

항공기용 Al합금 단조품의 특성 향상을 위한 단조 공정 설계

이영선* · 이정환*

Forging Process Design to Improve the Properties of Al Alloy Forged Part for Aerospace

Y. S. Lee and J. H. Lee

Abstract

Fatigue strength, electrical conductivity and stress-corrosion-cracking resistance are considered as important factors at aircraft Al alloys, therefore Al7050 alloy has been developed to improve such properties. However, hammer-forged Al7050 parts showed the undesirable structures such as severe local grain coarsening and inhomogeneous material flow, resulted in the degraded mechanical properties. In this paper, process conditions are investigated for elimination of the grain coarsening and improved material flow during forging process by both of experiments and FEM analysis. Particular interest has been given to understand role of preform shape on the grain coarsening behavior and magnitude of the hammer forging load. The use of preform has been beneficial for reduction of the forging load and elimination of the grain coarsening. However, in the cases of as received bar and the round bar, which was machined to 2.5mm thickness in surface layer, some degree of local grain coarsening behavior has been observed. The optimized preform shape could be properly designed by applying the FEM simulation.

Key Words : Al7050 Alloy(Al 7050 합금), Hammer forging(해머 단조), Grain Coarsening(결정립 조대화), FEM(유한요소해석), Process Design (공정 설계), Preform(예비 성형체)

1. 서 론

일반적으로 단조기술은 동일한 형상의 제품을 빠른 시간 내에 대량생산을 할 수 있도록 하기 위해 가능한 한 최종 제품과 동일한 형상의 제품을 제조하는데 필요한 기술개발이 주력을 이루고 있다. 그러나, 항공산업용 단조품의 경우는 대량생산을 목적으로 하는 것 보다는 제

품의 요구 특성 만족을 위해 사용되고 있다. 그 예로 여객기의 주익(Main Wing) 1개에 사용되는 Al 단조품의 경우는 500종류를 초과하고 있으나 그 형상은 모두 다르다. 따라서, 형 단조에 필수적으로 사용되는 금형 또한 제품수와 동일한 수준으로 필요하나 제품은 비행기 생산 수량과 비교해 보면 상대적으로 매우 소량에 불과하다. 그러므로, 항공기용 단조품의 경우는 기계가공품과 원소

* 한국기계연구원 재료공정연구부

재에 비해 정적 강도는 20~30% 향상되며, 동적 특성(피로 강도 등) 향상을 통한 경량화, 안정성, 신뢰성 만족을 위해 적용되고 있는 것이다. 또한, 항공기용 단조품에서는 형상의 정밀화 보다는 오히려 품질의 안정적 확보가 중요시되고 있는데, 이는 항공기용 단조품의 형상들이 사용되는 부위 따라 유사한 형태를 갖지만, 중량 감소를 위해 설계 단계에서 최대한 불필요한 부위를 제거하기 때문에 사용 부위에 따라 형상이 모두 다르게 되어 부품 수가 매우 다양하다. 따라서, 항공기용 단조품에서는 실행형상(Net Shaping)을 추구하는 타 산업에 비해 공통적인 형상으로 단조품을 설계함으로써 금형비를 감소시키고 특성을 향상시키는 방향으로 개발이 이루어지고 있다.

2. 단조품 표면에 발생하는 조대 결정립 성장층

항공기용 Al합금 단조품은 운항 중에 받게 되는 반복적인 피로하중에 견디는 특성이 가장 중요한 부분이기 때문에, 타 산업 기계 부품에는 목인되는 표면 결정립 조대화 문제가 제어되지 않으면 요구 특성을 만족할 수 없다. 항공기용 Al합금 단조품의 경우는 ASTM E340, ASTM E3, MIL-A-2771D, MIL-H-6088의 규격에 의해 로제트(Rosette) 형태의 공정 용융상, 조대한 비금속 개재물과 기타 불균일한 조직이 형성되지 않도록 제품을 제조하여야 한다. 그러나, 일반적인 제조 공정을 이용하면 그림 1과 같이 제품 표면에 3~5mm 깊이의 조대한 결정립 성장층이 형성된다. 이러한 비정상 조대 결정립 층은 인장특성과 피로특성, 응력 부식 특성(Stress Corrosion Cracking)을 저하시켜 부품의 조기 피로 파괴의 원인이 된다. 실제로 현재 수입되고 있는 일부 외산 단조품의 경우도 이러한 조대 결정립 성장층이 존재하고 있는 경우도 보고 되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 조대 결정립 성장층의 발생 원인을 규명하여 우수한 단조품을 제조할 수 있는 제조 공정을 개발하고자, 예비실험을 통하여 결정립 성장에 영향을 주는 인자(변형률, 온도 등)들에 대해 분석을 수행한 후, 실 단조품의 단조 공정에서 변수들의 영향을 3D-FEM 해석을 이용하여 분석을 수행함으로써 실 단조품 제조 공정을 설계하는데 필요한 기준을 설정하고자 하였다.

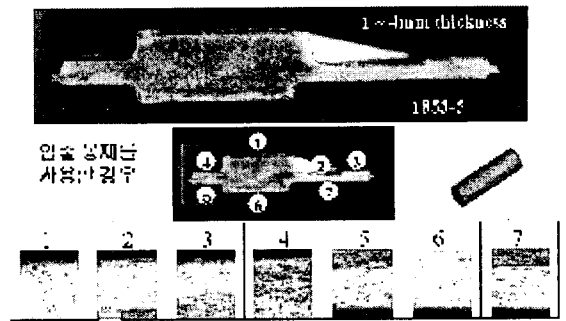


Fig. 1 Micro-structure of surface grain coarsening generated in forged part (Forging Temperature : 430°C)

3. 실험 및 이론해석

3.1 예비실험 및 공정변수

결정립 성장층이 발생하는 원인 분석을 위해 원소재 조직부터 단조 공정 순서에 의거하여 각 공정간 조직의 변화를 관찰하였다. 사용된 원소재의 조직은 그림 2와 같으며 단조를 위한 가열 공정의 영향을 분석하기 위해 그림 3과 같이 가열온도를 변화시켜 단조 가열 공정의 영향을 분석하였다. 분석 결과 단조 가열 온도가 450°C 이상 부터는 단순 가열 공정에서부터 비정상층이 발생됨을 알 수 있었다. 따라서, 단조온도는 430°C이하로 선정하여야 함을 알 수 있었다. 따라서, 가열온도를 430°C로 선정하여 열간에서 단조를 한 후 조직을 그림 4와 같이 분석하였다.

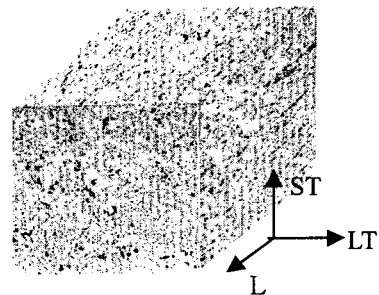
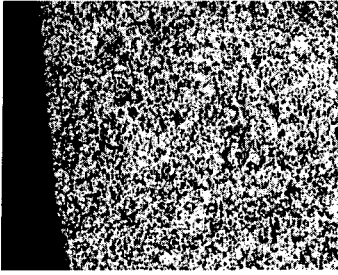
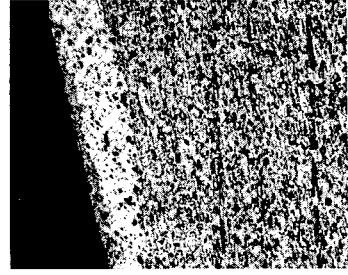


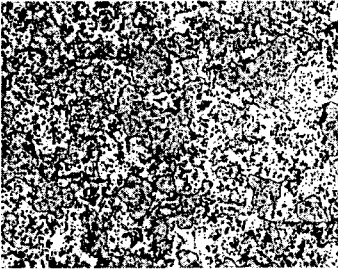
Fig. 2 Micro-structure of Al7050 Alloy (as-received)



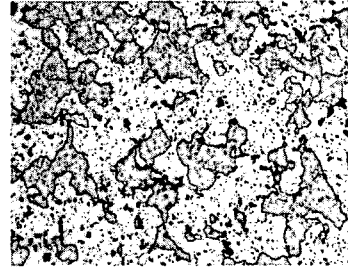
(Surface, 430°C-30min.)



(Surface, 480°C-30min.)



(Inside, 430°C-30min.)

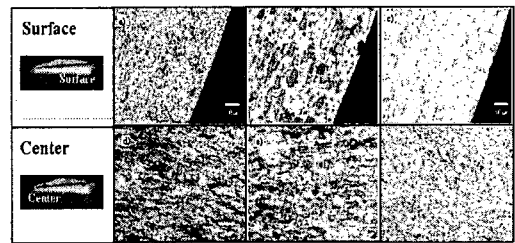


(Inside, 480°C-30min.)

Fig. 3 Micro-structure of raw material according to the heating for hot forging

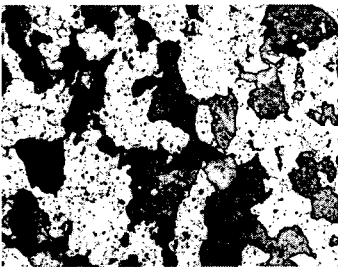


(Surface, 450°C-30min.)



(as-forged) (as-solution) (as-aging)

Fig. 4 Micro-structure of upsetted specimen (Forging Temperature : 430°C)



(Inside, 450°C-30min.)

이상의 결과로부터 결정립 성장층의 원인이 단조온도에 있음을 알 수 있었다. 그러나, 실 단조품을 제조한 결과는 그림 1에서 볼 수 있었던 것과 같이 여전히 결정립 성장층이 존재하고 있었다. 이와 같은 결과가 나타나게 된 것은 예비 실험에서 사용된 성형기는 유압프레스이며, 실제품 단조에 사용된 성형기는 해머(Hammer)이었던 점과 원소재의 단조 방향이 서로 다른 점이 원인이 될 수 있는 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 실 단조 공정에서 발생하는 문제점을 해결하고자 그림 5에서 볼 수 있는 것과 같은 예비성형체를 이용함으로써, 결정립 조대화 현상을 억제할 수 있었다.

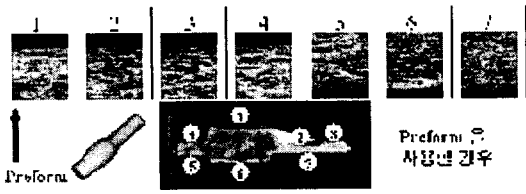
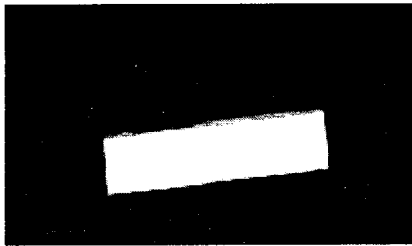


Fig. 5 Micro-structure of forged part when a preform is used

3.2 3차원 유한요소해석을 이용한 공정 변수 분석

연구 대상품과 같은 3차원적인 형상을 갖는 제품의 경우는 2차원 해석으로는 분석이 곤란하기 때문에 3차원 해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하였다. 해석에 사용된 컴퓨터는 2-CPU가 탑재되어 있는 고성능 컴퓨터로 계산시간을 향상시키기 위해 병렬계산을 수행하였다. 그림 6은 3차원 해석을 위한 3차원 모델을 나타내는 것으로서 압출봉재를 이용한 경우와 예비성형체를 이용한 경우를 보여주고 있다.



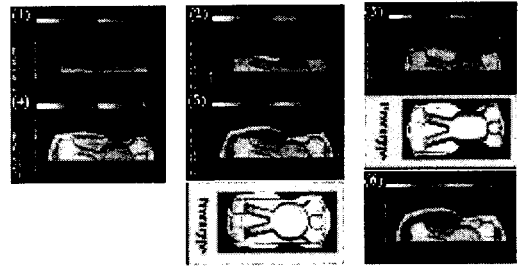
(Extruded bar)



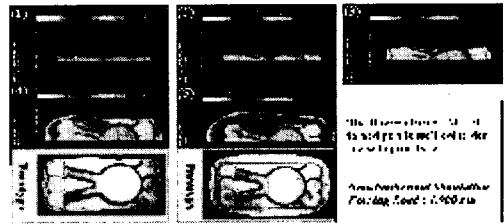
(Preform)

Fig. 6 3D-model of extruded bar and preform

해석에 사용된 모델의 요소 수는 100,000개로서 소재 표면의 온도의 변화를 관찰하기 위해 비등온 해석을 수행하였다. 그러나, 금형에는 메쉬(Mesh)를 형성하지 않고 해석을 수행하여 계산 시간을 단축시키고자 하였다. 그림 7은 해석의 진행 결과를 나타내는 사진으로 실 단조품의 형상과 좋은 일치를 보이고 있다.

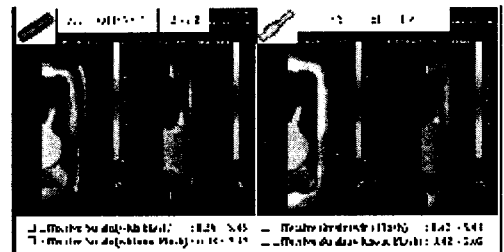


(Extruded bar)



(Preform)

Fig. 7 Deformation patterns and prototype



(Bar)

(Preform)

Fig. 8 Comparisons of effective strain of forged part

그림 8은 단조품의 부위별 변형을 분포로서 봉재를 사용할 경우와 예비성형체를 이용할 경우를 비교하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 예비성형체를 사용하게 되면 변형률의 부위별 차이가 감소되며 변형률이 전체적으로 증가된다. 변형률이 증가되는 것은 결정립의 성장을 억제하는 효과를 얻을 수 있는 효과가 있으므로 예비성형체의 이용이 결정립 조대화에 효과가 있음을 말해주고 있다. 또한, 그림 9는 단조품의 부위별 온도 분포를 비교하고 있는 것으로 예비성형체를 사용하게 되면 표면부위 온도가 10℃이상 저하되고 있는데, 온도 저하는 변형률 증가와 동일하게 결정립 성장 억제 효과를 얻을 수 있는 인자이므로 예비성형체의 이용에 대한 효과를 기대할 수 있다.

후 기

본 연구는 항공기 증기거점과제인 “고강도 구조용 단조품 개발”과제로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

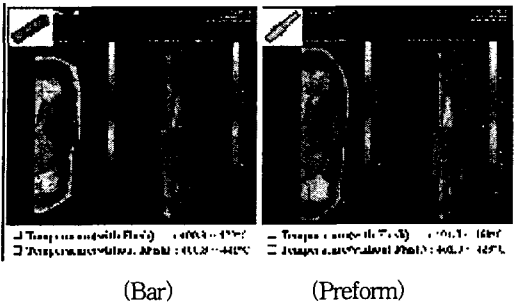


Fig. 9 Comparisons of temperature of forged part

4. 결 론

항공기용 Al합금 단조품의 특성 향상을 위해 실험과 유한요소해석을 이용하여 수행한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 단조품의 표면에 발생하는 결정립 성장은 실험과 이론 해석 결과 변형률과 온도에 의해 그 생성원인을 밝힐 수 있으며 3차원적인 단조품의 경우는 영향 인자들의 부위별 분포 균일화가 중요함을 알 수 있었다. 이와 같은 이유로 예비성형체를 이용하는 공정 또한 효과가 있음을 알 수 있었다.

(2) 그러나, 원소재를 단순 열처리를 통하여 조직 변화를 관찰한 결과, 일정 온도이상에서는 원소재의 가열에 의해서도 표면 결정립 조대화 현상이 발생되고 있었다. 이는 원소재 제조 공정시에도 결정립 미세화를 위한 공정 제어가 필요함을 말해주고 있다.

참 고 문 헌

- [1] K.P. Rao, K. Sivaram, J. Mats. Proc. Technol. 29(1992), p. 91
- [2] L.C. Lim, H.S. Fong, J. Mats. Proc. Technol. 23(1990), p. 211
- [3] W. Weronki, A. Gontarz, Zb. Pater, J. of Mats. Proc. Technol. 92-93(1999), pp. 50-53

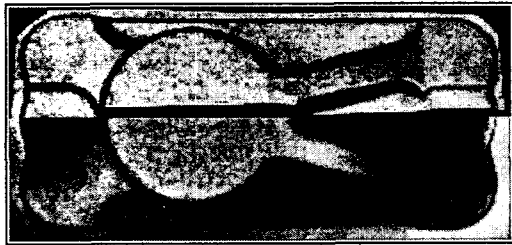


Fig. 10 Surface grain coarsening area of forged part (upper photo) and low effective strain(lower)

그림 10은 단조품 표면에 발생된 결정립 성장층의 위치와 유한요소해석에 의해 얻은 부위별 유효변형을 분포를 나타내고 있는데, 결정립 성장이 발생된 부위는 유효변형률이 다른 부위에 비해 상대적으로 낮은 수준을 나타내고 있다. 따라서, Al합금 단조품에서 발생하는 결정립 성장은 다른 변수들의 영향과 함께 결정립 성장을 억제할 수 있는 인자로 임계 변형률이 존재하고 있음을 알 수 있다. 그림 11은 이상의 결과를 이용하여 제조된 단조품의 외관을 나타내고 있다.

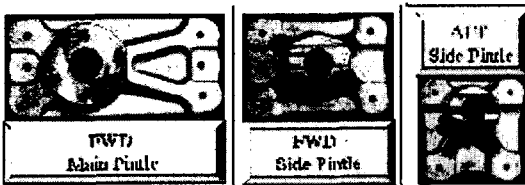


Fig. 11 Prototype manufactured by hot forging