피로손상된 제진합금의 인장성질에 미치는 피로응력 크기의 영향

이명수 · 김권후 · 강창룡*

부경대학교 대학원 금속공학과

Effect of Stress Magnitude on the Tensile Properties of Damaged Damping Alloy Under Fatigue Stress

Myong-Soo Lee, Kwon-Hoo Kim, and Chang-Yong Kang*

Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

Abstract: This study was carried out to investigate the effect of fatigue stress magnitude on the tensile properties of the damaged Fe – 22Mn – 12Cr – 3Ni – 2Si – 4Co damping alloy under various fatigue stress magnitudes. α' and ϵ -martensite were formed by fatigue stress in the Fe – 22Mn – 12Cr – 3Ni – 2Si – 4Co damping alloy. The α' and ϵ -martensite formed by fatigue stress in the fatigue damaged damping alloy was formed with a specific direction and surface relief, or crossing each other. With an increasing magnitude of fatigue stress, the volume fraction of α' -martensite and ϵ -martensite was increased, and the increasing rate of volume fraction of α' -martensite was more rapid than ϵ -martensite. At the same fatigue stress magnitude, a large amount of α' -martensite was formed than ϵ -martensite. With the increasing of fatigue stress magnitude, the tensile strength slowly increased and elongation rapidly decreased, and then tensile strength slowly decreased by increasing the volume fraction of α' -martensite. The tensile properties of the damaged Fe – 22Mn – 12Cr – 3Ni – 2Si – 4Co alloy under fatigue stress were strongly affected by the α' -martensite formed by fatigue stress. This results were the same tendency for metal with the strain induced martensite transformation.

(Received October 08, 2018; Accepted November 29, 2018)

Keywords: fatigue stress, damping alloy, martensite, tensile properties, fatigue damage

1. 서 론

소음과 진동은 다양한 형태의 인적, 물적 손실을 초래하고 있다. 때문에 이에 대한 규제가 점점 강화되어 가고 있을 뿐만 아니라 노동환경의 개선, 상품의 고부가 가치화 및 기기 또는 장치 등의 안정성과 장수명화 등을 위해서도 소음과 진동의 저감 또는 억제에 대한 필요성이 증가하고 있다. 따라서 이러한 필요성과 강화되고 있는 규제로부터 벗어나기 위한 다양한 노력과 연구도 활발히 이루어지고 있다 [1-12].

현재 공업적으로 이용되고 있는 소음과 진동 방지법은 시스템(System), 구조(Structure) 및 재료 감쇠(Material damping)법 등이 있다. 그러나 시스템 감쇠법은 설계상의

제한성과 제품의 경, 박, 단소화 등이 어렵고, 구조 감쇠법은 접착성, 가공성 및 용접성 등이 문제되어 공업적 이용 측면에서는 제한적이다 [5]. 때문에 최근에는 소음과 진동 원에 내부마찰계수가 큰 합금을 적용하여 직접 감쇠하는 재료 감쇠법이 감쇠효과가 크고, 가공성과 부착성 등이 우수하여 감쇠능과 강도의 조합이 우수한 제진합금을 개발하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다 [2-11].

제진합금이란 내부마찰이 커 외부에서 가한 진동에너지의 대부분을 열에너지 또는 다른 형태의 에너지로 용이하게 전환시키는 합금을 말하고, 제진합금의 감쇠기구는 외부응력에 의한 금속 내 존재하는 전위 등과 같은 결함의 이동에 기인함으로 감쇠능은 그 재료가 갖는 미세조직 등에 따라 달라진다 [8-11]. 또한 제진재료는 강도, 가공성, 제진에 의한 주파수 의존성, 온도 의존성 등이 낮을수록 유리하고[12], 강도가 높아지면 감쇠능은 낮아지게 된다 [4,13]. 따라서 이러한 모든 성질들을 만족하는 강도와 감

- 이명수: 박사과정, 김권후·강창룡: 교수

*Corresponding Author: Chang-Yong Kang

[Tel: +82-51-629-6346, E-mail: metkey@pknu.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

Table 1. Chemical compositions of specimen (wt%)

C	N	P	S	Mn	Cr	Si	Ni	Co	Ti	Fe
0.01	0.1	0.01	0.01	22	12	2	3	4	0.3	Bal.

쇠능의 조합이 우수한 제진합금을 만들기란 대단히 어렵다. 때문에 이러한 다양한 성질들을 만족하면서 강도와 감쇠능의 조합이 우수한 구조용 재료로 사용가능한 제진합금 개발을 위한 감쇠능에 미치는 미세조직의 영향, 감쇠능과 강도의 상호관계 등에 관한 많은 연구가 수행되어 왔지만[2-11] 많이 부족하다. 뿐만 아니라 감쇠능이 우수한 제진합금을 개발하여 진동원에 적용하여 사용하더라도 합금이 가공유기 마르텐사이트 변태를 일으키는 합금이면 사용 중에 하중을 지속적으로 받게 되거나 또는 피로 등과 같이 싸이클 형태로 주기적으로 받게 되면 받는 하중의 크기와 시간 등에 따라 미세조직이 달라지고[12,14], 그 결과 기계적 성질과 감쇠능 등도 달라지게 될 것이다 [4,11,15]. 때문에 강도와 감쇠능의 조합이 우수한 제진합금 개발과 개발된 제진합금의 사용범위 확대 등을 위해서도 여러 조건하에서 얻어진 다양한 자료들이 필요하다.

따라서 본 연구는 강도가 높고 감쇠능이 우수한 합금으로 알려진 Fe-22Mn-12Cr 합금[10]에서 고용강화에 의한 강도향상과 적층결합 형성에 의한 ϵ -마르텐사이트 생성을 용이하게 함으로서 감쇠능을 높이기 위해 3%Ni, 2%Si 그리고 4%의 Co가 첨가된 합금을 설계하였고, 이 합금에서 응력크기를 달리한 피로시험에 의해 재료를 손상시킨 다음 가해진 응력크기에 따른 미세조직 변화를 조사하고, 이러한 미세조직 변화가 인장성질에 미치는 영향을 조사하였다

2. 시료 및 실험 방법

2.1 시료

Fe-22%Mn-12%Cr-3%Ni-2%Si-4%Co의 화학조성을 갖는 합금은 고주파 진공 용해로에서 용해하여 잉곳으로 만든 후 이를 1250 °C로 가열하여 일정시간 유지 후 열간압연 하여 20 mm 두께의 판재로 만들었다. 다음 1050 °C에서 1시간 유지 후 수냉하는 고용화열처리 하여 시료로 사용하였고, 그 화학조성과 기계적 성질을 표 1과 2에 나타내었다.

2.2 피로손상시험

시료의 피로손상은 평행부 길이가 50 mm 크기를 갖는 ASTM E 8 의 규격을 따라 인장시험편으로 만든 다음 이

Table 2. Mechanical properties of specimen

Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
705	353	35

시료가 갖는 항복강도의 약 30%($\sigma_{\max}=105$ MPa), 50%($\sigma_{\max}=175$ MPa) 및 70%($\sigma_{\max}=245$ MPa)가 되는 여러 크기의 응력하에서 응력비 $R=1$ 의 정현파이고, 주파수는 10 Hz로 하여 5×10^5 cycle 까지 하는 피로시험을 통하여 손상 시켰다.

2.3 미세조직 관찰

각 시료들의 미세조직을 광학현미경으로 관찰하였고, 피로손상된 시료의 미세조직을 상세히 조사하기 위하여 주사전자현미경과 투과전자현미경(JEOL JEM 2010)으로 관찰하였다. 이 때 투과전자현미경 관찰은 시료를 연마와 정마 과정을 통해 약 80 μm 두께를 갖는 직경이 3 mm 크기인 시험편으로 만든 다음 Jet Polishing 하여 박막으로 만들어서 200 kV 가속전압으로 관찰하였다.

2.4 X선 회절시험

용체화한 시료와 응력 크기를 달리하여 피로손상시킨 시료가 갖는 각 상의 체적분율은 X선 회절시험으로 측정하였다. 이 때 X선 회절시험은 Mo-K α 특성 X선을 사용하여 1°/min의 속도로 10~80°사이의 범위를 회절시험 하였고, 체적분율은 이러한 시험에서 얻은 회절선도로부터 각 상에 해당되는 피크의 상대적분강도 값을 이용하여 구하였다 [16].

2.5 인장성질 측정

인장성질은 평행부 길이가 50 mm 크기를 갖는 ASTM E 8의 규격을 따라 제작된 인장시험편에서 응력크기를 달리하여 피로손상시킨 시료를 사용하여 cross head speed를 2 mm/min.의 속도로 인장시험 하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직 관찰

Fig. 1. Optical micrograph of Fe-22Mn-12Cr-3Ni-2Si-4Co damping alloys

그림 1은 Fe-22%Mn-12%Cr-3%Ni-2%Si-4%Co의 조성을 갖는 본 연구에 사용된 합금의 미세조직을 광학현미경으로 나타낸 것이다. 부분적으로 쌍정들이 존재하는 오스테나이트 조직에 소량의 마르텐사이트가 함께 존재하고 있는 것을 확인 할 수 있다.

그림 2는 피로손상에 따른 미세조직 변화를 조사하기 위하여 그림 1 조직을 갖는 시료에서 피로시험조건을 5×10^5 cycle, $f=10\text{Hz}$ 및 $R=0.1$ 로 동일하게 하고 응력의 크기만을 a)는 105 MPa, b)를 245 MPa 크기로 달리하여 피로손상시킨 시료의 미세조직을 광학현미경으로 나타낸 것이다. 두 시료가 동일하게 피로손상시키기 위해 가해진 응력에 의해 오스테나이트 조직의 일부가 마르텐사이트 조직으로 변태되는데[2,10] 기인하여 피로손상되지 않은 시료(그림 1)에서 보다 많은 양의 마르텐사이트가 존재하고 있는 것을 알 수 있고, 피로손상시키기 위해 가해진 응력의 크기가 큰 b) 시료가 a) 시료에 비해 생성된 마르텐사이트의 양이 많은 것을 확인 할 수 있다. 따라서 이로부터 피로손상시키기 위해 가해진 응력에 의해 오스테나이트 조직의 일부가 마르텐사이트 조직으로 변태하고 있을 뿐만 아니라 피로손상시키기 위해 가해진 응력 크기가 클수록 마르텐사이트가 많이 생성되는 것을 확인 할 수 있다.

그림 3은 피로손상된 시료에서 존재하는 마르텐사이트를 보다 상세히 조사하기 위하여 응력의 크기를 175 MPa로 하여 피로손상시킨 시료의 미세조직을 주사전자현미경으로 나타낸 것이다. 피로손상시키기 전에 생성된 마르텐사이트와 피로손상시키기 위해 가해진 응력에 의해 생성된 마르텐사이트가 모두 방향성을 띄고 부분적으로는 교차하면서

Fig. 2. Optical micrographs of damaged Fe-22Mn-12Cr-3Ni-2Si-4Co damping alloy under fatigue stress. a) 105 MPa, b) 245 MPa

Fig. 3. SEM micrograph of damaged Fe-22Mn-12Cr-3Ni-2Si-4Co damping alloys under 175 MPa fatigue stress.

생성되어 있고 또한 표면기복을 일으키며 생성되어 있는 것을 확인할 수 있다 [4,11]. 따라서 이러한 결과로부터 피로손상시키기 위해 가해진 응력에 의해 생성된 마르텐사이트도 열처리 및 소성변형 등에 의해 생성되는 마르텐사이트와 동일하게 생성되는 것을 확인 할 수 있다 [5,11].

일반적으로 상온에서 안정도가 낮은 면심입방정(FCC)의 오스테나이트 조직을 갖는 금속을 가공하면 가공에 의해 오스테나이트가 체심입방정(BCC)의 결정구조를 갖는 α' -마르텐사이트와 조밀육방정(HCP)의 결정구조를 갖는 ϵ -마르텐사이트 등으로 변태되는 것으로 알려져 있다 [11,17,18]. 또한 이 때 생성되는 α' -마르텐사이트는 그 재료의 기계적 성질에, ϵ -마르텐사이트는 감쇠능에 크게 영향을 미친다고 보고되고 있다 [4,11]. 때문에 피로손상시킨 재료에서 생성되는 마르텐사이트를 결정학적으로 조사하는 것은 이들 성질들에 미치는 영향을 규명하기 위한 측면에서 필요하다.

그림 4는 피로손상된 시료에서 존재하는 마르텐사이트를 결정학적으로 조사하기 위하여 그림 3) 시료가 갖는 미세조직을 투과전자현미경으로 관찰하여 나타낸 것이다. 여기

Fig. 4. TEM micrographs showing the martensite obtained in damaged Fe-22Mn-12Cr-3Ni-2Si-4Co damping alloy under 175 MPa fatigue stress. a) α' -Martensite, b) ϵ -Martensite

서 사진 a)는 결정구조가 체심정방형인 α' -마르텐사이트를, b)는 조밀육방형인 ϵ -마르텐사이트에 대한 암시야상과 암시야상에서 나타난 상의 제한시야 회절패턴과 이를 분석하여 나타난 것이다. 제한시야 회절패턴을 분석하여 나타난 결과로부터 서로 다른 결정구조를 갖는 체심입방형의 α' -마르텐사이트와 조밀육방형의 ϵ -마르텐사이트가 함께 존재하고 있는 것을 확인 할 수 있다.

이상의 미세조직관찰 결과로부터 피로손상시키기 위해 가해진 응력에 의해 마르텐사이트는 방향성을 띄고, 일부는 서로 교차하며 또한 표면 기복을 일으키며 생성되고 또한 결정구조가 서로 다른 체심입방형의 α' -마르텐사이트와 조밀육방형의 ϵ -마르텐사이트가 생성되고 있는 것을 알 수 있다.

3.2 미세조직과 인장성질에 미치는 응력의 영향

그림 5는 피로손상시키기 위해 가해진 응력크기에 따른 각 상들의 체적분율 변화를 조사하기 위하여 응력크기를 달리하여 피로손상시킨 시료에서 존재하는 각 상의 체적분율을 X-선 회절시험으로 조사하여 나타난 것이다. 피로손상시키기 위해 가해진 응력에 의해 오스테나이트의 일부가 α' 및 ϵ -마르텐사이트로 변태되고 있고, 가해진 응력 크기가 증가할수록 오스테나이트의 양은 빠르게 감소하는데 반하여 α' -마르텐사이트의 양은 비교적 빠르게 증가하고, ϵ -마르텐사이트의 양은 서서히 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5. Effect of stress on the volume fraction of each phases in fatigue damaged Fe-22Mn-12Cr-3Ni-2Si-4Co damping alloy

Fig. 6. Effect of stress on the tensile properties in fatigue damaged Fe-22Mn-12Cr-3Ni-2Si-4Co damping alloy

한편, 가해진 응력이 항복응력의 70%인 245 MPa 크기에서 생성된 두 마르텐사이트의 양을 비교해 보면, ϵ -마르텐사이트는 10% 이내로 적은 양이 생성되는데 반하여 α' -마르텐사이트는 20% 이상으로 ϵ -마르텐사이트 보다는 많은 양이 생성되는 것을 알 수 있다. 또한 이 결과에 의해 응력증가에 따른 마르텐사이트의 양이 증가되는 속도가 α' -마르텐사이트가 ϵ -마르텐사이트 보다 큰 것을 알 수 있다.

그림 6은 피로손상시키기 위해 가해진 응력크기에 따른 항복강도와 연신율 변화를 조사하여 나타난 것이다. 피로손상시키기 위해 가해진 응력에 의해 비례관계로 인장강도는 증가하고 연신율은 감소하는 것을 알 수 있고, 피로손상시키기 위해 가해진 응력크기가 증가함에 따라 인장강도는 서서히 증가하는데 반하여 연신율은 비교적 빠르게 감

소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 이와 같은 이유는 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 피로손상시키기 위해 가해진 응력에 의해 오스테나이트 조직의 일부가 자신보다 강한 마르텐사이트 조직으로 변태되고, 피로손상시키기 위해 가해진 응력 크기가 증가함에 따라 생성되는 마르텐사이트의 양이 많아지기 때문이다 [11].

3.3 인장성질에 미치는 마르텐사이트의 영향

이상의 미세조직관찰로부터 피로손상시키기 위해 가해진 응력에 의해 결정구조가 다른 두 종류의 마르텐사이트가 생성되고, 가해진 응력크기에 따라 생성되는 두 마르텐사이트의 생성기동 등이 달라지는 것을 알 수 있고, 이러한 변화에 따라 인장성질도 달라질 것으로 판단된다. 따라서 인장성질에 미치는 피로손상시키기 위해 가해진 응력에 의해 생성된 마르텐사이트의 영향을 조사하였다.

그림 7는 응력크기를 달리하여 피로손상시킨 시료의 인장강도와 연신율에 미치는 가해진 응력에 의해 생성된 α' -마르텐사이트의 영향을 조사하기 위하여 응력크기를 달리하여 피로손상시킨 시료의 인장강도 및 연신율과 피로손상에 의해 생성된 α' -마르텐사이트와의 관계를 조사하여 나타낸 것이다. α' -마르텐사이트의 양이 증가할수록 비례적인 관계로 인장강도는 증가하고 있고, 연신율은 빠르게 감소하고 있는 것을 알 수 있으며, 이러한 관계는 그림 6에서 나타낸 피로손상시키기 위해 가해진 응력크기에 따른 인장강도와 연신율과의 관계와 비슷한 것을 알 수 있다.

그림 8은 응력크기를 달리하여 피로손상시킨 시료의 인장강도 및 연신율과 피로손상에 의해 생성된 ϵ -마르텐사이트와의 관계를 조사하여 나타낸 것이다. ϵ -마르텐사이트의 양이 증가할수록 비례관계는 아니지만 인장강도는 빠르게 증가하고, 연신율은 빠르게 감소하다 서서히 감소하는 것을 알 수 있으며, 이러한 관계는 강도와 연신율에 비례관계를 나타내는 α' -마르텐사이트와는 다른 것을 알 수 있다.

그림 9는 피로손상된 시료의 인장강도와 연신율에 미치는 피로손상에 의해 생성된 α' -마르텐사이트와 ϵ -마르텐사이트의 양을 더한 전체 마르텐사이트의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 피로손상에 의해 생성된 두 마르텐사이트를 더한 전체 마르텐사이트의 양이 많아질수록 인장강도는 직선적인 비례관계로 서서히 증가하고, 연신율은 빠르게 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 이러한 결과는 피로손상된 시료의 강도와 연신율에 미치는 피로손상시키기 위해 가해진 응력의 크기와 α' -마르텐사이트의 관계와 비슷한 관계를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 결과로부터 피로손상된 재료의 인장성질은 피로손상

Fig. 7. Effect of α' -martensite on the tensile properties in fatigue damaged Fe-22Mn-12Cr-3Ni-2Si-4Co damping alloy

Fig. 8. Effect of ϵ -martensite on the tensile properties in fatigue damaged Fe-22Mn-12Cr-3Ni-2Si-4Co damping alloy

Fig. 9. Effect of $\alpha' + \epsilon$ -martensite on the tensile properties in fatigue damaged Fe-22Mn-12Cr-3Ni-2Si-4Co damping alloy

에 의해 생성된 α' -마르텐사이트에 더 크게 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라, 이러한 이유는 피로응력에 의해 결정구조가 다른 두 마르텐사이트가 생성되지만, 생성된 양이 ϵ -마르텐사이트는 10% 보다 적고, α' -마르텐사이트는 20% 이상으로 ϵ -마르텐사이트 보다 많다. 따라서 많은 양이 생성되는 α' -마르텐사이트에 더 크게 영향을 받았기 때문이라 판단된다. 또한 이와 같이 인장강도와 연신율이 α' -마르텐사이트에 더 크게 영향을 받고 있는 결과는 변형유기 마르텐사이트 변태를 일으키는 합금에서의 결과[4,11]와도 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

이상의 피로손상된 시료의 인장성질에 미치는 마르텐사이트의 영향을 조사한 결과로부터 피로손상시키기 위해 가해진 응력에 의해 α' -마르텐사이트와 ϵ -마르텐사이트가 생성되지만, 피로손상된 시료의 인장성질은 주로 피로손상에 의해 많은 양이 생성된 α' -마르텐사이트에 크게 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

응력 크기를 달리하여 피로손상시킨 Fe-22Mn-12Cr-3Ni-2Si-4Co 제진합금의 인장성질에 미치는 응력과 미세조직의 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 피로손상시키기 위해 가해진 응력에 의해 α' 및 ϵ -마르텐사이트가 생성되었고, 마르텐사이트는 방향성을 지니고, 표면기복을 일으키며, 일부는 서로 교차하며 생성되었다.
- 2) 피로손상시키기 위해 가해진 응력크기가 증가함에 따라 α' 및 ϵ -마르텐사이트의 체적분율은 증가하였다.
- 3) 응력이 증가함에 따라 체적분율이 증가하는 속도는 α' -마르텐사이트가 ϵ -마르텐사이트 보다 크게 나타났다. 따라서 동일 응력에서 α' -마르텐사이트가 더 많이 생성되었다.
- 4) 피로손상시키기 위해 가해진 응력크기가 증가함에 따라 생성되는 마르텐사이트의 양이 증가하는데 기인되어 인장강도는 서서히 증가하고, 연신율은 빠르게 감소하였다.
- 5) 피로손상된 시료의 인장성질은 가해진 응력에 의해 생

성되는 α' -마르텐사이트에 크게 영향을 받았다. 또한, 이러한 결과는 변형을 수반하는 가공유기 마르텐사이트 변태를 일으키는 합금에서와 동일하였다.

REFERENCES

1. U. Watanabe, *Tetsu-to-Hagane* **77**, 306 (1991).
2. H. Okada, H. Shashi, I. S. Kim, C. Y. Kang, N. Igata, and K. Miyahara, *Mater. Sci. Eng. A* **307**, 519 (2004).
3. K. K. Lee, W. Y. Jang, S. H. Baik, M. C. Shin, and C. S. Choi, *Scripta Mater.* **37**, 943 (1997).
4. M. K. Kwon and C. Y. Kang, *Korean J. Mater. Res.* **24**, 1 (2014).
5. J. Y. Lee, J. N. Kim, and C. Y. Kang, *Korean J. Met. Mater.* **62**, 919 (2015).
6. U. S. Mallik and V. Sampath, *Mater. Sci. Eng. A* **478**, 48 (2008).
7. Y. K. Lee, J. H. Jun, and C. S. Choi, *ISIJ Int.* **37**, 1023 (1997).
8. H. Sahashi, I. S. Kim, C. Y. Kang, N. Igata, and K. Miyahara, *Kinzoku* **74**(3), 1 (2004).
9. J. S. Kim, J. N. Kim, and C. Y. Kong, *Korean J. Met. Mater.* **56**, 265 (2018).
10. I. S. Kim, Y. Nishimura, S. M. Lee, Y. Watanabe, J. Y. Kim, H. R. Jung, C. Y. Kang, and K. Miyahara, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* **45**, 403 (2007).
11. D. U. Son, J. H. Kim, I. S. Kim, K. Miyahara, J. H. Sung, and C. Y. Kang, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* **42**, 621 (2004).
12. H. V. Panossian, *ASME* **114**, 101 (1992).
13. D. Birchon and D. E. Bromly, *Met. Sci. Journal* **2**, 41 (1968).
14. N. Bergeon, G. Guenin, and C. Esnouf, *Mater. Sci. Eng. A* **242**, 87 (1998).
15. Y. V. Taran, M. R. Daymond, and J. Schreiber, *Physica B* **350**, 98 (2004).
16. R. L. Miller, *Trans. ASM* **57**, 892 (1964).
17. A. J. Boger and W. G. Rurgers, *Acta Metall.* **12**, 255 (1964).
18. V. F. Zackzy, Z. R. Parker, D. Fahr, and R. Bush, *Trans. ASM* **60**, 252 (1967).