

여러 가지 쾌속조형 방식의 경사면 거칠기 특성

김기대*

(논문접수일 2007. 2. 8, 심사완료일 2007. 7. 5)

Characteristics of Roughness of Inclined Surface Fabricated by Various Rapid Prototyping Processes

Kim Gi Dae*

Abstract

Surface of rapid prototype has inevitably stair-stepping error, which is attributed to the continuous building process of 2 dimensional area. In this study, rounded edge model was established to estimate the roughness of inclined surface which has stair-stepping error. To investigate the roughness of rapid prototypes, specimens that have various surface inclinations were manufactured by various types of RP machines. As the surface inclination increased, the roughness of the specimens manufactured by *SL*, *FDM*, or *LOM* process decreased, which coincides with the simulation results. However, surface roughness of *3DP* specimen was almost independent of the inclination. Furthermore, as the angle of surface increased, roughness of *poly-jet* specimen also increased, which is attributed to the frictional behavior between writing head and scanned area.

Key Words : Rapid prototyping(쾌속조형), Stair-stepping error(계단형 오차), Surface roughness(표면 거칠기), Rounded edge model(둥근 계단형 모델), Surface inclination(표면경사)

1. 서론

설계한 부품을 빠른 시간 내에 3차원 형상으로 확인하기 위하여 개발된 쾌속조형(RP, rapid prototyping) 기술은 이제 쾌속직접주형(RT, rapid tooling) 기술로 발전하여 다양한 방식으로 응용되고 있다. 대표적인 기술로는 RP 시제품을

주조 공정의 원형(pattern) 혹은 마스터 모델(master model)로 사용하는 것으로서, 진공주형(vacuum casting) 공정에서 왁스 부품을 주조하는 데 마스터모델로 이용되거나⁽¹⁾, 정밀주조 공정에서 왁스 패턴을 대신하여 RP 시제품을 직접 마스터 모델로 사용하기도 한다⁽²⁾.

쾌속조형 기술은 2차원 단면을 생성한 후 이를 연속적으로 적층시켜 3차원 형상을 완성하는 기술로서, 사용하는 재료와

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

단면을 생성시키는 방법에 따라 여러 가지 방식으로 분류할 수 있으며, 각각의 방식은 독특한 특성 및 장단점을 가지고 있다⁽³⁻⁷⁾. 먼저 액상의 광경화성 에폭시 수지(epoxy resin)를 레이저로 주사하여 경화시키는 광조형(SL, Stereo-Lithography) 방식은 시제품의 형상 및 치수정밀도와 표면거칠기가 매우 우수하나, 내열성이 취약하여 50°C 이상의 온도에서는 기계적 물성치가 크게 나빠진다. 광경화성 액상 수지를 다중 노즐을 통해 분사(poly-jet)하고 분사와 동시에 경화시키는 방식인 *Objet* 社의 장비는 사용 환경이 비교적 우수하고 적층 두께(layer thickness)가 매우 얇아서 미세한 부품을 제작할 수 있으나 역시 내열성이 취약하고 지지대(supports) 비용이 많이 소요된다. ABS와 같은 고체 열가소성 수지를 용융 및 냉각시키면서 적층하는 *FDM*(Fused Deposition Modeling) 방식은 운영방식이 간단하고 사용 환경이 우수하나 기계적인 주사 방식으로 인해 제작 속도가 느리며 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. 분말(powder)을 레이저로 소결시켜 적층하는 *SLS*(Selective Laser Sintering) 방식은 사용재료가 다양하여 시제품의 응용 범위가 넓지만 재료 소모율이 너무 크고 분말 유출로 인해 사용 환경이 나쁘다. 종이를 사용하는 *LOM*(Laminated Object Manufacturing) 방식은 부피가 큰 제품일 경우 제작 재료비가 저렴하고 200°C 이상의 온도에서도 내열성이 뛰어난 방식이지만⁽⁷⁾, 적층 완료 후 제품을 추출하는 후처리 공정이 매우 불편하다. 이 밖에도 다양한 신기술 패속조형 방식이 개발되고 있으며, RP 장비 선택 시 각 방식의 특성을 충분히 고려해야 한다.

표면 거칠기가 우수한 패속조형물은 우선 시각적으로 만족감을 주고 후가공 시간을 줄여준다⁽⁸⁾. 뿐만 아니라 정밀 주조 공정을 위한 마스터모델로 사용하기 위해서는 RP 시제품 표면의 거칠기가 우수해야 한다. 그러나 패속조형 공정은 2차원 단면을 연속적으로 적층하기 때문에 경사면에서 계단형(stair-stepping) 오차가 불가피하게 나타난다. 따라서 시제품 적층이 완료되면 이를 제거하기 위하여 사포를 이용한 수작업(hand paper-sanding) 또는 비드 블라스팅(bead blasting) 공정을 수행하지만, 표면 후가공은 시간이 많이 소요되고 전체 치수오차를 더욱 증가시킬 수도 있으며 경우에 따라서는 후가공 자체가 불가능한 면도 존재한다.

이러한 패속조형물의 표면거칠기는 재료의 성질 및 레이저 스폿 직경(spot diameter), 분말입자 크기, 주사경로 등 다양한 제작 변수에 영향을 받지만 그 중 적층 두께 및 제작 방향이 가장 큰 영향을 미친다. 그동안 패속조형 방식의 표

면거칠기에 대한 연구가 많이 수행되었다⁽⁷⁻¹⁰⁾. Kim 등⁽⁷⁾은 수직, 수평면을 가지는 시편을 다양한 패속조형 방식으로 제작하여 표면 거칠기를 비교하였으며, Ahn⁽⁸⁾ 등은 표면 거칠기를 고려하여 후가공을 최소화시킬 수 있게 최적의 적층 방향을 결정하는 알고리즘을 제안하였다. Ha 등⁽⁹⁾은 *FDM* 방식에서 표면 경사와 주사간격에 따른 표면 거칠기의 변화를 측정하였고, Campbell 등⁽¹⁰⁾은 표면 경사에 따라 달라지는 표면조도를 시각적으로 보여주는 알고리즘을 제안하였다.

본 연구에서는 경사면을 가지는 패속조형물의 표면 거칠기를 예측하기 위하여 직각 계단형 모델을 토대로 한 수정 모델을 제안하고, 여러 가지 RP 공정으로 다양한 경사면을 가진 표면 거칠기 측정용 시편을 제작하였다. 각 RP 공정 방식에 따라 제작한 시편의 표면 거칠기가 표면의 경사각도가 변화함에 따라 어떻게 변화하는지를 관찰하여 그 특성을 비교하였고, 이를 표면 거칠기 예측 모델 결과도 비교하였다. 또한 적층 완료 후 시행되는 코팅 후처리가 표면 거칠기에 미치는 영향을 관찰하였다.

2. 경사면의 표면 거칠기 모델

2.1 직각 계단형 모델 (Sharp edge model)

Fig. 1은 일정한 경사를 가진 제품을 RP 공정으로 적층할 때 경사면에서 발생하는 계단형 오차를 보여주고 있다. 계단형 오차로 인해 발생한 최대 표면 거칠기(R_y)는 Fig. 2에 보이는 바와 같이 적층 두께(l_t)와 표면 경사(θ)와의 기하학적인 관계를 적용하여 계산할 수 있고, 계산 결과는 Eq. (1)과 같다. Fig. 2와 같이 일정한 주기를 가지는 표면곡선에서 평균 표면 거칠기(R_a)는 정의에 의해 Eq. (2)와 같이 된다.

$$R_y = l_t \cdot \cos\theta \tag{1}$$

$$R_a = \frac{1}{4} R_y \tag{2}$$

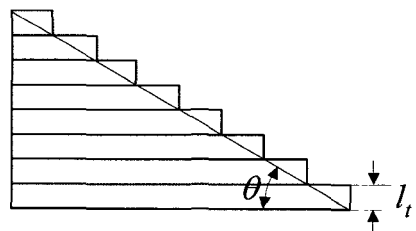


Fig. 1 Stair-stepping error of inclined surface in the RP process

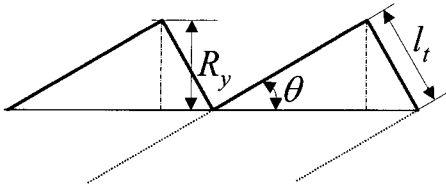


Fig. 2 Maximum roughness(R_y) of stair-stepping surface

2.2 둥근 계단형 모델(Rounded edge model)

실제 RP 공정에서 경사면이 적층되는 형상은 Fig. 3 (a)와 같이 모서리가 완벽하게 직각으로 이루어진 계단형이 아니고, Fig. 3 (b)에 나타난 바와 같이 내, 외부 모서리가 둥근 계단형으로 적층된다. 따라서 직각 형태의 계단에서 두 개의 모서리는 Fig. 4와 같이 외부 반경(r_1)과 내부 반경(r_2)이 서로 다른 두 개의 반지름을 가지는 형태로 가정하여 모델링하는 것이 더 합리적이며, Eq. (1)~(2)에서 제시한 직각 계단형 표면 거칠기 모델은 수정되어야 한다. Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 둥근 계단형일 때의 표면 거칠기는 직각 계단으로 가정하였을 때의 표면 거칠기보다 향상되며, Fig. 4에서 기하학적 관계를 고려하여 Eq. (3)~(4)와 같이 수정되어야 한다.

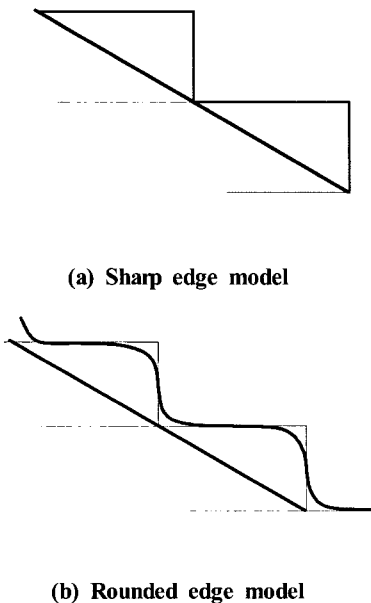


Fig. 3 Comparison of building process between sharp and rounded edge models

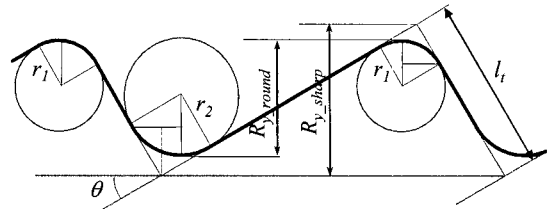


Fig. 4 Roughness of inclined surface in the rounded edge model

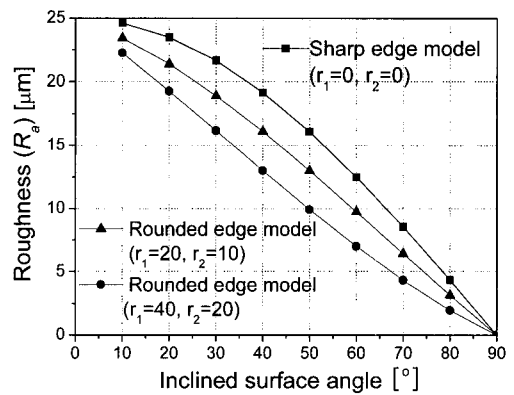


Fig. 5 Simulation results of roughness of inclined surface (layer thickness=0.1mm)

$$R_{y_{rounded}} = R_{y_{sharp}} - \{(r_1 + r_2)(\cos\theta + \sin\theta - 1)\} \quad (3)$$

$(r_1 + r_2 < l_t)$

$$R_{a_{rounded}} \approx \frac{1}{4} R_{y_{rounded}} \quad (4)$$

Fig. 5는 적층 두께를 0.1mm로 하여 시편을 제작할 때 Eq. (3)~(4)에 나타난 표면거칠기 모델을 적용하여 시편 표면의 경사각에 따른 예상되는 표면거칠기를 보여주고 있다. Fig. 5에서 보이는 바와 같이 표면의 경사가 증가할수록, 그리고 둥근 계단형 모델에서 가정한 내, 외부 모서리의 반경이 커질수록 표면거칠기는 향상됨을 확인할 수 있다.

3. 시험 방법

다양한 각도의 경사면을 가지는 시편을 여러 가지 쾌속조형 방식으로 제작한 후, 경사면의 거칠기를 측정하고 거칠기 예측 모델과 비교하였다. 이를 위해 0°부터 90°까지 10° 간격으로 다양한 경사면을 가지는 시편을 모델링하였으며, 지지대를 제거한 아랫면을 포함하여 총 11개 표면의 거칠기를 측정

Table 1 RP machines used in benchmark test

Processes	Apparatus Model	Makers	Materials	Layer thickness [mm]
SL	Viper-PRO	3D Systems	Accura60 (Epoxy resin)	0.1
	RM6000II	CMET	TSR-829 (Epoxy resin)	
	SLA5000	3D Systems	Somos11120 (Epoxy resin)	
(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		PCABS	
LOM	PLT-A3	KIRA	OTZ-3LT-P20 (Roll paper)	0.15

식(stylus type) 표면조도 측정기(Mitutoyo SV-3000)를 이용하여 측정하였다.

Table 1에는 본 연구에서 비교 시험한 패속조형 방식, 장비 모델명, 사용재료, 적층 두께 등이 나타나 있다. RP 시제품을 RT 공정에서의 마스터 모델로 사용할 경우에는 정밀도 및 표면거칠기가 매우 중요하기 때문에 일반적으로 광조형(SL) 방식의 RP 장비를 사용한다. 따라서 SL 방식에 대해서는 최신 세 종류의 장비를 사용하였고, 현재 국내외적으로 가장 많이 이용되는 3DP 방식과 FDM 방식, 그리고 SL과 3DP의 혼합 방식이라고 할 수 있는 다중분사(poly-jet) 방식, 그리고 전통적인 LOM 방식의 대표적인 장비를 비교 모델로 선정하였다. 3DP 방식과 LOM 방식에 대해서는 접착제 코팅 후처리 유무가 표면거칠기에 미치는 영향을 관찰하였다. 장비 표면 경사의 변화에 대해 각 장비로 제작한 시편의 거칠기 특성이 어떻게 변화하는지 관찰하였으며 그 결과를 해석하였다.

4. 측정 결과 및 해석

여러 가지 장비로 다양한 각도를 가지는 시편을 제작한 후에 표면거칠기 곡선을 측정하였으며, 거칠기 곡선의 특징을 서로 비교하였다. 대표적으로 Fig. 6에 SL 방식인 ViperPRO 장비로 제작한 시편에서 경사가 30°인 표면의 거칠기 곡선을 직각 계단형 모델과 비교하여 나타내었다. 여러 가지 방식 RP

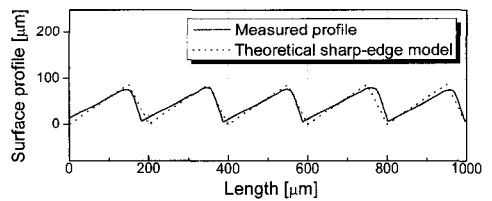


Fig. 6 Comparison theoretical square profile and measured profile of surface fabricated by ViperPRO(layer thickness=0.1mm, inclination = 30°)

Table 2 Laser spot diameter of SL-type RP machines

Apparatus Model	Laser spot diameter [mm]	
	Border scan mode	Hatch mode
ViperPRO	0.13	0.76
RM6000II	0.1	0.2 ~ 0.6
SLA5000	0.254	

공정 중 SL 공정에서는 r_1 과 r_2 의 크기가 레이저의 스폿 직경에 영향을 받을 것으로 예측된다. 즉, 레이저 스폿 직경이 작아질수록 단면 계단의 모서리 형상이 정밀하게 제작되어 직각 형상에 가깝게 조형될 것으로 추정된다. Table 2는 SL 방식 장비의 레이저 스폿 직경을 나타내고 있다. ViperPRO 및 RM6000II 장비는 단면 내부를 주사(hatch)할 때와 단면 가

장자리(border) 부분을 주사할 때 주사모드(scan mode)를 다르게 설정한다. 즉, 내부를 주사할 때는 제작시간을 단축시키기 위하여 레이저 스폿 직경을 크게 하는 대신 레이저 파워(power) 및 주사속도(scan speed)를 증가시키고, 가장자리부를 주사할 때는 표면거칠기 및 미세 형상 제작 정밀도를 향상시키기 위해 스폿 직경을 작게 설정한다.

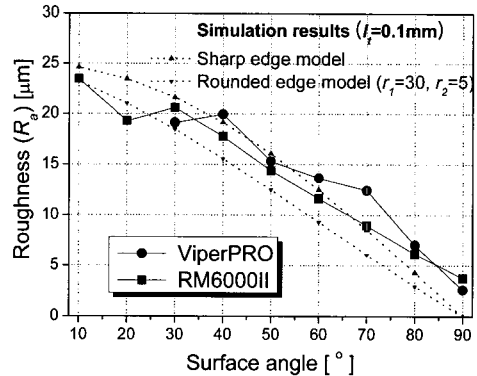
가장자리부를 주사할 때의 레이저 스폿 직경이 작은 ViperPRO와 RM6000II 장비로 제작한 시편은 직각 계단형 적층 모델과 유사하게 적층이 진행되어 r_1 과 r_2 의 값이 비교적 작은 반면, 가장자리부를 주사할 때의 레이저 스폿 직경이 상대적으로 큰 SLA5000 장비는 r_1 과 r_2 의 값이 크게 증가한 형태로 적층이 진행되었다. 그러나, 레이저 스폿 직경과 r_i 와의 정량적인 관계를 파악하기 위해서는 향후 더욱 심도 있는 연구가 필요하다.

Objet사의 Eden500V 장비는 적층 두께가 0.016mm로 현재 시판되고 있는 여러 가지 RP 장비 중 가장 얇으며, SLA5000 장비 시편과 유사하게 매우 큰 반경을 가지는 둥근 계단형으로 적층되었다. 반면, 분말가루를 3차원 프린팅하는 방식인 Z corp.사의 Z510 장비로 제작한 시편인 경우 표면의 거칠기 곡선은 적층 두께를 주기로 하지 않고 거의 불규칙적인 형태를 가지는 것으로 나타났다. FDM 및 LOM 공정 역시 적층 두께를 주기로 하여 규칙적인 거칠기 곡선이 나타났으며, FDM 방식의 경우 냉각이 완료된 아래층 표면 위로 반경이 큰 노즐을 통해 용융된 ABS 재료를 떨어뜨리는 방식으로 적층이 진행되기 때문에 적층 계단의 외부 반경이 매우 큰 형태로 적층이 진행되었다.

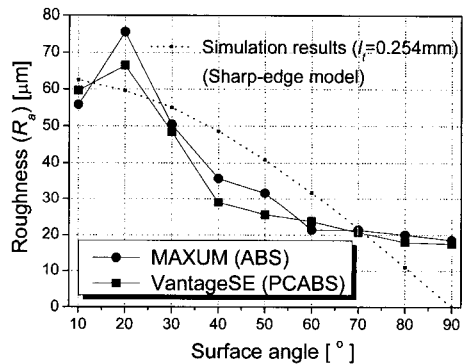
Fig. 7은 각 장비별로 표면 경사 각도의 변화에 따른 표면 거칠기의 변화를 보여주고 있다. 먼저, ViperPRO와 RM6000II와 같은 SL 방식의 장비는 매우 정밀하게 적층되기 때문에 경사 각도가 증가하면 표면거칠기가 향상되는 거칠기 예측모델 곡선과 변화 경향이 거의 일치하는 것으로 나타났다. FDM 방식의 경우도 대체적으로 경사가 증가하면 표면거칠기가 향상되는 경향을 가졌다. 그러나 특이하게 경사가 약 20°인 표면이 가장 거친 것으로 나타났고 표면의 경사가 50° ~ 60° 이상이면 각도에 따른 거칠기의 변화가 크게 감소되었다. 이러한 경향은 Ha 등⁽⁹⁾의 연구 결과에서도 발견할 수 있는 현상으로 FDM 방식에서 표면의 경사 각도의 변화에 따른 표면 거칠기의 변화를 명확하게 설명하기 위해서는 보다 근원적인 고찰이 필요하다고 판단된다.

SL 방식과 3DP 방식의 혼합방식인 Eden500V 장비는 얇은 두께로 적층하기 때문에 일반적으로 표면 거칠기가 가장 우수하다고 알려져 있다. 측정 결과 Fig. 7(c)에서 보이는

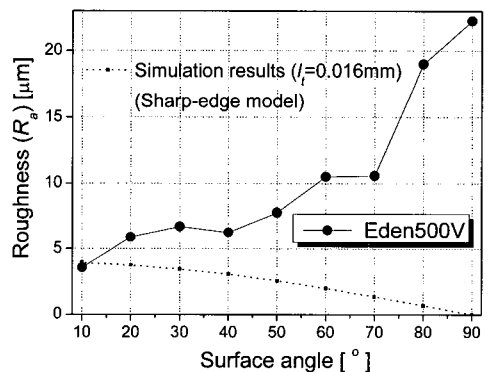
바와 같이 경사 각도가 50° 이하인 표면에서의 평균거칠기 (R_a)는 8 μm 이하로 여러 가지 방식 중 가장 표면 거칠기가 우수한 것으로 나타났다. 그러나 시편 측정결과 거칠기 예측



(a) SL type(ViperPRO, RM6000II), $l_i = 0.1\text{mm}$



(b) FDM type(Maxum, VantageSE), $l_i = 0.254\text{mm}$



(c) Poly-jet type(Eden500V), $l_i = 0.016\text{mm}$

Fig. 7 Variations of surface roughness according to the surface inclinations(l_i : layer thickness)

모델과는 달리 표면의 경사각도가 증가할수록 거칠기가 점차 증가하는 것으로 나타났다. 특히 경사가 90°인 수직면에서 평균 거칠기가 약 22.3 μm 로서 본 연구에서 비교한 여러 가지 방식 중 가장 거친 표면을 나타내었다. 표면의 경사각도가 증가할수록 오히려 거칠기가 증가하는 이유는 다중 노즐을 통해 단면에 재료를 프린팅(printing)할 때, 노즐을 포함하는 분사 헤드(writing head)와 주사 단면 간에 직접적인 접촉에 의한 마찰력 때문인 것으로 추정된다. 즉, 헤드와 윗면간의 마찰력으로 인해 헤드 이송 시 제작되고 있는 제품의 측면이 옆으로 밀려 나오게 되고 이러한 영향이 표면 경사가 증가할수록 더욱 크게 나타나기 때문인 것으로 추측된다.

분말가루를 결합시켜서 제작하는 3DP 방식과 종이를 적층시켜 제작하는 LOM 방식은 제품 적층이 완료되고 난 후, 층간의 결합력을 증대시키고 제품을 안정화시키기 위해서 액상 접착제를 도포하여 제품 표면을 코팅(infiltration coating)하는 과정이 필요하다. Fig. 8은 두 가지 방식에 대해 코팅

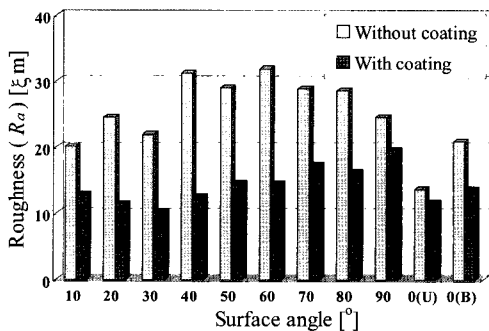
처리를 하기 전후의 표면 거칠기 변화를 보여주고 있다. 3DP 방식의 경우 분말재료를 결합하는 특성으로 인해 표면의 거칠기는 경사면 각도와는 크게 연관이 없는 것으로 나타났으며, 액상 접착제 표면처리를 수행함으로써 모든 각도에 대해서 표면 거칠기가 향상되는 것으로 나타났다. LOM 방식의 경우 일반적인 RP 공정과 마찬가지로 표면의 경사가 증가할수록 거칠기가 향상되는 경향을 보이는 것으로 나타났으며 전체적으로 표면처리를 하면 거칠기가 향상되는 경향을 보였다. 그러나 표면 경사 각도가 0°인 수평면의 경우에, 3DP 방식의 경우 거친 입자 사이의 틈을 접착제가 메워주는 작용을 하여 윗면과 아랫면 모두 거칠기가 향상되었으나 LOM 방식의 경우에는 표면처리를 하지 않았을 경우에는 부드러운 종이의 질감만으로 표면의 거칠기가 표현되는데 반해 표면 처리를 하면 불균일하게 응고된 접착제로 인해 거칠기가 오히려 증가하는 것으로 나타났다.

결론적으로 SL, FDM, LOM 공정에서는 계단형 오차가 표면 거칠기에 가장 큰 영향을 미치기 때문에 본 연구에서 제시하는 경사면의 거칠기 모델을 적용할 수 있다. 하지만 3DP 공정에서는 분말입자의 직경 및 표면처리 상태가 표면의 거칠기를 결정하고, Poly-jet 공정의 경우에는 계단형 형상이 표면의 거칠기를 결정하기 보다는 헤드와 주사 단면과의 마찰에 의한 영향이 제품 측면(표면)의 거칠기를 결정하기 때문에 경사면의 거칠기 모델이 적용될 수 없다.

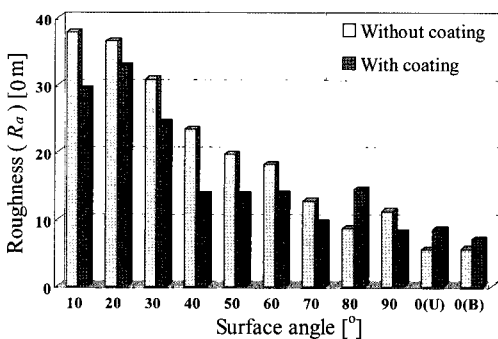
5. 결론

경사면을 가진 제품의 거칠기 예측 모델을 정립한 후, 여러 가지 방식의 RP 장비로 다양한 각도를 가진 시편을 제작하고 공정 방식 별로 표면 거칠기의 특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 계단형 오차를 가지고 있는 RP 공정의 표면 거칠기 모델은 모서리가 예리한 직각 계단형 적층 모델로 표현할 수 있지만, 보다 실제적으로는 계단의 모서리가 둥근 형태의 적층 모델로 표현해야 한다.
- (2) 레이저 스폿 직경이 작은 SL 방식의 장비(ViperPRO, RM6000II)로 제작한 시편의 표면은 직각 계단형으로 적층되는 이상적인 RP 적층 모델에 가장 가까운 형태로 정밀하게 적층되는 것으로 나타났다.
- (3) SL, FDM 및 LOM 방식은 표면의 경사각도가 증가할수록 표면거칠기가 향상되었으나, 3DP 방식은 표면 경사각도에 큰 연관성이 없이 불규칙한 표면을 나타내었다.



(a) 3DP type(Z510), $l_i = 0.1\text{mm}$



(b) LOM type(PLT-A3), $l_i = 0.15\text{mm}$

Fig. 8 Comparisons of surface roughness between with and without coating

- (4) 얇은 층 두께로 적층하는 *Poly-jet* 방식은 경사각도가 작은 표면에서는 표면 거칠기가 매우 우수하였으나, 표면의 각도가 증가할수록 헤드와 주사단면과의 마찰작용으로 인하여 표면이 오히려 거칠어졌다.
- (5) *3DP* 방식과 *LOM* 방식에서 액상접착제로 표면을 코팅 후처리를 하면 표면 거칠기가 향상되었으나, *LOM* 방식에서 경사가 0°인 수평면(위아래 면)에서는 코팅 후처리 후 거칠기가 오히려 증가하였다.

참 고 문 헌

- (1) Im, Y. G., Chung, S. I., and Jeong, H. D., 1999, "Development of Investment Casting Technique using R/P Master Model," *Journal of KSPE*, Vol. 16, No. 6, pp. 52~57.
- (2) Kim, H. C., Lee, S. and Lee, S. H., 2006, "Rapid Tooling Technology for Producing Functional Prototypes using Ceramic Shell Investment Casting and Patterns Produced Directly from Thermo-Jet 3D Printer," *Journal of KSPE*, Vol. 23, No. 8, pp. 203~210.
- (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) Shellabear, M., 1999, "Benchmark Study of Accuracy and Surface Quality in RP Models," *RAPTEC, Task 4.2 Report 2*.
- (6) Shellabear, M., 1998, "Model Manufacturing Processes - State of the Art in Rapid Prototyping," *RAPTEC, Task 4.2 Report 1*.
- (7) Kim, G. D. and Kim, J. Y., 2006, "Benchmark Study on Surface Roughness and Mechanical Properties of Rapid Prototypes," *Transactions of KSMTE*, Vol. 15, No. 4, pp. 56~62.
- (8) Ahn, D. K., Kim, H. C. and Lee, S. H., 2007, "Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 593~606.
- (9) Ha, M. K. and Chung, J. S., 2002, "The Influence of Surface Roughness on Slice Interval Adjustment at FDM," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 11, No. 4, pp. 68~74.
- (10) Campbell, R. I., Martorelli, M. and Lee, H. S., 2002, "Surface roughness visualization for rapid prototyping models," *Computer-Aided Design*, Vol. 34, pp. 717~725.