

## 論文

## AA5182판재와 AA5182/PP/AA5182 샌드위치 판재의 성형성 평가

김대용\* · 김기주\*\* · 정관수\* · 신광선\*\* · 유동진\*\*\*

Formability for AA5182 sheet  
and AA5182/PP/AA5182 sandwich sheet

D. Y. Kim\*, K. J. Kim\*\*, K. Chung\*, K. S. Shin\*\* and D. J. Yoo\*\*\*

## Abstract

For automotive applications, a sandwich sheet which was made of a 5182 aluminum alloy (AA5182) sheet and a polypropylene (PP) sheet, AA5182/PP/AA5182, has been developed. In order to evaluate its formability, the forming limit diagrams (FLD) of the 5182 aluminum alloy sheet with 0.2mm thickness and the sandwich sheet with 1.2mm thickness have been obtained based on the modified Marciniak-Kuczynski (M-K) theory. To account for the anisotropy of the sheet, Hill's 1948 yield function has been applied. The FLD of the sandwich sheet was predicted to be better than that of the AA5182 sheet, which was well confirmed by experiments.

## 초 록

자동차의 경량화를 위해서 AA5182/Polypropylene/AA5182 형태의 알루미늄 합금과 폴리프로필렌으로 구성된 샌드위치 판재가 개발되었다. 샌드위치 판재의 성형성을 평가하기 위해서 0.2mm 두께의 AA5182 판재와 1.2mm 두께의 샌드위치 판재의 성형한계도를 수정된 Marciniak-Kuczynski(M-K) 이론에 의해서 구하였다. 판재의 이방성을 표현하기 위해서 Hill의 1948년 항복곡선 표현 식을 사용하였다. 그 결과 샌드위치 판재의 성형한계도가 AA5182판재보다 더 우수하게 평가되었으며 이것은 실험값과 잘 일치하였다.

## 1. 서 론

최근 급속한 산업화로 인한 지구의 환경오염문제와 에너지 고갈 및 대체의 문제가 점점 그 중요성을 더해감에 따라 산업 선진국을 중심으로 대기오염을 줄이기 위한 노력으로 자동차의 연비를 향상시키려는 노력이 계속되고 있으며, 이러한 노력의 일환으로서 자동차의

경량화가 꾸준히 진행되고 있다. 이에 자동차의 중량 중 상당부분을 차지하고 있는 차체용 판재를 스틸(steel) 강판으로부터 알루미늄 합금 판재로 대체 하려는 노력이 지속되어 왔으며, 이미 일부 고급차종을 중심으로 알루미늄 합금 판재가 적용되고 있다. 최근에는 금속/플라스틱 샌드위치 판재를 이용하여 판재의 경량화를 극대화 시키려는 노력이 경주되고 있다. 샌드위

\* 서울대학교 섬유고분자공학과

\*\* 서울대학교 재료공학부, 항공재료연구센터

\*\*\* 대전대학교 컴퓨터응용기계설계학과

치 판재는 이중의 단일 혹은 복합재료를 조합 및 적층하여 제조한 판재로서 대개 두개의 강한 표면판재 사이에 상대적으로 낮은 밀도를 지닌 코어를 삽입시킴으로써 표면판재가 대부분의 힘을 지탱하는 구조를 지닌다. 이러한 구조는 요구되는 특성을 만족시키기 위하여 하나의 특정한 재료만을 이용하는 것이 아니라 각 재료의 장점을 조합하여 이용한다는 개념에 기초를 두고 있다.

최근에 자동차 차체용 판재로 개발되고 있는 알루미늄/플라스틱/알루미늄 샌드위치 판재는 기존의 다른 샌드위치 판재에 비해서 크게 두 가지 장점이 있다. 첫째는 표면 판재로 알루미늄을 사용하여 강판보다 무게 감소 효과가 크고, 둘째는 코어 재료로서 플라스틱을 사용하여 흡음성이 기존의 차체용 판재와 비교하여 대등 또는 향상된 결과를 얻을 수 있다. 즉, 두 재료가 지니는 우수한 특성을 이용함과 동시에 각각의 단점을 보완할 수 있는 하나의 판재로 제조한 것이다. 이상과 같이 우수한 특성을 갖는 샌드위치 판재를 자동차 재료로 적용하기 위해서는 성형성의 평가가 요구된다. 한편, 알루미늄 합금 판재의 성형성에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되었으나, 고분자 재료와 알루미늄 합금을 접합한 샌드위치 판재에 대한 성형성 관련 연구는 미진한 상태이다. 따라서 본 논문에서는 샌드위치 판재의 성형한계도를 이론적으로 예측하여 실제 실험적으로 얻어진 성형한계도와 비교함으로써 이론을 검증하고 성형성에 영향을 주는 여러 인자들의 영향을 고찰하고자 한다.

## 2. 연구동향 및 이론적 해석

### 2.1 성형한계도 및 수정 M-K 모델

판재의 성형한계도란 판면의 주 및 부 변형률의 비를 변화시키면서 판재의 파단을 유도하여 파단이 일어나는 순간 파단부 바로 주변의 주 및 부 변형률을 평면상에 나타낸 것이다. 국부 네킹의 발생과 궁극적인 재료 파괴의 기초가 되는 물리적인 원리의 본질적인 면을 고려함으로써 성형에 관련된 연속체역학적 측면과 금속의 미소역학적 측면을 고려하여 성형한계도를 예측하는 여러 가지 모델들이 그 동안 제안되어 왔다. 그 중 가장 널리 알려진 것은 Hill과 Marciniak-Kuczynski(이하 M-K)[1]의 모델이다.

성형한계도는 부변형률의 부호에 의해서 두 영역으

로 구분된다. 부변형률이 음인 영역은 결함이 주 응력 축과 일정한 각도를 이루게 되며, 이 각도는 Hill의 이론에 의하면 평면변형을 이루는 방향과 같은 각도를 이루게 된다. 부변형률이 양인 영역에서는 평면변형을 이루는 방향이 없기 때문에 이러한 Hill의 이론이 성립하지 않아, M-K모델이 등장하였다. 이 모델에서는 국부 네킹 현상을 설명하기 위해서 초기 불안정개념을 도입하였으며, 균일영역(homogenous region)과 결함영역(imperfection region) 사이의 힘의 평형조건과 변형을 적합조건으로부터 성형한계도를 예측하였다. 부변형률의 양인 영역에서만 적용되던 이 M-K모델이 후에 Barata da Rocha 등에 의하여 부변형률이 음인 영역까지 그 응용이 확대될 수 있는 수정된 M-K 모델이 발표되었다[2].

수정된 M-K 모델은 Fig. 1로서 개략적으로 설명할 수 있다. 이 모델에서는 우선 초기 불안정 영역을 가진 재료가 균일 영역과 결함영역이 주축에 임의의 각을 이루고 구성되어 있다고 가정한다. 여기에 결함영역과

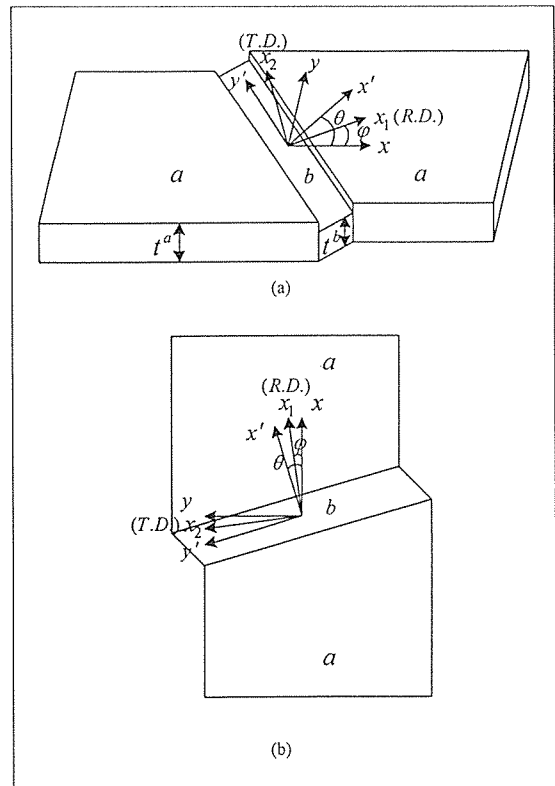


Fig. 1. Schematic view of the modified M-K model (a : homogeneous region, b : imperfection region)

균일영역 간의 경계 길이가 똑같다는 조건과 이 두 영역 사이 경계에서의 힘 평형 조건을 고려하면 균일영역에서 주 및 부 변형률을 일정하게 증가시킬 때 이 두 조건을 만족시키면서 결합영역이 변형하게 되는데, 결국은 결합영역의 변형률이 균일 영역에서의 변형률보다 더 커지게 된다. 이렇게 변형을 계속하면 결국 결합영역이 거의 평면변형 상태에 이르는데 이때의 균일영역의 변형률을 성형한계도로 보게 된다. 이때 처음 균일영역과 결합영역과의 초기 비틀림 각에 따라 성형한계도가 달라지는데 이 중에서 최소의 성형한계도를 그 재료의 성형한계도로 결정하게 된다.

## 2.2 식전개

앞 절에서 설명한 수정된 M-K이론을 근거로 하여 이방성을 갖는 판재의 성형한계도를 계산하기 위한 식을 전개해 보면 다음과 같다[3]. 우선 유효 소성일의 원리(the principle of equivalent plastic work)에 의해 평면 응력 상태에 놓인 판재에 의해서 주어진 응력과 변형률은 다음과 같은 식을 만족하게 된다.

$$\bar{\sigma}d\bar{\epsilon} = \sigma_{xx}d\epsilon_{xx} + \sigma_{yy}d\epsilon_{yy} + 2\sigma_{xy}d\epsilon_{xy} = \sigma_{xx}d\epsilon_{xx}(1 + \alpha\rho + 2\beta\gamma) = \sigma_{xx}d\epsilon_{xx}k_1 \quad (1)$$

여기서  $\bar{\sigma}$ 와  $d\bar{\epsilon}$ 는 각각 유효 응력, 유효 변형률 증분이다.

이 때 식 (1)에서의 각 변수들은 다음과 같이 정의되어진다.

$$\alpha = \frac{\sigma_{yy}}{\sigma_{xx}}, \rho = \frac{d\epsilon_{yy}}{d\epsilon_{xx}}, \beta = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xx}}, \gamma = \frac{d\epsilon_{xy}}{d\epsilon_{xx}} \quad (2)$$

$$k_1 = 1 + \alpha\rho + 2\beta\gamma$$

그리고

$$d\epsilon_{xx} = \frac{d\bar{\epsilon}}{\eta k_1}, d\epsilon_{yy} = \frac{\rho d\bar{\epsilon}}{\eta k_1}, d\epsilon_{xy} = \frac{\gamma d\bar{\epsilon}}{\eta k_1} \quad (3)$$

여기서  $\eta = \frac{\sigma_{xx}}{\bar{\sigma}}$  이다.

Fig. 1에서 a 영역(균일영역)에 변형이 가해지면 b 영역(결합영역)이 회전하게 되는데 그 각의 변화는 다

음과 같이 구할 수 있다.

$$\tan(\theta + d\theta) = \tan\theta \frac{\eta^a k_1^a + d\bar{\epsilon}^a}{\eta^a k_1^a + \rho^a d\bar{\epsilon}^a} \quad (4)$$

균일영역과 결합영역 간의 경계에서 갖는 변형률 적합조건(strain compatibility condition)은 다음과 같다.

$$d\epsilon_{y'y'}^a = d\epsilon_{y'y'}^b \quad (5)$$

$$\frac{d\bar{\epsilon}^a}{d\bar{\epsilon}^b} = \frac{\eta^a k_1^a k_2^b}{\eta^b k_1^b k_2^a} \quad (6)$$

여기서  $k_2 = \sin^2\theta + \rho\cos^2\theta - 2\gamma\sin\theta\cos\theta$  이다.

균일영역과 결합영역의 경계에서 이루어지는 힘 평형 조건(force equilibrium condition)은 다음과 같다.

$$\sigma_{x'x'}^a t^a = \sigma_{x'x'}^b t^b \quad (7)$$

$$\sigma_{y'y'}^a t^a = \sigma_{y'y'}^b t^b$$

여기서  $t^a$ 와  $t^b$ 는 각각 균일 영역과 결합 영역에서의 두께를 나타낸다.

또한 식 (7)으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\beta^b = \frac{\beta^a(\alpha^b \sin^2\theta - \cos^2\theta) + \sin\theta\cos\theta(\alpha^b - \alpha^a)}{\alpha^a \sin^2\theta - \cos^2\theta} \quad (8)$$

$$\frac{\eta^a}{\eta^b} \frac{k_3^a}{k_3^b} = D \frac{w(\bar{\epsilon}^b, \dot{\bar{\epsilon}}^b)}{w(\bar{\epsilon}^a, \dot{\bar{\epsilon}}^a)} \quad (9)$$

여기서  $k_3 = \cos^2\theta + \alpha\sin^2\theta + 2\beta\sin\theta\cos\theta$ 이고  $D$ 는 결함 상수(defect parameter)로서  $t^b/t^a$ 를 나타내며  $w(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}})$ 는 유동곡선(flow curve, or work-hardening law)을 나타낸다. 변형에 의한 결함 상수의 변화량은 다음과 같은 식으로부터 얻을 수 있다.

$$\frac{dD}{D} = \frac{d\bar{\epsilon}^a}{\eta^a k_1^a} \left\{ 1 + \rho^a - (1 + \rho^b) \frac{k_2^a}{k_2^b} \right\} \quad (10)$$

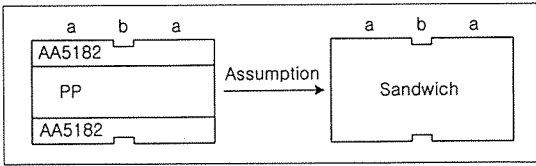


Fig. 2. Cross-section of the modified M-K model for the one material sheet sharing the same macroscopic properties with the sandwich sheet

### 2.3 적용

균일영역에서 일정한 증분 값  $d\bar{\epsilon}''$ 을 부여하고 하중이 일정비례로 증가(proportional loading)한다는 가정에 의해서 stress path  $\alpha''$ ,  $\beta''$ 가 주어지면 주어진 항복곡선과 구성방정식으로부터  $\rho''$ ,  $\gamma''$  및  $\eta''$ 을 얻을 수 있다.

본 논문에서 해석하고자 하는 AA5182 판재는 압연 가공으로 제조하였기 때문에 압연방향에 대하여 다양한 방향성을 갖게 되며, 따라서 이방성을 고려한 항복곡선을 필요로 한다. 알루미늄 합금의 이방성을 표현하는 항복곡선은 많은 발전을 해왔으나 그 중 가장 널리 알려진 Hill[4]의 1948년 식을 본 연구에서는 사용하였다. 또한 이방성을 갖는 AA5182와 폴리프로필렌을 접착하여 만든 샌드위치 판재의 경우에는 Fig. 2에 보여지는 바와 같이 이방성을 갖는 단일 판재로 가정하여 해석하였다.

Hill의 항복곡선은 평면응력 상태의 경우 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{G+H} \left[ F\sigma_2^2 + G\sigma_1^2 + H(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2N\sigma_{12}^2 \right] \quad (11)$$

여기서  $F, G, H, N$ 는 재료의 이방성을 나타내는 물질 상수로서 실험으로 얻어지는 소성 변형비를 통하여 얻을 수 있다. 식 (11)에서 1, 2축은 Fig. 1에서 나타난 것처럼 재료 상에 정의된 직각 좌표축을 의미한다.

항복 곡선으로부터  $\eta$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\eta = \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} = \left[ \frac{G+H}{F\alpha^2 + G+H(1-\alpha)^2 + 2N\beta^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

본 논문에서는 AA5182와 샌드위치의 구성방정식을 탄성영역이 없는 강소성(rigid plasticity)으로 가정하여 유동 법칙(associate flow rule)을 사용하였고 등

방성 항복(isotropic hardening)을 가정하였다. 즉,

$$d\epsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}} \quad (i, j = 1, 2) \quad (13)$$

위의 구성 방정식과 항복 곡선으로부터 변형률 비를 구하면 다음과 같다.

$$\rho = \frac{d\epsilon_2}{d\epsilon_1} = \frac{F\alpha - H(1-\alpha)}{G+H(1-\alpha)} \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{d\epsilon_{12}}{d\epsilon_1} = \frac{N\beta}{G+H(1-\alpha)} \quad (15)$$

식 (12), 식 (14) 및 식 (15)를 통하여 균일 영역에서 모든 미지수들을 구할 수 있다. 결함 영역에서의 미지수들을 구하기 위해서 우선  $\alpha''$ 를 임의의 수로 가정하면 식 (8)로부터  $\beta''$ 을 구할 수 있다.  $\alpha''$ ,  $\beta''$ 를 알면 항복 곡선과 구성 방정식을 알고 있으므로 결함 영역에서의 미지수 값 모두를 알 수 있다. 이렇게 구해진 미지수들이 식 (9)을 만족할 때까지 시행착오 방법(trial and error method)으로 그 값을 구한다. 그 후  $d\bar{\epsilon}''$ 를 증가 시키면서 계산을 반복한다. 계산을 반복하다가  $d\bar{\epsilon}''/d\bar{\epsilon}''$ 이 0에 수렴할 때 계산을 멈추고 그때의 균일 영역에서의 변형률을 얻는다. 각각의 stress path마다 여러 초기 비틀림 각을 주고 위의 계산 시행한 후 얻어진 변형률들 중 최소값을 성형한계도로 선택한다.

마지막으로 본 논문에서는 A5182 판재와 샌드위치 판재와 유동곡선을 다음 식 (16) 형태로 선택하여 해석에 이용하였다.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}''^n \dot{\bar{\epsilon}}''^m \quad (16)$$

여기서  $K$ 는 강도계수,  $n$ 은 가공경화지수,  $m$ 은 변형 속도 민감도를 나타낸다.

### 3. 실험

경량화 측면에서 알루미늄 합금 판재를 사용하는 경우, 현재 자동차의 차체 판재로 많이 사용되고 있는 0.74mm 두께의 스틸 강판과 동일한 굽힘강성을 갖기

위해서 1mm(이하 1.0t) 두께의 알루미늄 합금 판재가 필요하며, 동일 면적에 대하여 약 50%의 중량감소 효과를 얻을 수 있다[5]. 또한 0.2mm(이하 0.2t) 두께의 AA5182 판재를 표면판재로, 0.8mm 두께의 폴리프로필렌을 중심재로 하여 압연 접합한 총 두께 1.2mm(이하 1.2t)로 구성된 샌드위치판재는 동일한 굽힘강성을 지니는 0.74mm 두께의 스틸 강판에 비하여 65%의 중량감소 효과를 얻을 수 있다[6]. 이러한 사실을 바탕으로 본 연구에서는 0.2t AA5182 표면재와 1.2t 샌드위치 판재의 성형성을 평가하는데 초점을 맞추었다. 또한 같은 굽힘강성을 갖는 1.0t AA5182 판재와 1.2t 샌드위치 판재의 성형성을 이론에 의해 비교/평가해 보았다. 본 논문의 이론 적용에 필요한 0.2t AA5182판재와 1.2t 샌드위치 판재의 기본 물성 값들과 성형한계도를 아래와 같은 실험을 통하여 구하였다[7].

### 3.1 기본 물성 측정

#### 3.1.1 샌드위치 판재의 제조

샌드위치 판재는 0.2mm 두께의 AA5182 합금을 표면 판재로 0.8mm 두께의 폴리프로필렌을 중심재로 선택하여 스틸 강판과 동일한 굽힘 강성을 갖도록 제조하였다. 샌드위치 판재는 먼저 fillet 상태의 폴리프로필렌을 압출한 후, 표면 양쪽에 AA5182 판재와 함께 접착제인 EVA(ethylene vinyl acetone) 수지를 이용하여 140℃에서 압연 접합하여 제조하였다. 알루미늄합금 판재는 대한 전선(주)에서 압연한 후 어닐링 열처리를 행한 재료이다. Table 1에 본 논문에서 표면판재로 사용한 AA5182 판재의 화학적 조성을 나타내었다.

#### 3.1.2 인장 실험

이론 식에서 필요한 물성 값들은 가공 경화 지수 및 변형 속도 민감도 값이며 항복 곡선의 표현을 위해서 압연 방향과 일축 인장 축방향이 이루는 3방향(0도, 45도, 90도)의 소성 변형비와 압연 방향으로의 항복 응력 값이 필요하다. 이 값들을 구하기 위해서 상온 인장실험을 행하였는데 인장실험은 ASTM E8에 따라 표점거리 25mm인 판상 시편을 이용하였으며, 500kgf

Table 1. Chemical composition of AA5182 (wt. %)

Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Cr	Ti	Al
4.51	0.34	0.18	0.08	0.05	0.02	0.02	bal.

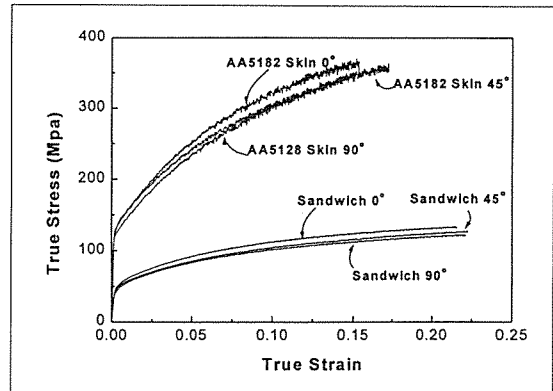


Fig. 3. True stress-strain curves of the AA5182 and sandwich sheets at room temperature for different tensile orientations

Table 2. Mechanical properties of the polypropylene cores, AA5182 skins and sandwich sheets at room temperature for different tensile orientations

Specimens	Angle to R.D.(°)	Y.S.(MPa) 0.2% offset	K(MPa)	n	m
Poly-propylene Cores	0	12.4	45.8	0.29	0.050
	45	12.2	47.6	0.31	—
	90	12.5	48.2	0.32	—
AA5182 Skins	0	133.2	647.7	0.32	-0.006
	45	132.3	615.0	0.31	—
	90	128.7	607.2	0.31	—
Sandwich Sheets	0	50.3	201.7	0.26	0.007
	45	47.0	189.9	0.27	—
	90	46.1	188.0	0.26	—

용량의 Instron 인장시험기를 사용하여 미세한 하중변화를 측정하였다. 이때 시험 초기 변형 속도는  $5 \times 10^{-4}$ /sec를 사용하였으며, 연신율은 extensometer를 사용하여 측정하였다. 또한 성형성 및 이방성 평가에 필요한 기초 자료를 확립하기 위하여 인장시편은 압연방향에 0도, 45도 및 90도 방향으로 가공하여 실험하였으며 각 물성 값은 여러 개의 시편을 측정하여 평균값으로 취하였다. Fig. 3에 AA5182 표면 판재 및 샌드위치 판재의 상온 인장곡선을 각 인장 방향에 따라 나타내었고, Table 2에 인장곡선으로부터 얻어진 각 상수 값들을 나타내었다.

#### 3.1.3 소성변형비 측정

압연재의 평면 이방성을 고려하기 위하여 알루미늄

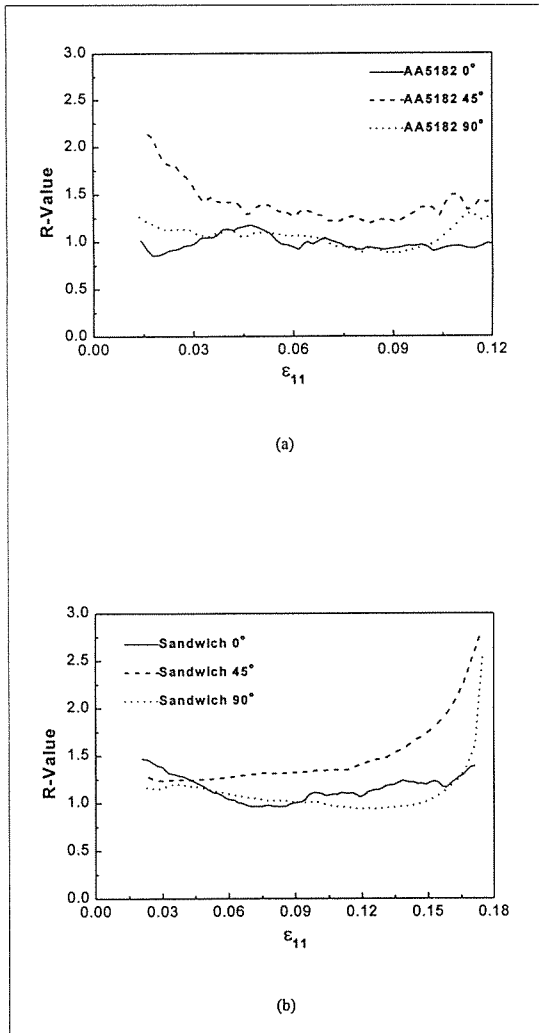


Fig. 4. Measured instantaneous plastic strain ratios(R-values) with respect to the tensile strain for different tensile orientations

Table 3. Instantaneous plastic strain ratios for different tensile orientations

Specimens	Angle to R.D.(°)	Instantaneous Plastic Strain Ratios (R)
AA5182 Skins	0	1.11
	45	1.38
	90	1.03
Sandwich Sheets	0	1.01
	45	1.33
	90	1.16

표면판재와 샌드위치 판재의 인장시편의 폭 및 길이방향에 extensometer를 각각 장착하여 변형률을 측정하였으며, 그 결과로부터 소성변형비를 계산하였다. 일반적으로 소성변형비는 다음 식으로 정의한다.

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_l} \quad (17)$$

여기서  $\epsilon_w$ 는 폭방향 진변형률  $\epsilon_l$ 는 두께방향의 진변형률이다. 그러나 식 (17)은 소성변형비가 변형률에 따라서 일정하다는 가정하에 유도한 것으로 소성변형비가 변화하는 경우에는 이러한 변화를 표현하기 어렵다. 그러므로, 본 재료의 경우는 순간 소성변형비(instantaneous plastic strain ratio)를 사용하였는데, 순간 소성변형비는 순간변형률의 비로서 식 (18)과 같다.

$$R = \frac{d\epsilon_{22}}{d\epsilon_{33}} \quad (18)$$

Fig. 4에 압연방향에 따른 AA5182 판재 및 샌드위치 판재의 소성변형비 변화 측정 결과를 나타내었으며 인장변형률 5~10% 사이에서 평균한 것을 Table 3에 표시하였다.

### 3.1.4 초기 결함 상수 측정

AA5182 판재의 초기 결함 상수를 구하기 위해서 표면 조도기를 사용하여 표면 조도를 측정하였다. 그러나 AA5182는 이방성을 가지고 있기 때문에 각 방향으로 표면 조도가 다르게 측정되었는데 압연방향과 수직 방향(T.D.방향)으로의 표면 조도가 가장 거칠기 때문에 T.D.방향의 표면 조도로부터 초기 결함 크기(initial defect size)를 결정하였다. Fig. 5 (a)는 실험에서 얻어진 T.D.방향으로의 표면 거칠기의 모습이고, Fig. 5 (b)는 표면 조도로부터 초기 결함 상수를 구하는 방법을 나타내었다. 이렇게 얻어진 0.2t AA5182 표면 판재의 초기 결함 크기부터 AA5182 판재와 샌드위치 판재의 초기 결함 상수(initial defect parameter)를 계산하여 Table 4에 표시하였다. 1.0t AA5182 판재와 1.2t 샌드위치 판재의 초기 결함 상수는 그 표면재가 모두 AA5182 판재이므로 초기 결함 크기는 0.2t AA5182와 동일하다고 가정하고 구하였다.

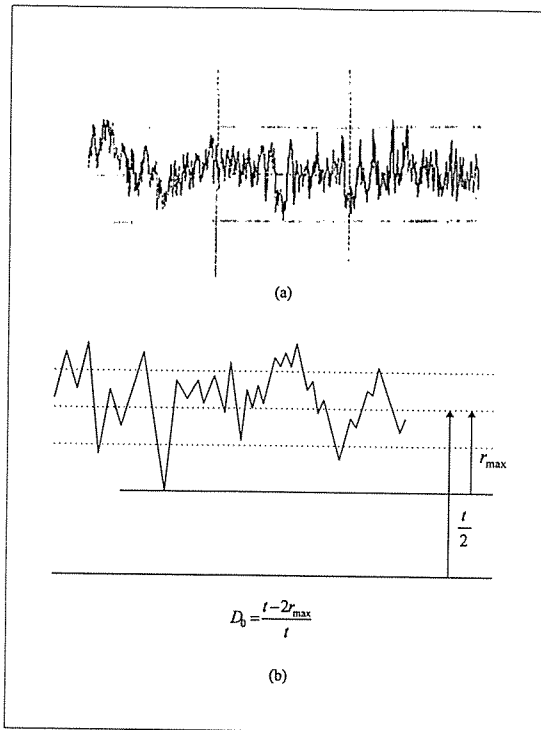


Fig. 5. Determination of initial defect parameter (a) Measured surface roughness of AA5182 (b) Determination of initial defect parameter for surface roughness

Table 4. Initial defect parameter of the AA5182 and sandwich sheets

	$r_{max}$	$t^a$	$D_0$
AA5182 (0.2t)	$1.5 \times 10^{-3} \text{ mm}$	0.2mm	0.9850
AA5182 (1.0t)	$1.5 \times 10^{-3} \text{ mm}$	1.0mm	0.9970
Sandwich (1.2t)	$1.5 \times 10^{-3} \text{ mm}$	1.2mm	0.9975

### 3.2 성형한계도의 측정

실험에 의한 성형한계도는 일반적으로 끝이 둥근 반구형 펀치에 의한 스트레칭(stretching)으로 측정된다. Fig. 6은 본 연구에서 판재의 성형한계도를 구하기 위해 사용한 Erichsen 신장-장비의 구조를 간략하게 보여 주고 있다. 즉, 사각형의 그리드가 마킹된 판재의 주위를 링 형상의 다이로 고정시킨 상태에서 반구형의 끝을 가진 펀치로 파단이 일어나는 순간까지 하중을 가하여 파단부 주위의 삼각형 요소의 변형률을 측정하여 얻을 수 있다. 직경이 50mm인 반구형 펀치를 이용하였으며, 판의 폭과 윤활 조건을 변화시킴으로써 파단 시 파단면 주위의 다양한 변형경로에 따른 주 및 부

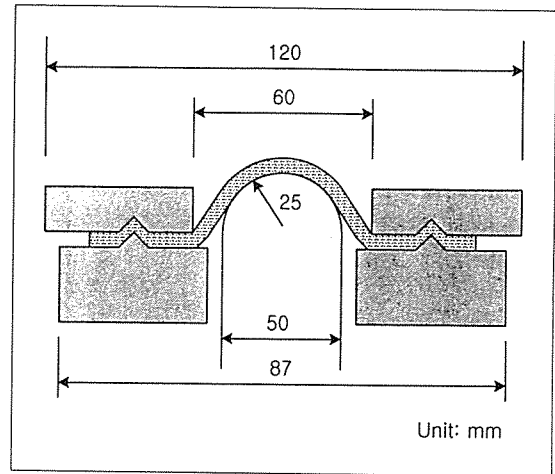


Fig. 6. Schematic view of the punch-die set for stretching-forming to measure formability

변형률을 측정할 수 있었다. 즉, 시편의 크기가 100mm×100mm인 시편을 이용하여 윤활조건을 바꾸어 줌으로써 평면변형-등이축신장 간의 범위에 대한 한계 변형률을, 또한 100mm×80mm ~ 100mm×20mm사이에서 10mm 씩 폭의 크기를 변화시켜 일축 인장-평면변형 영역의 한계 변형률을 측정하였다. 윤활 재료는 graphite를 사용하였으며 시편 가장자리의 누름 압력은 70kN으로 하여 실험하였다. 성형한계도는 부분적인 균일 발생 영역(partially necked region)과 균일 없는 영역(unnecked region)사이에 경계를 그어 구하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 실험 결과와 수정된 M-K이론에 의한 결과 비교

실험을 통하여 0.2t AA5182 판재와 1.2t 샌드위치 판재의 성형한계도를 비교한 결과 Fig. 7에 나타난 바와 같이 샌드위치 판재가 AA5182 판재보다 성형성이 더 우수하게 평가되었다. 또한 수정된 M-K이론에 의해 0.2t AA5182 판재와 1.2t 샌드위치 판재의 성형한계도를 해석한 결과 역시 Fig. 8과 같이 실험으로 측정한 결과와 유사한 경향으로 샌드위치 판재가 AA5182 판재보다 성형성이 더 우수한 것으로 평가되었다.

실험 값과 이론 값을 비교해 본 결과 실험에서 구한 한계 변형률 보다 이론 값이 상당히 높게 나왔는데, 이

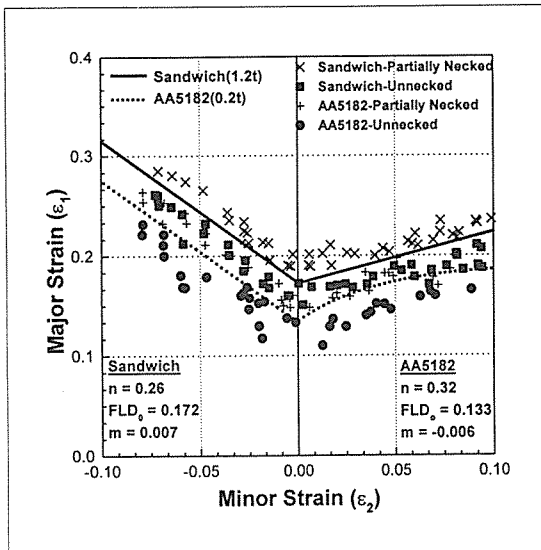


Fig. 7. Measured FLDs of the 0.2t AA5182 and 1.2t sandwich sheets

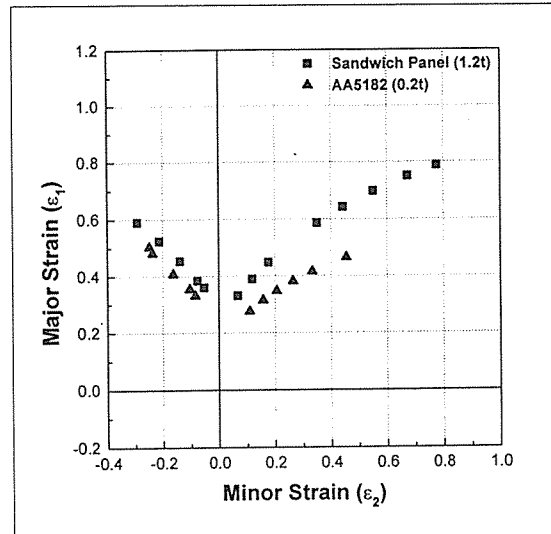


Fig. 8. Predicted FLDs of the 0.2t AA5182 and 1.2t sandwich sheets

것은 여러 가지 원인 중에 크게 두 가지로 구분해서 설명할 수 있다. 첫째, 실제 측정 실험은 out-of-plane 상에서 곡률 구배로 인한 네킹이 일어난 반면 이론적인 해석에서는 in-plane 상에서 초기 결함영역에 의해 네킹이 발생한다고 가정하였으므로 곡률 구배가 변형량으로 흡수 되었기 때문이다. 둘째로 폴리프로필렌 판재의 경우 금속 재료와 달리 아직까지 항복 곡선이 적절하게 정의되지 못한 상태이므로 복합 샌드위치 판재를 단일 금속 판재와 동일한 항복 곡선을 갖는다고 가정하여 해석하였는데, 이들 항복 곡선은 샌드위치 판재의 성질과 완벽하게 부합하지 못하므로 정량적인 면에서 오차가 발생할 수 있다는 점이다. 이러한 가정을 극복하기 위해서는 실험적으로는 in-plane 상에서 성형성을 측정하여 이론적인 해석 결과와 비교하여야 하며, 이론적인 해석 측면에서는 샌드위치 판재의 성형성을 각 구성 판재 층 각각에 맞는 항복 곡선으로 정의하고 실제 재료와 동일한 기계적 물성을 부여하여 계산하여야 한다.

#### 4.2 샌드위치 판재의 성형성 의존 인자 고찰

일반적으로 M-K 이론에서 성형한계도에 영향을 미치는 인자는 가공 경화 지수, 변형 속도 민감도, 항복 곡선의 모양 및 초기 결함 상수가 있다. 성형한계도에 관한 다른 연구에 의하면 모든 조건들을 동일하게 부

여하였을 때 가공 경화 지수가 클수록, 변형 속도 민감도가 클수록, 초기 결함 상수가 클수록 성형한계도가 높게 나타난다. 또한 항복곡선의 등이축신장 점에서 평면변형 점까지의 모양과 일축신장 점에서 평면변형 점까지의 모양이 완만할수록 성형한계도는 높게 나타난다[8-10]. 이러한 사실을 바탕으로 Fig. 7과 Fig. 8에서 1.2t 샌드위치 판재가 0.2t AA5182 판재보다 성형한계도가 높게 나타난 이유를 설명할 수 있다. 동일한 형태의 항복곡선을 사용하였으므로 항복곡선의 영향이 미미하다고 가정하면 가공경화지수는 AA5182 판재가 크지만 변형속도민감도 및 초기결함상수는 샌드위치 판재가 크기 때문에 샌드위치 판재의 성형한계도가 높게 나타난 것이다. 이것은 샌드위치 판재의 구성 판재인 폴리프로필렌이 샌드위치 판재의 변형속도민감도와 초기결함상수를 AA5182 판재보다 크게 하는데 기여하였기 때문이다.

폴리프로필렌이 샌드위치 판재의 성형성에 미친 영향을 구체적으로 고찰을 위해서 유사한 두께의 AA5182 판재와 샌드위치 판재의 성형성을 비교해 보았다. 금속재료의 성질은 압연공정에 따른 많은 변수들의 영향 때문에 실험적으로는 0.2t AA5182 표면재와 동일한 물성을 갖는 1.0t AA5182 판재를 제조하기 어려우므로, 0.2t AA5182 표면재와 같은 물성의 1.0t AA5182 판재를 가정하고 수정된 M-K 이론을 적용하

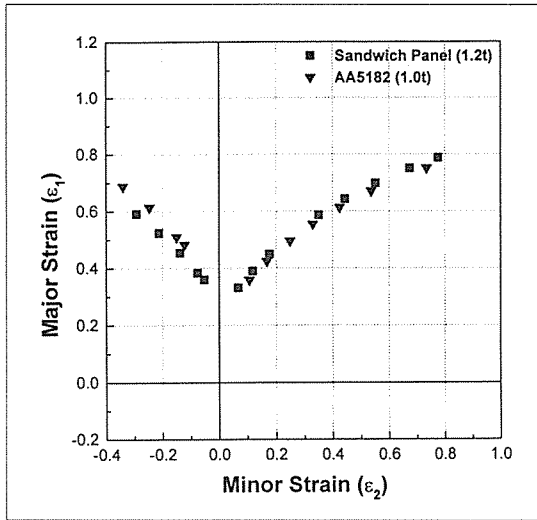


Fig. 9. Predicted FLDs of the 1.0t AA5182 and 1.2t sandwich sheets

여 해석하였다. 여기서 1.0t AA5182 판재를 선택한 이유는 1.2t 샌드위치 판재와 유사한 두께를 갖고, 앞서 언급한대로 스틸 강판과 굽힘강성이 동일하면서 경량화 효과가 있는 두께이기 때문이다. 해석 결과, Fig. 9와 같이 1.0t AA5182 판재와 1.2t 샌드위치 판재의 성형한계도는 주 변형률과 부 변형률 값들이 서로 유사하게 나타났다. 이러한 해석상으로는 폴리프로필렌의 물성은 샌드위치 판재의 성형성 향상에 큰 영향을 주지 못한다는 것을 알 수 있었다. 그 판단의 근거는 다음과 같다. Table 2에서 살펴보면 폴리프로필렌의 변형속도민감도는 AA5182 판재 보다 커서 AA5182 판재에 비해 샌드위치판재의 변형속도민감도를 높인데 기여하였지만 가공경화지수는 AA5182보다 작아서 AA5182 판재에 비해 샌드위치판재의 가공경화지수를 낮추는데 기여하였다는 것을 알 수 있다. 즉 폴리프로필렌에 의해서 샌드위치판재의 변형 속도 민감도는 높아지지만 가공 경화 지수는 낮아짐으로써 두 인자의 성형성에 미치는 영향이 상쇄되어 성형성 향상에 기여를 하지 못한 것으로 평가 된다. 또한 이것은 0.2t AA5182 판재보다 1.2t 샌드위치판재의 성형성이 우수하게 나타난 것이 폴리프로필렌에 의해서 샌드위치판재의 물성이 향상된 결과라기보다 초기결함상수가 커진 결과라고 판단하는데 근거가 된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 0.2mm 두께의 AA5182 판재와 1.2mm 두께의 AA5182/ PP/AA5182 샌드위치 판재의 성형한계도를 수정된 M-K이론을 이용하여 해석하였으며, 실험을 통하여 측정된 값과 비교/분석하였다. 실험을 통하여 측정된 성형한계도 상에서는 1.2t 샌드위치 판재가 0.2t AA5182 판재 보다 성형성이 우수한 것으로 나타났으며, 수정된 M-K이론에 의해 예측한 결과와 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 이렇게 성형성이 우수하게 평가된 요인을 구성 판재인 폴리프로필렌이 샌드위치 판재의 물성과 두께에 미친 영향을 바탕으로 분석하였다. 측정치와 더 잘 부합하는 해석 결과의 구현, 특히 항복 곡선의 차이에 의한 영향을 조사하기 위해서는 AA5182 판재와 샌드위치 판재의 구성 판재인 폴리프로필렌 판재 및 이들의 조합으로 이루어진 샌드위치 판재의 물성을 표현할 수 있는 항복 곡선의 개발이 필요하며, 또한 이들 구성 판재의 기계적 성질을 모두 고려하여 계산하는 성형한계도 계산법 개발이 필요하다.

## 후 기

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Z. Marciniak and K. Kuczynski, "Limit Strains in the Processes of Stretch-Forming Sheet Metal.", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 9, 1967, pp. 609-625.
2. A. Barata Da Rocha, F. Barlat, and J. M. Janlinier, "Prediction of the Forming Limit Diagrams of Anisotropic Sheets in Linear and Non-linear Loading.", Materials Science and Engineering, Vol. 68, 1984-1985, pp. 151-164.
3. F. Barlat., "Crystallographic Texture, Anisotropic Yield Surface and Forming Limits of Sheet Metals.", Materials Science and Engineering, Vol. 91, 1987, pp. 55-72.

4. R. Hill, *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford, London, 1950, pp. 317-320.
5. A. K. Vasudevan and R. D. Doherty, "Aluminum Alloys-Contemporary Research and Applications.", 1989, pp. 539-550.
6. E. W. Veenstra, "Aluminum-Plastic-Aluminum Sandwich Sheet for Maximum Weight Reduction in Body Panels.", SAE, 1993, 930706, pp. 1-10.
7. 김기주, 신광선, 알루미늄 샌드위치 판재의 특성평가, 제5회G7차세대 자동차기술 Workshop 논문집, KATECH, 1997, pp. 639-647.
8. Z. Marciniak, K. Kuczynski and T. Pokora, "Influence of the Plastic Properties of a Material on the Forming Limit Diagram for Sheet Metal in Tension", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 15, 1973, pp. 789-805.
9. W. F. Hosford (1993), "The Mechanics of Crystals and Textured Polycrystals", Oxford University Press, London, 1993, pp. 157-162.
10. 최시훈, "알루미늄 합금 판재의 변형집합조직 예측 및 이방성에 미치는 집합조직의 영향에 관한 연구", 공학박사학위논문, 서울대학교, 1998, pp. 188-195.