

## 쾌속조형용 재료의 특성 - FDM

김승화\*, 안성훈\*\*

### Material Characterization of RP Process - Fused Deposition Modeling

Kim, S. H.\* and Ahn, S. H.\*\*

#### ABSTRACT

Rapid Prototyping (RP) technology has been advanced to fabricate initial prototypes from various materials. Stratasys' Fused Deposition Modeling (FDM) is one of the typical RP processes that provide functional prototypes of ABS plastic. In order to predict the behavior of final ABS parts, it is critical to understand the material properties of the raw FDM process material, and the effect that FDM build parameters have on the FDM part. In this paper, we seek to characterize the properties of ABS parts fabricated by the FDM 1650. Using the Design of Experiment (DOE) approach, the process parameters of FDM, such as raster orientation, air gap, bead width, color, and model temperature were examined. Tensile strengths of crisscross specimens,  $[45^\circ/45^\circ]$ , cross specimens,  $[0^\circ/90^\circ]$ , and directionally fabricated tensile specimens ( $[0^\circ]$  and  $[90^\circ]$ ) were measured and compared with the injection molded FDM-ABS P400 material. For the FDM parts made with a  $-0.003''$  air gap, the typical tensile strength ranged between 50 percent and 83 percent of the strength of injection molded ABS P400. From the experiments, a couple of build rules for designing FDM parts were obtained.

**Key words** : Rapid prototyping, Strength, Anisotropy

#### 1. 서 론

Stratasys사의 Fused Deposition Modeling(FDM)은 ABS 플라스틱을 사용하여 기계/항공기 부품의 시제품을 생산하는 전형적인 쾌속조형(Rapid Prototyping, RP) 공정중의 하나이다. 쾌속조형의 연구방향이 시제품의 생산 뿐 아니라 쾌속금형제작에도 응용되면서 각 공정마다 중요한 공정조건들이 연구되어지고 또 강도에 대한 연구도 진행되고 있다<sup>[1-3]</sup>.

FDM의 제조 방법에 대해서 간단히 설명하면 다음과 같다. 첫번째 단계는 3차원 CAD에 의한 슬라이드 모델의 생성이다. 그 모델은 STL(stereolithography)파일 형태로 FDM의 Quickslice 소프트웨어에 입력된다. 이 STL 파일은 Quickslice에서 슬라이스(slice)되어 다수의 2차원 윤곽들로 나타내어진다(SSL 파일). 다른 쾌

속조형 기기의 일반적인 원리와 같이, 이 2차원의 윤곽들이 FDM에서 적층되어 3차원 제품을 구성한다. 그리고는 FDM 기계의 하드웨어를 제어할 플래닝(planning)이 뒤따른다. 플래닝에서 생성되는 SML 파일이 FDM의 하드웨어를 구동하는 역할을 한다. FDM공정은 Fig. 1에 보이는 바와 같이 ABS 필라멘트가 발열관(heater)

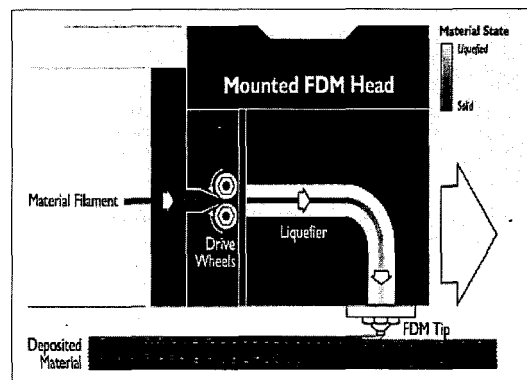


Fig. 1. Fused Deposition Modeling process<sup>[4]</sup>.

\*경상대학교  
\*\*중신회원, 경상대학교  
- 논문투고일: 2001. 7. 6  
- 심사완료일: 2001. 11. 23

를 통과하여 반 용융상태로 공급되어 노즐을 통과하고 적층된다. 이 반 용융의 ABS수지는 이미 쌓인 ABS층과 접합된다.

FDM이 다른 RP공정과 구별되는 점 중의 하나는 엔지니어링 플라스틱인 ABS를 사용함으로써, 형상만을 조형하는 것이 아니라 실제 ABS로 생산되는 기계적 부품의 쾌속생산이 가능하다는 것이다. 그러므로 ABS로 제조된 제품의 성질을 예측하고 이용하기 위하여, 가공하지 않은 FDM 재료의 물성, 그리고 FDM공정에 관계된 공정 조건들이 FDM제품에 주는 영향들을 이해할 필요가 있다. 본 논문에서는 FDM 1650에 의해서 만들어진 ABS 부품의 재료적인 특성, 특별히 방향성과 강도를 측정하려고 한다.

## 2. 실험

### 2.1 공정조건 평가

FDM재료의 특징을 측정하는 실험을 시작하기에 앞서 다음의 “공정조건”(process parameters)들이 선택되었다.

- 공기 갭(air gap) : FDM 재료의 비드 사이의 공간으로 지정치인 0은 비드가 단지 서로 맞닿는 것을 의미한다. 공기 갭이 음수(negative)로 지정되면, 두개의 비드가 같은 공간을 부분적으로 차지하는 것을 의미한다.
- 비드 폭(bead width) : 이것은 FDM 노즐이 적층하는 ABS섬유의 폭이고 본 실험에 사용된 FDM 1650에서 T12 노즐을 사용하면 0.30 mm(0.012 inch)에서 1 mm(0.0396 inch)까지 변화할 수 있다.
- 모델 온도 : 재료를 적층하는 발열판의 온도로 재료가 적층되어 기존의 재료와 합하여 녹는 정도를 조절하다.
- 색상 : FDM P400 ABS 재료는 여러 가지 색을 제공한다. 노랑색, 붉은색, 백색, 푸른색, 검정색, 갈색 등.
- 래스터 방향 : 비드의 방향. 본 실험에서는 하중을 가하는 방향으로부터의 각도로 정의된다.

참고로 본 실험에서는 주변온도(envelope temperature), 슬라이스 높이, 노즐 직경은 공정조건에서 제외했음을 알려준다.

### 2.2 인장강도 실험

각 공정조건을 평가하기 위해서 FDM 1650로 일련의 인장강도 시편들이 만들어졌다. Fig. 2에서 보이는

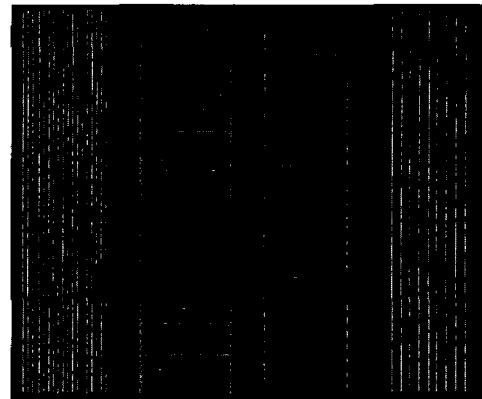


Fig. 2. Quickslice SML file showing samples with bead-width, air gap, and raster orientation variation.

바와 같이 Quickslice에서 SML 파일을 조작해서 각각 다른 비드 폭, 공기 갭을 가진 시편을 만들 수 있었다. 시편은 ASTM D3039-76의 기준에 맞추어 치수를 정했다(229 mm×25.4 mm×3.3 mm). 당초에는 ASTM D638-98의 도그본(dog bone) 시편이 사용되었지만 라운드부분의 응력집중으로 인해 복합재료의 물성치 측정에 사용되는 ASTM D3039-76으로 시편의 모양을 바꾸었다. 25KN 로드셀을 장착한 INSTRON 8872 인장강도기와 Series 프로그램을 사용하여 위치와 하중 데이터가 수집되었고 스트레인값의 수집은 SAS97 프로그램이 사용되었다. 하중은 2 mm/min의 속도로 시편이 파괴될 때까지 가해졌다.

### 2.3 실험 설계(Design of Experiment)

각 공정조건에 영향을 측정하기 위해서 실험이 설계되었다. Fig. 3에서 보이듯이 10가지의 공정조건을 생각할 수 있으나 이 경우 요구되는 실험의 수는 512가

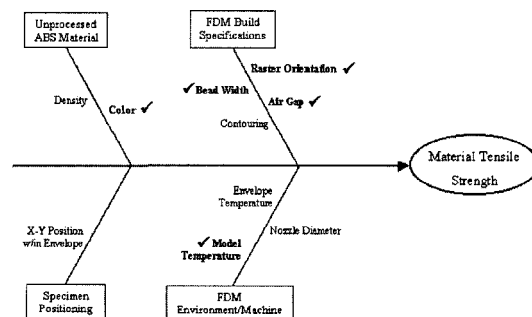


Fig. 3. Fishbone diagram of potential factors influencing tensile strength.

Table 1. Variable symbols and level settings

Variable	Symbol	Levels	
		Low(-)	High(+)
Air Gap (in.)	A	0.0000	-0.0020
Bead Width (in.)	B	0.02	0.0396
Model Temperature (C)	C	270	280
ABS Color	D	Blue	White
Orientation of Rasters	E	Transverse	Axial

지가 된다( $2^{16}$ ). 공정조건의 수를 적당한 5가지로 단순화시키기 위해서, 중복된다고 생각되는 공정조건들, 즉 주변 온도와 모델 온도, 비드 폭과 노즐 직경을 통합했고 시편제작시 조절이 어려운 재료의 밀도, x-y 위치는 생략되었다. 결과적으로 본 실험에서는 16가지( $2^4$ )의 실험이 수행되었다. 각각 조건의 조정범위는 Table 1과 같다. 각각의 공정조건은 서로 독립적으로 작용하고, Table 1과 같이 각 공정의 변화구간을 최저값(low)과 최고값(high)으로 지정하였다. 여기서 각 공정조건이 인장강도에 미치는 영향이 최고점과 최저점을 연결한 직선에 비례한다고 가정한다. 최저값과 최고값은 Stratasys의 사용설명서<sup>(4)</sup>와 일반적으로 사용되어지는 범위를 기준으로 정해졌다. 공기 갭은 음수의 값을 가질수록 강도를 증가시킨다고 알려져 있으나 -0.003 (inch) 이하인 경우에 표면의 거칠기와 치수에 문제가 발생할 수 있어 범위가 0부터 -0.002까지로 제한되었다. 비드 폭은 실제로 FDM1650에서 사용되는 범위로 설정되었다. FDM용 ABS는 약 180°C에서 글래스상태( $T_g = 180^\circ\text{C}$ )로 되고 모델온도의 최저값인 270°C에서 반 용융상태로 된다. 모델온도의 최대값인 280°C는 가공조건 중 실질적인 최고 한계값을 취한 것이다. 색상은 여러 색 중에서 두 가지를 취했고, 래스터 방향은 직관적으로 각각 최고, 최저가 되는 90°와 0°를 취했다. 자세한 실험설계의 내용은 [5-7]을 참조했다.

#### 4. 결 과

어떤 공정조건이 FDM으로 성형된 가공물의 재질에 영향을 미치는가의 결과가 Fig. 4에 보여진다. 실험설계에서 선택된 다섯 가지의 공정조건 중 공기 갭과 래스터 방향만이 인장강도에 눈에 띄는 영향을 주고 비드 폭, 모델온도, 재료의 색상은 별 영향이 없는 것을 알 수 있다.

여기서 래스터 방향은 인장방향과 평행(axial, 0°)인 것과 직각(transverse, 90°)의 두 가지만 시험되었는데, 더 상세한 결론을 얻기 위하여 부가적인 실험을 수행

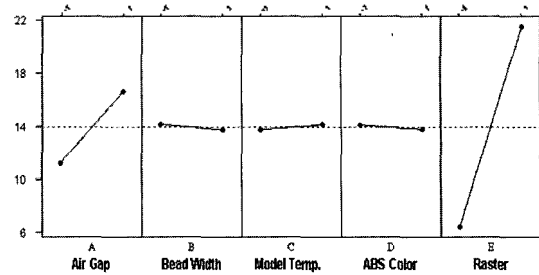


Fig. 4. Plot of tensile strength (Y, MPa) versus main effects.

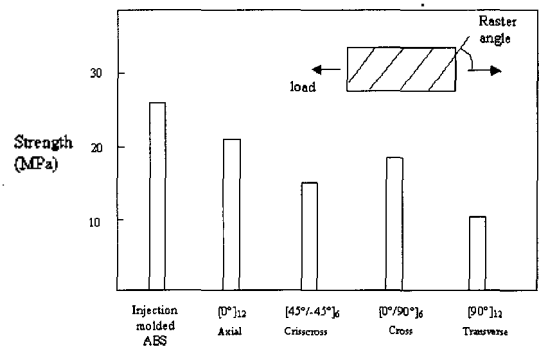


Fig. 5. Strength of specimens with various raster (-0.003 air gap) compared with injection molded ABS P400.

하였다. 부가실험의 첫째로, FDM으로 제조된 제품의 강도를 평가하기 위해서 기준이 되는 인장시편을 사출성형으로 만들었다. 먼저 알루미늄으로 ASTM 3039-76의 표준시편을 성형할 수 있는 금형을 가공했다. 아직 사용되지 않은 FDM의 P400 필라멘트를 3-5 mm 길이로 잘라서 사출성형기의 호퍼(hopper)에 넣고 270°C에서 알루미늄 금형으로 사출하여 인장시편을 만들었다. 이 시편의 인장강도는 Fig. 5에서 보이듯이 27 MPa의 값을 가진다.

두 번째로, [45°/-45°]<sub>6</sub>와 [0°/90°]<sub>6</sub>의 시편이 추가로 실험되었다. 여기서 [45°/-45°]<sub>6</sub>은 인장방향에 대하여 45°와 -45°의 방향을 여섯 번 반복하여 전체 12장으로 구성된 시편을 나타낸다. 작업자의 특별한 지시가 없는 경우 Quickslice소프트웨어는 [45°/-45°]를 자동적으로 생성시키므로 이는 FDM제품의 대표적인 래스터 방향이다. [0°/90°]<sub>6</sub> 시편은 [45°/-45°]<sub>6</sub>를 45도 변환하여 인장력을 작용하는 것과 같다. 래스터방향은 각 시편의 인장강도를 50%까지 변화시키는 중요한 공정요인이 Fig. 5에서 보여진다. 그리고 그 인장강도들은 원래 ABS(사출성형시편)의 약 50%-83%의 인장강도를 가짐을 볼 수 있다.

인장강도 실험의 결과에 대해서는 Fig. 6에서 보충 설명되어진다. 파괴된 파단면이 45도를 따라 진행된

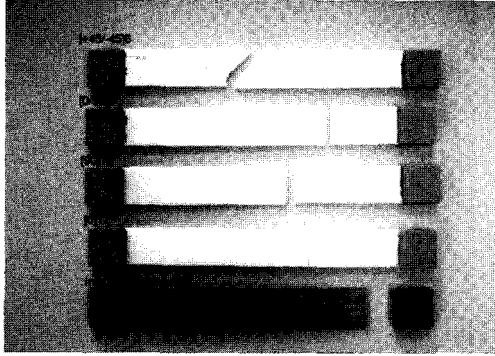


Fig. 6. Failure modes of the specimens with various raster orientations (-0.003 air gap) compared with injection molded ABS P400.



Fig. 7. Scanning Electron Microscope (SEM) picture of the fracture surface of a 45 degree specimen.

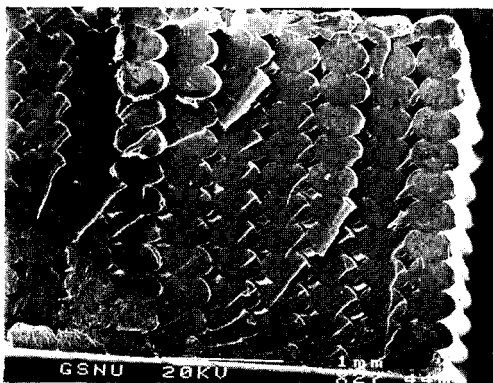


Fig. 8. Scanning Electron Microscope (SEM) picture of the fracture surface of a 0 degree specimen.

[45°/45°]<sub>6</sub>시편을 제외하고는 모두 인장방향에 직각으로 파괴되었다. 그 중에서, [0°]<sub>12</sub>시편은 다수의 부분적인 파단면을 가진다.

Fig. 7은 주사전자현미경(SEM) 사진으로 [45°/45°]<sub>6</sub>시편의 파단면을 확대한 것이다. ABS의 각 섬유가 계단식으로 파단되어 45°의 파단면을 이룬다. 그와 비교해서 Fig. 8에 보이는 [0°]<sub>12</sub>시편의 파단면은 모두 인장방향에 직각으로 섬유들이 끊어짐을 알 수 있다.

이 사진들에서 래스터 방향은 FDM으로 제조된 제품이 방향성 또는 이방성(anisotropy)을 가지는 원인이 되며 결국에는 이 이방성에 의해 Fig. 5와 같이 인장강도가 변화됨을 알 수 있다. 인장강도 외에 전단강도에도 방향성이 있다. Fig. 7과 8에서 보이는 적층된 섬유 하나하나를 보면 원형이 아니라 타원형의 단면을 가진다. 그로 인하여 주변의 섬유들과 접합될 때 좌우의 섬유 보다는 상하의 섬유들과 더 많은 접촉면적을 가지고, 결과적으로 전단강도에 영향을 준다. 실제로 간단한 시편실험에서 적층사이(상하)의 전단강도는 10.0 MPa인 반면 좌우 방향은 7.35 MPa로 측정되었다<sup>[8]</sup>.

#### 4. 제 안

본 실험으로부터 FDM의 플래닝을 위한 다음과 같은 제안을 할 수 있다.

제안 1: 인장력이 섬유를 따라 작용하도록 적층할 것. Fig. 9에서와 같이 나사로 조립하기 위한 보스(boss)를 구성하는데 첫번째 단면과 같은 동심원으로 섬유가 적층될 때 최대응력(hoop stress)을 섬유방향(axial)으로 받으므로 응력이 섬유를 가로질러 작용하는 두 번째 단면 보다 강하게 된다. 참고로 플래닝에서 래스터 방향을 지정하지 않을 경우 Quickslice에서 자동적으로 두 번째 단면으로 결정된다.

비슷한 내용으로 Fig. 10에서는 맞물림연결(snap fit)의 경우로 조립시에 끝점의 경사면에 힘이 작용하게 된다. 이 경우에도 플래닝할 때 섬유를 길이방향으로 지정하여야 반복적인 맞물림에서 보다 피로(fatigue)에 잘 견디는 구조를 얻을 수 있다.

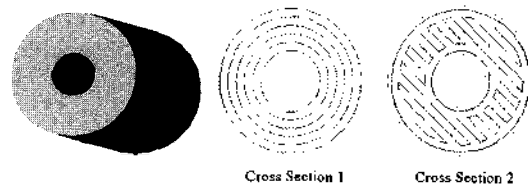


Fig. 9. Two different road orientations for boss design.

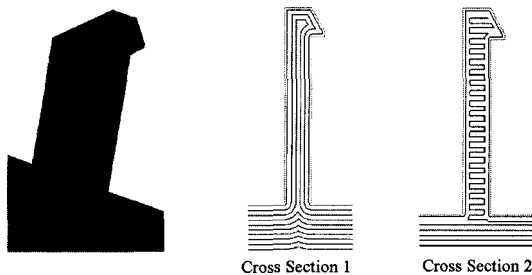


Fig. 10. Two different road orientations for cantilever snap-fit design.

제안 2: 음수(negative)의 공기 갭은 강도를 증가시킨다. 만일 강도가 중요한 요소라면 음의 공기 갭을 사용하면 전반적인 강도를 증가시킬 수 있지만,  $-0.003$  인치 이상의 공기 갭은 적층시에 다량의 재료를 적층하여 표면의 거칠기를 떨어뜨리고 제품의 정밀도를 저하시킨다.

제안 3: 전단응력은 좌우의 비드 사이보다 상하의 층 사이가 더 강하다. FDM 제품이 전단력을 견뎌야 한다면 적층방향(상하방향)으로 힘을 받도록 생산해야 한다.

## 5. 결론 및 향후계획

FDM재료의 특징을 측정하기 위하여 비드 폭, 공기 갭, 모델온도, 레스터 방향, 색상 등의 공정조건과 인장강도의 관계가 측정되었다. 레스터방향은 각 시편의 인장강도를 50%까지 변화시키는 중요한 공정요소이고 그 인장강도들은 원래 ABS의 약 50%~83%의 인장강도를 가짐을 볼 수 있다. 레스터 방향은 또한 FDM으로 제조된 제품이 이방성(anisotropy)을 가지는 원인이 되며 결국에는 이 이방성에 의해 인장강도가 변화됨을 알 수 있다.

본 실험으로부터 FDM의 생산에 고려해야 하는 다음과 같은 제안이 유추되었다:

1. 인장력이 섬유를 따라 작용하도록 적층할 것.
2. 음수(negative)의 공기 갭은 강도를 증가시킨다.
3. 전단응력은 좌우의 비드 사이보다 상하의 층 사이

가 더 강하다.

본 연구에서 얻어진 인장강도의 범위를 레스터 방향에 따라 보다 정확하게 예측하기 위하여 Classical Lamination Theory와 failure criterion을 적용한 연구가 진행중이다. 또한 본 실험에서 인장강도에 영향을 주지 않은 비드 폭의 범위를 넓혀서 추가적인 실험이 진행중이다.

## 감사의 글

본 연구는 BK 21에서 지원 받았으므로 제위께 감사를 드립니다. 또한 실험을 보조한 이홍경, 이재일에게 사의를 표하는 바이다.

## 참고문헌

1. 최두선, 신보성, 김주한, "FDM 패속 조형기를 통해 만들어진 ABS 파트를 이용한 직접 정밀 주조에 대한 연구," 한국정밀공학회지, 제16권, 제10호, pp. 59-67, 1999.
2. 양동열, 손현기, "패속제품개발(RPD)을 위한 패속조형기술의 최근동향," 한국정밀공학회지, 제17권, 제10호, pp. 5-10, 2000.
3. 송용익, 박세형, 조정권, 황경현, 최두선, 신보성, 지혜성, "3D Welding and Milling for Rapid Tooling," 한국정밀공학회 춘계학술대회, pp. 940-944, 1998.
4. *FDM System Documentation*, Stratasys, Inc. Minneapolis, Minnesota, USA, 1998.
5. Wu, J. and Hamada, M., *Experiments: Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization*, John Wiley & Sons, Inc. New York, USA, 2000.
6. Box, G., Hunter, W. and Hunter, J., *Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*, John Wiley & Sons, Inc., 1978.
7. 이우선, 최신실험설계, 영풍문고, 1998.
8. Montero, M., Roundy, S., Odell, D., Ahn, S. H. and Wright, P., "Material Characterization of Fused Deposition Modeling (FDM) ABS by Design of Experiments," *Proceedings of Rapid Prototyping & Manufacturing Conference*, May 15-17, Cincinnati, Ohio, USA, 2001.



**김 승 화**

2001년 경상대학교 기계항공공학부 학사  
2001년~현재 경상대학교 기계항공공학부 석사과정  
2002년~현재 주식회사 상농기계 연구원  
관심분야: CAD/CAM, Rapid Prototyping



**안 성 훈**

1992년 University of Michigan, Ann Arbor 학사  
1994년 Stanford University 석사  
1997년 Stanford University 박사  
1997년~2000년 University of California, Berkeley 연구원/강사  
2000년~현재 경상대학교 기계항공공학부 조교수  
관심분야: 인터넷기반 디자인 및 생산, Rapid Prototyping, 복합재료, 마이크로머시닝, 사출성형