

유한요소법을 이용한 하이드로포밍 알루미늄 범퍼빔의 성형공정 최적화

손원식^a, 염상혁^b, 이지훈^a, 김승모^{a*}Optimization of the Hydro-Forming Process for Aluminum Bumper Beams
by Using Finite Element AnalysisWonsik Son^a, Sanghyuk Yum^b, Jihoon Lee^a, Seungmo Kim^{a*}^a School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education,
1600, Chungjeol-ro, Byeongcheon-myeon, Dongnam-gu, Cheonan, Chungnam-do, 31253, Korea^b School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University,
1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	18	April	2017
Revised	12	June	2017
Accepted	3	July	2017

Keywords:

Hydroforming
Aluminum bumper beam
AL7021-T4
Forming Parameter
FE Analysis

ABSTRACT

Hydro-forming is being employed increasingly to realize lightweight vehicular parts. The bumper beam produced by this process weighs 30% less than the conventional products with equal stiffness. However, hydro-forming involves complex parameters to obtain the target geometry and low residual stress. Parametric studies are conducted using finite element analysis to obtain optimized process conditions. Through these numerical approaches, the internal and holding pressures and feeder forward stroke along the extruded direction are optimized to achieve low residual stress and to minimize springback. The numerical results are verified by experimental observations made by employing a three-dimensional laser scanner. The numerical and experimental results are compared in terms of the springback. Both results show similar tendencies.

1. 서론

최근 자동차 산업발달로 차량에는 다양한 안전 및 편의장치가 부착되어 소비자에게 제공되고 있다. 하지만 이로 인해 차량의 전체 중량 또한 증가하는 상황이다. 지구 온난화로 환경 법규가 제정되고 향상된 연비가 요구되고 있다. 따라서 증가하는 부품 무게에서 향상된 연비 및 배출가스 규제를 만족하기 위해 자동차 부품의 경량화는 최근 핵심주제로 다양하게 연구되고 있다^[1,2].

일반적으로 알루미늄은 기존의 철강재 차체 강성을 가진 제품보다 물성 측면에서 약 30%가량의 경량화가 가능하며^[3,4] 저 비중, 고 강도, 고 내부식성의 장점이 있다^[5]. 특히 기존의 단품 철강 판재

로 성형한 후 스폿(spot)용접하는 다 공정 접합방식의 제조공정과 달리^[6], 알루미늄 범퍼 빔의 경우 복잡한 단면을 가진 중공형 압출재의 생산을 통해 범퍼 빔을 성형하는 일괄 대량생산이 가능하므로 저비용, 경량화가 가능한 생산방식으로 기대된다. 알루미늄 압출재의 경우 필요한 형태로 성형하기 위해서 스트레치(stretch) 벤딩과 프레스(press) 벤딩 등의 다양한 성형과정을 거치게 된다. 스트레치 벤딩은 공정 특성상 별도의 전용장비가 필요하고 작업속도가 느리므로 제조원가에 영향을 끼치며, 양 끝단부를 인장하는 방식이므로 물성치의 변화가 발생한다. 반면, 프레스 벤딩은 물성치의 변화는 없으나 벤딩 시 스프링백이 발생하며 형상의 곡률에 따라 국부 좌굴의 발생 및 단면 형상의 변형이 유발된다. 또한 소재 물성치

* Corresponding author. Tel.: +82-41-560-1159

Fax: +82-41-560-1253

E-mail address: smkim@koreatech.ac.kr (Seungmo Kim).

의 산포에 따라 곡률의 차이도 존재하므로 복잡한 형상에 적용하기에 어렵다. 따라서 이를 보완하는 방법으로 자동차의 알루미늄 범퍼 빔의 제작에 압출공정 하단부에 가변 곡률 장치를 부착하여 범퍼 빔의 곡률을 조절하는 방법도 있으나⁷⁾ 곡률의 크기가 제한적이고 특정한 형상에 국한되는 한계점이 있다. 앞에서 열거한 공정들의 단점을 보완한 공정이 하이드로 포밍 공정(Hydro-forming process)이다. 하이드로 포밍 공정은 최근 자동차 부품 제작 시 일반 프레스 공정을 대체하여 정밀 부품을 생산할 수 있는 방법으로 서브프레임(sub-frame), 배기 다기관(exhaust manifold) 등의 관재나 판재의 다양한 형상에 적용 가능하다. 하이드로 포밍 공정은 기존의 단축 압축 공정에 유체를 이용하여 성형품의 내부 혹은 외부에 상호 작용을 통해 성형품의 형태를 유지할 수 있는 공정으로 두께 감소를 보상할 수 있는 개선된 부품 성형 공정이다⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 하이드로 포밍 공정 방법을 이용하여 각재 형태의 알루미늄 압출재에 내압과 보압, 그리고 액압 적용 장치의 피당량을 적용하여, 충격을 견딜 수 있는 형상의 알루미늄 범퍼 빔의 곡률 성형 공정을 해석하고 실험을 통하여 검증하는 최적설계를 위한 연구를 진행하고자 한다.

2. 하이드로 포밍 공정의 유한요소해석

2.1 알루미늄 범퍼 빔의 기계적 성질

일반적으로 빔의 곡률 성형에 영향을 주는 요인으로 합금강도와 압출단면의 구조를 들 수 있는데, 합금 강도의 조건으로는 기존의 강 판재를 대체하는 제품으로 충분한 강성과 함께 차량 충돌 시 1차적인 충격을 견딜 수 있어야 한다. 이를 위해 7000 계열의 알루미늄 합금을 고려하였으며, 이러한 충돌 특성을 효과적으로 견딜 수 있도록 단면은 내부에 추가 구조가 포함된 날일(日) 형태의 형상을 설계 및 고려하였다.

알루미늄 범퍼 빔의 소재는 AL7021-T4로 열처리하지 않은 제품으로 압출된 소재의 측면의 일부에서 인장시편을 가공하여 시험시편의 규격 KS B 0801의 13B를 기준으로 Fig. 1과 같이 제작했다⁹⁾. 재료인장시험기(MTS 810)와 extension meter를 이용하여 응력-변형률 선도를 측정하였으며 Fig. 2에 표시하였다.

알루미늄 범퍼 빔의 단면과 압출금형, 범퍼 빔의 성형 후 제품의 형태는 Fig. 3과 같으며 단면 형상은 Fig. 4와 같이 날일(日)형태로

충격에너지를 감당하는 구조로 설계하였다. 단면은 압출구조 및 충격설계에 근거하여 위치별로 다른 두께(3~3.5 mm)가 적용되었고 범퍼 빔 단면의 종횡비(aspect ratio)는 1.7이다.

2.2 하이드로 포밍 공정

하이드로 포밍 공정은 Fig. 5와 같이 상하형 금형 및 액압 공급 장치, 그리고 유압 실린더, 범퍼빔 압출재로 이루어진다. 성형 제조 공정은 Fig. 7과 같이 총 네 개의 스텝으로 나뉜다.

순서대로, Fig. 7(a)는 성형하는 제품에 해당하는 금형을 세팅하는 단계로 금형의 상하형 금형, 액압 공급 장치와 유압 실린더를 제조 공정에 맞게 설치한다. 그리고 Fig. 7(b)와 같이, 성형공정의 전 단계로 상형 금형과 유압 실린더를 소재가 투입될 수 있게 후퇴시킨 후 압출재를 투입한다. Fig. 7(c)는 소재를 성형하는 단계로 세부적으로 두 단계로 이뤄진다. 첫 번째는 상하형 금형과 범퍼 빔

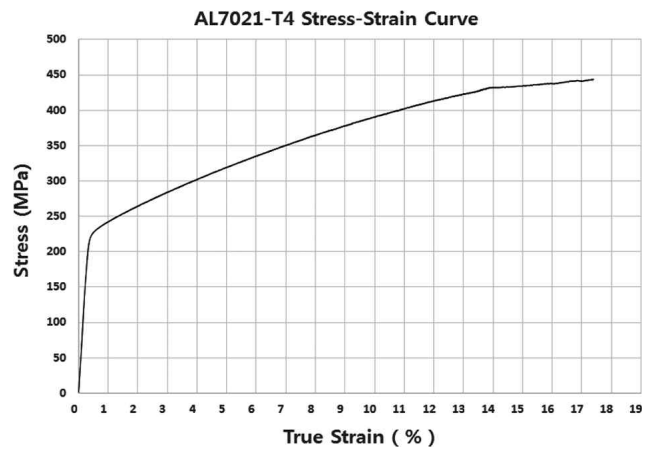


Fig. 2 True stress-strain curve (Al7021-T4)

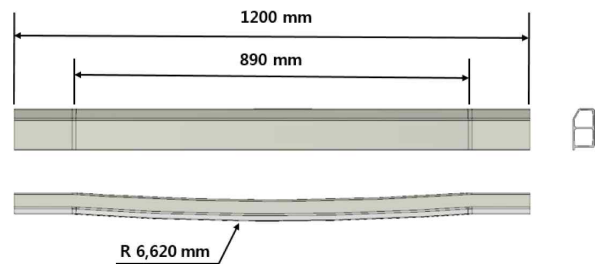


Fig. 3 Aluminum bumper beam 3D dimension before/after molding



Fig. 1 Extension test specimen of KS B 0801 13B

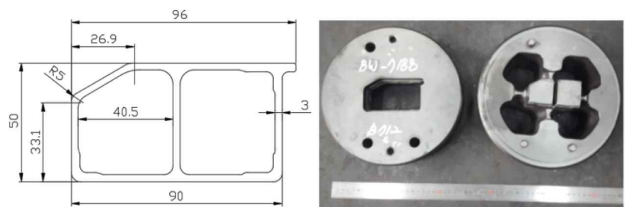


Fig. 4 Bbumper beam section & extrusion mold

접촉하며 곡률을 성형하는 단계이다. 접촉 시 금형의 형상을 고려하여 내압(internal pressure)의 적용여부가 결정되며 측면의 유압 실린더(hydraulic cylinder)의 액압 공급 장치(feeder)를 적절히

이동하여 성형이 진행된다. 두 번째는 곡률 성형 후 내부 보압 단계로 진행되며, 금형이 닫힌 상태로 보압(holding pressure)을 적용하여 성형품이 금형의 형상을 최대한 유지하도록 공정을 완료하는 단계이다. 그리고 최종 단계로 Fig. 7(d)와 같이 금형 하부에서 탈거 도구(ejecting tool)를 이용하여 범퍼 빔을 추출한다.

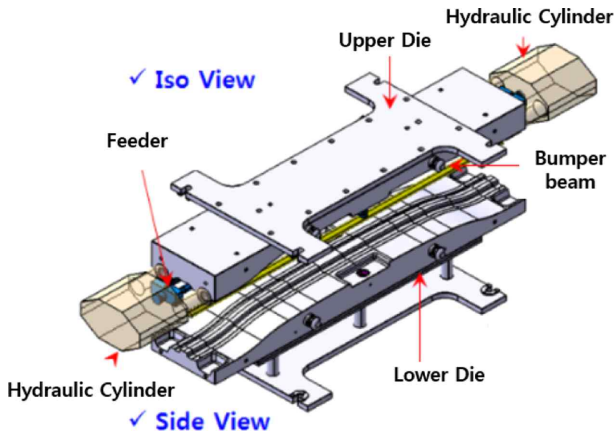


Fig. 5 Hydro-forming system for aluminum bumper beam

2.3 하이드로 포밍 공정 해석

성형 공정의 유한요소해석(FE Analysis)을 위해 Table 1과 같이 공정설계 변수를 지정하였다. 유한요소해석을 통해 Fig. 7(c) 단계에서 내압의 유무 조건에서 금형의 상하 이동 및 측면 액압 공급 장치의 효과와 보압의 영향까지 고려하였다. 즉, 해석 진행 순서는 범퍼 빔 압출재 로딩 및 액압 공급 장치 적용, 상형 금형 하강 및 내압 적용, 닫힌 금형 상태에서의 보압 적용, 상형 금형 제거 순으로 진행하였다. 해석의 수치적 조건은 Table 2에 표시하였다.

해석 도메인은 Fig. 8과 같으며, 비선형 해석의 계산 시간을 고려

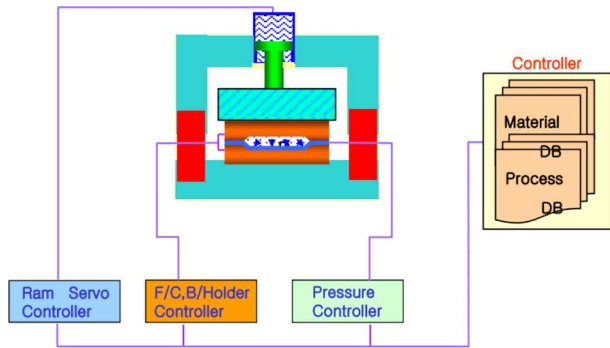


Fig. 6 Hydro-forming control diagram

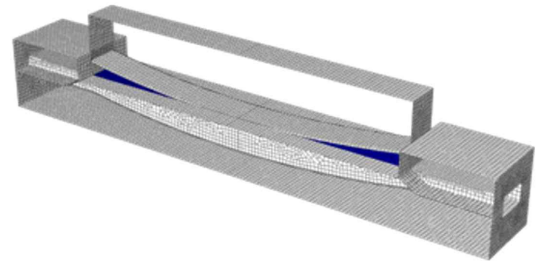


Fig. 8 Simulation domain of hydro-forming for aluminum bumper beam

Table 1 Hydro-forming process parameters

Internal pressure	Adjustable from 0 ~ 120 bar
Ram down speed	2 mm/s ~ 8 mm/s Controllable
Holding pressure	Max 1000 bar

Table 2 Numerical condition of hydro-forming analysis

Material Property	Mass Density : 2699 kg/m ³
	Elastic Modulus : 69 GPa
	Poisson Ratio : 0.36
	Plastic Property : Al7021-T4
Mesh Data	Friction Formulation - Penalty Method / Hard Contact - Friction Coeff. : 0.15
	Node # : 29438
	Element # : 14444
Simulation Tool	Mixed Element : Quad, Triangular
	Abaqus Explicit Module - Non-linear Contact Analysis Shell Modeling



(a) Mold setting

(b) Loading



(c) Hydroforming

(d) Ejecting

Fig. 7 Hydro-forming process step

하여 대칭(symmetry) 모델을 통해 해석 상 효율을 확보하였다.

본 연구의 주요 목표는 곡물 성형 후에 나타나는 스프링백 최소화이며, 이를 위해 내압과 보압 적용에 따른 범퍼 빔의 성형 특성을 분석하였고 공정 최적화를 진행하였다. 그리고 해석과 동일한 조건의 실험을 통해 검증을 진행하였다.

2.3.1 내압에 따른 성형 특성 분석

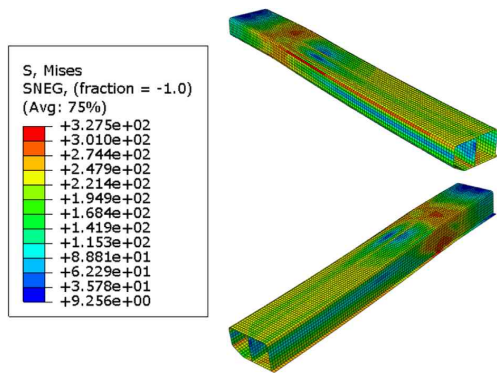
알루미늄 범퍼 빔과 금형의 접촉면에 따라 범퍼 빔의 위치별 일부 구간이 인장, 압축, 굽힘 하중을 받게 된다. 또한 하중에 따라 특정 부분에 응력집중 및 또는 접힘 현상이 일어나게 된다.

이러한 성형 특성을 공정 변수에 따라 관찰하기 위하여 우선 내압의 유무에 따른 성형을 예측하는 해석을 진행하였다. 성형에 따른 변형 모습을 쉽게 관찰하기 위하여 10배의 배율로 성형 모습을 도시하였다(Figs. 9, 10). 그림에서와 같이, 내압의 유무에 따라 전체 범퍼 빔의 응력 분포는 위치별로 다르게 나타난다. Fig. 9에서는 내압이 없는 상태로 성형 해석이 진행되었고 von mises stress가 최대 327 MPa로 나타나며 Fig. 10은 내압 80 bar를 적용하여 해석한 결과로, von mises stress는 최대 346 MPa로 대략 5% 증가함을 관찰하였다. 또한, 전체적인 응력 증가와 더불어 내압의 존재

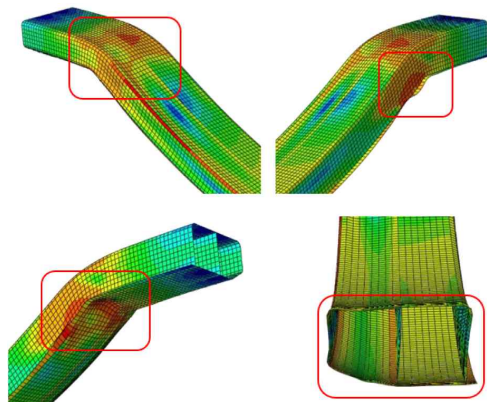
에 따라 범퍼빔 단면의 좌하향 부분에서 응력분포의 편차가 커지는 것도 확인하였다.

내압 조건에서 성형되는 경우, 전체적으로 잔류응력이 높고, 위치별로 응력편차도 커지는데, 이러한 현상은 내압 조건의 목적이 내부 단면 형상의 유지가 목표이므로 상하형 금형 성형 외에 또다른 인자로 작용하여 영향을 미치는 점이 원인으로 판단된다. 즉, 상하형 금형의 프레스 효과로 인해 나타나는 자연스러운 변형의 형태를 내압이라는 인자를 통해 강제로 단면 형상을 유지한다는 점에서 응력값의 절대적인 증가와 편차확대로 이어지는 것으로 예측된다. 범퍼 빔의 성능은 차량의 충격 에너지의 향상에 목적이 있으므로 성형 후 잔류응력은 편차가 적고 전체적인 크기도 작을수록 유리하다. 따라서 내압의 경우에 잔류응력 관점에서는 범퍼 빔의 특성 상 불리한 점이 있다. 다만, 단면의 내부 기동 형상의 유지 등과 관련해서는 내압조건의 경우가 공정 특성상 단면 유지에 유리하므로, 내압 성형 조건의 적용은 범퍼 빔 특성 관점에서는 서로 트레이드 오프(trade off)의 관계가 있음을 확인하였다.

그리고, 내압의 유무에 상관없이 공통적으로 곡률이 큰 부분에서는 응력의 크기가 항상 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은, 상하형 금형 형상의 급격한 치수 변화로 인한 것이며 압출

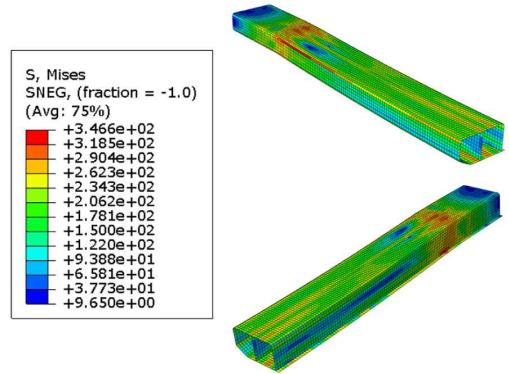


(a) Von mises stress contour & profile

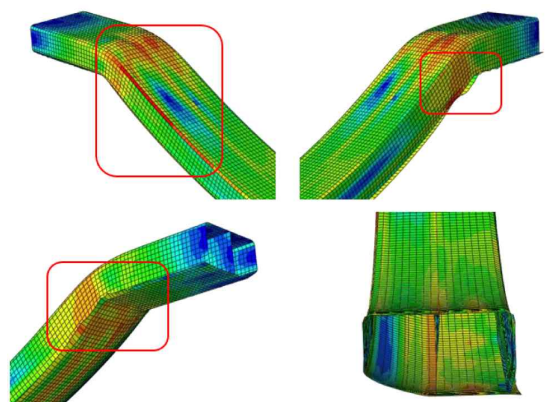


(b) Magnified profile (10 times)

Fig. 9 Hydro-forming simulation at internal pressure 0 bar



(a) Von mises stress contour & profile



(b) Magnified profile (10 times)

Fig. 10 Hydro-forming simulation at internal pressure 80 bar

재의 성형 후 응력집중과 접합 메커니즘을 유발하여 추후 제품 성능에 영향을 줄 것으로 판단된다. 따라서, 응력집중의 관점에서는 곡률의 크기를 가능한 작게 가져갈 수 있는 제품과 금형의 설계가 필요하며, 성형품의 트리밍(trimming)을 통해 최종 제품이 제작되는 경우는 응력이 집중되는 부분을 트리밍의 영역에 포함하여 금형을 설계하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

2.3.2 보압 적용에 따른 성형 특성 분석

내압을 고려한 성형 이후, 두 번째 단계로 제품에 보압 공정을 실시할 수 있다. 내압보다 10-100배 큰 압력을 1차 성형된 제품 내에 일정 시간 주입하여 설계했던 범퍼빔 형상을 확보하는 것이 목적이다. 다만, 관련 공정 경험을 통해 주어진 구조에서는 1,000

bar 이상의 보압을 실시하는 경우, 과도한 변형이 발생하여 금형 제거가 어려울 정도가 되므로, 해석에서는 보압의 적용은 500 bar, 700 bar, 900 bar로 나누어 실시하였다.

두 가지 내압 성형 이후 보압을 500, 700, 900 bar로 진행할 때, 응력 분포를 관찰하기 위하여 해석 상 측정 위치를 Fig. 11에 표시하였다. 내압 0 bar과 80 bar에서 성형이 완료된 후 보압을 적용하여 Fig. 11에서 표시한 위치에서의 응력분포를 각각의 보압의 경우에 대해 Fig. 12, 13과 같이 나타내었다. 결과값을 통해 보압을 크게 가져갈수록 전체적인 잔류응력은 완화되는 경향이 있음을 확인하였다.

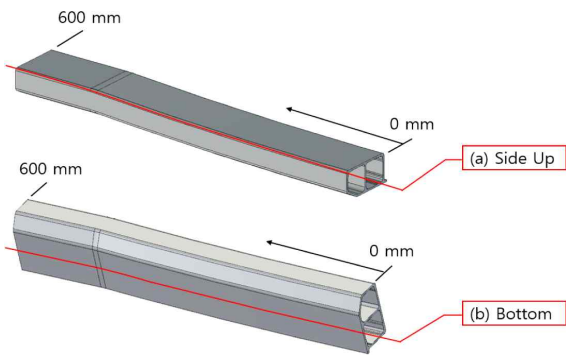
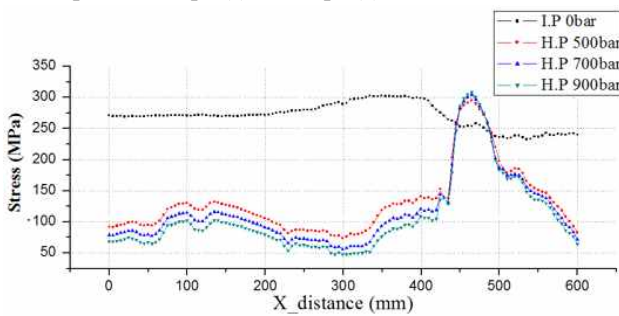
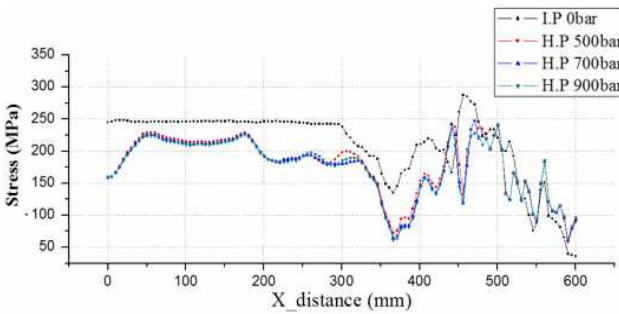


Fig. 11 Measurement position of stress distribution after holding pressure step: (a) side up, (b) bottom



(a) Side Up (Internal pressure 0 bar)



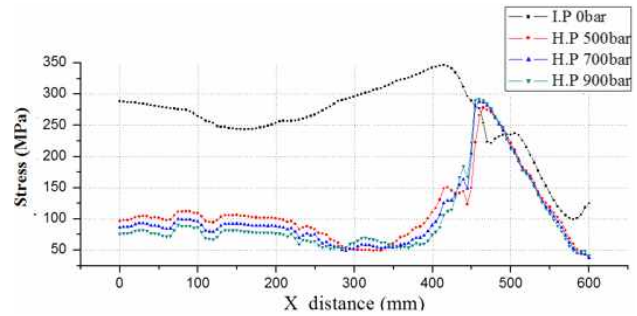
(b) Bottom (Internal pressure 0 bar)

Fig. 12 Stress distribution for holding pressure at internal pressure 0 bar

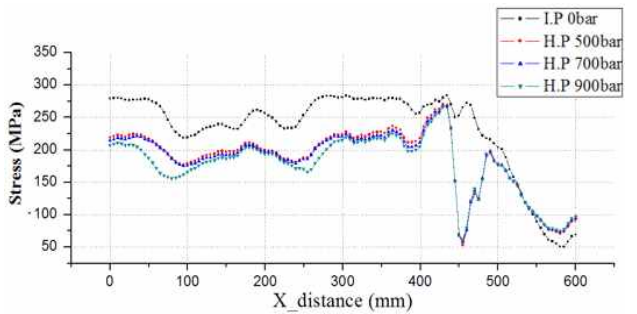
2.3.3 스프링백 특성 분석

알루미늄 범퍼 빔을 하이드로 포밍 성형할 경우, 곡률에 따른 성형 후 스프링백이 발생한다. 원하는 치수의 제품으로 성형하기 위해서는 이러한 스프링백을 최소화하는 것이 필수적인데, 이를 위해 금형 제거 시 나타나는 범퍼 빔의 탄성방향 변위를 측정하여 보압의 크기와 길이방향 피딩량에 따른 상관성을 살펴보았다. 길이방향 피딩량(feeder forward stroke, FFS)는 Fig. 14와 같이 길이방향 측면의 액압 공급장치를 통해 주어지며 금형을 통한 성형과정에서 압출재에 반영하였다.

FFS는 스프링백의 최소화를 위해 필요한 주요 공정변수로, 0 mm로 전혀 주어지지 않을 경우 최대 8 mm의 스프링백이 발생함



(a) Side Up (Internal pressure 80 bar)



(b) Bottom (Internal pressure 80 bar)

Fig. 13 Stress distribution graphs for holding pressure at internal pressure 80 bar

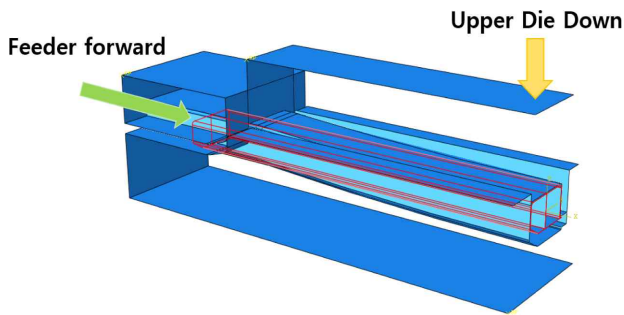


Fig. 14 Feeder forward stroke (FFS) added hydro-forming process

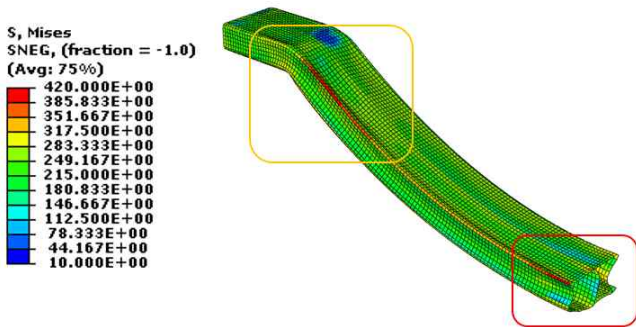


Fig. 15 Hydro-forming simulation profile with 4 mm FFS (magnified by 10 times)

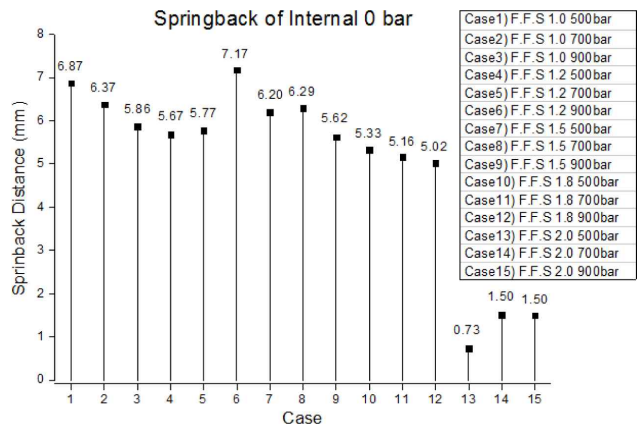
을 확인하였고, 4 mm로 진행하는 경우 과도한 단면 변형이 발생함을 확인하였다. Fig. 15에서 FFS를 4 mm로 주었을 때의 결과를 확인할 수 있다. 단면의 과도한 변형 뿐 아니라 Von Mises 응력의 경우 최대 417 MPa의 값을 보였다. 이 값은 인장테스트로 살펴본 최대극한강도의 값과 비슷하므로 압출재의 파손을 유발할 것으로 예측된다.

따라서 해석에서는 스프링백의 최소화를 위한 FFS값으로 1 mm, 1.2 mm, 1.5 mm, 1.8 mm, 2.0 mm를 고려하였고, 앞에서 제시한 세 가지의 보압과 연관한 스프링백의 결과값을 Fig. 16에 표시하였다.

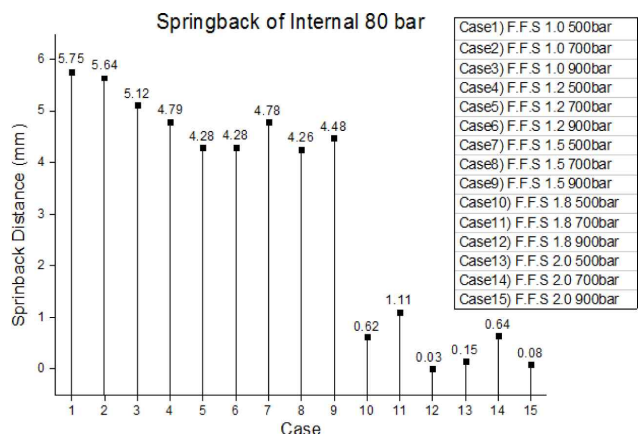
Fig. 16의 그래프와 같이 내압, 보압 그리고 FFS 적용에 따른 스프링백의 수치를 관찰해본 결과, 내압이 적용되고 보압이 커질수록 상대적으로 스프링백이 작아지는 경향을 확인할 수 있었다. 특히, 내압 80 bar, FFS 1.8 mm부터 스프링백이 현저히 줄어들었고 2.0 mm에서는 1 mm 이내의 스프링백이 나타나는 것을 확인하였다.

3. 하이드로 포밍 공정의 성형 실험 및 측정

실제 하이드로 포밍 공정의 실험은 AL7021-T4의 압출재(최대 인장 강도 450 MPa)를 2500 Ton 프레스의 볼 스타 규격 (2,000 mm × 2,000 mm)에 맞추어 수행하였다. 상형과 하형의 다이는



(a) Springback of internal pressure 0 bar



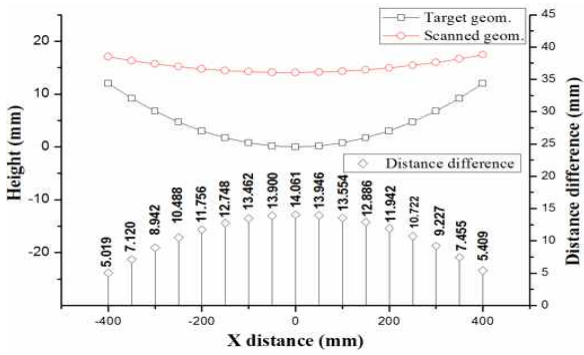
(b) Springback of internal pressure 80 bar

Fig. 16 Springback measurement of hydro-forming simulation with holding pressure & FFS

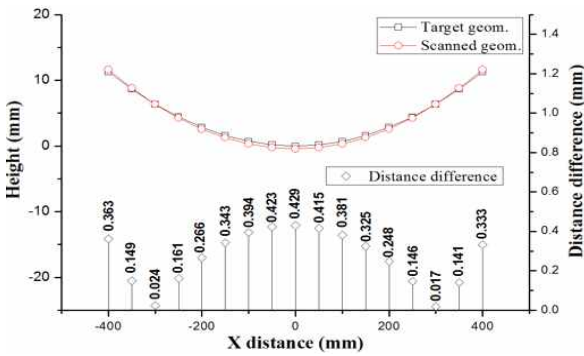
주물(FC40)로 제작하였고, 소재와 마찰이 있는 인서트 금형은 마찰면적에 따라 SKD61과 KP4M을 사용하였고 열처리(HRC 55~60)하였다.

해석에서 살펴본 결과값을 토대로, 오직 프레스 성형만 진행한 조건(FFS 미적용, 내압, 보압 미적용)과 스프링백이 작은 조건인 FFS 적용, 내압 80 bar, 보압 500 bar, 700 bar, 900 bar의 경우를 선별하여 실험을 진행하였고, 하이드로 포밍으로 만들어진 압출재 성형품을 레이저 스캐너를 이용하여 측정하여 초기에 목표로 했던 치수와의 차이를 측정하였다. Fig. 17은 아래 방향으로 볼록한 곡률로 성형된 압출재의 형태를 측정한 내용으로, 공정을 통해 제작된 범퍼빔의 측정치와 목표로 했던 곡률의 형태를 함께 도시하여 나타내었다. FFS와 내/보압을 적용하지 않고 오로지 프레스만 수행한 제품의 경우 매우 큰 스프링백을 보이나, FFS와 내/보압을 적용하여 단면구조를 확보하며 범퍼빔의 곡률 성형을 하는 경우 스프링백의 발생을 1 mm 이내로 최소화할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

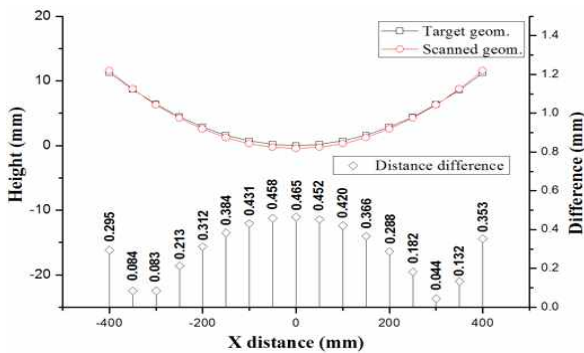
앞선 해석 결과에서 도출한 스프링백과 비교 검증을 하기 위해



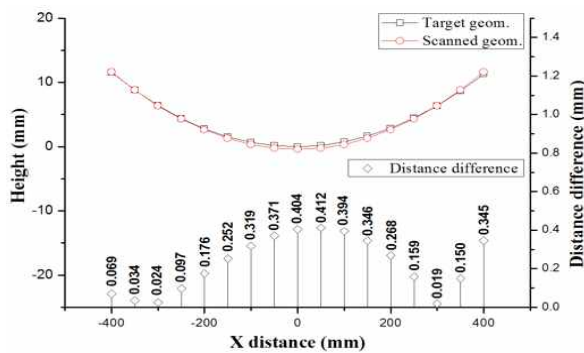
(a) only press
(No FFS, no internal pressure, no holding pressure)



(b) holding pressure 500 bar
(FFS 2 mm, internal pressure 80 bar)



(c) holding pressure 700 bar
(FFS 2 mm, internal pressure 80 bar)



(d) holding pressure 900 bar
(FFS 2 mm, internal pressure 80 bar)

Fig. 17 Bumper beam 3D scanned data compared with target geometry

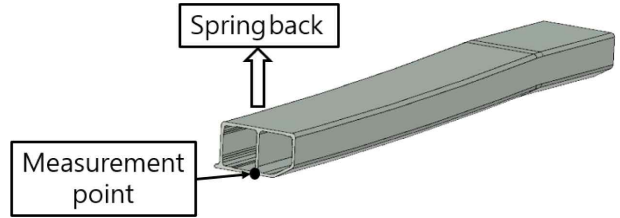


Fig. 18 Spring-back measurement point in symmetry model of bumper beam

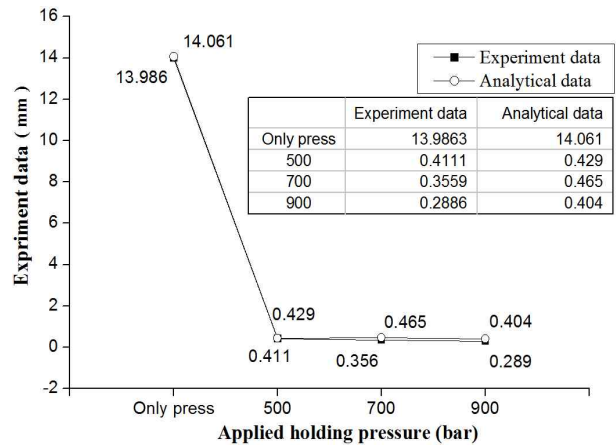


Fig. 19 Comparison of experimental data and analytical data

Fig. 18에서와 같은 기준점에 해당하는 스프링백의 해석값과 실험 값을 Fig. 19에 함께 도시하였다. 두 결과값은 최대 0.2 mm 작은 정도의 오차값을 보이고 있으며, 이러한 실험값과의 비교검증을 통해 해석의 정합성을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 AL7021-T4 알루미늄 범퍼 빔의 하이드로 포밍 성형에 대한 공정 최적화를 위해 유한요소법을 이용한 성형 해석을 진행하고, 선정된 조건에 따른 실험을 진행하여 결과값을 비교 검증하였다. 이를 통해 성형제품의 응력 크기 및 분포 그리고 스프링백을 최소화하는 공정조건을 확보하였고 최적화된 공정을 확인하였다.

알루미늄 범퍼빔은 충격에너지를 감당하는 부품의 특성상, 잔류응력의 크기를 최소화해야 하며, 그와 동시에 단면의 형태를 유지하고 있어야 충돌 등에 대한 외부변형에 효과적으로 대응할 수 있다. 따라서 앞선 내압이 없는 공정에서와 같이 단면 형상이 무너지는 형태의 공정 조건보다는, 적절한 내압(80 bar)을 통해 전반적으로 단면의 변형을 줄이고 곡률이 적은 부분에서도 응력이 고르게 분포되도록 설정하는 것이 바람직하다. 마찬가지로 보압 적용은 범퍼의 전체적인 잔류응력의 크기를 낮추고 단면의 원상회복에 도움을 주는 공정으로 내압의 10배 정도의 값으로 그 효과를 확인하였

다. 스프링백은 범퍼빔의 최종 치수 확보에 영향을 주는 인자이며, 스프링백에 대한 영향을 고려하는 방법으로 그 값을 미리 예측한 금형을 가공하는 방법도 있으나, 가능한 공정조건의 적절한 적용을 통해 그 값을 최소화하는 공정조건을 확보하는 것이 바람직하다. 알루미늄 범퍼빔의 경우는 길이방향의 FFS의 적용을 통해 성형성을 향상시킬 수 있음을 해석과 실험을 통해 확인하였으며, 본 제품 기준 대략 2 mm의 FFS를 통해 스프링백을 최소화할 수 있었다. 이처럼 알루미늄 범퍼빔의 성형과 관련하여 하이드로포밍 공정의 해석과 실험을 통해 공정변수의 영향을 살펴보았으며, 이를 통해 경량화 및 저비용을 위한 새로운 성형기법의 최적화된 공정조건을 확보, 제시할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 경제협력개발기구 산업육성사업과 2017년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원으로 수행된 연구결과입니다(R0004151).

References

- [1] Kleiner, M., Chatti, S., Klaus, A., 2006, Metal Forming Techniques for Lightweight Construction, Journal of Materials Processing Technology, 177 2-7.
- [2] Choa, S. H., Jang, J. Y., 2016, Strength Analysis of Die-cast Aluminum-alloy Brake Pedals for use in Lightweight Cars, J. of the KSMTE, 25:2 138-142.
- [3] Kim, S. B., Lee, K. H., Huh, H., Yoo, J. S., Lee, M.Y., 2006, Crashworthiness Evaluation of Aluminum Crash Box for an Auto-body, KSAE Fall Conference Proceedings, 1106-1111.
- [4] Lee, C. J., Lee, S. B., Ko, D. C., Kim, B. M., 2012, Effect of Bead Shape in Aluminum Crash Box for Effective Impact Energy Absorption Under Low-Velocity Impact Condition, Transactions of KSME(A), 36:10 1155-1162.
- [5] Han, M. S., Cho, J. O., 2013, Study on Strength Durability of Automotive Front Bumper during Driving, J. of the KSMTE, 22:4 673-679.
- [6] Kang, P. H., Kim, B. J., Ryu, S. M., Son, S. M., Moon, Y. H., 2003, Analysis of Hydro-forming process for bumper stay, Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference 22:4 673-679.
- [7] Jo, Y. J., Lee, S. K., Kim, B. M., Oh, K. H., Park, S. W., 2008, Process Development of Variable Curvature Extrusion for Automotive Aluminum Bumper, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, 233-236.
- [8] Kim, Y. S., Cho, H. S., Park, C. D., Kim, Y. S., Jo, Y. J., 2000, Evaluation of Tube Hydroformability, Transactions of Materials Processing 9:6 604-614.
- [9] Lee, M. Y., Kang, C. Y., Ryu, S. J., 2004, Development of Hydroformed Automotive Parts with Heat-treatable Aluminum Extrudates, J. of the Korean Society for Heat Treatment, 17:3 165-172.