

투명 재료를 사용하는 광조형 방식 쾌속조형 장비의 성능 비교 시험

김기대[#], 성주형^{*}

A Benchmark Study on the Stereo-lithography-type Rapid Prototyping Apparatus using Transparent Materials

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

ABSTRACT

Among various rapid prototyping processes, stereo-lithography process which can manufacture transparent prototype is known to be the greatest in the form & dimensional accuracy and surface roughness. In this paper, bench mark tests of 4 stereo-lithography-type rapid prototyping apparatus were carried out using transparent materials. The test includes measurement of mechanical properties, form accuracy, building speed and manufacturing cost. It was observed that *ViperPRO* of *3D systems* is advantageous in the mechanical properties and building speed, *RM6000II* of *CMET* in sub-milli scale form accuracy and manufacturing cost, and relatively economical *Eden500V* of *Objet* is great in tensile strength at room temperature.

Key Words : Rapid prototyping (쾌속조형), Stereo-lithography process (광조형 공정), Bench mark test (성능비교시험), Mechanical property (기계적 물성치), Form accuracy (형상정밀도)

1. 서론

신제품을 개발할 때 제품 설계로부터 실제 눈으로 확인할 수 있는 시제품(prototypes)을 제작하는 과정은 반드시 필요하고 이에 소요되는 경제적, 시간적 비용을 절약하기 위하여 쾌속조형 (RP, rapid prototyping) 기술이 이용되고 있다. 쾌속조형 공정이란 3 차원 형상을 여러 개의 2 차원 단면으로 나눈(slicing) 후 이를 순차적으로 적층(building)함으로써 원하는 3 차원 시제품을 만드는 공정이다. 현재

까지 여러 가지 방식의 RP 공정기술이 개발되었고, 각 공정 기술을 적용하는 장비들은 사용할 수 있는 재료의 종류가 다르고 단면을 적층하고 제품을 완성하는 방식이 다르다. 이에 따라 각 방식으로 제작한 시제품은 기계적 물성치와 형상 및 치수 정밀도, 그리고 표면 거칠기 등이 다르고 제품을 완성하는데 소요되는 시간 (제작 속도)과 제작 비용 등이 모두 다르기 때문에 이용자는 여러 가지 RP 공정의 특성을 정확히 파악하고 적용하고자 하는 용도에 적합하게 최적의 공정 방식과 장

☞ 접수일: 2007 년 1 월 30 일; 게재승인일: 2007 년 4 월 11 일

교신저자: 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

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

* 대구가톨릭대학교 자동차부품 디지털설계·생산 지역혁신센터

비를 선택하여야 한다. 그 동안 여러 가지 RP 방식에 대해 그 특성을 비교하고 각각의 변수에 대해 정량적인 비교를 통한 공정 방식 혹은 장비의 성능을 비교한 연구가 많이 수행되어 왔다.¹⁻⁷

광조형(SL, Stereo-Lithography) 방식은 여러 가지 RP 공정 중 가장 먼저 개발된 방식으로서 현재 미국의 *3D systems* 社, 이스라엘의 *Objet Geometries* 社, 일본의 *CMET* 社를 중심으로 새로운 재료가 끊임 없이 개발되고 장비의 성능이 지속적으로 향상되고 있으며 현재까지도 가장 많이 이용되고 있는 방식이다. RP 공정으로 제작한 시제품을 원형(pattern) 혹은 마스터 모델(master model)로 하여 더욱 다양한 제품을 생산하는 기술인 RT(Rapid Tooling) 공정을 수행하기 위해서는 형상 및 치수 정밀도, 표면 거칠기 등이 매우 우수한 RP 제품을 사용해야 한다. 따라서 이러한 경우에는 일반적으로 정밀도가 가장 뛰어나다고 알려져 있는 광조형 방식의 장비를 이용하고 있다. 광조형 방식의 장비는 여러 가지 성질을 가지는 재료를 사용할 수 있지만, 대표적으로 내부가 투명한 제품을 제작할 수 있는 투명 액상 에폭시 수지(epoxy resin)를 이용한다. 투명한 시제품을 이용하면 제품의 내부 구조를 명확하게 알 수 있게 해 줄 뿐 만 아니라 엔진 내부의 냉각수 흐름을 관찰할 때와 같이 유동 가시화 시험을 가능하게 해준다.

본 연구에 앞서 *FDM*, *SLS*, *EOS* 방식과 같이 사출 성형 시제품을 대신할 수 있는 기능성 RP 장비에 대해 다양한 시험을 통해 그 성능을 비교한 연구를 수행한 바 있다.⁴ 본 연구에서는 정밀도가 우수한 광조형 방식의 RP 장비에 대해 투명 재료로 제작한 시제품의 기계적 물성치, 내열성, 형상 정밀도, 제작 속도, 그리고 제작 비용 등의 특성을 다양한 방식으로 비교 시험하였고, 공정의 특성을 토대로 하여 시험 결과를 분석하였다.

2. 시험 절차 및 방법

비교 시험을 수행한 장비의 종류와 사용 재료를 Table 1 에 나타내었고, Table 2 에 각 장비의 특성을 나타내었다. 일반적인 광조형 장비는 광경화성 액체 수지를 레이저로 주사하여 경화시키면서 적층하지만, *Objet* 社 *Eden500V* 장비는 3 차원 프린팅 방식과 유사하게 600dpi 의 분해능을 가지는 미세한 노즐을 통해 광경화성 액체수지를 다중 분사

(poly-jet)하고 동시에 경화시키면서 적층한다. 각 장비 별로 여러 가지 재료를 사용할 수 있으나, 본 연구에서는 각 장비 별로 가장 투명한 시제품을 제작할 수 있는 재료로 한정하여 비교 시험하였다.

각 장비 별 제품의 기계적 물성치를 비교하기

Table 1 RP machines and materials participated in BMT

Apparatus model	Maker	Material
<i>ViperPRO</i>	<i>3D systems</i> (USA)	<i>Accura60</i>
<i>Rapid Meister 6000II</i>	<i>CMET</i> (Japan)	<i>TSR-829</i>
<i>Eden500V</i>	<i>Objet Geometries</i> (Israel)	<i>FullCure720</i>
<i>SLA5000</i>	<i>3D systems</i> (USA)	<i>Somos11120</i>

Table 2 Characteristics of stereo-lithography RP machines

Apparatus	Building size (x×y×z[mm ³])	Scan speed [m/s]	Layer thickness*
<i>ViperPRO</i>	650×750×550	-Border : 3.5 -Hatch : 25	0.1 0.05
<i>RM6000 II</i>	610×610×500	Max. 22	0.1 0.05
<i>Eden500V</i>	500×400×200	0.42 (Head speed)	0.016 0.03
<i>SLA5000</i>	508×508×584	5	0.15 0.1

* Bold means general conditions

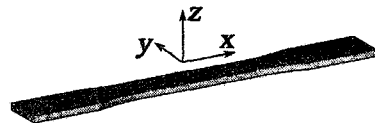


Fig. 1(a) Specimens for tensile and heat resistance test

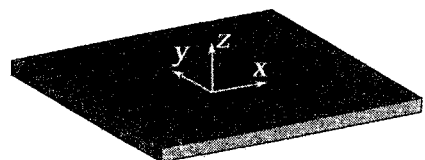


Fig. 1(b) Specimens for puncture impact test

Table 3 Dimensions of test specimens and simulation parts

Tests		x[mm]	y[mm]	z[mm]	Volume [cm ³]
Mechanical properties	Tensile & Heat resistance	165	19	3	7.87
	Impact	100	100	5	50
Building time & manufacturing cost	Part (I)	440.2	367.3	242.2	9,731.8
	Part (II)	476.7	223.1	79.8	803.8

Table 4 Heat deflection(distortion) temperature^{8~10}

	ASTM D648 @66 psi [°C]	ASTM D648 @264 psi [°C]	Specific gravity [g/cm ³]
Accura60 (ViperPRO)	53~55	48~50	1.13(Liquid) 1.21(Solid)
TSR-829 (RM6000II)	-	49.4	1.08
FullCure720 (Eden500V)	48.4	44.4	1.092
Somos11120 (SLA5000)	45.9~54.5	49.0~49.7	1.12

위하여 먼저, Fig. 1(a)에 나타난 형상의 인장 강도 측정용 시편을 제작하고 상온(room temperature)에서 인장 강도를 측정하였다. 적층 방향에 따른 인장 강도의 변화를 알아보기 위하여 그림에서 적층 방향을 x, y, z 세 방향으로 하여 시편을 따로 제작하고 INSTRON 5569 장비를 이용하여 인장 강도를 측정, 비교하였다. Table 3 은 시험에 사용된 시편과 시뮬레이션 모델의 치수를 나타내고 있다.

광조형 방식으로 제작한 시제품은 정밀도가 상대적으로 뛰어나지만 고온과 열에 매우 취약한 단점을 가지고 있기 때문에 시편과 시험 환경의 온도를 변화시켜가면서 인장 강도의 변화를 관찰하였다. Table 4 에서 나타난 바와 같이 광경화성 수지의 열 변형 온도(heat deflection temperature)가 대부분 50 °C 정도이기 때문에 본 연구에서는 내열성 시험 환경 온도를 60 °C 까지로 제한하였다. 인장 강도를 측정하기 위한 모든 시험은 3 회 반복 실시하였고 강도의 평균값을 비교하였다.

광조형 방식의 시제품이 가지고 있는 또 하나의 큰 단점은 충격에 약하다는 것이다. 일반적으로 광조형 방식으로 제작한 얇은 두께를 가진 제품은

외부 충격으로 인해 쉽게 파손되는 성질이 있기 때문에 Fig. 1(b) 와 같이 정사각형 판재 형상의 시편을 사용하여 관통시험(puncture test)를 실시하여 내충격성을 측정하였다. 시편을 제작한 후 INSTRON DYNATUP 9250HV 장비를 이용하여 시편을 고정한 후, 6.57kg 의 질량을 가지는 12.7mm 반구 형상의 추(타격날)를 일정한 높이(8.7cm)에서 낙하시켜 시편이 파손 혹은 손상될 때까지 시편이 최대로 견디는 힘(peak load)과 그때까지 시편이 흡수한 에너지(energy to maximum load)를 측정하고 서로 비교하였다. 충격 시험 역시 적층 방향을 변화시켜 가면서 적층 방향 별 내충격성의 변화를 살펴보았다. 단시간에 시험이 완료되기 때문에 시험 결과에 신뢰성을 부여하기 위하여 모든 충격 시험은 5 회 반복 실시하였고, 평균값을 비교하였다.

광조형 방식으로 RP 부품을 제작할 때는 액상 수지의 상변화로 인한 응고수축(solidification shrinkage)과 온도의 변화로 인한 열수축(thermal shrinkage) 때문에 곡률 변형(curl distortion)이 발생하며¹¹, 변형의 크기는 재료의 종류와 주사 방식 등 제작 조건에 크게 영향을 받는다. 본 연구에서는 Fig. 2 과 같이 길이(x)와 두께(z)가 다른 여러 가지 치수의 바(bar) 형상 시편을 제작한 후 CMM 을 이용하여 시편 윗면 중앙을 길이 방향으로 일정한 간격으로 측정하여 곡률 변형을 측정하고 서로 비교하였다. 측정된 최대 곡률 변형량은 시편의 진직도 오차에 해당하는 크기로서 곡률 변형에 의한 시편의 진직도 오차를 비교함으로써 제품의 형상 정밀도를 유추하였다.

Fig. 3 은 제작 속도 (시간)와 제작 비용을 비교하기 위한 시뮬레이션 모델이다. Part (I) 은 실제치수의 6기통 엔진 블록 형상이고 part (II) 는 시계

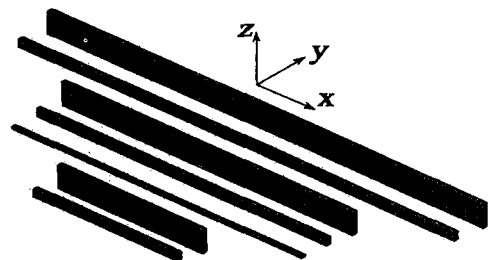


Fig. 2 Bar-shaped specimens for measuring curl distortion

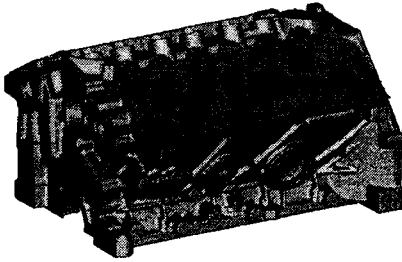


Fig. 3(a) Simulation Part I (engine block) for comparing manufacturing time and cost

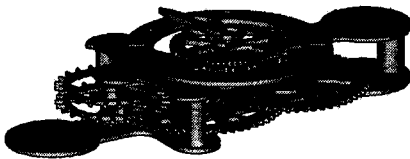


Fig. 3(b) Simulation Part II (clock) for comparing manufacturing time and cost

내의 기어 박스를 모델링한 부품으로서 모델들의 치수는 Table 3 에 나타나 있다. part (II) 는 상대적으로 두께가 얇고 치수가 작아 part (I) 에 비하여 부피가 약 8.3% 에 불과하다. 두 가지 모델에 대하여 시뮬레이션을 통해 여러 가지 광조형 장비 별로 제작 속도와 재료비 및 레이저 비용 등을 포함한 제작 비용을 비교하였다.

3. 비교 시험 결과 및 분석

3.1 기계적 물성치

3.1.1 적층 방향에 따른 인장 강도의 변화

각 시편별로 응력-변형률 곡선을 얻고 이로부터 최대 인장 강도의 평균값을 측정된 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. Fig. 1(a) 에 나타난 것처럼 적층 방향을 z 방향으로 하여 시편을 수평 방향으로 놓아서 제작한 경우에는 Eden500V 장비로 제작한 FullCure720 시편의 인장 강도가 약 62.5 MPa 로 가장 큰 것으로 나타났다. 그러나 이 장비는 시편의 적층 방향을 다르게 하였을 경우, 특히 길이 방향으로 세워서 적층하였을 경우 Fig. 4 에 나타난 바와 같이 인장 강도가 절반 이하로 감소되는 것으로 나타났다. 반면 다른 장비의 경우 이와는 다른 결과가 나타났다. 즉, 시편을 눕혀서 제작하는 경우보다 적층 방향을 y 또는 x 방향으로 하였을

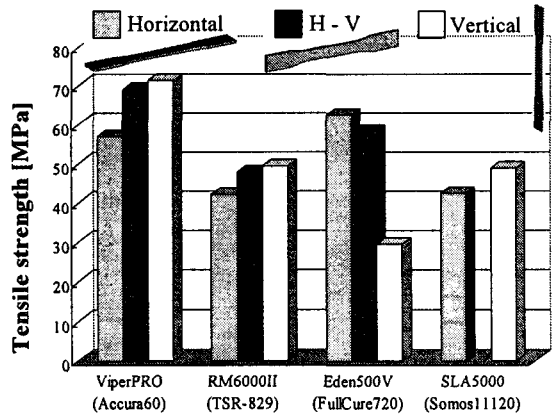


Fig. 4 Comparisons of tensile strength

경우 인장 강도가 조금 더 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 레이저 주사(scanning) 방향보다는 적층 방향의 인장 강도가 더 높다는 것을 의미한다. 그 이유는 광조형 시 경화 깊이(cure depth)를 층 두께(layer thickness)보다 훨씬 더 크게 조정하기 때문에 적층 방향으로 여러 층에 걸쳐 경화 작용이 반복적으로 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

3.1.2 내열성 (온도에 따른 인장강도의 변화)

광조형 방식의 RP 시제품이 어느 정도의 내열성을 가지고 있는지 확인하기 위하여 온도를 조절할 수 있는 챔버(chamber) 내에서 인장 시험을 수행하였으며, 시험 환경과 시편의 온도의 변화에 따른 시편의 인장 강도를 측정하였다. Fig. 5 에서 보이는 바와 같이 시편의 온도가 증가함에 따라

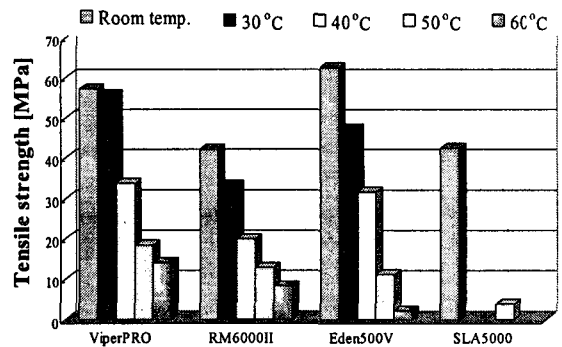


Fig. 5 Tensile strengths according to ambient temperature

재료의 연성이 증가하면서 인장 강도가 점차 감소하였다. 상온에서 인장 강도가 가장 컸었던 *Eden500V* 장비 시편은 온도가 증가함에 따라 인장 강도가 가장 빠른 속도로 감소하는 것으로 나타났다. 반면 *Accura60* 을 재료로 하여 *ViperPRO* 장비로 제작하였을 경우에는 재료의 열변형온도 (HDT) 가 넘는 60°C 환경에서도 약 14MPa 의 인장 강도를 가지는 것으로 나타났다.

3.1.3 내충격성

각각의 RP 공정 방식으로 정사각형 판재 모양의 RP 시편을 적층 방향 별로 5 개씩 제작하고 낙하추를 이용한 관통 충격 시험을 5 회 실시하였으며, Fig. 6 에 그 결과의 평균값의 변화를 나타내었다. 시험 결과 *ViperPRO* 장비로 제작한 시편이 충격에 대한 저항력이 가장 우수한 것으로 나타났다. 적층 방향에 따른 내충격성의 변화는 인장 강도의 변화와 마찬가지로 *ViperPRO* 와 *RM6000II* 장비의 경우 수평 방향보다는 수직(적층) 방향으로의 내충격성이 더욱 증가하는 것으로 나타났다.

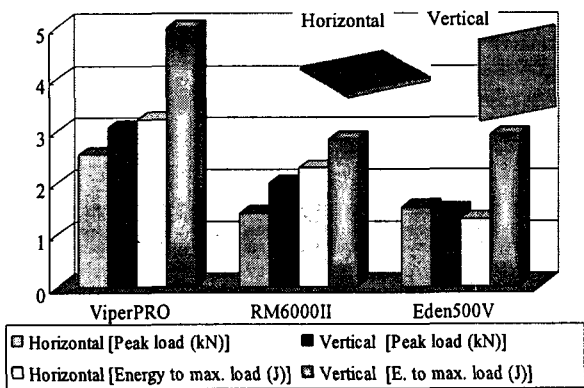


Fig. 6 Results of puncture impact tests

3.2 형상 정밀도

제작된 부품의 형상 정밀도를 비교하기 위해서는 여러 가지 방법을 적용할 수 있겠지만 본 연구에서는 가늘고 긴 직육면체 바 형상의 시편을 제작하고, 특히 광조형 공정 방식에서 적층 방향과 수직한 방향으로 진직도 오차를 유발시키는 요인인 곡률 변형의 크기를 CMM 으로 측정함으로써 형상 정밀도를 비교하였으며, Fig. 7 에 대표적인 결과를 나타내었다. Table 5 에 폭이 5mm 이고 길이

(150~450mm)와 두께(2.5~30mm)가 다른 다양한 시편에 대한 최대 곡률 변형량을 측정된 결과를 나타내었으며, 전체적으로 시편의 길이가 길어질 수

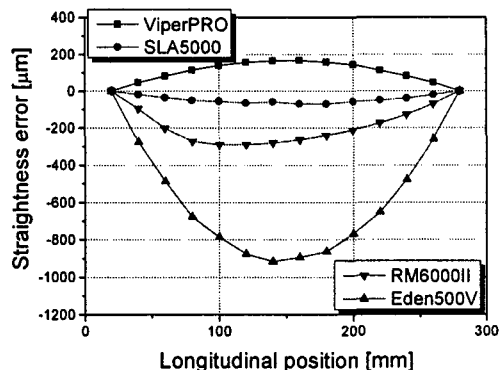


Fig. 7(a) Straightness error induced by curl distortion of bar-shaped specimens (300×10×5)

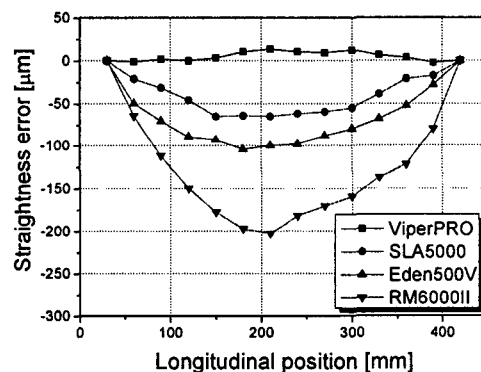


Fig. 7(b) Straightness error induced by curl distortion of bar-shaped specimens (450×30×5)

Table 5 Measured straightness error of bar-shaped specimens [μm]

Bar size (x×y×z[mm ³])	ViperPRO	RM6000II	Eden500V	SLA5000
150×10×5	24	91	251	22
150×30×5	22	91	57	16
300×2.5×5	289	1720	494	776
300×10×5	139	290	917	70
300×30×5	15	152	99	24
450×10×5	474	279	2360	111
450×30×5	22	203	104	65

록, 그리고 두께가 얇아질수록 곡률 변형량은 증가하는 것으로 나타났다. 측정 결과 3D systems 사의 ViperPRO 나 SLA5000 장비가 RM6000II 나 Eden500V 장비에 비하여 곡률 변형량이 작은 것으로 나타났다.

한편 본 연구에서는 치수가 작고 모양이 복잡한 형상을 제작할 때 어느 장비가 유리한지 알아보기 위하여 미세 두께의 리브, 미세 지름의 구멍, 미세 틈을 가진 시편을 모델링하여 각 장비 별로 제작해본 결과, 액체수지 표면에 생성되는 레이저 빔의 최소 스폿(spot) 지름이 작은 RM6000II 장비는 0.2mm 형상까지는 전혀 문제없이 제작이 가능하였으며, 미세 형상의 제작 정밀도 측면에 있어서는 RM6000II 장비가 가장 우수한 것으로 나타났다.

3.3 제작 속도

시제품을 빠른 시간 내에 공급해야 하는 RP 공정의 특성상 제품을 제작하는 속도는 장비를 결정하는데 있어서 매우 중요한 인자이다. 광조형 장비를 이용하여 Fig. 3 에 나타난 두 가지 모델을 제작할 때, 소요되는 적층 시간을 시뮬레이션으로 비교한 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 광조형 공정에서 적층 시간은 적층 두께와 레이저 주사속도(Objet 장비의 경우에는 헤드의 이송속도)에 가장 큰 영향을 받고, 그 외에 새로운 층이 생성될 때 표면이 안정될 때까지 기다리는 시간(z-wait time) 및 리코터(recoater) 이동속도 등에 영향을 받는다. Eden 500V 장비는 0.016mm, 나머지 장비는 0.1mm 의 층 두께를 적용하였고, 기타 조건은 각 장비에서 가장 일반적으로 사용하는 조건을 적용하였다.

시뮬레이션 결과 단면 내부를 주사할 때의 레이저 해칭속도(hatching speed)가 가장 빠른 Viper PRO 장비의 적층 속도가 가장 우수한 것으로 나타났고 해칭속도가 느린 SLA5000 장비의 제작속도가 가장 느린 것으로 나타났으며, 내부 단면적이 넓은, 즉 모델의 부피가 클수록 제작 속도의 차이가 더욱 크게 나는 것으로 나타났다. Eden500V 장비의 경우, 층두께가 얇고 헤드 이송속도가 상대적으로 느리지만 한번의 헤드 이송으로 넓은 단면적을 동시에 경화시킬 수 있기 때문에 제작속도 측면에 있어서도 경쟁력을 가지고 있는 것으로 나타났다.

RP 시제품을 완성하기 위한 전체 제작 시간은

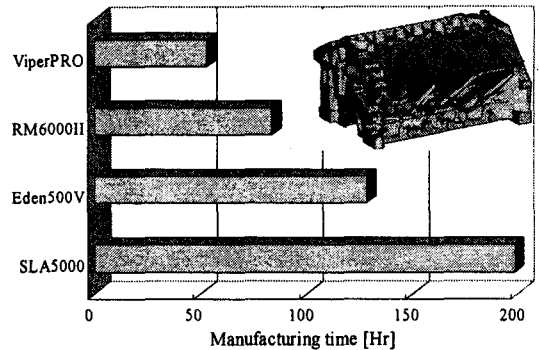


Fig. 8(a) Comparisons of estimated time for building part (I)

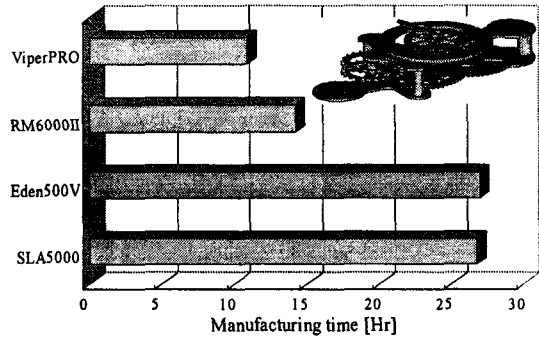


Fig. 8(b) Comparisons of estimated time for building part (II)

위에서 보여진 적층 시간 이외에 데이터 단면 파일과 지지대(supports)를 생성하는데 소요되는 전처리 시간과 지지대 제거, 세척, 후경화(postcure) 시간 등을 포함하는 후처리 시간이 포함된다. Eden500V 장비는 후경화 과정이 필요 없지만 모델 내외부를 감싸고 있는 지지대를 깨끗이 제거하는데 시간이 상대적으로 많이 소요된다.

3.4 제작 비용

광조형 방식 RP 공정의 제작비용은 크게 모델 재료비, 지지대 재료비, 그리고 소모품인 레이저 비용으로 나눌 수 있다. 모델 재료비는 제품의 부피[cm³]에서 Table 4 에 나와 있는 재료의 비중(specific gravity)[g/cm³]을 곱한 값에서 재료의 단가 [₩/g]를 곱하면 산출된다. ViperPRO, RM6000II 및 SLA5000 장비에서 지지대 재료비는 대략 모델 재

료비의 10% 정도 소요되므로 이를 적용하였다. 하지만 광조형 및 3DP 혼합 방식인 *Eden500V* 장비에서는 지지대 생성 방식이 이와는 크게 다르다. 즉, 현재 단면적이 아래층에 비하여 조금이라도 크다면 반드시 지지대 구조가 필요하고, 단면적이 아래층에 비하여 작다고 할 지라도 단면적의 절대 크기가 작고 얇은 경우에는 헤드 이송 시 헤드와의 접촉으로 쓰러질 염려가 있기 때문에 지지대로 구조물을 둘러싸서 구조물의 강성을 보장해 주어야만 한다. 따라서 지지대 재료가 상당히 많이 소요되며 이로 인해 지지대 비용이 전체 재료비에서 차지하는 비중이 매우 크다.

레이저 비용은 레이저 단가에 레이저 수명을 나눈 후 적층 시간을 곱하면 계산되며, 레이저가

필요 없는 *Eden500V* 장비는 이로 인한 소요 비용이 없다. 이러한 계산 방식에 근거하여 Fig. 3 의 두 가지 모델을 각 장비로 제작할 때 전체 소요 예상 비용을 계산한 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 전체적으로 재료비 단가가 상대적으로 저렴한 *RM6000II* 장비가 제작비용 측면에서 가장 우수한 것으로 나타났고, 주사 속도가 느린 *SLA5000* 장비에서는 레이저 비용이, *Eden500V* 장비에서는 지지대 재료비가 전체 제작 비용에서 차지하는 비중이 상대적으로 크게 나타났다.

4. 결론

형상 및 치수정밀도, 표면거칠기가 우수한 광조형 방식의 여러 가지 쾌속조형 장비에 대하여 투명 재료를 사용하여 시편을 제작한 후, 다양한 방법으로 성능을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) *Eden500V* 장비는 상온에서의 인장 강도가 가장 우수하였으나 온도의 증가에 따른 내열성이 상대적으로 취약하였고 적층(수직) 방향의 인장 강도가 취약하였다. 반면 *ViperPRO*, *RM6000II*, *SLA5000* 장비는 오히려 적층 방향의 인장 강도가 더욱 증가하였다. 정사각형 판재 형상으로 내충격성을 측정한 결과 *ViperPRO* 장비가 가장 우수하였다.

(2) *RM6000II* 장비는 치수가 0.2mm 까지의 형상을 제작할 수 있어 미세 형상 정밀도가 가장 뛰어나고, 길이와 두께가 다른 바 형상의 시편으로 곡률 변형을 측정한 결과 전체적인 형상 정밀도는 *ViperPRO* 장비가 가장 우수하였다.

(3) 단면 외부 윤곽에 비해 단면 내부를 8배 이상 빠르게 주사하는 *ViperPRO* 장비의 제작 속도가 가장 빨랐으며, 모델의 부피가 클수록 더욱 큰 차이를 나타내었다.

(4) 제작비용 측면에서는 재료비 단가가 저렴한 *RM6000II* 장비가 가장 우수하였고, 전체 제작 비용에서 주사 속도가 느린 *SLA5000* 장비는 레이저 비용이 *Eden500V* 장비는 지지대 재료비가 차지하는 비중이 상대적으로 컸다.

참고문헌

1. Ahn, D. G and Yang, D. Y., "Principle of Rapid

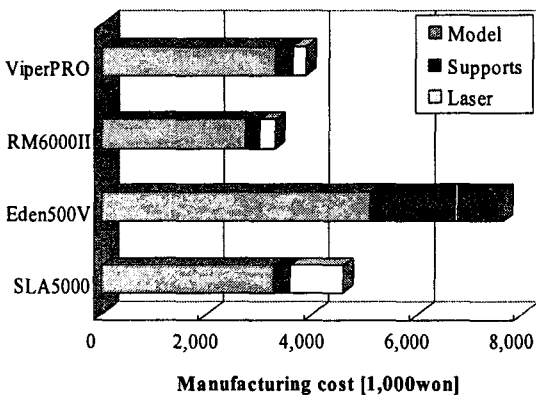


Fig. 9(a) Comparisons of total cost for manufacturing part (I)

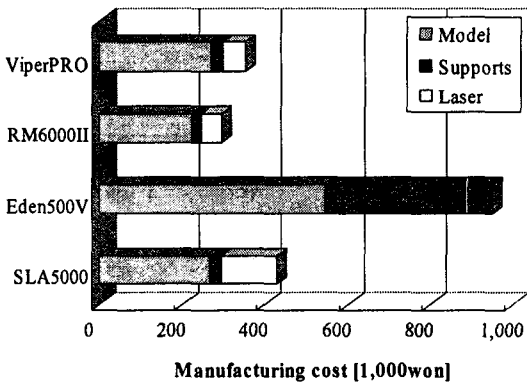


Fig. 9(b) Comparisons of total cost for manufacturing part (II)

- Prototyping and its Trends,” Journal of the KSPE, Vol. 22, No. 10, pp. 7-16, 2005.
2. 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.
 3. 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.
 4. Kim, G. D. and Sung, J. H., “Bench Mark Test on Rapid Prototyping Processes and Machines for Functional Prototypes,” Journal of the KSPE, Vol. 23, No. 6, pp. 187-195, 2006.
 5. Kim, G. D. and Kim, J. Y., “Benchmark Study on Surface Roughness and Mechanical Properties of Rapid Prototypes,” Transactions of KSMTE, Vol. 15, No. 4, pp. 56-62, 2006.
 6. Shellabear, M., “Benchmark Study of Accuracy and Surface Quality in RP Models,” RAPTEC, Task 4.2 Report 2, 1999.
 7. Shellabear, M., “Model Manufacturing Processes - State of the Art in Rapid Prototyping,” RAPTEC, Task 4.2 Report 1, 1998.
 8. <http://www.3Dsystems.com>
 9. <http://www.cmet.co.jp>
 10. <http://www.objet.info>
 11. Kim, G. D. and Lee, J. K., “Prediction of Curl Distortion using Classical Lamination Theory in Stereo-lithography,” Journal of the KSPE, Vol. 22, No. 11, pp. 210-217, 2005.