

|||||||
論 文
|||||||

Ni-Al 청동 주물의 인장 특성에 미치는 표면 조도 및 미세 조직의 영향

박태동 · 김대영

Effects of Surface Roughness and Microstructure on Tensile Properties of As-Casted Ni-Al Bronze

Tae-Dong Park and Dae-Young Kim

Abstract

Effect of surface roughness and microstructure of the specimen on tensile properties of Ni-Al bronze casting has been investigated. Surface roughnesses of the tensile test specimen of interest are in range of 0.1 to 2.0 μm in Ra obtained by changing machining conditions. Fracture of the Ni-Al bronze casting initiated at the surface and propagated in a brittle manner during tensile tests. Tensile elongation value of the casting was strongly dependent on the surface roughness range studied, while tensile and yield strengths were almost independent on it. The elongation value was almost constant up to the surface roughness of 1.0 μm in Ra, and then decreased in a linear manner with an increase in Ra value up to 2.0 μm . However, tensile strength and hardness were strongly dependent on the microstructure, especially α phase fraction, and were decreased with increasing α phase fraction in microstructure. It is, therefore, recommended that decrease of surface roughness up to 1.0 μm in Ra, shrinkage porosity and α phase are required in order to obtain good tensile properties for Ni-Al bronze casting.

(Received August 7, 2000)

1. 서 론

선박용 프로펠러 재질로는 Ni-Al 청동, Mn-Al 청동 및 마르텐사이트계 스테인레스 주강 등이 있으나, Ni-Al 청동은 우수한 피로 강도 및 내부식성으로 인해 해수 중 회전 굽힘 피로 하중 조건에서 작동되는 프로펠러 원소재로 널리 사용되어 왔다[1-6]. 상업용으로 널리 사용되는 합금계는 Cu-10Al-5Ni-5Fe인 데, Fe는 조직 미세화로 인한 고강도 목적으로, Ni은 내부식성 향상 목적을 위해 각각 합금 설계되었다. 이런 합금 성분계로 용해 및 주조후 최종 미세 조직은 부식 피로 저항성이 우수한 α (alpha)와 κ (kappa, FeAl 또는 NiAl의 금속간 화합물)상으로 구성된다. Cu-Al 이원계 합금에서 얻을 수 있는 최종 응고 조직은 α , β 및 γ_2 (gamma 2)상인 데, 이 합금계에 Ni 및 Fe 원소를 첨가하면 κ 상이 석출되고, 이로 인해 Al 당량(Al equivalent)이 감소되어 γ_2 상의 석출 기회가 감소됨으로

써 내부식성 및 기계적 성질이 향상된다고 보고되었다 [1-6]. 그리고, 이 합금계에 약 1 wt.% 정도의 Mn이 첨가되는 데, 이는 용탕 용해 시 탈산제의 역할과 주조성을 개선하기 위한 목적이다.

선박용 대형 프로펠러는 주형 틀에 용금의 주입 및 응고 후 탈사한 상태, 즉 주방 상태로 제작하는 데, 이는 주조 후 열처리를 실시하면 물성은 향상되지만 냉각후 변형이나 생산 단가가 상승하기 때문이다. 따라서, 주조 직후 기계적 성질 개선을 위한 후속 열처리를 별도로 수행하지 않으므로 주방 상태에서의 최적 물성 확보가 필수적이며, 특히 가공 조건에 따른 물성 평가의 정립이 필요하였다.

따라서, 본 연구에서는 30~100톤의 후물재 프로펠러 제작 시 별주편으로 주입하는 "V" 블록 시험편을 대상으로 하였으며, 시험편 가공 시 표면 거칠기를 변수로 해 Ni-Al 청동 주물의 인장 특성을 평가하고자 하였다.

Table 1. Chemical compositions of Ni-Al bronze casting (wt.%)

Elements	Cu	Al	Ni	Fe	Mn	Sn	Pb	Zn	Si	P
Content	79.42	9.62	4.73	4.68	0.92	0.02	0.01	0.07	0.05	0.019
	~79.90	~9.70	~4.97	~5.06	~0.97	~0.03	~0.02	~0.09	~0.08	~0.023

2. 실험방법

본 실험에 사용된 Ni-Al 청동 주물은 현대중공업(주) 프로펠러 생산부에서 선박용 프로펠러 제작을 위해 사용된 30톤 용량 저주파 용해로로부터 준비하였다. Ni-Al 청동은 새 잉곳트와 선박용 폐프로펠라의 일부를 이용해 30톤 용량의 용해로에 장입한 후 유도 가열에 의해 용해하였으며, 최종 주물품 내부의 결함 원인인 수소를 제거하기 위해 용금 내부로 질소 가스를 주입(purging)시키는 탈가스 처리를 실시하였다. 용해가 완료되면 용금을 냉각시켜 1240°C의 온도에서 프로펠러 제작용 주형 틀 부근의 용탕 받이(pouring basin)로 용금을 이동시켜 주형 틀 내부로 주입시킨다. 프로펠러 제작용 주형 틀로 출탕하기 직전에 소형 이동형 레이들(portable ladle)을 이용해 용해로나 대형 레이들(ladle)로부터 소량의 용금을 채취한 후 소형 금형 틀에 주입 및 급냉시킨 시험편으로 화학 성분을 분석하였으며, 그 결과를 table 1에 나타내었다.

대형 프로펠러 주형 틀로 출탕시키기 전 소형 이동형 레이들(portable ladle)을 이용해 별주편인 "V"자 형

상 블록 주형 틀에 Ni-Al 청동 용금을 상주입하였으며, 용금으로 채워진 블록 상부에 발열제를 도포하였다. 발열제를 도포하는 이유는 압탕 역할을 하는 상부 용금 부위가 대기에 노출되면 조기 응고될 뿐 아니라 하부 쪽으로 용금이 충분히 공급되지 못해 주조 불량이 되므로 이를 방지하기 위함이다. 별주편의 주형 틀은 주물사와 철 프레임(frame)을 이용해 제작하였으며, 주입된 용금의 응고물과 주형 틀을 쉽게 분리하기 위해 주형 틀 내부에 도형제를 도포(coating)하였다. 도형제 처리된 주형 틀은 주형 틀과 도형제에 내부에 포함된 수분을 제거하기 위해 건조기 내에 장입 후 250°C의 온도에서 24시간 동안 충분히 건조시켰다.

별주편 제작이 완료되면 용금이 담긴 대형 레이들(ladle)은 대형 크레인에 의해 실편 프로펠러 합형틀 쪽으로 이동되어 용탕 받이(pouring basin)에 주입되며, 용탕의 온도가 1150°C가 되면 용탕 받이(pouring basin)와 주형 틀이 연결된 탕구(sprue)를 통해 실편 주형틀 내부에 하주입된다. 용금이 주입된 별주편은 24시간이 경과되면 충분히 냉각되므로 주형 틀을 제거하였다. 주방 상태 별주편에 대한 물성 평가는 Fig. 1에

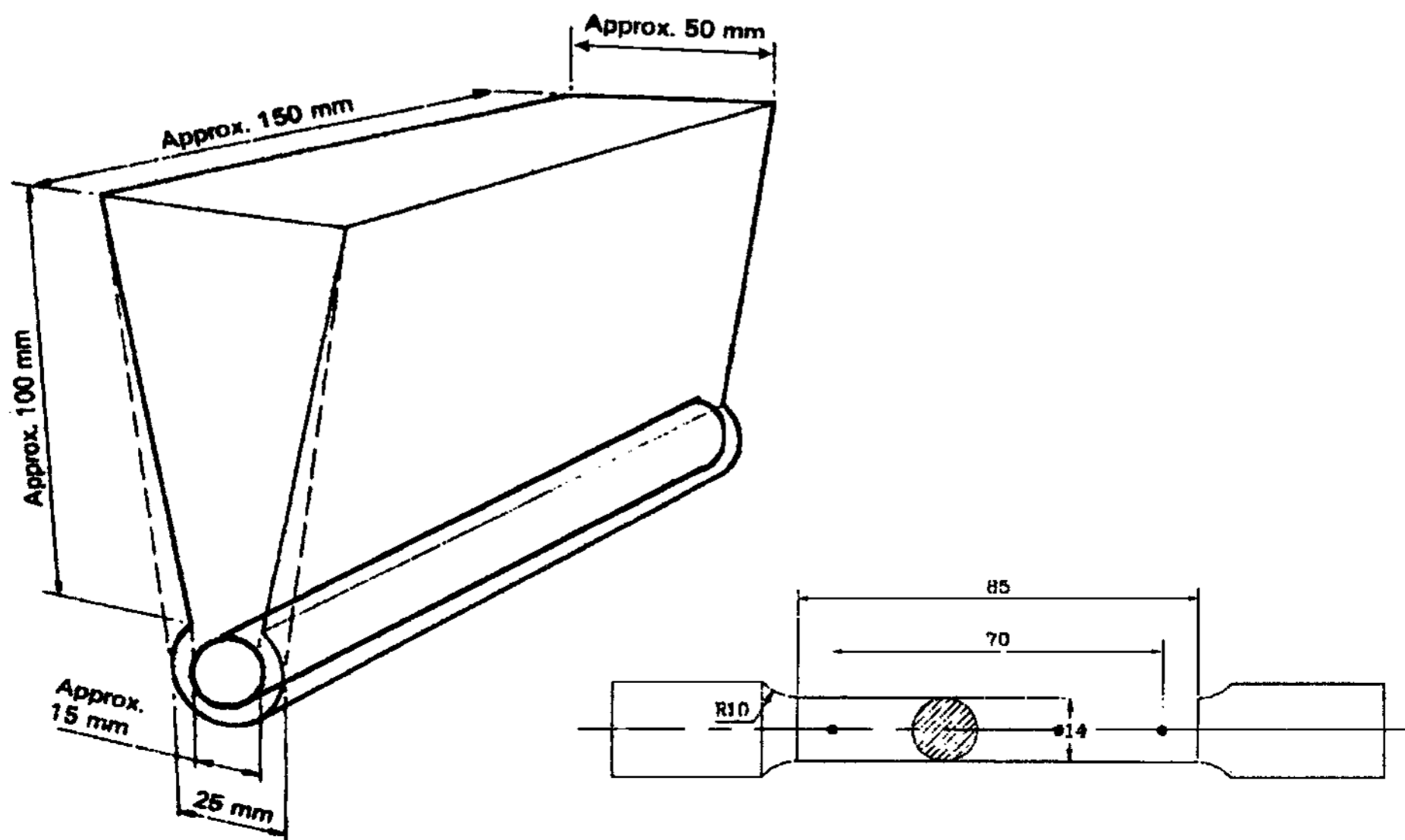


Fig. 1. Dimensions of V-shape block mold and sampling location of tensile specimen

나타낸 바와 같이 IACS (International Association Class Society)에서 규정한 위치에서 인장 시험을 채취했으며, 이 후 상온 조건에서 인장 시험을 수행하였다.

Ni-Al 청동 주물의 인장 특성에 영향을 미치는 인자들 중에서 응고 속도와 관련된 주입 온도 효과를 확인하고자 용해로 (주입온도; 1240°C) 및 대형 레이들 (주입온도; 1200°C)에서 각각 별주편을 제작하였다. 또한, 주입 조건별 별주편의 표면 조도 영향을 평가하기 위해 인장 시험편 가공 시 선반 작업과 연마지를 이용해 표면 조건을 변화시켜 준비하였다. 표면 조도는 인장 시험 전.후에 표면 조도 측정기 (surf tester)를 이용해 0.8 mm 길이를 대상으로 Ra (Average Surface Roughness index; 평균 조도 지수)로 평가하였으며, 표면부의 가공 상태는 확대경(zoomscope)을 이용해 확인하였다. 표면 조도를 변수로 인장 시험한 후 SEM (Scanning Electron Microscope; 주사전자현미경)을 이용해 파면과 그 주위를 관찰함으로써, 균열 개시부 및 전파 양상을 확인하였다. 각종 변수에 따른 시험편의 미세 조직 관찰을 위해 광학 현미경과 SEM을 이용하였으며, 연마지로 연마(polishing) 후 염화철 용액 (Ferric Chloride solution; 20 ml HCl + 13 ml FeCl₃ + 50 ml H₂O)을 사용해 5-20초 동안 에칭시켜 조직 관찰용 시험편을 준비하였다. 주입 조건에 따른 경도 및 인장 특성을 규명하기 하기 위해 영상 분석기 (image analyzer)를 이용해 α 및 κ상 분율을 정량적으로

로 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 인장 시험 전 표면 조도기(surf tester)를 이용한 표면 조도 시험 결과를 보여주는 데, Ra가 최소 0.15 μm에서 최대 2.02 μm까지 변함을 보여주고 있다.

각종 표면 조도로 준비된 인장 시험편을 대상으로 상온 인장 시험한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig 3의 결과에서도 알 수 있듯이 표면 조도인 Ra에 따라 항복 강도 및 인장 강도는 크게 변함이 없지만, 연신율의 경우 Ra가 증가함에 따라 약 24%에서 17%까지 감소됨을 알 수 있었다. 특히, 용해로(주입온도; 1240°C)에서 주입한 시험편은 Ra가 약 1 μm까지 연신율은 거의 동일하였으나, 그 이후 Ra가 커짐에 따라 연신율은 직선적으로 감소하였다. 그리고, 레이들 (ladle)에서 주입한 시험편은 동일 Ra에서도 연신율이 약 4% 정도 감소하였다. 이 실험 결과로부터 주방 상태의 Ni-Al 청동은 표면 조도에 따라 연신율은 크게 영향을 받지만, 항복 및 인장 강도는 크게 변함이 없음을 알 수 있다. 이처럼 표면 조도에 따라 연신율 변함을 확인하기 위해 확대경(zoomscope)을 이용해 파면을 관찰한 결과, 모든 시험 조건에서 Fig. 4에 나타낸 바와 같은 파단 양상을 나타내었다.

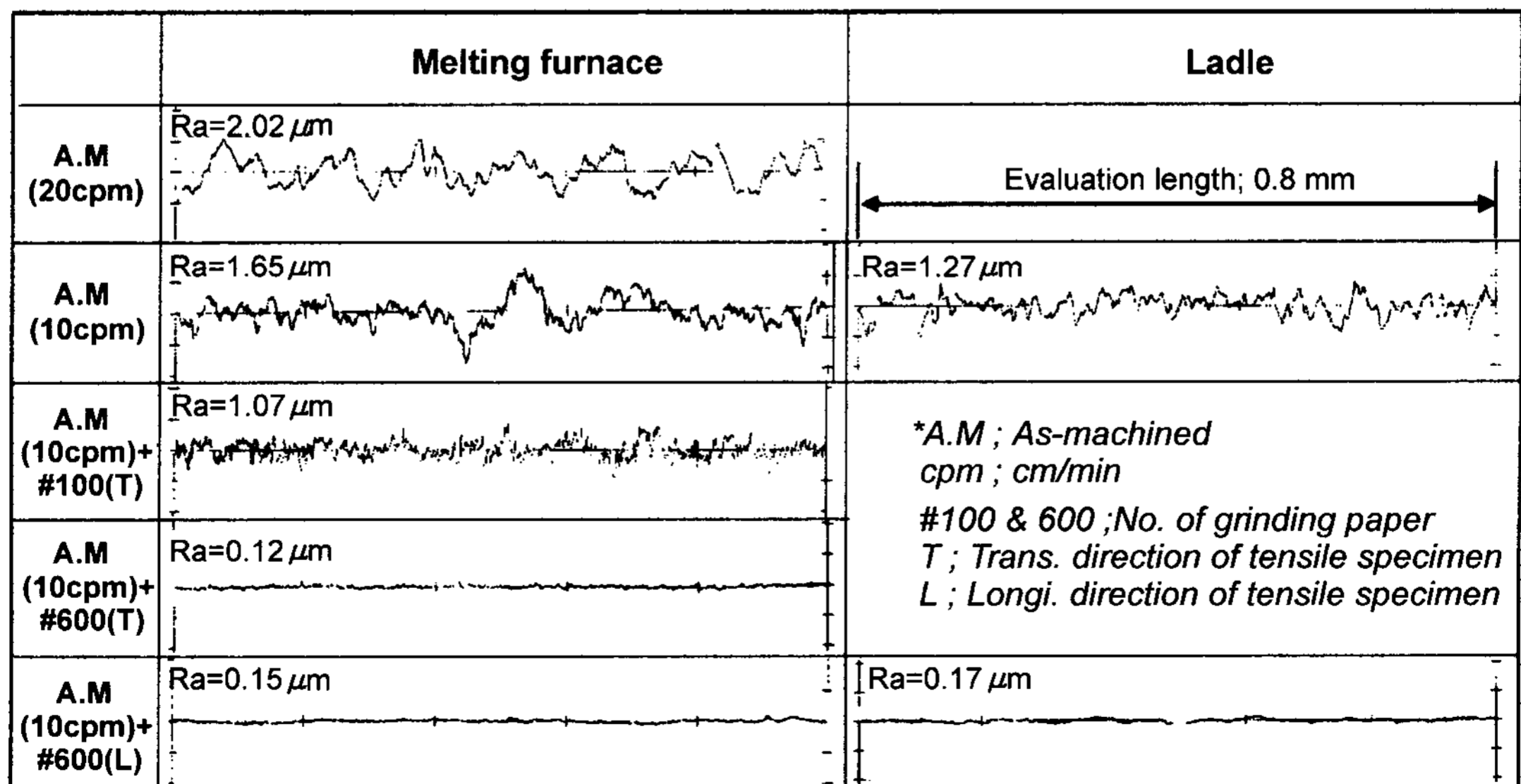


Fig. 2. Roughness test result of specimen surface before tensile test

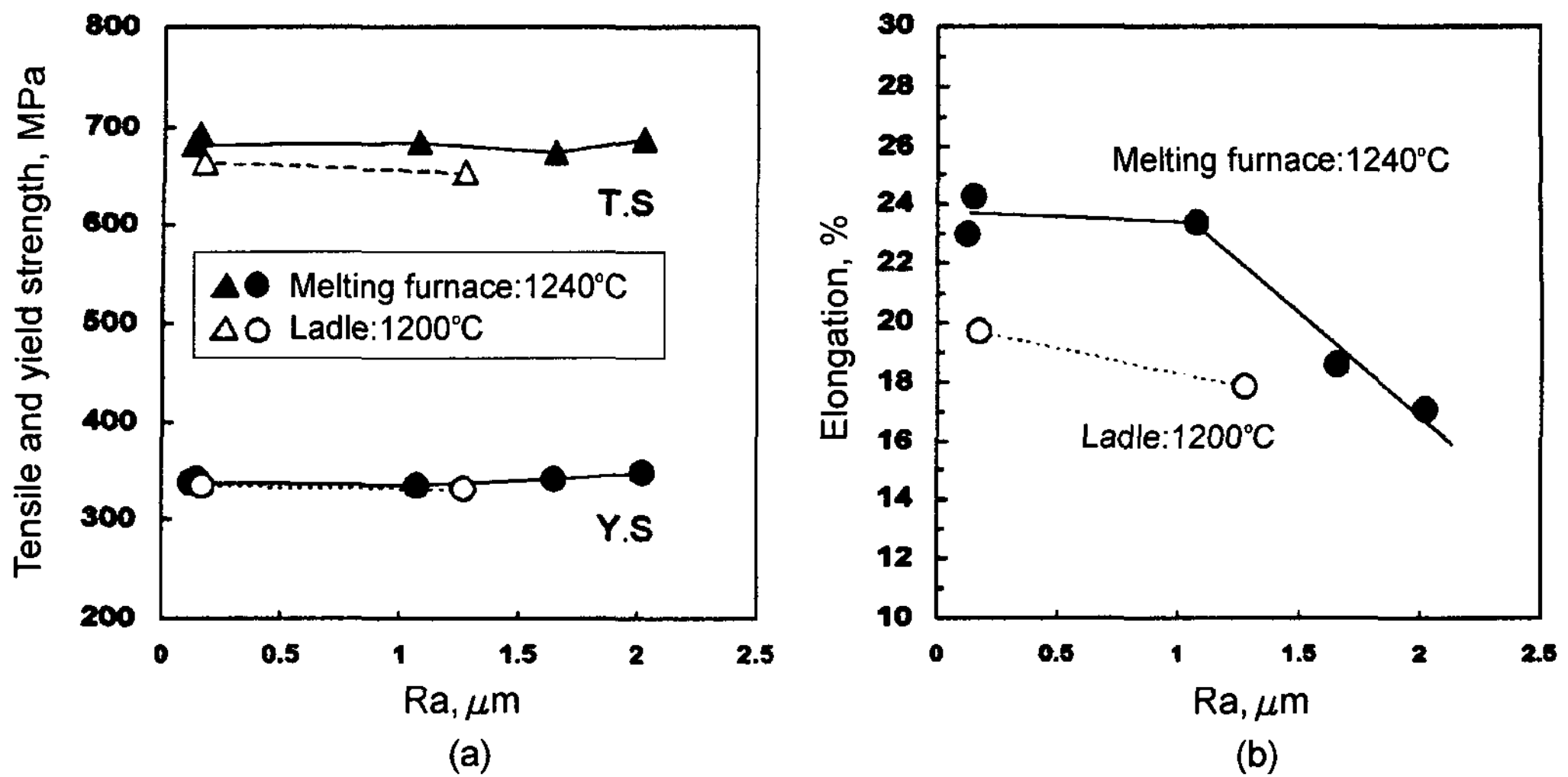


Fig. 3. Variation of tensile properties as a function of surface roughness of the specimen: (a) tensile and yield strength and (b) elongation

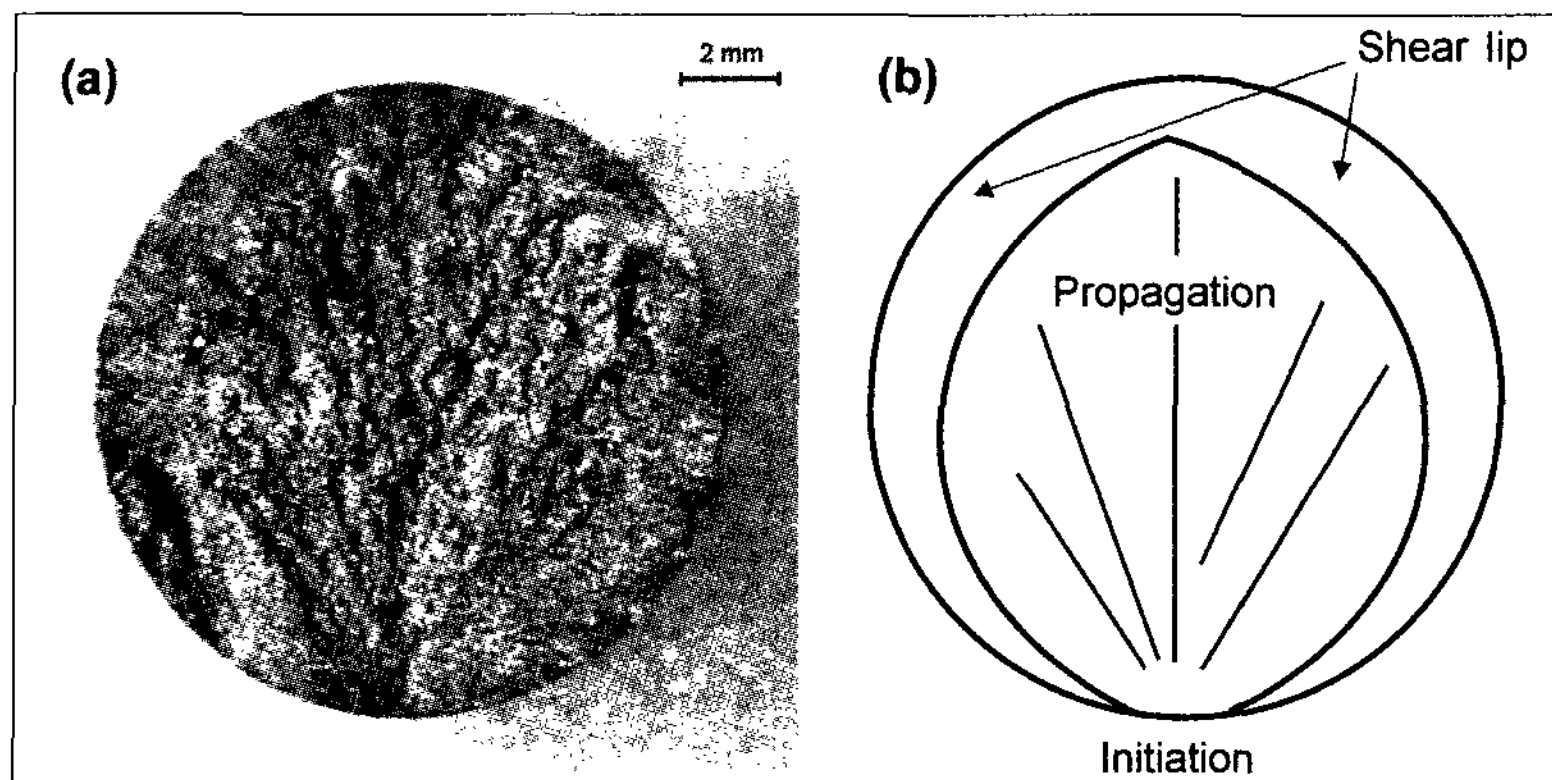


Fig. 4. (a) Fracture surface and (b) schematic drawing of the fracture surface of the Cu-10Al-5Ni-5Fe alloy casting

인장 시험편의 파면은 인장력에 형성된 파단 개시부 및 전파부와 전단력에 의해 단면적 감소로 형성된 전단 파단면(shear lip)의 세 부분으로 나눌 수가 있다. 이 세 부위에 대한 파면 양상을 확인하기 위해 주사전 자현미경으로 관찰한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에 나타낸 사진들은 용해로에서 주입한 후 표면 조도가 $0.12 \mu\text{m}$ 로 가공된 시험편(인장강도 = 687 MPa, 항복강도 = 345 MPa 및 연신율 = 25%)을 대상으로 500 배 확대해 관찰한 것으로서, 파단 개시부 및 전파부는 α 상의 연성 파괴와 κ 상의 취성 파괴로 구성되어 있음을 보여준다. 즉, 연성이 우수한 α 상은 얇은 딴플(shallow dimple) 양상을, 검고 작으면서 검고 편평하며 둥근 형상 파면을 나타내는 κ 상은 벽개 파괴

(cleavage fracture)를 각각 보여 주고 있다.

표면 조도에 따른 파단 경위를 좀 더 정확히 평가하기 위해 파단부 근처에서 제 2차 균열을 조사하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6의 결과에서도 알 수 있듯이 기계 가공만 한 상태(A.M : As-machined)는 선반 바이트 자국이 노치로 작용해 균열 민감성이 증가한 것으로 판명되었다. 게다가 Fig. 7의 미세 조직에서도 알 수 있듯이 바이트 흔적이 소성 변형을 발생시켜 취성 경향이 증가해 인장 시험 시 작용한 하중에서 균열이 발생되었음을 보여준다. 인장 시험에서 결함 유무를 확인하기 위해 전 시험편을 대상으로 인장 시험 후 파단 개시부들을 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

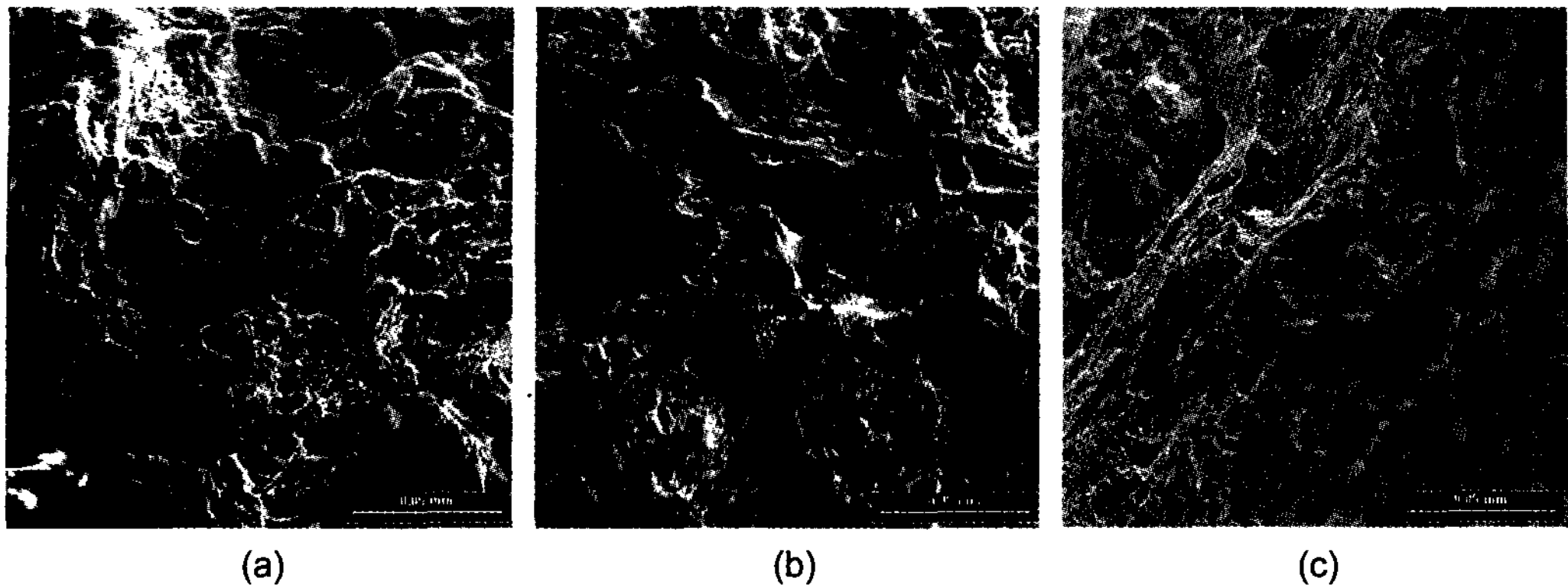


Fig. 5. SEM fractographs of fracture surface of Cu-10Al-5Ni-5Fe alloy casting: (a) initiation site (b) propagation region and (c) shear lip as final fracture

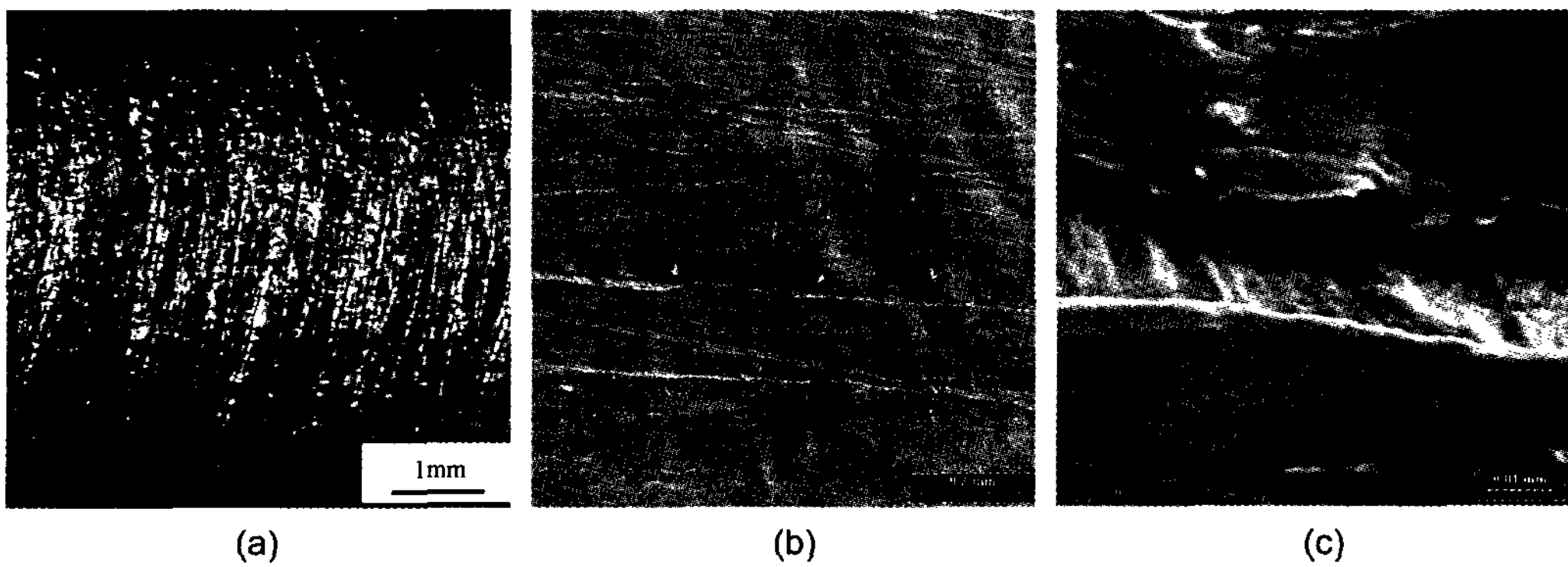


Fig. 6. Surface morphologies of fractured specimen with Ra = 2.0 μm

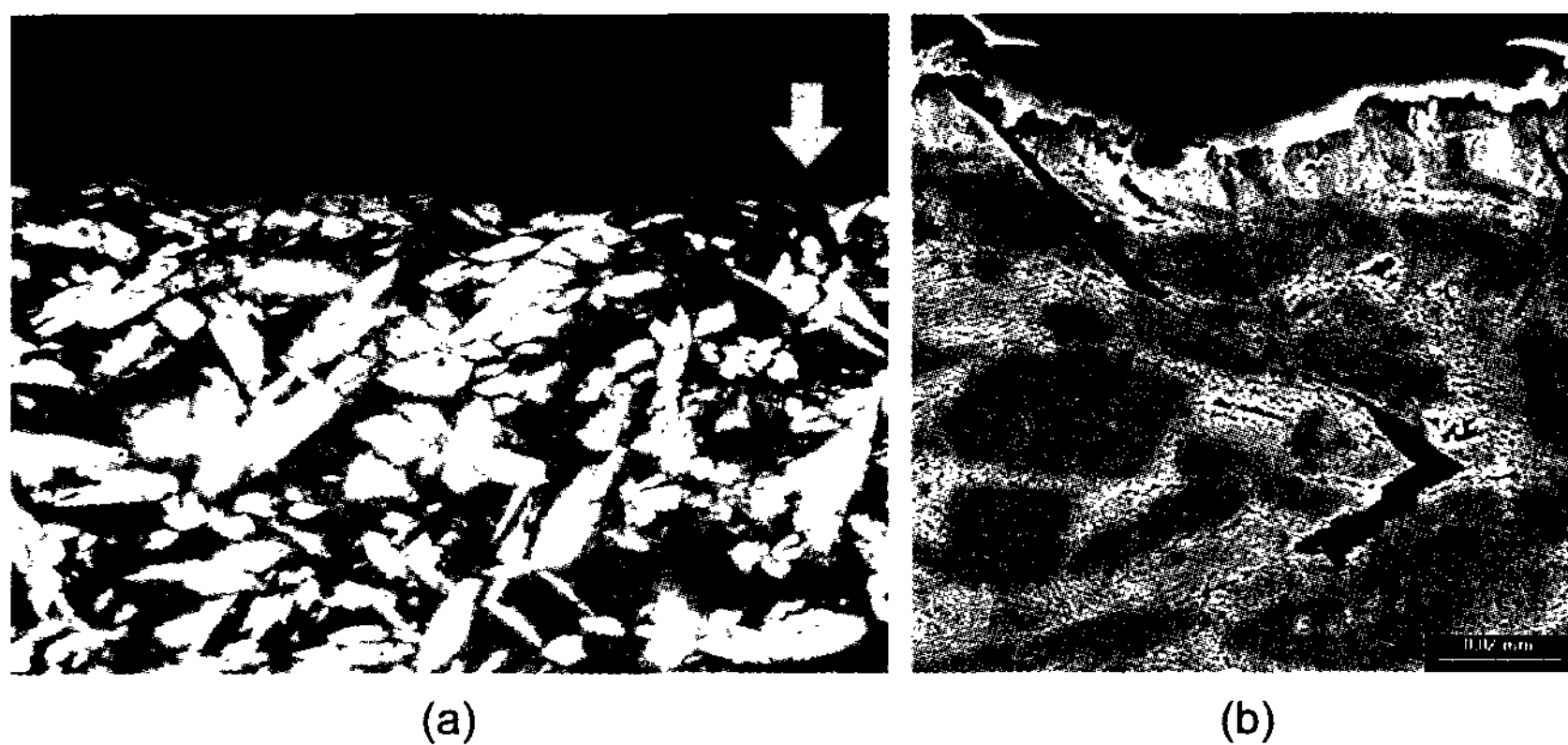


Fig. 7. (a) Optical and (b) SEM microstructure of cross-section of tensile specimens, showing plastic deformation trace and initiation of cracks at the surface

Fig. 8의 결과에서도 알 수 있듯이 용해로에서 주입한 시험편들에 비해 레이드(ladle)에서 주입한 시험편에서 주물 결함인 수축공(shrinkage porosity)이 발견되었다. 따라서, 이러한 결함들이 인장 시험편에 존재하면

시험 도중 응력 집중처로 작용할 뿐 아니라 표면 조도가 증가하면 표면부 거칠기가 노치로 작용해 인장 연신율을 저하시킨다.

앞서 각종 결과들을 종합하면, 연신율에 영향을 미치

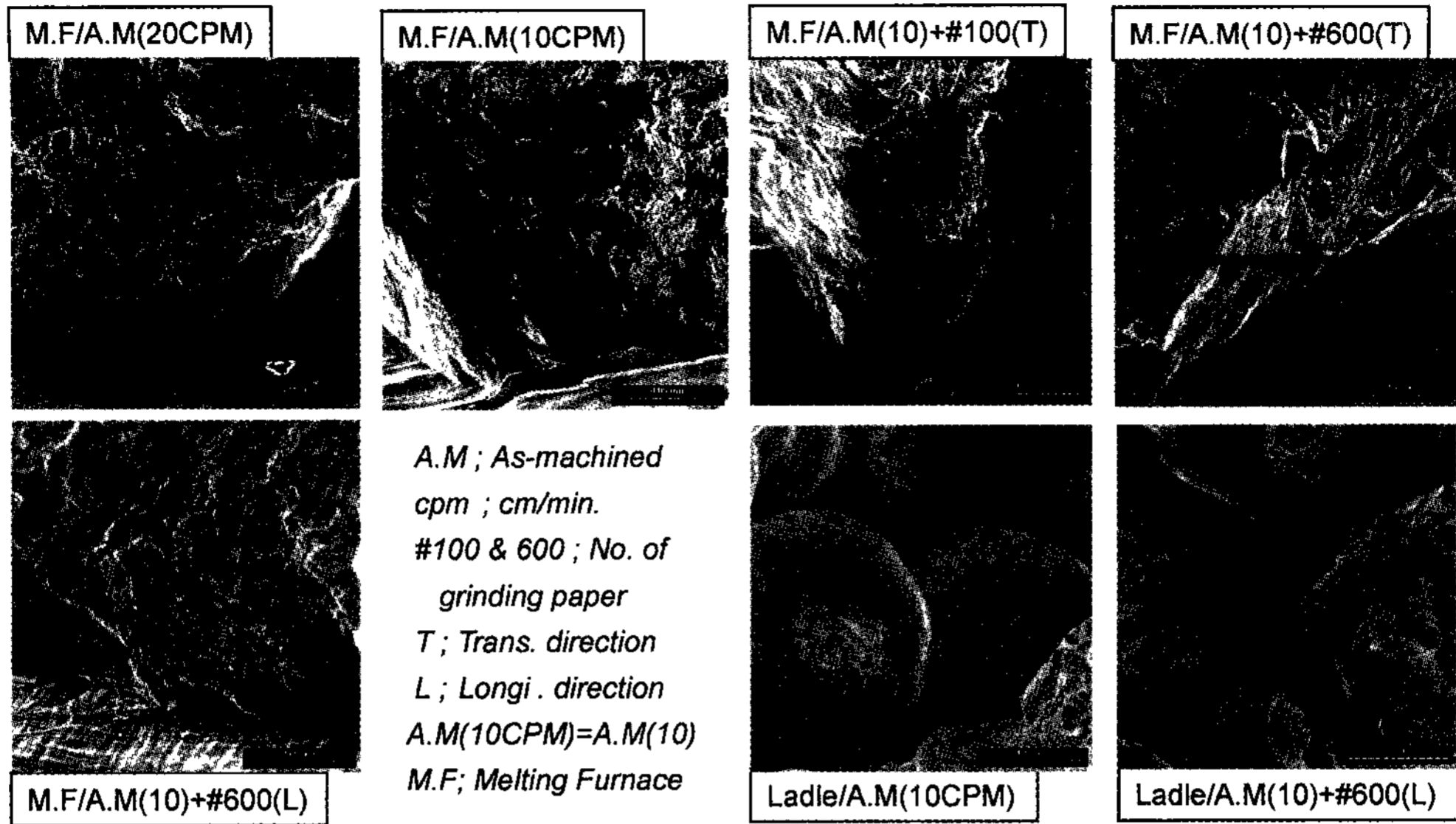


Fig. 8. SEM fractographs of tensile fracture initiation site with various experimental condtions

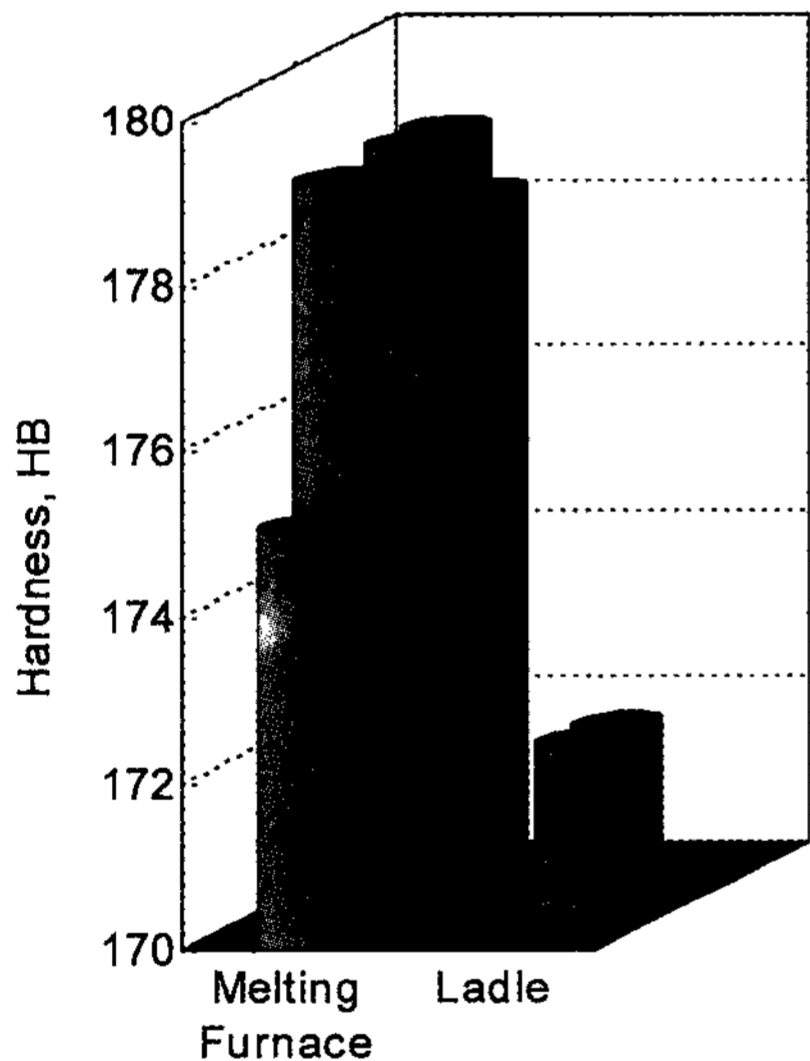


Fig. 9. Hardness test result with different pouring condtion

는 인자들은 수축공 결함 및 표면 조도이며, 인장 강도와 항복 강도에는 크게 영향을 미치지 않았다. 한편, 주입 조건에 따른 항복 강도 변화는 없었지만, 인장 강도에는 차이가 있었으며, 이를 확인하기 위한 주입 조건별 경도 시험을 HB scale로 측정해 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9의 결과에서도 알 수 있듯이 용해로에서 주입한 시험편이 레이들(ladle)에서 주입한 시험편에 비해 경도가 6 HB가 높았는데, 이는 앞서 인장 강도 시험 결과와 일치하는 것이다. 이처럼 주입 조건에 따

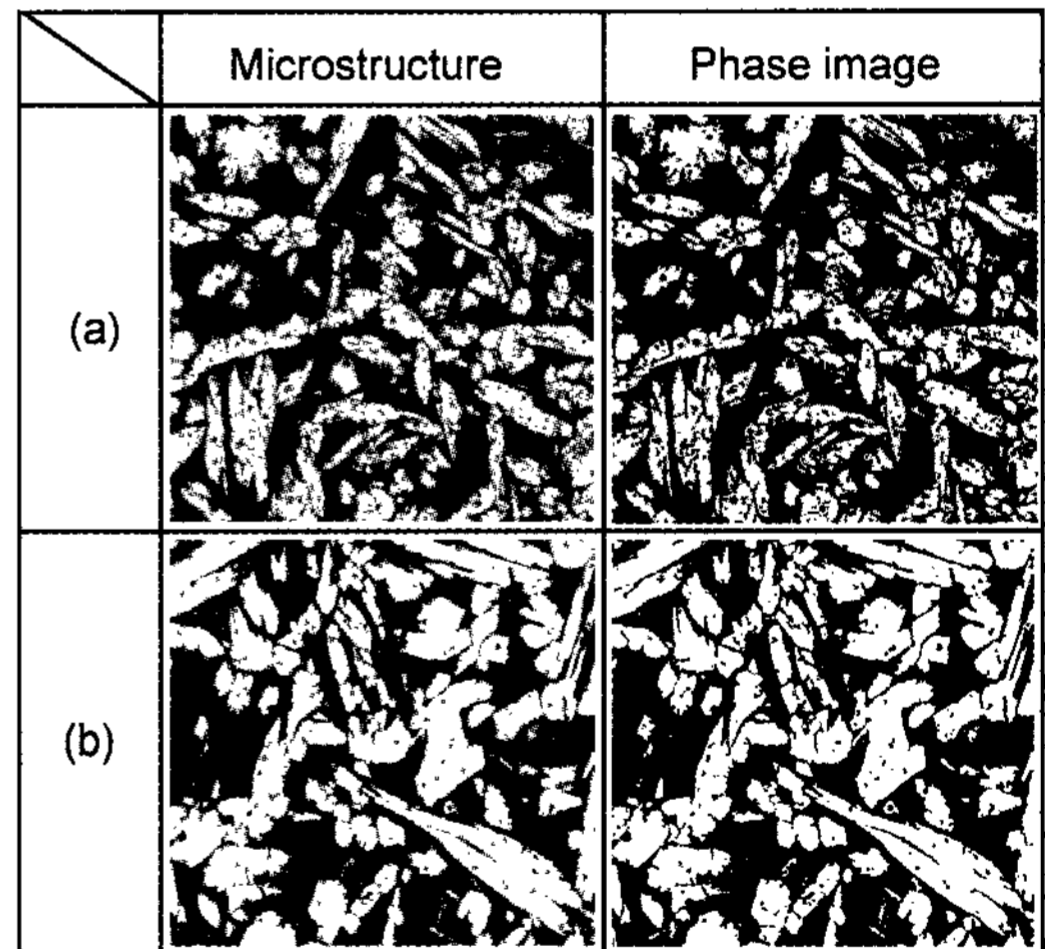


Fig. 10. Microstructures and phase images for phase fraction evaluation casted at temperatures of (a) melting furnace(1240°C) and (b) ladle(1200°C)

라 인장 강도와 경도치의 차이가 있음을 확인하기 위해 미세 조직을 관찰하였으며, α상 분율을 영상 분석기(image analyzer)로 측정해 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서도 알 수 있듯이 레이들에서 주입한 시험편이 α상 분율이 용해로에서 주입한 시험편에 비해 상대적으로 높았으며, 이로 인해 인장 강도 및 경도가 감소한 것으로 판단된다. 즉, 용해로에서 주입한 시험편은 레이들에서 주입한 시험편과 비교해 볼 때 40°C 높은 온도에서 주입하였으며, 이로 인해 응고시 용해로에서

주입한 시험편의 냉각 속도가 상대적으로 증가해 석출 경화형 κ 상의 분율이 증가하고 α 상의 분율이 감소한

것으로 판단된다.

따라서, 현업에서 주입한 시험편을 대상으로 α 상 분율에 따른 인장 강도, 항복 강도 및 연신율을 도시해 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서도 알 수 있듯이 표면 조도에 의해 영향을 받지 않았던 인장 강도는 미세 조직 중 α 상 분율에 따라 변화됨을 알 수 있었다. 즉, FCC 구조인 α 상의 분율이 증가함에 따라 석출 경화상인 κ 상 분율이 감소하였으며, 이로 인해 인장 강도는 감소하였으나, 항복 강도 및 연신율은 구성 상의 분율에 따라 변화가 없었다.

4. 결 론

주방 상태의 Ni-Al 청동을 대상으로 표면 조도 및 미세 조직에 따른 인장 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 표면 조도가 증가함에 따라 인장 강도 및 항복 강도는 변함이 없었으나, 연신율의 경우 표면 조도가 $1\mu\text{m}$ 까지는 변함이 없었지만, 이 값보다 클 경우 직선적으로 감소하였다. 또한, 인장 시험편 내에 수축공과 같은 주물 결함이 있을 경우 응력 집중 효과에 의해 연신율이 저하되었다. 표면 조도에 영향이 없던 인장 강도는 최종 응고 후 미세 조직 중 α 상의 분율에 따라 변화가 있었는데, α 상이 증가함에 따라 인장 강도는 직선적으로 감소하였으나 항복 강도 및 연신율은 경향성을 확인할 수 없었다. 따라서, 동일 합금 성분계인 Cu-10Al-5Ni-5Fe에서 인장 강도 및 연신율을 동시에 개선하기 위해서는 주조 조건을 적절히 조절해 최종 미세 조직 중 α 상의 분율을 감소시켜야 할 뿐 아니라, 최종 응고 상태에서 노치 역할을 하는 수축공의 함량을 줄여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Hasan, F., Jahanafrooz, A., Lorimer, G.W., and Ridley, N.; Met. Trans., Vol 13A, (1982) 1337.
- [2] Culpan, E.A., Rose, G.; J. Mater. Sci., Vol 13, (1978) 1647.
- [3] Thomson, R., Edwards, J. O.; AFS Transactions., Vol 78-15A, (1978) 385.
- [4] Masao Kanamori., Shoji Ueda.; Trans. JIM., Vol 1 (1960) 103.
- [5] Lloyd, D. M., Lorimer, G.W., Ridley, N.; Metals Technology., March, (1980) 114.
- [6] Crofts, W.L.J.; Casting., Nov., (1965) 25.

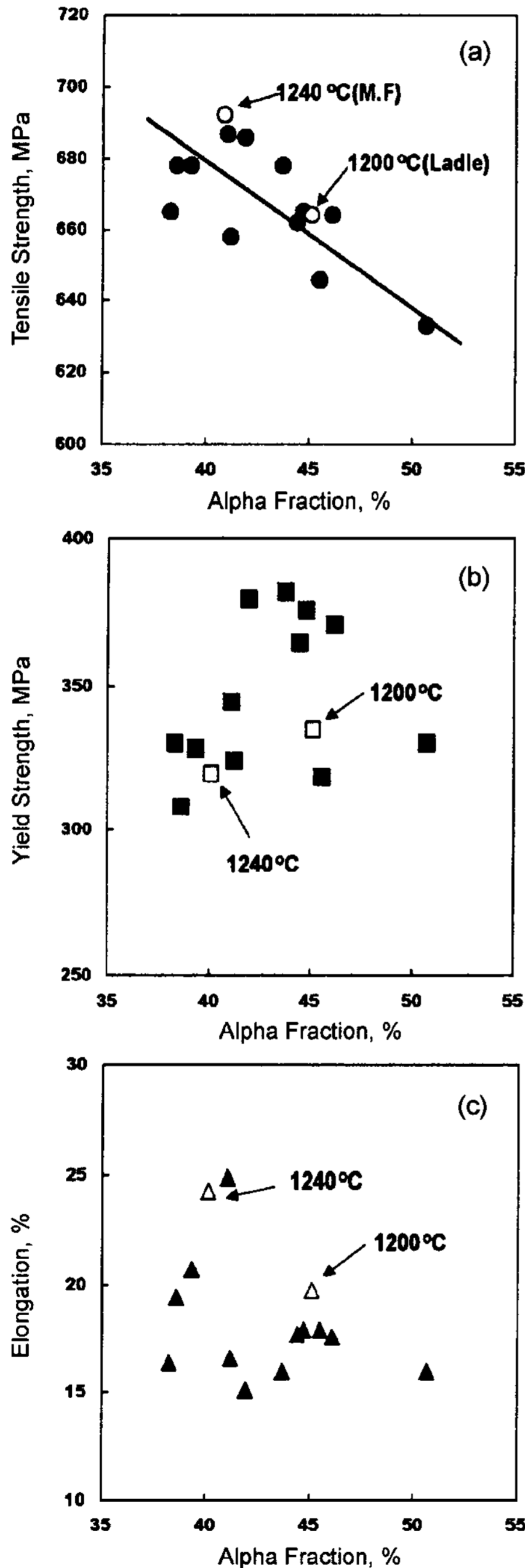


Fig. 11. Variations of tensile properties as a function of α phase fraction in microstructure: (a) tensile strength, (b) yield strength and (c) elongation (●, ■, ▲; Field data, ○, □, △; this experimental data)