

자동차 서브프레임 용접판재 유압성형시 주름발생 원인분석과 금형설계

김현영* · 신용승* · 홍춘기* · 전병희** · 오수익***

Analysis of Wrinkling and Die Design for Welded Blank Hydroforming of Automotive Subframe

H. Y. Kim, Y. S. Shin, C. K. Hong, B. H. Jeon and S. I. Oh

Abstract

This paper presents possible defects when welded blank hydroforming and focus on wrinkling, and the die design to prevent this defect. An explicit finite element code, PAM-STAMP, is used to simulate welded blank hydroforming process. The numerical results are compared to the experimental results in the aspect of deformed shape. An automobile subframe is taken as an example to carry out finite element analysis.

Key Words : Finite Element Analysis, Explicit Finite Element Code, Welded Blank Hydroforming(WBH), Subframe.

1. 서 론

자동차의 연비향상, 배기가스 저감 및 소비자의 안전도 욕구증가로 인한 고안전·초경량차체 개발연구가 현재 전세계적으로 활발히 진행되고 있으며, 이와 같은 필요조건을 만족시키기 위해서 재료면에서는 고장력 강판, 알루미늄 합금 및 TWB(Tailor Welded Blank)등의 사용이 증가하고 있다. 또한 생산공법면에서는 관재유압성형(tube hydroforming)기술과 같은 신기술이 개발·적용되고 있다.

관재유압성형기술을 바탕으로 개발된 관재유압성형

(sheet hydroforming)⁽¹⁾은 Table 1과 같이 분류할 수 있다.⁽²⁾

Table 1 Classification of sheet hydroforming

Sheet hydroforming
- Hydraulic stretch forming of single blank
- Hydraulic stretch forming of double blank
• Welded blank hydroforming
• Non-welded blank hydroforming
- Hydromechanical deep drawing

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부
** 인덕대학 기계설계과
*** 서울대학교 기계항공공학부

Table 2 Mechanical properties of SAPH38P

Density [kg/mm ³]	7.8E-06
Young's modulus [MPa]	206E+03
Poisson's ratio	0.3
Yield strength [MPa]	276.91
K [MPa]	629.6
n	0.184
ϵ_0	0.002
Thickness [mm]	2.6

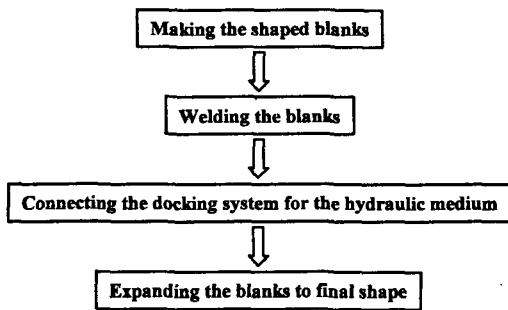


Fig. 1 Welded blank hydroforming process

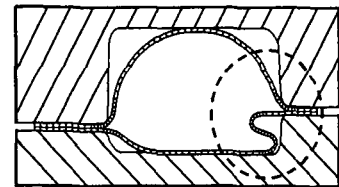
이중판재유압성형(hydraulic stretch forming of double blank)은 사용하는 판재의 가공상태에 따라 다시 용접판재유압성형(welded blank hydroforming)과 비용접판재유압성형(non-welded blank hydroforming)으로 분류할 수 있다. 판재유압성형에 관한 연구로 Robbert⁽¹⁾은 비용접판재(non-welded blank)와 용접판재(welded blank)를 사용한 유압성형공정의 성형한계에 관한 연구를 수행하였고, Wang⁽³⁾은 유압벌지성형(integrated hydro-bulge forming)을 적용한 구형용기생산에 관한 연구를 수행하였고, Zhang⁽⁴⁾등은 하이드로메카니컬 딥드로잉(hydrmechanical deep drawing)에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 자동차용 서브프레임을 예제로 하여 용접판재유압성형공정에서 제품에 발생하는 주름의 발생원인을 분석한 뒤 주름을 억제할 수 있는 금형설계에 관한 연구를 수행하였다. 성형해석에서 판재는 4절점 벨리치코-차이 셸요소(Belytschko-Tsay shell element)로 모델링 되었고, 응력-변형률관계는 Krupkowsky의 경화식, $\sigma=K(\epsilon+\epsilon_0)^n$ 을 따르는 평면이방성 탄-소성재료로 가정하였다. 해석에 사용된 판재는 SAPH38P이며 재료의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

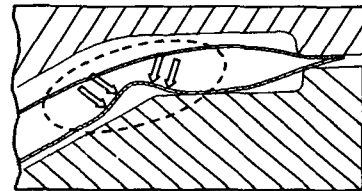
2. 용접판재유압성형(WBH)

2.1 용접판재유압성형기술의 개요

용접판재유압성형기술은 Fig. 1과 같은 공정순서로 이루어진다. 성형에 사용되는 용접판재는 동일한 치수의 두 판재를 상·하로 겹친 뒤 레이저용접을 통하여 제작되며, 이때 두 판재의 재료와 두께는 서로 같게 또는 각각 달리할 수 있다⁽⁵⁾. 이와 같이 제작된 용접판재는 상·하금형 사이에 위치하고, 유압시스템이 연결된 뒤 유체 주입과 동시에 두 판재 사이에서 발생하는 유압으로 인하여 성형이 이루어진다. 이 기술을 사용할 경우 성형시 재료가 플렌지로부터 금형내로 유입되어 판재유압성형기술 보다 다양한 단면형상을 갖는 부품을 생산할 수 있고, 기존의 스템핑 공정에 비해 적은 공정을 통하여 두께가 균일한 경량·고강도 부품을 생산할 수 있다.⁽¹⁾ 현재 이 기술의 적용여부가 검토되고 있는 자동차 부품으로는 인스트루먼트 패널 서포트(instrument panel support), 서브프레임(subframe), 루프레일(roof rail), 공간프레임(space frame)등이 있다.



(a) wrinkling 1



(b) wrinkling 2

Fig. 2 Wrinkling for welded blank hydroforming

2.2 주름발생원인 및 대책

용접판재유압성형공정에서는 두 판재를 용접으로 고정했기 때문에 유압 발생시 두 판재가 동시에 금형캐비티로 유입되므로 Fig. 2(a)같이 금형분할면을 기준으로 상·하형금형의 내부깊이가 차가 클 경우 상·하용접판재 각각의 유입량이 서로 다르게 되어 금형 깊이가 낮은

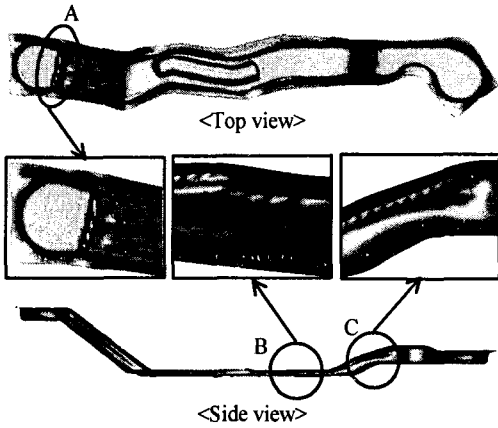


Fig. 3 Wrinkling in welded blank hydroforming

쪽 판재에서 주름이 발생할 수 있고, Fig. 2(b)와 같이 금형분할면의 단차가 클 경우 금형분할면 보다 상·하형 금형의 곡률반경이 작게 되어 성형시 주름이 발생할 수 있다.

Fig. 3은 기존의 스탬핑 금형과 동일한 금형분할면을 사용하여 서브프레임의 Left member에 용접판재유압성형기술을 적용할 경우, 성형해석결과 용접판재의 하판에 발생한 주름을 나타낸다. A부분에서 발생한 주름은 위에서 언급한 주름발생 원인 중 후자의 원인 때문에 발생하고, 주름 B, C는 전자의 원인 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 주름발생원인중 전자의 경우 설계변경을 통한 상·하형금형의 내부깊이 조절로 억제할 수 있고, 후자의 경우는 금형의 설계변경 및 블랭크 홀더력 조절을 통하여 억제할 수 있다.

3. 자동차용서브프레임의 용접판재유압성형해석

3.1 용접판재유압성형을 위한 금형설계

서브프레임은 주행시 노면의 불균일함으로 인하여 차체에 발생하는 진동의 흡수 및 감쇠, 급정지·출발시 엔진의 회전방지, 충돌시 승객룸 공간의 확보를 통한 승객보호의 기능을 필요로 하는 부품으로 구조에 따라 Rectangular, Horse shoe, Beam cross member 형태로 분류된다. 본 연구에서는 Rectangular 형태의 서브프레임에 용접판재유압성형기술을 적용하였고, 구조는 Fig. 4와 같다. 유압성형기술을 적용하여 성형하고자 하는 부분은 Fig. 4에서 점선으로 표시한 부분으로 No. 1 member와 Left, Right member의 앞쪽부분이다. 성형목

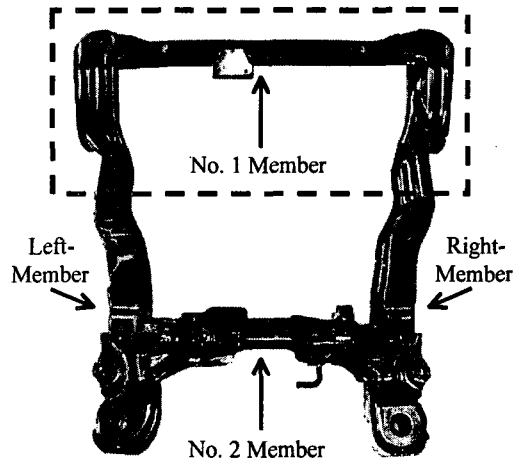


Fig. 4 Configuration of subframe

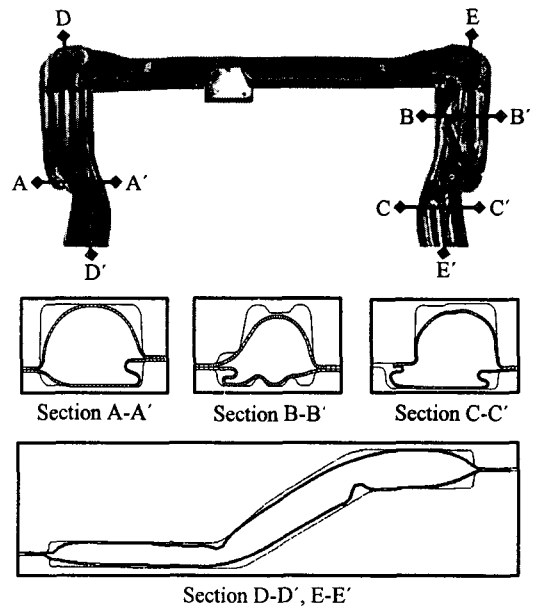


Fig. 5 Deformed shapes(2D analysis) at each section

표부분중 상·하형금형의 내부깊이 차가 큰 부분과 금형 단차가 큰 부분의 단면을 살펴보면 Fig. 5와 같고, 이들 단면에 대한 2차원 단면해석을 해본 결과 그림과 같이 주름이 발생했다. 따라서 기존 스탬핑 금형과 동일한 금형분할면을 사용할 경우 상·하형금형의 내부깊이 차가 큰 단면 A-A', B-B', C-C'와 금형분할면의 단차가 큰 단면 D-D', E-E'에서 주름이 발생할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 위에서 예상한 주름의 발생을 억제하기 위하여 Left, Right member부분의 금형분할면을 이동시켜 상·하형금형의 내부깊이 차를 조절하였고, 성형시 용접판재의 유입저항을 감소시키기 위해서 No. 1 member와 Left, Right member가 결합되는 두 부분은 곡률(R50)을 갖도록 금형을 설계하였다. 그러나 금형단차로 인하여 주름발생이 예상되는 단면 D-D', E-E'두 부분은 제품 조립시 타 부품과의 간섭으로 인하여 설계변경이 이루어지지 않았다.

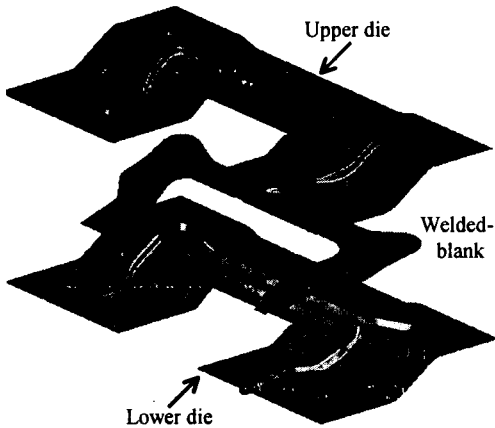


Fig. 6 F.E. model for WBH

3.2 성형해석 및 트라이 아웃(Try-out)

성형해석은 상·하형금형 사이에 용접판재를 위치시키고 상형금형이 하강한 뒤 유압시스템이 연결되는 순서로 이루어진다. Fig. 6은 성형해석을 위한 금형과 용접판재의 유한요소 모델을 나타낸다. 용접판재의 용접부는 판재의 외곽선을 기준으로 5mm 부근에 위치한 상·하 용접판재의 접점을 동시에 선택하여 강제운동을 하도록 하여 모델링 하였고, 성형해석에서 사용한 유체유동율은 해석시간 단축을 위하여 관성효과가 발생하지 않는 범위 내에서 최대로 설정하였다.

Fig. 7은 성형해석결과 두께방향변형률을 나타낸다. A, B, C, D부분은 다른 부분에 비하여 두께증가가 큰 부분으로 주름발생이, E부분은 두께감소로 인한 찢어짐(tearing)이 예상되는 부분이다. Fig. 8은 금형 트라이 아웃결과와 성형압력 500 bar에서 제품에 발생한 주름과 찢어짐을 나타내며, 성형해석결과를 통하여 예상했던 부분과 동일한 부분에서 주름 및 찢어짐이 발생함을 알 수 있다. 또한 전체적인 용접판재의 유입경향도 해석결과와 비교할 만한 것으로 판단된다.

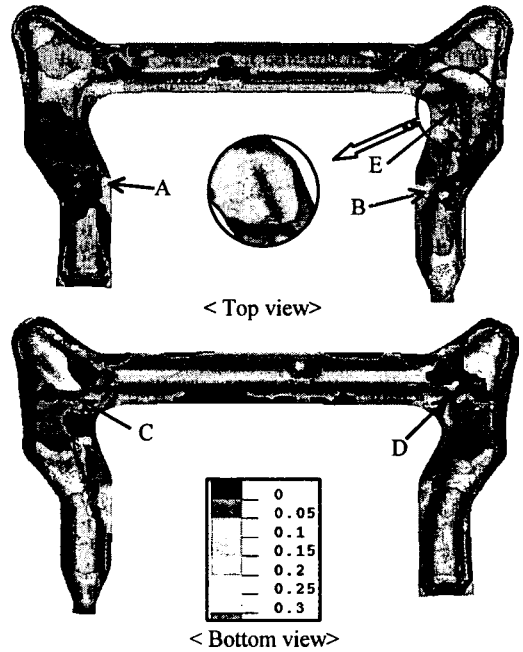


Fig. 7 Thickness strain

금형 트라이 아웃결과 나타난 A, B, C, D부분의 주름은 금형단차가 크기 때문에 발생한 주름이고, E부분에서 발생한 찢어짐은 상·하금형의 내부깊이 차가 크기 때문에 발생한 것으로 차후 금형설계변경은 이점에 유의하여 이루어져야할 것으로 예상된다.

유압성형시 용접판재의 유입경향을 살펴보면, 성형 후 필요이상의 플렌지부가 나타남을 알 수 있다. 따라서 차후 성형해석을 통하여 용접판재의 형상최적화가 이루어져야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차용 서브프레임을 예제로 하여 용접판재유압성형공정에서 제품에 발생하는 주름의 발생원인을 분석한 뒤 주름을 억제할 수 있는 금형설계에 관한 연구를 수행하였다. 이상의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 용접판재유압성형공정에서 제품에 발생할 수 있는 주름은 금형분할면을 기준으로 상·하형금형의 내부깊이 차가 클 때 발생하는 주름과 금형단차가 클 때 발생하는 주름이 있다. 주름발생원인중 전자의 경우 설계변경을 통한 상·하형금형의 내부깊이 조절로 억제할 수 있고,

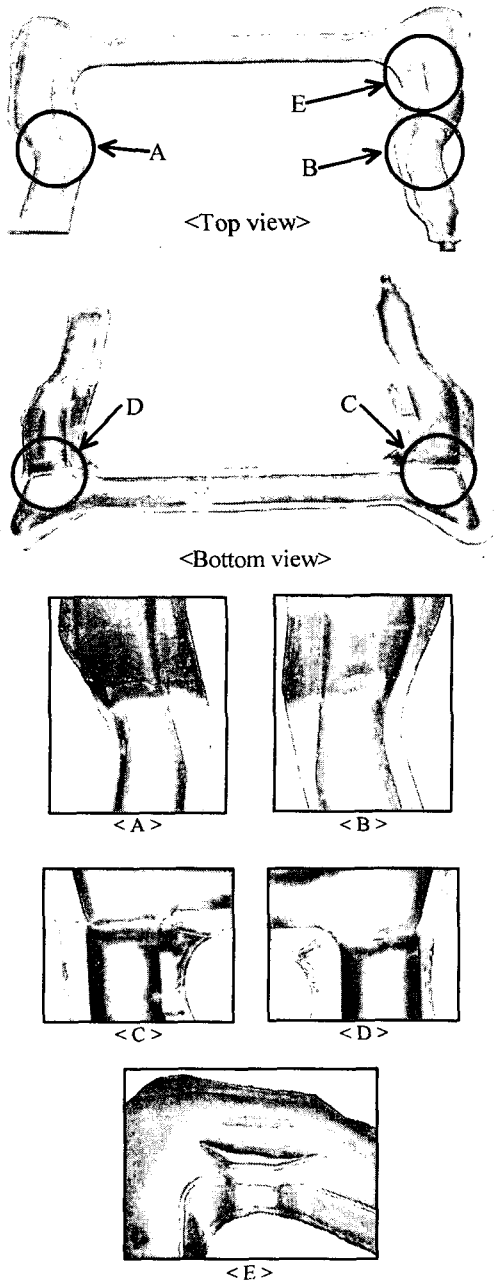


Fig. 8 Prototype at max. pressure 500 bar

후자의 경우 금형의 설계변경 및 블랭크 홀더력 조절을 통하여 주름발생을 최소화 할 수 있는 것으로 판단된다.

(2) 용접판재유입성형을 위한 금형 설계단계에서 2차원 단면해석 및 3차원성형해석에서 얻은 결과를 금형설계에 반영하여 만족할 만한 금형 트라이 아웃 결과를 얻었다.

(3) 성형해석결과와 금형 트라이 아웃결과 중 주름 및 찢어짐 발생위치와 소재 유입경향을 비교하였으며, 두 결과가 잘 일치함을 확인하였다.

(4) 차후 제품결함 억제를 위한 금형 설계변경, 용접판 재형상 최적화 그리고 성형압력크기 및 경로에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

(5) 본 연구에서는 마찰과 용접선의 영향을 고려하지 않고 성형해석을 수행하였다. 따라서 이 요소들이 재료의 성형성에 미치는 영향은 차후 충분한 연구를 통하여 검토되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Robbert, S., 1999, "Process Limits for The Hydroforming of Sheet Metal Pairs", Advanced Technology of Plasticity, Vol. II, Proceedings of the 6th ICTP, pp.1261~1266.
- (2) Klaus Siegert and Matthias Aust, 2000, "State-of-the-Art of Hydroforming Tubes Extrusions and Sheet Metals in Europe", Institute for Sheet Metal Forming Technology of the University of Stuttgart.
- (3) Wang, Z. R., 1999, "Numerical Simulation of Some New Integrated Hydroforming Process", Advanced Technology of Plasticity, Vol. II, Proceedings of the 6th ICTP, pp.1253~1260.
- (4) Zhang, S. H., Kang, D. C., Lang, L. H., Danckert, J. and Nielsen, K. B., 1999, "Finite Element Analysis of Hydromechanical Deep Drawing", Numisheet'99, pp.463~466.
- (5) Lenze, F. J. and Gruszka, T., 1997, "Application of Hydroforming for Body-In-White", Advanced Technologies & Processes IBEC'97, pp.11~20.
- (6) Kim, H. J., Jeon, B. H., Kim, H. Y. and Kim, J. J., 1993, "Finite Element Analysis Liquid Bulge Forming Process of T-Shaped Pipe by An Explicit Code", Advanced Technology of Plasticity, pp.545~550.