

■■■■■■■■■■  
技術資料  
■■■■■■■■■■

## 주조단조법에 의한 AI합금 부품의 제조

김기영

### Application of Casting & Forging Process to Aluminum Parts

Ki-Young Kim

#### 1. 개 요

단조공정은 통상 잉고트 또는 연주재를 압연 또는 압출한 소재를 사용하여 목적하는 형상으로 가공하는 공정이나, 주조품에서 압연이나 압출을 하지 않고 곧바로 단조를 하게 되면 에너지를 크게 절약할 수 있으므로 철강분야에서도 연주재를 곧바로 단조하는 방법이 이용되고 있다[1-4]. 비철분야에서도 주조와 단조를 혼합한 공정이 황동과 알루미늄 합금에 적용이 되고 있는데 주조품을 최종 목적 형상에 가깝게 만든 후(이를 주조 프리폼이라 한다) 단조하는 방법이다[5,6].

현재 각종 부품의 제조공정에서는 환경 및 자원문제와 직결되는 에너지의 과다한 사용을 줄이기 위한 노력이 전 세계적으로 진행되고 있는데, 이러한 부품의 주요 용도 중의 하나가 자동차산업으로, 지구환경 개선을 위한 배기가스 저감의 주요 방안 중의 하나인 자동차의 경량화를 위해서는 기계적성질이 증시되는 부품을 보다 싼 가격에 만드는 것이 요구된다. 자동차용 알루미늄 부품의 80% 이상은 주조품이 차지하고 있으나, 주조품은 강도와 신뢰성이 요구되는 자동차의 보안 부품에는 별로 사용되지 않고 단조품이 사용되고 있다. 고강도부재나 내압성이 요구되는 부품의 경우에는 압출재를 소재로 하여 열간단조법으로 제품 형상을 성형하는 방법이 일반적이나, 단조품은 주조품에 비하여 생산원가가 비싸므로 일부 차종에만 적용이 되고 있다[7].

알루미늄 단조품의 생산원가는 단강품의 약 3.3배, 알루미늄 주조품의 약 1.8배 정도인데, 알루미늄 단조

품의 생산원가를 줄이는 방법은 원재료가격의 저감, 공정생략, 재료회수율 향상 등을 들 수 있다[8].

이러한 요구를 만족시킬 수 있는 방법이 주조단조법인데, 단조품보다 생산원가가 싸고 단조품 정도의 기계적 성질을 얻을 수 있는 방법으로, 단조 전의 소재를 주조법으로 제조한 후, 이를 열간단조하는 방법이다. 이 글에서는 AI합금의 주조단조법에 대하여 소개하고자 한다.

#### 2. 주조단조법의 특징

주조단조법을 경합공정인 다이캐스팅, 중력금형주조, 저압주조, 단조법과 생산성, 재료원가, 성형도, 금형수명, 기계적강도, 신율, 두께 대응력, 품질 신뢰도를 비교한 결과는 그림 1과 같다[9]. 생산성, 재료원가, 성형도, 기계적강도, 신율, 두께대응력, 품질 신뢰도 등 대부분의 항목에서 주조단조법은 타 공법에 비하여 경쟁력이 있으며, 특히 품질 신뢰도, 기계적강도는 단조법과 동등한 수준이나, 금형 수명은 주조법에 비하여 열

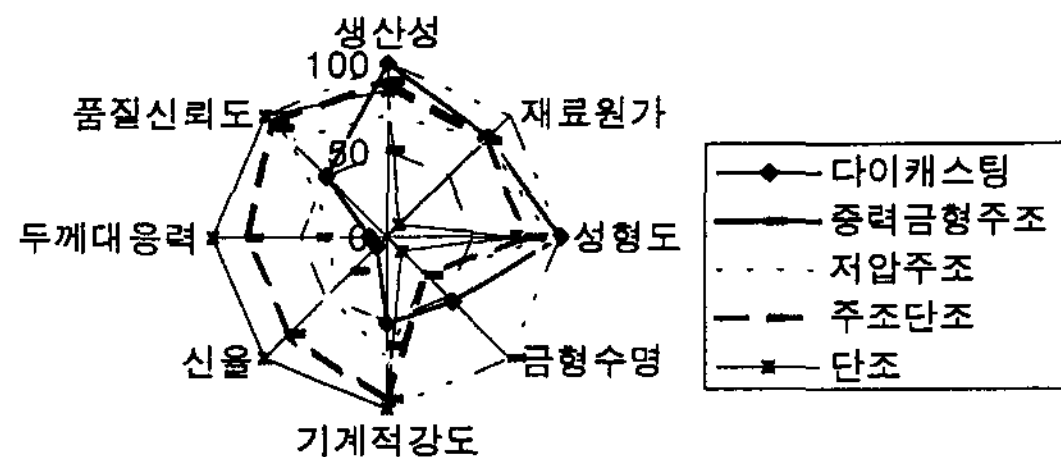


그림 1. 다이캐스팅, 중력금형주조, 저압주조, 단조법과 비교한 주조단조법의 특성

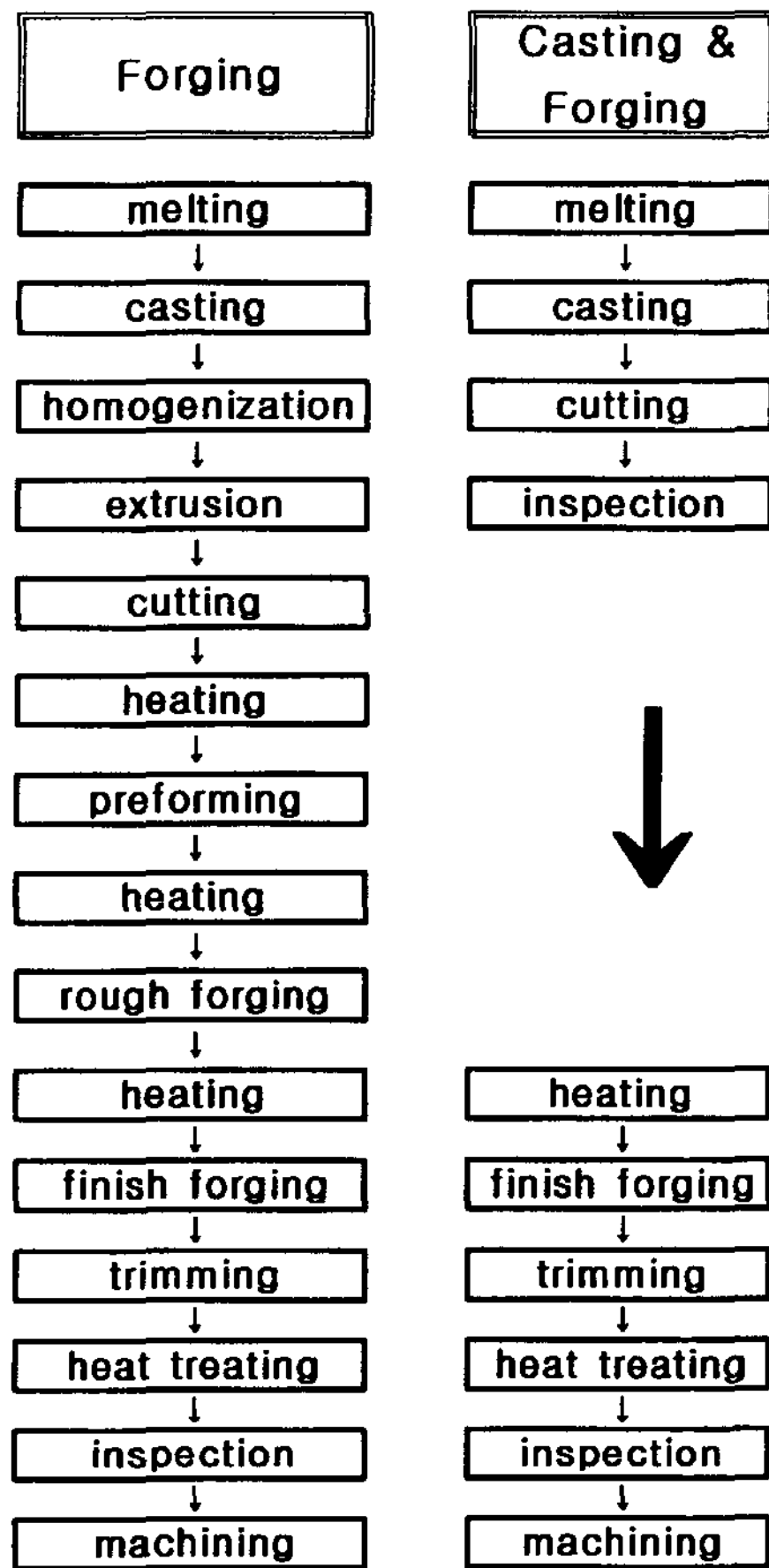


그림 2. 단조법과 주조단조법의 공정도

세에 있음을 알 수 있는데 주조단조법의 특징을 요약하면 다음과 같다[10].

- 소재로 주조용 합금을 사용하므로 재료코스트가 압출재에 비하여 싸다
- 열간 단조하고 나서 트리밍한 플래쉬(flash)는 재용해하여 주조재의 제조에 재이용 가능하다.

- 최종 형상에 가까운 주조 프리폼(preform)재를 설계할 수 있으므로, 프리폼 형상의 자유도가 높고, 단조 재료의 회수율도 높아진다.
- 그림 2에서 주조단조법과 단조법의 공정비교를 보면 주조단조법이 4~5 공정 적은 것을 알 수 있다. 즉 압출재로 단조를 할 경우는 금형이 여러개 필요하지만 주조단조의 경우는 마무리금형만 필요하므로 단조비 및 금형비가 절감된다.
- 소형품은 여러개의 동시 단조가 가능하다.

### 3. 주조단조용 소재

주조단조용 소재는 우선 주조를 하여 예비성형체(주조프리폼)를 만들므로 기본적으로는 주조용 합금 또는 이를 약간 변화시킨 합금이 대부분이고, 용도에 따라서 전신재용 재질도 이용이 되고 있다. Al-Cu계 합금, Al-Si-Mg계 합금, Al-Si계 합금이 많이 이용되고 있다 [7-11].

### 4. 기계적 특성

주조 프리폼재와 비교하여 주조단조한 것은 단조 후에 인장강도, 항복강도(내력), 신율, 충격치, 피로강도는 크게 증가한다(그림 3~8). 특히 충격치는 단조 후에 현격히 증가하는 것을 알 수 있다(그림 4). 기계적 성질이 개선되는 것은 단조하중에 의한 주조조직의 파괴에 따른 조직의 미세화 및 단조 하중에 의하여 내부 기공이 눌러 찌그러짐에 의한 내부 기공율의 감소에 기인한 것이다. 단조율이 15% 정도가 되면 기공량은 주조 프리폼재의 반으로 감소한다(그림 9)[9].

한편 단조율의 영향을 보면 합금 조성에 관계없이 신율, 충격치는 증가하나, 인장강도 및 항복강도는 감

표 1. 주조단조용 합금의 예

규격	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ti	Cr	비고
AC1B	3.8~5.2	0.2	0.25~0.45	0.05	0.30	0.05	0.01~0.30		
AC4CH	≤ 0.20	6.5~7.5	0.25~0.45		≤ 0.20				
A6061	<0.02	1.03	0.69	0.04	0.18	<0.01	0.06	0.23	
A2014	4.20	1.05	0.57	0.08	0.24	0.55	0.20		
A 합금	0.4~0.5	2.7~3.3	0.4~0.5		<0.12				개발품
B 합금	4.37	6.05	0.56	0.03	0.28	0.03	0.19	0.01	"
C 합금	4.46	16.9	0.57	0.03	0.71	0.04	0.09	0.01	"

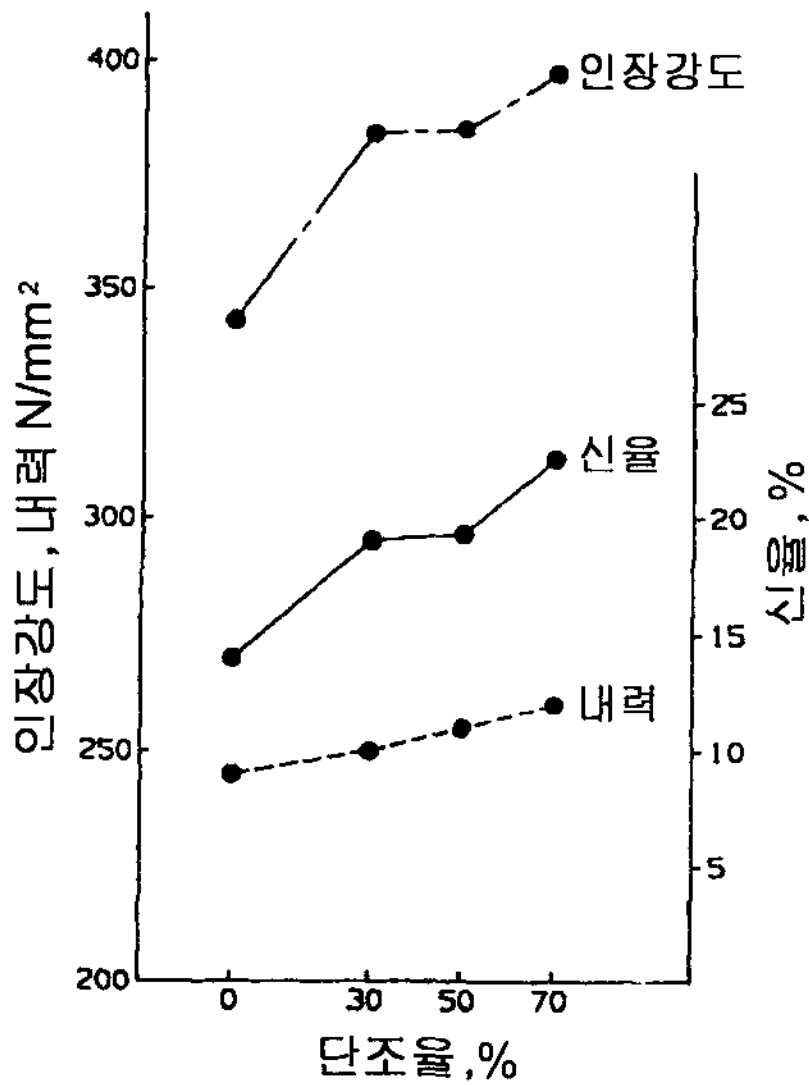


그림 3. 주조단조법에 의한 AC1B 합금의 기계적성질

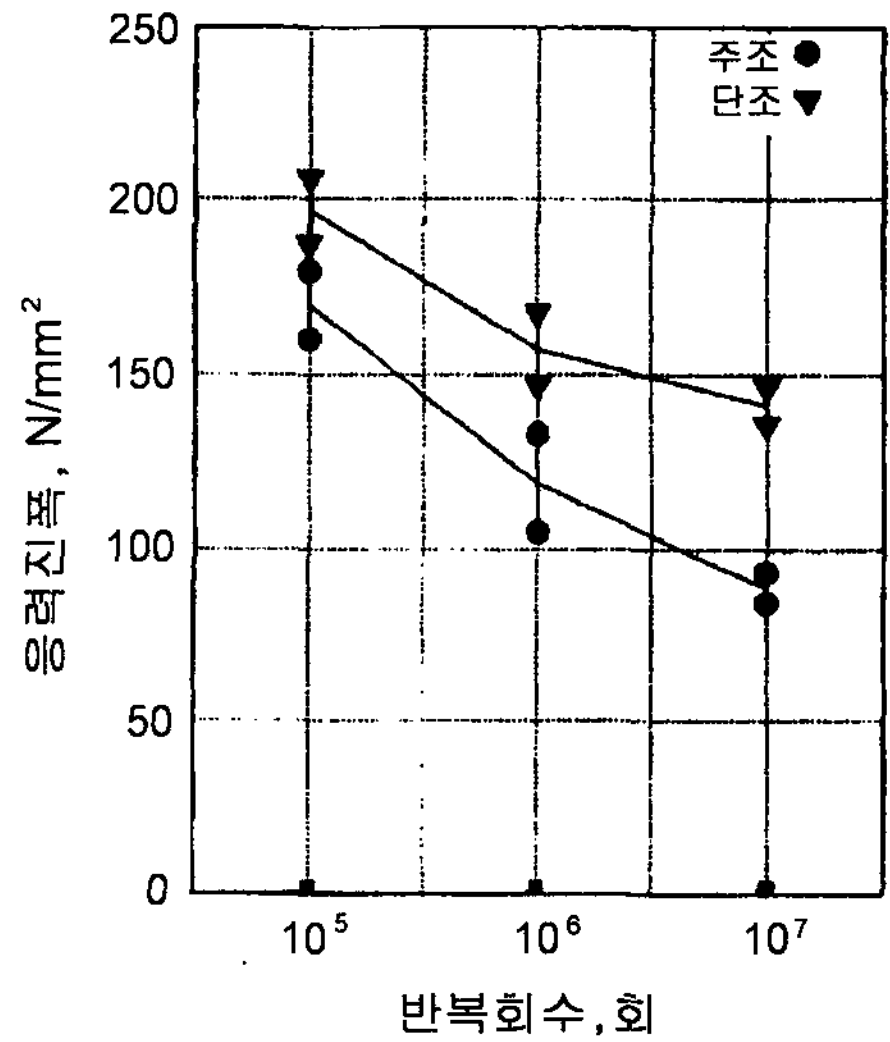


그림 5. 주조단조법에 의한 AC1B의 S-N선도(회전굽힘 시험)

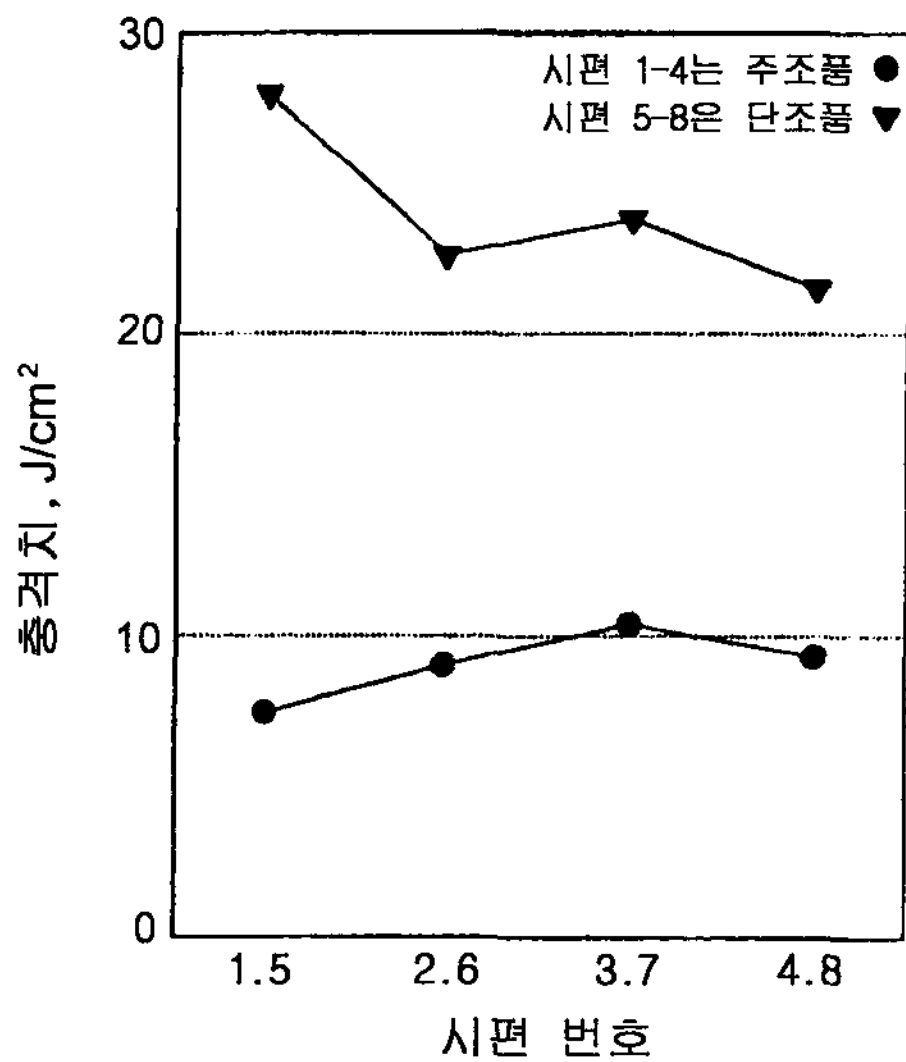
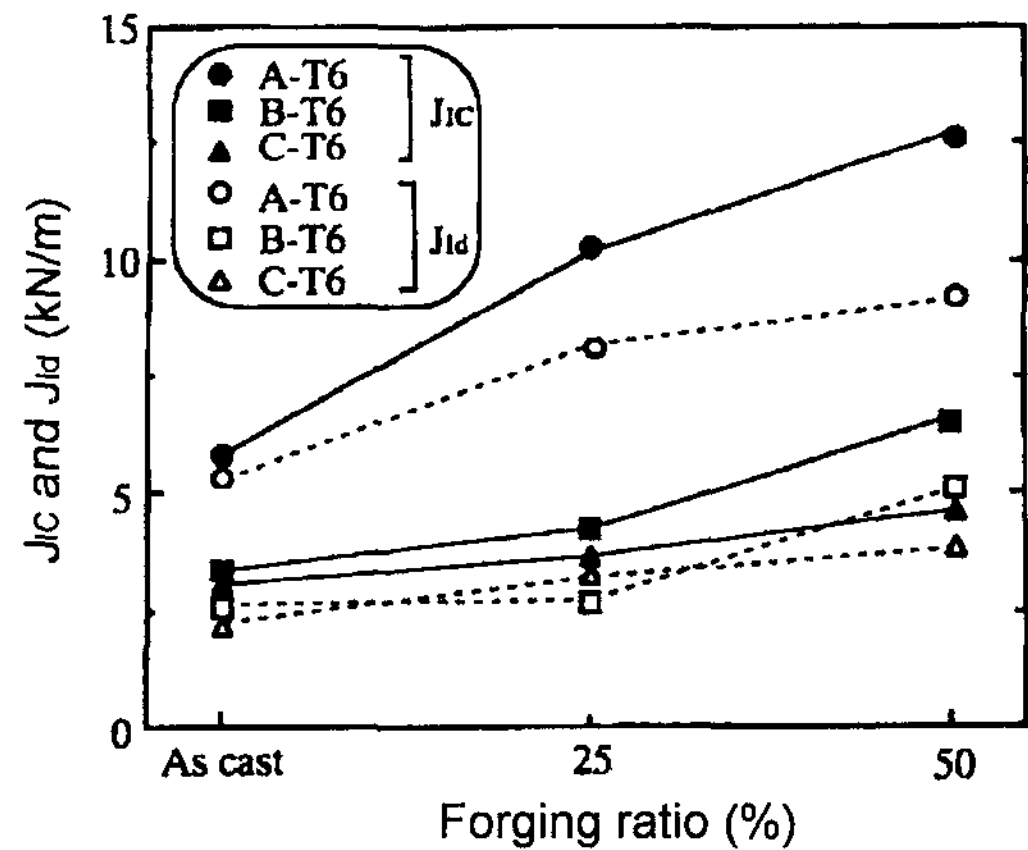


그림 4. 주조단조법에 의한 AC1B의 샤피 충격치



합금	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Ti	Sr(ppm)
A	0.71	0.11	0.31	1.03	0.11	0.03	-
B	4.10	0.10	0.32	0.92	0.10	0.03	26~48
C	7.20	0.11	0.31	0.93	0.09	0.03	29~62

그림 6. 단조율과 파괴인성(Al-Si합금)

소하는 경우도 있다. Al-Cu계 합금에서는 단조율이 커질수록 인장강도, 신율, 내력이 모두 증가하나(그림 3)[9], Al-Si계 합금에서는 단조율이 어느 이상이 되면 오히려 기계적성질이 더 이상 개선되지 않는 경우도 있다(그림 7, 8)[7,11].

합금조성의 영향을 보면 Si량이 증가하면 인장강도와 내력은 저하하나, 신율은 증가하다가 감소한다(그림 10). Mg 및 Cu의 영향을 보면 두 원소 모두 그 양이 증가함에 따라서 신율은 감소하고 인장강도는 증가한

다(그림 11). 따라서 인장강도의 감소를 최소화하고, 신율을 최대화하는 조성범위로 합금을 결정하여야 한다. Fe는 그 양이 많아지면 인장강도와 신율이 모두 저하하므로(그림 12) 주조품에서처럼 Fe량은 최소화하는 것이 좋다. Fe가 0.1%를 넘으면 신율의 저하가 현저하여 주조단조법의 특징을 살릴 수 없으므로 Fe량은 잘 제어되어야 한다[7].

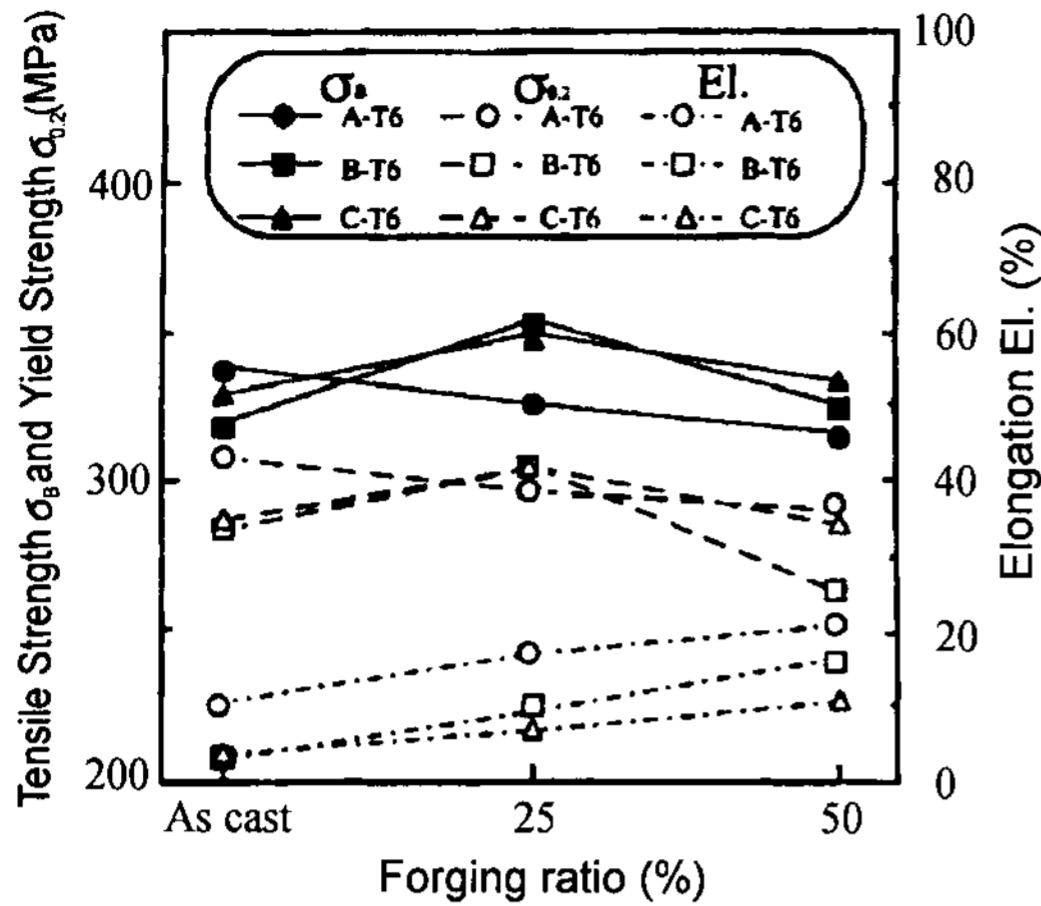


그림 7. 단조율과 인장강도(Al-Si합금) (A, B, C 합금은 그림 6과 동일)

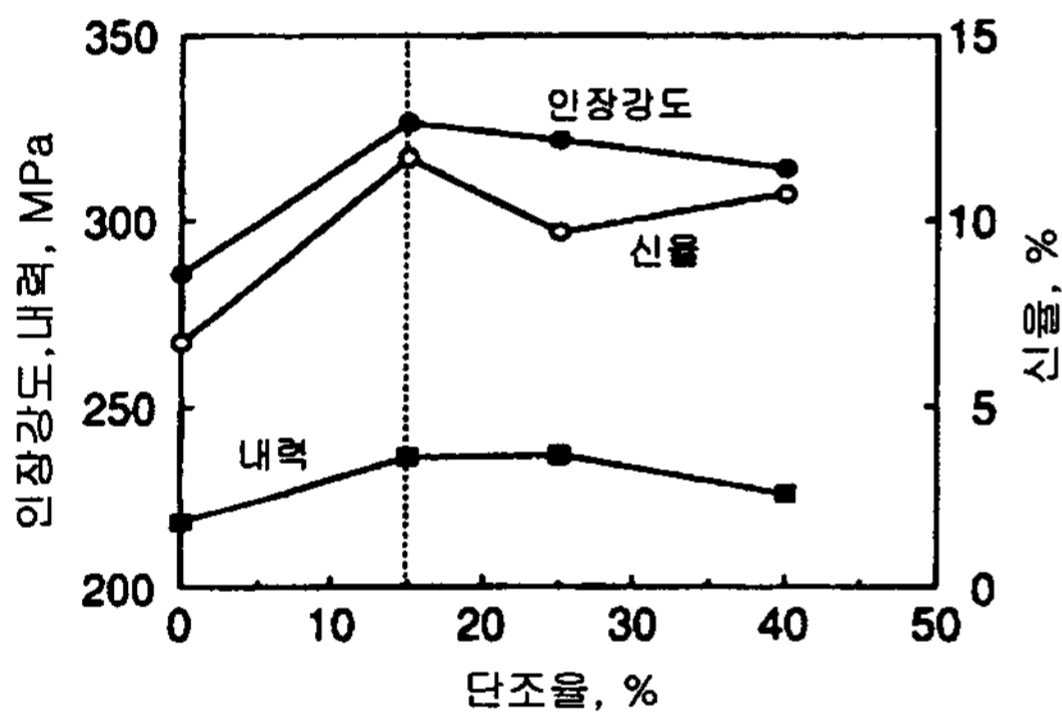


그림 8. 단조율과 기계적성질(Al-3Si-0.4Mg-0.4Cu, T6처리)

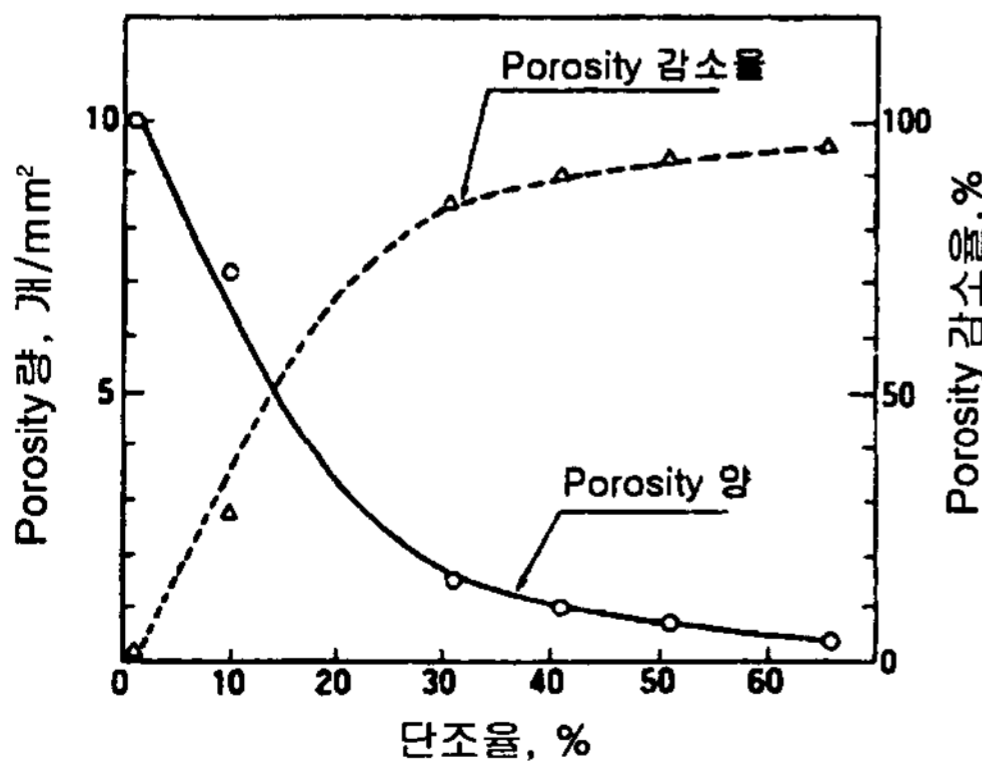


그림 9. 단조율과 기공율과의 관계(AC1B)

5. 조 직

단조율이 증가하면 초정  $\alpha$ 는 눌러서 변형되고, 단조

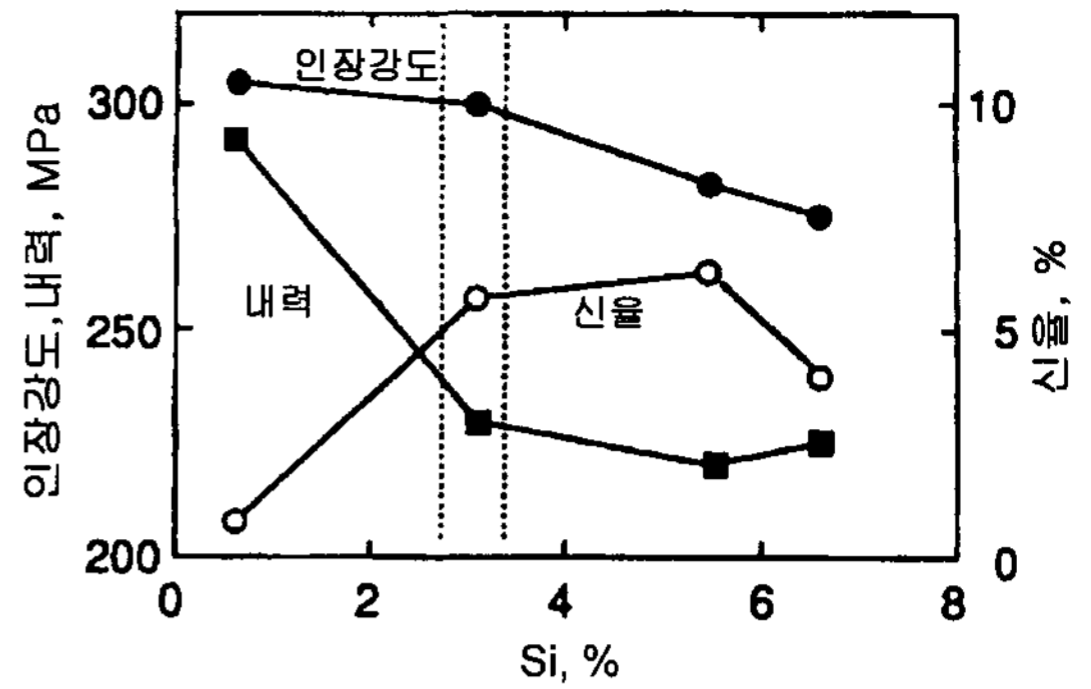


그림 10. Si량과 기계적성질, 사형주조→단조→T6처리

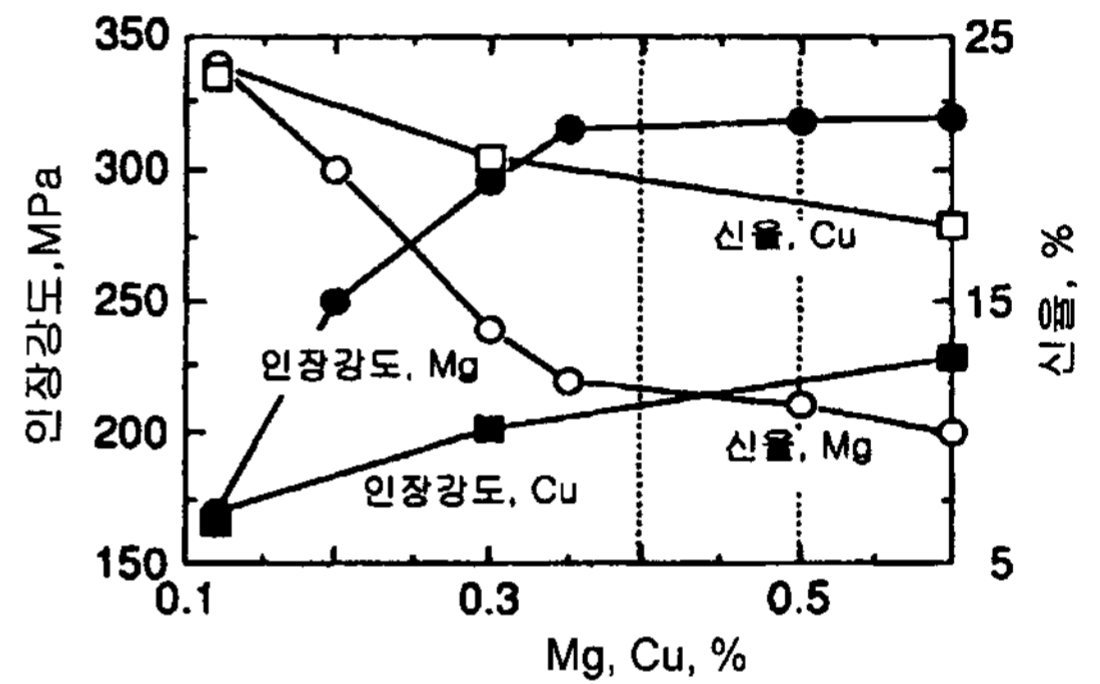


그림 11. Mg 및 Cu량과 기계적성질, 금형주조→단조→T6처리

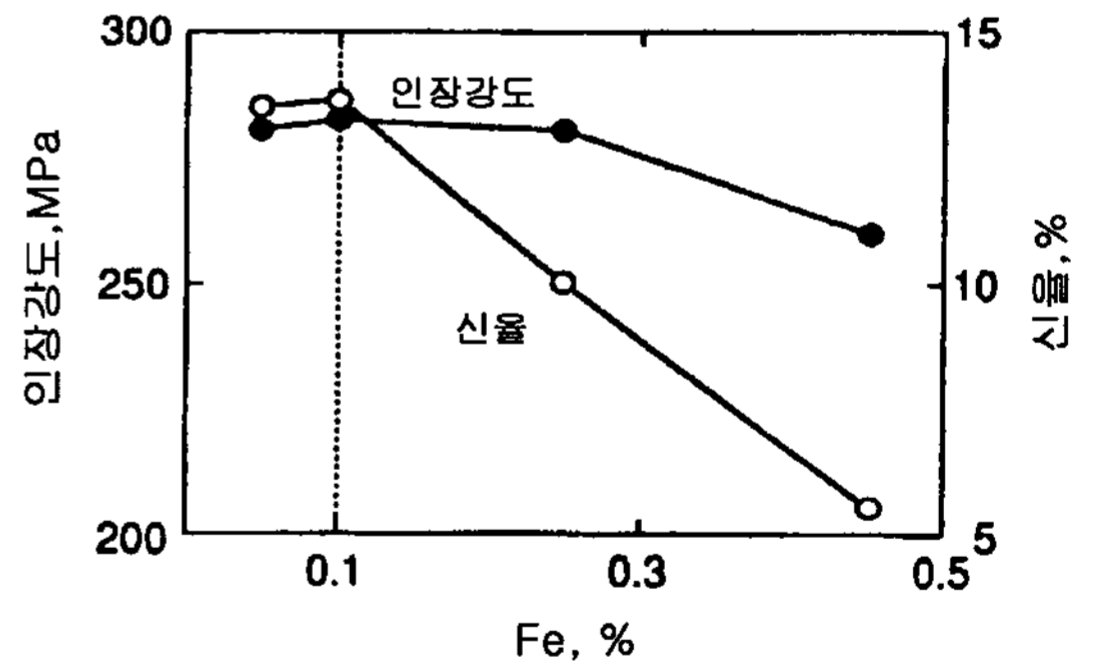


그림 12. Fe량과 기계적성질, 사형주조→단조→T6처리

율이 50%가 되면 셀조직이 형성되며, 단조방향과 수직방향으로 조직이 늘어나게 된다(그림 13). 보다 확대해서 보면 A합금의 경우 침상의  $\beta$ -AlFeSi상이 관찰되는데, 단조를 하면 이  $\beta$ -AlFeSi상이 분산되어 입상으로 변화한다. 공정 Si도 단조율이 증가할수록 입상으로 변해간다(그림 14).

그림 15는 인장시험 후의 파면 사진이다. Si량이 낮은 시료에서는 조대한 공극(void) 사이에 미세한 공극

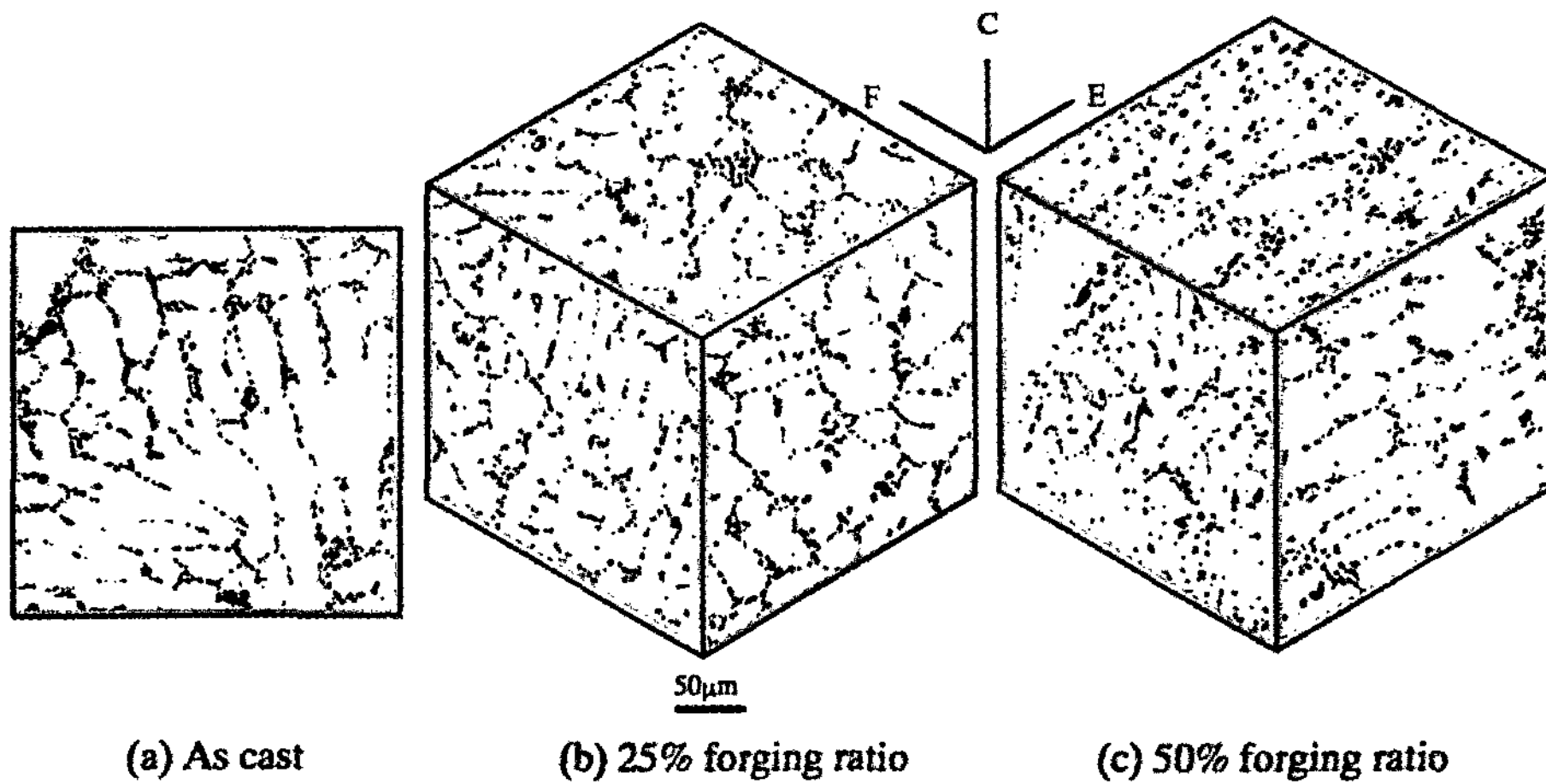


그림 13. Al-4%Si 합금의 주조, 단조 후의 조직 F: 단조방향, C: 주조방향, E: 단조 시 늘어나는 방향

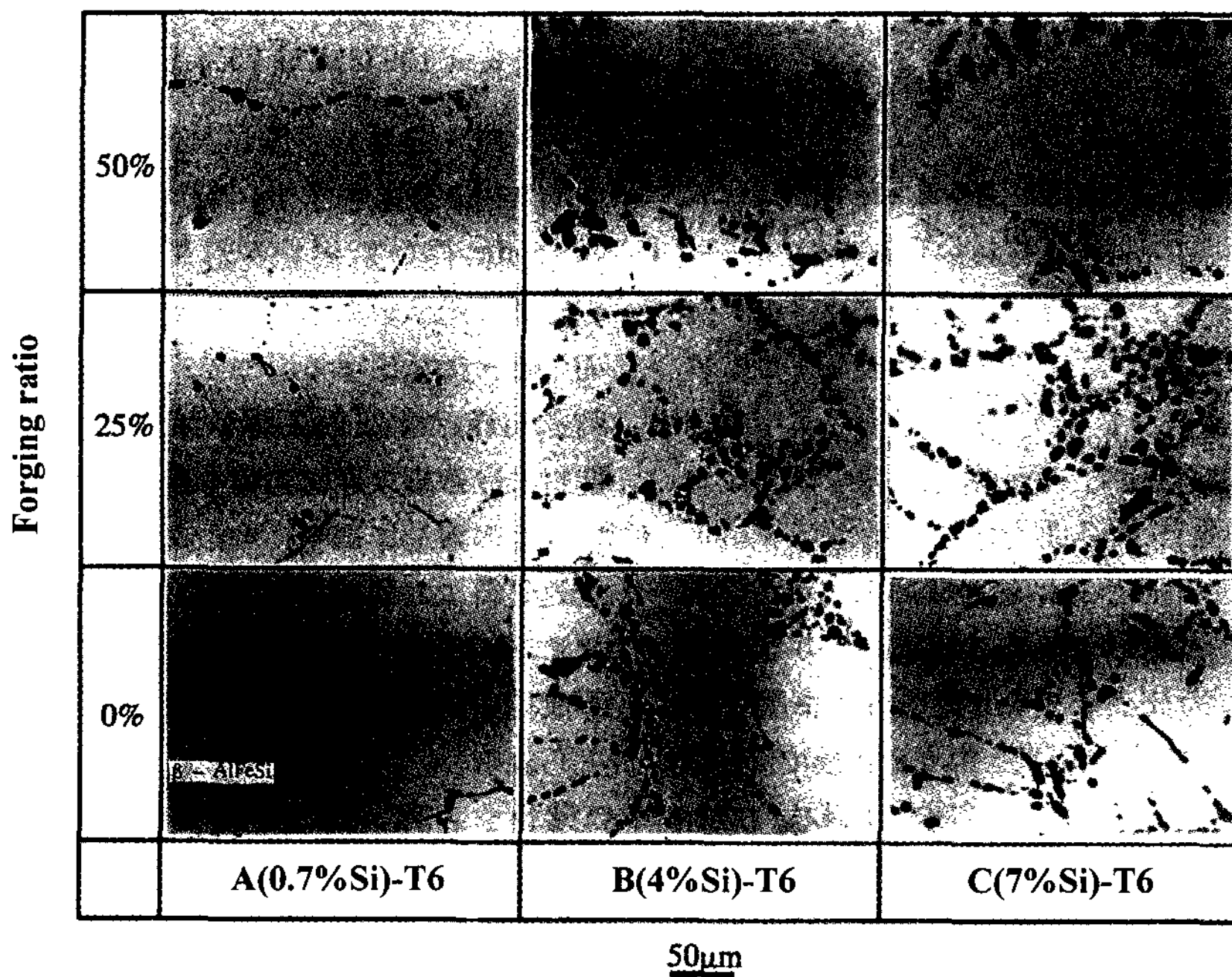


그림 14. 단조율과 미세조직 (A, B, C 합금은 그림 6과 동일)

이 연결되어 있는 형태이다. 단조율이 증가하면 미세한 공극은 사라지고 조대한 공극에 의한 dimple과면으로 된다. 일반적으로 조대한 공극 사이에 미세한 공극이 연결된 파괴는 조대한 공극만의 파괴보다 연성이 떨어진다고 알려져 있다. 따라서 단조에 의한 연성의 향상은 Si 함량이 낮은 경우에 더욱 유효하게 된다 [11].

## 6. 공 정

실체강도와 외관품질이 요구되는 제품의 제조를 위한 검토항목은, 주조공정에서는 재료조성, 소재형상, 주조공법, 주조방안, 주조조건, 도형조건 등이고, 단조공정에서는 주조소재형상, 단조금형설계, 단조조건, 열처리조건 등이다. 특히 주조공정에서의 품질관리가 철저

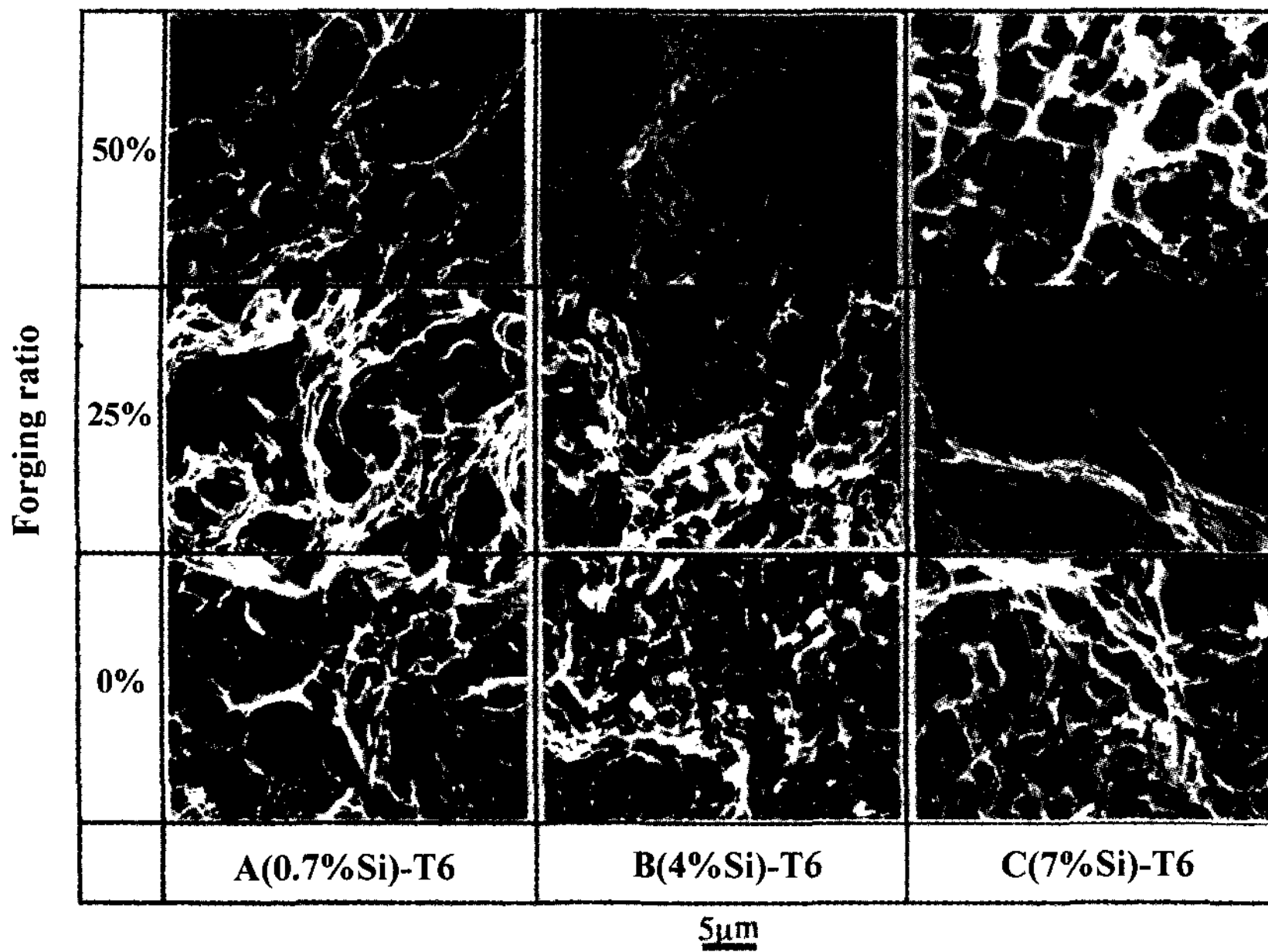
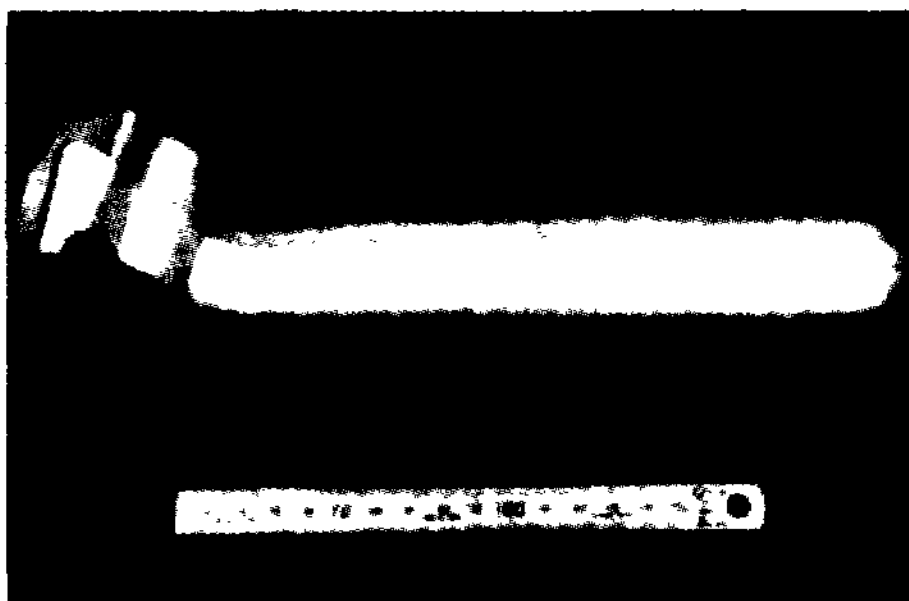
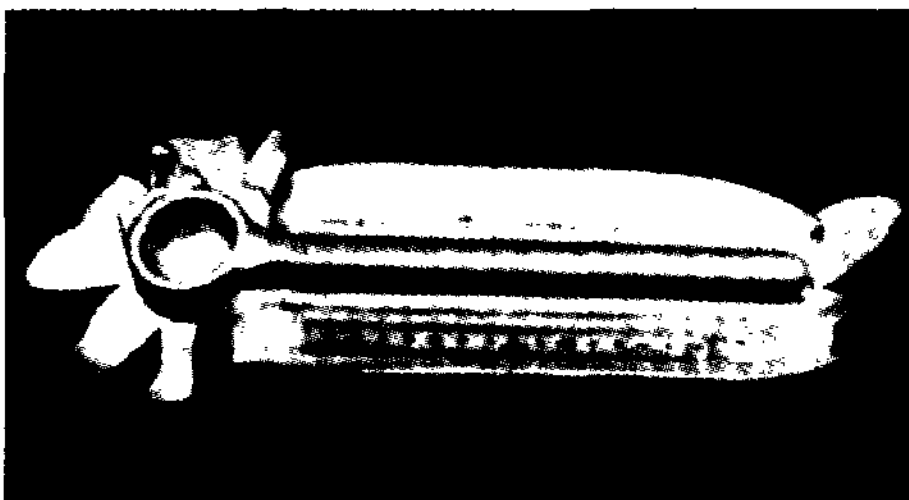


그림 15. 인장 파면의 SEM사진 (A, B, C 합금은 그림 6과 동일)



(a)



(b)

그림 16. 주조 및 단조 후의 이륜차용 핸들(2000계열 유사 합금)

이 이루어져야만 하는데, 관리항목으로는 DAS(dendrite arm spacing), 내부수축결함, 산화물, 가스결함, 외부수축, 표면 탕주름 등이 있다.

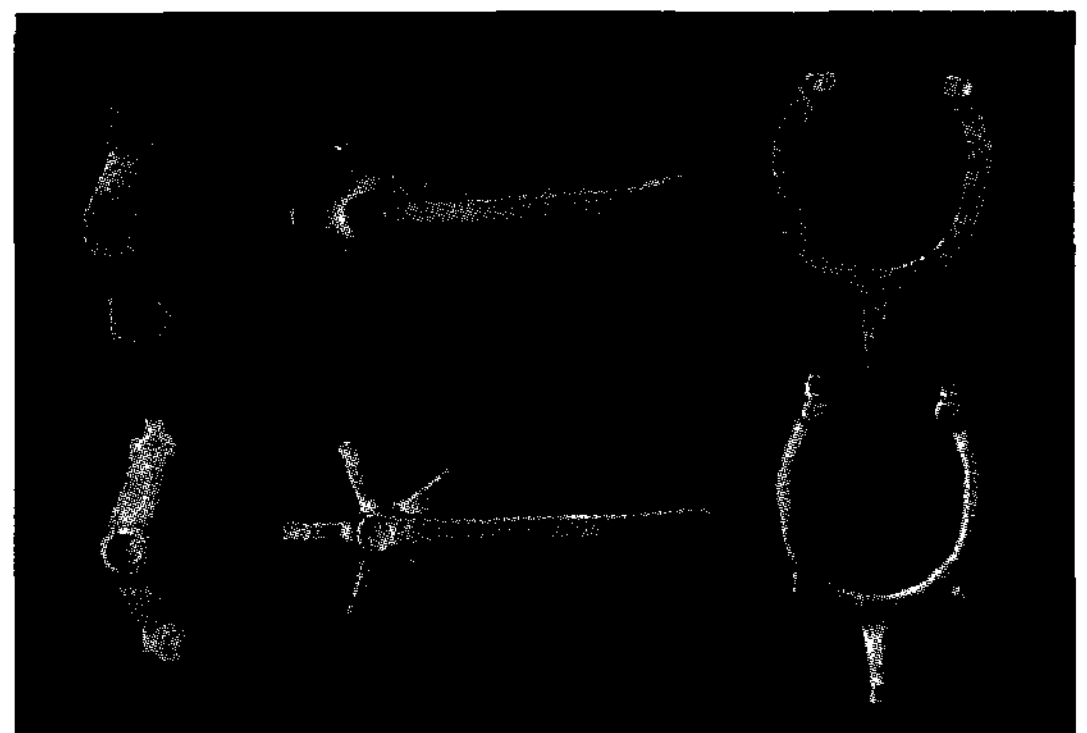


그림 17. 주조단조법으로 제조한 부품의 예

그림 16은 이륜차용 핸들을 2000계열 유사합금으로 금형에 주조 후 단조한 예이다. Al-Cu계 합금은 주조성이 좋지 않아서 표면 수축결함, 소착, 열간균열이 발생하기 쉬우므로 주조방안을 잘 작성하여야 한다. 단조는 단조 스트로크 260 mm, 단조회수는 32회분, 윤활제는 흑연계 윤활제를 사용하여 한 것이다[7].

그림 17은 주조단조법을 이용하여 제조한 알루미늄 합금 부품의 예이다[10].

표 2는 각종 공법으로 제조한 알루미늄 로드 휠의 기계적성질, 중량 및 제조원가를 나타낸 것이다. 주조단조한 것이 기계적 성질은 단조품과 대등한 수준이나, 제

표 2. 각종 공법으로 제조한 자동차 로드휠의 기계적성질  
과 중량 및 원가

공 법	주조단조	단 조	저압주조
인장강도, MPa	300	300	250
신율, %	10	12	5
중량, kg	8.5	8.2	9.0
제조원가	70	100	-

조원가는 약 70%정도로 저렴한 것을 알 수 있다[7].

## 7. 결 언

주조단조법은 생산현장에서 활용된지 25년 이상인 것으로 알려져 있으나, 그다지 활발하게 이용이 되지 않은 공법으로, 복잡 형상의 부품에 적용하기 위해서는 주조재를 우선 잘 만들어야 한다. 즉 near net shape 주조소재를 단조하므로 단조 시에 잘 견디면서 목표하는 기계적 성질을 얻기 위해서는 결함이 없는 고품질의 주조품의 제작이 필수적이다. 특히 주조단조 소재는 통상의 주조재에 비하여 주조성이 떨어지므로 주조방안, 산화물의 제거, 표면 결함의 억제 등이 요구

된다. 따라서 합금설계 시에 주조성과 단조성을 모두 고려하여야 하며, 또한 제품 형상 설계 시에도 이 두 가지를 모두 고려하여야만 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] A. Neubauer et al: GIESSEREITECHNIK, 28(1982), 131
- [2] A. Islyaib and A. Noibauer: KUZNECHNO-SHTAMPOV, (1986), 5
- [3] A. Isseib et al: NEUE HUTTE, 32(1987), 431
- [4] F. Penalba and M. A. Olmos: Deform. MET., 129(1987), 27
- [5] A. Ezzhev et al: KUZNECHNO-SHTAMPOV, (1974), 13
- [6] S. B. Ballantine: FWP J., 18(1978), 55
- [7] H. Kanbe et al : J. of Japan Institute of Light Metals, 48(1998), 103
- [8] Japan Institute of Light Metals: Report on the casting & forging of aluminium alloys(1996)
- [9] T. Nishimura et al: Sokeizai, 37(1996), 18
- [10] T. Nishimura: J. of Japan Institute of Light Metals, 47(1997), 587
- [11] Q. Yao et al: J. of Japan Institute of Light Metals, 47(1997), 613