https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.3.177

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. ISSN 2508-5107(Online)

Check for updates

유한요소해석을 통한 A6014 스프링백 예측

이형기^{a,b}, 김상훈^c, 도두이퉁^c, 김진재^b, 김영석^{b*}

A6014 Springback Prediction Using FEM(Finite Element Analysis)

Hyungki Lee^{a,b}, Sang-Hoon Kim^c, Duy-Tung Do^c, Jinjae Kim^b, Young-Suk Kim^{b*}

^a General Program Management Team, KEIT

^b Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

^c Research Engineer in the Advance Research Team, HWASHIN Co., Ltd.

ARTICLE INFO

Article histo Received Revised Accepted	ory: 29 30 3	April May June	2022 2022 2022
<i>Keywords:</i> Aluminum Springback Computer a Plastic worl Yoshida-Ue	alloy iided king mori	engineering model	

ABSTRACT

Recently, automobile market trends have taken a turn towards eco-friendly vehicles in response to environmental regulations framed to encourage carbon-neutral forms of transportation. The biggest challenge to achieve this goal is adequate weight reduction of the frame of the vehicle. To achieve this, car manufacturers have to replace existing steel system frames with aluminum alloy-based frames. In this study, the basic parameters for related analysis were identified based on extensive mechanical tests by considering the use of A6014-T4 material to fabricate automobile parts. In particular, finite element analysis and comparative verification were performed based on the result of a U-bending test.

1. 서 론

1.1 연구배경

2018년 IPCC 총회에서 채택된 '지구온난화 1.5°C' 특별보고서^[1] 에 따르면, 현 수준의 온실가스 배출량을 유지 시 2030~2052년 사이 전 지구 평균온도가 1.5도를 초과할 가능성이 커질 수 있다고 한다. 이러한 지구온난화의 직접적인 원인이 되는 이산화탄소의 저감 방안은 지속해서 주목받아 왔고, 이에 따라 2000년대 중반 탄소 중립에 대한 개념이 만들어졌다. 탄소중립을 위해 자동차시 장도 영향을 받아 내연기관에 대한 차량규제가 진행되고 있다. 영 국은 2030년부터 내연기관 신차판매를 금지할 예정이고, 중국은 2035년, 미국 캘리포니아주에서는 2035년, 프랑스는 2040년부터 신차판매를 금지하겠다고 발표하였으며, 내연기관의 환경 규제로 인해 친환경차를 중심으로 자동차 시장은 재편되고 있다^[2]. 차세대 친환경차는 가벼운 차체 및 부품 적용을 통한 에너지 효율 향상 기술이 중요할 것으로 전망되고 있다. 특히, 알루미늄은 대표적인 경량 소재로 비강도가 높아 차량 경량화에 용이하기 때문에 차체 부품, 섀시부품 및 배터리 케이스 등 적용 범위가 점차 확대되고 있다.

알루미늄을 소재로 소성가공을 통한 부품을 제작할 경우, 일반 강판소재 대비 약 1/3 정도로 낮은 탄성계수로 인해 스프 링백이 큰 것으로 알려져있다. 스프링백은 성형 후 잔류응력 으로 발생하는 현상으로 제품의 치수 정밀도 저하 및 제품 결 함을 야기시킨다. 스프링백에 영향을 미치는 요인으로는 소재 의 물성, 두께, 성형 조건 등 여러 요인들에 의해 그 영향이 달라지 며, 스프링백을 예측하기 위한 CAE(compute aided engineering)

^{*} Corresponding author. Tel.: +82-53-950-5580

E-mail address: caekim@knu.ac.kr (Young-Suk Kim).

관련 많은 방법들이 연구되어 왔다 [3-7]. 이 중, Yoshida-Uemori [8-11] 등은 바우싱거 효과가 해석 결과에 반영될 수 있도록 등방경 화 및 이동경화를 복합적으로 적용하여 스프링백 해석에 기여하였 다. 이후 A5052-O와 A6016-T4에 대한 스프링백 예측 관련 연구 를 통해 적절한 이방성 항복식 및 경화식 도입이 필요하다고 제안 하였고^[12], Meng^[13] 등은 A6061과 S45C 소재에 대한 경화식별 비교 검증을 통해 Y-U모델이 반복 굽힘시험에 대한 스프링백 예 측 정확도가 높은 결과를 발표하였다. 본 연구에서는 완성차에서 펜더, 도어 등 차체 부품^[14]으로 많이 활용하고 있는 A6014-T4 소재에 대한 스프링백 예측을 통해 생산현장에서 야기될 수 있는 품질 불량을 사전에 예방하고자 한다. 또한, 기존 연구와 달리 Y-U모델과 등방경화식, 이동경화식을 비교 검증하기 위해 다음과 같은 시험을 실시하였다. A6014 소재에 대한 인장시험, 인장-압축 시험, U-벤딩시험, 마찰시험 등을 통해 기계적인 물성치와 스프링 백의 경향성 등 해석 조건을 확보하였다. 상용 유한요소해석프로 그램인 Autoform을 이용하여 스프링백에 미치는 영향을 평가하 기 위해 해석 인자는 마찰계수, 요소망 크기, 경화식을 조건별로 다르게 설정하여 U-벤딩 시험 결과와 해석 결과를 비교하였다. 재 료의 응력상태가 항복조건을 충족하는지 확인하기 위한 항복조건 식 중 이방성 소재에 대한 이론으로는 대표적인 Hill1948^[15], Hill1990^[16], Hosford와 Logan^[17], Barlat^[18] 등이 발표한 항복 조건식이 있다. 이번 연구에서는 이방성 소재에 적합한 Hill1948 식을 사용하였고 경화식은 등방경화식, 이동경화식, Y-U모델을 각각 적용 후 유한요소해석의 신뢰도를 고찰하고자 하였다.

2. 재료시험 및 스프링백시험

2.1 단축인장시험

A6014-T4 소재는 지동차 차체 부품 중 특히 도어 등 moving part에 많이 활용되고 있다. A6014는 주 원소가 Al-Mg-Si으로 구성된 6xxx계열 합금으로 강도와 내식성이 양호한 것으로 알려 져 있다. 소재의 인장력에 의한 탄성적 성질, 소성변형 저항 및 파 단강도를 측정하기 위해 A6014-T4 두께 1.4 mm 소재의 인장시 험을 실시하였다. KS B0801-13B호 시편으로 변형률속도 0.002 /s의 속도로 인장시험을 실시하였고, A6014는 압연제조공정을 통 해 생산되기 때문에 이방성을 확인하기 위해 압연방향을 기준으로 0°, 45°, 90° 방향으로 각각의 인장시험을 수행하였다. 인장시험 을 통해 응력-변형률 곡선을 Fig. 1과 같이 도출하여 기계적인 물 성치인 연신율(elongation), 탄성계수(modulus of elasticity), 항 복점 및 항복강도(yield strength), 인장강도(tensile strength), 이 방성 계수(R-value, Lankford 변수) 등을 확보하였고 그 결과는 Table 1에 나타내었다. R0은 압연방향에서 측정된 값이고, R45

Table 1 Mee	chanical prope	erties of A	6014 with	different	orientations
Tensile	Е	YS	TS	EL	

Tensile	Е	YS	TS	EL	D volue
direction	(GPa)	(MPa)	(MPa)	(%)	K-value
0°	58.9	123.96	234.52	23	0.41
45°	57.9	122.48	229.44	22.5	0.99
90°	56.7	120.71	225.303	21.5	1.02



및 R90은 압연방향을 기준으로 각각 45°, 90°에 대한 결과이다. 결과값을 확인하면 압연방향별로 기계적 특성이 상이하다. 압연방 향 90°방향에서 0°방향으로 갈수록 탄성계수가 증가하고 이에 따 라 항복강도와 인장강도가 함께 증가한다. 연신율도 90도에서 0도 방향으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 진응력-진변형률은 Fig. 1의 Voce모델을 따르는 경향을 보였으며 해당식은 Fig. 1에 표현되었다.

2.2 인장-압축시험

인장시험으로는 역하중으로 인한 가공경화 정체, 바우싱거 효과 를 확인할 수 없기 때문에 Y-U모델을 적용하기 위해 변형률속도 0.002 /s의 속도로 인장-압축시험을 실시하였다. 시편을 ±2% - ±4% - ±6% - ±8% 순으로 인장, 압축을 반복하여 진행하였다. 이 시험을 통해 경화거동을 볼 수 있으며 Y-U모델을 적용하기 위 한 기계적인 물성치를 확보하였다. Fig. 2(a)는 인장-압축시험 시 편 크기를 Fig. 2(b)는 시험 결과에 대한 S-S 곡선이다.

2.3 U-벤딩 시험 및 3D데이터 추출

A6014-T4 두께 1.4 mm 소재에 대한 실제 스프링백을 검증하 기 위해 NUMISHEET 1993 Conference ^[19]를 벤치마킹하여 무 윤활 조건으로 굽힘 시험을 실시하였다. 50톤 유압 프레스를 이용 하여 드로잉속도는 10 mm/min으로 시험하였다. 시험 결과 스 프링백 발생량 등 해석 결과와 비교할 수 있는 데이터를 확보

하기 위해 3D 스캐닝을 통한 역설계를 진행하였다. 3차원 광학 식 LED 3D 스캐닝 장비인 ATOS Q 12M 장비를 이용하여 U벤 딩 시험 결과를 Fig. 3(a)와 같이 3차원 모델링으로 구현하였다.



(a) Speiciment of Tension- compression test





Table 2 Value of Springback

	θ1	θ2	ρ
Measurement	88	100	129.3

3차원 모델링을 통해 역설계한 결과와 해석 결과를 비교 검증하기 위해 NUMISHEET 2011 Benchmark 4^[20]를 참고하여 스프링백 결과를 검증하였다. 3D모델링의 중심부를 기준으로 2D 도면으로 추출한 후 θ1(다이각도), θ2(펀치각도), ρ(측벽 휨) 에 대한 치수 측정을 실시하였다. 치수 측정을 통한 형상(Section A-A)은 Fig. 3(b)와 같으며 그 결과값을 Table 2에 나타내었다.

2.4 마찰시험

유한요소해석에서 중요하게 활용되는 인자로 마찰계수 (coefficient of friction)가 있다. 실제 시험을 통한 마찰계수를 측 정하는 방법은 U-벤딩시험, 컵드로잉시험, 드로우비드 마찰시험 등이 앞선 연구에서 이미 소개되었다^[21]. 본 연구에서는 U-벤딩시 험과의 해석 결과 비교 시 신뢰도 확보를 위하여 U-벤딩 마찰시험 을 실시하였다. 50톤 유압프레스의 10 mm/min의 드로잉속도로 무윤활 조건에서 시험하였다. U-벤딩시험을 통한 마찰시험은 블랭 크홀딩력의 작용 유무에 대한 펀치력의 차이를 이용하여 마찰계수 를 도출한다. 블랭크홀딩력이 작용하지 않은 경우 재료의 기계적



(a) 3D modeling (b) Section A-A' Fig. 3 Results for U-bending Test



(a) Test with BHF in δ



(b) Test without BHF Fig. 4 Schematic of U-bending friction test

특성, 두께의 영향을 받지 않기 때문에 이를 위해 판재 두께에 δ값 을 부여하여 블랭크홀딩력을 가하지 않은 상태로 시험하였다. 즉, U-벤딩시험을 통한 마찰시험을 위해 Fig. 4(a)와 같이 력이 작용하 는 경우와 Fig. 4(b)와 같이 블랭크홀딩력이 작용하지 않도록 다이 페이스에 δ값을 부여하는 소재를 안착하였다. 이러한 조건을 달리 한 두 번의 시험을 통해 블랭크홀딩력에 대한 펀치력의 차이를 비 교하여 결과값을 도출하였다. 마찰시험을 위해 Fig. 5(a)와 같이 50 × 200 mm²의 시편을 확보하였고, 마찰계수 μf는 다음과 같은 식(1)을 통해 결과값이 도출된다.

$$\mu_f = \frac{1}{\pi \alpha} \left[-1 + \left(1 + \pi \alpha \left(\frac{\Delta T}{N}\right)\right)^{\frac{1}{2}} \right] \tag{1}$$

위 식의 N값은 블랭크홀딩력, △T는 블랭크홀딩력이 작용하는 경우의 펀치력 T와 블랭크홀딩력이 작용하지 않은 경우의 펀치력



(a) Speiciment of friction test (b) Result of friction test Fig. 5 Friction test

Table 3 Result of U-bending friction test

Maximum punch force			N	~	f
T(kN)	T'(kN)	ΔT	(kN)	u	μι
30.96	18.35	12.61	20.5	1.5	0.2067

T'의 차이를 의미한다. α는 일반적으로 1.5~3.0을 갖으며 α는 1.5 에서 3.0으로 증가시 마찰계수는 감소한다. N, △T값 도출을 위해 U-벤딩시험과 동일한 조건으로 시험을 실시하였고, 마찰시험의 결 과물은 Fig. 5(b)와 같다. 마찰시험 결과를 통해 도출한 입력값 및 마찰계수 μf는 Table 3에 나타내었다.

3. 유한요소해석

3.1 Y-U모델 변수 도출

Y-U 모델식을 적용하기 위해서는 가공 경화를 모사하기 위한 7개의 변수(Y, C, B, Rsat, b, m, h)와 탄성계수의 연화현상을 모사하는 재료변수 2개(Ea, 5)가 필요하다. 앞서 실험한 인장-압축 시험을 통한 응력-변형률 곡선과 Y-U 모델을 통해 수학적인 계산 으로 얻어지는 곡선의 일치도가 높을수록 A6014의 스프링백 예측 정확도는 증가하므로 이에 대한 정합이 필요하다. 이를 위해 Y-U 모델식의 최적화를 도와주는 프로그램(MatPara, CEM Inst. CO. Ltd)을 이용하여 Fig. 7과 같이 인자를 동정하여 Table 4에 나타 냈다[22]. 항복곡면은 비선형 이동경화가 나타나고 경계곡면은 이 동경화와 등방경화를 따르는 것으로 가정한 두개의 곡면은 Fig. 6과 같다. Y는 항복곡면의 크기, C는 항복곡면의 움직임을 의미한 다. B는 경계곡면의 초기 크기이고, Rsat은 경계곡면의 등방경화 의 수렴값을 b는 경계곡면에 대한 이동경화의 수렴값을 의미한다. m은 경계곡면의 등방경화속도를 나타내는 계수이며 h 비경화영역 의 발전속도(가공경화정체)를 나타내는 계수이다.

Table 4 Results for Yoshida-Uemori parameter by matpara

	Y	С	В	Rsat	b
Donomoton	135	414.8	202.20	135	33.33
Parameter	m	h	Ea	Ę	
	16	0.01	72,000	10	



Fig. 6 Schematic illustration of the YU model



Fig. 7 Derivation Yoshida-Uemori parameter by matpara

3.2 Springback 해석

유한요소해석 상용소프트웨어인 Autoform을 이용하여 성형해 석을 실시하였다. 마찰계수(0.15, 0.2, 0.3), 경화식(등방경화, 이 동경화, Y-U모델), 요소망 크기(2 mm, 4 mm) 등 3개의 인자를 활용하여 U-벤딩 시험과 가장 유사한 결과값을 확인하기 위한 해 석을 실시하였다. 항복조건식은 판재의 평면 이방성을 고려한 Hill1948모델을 활용하였다. 인자들의 수준은 최대 3가지로 설정 하여 총 18번의 해석을 실시하였다. 마찰계수는 Autoform에서 권 장하는 값인 0.15 외 마찰시험에서 확인된 0.2외 추가로 0.3을 적 용한 해석을 실시하였고, 경화식은 등방경화식, 이동경화식, Y-U 모델 등 3가지를 각각 적용하였다. 기본적으로 가장 많이 활용되는 등방경화식을 기준으로 이동경화식을 통해 U-벤딩시 발생되는 인 장, 압축에 대한 바우징거 효과가 표현되는지 확인하기 위해 실시 하였고, 마지막으로 정확도가 높은 것으로 알려진 Y-U모델을 적 용한 해석을 실시하였다. 또한, 요소망 크기는 2 mm와 4 mm로 2가지를 달리하여 크기별 해석 결과를 비교하기 위한 해석 조건을 적용하였다. Table 5는 유한요소해석의 인자별 수준을 정리한 내 용이다. 유한요소해석을 위해 U-벤딩시험과 동일한 정렬로 Fig. 8과 같이 설정하여 시험결과와 비교하였다.

Table 5 Parameters and their levels				
Test.	Coefficient	Hardening	Mesh	
No	of friction	curve	size	
1	0.15	Isotropic	2 mm	
2	0.15	Isotropic	4 mm	
3	0.15	Kinematic	2 mm	
4	0.15	Kinematic	4 mm	
5	0.15	Y-U	2 mm	
6	0.15	Y-U	4 mm	
7	0.2	Isotropic	2 mm	
8	0.2	Isotropic	4 mm	
9	0.2	Kinematic	2 mm	
10	0.2	Kinematic	4 mm	
11	0.2	Y-U	2 mm	
12	0.2	Y-U	4 mm	
13	0.25	Isotropic	2 mm	
14	0.25	Isotropic	4 mm	
15	0.25	Kinematic	2 mm	
16	0.25	Kinematic	4 mm	
17	0.25	Y-U	2 mm	
18	0.25	Y-U	4 mm	

3.3 Springback 해석 결과 비교

유한요소해석 상용프로그램인 Autoform을 이용하여 앞서 정의 한 인자별 수준을 반영한 총 18번의 해석을 실시하였다. 해석 결과 는 NUMISHEET 2011 Benchmark 4를 참고하여 U-벤딩 시험 결과와 동일한 방법으로 2D 단면의 치수를 확인하였다. 이러한 결 과값과 U-벤딩 시험 결과의 비교를 실시하였다.

δ는 상대오차율로 정의한다. U-벤딩 시험결과를 통해 측정한 $\theta 1$ (다이각도), $\theta 2$ (펀치각도), ρ (측벽 휨) 값을 각각 $\theta 1_{exp}$, $\theta 2_{exp}, \rho_{exp}$ 로 정의하고, CAE해석 결과로 측정한 $\theta 1, \theta 2, \rho$ 값 을 시험 순번에 따라 1번부터 18번까지 부여하여 각각의 해석 결 과를 $\theta 1_{NO}, \theta 2_{NO}, \rho_{NO}$ 로 정의하였다.

시험 결과와 해석 결과의 상대적인 차이를 비율로 나타내는 값 인 $\delta_{\theta_1}, \delta_{\theta_2}, \delta_{\rho} \in \theta_1, \theta_2, \rho$ 에 대한 각각의 상대오차율로 표현되 며 다음의 식 (2), (3), (4)로 각각 정의한다.

$$\delta_{\theta 1} = \left| \frac{\theta \mathbf{1}_{NO} - \theta \mathbf{1}_{\exp}}{\theta \mathbf{1}_{\exp}} \right| \times 100\% \tag{2}$$

$$\delta_{\theta 2} = \left| \frac{\theta 2_{NO} - \theta 2_{\exp}}{\theta 2_{\exp}} \right| \times 100\%$$
(3)

$$\delta_{\rho} = \left| \frac{\rho_{NO} - \rho_{\exp}}{\rho_{\exp}} \right| \times 100\% \tag{4}$$



Fig. 8 CAE U-bending tool (a) Set up (b) Synchronization reference geometry

상대오차율의 결과는 Fig. 9과 같다. 해석결과를 비교해보면 전 반적으로 Fig. 9(a)의 θ1 상대오차율 값과 Fig. 9(b)의 θ2 상대오 차율 값은 모두 3% 이내이다. 그러나 Fig. 9(c)의 ρ에 대한 상대 오차율 값은 최소 1.3%에서 최대 187.72%로 편차가 상당함을 확 인할 수 있다. U-벤딩시험은 복잡한 형상이 아닌 단순한 형상에서 인장-압축 거동이 일어난다. 실제 시험 결과와 해석 결과는 측벽부 에서의 오차가 많이 발생함을 볼 수 있다. 마찰계수에 의한 해석 정확도를 비교하면, 마찰계수가 0.2일 때 상대적으로 정확도가 가 장 높고 0.15, 0.25순으로 정확도를 보인다. 항복함수별 해석 정확 도를 비교하면, Y-U모델의 해석 정확도가 가장 높고, 요소망 크기 별 해석 경향은 전반적으로 4 mm보다는 2 mm에서 해석 결과가 좋게 나타났다.

전체 해석결과를 종합하면 역설계 데이터와 정확도가 가장 높은 것은 11번 해석 결과이고 다음으로 12번, 6번 순으로 나타났으며 11번 해석 결과는 Y-U모델을 적용한 마찰계수 0.2, 요소망 크기 2 mm의 조건인 경우이다.

4. 결 론

본 연구에서는 A6014-T4 두께 1.4 mm 소재를 이용하여 스프 링백 예측 정확도를 확인하였다. 이를 위해 인장시험, 인장-압축시 험, U-벤딩시험, 마찰시험을 실시하였고, 시험 결과에 대한 해석 결과의 신뢰도를 높이기 위해 3D 측정기를 통해 U벤딩 시험 결과 를 모델링화하여 시험 결과의 치수를 측정하였다.

유한요소해석은 상용프로그램인 Autoform을 이용하여 인자로 마찰계수, 경화식, 요소망 크기에 대한 수준을 달리하여 해석을 실 시하였다. 본 논문에서 수행하고 검토된 연구내용을 요약하면 다 음과 같다.

A6014-T4 소재의 스프링백 예측에 대한 해석을 위해 3개의 인 자에 대한 최대 3개의 변수를 입력하여 총 18번의 해석을 수행하 였고, 해석 결과물에 대한 중앙 단면을 2D 단면으로 측정하였다.



그 결과, θ1(다이각도) 및 θ2(펀치각도)는 상대오차율이 3% 이내 로 해석 결과와 U-벤딩시험 결과가 유사하게 나타났다.

그러나, ρ(측벽 휨)에 대한 상대오차율은 시험 결과와 해석 결과 의 편차가 상당히 심하게 나타났으며, 경화식을 기준으로 정확도 를 비교하면 Y-U모델, 이동경화식, 등방경화식 순으로 정확도가 높게 나타났다. 전체 해석 결과에서 마찰계수 0.2 및 요소망 크기 2 mm, Y-U모델을 통한 해석이 상대오차율 1.3%로 시험 결과가 가장 일치하는 것으로 확인되었다. Y-U모델의 인자를 통한 U-벤딩 유한요소해석을 실시하면서, p에 대한 상대오차율은 등방경화식과 Y-U모델의 정확도 차이가 최대 170%가 발생하였다. 잘못 적용된 경화식으로 인해 발생되는 해석 결과의 차이는 스프링백 예측 정확도를 심각하게 떨어뜨릴 수 있음을 고찰할 수 있었다. 이번 연구를 통해, 추가 연구의 필요 성을 생각하게 한다. 알루미늄과 같이 FCC구조의 이방성 소재는 스프링백 예측이 난해하므로, 보다 심층적인 스프링백 해석 연구 가 필요하다. 도어 이너류 등 생산 현장에서 스프링백으로 인해 고질적인 품질 문제를 안고 있는 차체부품은 스프링백 해석을 실 시 후 결과 비교를 반복하여 Y-U모델의 스프링백 예측 신뢰도를 높여야한다고 판단된다.

References

- [1] IPCC, 2018, viewed 18 March 2022, An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, <https://www.gihoo.or.kr/portal/kr/community/data_view.do?
 p=1&idx=18546&column=&groupname=data&groupid=&f= 1&q=>.
- [2] Lee, M. G., 2021, Lightweight Materials Technology in the Transition to Electric Mobility, Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, 43:1 38-40.
- [3] Kim, S., Lee, M., Choi, B., Lee, J., Kim, H., 2012, Springback Prediction in the Finite Element Analysis of the Stamping Process of an S-rail considering Kinematic Hardening, KSAE Annual Conference, 1365-1368.
- [4] Chen, P., Ko, M., 2007, Simulation of Springback Variation in Forming of Advanced High Strength Steels, J. Mater. Process. Technol., 190:1-3 189-198, https://doi.org/10.1016/ j.jmatprotec.2007.02.046.
- [5] Yang, D.-Y., Lee, S.-W., Yoon, Yoo, D.-J., 1999, Springback Analysis in Sheet Metal Stamping Processes and Industrial Applications, Transactions of Materials Processing, 8:1 22-28.
- [6] Bertram, A., Böhlke, T., Krawietz, A., Schulze, V., 2007, Finite Element Simulation of Sheet Metal Forming and Springback using a Crystal Plasticity Approach, NUMIFORM'2007, AIP Conference Proceeding, 908:1 769-773.
- [7] Chung, K., Lee, M. G., Kim, D., Kim, C., Wenner, M. L., Barlat, F., 2005, Spring-back Evaluation of Automotive Sheets based on Isotropic-kinematic Hardening Laws and Non-quadratic Anisotropic Yield Functions: Part I: Theory and Formulation, Int. J. Plast., 21:5 861-882, https://doi.org/10.1016/j.ijplas.

2004.05.016.

- [8] Yoshida, F., 2000, A Constitutive Model of Cyclic Plasticity, Int.
 J. Plast., 16:3-4 359-380, https://doi.org/10.1016/S0749-6419(99)00058-3.
- [9] Yoshida, F., Urabe, M., Toropov, V.V., 1998, Identification of Material Parameters in Constitutive Model for Sheet Metals from Cyclic Bending Tests, Int. J. Mechanical Sciences, 40:2-3 237-249, https://doi.org/10.1016/S0020-7403(97)00052-0.
- [10] Yoshida, F., Uemori, T., Okada, T., Toropov, V.V., 2000, Identification of Material Parameters in Largestrain Cyclic Plasticity Models for Sheet Metal Forming Applications, Proc. 8th Int. Symp., 612-614.
- [11] Yoshida, F., Uemori, T., 2002, A Model of Large-strain Cyclic Plasticity Describing the Bauschinger Effect and Workhardening Stagnation, Int. J. Plast., 18:5-6 661-686, https://doi.org/10.1016/ S0749-6419(01)00050-X.
- [12] Uemori, T., Sumikawa, S., Naka, T., Ma, N., Yoshida, F., 2017, Influence of Bauschinger Effect and Anisotropy on Springback of Aluminum Alloy Sheets, Materials Transactions, Japan Institute of Metals, 58:6 921-926, https://doi.org/10.2320/ matertrans.l-m2017812.
- [13] Meng, Q., Zhao, J., Mu, Z., Zhai, R., Yu, G., 2022, Springback Prediction of Multiple Reciprocating Bending based on Different Hardening Models, Journal of Manufacturing Processes, 76 251-263, https://doi.org/10.1016/j.jmapro. 2022.01.070.
- [14] Krinninger, M., Feistle. M., Golle R., Volk, W., 2017, Notch Shear Cutting of Aluminum Alloys, 17th International Conference on Sheet Metal, SHEMET17, Proceedia Engineering, 183 53-58, https://doi.org/10.1016/j.proeng. 2017.04.010.
- [15] Hill, R., 1948, A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 193:1033 281-297, https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045.
- [16] Hill, C. W. L., Hwang, P., Kim, W. C., 1990, An Eclectic Theory of the Choice of International Entry Mode, Strateg. Manag. J., 11:2 117-128, https://doi.org/10.1002/smj.4250110204.
- [17] Rogan, R. W., Hosford, W. F., 1980, Upper-bound Anisotropic Yield Locus Calculations Assuming (111) -Pencil Glide, Int. J. Mechanical Sciences, 22:7 419-430, https://doi.org/10.1016/ 0020-7403(80)90011-9.
- [18] Barlat, F., Brem, J. C., Yoon, J. W., Chung, K., Dick, R. E., Lege,

D. J., Pourboghrat, F., Choi, S.-H., Chu, E., 2003, Plane Stress
Yield Function for Aluminum Alloy Sheets—Part 1: Theory, Int.
J. Plasticity, 19:9 1297-1319, https://doi.org/10.1016/S0749-6419(02)00019-0.

- [19] Makinouchi, A., 1993, Verification of Simulation with Experiment, NUMISHEET'93: Proceedings of the 2nd International Conference Numerical Simulation of 3-D Sheet Metal Forming Processes, Tokyo, Japan.
- [20] Chung, K., Kuwabara, T., Verma, R., Park, T., 2011, BM4 -Pre-strain Effect on Spring-back of 2-D Draw Bending, The NUMISHEET 2011 Benchmark Study of the 8th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D SheetMetal Forming Processes, 175.
- [21] Kim, Y. S., 1994, Comparison of Friction Coefficients of Sheet Materials in Various Deformation Modes, Trans. Mater. Process., 3:1 51-62.
- [22] Seo, O. S., Lee, E. G., Hong, S. M., Choi, S. C., Ryu, S. Y., Lee, M. G., Kim, H. Y., 2012, Prediction of Springback for Al Alloy Sheet using Yoshida-Uemori Mode, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., 219-222.

Hyungki Lee Senior researcher in KEIT. Undergraduate School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interests are Press stamping Design and Plasticity Theory. E-mail: hklee@keit.re.kr	
Sang-Hoon Kim Senior Research Engineer in the Advance Research Team of HWASHIN CO., LTD. His research interest is Plasticity Theory, Press Forming, Sheet Metal Forming, 3D Scanning, Reverse Engineering. E-mail: sang-hoon.kim@hwashin.co.kr	
Duy-Tung Do Research Engineer in the Advance Research Team of HWASHIN CO., LTD. His research interest is Plasticity Theory, Press Forming, Sheet Metal Forming, 3D Scanning, Reverse Engineering. E-mail: tung-Do@hwashin.co.kr	
Jinjae Kim Post Doc. in the School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interests are Plasticity Theory, Press Forming, Sheet Metal Forming. E-mail: jinjaekim@knu.ac.kr	
Young-Suk Kim Professor in the School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interests are Plasticity Theory, Press Forming, Sheet Metal Forming. E-mail: caekim@knu.ac.kr	