

AA6061 휠 성형공정의 열-점소성 유한요소해석

김영훈, 황병복*

인하대학교 자동화공학과

Analysis of AA6061 Wheel Forging Processes by the Thermo-Viscoplastic Finite Element Method

Young-Hoon Kim and Beong-Bok Hwang

Department of Industrial Automation, Inha University

Abstract

In this study, the finite element analysis of AA6061 wheel forging processes over hot working range is performed and a thermo-viscoplasticity theory applicable to hot forging is applied for simulation. Aluminum alloy has frequently been utilized to manufacture automobile and aircraft parts due to its various advantages such as lightness, good forgeability, and wear resistance. Several forging conditions are applied to the simulation, such as die speeds, rib thicknesses, and depth of die cavity. The effectiveness of the simulation results is summarized in terms of metal flow, strain distributions, temperature distributions, forging load, which are essential to overall process design.

Key Words : Hot Forging, Thermo-Viscoplasticity, Aluminum Alloy

1. 서 론

알루미늄 합금은 내식성 및 내마멸성이 강하고, 경량이면서도 비강도가 높아 강 재료를 대체 하여 자동차나 항공기의 부재로 사용됨으로써 제품의 경량화를 추구할 수 있다. 또한 단조성이 우수하여 성형하중이 낮아질 뿐 아니라, 금형충만성이 좋아 정밀하게 제조할 수 있어 기계가공비의 절감을 이룰 수 있다.^[1] 일반적으로 열간단조는 금속의 재결정 온도이상에서 이루어지는 공정으로 냉간단조작업의 경우에 비해 재료의 유동용력이 감소하는 면이 있어 성형에너지가 적게 소모되므로 장비의 능력이 제한적이고 재료의 대변형이 요구될 때 유리한 공정이다.^[2] 이러한 장점들로 인해 자동차용 휠은 열간단조에 의하여 주로 제작되고 있으며 비교적 가혹한 사용환경을 고려해 볼 때 여러 가지 면에서 완성품의 바람직한 성질들을 얻을 목적으로 알루미늄 합금이 널리 사용되는 추세이다.

금속성형공정에서 열전달의 해석은 Bishop^[3]의 방법을 Altan과 Kobayashi^[4], Lahoti와 Altan^[5], Nagapal 등^[6]이 각각 압출, 엿셋팅과 비틀림, 단조에 이용하였다. Oh^[7] 등은 변형률속도에 민감한 재료의 변형을 해석하기 위하여 수식화를 하였고, 변형률속도를 도입한 점소성 이론은 Perzyna^[8]

와 Cristescu^[9]가 일반화 하였다. Zienkiewicz 등^[10]은 정상상태 압출에서 변형과 열전달의 연계 해석을 수행하였고 Rebelo와 Kobayashi^[11]는 증실실린더와 링 옆셋팅에서 비정상상태의 점소성 변형과 열전달의 연계해석방법을 개발하였다.

본 논문에서는 자동차용 휠의 후가공 즉, 롤 폼잉과 기계가공 이전의 형상을 제조하는 공정에 대해 유한요소해석을 수행하고 재료유동에 의한 소재의 형상변화, 변형률분포, 온도분포, 성형하중 등을 분석한다.

2. 해석방법

열간단조공정에서 시간에 종속적인 재료의 거동을 다루기 위하여 점소성 이론이 도입되었으며 탄성변형을 무시한 강성 해석이 일반적으로 수행되어졌다. 해석에 사용 된 6061의 유동응력과 온도 및 변형률속도의 관계는 (1)과 같고^[12], 변형률속도에 대한 유동응력의 변화율은 (2)와 같다.

$$\bar{\sigma} \text{ (MN/m}^2\text{)} = \frac{\sinh^{-1} \left\{ \left(\exp\left(\frac{1.852 \times 10^4}{T \text{ (K)}}\right) \times 6.803 \times 10^{-11} \dot{\epsilon} \right)^{\frac{1}{4.94}} \right\}}{0.011} \quad (1)$$

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\dot{\epsilon}} = \frac{18.4026K}{\dot{\epsilon}^{0.797571} \sqrt{1 + K^2 \dot{\epsilon}^{0.404858}}} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } K = \left\{ \exp\left(\frac{1.852 \times 10^4}{T \text{ (K)}}\right) \times 6.803 \times 10^{-11} \right\}^{\frac{1}{4.94}}$$

그림 1은 초기소재의 크기, 펀치와 다이의 형상 및 유한요소망을 나타낸 것이다.

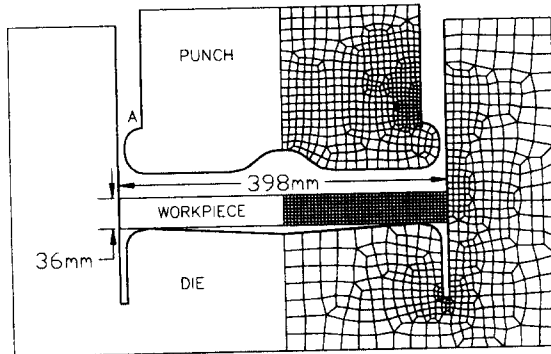


Fig. 1 Finite Element Meshes for Workpiece and Tools

그림 2처럼 휠은 성형후 전체적으로 림(rib)과 웹(web)을 갖는 형상이며 축대칭이 아닌 웹 중앙의 돌출부와 장식모양을 갖는 전면부는 각각 반원형태와 경사면으로 단순화하여 해석하였으며

그림 1의 A부분과 같이 펀치의 노우즈를 설계한 것은 공정완료후 펀치배범을 원활히 하기 위함이다. 공정은 압출이 주된 것이고 단공정으로 끝내는데 전·후방 압출을 행하여 림을 충분히 길게 한 후 몇가지 후가공을 하며 림성형은 별도의 장비에 의해 행한다.

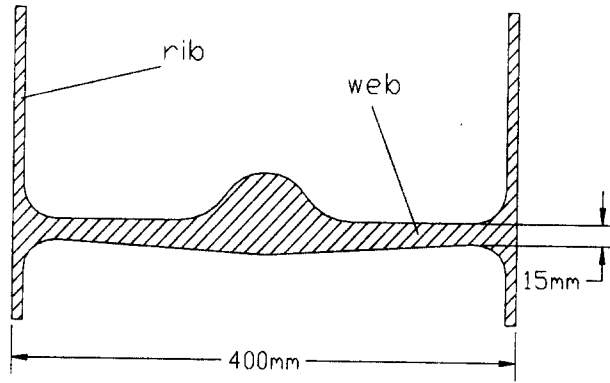


Fig. 2 Wheel Geometry after Forging

해석에 이용된 6061과 펀치와 다이재료인 H13의 열적 물성치와 몇 가지 공정조건값을 표 1과 표 2에 나타내었다.

Table 1 Thermal Properties and Heat Transfer Coefficients

	6061	Punch & Die(H13)
Conductivity (N/sec · K)	240	28.4
Density*Heat Capacity (N/mm ² · K)	2.8	3.676
Heat Transfer Coef. to the Environment (N/sec · mm · K)	0.007	
Heat Transfer Coef. of the Lubricant (N/sec · mm · K)	35.02	
Radiation Coef.*Boltzman Constant (N/sec · mm · K ⁴)	85 × 10 ⁻¹³	

Table 2 Process Conditions

Condition	Value	
Friction Factor	0.2	
Fraction of Plastic Work Turned into Heat	0.95	
Initial Billet Temperature	450 °C	
Initial Punch and Die Temperature	200 °C	
Environment Temperature	27 °C	
Forging Speed	0.2m/s	0.1m/s
Rib thickness	7mm	8.5mm
Depth of Die Cavity	60mm	90mm

3. 공정해석 결과

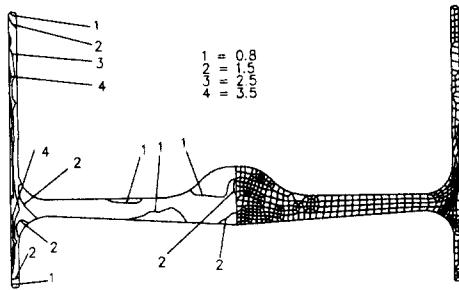


Fig. 3 Effective Strain Distributions, 0.2m/s

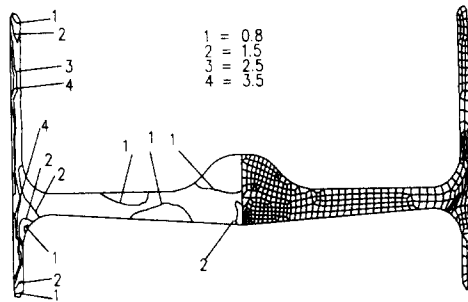


Fig. 4 Effective Strain Distributions, 0.1m/s

그림 5와 그림 6은 두 경우에 대한 공정 완료 후의 각각의 온도분포를 보여주고 있다. 립 하단 끝 부분의 약간 떨어진곳에서 낮은 온도분포를 보였으며 펀치속도 0.1m/s의 경우가 성형시간이 더 길기 때문에 펀치와 다이에 의한 냉각이 더 많게 되어 접촉면에서 같은 깊이의 부위라 하더라도 0.2m/s의 경우보다 온도가 낮게 나타났다. 소재내 최고온도는 450°C 부근으로 비슷하지만 최저온도는 펀치속도가 0.2m/s일 때 382°C, 0.1m/s일 때 363°C로, 소재내에서 온도의 최대편차는 각각 68°C와 87°C정도이다.

본 논문에서는 펀치속도를 두 가지로 하여 해석을 수행하고 결과를 비교해 보았다.

그림 3과 그림 4는 각각의 변형률속도에 대한 유효변형률분포를 나타낸 것으로 웰 부위나 모서리, 립의 끝 부분보다는 다이의 벽면을 따라가는 립의 외측에서 변형이 크게 일어났으며 최대 유효변형률은 펀치속도가 0.2m/s의 경우 5.9, 0.1m/s의 경우 6.6의 값을 나타내었다. 초기소재의 직경과 높이는 각각 398mm와 36mm이고 이는 직경 400mm의 휠로 가공된다. 립의 두께는 펀치속도 0.2m/s의 경우 7mm, 0.1m/s의 경우 8.5mm로 하였는데 이에 따른 공정 후 립의 전체 높이는 같은 행정거리 21mm에 대해 각각 230mm와 190mm로 성형되었다.

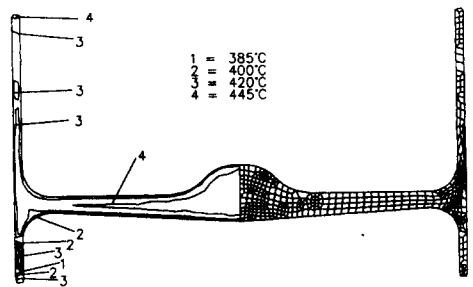


Fig. 5 Temperature Distributions, 0.2m/s

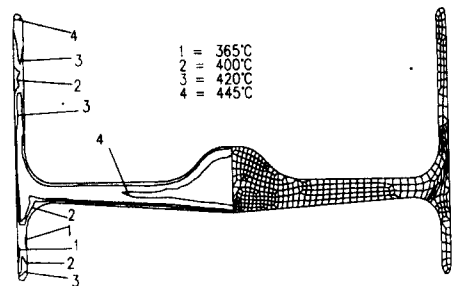


Fig. 6 Temperature Distributions, 0.1m/s

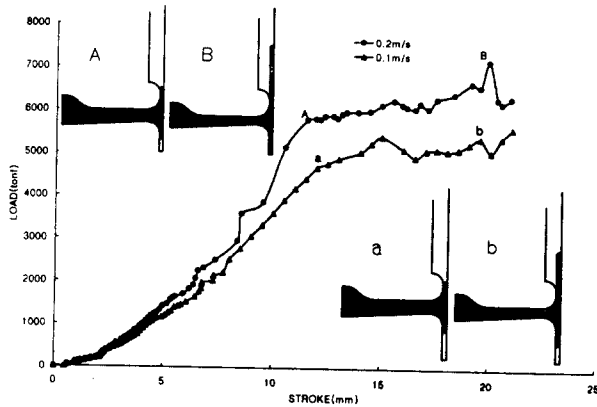


Fig. 7 Stroke-Load Curves

중이 발생하여, 0.1m/s의 경우에는 다이의 하단부 깊이를 더 깊게하여 해석을 하였다. 최대하중과 소요에너지는 펀치속도가 0.2m/s의 경우 각각 7196.2tonf와 829.99kJ이고 0.1m/s의 경우 각각 5628.3tonf와 680.97kJ이다.

그림 7은 행정-하중선도인데 고온에서는 변형률속도가 커짐에 따라 유동응력도 증가하므로 성형하중도 펀치속도가 0.2m/s일 때 더 높음을 확인할 수 있고 두 경우 모두 하중이 일정한 기울기를 갖고 증가하다가 완만해지는데 이는 압출이 정상상태에 도달했을 때 나타나는 일반적인 경향이다. 그림 7에서 보면 펀치속도 0.2m/s에서 B의 경우과 같이 립의 하단부를 채우는 순간 침두하

4. 결 론

전·후방 압출의 단공정으로 가공되는 자동차용 알루미늄 합금 필의 성형공정에 대한 열-점소성 유한요소해석을 수행하였다. 본 논문의 해석결과는 제품설계와 장비선정의 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것이다. 향후, 펀치와 금형의 형상과 공정조건 등의 변화를 통한 하중비교, 온도에 따른 접촉면의 열적 경계조건, 실험을 통한 검증이 필요할 것이다.

후기 : 본 연구는 인하대학교 및 (주)쌍용정공의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Air Force Materials Laboratory, *Forging Equipment, Materials, and Practices*, MCIC-HB-03, p. 148, 1973.
- [2] Kenneth C Ludema, et al., *Manufacturing Engineering*, Prentice-Hall, p. 208, 1987.
- [3] Bishop, J. F. W., "An Approximate Method for Determining the Temperature Reached in Steady-State Motion Problems of Plane Plastic Strain," *Q. J. Mech. Appl. Math.*, Vol. 9, p. 236, 1956.
- [4] Altan, T., and Kobayashi, S., "A Numerical Method for Estimating the Temperature Distributions in Extrusion through Conical Dies," *Trans. ASME, J. Engr. Ind.*, Vol. 90, p. 107, 1968.

- [5] Lahoti, G., and Altan, T., "Prediction of Temperature Distributions in Axisymmetric Compression and Torsion," Trans. ASME, J. Engr. Materials Technology, Vol. 97, p. 113, 1975.
- [6] Nagapal, V., Lahoti, G. D., and Altan, T., "A Numerical Method for Simultaneous Prediction of Metal Flow and Temperatures in Upset Forging of Rings," Trans. ASME, J. Engr. Ind. Vol. 109, p. 413, 1978.
- [7] Oh, S. I., Rebelo, N. M., and Kobayashi, S., "Finite Element Formulation for the Analysis of Plastic Deformation of Rate-Sensitive Materials in Metal Forming," IUTAM Symposium, Tutzing/Germany, p. 273, 1978.
- [8] Perzyna, P., "Fundamental Problems in Viscoplasticity," Adv. App. Mech., Vol. 9, p. 243, 1966.
- [9] Cristescu, N., *Dynamic Plasticity*, North-Holland, Amsterdam, 1967.
- [10] Zienkiewicz, O. C., Onate, E., and Heinrich, J. C., "Plastic Flow in Metal Forming-I. Coupled Thermal Behavior in Extrusion-II. Thin Sheet Forming," Applications of Numerical Methods to Forming Processes, ASME, AMD, Vol. 28, p. 107, 1978.
- [11] Rebelo, N., and Kobayashi, S., "A Coupled Analysis of Viscoplastic Deformation and Heat Transfer-I. II.," Int. J. Mech. Sci., Vol. 22, pp. 699, 707, 1980.
- [12] Y. C. Yoo, "Hot Workability of Aluminum Alloys," KOSEF, p. 20, 1985.