

## 알루미늄 튜브의 열간가스 성형해석

김현영<sup>1#</sup>, 임희택<sup>2</sup>, 황상희<sup>1</sup>, 이기동<sup>3</sup>, 이우식<sup>4</sup>, 김대업<sup>4</sup>

### Hot Air Forming Analysis of Aluminum Tube

H. Y. Kim, H. T. Lim, S. H. Hwang, K. D. Lee, W. S. Lee and D. Y. Kim

#### Abstract

The application of light weight materials, such as aluminum alloy, has been limited due of their poor formability. Especially, aluminum alloy tube has limited expansion capability at most 15% at room temperature. New manufacturing process, called hot air forming, is introduced to apply aluminum tube to the automotive suspension components which have complex shape and require high expansion ratio about 40%. The process is carried out at the elevated temperature above 500°C, so numerous material properties and process parameters related to the high temperature should be investigated and determined to get a sound product. In this study, the effect of thermal properties and forming parameters such as the temperature of tool, axial feeding and gas pressure are analyzed by using explicit finite element method.

**Key Words** : Hot air forming (HAF), Aluminum alloy, Thermal property, Axial feeding, Gas pressure

#### 1. 서론

열간가스성형은 열간에서 알루미늄 소재의 높은 성형성을 이용하는 가공 방법이다. 알루미늄 튜브를 고온으로 가열하고 금형에 안착된 튜브 내부에 가스를 불어넣어 성형하게 된다. 열간가스성형을 적용할 경우, 기존 상온 액압성형보다 상당히 증가된 확관률을 얻을 수 있기 때문에 매우 복잡한 형태의 성형이 가능하며 높은 수준의 부품 통합화가 가능하다.

일반적으로 액압성형 공정을 적용하는 경우, 성형해석을 통해 예비성형의 적용 및 주요 성형인자의 영향 등을 예측하여 제품 생산에 반영하게 된다[1,2]. 하지만 현재까지 국내외적으로 열간가스성형에 대한 경험과 기술이 축적되어있지 못한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄 튜브 열간가스성형을 시뮬레이션할 수 있는 유한요소 해석모델을 구성하고, 이 모델을 실제 자동차 서

브프레임 부품에 적용하였다.

열간에서의 알루미늄 튜브의 재료 물성치 변화와 금형의 온도, 축압축량 및 속도, 가스 압력의 변화를 분석하였으며, 이를 실제 트리아아웃에 적용하였다.

#### 2. 열간가스성형 모델링

Fig. 1은 알루미늄 열간가스성형을 적용하여 개발하고자 하는 자동차용 리어 서브프레임이다. Fig. 2는 No.1 과 No.2 사이드 멤버에 대한 확관율 분포를 보여준다. 각각 32.7%와 36.9%의 높은 최대 확관률을 나타낸다.

사이드 멤버에 사용될 알루미늄 튜브 직경은 열간가스성형시 주름이 발생하지 않도록 확관율 0%인 단면의 둘레길이를 고려하여 결정하였다. 이렇게 결정된 최적 튜브 직경은 70 mm 이다. 사용된 소재는 열간가스성형을 위해 개발된 Al 5000

1. 강원대학교 기계메카트로닉스공학부  
2. 한국기계연구원 부설 재료연구소  
3. ㈜ 화신  
4. 현대모비스  
# E-mail: khy@kangwon.ac.kr

계 합금 소재이며 고온 인장시험으로 구한 고온 물성치는 Fig. 3 에 나타내었다. 고온 인장시험은 밀폐된 노(furnace)에서 수행되었으며 변형률 속도(strain rate)는 0.01/s 였다. Table 1 은 온도를 고려한 성형해석을 위한 알루미늄의 비열(specific heat)과 열전도도(thermal conductivity)이다.

본 연구에서는 상용 익스플리시트 유한요소성형해석 프로그램인 PAM-STAMP v2007을 사용하였다. Fig. 4는 프로그램에서 사용되는 열전도 모델과 열전달을 위한 접촉조건을 보여준다. 여기서  $K$ 는 열전도, 그리고  $R$ 은 열저항(thermal resistance)이다. 금형과 블랭크가 접촉하여 열전도(conduction)가 발생하는 표면은 식(1)의 열전도식을 이용하고 금형과 블랭크가 접촉하지 않는 부분에서 열대류(convection)가 발생하는 표면은 식(2)의 변형된 열전도 식을 이용한다. 식(2)는 접촉두께(contact thickness)로 열전도량을 조절하여 열대류를 간접적으로 표현하는 방법이다

$$q_{cond} = (T_s - T_m) \times HTSurf \times Area \times TPVSF \quad (1)$$

$$q_{conv} = (T_s - T_m) \times \frac{HTCond}{THContact} \times Area \times TPVSF \quad (2)$$

여기서  $T_s$ 는 블랭크의 온도,  $T_m$ 은 금형의 온도,  $HTSurf$ 는 표면열전도계수(surface heat transfer coefficient),  $Area$ 는 접촉면적,  $TPVSF$ 는 시간증분(time step)과 속도조정인자(velocity scale factor)의 비,  $HTCond$ 은 열전달계수(conduction heat transfer),  $THContact$ 은 접촉두께를 나타낸다.

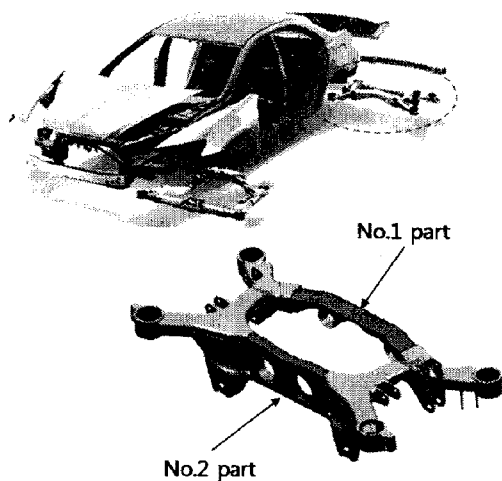


Fig. 1 Automotive rear subframe

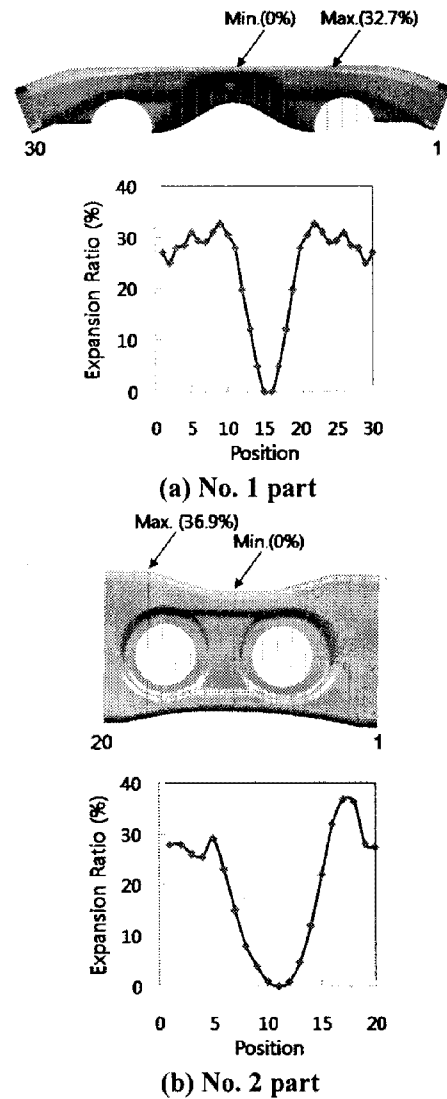


Fig. 2 Expansion ratio distribution of side members

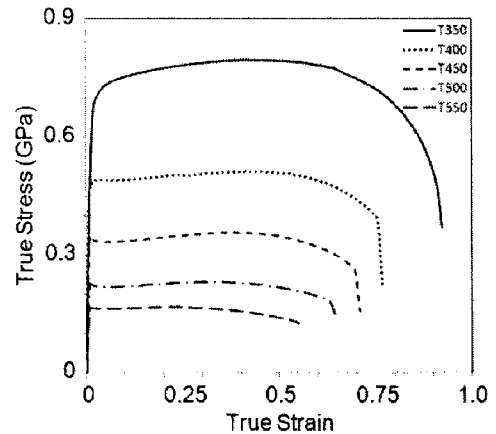


Fig. 3 Stress-strain curve with various temperatures

Table 1 Thermal properties of aluminum tube [3]

Specific heat	945 J/kg · K (945 kN · mm/kg · K)
Thermal con.	221 W/m · K (0.000221 kN/msec · K)

### 3. 열간가스성형 해석

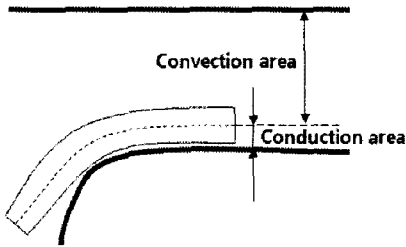
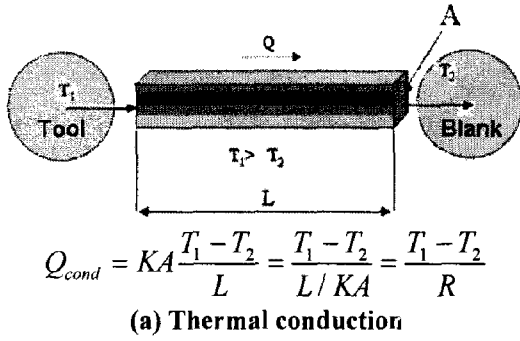


Fig. 4 Heat transfer model in PAM-STAMP

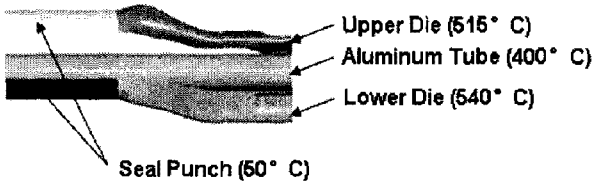


Fig. 5 Finite element model of No.1

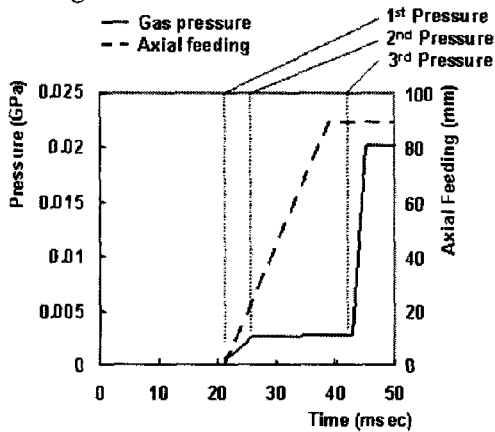


Fig.6 Gas pressure and axial feeding curve for HAF simulation of No.1

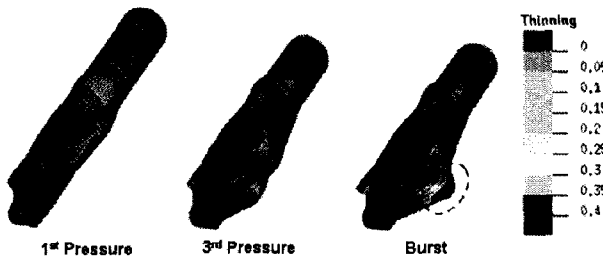


Fig.7 Deformed shape and thinning distribution after HAF simulation of NO. 1

Fig. 5는 No. 1의 열간가스성형 해석을 위한 유한요소모델이며 해석에 적용된 금형 및 알루미늄 튜브의 초기온도를 나타내었다. Fig. 6은 시간에 따른 가스압력 곡선으로 3단계로 가스 압력을 작용시켰다. 1단계는 가스압력이 작용하기 시작하는 구간이며 2단계는 일정 가스압력으로 성형하는 구간, 3단계는 미성형된 코너부를 성형하는 최종 압력 구간이다. Fig. 7은 열간성형 후의 각 단계별 변형양상과 두께감소율을 나타낸 것이다. 축압축을 통해 소재 유입부 근처의 파단을 억제하였지만 최대 확장률 지점에서 여전히 파단 가능성이 있음을 보여주고 있다.

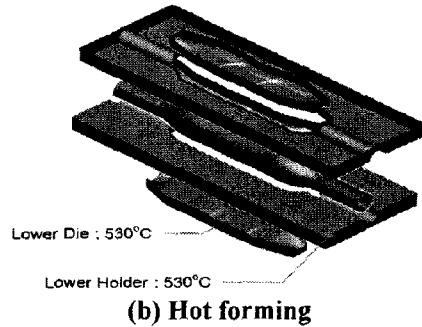
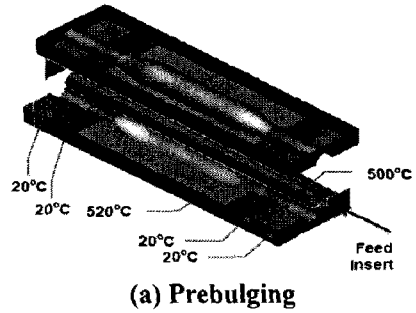


Fig. 8 Finite element model of No.2

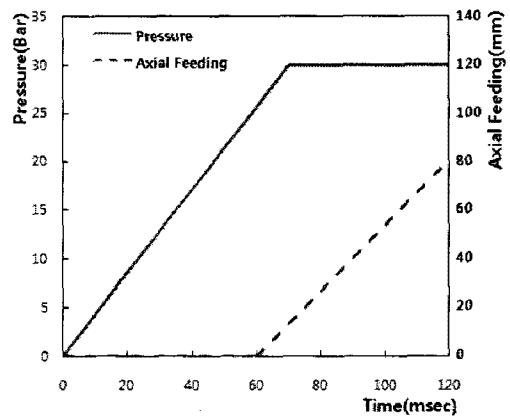


Fig. 9 Gas Pressure and axial feeding curves for prebulging simulation of NO.2

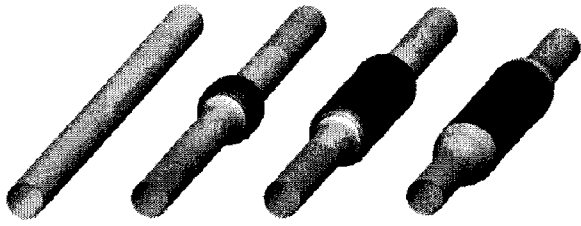


Fig. 10 Deformed shapes after prebulging simulation of NO.2

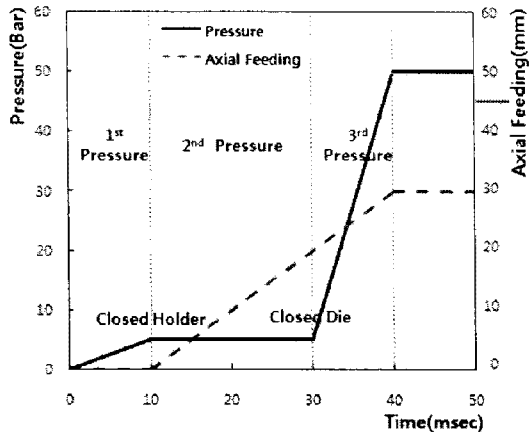


Fig. 11 Gas Pressure and axial feeding curves for hotforming simulation of NO.2

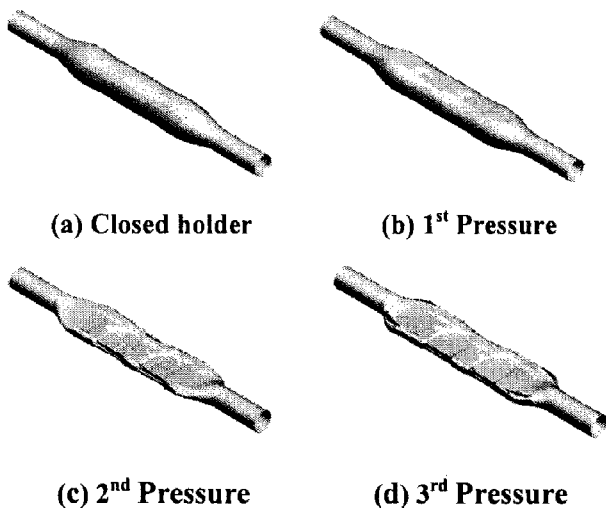


Fig. 12 Deformed shapes after HAF simulation of No.2



Fig. 13 Tryout result after prebulging

Fig. 8은 No. 2 부재에 대한 열간가스성형 모델이며, 해석에 적용된 금형 및 알루미늄 튜브의 초기온도를 나타내었다. No. 2의 경우, 2단계로 성형을 수행한다. 여러 번의 시행착오로부터 예비확관 성형시의 압력은 시작부터 70msec까지 30bar로 점진적으로 올린 다음, 일정하게 유지하였으며, 축압축량은 60msec부터 120msec까지 각각 80mm씩 총 120mm로 설정하였다(Fig. 9). Fig. 10은 예비확관 성형의 각 단계별 변형양상을 나타낸다. 중간에서부터 양 끝단으로 성형이 진행됨을 알 수 있다. 최종열간성형은 10msec동안 상하형 홀더를 닫으며 1차 압력을 가하고 10msec에서 30msec동안 상하형 다이가 닫히면서 2차 압력을 5Bar로 일정하게 유지한다. 금형이 닫힌 후 40msec까지 50bar의 압력을 적용하였으며(Fig. 11), 최종열간성형의 단계별 변형양상은 Fig. 12와 같으며, Fig. 13은 No. 2 부재의 예비확관 성형 트라이 아웃 결과이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 열간가스성형을 적용한 리어 서브프레임의 사이드 멤버에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 상용 익스플리시트 프로그램인 PAM-STAMP v2007을 이용하였다. 알루미늄 튜브에 대한 고온 물성치와 가스압력 및 축압축을 고려한 유한요소해석 모델을 구성하였으며, 해석에서 적용되는 각종 모델링 방법론에 대하여 논의하였다. 향후 시제품과 해석결과를 비교하여 알루미늄 열간가스성형 해석모델의 타당성과 신뢰성을 검증하는 절차가 수행되어야 할 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] 권태우, 김종철, 전진화, 장계원, 이우식, 2006, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 292~294.
- [2] 임희택, 김형중, 이동재, 김현영, 2006, 알루미늄 튜브 하이드로포밍 성형해석 및 성형성 평가, 한국소성가공학회지, 제 15 권, 제 2 호, pp. 138~142.
- [3] 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, JMPT 120, pp. 412~418.