

# 예비성형체형상이 알루미늄합금의 열간단조공정에 미치는 영향

권영민\*, 이영선\*\*\*, 송정일\*\*, 이정환\*\*\*

## The Effect of Preform Shape for Hot-forging Process of Aluminum-alloy

Y.M. Kwon, Y.S. Lee, J.I. Song, J.H. Lee

**Key Words:** Hot-forging Process(열간단조공정), Preform Shape(예비성형체형상), Optimized Dies(최적화된 금형), Non-isothermal Analysis(비등온 해석)

### Abstract

A effective and accurate method of hot-forging process is essential to the design of optimized dies as well as workpiece of intial shape. the former is achieved by a proper forging sequence with invokes serious problem like excessive load and die wear, die failure, underfilling and lap defects. the latter is achieved by a proper preform design of case I, case II, case III. metal forming processes of aluminum-alloy forged at an effective strain and temperature are analyzed by the finite element method. the non-isothermal analysis have been compared with optimized in terms of preform shape

### 1. 서론

금속의 변형은 상온에 비해 고온에서 재료의 항복강도는 낮고 가공경화 현상이 없으므로 소성변형에 요구되는 유동응력은 감소한다. 유동응력의 감소에 따라 소모되는 성형에너지가 낮으므로 열간 단조는 장비의 능력이 제한적이고 대변형이 요구되거나 복잡한 형상의 부품을 제조할 때 유리한 공정이다. 열간단조는 이러한 장점들로 인해 항공기나 자동차 부품의 생산에 널리 이용되고 있다. 항공기산업에 사용되는 단조품들은 소재별로 분류하면 크게 기체부품에 주로 사용되는 알루미늄합금과 엔진부품에 사용되는 티타늄합금, 내열합금으

로 구분할 수 있다. 기체부품으로 주로 사용되는 알루미늄합금은 경량일 뿐 아니라, 열전전도, 전기전도도, 내식성이 우수하고 비강도가 큰 특징을 가지고 있다. 특히 항공기용 알루미늄 합금은 강도, 인성, 내응력 부식 균열특성, 파괴특성이 우수한 합금을 사용하여 재료의 신뢰성과 안전성을 확보하여야 한다. 열간 단조에서 최적공정을 설계하고 결함 없는 제품을 만들기 위해서는 재료의 유동양상과 금형충진, 응력과 변형률, 변형속도, 온도분포 등에 대한 정량적 분석이 요구되며, 단조성이나 유동응력 등과 같은 재료의 성질, 마찰과 윤활, 금형에 의한 냉각효과, 성형하중, 금형과 재료의 초기온도 등의 가공조건에 대한 면밀한 분석이 요구된다.<sup>(1)</sup>

본 연구에서는 제조공정 단축 및 단조품의 기계적 특성 증대를 위해 FEM을 이용한 정확한 예비성형체의 형상설계를 통해 열간단조 공정을 정량

\* 창원대학교 기계공학과 대학원

\*\* 창원대학교 기계공학과

\*\*\* 한국기계연구원

적으로 비교, 분석하였다.

### 2.1 열간단조 금형설계

단조금형을 설계하려면 소재의 강도와 연성, 변형 속도와 온도에 대한 민감도, 마찰특성, 소재의 형상과 복잡성 등에 대한 지식이 필요하다. 단조하중이 크고 특히 가공 허용오차가 작은 경우에는 금형의 변형이 중요하게 고려되어야 한다.<sup>(2)</sup> 단조금형 설계에서 가장 중요한 법칙은 저항이 최소인 방향으로 소재를 유동시켜 소재가 금형 공동부를 적절히 충전시키도록 분산시키는 것이다. 단조단계의 수는 일반적으로 형상이 복잡할수록 증가하지만 보통 부스터(buster), 블락커(blocker), 피니셔(finisher)의 세 단계로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 적절한 예비성형체의 형상설계를 통해 피니셔금형만으로 최종제품을 성형할 수 있는 방향을 모색하였다. 금형설계는 단조품설계에서 결정된 빼기구배, 코너반경과 필렛반경, 두께 및 길이공차, Mismatch공차 등의 사항을 고려하여 금형강도와 결육(Underfill)등과 같은 단조결함이 발생하지 않도록 플래시 랜드(Flash Land)부와 거터(Gutter)를 설계하여 단조품의 치수를 최대한 정밀하게 성형하기 위해 열수축과 탄성변형등을 고려하여 치수설계를 하였다. Fig. 1은 카티아(CATIA)에서 설계한 단조품의 상·하 금형을 나타내고있다.

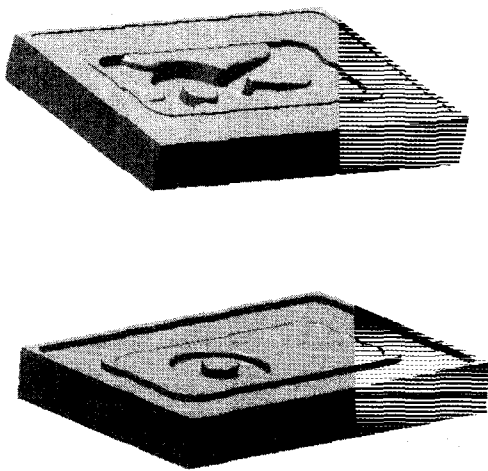
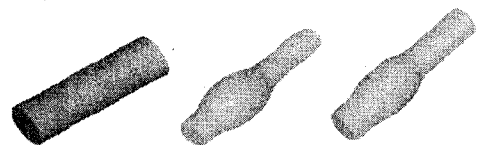


Fig. 1 Upper and lower die designed by CATIA

### 2.2 단조품 및 예비성형체 형상 설계

단조공정을 설계하기 위해서는 기본적으로 필요한 조건들이 있다. 단조에 사용될 장비, 소재선정, 단조를 열간으로 혹은 등온으로 할 것인지 등인데 이중에서도 주어진 조건도 있고 고정된 조건도 있으며 선택을 해야할 조건도 있다. 이러한 여러 가지 공정변수 가운데 초기 소재의 형상과 적절한 금형설계를 통해 최적 단조공정설계 방향을 모색하였다. 단조품의 최종형상과 치수는 기계가공품의 형상과 치수를 기본으로 하여 설계하였으며 예비성형체의 형상 설계는 단조품의 평면 단면적(plane view area)과 제품크기를 기준으로 한 빌렛형상( $\phi 60 \times 190\text{mm}$ )의 Case I 을 설계하였으며 Case II 는 앞에서 설계한 단조품을 10 mm간격으로 단면적을 구한 후 반지름으로 환산하여 예비성형체를 설계하였다. 최종적으로 Case III는 Case II의 단조 해석 수행 후 최종상태에서의 부위별 충전상태를 관찰하여 미충진 부위 및 과충진 부위의 변형 이력을 역추적하여 예비성형체를 재 설계하여 단조 해석을 수행하였다. 결론적으로 적절한 예비성형체의 설계를 통한 단조공정의 해석은 소재유동에 대한 정확한 예측과 성형하중 및 결함발생 가능성을 미리 예측할 수 있으므로, 실제로 금형을 제작하기 이전에 금형형상과 단조품의 형상을 수정할 수 있었다. Fig. 2 는 카티아(CATIA)를 이용해 설계한 예비성형체의 형상을 나타내고 있다.



( $\phi 60 \times 190\text{mm}$ ) (max.dia.  $\phi 58$ ) (max.dia  $\phi 59$ )

Fig. 2 Preform mode of Case I, Case II, Case III

### 3.1 예비성형체 형상에 따른 3차원 유한요소해석

단조품의 형상적인 특성은 단순하면서도 생성하기 어려운 여러개 자유곡면으로 이루어져 있다. 특히 범용 유한요소 프로그램에서 제공하는 전처리과정

(pre-processor)을 이용한 단조품의 모델링은 그 방법 및 절차가 까다로우며, 솔리드모델의 생성에 많은 시간이 소요되는 단점을 가진다. 이러한 단점을 보완하고, 보다 효율적인 모델링을 위해 본 연구에서는 CAD/CAM/CAE전문 소프트웨어인 CATIA를 이용하였다. 성형해석은 금속유동(metal flow), 변형률, 다이와 빌렛 사이의 접촉압력 분포를 예측하기 위해 강소성 유한요소해석을 사용하였으며 대상품은 3차원 형상이므로 2차원 해석을 통해서서는 정확한 분석이 어렵기 때문에 본 연구에서는 FEM 해석 프로그램 가운데 3차원 해석이 가능한 DEFORM-3D를 이용하여 해석을 수행하였다. 유한요소해석에서는 알루미늄 7050을 단조소재로 하여 Case I, Case II, Case III의 예비성형체 형상에 따른 변형과 온도 분포를 강소성 유한요소법(rigid plastic finite element method)으로 해석하였다. 해석조건은 축대칭 형상이므로 1/2단면만을 비등온(non-isothermal)해석하였으며, 제품의 표면요소 수는 Case I, Case II, Case III의 경우 동일하게 미세한 부분까지 분석을 위해 표면부에 5,000개의 메쉬(mesh) 생성시켰고 상·하부 금형의 메쉬(mesh)는 형성하지 않고 온도를 일정하게 입력하여 해석을 수행하였다. 소재가 변형률속도에 따라 민감한 반응을 나타내므로 각각의 경우에 대한 실험값을 보간하여 사용하였으며 전단 마찰상수는 열간가공 상태인 0.2로 가정하였다.<sup>(3~8)</sup> Fig.3 은 DEFORM-3D의 전처리과정(pre-processing)을 나타내고 있다.

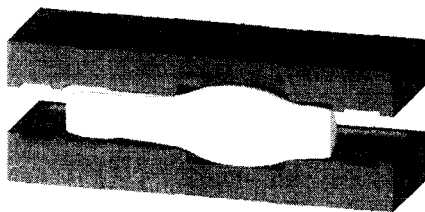


Fig. 3 DEFORM-3D modelling

### 3.2 3차원유한요소 해석 결과

열간 성형가공시 열적·기계적 공정변수의 이력을 고려하기 위해 강소성 유한요소법을 사용하여 수

행하였다. Fig. 2 와 같은 세가지 형상을 기준으로 해석을 수행하였다. Case I의 경우 초기 압출빌렛( $\phi 65\text{mm}$ )에서 양측편차 2.5mm가공한 빌렛( $\phi 60 \times 190\text{mm}$ )으로 가정하여 해석하였다. 성형중의 유효변형률 분포는 Fig. 4 과 같으며 성형전반부와 중반부에서는 캐비티(cavity)가 제품길이방향으로의 충진이 지배적이다. 점차 폭 방향의 유동되는 현상을 나타내고 있다. 그런데 길이방향으로의 유동은 금형 상·하의 캐비티를 따라서 흐르게 된다. 이렇게 되면 다이의 곡면부위에 소재의 급격한 유동이 발생하여 국부적 온도상승과 다이 마모가 발생한다. 또한 윤활이 나빠질 것으로 예상된다. Case II의 경우 최종 단조품과 동일한 체적으로 설계한 경우로 성형중의 유효변형률 분포는 Fig. 5 와 같으며 전반적으로 Case I에 비해 원활한 유동형태를 보이고 제품 폭 방향의 캐비티가 완전 충진 전에 플래쉬(flash)가 발생하는 것을 알 수 있다. 해석결과 Case II의 경우 폭 방향 캐비티의 미충진이 발생하였다. 이러한 결과로 Case II의 경우 길이방향의 유동에 비해 폭 방향의 캐비티의 충진이 늦어짐을 알 수 있다. Case II의 해석결과에서 폭부위 캐비티에 미충진이 발생하므로 Case III에서는 미충진부위의 반경을 증가시키고 길이를 감소시켜 성형 해석을 수행한 결과 길이방향과 폭 방향의 다이 채움이 양호함을 알 수 있었다. Fig. 6 은 Case III의 성형중의 유효변형률 분포를 나타내고 있다. 앞에서 수행한 Case I, Case II, Case III의 성형해석결과 최종상태에서의 부위별 온도분포를 Fig. 7 에 나타내었는데 Case I이 전체적으로 부위별 온도가 가장 높아짐을 알 수 있으며 단조품의 폭 방향 위치인 3포인트(point)와 플래시 부위인 8, 9, 10포인트(point)의 온도가 다른 부위에 비해 높아짐을 알 수 있다. 이러한 결과로 유효변형률이 높은 부위에서 온도 또한 높아짐을 알 수 있었다. Fig. 8 은 성형해석 완료 후의 초기 소재의 형상에 따른 하중분포를 나타내고 있는데 압출바 형상의 Case I 경우 약 2,200톤의 성형하중이 소요되었으며 Case II는 제품의 폭 방향으로 미성형이 발생됨에 따라 성형하중은 약 1,450톤이 소요되었으며 Case II의 미 성형부위를 고려하여 재 설계한 Case III의 경우 Case I에 비해 약 300톤의 성형하중이 감소하는 경향을 나타내고 있다.

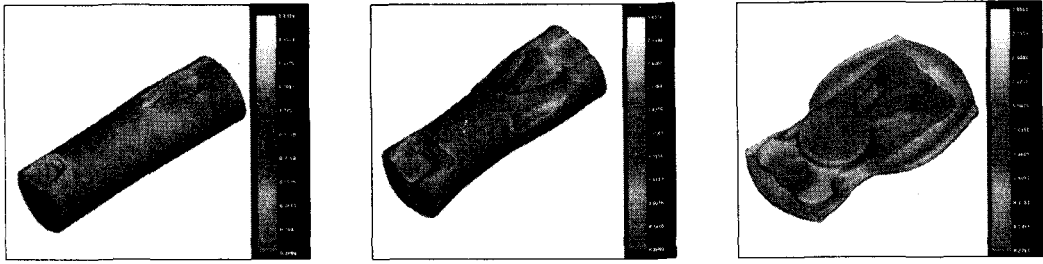


Fig. 4 Effective strain distribution at each stroke in Case I ( forging temp.400°C )

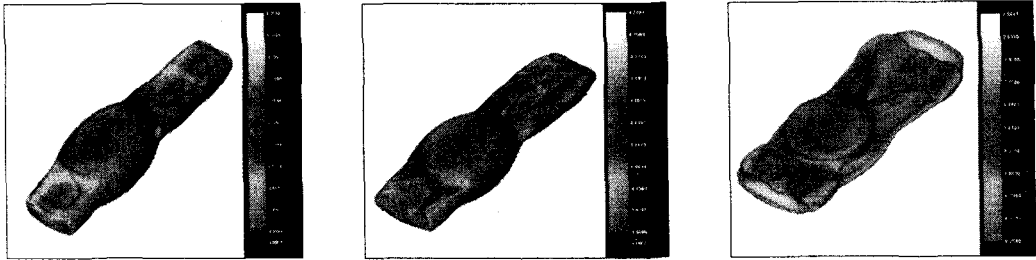


Fig. 5 Effective strain distribution at each stroke in CaseII ( forging temp.400°C )

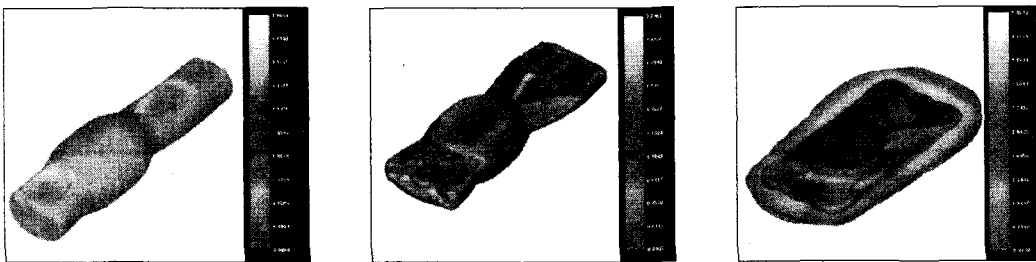


Fig. 6 Effective strain distribution at each stroke in CaseIII ( forging temp.400°C )

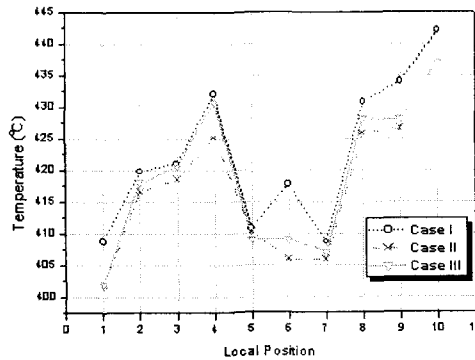
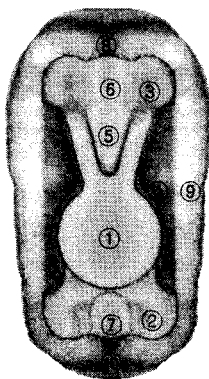


Fig. 7 Final temperature distribution according to preform mode of Case I, CaseII, CaseIII

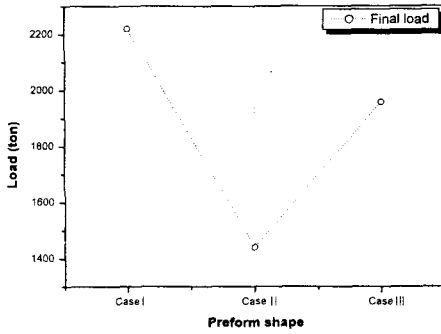


Fig. 8 Final load according to preform mode of Case I, Case II, Case III

#### 4. 결론

본 연구에서는 유한요소법을 이용해 알루미늄합금의 열간 단조시 적절한 금형설계와 예비성형체의 형상에 따른 열간단조해석을 수행하였으며 항공기 및 자동차의 열간 및 등온단조 공정설계에 유한요소법을 활용하여 공정에 필요한 정보를 미리 구하는 것은 시행착오를 줄여 생산단가 및 공정개발 시간을 줄일 수 있음을 알 수 있었으며 해석결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 기존의 현장중심적인 열간단조공정을 3차원 유한요소법을 이용하여 성형시 초기소재의 형상별 유동양상 및 최종 단조품의 기계적특성에 지배적인 영향을 미칠 수 있는 부위별 유효변형률 및 온도변화를 정량적으로 분석하였다.
- (2) 적절한 예비성형체 형상구현을 통해 장비의 성형하중을 약15% 정도 감소시킬 수 있었으며 및 단조시의 변형열 발생량을 감소시킬 수 있었다.

- (1) T. Altan, S.I. Oh and H.L. Gegel, 1983, "Metal Forming: Fundamentals and application", ASME series in Metal Processing.
- (2) K. Lange, 1985, "Handbook of Metal Forming", McGraw-Hill Book Co..
- (3) 이영선, 이정환, 1999, "Al 합금 정밀단조를 위한 금형설계 및 공정조건의 영향", 한국정밀공학회지, Vol. 16, No. 11, pp. 166~173.
- (4) 이정환, 정형식, 이영선, 이상용, 1994, "항공기용 Al합금의 정밀단조기술," 기계와재료 제6권, 제2호 pp 46~59.
- (5) Male.A.T and Depierre.V., "The Validity of Mathematical Solutions for Determining Friction from the Ring Compression Test," ASME Paper No 69- W. A/Lub-8.
- (6) C.H.Lee, T.Altan, 1972, "Influence of Flow Stress and Friction upon Metal Flow in Upset Forging of Rings and Cylinders," J. of Engineering for Industry, Trans. of the ASME, Aug., pp.775~782,
- (7) D.Bhattacharyys and R.H.Brown, 1980, "Sensitivity of Ring-Compression Test," The International Symposium on Metalworking Lubrication, Aug., pp. 23~30.
- (8) Goetz.R.L., Jain.V.K., Morgan.J.T., 1991,"Effects of Material and Processing Condition upon Ring Calibration Curves," Wrights-Patterson AF-B Wear 1, Mar., pp. 71~86.