

7175 합금 단조재의 미세조직과 기계적 성질에 미치는 중간가공열처리 영향

이용연, 송영범, 손영일, 이경훈, 은일상
국방과학연구소

The Effect of Intermediate Thermo-Mechanical Treatment on the
Microstructure and Mechanical Property of 7175 Al Alloy

Y.Y.Lee, Y.B.Song, S.T.Im, Y.I.Son, K.H.Lee, I.S.Eun

Agency for Defence Development, Yuseong P.O. Box 35-4, 305-600
Taejeon, Korea

ABSTRACT

The microstructure, tensile and impact properties of forgings of 7175 aluminium alloy have been studied as a function of intermediate thermo-mechanical treatment(ITMT) process. The ITMT process is consisted of warm working and recrystallization. In the case that the billet was warm-worked above 60% below 250°C and recrystallized at 475°C, the grain size revealed about 17 μ m which corresponds to one third of that of conventional process. The refinement of grain size led to the improved ductility and impact energy without sacrifice of tensile strength. It was found that the ITMT processed specimen behaved isotropically due to the near equiaxed grains. It was observed that the ITMT processed specimen showed the mixed fracture mode of transgranular and intergranular, instead of intergranular mode. This change of fracture mode contributed to the improved ductility and impact property.

1. 서 론

7000계 알루미늄 합금은 비강도가 높아 항공기, 고속전철 차량 등의 기체 및 경량화 구조 재료로서 많이 사용되고 있으나 용력부식균열(SCC : Stress Corrosion Cracking) 저항특성이 낮으며, 표면부의 결정립 조대화 및 방향에 따른 기계적 성질의 차이가 심하여 이에 대한 개선법에 관한 많은 연구가 되고 있다. 즉 7175, 7475, 7050, 7150 합금에서와 같이 고청정 원소사용, 탈가스 처리 및 개재물 혼입억제 등 특수한 공정제어방법과 2차상 입자분율을 감소시

키거나 신합금 설계 또는 중간가공 열처리에 의해 결정립을 미세화시키는 방법 등이 이의 일환이다. ITMT는 7000계 합금을 균질화처리-온간가공-재결정처리 과정을 통해 결정립을 미세화시키는 공정으로서 ISML-ITMT법¹⁾, FA-ITMT법²⁾ 및 RI-ITMT법³⁾ 등이 알려져 있으며, 주로 판재에서 일방향으로 길게 늘어난 큰 입자를 미세한 등축 재결정립으로 미세화시켜 횡방향의 인성을 향상시키는데 응용되고 있다. 특히 FA-ITMT는 균질화처리에 의해 Cr을 미세한 E상($Al_3Mg_2Cr_2$) 입자로 분산시키고, Zn, Mg, Cu와 같은 합금원소를 조대한 입자로 석출

시킨 후 저온소성가공과 재결정 처리를 통해 미세결정립을 얻는 공정이다.

한편 형단조 공정에 ITMT 공정을 적용한 연구는 현재까지 보고되고 있지 않으며, 형상이 복잡한 형단조품의 경우 균일한 변형이 사실상 불가능하고 온간가공시 장비요구하중이 매우 크게 되기 때문에 적용이 어려운 것으로 생각된다. 그러나 대형 Al형단조품은 수직상정의 크기가 큰 대형주조빌렛트를 사용해야 하기 때문에 단조비가 작아 결정립이 조대하고, 주조조직이 잔류하게 되어 기계적 성질이 나쁘게 된다. 따라서 7175 합금 빌렛트를 이용하는 대형 단조공정에 FA-ITMT 개념을 도입, 적용하면 결정립 미세화에 의한 재료특성 개선이 가능할 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 시편시험에 의한 ITMT 조건시험을 실시하여 ITMT 최적조건을 도출하고, 빌렛트의 주조조직 파괴를 위하여 3축 자유단조에 의한 빌렛트 제작(BM : Billet Making)공정을 설계하여 형단조 시험에 적용함으로써 결정립 미세화 거동을 조사 분석하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 시료는 Direct Chill 주조한 후 460℃에서 30시간 1차 균질화 처리한 직경 15인치의 Al 7175 합금 빌렛트였으며, 합금의 조성은 Table 1과 같다.

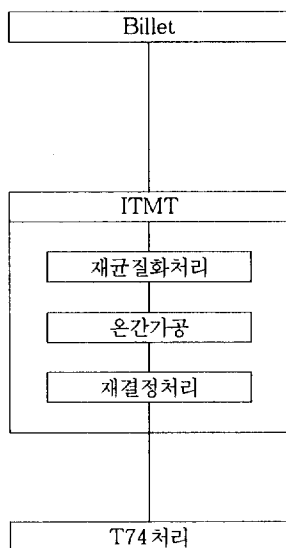
Table 1. Chemical composition of 7175 alloy and the specimen used.

	Zn	Mg	Cu	Cr	Fe	Si	Mn	Ti	Al
AA7175	5.1~6.1	2.1~2.9	1.2~2.0	0.18~0.30	≤0.2	≤0.15	≤0.1	≤0.1	bal
sample	5.40	2.74	1.66	0.20	0.08	0.03			bal

Fig. 1은 실험단계를 개략적으로 나타낸 것으로서 우선 시편단위의 ITMT 조건시험을 통하여 적합한

결정립 미세화 조건을 결정된 후 이 결과를 형단조재 단조 시험에 작용하여 결정립 미세화 거동을 관찰하였다.

(a) ITMT 조건시험



(b) 형단조시험

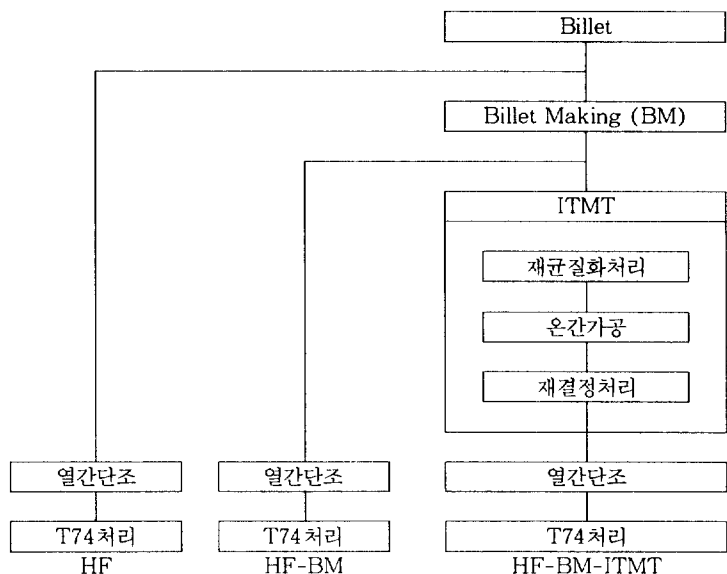


Fig. 1. Flow diagram of experiments of ITMT process for 7175 Al alloy.

시험에 사용된 각종 시편의 형상으로서 15인치 빌렛의 반경중앙부에서 ITMT 조건 시험용 시편은 직경 15mm×길이 40mm, 축소모델 단조시편은 직경 110mm×길이 110mm의 봉상으로 채취 및 가공하여 사용하였다. ITMT 조건시험은 상기의 봉상시료를 재결정에 유효한 충분한 석출이 일어나도록 482°C에서 3시간 유지후 노냉으로 재균질화 처리(re-homogenization)한 후 인스트론 만능시험기(Instron, 4505)에서 실제 단조공정인 프레스 단조를 모사하는 압축시험을 하였으며, 재결정 거동에 미치는 공정인자의 영향을 분석하고자 가공온도, 가공량 및 재결정처리 온도를 변화시켰다. 가공온도의 영향을 관찰하기 위하여 가공온도를 25°C, 200°C, 250°C, 310°C, 350°C, 420°C에서 가공량을 60%로 고정시켜 압축가공을 실시하였고, 가공량의 영향을 조사하기 위하여 가공온도는 250°C로 고정하고, 가공량을 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%로 변경하여 온간가공을 실시하였다. 온간가공된 시편은 급열을 위하여 475°C의 염욕(KNO₃+NaCl+BaCl₂)에서 2시간 동안 재결정처리를 하였으며, 510°C에서 1hr 용체화 열처리한 후 T74 시효열처리(107°CX97hr+177°CX6hr)를 행하였다. 또한 온간가공은 250°C에서 60%로 일정하게 한 후 재결정처리 온도를 300°C, 350°C, 400°C, 460°C, 475°C로 변화시켜 재결정 거동을 관찰하였다.

이렇게 하여 얻어진 7175합금의 ITMT공정 인자를 이용하여 Fig. 2(c)공정으로 플랜지형의 형단조품을 500톤 프레스에서 cross head speed를 105mm/sec로 단조하였다. 또한 비교평가를 위하여 Fig. 1에서 나타난 것처럼 주조 빌렛을 그대로 이용하는 일반 온간단조공정(HF), 주조조직을 파괴시킨 형단조용 빌렛제작을 위한 3축 자유단조가 첨가된 일반공정(HF-BM)과 그리고 3축 자유단조와 ITMT를 적용한 공정(HF-BM-ITMT) 등 3가지로 나누어 실험하였다.

이후 ITMT 조건시험 시료는 단면 중심부에서, 형단조시험 시료는 가장 두꺼운 부위에서 미세조직을

관찰하였으며 상분석기(Image analyzer Quantimum 520)를 이용하여 배율 300배로 결정립크기를 측정하였다. 또한 재균질화처리후의 석출물분석을 위하여 주사전자현미경(SEM, Jeol 840A)과 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)를 사용하였다.

기계적 성질은 인장시험과 충격시험을 하였으며, 인장시험은 게이지 길이 10mm, 직경 3.5mm인 sub-size 시편을 $1 \times 10^{-3} s^{-1}$ 변형속도로 최대용량 10톤의 만능시험기(Instron, 4505)에서 시험하였으며, 충격시험은 최대용량 360J인 계장화 Charpy 충격시험기에서 두께 5mm, 폭 10mm의 sub-size로 상온에서 5.15m/sec 충격속도로 총충격에너지(Et), 균열생성에너지(Ei), 균열전파에너지(Ep)를 측정하였다.

시료의 제한으로 통상사용하는 공정(HF)과 중간가공 열처리 적용공정(HF-BM-ITMT)으로 상호 비교하였으며, 인장시험은 종(Longitudinal) 방향과 횡(Transverse) 방향, 충격에너지는 두께(ST: Short Transverse) 방향에서 서로 그 값을 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 재균질화 처리에 따른 석출특성의 변화

ITMT 조건 시험용 7175 합금의 초기상태는 주조시 형성된 합금원소의 편석을 줄이고, 비평형 2차상을 모상으로 용해시키기 위해 완전 균질화 처리된 것이며, 이 상태의 미세조직은 직경 0.1 μ m 수준의 미세한 E상 입자 즉, Cr 분산상(dispersoid: Al₁₈Mg₃Cr₂)과 직경 1 μ m 수준의 조대한 M상(MgZn₂+CuAl)으로 구성된다. 미세한 E상은 후속 재결정시에 입계이동을 방해하여 미세한 재결정립 형성을 가능하게 하며, 조대한 M상은 전단되지 않는 강성의 석출물로서 후속 온간 가공시 변형대를 형성시켜 재결정의 핵 생성 위치로 작용한다. 본 연구에서는 초기 상태의 시료를 재균질화 열처리하였는데 이는 냉각 도중 조대한 M상의 석출을 최대화하기 위함이다.

통상의 FA-ITMT에서는 재균질화 처리를 대략 482℃까지 가열한 후 260℃ 부근까지 단계별 노냉한 조직을 재결정 처리를 위한 초기조건으로 설정하고 있으나, 본 연구에서는 생산성을 고려하여 482℃까지 가열후 상온까지 직접 노냉하였다. Photo. 1은 7175 초기상태와 재균질화처리 상태에서 주사전자현미경으로 2차상을 확인한 결과이며, 초기상태에 비해 재균질화처리 후에는 길이 약 5 μm , 직경 1 μm 크기의 M상으로 판단되는 판상 또는 구상 석출물의 밀도가 크게 증가한 것을 알 수 있다.

EDS 분석결과를 보면 판상 석출물은 주로 Cu, Zn로 구성된 화합물이며 셀 경계부에 존재하는 것은 Al, Cu, Fe로 구성된 공정화합물로 판명되었으며, Al₇Cu₂Fe계로 추정된다⁴⁾.

Al합금의 중간가공열처리에서는 입자의 종류, 크기, 분포 등이 재결정에 중요한 역할을 한다. 유효한 입자의 크기는 약 1 μm 이상이어야 재결정의 핵생성 위치로 작용하여 입자간 간격이 작을 때 촉진된다고 한다.^{5), 6)}

3.2 재결정에 미치는 온간가공온도의 영향

재균질화 처리를 거쳐 조대한 석출물을 석출시킨 시편을 상온(25℃)에서 고온(420℃)까지 온도를 변화시켜 60%의 압축가공(upsetting)을 도입한 후 재결정처리 함으로써 재결정에 미치는 온간가공온도 변화의 효과를 관찰한 결과 Photo. 2와 같다.

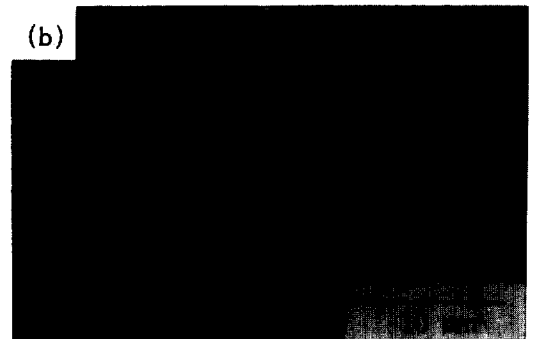
상온가공 그리고 온간가공 온도가 250℃까지는 미세한 등축(equiaxed)의 결정립이 형성되어 재결정 현상이 뚜렷하였으나, 310℃ 이상의 고온가공 온도에서는 재결정 조직은 거의 보이지 않고, 가공축에 수직인 방향으로 길게 늘어난 pan-cake 형상의 온간가공 조직만 나타났다.

재결정 처리후 상분석기를 사용하여 결정립 크기를 측정된 결과 가공을 상온에서 하였을 경우는 6.7 μm , 7.0 μm , 13.2 μm , 16.8 μm 및 17.2 μm 로 커졌으며, 310℃ 이상의 고온에서는 매우 제한적으로 재결정되어 매우 조대한 결정립을 나타내었다. 온간가공의 목적은 가공변형에 의하여 축적된 에너지, 즉 재결정구동력을 부여하여 전위밀도를 높임으로써 재결정 핵 발생을 유도하기 위한 것이다. 가공온도가 높았을 때 재결정이 안된 이유는 재결정에 필요한 에너지가 축적되지 않았고, 전위들이 대부분 소멸되었기 때문인 것으로 생각된다. 그러므로 온간가공온도가 높을 경우에는 더 큰 가공량이 필요할 것이며, 상온에서 가공할 경우에는 슬립의 제한으로 균일한 변형이 어려우므로 균열발생 가능성이 높을 것이다.

미세조직을 비교한 결과 미세 재결정이 나타난 온도는 200~250℃인 온간가공영역이다. 본 연구에서는 가공온도를 2250℃로 선정하여 횡단조시험에 적용하였다. 재결정 처리에 의한 결정립 미세화 기법은 온간가공에 의해 조대한 M상이 전위셀벽과 아결정립에 drag force를 작용함으로 재결정 핵생성하게 된



(a) Before re-homogenized



(b) After re-homogenized

Photo. 1 Scanning electron micrographs showing the distribution of second phase particles of 7175 billets

다. 새로운 재결정립은 미세한 E상에 의해 입계이동이 저지되므로 재결정립의 성장이 억제되고, 조직은 매우 안정된다.

3.3 재결정에 미치는 온간가공량의 영향

재결정에 미치는 온간가공량의 영향을 조사하기 위하여 온간가공 온도를 250℃로 하고, 가공 양을 30%에서 80%로 변화시킨 후 재결정처리 및 용체화, 시효처리를 실시하여 조직관찰한 결과 Photo. 3과 같다. Photo. 3 (a), (b)와 같이 40%까지는 재결정립의 크기가 조대하고, 불균일한 분포를 나타내지만 50% 이상의 경우에는 미세하고, 균일한 재결정립 분포가 나타나고 있다. 그리고 상분석기를 사용하여 결정립 크기를 측정한 결과 온간가공량을 30%에서 80%로 증가시켰을 때 최종 재결정립 크기는 각각 27.1 μm 에서 6.5 μm 로 감소하였으며, 60% 이상에서는 감소량이 크지 않았다. 이로부터 온간가공량은 60% 이상부터 재결정립 크기가 10 μm 이하로 급격히 감소되므로 적정온간 가공량으로 판단하였다. 그

러나 가공방법이나 시편의 상하 마찰력 차이 때문에 균일한 변형을 기대하기 어려우므로 3축 자유단조법으로 변형을 갖도록 하는 것이 유리하다.

3.4 재결정에 미치는 재결정온도의 영향

온간가공을 250℃에서 60% 변형한 시편을 재결정 온도 300℃, 350℃, 400℃, 440℃, 460℃ 및 475℃로 변화시켜 재결정처리한 시편을 용체화처리 및 시효열처리(T74)를 행한 후의 미세조직은 Photo. 4와 같다. 재결정온도가 증가할수록 재결정립의 크기는 감소하고, 균일하게 재결정이 일어난다. 이로부터 재결정처리 온도는 재결정립 크기도 미세하며 더욱 등축형상이 되는 400℃ 이상이 적합할 것으로 판단된다. 재결정 처리온도가 너무 높으면 급속가열에 의한 비평형 공정상의 용융이 일어나므로 재료의 물성에 악영향을 미친다.

3.5 형단조시험

이상과 같이 시편시험으로 결정된 7175 합금의

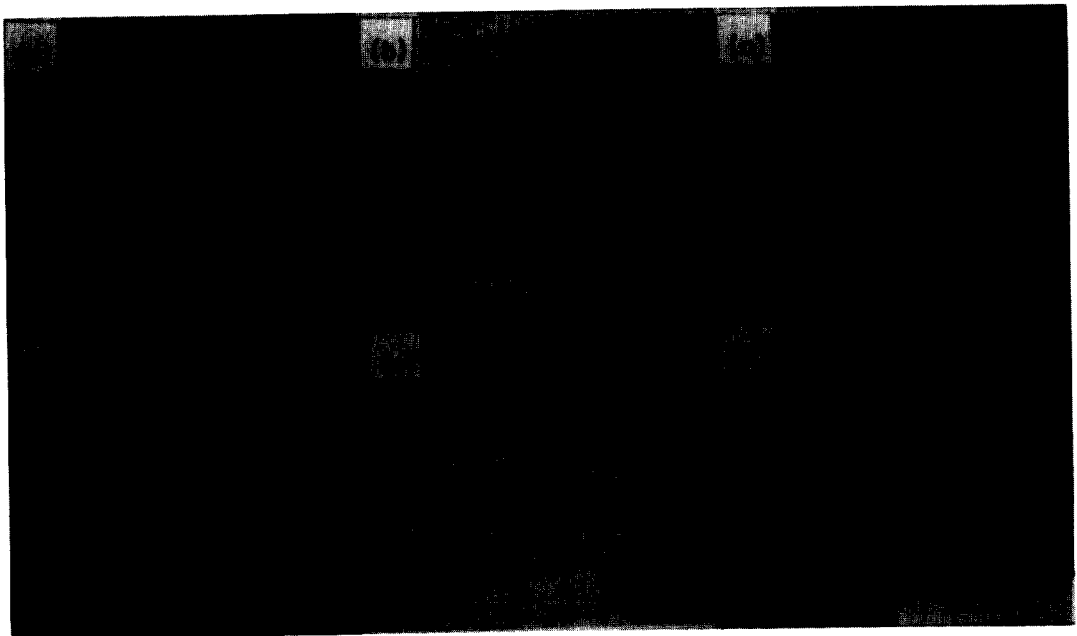


Photo. 2 Optical microstructures of billet deformed 60% at different working temperatures.

a) 25℃ b) 200℃ c) 250℃ d) 310℃ e) 350℃ f) 420℃

ITMT 공정인자를 실제 형단조품에 적용하기 위하여 플랜지형의 형단조품을 대상으로 단조시험한 후 상분석기를 이용하여 결정립의 결정립 크기 분포를 측정한 결과 기존공정으로 제작한 단조재의 평균 결정립

크기는 약 $62\mu\text{m}$ 의 조대한 전형적인 열간가공 조직을 나타내며 크기분포는 직경이 $10\sim 120\mu\text{m}$ 인 결정립이 분포하고 있다. ITMT 공정을 도입한 후 형단조한 중간가공열처리 적용공정에서는 거의 대부분 재결정

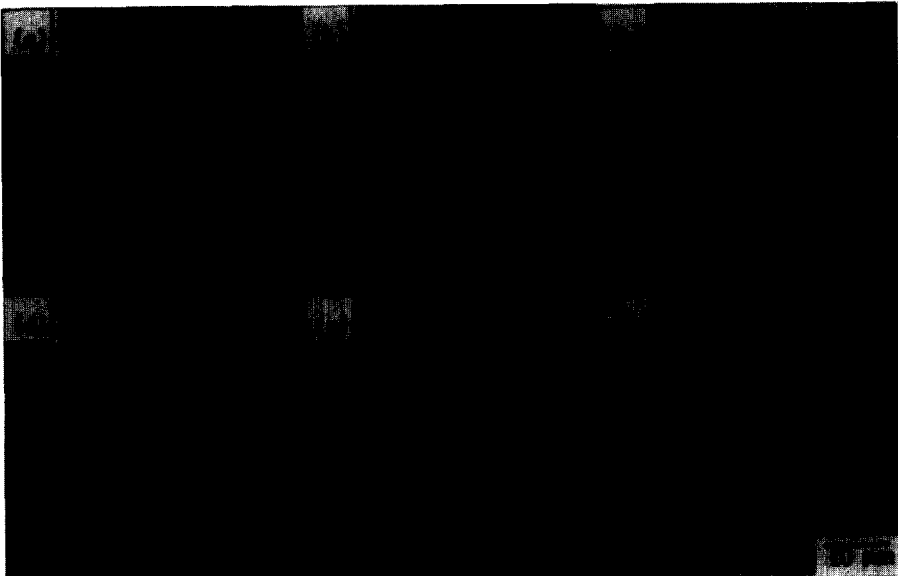
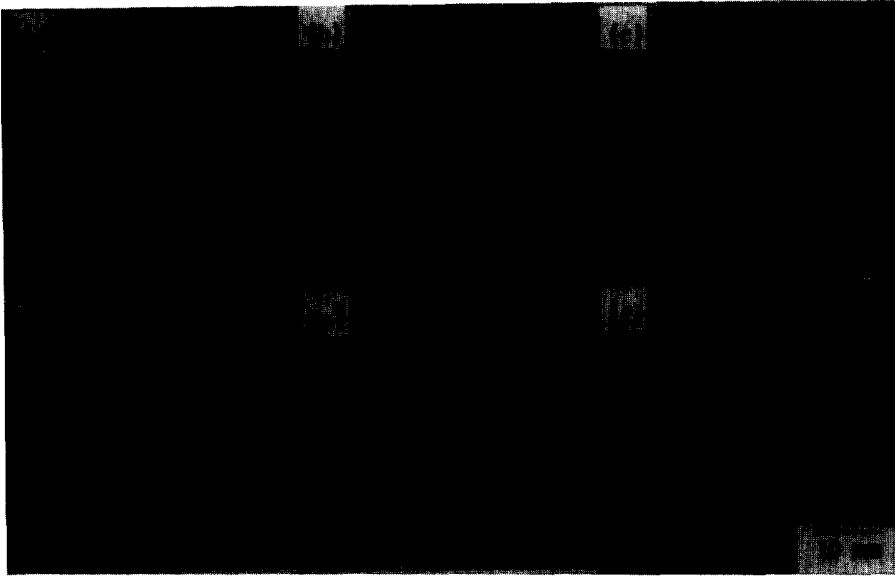


Photo. 4 Optical microstructures of the samples treated at different recrystallization temperatures for 2 hours.
a) 300°C b) 350°C c) 400°C d) 440°C e) 460°C f) 475°C

화되어 평균 결정립 직경이 약 $17\mu\text{m}$ 인 미세 재결정립을 나타내며 크기분포는 직경이 $20\mu\text{m}$ 이하인 결정립이 주된 분포를 이루고 있다. 시편을 용체화처리 및 시효열처리(T74)를 행한 후의 미세조직은 Photo. 5와 같다. 이로부터 빌렛을 3축 자유단조한 후 ITMT 공정을 적용하면 형단조 공정에서도 결정립이 미세화됨을 확인하였다. 미세화된 재결정립이 고온형단조(400°C 부근)와 최종열처리 즉 T74처리(SHT+Aging)에 의해 다시 성장하지 않아야 하지만 변형량이 크지 않은 경우 E상이 결정립성장을 억제시켜 조직을 안정화시킴을 알 수 있다.

3.6 기계적 성질

형단조품에서 인장 및 충격시편을 채취하여 기계적 성질을 시험한 결과 Table 2 및 Table 3과 같다. 시험결과 통상 공정(HF)보다 중간가공열처리 적용공정(HF-BM-ITMT)으로 인장특성은 강도를 유지하면서 연신율이 약간 상승하였으며, 약 16% 수준으로 종(Longitudinal)방향과 횡(Transverse)방향에 관계없이 균일하여졌으며, 충격에너지는 종에너지면에서 약 50% 상승하였다. 이는 파괴양상이 두 공정 공히 Photo 6에서와 같이 입계파괴 양상이나 중간가공열처리공정을 적용한 경우, dimple이 다소 함유된

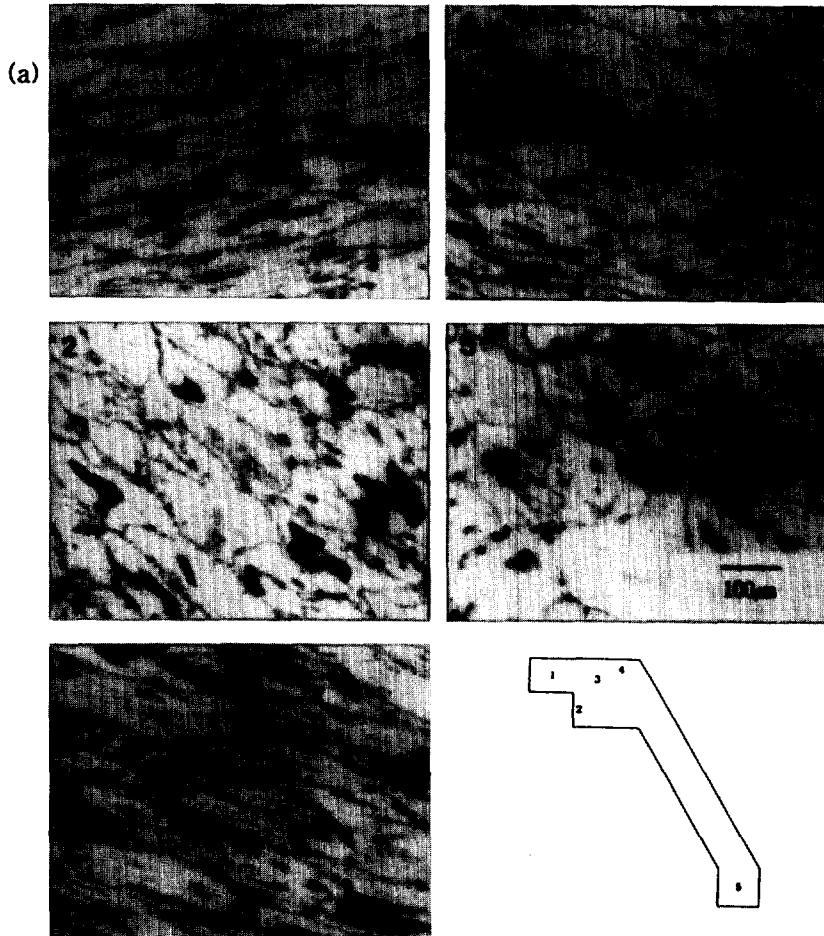


Photo. 5 Optical microstructure of the flange type of the die forged sample.
 (a) conventional proces (b) ITMT process

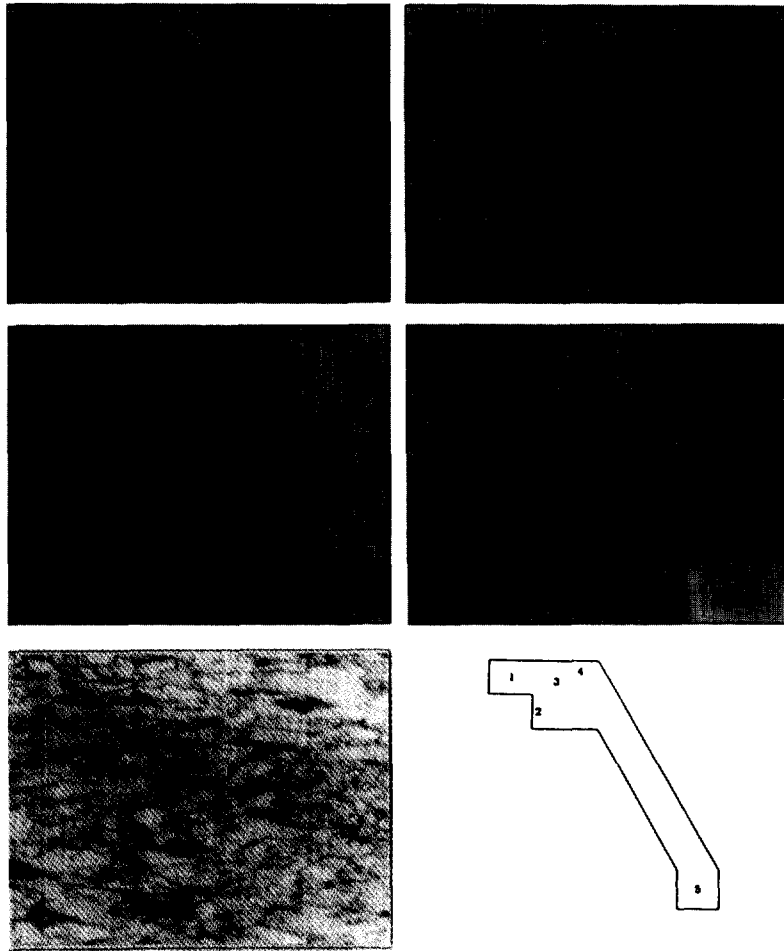


Photo. 5 Optical microstructure of the flange type of the die forged sample.
 (a) conventional proces (b) ITMT process

연성파괴에 가까운 파면이며, 이로 인하여 연신율이 높은 것으로 판단된다.

Table 2. Tensile properties of the forged parts.

제 조 방 법	시 편 방 향	Tensile properties		
		UTS(MPa)	YS(MPa) 0.2% offset	E1.(%)
기존공정(HF)	Longitudinal	523	456	12.4
	Transverse	536	472	13.0
중간가공열처리적용공정 (HF-BM-ITMT)	Longitudinal	537	467	16.0
	Transverse	534	459	16.2

Table 3. Charpy Impact Energy of the samples.(ST direction)

제 조 방 법	균열개시에너지(Ei) [J/cm ²]	균열전파에너지(Ep) [J/cm ²]	총 충격에너지(Et) [J/cm ²]
기존공정(HF)	1.630	0.555	2.185
중간가공열처리적용공정 (HF-BM-ITMT)	2.337	1.510	3.847

4. 결 론

- 1) 재결정립은 200~250℃의 온간가공 온도에서 미세하였으나, 310℃ 이상의 온도에서는 조대화 되었다. 또한 250℃에서의 온간가공시 가공량의 증가에 따라 미세화 되었으며, 80% 가공량에서 6.5μm 크기의 균일한 미세조직을 나타냈다.
- 2) 재결정립은 재결정 처리온도를 475℃까지 증가 시킴에 따라 재결정립은 크기가 점차 감소하였으

나 400℃ 이상에서는 거의 유사하게 미세화 되었다.

- 3) 중간가공열처리 공정 및 통상공정으로 형단조하여 미세조직을 비교한 결과 중간가공열처리 공정이 통상적인 단조공정에 보다 약 1/3 이하로 미세화 된 17μm의 재결정립을 얻었다.
- 4) 중간가공열처리 공정을 적용한 결과 인장특성면에서 신율이 약 16% 이상 향상되었으며, 충격에너지는 약 50% 상승하였다.

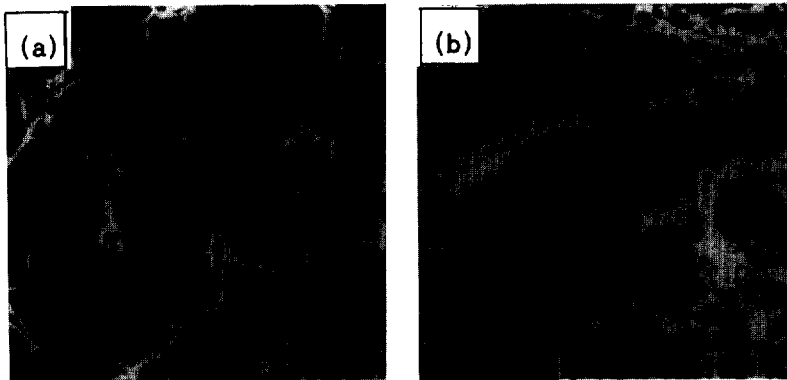


Photo. 6 Fracture surfaces of the notched Charpy impact samples.

(a) conventional process (b) ITMT process

참고문헌

- 1. E. Di Russo, M. Conserva, M. Buratti and F. Gatto, Mater. Sci. Eng., 14(1974), 23
- 2. J. Waldman, H. Sulinski and H. Markus, Metall. Trans., 5A(1974), 573
- 3. 小林俊郎, 新家光雄, 出川公雄·輕金屬, vol. 36 (1986), 718
- 4. R.J.H. Wanhill, G.F.J.A. van Gestel, ALUMINUM, 54(1978), 543
- 5. 洪 倫義, 村松 尙國, 遠藤 孝雄, 輕金屬, 39 (1989), 541
- 6. C.C. Bampton, J.A. Wert, and M.W. Mahoney, Met. Trans. 13A(1982); 193
- 7. J. T. Staley, ASTM STP605, ASTM(1974), 71