

Al 1050, 5052 판재의 성형성에 관한 실험적 고찰

강용기* · 박진욱* · 문영훈**

(1999년 7월 26일 접수)

An Experimental Study On The Formability of Aluminum 1050 and 5052 Sheet Metal

Y. K. Kang, J. W. Park and Y. H. Moon

Abstract

Sheet metal formabilities for aluminum 1050 and 5052 were experimentally investigated in this study. Deep drawability, bendability and stretch formability were measured at each process condition and correlated with tensile properties of sheet metal. To compare the formabilities of aluminum 1050 and 5052 sheets with those of steel sheets, deep drawing quality(DDQ) steel sheets are also tested at the same test conditions. Through the experimental studies, influential process variables for each forming process were obtained and correlated with the tensile properties. The comparisons of sheet metal formabilities with those of steel sheets showed that aluminum 1050 and 5052 is inherently deficient in formability than steel sheets but Al 5052 that has higher n and r value than Al 1050 showed better formabilities.

Key Words : Sheet Metal Formabilities, Deep Drawabilities, Bendability, Stretch Formability

1. 서 론

냉연강판은 양호한 성형성과 기계적 성질을 갖고 있어 산업전반에 널리 적용되어 왔으나, 근래에는 소재 경량화 추세에 부응하여 알루미늄 합금판재의 사용이 확대되고 있다. 알루미늄 합금판재는 대체로 항복강도, 균일연신율, 가공경화지수, 이방성계수 등의 고유불성치가 낮고, 굽힘에서 스프링 백량이 커서 냉연강판에 비해 성형성이 떨어지는 반면, 이어링비가 낮기 때문에 드로잉성형시 이점이 있는 것으로 알려져 있다.^(1~4)

본 논문에서는 알루미늄 합금판재로 널리 사용되는 Al1050과 Al5052를 이용하여 성형성 시험을 실시함으로써 각 소재의 고유불성치와 성형성과의 상관관계를 조사하고, 각 성형공정에서 소재에 미치는 공정변수의 영향을 분석하였다.

또한, 판재성형성이 우수하여 자동차용 소재로 널리 사용되는 DDQ(Deep Drawing Quality)급 냉연강판도 동일한 성형성 시험을 실시함으로써 알루미늄 합금판재와의 차이점을 비교하였다.

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 성밀정형 및 금형가공연구센터

2. 실험 방법

본 연구의 시험소재는 가공성과 용접성이 우수하고 알루미늄의 순도가 높아서 압출관 코일 등에 많이 사용되고 있는 Al1050-H18과 성형성과 용접성이 우수하고 상당한 강도를 가지고 있기 때문에 판금재료나 설비재, 자동차 차체판넬 그리고 선박용 재료 등에 사용되고 있는 Al5052-H32, 그리고 대표적인 냉연강판으로서 성형성과 강도가 우수한 SPCD재를 사용하였다. 각 실험에 사용된 소재의 두께는 0.8, 1.0, 1.2mm로 하였으며, 인장시험과 굽힘실험은 10톤급 MTS에서, 딥드로잉 실험과 스트로칭 실험은 50톤급 복동식 유압프레스에서 행하였으며, 펀치스트레칭 실험은 50톤급 박판종합시험기에서 실시하였다.

2.1 인장 시험

시편은 ASTM E517을 참조하여 와이어 커팅기로 압연방향에 대하여 각각 0도, 45도 90도 방향으로 절단하였다. 크로스헤드 속도는 15mm/min으로 하였으며, 제작된 시편의 모양은 Fig. 1과 같다.

인장시험을 통해 항복강도, 인장강도, 최대하중, 균일연신율, 전체연신율, 탄성계수(E), 가공경화지수(n), 강성계수(K)등을 구하였으며, 항복점과 넥킹점사이에 임의의 적절한 변위점을 구한 후 시편을 신장하여 소성변형률비(R), 수직이방성(\bar{R}), 그리고 평면이방성(ΔR)을 구하

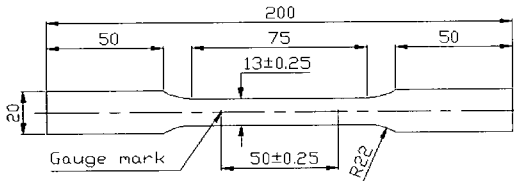


Fig. 1 Specimen size used in tensile test

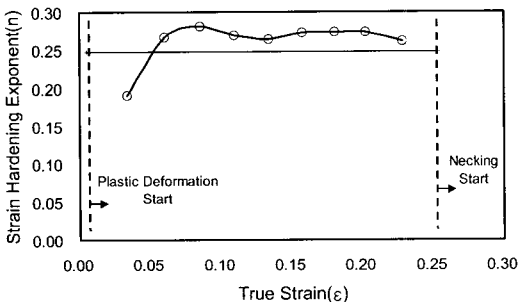


Fig. 2 Variation of n-value (SPCD 0.8mm thickness)

였다. R, \bar{R} , ΔR 을 구하는 식은 아래와 같다.

$$R = \frac{\ln(w_0 - w_f)}{\ln(l_f w_f - l_0 w_0)} \quad (1)$$

$$\bar{R} = (R_0 + 2R_{45} + R_{90})/4 \quad (2)$$

$$\Delta R = (R_0 - 2R_{45} + R_{90})/2 \quad (3)$$

항복강도는 0.2% offset을 사용하였고, 인장강도는 최대하중에서의 강도이다. 균일연신율은 최대하중까지의 연신율이며, 전체연신율은 파괴까지의 연신율이다. 탄성계수는 탄성구간에서의 기울기를 취하였다. K값과 n값은 진응력-진변형률 곡선으로부터 구하였으며, 항복점에서 인장강도까지의 진응력-진변형률 곡선과 일치하는 $\sigma = K\epsilon^n$ 의 식을 구하였다. n값은 진응력-진변형률 선도에서 어떠한 구간을 잡느냐에 따라 차이가 나게 되는데, 본 연구에서는 Fig. 2에 보인 바와 같이 항복점과 인장강도사이의 다양한 구간에서 n값을 구한 후, n값의 평균값을 대표값으로 정하였다.

2.2 딥드로잉 실험

딥드로잉 실험은 원형 펀치를 이용하여 실시하였다. 제품이 성형되는 다이 내경은 40mm로 하였으며 클리어런스는 20%로 고정하였다. 펀치와 다이의 곡률반경은 6mm로 하였으며, 램의 초기속도는 720mm/min으로 정하였다.

먼저, 소재의 최대 블랭크 직경을 알아보기 위하여 블랭크 홀더력을 적절히 조절하면서 블랭크 직경을 점진적으로 증가시켜 성형품이 파손이 되지 않는 한계 드로잉비에서 최대 블랭크의 크기를 구하였다. 한계 드로잉비(LDR)를 나타내는 식은 아래와 같다.

$$\text{원형 LDR} = \frac{\text{최대 블랭크 직경}}{\text{펀치 직경}} \quad (4)$$

또한, 최대 블랭크 크기에서 최적의 블랭크 홀더력 범위를 알아보기 위하여 주름발생부터 파단에 이르기까지 블랭크 홀더력을 변화시켰다.

Fig. 3에 보인 바와 같이 실제 성형된 제품의 이어링비는 다음을 이용하였다.

$$\text{Earing ratio} = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{1/2(h_{\max} + h_{\min})} \times 100 \quad (5)$$

Table 1 Material characteristics of STD11

Die Material	Surface Treatment	Hardness (Rockwell)	Surface Roughness		
			Ra	Rmax	Rz
STD11	열처리 (HRC 60)	60.80	0.09	0.47	0.43

금형은 Table 1의 기계적 특성을 갖는 STD11을 이용하여 제작하였다.

윤활제는 Al1050, 5052의 경우 알루미늄 합금판재에 주로 이용되는 동점도(40℃, cSt)가 1.5인 속건성형 프레스 오일인 3411을 선택하였으며, 강판인 SPCD의 경우 동점도(40℃, cSt)가 162인 일반 프레스 가공유 3105를 선택하였다.

2.3 굽힘실험

굽힘실험은 굽힘시 문제가 되는 스프링 백의 측정에 중점을 두었는데, MTS장비에 U-자형 굽힘장치를 장착

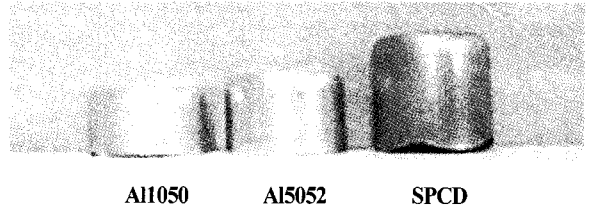


Fig. 3 Photograph of deep drawing products

하고 펀치의 하강속도를 240mm/min으로 설정하였다. 사용된 시편의 치수는 140mm×100mm로 하였으며, 금형과 펀치의 재질은 STD11로 하였다.

쿨리어런스에 따른 스프링 백량을 측정하기 위하여 쿨리어런스를 각각 10%, 30%, 50%로 설정하였으며, 윤활제는 딥드로잉 실험에서 사용한 것과 같이 3411과 3105의 2종류를 선택하였다.

스프링 백량은 성형된 제품의 굽힘부를 스탬프로 바로고 이것을 종이에 찍은 후 각도기로 탄성 복원된 스프링 백량을 직접 측정하였다.

Table 2 Tensile Properties

	Thickness (mm)	Direction	Y.S. (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	e _u	E (kg/mm ²)	K	n	r	r _m	Δr	
Al 1050	0.8	0°	10.61	12.50	0.023	2500	18.84	0.102	0.668			
	0.8	45°	10.87	13.19	0.018	2660	18.81	0.082	0.417	0.555	0.275	
	0.8	90°	12.06	13.58	0.017	3163	17.73	0.062	0.718			
	1.0	0°	11.72	12.84	0.020	2843	16.80	0.065	0.672			
	1.0	45°	12.57	13.56	0.019	3169	17.51	0.060	0.422	0.563	0.283	
	1.0	90°	12.95	13.84	0.017	3150	17.59	0.056	0.736			
	1.2	0°	11.27	12.74	0.027	2818	16.50	0.063	0.700			
	1.2	45°	11.13	13.37	0.023	2833	21.24	0.113	0.446	0.578	0.263	
	1.2	90°	12.73	13.70	0.017	3175	18.15	0.065	0.718			
	Al 5052	0.8	0°	15.57	21.80	0.116	2710	35.99	0.177	0.824		
		0.8	45°	14.62	21.20	0.134	2690	34.52	0.174	0.636	0.744	0.215
		0.8	90°	14.62	21.08	0.115	2437	34.93	0.178	0.878		
1.0		0°	19.67	25.09	0.086	3540	37.69	0.132	0.851			
1.0		45°	18.34	24.36	0.090	3650	36.81	0.136	0.657	0.775	0.236	
1.0		90°	18.96	24.75	0.077	3440	37.87	0.139	0.935			
1.2		0°	18.54	24.69	0.104	3255	39.04	0.158	0.861			
1.2		45°	18.11	23.93	0.106	3540	36.73	0.146	0.636	0.756	0.239	
1.2		90°	18.68	24.46	0.111	3115	37.94	0.151	0.889			
SPCD		0.8	0°	16.43	30.16	0.289	6526	53.56	0.248	1.361		
		0.8	45°	18.17	31.50	0.282	8028	55.16	0.238	1.061	1.263	0.404
		0.8	90°	18.00	30.78	0.275	7652	53.57	0.235	1.569		
	1.0	0°	16.53	29.56	0.283	6291	52.18	0.243	1.217			
	1.0	45°	17.75	30.61	0.283	6431	53.88	0.241	0.877	1.083	0.412	
	1.0	90°	17.46	29.46	0.290	6291	51.65	0.239	1.361			
	1.2	0°	18.22	30.65	0.270	6713	53.33	0.233	1.481			
	1.2	45°	19.37	31.76	0.250	7100	55.16	0.229	1.061	1.305	0.488	
	1.2	90°	18.22	29.93	0.274	6572	52.15	0.235	1.616			

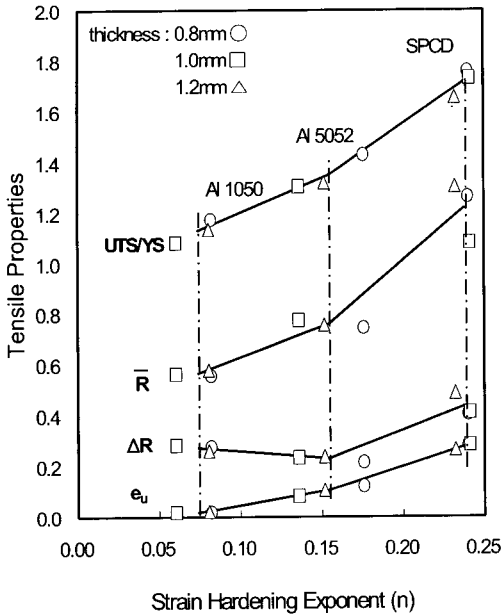


Fig. 4 Relationships between n and tensile properties

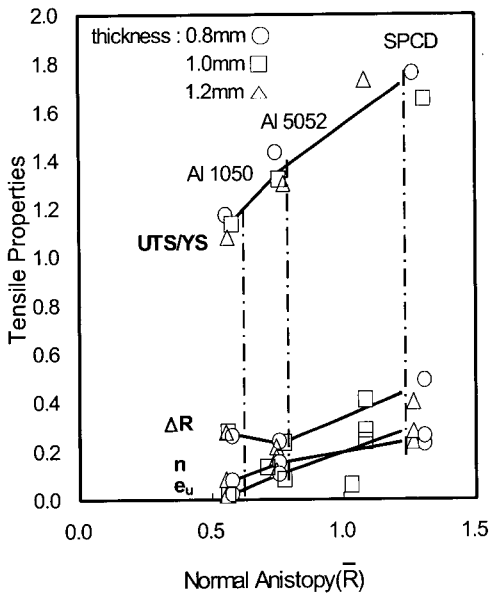


Fig. 5 Relationships between \bar{R} and tensile properties

2.4 스트레칭 실험

비드가 없는 급형을 사용하였으므로 스트레칭시 소재가 드로잉되는 것을 방지하기 위하여 블랙 홀더력을

최대로 주었으며, 소재를 200mm×200mm로 매우 크게 하였다. 펀치는 성형의 난이도가 높은 밑면이 평평하고 사각형인 펀치를 이용하였다. 펀치와 다이의 곡률 반경은 6mm이며 펀치의 하강속도는 720mm/min으로 설정하였다.

윤활제에 따른 성형특성을 알아보기 위하여 딥드로잉과 같은 윤활제를 사용하였다.

3. 실험결과

인장시험은 판재의 성형성을 평가하는 가장 기본적인 방법이며 인장 데이터로 얻어지는 물성치는 각 소재의 성형성과 연관성을 갖는다.⁽⁵⁻⁹⁾ 본 인장시험에서 구한 재료의 물성치는 Table 2에 나타내었다.

Fig. 4~5는 가공경화지수(n)와 수직이방성(\bar{R})에 따른 인장특성을 나타내고 있는데 가공경화지수값이 큰 소재일수록 균일연신률, 소성변형률비, UTS/YS값이 증가하였고 이는 수직이방성(\bar{R})에서도 유사한 경향을 나타내었다. 반면에, 평면이방성(ΔR)은 가공경화지수와 수직이방성과는 직접적인 비례관계를 가지지 않았다.

일반적으로 스트레칭성에 영향을 미치는 물성인자로는 균일연신율과 가공경화지수 n 값이며, 딥드로잉성에 영향을 미치는 물성인자는 소성변형률비 R 값으로 알려져 있다.⁽¹¹⁾ 즉, 판재성형용 소재는 균일연신율과 소성변형률비(R)값, 가공경화지수(n)값이 클수록 유리하므로 본 인장시험으로부터 딥드로잉성은 SPCD>Al5052>Al1050 순이며, 스트레칭성도 SPCD>Al5052>Al1050 순으로 예상할 수 있다.

3.1 딥드로잉 실험

성형조건에 따른 최대성형하중과 최대성형깊이를 Fig. 6~7에 나타내었다. 최대성형하중과 최대성형깊이의 크기는 SPCD, Al5052, Al1050의 순이었으며 이는 인장시험으로 예측 가능한 결과였다. 두께가 증가함에 따라 성형하중과 성형깊이는 약간씩 증가하였다.

Fig. 8은 딥드로잉에서 성형성을 나타내는 한계드로잉비(LDR)와 소재의 물성치의 관계를 나타낸 그림이다. SPCD가 알루미늄 합금판재보다 한계드로잉비가 월등히 우수하였고, 알루미늄 합금판재중에서는 균일연신률, 수직이방성, UTS/YS값, 그리고 가공경화지수가 큰 Al5052가 한계드로잉비의 값이 컸다.

Fig. 9는 인장시험으로 산출한 평면이방성과 성형된 시편을 실제 측정하여 구한 이어링비의 관계를 나타낸

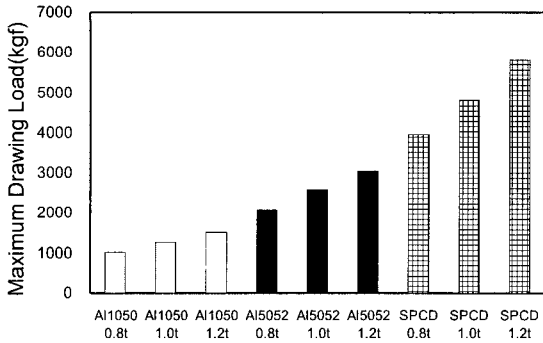


Fig. 6 Comparison of maximum drawing loads

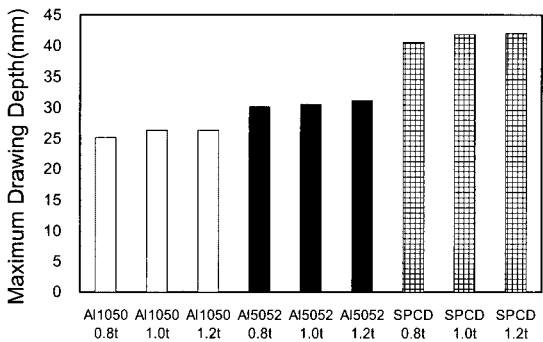


Fig. 7 Comparison of maximum drawing depths

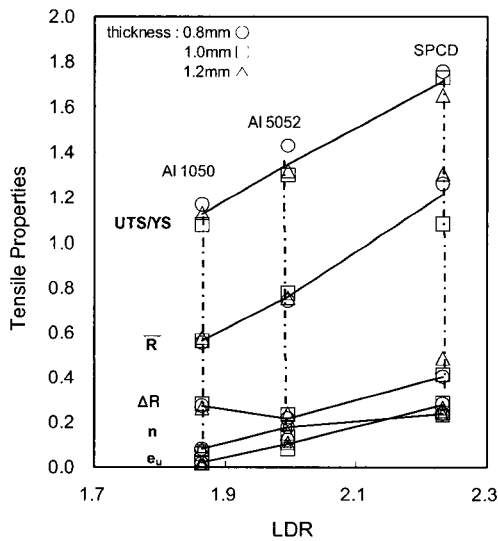


Fig. 8 Relationship between LDR and tensile properties

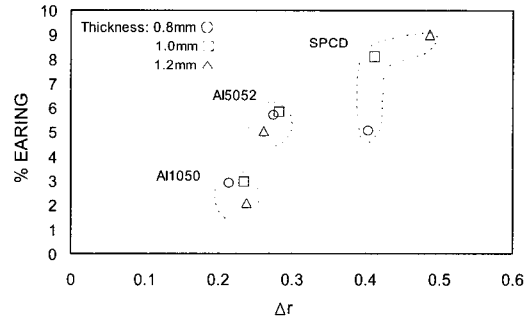


Fig. 9 Comparison of ΔR and %earing

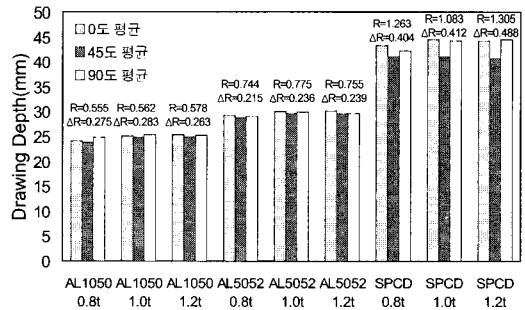


Fig. 10 Comparison of drawing depth with respect to rolling direction

그림으로 근사적으로 비례관계를 보였으며, SPCD인 냉연강판이 가장 큰 이어링 경향을 나타내었다. Fig. 10은 압연방향에 따른 성형깊이를 나타내었는데, 모든 시편에서 0도와 90도보다는 45도방향에서 성형깊이가 낮았다.

일반적으로 딥드로잉성에 영향을 주는 주요 물성인자는 소성변형률비 R 값이며, R 값이 크면 드로잉성은 향상된다고 알려져 있다. 하지만, 딥드로잉 공정에서 파단시 국부넉킹의 지탱능력은 가공경화지수에 관계되므로 가공경화지수(n)값이 크면 그만큼 LDR(Limit Drawing Ratio)의 값을 증가시킬 수 있으므로 n 값도 무시할 수 없다.

3.2 벤딩

Fig. 11은 굽힘성형후의 소재형상으로 냉연강판인 SPCD가 알루미늄 합금판재보다도 스프링 백량이 작았으며, Al5052가 Al1050에 비해 스프링 백량이 크게 나타났다.

Fig. 12는 클리어런스와 소재의 두께에 따른 스프링 백량의 영향을 나타낸 그림이다. 클리어런스가 증가할수록, 두께가 얇을수록 스프링 백량은 증가하였다.

Fig. 13은 스프링 백량과 인장시험으로부터 구한 물성

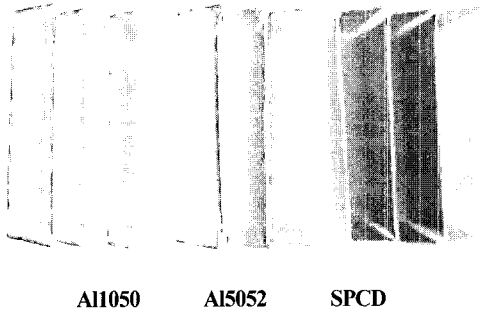


Fig. 11 Comparison of U-bended products

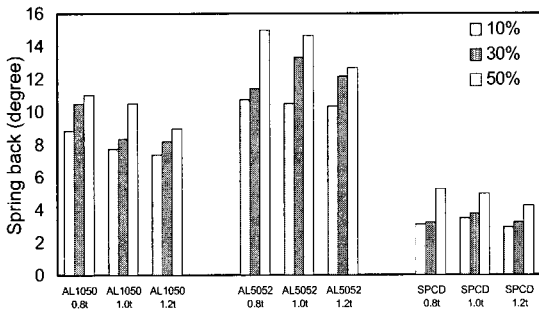


Fig. 12 Comparison of spring back amount

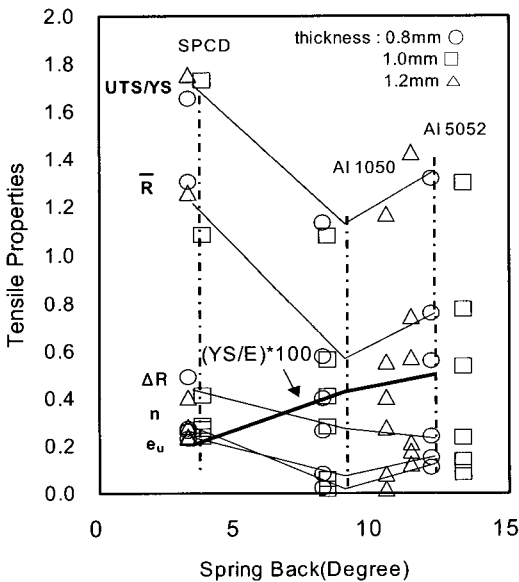


Fig. 13 Relationship between spring back and tensile properties

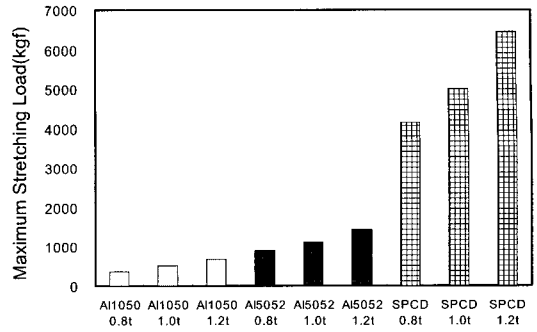


Fig. 14 Comparison of maximum stretching load

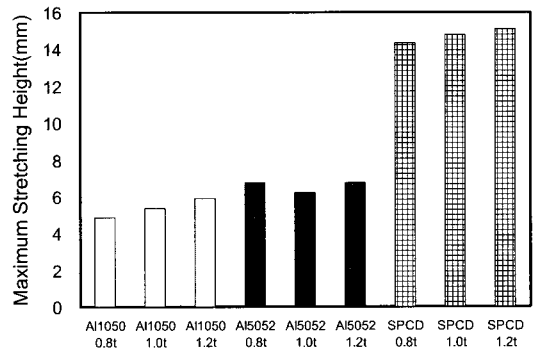


Fig. 15 Comparison of maximum stretching height

치와의 관계를 나타낸 그림으로서 주목할 것은 YS/E의 값이 직선적인 관계를 나타내고 있다는 것이다.

스프링 백이란 압연에 의해 제조된 판재가 결정 기하학적 방향성 또는 기계적 섬유조직에 의한 방향성 때문에 성형된 후에 탄성 복원한다는 것을 의미하는데,⁽¹⁰⁻¹¹⁾

본 연구의 실험결과는 스프링 백량($\Delta\epsilon_\theta$)을 예측하는 Hosford와 Caddell의 식과 동일한 경향을 보였다.

$$\Delta\epsilon_\theta = 3 \frac{\sigma_0}{tE'} \quad (6)$$

여기서, $E' = E/(1-\nu^2)$

t : 두께

ν : Poisson's ratio

σ_0 : Yield stress

E : Modulus of elasticity

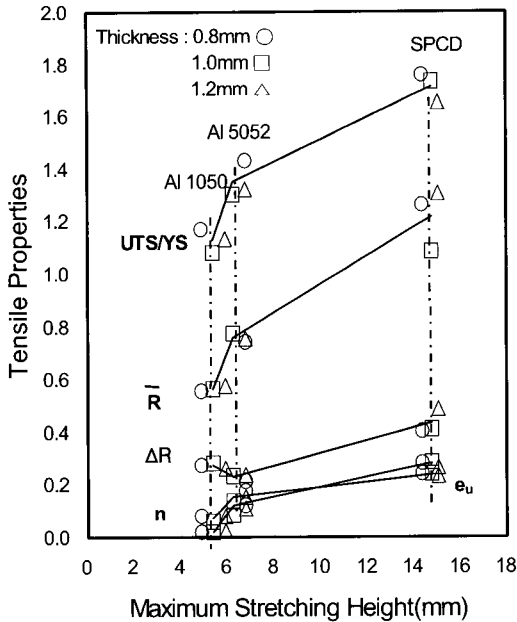


Fig. 16 Relationship between stretching height and tensile properties

3.3 스트레칭 실험

딥드로잉 실험에서와 마찬가지로 성형조건에 따른 각각 스트레칭시 최대성형하중과 최대성형높이를 살펴보면, Fig. 14~15에서처럼 최대성형하중과 최대성형높이는 SPCD가 알루미늄 합금판재에 비해 월등히 컸다.

Fig. 16은 최대성형높이와 인장특성을 비교한 그림으로서 가공경화지수, 균일연신율, 소성변형률비, 그리고 UTS/YS값이 클수록 최대성형높이는 증가함을 보여주고 있다. Al5052와 Al1050의 경우 가공경화지수 n값, 균일연신율, UTS/YS값이 큰 Al5052가 Al1050에 비하여 스트레칭성이 우수하였다.

4. 결론

(1) 인장시험으로 구해진 소재의 고유물성치로 Al5052, Al1050의 성형성을 예측할 수가 있었으며, 딥드로잉의 경우 소성변형률비와 가공경화지수가 주요 물성인자였으며, 스트레칭의 경우 균일변형률비와 가공경화지수였다. 굽힘에서 스프링 백에 미치는 주요 인자는 탄성계수와 항복강도 그리고 두께였다.

(2) 소재의 두께가 두꺼울수록 미소량이지만 성형성이 향상되었고, 스프링백량은 감소하였다.

(3) 강에 비해 낮은 알루미늄의 판재 성형성은 소재가 갖는 고유물성치인 낮은 R, n값에 기인되므로 성형실험 인자의 조정만으로는 성형개선에 한계가 있었다.

후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 급형가공연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고 문헌

- (1) R. D. Butler, 1964, "Relationship between sheet-metal formability and certain mechanical properties", Sheet Metal Industries, pp.705~716.
- (2) S. S. Hecker, 1975, "Formability of aluminum alloy sheets", Transaction of the ASME, pp.66~73.
- (3) J. Hu, T. Shikwa and K. Ikeda, 1998, "Analysis on earing behavior of textured pure aluminum and A5083 alloy sheets", Journal of Materials Processing Technology, Vol.83, pp.200~208.
- (4) M. M. Moshkar and A. Zamanian, 1997, "Optimization of the tool geometry in the deep drawing of aluminum", Journal of Materials Processing Technology, Vol.72, pp.363~370.
- (5) J. Woodthorpe, 1969, "The effect of r and n upon the forming limit diagrams of sheet steel", Sheet Metal Industries, pp.1061~1067.
- (6) J. F. Siekik, 1986, "Process variable effects on sheet metal quality", J. Applied Metalworking, Vol.4, No.3, pp.262~269.
- (7) L. R. Sanchez and D. Robertson, 1996, "Springback of sheet metal bent to small radius/thickness ratios", SAE Transactions: Journal of Materials & Manufacturing, Vol.105, No.5, pp.650~656.
- (8) M. Gotoh, M. Katoh and M. Yamashita, 1997, "Studies of Stretch-Drawing Process of Sheet Metals", Journal of Materials Processing Technology, Vol.63, pp.123~128.
- (9) E. Doege, K. Dröder and B. Griesbach, 1997, "On

the development of new characteristic values for the evaluation of sheet metal formability", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.71, pp.152~159.

- (10) D. Schmoeckl and M. Beth, 1993, "Springback reduction in draw-bending process of sheet metals", *CIRP Annals. Manufacturing Technolo-*

gy, Vol.42, No.1, pp.339~342.

- (11) A. P. Karafillis and M. C. Boyce, 1992, "Tooling design accommodating springback errors", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.32, No.1-2, pp.499~508.