

# 경사부를 갖는 A1 7175 대형 플랜지 단조품의 복합성형공정 개발

이경훈, 은일상, 이중억\*, 정덕진\*  
국방과학연구소, \*(주)풍산

## 요 약

일반적으로 밀폐 형단조공정에서 약 10,000톤의 성형력이 필요한 직경이 540mm인 플랜지 형태의 알루미늄 7175 합금 단조품을 2,500톤 프레스에서 단조하기 위한 공정연구를 하였다. 장비의 성형력 부족을 극복하기 위하여 업셋단조와 기계가공 및 전방압출을 조합한 복합성형공정을 제안하였으며, 복합공정은 실제재료를 이용한 ¼ 축소 모델 실험과 유한 요소 해석으로 그 타당성이 판단되었고, 선정된 프레스에서 실물 크기의 플랜지 단조 가능성을 확인하였다.

### 1. 서 론

항공우주 산업의 발달에 따라 고강도 알루미늄 합금 단조기술<sup>1,2,3)</sup>의 국산화 개발이 요구되고 있으나 국내의 알루미늄 합금 단조기술 및 장비는 매우 열악한 실정에 있다. 특히 유도탄 기체 및 추진기관의 경량화 구조재로서 대형 링롤 단조 및 형단조품의 국산화 개발을 위하여 7175 합금이 개발되었고<sup>4,5)</sup> 이 합금의 대형 형단조품 개발을 위한 국내 보유 단조장비를 조사한 결과 10,000톤 수압프레스(한국 중공업)와 35톤 카운터블로우 해머(삼미금속)가 확인되었다. 그러나 10,000톤 프레스는 개방 형단조를 위한 전용장비로서 밀폐 형단조품을 개발하는데는 치수정밀도와 금형비 투자 측면에서 불리하고, 35톤 해머는 프레스에 비하여 성형속도가 빠르기 때문에 단조 온도의 정밀제어가 요구되는 알루미늄합금 단조에 부적합하다. 따라서 성형용량은 작지만 국내 가용 단조장비 중에서 최대인 2,500톤 프레스(풍산)를 이용하여 제한된 하중이내에서 직경 540mm의 7175합금 플랜지 단조품을 개발하기 위한 공정 연구를 실시하였다.

형단조품의 공정 개발은 실제의 장비와 재료를 이용한 실물 크기의 실험이 가장 효과적이고 직접적인 방법이나 이 방법은 성형하중의 과부하에 의하여 장비와 금형이 손상될 수 있고 실험경비의 부담이 크기 때문에 극히 제한적으로 적용되는 반면, 플라스틱이나 납 등의 상사재료를 이

용한 실험적인 방법과 유한요소해석 등의 수치적인 방법이 일반적으로 적용되고 있다<sup>6,7,8)</sup>.

본 연구에서는 플랜지 단조품을 2,500톤 프레스로 성형하기 위해서 실험적 방법과 수치 해석적 방법을 함께 이용하였다. 각 공정의 최대 성형하중을 장비용량 이하로 제어할 수 있도록 업셋 단조와 기계가공 및 전방압출 공정을 적절하게 조합한 복합 공정을 제안하고, 실제 재료를 사용한 ¼ 축소 모델실험과 유한요소해석으로 그 타당성을 판단하였으며, 연구 결과 실제 플랜지 단조품은 시행착오없이 개발이 가능하였다.

### 2. 실험 및 계산

#### 2.1 복합성형 공정의 제안

장비 용량을 초과하는 단조품의 성형 방법으로는 성형력 분산을 위해서 공정 수를 늘리는 복합 성형 공정 및 금형과 단조품의 접촉 면적을 작게 하여 부분적이며 연속적인 단조를 함으로써 전체를 성형하는 점진단조 공정이 있다. 한편 Fig.1은 경사부를 갖는 직경 540mm의 알루미늄 7175 플랜지 단조품으로서 2,500톤 이라는 제한된 하중으로 개발하기 위한 목표이다. 단조품은 높이에 비해 직경이 3배 정도로 비교적 넓으면서, 상부 체적이 하부에 비해 크고 외부형상이 복잡하기 때문에 장비의 성형능력이 충분한 경우에도 일반적인 형단조 공정으로는 상부와 외면의 다이 채

음이 어려운 성형적 특징이 있다. 따라서 플랜지 단조품은 금형이 하부로부터 상부로 재료 유동이 일어나는 일반적인 밀폐 형단조 공정보다는 링형상의 예비성형체를 업셋단조 및 기계가공으로 제작한 후 하부 금형의 상부에 장착하여 상부에서 하부로 재료유동이 일어나도록 압출하는 복합성형 방법이 성형하중과 재료유동 측면에서 적합한 공정임을 알 수 있다.

본 연구에서는 식(1)과 같은 Schey의 프레스 성형하중 예측을 위한 경험식을 이용하여<sup>9)</sup> 제시된 단조품의 성형하중 예측 및 모델시험을 위한 기초 공정설계를 실시하였다.

$$P_f = C \cdot \sigma_a \cdot A_t \quad (1)$$

여기서  $A_t$ 는 단조품의 투영면적이고,  $C$ 는 단조 난이도에 따른 형상계수로서 Table 1에 따르며,  $\sigma_a$ 는 평균유동응력으로서 Al 7175의 강도 및 화학적 성분이 7075와 유사하기 때문에 Altan 등으로부터 450°C에서의 7075 응력값을 인용하였다<sup>10)</sup>. Table 2는 식(1)을 이용한 플랜지 단조품의 밀폐 형단조와 복합성형시의 하중 예측 및 모델시험용 350톤 프레스에서 성형가능한 축소모델 단조품의 설계 결과이다. 복합성형시의 하중은 업셋 단조와 전방압출의 경우에 각각 3,249톤과 4,743톤으로 밀폐 형단조의 7,786톤 보다 감소하는 경향을 보였으나 2,500톤 프레스로 단조하기에는 부적절하였으므로 저자들이 함께 연구한 바 있는 점진단조 기법의 적용 가능성까지 고려하였다. 또 실험 장비인 350톤 프레스에서 성형 가능한 모델 단조품은 실제의 1/4 축소형으로 설계하였다.

## 2.2. 축소 모델 실험

플라스티신이나 납 등의 모델재료를 사용하는 축소실험은 실제 공정과 기하학적 형상을 대응시키면서 가공경화지수, 변형을 속도 민감지수 및 마찰계수 등 다양한 재료 조건들에 대하여 실제 재료와 동일한 값을 갖는 재료를 선택해야 하는 어려움이 있으므로, 실험 환경이 허락하면 실제 재료를 사용하는 것이 모델재료 사용시에 입증해야 하는 상사성 연구를 생략할 수 있어서 유리하다.

실제의 1/4 크기로 수행한 축소 모델 실험은 실제재료인 Al 7175 압출 봉재(φ60x100mm)를 시료로 사용하여 350ton 유압프레스(일본,

Neagari Co.)에서 Fig.2와 같은 공정으로 진행하였다. 알루미늄 신합금 7175는 7075와 그 성질등이 유사하나 가열온도에 따른 성형성을 파악하기 위하여 φ50x90mm 소재를 390°C, 420°C와 450°C로 각각 가열후 50% 압축실험을 하였다. 실험 결과 390°C와 420°C의 경우에는 양호하게 업셋팅되었으나 450°C의 경우에는 팬케이크의 외면에 크랙 현상이 나타났으며, 단조공정 중의 온도상승이 크랙으로 발전할 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 압축실험의 결과로부터 소재 가열온도는 7075에서의 최적 단조온도와 동일한 390~420°C, 금형 예열온도는 300°C로 결정하였으며, 윤활제는 단조 현장에서 주로 쓰이는 흑연분말과 기름(미강유)의 혼합물을 사용하였다. Fig.3은 모델실험 결과에 의하여 설계된 대형 플랜지 단조품의 예비성형체이다.

## 2.3. 유한 요소 해석

모델실험 결과 복합성형공정의 가능성을 확인한 다음 단계로써 본 연구의 주요공정인 업셋단조와 형단조공정에 대해 DEFORM을 이용한 유한요소해석을 실시하였다. 또한 복합성형공정의 해석에 앞서서 일반적인 밀폐 형단조 공정에 대한 해석을 하였으며 필요하중은 9,000톤 이상이었다. 소재온도 420°C에서 등온 해석을 하였고, 응력-변형도율 관계는 Altan<sup>10)</sup> 등의 결과를 인용하여 보간법 및 최소자승법에 의하여 도출한 식(2)를 사용하였다. 420°C는 재료의 가공경화 효과를 무시할 수 있는 열간 영역이므로 식(2)에서 변형도 항은 고려되지 않았다.

$$\sigma = 8.4 \epsilon^{0.110} \quad (\text{kgf/mm}^2) \quad (2)$$

소재는 연구 목표인 플랜지 단조품 개발시 사용될 소재와 동일한 크기인 φ233×h410mm로 하였으며, 마찰상수  $m$ 은 0.3을 적용하였다.

## 2.4. 플랜지 단조품 개발

단조품은 성형속도 75mm/sec인 2,500톤 프레스(미국, Lake Area Co.)에서 개발하였다. 소재는 (주)삼선공업에서 직경 15인치로 연속주조한 후 460°C에서 30시간 동안 균질화처리한 후 직경 233 mm로 압출한 봉재를 사용하였다. 16개의

소재 중 12개는 400℃로, 4개는 420℃로 염욕로에서 가열하였고, 금형은 300℃로 예열하였다. 윤활제는 모델실험과 마찬가지로 흑연분말과 기름(미강유)의 혼합물을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 축소 모델 실험

Fig.4와 Fig.5는 모델실험의 전방압출 공정 중에 측정된 금형온도 및 소재온도에 따른 성형하중의 분포이다. 여기서 금형온도는 공정 직후에 상부와 하부금형 온도를 각각 측정된 평균값이고 소재온도는 공정 전후의 소재온도 평균값이다. 단조하중은 금형온도가 160℃에서 260℃로 변하고, 소재온도가 300℃에서 360℃로 변함에 따라 188ton에서 100ton으로 약 45%이상의 감소가 있었다. 따라서 Al7175의 단조공정에서 금형예열과 소재가열 및 공정중 온도유지가 성형하중에 미치는 영향을 뚜렷하게 알 수 있었다. 또 측정하중은 Schey의 경험식에 의한 계산 결과와 비교할 때 36%에서 66%까지 오차가 있음을 발견하였으며, 그에 따라 2,500톤 이내에서 실제 단조품의 성형 가능성을 기대할 수 있었다.

#### 3.2 유한 요소 해석

예비성형체 높이 96mm까지 76.5% 압축한 업셋 단조의 최대하중은 2,400톤으로 계산되었다. 그러나  $\phi 530 \times h 96$ mm인 링 형상의 예비성형체로부터  $\phi 540 \times h 185.5$ mm인 플랜지 단조품의 최대성형하중은 3,500톤으로 계산되어 완전한 성형을 위해서는 장비 용량이 부족한 것으로 나타났으나, 단조품의 특성상 두께를 Fig.1의 설계보다 두껍게 단조하여 기계가공한다면 개발이 가능할 것으로 판단되었다. 따라서 플랜지 단조품의 금형설계시에는 공정 제안시에 고려하였던 점진단조 기법을 적용하지 않았다. Fig.6은 복합공정과 밀폐 형단조 공정에 의한 단조품의 유효 변형도 분포이다. 복합공정의 최대 유효변형도는 약 1.7로 밀폐 형단조의 약 3.2에 비해 성형정도가 약간 부족한 듯이 보이나 복합공정의 경우에 업셋 단조시의 변형도 1.5를 고려하면 9,000톤의 하중으로 충분히 성형을 한 밀폐 형단조공정의 변형도와 동일한 값을 갖음을 알 수 있다.

### 3.3 플랜지 단조품 개발

플랜지 단조품은 단조 불량 4개를 제외하고는 두께 41mm인 플랜지 부위의 두께가 유한요소해석 결과로부터 예상하였듯이 46~52mm로 평균 8mm 정도 두꺼웠으며 모서리 부위도 완전한 다이 채움이 일어나지는 않았으나, 기계가공 공정에 투입하여 제품으로 사용하기에는 충분히 양호하였다. 300℃로 예열한 금형은 180~225℃로 측정되었으며, 400℃로 가열한 소재들은 공정 전후에 각각 335℃와 268℃이었고 420℃로 가열한 경우에는 389℃와 318℃로 측정되었다. 소재의 초기온도 차이에 따른 단조품의 변형형상 등은 별로 구별되지 않았다. Fig.7은 400℃로 가열한 소재들의 경우 단조공정 중에 상부금형의 하강거리에 따라서 읽은 장비의 압력계이지 값을 프레스의 실린더 직경에 곱하여 구한 실제 성형하중이다. 업셋 단조와 형단조에 대하여 각각 나타내었으며, 수치해석 결과를 함께 비교하였다. 업셋 단조에서는 해석 결과인 2,380톤의 85%인 2,016톤, 형단조에서는 해석 결과인 3,400톤의 63%인 2,139톤까지 측정되었다. 업셋 단조의 경우 해석값과 측정값이 비교적 잘 맞고 있으나 형단조의 경우에는 완전한 재료유동이 일어나지 않았던 단조품의 형상에서 알 수 있듯이 프레스의 용량 부족을 보여주고 있다. Fig.8은 복합성형공정으로 개발된 플랜지 단조품이다.

### 4. 결론

유한요소해석 결과 밀폐 형단조 공정으로는 약 10,000톤 정도의 성형하중을 필요로 하는 Al 7175 대형 플랜지 단조품을 2,500톤 프레스에서 개발하기 위한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실제재료에 의한 모델실험은 재료에 대한 상사연구를 생략할 수 있어서 연구노력을 한 방향으로 집중할 수 있었으며, 실제 단조시 예비성형체 설계에 실험결과의 100% 활용이 가능하였다.
2. 업셋단조와 기계가공 및 전방압출 공정을 복합적으로 응용하여 2,500톤 프레스에서 9,000톤 이상의 성형하중이 필요한 알루미늄 대형 단조품을 개발하였다.

참고 문헌

1. A.R.Canfield, E.E.Andersib : "Space Shuttle Nozzle Development", AIAA-78-951
2. R.W.Magness,J.W.Gasaway : "Development of a High Performance Rocket Motor for the VT-I Tactical Missile", AIAA-88-3325
3. C.Ouchi et al., : "Development of Heavy Forgings of High Strength Aluminum Alloys", NKK Tech. Review NO.55(1989)
4. 은일상 등 : "대형 복합재 연소관 Boss용 Al 합금 국산화 개발", 한국추진공학회 학술강연회 논문집, 제4회 (1995)
5. 은일상 등 : "Al 7175 합금 단조재의 중간 가공열처리가 미세조직에 미치는 영향", 제5차 유도무기 추진기관 학술대회논문집(1995)
6. Nippon Kokan K.K. : "Experimental Technique Using Plasticine", Rolling Technology Laboratory, Technical Research Center, (1983, July)
7. 양동열 등, "점진단조 및 복합성형법을 이용한 대형 돔 단조품의 공정개발", 대한기계학회 논문집, Vol.18, No.7 (1994)
8. S.Kobayashi : "Process Design in Metal Forming by the Finite Element Method", Proceedings of the 2nd Int. Conference on Technology of Plasticity (1987, August)
9. T. Altan et al., : Forging equipment, materials and practices", MCIC-HB-01 (1973)
10. T. Altan et al., : "Metal Forging Fundamentals and applications", ASM (1983)

Table 1. Shape Complexity Factor, C

		Value of C
Upsetting		1.2 - 2.5
Closed Die Forging	Simple Shapes without flash	3 - 5
	Simple Shapes with flash	5 - 8
	Complex Shapes with flash	8 - 12

Table 2. Prediction of Forming Load and Results of Model Design

		C	$\sigma_a$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	At(mm <sup>2</sup> )	Load (ton)
Conventional Closed Die Forging		4	8.5	229,022 ( $\phi$ 540mm)	7,786
Complex Forming	Upsetting	1.8	8.5	212,371 ( $\phi$ 520mm)	3,249
	Forward Extrusion	3	8.5	186,016 ( $\phi$ 540x $\phi$ 234mm)	4,743
Results of Model Design	Upsetting	1.8	8.5	13,273 ( $\phi$ 130mm)	203
	Forward Extrusion	3	8.5	11,580 ( $\phi$ 135x $\phi$ 59mm)	295

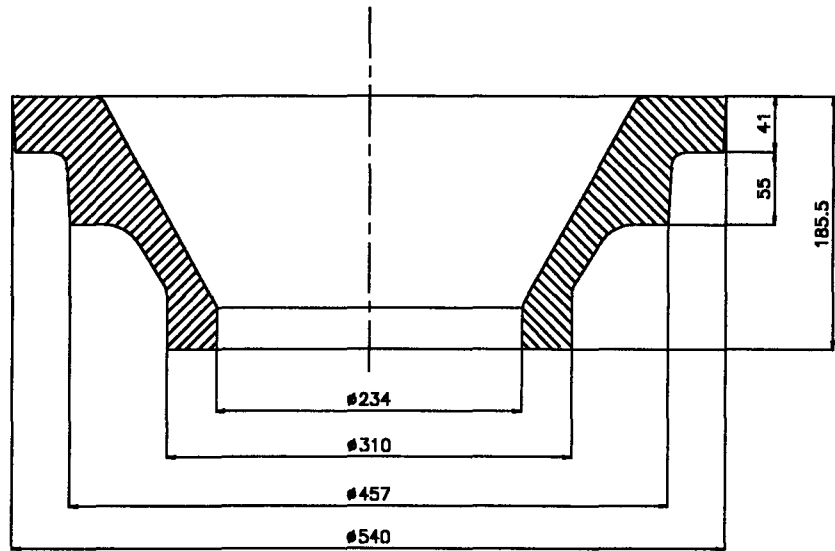


Fig.1 Forging drawing of aluminum 7175 flange

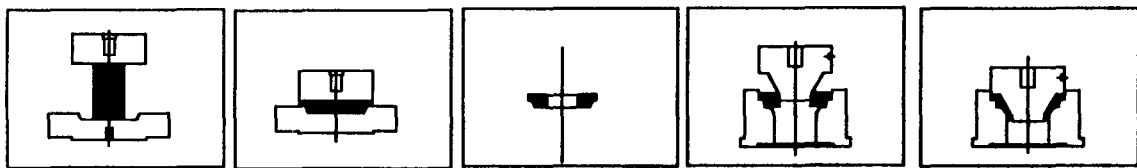


Fig.2 Proposed complex forming process for model test

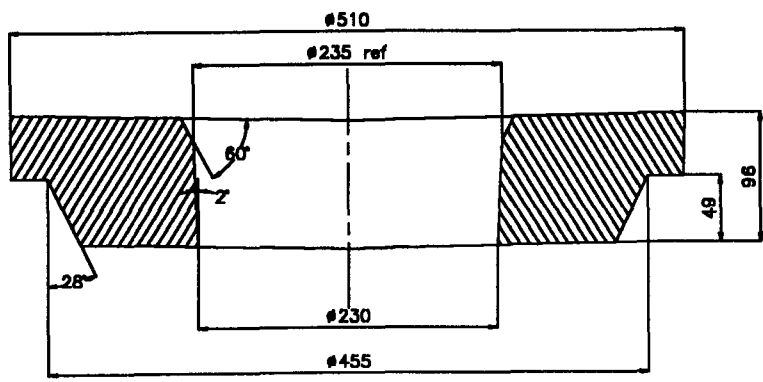


Fig.3 Preform drawing attained from results of model test

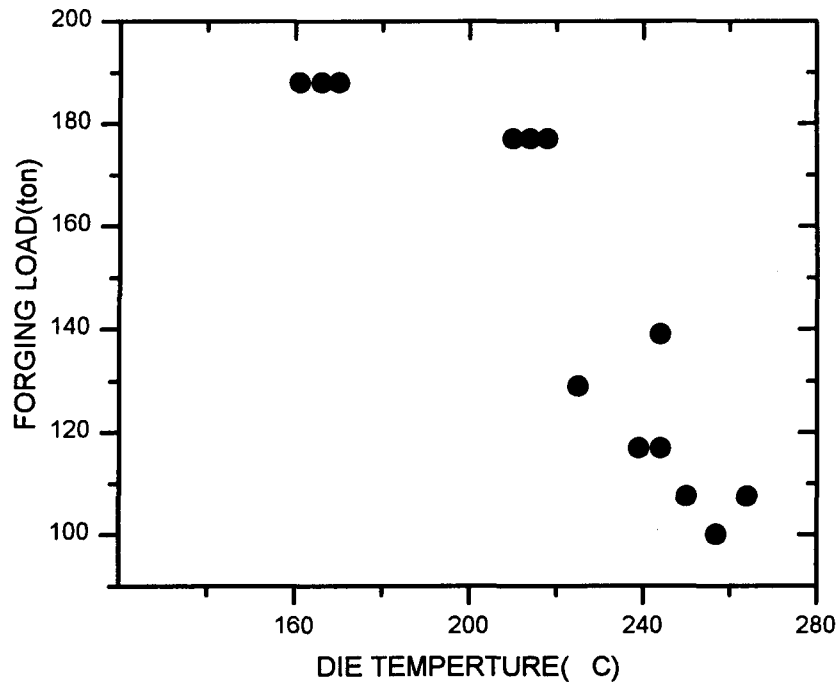


Fig.4 Relations between forging load and die temperature at model test

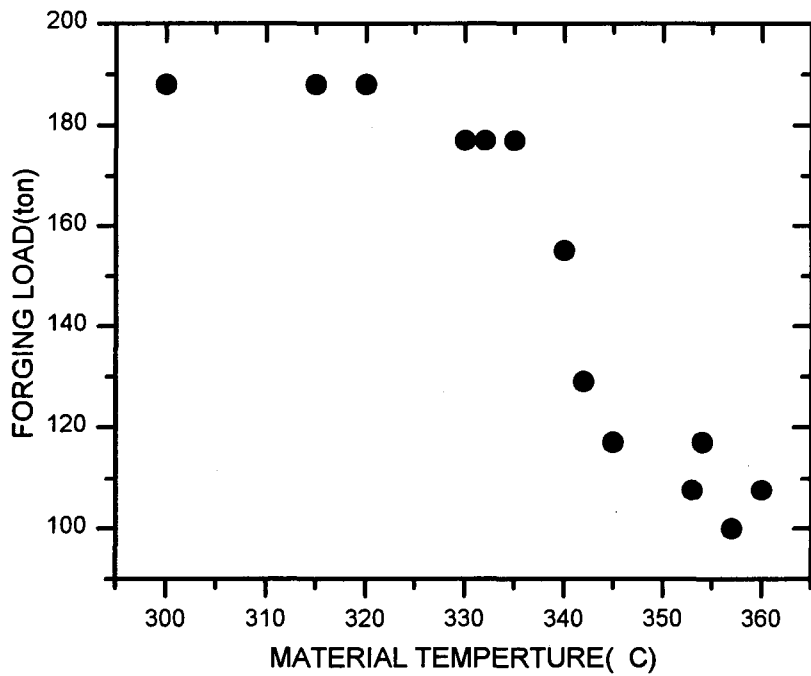


Fig.5 Relations between forging load and material temperature at model test

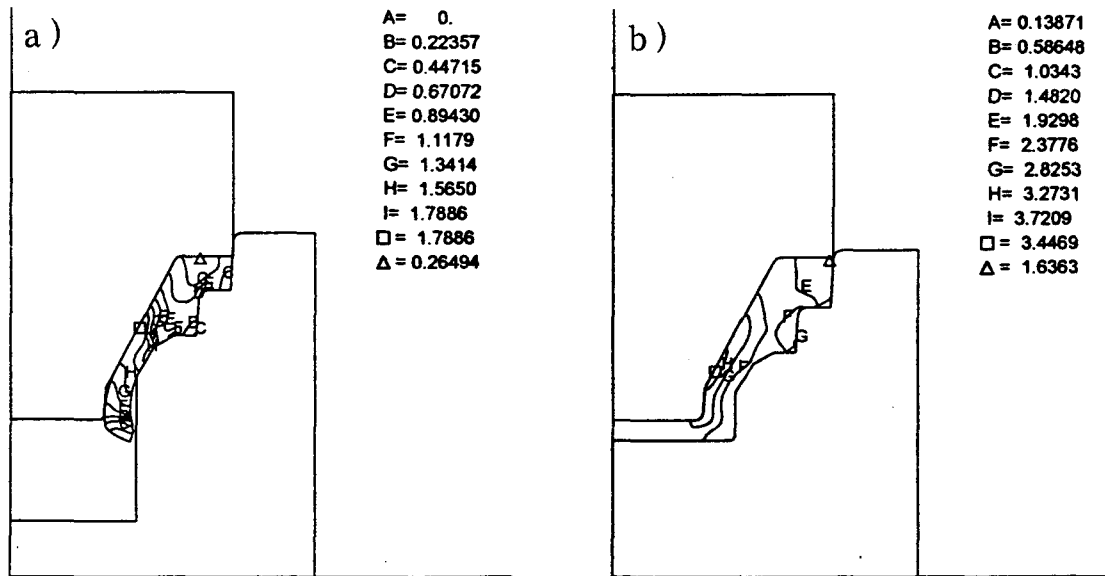


Fig.6 Effective strain distribution of a) final stage of complex forming and b) conventional closed die forging

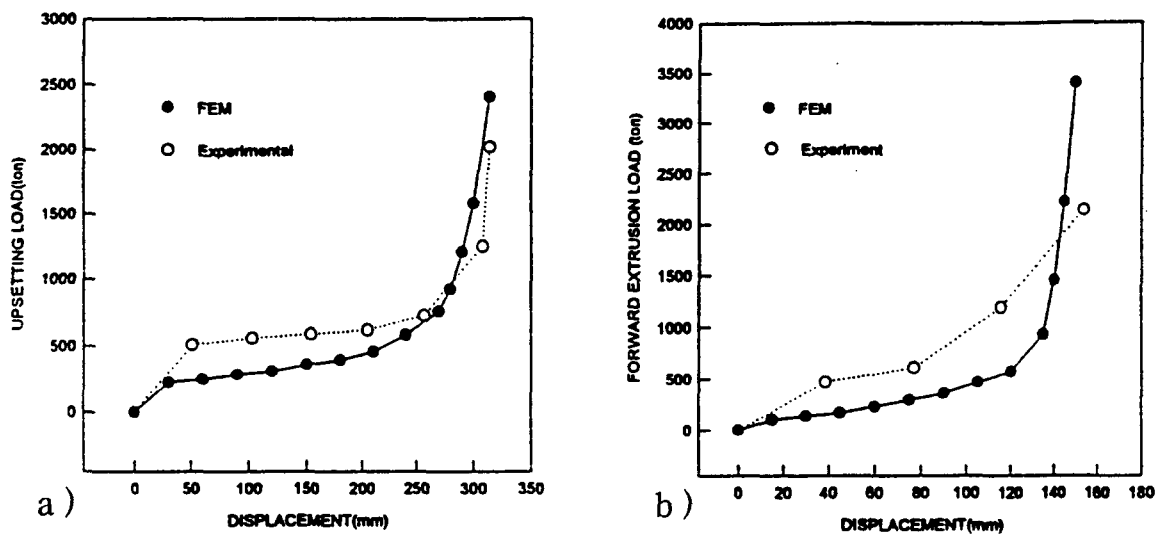


Fig.7 Relations between forging load and upper die displacement of a) upsetting process and b) forward extrusion process

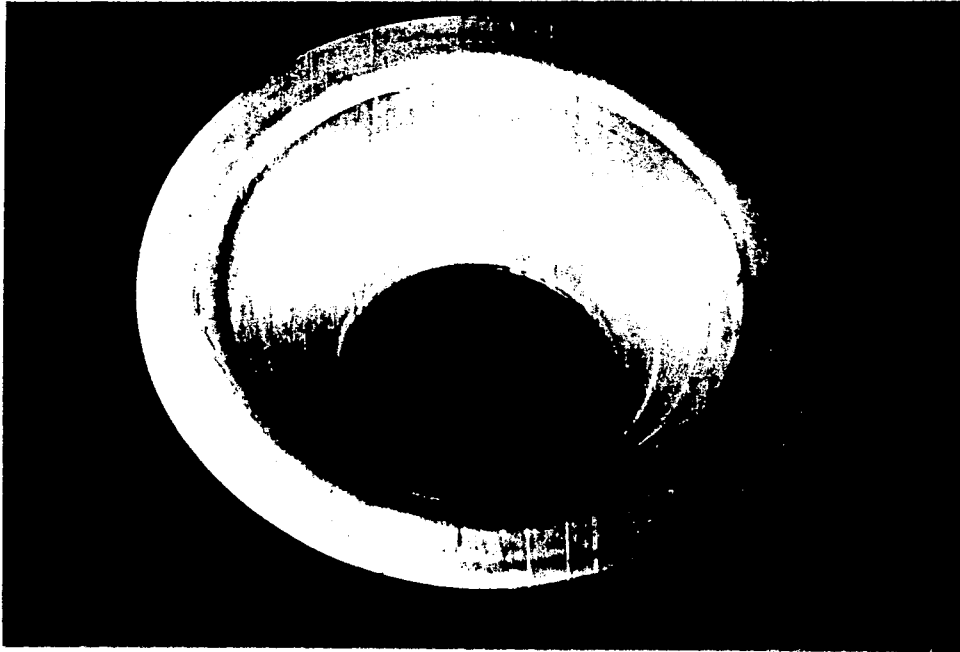


Fig.8 Al 7175 flange forging product developed from complex forming process