

박판성형시 킨 예측모델 개발(II)-실험적 검증

주병돈¹ · 박현규¹ · 김동우¹ · 문영훈[#]

Development of Prediction Model for Sidewall Curl in Sheet Metal Forming(II)-Experimental Validation

B. D. Joo, H. K. Park, D. W. Kim, Y. H. Moon

(Received April 19, 2007)

Abstract

Sidewall curl is the curvature that results from non-uniform through-thickness strain present in the sheet stamping process which involves material flow over a die radius. In order to understand and control curl for tight fit-up tolerances, an analytical model that can provide a reliable measure for the amount of curl would be very helpful. In this study, a model is developed based on the moment-curvature relationship during bending-under-tension operations. For the verification of analytical model, sidewall curl is experimentally measured after deformation of a strip using a bending-under-tension test system. The results show a consistent relationship between the theoretically predicted value and the experimentally obtained one, especially in regions of high curl.

Key Words : Sidewall curl, Curl curvature, Analytical model, Bending-under-tension, Moment-curvature

1. 서 론

측벽부 킨(Sidewall curl)은 스프링백의 한 현상으로, 판재의 드로잉 및 굽힘성형후 주로 발생한다. 킨이 심하게 발생하면 가공 후 부품조립에 문제를 일으키게 되므로, 금형 설계 및 가공조건과 소재 선정시 고려되어야 하는 중요한 특성이다. 킨을 정확하게 제어하기 위해서는 킨의 발생에 영향을 미치는 여러 인자들에 대한 면밀한 이해가 요구되며 이에 대한 다양한 연구가 이루어져 왔다[1~7]. Davies[1]의 경우 저탄소강이나 HSLA50, HSLA80, DP-80 강종에 대해 변형경화속도가 변형분포에 미치는 영향으로 부터 측벽부 킨 측정시험을 실시한바 있으며 Matlock 등[2~3]은 유압제어 굽힘-인장시험장치를 이용하여 킨 발생영향인자를 연구하였다. 실험을 통한 접근 외에도 이론적인

해석모델을 이용한 연구도 다양하게 진행되어 공정인자의 해석에 널리 활용되고 있다[4~8].

본 논문의 전반부[9]에서는 굽힘-인장응력(bending under tension)하에서 모멘트-곡률(moment-curvature) 관계에 근거한 이론적 해석모델을 개발한 바 있으며, 본 연구에서는 실험을 통해 얻어진 측벽부 킨 값과의 비교를 통해 이론 해석 모델의 예측정밀도를 검증해 보고자 한다.

2. 킨 측정 실험

2.1 시험대상재료

킨 측정을 위한 재료로는 이상 조직강인 DP600과 고강도 저합금강인 SPFC590R 을 대상으로 하였다. 인장시험은 ASTM E8 판상시편을 이용하였고, 시편두께는 1.00~1.60mm 사이의 8 가지 경우를 대상으로 하였다. 인장실험을 통해 실제 이론

1. 부산대학교 정밀기계공학과
교신저자: 부산대학교 정밀기계공학과/정밀정형 및 금형가공 연구소, E-mail:yhmoon@pusan.ac.kr

적인 해석에 필요한 가공경화지수(n), 강도계수(K), 0.2% offset 항복강도(σ_0)를 구하였고, n 및 K의 값은 항복강도와 인장 강도 사이 범위에서 멱함수 ($\sigma = K \cdot (\epsilon_0 + \bar{\epsilon}_p)^n$)를 이용해 회귀분석으로 구하였다. 탄성계수(E)는 일반적인 강의 탄성계수를 고려하여 2 가지의 강종에 대해서 207GPa 로 통일하여 사용하였다. 이들 재료의 인장 물성치는 Table 1 에 나타내었다.

박판성형의 측면에서 이방성은 재료의 기계적 성질과 물리적 성질을 좌우하는 중요한 인자로 고려되지만 본 논문에서는 실험적인 물성치와 해석모델을 위한 물성치를 동일하게 주어 해석모델의 입증을 위한 방법론적인 측면에서 연구 되었으므로 재료의 이방성은 고려하지 않았다.

Table 1 Longitudinal tensile properties for the examined materials

material	Thickness (mm)	Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	n	K (MPa)
DP600A	1.04	365	596	0.128	776
DP600B	0.99	340	616	0.129	812
DP600C	1.42	360	621	0.122	808
DP600D	1.07	365	666	0.129	881
DP600E	1.19	355	704	0.142	944
590RH	1.56	395	619	0.112	800
590RI	1.18	385	628	0.109	795
590RJ	1.37	400	657	0.118	854

2.2 실험장치 및 방법

본 연구에서는 Hilditch 등[2]에 의해 제안된 BUT(bending-under-tension)실험을 통해 해석모델을 검증하였다. Fig. 1에 킨 측정장치에 대한 도식도를 나타내었다. BUT 시스템은 이전에 마찰과 성형성 연구를 위해 고안된 89kN 하중능력의 컴퓨터 제어 시험기로서 후방장력 부여를 위한 44.5kN 급 유압 로드 프레임, 152mm 이송용 액추에이터 부분과 실제 판재를 당겨주기 위한 203mm 이송용 액추에이터, 44.5kN 로드셀 등으로 구성되어 있다. BUT 실험은 후방장력으로 판재를 일정하게 잡아주고 이때 로드 프레임에 설치된 액추에이터에 의해 일정한 변위속도로 롤러를 통해 굽힘과 인장을 부여하는 실험이다. 이때 후방장력을 부여하는 유

압실린더 유닛은 설정장력을 유지하기 위해 축방향 이동이 가능하도록 설계되었다.

BUT 실험에 대하여 Fig. 2에 나타내었고 Fig. 2(a)의 경우는 굽힘 각을 90°로, Fig. 2(b)의 경우는 굽힘 각을 45°로 하여 실험한 경우를 나타내었다 [2~3]. 액추에이터의 변위속도는 2540mm/min으로 일정하게 유지시켰다. 실험은 변위가 최대 127mm 일 때 중단하였다. 또한 서로 다른 두 가지 후방장력을 가한 상태에서 실험이 이루어 졌고, 두 경우 모두 45°, 90°의 굽힘 각(θ)으로 실험하였다. 이 실험에 사용된 재료인 SPFC590R의 경우 평균 인장강도는 625MPa 이고 DP600의 경우는 640MPa 으로 후방장력이 작은 탄성영역의 경우 평균인장강도의 25%, 후방장력이 큰 소성영역의 경우는 평균인장강도의 65%의 힘을 가해 실험을 하였다. 이러한 실험적인 방법을 이용해서 측정된 서로 다른 축 방향 응력, 굽힘 각을 고려해 이론의 수치해석 모델에 대입하여 결과값을 유도하였고 이를 비교해서 타당성을 검토하였다.

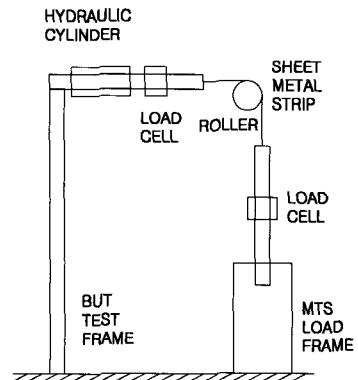


Fig. 1 Schematic drawing of the bending-under-tension testing apparatus

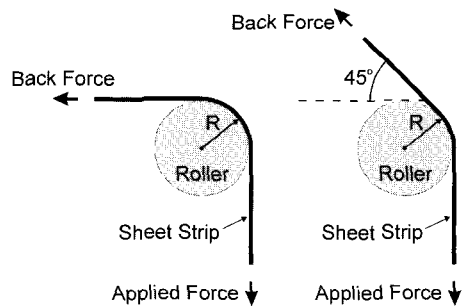


Fig. 2 Schematic of the bending-under-tension test geometry for a bend angle of (a) 90°, and a bend angle of (b) 45°

2.3 컬 측정

BUT 실험을 완료한 후 시편을 시험기로부터 제거하고 Fig. 3[2]에 보인 방법으로 컬 반경(R_c)을 측정 하였다. R_c 의 측정은 실험동안 롤러에 접촉된 재료의 중심부에서 최대 아크의 높이(h)와 현의 길이(C)에 의한 관계에 의해서 피타고라스식으로 구할 수 있다. 여기서 C 와 h 값은 실제 실험시편을 버니어 캘리퍼스로 측정해서 구한다.

$$R_c = \frac{h}{2} + \frac{(c/2)^2}{2h} \quad (1)$$

구해진 R_c 로부터 컬 곡률 값은 역수를 취함으로써 얻어 진다. 후방장력과 굽힘 각도에 따른 측정된 R_c 값은 Table 2에 나타내었다.

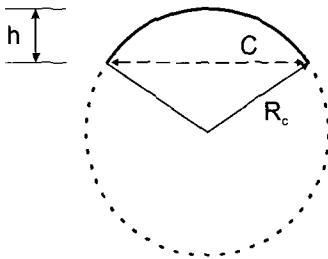


Fig. 3 The height(h) and chord length(C) used to calculate the radius (R) of a circle from a given arc.

Table 2 Average curl radii for the duplicate test samples

Material	Thickness (mm)	Low BT-curl rad. (mm)		High BT-curl rad. (mm)	
		45°	90°	45°	90°
DP600A	1.04	172	165	532	1199
DP600B	0.99	159	145	487	1330
DP600C	1.42	218	194	666	3085
DP600D	1.07	150	144	323	619
DP600E	1.19	166	137	269	313
590RH	1.56	231	245	1286	Infinite
590RI	1.18	180	182	521	1793
590RJ	1.37	190	190	530	1101

3. 해석모델을 이용한 컬 계산

3.1 굽힘각과 적용응력에 따른 변형률 ϵ_a 가해진 변형률 ϵ_a 값은 굽힘-인장시 판재에 걸

리는 힘에 의해 늘어난 실제 변형률 값으로, 스프링백 인자(S_p)를 통한 6 개의 변형패턴별 적용모델을 선정하고, 장력(T)과 모멘트(M) 값을 얻는데 사용되는 중요한 값이다. 이는 낮은 후방장력(Low back tension)의 경우와, 높은 후방장력(High back tension)의 경우 굽힘 각도에 따라(45°, 90°) 실제 실험에 적용된 응력을 통해 구할 수 있다. BUT 실험에 적용된 응력으로부터 해석 모델을 통한 컬을 구하기 위해 실제 적용된 응력으로부터 이론수식에 대입할 응력을 구하고 이를 통해서 ϵ_a 값을 구하는 것이다.

굽힘 각이 90°일 때 판재와 다이에 접촉하는 부분이 증가하기 때문에 마찰에 의한 응력이 더 클 뿐 아니라 굽힘에 의한 더 큰 구속에 의한 결과로 적용된 응력이 더 크다. 그러므로 컬 반경의 차이점은 후방장력과 굽힘 각도로부터 결합된 응력, 즉 작용응력의 크기에 기인한다. 후방장력이 작고 굽힘 각이 45°인 경우 계산을 위해 적용된 응력의 범위는 200~210MPa이고 굽힘 각이 90°인 경우 응력은 240~270MPa 이다. 비록 적용된 응력이 재료마다 다소 차이는 있을지라도 후방장력이 작을 때 적용된 응력은 45°, 90°의 경우 모두 항상 항복강도보다도 작은 쪽에 있다. 후방장력이 클 경우 굽힘 각이 45°일 때 모든 재료의 적용된 응력의 범위는 480~510MPa이고 굽힘 각이 90°일 때 응력은 520~580MPa이다. 이 또한 적용된 응력이 재료마다 다소 차이는 있을지라도 큰 후방장력을 가질 때 적용된 응력은 45°, 90°의 경우 모두 항상 항복 강도보다도 큰 쪽에 있다. 항복 강도보다 작을 경우 $\epsilon_a = \sigma_a / E_L$ 를 통해 구해지고, 항복강도보다 클 경우 $\epsilon_a = (\sigma_a / K)^{1/n}$ 를 통해 구할 수 있다.

3.2 곡률반경과 그 외의 변수

컬을 계산하기 위해서는 아래의 식 (2)에 나타난 예측식을 이용한다[9].

$$Curl = \left(\frac{1}{\rho} \right)_s - \left(\frac{1}{\rho} \right)_f - \frac{12 \cdot (M_s - M_f)}{E \cdot t^3} \quad (2)$$

M_s 와 M_f 는 6 가지의 변형양상에 대한 모멘트-곡률 관계식을 이용하여 해당 곡률반경 및 변수 값 들을 대입하여 구하고 이를 식 (2)에 대입하여 컬을 계산한다.

ρ_s 는 판재와 접촉하는 롤러의 곡률반경을 나타내는 것으로 이 실험에 적용된 롤러의 곡률반

경은 12mm 이다. ρ_f 의 값은 아래 식 (3)을 통해 구할 수 있다.

$$\Delta\theta = \Delta\left(\frac{1}{\rho}\right) = \left(\frac{1}{\rho}\right)_f - \left(\frac{1}{\rho}\right)_s = -\frac{12 \cdot M_s}{E_L \cdot t^3} \quad (3)$$

장력 T와 모멘트 M에 나타난 임의의 매개변수인 a, b의 값은 장력 T에 의해서 구하여져 굽힘모멘트의 계산에 적용된다. 변형률값이 탄성범위일 때 장력 T는 식 (4)로, 소성범위일 때 장력 T는 식 (5)으로 나타내어진다.

$$T = t\sigma_a = tE\varepsilon_a \quad (4)$$

$$T = t\sigma_a = tK(\varepsilon_a)^n \quad (5)$$

4. 결과 및 고찰

실험으로부터 얻어진 컬 반경값은 이론적인 해석 모델을 통해 얻어진 값과 직접 비교를 통해 검증하였다. 이론적인 계산을 위해 이용된 계수나 변수 값은 실험치와 동일하게 사용하였다. Table 3은 해석 모델을 통해 얻은 컬 반경(Rc)값을 개괄적으로 나타낸 값이고, 실험을 통한 컬 반경의 결과 값을 Table 4에 나타내었다.

4.1 굽힘각, 후방장력, 적용된 응력에 따른 컬 반경 (Rc)영향도

Table 3와 Table 4를 통해 굽힘각과 후방장력, 적용된 응력에 대한 영향도를 볼 수 있다. 결과에 따르면 굽힘 각, 후방장력, 적용된 응력이 클수록 컬 반경은 커짐을 알 수 있다. 그러므로 컬 반경의 차이점은 후방장력과 굽힘 각으로부터 결합된 응력, 즉 적용응력의 크기에 기인한다고 할 수 있다. 후방장력이 높고 굽힘 각이 90°인 경우, 판재와 다이에 접촉하는 부분이 증가하기 때문에 마찰에 의한 응력이 더 클 뿐 아니라 굽힘시의 높은 구속으로 인해 적용된 응력이 가장 크다.

4.2 컬 곡률(1/Rc)의 비교

Fig. 4는 DP600과 SPFC590R의 실험치의 컬 곡률(1/Rc)값과 예측치의 컬 곡률(1/Rc) 값을 나타내었다. 컬 반경(Rc)의 역수의 값이 컬 곡률(Curl curvature, 1/Rc)로 나타나고 컬 곡률의 값이 작을수록 더 평평함을 나타낸다.

Table 3 Applied stress obtained from variation of back tension and bend angle

BT	Bend angle	σ_a (MPa)	σ_a for σ_a (MPa)	Basic equation for σ_a
LT	45°	200-210	205	$\varepsilon_a = \sigma_a / E,$ E=207 GPa
LT	90°	240-270	255	
HT	45°	480-510	495	$\varepsilon_a = (\sigma_a / K)^{1/n}$
HT	90°	520-580	550	

Table 4 The curl radii(Rc) obtained from analytical model

Material	Thickness(mm)	LT, 45°	LT, 90°	HT, 45°	HT, 90°
DP600A	1.04	155.91	157.64	547.77	2241.36
DP600B	0.99	143.90	145.61	375.16	1489.72
DP600C	1.42	189.52	191.08	327.13	816.43
DP600D	1.07	141.43	142.97	220.74	446.66
DP600E	1.19	150.65	152.13	216.80	363.05
590RH	1.56	200.64	202.12	290.07	631.61
590RI	1.18	157.57	159.13	246.39	633.41
590RJ	1.37	171.85	173.30	228.99	402.84

컬 곡률이 작을 경우 다른 두께와 인장강도 그리고 미묘한 복합적인 성형양상의 결과로써 실험적인 측면에서 예측모델을 통한 예측치와 다소 차이를 보이지만 대체적으로 거의 유사한 컬 곡률 값을 가진다. 비록 후방장력이 클 때의 낮은 곡률부에서 실험값과 예측 값의 차이를 보이지만 높은 곡률부에서는 실험데이터와 예측모델에 의한 값이 높은 상관관계를 가진다. 낮은 곡률부에서의 높은 예측오차는 낮은 곡률부에서의 예측모델의 부정확성과 상대적으로 높은 시험오차에 복합적으로 기인한 것으로 판단된다. 컬 곡률이 큰 경우에는 가공 후 부품조립을 곤란하게 하므로 금형 설계 및 가공조건과 소재선정에서 고려하여야 하는 중요한 특성으로 컬 곡률의 정확한 예측이 가장 필요로 되는 구간은 바로 큰 컬 곡률을 가지는 구간으로(High curl curvature/Low back tension force)실험을 통한 값과 예측 모델을 통한 값이 큰 상관성을 보여준다.

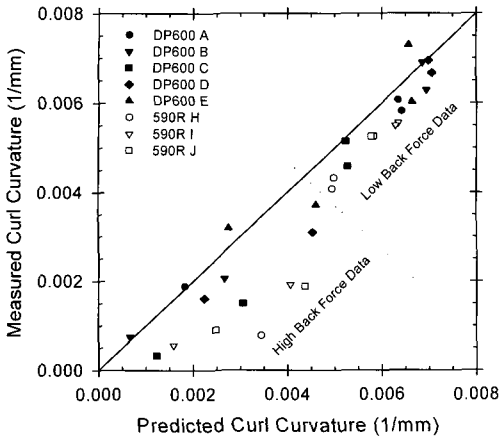


Fig. 4 The comparison of predicted and measured curl radii

5. 결론

DP600 과 SPFC590R 에 대한 BUT 실험을 컬 예측 모델을 실험적으로 검증한 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 이론적인 해석 모델에서 뿐만 아니라 실험에 있어서 적용된 응력 및 항복강도, 탄성계수, 굽힘반경, 굽힘 각, 판재 두께 등은 중요한 변수로써 작용하고 이들 변수 값들은 판재의 스템핑 공정에서 컬에 중요한 영향을 미친다. 해석모델과 실험을 통해서 컬 곡률을 측정된 결과 일률적이지는 않으나 대체적으로 두께가 작고 굽힘 각이 작을수록, 인장강도가 증가할수록 컬 곡률은 증가한다.

(2) 후방장력이 클 때의 굽힘 각이 90°인 경우 판재와 다이에 접촉하는 부분이 증가하기 때문에 마찰에 의한 응력이 더 클 뿐 아니라 굽힘에 의한 더 큰 구속에 의한 결과로 적용된 응력이 가장 크다. 이에 따른 결과로 굽힘 각, 후방장력, 적용된 응력이 클 때 컬 반경은 커지고 역수를 취하는 컬 곡률 값은 작아진다.

(3) 이론적인 측면에서 인장강도가 감소할수록 컬 곡률이 커지며 n, k 값이 클수록 작은 컬 곡률을 나타내었다.

(4) 예측모델을 통한 예측치와 실험치의 비교결과 양호한 상관관계를 보였으며, 후방장력이 클 때의 낮은 곡률부에서 실험값과 예측 값의 차이

를 보이지만 상대적으로 중요한 높은 곡률부에서는 실험데이터와 예측모델에 의한 값이 높은 상관관계를 보였다.

후기

본 연구는 한국과학기술재단지정 부산대학교 국가핵심연구센터의 연구비 일부지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

- [1] R. G. Davies, 1984, Sidewall curl in high strength steels, Journal of Applied Metalworking, Vol. 3, pp. 120~126.
- [2] T. B. Hilditch, D. K. Matlock, B. S. Levy, J. F. Siekirk, 2004, Experimental Evaluation of Curl and Tensile Properties of Advanced High Strength Sheet Steels, SAE Technical Paper 2004-01-1045.
- [3] W. D. Cardin, L. M. Geng, D. K. Matlock, R. H. Wagoner, 2002, Measurement of springback, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 44, pp. 79~101.
- [4] F. Pourboghra, E. Chu, 1995, Prediction of springback and side-wall curl in 2-D draw bending, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 50, pp. 361~374.
- [5] N. E. Thompson, C. H. Ellen, 1985, A simple theory for side-wall curl, Journal of Applied Metalworking, Vol. 4, pp. 39~42.
- [6] Z. T. Zhang, D. Lee, 1995, Effects of process variables and material properties on the springback behavior of 2D-draw bending parts, SAE Technical Paper 950692.
- [7] C. C. Chu, 1988, The analysis of side-wall curl control, Proceedings of 15th Biennial Congress of the IDDRG, pp. 227~230.
- [8] 장성호, 허영무, 서대교, 2003, U 드로오 벤딩에서의 스프링백 예측을 위한 이론적 단순화, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 125~131.
- [9] 주병돈, 박현규, 김동우, 문영훈, 2007, 박판성형시 컬 예측모델 개발(I)-해석적 모델, 한국소성가공학회지, 제 16 권 제 6 호, pp. 432~437.