

분말야금법으로 제조된 Cu-7.5Ni-5Sn 합금의 열처리 조건에 따른 기계적 특성의 변화

류재철 · 김상식 · 한승전* · 김창주*

경상대학교, 재료공학부, 항공기부품기술연구소

*한국기계연구원, 비철재료실

Tensile Properties of Powder Metallurgy Processed PM Cu-7.5Ni-5Sn Alloy with Different Heat Treatment Conditions

J.C. Rhu, S.S. Kim, S.Z. Han* and C.J. Kim*

Gyeongsang National University, Division of Materials Science and Eng., ReCapt

*Materials Science Department, KIMM

(1999년 6월 15일 받음, 1999년 8월 4일 최종수정본 받음)

초 록 분말야금법으로 제조된 Cu-7.5Ni-5Sn 합금의 용체화 및 시효 열처리 조건에 따른 기계적 특성의 변화를 관찰하였다. As-received 상태의 Cu-7.5Ni-5Sn 합금을 시효한 경우에는 시효 20분 후에 γ' 상의 석출에 의한 강도 증가를 나타내는데 반해, 재용체화 처리된 시편에서는 시효 수십초부터 스피노달 분해에 의한 급격한 강도의 증가를 나타내고 있다. 그러나 전체적인 인장강도는 재용체화 처리를 행한 경우에 비해 as-received 상태에서 등온 시효한 경우가 더욱 우수한 것으로 나타났다. 이러한 현상은 재용체화 처리에 의한 결정립 성장에 기인한 것으로 사료된다. As-received 상태의 Cu-7.5Ni-5Sn 합금을 장시간 시효하게 되면 결정립계에 불연속 석출물이 생성되었으며, 이러한 불연속 석출물의 생성과 성장은 열처리 조건에 영향을 받는 것으로 관찰되었으며, 합금의 최종 기계적 성질에 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Abstract Tensile properties of powder metallurgy (PM) processed Cu-7.5Ni-5Sn alloys, either as-received or additionally solution heat treated, were examined as a function of aging time. It was found that the as-received Cu-7.5Ni-5Sn alloys showed an abrupt increase in tensile strength after aging at 350°C for 20 minutes, due to the metastable γ' precipitation and a marginal Spinodal decomposition. The resolutionized PM Cu-7.5Ni-5Sn alloys, on the other hand, showed a gradual increase in tensile strength from the very early stage of aging. The overall tensile strength of resolutionized PM Cu-7.5Ni-5Sn alloys, however, was lower than that of the as-received and aged counterparts, due to the grain growth during resolutionization. After prolonged aging for the as-received PM Cu-7.5Ni-5Sn alloys, a considerable amount of discontinuous precipitates formed along the grain boundaries. The formation and growth kinetics of such discontinuous precipitates appeared to be dependent on the heat treatment conditions, and affect the mechanical properties greatly.

1. 서 론

전자부품의 소형화 및 고집적화에 따라 전기적 특성뿐만 아니라, 기계적 성질이 우수한 커넥터용 동합금의 필요성이 대두되고 있다.^{1~5)} 지금까지는 고강도, 고탄성의 석출경화형 Cu-Be 합금이 사용되어지고 있으나, 제조공정상의 어려움과 인체에의 유해성 등으로 인해 대체제로서 Cu-Ni-Sn계 합금에 관한 관심이 국내외적으로 높아지고 있다.^{1~8)} Cu-Ni-Sn계 합금은 시효 초기에 α 과포화 고용체로부터 Sn-rich와 Sn-poor 영역의 변조구조를 형성시키며 강화를 일으키는 스피노달 분해가 발생하고, 시효가 지속됨에 따라 Sn-rich 영역으로부터 모상과 정합관계의 준안정 γ' 상이 기지에 미세하게 석출하면서 큰 강화 효과를 나타내는 것으로 보고되어 있다.⁶⁾ 스피노달 분해 강화를 일으키는 Sn의 첨가는 그러나, 응고시 Sn 정출물의 편석 현상을 일

으키게 되고, 이에 따른 기계적 특성의 저하와 열간 압연 등에 의한 판재 성형시 악영향을 미치기도 한다.^{8~10)} 이러한 Sn 정출물에 의한 기계적 특성 저하 문제에 대한 해결책의 하나로 분말야금법을 이용한 Cu-Ni-Sn계 합금 개발이 시도되어지고 있다. 예를 들어 미국의 AMETEK사에서 개발된 분말야금법으로 제조된 Cu-15Ni-8Sn 합금의 경우, 적절한 가공열처리 (thermomechanical processing) 를 거치면 스피노달 분해와 미세한 γ' 상의 석출에 의해 1, 200MPa 이상의 고강도를 얻을 수 있는 것으로 보고되어 있다.¹¹⁾ 그러나 장시간 시효처리 하였을 경우 결정립계에 α 상과 γ 상으로 이루어진 불연속 석출물이 생성됨으로 인해 강도 및 연성이 감소하는 것으로 알려져 있다.¹²⁾ 결정립계에서 생성되는 조대한 불연속 석출물이 Cu-Ni-Sn계 합금의 시효시 생성된 스피노달 변조 구조를 파괴하고 기지의 용질원자의 감소를 초래하여 강도를 저하시킨다는 사실은

이미 여러 연구자들에 의해 제안되어 왔다.^{8,9)} 그러나 이러한 불연속 석출물이 Cu-Ni-Sn계 합금의 연성에 미치는 영향에 대해서는 일반적으로 이러한 석출물들이 연성을 감소시킬 것으로 추론할 뿐 체계적인 연구는 이루어져 있지 않고 있다.⁹⁾

본 연구에서는 Sn 정출물의 편석을 억제할 목적으로 미국의 AMETEK사에서 분말야금법으로 제조된 Cu-7.5Ni-5Sn 합금의 용체화 및 시효 열처리 조건에 따른 기계적 특성변화를 관찰하고자 한다. 한편 X-ray, 광학현미경 및 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 미세조직, 파단면 및 측면을 관찰하여, 열처리 조건이 스피노달 분해 강화나 결정립계의 불연속 석출물의 생성 및 성장에 미치는 영향과 이들 기계적 특성간의 관계를 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에서는 미국의 AMETEK사에서 급속응고법으로 제조된 분말로부터 압출 및 압연 성형된 0.5mm 두께의 분말야금법(PM) Cu-7.5Ni-5Sn 합금 판재를 구입하여 사용하였다. 본 합금 판재는 water atomization법에 의해 급속응고된 Cu-7.5Ni-5Sn 합금 분말을 압연 및 소결 성형된 후 약 22% 냉간 압연한 판재를 663°C에서 5분간 annealing한 상태로 공급되었다. As-received 상태의 합금 판재를 350°C의 염욕에서 30초에서 최고 48시간까지 등은 시효하였다. 한편 용질 원자의 고용 정도에 따른 용체화 처리후의 시효 특성이나 결정립 크기 변화에 따른 기계적 특성 변화를 관찰하기 위해 시편을 850°C에서 각각 30분, 1시간 및 3시간 재 용체화 처리하였으며, 1시간 재용체화 처리한 시편의 경우는 다시 350°C에서 30초에서 24시간까지 등은 시효하였다. 열처리된 시편의 인장 특성을 관찰하기 위해 표점거리 25.4mm의 판상 시편을 제조하였으며, SHIMADZU AG-10TG 만능시험기를 이용하여 10⁻⁴/sec의 변형률속도로 인장시험을 행하였다. 인장시험 후 파단면은 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다. 또한 장시간 시효하였을 때 결정립에 생성되는 불연속 석출물이 인장파단에 미치는 영향을 관찰하기 위해 파단된 시편의 측면을 SEM을 이용하여 관찰하였다. 미세조직 관찰을 위하여 50ml NH₄OH + 25ml H₂O₂ + 6ml HNO₃ 용액을 사용하여 부식시킨 후, NaOH 과포화 수용액으로 세척하였다. 또한 시효에 따른 스피노달 분해를 확인하기 위해 CuK α 선을 사용한 XPD분석에서 주사속도를 0.1%/min로 하여 (200) α 주변에서 side band^{14,15)}를 관찰하였다.

3. 실험결과

그림 1은 as-received 상태의 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금을 350°C에서 30초에서 최고 48시간까지 등은 시효하였을 때 시효시간에 따른 최대인장강도와 연신율의 변화를 보여주고 있다. 본 그림에서 보는 바와 같이 시효 20분까지의 최대인장강도는 530MPa 내외로 강도의 변화를 나타내지 않고 있다. 한편 이 영역에서는 연신율의 변화도 거의 관찰되지 않았다. 그러나 시효 1시간을 전후하여 급격한 인장강

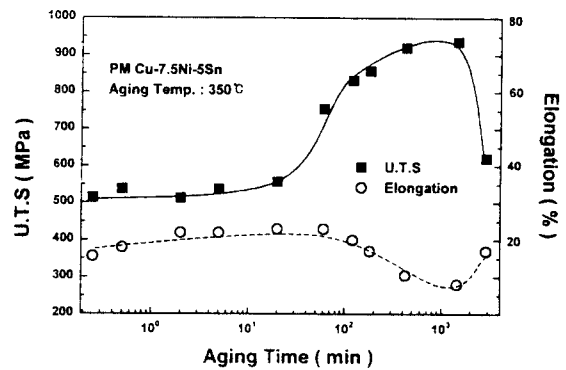


Fig. 1. Effect of aging time on tensile strength and elongation of PM Cu-7.5Ni-5Sn alloys.

도의 증가를 나타내다가, 시효 7시간을 전후하여 936MPa의 최대 인장강도에 도달하였다. 이때 인장강도의 증가와 함께 연신율은 다소 감소하는 경향을 나타내고 있다. 시효 24시간 후부터 강도의 증가는 둔화 내지 감소되는 경향을 보이다가, 48시간 시효하였을 경우의 인장강도는 현저히 감소하고 연신율은 24시간 시효한 것에 비해 다소 증가되었음을 관찰할 수 있었다.

그림 2는 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금의 (a) as-received 상태와, 350°C에서 각각 (b) 1시간, (c) 7시간, (d) 24시간 및 (e) 48시간 등은 시효한 후의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 사진을 보여주고 있다. 시효시간이 증가하여도 평균 결정립의 크기는 22 μ m 내외로 큰 변화를 보이지 않고 있으며, 인장강도의 증가가 둔감해지는 시효 7시간 이후에는 결정립계에 그림에서 검은색으로 나타나고 있는 석출물들이 다량 관찰되고 있다. 이러한 석출물들을 SEM을 이용하여 고배율에서 관찰한 결과, Kim¹²⁾이나 Hermann^{8,9)} 등이 보고한 바와 같이 α 와 γ 상이 교대로 성장하여 마치 철강재에서의 pearlite 구조와 유사한 형상을 나타내는 층상구조의 불연속 석출물 colony임을 알 수 있었다 (그림 2(f)). 이러한 결정립계의 불연속 석출물은 시효시간이 증가됨에 따라 증가하여 48시간 시효하였을 경우는 불연속 석출물의 부피분율이 84%에 이르게 된다.

시효에 따른 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금의 변형 거동을 이해하기 위해, (a) as-received 상태와 각각 (b) 20분 (c) 1시간, (d) 7시간, (e) 24시간 및 (f) 48시간 등은 시효한 후의 인장파단된 시편의 파단면을 SEM으로 관찰한 사진을 그림 3에 나타내었다. 인장강도 변화가 관찰되지 않는 시효 20분까지의 시편에서는 전형적인 연성과파괴 양상이 관찰되다가 1시간 시효된 시편의 파단면에서는 다소의 입계 파괴 양상이 관찰되기 시작하고 있다. 한편 7시간 시효 처리된 시편에서는 전형적인 입계파괴가 관찰되다가, 24시간 시효하였을 때는 입계파괴 양상과 함께 연성과파괴 양상이 다시 나타나고 있다. 그리고 48시간 시효된 시편에서는 다시 대부분 연성과파괴 양상이 관찰되었다.

그림 4는 입계파괴가 관찰되기 시작하는 350°C에서 7시간 시효된 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금 시편을 인장 실험한 후 파단면 주위의 측면을 SEM을 이용하여 관찰한 사진들

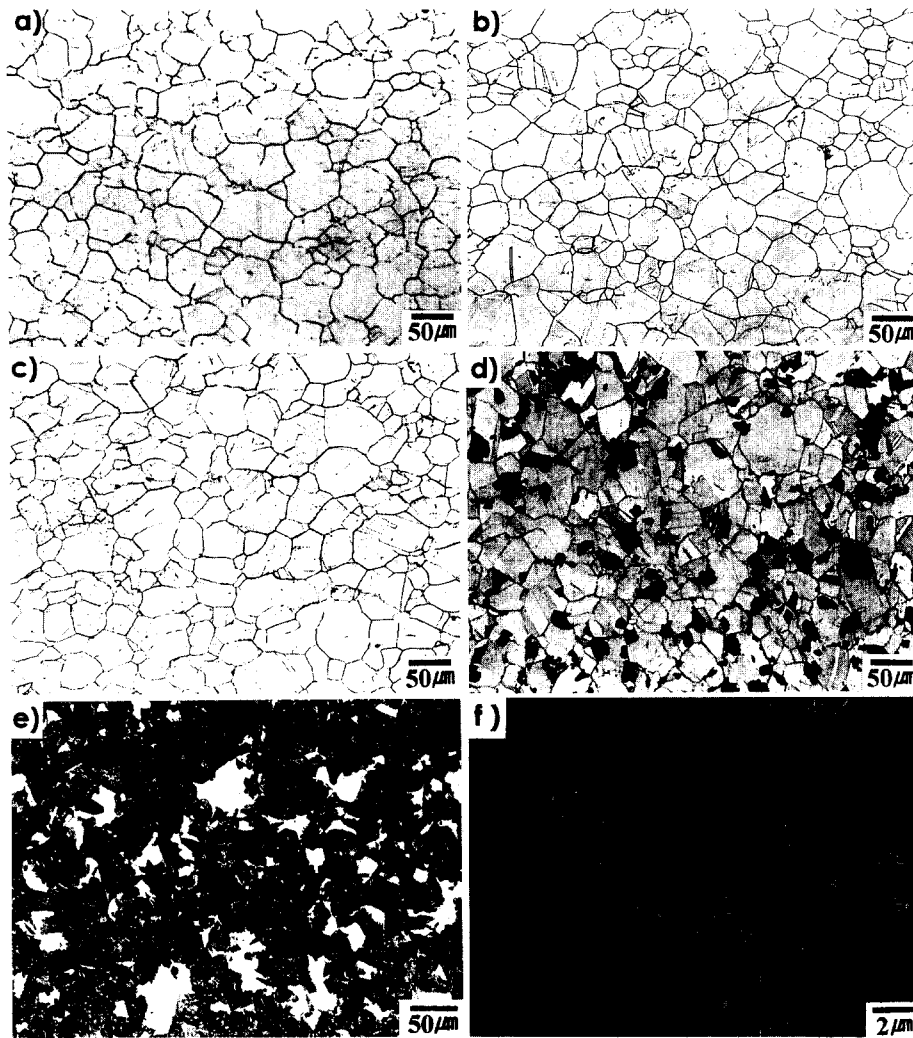


Fig. 2. Optical micrographs of PM Cu-7.5Ni-5Sn alloys, (a) as-received, and subsequently aged at 350°C for (b) 1 hour, (c) 7 hours, (d) 24 hours and (e) 48 hours, respectively, and (f) high magnification SEM micrograph of (d).

을 보여주고 있다. 본 그림에서 보는 바와 같이 대부분의 균열은 결정립계의 삼중점에서 시작되는 것을 알 수 있으며, 특별히 화살표가 지시하고 있는 결정립의 불연속 석출물 colony에서 초기 균열이 생성되는 것은 아닌 것으로 보여진다. 실제로 균열이 인장 방향으로 상당히 발달될 때까지도 불연속 석출물 colony 내의 균열은 아직 발달되어 있지 않은 것을 관찰할 수 있다. PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금에서의 이러한 경향은 불연속 석출물 colony와 colony의 계면에서 초기 균열이 관찰되는 구조법으로 제조된 Cu-Ni-Sn계 합금과는 다른 양상을 보여주고 있다.¹²⁾

한편 이러한 불연속 석출물의 생성 및 성장은 Sn이나 Ni 과 같은 용질원자를 용체화 처리를 통해 기지에 충분히 고용시킴으로써 해서 억제할 수 있다고 Hermann등은 제안하고 있다.^{8,9)} 이처럼 용질원자의 고용 정도에 따른 기계적 특성의 변화를 관찰하기 위해 as-received 상태의 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금 판재를 850°C에서 1시간 재용체화 처리 및 시효 처리한 후의 미세조직과 인장 특성을 관찰하였다. 그림 5는 as-received 상태의 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금 시편을 (a) 1시간 용체화 처리한 후의 미세조직과, 350°C

에서 각각 (b) 1시간 (c) 7시간 및 (d) 24시간 시효한 후의 미세조직을 광학현미경을 이용하여 관찰한 사진을 보여주고 있다. 그림 5(a)의 1시간 용체화 처리된 시편과 그림 2(a)의 as-received 상태의 시편을 비교해보면 재 용체화 처리 중에 결정립의 크기가 매우 성장되어 있음을 관찰할 수 있다. 예를 들어 as-received 상태에서 시편의 평균 결정립 크기는 22 μm 인데 반해 재용체화 처리된 시편의 평균 결정립 크기는 59 μm로 매우 조대화 되어 있었다. 또한 그림 5(d)와 그림 2(d)를 비교해 보면 알 수 있듯이, 충분히 용체화 처리된 시편의 결정립에서 관찰되는 불연속 석출물의 양은 as-received 상태의 시편을 시효하였을 때에 비하여 14%에서 2%로 현저히 감소되어 있었다.

그림 6은 850°C에서 1시간 재 용체화 처리된 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금을 350°C에서 30초에서 24시간까지 등온 시효하였을 때의 인장 특성의 변화를 보여주고 있다. 1시간 재용체화 처리된 시편의 인장 특성은 as-received 상태 시편의 인장 특성에 비해 강도면에서 현저히 저하되어 있음을 알 수 있다. 한편 1시간 재용체화된 시편에서는, 시효 20분 내지 1시간 정도에서 강도 증가를 나타내었던 as-re-

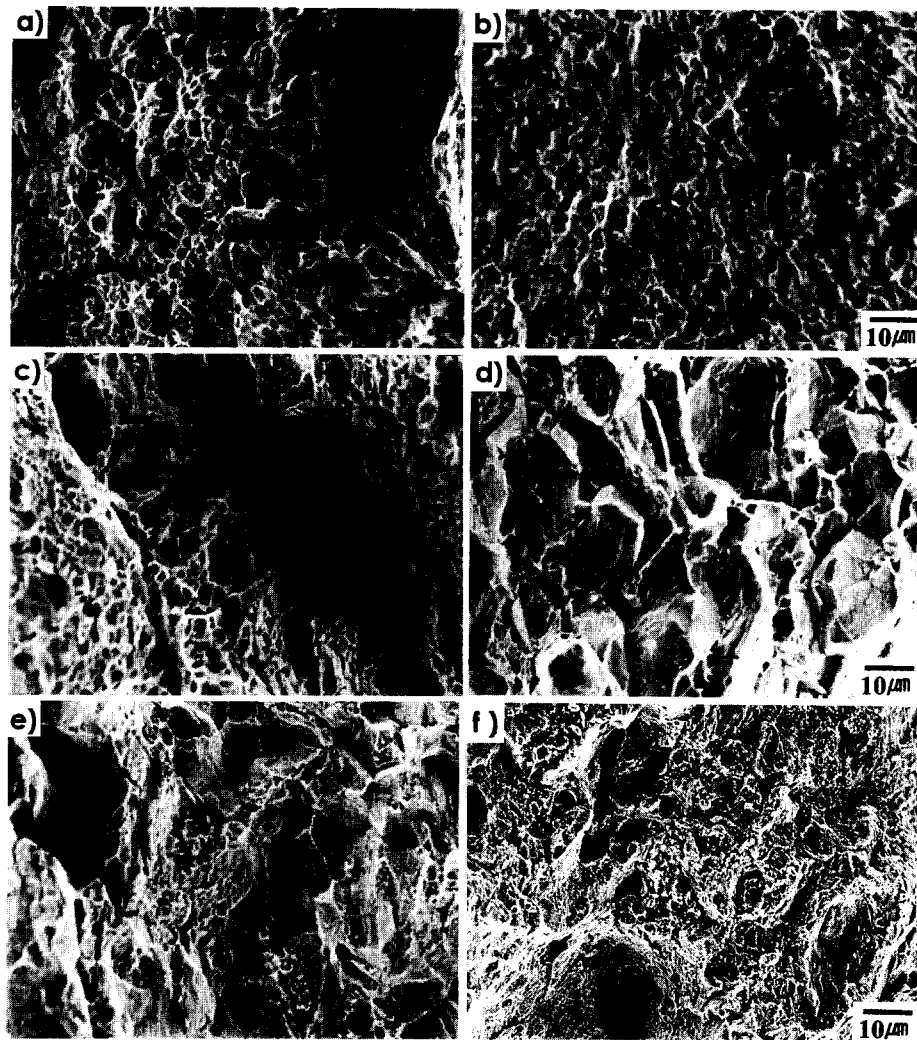


Fig. 3. SEM fractographs of tensile fractured PM Cu-7.5Ni-5Sn alloys, (a) as-received, and subsequently aged at 350°C for (b) 20mins, (c) 1 hour, (d) 7 hours, (e) 24 hours and (f) 48 hours, respectively.

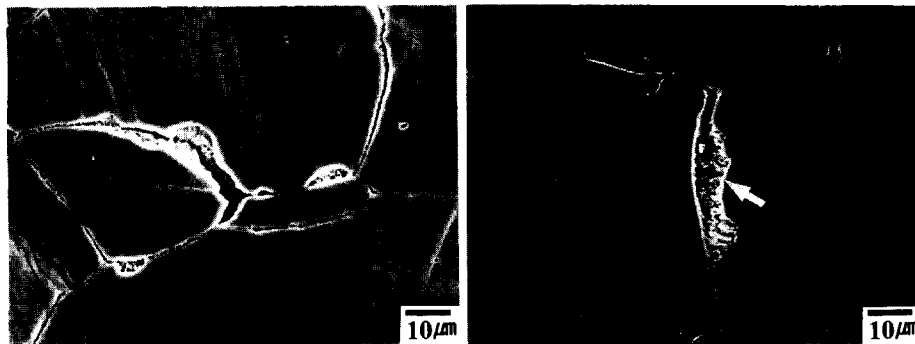


Fig. 4. SEM micrographic side views of tensile fractured PM Cu-7.5Ni-5Sn alloys, aged at 350°C for 7 hours.

ceived 상태의 시편과는 달리, 시효 30초부터 인장강도의 증가가 관찰되고 있고 시효 24시간까지 꾸준한 증가를 보여주고 있다. 재용체화 처리된 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금에서의 이러한 시효 초기의 급격한 강도 증가는 알려진 바와 같이 Sn-poor와 Sn-rich 변조구조를 형성하는 스피노달 분해에 의한 것으로 짐작할 수 있다.^{2,3,6,13)} 재용체화 처리된 시편에서의 시효에 따른 강도 증가와 동반하여 연신율은

매우 급격히 감소하여 24시간 시효된 시편에서는 1 내지 2%의 연신율을 보여주고 있다. 한편 재용체화 처리된 시편의 시효에 따른 인장 파단 양상의 변화는 as-received 상태의 시편을 시효하였을 때의 파단 양상과 유사하였다.

그림 1과 그림 6의 용체화 처리만 행한 시편의 인장 결과를 비교해 보면, 1시간 용체화 처리한 시편의 인장강도가 as-received 상태의 시편에 비해 월등히 낮음을 알 수 있

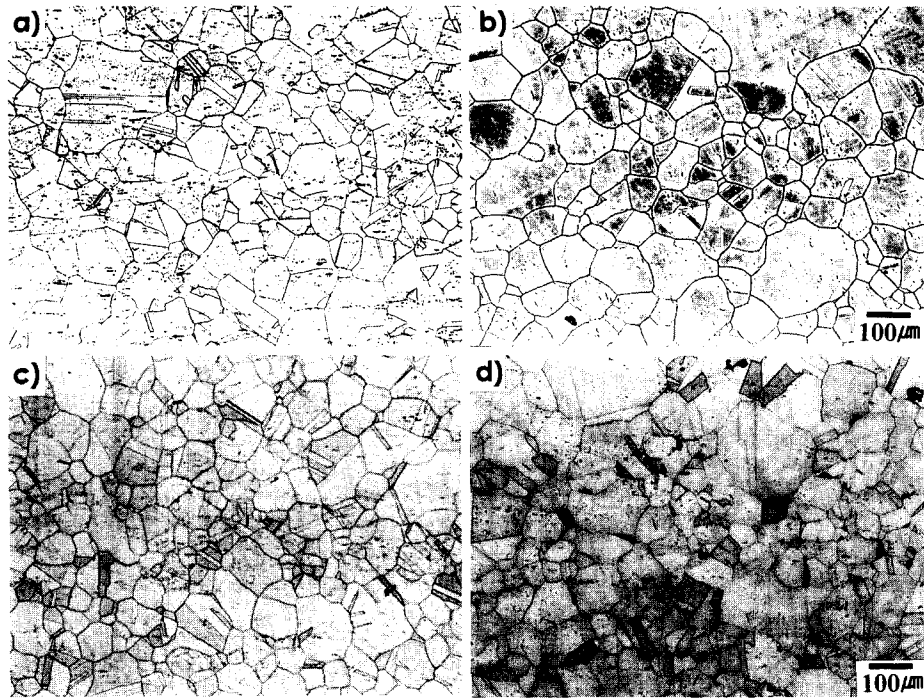


Fig. 5. Optical micrographs of PM Cu-7.5Ni-5Sn alloys, (a) resolutionized at 850°C for 1 hour, and subsequently aged at 350°C for (b) 1 hour, (c) 7 hours and (d) 24 hours, respectively.

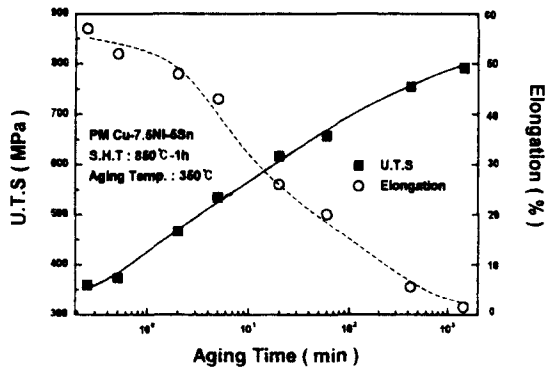


Fig. 6. Effect of aging time on tensile strength and elongation of PM Cu-7.5Ni-5Sn alloys, resolutionized at 850°C for 1 hour and subsequently aged at 350°C.

으며, 이러한 강도의 저하 원인 중에 용체화 처리시 결정립의 성장에 의한 것이 지배적인 것으로 제안되고 있다.⁹⁾ 본 연구에서도 이러한 결정립 성장이 기계적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 관찰하고자, 용체화 처리 시간을 30분, 1시간 및 3시간으로 달리하여 항복강도를 측정 후 Hall-Petch 관계를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 보는 바와 같이 재용체화 처리된 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금의 항복강도는 (결정립 크기)^{-1/2}에 직선적으로 비례하는 Hall-Petch 관계를 만족하고 있다는 것을 알 수 있다.

4. 고 찰

본 연구에서는 응고시 Sn 정출물의 편석을 방지하기 위해 분말야금법으로 제조된 Cu-7.5Ni-5Sn 합금의 열처리

조건에 따른 기계적 특성의 변화를 관찰하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이, as-received 상태의 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금을 350°C에서 등온 시효하였을 경우, 시효 초기에는 인장강도의 변화가 거의 나타나지 않다가 시효 20분에서 1시간 사이에서 급격한 강도의 증가를 보이고 있다. 시효 20분에서 1시간 사이에서 나타나는 이러한 강도의 증가는 Hermann^{8,9)} 등이나 Zhao¹⁰⁾ 등이 제안한 바와 같이 스피노달 분해에 의한 강화와 D0₂₂형의 규칙격자 구조를 가지는 (CuNi_{1-x})₃Sn 조성의 준안정상인 γ 상의 석출에 의한 강도 증가에 기인한 것으로 사료된다. 한편 그림 6에서 보는 바와 같이 850°C에서 재 용체화 처리를 행한 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금에서는 시효 30초부터 꾸준한 강도 증가가 관찰되고 있으며, 이는 재용체화한 시편에서의 스피노달 분해 강화 효과가 as-received 상태의 시편을 시효 처리하였을 때에 비해 월등히 높음을 간접적으로 증명하고 있다. 이러한 경향은 각 시편의 (200)_h 회절선 비교에서도 나타나고 있다. 그림 8은 as-received 상태의 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금을 350°C에서 20분 및 1시간 시효한 시편과, 850°C에서 1시간 재용체화 처리한 합금을 350°C에서 5분 및 1시간 등온시효한 시편의 (200)_h 회절선의 변화를 보여주고 있다. 스피노달 분해의 증거인 회절선상의 side band들이 재용체화된 시편에서는 시효 5분에서부터 뚜렷이 관찰되는 반면, as-received 상태의 시편에서는 시효 20분까지는 이러한 side band가 나타나지 않다가 시효 1시간된 시편에서 불명확하게 side band가 관찰되고 있다. 이러한 용체화 처리 조건에 따른 스피노달 분해 강화 효과의 차이는 기지 내에 고용되어 있는 Sn 용질 원소의 함량

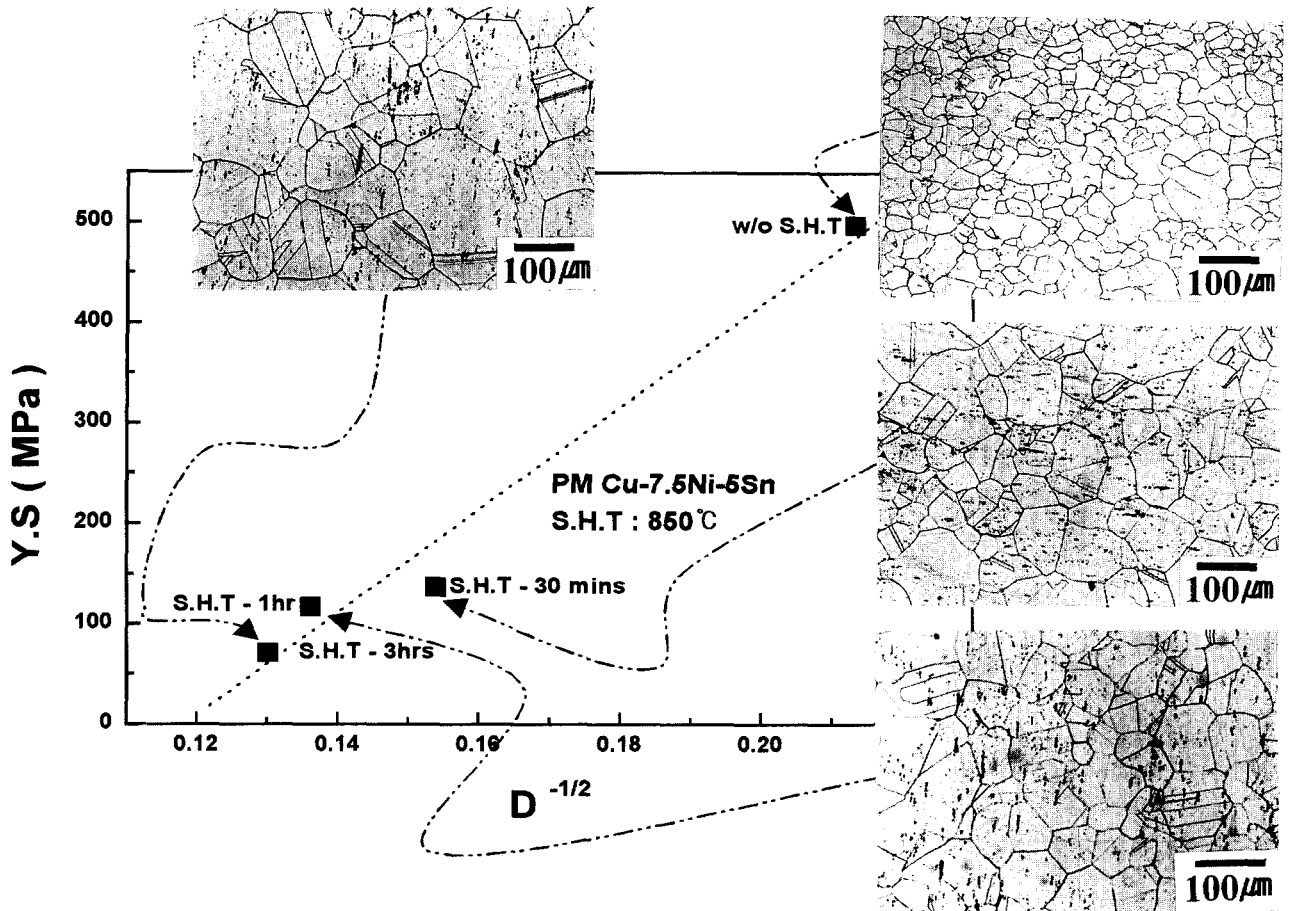


Fig. 7. The grain size dependence of the yield stress of PM Cu-7.5Ni-5Sn alloys with various solution heat treatment conditions.

과 관계가 있는 것으로 사료된다. 즉 α 와 γ 의 2상 영역에서 annealing 처리된 as-received 상태의 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금에서는 상당량의 Sn이 $D0_3$ 형의 $(CuNi_{1-x})_3Sn$ 조성의 γ 상에 존재한다고 보고되어 있으며,⁹⁾ 따라서 실제 기지의 Sn 함량은 스피노달 분해를 일으키는 임계 Sn 함량인 4% 미만일 것으로 보인다. 이러한 as-received 상태의 시편을 850°C에서 1시간 재 용체화 처리할 경우 대부분의 Sn이 기지에 고용됨으로 인해 시효 초기부터 스피노달 분해에 의한 급격한 강화를 보이는 것으로 사료된다.

한편 이러한 장시간의 용체화 처리는, 그림 5(a)와 그림 2(a)를 비교해 보면 알 수 있듯이, 결정립의 조대화를 초래하게 되고 결과적으로 기계적 특성을 저하시키게 된다. 실제로 그림 7에서 보는 바와 같이, PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금의 항복강도는 (결정립 크기)^{-1/2}에 직선적으로 비례하는 Hall-Petch 관계식을 만족하고 있는 것을 알 수 있다. 이처럼 재 용체화 및 시효처리된 합금에서는 높은 스피노달 분해 강화 효과를 보이고는 있으나, 결정립의 조대화로 인해 전체적인 강도는 as-received 상태의 시편을 시효하였을 경우에 비해 낮은 것을 알 수 있다.

As-received 상태의 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금을 장시간 시효하게 되면 결정립 주위에 불연속 석출물이 생성 및 성장되면서 급격한 강도의 저하를 초래한다는 것을 그림 1

과 그림 2에서 알 수 있다. 이러한 불연속 석출물의 생성 및 조대화에 의한 강도 저하는 스피노달 변조 구조의 파괴와 γ 상의 생성에 의한 기지 중의 용질 원자의 감소에 따른 것으로 여러 연구자들이 이미 제안하고 있다.^{1,8,9)} 그러나 이러한 불연속 석출물이 Cu-Ni-Sn계 합금의 연성에 미치는 영향에 대해서는 명확히 밝혀져 있지 못하다. 일반적으로는 이러한 결정립계에서의 불연속 석출물이 연성을 저하시킨다고 믿어지고 있으나, Hermann 등은 불연속 석출물의 양이 PM Cu-15Ni-8Sn 합금의 연성에 큰 영향을 미치지 않는다고 보고하고 있다.^{8,9)} 본 연구 결과에서는 생성된 불연속 석출물이 오히려 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금의 연성을 다소 증가시키는 것으로 사료된다. 우선 그림 1에서 보는 바와 같이 결정립계가 대부분 조대한 불연속 석출물로 덮여 있는 시효 48시간된 시편에서의 연성이 오히려 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 4에서 보는 바와 같이, 인장 파단시 균열이 불연속 석출물 colony와 colony 사이에서 생성되는 것이 아님을 관찰할 수 있었으며, 마이크로 비커스 경도 측정 결과, 기지의 경도값은 307Hv인데 비해 불연속 석출물의 경도값은 267Hv로 낮음을 알 수 있었다. 그러나 PM Cu-Ni-Sn계 합금에서의 이러한 경향은 주조법으로 제조된 Cu-Ni-Sn계 합금과는 다른 경향을 나타내고 있다. Rhu와 Kim¹²⁾ 등은 연속주조로 제조된 Cu-Ni-

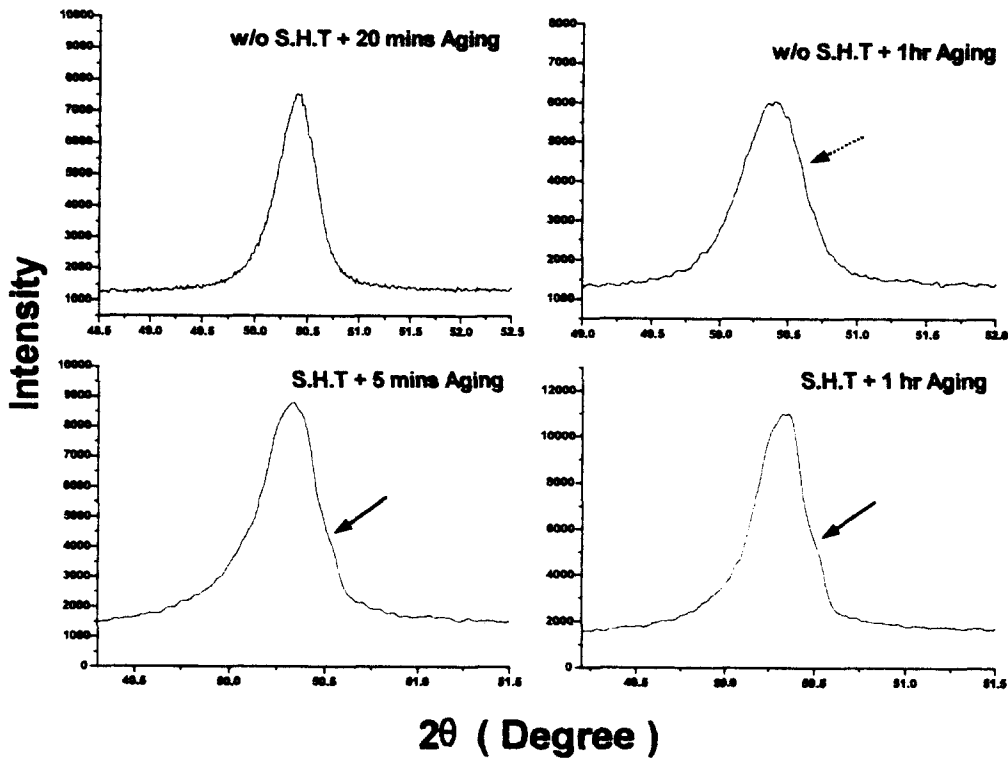


Fig. 8. Changes in the (200) α side band profiles of PM Cu-7.5Ni-5Sn alloys, either aged at 350°C for 20 mins and 1 hour, or resolutionized at 850°C for 1 hour and subsequently aged at 350°C for 5 minutes and 1 hour, respectively.

Sn계 합금에서는 인장 과단시 초기 균열이 불연속 석출물의 colony와 colony의 계면에서 생성되며, 이 때 불연속 석출물의 경도는 기지의 경도보다 높은 것으로 보고하고 있다. 결론적으로 Cu-7.5Ni-5Sn계 합금에서 장시간 시효시 생성되는 결정립계의 불연속 석출물들은 합금의 인장강도를 저하시키나, 연성에 미치는 영향은 합금 조성이나 제조 방법 등에 따라 달라질 수 있는 것으로 사료된다. 이러한 불연속 석출물의 생성 및 성장은 그림 2와 그림 5에서 보는 바와 같이, 재 용체화 처리된 시편에서 매우 제한적인 것을 알 수 있다. 한편 불연속 석출물의 생성은 기지에 고용된 Sn 함량이 일정량 미만일 때 증대되는 것으로 Hermann^{8,9)} 등은 보고하고 있으며, 본 연구 결과도 이와 동일한 경향을 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 분말야금법으로 제조된 Cu-7.5Ni-5Sn 합금의 열처리조건에 따른 기계적 특성의 변화를 연구하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 2상 영역에서 annealing 처리된 as-received 상태의 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금을 등은 시효하게 되면, 시효 초기에는 인장강도의 변화가 거의 관찰되지 않다가, 시효 20분에서 1시간 사이에서 급격한 인장강도의 증가를 보인다. 이러한 급격한 강도의 증가는 주로 준안정상인 γ 상의 석출에 의한 강화와 다소의 스피노달 분해에 의한 강화에 기인한 것으로 사료된다.

2) PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금을 850°C에서 1시간 재 용

체화 처리한 후 등은 시효한 시편에서는 시효 수십 초의 초기부터 스피노달 분해에 의한 급격한 강도 증가를 보이고 있다. 이러한 재 용체화 처리에 따른 스피노달 분해 강화 효과의 증가는 기지 내에 고용되어 있는 Sn 용질원자의 함량과 관계가 있는 것으로 사료된다.

3) 비록 재 용체화 처리가 급격한 스피노달 분해 강화를 일으키나, 동일 시효 조건에서 재 용체화 처리된 시편의 강도는 as-received 상태의 시편에 비해 전체적으로 저하됨을 알 수 있었다. 이는 재 용체화 처리시 조대화 되는 결정립의 영향인 것으로 보인다.

4) As-received 상태의 PM Cu-7.5Ni-5Sn 합금을 장시간 시효하게 되면 결정립 주위에 불연속 석출물이 생성 및 조대화 되면서 급격한 강도 저하를 초래하게 된다. 이러한 불연속 석출물은 그러나 주조법으로 제조된 Cu-Ni-Sn 합금계에서와는 달리 본 합금의 연성을 저하시키지 않았으며, 오히려 다소 연성이 증가하는 경향을 보이고 있다.

참 고 문 헌

1. Y.C. Jung, S.Z. han, J.M. Lee and C.J. Kim: J. Korean Inst. Metals, **36**(1998) 813.
2. S.S. Kim, J.C. Rhu, Y.C. Chung, S.Z. Han and C.J. Kim: J. Korean Inst. Metals, **36**(1998) 1263.
3. J.C. Rhu, S.S. Kim, Y.C. Chung, S.Z. Han and C.J. Kim: J. Korean Inst. Metals, **36**(1998) 1375.
4. R.K. Ray and S.C. Narayanan: Metall. Trans., **13A**(1982) 515.

5. B.G. Lefevre, A.T. D'Annessa and D. Kalish: Metall. Trans., **9A** (1978) 577.
6. Y.C. Jung, C.J. Kim, J.M. Lee and S.Z. Han: J. Korean Inst. Metals, **36** (1998) 3.
7. J.M. Lee, Y.C. Jung, S.Z. Han and C.J. Kim: J. Korean Inst. Metals, **36** (1998) 1215.
8. P.H. Hermann, C. Biselli and D.G. Morris: Mat. Sci and Tech., **13** (1997) 489.
9. P.H. Hermann and D.G. Morris: Metall. Trans., **25A** (1994) 1403.
10. J.C. Zhao and M.R. Notis: Acta Mater., **46** (1998) 4203.
11. C.R. Scorey: JOM, **26** (1984) 52.
12. J.C. Rhu, S.S. Kim, Y.S. Kim and C.J. Kim: J. Korean Inst. Metals, **37** (1999) 19.
13. J.T. Plewes: Metall. Trans., **6A** (1975) 537.
14. L.H. Schwaiz and J.T. Plewes: Acta Mater., **22** (1974) 911.
15. B. Pitchk and L.H. Schwartz: Acta Mater., **28** (1980) 807.