

# Fe-20Mn-12Cr-3Ni-3Si 합금의 감쇠능에 미치는 가공유기 마르텐사이트의 영향

## Effect of Deformation Induced Martensite on the Damping Capacity of Fe-20Mn-12Cr-3Ni-3Si Alloy

김권후\* · 손영민\*\* · 정종민\*\*\*†  
Kwon-Hoo Kim\*, Young-Min Son\*\* and Jong-Min Jung\*\*\*†

(Received 8 September 2020, Revision received 12 October 2020, Accepted 12 October 2020)

**Abstract :** This study was carried out the effect of transformation induced martensite on the damping capacity in Fe-26Mn-12Cr-3Ni-3Si alloy. Two kinds of martensites were formed by cold working, and the specific direction, surface relief and partially intersection were affected on the formation of these martensites. The amount of  $\alpha'$ -martensite was slowly increased with an increasing the degree of cold rolling, but the amount of  $\epsilon$ -martensite was rapidly increased. Volume fraction of  $\epsilon$ -martensite which was formed by cold working was larger than that of  $\alpha'$ -martensite. From this reason, damping capacity was greatly influenced by the volume fraction of  $\epsilon$ -martensite which was formed by cold working. Therefore, it was found that  $\epsilon$ -martensite was mainly effected on damping capacity of cold rolled Fe-26Mn-4Co-2Al-3Si alloy in this study.

**Key Words :** Damping Capacity, Cold Working, Internal Friction,  $\alpha'$ -Martensite,  $\epsilon$ -Martensite

### 1. 서 론

매년 소음 및 진동에 대한 규제가 갈수록 강화되어 가고 있으며, 산업분야에서는 기기 또는 장치 등의 안정성과 장수명화 뿐만 아니라, 노동과 주거 환경의 개선 등을 위해서도 진동과 소음의 저감에 대한 필요성이 높아지고 있다.

현재 산업적으로 많이 이용되고 있는 소음과

진동 방지법은 시스템, 구조 및 재료 감쇠법 등이 있다. 그러나 시스템 및 재료 감쇠법은 제품의 경, 박, 단소화 등이 어려울 뿐만 아니라 가공성과 용접성 등이 낮고, 감쇠효과도 적어 공업적 이용 측면에서는 제한적으로 적용되고 있다. 따라서 최근에는 강도가 높고 가공성이 우수하면서도 내부마찰계수가 큰 재료를 소음과 진동원에 직접 적용함으로써 큰 감쇠효과를 얻을 수 있는 재료 감쇠

\*\*\*† 정종민(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-0590-1436) :  
교수, 한국폴리텍대학 울산캠퍼스 산업설비자동화과  
E-mail : jmjung@kopo.ac.kr, Tel : 052-290-1550  
\*김권후(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4658-0579) :  
부교수, 부경대학교 금속공학과  
\*\*손영민(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3927-4233) :  
연구원, (주)제이케이골드

\*\*\*† Jong-Min Jung(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-0590-1436) :  
Professor, Department of Industrial Facility Automation, Ulsan  
Campus of Korea Polytechnic.  
E-mail : jmjung@kopo.ac.kr, Tel : 052-290-1550  
\*Kwon-Hoo Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4658-0579) :  
Associate Professor, Department of Metallurgical Engineering,  
Pukyong National University.  
\*\*Young-Min Son(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3927-4233) :  
Ressercher, Department of JK GOLD Co. Ltd.

법에 대한 관심이 크게 높아지고 있고, 이에 따라 소음과 진동원에 강도와 감쇠능의 조합이 우수한 재료를 개발하여 적용하려는 많은 연구들이 수행되어 왔다.<sup>1-7)</sup>

내부마찰이 커서 외부에서 가한 진동에너지의 대부분을 열 또는 다른 형태의 에너지로 전환시키는 합금을 제진합금이라 말하며,<sup>2)</sup> 제진합금의 감쇠는 외력에 의해 발생한 금속 내 전위 등과 같은 결함에 의해 일어나기 때문에, 감쇠능은 합금의 열 기계적 이력(Thermo-mechanical history), 즉 미세조직 등에 따라 크게 달라지며,<sup>4)</sup> 강도, 가공성, 제진에 의한 주파수 및 온도 의존성 등이 낮을수록 높아지고, 강도가 높아지면 감쇠능은 낮아지는 특성을 가지고 있다.<sup>1,7)</sup> 따라서 이러한 여러 특성들을 만족하는 우수한 강도와 감쇠능의 조합을 가진 제진합금 개발은 어렵기 때문에 이에 대한 다양한 많은 연구가 수행되어 왔지만,<sup>5,10)</sup> 아직 많이 부족하다.

본 연구는 감쇠능과 강도의 조합이 우수한 제진합금개발에 필요한 자료를 얻기 위해 감쇠능과 강도 등이 우수한 Fe-20Mn-12Cr 합금에서 적층결합생성에 의한 감쇠능을 높이고, 고용강화와의 한 강도 및 내식성 향상 등을 위하여 3%의 Ni와 Si가 첨가된 제진합금을 설계하고, 이 합금에서 압연량을 달리하는 냉간 압연하여 미세조직을 변화시킨 다음 감쇠능에 미치는 미세조직의 영향을 조사하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시료

본 연구에서 사용된 시료는 진공용해로에서 목적성분으로 용해하여 잉곳으로 제작하여, 1,200℃로 가열한 다음 열간 압연하여 필요한 여러 두께의 판재로 만들었다. 다음 1,050℃에서 1시간 유지한 후 수냉하는 용체화처리와 산세과정을 거친 다음, 각 시료가 최종 2 mm 두께의 판재가 되도록 냉간 압연 했다. Table 1은 본 연구에서 사용된 최종 시료의 화학조성을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of specimen (wt.%)

C	N	SI	P	S	Mn	Co	Al	Fe
0.01	0.02	0.06	0.001	0.008	26.3	3.97	2.23	bal.

### 2.2 미세조직의 관찰

각 시료의 미세조직을 광학현미경으로 관찰하였다. 또한 냉간 가공한 시료의 미세조직에 대해서는 주사전자현미경과 투과전자현미경으로도 관찰하였다. 투과전자현미경 관찰용 시료를 80 μm 두께로 만든 다음 제트폴리싱으로 박막으로 만든 후 200 kV 가속전압의 투과전자현미경(JEOL JEM 2010)에서 측정했다.

### 2.3 미세조직의 정량 분석

각 시료가 갖는 상들의 체적분율은 Mo-Kα 특성 X선을 사용하여 2 °/min의 속도로 10~80° 사이의 범위에서 얻은 회절선도로 부터 각상에 해당되는 피크의 상대 적분강도 크기를 사용하여 측정하였다.<sup>9)</sup> 또한 가공에 의해 생성되는 양이 대단히 적어 X-선 회절시험으로 측정하기 곤란한 α'-마르텐사이트의 양은 EBSD (Electron Back Scattered Diffraction)를 사용하여 Phase map 등으로 조사하였다.

### 2.4 감쇠능 측정

감쇠능 측정은 냉간 압연한 시료로부터 2 mm × 120 mm × 10 mm 크기의 시험편으로 방전가공하여 제작한 후, 횡형 내부마찰 측정 장치를 이용하여 진공 하에서 대수감쇠율을 구하는 방법으로 측정하였다. 감쇠율을 구하는 방법은 아래의 식과 같다.<sup>5)</sup>

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_0}{A_n} \quad (1)$$

여기서, n: 파수, A<sub>0</sub>:최초파의 진폭, A<sub>n</sub>:n 번째 파의 진폭을 의미한다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 미세조직 관찰

냉간 가공 전의 Fe-20%Mn-12%Cr-3Ni-3Si 합금의 미세조직을 광학현미경에서 측정한 결과를 Fig. 1에 나타냈다. Fig. 1을 보면, 오스테나이트 조직에 부분적으로 쌍정과 마르텐사이트 조직이 존재하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 냉간 가공에 따른 미세조직변화를 조사하기 위하여, Fig. 1의 미세조직을 갖는 시료를 29% 냉간압연 후, 미세조직을 광학현미경과 주사전자현미경으로 관찰한 결과를 나타냈다. 냉간 가공에 의해 일부 오스테나이트 조직이 마르텐사이트 조직으로 변태되어 오스테나이트 조직에 비교적 많은 양의 마르텐사이트가 발생하여 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 두 미세조직 사진으로부터 마르텐사이트에 의한 발생된 표면기복이 확인되고, 특정한 방향성을 지니고, 부분적으로는

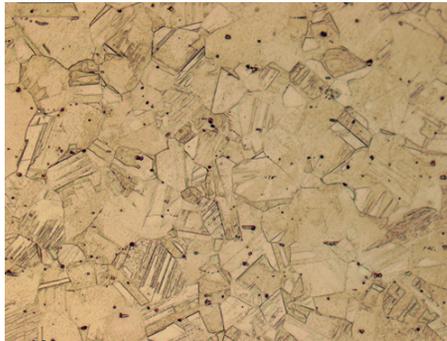


Fig. 1 Microstructure of Fe-20Mn-12Cr-3Ni-3Si alloy before cold-working

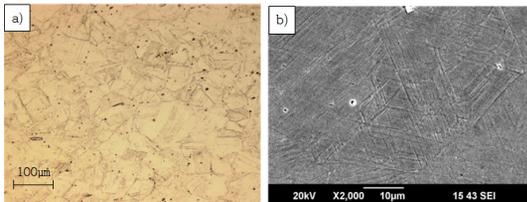


Fig. 2 Optical and SEM micrographs of 29% cold rolled Fe-20Mn-12Cr-3Ni-3Si alloy;  
a) Optical b)SEM

서로 교차하며 생성되어있는 것을 알 수 있다.<sup>6,11)</sup>

Fig. 3은 미세조직 변화에 미치는 냉간 가공도의 영향을 조사하기 위하여 가공량을 달리하여 냉간 압연한 두 시료의 미세조직을 주사전자현미경으로 관찰하여 나타낸 것이다. 13% 냉간 압연한 시료의 미세조직 a)에서보다는 49% 냉간 압연한 시료의 미세조직인 b)에서 더 많은 마르텐사이트가 존재하고 있는 것을 알 수 있고, 이 결과로부터 가공량이 증가할수록 더 많은 양의 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태되고 있다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 냉간 압연에 의해 생성되는 마르텐사이트를 결정학적 분석으로 조사하기 위하여, 용체

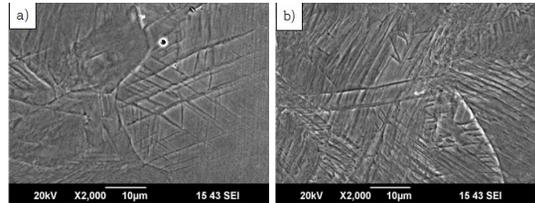


Fig. 3 SEM micrographs showing the effect of cold rolling in Fe-20Mn-12Cr-3Ni-3Si alloy

a) 13% Cold rolling b) 49% Cold rolling

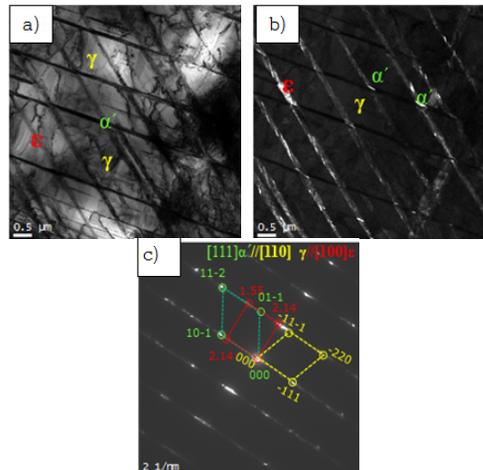


Fig. 4 TEM micrographs showing the martensite obtained in 49% cold rolled Fe-20Mn-12Cr-3Ni-3Si alloy

a) Bright field image, b) Dark field and c) SADP and indexing of SADP

화처리 후 49% 냉간 압연한 미세조직을 투과전자 현미경으로 관찰하여 나타난 결과로서, a)는 미세 조직의 암시야상, b)는 암시야상에서 나타난 상의 제한시야회절 패턴과 이를 분석한 결과이다. 이 결과로부터, BCT 결정구조를 갖는  $\alpha'$ -마르텐사이트와 HCP 결정구조를 갖는  $\epsilon$ -마르텐사이트의 두 종류의 마르텐사이트가 생성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 마르텐사이트는 특정한 방향성을 지니고 생성되거나 또는 부분적으로는 서로 교차하며 생성되어 있는 것을 다시 확인할 수 있다.<sup>12)</sup>

### 3.2 미세조직과 감쇠능에 미치는 냉간 가공의 영향

Fig. 5는 가공에 따른 미세조직의 정량적 변화를 조사하기 위하여, 용체화처리 후 냉간 압연량을 달리하여 냉간 압연한 시료내 존재하는 각 상들의 체적분율을 나타낸 결과이다. 냉간 압연량이 증가함에 따라서 오스테나이트의 양은 서서히 감소하고 있는 것에 반해,  $\alpha'$ -마르텐사이트와  $\epsilon$ -마르텐사이트의 양은 서서히 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 압연량의 증가에 의해 오스테나이트의 양이 감소하고  $\alpha'$  및  $\epsilon$ -마르텐사이트의 양이 증가하는 현상이 일어나는 이유는 냉간 가공에 의해서 오스테나이트의 조직의 일부가 두 종류의  $\alpha'$  및  $\epsilon$  마르텐사이트 조직으로 마르텐사이트 변태가 일어나기 때문이다. 또한  $\epsilon$ -마르텐사이트는 변형 초기에서부터 생성되어 서서히 증가하고 있는데 반하여,  $\alpha'$ -마르텐사이트는 변형 초기에는 생성되지 않지만, 어느 정도 변형이 진행된 다음 생성되기 시작하여 가공량의 증가와 더불어 서서히 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 가공량이 많은 78%의 가공에서도 그 생성량은 6% 이하로, 적은 체적분율을 나타낸다. 또한  $\epsilon$ -마르텐사이트는 비교적 많은 양이 존재하고 있지만,  $\alpha'$ 의 양이 극히 적은 이유는 20%의 Mn과 3%의 Ni 및 3%의 Si가 첨가됨에 따라 오스테나이트의 안정도 높아질 뿐만 아니라 적층결함 등이 많아지는데 기인된다고 판단된다.

Fig. 6은 감쇠능에 미치는 냉간 가공의 영향을 조사하기 위하여, 압연량을 달리하여 냉간 압연

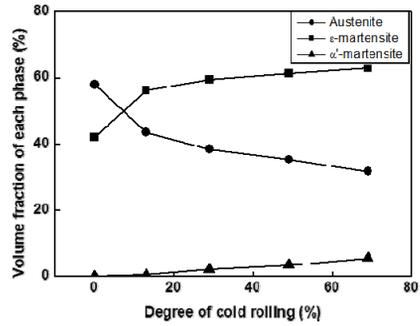


Fig. 5 Effect of cold rolling on the volume fraction of each phase in Fe-20Mn-12Cr-3Ni-3Si alloy

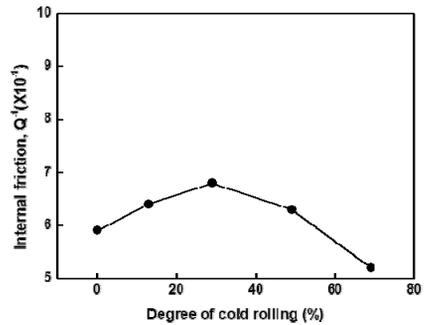


Fig. 6 Effect of cold rolling on the internal friction in Fe-20Mn-12Cr-3Ni-3Si alloy.

한 시료의 내부마찰계수를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 내부마찰계수는 가공량이 증가함에 따라 증가하다가 최댓값이 약 30%의 냉간 압연에서 최댓값을 나타낸 다음 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

### 3.3 감쇠능에 미치는 마르텐사이트의 영향

이상의 실험으로부터 가공에 의해 BCT 결정구조를 갖는  $\alpha'$ -마르텐사이트와 HCP 결정구조를 갖는  $\epsilon$ -마르텐사이트, 즉 두 종류의 마르텐사이트가 생성되고, 가공량에 따라서 두 종류의 마르텐사이트의 체적분율이 달라지고 있는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 변화가 본 연구에서의 감쇠능에도 영향을 미칠 것으로 판단되어, 냉간 가공에 의해 생성된 두 종류의 마르텐사이트가 감쇠능에 미치는 영향을 조사하였다.

Fig. 7은 감쇠능에 미치는 냉간 가공에 의해 생

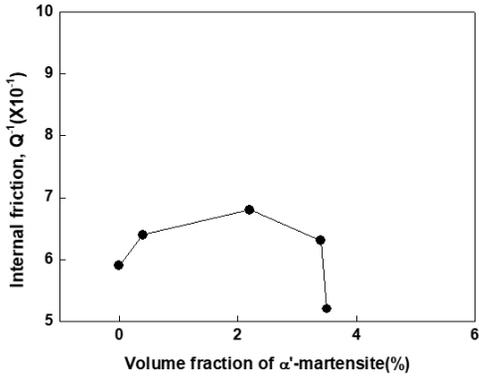


Fig. 7 Effect of  $\alpha'$ -martensite on the internal friction in cold rolled Fe-20Mn-12Cr-3Ni-3Si alloy.

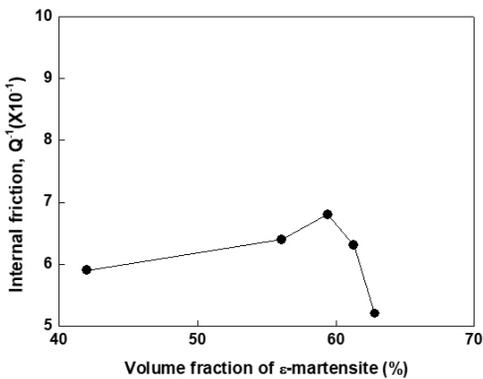


Fig. 8 Effect of  $\epsilon$ -martensite on the internal friction of cold rolled Fe-20Mn-12Cr-3Ni-3Si alloy.

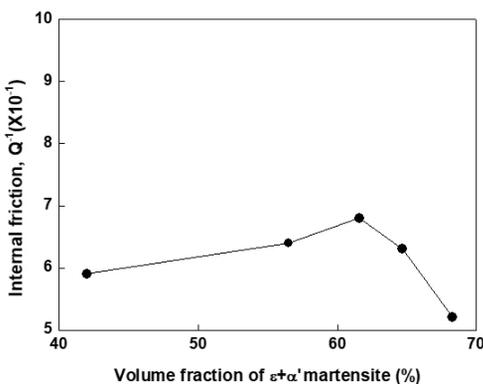


Fig. 9 Effect of total martensite on the internal friction in cold rolled Fe-20Mn-12Cr-3Ni-3Si alloy

성되는  $\alpha'$ -마르텐사이트의 영향을 조사하기 위하여 가공량을 달리하여 냉간 가공한 시료의 내부마찰계수와  $\alpha'$ -마르텐사이트 체적분율과의 관계를 조사하여 나타낸 것이다.  $\alpha'$ -마르텐사이트의 체적분율이 증가함에 따라 내부마찰계수는 증가하다가 최댓값이 약 2.2%의  $\alpha'$ -마르텐사이트의 체적분율에서 최댓값을 나타낸 다음 빠르게 감소하고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 감쇠능에 미치는 냉간 가공에 의해 생성된  $\epsilon$ -마르텐사이트의 영향을 조사하기 위하여, 가공량을 달리하여 냉간 가공한 시료의 내부마찰계수와  $\epsilon$ -마르텐사이트 체적분율과의 상호관계를 나타낸 결과이다.  $\epsilon$ -마르텐사이트의 체적분율이 증가함에 따라 내부마찰계수가 서서히 증가하다가 최댓값이 약 60%의  $\epsilon$ -마르텐사이트의 체적분율에서 최댓값을 나타낸 다음 빠르게 감소하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 이러한 결과는 본 연구에서와 같이 가공에 의해  $\alpha'$  및  $\epsilon$ -마르텐사이트가 생성되는 합금에서 감쇠는 주로 오스테나이트와  $\epsilon$ -마르텐사이트의 계면이동,  $\epsilon$ -마르텐사이트 내부 적층결함 경계의 이동 및  $\epsilon$ -마르텐사이트 플레이트 내부 형제정 계면의 이동 등에 의해서 일어난다.<sup>11)</sup> 따라서 감쇠능이  $\epsilon$ -마르텐사이트에 지배되기 때문에  $\epsilon$ -마르텐사이트의 양이 증가할수록 감쇠능이 증가하는 일반적인 합금에서의 연구결과와는 다른 것을 알 수 있다. 또한 이와 같은 거동을 나타내는 이유는 본 합금에서 감쇠능은  $\epsilon$ -마르텐사이트에 영향을 받아 가공에 의해 생성되는  $\epsilon$ -마르텐사이트의 양이 증가함에 따라 증가하여야 하지만, 가공량이 많아지게 되면 재료 내부에 전위 등과 같은 많은 결함들이 도입되어 이들의 상호작용에 의해 오스테나이트와  $\epsilon$ -마르텐사이트의 계면이동,  $\epsilon$ -마르텐사이트 내부 적층결함 경계의 이동 및  $\epsilon$ -마르텐사이트 플레이트 내부 형제정 계면의 이동 등을 어렵게 하는 장애물들이 생성되어 방해하기 때문이라 판단된다.

Fig. 9는 감쇠능에 미치는 가공에 의해 생성된 두 종류의 마르텐사이트( $\alpha'$ 와  $\epsilon$ -마르텐사이트를 더한 전체 마르텐사이트의 체적분율)의 관계를 조사하여 나타낸 것이다. 전체 마르텐사이트의 체적

분율이 증가함에 따라 내부마찰계수는 빠르게 증가하다 최댓값이 약 62%의 마르텐사이트의 체적 분율에서 최댓값을 나타낸 후 감소하는 것을 알 수 있고, 이러한 거동은 Fig. 8의 내부마찰계수에 미치는  $\epsilon$ -마르텐사이트의 영향을 나타낸 결과와 같은 것을 알 수 있고, 이로부터 감쇠능은  $\epsilon$ -마르텐사이트에 크게 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 이와 같이 가공에 의해 결정구조가 다른 두 종류의 마르텐사이트인  $\alpha'$  및  $\epsilon$ -마르텐사이트가 생성되고 있지만  $\epsilon$ -마르텐사이트에 크게 영향을 받는 이유는  $\alpha'$ -마르텐사이트는 변형초기에는 생성되지도 않을 뿐만 아니라 78% 가공하여도 6%보다 적은 양이 생성되는데 반하여,  $\epsilon$ -마르텐사이트는 변형과 더불어 생성되기 시작하고 또한 78%까지 가공하면 20% 정도로 많이 생성되기 때문에 양이 적은  $\alpha'$ -마르텐사이트보다는 양이 많은  $\epsilon$ -마르텐사이트에 더 영향을 많이 받기 때문이라 판단된다.

#### 4. 결 론

Fe-20Mn-12Cr-3Ni-3Si 합금을 가공량을 달리하는 냉간 압연하여 미세조직을 변화시킨 다음 감쇠능에 미치는 미세조직과의 영향을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 냉간 가공에 의해 두 종류의  $\alpha'$  및  $\epsilon$ -마르텐사이트가 생성되었다. 또한  $\alpha'$  및  $\epsilon$ -마르텐사이트는 특정한 방향성을 지니고, 표면기복을 일으키며 생성되었다.

2) 가공량이 증가함에 따라  $\alpha'$  및  $\epsilon$ -마르텐사이트의 양은 서서히 증가하고, 가공에 의해 생성되는 양은  $\epsilon$ -마르텐사이트가  $\alpha'$ -마르텐사이트보다 많이 생성되었다.

3) 가공량이 증가함에 따라 감쇠능은 서서히 증가하다 최댓값이 약 62%의 마르텐사이트의 체적 분율에서 최댓값을 나타낸 다음 감소하였다.

4) 본 연구에서의 감쇠능은  $\alpha'$ -마르텐사이트보다 약 30배 정도 많은 양이 생성되는  $\epsilon$ -마르텐사이트에 크게 영향을 받았다.

## Acknowledgments

This work was supported by Research Grant of Pukyong National University. (2020 year)

## Author contributions

J. M. Jung; Conceptualization. Y. M. Son; Data curation. K. H. Kim; Formal analysis. Y. M. Son; Investigation. K. H. Kim; Methodology. J. M. Jung; Project administration.

## References

1. D. Birchon, D. E. Bromly and D. Healey, 1968, "Mechanism of Energy Dissipation in High-Damping-Capacity Manganese-Copper Alloys", *Met. Scie. Journal*, Vol. 2, pp. 41-46.
2. N. Chiba, 1985, "Current Status of vibration Damping Laminated steel sheets", *Tetsu-to-Hagane*, Vol. 71, No. 15, pp. 1742-1750.
3. Y. K. Lee, J. H. Jun and C. S. Choi, 1997, "Damping Capacity in Fe-Mn Binary Alloys", *ISIJ Inter*, Vol. 37, pp. 1023-1030. (<http://doi.org/10.2355/isijinternational.37.1023>)
4. K. K. Jee, W. Y. Jang, S. H. Baik and M. C. Shin, 1999, "Damping mechanism and application of Fe-Mn based alloys", *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, Vol. 273-275, pp. 538-542. ([http://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00395-0](http://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00395-0))
5. C. Y. Kang, Y. M. Son, Y. H. Kim and N. G. Won, 2019, "Effect of Cold Working on the Damping Capacity of Fe-27Mn-4Co-2Al-3Si Damping Alloy", *The J. of the Korean Soc. for Power Syst. Eng.*, Vol. 23 No. 3, pp. 12-17. (<http://doi.org/10.9726/ksps.2019.23.3.012>)
6. S. H. Baik, J. C. Kim, K. K. Jee and C. S. Choi, 1997, "Transformation Behavior and Damping Capacity in Fe-17%Mn-X%C-Y%Ti Alloy", *ISIJ Inter*, Vol. 37, No. 5, pp. 519-522.

- (<http://doi.org/10.2355/isijinternational.37.519>)
7. M. K. Kwon, C. Y. Kang, 2014, "Correlationship Between Tensile Properties and Damping Capacity of 316L Stainless Steel", Korean J. Mater. Res., Vol. 24, No. 1, pp. 1-5.  
(<http://doi.org/10.3740/MRSK.2014.24.1.1>)
  8. J. A. Venables, 1962, "The Martensite Transformation in Stainless Steel", Phil. Mag., Vol. 7, No. 73, pp. 35-44.
  9. G. S. Jeong, C. Y. Kang, 2016, "Effect of Deformation Induced Martensite on the Damping Capacity of Fe-26Mn-4Co-2Al Alloy", Korean J. Mater. Res, Vol. 26, No. 9, pp. 493-497.  
(<http://doi.org/10.3740/MRSK.2016.26.9.493>)
  10. J. H. Jun, Y. K. Lee and C. S. Choi, 1995, "Effect of cold rolling on damping capacity of Fe-23% Mn alloy", J. Kor. Inst. Met. & Mater, Vol. 33, pp. 1600-1608.
  11. A. J. Boger and W. G. Rurgers, 1964, "Partial dislocation on the {110} planes in the B.C.C. lattice and the transition of the F.C.C. in to the B.C.C. lattice", Acta Metall, Vol. 12, p. 255.