

## 온간 단조성형기술을 이용한 마그네슘합금의 임펠러 제조공정연구

김승돈<sup>1</sup> · 강성훈<sup>#</sup> · 권용남<sup>1</sup> · 이정환<sup>1</sup>

### A Study on Warm Forging of Magnesium Alloy Impeller

S. D. Kim, S. H. Kang, Y. N. Kwon, J. H. Lee

(Received May 10, 2007)

#### Abstract

This study focuses on the warm forging of a magnesium alloy impeller used for the fuel cell. The impeller has the very complicated shape with sharply twisted blade and thus is generally produced by mechanical machining or casting process. However, since these technologies give the high manufacturing cost or poor mechanical properties, the forging technology is required to make the high-quality impeller with the lower manufacturing cost. In order for production of the impeller by warm forging technology, the parametric studies using finite element analyses were carried out to find the optimal perform shape of impeller. Based on the FE simulation results, dies for impeller forging were designed and the resultant forged impeller was shown.

**Key Words** : Magnesium Alloy Impeller, FE Simulation, Warm Forging.

#### 1. 서 론

최근 부품의 경량화가 이슈가 되면서 마그네슘합금, 강화플라스틱, 알루미늄합금 등 경량소재의 수요가 증가하고 있다. 특히, 마그네슘합금은 구조재료로서 가장 비강도가 높고, 우수한 진동/충격 흡수성, 전자파 차폐성을 가지고 있어 산업용 부품소재로서 각광을 받고 있다[1].

그러나 마그네슘합금은 특유의 조밀육방구조로 인해 단조성형성이 좋지 않아 대부분 다이캐스팅이나 기계가공에 의해 부품제조가 이루어지고 있는 실정이다. 일반적으로 주조에 의해 제조된 부품들은 표면처리 등의 후공정이 요구되며, 기공이나 내부 결함에 의해 단조품에 비해 기계적 성질이 저하되는 단점이 있다. 반면, 5축 가공에 의한 임펠러 제조는 가공 시간이 길며 생산비용이 타

공정에 비해 매우 고가이므로 생산성 측면에서 매우 비효율적이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 단조성형기술을 이용한 다양한 부품제조기술에 대한 연구가 수행되고 있다[2~3].

본 연구에서는 기존의 문제점을 보완하기 위해 온간단조성형에 의해 마그네슘합금 임펠러를 제조하기 위한 연구를 수행하였다. 단조성형공정에는 온도, 펀치 속도, 윤활방법, 예비성형체 등 다양한 성형조건이 있지만, 복잡한 형상을 갖고 있는 임펠러의 경우 단조성형이 매우 어려워 최적화된 예비성형체 형상 및 금형설계안을 도출하는데 연구의 초점을 두었다. 유한요소해석은 250℃의 등온 조건에서 수행되었고, 정형에 가까운 임펠러를 제조하기 위해 밀폐단조 조건하에서 해석을 수행하였다. 해석을 위한 펀치, 상/하부 금형, 시편의 모델링은 I-DEAS를 이용하였고 유한요소해석은 상

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 소재성형연구센터  
# 교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소 소재성형연구센터,  
E-mail: kangsh@kmail.kimm.re.kr

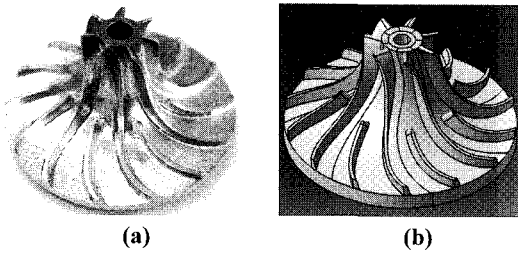


Fig. 1 (a) Photograph of an aluminum alloy impeller produced by machining process and (b) model used in FE simulation

용프로그램인 DEFORM-3D™를 이용하였다. 그리고 마그네슘합금 AZ31의 온간 물성치를 도출하기 위하여 다양한 변형률속도에서 압축실험을 수행하였다.

## 2. 유한요소 해석

### 2.1 모델링

Fig. 1 은 5 축 기계가공으로 생산되는 연료 전지용 알루미늄합금 임펠러의 형상과 모델링한 형상을 나타내고 있다. 그림과 같이 블레이드 높이가 일정하지 않을 뿐만 아니라 두께가 얇고, 많은 곡률을 가지고 있기 때문에 모델링과 정밀성형에 어려움이 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 인블류트 곡선을 갖는 블레이드는 총 14 개로 이루어져 있으며, 위치에 따라 블레이드 높이가 각각 차이가 있다.

### 2.2 압축실험

유한요소해석에 요구되는 마그네슘합금 AZ31의 물성치를 얻기 위해 250°C에서 변형률 속도에 따라 압축실험을 수행하였으며[4], 그 결과를 Fig. 2 에 정리하였다. 고속 성형조건에서의 소재의 유동양상을 고찰하기 위해 변형률속도 10/s와 50/s에서의 압축실험도 수행하였다. 응력-변형률 선도에서 알 수 있듯이 변형률 속도가 증가할수록 압축변형에 따른 소재의 응력이 증가함을 알 수 있다.

### 2.3 해석조건

Fig. 3에 본 연구에서 사용된 임펠러 예비성형체 형상 및 금형 형상을 개략적으로 도시하였다. 예비성형체의 형상과 금형핀의 유무가 임펠러의 성형에 미치는 영향을 유한요소해석을 통해 고찰하였다. 예비성형체는 세장비가 서로 다른 원통형 형상과 베벨형 형상을 사용하였고, 약 70,000개의 사면체요소를 사용하여 해석을 수행하였다.

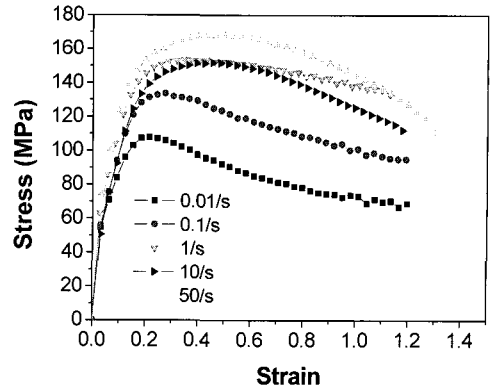


Fig. 2 Stress vs. Strain plots according to various strain rates at temperature of 250°C

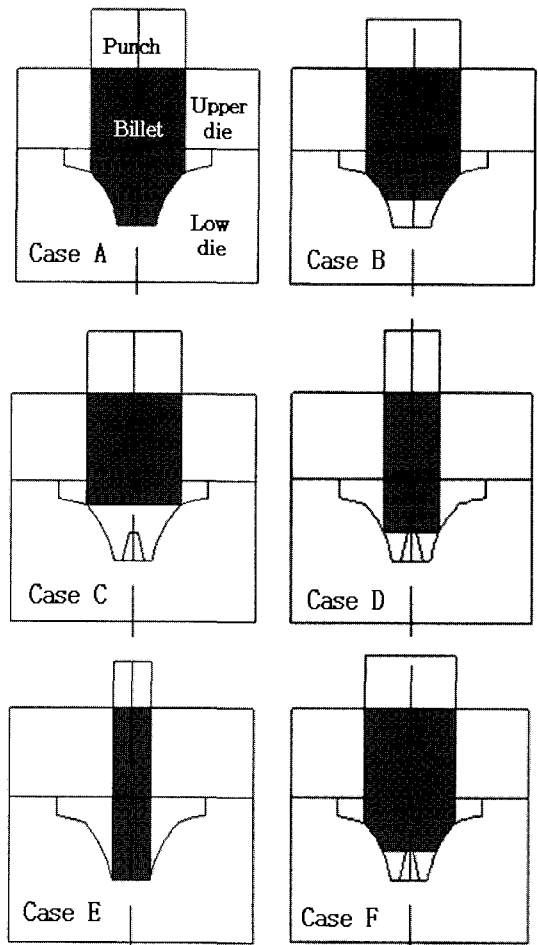


Fig. 3 Schematic preforms and dies used in the FE simulation of impeller forging

**Table 1 Summary of simulation results**

○: Underfilling  
●: Good Shape

	Upper Part	Middle Part	Low Part
CASE A	○	○	○
CASE B	○	○	○
CASE C	●	●	○
CASE D	●	●	○
CASE E	●	●	○
CASE F	●	●	●

금형과 소재의 접촉면에서 전단마찰상수는 0.3, 성형속도는 약 20.0m/s, 성형온도는 250°C의 조건 하에서 등은 밀폐단조로 유한요소해석을 수행하였다.

### 3. 유한요소해석

앞서 언급하였듯이 연료진지용 마그네슘 임펠러의 성형을 위해 예비성형체의 형상 최적화를 위한 유한요소해석을 수행하였다. 임펠러가 복잡한 형상을 가지고 있기 때문에 예비성형체의 형상에 따라 성형성에 많은 영향을 줄 것으로 판단되어, 각각 3 개의 원통형 및 베벨형 예비성형체를 가지고 유한요소해석을 수행하였다. 또한 두께가 얇은 블레이드의 성형이 충분이 이루어지도록 반경 방향의 소재유동을 유도하기 위한 금형편을 사용하였다.

도식적으로 정리된 Fig. 3의 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었으며, 각기 서로 다른 소재의 유동양상을 보여주고 있음을 알 수 있다. 특히 CASE F를 제외한 모든 경우에서 임펠러 블레이드 상/하단부위에 소재의 미충만이 발생하였다. 이러한 해석 결과를 Table 1에 정리하였다. CASE D의 형상을 가진 예비성형체의 경우, 성형초기에는 상단영역에서 성형과 동시에 반경 방향으로의 소재유동이 발생한다. 하단영역의 금형편이 블레이드 성형을 위한 반경방향 소재 유동을 유도하는데 큰 효과가 없음을 보이고 있다. CASE F의 베벨형 예비형상의 경우, 전방압출 과 동시에 금형편에 의한 반경방향 소재유동이 동시에 발생하여 블레이드가 완전하게 성형되고 있음을

알 수 있다. 소재의 응력은 성형초기에는 소성 변형이 전 영역에서 발생하므로 전체적으로 균일한 분포를 보여주고 있으며, 하단영역에 가장 작은 값을 나타내고 있다. 최종적으로 블레이드 성형이 완료된 후 블레이드 하단 끝부분에서 가장 높은 응력이 걸리는 것을 알 수가 있었다.

Table 1에 정리된 바와 같이 6 가지 경우의 예비성형체 유한요소결과 소재의 미충만이 없이 완전하게 블레이드가 성형이 이루어진 경우는 CASE F 이었으며, 154(kN)의 성형하중이 요구되었다.

### 4. 금형 설계

임펠러의 블레이드의 형상은 매우 복잡하고 일정한 방향으로 경사각을 이루고 있지 않다. 특히 임펠러의 상/하단에 해당하는 블레이드의 방향은 서로 다르므로, 최종 성형된 임펠러를 금형으로부터 분리하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 성형된 임펠러의 취출을 쉽게 하기 위해 총 7 개의 분리형 금형을 설계하여 실험을 수행하였다.

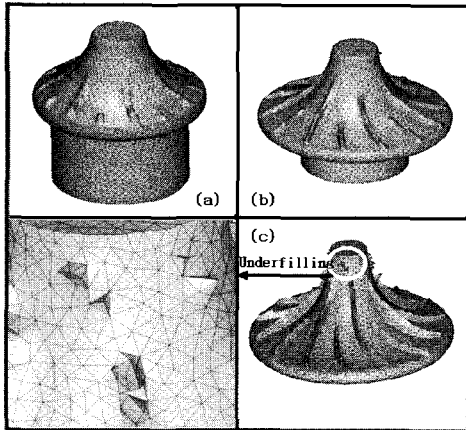
금형설계는 소재의 미충만없이 임펠러 성형이 가능한 CASE F의 해석결과를 바탕으로 이루어졌다. Fig. 5에 유한요소해석 결과를 바탕으로 설계된 금형 형상을 나타내었다. 단조성형 중 금형응력의 완화를 위해 보강링은 단조압력에 의해 분리형 금형과 보강링이 자연적으로 체결이 되면서 버의 발생을 최대한 억제하여 후가공이 최소화 되도록 하였다.

### 5. 실험결과

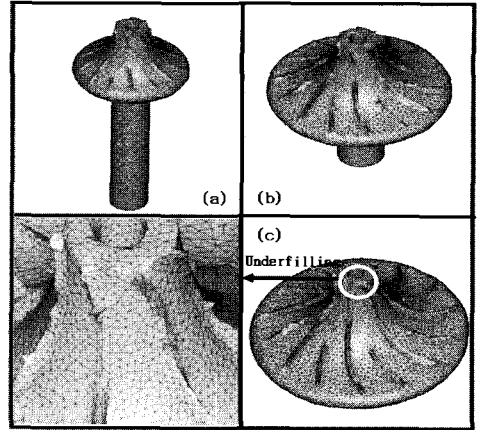
앞서 언급하였듯이 유한요소 해석결과 가장 최적의 예비성형체의 형상을 나타낸 CASE F를 바탕으로 실험을 하였으며 Fig. 6은 실험장비를 나타내고 있다.

금형을 300°C에서 가열한 후 마그네슘합금 시편을 금형에 삽입하여 약 10분간 가열하였다. 예비성형체 및 임펠러 성형을 위한 펀치 속도는 약 1.0mm/min이며, 성형 후 제품의 취출은 하부금형에 위치한 이젝터를 사용하였다.

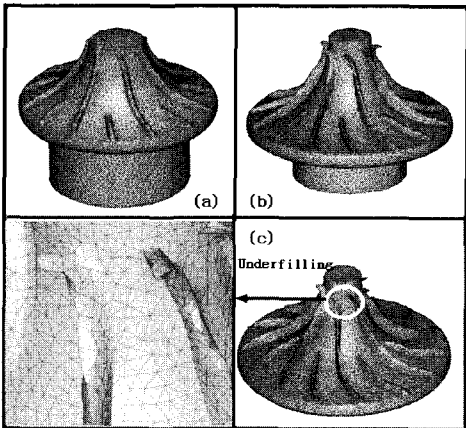
초기 시편 및 성형된 예비성형체 형상과 이를 이용한 임펠러의 최종형상을 Fig. 7에 나타내었다.



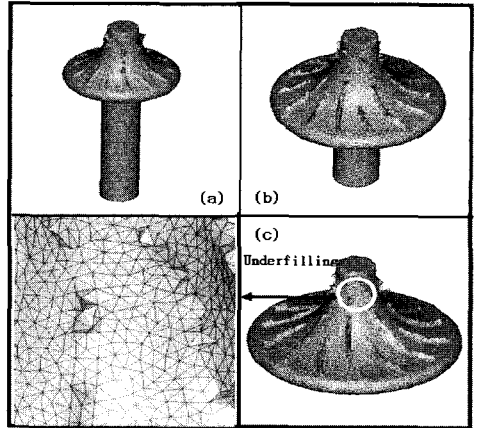
CASE A



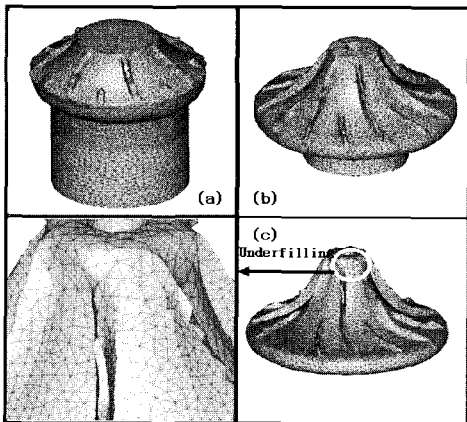
CASE D



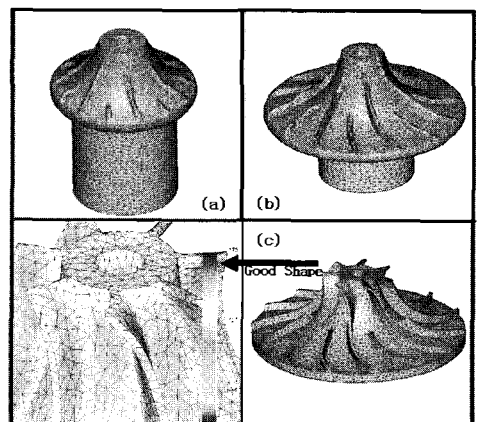
CASE B



CASE E



CASE C



CASE F

Fig. 4 Deformation processes of the CASE (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, and (f) F

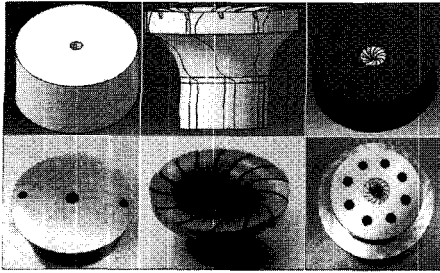


Fig. 5 Die design for the impeller forging

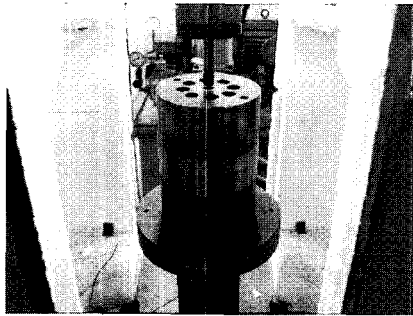


Fig. 6 Equipments for impeller forging

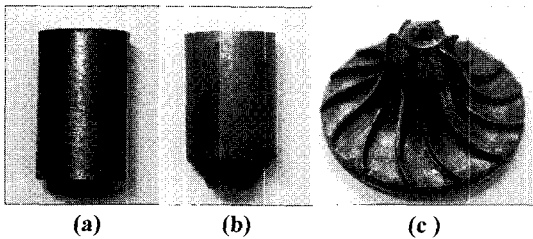


Fig. 7 Photographs of (a) initial billet, (b) preform, and (c) forged impeller

## 6. 결론

본 연구에서는 차세대 자동차용 연료전지에 사용되는 임펠러 제조의 생산성 향상을 위해 기존의 5축 기계가공으로 제조되던 공정을 온간 단조공정으로 대체하기 위한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

(1) 다양한 유한요소해석 결과 베벨형의 예비성형체를 사용한 경우 완전한 형상의 임펠러를 얻을 수 있었으며, 특히 블레이드를 성형함에 있어 금형편을 사용한 경우 반경방향의 소재유동을 유도하는데 효과적임을 알 수 있었다.

(2) 전체적으로 세장비가 큰 경우 임펠러 전 영역에서 블레이드의 성형이 불완전하며, 세장비가 작아질수록 블레이드 경사각이 가장 큰 하단영역에서만 소재의 미충만으로 인해 불완전한 블레이드 성형이 이루어짐을 알 수가 있었다.

(3) 하단영역의 반경방향으로의 소재 유동을 유도하기 위한 금형편은 세장비에 상관없이 블레이드 성형에 큰 영향을 미치지 않았다. 그러나 CASE F의 베벨형 시편을 사용한 경우에는 반경방향으로의 소재유동이 원활하게 발생하여 하단영역에서의 블레이드성형이 충분하게 이루어졌다.

(4) CASE F의 유한요소해석결과를 바탕으로 임펠러의 취출을 위한 분리형 금형을 설계하였고, 보강링은 분리형 금형과 자연체결이 되도록 설계하였다.

(5) 설계된 금형세트를 이용해 완전한 형상의 마그네슘합금 임펠러 성형이 성공적으로 수행되었다.

## 후 기

본 연구는 산업 자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] B. L. Mordike, T. Edert, 2001, Magnesium Properties-applications-potential, Materials Science and Engineering A, Vol. 302, pp.37~45.
- [2] P. Skubisz, 2006, Forgeability of Mg-Al-Zn Magnesium alloys in hot and warm closed die, journal of material processing technology, Vol. 177, pp. 210~213.
- [3] D. B Shan, 2004, Study on precision forging technology for a complex-shaped light alloy forging, journal of material processing technology Vol. 151, pp. 289~293.
- [4] 권용남, 이영선, 이정환, 2003, 변형량 및 변형률속도 변화에 따른 Al6061합금의 특성 변화, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 88~91.