

쾌속조형부품의 표면거칠기와 기계적 물성치에 관한 비교

김기대*, 김정윤†

(논문접수일 2006. 3. 3, 심사완료일 2006. 4. 4)

Benchmark Study on Surface Roughness and Mechanical Properties of Rapid Prototypes

Kim Gi Dae*, Jungyun Kim†

Abstract

Various kinds of rapid prototyping processes are available, such as stereo-lithography apparatus(SLA), fused deposition modeling(FDM), selective laser sintering(SLS), 3 dimensional printing(3DP), and laminated object manufacturing(LOM). In this study, benchmark tests are carried out to obtain detailed informations about surface roughness and mechanical properties of those parts. Although the patterns and roughness averages of part surface are dependent on the surface direction, the roughness of SLA part is the best and that of FDM or 3DP part is the worst. It is shown that FDM part has an advantage in impact strength, SLS(or EOS) part in compressive strength, and LOM part has an advantage in tensile strength and heat resistance, but the change of building direction in FDM and LOM processes severely weakens the tensile and impact strengths.

Key Words : Rapid prototyping(쾌속조형), Benchmark test(성능비교시험), Surface roughness(표면거칠기), Mechanical properties(기계적물성치), Building direction(적층방향)

1. 서론

쾌속조형(RP, Rapid Prototyping) 공정으로 만든 시제품은 제조업, 의료, 장신구에 이르기까지 다양한 분야에서 이용되고 있다. 현재까지 소개된 여러 가지 쾌속조형 방식은 각각의 공정 특성으로 인해 장단점을 가지고 있다⁽¹⁻⁷⁾. 3D systems

사가 대표하는 SLA 공정으로 제작한 시제품은 내부를 투명하게 만들 수 있고 정밀도가 우수하나 상변화로 인한 형상오차를 가지고⁽⁸⁾, 강성이 부족하며 유독성 재료로 인해 주의가 필요하다고 알려져 있고, Stratasys 사의 FDM 공정은 시제품의 강성이 높고, 사용 환경이 우수하나 제작 속도가 느리다. 최근 DTM 사를 인수한 3D systems 사의 SLS 공정과

* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 (gidkim@cu.ac.kr)
주소: 712-702 경상북도 경산시 하양읍 금락리 330

† 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

이와 유사한 방식인 EOS GmbH 사의 EOS 공정은 다양한 성질을 가지는 분말 재료를 사용할 수 있어 시제품의 응용성이 넓고 시제품의 정밀도 및 제작 속도 측면에서 우수하나, 재료소모율이 커서 제작비용이 많이 소요되며 분말성 재료가 외부로 노출될 위험이 커서 사용 환경이 나쁜 단점을 가지고 있다. Z Corporation 사 또는 Contex 사의 3DP 공정은 제작 속도 및 재료비용 측면에 있어서 현재 여러 가지 패속조형 방식 중 최고 수준으로 평가 받고 있지만, 시제품의 강도 및 정밀도가 매우 취약하며, Helisys 사 또는 Kira 사의 LOM 공정은 재료비용이 매우 저렴하지만 완성된 부품을 추출하기 위해서는 대단히 불편한 후처리 공정을 거쳐야 한다. 이 밖에도 많은 특성들을 가지는 다양한 패속조형 공정들이 존재하며 각 공정의 특성에 맞게 적용되고 있다⁽¹⁻⁷⁾. 패속조형장비 제조업체들은 각 방식의 단점들을 지속적으로 개선하고 있음은 물론 꾸준히 새로운 공정 방식을 개발하고 있어 패속조형의 기술적 발전은 매우 빠르게 진행되고 있다.

우수한 패속조형 공정이 갖추어야 항목은 우선, 시제품의 형상 및 치수정밀도가 우수해야 하고, 제품의 기계적 물성치(mechanical properties)와 내열성(heat resistance)이 뛰어나야 하며 표면거칠기가 우수해야 한다. 또한 제작 속도가 빠르며 제작비용이 저렴하고 사용 환경이 깨끗해야 하며 후처리 공정이 간단해야 한다. 여러 가지 패속조형에 대해 이러한 각 성능지표를 비교하고 장단점을 분석하는 연구도 국내외에서 활발히 이루어지고 있다⁽¹⁻⁷⁾.

본 연구에서는 현재 국내외에서 가장 많이 사용되고 있는 SLA, FDM, SLS, EOS, 3DP, LOM 등 6개 패속조형 공정에 대해 각 공정의 대표 재료로 시편을 제작하고 면의 방향에 따른 표면거칠기를 비교하였다. 그리고 인장강도, 압축강도, 충격강도 뿐 만 아니라 온도에 증가에 따른 내열성 등 시제품으로서의 기능을 수행하기 위하여 꼭 갖추어야 할 대표적 기계적 물성치에 대해 비교 시험(BMT, bench mark test)을 수행하였고, 각 공정의 특성을 토대로 하여 이 결과를 분석하였다.

2. 시험절차 및 방법

본 비교 시험에 사용된 장비는 각 공정 방식별로 비교적 최신 모델을 이용하였으며 시험에 사용된 장비 및 제조사 그리고 사용재료를 Table 1에 나타내었다. SLA와 LOM 공정은 국내소재 기술혁신센터에, FDM, SLS, EOS, 3DP 공정은 미국 혹은 독일 소재 장비 본사에 의뢰하여 시편을 제작하였다. 각 방식별로 다양한 성질을 가지는 여러 가지 재

료를 사용할 수 있으나, 본 연구에서는 각 공정 방식별로 가장 일반적으로 사용되는 대표재료만을 비교대상으로 하였다. 층 두께(layer thickness), 주사속도(scanning speed) 등 기타 제작조건은 모든 장비별로 동일하게 적용하지 않고, 장비별로 가장 일반적으로 사용하는 조건을 적용하여 각 시편을 제작함으로써 장비별 일반적인 성능을 비교하였다.

각 공정별 제품의 표면거칠기를 비교하기 위하여 먼저 Fig. 1과 같은 가장 기본적인 직육면체 형상의 시편을 제작하였다. 윗면은 수지, 분말입자 등의 결합 조직 형상이 반영되고, 측면은 각 층 또는 결(layer)이 적층되는 형상이 반영되며, 아래면은 지지대의 유무 혹은 지지대 제거 용이성 정도에 따라 거칠기가 달라진다. 이러한 영향을 파악하기 위하여 시편의 윗면과 아랫면, 그리고 측면의 표면거칠기를 축침식 표면조도측정기(SV-3000, Mitutoyo)로 측정하여 서로 비교하였다.

Fig. 2는 미국재료시험협회(ASTM, American Society for Testing and Materials)가 제안하는 방법에 의거하여 다

Table 1 Rapid prototyping machines participated in BMT

Processes	Apparatus Model	Manufacturing company	Materials	Layer thickness [mm]
SLA	SLA-5000	3D Systems	Somos11120 (Epoxy resin)	0.15
FDM	MAXUM	Stratasys	ABS	0.254
SLS	Sinterstation HiQ+HS	3D Systems	SLS_PA (polyamide)	0.1
EOS	EOSP-385	EOS GmbH	EOS_Prime (polyamide)	0.15
3DP	Z510 Spectrum	Z Corporation	102 powder (Plaster)	0.1
LOM	PLT-A3	Kira	OTZ-3LT-P20 (Roll paper)	0.15

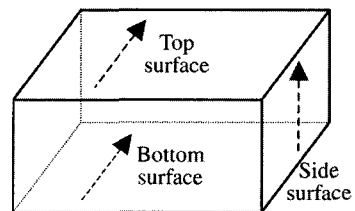


Fig. 1 Cubic specimen for surface roughness measurements

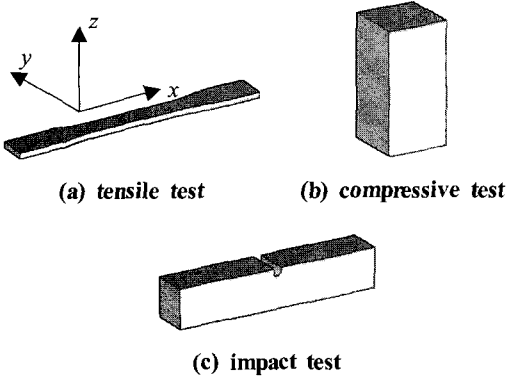


Fig. 2 Specimens for measuring mechanical properties

Table 2 Experimental methods

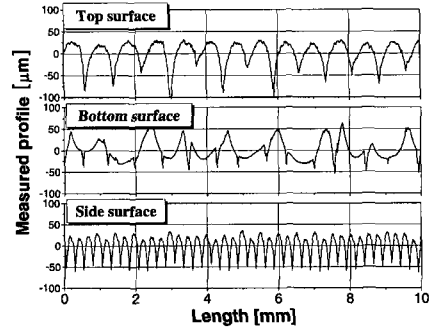
Test	Method	Apparatus	Specimen size (x×y×z)[mm ³]
Tensile (Heat resistance)	ASTM D 638:2003	INSTRON 5569	165×19×3 (Type I)
Compressive	ASTM D 695:2002	INSTRON 5569	12.5×12.5×25
Impact	ASTM D 256:2005	INSTRON DYNATUP 9250HV	55×10×10 (2mm U notch)

양한 기계적 물성치를 측정하기 위한 시편의 형상이며 Table 2에 각 시험의 구체적인 방법과 시험 장비, 그리고 시편 치수를 나타내었다. 각 시편 제작 시 Fig. 2에서 나타난 각 시편의 적층방향을 z 방향과 x 방향으로 하여 두 가지 모두를 제작함으로써 적층방향에 따른 기계적 물성치의 변화도 함께 관찰하였다. RP 시제품이 고온에 견디는 정도인 내열성을 측정하기 위하여 시편과 시험환경의 온도를 50℃ 간격으로 증가시켜가면서 온도의 증가에 따른 인장강도의 변화를 측정하였다. 모든 시험은 3회(내열성 시험은 2회) 반복 수행하는 것을 원칙으로 하였으며 이들의 평균값을 이용하였다.

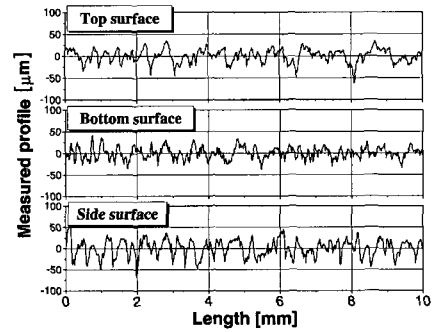
3. 시험 결과 및 분석

3.1 표면거칠기 비교

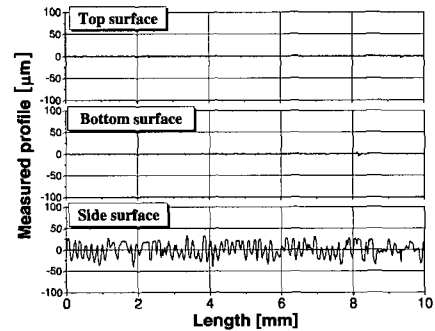
Fig. 3은 직육면체 형상의 일부 시편에 대해 윗면, 아랫면, 그리고 적층방향 측면의 거칠기를 측정된 결과를 나타내고 있으며, Fig. 4에 전체 6개 방식별로 평균표면거칠기(roughness



(a) FDM



(b) SLS



(c) LOM

Fig. 3 Results of surface roughness measurements

average, R_a)를 측정된 결과를 정리하였다. 측정결과 FDM 방식을 제외한 다른 모든 방식은 윗면과 아랫면에 비하여 측면의 표면이 거친 것으로 나타났다.

FDM 시편의 표면은 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 노즐에서 압출된 용융 ABS 수지가 형성하는 규칙적인 패턴이 나타나고 있다. 측면의 경우 층두께(0.254mm)를 주기로 하

여 나타나고 있지만 윗면은 이보다 더 큰 간격으로 규칙적인 패턴을 보이고 있다. 그 이유는 FDM 공정의 특성상 용융된 수지가 압출되면 가로(단면방향)와 세로(적층방향)의 비율이 약 2:1 인 고체가 형성되기 때문에 단면 주사간격을 층두께의 2배로 하고 또한 단면 주사 방향을 45°로 하였기 때문이다. 따라서 윗 표면에서 나타난 패턴 주기를 계산하면 식 (1)과 같다.

$$0.254[mm] \times 2 \times \sec(45^\circ) \approx 0.72[mm] \quad (1)$$

아랫면의 프로파일이 윗면과 다르게 나타나는 것은 단면 주사방향(45°)과 아랫면과 결합되어 있던 지지대의 주사방향(30°)이 달라서 지지대 제거 시 이들의 영향이 혼재되어 나타났기 때문이다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 전체적으로 SLA 시편의 표면 거칠기가 가장 우수하였으며, 윗면은 R_a 가 약 $0.37\mu m$, 지지대가 제거된 아랫면은 약 $2\mu m$, 측면은 약 $4.3\mu m$ 로 측정되었다. 특히 측면의 경우 주기적인 층두께(0.15mm)의 영향이 미세하게 관찰되긴 하였으나, 이것보다는 리코터(recoater)가 각 층 단면을 쓸어가면서(sweep) 형성하는 불규칙적인 패턴의 영향이 더욱 크게 나타났다.

분말가루(powder)의 결합으로 제작하는 SLS, EOS, 3DP 방식의 시편은 모든 방향의 표면에서 불규칙적인 패턴을 가지는 것으로 나타났으며, 윗면과 아랫면에 비하여 측면에서의 표면거칠기가 모두 나쁘게 나타난 이유는 동일 평면에서의 분말가루의 결합 공정과 층간 결합 공정이 다르기 때문이다. 이는 또한 동일한 단면에 대해 연속적으로 레이저를 주사(SLS, EOS) 혹은 결합제(binder)를 분사(3DP) 할 때 발생하는 장비의 반복정밀도 오차도 영향을 미친 것으로 판단된다.

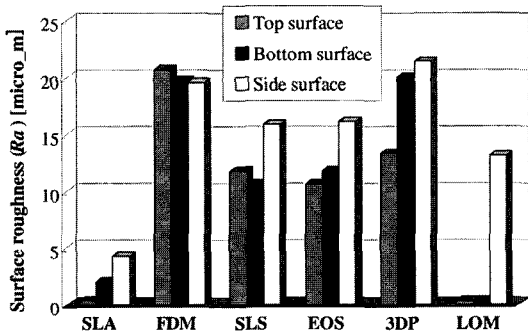


Fig. 4 Comparisons of surface roughness

Fig. 3 (c)와 Fig. 4에서와 같이 LOM 시편의 윗면과 아랫면은 종이표면 자체의 거칠기만을 반영하여 표면거칠기가 $0.4\mu m$ 이내로 매우 우수한 것으로 나타났으나, 측면은 종이와 종이의 적층으로 인해 층두께를 주기로 하여 규칙적인 패턴이 나타나서 $13\mu m$ 이상으로 상대적으로 표면이 거칠었다. 따라서 다른 공정에 비하여 LOM 공정으로 제작한 부품의 표면거칠기는 면의 방향에 매우 민감한 영향을 받기 때문에 특히 적층방향에 주의를 기울여야 함을 알 수 있다.

3.2 인장강도 비교

Fig. 5는 여러 가지 공정방식으로 제작한 시편으로 수행한 인장시험 결과 중 대표곡선 하나씩을 보여주고 있다. 상온 인장시험 결과, LOM 방식으로 제작한 시편의 인장강도는 평균 약 68.4MPa 로 가장 강한 것으로 나타났지만, 타 방식에 비해 변형률이 매우 작아서 시편의 유연성(flexibility)이 작은 것으로 나타났고, 그 뒤를 이어 EOS, SLS, SLA, FDM 순으로 인장강도의 크기를 나타냈다. 제작 속도가 가장 빠른 3 DP 방식으로 제작한 시편은 응력과 변형률이 매우 작아 인장강도는 약 8MPa 에 불과하였다. 이와 같은 응력-변형률 곡선으로부터 각 공정별로 최대 인장강도의 평균값을 측정 한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서는 시편을 수직방향으로 세워 제작한 경우의 측정 결과와 장비 제작사가 제공하는 재료 물성치 데이터(인장강도)⁽⁹⁻¹¹⁾도 함께 나타내어 서로 비교하였다. Z Corporation 사와 Kira 사는 재료의 인장강도에 대한 정보를 제공하지 않아 확보할 수 없었다. FDM 시편은 수직방향으로 인장강도가 크게 감소하였으며, 적층 방향에 따라 시편의 인장강도가 가장 많이 차이가 나는

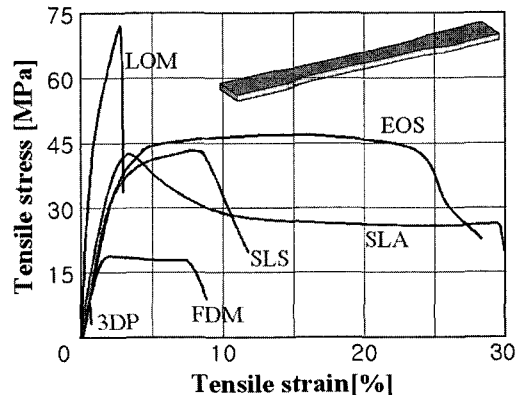


Fig. 5 Stress-strain curves of tensile tests

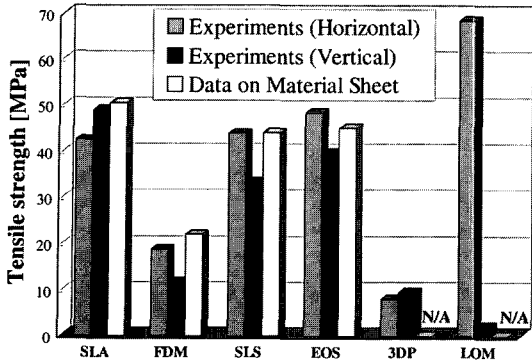


Fig. 6 Comparisons of tensile strength

것은 LOM 방식이었다. 이것은 종이와 종이를 결합시키는 결합체의 층간 접착력이 매우 약하다는 것을 의미하고, 이로 인해 층간분리(delamination) 현상이 발생할 가능성이 크다는 것을 의미한다.

3.3 압축강도 비교

Fig. 7는 압축시편을 여러 가지 방식으로 제작한 후, 압축강도 측정시험을 수행하고 얻은 압축응력-압축변형률 선도 중 대표곡선 하나씩을 나타내고 있다. Fig. 8은 이러한 시험 결과들의 평균값을 정리한 것이며, 압축변형률의 증가에 따른 압축응력(강도)의 변화를 나타내고 있다. 분말 가루를 소결(sintering)하여 제작하는 SLS 방식과 EOS 방식의 시편 선도는 거의 비슷한 결과를 나타냈고, FDM 방식 또한 응력의 크기가 조금 작을 뿐 세 가지 방식은 압축 초기와 초기 이후 두 단계로 압축응력과 압축변형률이 거의 선형적인 관계를 가지는 공통적인 특징이 나타났다. LOM 방식과 3DP 방식은 상대적으로 낮은 압축강도를 나타냈는데, 특히 분말 가루를 접합제로 고정하는 3DP 방식으로 제작한 시편은 압축시험 초기 모두 부서져서 인장과 함께 압축에도 매우 취약하다는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 시편의 적층방향을 변화시켜서 압축강도를 측정한 결과 인장강도시험 결과와는 달리 모든 방식에서 압축강도는 적층방향에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

3.4 충격강도 비교

Fig. 9는 충격시편으로 샤르피 테스트(Charpy test)를 수행한 결과를 보이고 있다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 (a)는 노치(notch)가 시편의 윗면에 생성되도록 적합한 경우이고, (b)는 노치가 적층면(layer)을 따라 시편의 옆면에 생성되

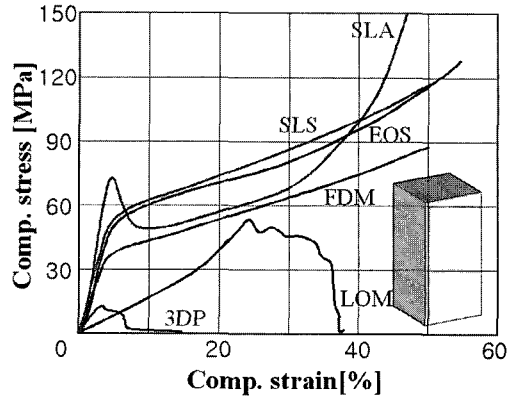


Fig. 7 Stress-strain curves of compressive tests

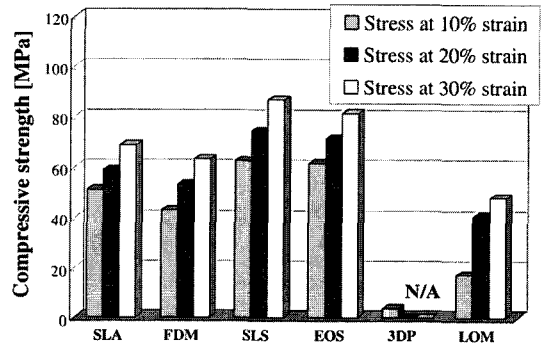


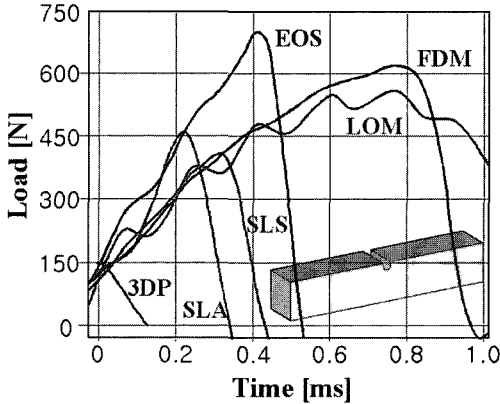
Fig. 8 Comparisons of compressive strength

록 시편을 세워서 적용한 경우이다. 시험 결과 충격 시 견딜 수 있는 최대 힘(peak load)은 EOS 시편이 가장 큰 것으로 나타났지만, FDM과 LOM 시편은 충격을 받은 후 시편이 견딜 수 있는 최대 힘까지 도달하는 데 걸리는 시간이 EOS 시편보다 2배 정도 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 충격에너지 흡수량을 나타내는 충격강도는 FDM과 LOM 시편이 가장 우수하였다. 3DP 시편은 충격 후 불과 0.02ms 이내에서 최대 힘에 도달하고 이후 시편이 손상되어 충격강도가 매우 취약함을 보여주고 있다. Fig. 9 (b)와 같이 시편 옆면에 노치를 생성시켰을 경우에는 (a) 시편 결과에 비해서 SLA, SLS, EOS 방식은 결과가 크게 달라지지 않은 반면, 상대적으로 높은 충격강도를 나타낸 FDM과 LOM 시편의 충격강도는 적층 방향에 따라 크게 다른 결과가 나타났다. FDM 방식은 충격이 가해진 후 불과 0.05ms 뒤에 최대 약 170N의 힘을 받고 이후 시편이 손상되었고, LOM 및 3DP 방식은 견딜 수 있는 힘의 크기가 너무 작아 측정이 불가하였다.

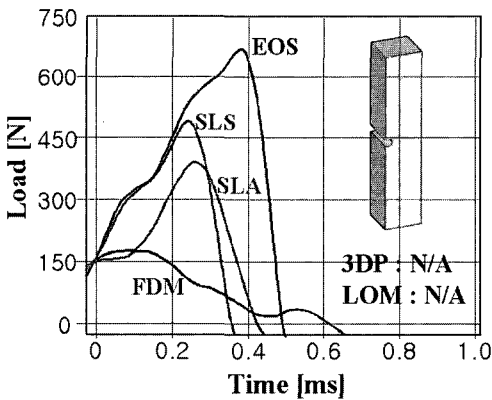
이상과 같은 시험결과들로부터 구한 측정 평균값을 Fig.

10에 정리하였다. 앞선 인장시험 결과에서 FDM 과 LOM 방식의 경우 적층 방향에 큰 영향을 받는다는 것을 확인하였

는데, 적층 방향이 충격강도에 미치는 영향은 이보다 더욱 크다는 것을 확인할 수 있다.



(a) In case notch is generated on the top face



(b) In case notch is generated on the side face

Fig. 9 Load variations during impact test

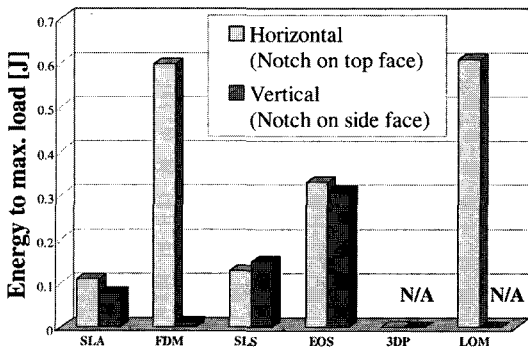


Fig. 10 Comparisons of impact strength

3.5 내열성 비교

장비 혹은 재료 공급사는 각 재료별로 용융점(melting point) 또는 유리 전이 온도(glass transition temperature), 그리고 시험조건별 열변형 온도(heat deflection temperature) 등 재료의 열적 물성치(thermal properties)를 제공하고 있다⁽⁸⁻¹⁰⁾. Fig. 11은 시험 환경의 온도를 50°C 간격으로 증가시켜가면서 인장시험을 실시하고 각 온도에서 측정된 평균 인장강도의 크기를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 SLA 시편의 경우 상온에서의 인장강도는 40MPa 이 넘지만, 50°C에서는 시편이 열변형 온도에 도달하여 인장강도가 3.9MPa 에 불과하였으며, 이 이상의 온도에서는 시험이 불가능하였다.

Fig. 12에서는 내열성시험 결과 시편의 형상을 보여주고 있다. 100°C 환경에서 SLA와 3DP 시편은 온도를 올리는 과정에서 시편을 고정(grip)하는 위치에서 이미 파단이 발생하여 더 이상 시험을 진행할 수 없었음을 보여준다. FDM 공정의 ABS 시편의 경우 유리 전이 온도가 104°C로 100°C까지의 인장강도가 측정되었으며, SLS와 EOS 공정의 PA(polyamid)재료의 경우 용융점이 약 180°C로 150°C에서 인장강도의 크기가 약 12.5MPa로 측정되었다. 200°C 환경에서 FDM, SLS, EOS 시편은 유리 전이 온도 혹은 용융점을 초과하였기 때문에 시편에 변형이 크게 발생하여 강도 측정이 불가능하였다. 상온에서 단면(수평)방향으로의 인장강도가 가장 큰 것으로 나타난 LOM 시편의 경우 온도가 증가하면 종이 재료 시편이 변색되고 층간 접착력이 더욱 감소되어 층간분리현상이 발

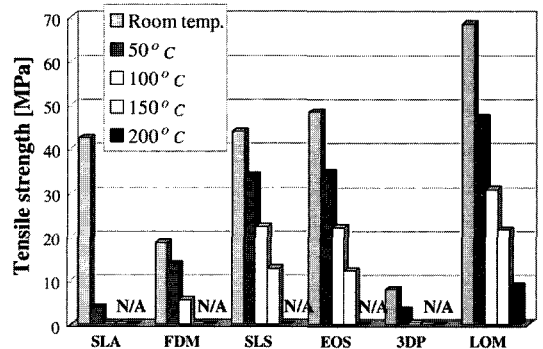
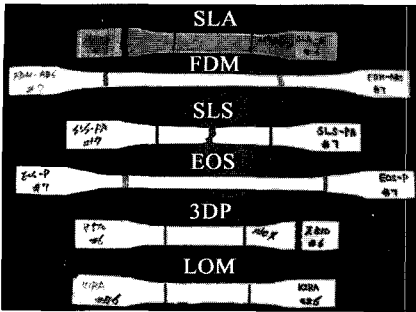
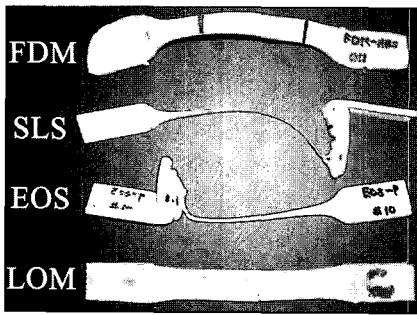


Fig. 11 Variations of tensile strength according to ambient temperature



(a) Under the condition of temperature 100°C



(b) Under the condition of temperature 200°C

Fig. 12 Variations of tensile test specimens

생하였지만, 여러 공정 중 유일하게 200°C 환경에서 약 8.9MPa의 크기로 인장강도가 측정되었다(Fig. 11).

4. 결론

여러 가지 폐속조형 공정에 대해 최신 장비로 가장 대표적인 재료와 일반적인 제작조건을 적용하여 시편을 제작한 후, 표면 거칠기와 기계적물성치를 비교시험 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 다만, 이러한 결과는 제작자의 숙련도, 재료의 상태, 제작환경 등에 따라 다소간 변화할 수 있음에 유의해야한다.

- (1) 표면의 거칠기의 경우 SLA 방식의 시편이 가장 우수하였고, FDM 및 3DP 방식의 시편이 가장 나았으며, LOM 방식의 시편의 경우 면의 방향에 따라 표면거칠기는 크게 차이가 났다. 분말가루를 사용하는 SLS, EOS, 3DP 시편은 면의 방향에 관계없이 불규칙한 표면을 얻었으나, 모두 윗면과 아래면 보다는 측면의 거칠기가 더 나았다.
- (2) 인장강도는 LOM 시편이 우수하였고, 압축강도는 SLS와 EOS 시편이, 그리고 충격강도는 FDM과 LOM 시편이 우수하였다.

- (3) LOM 시편의 경우, 단면(수평)방향으로의 인장강도와 충격강도는 매우 우수하였으나, 적층(수직)방향으로의 강도는 매우 취약하였다. FDM 시편도 역시 적층방향의 영향을 크게 받았다.
- (4) 시편의 내열성을 확인해본 결과, SLA와 3DP 시편의 경우 50°C 이상의 온도에서는 열변형이 발생하였고, LOM 시편의 경우 200°C 이상까지도 견딜 수 있었으며, SLS와 EOS 시편은 150°C 이상, FDM 시편은 100°C 이상까지 견디는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- (1) Wohler, T. T., 2005, *Wohlers Report 2005, Rapid Prototyping & Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates Inc.
- (2) Ahn, D. G. and Yang, D. Y., 2005, "Principle of Rapid Prototyping and its Trends," *Journal of KSPE*, Vol. 22, No. 10, pp. 7~16.
- (3) Pham, D. T. and Gault, R. S., 1998, "A Comparison of Rapid Prototyping Technologies," *Int. J. of Machine Tool & Manufacture*, Vol. 38, pp. 1257~1287.
- (4) Mahesh, M., Wong, Y. S., Fuh, J. Y. H. and Loh, H. T., 2004, "Benchmarking for Comparative Evaluation of RP Systems and Processes," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 10, No. 2, pp. 123~135.
- (5) EOS Gmbh Shellabear, M., 1999, "Benchmark Study of Accuracy and Surface Quality in RP Models," *RAPTEC, Task 4.2 Report 2*.
- (6) EOS Gmbh Shellabear, M., 1998, "Model Manufacturing Processes - State of the Art in Rapid Prototyping," *RAPTEC, Task 4.2 Report 1*.
- (7) Kim, G. D. and Oh, Y. T., 2005, "Experimental Investigation on the Distortion Error induced by Shrinkage in Stereolithography Process," *Journal of KSMTE*, Vol. 14, No. 6, pp. 61~67.
- (8) Kim G. D. and 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
- (9) <http://www.3Dsystems.com>.
- (10) <http://Stratasys.com>.
- (11) <http://www.EOS-gmbh.de>.