

Cu-65%Mn 합금의 진동감쇠능 퇴화 및 회복

鄭泰臣, 田仲桓*, 李承薰, 李榮局, 崔鍾述

연세대학교 공과대학 금속공학과

*연세대학교 철강연구소

A Study on Degradation and Recovery of Damping Capacity in Cu-65%Mn Alloy

Tae-Shin Chung, Joong-Hwan Jun*, Seung-Hoon Lee,
Young-Kook Lee and Chong-Sool Choi

Department of Metallurgical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749

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

ABSTRACT

Degradation and recovery of damping capacity in a Cu-65%Mn alloy have been studied. When the alloy was isothermally aged at 400°C, the highest damping capacity was observed after aging for 4 hours. In case when the alloy aged at 400°C for 4 hours was maintained at 100°C, the damping capacity gradually decreased with time. The microstructural observations showed that the formation of subdomains and α -Mn precipitates are responsible for the degradation of damping capacity. When the degraded specimen was reheated at 250°C for 30 minutes, the damping capacity was recovered considerably owing to the redistribution of impurity atoms, the extinction of subdomains and the release of damping sources from α -Mn precipitates during the repeated transformation, fcc \leftrightarrow fcc.

1. 서 론

미세조직의 제어를 통하여 진동감쇠능과 기계적 성질을 모두 향상시킨 방진합금을 진동체에 적용하여, 별도의 설계 변경이나 질량의 증가 없이도 소음과 진동의 발생을 최소화하는 방진대책이 최근 많은 관심을 끌고 있다¹⁻³⁾. 지금까지 개발된 방진합금⁴⁻⁶⁾중에서 Cu-Mn 합금은 진동감쇠능과 내식성이 우수하여 군사용 잠수함 스크류 또는 일부 정밀기계의 부품에 사용되고 있지만, 상온에서 장시간 사용할 경우 진동감쇠능이 점차 퇴화하는 경향이 있다^{7,10)}. 따라서 이에 대한 원인을 규명하기 위하여 많은 연구가 집중

적으로 수행되어 왔다. 하지만, 실제로 기계부품이 작동되는 온도가 상온보다 훨씬 높기 때문에 상온 이상의 온도에 유지할 경우 시간에 따른 진동감쇠능의 변화가 어떻게 되는가를 추가적으로 조사해야 한다고 생각한다.

따라서 본 연구는 Cu-65%Mn 합금을 실험합금으로 선정하여 (가) 400°C에서 드온시효시킬 때 최대 진동감쇠능이 나타나는 시효조건을 도출한 후, (나) 최대 진동감쇠능을 나타내는 시편을 100°C에서 유지시키면서 시간에 따른 진동감쇠능의 변화를 조사하여 미세조직과 연관지어 고찰하였으며, (다) 또한 이러한 과정을 거친 시편을 다시 250°C에 재가

열한 후 진동감쇠능을 조사하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 Cu-Mn 합금은 전해망간(순도 99.99%)과 무산소동(순도 99.99%)을 소정량 평량하여 진공고주파 유도로에서 용해하여 소정 형상의 잉곳으로 제조하였다. 제조된 합금의 화학조성은 Table. 1과 같다.

잉곳트를 Ar 분위기 중에서 850℃로 가열하여 72시간 균질화 처리한 후, 적당한 크기의 각재로 절단하고 열간압연과 각종 기계적 가공을 통하여, 120mm(L)×12mm(W)×1.3mm(T)의 치수를 갖는 진동감쇠능 시편과 소정의 치수를 갖는 X-선 회절 시편 및 미세조직 관찰용 시편을 각각 제작하였다. 모든 시편은 800℃에서 2시간 동안 Ar 분위기 중에서 용체화처리한 후 수냉하였다. 400℃에서 48시간까지 등온시효하여 최대의 진동감쇠능을 나타내는 시효시간을 도출하였으며, 최대의 진동감쇠능을 나타내는 시편을 100℃에서 30일까지 유지하면서 진동감쇠능의 변화를 관찰하였다.

이러한 과정을 거친 시편을 250℃에서 30분간 재가열하고 수냉한 후, 진동감쇠능을 측정하여 재열처리 전의 진동감쇠능과 비교하였다.

Table 1. Chemical composition of an experimental alloy (wt.%).

Alloy	Cu	Mn	Ni	Fe	C
Cu-65%Mn	bal.	64.9	0.001	0.14	0.018

시효에 따른 정방정성(tetragonality)의 변화를 확인하기 위하여, Cu-K α 선으로 X-선 회절시험을 행하였다. 이때 회절각(2 θ)의 범위는 40~120°, 주사속도는 8°/min이었다. 광학현미경의 미세조직은 5% C₆H₈O₇ 수용액으로 시편을 부식시킨 후 관찰하였다. 한편, 허부조직은 H₃PO₄와 C₃H₈O₂ 혼합용액

4 : 1로 혼합하여 전압 20V의 조건으로 전해연마한 후, 200KV의 가속전압하에서 투과전자현미경(model : Philips CM30)으로 관찰하였으며, 석출물은 주사전자현미경(model:Philips XL-30FEG)을 이용하여 조사하였다.

진동감쇠능의 측정은 본 연구실에서 제작한 외팔보(cantilever)형 진동감쇠능 측정장치를 이용하였으며, Fig. 1에 진동감쇠능 측정장치의 개략도와 시편 형상을 나타내었다. 본 연구에서는 진동감쇠능을 대수감쇠율(logarithmic decrement, δ)로 나타내었으며, 그 정의는 식(1)과 같이 이웃한 두 변형진폭(a_n, a_{n+1})의 비에 자연대수를 취한 것이다.

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

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

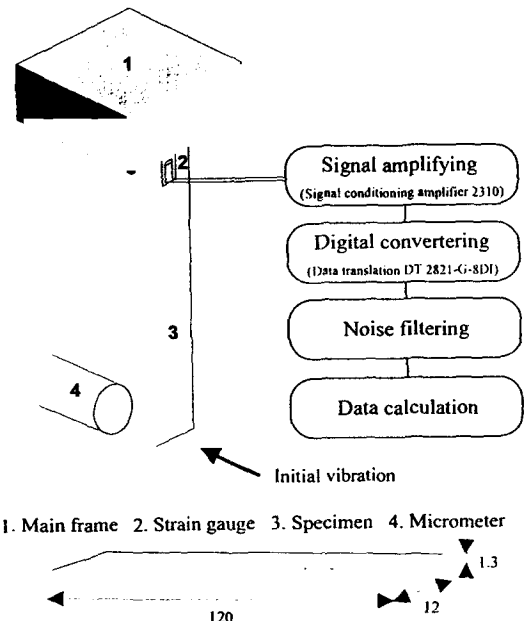


Fig. 1. Schematic illustration showing a damping measuring apparatus and dimension of its specimen (in mm).

3. 실험결과 및 고찰

3.1 등온시효에 따른 진동감쇠능의 변화

Fig. 2는 Cu-65%Mn 합금을 400°C에서 48시간까지 등온시효한 후, 시효시간에 따른 진동감쇠능의 변화를 상온에서 측정한 결과이다. 진동감쇠능은 시효시간 1시간 이후부터 급격히 증가하여 4시간에서 최대값을 나타내었으며, 그 이상으로 시효시간이 증가함에 따라 급격히 감소하였다. Fig. 3은 400°C에서 48시간까지 등온시효한 시편의 정방정성(격자상수비, c/a)을 측정하여 시효시간의 함수로 나타낸 것이다. 시효시간 1시간 이후부터 정방정성이 급격히 낮아지며, 12시간에서 최소값을 나타낸 후 점차 증가하는 경향을 보인다. Cu-Mn 합금에서 시효에 따른 정방정성의 저하는 fct 마르텐사이트의 함량의 증가와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다¹¹⁾. Cu-Mn 합금의 진동감쇠기구는 fct 마르텐사이트의 하부구조를 이루고 있는 쌍정의 계면이 외부능력에 의해 이동함에 의해서 발생하는 내부마찰이므로¹²⁾, 정방정성이 낮아질수록 진동감쇠능이 증가하는 경향을 나타내게 된다. Fig. 2와 3으로부터 알 수 있는 바와 같이, 본 연구에서 사용한 Cu-65%Mn 합금의 경우 정방정성이 시효시간 1시간 이후부터 12시

간까지 지속적으로 감소함에도 불구하고 진동감쇠능은 4시간에서 최대값을 나타낸 후 급격히 감소하였다. 이러한 진동감쇠 경향을 분석하기 위하여 투과전자현미경(TEM)과 주사전자현미경(SEM)으로 시효시간에 따른 하부조직의 변화를 관찰하였다.

Fig. 4는 400°C에서 각각 2시간과 4시간 동안 시효한 Cu-65%Mn 합금의 TEM 조직과 제한시야회절도형(SADP)을 나타낸 것이다. 2시간 동안 시효한 시편에서 마르텐사이트의 내부에서 쌍정을 관찰할 수 있으며(Fig. 4-(a)), 4시간으로 시효시간이 증가함에 따라 쌍정의 밀도가 증가된 것을 확인할 수 있다. Fig. 5는 400°C에서 8시간 및 36시간 동안 시효한 시편의 하부조직을 SEM으로 관찰한 결과이다. 침상의 α-Mn이 기지와 일정한 방위를 가지고 석출되어 있으며, 시효시간이 길어질수록 석출물의 밀도와 양이 점차 증가하고 있다. Buttler 등¹³⁾은 α-Mn 석출물이 cubic 형태를 가지며, 기지와 다음과 같은 Kurdjumov-Sachs 방위관계를 이룬다고 보고하였다.

$$(111)_M \parallel (101)_{\alpha-Mn} \quad [1\bar{1}0]_M \parallel [11\bar{1}]_{\alpha-Mn}$$

Fig. 4와 5의 미세조직을 Fig. 2의 진동감쇠능 측정결과와 연관지어볼 때, 시효시간 1시간 이후 4시간까지의 진동감쇠능 증가는 fct 마르텐사이트 함

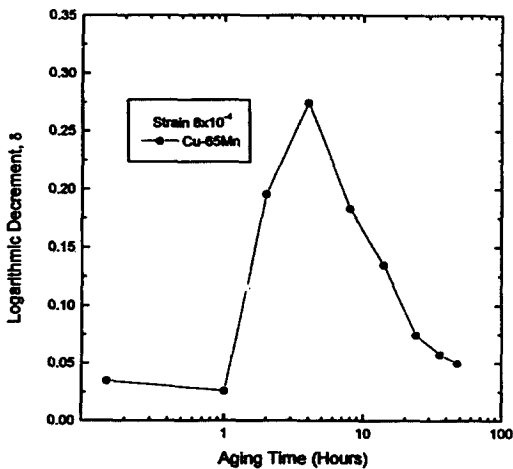


Fig. 2. Variation in damping capacity with isothermal aging time at 400°C in Cu-65%Mn alloy.

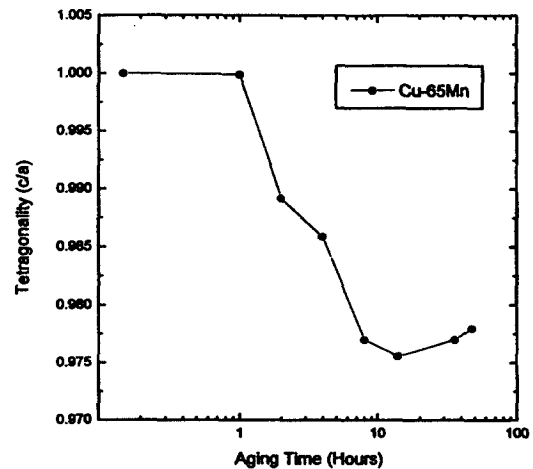


Fig. 3. Variation in tetragonality with isothermal aging time at 400°C in Cu-65%Mn alloy.

하여 진동응력에 의한 쌍정계면의 이동이 방해를 받기 때문이라 생각된다.

3.2 진동감쇠능 퇴화 및 회복

Fig. 6은 400°C에서 4시간 동안 시효하여 최대의 진동감쇠능을 나타내는 Cu-65%Mn 합금을 100°C에서 30일까지 유지하면서, 시효시간에 따른 진동감쇠능의 변화를 상온에서 측정한 결과이다. Fig. 6으로부터, 시효시간이 증가함에 따라 지속적으로 진동감쇠능이 저하하고 있음을 관찰할 수 있다. Laddha 등⁹⁾은 Cu-Mn 합금을 상온에서 유지할 경우 진동감쇠능이 저하되는 원인을, 탄소나 질소같은 침입형 불순물 원자가 마르텐사이트 내부로 확산하여 진동감쇠원인 쌍정경계를 고착하기 때문이라고 보고하였다. 본 연구에서는 상온보다 높은 100°C에서 유지하였기 때문에, 침입형 불순물 원자의 확산 이외에 진동감쇠능을 저하시키는 다른 요인이 있는지 확인하기 위하여, 시효시간에 따른 하부조직의 변화를 관찰하였다. Fig. 7은 400°C에서 4시간 동안 등온시효한 후 100°C에서 30일간 유지한 Cu-65%Mn 합금의 미세조직을 TEM으로 관찰한 결과이다. 쌍정내부에 석출물이 미세하게 분포되어 있으며 (Fig. 7-(a)), SADP와 수렴성 빔 전자회절로 이 석출물이 cubic 형태를 가지는 α -Mn임을 확인하였다 (Fig. 7-(d),(e)). 또한, domain과 domain 사이에 subdomain이 생성되는 것도 관찰할 수 있다 (Fig. 7-(b)). 따라서, 100°C에서 장시간 유지할 경우 진동감쇠능이 저하되는 이유는 이미 보고된 침입형 불순물 원자에 의한 진동감쇠원의 고착 이외에, subdomain과 α -Mn의 석출물이 진동감쇠원의 작동을 방해하기 때문으로 생각된다.

Fig. 8은 400°C에서 4시간 동안 등온시효한 시편과, 그 후 100°C에서 30일간 유지한 시편, 그리고 다시 250°C에서 30분간 재가열한 시편의 진동감쇠능을 서로 비교하여 나타낸 것이다. 이 그림으로부터, 100°C에서 유지하여 저하된 진동감쇠능이 재열처리에 의해 일부 회복됨을 확인할 수 있다. 250°C

가 마르텐사이트의 역변태 온도인 164°C 이상임을 감안하면, 그 이유는 재열처리로 인해 야기되는 반복 변태 (fcc \leftrightarrow fct) 동안에 침입형 불순물 원자가 재배열되고, subdomain이 사라지며, α -Mn 석출물에 의한 고착으로부터 진동감쇠원이 해방되기 때문이라 생각된다.

4. 결 론

- 1) 400°C에서 시효한 Cu-65%Mn 합금의 진동감쇠능은 4시간에서 최대값을 나타내었다. 시효시간에 따른 진동감쇠능의 증가는 fct 마르텐사이트 함량의 증가 및 쌍정밀도의 증가와 연관되어 있으며, 4시간 이후의 진동감쇠능 저하는 α -Mn이 석출되어 진동감쇠원의 이동을 방해하기 때문이다.
- 2) 400°C에서 4시간 동안 등온시효한 시편을 100°C에서 유지한 결과, 유지시간이 증가함에 따라 진동감쇠능이 점차 낮아졌다. 이는 침입형 불순물 원자의 확산, subdomain의 생성 및 α -Mn 석

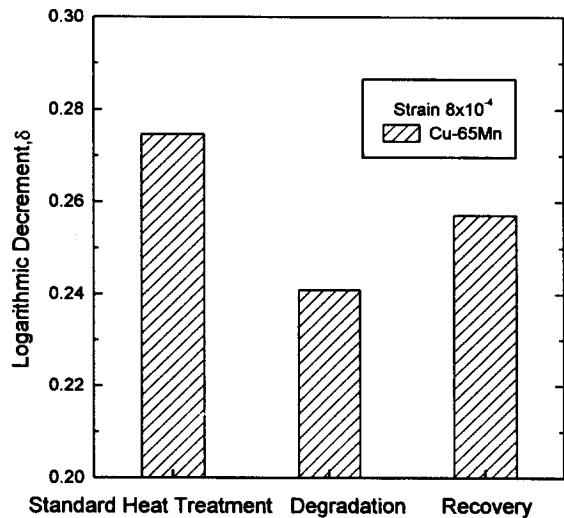


Fig. 8. Comparison of damping capacity in the Cu-65%Mn alloy subjected to (a) aging at 400°C for 4 hours, (b) holding at 100°C for 30 days after (a), and (c) re-heat treatment at 250°C for 30 minutes after (b).

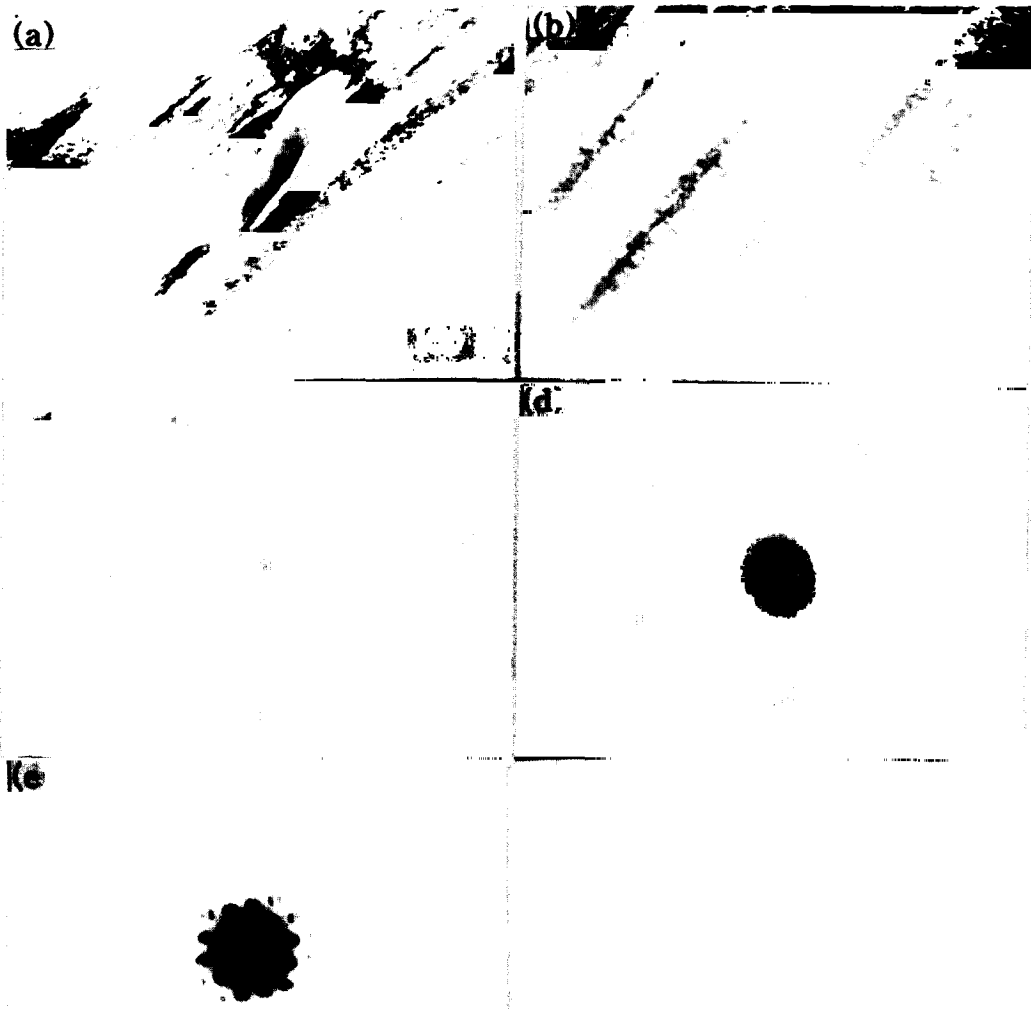


Fig. 7. TEM images, SADP and CBED of Cu-65%Mn alloy after aging at 100°C for 30 days. Beam direction is near $\langle 011 \rangle$. Bright field image.

- (a) twin and α -Mn Precipitate
- (b) twin domain and subdomain
- (c) SADP of matrix
- (d) SADP of Precipitate
- (e) CBED of Precipitate

출몰로 인하여 진동감쇠원의 작동이 방해받기 때문이다.

3) 400°C에서 4시간 동안 시효한 후 100°C에서

30일간 유지한 Cu-65%Mn 합금을 마르텐사이트 역변태 온도 보다 높은 250°C에서 재가열한 결과, 진동감쇠능이 일부 회복되었다. 이는 재열

처리로 인해 야기되는 반복변태(fcc \leftrightarrow fct) 동안에 침입형 불순물 원자가 재배열되고, subdomain이 사라지며, α -Mn 석출물에 의한 고착으로부터 진동감쇠원이 해방되기 때문이다.

후 기

본 연구는 1997년도 한국과학재단의 핵심전문과제(과제번호 : 971-0803-032-2) 연구비에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. I. G. Ritchie and Z-L. Pan : Metall. Trans., 22A (1991) 607
2. D. W. James Mater. : Sci. Eng., 4 (1961) 1
3. K. Sugimoto : J. Iron Steel Inst. Jpn., 14 (1974) 127
4. A. V. Siefert and F. T. Warrell : J. Appl. Phys., 22 (1951) 1257
5. K. Sugimoto : Journal de Physique, 42 (1981) C-971
6. O. Mercier, K. N. Metton and Y. de Preville : Acta Metall., 27 (1979) 1467
7. G. F. Weissmann : Proc. ASTM, 58 (1958) 869
8. A. Cochard : Trans. ASM, 52 (1960) 914
9. S. Laddha, D. C. Van Aken : Metall. Trans., 26A (1995) 957
10. S. Laddha, D. C. Van Aken and H-T. Lin : Metall Trans., 28A (1997) 105
11. A. I. Bichinashbili, Y. Z. Vintaykin, D. F. Litvin and V. A. Udovenko : Phys. Met. Metall., 41 (1976) 112
12. J. M. Vitek and H. Warlimont : Met. Sci. J., January (1976) 7
13. E. P. Butler and P. M. Kelly : Trans. Met. Soc. AIME, 242 (1968) 2099