

기능성 시제품 생산용 쾌속조형공정의 성능비교시험

김기대[#], 성주형^{*}

Bench Mark Test on Rapid Prototyping Processes and Machines for Functional Prototypes

Gi Dae Kim[#] and Joo Hyung Sung^{*}

ABSTRACT

FDM, SLS, and EOS processes are the layered manufacturing processes for functional prototypes. In this paper, bench mark tests of those processes were carried out using various materials. The test includes mechanical properties, such as tensile and compressive strengths, hardness, impact strength, and heat resistance, and surface roughness, shape and dimensional accuracy, manufacturing time, and manufacturing costs. It is verified that SLS method is advantageous in surface roughness and manufacturing time, EOS method in shape accuracy, and FDM method is great in manufacturing costs.

Key Words : Layered manufacturing process(적층제작공정), Functional prototypes(기능성 시제품), Bench mark test(성능비교시험), Mechanical property(기계적 물성치)

1. 서론

쾌속조형 기술을 도입함으로써 기업은 생산공정의 단축 및 이를 통한 비용 절감의 효과를 가져올 수 있었고 나아가 동시공학(concurrent engineering) 및 역공학(reverse engineering)의 실현이 가능하게 되었다. 국내에서는 10 여년 전부터 일부 대기업에 한정되어 쾌속조형장비가 도입되었으며 현재는 대기업은 물론이고 국공립 연구기관과 대학, 그리고 규모가 큰 제조업체를 중심으로 다양한 종류의 쾌속조형기가 구축되고 있다.

현재까지 소개된 여러 가지 쾌속조형 방식은 사용재료의 종류 및 적층 방식이 각각 달라 시제

품의 특성이 다르며, 많은 연구자들은 각 방식의 특성을 비교하는 연구를 수행하였다.³⁻⁶ Pham 등³은 여러 가지 쾌속조형 방식들의 특성과 장단점을 바탕으로 하여 사용자가 RP 장비를 선택하는 기준을 제시하였고, Mahesh 등⁴은 RP 공정의 비교 시험(BMT, bench mark test)을 효과적으로 수행할 수 있는 부품 형상을 제안하여 여러 공정들의 성능을 평가하였으며, Shellabear⁵⁻⁶은 여러 RP 장비로 다양한 각도의 경사면을 가진 부품을 제작하고 이들의 표면거칠기와 형상정밀도를 비교 시험한 결과를 제시하였다. 그러나 비교시험 결과 장비 기사들의 숙련도와 재료의 상태, 사용환경 등이 달라짐에 따라 일관된 결과가 나타나지는 않았다.

접수일: 2006년 1월 23일; 게재승인일: 2006년 4월 25일

교신저자: 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

E-mail gidkim@cu.ac.kr Tel. (053) 850-2724

* 대구가톨릭대학교 자동차부품 디지털설계·생산 지역기술혁신센터

자동차 부품 분야를 비롯하여 많은 분야에서 형상이 변경되거나 새롭게 설계된 사출성형용 부품을 이와 비슷한 재질의 RP 시제품으로 제작한 후, 다른 양산 부품들과 조립한 뒤에 여러 가지 기능을 검증하고 있다. 또한 복잡한 내부형상을 가지고 있어 전통적인 방식으로는 가공하기 어려운 경우, 혹은 필요한 부품의 수량이 제한적이라 양산 금형을 제작하기 곤란할 경우에는 RP 시제품 자체를 직접 완성 부품으로 활용하고 있다. 최근 쾌속조형 분야에서 위와 같은 기능적 목적으로 RP 시제품을 직접 사용하는 기능성 시제품(functional prototype) 분야에 대한 관심이 높아져가고 있다.¹

우수한 쾌속조형 장비란 형상 및 치수정밀도가 우수하고 제작속도가 빠르며 제작비용이 저렴하고 사용 환경이 깨끗해야 하며 후처리 공정이 간단해야 하는 등의 항목을 고루 갖추고 있어야 한다. 그러나, 기능성 시제품은 위에서 열거한 항목들 이외에 완제품으로서의 여러 가지 기능을 수행하고 검증하는데 견딜 수 있기 위하여 강도, 경도 등 기계적 물성치(mechanical properties)와 내열성(heat resistance)이 뛰어나야 한다. 이러한 조건에 비추어 볼 때 기능성 시제품으로 적용이 가능한 쾌속조형 방식은 대표적으로 FDM(Fused Deposition Modeling), SLS(Selective Laser Sintering), 그리고 SLS 방식과 유사하지만 재료 공급 방식과 부품 추출 방식 등이 차별화 된 EOS GmbH 사의 EOS 방식을 들 수 있다.

쾌속조형의 응용분야가 다양하게 증가하여 국내적으로 많은 기관들이 쾌속조형기를 도입하고 있는 시점에서 각 공정 방식의 여러 가지 성능을 다양한 항목별로 비교 분석하는 것은 매우 의미 있는 일이다. 본 논문에서는 여러 가지 쾌속조형 공정 중 기능성 시제품을 제작하는 RP 공정에 대해 부품 혹은 시편들의 기계적 물성치, 내열성, 형상 및 치수정밀도, 제작속도, 제작비용, 표면거칠기 등의 항목별로 각 공정의 성능을 비교 시험하였고, 공정의 특성을 토대로 하여 시험 결과를 분석하였다.

2. 시험 절차 및 방법

시험에 사용된 장비의 특성과 사용 재료 등을 Table 1 에 나타내었다. 비교 시험에서 객관성을 높이기 위하여 모든 시편은 미국과 독일 본사에서

제작하였고, 각 공정 매커니즘 비교가 아닌 각 장비를 실질적으로 비교하기 위해 제작조건을 동일하게 적용하지 않고, 각 장비별로 가장 일반적으로 사용하는 조건을 적용하였다.

SLS 나 EOS 방식은 PA(poly-amid), A(alumide), GF(glass filled nylon) 등 여러 가지 재질의 분말재료(powder)를 레이저로 소결(sintering)함으로써 다

Table 1 Rapid prototyping machines participated in bench mark test

	EOS	SLS	FDM
Model	EOSP-385	Sinterstation HiQ+HS	MAXUM (Vantage SE)
Part size (x×y×z[mm ³])	340×340×620	380×330×450	600×500×600 (406×355×406)
Scan speed [m/sec]	5	5 (HiQ) 10 (HiQ+HS)	0.254 [line] 0.127 [curve] 0.0254 [circle] (0.178)
*Layer thickness [mm]	0.1, 0.15	0.05, 0.1, 0.15	0.127, 0.178, 0.254
*Materials	<ul style="list-style-type: none"> • EOS_Prime (poly-amid) • EOS_A (alumide) 	<ul style="list-style-type: none"> • SLS_PA (poly-amid) • SLS_GF (glass filled nylon) 	<ul style="list-style-type: none"> • FDM_ABS • FDM_PC (poly-carbonate) • FDM_PCABS • ** FDM_PPSF
Manufacturing company	EOS GmbH (GER)	3D Systems (USA)	Stratasys (USA)

Underline means general conditions or materials.

** The specimen made by FDM_PPSF material was manufactured using the model of "FDM TITAN".

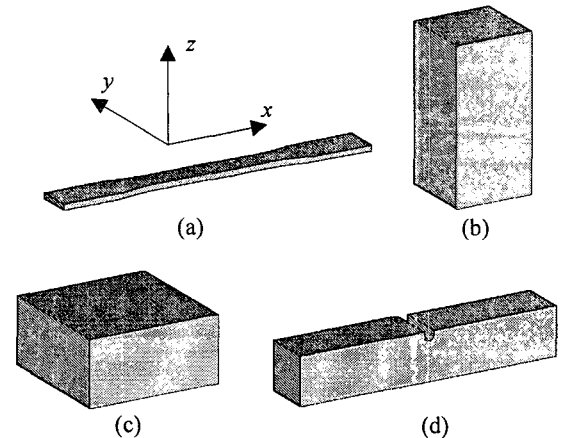


Fig. 1 Specimens for measuring mechanical properties (a) tensile test (b) compressive test (c) hardness test (d) impact test

Table 2 Dimensions of test specimens

구분	x[mm]	y [mm]	z[mm]	Volume [cm ³]
인장시편	165	19	3	7.87
압축시편	12.5	12.5	25	3.91
경도시편	30	30	15	13.5
충격시편	55	10	10	5.46
Part A	237.5	200	24	165.7
Part B	213.2	123.5	80.7	160.2
Model (I)	1034.3	242	298.1	8,727.1
Model (II)	365.5	244.7	190	1,806.3
Model (III)	238.0	129.5	79.9	232.5

양한 성질을 가지는 시제품을 제작할 수 있는 반면, FDM 방식(대표모델 MAXUM)은 ABS 계열의 열가소성 수지를 용융시켜 노즐을 통해 분사하고 이를 곧바로 응고시킴으로써 시제품을 제작한다. 재료의 다양성 측면에서 성능비교시험을 공정하게 수행하기 위하여 FDM 방식도 PC(poly-carbonate), PC-ABS 등 다양한 재료를 사용할 수 있게 개발된 모델(Vantage SE)을 추가하여 시험을 진행하였다.

폐속조형으로 제작된 기능성 시제품의 기계적 물성치를 측정하기 위하여 Fig. 1 과 같은 다양한 형태의 시편을 사용하였으며 Table 2 에 BMT 에 사용된 시편과 부품들의 구체적인 치수가 나타나 있다. Fig. 1(a)는 인장강도를 측정하기 위한 시편의 형상이다. 시편 및 시험 환경의 온도를 상온(21±3°C)과 50, 100, 150, 200°C 로 올린 상태에서 인장강도를 측정함으로써 시편의 내열성을 간접적으로 측정하였다. Fig. 1(b)는 압축강도를 측정하기 위한 시편으로 z 방향 압축변형률과 압축응력의 변화를 측정하였다. Fig. 1 의 (c) 와 (d) 는 각각 경도와 인성(toughness) 혹은 충격강도를 측정하기 위한 시편 형상이다. Fig. 1 에서 적층(z, 수직)방향과 단면주사(x, 수평)방향을 바꾸어 시편의 적층 방향을 90° 변화시킨 시편도 함께 제작한 후 적층 방향에 따른 여러 가지 물성치의 변화도 함께 관찰하였다. 모든 시험은 미국재료시험협회(ASTM)의 기준에 의거한 시험법으로 국제공인시험기관(Kolas)에서 실시하였으며, 3 회(내열성 시험은 각 온도 당 2 회) 반복 실시하여 비교분석 시 각 시험 결과들의 평균값을 이용하였다

시제품의 표면거칠기를 비교하기 위하여 직육면체 형상의 시편에서 아랫면과 윗면, 그리고 적층 방향의 측면을 축침식 조도측정기(SV-3000, Mitutoyo)로 측정하여 서로 비교하였다.

Fig. 2 는 시제품의 형상 및 치수정밀도를 측정하기 위하여 임의로 설계한 부품이다. Part A 는 전체적으로 평면 형상을 가지고 있어 뒤틀림 변형(curl distortion/warpage)의 정도를 알 수 있으며, 또한 점선으로 표시된 부분은 리브(rib)와 구멍(hole), 그리고 돌출부로 구성되어 미세 형상에 대한 제작정밀도를 관찰할 수 있다. Part B 는 총 15 개의 부품으로 구성되어 있으며 이를 조립한 것이며, 조립성 및 조립 후의 형상정밀도를 관찰할 수 있다. 각각의 모델을 다양한 폐속조형 방식으로 제작하고 비접촉 3D 스캐너(C100/400VZ, Steinbichler)로 제품의 점 데이터군(point cloud)을 얻은 후, 이들과 CAD 모델을 비교(merge)함으로써 어느 정도의 제작오차가 발생하였는지 살펴보았다.

각 공정 장비별로 제작속도를 비교 측정하기 위하여 Fig. 3 과 같은 가상모델을 이용하였다. Table 2 에 나타난 바와 같이 (a) Model(I)은 x 방향의 치수가 장비 플랫폼(platform) 크기보다 커서 3 등분으로 나누어 적용하였으며, 장비별로 등분된 부분 부품들의 배열 방법과 부품의 내부 구조가 달라짐에 따라 제작시간이 어떻게 달라지는지 비교하였다. 이보다 치수가 작은 (b) Model(II)와 (c) Model(III)는 부피가 약 8 배 정도 차이가 나는 부품들로 치수와 부피의 변화에 따른 제작시간의 차이를 비교하였다.

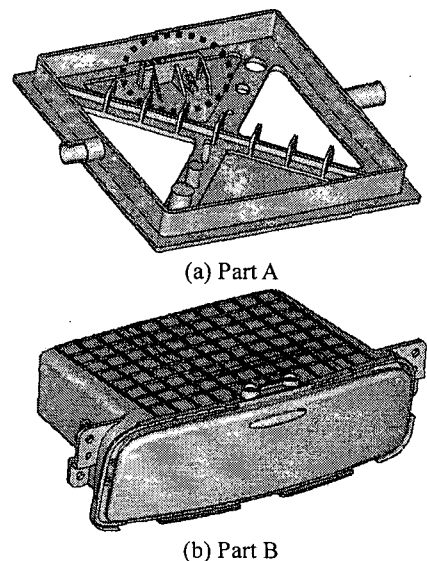


Fig. 2 Test parts for measuring shape and dimensional accuracy

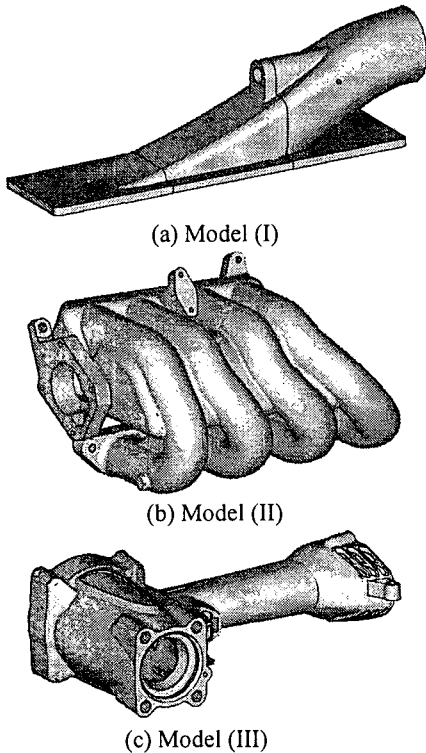


Fig. 3 Imaginary test parts for comparing estimated manufacturing time through simulations

비교시험에는 기계적 물성치, 표면거칠기 측정용 시편이 모두 35 개 사용되어, 모두 약 420 cm³의 부피를 차지하며, 형상 및 치수정밀도 측정용 부품은 2 set, 16 개로 모두 약 326 cm³의 부피를 차지한다. 여기에 지지대(supports) 또는 소모성 재료를 포함하여 이들 부품을 모두 제작하는데 소요되는 총 재료비를 산출하여 순수 제작비용을 서로 비교하였다.

3. 비교시험 결과 및 분석

3.1 기계적 물성치

3.1.1 인장강도

인장 시험결과 응력-변형률 곡선을 얻고 이로부터 각 방식별, 재료별로 최대 인장강도를 측정된 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 상온 인장시험 결과, FDM 방식으로 제작한 PC 재료의 인장강도가 약 50.2MPa 로 가장 강한 것으로 나타난 반면, 같은 방식의 ABS 재료는 약 18.7MPa 로 상대적으로 가

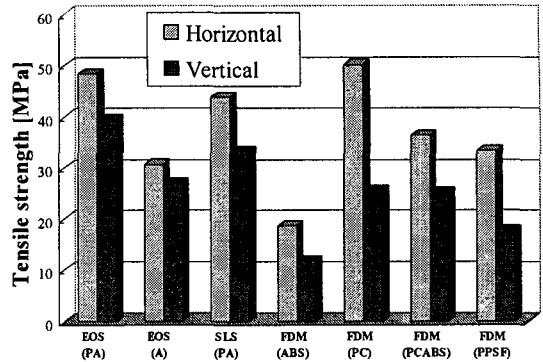


Fig. 4 Comparisons of tensile strength

Table 3 Tensile strength (Data on material sheet⁷⁻⁹ vs. Experimental results) [MPa]

방식	재료	Data on material sheet	Experimental Results
EOS	PA	45	48.4
	A	46	30.8
SLS	PA	44	43.9
	GF	38.1	41.6
FDM	ABS	22	18.7
	PC	52	50.2
	PCABS	52	36.5
	PPSF	55	37.2

장 약한 것으로 나타났다. Table 3 에는 장비 제조사들이 제시하고 있는 강도 수치와 시험 결과 수치를 비교하였는데, FDM 과 EOS 방식에서 상대적으로 큰 편차가 나타났으며, 이 부분은 보다 정확한 검증이 필요하다고 판단된다.

쾌속조형 공정은 층간의 연속적인 결합과정을 거치기 때문에 시편 적층 방향에 따라 재료의 물성치가 달라질 수 있다. 인장 시편을 수평하게 제작한 경우와 수직하게 세워서 제작한 경우를 비교한 결과 Fig. 4 에 나타난 바와 같이 모든 공정에서 적층(수직) 방향의 인장강도는 단면(수평) 방향에 비하여 감소하였다. 강도 감소율을 살펴보면, EOS 공정에서는 평균 15%, SLS 공정에서는 평균 24%, FDM 공정에서는 평균 41% 정도 감소하여 FDM 공정이 적층 방향에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 분말가루의 소결 과정으로 층간을 결합시키는 공정이 열가소성 수지의 용융과 응고과정으로 결합시키는 공정보다 층간 결합력이 더욱 크다는 것을 말해준다.

3.1.2 압축강도

Fig. 5 는 Fig.1(b) 에 보여진 압축강도 측정용 시편으로부터 얻은 압축응력-압축변형률 선도를 통해 압축강도를 측정한 결과이다. 전체적으로 EOS 와 SLS 공정으로 제작한 시편이 FDM 시편에 비하여 상대적으로 압축강도가 높은 것으로 나타났다. 그러나 인장강도 시험과는 다르게 적층 방향이 압축강도에 미치는 영향은 거의 미미한 것으로 관찰되었다.

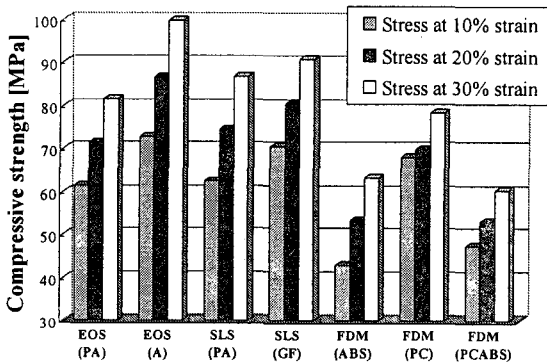


Fig. 5 Comparisons of compressive strength

3.1.3 경도

Fig. 6 은 Fig. 1(c) 에 보여진 경도 측정시편으로 로크웰 경도(R 스케일)를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 시험 결과 인장강도 측정결과와 마찬가지로 FDM 방식의 PC 재료로 제작한 시편의 경도가 가장 크고 같은 방식의 ABS 재료 시편의 경도가 가장 작은 것으로 나타났으며, SLS 와 EOS 방식은 비슷한 수준을 나타내었다. 전체적으로 적층 방향이 시편의 경도에 미치는 영향은 미미하였다.

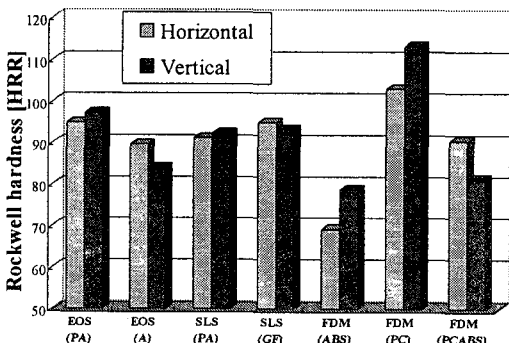


Fig. 6 Comparisons of hardness

3.1.4 충격강도

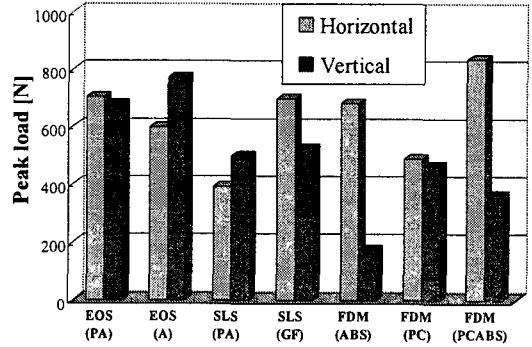


Fig. 7(a) Comparison of peak load

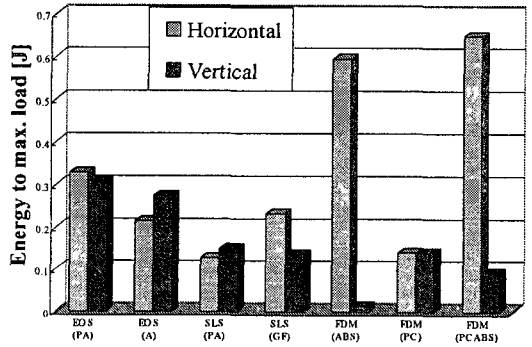


Fig. 7(b) Comparison of energy to maximum load

Fig. 7 은 낙하추(drop weight) 시험 방법을 이용하여 시편의 충격강도를 측정한 결과를 나타낸 것으로, Fig. 7(a)는 충격력이 가해진 후 시편이 받은 최대 힘의 크기를 나타내고, Fig. 7(b)는 최대 힘을 받을 때까지 시편이 흡수한 충격에너지 크기를 보여주고 있다. Fig. 7(a)에서와 같이 EOS_PA 시편과 FDM_ABS 시편이 받은 최대 힘은 약 680N 으로 거의 동일하지만 Fig.7(b)에서와 같이 시편이 충격에너지를 흡수하는 측면에 있어서는 보다 오랫동안 견디는 FDM 시편이 2 배 정도 우수한 것으로 계산되었다. Fig. 7 은 또한 적층 방향에 따른 충격강도의 변화를 보여주고 있다. 노치(notch)가 시편의 측면에 생성되도록 충격시편을 세워 적층한 경우, FDM_ABS 시편은 불과 0.05ms 뒤에 최대 174N 의 힘을 받은 후 시편이 충격으로 손상되었다. 이는 적층 방향이 충격에너지의 흡수, 즉 충격강도에 미치는 영향이 대단히 크다는 것을 보여주는 것으로, FDM 방식은 적층방향으로 재료의 취성(brittleness)이 매우 증가한다는 것을 말해준다.

3.1.5 내열성

기능성 시제품은 높은 온도의 사용 환경에서도 견딜 수 있는 내열성이 반드시 필요하다. Table 4 는 각 방식별 및 재료별로 열적 물성치를 보여주고 있다. Fig.8 은 시편 주위의 온도를 서서히 높이면서 시편과 시험 환경의 온도가 같아진 상태에서 인장강도를 측정 한 결과이다. 예상되는 바와 같이 시편의 온도가 증가함에 따라 시편의 연성이 증가하면서 인장강도는 점점 감소하였다. FDM 방식에서는 PPSF 재료가 200°C 에서도 약 10.5MPa 정도의 인장강도를 가지고 있어 고온에서도 기능성 시제품으로서 사용이 가능함을 알 수 있고, 같은 방식의 PC 재료는 150°C 환경에서도 인장강도 시험이 불가능한 재료로 변화되어 제조사(Stratasys 社)가 제공하는 유리전이온도(161°C)에 대한 정보는 정확한 검증이 필요하다고 판단된다. SLS 와 EOS 방식의 재료들은 용융점이 180 °C 근처이며 시험 결과 150°C 환경에서 8~13MPa 정도의 인장강도를 나타냈지만, 이 이상의 온도에서는 시험이 불가능하였다.

Table 4 Thermal properties of used materials [from material data sheets⁷⁻⁹]

		Heat deflection temperature [°C]		Glass transition temp. [°C]	Melting point [°C]
		@66psi	@264psi		
EOS	PA	181	-	-	184
	A	177.1	-	-	172~180
SLS	PA	177	86	-	184
	GF	175	110	-	185
FDM	ABS	90	76	104	-
	PC	138	127	161	-
	PCABS	110	96	125	-
	PPSF	-	189	230	-

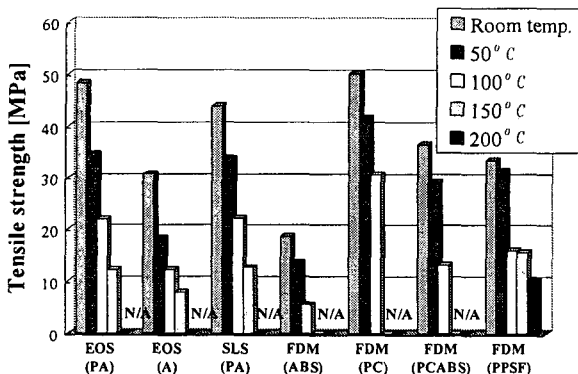


Fig. 8 Tensile strengths according to ambient temperature

3.2 형상 및 치수정밀도

Fig. 2(a)의 부품(part A)을 각 방식의 대표 재료로 제작한 후, 3D 스캐너(C400VZ)로 측정 한 데이터와 CAD 데이터를 서로 비교한 결과를 Fig.9(a)에 나타내었다. EOS 와 FDM 방식의 부품은 측정된 점 데이터군의 88% 이상이 CAD 모델과 ±0.2mm 이내의 오차를 가지고 일치하였고, 평면 형상의 뒤틀림 변형으로 인해 SLS 방식은 이보다 정밀도가 약간 떨어졌다.

Part A 중 점선으로 표시된 미세 부분만을 대상으로 하여 분해능이 더욱 높은 장비(C100VZ)로 측정 한 결과, Fig. 9(b)에 나타난 바와 같이 SLS 방식의 형상정밀도가 가장 우수하였다. 반면 FDM 방식은 Fig. 10 에서 보이는 바와 같이 두꺼운 층 두께의 영향으로 표면이 거칠고, 또한 노즐의 반

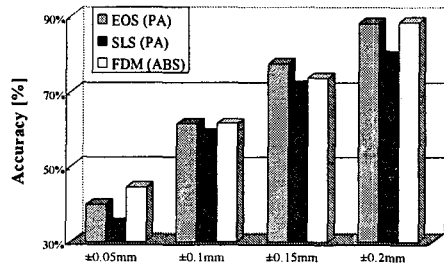


Fig. 9(a) Shape and dimensional accuracy of part A (global measurement)

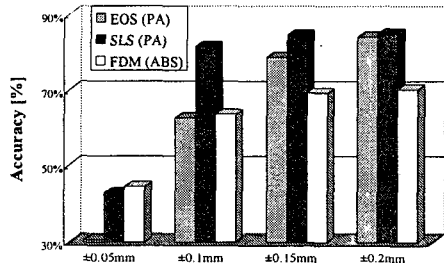


Fig. 9(b) Shape and dimensional accuracy of part A (local measurement)

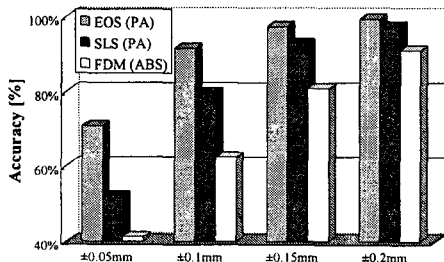


Fig. 9(c) Shape and dimensional accuracy of part B

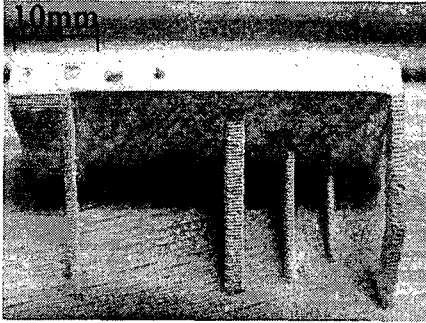


Fig. 10 Local measurement zone of part A (FDM_ABS)

경이 크기 때문에 미세한 부분에서의 가공이 어려워 미세 형상정밀도가 떨어지는 것으로 나타났다. Fig.9(c)는 Fig.2(b)의 부품(part B)을 대상으로 같은 방법으로 측정한 결과이며 이 경우에는 모두 90% 이상 $\pm 0.2\text{mm}$ 이내에 포함되었지만, 그 중에서도 EOS 방식이 가장 우수한 결과(99.4%)를 보여주었고, FDM 방식의 정밀도가 상대적으로 가장 떨어지는 결과(91%)를 보였다.

이상의 결과로부터 전체적으로는 EOS 방식의 형상정밀도가 가장 우수하였지만, 시제품의 형상정밀도는 부품의 형상 및 치수에 따라 달라진다는 것을 알 수 있었다.

3.3 제작속도

제작속도는 층두께와 단면 주사속도 등으로 결정되는 적층시간(building time)과 후처리, 특히 후처리하는데 소요되는 시간으로 결정된다. BMT에 참여한 장비별 주사속도는 Table 1에 나타나 있듯이 SLS, EOS, FDM 장비 순으로 속도가 빠르다. 특히 FDM MAXUM 장비는 주사경로의 형태에 따라 주사속도가 달라지므로, FDM VantageSE 장비를 비교대상으로 하였다.

Fig. 3에 보이는 3가지 가상 모델을 각 장비별로 가장 일반적인 제작조건을 적용하여 제작하였을 때, 예상되는 적층시간을 시뮬레이션 하였고 후처리에 소요되는 시간을 모두 포함한 총 소요시간을 예측한 결과를 Fig.11에 나타내었다. SLS 및 EOS 방식의 경우 소결되지 않은 분말가루가 지지대 역할을 하여 다층으로 배열하여 제작할 수 있기 때문에 치수가 커서 3 등분하여 제작한 모델(I)의 경우에도 한번에 제작이 가능하였다.

적층이 완료된 후 SLS와 EOS 공정은 소결된

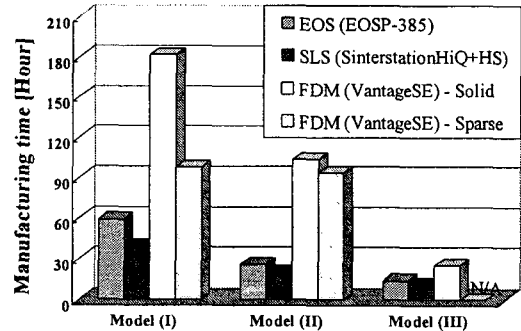


Fig. 11 Comparisons of estimated time to manufacture each simulation model

부품과 소결되지 않은 분말가루가 함께 섞여있는 고온의 파트케익(part cake) 속에서 부품을 추출(breakout)하는 후처리 공정이 필요하다. SLS 방식의 경우 룬이 냉각되기를 기다리는 시간인 약 4시간 정도의 냉각 시간과 40분 정도의 추출 시간, 50분 정도의 비드블라스터(bead blaster) 가공 시간을 포함하여 총 5시간 30분 정도의 후처리 시간이 필요하며, EOS 방식은 SLS 방식에 비해 냉각 방식이 간편한 구조로 되어 있어 냉각시간이 다소 적게 소요된다.

FDM 방식에서는 치수가 크고 형상이 단순한 모델(I)의 경우에는 수작업으로 간단히 제거할 수 있는 일반 지지대를 사용할 수 있지만, 모델(II)와 모델(III)과 같이 내부가 복잡한 형상일 경우에는 수용성 지지대를 사용해야 하고 이를 물로 용융시키는 후처리 과정이 약 10시간 정도 소요된다.

FDM 공정은 또한 적층 단면의 구조를 변화시킬 수 있는데, 내부를 모두 채우는 솔리드(solid) 구조와 무게와 적층 시간을 단축시킬 수 있는 벌집(sparse) 구조가 있다. Fig. 11에 FDM 공정에서 적층 단면 구조의 변화에 따른 제작시간의 차이를 보여주고 있는데, 부피가 큰 부품일수록 단면 구조에 따른 제작 속도 차이는 크게 났으며, 부품의 치수가 상대적으로 작고 두께가 얇은 모델(III)의 경우에는 벌집 구조로 제작이 불가능하였다.

3.4 제작비용(재료비)

BMT 참여업체에서는 한 재료당 총 51개의 부품을 제작하였으며, 이 부품들의 부피를 CAD 모델로부터 산출한 결과 총 746cm^3 으로 계산되었다. Table 5에 나타난 재료별 데이터를 참고로 하여

이들 부품을 모두 제작하기 위한 재료비를 각 방식별로 계산하여 서로 비교하였다.

SLS 와 EOS 공정에서 적층이 완료된 후 파트 케익 속에 남아 있는 분말가루는 이미 상당한 열을 받아 입자가 손상을 입었으며, 이를 계속해서 재사용할 경우에는 제품의 정밀도가 떨어지게 된다. 따라서 장비 제조사에서는 사용한 분말(used powder)을 재사용할 때에는 완전히 새로운 분말(new powder)과 일정한 비율로 혼합하여 사용할 것을 권장하고 있으며, EOS 에서는 새로운 분말과 사용된 분말 비율을 5:5 로, SLS 에서는 3:7 을 추천 비율로 지정하고 있다.

Table 5 를 참고로 하여 파트케익 전체 부피에서 51 개 부품들이 차지하는 부피의 비율을 계산하면 SLS 방식에서는 전체 22,823cm³ 중 746cm³ 으로 약 3.27%, EOS 방식에서는 약 3.92% 로 계산되어진다. 만약 새 분말만으로 계속 제작한다면 96% 이상의 분말 재료가 버려지게 되고 이는 재료 소모율이 매우 크다는 것을 의미한다. FDM 공정의 경우 746cm³ 의 부품을 제작하기 위해 약 910cm³ 의 ABS 재료와 209 cm³ 의 지지대 재료가 필요한

Table 5 Data for calculation of manufacturing costs

	EOS (PA)	SLS (PA)	FDM (ABS)
Density [g/cm ³]	0.435-0.445 (bulk)	0.59 (bulk)	1.05
Material costs [₩/kg]	100,000	180,000	450,000
Total volume of supports	-	-	209 cm ³
Total volume of part cake	19,074 cm ³ (34×34×16.5)	22,823 cm ³ (38×33×18.2)	-

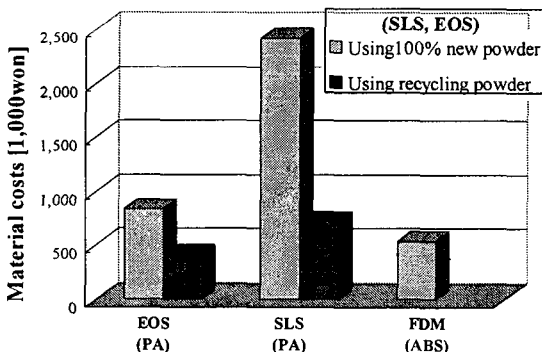


Fig. 12 Comparison of total manufacturing costs

데, 소요되는 ABS 재료의 부피가 제작되는 부품의 부피보다 큰 것은 지지대를 고정할 수 있는 베이스(base)제작에 모델 재료가 필요하기 때문이다.

Fig. 12 는 각 방식별로 순수 제작비용(재료비)을 산출한 결과를 보여주고 있다. 단위 질량당 재료비는 FDM 방식이 가장 고가이지만, 지지대를 제외하고는 따로 소모되는 재료가 없기 때문에 전체 제작 비용은 가장 저렴하였고, 원재료비가 비싸고 재료소모율이 큰 SLS 방식이 가장 제작비용이 많이 소요되었다. 제조사에서 추천하는 비율로 새 분말을 섞어 분말가루를 재사용할 경우에는 EOS, FDM, SLS 순서로 재료비가 저렴하였다.

3.5 기타

기능성 폐속조형기를 도입하고 운용하는데 있어서는 앞 절에서 비교한 항목 이외에도 시제품의 표면거칠기 정도, 사용 환경, 사용의 편의성, 재료의 다양성, 사용용도의 다양성, 시장 점유율, 기술 지원(A/S) 가능 수준, 장비 도입가 등을 고려해야 한다.

작육면체 시편의 표면거칠기(R_a)를 측정된 결과, SLS 시편의 윗면, 아랫면, 측면의 표면거칠기는 각각 평균 12.8, 10.5, 13.5 μm 로 가장 우수하였고, EOS 시편이 16.6, 13.2, 16.8 μm , FDM 시편이 21.7, 19.6, 18.8 μm 로 측정되었다. 측면의 표면거칠기는 층 두께의 영향을 가장 많이 받고, 위아래면은 입자의 결합방식, 입자의 크기 등의 영향을 받는다. FDM 시편은 모든 방향의 면에서 노즐에서 압출된 수지가 형성하는 규칙적인 패턴이 그대로 나타나며, 측면보다 위아래면의 표면이 더 거칠었다. 반면, SLS 와 EOS 시편의 표면은 불규칙적인 패턴을 보였다.

분말을 사용하는 SLS 나 EOS 방식의 공정 특성상 재료를 공급하고 완성된 제품을 추출할 때 분말 입자들이 외부로 유출될 가능성이 크며, 이는 사용 환경을 악화시키는 결과를 초래한다. FDM 방식은 사용의 편의성 및 사용 환경 측면에서 타 방식들에 비하여 매우 우수하다고 할 수 있다. 반면 재료의 다양성 및 이들을 사용한 응용성 측면에서는 고무와 같은 재질(flex plastic), 금속 재질, 주조 패턴용 재질(cast form) 과 같은 여러 가지 재료로 제작이 가능한 SLS 방식이 가장 우수하다고 할 수 있다. 시장 점유율 측면에서는 FDM, SLS, EOS 방식의 순서로 높다!

4. 결론

사출성형 부품을 대신할 수 있는 가능성 시제품 생산용 RP 공정인 FDM, SLS, EOS 방식을 대상으로 다양한 비교시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 다만, 이러한 시험결과는 사용자의 숙련도 및 제작환경, 재료의 상태 등에 따라서 다소간 달라질 수 있음을 유의해야 한다.

(1) 다양한 기계적 물성치 중 인장강도와 충격강도는 뚜렷한 방향성을 가지고 있었으며, 특히 FDM 시편은 적층방향(z 방향)으로 강도가 크게 감소되었다.

(2) 사용재료의 용융점과 유리전이온도에 따라서 시제품의 내열성이 결정되었으며, FDM 방식의 PPSF 재질은 200°C 이상, SLS 와 EOS 방식의 시편은 150°C 이상에서 인장강도를 나타내었다.

(3) 형상 및 치수 정밀도는 전체적으로 EOS 방식이 가장 우수하였으며, 정밀한 부분의 제작에 있어서는 SLS 방식이 우수하였다. 또한 가장 얇은 층 두께로 제작한 SLS 시편의 표면거칠기가 가장 우수하였다.

(4) SLS 와 EOS 방식은 빠른 주사속도와 부품의 다층 배열로 FDM 방식에 비하여 제작 속도가 훨씬 빠르며, 빨라지는 정도는 부품의 형상 및 치수에 따라 변화하였다.

(5) 원재료가 비싸지만 재료 소모율이 적은 FDM 방식의 제작비용이 가장 저렴하였고, 분말가루를 추천비율로 재사용할 때에는 EOS 방식이 가장 유리하였다.

참고문헌

1. Wohler, T. T., "Wohlers Report 2005, Rapid Prototyping & Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report," Wohlers Associates Inc., 2005.
2. Ahn, D. G. and Yang, D. Y., "Principle of Rapid Prototyping and its Trends," Journal of KSPE, Vol. 22, No. 10, pp. 7-16, 2005.
3. Pham, D. T. and Gault, R. S., "A Comparison of Rapid Prototyping Technologies," Int. J. of Machine Tool & Manufacture, Vol. 38, pp.1257-1287, 1998.
4. Mahesh, M., Wong, Y. S., Fuh, J. Y. H. and Loh, H. T., "Benchmarking for Comparative Evaluation of RP

- Systems and Processes," Rapid Prototyping Journal, Vol. 10, No. 2, pp. 123-135, 2004.
5. EOS Gmbh Shellabear, M., "Benchmark Study of Accuracy and Surface Quality in RP Models," RAPTEC, Task 4.2 Report 2, 1999.
6. EOS Gmbh Shellabear, M., "Model Manufacturing Processes - State of the Art in Rapid Prototyping," RAPTEC, Task 4.2 Report 1, 1998.
7. <http://www.3Dsystems.com>
8. <http://Stratasy.com>
9. <http://www.EOS-gmbh.de>