

쾌속조형 시작품의 적층방향별 물성평가 및 이방성을 고려한 유한요소해석

Investigation into Directional Properties of Rapid Prototypes and Its Application to FE Analysis Considering Anisotropy

✉ 박근¹, 김영수², 박도윤²

✉ Keun Park¹, Young-Soo Kim² and Do-Yoon Park²

¹ 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부 (Seoul National Univ. of Technology)

² 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부 원 (Seoul National Univ. of Technology)

✉ Corresponding author: kpark@snut.ac.kr, Tel: 02-970-6358

Manuscript received: 2008.1.16 / Revised: 2008.5.5 / Accepted: 2008.5.8

Rapid Prototyping (RP) has been widely used for rapid development of prototypes in various industrial fields. In recent years, a new requirement in RP industry has issued so as to directly manufacture a functional prototype which has enough mechanical properties to be used as a functional part. The RP prototype, however, has a limitation in mechanical properties due to its layer-by-layer manufacturing process. This manufacturing process results in anisotropy of the prototype, especially showing weakness in the building direction. In the present work, we performed tensile tests for RP prototypes in order to determine directional mechanical properties. The test specimens were made by using Eden330™ by Objet Geometries Ltd. Finite element analyses considering material anisotropy were then carried out for RP prototypes with various building directions. Effect of the building direction on the mechanical strength was investigated through the analysis, and compared with experimental results.

Key Words: Rapid Prototyping (쾌속조형), Finite Element Analysis (유한요소해석), Anisotropy (이방성), Functional Prototype (기능성 시작품)

1. 서론

최근 시장의 요구에 따라 제품의 모델이 다양화되고 제품의 형상이 복잡해지고 있다. 급변하는 시장에서 경쟁력을 갖추기 위해서는 시장의 선점이 중요하며, 이를 위해서는 제품 개발 기간 비용의 단축이 필수적이다. 이러한 시장의 요구에 효과적으로 대처하기 위해서는 제품의 설계부터 시작품 제작에 이르는 제품 개발기간을 단축하고 신속하고 저렴하게 시장에 출시하는 것이 필수적이

다. 따라서 시작품 설계 및 개발과정의 동시공학(Concurrent engineering)적인 추구를 위한 시스템을 구축하는 것이 바람직하며, 이러한 시스템의 일환으로 쾌속조형법(Rapid prototyping) 및 쾌속 금형제작(Rapid tooling)이 도입되어 활발하게 사용되고 있다.¹

쾌속조형법은 최근 10 여년간 자동차, 가전, 전자, 항공 및 중공업 등 거의 모든 제조 관련분야에 걸쳐서 제품의 설계에서 생산에 이르는 기간과 노력을 절감하는 동시공학의 필수적인 도구로써

사용되고 있다. 쾌속조형법은 3 차원 형상의 제품을 높이에 따른 2 차원 단면 데이터로 분할하여 각각의 단면을 레이저 등을 이용하여 제작하고 적층, 접합하여 원하는 형상의 제품을 생산하는 방식이다. 초기의 쾌속조형법은 형상 검증이나 조립성 평가를 위하여 사용되었으나, 근래에는 쾌속조형품을 2 차공정을 위한 마스터 모델로도 사용하는 등 적용 범위가 확장되고 있다.^{2,4}

최근에는 자동차, 가전, 전자산업 등 다양한 분야에서 사출성형으로 제작되는 플라스틱 부품 개발과정에서 비슷한 재질의 쾌속조형 시작품을 제작하여 조립성을 평가하는 등 기능성 시제품으로 사용하는 등 적용 범위가 확장되고 있다.^{5,6} 쾌속조형 시작품을 기능성 시제품으로 사용하기 위해서는 강도, 경도, 인성, 내열성 등의 기계적 물성이 뒷받침되어야 하는데, 두께방향의 적층을 통해 제작된 쾌속조형품의 경우 방향에 따른 물성 차이가 발생되며 특히 적층방향으로의 물성이 저하되는 것으로 알려져 있다.^{7,8}

따라서 기능성 시작품의 안정성을 평가하기 위해서는 해당 부품에 작용하는 하중을 고려하여 작용하는 응력을 예측함으로써 안정성 여부를 사전에 평가해야 한다. 본 논문에서는 유한요소해석을 적용하여 쾌속조형 시작품의 안전성 평가를 예측하기 위한 기반 연구를 수행하고자 한다. 우선적으로 다중 분사 노즐과 UV 경화를 이용한 광조형 장비인 Objet Geometries 社의 Eden330[®] 장비를 사용하여 시작품을 다양한 방향으로 제작하고, 인장시험을 통해 방향에 따른 쾌속조형품의 기계적 물성 차이를 고찰하고자 한다. 또한 실험으로 얻어진 방향별 물성을 고려하여 유한요소해석을 실시함으로써 이방성을 고려한 쾌속조형 시작품의 평가기법을 제시하고자 한다.

2. 쾌속조형품의 기계적 물성

2.1 쾌속조형 장비의 제작특성 고찰

본 연구에서는 이스라엘 Objet Geometries 社의 Eden330[®] 장비를 사용하여 쾌속조형 시편을 제작하였다. Eden330[®] 은 광경화성 수지를 재료로 사용하는 광조형 방법으로서 다수개의 노즐을 통해 분사된 광경화성 수지에 UV 를 조사하여 경화시켜준다.¹ Fig. 1 에 Eden330[®] 장비의 제작 원리를 도시하였다. 1000 여개의 노즐이 장착된 헤드가 수평방향(X-방향)으로 이동되며 수지를 분사하고, 이송이

완료되면 Y-방향으로 헤드의 폭만큼 평면내 수직 이동하여 원하는 단면의 형상에 대해 수지를 분사하여 경화시켜준다. 이때 경화층의 두께는 16~20 μm 의 범위로 비교적 정밀한 제품의 제작이 가능하다. 단면의 경화가 완료되면 작업대가 경화층의 두께만큼 아래로 하강(Z-방향)하고 이후 다음 층의 경화가 진행된다. 따라서 단면간의 적층이 진행되는 Z-방향과 단면내의 물성이 차이가 발생함은 물론, 단면 내의 X-방향과 Y-방향에서도 물성의 차이가 발생될 것으로 예상된다.

Eden330[®]은 아크릴 계열의 광경화성 수지인 FullCure[®]를 모델재료로 사용한다. 본 연구에서는 이중 가장 널리 사용되는 투명수지인 FullCure[®]720 수지를 사용하여 시편을 제작하였다. Table 1 에 FullCure[®]720 의 기계적 물성을 요약하였다. 그러나 상기 물성은 재료가 등방성이라는 가정 하에 제시된 것으로, 두께방향의 적층을 통해 제작된 쾌속조형품의 경우 방향에 따른 물성 차이가 발생될 것으로 예상된다.

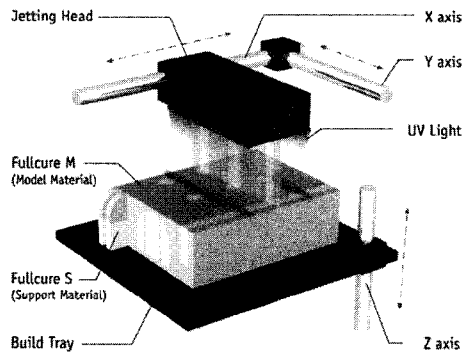


Fig. 1 Working principle of Objet Eden330[®]

Table 1 Mechanical properties of FullCure[®]720

Property	Content
Elastic modulus (MPa)	2870
Tensile strength (MPa)	60.3
Flexural strength (MPa)	75.8
Elongation at break (%)	15 ~ 25

2.2 적층방향에 따른 기계적 물성 측정

방향에 따른 쾌속조형품의 기계적 물성 차이를 고찰하기 위해 Fig. 2 와 같이 각각 노즐 이동 방향(X), 면내 수직방향(Y), 적층방향(Z)으로 구분하여 인장시편을 제작하였다. 조형시 노즐 헤드의

이동속도는 400mm/s, 노즐온도는 70℃, 작업대 온도는 30℃, 적층 두께는 0.016mm 로 설정하였다. 인장시편은 ASTM D638 의 규격에 따라 제작하였으며, INSTRON 8516 장비(최대하중 10 ton)를 사용하여 인장시험을 실시하였다. 실험은 상온에서 실시하였으며, 시편당 5 회씩 수행하여 평균치를 계산하였다. Table 2 에 시편의 제작방향에 따른 탄성계수 및 인장강도를 비교하였다.

우선 방향별 탄성계수를 비교하면 X-방향 및 Y-방향 제작시편의 경우 Table 1 에 제시된 재료의 기준 물성(2870 MPa)에 비해 다소 낮게 측정된 반면 Z-방향의 경우 1/5 이하로 감소됨을 알 수 있다. 인장강도의 경우 X-방향 및 Y-방향 제작시편의 경우 재료의 기준 물성(60.3MPa)에 비해 74-75% 정도의 비율을 보인 반면, Z-방향의 경우 재료의 인장강도의 22.8%에 해당한다. 이러한 이유로 인해 쾌속조형에 의해 제작된 시작품이 일반 플라스틱 재료에 비해 취약한 특성을 갖는 것으로 분석된다.

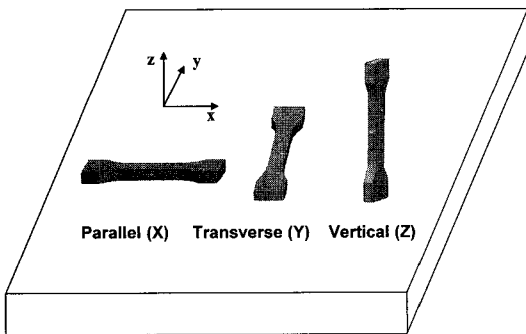


Fig. 2 Specimens for tensile test with various building directions (x, y, and z directions)

Table 2 Comparison of elastic modulus and tensile strength with various building directions

Direction	X	Y	Z
Elastic modulus (MPa)	2357	1954	430.3
Tensile strength (MPa)	44.77	44.57	13.76

3. 쾌속조형 시작품의 강도 실험

3.1 사각 케이스의 압축실험

앞절에서는 두께별 적층에 의한 쾌속조형 시작품이 플라스틱 재료의 물성에 미치지 못함을 인장시험을 통해 고찰하였다. 본 절에서는 쾌속조형

시작품을 실제 기능성 부품으로의 사용 가능 여부를 검토하기 위해 Fig. 3 에 도시한 바와 같이 높이 20mm 의 사각컵 형태의 시편을 제작하였다. 시편의 형상 선정 과정에서 다음의 사항을 고려하였다. 우선 사출성형으로 제작되는 플라스틱 제품의 특성과 유사하게 두께를 2mm 로 균일하게 설정하였다. 둘째로 복합적인 응력상태에서의 파단 여부를 고찰하기 위해 제작된 시편 상면에 압축하중을 인가하였을 때의 거동을 관찰하도록 하였고, 이를 위해 상면 중심부에 펀치를 안착시키기 위한 원형 도피부를 고려하여 설계하였다.

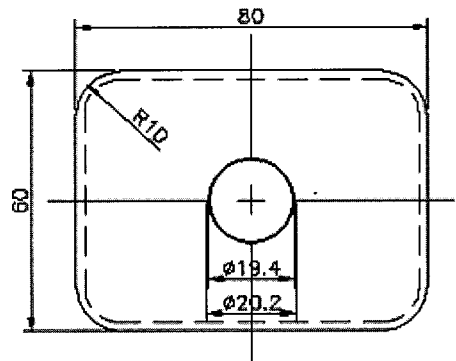


Fig. 3 Dimensional specifications of the rectangular case

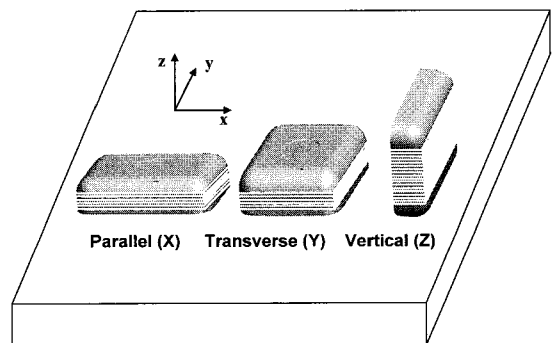


Fig. 4 Specimens for compression test with various building directions (x, y, and z directions)

또한 방향에 따른 쾌속조형품의 기계적 물성 차이를 고찰하기 위해 Fig. 4 와 같이 제품의 길이 방향을 각각 노즐 이동방향(X), 면내 수직방향(Y), 적층방향(Z)으로 구분하여 제품을 제작하였다. Fig. 5 에 쾌속조형을 통해 제작된 제품(X-방향)의 형상을 도시하였다. 또한 동일한 형상에 대해 사출성형용 금형을 제작하여 사출성형을 실시하였다. 이

때 사출성형 재료는 제일모직의 ABS 수지(Starex SR-0320)를 사용하였으며, Table 3 에 해당 재료의 물성을 요약하였다. 인장강도는 49 MPa 로 원재료 물성치(60.3 MPa)의 80% 정도에 해당한다.

Table 3 Mechanical properties of Starex SR-0320

Property	Content
Elastic modulus (MPa)	2400
Tensile strength (MPa)	49.0
Flexural strength (MPa)	69.0
Elongation at break (%)	10 ~ 20

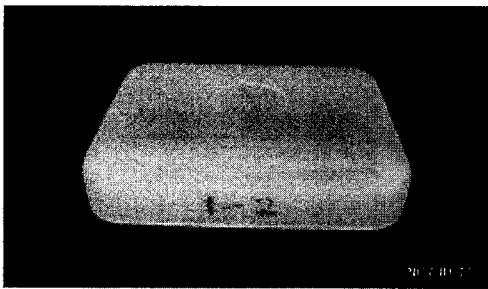


Fig. 5 RP prototype for the rectangular case (X-direction)

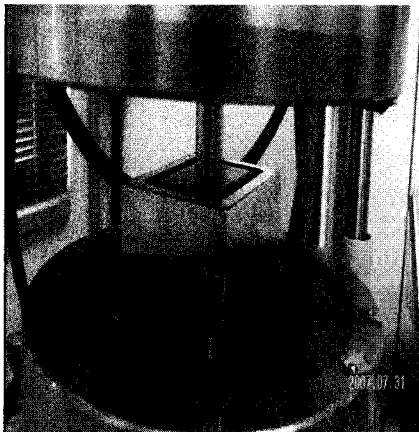


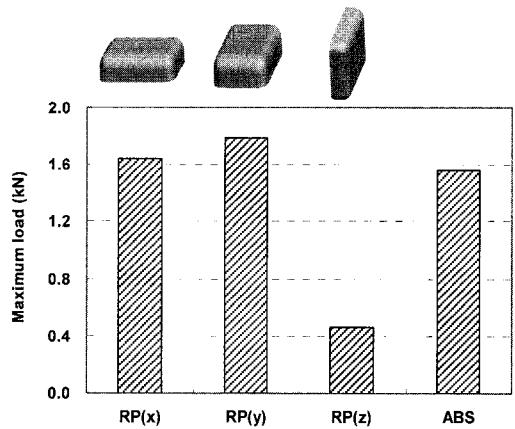
Fig. 6 Experimental setup for the compression test

방향별로 제작된 쾌속조형품과 사출품을 대상으로 Fig. 6 과 같이 압축시험을 실시하였다. 압축 시험은 제품 상면의 원형 도피부에 직경 20mm 의 펀치가 안착되도록 하였고, 바닥면을 구속하기 위한 치구를 별도로 제작하여 INSTRON 8516 장비에 설치하였다. 실험은 조건당 5 개씩 실시하여 평균값을 산정하였으며, 시편이 파괴될 때까지 진행

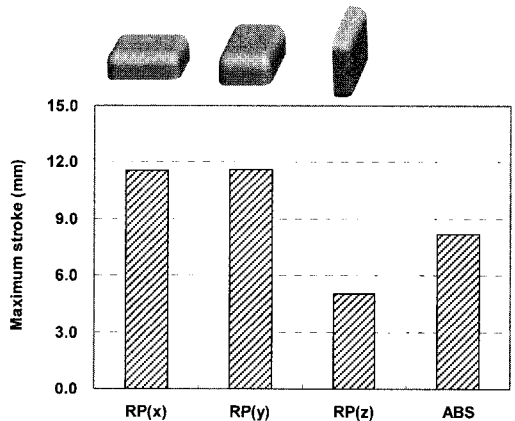
하여 해당 위치에서의 압하량과 최대하중을 비교하였다.

3.2 적층방향에 따른 압축시험 결과 비교

Fig. 7 에 적층방향별로 구분된 쾌속조형 시작품 및 게이트 자국을 사상하여 제거한 ABS 사출성형품의 압축시험시 시편이 파괴된 시점에서의 최대하중과 압하량을 비교하였다. 우선 X-방향과 Y-방향으로 제작된 쾌속조형품의 경우 최대하중 및 최대 압하량 모두 비슷한 수준으로 분석되었으며, 이는 Table 2 에 제시된 바와 같이 평면내의 방향성이 큰 차이를 보이지 않는 점에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 해당 장비를 사용한 쾌속조형시 평면내 방향은 제품의 강도에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

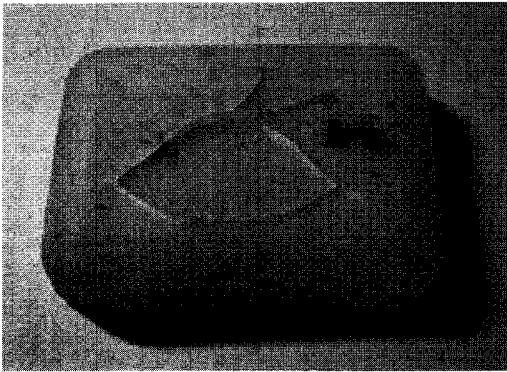


(a) Comparison of the maximum load

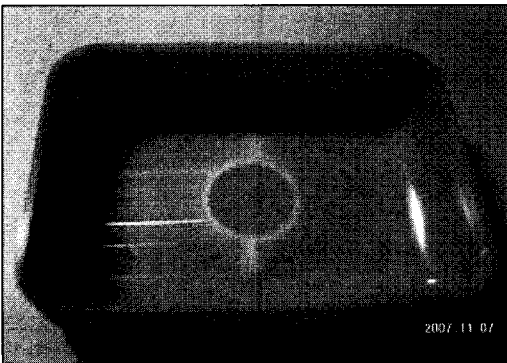


(b) Comparison of the maximum stroke

Fig. 7 Comparisons of experimental results



(a) RP prototype (X-direction)



(b) Injection-molded ABS part

Fig. 8 Shapes of failure in the compression test

반면에 Z-방향으로 제작된 쾌속조형품의 경우 최대하중은 면내 방향의 1/3 이하로 나타남을 알 수 있는데(Fig. 7 (a) 참조), 이는 해당 방향의 인장강도가 기타 방향의 1/3 이하(Table 2 참조)임을 감안할 때 타당한 결과로 판단된다. 반면에 최대압하량의 경우 면내 방향의 1/2 이하로 나타나 최대하중에 비해 상대적인 감소폭이 작게 나타났으며(Fig. 7 (b) 참조), 이는 Z-방향 제작의 경우 인장강도의 감소와 함께 탄성계수도 감소되었기 때문으로 분석된다. 즉 적층방향으로의 강성이 저하됨에 따라 재료의 인장강도에 도달하기 위한 상대적인 압하량이 증가한 것으로 판단된다.

한편 ABS 사출품의 경우 X-방향과 Y-방향으로 제작된 쾌속조형품에 비해 최대하중이 거의 비슷하게 나타났다. ABS 수지의 인장강도(49.0 MPa)가 Table 1 에 제시한 FullCure[®]720 재료(60.3 MPa)의 80% 정도에 해당하는 점을 감안하면 쾌속조형품의 적층과정에서 강도 저하가 발생됨을 예측할 수 있다. 반면 해당 결과는 Table 2 에 제시한 쾌속조

형 재료의 면내방향 강도(45 MPa 이하)보다 약간 높은 사실과 모순된 점을 보인다. 자세한 분석을 위해 Fig. 8 에 쾌속조형품(X-방향 제작)과 사출품의 파단 형상을 비교하였다. 쾌속조형품의 경우 펀치 형상 주변에 걸쳐 파단이 발생한 반면 사출품의 경우 중앙의 게이트부를 중심으로 파단이 발생하였다. 이러한 현상은 사출성형품의 게이트 자국에서의 응력 집중 효과에 의해 파단이 다소 일찍 발생하였음을 유추할 수 있으며, 게이트 자국을 사상함에 따라 다소 완화(최대하중 23.6% 상승)되기는 하였으나 여전히 동일한 파단형태를 보였다.

4. 쾌속조형 압축시험의 유한요소해석

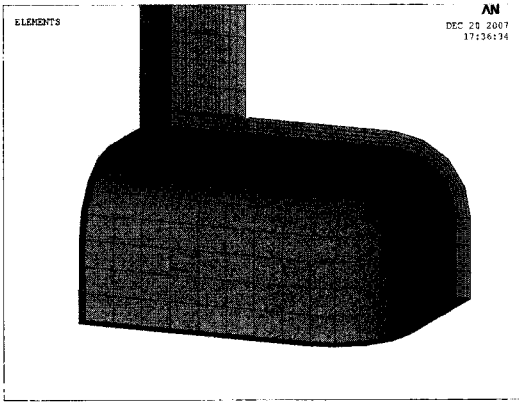
4.1 이방성을 고려한 유한요소해석

Fig. 9 (a)에 해석을 위한 유한요소 모델을 도시하였으며, 대칭성을 고려하여 1/4 부분에 대해 유한요소 격자를 생성하였다. 굽힘효과를 고려하기 위해 3 차원 20 절점 6 면체 요소를 사용하여 시편의 두께방향으로 4 개층의 격자를 구성하였다. 해석은 ANSYS[™]10.0 을 사용하였으며, 펀치와 소재와의 접촉처리를 위해 면대면 접촉요소(Surface-to-surface contact element)를 사용하였다. 펀치의 총 압하량은 7.5mm 로 설정하였고, 이를 200 단계의 부구간으로 구분하여 해석을 수행하였다.

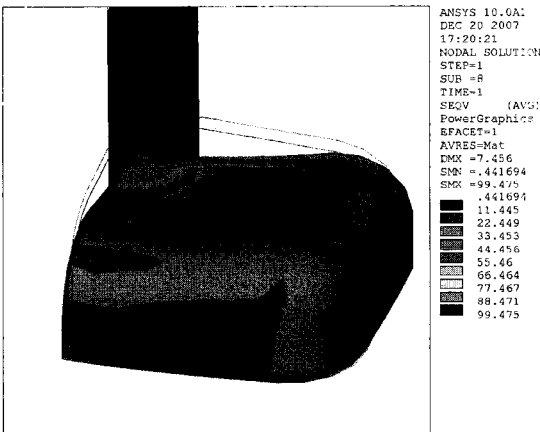
해석결과를 실험결과와 비교하기 위해 적층방향별로 구분된 쾌속조형 시작품 및 ABS 로 제작된 사출성형품에 대해 해석을 진행하였다. 쾌속조형품의 경우 재료의 물성을 직교이방성(Orthotropic)으로 가정하여 Table 2 에 제시된 방향별 물성을 사용하였으며, ABS 사출품의 경우 등방성으로 가정하고 Table 3 에 제시된 물성을 사용하였다.

Fig. 9 (b)에 X-방향으로 제작된 쾌속조형품의 유효응력 분포를 도시하였다. 최대 응력은 펀치 접촉부 하단면에서 발생되었으며, 크기는 99.5 MPa 로 예측되었다. 이는 재료의 최대인장강도인 45 MPa(Table 2 참조)를 2 배정도 초과하는 값에 해당하는데, 이는 실제 압축시험에서 제품이 완전히 파단될 때까지 실험을 진행하였기 때문으로 분석된다.

Fig. 10 에 4 가지 경우에 대해 압하량에 따른 최대응력의 변화를 그래프로 도시하였다. 우선 X-방향과 Y-방향으로 제작된 쾌속조형품의 경우에 거의 유사한 결과를 보임을 알 수 있다. 반면에



(a) Finite element model for the compression test



(b) Distribution of the von-Mises stress (RP-x)

Fig. 9 Finite element analysis results

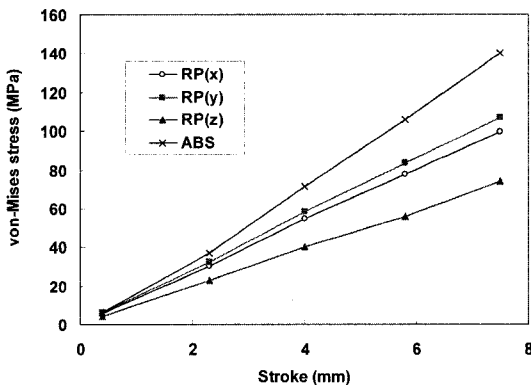


Fig. 10 Comparison of the maximum stress

ABS 사출품의 경우 면내 방향의 쾌속조형품에 비해 30% 정도 높은 응력이 발생됨을 알 수 있는데,

이는 X-방향과 Y-방향으로 제작된 쾌속조형품의 경우 두께(Z) 방향의 탄성계수가 면내 방향의 1/5 이하인 만큼(Table 2 참조) 두께방향으로의 변형이 상대적으로 용이하기 때문으로 분석된다. 한편 Z-방향 제작의 경우 면내 방향 제작의 경우에 비해 70% 정도의 응력이 발생된 것으로 예측되었으며, 역시 탄성계수의 저하로 인해 동일 압하량에서 부가되는 응력이 상대적으로 적음을 알 수 있다.

4.2 방향에 따른 해석결과 비교

4.1 절에서 기술한 바와 같이 쾌속조형 시작품의 경우 방향별로 다른 물성을 가지고 있어 기존의 등방성 재료와는 다른 각도에서 유한요소해석 결과를 고찰해야 한다. 특히 재료의 방향별 탄성계수의 차이로 인해 동일한 변형량에서도 방향별로 상이한 응력분포를 보이며, 결과적으로 재료의 강도와 탄성계수를 종합적으로 고려하여 제품의 안정성 여부를 평가해야 한다.

본 연구에서는 상기 해석결과를 토대로 재료의 안정성 여부를 평가하기 위해 Fig. 7 (b)에 제시한 적층방향별 최대 압하량의 상대비율을 예측하기 위한 모델을 제시하였다. 이를 위해 변형율에 근거한 안전 계수(Modified safety factor)를 도입하였으며, 이는 변형율이 응력의 성분에 비례하고 탄성계수에 반비례하는 점을 감안하여 아래 식과 같이 좌표축 방향에 따라 정의하였다.

$$\lambda_i = \frac{E_i}{E^*} \cdot \frac{\sigma_i^*}{\sigma_i}, \quad (i = x, y, z) \quad (1)$$

여기서 E^* 는 FullCure720® 재료의 공칭 탄성계수(Table 1 참조)이며, σ_i^* 는 재료의 방향별 항복응력을 의미한다.

Table 4 에 압하량 3.5mm 에서의 방향별 최대수직응력 및 그에 따른 수정된 안전계수를 비교하였다. 여기서 방향별 최대응력이 인장강도 이하인 경우에도 안전계수가 1 보다 작은 경우가 발생하는데 이는 재료의 공칭 탄성계수(2870 MPa)가 실제 측정치보다 크기 때문이며, 이를 근거로 실제 파괴에 영향을 미치는 임계 안전계수를 아래와 같이 계산된 3 개의 방향별 안전계수중 최소치를 사용하여 결정하였다.

$$\lambda_{crit} = \min(\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z) \quad (2)$$

Table 4 Comparison of the calculated directional stress components and the modified safety factors

Direction		RP(x)	RP(y)	RP(z)	σ^*
Maximum	σ_x	36.69	35.21	33.22	44.77
Stress	σ_y	41.44	46.55	22.34	44.57
(MPa)	σ_z	7.46	20.22	19.54	13.76
Modified	λ_x	1.002	1.044	1.107	-
Safety	λ_y	0.732	0.652	1.358	-
Factor	λ_z	0.422	0.463	0.171	-

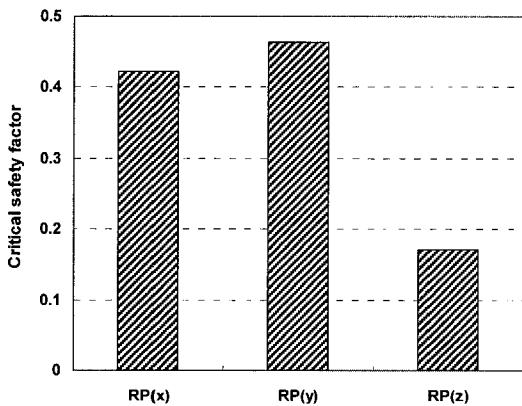


Fig. 11 Comparisons of the critical safety factors according to the building directions

Fig. 11 에 식 (2)를 사용하여 계산한 임계 안전 계수를 제작방향별로 비교하였다. 임계안전계수 역시 X-방향과 Y-방향으로 제작된 쾌속조형품의 경우 비슷한 수준으로 분석된 반면 Z-방향으로 제작된 쾌속조형품의 경우 절반 이하로 나타남을 알 수 있으며, 이는 Fig. 7 에 도시한 실험결과와 상당히 유사함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 제시한 이방성을 고려한 유한요소해석을 수행하여 쾌속조형품의 임계 안전계수값 계산에 활용할 수 있었고, 계산된 안전계수를 사용하여 쾌속조형 제품의 안정성을 방향별 인장강도와 탄성계수를 종합적으로 고려하여 평가할 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

이상으로 본 연구에서는 이방성을 고려한 유한요소해석을 적용하여 쾌속조형 시작품의 안전성 평가를 예측하기 위한 기반 연구를 수행하였다.

이러한 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1)UV 경화를 이용한 광조형 장비인 Objet Eden330® 장비를 사용하여 인장시편을 다양한 방향으로 적층하여 제작하였고 인장시험을 통해 방향에 따른 쾌속조형품의 기계적 물성차이가 방향별로 최대 3 배 이상 발생함을 확인하였다.

(2)쾌속조형 시작품의 기능성 부품으로의 사용 가능 여부를 검토하기 위해 사각컵 형태의 시편을 제작하여 압축하중을 인가하였을 때의 거동을 관찰하였고, 적층방향의 물성이 면내 방향의 물성에 비해 1/2 이상 저하됨을 확인하였다.

(3)상기 실험결과를 토대로 방향별 물성을 고려하여 직교이방성을 적용한 유한요소 해석을 실시하여 임계 안전계수값을 계산하였고, 이를 사용하여 방향별 인장강도와 탄성계수를 종합적으로 고려한 쾌속조형 시작품의 평가기법을 제시할 수 있었다.

향후에는 상기 연구결과를 토대로 쾌속조형품의 직교이방성을 고려한 유한요소해석을 통해 쾌속조형품을 기능성 제품으로 사용하기 위한 검증 도구로써 활용이 가능할 것으로 전망된다.

참고문헌

- Ahn, D. G. and Yang, D. Y., "Principle of rapid prototyping and its trends," J. of KSPE, Vol. 22, No. 10, pp. 368-374, 2005.
- Park, K., Lee, S. C., Jung, J. H., Yang, D. Y. and Yoon, J. R., "Development of prototyping and die/mold manufacturing technology using rapid prototyping," Trans. J. Kor. Soc. Mech. Engng. (A), Vol. 20, No. 5, pp. 1582-1589, 1996.
- Im, Y. G., Chung, S. I. and Jeong, H. D., "Development of investment casting technique using R/P master model," J. of KSPE, Vol. 16, No. 6, pp. 52-57, 2000.
- Park, K., Kim, Y. S., Kim, C. S. and Park, H. J., "Integrated application of CAD/CAM/CAE/RP for rapid development of a humanoid biped robot," J. Mat. Proc. Tech. Vol. 187-188, pp. 609-613, 2007.
- Wohler, T. T., "Wohlers report 2005, rapid prototyping and manufacturing state of the industry annual worldwide progress report," Whohlers Associates Inc., 2005.
- Kim, G. D. and Sung, J. H., "Bench mark test on

- rapid prototyping and machines for functional prototypes,” J. of KSPE, Vol. 23, No. 6, pp. 187-195, 2006.
7. Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. and Wright, P. K., “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS,” Rapid Prototyping, Vol. 8, No. 4, pp. 248-257, 2002.
 8. Kim, G. D. and Sung, J. H., “A benchmark test on the stereo-lithography-type rapid prototyping apparatus using transparent material,” J. of KSPE, Vol. 24, No. 6, pp. 138-145, 2006.