

Cu-35%Sn 합금의 일방향 열처리에서 출현하는 미세조직

최광진 · 지태구 · 박장식

홍익대학교 조치원캠퍼스 금속공학과

Microstructural Evolution in the Unidirectional Heat Treatment of Cu-35%Sn Alloys

K. J. Choi, T. G. Jee, J. S. Park

Dept. of Metallurgical Engineering, Hongik Univ., Chochiwon, 339-701, Korea

Abstract A specimen of Cu-35%Sn alloy has been subjected to the unidirectional heat treatment in an attempt to examine the evolution of microstructures under varying thermal conditions. The specimen was cast in the form of a cylinder 10 mm in diameter and 200 mm in length, which was then installed in the temperature gradient field established inside a vertical tube furnace. The furnace temperature was adjusted to make the upper part at 750°C and bottom end part at 300°C of the specimen. The experiment was terminated by dropping it into water after the 30 minutes holding at given temperature. By the rapid cooling, the high temperature phases, γ and ζ , were retained at ambient temperature with some of γ phase transformed to ϵ phase, especially at the grain boundaries of γ phase. The presence of ϵ phase was found to determine the nature of phase transformations of the ζ phase undergoes upon cooling. In the close area of the ϵ phase, ϵ phase grew separately out of ζ and adds to the preexisting ϵ whereas in areas away from ϵ , both δ and ϵ grew simultaneously out of ζ and formed a lamella eutectoid structure. The transformation to δ was found to occur only in slow cooling. The hardness on each phase showed that the retained phases, γ and ζ , could be plastically deformed without brittle fracture while the phases, ϵ and δ , were too brittle to be deformed.

(Received September 22, 2003)

Key Words: Cu-35%Sn alloy, Unidirectional heat treatment, Temperature gradient, Phase transformations, Hardness, Microstructure

1. 서 론

청동으로 불리는 구리-주석합금은 수천 년 동안 사용되어 왔음에도 불구하고 근래에 이에 관한 연구가 실행되어 보고된 경우는 흔하지 않다. 특히 주석함량이 높은 청동의 경우에는 상태도에 주어진 자료를 제외하면 출현하는 상(phase)의 형상(morphology)이나 기계적 성질 등 실질적으로 이들 소재를 이해하는데 필요한 자료가 거의 전무한 실정이다. 청동합금에 포함되는 주석함량이 지나치게 높을 경우脆性이 증가하여 이를 공업용 소재로 사용할 수 없음을 사실이다[1]. 그러나 우리나라에서 제작된 고대의 청동기 유물은 물론 오늘날 제작되고 있는 각종 유기에 도 주석함량이 높은 합금을 사용하는 전통이 이어져 오고 있는 점에 비추어 이들 합금에서 발견되는 조직의 형성과정에 대한 연구는 필수 불가결한 것으로 판단된다[2, 3]. 이를 위한 노력의 일환으로 본 연구

에서는 조직형성과정이 비교적 복잡하여 상태도만으로 그 상변화 과정을 추측하기 어려운 Cu-35%Sn 합금을 대상으로 일방향 열처리 실험을 수행함으로써 열처리 조건과 출현하는 미세조직 그리고 각 조직의 기계적 성질간의 상관관계를 살펴보았다.

2. 실험방법

본 연구에서는 상용 구리와 주석을 구입하여 무게를 기준으로 주석함량이 35%인 청동합금을 주조하여 모합금으로 사용하였으며 열처리용 시편은 이를 재용해하여 지름 10 mm 길이 200 mm 정도의 원통형 graphite 주형을 이용하여 주조하였다. (본고에서의 주석함량은 모두 무게를 기준으로 한다.) 일방향 열처리 실험은 수직 관상로를 사용하여 실시하였다. 여기에서 시편의 상단과 하단은 각각 750°C와 300°C부근의 온도에서 30분간 유지시킨 후 이를 수

냉하였다. 이렇게 열처리된 시편의 미세조직은 광학 현미경과 전자현미경을 사용하여 분석되었으며 이를 위하여 연마와 부식의 과정을 거쳐 시편이 준비되었다. 부식용액으로는 증류수 100 ml와 염산 30 ml에 산화철(III) 10 g을 혼합한 용액이 사용되었다. 시편의 화학조성은 전자현미경에 부착된 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectrometer)를 이용하여 측정되었다. 한편 열처리 시 출현하게 되는 각 상의 취성 및 연성 정도를 관찰하기 위하여 로크웰 및 비커스 경도기를 이용하여 경도를 측정하였다. 여기에서는 대상 부위를 경도기의 압입자로 눌러 압력을 가할 때 압흔 주위에 균열(crack)이 발생하는지 아니면 slip line이 형성되는지 등이 관찰되었다. 로크웰 경도는 B-scale(강철볼 압입자, 하중 100 kg)로 측정하였으며 비커스 경도는 다이아몬드 압입자를 이용하여 500 g의 하중에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Cu-Sn 평형 상태도 해석

Cu-Sn 평형상태도인 Fig. 1에 Cu-35%Sn 합금은 냉각 시 액상으로부터 γ 상을 생성시키며 응고가 완료되는 것으로 나타나있다[4]. 이후 약 655°C까지는

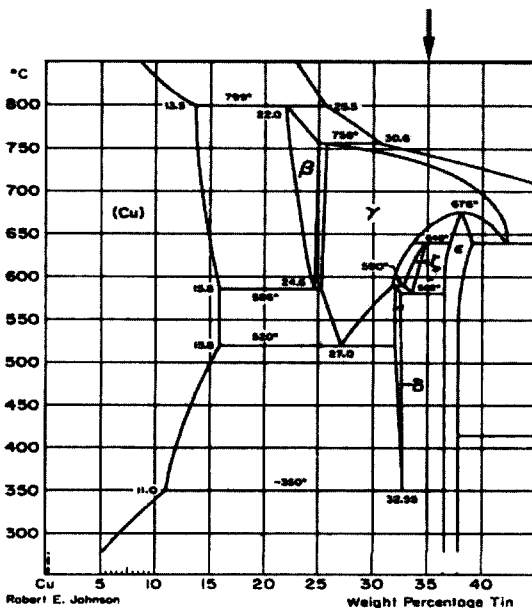
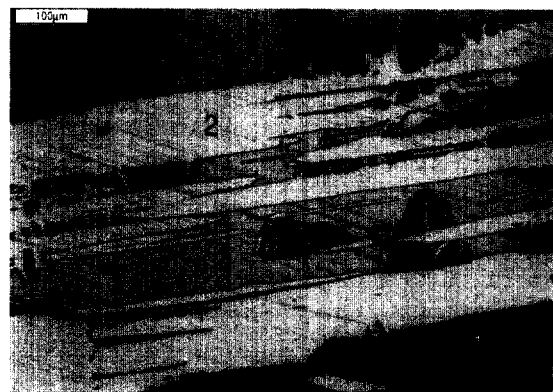


Fig. 1. Cu-Sn phase diagram.

γ 단일상으로 존재하게 되나 655°C에 이르러서는 ϵ 상이 생성되기 시작함으로써 γ 상과 ϵ 상이 공존하게 된다. 640°C이하의 온도에서는 ζ 상과 ϵ 상이 공존하나 582°C에서 ζ 상은 δ 상과 ϵ 상을 석출시키며 소멸되고 그 이하의 온도에서는 ϵ 상과 δ 상만이 존재하게 된다. 또한 350°C에서는 δ 상이 α 상과 ϵ 상으로 상변태 되지만 이 반응은 그 변태속도가 매우 느리므로 고려하지 않아도 된다.

3.2. 모합금의 미세조직

Fig. 2a는 주조된 모합금의 미세조직을 보여주는 광학현미경 사진이다. 여기에 1~4로 표시된 부위에는 4가지 서로 다른 상 또는 조직이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이들 각 부위에 대하여 실시한 EDS 분석결과 1, 2, 3 부위에는 각각 38.6%, 32.2%,



(a)



(b)

Fig. 2. Microstructures of as-cast Cu-35wt%Sn alloy ; (a) optical image (b) SEM image.

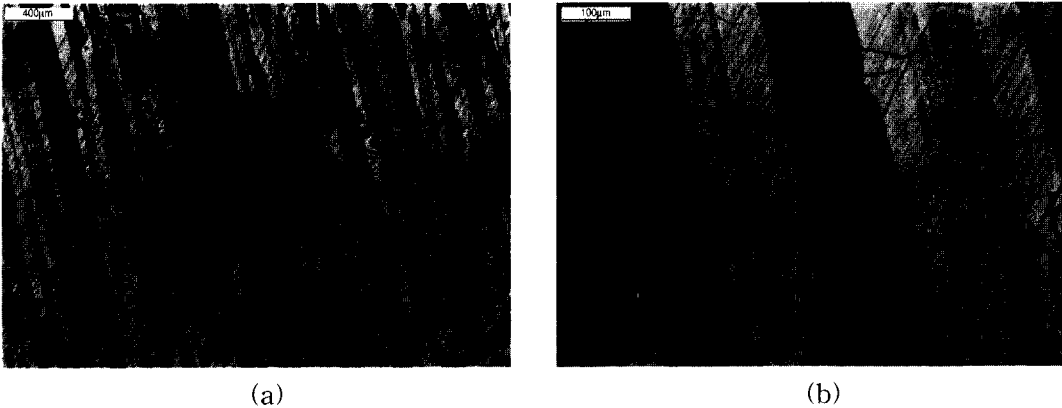


Fig. 3. Optical micrographs with Rockwell hardness indentation(B-scale, 100 kgf) of the as-cast Cu-35wt%Sn alloy ; (a) indentation and its surroundings, (b) magnified view of (a).

33.5%의 주석이 포함된 것으로 나타났다. 주석함량 면에서 3부위는 2부위에 비하여 약 1.0%정도 높게 나타났다. 1부위는 ϵ 상에 해당하며 2는 δ 상에 그리고 3은 ζ 상에 해당함을 나타내는 것이다. Fig. 2b는 Fig. 2a에 4로 표시된 층상부위를 확대한 전자 현미경 사진이다. 여기에 1과 2로 표시된 부위의 주석함량은 33.7%와 37.4%로 나타났다. 따라서 1로 표시된 부위는 δ 상이며 2로 표시된 부위는 ϵ 상을 알 수 있다. 따라서 이 부위는 582°C에서 일어나는 $\zeta \rightleftharpoons \delta + \epsilon$ 공석반응의 결과 생성된 층상조직임을 알 수 있다. 이러한 $\delta + \epsilon$ 의 층상조직은 Fig. 2a에 3으로 표시된 ζ 상 내부나 그 연장선에 위치하는 것으로 밝혀졌다. 이러한 사실로부터 주조된 모합금의 미세조직에는 ϵ , ζ , δ 상이 공존하며 이들의 배열형태를 보면 조대한 ϵ 상을 기준으로 그 주변에는 δ 상이 존재하는 반면 이에서 멀리 있는 부위에

는 ζ 상이나 $\delta + \epsilon$ 의 층상조직이 존재한다는 것을 알 수 있다. 이는 ϵ 상과 ζ 상이 공존하는 온도구간을 지나 582°C에 이르게 되면 상태도 상에서는 ζ 이 새로운 ϵ 과 δ 를 동시에 석출시키며 소멸되는 것으로 되어있으나 실제의 반응은 ζ 상이 일부 잔류하고 있음을 보여준다. Fig. 2a에 보이는 조직상의 특징으로 보아 주조과정에서 일어나는 실제의 상변태에서는 ϵ 상을 기준으로 이에 인접한 ζ 는 기존의 ϵ 과의 경계에 ϵ 상을 단독으로 석출시키며 기존의 ϵ 부위를 넓혀 가는 반면 여기에서 멀리 떨어져 있는 ζ 상은 ϵ 과 δ 상을 동시에 석출시킴으로써 층상의 조직을 형성하는 것으로 사료된다. 이러한 차이는 계면에너지가 상태변에 미치는 효과를 반영하는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 3a는 주조된 모합금 시편에서 측정된 록크웰 정도의 압흔으로 그 주위에 다수의 균열이 생성되어

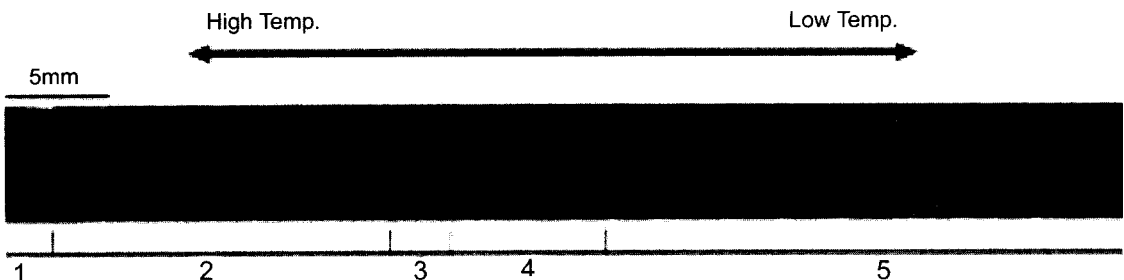


Fig. 4. Continuous microstructure of specimen after temperature gradient heat-treatment.

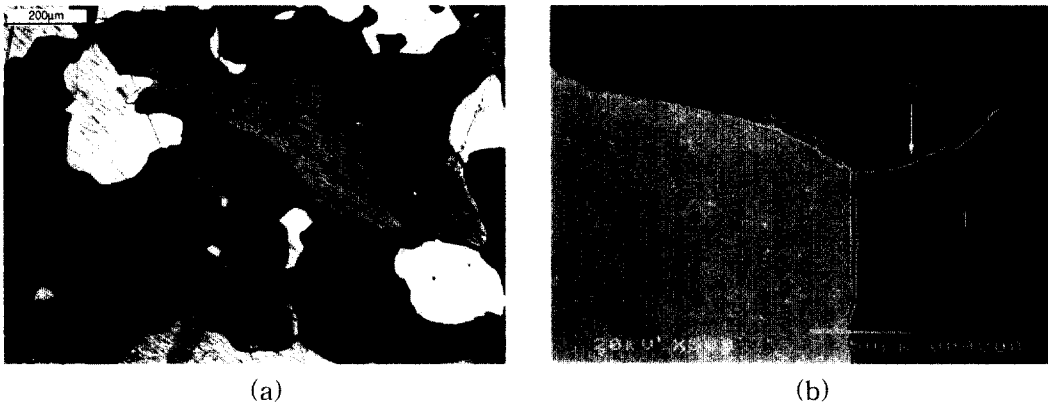


Fig. 5. Enlarged microstructures of area 1 in the Fig. 4 ; (a) optical image and (b) SEM image.

있다. 이를 확대한 Fig. 3b에서는 δ 상과 ϵ 상으로 구성된 미세조직을 볼 수 있는데, 여기에는 상의 종류에 관계없이 균열이 생성되어 있다. 따라서 주조된 Cu-35%Sn 청동합금은 매우 취약하다는 것을 알 수 있다.

3.3. 일방향 열처리에서 출현하는 미세조직

주석함량이 35%인 청동은 고온에서 복잡한 상변화 과정을 거친다. 특히 582~670°C범위에서 예상되는 온도에 따른 복잡한 상변화 과정을 명확히 관찰하기 위하여서는 일방향 열처리 기법이 유용하다. Fig. 4는 온도구배 열처리를 실시한 원통형 시편에서 관찰되는 미세조직 변화를 연속적으로 보여주는 광학현미경 사진이다. 그림 하단에 표시된 번호는 미세조직에 따라 구분한 것으로 서로 다른 상으로 구성되어 있거나 같은 상일지라도 조대화 정도가 다른 것을 구

분한 것이다. 1영역은 γ 상과 이들의 결정립계에 생성된 일부 ϵ 상, 2영역은 조대한 γ 상과 다수의 ϵ 상, 3영역은 미세한 γ 상 및 ϵ 상, 4영역은 ζ 상과 ϵ 상, 5영역은 δ 상과 ϵ 상으로 구성되어 있다. 이들 각 부위의 미세조직을 살펴보면 다음과 같다.

① 1로 표시된 영역

Fig. 5a는 Fig. 4에 1로 표시된 영역을 확대한 광학현미경 조직사진으로 대부분 γ 상으로 되어 있으나 γ 상 결정립계 일부에 ϵ 상이 생성되어 있는 것으로 관찰되었다. 여기에 나타난 ϵ 상은 급랭과정에서 생성된 것으로 사료된다. 이를 확대한 전자현미경 사진인 Fig. 5b에서는 1로 표시된 γ 상 결정립과 2로 표시된 ϵ 상을 볼 수 있다. 그림에 표시된 각 부위를 대상으로 실시한 EDS 분석결과 1, 2에서의 주

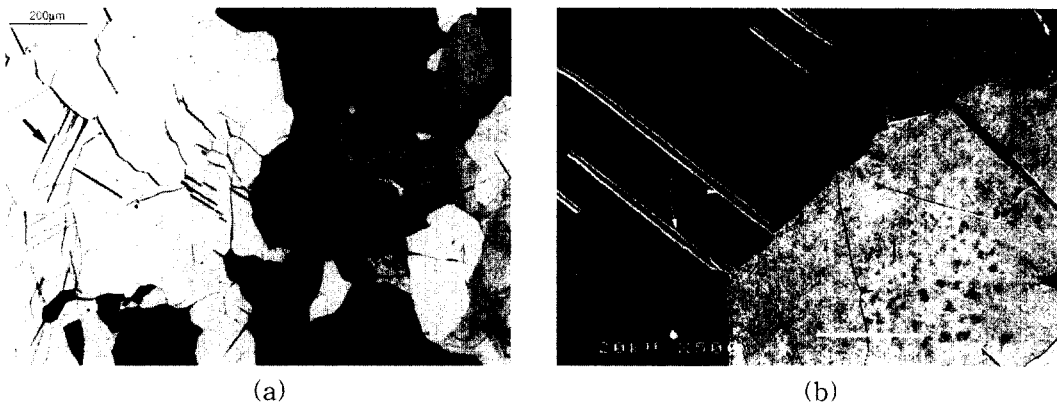


Fig. 6. Microstructures of specimen after water quenched at 790°C of Cu-35wt%Sn alloy ; (a) optical image and (b) SEM image.

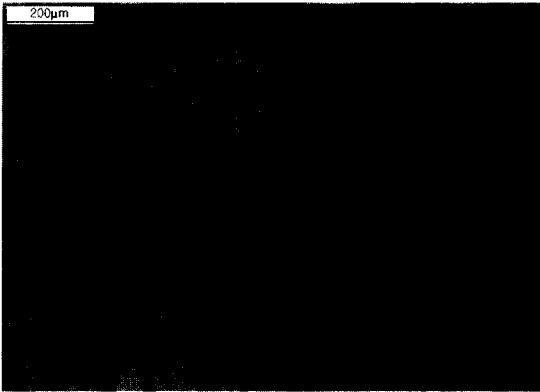


Fig. 7. Enlarged microstructure of area 2 in the Fig. 4.

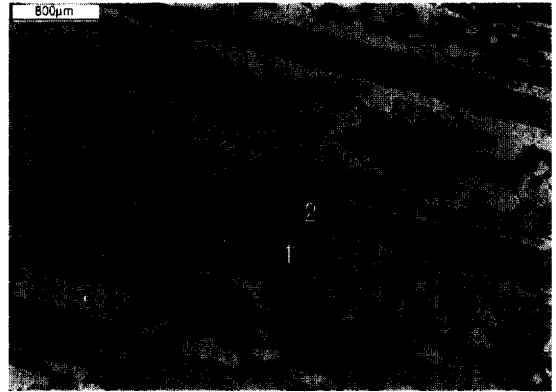


Fig. 9. Enlarged microstructure of area 3 in the Fig. 4.

석함량은 각각 34.0%, 37.0%인 것으로 나타났다. 이는 1부위는 γ 이며 2부위는 ϵ 임을 보여준다. Cu-Sn 상태도를 살펴보면 650°C 이상의 고온에서는 ϵ 상이 존재하지 않는다. 따라서 비평형 상태의 열처리를 통해 생성된 ϵ 상을 설명하기 위하여 790°C의 액상으로부터 모합금을 급랭시키는 보충실험을 실시하였다. 그 결과를 Fig. 6a와 6b에 나타냈으며 Fig. 5a 및 5b에서와 유사한 미세조직이 관찰된다. Fig. 6a의 좌측에 화살표로 표시된 균열은 대부분 열 충격에 의하여 발생한 것으로 판단된다. Fig. 6b에서 1로 표시된 곳은 γ 결정립이며 2로 표시된 곳은 ϵ 상에 해당한다. 이러한 실험결과는 물 속에 담금질하는 급랭과정에서도 ϵ 상이 생성되는 것을 보여준다.

이러한 ϵ 상들은 주로 γ 결정립계에 생성되어 그 내부로 성장하는 것으로 추정되며 이들 두 상간에는 모종의 결정학적 상관관계가 있는 것으로 판단된다. 한편 700°C의 고체상태에서 급랭시킨 모합금에서도 비슷한 결과가 얻어진 점으로 미루어 보아 Fig. 4에 1로 표시된 부위가 650°C 이상의 고온에서 급랭된 것을 알 수 있다.

② 2로 표시된 영역(γ 상+ ϵ 상)

Fig. 7은 Fig. 4에 2로 표시된 영역의 미세조직 사진으로 γ 상 및 ϵ 상이 관찰된다. 이는 이 부위가 급랭 이전 γ 상과 ϵ 상이 공존하는 640~655°C 범위의 온도에 자리하고 있었음을 시사한다. 특히 ϵ 상의 형상은 γ 결정립 및 결정립계에 침상으로 석출된다는 것을 알 수 있다.

③ 3 및 4로 표시된 영역

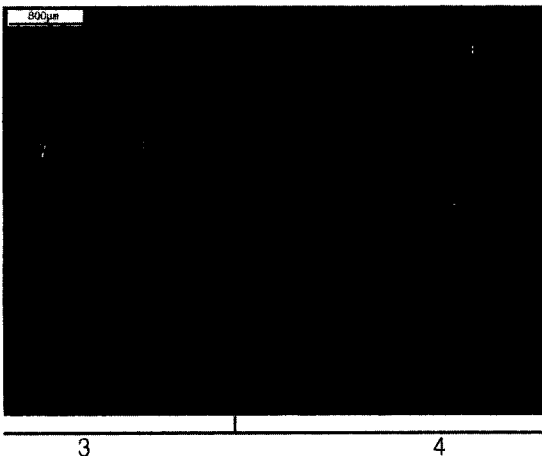


Fig. 8. Enlarged microstructure around boundary of areas 3 and 4 in the Fig. 4.



Fig. 10. Enlarged microstructure around boundary of areas 4 and 5 in the Fig. 4.



Fig. 11. Enlarged microstructures of left side area 5 in the Fig. 4 ; (a) optical image and (b) SEM image.

Fig. 8의 좌측은 Fig. 4에 3으로 표시된 영역으로 앞의 2로 표시된 영역에서와 마찬가지로 γ 상과 ϵ 상이 보인다. 그러나 조직의 크기 면에서 다소 미세해진 것을 볼 수 있는데, 이는 이 영역이 급랭 이전 640°C 직상에 위치함으로써 2로 표시된 부위에 비해 상대적으로 낮은 온도에 있었음에 기인하는 것으로 판단된다. Fig. 8의 중앙에 보이는 경계부위를 중심으로 좌측 3으로 표시된 영역에서는 γ 상과 ϵ 상이 그리고 우측 4로 표시된 영역에서는 ζ 상과 ϵ 상이 관찰되는 점으로 보아 이 부위가 일방향 열처리 실험 도중 640°C의 온도에 있었던 것으로 보여진다. 4부위에서 ϵ 상의 존재형태를 살펴보면 ϵ 상은 γ 상의 결정립 내부나 결정립계에 비교적 직선적으로 석출되어 있음에 비하여 ζ 상과는 무관하게 석출됨을 알 수 있다. 이 사실은 광학현미경 관찰에서 γ 상과

ζ 상을 구분하는데 필요한 기준이 될 수 있다. Fig. 9는 Fig. 4에 4로 표시된 영역에서의 미세조직 사진으로 1로 표시된 ζ 상과 2로 표시된 ϵ 상을 볼 수 있다. 이들 각 부위에서 주석함량을 측정한 결과 1에서는 34.5%, 2에서는 37.8%로 나타나 이들이 각각 ζ 및 ϵ 상임을 확인하였다.

④ 5로 표시된 영역

Cu-Sn 상태도에 따르면 ζ 상은 582°C에서 δ 상과 ϵ 상으로 변태한다. 따라서 Fig. 4에 4와 5로 표시된 영역의 경계부위는 일방향 열처리 과정에서 대략 582°C에 놓여있던 부위이다. 이 부위를 보여주는 Fig. 10에는 1로 표시된 ζ 상과 2로 표시된 ϵ 상 및 3으로 표시된 δ 상을 볼 수 있다. 또한 좌측의 ζ 상이 우측의 미세한 층상조직과 동일선상에 놓여 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 우측의 층상조직은



Fig. 12. Enlarged microstructures of right side area 5 in the Fig. 4 ; (a) optical image and (b) SEM image.

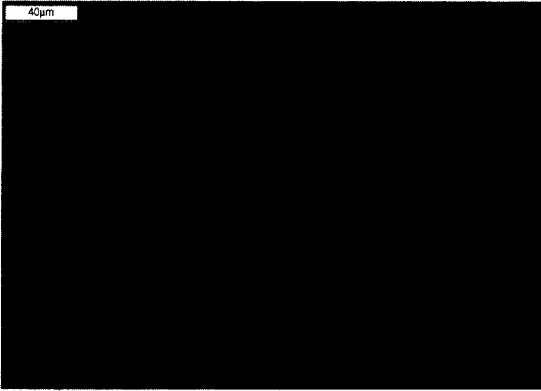


Fig. 13. Optical micrograph with microhardness indentation of the γ phase.

ζ 상으로부터 변태된 것임을 알 수 있다. 한편 2로 표시된 조대한 ϵ 상에서는 582°C 를 전후하여 상변태가 일어나지 않았다. Fig. 11a는 Fig. 4에 5로 표시된 영역의 좌측 즉 582°C 직하의 온도에 놓여있던 부분의 광학현미경 조직사진으로 1로 표시된 ϵ 상과 2로 표시된 δ 상, 그리고 3으로 표시된 매우 미세한 층상조직이 나타나 있다. 이는 앞서 언급한 Fig. 10의 우측과 같은 형태의 미세조직이다. Fig. 11b는 Fig. 11a에 3으로 표시된 부위를 확대한 전자현미경 사진으로 1로 표시된 불룩한 부위와 2로 표시된 오목한 영역이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이들 각각의 영역에서 실시한 EDS 측정결과 1은 δ 상이며 2는 ϵ 상임을 확인하였다. 이 부위는 ζ 상이 미세한

층상조직의 ϵ 상과 δ 상으로 변태된 것이다.

Fig. 12a는 Fig. 4에 5로 표시된 영역의 우측 즉 Fig. 11a에 비해 더 낮은 온도에 놓여있던 부분으로서 1, 2 및 3으로 표시된 부위와 미세한 층상조직이 존재하는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 12b는 Fig. 12a 일부를 확대한 전자현미경 사진으로 그림에 표시된 번호도 Fig. 12a의 번호와 일치한다. 이들 각각의 영역에서 실시한 EDS 측정결과 1로 표시된 영역은 32.0%Sn, 2로 표시된 영역은 33.6%Sn, 그리고 3으로 표시된 영역은 37.7%Sn으로 나타났다. 따라서 1로 표시된 영역은 δ 상, 2로 표시된 영역은 ζ 상, 그리고 3으로 표시된 영역은 ϵ 상임을 알 수 있다. 이 부위가 대략 300°C 부근의 저온에서 급냉되었으므로 온도구배 열처리에 의한 상변태는 거의 일어나지 않은 것으로 볼 수 있다. 따라서 주조된 모합금에서의 조직이 그대로 유지되고 있을 가능성이 크다. 이러한 실험결과는 냉각도중 ζ 상의 상변태 속도를 나타내며 냉각속도에 따라 ζ 상은 $\delta + \epsilon$ 의 층상조직으로 변태되거나 잔류할 수 있음을 보여준다.

3.4. 경도측정 결과

Fig. 13은 γ 상에서의 미소경도 압흔을 보여준다. 이의 경도값은 $\text{HV}=402$ 에 해당한다. 압흔 좌측에 보이는 균열은 급냉시 열 충격에 의한 것으로 경도 측정 과정에서 균열이 생성되지는 않았다. 그러나 앞서 살펴본 모합금의 로크웰 경도 측정결과에서와 같이 상의 종류에 관계없이 균열이 전파되는 것을 감

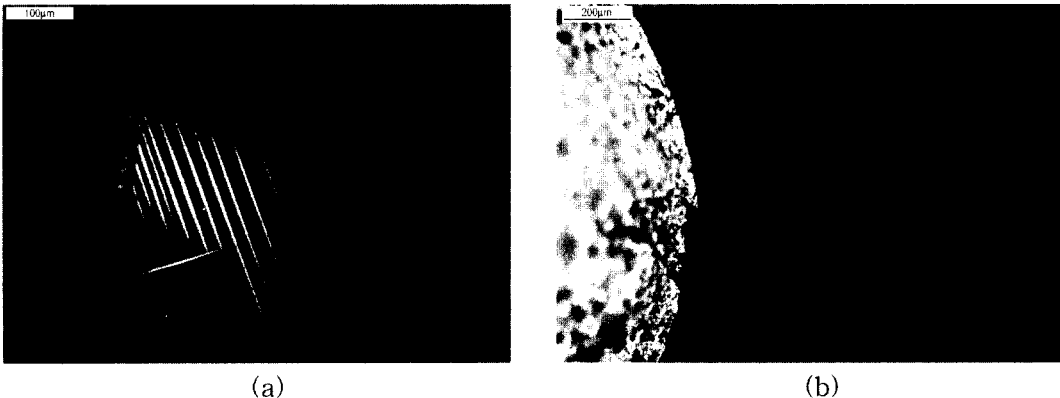


Fig. 14. Optical micrographs with Rockwell hardness indentation(B-scale 100kg) of the γ phase ; (a) Cu-26wt%Sn and (b) Cu-28wt%Sn.

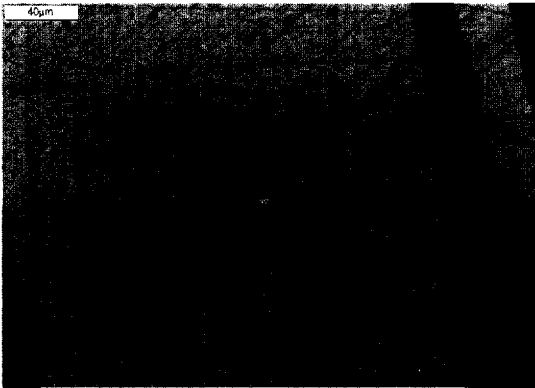


Fig. 15. Optical micrograph with microhardness indentation of the δ phase.



Fig. 16. Optical micrograph with microhardness indentation of the ζ phase.

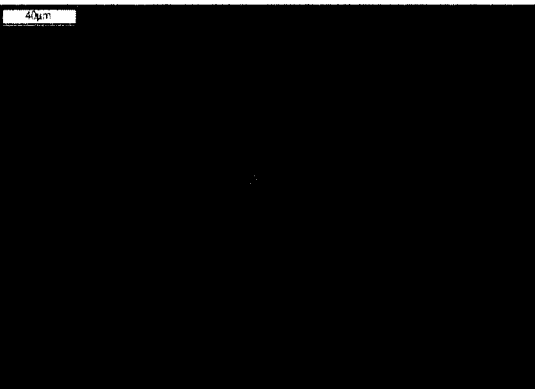


Fig. 17. Optical micrograph with microhardness indentation of the ϵ phase.

안하면 이 γ 상은 취성이 큰 상임을 알 수 있다. γ 상이 함유할 수 있는 주석은 대략 25.2~42% 정

도로 그 범위가 비교적 넓다. 그러므로 같은 γ 상이라 할지라도 주석함량에 따라 기계적 성질이 달라지게 될 가능성이 높다. 이를 확인하기 위하여 주석함량이 각기 다른 γ 상에 대한 로크웰 경도측정실험을 수행하였다. Fig. 14a는 Cu-26%Sn인 청동합금을 700°C에서 급랭한 시료, 즉 주석함량이 26%인 γ 상의 로크웰 경도 압흔으로 경도값은 107로 측정되었으며, 압흔 주위에는 균열이 발생하는 대신 슬립선이 나타나고 있다. 이는 여기에서의 γ 상이 높은 경도와 더불어 연성과 인성을 지니고 있음을 보여주는 것으로 볼 수 있다. Fig. 14b는 Cu-28%Sn인 합금을 550°C에서 급냉한 시료, 즉 주석함량이 28%인 γ 상의 로크웰 경도 압흔으로 경도값은 107에 해당하며 이 수치는 Fig. 14a의 26%Sn 시료에서와 유사한 값이다. 그러나 압흔 주위에 균열이 생성되어 전파된 것이 관찰되는 점으로부터 γ 상은 주석함량 증가에 따라 연성은 감소하며 취성이 증가한다는 것을 알 수 있다. Fig. 15는 δ 상에서의 압흔으로 이는 비커스 경도값은 502에 해당하는 매우 높은 값이다. δ 상이 함유할 수 있는 주석은 대략 32~32.55%이며 상온에서 매우 취약하므로 청동의 상온가공을 불가능하게 하는 원인이 된다. 그러나 그림에 나타난 바와 같이 압흔 주위에 균열은 생성되지 않았으며 단지 압흔의 크기가 매우 작게 나타난 것을 볼 수 있다. Fig. 16은 ζ 상에서의 압흔으로 경도값 420에 해당한다. 압흔 주위에서 슬립선이 관찰되는 것으로 보아 ζ 상의 취성은 그리 크지 않다는 것을 알 수 있으나 이에 대하여는 더 많은 연구가 필요하다. Fig. 17은 ϵ 상에서의 압흔을 보여준다. 여기에서의 경도값은 387로 비교적 낮게 나타났다. 그림에서 압흔 주위에 미세한 균열이 생성되어 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 ϵ 상은 낮은 응력 하에서도 쉽게 파괴에 도달하는 취약한 성질을 가지고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

Cu-35%Sn 청동합금을 대상으로 하는 일방향 열처리 실험결과는 다음과 같다.

1. 급랭처리를 통하여 γ 와 ζ 에 초래되는 상변태를 억제함으로써 이들을 상온에 잔류시킬 수 있었다. 그러나 급랭을 통하여서도 γ 상 내부나 결정립계에 ϵ

상이 생성되는 것을 방지할 수 없었다. 주석함량이 낮을 경우 γ 상은 경도와 함께 양호한 연성 및 인성을 지니게 되나 주석함량이 증가함에 따라 연성은 감소하고 취성은 증가하는 것으로 나타났다.

2. ζ 상의 상변태는 부위에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 즉, ϵ 에 인접한 ζ 영역에서는 ζ 가 ϵ 단일상으로 상변태되면서 ζ 영역이 줄어드는 만큼 기존의 ϵ 영역이 늘어남에 비하여 ϵ 영역에서 멀리 위치한 ζ 영역에서는 ζ 가 상변태되면서 $\delta + \epsilon$ 의 층상조직이 형성되는 것으로 밝혀졌다. 한편 이와 같은 ζ 상의 상변태는 냉각속도가 매우 낮을 경우를 제외하면 대부분의 경우 상온에서 ζ 상이 잔류하게 된다. 또한 ζ 상 영역에서의 미소경도 측정결과 압흔 주위에 슬립선이 생성되는 것으로 보아 이의 인성이 매우 낮지 않은 것으로 추정되나 다른 상과 함께 조직을 구성하는 경우 균열의 전파를 막을 정도는 아닌 것으로 나타났다.

2. δ 상은 고온에서 586°C이하로 서냉할 경우에

한하여 석출 가능하며 이 δ 상은 취성이 매우 높은 것으로 나타났다.

3. ϵ 상은 고온에서 비교적 빠른 속도로 생성될 뿐 아니라 γ 상과 특정한 결정학적 관계를 맺으며 성장하는 것으로 밝혀졌다. ϵ 상은 비교적 낮은 하중에서도 쉽게 부서질 정도로 그 취성이 높은 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 양훈영 ; 신금속재료학 ; 문운당, 1994. p.372~377.
2. 박장식, 최광진, 정광용, 정영동 ; 청동유물의 제작기법 연구 ; 대한금속학회 추계학술대회, 1999.
3. 장대정, 최광진, 박장식, 정광용 ; 주석함량이 높은 청동의 압축변형 특성에 관한 연구 ; 대한 금속학회 추계학술대회, 1999.
4. John D. Verhoeven ; Fundamentals of Physical Metallurgy ; John Wiley & Sons, New York, 1975. p.321~321.