한국소성가공학회지 제 4 권 제 4 호, pp. 335~344, 1995

〈論 文〉

모델재료와 SLA 시금형을 이용한 터빈블레이드 열간단조공정의 모사실험

박 근* · 신민철* · 양동열* · 조종래** · 김종수***

(1995년 5월 13일 접수)

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

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

Abstract

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

Key Words: Hot Forging Process, Modelling Experiment, Turbine Blade, Rapid Prototyping, Stereolithography Apparatus(SLA)

1. 서 론

단조 공정에서 금형은 소재에 외력을 작용시켜서 소재를 변형시키는 역할을 한다. 이때 금형의 형상은 소재의 유동 양상을 결정하며 금형이 올바르게 설계되어야만 결함이 없고 우수한 제품을 생산할 수 있다. 단조 공정에 사용되는 금형을 설계하기 위해서는 재료의 유동상태를 잘 파악해서 결함의 발생여부, 공정 최종단계에서 소재의 금형 충만 여부, 소재의 응력상태, 소요 하중 등의 성형변수와 공정변수를 결정하는 것이 매우 중요하다.

이와같은 설계에 중요한 인자를 파악하기 위해서 실제 금형을 제작하고 실소재를 이용하여 실험을 할 수도 있으나 상대적으로 많은 비용과 시간이 필요하다. 이에 비해 모델재료를 이용한 모사실험은 비용이 절감되며 비교적 짧은 시간에 실제 공정을 예측할 수 있으므로 제품의 성형성 평가, 적절

*한국과학기술원 정밀공학과
**한국중공업(주)
***한국금형기술(주)

한 금형 및 공정설계, 그리고 예비형상(preform)의 선택을 위해서 많이 이용되는 방법이다. 지금까지 주로 사용된 모델재료들은 왁스, 탄소강, 진흙, 또는 납등으로 현재까지 이들에 대한 많은 연구가 진행되어왔다[1].

본 연구에서는 인중 열간상태에서 금속의 유동과 매우 유사하다고 알려져 있으며 성형성이 좋은 플라스티신(plasticine)을 모델재료로 사용하였다. 이것은 유동 응력이 낮아 아크릴, 에폭시 등의 수지금형을 사용하여 보다 경제적인 성형 실험이 가능하다 현재 플라스티신을 사용하여 열간 금속 성형공정의 모델실험 수행을 통한 성형성 평가에 관해 국내, 외에서 많은 연구가 진행되었다[2~5]. 이러한 수지금형은 보통 절삭가공에 의존하여 제작되는 경우가 많아 복잡한 형상의 제품 개발 과정에 있어서 상대적으로 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다.

본 연구에서는 현재 여러 산업 분야에서 각광받고 있는 쾌속 3차원 조형법(Rapid prototyping)을 사용하여 보다 신속하게 수지금형을 제작함으로써 기존의 수지금형 제작시 소요되는 시간과 노력의 절감을 목적으로 한다. 쾌속 3차원 조형법은 2차원적인 층을 쌓아 복잡한 3차원 형상의 제품을 신속하게 제작하는 방법으로 사용 재료와 제작 원리의 차이에 따라 여러가지 공정이 있는데 본 연구에서는 이중 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 SLA(Stereolithography Apparatus) 시스템을 사용하였다. SLA는 액상의 광경화성 수지에 레이저를 주사하여 경화시킴으로써 원하는 형상의 제품을 제작하는 방법으로 제작된 수지금형이 플라스티신 성형에 적합한지에 대한 고찰이 필요하다. 이를 확인하기 위해 제작된 수지금형을 사용하여 플라스티신 성형실험을 수행하고 이 결과로부터 터빈 블레이드 열간단조시의 변형 형상 및 금형 충만 여부, 성형 하중 등을 고찰하여 성형성을 평가함으로써 실제품 성형을 위한 금형 및 공정 설계를 반영하고자 한다.

2. 플라스티신을 사용한 열간단조의 모사실험

2.1 터빈블레이드 열간단조공정의 특성

본 연구에서는 원자력 발전소에서 사용되는 터빈블레이드를 대상으로 삼아 실험을 진행하였다. 재질은 스테인레스강이며 대형제품(길이 626mm)이므로 상대적으로 성형하중이 크고 금형설계제작 과정에서 많은 시간과 비용이 소요될 것으로 예상된다. 따라서 실제 금형제작에 앞서 모델재료를 사용한 성형실험을 위한 수지금형은 보통 기계적 성질이 우수한 아크릴, 에폭시 등의 수지를 사용하여 기계가공에 의해 제작된다. 그러나 본 연구에서 사용한 터빈블레이드 제품은 날개부분이 3차원 곡면으로 이루어져 있고 또한 날개의 끝부분의 궤적 역시 3차원 스플라인으로 이루어져 상하부 금형의 분리면(parting surface)도 3차원 곡면으로 표현된다. 이러한 금형을 가공하기 위해서는 5축 CNC machine을 사용해야 하므로 많은 시간과 비용이 소요된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 SLA를 사용한 신속한 수지금형 제작 방법을 제안하였다.

2.2 스테인레스강과 플라스티신의 상사성 도출

플라스티신 모사실험이 실제 실험과 상사성을 이루기 위해서는 등온 및 준정적 상태

Table 1 Friction coefficients for various lubricants

Lubricants	Friction Factor
teflon and vaseline	0.08~0.15
tissue	0.2~0.35
wrapping paper	0.1~0.17
baby powder	0.5~0.75

Table 2 Similarity relationship of stainless steel and plasticine

	Variable	Stainless steel	Similarity	Plasticine
Basic Property	Length	l_s	$l_s=l^* l_p$	l_p
	Time	t_s	$t_s=t^* t_p$	t_p
	Force	F_s	$F_s=F^* F_p$	F_p
Related Property	Stress	σ_s	$\sigma_s=\frac{F^*}{l^{*2}}\sigma_p$	σ_p
	Strain rate	$\dot{\varepsilon}_s$	$\dot{\varepsilon}_s=\frac{1}{t^*}\dot{\varepsilon}_p$	$\dot{\varepsilon}_p$

Table 3 Comparison of experiment conditions

	Plasticine	Stainless steel	Scale factor
Length	156.5mm	626mm	l^*
Velocity	$V_p=83.4\times10^{-6}$m/sec	$V_s=5.604$m/sec	$1/t^*$
Temperature	29 ℃ ±1 ℃	1150 ℃	

하에서 기하학적 형상의 대응 및 마찰계수, 포아송비, 가공경화율지수(m) 등이 유사해야 한다. 본 연구에서 기하학적 형상은 동일하게 설계하였다(1/4 축소). 또한 실제공정에서의 마찰계수 값은 0.12~0.15정도로 판단되는 반면, 플라스티신 성형실험에 있어서 윤활제의 종류에 따라 마찰계수가 달라지게 된다[4]. Table 1에 이를 정리하여 나타내었다. 본 연구에서는 상사성을 유지하기 위해 이중 마찰계수의 범위가 가장 유사한 랩핑 페이퍼를 윤활제로 사용하였다.

한편 20℃에서의 플라스티신은 1000℃에서의 강에 대한 포아송비 및 가공경화율지수가 거의 유사하다고 알려져있다[2]. 본 실험에서 사용된 스테인레스강과 플라스티신의 구성방정식은 해당 온도에서 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{\sigma}_s=9.762\,\dot{\varepsilon}_s^{0.106}\,(\mathrm{kgf/mm^2})\ (1150℃) \quad (1)$$

$$\bar{\sigma}_p=0.020\,\dot{\varepsilon}_p^{0.08}\,(\mathrm{kgf/mm})\ (20℃) \quad (2)$$

여기서 가공경화율지수가 스테인레스강의 경우 0.106, 플라스티신의 경우가 0.08로 다소 차이가 있으나 실제 플라스티신의 성형온도가 29℃로 보다 높은 점을 감안하여 두 지수를 거의 같다고 가정함으로써 상사성을 도출하였다. 이와 같이 고온에서의 스테인레스강과 상온에서의 플라스티신이 상사성을 만족할 때 그 관계식은 Table 2에서와 같이 나타낼 수 있다.

이 관계식을 (1), (2)식에 대입하여 연립하면 다음 식을 유도할 수 있다.

$$0.020\times\frac{F^*}{l^{*2}}=9.762\times\frac{1}{t^{*0.08}} \quad (3)$$

(3)식을 정리하면 결과적으로 하중척도 F^*를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Table 4 Scale factor of each variable

Variable	Scale factor
Length	$l^*=4$
Time	$t^*=59.52\times10^{-6}$
Force	$F^*=17008$
Stress	$\frac{F^*}{l^{*2}}=1063$

$$F^* = 488 \times \frac{l^{*2}}{t^{*0.08}} \quad (4)$$

Table 3은 상사성 도출에 필요한 각종 공정변수(실제의 크기, 성형속도, 성형온도)들을 보여준다. 이를 이용하여 (4)식으로부터 모델실험을 통한 성형성평가에 필요한 척도값을 계산하면 Table 4와 같다. 다음 장에서는 수지금형 제작에 사용된 SLA 시스템에 대해서 간략하게 설명하도록 하겠다.

3. SLA 시스템의 소개

3.1 SLA 시스템의 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 액체상태에서 고체상태로 경화되는 특성을 갖고 있다.

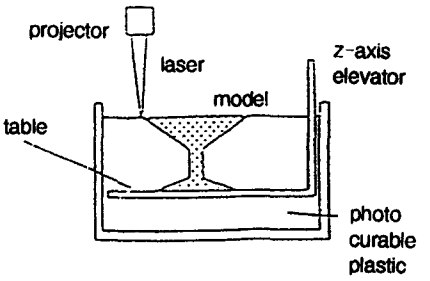
Fig. 1의 (a)는 SLA 시스템의 기본 구성을 나타낸다. 용기 안에는 액상의 광경화수지가 담겨 있고 수직으로 이동가능한 테이블이 경화된 수지를 지지해주며 적층과정에 따라 높이를 변화시켜준다. 한편 상부의 레이저는 X-Y 평면내에서 단면의 형상에 따라 이동해가며 표면의 수지를 경화시킨다.

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.

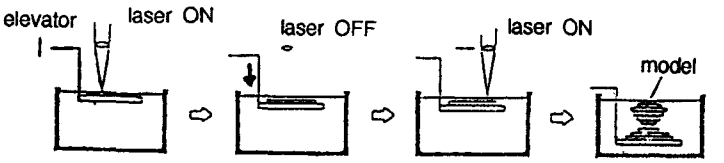
3차원 CAD 데이타로부터 SLA 시작품을 만들기까지는 여러 단계의 공정을 거쳐야 한다. Fig. 2에 이러한 일련의 과정을 간략하게 도식화하였다. 각 공정에 대한 설명은 다음과 같다.

STEP 1 : CAD 설계(CAD Design)

원하는 제품의 형상을 CAD 시스템에서 3



(a) Schematic diagram of SLA system



(b) Three-dimensional building process

Fig. 1 SLA system

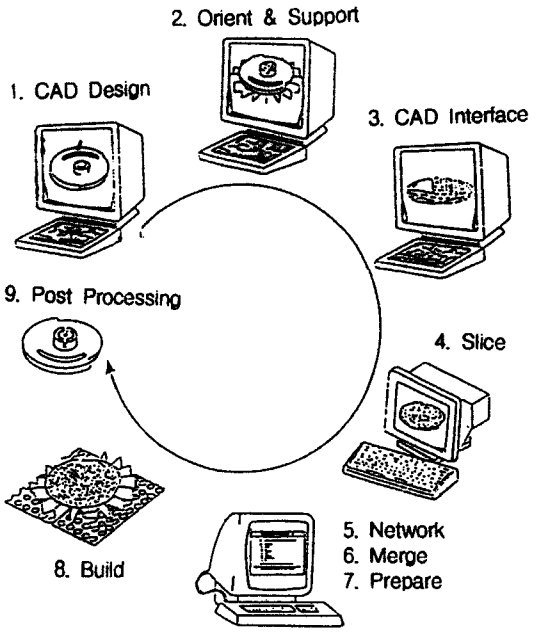


Fig. 2 Prototyping processes using SLA

차원적으로 모델링한다.

STEP 2 : 방향잡기 및 지지대 설치(Orient & Support)

SLA에서 안정된 제품을 생성하기 위한 위치를 정해주고 제품생성후 제품과 테이블간의 용이한 분리를 위해 지지대를 설치해준다.

STEP 3 : CAD 인터페이스(CAD Interface)

CAD 데이터를 SLA의 입력 화일인 STL 화일 형식으로 바꿔준다. 여기서 STL 화일은 제품의 표면을 선형 삼각형 격자로 분할하여 3차원 형상을 묘사해준다.

STEP 4 : 층분할 작업(Slice)

이 작업은 SLA 제작을 위해 3차원 형상을 무수히 많은 얇은 층의 적층된 형태로 분할하는 작업이다. 슬라이스 컴퓨터에서 해상도 및 hatch 간격 등 일종의 가공 조건을 부여하여 3차원 형상을 얇은 층으로 분해한다.

STEP 5 : 네트워킹(Network)

층분할된 데이터 화일을 슬라이스 컴퓨터에서 SLA시스템에 부착된 컨트롤 컴퓨터로 전송하여 준다.

STEP 6 : 합성(Merge)

층분할된 모든 화일들이 결합되고 SLA의 운전을 목적으로 재포맷된다. 또한 층분할된 모델의 이동, 회전, 대칭, 복사 등의 작업이 소프트웨어적으로 가능하다.

STEP 7 : 자료설정(Prepare)

SLA 시작품 제작을 위한 여러가지 환경변수들(경화폭 및 깊이, 레이저의 주사방향 및 경로 등)을 설정해준다.

STEP 8 : 적층(Building)

층분할된 형상 데이터에 따라 레이저와 테이블이 각각 수평, 수직운동을 반복하며 3차원 형상의 제품을 적층한다.

STEP 9 : 후가공 공정(Post Processing)

제작된 제품에서 지지대를 제거해내고 후경화과정을 통해 제품을 완전히 경화시킨 뒤 표면의 정밀도 향상을 위해 사상 혹은 코팅 등의 후처리를 하여 완성시킨다.

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

Table 5 Material propety of the resin(XB5154)

Tensile strength	35N/mm²
Tensile modulus	1100-1200N/mm²
Elongation at break	11-19%
Impact strenght	20-25kJ/m²
Hardness	78 Shore D
Glass transition temperature	83℃

층을 쌓아 3차원 형상을 만들기가 용이하다. Table 5에는 본 연구에서 사용한 광경화수지(Resin XB5154)의 물성치를 나타내었다. 이는 아크릴계열의 수지로 보통 수지금형으로 사용되는 에폭시, 아크릴 등에 못지 않게 기계적 성질 및 가공성이 우수하여 플라스티신 모델실험용 금형으로의 사용이 적합하다고 판단된다. 다음 절에서 실험을 통해 이를 확인하도록 하겠다.

4. SLA 시금형을 이용한 플라스티신 성형실험

4.1 SLA를 사용한 터빈블레이드 시금형의 제작

본 절에서는 SLA를 사용하여 터빈블레이드 성형실험을 수행하기 위한 시금형의 제작에 관해 설명하겠다. 우선 SLA의 입력화일 작성을 위한 3차원 CAD 모델링을 I-DEAS Solid Modelling을 사용하여 수행하였다. Fig. 3은 터빈 블레이드의 형상을 개략적으로 나타낸 도면이고 Fig. 4는 이를 1/4로 축소하여 3차원적으로 모델링한 형상으로 이를 음각으로 사용하여 상부금형과 하부금형의 형상을 모델링하여 SLA 시금형을 제작하였다. Fig. 5, 6에 각각 상부금형과 하부금형의 CAD 모델링 형상과 제작된 SLA 시금형의 형상을 비교하였다.

2개의 시금형은 크기가 작아 SLA 용기($500\times500mm^2$)안에서 동시에 적층이 가능하며 이러한 일련의 제작과정은 후가공과정을 포함하여 5~6시간 정도 소요되어 기계가공에 의존하던 기존의 수지금형 제작방법에 비해 획기적으로 많은 시간이 단축되었다. 이와 같이 제작된 SLA 시금형을 사용하여 플라스티신 실험을 무리없이 수행하였고 최종 성형단계에서도 금형에 아무런 손상이 없는 점으로 볼 때 결과적으로 광경화수지로 제작된 SLA 시금형이 플라스티신 성형실험을 위한 금형으로 적합하다고 판단된다.

4.2 플라스티신 성형실험

시편의 형상은 Fig. 7과 같다. 시편은 앞서 모델링한 터빈블레이드의 3차원 CAD 모델을 사용하여 소프트웨어적으로 제품의 체적을 계산한 후에 성형시 플래시 생성을 고려하여 계산된 체적보다 다소 여유있게 설계하였다. 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 에폭시계열의 수지와 경화제로서, 1 : 1 비율로 고르게 섞어 시편모델로 형을 뜨고 굳혀 (b)와 같이 만들어진다. 또한 앞서 설명한 바와 같이 윤활재 및 시편모델과 에폭시수지의 이형제로써 랩핑 페이퍼를 사용했다. 그리고 플라스티신을 시편금형 사이에 놓고 눌러 (c)와 같이 시편을 제작하였다.

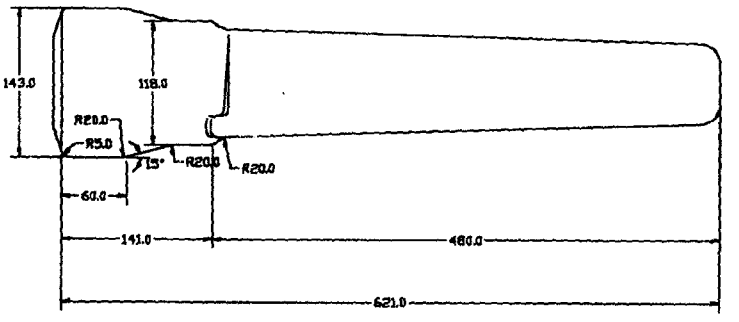


Fig. 3 Schematic diagram of turbine blade

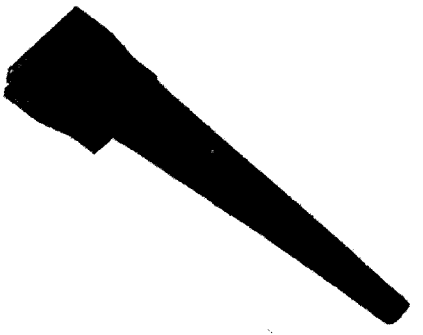
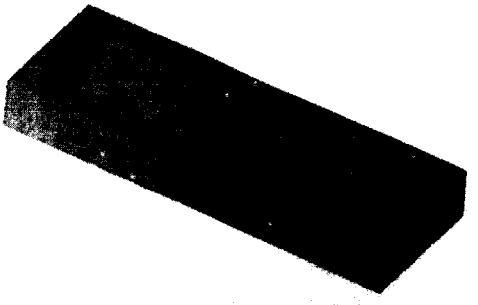


Fig. 4 Three-dimensional CAD modelling (turbine blade)

플라스티신 시편의 성형실험은 UTM (Universal Testing Machine)으로 수행하였다. 그리고 SLA 수지 금형에 핀을 박아 가이드 역할을 하도록 하였고 최종 변위(15 mm)를 설정한 다음, 일정한 속도로 변위를 증가시켰다.

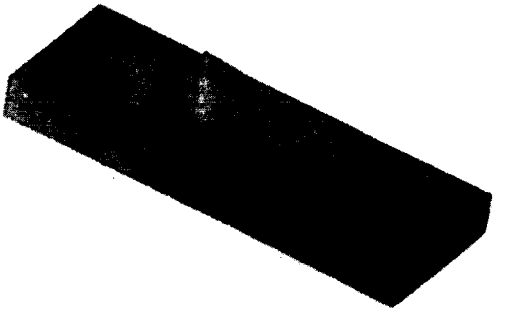
실제 수지금형을 최종변위까지 눌렀을 때는 시편의 체적이 요구되는 제품의 체적보다 크기 때문에 플래시가 생기게 된다.



(a) CAD modelling

(b) SLA prototype die

Fig. 5 SLA prototype die(upper die)



(a) CAD modelling

(b) SLA prototype die

Fig. 6 SLA prototype die(lower die)

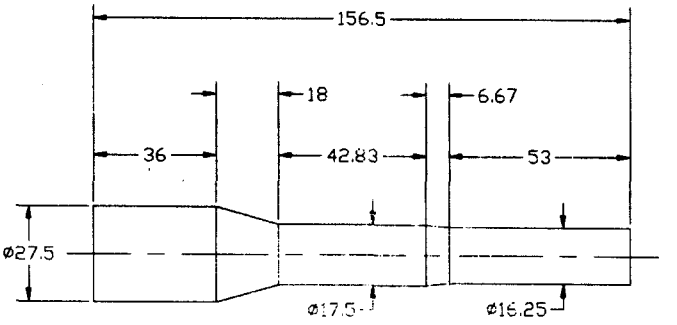


Fig. 7 Shape and dimensions of a preform

Fig. 9는 이와같은 터빈 블레이드의 단계별 형상 및 플래시형상의 생성과정을 보여준다 (왼쪽부터 차례로 초기형상, 8, 12, 14, 15 mm의 변위만큼 성형시의 형상). 실험시 소재와 금형간의 기하학적인 제약조건에 의해 초기시편의 위치가 정중앙에 위치하지 못하고 하부금형의 금형형상을 따라 약간 비스듬한 형태로 설정되었다. 이로 인해 소재가 금형 내부에 비대칭적으로 채워져 들어갔으며 플래시도 비대칭적으로 형성되었다. Fig. 10은 최종적으로 성형된 제품의 플래시를 제거한 형상으로 블레이드의 날개 부분이 결함이 없이 소재가 충만하여 성공적으로 성형이 되었음을 알 수 있다.

4.3 성형하중 평가

Fig. 11은 최종성형단계까지의 하중 대 변위의 그래프를 보여준다. 최종변위는 15 mm이고 13mm를 지나면서 플래시의 생성과 함께 하중이 급격히 증가하며, 최종하중은 662kgf이다. 따라서 여기에 하중척도를 곱하면 실제 스테인레스강을 이용한 성형공정의 하중은 2.3절의 (4)식과 같이 계산하여 약 11,250ton 정도로 예상된다. 실제로 터빈 블레이드의 성형은 35ton 해머로 다단으로 이루어지며, 해머와 프레스의 단조 능력에 대한 평가식은 아래와 같다[9].

$$E_T(\text{kgf}\cdot\text{m}) = L_f(\text{ton})/0.4 \qquad (5)$$

여기서 E_T는 해머의 에너지 용량, L_f는

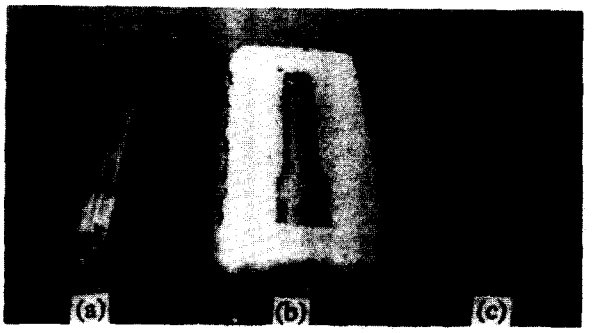


Fig. 8 (a) preform model(steel)
(b) preform mold(epoxy)
(c) final preform(plasticine)

Fig. 9 Deformed shape at each stage

Fig. 10 Deformed shape at final stage

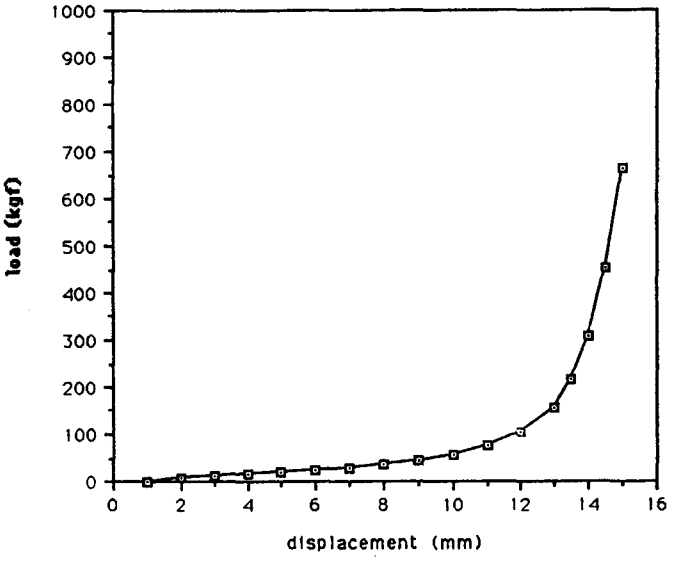


Fig. 11 Forging load vs. displacement

프레스의 최대 하중이다. 윗식에 의하면 35 ton 해머의 단조 능력은 14,000ton 프레스의 능력과 같다. 또한 수지금형을 최종단계까지 성형하는 과정에서 수지금형이 탄성변형함에 따라 하중이 실제 소요량보다 과대평가되는 측면이 있어 모사실험에서의 최종하중은 상사값보다 작다고 볼 수 있으며, 실제 공정에서 상사성에서의 가정으로 인한 오차를 고려하더라도 주어진 시편은 무난히 성형되리라고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서 SLA를 이용하여 수지금형을 제작하고 이를 사용하여 플라스티신 성형실험을 수행함으로써 터빈블레이드 시작금형의 성형성을 평가하였다. 이러한 결과를 종합하여 정리해보면 다음과 같다.

(1) 터빈블레이드 열간단조의 성형성을 평가하기 위해 플라스티신 모사실험을 제안

하고 실제 실험과 유사하도록 각종 공정변수를 설정하여 플라스티신과 스테인레스강과의 상사성을 도출하였다.

(2) SLA의 기본 원리와 이를 이용한 CAD 모델로부터 시작품 제작까지의 일련의 과정에 대해 고찰하였고 경화된 광경화 수지의 기계적 성질이 플라스티신 성형실험을 위한 금형으로 사용하기에 적합함을 문헌조사와 성형실험을 통해 확인하였다.

(3) SLA를 이용하여 신속하게 수지금형을 제작하고 이를 사용하여 터빈블레이드의 플라스티신 성형실험을 수행하였다. 실험시 단계별 성형형상 및 성형하중을 고찰하여 실제 성형시의 성형성을 평가하고 소요하중을 예측함으로써 실제 공정 및 금형설계시에 적절한 금형 및 예비형상을 설계에 반영할 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

(1) T.Wanheim, V.Maegaard and J.Dancdert, 1984, "The Physical Modeling of Plastic Working Processes", Advanced Technology of Plasticity, Vol.1, p. 984.

(2) R.L.Bodnar, D.C.Ronemus, B.L.Bramfitt and D.C.Shah, 1986, "Physical Modelling of Hot-Deformation Processes-Using Plasticine", Trans. ISS., pp. 35~46.

(3) T.Hidehiko, T.Yoshiharu and I.Junichi, 1984, "Simulation of Hot Steel in Plastic Working with Plasticine and Lead", Advanced Technology of Plasticity, Vol. Ⅱ, pp. 1003~1008.

(4) G.A.Lee, Y.T.Im, J.S.Lee and S.S. Hong, 1992, "An Experimental Study on Forming an Axi-Symmetric dome Type Closed-Die Forging Product Using Modeling Material", KSME, Vol. 16, No. 11, pp.2082~2089.

(5) C.Y.Park, D.Y.Yang, K,H.Lee, and I.S. Eun, 1994, "An Experimental Study of Forming Process Development in Large Nozzle-Shaped Product uning the Incremental Forging Method for Expanding", KSTP, Vol.3, No.1, pp. 110~119.

(6) D.Deitz, 1992, "Stereolithography Automates Prototyping", Mechanical Engineering, vol.112, pp. 34~43, Feb.

(7) S.W.Thomas, 1992, "Stereolithography Simplifies tooling For Refined Rubber Parts", Mechanical Engineering, pp. 65~69, July.

(8) A.Reisner, 1989, "Photosensitive Polymer", John Wiley & Sons, New York.

(9) 조남춘, 김남환, 이성호, 홍성석, 이종수, 1984, "해머 단조 공정의 Physical Modeling-예비성형체 설계에 대한 대형 단조품 성형", 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp.35~45.