

알루미늄 합금박판 비등온 성형공정 스프링백 해석용 유한요소 프로그램 개발 (1부 : 실험)

금영탁*·유동열**·한병엽**
(2002년 11월 11일 접수)

Development of Finite Element Program for Analyzing Springback Phenomena of Non-isothermal Forming Processes for Aluminum Alloy Sheets (Part I : Experiment)

Y. T. Keum, D. Y. Yoo and B. Y. Han

Abstract

In order to examine the springback amount and material properties of aluminum alloy sheets (AL1050 and AL5052) in the warm forming which forms the sheet above the room temperature, the stretch bending and draw bending tests and tensile test in various high temperatures are carried out. The warm forming temperature 150°C is a transition in terms of the material properties: over the forming temperature 150°C, them σ_{YS} , σ_{TS} , E , k , n , etc. are bigger but ϵ and plastic strain ratio are smaller. Below the forming temperature 150°C, there are no big differences in material properties as the forming temperature changes. AL5052 sheet has more springback effect than AL1050 sheet. While the springbacks of AL5052 and AL1050 sheets show a big reduction over the warm forming temperature 150°C in the stretch bending test, the springback rapidly reduces in the warm forming temperature 150°C-200°C for AL5052 sheet and 200°C-250°C for AL1050 sheet in the draw bending test.

Key Words : Springback, Aluminum Alloy Sheets, Stretch Bending Test, Draw Bending Test, Tensile Test, Wall Curl

1. 서 론

최근 자동차업계는 자동차 배기가스로 인한 환경오염

* 한양대학교 기계공학부

** 한양대학교 일반대학원 정밀기계공학과

문제가 사회적으로 대두됨에 따라 자동차의 연비향상을 위해 차체 경량화 연구에 매진하고 있는 추세이며 일반 강판 소재를 대신하여 알루미늄 합금 소재를 차체에 이용하고 있다. 그러나 알루미늄 합금 소재는 성형할 때 소성 이방성비가 작아 재료의 유입이 잘 이루어지지 않으며, 강판 소재에 비해 낮은 탄성계수(강판의 약 1/3)로 인하여 스프링백양 또한 강판 소재에 비해 크다는 단점이 있다. 스프링백 현상은 제품의 치수 정밀도를 떨어뜨릴 뿐만 아니라 제품결합의 원인이 되어 이에 대한 대책 마련이 시급한 실정이다.

알루미늄 및 알루미늄 합금 소재는 200~300℃ 범위에서 인장강도의 감소와 함께 높은 연성을 나타내는 성질이 있어, 성형시 급형 부품의 일부를 가열 혹은 냉각하거나 소재를 직접 가열하여 소재 강도를 성형 중에 변화시키면서 성형성을 향상시키고, 스프링백양을 줄일 수 있다.

스프링백에 대한 연구동향으로는 Chu 등⁽¹⁾은 평면 변형률 상태에서 인장, 굽힘 변형을 일으키는 박판의 굽힘 해석에서, 모멘트와 곡률의 관계를 이용하여 스프링백과 벽젓힘 현상에 대한 연구를 박막 이론에 의한 유한 요소 해석 프로그램을 이용하여 수행하였다. Zhang과 Lin⁽²⁾은 스프링백을 예측하는 새로운 수학적 모델을 제시하고 기존의 모델과 비교하였다. 또한 공정변수와 재료 상수를 차례대로 변화시켜가며 스프링백에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. Wagoner 등⁽³⁾은 박판 성형 공정에서의 정확한 응력해석이 스프링백 해석 결과에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 상용 프로그램인 Z-Band와 LS-Nike/Dyna를 통한 모사 실험 결과와 실험결과를 비교 분석하였다. 또한, 2차원 박막요소를 이용한 성형해석 프로그램에 굽힘효과를 묘사할 수 있는 알고리즘을 도입하여 모사결과와 실험치를 비교하는 연구를 수행하였다. Leu 등⁽⁴⁾은 스프링백에 소성변형률비(\bar{R})와 가공경화지수(n)의 영향을 고려하여 스프링백 예측에 대한 연구를 수행하였고 연구결과를 실험치와 비교하였다.

한편, 국내 연구 동향으로는 김용환 등⁽⁵⁾은 비등온 박판 성형 공정을 3차원 유한요소 해석법을 이용하여 변형 중 온도가 성형성에 얼마나 영향을 미치는지 평가하였다. 양동열 등⁽⁶⁾은 스프링백 현상을 유한요소법으로 해석 시 스프링백에 영향을 미치는 모델링 인자인 벌칙상수, 블랭크의 요소 크기, 곡률부의 요소 수, 펀치 속도에 대해 평가하였으며, 벤치 마크 문제인 S-rail과 실제 산업 예제인 루프 패널의 스프링백 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 알루미늄 합금 박판의 온간성형 기술에서 스프링백현상과 물성을 관찰하기 위하여 고온인장실

험, 스트레치 굽힘실험, 그리고 드로우 굽힘실험을 수행하였다.

2. 실험

2.1 고온 인장실험

고온 인장실험의 목적은 온간 성형에서 스프링백현상을 유한요소해석법으로 시뮬레이션 하는데 필요한 입력 데이터와 고온에서 소재가 갖는 기계적 성질을 고찰해보기 위함이다.

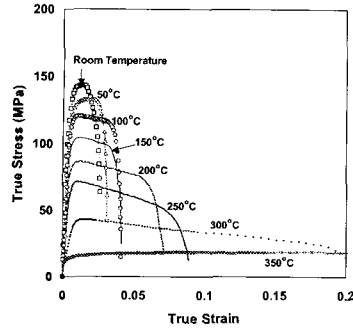
본 연구의 실험소재는 가공성과 용접성이 우수하고 알루미늄의 순도가 높아 압출관 코일 등에 많이 사용되는 순수 알루미늄 계열의 AL1050-H16(이하 AL1050)과 성형성과 용접성이 우수하고 높은 강도를 가지고 있어 판급재료나 설비재, 자동차 차체판넬, 선박용 재료 등에 사용되고 있는 Al-Mg 계열의 AL5052-H32(이하 AL5052)를 사용하였고, 각 소재의 두께는 0.8mm이며 Table 1은 이들 재료의 화학성분을 나타내고 있다.

실험용 시편은 압연방향으로부터 0°, 45°, 90°방향에서 인장시편제작용 급형을 이용한 전단 가공으로 준비되었으며 이때 인장시편의 게이지부 길이는 60mm, 폭은 14mm이다. 준비된 인장시편들은 온도조절이 가능한 UTM에 장착되었고, 5mm/min 인장속도로 하여 상온에서부터 50℃간격으로 350℃까지 온도를 변화시키면서 인장실험이 수행되었으며, 수 차례의 인장실험에 대한 평균치를 실험 값으로 하였다. Fig. 1은 실험 온도별 인장실험결과를 나타낸 인장선도이다. 온도가 증가할수록 인장강도와 항복강도는 감소하는 경향이 있으나, 연신율은 점차 증가한다. 상온(실온)에서 소재의 연신율과 인장강도는 각각 AL1050의 경우 2.8%와 138MPa, AL5052의 경우 7.3%와 232MPa로 낮은 연신율과 높은 인장강도를 갖지만, 300℃의 고온에서는 AL1050의 경우 21%와 44MPa, AL5052의 경우 99%와 88MPa로 상온에 비해 연신율은 현저하게 증가하고 인장강도는 절반 이하로 뚜렷히 감소하였다.

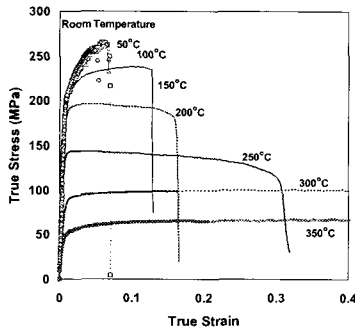
Fig. 2는 AL1050, AL5052 판재의 인장 실험결과를 응력 변형률의 변형경화식으로 표현한 그림이다. AL1050

Table 1 Chemical composition of AL1050 and AL5052

Alloy number	Al	Mg	Cr	Ti	Fe	Si	Cu	Mn	V	Zn
	Min	Max		Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max
AL1050	99.5	0.05		0.03	0.4	0.25	0.05	0.05	0.05	0.05
AL5052	97.3	2.2-2.8	0.15-0.35		Max	Max	Max	Max		Max
					0.4	0.25	0.1	0.1		0.1



(a) AL1050



(b) AL5052

Fig. 1 Measured true stress-strain relationships of (a)AL1050 and (b)AL5052 sheet specimens associated with various test temperatures

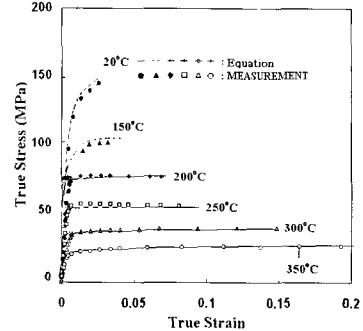
의 경우 150°C에서 변형률이 10%를 넘었을 때, AL5052의 경우 250°C에서 변형률이 9%를 넘었을 때 응력을 약간 크게 평가하는 것을 제외하면 다음의 변형경화식이 전체적으로 AL1050, AL5052 박판의 온도별 변형특성을 잘 표현하고 있다.

$$\sigma = \sigma_0(T) + K(T) \{ \varepsilon + \varepsilon_0(T) \}^{n(T)} \left\{ \frac{\dot{\varepsilon}}{\gamma(T)} \right\}^{m(T)} \quad (1)$$

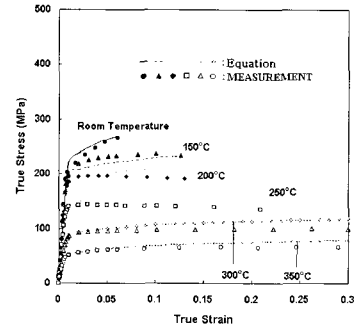
여기서 $\sigma_0(T)$, $K(T)$, $\varepsilon_0(T)$, $n(T)$, $\gamma(T)$, $m(T)$ 는 각각 온도의 함수로 표기된 초기 응력, 강도계수, 초기 변형률, 변형 경화 지수, 초기 변형률 속도, 변형률 속도 지수 이다.

2.2 스프링백 실험

온간 성형에서 스프링백 저감을 확인하고 성형 온도에 따른 스프링백 거동을 관찰하기 위해 알루미늄 합금 박판이 스트레치 상태에서 성형되는 스트레치 굽힘실험과 박판이 드로우 상태에서 성형되는 드로우 굽힘실험을 성



(a) AL1050



(b) AL5052

Fig. 2 True stress-strain relationships of (a)AL1050 and (b)AL5052 sheet various test temperatures

형 온도를 조정하면서 수행하였다.

2.2.1 스트레치 굽힘실험 (Stretch-Bending Test)

성형 온도에 따른 알루미늄 합금 박판 소재에 대한 스트레치 굽힘실험을 위해 스트레치 굽힘 성형용 축소급형을 제작하였으며, 축소급형의 형상 및 실험의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 다이의 어깨 반경은 10mm이고 편치 반경은 2mm로 하였으며, 클리어런스는 1.2mm이다.

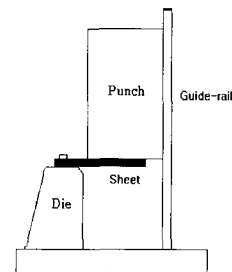


Fig. 3 Schematic view of experimental apparatus for a stretch bending test

제작된 축소금형에 AL1050과 AL5052시편을 장착하여 실험을 수행하였으며 각각 압연방향으로부터 0°, 45°, 90°의 방향에서 추출된 시편의 크기는 150mm×30mm이다. 축소 금형에 시편을 장착하고 온도조절이 가능한 가열로 안에 넣고 상온부터 50°C간격으로 350°C까지 온도 변화에 따른 굽힘실험을 실시하였다. 시편의 성형 온도가 목표 온도에 도달하도록 수 십분동안 목표 온도를 유지시켜 주었고, 열전대를 이용하여 시편의 온도를 직접 측정하였다.

스프링백의 크기는 굽힘 성형 전·후의 굽힘 각도(θ)를 측정하여 구하였다. (Fig. 4 참조)

2.2.2 드로우 굽힘실험 (Draw-Bending Test)

스트레치 굽힘실험과 마찬가지로 성형온도를 상온에서부터 시작하여 350°C까지 50°C간격으로 조정하면서 굽힘 성형 실험을 실시하였다. 성형 온도에 따른 알루미늄 합금 박판 소재에 대한 드로우 굽힘실험을 위해 축소 금형을 제작하였으며 축소 금형의 형상 및 실험의 개략도를 Fig. 5에 나타내었다. 다이의 어깨 반경은 10mm이고 펀치 코너 반경은 2mm로 하였으며, 클리어런스는 1.2mm로 하고 뒤쪽에 무게추를 달아 BHF를 조정하였다. 시편은 인장 시편 모양으로 제작하였으며 게이지부 길이는 60mm, 폭 14mm, 두께 0.8mm이며 각각 압연방향으로부터 0°, 90°의 방향에서 추출하였고 준비된 축소금형에 AL1050과 AL5052시편을 장착하여 가열로 안에 넣고 상온부터 50°C간격으로 350°C까지 온도 변화에 따른 굽힘 실험을 실시하였다.

스프링백의 크기는 굽힘 성형 전·후의 굽힘 각도 ($\Delta\theta_1 = \theta_1 - 90^\circ$, $\Delta\theta_2 = 90^\circ - \theta_2$)를 측정하여 구하였다.(Fig. 6 참조)

2.3 실험결과 및 고찰

온도가 증가함에 따라 소재의 종류와 시편의 추출방향에 관계없이 스프링백 크기가 감소하고 있음을 확인 할 수 있었고, 온간 성형이 스프링백 크기를 감소시키는데 유효한 방법임을 알 수 있었다

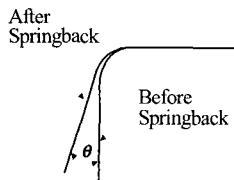


Fig. 4 Springback, θ , in stretch bending test specimen

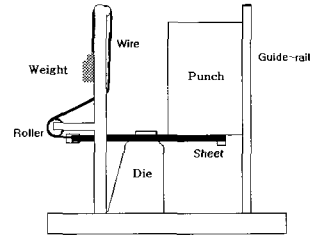


Fig. 5 Schematic view of experimental apparatus for a draw bending test

Fig. 7는 각 소재에 대해 온도별 스트레치 굽힘실험 후 발생한 스프링백의 크기를 수치적으로 보여주고 있는 그래프이다. 스프링백은 소재의 물성치에 많은 영향을 받으므로 온도가 변화함에 따라 스프링백의 크기도 변화되는 모습을 관찰할 수 있다. 우선 AL1050은 AL5052에 비해 비교적 스프링백 크기가 작게 나타났으며 이것은 AL5052소재가 AL1050에 비해 높은 항복강도를 가지고 있기 때문인 것으로 추측된다. 또한 두 소재 모두 높은 온도에서 성형할수록 스프링백 크기는 감소하고 있음을 볼 수 있는데, 특히 성형온도 150°C이후로 스프링백 크기가 현저히 줄어들고 있음을 볼 수 있다. 또한 각 소재의 압연방향에 따른 시편 추출 방향별 스프링백 크기를 관찰해 보면 상온에서는 각시편 추출 방향에 따라 스프링백 크기에 차이를 보여주고 있으나 높은 온도에서 성형할수록 그 차이가 줄어들고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 알루미늄 박판 소재가 재결정 온도가 됨에 따라 소재의 성질이 등방성화 하기 때문이라 추정된다.

식 (2)는 Leu⁽⁵⁾가 소재의 소성이방성을 고려하여 스프링백 크기를 예측하기 위해 나타낸 식으로 굽힘 성형시 굽힘 곡률과 스프링백이 발생한 후 곡률과의 관계를 보여주고 있다. 식에서 볼 수 있듯이 스프링백은 강도계수가 작을수록, 탄성계수는 클수록 감소하게 되며 그밖에 소재의 두께, 소성이방성비 등 여러 물성치에 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

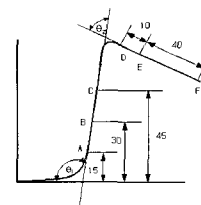
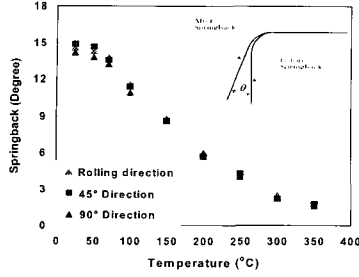
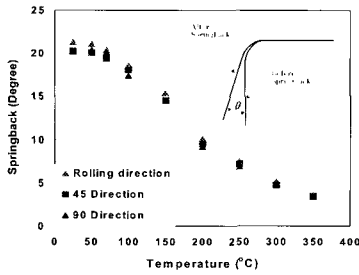


Fig. 6 Measurement of θ_1 and θ_2 for calculating springback in draw bending test



(a) AL1050



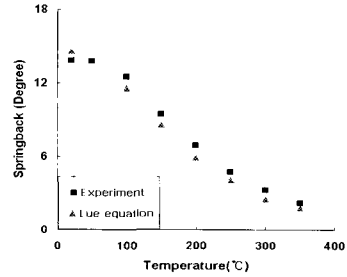
(b) AL5052

Fig. 7 Springback of (a) AL1050 and (b) AL5052 after stretch bending test associated with test temperatures

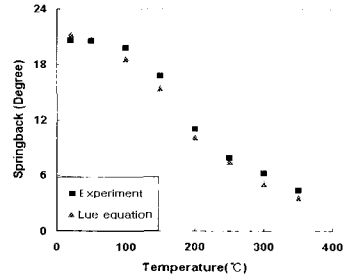
$$\frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_c'} = K \left(\frac{1 + \bar{R}}{\sqrt{1 + 2\bar{R}}} \right)^{1+n} \left(\frac{3(1-\nu^2)}{hE(1+n)} \right) \left(\frac{h}{2R_c} \right)^n \quad (2)$$

여기서 R_c , R_c' 은 각각 소재 중립면에서의 스프링백 전·후의 굽힘 반지름이며, K 는 강도계수, \bar{R} 는 소성이 방성비, n 은 가공경화지수, h 는 소재의 두께, ν 는 프아송 비, E 는 탄성계수이다. 스프링백 실험을 통하여 온도가 증가할수록 스프링백 크기가 감소하는 것은 온도에 따라 탄성계수의 변화보다 강도계수나 다른 물성치들의 영향이 크기 때문인 것으로 추정된다. Fig. 8은 온도에 따라 식(2)에 온도별 인장실험에 의해 도출된 물성치를 대입하여 예측한 스프링백 크기와 실제 실험치를 비교한 그래프이다. 각 성형 온도에서 예측값과 실험값은 약간의 오차를 보이고 있으나 온도가 증가함에 따라 스프링백의 감소 경향은 대체적으로 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9, Fig 10은 드로우 굽힘실험에서 발생한 성형온도별 스프링백의 크기를 수치적으로 보여 주고 있다. 성형온도가 높아짐에 따라 스프링백의 크기도 크게 변화되는 모습을 관찰할 수 있다. AL1050은 250°C 이후부터 스프링백양이 급격히 감소하고 AL5052는 150°C 이후부터



(a) AL1050



(b) AL5052

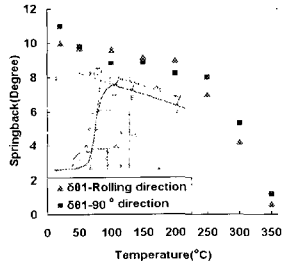
Fig. 8 Comparison of springback amount of (a) AL1050 and (b) AL5052 after stretch bending between theory and experiment associated with various test temperatures

지속적으로 감소하는 현상이 나타났다. 스트레치 굽힘 실험에서의 마찬가지로 AL1050은 AL5052에 비해 비교적 스프링백 크기가 작게 나타났으며 이것은 AL5052소재가 AL1050에 비해 높은 항복강도를 가지고 있기 때문인 것으로 추정된다. 또한 각 소재의 방향별 스프링백 크기를 비교해 보면 스트레치 굽힘과 같이 고온으로 갈수록 이 방성 영향이 작아지는 것을 알 수 있다. 각 소재의 스프링백 감소경향은 서로 비슷하지만, AL5052가 감소율이 더 큰 것을 알 수 있었고 $\Delta\theta_2$ 가 $\Delta\theta_1$ 보다 더 저온에서 작아지는 것을 알 수 있었다.

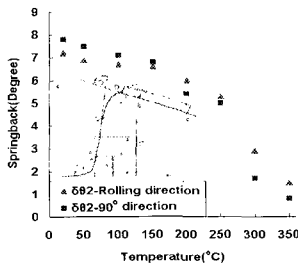
3. 결론

비등온 박판성형에서 알루미늄 합금 박판의 스프링백과 물성을 관찰하기 위하여, 고온 인장실험, 스트레치 굽힘실험, 그리고 드로우 굽힘실험을 실시하였다. 이와 같은 일련의 알루미늄 합금 박판의 고온 성형실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) AL1050과 AL5052소재의 온도별 인장실험을 통하여 실험온도 150°C를 기점으로 실험 온도가 증가할수록



(a) $\Delta\theta_1$



(b) $\Delta\theta_2$

Fig. 9 Springback of AL1050 after draw-bending test associated with test temperatures (a) $\Delta\theta_1$, (b) $\Delta\theta_2$

항복강도, 인장강도, 탄성계수, 강도계수, 가공경화지수 등의 물성치가 감소하였고, 연신율, 소성변형율비 등은 증가하였다.

(2) 스트레치 굽힘실험을 통하여 AL5052소재는 AL1050 소재 보다 스프링백양이 크게 나타났으며 두 소재에 대해 온간 성형법을 적용한 결과 성형 온도 150°C 이후로 스프링백양은 크게 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

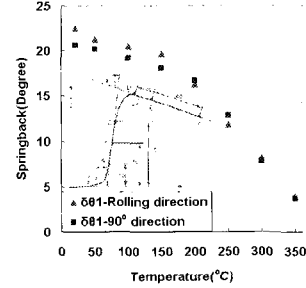
(3) 드로우 굽힘실험을 통하여 AL5052소재는 150°C-200°C, AL1050소재는 200°C-250°C에서 스프링백이 급격히 감소함을 알았다. 또한 AL5052 소재는 AL1050소재보다 더 많은 양의 스프링백 저감효과를 볼 수 있었다.

후 기

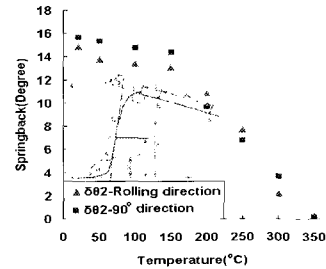
이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-2001-041-E00097)

참 고 문 헌

(1) F.Pourboghraat and E. Chu, "Prediction of



(a) $\Delta\theta_1$



(b) $\Delta\theta_2$

Fig. 10 Springback of AL5052 after draw-bending test associated with test temperatures (a) $\Delta\theta_1$, (b) $\Delta\theta_2$

springback and sidewall curl in 2D-draw bending" Journal of Materials Processing Technology, Vol 50, Issues 1-4, March 1995, pp. 361~374.

- (2) L.C.Zhang and Z.Lin, "An analytical solution to springback of sheet metals stamped by a rigid punch and an elastic die" Journal of Materials Processing Technology, Vol 63, pp. 49~54.
- (3) N. He and R. H. Wagoner, 1996, "Springback simulation in sheet metal forming", NUMISHEET '96, pp. 308~315
- (4) Daw-Kwei Leu, 1997, "A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals", Journal of Materials Processing Technology, Vol 66, pp. 9~17.
- (5) 김용환, R.H. Wagoner, 1990, "비등온 박판 성형 공정의 유한요소 해석", 대한기계학회논문집 제 14권 제 5호, pp. 1119~1128.
- (6) 양동열, 이상욱, 윤정환, 유동진, 1999, "박판 성형에서의 스프링백 해석과 산업적 응용", 한국소성가공학회지 제8권 제1호, pp. 22~28.