

단면 분석을 통한 자동차용 리어 서브-프레임 하이드로포밍 부품의 공정 제어 및 설계

김기주
동명대학교 메카트로닉스공학과

Hydro-forming Process Control and Design Concept of Automotive Rear Sub-frame Components Through Cross Sectional Analysis

Kee Joo Kim

Department of Mechatronics Engineering, Tongmyung University

요 약 하이드로포밍 기술은 지난 20년간 자동차부품의 적용을 중심으로 비약적인 발전을 해 왔다. 이 기술은 자동차 산업 응용분야에 많은 장점을 가지고 있는데 이는 더 나은 구조적 강건성, 부품수 감소에 기인한 비용절감, 재료절약, 무게감소, 낮은 스프링백현상, 개선된 강도, 내구성 향상, 설계 유연성 등이다. 하이드로포밍 부품의 성형성 검토를 위하여 다양한 컴퓨터 시뮬레이션 기술 등이 발달해 왔으며 이를 통해 성형 가능성을 검토하는 것과 동시에 성형을 위하여 벤딩 공정, 프리포밍 공정, 다이클로징 공정 등의 효율적인 공정을 수립하여 하이드로포밍 부품들을 설계하고 있다. 이에 본 연구에서는 하이드로포밍 부품 설계 시 고려사항 중 성형량, 부품의 단면길이(하이드로포밍 프레스 용량에 맞는), 최소 곡률(하이드로포밍 압력에 따른 곡률 영향 평가) 등을 제시하고 실제 자동차용 리어 서브-프레임 부품의 단면분석을 실시함으로써 하이드로포밍 성형을 위한 설계 방안을 제시하고자 한다. 아울러 하이드로포밍 공정인자 중 프리벤딩, 축피딩, 유압 압력, 프레스 하중, 마찰 등의 효과를 분석하여 이들 공정이 직접적인 하이드로포밍 성형에 필요인자 인지 등을 고찰하였다.

Abstract Hydro-forming technology has spread dramatically throughout automotive industry over the last 20 years. This technology has many advantages for automotive applications in terms of better structural integrity of the parts, lower cost from fewer parts, material savings, weight reduction, lower springback, improved strength, durability, and design flexibility. In this study, various simulation technologies were developed to investigate the formability of hydro-forming components. Through this technology, to establish the effective forming process for appropriate components design, the bending process, pre-forming process, die closing process, etc. were considered for good forming. This paper proposes the forming amount, section length (corresponding to the hydro-forming press capacity), and minimum curvature (curvature effect evaluation according to the hydro-forming pressure) among the considerations in the design of the hydro-forming part. In addition, a design method is proposed for hydro-forming molding by carrying out cross section analysis of a real sub-frame part for automobiles. The effects of pre-bending, axial feed, hydraulic pressure, press load, and friction among the hydro-forming process parameters were analyzed. Therefore, whether these processes are necessary factors for hydro-forming were examined.

Keywords : Bending, Hydro-forming, process control, rear sub-frame, thinning

1. 서론

하이드로포밍(Hydro-forming) 기술은 지난 20여 년

간 자동차산업에서 비약적인 성장을 해왔다. 자동차산업에서 본격적으로 사용하기 이전 초기의 하이드로포밍 부품은 단순한 다지관 형태가 대부분으로 위생용 부품 또

*Corresponding Author : Kee Joo Kim(Tongmyung Univ.)

Tel: +82-51-629-1545 email: kjkim@tu.ac.kr

Received May 8, 2018

Revised (1st June 18, 2018, 2nd July 9, 2018)

Accepted September 7, 2018

Published September 30, 2018

는 약기류 제조에 적용되었다[1]. 하이드로포밍 기술이 비로소 경쟁력을 갖추게 된 계기는 최근 들어 고압 유압 시스템, 컴퓨터에 의한 정밀제어 기술의 발전 그리고 프레스의 대형화를 들 수 있다. 이 기술은 기존의 프레스 성형 공법에 비하여 부품수의 감소, 일체화 성형, 부품수 및 금형의 감소로 인한 비용절감, 펀칭 또는 용접 공정의 생략, 높은 형상 정밀도, 부품의 강성 및 내구성 향상, 설계의 유연성 등 많은 장점을 가지고 있다[1,2]. 차량경량화의 목표달성을 위하여 사용되는 튜브 소재의 강도도 증가하는 추세에 있다. 현재 인장강도 300~400MPa급 소재가 널리 이용되고 있으나 최근 들어 새시부품을 중심으로 인장강도 400MPa급 강재 적용이 확산되고 있다[1,2].

본 연구에서는 인장강도 440MPa급 강재를 이용한 하이드로포밍 리어 서브프레임 부품 개발의 과정을 다루고자 하며 개발된 부품의 형상 및 두께 감소율에 대한 분석을 통하여 단면 설계기준을 제시하고자 한다. 인장강도 440MPa급 고강도 강재를 이용하여 하이드로포밍 리어 서브프레임용 하이드로포밍 사이드멤버 및 크로스멤버 부품을 성공적으로 설계하였다. 부품설계 단계에서는 사이드멤버 부품과 리어 크로스멤버 부품의 형상에 대한 초도 분석 및 전체적인 공정 설계가 이루어졌다.

2. 부품설계

2.1 하이드로포밍 공정 인자

하이드로포밍 부품 설계 시에는 부품의 단면길이는 가능한 동일하게 유지하여야 하는 데 최소 단면 길이를 분석하여 초기 튜브 직경을 결정해야 한다.

최소곡률의 경우 성형압력은 최소곡률에 의해 결정되며 성형압력과 최소 곡률은 반비례한다.

하이드로포밍 시 프리벤딩이 필요한지 결정해야 하는데 프리벤딩은 주름, 좌굴을 예방하며 소재 두께 감소, 단면형상 변화, 표면 흠집발생을 최소화 시키는데 필요한 공정이다. 또한 굽힘부위의 확관율을 최소화 시키는 설계에 필요한 공정이다.

축피딩(axial feeding)의 경우 소재 두께가 과하게 감소될 때 파단 지연을 위해 필요한 공정이며 이를 통해 형상 자유도(확관을 과대 설계 가능)가 증가한다.

하이드로포밍 압력은 축피딩과 연동되어 있으며 독일의 경우 고압방식을, 북미의 경우 저압방식을 사용한다[3]. 여기서 프레스 하중의 경우 경제성, 적정 잠금방식 등을

고려해야 한다. 또한 금형 및 튜브의 적정 윤활제를 선택하여 마찰의 영향을 최소화 해야 한다. Fig. 1에 곡률반경에 따른 하이드로포밍 압력의 관계를 나타내었다. 예상한 대로 곡률 반경이 클수록 성형압력은 감소하였으며 프레스 용량을 계산하여 설계 곡률 반경을 결정해야 한다.

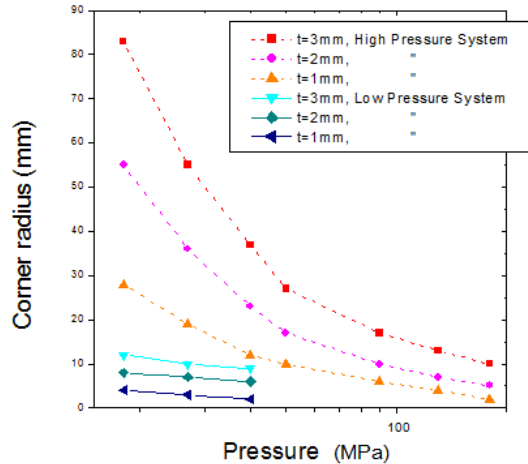


Fig. 1. Relationship between forming pressure versus corner radius [3].

Fig. 2에는 하이드로포밍 공정 전에 튜브 벤딩공정에서 사용하는 설비의 구성을 나타내었다.

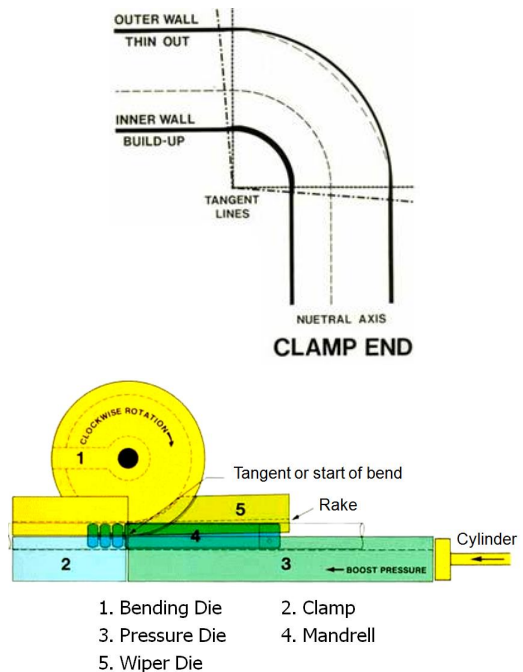


Fig. 2. Bending apparatus for hydro-forming[3].

2.2 하이드로포밍 압력 계산[1,2]

정확한 하이드로포밍 압력과 프레스의 용량을 미리 계산하여 장비가 성형 가능한 용량인지를 다음의 식들로부터 확인하여야 한다. Fig. 1에 나타난 두께가 얇은 파이프가 내압을 받을 때 파이프의 항복강도는 식 (1)과 같다.

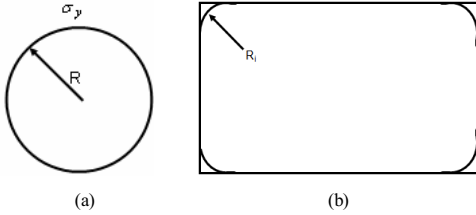


Fig. 1. Relationship between internal pressure and wall thickness.

$$\sigma_y = P_i R_i / t \quad (1)$$

여기서, P_i , σ_y , t , R_i 는 각각, 내부 하이드로포밍 압력(internal hydro-forming pressure), 재료항복강도(material yield strength), 튜브벽두께 및 유효 튜브벽 내경(effective internal radius of the tube wall) 이다. 식 (1)에 나타난 바와 같이 재료의 두께와 항복응력이 증가함으로써 성형을 위한 내부압력은 증가하게 되고 R_i 가 감소할수록 큰 내부압력이 필요하게 된다. 이를 활용하여 튜브의 최대내부압력(P_{max})을 계산하는 경험식은 식 (2)와 같다[1,2].

$$P_{max} = 1.1547 \cdot \frac{\sigma_{uts}}{R_{min} - t / 2} \cdot t \quad (2)$$

여기서, σ_{uts} 는 소재의 인장강도이며, R_{min} 은 최소곡률반경이다. 또한, 프레스의 용량을 결정하는 것은 제품의 전체 면적이다. 프레스 용량(하이드로포밍용 금형을 닫는데 걸리는 힘), F_{clamp} 는 식 (3)과 같이 튜브의 최대내부압력 (P_{max})과 튜브의 크기에 비례한다.

$$F_{clamp} = P_{max} \cdot d_i \cdot l \quad (3)$$

여기서, d_i 는 제품의 내경(tube inner diameter), l 은 튜브의 길이이다. 이를 고려하여 제품의 성형을 위한 프레스 용량을 결정하여야 한다. 한편, 축실린더(Axial

Cylinder)는 파이프 내부의 확관기(intensifier) 압력의 전달 및 봉합(sealing)과 피딩(Axial Feeding)으로 성형성을 확보하는 기능을 하며 피딩(Feeding)이 필요한 공정에서는 축힘(Axial Force)을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F = F_s + F_a + F_f \quad (4)$$

여기서, F_s 는 튜브의 내부압에 대한 봉합힘(Sealing Force Max. Force to seal tube ends)로 다음식 (5)와 같다.

$$F_s = P_{max} \cdot \pi \left(\frac{d_o - 2t}{2} \right)^2 \quad (5)$$

d_o 는 튜브 직경(tube outer diameter)이다. 식 (4)에 서, 튜브 소재를 소성변형 시키는 힘, F_a 는

$$F_a = Tube_Section_Area \times \sigma_z = (d_o - t)\pi \times t \times 1.2 \times \sigma_{uts} \quad (6)$$

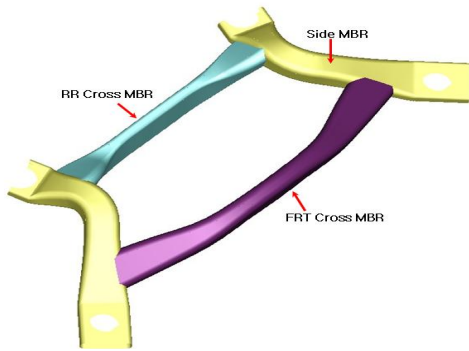
식 (4)에서, 마찰에 대한 저항력 F_f 는

$$F_f = \mu \cdot P_{max} \cdot A_f \quad (7)$$

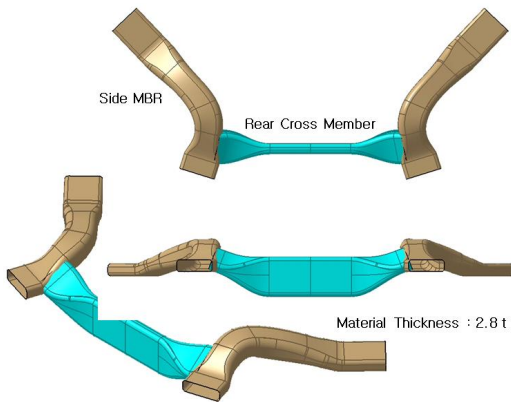
여기서, μ (해석시 입력값으로 마찰계수 값은 0.06을 입력하였음)는 금형과 튜브간 마찰계수(friction coefficient between die and punch)이며, A_f 는 압력을 받고 있는 면적(friction surface in areas where material is moving)이다.

2.3 리어 서브프레임 부품 설계

새시부품의 대물 파트인 리어 서브프레임(Rear Sub-frame)은 자동차 새시 부품으로서 승용차의 뒷쪽 하단부에 위치하여 액슬(Axle)을 서브할 뿐만 아니라 차체와 휠(Wheel)을 연결하는 역할을 한다[1,2]. 뒷쪽 휠은 이 부품에 여러 개의 링크 부품으로 연결되어 편안한 승차감을 제공한다. 이 리어 서브프레임은 2개의 사이드 멤버(Side Member)와 2개의 크로스 멤버(Cross Member)로 구성된다. 본 연구에서는 이 2개의 사이드 멤버 파트를 튜브 하이드로포밍에 의하여 설계하였으며 Fig. 3에 그 형상을 나타내었다.



(a) Rear sub-frame including side members



(b) side members and rear cross member

Fig. 3. Geometry of (a) rear sub-frame and (b) side members and rear cross member.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 사이드멤버 해석결과

Fig. 4에 사이드 멤버 부품의 단면분석결과를 나타내었는데 각 숫자가 나타내는 의미는 각 단면의 원주길이이며 단위는 mm이다. 초기 튜브의 외경(outer diameter)은 84 mm이기 때문에 튜브의 원주길이는 263.76 mm이다. 단면분석 결과를 통하여 부품의 최대 및 최소 단면 원주길이와 최소 코너 반경을 얻게 되며 이 결과로부터, 요구되는 튜브의 길이, 프레스 하중 및 최대 가압력을 계산할 수 있다.

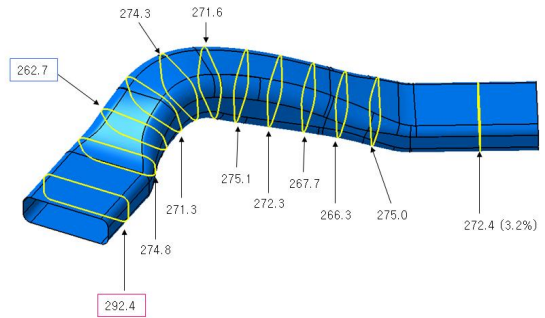


Fig. 4. Analyses of cross sections of side member along the part, (unit: mm) [4].

하이드로포밍 성형해석을 위하여 계산에 사용된 프로그램은 성형 및 충돌해석 상용 프로그램인 LS-Dyna를 사용하였다. Fig. 5에는 사이드멤버 부품이 하이드로포밍 공정 완료 후, 형상 및 두께감소율 분포를 나타내었다. 이때 필요한 최고 성형압력은 150 MPa 이었으며 최대 두께 감소율(thinning)은 13%로 예측되었다. 부품설계측면에서 이 소재에 대한 최대 허용 두께 감소율은 25%로서 거의 허용두께보다는 낮게 두께감소가 있을 것으로 예측되었다[4].

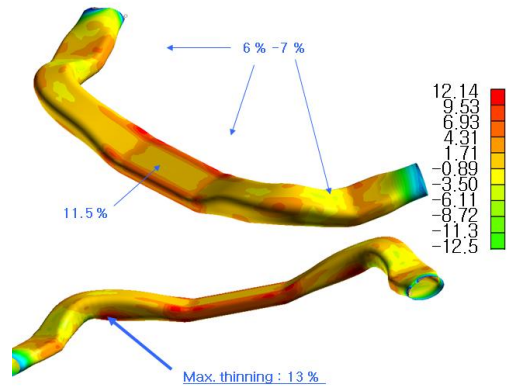


Fig. 5. Predicted geometry and distribution of thickness after hydro-forming.

3.2 리어 크로스멤버 부품 분석결과

Fig. 6에 리어 크로스멤버 부품의 형상을 상세히 나타내었는데 급격한 단면변화가 있는 부위가 있다.

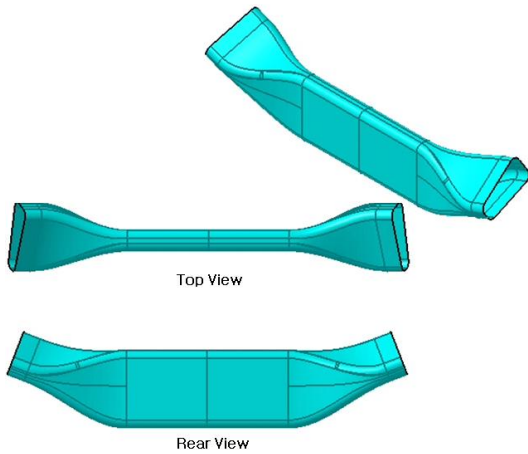


Fig. 6. Geometry of rear cross member

Fig. 7에 크로스멤버 부품의 단면분석결과를 나타내었는데 각 숫자가 나타내는 의미는 각 단면의 원주길이이다. 초기 튜브의 외경(outer diameter)은 88.9 mm이기 때문에 튜브의 원주길이는 279.2 mm이다. 단면분석 결과를 통하여 부품의 최대 및 최소 단면 원주길이와 최소 코너 반경을 얻게 되며 이 결과로부터, 요구되는 튜브의 길이, 프레스 하중 및 최대 가압력을 계산할 수 있다. 수식 (1)~(7)을 이용하여 리어 크로스멤버 부품을 피딩하는데 필요한 축힘을 계산한 결과 228.1 ton으로 계산되었으며, 계산에 사용한 값들을 Table 1에 정리하여 나타내었다.

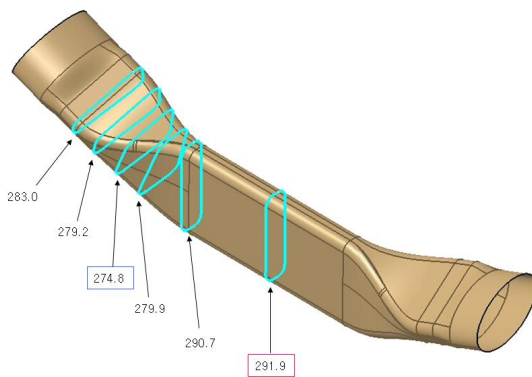


Fig. 7. Analyses of cross sections of cross member along the part, (unit: mm).

Table 1. Calculation results of press capacity security in case of rear cross member

Corner radius, min.	10 mm
Tube size (determined)	88.9mm
Thickness of tube wall (given)	2.8 mm
Max. force to seal tube ends	96.9 ton
Force to move materials at tube ends	43.0 ton
Force by the friction	88.3 ton
Calibration pressure, min.	177.8 MPa
Axial force for feeding	228.1 ton

이상의 고찰과 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타낸 단면분석 결과에서처럼 단면에 급격한 변화가 있는 부위가 있으므로 하이드로포밍 전에 프리포밍이 필요할 것이다. 이러한 단면분석에 의한 고찰을 통하여 확관이 큰 영역과 피딩이 필요한 부분, 두께 감소가 과대할 것으로 예상되는 부위를 선별할 수 있다. Fig. 8에 리어 크로스멤버 부품의 프리포밍 금형을 Fig. 9에 하이드로포밍 금형을 설계하여 나타내었다. 이러한 금형설계를 통해 급격한 단면변화에 대비하여 성공적인 하이드로포밍 공정을 실현할 수 있을 것으로 기대된다.

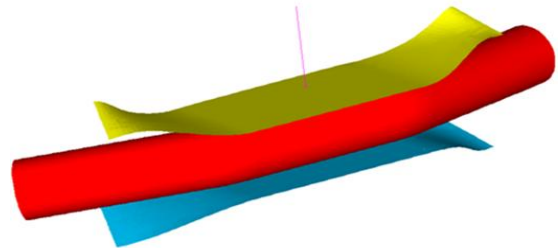


Fig. 8. Geometry of pre-forming die for rear cross member part.

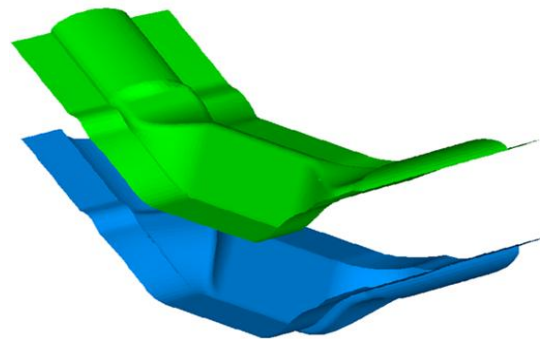


Fig. 9. Geometry of hydro-forming die for rear cross member part.

4. 결 론

- 1) 하이드로포밍 공정에 필요한 필수인자들을 분석하였으며 곡률 반경이 클수록 성형압력은 감소하였다.
- 2) 프레스 용량을 계산하여 설계 곡률 반경을 결정해야 한다. 인장강도 440MPa급 고강도 강재를 이용하여 하이드로포밍 리어 서브프레임용 하이드로포밍 사이드멤버 및 크로스멤버 부품을 성공적으로 설계하였다.
- 3) 부품설계 단계에서는 사이드멤버 부품과 리어 크로스멤버 부품의 형상에 대한 초도 분석 및 전체적인 공정 설계가 이루어졌다. 요구되는 확관율은 모두 가능한 수준으로 설계하였다.
- 4) 사이드멤버 부품의 상세한 시뮬레이션 결과에서는 하이드로포밍에 의한 최종 두께 감소율이 양호한 수준으로 예측되었으며 이는 부품개발을 위한 기준치에 부합하였다.

References

- [1] K. J. Kim, C. W. Sung, "Hydro-forming Process of Automotive Rear Sub-frame by Computer Aided Engineering (CAE)", Transactions of KSAE, Vol, 16, No. 3, pp. 38-43, 2008.
- [2] K. J. Kim, J. h. Kim, B.-I. Choi, "Hydro-forming Process Development of Automotive AA6061 Rear Sub-frame Side Member by Computer Aided Engineering (CAE)", Transactions of KSAE, Vol, 18, No. 5, pp. 45-49, 2010.
- [3] K. J. Kim, K. Kim, Y. Kang and J. H. Park, "Conical tube hydro-forming design of automotive instrument panel beams using computer aided engineering", MATERIAL- WISSENSCHAFT UND WERKST-OFFTECHNIK, Vol. 44, No. 5, pp. 354-359, 2013.
- [4] K. J. Kim, "Hydro-forming Process of Automotive Rear Sub-frame Members by Finite Element Analysis", Transactions of KSMT, Vo. 20, No. 4, pp. 1-6.

김 기 주(Kee Joo Kim)

[중신회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 일반대학원 재료공학부 (공학박사)
- 1993년 8월 ~ 2009년 2월 : 쌍용자동차 기술연구소 책임연구원
- 2009년 3월 ~ 2016년 2월 : 서정대학교 자동차과 교수
- 2016년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 메카트로닉스공학부 교수

<관심분야>

기계공학, 기계설계, CAE