

■■■■■■■■■■
論 文
 ■■■■■■■■■■

반응고 공정 가압 주조한 A356 합금의 미세조직 및 기계적 특성

김석원 · 강연철 · 김동건 · S.Kumai*

Microstructural and Mechanical Characteristics of A356 Alloy Cast by Semi-Solid Squeeze Process

Sug-Won Kim, Yeun-Cheul Kang, Dong-Kun Kim, Sinji Kumai*

Abstract

So far, the study on semi-solid process has been carried out to develop and research new advanced materials without some casting defects. In this study, A356 billets consisted of various dendritic shapes were prepared using electro-magnetic stirring process continuously. As-cast respectively has liquidus temperature of 625.6°C and solidus temperature of 573.55°C A356 slugs were reheated homogeneously at different temperatures of 580, 590 and 605°C, followed by squeezing in a mold insulated with applied pressures(0, 25, 50 and 70 MPa). In order to investigate on aging response for casts, 50 MPa squeezed specimen among all specimens was prepared in aging treatments, which conditions are aging temperature of 160°C and holding times of 0, 45, 90, 270, 360, 720, 1440 and 2880 min after solution treatment (540°C for 10 hr). SSM ingot with the output velocity of 150mm/min appeared more spheroidal shape and fine structure than that with the output velocity of 250 mm/min. According to increasing in reheating temperature, numbers of fatigue cycles, U.T.S and elongation increased at same time.

(Received June 16, 2000)

1. 서 론

경량재료로서 알루미늄합금은 자동차용 경량부품 제조에 많이 이용되고 있으며 주로 다이캐스팅이나 용탕 단조법에 의해 제조되고 있다[1]. 그러나 이들 방법에 의해 제조된 부품은 응고시 수지상 조직이 형성[2]됨으로써 인성이나 내구성이 부족한 단점[3]이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해서는 액상과 고상영역에서 응고시 전자교반함으로써 수지상 조직을 파쇄하여 구상화 시키고 균일한 미세조직을 가지는 합금을 제조하는 기술[4,5]이 필요함과 동시에 빌렛을 반응용 상태로 재가열 하여 재료의 리오로지 특성을 이용하여 제품을 성형시키는 공정기술이 필요하다.

반응고·반응용(이하 반응고라 칭함) 가공법은 주조와 단조를 혼합한 복합가공법으로서 1971년에 MIT [2,6,7]에서 연구되어 rheocasting, thixocasting 또는

stirrcasting으로 부르고 있다[8-10] 오늘날 반응고가공법은 반응고 성형법(rheocasting)과 반응용성형법(thixofforming)의 두 가지로 분류할 수 있다. Rheocasting은 반응고 상태에서 제조된 슬러리(slurry)를 직접성형가공하여 최종제품으로 제조하며, Thixofforming은 반응고 상태에서 주조된 빌렛(이때의 조직은 구형의 비수지상 조직)을 제조한 후, 이 빌렛을 적당한 길이로 절단된 슬러그(slug)를 반응용 상태로 재가열하여 단조 혹은 다이캐스팅을 실시하여 최종제품으로 제조하는 것이다.

본 연구에서는 A356합금을 이용하여 반응고 구상화 조직을 얻기 위하여 전자교반법을 이용하였으며 제조된 소재(Billet)를 slug상태절단하여재가열 및 가압한후 시험편을 제조하였다. 이 때 재가열 온도와 가압력에 따른 미세조직과 기계적 성질 및 시효현상의 변화에 대하여 연구하였다.

전북대학교 신소재 공학부(Faculty of Advanced Materials Engineering, Chonbuk National University, Chonju 561-182, Korea Research Institute of Advanced Materials Development)

*일본동경공대(Tokyo Institute of Technology, Japan)

2. 실험방법

본 연구에서 A356재료를 사용하여 반응고 상태로 한 다음 고/액 공존 영역에서 전자교반을 이용하여 76 mm 빌렛을 제조하였다. 이때 시편의 제조조건으로써는 용해온도 800°C, 출탕온도 770°C, 턴디시 용탕온도는 640°C였으며 전자교반 조건으로써는 50V, 90A, 220 Gauss, 몰드벽에서의 용탕회전 속도는 500 RPM 이었고 냉각수로는 18°C의 물을 분당 20l의 속도로 냉각시켰다. 인출속도는 150 mm/min(이하 A라 함)과 250 mm/min(이하 B라함)으로 하였다. 이러한 빌렛을 $\Phi 55$ mm로 가공한 다음 반응고성형법(thixoforming)에 의해 즉, 슬러리 상태로 재가열 한 후 가압하여 최종 시험편을 제조하였다. 이 때 재가열 온도는 580°C ($fs = 0.550$), 590($fs = 0.475$)°C, 605°C($fs = 0.307$) 였으며 550°C까지 가열한 다음 550°C에서 5분간 유지후 목표온도로 재가열 하여 시험편을 제작하였다. 이때 승온속도는 1°C/sec 였다. 가압력은 25, 50, 70 MPa로 변화시키면서 시험편을 제작 하였다. 시험편 제작에 사용된 금형은 내부반경 60 mm, 외부반경 100 mm, 높이 160 mm인 SM45C로 제작하여 사용하였으며, 반응고 슬러그를 주입한 후 초기의 급속한 냉각을 방지하기 위하여 금형내부 및 하부에 두께 2 mm 단열재로 단열하여 사용하였다. 금형에 사용한 열전대는 금형 밑에서 2 cm 높이로 하였고 내부와 외부에 설치하여 측정하였다.

각각의 시험편을 금형밑 15 mm 높이에서 가로로 절단한 후 center부와 edge부를 채취하여 5% 불산으로 수초간 부식한 다음 관찰하였으며 재가열 온도에 따른 초정 α 의 변화를 관찰하기 위하여상분석기를 이용하여 초정 α 의 크기 및 구상율을 측정하였다. 이때 초정 α 의 크기는 시편 center부에서 100개를 측정한 후 평균하였으며 초정 α 의 구상율은 center부에서 먼저 장축을 측정한 후 그 장축에 수직인 단축을 측정하여 장축과 단축의 비로써 나타내었다. 경도는 HR_F를 이용하여 시편중앙에서 20 mm떨어진 부분을 원주방향으로 평균 7회 측정 후 평균하였다.

인장시험 및 피로시험은 시편을 봉상으로 가공 하여 실험 하였다. 피로시험은 최대하중을 320 kgf으로 하였고 응력비(R)는 0.1로 한 다음 20 Hz로 하여 완전한 파단이 일어날 때까지 행하였다. 이때 파단이 일어날 때까지의 cycle 수를 측정하였다. 또한 인장 시험 및

피로시험을 행한 후 그 파단면을 광학 및 SEM으로 관찰 하였다.

열처리는 590°C로 재가열한 시험편을 제작한 후 540°C에서 10시간 동안 용체화 처리를 행한 후 160°C에서 0분 45분 1.5, 3, 6, 12, 24, 48시간동안 시효처리를 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 조직관찰

Fig. 1은 인출속도가 150 mm(A 시편)인 SSM ingot를 750°C까지 가열한 다음 금형에 중력 주조한 후 시편 밑에서 15 mm 지점을 가로로 절단하여 시편의 center부와 edge부를 관찰한 조직 사진이다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 그 조직은 dendrite 조직을 나타내고 있으며 시편의 edge부가 center부보다는 냉각속도가 빨라짐으로 인해서dendrite의 조직이 더 미세하게 나타나고 있다. 또한 (b)에서 보면 공정부분에 조대한 공정 Si가 침상으로 존재하고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 2은 SSM ingot의 중앙부분을 관찰한 그림이다.

SSM 방법으로 제작했을 경우 dendrite 조직이 나타나지 않고 장미상 형태의 조직을 나타내고 있다.

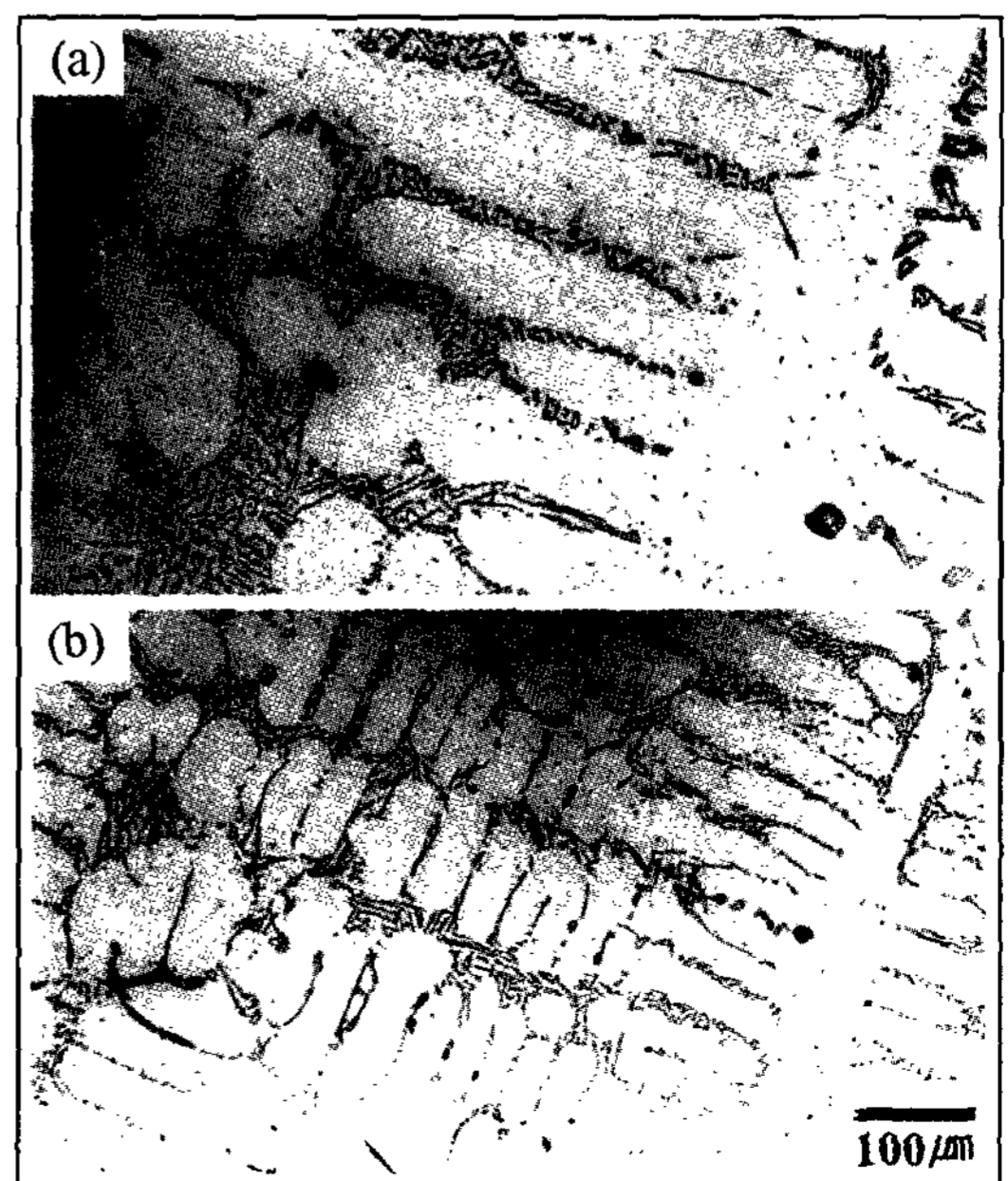


Fig. 1. The microstructures of gravity cast A specimen (a) center (b) edge

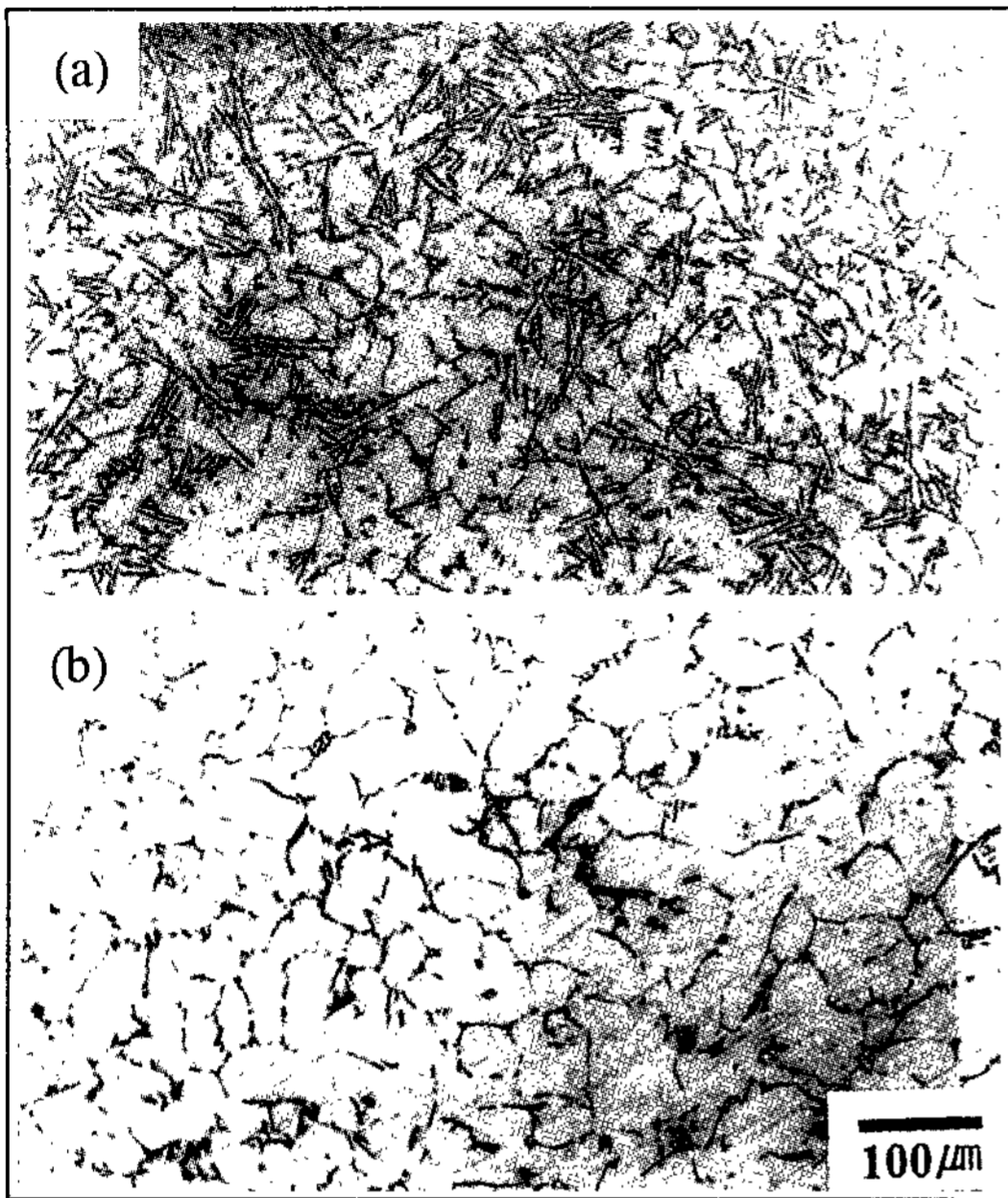


Fig. 2. The microstructures of semi-solid ingot fabricated with various SSM cast method (a) A (output velocity 150 mm/min) (b) B (output velocity 250 mm/min)

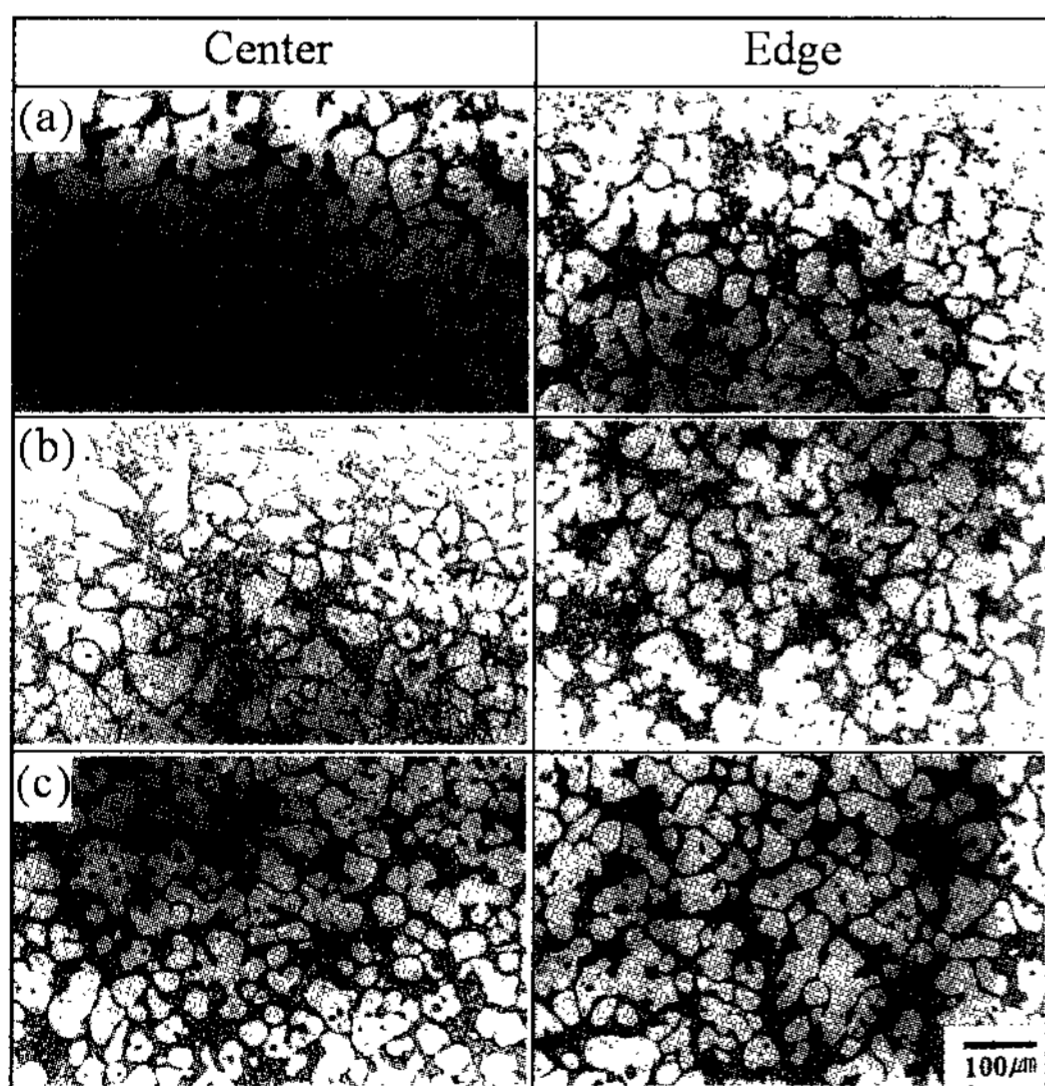


Fig. 3. The changes of microstructures with various reheating temperature in 50MPa squeezed A specimen (a) A580°C (b) A590°C (c) A605°C

A시편과 B시편을 비교하면 A시편의 경우가 B시편의 경우보다 더 구상이며 더 많이 파쇄된 dendrite 조직을 나타내고 있다. 이는 인출속도가 늦어짐으로써 그

만큼 교반하는 시간이 길어지기 때문에 더 구상이고 파쇄된 dendrite조직을 나타내는 것으로 생각된다.

Fig. 3는 인출속도가 150mm/min인 ingot를 580°C, 590°C 그리고 605°C로 재가열 한 다음 50 MPa로 Squeeze 하여 제조한 시험편(이하 A580°C 그리고 A590°C라 함)의 조직 사진이다. 재가열 온도가 증가함에 따라 공전조직 분율이 증가하였으며 초정 α 의 크기와 구상률도 증가함을 알 수 있다. 또한 Center가 Edge보다 이러한 현상이 크게 나타나고 있는데 그 이유는 Squeeze할 때 Squeeze의 영향으로 내부가 외부보다 냉각속도가 늦기 때문으로 생각된다. Semi-solid ingot를 반응고 상태의 온도로 재가열 할 때 다음의 3가지 현상이 일어남을 알 수 있다. 그 첫째는 초정 α -Al가 장미상 형태로부터 구상화 형태로 변하고 둘째는 온도가 증가함으로써 여러 입자가 서로 부착되어 계면면적을 줄이기 위해 초정 α -Al가 조대화 되며 셋째로 평형상태를 유지하기 위해 작은 초정 α -Al가 부분 용해된다. 이렇게 부분적으로 용해 되어 온도가 증가함으로써 Eutectics가 증가되어 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 계면 전체의 계면 에너지를 감소하기 위한 원소의 확산에 기인되는 것으로 보고[11]되고 있다. 또한 초정 α 안에 isolated eutectics가 나타나 있음을 알 수가 있다.

Fig. 4에서 Isolated eutectics가 생성되는 것을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 SSM ingot의 경우 조직은 완전한 구상의 조직을 가지지 않고 장미상 형태의 조직을 가진다. 이러한 장미상 형태의 조직이 재가열 됨에 따라 계면전체의 에너지를 감소시키기 위하여 구상으로 되며 조대화 되는데 이때, dendrite arm 사이에 있는 공정이 조대화 되면서 초정 α -Al로 trap되는 것으로 생각된다. 일반적으로 입자 또는 수지상 가지가 조대화 될 때, 고상률이 낮을 경우에는 Gibbs-Thomson 효과에 의해 상대적으로 큰 입자가 작은 입자를 흡수하면서 성장하는 ripening현상이 지배적으로 작용하며, 고상률이 높은 경우에는 여러 입자가 서로 부착되어 계면면적을 줄이는 coarsening이 지배적인 기구로 입자가 조대화 된다[12]. 이번 실험에서는 두 번째의 경우인 coarsening이 지배적인 조대화 기구라고 생각된다.

Fig. 5는 A, B의 SSM ingot를 590°C로 재가열 한 후 50 MPa로 가압하여 제조한 시험편을 관찰한 조직 사진이다. 사진(a)와 (b)를 비교하면 A590°C 시험편이

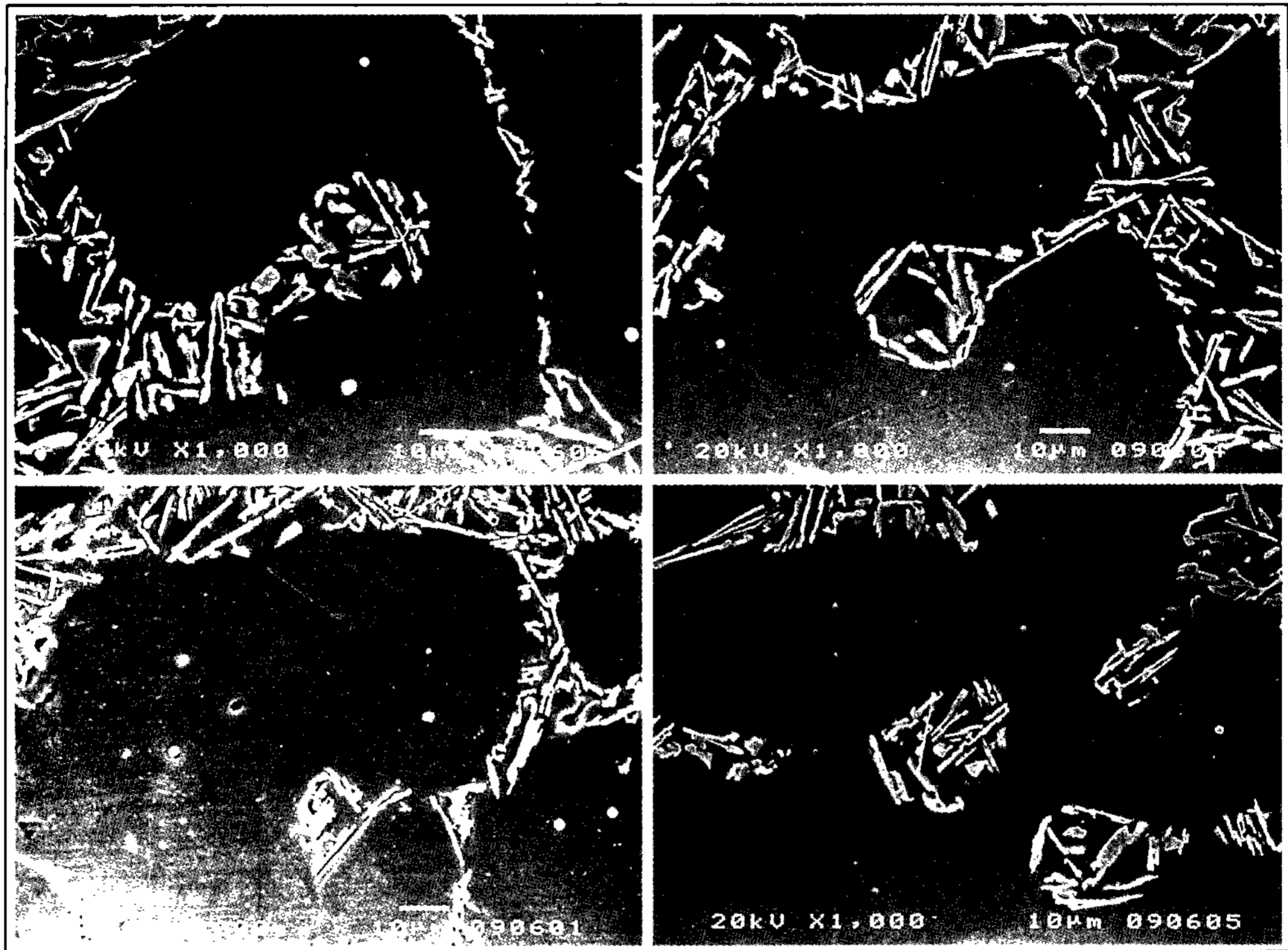


Fig. 4. Process of formation of isolated eutectic inside dendrites

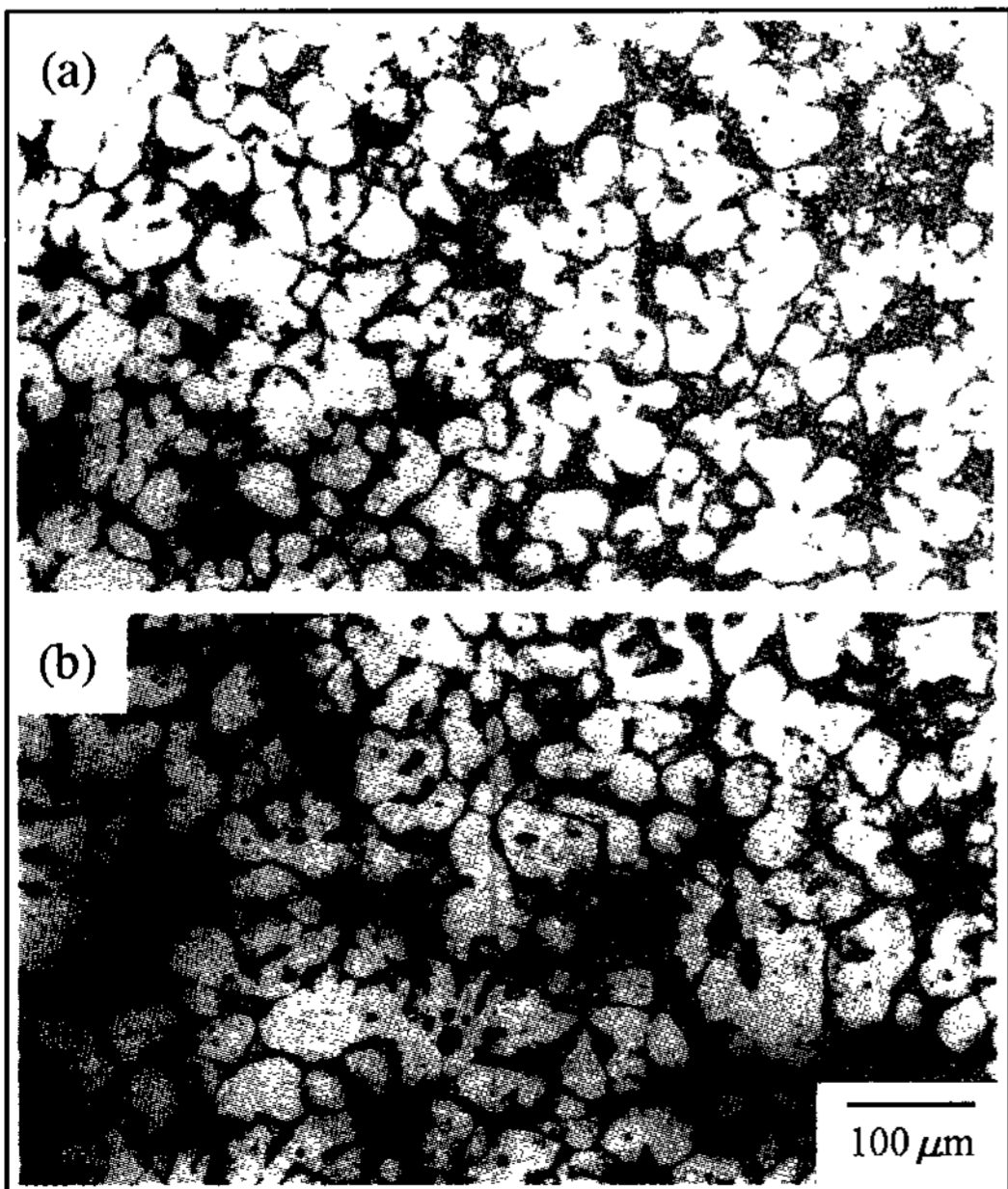


Fig. 5. The change of microstructures in various specimens reheated 590°C and applied with 50 MPa (a)A590°C (b) B590°C

B590°C 시험편보다 더 구형이며 미세한 초정 α dendrite를 보이고 있다. 이 원인은 Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 SSM ingot의 제조시 인출속도가 적어 A SSM ingot가 B SSM ingot보다 미세화된 영향이 그대로 가압시에도 유전이 된다고 생각되며 더욱이 가압에 의한 냉각속도의 증가로 인하여 Dendrite의 성장속도가 억제 되었기 때문이다.

Fig. 6는 A, B의 SSM ingot를 580, 590 그리고 605°C로 재가열 한 후 50 MPa로 가압하여 제작한 시편의 중앙부분에서 측정된 초정 α -Al의 grain size와 구상율이다. Fig. 3의 조직사진에서 볼 수 있듯이 초정 α -Al의 grain size는 온도 변화에 따라 큰 차이가 나지 않았다. 이는 550°C에서 목표온도까지의 승온속도가 0.5°C/sec이고 목표 온도에 도달한 후 바로 가압하였기 때문에 초정 α -Al이 조대화 될 시간이 충분하지 않았기 때문으로 생각된다. 그러나 재가열 온도가 증가함에 따라 초정 α -Al grain size는 약간 증가하는 경향을 보이고 있으며 재가열 온도가 증가함에 따라 초정 α -Al의 grain size의 편차가 감소하였다.

A시험편과 B시험편을 비교하면 A시험편 경우가 약

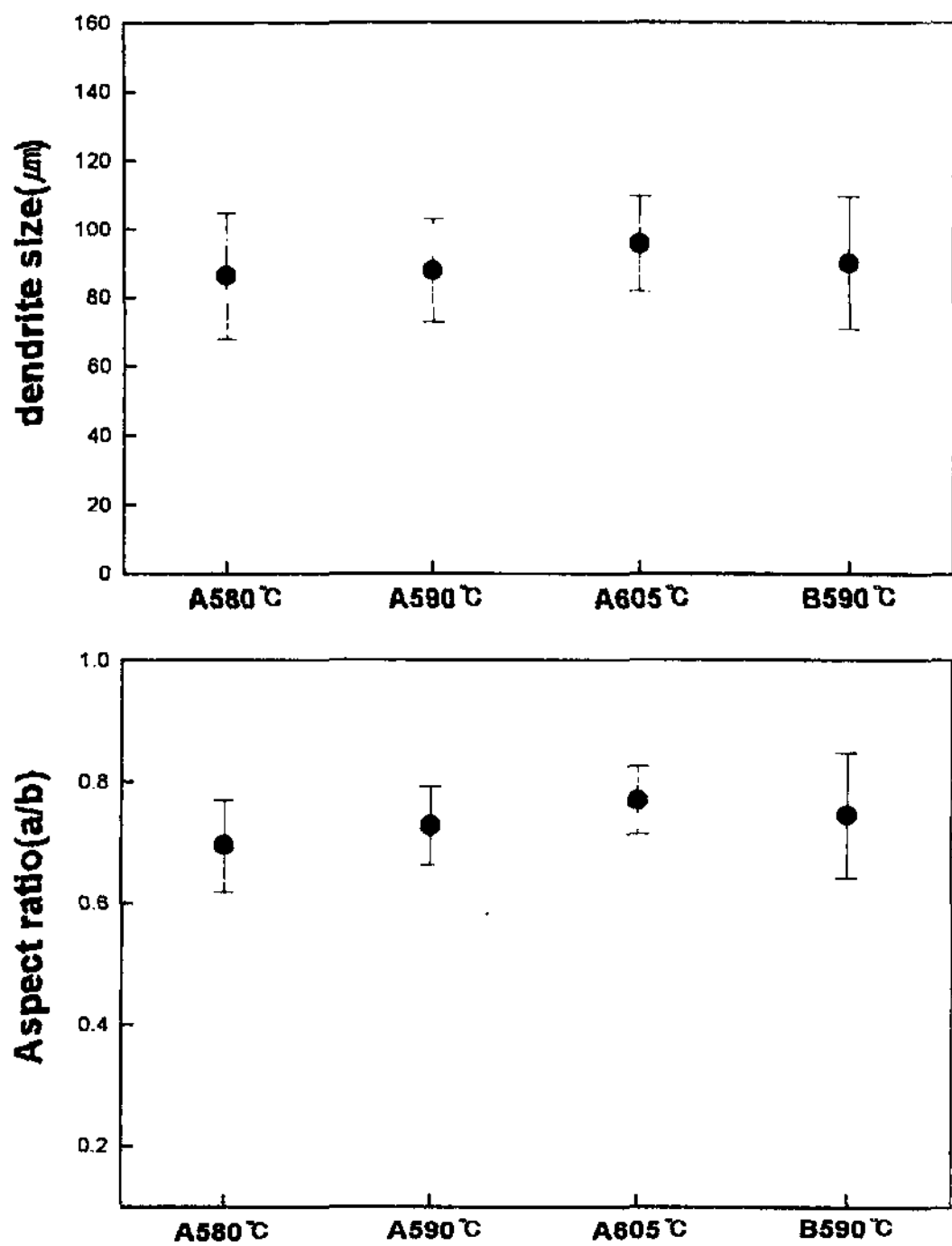


Fig. 6. Dendrite size and aspect ratio according to manufacturing conditions in various specimens (50 MPa)

간 더 미세하였으며, 그 Dendrite size의 편차도 적게 나타났다. 이는 처음에 제작한 SSM ingot에서 A시험편이 B시험편의 경우보다 교반 시간이 길어짐으로써 초정 α -Al이 더 미세하고 균일하게 파쇄 되었기 때문에 재가열 후에도 초정 α -Al의 grain size가 적은 것으로 생각된다.

구상율도 grain size와 같은 양상을 나타내고 있다. A590°C시험편이 B590°C 시험편보다 그 편차가 작았다. 따라서 Fig. 4와 Fig. 5로부터 재가열 된 시험편의 조직은 초기 SSM ingot의 영향을 많이 받는 것으로 생각된다.

Fig. 7은 A시험편을 590°C로 재가열 한 후 가압력에 따른 공정상의 변화를 관찰한 조직사진이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 무가압일 경우에는 조대한 공정 Si가 관찰 되나 가압력이 증가함에 따라 공정 Si가 미세하게 관찰되는 것을 볼 수 있다. 이는 가압력이 증가함에 따라 반응고 slugs와 die간 계면 열전달 계수가 커짐으로써 냉각속도가 증가되었기 때문으로 사료된다. 또한 70 MPa인 경우 급격히 공정 Si가 미세해지는 것을 볼 수 있다. 70 MPa인 경우는 25 MPa이나 50 MPa

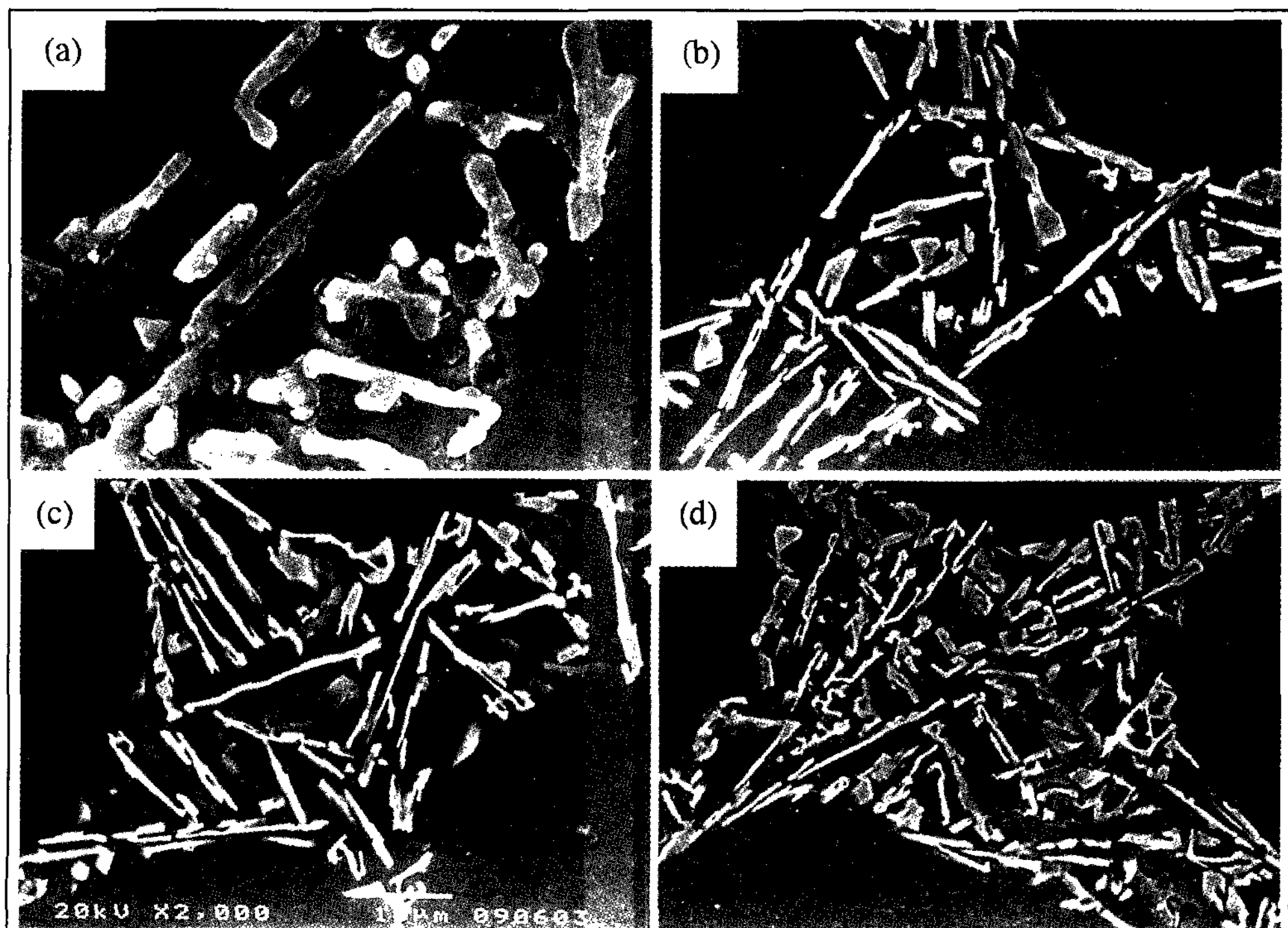


Fig. 7. Shapes and sizes of eutectics according to applied pressure in A590°C specimen (a) gravity (b) 25 MPa (c) 50 MPa (d) 70 MPa

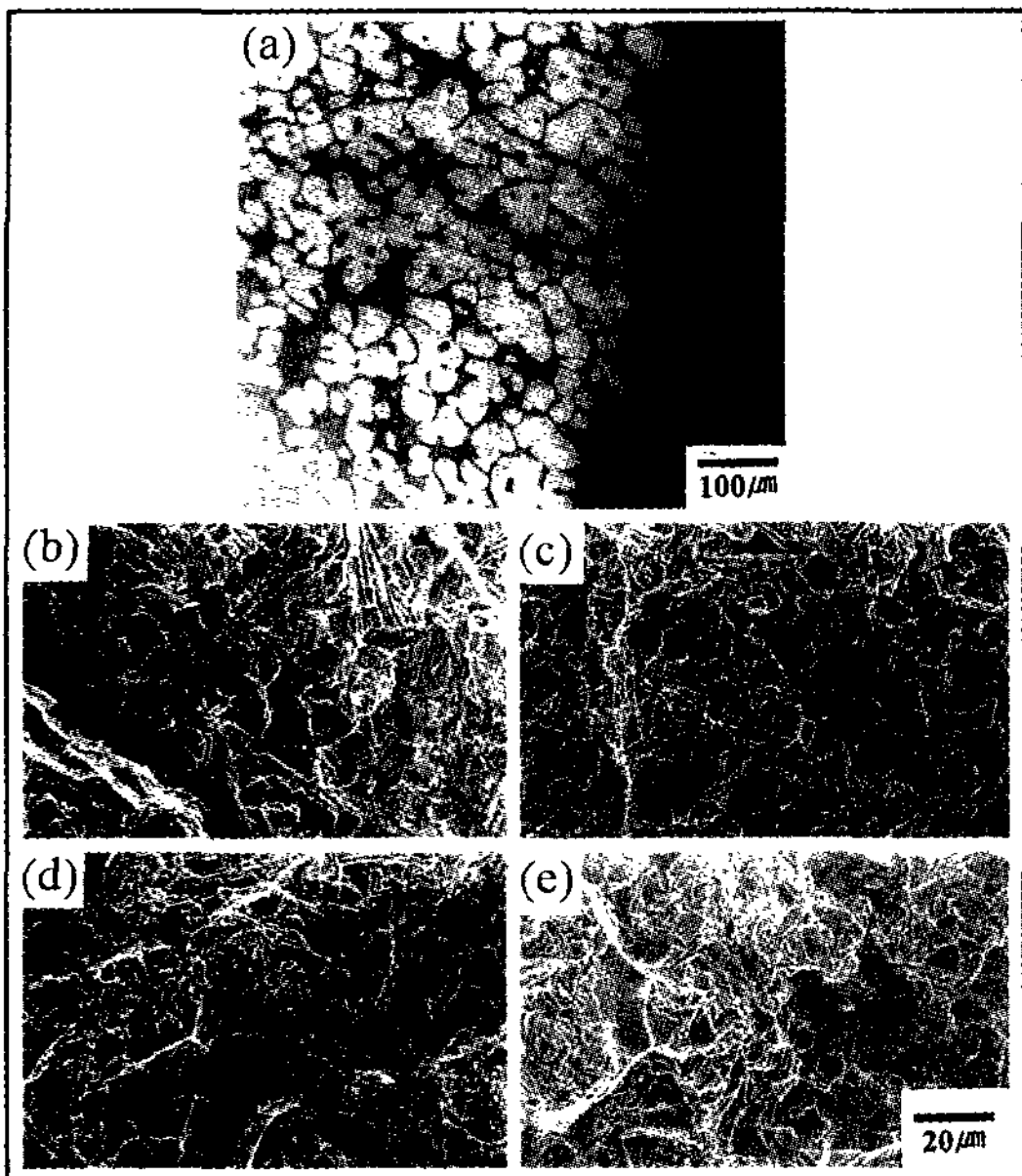


Fig. 8. Fractographs in various specimens after tensile test (a) A SSM ingot (b) A580°C (c) A590°C (d) A605°C (e) A590°C

보다 응고 shell의 저항을 극복할 만큼 큰 압력이 되었기 때문에 그만큼 가열된 Slug와 die간 계면 열전달 계수가 급격히 커짐으로써 냉각속도가 급격히 증가되었기 때문으로 생각된다.

Fig. 8은 SSM ingot 및 재가열 시험편을 인장 시험 후 관찰한 파면을 보이고 있다. (a)에서 볼 수 있는 것처럼 파괴는 초정 α -Al와 공정상 사이의 계면에서 일어났다. 또 공정 부분에서는 공정 Si를 따라 파괴되었음을 알 수 있다. 따라서 초정 α -Al을 구상화시키고 공정 Si를 미세화 시켜 응력집중을 저하시킴으로써 상승된 인장강도를 얻으리라 생각된다.

인장시험 후 그 파괴 양식을 보면 (b), (c), (d) 그리고 (e)에서 보는 바와 같이 입계파괴 양상을 나타내고 있다.

Fig. 9는 피로시험 후 피로크랙 초기점 직하에서 그 파괴 경로를 관찰한 조직사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 파괴 경로는 초정 α -Al와 공정 사이를 따라 파괴되었으며 특히 공정 Si를 따라 파괴되었음을 알 수 있다.

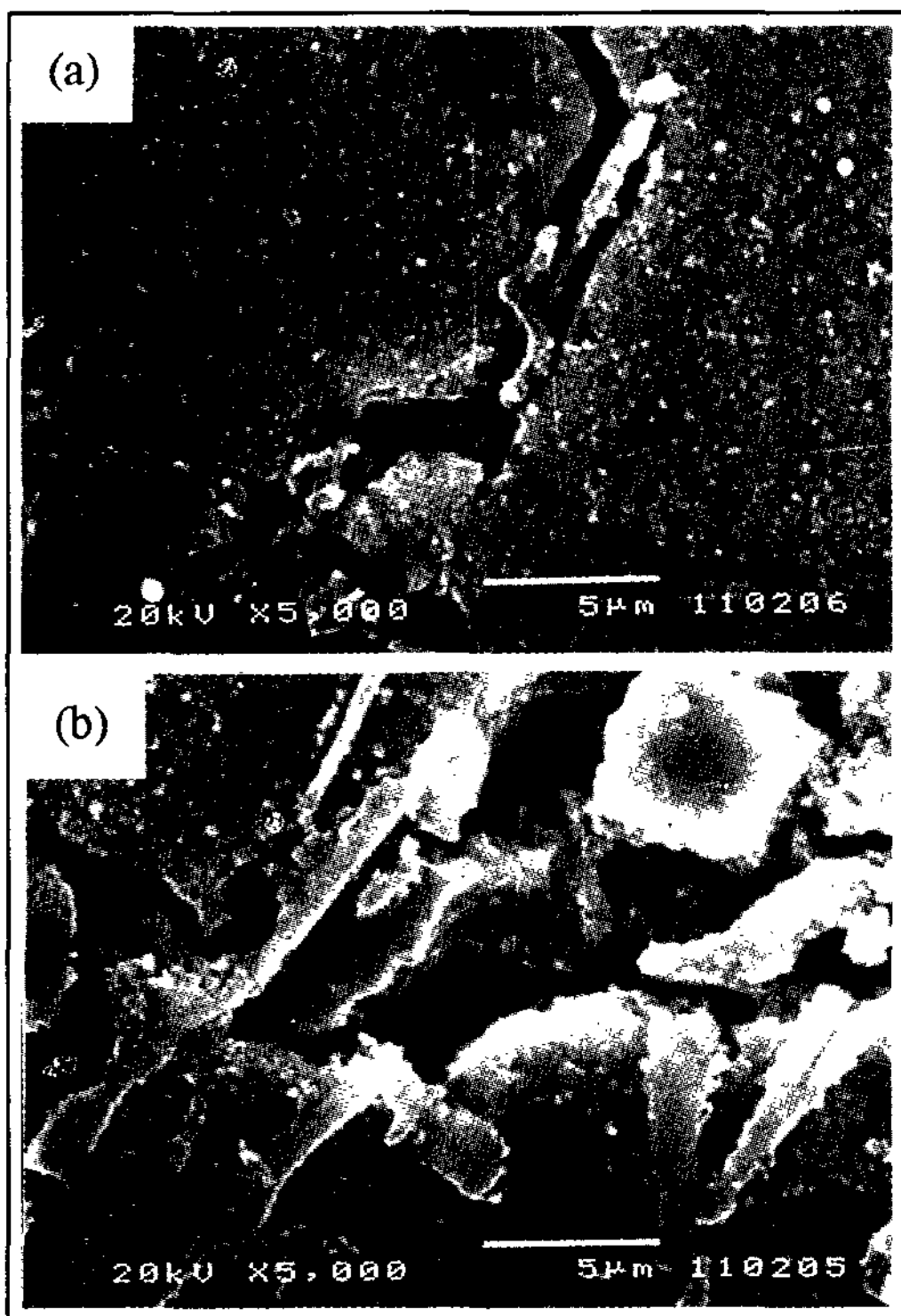


Fig. 9. Fractographs in direct under fatigue crack spot various specimens after fatigue test (a) A 580°C (b) A605°C

3.2 기계적 성질

3.2.1 경도, 인장강도 및 연신율

Fig. 10은 SSM ingot 및 재가열 온도에 따른 경도 변화이다. SSM ingot의 경우 인출속도가 150 mm/min인 경우가 인출속도 250 mm/min인 경우보다 높게 나타났다. 이는 인출속도가 150 mm/min인 SSM ingot의 경우가 인출속도 250 mm/min인 경우보다 인출속도가 늦어져 그만큼 교반하는 시간이 증가됨으로써 구상화된 조직 및 미세한 grain size로 되었기 때문이다. 또

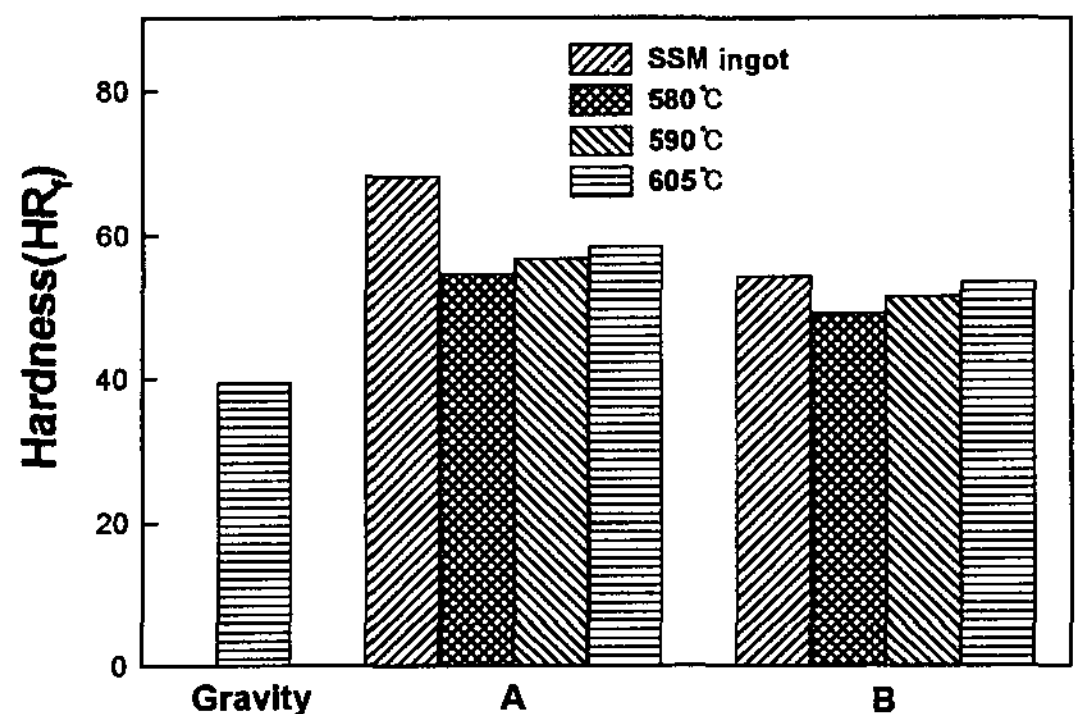


Fig. 10. Relationship between hardness and reheating temperatures

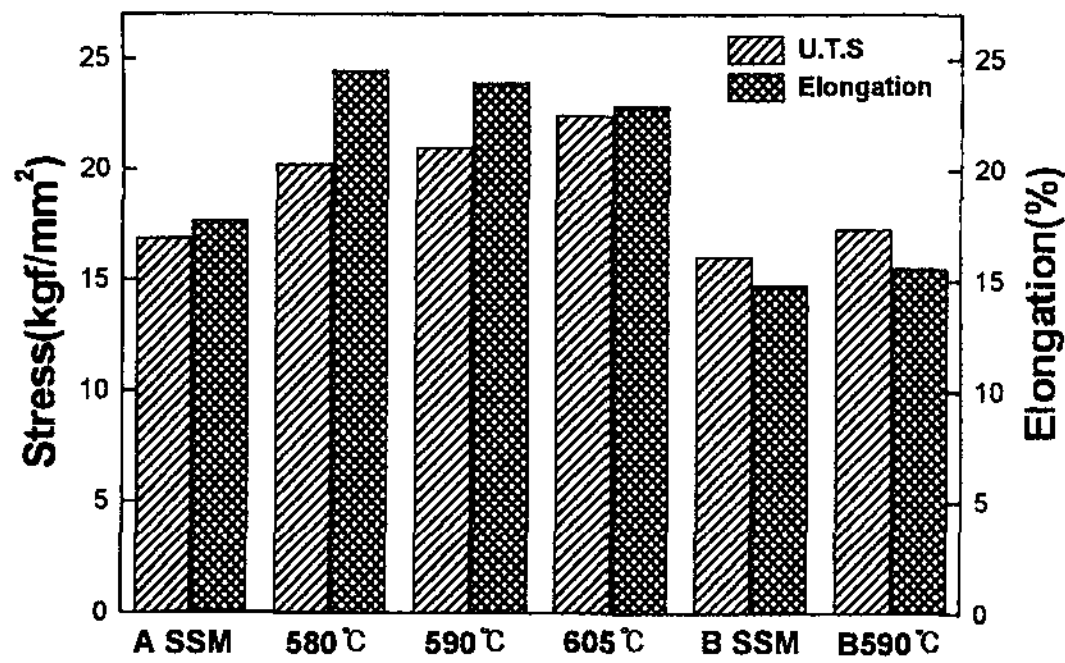


Fig. 11. U.T.S and elongation in various specimens

한 재가열 온도가 증가함에 따라 더 높은 경도치를 나타내고 있다. 재가열 온도가 증가함에 따라 액상이 증가함으로써 그만큼 공정량이 증가하게 된다. 따라서 재가열 온도가 증가함에 따라 더 높은 경도치를 보인다.

Fig. 11은 여러 시편에 있어 그 제조조건에 따른 인장강도 및 연신율이다.

그림에서 보는 바와 같이 A SSM ingot가 B SSM ingot보다 더 높은 인장강도를 나타내고 있다. 이는 A SSM ingot가 B SSM ingot보다 교반 시간이 길어짐으로써 초정 α -Al이 더 구상화되었기 때문으로 생각된다. 또한 연신율도 인장강도와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 따라서 초정 α -Al을 구상화 시킴으로써 인장강도와 연신율을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

재가열의 영향을 살펴보면, SSM ingot 보다는 재가열 함으로써 인장강도 및 연신율이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 재가열 함으로써 장미상 형태의 초정 α -Al이 구상의 형태로 변화되었고 또한 50 MPa로 가압 함으로써 그 만큼 냉각속도가 증가하여 공정 Si가 미세화 되었기 때문에 그 만큼 크랙 발생의 집중점[3]이 적어졌기 때문으로 생각된다. 또한 재가열 온도가 증가하면서 인장강도가 증가되는 것을 알 수 있다. 이는 재가열 온도가 증가 함에 따라 공정량이 증가하고 또한 초정 α -Al의 조대화는 약간 발생하나 구상으로 변화되었기 때문에 그 만큼 크랙 발생의 집중점이 적어졌기 때문으로 생각된다. 그러나 연신율은 재가열 온도가 증가함에 따라 감소됨을 알 수 있다.

시편 종류에 따른 영향을 살펴보면 A590°C의 경우가 B590°C 경우보다 더 높은 인장강도를 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서 재가열 후의 인장강도는 초기 SSM ingot의 영향을 많이 받으며 SSM ingot의 조직

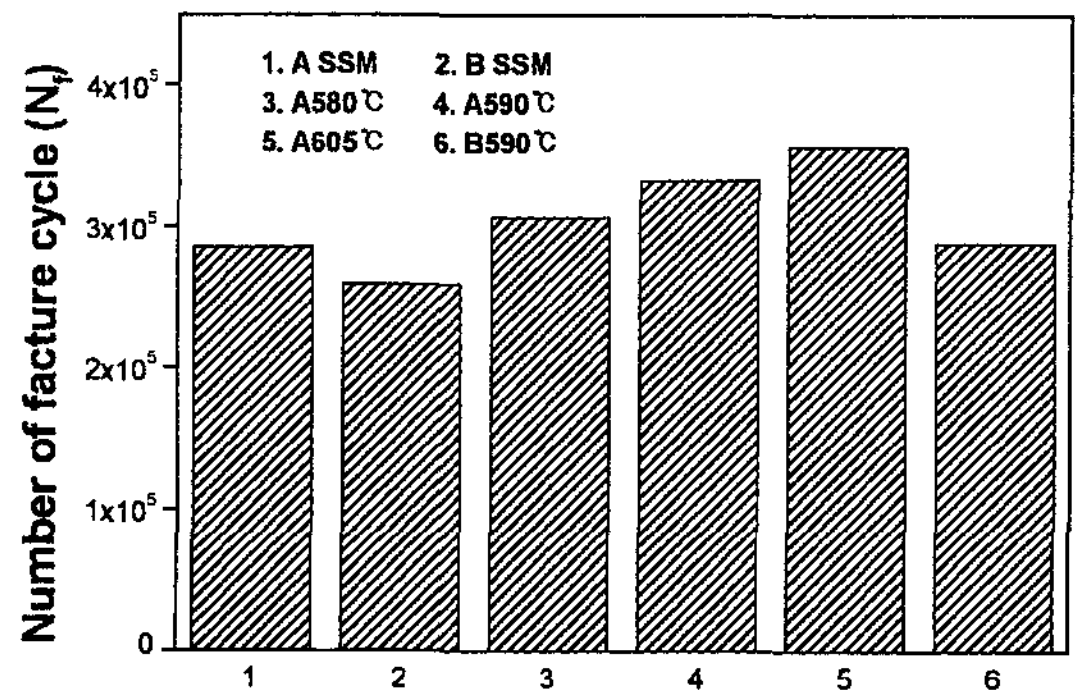


Fig. 12. Number of fracture cycles vs. manufacturing conditions

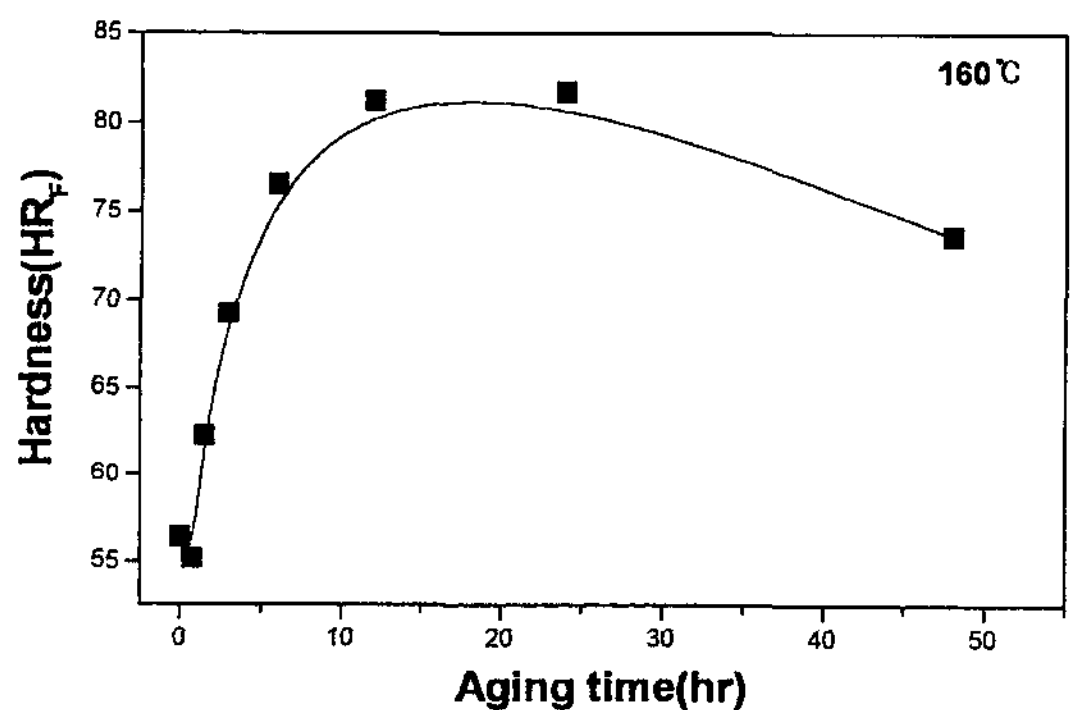


Fig. 13. Hardness vs. aging times in A590°C specimens (50 MPa)

이 재가열 후의 기계적 성질에 중요한 영향을 줄 것으로 생각된다.

3.2.2 피로강도

Fig. 12는 시험편에 따른 피로시험의 결과이다. 피로강도는 완전한 파단이 일어나는 cycle수로 비교하였다. Fig. 12 볼수 있듯이 A SSM ingot가 B SSM ingot보다 더 높은 피로강도를 나타내고 있다. 이것은 앞에서 설명했던 것처럼 A SSM ingot의 경우가 B SSM ingot보다 교반 시간이 길어짐으로써 더 구상화된 조직을 나타내어 응력집중 장소가 더 소멸되었기 때문으로 생각된다.

또한 재가열 온도가 증가함에 따라 더 높은 피로강도를 나타내는 것을 볼 수 있다. 이는 재가열 온도가 증가함에 따라 초정 α -Al이 더 구상화 되었기 때문으로 생각된다.

3.2.3 시효특성

Fig. 13은 인출속도 150 mm/min인 SSM ingot를 590°C로 재가열 하여 50 MPa로 가압한 후 제조한 시

험편을 540°C에서 10시간 용체화 처리하고 160°C에서 시효처리 한 시험편의 경도치를 나타내고 있다. 최대 경도는 12시간에서 나타났다. 이는 Mg₂Si상[3]의 석출로 기인한 것으로 사료된다.

4. 결 론

인출속도가 150 mm/min인 SSM ingot가 인출속도 250 mm/min인 SSM ingot 보다 초정 α-Al이 더 구상화 되었으며 그 grain size도 작았다. 재가열 온도가 증가함에 따라 초정 α-Al가 균일해 졌으며 초정 α-Al의 구상율도 증가하였다. 그러나 초정 α-Al의 size는 약간 증가 하였다. SSM ingot를 재가열 함에 따라 피로수명, U.T.S 그리고 연신율이 증가하였다. 재가열 온도 및 가압력의 증가에 따라 U.T.S 및 피로수명이 증가하였다. 또한 시효 특성에는 12시간의 시효처리에서 최고의 경도를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 1998년 전북대학교 학술연구지원과 1999년 전북대학교 국제공동연구지원 및 2000년 한국주조공학회의 연구지원에 의하여 이루어졌음에 이에 감사를 드립니다. 또한 본 실험을 위해 시료를 제공하여주신 KIST의 이호인 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Charles Vives : Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 27B (1996) 445
- [2] Merton C. Flemings : Metallurgical Transactions B, Vol. 22B (1991) 269
- [3] Byung Jun Jung, Soichiro Ichihata, Tatsuo Sato, Hiroyasu Tesuka, Akihiko Kamio, Seiji Saikawa and Kiyoshi Nakai : J. Jpn. Inst. Light Met., Vol. 45 (1997) 626
- [4] Kazunori Tahara, Byung Jun Jung, Hiroyasu Tezuka, Tatsuo Sato and Akihiko Kamio : J. Jpn. Inst. Light Met., Vol. 47 (1997) 620
- [5] S. Murali, T. S. Arvind, K. S. Raman and K. S. S. Murthy : Materials Transactions, JIM, Vol. 38 (1997) 28
- [6] Alan A. Koch and Curt Kyonka : Indianapolis T95-114 (1995) 397
- [7] Kenneth P. Young and Rudolf Fitze : The 3rd Int'l Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, (1994) 155
- [8] Jeong-Ho lim, Jeong-Ho Kim, Ki-bae Kim and Eui-Park Yoon : J. of the Korean Inst. of Met. & Mater., Vol. 35 (1997) 1341
- [9] Woon-Jae Jung, Ki-Tae Kim and Chun-Pyo Hong : J. of the Korean Inst. of Met. & Mater., Vol. 10 (1997) 107
- [10] Ki-Bae Kim and Eui-pak Yoon : J. of the Korean Inst. of Met. & Mater., Vol. 10 (1997) 113
- [11] Akihiko Kamio : Proceeding of the First KIM-JIM Joint Symposium, (1999) 63
- [12] Dong-Hoon Rho, Sang-Mok Lee and Chun-Pyo Hong : Journal of the Korea Foundrymen's Society, Vol. 19 (1999) 123