

# AZ31 판재의 온간 사각컵 디프드로잉에서 금형 설계에 대한 성형성 민감도의 평가

김홍규<sup>#</sup> · 김기덕<sup>1</sup>

## Evaluation of Formability Sensitivity to Die Design in Warm Square Cup Deep Drawing of AZ31 Sheet

H. K. Kim, G. D. Kim

(Received November 2, 2006)

### Abstract

Magnesium alloy has low formability at room temperature and therefore, in many cases, forming at elevated temperatures is necessary to obtain the required material flow without failure. In the present study, square cup deep drawing tests using the magnesium alloy AZ31 sheet were experimentally conducted using the punches and dies with different edge radius to evaluate the formability sensitivity to the die design variables. The experimental results showed that the fracture position over the cup wall moved from the punch nose to the flange as the die temperature increased, and that the drawing depth change was more affected by the punch radius than the die radius.

**Key Words :** Magnesium Alloy, Deep Drawing, Formability, Sensitivity, Die Design

### 1. 서 론

뛰어난 경량성으로 인해 최근 많은 관심을 받고 있는 마그네슘 합금은 조밀육방체(HCP) 결정 구조로 인해 상온에서의 소성가공성이 좋지 않아 주로 마그네슘을 액상으로 성형하는 주조 또는 다이캐스팅에 의해서 제품이 생산되고 있다. 그러나 성형품의 기계적 강도 미흡, 높은 후처리 비용, 박육 제품 성형의 어려움 등의 이유로 그 적용 범위에 제약이 따르는 상황이다. 그런데 마그네슘 합금의 경우 가열된 상태에서는 소성가공성이 상당히 향상되는 특성을 갖기 때문에 최근 들어 온간 프레스 금형에 의한 부품 생산이 큰 주목을 받고 있다[1~9].

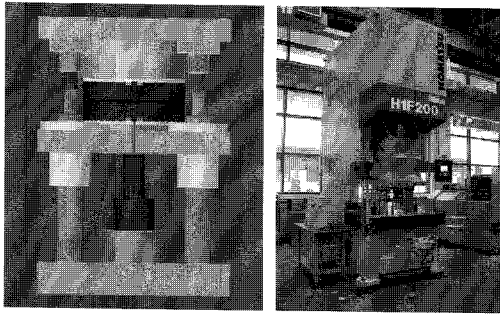
일반적으로 판재 디프드로잉 공정에서 성형물의 성형성을 결정하는 많은 인자가 알려져 있다.

예를 들면, 연신율이나 이방성 등의 소재 자체 물성, 블랭크의 적절한 크기 및 모양, 금형의 가열 온도, 프레스 가압 방식과 속도 등이다. 따라서 최적의 성형 공정을 결정하기 위해서는 이러한 여러 가지 성형성 결정 인자의 영향을 평가하고 설계에 반영해야 한다.

마그네슘 합금 판재 디프드로잉의 경우에도 각각의 인자가 성형성에 미치는 영향에 대한 정량적인 평가는 향후 최적의 성형 공정을 설계하는데 매우 중요한 정보가 된다. 그런데 마그네슘 합금의 판재의 경우 온도에 따른 프레스 성형성은 대부분의 연구에서 수행되었지만, 금형 형상 설계가 성형성에 미치는 영향에 대해서는 아직 일부 연구에서만 수행된 상황이다[1~3].

이에 본 연구에서는 서로 다른 어깨부 반경을 갖는 펀치와 다이 조합의 온간 금형 시스템을 사

1. 한국생산기술연구원 정밀금형팀  
# 교신저자: 한국생산기술연구원 정밀금형팀,  
E-mail: krystal@kitech.re.kr



(a) (b)

Fig. 1 Press forming equipment: (a) warm deep drawing die system, (b) servo press(200ton, Komatsu Industries Corp.)

용하여 사각컵 디프드로잉 성형 시험을 수행하였다. 그리고 시험 결과를 토대로 펀치와 다이의 어깨부 반경에 대한 AZ31 판재 드로잉 성형성의 민감도를 평가하였다.

## 2. 프레스 금형 시스템 및 성형 시험

### 2.1 서보 프레스와 온간 금형

온간 프레스 성형 공정은 크게 소재의 가열, 프레스 성형, 성형물 취출의 3 단계로 나눌 수 있다. 이 때 소재의 가열을 위해서 다양한 방식이 가능한데 성형 중의 소재 열손실과 공정의 연속성을 고려하면 금형 내에서 소재를 가열하고 바로 성형을 수행하는 것이 효과적이다. 이러한 이유로 금형 내에 가열 장치가 내장된 Fig. 1(a)와 같은 온간 금형을 설계, 제작하였다. 이렇게 제작된 온간 금형을 Fig. 1(b)와 같은 서보 프레스(Komatsu Industries Corp., H1F200)에 장착하여 온간 디프드로잉을 수행하였다. 서보프레스를 사용함으로써 소재의 가열과 성형 공정을 하나의 프레스 모션 사이클 내에서 연속적으로 수행할 수 있었다.

그런데 이런 연속 공정을 가능하게 하기 위해서는 서보 프레스의 모션 프로파일을 공정에 적합하도록 프로그래밍해야 한다. 본 연구에서는 Fig. 2 에 보인 것과 같은 슬라이드 모션 프로파일을 사용하여 디프드로잉 성형을 수행하였다. 이 때 목표 드로잉 깊이에 따라 드로잉 단계의 스트로크를 알맞게 조절하였다.

본 연구의 목적이 펀치와 다이의 금형 설계, 특히 어깨부 반경의 변화에 따른 성형성의 평가이

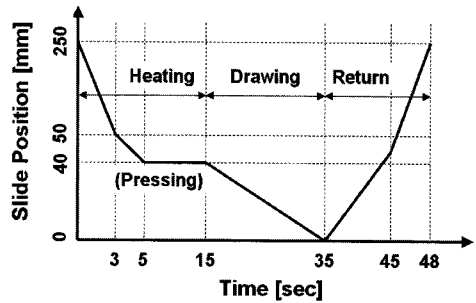


Fig. 2 Servo press slide motion profile used for 40mm drawing of AZ31 sheet

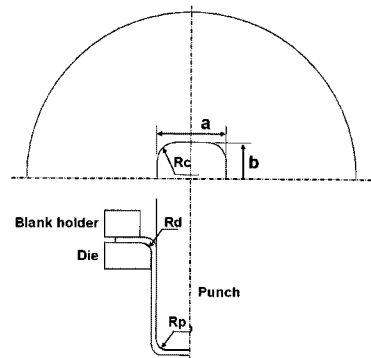


Fig. 3 Die design variables for square cup deep drawing die system

Table 1 Spec. of punch & die sets for square cup deep drawing die system (unit: mm)

Set	Corner radius (Rc)	Die radius (Rd)	Punch radius (Rp)
#1	10	6.25	6.25
#2	10	3	6.25
#3	10	3	1.8
#4	10	6.25	1.8

므로 이를 위해 각각 2가지 수준의 어깨부 반경을 갖는 펀치와 다이를 가공하였다. 사각컵 드로잉을 위한 펀치와 다이의 형상 설계 변수와 실제 제작된 값들을 Fig. 3과 Table 1에 보여주고 있다. 사각컵은 40mm×40mm의 정사각형 단면이고, 사각컵 코너 반경은 펀치 기준으로 10mm, 클리어런스는 사용한 판재 두께 0.8mm를 고려하여 0.96 mm의 값을 모든 경우에 사용하였다. 반면에 다이 어깨부 반경(Rd)으로 6.25mm와 3mm, 펀치 어깨부 반경(Rp)으로 6.25mm와 1.8mm를 갖는 각각 2종류의 다이와 펀치를 가공하고 이들의 조합으로 총

4 세트의 금형 시스템을 제작하였다. 금형 가열을 위해 다이와 블랭크 홀더 내부에는 시즈히터 (Sheath Heater) 타입의 열선을 삽입하고 가열하였다. 반면 펀치 내부에는 유로를 가공하고 15℃의 냉각수를 순환시켜 펀치의 온도 상승을 억제할 수 있도록 하였다.

### 2.2 온간 사각컵 디프드로잉 시험

두께 0.8mm 의 마그네슘 합금 AZ31 판재로부터 지름 120mm 의 원형 블랭크를 가공하여 디프드로잉 성형 시편으로 사용하였다.

성형 공정은 앞에서 설명된 바와 같이 Fig. 2 의 슬라이드 모션에 따라 진행되었는데, AZ31 판재 블랭크는 드로잉 성형 직전에 블랭크 홀더와 다이 사이에서 약간의 예압(Pressing 단계) 하에 10 초 동안 가열(Heating 단계)된 후 곧바로 드로잉 성형(Drawing 단계)되었다. 드로잉 성형이 완료된 후에는 금형과 성형물에 충격을 주지 않도록 적절한 속도로 슬라이드를 초기 위치로 복귀(Return 단계)시켰다. 판재 투입부터 성형물 취출까지의 이 모든 공정을 수행하는데 사용된 시간은 스트로크가 가장 긴 40mm 드로잉의 경우를 기준으로 약 50 초였다. 물론 각 단계의 슬라이드 속도를 바꾸면 전체 공정 시간도 바뀌게 되는데, 본 논문에서 보이는 결과들은 위의 공정에 따라 수행되었다.

블랭크 홀더의 가압 장치로는 공압에 의한 다이 쿠션을 사용하였다. 블랭크 홀더 가압력 설정을 위해서 초기 공압 수준을 제어하였고, 공압 다이 쿠션의 특성으로 인해 40mm 스트로크의 경우 블랭크 홀더 가압력이 초기 가압력으로부터 약 35% 증가하였다. 본 연구에서는 수 차례의 성형 시험을 토대로 비교적 우수한 드로잉 결과를 얻을 수 있는 7.5kN 의 초기 블랭크 홀더 가압력을 사용하였다.

## 3. 성형성 민감도 평가

### 3.1 금형 형상 설계가 성형성에 미치는 일반적 경향

일반적으로 똑같은 드로잉 깊이를 목표로 하는 경우에도 펀치와 다이의 코너 또는 어깨부 반경은 조금씩 다를 수 있다. 이럴 경우 반경의 크기에 따라 목표로 한 드로잉 깊이까지 성공적으로 성형될 수도 있고 도중에 파단이 발생할 수도 있

다. 즉, 성형성 측면에서 보면 펀치와 다이의 코너와 어깨부 반경 등은 최적의 값이 존재하는 것이 일반적인 경향이다. 예를 들면, 펀치 어깨부 반경이 너무 크면 펀치 밑부분에서 2 축 인장에 의한 판 두께 감소가 심하고 금형에 의한 구속력이 작아져 변형 영역이 커지고 때로는 보디 주름이 발생한다. 반면 펀치 어깨부 반경이 너무 작으면 굽힘 변형에 의한 파단 가능성이 커진다. 이와 유사하게, 다이 어깨부 반경이 너무 크면 금형의 구속을 안 받는 영역이 커져서 보디 주름 가능성이 커지고, 다이 어깨부 반경이 너무 작으면 굽힘 저항에 의한 펀치력이 증가하고 굽힘으로 인한 파단 가능성이 커진다. 사각컵 코너 반경의 경우에도 대부분의 경우 반경이 작아지면 성형성이 안 좋아지지만 때로는 코너부에 집중될 수축 변형 양의 일부가 길어진 사각컵 직변부로 흡수되어 드로잉 저항이 어느 정도 완화되기도 한다. 이 밖에 펀치와 다이 사이의 간극인 클리어런스도 판재의 디프드로잉 성형성에 큰 영향을 주는 점은 잘 알려져 있다.

### 3.2 AZ31 드로잉에서의 성형성 민감도

모두 4 세트의 금형을 사용하여 온간 디프드로잉을 수행하였다. 드로잉 깊이를 0~40mm 범위에서 5mm 간격으로 증가시키면서 성형 시험을 수행하고 육안으로 파단이 관찰되지 않으면 성형 성공, 파단이 관찰되면 성형 실패로 판단하였다. 그 때 성형 성공으로 판단되는 온도별 최대 드로잉 깊이를 금형 세트 각각에 대해 표시하면 Fig. 4 와 같다.

Fig. 4로부터 평균적인 성형성을 평가하면, 금형 세트 #1의 경우가 다른 경우보다 월등히 좋은 성형성을 보이고, 금형 세트 #2의 경우는 중간 정도

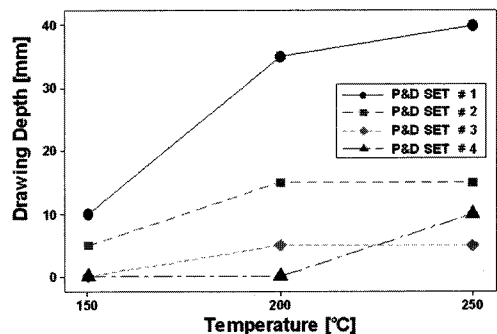


Fig. 4 Drawing depth dependency on temperature for four punch & die sets

의 성형성을 보임을 알 수 있다. 금형 세트 #3과 금형 세트 #4의 경우는 온도별로 서로간의 우열이 다르고 실제 드로잉 깊이도 작아서 명확한 차이를 말하기는 어렵다. 근사적으로 보면 본 연구에서 사용한 Rp와 Rd에서는 가능하면 큰 쪽의 값을 사용할 때 더 큰 드로잉 깊이를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

금형 온도에 따른 디프드로잉 성형성은 앞에서 보인 Fig. 4의 드로잉 깊이 데이터로부터 판단할 수 있는데, 금형 세트에 따라 약간의 차이는 있지만 대부분 온도가 올라갈수록 드로잉 깊이가 증가하였고 200℃와 250℃에서는 드로잉 깊이가 서로 같거나 250℃에서 근소하게 큰 값을 보여주었다. 이러한 경향은 이전의 연구[3~5]에서는 온도 200℃에서 최대 드로잉 깊이를 나타낸 점과 약간의 차이를 보여준다. 이러한 차이점은 첫째로 최고의 성형성을 갖는 온도 조건이 200℃와 250℃ 사이에 존재하기 때문일 수도 있고, 둘째로 펀치 냉각으로 인해 비록 금형 온도 기준으로 250℃로 측정되었지만 판재의 온도는 그 보다 낮기 때문일 수도 있다. 이번에 사용한 금형의 구조상 판재의 온도를 직접 측정하기가 곤란하였는데, 좀 더 정확한 평가를 위해서는 향후 판재 자체의 온도 분포를 측정해야 하겠다.

이번에는 최대 드로잉 깊이 이상으로 드로잉했을 때 나타나는 사각컵의 파단 양상을 고찰하였다. 금형 세트 #1~#4를 사용하였을 때 얻어진 사각컵 파단의 대표적인 모습들을 Fig. 5~8에 보여주고 있다.

금형 세트 #1의 경우에 200℃의 온도에서 드로잉 깊이 35mm까지는 대부분의 경우 파단이 나타나지 않았지만 몇몇 경우에는 파단이 관찰되기도 하였다. 한편 40mm까지 드로잉하면 대부분의 경우 파단이 나타났다. 35mm와 40mm 드로잉에서 나타나는 파단의 모습을 Fig. 5의 (a)와 (b)에 나타내었는데, 플랜지 가까운 모서리 부근에서 파단이 발생했음을 볼 수 있다. 이 때 플랜지 부위의 심한 주름도 볼 수 있는데 드로잉 도중 어느 시점에서 급속히 주름이 발생함을 관찰할 수 있었다. 주름 억제를 위해서는 블랭크 홀더 가압력을 증가시킬 필요가 있으며, 금형 세트 #1의 파단 양상도 어느 정도 주름 발생의 영향을 받았을 가능성이 있다. 그럼에도 40mm 드로잉이 완료될 때까지 일반적인 드로잉 파단 후보 지역인 펀치 바닥면 근방 벽면에서는 파단의 모습을 볼 수 없었다.

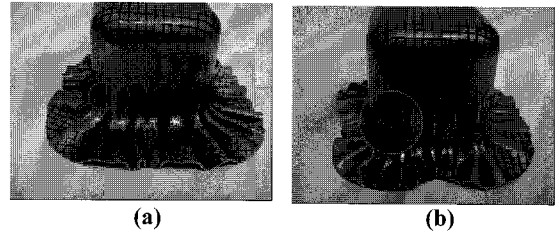


Fig. 5 Drawing failures for set #1 (a) after 35mm drawing at 200°C, (b) after 40mm drawing at 200°C

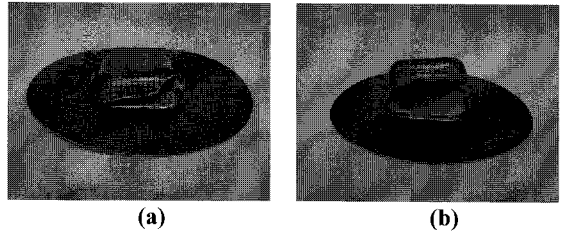


Fig. 6 Drawing failures for set #2 (a) after 10mm drawing at 150°C, (b) after 20mm drawing at 250°C

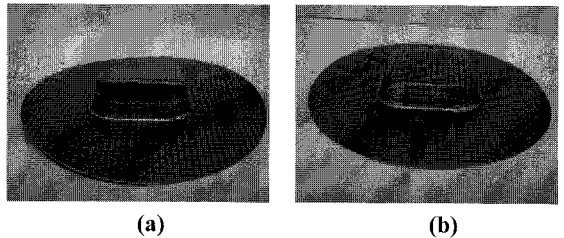


Fig. 7 Drawing failures for set #3 (a) after 10mm drawing at 200°C, (b) after 10mm drawing at 250°C

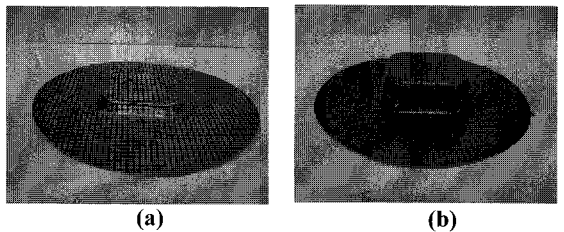


Fig. 8 Drawing failures for set #4 (a) after 5mm drawing at 200°C, (b) after 15mm drawing at 250°C

금형 세트 #1과 같이 Rp=6.25mm의 값을 갖는 금형 세트 #2 (Fig. 6 (a), (b))의 경우에는 드로잉 깊이가 금형 세트 #1에 비해 감소하였지만 온도에 상관없이 플랜지에 가까운 컵 벽면을 가로지르며

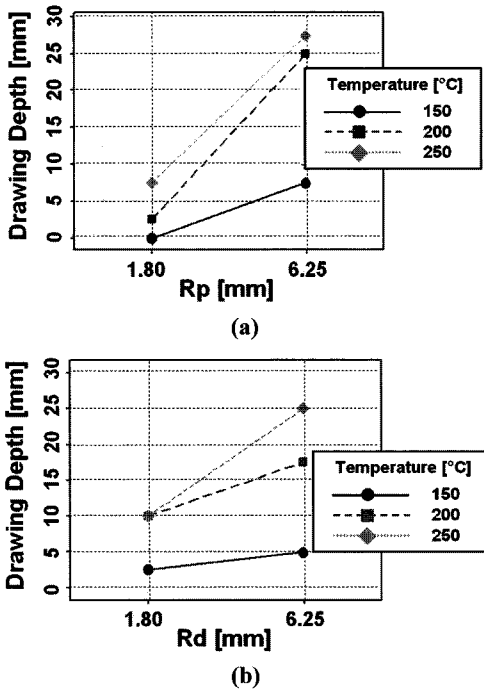


Fig. 9 Drawing depth dependency at each temperature (a) on Rp and (b) on Rd

파단이 전파되었음을 볼 수 있었다. 즉, 파단 위치의 관점에서는 금형 세트 #1의 경우처럼 펀치 바닥면 부근 보다는 플랜지 부근에서 나타났음을 알 수 있다.

반면 Rp=1.8mm로서 Rd의 값보다 작은 금형 세트 #3, #4의 경우에는 온도에 따라 다른 파단 양상을 보여준다. 즉, 온도 200°C에서는 펀치 바닥면에 가까운 컵 벽면을 가로지르며 파단이 전파되었는데, 온도 250°C에서는 Rp의 값이 작음에도 불구하고 금형 세트 #1, #2의 경우처럼 플랜지 가까운 컵 벽면을 가로지르며 파단이 전파되었다. 즉, 파단선이 온도 증가에 따라 펀치 바닥 쪽에서 플랜지 쪽으로 이동한 셈이다.

위와 같은 관찰로부터 대략 온도 200°C 이하에서는 Rp와 Rd의 값에 따라 컵 벽면의 파단 위치가 결정되지만 대략 온도 250°C 이상에서는 그와 상관없이 플랜지 부근의 컵 벽면에서 파단이 발생한다고 추정할 수 있다. 이렇게 파단 위치가 플랜지 쪽으로 이동하는 현상은 다이의 가열과 펀치의 냉각 효과에 어느 정도 기인한다. 즉, 펀치 근방의 냉각된 판재는 드로잉 중 변형이 상대적으로 억제되고 이로 인해 판재 연신으로 인한 파

단 진행으로부터 안전하게 되기 때문이다. 다만 다이 온도 200°C 이하에서는 Rp의 값에 따라서 초기 드로잉에서 굽힘 변형이 어려웠거나 가능했다. 후속 드로잉 도중에 파단을 유발할 정도로 상태가 안 좋아서 그와 같은 펀치 냉각에 의한 파단 억제 효과가 큰 역할을 못하게 된다.

사용한 4가지의 금형 세트에서 Rp와 Rd의 값을 각각 변화시켰을 때의 드로잉 깊이 변화를 정량적으로 평가하기 위하여 Fig. 4에 나타난 드로잉 깊이 데이터를 토대로 하여 Fig. 9에 보인 것과 같이 드로잉 깊이의 Rp 및 Rd에 대한 민감도 그래프를 온도별로 얻었다. 온도가 올라갈수록 Rp 및 Rd에 민감하게 드로잉 깊이가 변화하였고, Rp에 대한 민감도가 Rd에 대한 민감도에 비해 상대적으로 컸다. 다만, 드로잉 깊이와 Rp, Rd 사이는 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하는 비선형 관계이므로 좀더 정확한 민감도 특성을 얻기 위해서는 더 많은 종류의 금형 세트를 사용한 시험이 필요하다.

#### 4. 결론

서보 프레스와 온간 사각컵 디프드로잉 금형을 사용하여 마그네슘 합금 AZ31 판재의 드로잉 시험을 수행하였다. 드로잉 성형성에 미치는 금형 형상 설계의 영향을 고찰하기 위해 서로 다른 어깨부 반경을 갖는 펀치와 다이를 사용하여 4가지 세트의 금형을 제작하고 150°C, 200°C, 250°C의 3가지 금형 온도에서 드로잉을 수행하고 파단 없는 사각컵을 얻을 수 있는 최대 드로잉 깊이를 측정하였다.

4가지 세트의 금형에 대한 시험 결과 150°C와 200°C의 다이 온도에서는 펀치와 다이의 어깨부 반경에 따라 컵 벽면에 발생하는 파단 선의 위치가 결정되었다. 즉, 어깨부 반경이 작은 쪽에 가까운 컵 벽면에서 파단 선이 발생하였다. 반면에 250°C의 다이 온도에서는 펀치와 다이의 어깨부 반경에 상관없이 플랜지 가까운 쪽의 컵 벽면에서 파단 선이 발생하였다. 펀치와 다이의 어깨부 반경 변화에 따른 드로잉 깊이 변화, 즉, 민감도를 보면 펀치 어깨부 반경의 영향이 다이 어깨부 반경의 영향보다 상대적으로 크거나 같았다.

금형 설계에 따른 성형성 민감도를 보다 정확히 평가하기 위해서는 향후 보다 많은 수준의 펀치와 다이 어깨부 반경에 대한 시험이 필요하다.

그 밖에도 사각컵의 코너 반경과 펀치-다이 클리어런스의 변화에 따른 시험, 평가도 수행될 필요가 있다.

## 후 기

본 연구는 “2010 생산기반혁신기술개발사업”의 “경량판재 프레스성형부품화 기반기술 개발” 과제 의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. Takuda, T. Yoshii, N. Hatta, 1999, Finite-element analysis of the formability of a magnesium-based alloy AZ31 sheet, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 89-90, pp. 135~140.
- [2] F. K. Chen, T. B. Huang, 2003, Formability of stamping magnesium-alloy AZ31 sheets, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 142, pp. 643~647.
- [3] F. K. Chen, T. B. Huang, C. K. Chang, 2003, Deep drawing of square cups with magnesium alloy AZ31 sheets, *Int. J. Mach. Tool. Manufac.*, Vol. 43, pp. 1553~1559.
- [4] E. Doege, K. Droder, 2001, Sheet metal forming of magnesium wrought alloys-formability and process technology, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 115, pp. 14~19.
- [5] 김홍규, 이위로, 홍석관, 김종덕, 한병기, 2006, 마그네슘 합금 AZ31 판재의 온간 사각컵 디프드로잉 공정의 유한요소 해석, *한국소성가공학회지*, 제 15 권, 제 3 호, pp.232~240.
- [6] 박진기, 김영석, T. Kuwabara, 유봉선, 2005, AZ31 마그네슘 합금 판재의 소성변형특성, *한국소성가공학회지*, 제 14 권, 제 6 호, pp. 520~526.
- [7] 추동균, 강충길, 이준희, 2005, 툴 표면처리 및 온도가 AZ31 마그네슘 판재의 드로잉에 미치는 영향, *한국소성가공학회 2005년도 추계학술대회 논문집*, pp. 118~121.
- [8] N. Ogawa, M. Shiomi, and K. Osakada, 2002, Forming limit of magnesium alloy at elevated temperatures for precision forging, *Int. J. Mach. Tool. Manufac.*, Vol. 42, pp. 607~614.
- [9] D. L. Yin, K. F. Zhang, G. F. Wang, and W. B. Han, 2005, Warm deformation behavior of hot-rolled AZ31 Mg alloy, *Mat. Sci. Eng. A*, Vol. 392, pp. 320~325.