

온간하이드로포밍을 이용한 알루미늄 자동차부품 제조기술 개발

손성만¹, 이문용^{1#}, 김봉준², 문영훈², 이영선³

Development of Manufacturing Technology for Aluminum Automotive part with Warm Hydroforming

S. M. Sohn, M. Y. Lee, B. J. Kim, Y. H. Moon, Y. S. Lee

Abstract

Warm forming technology was classified into hot gas forming of using compressible fluid as a nitrogen gas and warm hydroforming of using the incompressible fluid as a thermal oil by using medium fluid. In this study, the aluminum side-rail part was developed with warm hydroforming technology. For the warm hydroforming system, top and bottom die was designed to insert heating cartridge in die cavity and special indirect fluid heating system was designed to heat the thermal oil. As increase the temperature, hydroformability was increased linearly. Aluminum side-rail center part was formed 90% at the internal pressure of 100bar and perfectly formed at 300bar within a moderate temperature. The tube material used for warm hydroforming was a aluminum 6000 series alloy with the diameter of 120mm, thickness of 5mm, length of 1,300mm. Warm hydroformed side-rail center part had 20% of maximum expansion ratio and below 20% of maximum thinning ratio at corner radius. This results were provided to show warm hydroforming possibility for aluminum automotive components.

Key Words : Warm hydroforming, Hot gas forming, Frame body, Side rail part, Aluminum alloy, Hydroformability

1. 서 론

최근 자동차 기술개발의 동향은 승객의 안전이 최우선으로 인식되는 성향에 따른 고안전 차체의 개발과 함께 환경오염 규제강화 및 고유가에 따른 연비향상을 위하여 초경량 차체의 개발이 시대적으로 요구되고 있다. 특히 차세대 차량인 하이브리드 자동차와 연료전지 자동차는 새로운 개념의 동력 시스템이 적용되므로 추가적인 보조동력 및 추가부품에 의해 차량 중량의 증가가 예상되므로 획기적인 경량화를 위해 알루미늄, 마그네슘과 같은 경량소재의 사용이 요구되고 있다[1].

경량소재의 적용과 함께 경량화를 위한 일체화

성형기술인 TWB, 하이드로포밍 기술의 적용에 관한 연구는 계속되고 있으며 철계 뿐만 아니라 비철계 소재에 있어서도 그 적용이 증가하는 추세이다. 그러나 경량소재의 대부분은 성형성이 매우 낮은 단점이 있으므로 일체화 성형 시 설계자유도를 높이기 위해서는 마그네슘 합금의 경우 온간상태에서 성형을 실시하여야 하며 알루미늄 합금의 경우 전, 후 열처리를 통하여 성형성과 강도를 얻기 때문에 제조경비가 증가하는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하고 일체화성형을 통한 부품수의 절감 및 경량화를 위하여 최근에는 미국, 독일, 일본을 중심으로 온간성형기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[2].

1. (주)성우하이텍 기술연구소
2. 부산대학교 정밀기계공학과
3. 한국기계연구원 정밀정형금형가공연구소
교신저자: (주)성우하이텍 기술연구소
E-mail:sonsm@swhitech.co.kr

일본의 경우 Honda사는 온간가스성형(hot gas forming, hot bulge forming, hot tube forming, air blow forming) 기술을 적용하여 05년 Legend (Acura RL) 모델에 알루미늄 서브프레임(sub-frame)을 양산 적용하였다. 이 시스템은 높은 성형성과 낮은 성형 응력으로 인해 기존에 비해 간단하고 작은 용량의 장비와 금형으로 제품을 성형하였으며 새로운 축압축량 조절 시스템을 이용하여 두께분포가 균일한 제품을 얻을 수 있다고 보고 되었다[3].

온간성형기술은 크게 사용유체에 따라 질소가스를 사용하는 온간가스성형(hot gas forming)과 내열유를 사용하는 온간액압성형기술(warm hydroforming)로 나눌 수 있다. 온간개스포밍은 압력매체를 질소가스를 사용하므로 증압기(intensifier)가 필요 없으며 설비투자비가 낮고 작업환경이 깨끗한 장점이 있으나 고압성형이 어렵고 저압에서 충분한 성형성을 확보하기 위해서는 성형온도가 높아야 하는 단점이 있다[3-4]. 이에 반해 온간 하이드로포밍은 압력매체로서 끓는점(boiling point)이 높은 내열유를 사용하는데 이는 기존의 하이드로포밍 매체인 물을 사용하는 경우 100℃ 이상에서 끓기 때문이다. 따라서 낮은 온도에서도 소재의 성형성만 확보된다면 높은 성형 압력으로 성형시킬 수 있으므로 기본적인 소재의 물성의 변화를 최소화할 수 있다. 그러나 기존 설비와 함께 금형 및 매체 유 가열장치를 추가적으로 갖추어야 하므로 설비가 복잡하고 오일 가열에 따른 작업환경이 위험해지는 단점이 있다[4].

이러한 장단점에도 불구하고 온간성형은 온도의 상승에 따른 소재의 강도저하와 연신율의 향상으로 인해 성형성을 획기적으로 향상시킬 수 있으므로 복잡한 형상의 제품을 하나의 부품으로 일체화 성형(net shape forming)이 가능하다. 특히 알루미늄과 같은 경량소재를 이용하여 자동차 부품을 제작하는 경우 성형성이 낮은 단점이 있지만 온간성형을 통해 성형성의 향상과 고강도의 유지라는 상반되는 문제를 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 온간하이드로포밍 시스템을 구축하고 온간상태에서 알루미늄 사이드레일을 제작하였으며 시제품 분석을 통해 그 효과를 정리하였다.

2. 온간하이드로포밍 실험

2.1 하이드로포밍 사이드레일 부품의 설계

프레임바디는 경량트럭(light pickup truck)이나 SUV(sport utility vehicle) 차량에 있어 차체를 결합하고 엔진, 트랜스미션, 서스펜션 시스템 등이 장착되는 주요 구조물이며 그 구성은 그림 1과 같이 차량의 길이 방향으로 두개의 사이드레일과 사이드레일의 직각방향으로 다수의 크로스 멤버로 구성되어 사다리꼴 형태를 갖추고 있다. 프레임 바디의 기능은 주요 부품의 장착과 함께 차량의 운행에 있어 주행 중에 노면으로부터의 충격과 하중에 의해 발생하는 인장, 압축, 굽힘, 비틀림, 진동, NVH 등에 충분히 견딜 수 있는 강도와 강성을 유지하여야 한다[1,5].

사이드레일은 이러한 프레임바디의 특성을 결정짓는 주요 부재로서 최근의 플랫폼 공용화, 모듈화 추세에 따라 전체 사이드레일을 2개 혹은 3개의 부품으로 분할하여 성형하고 조립한다. 기존의 사이드레일은 열연강판을 이용해 “C”형으로 프레스 성형하여 내측판넬(inner panel)과 외측판넬(outer panel)을 아크용접하여 제작하였다. 그러나 긴 용접길이에 의한 열변형 문제와 최근의 경량화 추세에 따라 하이드로포밍을 이용하여 사이드레일 부품을 일체화 성형으로 제조하고 있다[1,6,7].

Fig. 1은 프레임바디의 획기적인 경량화를 위해 전체를 알루미늄으로 설계하였으며 특히 사이드레일 부품은 알루미늄 튜브를 이용하여 하이드로포밍으로 성형하도록 설계되었다. 사이드레일 프론트와 리어부품은 10% 내외의 확관율을 갖도록 설계하였으며 사이드레일 센터 부품은 Fig. 2와 같이 양 끝단에 삽입부를 두어 프론트, 리어레일을 삽입하여 조립토록 설계하였다. 레일 삽입부의 확관율은 대략 20%로 설계되었는데 삽입부의 성형을 위해서는 높은 성형성이 요구되기 때문에 사이드레일 센터 부품은 상온이 아닌 온간상태에서 성형되도록 설계하였다.

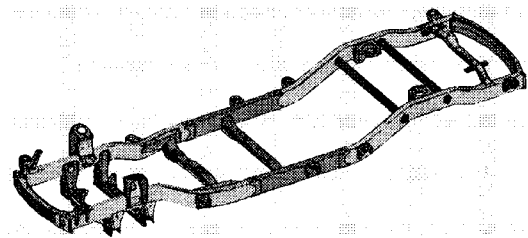


Fig. 1 Design of the aluminum frame body

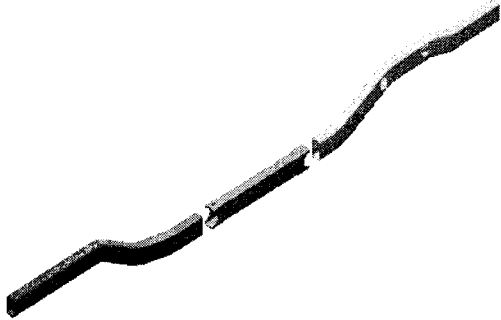


Fig. 2 Design of side-rail part(front, center, rear)

2.2 온간하이드로포밍 시스템

온간하이드로포밍은 크게 금형가열 시스템과 압력 매체유 가열 시스템으로 구성되었다. 금형가열을 위하여 Fig. 3과 같이 지름 16mm, 길이 1,300mm, 적정용량의 히팅 카트리지(heating cartridge)를 상하 인서트 금형(cavity)에 4열을 삽입하였다. 인서트금형의 히터 삽입부 가공에 있어 금형온도상승에 따른 금형 및 삽입된 히터의 열팽창율을 고려하여 적정유격을 두어 구멍을 가공하였으며 하이드로포밍 공정에 있어 최대 내부압력에 의한 파열방지를 고려하여 캐비티 면과 구멍간의 두께를 결정하였다. 계산결과 온간하이드로포밍에 있어 재료연화에 따라 성형압력이 매우 낮아지므로 그 영향도는 매우 낮은것으로 나타났다. 금형본체와 캐비티 금형간은 단열재로 차단하여 열 손실을 방지하였다.

온간하이드로포밍에 있어 상온 매체유를 공급하는 경우 가열된 금형 및 튜브는 열전달에 의해 냉각되므로 효율이 저하될 것으로 예상되어 별도의 오일 가열 장치를 제작하였다. 오일가열 장치는 간접가열식 보일러의 형태로 매체유는 내열펌프를 이용해 저장탱크(oil bath)에서 가열장치로 강제 이송된다. 오일가열 장치로 이송된 매체유는 내부에 원형으로 감겨진 구리튜브를 통과하면서 점차 온도가 상승하여 출구부에서의 매체유 온도는 내부 분위기 온도와 동일하게 유지되도록 제작하였다. 고온의 압력 매체유는 펀치를 통하여 가열된 알루미늄 튜브 내부에 공급되어 열손실을 최소화 하여 온간 하이드로포밍 성형을 할 수 있도록 제작되었다.

금형가열 시스템과 매체유가열 시스템을 구성하여 컨트롤러와 함께 최종적인 온간액압성형 시스템을 Fig. 4와 같이 구성하였다.

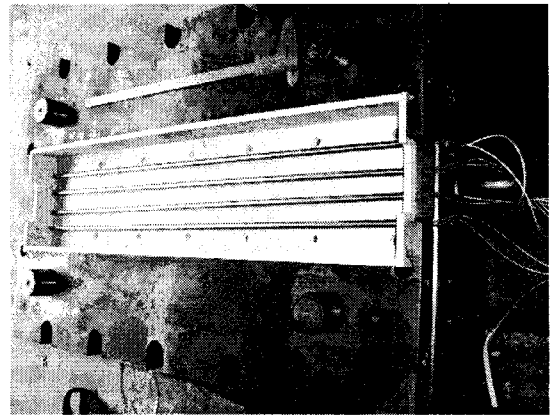


Fig. 3 Inserted heating cartridge in bottom die

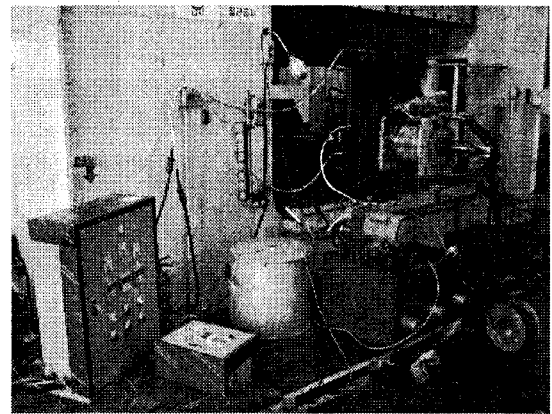


Fig. 4 The warm hydroforming system

2.3 온간하이드로포밍 성형조건

온간하이드로포밍에 있어 온도의 상승에 따라 소재의 유동응력은 낮아지며 상대적으로 성형성은 향상된다[8,9,10]. 사이드레일 센터 부품용 소재는 알루미늄 6000계열 합금으로 지름 120mm, 길이 1,160mm, 두께 5mm의 소재를 사용하였으며 상온에서 하이드로포밍 성형을 하는 경우 1,000bar 이상의 압력에서 완전성형 될 것으로 예상되었으나 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 온간 하이드로포밍 결과 350bar의 압력에서 완전 성형되었다. 이때 시험 온도는 200~300℃ 온도범위에서 온간 성형을 실시하였으며 축압축량은 좌, 우 각각 27mm로 온간성형성의 향상효과를 확인하기 위해 소재유입량을 최소화 하였다.

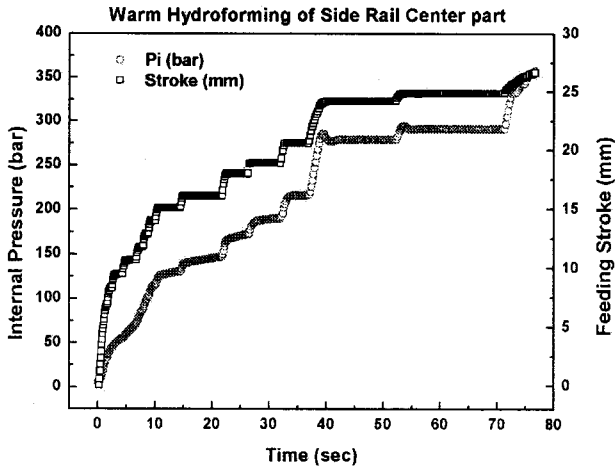


Fig. 5 Warm hydroforming condition

온간 하이드로포밍 결과 성형온도의 상승에 따라 소재의 성형성은 선형적으로 상승하였으며 사이드레일 제품은 100bar의 압력에서도 90% 이상 성형되었고 이때 축방향 소재 유입량은 좌우 10~20mm 정도로서 실링을 위한 최소한의 축압축을 사용하였다. 그러나 온간하이드로포밍 공정에 있어 좌굴이나 주름발생 문제는 상온보다 더 민감한 반응을 나타내는데 그것은 온도상승으로 인한 소재의 연화로 인해 축압축 시 축방향 응력에 대해 저항력이 낮아지기 때문이다.

특히 사이드레일 센터부 끝단의 형상과 같이 좌우 양끝이 고확관부인 경우 소재는 금형 확관부 캐비티의 공간상에 놓여 있는 형태가 되므로 실링이나 소재유입을 위한 압축응력에 대해 소재는 쉽게 좌굴이 발생하는 것으로 사료된다.

3. 온간하이드로포밍 실험결과

3.1 사이드레일 시제품의 성형

사이드레일 센터부품은 전, 후의 사이드레일을 삽입하고 볼트를 이용하여 체결하므로 양끝단의 확관율이 매우 높게 설계되었다. 시제품 제작을 위해 상하 금형과 매체유 가열장치를 일정한 온도까지 예열한 후 원형 압출 튜브를 금형 내부에 장착하고 상부금형을 닫아 예비성형을 실시하였다. 금형에 의해 예비성형된 튜브의 실링부는 땅

콩형태로 성형되는데 이때 경사진 사각편치를 양쪽에 삽입하여 튜브의 형태를 사각으로 성형하여 실링하였다. 편치의 형태를 사각으로 설계한 것은 원형튜브에서 최종 제품형태인 사각을 형성하기 위한 천이구간을 삭제하여 성형 후 소재의 트림(trim)량을 최소화함으로써 소재 회수율을 향상시키고자 하였다.

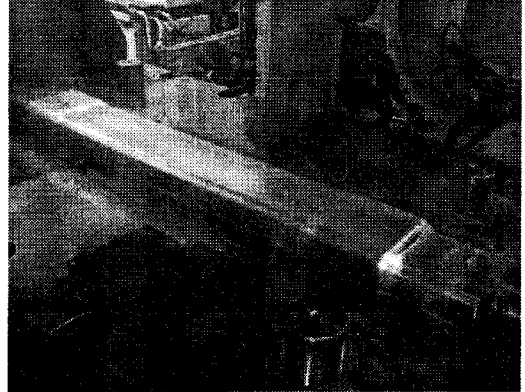


Fig. 6 Warm hydroformed side-rail center part

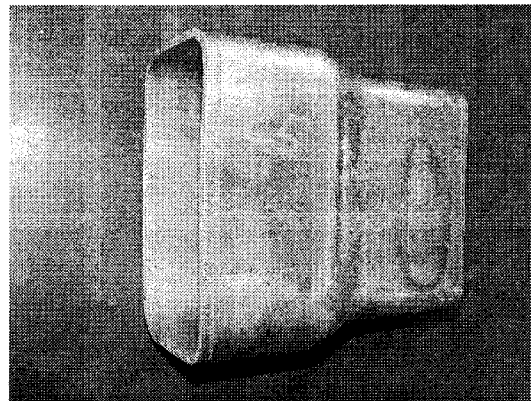


Fig. 7 Maximum expansion area

실링 후 내열펌프에 의해 매체유는 가열장치의 내부경로를 거쳐 충분히 온도가 상승된 상태로 튜브 내부에 공급하였고 금형에 장착된 많은 열전대를 통해 일정 성형온도까지 제어 한 후 Fig. 6 과 같이 온간하이드로포밍을 실시하였다. 온간하이드로포밍 결과 낮은 성형압력에서도 Fig. 7과 같이 코너반경의 성형은 설계대로 완전 성형되었으며 단면의 두께 분포도 매우 균일하였다.

3.2 온간성형 시제품 분석

성형된 사이드레일 센터부품의 단면관찰을 위해 5곳을 절단하여 두께분포 및 성형패턴을 관찰하였다. 각 단면의 형상은 Fig. 8과 같이 국부적인 박관부는 관찰할 수 없었고 성형 양상도 최대 확관부 단면 S1, S5과 저 확관부 S2, S3, S4를 비교해 볼 때 확관율과는 관계없이 동일한 것으로 판단되었다. 각 단면별 코너부 4곳의 곡률반경도 저 확관부는 물론 고 확관부에서도 설계대로 정확히 성형되었다.

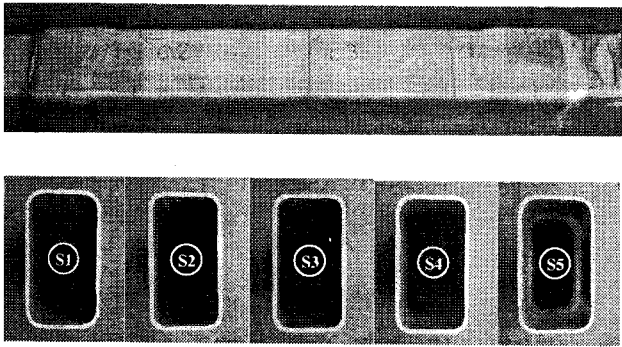


Fig. 8 Cross-section of the warm hydroformed side rail center part

각 단면별 두께분포를 측정하기 위하여 단면의 32개소를 측정하여 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 소재 두께 5mm를 기준으로 No.9 주위는 하부금형 접촉부이고 No.25 주위는 상부금형 접촉부로서 8% 정도의 두께 증가가 나타났고 코너부에서 부분적으로 두께의 감소가 나타났으나 두께감소율은 20% 이하였다.

코너부의 두께감소에 있어 곡률반경 중심인 No.4, 14, 20, 30 보다는 오히려 상하금형 접촉면의 근접한 위치 즉, No.5, 13, 21, 29 위치에서 그 두께는 더욱 감소하였는데 이는 내부 매체유체의 온도가 비록 균일하다 하더라도 프리포밍에 의해 금형에 접촉된 면의 온도가 다소 높음으로 인하여 물성의 차이가 존재하는 것으로 예측되며 하이드로포밍 시 코너부가 압력에 의해 확관될 때 코너금형에 접촉되지 않은 곡률반경 중심보다 금형에 접촉된 곡률반경 시작부에서 먼저 확관 변형되는 것으로 사료된다.

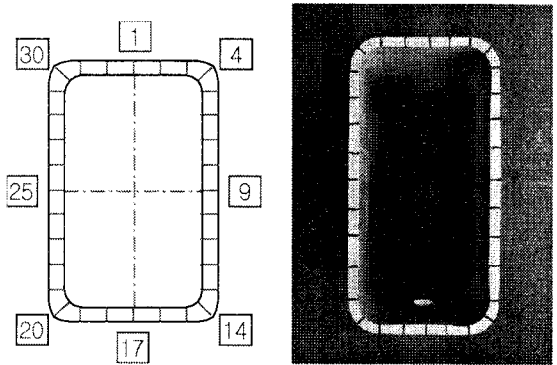
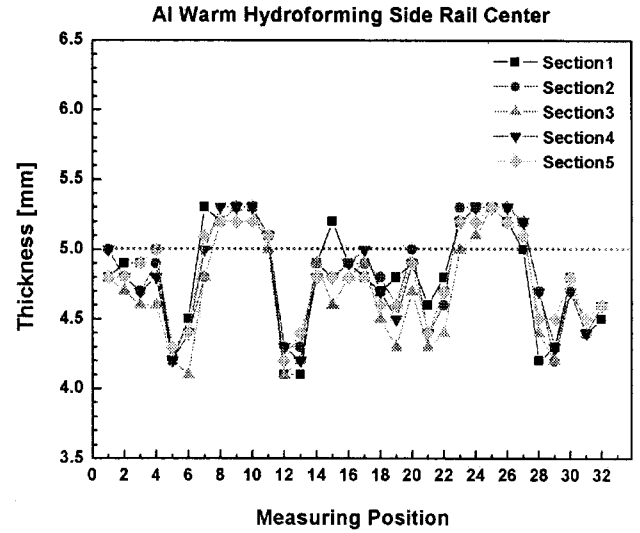


Fig. 9 Thickness distribution of the each cross-section

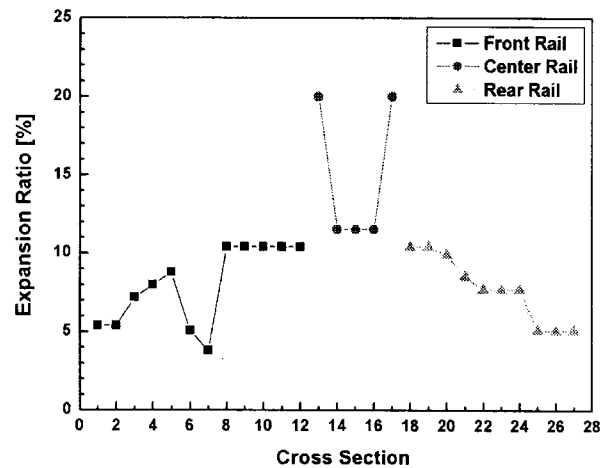
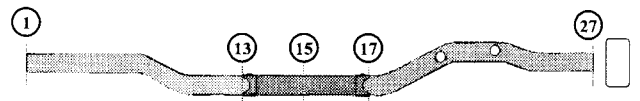


Fig. 10 Expansion ratio of side-rail parts

시제품의 확관율 측정을 위해 각 단면별 원주 길이를 측정하여 프론트부, 리어부와 함께 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 사이드레일 센터부는 프론트부와 리어부의 확관율이 최대 10.5% 인데 반해 비해 전체적으로 11.5%로 확관되었으며 삽입부는 성형결함 없이 최대 20%의 확관율을 나타내었다.

4. 결 론

온간하이드로포밍 시스템을 구축하고 알루미늄 6000계 합금을 이용하여 프레임바디용 사이드레일 센터부품을 온간 하이드로포밍으로 제작하였으며 시제품 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 온간하이드로포밍 시스템에 있어 금형 및 매체유 가열시스템의 온도제어가 매우 중요한 요소이며 일정온도 이상에서는 매체유의 내열성 및 내구성이 현저히 저하하므로 보다 내열성이 우수한 매체유의 개발이 요구된다.

(2) 사각편치의 사용으로 인해 천이구간이 없도록 설계하였고 스크랩량을 최소화 하여 소재 회수율을 향상시킬 수 있었다.

(3) 성형온도의 상승에 따라 성형성은 비례적으로 상승하였고 온간상태에서 300bar의 압력으로 소재유입을 최소화하여 시제품을 완전성형 하였다.

(4) 시제품 평가결과 두께감소율은 최대 20% 이하로 균일하였으며 최대 두께감소부는 코너 중심부가 아닌 중심부 근처의 금형접촉부에서 우선적으로 신장 변형되어 두께 감소율이 가장 높았다.

후 기

본 연구는 핵심기반기술사업인 2010 생산기반혁신기술사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] B. Deep, L. Decker, M.P. Kiley, 2005, 2006 Chevrolet Corvette Z06 aluminum spaceframe, SAE 2005-01-0465
- [2] Bill Dykstra, 2001, Hot Metal Gas Forming - The Next-Generation Process for Manufacturing Vehicle Structural Components, SAE 2001-01-3088
- [3] Izuru Hori, Daisuke Yamamoto, 2005, Development of production engineering of hot bulge forming, Tubehydro 2005 Conference, pp. 95
- [4] B.J. Kim, S.M. Sohn, K.S. Park, Y.H. Moon, 2005, The Effects of the Heating Conditions on the Hydroformability of the Aluminum Alloys at High Temperatures, Materials Science Forum, Vol.475-479, pp.3307-3310
- [5] M.W. Danyo, C.S. Young, H.J. Cornille, J. Porcari, 2003, A design concept for an aluminum sport utility vehicle frame, SAE 2003-01-0572
- [6] G. S. Jin, H. S. Kim, 2005, Performance comparison of hydroformed side member to stamped side member of automotive full frame assembly, Tubehydro 2005 Conference, pp. 89-93
- [7] N. Asnafia, T. Nilsson, G. Lassl, 2003, Tubular hydroforming of automotive side members with extruded aluminium profiles, Journal of Materials Processing Technology, Vol.142, pp.93-101
- [8] D.W. Suh, S.M. Sohn, M.Y. Lee, S.Y. Lee, 2005, Deformation Behaviors of 6061 and 7075 Aluminum Tubes at Elevated Temperatures for Warm Hydroforming, Materials Science Forum, Vol.475-479, (2005) pp.373-376
- [9] S. Novotny, M. Geiger, 2003, Process design for hydroforming of lightweight metal sheets at elevated temperatures, Journal of Materials Processing Technology, Vol.138, pp594-599
- [10] 이문용, 강창룡, 이상용, 2004, 고강도 알루미늄 튜브의 온간하이드로포밍 특성, 소성가공학회지, Vol.13, No.5, pp 403-408