

중간가공열처리를 적용한 Al 7175 합금 형단조제품의 기계적 성질

손영일, 이경훈, 은일상, 송영범, 이용연
국방과학연구소

요 약

Al 7175 합금 형단조에서 주조조직 파괴를 위한 빌렛제조(BM)공정과 ITMT공정이 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하였다. BM공정과 ITMT 공정을 동시에 적용한 형단조제품의 기계적 성질은 길이방향에서 인장강도가 10%, 연성이 50%, 충격흡수 에너지가 20% 증가되었고 횡방향에서도 인장강도가 7%, 연성이 9% 증가되었다. 이와 같은 기계적 성질의 향상은 BM과 ITMT공정을 동시에 적용한 형단조제품 미세조직의 결정립크기가 $17\mu\text{m}$ 로서 일반단조조직보다 3배이상 미세하고, 균일한 등축재결정 조직을 나타내는데 기인하는 것으로 판단된다.

1. 서 론

비강도가 높아 항공기 뿐만 아니라 유도탄의 기체 및 추진기관 경량화 구조 재료로서 많이 사용되고 있는 7XXX계 알루미늄 합금 형단조제품¹⁾²⁾³⁾은 강도, 연성, 인성등의 제반물성을 만족하기 위해서는 주조조직이 완전 제거될 수 있는 높은 압출비(8:1)를 갖는 소재를 사용해야만 한다. 그러나 현재 국내에서 개발하고자 하는 직경 700mm 이상의 형단조재의 경우 직경 300mm 이상의 압출소재를 필요로 하나, 이것은 국내에서 생산 가능한 주조 빌렛의 최대 직경이 약 370mm이므로 단조용 소재로 압출봉재를 사용하는 것이 불가능하므로 주조빌렛을 사용하여야 한다. 따라서 주조빌렛으로 제작된 형단조제품은 주조조직이 상당히 잔류하게 되어 기계적 성질이 나쁘게 된다. 그러므로 Al 합금대형 형단조제품에 사용되는 소재는 주조조직을 효과적으로 제거할 수 있는 다른 방법을 필요로 하고 있다. 현재 미국, 러시아를 비롯한 선진 외국에서는 대형 형단조제품의 소재는 Billet Making(BM)으로 알려진 주조조직 파괴를 위한 자유단조를 실시하고 있는 것으로 소개되고 있으며, 이러한 자유단조방법은 각 단조회사의 자체 know-how로서 보유하고 있다. 따라서 대형 형단조제품 제작을 위해서는 BM공정 개발이 필수적이며, 또한 형단조시 나타내는 이방성(특히 ST방향의 낮은 물성)을 방지할 수 있는 방법이 동시에 적용되어야 한다.

형단조제품의 방향성을 방지하는 기술로는 결정립의 미세화와 균일화가 가능한 중간가공열처리(ITMT : Intermediate Thermo-Mechanical Treatment)방법이 있다. ITMT는 균질화처리-저온소성가공-재결정처리 과정을 통해 결정립 및 아결정립을 미세화시키는 공정으로서 ISML-ITMT⁴⁾, FA-ITMT⁵⁾ 및 RI-ITMT⁶⁾⁷⁾ 등이 알려져 있으며 Fig.1에서 각 ITMT 공정의 흐름도를 나타내었다. 그러나 이러한 중간가공열처리는 주로 판재에서 적용되고 있으며, 형단조 공정에 적용한 연구는 현재까지 보

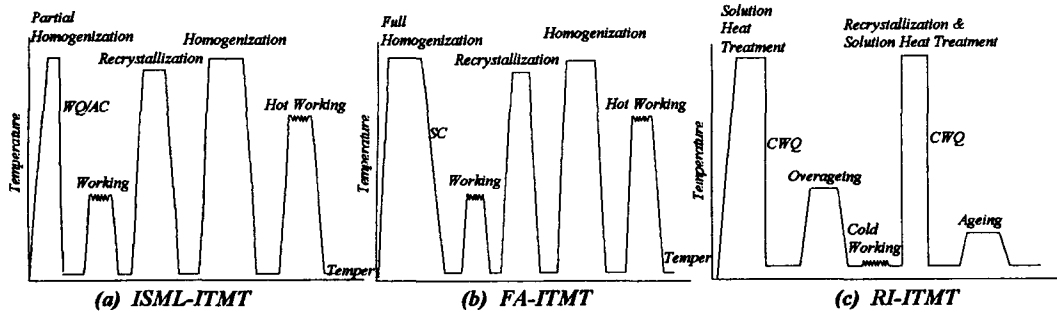


Fig. 1. Procedures of various Intermediate Thermo-mechanical Treatment(ITMT).

고되고 있지 않으며, 형상이 복잡한 형단조품의 경우 균일한 변형이 사실상 불가능하고 온간가공시 장비 요구하중이 매우 크게 되기 때문에 적용이 어려운 것으로 생각된다. 따라서 7175 합금의 대형 형단조 공정에 BM 및 FA-ITMT 개념을 도입하여 주조조직 제거 및 결정립 미세화에 의한 재료 특성 개선에 관한 연구가 필요할 것으로 판단되었다. 또한 대형 형단조품을 이용하여 최적공정을 도출하는데에는 경비 손실 및 시간적 손실이 크므로 따라서 실물형상의 축소모델 형단조시험을 통하여 실험을 행하였다. 이러한 축소모델 형단조품은 정확한 응력해석을 통한 하중분포 및 press용량을 파악하여 최적의 조건을 도출하였고, 이것은 대형의 형단조품에 적용 가능할 것으로 예측되었다.

따라서 본 연구는 주조빌렛의 주조조직 파괴를 위한 자유단조공정(BM)과 ITMT 공정을 축소모델 형단조품에 적용하여 이것이 형단조품의 기계적 성질에 미치는 영향을 조사 분석하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 시료는 (주) 삼선공업에서 D-C 연속주조한 후 460°C에서 30시간 1차 균질화 처리한 직경 15인치의 Al 7175 합금 빌렛 이었으며, 합금의 조성은 Table 1과 같다. Fig. 2는 실험과정을 나타낸 것으로서 비교평가를 위하여 주조빌

Table 1. Chemical composition of Al 7175 alloys used for experiments

	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.
7175	5.40	2.74	1.66	0.20	0.08	0.03			bal.

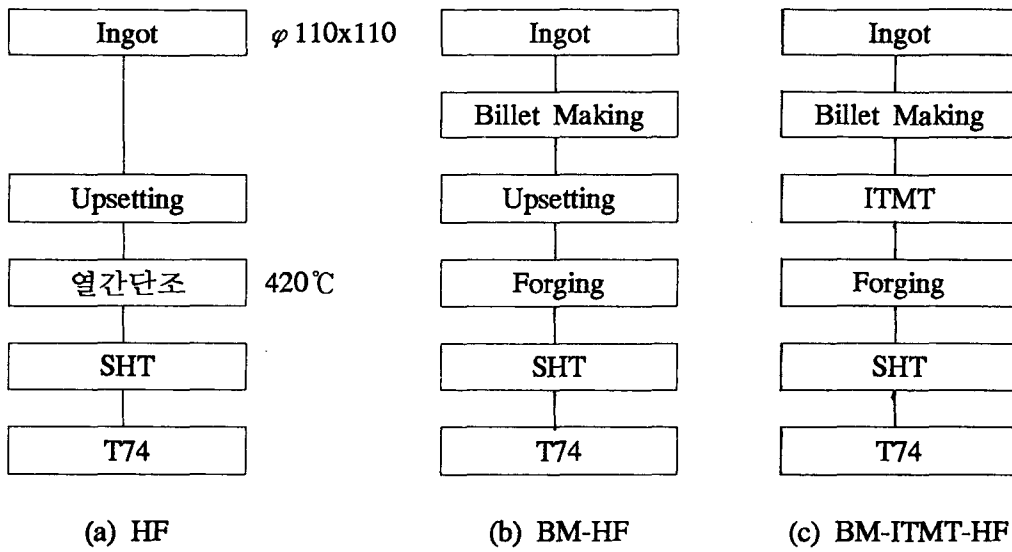


Fig. 2. Experimental procedures for BM and ITMT process in 7175 Al alloy.

렛을 그대로 이용하는 일반 고온단조공정(HF), 주조조직을 파괴시킨 형단조용 빌렛 제조를 위한 3축 자유단조가 첨가된 일반공정(BM-HF)과 그리고 3축 자유단조와 ITMT를 적용한 공정(BM-ITMT-HF) 등 3가지로 나누어 실험하였다.

기존공정인 HF공정은 직경110X길이110mm의 빌렛트를 열간단조온도인 420°C에서 55% upsetting하여 직경190X길이49mm의 pan-cake를 만든후 420°C에서 열간단조하여 Fig.3과 같은 형상으로 형단조를 실시하고, 482°C에서 2시간 동안 용체화 열처리를

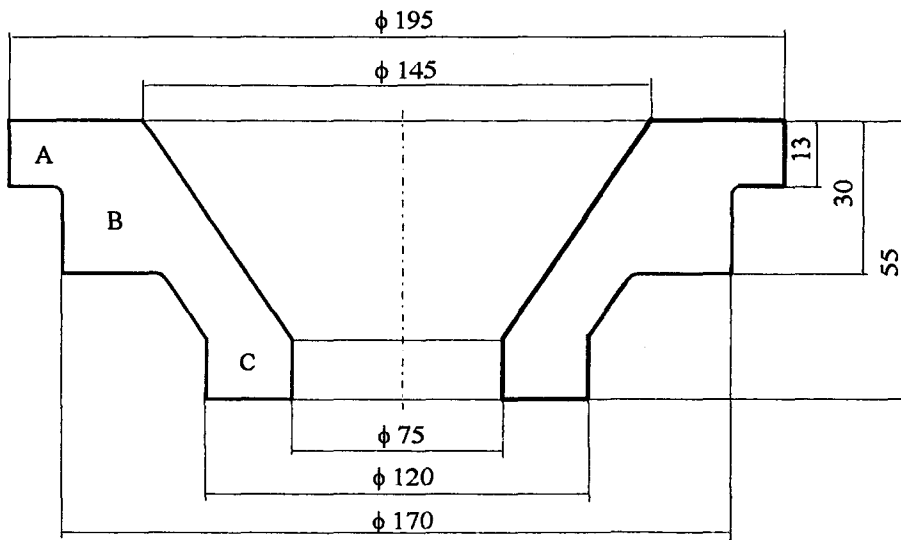


Fig. 3. Schematic diagram of shaped-forgings

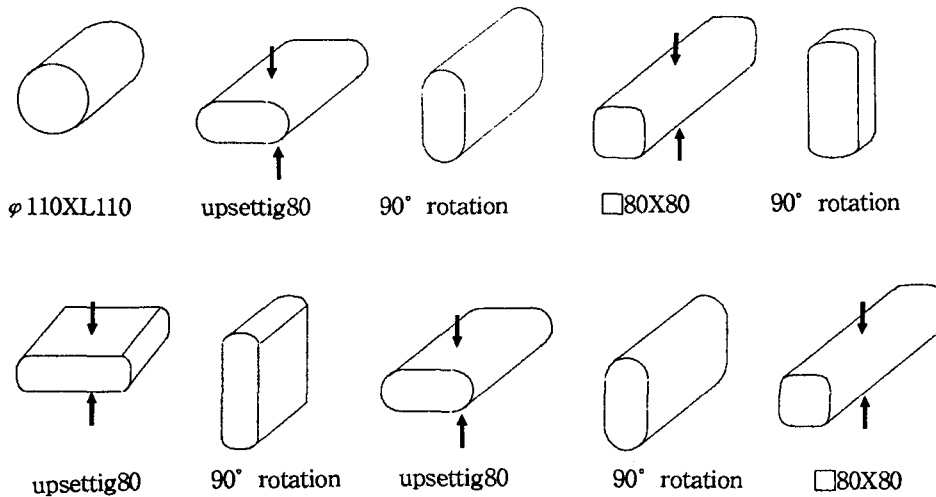


Fig. 4. Billet Making(BM) Process.

실시하고, 시효는 T74처리(107℃, 7시간+177℃, 6시간)로 실시하였다. 그리고 BM-HF공정은 기존공정에 빌렛트의 구조조직 제거를 위한 3축 자유단조(BM)를 실시한 것으로 그 공정은 Fig.4와 같다. BM-ITMT-HF공정은 BM후 빌렛트를 482℃에서 3시간 동안 재균질화처리후 250℃에서 70% 이상의 온간가공을 실시하여 직경190X 길이49mm의 pan-cake를 만든 후 475℃에서 2시간동안 재결정처리를 실시하였고 열간단조, 용체와 처리 및 시효처리는 모든 공정을 동일하게 처리하였다.

열처리가 끝난 시험편은 절단 후 grinding/polishing하여 광학현미경을 이용하여 미세조직을 관찰하였으며, 결정립 크기는 image analyser (Cambridge, QUANTIMET 520)를 사용하여 측정하였다.

Fig. 5는 실험에 사용된 인장 시험편 및 충격시험편의 방향별 채취 위치 및 형상 및 크기를 나타낸 것으로 인장 시험편은 gauge length 10mm의 sub-size 시험편이며 충격시험편은 두께 5mm, 폭 10mm의 ASTM sub-size 시험편을 사용하였다. 인장시험은 10 ton 용량의 만능 재료 시험기(INSTRON, 4505)를 사용하여 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 의 변형 속도로 시험하였으며, 변형은 최대 100%까지 측정할 수 있는 변위측정기(extensometer)를 사용하여 측정하였다. 충격시험은 360 J 용량의 계장화(計裝化) Charpy 충격 시험기를 사용하여 시험하였으며, 충격에너지(E_t), 균열생성에너지(E_i : crack initiation energy), 균열전파에너지(E_p : crack propagation energy), 최대하중(P_{max}) 및 최대하중까지의 변위(D_i)를 측정하였다. 단조품의 인장 및 충격시험시의 파괴거동을 관찰하기 위하여 파면을 주사 전파현미경을 이용하여 관찰하였다.

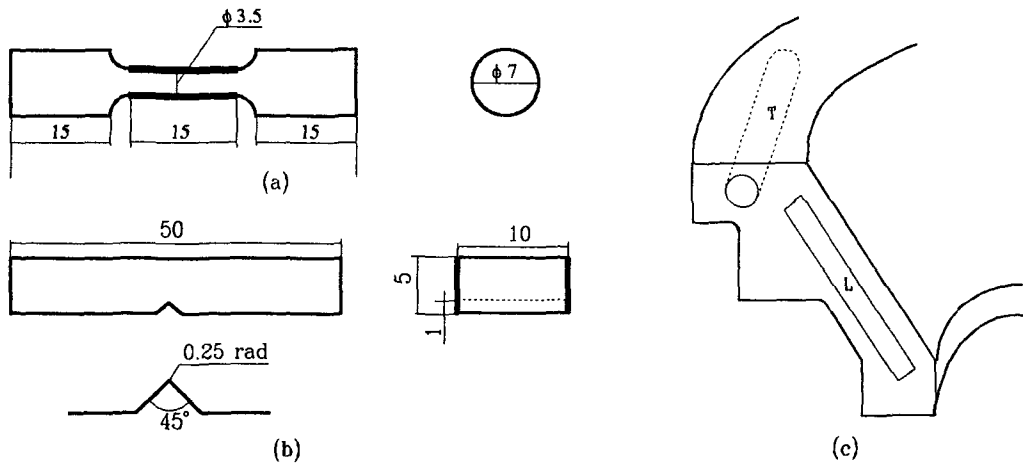


Fig. 5. (a) Tensile specimen, (b) impact specimen, and (c) direction.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. BM에 의한 미세조직변화

Fig.6은 3축자유단조에 의한 BM이 미세조직에 미치는 효과를 분석하기 위하여 주조 빌렛에서 upsetting만 수행한 경우와 BM이 추가로 수행된 경우 pan-cake의 강화 열처리후 중간부위 양 끝단 및 중앙부위의 미세조직을 나타낸 것이다.

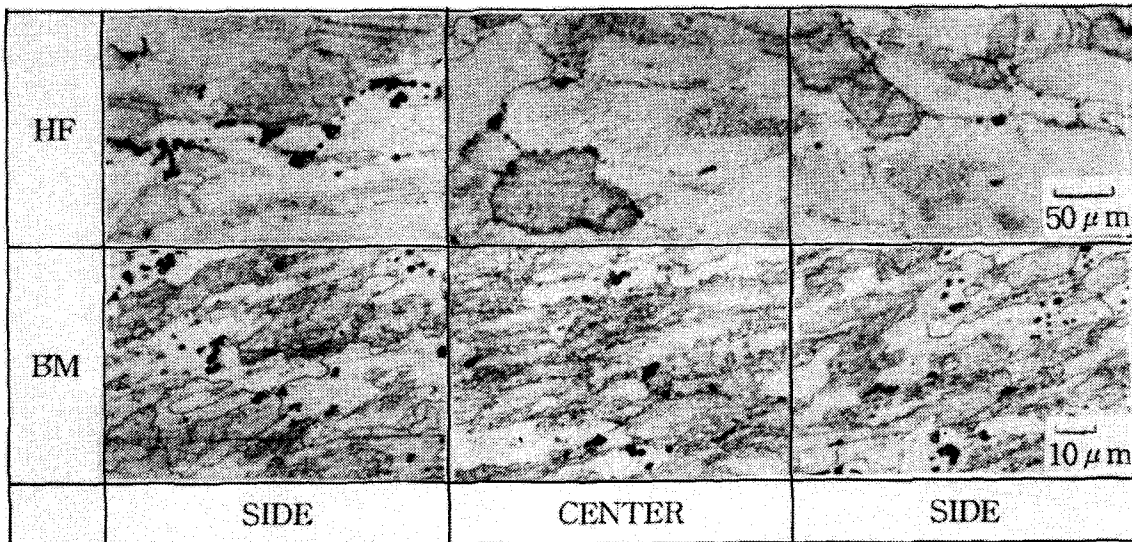


Fig.6 Microstructure of HF and BM pan-cake

Upsetting만 수행된 경우 전 부위에 걸쳐 약 $100\mu\text{m}$ 의 조대한 결정립이 대부분을 이루고 있으며 입계에는 상당히 많은 불용성 화합물과 가용성 비평형상으로 추정되는 2차상들이 존재하고 있으며 주조조직도 상당히 존재하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 조직들은 작은 응력하에서 쉽게 균열되거나 또는 균열성장이 용이하게 되므로 파괴인성이 상당히 낮은 것으로 예측된다. 이에 반하여 BM처리된 조직은 상당히 미세화 되어진 재결정립을 보여주고 있으며 결함의 우선경로인 2차상들도 상당히 감소되어 있음을 알 수 있으며 주조조직은 거의 제거되었음을 보여주고 있다. 이것은 BM처리시의 고온자유단조에 의하여 2차상 입자들이 재분포되고 또한 많은 소성변형으로 인하여 축적된 에너지가 후속 열처리 과정에서의 미세 결정립 생성에 대한 구동력이 되었기 때문으로 예측된다. 따라서 BM공정은 형단조품의 결정립 미세화 및 균일화를 위한 필수공정으로 생각된다.

3.2 형단조품의 기계적 성질

3.2.1 인장 특성

Fig.7은 각 공정에 의해 제조한 형단조품을 Fig.5와 같이 인장시편을 채취하여 인장 시험한 결과를 나타낸 것으로 longitudinal 및 transverse 방향 모두 인장강도 및 신율이 증가하였으며, 이로서 주조조직 파괴를 위한 자유단조 및 결정립 미세화를 위한 중간가공 열처리(ITMT)공정이 형단조품의 기계적 물성의 증가에 효과적이었음을 알 수 있다. 그리고 HF 공정의 경우 방향에 따라 연성이 약 35%이상 차이가 나는데, 이는 3.3.1 에서 나타내어진 미세조직의 결과에서 보면 조대한 주조조직의 결정립의

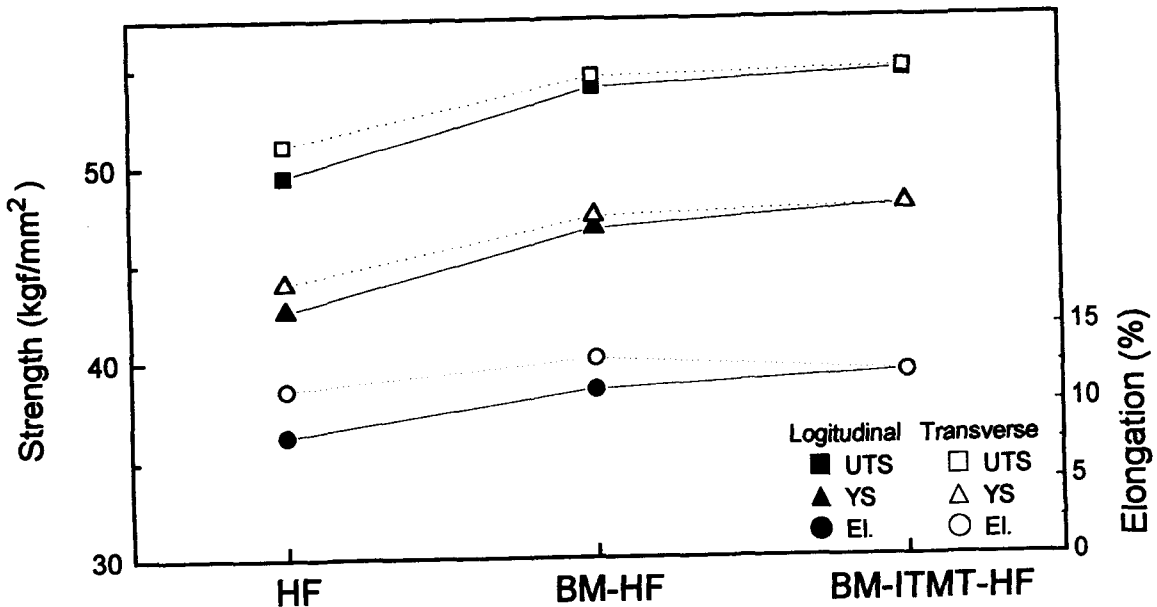


Fig.7 Tensile properties of various die-forgings

단순 연신에 의한 조직의 불균일때문으로 생각된다. 그러나, 중간 가공열처리를 도입한 경우 결정립의 longitudinal방향 및 transverse방향에 대한 aspect ratio의 감소에 의해 두 방향의 연신율은 차이가 없이 모두 증가하였다. 이와같이 결정립이 미세화 되면 Hall-Petch 관계식에 따라 강도가 증가되며⁸⁾ 또한 최근의 연구 결과에 의하면 다결정합금의 강도는 결정립의 크기 분포의 폭에 의해서도 영향을 받은 것으로 알려지고 있다. 따라서 단조품의 결정립 미세화는 조직의 이방성을 최소화하여 두꺼운 단조품의 두께(ST)방향의 연성과 파괴인성을 향상시킬 것으로 예상된다. Dirusso는 7075 합금 판재를 ITMT하여 연성의 증가를 보고한 바 있으며, 러시아 VILS에서는 7050 합금 단조품을 결정립 미세화시켜 ST 방향의 연성과 파괴인성을 크게 증가시켰다고 알려져 있다.

3.2.2 충격시험

Table 2는 제조방법에 따른 형단조품의 충격시험 결과를 나타낸 것으로 기존공정인 HF에 비하여 주조조직을 제거한 BM-HF와 BM-ITMT-HF 공정이 모든 결과치가 증가하고 있음을 보여준다. 이러한 결과는 결정립 미세화에 의한 충격인성의 증가와 파괴인성에 악영향을 주는 2차상 입자의 크기와 분포의 변화 때문인 것으로 판단된다. 그러나 ITMT를 적용한 경우에는 오히려 충격에너지 및 하중이 약간 감소하는 경향을 보이는데 이것은 Staley의 연구 결과에 의하면 재결정에 의해 결정립이 미세화되면 전위 하부구조가 소멸되므로 조대한 슬립밴드 형서에 의한 입계파괴를 조장하여 파괴인성을 오히려 떨어뜨린다고 보고하고 있다⁹⁾.

3.3. 형단조품의 미세조직 및 파면

3.3.1 미세조직

Fig.8은 Fig.2에 나타난 각종 공정으로 제조한 형단조품의 최종 열처리가 끝난 후의 단면 미세조직을 Fig.3에 나타난 위치별로 나타내고 있다. HF 공정으로 제조한 형단조품은 다른 것에 비해 결정립이 조대하였으며, 위치에 따라 결정립의 크기 및

Table 2. Impact properties of various die-forgings.

제조방법 \ 충격값	Pmax (KN)	Df (mm)	Ei (J/cm ²)	Ep (J/cm ²)	Et (J/cm ²)
CV	2.17	0.74	1.88	0.88	2.76
BM	2.49	0.87	2.63	1.26	3.89
ITMT	2.42	0.81	2.27	1.02	3.29

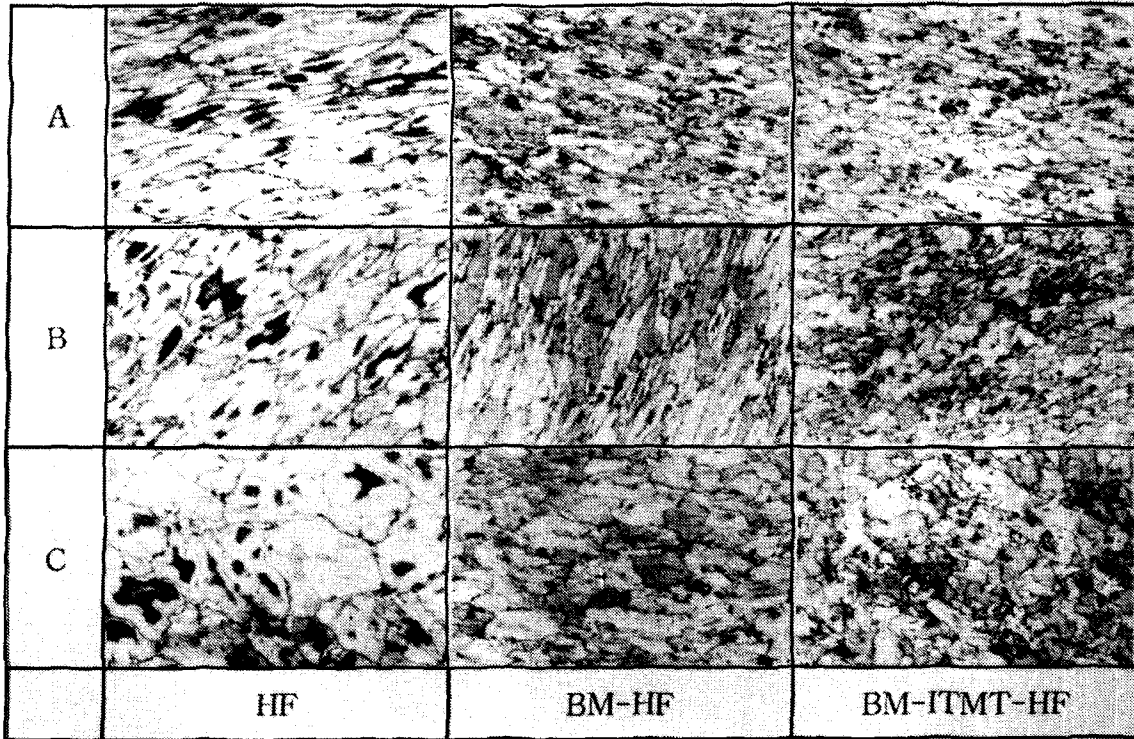


Fig.8 Microstructure of various die-forgings

형상이 불균일하였으며, 성형성이 낮아서 형단조품의 step 부분 즉, 단조시 극심한 금속유동이 일어나는 부분에는 균열이 발생하였다. 변형을 가장 적게 받은 C번 위치의 미세조직을 보면 주조시 생성된 수지상정 및 용질원소의 편석, 비평형 공정상 등과 같은 주조조직이 최종 단조품에 잔존하고 있었다. 그러므로 단순한 upsetting만으로는 주조조직을 제거할 수 없었으며, 앞서 설명되어진 주조조직 제거공정(BM)이 열간 단조에는 필수적으로 도입되어야 할 것이다.

BM 공정이 추가된 BM-HF 공정은 편석 및 수지상정등과 같은 주조조직은 모두 제거되었으나, 위치에 따른 미세조직의 불균일성은 그대로 잔존하고 있었으며, 열간 가공조직에 의한 grain flow가 존재하므로 ST방향(두께방향)의 물성이 저하되리라 예상된다. 그리고 결정립도 많이 미세화 되었는데, 이는 앞서 설명되어진 pan-cake의 미세조직이 열간 단조조직에 적용되었기 때문이다.

BM-ITMT-HF 공정은 중간가공 열처리에 의해 결정립을 미세화시킨 pan-cake를 열간단조하여 제조하는 공정으로 HF 공정보다 결정립 크기가 작으면서, 거의 equaxed grain 이므로 이방성은 크게 개선되리라 생각된다. 또한 단조품의 각 위치에 따른 결정립의 크기, 형상 및 분포도 다른 공정보다 균일하였으며, 균일

석출된 Cr dispersoid(E상)에 의하여 결정립성장이 억제되므로 기계적 성질의 균일성을 확보할 수 있을 것으로 예상되었다.

Fig.9는 단조품의 단면 미세조직중 C면 위치에서 결정립 크기에 따른 분포를 image analyser로 분석한 결과이다. HF 공정의 경우 넓은 범위에 걸쳐 10~120 μm 의 결정립이 분포되어 있었으며, BM-HF 공정은 20~60 μm 의 결정립이 BM-ITMT-HF 공정은 대부분이 20 μm 이하의 미세 결정립으로 이루어져 있음을 알 수 있다.

이로부터 빌렛을 3축으로 자유단조하여 그 과정에 ITMT를 적용하면 형단조 공정에서도 판재에서와 같은 결정립 미세화를 기대할 수 있다. 일단 미세화된 결정립이 고온형단조(약 420 $^{\circ}\text{C}$ 부근)와 최종열처리(SHT+Aging)에 의해 다시 성장하지 않아야 하는 조건이 있다. 그러나 금형온도가 낮아 재료가 저온 변형하거나 변형속도가 너무 높지 않는 한, 재균질화처리 단계에서 이미 미세하게 석출한 E상 분산입자는 강력한 결정립 성장 억제 역할을 할 것으로 예상된다.

3.3.2 파면특성

Fig.10은 충격시험 후 파단면을 주사전자현미경으로 관찰한 것으로 HF 공정과 ITMT가 적용된 공정을 상호 비교하였다.

저배율 사진을 보면, BM-ITMT-HF공정을 적용한 경우가 HF공정으로 제조한 경우보다 결정립들이 훨씬 미세하며, 연성파괴시 나타나는 dimple이 더 많이 존재하고 있다. 이것들을 고배율로 관찰한 결과, HF공정의 경우 주로 입계파괴에 의한 취성파괴를 나타내고 있으나, BM과 ITMT공정을 적용한 경우는 많은 dimple 형성에 의한 입내파괴와 입계파괴가 혼합된 양상을 나타내고 있다. 이와같은 결과는 BM과 ITMT공정을 적용한 경우 충격값 및 연신율이 향상되는 것과 잘 일치하고 있다.

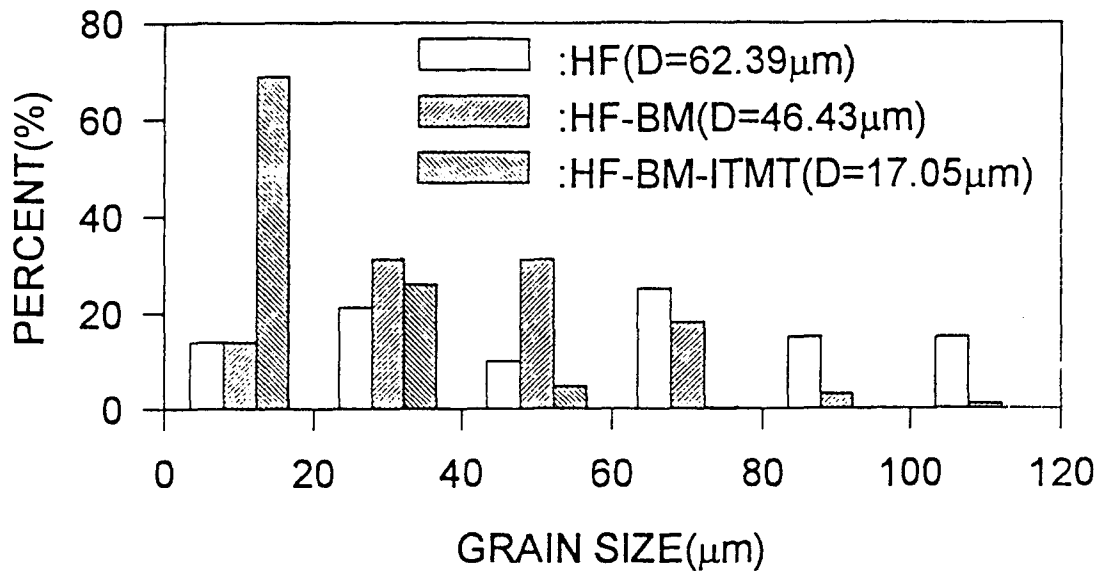


Fig.9 Grain size distribution of various die-forgings

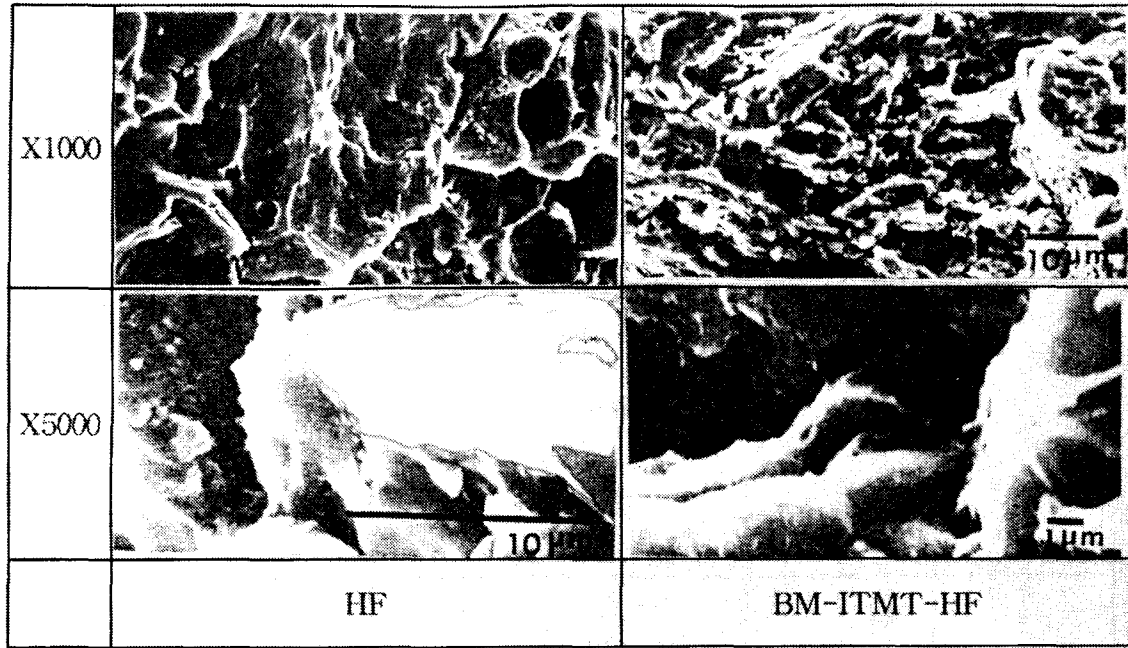


Fig.10 Scanning electron fractographs of fractured charpy V-notch specimens of various die-forgings

4. 결론

- 1) 일반단조공정의 pan-cake에 BM을 수행한 결과 주조조직의 제거, 입자의 미세화 및 불용성 2차산화합물의 감소등의 효과가 나타나 BM공정은 형단조품의 결정립 미세화 및 균일화를 위한 필수공정으로 생각되었다.
- 2) BM공정과 ITMT 공정을 동시 적용한 형단조품의 기계적 성질은 길이방향에서 인장강도가 10%, 연성이 50%, 충격흡수에너지가 20% 증가되었고 횡방향에서도 인장강도가 7%, 연성이 9% 증가되었다. 이와 같은 기계적 성질의 향상은 BM 과 ITMT공정을 동시 적용한 형단조품 미세조직의 결정립크기가 $17\mu\text{m}$ 로서 일반단조조직보다 3배이상 미세하고, 균일한 등축재결정 조직을 나타내는데 기인 하는 것으로 판단된다.
- 3) BM 및 ITMT공정은 7XXX계 알루미늄 형단조품의 취약점인 ST방향의 낮은 인 성 및 연성의 개선 및 잔존하는 주조조직 제거에 필수적인 공정으로 추진기관 및 항공기용 경량화 구조재의 신뢰도 향상에 기여할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. A.R.Canfield, E.E.Andersib : "Space Shuttle Nozzle Development", AIAA-78-951
2. C.A.Chase : "IUS Flight Motor Design and Full-Scale Development Program", AIAA-78-1017.

3. R.W.Magness, J.W.Gasaway "Development of a High Performance Rocket Motor for the VT-I Tactical Missile", AIAA-88-3325
4. E. Dirusso, M. Conserva, M. Buratti and F. Gatto, Mater. Sci. Eng., 14(1974), p.23
5. J. Waldman, H. Sulinski and H.Markus, Metall. Trans., 5A(1974), p.573
6. J.A. Wert, N.E. Paton, C.H. Hamilton and M.W. Mahoney : Metall. Tras. vol.12A (1981), p.1265
7. 小林 俊郎, 新家 光雄, 出川 公雄 : 軽金属, vol.36 (1986), p.718.
8. A.M. Marcus, B.L. Adams, and A.B. Gokhale : Scri. Met., vol.27 (1992), p.155
9. J. T. Staley, ASTM STP605(1974), ASTM, p.71