

<논문> SAE NO. 943706

## 차체용 알루미늄 판재의 프레스 성형성

### Press Formabilities of Aluminum Sheets for Autobody Application

김영석\*, 김기수\*\*, 권남철\*\*\*  
Y. S. Kim, K. S. Kim, N.C.Kwon

#### ABSTRACT

Press formabilities of aluminum sheets for automobile body were investigated. Plane strain stretching test (called RIST-PSST), cupping test and U bending test were performed to assess the press formability of aluminum sheets respectively. The results showed that aluminum sheets are generally inferior to cold-rolled steel sheet of deep drawing quality (CSP3N) in press formability.

The limiting punch height (LPH) and limiting plane strain (FLCo) of aluminum sheets are 50% - 70% level compared to that of CSP3N. Moreover, the limiting drawing ratios(LDR) of aluminum sheets are ranged between 1.95 and 2.1. The poor press formability of aluminum sheets is responsible for low values of total elongation and plastic anisotropy parameter in tensile characteristic. The shape fixability of aluminum sheets evaluated in U bending test is very poor due to its low elastic modulus compared to CSP3N.

주요기술용어 : Press formability(프레스 성형성), Aluminum sheet(알루미늄 판재), Plane strain stretching test(평면변형장출실험), Limiting drawing test(한계드로잉비), Shape fixability(형상동결성)

#### 1. 서론

자동차에 대한 요구성능은 점차 높아가고 있어 주행성능 및 내구성의 향상, 소음의 저감, 충돌 안전 대책등 수요가 요구에 부응하기 위하여 각종 기능이 추가되고 있는 실정이다. 그러나 이들은 자동차의 중량을 증가시켜 연비를 낮추는 원인이 된다. 한편 지구환경보호의 측면에서 자동차 배

기가스에 포함된 CO<sub>2</sub> 가스증가에 따른 온실효과에 의한 지구온난화 현상에 대한 대책으로 최근에는 미국을 중심으로 기업별평균연비규제 (corporate average fuel economy, CAFE)가 강화되고 있어 자동차의 연비향상과 전기자동차와 같은 무공해 자동차의 개발이 요구되고 있다. 자동차의 연비향상을 위해서는 엔진자체의 효율 향상, 주행저항저감등과 차체의 경량화가 필요

\* 정회원, 산업과학기술연구소 용접연구센터  
\*\* 산업과학기술연구소 용접연구센터  
\*\*\* 현대자동차 재료기술부

하나 현재로는 차체의 경량화가 중요한 테마로 대두되고 있다.

자동차의 경량화 수단으로 종래부터 차체의 내·외판넬에 고강도강판이 사용되고 있으나 이에 의한 경량화효과는 한계에 달하고 있고 또한 내식성에 문제로 인하여 최근에는 강판과 비교하여 비중이 1/3-1/4 수준인 알루미늄이나 프라스틱과 같은 비철계 경량소재가 후드, 트렁크 리드, 도어 내외판등 중량점유율이 큰 판넬을 중심으로 일부 사용되기 시작하였다. 특히 알루미늄 판재의 사용에 의한 경량화 효과는 45% - 50%에 달하고 있고 지구환경보호 측면에서 재활용(Recycling) 효과가 커서 금후 알루미늄의 사용이 증대될 것으로 전망된다.<sup>1)</sup> 그러나 알루미늄 판재는 일반적으로 강판과 비교하여 스탬핑 성형성, 접합성 그리고 도장성등이 열세에 있어서 대량생산단계에 있어서는 기술적으로 해결해야 할 많은 문제점을 내포하고 있는 실정이다.<sup>2-4)</sup>

일반적으로 자동차용 내·외판넬은 스탬핑공정에서 장출, 드로잉, 굽힘과 플렌지 가공등 여러가지 변형모드가 복합된 가공을 받고있지만 현재 차체 판넬로 적용되고 있는 알루미늄 판재는 대부분 장출 및 플렌지 가공되고 있기 때문에 특히 소재의 장출성 확보가 중요하다.

본 연구에서는 자동차 내·외판넬용으로 사용되고 있는 각종 알루미늄 판재의 프레스 성형성-장출성, 드로잉성 및 형상동결성-을 평가, 분석하고 그 결과를 냉연강판의 경우와 비교하여 향후 알루미늄 판재의 최적 프레스 가공기술 개발에 활용하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 인장실험

실험에는 현재 일본, 미국등에서 자동차 내·외판넬용으로 사용되고 있는 Al-Mg-Si계(6\*\*\*계)의 열처리형 합금중에서 3종류의 판재와 Al-Mg계(5\*\*\*계)의 비열처리형 합금중에서 5종류의 판재 그리고 비교재료써 저탄소 냉연강판 CSP3N을 이용하였다. Al-6\*\*\*계의 열처리형

합금은 성형성은 약간 떨어지나 소부경화성을 갖고 스트레치 스트레인의 발생이 없어 강도를 중시하는 외판용으로 사용되고 있고 Al-5\*\*\*계의 비열처리 합금은 성형성과 내식성이 우수해 주로 성형이 깊은 내판용으로 자주 사용되고 있다. 시편들의 기계적특성을 파악하기 위해 코일의 압연방향에 대해 0°, 45°, 90°의 각방향으로 ASTM E-8규격의 인장시편을 제작하여 196KN 용량의 Instron 만능시험기에 의해 10mm/min의 일정한 속도로 인장실험을 실시하였다. 가공경화지수 n값은 연신률이 10% - 20% 사이에서 결정하였으며 소성이방성계수 r값은 연신률 15%에서 폭방향 변형률  $\epsilon_w$ , 길이방향 변형률  $\epsilon_l$ 을 정밀측정하여 다음식으로 구하였다.

$$r = \epsilon_w / \epsilon_l = -\epsilon_w / (\epsilon_w + \epsilon_l) \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_l$ 은 두께방향 변형률이다. 인장특성값들은 각 방향의 값을 평균하여,  $X = (X_0 + 2X_{45} + X_{90})/4$ , 구하였다.

### 2.2 장출성형실험

일반적으로 판재의 장출성형성을 평가하기 위한 수단으로 에릭센(erichsen)실험과 반구형 펀치에 의한 장출실험(Hemispherical Punch Stretching Test)이 널리 사용되고 있다. 그러나 전자의 경우에 직경이 20mm로 적어 상당한 굽힘변형을 수반하여 시편두께에 대한 의존성을 크게하고 또한 반경방향으로 재료의 드로잉을 피할 수 없어 반복실험에서 재현성이 떨어지는 단점이 지적되고 있다. 한편 후자의 경우는 상대적으로 직경이 101.6mm로 큰 반구형펀치를 이용하여 시편을 장출성형하여 파단시 성형한계선(forming limit curve, FLC 혹은 forming limit diagram, FLD)<sup>5)</sup> 또한 한계돔높이(limiting dome height, LDH)<sup>6)</sup>에 의해 장출성형성을 평가하나 실험조건 및 시편의 표면상태에 따라 실험 편차가 많고 또 실험준비 과정에 많은 수고가 드는 단점이 있다.<sup>7)</sup>

본 연구에서는 당 연구실에서 최근에 개발한 재현성이 우수하고 스탬핑 실적과 잘 일치하는 평면변형 장출실험기술(plane strain stretching

test, RIST-PSST)<sup>89)</sup>을 이용하여 알루미늄 판재의 장출성형성을 파악하였고, 그 결과를 에릭센 실험결과 및 반구형 펀치 장출실험에서 구한 FLC 결과와 비교하였다. 개발한 평면변형 장출실험 기술은 일반적으로 스탬핑 파단불량의 약 85% 이상이 부변형률이  $-10% < \epsilon_2 < 20%$  범위에 있는 평면변형모드 근처에서 발생한다는 것에 착목하여, 실린더형의 펀치를 이용하여 일정한 폭을 갖는 사각시편의 전면에 걸쳐 평면변형상태를 유지하면서 장출성형하여 파단시 한계펀치높이 (limiting punch height, LPH) 혹은 한계평면변형률(limiting plane strain, 혹은 Plane Strain Intercept of FLC,  $FLC_0$ )의 크기에 의해 재료의 장출성형성에 대한 우열을 평가한다. 따라서 평면변형 장출실험에서 큰 특성값을 갖는 판재는 장출성형성이 좋고 특성값이 낮은 판재는 장출성형성이 상대적으로 나쁘다고 볼 수 있다. Fig.1에 평면 변형장출 실험의 개요와 공구의 기하학적 조건을 나타내었다. 장출실험은 588KN/392KN 복동식 유압프레스를 이용하였으며 블랭크 가압력은 294 KN으로 하여 시편의 드로잉발생을 억제하였고 펀치속도는 250mm/min로 하였다. 실험은 압연 방향과 직각방향으로 일정한 폭의 사각시편을 준비하여 코일 출하공정에서 도포된 방청유를 아세톤으로 세척한후 무도유상태에서 장출성형 하였다.

한편 스탬핑 공정중에 발생 가능한 모든 변형 상태에서 재료가 견딜 수 있는 한계변형률을 나타내는 FLC는 냉연강판이나 알루미늄 판재의 경우에 재료별로 높이의 차이는 있으나 거의 유사한 형태를 갖고 있으므로<sup>10)11)</sup> FLC에서 가장

낮은 점인 평면변형하의 한계변형률  $FLC_0$ 값에 대한 정보는 재료의 스탬핑 성형성을 평가하는데 매우 유익하다. 평면변형 장출실험에서는 시편의 전면에 걸쳐 폭방향 부변형률이 거의 영인 상태가 되어 평면변형 상태에 있으므로 평면변형 장출 실험후 파단면 주위의 두께를 정밀측정하면(thickness strain analysis, TSA)<sup>11)</sup>  $FLC_0$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

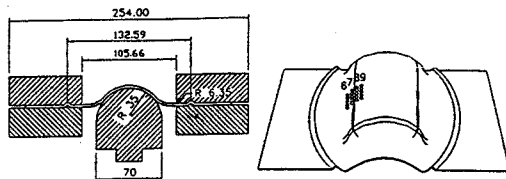
$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= -\epsilon_3 (\epsilon_2 = 0) \quad (1=1, 2=w, 3=t) \\ \epsilon_3 &= \ln(t/t_0) \\ \epsilon_1 &= \exp(-\ln(t/t_0)) - 1 \\ &= FLC_0 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서  $\epsilon$ 은 대수변형률을 나타내고  $e$ 는 공학 변형률을 나타낸다.  $t_0, t$ 는 각각 변형전과 변형후 크랙발생 인접부의 시편두께이다. 여기서 파단면 주위의 시편두께는 Krautkramer Branson사의 CL-304모델의 초음파 두께측정기를 이용하여 0.001mm까지 정밀 측정하였다. 이 방법에 의한  $FLC_0$ 의 도출은 Hecker의 방법과 같이 실험전에 시편에 그리드를 새기는 작업 및 변형된 그리드에 대해 변형률의 정밀측정을 위한 원형그리드해석기(optical grid analyzer, OGA)와 같은 고가의 장비를 필요로 하지 않는 장점이 있다.

2.3 컵 성형실험

알루미늄 판재의 딥 드로잉성을 평가하기 위해 Swift 컵 성형실험을 수행하여 한계드로잉비(limiting drawing ratio, LDR=파단되기 전의 최대 블랭크 직경  $D_0$ /펀치직경  $D_p$ )를 측정하였다. Fig.2에 컵 성형실험에 대한 공구의 기하학적 조건 및 실험조건을 나타내었다. 실험은 실험편차를 줄이기위해 시편에 우지를 적당히 도포하였고 블랭크 가압력은 5.88KN으로 하였으며 펀치속도는 13mm/min로 하였다.

한편 Hill의 신이방성이론<sup>12)</sup>을 이용하여 이론적으로 LDR을 도출하여 이방성계수  $r$ 이 LDR에



(a) punch and die set (b) tested specimen  
Fig.1 Schematic view of plane strain stretching test

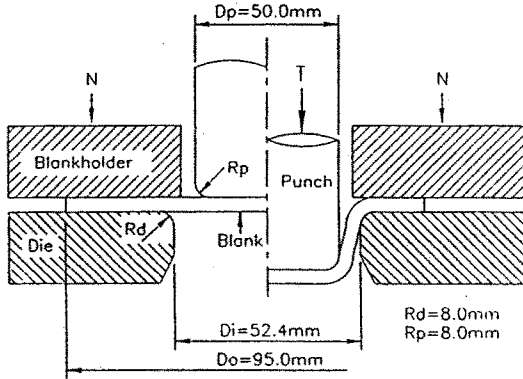


Fig.2 Schematic view of cup drawing test for evaluating limiting drawing ratio, LDR

미치는 영향을 파악하였으며 그 결과를 실험결과와 비교하였다. Hill의 신이방성 이론에 의한 소성항복조건식은 평면응력상태하에서 평면동방성인 이방성판재에 대해 다음식으로 표시된다.

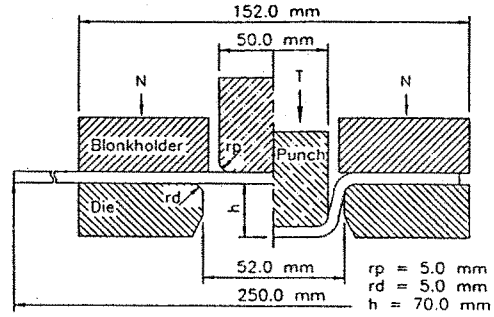
$$(1+2r) |\sigma_1 - \sigma_2|^m + |\sigma_1 + \sigma_2|^m = 2(1+r)\sigma_y^m \quad (3)$$

여기서  $m(1 \leq m \leq 2)$ 은 단축인장실험과 등이 축인장실험에서의 가공경화특성을 비교하여 결정되는 상수로 Hill의 구이방성이론은  $m=2$ 에 해당한다. 한편  $\sigma_1, \sigma_2$ 는 각각 판 면내에서 주, 부응력이고  $\sigma_y$ 는 소성유동응력이다.

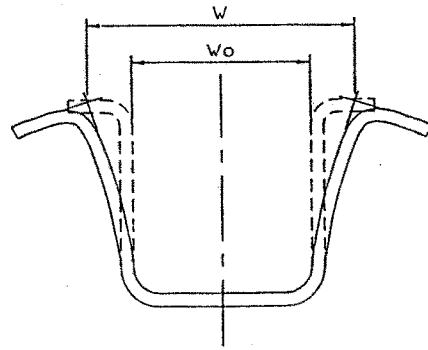
이론적으로 컵 성형공정에서 간단히 LDR을 구하기 위해서 재료는 비가공경화로 가정하였고 또한 플랜지부와 컵벽부에서 평면변형상태를 가정하였다. 컵 성형공정에서 응력상태에 대한 고찰로 부터 LDR은 식 (4)로 표시된다.

$$\ln(D_p/D_r) = \ln(LDR) = \eta(\sigma_w/\sigma_f) \quad (4)$$

여기서  $\eta$ 는 마찰과 다이반경부에서 굽힘을 고려하기 위한 가공효율로 통상 0.74-0.79 사이의 값을 갖는다.  $\sigma_f$ 는 플랜지부에서 재료의 평균유동응력이고  $\sigma_w$ 는 컵벽부에서 재료의 평균유동응력이다. 식 (4)에 Hill의 신이방성이론에 의한 식 (3)을 적용하면 LDR은 다음식으로 주어진다.



(a)



(b)

Fig.3 Schematic view of U bending test (a) punch and die set (b) amount of spring back (inaccuracy in wall distance)

$$\ln(LDR) = (\eta/2)[(1+2r)^{1/(m-1)} + 1]^{(m-1)/m} \quad (5)$$

### 2.42 U 굽힘실험

알루미늄판재의 프레스 성형후 형상동결성(shape fixability)를 평가하기 위해 Fig.3a, 3b에 나타낸 것과 같이 폭이 50mm( $W_0$ )인 펀치를 이용하여 u 굽힘실험을 실시하였다. 시편의 크기는 폭 35mm×길이 250mm로 하였고 블랭크가압력은 19.6KN으로 하였고 펀치속도는 100mm/min로 하였다. 재료의 형상동결성은 판재를 70mm 깊이로 굽힘성형 한후 하중을 제거한 상태에서 시편 입구부의 폭( $W$ )을 측정하여 탄성회복에 의한 폭벌어짐량,  $\Delta W = W - W_0$ 으로 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장특성

Table 1에 알루미늄 판재의 인장특성을 나타내었다. 비교재의 DDQ 냉연강판과 비교하면 전반적으로 전연신률 El 및 소성이방성계수 r값이 매우 낮음을 알 수 있다. 특히 전연신률은 냉연강판과 비교하여 60%~70% 수준으로 낮고 대표적인 알루미늄 판재의 연신률-인장하중 선도로 부터 알 수 있듯이<sup>34)</sup> 최대하중이후의 국부연신률이 작기 때문에 판재의 굽힘(hemming)가공시 외층에 크랙이 야기되어 굽힘곡률에 제한을 받는다. 또한 소성이방성계수 r은 냉연강판의 1/3 수준으로 알루미늄 판재의 덩 드로잉성은 냉연강판보다 나쁠것으로 예상되는데 이는 알루미늄 판재의 경우에 드로잉성을 좋게하는 <111> 슬립 방향으로 집합조직의 발달이 적기 때문이다. 그러나 가공경화지수는 냉연강판보다 동등 이상이며 장출성형성이 우수하므로 얇은 깊이의 장출가공을 주로 받는 후드나 도어 외판 등의 판넬성형에 적합하다는 것을 알 수 있다. 한편 알루미늄 판재의 탄성계수는 냉연강판의 1/3 정도

로 낮기때문에 성형후 스프링백등의 형상동불량이 야기되기 쉬운 단점이 있음을 예측할 수 있다.

3.2 장출성형성

평면변형 장출실험에서는 시편의 폭에 따라 시편의 변형률상태가 드로잉모드와 평면변형모드 사이에 존재하므로 평면변형을 나타내는 시편의 폭을 결정하는 것이 중요하다. Fig.4는 폭이 124mm인 알루미늄 판재와 냉연강판에 대해 평면변형 장출실험후의 변형된 시편의 형상을 나타낸다. 평면변형장출실험의 경우에는 Fig.1에서와 같이 편치의 기하학적인 구속조건에 의해 평

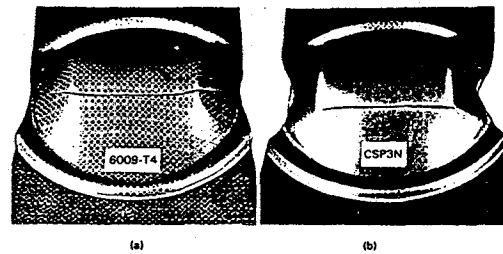


Fig.4 Showing deformed specimens for aluminum (a) and cold-rolled steel sheets (b) with blank width of 124mm

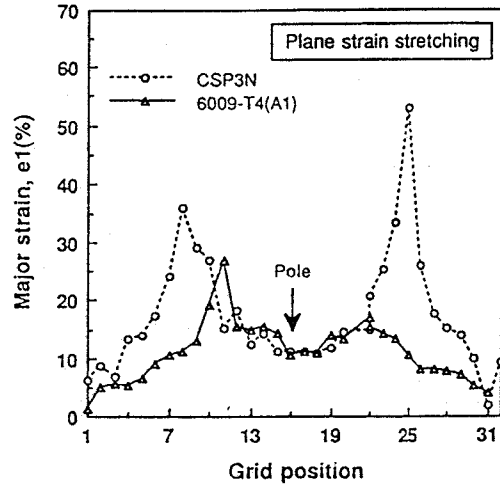
Table 1 Mechanical properties of tested materials

Alloy		t (mm)	E (MPa)	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	r 15%	n 10%~20%	Material
Al	A1	1.06	68.0	140	258	25.8	0.62	0.23	6009-T4
Mg	A2	0.98	67.3	137	250	27.8	0.58	0.23	6383-T4
Si	A3	0.96	62.3	123	235	27.8	0.64	0.25	Ac120-T4
Al	A4	0.79	67.3	114	251	31.7	0.72	0.34	TG25-0
	A5	0.99	68.9	132	284	31.9	0.68	0.35	5032-0
	A6	0.96	66.1	137	280	25.5	0.69	0.29	5182-0
Mg	A7	1.01	70.0	133	280	30.0	0.74	0.32	5030-T4
	A8	0.99	66.9	134	247	29.9	0.65	0.30	GC45-0
CSP3N		0.82	205	164	292	47.3	1.88	0.22	Mild steel

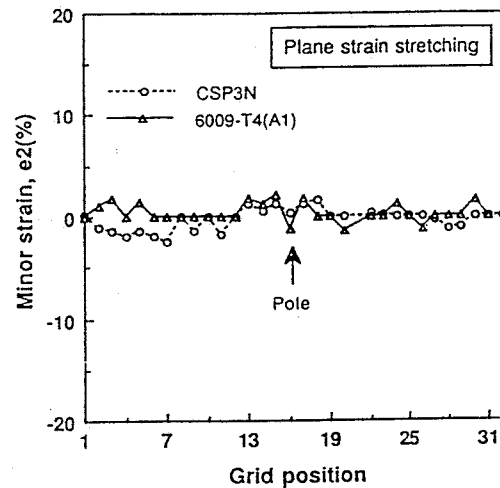
\* Tensile specimen : ASTM E-8 standard, t : Thickness,  
 E : Young's modulus, YS : Yield strength, TS : Tensile strength,  
 El : Total elongation, n : Work hardening exponent,  
 r : Plastic anisotropy parameter  
 CSP3N : Cold-rolled steel plate of non-aging deep drawing quality

면변형을 유도하고 있어서 냉연강판의 경우에는 표면마찰상태나 시편의 인장특성 혹은 두께에 관계없이 통상 시편의 폭이 126mm 전후에서 평면변형이 확보된다.<sup>9,11)</sup> 그러나 알루미늄 판재의 경우에는 균일연신후에 국부연신률이 작기 때문에 시편폭이 126mm의 경우에 펀치 코너반경부 ( $R_c=5.0\text{mm}$ )에서 과도한 국부굽힘변형에 의해 조기에 파단이 발생한다. 따라서 알루미늄 판재의 성형성평가를 위해서는 펀치 코너반경부의 곡률 반경을 보다 크게하거나 시편의 폭을 126mm 이하로 할 필요가 있다. 본 연구에서는 시편의 폭을 124mm로 하여 각종 알루미늄 판재의 장출성형성을 파악하여 냉연강판의 경우와 비교하였다.

Fig.5a, 5b에 대표적인 알루미늄 판재와 냉연강판에 대해 시편의 폭을 124mm로 하여 평면변형장출실험에서 파단까지 장출성형한 후 OGA를 이용하여 사각시편의 길이 방향으로 측정된 주변형률과 부변형률 분포를 나타내었다. Fig.5a에서 주변형률  $e_1$ 은 재료에 관계없이 펀치와 재료가 접하는 경계근처에서 최대값을 갖고 양단과 펀치의 극점(pole)으로 갈수록 점차 감소한다. 또한 알루미늄 판재의 경우에 펀치와 판재가 접하고 있는 극점주위에서 주변형률의 크기는 냉연강판과 비교하여 큰 차이는 보이지 않으나 파단부에서의 최대 주변형률은 냉연강판의 50% 수준으로 낮으므로 시편의 길이방향으로 상대적으로 균일한 변형이 얻어지고 있다고 볼 수 있다. 그러나 알루미늄 판재의 경우에는 냉연강판보다 최대 주변형률의 위치, 즉 파단발생 위치가 펀치의 극점쪽에 가까운 것을 알 수 있다. 평면변형장출실험에서 최대 주변형률의 위치는 재료의 이방성계수와 마찰계수의 크기에 따라 변하는데,<sup>14)</sup> 본 연구에 사용한 알루미늄 판재의 경우에 드로오비드 마찰실험<sup>15)</sup>에서 구한 쿠룸마찰계수( $\mu_c$ )가 0.13-0.16 사이의 값을 갖고 냉연강판과 비교하면( $\mu_c=0.14-0.15$ ) 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서 알루미늄 판재의 경우에 최대 주변형률 위치가 펀치의 극점쪽으로 이동하고 있는 것은 알루미늄 판재가 낮은 이방성계수  $r$ 값을 갖기 때문으로 생각할 수 있다. 한편 본 평면변형장출 실험에서는 알루미늄 판재와 냉연



(a)



(b)

Fig.5 Strain distributions along grid position in the longitudinal direction of the specimen  
(a) major strain (b) minor strain

강판의 경우에 부변형률  $e_2$ 은 시편의 전면에 걸쳐 거의 +2% 범위내에 존재하고 있으므로 항상 평면변형상태에 있음을 알 수 있다.

Fig.6은 평면변형 장출실험에서 구한 한계펀치 높이 LPH와 전연신률 EI과의 관계를 나타낸다. LPH의 크기는 재료가 국부넉 발생까지의 한계 변형능력과 변형집중없이 균일변형할 수 있는 능력을 나타내는 척도이므로 LPH가 높다는 것은

재료의 장출성형성이 우수하다고 볼 수 있다. 그림에서 LPH는 전연신률의 증가에 따라 선형적으로 증가하고 있으나 냉연강판과 비교하면 약 70% 수준으로 낮음을 알 수 있다.

Fig.7은 가공경화지수 n에 따른 LPH의 변화를 나타낸다. EI의 경우와는 달리 산포된 결과를

나타내고 있으나 대체로 가공경화지수가 커질수록 LPH가 증가함을 알 수 있다. 이는 일반적으로 판재의 가공경화지수가 커질수록 재료의 균일변형능력이 증가하여 재료의 변형집중이 억제되고 재료의 변형이 편치와 접촉부에서 보다 균일하게 분포하여 장출성이 향상되기 때문으로 설명할 수

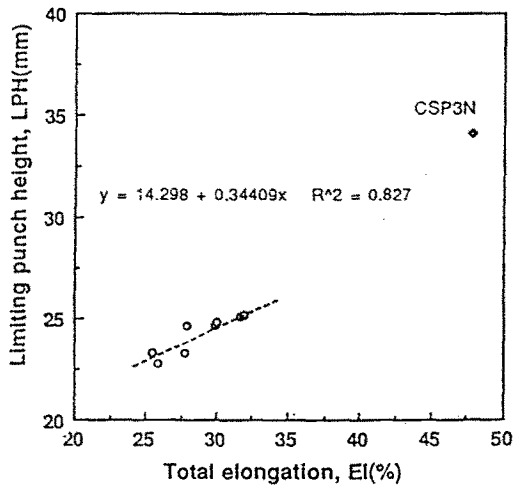


Fig.6 Relationship between total elongation EI and limiting punch height LPH

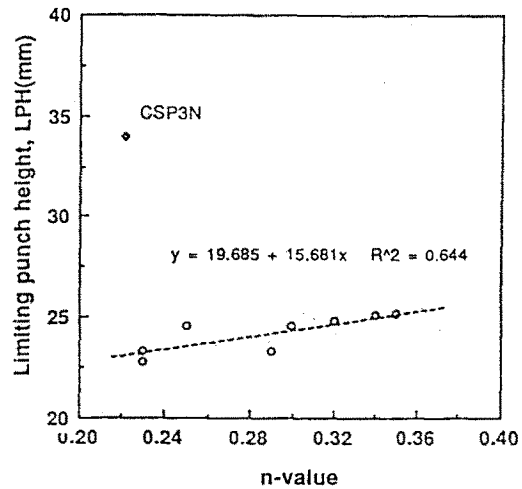


Fig.7 Relationship between work hardening exponent n and limiting punch height LPH

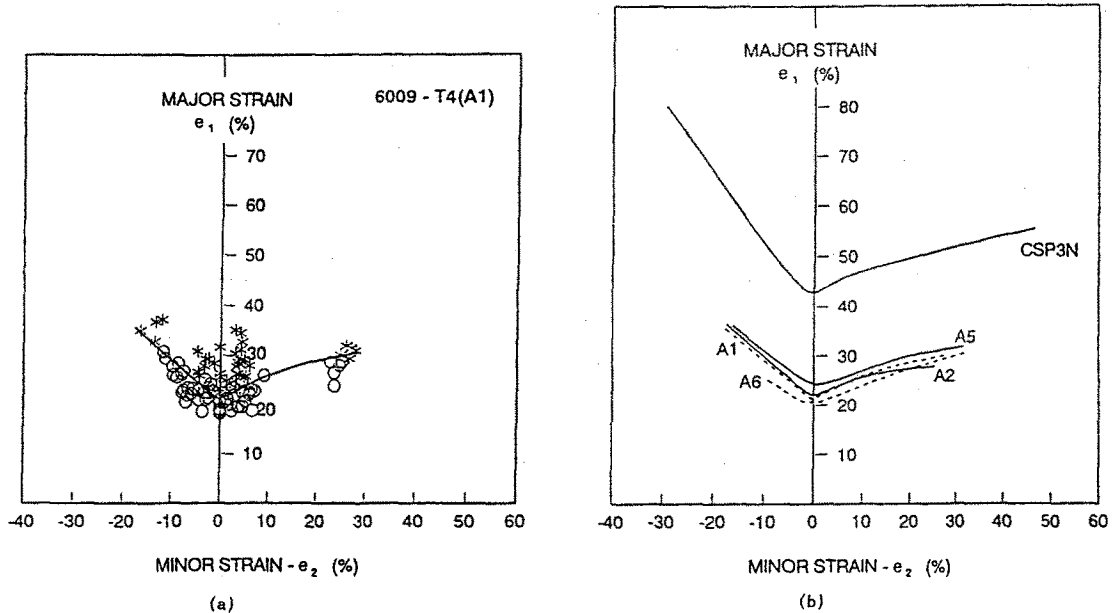


Fig.8 (a) Forming limit curve FLC for A1(6009 -T4) aluminum sheet and (b) comparison of FLC between typical aluminum sheets and cold-rolled steel sheet CSP3N

있다.

Fig.8 a, 8b는 각각 6009-T4 알루미늄 판재에 대해 Hecker의 방법에 의한 장출실험후 OGA에 의해 측정된 성형한계선 FLC와 대표적인 알루미늄 판재들과 비교재인 냉연강판에 대해 구한 FLC의 비교를 나타낸다. 알루미늄 판재들은 냉연강판과 비교하여 드로잉영역과 장출영역에서

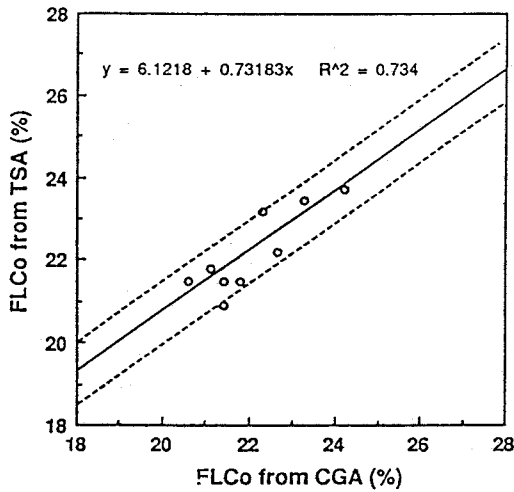


Fig.9 Comparison of limiting plane strain FLC<sub>0</sub> between measurement from OGA and calculation from TSA

모두 성형한계선이 냉연강판의 약 50% 수준으로 낮아 일반적인 스탬핑 성형성이 열세에 있음을 알 수 있다. 한편 알루미늄의 판재의 성형한계선은 냉연강판과 비교하여 절대값은 낮지만 거의 유사한 형상을 갖고 있어 앞에서 논한바와 같이 FLC에서 가장 낮은 점에 해당하는 한계평면변형률 FLC<sub>0</sub> 값으로 재료의 스탬핑 성형성의 우열을 평가할 수 있다.

평면변형 장출실험후 두께측정에 의해 계산된 FLC<sub>0</sub>와 Hecker의 방법에 의한 장출실험 후 OGA에 의해 측정된 FLC<sub>0</sub>의 비교를 Fig.9에 나타내었다. 두께측정으로 부터 구한 FLC<sub>0</sub>는 OGA에 의해 측정된 FLC<sub>0</sub>와 거의 +0.7% 오차 범위 내에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 평면변형 장출실험을 통하여 파단면 근처의 두께를 정밀측정하면 한계평면변형률 FLC<sub>0</sub>를 쉽게 예측할 수 있다.

Fig.10은 평면변형 장출실험으로 부터 구한 FLC<sub>0</sub>에 미치는 전연신률 EI의 영향을 나타낸다. FLC<sub>0</sub>와 전연신률은 밀접한 상관관계를 보이지 않으나 대체로 전연신률 증가에 따라 FLD<sub>0</sub>가 커지고 있다고 볼 수 있다. 전반적으로 알루미늄 판재의 한계변형능력은 냉연강판과 비교하여 50% - 60% 정도 수준으로 낮음을 알 수 있다.

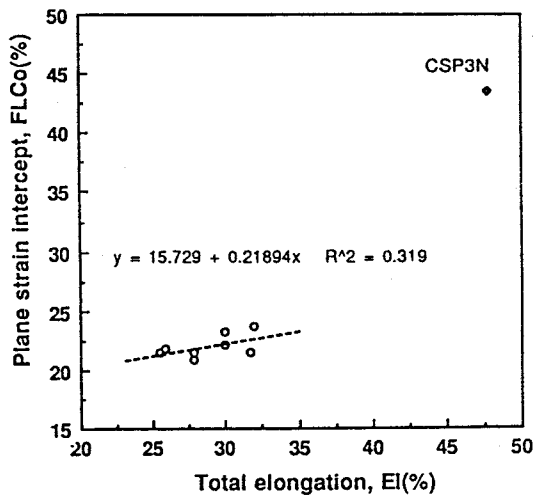


Fig.10 Effect of total elongation EI on limiting plane strain FLC<sub>0</sub>

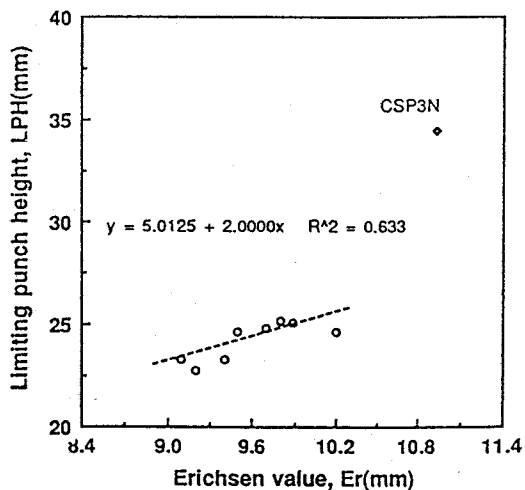


Fig.11 Relationship between Erichsen value Er and limiting punch height LPH



기존에 판재의 장출성형성 평가척도로 널리 이용되고 있는 Erichsen값, Er과 한계편치높이 LPH와의 관계를 Fig.11에 나타내었다. LPH는 대체로 E값과 선형관계를 보이는데 알루미늄 판재별 장출성형성 우열의 차이가 E값의 경우에 약 1.1mm 정도인데 반해 LPH의 경우는 2.4mm 정도로 커서 LPH의 경우가 재료간 장출성형성의 우열을 보다 명확히 하는 특징이 있다.

3.3 딥 드로잉성

Fig.12는 소성이방성계수 r과 컵 성형실험 및 이론적으로 식 (5)에서 구한 한계드로잉비 LDR의 관계를 나타낸다. 여기서는  $m=1.8^{13,16}$ ,  $\eta=0.79$  또는  $\eta=0.75$ 로 하였다. 본 연구에서 사용한 알루미늄 판재의 경우에 재료간의 r값의 변화가  $\Delta r=r(A7)-r(A2)=0.16$ , 정도로 크지 않아 이 범위에서 r값과 LDR간의 상관관계를 단정하기란 곤란하다. 실험결과는 산포되어 있지만 대체로 r값이 커질수록 LDR이 점차 증가한다고 간주할 수 있다. 실험결과는 이론식 (5)로부터  $\eta=0.79$ 로 하여 구한 결과와 어느정도 일치하고 있는데 식 (5)에서 LDR은 가공효율  $\eta$ 값의 크기에 의존하므로 이론과 실험결과의 절대값의 비교는 현단계에서 무의미하다.

3.4 형상동결성

U 굽힘실험에서 구한 폭벌어짐량( $\Delta W$ )과 재료의 인장강도 및 항복응력과 관계를 Fig.13에 나타내었다. 알루미늄 판재의 인장강도/두께 비가 증가할수록 스프링백(폭벌어짐량)이 선형적으로 커져 형상동결성이 나빠지는 것을 알 수 있다. 이는 일반적으로 형상동결성은 항복응력(혹은 인장강도) 및 재료두께에 비례하고 탄성계수에 반비례하기 때문에 알루미늄 판재의 항복응력과 인장강도가 냉연강판보다 낮지만 탄성계수는 냉연강판의 1/3 정도이기 때문에 알루미늄 판재의 형상동결성이 나쁜 것이다.

앞에서 고찰한 바와 같이 알루미늄 판재의 프레스 성형성은 전반적으로 냉연강판보다 열세에 있기때문에 기존의 강판 성형용 프레스 금형조건에서 알루미늄 판재의 고속 프레스 가공에는

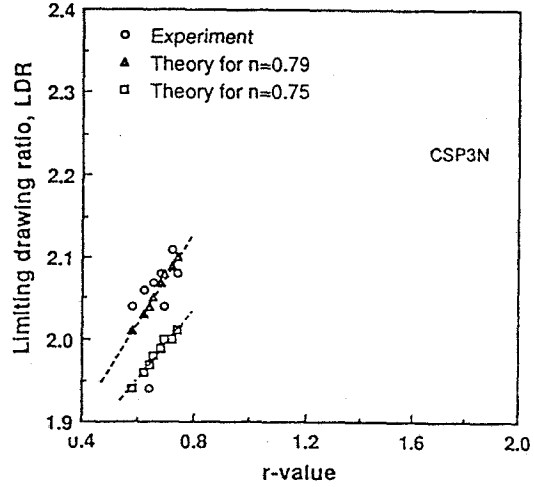


Fig.12 Relationship between plastic anisotropy parameter r and limiting drawing ratio LDR

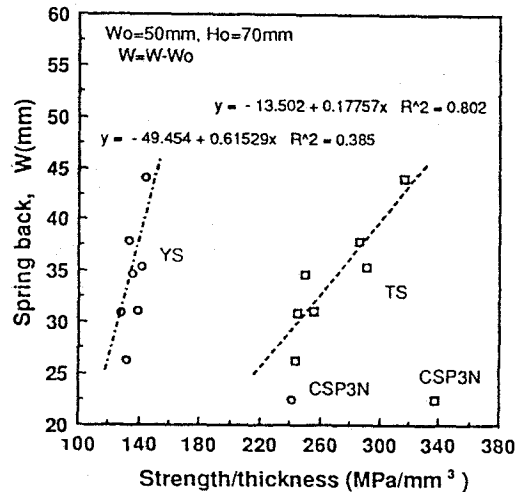


Fig.13 Effect of tensile strength/thickness on shape fixability

어려움이 있고 또한 적용부품에 제약을 받는다. 향후 보다 차체의 경량화를 실현하기 위해서는 냉연강판 수준의 프레스 성형성을 갖는 알루미늄 합금의 개발 및 프레스 가공기술의 최적화가 요구될 것으로 전망된다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 내·외관널용으로 사용

되고 있는 Al-Mg계 및 Al-Mg-Si계의 각종 알루미늄 판재들의 장출성 및 드로잉성을 평가하고 그 결과를 냉연강판의 경우와 비교하였다. 본 연구에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 자동차용 내·외판넬용 알루미늄 판재들의 전연신률 EI과 이방성계수 r은 전반적으로 냉연강판보다 열세에 있고 가공경화지수 n은 냉연강판과 동등 이상이다.
- 2) 따라서 알루미늄 판재들은 스템핑 성형성이 냉연강판보다 일반적으로 낮아 얇은 깊이의 장출가공을 받는 판넬의 성형에만 적합하다.
- 3) 평면변형 장출실험에서 한계편치높이 LPH 및 한계평면 변형률 FLC<sub>0</sub>로 평가한 알루미늄 판재의 장출성형성은 각각 냉연강판의 70% 및 50% 정도 수준으로 낮다.
- 4) 알루미늄 판재의 전연신률 EI은 장출성형성을 나타내는 LPH와 밀접한 상관성을 갖는다.
- 5) 알루미늄 판재의 경우에 이방성계수 r값과 한계드로잉비 LDR 어느정도 선형관계가 인정된다.
- 6) 알루미늄 판재는 낮은 탄성계수로 인해 형상동결성이 열세에 있다.

## 후 기

본 연구를 위해 시편을 제공하여 주신 현대자동차 재료기술부와 실험을 수행하여 주신 현대자동차의 조준모씨와 산업과기연의 김정철씨께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. S. Ujihara, et al., "Minimizing the weight of autobody and aluminium sheets", Proc. of Int. Conf. on Recent Advances in Science and Engineering of Light Metals, Tokyo, pp.1163-1171, 1991.
2. T. Mori, et al., "Press formability of aluminum alloy sheets for autobodies", ibid pp.661-666.
3. 자동차경량화 특집, "알루미늄 합금의 성형 가공(1), 자동차 경량화와 프레스 가공(11)", 프레스기술, Vol. 29-2, pp.17-79, Vol. 29-4, pp.27-36, 1991.
4. 김영석, "알루미늄 판재의 성형기술의 현황과 과제", 대한기계학회지, Vol. 32-7, pp.620-631, 1992.
5. S. S. Hecker, "Simple technique for determining forming limit curve", Sheet Metal Industries, Vol. 52, pp.671-676, 1975.
6. R. A. Ayres et al., "Evaluating the GMR limiting dome height test as a new measure of press formability near plane strain", J. of Applied Metalworking, Vol. 1-1, pp.73-82, 1979.
7. N. Izworski and A. Graf, "Obtaining LDH stability", SAE paper No. 910512, 00.41-45, 1991.
8. 김영석, 박기철, 남재복, "평면변형 장출실험을 이용한 스템핑 성형성평가", 한국자동차공학회지, Vol. 15-2, pp.121-129, 1993.
9. 김영석, 박기철, 남재복, "스템핑 성형성 평가기술개발", 대한기계학회 추계학술대회 초록집, pp.396-400, 1991.
10. K. S. Raghavan, R. C. Van Kuren and H. Darlington, "Recent progress in the development of forming limit curves for automotive sheet steels", SAE paper No. 920437, pp.87-104, 1992.
11. 김영석, 박기철, "판재의 성형성 평가실험에 대한 고찰", 대한기계학회지, vol. 33-1, pp.47-65, 1993.
12. R. Hill, "Theoretical plasticity of textured aggregates", Math. Proc. Camb. Phi. Soc., Vol. 75, pp.179-191, 1979.
13. P. B. Mellor and A. Parmar, "Plasticity analysis of sheet metal forming", in Mechanics of Sheet metal Forming, ed., D. P. Koistinen and N.-M. Wang, Plenum Press, pp.53-73, 1978.
14. 김영석, 박기철, "평면변형 장출실험기술의 안정성에 관한 연구" 대한금속학회지 논문투고예정, 1993.
15. 김영석, 김정철 외, "고속 드로오비드 마찰

시험기의 개발”, 산업과기연 미공개 자료, 1992.

16. N. Asnafi and C. Magnusson, “On formability of sheet aluminum”, in Sheet Metals in Forming Processes, Proc. of 16th Biennial Congress IDDRG, Borlange, Sweden, pp.81-91, 1990.