

근사 상사 이론을 이용한 비축대칭 등온 단조의 가공하중 예측

한정영*, 최철현*, 배원병**, 김영호**, 이종현***

Prediction of the Forming Load of Non-Axisymmetric Isothermal Forging using Approximate Similarity Theory

Jeong Young Han*, Cheol Hyun Choi*, Won Byong Bae**, Young Ho Kim**, Jong Heon Lee***

ABSTRACT

An approximate similarity theory has been applied to predict the forming load of non-axisymmetric forging of aluminum alloys through model material tests. The approximate similarity theory is applicable when strain rate sensitivity, geometrical size, and die velocity of model materials are different from those of real materials. Actually, the forming load of yoke, which is an automobile part made of aluminum alloys(Al-6061), is predicted by using this approximate similarity theory. Firstly, upset forging tests are have been carried out to determine the flow curves of three model materials and aluminum alloy(Al-6061), and a suitable model material is selected for model material test of Al-6061. And then hot forging tests of aluminum yokes have been performed to verify the forming load predicted from the model material, which has been selected from above upset forging tests. The forming loads of aluminum yoke forging predicted by this approximate similarity theory are in good agreement with the experimental results of Al-6061 and the results of finite element analysis using DEFORM-3D.

Key Words : Approximate Similarity Theory (근사 상사 이론), Forming Load (가공하중)

1. 서론

플라스티신(plasticine)은 상온에서의 유동특성이 고온에서의 강의 유동특성과 상사성이 있다고 알려져 있으며 이러한 이유로 인해 모델재료로서 널리 사용되어 왔다. 대부분의 연구는 가공경화지수 또는 변형률속도 민감지수, 기하학적 크기, 마찰조건이 같다는 전제에서 상사성이 연구되었다^(1~2).

Kudo⁽³⁾ 등은 압연판에서 레벨러(leveller)에 의한

판의 곡률변화 해석에서 차원해석의 π -이론을 이용하여 모델재료와 기하학적으로 비상사인 경우에 해석을 시도하였다. 또한 Altan⁽⁴⁾ 등은 가공경화지수가 다른 모델재료로서 에너지 평형의 원리를 도입하여 가공하중을 예측하였는데 실제재료와 모델재료의 시편의 크기 및 다이속도가 같다는 조건하에서 가공하중을 예측하였기 때문에 체적이 큰 경우 제작 및 경제성이 문제가 되었다.

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

** 부산대학교 기계공학부

*** 경남정보대학 기계시스템학부

가공정화지수가 다른 그러나 실제로 이러한 조건을 완전히 만족하는 모델재료를 선정한다는 것은 대단히 어려운 일이다. 최근의 연구에서 π -이론과 에너지평형이론을 이용하여 변형률속도 민감지수, 시편의 크기, 다이속도가 다를 때 단순 업셋 단조하중을 예측하는 방법이 제시되었다⁽⁵⁾.

본 연구에서는 실제 단조 공정에 적용하기 위해 차원해석의 π -이론을 이용하여 변형률속도 민감지수, 기하학적 크기, 다이속도가 다를 때 비축대칭형상의 자동차 알루미늄 부품인 요크(yoke)의 가공하중을 예측하고자 한다. 먼저 세 가지 모델재료와 A1-6061의 구성방정식을 구하기 위해 압축실험을 한 후 업셋 단조 실험을 수행하여 가장 적합한 모델재료를 선정하였다. 그리고 마찰 실험을 수행하여 모델 상사 실험에 적합한 윤활제를 선정한 후 비축대칭 형상인 요크의 가공하중을 예측하였다.

2. 차원해석의 π -이론을 이용한 근사 상사의 일반화⁽³⁾

열간 소성가공에서 일반적으로 가공하중은 다음과 같은 변수들의 영향을 받는다.

$$F = \Phi(\bar{\sigma}_a, \bar{\epsilon}_a, \tau_f, V_D, H_o, H, T, T_m) \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma}_a$ 는 평균유효응력, $\bar{\epsilon}_a$ 는 평균유효변형률속도, τ_f 는 마찰전단응력, V_D 는 다이속도, H_o 는 시편의 초기높이, H 는 일정순간의 시편의 높이, T 는 일정순간 시편의 평균온도, T_m 은 시편의 용점온도를 각각 나타낸다. 식(1)에서 가공하중에 영향을 주는 변수들은 차원해석의 π -이론을 사용하여 5개의 무차원 변수로 줄일 수 있다.

$$\pi_1 = \frac{F}{\bar{\sigma}_a H^2}, \quad \pi_2 = \frac{H_o}{H}$$

$$\pi_3 = \frac{\tau_f}{\bar{\sigma}_a}, \quad \pi_4 = \frac{V_D}{\bar{\epsilon}_a H}, \quad \pi_5 = \frac{T}{T_m}$$

따라서 식(1)은 다음과 같이 무차원 변수로 나타낼 수 있다.

$$\pi_1 = \Phi_1(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) \quad (2)$$

실제재료와 모델재료 사이에 상사성이 만족하기 위해 무차원변수들은 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\pi_{2R} = \pi_{2M}; \quad \frac{H_{oR}}{H_R} = \frac{H_{oM}}{H_M} \quad (3)$$

$$\pi_{3R} = \pi_{3M}; \quad \frac{\tau_{fR}}{\bar{\sigma}_{aR}} = \frac{\tau_{fM}}{\bar{\sigma}_{aM}} \quad (4)$$

$$\pi_{4R} = \pi_{4M}; \quad \frac{V_{DR}}{\bar{\epsilon}_{aR} H_R} = \frac{V_{DM}}{\bar{\epsilon}_{aM} H_M} \quad (5)$$

$$\pi_{5R} = \pi_{5M}; \quad \frac{T_R}{T_{mR}} = \frac{T_M}{T_{mM}} \quad (6)$$

식(3)은 기하학적 상사, 식(4)는 마찰조건을 나타낸다. 식(5)는 (V_{DR}/H_R) 와 (V_{DM}/H_M) 의 비가 같다면 재료내의 평균유효변형률속도 $\bar{\epsilon}_a$ 가 같아진다. 따라서 운동학적 상사가 성립하게 된다. 식(6)은 두 재료사이에 열적 상사를 나타내는 무차원 변수로서 무시하였다. 소재의 기하학적 상사, 마찰 조건, 시편의 크기에 대한 다이속도 비가 같다면 다음과 같은 상사조건이 성립한다.

$$\pi_{1R} = \pi_{1M}; \quad \frac{F_R}{\bar{\sigma}_{aR} H_R^2} = \frac{F_M}{\bar{\sigma}_{aM} H_M^2} \quad (7)$$

식(7)에서 실제재료의 가공하중 F_R 은 다음과 같이 나타낼 수 있으며 임의의 높이감소율에 대한 모델재료의 가공하중 F_M 이 주어지면 그 때의 실제재료의 가공하중을 다음 식에서 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} F_R &= F_M \left(\frac{H_R}{H_M} \right)^2 \left(\frac{\bar{\sigma}_{aR}}{\bar{\sigma}_{aM}} \right) \\ &= F_M \left(\frac{H_R}{H_M} \right)^2 \left(\frac{C_R \bar{\epsilon}_a^{-nR}}{C_M \bar{\epsilon}_a^{-nM}} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $\bar{\sigma}_a = C \bar{\epsilon}_a^n$

3. 실험

3.1 업셋 단조 실험

세 가지 모델재료를 이용하여 업셋 단조의 가공하중을 예측하였다.⁽³⁾

3.1.1 시편 제작

모델재료는 순수 플라스틱인(100%)만 가진 재료(P재)와 순수 플라스틱인(97%)에 라놀린(3%)을 첨가한 재료(PL재), 그리고 순수 플라스틱인(90%)에 라놀린(7%)과 레진(3%)을 첨가한 재료(PLR재)의

세 가지 혼합 플라스틱을 사용하였다. 시편은 모델 재료를 충분히 반죽을 한 후 아크릴판에 넣은 후 고무망치로 잘 충전시킨 후 빼내었다.

3.1.2 압축 실험

응력과 변형률속도 관계식을 구하기 위해 압축 실험을 수행하였다. 시편의 직경과 높이 비는 1:1이고, 모델 재료의 크기는 30mm로 Al-6061의 크기는 15mm로 만들었다. 모델 재료는 배물림 현상을 최소화하기 위해 윤활제로 실링 필름(sealing film)에 바셀린(vaseline)을 발라서 사용하였으며 Al-6061은 흑연(graphite)을 사용하였다.

실험장비는 25kN MTS를 사용하였으며 모델 재료는 상온(20℃)에서 세 가지 다른 다이속도 0.15, 0.3, 3mm/s로 Al-6061은 고온(450℃)에서 0.075, 0.15, 1.5mm/s로 압축실험을 하였다.

실험에서 구한 모델재료와 Al-6061의 응력과 변형률속도 관계식은 다음과 같다.

$$P재 : \bar{\sigma} = 0.209 \epsilon^{-0.046} \text{ (MPa)} \quad (9)$$

$$PL재 : \bar{\sigma} = 0.124 \epsilon^{-0.098} \text{ (MPa)} \quad (10)$$

$$PLR재 : \bar{\sigma} = 0.491 \epsilon^{-0.121} \text{ (MPa)} \quad (11)$$

$$Al-6061 : \bar{\sigma} = 64.9 \epsilon^{-0.153} \text{ (MPa)} \quad (12)$$

3.1.3 엽셋 단조 실험

모델재료 시편의 크기는 높이 대 직경 비가 1:1(30mm:30mm)이고 Al-6061은 1:1(10mm:10mm)로 제작하였다. 모델재료는 상온(20℃)에서 다이속도 0.3mm/s일 때 그리고 Al-6061은 고온(450℃)에서 다이속도 0.15mm/s일 때 높이감소율 50%까지 압축하였다. 모델재료 실험은 윤활제로 탈크 파우더(talc powder)를 사용하였고 엽셋 단조 실험은 흑연을 사용하였다. 모델재료 실험에서는 상사조건을 만족하기 위해 소재의 크기와 다이속도는 엽셋 단조 실험의 2배가 되도록 하였다.

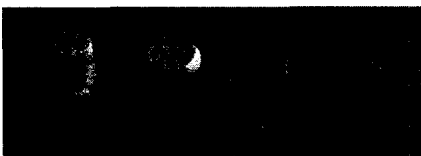


Fig. 1 Appearance of initial and final specimens of model material and Al-6061

모델재료와 Al-6061의 초기 시편과 최종 시편의 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

3.2 요크 단조 실험

모델재료 실험에 적합한 새로운 윤활제를 선정하였으며 엽셋 단조 실험에서 선정된 모델재료를 이용하여 비축대칭형상의 자동차 알루미늄 단조 부품인 요크(yoke)의 가공하중을 예측하였다.

3.2.1 압축 실험

플라스틱은 제작방법, 온도, 반죽정도, 보관방법에 따라 민감하게 반응하므로 P재의 응력과 변형률속도 관계식을 구하기 위해 다시 압축실험을 수행하였다. 모델재료는 상온(20℃)에서 세 가지 다른 다이속도 0.5, 1, 2mm/s로 실험을 하였다. Al-6061은 1차 실험에서 구한 응력과 변형률속도 관계식을 그대로 사용하였다.

실험에서 구한 P재의 응력과 변형률속도 관계식은 다음과 같다.

$$P재 : \bar{\sigma} = 0.301 \epsilon^{-0.099} \text{ (MPa)} \quad (13)$$

3.2.2 마찰 실험

마찰 실험 시편의 크기는 외경 대 내경 대 높이 비가 6:3:2(30mm:15mm:10mm)로 하였다. 모델재료 실험에 적합한 윤활제를 선정하기 위해 합성세제, 실링 필름에 바셀린을 바른 것, 합성세제에 파우더를 2:1로 혼합한 것의 마찰 특성을 조사하였다. 실험장비는 25kN MTS를 이용하였으며 다이속도 0.5mm/s로 압축하였다.

모델재료에 대한 단계별 시편의 형상을 Fig. 2에 나타내었다.



Fig. 2 Appearance of model specimens after ring tests

3.2.3 요크 단조 실험

비축대칭 알루미늄 자동차 부품인 요크의 가공하중을 예측하기 위해 모델재료 실험과 열간 단조 실험을 수행하였다. P재의 초기 소재 크기는 $\phi 32$

> h60mm이고 Al-6061은 $\phi 16 \times h 32$ mm이다. 모델재료 실험은 25kN MTS를 사용하였으며 P재를 이용하여 상온(20℃)에서 다이속도 2mm/s로 실험을 하였다. 그리고 열간 단조 실험은 50ton 유압프레스를 사용하였으며 Al-6061을 이용하여 고온(450℃)에서 1mm/s로 실험을 하였다. 모델재료 실험은 윤활제로 합성세제에 파우더를 2:1로 혼합한 것을 사용하였고 열간 단조 실험은 흑연을 사용하였다. 모델재료 실험에서는 상사조건을 만족하기 위해 소재의 크기와 다이속도는 열간 단조 실험의 2배가 되도록 하였다.

모델재료 실험장비는 Fig. 3에 열간 단조 실험 장비는 Fig. 4에 나타내었으며 초기 소재와 최종 단조품의 형상을 Fig. 5에 나타내었다.



Fig. 3 Experimental setup for model materials



Fig. 4 Experimental setup for Al-6061



Fig. 5 Final appearance obtained by a model material test and FEM simulation

4. 결과 및 고찰

4.1 업셋 단조 실험

업셋 단조 실험에서는 높이 감소율 10% 간격으로 측정된 모델재료의 단조 하중, 기초 실험에서 구한 세 가지 모델재료와 Al-6061의 재료상수와 변형률속도 민감지수(식(9-12))를 식(8)에 대입하여 가공하중을 예측하였다. 여기서 평균변형률속도는 다이속도를 시편의 현재높이로 나눈 값으로 계산하였다.

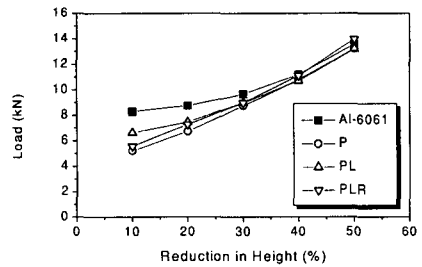


Fig. 6 Prediction of upset load of Al-6061 at die velocity=0.15mm/s

세 가지 모델재료로 예측된 하중과 실제 재료의 하중을 Fig. 6에 나타내었으며 세 가지 모델재료로 예측한 값은 성형 초반부에는 실제 하중보다 오차가 크게 나타나지만 성형 후반부로 갈수록 실험치와 잘 일치하였다. 따라서 모델재료로서 PL재와 PLR재보다 비교적 제작하기 쉬운 P재가 적합하다.

4.2 요크 단조 실험

플라스틱신은 온도와 시간 그리고 반죽의 정도에 따라 물성치가 민감하게 변하므로 모델실험 직전에 기초실험을 수행해야 할 필요성이 있다. 따라서 업셋 단조 실험 결과 가장 적합한 모델재료로 선정된 P재의 응력과 변형률속도 민감지수를 구하기 위해 다시 기초실험을 수행하였다.(식(13))

모델재료 실험 시 윤활제로 사용된 파우더가 분말 형태이므로 다이에 골고루 묻지 않고 떨어져 내리는 단점이 있었다. 이러한 결점을 보완하기 위해 새로운 윤활제의 필요성이 제기되어 마찰 실험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 액체 합성세제와 합성세제에 파우더를 혼합한 것 둘 다 마찰상수 값이 약 0.2~0.3의 값을 나타내었으며 열간에서의 흑연과 상사성을 보였다. 합성세제에 파우더를 혼합한 것은 어느 정도 점성을 가지면서 액

체합성세제보다 다이와의 분리가 비교적 용이하므로 모델재료 실험에 적합한 윤활제로 판단된다.

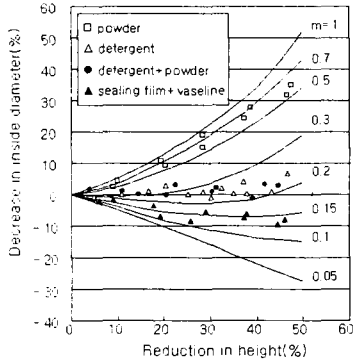


Fig. 7 Variation of friction factors for various lubricants

업셋 단조 실험과 마찬가지로 방법으로 비축대칭형상의 자동차 알루미늄 단조 부품인 요크의 가공하중을 예측하였다. 여기서 Al-6061과 P재의 응력과 변형률속도 관계식은 식(12)과(13)을 사용하였으며 평균변형률속도는 다이속도를 소재의 최대 높이로 나눈 값으로 근사화하여 사용하였다.⁽⁶⁾ 그리고 FEM 상용소프트웨어인 DEFORM-3D를 사용하여 등온:450℃, 다이속도: 1mm/s, 마찰상수(m):0.3 으로 시뮬레이션하여 실제 실험치와 비교하였으며 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

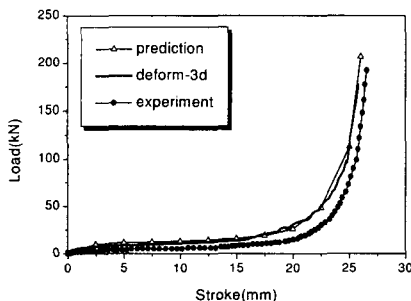


Fig. 8 Prediction of forging load of yoke at die velocity = 1mm/s

열간 단조 실험 시 가열로 인한 소재의 열팽창으로 실제 행정거리가 약 0.4mm 정도 늘어났다. 이 양을 고려해 볼 때 모델재료로 예측 값은 실제 실험

힘치의 최대 하중과 비교적 잘 일치하였다. 그리고 모델 재료로 예측한 값은 FEM 해석 값과 거의 유사한 경향을 보였다.

5. 결론

근사 상사 이론을 이용하여 변형률속도 민감지수와 기하학적 크기, 다이속도가 다를 때, 비축대칭 알루미늄 자동차 부품인 요크의 가공하중을 예측하였다. 모델재료 실험을 통해 예측된 가공하중은 실제 Al 단조 실험치와 잘 일치하였으며 FEM 상용소프트웨어인 DEFORM-3D에 의한 해석치와도 유사한 경향을 보였다.

후기

본 연구는 부산대학교 기계기술연구소를 통한 한국학술진흥재단의 연구비의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 조남춘, 김남환, 이성호, 홍성식, 이종수, "해머 단조 공정의 Physical Modeling-예비성형체 설계에 의한 대형 단조품 성형," 소성가공학회 추계 학술대회 및 심포지움 논문집, pp. 35-45, 1992.
2. 이종헌, 김영호, 배원병, 이원희, "고온 연강 유동 특성을 연구하는 모델 재료 개발에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, 제17권, 제5호, pp. 1161-1171, 1993.
3. 工藤英明, 會田長一郎, "塑性加工における相似則 (I)," 塑性と加工, 第13巻, 第141號, pp. 739-744, 1972.
4. Altan, T., Henning, H. J., Sabroff, A. M., "Use of Model Material in Predicting Forming Loads in Metal Working," Trans. of ASME, J. of Engineering for Industry, pp. 444-452, May, 1970.
5. 김영호, 배원병, 이종헌, "MMT를 이용한 Al-7075 열간 업셋 단조의 가공하중 예측," 한국소성가공학회지, 제2권, 제3호, 통권 제4호, pp. 37-50, 1993.
6. "DEFORM-3D Version 3.0 User Manual," Scientific Forming Technologies Corporation, pp. 56, 1999.