

# 미세 균일 조직의 대형 알루미늄 단조품의 개발

이 영무, 이 종익, 정 덕진, 김 광련  
(주) 풍 산

## 요 약

항공 우주 재료 중에서 알루미늄 합금 재료가 차지하는 비중은 매우 크다. 사용 조건에 적합한 특성을 갖도록 하기 위한 연구 노력 중의 한 가지가 단조품 조직의 미세화이다. 일반적으로 조직을 미세화 하는 방법으로는 I.T.M.T 공법을 적용하고 있으나, 러시아에서는 미세 균일한 조직의 알루미늄 열간 단조품을 제조하기 위하여 billet의 주조 공정에서 초음파 처리(U.S.T)를 적용하고 열간 단조 공정에서는 조직 상태도를 활용하여 성형 단계별 소성 가공량의 조절과 작업 온도를 관리함으로써 미세 균일 조직의 대형 알루미늄 단조품을 생산하고 있다.

## 1. 서 언

대형 알루미늄 단조품(직경 300 mm 이상)의 열간 단조 작업의 목표는,

- 1) 원하는 형상을 얻는다.
- 2) 과열 조직이 없고 과대 성장입도가 없이 균일한 조직을 가질 것
- 3) 취약한 주조 조직의 조절.
- 4) 사용 조건에 악영향을 주는 metal flow의 끊김이나 겹침이 없고 적합한 물리적 특성을 갖도록 하는 것이다.

대형 단조품 제조 공정의 대표적 흐름도는 Table 1. 과 같으며 주조후 압출과 같은 조절 과정이 없으므로 위의 단조 가공의 목표를 달성하기 위해서는 원 소재인 billet의 주조에서부터 가열, 단조, 열처리등 전 공정에 걸쳐 세심한 공정 계획이 따라야 한다. 국방 과학 연구소와 함께 개발 중인 알루미늄 단조품의 생산과 관련하여 미세하고 균일한 조직의 알루미늄 단조품을 얻기 위한 생산 현장에서의 관리 사항을 단계별로 기술하였다.

## 2. 주조 단계

고 품질의 미세, 균일 조직의 대형 단조품을 얻기 위해서는 소재의 주조 단계에서부터 관리되어야 한다. 일반적으로 알루미늄 단조용 소재는 주조시 Ti, B등의 입도 조절제를 첨가하고 균질화 처리 및 압출 과정을 거쳐 단련함으로써 유해한 주조 조직을 파괴하여 취약점을 보완한다. 대부분의 국방 규격에서 기계 가공용 소재와 단조용 소재에 대하여 압출비가 4s ~ 6s 수준의 단련된 소재를 사용토록 규제하고 있는 것도 이와 같은 맥락에서이다.

그러나 이러한 조절 요구는 대형 단조물에 대해 현실적으로 적용이 불가능하다. 압출비가 4s ~ 6s 수준의 조절된 billet는 직경 200mm 이상은 공급되지 않는다. 일반적인 주조법으로 얻어지는 billet의 직경은 최대 400mm를 넘지 못하기 때문에 대형 단조물 소재로 사용하기 위해서는 upsetting 공정 등으로 조절 과정을 거치도록 계획하지만, 좌굴 한계와 소재의 대량 손실, 공수의 과다 소요 때문에 많은 어려움이 따른다. 이러한 문제점을 해소하기 위해 주

조후 조절 과정이 필요 없는 대형 ingot 제조 기술은 초음파를 이용한 주조 기술(Ultra Sonic Treatment)이라고 할 수 있다. 이 기술의 특징을 살펴보면, 1단계로 탕구에서 초음파의 cavitation을 이용하여 degasing 처리하고, 2 단계로는 몰드내에 유리 섬유 필터(fiber glass filter)에 의한 불순물 제거와 교반 작용을 수행함으로써 다음과 같은 효과를 얻을 수 있다.

- 1) 최대 1,200 mm 직경의 대형 billet 주조가 가능하고
- 2) 용존 가스량이 현저히 낮으며 insoluble - impurity의 효과적인 제거
- 3) 미세하고 균일한 nondendritic structure를 얻을 수 있다.

U.S.T 처리 장치의 개략도는 Fig. 1과 같으며 초음파의 강도에 따른 degasing 효과와 조직의 개선 효과는 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다. 실제 U.S.T 방법으로 제조된 알루미늄 7175, 직경 320mm인 ingot 단면 macro etching 조직과 micro structure는 Fig. 4와 같다.

이러한 주조 조직의 개선으로 대형 단조에 사용될 소재의 분괴 조절 처리 공정을 없애거나 최소화시킬 수 있었다.

### 3. 열간 단조 작업 조건

대부분의 알루미늄 단조품에서의 문제점은 부분적으로 발생하는 조대 결정립이며 결정 입도는 심한 경우 수십 mm의 크기를 갖기도 한다. 이러한 조직의 조대화과 불균일함은 재료의 피로 강도를 저하시키므로 여러 가지 방법으로 단조 조직의 미세, 균일화시키기 위한 많은 연구가 행해져 왔다. 이러한 연구중 괄목할 만한 사항으로 Y. M. Vaynblat (VILS, Russia)의 "Structure

maps for steady-state deformation of aluminum alloys"을 들 수가 있다.

알루미늄 재료에 있어서 가공 방법에 따라 조직이 다르게 나타난다. 압출재의 경우는 표면 입도가 조대하고, 단조품인 경우는 표면과 내부의 입도가 불균일하며, 압연재의 경우는 대체로 균일한 것을 볼 수 있는데, 이는 소성 가공 조건, 즉 strain-rate 와 working temperature 가 다르기 때문에 나타난다.

동일한 가공 온도로 소성 가공을 하더라도 압출 가공에서는 표면과 중심부의 strain rate가 다르며, 단조품의 경우 형상에 따라 strain rate와 effective strain이 다르고, 금형과 접촉되는 부위의 소재 온도와 비접촉되는 부위의 온도 차이, 원소재의 조직의 불균일 등의 요인으로 인하여 조직이 불균일해진다. 일반적으로 압연 제품의 조직이 균일한 것은 가공 속도가 빠르고 가공 온도의 편차가 적기 때문으로 판단된다. 이와 같이 현실적으로 나타나는 가공 조건과 제품이 갖는 조직과의 상관관계를 규명하여 도식화 한 것이 Vaynblat의 조직 상태도이며, 이를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5의 (a)는 소성 가공시의 조직 상태도이며, (b)는 이를 열처리 하였을 때 나타나는 조직 상태를 조직 형태별로 도식화 한 것이다.

대형 알루미늄 단조품에서 조직의 미세 균일화 방법도 Fig. 5와 같은 상태도를 근거로 하여 단조 작업 조건(소재 가열 온도, pressing speed, 금형 예열 온도 등)과 소성 변형의 최적화, 균일화를 위한 금형의 설계를 유도할 수 있다.

본 대형 단조품 개발에서 작업 조건 설정은 Fig. 5의 조직 상태도에서 좌, 상 구역이 된다. 이러한 조건하에서 결정 입도 미세화 mechanism은, 재료가 열간 소성 가공에 따라 외부 에너지가 공급되어 지

므로 변형후 결정 입도내의 dislocation이 slip plan으로 이동하여 low-angle boundary를 형성함으로써(polygonization) 수  $\mu\text{m}$ 의 미세한 sub-grain이 형성된다. 이러한 sub-grain 형성 조건을 매 소성 가공 단계에서 반복함으로써 sub-grain boundary를 균일하게 하고 강화시키는 방법이다. 소성 변형의 단계별 최적화, 균일화 방법으로 유한 요소 해석용 program을 활용함으로써 더욱 신속하고 정확한 예측을 할 수 있게 되어 단조품 품질의 개선에 기여하게 되었다. 그 예로서, Fig. 6은 (주)풍산에서 개발중인 전차용 road wheel에 대하여 유한 요소 해석 program인 DEFORM을 사용하여 공정 설계한 결과이고, Fig. 7은 해석 결과이다.

#### 4. 단조품의 품질 평가

미세 균일 조직의 대형 알루미늄 단조품을 평가하기 위하여 추진 기관에 사용되는 대형 Al. closure를 선정하여 VILS(러시아)연구소와 공동으로 생산하여 단조품의 품질을 평가하였다.

단조 시험에 사용된 billet은 VILS(Russia) 연구소에서 U.S.T 처리한 것이며, 재질은 Al. 7175, 직경  $\phi 320\text{mm}$ 이다. 단조 작업은 6,000ton hydraulic press를 사용하였으며, billet 가열은 salt bath에서  $420^\circ\text{C}$ 로 가열하였다. 대형 Al. Closure 열간 단조품을 Fig. 8에 나타내었다. Al. closure 열간 단조품은 표준 열처리를 실시하였으며, 열처리를 실시한 후 단조품에 대한 평가를 실시하였다. Fig. 9에 열처리 후의 단조품의 미세화된 sub-grain structure를 나타내었다. VILS 연구소에서 단조품을 평가한 결과는 다음과 같다. Table 2에 기계적 성질 시험 결과를 나타내었고, Table 3에는 초음파 탐상 검사 방법 및 결과

를 나타내었고, Table 4에는 전기 전도도 측정 결과를 나타내었으며, Table 5에는 잔류 응력 측정 결과를 나타내었다.

#### 5. 결론

미세 균일 조직의 대형 알루미늄 단조품을 생산하기 위하여 billet 주조에서 초음파 처리(U.S.T)의 적용과 단조 조건 설정을 Vaynblat의 조직 상태도를 근거로 하여 다음과 같은 품질의 단조품을 생산이 가능할 것으로 판단된다.

- 1) 과대 성장 또는 불균일 재결정 조직이 없는 metal flow.
- 2) sub-grain 형태이나  $3\mu\text{m}$ 수준의 미세 균일한 micro-structure.
- 3) 우수한 파괴 인성(K1C)과 방향성이 극소화된 기계적 성질
- 4) 우수한 내응력 부식성을 갖는 양호한 전기 전도도.
- 5) 냉간 소성 가공으로 열처리 응력을 1/5로 줄인 20~30MPa수준의 잔류 응력을 갖는 양호한 단조품.

(주)풍산에서 보유한 5,000ton hydraulic press를 이용하여 미세 균일한 조직을 갖는 전차용 road wheel등 대형 단조품 생산에 적용 가능할 것으로 생각된다.

#### 후 기

본 논문은 국방 과학 연구소의 지원 하에 이루어 졌으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

1. Metal handbook, vol. 7
2. Stanley T. Rolfe, John M. Barson, "Fracture and fatigue control in structures.", chapter 3, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J
3. 황 성주, 임 재규, 이 오명, 손 영일, 은 일상, 신 돈수, "고강도 알루미늄 단조품의 파괴 특성에 관한 연구", 제5차 유도 무기 추진 기관 학술 대회 논문집, 국방과학 연구소, 1995.
4. G. I. Eskin, "Effects of acoustic cavitation effect on the process of aluminum and magnesium alloys refining and crystallization in the ultrasonic field", Light materials for transportation systems, edited by Nack J. Kim, Center for advanced aerospace materials, 1993.

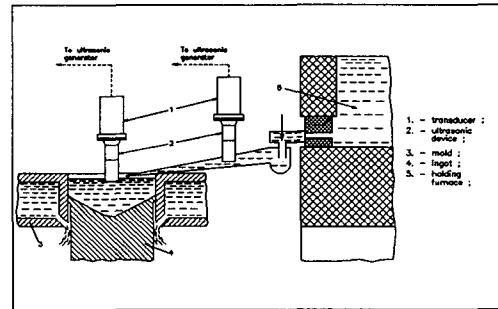


Fig. 1 Schematic of U.S.T of the melt in the ingot liquid bath and in the path between the holding furnace and the mold

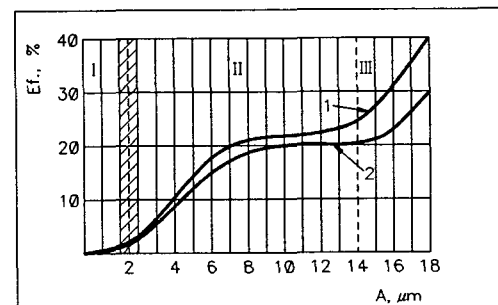
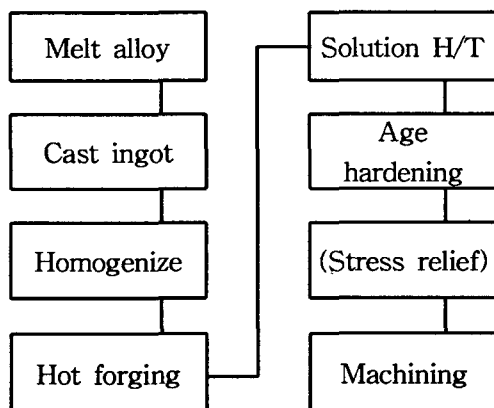


Fig. 2 The effect of U.S.T on the degassing efficiency of A7Al (1) and AMg6 (2) alloy melts: I - cavitation is absent, II - cavitation initiation, III - developed cavitation.

Table 1. Fabrication sequence for large forging.



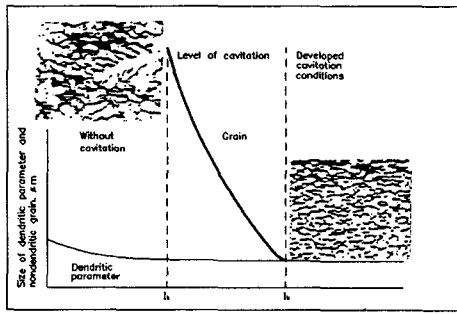
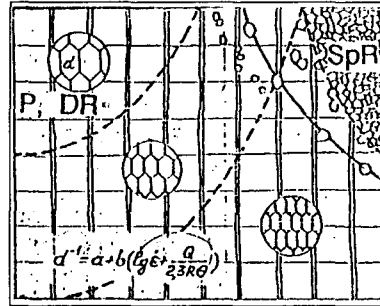
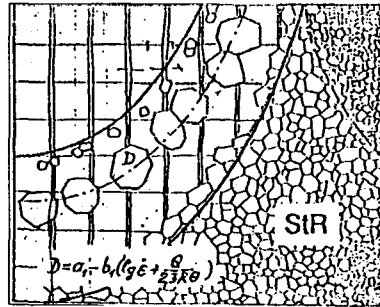


Fig. 3 The effect of intensity of U.S.T of the melt and the degree of cavitation development on the change from nondendritic type of aluminium alloy solidification to dendritic one.



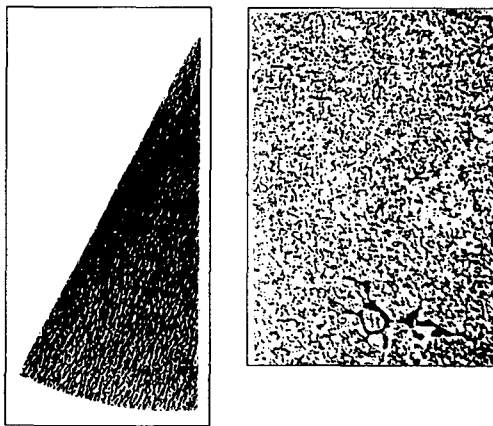
(a) after deform



(b).after solution H/T

Fig. 5 structure maps for steady-state deformation of aluminium alloys.

- P - Polygonization
- SpR - Spontaneous recrystallization
- StR - Static recrystallization
- DR - Dynamic recrystallization



(a) macro structure(x1) (b) micro structure(x200)

Fig. 4 The photo of macro and microstructure of Al 7175 alloy ingot.

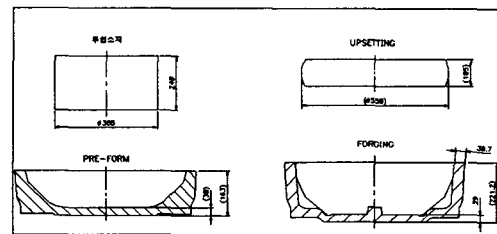
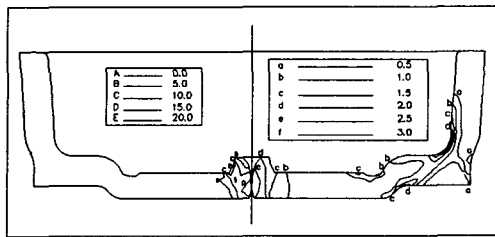


Fig. 6 Flow-chart for K1. road wheel



(a) effective strain rate (b) effective strain

Fig. 7 Effective strain rate and effective strain distributions for Al. 2014, K1 road wheel after hot forged deformation.

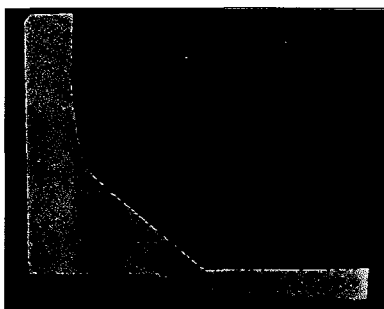


Fig. 8 The photograph for Al. forged closure. (x1)



Fig. 9 The electron microscopy of Al. closure after heat treatment. (x10,000)

Table 2. Mechanical properties (Al. 7175-T73)

1) Tension test (ASTM E-8)

specimen orientation	test results			
	U.T.S (Kg/mm <sup>2</sup> )	Y.S (Kg/mm <sup>2</sup> )	E.L (%)	R.A (%)
longitudinal	47.0~48.8	36.8~41.7	8.8~12.0	19~35
long-transverse	45.8~48.7	37.2~41.5	11.2~12.8	23~35
short-transverse	46.7~48.2	39.2~40.8	6.4~7.6	9~20

2) Fracture toughness test (ASTM E-399)

specimen orientation	KIC, MPa√m	note
transverse to fiber direction	32.0 ~ 34.7	ASTM Ref 26.4

Table 3. The results of ultrasonic inspection

applied Spec. No.	MIL-STD-2154
inspection method	수침법, 10MHz transducer
inspection criteria	ψ 2mm reference defect 보다 크지 않을 것.
results	No. defect.

Table 4. The results of electrical conductivity

inspection criteria	results	note
I.A.C.S	40.0 ~ 44.3	ref. 38

Table 5. The results of measurement  
for residual stress

\* Stress relieving method :  
cold sizing 3% volume.

type of residual stress	residual stress, MPa	
	after solution H/T	after cold deformed
radial	-120 ~ 140	-20 ~ 25
axial	-110 ~ 130	-25 ~ 27