

## 알루미늄 5454 합금 판재의 성형성 예측

김찬일\* · 양승한\*\* · 김영석\*\*†

\* 경북대학교 기계연구소, \*\* 경북대학교 기계공학부

### Prediction of Formability of Aluminum Alloy 5454 Sheet

Chan Il Kim\*, Seung Han Yang\*\* and Young Suk Kim\*\*†

\* Institute of Mechanical Engineering Technology, Kyungpook Nat'l Univ.,

\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received September 16, 2011; Revised November 22, 2011; Accepted November 25, 2011)

**Key Words:** Formability(성형성), Aluminum Alloy(알루미늄 합금), Plastic Instability(소성 불안정), Forming Limit Diagram(성형한계도)

**초록:** 자동차 산업에서 대기오염을 줄이고 연비를 향상시키기 위해 경량화가 중요한 과제로 여겨지고 있다. 이를 위해 알루미늄 소재의 적용이 증가하고 있다. 판재를 차체에 적용하기 위해서는 주로 프레스 가공 공정을 거치게 된다. 이때, 재료, 제품설계 및 프레스 공정의 부적절한 가공 변수의 사용으로 인하여 파단, 주름, 및 스프링 백 등에 의한 다양한 형태의 가공 불량 발생한다. 따라서 이들 변수들의 적절한 조화 뿐 만 아니라 엄격한 공정 관리가 요구된다. 이에 본 연구에서는 자동차 판재에 주로 사용되는 A15454 재료에 대한 이론적으로 유도한 소성 불안정 조건을 구하고, MATLAB을 이용하여 성형 한계도를 도출하였다. 또한, 장출 인장 실험을 통해 얻어진 실험값과 이론적으로 도출한 성형 한계도와의 비교를 수행하였다.

**Abstract:** In the automobile industry, reducing the weight is the most important objective for reducing air pollution and improving the fuel efficiency. For this reason, the application of aluminum sheets is increasing. When the sheets are applied to the automobile, using inappropriate variables for the material, product design, and press processing can generate tearing, wrinkling, and spring-back problems, which are the main types of failure in the manufacturing process. Therefore, it is necessary to reduce these failures by harmonizing the many variables and strictly managing the processes. In this research, we study the theoretical plasticity instability of A15454 and obtain the forming limit diagram (FLD) using MATLAB. Moreover, we compare the theoretical FLD with an experimental FLD obtained from a stretching test.

- 기호설명 -

$R$  : 수직 이방성 계수 (Lankford value)

$\epsilon_t$  : 폭 방향 변형률

$\epsilon_w$  : 두께 방향 변형률

$F, G, H, L, M, N$  : Hill의 2차형 항복조건식의 이방성 매개변수

$R_m$  : 평균 수직 이방성 계수

$R_0$  : 0도 시편의 수직 이방성 계수

$R_{45}$  : 45도 시편의 수직 이방성 계수

$R_{90}$  : 90도 시편의 수직 이방성 계수

$\bar{\sigma}$  : 유효 응력

$\sigma_{ii}$  : 주응력 텐서

$\epsilon_{ii}$  : 주변형률 텐서

$\sigma_Y$  : 항복응력

$\beta$  : 주 변형률과 부 변형률의 비

$\lambda$  : 레비-미세스 구성식의 비례상수

$\alpha$  : 주 응력비

$H$  : 가공경화를 나타내는 접선계수

$H'$  : 가공경화율

$n$  : 가공경화지수

$m$  : 변형률 속도 민감성 지수

† Corresponding Author, caekim@knu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

## 1. 서론

최근 자동차의 설계에서는 단순히 주행 성능이나 내구성 뿐 만 아니라, 사용자의 안전과 편의까지 담당하는 다양한 기능이 추가되고 있다. 이러한 기능의 추가는 사용자의 입장에서는 환영할 만한 일이지만, 반대급부로 많은 부품의 추가로 인한 중량 증가는 차량의 연비를 크게 떨어뜨리게 된다. 따라서 자동차의 경량화는 피할 수 없는 문제로 대두되고 있다. 따라서 기존의 강제로 구성된 차량의 부품들에 있어서 다양한 재료의 접목이 시도되고 있다. 그중에서도 가장 주목받고 있는 경량화 소재로 알루미늄을 들 수 있다.<sup>(1)</sup>

공업용 금속재료로서 알루미늄은 다른 금속에 비해 소성가공이 쉽고, 다양한 형상의 모양을 성형할 수 있다. 예를 들어 얇은 박이나 복잡한 형상의 압출 형재, 압연, 단조제품을 쉽게 제조할 수 있고, 절삭가공성이 뛰어나기 때문에 금형이나 정밀부품에도 사용된다. 또한 알루미늄의 비중은 2.7로 철(7.8)이나 동(8.9)와 비교하여 약 1/3이다.<sup>(2)</sup> 따라서 경량화에 의한 성능향상이 시대의 요구로 되고 있는 요즘 특히 자동차, 철도차량, 항공기, 선박 컨테이너 등의 수송 분야에서 많은 알루미늄이 사용되고 있다.<sup>(3)</sup>

자동차 몸체 판넬용 합금에 요구되는 재료 특성은 강도강성, 스템핑 성형성, 내식성, 용접성, 표면 내식성 등이 있고, 제품 기능으로는 강성, 내덴트성, 내구성 등이 있다. 현재까지 몸체 판넬용으로 개발된 합금은 Al-Cu(-Mg)계(2000계), Al-Mg-Si계(6000계)의 열처리 합금과 Al-Mg계(5000계)의 비열처리 합금의 두 종류로 대별된다.<sup>(1)</sup> 일반적으로 자동차용 판재로는 강도 및 성형성이 우수한 알루미늄 5000계 합금이 사용되고 있으며, 그 중에서 Al5052 합금 판재가 주로 연구되어 왔다.<sup>(4-8)</sup> 한편, Al5454 합금 판재는 Al5052보다 강도가 높고, 내식성, 성형성, 용접성이 뛰어난 것으로 알려져 있지만, 그에 대한 연구는 상당히 미미하다.<sup>(9)</sup>

자동차용 판재 소재는 냉간 압연 제조 공정에서 생산되기 때문에 소성 이방성 특성(anisotropic property)을 갖는다. 이 소성 이방성 특성의 정확한 거동 묘사는 프레스 성형공정의 최적화에 필수적이며 다양한 소성 이방성 모델이 제안되어 있다.<sup>(10)</sup> 일반 강판 성형해석에서 주로 사용되는 Hill의 1948 이론<sup>(11)</sup>은 2차 이방성 항복조건으로,

Mises의 항복조건식에 이방성을 나타내는 6개의 상수를 도입하여 일반화 한 것이다. 그러나 Hill의 이론은  $R$ 값이 1보다 작은 금속에 대해서는 이론으로부터 예측되는 등2축 인장에서의 항복응력값이 실험에 의한 결과 값보다 항상 낮게 나타나는 것으로 알려져 있다.<sup>(12)</sup> Hill<sup>(13)</sup>은 1979년에 판재의 수직 이방성을 묘사하는 일반적인  $m$ 차식 항복조건식을 발표하였는데, 실험에 의해서 지수  $m$ 값을 결정하기 때문에 그 실험의 하중경로 주위에서는 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 알려져 있어 평면 등방성을 가정한 성형해석에서 많이 사용되고 있다.

최근 들어 비철금속의 이상거동을 보다 정확히 모델링하기 위하여 비2차 평면 이방성 항복조건에 대한 몇몇 연구가 보고되고 있다.<sup>(14,15)</sup> Hill<sup>(16)</sup>은 1990년에 자신의 2차 이방성 항복조건과  $m$ 차 수직 이방성 항복조건을 일반화하여 응력장에서 표현한 비2차 이방성 항복조건을 제시하였다. 그러나 관련한 재료 물성 및 항복조건에 필요한 변수를 결정하기 위한 실험과정이 어려워 알루미늄 합금 성형품의 파단 및 주름 등의 전산모사 예측은 난제로 남아 있다.<sup>(17)</sup>

이에 본 연구에서는 Al5454에 대하여 인장시험을 수행하여 소성 이방성 계수를 구하고, FLD 실험을 통하여 성형한계선을 예측하였으며, 또한 비례부하 경로 하에서 변형되는 판재는 넥 파단 근처에서는 변형 경로가 평면변형 경로로 바뀐다는 실험결과에 근거한 Hora의 소성 불안정 발생 조건<sup>(18)</sup>을 근거로 FLD를 도출하여 실험값과 비교하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 R-value (Lankford Value)

재료에 나타나는 이방성의 정도를 거시적으로 표현하는 방법으로 Lankford 변수 즉, 이방성 계수를 사용한다. 판재 이방성의 정도는 방향별로 두께 방향 변형률( $\epsilon_t$ )과 폭 방향 변형률( $\epsilon_w$ )의 비값으로 정의되며 이를 수직 이방성 계수라 한다.

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (1)$$

압연 재료는 일반적으로 채취된 시편과 압연방향에 이르는 값에 따라 수직 이방성 계수의 변화가 있으며, 이 경우 다음과 같은  $R$ 의 평균값을

구하여 평면의 평균 수직 이방성 계수로 사용한다.

$$R_m = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (2)$$

## 2.2 소성 항복 조건

프레스 가공의 소재가 되는 얇은 금속 판재는 보통 냉간 압연 공정에 의해 생산되는데 냉간 압연 중에 다결정 금속 재료는 두께 방향으로 압축되면서 부하에 대한 구속조건을 만족하도록 결정립들의 회전과 연신이 일어난다. 이렇게 냉간 압연된 금속 판재를 금속 투과 현미경으로 조사하면 금속 결정의 원자배열이 통계적으로 특정한 방향으로 나열되어 있음을 알 수 있다. 이런 결정의 선택방위에 존재는 재료의 기계적 특성에 이방성(anisotropy)을 나타내고 이러한 판재 가공시에 재료의 변형특성과 가공한계를 지배하는 중요한 인자가 된다.

냉간 압연된 판재를 고찰하면 재료는 직교하는 3개면에 대하여 대칭인 성질을 갖기 때문에 직교 이방성 재료라고 불리고, 이때 대칭면의 교선인 3개의 직교축을 직교 이방성 주축이라고 한다. 이 경우 압연방향, 폭방향, 두께방향을 각각 이방성 주축과 일치시켜  $x, y, z$  좌표계로 취하면 Hill의 2차형 항복조건식은 다음과 같이 나타내진다.

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 \quad (3)$$

여기서  $F, G, H, L, M, N$ 은 이방성 매개 변수이다.

일반적인 판재 프레스 성형에서는 대부분의 성형 공정이 평면응력 상태( $\sigma_z = 0$ )하에서 일어난다고 볼 수 있으므로, 이 경우 이방성 재료에 대한 Hill의 항복조건식은 다음과 같다.

$$2f(\sigma_{ij}) = F\sigma_y^2 + G\sigma_x^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2N\tau_{xy}^2 \quad (4)$$

또한, 평면 이방성 재료에 대해 주응력 방향이 이방성 주축방향과 일치하는 응력성분에 대해서는 유효응력( $\bar{\sigma}$ )을 주응력의 항들로 정의할 수 있다.

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\sigma_1, \sigma_2) \quad (5)$$

이런 이방성 재료에 대해 Hill은 다음과 같이 유효응력과 유효변형률( $\bar{\epsilon}$ )을 정의하였다.<sup>(11)</sup>

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \frac{2R_m}{1 + R_m}\sigma_1\sigma_2 = \sigma_Y^2 (= \bar{\sigma}^2) \quad (6)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{R_{m+1}}{\sqrt{(2R_m + 1)}} \sqrt{\epsilon_{11}^2 + \epsilon_{22}^2 + \frac{2R_m}{R_{m+1}}\epsilon_{11}\epsilon_{22}} \quad (7)$$

## 2.3 소성 불안정 발생 조건

국부 네킹 과정에서 평면 변형을 한다고 가정하면, 응력 변화 때문에 경화 효과가 발생하여 국부 네킹을 지연시킨다. 판별기준은 다음과 같다.<sup>(16)</sup>

$$\frac{d\sigma_{11}}{d\epsilon_{11}} = \frac{\partial\sigma_{11}}{\partial\epsilon_{11}} + \frac{\partial\sigma_{11}}{\partial\beta} \frac{\partial\beta}{\partial\epsilon_{11}} \geq \sigma_{11} \quad (8)$$

여기서  $\beta$ 는 주변형률과 주변형률의 비이다.

재료가 Hill의 이방성 항복조건<sup>(11)</sup>을 따른다고 한다면 유효응력과 유효변형률은 식 (6)~(7)와 같고, Levy-Mises의 구성 식으로부터 응력과 변형률의 관계를 구할 수 있다.

$$d\epsilon_{11} = \lambda \frac{dF}{d\sigma_{11}} = \lambda \left( 2\sigma_{11} - \frac{2R_m}{1 + R_m}\sigma_{22} \right) \quad (9)$$

$$d\epsilon_{22} = \lambda \frac{dF}{d\sigma_{22}} = \lambda \left( 2\sigma_{22} - \frac{2R_m}{1 + R_m}\sigma_{11} \right) \quad (10)$$

이를 변형률 비로 나타내면 다음과 같다.

$$\beta = \frac{d\epsilon_{22}}{d\epsilon_{11}} = \frac{2\sigma_{22} - \frac{2R_m}{1 + R_m}\sigma_{11}}{2\sigma_{22} - \frac{2R_m}{1 + R_m}\sigma_{11}} \quad (11)$$

$$= \frac{\sigma_{22}(1 + R_m) - R_m\sigma_{11}}{\sigma_{11}(1 + R_m) - R_m\sigma_{22}}$$

식 (11)을  $\sigma_{22}$ 에 대하여 정리하여, 응력비를 구할 수 있다.

$$\sigma_{22} = \left( \frac{\beta + \beta R_m + R_m}{1 + R_m + \beta R_m} \right) \sigma_{11} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{22}}{\sigma_{11}} = \frac{\beta(R_m + 1) + R_m}{\beta R_m + (R_m + 1)} \quad (13)$$

식 (12)을 식 (6)에 대입하면  $\sigma_{11}$ 과  $\bar{\sigma}$ 의 관계식을 구할 수 있다.

$$\sigma_{11} = \sqrt{\frac{1 + R_m}{(1 + A^2)(1 + R_m) - 2R_m A}} \bar{\sigma} \quad (14)$$

$$= f(\alpha) \bar{\sigma}$$

$$f(\alpha) = \sqrt{\frac{1 + R_m}{(1 + A^2)(1 + R_m) - 2R_m A}} \bar{\sigma} \quad (15)$$

$$A = \frac{\beta + \beta R_m + R_m}{1 + R_m + \beta R_m} \quad (16)$$

한편, 주변형률( $\epsilon_{11}$ )과 유효변형률( $\bar{\epsilon}$ )의 관계는 식 (7)로부터 다음과 같이 나타낸다.

$$\epsilon_{11} = \frac{1}{\frac{R_m + 1}{\sqrt{2R_m + 1}} \sqrt{\frac{(R_m + 1)(1 + \beta^2) + 2R_m \beta}{R_m + 1}}} \quad (17)$$

$$= \frac{1}{g(\beta)}$$

$$g(\beta) = \frac{R_m + 1}{\sqrt{2R_m + 1}} \sqrt{\frac{(R_m + 1)(1 + \beta^2) + 2R_m \beta}{R_m + 1}} \quad (18)$$

재료의 가공경화특성을 나타내는 응력-변형률 선도로부터 식 (8)은 다음과 같이 유도된다.

$$H = H(\bar{\epsilon}), \quad \bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}), \quad \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} = H' \quad (19)$$

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial \epsilon_{11}} = \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial \bar{\sigma}} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\epsilon}} \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial \epsilon_{11}} \quad (20)$$

$$= \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial \bar{\sigma}} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\epsilon}} H' = f(\alpha) g(\beta) H'$$

또한,  $\frac{\partial \beta}{\partial \epsilon_{11}} = \frac{\beta}{\epsilon_{11}}$ 라 가정하면 식 (14)와 식 (17)로부터 다음의 관계를 만족한다.

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \epsilon_{11}} = \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \epsilon_{11}} \quad (21)$$

$$= \frac{\partial (f(\alpha) \bar{\sigma})}{\partial \alpha} \frac{1}{\frac{\partial \beta}{\partial \alpha}} \frac{\partial \beta}{\partial \epsilon_{11}}$$

$$= f'(\alpha) H \frac{1}{\beta'(\alpha)} \frac{\beta}{\epsilon_{11}}$$

$$= \frac{\pm f'(\alpha) g(\beta) \beta}{\beta'(\alpha) \bar{\epsilon}} H$$

$\sigma_{11} = f(\alpha) H$ 라 하고 식 (8)을 정리하면 다음과 같다.

$$f(\alpha) g(\beta) H' \pm \frac{f'(\alpha) g(\beta) \beta}{\beta'(\alpha) \bar{\epsilon}} H \geq f(\alpha) H \quad (22)$$

재료의 변형이 진행될수록 가공 경화율이 점차 낮아지고 최종적으로 소성 불안정이 발생하게 되는 가공경화율( $H'$ )은 다음 식으로 나타내진다.

$$H' \geq \left[ \frac{f(\alpha) \pm \frac{f'(\alpha) g(\beta) \beta}{\beta'(\alpha) \bar{\epsilon}}}{f(\alpha) g(\beta)} \right] H \quad (23)$$

실제 이론해석에서는 소성 변형에 따라 식 (23)에 만족하는지를 확인하여 조건이 만족하는 시점을 소성불안정 발생 조건으로 간주한다.

### 3. 성형성 측정 실험

#### 3.1 실험 재료

본 실험에서 사용한 재료는 Al5454 합금 판재로 두께 1.5mm를 상온에서 실험하였다. 합금 판재의 조성은 Table 1과 같다.

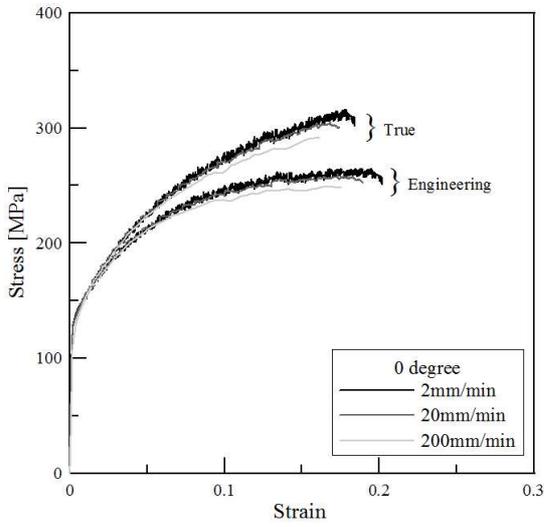
#### 3.2 단축 인장 실험

인장실험은 재료의 특성을 알아볼 수 있는 가장 간단한 실험법으로써 시편에 걸리는 응력의 분포를 쉽게 알 수 있는 장점이 있다.

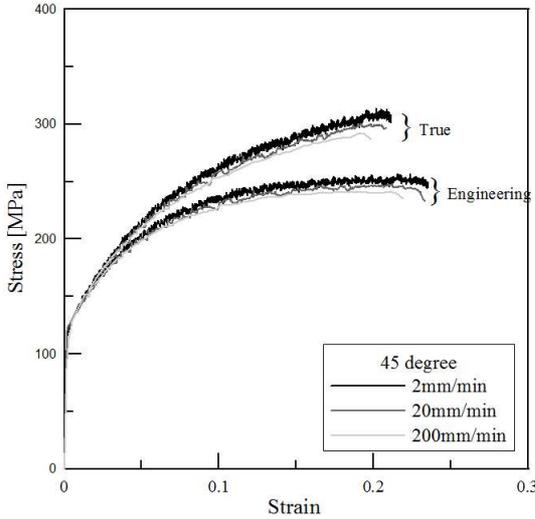
본 연구에서 사용된 시편은 KS13B형으로 판재의 압연방향에 따라 0°, 45°, 90°의 방향으로 레이저 커팅으로 제작되었다. 시편의 절단면에 Burr가 존재하면 notch 역할을 하므로 sand paper로 정교하게 다듬질 하였다. 단축 인장 실험에 사용된 인장 시험기는 KSU-10M기종으로, 본 연구에

**Table 1** Chemical composition of Al5454 (1.5t)

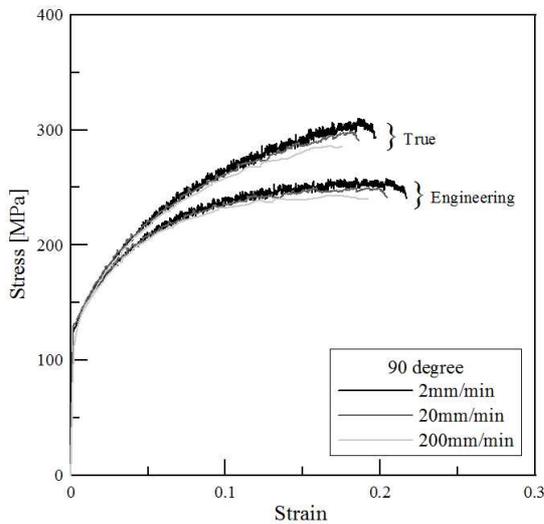
Element	Weight percent
Iron	0.40
Silicon	0.25
Copper	0.10
Manganese	0.5~1.0
Magnesium	2.4~3.0
Chromium	0.2~0.5
Zinc	0.25
Titanium	0.20



(a) 0 degree



(b) 45 degree



(c) 90 degree

Fig. 1 Stress-strain curve

서는 2mm/min, 20mm/min, 200mm/min의 세 가지 속도로 실험을 진행하였다.

Fig. 1은 각 시편의 방향별 단축 인장 실험 결과를 나타낸 것이다. 일반적으로 재료의 변형 저항은 온도와 변형률 속도의 영향을 받는다. 많은 금속 재료는 재결정 온도 이하에서 가공하는 냉간 가공 온도 범위에서는 변형률 속도가  $1 \times \text{sec}^{-1}$  정도까지는 응력-변형률 곡선은 거의 변하지 않는다. 그러나 온도가 상승함에 따라 변형 저항은 현저하게 감소하고, 재결정 온도 이상에서는 변형과 동시에 회복과 재결정이 일어나 연화하므로 가공 경화가 거의 일어나지 않게 된다. 따라서 일반적인 철강 재료의 경우 변형률 속도가 빨라질수록 항복응력과 인장 강도가 커지게 된다.

하지만 Fig. 1에서 보는 바와 같이 알루미늄의 판재를 상온에서 인장 실험을 실시할 경우, 변형 속도가 증가할수록 초기에 파단이 발생하여 연신율이 작아진다. 또한 항복응력과 인장 강도 역시 변형률 속도가 증가할수록 감소하는 경향을 가진다. 따라서 변형률 속도 민감성 지수( $m$ ) 값은 음의 값을 가지게 된다.

Table 2는 인장실험으로 구해진 속도에 따른 재료의 물성치를 나타낸다.

### 3.3 FLD 측정

성형한계선도를 도출하기 위해서 면의 변형실

Table 2 Material properties of Al5454

Rolling direction		0°	45°	90°	Ave.
Value	Velocity (mm/min)				
E (GPa)	2	74.7	71.1	73.3	73.0
	20	72.4	67.7	75.8	72.0
	200	70.7	63.1	73.9	69.2
$\sigma_y$ (MPa)	2	135	123	132	130
	20	135	126	132	131
	200	127	120	128	125
$\sigma_{UTS}$ (MPa)	2	266	256	259	260
	20	260	247	250	252
	200	248	241	243	244
n	2	0.259	0.261	0.250	0.257
	20	0.248	0.257	0.236	0.247
	200	0.235	0.261	0.244	0.240
m		-0.0021	-0.0012	-0.0014	-0.0016
R	2	1.070			
	20	0.826			
	200	0.749			

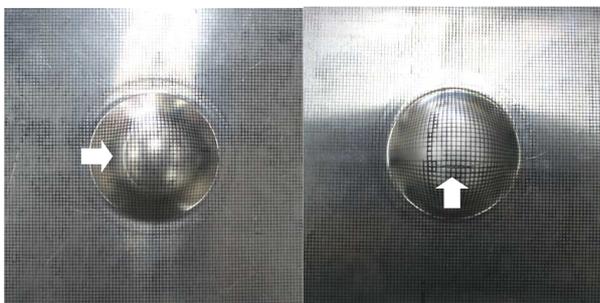
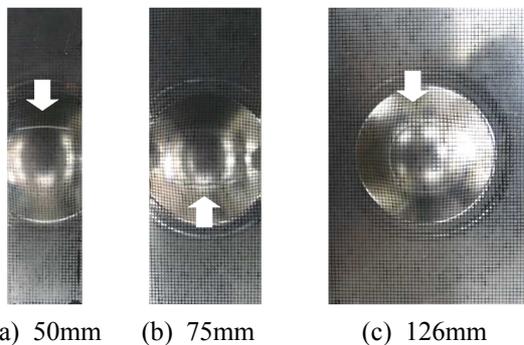
험(out-of-plane deformation test)인 Hecker의 방법을 사용하였다. 면외 변형실험의 경우는 구형 펀치의 곡률에 의해 시편의 두께방향의 변형구배(strain gradient)가 존재하는 효과가 생겨 성형한계선도가 높게 평가되는 특징이 있다.<sup>(19)</sup>

사용된 시편은 2mm×2mm의 정사각형 패턴이 에칭 된, 길이는 180mm로 일정한 반면 폭은 50, 75, 126, 180mm인 4가지 시편을 사용하였다. 직경이 50.8mm인 구형의 펀치로 장출 성형하여 시편의 다양한 변형 상태를 재현하고, 시편의 일부

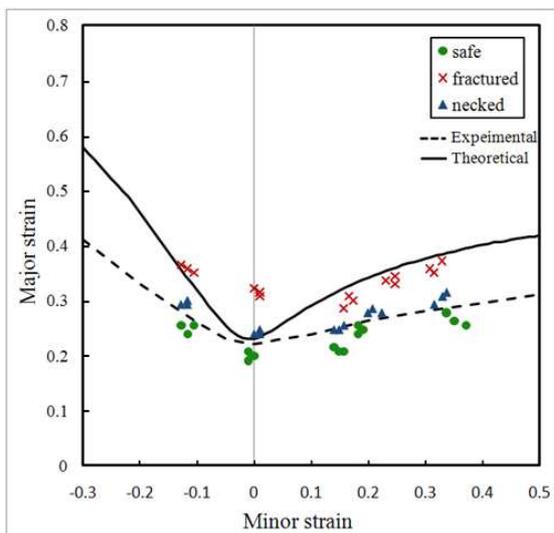
에 파단이 발생할 때까지 성형하였다. 또한 180mm×180mm에 대해서는 등 2축 인장 상태 하에서 판재의 파단을 유도하기 위하여, 폴리우레탄 2장과 그 사이에 윤활제를 도포하여 추가적인 실험을 실시하였다. 성형 후 파단이 발생한 부위 주변에서 주·부변형률을 MFLD 시스템<sup>(19)</sup>을 이용하여 FLD를 구하였다.

Fig. 2는 장출 성형 실험 후 시편의 모습이다. Fig. 2의 화살표 부분은 각 시편의 파단부를 나타낸 것이다. 윤활제를 사용하지 않은 시편에서는 공구와 판재가 만나는 경계 부분에서 파단이 발생하였다. 하지만, Fig. 2(e)에서 보는 바와 같이 마찰을 최소화한 시편의 경우 파단 위치가 정 중앙에 근접한 부분에서 일어남을 알 수 있다.

Fig. 3은 단축 인장 실험을 통하여 구해진 데이터를 근거로 하여, 식 (21)에서 유도한 소성 불안정 발생 조건을 이용하여 MATLAB을 통하여 구한 이론적인 FLD와 장출 인장실험으로부터 얻어진 자료를 토대로 FLD를 도출한 결과를 비교한 그래프이다. 그림에서 ×표시는 파단이 발생한 그리드에 대한 것이고, ▲는 국부 넥 영향 부위, 그리고 ●는 파단선으로부터 멀리 떨어져 있는 그리드에 대한 값이다. 따라서 각 시편에 대한 성형 한계는 안전 변형 영역과 넥 영향 영역의 경계로 구하였다. 이렇게 연결된 선의 위치가 상승할수록 그 재료의 성형성이 높다고 판단할 수 있다. 또한 부 변형률이 0인 지점에서 주변형률이 가공 경화 지수와 근사하다는 Hill의 이론<sup>(11)</sup>을 통해, 성형한계선도의 성형 곡선이 y축인 주변형률 축과 만나는 점의 값(FLD<sub>0</sub>)이 그 재료의 가공경화지수 *n*과 일치하여야 한다. 실험으로 구한 FLD<sub>0</sub> 값은 약 0.22 정도로, *n*승 경화 가소성 재료 모델인 Swift curve fitting을 이용하여 이론적으로 구한 FLD<sub>0</sub> 값인 0.235과 거의 일치한다. 그러나 주변형률이 0이 아닌 영역에서의 실험값은 이론값보다 완만하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 실험 시 실제 판재의 거동과 이론적인 거동의 불일치에서 오는 오차와 MFLD 시스템 사용 시 수작업으로 그리드의 중앙 점을 선택함으로써 발생하는 오차로 생각된다.



(d) 200mm (e) 200mm (with lubricant)  
**Fig. 2** FLD specimen after experiment



**Fig. 3** Theoretical and experimental FLD

#### 4. 결론

본 연구는 A15454 합금 판재의 단축 인장 실험을 통한 물성치 조사와 장출 인장 실험을 통한

성형 한계도를 도출함으로써 재료의 성형특성을 알아내었다.

단축 인장실험을 통하여 인장 속도를 증가시킬 수록 작은 응력에서도 빨리 파단 됨을 알 수 있었다. 또한, 장축 인장 실험을 통해 도출해 낸 FLD는 금속의 성형성을 판단하는데 널리 이용되고 있다. 본 실험의 Al5454 합금 판재에 대해 실험에서 구한 FLD는 소성불안정 발생 조건을 이용하여 이론적으로 구한 FLD 선도와 유사한 형태를 나타내었지만, 선도의 기울기는 이론과 대비하여 좀 더 완만하였다.

결론적으로, 알루미늄 소재는 강판과 비교하여 신율이 낮으므로 성형 깊이가 깊은 부품을 가공 시에는 주의를 요하여야 하며 가공성도 떨어진 다.

따라서 본 연구는 알루미늄 판재의 현장 적용에 있어서 기존의 강재에 대한 차이점과 성형품 제작 시 고려해야 할 사항들을 살펴보고, 발생할 수 있는 여러 성형 결함들의 예측에 기여할 것으로 사료된다.

## 후 기

이 논문은 2011도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업으로 수행된 연구임(2011-0018392).

## 참고문헌

- (1) Kim Y. S., 1992, "Recent and Future Development of Stamping Technology for Aluminum Car Body Sheet," *Transactions of the KSME*, Vol. 32, No. 7, pp. 620~631.
- (2) Kim, Y. S., Kim, K. S. and Kwon, N. C., 1993, "Press Formabilities of Aluminum Sheets for Autobody Application," *Proceeding of the KSAE Conference*, pp. 233~246.
- (3) Jo, H. H. and Cho, H., 2003, "Trend and Future Development of Aluminum Extrusion Technology," *Proceedings of the KSTP Conference*, pp. 322~329.
- (4) Kim, C. M. and Park, J. J., 1996, "An Experimental Study on Plastic Anisotropy of Aluminum-5052 Sheet," *Proceedings of the KSME Conference A*, pp. 121~125.
- (5) Yoon, J. W., Lee, Y. S., Lee, M. Y. and Jeong, B. H., "Study on the Mechanical Properties of 5052 Aluminum Alloy Laser Welds," *Journal of KSLP*, Vol. 6, No. 1, pp. 25~31.
- (6) Gang, U. G., Lee, S. H., Lee, J. C. and Nam, W. J., 2008, "Enhancement of Mechanical Properties of 5052 Al Alloy by Cryogenic and Warm Rolling," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 17, No. 2, pp. 102~106.
- (7) Hayashi, H., 1993, "Formability of Aluminum Alloy Sheets for Autobodies," *Proceedings International Symposium Light Materials for Transportation Systems*, pp. 351~363.
- (8) Li, C., Liu, D., Yu, H. and Ji, Z., 2009, "Research on Formability of 5052 Aluminum Alloy Sheet in a Quasi-static-dynamic Tensile Process," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, No. 2, pp. 117~124.
- (9) Khan, Z., 1996, "Effect of Corrosive Environment on the Fatigue Crack Initiation and Propagation Behavior of Al 5454-H32," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 5, No. 1, pp. 78~83.
- (10) Kim, Y. S., Kim, C., Lee, S. Y., Won, S. Y., and Hwang, S. M., 2003, "Forming Limits for anisotropic sheet metals," *JSME International Journal*, Vol. 45A, No. 4, pp. 627~634.
- (11) Hill, R., 1950, *The Mathematical Theory of Plasticity*, Clarendon Press, Oxford.
- (12) Hosford, W. F., 1988, "Limitation of Non-Quadratic Anisotropic Yield Criteria and Their Use in Analysis of Sheet Forming," *ASM International*, pp. 163~170.
- (13) Hill, R., 1979, "Theoretical Plasticity of Textured Aggregates," *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 85, pp.179~191.
- (14) Barlat, F., Maeda, Y., Chung, K., Yanagawa, M., Brem, J. C., Hayashida, Y., Lege, D. J., Matsui, K., Murtha, S. J., Hattori, S., Becker, R. C. and Makosey, S., 1997, "Yield function Development for Aluminum Alloy Sheets," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. Vol. 45, No. 11/12, pp. 1727~1763.
- (15) Bron, F. and Besson, J., 2004, "A Yield Function for Anisotropic Materials: Application to Aluminum Alloys," *International Journal of Plasticity*, Vol. 20,

- pp. 937~963.
- (16) Hill, R., 1990, "Constitutive Modeling of Orthotropic Plasticity in Sheet Metals," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 38, No. 3, pp. 405~417.
- (17) Shin, H. D., Park, J. G., Park, C. D. and Kim, Y. S., 2009, "Study on the Yield Locus of Aluminum Alloy Sheet Using Biaxial Cruciform Specimens," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 18, No. 5, pp. 416~421.
- (18) Hora, P., Tong, L. and Reissner, J., 1996, "A Prediction Method for Ductile Sheet Metal Failure in FE-simulation," *Proceedings of the Numisheet'96 Conference*, pp. 252~256.
- (19) Kim, Y. S., 2003, *Plasticity*, Sigma Press, Seoul, pp. 164~169, 519~534, 587~588, 607~608.