

2축 십자형 시편을 이용한 알루미늄 합금 판재의 항복곡면에 대한 연구

신효동¹ · 박진기² · 박춘달¹ · 김영석[#]

Study on the Yield Locus of Aluminum Alloy Sheet Using Biaxial Cruciform Specimens

H. D. Shin, J. G. Park, C. D. Park, Y. S. Kim

(Received June 24, 2009 / Revised July 2, 2009 / Accepted July 9, 2009)

Abstract

The applications of the aluminum alloy sheets to the auto-body panels are dramatically increasing for weight reduction of the automobiles. However, low formability of the aluminum alloy sheet compared to the steel sheet can be obstacles in tool manufacturing processes. Therefore, many of yield criteria for the anisotropic materials such as the aluminum alloy sheet have been observed. In this study, the biaxial tensile test and FLD test for the aluminum alloy sheet are performed. The results are compared with Hill's 1948 and Hill's 1990 models by means of theoretical predictions. Finite element analysis was also performed using the proposed method for the real panel.

Key Words : Yield Locus, FEM, Aluminum Alloy Sheet

1. 서 론

심각한 환경오염과 자동차 수요의 급격한 증가에 따른 에너지 자원의 고갈로 인해 이미 선진국에서는 자동차 연비 및 배기가스의 규제를 한층 심하게 강화하고 있는 실정이라서 자동차 재료의 개발동기도 단순한 연비 향상이라는 수준을 넘어 환경규제에 따른 경쟁력 향상을 위한 새로운 기술개발이 자동차 산업에서 절실히 요구되고 있다.

특히, 소재의 경량화는 엔진효율을 높여 자동차의 성능향상을 극대화시키고 그로 인해 연비향상을 도모할 수 있어서, 결국 소재의 경량화는 환경오염방지와 연료절감에 가장 적합하고 효과적인 방법이다[1~4]. 자동차용 내외 판넬에 사용되는 판재의 경량화 추세에 대응하고 이에 따른 성형공

정 문제점을 최소화하기 위해 유한요소해석을 이용한 성형해석 기술이 자동차 산업 현장에서 널리 이용되고 있다. 자동차용 판재 소재는 냉간 압연 제조공정에서 생산되기 때문에 소성 이방성 특성(anisotropic property)을 갖는다. 이 소성 이방성 특성의 정확한 거동 묘사는 프레스 성형공정의 최적화에 필수적이며 다양한 소성이방성 모델이 제안되어 있다[5]. 일반 강판 성형해석에서 주로 사용되는 Hill's 1948 이론[6]은 소성 이방성 계수 R 값이 1.0보다 작은 비철금속에 대해서는 평면 변형 인장과 등 2축 인장에서의 시험결과를 항상 과소평가 하는 것으로 보고되고 있다. 이런 비정상거동(anomalous behavior)현상으로 인하여 성형해석이 까다로운 것으로 알려져 있다[7]. 비철금속의 비 정상거동을 예측하기 위해 비2차 평면 이방성

1. 대구기계부품연구원 차세대금형기술혁신센터

2. 경북대학교 기계공학부

교신저자: 경북대학교 기계공학부

E-mail : caekim@knu.ac.kr

Table 1 Standard chemical composition of test material (mass %)

	Si	Fe	Cu	Nn	Mg	Zn	Al
AL3004-O	0.2	0.4	0.2	1	0.9	0.01	Bal

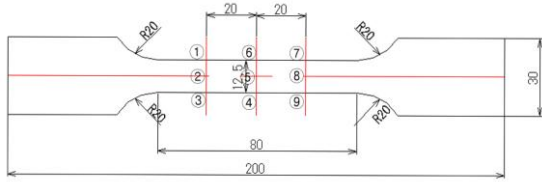


Fig. 1 Specimen for uniaxial tensile test

Table 2 Mechanical properties of the material

Tensile direction (°)	E (GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	c^*	n^*	α^*	r^{**}
0	64.7	57.49	353.9	0.306	0.0020	0.65
45	61.3	55.99	317.7	0.286	0.0015	0.84
90	55.3	57.02	322.4	0.290	0.0018	0.57

* Approximated using $\sigma = c(\alpha + \epsilon^p)^n$ for $\epsilon^p = 0.002 \sim 0.1$

**Measured at uniaxial plastic strain $\epsilon^p = 0.1$

항복조건식인 Hill's 1990 이론[8]을 제안되었으나 관련한 재료물성 및 항복조건에 필요한 변수를 결정하기 위한 실험과정이 어려워 알루미늄 합금 성형품의 파단 및 주름 등의 전산모사 예측은 난제로 남아 있다.

본 연구에서는 알루미늄 합금 판재의 항복이론을 검증하기 위하여 십자형 시편을 이용한 2축 인장시험을 수행하였다. 등가 소성일의 원리를 적용하여 항복곡면을 도출하였다. 단축 인장시험과 성형성 시험을 수행하여 소성이방성 계수값과 성형한계선을 구하였다. 이 데이터를 기반으로 하여 유한요소해석을 수행 후 알루미늄 합금 실 성형품과 비교하여 성형해석 정도를 알아보고자 한다.

2. 기계적 특성 평가

2.1 단축 인장시험

알루미늄 합금판재의 기본적인 기계적 물성값을 추출하기 위하여 Fig. 1 나타낸 KS-13B 시편을 이용하여 단축인장시험을 하였다. 사용된 소재는 AL3004-O 0.6mm 소재이며, 재료의 화학조성은 Table 1에 나타내었다. 공칭 변형률 7%까지 인장

하여 이방성 계수를 측정하였다. 각 방향별로 인장시험을 하여 n승경화 강소성 재료 모델인 Swift 커브피팅(curve fitting)하여 Table 2에 나타내었다. 또한 각 방향별 응력-변형률 선도(Stress-strain curve)를 Fig. 2에 나타내었다.

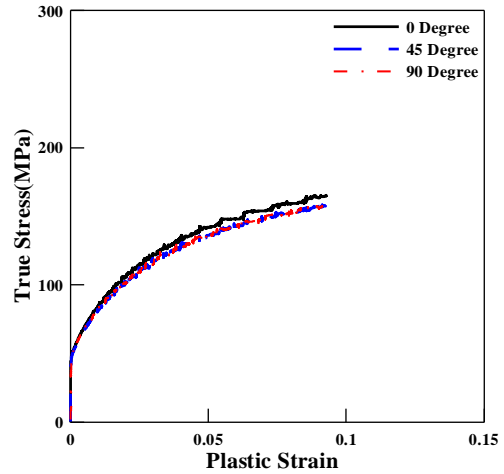
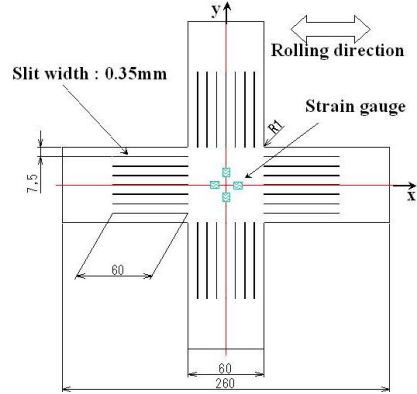


Fig. 2 Comparison of different directions

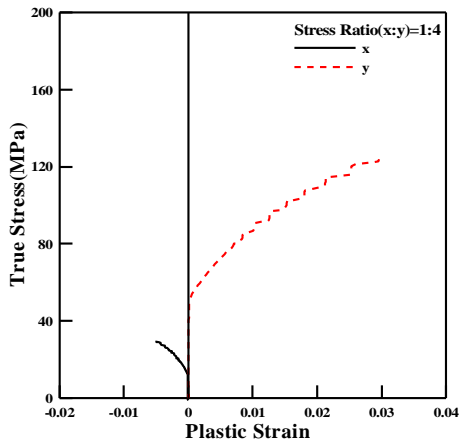


(a) cruciform specimen

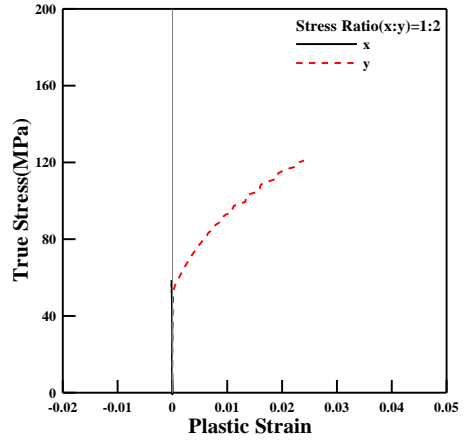


(b) biaxial tensile tester

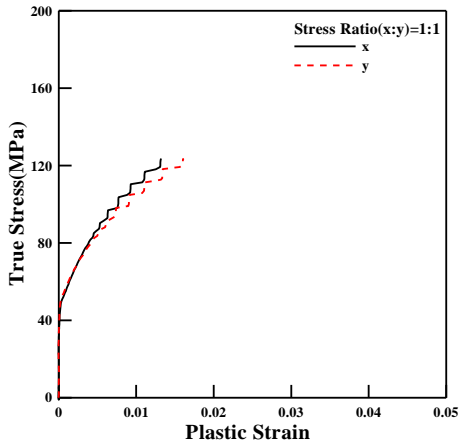
Fig. 3 Experimental apparatus for biaxial tensile test



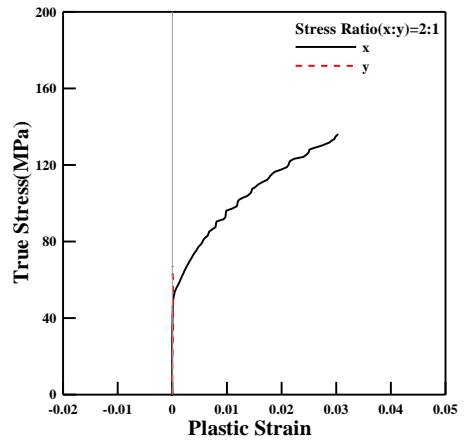
(a) stress ratio(x:y)=1:4



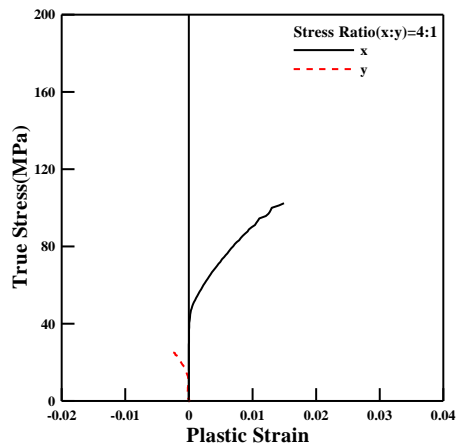
(b) stress ratio(x:y)=1:2



(c) stress ratio(x:y)=1:1



(d) stress ratio(x:y)=2:1



(e) stress ratio(x:y)=4:1

Fig. 4 Stress-strain curve at each stress ratio

Table 2 Plastic works for each plastic strains

ϵ^p_0	0.0005	0.002	0.02
W	0.0245	0.105	1.164

Table 3 Equivalent stresses for each equivalent plastic strains(unit : MPa)

Stress ratio ϵ^p_0	0.0005		0.002		0.02	
	X	Y	X	Y	X	Y
1:0	49.9	0	57.4	0	105.9	0
4:1	53.6	13.9	61.8	15.7	112.5	27.9
2:1	53.5	27.7	62.2	31.9	115.4	57.5
1:1	49.2	50.3	56.7	57.8	105.3	106.3
1:2	27.3	56.2	31.3	64.5	54	111.7
1:4	12.1	53.3	13.9	60.5	25.8	108.8
0:1	0	49	0	57	0	102

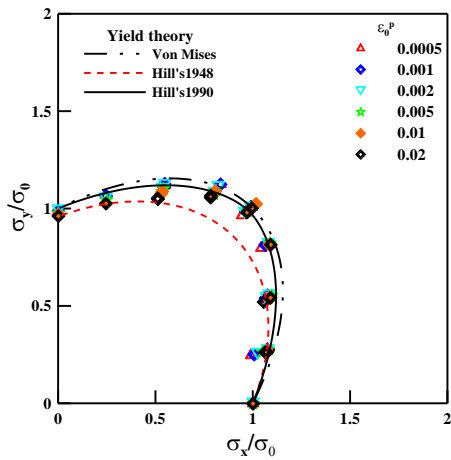


Fig. 5 Comparison of experimental data with theoretical yield locus

2.2 2축 인장시험

Fig. 3 에 나타낸 십자형 시편[9]과 경복대가 개발한 2 축 인장시험기를 이용하여 X 축과 Y 축의 응력비를 1:4, 1:2, 1:1, 2:1, 4:1 로 달리하여 시험을 하였다. 변형률은 시편의 중앙에 붙힌 스트레인 게이지(Strain gage)를 통해 측정하였으며, 응력-변형률 선도를 Fig. 4 에 나타내었다.

2.3 항복곡면 작성

단축 응력-변형률 선도로부터 소성일[10]을 계



Fig. 6 Specimens after the formability test

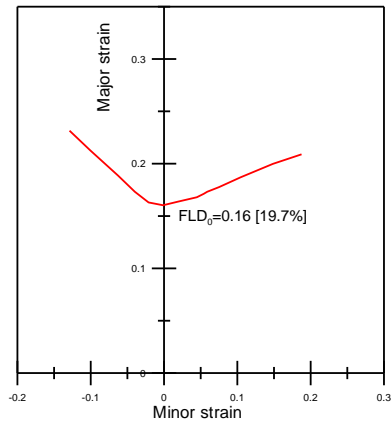


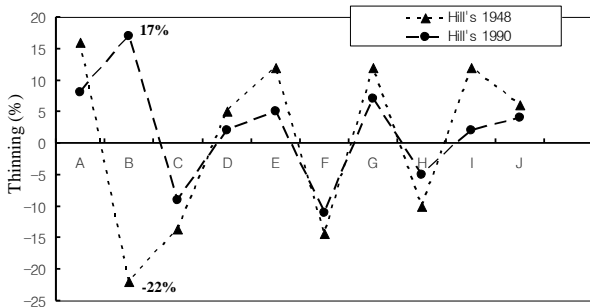
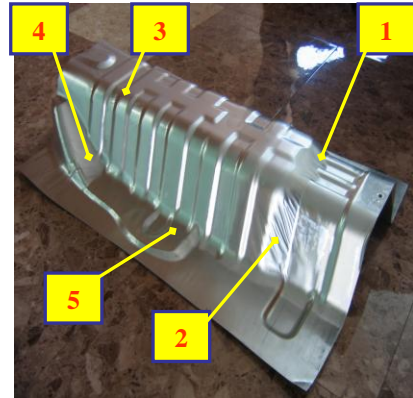
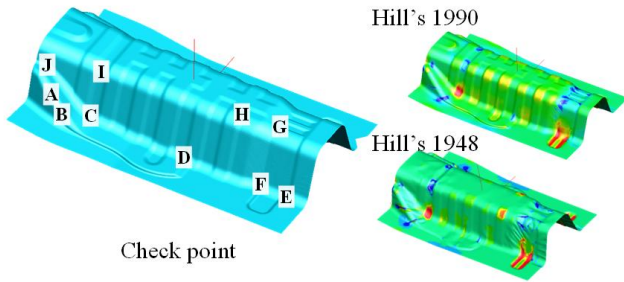
Fig. 7 Forming limit diagram for aluminum alloy

산하여 각 등가 소성 변형률에 따른 소성일을 Table 2 에 나타내었다. Table 3에는 단축인장의 소성일을 기준으로, 등가 소성 변형률에 따른 2축 응력값을 나타내었다. Fig. 5은 Table 3을 이용하여 소성 변형률 σ_0 로 무 차원화 시켜 von Mises, Hill's 1948, $m=1.8$ 일 때 Hill's 1990의 항복 조건식과 비교하여 나타내었다.

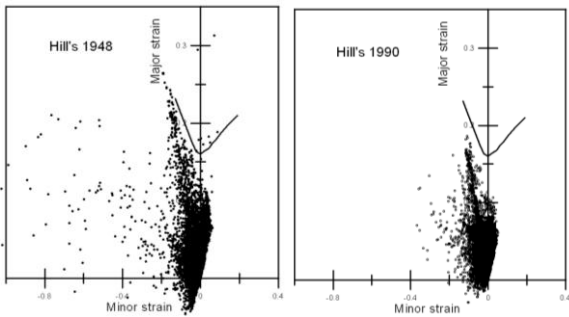
Hill's 1990이론에서 예측 변수[11]는 비2차 항복 파라미터값을 변화시킴에 따른 것으로 본 실험에 사용된 알루미늄 합금 판재의 소성 항복거동은 Fig. 5에서 나타나 것과 같이 $m=1.8$ 일 때 Hill's 1990의 조건식에서 가장 근사하게 표현된다.

3. 성형한계도(FLD) 도출

성형한계도를 도출하기 위하여 성형한계 시험을 실시 하였다. 일반적인 성형성 시험에서는 시편을 파단시키기 위하여 비드를 고정 하나 성형성이 떨어지는 알루미늄 판재 실험시 비드부에 파단이 발생하므로 비드를 제거하고 시험을 수행 하였다. 시험에 사용된 시편폭은 25, 50, 75, 100,



(a) thinning at critical areas



(b) strain distributions with FLD

Fig. 8 Comparison of FEM simulation results using Hill's 1948 and Hill's 1990 yield theory

125, 130, 135, 150, 200mm이며 변형률을 측정하기 위하여 직경이 2.54mm(0.1")인 원형그리드를 전기 화학적 에칭법을 사용하여 마킹 하였다. FLD성형 후 시편사진은 Fig. 6과 같다. 등이축변형을 얻기 위해 폭200mm의 시편에 윤활처리를 하였다. Fig. 7은 성형 전후의 변형률을 측정하여 정리한 결과이다. 성형한계도 상에서 최소점을 나타내는 평면 변형경로의 FLD_0 가 공칭변형률 기준으로 19.7% (진변형률 0.16)임을 알 수 있다.

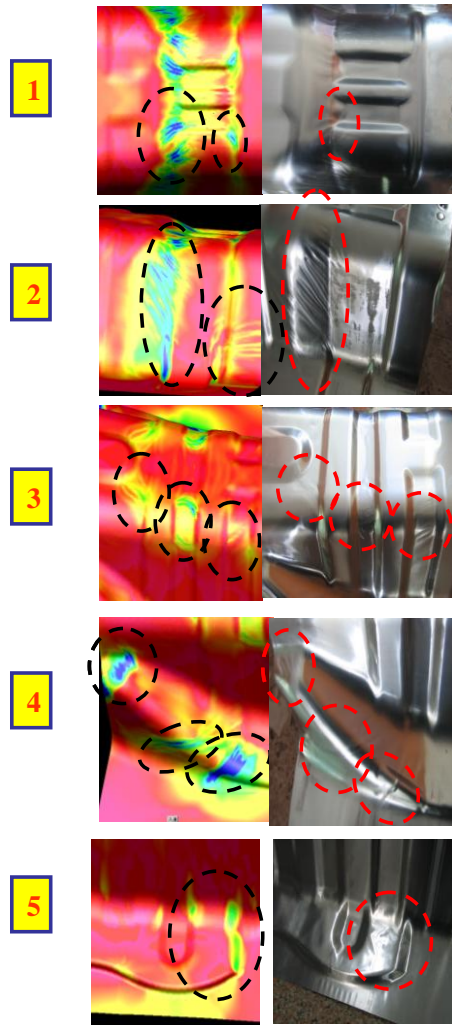


Fig. 9 Comparison of FEM simulations using Hill's 1990 yield theory and rear panel stamping

4. 성형해석 및 결과

앞에서 구한 데이터를 이용하여 해석 정도를 검증하기 위하여 자동차 알루미늄 샤시 부품인 Heat Protector Main를 선정하여 성형해석을 수행하다. 성형해석은 PAM-STAMP 2G[12]을 이용하였다. 블랭크의 초기 요소크기는 8mm이고 적응요소(Adaptive mesh)를 4level 적용하여 최종 성형 완료된 상태에서 요소는 1mm 크기가 되도록 하였다. 해석에 사용된 인자들은 홀딩속도 2m/sec, 성형속도 5m/sec, 벌칙상수(Penalty scale factor) 0.03, 두께방향 적분점수(Gauss point) 5, 쿨롱 마찰계수(Coulomb friction coefficient)는 0.1를 사용하였다. 항복 조건식은 Fig. 5의 결과검증을 위하여 Hill's 1948과 Hill's 1990를 각각 적용하여 해석을 수행 하였다. Fig. 8은 Hill's 1948과 Hill's 1990 항복조건식을 적용한 두께 변형률(Thinning) 분포와 FLD 분포를 비교한 해석결과이다. 두께 변형률(Thinning) 분포는 전체적으로 유사한 경향을 나타내고 있지만 Fig. 8(a)의 특정한 부위[B]에서 +17%와 -22% 상반되는 결과를 나타내고 있다. Fig. 8(b)의 FLD분포에서도 성형한계선(FLC) 넘어 파단이 예상되는 부위와 부 변형률(Minor strain) -0.4 이하의 변형률이 발생하여 Hill's 1948 항복조건식이 해석 정도가 떨어짐을 알 수 있다. Fig. 9는 Hill's 1990 항복조건식 적용 해석결과와 실 판넬을 비교한 결과이다. 실 판넬의 주름부위와 해석 결과 부위가 동일한 것을 나타내고 있다.

5. 결론

(1) 알루미늄 합금판재의 인장시험 및 성형성 시험을 수행하여 기계적 물성값을 구하였다. 2축 인장시험에서는 알루미늄 합금 판재의 소성 항복 거동은 $m=1.8$ 일 때 Hill's 1990의 항복조건식이 가장 근사하게 표현됨을 확인 할 수 있었다.

(2) Hill's 1948과 Hill's 1990 항복조건식 및 도출된 데이터를 이용하여 유한요소해석을 수행하여 결과를 실 판넬과 비교하였다. Hill's 1990 항복조건식을 적용한 해석결과가 실 판넬과 잘 일치함을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 얻어진 기계적 물성값을 데이터베이스화 함으로 알루미늄 부품개발에 효과적으로 활용 할 수 있으리라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Y. S. Kim, State of art report on aluminum sheet forming, Kor. Soc. Automotive Eng., Vol. 14, No. 1, pp. 3~12.
- [2] K. S. Kim, K. D. Hur, 2009, Characteristics of Bending Deformation in Aluminum Rectangular Bar by Press Die, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 1, pp. 13~19.
- [3] D. Y. Kim, W. N. Lee, J. H. Kim, C. M. Kim, K. S. Chung, 2009, Experimental Formability Investigation for FSW Sheets with Respect to Base Material's Directional Combination, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 1, pp. 73~79.
- [4] D. Li, A. Ghosh, 2003, Tensile deformation behavior of aluminum alloys at warm forming temperatures, Mat. Sci. Eng., Vol. 352A, pp. 279~286.
- [5] Y. S. Kim, C. Kim, S. Y. Lee, S. Y. Won, S. M. Hwang, 2003, Forming limits for anisotropic sheet metals, JSME Int. J., Vol. 46A, No. 4, pp. 627~634.
- [6] R. Hill, 1950, The Mathematical Theory of Plasticity, Clarendon Press, Oxford.
- [7] Y. S. Kim, 2009, Theory of Engineering Plasticity, Sigma Press
- [8] R. Hill, 1990, Constitutive Modeling of Orthotropic Plasticity in Sheet Metals, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 38, No. 3, pp. 405~417.
- [9] T. Kuwabara et al. 1998, Measurement and analysis of differential work hardening in cold-rolled steel sheet under biaxial tension, J. Mater. Process. Tech, Vol. 80-81, pp. 517~523.
- [10] J. G. Park, Y. S. Kim, T. Kuwabara, B. S. You, 2005, Plastic Deformation Characteristic of AZ31 Magnesium Alloy Sheet, Trans. Mater. Process., Vol. 14, pp. 520~526.
- [11] K. B. Lee, S. Y. Lee, Y. T. Keum, 1997, Sectional Forming Analysis of Stamping Processes for Aluminum Alloy Sheet Metals, J. Kor. Soc. Technol. Plast., Vol. 6, No. 4.
- [12] PAM-STAMP 2G 2008, User's Manual.