

L-벤딩에서 공정 설계변수가 스프링백에 미치는 영향의 평가를 위한 유한요소해석 및 검증

조민진¹ · 김수진² · 전만수[#]

Finite Element Analysis and Its Verification of Springback in L-bending to Evaluate the Effect of Process Design Parameters

M. J. Cho, S. J. Kim, M. S. Joun

(Received November 2, 2021 / Revised November 16, 2021 / Accepted November 22, 2021)

Abstract

A parametric study was conducted on the effects of five fundamental design parameters on springback, including die clearance, step height, step width, punch radius, and taper relief in an L-bending process, controlled by the compression force. The experiment was also conducted to verify the usefulness of the parametric study procedure for process design, as well as the finite element predictions. The elastoplastic finite element method was utilized. The L-bending process of the york product, which is a key part of the breaker mechanism, was employed. The deformation of the material was assumed to be due to plane strain. Five samples of each design parameter were selected based on experiences in terms of process design. The finite element predictions were analyzed in detail to show a shortcut towards the process design improvement which can replace the traditional process design procedure relying on trial-and-errors. The improved process design was verified to meet all the requirements and the predictions and experiments were in good agreement.

Keywords: Parametric Study, L-Bending, Springback, Design Parameters, Elastoplastic FEM

1. 서 론

최근 20 년간 판재의 체적소성가공 기술 또는 판단조기술이 크게 발전하였다[1,2,3]. 판단조에서는 기본적으로 판재의 두께 대비 판재의 크기 비율이 전통적인 판재성형에 비하여 작으며, 비교적 큰 변형률이 동반된다. 이러한 성형 제품에 대한 요구 정밀도가 지속적으로 높아지고 있고, 형상도 복잡해지고 있다. 일반 판재성형과 마찬가지로 판단조 공정으로 치수와 공차를 만족시키면서 제품의 품질과 생산성을 확보하는 것이 쉽지않다. 특히 스프링백(Springback) 현상은 벤딩(Bending) 제품의 품질에 직

접적인 영향을 미치게 되므로 설계단계에서 이에 대한 고려가 필요하다. 해석적 측면에서도 스텝에 의한 국부변형이 크기 때문에 기존의 판재성형 이론으로는 한계가 있으며, 체적소성 가공 공정에서 스프링백을 예측하기 위한 탄소성 유한요소해석 기술의 적용이 필요하다[4].

L-벤딩(L-bending)도 해석적 측면에서 넓게는 판단조 공정으로 보는 것이 타당하다. 변형이 굽힘변형을 받는 모서리 부분에 집중되어 있고, 고정도의 스프링백의 예측이 요구되기 때문이다. 산업현장의 L-벤딩 공정의 개발에 있어서, 경험에 의존해서 벤딩 펀치와 벤딩금형을 분할 형식으로 설계하여 제작한 후, 형상에 따라 교정 공정과 아이들 공정을 추가하거나 벤딩펀치와 벤딩금형을 수정하는 과정을 수차례 반복하는 시행착오적 방식으로 제품의 품질을

1. 한국폴리텍대학 자동차기계과, 교수
2. 경상국립대학교 기계항공공학부, 교수
교신저자: 경상국립대학교 기계항공공학부, 교수.
E-mail: msjoun@gnu.ac.kr. ORCID: 0000-0003-1678-5415

만족시키고 있다. 이것은 L-벤딩 공정이 대표적인 스프링백에 취약한 공정이기 때문으로 해석기술의 한계 상황에 놓여있기 때문이다.

스프링백에 관한 연구는 많은 연구자들과 기술자들에 의해 진행되어 왔다. Ling 등[5]은 L-벤딩 공정의 금형 개발 시 문제되는 스프링백 문제를 감소시키기 위해, 금형간격(Die clearance), 금형 반경, 스텝 높이(Step height)와 같은 설계변수에 대한 변수영향 분석을 유한요소법을 활용하여 실시할 것을 권장하였다. Jang 등[6]은 90° 굽힘 공정에서 발생하는 스프링백을 사이드 가압 및 굽힘 공정으로 보정하였다. 이 목적으로 유한요소해석 기술이 사용되었으나, 강소성 유한요소법을 사용했기 때문에 스프링백 자체를 예측하지는 못하였다. Hong 등[7]은 굽힘 성형에서 DOE를 활용한 최적설계기법으로 비드의 형상과 위치 간의 상관관계를 파악하여 보다 효율적으로 강건한 설계를 실시하였다.

Kumar 등[8]은 L-벤딩에서 알루미늄 판재품의 스프링백 및 표면의 마모 효과를 확인하기 위해 0.5 ~ 3.5 mm 두께의 알루미늄 판재를 두께별로 실험하였으며, 금형간격이 각 두께에 대한 특정치를 넘어서면 스프링백과 마모가 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. Chen 등[9]은 판재의 L-벤딩에서 발생하는 스프링백을 효율적으로 줄일 수 있는 리버스 벤드 방식(Reverse bend approach)을 제안하였고, 굽힘 영역을 세 영역으로 구분하고 영역별 응력 분포와 스프링백 현상을 유한요소법으로 예측하였고, 결과의 타당성을 실험을 통해 검증하였다.

Nasrollahi 등[10]은 굽힘 영역에 구멍이 있는 천공 부품에 대한 연구에서 구멍 유형, 구멍 수, 시트 폭에 대한 구멍 폭의 비율 등의 공정변수에 대해 유한요소해석과 함께 실험을 실시하였다. 그 결과, 굽힘 영역에 구멍이 있으면 스프링백에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. Thipprakmas 등[11]은 V-굽힘 공정에서 굽힘 각도, 재료 두께 및 펀치 반경 등의 공정 매개변수가 굽힘 제품의 스프링백과 스프링고에 직접적인 영향을 미친다는 것을 유한요소해석과 Taguchi 기법 및 ANOVA 기법을 조합하여 예측하였다. Lee 등[12]은 고온에서 두꺼운 판재의 굽힘에 관한 유한요소해석 결과를 바탕으로 스프링고 예측모델을 구축하였고 치수를 향상시키기 위한 금형의 보정 방법을 제시하였다.

기존의 L-벤딩 공정과 금형구조는 스프링백의 문

제를 해결하기 위해서 제조현장의 경험에 의존하여 수차례의 시행오차를 거쳐 개발된 것이다. 해석 기술이 발전된 지금도 L-벤딩에 영향을 미치는 주요 공정인자들이 표준화되어 있지 않아, 관련 문제가 반복적으로 발생되고 있다.

이 연구에서는 압축량 조절방식을 채택한 금형으로 차단기 핵심부품인 요크(Yoke)를 L-벤딩할 때 발생하는 스프링백 현상의 주요 인자로 산업 현장의 경험에 의거하여 금형간격, 테이퍼 릴리프(Taper relief), 스텝 높이, 스텝 폭(Step width), 펀치 반지름 등을 결정하여, 그 영향을 탄소성 유한요소법으로 분석하고, 그 결과의 타당성을 검토한다.

2. 문제의 정의

Fig. 1은 스프링백을 정밀하게 제어할 수 있도록 고안된 압축량 조절방식의 L-벤딩 금형구조이며, 스프링백에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 주요 인자들, 즉 금형간격, 테이퍼 릴리프, 스텝 높이, 스텝 폭, 펀치 반지름 등을 정의하였다[13]. 정의된 인자들을 단계적으로 조합하여 유한요소해석을 수행하였으며, 각 인자별 단계에 따라 굽힘 각도와 다리 길이의 변화량을 비교하였다.

L-벤딩 금형을 경험에 의존해서 설계할 때, 스프링백으로 인해 굽힘 각도에 대한 치수정밀도는 설계자의 경험과 수차례의 시행착오적 접근을 통해 보정될 수 있어서, 많은 비용과 시간이 소요된다. 따라서 이 연구에서는 탄소성 유한요소해석 기술을 활용하여 L-벤딩 공정에서의 스프링백 현상을 분석하였다[14, 15].

2.1 L-벤딩 공정 변수 정의

Fig. 1은 L-벤딩 금형의 공정변수를 정의한다. 공정 변수 중에서 금형 설계자가 제어할 수 있는 변수는 제어인자로 분류하였고, 제어할 수 없는 변수는 잡음인자로 하였다. 그리고 금형설계에서 표준화되어 있는 변수는 고정인자로 정의하였다.

이 연구에서 제어인자는 금형간격(DC), 테이퍼 릴리프(TR), 스텝 높이(SH), 스텝 폭(SW), 펀치 반지름(PR)이고, 제어할 수 없는 잡음인자는 원소재 두께(TS), 즉 2.0 mm이고, 고정인자는 굽힘 펀치 직선거리(Bending distance, DS)와 굽힘 펀치 입구 반지름(Entry radius, ER), 즉 3.0 mm이다.

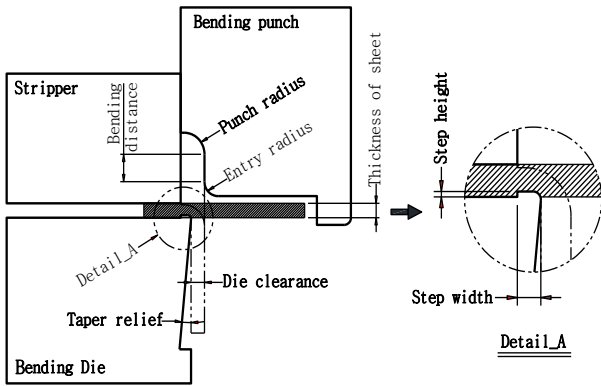


Fig. 1 L-Bending structure and process factor

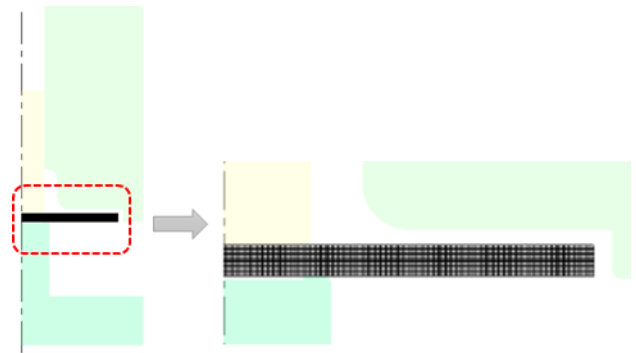


Fig. 2 Initial configuration of the FE analysis problem

2.2 유한요소해석 모델

사용된 해석 조건을 Table 1[4]에 요약하였다. 요크 제품에 사용된 소재는 KS D 3512 SPCC-S이다. 재료는 탄소성체로 간주하였고, 금형은 강체로 가정하였다. 이 재료의 기계적 성질(탄성계수, 포아송비)과 유동곡선(Swift 모델)은 Table 1에서 보는 바와 같다.

시험은 상온(25 °C)에서 이루어졌다. 재료의 변형률 속도 의존성을 무시하였으므로 펀치의 속도를 -1.0 mm/s로 가정하였다.

Table 1 Material properties and process conditions [4]

Material	KS D 3512 SPCC-S
Young's modulus (E)	210 GPa
Poisson's ratio (ν)	0.3
Flow stress ($\bar{\sigma}$)	$143.8(1+\bar{\epsilon}/0.0068)^{0.26}$ MPa
Coefficient of Coulomb friction (μ)	0.05
Initial temperature of material (T)	25 °C
Punch velocity (v)	-1.0 mm/s

해석 중 금형의 소재 칩투를 0.05 mm 이내로 제한하였고, 금형에 칩투된 절점은 후속 해석 단계에서 금형 표면에 위치할 때까지 점진적으로 밀어내었다. 금형과 소재 사이는 비교적 양호하게 윤활되었다는 판단 하에 마찰계수를 0.05로 가정하였다.

요소 수는 2,000 개로 초기의 해석 모델은 Fig. 2에서 보는 바와 같다[15].

2.3 유한요소해석

L-벤딩의 목표치인 굽힘 각도 $90 \pm 0.05^\circ$ 와 굽힘 다리 길이 18.0 ± 0.1 mm 를 확보하기 위해 산업현장의 경험치를 바탕으로 스프링백에 영향을 미치는 제어인자 5 가지를 선정하였고, 비교분석을 위해 각 인자를 5 단계로 구분하였다.

따라서 유한요소해석 횟수는 총 25 번이다. 선정된 5 개 제어인자는 DC, TR, SH, SW, PR 로 Table 2에 나타내었다. 여기서 DC 는 원소재 두께를 기준으로 양쪽으로 5%씩 변화시켰고, SH 는 원소재 두께의 10% 를 기준으로 양쪽으로 2.5%씩 변화시켰다. PR 값은 원소재 두께 2.0 mm 에 굽힘 금형 반지름 0.5 mm 을 더한 굽힘 제품의 외측 반지름 2.5 mm 이상을 적용했다.

Table 2 L-bending design process variable level

Control Parameters	Unit	Levels				
		1	2	3	4	5
DC	mm	19	195	20	205	21
TR	°	0	01	015	02	03
SH	mm	01	015	02	025	03
SW	mm	1.0	1.25	15	1.75	2.0
PR	mm	25	26	27	28	29

각 제어인자의 기준 값은 PR=2.80(2.5+t15%), TR=0.15°, SH=0.20(t10%), SW=1.75, DC=2.00(1t) 이다. 유한요소해석은 5 개의 인자 중 4 개 인자는 현장

경험치 기준 값을 적용하고 나머지 1 개 인자는 Table 2와 같이 단계별로 구분된 값을 적용하여 수행하였다.

첫 번째 유한요소해석은 금형간격에 따른 스프링백 변화를 비교분석하기 위한 것으로, 다른 인자는 기준 값으로 고정하고 DC 값을 원소재 두께의 0.95 ~ 1.05 배(1.9 ~ 2.1)까지 5 단계로 변경하면서 유한요소해석을 수행하였다.

두 번째 유한요소해석은 금형 테이퍼 릴리프에 따른 스프링백 변화를 비교분석하기 위한 것으로, 다른 인자는 기준 값으로 고정하고 TR 값을 0 ~ 0.3° 까지 5 단계로 변경하면서 유한요소해석을 수행하였다.

세 번째 유한요소해석은 금형 스텝 높이에 따른 스프링백 변화를 비교분석하기 위한 것으로, 다른 인자는 기준 값으로 고정하고 SH 값을 원소재 두께의 5 ~ 15%(0.1 ~ 0.3)까지 5 단계로 변경하면서 유한요소해석을 수행하였다.

네 번째 유한요소해석은 금형 스텝 폭에 따른 스프링백 변화를 비교분석하기 위한 것으로, 다른 인자는 기준 값으로 고정하고 SW 값을 원소재 두께의 50 ~ 100%(1.0 ~ 2.0)까지 5 단계로 바꾸면서 5 회에 걸쳐 유한요소해석을 수행하였다.

다섯 번째 유한요소해석은 펀치 반지름에 따른 스프링백 변화를 비교분석하기 위한 것으로, 다른 인자는 기준 값으로 고정하고 PR 값을 제품 외측 반지름에 원소재 두께의 5 ~ 20%(2.5 ~ 2.9)를 더한 5 단계의 공정설계에 대하여 유한요소해석을 수행하였다.

3. L-벤딩의 유한요소해석 결과

3.1 금형간격의 영향

금형간격(DC)에 따른 스프링백의 유한요소해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. DC가 원소재의 두께보다 작으면 스프링백이 발생하였고, 크면 스프링고 발생하였다. DC가 증가하면, 다리 길이가 감소함을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 주요 3 가지 조건에 대한 유한요소해석 결과를 나타내고 있다. 스프링고가 발생한 DC = 1.9 mm의 경우, 벤딩각도는 89.87°로 목표 값인 90 ± 0.05°와는 -0.08° 오차를 보였다. 벤딩길이는 18.28

mm로 목표 값인 18 ± 0.1 mm와는 -0.18 mm의 오차를 보였다. 이것은 공차범위를 만족시키지 못한다. 스프링백이 발생한 DC = 2.1 mm의 경우, 굽힘 각도는 90.35°로 목표 값인 90 ± 0.05°와는 0.3° 오차를 보였다. 벤딩 다리 길이는 17.97 mm로 목표 값인 18 ± 0.1 mm를 만족하였다. 벤딩각도와 벤딩길이를 동시에 만족시킨 DC = 2.0 mm의 경우, 현장 경험치로 벤딩 각도는 90.01°로 목표 값인 90 ± 0.05°를 만족하였다. 벤딩길이는 18.06 mm로 18 ± 0.1 mm의 공차범위를 만족하였다.

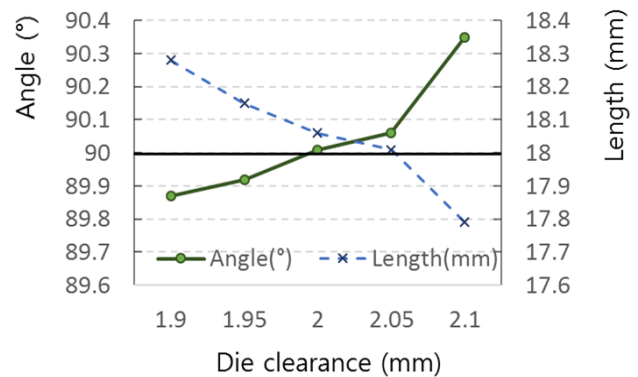


Fig. 3 Influence of die clearance

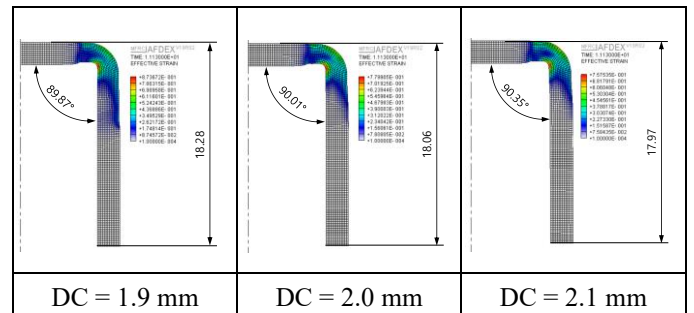


Fig. 4 Die clearance analysis result

해석결과를 정리해 보면, DC = 2.0, 2.05, 2.1 mm의 경우, 스프링백으로 벤딩각도는 0.35°까지 증가하였으나, 벤딩길이는 치수공차 범위 이내에 존재하며 DC로부터 영향을 거의 받지 않았다. 반면, DC = 1.9, 1.95 mm의 경우, 스프링고의 발생으로 벤딩각도는 -0.13°까지 발생하였다. 벤딩길이도 18.28 mm로 공차 범위를 벗어나며, DC의 감소가 치수정밀도에 비교적 큰 영향이 미친다는 것을 알 수 있다.

3.2 테이퍼 릴리프의 영향

벤딩금형에 적용한 테이퍼 릴리프(TR)에 따른 스프링백 해석결과를 Fig. 5에 나타내었다. 벤딩각도를 만족하는 최적의 TR은 0.1 ~ 0.15°의 범위이다. 이 값이 아주 작으면 스프링백이 발생하고, 너무 크면 스프링고가 발생함을 알 수 있다. 벤딩길이는 TR의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

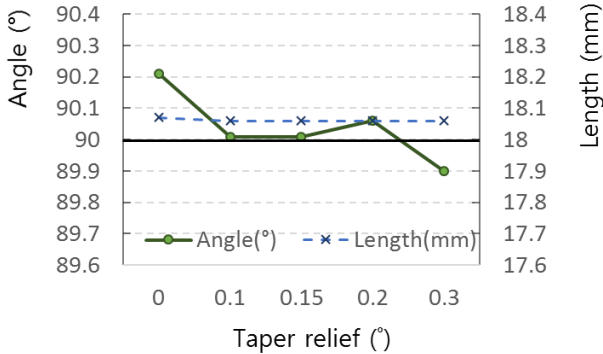


Fig. 5 Influence of taper relief

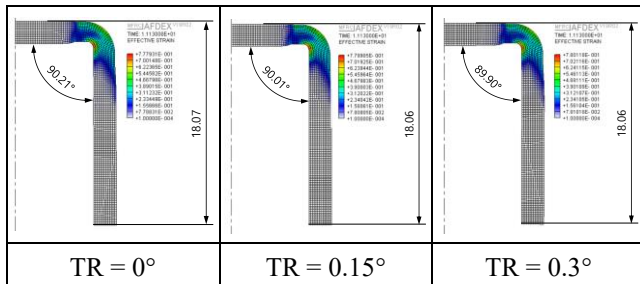


Fig. 6 Taper relief analysis result

Fig. 6에는 주요 3 가지 경우, 즉 TR = 0, 0.15, 0.3°에 대한 유한요소해석 결과를 나타내었다. 스프링백이 발생한 TR = 0°의 경우, 벤딩각도는 90.21°로 목표 값인 $90 \pm 0.05^\circ$ 와는 0.16°의 오차를 보였다. 벤딩길이는 18.07 mm로 목표 값인 18 ± 0.1 mm를 만족하였다. 스프링고가 발생한 TR = 0.3°의 경우, 벤딩각도는 89.90°로 목표 값인 $90 \pm 0.05^\circ$ 와는 -0.05° 오차를 보였다. 벤딩길이는 18.06 mm로 목표 값인 18 ± 0.1 mm를 만족하였다. 벤딩각도와 벤딩길이를 동시에 만족시킨 TR = 0.15°의 경우, 현장 경험치로 벤딩각도는 90.01°로 목표 값인 $90 \pm 0.05^\circ$ 를 만족하였다. 벤딩길이도 18.06 mm로 18 ± 0.1 mm로 공차범위를 만족하였다.

해석결과를 정리해 보면, TR = 0 ~ 0.2°의 경우, 스프

링백으로 벤딩각도는 90.21°까지 증가하였으나, 벤딩길이는 치수공차 범위 내로 영향을 거의 받지 않았다. TR = 0.3°의 경우, 반대로 스프링고가 발생하여 벤딩각도는 89.90°로 나타났으며, -0.1° 내외의 영향을 받았다. 벤딩길이는 TR = 0 ~ 0.2°와 동일하게 공차범위 내로 영향을 거의 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

3.3 스텝 높이의 영향

벤딩금형에 적용한 스텝 높이(SH)에 따른 스프링백 해석결과를 Fig. 7에 나타내었다. SH는 벤딩각도를 감소시켜서 원소재 두께의 10%인 0.2 mm보다 작으면 스프링백이 발생하고, 크면 스프링고가 발생한다. SH가 증가함에 따라 벤딩길이도 지속적으로 길어진다.

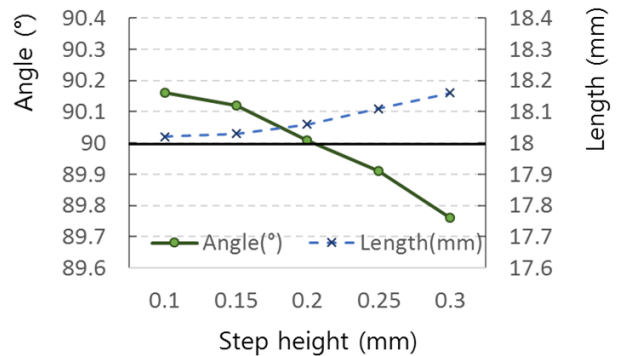


Fig. 7 Influence of step height

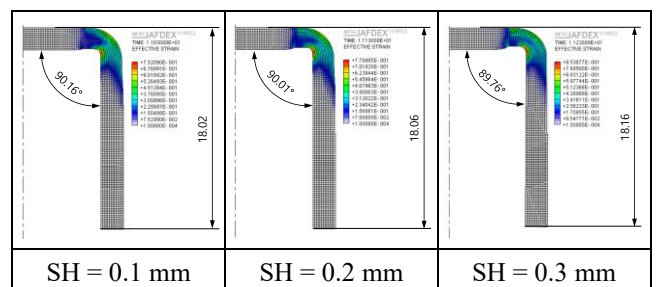


Fig. 8 Step height analysis result

Fig. 8는 주요 3 가지 조건(SH = 0.1, 0.2, 0.3 mm)에 대한 유한요소해석 결과를 나타내고 있다. 스프링백이 발생한 SH = 0.1 mm의 경우, 벤딩각도는 90.16°로 목표 값인 $90 \pm 0.05^\circ$ 와는 0.11°의 오차를 보였다. 벤딩길이는 18.02 mm로 목표 값인 18 ± 0.1 mm를 만족하였다. 스프링고가 발생한 SH = 0.3 mm의 경우, 벤

딩각도는 89.76°로 목표 값인 $90 \pm 0.05^\circ$ 와는 -0.19° 오차를 보였다. 벤딩길이는 18.16 mm로 목표 값인 18 ± 0.1 mm 와는 0.06 mm 오차가 발생하였다. 벤딩 각도와 벤딩길이를 동시에 만족시킨 SH = 0.2 mm의 경우, 벤딩각도는 90.01°로 목표 값인 $90 \pm 0.05^\circ$ 를 만족하였다. 벤딩길이는 18.06 mm로 18 ± 0.1 mm로 공차범위를 만족하였다.

해석결과를 정리해 보면, SH = 0.1 ~ 0.2 mm의 경우, 스프링백으로 벤딩각도는 90.16°까지 증가하였으나, 벤딩길이는 치수공차 범위 내로 영향을 거의 받지 않았다. SH = 0.25, 0.3 mm의 경우, 스프링고의 발생으로 벤딩각도는 89.76°로 나타나 -0.24° 까지 영향을 받았다. 벤딩길이는 18.16 mm로 공차범위를 벗어나 치수정밀도에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

3.4 스텝 폭의 영향

벤딩금형에 적용한 스텝 폭(SW)에 따른 스프링백 해석결과를 Fig. 9에 나타내었다. 모든 조건에서 스프링백이 발생했으며, SW = 1.5 mm와 SW = 1.75 mm 사이에서 스프링백이 가장 작은 최적 값이 존재한다. SW와 다리 길이는 약한 비례 관계이다.

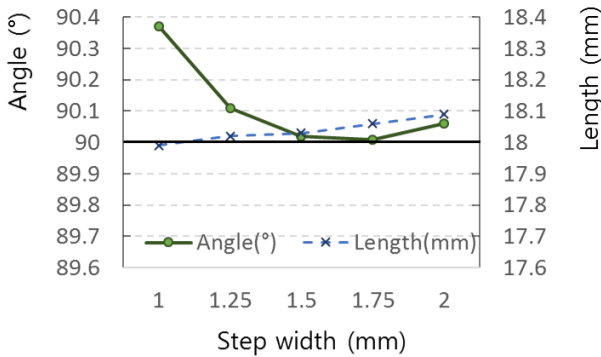


Fig. 9 Influence of step width

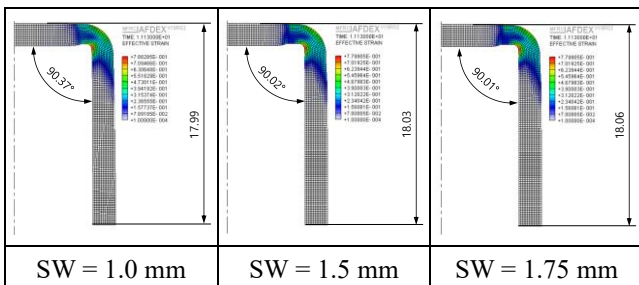


Fig. 10 Step width analysis result

Fig. 10은 주요 3 가지(SW = 1.0, 1.5, 1.75 mm) 경우에 관한 유한요소해석 결과를 나타내고 있다. 스프링백이 발생한 SW = 1.0 mm의 경우, 벤딩각도는 90.37°로 목표 값인 $90 \pm 0.05^\circ$ 와는 0.32° 오차를 보였다. 벤딩길이는 17.99 mm로 목표 값인 18 ± 0.1 mm의 공차범위를 만족하였다. 목표 값에 가장 근접한 SW = 1.5 mm의 경우, 벤딩각도는 90.02°로 목표 값인 $90 \pm 0.05^\circ$ 의 공차범위를 만족하였고, 벤딩길이는 18.03 mm로 18 ± 0.1 mm의 공차범위를 만족하였다. 벤딩 각도와 벤딩길이를 동시에 만족시킨 SW = 1.75 mm의 경우, 벤딩각도는 90.01°로 목표 값인 $90 \pm 0.05^\circ$ 를 만족시켰으며, 벤딩길이는 18.06 mm로 18 ± 0.1 mm의 공차범위를 만족하였다.

해석결과를 정리해 보면, SW = 1.0 ~ 2.0 mm의 경우, 스프링백 발생으로 벤딩각도는 90.37°까지 증가하였다. 그러나 벤딩길이는 공차범위 이내에 존재하며, SW로부터 영향을 거의 받지 않았고 스프링고도 발생하지 않았다.

3.5 펀치 반지름의 영향

펀치 반지름(PR)에 따른 스프링백의 유한요소해석 결과를 Fig. 11에 나타내었다. PR이 제품 외부 반지름과 동일한 2.5 mm이면 스프링고가 발생하였다. PR을 증가시키면 스프링고는 개선되지만, 너무 키우면 스프링고가 다시 발생한다. 모든 범위에서 PR이 커지면 벤딩길이가 조금씩 증가한다.

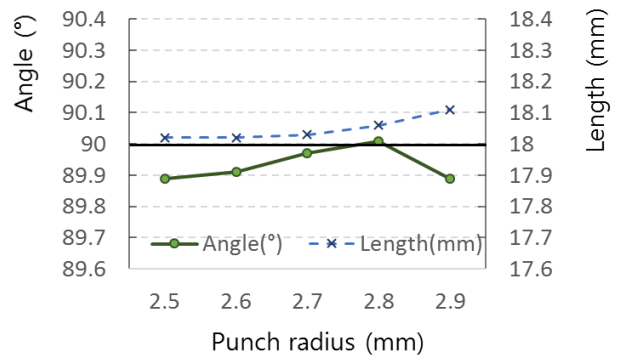


Fig. 11 Influence of punch radius

Fig. 12는 주요 3가지 경우(PR = 2.7, 2.8, 2.9 mm)에 대한 유한요소해석 결과를 나타내었다. 스프링고가 발생한 PR = 2.7 mm의 경우, 벤딩각도는 89.97°이고, 벤딩길이는 18.03 mm이다. 이것들은 목표 값인 $90 \pm 0.05^\circ$ 와 18 ± 0.1 mm 공차범위를 각각 만족한다.

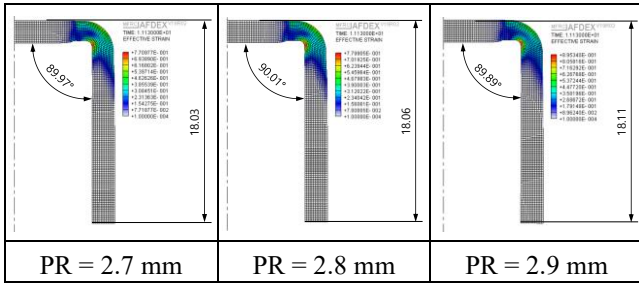


Fig. 12 Punch radius analysis result

스프링고가 가장 심하게 발생한 PR = 2.9 mm의 경우, 벤딩각도는 89.89°로 목표 값인 $90 \pm 0.05^\circ$ 와는 -0.06° 오차를 보였고, 벤딩길이는 18.11 mm로 목표 값인 18 ± 0.1 mm 와는 0.01 mm만큼 오차를 보여, 공차범위를 만족시키지 못하였다. 벤딩각도와 벤딩길이를 동시에 만족시킨 PR = 2.8 mm의 경우, 벤딩각도는 90.01° 이며, 벤딩길이는 18 ± 0.1 mm로 나타났다.

해석결과를 정리해 보면, PR = 2.7, 2.8 mm의 경우, 스프링고와 스프링백이 발생되었지만, 벤딩각도와 벤딩길이는 치수공차 범위를 만족시켰고, PR = 2.5, 2.6, 2.9 mm의 경우, 스프링고의 발생으로 벤딩각도는 89.89°로 기준 값에 비해 -0.11° 의 차이를 보였다. 벤딩길이도 18.11 mm로 공차범위를 벗어나 치수정밀도에 다소 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

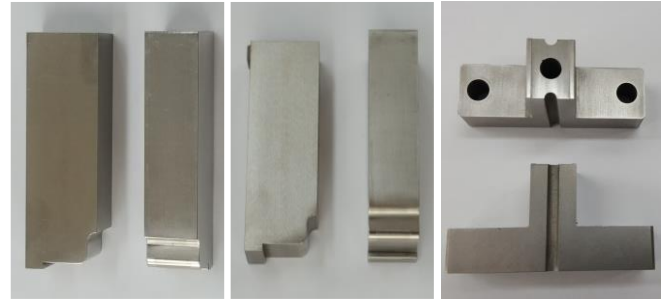
3.6 굽힘 시험 검증

해석결과를 바탕으로 최적의 설계조건으로 DC = 2.0, TR = 0.15, SH = 0.2, SW = 1.75, PR = 2.8를 적용하여 벤딩펀치 및 금형을 Fig. 13(a)와 같이 제작하였으며 그 시제품은 Fig. 13(b)에서 보는 바와 같다.

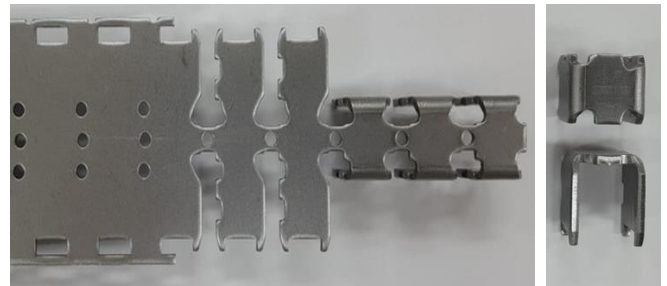
이 요크 시제품의 주요 치수인 벤딩각도와 벤딩길이 치수는 Fig. 14에서 보는 바와 같이 3차원 측정기를 사용하여 측정되었다. 10개의 시제품에 대한 측정값의 평균을 유한요소해석 결과와 함께 Table 3에 정리하였다.

L-벤딩 공정의 실험과 유한요소해석 결과를 비교하면, 벤딩각도는 $0.02 \sim 0.03^\circ$ 의 차이를 보였으며, 도면의 치수 및 공차범위를 만족하였다. 벤딩길이는 0.01 mm 정도의 차이를 보여 도면의 치수 및 공차범위를 만족하였다.

결과적으로 L-벤딩 공정의 핵심인 벤딩각도와 벤딩길이의 예측결과는 실험결과와 공학적으로 정확하게 예측되는 것이 확인되었다.



(a) Apparatus



(b) Yoke

Fig. 13 Experimental apparatus and yoke

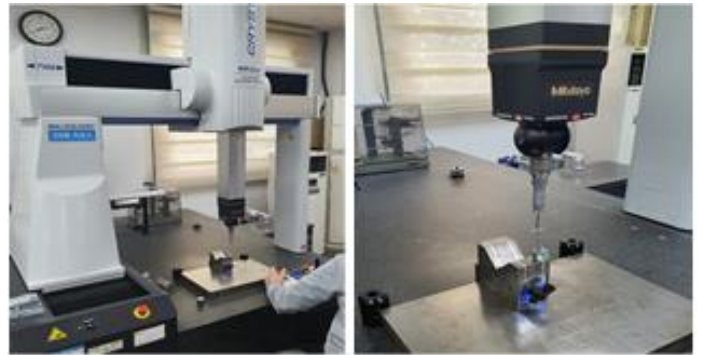
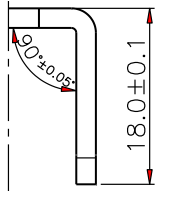
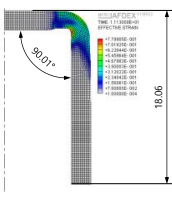


Fig. 14 3D measuring machine used to measure

4. 결론

이 연구에서는 L-벤딩 공정의 치수정밀도에 영향을 미치는 5 개 인자, 즉 금형간격, 테이퍼 릴리프, 스텝 높이, 스텝 폭, 펀치 반지름에 대한 매개변수 연구를 탄소성 유한요소해석을 이용하여 실시하였다. 각 인자의 스프링백 해석에 따른 벤딩각도와 벤딩길이의 변화량을 비교 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Table 3 Comparison of predictions with experiments

Product dimensions	Field experience test result	FE predictions	FE result
	89.98 ~ 89.99°		90.01°
	18.06 ~ 18.07 mm		18.06 mm

(1) 금형간격이 원소재 두께(2.0 mm) 이하이면 스프링고와 함께 벤딩 다리가 길어지는 현상이 발생하였고, 반대로 102.5%(2.05 mm) 이상으로 증가하면 스프링백 발생과 함께 벤딩 다리가 짧아지는 현상이 발생하였다.

(2) 테이퍼 릴리프는 0.1 ~ 0.15°에서 스프링백이 최소화되고, 이것이 벤딩 다리 길이에 미치는 영향은 작다.

(3) 스텝 높이는 벤딩 다리 길이를 증가시키고 벤딩각도를 감소시켜서, 이것이 원소재 두께의 10%(0.2 mm)보다 작으면 스프링백이 발생하고 커지면 스프링고가 증가한다.

(4) 스텝 폭은 원소재 두께의 75 ~ 88%(1.5 ~ 1.75 mm)에서 스프링백이 최소화되고 이를 벗어나면 스프링백이 증가한다.

(5) 펀치 반지름을 제품 외측 반지름에다 원소재 두께의 10 ~ 15%(2.7 ~ 2.8 mm)를 더한 값으로 했을 때 요구 벤딩각도를 만족하였고, 그 외에서는 스프링고와 함께 벤딩 다리가 길어지는 현상을 발생시켰다.

이러한 설계변수 연구를 바탕으로 선정된 최적의 공정조건으로 시제품 금형을 제작하여 시험생산한 실제품의 치수를 확인한 결과, 벤딩각도 및 벤딩 다리 길이에 대한 실험치와 유한요소해석 예측결과가 공학적으로 일치하는 것을 확인하였다.

따라서 정밀 L-벤딩 공정의 인자별 기준 값의 적용범위를 금형간격은 제품 두께의 100 ~ 102.5%(2.0 ~ 2.05 mm), 테이퍼 릴리프는 0.1 ~ 0.3°, 스텝 높이는 원소재 두께의 10%(0.2 mm), 스텝 폭은 원소재 두께의 75 ~ 88%(1.5 ~ 1.75 mm), 펀치 반지름은 제품 외측 반지름에 원소재 두께의 10 ~ 15%(2.7 ~ 2.8 mm)를 더한 값으로 설계하면, 반복설계를 최소화할 수 있다. 결과적으로 유한요소해석 기술이 공정설계의 도구

로서 과거의 경험을 대신할 수 있음을 말해 준다.

REFERENCES

- [1] T. Nakano, 2001, Compound Technology of Sheet Metal Forming and Forging, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 42(484), pp. 388~392.
- [2] M. Merklein, J.M. Allwood, B.-A. Behrens, A. Brosius, H. Hagenah, K. Kuzman, K. Mori, A.E. Tekkaya, A. Weckenmann, 2012, Bulk Forming of Sheet Metal, CIRP Ann.-Manuf. Technol., Vol. 61(2), pp. 725~745. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.007>
- [3] K. Mori, T. Nakano, 2016, State-of-the-art of Plate Forging in Japan, Prod. Eng., Vol. 10, pp. 81~91. <https://doi.org/10.1007/s11740-015-0648-1>
- [4] W.J. Chung, B.S. Kim, S.W. Lee, H.Y. Ryu, M.S. Joun, 2014, Finite Element Simulation of Plate or Sheet Metal Forming Processes Using Tetrahedral MINI-Elements, J. Mech. Sci. Tech., Vol. 28, pp. 237~243. <https://doi.org/10.1007/s12206-013-0959-0>
- [5] Y.E. Ling, H.P. Lee, B.T. Cheok, 2005, Finite Element Analysis of Springback in L-Bending of Sheet Metal, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 168, pp. 296~302. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.236>
- [6] M. J. Chang, G. H. Kim, C. J. Lee, B. M. Kim, S. B. Lee, D. C. Ko, 2011, Progressive Process Design of Integrated Part for Mobile Phone, Transactions of Materials Processing, Vol. 20, No. 2, pp. 110~117. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2011.20.2.110>
- [7] S.M. Hong, J.H. Hwang, 2014, Bead Optimization to Reduce Spring-back of Sheet Metal Forming using High Strength Steel, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vo. 23, No. 4, pp. 350~354. <https://doi.org/10.7735/ksmte.2014.23.4.350>
- [8] K.D. Kumar, K.K. Appukuttan, V.L. Neelakantha, P.S. Naik, 2014, Experimental Determination of Spring Back and Thinning Effect of Aluminum Sheet Metal During L-bending Operation, Materials and Design, Vol. 56, pp. 613~619. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.047>
- [9] F.K. Chen, S.F. Ko, 2011, Deformation Analysis of

- Spring-back in L-Bending of Sheet Metal, *Advanced Science Letters*, Vol. 4, No. 6-7, 1928~1932.
<https://doi.org/10.1166/asl.2011.1713>
- [10] V. Nasrollahi, B. Arezoo, 2012, Prediction of Spring-back in Sheet Metal Components with Holes on the Bending Area, using Experiments, Finite Element and Neural Networks, *Materials and Design*, Vol. 36, pp. 331~336.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.039>
- [11] S. Thipprakmas, W. Phanitwong, 2011, Process Parameter Design of Spring-back and Spring-go in V-bending Process using Taguchi Technique, *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 4430~4436.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.069>
- [12] J.H. Lee, K.M. Lee, D.O. Kim, H.S. Choi, B.M. Kim, 2015, Spring-back and Spring-go Behaviors in Bending of Thick Plates of High-strength Steel at Elevated Temperature, *Computational Materials Science*, Vol. 100, pp. 76~79.
[https://doi.org/10.1016/j.co mmatsci.2014.10.059](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.10.059)
- [13] M.J. Cho, 2019, Development of Composite Die for Riveting of Bimetal Assembly for Circuit Breaker, M.S. Thesis, Gyeongsang National University, pp. 9~13.
- [14] M.S. Joun, J.G. Eom, W.J. Chung, 2014, Finite Element Analysis of Springback Phenomenon and Residual Stress in Plate Forging, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, Yeosu, Korea, pp. 184~185.
- [15] K.G. Park, H.K. Moon, S.K. Oh, M.S. Joun, 2020, Development of Combined Sheet Metal Forming and Plate Forging of a Metal Seal Part of Hub Bearing for an Automobile, *Trans. Mater. Proc.*, Vol. 29, pp. 194-202. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2020.29.4.194>