

유한요소해석 연계 알루미늄 다층판재의 기계적 거동 예측

성진영^{1,5}·김민호^{1,5}·봉혁중^{2,#}·이광석³·김민중⁴·김지훈⁶

Predicting Mechanical Response of Multilayered Aluminum Sheet Using Finite Element Analysis

J. Y. Sung, M. H. Kim, H. J. Bong, K. S. Lee, M. J. Kim, J.H. Kim

(Received November 10, 2020 / Revised November 16, 2020 / Accepted November 20, 2020)

Abstract

The mechanical responses of multilayered aluminum sheet fabricated by roll bonding, i.e., A1050/A3004 (65% A1050, 35% A3004 by thickness), were investigated via combined experiment and finite element (FE) analysis. The mechanical properties were measured using uniaxial tensile tests in various loading directions for the multilayered sheet. The corresponding tests for individual layers were also conducted. The testing samples were prepared by wire electro discharge machining (EDM). Stress-strain curves and Lankford coefficients of the multilayered sheet were then predicted by FE simulations. The measured mechanical properties of the individual layers were utilized as inputs for the simulation. Two yield functions, i.e., isotropic von-Mises and anisotropic non-quadratic Hill1948, were employed. Predicted results were compared with the experimental data and further discussed.

Key Words: Multilayered Sheet, Roll Bonding, Finite Elemental Method (FEM)

1. 서론

자동차, 항공기 등의 수송기기 및 화학 용기, 주방용품 등 다양한 산업 분야에서 제품의 고성능화 및 다기능화에 대한 요구가 많아지고 있다. 그동안 다양한 분야에서 주로 단일 금속 판재를 사용해왔다. 하지만, 단일 금속 판재는 기계적 물성 및 성형성 등과 같은 물리적 성질을 향상시키는 데 한계가 있다. 이러한 단일 금속 판재가 가지는 기계적 물성의 한계를 극복함과 동시에 단일 금속 판재는 가지지 못하는 기계적, 열적, 전기적 특성을 향상시키는

장점으로 인해 다층 금속 판재에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1-5]. 다층 금속 판재의 제조 방법으로는 롤 본딩(roll bonding) [6,7], 확산 접합(diffusion bonding) [8,9], 폭발 압접(explosive welding) [10,11] 등이 있다. 이 중 제작 공정의 경제성, 편의성, 연속 제조 가능성 등을 고려했을 때, 롤 본딩법이 가장 널리 이용되고 있다. 롤 본딩 적용 모재로는 주로 스테인리스강, 구리, 티타늄, 알루미늄 등이 적용된다[12]. 이들 중 경량 소재인 알루미늄 합금의 경우 우수한 충격 흡수능, 성형성, 열전도율, 내열성 등의 특성 때문에 열교환기용 재료 및 주방용품 등으로 활용되고 있다. 다층 금속 판재의 다양한 소재, 실험 조건 및 접합 조건 등에 대해 많은 연구가 진행되고 있으나 성형 해석 방법에 대해서는 연구가 부족한 실정이다. 다층 금속 판재의 강도는 잘 알려진 혼합 법칙(rule of mixture)과 구성 모재의 강

1. 한국재료연구원, 연구원

2. 한국재료연구원, 선임 연구원

3. 한국재료연구원, 책임 연구원

4. 한국클래드텍, 이사

5. 부산대학교 기계공학부 대학원생

6. 부산대학교 기계공학부 교수

Corresponding Author: Korea Institute of Materials Science,

E-mail: hjbong@kims.re.kr. ORCID : 0000-0001-6177-979X

도를 이용해 대략적으로 예측이 가능하다. 하지만 일반적으로 금속 판재의 성형성은 소재의 강도뿐만 아니라 이방성에 크게 영향을 받게된다[13]. 따라서, 정확한 다층 금속 판재의 성형성의 평가 및 예측을 위해서는 구성 소재의 이방성과 가공 경화 거동을 복합적으로 고려한 유한요소해석이 필수적이다. 본 연구에서는 롤 본딩법에 의해 제조된 다층 금속판재(A1050/A3004)를 와이어 방전가공(wire electric discharge machining, EDM)의 방법으로 두 구성 소재(A1050, A3004)로 분리하였다. 이렇게 분리한 두 알루미늄 소재의 물성을 각각 측정하였고, 실험 데이터와 유한요소해석을 연계하여 다층 금속 판재의 물성을 예측하고 실험값과 비교하였다. 더 나아가 LDH (Limiting dome height) 실험을 통해 각기 다른 응력 상태에서의 기계적 거동을 측정하였으며, 이를 유한요소해석 결과와 비교 분석하였다. 이를 통해 다층 금속판재의 기계적 거동을 모델링 하는 방법론에 대해 고찰하고자 하였다.

2. 실험

2.1 소재 확보 및 시편 준비

본 실험에 적용된 구성 소재들은 A1050, A3004로 화학 성분은 Table. 1과 같다. 롤 본딩 전 이중 금속 판재의 두께는 6.85 mm에서 롤 본딩 후 2.4 mm의 두께를 가지게 되었으며, 압하율은 65%이다. 롤 본딩 후 광학현미경(optical microscope)과 전자후방산란 회절(electron back-scatter diffraction)을 통해 A1-050과 A3004의 두께비를 확인하였다. 확인한 두께비를 바탕으로 EDM을 통해 두 구성 소재(A1050, A3004)로 분리한 시편을 확보하였다.

Table 1 Chemical compositions of constituent alloys used in this study (Unit: wt%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
A1050	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	Bal.
A3004	0.30	0.70	0.25	1.00	0.80	0.25	-	Bal.

2.2 일축 인장 시험

본 연구에서 사용한 이중 금속 소재 A1050/A3004 2-ply와 EDM 가공한 0.83 mm 두께의 A1050, 그리고 1.57 mm 두께의 A3004 소재의 인장 실험을 각각 수행하였다. 주 응력 방향은 rolling direction (RD),

transverse direction (TD), diagonal direction (DD)로 설정하여 방향별 인장 특성을 측정하였다. 일축 인장 시험은 Fig. 1과 같이 만능시험기(universal testing machine, UTM)를 사용하여 ASTM E8M sub-size 인장 시편에 대해 수행하였으며, 모든 실험은 상온에서 준 정적 변형률 속도($\sim 0.001/s$)에서 진행하였다. 변형률은 Fig. 1의 디지털 이미지 상관기법(digital image correlation, DIC)을 이용하여 측정 및 분석하였다.

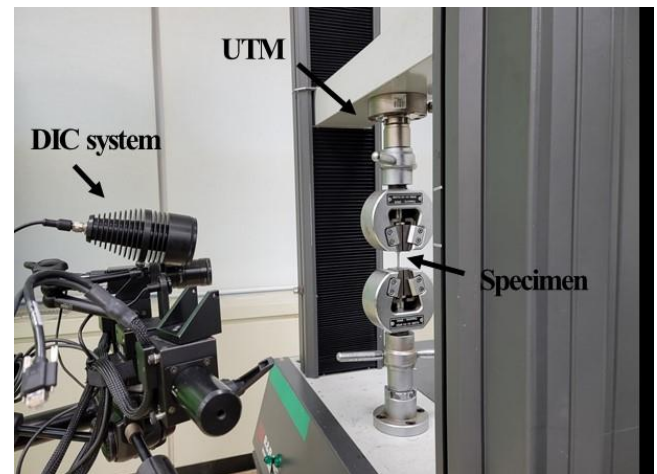


Fig. 1 Uniaxial tension tests with 2D DIC system

2.3 Limit Dome Height (LDH) 시험

A1050/A3004 2-ply 소재의 응력 상태에 따른 기계적 거동을 평가하기 위해 LDH 시험을 Erichsen model 142-40 장비(Fig. 2 (a))를 이용하여 수행하였다. Fig. 2 (b)는 LDH 실험 급형의 개략도이다. 비드를 활용하여 시편을 잡아준 후 직경이 100 mm인 펀치를 사용하여 판재를 변형시켰다. 실험은 판재에 파단이 발생할 때까지 진행하였다. 실험을 위해 Fig. 3와 같이 중심부가 잘록한 형태의 Nakajima 시편을 제작하였다. 장축은 RD와 평행하게 설정하였다. 다양한 변형 모드를 얻기 위해 시편 폭을 45, 110, 200 mm로 설정하여 일축 인장, 평면 변형, 이축 인장의 응력 상태를 구현하였다. 시험 전 시편에 흰색과 검은색 스프레이를 사용하여 불균일한 스페클 패턴(speckle pattern)을 표면에 도포하였다. 디지털 카메라로 성형의 시작부터 2 Hz의 주기로 시편 표면을 촬영하였고, 이미지들을 디지털 이미지 상관기법으로 분석하여 변형률 분포 변화를 분석, 측정하였다. 실험은 상온의 온도 조건, 윤활제는 테프론(Teflon)과 흑연 윤활제를 함께 사용했으며, 크로스 헤드 속도

(cross-head speed)는 0.5 mm/s, 블랭크 홀딩 압력 (blank holding force)은 100 kN 조건에서 실험을 진행하였다.



Fig. 2 (a) Erichsen 142-40 testing machine

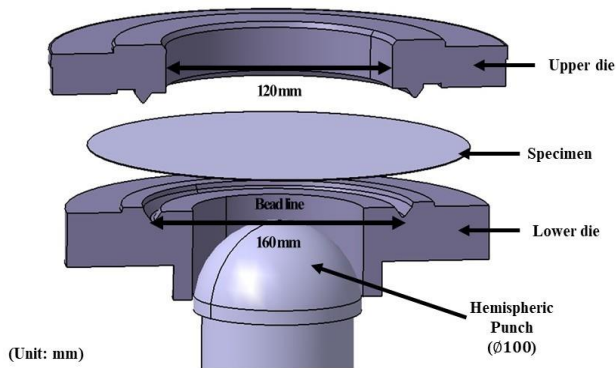


Fig. 2 (b) detailed dimensions of LDH tools

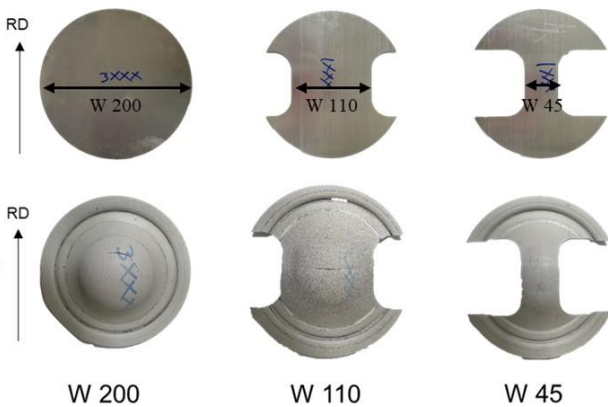


Fig. 3 Test samples used in LDH tests

2.4 유한요소해석

일축 인장과 LDH 실험 시 A1050/A3004 2-ply 소재의 물성을 상용 유한요소 해석 프로그램인 Abaqus/standard v2020 를 활용하여 예측하였다. 해석 모델은 Fig. 4 와 같다. Fig. 4 (a)는 일축 인장 성형 해석 모델로써 ASTM E8M sub-size 시편 형상을 따라 모델링하였으며 대칭조건을 고려하여 1/4 모델 (quarter model)을 적용하였다. 셸(shell) 요소를 사용하였고, 게이지(gauge)부의 메쉬 크기는 0.2 mm 로 설정하였다. 총 요소수는 761 개 였다. Fig. 4 (b)는 LDH 성형 해석 모델이다. 마찬가지로 대칭조건을 고려한 1/4 모델과 셸 요소를 사용하였다. 금형과 판재 사이의 마찰은 쿨롱 마찰(Coulomb friction) 모델을 사용하였으며 마찰 계수는 0.05 로 설정하였다. 본 연구에서 사용한 세 시편 폭(45, 110, 200 mm)에 대해 총 요소수는 각각 2,411, 4,332, 4,819 개 였다.

소재의 가공 경화 거동은 식 (1)과 (2)의 Swift 와 Voce 가공 경화식을 이용하여 표현해 주었다. 두 구성 모재(A1050, A3004) 및 다층 판재 (A1050/A3004)의 RD 방향 인장 시의 응력-변형률 선도에 대해 가공 경화식을 균일 연신(uniform elongation)점까지 최소 자승법(least square method)으로 피팅(fitting) 하였고 이를 가공 경화 거동의 기준으로 삼았다. 결정된 상수들을 Table 2 와 Table 3 에 표기하였다.

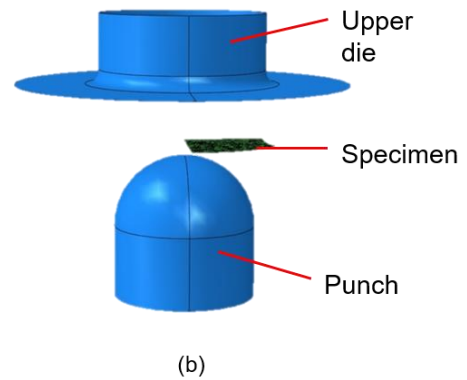
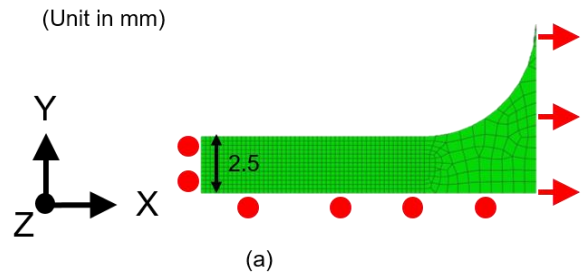


Fig. 4 Finite element models for (a) uniaxial tension, and (b) LDH tests

$$\sigma = K(\varepsilon + \varepsilon_0)^n \quad (1)$$

$$\sigma = A + B[1 - \exp(-C\varepsilon)] \quad (2)$$

항복 함수로는 소재의 이방성을 고려하는 Hill1948 식 [14]과 등방성을 가정하는 von-Mises 식 [15]을 활용하였다. 평면 응력(plane stress) 상태에서 Hill1948 식은 식 (3)과 같이 표현된다. 여기서 $\bar{\sigma}$ 는 등가 응력(equivalent stress), F, G, H, N 은 이방성을 표현하는 상수이다. 두 구성 모재(A1050, A3004) 및 다층 판재 (A1050/A3004)의 일축 인장 방향별 r-값(r_{RD} , r_{TD} , r_{DD})을 이용하여 이방성 상수값들을 결정하였다. 이때 r-값은 진 변형률(true strain)과 r-값의 그래프를 식(4)를 이용하여 피팅하였고, 포화(saturation)값인 c 값을 r-값으로 최종 결정하였다. 이렇게 결정한 r-값들을 이용하여 Hill1948 식의 이방성 상수값들을 계산하였고 Table 4 에 표기하였다.

본 연구에서는 두 가지의 접근법으로 A1050/A3004 2-ply 소재의 유한요소해석을 진행하였다. 첫 번째는 “Composite 모델”로써 2-ply 다층 판재의 두께 방향으로 섹션(section)을 나누어 준 이후에, 각 구성 모재의 두께를 고려하여 각각의 섹션에 해당하는 구성 모재의 물성을 해석 모델에 넣어주는 방법이다 (Fig. 5 (a)). Composite 모델의 경우 두 구성 모재를 각각 5 개의 적분점(integration point) 을 가지는 쉘 요소를 사용하여 모델링 하였다. 두 번째는 “Homogeneous 모델”로써 A1050/A3004 2-ply 소재를 단일 소재로 가정하는 접근법이다. 이 경우에는 A1050/A3004 2-ply 소재의 일축 인장 데이터를 활용하여 구성 방정식을 만들었고 이를 해석 모델에 넣어주었다 (Fig. 5 (b)). Homogeneous 모델에선 5 개의 적분점(integration point) 을 가지는 쉘 요소를 사용하여 2-ply 소재의 물성을 넣어주었다.

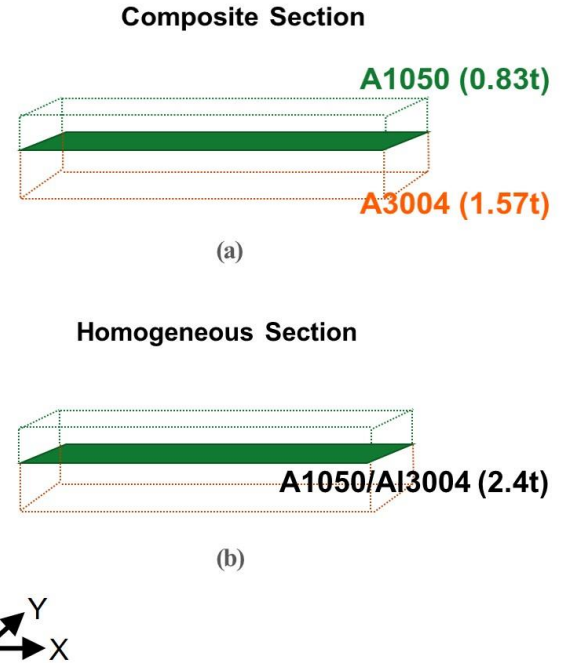


Fig. 5 Schematics of FE models representing 2-ply aluminum sheet: (a) composite model, and (b) Homogeneous model

Table 2 Best-fit parameters for Swift hardening model

Material		Swift		
		K(MPa)	n	ε_0
A1050	RD	116.72	0.23	0.0005
A3004	RD	280.37	0.27	0.0008
A1050/A3004 2-ply	RD	172.52	0.23	0.0001

$$\sqrt{F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{zx}^2 + 2N\sigma_{xy}^2} = \bar{\sigma}$$

$$F = \frac{r_0}{r_{90}(1+r_0)}, G = \frac{1}{(1+r_0)}, H = \frac{r_0}{(1+r_0)}, N = \frac{(1+2r_{45})(r_0+r_{90})}{2r_{90}(1+r_0)} \quad (3)$$

$$y = Ax \exp\left(-\frac{x}{b}\right) + c \quad (4)$$

Table 3 Best-fit parameters for Voce hardening model

Material		Voce		
		A(MPa)	B(MPa)	C
A1050	RD	34.52	46.28	14.60
A3004	RD	55.36	87.38	31.57
A1050/A3004 2-ply	RD	50.43	71.68	13.16

Table 4 Best-fit parameters for Hill's 1948 yield function

Material	Hill1948			
	F	G	H	N
A1050	0.671	0.494	0.506	1.077
A3004	0.634	0.700	0.300	1.630
A1050/A3004 2ply	0.692	0.611	0.389	1.585

3. 결과 및 고찰

3.1 응력-변형률 선도 및 r-값

Voce, Swift 가공 경화식을 가정하였을 시 두 항복 함수(Hill1948, von-Mises)를 활용하여 A1050/A3004 2-ply의 응력-변형률 선도를 Composite 모델을 이용하여 예측한 결과와 실험 결과를 비교하여 Fig. 6과 7에 인장 방향별로 나타내었다.

먼저 실험 결과의 경우, 주 응력 방향(RD, DD, TD)에서 모두 응력 값이 A1050 소재가 가장 낮고, A3004 소재가 가장 높으며, A1050/A3004 2-ply 소재가 A1050과 A3004의 중간 값으로 나타났다. 이를 통해 A1050/A3004 2-ply 소재는 혼합 법칙(rule of mixture)을 따른다는 것을 유추할 수 있다.

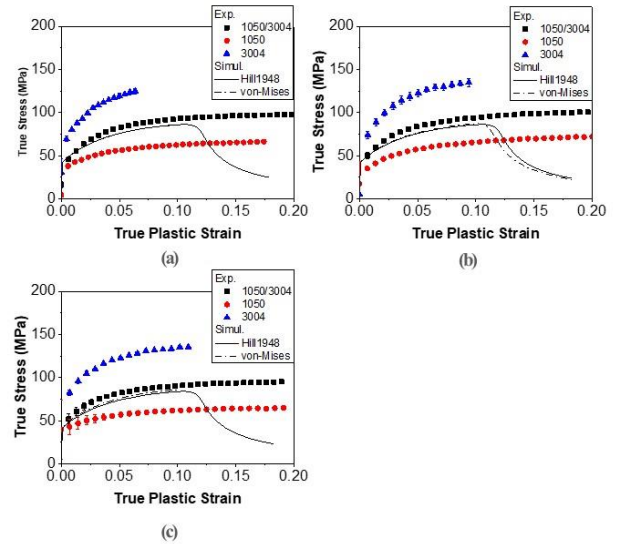


Fig. 6 Comparison of stress-strain curves: Experiments vs. FE simulations using Voce hardening and composite model, (a) RD, (b) DD, and (c) TD

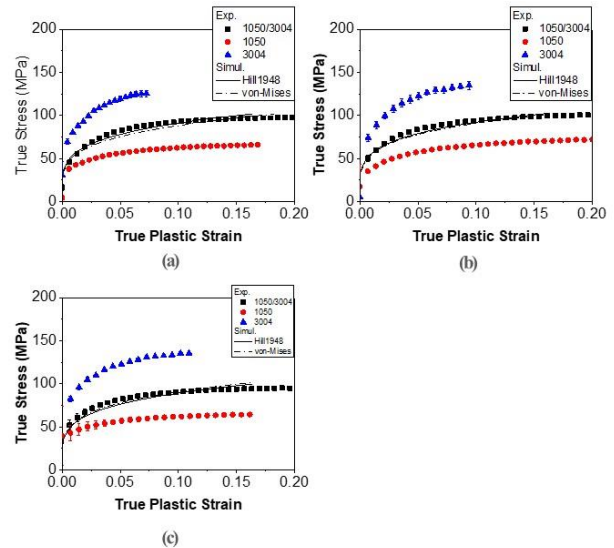


Fig. 7 Comparison of stress-strain curves: Experiments vs. FE simulations using Swift hardening and composite model, (a) RD, (b) DD, and (c) TD

해석 결과를 보면 Fig. 6의 Voce 가공 경화식을 가정하였을 때 A1050/A3004 2-ply 소재의 응력-변형률 선도를 어느 정도 따라가다가 변형률이 RD 방향에서 10.6%, DD 방향에서 10.6%, TD 방향에서 10.5%

지점에서 네킹 현상을 예측하여 응력 값이 감소하는 것을 볼 수 있다. 반면, Fig. 7의 Swift 가공 경화식을 활용한 것을 보면 Voce 식 가정 시 네킹이 예측된 변형률 이후의 구간에서도 응력-변형률 선도를 잘 예측하는 것을 확인할 수 있다. 항복식에 관련하여서 두 항복 함수(Hill1948, von-Mises) 모두 가공 경화식에 상관없이 비슷한 양상을 나타냈다.

응력-변형률 선도 이외에도 주 응력 방향에 따른 r -값의 변화를 예측한 결과를 실험 결과와 Fig. 8 과 Fig. 9 에 비교하였다. Fig. 8 은 Voce 가공 경화식을 가정하였을 시의 예측 결과를 보여준다. 먼저, 실험 결과의 경우 RD 방향, TD 방향에서는 A1050/A3004 2-ply 의 r -값이 A1050 과 A3004 의 중간에 위치하는 결과를 보여주나 DD 방향에서는 시편 가공 상의 문제 및 실험 오차로 인해 다소 부정확한 결과가 측정되었다. 해석 결과의 경우, 판재의 이방성을 고려하는 Hill1948 항복식을 가정하였을 경우, 주 응력 방향에 따른 r -값의 차이를 잘 예측하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 두 구성 소재의 r -값을 활용하여 A1050/A-3004 2-ply 소재의 r -값을 충분히 예측할 수 있음을 유추할 수 있다. 이 결과는 일반적으로 복합재의 강도를 예측하는 혼합 법칙(rule of mixture)이 r -값의 예측에도 적용이 가능함을 의미할 수 있다. 반면 등방성을 가정하는 von-Mises 식의 경우 응력 방향에 상관없이 r -값을 1로 예측하는 것을 확인할 수 있다. 실험 결과 값으로는 RD 방향에서 20.3%, DD 방향에서 24.5%, TD 방향에서 18.9%에서 네킹이 발생한다. 하지만 Voce 식을 가정할 경우 세 주 응력 방향(RD, DD, TD)에서 모두 A1050/A3004 2-ply 의 실험값을 따라가다가 변형률이 RD 방향에서 10.6%, DD 방향에서 10.6%, TD 방향에서 10.5% 구간에서 네킹 현상이 예측되어 r -값이 실험 결과로부터 벗어나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9 의 Swift 식을 활용하여 예측한 결과에서도 Hill1948 식을 가정하여 A1050/A3004 2-ply 소재의 r -값을 예측하였지만, von-Mises 식의 경우 1 의 r -값을 예측하는 것을 확인할 수 있다. Swift 가공 경화식을 가정할 경우 Voce 식을 가정했을 시 네킹이 예측된 변형률 이후 구간에서도 실험결과를 잘 예측함을 확인 가능하다

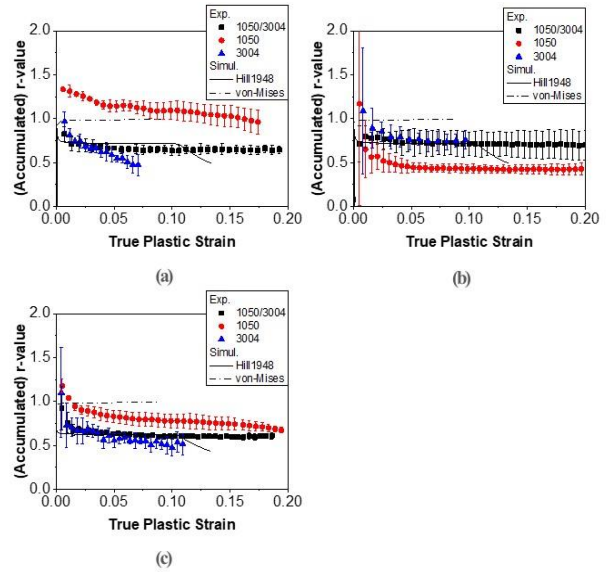


Fig.8 Comparison of r -values: Experiments vs. FE simulations using Voce hardening and composite model, (a) RD, (b) DD, and (c) TD

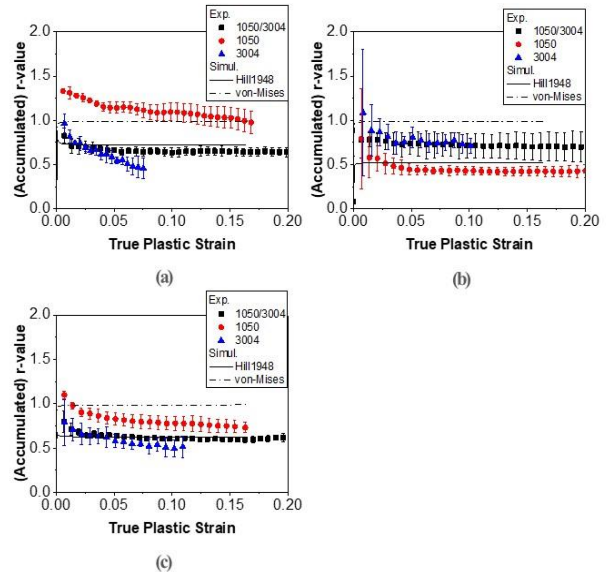


Fig.9 Comparison of r -values: Experiments vs. FE simulations using Swift hardening and composite model, (a) RD, (b) DD, and (c) TD

3.2 LDH (Limiting Dome Height)

일축 인장 이외에 평면 변형이나 이축 인장 등 다양한 응력 상태에서의 기계적 거동을 LDH 실험을 통해 평가하고 유한요소해석으로 예측해 보았다.

LDH 실험에 사용한 Nakajima 시편에서 폭을 45, 110, 200 mm로 변화시켜 각각 일축 인장, 평면 변형, 이축 인장의 응력을 구현하였다. 가공 경화식으로는 Voce, Swift 식을 활용하였고, Hill1948과 von-Mises 식을 항복 함수로 가정하였다. 일축 인장 해석과 마찬가지로 Composite 모델을 활용하여 성형 해석을 진행하였고, 비교를 위해 A1050/A3004 2-ply 소재를 단일 소재로 가정하는 Homogeneous 모델의 예측 결과와도 비교하였다. 실험과 해석 결과를 펀치 스트로크(stroke)에 따른 하중(force)값으로 비교하였다. Fig. 10 와 Fig. 11 에 비교 결과를 나타내었다.

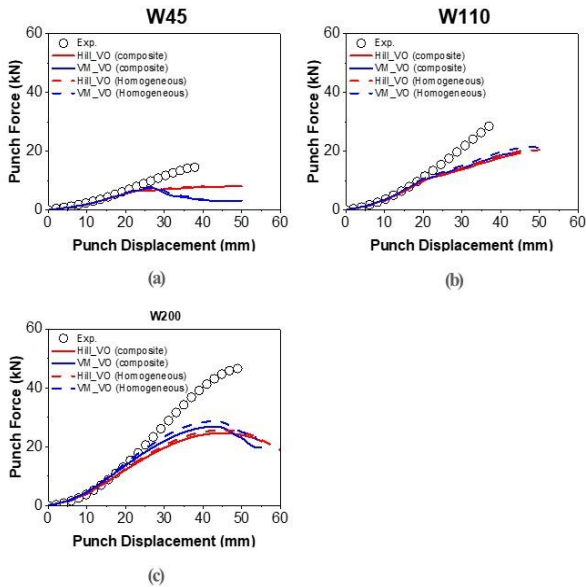


Fig. 10 Comparison of punch force vs. punch stroke obtained by experiments and simulations using Voce hardening: (a) W45, (b) W110, and (c) W200

Fig. 10의 실험결과와 Voce 가공 경화식을 활용하여 예측한 해석 결과를 보면 모든 응력 상태에서 A1050/A3004 2-ply 소재의 실험 결과값을 따라가다가 네킹(혹은 파단) 현상이 실험보다 일찍 발생하여 응력 값이 실험보다 먼저 떨어지는 것을 볼 수 있다. 하지만 Fig. 11의 Swift 가공 경화식을 활용한 것을 보면 실험과 근사한 펀치의 변위 값에서 네킹(혹은 파단)을 예측하는 것을 확인할 수 있다.

Table 5와 Table 6에 Voce 및 Swift 가공 경화식을 활용하여 예측한 네킹(파단)시 펀치 스트로크(stroke)

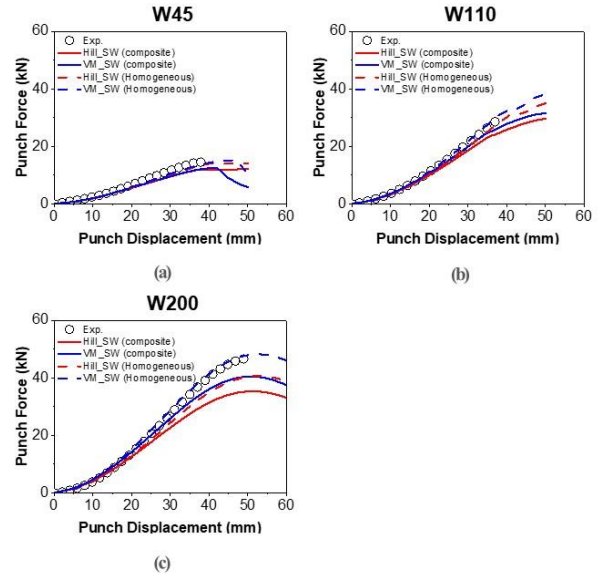


Fig. 11 Comparison of punch force vs. punch stroke obtained by experiments and simulations using Swift hardening: (a) W45, (b) W110, and (c) W200

를 실험결과와 비교하였으며, Composite 모델 및 Homogeneous 모델에 대해 항복함수 von-Mises (VM)와 Hill1948 (Hill)식을 활용한 예측 결과를 나타내었다. Voce 가공 경화식을 활용한 Table 5를 보면 W45의 경우, 실험 결과보다 10 mm~14 mm 정도 먼저 네킹이 발생하는 것으로 예측되며, W110에서는 16 mm~19 mm, W200에서는 4 mm~7 mm 먼저 네킹이 발생하는 것으로 예측된 것을 확인할 수 있다. Swift 가공 경화식으로 예측한 Table 6을 보면 오차가 W45, W110, W200의 시편에 대해 각각 2 mm~10.5 mm, 1 mm~4 mm, 1.5 mm~4 mm로 Voce 가공 경화식을 가정하였을 시의 오차에 비해 크게 감소한 것을 확인할 수 있다. 항복 함수에 따른 펀치 변위-스트로크 그래프의 차이는 크게 나타나지 않았으며, 예측한 네킹(파단)시 펀치 스트로크 차이도 2 mm 이내로 거의 차이가 없음을 확인할 수 있다.

A1050, A3004 각각의 물성을 적용한 Composite 모델과 A1050/A3004 2-ply의 물성을 적용한 Homogeneous 모델의 예측 결과를 비교하면, Voce 식을 가정한 경우에는 응력 상태에 상관없이 두 모델의 결과가 유사함을 확인할 수 있다. Swift 식을 가정한 경우 Homogeneous 모델이 Composite 모델에 비해 펀치 하중을 좀 더 높게 예측하는 현상을 확인

할 수 있다. 이 같은 현상은 가공 경화식을 결정하는데 활용한 데이터의 변형률 범위 차에 기인하는 것으로 사료된다. 본 연구에서는 와이어 방전가공법으로 두 구성 모재를 분리하였는데, 가공 과정에서 시편은 데미지(damage)를 받게 되고 이로 인해 분리된 두 구성 모재의 연신율이 낮아지는 현상이 관찰되었다. 본 연구에서 가공 경화식 결정을 위해 균일 연신점까지의 응력선도를 활용하였었는데, 2-ply 소재에 비해 낮은 두 구성 모재의 연신율로 인해 가공 경화 거동에 차이가 생긴 것으로 예상된다. 이때문에, 두 모델이 예측한 펀치 하중은 스트로크가 커질수록 그 차이가 커지는 현상을 보여준다. 가공 경화 거동 결정에서의 오차에 의해 LDH 실험의 후반부에서 두 모델 사이의 오차가 발생하긴 하지만 그 외의 구간에서는 두 해석 결과가 대부분 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있고, 이 결과는 A1050/A3004 2-ply 판재의 경우 성형 시 계면에서의 박리 현상이 없음을 의미할 수 있고, 따라서 두 다층 판재를 단일 소재로 가정하여 기계적 거동을 판단, 예측하여도 무리가 없다는 결론에 이를 수 있게 한다.

Table 5 punch stroke when necking occurs obtained by experiments and simulations using Voce hardening

Width	Experiment (mm)	Composite (mm)		Homogeneous (mm)	
		VM	Hill	VM	Hill
W45	36.84	27.00	23.43	27.36	23.27
W110	37.46	18.89	21.84	18.82	21.24
W200	49.66	42.83	43.88	42.87	45.44

Table 6 punch stroke when necking occurs obtained by experiments and simulations using Swift hardening

Width	Experiment (mm)	Composite (mm)		Homogeneous (mm)	
		VM	Hill	VM	Hill
W45	36.84	41.33	38.65	45.37	47.30
W110	37.46	36.45	37.78	39.64	41.66
W200	49.66	51.29	51.51	52.35	53.67

4. 결론

본 연구에서는 롤 본딩법으로 제작된 A1050/A3004 2-ply 이중 금속 판재의 주 응력 방향별 일축 인장 시험 결과와 LDH 실험에 대한 유한요소해석 결과값을 비교, 분석하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험을 통해 측정된 두 구성 모재(A1050, A3004)의 일축 인장 응력-변형률 선도와 유한요소해석을 활용하여 A1050/A3004 2-ply 소재의 응력-변형률 선도를 예측하였고, 실험 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 이방성을 고려하는 항복함수인 Hill1948 식과 각 모재(A1050, A3004)의 r-값 측정치를 활용하여 A1050/A3004 2-ply 소재의 r-값을 예측한 결과, 실험 결과와 해석 결과가 유사함을 확인하였다.

(3) A1050/A3004 2-ply 소재에 가공 경화식 Voce 식과 Swift 식을 적용해봤을 때, Voce 식은 인장, LDH 시험에서 나타난 네킹(혹은 파단) 지점을 과소평가하는 경향이 나타나는 반면, Swift 식의 경우 실험 결과 값과 해석 결과 값이 비슷하게 나타났다. 따라서, 본 알루미늄 다층 판재의 가공 경화를 Swift 식으로 표현하는 것이 유리하다고 판단된다.

(4) 각 모재(A1050, A3004)의 물성을 각각 모델링하여 A1050/A3004 2-ply 소재의 물성을 예측한 결과와 A1050/A3004 2-ply 소재를 단일 소재로 가정하여 LDH 시험시 기계적 거동을 예측한 결과가 일치하는 것을 확인하였다.

(5) 위 결과는 A1050/A3004 2-ply 소재의 성형 시 계면에서의 박리 현상이 발생하지 않음을 의미할 수 있으나, 실제 실험을 통한 증명이 필요하다고 판단된다.

(6) 가정한 두 항복 함수(von-Mises, Hill1948) 모두 등 이축 인장 시 성형 하중을 다소 낮게 예측하는 경향을 보인다. 이는 두 항복 함수 모두 등 이축 인장 시의 항복 응력을 고려하지 않기 때문으로 사료된다. 이 같은 예측 에러를 보완하기 위해 Yld2000-2d 식 등과 같은 진보된 항복식의 사용이 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술평가원기원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 ('20006974')

REFERENCES

- [1] J. Lacaze, S. Tierce, M. C. Lafont, Y. Thebault, N. Pébère, G. Mankowski, C. Blanc, H. Robidou, D. Vaumousse and D. Daloz, 2005, Study of the microstructure resulting from brazed aluminium materials used in heat exchangers, *Materials Science and Engineering A* vol. 413, pp. 317~321.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.187>
- [2] L.Y. Sheng, F. Yang, T.F. Xi, C. Lai, H.Q. Ye, 2011, Influence of heat treatment on interface of Cu/Al bimetal composite fabricated by cold rolling, *Composites: Part B*, vol.42, pp. 1468~1473.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.04.045>
- [3] K.S. Lee, Y.S. Lee, and Y.N. Kwon, Influence of Secondary Warm Rolling on the Interface Microstructure and Mechanical Properties of a Roll-Bonded Three-Ply Al/Mg/Al Sheet, *Materials Science and Engineering: A*, vol.606, pp 205~213.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.082>
- [4] M. Hosseini, H. Danesh Manesh, 2015, Bond strength optimization of Ti/Cu/Ti clad composites produced by roll-bonding, *Materials and Design*, vol. 81, pp.122~132. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.010>
- [5] I.K. Kim, J.Y. Song, K.H. Oh, S.I. Hong, 2012, Failure and Deformation Analyses of 3-ply Mg/Al/STS Clad-Metalin Bending, *Korean J. Met. Master*, vol.50, pp345~351
<https://doi.org/10.3365/kjmm.2012.50.5.345>
- [6] P.-P. Gudur, M.-A. Salunkhe, U.-S. Dixit, 2008, A theoretical study on the application of asymmetric rolling for the estimation of friction, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 50, pp. 315~327.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.06.002>
- [7] X. Li, G. Zu, M. Ding, Y. Mu, P. Wang, 2008, Interfacial microstructure and mechanical properties of Cu/Al clad sheet fabricated by asymmetrical roll bonding and annealing, *Materials Science and Engineering A*, vol. 529, pp. 485~491.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.09.087>
- [8] W. Yao, A.P. Wu, G.S. Zou, J.L. Ren, 2008, Formation process of the bonding joint in Ti/Al diffusion bonding, *Materials Science and Engineering A*, vol. 480, pp. 456~463.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.07.027>
- [9] S. Chen, F. Ke, M. Zhou, Y. Bai, 2007, Atomistic investigation of the effects of temperature and surface roughness on diffusion bonding between Cu and Al, *Acta Materilia*, vol. 55, pp. 3169~3175.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.12.040>
- [10] F. Findik, 2011, Recent developments in explosive welding, *Materials and Design*, vol. 32, pp. 1081~1093.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.017>
- [11] A. Durgutlu, B. Gülenç, F. Findik, 2005, Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding, *Materials and Design*, vol. 26, pp497~507.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.07.021>
- [12] E.Y. Kim, J.H. Cho, H.W. Kim, S.H. Choi, 2013, Determination of the Optimum Friction Conditions for Prediction of Deformation Texture in Al/Al-Mg-/Al composite Sheets during Cold-Roll Cladding, *Korean J. Met. Mater*, vol.51, pp 041~050
<https://doi.org/10.3365/kjmm.2013.51.1.041>
- [13] J.G. Kim, B.H. Park, S.K. Kim, K.G. Chin, H.S. Kim, 2014, Finite Element Analysis of the R-value of a 2-Layer Clad Steel, *Transactions of Materials Processing*, vol.23, pp311~316
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2014.23.5.311>
- [14] R.Hill, 1948, A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. A193, pp. 281~297.
<https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045>
- [15] R. V. Mises, 1913, *Mechanik Der Festen Körper Im Plastisch-Deformablen Zustand*, *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, Vol. 1913, pp. 582~592.