J. of the Korean Society for Heat Treatment
Vol. 9, No. 1, March, pp.12~18.

《論 文》

Fe-17%Mn 합금의 미세조직과 진동감쇠능에 미치는 용체화처리의 영향

이영국 · 전중환 · 최종술
연세대학교 공과대학 금속공학과

Effect of Solution Treatment on the Microstructure and Damping Capacity of Fe-17%Mn Alloy

Young-Kook Lee, Joong-Hwan Jun and Chong-Sool Choi
Department of Metallurgical Engineering, Yonsei University, Seoul, 120-749

ABSTRACT

Austenite(γ) grain size, ε martensite volume fraction and damping capacity of Fe-17%Mn alloy have been investigated as a function of solution treatment temperature of 600℃ to 1100℃. With increasing the solution temperature, γ grain size, ε martensite content and damping capacity are increased, while the hardness is decreased. When γ grains are small, ε plates grow in only one direction in each γ grain. However, if the γ grains are large in accordance with high solution treating temperature, several ε variants with different orientations are formed and intersected each other in each γ grain. In spite of small ε martensite content, the damping capacity of the specimen which was annealed at 700℃, followed by subzero treatment at -196℃, is almost equal to that of the specimen annealed at 1000℃ and subsequently quenched to room temperature. From this result it is suggested that the damping capacity of Fe-17%Mn alloy having fine γ grains is mainly attributed to the movement of γ/ε interface without the operation of other damping sources such as ε/ε boundaries and stacking faults in ε reported previously.

1. 서 론

산업문명이 고도로 발전함에 따라 인류의 생활은 편의와 풍요를 누리게 되었지만, 그것이 남긴 각종 부산물은 공해로서 우리의 자연환경을 위협하고 있다. 이들 공해 중 소음과 진동은 인간에게 심리적 불안감과 난청 등의 질병을 유발시키며, 공업적 측면에서는 정밀기계의 정밀도 저하 및 부품의 조기피로파괴 등의 성능저하를 야기시킨다. 이러한 소음과 진동을 방지하기 위해서 종래에는 진동체에 오일댐퍼나 에어댐

퍼를 설치하여 진동에너지를 흡수시키거나(system damping), 금속과 금속 사이에 점탄성이 큰 고분자 재료를 끼워서 진동에너지를 흡수시키는 방법(structure damping) 등이 강구되어 왔었다. 이러한 구조적 방법에 의해서는 진동과 소음을 제거하는 데 있어서 많은 문제점들이 내포되어 있을 뿐만 아니라, 공업적 이용면에서도 그 한계성을 벗어날 수가 없다. 따라서 최근에 와서는 금속재료 그 자체가 진동에너지를 직접 흡수케 하는 적극적인 방식(material damping)으로 방진대책이 전환되면서 방진합금의 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1-3]

최근 저자들 중의 일부가[4-8] Fe-17%Mn 이원계 합금이 높은 진동감쇠능을 나타내며, 기계적 성질 또한 매우 우수하다는 사실을 처음으로 밝혀내었다. 이 합금은 방진합금의 성능을 표시하는 α값(비감쇠능×인장강도)이 $30\%\times70kg/mm^2=2100\%\cdot kg/mm^2$으로서 지금까지 개발된 어느 합금보다도 우수한 성능을 가진 방진합금이다. 그런데 Fe-17%Mn 합금의 공업적 실용화를 위해서는 반드시 용체화처리과정을 거쳐야 하며, 이때 용체화처리온도는 마르텐사이트 변태전의 초기 오스테나이트 결정립 크기에 직접적인 영향을 주며, 오스테나이트 결정립 크기는 마르텐사이트 변태온도 및 ε 마르텐사이트 상분율 등을 변화시키게 되므로 용체화처리온도는 Fe-17%Mn 합금의 마르텐사이트 변태거동 및 진동감쇠능에 직접적으로 영향을 주는 중요한 인자임에 틀림없다. 하지만 아직도 이에 대한 자세한 연구는 행해져 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Fe-17%Mn 합금에서 용체화처리온도가 오스테나이트 결정립 크기, ε 마르텐사이트의 형상과 분율 및 진동감쇠능에 어떻게 영향을 미치는지에 대해 체계적으로 조사하고, 그 결과에 대해 이론적 고찰을 수행하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 Fe-17.4wt%Mn 합금(불순물로서 탄소가 0.03wt% 함유)은 전해철과 금속 망간을 마그네시아 도가니에 장입한 다음, 아르곤 분위기하에서 고주파 용해로를 사용하여 용해한 후, 약 10kg의 봉상 잉곳트로 제조되었다. 망간의 편석 등을 제거하기 위하여 이 잉곳트를 1100℃에서 24시간 동안 균질화처리를 행한 후, 약 1000℃에서 열간압연하여 2.5㎜ 두께의 판재를 제조하였다. 용체화처리시 오스테나이트 결정립 크기를 변화시키기 위해서는 가공유기 α' 마르텐사이트에서 오스테나이트로의 역변태를 이용하여야 하는데, 먼저 가공유기 α' 마르텐사이트 단상을 얻기 위해 열연판재를 1050℃에서 1시간 유지 후 수냉한 다음, 최종두께 1㎜로 냉간압연을 행하였다(냉간압연율 60%). 이 냉연판재의 길이방향(압연방향)으로 시편을 채취하여 10㎜×120㎜×1㎜ 크기의 판상 진동시편을 기계가공하여 제작하였다.

이들 시편의 용체화처리는 진공열처리로를 사용하여 α' 마르텐사이트가 γ 오스테나이트로 완전히 역변태가 종료되는 온도 이상인 600℃부터 1100℃ 사이의 여러 온도에서 30분간 유지한 후 수냉하였다. 이와 같이 열처리된 시편의 미세조직은 perchloric acid(10ml)와 acetic acid(90ml)의 혼합용액 속에서 전압 20V, 전류 20㎃의 조건으로 전해연마한 후, 증류수(50cc)+potassium pyrosulfite($K_2S_2O_5$, 0.6g)의 부식액으로 부식시켜 광학현미경과 주사전자현미경을 사용하여 관찰하였으며, 영상분석기(image analyzer)를 사용하여 ε 마르텐사이트의 상분율을 측정하였다. 용체화처리온도에 따른 경도의 변화를 조사하기 위하여 Rockwell 경도기를 사용하여 B scale로 시편당 5회 측정한 후 그 평균치를 시편의 경도값으로 취하였다. 시편의 진동감쇠능은 본 연구실에서 제작한 판상 횡진동장치를 사용하여 시편을 자유진동시켰을 때, 시간에 따른 진폭의 변화로부터 대수감쇠율(δ)을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 공석강과 Fe-17%Mn 합금에서 용체화처리온도에 따른 오스테나이트 결정립 크기의 변화를

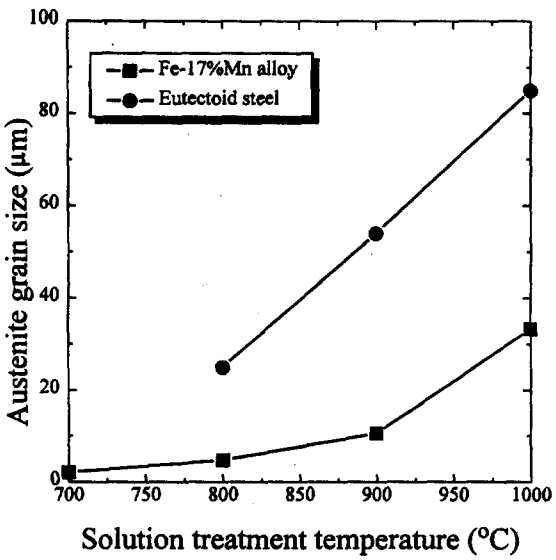

Fig. 1 Relation between solution treatment temperature and austenite grain size (holding time is 30min.)

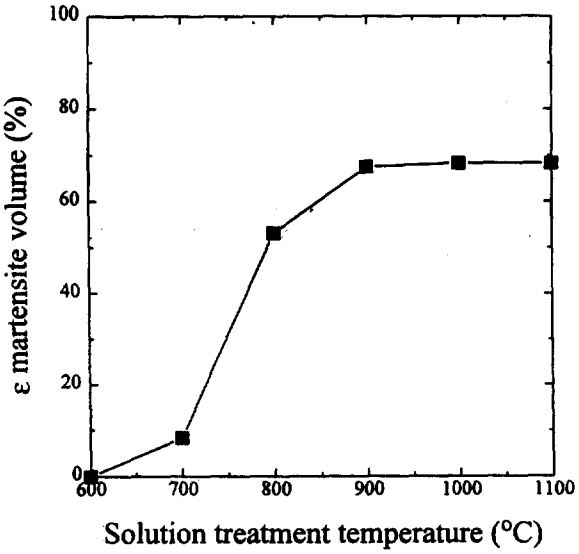

Fig. 2 Variation of ε martensite volume fraction with solution treatment temperature

보여 주고 있다. 두 강종 모두 용체화처리온도가 높을수록 오스테나이트 결정립 크기가 증가하였으며, Fe-17%Mn 합금의 경우 700℃에서는 약 2㎛ 정도의 매우 미세한 결정립 크기를 보이고, 용체화처리온도가 증가함에 따라 결정립은 점점 조대해져 1000℃의 경우에는 약 33㎛로 되었다. 따라서 이 합금의 오스테나이트 결정립 크기는 용체화처리온도를 변화시킴으로써 용이하게 조절이 가능함을 알 수 있다. 한편, 공석강에 비해 Fe-17%Mn 합금의 결정립 성장속도가 훨씬 느림을 알 수 있는데, 이것은 기지에 다량으로 고용되어 있는 망간이 결정립계로 편석하여 결정립 성장의 자유에너지가 되는 입계에너지를 감소시키기 때문이라 생각된다.

Fig. 2는 Fe-17%Mn 합금에서 용체화처리온도와 비열적으로 생성된 ε 마르텐사이트량과의 관계를 나타낸 것이다. 용체화처리온도가 높은 경우에는 ε 마르텐사이트의 양이 약 65% 정도였으나, 용체화처리온도가 낮아짐에 따라 급격히 감소하여 600℃에서 열처리한 시편은 오스테나이트 단상조직임을 광학현미경 관찰과 X-선 회절시험을 통해 확인할 수 있었다. 이처럼 낮은 용체화처리온도에서 오스테나이트 단상이 나타나는 이유는, 이 경우 오스테나이트 결정립이 매우 미세하여(약 1㎛) ε 마르텐사이트 변태개시온도가 상온 이하로 낮아졌기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 현상은 Fe-Cr-Ni 합금[9]과 Fe-Ni-C 합금[10]에서 오스테나이트 결정립 크기와 마르텐사이트 변태거동의 상호관련성에 관한 연구에서도 동일하게 나타났다. 이처럼 오스테나이트 결정립 크기가 미세해지면 마르텐사이트 변태가 억제되는 이유는 결정립계 주위의 원자들은 이웃한 원자와의 결합이 약하기 때문에 원자들의 협동적 전단변형으로 일어나는 마르텐사이트의 성장이 결정립계에 의해 저지되기 때문인 것으로 알려지고 있다.[11]

Photo 1은 용체화처리온도에 따른 ε 마르텐사이트의 형상을 보여 주고 있다. 700℃에서 열처리하여 오스테나이트 결정립 크기가 매우 작은 경우에는 1개의 오스테나이트 결정립내에 ε 마르텐사이트 플레이트들이 모두 한 방향으로만 성장해 있기 때문에 마르텐

사이트 플레이트들간의 상호 교차는 일어나지 않음을 알 수 있다. 반면에 1000℃에서 열처리하여 오스테나이트 결정립이 큰 경우에는 1개의 오스테나이트 결정립내에 ε 마르텐사이트 플레이트 성장방향이 여러 방향이므로 마르텐사이트 플레이트들이 서로 교차하고 있음을 관찰할 수 있다. 이와 같이 오스테나이트 결정립이 큰 경우에 ε 마르텐사이트 플레이트의 교차가 일어나는 이유는, 결정립이 클수록 M_s 점이 높아져서 마르텐사이트 변태에 이용될 화학적 자유에너지가 크기 때문에 여러 개의 해빗면이 작동할 수 있기 때문이라 생각된다. 한편, 오스테나이트 결정립이 작게 되면, M_s 점이 낮아져서 마르텐사이트 변태에 이용될 화학적 자유에너지는 작게 되어 제일 유리한 해빗면만 우선적으로 작동하기 때문에 한 오스테나이트 결정립내에 한 방향의 마르텐사이트 결정만이 형성된다고 생각된다.

Fig. 3은 용체화처리온도에 따른 경도의 변화를 나타내고 있다. 용체화처리온도가 높을수록 경도는 낮아지고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 용체화처리온도가 높을수록 기지(오스테나이트)보다 단단한 ε 마르텐사이트 상의 분율이 증가하므로 (Fig. 2 참조) 경도가 증가하리라는 예상과는 반대되는 것으로, 이는 오스테나이트에 비해 경도가 약간 높은 ε 마르텐사이트 상의 분율이 증가한 효과보다는 오스테나이트 결정립 조대화에 의한 연화효과가 보다 크게 작용했기 때문인 것으로 생각된다.

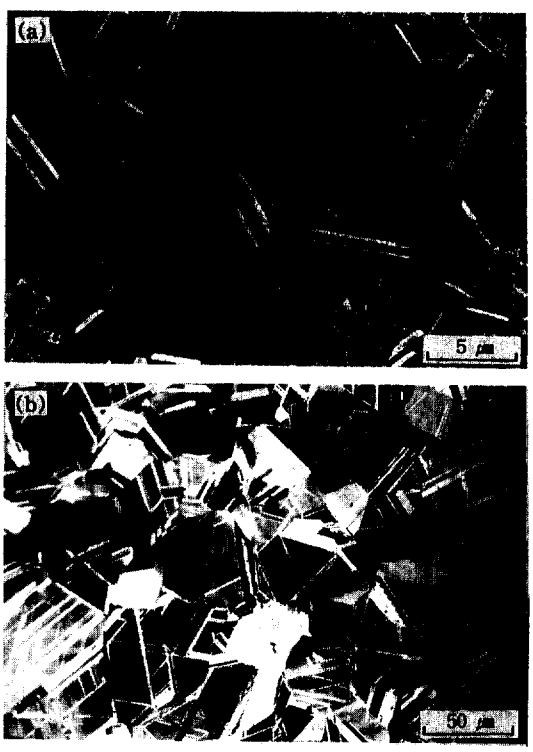

Photo 1 Variation of ε martensite morpholoy with solution treatment temperature in Fe-17%Mn alloy. Annealed at (a)700℃ and (b)1000℃ for 30min. after 60% cold rolling.

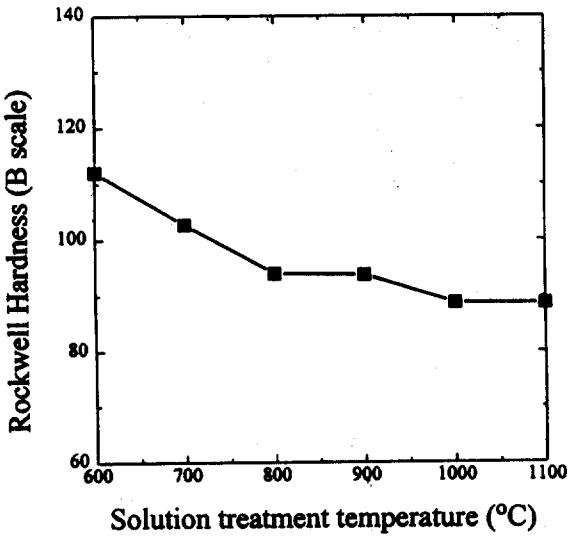

Fig. 3 Relation between Rockwell hardness and solution treatment temperature

Fig. 4는 용체화처리온도에 따른 진동감쇠능의 변화를 보여 주고 있는데, 용체화 처리온도가 높을수록 진동감쇠능은 증가하며 약 900℃ 이상에서는 거의 일정한 감쇠능을 나타낸다. 이러한 경향은 앞의 Fig. 2에서 용체화처리온도와 ε 마르텐사이트 상분율과의 관계와 매우 유사한 것으로 보아, 진동감쇠능은 ε 마

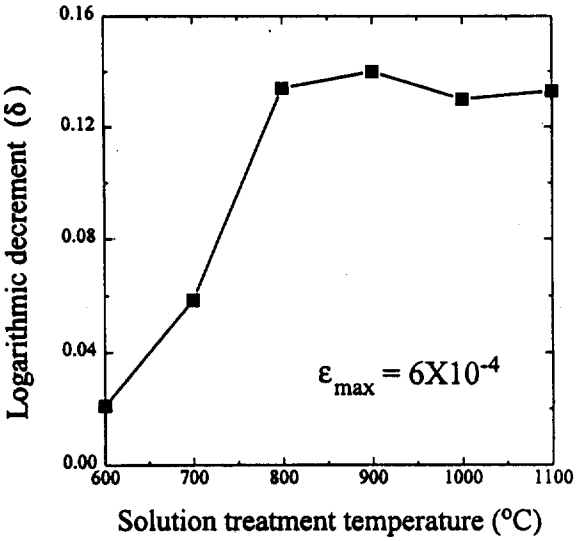

Fig. 4 Variation of the damping capacity with solution treatment temperature. The damping capacity was measured at 6×10^{-4} maximum strain using cantilever apparatus

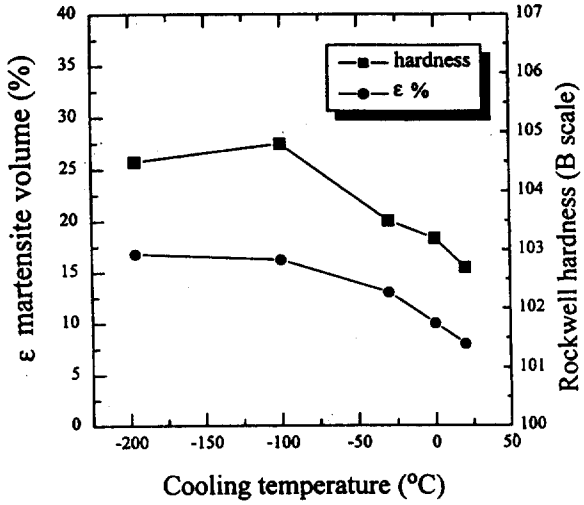

Fig. 5 Variation of ε martensite volume fraction and Rockwell hardness with the cooling temperature after solution treatment at 700℃ for 30min.

르텐사이트 상분율에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 4의 결과는 오스테나이트 결정립 크기가 서로 다른 상태에서의 진동감쇠능이므로 동일한 결정립 크기에서 ε 마르텐사이트 상분율의 영향을 조사할 필요가 있다. 이를 위해 700℃에서 용체화처리한 시편을 상온 이하의 여러 온도에서 심냉처리하여 ε 마르텐사이트 상분율을 증가시켰다.

Fig. 5는 심냉처리온도에 따른 ε 마르텐사이트 상분율과 경도의 변화를 보여 주고 있는데, 상온에서 ε 마르텐사이트 상분율이 약 8vol.%였던 것이 -196℃에 심냉처리한 결과, 약 17vol.%로 증가하였음을 알 수 있다. 한편, 경도는 심냉처리온도가 낮을수록 약간 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 동일한 오스테나이트 결정립 크기에서 ε 마르텐사이트 상분율의 증가에 따라 경도가 증가한다는 것을 의미한다.

Fig. 6은 700℃에서 용체화처리한 후, 상온 이하의 여러 온도에 심냉처리하여 ε 마르텐사이트 상분율

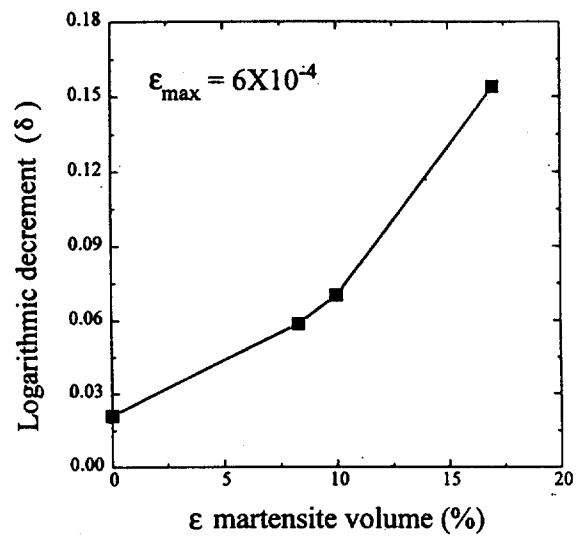

Fig. 6 Relation between the damping capacity and ε martensite volume fraction in Fe-17%Mn alloy which was cooled to various temperatures after solution treatment at 700℃ for 30min.

을 다르게 하여 진동감쇠능을 측정한 결과이다. 앞의 Fig. 4에서와 마찬가지로 진동감쇠능은 동일한 오스테나이트 결정립 크기에서도 ε 마르텐사이트 상분율의 증가에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 주목하여야 할 점은 액체질소에 심냉처리한 경우 ε 마르텐사이트 상분율이 약 17vol.% 정도로 적음에도 불구하고 진동감쇠능이 대수감쇠율로 약 0.15 정도의 매우 높은 값을 나타낸다는 것인데, 이 값은 Fig. 4에서 900℃ 이상에서 용체화처리하여 ε 마르텐사이트 상분율이 약 65vol.% 정도일 때의 진동감쇠능에 해당하는 것이다. 이와 같이 ε 마르텐사이트 상분율이 적음에도 불구하고 높은 진동감쇠능을 나타내는 이유를 밝히기 위해 1000℃와 700℃에서 각각 용체화처리한 시편의 동일한 면적내에(지름이 약 33㎛인 결정립의 단면적, 약 855㎛²) 존재하는 ε 마르텐사이트 플레이트의 총길이를 측정하였다. 그 이유는 ε 마르텐사이트 플레이트의 총길이가 γ/ε 계면적에 직접적으로 비례하기 때문이다. 그 결과, 1000℃의 경우에는 ε 마르텐사이트 플레이트의 총길이가 약 180㎛, 700℃의 경우에는 약 300㎛이었다.

이 결과를 이용하여 1000℃에서 용체화처리한 경우의 ε 플레이트의 폭(W_1)과 700℃에서 용체화처리한 경우의 ε 플레이트의 폭(W_2)의 비(W_2/W_1)를 계산해 보면, $W_2/W_1 = 17/300 \div 65/180 \fallingdotseq 1/6$이다. 즉 700℃에서 용체화처리한 경우 ε 량이 17vol.%임에도 불구하고 1000℃에서 용체화처리한 경우의 65vol.%보다 ε 플레이트의 총길이가 긴 이유는 700℃의 경우가 1000℃에 비해 ε 플레이트의 폭이 1/6 정도로 작기 때문이다. 저자들은 Fe-Mn 합금의 진동감쇠기구는[8] ε/γ 계면, ε 마르텐사이트 형제정 계면 및 ε 내의 적층결함 등의 감쇠원으로 이루어져 있음을 이미 보고한 바 있다. 700℃에서 용체화처리하여 심냉처리한 경우 17vol.%ε을 갖는 시편의 진동감쇠가 주로 ε/γ 계면이동에 의해 일어난다고 가정하면(왜냐하면 ε 량이 비교적 적기 때문에) 1000℃에서 용체화처리하여 65vol.%ε을 갖는 시편의 감쇠능을 정량적으로 분석할 수 있다. 즉 (0.15-0.02)×(180/300)=0.078은 ε/γ 계면이동에 기인된 감쇠능이고, (0.13-0.02)-0.078=0.032는 ε층의 적층결함 경계의 이동 및 ε 마르텐사이트 형제정 경계의 이동에 기인된 감쇠능이다. 환언하면, 1000℃에서 용체화처리한 시편에서 ε 마르텐사이트로 인해 증가된 전체 감쇠능의 약 71%는 ε/γ 계면이동에 기인된 감쇠능이고, 약 29%는 ε내의 적층결함 경계의 이동 및 ε 마르텐사이트 형제정 경계의 이동에 기인된 감쇠능이다.

4. 결론

Fe-17wt%Mn 합금에서 용체화처리온도에 따른 오스테나이트 결정립 크기, ε 마르텐사이트 상분율 및 진동감쇠능을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용체화처리온도가 높을수록 오스테나이트 결정립 크기, ε 마르텐사이트 상분율 및 진동감쇠능이 모두 증가하였으며, 경도는 반대로 감소하는 경향을 나타내었다.
2. 오스테나이트 결정립이 작은 경우에는 오스테나이트 한 결정립내에 한 방향으로만 ε 마르텐사이트 플레이트가 생성되었으나, 오스테나이트 결정립이 조대화됨에 따라 한 오스테나이트 결정립내에 여러 방향의 ε 플레이트가 형성되었다.
3. 700℃에서 용체화처리하고 액체질소에 심냉처리한 시편은 ε 마르텐사이트 상분율이 17vol.% 정도로 적지만, 1000℃에서 용체화처리하여 65vol.%의 ε 상분율을 나타내는 시편과 거의 같은 진동감쇠능(약 0.15)을 나타내었다. 이는 오스테나이트 결정립이 미세할수록 감쇠기구가 ε/γ 계면에 의해 지배됨을 의미한다.
4. Fe-17%Mn 합금을 700℃에서 용체화처리하고 액체질소에 심냉처리하는 경우가 종래 1000℃부근에서 용체화처리하는 경우보다 대수감쇠율 × 경도값이 더 크므로 보다 효과적인 열처리 방법임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. L. Wang and T. Ge: Phys. Stat. Sol. (a), 1988, vol.105, pp.447~453
2. K. Sugimoto: J. Phys., 1981, vol.42, pp.C5-971-C5-982
3. H.C. Lin, S.K. Wu and M.T. Yeh: Metall. Trans. A, 1993, vol.24A, pp.2189~2194
4. 최종술, 김준동, 백승한: 대한민국 특허 제 057437호, 1992
5. C.S. Choi, M.B. Lee, S.H. Baek, Y.C. Son, J.C. Kim, J.H. Jun and Y.S. Ko: U.S.A. Pat. No. 5290372, 1994
6. C.S. Choi, J.D. Kim, T.H. Cho, S.H. Baek and G.H. Ryu: Proc. ICOMAT-92, Monterey, California, July, 1992, pp.509~514
7. 최종술, 김준동, 문인기, 백승한: 열처리공학회지, 1991, vol.4, No.4, pp.15~23
8. 전증환, 이영국, 최종술: 대한금속학회지, 1995, vol.33, No.12, pp.1600~1608
9. K. Tomimura, S. Takaki, S. Tanimoto and Y. Tokunaga: ISIJ International, 1991, vol.31, pp.721~727
10. 牧 正志, 友田 陽, 田村今男: 日本金屬學會志, 1974, vol.38, pp.871~876
11. 西山善次: マルテンサイト 變態(基本編), 丸善, 1971, pp.204