

論文

폐속조형재료의 강도예측모델 - Fused Deposition Modeling (FDM)

안성훈^{*,}, 이선영^{**}, 백창일^{*}, 추원식^{*}

Strength Prediction Model of Rapid Prototyping Parts - Fused Deposition Modeling (FDM)

Sung-Hoon Ahn^{*,}, C. Sunyoung Lee^{**}, Changil Baek^{*} and Wonshik Chu^{*}

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. In this paper an analytic model was proposed 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(FDMAS) was developed to provide strength prediction and design rules for FDM parts.

초 록

폐속조형(Rapid Prototyping)기술은 다양한 형태의 재료를 사용하여 초기모형을 제작할 수 있다. Stratasys사의 FDM은 플라스틱 재료로 조형물을 제작하는 대표적인 폐속조형공정이다. 또한 FDM으로 제작된 부품들은 하중을 받는 구조용 재료로도 사용된다. FDM은 약 $300\mu\text{m}$ 두께의 가는 필라멘트의 형태로 일정한 방향으로 재료를 적층하므로, FDM으로 제작된 부품들은 이방성 재료의 성질을 나타낸다. 본 연구에서는 FDM 부품의 인장강도를 예측하기 위한 해석방법을 제시하고자 한다. 복합재를 위한 Classical Lamination Theory를 사용하여 컴퓨터 코드를 작성하였다. FDM 제품의 파괴를 예측하기 위하여 계산코드에 Tsai-Wu failure criterion 이론을 도입하였다. 해석방법에 의해 예상되는 인장강도와 실제 실험으로 얻은 수치를 비교하였다. 예상치가 측정치에 근사한 값을 보이므로 본 계산식의 타당성이 입증되었다. 덧붙여 FDM의 강도계산과 설계규칙이 웹기반의 제안서비스(FDMAS)에서 제공된다.

1. 서 론

컴퓨터를 사용한 설계(CAD)와 폐속조형의 발전으로 인하여 설계자는 개념에서 초기모형을 제작하는 시간을 단축할 수 있게 되었다. 최근 이슈가 되고 있는 폐속조형분야에서 중요한 문제 중의 하나는 기계적 하중을 지지할 수

있는 강도나 강성을 제공하는 '기능성 부품'을 제조하는 것이다.

Stratasys사의 FDM 공정은 엔지니어링 플라스틱을 이용하여 시작품을 생산한다[1]. FDM의 제조 방법에 대해서 간단히 설명하면 다음과 같다. 첫 단계는 3차원 CAD에 의한 모델의 생성이다. 생성된 모델은 STL파일 형태로 FDM의

*+ 경상대학교 기계항공공학부, 교신저자(E-mail: shahn@nongae.gsnu.ac.kr)

** 경상대학교 공학연구원

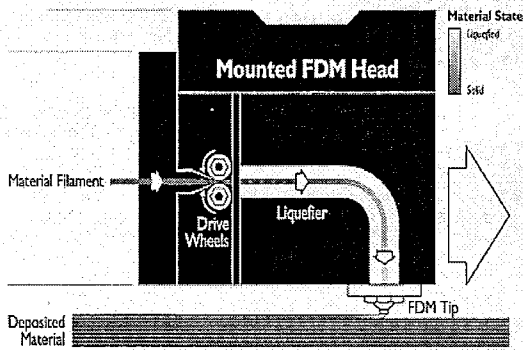


Fig. 1 A schematic diagram of Fused Deposition Modeling process.

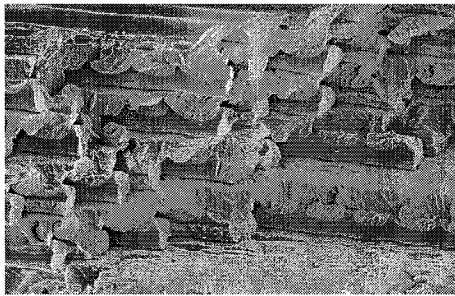


Fig. 2 Scanning Electron Microscope(SEM) picture of the fracture surface of an FDM specimen.

Quickslice 소프트웨어에 입력된다. 이 STL파일은 Quickslice에서 슬라이스(slice)되어 다수의 2차원 윤곽들로 나타내어진다(SSL 파일). 그리고는 FDM 기계의 하드웨어를 제어하기 위한 공정설계(process planning)가 뒤따른다. 공정설계에서 생성되는 SML 파일이 FDM의 하드웨어를 구동하는 역할을 한다. FDM공정은 Fig. 1에 보이는 바와 같이 ABS 또는 폴리카보네이트 필라멘트가 발열판(heater)을 통과하여 반 용융상태로 노즐을 통과하고 약 300 μ m 두께로 적층된다. 이 반 용융의 수지는 이미 쌓인 층과 접합된다.

FDM 공정은 필라멘트를 일정한 방향으로 적층하므로, Fig. 2에서 보이는 바와 같이 파단면은 필라멘트의 방향에 영향을 받아 이방성의 특성을 가지게 된다. 여러 연구자들이 이러한 이방성에 대하여 연구하였고[2-4], Montero 등은 쾌속조형 공정에서 FDM 부품의 기계적인 성질에 대한 비드 폭, 공기 갭, 모델 온도, 래스터(raster) 각도 그리고 색상 등의 공정조건의 영향에 대하여 보고하였다[4]. 실험의 결과로부터 래스터 각도와 공기 갭이 FDM 부품의 강도에 관련하여 가장 중요한 변수라는 것이 밝혀졌다. 래스터 각도는 부품의 하중방향에 따른 재료의 적층 방향에 의해 결

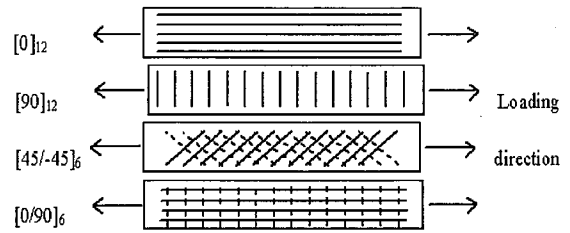


Fig. 3 Top view of tensile specimens with various raster angle.

정된다. 그리고 공기 갭은 FDM 재료에서 비드 사이의 공간이다. 기능적인 FDM 부품을 설계하기 위해서는 래스터 각도의 영향을 받는 강도에 대한 이해가 필요하다. 공기 갭의 크기가 다르면 서로 다른 재료상수를 가지게 되므로, 본 연구에서 공기 갭의 크기는 -0.003inch(-76.2 μ m)로 고정하였고, 래스터 각도의 영향에 의한 부품의 강도예측을 그 목표로 한다. 또한 ABS 부품의 래스터 각도와 공기 갭을 변화시킴에 따른 강도를 예측할 수 있는 인터넷기반 제안 서비스도 구축하였다.

2. 실험

저자의 이전 연구에서 FDM용 ABS 재료의 강도는 동일한 재료의 사출성형 된 시편에 비해 60~72%정도의 인장강도를 갖는 것으로 알려졌다[5].

ASTM D3039[6]에 따라 인장 실험을 행하였고, 시편의 크기는 229mm \times 25.4mm \times 3.3mm이었다. 각각의 FDM 시편은 Fig. 3에 나타난 것처럼 다양한 래스터 각도에 따라 12개의 층으로 이루어졌다. [0]₁₂시편은 하중방향으로 래스터가 배열되었으며, [45/-45]₆시편은 45°각도와 -45°를 반복하며 여섯 번씩 적층하였다. 인장시험은 25kN의 용량을 가진 Instron 8872 인장강도기를 사용하였으며, 2mm/min 비율로 하중을 가하면서 시편을 시험하였다. 하중을 받는 동안 각 시편의 하중과 변위를 측정하였다.

3. 파괴모델

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

3.1 Classical Lamination Theory

Fig. 4에서 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.

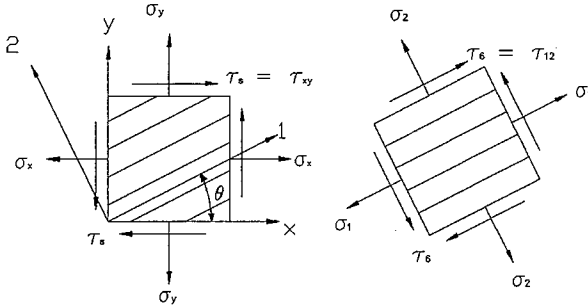


Fig. 4 Definition of off-axis and on-axis coordinates.

Classical Lamination Theory에서 얇은 판재는 평면 응력(plane stress)으로 가정되고, 두께를 통한 응력은 무시되므로, 판재의 변형은 아래의 식으로 표현될 수 있다(Fig. 5).

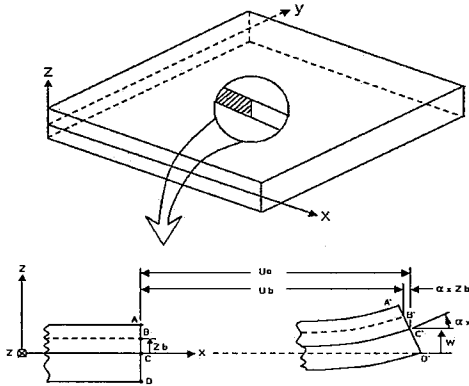


Fig. 5 Definition of coordinates in a plate.

$$\varepsilon_j = \varepsilon_j^0 + Z\kappa_j \quad (j=x, y, s) \quad (1)$$

ε^0 는 단면 중앙에서의 변형률이고, Z 는 두께방향의 관심지점, 그리고 κ 는 곡률이다. 판재내의 응력은 변형률과 주축(off-axis) 강성행렬 $[Q_{ij}]$ 의 곱으로써 계산된다.

$$\sigma_i = [Q_{ij}]\varepsilon_j \quad (i, j=x, y, s) \quad (2)$$

합력 N_{xy} (단위폭당 힘)와 M_{xy} (단위폭당 모멘트)는 식(3), (4)와 같이 구해지며 이 힘과 모멘트의 방향은 Fig. 6에 정

의되어 있다.

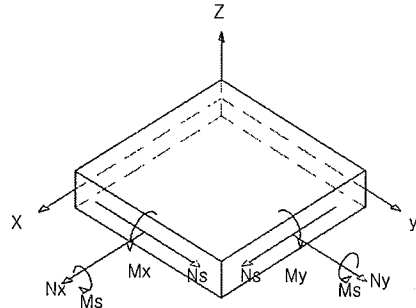


Fig. 6 Definition of resultant forces and moments.

$$N_i = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \sigma^k_i dz \quad (3)$$

$$M_i = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \sigma^k_i z dz \quad (4)$$

위의 두 공식은 다음과 같이 조합된다.

$$\begin{bmatrix} N_i \\ M_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ij} & B_{ij} \\ B_{ij} & D_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_j^0 \\ \kappa_j \end{bmatrix} \quad (5)$$

식(5)는 아래와 같이 변환된다.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_j^0 \\ \kappa_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{ji} & b_{ji} \\ c_{ji} & d_{ji} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_i \\ M_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)은 변형률과 곡률을 계산하기 위하여 축방향 힘과 굽힘모멘트를 취하였지만, 본 모델에서는 축방향 힘만을 고려하여 시편에 작용된 인장력으로 사용한다.

변형률이 얻어진다면, 식(2)에서 각 층에서의 주축방향 응력을 구할 수 있다. 그리고 응력변환식을 사용하여 주축방향 응력으로부터 적층판방향 응력을 계산한다.

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

이 변환은 래스터 각도 $\cos\theta(m)$ 와 $\sin\theta(n)$ 으로 구성되어 있다.

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.2 Tsai-Wu Failure Criterion

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

$$f_1 \sigma_1 + f_2 \sigma_2 + f_{11} \sigma_1^2 + f_{22} \sigma_2^2 + f_{66} \tau_6^2 + 2 f_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1 \quad (9)$$

이 식의 계수는 아래에 정의되어 있다.

$$f_1 = \frac{1}{F_{1t}} - \frac{1}{F_{1c}} \quad (10)$$

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

$$f_2 = \frac{1}{F_{2t}} - \frac{1}{F_{2c}} \quad (12)$$

$$f_{22} = \frac{1}{F_{2t} F_{2c}} \quad (13)$$

$$f_{66} = \frac{1}{F_6^2} \quad (14)$$

$$f_{12} \cong -\frac{1}{2} (f_{11} f_{22})^{1/2} \quad (15)$$

F_{1t} , F_{2t} , F_{1c} , F_{2c} , F_{66} 은 각각 길이방향인장강도, 가로방향 인장강도, 길이방향압축강도, 가로방향압축강도 그리고 전단강도이다. 식(9)는 안전계수를 결정하기 위하여 각 층을 검사하기 위한 식이다. 다층의 FDM의 파괴는 각 층들 중 가장 안전계수가 낮은 층에서 발생한다.

4. 결 과

실험으로부터 구해진 Table 1의 자료를 사용하여 예상파괴하중과 실험결과를 비교하였다. 실험 값 중 길이방향 압축강도와 가로방향압축강도는 공기 갭이 0인 경우의 실험 값을 사용하였다. 사출성형한 시편의 압축강도가 40MPa로 측정되었으므로 이를 상한 값으로 사용하면 약 10% 이내의 오차범위 내로 -0.003의 공기 갭인 경우의 압축강도를 추정할 수 있다[5]. Fig. 7은 실험에서 파괴된 시편을 보여 준다.

Table 1 Material constants of FDM ABS (-0.003 air gap)

Property	Value
Longitudinal tensile strength	22.1 MPa
Transverse tensile strength	14.4 MPa
Longitudinal compressive strength	39.2 MPa
Transverse compressive strength	35.5 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

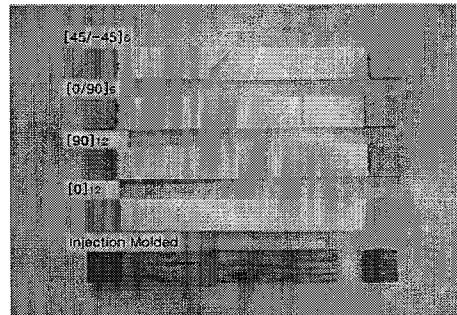


Fig. 7 Specimens after tensile tests.

Fig. 8은 다양한 래스터 각도에 대한 각 층들의 인장강도의 계산결과를 보여준다. FDM의 Quickslice 소프트웨어에서는 두 가지 래스터 각도를 지정하여 적층할 수 있으나 적층순서는 조절할 수 없다. 그러므로 Fig. 8(c), (d)의 경우와 같이 비대칭인 적층에 대해서는 굽힘모멘트가 작용하여 동일한 래스터 각도를 갖는 층의 응력이 서로 다른 값을 가지게 된다.

Fig. 9에서는 예상파괴하중과 실험결과가 상당히 근접함을 보이고 있으며 사출성형 된 FDM 재료의 인장강도와 비교할 수 있다.

5. FDM Advisory Service (FDMAS)

캐속조형의 특성상 빠른 시간에 설계로부터 생산이 이루어지므로 강도계산이나 디자인 규칙이 필요하다면 이러한 기능을 하는 소프트웨어의 접근성(accessibility)이 중요하게 된다. 본 연구에서 일어난 강도예측코드를 사용하여 웹브라우저에서 래스터 각도와 적층수를 입력하여 손쉽게 파괴하중을 예측할 수 있도록 하였다(Fig. 10,11).

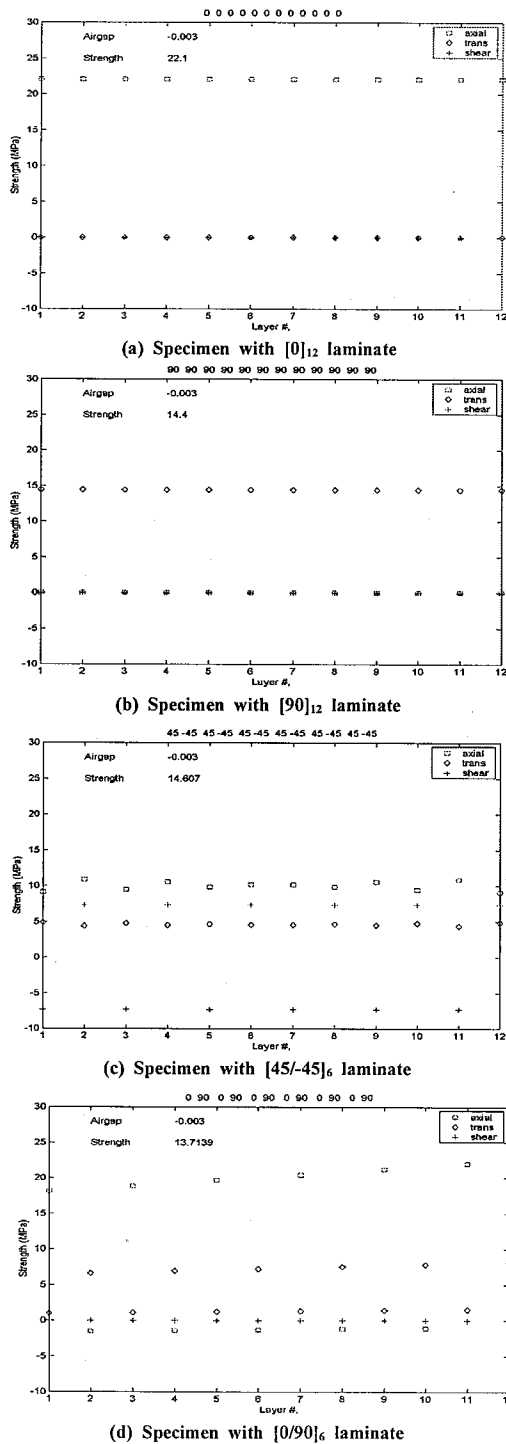


Fig. 8 Results of strength prediction from the model.

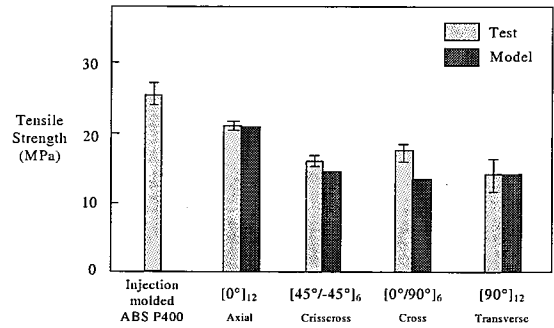


Fig. 9 Tensile strengths of ABS P400 specimens with various raster angles (-0.003 air gap).

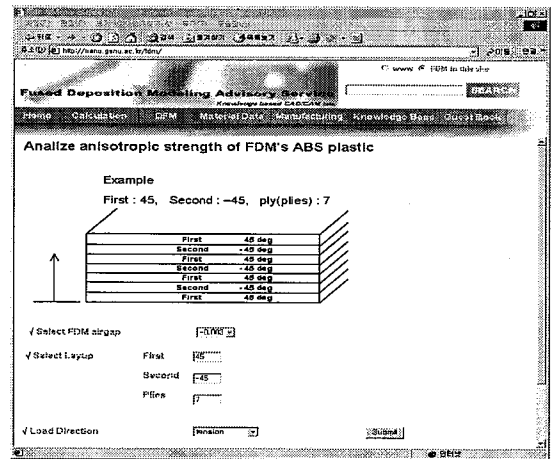


Fig. 10 The calculation module of FDMAS for failure prediction.

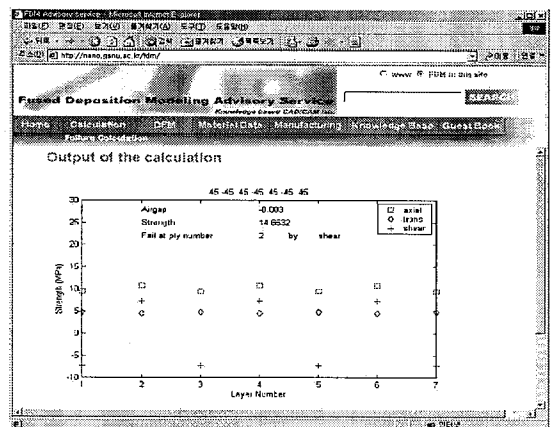


Fig. 11 The result of above calculation.

6. 결 론

FDM ABS재료의 파괴유형과 강도를 예측하기 위하여 이방성 모델을 제안하였다. 이방성 재료에 대해 Classical Lamination Theory 와 Tsai-Wu failure criterion을 적용하였다. 본 모델은 래스터 각도에 따라 파괴하중을 예측할 수 있었고 실험결과와 유사한 값을 보여주었다. 본 연구에서는 공기 갭을 -0.003inch로 고정하였으나, 공기 갭의 범위를 변경한다면 다른 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.

후 기

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

참고문헌

- 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.