

Cu-55%Mn 합금의 진동감쇠능에 미치는 각종 열처리의 영향

鄭泰臣, 田仲桓*, 李榮局, 崔鍾述

연세대학교 공과대학 금속공학과

*연세대학교 철강연구소

Effects of Different Heat Treatments on Damping Capacity of Cu-55%Mn Alloy

Tae-Shin Chung Joong-Hwan Jun* Young-Kook Lee Chong-Sool Choi

Department of metallurgical, Yonsei University, Seoul 120-749

*Research Institute of Iron & Steel Technology, Yonsei University, Seoul 120-749

ABSTRACT

Effects of different heat treatments on microstructure and damping capacity of Cu-55%Mn alloy were investigated to find an optimum heat treatment condition for a maximum damping capacity. The alloy showed the high level of damping capacity in case of the aging at 375 and 400°C. This is ascribed to the FCC→FCT martensitic transformation and microstructural changes from mottled to tweed band type. The damping capacity had a maximum value of 0.33 in logarithmic decrement when the alloy was aged at 375°C for 14 hours followed by 20 times of thermal cycling between room temperature and 250°C. The refinement of tweed structure by thermal cycling is thought to be responsible for the highest damping capacity.

1. 서 론

최근, 소음이나 진동에 의한 정밀기계의 정밀도 저하 및 기계부품의 피로파괴 등을 방지하기 위해, 진동감쇠능과 기계적 성질이 우수한 방진합금을 기계부품이나 구조물의 진동체에 사용하는 방진수단이 주목받고 있다^{1, 2)}. 지금까지 개발된 여러 방진합금³⁻⁵⁾ 중 Cu-Mn 합금은 방진합금의 필수요건이라 할 수 있는 높은 진동감쇠능을 나타내면서, 우수한 기계적 성질과 내식성을 겸비하고 있기 때문에 어느 합금보다 실용화가 유망한 재료로 평가받고 있다⁶⁻⁸⁾.

본 연구는 Cu-Mn 합금의 진동감쇠능을 보다 향상시키기 위한 최적의 열처리 조건을 도출하는 것이

주 목적이다. 이를 위하여 Cu-55%Mn 합금을 실험합금으로 선정하여 용체화처리 후 냉각속도의 변화, 시효, 반복열처리 등에 따른 진동감쇠능을 조사하고, 이를 미세조직과 연관시켜 고찰하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 Cu-55%Mn 합금은 순도 99.99%의 전해망간과 99.99%의 무산소동을 사용하여 진공고주파 유도로에서 용해하여 소정형상의 잉곳트로 제조하였다. 제조된 합금의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 잉곳트를 850°C에서 72시간 동안 균질화처리한 후, 적당한 크기의 각재로 절단하고

열간압연과 각종 기계적 가공을 행하여 소정의 치수를 갖는 진동감쇠능 시편, X-선 회절 시편, 미세조직 관찰용 시편 등을 각각 제작하였다. 모든 시편을 800°C에서 2시간 동안 용체화처리한 후 (i) 노냉, (ii) 수냉, (iii) 수냉한 후 300~500°C의 온도에서 시효, (iv) 400°C까지 노냉하여 그 온도에서 시효, 그리고 (v) 수냉하여 시효한 후 250~500°C의 온도구간에서 10분간 유지한 다음 상온에 수냉하는 과정을 되풀이 하는 반복열처리(thermal cycling) 등의 다양한 열처리를 실행하였다.

Table 1. Chemical composition of the alloy used (wt. %)

Alloy	Chemical Composition (wt. %)				
	Cu	Mn	Ni	Fe	C
Cu-55%Mn	bal.	55.05	0.001	0.13	0.015

열처리 조건에 따른 미세조직은 X-선 회절시험, 광학현미경 및 투과전자현미경(TEM)으로 조사하였다. X-선 회절시험은 Cu-K α 선으로 40~120°의 회절각(2 θ) 범위에서 8°/min의 주사속도로 행하였다. 광학현미경 조직은 5% Citric Acid 용액으로 부식시킨 후 관찰하였으며, 하부조직은 시편을 CH₃COOH 500ml + CrO₃ 100g + 증류수 20ml의 혼합 용액을 사용하여 상온에서 20V의 전압으로 전해연마한 후, 200kV의 가속전압하에서 투과전자현미경(model : Philips CM30)으로 관찰하였다.

진동감쇠능의 측정은 본 연구실에서 제작한 외팔보(cantilever)형 진동감쇠능 측정장치를 이용하였다. Fig. 1은 진동감쇠능 측정장치의 개략도와 시편형상을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 진동감쇠능을 대수감쇠율(logarithmic decrement, δ)로 나타냈으며, 그 정의는 식 (1)과 같이 이웃한 두 변형진폭(α_n, α_{n+1})의 비에 자연대수를 취한 것이다.

$$\text{대수감쇠율} : \delta = \ln\left(\frac{\alpha_n}{\alpha_{n+1}}\right) \quad (1)$$

한편, Cu-Mn 합금은 진동감쇠능이 진폭에 의존하는 이력형 방진합금이기 때문에, 8×10^{-4} 의 일정한 진폭변형률(strain amplitude)에서 진동감쇠능을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 800°C에서 2시간 동안 용체화처리한 후 각각 상온에 노냉, 수냉, 수냉한 후 360~400°C에서 시효, 그리고 400°C까지 노냉하여 그 온도에서 시효한 Cu-55%Mn 합금의 진동감쇠능을 시효시간에 따라 나타낸 것이다. 수냉한 시편보다 노냉한 시편의 진동감쇠능이 훨씬 높은 것을 알 수 있는데, 이것은 수냉한 시편은 γ (FCC) 단상인 반면, 노냉한 시편은 스피노달분해에 의해 발생한 Mn-rich 구역에서 높은 진동감쇠능을 나타내는 FCT 마르텐사이트가 생성 되었기 때문이다. 시효에 의한 진동감쇠능의 변화는 시효온도와 시효시간에 따라 다른 경향을 나타내었다. 360°C에서는 진동감쇠능이 매우 낮고 시효시간에 따라 진동감쇠능의 변화도 거의 없었다. 그 이유는 Fig. 3⁹⁻¹¹⁾에서 보는 바와 같이 Cu-55

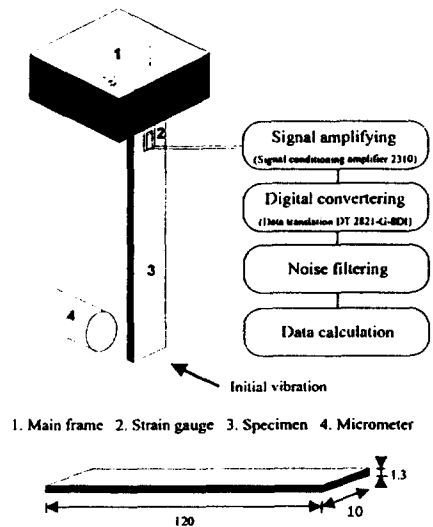


Fig. 1. Schematic illustration showing a damping measuring apparatus and dimension of its specimen(in mm)

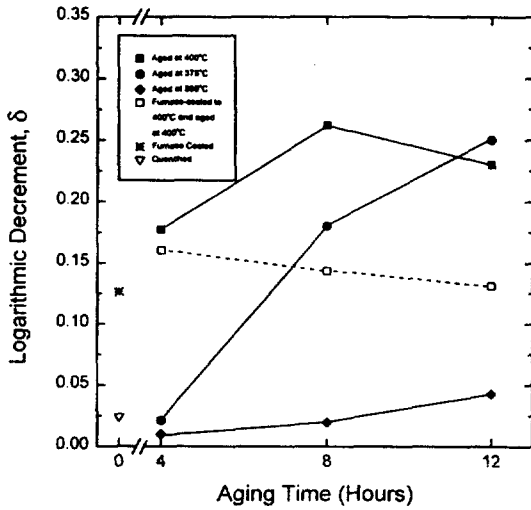


Fig. 2. Variation in damping capacity with respect to heat treatment condition for Cu-55% Mn alloy.

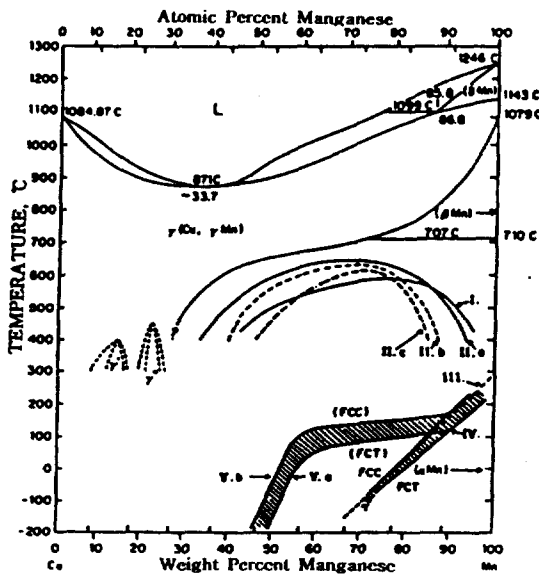


Fig. 3. Phase diagram of Cu-Mn binary system¹⁰⁾.
 I. Miscibility gap
 II. Miscibility gap
 a. Layering range
 b. Chemical spinodal
 c. Coherent spinodal
 III. Neel temperature
 IV. FCC-to-FCT transition in quenched alloy
 V. FCC-to-FCT transition in aged alloy

%Mn 합금의 경우 360°C는 온도가 낮아서 스피노달분해가 일어나지 않아서 Mn-rich 구역이 생성되지 않았기 때문에 생각된다. 375°C에서는 시효시간이 증가함에 따라 진동감쇠능이 급격히 증가하고 있으며, 400°C에서는 8시간에서 최대 진동감쇠능을 나타낸 후 감소하는 경향을 보였다. 375°C와 400°C 모두 Fig. 3에서 보는 바와 같이 스피노달분해가 일어나서 이로 인해 생성된 Mn-rich 구역이 상온으로 냉각시 FCC→FCT 마르텐사이트 변태가 일어나 진동감쇠능이 상승되었다고 생각된다. 400°C에서 8시간 이상 시효했을 때 진동감쇠능이 오히려 낮아지는 이유는 진동감쇠능을 저해하는 것으로 알려진 α-Mn이 석출하기 때문으로 판단된다. 한편, 400°C까지 냉각하여 그 온도에서 유지한 시편의 진동감쇠능은 시효시간에 따라 점차 저하 되는 것을 알 수 있는데, 이 또한 평형상인 α-Mn이 석출되기 때문이라고 생각된다. Fig. 2로부터, 다양한 열처리 조건 중 Cu-55%Mn 합금에서 높은 진동감쇠능이 나타나는 조건은 수냉 후 375°C와 400°C에서 시효한 경우임을 알 수 있다. 따라서, 375°C와 400°C에서 시효시간을 더욱 증가시키면서 진동감쇠능의 변화를 조사하였다.

Fig. 4는 375°C와 400°C에서 0~32시간까지 시효한 Cu-55%Mn 합금의 진동감쇠능을 시효시간에 따라 나타낸 것이다. 400°C에서 시효한 경우는 1시간 이후부터, 375°C에서는 4시간 이후부터 진동감쇠능이 급격히 증가하여 각각 8시간과 14시간에서 최대값을 나타낸 후 감소하였으며, 최대 진동감쇠능은 375°C에서 시효했을 때가 더 높았다. Fig. 5는 375°C와 400°C에서 시효한 시편의 정방정성(c/a 축비)을 시효시간에 대해 나타낸 것이다. 400°C에서 1시간 이후부터, 375°C에서는 2시간 이후부터 낮아지며 시효온도가 높을수록 더욱 급격히 낮아지는 것을 관찰할 수 있다. 시효시간에 따른 정방정성의 감소가 스피노달분해에 의한 Mn-rich 구역의 Ms 온도의 상승에 따른 FCC→FCT 변태가 일어났기 때문이다. Fig. 5의 정방정성을 Fig. 4의 진동감쇠

능과 비교해 보면, 정방정성의 저하에 대응하여 진동 감쇠능이 높아지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 정방정성이 낮아질수록 진동감쇠능이 높은 FCT 마르텐사이트 변태량이 증가하기 때문으로 생각된다.

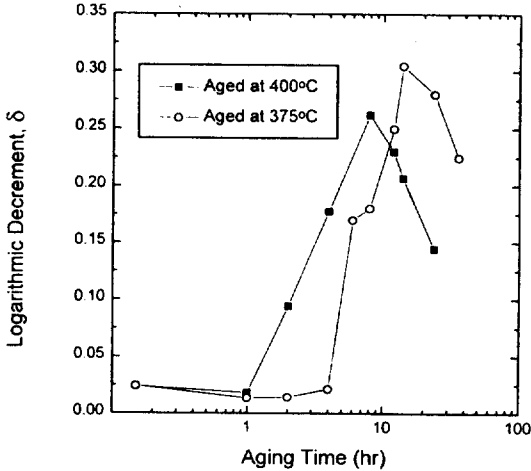


Fig. 4. Variation in damping capacity with aging time for the Cu-55%Mn alloy subjected to aging at 375°C and 400°C, respectively.

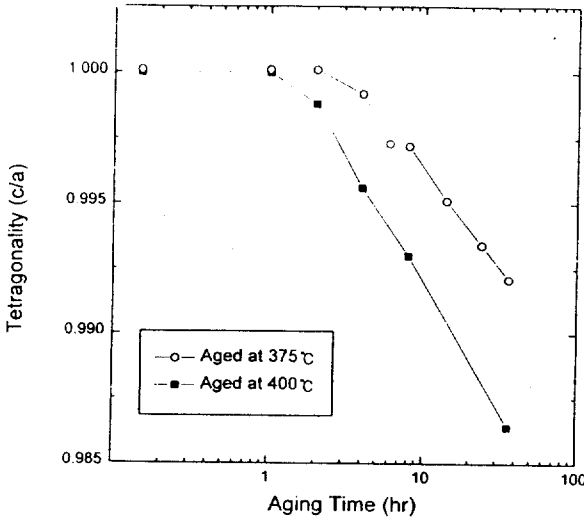


Fig. 5. Variation in tetragonality of Cu-55%Mn alloy with aging time at 375°C and 400°C, respectively.

Fig. 6은 375°C에서 시효한 Cu-55%Mn 합금에서 시효중에 일어나는 하부조직의 변화를 투과전자현미경(TEM)으로 관찰한 것이다. Fig. 6(a)는 2시간 동안 시효한 시편의 하부조직으로, 방향성이 없는 불규칙적인 명암으로 보아 mottled 조직임을 알 수 있으며, 그 내부에 전위가 관찰된다. Fig. 4의 진동감쇠능 결과와 연결지어볼 때, Cu-55%Mn 합금의 mottled 조직은 진동감쇠능이 매우 낮은 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(b)와(c)는 각각 14시간 시효한 시편의 명시야상과 암시야상으로, mottled 조직이 사라지고 방향성이 있는 망선모양의 tweed 조직이 나타난다. 이러한 tweed 조직은 FCC 구조를 가지는 γ 상의 {110}면을 따라 나타나는 불규칙한 선들의 명암으로 구성되는 것으로 알려져 있으며¹²⁾, mottled 조직과 반대로 진동감쇠효과가 매우 큰 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(d)는 14시간 동안 시효한 시편에서 관찰되는 tweed 밴드를 나타낸 것이다. tweed 밴드는 FCC→FCT 변태로 인한 스트레인이 국부적으로 증가된 영역에서 많은 수의 평행한 tweed 줄무늬가 강화되어 발생하는 것으로 보고되었다^{9,13)}. 또한, 36시간 동안 시효한 하부조직에서도 트워드 밴드가 넓게 퍼진 형태로 나타나고 있으며 (Fig. 6(e)), 이 때 정방정성은 Fig. 5에 나타난 것과 같이 더욱 낮아진다. 그러나, 시효가 진행됨에 따라 Fig. 6(f)에 나타난 것과 같이 Mn-rich 영역에서 평형상인 α -Mn이 석출하여 진동감쇠능이 감소하게 된다.

Cu-55%Mn 합금의 진동감쇠능을 더욱 향상시킬 목적으로, 375°C에서 14시간 동안 시효한 Cu-55%Mn 합금에 대하여 반복열처리를 실행하였다. Fig. 7(a)는 상온과 250°C 사이에서 10~60분간 유지한 후 상온에 수냉하는 것을 1사이클로 하는 반복열처리를 10회한 시편의 진동감쇠능 결과로, 유지 시간에 관계없이 진동감쇠능이 거의 일정한 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)는 각각 250, 400, 500°C에서 10분간 유지한 후 상온에 수냉하는 반복열처리를 10회한 후 진동감쇠능을 측정된 결과로, 반복열처리 온

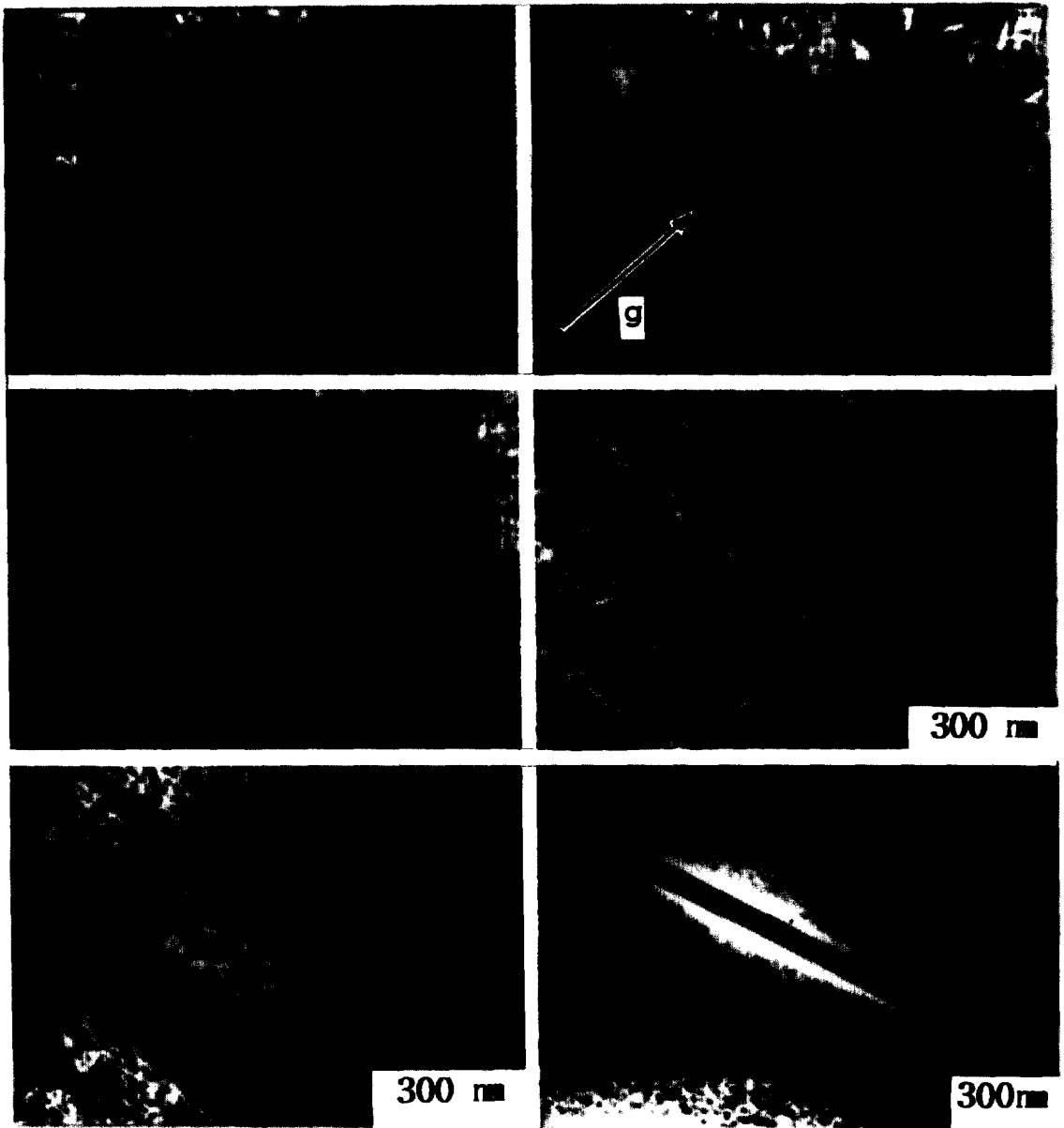


Fig. 6. TEM micrographs of the Cu-55%Mn alloy aged at 375°C for various times. Beam direction is near $\langle 110 \rangle$.

(a) mottled contrast in the specimen aged for 2hr. Bright field image
 (b) tweed contrast in the specimen aged for 14hr. Bright field image with $g=002$. Beam direction is near $\langle 110 \rangle$.
 (c) tweed contrast in the specimen aged for 14hr. Dark field image with $g=002$. Beam direction is near $\langle 110 \rangle$.
 (d) tweed band contrast in the specimen aged for 14 hr.
 (e) tweed band contrast in the specimen aged for 36 hr. Bright field image
 (f) tweed band and precipitate contrast in the specimen aged for 36 hr.

도가 높을수록 진동감쇠능이 낮아졌다. 이에 대한 원인을 조사하기 위하여 광학현미경 조직관찰을 행하였다. Fig. 8은 각각 400℃와 500℃에서 10회 반복 열처리한 시편의 광학현미경 조직사진이다. 반복 열처리 온도가 높을수록 결정립계에 a-Mn의 석출량이

점차 많아지는 것을 알 수 있으며, 따라서 a-Mn 석출물이 진동감쇠능을 저해하는 요인임을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 최대진동감쇠능을 나타내는 조건인 400℃에서 8시간, 375℃에서 14시간 동안 시효한 Cu-55%Mn 합금을 상온과 250℃ 사이에서 반복 열처리한 후 반복 열처리 횟수에 따른 진동감쇠능의 변

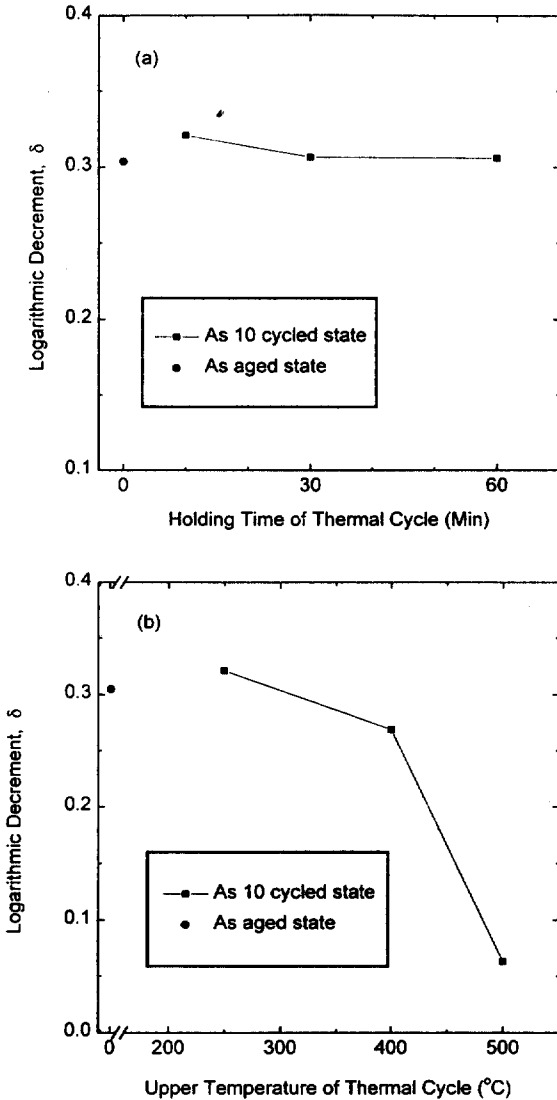


Fig. 7. Variation in damping capacity with (a) holding time at upper temperature of thermal cycling (R.T.→250℃) and (b) upper temperature of thermal cycling for 10 min in the Cu-55%Mn alloy subjected to aging at 375℃ for 14 hr.

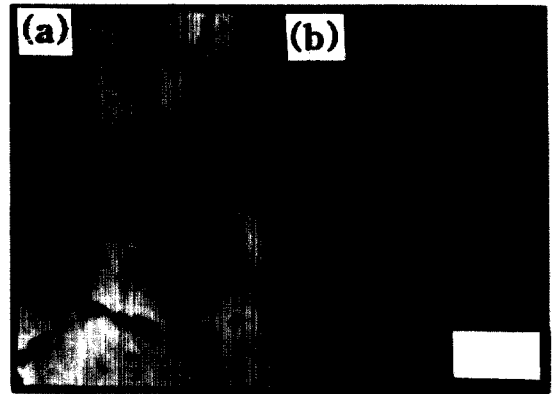


Fig. 8. Changes in optical microstructure with upper temperature of thermal cycling for the Cu-55%Mn alloy subjected to 10 times of thermal cycling at (a) 400℃ and (b) 500℃, respectively.

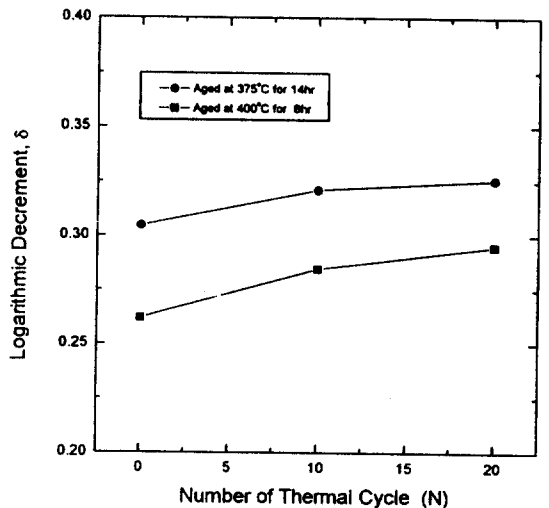


Fig. 9. Variation in damping capacity with number of thermal cycles for the Cu-55%Mn alloy aged at 375℃ for 14 hr and aged 400℃ for 8 hr, respectively.

화를 나타낸 것이다. 반복열처리 횟수가 증가함에 따라 두 시편 모두 진동감쇠능이 증가하였으며, 그 원인을 조사하기 위하여 투과전자현미경으로 하부조직을 관찰하였다.

Fig. 10은 375°C에서 14시간 시효한 후 250°C에서 10회 반복열처리한 시편의 명시야상으로, Fig. 6(b)에 나타낸 반복열처리 전의 tweed 조직과 비교하여 tweed 간격이 매우 미세해진 것을 알 수 있다. 따라서, 반복열처리에 의해 정변태 및 역변태 과정을 거치면서 도입된 미세용력에 의해 트워드 조직이 보다 조밀해져 진동감쇠능이 증가된 것으로 생각된다.

4. 결 론

Cu-55%Mn 합금에서 열처리 조건에 따른 진동감쇠능을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Cu-55%Mn 합금을 여러 조건에서 열처리한 결과, 수냉 후 375°C에서 14시간 동안 시효했을 때 최대 진동감쇠능이 나타났다.
- (2) 375°C에서 시효한 Cu-55%Mn 합금의 하부조직은 시효시간이 증가함에 따라 mottled 조직 → tweed 조직 → tweed 밴드 조직의 순서로 변화

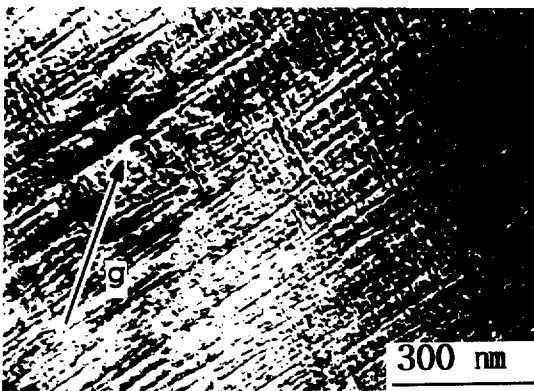


Fig. 10. TEM micrograph of the Cu-55%Mn alloy subjected to 10 times of thermal cycling (R.T.↔250°C) after aging at 375°C for 14 hr.

였다.

- (3) 375°C와 400°C에서 시효한 Cu-55%Mn 합금을 상온과 250°C 사이에서 반복열처리하였을 때, 반복열처리 횟수가 증가함에 따라 진동감쇠능이 증가하였다. 이는 진동감쇠능과 밀접한 관련이 있는 트워드 조직이 미세화되었기 때문으로 생각된다.

후 기

본 연구는 1997년도 한국과학재단 핵심전문연구과제(과제번호: 971-0803-032-2)의 연구비로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. R. de Batist : Journal de Physique, 44 (1983) C9-39
2. D. W. James : Mater. Sci. Eng., 4 (1969) 1
3. O. Mercier, K. N. Melton and Y. de Preville : Acta Metall., 27 (1979) 1467
4. G. F. Weissmann : Proc. ASTM, 58(1958) 869
5. A. Cochard : Trans. ASM, 52 (1960) 914
6. I. G. Ritchie and Z-L. Pan : Metall. Trans., 22A (1991) 607
7. A. V. Siefert and F. T. Worrell : J. Appl. Phys., 22 (1951) 1257
8. K. Kawahara, N. Sakuma and Y. Nishizaki : J. Jpn. Inst. Met., 57 (1993) 1089
9. L. L. Mayes : Master Thesis, AD-A197317, (1988)
10. J. M. Vitek and H. Warlimont : Met. Sci., (1976) 7
11. YE. Z. Vintaykin, D. F. Litvin and V. A.

- Udovenko : Phys. Met. Metall., 37 (1974) 92
12. I. M. Robertson and C. M. Wayman : Phil. Mag., 48A (1983) 421
13. K. Shimizu, Y. Okumura and H. Kudo : Trans. Jpn. Inst. Met., 23 (1982) 53