

## 가열냉각방법에 의한 마그네슘합금의 판재성형성 개선

강대민<sup>#</sup> · K. Manabe<sup>1</sup>

### Improvement on the Formability of Magnesium Alloy Sheet by Heating and Cooling Method

Dae-Min Kang, Ken-ich Manabe

(Received May 19, 2005)

#### Abstract

In this paper, warm deep drawing process with local heating and cooling technique was attempted to improve the formability of AZ31 magnesium alloy which is impossible to form by conventional methods at room temperature by finite element method and experiment. For FE analysis, in first model with considering heat transfer, both die and blankholder were heated to 573K while the punch was kept at room temperature by cooling water. Also distribution of thickness and von Mises stress at room temperature and 498K for warm deep drawing were compared by FEM. Uniaxial tension tests at elevated temperature were done in order to obtain the temperature dependence of material constant under temperature of 293K~573K and cross head velocity of 5~500mm/min. The phenomenological model for warm deep drawing process in this work was based on the hardening law and power law strain rate dependency. Deep drawing experiment were conducted at temperatures of room temperature, 373K, 423K, 473K, 498K, 523K, and 573K for the blank and deep drawing tools(holder and die) and at a punch speed of 10mm/min.

**Key Words** : Magnesium Alloy, Warm Deep Drawing, Heat Transfer, Finite Element Method

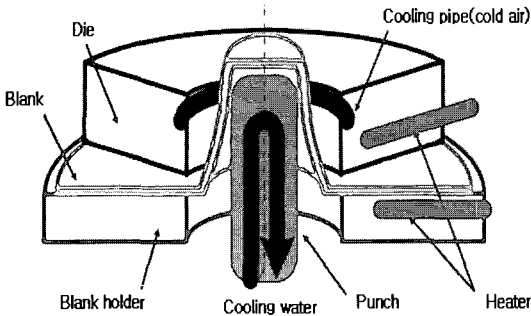
#### 1. 서 론

마그네슘합금은 1808년 H.Davy에 의해 발견된 은백색의 금속이고 밀도가  $1.74\text{g/cm}^3$ 으로 여러가지 금속과 합금화할경우 알루미늄합금의 2/3, 티타늄합금의 1/4, 철강재료의 1/5 정도의 밀도를 가지게되어 최근 자동차산업과 전자산업등과 같은 경량구조물에 크게 주목을 받고있다. 한편 마그네슘합금의 판재성형중 주요한 제조공정중 하나인 딥드로잉에 관한 연구로는 그동안 몇몇 연구자들에 의해 상온에서 연구되어왔으나 상온에서는 판의 두께의 감소를 수반하는 변형에 대해서는 강한 이방성을 나타내어 프레스성형이 어렵다. 그러

나 고온이 되면 비저면 슬립계가 활동하게되어 슬립계의 수가 증가하면서 변형이 용이하게되어 최근에는 펀치부분에는 냉각시키고 다이 및 블랭크홀더 부분에서 히터로 가열하여 성형하는 가열냉각 온간성형법이 응용되고있다[1].

온간성형법에 관련된 연구로는 E.Doege[2]등에 의해 여러종류의 마그네슘합금에 대해 온도 473K~523K범위에서 다이프드로잉 실험을 통하여 판재성형성과 한계드로잉비에 성형속도의 영향을 고려하였고, D. M. Kang[3~5]등에 의해 온간 다이프드로잉시 AZ31합금의 판재성형성에 관한 연구를 하였으나 아직 국내외적으로 마그네슘합금인 AZ31의 판재성형성에 대한 연구는 매우 불

<sup>#</sup> 교신저자 : 부경대학교 기계공학부, dmkgang@pknu.ac.kr  
1. Tokyo Metropolitan University



**Fig. 1** Schematics of warm deep drawing by local heating and cooling system

충분한 실정이다. 본 연구에서는 국부가열냉각법을 이용하여 실험과 시뮬레이션을 통하여 AZ31 마그네슘합금재의 디이프드로잉성 개선에 대해 파악하고자한다.

## 2. 가열냉각 해석모델

Fig.1은 국부가열냉각을 적용한 온간다이프로딩 성형법의 개략도로서 다이와 블랭크홀더 내부에 설치되어있는 히터를 이용하여 블랭크를 가열시키고, 펀치내부에 물이 순환하여 펀치를 냉각시켜 펀치와 블랭크의 접촉부에서의 온도를 상온으로 유지하게한다. 본 해석에는 이러한 가열냉각해석 모델을 위해 펀치, 다이, 블랭크홀더 그리고 블랭크 등으로 모델화하였고 성형해석을 위해 기하학적 성질로부터 2차원 축대칭모델을 이용했다. Table 1에서 해석에 사용된 각각요소의 치수등을 표시하였고 블랭크, 펀치, 홀더 및 다이등 성형에 필요한 각각 요소들의 형상은 해석의 조건과 실험의 조건과 일치시켰다. 요소분할은 두께방향으로 2분할, 반경방향으로는 120분할했다. 전요소수는 240, 최소요소크기는 세로 0.24mm, 가로 0.99mm로 했다. 블랭크홀더력은 5.9kN, 펀치속도는 10mm/min로 하였다. 가열냉각성형해석을 위해 사용된 해석기는 열전달 해석이 가능한 MARC/Mentat (2003version)이다.

## 3. 실험

### 3.1 고온인장시험

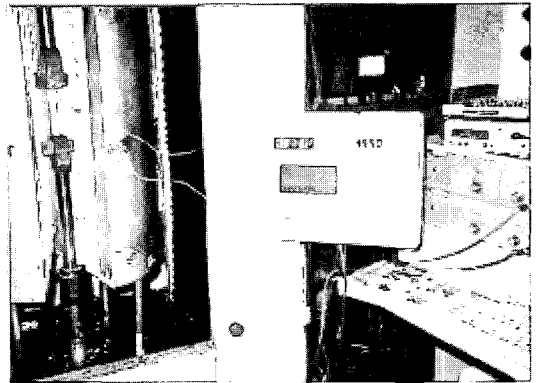
고온인장시험은 마그네슘합금판의 JIS13호 시험편을 이용하여 실험을 행하였고 Table 2는 실험용

**Table 1** Dimensions of punch and die used in the F.E. simulation

Punch diameter/mm	33
Punch shoulder radius /mm	3
Die diameter /mm	35.5
Die shoulder radius /mm	5

**Table 2** Chemical composition (%) of magnesium alloy sheet(AZ31)

Al	Zn	Zr	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Ca
1.9	1.1	-	4.7	-	1.0	0.1	0.03	-



**Fig. 2** Uniaxial tensile tester under warm temperature

시험에 사용된 마그네슘합금의 화학적 성분을 표시하였다.

고온인장시험은 Fig. 2와 같이 항온로내에 온도 제어가 되고 최대하중이 100kN이며 출력신호는 로드셀의 인장하중과 크로스헤드의 변위로서 나타내어지는 인장시험기(AUTOGRAPH, 최대하중 100kN)로부터 상온에서 573K까지 온도범위에서 변형속도가 5mm/min부터 500mm/min까지 조사하였다.

### 3.2 가열냉각 디이프드로잉 실험

가열냉각 디이프드로잉실험은 Fig. 2의 만능인장 압축시험기를 사용하여 Fig. 3과 같이 드로잉 치구를 부착하여 실험을 행하였다. 본 치구는 플랜지를 가열, 펀치부는 물을 내부에 순환시켜 냉각시켰다. 다이와 블랭크홀더의 가열부의 실험온도조건은 온도가 성형성에 미치는 영향을 파악하기

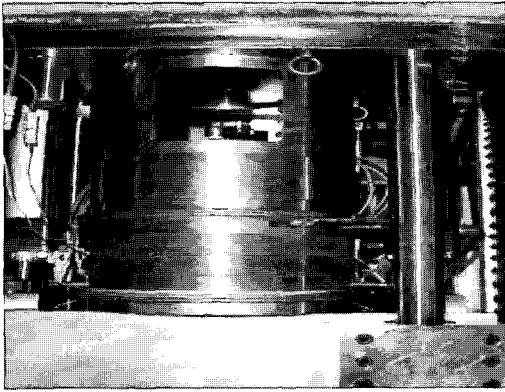


Fig. 3 Equipment for warm deep drawing

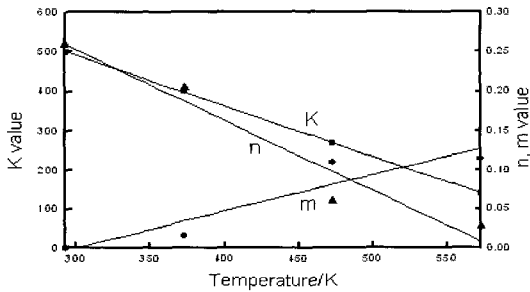


Fig. 4 Material value at various temperature

위해서 상온, 373K, 423K, 473K, 498K, 523K 및 573K 등의 조건에서 행하였고 크로스헤드속도를 10mm/min으로 하였다. 또한 실험에 사용된 블랭크홀더력과 드로잉비는 유한요소해석에 사용된 조건과 마찬가지로 각각 5.9kN, DR은 3.6으로하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 실험결과

###### 4.1.1 고온인장시험결과

고온인장시험에 사용된 온도조건은 상온, 373K, 473K, 그리고 573K 이고 크로스헤드속도는 5,50,500 mm/min 등이다. 현상학적인 모델은 다음과같이 응력은 가공경화지수  $n$  과 변형률속도 민감성  $m$  에 의존된다고하면

$$\sigma_{eq} = K \epsilon_{eq}^n \dot{\epsilon}_{eq}^m \quad (1)$$

가 된다. Fig. 4는 고온인장시험을 통하여 K 값, m

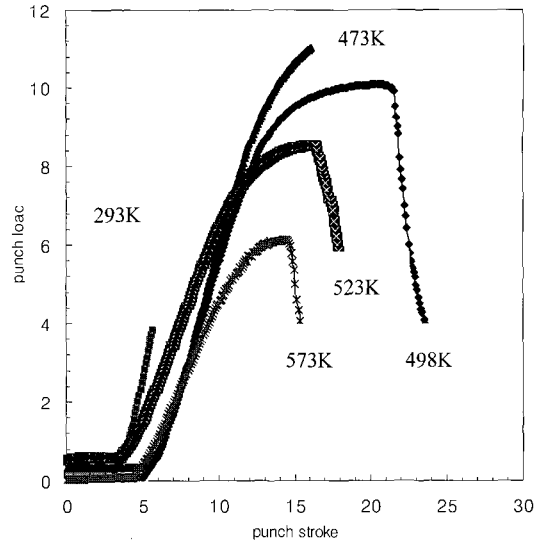


Fig. 5 Relationship between punch stroke and punch load under punch velocity of 10mm/min

값, 그리고  $n$  값의 온도의존성을 나타낸 결과로서 K 값, m 값 및  $n$  값의 표시는 각각 사각형(■), 삼각형(▲), 그리고 원(●)으로 표시하였다. 이 결과로부터 FEM에 사용된 재료특성치의 온도의존성을 구하여 서브루틴을 이용하여 변형시 재료내에서의 블랭크의 재료특성치 K 값, m 값 및  $n$  값을 계산하였다.

##### 4.1.2 가열냉각 디이프드로잉 실험결과

Fig. 5는 펀치속도가 10mm/min인경우의 블랭크홀더와 다이로 각각의 온도로 가열하였을때, 펀치하중과 펀치행정사이의 실험결과를 나타낸 것으로 온도가 498K인경우의 파단시의 펀치행정이 가장 크게 나타났다. Fig. 6은 크로스헤드 속도를 10mm/min으로했을경우 온도에 따른 파단시의 최대성형높이를 나타낸 결과로서, 가열냉각디이프드로잉시 파단시의 최대성형높이가 상온인 경우의 최대성형 높이보다 크게 증가되었다. 특히 온도가 498K 조건에서의 최대성형높이가 24.29mm로서 상온치의 5.73mm의 값보다 훨씬 크게 나타났다. 이러한 결과와 유사하게 E. Doege[2]등에 의해 AZ31마그네슘합금은 473K부터 495K까지의 온도범위에서 뛰어난 성형효과를 갖고, 이것은 재료의 육방구조에 있어 피라미드 활주평면의 열적활성화에 기인한다고했다.

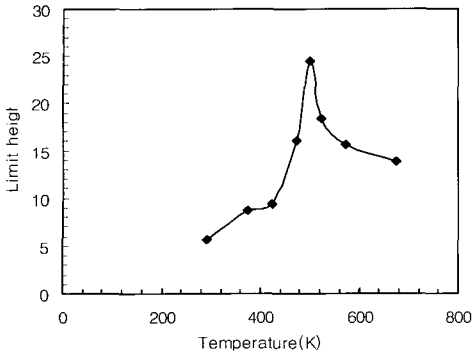


Fig. 6 Relationship between limit height and temperature

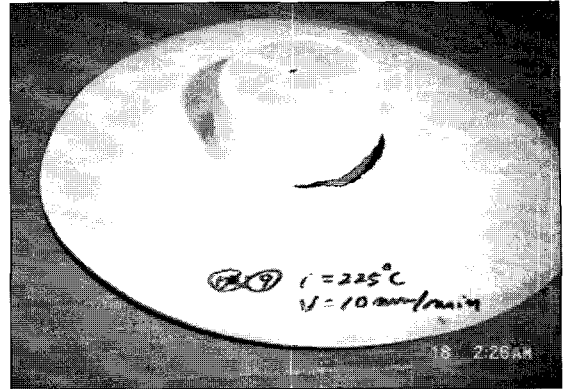


Fig. 7 The experiment result under 498K

Table 3 The necking position of warm deep drawing

Temp. of tools	Punch velocity	Necking point
293K	10mm/min	Punch shoulder
373K	10mm/min	Punch shoulder
423K	10mm/min	Punch shoulder
473K	10mm/min	Die wall
498K	10mm/min	Die wall
523K	10mm/min	Die wall
573K	10mm/min	Die wall

Table 4 Temperatures of component for simulation of two model

	Model I	Model II
Blank	293K	573K
Punch	293K	573K
Blank holder	573K	573K
Die	573K	573K

Table 3 은 펀치속도가 10mm/min 인 경우, 블랭크홀더와 다이부분을 상온으로 유지했을 경우와 373K, 423K, 473K, 498K, 523K 그리고 573K 으로 가열했을 경우의 파단부의 위치를 각각 나타낸 것이다. 여기서보면 블랭크홀더와 다이에서의 온도가 293K-423K 일경우의 파단은 펀치부에서 발생하였고 블랭크홀더와 다이의 온도가 473K-573K 으로 했을 경우는 다이벽부에서 파단이 발생하였다. 이것은 다이와 블랭크홀더를 가열시킴으로써 소재가 연화되고, 성형공정에서 변형집중에 의한 파단의 대부분을 차지하는 펀치 형상반경부분에 냉각을 가하여 인장강도를 증가시킴으로써 변형저항의 증대에 따른 펀치코너부분에 국부적 네킹이 지연되어, 결국에는 이것이 판재성형성을 향상시키는 요인이 된다고 추측된다[6]. Fig.7 은 다이와 블랭크홀더의 온도가 498K 로 가열하였을때의 다이프로딩실험결과로서 파단부의 위치가 다이벽부로 나타났다.

## 4.2 유한요소해석결과

### 4.2.1 열전달효과가 성형에 미치는 영향

블랭크와 다이요소의 열전달효과가 최종성형형상에의 영향을 살펴보기 위하여 두가지 모델을 사용하였다. 첫번째모델은 다이와 블랭크홀더부분에 573K 로 가열하고 펀치는 상온으로 유지한다. 두번째모델에서는 블랭크, 블랭크홀더, 다이와 펀치부분 모두 573K 로 하였다. Table 4 는 이러한 두 모델을 위한 각각 요소의 온도를 나타낸다. Fig.8 의 모델 I 은 펀치와 블랭크, 블랭크홀더 및 다이와 블랭크 사이에 열전달을 고려하여 해석한 온간 다이프로딩의 성형결과를 나타낸 것이고 모델II는 열전달을 고려하지않고 해석된 결과를 나타낸 것이다. 이 결과에서 열전달효과를 고려하지 않는 해석결과는 성형깊이가 18.14mm 인 상태에서 국부적인 네킹이 발생하였고, 이에 비하여 열전달을 고려한 모델 I 에서의 성형결과는 성형깊이가 49.86mm 인 경우에도 변형이 고루 분포되어 국부적인 네킹없이 현저히 성형성이 뛰어나게 해석되어 열전달효과가 성형성에 대단히 큰 효과를 미친다는 것을 알 수 있다.

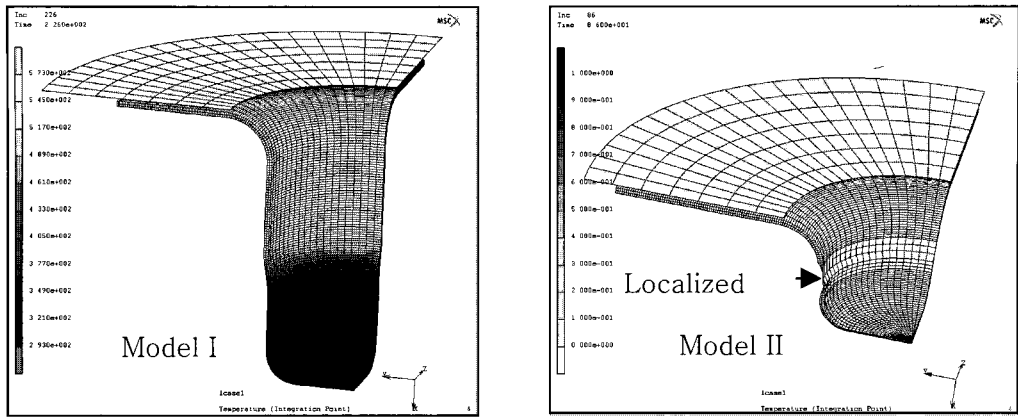


Fig. 8 Effect of heat transfer on warm deep drawing by FEM

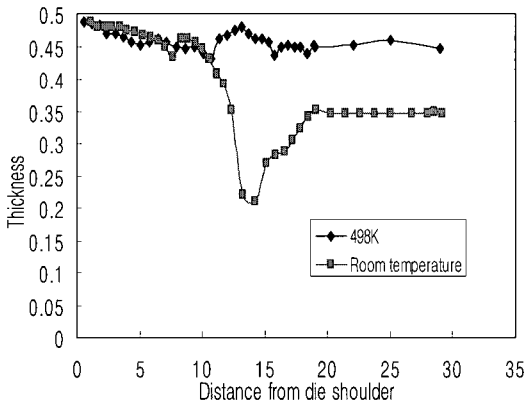


Fig. 9 Thickness distribution along distance from die shoulder

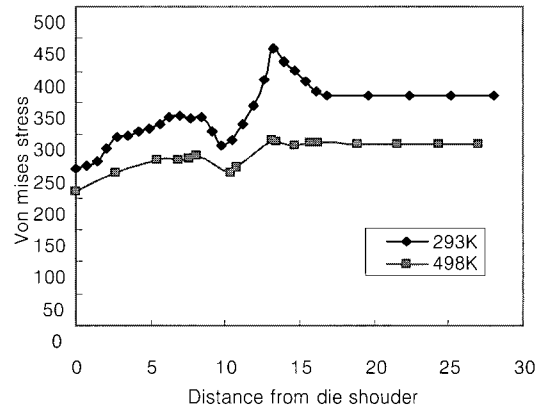


Fig.10 Von mises stress along distance from die Shoulder

#### 4.2.2 두께분포와 응력분포의 해석결과

다이와 블랭크홀더의 온도를 온간으로 유지했을 경우 성형시 판재의 두께분포와 응력분포에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 9는 다이와 블랭크홀더의 온도를 상온으로 했을 경우와 498K로 가열하여 성형했을 경우에 대해, 상온인 경우의 네킹이 발생하기 직전인 펀치행정거리가 12mm인 상태에서 블랭크홀더측의 다이어게부로부터 블랭크 위치에 따른 변형된 소재의 두께분포를 나타낸 것이다. 여기서 다이와 블랭크홀더의 온도가 온간으로 유지했을 경우가 상온으로 유지했을 경우보다 네킹이 발생하는 펀치행정이 훨씬 크게 나타나서 상온에서 네킹이 발생한 시점 이후의 두께

는 거의 '0'으로 나타났다. 그리고 두께분포를 구하기 위하여 성형된 높이에서 각 절점의 x,y 좌표를 유한요소법으로 구하여 C++프로그램을 이용하여 각 절점에서의 두께를 구하였다. 결과를 보면 상온에서는 펀치어깨부에서 두께가 급속히 감소되었으나 다이와 블랭크홀더부를 498K로 한 국부가열냉각시의 해석결과는 두께가 균질하게 변화되었다. Fig. 10은 상온과 국부가열시의 조건에서 응력분포를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 상온에서는 펀치어깨부에서는 응력의 집중현상이 발생하였으나 다이와 블랭크홀더부를 498K로 한 국부가열냉각시의 해석결과는 대체적으로 균질한 응력분포를 나타낸다.

## 5. 결 론

## 후 기

마그네슘합금(AZ31)의 가열냉각 다이프드로잉 성형을 위해 블랭크홀더와 다이온도를 온간으로 하고 펀치를 냉각하여 다이프드로잉실험과 유한 요소해석한 결과 다음과 결과를 얻었다.

(1) 펀치속도를 10mm/min 으로해서 펀치를 냉각시키고 블랭크홀더와 다이온도를 점차 온도를 가열시킨 조건에서 온간다이프드로잉 실험한 결과, 가열된 온도가 498K 인 경우에 최대성형높이가 발생되었고, 최대성형높이는 24.29mm 로서 상온에서의 5.73mm 의 결과보다 대단히 크게 나타났다.

(2) 가열냉각 다이프드로잉 실험결과, 블랭크홀더와 다이에서의 온도를 293K-423K 으로 가열했을때의 파단위치는 펀치부에서 발생하였고, 블랭크홀더와 다이에서의 온도를 473K-573K 으로 가열했을 경우는 다이벽부에서 파단이 발생하였다. 결국 다이와 블랭크홀더를 가열시켜 소재의 연성을 증가시키고 펀치부에서 냉각을 가하여 인장강도를 증가시킴으로서 펀치코너부에서 국부적 네킹이 지연되어 이것이 성형성을 향상시키는 원인이 된다고 사료된다.

(3) 블랭크와 펀치부, 블랭크와 다이 및 블랭크홀더사이에 열전달을 고려한 모델로 해석한결과는 열전달을 고려하지 않은 모델보다 국부적인 네킹없이 현저히 뛰어난 성형성이 나타났다. 이는 열전달효과가 마그네슘합금의 다이프드로잉성을 향상시키는데 매우 크게 작용한다고 추측된다.

(4) 상온인 경우와 다이와 블랭크홀더부를 498K 를 한 국부가열냉각시의 경우에대해 재료내의 두께분포와 응력분포를 구한결과 상온인경우는 펀치어깨부에서 급격한 두께감소와 응력집중이 발생하였고 국부가열냉각시의 경우는 대체적으로 균질한 두께분포와 응력분포가 나타났다.

이 논문은 2003년 한국과학재단 지역대학우수과학자 지원연구과제(계속과제, 번호:R05-2003-000-10410-0)의 지원으로 수행하였으며 이에 감사의 뜻을 표하고 아울러 실험과 해석을 행하는데 많은 도움을준 동경도립대학교의 Mr. Shimomura님께 감사사를 포함합니다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. Yoshihara, H. Yamamoto, K. Manabe, H. Nishimura, 2001, Proceedings of the International Conference on Advanced Material Processing Technologies(AMPT01) Sep, Formability Enhancement in Magnesium alloy Deep Drawing by local heating and cooling technique, pp. 18~21.
- [2] E. Doege, KdrOder, 2001, Sheet Metal Forming of Magnesium wrought alloy formability and process Technology, J.of Materials processing Technology 115, pp. 11~19.
- [3] D. M. Kang, J. K. Hwang, 2004, The Simulations of the Formability of AZ31 Magnesium alloy sheet in Warm deep drawing, J.of KSMPE, Vol.3 No.1, pp. 52~58.
- [4] A. El-Morsy, K. Manabe, D. M. Kang, J. K. Hwang, 2002, FE Analysis on temperature and deformation of magnesium alloy sheet in warm deep drawing process, NUMISHEET 2002, pp. 171~176.
- [5] D. M. Kang, K. Manabe, 2005, Improvement on the formability of Magnesium alloy sheet by heating and cooling method(II) Proceedings of KSTP Spring Conference 2005, pp. 385~388.
- [6] Yong-Ki Kang, 2002. 2, A study on the improvement of the deep drawability of Al-alloy by using forming process control, master thesis.