

Dynamic Strain Gage를 이용한 제진합금의 제진특성 측정

이규환 · 조권구 · 이봉직* · 신명철

한국과학기술연구원 금속연구부
*고려대학교 공과대학 금속공학과

Damping Property Measurement of Damping Alloy by Dynamic Strain Gage

Kyu Hwan Lee, Kwon Koo Cho, Bong Jik Lee*, Myung Chul Shin

Div. of Metals, KIST, Seoul 136-791, Korea

*Dept. of Metallurgical Engineering, Korea University, Seoul 136-075

초 록 dynamic strain gage와 12bit AD 변환기(analog to digital converter)를 이용한 새로운 제진 특성 측정 장치를 제작하였다. 이 장치를 이용하여 일반재료와 고제진재료의 제진특성을 연구하였다. 또한 열처리 조건, 초기 진동 진폭, 그리고 내부응력의 변화에 따른 SDC(specific damping capacity) 변화에 관하여 연구하였다.

일반재료와 제진재료의 비교에서, 제진재료는 진동을 가한 후 0.4초 이내에 진동 진폭이 거의 사라졌지만, 같은 시간에 일반재료의 진동 진폭은 거의 감소하지 않았다. Fe-16wt.%Cr계 합금의 제진 특성은 노냉일 때 SDCmax가 40% 이상이었고, Fe-5.5wt.%Al 합금의 제진 특성은 공냉일 때 SDCmax 값이 30% 이상이었다. 초기 진동 진폭이 증가할수록 최대 제진 특성치는 낮은 진동 진폭 영역으로 이동하였다. 제진 특성은 내부 응력이 증가할수록 급격한 감소를 보였으며, 본 연구에서 개발한 제진 측정 장치는 낮은 진동 진폭의 영역에서 정확한 제진 특성 측정이 가능하였다.

Abstract New damping measurement equipment was designed using the dynamic strain gage and high speed analog to digital signal 12 bit converter and compared it with existing equipment. The damping properties of general material and high damping material were also studied by this machine. The SDC (specific damping capacity) was measured with various heat treatment condition, initial vibration amplitude and internal stress.

- The vibration amplitude of high damping material is decreased within nearly less than 0.4 second after applying the initial forced vibration. But that of general material is still vibrating at the same time.
- After furnace-cooling heat treatment, SDCmax of Fe-16wt.%Cr system was more than 40% and that of Fe-5.5wt.%Al alloy was more than 30% after air-cooling heat treatment.
- Upon increasing of initial vibration amplitude, it is detected the migration of SDCmax into the region of small vibration amplitude.
- Damping capacity is decreased rapidly as the internal stress increases.
- Damping measurement equipment in the present study was able to give the more accurate results of damping properties in the small vibration amplitude region.

1. 서 론

최근 환경보호의 관점에서 소음이나 기계적

진동에 대한 사회적인 관심이 높아지고 있으며, 이를 위해 광범위하게 사용되고 있는 고무와 플라스틱 재료의 병용만으로는 불충분할

경우가 많다고 생각된다. 이와 같은 상황에서 우수한 강도를 지닌 금속재료 그 자체가 높은 감쇠능을 지닌 새로운 재료의 필요성이 요구되고 있다¹⁾.

제진(damping)이란 진동이 내부의 원인이건 외부이건 간에 진동의 진폭을 줄일려는 원인이나 효과를 말하는 것이며, 제진 합금(damping alloy)이란 내부마찰이 매우 높고 진동에너지를 잘 흡수하며, 기계와 구조체의 진동과 소음을 방지하는 역할을 할 수 있는 금속재료를 말하는 것이다²⁾. 금속재료의 내부마찰에 의해 외부의 소음이나 진동을 흡수하는 제진 합금은 미국과 소련에서 국방용으로 그 개발이 시작된 것으로, 잠수함의 소리억제, 탱크용 재료, 사부기기, 가전기기, 싱크, 철로 등에 다양하게 사용되고 있으며, 그 응용범위가 점차 증가되고 있다.

일반적으로 진동현상에 따른 문제점으로는 소음, 진동 그리고 피로가 있는데, 소음은 사회적인 규제와 군사적인 목적에 문제가 되고, 진동은 고속화의 장애, 정밀도의 저하 그리고 파괴등의 원인이 되며, 피로는 피로파괴의 원인 및 기계수명 저하의 원인이 된다. 이러한 진동에 대한 방진대책으로는 진동의 진폭을 최소화할 수 있는 부드럽고 딱딱한 것을 이용하거나, 공진 조건의 제거 및 구조체 자체가 진동을 감쇠할 수 있는 것을 이용하는 것이 있는데, 이 세가지 중에서도 구조체 자체가 진동 감쇠를 할 수 있는 재료를 사용하는 것이 가장 이상적인 방법이라 할 수 있다. 이러한 구조체 자체의 진동 감쇠 방법으로는 세가지가 있는데 첫째로는 외부에 oil damper나 air damping를 설치하여 제진 효과를 노리는 system damping이 있고 둘째로는 structure damping으로써 금속재료 사이에 점탄성고분자 재료를 삽입시킨 sandwich구조를 하는 것으로 진동에 수반하는 점탄성고분자 재료의 silp에 의해 흡수하는 것이다. 그러나 이 방법은 강판 사이의 접촉성이 나쁘고, 점탄성고분자 재료가 전기를 통하지 않기 때문에 spot용접성이 나쁘며, 사용온도가 한정된다는 많은 단점이 있다. 셋째로는 material damping으로써 감쇠능이 크고 강도가 높은 금속재료를 사용함으로써 자체의 감쇠능을 이용하여 진동 및 소음의 발생원 자체를 제거하는 것으로써

점탄성고분자 재료가 한정된 주파수와 온도에서만 사용해야 한다는 단점이 있는 반면, 금속재료는 이러한 단점을 크게 보완할 수 있기 때문에 최근 가장 각광을 받고 있다^{3,4)}. 이러한 재료는 고감쇠능 합금, 방진 합금, 제진 합금 및 흡진 합금으로 불리워 지고 있다.

따라서 본 연구에서는 제진 특성에 대한 개념을 도입하고, 제진 특성을 측정하는데 있어서 기존의 방법과 다른 측정 장치를 개발하여 정확한 제진 특성과 특히, 낮은 진동 영역에서의 감쇠능을 측정하고자 하였다. 사용한 재료는 낮은 진동 영역에서 우수한 제진 특성을 나타내고 경제성과 실용성을 가진 철기 제진 합금인 Fe-Cr과 Fe-Al계 합금을 선택하였으며, 이 재료의 제진 특성을 열처리 조건, 초기 진동 진폭의 크기 그리고 내부 응력 등을 변수로 하여 측정하였다.

2. 이론적 배경

2.1 재료의 감쇠능

감쇠능을 정의하는 데는 내부마찰이라는 단어가 사용된다. 본래, 완전하게 Hooks의 법칙에 따른다고 생각되는 물체에 진동을 가하여, 방지하면 그 물체는 영구히 진동을 계속할 것이다. 물론 이것은 진동의 에너지가 음파의 에너지로서 외부로 전달되지 않는다고 판정한 경우이다. 하지만 재료에 가해진 진동에너지는 음파에너지(소리, 소음)와 열에너지로 전환되어 소멸된다. 이때 금속적인 측면에서 음파에너지를 외부마찰이라 하고 열에너지를 내부마찰이라 한다.

원래 금속물리학 분야등에서 많이 사용되는 내부마찰 Q^{-1} 은 진동하는 물체가 1cycle당 잃는 에너지의 비율로서 다음과 같이 나타낸다⁵⁾.

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (1)$$

여기서 δ 는 대수감쇠율, ΔW 는 1cycle당 에너지 손실, W 는 에너지의 크기이다. 식(1)의 관계는 내부마찰이 작을 때, 즉 $\Delta W/W \ll 1$ 일 때 성립하고, 이와 같은 경우에는 공명곡선의 예리함을 나타내는 인자 Q 의 역수를 에너지 손실율의 대용으로 사용한다. 그런데 공학분야에서 문제가 되는 진동 감쇠능의 경우에는 일반적으로 진폭도 큰 경우가 많고, 따라서 감쇠능 값 그 자체도 크므로 $\Delta W/W <$

<1의 관계가 성립하지 않는 일이 많다. 따라서 크기로 전술한 Q^{-1} 과 δ 등의 척도를 이용하는 것은 부적당하고 에너지 손실을 $\Delta W/W$ 를 직접적으로 구할 필요가 있다. 이를 위해서 이용하는 방법은 다음과 같다.

$$P = \frac{\Delta W}{W} = \frac{A_n^2 - A_{n+1}^2}{A_n^2} \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서 A_n 은 A_{n+1} 은 각각 n번째와 (n+1)번째의 진폭의 크기이며 (2)의 양을 일반적으로 감쇠능(SDC: specific damping capacity)으로 부르고 있다.

또한 재료의 제진 특성을 표현하는 인자 중에는 logarithmic decrement(δ), loss coefficient(η), quality factor(Q) 그리고 stress와 strain사이의 각(α)이 있으며 이들의 관계는 아래와 같다.

$$\delta = \log_e(A_n/A_{n+1}) \quad (3)$$

$$Q = \sqrt{3} f_r / \Delta f \quad (4)$$

여기서 A_n 과 A_{n+1} 은 진폭이고, Δf 는 공명주파수, f_r 에서 공명 peak의 폭의 반을 나타내며, 여기서 제진 값이 매우 낮다면($\delta < < 1$)

$$\eta = \tan \alpha = Q^{-1} = \delta / \pi = P / 2\pi \quad (5)$$

로 표현된다.

2.2. 진동측정

제진 특성을 측정하기 위한 진동측정 방법에는 일반적으로 inverted torsion pendulum, LVDT(linear variable differential transformer) 그리고 cantilever beam 법 등이 주로 사용되고 있다. inverted torsion pendulum⁶⁾은 그림1에서 볼 수 있듯이 시편의 한쪽끝은 고정되고 다른 쪽은 움직일 수 있도록 하여 약간의 인장 응력을 가하여 시편이 회전되게 하여 측정하는 방법이다. 그런데 이 방법은 시편을 얇은 wire형태로 만들어야 한다는 시편 제작상에 많은 단점이 있다. LVDT법⁷⁾은 소련에서 주로 사용하는 방법으로 그림2에서 볼 수 있듯이 시편에 부착된 자석이 솔레노이드 내부에서 진동할 때 발생하는 자장의 변화를 측정하여 제진특성을 분석하는 방법이다. 이 방법은 시편이 커야 하고 precalibration에 의한 측정으로 많은 작업을 요하며 부정확할 뿐만 아니라 낮은 진폭에서는 측정이 불가능하다는 단점이 있다. 마지막으로 cantilever beam법⁷⁾

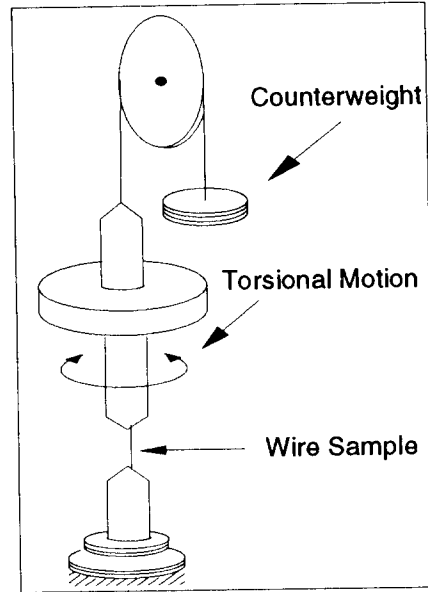


Fig. 1. Basic mechanical parts of an inverted torsion pendulum

은 본 연구에서 적용한 것으로 그림4에 나타내었다. 이 방법은 시편의 한쪽끝이 고정된 시편에 electric resistance strain gage를 부착한 것으로 시편에 기계적인 변형이 가해졌을 때 strain gage를 이루고 있는 얇은 wire의 저항변화로 제진 특성을 측정하는 방법으로 앞의 두 방법에 비해 정확한 변형을 줄 수 있고, 판재로 된 시편에 측정이 가능하며 특히, 낮은 진동에서의 측정이 가능하다는 큰 장점이

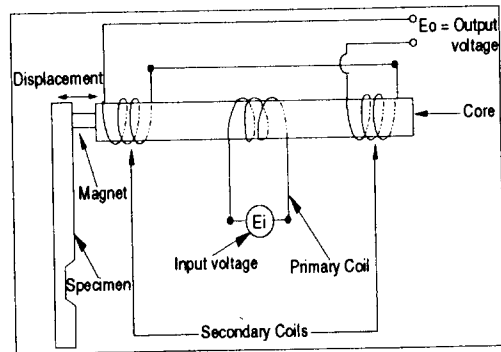


Fig. 2. Basic mechanical parts of an LVDT(Linear Variable Differential Transformer)

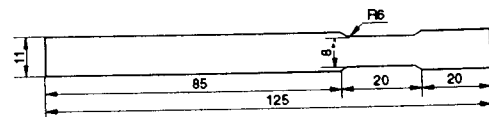


Fig. 3. Schematic diagram of damping specimen.

있다. 그외 본 연구에서 사용한 cantilever beam법에 의한 제진 특성의 측정 실험방법에서 더욱 자세히 설명하기로 한다. beam법에 의한 제진 특성의 측정에 관해서는

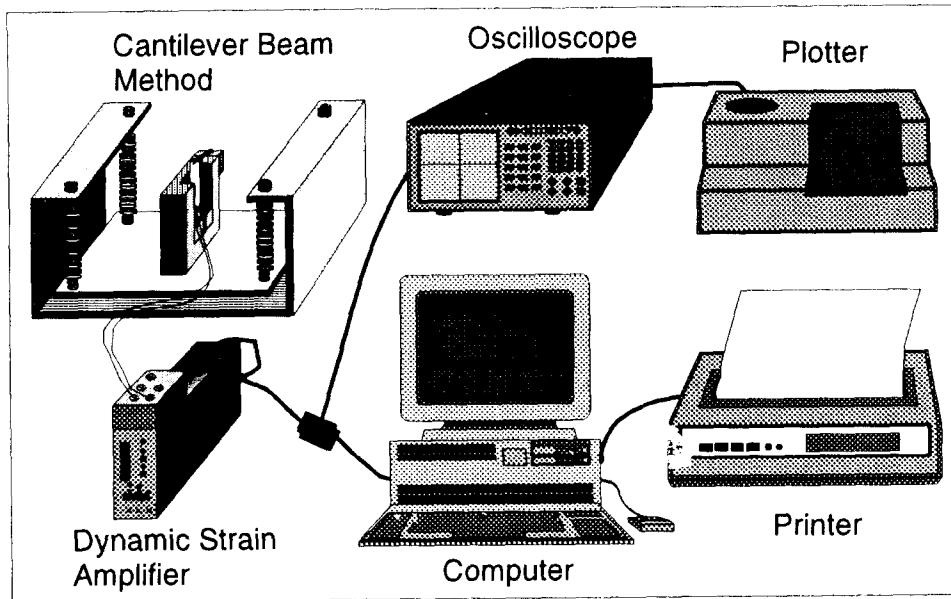


Fig. 4. Experimental apparatus.

3. 실험 방법

3.1. 재료준비

본 연구에서 사용한 재료는 AISI 1015(비제진 합금) 및 Fe-Cr 이성분계와 여기에 Nb와 Ti를 첨가한 삼성분계 그리고 Fe-Al 이성분계이고, 이때 Fe는 전해철을 사용하였다. 이 재료를 진공유도용해를 통하여 용해한 후 주괴를 금속학적인 표준법을 통해 만든 후 박판의 형태로 단조, 열간 또는 냉간 압연을 행하였다. 이렇게 제작된 시편을 열처리 조건 및 초기 진동·진폭의 크기 등을 변수로 제진 특성을 측정하기 위하여 제진시편을 제작하였으며 그 개략도를 그림3에 나타내었다.

3.2. SDC(specific damping capacity) 측정

제진 특성을 측정하기 위하여 cantilever beam 형태의 제진 특성 측정기를 직접 제작하였다. 시편의 탄성 변형을 측정하기 위하여 스트레인 게이지를 사용하였으며, 이때 초기 변형율은 0.125 strain(%)였으며 이 값은 재료의 0.2% 항복강도의 62.5%에 해당하는 값이다. 측정은 스트레인을 dynamic strain amplifier(Strain Amplifier, KYOWA, DPM-613A)를 통하여 증폭한 후 고속 AD/DA

converter(Real time devices, ADA3100, sampling time : 5μ sec, function point number : 250,000)를 사용하여 디지털한 후 이를 컴퓨터(IBM Compatible Computer, 486 DX2 66MHz)를 사용하여 파형으로 나타내고 이를 다시 프로그램을 이용하여 최대 진폭값을 측정하고 이를 환산하여 logarithmic decrement 값이나 SDC수치로 나타내어 각시료의 damping capacity를 측정하였다. 여기에 사용된 장치를 그림4에 나타내었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 비제진 합금과 제진 합금의 제진 특성 비교

그림5와 6은 본 연구에서 제작한 제진 특성 분석 장치를 이용하여 측정한 것으로 일반 재료(AISI 1015)와 본 연구에서 개발한 제진 재료(Fe-5.5wt.%Al)와의 제진 특성을 단편적으로 비교한 것이며, 진동파는 진동을 가한 후 0.025초에서 0.4초 사이의 파형을 프린트한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 일반재료는 진폭이 줄어드는 속도가 매우 느려서 0.4초가 지나도록 진폭의 큰 감소는 볼 수 없으며, SDC 대 strain의 그림에서 곡선이 계속적인 감소를 보이는데 이는 거의 제진 특성이

없음을 나타내는 것이다. 그런데 본 연구에서 개발한 제진 합금의 그림을 보면 0.4초 정도에서의 진동 진폭은 거의 없음을 알 수 있으며, SDC의 증가는 최대치에 이를 때 까지 직선적으로 증가하다가 $\Delta\epsilon/\epsilon$ 이 더욱 증가하게 되면 포물선을 따라 제진 특성은 감소하였고

외삽법으로 분석한 결과 진폭이 0인 경우 SDC도 0으로 나타났다. 그림6에서처럼 낮은 진동 진폭의 영역에서 최대 제진 특성을 나타낸다는 것은 낮은 진동에서의 적용이 가능하다는 것을 의미한다.

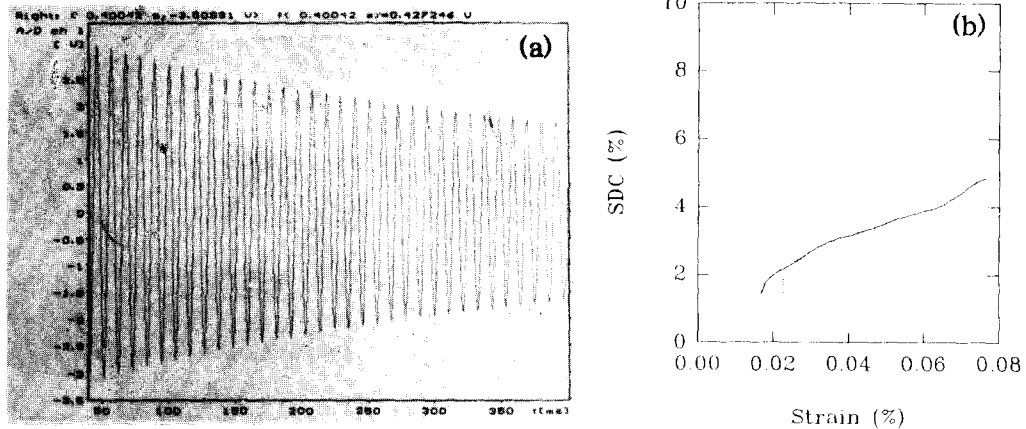


Fig. 5. Free-decay damping curve of a clamped-free cantilever beam(a) and specific damping capacity(b) for AISI 1015 alloy (non-damping alloy)

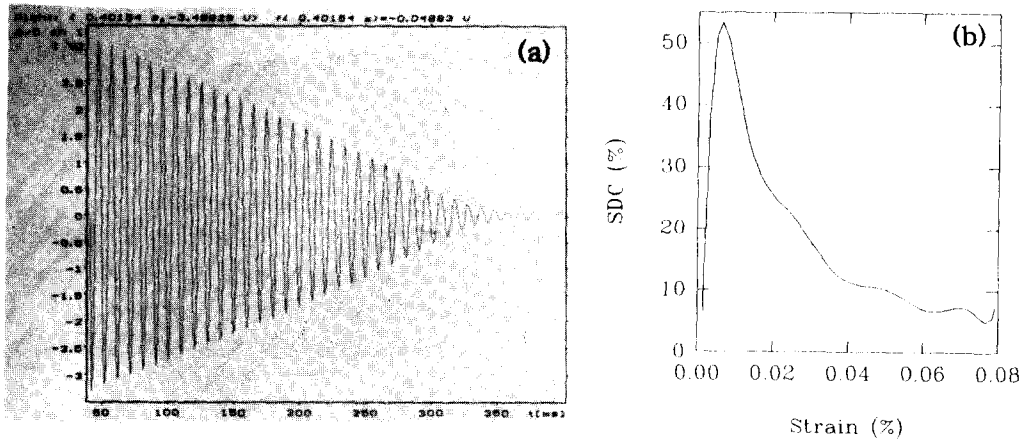


Fig. 6. Free-decay damping curve of a clamped-free cantilever beam(a) and specific damping capacity(b) for Fe-5.5wt.% Al alloy (damping alloy)

4.2 Fe-Cr계 합금의 제진 특성

Fe-Cr계 합금에 대한 높은 탄성에너지 소멸의 주된 기구의 조사는 제진 특성에 대한 열처리 효과와 초기 진동 진폭의 크기로 시작했다. 1000°C에서 수냉된 모든 합금의 에너지 소멸수준은 조사된 모든 진동 진폭 영역에서 4-8%를 넘지 않은 작은 SDC값이었다. 서냉(공냉, 노냉) 후에는 SDC의 급격한 증가를 보였고, 더욱이 SDC의 진폭의존성이 관찰되었다(그림7). 작은 진폭의 영역에서는 진동

진폭에 따라 SDC의 직선적인 증가를 나타내었고, 외삽법으로 한 결과 진폭이 0인 경우 SDC도 0으로 나타나는 아주 정확한 값을 보였다.

SDC의 증가는 SDCmax(최대 제진 특성)에 이를 때 까지 직선적으로 증가하다가 $\Delta\epsilon/\epsilon$ 이 더욱 증가하게 되면 포물선을 따라 제진 특성은 감소하였다. 그러한 특성은 탄성에너지 소멸의 자기-기계적 기구를 가진 재료에 있어서 고유한 특성이며, 진동 진폭이 증가함에

따라 자기 기계적 이력곡선의 포화를 보였고, 모든 조사에서 그것은 특징적으로 나타났다.

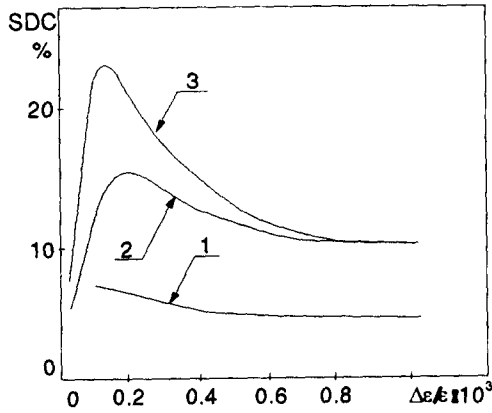


Fig. 7. Amplitude dependence of damping capacity of alloy Fe-15.4wt.%Cr.
1. water quenching 2. air cooling
3. furnace cooling

Fe-Cr합금에서 SDC-진폭 의존곡선의 기울기는 1000°C로 부터 냉각속도가 감소함에 따라 증가하였고, 이러한 조건에서 SDCmax는 작은 진동 진폭 영역으로 이동하였다. 열처리 동안에 Fe-Cr합금의 자구 구조와 자기-탄성 특성의 실제적인 변화가 일어나고, 그것은 자기-기계적 이력 곡선의 형태를 좌우하게 된다. 언급된 변수들은 외부 탄성 응력의 크기에 의존하고, 강자성 자기 일그러짐 재료에

적용된다. 이러한 사실 때문에 초기 진동 진폭의 증가로 제진 특성은 서로 중복되지 않는다(그림 8). 초기 진동 진폭의 증가에 따라 SDC의 진폭 의존성에 있어서 직선 부분이 생기고 최대 제진 특성치는 작은 진폭 영역으로 이동한다. 이러한 효과는 가역적인 거동을 가리키는 것이 아니고, 이러한 효과를 일으키는 자기-탄성 두 변수(coupling parameters)들의 변화는 비가역적이다. 이성분계 합금에 대해 위에서 언급한 탄성하중과 열처리의 의존성에 따른 제진 특성의 변화는 Fe-Cr합금의 고유한 특성이다.

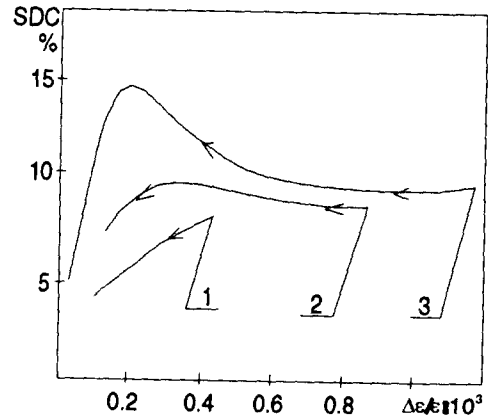


Fig. 8. Effect of initial amplitude growth on damping capacity of Fe-15.4wt.%Cr alloy after air cooling.(Measuring sequence : 1→2→3)

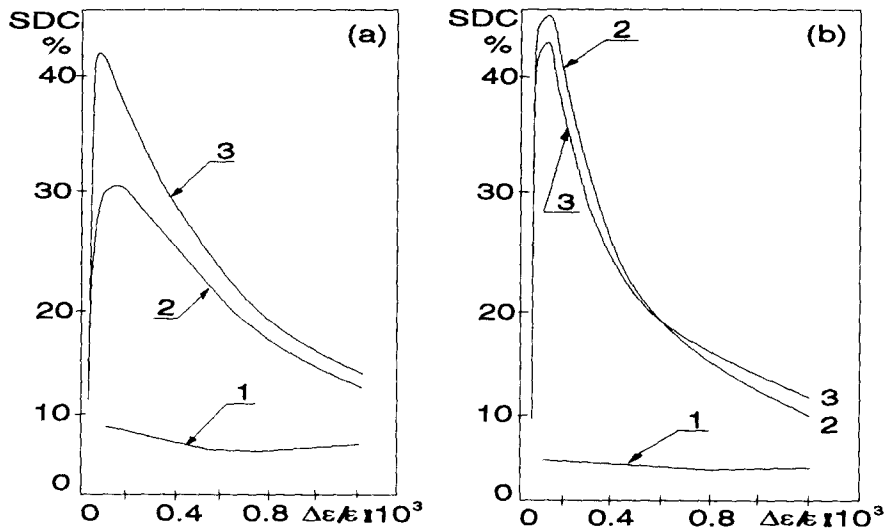


Fig. 9. Amplitude dependence of damping capacity for alloys Fe-16wt.%Cr-0.2wt.%Nb(a) and Fe-18wt.%Cr-0.4wt.%Ti(b). 1. water quenching 2. air cooling 3. furnace cooling.

Fe-Cr합금에 첨가된 Nb, Ti는 제진 특성을 증가시킨다는 관점에서는 가장 효과적이다(그림9). 0.2-0.3wt.%의 Nb의 첨가시 $\Delta\epsilon$ 의 값을 그대로 유지하면서 SDCmax값을 증가시키고, 또한 그것은 냉각속도에 민감한 반응을 보인다. 그리고 Nb의 함량을 더 많이 첨가하면 Fe의 α -고용체에 있어서 Nb의 용해도가 0.3wt.%를 초과하지 않기 때문에 제진 특성의 감소를 보인다. 제2상의 석출물들은 자구벽의 pinning효과를 일으킬 것이고, 따라서 부호 변화응력의 외부장(external field)에 있어서 가역적인 이동의 능력은 사라질 것이다. Fe-Cr합금에서의 Ti는 제진 특성을 개선시키며, 그림9에서 볼 수 있듯이 다른 원소들에 비해 열처리에 민감하지 않다. 또한 Ti는 보다 작은 진동 진폭 영역으로 SDC 진폭 의존성에 대한 최대값의 위치를 이동시킨다.

4.3. Fe-Al계 합금의 제진 특성

1000°C에서 1시간 동안 열처리한 후 수냉, 공냉 그리고 노냉 했을 때의 Fe-5.5wt.%Al합금의 제진 특성을 그림10에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 급냉한 경우에는 탄성진동에너지를 소실성이 좋지 않기 때문에 SDC값은 4-8%를 넘지 못한다. 시편의 냉각속도를 느리게 하면 SDC값은 증가하고 독특한 진폭에 대한 의존성이 나타난다. 작은 변형 진폭범위에서는 직선적인 SDC값의 증가가 일어나

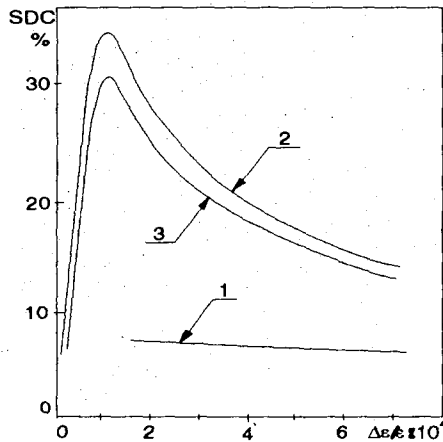


Fig. 10. Curves of specific damping capacity(SDC) amplitude dependence of the Fe-5.5wt.%Al alloy in the quenched(1), cooled on air(2) and slowly cooled with the furnace(3) states.

고 진폭이 0이면 SDC값도 0이 된다. 이러한 특성은 자기-기계적 제진 합금에서는 일반적인 것이고, 변형 진폭이 증가하는 것은 자기-기계적인 이력의 포화에 기인한다.

제진 성능에 있어서 열처리 효과에 대한 특성은 큰 차이를 보이고 있는데, Fe-Cr계 합금이 노냉하였을 때 가장 높은 제진 성능을 가지는 반면 Fe-Al계 합금은 공냉하거나 비교적 빠른 냉각속도를 가질 때 가장 좋은 제진 특성을 가진다.

Fe-5.5wt.%Al합금의 polishing 전과 polishing 후의 내부 응력 증가에 따른 제진 특성의 영향을 조사한 결과를 그림11에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 polishing전과 polishing후의 자유 감쇠 곡선과 SDC-변형률 곡선에는 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 polishing에 의한 내부 응력의 증가는 제진 특성에 큰 악영향을 미치는데 이는 내부 응력이 증가하면 재료 내부에 전위의 증가와 자구구조의 변화로 자구의 이동을 방해하기 때문이라 사료된다.

5. 결 론

이상의 제진 특성 측정장치의 개발과 이 장치를 이용하여 Fe-Cr계 및 Fe-Al계의 제진 특성을 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 개발한 제진 특성 측정장치는 기존의 장치에 비해 제진 특성 분석에 있어 정확한 pre-strain을 가할 수 있고, 특히 낮은 진동 진폭 영역에서의 정확한 진동측정이 가능하였다.

(2) 일반적인 재료와 제진재료의 제진 특성을 비교한 결과, 0.4초 후에 제진재료는 진동진폭이 거의 0에 가까운 반면 일반재료는 약간의 진동 진폭의 감소만 있었다.

(3) Fe-Cr계 합금은 열처리 후 냉각속도를 천천히 할수록 높은 제진 상태를 나타내었으며, 초기 진동 진폭이 증가함에 따라 최대 제진 특성은 작은 진폭 영역으로 이동하였다.

(4) Fe-Cr계 합금의 경우 제3원소인 Nb와 Ti를 첨가했을 경우, 노냉시 SDCmax값은 40% 이상이었다.

(5) Fe-Al계 합금의 제진 특성은 Fe-Cr과는 달리 열처리 후 냉각속도를 공냉의 속도로

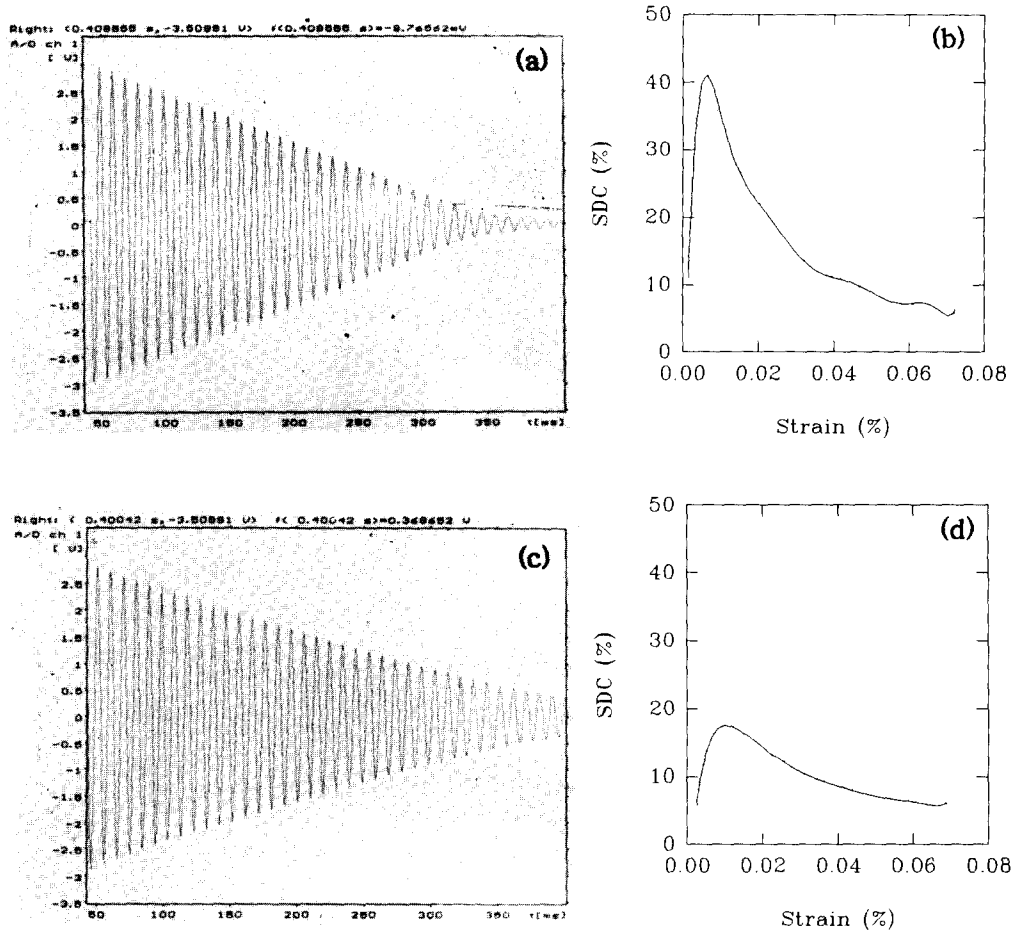


Fig. 11. Damping properties of Fe-5.5wt.% Al alloy.

- (a) free-decay damping curve before polishing
- (b) SDC-strain curve before polishing
- (c) free-decay damping curve after polishing
- (d) SDC-strain curve after polishing

냉각했을 때 가장 높은 제진 특성을 나타내었으며, 이 때의 SDCmax 값은 35% 정도였다.

(6) Fe-Al계 합금에 응력을 가하기 전과 가한 후의 제진 특성을 조사한 결과, 응력이 가해진 후의 제진 특성은 가하기 전에 비해 제진 특성이 50% 이상 감소하였다.

감사의 글

본 논문을 작성하는데 도움을 준 서울산업대학교 송시연씨와 국민대학교 심현이씨께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 杉本孝一; 日本金屬學會報, 14(1975)491
2. 杉本孝一; 日本金屬學會報, 10(1971)44
3. D. W. James; Mater. Sci. Eng., 4(1969)1-8
4. 杉本孝一; 鐵と鋼, 14(1974)127
5. 通産省材料調査會, 新素材便監, 1990, p333
6. I.G.Ritchie and Z.L.Pan; Metal. Trans. 22A (1991) 607
7. S.S.Rao; "Mechanical Vibrations" 2nd, ed., Addison-Wesley, 1990, p487-496