

온간 하이드로포밍에 관한 유한요소해석 및 실험적 검증

김봉준¹, 박광수¹, 최경호¹, 문영훈[#]

Finite Element Analysis and Experimental Confirmation of Warm Hydroforming Process

B. J. Kim, K. S. Park, K. H. Choi, Y. H. Moon

Abstract

The hydroformability of aluminum alloy sheets at elevated temperatures have been investigated in this study. It is necessary to analyze the variations of the mechanical properties that depend on the forming temperature and the heat conduction during warm hydroforming. Therefore, in this study a coupled simulation of plastic deformation and temperature distribution in the warm hydroforming process is performed and compared with experimental data. The multi-purpose code DEFORM-2D can handle this type of calculations but it takes high computation time if contact heat transfer between die, tube and pressure medium occurs. Experiments were conducted by high temperature tribometer(pin-on-disk) allowing measuring the friction coefficients of the aluminum alloys at several temperatures and these results are applied to the coupled simulation by which the optimal process parameters such as internal pressure and preset temperature on hydroformability can be determined. The comparison of the FE analysis with the experimental results has shown that hydroformability given by bulge height, and temperature distribution of the tube specimen make a little difference with the FE results but the trend predicted by simulation agrees well with experiments.

Key Words : Warm Hydroforming, Aluminum Alloy, Induction Heating, FEM

1. 서론

현재 전세계적으로 자동차업계에서는 안정성 향상과 더불어 환경 문제와 관련한 자동차 배기가스 저감에 대한 관심이 집중되고 있다. 자동차의 연료 소비는 자동차 중량에 비례하여 증가하므로 연비 향상과 배기가스의 감소를 위해서는 자동차의 경량화는 필수 불가결하다. 근래 몇 년 전부터 범지구적으로 제정되고 있는 연비 향상 및 배기오염 감소에 관련된 각종 규제 및 법규를 만족하기 위해서는 필수적으로 차량의 경량화를 이루어야 하며, 국내외 많은 자동차 업체에서도 경쟁적으로 경량 차량의 개발에 나서고 있다. 이를 위해 대체 재료의 적용을 통한 경량화로 이

개발에 사용되는 재료로는 알루미늄, 마그네슘, 플라스틱 등이 있다. 이 중 알루미늄의 경우 경량화를 위해 철계 소재를 대체하는데 필요한 고강도 합금의 경우 성형성은 상온에서는 철계 소재에 비해 크게 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 이를 개선하기 위해 알루미늄의 온도에 따른 성형 특성을 활용하여 온간 하이드로포밍 기술을 개발, 적용하고자 한다. 관개 하이드로포밍에서의 성형 한계는 보통 인장 물성치를 이용한 FEM 성형해석에 의해 예측된 국부적인 넥킹(necking)에 의해 결정되는데, 성형 중의 시간에 따른 온도 변화에 의한 물성치 변화의 영향도를 정확하게 고려하는 것은 어렵다. 이는 금형과 소재 간의 접촉 열전달 및 대기로의 대류 열전달로 인해 성형 관재의 부

1. 부산대학교 정밀기계공학과

교신저자: 부산대학교 정밀기계공학과,

E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

위별 온도 구배가 시간에 따라 달라지기 때문이다. 최적의 성형 조건을 찾기 위해서는 실시간으로 변화하는 온도에 따른 기계적인 물성치 뿐만 아니라 열전달을 함께 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 성형성에 영향을 미치는 소성 변형과 온도 분포의 영향도를 함께 고려하는 thermo-mechanical FE 시뮬레이션을 수행하였으며, 온도별 알루미늄의 마찰계수를 tribometer(pin-on-disk 방식)을 이용하여 측정하여 위의 해석에 적용하였다.[1] 유도가열방식을 이용한 온간 하이드로포밍 성형으로 얻은 관재의 확관 높이(bulge height)와 온도 분포를 여러 설정 온도(preset temperature)별 FE 시뮬레이션 결과와 비교, 검증하였다.

2. 해석 절차

2.1 FE 시뮬레이션에 이용된 물성치

본 연구에 사용된 AA6061 미열처리 압출관재의 치수는 두께 5mm, 외경 50.8mm 이다. 인장시험 시편은 Fig. 1 에서 보이듯이 ASTM E8M 규격으로 가공하였다. 인장시험 조건으로는 온도별로 각각 200°C, 300°C에서 크로스 헤드 속도 2mm/min, 20mm/min, 200mm/min 에서 수행하였으며, 이는 각각 초기 변형율 속도 0.001/s, 0.01/s, 0.1/s 와 일치한다.(Fig. 2) 이와 같이 고온 인장시험에서 얻은 결과들을 이용하여 성형해석시 계산된 온도와 변형율, 변형율 속도에 따른 유동응력이 성형적으로 보간(interpolation)되어 적용된다.

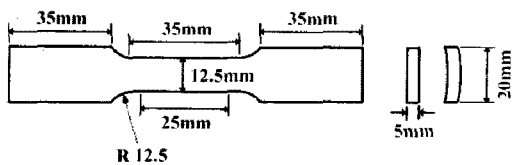


Fig. 1 Specimen for tensile tests(ASM E8M)

성형해석에 사용된 입력 데이터는 Table 1과 같다. 관재와 대기 사이의 대류열전달계수는 0.02N/sec/mm/°C, AA6061의 열전도계수와 열당량 (heat capacity)은 각각 180 N/sec/°C 와 2.43369 N/ mm²/°C이다. 성형해석에 적용되는 마찰계수는 pin-on-disk 시험으로 하중 40N, 회전속

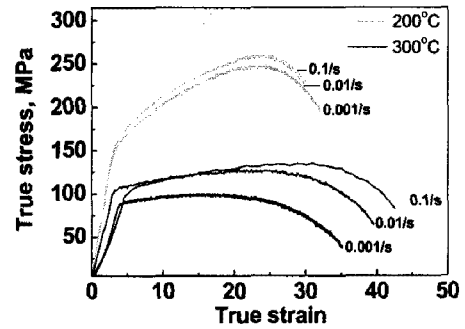


Fig. 2 Flow curve of AA6061 extruded tubes

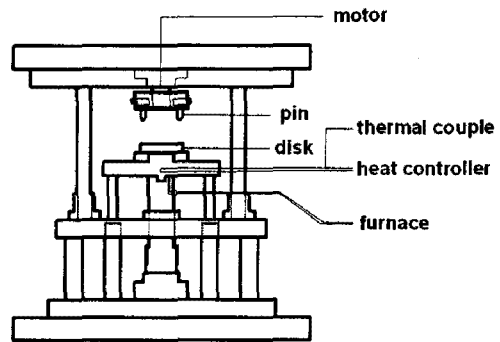


Fig. 3(a) Experimental set-up of the pin-on disk

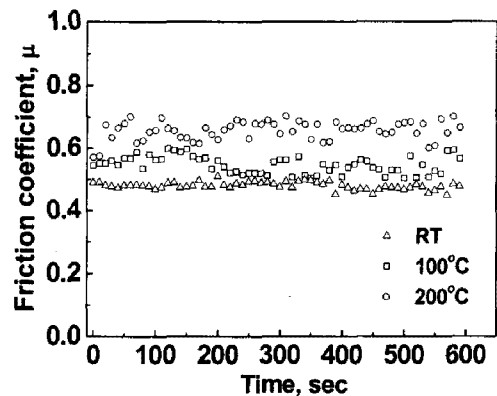


Fig. 3(b) Friction curves of AA6061 sheet

도 100rpm에서 수행하여 얻었다.(fig. 2(a)) 금형재로 제작된 pin은 상부 회전 shaft에 고정하고, 알루미늄 관재로 제작된 disk는 하부 고정 로드(stationary rod)에 안착시키고, shaft가 회전함에 따라 하부 고정 로드를 통해 하중을 가한다. 이 때 마찰 토크는 고정 로드와 부착된 로드셀(load cell)로 10초에 한 번씩 측정된다. Fig. 2(b)에서 보듯이

이 온도가 올라감에 따라 마찰계수가 증가하게 되며, 그 값의 진폭 또한 늘어나게 되는데, 이는 온도가 올라감에 따라 관재 표면이 물러져 회전하는 pin에 흡착하게 되기 때문으로 사료된다.

Table 1 Comparison of measured roughness data

parameter	values
Tool setup	
extruded tube material	AA6061
thickness(mm)	5.0
initial tube temperature(°C)	10~320
initial die temperature(°C)	10
Material properties	
Young's modulus, E(GPa)	69
Poisson's ratio, ν	0.33
flow stress curve(MPa)	in Fig. 2
friction coefficient, μ	in Fig. 3(b)
Thermal properties	
thermal conductivity(N/sec/°C)	180
heat capacity(N/ mm ² /°C)	2.43369
convection coefficient(N/sec/mm//°C)	0.02

3. 해석 결과

3.1 성형해석 결과

본 성형해석은 DEFORM-2D를 사용하여 소성 변형과 열전달해석이 동시에 수행되는 couple 해석을 수행하였다. Fig. 4는 온간 하이드로포밍 성형 중의 각각의 축방향 압입량(Fd)에 따른 소재의 변형 양상과 관재의 온도 분포를 나타낸다. 관재는 최초로 320°C로 균일하게 설정하고 관재 끝단에 맞닿는 펀치는 200°C이며, 대기에 노출됨과 동시에 금형과의 접촉하게 된다. 따라서 Fig. 5에서와 같이 관재의 접촉부(B)에서의 온도가 급격하게 떨어지게 되어 관재의 확관부(A)와의 온도 구배가 생기게 된다. 이와 같은 결과로 금형과 접촉하는 부위의 관재 표면의 온도가 상승함에 따른 마찰 조건 악화를 저하시킬 수 있으며, 반대로 확관부의 성형성은 온도 증가로 인한 성형성 향상을 기할 수 있다.

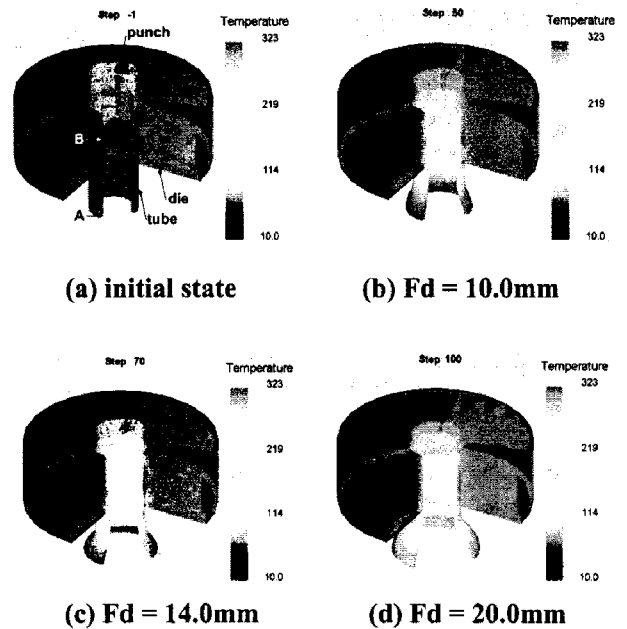


Fig. 4 Deformation shape and temperature distribution in warm hydroforming

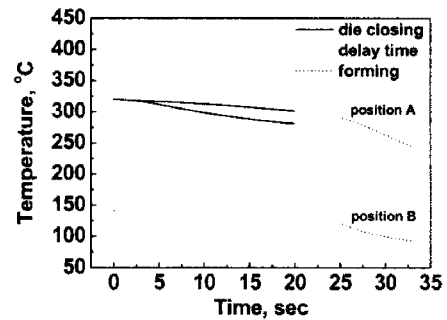


Fig. 5 Temperature distribution of the tube

3.2 실험 결과와의 비교, 분석

액압성형시 관재를 빠른 시간에 가열하고 효과적으로 온도를 제어하는 것은 물론 관재 두께가 5mm인 국부적인 부분에서 효율적으로 가열시키기 위해 주파수 30kHz, 10kW 사양의 유도가열장치를 적용하였다.[2]

Fig. 6은 설정온도(preset temperature) 320°C까지 가열시킨 후 K-type 열전대를 이용하여 관재 중심부의 온도 변화를 측정하고 열전달 해석값과 비교한 것이다. 보는 바와 같이 시뮬레이션 결과와 실제 측정된 온도 변화값이 잘 일치됨을

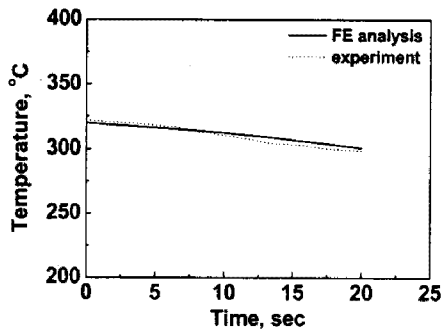


Fig. 6 Temperature variation from FE simulation and experiment

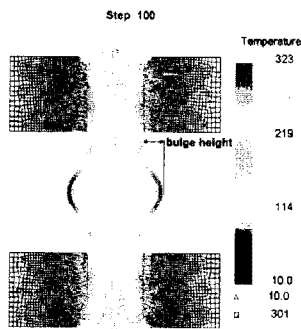


Fig. 7 Measuring point of the deformed tube

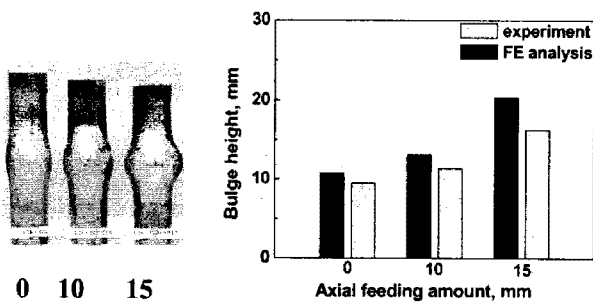


Fig. 8 Comparison of the formability of FE simulation with the of the experiments

알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 Fig. 5에서와 같이 온간 하이드로포밍 성형시 금형과의 접촉 후의 온도 변화 추이에 따른 기계적 물성치의 변화를 성형해석 상에 오차를 줄이면서 적용시켰다. Table 2에서의 실험에서의 성형 하중을 적용시 성형된 관재의 확관 높이(Fig. 7)와 성형해석상의 결과를 비교하였다. Fig. 8에서 보이듯이 실험 결과값이 전체적으로 성형해석의 결과에 비해 낮은

값을 가졌는데, 그 차이는 실제 실험의 경우 압력 유체인 열매체유가 물에 비해 압축성이며, 점성을 띠어 증압기(intensifier) 끝단의 압력 센서를 통해 얻은 내부 유체압력이 정확하지 않기 때문으로 사료된다. 아울러 축방향 압입을 할 경우 성형 해석시 금형과 관재와의 접촉 상태의 변화를 구현한 것이 실제 실험과 차이가 있기 때문이다. 그러나 전체적인 온도 분포와 변형양상이 잘 일치하였다.

Table 2 Loading condition level used in experimental investigation of AA6061 extruded tubes($T_{max}=320^{\circ}\text{C}$)

level	bursting pressure (MPa)	feeding amount (mm)
L1	15.2	0
L2	16.8	10
L3	18.7	15

4. 결론

본 연구에서는 온간하이드로포밍 성형시 시간에 따라 변화되는 온도에 따른 기계적인 물성치(flow stress)와 마찰 조건의 변화를 성형해석상에 구현하여 실제 실험 결과값과 비교하였다. 변형을 속도별, 온도별 고온 인장실험과 pin-on-disk 마찰 시험을 통해 얻은 데이터를 위의 성형해석시 적용하였다. 성형 중의 온도 변화를 모사한 해석결과는 실제 측정된 온도값과 잘 일치한 반면 관재의 확관 높이는 조건별로 약간 차이가 났다. 그러나 전체적으로 실험결과값의 변화 추이가 적절히 잘 모사되었다.

참고 문헌

- [1] T. Polcar, R. Novak, P. Siroky, 2006, The tribological characteristics of TiCN coating at elevated temperatures, WEAR, Vol. 260, pp. 40~49.
- [2] B. J. Kim, S. M. Son, K. S. Park, Y. H. Moon, 2005, The effect of the heating conditions on the hydroformability of the aluminum alloys at high temperatures, Materials Science Forum, Vol. 475~479, pp. 3307~3310