

이방성판재 셸로우드로잉에서 분할 블랭크 홀더가 비대칭 스프링백 저감에 미치는 영향

강정진[#] · 홍석관¹ · 김홍규¹ · 허영무¹

The Effect of Segmented Blank Holders on Reducing Asymmetric Springback of Anisotropic Sheet Metal in Shallow-Drawing

J. J. Kang, S. K. Hong, H. K. Kim, Y. M. Heo

(Received January, 10, 2005)

Abstract

The deterioration of dimensional accuracy, caused by springback, is one of problems to always occur in sheet metal forming processes. As the demand for lighter and stronger metals increases, the development of improved forming processes settling the springback problem becomes more important. In this work, asymmetric springback phenomena are investigated, which occur in the shallow-drawing process with the anisotropic sheet metal and axisymmetric tools. The improvement possibility of dimensional accuracies, mainly, flatness, was examined by applying segmented blank holding forces as a method for springback control.

Key Words : Springback, Shallow-Drawing, Segmented Blank Holder, Anisotropic Sheet Metal

1. 서 론

스프링백(springback)에 의한 판재성형 정밀도 저하의 문제는 금속 판재 성형에서 영원한 숙제 중에 하나이다. 가벼우면서도 강도가 높은 소재에 대한 수요 영역이 점점 넓어지면서, 개선된 성형 기술의 필요성 또한 커지고 있다. 더불어, 판재 성형 CAE는 기존의 판재 성형 공정의 문제점 분석을 위한 도구로서 뿐만 아니라, 새로운 공정, 새로운 소재에 대한 성형 기술 개발의 도구로서 1990년대부터 본격적으로 광범위하게 활용되고 있다. 양재봉 등[1]은 대표적인 경량 소재인 알루미늄 판재 성형공정 해석을 수행하면서, 반응표면 분석법을 이용하여 스프링백을 조절할 수 있는 방법과 최적 안을 제시하였다. 특히 각기 다른 위치의 비드(bead)들의 높이를 성형인자로 하였을

경우에 대한, 알루미늄 판재의 스프링백을 최소화할 수 있는 최적의 성형 조건을 제안하였다. 정완진[2]은, 성형 해석 직후의 잔류 응력 분포가 스프링백 해석 결과에 큰 영향을 미칠 수 있음을 지적하면서 탄성회복 해석 이전의 정확한 응력계산의 중요함을 강조하였다. 계산 효율을 높이기 위하여, 성형 공정은 외연적 유한 요소법에, 스프링백은 내연적 유한 요소법에 기초하여 해석을 수행할 수도 있으나, 보다 신뢰성 있는 스프링백 해를 얻는다는 측면에서는 외연적 유한 요소법에 기초하는 경우 여러 종류의 해석 인자에 대한 주의 깊은 선택이 필요하다. 양동열 등[3]은, 루프패널 성형 및 스프링백 해석을 수행하면서, 판재 및 금형을 모델링하는 과정에서 생성되는 요소(finite element)의 크기가 해석 해에 영향을 미치는 주요 인자 중의 하나임을 밝힌 바 있다.

교신저자: 한국생산기술연구원 정밀금형팀
1. 한국생산기술연구원 정밀금형팀

본 논문에서는 이방성을 갖는 금속판재의 셸로우드로잉(shallow-drawing) 성형공정 중에 발생하는 비대칭 스프링백 현상을 관찰하면서, 공정 인자 조정을 통한 정밀도 향상 방안을 제시하기 위하여 기초 해석을 수행하였다. Siegert 등[4]은 비축대칭 형상의 딥드로잉 공정에서 분할 금형, 유압 실린더 등을 포함한 closed loop control system을 이용하여 마찰력을 조정함으로써 판재의 성형성을 향상시킬 수 있음을 보였다. 홍주표 등[5]은 블랭크 가압력을 각 위치별로 독립적으로 조정하면서 레이저 용접 판재의 성형성을 고찰하였다. 본 연구에서는 공간별로 블랭크 가압력을 조정함으로써, 냉간압연강판의 성형 공정에서 평면도를 중심으로 한 성형 정밀도 향상의 가능성을 검토해 보고자 한다.

2. 고탄소강의 이방성 특성 분석

2.1 재료시험

아래에 인장 시험 결과로 얻어진, 냉간압연 고탄소강 판재의 물성치를 정리하였다.

Table 1 Mechanical properties

*ORD °	YS N/mm ²	TS N/mm ²	EL %	n -	R -
0	467	587	28	0.12	1.08
45	405	569	29	0.16	0.94
90	386	557	31	0.16	1.28

* ORD, Orientation to rolling direction; YS, Yield strength; TS, Tensile strength; EL, Elongation; n, strain hardening index; R, R-value

본 연구에서 사용된 고탄소강 판재는 보통의 강(steel) 소재보다 항복강도의 수준이 높고, 냉간압연으로 생성된 소성이방성으로 인하여 방향별 항복강도가 최대 80MPa 정도의 편차를 보이고 있다. 이 소재를 사용하여 성형하는 경우 충분한 소성변형을 동반하지 않으면 스프링백으로 인한 형상 정밀도 저하의 문제가 심각하리라는 것을 예측할 수 있으며, 방향별 성형 저항의 차이로 인한 뒤틀림 발생으로 균일한 형상 정밀도를 얻기 힘들 것이라는 것 또한 짐작할 수 있다. 아래는 인장 시험에 의한 방향별 응력변형을 곡선을 보여 주고 있다.

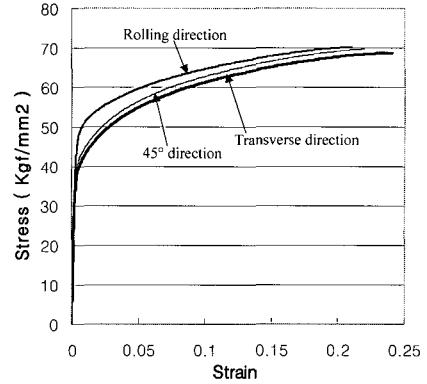


Fig. 1 True stress-strain curves of cold rolled high carbon steel by direction

2.2 이방성 모델

금속판재 성형해석을 위하여 상용해석 프로그램인 MARC를 사용하였다. MARC에서 기본적으로 제공하고 있는 이방성 모델은 Hill48 모델[6]과 Barlat91 모델[7]이 있으며, 이방성 항복함수는 각각 식(1)과 식(2)와 같이 주어진다.

$$\bar{\sigma}^2 = A(\sigma_y - \sigma_z)^2 + B(\sigma_z - \sigma_x)^2 + C(\sigma_x - \sigma_y)^2 + D\tau_{yz}^2 + E\tau_{zx}^2 + F\tau_{xy}^2 \quad (1)$$

$$2\bar{\sigma}^m = |S_1 - S_2|^m + |S_2 - S_3|^m + |S_3 - S_1|^m \quad (2)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 단축인장시험에서 항복응력을 나타내는 유효응력이며, m 값은 결정구조와 관련된 항복파라미터로서, m=1 혹은 ∞일 때 Tresca 항복조건식이 되고, m=2 혹은 4일 때 von-Mises 항복조건식이 된다. 대개 BCC 금속은 m=6의 값을 갖고 FCC 금속은 m=8의 값을 갖는다[8]. 이들 이방성 모델과 실험결과를 비교하기 위해 Table 1의 물성치를 이용하여 이방성 항복함수의 계수를 결정하고, 그 계수들로 정의된 이방성 항복함수로부터 압연 방향을 기준으로 0°, 45°, 90°방향의 항복강도를 구하여 각 방향의 항복강도를 0°방향의 항복강도로 나누었다. 각 항복함수의 주요계수는 제한된 실험치를 바탕으로 결정이 되기 때문에, Fig. 2에서 보듯이 이방성 항복함수로부터 계산된 항복응력과 실험에 의한 항복응력이 어느 정도의

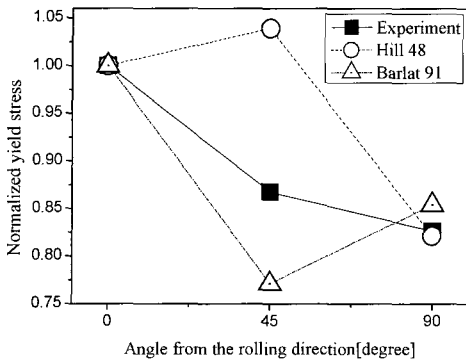


Fig. 2 Comparison of measured and fitted yield stresses for the various yield functions

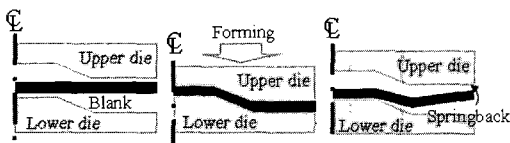


Fig. 3 Schematics of the sheet metal forming process

차이를 보이게 된다. 본 연구의 적용 소재인 냉간 압연 고탄소강의 경우, 특히 45°방향의 항복응력에서 Hill 모델보다 Barlat 모델이 실험에 보다 근사한 경향을 보이고 있다.

2.3 셸로우드로잉에서의 비대칭 스프링백

Fig. 3은 두께 2mm, 지름 260mm 인 고탄소강 소재의 이방성 금속판재의 성형 개략도를 나타낸 그림이다. 판재도 원형이고, 성형 공정 및 프레스 금형 또한 축대칭이기는 하지만, 금속판재가 이방성을 가지고 있기 때문에 성형 후에 스프링백에 의하여 발생하는 변위 분포는 축대칭이 아니다. 더욱이 스트로크 깊이가 판재두께의 1.4배 밖에 되지 않아 스프링백의 비대칭성이 두드러질 것은 자명하다.

성형 후 소재의 원주 방향의 높이(스프링백량) 분포를 측정하기 위한 위치를 Fig. 4에 도시하였다. 높이 측정에는 접촉식 높이측정기(height gauge)를 사용하였으며, 30°간격으로 측정하였다. 원형 판재에서 압연 방향의 측정 위치를 90°, 270°로 하였으며, 압연방향에서 가로지르는 방향을 0°, 180°로 하였다. 시계 방향으로 돌아가면서 원형

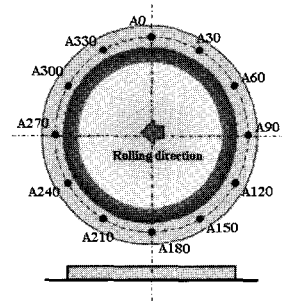


Fig. 4 Locations of height measurement for the evaluation of flatness

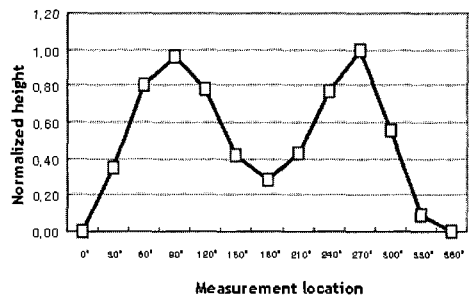


Fig. 5 Experimental distribution of normalized heights along the circumferential direction

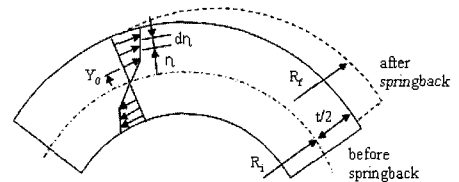


Fig. 6 Stresses at a section of curved beam

판재의 중심으로부터 같은 거리에 있는 위치에서 측정된 높이를 Fig. 5에 도시하였다. 단, 측정된 높이는 최대 높이로 나눈 값으로 표시하였다. 0°, 180° 방향에서보다 금속 판재의 압연 방향인 90°, 270°방향에서의 높이가 상대적으로 더 높은 것으로 측정되었는데, 이는 항복강도, R 값 등의 차이로 대표되는 금속 판재의 이방성에 따른, 스프링백을 포함한 변형의 불균일성으로 판단된다.

또한, Fig. 5에서 측정된 높이는 측정면이 전체적으로 기울어져 있음으로 발생하는 측정 오차를

포함하고 있는 값으로, 표준 평면도 측정법에 의한 측정값은 아니다.

이와 같이 본 성형공정에서 나타나는 비대칭 스프링백의 원인을 살펴보면 다음과 같다.

Fig. 6에 나타낸 바와 같이 판재가 굽힘변형을 받은 후에 하중을 제거하는 과정에서 소재는 항상 탄성변형을 겪으며, 하중제거로 인해 굽힘 반지름이 R_i 에서 R_f 로 변화된 경우에 위치 η 에서의 변형률과 응력의 변화량은 각각 다음과 같다.

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_i - \varepsilon_f = \frac{\eta}{R_i} - \frac{\eta}{R_f} \quad (3)$$

$$\Delta\sigma = E' \Delta\varepsilon = E' \eta \left(\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_f} \right) \quad (4)$$

따라서 식(3),(4)로부터 모멘트의 변화량을 계산할 수 있으며 또한, 식(5)과 같은 스프링백 전후의 굽힘 반지름 변화량을 구할 수 있다[9].

$$\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_f} = \frac{24}{t^3 E'} \left[\int_0^y \left(\frac{\eta}{y} Y_0 \right) \eta d\eta + \int_y^{t/2} \sigma_f \eta d\eta \right] \quad (5)$$

식(5)로부터 스프링백량의 차이는 항복강도 Y_0 의 크기에 비례적으로 변함을 알 수 있다. 따라서 Fig. 7에서 보이듯이 항복강도가 가장 높은 압연방향의 스프링백량이 가장 큰 것을 볼 수 있다. 또한 FEM을 통한 시뮬레이션 예측에서도 Barlat 모델을 적용한 모델이 실험결과에 가장 근접하였다.

3. 분할 블랭크 홀더

3.1 실험 조건 및 장비

Fig. 8에 개략적으로 나타낸 분할금형시스템(segmented tools system) 기술의 핵심은 제품성형시 소재에 발생하는 단면의 휨 변형을 위치별, 시간별로 제어하기 위하여 블랭크 홀더(blank holder)를 사진 Fig. 9와 같이 분할하고 이에 작용하는 압력의 크기를 소재의 압연과 비압연 방향으로 구분하여 다르게 적용한다는 것이다. 고탄소강 제품의 프레스 가공 시 블랭크 홀더에 가해지는

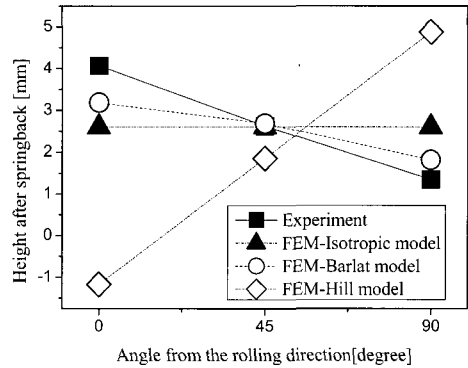


Fig. 7 Predicted distributions of heights along the circumferential direction after springback in each case

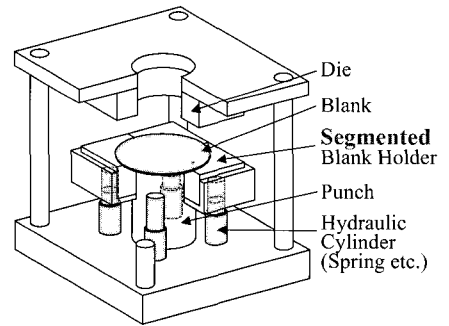


Fig. 8 Schematics of a proposed tool structure with segmented blank holders

가압력으로는, 작업조건에 따라 차이가 있을 수 있으나 타발력의 15%를 적용하기로 하였고, 압력값을 유지하기 위한 방법으로 코일스프링(coil spring)보다 상대적으로 큰 하중을 가할 수 있는 가스 스프링(gas spring)을 사용하였다. 분할된 블랭크 홀더 각각에는 사용 설비(Fig. 10)의 크기를 고려하여 압연 방향으로 5ton의 가스 스프링을 배치하였고, 비압연 방향으로는 압연 방향보다 20% 낮은 압력값의 가스 스프링을 설치하였다. 이는 결과적으로 불균일하게 발생하는 스프링백 및 성형판재의 뒤틀림의 원인을 압연금속판재의 방향별 항복강도의 상대적인 차이로 가정하고 재료시험 결과를 참고하여 설정한 수치이다. 실제 시험을 수행하기 전에 설정된 공정조건의 타당성을 미리 확인하고, 본 공정에 대한 수치해석적

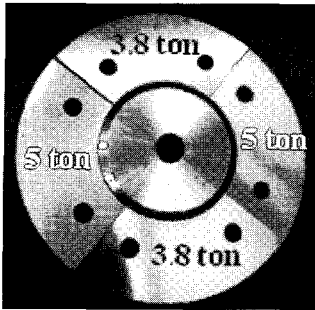


Fig. 9 Segmented blank holders

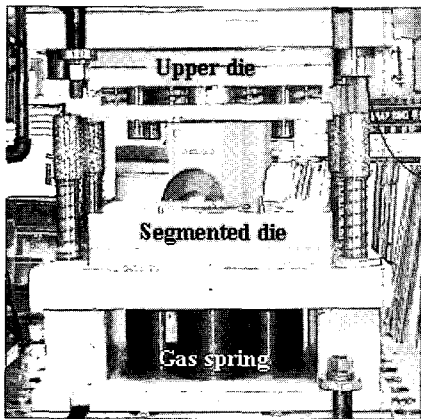


Fig.10 Experimental tools

접근의 타당성을 살펴보기 위하여, 유한요소법에 근거한 가상 시뮬레이션을 통해 이방성을 갖는 금속판재의 비대칭 스프링백 현상도 함께 관찰하였다.

3.2 수치해석조건

수치해석에 사용된 삼차원 모델은 Fig. 11에 보듯이 공정의 대칭성과 분할금형을 고려하여 1/4 모델로 생성하였다. 해석 절차는 먼저 상부외판다이(upper outer die)와 블랭크홀더(blank holder)가 소재를 고정시키고 하부펀치(lower punch)에 의해 성형하는 순서로 이루어진다. 이때 상부중심홀더(upper inner holder)는 하부펀치가 행정함에 따라 스프링의 반력으로 소재를 눌러주면서 성형하기 때문에 뒤틀림을 방지해 준다. 또한, 펀치가 행정함과 동시에 블랭크홀더는 서로 다른 가압력이 작용하기 시작한다. 소재는 Barlat 이 제안한

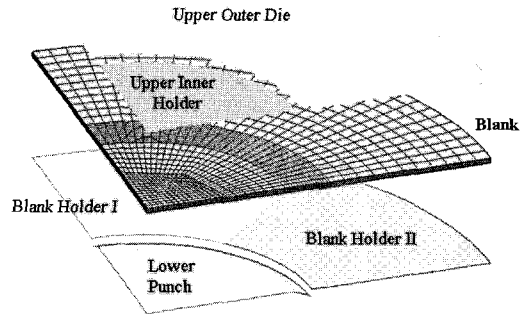


Fig.11 Schematic view (1/4 model) of the sheet metal forming process with segmented tools including blank holders

Table 2 Material-related input for simulation

Material	Cold rolled high carbon steel
Young's modulus	205 MPa
Poisson's ratio	0.3
Y45/Y0	0.86785
Y90/Y0	0.82731
YB/Y0	1
M factor	6

이방성 항복함수를 적용하였고, 앞서 기술한 이방성 조건식을 이용하여 Table 2와 같은 입력값을 사용하였다.

4. 분할 블랭크 홀더의 효과

분할 블랭크 홀더를 사용하였을 경우와 사용하지 않았을 경우 각각 실험을 통하여 스프링백 후의 원형 블랭크의 원주상의 높이 분포를 Fig. 12에 도시하였다. 그림에서 분할 블랭크 홀더를 사용하지 않았을 경우 즉, 일체형 블랭크 홀더(united bh.:solid-line)를 사용하였을 경우에는 스프링백 후 압연 방향의 높이가 가장 큰 것을 볼 수 있으며, 비압연방향으로 갈수록 점차 줄어드는 경향을 보였다. 이는 압연방향 금속 판재의 항복강도가 비압연방향보다 상대적으로 높아서 스프링백량도 더 크게 발생한 것으로 판단된다.

한편 분할 블랭크 홀더(segmented bh.:dotted-line)를 사용하였을 때의 결과를 살펴보면 전체적으로

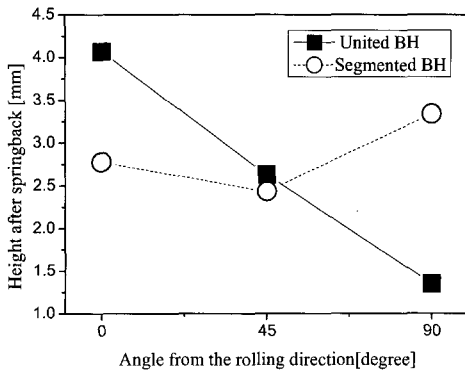


Fig.12 Comparison of united and segmented blank holder for height after springback

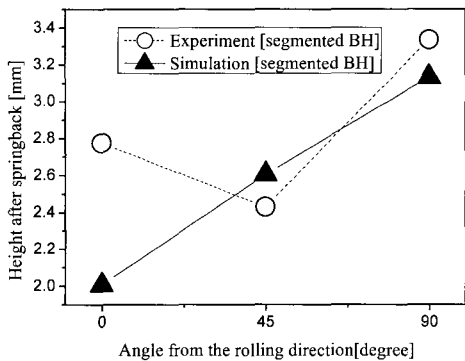


Fig.13 Comparison of experiment and simulation for height after springback

스프링백량이 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 제품의 정밀도 측면에서 최대 높이차의 절대치인 평면도(flatness)를 중심으로 비교해 본다면 일체형 블랭크 홀더를 사용하였을 때의 평면도는 2.8mm (4.1-1.3)이고 분할 블랭크 홀더를 사용하였을 때의 평면도는 1mm(3.4-2.4)로서 약 67%의 성형 정밀도가 향상된 것이다. 또한 비압연방향의 높이차가 일체형 블랭크 홀더를 사용한 모델의 경향과 다르게 나타난 것을 알 수 있는데, 이러한 현상은 Fig. 13에 보이는 바와 같이 가상 시뮬레이션 결과에서도 유사한 경향을 보이고 있다. 이와 같이 분할 블랭크 홀더를 사용하였을 때 스프링

백량의 감소와 더불어 기존의 높이 분포와 다른 결과를 보인 원인은, 서로 다른 블랭크 홀더의 가압력이 압연방향과 그에 수직한 방향으로 대표되는 이방성 판재 면상의 각 방향에 서로 다른 이력의 굽힘변형을 유발시켜 이방성 소재가 갖는 불균일한 잔류응력 생성의 위치별 차이를 줄여주거나 역전시키는 역할을 한 것으로 볼 수 있겠다.

5. 결론

이방성을 갖는 금속판재의 성형공정 중에 발생하는 비대칭 스프링백 현상을 실제 실험과 가상 시뮬레이션을 통하여 살펴보았다. 또한, 해당 성형공정 개선의 한 방안으로서 분할된 블랭크 홀더의 도입을 제안하였으며, 가압력을 위치별로 조정함으로써, 냉간압연강판의 성형공정에서 평면도를 중심으로 한 성형정밀도 향상의 가능성을 보였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 사용된 냉간압연 고탄소강 판재의 경우 Hill48의 이방성 모델보다는 Barlat91의 이방성 모델이 재료시험 결과에 보다 더 근사한 것으로 나타났다. 해당 성형공정에 대한 가상 시뮬레이션에서도 Barlat91 모델을 적용하였을 때, 보다 실험치에 근사한 예측 결과를 보였다.

(2) 셀로우드로잉 성형공정에서 비대칭 스프링백량은 항복강도가 가장 높은 압연방향에서 가장 크게 발생하였다.

(3) 분할 블랭크 홀더를 사용하여 성형해 본 결과, 원주 방향의 평면도 측면에서 성형 정밀도가 약 67% 향상되었다.

참고 문헌

- [1] 양재봉, 전병희, 오수익, 2000, 반응표면분석법을 이용한 알루미늄 판재 성형공정의 스프링백 저감에 관한 연구, 한국소성가공학회지, 제 9 권, 제 5 호, pp. 526~532.
- [2] 정완진, 1999, 박판성형시 탄성복원에 대한 유한요소해석, "대한기계학회논문집 A 권, 제 23 권, 제 12 호, pp. 2197~2208.
- [3] 양동열, 이상욱, 윤정환, 유동진, 1999, 박판 성형에서의 스프링백 해석과 산업적 응용, 한국소성가공학회지, 제 8 권, 제 1 호, pp. 22~28.
- [4] K. Siegert, M. Ziegler, S. Wagner, 1997, Closed loop

- control of the friction force. Deep drawing process, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 71, pp. 126~133.
- [5] 홍주표, 김현영, 오수익, 1997, 레이저 용접 판재의 정사각 컵 드로잉 성형성 연구, 한국소성가공학회지, 제 6 권, 제 1 호, pp. 68~80.
- [6] R. Hill, 1948, A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, Proc. Roy. Soc. London, Vol. A193, pp. 281~297.
- [7] Frederic Barlat, Daniel J.Lege, John C.Brem, 1991, A six-component yield function for anisotropic materials, Internatoinal Journal of Plasticity, Volume7, Issue7, pp. 639~712.
- [8] Oana Cazacu, Frederic Barlat, 2003, Application of the theory of representation to describe yielding of anisotropic aluminum alloys, International Journal of Engineering Science, 41, pp. 1367~1385.
- [9] 김낙수, 김형중, 2002, 소성가공과 해석, 문운당, pp.316~323.