

金屬板材의 스프링백 特性에 관한 實驗的 研究

An Experimental Study on the Springback Characteristics of Sheet Metals

박 정 완* 김 형 종**
Park, Jung Wan Kim, Hyung Jong

ABSTRACT

The springback characteristics of some sheet metals such as commercially pure aluminium, mild steel and stainless steel in a forming process are investigated experimentally. Three geometrical parameters for evaluating springback in the plane-strain draw-bending, which was a benchmark model of NUMISHEET '93 conference, are defined. The measurement of the springback parameters is carried out accurately and easily by using an image analysis system developed in this study. The effects of the blank holding pressure and tensile strength of the material on the springback are also examined.

1. 서 론

판재 프레스 공정으로 성형된 제품이 금형으로부터 분리될 때 새로운 정적평형상태를 만족하기 위하여 탄성복원 현상이 발생한다. 소재 내부의 잔류응력으로 인하여 필연적으로 발생하게 되는 스프링백(springback)은 탄성복원의 대표적인 현상으로 형상과 치수의 불량을 일으키는 가장 큰 원인 중의 하나이다. 항복응력이 크고 탄성계수가 작은 재료일수록 스프링백 양이 크기 때문에 고장력강, 알루미늄합금, 스테인레스강 등을 점차 많이 사용하고 있는 현재의 추세를 고려할 때, 스프링백에 의한 치수변화의 정확한 예측은 금형설계나 성형공정설계에 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 그러나 스프링백의 양은 성형제품의 기하학적 형상과 판재의 재질, 성형 방법 및 공정조건 등 많은 인자에 의하여 좌우되므로 예측이 매우 어려운 것으로 알려져 있다.

1980년대까지 스프링백 특성에 관한 대부분의 연구는 순수 굽힘이나 3점 굽힘과 같은 간단한 모델에 국

한되었다. Gardiner[1]는 탄-완전소성 재료의 굽힘에서 접선응력만 고려하여 스프링백을 구하였고, Queener 등[2]은 평면변형을 굽힘에서의 스프링백을 구하였다. 3점굽힘에서의 스프링백 문제에 대하여 Mickalich 등[3]은 공정변수들의 영향을 조사하였으며, 이호용 등[4]은 순수굽힘에서의 스프링백 이론을 응용한 근사식을 유도한 바 있다.

최근에 외연적(explicit) 유한요소법을 이용한 판재 성형 공정해석용 프로그램[5,6]들이 개발되어 복잡한 형상의 성형공정과 스프링백 현상을 수치적으로 시뮬레이션하는 것이 가능해지면서 이 분야의 연구에 획기적인 발전이 이루어졌다[7-10]. 특히, 평면변형을 드로벤딩(draw-bending) 시험이 NUMISHEET '93[11]의 벤치마크 문제로 채택된 이후 이 모델은 금속판재의 스프링백 특성을 평가하는 전형적 방법으로서 많은 연구의 대상이 되었다. Mattiasson 등[8]은 외연적 유한요소해석에서 발생하는 응력완화 현상이 탄성복원 해석 결과에 미치는 영향을 조사한 바 있으며, 이 연구의 문제점을 보완하기 위하여 정완진 등[9]은 벌칙함수를 이용한 접촉처리 방법에서 정확한 응력상태를 구하기 위한 해석인자의 선택에 관한 연구를 수행하였다. 또한, He 등[10]은 1단계 해석프로그램

* 강원대학교 산업대학원 석사과정, 강릉직업전문학교 교사

* 강원대학교 기계공학과 부교수

(one-step solver)[12]와 상용 코드[5]를 각각 사용하여 여러 가지 공정변수가 스프링백에 미치는 영향에 대한 민감도 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 평면변형을 드로벤딩 시험을 여러 가지 재료와 성형조건에서 수행하고 그 결과를 분석하였다. 금형 및 소재의 형상과 치수, 그리고 스프링백 양을 정량적으로 나타내기 위한 기하학적 파라미터의 정의는 기본적으로 NUMISHEET '93[11]의 벤치마크 모델을 따랐다. 특히, 이 형상 파라미터들을 자동으로 측정하기 위한 화상분석(image analysis) 프로그램을 개발하여 본 실험에 응용함으로써 지금까지 수동으로 행해져왔던 측정작업을 더욱 정확하고 신속하게 처리할 수 있는 시스템을 구축하였다.

드로벤딩 실험에 앞서, 재료의 가장 중요한 기계적 특성인 응력-변형을 곡선을 구하기 위하여 표준 인장 시편을 준비하고 단축인장 시험을 수행하였다. 인장 시편 가공을 위한 전단 금형과 드로벤딩 실험을 하기 위한 금형은 본 연구에서 직접 제작하였다.

2. 스프링백의 측정

Fig. 1은 평면변형을 드로벤딩에 사용된 금형 세트의 형상과 주요 치수를 나타내며, Fig. 2는 성형 후 스프링백 특성을 나타내는 형상인자들, 즉 하부각 θ_1 , 상부각 θ_2 및 곡률반경 ρ 를 정의하는 방법을 도식적으로 나타낸 것이다. 본 연구에서는 변형된 시편의 측면을 스캐닝하여 얻은 화상으로부터 기하학적 형상을 디지털화하여 이들 형상인자를 자동으로 측정할 수 있는 화상처리 시스템을 개발하였다.

평면변형을 드로벤딩 실험에 사용되는 금형과 소재 및 공정변수들이 모두 전후 및 좌우 방향으로 대칭을 이루어야 하나 실제 성형되어 나오는 제품은 여러 가지 공정조건들의 차이로 인하여 비대칭을 나타내는 경우가 많다. 중점 O를 지나는 점선, 즉 X축을 화상처리법으로 구하기 위해서는 중점 O를 선정한 후 주변 일정 거리상의 점들을 1차식으로 근사해야 하며 이 때 상당한 오차요인을 수반한다. 이러한 이유로 밑변의 중점 O의 점선 및 법선을 기준좌표축으로 삼는 것은 현실적으로 타당하지 않으며 화상처리법을 적용하기에 부리가 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3에 도식적으로 나타낸 방법을 고안하였다. 그 측정 절차는 다음과 같다.

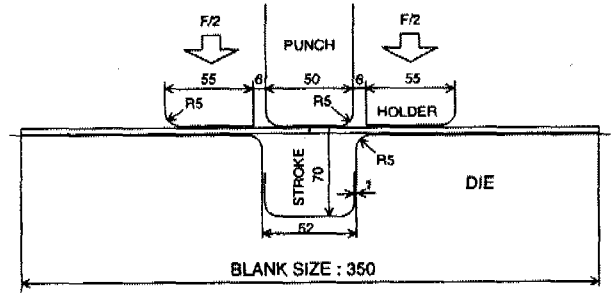
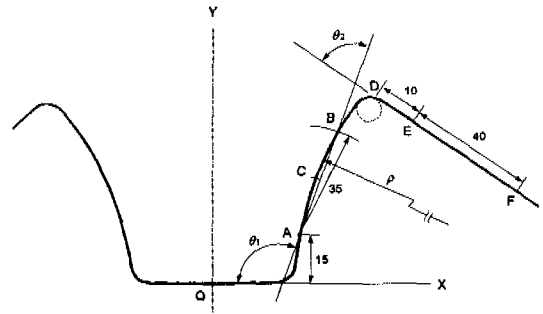


Fig. 1 Geometry description of 2D draw-bending problem



[Spring Back]

θ_1 : Angle between O-X and A-B
 θ_2 : Angle between A-B and E-F

[Curvature]

ρ : Defined by the radius of a circle through A, B and C

[Point]

A : 15 mm from O-X
 B : 35 mm from point A
 C : Middle point of the straight line A-B
 D : End of Die's curve
 E : 10 mm from D
 F : 40 mm from E

Fig. 2 Geometric parameters defining springback

- (1) 시편의 옆면을 스캐닝하여 원시화상을 얻는다. 이때 실제좌표(mm 단위)와 화상좌표(화소 단위)와의 비에 관한 정보는 비트맵 파일 내에 포함된다.
- (2) 적절한 필터를 이용하여 원시화상을 이치화(thresholding) 한 후, 노이즈를 제거하고 세선화(thinning)를 적용한다. 세선화 처리를 하면 화상 내의 모든 선들은 그 중심 골격을 따라 굵기가 1 화소로 된다.
- (3) Fig. 3에 표시된 두 점 D 및 D'을 구하기 위해 양단에서부터 이웃한 화소들을 검색하여 동일 거리에 놓인 점 O'과의 수직거리가 최대인 점을 찾

아나간다. 직선 D-D'은 좌우 골격선에 대한 공통 접선이다.

- (4) 직선 D-D'에 평행한 직선과 시편 화상과의 두 교점을 서로 대응되는 점이라 간주하고 그 중점을 찾는다. Fig. 3의 중앙에 세로방향으로 찍힌 16 개의 점들은 이렇게 구한 중점들을 나열한 것이다.
- (5) 과정 (4)에서 얻은 16 개의 점들과 점 O'을 가장 근사하게 지나는 직선을 최소자승오차법(least square error method)으로 구하여 Y축으로 하고, 점 O'을 지나고 Y축에 직교하는 직선을 X축으로 한다.
- (6) 점 A, B, C 및 E, F는 각각 정의된 치수만큼 떨어진 점을 찾아 구한다.
- (7) Fig. 4에 표시된 네 군데의 측정 부위, 즉 앞면좌측(Front-Left, FL), 앞면우측(Front-Right, FR), 뒷면좌측(Back-Left, BL), 뒷면우측(Back-Right, BR)에 대하여 각각 하부각 θ_1 , 상부각 θ_2 및 곡률반경 ρ 를 계산하고, 이들을 산술 평균한 것을 한 시편에 대한 측정값으로 한다.

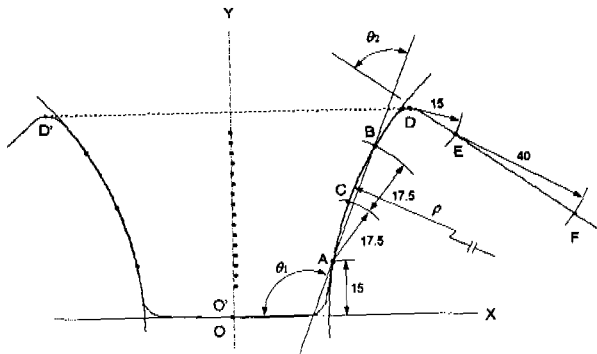


Fig. 3 Schematic diagram for the measurement algorithm using the image processing technique

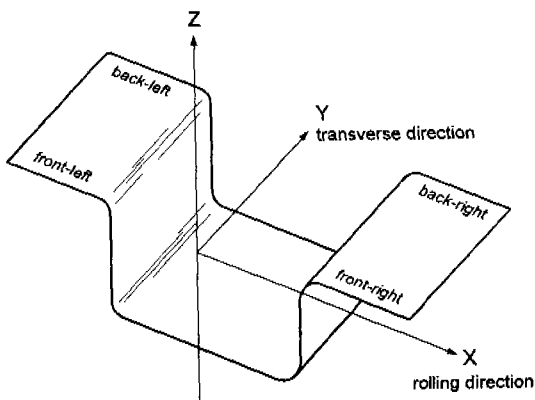


Fig. 4 Four sections to be measured

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 인장 실험

인장시험은 인장강도, 항복강도 및 내력, 연신율, 단면수축률 등의 일반측정과 비례한도, 탄성한도, 탄성계수 등의 정밀측정을 통하여 재료가 가지는 하중-변형 특성을 구하는 기초 시험법으로서 인장강도가 작으면 형상성이 좋아지고 주름도 발생되지 않지만 드로벤딩 시에 재료에 따라 측벽의 휨이 발생하기 쉽다. 즉 항복점이 낮은 금속판재를 사용하여 드로벤딩할 경우 스프링백 등의 의제와 펀치 밀면의 형상동결에 효과적이다. 따라서 현재 드로벤딩용 재료를 선택할 때의 기준으로 인장강도가 많이 이용되고 있다.

인장시험편은 드로벤딩 실험에 사용될 두께 0.8 mm의 알루미늄, 연강, 스테인레스강 판재로부터 압연 방향에 대하여 0°, 45°, 90° 방향으로 채취하였다. Fig. 5는 KS B 0801 13B호 판재용 인장시험편의 규격이며, Fig. 6은 이 시험편을 채취하는데 사용한 전단금형의 사진이다.

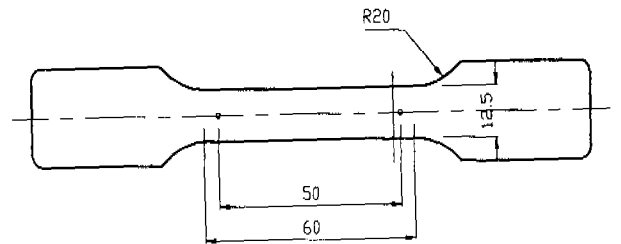


Fig. 5 Dimension of a tensile test specimen

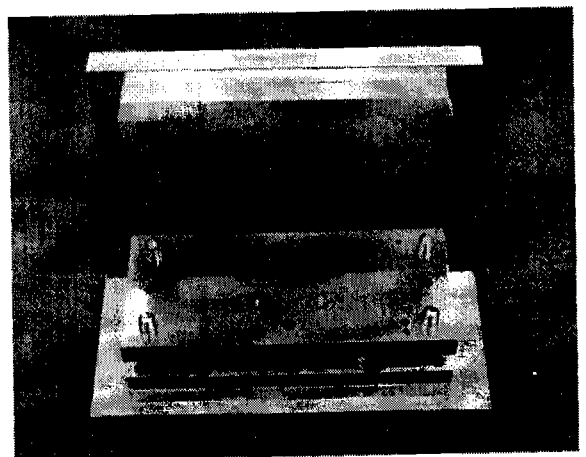
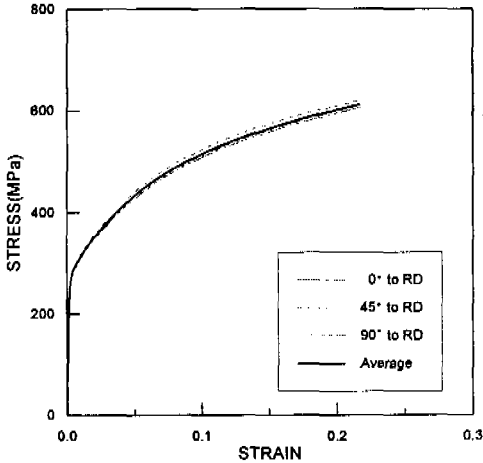


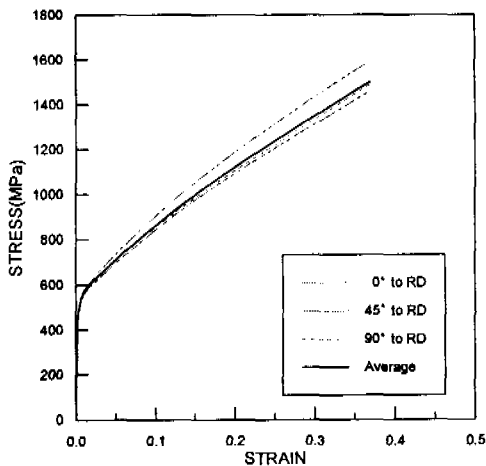
Fig. 6 Blanking die set for tensile specimens

Fig. 7(a), (b)는 각 재료에 대한 진응력-진변형을 곡선이다. 재료별, 각도별로 각각 세 개의 시편에서 얻어진 데이터를 산술 평균한 것이며, 재료별로 평균값으로 표시된 곡선은 세 가지 각도에 대한 유동응력값을 다음 식으로 평균한 것이다.

$$\sigma_{avg} = \frac{\sigma_0 + 2\sigma_{45} + \sigma_{90}}{4}$$



(a) Mild steel



(b) Stainless steel

Fig. 7 Stress-strain curves of the materials used

3.2. 평면변형을 드로벤딩 실험

스테인레스강, 연강 및 알루미늄 등 세 가지 재료에 대하여 각각 20, 35, 50 mm의 폭을 가진 시편들을 두 개씩 준비하고 드로벤딩 실험을 수행하여 스프링백 양을 나타내는 형상 파라미터들, 즉 하부각 θ_1 , 상부각 θ_2 및 곡률반경 ρ 를 측정된 결과를 Table 1~6에

나타내었다.

보통 스프링백 현상으로 인하여 하부각은 90° 보다 커지고 상부각은 90° 보다 작아지며 곡률은 Fig. 2 또는 Fig. 3에 표시된 것과 같은 방향으로 발생하게 된다.

각 시편 당 평균값은 Fig. 4에 표시한 전후좌우 네 부분(FL, FR, BL, BR)에서 측정된 값을 산술 평균한 것이며, 이 값을 두 시편에 대하여 다시 평균한 값을 표의 하단에 나타내었다. θ_1 과 θ_2 의 각들은 측정값 사이의 편차가 크지 않으나, 곡률반경 ρ 는 보통 수십 % 정도의 편차가 난다. 특히 알루미늄과 같이 작은 곡률을 갖는 재료의 경우 크기는 10배 가까운 편차를 나타내고 있다. 이는 금형 및 공정조건(소재, 마찰, 하중 조건 등)의 비대칭성과 같은 실험적 요인에 가장 큰 영향을 받은 결과이나, 측정상의 여러 가지 오차요인과 곡률반경의 기하학적 특성에도 상당히 기인하는 것으로 추정된다. 특히, Fig. 2 및 Fig. 3에서 곡률반경을 결정하는 세 점 A, B, C가 일직선에 가깝게 위치할 경우 이들 좌표의 미소한 오차가 기하학적으로 곡률반경을 계산할 때 매우 큰 편차를 야기하기 때문이다.

한편, 알루미늄 소재의 경우 블랭크 가압력이 2,000 kgf일 때는 펀치 변위가 70 mm에 이르기 전에 모든 시편에 파단이 일어났으며, 블랭크 가압력이 250 kgf 일 때는 폭 20 mm의 시편에 파단이 일어나 유용한 데이터를 얻을 수 없었다. 따라서 알루미늄 소재에 대한 결과는 이 후의 논의에서 제외하기로 한다.

Fig. 8~10은 각각 블랭크홀더 압력(blank holding pressure)에 따른 하부각 θ_1 , 상부각 θ_2 및 곡률반경 ρ 의 변화를 도시한 것이다. 여기에 사용된 측정값에서 블랭크홀더 압력은 블랭크 가압력(BHF)을 소재의 플랜지부 면적으로 나눈 값이다. 이들 그래프에서 측정치의 경향이 블랭크홀더 압력에 따라 매끄러운 변화를 보이는 것은 아니나, 같은 블랭크 가압력에 대하여는 일반적으로 알려져 있는 바와 같이 대체로 블랭크홀더 압력이 클수록(즉, 시편 폭이 작을수록) 스프링백 양이 감소하는 경향(하부각 감소, 상부각 및 곡률반경 증가)을 나타내고 있다.

한편, Fig. 11 및 12는 평면변형을 드로벤딩 시험에서 펀치 변위에 따라 펀치 하중이 변하는 양상을 나타낸다. 펀치 하중은 소재를 성형하는데 필요한 힘과

플랜지부 및 다이 반경부에서의 마찰력을 극복하는데 필요한 힘으로 구성된다. 성형에 소요되는 힘은 소재 폭이 클수록, 마찰력을 극복하는데 소요되는 힘은 블랭크 가압력이 클수록 증가하게 된다. 이런 일반적 경향은 그림에서 분명히 알 수 있으나, 두 가지 재료 공히 편치 하중이 성형 초기에 급격히 증가하다가 편치 및 다이 반경부에서의 굽힘 변형이 완료되고 난 후에는 거의 변화가 없는 점과, 소재의 폭보다는 블랭크 가압력의 크기에 더 큰 영향을 받는 점 등을 감안할 때, 성형에 소요되는 힘보다 마찰력을 극복하는데 소요되는 힘이 편치 하중의 더 큰 부분을 차지하는 것으로 생각된다.

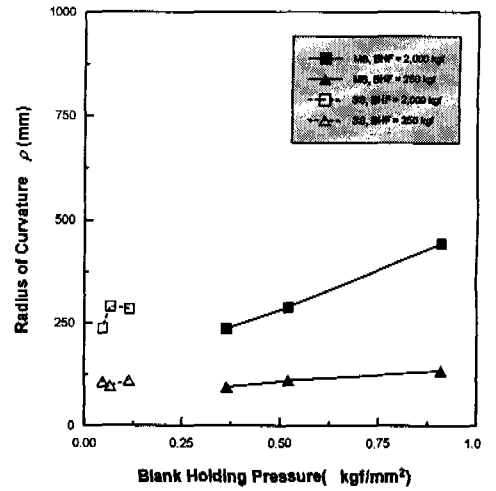


Fig. 10 Effect of the blank holding pressure on the radius of curvature ρ

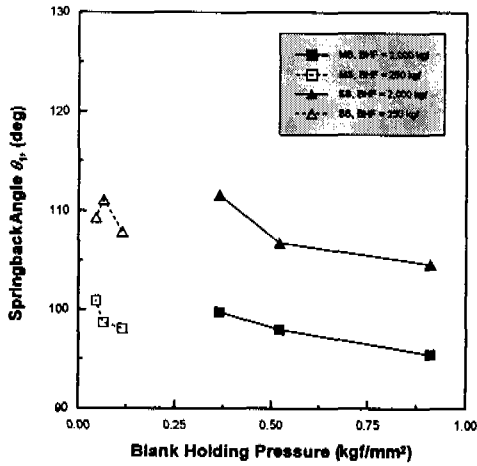


Fig. 8 Effect of the blank holding pressure on the lower angle θ_1

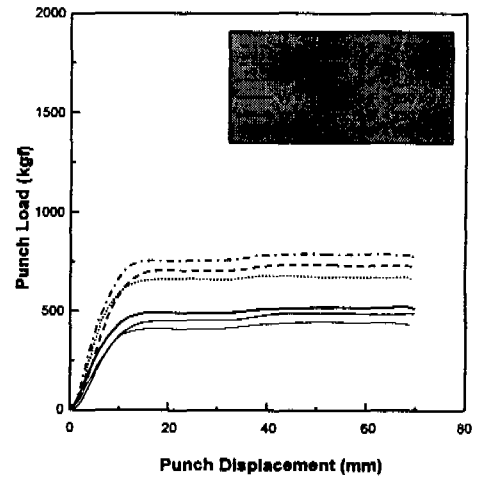


Fig. 11 Punch load vs punch displacement curve of mild steel

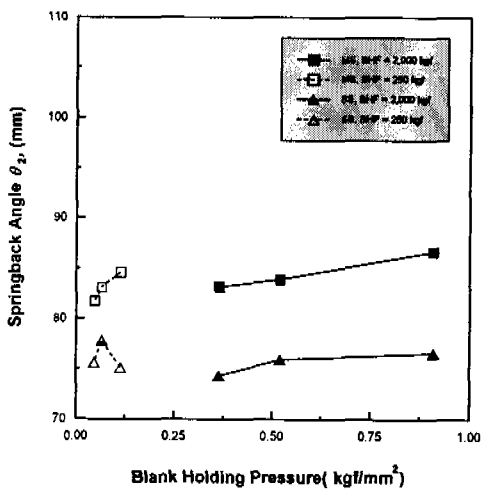


Fig. 9 Effect of the blank holding pressure on the upper angle θ_2

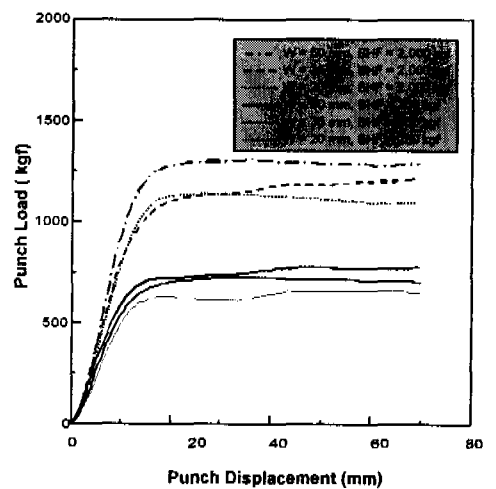


Fig. 12 Punch load vs punch displacement curve of stainless steel

Table 1 Measured value of the lower angle θ_1

(BHF = 2,000 kgf)

		Aluminum			Mild Steel			Stainless Steel		
		20	35	50	20	35	50	20	35	50
#1	FL				96.05	99.13	99.41	104.2	107.5	110.8
	FR				95.90	97.72	99.27	104.3	107.6	109.9
	BL				95.39	97.78	99.52	103.6	106.8	110.9
	BR				94.92	97.47	100.1	103.9	106.8	112.3
	Avg.				95.58	98.03	99.68	104.0	107.2	111.0
#2	FL				96.06	98.69	100.2	105.1	106.3	113.0
	FR				95.16	98.26	99.64	105.2	106.6	112.1
	BL				95.19	96.91	99.85	105.1	106.1	111.3
	BR				94.90	97.60	100.1	105.2	106.7	111.8
	Avg.				95.33	97.87	99.95	105.2	106.4	112.1
Avg.					95.45	97.95	99.77	104.6	106.8	111.6

Table 2 Measured value of the upper angle θ_2

(BHF = 2,000 kgf)

		Aluminum			Mild Steel			Stainless Steel		
		20	35	50	20	35	50	20	35	50
#1	FL				86.16	84.00	82.53	77.14	74.30	76.11
	FR				87.34	84.72	83.27	76.52	74.83	73.26
	BL				86.21	83.50	83.11	77.17	73.73	75.90
	BR				86.32	84.72	83.82	75.64	73.78	75.12
	Avg.				86.50	84.23	83.18	76.61	74.16	75.09
#2	FL				86.50	83.75	83.24	76.84	75.20	73.55
	FR				87.64	85.09	84.02	76.04	76.13	74.31
	BL				86.00	82.04	83.28	77.32	75.65	71.45
	BR				87.17	83.60	84.31	75.96	75.78	74.58
	Avg.				86.82	83.62	83.71	76.54	75.69	73.47
Avg.					86.66	83.93	83.45	76.58	75.93	74.28

Table 3 Measured value of the radius of curvature ρ

(BHF = 2,000 kgf)

		Aluminum			Mild Steel			Stainless Steel		
		20	35	50	20	35	50	20	35	50
#1	FL				371.2	248.8	209.8	151.3	97.4	97.8
	FR				443.7	305.0	257.6	123.3	119.9	92.9
	BL				395.2	254.5	243.0	151.2	114.8	100.6
	BR				396.2	311.7	234.9	124.4	105.6	97.6
	Avg.				401.5	280.0	236.3	137.5	109.4	97.2
#2	FL				366.8	239.6	192.2	140.2	104.2	93.1
	FR				570.3	393.9	294.1	124.6	116.8	95.8
	BL				469.9	299.2	225.0	146.0	114.3	85.3
	BR				530.5	260.4	240.5	118.5	109.2	99.4
	Avg.				484.4	288.3	238.0	132.3	111.1	93.4
Avg.					443.0	289.1	237.1	134.9	110.3	95.3

Table 4 Measured value of the lower angle θ_1

(BHF = 250 kgf)

		Aluminum			Mild Steel			Stainless Steel				
		20	35	50	20	35	50	20	35	50		
#1	LF				94.52	98.82	98.84	99.48	101.7	108.6	113.5	110.0
	FR				94.04	84.90	98.54	98.22	101.3	108.6	112.5	108.7
	BL				92.19	97.47	98.51	98.57	101.2	107.8	112.9	108.9
	BR				93.20	84.00	98.46	98.42	101.7	108.0	112.8	109.4
	Avg.				93.49	91.30	98.69	98.67	101.5	108.3	112.9	109.3
#2	FL				94.86	99.20	97.59	100.4	107.7	110.4	109.4	
	FR				93.86	97.44	97.62	99.69	107.5	110.1	108.2	
	BL				92.40	97.76	97.22	99.89	107.4	110.0	109.5	
	BR				93.08	97.01	97.78	100.7	107.5	110.4	109.9	
	Avg.				93.55	97.85	97.55	100.2	107.5	110.2	109.3	
Avg.					93.52	94.58	98.07	98.67	100.9	107.9	111.1	109.3

Table 5 Measured value of the upper angle θ_2

(BHF = 250 kgf)

		Aluminum			Mild Steel			Stainless Steel				
		20	35	50	20	35	50	20	35	50		
#1	FL				90.28	97.03	84.57	83.35	81.11	73.60	74.58	75.42
	FR				92.19	87.66	83.89	82.94	81.20	75.80	75.44	75.22
	BL				88.60	97.05	84.53	83.15	81.30	73.50	75.18	75.06
	BR				90.80	86.83	83.61	82.87	81.54	75.11	75.04	75.64
	Avg.				90.47	92.14	84.15	83.08	81.29	74.50	75.06	75.34
#2	FL				90.81	86.17	83.92	82.74	75.08	72.37	75.08	
	FR				92.19	89.73	86.05	80.95	76.34	73.07	75.93	
	BL				89.03	85.09	83.73	83.13	74.97	72.44	75.43	
	BR				90.81	89.11	86.20	81.84	76.24	73.06	76.94	
	Avg.				90.71	87.53	84.98	82.17	75.66	72.74	75.86	
Avg.					90.59	89.84	84.57	83.08	81.73	75.08	77.80	75.60

Table 6 Measured value of the radius of curvature ρ

(BHF = 250 kgf)

		Aluminum			Mild Steel			Stainless Steel				
		20	35	50	20	35	50	20	35	50		
#1	FL				2655	569.3	273.3	268.1	179.0	109.2	89.6	115.3
	FR				16012	973.8	319.0	307.5	235.0	109.7	107.2	98.6
	BL				8863	563.4	269.9	319.5	236.6	109.2	107.9	99.2
	BR				4170	1146	286.2	269.9	241.1	110.9	94.1	116.7
	Avg.				7925	813.2	287.1	291.3	222.9	109.8	99.7	107.4
#2	FL				1842	463.8	242.2	289.9	109.9	92.1	103.8	
	FR				15270	1252	317.5	216.2	118.0	101.9	116.5	
	BL				1861	426.9	240.3	291.9	111.8	94.0	105.8	
	BR				3471	1009	332.9	216.4	117.5	92.8	112.6	
	Avg.				5611	788.1	283.2	253.6	114.3	95.2	109.7	
Avg.					6788	800.6	285.2	291.3	238.3	112.0	97.5	108.6

4. 결 론

참 고 문 헌

금속판재의 성형 시에 필연적으로 발생하는 스프링백의 특성을 조사하기 위하여 NUMISHEET '93에서 제시한 평면변형을 드로벤딩 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 판재 인장시편 채취용 전단 금형과 평면변형을 드로벤딩 성형용 금형세트를 제작하였다.
- (2) 연강, 스텔레스강 인장시편을 압연방향에 대하여 0°, 45°, 90° 의 세 방향으로 세 개씩 채취하고, 인장시험 후 얻어진 데이터를 방향별로 평균하여 각 재료의 진응력-진변형을 곡선을 구하였다.
- (3) 평면변형을 드로벤딩 시험용 소재는 두 종류의 금속판재에 대하여 폭 20, 35, 50 mm의 세 가지로 전단 가공하여 준비하였으며, 블랭크 가압력은 각 재료 각 폭에 대하여 250 및 2,000 kgf의 두 가지로 하고 공통된 윤활 조건에서 실험을 수행하였다. 성형 후 스프링백에 의하여 변형된 형상을 신속하고 정확하게 측정하기 위한 화상처리 프로그램을 사용하여 데이터를 구하였다.
- (4) 스프링백 양을 나타내는 각들은 측정값 사이의 편차가 크지 않으며, 인장강도가 클수록 각이 커짐을 알 수 있었다. 그러나 곡률반경 ρ 는 보통 수십 % 정도에 곡률이 작은 경우 크기는 10배 가까운 편차를 나타내었다.
- (5) 같은 블랭크 가압력에 대하여는 일반적으로 알려져 있는 바와 같이 대체로 블랭크홀더 압력이 클수록(즉, 시편 폭이 작을수록) 스프링백 양은 각 재료의 인장강도에 큰 영향이 없이 감소하는 경향을 보였다.
- (6) 펀치 하중은 성형 초기에 급격히 증가하다가 펀치 및 다이 반경부에서의 급히 변형이 완료되고 난 후에는 거의 변화가 없었으며, 소재의 폭보다 블랭크 가압력의 크기에 더욱 큰 영향을 받는다. 이러한 사실로부터 펀치 하중을 구성하는 인자 중 소재의 성형에 필요한 힘에 비하여 소재와 금형 간의 마찰력을 극복하는데 소요되는 힘이 더 큰 부분을 차지하는 것을 확인하였다.

- [1] F. J. Gardiner, "The Springback of Metals", *Trans. ASME*, Vol. 79, pp. 1-9, 1957.
- [2] C. A. Queener and R. J. DeAngelis, "Elastic Springback and Residual Stresses in Sheet Metal Formed by Bending", *Trans. ASM*, Vol. 61, pp. 757-768, 1968.
- [3] M. K. Mickalich and M. L. Wenner, "Calculation of Springback and its Variation in Channel Forming Operations", *SAE Paper* 880526, pp. 2.358-2.366, 1988.
- [4] 이호용, 황병복, "3점굽힘에서의 스프링백에 관한 연구", *한국소성가공학회지*, 제3권 제4호, pp. 401-408, 1994.
- [5] J. O. Hallquist, D. W. Stillman and T. L. Lin, *LS-DYNA3D 920 User's Manual*, Livermore Software Tech. Corp., 1992.
- [6] Pam System International, *PAM-STAMP User's Guide*, 1995.
- [7] 김현영, 김중재, "Explicit Code에 의한 Stamping 시 스프링백 및 성형성 예측", *한국소성가공학회지*, 제3권 제1호, pp.84-96, 1994.
- [8] K. Mattiasson, A. Strange, P. Thilderkvist and A. Samuelsson, "Simulation of Springback in Sheet Metal Forming", *Proc. of NUMIFORM '95*, pp. 115-124. 1995.
- [9] 조진우, 정완진, "판재성형의 탄성복원에 대하여", *한국소성가공학회지*, 제6권 제5호, pp. 386-394, 1997.
- [10] N. He and R. H. Wagoner, "Springback Simulation in Sheet Metal Forming", *Proc. of NUMISHEET '96*, pp.308-315, 1996.
- [11] A. Makinouchi, et. al. (Ed.), *Proc. of NUMISHEET '93*, pp. 398-405, 1993.
- [12] X. T. Zhang and D. Lee, *One-Step Rail Bending, Users Manual* (Ver. 1.0 and 2.0), RPI, Troy, NY, 1995.