 있으며 이제 쾌속제조 (RM: Rapid Manufacturing)의 영역으로 확대되고 있다. 이와 같은 기술 발달의 중심에 다양한 RP 장비와 공정들이 자리를 잡고 있다. 사용자 입장에서 이처럼 다양한 장비와 공정들 간의 장단점 및 특성들을 비교하여 적절한 RP장비 및 공정을 선정하는데 참고자료로 활용할 수 있도록 하기 위하여 RP 공정 및 장비의 비교를 위한 벤치마킹 연구가 많이 수행되어 왔다. 벤치마킹 연구에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

1987년 3D System사에서 RP장비를 상용화하고 일본에서도 광경화수지에 의한 경화방법으로 PR장비를 개발한 이래 여러 RP기술 공정을 가진 장비들이 계속 개발됨에 따라 이들의 RP기술을 상호 비교할 수 있는 RP기술에 대한 벤치마킹이 필요하게 되었다.

1991년 벨기에의 J.P. Kruth는 RP기술에 대한 기본 설명과 함께 RP의 각 공정을 분류하여 상호 비교

하였다. 또한 테스트 파트를 제작하여 각 공정에 따른 형상 정밀도를 상호 비교하였는데 SLA공정이 그 중 높은 정밀도를 보여 주었다[1].

Kodak사의 Van Pute는 테스트파트를 제작하여 형상의 변형 및 치수 정밀도를 통계적 기법을 이용하여 처리하였다[2]. 듀폰사의 E.P. Gargiulo도 SLA공정에서의 정밀도 에러 분석에 대해 통계적 처리 기법을 제안하였다[3].

이후 클라이슬러회사의 L.D. Schmidt가 자사에서 사용하는 RP시스템에 대한 벤치마크 테스트를 수행하였다[4,5]. 여기서는 정밀도 테스트는 고려하지 않고 제작비용 및 시간에 대한 벤치마킹을 수행하였으며 RP작업자에 대한 설문조사를 수행하였다. 이밖에도 Farentinos와 Khoshnevis는 CAD 모델로 테스트파트를 선정하여 이에 대한 3차원 측정기를 이용하여 형상의 치수를 측정하여 각 공정을 서로 비교하였다[6]. M. Schellabear는 EU에서 지원하는 RAPTEC연구 사업에서 각종 RP공정에 대한 벤치마킹을 수행하였다[7,8]. 여기서는 RP기술 및 사용재질에 따른 기하학적인 정밀도 및 표면조도를 측정하여 상호 비교하였다. 일본 동경대의 나카가와 교수는 각종 RP제작사에 대한 형상 정밀도 및 제작시간, 비용 등을 계산하였다[9]. 특히 일본 RP장비 대한 벤치마킹 결과가

많이 소개 되었다. 국내 광주과학기술원에서는 자체 테스트파트를 개발하여 RP공정에 대한 정밀도를 비교하고 공정평가를 실행 하였다[10,11]. 최근에 들어서는 쾌속조형 및 쾌속금형 뿐만 아니라 Rapid Manufacturing에 대한 벤치마킹 수행사례도 나오고 있다.

본 논문에서는 우선 국내에서 RP장비의 시장현황을 파악하고 현재 많이 사용되고 있는 SLA, SLS, FDM, 3D 잉크젯 방식 등과 같은 RP장비들을 사용하여 테스트파트를 제작하고 기존의 RP 장비 및 공정을 비교하기 위한 속성들을 모두 수용하여 정밀도(accuracy)와 표면거칠기(surface roughness)를 측정하고 조형시간(process time) 및 비용(part cost)을 계량화하여 종합적인 비교분석을 수행한다.

## 2. 쾌속조형 공정 비교시험

### 2.1 쾌속조형 공정 비교시험을 위한 공정 및 속성

#### 2.1.1 비교시험을 위한 공정 및 제작

국내에서 많이 사용되고 있는 SLA, SLS, FDM, Inkjet 방식 등과 같은 공정 위주로 최신 RP장비들을 사용하여 동일한 작업조건 하에서 테스트파트를 조형하였다. 이를 위해 일정한 적층 두께하고 테스트파트 조형 위치와 방향을 모두 같게 하여 작업자의 숙련도에 영향을 미치지 않도록 최대한 자동화 모드를 선택하여 테스트파트를 제작 하였다.

#### 2.1.2 치수 정밀도(Dimensional Accuracy)

치수정밀도를 측정하기 위해서는 3차원측정기(CMM, Coordinate Measuring Machine, 3D Digitizer)를 사용하여 실제 제작한 모델을 이론적인 치수와 상호 비교할 수 있어야 한다.

측정을 위한 데이터 항목은 다음과 같은 것을 고려하였다.

- Part Number(제작번호)
- Process(제작공정: SLA, SLS, FDM, Inkjet...)
- Material(사용 재료)
- Manufacturer/Supplier(제작사, 재료공급사)
- Layer Thickness(적층 두께, mm)
- Reference Dimension(이론 치수, X, Y, Z)
- Actual Dimension(실제치수, X, Y, Z)
- Absolute deviation(절대편차)
- Percent deviation(편차백분율, %)
- Post process(후처리 작업 여부)
- Remarks(비고)

#### 2.1.3 표면 거칠기(Surface Roughness)

표면 품질을 측정하기 위해서는 표면에서의 거칠기(표면조도, Ra)를 측정하여야 하는데 이러한 측정 방식에는 비접촉식과 접촉식이 있으며 표면조도의 측정에 있어서는 표면 품질 향상을 위한 후처리 작업을 수행하였는지 여부를 반드시 확인하여 데이터로 입력하여야 한다. 본 연구에서는 후처리 하지 않은 상태에서 접촉식 장비를 사용하여 측정 기록 하였다. 다음은 표면조도 측정을 위한 항목이다.

- Part Number(제작번호)
- Process(제작공정: SLA, SLS, FDM, Inkjet...)
- Material(사용 재료)
- Manufacturer/Supplier(제작사, 재료공급사)
- Layer Thickness(적층 두께, mm)
- Surface Roughness(표면조도, Ra)
- Post process(후처리 작업 여부)
- Remarks(비고)

#### 2.1.4 제작비용(Part Cost)

테스트파트를 제작하기 위한 비용은 RP장비의 재료비뿐만 아니라 크게 RP제작의 전처리 작업 및 후처리 작업에 드는 비용 및 인건비를 포함하는 제작에 필요한 제반비용을 포함한다.

제작비용 계산 항목은 RP 제작업체 및 RP장비에 따라 차이가 있으므로 모든 RP파트 제작비용을 일률적으로 적용 할 수 없으므로 그 중 필요한 몇 개의 항목에 대해서만 비용을 계산할 수 있다. 다음은 일반적인 제작비용 계산 항목들 이다.

- Part Number(제작번호)
- Machinery(RP machine) (RP장비 사용료)
- Process(제작공정: SLA, SLS, FDM, Inkjet...)
- RP system list price(장비 가격)
- Computer Equipment(컴퓨터 사용료)
- Material(사용 재료 소모품비)
- Part Cleaner(파트 클리너 사용비)
- Post-cure Apparatus(후처리 성형기 사용비)
- Labour, Overhead(인건비)
- Maintenance(유지 보수비)
- Service, Utility(전기, 수도 등 부대비용)

#### 2.1.5 제작시간(Process Time)

테스트파트의 제작 시간은 크게 RP장비의 RP제작의 전처리 작업시간, 성형시간, 그리고 후처리 작업 시간으로 나눌 수 있다. 그러나 전처리 및 후처리의 제작 시간은 작업자의 숙련도에 크게 의존하게 된다. 그러나 일반적으로 성형에 필요한 Building time이 전체 작업시간의 대부분을 차지하므로 전체 작업시간에 있어 작업자의 숙련도는 큰 비중을 차지 않는다.

또한 제작비용 계산과 마찬가지로 일부 항목은

RP기술에 따라 차이가 있으므로 모든 RP기술에 일률적으로 적용되는 것이 아니라 그 중 필요한 몇 개의 항목에 대해서만 제작시간을 측정하게 된다. 다음은 일반적인 제작비용 계산 항목들이다.

- Part Number(제작번호)
- Process(제작공정: SLA, SLS, FDM, Inkjet...)
- Material(사용 재료)
- Post process(후처리 작업 여부)
- Pre-processing time(전처리 작업 시간)
  - generate support
  - view part and supports
  - input parameter
  - prepare slice
- Building time(성형 시간)
- Post-processing time(후처리 작업 시간)
  - remove supports
  - wash or clean parts
  - post curing
  - finishing or polishing

## 2.2 테스트파트 선정

RP공정 특성에 맞는 적절한 테스트파트를 선정하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

- 다양한 primitive 포함
- 각 방향 치수 정밀도를 평가하기 위한 고른 x, y, z축 primitive 배열
- 작은 형상 표현 가능 여부를 평가하기 위한 small feature 포함
- 빠른 조형과 쉬운 측정을 위한 가급적 작고 단순한 형상

본 연구에서 RP공정비교시험을 위한 테스트 파트는 국제 IMS RPD사업에 참여한 EU 및 호주 측에서 제안된 IMS\_T2 모델을 사용하였다. 제안된 테스트파트는 위와 같은 조건들을 수용하였으며 Fig. 1과 같다.

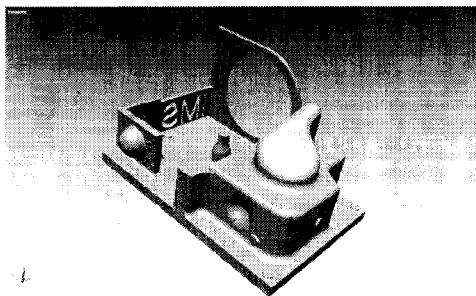


Fig. 1 Test Part

## 3. 테스트파트 조형 및 측정

### 3.1 테스트파트 조형

현재 국내에 도입된 최신장비를 위주로 선정된 RP장비들을 사용하여 테스트파트를 제작하였다.

Table 1 Selected RP systems for the benchmark

Model Name	Company	Process	Material	Layer thickness
FDM Titan	Stratasys(미국)	FDM	Polycarbonate	0.178mm
EOSINT P330	EOS GmbH(독일)	SLS	Polyamide	0.15mm
Objet Quadra	Objet Geometries(미국)	Inkjet	Photopolymer	0.02mm
VEER si <sup>2</sup>	3D Systems(미국)	SLA	Epoxy	0.1mm
SCUP 1600GS	CMET(일본)	SLA	Epoxy	0.1mm

각 장비마다 일정한 적층 두께를 지정하고 테스트파트의 조형 위치와 방향을 모두 같게 하며, 작업자의 숙련도에 영향을 미치지 못하도록 최대한 자동화 모드를 선택하여 조형하였다. 또한 정확한 표면 거칠기 측정을 위해 모든 조형물의 마무리 공정(Polishing, finishing)을 거치지 않는다.

Table 1은 시험대상 장비와 사용 재료 그리고 장비별 적층 두께를 나타낸 것이다. Table 1에서 장비의 적층 두께를 보면 비교실험을 위해 0.1mm의 일정한 두께 값을 설정하려 하였으나 장비의 고유 특성으로 조정이 가능하지 않아 장비에 설정된 값으로 설정하였다.

테스트파트는 위의 선정된 장비를 보유하고 있는 많은 경험을 가지고 있는 업체나 기관에 의뢰하였다.

### 3.2 테스트파트 측정

치수정밀도를 측정하기 위해 ㈜덕인사의 ASTRO 543C (Reinshaw TP6 A Probe 장착) 접촉식 3차원 측정기(CMM, Coordinate Measuring Machine)를 이용하였고 표면거칠기의 측정은 Federal사의 Surfanalyzer TM4000 표면조도측정기를 사용하여 Ra와 Rz의 Parameter를 측정하였다.

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 Cylinder Diameter
5	Round Hole Diameter	18	Small Cylinder height
6	Round Hole thickness	19	Centre upper Cylinder Diameter
7	Thickness of Wall 1(IMS letters)	20	Centre upper Cylinder height
8	IMS letters Height	21	Centre lower Cylinder Diameter
9	Thickness of Wall 2 (1/2 sphere)	22	Centre Cylinder base height
10	Thickness of Slope1 at Wall 2	23	Pillar Length (X)
11	Thickness of Slope2 at Wall 2	24	Pillar width (Y)
12	Angle of Slope1 at Wall 2	25	Pillar height (Z)
13	Angle of Slope2 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		

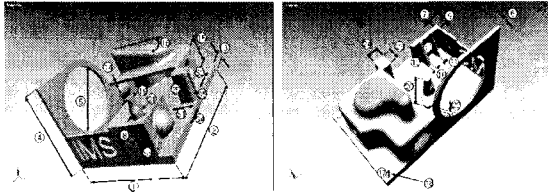


Fig. 2 Measuring Locations on the Test Part

형상 정밀도를 평가하기 위해 선형 거리와 곡면, 각도 등을 포함하는 총 25 곳을 측정하고, 표면 거칠기를 평가하기 위해 x, y, z 방향으로 총 5 부위를 측정한다. Table 2과 Table 3는 각각 측정 부위에 대한 형상 정밀도와 표면 거칠기의 세부 항목을 나타낸다. Fig. 2는 테스트파트의 측정 부위를 표시하였다.

### 3.3 측정 결과

#### 3.3.1 치수정밀도(Dimensional Accuracy)

Table 4 Accuracy of each RP system

Model	Process	Dev.( $\mu$ m)	Dev.(%)
FDM TITAN	FDM	89.1	0.81
EOSINT P380	SLS	171.1	2.19
Objet Quadra	Inkjet	157.8	1.87
Viper si2	SLA	82.6	1.29
SCUP II 600GS	SLA	99.3	1.09

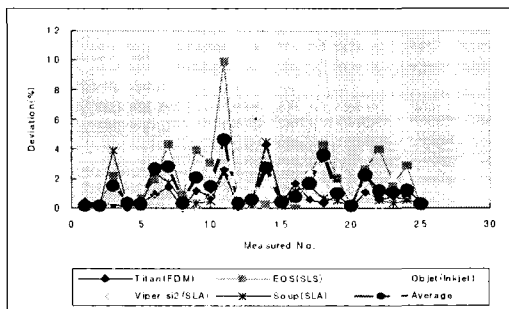


Fig. 3 Distribution of the Percentage Deviation

Table 4 와 Fig. 3의 결과를 보면 FDM 공정의 Titan과 SLA 공정의 Viper, Soup 장비로 조형한 테스트파트가 비교적 모든 측정 위치에서 고른 오차 편차를 보였다. 절대 오차값 과 백분율 오차 값에 대한 순위 차이가 다소 있으나 대체적으로 좋은 결과를

보였고 Inkjet 공정의 Objet와 SLS 공정의 EOSINT 장비를 이용하여 조형한 테스트파트의 조형상태도 좋으나 상대적으로 오차 편차가 큰 것을 알 수 있다.

#### 3.3.2 표면 거칠기(Surface Roughness)

RP 조형의 특성상 조형물의 표면 조도는 일반 머시닝 가공에 비해 상대적으로 떨어진다. 이를 극복하기 위해 대부분 사상공정(polishing or finishing)을 다시 거치게 되는데 본 연구에서는 이런 사상과 같은 후처리 공정을 거치지 않은 테스트파트를 측정하였다. 따라서 기존의 데이터보다 다소 거친 결과 나타나지만 작업자의 숙련도에 영향을 받지 않으므로 좀 더 정확한 비교가 될 것이다. Fig. 4은 전체 표면 거칠기에 대해서 나타낸 것이다. SLS 공정과 FDM 공정의 결과가 상대적으로 SLA나 Inkjet 공정 보다 거칠게 나온 것은 RP공정 방식과 사용한 재료의 특성 때문이다. 그러나 이러한 차이는 조형이 끝난 후 거치는 사상공정(polishing or finishing)을 통해 줄일 수 있을 것이다

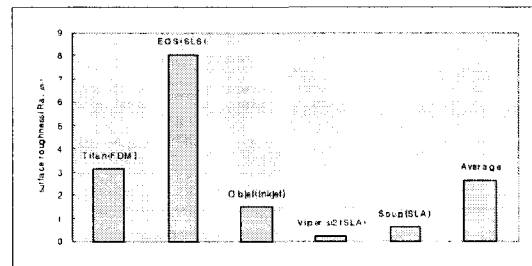


Fig. 4 Surface Roughness Associated

#### 3.3.3 제작 시간 및 비용

제작비용은 테스트파트 제작에 필요한 제반 비용을 말하며, 제작시간은 파일 변환, 에러 체크 등과 같은 전처리 작업 시간과 실제 조형 시간, 후처리 작업 시간으로 나눌 수 있다. 전처리 및 후처리 제작 시간은 작업자의 숙련도에 크게 의존하게 되므로 필요한 몇 개의 항목에 대해서만 측정하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 각각 제작시간과 제작비용을 비교한 그래프이다.

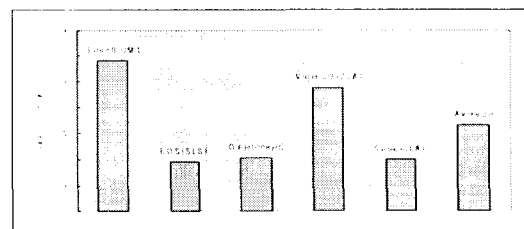


Fig. 5 Process Time Associated

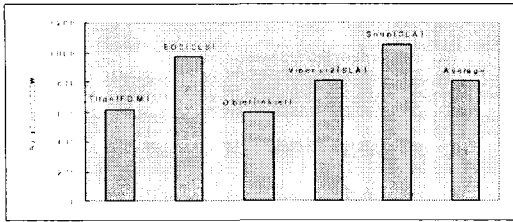


Fig. 6 Process Cost Associated

#### 4. 결론

테스트파트의 측정 결과를 살펴보면 치수정밀도는 SLA 공정의 Viper 시스템과 Soup 시스템이 비교적 양호하였고, 상대적으로 SLS 공정의 EOSINT 시스템과 Inkjet 공정의 Objet시스템이 조금 떨어지게 나타났다. 또한 표면거칠기는 계단 효과(step effect)가 두드러진 SLS 공정과 FDM 공정의 결과가 상대적으로 SLA나 Inkjet 공정 보다 거칠게 나왔다. SLS 장비에 사용된 재료는 파우더 상태의 Polyamide이므로 재료의 영향으로 조형물의 표면이 거칠게 나왔으며 FDM의 경우 재료의 형태가 가른 실 모양으로 가른 선의 재료 Polycarbonate를 적층하는 방식이므로 조형물의 표면이 상대적으로 거칠게 조형된다. 이러한 차이는 조형이 끝난 후 거치는 사상공정(polishing or finishing)을 통해 줄일 수 있으나 작업자의 숙련도에 따라 영향을 받는다. 또한 RP장비의 제작방식, 제작경로 및 작업자의 숙련도에 의해 치수 정밀도에 영향을 미칠 수 있다.

좋은 정밀도를 보이는 SLA 공정의 장비는 조형 시간과 조형 비용이 상대적으로 높았으며 FDM 공정은 조형 시간이 긴 반면 조형 비용은 낮게 나타났다. 또한 Inkjet 공정은 조형시간과 비용 모두 낮게 나타났다. Table 5은 전체적인 측정결과를 나타낸 것이다.

Table 5 Results of a Benchmarking Comparison

RP System	Process	Accuracy ( $\mu m$ )	Roughness (Ra, $\mu m$ )	Build Cost (1,000Won)	Build Time (hr)
FDM TITAN	FDM	89.1	3.08	620	29
EOSINT P380	SLS	171.1	8	970	9.5
Objet Quadra	Inkjet	157.8	1.52	600	10.3
Viper si2	SLA	82.6	0.22	810	24
SOUP   600GS	SLA	99.3	0.58	1050	10

제작비용을 계산하기 위해서는 각 RP장비의 공정에 대해 전체적으로 공통된 제약조건을 부여할 필요가 있다. 즉, 모든 RP공정에 일정한 적층 두께의 조건을 부여하여 이에 대한 제작비용을 고려하여야 한다.

#### 후기

본 논문은 산업자원부에서 시행하는 국제 IMS 프로그램 연구개발사업의 기술개발 결과의 일부임을 알려드리며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. J.P. Kruth, Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques, Annals of the CIRP vol 40/2, 1991, 603-614.
2. Douglas A. V. Putte, A Brief Benchmarking Study of Rapid Prototyping Techniques, Eastman Kodak Company, 1992, 3rd RPDL Conference, 251-263.
3. E.P. Gargiulo, Stereolithography Process Accuracy: Further User Experience, 1992, 3rd RPDL Conference, 239-250.
4. L.D. Schmidt, Rapid Prototyping Technology: Benchmarking Comparison, Chrysler Corp. 1993, 4th RPDL Conference, 301-315.
5. L.D. Schmidt, How Chrysler is using Stereolithography Rapid Prototyping Survey Results, Chrysler Corp. 1994, 5th RPDL Conference, 359-370.
6. S. Farentinos, B. Khoshnevis, A Study of Accuracy in Automated Fabrication, [http://www.pml.com/accuracy\\_study.html](http://www.pml.com/accuracy_study.html)
7. Mike Shellabear, Model Manufacturing Processes State of the Art in Rapid Prototyping, 1998, RAPTEC Task 4.2 Report1.
8. Mike Shellabear, Benchmark Study of Accuracy and Surface Quality in RP Models, 1999, RAPTEC Task 4.2 Report2.
9. K. Loose, T. Nakagawa, Benchmarking Various Methods of Layer Manufacturing Systems in Rapid Prototyping, 1998, 90-100.
10. 변홍식, 신행재, 이관행, "RP공정의 정밀도 비교 평가", 한국정밀공학회 2000 추계학술대회 논문집, 2000, 272-276.
11. 신행재, 변홍식, 이관행, "쾌속 조형 공정의 성능 평가 및 선정에 관한 연구", 한국정밀공학회 2001 춘계학술대회 논문집, 2001, 37-40.