

SLA 시금형을 이용한 터빈블레이드 단조공정의 모델실험

박 근*, 신 민철*, 양 동열*, 조 종래**, 김 중수***

* 한국과학기술원 정밀공학과

** 한국중공업 (주)

*** 한국금형기술 (주)

Experiment of Turbine Blade Forging Process using Model Material and SLA Prototype Die Set

K. Park*, M.C. Shin*, D.Y. Yang*, C.R. Cho** and J.S. Kim***

* Department of Mechanical Engineering, KAIST

** Korea Heavy Industry, Inc.

*** KOMOTECH, Inc.

ABSTRACT

In this paper, an experimental study of hot forging process is carried out using plasticine. In order to manufacture the die set, Stereolithography Apparatus(SLA) which is most widely used rapid prototyping system is introduced. Turbine blade forging is executed using plasticine and the SLA prototype die set. Through the experiment, it turned out that SLA prototype is suitable to the die set for the plasticine workpiece, and the formability and forming load of turbine blade forging are predicted.

1. 서 론

단조 공정에서 금형은 소재에 외력을 작용시켜서 소재를 변형시키는 역할을 한다. 단조 공정에 사용되는 금형을 설계하기 위해서는 재료의 유동상태를 잘 파악해서 결함의 발생 여부, 공정 최종단계에서 소재의 금형 충만 여부, 소재의 응력상태, 소요 하중 등을 결정하는 것이 매우 중요하다.

이와같은 설계에 중요한 인자를 파악하기 위해서 실제로 금형을 제작해서 실소재를 이용하여 실험을 할 수도 있으나 많은 비용과 시간이 필요하다. 이에 비해 모델재료를 이용한 모사실험은 비용이 절감되며 비교적 짧은 시간에 실제 공정을 예측할 수 있으므로 적절한 금형 및 공정설계 그리고 예비형상(preform)의 선택을 위해서 많이 이용되는 방법이다. 지금까지 주로 사용된 모델재료들은 왁스, 탄소강, 진흙, 또는 납등으로 지난 반세기

동안 이들에 대한 많은 연구가 진행되어왔다[1].

본 연구에서는 이중 열간상태에서 금속의 유동과 매우 유사하다고 알려져 있으며 성형성이 좋은 플라스틱인(plasticine)을 모델재료로 사용하였다. 이것은 유동 응력이 낮아 아크릴, 에폭시 등의 수지금형을 사용하여 보다 경제적인 성형 실험이 가능하다[2-5]. 이러한 수지금형은 보통 절삭가공에 의존하여 제작되는 경우가 많아 실제 제품 개발 과정에 있어서 상대적으로 많은 시간이 소요된다.

본 연구에서는 현재 여러 산업 분야에서 각광받고 있는 쾌속 3차원 형상제조법 (Rapid prototyping) 중 가장 널리 사용되고 있는 SLA (Stereolithography Apparatus)를 사용하여 보다 신속하게 수지금형을 제작함으로써 기존의 수지금형 제작시 소요되는 시간과 노력을 절감한다. 또한 제작된 수지금형을 사용하여 플라스틱인 성형실험을 수행하고 이 결과로부터 터빈 블레이드 열간단조의 성형성을 평가함으로써 실제품 성형에 반영하고자 한다.

2. 스테인레스강과 플라스틱인의 상사성 도출

실제 단조공정과 모델링 실험이 상사성을 이루기 위해서는 소성영역에서 응력과 변형률, 응력과 변형률속도 사이의 관계들이 서로 유사해야 된다. 본 연구에서 사용된 스테인레스강과 플라스틱인의 구성방정식은 각각 다음과 같다.

$$\sigma_s = 9.762 \dot{\epsilon}_s^{0.106} \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \quad (1150^\circ\text{C}) \quad (1)$$

$$\sigma_p = 0.020 \dot{\epsilon}_p^{0.08} \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \quad (20^\circ\text{C}) \quad (2)$$

고온에서의 스테인레스강과 상온에서의 플라스틱인이 상사성을 만족할 때 그 관계식은 Table 1에서와 같이 나타낼 수 있다. 이 값을 (1), (2)식에 대입하여 연립하면 다음 식을 유도할 수 있다.

$$0.020 \times \frac{F^*}{l^{*2}} \times t^{*0.08} \times \dot{\epsilon}_s^{0.08} = 9.762 \times \dot{\epsilon}_s^{0.106} \quad (3)$$

변형률 속도가 커질수록 $\dot{\epsilon}_s^{0.08}$ 와 $\dot{\epsilon}_s^{0.106}$ 의 차이는 작아지고, 실제로 플라스틱인 모델링 실험은 상온보다 높은 약 29°C에서 행해졌으므로 n값은 0.08보다 크다고 볼 수 있다. 따라서 두 지수는 거의 같다고 가정할 수 있다. 결과적으로 하중척도 F^* 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$F^* = \frac{9.762}{0.020} \times \frac{l^{*2}}{t^{*0.08}} \quad (4)$$

Table 2는 실험에 사용된 수치와 실제의 크기, 조건들을 보여준다. 이를 이용하여 척도 값을 계산하면 Table 3과 같다.

3. SLA 시스템의 구성

3.1 원리

SLA(Stereolithography Apparatus)는 레이저 및 컴퓨터, 광경화수지를 응용한 일종의 3차원 인쇄장치로 그 기본 원리는 원하는 3차원 형상의 단면을 높이에 따라 적층하여 입체 형상을 만든다는 점이다[6,7]. 여기서 광경화수지는 특정 파장의 레이저에 노출되면 액체 상태에서 고체상태로 경화되는 특성을 갖고 있다.

Fig.1의 (a)는 SLA 시스템의 기본 구성을 나타낸다. 용기 안에는 액상의 광경화수지가 담겨 있고 수직으로 이동가능한 테이블이 경화된 수지를 지지해주며 적층과정에 따라 높이를 변화시켜준다. 한편 상부의 projector는 X-Y 평면내에서 단면의 형상에 따라 이동하며 표면의 수지를 경화시키는 역할을 한다.

Fig.1의 (b)는 광경화성 수지의 적층 과정을 나타낸다. 우선 테이블이 한 층의 두께(레이저에 노출되었을 때 경화되는 깊이, 약 0.1-0.5mm)만큼 아래로 이동하고 레이저가 상응하는 단면 형상에 따라 수평이동을 하며 한 층의 경화가 완성된다. 그 다음에 테이블이 한 층의 두께만큼 아래로 이동하고 전단계에서 경화된 수지 위에 새로운 단면이 경화되어 적층된다. 이러한 일련의 과정을 계속 반복해가며 원하는 3차원 형상의 제품을 완성한다.

3차원 CAD 데이터로부터 SLA 시작품을 만들기까지는 여러 단계의 공정을 거쳐야 한다. Fig. 2에 이러한 일련의 과정을 도식화하였다.

3.2 광경화성 수지의 특성

광경화수지는 특정 파장의 빛을 받게 되면 액체에서 고체로 변하는 특성이 있다. 특히 빠른 속도의 레이저를 받으면 빛에 노출된 부분만 굳어지고 노출되지 않은 부분은 액체로 남아 재사용이 가능하며 노출 시간, 빛의 주사 속도, 재료의 특성 등에 따라 경화되는 깊이의 조절이 가능하다[8]. 또한 층과 층 사이에 우수한 접착력이 있어 층을 쌓아 3차원 형상을 만들기가 용이하다. Table 4에는 본 연구에서 사용한 광경화수지(Resin XB5154)의 물성치를 나타내었다.

4. SLA 시금형을 이용한 플라스틱인 성형실험

4.1 SLA를 사용한 터빈블레이드 시금형의 제작

본절에서는 SLA를 사용하여 터빈블레이드 모델실험을 수행하기 위한 시금형의 제작에 대해 언급하고자 한다. 우선 SLA의 입력 화일 작성을 위한 3차원 CAD 모델링을 I-DEAS Solid Modeling을 사용하여 수행하였다. Fig. 3은 터빈 블레이드의 형상을 개략적으로 나타낸 도면이고 Fig. 4는 이를 1/4로 축소하여 3차원적으로 모델링한 형상으로 이를 음각

으로 사용하여 상부금형과 하부금형의 형상을 모델링하여 SLA 시금형을 제작하였다. Fig.5, 6에 각각 상부금형과 하부금형의 CAD 모델링 형상과 제작된 SLA 시금형의 형상을 비교하였다. 제작된 SLA 시금형을 사용하여 플라스틱인 실험을 수행하였다.

4.2 플라스틱인 성형실험

시편의 형상은 Fig. 7과 같다. 시편의 제작은 다음과 같은 순서로 했다. 먼저 Fig.8의 (a)와 같이 강(steel)으로 시편형상과 같은 시편모델을 가공제작하였다. 그다음 이를 이용하여 반대형상의 시편금형의 상하부를 (b)와 같이 만들었다. 이때 사용된 소재는 에폭시계 열의 수지와 경화제로서, 1:1 비율로 고르게 섞어 시편모델로 형을 뜨고 굳혀 (b)와 같이 만들어진다. 또한 시편모델과 에폭시수지의 이형제로써 랩핑 페이퍼를 사용했다. 그리고 플라스틱인을 시편금형 사이에 놓고 눌러 (c)와 같이 시편을 제작하였다.

플라스틱인 시편의 성형실험은 UTM(Universal Testing Machine)으로 수행하였다. 그리고 SLA 수지 금형에 핀을 박아 가이드(guide) 역할을 하도록 하였다. 시편은 하부금형에 놓고 윤활제로써 랩핑 페이퍼를 두겹씩 아래위로 깔았다. 그리고 최종 변위(15mm)를 설정한 다음, 일정한 속도로 변위를 증가시켰다.

실제 수지금형을 최종변위까지 눌렀을 때는 시편의 체적이 요구되는 제품의 체적보다 크기 때문에 플래시가 생기게 된다. Fig.9는 이와같은 터빈 블레이드의 단계별 형상 및 플래시형상의 생성과정을 보여준다(왼쪽부터 차례로 초기형상, 8, 12, 14, 15mm의 변위만큼 성형시의 형상). Fig. 10은 최종적으로 성형된 제품의 플래시를 제거한 형상으로 블레이드의 날개 부분이 결함이 없이 소재가 충만하여 성공적으로 성형이 되었음을 알 수 있다.

4.3 결과 분석

Fig. 11은 하중 대 변위의 그래프를 보여준다. 최종변위는 15mm이고 13mm를 지나면서 하중이 급격히 증가하며 최종하중은 662kgf이다. 따라서 여기에 하중척도를 곱하면 실제 스테인레스강을 이용한 성형공정의 하중은 2.3절의 (5) 식과 같이 계산하여 약 11,250 ton 정도로 예상된다. 실제로 터빈 블레이드의 성형은 35 ton 해머로 다단으로 이루어지며, 해머와 프레스의 단조 능력에 대한 평가식은 아래와 같다.

$$E_r (\text{kgf} \cdot \text{m}) = L_r (\text{ton}) / 0.4 \quad (6)$$

여기서 E_r 는 해머의 에너지 용량, L_r 는 프레스의 최대 하중이다. 윗식에 의하면 35 ton 해머의 단조 능력은 14,000 ton 프레스의 능력과 같다. 한편 실제 수지금형을 최종단계까지 성형하는 과정에서 수지금형이 탄성변형함에 따라 하중이 실제 소요량보다 과대평가 되었음을 알 수 있다. 따라서 모델링에서의 최종 하중은 상사값보다 작다고 볼 수 있으며 실제 공정에서도 상사성에서의 가정으로 인한 오차를 고려하더라도 주어진 시편은 무난히 성형되리라고 예상된다.

5. 결 론

본 연구에서는 SLA를 이용하여 수지금형을 제작하고 이를 사용하여 플라스틱인 성형 실험을 수행함으로써 터빈블레이드 시금형의 성형성을 평가하였다. 이러한 결과를 종합하여 정리해보면 다음과 같다.

- (1) 터빈블레이드 열간단조의 성형성을 평가하기 위해 플라스틱인 모사실험을 제안하고 플라스틱인과 스테인레스강과의 상사성을 도출하였다.
- (2) SLA를 이용한 CAD 모델로부터 시작품 제작까지의 일련의 과정에 대해 고찰하였고 경화된 광경화수지의 기계적 성질이 플라스틱인 성형실험을 위한 금형으로 사용하기에 적합함을 확인하였다.
- (3) SLA를 이용하여 신속하게 수지금형을 제작하고 이를 사용하여 터빈블레이드의 플라스틱인 성형실험을 수행하였다. 실험시 단계별 성형형상 및 성형하중을 고찰하여 실제 성형시 성형성을 평가하고 소요하중을 예측함으로써 실제 공정 설계시에 적절한 금형 및 예비형상(preform)을 설계에 반영할 수 있었다.

후 기

본 연구는 1993-1994년도 한국중공업 주식회사의 지원으로 수행된 연구로 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

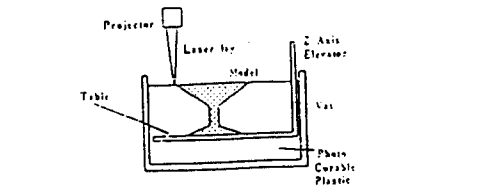
- [1] Wanheim, T., Maegaard, V. and Danccert, J., "The Physical Modeling of Plastic Working Processes", Advanced Technology of Plasticity, Vol.1, pp.984, 1984.
- [2] R.L. Bodnar, D.C. Ronemus, B.L.Bramfitt and D.C.Shah, "Physical Modelling of Hot-Deformation Processes - Using Plasticine", Trans. ISS., pp.35-46, 1986.
- [3] Stephen P. Dudra, Paul Burte and Yong Taek Im, "Physical Modeling Technique with Plasticine of Metal Forming Processes", Research Memorandum, The Ohio State University, March, 1988.
- [4] Hidehiko, T., Yoshiharu, T. and Junichi, I., "Simulation of Hot Steel in Plastic Working with Plasticine and Lead", Advanced Technology of Plasticity, vol.II, pp.1003-1008, 1984.
- [5] G.A.Lee, Y.T.Im, J.S.Lee and S.S.Hong, "An Experimental Study on Forming an Axi-Symmetric Dome Type Closed-Die Forging Product Using Modeling Material", KSME, Vd.16, No.11, pp.2082-2089, 1992
- [6] D.Deitz, "Stereolithography Automates Prototyping, Mechanical Engineering", vol.112, pp.34-43, Feb., 1992
- [7] S.W. Thomas, "Stereolithography Simplifies Tooling For Refined Rubber Parts", Mechanical Engineering, July, 1992
- [8] A.Reisner, Photosensitive Polymer, John Wiley & Sons, New York, 1989

	물리적인 양	스테인레스강	관계식	플라스틱인
기초 물리량	길이	l_s	$l_p = \Gamma' l_s$	l_p
	시간	t_s	$t_p = \Gamma' t_s$	t_p
	힘	F_s	$F_p = F' F_s$	F_p
영향을 받은 물리량	응력	σ_s	$\sigma_p = \frac{F'}{l'} \sigma_s$	σ_p
	변형률 속도	$\dot{\epsilon}_s$	$\dot{\epsilon}_p = \frac{1}{l'} \dot{\epsilon}_s$	$\dot{\epsilon}_p$

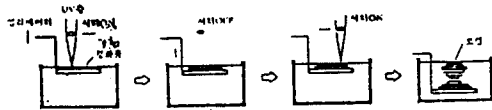
Table 1. 스테인레스강과 플라스틱인의 상사 관계식

	플라스틱인	스테인레스강	결정할 척도값
길이(시편)	156.5 mm	626 mm	Γ'
속도	$V_p = 83.4 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$	$V_s = 5.604 \text{ m/sec}$	Γ'/Γ''
온도	$29^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$	1150°C	

Table 2. 모델실험 조건과 실제실험조건의 비교



(a) SLA 시스템의 기본 구성



(b) 광경화수지의 적층 과정

Fig. 1. SLA 시스템의 원리

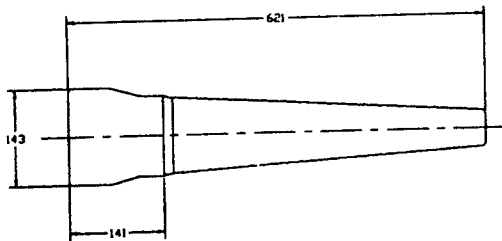


Fig. 3. 터빈블레이드의 개략적인 형상 및 치수

물리적인 양	척도값
길이	$\Gamma' = 4$
시간	$t' = 59.52 \times 10^{-6}$
힘	$F' = 17008$
응력	$\frac{F'}{l'} = 1063$

Table 3. 각 물리량의 척도값

Tenile strength	35 N/mm ²
Tensile modulus	1100 - 1200 N/mm ²
Elongation at break	11 - 19 %
Impact strength	20 - 25 kJ/m ²
Hardness	78 Shore D
Glass transition temperature	83°C

Table 4. 광경화수지(XB5154)의 물성치

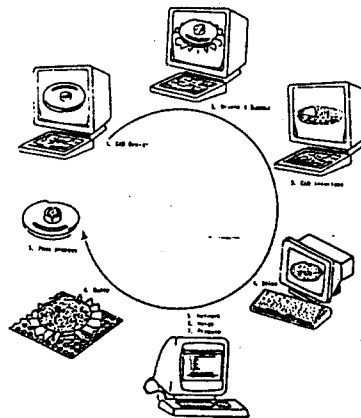


Fig. 2. SLA 시제품의 제작 공정

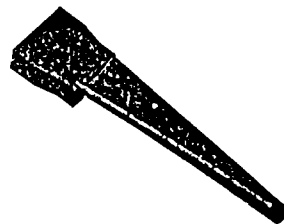
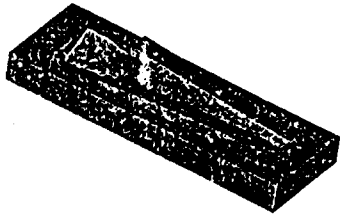
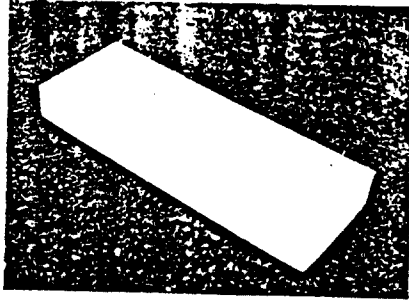


Fig. 4. 터빈블레이드의 3차원 모델링 영상

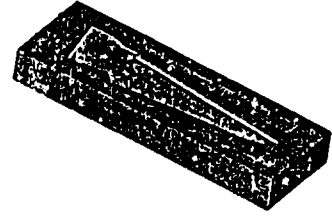


(a) 하부금형의 모델링 형상

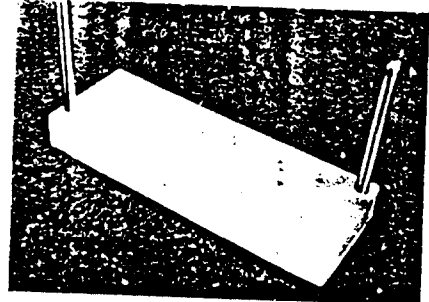


(b) SLA로 제작된 하부금형의 시금형

Fig. 5. 상부금형의 모델링 형상 및 제작된 시금형



(a) 상부금형의 모델링 형상



(b) SLA로 제작된 상부금형의 시금형

Fig. 6. 하부금형의 모델링 형상 및 제작된 시금형

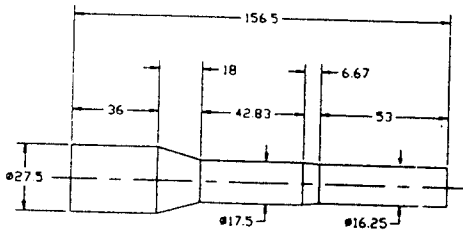


Fig. 7. 시편의 형상 및 치수

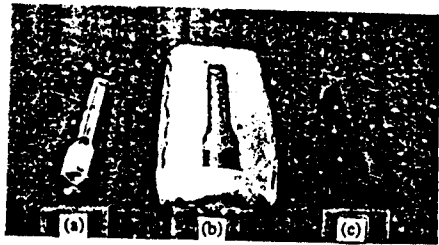


Fig. 8. (a) 강(steel)으로 제작된 시편모델
(b) 에폭시로 된 시편금형
(c) 시편금형으로 제작된 플라스틱인 시편



Fig. 9. 터빈 블레이드의 단계별 성형 형상



Fig. 10. 최종 성형된 제품 형상

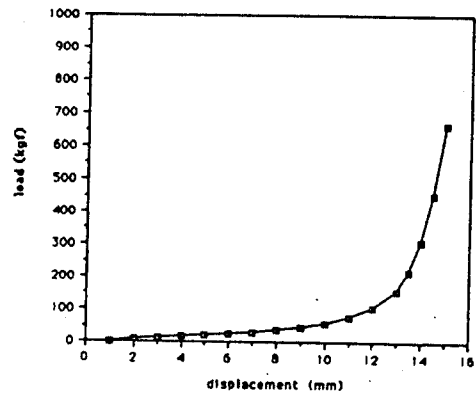


Fig. 11. 하중 대 변위의 그래프