

여러 가지 방식의 쾌속조형물 특성 및 장비 성능의 정량적 비교

김기대[†]

Quantitative Comparisons of the Characteristics of various Rapid Prototypes and RP machines

Gi Dae Kim

Key Words: Surface roughness(표면거칠기), Tensile strength(인장강도), Heat-resistance(내열성), Shape accuracy(형상정밀도), Manufacturing speed(제작속도)

Abstract

For the various RP processes and machines, quantitative comparisons were carried out, which include the variations of roughness according to inclined angle of surface, tensile strength and heat-resistance, shape accuracy affected by curl distortion, manufacturability of submilli-scale structure, and manufacturing speed. It was observed that steeper surface results in smoother roughness except *Eden500V* of *Objet*. Specimen made by *LOM* process showed the best heat-resistance, but that of *SL* process had heat-resistance only up to 60°C. Generally, tensile strength in the building direction was shown to be smaller than in the scanning direction, but *SL* process showed the opposite results. *RM6000II* of *CMET* was superior in the manufacturing small-scale structure below 0.2mm, and *Z510* of *Zcorp.* and *ViperPRO* of *3D systems* were great in manufacturing speed.

1. 서 론

시제품의 생산기간을 단축시키고, 동시공학과 역설계를 가능하게 해주는 쾌속조형 기술은 사용하는 재료의 종류와 단면을 생성시키고 적층시키는 방식에 따라 여러 가지 방식으로 분류할 수 있으며, 각각의 방식은 독특한 특성 및 장단점을 가지고 있다.^(1~8) 액상의 광경화성 에폭시 수지(epoxy resin)를 레이저로 주사하여 경화시키는 광조형(SL, Stereo-Lithography) 방식은 시제품의 형상 및 치수정밀도와 표면거칠기가 우수하지만 내열성이 취약하여 고온에서의 기계적 물성치가 매우 취약하다. 광경화성 액상 수지를 다중 노즐을

통해 분사(poly-jet)하고 동시에 경화시키는 방식인 *Objet* 社의 장비는 사용 환경이 비교적 우수하고 적층 두께가 매우 얇아서 미세한 형상을 제작할 수 있으나, 내열성이 취약하고 지지대(supports) 비용이 많이 소요된다. ABS 와 같은 고체 열가소성 수지를 용융 및 냉각시키면서 적층하는 *FDM*(Fused Deposition Modeling) 방식은 장비를 운영하기 쉽고 사용 환경이 우수하나, 제작 속도가 느리고 적층 두께가 두꺼워서 제품 표면이 거칠다. 세라믹 분말을 접착시켜 적층하는 *3DP*(3 Dimensional Printing) 공정은 재료비가 저렴하고 제작 속도가 매우 빠른 반면 제품 정밀도와 기계적 물성치가 매우 취약하다. 분말가루를 레이저로 소결시켜 적층하는 *SLS*(Selective Laser Sintering) 방식은 사용재료가 다양하여 시제품의 응용 범위가 넓지만 재료 소모율이 너무 크고 제작 공정 중 분말가루가 유출되기 쉬워서 사용 환경이 좋지 않다. 종이를 사용하는

[†] 회원, 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부
E-mail : gidkim@cu.ac.kr
TEL : (053)850-2724 FAX : (053)850-2710

LOM(Laminated Object Manufacturing) 방식은 부피가 큰 제품일 경우 제작 재료비가 저렴하고 내열성이 뛰어나지만, 적층이 완료된 후 제품을 추출하는 후처리 공정이 너무 불편하다. 이 밖에도 다양한 신기술 쾌속조형 방식이 개발되고 있으며, RP 장비 선택 시 각 방식의 특성을 충분히 고려해야 한다.

본 연구에서는 여러 가지 쾌속조형 방식에서 각 방식별로 대표적인 장비를 선정하고 이 장비들을 이용하여 특별히 설계된 시편을 제작한 후 제작된 쾌속조형물의 특성을 비교하였다. 표면 각도의 변화에 따른 표면거칠기의 변화, 상온에서의 인장강도와 온도 증가에 따른 내열성의 변화, 곡률변형으로 인한 형상정밀도의 변화, 미세구조물의 제작 정밀도, 그리고 제품 제작 속도 등을 비교함으로써 RP 방식에 따른 쾌속조형물의 특성과 RP 장비의 성능을 정량적으로 비교하였다.

2. 비교시험 방법

Table 1 은 본 연구의 비교시험에서 사용된 RP 방식과 장비 목록으로서 현재 국내외적으로 가장 많이 이용되고 있고, 비교적 최신의 대표적인 장비들로 구성되어 있다.

Fig. 1은 RP 제품의 표면의 경사각도에 따라 표면 거칠기가 어떻게 변화하는지를 알아보기 위

Table 1 RP machines used in benchmark test

Processes	Apparatus Model	Makers	Materials	Layer thickness [mm]
SL	ViperPRO	3D Systems	Accura60 (Epoxy resin)	0.1 (0.05)
	RM6000II	CMET	TSR-829 (Epoxy resin)	0.1 (0.05)
	SLA5000	3D Systems	Somos11120 (Epoxy resin)	0.15 (0.1)
(Poly-jet)	Eden500V	Objet	FullCure720 (Epoxy resin)	0.016
3DP	Z510 Spectrum	Z Corp.	102 powder (Plaster)	0.1
FDM	MAXUM	Stratasys	ABS	0.254
	VantageSE		PC	
SLS	Sinterstation HiQ+HS	3D Systems	PA (poly-amide) A (Alumide) GF (Glass filled nylon)	0.1 (0.15)
	EOSP-385	EOS GmbH		
LOM	PLT-A3	KIRA	OTZ-3LT-P20 (Roll paper)	0.15

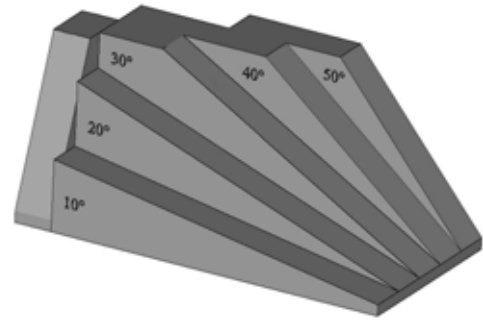


Fig. 1 Specimen for measuring the roughness of inclined surfaces (50×100×45)

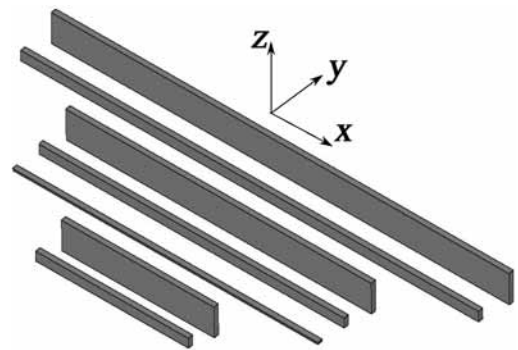


Fig. 2 Bar-shaped specimens for measuring curl distortion

하여 특별히 설계한 시편의 형상이다. 그림에서 보이는 바와 같이 각도가 다양한 경사면을 가지고 있으며 경사면의 거칠기를 측정식(stylus type) 표면조도 측정기(Mitutoyo SV-3000)를 이용하여 측정하였다.

RP 공정에서 연속적으로 2차원 단면을 적층할 때 재료의 상변화 또는 온도 변화로 인해 층간 수축률의 차이가 발생하고 이로 인해 제품은 곡률 변형(curl distortion)이 발생하게 된다. 곡률 변형량은 재료의 종류와 주사 방식 등 제작 조건에 크게 영향을 받는다. 형상정밀도가 상대적으로 가장 우수하다고 알려진 광조형 공정 방식에 대해 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 중앙 부분을 길이 방향으로 일정한 간격으로 측정하여 곡률 변형량을 측정하였다. 측정된 최대 곡률 변형량은 시편의 진직도 오차에 해당하는 크기로서 곡률 변형에 의한 시편의 진직도 오차를 비교함으로써 광조형 공정 RP 장비의 형상 정밀도를 비교하였다. 또한 SL 방식의 RP 장비로 미세탑과 미세구멍, 미세리브 등 다양한 형상을 가진 Fig. 3 과

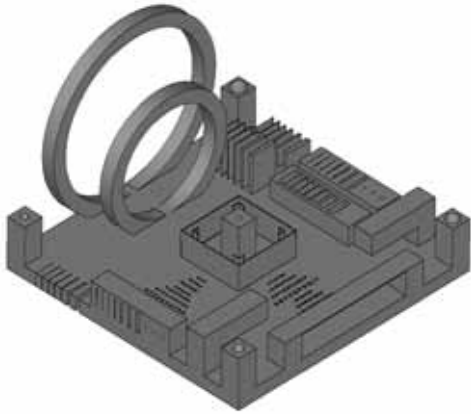


Fig. 3 Specimen for measuring shape accuracy (200×200×130)

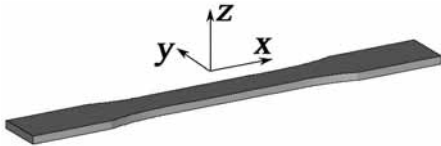


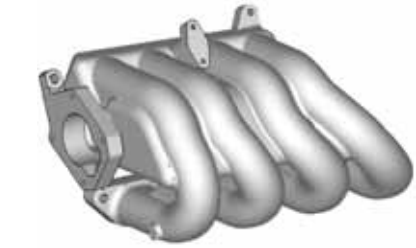
Fig. 4 Specimen for tensile and heat resistance test (165×19×3)

같은 모델을 제작하고 장비별 미세형상의 제작 정밀도를 비교하였다.

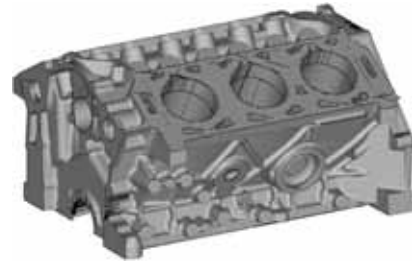
Fig. 4 는 인장강도를 측정하기 위한 시편의 형상이다. 각 장비별로 시편을 제작하고 인장강도 측정 시험을 수행하여 강도의 크기를 비교하였다. 그림에서 적층(z, 수직)방향과 단면주사(x, 수평)방향을 바꾸어 적층 방향의 변화에 따른 물성치의 변화도 함께 관찰하였다.

제품의 내열성을 비교하기 위하여 시편 및 시험 환경의 온도를 상온에서 뿐만 아니라 200°C 까지 올린 상태에서 인장강도를 측정하였다. 시험은 미국재료시험협회(ASTM)의 기준에 의거한 시험법으로 국제공인시험기관(Kolas)에서 실시하였다.

각 공정 장비별로 제작 속도를 비교 측정하기 위하여 Fig. 5 와 같은 가상모델을 이용하였다. Fig. 5(a) 의 부품 A 는 4기통 엔진의 흡기 매니폴더 형상이며, Fig. 5(b) 의 부품 B 는 실제 치수의 6기통 엔진 블록 형상으로서 부품 A 에 비해 부피가 5배 이상이다. 이러한 모델 부품을 제작하는데 각 장비별로 소요되는 적층시간, 전후처리시간을 비교하였다.



(a) Simulation part A (366×245×190)



(b) Simulation part B (440×367×242)

Fig. 5 Simulation models for comparing of manufacturing speed

3. 비교 결과 및 토의

3.1 표면거칠기

쾌속조형 공정은 2차원 단면을 연속적으로 적층하여 제작하기 때문에 Fig. 6 에서 보이는 바와 같이 제품 경사면에서 불가피하게 계단형(stair-stepping) 오차가 나타난다. Fig. 7 은 표면조도가 가장 좋다고 알려진 SL 방식의 RP 장비로 제작한 시편에서 30° 경사진 표면의 프로파일 형상을 측정한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 ViporPRO 장비가 가장 이론적인 형상과 가까운 것으로 나타났다.

다양한 RP 장비로 Fig. 1 의 시편을 제작하고 표면 각도의 변화에 따른 표면거칠기(R_a)의 변화를 측정하여 Fig. 8 에 나타내었다. Fig. 6에서 유

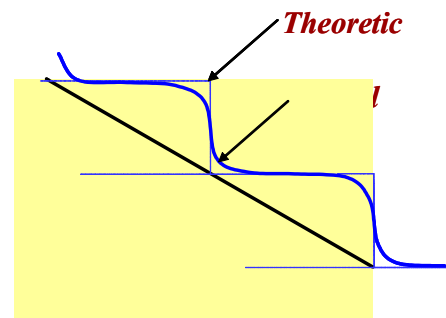


Fig. 6 Stair-stepping error generated on the inclined surface

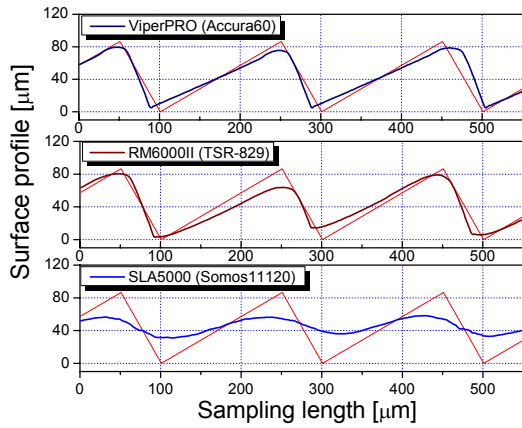


Fig. 7 Profiles of surfaces with inclination of 30° manufactured by SL type machines

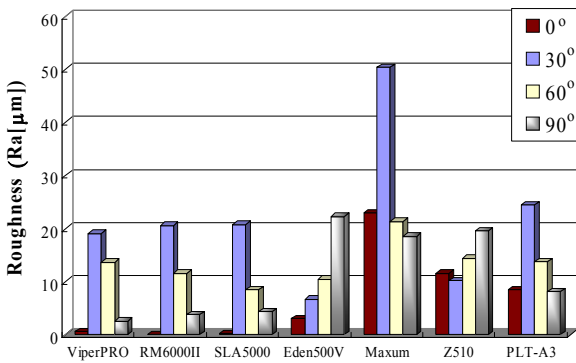


Fig. 8 Variations of surface roughness according to the angles of the surface

추할 수 있듯이 이론적으로 표면의 각도가 커지면 계단 형상의 요철(凹凸)이 작아지게 되고 따라서 표면 거칠기가 좋아진다. Fig. 8의 측정 결과에서도 알 수 있듯이 계단형 오차가 발생하지 않는 수평면(경사각 0°)을 제외하고는 대부분의 장비에서 표면의 각도가 증가하면 표면 거칠기가 향상되는 것으로 나타났다. 그리고 FDM 방식의 Maxum 장비로 제작한 시편의 표면이 가장 거칠고 SL 방식의 시편이 가장 우수한 것으로 나타났다. 3DP 방식의 Z510 시편은 표면각도의 영향을 거의 받지 않았으며, 층두께가 가장 얇은 Eden500V 시편은 표면 각도가 증가할수록 오히려 표면조도가 거칠어지는 것으로 나타났다.

3.2 형상정밀도

순차적인 적층 공정으로 RP 제품은 곡률변형이 발생하며, 이 변형량을 측정함으로써 SL 방식

의 RP 장비에 대해 형상정밀도를 비교하였다. Fig. 2의 시편을 제작하고 최대 곡률 변형량을 측정한 결과 전체적으로 시편의 길이가 길어질수록, 그리고 두께가 얇아질수록 곡률 변형량은 증가하는 것으로 나타났으며, 300×10×5 치수의 시편 측정 결과가 Fig. 9에 나타나있다. 비교 결과 3D systems사의 ViperPRO나 SLA5000 장비가 RM6000II나 Eden500V 장비에 비하여 곡률 변형량이 작은 것으로 나타났다.

한편 치수가 작고 모양이 복잡한 형상의 제작성을 알아보기 위하여 Fig. 3 모델을 제작하여 미세형상의 제작정도를 관찰한 결과, Fig. 10에 나타난 바와 같이 액체수지 표면에 생성되는 레이저 빔의 최소 스폿(spot) 지름이 작은 RM6000II 장비는 0.2mm 형상까지는 전혀 문제없이 제작이

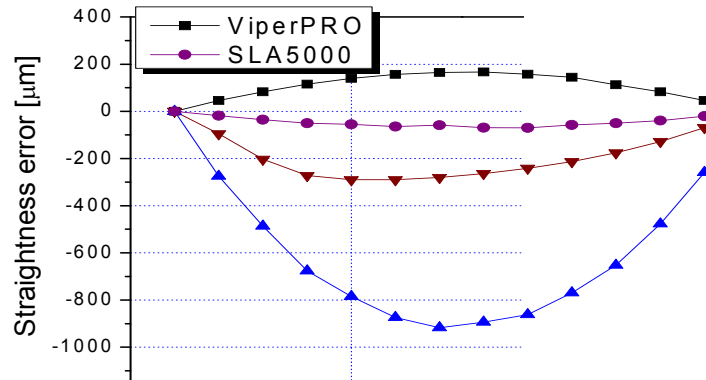


Fig. 9 Straightness error induced by curl distortion of bar-shaped specimens (300×10×5)

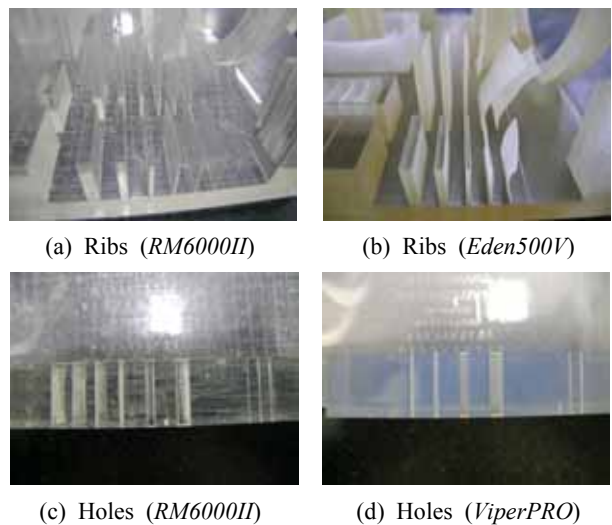
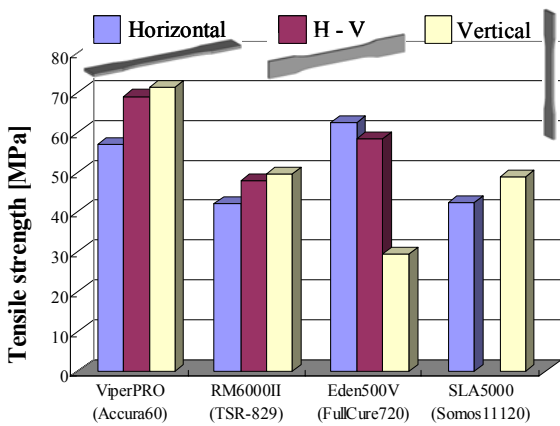


Fig. 10 Photos for comparing the shape accuracy of small-scale structure

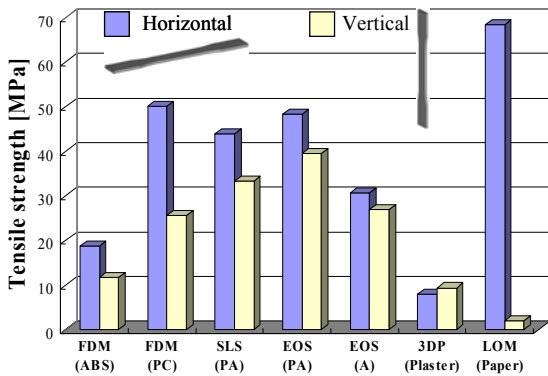
가능하였으며, 미세 형상의 제작 정밀도 측면에 있어서는 *RM6000II* 장비가 가장 우수한 것으로 나타났다.

3.3 기계적물성치

각 공정별 시편의 최대 인장강도를 측정한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 시편을 눕혀서 제작한 후, 주사방향(scanning directing)의 인장강도를 측정한 결과 *LOM* 방식으로 제작한 시편의 강도가 가장 컸으며, *3DP* 방식이 가장 작았다. 반면 시편을 세워서 제작하고 적층방향(building direction)의 인장강도를 측정한 결과 Fig. 11(b)에서와 같이 대부분 공정에서 강도가 감소하였으며, 특히 *LOM* 방식과 *FDM* 방식에서 감소폭이 컸다. 반면 *SL* 방식에서는 Fig. 11(a)에서와 같이 적층 방향의 인장 강도가 오히려 더 큰 것으로 나타났는데, 그 이유는 광조형 시 경화 깊이(cure depth)를 층 두께(layer thickness)보다 훨씬 더 크게 조정하기 때문에 적층 방향으로 여러 층에 걸쳐 경화작용이 반복되기 때문인 것으로 판단된

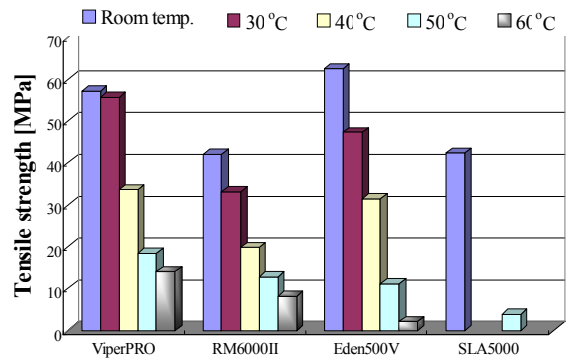


(a) SL type machines

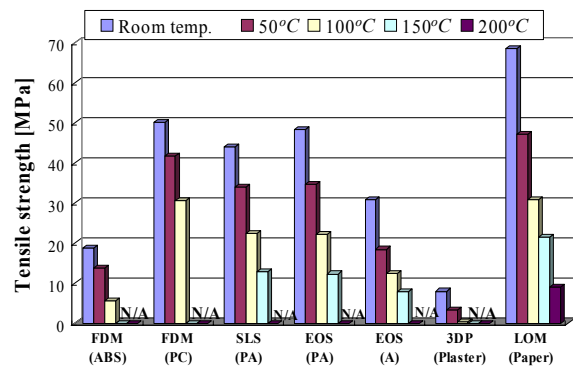


(b) Other type machines

Fig. 11 Comparisons of tensile strength



(a) SL type machines



(b) Other type machines

Fig. 12 Comparisons of heat resistance

다.

온도가 증가하면 재료의 연성이 증가하여 인장강도가 감소하게 되며 Fig.12는 온도에 따른 인장강도의 변화를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 *LOM* 시편이 내열성이 가장 큰 것으로 나타났으며, 재료의 열변형온도(heat deflection temp.) 혹은 유리전이온도(Glass transition temp.)에 따라 시편이 견딜 수 있는 온도의 한계가 정해졌다.

3.4 제작속도

Fig. 13은 Fig. 5(a)의 part A를 제작하는데 필요한 시간을 비교한 것으로 적층시간을 시뮬레이션하여 산출하고 전/후처리 시간을 예상하여 이를 각 장비별로 정리하였다. 제작 속도는 제작하고자 하는 제품의 치수와 형상에 따라 어느 정도 결과가 달라질 수 있지만, part A의 경우 *3DP* 방식의 *Z510* 장비로 제작할 경우 속도가 가장 빨랐으며, *SLS*, *SLA*, *LOM*, *FDM* 방식 순으로 나타났다.

광조형 방식은 전처리시간, 세척 및 후경화 처리 시간이 필요하지만 대부분 적층하는데 시간이

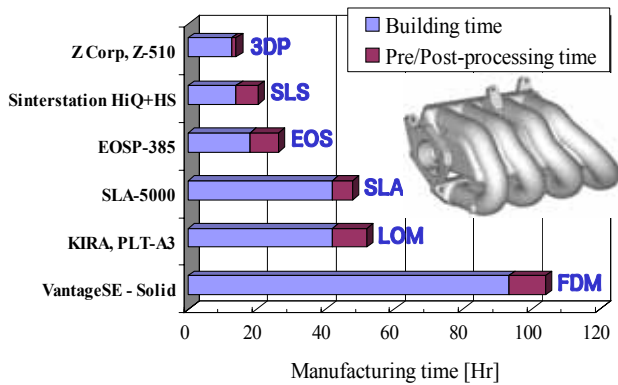


Fig. 13 Comparisons of total manufacturing time

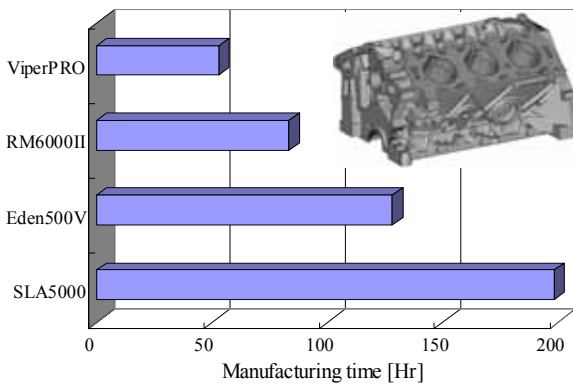


Fig. 14 Comparisons of building time (SL type machines)

소요된다. SL 방식의 장비에 대해서 part A 보다 제품의 부피가 5배 이상 큰 Fig. 5(b)의 part B 를 제작할 때의 적층 속도를 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 14 에 나타내었다. 시뮬레이션 결과 단면 내부를 주사할 때의 레이저 해칭속도(hatching speed)가 가장 빠른 ViperPRO 장비의 적층 속도가 가장 빠른 것으로 나타났고 해칭속도가 느린 SLA5000 장비가 가장 느린 것으로 나타났다. Eden500V 장비의 경우, 층두께가 얇고 헤드 이송 속도가 상대적으로 느리지만 한번의 헤드 이송으로 넓은 단면적을 동시에 경화시킬 수 있기 때문에 제작속도 측면에 있어서도 경쟁력을 가지고 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

여러 가지 방식의 RP 장비로 시편을 제작하고 캐속조형물의 특성을 비교한 결과, RP 공정방식과 재료의 종류가 달라짐에 따라 다양한 특성을

관찰할 수 있었다. 표면거칠기는 광조형 방식, 그 중에서도 ViperPRO 및 RM6000II 장비가 우수하였다. SL 방식에서 곡률변형에 따른 형상정밀도는 ViperPRO 장비가, 미세형상의 제작정밀도는 RM6000II 장비가 우수하였다. 상온에서의 인장강도는 LOM 시편이 우수하였지만, 적층 방향이 변화하면 강도가 크게 감소하였다. 반면 SL 방식은 주사방향보다는 적층방향에서 오히려 강도가 더 증가하였다. 내열성 또한 LOM 방식이 가장 우수하였다. 제작속도 측면에서는 Z corp. 장비가 가장 우수하였으며, SL 방식 중에서는 ViperPRO 장비가 가장 우수하였다.

※ 본 학술발표 논문은 참고문헌 (6)~(8) 에서 발췌한 내용이 많이 포함되어 있습니다.

참고문헌

- (1) Pham, D. T., Gault, R. S., 1998, "A Comparison of Rapid Prototyping Technologies," *Int. J. of Machine Tool & Manufacture*, Vol. 38, pp.1257~1287.
- (2) Mahesh, M., Wong, Y. S., Fuh, J. Y. H., Loh, H. T., 2004, "Benchmarking for Comparative Evaluation of RP Systems and Processes," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 10, No. 2, pp. 123~135.
- (3) Shellabear, M., 1999, "Benchmark Study of Accuracy and Surface Quality in RP Models," *RAPTEC, Task 4.2 Report 2*.
- (4) Shellabear, M., 1998, "Model Manufacturing Processes - State of the Art in Rapid Prototyping," *RAPTEC, Task 4.2 Report 1*.
- (5) Ahn, D. G., Yang, D. Y., "Principle of Rapid Prototyping and its Trends," *Journal of KSPE*, Vol. 22, No. 10, pp. 7~16, 200
- (6) Kim, G. D., 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
- (7) Kim, G. D., Sung, J. H., "Bench Mark Test on Rapid Prototyping Processes and Machines for Functional Prototypes," *Journal of KSPE*, Vol. 23, No. 6, pp. 187~195, 2006
- (8) Kim, G. D., Sung, J. H., "A Benchmark Study on the Stereo-lithography-type Rapid Prototyping Apparatus using Transparent Materials," *Journal of KSPE*, Vol. 24, No. 6, 2007