

마찰교반용접(FSW) 된 알루미늄 합금(AA6111-T4, AA5083-H18) 및 DP강 판재의 인장 시험시 파단 현상 해석

박상준¹. 엄기문². 마닝¹. 안강환¹. 정경환¹. Chongmin Kim³.
Kazutaka Okamoto⁴. R. H. Wagoner⁵. 정관수^{1,*}

Analysis of Failure Phenomena in Uni-axial Tension Tests of Friction Stir Welded AA6111-T4, AA5083-H18 and DP-Steel

S. Park, K. Um, N. Ma, K. Ahn, K. H. Chung, C. Kim, K. Okamoto, R. H. Wagoner, K. Chung

Abstract

Failure phenomena in uni-axial tension test were experimentally and numerically investigated for AA6111-T4, AA5083-H18 and DP-Steel, which were friction-stir welded with the same and different thicknesses. Forming limit diagram(FLD) was measured using hemispherical dome stretching tests for base materials and also predicted by Hill's bifurcation and M-K theories for welded areas. Finite element simulations well predicted hardening behaviors, failure locations as well as failure patterns for the uni-axial tension tests especially utilizing very fine meshes and FLD along with stress softening.

Key Words : AA6111-T4, AA5083-H18, DP-Steel, Friction Stir Welding(FSW), Anisotropic yield function, Forming limit diagram(FLD), Hill's bifurcation theory, M-K theory, Strain rate sensitivity

1. 서론

오늘날 자동차 산업은 차량 경량화를 위한 기술 개발에 최선을 다하고 있다. 차량 경량화를 위해 상대적으로 가벼운 알루미늄 합금이나 또는 고강도 재료로서 두께를 얇게할 수 있는 DP강 판재를 이용하여 차체를 설계함으로써 최근 우려되는 환경오염 문제를 해결하고 연료 효율을 개선하고자 하는 노력이 계속되고 있다. 아울러, 차체를 설계함에 있어 반드시 요구되는 용접 기술의 발달로 마찰교반용접(Friction Stir Welding)과 같은 새로운 기술도 개발되었다. 이에 본 연구에서는 이와 같이 새롭게 개발된 재료와 용접 기술을 이용하여 차량을 설계하고 차체를 성형할 때 고려해야 할 성형성에 관련된 연구의 일환으로 일축

인장 시험에서 관찰되는 파단 현상을 전산모사하여 해석하였다.

2. 이론

2.1 항복 함수

알루미늄 합금 판재(AA6111-T4, AA5083-H16) 및 DP 강 판재의 초기 이방성 소성 거동을 표현하기 위해 Barlat 등에 의해 제안된 항복 응력 함수 Yld2004-18p[1]을 사용하였고, 이 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$f^{VM} = \{\Phi/4\}^{1/M} = \bar{\sigma}$$
$$\Phi = |\tilde{S}_I - \tilde{S}_I^M| + |\tilde{S}_I - \tilde{S}_II^M| + |\tilde{S}_I - \tilde{S}_III^M| + |\tilde{S}_II - \tilde{S}_I^M| + |\tilde{S}_II - \tilde{S}_II^M| + |\tilde{S}_II - \tilde{S}_III^M| + |\tilde{S}_III - \tilde{S}_I^M| + |\tilde{S}_III - \tilde{S}_II^M| + |\tilde{S}_III - \tilde{S}_III^M| \quad (1)$$

1. 서울대학교 재료공학부
2. ㄹ르노 삼성 자동차 연구소
3. General Motors R&D Center
4. Hitachi America Ltd.
5. Ohio State University
* 교신저자:저능형텍스타일연구센터, E-mail:kchung@snu.ac.kr

식(1)에서 $\bar{\sigma}$ 는 유효 응력(effective stress)이며, \bar{S}'_k 와 \bar{S}''_k ($k=I, II$)는 각각 \bar{s}' 와 \bar{s}'' 의 주축값(principal value)이며, \bar{s} (\bar{s}' or \bar{s}'')는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}\bar{s}' &= \mathbf{C}' \cdot \mathbf{s} = \mathbf{C}' \cdot \mathbf{T} \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{L}' \cdot \boldsymbol{\sigma} \\ \bar{s}'' &= \mathbf{C}'' \cdot \mathbf{s} = \mathbf{C}'' \cdot \mathbf{T} \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{L}'' \cdot \boldsymbol{\sigma}\end{aligned}\quad (2)$$

위에서 \mathbf{C}' 와 \mathbf{C}'' 는 (따라서 \mathbf{L}' 와 \mathbf{L}'') 비등방계수를 포함하는 행렬이고 \mathbf{T} 는 코시(Cauchy) 응력 텐서 $\boldsymbol{\sigma}$ 와 데비에이터 응력 텐서 \mathbf{s} 의 선형 변환 행렬이다.

2.2 성형 한계도

모재의 성형 한계도는 반구의 돔 스트레칭(hemispherical dome stretching) 실험에 의해 측정하였고, 용접부의 경우에는 실험이 불가능하므로 Hill의 Bifurcation 이론[2]과 M-K이론[3]을 이용하여 계산하였다. 결과는 Fig. 1에 선택적으로 제시하였다.

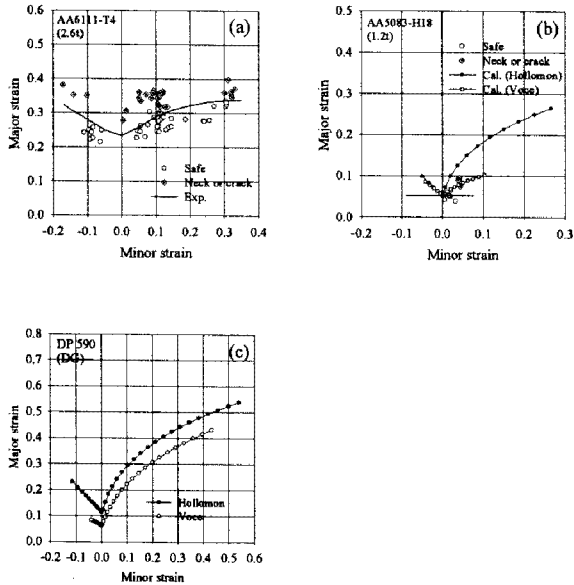


Fig. 1 FLD : (a) AA6111-T4 (2.6t), (b) AA5083-H18 (1.2t), (c) DP-Steel (DG)

3. 소재 물성 평가

3.1 인장 실험

인장 실험은 KS B 0801 규격에 맞는 시편을 제작하여 실시하였으며, 용접된 시편의 경우 용접 부위에 존재하는 열영향부(Heat Affected Zone)를

고려하기 위하여 등-변형률 조건과 힘의 평형 조건을 가정한 혼합규칙(Rule of Mixture)을 이용하였다. 인장 실험 결과 Fig. 2와 같은 경화 곡선을 얻는다.

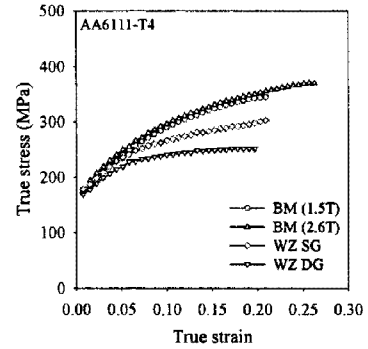


Fig. 2 (a) Hardening curves of AA6111-T4

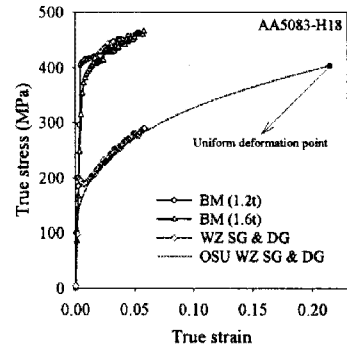


Fig. 2 (b) Hardening curves of AA5083-H18

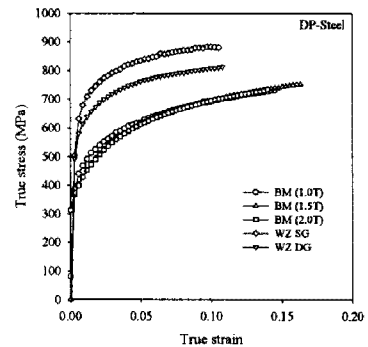


Fig. 2 (c) Hardening curves of DP-Steel

3.2 DP강의 변형률 속도 측정

DP강의 경우, 변형률 속도에 민감한 재료이므로 실험을 통해 변형률 속도 민감 상수 $m=0.009$ 임을 다음식에 의해 확인하였다.

$$\begin{aligned}\sigma &= K \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \\ m &= \frac{\ln(\sigma_2/\sigma_1)}{\ln(\dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1)}\end{aligned}\quad (3)$$

4. 실험 및 고찰

4.1 인장 실험

인장 실험은 모재 및 용접 시편의 종류에 따라 Table 1에 표시한 것과 같이 총 18가지 경우에 대하여 실시하였고, 모재의 경우에는 두께가 얇은 것과 두꺼운 것, 그리고 평행하게 용접된 시편과 수직방향으로 용접된 시편은 각각 같은 두께로 된 것과 다른 두께로 된 것을 실험 하였다.

Table 1 Types of uni-axial tensile test(total 18 cases)

		AA5083-H18	AA6111-T4	DP-Steel
Base	Thin	1.2t	1.5t	1.5t
	Thick	1.6t	2.6t	2.0t
Weld	SG(long)	1.6t-1.6t	1.5t-1.5t	2.0t-2.0t
	SG(trans)	1.6t-1.6t	1.5t-1.5t	2.0t-2.0t
	DG(long)	1.2t-1.6t	1.5t-2.6t	1.5t-2.0t
	DG(trans)	1.2t-1.6t	1.5t-2.6t	1.5t-2.0t

4.2 전산 모사

이번 연구에서는 유한요소법에 의한 전산 모사 방법으로 재료의 경화 곡선, 경화 곡선 위에서의 파단 위치, 그리고 시편의 파단 패턴을 표현할 수 있는지 확인하고자 하였다. 따라서, 총 18가지 경우인 시편의 인장 실험에 대해서, 사용자 서브루틴(user subroutine)을 이용한 ABAQUS/Standard 프로그램[4]을 사용하여 전산모사 하였다. Shell element를 사용하였고, 파단 패턴을 확인하기 위해서는 매우 세밀한 mesh 크기를 이용해야 한다. 연구의 결과로 판단할 때, 대략 0.2mm X 0.4mm의 크기를 사용해야 파단 패턴이 나타남을 확인할 수 있었다.

4.2.1 AA6111-T4 판재

AA6111-T4 판재의 경우, 변형률 집중(strain localization)에 의해 파단이 결정됨을 알 수 있었고, 일반적인 재료의 파단과 같이 자연적으로 파단이 형성되었다. Fig. 3에 두께 1.5mm인 AA6111-T4 모재의 실험에 의한 경화곡선과 전산모사에 의한 경화곡선을 나타내었고, FLD에 의한 초기 파단점을 표시하였다. 또한, 실험과 전산모사에 의한 파단 패턴을 비교하였다.

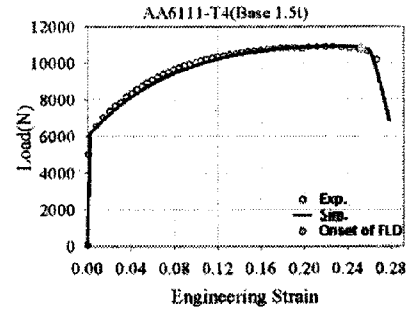


Fig. 3 (a) Comparison of hardening curves between exp. and sim. (AA6111-T4 base(1.5t))

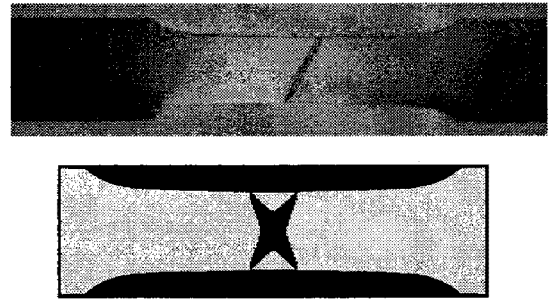


Fig. 3 (b) Comparison of failure patterns between exp. and sim. (AA6111-T4 base(1.5t))

4.2.2 AA5083-H18 판재

AA5083-H18 판재의 경우, 재료의 파단은 변형률 집중이 아닌 재료의 brittleness에 의해 결정된다. 따라서, 파단 현상을 구현하기 위해서는 재료의 정확한 FLD를 알고 있어야 하며, FLD에 의해 파단이 시작되는 시점에 인위적으로 응력을 없애주는 방법(stress softening)을 사용하였다. Fig. 4에 두께 1.6mm인 모재를 길이 방향으로 용접한 AA5083-H18 시편의 전산 모사 결과를 나타내었다.

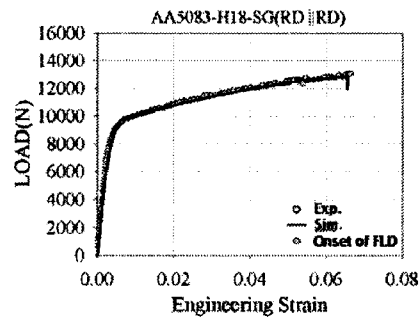


Fig. 4 (a) Comparison of hardening curves between exp. and sim. (AA5083-H18 SG(longitudinal))

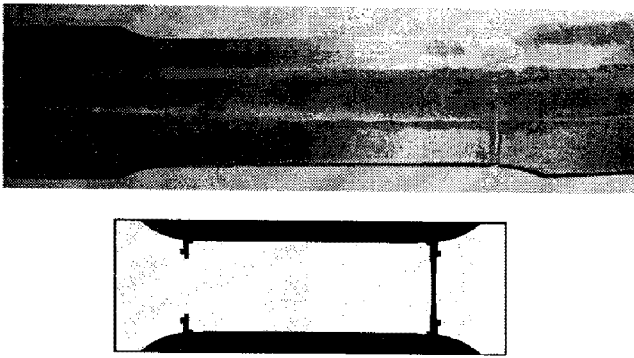


Fig. 4 (b) Comparison of failure patterns between exp. and sim. (AA5083-H18 SG(long))

4.2.3 DP강 판재

DP강 판재의 경우, 인장 실험의 결과, 변형률 속도에 민감한 물질임을 확인할 수 있다. 따라서, 전산모사에서도 변형률 속도를 고려하여 연구를 진행하였다. Fig. 5에서와 같이, 파단 패턴과 파단의 진행은 AA5083-H18에 적용된 응력 softening 효과를 적용하여 확인할 수 있다.

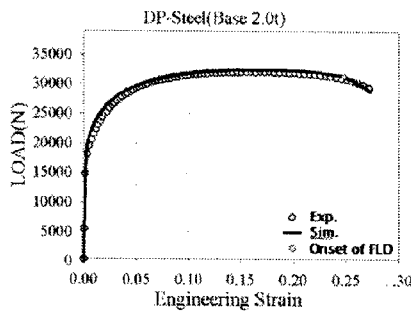


Fig. 5 (a) Comparison of hardening curves between exp. and sim. (DP-Steel base(2.0t))

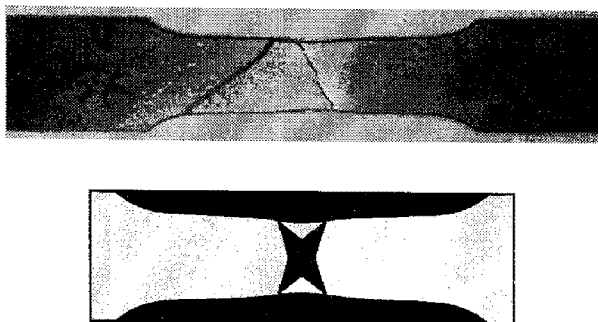


Fig. 5 (b) Comparison of failure patterns between exp. and sim. (DP-Steel base(2.0t))

5. 결론

(1) Fig. 2에서 보이는 것과 같이 각 재료의 용접 부위는 모재와 비교할 때, AA6111-T4의 경우에 연성(ductility)과 강도(strength)가 줄어들고 AA5083-H18의 경우, 강도는 줄어드나 연성이 증가하며, DP강의 경우에는 연성은 줄어들고 강도는 높아졌다.

(2) 유한요소법을 이용한 전산모사 방법을 통해 일축 인장 실험에서 관찰되는 시편의 파단 패턴, 경화곡선의 모양, 그리고 경화곡선 상에서의 파단 위치를 정확히 예측할 수 있다. 특히, 파단 현상을 예측할 때에는 매우 세밀한 mesh가 필요하였고, 재료의 정확한 FLD와 함께 응력 softening 효과가 요구되나, AA6111-T4 모재의 경우, 변형률 집중에 의한 파단으로 정확한 FLD 정보가 파단 현상의 정확한 예측에 크게 중요하지 않았다.

(3) 길이 방향의 용접 시편에서는 연성이 작은 부분에서 파단이 시작되어 AA5083-H18의 경우, 모재부분에서, AA6111-T4와 DP강의 경우, 용접부위에서 파단이 시작되었다.

(4) 수직 방향의 용접 시편에서는 강도가 적은 부분에서 파단이 시작되어 AA6111-T4와 AA5083-H18의 경우, 용접부위에서, DP강의 경우, 모재부분에서 파단이 시작되었다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업(R11-2005-065)과 General Motors의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] F. Barlat, H. Aretz, J. W. Yoon, M. E. Karabin, J. C. Brem, R. E. Dick, 2005, Linear transformation-based anisotropic yield function, *Int. J. Plast.*, Vol. 21, pp. 1009~1039.
- [2] R. Hill, 1952, On discontinuous plastic states with special reference to localized necking in thin sheets, *J. Mech. Phys. Solid*, Vol. 1, pp. 19-30.
- [3] Z. Marciniak, K. Kuczynski, 1967, Limits strains in the processes of stretch-forming sheet metal, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 9, pp. 609-620.
- [4] ABAQUS, 2005, User's manual for version 6.5, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc.