

CuAlNi 형상기억합금의 결정립 미세화에 따른 시효효과

양 권 승 · 박 창 선* · 장 우 양*

조선대학교 재료공학과

*조선대학교 금속공학과

The Effect of Ageing on Grain Refinement of CuAlNi Shape Memory Alloy

G. S. Yang, C. S. Park* and W. Y. Jang*

Dept. of Materials Engineering, chosun University

*Dept. of Metallurgical Engineering, Chosun University

ABSTRACT

This research was performed to investigate the effect of ageing on grain refinement of 82wt%Cu-13.5wt%Al-4.5wt%Ni-0.1wt%misc metal alloy with ageing temperature and time. The results obtained in this study are as follows;

The variation of transformation temperature with ageing temperature had very influence on ageing time at 300°C. But it had not influence on ageing time at 100°C. The variation of transformation temperature after second reversed transformation cycle was not occurred in martensitic phase ageing, but M_s point was appeared equally with third reversed transformation cycle in parent phase ageing. The variation of M_s point was not nearly with ageing time at 100°C ageing temperature. But it was decreasing with ageing time at 300°C ageing temperature and A_s point was increasing with ageing time. Structure of parent phase ageing was being M18R martensitic and N2H martensitic phase. It was found that α and γ_2 phase were created by ageing of long time at 300°C ageing temperature.

1. 서 론

형상기억합금에서 나타나고 있는 형상기억효과는 마르텐사이트변태가 끝나는 온도인 M_s 점 이하에서 변형을 받아 모상이 안정화되는 온도 (A_s 온도이상)로 가열하면 모상으로 역변태하여 변형 이전의 원래 형상으로 회복되는 현상으로서 현재 많은 합금계가 개발되었거나 개발되고 있다. 지금까지

지 알려진 가장 실용성이 있는 형상기억합금으로서 Ni-Ti계와 Cu계라 할 수 있다. Ni-Ti계 합금은 형상기억효과가 뛰어난 반면 제조공정 및 경제성에 문제점이 있으나 Cu계 합금은 형상기억능력이 좋고 경제성에서 유리하기 때문에 많은 관심의 대상이 되어왔다.

그러나 CuAlNi 합금은 시효시 γ_2 상의 석출^{1,2)}과 결정립이 크기때문에 반복 열사이클에 의한 피

로특성과 같은 기계적성질이 좋지 못하고 입계파괴 및 시효에 의한 안정화등이 문제점^{3, 4)}으로 지적되어 왔다. 이러한 기계적성질은 결정립을 미세화시켜 일부 개선되고 있으며 시효에 의한 변태온도 변화 및 마르텐사이트 안정화에 대한 일률적인 결과는 아직 미흡한 상태이다.

Cu계 합금에서의 변태점은 Al농도에 크게 영향을 받고 있으며 Ni 또한 변태점에 관해서 Al에는 미치지 못하나 고 Ni함량에 따른 격자변형 및 상변화에 영향⁵⁾을 주고 있으며 냉각속도에 의한 변태온도의 영향 또한 크다. 이는 퀴칭할때 동결된 과잉 공공농도, 퀴칭시 열응력에 의해 도입된 격자결합, 석출(CuAl₂, Cu₂Al₃)량의 변화에 의한 matrix의 Al농도 변화등이 원인이라 할 수 있다. 이와같은 변태점의 다양한 변화때문에 일반적으로 시효에 의한 마르텐사이트의 안정화가 연구의 대상이 되고 있다.

Miki⁶⁾나 Morris등^{7, 8)}은 CuAlNi합금에 Cr, B를 Dunne등⁹⁾은 Mn, Ti, B등의 합금원소를 첨가하여 결정립을 미세화시켜 기계적성질 및 형상기억 특성등을 개선시키고자 하였으며, Jean등¹⁰⁾의 분말첨가법, Husain등³⁾의 급냉용고법에 의해 미세화 이후의 시효효과를 연구하였다. 또한 Agafonov등⁴⁾은 CuAlNi합금에서 Al조성변화에 따른 마르텐사이트 안정화와 시효거동등을 연구하였다.

그러나 현재까지 CuAlNi합금에 제4원소첨가로서 misch metal을 첨가시킨 합금원소 첨가법에 의한 결정립 미세화에 대한 연구는 아직 이루어지지 않았기 때문에 본 연구에서는 misch metal을 첨가시켜 결정립을 미세화시킨 후 열처리 및 시효조건에 의한 변태특성을 규명하고 3원합금과 일치된 실험조건을 부여하여 상호 비교함으로써 시효조건에 따른 석출물거동 및 하부조직으로 생성된 마르텐사이트상과 석출물의 상호관계등에 대한 영향을 연구 조사하였다.

2. 실험방법

실험에 사용된 합금은 고주파 유도용해로에서 용

해하였으며 주조된 잉곳트는 870°C에서 24시간동안 유지한 후 균질화처리를 하였다. 같은온도에서 1mm두께로 연간압연한 후 변태온도 측정용 시편, X-선 회절시험 및 현미경관찰용 시편을 얻어 β 단 상구역인 870°C에서 10분간 유지후 0°C 얼음물에 냉각하였다. 시효온도 및 시간은 100°C와 300°C에서 각각 1시간, 24시간 시효처리 하였다. 시효에 사용된 매체는 silicon oil과 NaNO₂ 40%, NaNO₃ 7%, KNO₃ 53%의 혼합염욕이 사용되었다. 실험에 사용된 시편의 화학조성은 82wt%Cu-13.5wt%Al-4.5wt%Ni합금과 상기 합금에 0.1wt% misch metal을 첨가한 합금으로 이루어졌다.

광학현미경조직은 H₂O(120ml), HCl(30ml), FeCl₃(10g)의 부식액을 사용하여 관찰하였으며 변태점측정은 Mettler사 DSC30을 이용하였다. 이때의 조건은 10°C/min의 냉각과 가열속도로 100~300°C 온도 구간에서 시험하였다. 시효온도와 시간에 따른 마르텐사이트의 안정화와 상변태 및 결정구조변화를 조사하기 위하여 X-선 회절시험을 하였으며 시험조건은 $30^\circ < 2\theta < 80^\circ$ 의 범위에서 Cu-K α 특성 X선을 이용하여 35KV, 15mA의 조건에서 회절상을 측정하였다.

또한 philips사 model CM20 TEM을 이용하여 미세조직, 시효에 의한 특성변화와 제2상으로 생성된 석출상의 변화를 조사 분석하였다. TEM 관찰용 시편은 HNO₃ 33%, methanol 67% 용액에 dry ice를 사용하여 -40°C로 유지한 후 40~50V로 thinning하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 광학현미경에 의한 미세조직 및 상변화

870°C에서 10분간 유지 후 0°C 얼음물에 급냉한 시편을 광학현미경에 의해 관찰된 결과는 Fig. 1과 같다. Fig. 1(a)에서 처럼 CuAlNi 3원합금의 결정립 크기는 약 0.62mm로 매우 큰 결정립을 보여주고 있으나 Fig. 1(b)에 나타나 있는 것처럼 합금원소를 첨가하였을때는 결정립 크기가 약 60 μ m로



Fig. 1 Optical micrographs of CuAlNi alloy(a) and CuAlNi+misch metal alloy(b) ice water quenched at 870°C for 10min.

크게 감소했음을 알 수 있다. 이는 합금원소인 misch metal이 결정입계 및 입내에 분산되어 결정립의 성장속도를 상호 억제하였기 때문인 것으로 생각된다. 즉 이러한 미세 효과는 misch metal이 기지금속인 Cu, Al 및 Ni에 대해 고용도가 매우 낮기 때문에 기지금속과 화합물을 형성하여 제2상으로 존재하거나 기지금속과 석출물을 형성하여 기지내에 미세하게 분산되기 때문으로 여겨진다.

β 황동에 Fe동과 같이 고용도가 낮은 합금원소를 첨가하면 미세한 석출물에 의해 핵생성 장소의 수가 증가하기 때문에 결정립은 미세하여지고 결정립의 성장이 억제된다는 보고¹¹⁾가 있다. 본 실험에서도 미세하게 분산된 제2상입자는 기지중에 고용되지 못한 misch metal이 응고시 정출한 것으로서 misch metal과 반응하여 형성된 제2상입자가 핵생성 장소로 작용하여 β 상의 핵생성을 촉진함으로써

결정립이 미세화 되었을 것으로 판단된다.

Fig. 2는 시효온도와 시간의 변화에 따른 조직의 변화를 관찰하기 위해서 870°C에서 10분간 유지 후 0°C 얼음물에 급냉시킨 후 3원계합금과 4원계합금의 시편을 시효온도 100°C, 300°C에서 24시간 시효처리한 광학현미경 사진이다.

사진에서 알 수 있듯이 3원계합금이나 4원계합금 모두 100°C에서 시효처리한 시편은 24시간동안 열처리함에 따라 결정립크기가 약간 증가하는 경향을 나타내었으나 다른 상으로의 전이현상은 보이지 않았다.

그러나 300°C에서 시효처리한 시편은 100°C에서 시효처리한 시편과는 달리 α 및 γ_2 상으로 보이는 상들이 나타나 있다. 이는 실험에 사용된 합금의 변태온도(M_s 온도)가 약 150~200°C라는 점으로 미루어 보아 300°C에서 시효하는 동안 상당량 모상으로의 역변태가 일어나 고온에서 안정한 β 상과 α 혹은 $\beta' + \gamma_1' + \gamma_2$ 상으로의 상전이가 일어난 것으로 생각된다. 또한 마르텐사이트상시효와 모상시효에서 제2상입자의 석출은 변태온도의 변화를 야기시키고, 이러한 변태온도의 변화는 급냉에 의한 원자공공이나 변태온도 변화에 크게 영향을 미치는 Al이 석출상의 생성량에 따른 변화와 시효때 일어나는 Cu나 Al의 원자확산을 제어하는 Ni의 작용에 의해 크게 의존하고 있다. 또한 합금원소의 첨가에 따라서는 크나큰 영향을 미치지 못하는 못하나 시효온도가 높은 모상시효에서는 뚜렷한 경향이 나타났다.

3. 2 시효에 의한 변태온도 변화

Fig. 3 및 4는 4원계 합금에서 모상 및 마르텐사이트상 시효시 시효시간을 각각 1시간 및 24시간 동안 유지시켰을때의 변태온도 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 100-24는 100°C에서 24시간 시효처리한 시편의 변태곡선이고 100-1은 100°C에서 1시간 시효처리한 시편의 변태곡선이다. 또한 2개의 peak는 DSC에서 1차 및 2차 가열냉각을

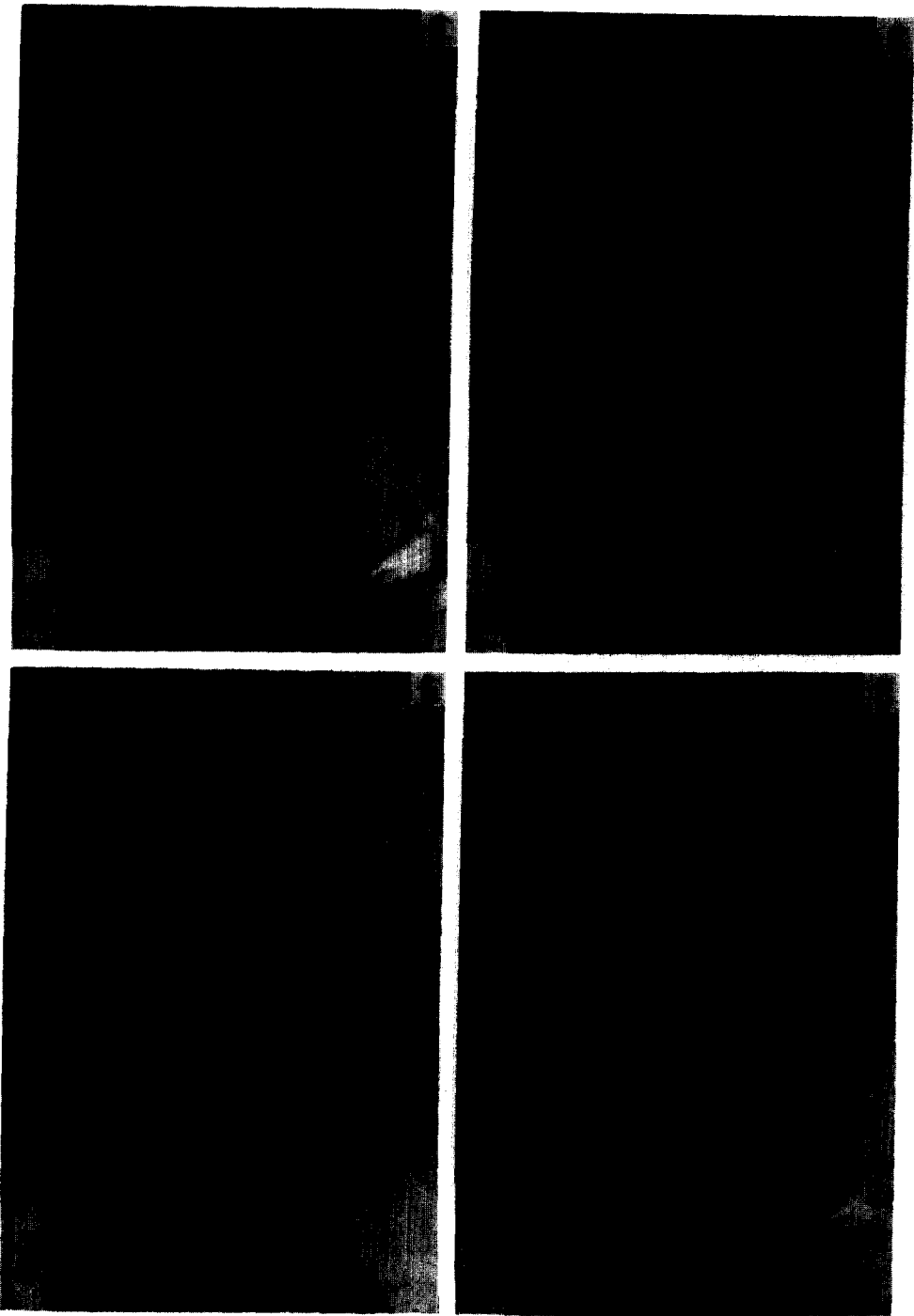


Fig. 2 Optical micrographs of CuAlNi alloy(a, b) and CuAlNi+misch metal alloy(c, d).
(a) aged at 100°C for 24h (b) aged at 300°C for 24h
(c) aged at 100°C for 24h (d) aged at 300°C for 24h

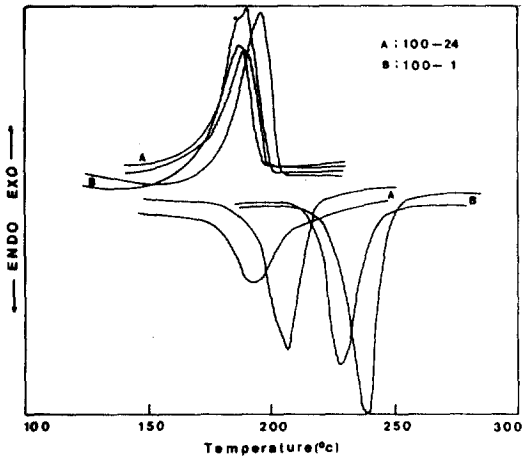


Fig. 3 DSC curves of CuAlNi+misch metal alloy aged at 100°C for 24h(A) and 1h(B).

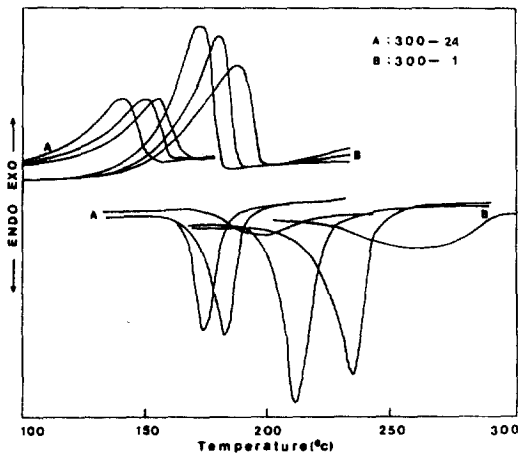


Fig. 4 DSC curves of CuAlNi+misch metal alloy aged at 300°C for 24h(A) and 1h(B).

하였을 때 나타나는 peak이다. 1차 가열 냉각과 2차 가열 냉각시 변태온도의 변화가 생긴 것은 시효에 의한 모상의 안정화보다는 열사이클링에 의한 전위의 생성 및 원자 재배열에 의한 공공의 소멸로 인하여 변태가 지연된 것으로 사료된다. 마르텐사이트상시효에서 2차 가열 냉각 이후에는 변화가 생기지 않고 있으며 모상시효는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 M_s 변태점은 3차 가열 냉각까지 변화가 생긴 후 4차 가열 냉각부터는 3차 가열 냉각

peak와 똑같이 나타났다. 모상에서는 일부 미변태 β가 열사이클에 의한 응력유기마르텐사이트로 완전히 변화가 일어나 3차 이후에는 안정화가 일어난 것으로 사료된다. 또한 A_s는 3차 가열 냉각시 매우 broad한 peak가 나타나 있고 1차 및 2차 가열 냉각과는 상당히 다른 변태점 변화를 나타내 보이고 있다. 이는 역변태에 필요한 요소가 3차 가열 냉각부터는 β'과 γ' 마르텐사이트에서 α 혹은 γ₂ 상으로의 전이가 쉽게 일어나기 때문인 것으로 사료된다. 즉 1차 및 2차 가열 냉각시 원자 재배열에 의해 공공이 소멸되거나 원자확산에 의해 규칙화된 마르텐사이트가 3차 가열부터는 다시 불규칙 β 상으로의 용이한 접근 혹은 α 및 γ₂ 상으로의 전이가 쉽게 일어나기 때문에 규칙화의 소멸이 원인인 것으로 사료된다.

Cu계 형상기억합금에서 마르텐사이트상에서의 시효는 마르텐사이트가 안정화 되어 역변태 개시온도가 상승하고 사용중 변태온도의 변화가 일어난다. 이러한 변화는 고온의 규칙 β 상에서 급냉에 의한 원자공공의 생성과 시효시 이에 따른 모상의 규칙원자 재배열에 장거리확산 보다 근접원자간 확산이 지배적이기는 하지만 모상상태에서의 확산과는 달리 급냉시 생성된 과잉공공이 급감하지 못하고 쉽게 평형상태에 도달되지 않기 때문에 역변태온도가 상당히 올라간 것으로 생각된다.

또한 급속냉각에 의한 과잉공공을 다량으로 함유한 마르텐사이트상 상태에서의 장시간 시효시 불완전한 규칙화 마르텐사이트상과 함께 역변태에 필요한 자유에너지가 감소하고 규칙화 중대로 확산시간의 장기화에 따라 원자가 재배열 되어 마르텐사이트상의 자유에너지가 감소하여 안정화가 일어나고 역변태온도가 상승하는 것으로 설명된다.

한편 모상에서의 시효는 급냉에 의해 도입된 원자공공 및 상계면에 고착되어 있는 이들 집합체가 시효에 의해 소멸됨으로서 용이한 계면이동이 일어나 변태온도에 변화를 일으키고 모상에서 오랜시간 시효를 하므로써 β' + γ' 상에서 γ₂ 상으로의 변화

에 따른 기지내의 Al농도감소 및 시효에 의한 규칙화 증대에 따른 변태온도의 변화로 설명되고 있다.

CuAlNi합금계에서 본 합금조성과 같은 경우 Ni이 Cu와 Al원자의 확산억제인자로 작용하고 급냉에 의한 동결공공 및 규칙화의 미비등이 시효가 진행되면서 공공의 소멸 및 확산에 의한 원자의 재배열로 규칙화가 증대되어 변태온도에 변화가 생긴다고 사료된다.

4원합금계의 경우 급냉에 의한 γ_2 상의 석출과 높은온도에서 장시간 유지되는 과정중에 석출되는 γ_2 상의 생성을 고려할 수가 있는데 급냉에 의한 단순한 열적인 석출보다 β 상에 고용도가 낮은 misch metal 첨가로 이들 석출상에 의한 결정입계 이동이 방해를 받고 시효에 의해 생성된 석출물이 결정성장을 억제시켜 변태온도에 변화를 주고있고 결정립 미세화효과도 기대할 수가 있다.

본 합금 조성을 갖는 시편에서도 마르텐사이트상 상태인 100°C 시효에서는 Fig. 3에서처럼 시효시간에 따라 M_s 온도는 크게 변화가 없었으나 역변태온도인 A_s 는 시효시간이 긴 24시간 시효시 1시간 시효보다 매우 감소하였고 모상 상태인 300°C에서는 Fig. 4에서 보인 것처럼 시효시간이 길어짐에 따라 M_s 는 크게 감소하였고 A_s 는 크게 증가하였다.

3.3 전자현미경 및 X-선 회절시험

Fig. 5는 4원계합금을 100°C에서 1시간 시효한 시편의 전자현미경사진으로서 열탄성마르텐사이트에서 전형적으로 나타나는 쌍정형 β' 마르텐사이트상을 TEM으로 찍은 명시야상 및 암시야상의 사진이다. 낮은온도와 짧은시간 시효에서는 쿨링만을 한 시편과 조직적인 면에서의 차이는 거의 없다고 볼 수 있다.

CuAlNi합금의 급냉된 상태에서의 기본적인 조직은 내부 적층결함을 갖고 형성되어 있는 M18R 마르텐사이트¹²⁾와 내부 쌍정으로 구성되어 있는 N2H 형태의 마르텐사이트¹³⁾로 형성되어 있다. 그러나 시효온도 및 시효시간에 따라 α 와 γ_2 상이 생

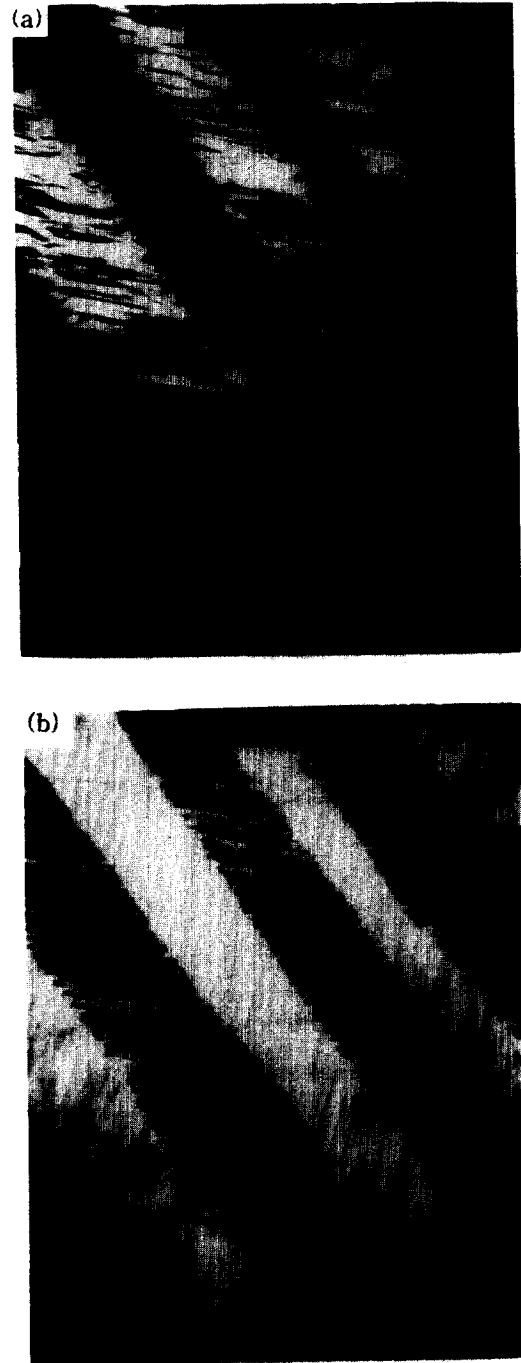


Fig. 5 Transmission electron micrographs of CuAlNi + misch metal alloy aged at 100°C for 1h. bright field image(a) and dark field image(b).

성되어 상구조가 변화 된다던가 γ_2 상에 의한 경도 값에 변화가 일어난다.

본 실험에서는 미세구조관찰 결과 주로 M18R 마르텐사이트로 구성되어 있고 일부 N2H 형태의 마르텐사이트로 형성되었다. 이러한 초기조직들은 X-선 실험결과에서 알 수 있듯이 초기 18R 마르텐사이트가 시효시간이 증가하면 마르텐사이트상과 γ_2 상으로 변화되고 또한 시간이 길어지고 온도가 높으면 γ_2 상과 α 상으로 변태가 진행되고 있음을 알 수 있다. 이러한 상구조의 변화는 변태온도 변화와도 밀접한 관계가 있다. 즉 급냉에 의해 동결된 원자공공들이 시효에 의해 원자확산이 일어나 제거되고 이에따라 규칙화가 증대되어 변태온도의 변화를 야기시킨다. 이러한 변태온도의 변화는 Fig. 3 및 4에서 알 수 있듯이 시효시간과 시효온도에 따라 크게 변화하고 있으나 이러한 원인은 이미 기술되어진 원인외에 시효시간이 길어짐에 따라 γ_2 상 석출에 의한 Al농도의 감소, 또한 본 실험에 사용된 고Ni농도에 의해 Ni이 다른 원자들의 확산 억제효과에 의해 급냉시 규칙화를 저해한다던가 시효시 확산에 의한 변태온도(M_s) 감소효과가 일어났다고 생각된다. 이처럼 시효시간이 길다든가 시효온도가 높게되어 원자 재배열 혹은 공공의 소멸에 의해 규칙화가 증대되고 이에따라 변태온도가 변화하며, 이러한 변태온도의 변화는 열평형적으로 안정한 α 상과 γ_2 상으로의 상변화를 일으킨 것으로 생각된다.

Fig. 6은 결정립 미세화된 시편을 300°C에서 1시간 시효한 시편의 TEM사진이다. Fig. 6(a)는 내부적응결함을 갖는 M18R type의 β' 마르텐사이트이고 (b)는 사진(a)에서 variant A의 전자회절 pattern이다. 또한 (c)는 내부쌍정을 갖는 N2H type의 γ_1' 마르텐사이트이고 (d)는 사진(c)의 variant A에 대한 전자회절 pattern이다. 300°C에서 1시간 시효한 시편의 일반적인 조직은 주로 M18R type의 마르텐사이트로 형성되어 있고 일부 N2H type의 마르텐사이트가 생성되어진 것을 알 수 있

다. 이러한 조직은 낮은온도에서 시효시킨 마르텐사이트상 상태에서의 시효에서는 시효시간에 관계 없이 거의 찾아볼 수 없는 조직이었다. N2H type의 쌍정이 ABAB형태의 variant들이 전자회절 pattern상 사진에서 (121)면을 쌍정면으로 (120)면과 (201)면으로 이루어졌고 이들 면이 쌍정을 이루면서 약 84° 기울어진 상태이다.

Fig. 7은 300°C에서 24시간동안 시효시킨 시편의 미세쌍정 plate를 확대한 TEM사진과 plate의 경계부분의 전자회절 pattern이다. 쌍정내부 및 쌍정경계에 α 및 γ_2 상으로 보이는 미세 석출물이 미세하게 분산되어 있는것을 알 수 있다. 이러한 석출물들은 경도값에 변화를 주고 변태온도(M_s)를 낮추어주는 요인으로서 크게 작용했을 것으로 생각된다.

Fig. 8은 4원계합금으로서 100°C 1시간, 300°C 1시간, 300°C 24시간 동안 시효시킨 시편의 X-선 회절 peak이다. 그림에서 알 수 있듯이 마르텐사이트상 시효의 경우 matrix는 γ_1' 마르텐사이트와 β' 마르텐사이트로 이루어져 있다. 시효온도가 높은 300°C에서는 시효시간이 길어짐에 따라 역변태가 진행되어 최초 미변태 α 및 $\beta_1(\text{DO}_3) \rightarrow \beta'$ 또는 γ_1' 으로 변태된 상이 소멸되고 모상 및 γ_2 상이 생성되었고 상당히 높은 변태온도를 갖는 본 합금계에서 M_s 점 이상에서 시효처리한 경우 장시간동안 모상시효가 되어 이러한 상변화가 일어났다고 생각된다. 즉 이는 저농도 Ni합금에서는 DO_3 의 규칙화와 저온에서 시효초기에 γ_2 상이 정합석출이 되어 변태온도의 변화를 야기시키나 본 실험과 같이 고농도 Ni합금에서는 Fig. 3에서도 알 수 있듯이 100°C 1시간의 경우 M_s 점의 변화는, 저농도 Ni합금에서 나타나는 DO_3 의 규칙화 및 미세 γ_2 상의 정합석출로 인해 시효시간에 따라 영향을 받고있지 않으나, Fig. 4에서처럼 300°C에서는 시효시간에 따라 변태온도의 변화가 심하다. 이는 X-선 회절 peak에서도 알 수 있듯이 미세 γ_2 상의 석출이 시효초기 원자 재배열에 의한 규칙화보다 우선하기 때문인 것으로 사료된다.

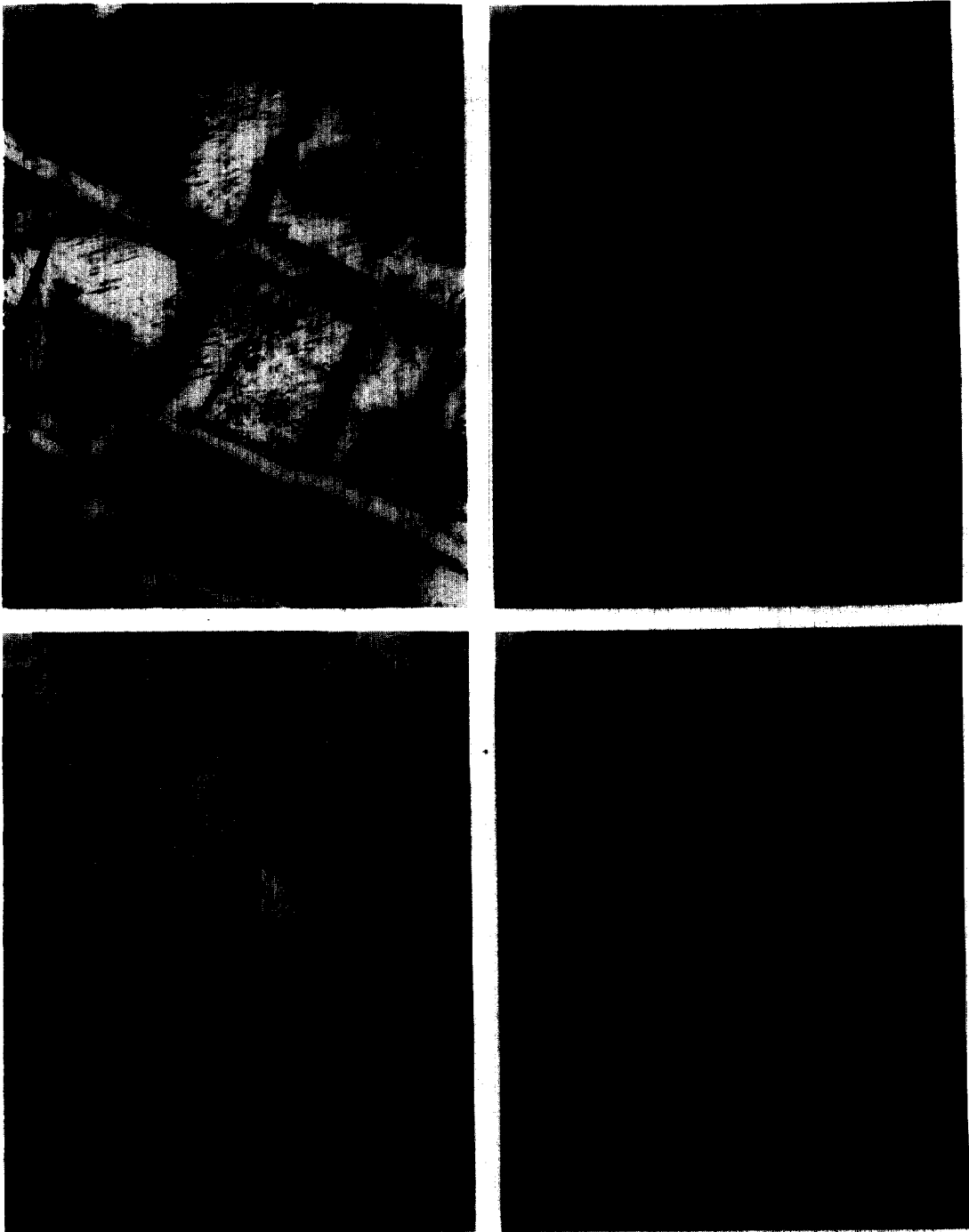


Fig. 6 Transmission electron micrographs showing M18R type structure(a) and N2H type structure(c) of CuAlNi+misch metal alloy aged at 300°C for 1h. bright field image(a, c), and electron diffraction pattern and its indexing of variant A(b, d). The corresponding zones are : (b) $[2\bar{1}0]$; (d) $[012]$

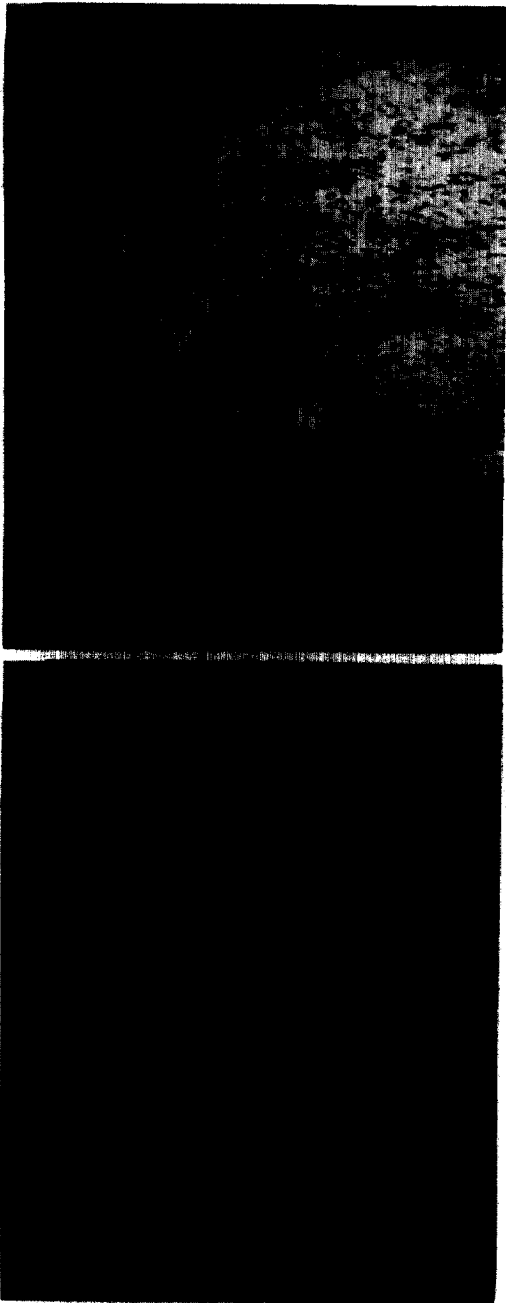


Fig. 7 Transmission electron micrographs of CuAlNi+misch metal alloy aged at 300°C for 24h. bright field image of twin boundary area(a), and electron diffraction pattern and its indexing of twin boundary area(b). The corresponding zone is : (b) [120]

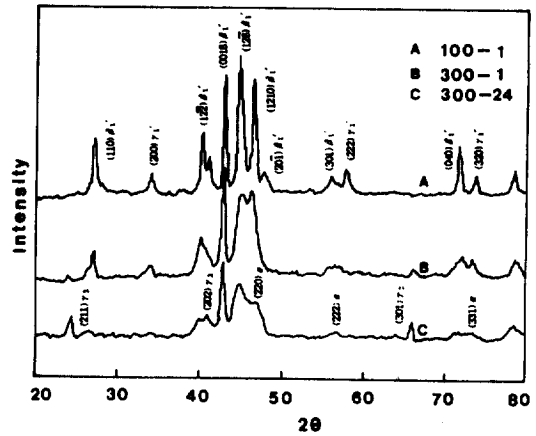


Fig. 8 X-ray diffraction profiles of CuAlNi+misch metal alloy aged at 100°C for 1h(A), at 300°C for 1h(B) and at 300°C for 24h(C).

4. 결 론

82wt%Cu-13.5wt%Al-4.5wt%Ni 합금계의 기본조성을 갖는 형상기억합금에 0.1wt% misch metal을 첨가하여 결정립미세화에 따른 변태저동 및 시효효과를 조사한 결과는 다음과 같다.

1) 시효온도에 따른 변태온도의 변화는 100°C 시효에서는 시효시간에 큰 영향을 받지않으나 300°C 시효에서는 시효시간에 매우 큰 영향을 받는다.

2) 100°C 시효시 시효시간에 따라 M_s점은 큰 변화가 없으나 A_s점은 시효시간이 긴 24시간 시효시 매우 감소하였고 300°C 시효에서는 시효시간이 길어짐에 따라 M_s는 크게 감소하였고 A_s는 크게 증가하였다.

3) 마르텐사이트상 시효에서 2차 가열 냉각한 이후에는 변태온도의 변화가 생기지 않으나 모상시효시 M_s점은 3차 가열 냉각까지 변화가 생긴 후 4차부터는 3차 가열 냉각곡선과 같게 나타났다. 이는 모상에서는 일부 미변태 β가 열사이클링에 의한 응력유기 마르텐사이트로 완전히 변화가 일어나 3차 이후에는 안정화가 일어난 것으로 사료된다.

4) 모상시효 조직은 M18R 마르텐사이트와 N2H

마르텐사이트로 형성되어 있고 시효시간의 증가에 따라 α 및 γ_2 상의 석출이 뚜렷했다.

5) 모상시효시 고농도 Ni합금에서는 조직의 미세화에 의해 미세 γ_2 상의 정합석출이 원자재 배열에 의한 규칙화보다 변태온도변화에 큰 영향을 미쳤다.

후 기

본 연구는 1993년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. K. Moril and K. Otsuka : J. of Mater. Sci. Letter, 56~58(1990)441.
2. F. C. Lovey, V. Torra, A. Isalgue, D. Roqueta and M. Sade : Acta Metall., 42(1994) 453.
3. S. W. Husain, M. Ahmed, F. H. Hashmi and A. Q. Khan : "Proceedings of the MRS International Meeting on Advanced Materials", Japan(1988)389.
4. V. Agafonov, P. Naudot, A. Dubertret and B. Dubois : Scripta Met., 22(1988)489.
5. M. Ahmed, S. W. Husain, Z. Jqbal, F. H. Hashmi and A. Q. Khan : Ibid 22(1988)803.
6. M. Miki and Y. Ogino : 日本金屬學會誌, 第51卷 第9號 (1978)824.
7. M. A. Morris : Scripta Met., 25(1991)2541.
8. M. A. Morris and S. Gunter : Ibid 26(1992) 1663.
9. D. P. Dunne, J. Van Humbeeck and L. Delaey : "Proceedings of the MRS International Meeting on Advanced Materials", Japan(1988)329.
10. R. D. Jean, T. Y. Wu and S. S. Leu : Scripta Met., 25(1991)883.
11. A. Q. Khan and L. Delaey : Z. Metallkd., 60 (1969)494.
12. T. Saburi, C. M. Wayman, K. Takata and S. Nenno : Acta Metall., 28(1980)15.
13. T. Saburi and S. Nenn : Proc. Int. Conf. on Solid-Solid Phase Transformations TMD-AIME, Warrendale, PA, (1982)1455.