

# 컴퓨터응용공학을 이용한 자동차 Frame Cross Member의 Hydro-Forming 가공 Hydro-Forming of Automotive Frame Cross Member through Computer Aided Engineering

성창원<sup>1</sup>, 백영남<sup>1</sup>, \* #김기주<sup>2</sup>, 김주성<sup>2</sup>, 김경식<sup>3</sup>, 원시태<sup>4</sup>

C.W. Sung<sup>1</sup>, Y.N. Baik<sup>1</sup>, \* #K. J. Kim(kjkimfe@smotor.com)<sup>2</sup>, J. S. Kim, K.S.Kim<sup>3</sup>, S. T. Won<sup>4</sup>

<sup>1</sup>경희대학교 기계공학과, <sup>2</sup>쌍용자동차 CAE팀, <sup>3</sup>한국기계연구원 나노역학팀, <sup>4</sup>서울산업대학교 금형설계과

Key words : Tube hydroforming, frame, cross member, axial feeding, CAE

## 1. 서론

하이드로포밍(hydro-forming) 기술은 지난 10여 년간 자동차산업에서 비약적인 성장을 해왔다. 자동차산업에서 본격적으로 사용하기 이전 초기의 하이드로포밍 부품은 단순한 다지관 형태가 대부분으로서 위생용 부품 또는 악기류 제조에 적용되었다[1]. 하이드로포밍 기술이 비로소 경쟁력을 갖추게 된 계기는 최근 들어 고압 유압 시스템, 컴퓨터에 의한 정밀제어 기술의 발전 및 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[24]. 하이드로포밍 기술을 이용하여 새시 프레임(chassis frame), 엔진크레들(engine cradle), 배기계 부품, 프론트 및 리어 서브프레임(front or 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. 하이드로포밍용 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 안착되게 하기 위하여 프리포밍 공정(pre-forming process)을 거치게 된다. 대부분의 경우 프리포밍 형상은 하이드로포밍 공정의 성패에 결정적인 요인이 된다. 한편, 프리포밍된 튜브는 하이드로포밍 금형으로 옮겨진 후 내부 유체를 통하여 성형된다.

차량 경량화의 목표달성을 위하여 사용되는 튜브 소재의 강도도 증가하는 추세에 있다. 본 연구에서는 인장강도 440MPa급 강재를 이용한 하이드로포밍 프레임 크로스 멤버 부품 개발의 과정을 컴퓨터 응용공학(CAE: computer aided engineering)을 이용한 해석을 통하여 다루고자 하며 개발된 부품의 형상 및 두께 감소율에 대한 가공 품질평가 시험결과와 비교하는 등 설계참조를 위한 해석방법을 제시하고자 한다.

## 2. 부품의 개념설계

SUV (sports utility vehicle) 차량 새시부품의 대부분을 차지하는 프레임(full frame)은 자동차 새시 부품으로서 승용차의 하단부에 위치하여 총 6개의 크로스멤버와 사이드 레일(side rail)을 연결하여 엔진, 액슬(axle), 각종 서스펜션(suspension)류를 서브할 뿐만 아니라 차체와 휠을 연결하는 역할을 한다. 이 부품에 여러 개의 링크 부품들이 연결되어 편안한 승차감을 제공할 뿐만 아니라 여러 개의 고무 인슐레이터(rubber insulator)로 차체와 연결되어 차량의 엔진 진동 절연 역할과 내구성을 증대시키는 역할을 한다. 본 연구에서는 6개의 프레임 구성 크로스멤버 중 하이드로포밍 가공이 필요한 크로스멤버 No. 6 (#6)를 튜브 하이드로포밍에 의하여 가공하였으며 Fig. 1에 그 형상을 나타내었다.

Fig. 2는 프레임 크로스 멤버 No. 6 부품의 단면분석결과를 나타내었는데 이를 통하여 부품의 최대 및 최소 단면 원주길이와 최소 코너 반경을 얻게 된다. 이 부품의 경우 최소 및 최대 원주길이는 244.2 mm, 310.5 mm이며 이때의 확관율은 각각 2.0%, 29.8%이다. 이에 적정 튜브 사이즈는 원주길이 239.3mm를 갖는 외경 76.2mm(3") 튜브이다. 그러나 일반적으로 허용하는(대략 10% 내외) 최대 확관율보다 상당히 높게 설계되어 있으며, 이 부품의 경우 최대 확관율 지점이 부품의 양 끝단부에 가까우므로 양쪽

끝단부 축 피딩(axial feeding) 등 특별한 조치가 절대적으로 필요할 것이다.

하이드로포밍 공정 시뮬레이션을 위한 튜브소재 재질은 인장 시험을 통하여 측정하였으며 그 결과를 표 1에 나타내었다. 인장강도는 473MPa이며 탄소성 가공경화 거동을 보이는 재료로서 해석에서는 등방성을 가정하였다. 성형해석을 위한 모델은 상·하부 금형 및 기하학적 벤딩 형상을 갖는 튜브로 구성되며 벤딩 공정에 대한 성형해석을 먼저 행하였다.

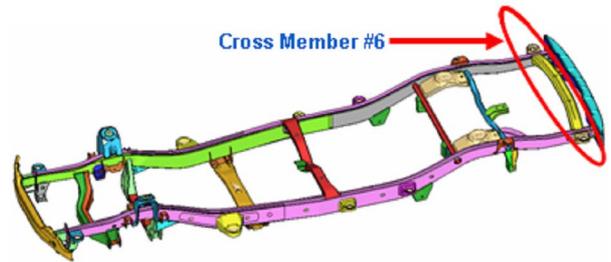


Fig. 1. Geometry of cross member #6 included in automotive frame.

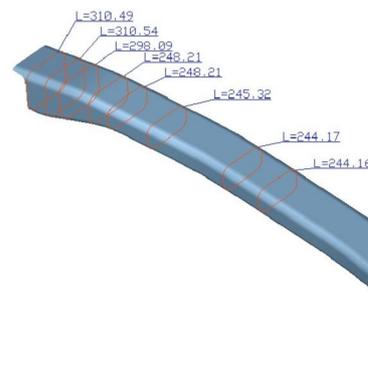


Fig. 2. Analyses of cross-section perimeters along the half symmetry part, (unit: mm).

Table 1 Mechanical properties of tube material.

Elastic Modulus	Yield Strength	Tensile Strength	Uniform Elongation	Tensile Elongation	n
210 GPa	365 MPa	473 MPa	16.3%	31.4%	0.15

Fig. 3에는 하이드로포밍 공정에 의하여 실제로 제작될 부품의 금형 캐비티(cavity) 적정성을 검토한 결과를 나타내었다. 적정성 검토에 사용된 프로그램은 대표적인 CAD 상용 프로그램인 CATIA를 사용하였다. 검토결과 별도의 프리포밍 공정 없이 금형에 안착이 가능함을 알 수 있었다.



Fig. 3. Initial mesh of hydroforming die cavity and tube.

Fig. 4에는 양쪽 끝단부 피딩(feeding)없이 상용 프로그램인 LS-DYNA3D를 이용하여 하이드로포밍 해석한 결과를 나타내었다. 초기 개념설계 시 예측했듯이 끝단부에 두께감소율이 최대 37.8%로 높아서 크랙(crack)이 예상되는바 별도의 측방향 피딩이 필요함을 알 수 있다. Fig. 5에는 끝단부 측방향 피딩을 양쪽 끝단에 각각 45 mm 씩 가하여 하이드로포밍 공정이 완료된 후의 형상 및 두께감소율 분포 해석결과를 나타내었다. 이때 필요한 최고 성형압력은 1,125 bar로 계산되었으며 최대 두께 감소율(thinning)은 17.9%로 현저하게 감소하였다. 이는 끝단부 피딩으로 두께 감소를 완화시킨 결과이다. 부품설계측면에서 이 소재에 대한 최대 허용 두께 감소율은 25% 내외로서 거의 허용두께보다는 낮게 두께감소가 있을 것으로 예측되어 본 연구로 수정된 공법을 통한 해당 부품의 성형 시 크랙 없이 안전한 것이다[5].

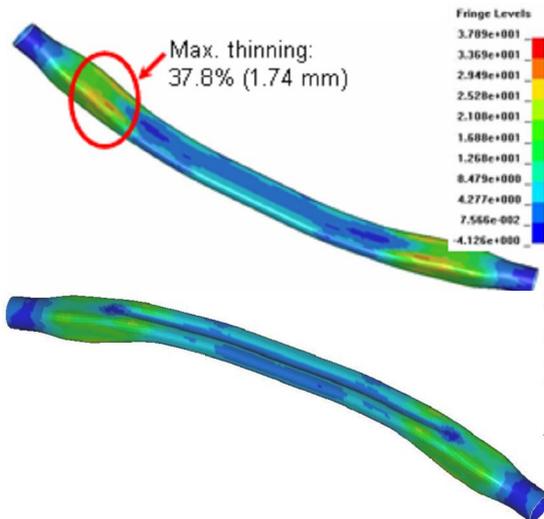


Fig. 4. Predicted geometry and distribution of thinning after hydroforming process without axial feeding.

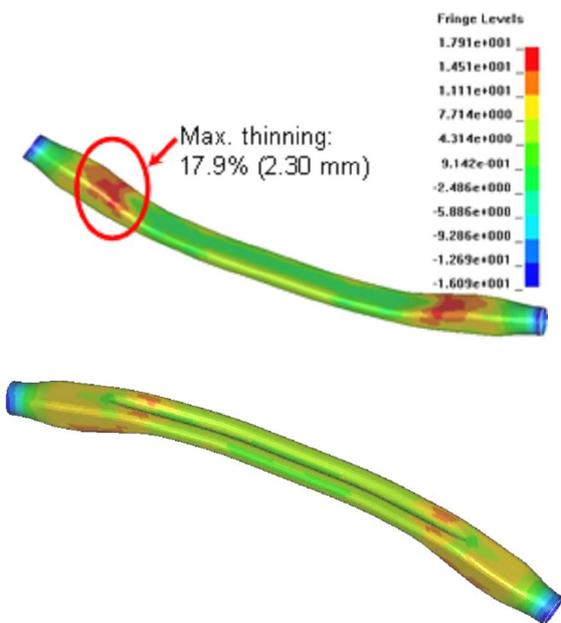


Fig. 5. Predicted distribution of thinning after hydroforming process with axial feeding (45 mm).

### 3. 시험 제작 및 고찰

해석결과의 정확도를 고찰하기 위하여 하이드로포밍 성형품

에 대하여 초음파 측정하여 주요 위치의 두께를 수회 측정하였다. Fig. 6은 성형품의 단면을 구성하는 최소두께를 측정한 위치를 나타내었으며 측정결과를 표 2에 나타내었다. 초기 2.8 mm 두께 튜브를 하이드로포밍 가공 후 최대 두께 감소는 2.35 mm로 측정 되었으며 그 위치(2e)와 두께값은 시뮬레이션 결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 표 2의 두께 측정 결과를 Fig 5의 해석결과와 비교/고찰하면 최대 차이(deviation)는 2.1 %로서 유사하여 예측 결과와 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

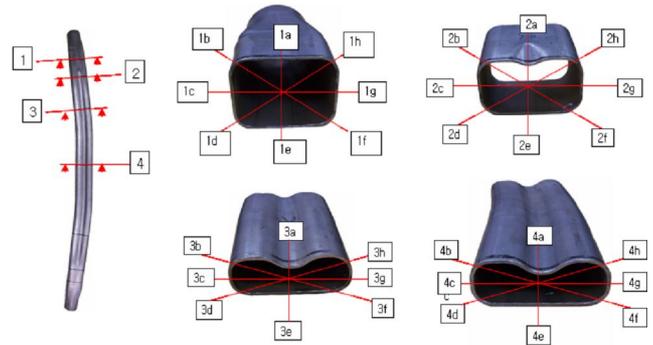


Fig. 6. Positions where the thickness is measured on the hydroformed parts.

Table 2. Experimentally measured thickness.

Position	a	b	c	d	e	f	g	h
1	2.69	2.75	2.64	2.61	<b>2.36</b>	2.57	2.63	2.67
2	2.57	2.60	2.58	2.68	2.79	2.53	<b>2.35</b>	2.60
3	2.79	2.80	2.70	2.84	2.82	2.72	2.61	2.73
4	2.74	2.76	2.67	<b>2.80</b>	2.80	2.63	2.57	2.75

### 4. 결론

인장강도 440MPa급 고강도 강재를 이용하여 SUV 프레임용 하이드로포밍 크로스 멤버를 성공적으로 개발하였다. 부품설계 단계에서는 부품의 형상에 대한 초도 분석 및 전체적인 공정 설계가 이루어졌다. 요구되는 확률율은 모두 가능한 수준을 상회하여 끝단부 측방향 피딩이 필요함을 알 수 있었으며 예상되는 프레스 용량, 최대 가압력 및 피딩력은 보유하고 있는 설비를 이용하여 하이드로포밍 성형이 가능함을 확인하였다. 상세한 시뮬레이션 결과에서는 하이드로포밍에 의한 최종 두께 감소율이 부품개발을 위한 크랙발생 기준치에 부합하여 양호한 수준으로 예측되었다. 하이드로포밍이 가능함을 예측한 결과를 토대로 시작급형을 설계, 제작하여 실부품을 제작 실험 하였으며 그 형상의 두께 감소율을 분석하였다. 본 연구에서 수정된(측방향으로 최대 45mm 피딩한) 가공법으로 하이드로포밍 성형한 결과 최대 두께 감소율은 17.8%로 초기 대비 개선되었으며 그 위치는 시뮬레이션 결과와 동일한 위치에서 발생하였다. 또한 실제 가공된 부품의 형상은 예측을 위한 컴퓨터 해석결과와 잘 일치하였다.

### 참고문헌

1. F. Dohmann, Ch. Hartl: J. of Mater. Proc. Tech., Vol. 71 (1997) p. 174-186.
2. S. Nakamura, H. Sugiura, H. Onoe, K. Ikemoto: J. of Mater. Proc. Tech., Vol. 46 (1994) p. 491.
3. M. Ahmetoglu, T. Altan: J. of Mater. Proc. Tech., Vol. 98 (2000) p. 25.
4. M. Ahmetoglu, K. Sutter, S.J. Li, T. Altan: J. of Mater. Proc. Tech., Vol. 98 (2000) p. 224.
5. K. J. Kim, J.-S. Kim, B.-I. Choi, K. H. Kim, H. H. Choi, C.-W. Kim, K. W. Kang, J.-H. Song and C.-W. Sun, J. of Mech. Science and Tech., Vol. 21, No. 10 (2007) pp. 1523-1528.