

자동차 부품용 알루미늄 압출재의 프레스 성형기술

최영*, 여흥태#, 박준홍**, 강면규***, 오개희***, 박상우***

Press Forming of Extruded Aluminum Profile for Automotive Parts

Young Choi*, Hong Tae Yeo#, Joon Hong Park**, Myun Gyu Kang***, Kae Hee Oh*** and Sang Woo Park***

ABSTRACT

The necessities for heightening fuel efficiency as well as lightweight design, lead to an increase of the use of aluminum alloys in the automobile industry. Extruded aluminum profile channels are used widely for the design of frame parts as lightweight assemblies, especially if a high stiffness is needed. While many applications can be realized with forming of hollow square-sectioned extruded profiles such as a stretch bending and a hydro-forming, some applications demand the use of a press bending which can be hardly found in the previous study. In this study, by introducing the use of a press bending into car sub-frames, the demands for higher accuracy as well as higher flexible method than the conventional methods will be satisfied. With respect to the design of sub-frames, the process planning was performed from the shape of a sub-frame product. The designed processes were analyzed by the commercial FEM code, DEFORM-3D. Forming dies for the each process were designed and prototypes of sub-frames were manufactured by the verified forming process. In addition, some of the important features of design parameters in the press bending were reviewed.

Key Words : Aluminum(알루미늄), Extruded profile(압출재), FEM(유한요소법), Light weight(경량화), Press bending(굽힘가공), Press Forming(프레스 성형), Pressing(압축성형), Reference line(기준선), Sub-frame(서브프레임)

1. 서론

최근 자동차 경량화를 목적으로 경량 소재인 알루미늄의 사용이 증가하고 있다. 강성(stiffness)을 높이고 경량화를 달성하기 위해, 알루미늄 중공 압출재(extruded profile)를 프레임(frame) 종류의 부품으로 성형하는 방법이 이용된다.¹

중공 사각단면 압출재의 성형에 있어, 스트레치 벤딩(stretch bending)^{2,3}으로 성형하는 것과 하이드로 포밍(hydroforming)^{4,5}에 대한 연구결과는 다수 발표되어 있으나 프레스 벤딩(press bending)에 의한 중공 사각단면 압출재의 성형에 관한 연구는 찾아보기 어렵다.

본 연구는 자동차 서브프레임(sub-frame)의 알

접수일: 2005년 11월 11일; 게재승인일: 2006년 4월 14일

* 인제대학교 기계자동차공학부

교신저자: 동의대학교 기계공학과

E-mail : htyeo21@deu.ac.kr Tel. (051) 890-2239

** 신소형재가공정정공정개발연구센터 동아대학교

*** ㈜동양강철 기술연구소

루미늄 성형에 관한 것이다. 본 연구에서는 중공 사각단면 압출재를 프레스 벤딩(press bending)과 압축(pressing) 성형으로 서브프레임 부품을 성형하고자 한다.

먼저, 제품 형상으로부터 벤딩 및 압축 성형 공정을 설계하는 것(process planning)이 필요하다. 이를 위해, 본 연구에서는 제품 아래면 중심선을 기준선(reference line)으로 두고 공정을 설계하였다.

설계 검토된 성형공정을 상용 소프트웨어인 DEFORM-3D⁶을 이용하여 성형 해석하였다. 성형해석은 공정설계의 내용을 검토하고 성형에서 이용되는 맨드릴(mandrel) 및 홀더 등의 세부적인 금형 설계에 이용되었다.

실제 금형제작 및 실험을 통해 시작품을 성형하여 본 연구에서 보인 공정설계 방법, 성형해석 및 금형 설계의 타당성을 보였다.

2. 성형 공정설계

2.1 중공 압출재의 성형

중공 알루미늄 압출재를 프레스 벤딩 및 압축 성형한 부품은 하이드로포밍(hydroforming)의 예비성형체(preform)으로 사용되기도 하고, 성형된 부품을 용접 및 조립하여 경량화 자동차 부품을 생산한다. 이를 Fig. 1에 나타내었다.

일반적으로, 중공 압출재(extruded profile)의 성형을 위해, 스트레치 벤딩(stretch bending)공정이 이용되며, 높은 생산성을 위해 프레스 벤딩(press bending)이 이용되기도 한다. 프레스 벤딩 개요를 Fig. 2에 나타낸다.

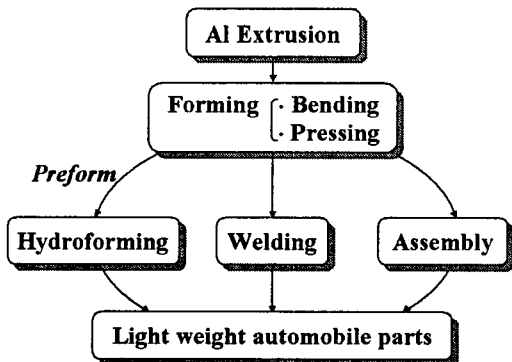


Fig. 1 Light weight automobile parts

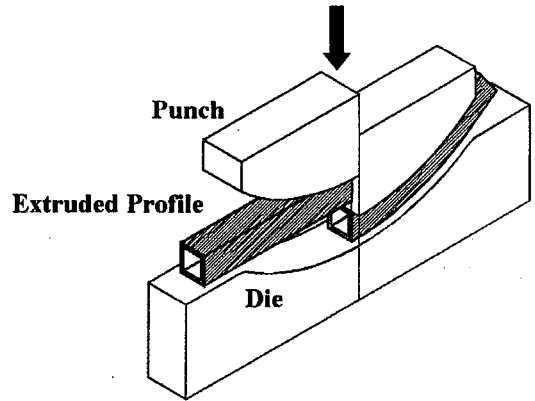


Fig. 2 Press bending for the extruded profile

2.2 성형 공정설계

2.2.1 서브 프레임(Sub-frame)

중공 알루미늄 압출재로부터 성형코자 하는 서브 프레임의 설계도면은 아래 Fig. 3과 같다. 본 연구는 서브 프레임 부품 중 No. 1 부품의 성형에 한정하고자 한다.

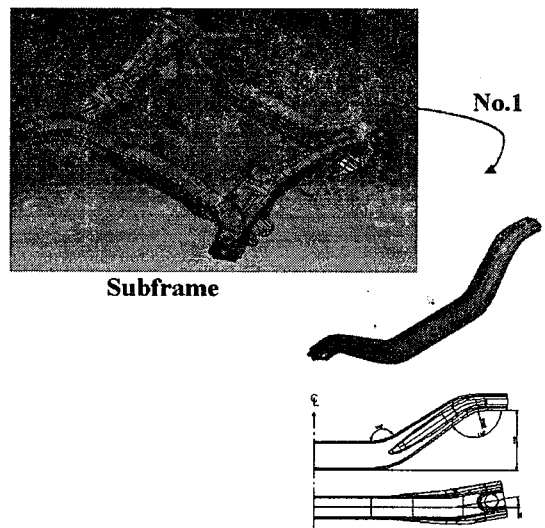


Fig. 3 No. 1 part of the sub-frame

2.2.2 기준선(Reference line)

중공 알루미늄 압출재를 성형하는 공정은 프레스 벤딩(bending)과 압축공정(pressing)이다. 벤딩 및 압축공정을 고려하기 위해, Fig. 4와 같은 기준

선(reference line)을 최종제품에 설정한다. 본 연구에서는 3차원으로 모델링 된 제품의 아래면 중심선을 기준선으로 선택하였다. 단동형 프레스(simple action press)에서 금형이 고정되기 때문에 아래 면을 기준으로 선택하였다. 제품 형상을 기준으로 좌우로 벤딩되기 때문에 아래 면에서 중심선을 기준선(reference line)으로 설정하였다.

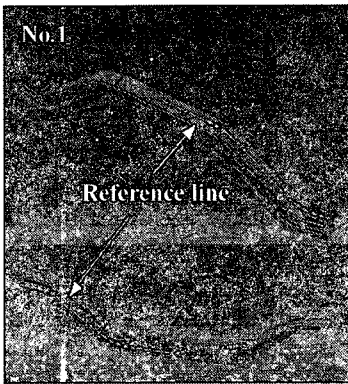


Fig. 4 Reference line of the No. 1 part

기준선으로부터 공정설계를 수행하는 과정을 아래에 설명한다. 기준선을 이용한 중공 압출재의 성형 공정설계를 Fig. 5에 나타낸다. 성형 전의 형상(undeformed configure)이 한 평면(yz 평면)에 위치하도록 성형 공정인 벤딩 공정을 결정한다. 벤딩 공정은 xy 평면과 평행한 한 평면에서 이루어진다. 즉, 성형 후의 형상에서 기준선을 이루는 직선들 중에서 바깥쪽의 직선이 그 안쪽 직선으로 회전되어 변형 전의 형상을 결정한다.

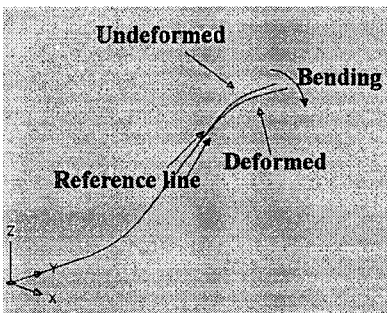
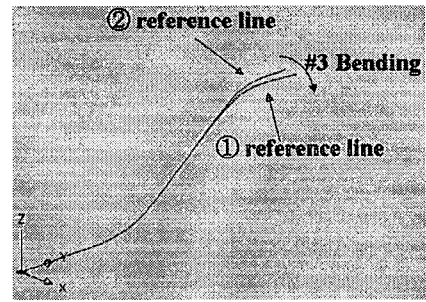


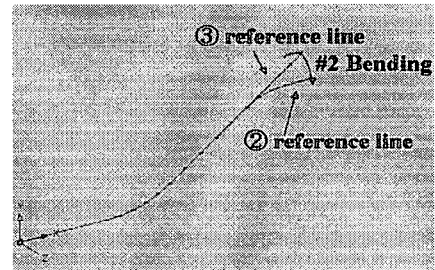
Fig. 5 Process planning of the extruded profile with the reference lines

2.3 벤딩 공정설계

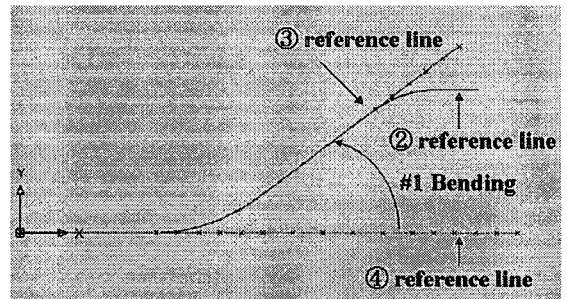
제품으로부터 설정한 기준선을 j 번으로 두고 벤딩 성형공정을 고려하여 k 번 기준선을 설계한다. 이를 Fig. 6 (a)에 나타낸다. 이 때 벤딩 공정(#3)은 xy 평면과 평행한 평면에서 이루어진다. #2 벤딩 성형공정을 Fig. 6 (b)에 나타낸다. 이 때, 벤딩 공정은 xy 평면에서 이루어진다.



(a) #3 bending



(b) #2 bending



(c) #1 bending

Fig. 6 Process planning for the bending of the extruded part with the reference lines

Fig. 6 (c)에 #1 벤딩공정을 나타낸다. 1회 성형에 한가지 형상을 성형하도록 한다면, m 번 기준선

(압출소재)으로부터 1 번 기준선으로 #1 벤딩 성형하고 1 번 기준선으로 #2 벤딩 성형하여 k 번 기준선이 된다.

본 연구에서는 성형공정을 줄이기 위해, #1 벤딩에서 #2벤딩을 포함하도록 하여 공정을 단축하였다. 즉, m 번 기준선(압출소재)으로부터 k 번 기준선으로 벤딩 성형된 후, j 번 기준선으로 성형된다.

2.4 압축가공 공정설계

중공 압출 단면이 변형되는 압축가공(pressing)은 #1 벤딩 공정 이후로 결정된다. #3 벤딩 이후, 압축가공을 할 경우, 좌우 비대칭 형상이 되기 때문에 #3 벤딩 이전에 압축가공을 시행하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

압축가공을 기준선을 이용하여 고려하는 개념을 Fig. 7에 나타낸다. 즉, 기준선이 제품 아래 면의 중심선임으로 기준선의 변형 없이 압출재의 단면 변화만을 압축가공에서 고려한다.

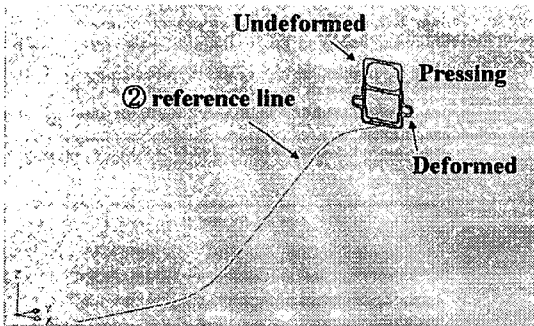


Fig. 7 Process planning for the bending of the extruded part with the reference lines

3. 유한요소 해석

3.1 성형공정의 유한요소해석

공정설계의 내용을 검토하고 성형에서 이용되는 맨드렐(mandrel) 및 홀더(holder) 등의 세부적인 금형 설계를 위해 DEFORM-3D 를 이용하여 유한요소 해석하였다. 초기 소재의 유한요소 격자를 Fig. 8에 나타낸다. 최종 성형품을 고려하여 압출방향의 격자(mesh) 밀도를 조절하였다. 사용된 소재는 Al 6082-F 이며 소재의 인장시험(tensile test)으로부터 얻어진 응력-변형률 데이터를 이용하였다.

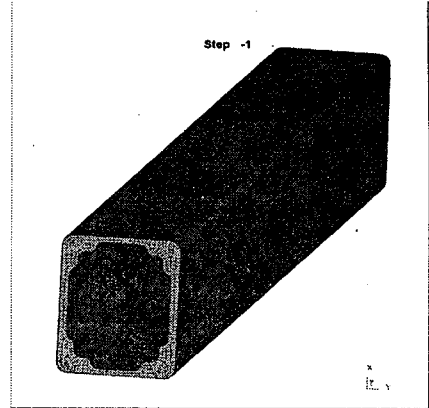


Fig. 8 Initial mesh of the extruded part

3.1.1 #1-#2벤딩 해석

#1 벤딩과 #2 벤딩을 동시에 수행하기 위하여 고정 홀더를 갖는 벤딩공정을 적용하여 유한요소 해석하였다. 초기 금형구조는 Fig. 9와 같다. 대칭부 밀면은 쿠션홀더(cushion holder)에 의해 구속되어 상부 펀치와 동일한 속도로 이동한다. 홀더는 압출재의 양끝부분을 지지하며 마찰에 의한 인장력을 압출재에 부여하는 효과를 가지게 된다. 홀더로 구속된 부분은 굽힘 발생에 의해 함몰이 발생할 수 있으므로 고정형 맨드렐을 삽입하여 함몰을 방지한다. Fig. 10은 벤딩 최종 단계의 금형의 위치를 나타낸다.

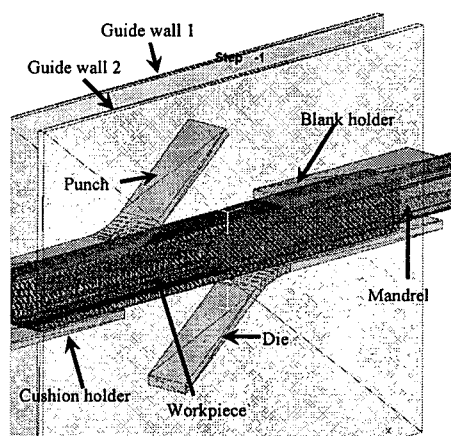


Fig. 9 Initial step of #1-#2 bending process

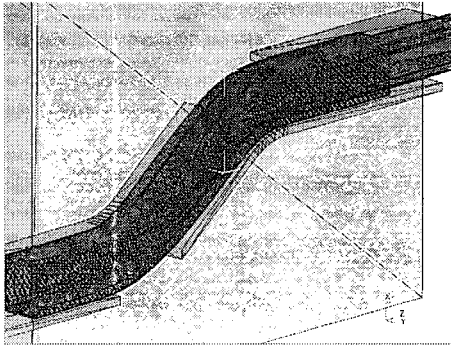


Fig. 10 Final step of #1-#2 bending process

3.1.2 압축가공 해석

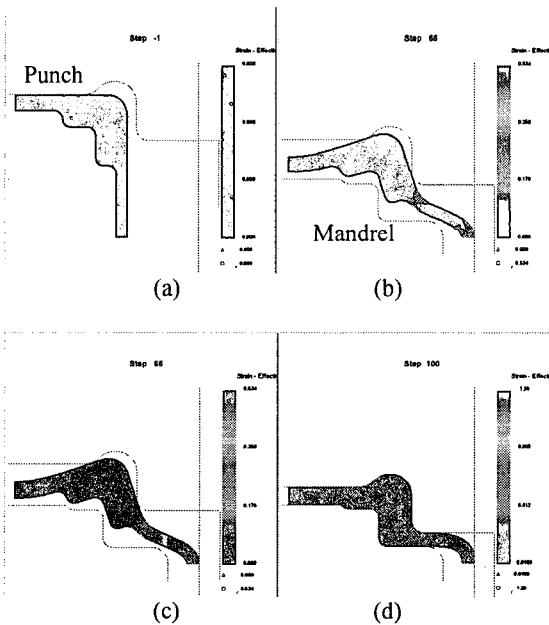


Fig. 11 2D analysis for design of pressing process

단면의 압축가공시 중앙부 함몰방지 및 날개부 형상을 만들기 위하여 먼저 평면변형률 조건으로 가정하여 2차원 성형해석을 수행하여 맨드릴 형상을 기본적으로 설계하였다. 이때 압축가공 최종 형상에서 내면을 구속하는 맨드릴은 초기에 소재 내부에 삽입할 수 없으므로 압축가공에 의해 소재 측면의 굽힘 변형을 발생시켜 확장시킨 후 맨드릴을 삽입하는 공정으로 구성된다. 2차원 성형해석

결과를 Fig. 11에 나타낸다. (a)는 압축 초기상태이다. (b)는 압출재의 상/하부 가압하는 과정에서 상/하부 소재의 굽힘이 발생하며 측면의 소재는 옆으로 이동하여 측면 가이드와 접촉하게 된다. 여기서 압출재 내부의 선은 맨드릴의 삽입 위치를 판단하기 위하여 가상 모델을 입력한 것이다. (c)의 단계에서 압출재 내부에 맨드릴을 삽입하여 계속 압축한다. (d)는 최종 압축된 형상을 나타낸다. 여기서 날개 곡률부에서 유효변형률이 높게 나타나며 펀치에 의해 압출재의 홈부를 압축성형하므로 높은 유효변형률이 나타난다.

2차원 평면변형률 상태의 해석을 토대로 3차원 성형해석을 수행하는 공정은 Fig. 12와 같다.

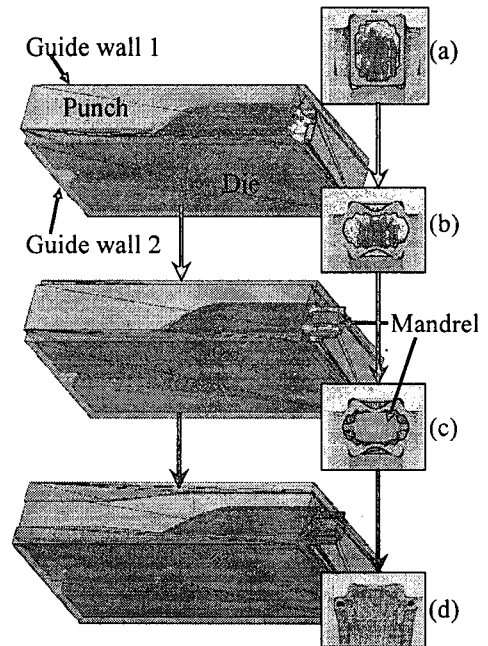


Fig. 12 3D analysis of pressing process

3.1.3 #3 벤딩 해석

사이드 펀치에 의해 압축 가공된 부분을 굽히는 #3 벤딩 공정을 Fig. 13에 나타낸다. 이 경우 중심부의 소재는 홀더로 고정하여 변형이 없도록 하였다. 압축가공된 측면부분 날개 형상이 있으므로 펀치와 다이는 날개부분을 고려하여 설계하였다.

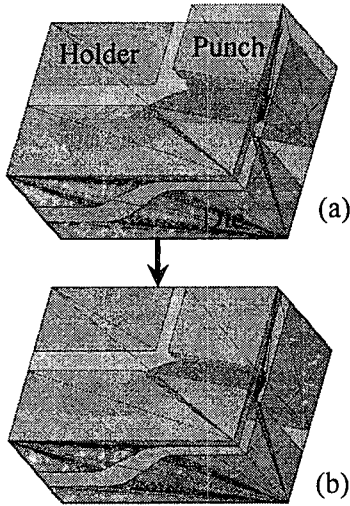


Fig. 13 #3 bending process

3.1.4 탄성 회복을 고려한 설계

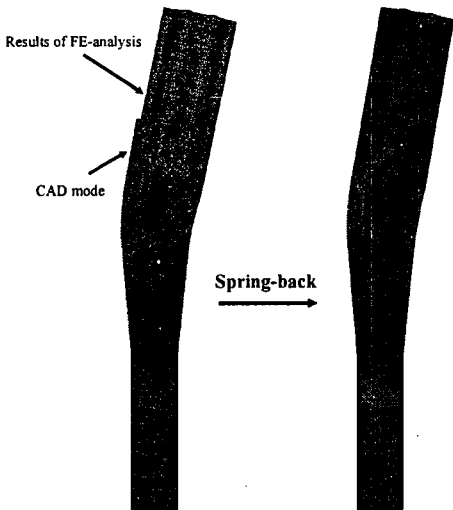


Fig. 14 Spring-back analysis of #3 bending process

본 제품은 중공 사각단면의 압출재를 여러 공정의 벤딩 및 압축가공에 의해 성형하므로 각 공정에서 성형 후 탄성회복량을 보정한 금형설계가 이루어지지 않으면 소재가 다음 공정의 금형에 투입되지 않는 경우가 발생한다. 또한 최종제품의 치수오차도 크게 된다.

그러므로 성형해석 후 탄성회복을 위해 금형을 제거하고 소재의 탄성회복해석을 수행하기 위하여 탄소성재료(elasto-plastic material)로 소재를 설정하여 해석하였다.

#3벤딩 공정의 성형해석 마지막 단계에서 금형을 제거한 후 절점속도 및 변위를 제거하고 탄성회복 해석을 수행한 결과를 간략하게 Fig. 14에 나타낸다. 탄성회복량을 고려하여 성형해석을 한 결과 Fig. 14와 같이 최종제품을 원하는 형상으로 성형할 수 있었다.

3.2 성형 해석 결과

Fig. 15는 #1-#2 벤딩공정의 해석 결과로 유효 변형률 분포를 나타낸다. 상부의 높은 유효변형률은 맨드릴과 홀더 및 다이에 의해 압출재가 마찰 구속되므로 인장변형이 발생한 결과이다.

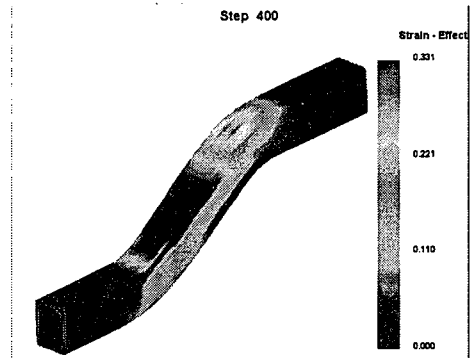


Fig. 15 Effective strain distribution of #1-#2 bending

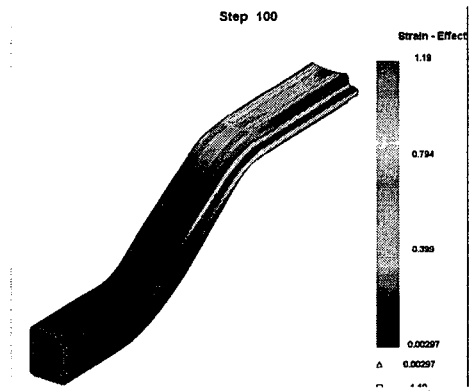


Fig. 16 Effective strain distribution of press forming

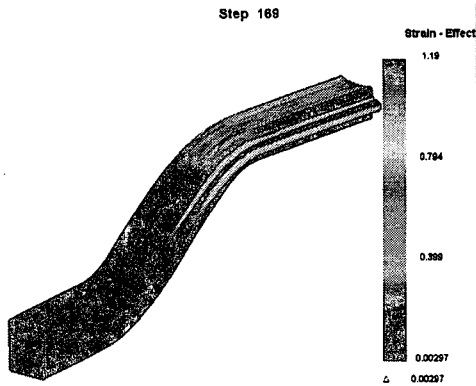


Fig. 17 Effective strain distribution of #3 bending

Fig. 16 은 압축성형공정에 의해 날개부와 홈부를 성형한다. 홈부성형시 홈부의 모서리부에서 많은 압축 변형되므로 높은 유효변형률이 나타난다. 날개 성형시 날개 곡률부는 압축변형이 나타나고 날개 끝부분은 굽힘에 의한 인장 변형이 나타난다.

Fig. 17은 #3 벤딩공정의 해석 결과인 유효변형률 분포이다.

4. 성형 시험

성형해석 결과로부터 결정된 금형 형상으로 금형을 제작하여 성형 시험한 결과는 다음과 같다.

Fig. 18은 압출재의 프레스 성형과정에서 각각의 성형품의 사진이다. Fig. 18 (a)는 #1-#2벤딩 제품이다. Fig. 18 (b)는 날개부 및 홈부를 압축 성형한 제품이다. Fig. 18 (c)는 #3 벤딩 성형 후 트리밍한 제품이다.

압축 성형 공정에서 압출재 단면의 변형과정을 Fig. 19에 나타낸다. Fig. 19 (a)는 초기 압출재 단면이고 Fig. 19 (b)는 맨드렐을 삽입하기 위하여 압출재의 상하를 압축하여 측면을 확장시켰다. Fig. 19 (c)는 맨드렐을 삽입한 후 압축을 계속하여 최종 압축된 제품을 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 알루미늄 중공 사각단면 압출재를 프레스 벤딩 및 압축 성형하여 서브프레임 부품을 성형하였다.

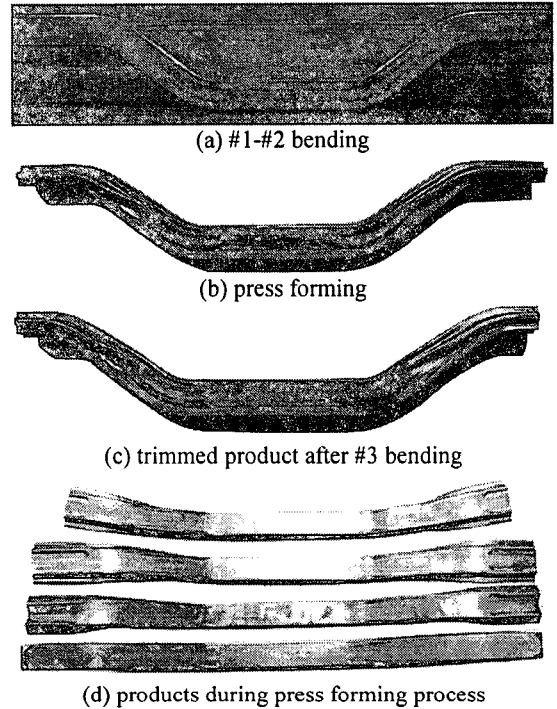


Fig. 18 Photos - press forming of the extruded profile

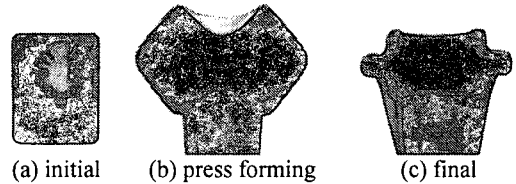


Fig. 19 Deformation of the section by press forming

제품 형상으로부터 벤딩 및 압축 성형 공정을 설계하기 위하여 제품 아래면 중심선을 기준선으로 두고 공정을 설계하였다. 성형해석을 통하여 공정 설계를 검토하고 탄성회복에 따른 금형 설계를 보정하였다. 또한 압축성형공정에서는 공정설계 및 맨드렐 형상 설계를 위해 2차원 평면변형률 상태의 해석을 수행하였고 3차원 해석 적용에 효과적인 것으로 판단된다.

이와 같이 압출재의 프레스 성형에 의해 제품을 생산할 경우 성형공정에 대해 유한요소해석 기법을 적용하여 미리 제품의 성형성을 평가하고 금형의 설계 및 수정에 반영하여 보다 향상된 제품

을 적은 비용으로 빠른 시간 내에 개발할 수 있으므로 향후 압출재의 프레스 성형공정 설계에 유용하게 적용될 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Vollertsen, F., Sprenger, A., Kraus, J. and Arnet, H., "Extrusion, Channel, and Profile Bending: a Review," J. Mater. Process. Technol., Vol. 87, pp. 1 - 27, 1990.
2. Corona, E., "A Simple Analysis for Bend-strech Forming of Aluminum Extrusions," Int. J. of Mech. Sci., Vol. 46, pp. 433 - 338, 2004.
3. Paulsen, F., Welo, T. and S ø vik, O. P., "A Design Method for Rectangular Hollow Section in Bending," J. Mater. Process. Technol., Vol. 113, pp. 699 - 704, 2001.
4. Yang, J. B., Jeon, B. H. and Oh, S. I., "Design Sensitivity Analysis and Optimization of the Hydroforming Process," J. Mater. Process. Technol., Vol. 113, pp. 666 - 672, 2001.
5. Asnafi, N., Nilsson, T. and Lassl, G., "Tubular Hydroforming of Automotive Side Members with Extruded Aluminum Profiles," J. Mater. Process. Technol., Vol. 142, pp. 93 - 101, 2003.
6. DEFORM-3D Version 5 Labs Manual.