

Air Bulging을 이용한 열간 알루미늄 성형에 관한 연구

박동환[#] · 김태준¹

A Study on Al Hot Forming Using Air Bulging

D. H. Park, T. J. Kim

(Received August 25, 2014/ Revised December 15, 2014 / Accepted December 18, 2014)

Abstract

Hot tensile tests were conducted at different temperatures ranging from 20°C to 550°C to evaluate the mechanical properties of Al5052 seamless tubes. Such tubes can provide the technological foundation for complex forming using hot air bulging. Hot air bulging is one of the recently developed hydroforming techniques and it has some limitations in terms of cycle times. The benefits of hot air bulging are weight and cost savings through part consolidation and reduced post-forming processes such as welding and piercing. In order to extend the forming limits of Al lightweight material hot air bulging was investigated. A heated tube was placed in a heated die and sealed at the ends by sealing cylinders. The heated tube was subsequently expanded against the die cavity wall by internal pressure using air medium. The results of the current study show that axial feeding speed and air pressure have an effect on the formability of Al tubes during air bulging at elevated temperatures.

Key Words : Air Bulging, Al Hot Forming, Air Medium, Axial Feeding Speed, Heated Tube

1. 서 론

국제 유가의 상승, 이산화탄소 배출 규제에 대응하기 위한 기술로 현재 대표적으로 알루미늄 합금을 자동차에 적용하는 경량화 부품 제조기술 연구가 전 세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 알루미늄 컨트럴 암의 경우 자동차의 조향을 담당하는 기능 부품으로 기존 철강 부품보다 경량으로 철강 부품과 동일한 성능을 발휘할 수 있다는 것이 장점이다. 또한 기존 다수의 부품이 용접을 통해 제조되는 것과 달리 단일 공정으로 만들 수 있어 부품의 모듈화도 용이하다. 기존 하이드로포밍에 비해 열간 벌징 성형공법은 알루미늄 관재의 성형 자유도를 향상하기 위한 신공법으로 알루미늄의 우수한 고온

성형성을 이용하여 관을 열간으로 유지한 상태에서 성형함으로써 기존보다 증가된 확관률을 얻을 수 있고, 그 결과 복잡한 형상의 성형이 가능하여 부품 통합화가 가능하게 된다[1~4]. 이와 더불어 확관 성형시의 내압이 기존 하이드로포밍 공법에 비해 감소됨으로써 생산설비의 소형화가 가능하다. 경량화 실현을 위해 부품 업계에서는 점차적으로 중대형 차량의 현가 부품에 경량재료인 알루미늄 합금을 적용함으로써 기존 강재 부품보다 약 20~40% 정도 경량화를 달성하고 있다[5~8].

하지만 종래 알루미늄 적용 부품의 경우 관재 또는 관재를 상온에서 성형함으로써 낮은 성형성에 의한 성형자유도의 한계와 이에 따른 총 부품수 증가 및 용접수 증가 등으로 품질 저하가 문제점으로

1. (주)화신 기술연구소장

[#] Corresponding Author : Gyeongbuk Hybrid Technology Institute, E-mail: pdh@ghi.re.kr

대두되고 있다. Air Bulging을 이용한 열간 별지 성형 공법은 알루미늄 소재의 성형 자유도를 향상하기 위한 것으로 기존 하이드로포밍 기술이 갖는 낮은 성형성을 개선한 공법이다.

마그네슘 합금[9, 10]은 냉간에서 조밀육방격자 구조를 가지므로 상온에서 성형하기가 어려워 온간에서 성형하지만, 알루미늄 합금은 면심입방격자 구조를 가지므로 상온에서 고온으로 갈수록 전연성이 풍부하고 연신율이 증가되는 성질이 있다. 즉, 알루미늄 합금을 승온함에 따라 변형저항이 상온에 비해 감소하고, 연신율은 증가한다. 이러한 뛰어난 고온 성형성을 이용하여 관재를 열간으로 유지한 상태에서 성형함으로써 기존보다 증가된 확관률을 얻을 수 있고, 그 결과 복잡한 형상의 성형이 가능하게 된다[11, 12].

컨트롤 암 제품은 자동차의 조향을 담당하는 기능 부품으로 알루미늄 합금을 자동차에 적용하는 경우 부품 경량화가 가능하다. 알루미늄 합금을 통해 조향·현가 부품을 제조할 경우에 기존 강판의 경우 여러 부품을 용접하여 제조하던 것을 일체화 부품으로 변경함으로써 부품 모듈화가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 기존 철강의 하이드로포밍 기술 한계를 극복할 수 있는 기술로서 알루미늄 튜브의 열간 별지 성형공법을 적용하여 일체형 자동차 컨트롤 암(control arm) 부품을 제작하고자 하였다[13].

2. 고온 인장 시험

Al 합금 파이프를 열간 별지 성형공법으로 자동차용 컨트롤 암 제품을 제작하기 위하여 고온인장 시험을 실시하였다. 시험에 사용된 소재는 Al5052로 Fig. 1의 두께 4.0mm, 직경 63mm인 파이프 소재를 와이어 커팅 가공하여 인장시편으로 사용하였다. 기계적 성질을 파악하기 위해 고온인장시험을 실시하였는데, 시편은 고온인장시험 Sub Size 규격의 압연 방향으로 인장시편을 수집하였다. 시편의 표점거리는 25mm로 하였으며, 인장시험은 U.T.M에서 크로스헤드(crosshead)를 5mm/min으로 유지시킨 후 파단에 이르기까지 인장하였다. Fig. 2의 인장시편(폭 5mm)으로 시험을 실시하였고, Fig. 3은 인장시험을 통하여 얻은 Al5052의 기계적 성질로 상온(20℃), 100℃, 200℃, 300℃, 400℃, 450℃, 500℃, 550℃ 온도에서의 인장시험 데이터를 보여준다. 상온에서 550℃까지

온도가 상승함에 따라 연신율이 증가함을 알 수 있고, 반면 항복점과 인장강도는 점점 감소함을 알 수 있다. Fig. 4는 본 연구에서 개발하고자 하는 자동차 컨트롤 암 제품을 보여준다.



Fig. 1 Seamless pipe of Al5052(diameter 63mm)

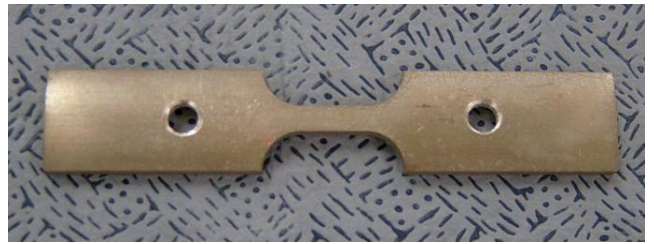


Fig. 2 Hot tensile test specimen of Al5052

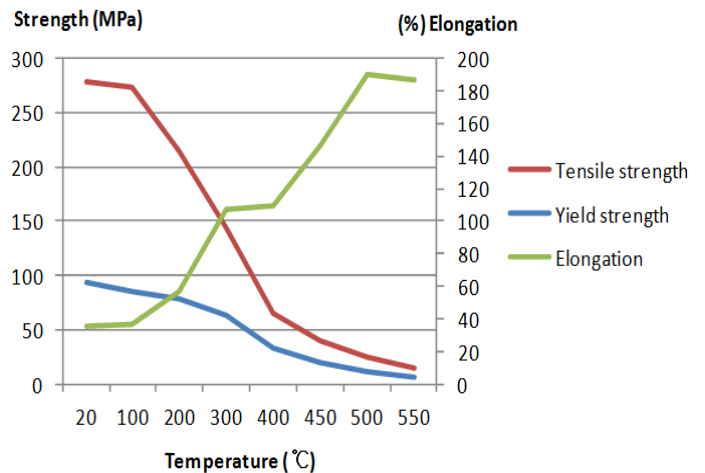


Fig. 3 Mechanical properties of Al5052

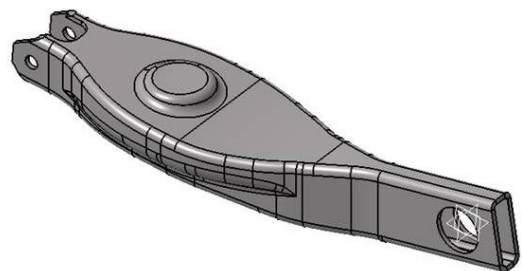


Fig. 4 Control arm product

3. 열간 벌지 성형 해석

3.1 최적 공정 설정

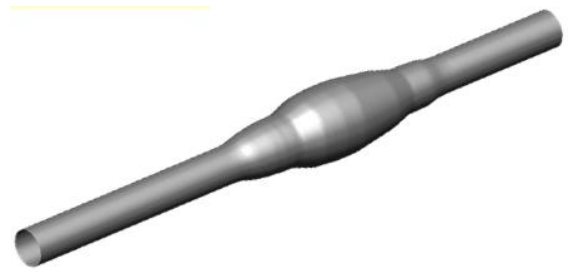
열간 벌지 성형해석은 AutoForm S/W를 사용하여 진행하였는데, 해석을 진행하기 위해서 우선적으로 판단되어야 할 부분이 공정 변수로 Air Bulging을 이용한 알루미늄 성형에 있어서 고려해야 할 변수는 다양하게 존재한다. 소재와 금형의 재료 마찰특성 변수, 소재와 금형 사이의 환경적인 변수가 그러한 요소이며, 이러한 요소를 모두 비교해 가며 해석을 진행하는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 큰 영향을 주는 요인들을 파악할 필요가 있다. 공기압에 대해서는 공기압이 가해지는 속도, 압력 분포, 공정 간의 공기압 설정 방법 등을 고려해야 한다. 온도에 관해서는 금형 온도, 소재 온도, 가열하는 속도 등이 있다. 그리고 소재 양쪽 끝에서 소재를 밀어주는 축방향 이송(axial feeding) 속도, 공기압에 의한 성형 외에 프레스 작업 속도 등을 고려해야 한다. 열간 벌지 성형공법으로 자동차용 컨트롤 암 제품을 제작하기 위한 공정순서는 1공정 벌징(bulging), 2공정 사이드 포밍(side forming), 3공정 포밍(forming) 가공으로 설계하였다. 1공정에서 확관률의 결정은 2공정과 3공정 가공을 하기 위해서 두께관리 측면에서 중요하다. Table 1은 시험에 사용된 Al5052 소재의 물리적 성질을 보여준다. 1공정 벌징 가공은 Al 합금 관을 500-530℃ 정도로 예열하고, 금형 온도를 500-530℃로 유지하면서 관 양쪽에 공기를 매체로 압력을 가압하고, 또한 동시에 축방향으로 이송을 하면서 확관 가공하는 공정이다. 1공정 벌징 가공 시에 축방향 이송량이 많으면 좌굴이 일어나고, 작으면 두께 감소가 많아져 파단이 발생한다. 축방향 이송 속도가 압력을 주는 속도보다 느리게 되면 변형이 심한 부위에서 소재의 파단이 발생하게 되고, 훨씬 빠르게 되면 좌굴에 의한 제품 불량률의 원인이 될 수 있다.

Fig. 5 (a)는 1공정 벌징 가공을 나타낸다. 확관률의 선정은 Al 합금 관의 원주길이를 기준으로 얼마나 확관되어야 최적의 제품 형상과 균일한 두께를 만들 수 있는지를 고려하여 적용하였다. 컨트롤 암 제품의 기본 단면 길이를 기준으로 Al 합금 관의 직경을 63mm로 결정하였다. Fig. 5 (b)는 2공정 사이드 포밍 가공을 보여주고, Fig. 5 (c)는 3공정 포밍 가공을 나타낸다. Fig. 6은 구간별 확관율 계산 결과를 보

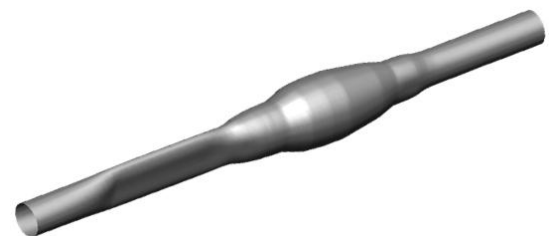
여준다. 알루미늄 적용 컨트롤 암의 초기 모델 원소재 사양은 소재의 외경 $\varnothing 63\text{mm}$, 두께 4mm, 길이 1,070mm로 설계하였다. 전체 형상은 강관 사양과 비교하여 동일하게 하였으며, 관의 직경은 제품 형상에서 구간별 확관율을 계산하여 최소 확관 구간의 둘레를 측정하고 그에 따라 관의 직경을 도출하였다. 이러한 구간별 확관율 계산 결과 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 최대 확관율이 97.3%로서 개발목표 확관율 60%를 웃도는 결과이다. 또한 전체 중량이 Steel 사양 3.44kg 대비 알루미늄 사양 1.196kg으로 71.8%의 경량화율을 달성할 수 있었다.

Table 1 Physical properties of Al5052

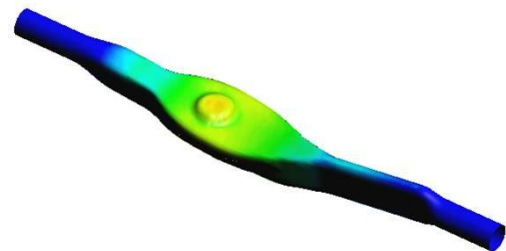
Classification	Value
Density [g/cm^3]	2.68
Thermal conductivity [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]	137
Specific heat [$\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$]	0.88



(a) 1st bulging process of control arm



(b) 2nd side forming process of control arm



(c) 3rd forming process of control arm

Fig. 5 Process models of control arm

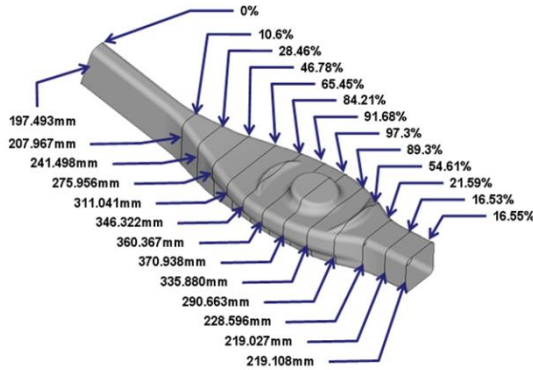


Fig. 6 Bulging ratio of control arm product

3.2 확관률에 따른 제품 영향

1공정 별칭 가공에서 확관된 외경크기가 최종 제품에 미치는 영향을 연구하기 위하여 확관 외경크기를 $\phi 88$, $\phi 99$, $\phi 110$ 등의 3가지로 설계하여 성형 해석을 수행하였다. Fig. 7은 컨트롤 암 제품의 돌기 부위를 보여준다. 성형 해석 시에 1공정에서 3공정까지 공정이 진행됨에 따라 A부 돌기 부위의 두께를 비교하여 최종 제품에 미치는 영향을 분석하였다. 특히 돌기 부위에서 공정이 진행됨에 따라 두께가 얇아지는 경향이 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 컨트롤 암 제품의 1공정 별칭 급형 모델을 나타낸다. 성형 해석 시에 1공정에서 두께를 비교하여 최종 제품에 미치는 영향에 대해 각 조건별로 최적공정 설계를 진행하였다. 특히 A부분의 돌기 부위에서 두께가 얇아지는 경향이 나타나므로 특별한 주의가 요망된다. 1공정에서 축방향 이송 및 압력조건은 확관이 마무리되기 직전에 내부 압력이 상승할 수 있도록 축방향 이송을 병행하여 확관 성형하였다.

Fig. 9 (a)는 1공정 별칭 가공에서 외경 88mm일 경우의 해석 결과를 나타낸다. 1공정 별칭 가공에서는 두께가 약 3.17mm로 균일하게 분포됨을 알 수 있다. Fig. 9 (b)는 3공정 포밍 가공에서 외경 88mm일 경우의 해석 결과를 나타낸다. 최종 공정 성형에서 돌기 부분의 최소 두께가 2.02mm로 나타남을 알 수 있다. Fig. 10 (a)는 1공정 별칭 가공에서 외경 99mm일 경우의 해석 결과를 나타낸다. 1공정 별칭 가공에서는 두께가 약 2.8mm로 균일하게 분포됨을 알 수 있다. Fig. 10 (b)는 3공정 포밍 가공에서 외경 99mm일 경우의 해석 결과를 나타낸다. 최종 성형 공정에서 돌기 부분의 최소 두께가 2.02mm로 나타남을 알 수

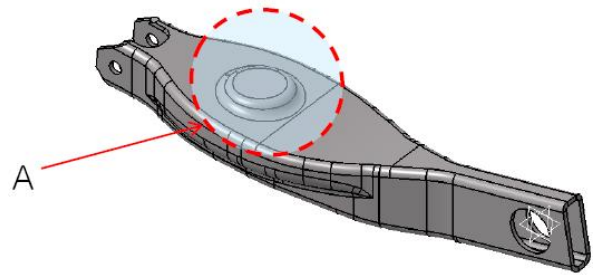


Fig. 7 Protrusive portion of control arm product

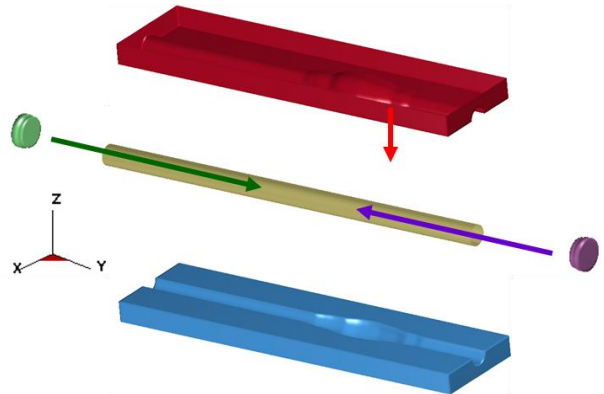


Fig. 8 Die model of 1st bulging process

있다. Fig. 11 (a)는 1공정 별칭 가공에서 외경 110mm일 경우의 해석 결과를 나타낸다. 1공정 별칭 가공에서는 두께가 약 2.66mm로 균일하게 분포함을 알 수 있다. 2공정 사이드 포밍 가공에서는 확관 가공이 아니므로 두께변화가 거의 나타나지 않는다. 이는 큰 변형률을 가진 성형이 아닌 것으로 판단되며, 따라서 두께 감소가 미약함을 알 수 있다. Fig. 11 (b)는 3공정 포밍 가공에서 외경 110mm일 경우의 해석 결과를 나타낸다. 최종 제품 성형에서 돌기 부분의 최소 두께가 1.92mm로 나타남을 알 수 있다.

Table 2는 1공정의 외경 크기가 최종 제품에 미치는 영향에 대해 해석 결과를 비교하였다. 1공정 별칭 가공의 외경 크기별로 진행한 결과 기존 1공정의 확관률을 낮게 하는 것이 최종제품의 두께 확보가 용이함을 알 수 있다. 1공정 별칭 가공의 외경 크기가 88mm, 99mm의 경우 최종제품의 두께가 동일하게 나타나지만, 1공정에서 3공정으로 성형 시에 두께편차가 작은 99mm가 최적 공정으로 결정하였다.

Table 2 Simulation results of control arm

Diameter [mm]	1 st Bulging [mm]	3 rd Forming [mm]
ø88	3.17	2.02
ø99	2.8	2.02
ø110	2.66	1.92

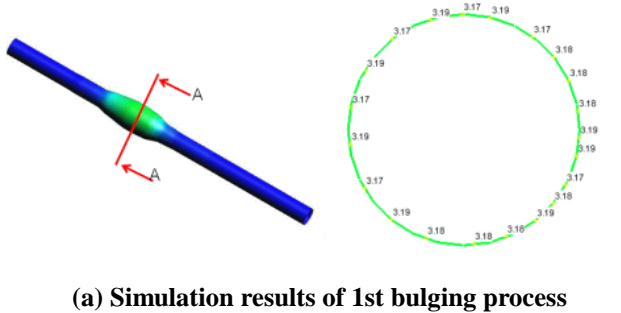


Fig. 9 Simulation results of 1st bulging and 3rd forming process (diameter 88mm)

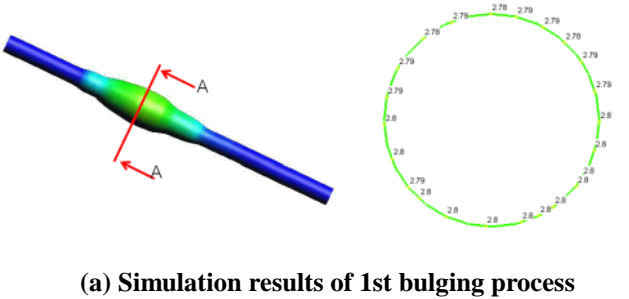


Fig.10 Simulation results of 1st bulging and 3rd forming process (diameter 99mm)

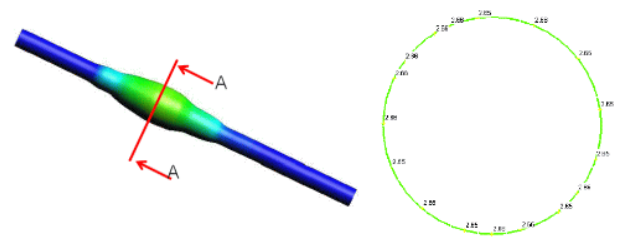


Fig.11 Simulation results of 1st bulging and 3rd forming process (diameter 110mm)

4. 실험 결과 및 고찰

1공정에서 3공정으로 성형 시에 두께편차를 작게 유지하는 것이 중요하다. 최종 공정에서 돌기 부분의 최소 두께가 중요하므로 이를 균일하게 관리하기 위하여 성형해석 결과에서 나온 최적 환관 길이를 99mm로 제작하였다. Fig. 12의 Hot Air Bulging 성형 장치를 이용하여 알루미늄 합금 관을 환관하여 가변 형상으로 제작하기 위해서 제어해야 하는 주요 인자는 Gas 압력, 축방향 이송속도, 금형온도 제어 등이다. 알루미늄 합금 관의 Hot Air Bulging 성형 공정을 진행하기 위해서는 최적의 온도로 DC Heater 장치에 의해 소재를 예열해야 한다. DC Heater 장치는 일정한 전기 저항성을 지닌 물체에 전류를 흘리면 전기 에너지가 열에너지로 변화되어 금속소재의 전기 저항으로 인하여 열을 발생시킨다. Fig. 13은 알루미늄 합금 관의 예열을 위한 Pre-Heating 장치를 보여준다. Hot Air Bulging 장치의 소재 예열을 위한 Pre-Heating 공정에서 가장 우선시 되어야 하는 기능은 가열하기 위하여 소재에 도통시키는 전류의 밀도가 일정하게 도통될 수 있도록 하는 전류 정밀 제어 시스템이 중요하다. 왜냐하면 금속소재는 소재가 가열됨에 따라 부하 저항 특성이 변화하고 이는 온도상승에 따른 체적저항과 소재를 고정하기 위한 가압력에 따른 접촉 저항이 변화하기 때문이다. 따



Fig.12 Hot air bulging equipment



Fig.14 Axial feeding equipment



Fig.13 Pre-heating equipment

라서 본 시스템에서는 고정밀 정진력 제어 방식을 채택함으로써 소재에 도통시키는 전류밀도를 일정하고 정밀하게 제어하도록 하였다. Fig. 14는 축방향 이송 장치를 보여준다. 축방향 이송 장치는 금형 성형 중에 파이프 직경에 맞추어 Nozzle이 밀착되어 에어의 누설을 막아주는 O-ring 선정이 중요하며, 소재를 확관 성형하기 위하여 파이프 내부로 에어 압력을 공급해 주는 장치이다. O-ring 선정은 파이프 소재와 Nozzle 내부 결합 시에 겹침량을 0.5mm로 하여 에어 압력이 최대 40bar 이상에도 누설 발생을 방지할 수 있도록 제작하였다.

Fig. 15는 별징 성형 트라이아웃 시에 작업조건을 보여준다. 먼저 소재를 금형에 로딩한 후 좌우 축 압축력을 가하여 파이프 내부로 공기압을 140sec 동안 서서히 32bar까지 승압하였다. 예열된 알루미늄 합금 관 소재를 1공정 금형으로 이송 후 금형을 닫은

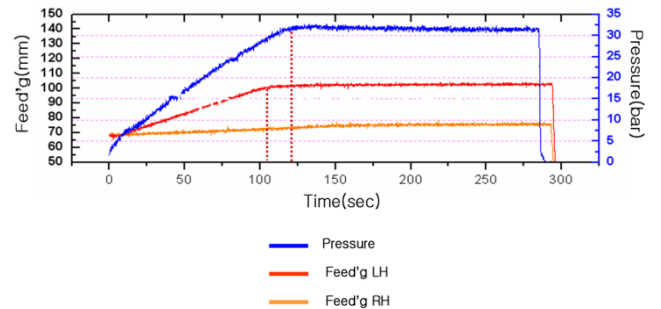


Fig.15 Operation conditions of 1st bulging process

상태에서 축방향 피딩과 내부 에어 압력을 공급하여 알루미늄 관 외측이 금형 캐비티 형상과 같이 확관 성형되게 하였다. 이 때 금형 내부 온도를 일정하게 유지하기 위해 카트리지 히터를 금형에 설치하였다. 좌우 피딩량 차이는 좌우 제품 형상이 다르므로 피딩량의 차이를 달리하여 성형하였다.

Fig. 16은 1공정 별징 가공과 2공정 사이드 포밍 가공 후 제품 형상과 두께분포를 보여준다. 1공정 별징 가공되는 부분은 원소재 파이프를 확관 가공하는 것으로 축방향 이송과 공기 압력 조정 등으로 소재의 두께감소율을 최소화할 수 있도록 수차례 트라이아웃을 진행하여 최적 제품을 제작할 수 있었다. 2공정에서 좌측 사이드 포밍 가공되는 부분은 원소재 파이프의 단면 형상을 가공하는 것으로 확관 가공이 되지 않는 Section A-A 구간에서는 전체적으로 두께 편차가 거의 없이 일정한 두께 분포를 확인할 수 있으나, 확관이 이루어지는 Section B-B 구간에서는 원소재 두께 4mm에서 2mm까지 최대 50%까지 두께 편차가 발생되었음을 확인할 수 있다. Fig. 17은 원소재의 Pre-Heating 작업을 시작으로 별징, 사이드 포밍, 포밍 공정을 수행하여 나온 최종 제품을 보여준다. 알루미늄 합금 관 Al5052 소재(두

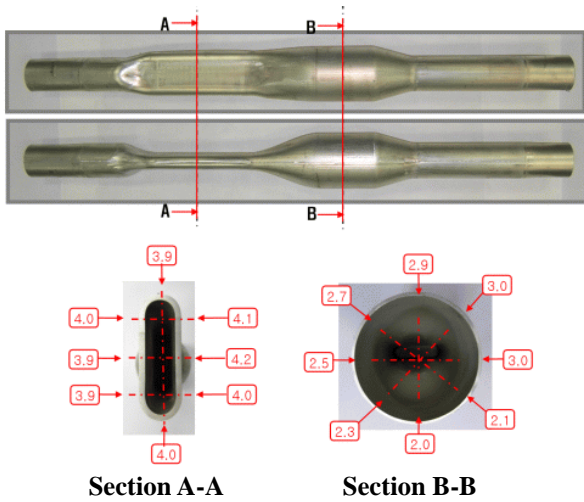


Fig.16 Section thickness distribution of 1st bulging and 2nd side forming process

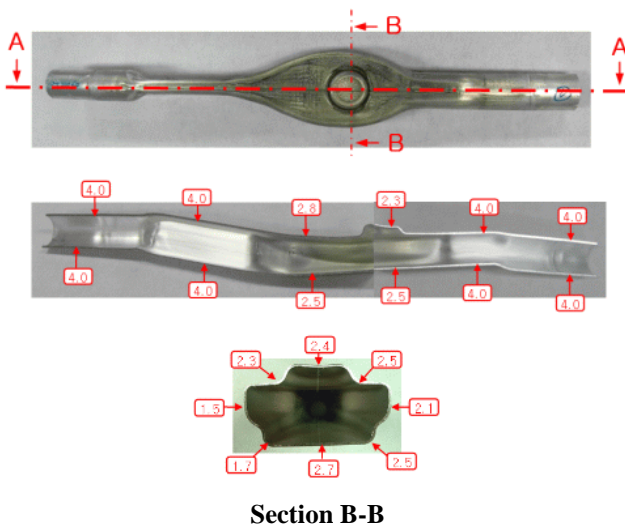


Fig.17 Section thickness distribution of 3rd forming process



Fig.18 Final product of control arm after wire cutting machining

께 4.0mm)를 이용하여 최종 제품형상을 구현하였으며, 완성된 제품의 단면 형상 두께 분포를 분석한 결과 확관이 이루어지는 Section B-B 구간에서는 비

교적 큰 두께 감소를 보이는 것으로 나타났다. 이는 1공정 별칭 가공에서의 두께감소가 공정이 진행됨에 따라 더욱 감소되어 3공정 포밍 가공에서 돌기부 성형이 진행됨에 따라 두께감소가 더욱 진행된다는 것을 알 수 있다. Fig. 18은 Hot Air Bulging의 최종 제품을 보여준다. 와이어 커팅 절단 후 최종 제품을 양호하게 얻을 수 있었다. 실험 결과 1공정에서 3공정으로 공정이 진행됨에 따라 두께 관리가 각 공정에서 중요함을 알 수 있었고, 열간 별칭 성형해석 결과와 실험 후 최소두께가 다소 차이를 보이지만 평균두께 분포는 거의 일치함을 알 수 있었다. 최소두께가 다소 차이를 보이는 이유는 작업 시에 공정 변수 제어가 어려웠음을 말해준다.

5. 결론

본 연구는 Al 합금 소재의 고온 인장 시험을 통하여 소재 물성을 평가하고 고온에서의 축방향 이송과 공기압력을 고려한 금형 모델을 구성하였으며, 고온 물성치를 이용하여 축방향 이송과 공기압력 조절을 통하여 성형해석을 수행하였다. Hot Air Bulging 성형에서 공정 변수로는 축방향 이송, 공기압력 조정, 프레스 금형 온도 제어, 알루미늄 합금 관 소재 가열 속도 등 많은 공정 변수로 인하여 최적의 조건을 찾는 데 상당한 노력이 필요하였다. 알루미늄 합금 소재의 기계적 성질을 파악하기 위해 고온 인장시험을 실시하였는데, 상온에서 550℃까지 온도가 상승함에 따라 연신율이 증가함을 알 수 있고, 반면 항복점과 인장강도는 점점 감소함을 알 수 있었다. 냉간 알루미늄 성형에 비해 열간 알루미늄 별칭 성형기술은 고온 인장시험 결과에서 알 수 있듯이 변형저항이 상온에 비해 1/10 정도까지 감소하고, 연신율은 6배까지 증가한다. 그러므로 높은 확관률을 얻을 수 있었고 복잡한 형상의 성형도 가능하여 알루미늄 관재의 성형 자유도를 향상할 수 있었다. 또한, 알루미늄 합금관 소재를 성형하기 위하여 금형 내에 히터를 삽입하여 금형 온도를 제어할 수 있었고, 프레스 유압장치를 이용하여 공기압력을 제어할 수 있는 공기압 제어 장치를 프레스에 설치하였다. 압력 변화 조건은 양쪽에서 밀어주는 축방향 이송속도를 고려하여 설정하여야 소재의 무리한 변형을 막을 수 있었다. 알루미늄 관재의 Hot Air Bulging 성형 기술에 대한 실험과 해석을 통하여 최

적의 제품을 제작할 수 있었고, 성형해석 결과와 실험 결과가 유사함을 확인할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] Y. J. Jeong, J. H. Yun, A. Cuitino, 2006, Study on Phenomenological and Crystal Plasticity Models to Predict Anisotropic Behaviors for Aluminum Alloy Sheets, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 15, No. 8, pp. 42~48.
- [2] H. Takuda, K. Mori, I. Masuda, Y. Abe, M. Matsuo, 2002, Finite Element Simulation of Warm Deep Drawing of Aluminum Alloy Sheet When Accounting for Heat Conduction, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 120, No. 1, pp. 412~418.
- [3] H. Y. Kim, H. T. Lim, H. J. Kim, D. J. Lee, 2007, The Effect of Pre-bending on the Formability in the Tube Hydroforming Process of an Aluminum Rear Subframe, *Met. Mater. Int.*, Vol. 13, No. 2, pp. 87~92.
- [4] S. G. R. Shin, B. D. Joo, S. W. Han, C. H. Lee, Y. H. Moon, 2013, Analysis of Defect Characterization in a Rectangular Shape Flange Hydroforming Process, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 22, No. 5, pp. 275~279.
- [5] S. K. Sitaraman, G. L. Kinzel, T. Altan, 1991, A Knowledge-Based System for Process-Sequence Design in Axisymmetric Sheet-Metal Forming, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 25, No. 3, pp. 247~271.
- [6] G. Perotti, E. Maggiorano, F. Spirito, S. Tornincasa, 1985, A Calculation Program for Deep-Drawing Forms, *CIRP Ann-Manuf. Tech.*, Vol. 34, No. 1, pp. 237~240.
- [7] S. A. Majlessi, D. Lee, 1993, Deep Drawing of Square-Shaped Sheet Metal Parts, Part 2: Experimental Study, *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 115, No. 1, pp. 110~117.
- [8] J. G. Kim, J. B. Kim, J. H. Kim, 2014, The Influence of Process Parameters in Piercing with a High Aspect Ratio for Thick Aluminum Sheet, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 23, No. 1, pp. 23~28.
- [9] J. W. Bae, D. G. Choo, C. G. Kang, H. G. Kim, 2006, A Study on the Deep Drawing of AZ31B Magnesium Sheet at Warm and Hot Temperature, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 15, No. 7, pp. 9~16.
- [10] S. S. Han, M. Y. Lee, 2013, Numerical Study of the Butting Process for a AZ31B Magnesium Alloy Tube, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 22, No. 8, pp. 486~491.
- [11] C. H. Kim, D. H. Park, S. S. Kang, 1996, Temperature Effect on Warm Deep Drawability of Rectangular Cup Using Local Heating of Dies, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 13, No. 5, pp. 53~59.
- [12] Y. T. Keum, B. Y. Han, 2002, Springback of FCC Sheet in Warm Forming, *J. Ceram. Process. Res.*, Vol. 3, No. 3, pp. 159~165.
- [13] Z. B. He, X. B. Fan, F. Shao, K. L. Sheng, Z. B. Wang, S. J. Yuan, 2012, Formability and Microstructure of AA6061 Al Alloy Tube for Hot Metal Gas Forming at Elevated Temperature, *T. Nonferr. Met. Soc.*, Vol. 22, pp. 364~369.