

# Fused Deposition Modeling의 강도 예측 모델과 인터넷 서비스

백창일\*·추원식\*·이선영\*\*·안성훈\*

## Strength Prediction Model and The Internet Service of Fused Deposition Modeling

Changil Baek, Wonshik Chu, C. Sunyoung Lee and Sung-Hoon Ahn

**Key Words:** Rapid Prototyping, Strength, Anisotropy, Fused Deposition Modeling, Internet service

### Abstract

Rapid Prototyping (RP) technologies provide the ability to fabricate initial prototypes from various model materials. Stratasys' Fused Deposition Modeling (FDM) is a typical RP process that can fabricate prototypes out of plastic materials, and the parts made from FDM were often used as load-carrying elements. Because FDM deposits materials in about  $300\ \mu\text{m}$  thin filament with designated orientation, parts made from FDM show anisotropic material properties. This paper proposes an analytic model to predict the tensile strength of FDM parts. Applying the Classical Lamination Theory, which was developed for laminated composite materials, a computer code was implemented. Tsai-Wu failure criterion was added to the code to predict the failure of the FDM parts. The tensile strengths predicted by the analytic model were compared with experimental data. The data and prediction agreed reasonably well to prove the validity of the model. In addition, a web-based advisory service was developed to provide to strength prediction and design rules for FDM parts.

### 1. 서론

컴퓨터를 사용한 설계(CAD)와 쾌속조형의 발전으로 인하여 설계자는 개념에서 초기모형을 제작하는 시간을 단축할 수 있게 되었다. 최근 이슈가 되고 있는 쾌속조형분야에서 중요한 문제중의 하나는 기계적 하중을 지지할 수 있는 강도나 강성을 제공하는 '기능성 부품'을 제조하는 것이다. FDM 공정은 엔지니어링 플라스틱을 이용하여 시작품을 생산한다[1].

FDM 공정은 ABS 또는 폴리카보네이트를 약  $300\ \mu\text{m}$  두께로 반 용융된 필라멘트 형태로 Quickslice 소프트웨어에서 정해진 방향으로 적층

한다. 일정한 방향을 가지고 적층하므로, Fig. 1에서 보이는 바와 같이 파단면은 필라멘트의 방향에 영향을 받아 이방성의 특성을 가지게 된다. 여러 연구자들이 이러한 이방성에 대하여 연구하였고[2-5], 래스터 각도와 공기 갭이 FDM 부품의 강도에 관련하여 가장 중요한 변수라는 것이 밝혀졌다.



Fig. 1 Scanning Electron Microscope (SEM) picture of the fracture surface of a typical FDM specimen.

기능적인 FDM 부품을 설계하기 위해서는 래스터 각도의 영향을 받는 강도에 대한 이해가 필요

\* 경상대학교 기계항공공학부

\*\* 경상대학교 공학연구원

하다. 본 연구에서 공기 갭의 크기는 -0.003 inch로 고정하였으므로 래스터 각도의 영향에 의한 부품의 강도예측을 그 목표로 한다. 또한 ABS 부품의 래스터 각도와 공기 갭에 대한 강도를 예측할 수 있는 인티넷기반 제안서비스도 구축하였다.

## 2. 실험

ASTM D3039[6]에 따라 인장 실험을 행하였고, 시편의 크기는 229mm×25.4mm×3.3mm이었다. 각각의 FDM 시편은 Fig. 2에 나타난 것처럼 다양한 래스터 각도에 따라 12개의 층으로 이루어졌다.  $[0]_{12}$ 시편은 하중방향으로 래스터가 배열되었으며,  $[45/-45]_6$ 시편은  $45^\circ$  각도와  $-45^\circ$ 를 반복하며 여섯 번씩 적층하였다. 인장시험은 25kN의 하중을 가진 Instron 8872 인장강도기를 사용하였으며, 2mm/min 비율로 하중을 가하면서 시편을 시험하였다. 하중을 받는 동안 각 시편의 하중과 변위를 측정하였다.



Fig. 2 Top view of tensile specimens with various raster angles.

## 3. 파괴모델

FDM 재료의 이방성을 적용하기 위하여 복합재 이론을 도입하였다. 작용하중에 대한 내부의 응력을 계산하기 위하여 Classical Lamination Theory를 사용하였다. 그리고 파괴하중을 예측하기 위해 Tasi-Wu failure criterion을 사용했다[7].

### 3.1 Classical Lamination Theory

Fig. 3에서 하나의 FDM층에 주축(off-axis)과 적층판축(on-axis)을 나타내고 있다. 주축방향 응력은  $x, y, s$ 로 나타내었고, 적층판축 응력은 1, 2, 6으로 나타내었다. 여기에서  $x$ 는 하중이 가해진

방향이고, 1은 래스터 방향이다.

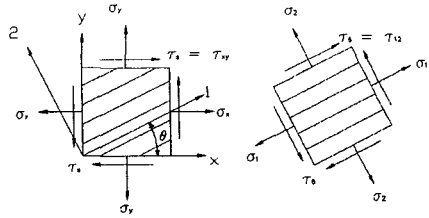


Fig. 3 Definition of off-axis and on-axis coordinates.

Classical Lamination Theory에서 얇은 판재는 평면 응력(plane stress)로 가정되고, 두께를 통한 응력은 무시되므로, 판재의 변형은 아래의 식으로 표현될 수 있다.

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{xy}^0 + Z\chi_{xy} \quad (1)$$

$\epsilon^0$ 는 단면 중앙에서의 변위이고,  $Z$ 는 두께방향의 관심지점이다. 그리고  $\chi$ 는 곡률이다. 식(1)에서 아래첨자  $xy$ 는  $x, y, s$ 를 나타낸다. 판재내의 응력은 변위에 주축 강성행렬  $[Q_{xy}]$ 을 곱함으로써 계산된다.

$$\sigma_{xy} = [Q_{xy}]\epsilon_{xy} \quad (2)$$

합력  $N_{xy}$ (단위폭당 힘)와  $M_{xy}$ (단위폭당 모멘트)를 생성하는 응력은 식(3),(4)와 같이 두께방향으로 적분된다.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix} dz \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_s \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix} z dz \quad (4)$$

위의 두 공식은 다음과 같이 조합된다.

$$\begin{bmatrix} N_{xy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xy} & B_{xy} \\ B_{xy} & D_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xy}^0 \\ \chi_{xy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

식(5)는 아래와 같이 변환된다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xy}^0 \\ \chi_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xy} & b_{xy} \\ b_{xy} & d_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{xy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)은 변위와 곡률을 계산하기 위하여 축방향 힘과 굽힘모멘트를 취하였지만, 본 모델에서는 축방향 힘만을 고려하여 시편에 작용된 인장력으로 사용한다. 변위가 얻어지면, 식(2)에서 각 층에서의 주축방향 응력을 구할 수 있다. 그리고, 응력변환식[7]을 사용하여 주축방향 응력으로부터 적층판방향 응력을 계산한다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 3.3 Tsai-Wu Failure Criterion

식(7)의 적층판축방향 응력으로부터, Tsai-Wu 이론에 의해 각 층에서의 파괴를 예상할 수 있다.

$$f_1 \sigma_1 + f_2 \sigma_2 + f_{11} \sigma_1^2 + f_{22} \sigma_2^2 + f_{66} \tau_6^2 + 2f_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1 \quad (8)$$

$$f_1 = \frac{1}{F_{1t}} - \frac{1}{F_{1c}} \quad (9)$$

$$f_{11} = \frac{1}{F_{1t} F_{1c}} \quad (10)$$

$$f_2 = \frac{1}{F_{2t}} - \frac{1}{F_{2c}} \quad (11)$$

$$f_{22} = \frac{1}{F_{2t} F_{2c}} \quad (12)$$

$$f_{66} = \frac{1}{F_6^2} \quad (13)$$

$$f_{12} \cong -\frac{1}{2} (f_{11} f_{22})^{1/2} \quad (14)$$

$F_{1t}$ ,  $F_{2t}$ ,  $F_{1c}$ ,  $F_{2c}$ ,  $F_{66}$ 은 각각 길이방향인장강도, 가로방향인장강도, 길이방향압축강도, 가로방향압축강도 그리고 전단강도이다. 식(8)은 안전계수를 결정하기 위하여 각 층을 검사하는 식이다. 다층의 FDM의 파괴는 각 층들 중 가장 안전계수가 낮은 층에서 발생한다.

## 4. 결과

Table 1 Material constant of FDM ABS

Property	Value
Longitudinal tensile strength	22.1 MPa
Transverse tensile strength	14.4 MPa
Shear strength (in-plane)	10.0 MPa
Axial modulus	25.1 GPa
Transverse modulus	9.49 GPa
Shear modulus	1.41 GPa
Poisson's ratio	0.367

실험으로부터 구해진 Table 1의 자료를 사용하여 예상파괴하중과 실험결과를 비교하였다. Fig. 4는 예상파괴하중과 실험결과가 상당히 근접함을 보이고 있다. 이들 강도의 참고수치는 사출성형된 FDM 재료로부터 측정되었다[8].

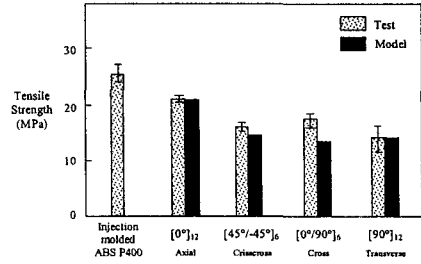
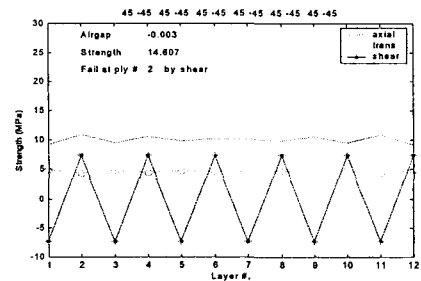
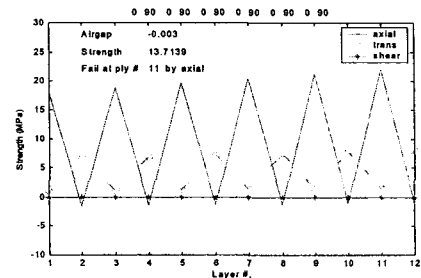


Fig. 4 Tensile strength of specimens with various raster compared with injection molded ABS P400(-0.003 air gap).

본 계산코드는 각 층의 응력값을 비교해서 파괴유형을 예측할 수 있었다. Fig. 5는 다양한 래스터 각도에 대한 각 층들의 계산된 응력과 파괴유형을 보여준다.



(a) Specimen with [45/-45]<sub>6</sub> laminate



(b) Specimen with [0/90]<sub>6</sub> laminate

Fig. 5 Output of the model which predicts tensile failure loads and modes.

## 5. FDM Advisory Service (FDMAS)

쾌속조형의 특성상 빠른 시간에 설계로부터 생산이 이루어지므로 강도계산이나 디자인 규칙이 필요하다면 이러한 기능을 하는 소프트웨어의 접근성(accessibility)이 중요하게 된다. 본 연구에서 얻어진 강도예측코드를 사용하여 웹 상에서 래스터 각도와 적층수를 입력하여 손쉽게 파괴하중과 파괴유형을 예측할 수 있도록 하였다(Fig. 6,7).

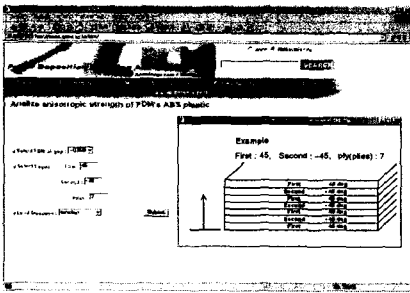


Fig. 6 The calculation module of FDMAS to predict failure load and mode.

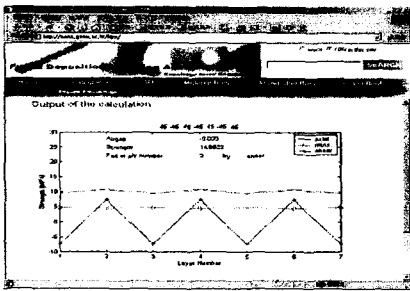


Fig. 7 The result from above Calculation.

## 6. 결론

FDM ABS재료의 파괴유형과 강도를 예측하기 위하여 이방성 모델을 제안하였다. 이방성 재료에 대해 Classical Lamination Theory 와 Tsai-Wu failure criterion 을 적용하였다. 본 모델은 래스터 각도에 따라 파괴하중과 파괴유형을 예측할 수 있었고 실험결과와 유사한 값을 보여주었다. 본 연구에서는 공기 갭을  $-0.003$  inch로 고정하였으나, 공기 갭의 범위를 변경한다면 새로운 물성치를 입력변수로 사용해야 하므로 추가의 실험이 요구된다. FDM의 강도설계를 위해 웹

환경의 FDMAS를 개발하였고, 일반에게 공개하여 <http://nano.gsnu.ac.kr/fdm> 에서 사용할 수 있게 하였다. 본 웹사이트는 FDM 관련 지식기반이 축적됨에 따라 내용을 보완해 나갈 계획이다.

## 후기

본 연구는 Brain Korea 21과 한국학술진흥재단(Korea Research Foundation, KRF-2000-005-E00005)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참고 문헌

- 1) *FDM System Documentation*, Stratasys, Inc., 1998.
- 2) D. C. Thompson and R. H. Crawford, "Computational Quality Measure for Evaluation of Part Orientation in Freeform Fabrication," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 16, No. 4, 1997, pp. 273-289.
- 3) S. H. Masood, W. Rattanawong, and P. Iovenitti, "Part Build Orientation Based on Volumetric Error in Fused Deposition Modeling", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, 2000, pp. 162-168.
- 4) M. Montero, D. Odell, S. Roundy, S. H. Ahn, and P. K. Wright, "Material Characterization of Fused Deposition Modeling (FDM) Process", *Proceeding of Rapid Prototyping and Manufacturing Conference, Society of Manufacturing Engineers*, May 15-17, Cincinnati, OH, 2001.
- 5) S. H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, "Anisotropic Material Properties of Fused Deposition Modeling (FDM) ABS," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 8, No. 4, 2002, pp. 248-257.
- 6) ASTM D3039-76, Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM, 1976.
- 7) S. W. Tsai and H. T. Hahn, *Introduction to Composite Materials*, Technomic Publishing, 1980.
- 8) 안성훈, 김승화, "쾌속조형용 재료의 특성 - FDM", *Society of CAD/CAM engineers*, Vol. 7, No. 2, 2002, pp. 96-101.