

## 후가공을 통한 반투명 RP 재료의 개발: FDM의 예

정우벽\* · 이선영\*\* · 안성훈†  
(2003년 2월 4일 접수, 2003년 7월 5일 심사완료)

### Development of Translucent RP Material by Post-processing: Case Study of FDM

Woobyok Jeong, Sunyoung Lee and Sung-Hoon Ahn

**Key Words:** Translucent(반투명), RP(쾌속조형), FDM, Infiltration(침투), Post-process(후가공)

#### Abstract

Translucent plastics are commonly used in packaging of mechanical and/or electrical components. Although Rapid Prototyping(RP) provides prototypes of various materials, translucent RP parts are not readily available from most RP processes. ABSi is one of the ABS materials available for Stratasys' FDM process, and the material has potential to be translucent. In this paper, two post-processing techniques were applied in order to increase optical transmissivity of the parts made of FDM's ABSi. First, elevated temperature condition was applied resulting in increased transmissivity while dimensional shrinkage was observed. Second, resin infiltration and surface sanding provided up to 16% transmissivity without shrinkage. These post-processes can be selectively applied to increase transmissivity of ABSi parts. Thus, translucent FDM part can be fabricated from regular FDM process followed by the post-processes developed in this study.

#### 1. 서론

쾌속조형 또는 신속제작(Rapid Prototyping)은 CAD로 설계된 형상의 시제품을 신속하게 제작하여 제품개발에 소요되는 시간과 비용을 절감한다. 쾌속조형물의 기계적 강도나 색상 등이 대량생산공정으로 제작된 제품과 유사한 기능성 쾌속조형물을 제작하는 시도가 계속되었으며 여러 공정들이 개발되었다.<sup>(1)</sup> 대표적인 대량생산기술인 플라스틱 사출성형의 경우 반투명 또는 투명한 부품의 사용이 증가되면서 금형을 제작하기 전에

시각품의 광학적 특성, 예를 들어 투명도를 완성품과 유사하게 제작하는 것이 관심의 대상이 되고 있다. 최초의 상용 쾌속조형장치인 SLA의 경우 광경화성수지를 적층재료로 사용하는데 경화된 수지자체가 약간의 투명성을 가지고 있어 색소를 첨가하여 반투명 색상의 플라스틱 성형이 시도되었다.<sup>(2)</sup>

플라스틱을 재료로 사용하는 대표적인 쾌속조형 장비 중에 Stratasys사의 FDM(Fused Deposition Modeling)이 있다.<sup>(3)</sup> FDM의 제조 방법에 대해서 간단히 설명하면 다음과 같다. 첫째 단계는 3차원 CAD에 의한 솔리드 모델의 생성이다. 생성된 모델은 STL(stereolithography)파일 형태로 FDM용의 Quickslice 또는 Insight라는 공정계획 소프트웨어에 입력된다. 이 STL 파일은 슬라이스(slice)되어 다수의 2차원 윤곽들로 나타내어진다(SSL파일). 공정계획에서 생성되는 SML 파일은 베이스와 서포트 및 적층물을 제작하기 위하여 FDM

\* 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : shahn@gsnu.ac.kr

TEL : (055)751-6075 FAX : (055)753-3667

\* 경상대학교 기계항공공학부

\*\* 경상대학교 공학연구원

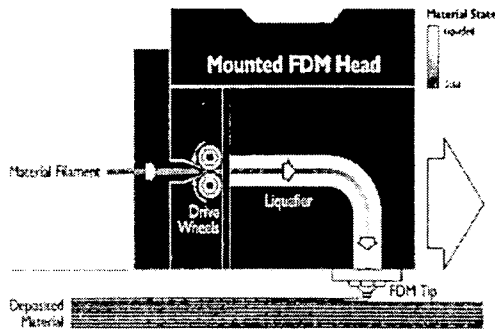


Fig. 1 Fused Deposition Modeling process<sup>(3)</sup>

의 하드웨어를 구동하는 역할을 한다. Fig. 1과 같이 플라스틱 필라멘트는 발열판(heater)을 통과하여 반 용융상태로 노즐을 통과하고 약 300 $\mu$ m~350 $\mu$ m의 두께로 적층된다. 이 반 용융의 ABS수지는 이미 적층된 ABS수지층과 접합되고 같은 공정이 반복되어 3차원 형상을 구성한다.

Montero 등은 FDM 제품의 기계적인 성질에 대한 비드 폭(bid width), 공기 갭(air gap), 모델 온도, 래스터(raster) 각도, 색상 등의 공정조건의 영향에 대하여 보고하였다.<sup>(4)</sup> 실험의 결과로부터 래스터 각도와 공기 갭이 FDM 부품의 강도에 관련하여 가장 중요한 변수라는 것이 밝혀졌다. 래스터 각도는 재료의 적층 방향에 의해 결정된다.

FDM은 ABS, 의료용ABS(ABSi), 폴리카보네이트를 적층재료로 사용한다. 이 중 FDM으로 제작된 ABSi는 상대적으로 약간의 투명도를 제공하여(투과율 1%미만) 후처리를 통해 투명도를 높일 가능성이 있다.

본 논문에서는 ABSi로 시편을 제작하고 온도 조절 또는 수지의 침투(infiltration)의 후처리(post-process)를 통해 FDM으로 제작된 시작품의 투명도를 향상시키는 실험에 대해 설명하고자 한다.

## 2. 시편 제작

투과율을 측정하기 위해 25mm×25mm×3mm의 CAD형상을 생성하고 이를 STL파일로 Stratasys사의 Quickslice 소프트웨어에 입력하였다. 이 형상을 두께방향으로 슬라이싱(slicing)하고 +45°/-45°의 래스터 각도로 필라멘트를 적층하도록

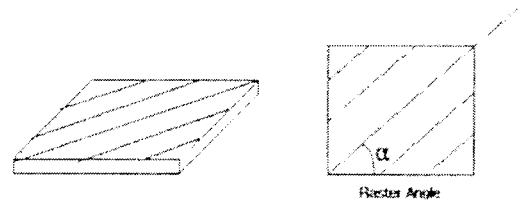


Fig. 2 Definition of raster angle in the FDM specimen used in this experiment

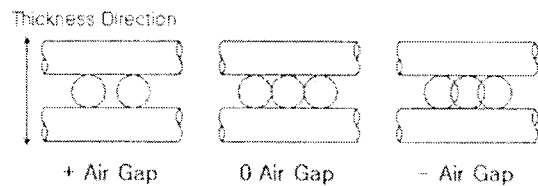


Fig. 3 Definition of +/- 0/- air gap

공정계획을 세웠다(Fig. 2). 참고로 +45°/-45는 Quickslice에서 래스터 각의 기본값(default)이다. 래스터 각은 재료의 강도에 영향을 주며,<sup>(5)</sup> 빛의 투과율에도 영향을 줄 것으로 예상되는 인자이지만 본 논문에서는 후처리 공정에 중점을 두어 래스터 각의 영향은 고려하지 않았다.

시편 재료의 색상은 호박색과 빨간색을 사용하였고 적층된 필라멘트사이의 간격을 뜻하는 공기 갭은 +0.003 인치(76.2 $\mu$ m), 0 인치, -0.003 인치(-76.2 $\mu$ m)로 시편을 제작하였다(Fig. 3). 표현의 단순화와 FDM사용자의 편의를 위해 공기 갭의 단위는 본 논문에서 계속해서 인치로 사용한다.

## 3. 투과율 측정

시편의 투명도를 정량적으로 비교하기 위해 UV/VIS/NIR Spectrometer(제작사: Perkin Elemer, 모델명: LAMBDA-900)를 사용하여 투과율을 측정하였다. 사용된 파장은 400nm~800nm를 범위로 각 시편의 파장별 투과율을 측정하였다. Fig. 4는 호박색(ABSi amber)과 빨간색(ABSi Red)의 후처리하지 않은 시편의 투과율데이터를 보여준다.

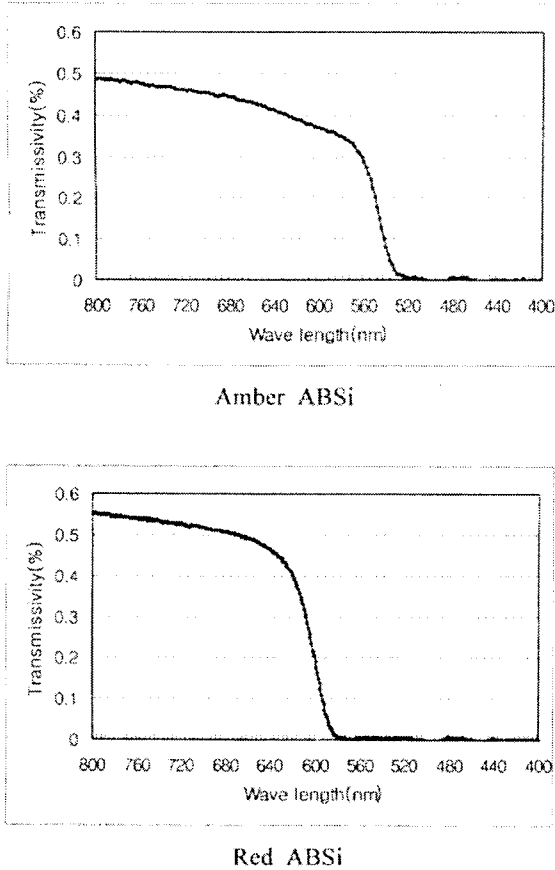


Fig. 4 Typical transmissivity characteristics of FDM specimens(air gap:0)

호박색과 빨간색 시편 모두 관측과장범위에서 1%미만의 투과율을 보인다. 두 시편의 데이터의 공통적인 특징은 파장이 최대인 800nm에서 투과율이 최대이고 각각 520nm와 580nm이하의 파장에서 투과율이 0이 되는 것이다. 후처리를 하지 않은 다른 공기 갭을 갖도록 제작된 시편들도 매우 낮은 투과율을 보였다. 본 실험에서는 파장이 800nm일 때의 투과율을 사용하여 후처리과정의 영향을 비교하고자 한다.

#### 4. 후처리 과정

##### 4.1 후처리 온도(Post-processing Temperature)

본 논문에서 후처리는 FDM으로 ABSi 제품을 생산한 후 투과율의 향상을 위해 부가적으로 시험한 공정을 가리킨다. 온도와 수지침투를 사용

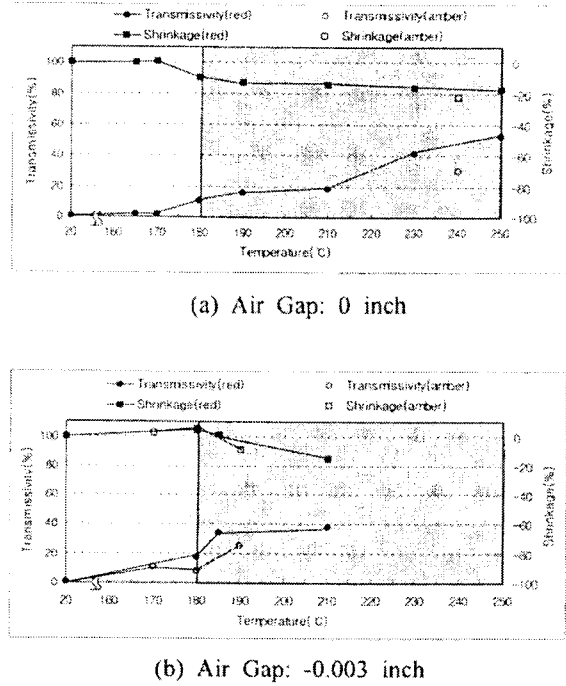


Fig. 5 The effect of post-processing temperature on transmissivity and shrinkage of ABSi specimens

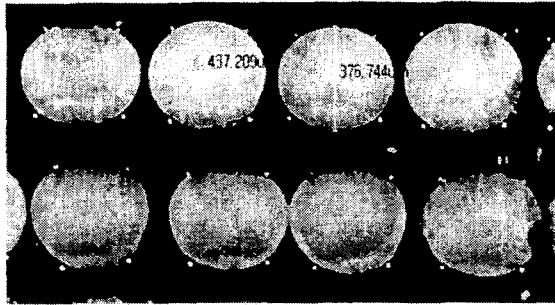
하여 광학적인 투과율을 향상시키고 표면처리(연삭)로 추가적인 투과율 향상을 시도하였다.

온도의 상승에 따라 가해지는 열은 열가소성 플라스틱인 ABSi로 형성된 FDM시편의 물리적인 미세구조를 변형시킨다. 온도 조절이 되는 오븐에서 시편을 실험온도에 5분간 노출시킨 후 투과율과 두께방향 수축률을 측정하여 온도의 영향을 조사하였다.

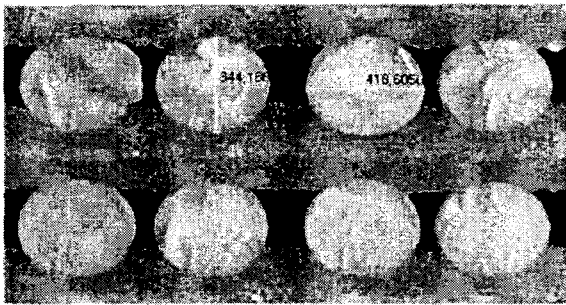
$$\text{수축률} = \frac{t - t_0}{t_0} \times 100(\%) \quad (1)$$

(t는 수축 후 시편의 두께이고 t<sub>0</sub>는 온도를 상승시키기 전의 두께이다.

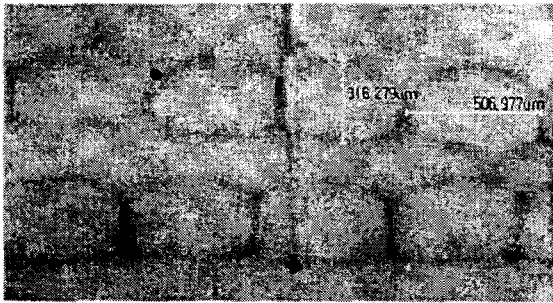
후처리 온도가 약 180°C이상이 되면 투과율이 눈에 띄게 증가하는 반면에 두께 방향 수축은 증가한다(Fig. 5). 이는 시편 내부의 공기 갭을 온도가 상승되어 반 용융상태로 된 ABSi재료가 채우므로 빛이 하나의 물질 안에서 투과하는 효과가 나타남과 동시에 공기 갭을 채운 ABSi재료의 위치변화로 시편의 두께가 감소했음을 보여준다.



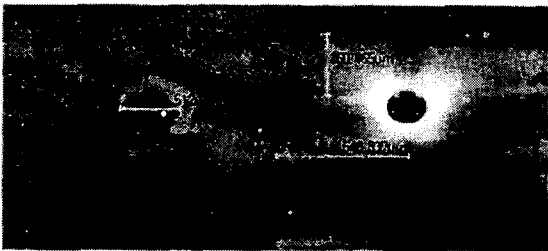
(a) At room temperature (20°C)



(b) At 170°C



(c) At 180°C



(d) At 250°C

Fig. 6 The effect of elevated temperature on the micro structure of FDM specimens (air gap:0, Red ABSi)

180°C에서 공기 갭이 0인 경우 수축률은 -10%이고 투과율은 11%이었다. Fig. 6은 온도에 따른 마이크로 구조의 변화를 보여준다. 온도가 상승함에 따라 재료사이의 공간이 감소함을 알 수 있다. 180°C이상에서는 수축뿐만 아니라 형상의 변형과 늘어짐이 발생하여 실질적인 사용가능 온도범위를 벗어난다. Fig. 6(d)는 250°C에서 원래 적층된 필라멘트의 구분이 없어지고 내부에 남아있는 공기 갭 사이의 기포를 보여준다.

180°C에서 공기 갭이 -0.003인 경우 수축률은 +3%이고 투과율은 10~20%이었다. 수축률이 이 온도에서 양의 값을 갖는 이유는 적층시 두께방향으로 발생한 압축간류응력이 온도의 상승으로 완화되어 필라멘트사이의 간격이 약간 증가하기 때문이다. 그러나 온도상승이 계속되면 수축이 진행된다.

양 의 공기 갭을 가진 시편은 치수의 변형이 더 크므로 실험에서 제외했다.

#### 4.2 수지침투(Resin Infiltration)

패속조형재료의 강화에 흔히 사용되는 순간접착제와 아크릴수지가 침투에 사용되었다. 그리고 건조 후 표면연삭으로 표면에서 빛의 산란을 막아 투과율을 높이도록 하였다.

##### 4.2.1 시안화 아크릴레이트(Cyano Acrylate)

시편을 시안화 아크릴레이트 (순간접착제) 수지에 30초간 담근 다음 건조 후 1000번 사포로 연삭하였다. 순간접착제의 침투는 약 5%정도의 투과율 향상을 보이지만 연삭 후 오히려 투과율이 약간 감소한다(Fig. 7). 실험에서 순간접착제가 연

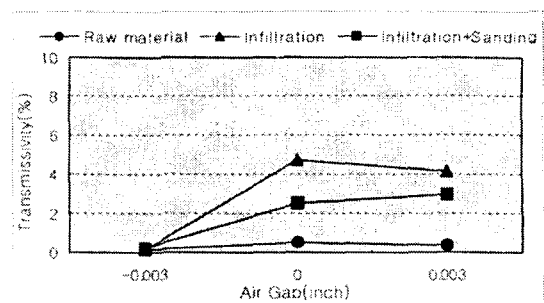


Fig. 7 The effect of infiltrating Cyano Acrylate and sanding on transmissivity of ABSi specimens(amber)

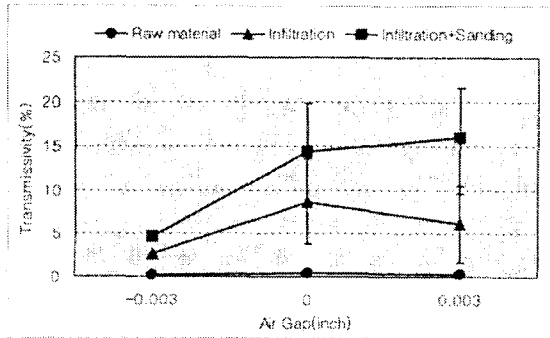


Fig. 8 The effect of infiltrating acrylic resin and sanding on transmissivity of ABSi specimens(amber)

삭 후 흰색으로 변색되는 것이 관찰되었는데 수지의 변색이 투과율 저하를 가져온 것으로 여겨진다.

4.2.2 아크릴 수지

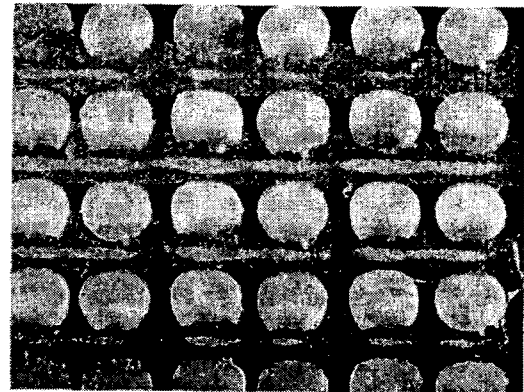
광학적으로 투과율을 향상시키기 위해 비결정질을 갖는 아크릴 수지를 침투시켰다. 사용된 아크릴 수지는 점성이 순간접착제보다 높아 침투에 시간이 더 필요하였다. 시편을 1분간 수지에 담근 후 30초간 건조를 하고 이를 10번 반복하였다.

공기 갭이 0과 +0.003 인치일 때 침투 후 투과율이 약 6~9%로 향상되었고 추가의 표면 연삭 후 약 14~16%의 투과율을 얻었다(Fig. 8). 사용된 아크릴 수지의 점성으로는 -0.003 인치 공기 갭의 시편에 침투가 어려워 투과율 향상이 비교적 적었다.

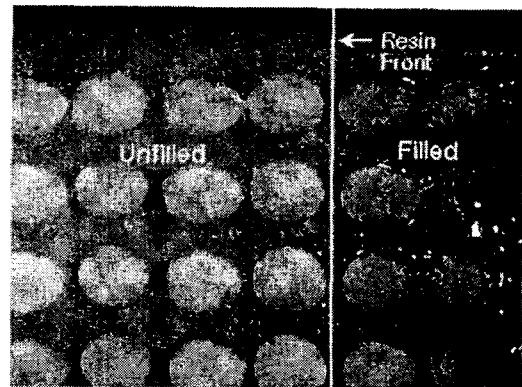
Fig. 9는 아크릴 수지가 침투된 후의 마이크로 구조를 보여준다. 수지침투 후 공기 갭이 수지로 채워져서 ABSi와 아크릴 수지의 경계가 잘 구별되지 않는다.

5. 토 의

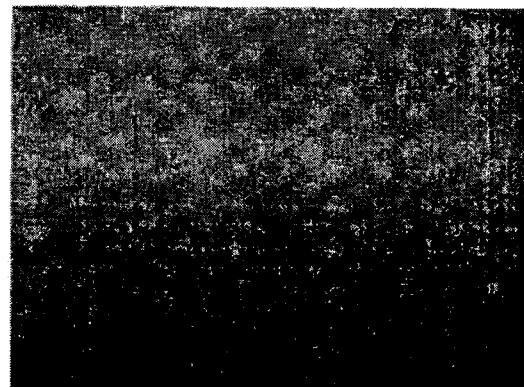
투과율의 향상은 빈 공간이 존재하는 FDM재료의 내부를 열로 서로 밀착시키거나 수지를 침투



(a) Before Infiltration



(b) During Infiltration



(c) After Infiltration

Fig. 9 The effect of infiltration on the micro structure of FDM specimens(air gap:0, Acrylic resin)

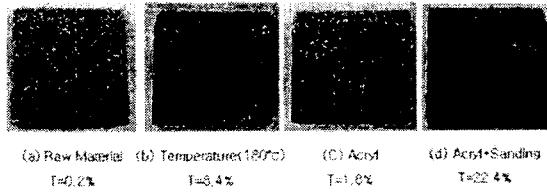


Fig. 10 Relative transmissivity of specimens by showing letter "A" through each specimen(amber)

Table 1 Index of Refraction

	ABSi	Acrylic Resin	Cyano Acrylate
Index of Refraction	1.57	1.69	1.51

시켜 채움으로써 가능했다. Fig. 10은 글자 "A"를 종이에 인쇄하고 각 시편을 통과해서 보이는 글자의 선명도로 상대적인 투명도와 측정된 투명도를 보여준다. 아크릴 수지를 침투시키고 표면을 연삭한 시편(d)가 가장 투명도가 높음을 볼 수 있다.

수지를 침투시키는 경우 서로 다른 수지가 경계를 이루므로 내부의 굴절이 생길 수도 있다. Table 1은 측정된 각 수지의 굴절률을 보여주는 데 ABSi와 침투된 두 수지의 굴절률은 큰 차이가 없었다.

수지의 온도를 상승시키는 후처리 방법은 제작물 전체의 온도의 범위를 균일하게 하여야 균일한 수지의 수축과 투명도의 향상을 얻을 수 있으므로 복잡한 형상의 후처리 공정으로는 문제가 발생할 여지가 있다.

표면연삭은 계단효과(stair-stepped effect)에 의한 쾌속조형의 거친 표면을 마무리하는 일반적인 방법이므로 표면연삭으로 인한 치수 변화는 고려하지 않았다.

Fig. 11은 FDM의 ABSi로 제작되고 후가공된 반투명 마우스부품의 예를 보여준다. 수지침투와 표면 연삭 후에 마우스에 조립되어 내부의 LED로부터 발산되는 빛을 투과시켜준다.

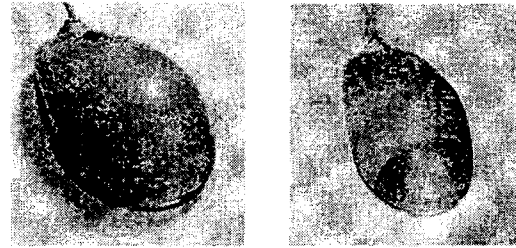


Fig. 11 An example of translucent mouse part fabricated by FDM and resin infiltration (left: raw FDM part, right: after resin infiltration and surface sanding)

## 6. 결 론

FDM은 불투명한 재료를 적층하여 시제품을 생산한다. 본 실험에서는 FDM용의 ABSi로 만든 형상을 후처리하여 투과율을 향상시킴으로써 반투명 플라스틱제품의 시제품을 얻을 수 있었다. 수축을 고려할 때 투과율을 향상시키기 위한 후처리온도는 180℃를 최대값으로 제시한다. 수지침투 후 표면 연삭은 투과율을 평균 16%까지 향상시켰다. 수지침투에 의한 투과율은 수지의 종류와 공정조건에 영향을 받으므로 보다 높은 투과율을 제공하는 후처리 공정을 찾는 것이 가능하다. 그리고 다양한 색상의 반투명 재질을 개발하는 것이 추후 연구될 계획이다.

## 후 기

본 연구는 UNITEF사업단과 BK21사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 연구를 도와주신 연암공업대학 김휘동 교수님과 보조한 이홍경, 진영성에게 사의를 표합니다.

## 참고문헌

- (1) H. S. Ji, 2002, "New Trends in Rapid Prototyping," Society of CAD/CAM engineers, Vol. 8, No. 3, pp. 1~13.
- (2) Y. G. Im, S. I. Chung, B. H. Cho, Y. D. Jung, H. D. Jeong, and H. W. Jeong, 2002,

- "Functional Prototype Development of Electronic Parts," *Proc. of The 35th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, pp. 237 ~ 242.
- (3) *FDM System Documentation*, Stratasys, Inc., 1998.
- (4) M. Montero, D. Odell, S. Roundy, S. H. Ahn, and P. K. Wright, 2001, "Material Characterization of Fused Deposition Modeling (FDM) Process,"

- Proc. of Rapid Prototyping and Manufacturing Conference, Society of Manufacturing Engineers*, May 15 ~ 17, Cincinnati, OH.
- (5) S. H. Ahn, M. Montero, D. Odel, S. Roundy, and P. K. Wright, 2002, "Anisotropic Material Properties of Fused Deposition Modeling (FDM) ABS," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 8, No. 4, pp. 248 ~ 257.