

차량 엔진크레들용 크로스멤버 부품의 하이드로-포밍가공 및 해석

김기주¹⁾ · 이용현²⁾ · 배대성²⁾ · 성창원¹⁾ · 백영남³⁾ · 손일선⁴⁾

서정대학 자동차과¹⁾ · 한양대학교 메카트로닉스공학과²⁾ · 경희대학교 기계공학과³⁾ ·
오산대학 자동차기계열 성장동력특성화사업단⁴⁾

Hydro-forming and Simulation of Cross Member Parts for Automotive Engine Cradle

Kee Joo Kim^{*1)} · Yong Heon Lee²⁾ · Dae Sung Bae²⁾ · Chang Won Sung¹⁾ ·
Young Nam Baik³⁾ · Il-Seon Sohn⁴⁾

¹⁾School of Automobile Engineering, Seojeong College, Gyeonggi 482-777, Korea

²⁾Department of Mechatronics Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Gyeonggi 449-701, Korea

⁴⁾School of Automobile & Mechanical Engineering, Osan College, Gyeonggi 447-749, Korea

(Received 30 June 2008 / Accepted 6 August 2008)

Abstract : The environment and energy related problem has become one of the most important global issues in recent years. One of the most effective ways of improving the fuel efficiency of automobiles is the weight reduction. In order to obtain this goal the hydroforming technology has been adapting for the high strength steel and its application is being widened. In present study, the chassis components (mainly cross members of engine cradle) simulation and development by hydroforming technology to apply high strength steel having tensile strength of 440 MPa grade is studied. In the part design stage, it requires feasibility study and process design aided by CAE (Computer Aided Design) to confirm hydroformability in details. Overall possibility of hydroformable chassis parts could be examined by cross sectional analyses. Moreover, it is essential to ensure the formability of tube material on every forming step such as pre-bending, performing and hydroforming. In the die design stage, all the components of prototyping tool were designed and interference with press was investigated from the point of geometry and thinning.

Key words : Hydroforming(하이드로포밍), Chassis(샤시), Simulation(해석), Cross member(크로스멤버), Thinning

1. 서론

튜브 하이드로포밍(hydro-forming) 기술은 지난 10여 년간 자동차산업에서 비약적인 성장을 해왔다. 그러나 이 기술의 실질적인 역사는 지난 50여 년을 거슬러 올라간다. 초기의 하이드로포밍 부품은 단순한 다지관 형태가 대부분으로서 위생용 부품 또는 약기류 제조에 적용되었다.¹⁾ 하이드로포밍 기

술이 비로소 경쟁력을 갖추게 된 계기는 최근들어 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 급형의 감소로 인한 비용절감, 펀칭 또는 용접 공정의 생략, 높은 형상 정밀도, 부품의 강성 및 내구성 향상, 설계의 유연성 등 많은 장점을 가지고 있다.²⁻⁴⁾

하이드로포밍 기술을 이용하여 엔진크레들(en-

*Corresponding author, E-mail: kjkimfem@naver.com

gine cradle), 배기계 부품, 프론트 및 리어 서브프레임(front & rear sub-frame), 라디에이터 서포트(radiator support), 사이드 레일(side rail), 캠 샤프트(cam shaft) 및 각종 차체 부품에 이르기까지 다양한 자동차 부품의 생산이 가능하다. 길이방향을 따라 단면형상의 변화가 있는 튜브형태의 부품을 주로 제조한다. 튜브소재는 부품의 형상대로 제작된 금형의 내부에서 고압의 유체를 통하여 확관 성형된다. 적절한 길이로 미리 절단된 튜브는 최종형상에 유사한 형태로 굽힘가공을 받게 되며 일반적으로 하이드로포밍 금형에 안착되기 위하여 프리포밍 공정(pre-forming process)을 거치게 된다. 대부분의 경우 프리포밍 형상은 하이드로포밍 공정의 성패에 결정적인 요인이 된다. 이렇게 프리포밍된 튜브는 하이드로포밍 금형으로 옮겨진 후 내부 유체를 통하여 성형된다.

차량경량화의 목표달성을 위하여 사용되는 튜브소재의 강도도 증가하는 추세에 있다. 현재 인장강도 300~400MPa급 소재가 널리 이용되고 있으나 최근들어 새시부품을 중심으로 인장강도 400MPa급 강재 적용이 확산되고 있다. 본 연구에서는 기존의 소재보다 강도가 높아 상대적으로 성형성이 취약한 인장강도 440MPa급 POS-HF440 강재를 이용한 하이드로포밍 엔진크레틀용 크로스멤버 부품의 가공 및 해석의 전 과정을 다루고자 하며 개발된 부품의 형상 및 두께 감소율에 대한 해석결과를 시험결과와 비교 및 분석하였다. 또한, 기존 연구에서 사용되는 고가용 프리포밍 공정용 금형과 차별되게 저가형 간이 금형으로 프리포밍 공정을 대체할 방법을 고안하여 제시하고자 한다.

2. 부품 분석 및 해석

새시부품의 대물 파트인 엔진크레틀은 자동차의 앞쪽 하단부에 위치하여 엔진을 서브할 뿐만 아니라 차체와 휠(wheel)을 연결하는 역할을 한다. 앞쪽 휠은 이 부품에 여러 개의 링크 부품으로 연결되어 편안한 승차감을 확보하여 준다. 이 엔진크레틀은 메인 멤버(main member)와 크로스 멤버(cross member)로 구성된다. 본 연구에서는 이 엔진크레틀의 크로스멤버 파트를 튜브 하이드로포밍에 의하여

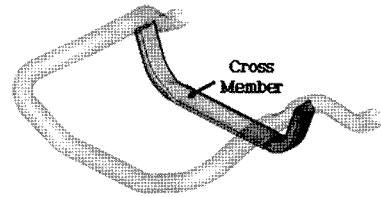


Fig. 1 Geometry of cross members in the cross member of engine cradle

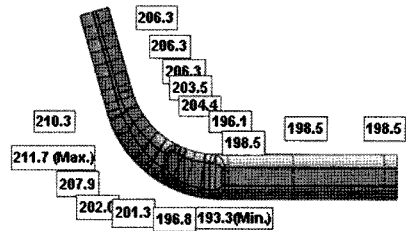


Fig. 2 Analyses of cross-section perimeters along the half symmetry part, (unit: mm)

개발하였으며 Fig. 1에 그 형상을 나타내었다.

먼저 부품은 하이드로포밍 공정에 의한 제조 가능성을 확인하기 위하여 길이방향으로 상세한 분석이 이루어진다. Fig. 2는 프론트 서브-프레임에 서브할 크로스멤버 부품의 단면분석결과를 나타내었다. 단면분석 그림은 CATIA 프로그램을 이용하여 설계된 부품의 CAD데이터 분석을 통하여 행하였으며 이를 통하여 부품의 최대 및 최소 단면 원주길이와 최소코너 반경을 얻게 된다. 또한 이 결과로부터, 요구되는 튜브의 길이, 프레스 하중 및 최대 가압력을 계산할 수 있다. 이 부품의 경우 최소 및 최대 원주길이는 193.3mm, 211.7mm이며 이때의 확관율은 각각 -3.3%, 6.3%이다. 적정 튜브 사이즈는 원주길이 199.5mm를 갖는 외경 63.5mm(2.5") 튜브이며 설계된 제품의 원주길이 원주길이가 튜브의 원주길이보다 커야 확관을 이용하여 하이드로포밍 공정으로 원활한 성형가공이 가능할 것이다. 일반적으로 허용하는 최대 확관율은 10%이며 이 부품의 경우 최대 확관을 지점이 부품의 양 끝단부에 가까우므로 더욱 안전하다 할 수 있다. 초도 분석결과를 표 1에 나타내었다. 표 1의 계산 방법은 다른 논문^{5,6)}에 자세히 소개하였으므로 본 논문에서는 이를 생략하였다. 하이드로포밍 공정 시뮬레이션을 위한 튜브 소재 재질은 POS-HF440소재의 인장시험을 통하여

Table 1 Results of the preliminary analysis

Corner radius, min.	10.0 mm
Tube size (determined)	63.5 mm
Thickness of tube wall (given)	2.3 mm
Max. force to seal tube ends	38.7 ton
Force to move materials at tube ends	25.1 ton
Force by the friction	35.9 ton
Calibration pressure, min.	1,419.4bar
Axial force for feeding	99.7 ton

Table 2 Mechanical properties of tube material

E, GPa	YS, MPa	TS, MPa	U.El, %	T.El, %	n
210	365	473	16.3	31.4	0.15

• E: Young's Modulus, YS: Yield Strength, TS: Tensile Strength, U.El.: Uniform Elongation, n: Strain Hardening Exponent

측정하였으며 그 결과를 표 2에 나타내었다. 인장강도는 473MPa이며 탄소성 가공경화 거동을 보이는 재료로서 해석에서는 등방성을 가정하였다. 성형해석을 위한 모델은 상·하부 금형 및 기하학적 벤딩 형상을 갖는 튜브로 구성되며 벤딩공정에 대한 성형해석을 먼저 행하였다.

Fig. 3에는 하이드로포밍 공정에 의하여 실제로 제작될 부품의 성형전 벤딩 해석 결과를 나타내었다. 계산에 사용된 프로그램은 성형 및 충돌해석 상용 프로그램인 LS-DYNA3D를 사용하였다. 계산결과 벤딩반경 100 mm를 갖도록 벤딩시 총 2회의 벤딩으로 초기 2.3 mm 두께의 튜브는 1.9~2.7 mm의 두께로 변화함을 알 수 있다. 본 벤딩가공 해석한 결과를 하이드로포밍 금형에 모의 삽입한 결과 엔진크래들의 메인멤버는 프리벤딩 공정 이외에 추가의 프리포밍 공정이 있어야 하이드로포밍 금형에 안착이 가능함을 알 수 있었다.

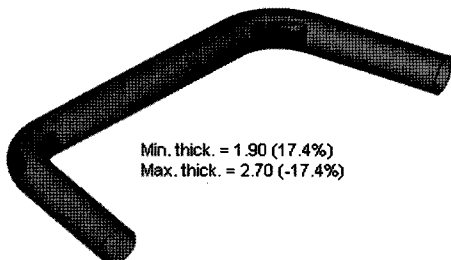


Fig. 3 Thickness after simple bending simulation

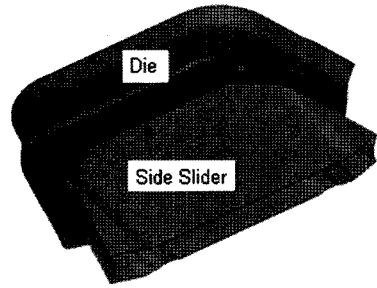


Fig. 4 Preforming die & side slider for tube crushing

Fig. 4에는 기존의 고가형 프리포밍 공정을 개선할 방법으로 튜브를 금형 캐비티에 원활히 삽입시킬 수 있도록 프리포밍 성형가공용 저가의 간이금형을 모델링해 나타내었다. 본 논문에서 제시하고자 하는 Fig. 4에 나타낸 측면 슬라이더(side slider)를 안쪽 방향으로 밀어 넣으면 다이에 의해 더 이상 튜브가 밀려나가지 못하므로 튜브의 형상이 프리포밍되어 성형될 것이다. Fig. 4의 형상과 같은 독특한 프리포밍 금형의 측면슬라이더를 위치시킨 후 튜브로 밀어 넣어 벤딩된 튜브의 형상을 변형시킬 시, 하이드로-포밍용 금형 캐비티에 원활히 삽입시킬 수 있었으며 이 간이금형으로 인해 저가형 하이드로포밍 공정을 이룰 수 있다.

Fig. 5에는 하이드로포밍 해석용 모델 중 Fig. 4의 프리포밍 공정을 거쳐 눌림 성형된 튜브와 하부금형을 나타내었다. Fig. 4의 프리포밍 공정을 거치지 않았다면 Fig. 5에서와 같이 다이 캐비티 내에 원활히 튜브를 삽입시킬 수 없을 것이다. 프리포밍 공정 시 물레이션은 벤딩해석에서와 마찬가지로 LS-DYNA3D를 사용하였다. 튜브에는 찌그러지는 변형이 발생하게 되는데 이때 튜브의 폭이 큰 부분에 핀칭(pinching) 현상이 나타나기 쉽다. 이러한 핀칭 현상은 초기 튜브가 크지 않더라도 금형이 닫히는 동안

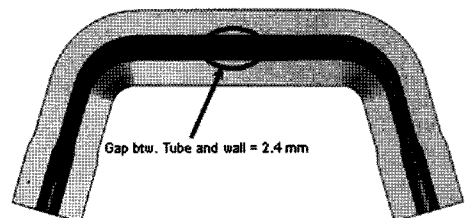


Fig. 5 Hydroforming die cavity and tube

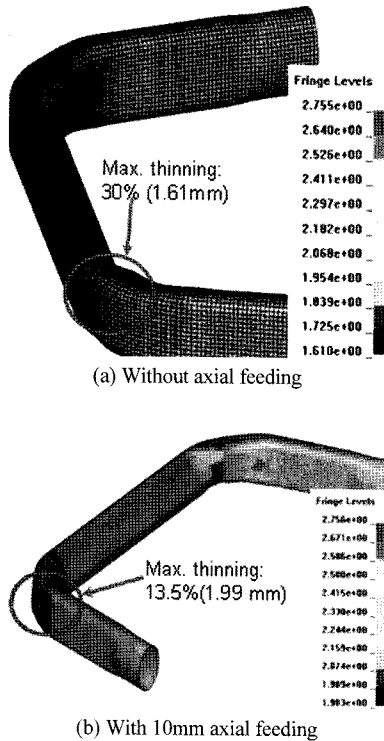


Fig. 6 Predicted geometry and distribution of thinning after hydroforming process

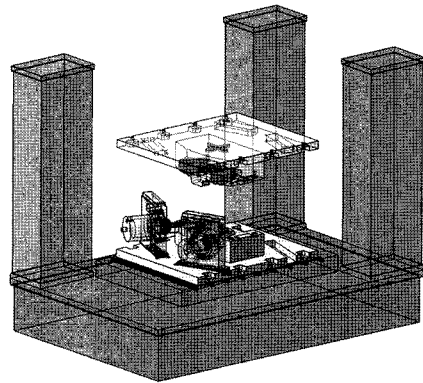
튜브가 편평하게 변형 될 경우에도 쉽게 발생할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 핀칭 현상이 발생하였는지를 프리포밍된 튜브를 다이 캐비티(cavity)에 모의 삽입시켜 확인하였으며 모사결과 이러한 현상은 나타나지 않았으며 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 프리포밍 공정을 수행하여 수축시킴으로써 금형이 닫히는(die closing) 동안 튜브가 간섭되거나 핀칭현상이 발생하는 것을 피할 수 있다.

Fig. 6(a)에는 마찰계수를 0.1로 하여 하이드로포밍 해석 후, 해석이 완료된 부품의 형상 및 두께감소율 분포를 나타내었다. 그림에서 나타난 contour라벨은 초기 2.3 mm였던 튜브 두께가 하이드로포밍 성형 해석 후 나타난 색깔변화이며 최고 두께 감소율(max. thinning)이 30% 이기 때문에 성형후 crack이 일어날 것이 예측되어, 양쪽 끝단부 축방향 피딩(axial feeding)을⁶⁻⁹⁾ 약 10 mm씩 가하여 성형하였으며 그 결과를 Fig. 6(b)에 나타내었다. 끝단부 피딩을 가하여 하이드로포밍 공정이 완료된 후의 형상 및 두께감소율 분포를 분석한 결과 최고 두께 감소율

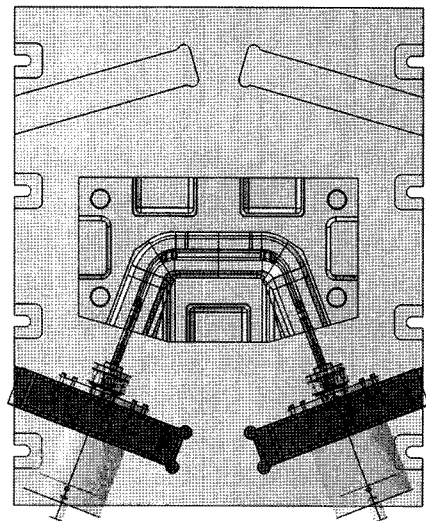
은 13.5%로 양호한 것으로 나타났다. 부품설계측면에서 이 소재에 대한 최대 허용 두께 감소율은 20%로서 더 이상의 형상 수정은 필요 없는 것으로 판단되었다.

3. 금형 설계

해석결과를 활용하여 하이드로포밍용 시작금형을 설계하였으며 전체적인 3-D설계 내역을 Fig. 7에 나타내었다. 상세한 금형 설계는 CATIA V5를 이용하여 수행하였다. 하이드로포밍 금형은 가이드플레이트(guiding plate), 압력판(pressure plate), 가이드핀/부시(guide pin/bush), 이젝터(ejector), 축실린더



(a) Iso-view



(b) Top-view

Fig. 7 Overall die design including press column

(axial cylinder) 등의 다양한 부품들로 구성된다. 금형의 설계시에는 금형 본체와 프레스와의 간섭 여부도 반드시 확인되어야 하는데 Fig. 7에 나타나듯이 금형이 프레스 컬럼과 간섭된 부분이 없는 것을 알 수 있다.

4. 하이드로-포밍 실험 및 부품 제작

Fig. 7로 설계된 금형을 이용하여 하이드로-포밍 실험을 행하였으며 직접적인 실험에서는 반복되는 트라이아웃(tryout) 과정을 통하여 제품의 성형을 안정시켰다. Fig. 8은 트라이아웃을 통하여 성형 완료된 하이드로포밍 튜브를 나타내었다. 하이드로포밍 공정에서 두께감소량을 줄이기 위하여 튜브의 양 끝단에 10 mm 씩 피딩하였다.

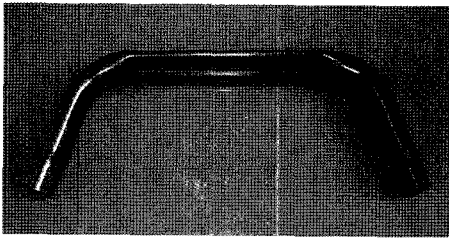


Fig. 8 Hydroformed part

5. 해석결과와 실험결과의 비교

Fig. 9는 성형품에서 두께를 3차원 레이저 스캐너로 측정된 위치를 나타내었으며 측정결과를 표 3에 나타내었다. 측정결과 최소 두께는 2.04 mm (3번 위치)이며 그 위치는 시뮬레이션 결과와 일치함을 알 수 있다. 표 3의 측정 결과에서 보는 바와 같이 해석 결과 대비 최대 차이는 2.45%로 나타났으며, 시뮬레이션 대비 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

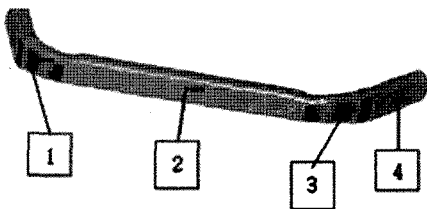


Fig. 9 Positions where the thickness is measured on the hydroformed part

Table 3 Calculated and measured thickness

Position	Measured	Calculated	Deviation
1	2.05 mm	2.00 mm	2.43%
2	2.28 mm	2.29 mm	-0.44%
3	2.04 mm	1.99 mm	2.45%
4	2.29 mm	2.28 mm	0.44%

6. 결론

인장강도 440MPa급 고강도 강재를 이용하여 하이드로포밍 가공한 샤프트부품(엔진 크레들용 크로스 멤버)을 성공적으로 개발하였다. 부품설계 및 해석 단계에서는 부품의 형상에 대한 초도 분석 및 전체적인 공정 설계가 이루어졌다. 요구되는 확관을은 모두 가능한 수준에 있었으며 예상되는 프레스 용량 및 최대 가압력은 사용 설비를 이용하여 가능하여 원활한 하이드로포밍 실험을 통해 확인하였다. 주요 초기 시뮬레이션 결과에서는 하이드로포밍에 의한 두께 감소율이 약 30%로 높아 규정된 목표량에 부합하지 않았으며 이에 측방향 피딩을 각각 10 mm 씩 부여하여 재 해석하였다. 측방향 피딩 부여를 통한 공정 개선 후, 하이드로포밍에 의한 최종 두께 감소율이 13.5% (초기 2.30 mm à 1.99 mm 두께)로 감소하여 개선된 수준은 양호한 수준으로 예측되었다. 시작금형을 설계, 제작하여 실험부품을 제작하였으며 두께 감소율 및 형상을 측정하였다. 하이드로포밍 실험을 통한 최대 두께 감소율은 해석에서 확립한 피딩조건인 10 mm의 끝단부 피딩을 부여하여 11.3% (초기 2.30 mm à 2.04 mm 두께)로 감소하였으며 이는 부품개발을 위한 기준치에 만족한 수준이다. 두께감소가 최대로 나타나는 부위는 해석결과와 실험결과에서 동일 위치였으며 해석결과 대비 실험결과와의 최대 차이(deviation)는 2.43%로 해석결과가 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

References

- 1) F. Dohmann, Ch.Hartl Vol.71, Journal of Materials Processing Technology, pp.174-186, 1997.
- 2) S. Nakamura, H. Sugiura, H. Onoe and K. Ikemoto, "Hydromechanical Drawing of Automotive Parts," J. of Mater. Proc. Tech., Vol.46,

- pp.491-503, 1994.
- 3) M. Ahmetoglu and T. Altan, "Tube Hydroforming-State-of-the-art and Future Trends," J. of Mater. Proc. Tech., Vol.98, pp.25-33, 2000.
 - 4) M. Ahmetoglu, K. Sutter, S. J. Li and T. Altan, "Tube Hydroforming: Current Research, Applications and Need for Training," J. of Mater. Proc. Tech., Vol.98, pp.224-231, 2000.
 - 5) N. Asnafi, "Analytical Modeling of Tube Hydro-forming," Thin-Walled Structure, Vol.34, pp.295-330, 1999.
 - 6) K. J. Kim, B. I. Choi and C. W. Sung, "Hydroforming Process of Automotive Engine Cradle by Computer Aided Engineering (CAE)," Transactions of KSAE, Vol.16, No.1, pp.86-92, 2008.
 - 7) B. H. Jeon, "A study on the automotive part forming technique for hydroforming," KSAE 1999 Structural & Strength Part Proceeding, pp.120-127, 1999.
 - 8) M. Y. Lee, S. Sohn and S. Lee, "A Study on the Automotive Bumper Rail Forming Technique by Hydroforming Process," KSAE 2000 Material & Recycling Proceeding, pp.87-93, 2000.
 - 9) J. Kim, L. P. Lei, S. Kang and B. Kang, "Bursting Failure Prediction in Tube Hydroforming Process," Transactions of KSAE, Vo.9, No.6, pp.160-169, 2001.