

Fe-Ni-C 마르텐사이트 합금에서 마르텐사이트의 형상이 진동감쇠능과 기계적 성질에 미치는 영향

李榮局, 申翰澈, 崔鍾述

연세대학교 공과대학 금속공학과

Effect of Martensite Morphology on Damping Capacity
and Mechanical Property of Fe-Ni-C Alloys

Young-Kook Lee, Han-Chul Shin, and Chong-Sool Choi

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

ABSTRACT

Effect of martensite morphology on damping capacity and hardness of Fe-Ni-C martensitic alloys were studied. The morphologies of martensite such as lath, butterfly, lenticular and thin plate were prepared by adjusting nickel content and austenite grain size. The hardness increased in order of lath, lenticular, thin plate, butterfly. The damping capacities of the lath and butterfly martensites were higher than those of the other two morphologies, indicating that the dislocation substructure is more effective in the damping capacity than the twin substructure. Especially, the butterfly martensite showed the highest damping capacity among these morphologies because of presence of not tangled but free dislocations in there.

1. 서 론

최근 개발된 Fe-Mn 방진합금^{1,2)}은 용체화처리 후 냉각할 때 γ 오스테나이트(fcc)로부터 ϵ 마르텐사이트(hcp) 변태가 일어나, 상온에서 오스테나이트와 ϵ 마르텐사이트의 혼합조직을 갖는다. γ 상과 ϵ 상으로 이루어진 Fe-Mn 합금이 높은 진동감쇠능을 나타내는 이유는 γ/ϵ 상계면, γ 상과 ϵ 상내에 존재하는 적층결함경계 등이 진동응력에 의해 쉽게 이동하여 진동에너지를 흡수하기 때문이라는 사실이 저자들의 일부에 의해 밝혀졌다^{3,4)}. 이러한 현상은 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 마르텐사이트 변태를 하는 Co-Ni 합금⁵⁾이나 Fe-Ru 합금⁶⁾에서도 유사하게 나타난다는 것을 또한 본 연구자들

의 일부에 의해 확인된 바 있다.

이들 Fe-Mn, Co-Ni, Fe-Ru 합금들의 공통점은 fcc \rightarrow hcp 마르텐사이트 변태를 한다는 점 이외에, 생성된 ϵ 마르텐사이트가 얇은 판상(thin plate) 형태를 갖는다는 점이다. fcc \rightarrow hcp 마르텐사이트 변태에 대해서는 열역학적으로나 미세조직학적으로 많은 연구가 행해졌으며⁷⁻⁹⁾, 그 결과를 진동감쇠능과 연관 지어 보고한 연구들이 많다^{3,4,10,11)}. 그러나 fcc \rightarrow bcc(또는 bct) 마르텐사이트 변태에서 마르텐사이트의 형상이 진동감쇠능에 미치는 영향에 관한 연구는 아직 보고된 바 없다.

따라서, 본 연구에서는 철계합금에서 bcc(또는 bct) 마르텐사이트의 형상과 진동감쇠능과의 관계를

알아보고자, Ni 함량과 열처리 온도를 조절함으로써 마르텐사이트의 형상이 lath, butterfly, lenticular, thin plate로 용이하게 바뀔 수 있는 Fe-Ni-C 합금¹²⁾을 선택하여 마르텐사이트 형상이 진동감쇠능과 경도에 미치는 영향을 조사하고자 하였다.

2. 실험방법

Umemoto 등¹²⁾이 Fe-Ni-C 합금에서 탄소함량과 Ms온도에 따른 마르텐사이트 형상을 조사하여 보고한 Fig. 1을 바탕으로 하여 본 연구에서는 lath 마르텐사이트와 butterfly 마르텐사이트가 나타날 것으로 예상되는 Fe-7%Ni-0.4% C 합금(Alloy1)과 Fe-22%Ni-0.4% C 합금(Alloy2), 그리고 용체화처리 온도를 조절함으로써 lenticular 마르텐사이트와 thin plate 마르텐사이트가 나타날 것으로 예상되는 Fe-29%Ni-0.4% C 합금(Alloy3)을 각각 마련하였다.

이들 합금은 고주파 진공유도로를 이용하여 약 10⁻² torr에서 용해하고 금형에 주조하여, 약 14kg의 잉곳트를 제조하였다. 제조된 잉곳트를 탈탄을 방지하면서 Ni의 편석을 제거하기 위해 보호성 분위기 중에서 1100℃에서 24시간 균질화처리를 행하였다.

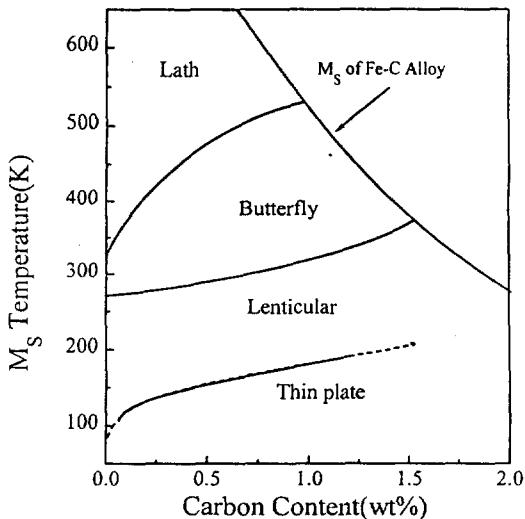


Fig. 1 The morphology of Fe-Ni-C martensite as a function of the formation temperature and the carbon content.¹²⁾

Table 1은 습식분석한 각 합금의 화학조성을 보여주고 있다. 균질화처리 후에 잉곳트를 절단하고 약 1000℃에서 열간압연하여 직경 약 18mm의 환봉을 제조하였다. 이로부터 표점부길이 79mm, 표점부지름 7mm, 전체길이 186mm인 봉상 진동감쇠능 측정시편을 비롯하여 미세조직관찰시편, 경도측정시편 등을 제작하였다.

Table 1 Chemical composition and martensite morphologies of Fe-Ni-C alloys used.

Alloy	Chemical Composition (wt%)					Martensite Morphology
	Ni	C	Mn	Si	Fe	
Alloy1	7.2	0.39	0.012	0.030	bal.	Lath
Alloy2	21.8	0.36	0.011	0.029	bal.	Butterfly
Alloy3	28.6	0.43	0.012	0.031	bal.	Lenticular or Thin plate

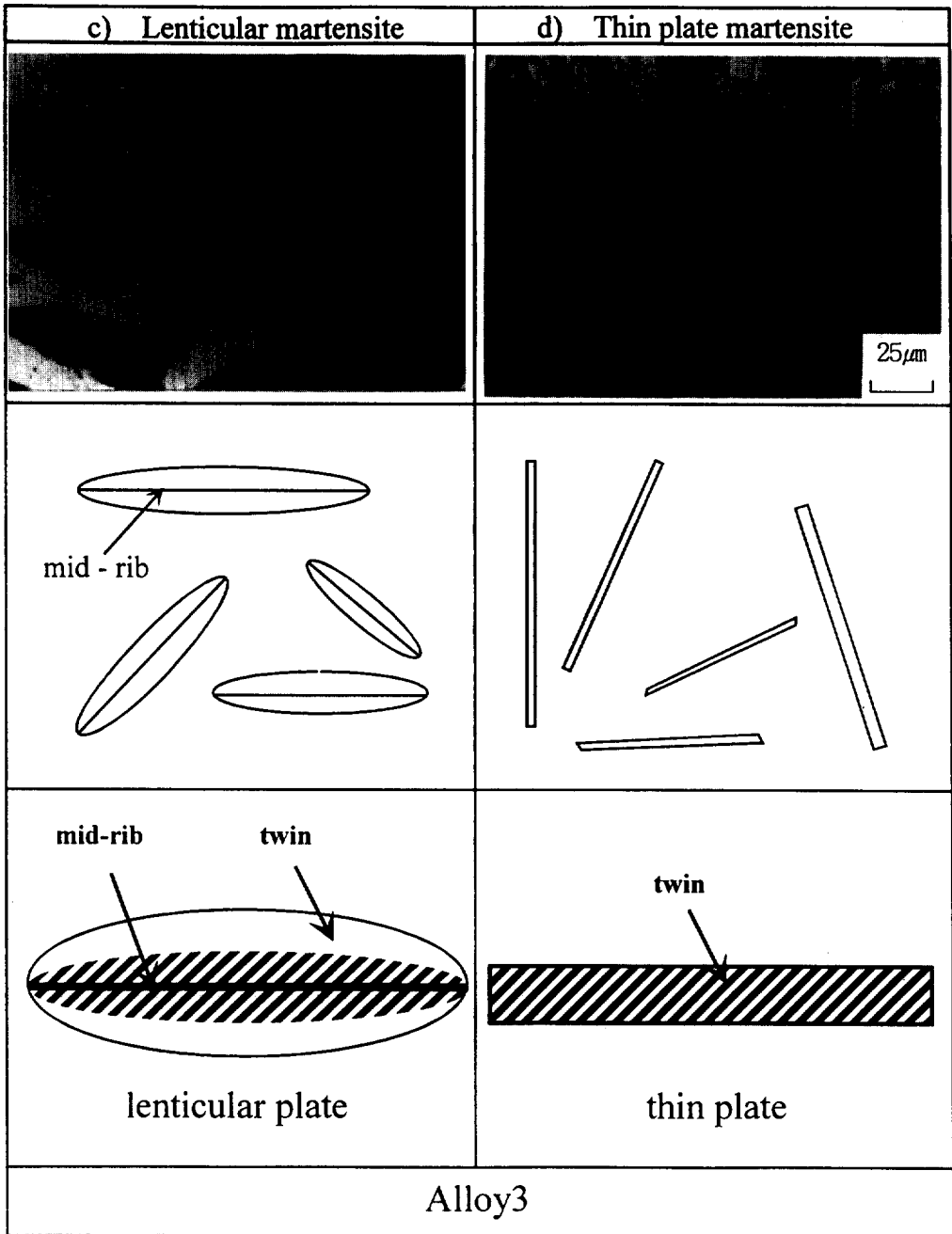
오스테나이트 결정립크기가 마르텐사이트 형상과 진동감쇠능에 미치는 영향을 조사하기 위해 용체화처리 온도 600~1100℃ 사이의 각 온도에서 30분간 가열한 후 수냉하였다. 오스테나이트 결정립크기는 선교차법으로 측정하였다. 그리고 각 마르텐사이트 형상별로 마르텐사이트 체적분율에 따른 진동감쇠능을 조사하기 위해 용체화처리된 시편을 상온이하의 여러 온도에서 서브제로 처리를 행하였다.

광학현미경 조직관찰은 시편을 acetic acid(90ml)와 perchloric acid(10ml)의 혼합용액에서 전압 20V, 전류 0.8A의 조건으로 전해연마한 후, 10% nital용액으로 부식시켜 관찰하였다. 한편, 마르텐사이트의 체적분율은 영상분석기(image analyzer)를 사용하여 측정하였으며, 오스테나이트상과 여러 마르텐사이트 형상의 경도를 비교하기 위해 미소경도계(Micro Vickers hardness tester)를 사용하여 50g 하중 하에서 경도를 측정하였다.

각 합금의 진동감쇠능은 본 연구실에서 제작한 Föpple-Pertz형 비틀림 진동시험장치¹³⁾를 사용하였으며, 진동감쇠능 값은 대수감쇠율(logarithmic dec-

	a) Lath martensite	b) Butterfly martensite
optical microstructure		
schematic illustration of optical microstructure	<p>packet boundary</p> <p>block boundary</p> <p>austenite grain boundary</p>	<p>100° - 140°</p> <p>tailless butterfly</p> <p>tailless butterfly</p> <p>tailed butterfly</p>
schematic illustration of TEM substructure	<p>lath</p> <p>dislocation</p>	<p>acicular plate</p> <p>dislocation</p>
TEM substructure		
	Alloy1	Alloy2

Fig. 2 Optical micrographs and schematic illustrations of martensite morphologies and their substructures in Fe-(7~29)%Ni-0.4%C alloys.



rement(δ))로 나타내었다. 마르텐사이트의 하부조직은 acetic acid(80ml)와 perchloric acid(20ml)의 혼합용액에서 전압 20V의 조건으로 시편을 전해 연마하여 박막을 만든 후, 투과전자현미경을 사용하여 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마르텐사이트의 미세조직과 상분율

Alloy1, Alloy2, Alloy3 세 합금에서 목표로 하는 여러가지 마르텐사이트 형상이 나타나는지를 확인하기 위해 Alloy1과 Alloy2는 1000°C에서 30분간 용체화처리한 후 수냉하였으며, Alloy3은 일부는 1100°C에서 30분간 용체화처리하고 수냉한 다음, -80°C에서 서브제로 처리하였고, 또 다른 일부는 온도가 조금 낮은 800°C에서 30분간 용체화처리하고 수냉한 다음, -196°C에 서브제로 처리하였다. Fig. 2는 광학현미경으로 관찰한 각 합금의 마르텐사이트 형상과 TEM으로 관찰한 각 마르텐사이트의 하부조직을 보여주며, 아울러 각 조직을 설명하기 위한 도식적인 그림도 같이 나타내었다. Alloy1은 block과 packet의 경계가 보이는 전형적인 lath 마르텐사이트 형상을 보이고, Alloy2에서는 tailless butterfly 마르텐사이트와 tailed butterfly 마르텐사이트가 함께 나타나고 있다. Alloy3은 용체화처리온도가 높아 Ms 온도가 높은 경우에는 마르텐사이트 플레이트의 중앙에 mid-lib이 존재하고, 마르텐사이트 상이 불록렌즈 모양을 하는 전형적인 lenticular 마르텐사이트가 나타났으며, 용체화처리온도가 낮아 Ms 온도가 낮은 경우에는 마르텐사이트 플레이트가 직선적이고, 두께에 비해 길이가 긴 thin plate 마르텐사이트 형상을 보이고 있다.

한편, TEM으로 관찰한 각 마르텐사이트의 형상별 하부조직^{12~15)}을 살펴보면, Fig. 2에서 보듯이 lath와 butterfly 마르텐사이트는 하부조직이 전위들로, lenticular와 thin plate 마르텐사이트는 하부조직이 변태쌍정들로 이루어져 있음을 알 수 있다. 특히

lath 마르텐사이트는 전위들이 서로 엉켜져 있는 반면에 butterfly 마르텐사이트의 경우에는 전위들이 엉켜있지 않고 직선적으로 평행하게 배열되어 있다.

Fig. 2에서 lath 마르텐사이트를 갖는 Alloy1의 경우에는 광학현미경상으로는 100% lath 마르텐사이트 조직인 것으로 보이지만, Alloy2와 Alloy3의 경우 butterfly, lenticular, thin plate 마르텐사이트 조직에서는 Ni 함량이 많아 Ms 온도가 낮기 때문에 100% 마르텐사이트를 갖지 못하고 상당량의 잔류 오스테나이트가 존재함을 볼 수 있다. 이를 정량적으로 조사하기 위해 각 합금에 대해 X선 회절시험을 행하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 Alloy1은 100% 마르텐사이트 조직이며, Alloy2는 상당량의 잔류 오스테나이트가 존재함을 알 수 있다(Alloy3도

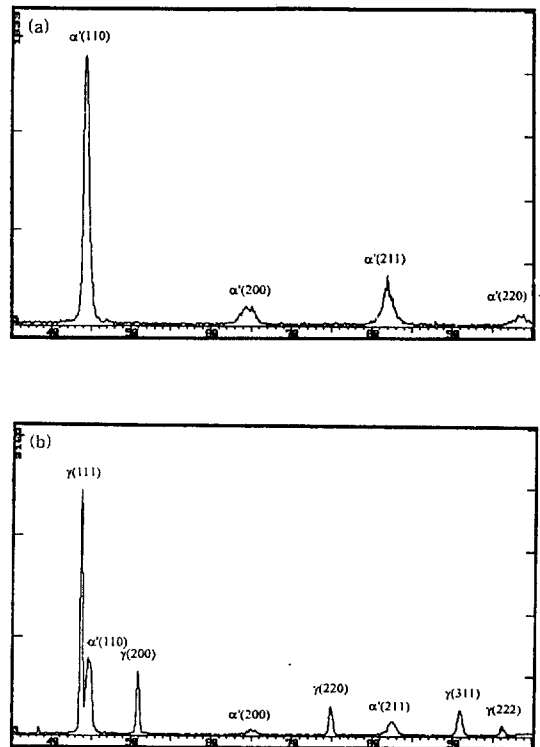


Fig. 3 X-ray diffraction patterns of (a) Alloy1(lath martensite) and (b) Alloy2(butterfly martensite).

동일함). 잔류 오스테나이트가 존재하는 Alloy2와 Alloy3을 상온이하의 여러 온도에 서브제로 처리한 후, 서브제로 처리온도에 따른 마르텐사이트 체적분율을 조사하여 Fig. 4에 나타내었다. Lath 마르텐사이트는 용체화처리 후 상온에서 이미 100% 마르텐사이트였으며, butterfly, lenticular, thin plate 마르텐사이트는 서브제로 처리온도가 낮아짐에 따라 마르텐사이트 체적분율이 증가하였다. 특히 lenticular 마르텐사이트와 thin plate 마르텐사이트는 서브제로 처리온도가 낮아짐에 따라 마르텐사이트 체적분율이 급격히 증가한 후 완만해지는 전형적인 burst형 변화가 일어남을 알 수 있다.

3.2 마르텐사이트 형상과 경도

Fig. 5는 Alloy3(Fe-29%Ni-0.4% C 합금)에서 나타나는 오스테나이트, lenticular 마르텐사이트, thin plate 마르텐사이트와 Alloy2(Fe-22%Ni-0.4% C 합금)에서 나타나는 butterfly 마르텐사이트, Alloy1(Fe-7%Ni-0.4% C 합금)에서 나타나는 lath 마르텐사이트의 경도를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 경도는 오스테나이트, butterfly, thin plate, lenticular, lath 마르텐사이트 순으로 점차 높

게 나타났다. 그러나 합금마다 Ni 함량이 다르기 때문에, 순수한 마르텐사이트 형상과 경도와의 관계를 알아보기 위해서는 Ni 함량이 경도에 미치는 영향에 대해 조사할 필요가 있다.

이전 연구결과¹⁶⁾에 따르면 Fe-Ni 이원계 합금에서는 Ni 함량이 약 10at%까지는 치환형 고용체강화가 일어나지만, 10~30at%에서는 Ni 함량이 마르텐사이트 강도에 거의 영향을 주지 못하는 것으로 알려져 있다. 한편, 탄소가 첨가된 Fe-Ni-C 마르텐사이트에서는 Ni 첨가에 의한 고용강화효과를 무시할 수 있다는 연구결과들이 Chilton¹⁷⁾과 Tanaka 등¹⁸⁾에 의해 보고된 바 있다. 따라서, Fe-Ni-C 합금에서 Ni 함량의 차이에 의한 고용강화의 차이는 매우 작을 것으로 예상되므로 Fig. 5에서 마르텐사이트 형상에 따른 경도의 차이는 순수한 미세조직의 영향에 의한 것이라고 생각할 수 있다.

종래 하부조직이 변태쌍정인 마르텐사이트의 경우에는 이들 쌍정이 슬립변형에 장애물로 작용하기 때문에 높은 경도를 나타내는 것으로 알려져 있다¹⁷⁾. 따라서 Fig. 2에서 보듯이 하부조직이 쌍정인 lenticular 마르텐사이트와 thin plate 마르텐사이트가 전위를 하부조직으로 하는 butterfly 마르텐사이트와

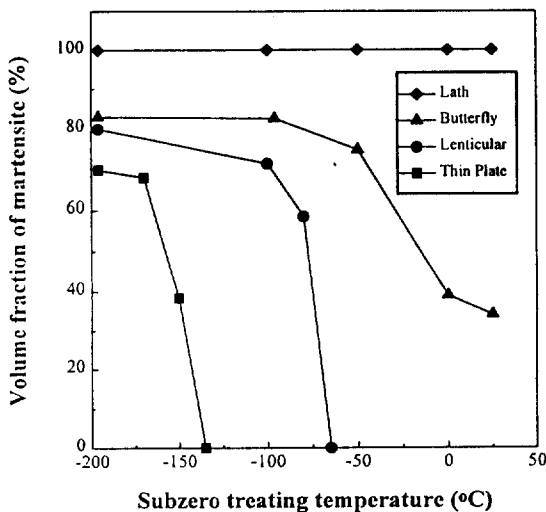


Fig. 4 Variation of martensite volume fraction with subzero treating temperature.

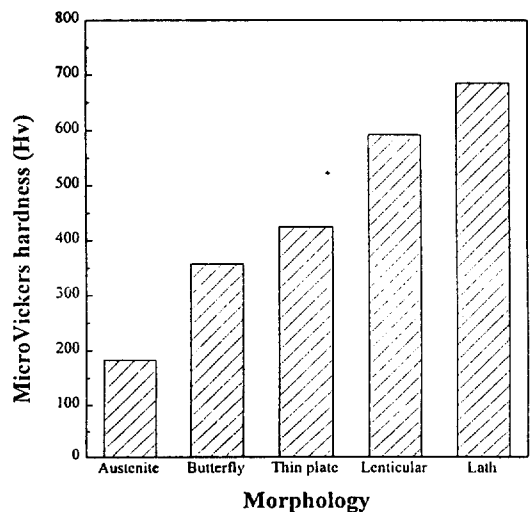


Fig. 5 Micro Vickers hardness of martensite of different morphologies.

lath 마르텐사이트보다 경도가 높을 것으로 예상했으나, 실제로는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 lath 마르텐사이트가 가장 높은 경도를 나타내었다. 이는 lath 내에 매우 많은 전위들이 서로 뒤엉켜 있어¹⁹⁾ 전위의 활주가 어려울 뿐 아니라, lath의 두께가 약 $0.3\mu\text{m}$ ²⁰⁾로 매우 작기 때문에 경도측정시 lath 경계에 의한 강화도 함께 나타났기 때문인 것으로 생각된다.

3.3 마르텐사이트 형상에 따른 진동감쇠능

Fig. 6은 lath, butterfly, thin plate, lenticular 마르텐사이트 합금에서 마르텐사이트 분율에 따른 진동감쇠능의 변화를 보여주고 있다. Butterfly, lenticular, thin plate 마르텐사이트 합금은 모두 오스테나이트 단상일 때의 진동감쇠능이 높고 서브제로 처리온도가 낮아 마르텐사이트의 체적분율이 증가할수록 진동감쇠능이 감소하고 있음을 알 수 있다. 한편, 그림으로부터 100% 마르텐사이트일 때의 진동감쇠능(100% 마르텐사이트에 외삽한 값)을 비교해보면 lath 마르텐사이트의 진동감쇠능이 가장 높고, thin plate 마르텐사이트의 진동감쇠능이 가장 낮음을 알 수 있다. 그러나, 그림에 표시되어 있는 것처럼 각 합금의 오스테나이트 결정립크기가 서로 다르므로

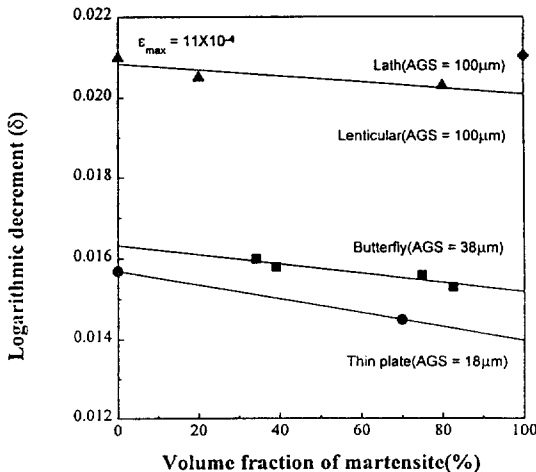


Fig. 6 Relation between damping capacity and volume fraction of martensite in Fe-Ni-C alloys.

순수하게 마르텐사이트 형상에 따른 진동감쇠능을 알아보기 위해서는 동일한 오스테나이트 결정립크기에서의 진동감쇠능을 조사할 필요가 있다. 그러나 thin plate 마르텐사이트의 경우 오스테나이트 결정립크기를 조대화시키면 Ms 온도가 높아져 thin plate 마르텐사이트가 나타나지 않게 되는 문제점이 있다. 따라서 용체화처리 후에 상온에서 오스테나이트 단상을 나타내는 Alloy3을 사용하여 오스테나이트 결정립크기를 변화시켜 진동감쇠능에 미친 오스테나이트 결정립크기의 영향에 대해 먼저 조사하였다. Fig. 7은 그 결과로서 오스테나이트 결정립크기에 따른 진동감쇠능을 진폭변형률별로 나타낸 것이다. 결정립크기에 관계없이 모두 진동감쇠능이 진폭변형률에 의존하는 이력형 진동감쇠능을 보이고 있으며, 동일한 진폭변형률에서는 오스테나이트 결정립크기가 조대할수록 진동감쇠능이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 실험결과는 Goto 등²¹⁾이 다결정 Cu 금속에서 내부마찰의 진폭의존성에 미치는 결정립크기의 영향에 대한 연구를 통해 결정립이 미세화됨에 따라 소성변형이 억제되고, 미소소성영역에서도 변형응력이 증가하여 내부마찰의 진폭의존성이 감소한다고 한 보고와

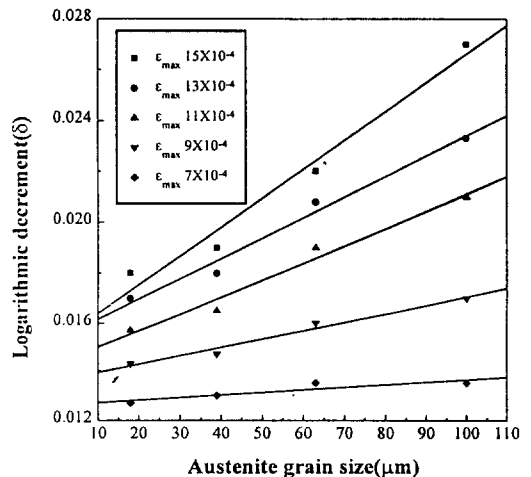


Fig. 7 Relation between damping capacity and austenite grain size at various maximum surface strains in Fe-29%Ni-0.4%C alloy.

잘 일치하고 있다. 한편, 앞서 언급한대로 Fe-Ni-C 삼원계 합금에서는 Ni에 의한 고용강화효과는 무시할 수 있으므로^{17,18)} Alloy3을 사용하여 구한 Fig. 7과 동일한 결과가 Alloy1과 Alloy2에서도 나타날 것으로 예상하여, 먼저 Fig. 7에서 진폭변형률이 11×10^{-4} 일 때 오스테나이트 결정립크기와 진동감쇠능과의 관계식을 구하였다. 그리고 그 관계식을 이용하여 Fig. 6에서 butterfly 마르텐사이트와 thin plate 마르텐사이트의 오스테나이트 결정립크기가 각각 $38 \mu\text{m}$ 와 $18 \mu\text{m}$ 에서 $100 \mu\text{m}$ 로 증가하였을 때의 진동감쇠능을 계산하여 Fig. 6으로부터 동일한 오스테나이트 결정립크기(약 $100 \mu\text{m}$)일 때 마르텐사이트분율에 따른 진동감쇠능을 다시 Fig. 8에 나타내었다. 그 결과 동일한 마르텐사이트 분율에서 butterfly 마르텐사이트의 진동감쇠능이 가장 높게 나타났으며, thin plate 마르텐사이트의 진동감쇠능이 가장 낮게 나타났다.

Fig. 8에서 각각 butterfly, lenticular, thin plate 마르텐사이트가 100%일 때의 진동감쇠능을 외삽에 의해 구한 다음, 100% lath 마르텐사이트의 진동감쇠능과 함께 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9는 모두 마

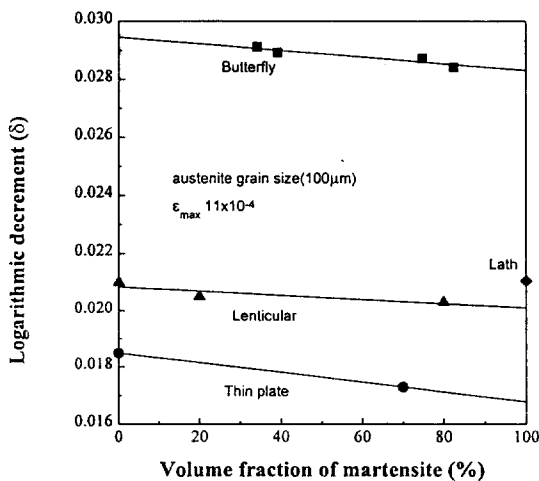


Fig. 8 Relationship between damping capacity and volume fraction of martensite in Fe-Ni-C alloys with an austenite grain size($100 \mu\text{m}$).

르텐사이트 단상이고, 초기 오스테나이트 결정립크기가 약 $100 \mu\text{m}$ 으로 일정할 때, 마르텐사이트 형상에 따른 진동감쇠능을 보여주고 있다. 전위를 하부조직으로 하는 lath 마르텐사이트와 butterfly 마르텐사이트가 변태쌍정을 하부조직으로 하는 lenticular 마르텐사이트와 thin plate 마르텐사이트보다 진동감쇠능이 우수함을 알 수 있다.

이는 상온에서 변태쌍정이 전위에 비해 외부응력에 의해 이동하기 어렵기 때문이다. 즉, 전위의 활주에 필요한 전단응력과 쌍정경계의 이동에 필요한 전단응력을 고려해 보면, 전위의 활주에 필요한 응력은 온도의존성이 매우 크므로 고온에서는 쌍정경계의 이동에 필요한 응력보다 작지만, 온도가 낮아짐에 따라 전위의 이동에 필요한 응력이 급격히 증가하기 때문에, 쌍정경계의 이동에 필요한 응력이 오히려 더 작게 된다.²²⁾ 이는 Fe-Ni계 합금에서 Ms 온도가 상온 이상으로 높은 경우에는 마르텐사이트의 하부조직이 전위로 되어 있고, Ms 온도가 낮은 경우에는 변태쌍정으로 이루어져 있는 것과 잘 일치하고 있다^{12, 23)}. 따라서, Fe-Ni계 합금에서 상온이상의 온도에서는 전위의 활주에 필요한 응력이 쌍정경계의 이동에 필요한 응력보다 작기 때문에, 전위를 하부조직으로 하

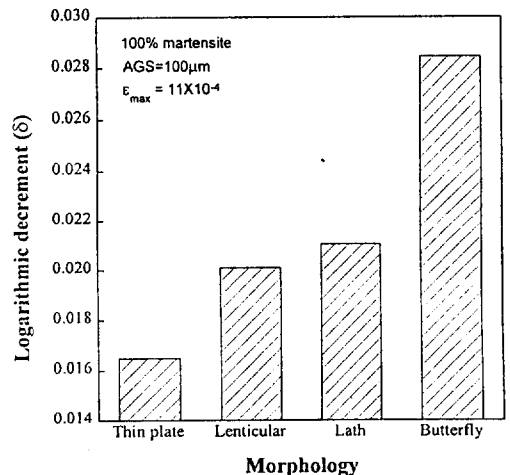


Fig. 9 Comparison of the damping capacities of the different morphological martensites.

는 lath 마르텐사이트나 butterfly 마르텐사이트의 진동감쇠능이 쌍정을 하부조직으로 하는 lenticular 마르텐사이트나 thin plate 마르텐사이트의 진동감쇠능보다 더 높게 나타나는 것으로 생각된다.

또한, Fig. 9에서 주목할 것은 하부조직이 전위일 지라도 butterfly 마르텐사이트가 lath 마르텐사이트보다 진동감쇠능이 더 우수하다. 이러한 원인은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 butterfly 마르텐사이트내의 전위들은 lath 마르텐사이트내의 전위들과는 달리 서로 엉켜있지 않고 평행하게 나열되어 있으므로 전위들간의 상호 작용이 강하지 않기 때문에, 외부진동응력에 의해 비교적 용이하게 활주가 가능하여 진동감쇠능이 높다고 생각된다.

4. 결 론

Fe-(7~29)%Ni-0.4%C 합금을 사용하여 형상이 다른 lath, butterfly, lenticular, thin plate 마르텐사이트를 얻어, 각 형상별로 진동감쇠능과 경도를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 마르텐사이트 형상별로 경도를 측정된 결과, butterfly 마르텐사이트, thin plate 마르텐사이트, lenticular 마르텐사이트, lath 마르텐사이트 순으로 경도가 점차 높았다.
- 2) 초기 오스테나이트 결정립크기가 100 μ m로 같고 이로부터 생성된 100% 마르텐사이트의 경우, 전위를 하부조직으로 하는 lath 마르텐사이트와 butterfly 마르텐사이트의 진동감쇠능이 쌍정을 하부조직으로 하는 thin plate 마르텐사이트와 lenticular 마르텐사이트보다 높았으며, 하부조직이 전위인 경우에도 butterfly 마르텐사이트가 lath 마르텐사이트보다 진동감쇠능이 더 높았다. 이 이유는 lath 마르텐사이트 내부의 전위는 서로 뒤엉켜있는데 반해서 butterfly 마르텐사이트 내부의 전위들은 서로 평행하게 나열되어 있어 외부의 진동응력에 의해 전위가 쉽게 이동할 수 있기 때문이다.

후 기

이 연구는 1995년도 교육부 신소재분야 연구지원 (Ministry of Education Research Fund for Advanced Materials in 1995)에 의해 이루어졌으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 최종술, (주)우진 : 대한민국 특허 제 0574375호, 1992년 12월 6일
2. C.S. Choi and Woojin OSK Corp. : U.S. Pat. No. 5290372, Mar. 1. 1994.
3. C.S. Choi, J.D. Kim, T.H. Cho, S.H. Baik and G.H. Ryu : Proc. of Int. Conf. on Martensitic Transformations, Monterey, (1992) 509
4. Y.K. Lee, J.H. Jun and C.S. Choi : Scr. Metall., 35 (1996) 825
5. Y.K. Lee, B.S. Lim, B.I. Cho and C.S. Choi : Scr. Mater., in press
6. 신한철 : 연세대학교 금속공학과 석사학위논문, (1995)
7. K. Ishida : Scr. Metall., 11 (1977) 237
8. J.F. Breedis and C. Kaufman : Metall. Trans., 2 (1971) 2359
9. J.H. Yang and C.M. Wayman : Materials Characterization, 28 (1992) 23
10. 전중환, 이영국, 최종술 : 대한금속학회지, 34 (1996) 1399
11. 이영국, 전중환, 최종술 : 열처리공학회지, 9 (1996) 12
12. M. Umemoto, E. Yoshitake and I. Tamura : J. of Mater. Sci., 18 (1983) 2893
13. 牧 正志, 田村今男 : 鐵と鋼, 7 (1981) 852
14. Q.Z. Chen, X.F. Wu and K. Tsun : Proc. of Int. Conf. on Martensitic Transformations, Monterey, (1992) 209

15. I. Tamura : Proc. of 1st JIM Int. Sym. on New Aspect of Martensitic Transformation, Kobe, (1976) 59
16. M.J. Roberts and W.S. Owen : Trans. ASM, 60 (1967) 687
17. J.M. Chilton and P.M. Kelly : Acta Metall., 16 (1968) 637
18. M. Tanaka and C.S. Choi : Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 12 (1972) 16
19. T. Maki and I. Tamura : Trans. ISIJ, 20 (1980) 700
20. K. Wakasa and C.M. Wayman : Proc. of 3rd Int. Conf. on Martensitic Transformations(ICOMAT-79), Boston, (1979) 34
21. 後藤 肇, 西野洋一, 淺野 滋 : 日本金屬學會誌, 55 (1991) 848
22. D.A. Porter and K.E. Eastering : "Phase Transformations in Metals and Alloys", Van Nostrand Reinhold Co., New York, (1981) 410
23. T. Maki : Materials Science Forum, 56-58 (1990) 157