

Fe-Al 합금의 제진특성에 미치는 열처리의 영향

이진형[†] · 김기주 · 김동관 · 이규환* · 신명철*

국민대학교 공과대학 금속·재료공학과

한국과학기술연구원 금속연구부

(1996. 3. 19. 접수)

Effects of Heat Treatment on Damping Characteristics of Fe-Al Alloys

J. H. Lee[†], K. J. Kim, D. K. Kim, K. H. Lee and M. C. Shin

Department of Metallurgy and Materials Eng., Kookmin Univ. Seoul, 136-702, Korea

*Division of Metals, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791

(Received Mar. 19, 1996)

요약 : Fe-5.7%Al-1.1%Cr-0.5%Si 및 여기에 0.12wt.%C가 함유된 합금의 최종 열처리를 800°C에서 가열 후 수냉 또는 노냉함으로써 냉각방법에 의한 제진특성의 변화를 조사한 결과, 수냉은 이 합금의 제진특성을 현저히 악화시켰다. 그 원인을 미세조직 및 우선방위 특성과 관련시켜 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 열처리 후의 냉각방법에 의해 결정립 크기 및 잔류응력은 거의 무시할 정도로 변화가 없었으며, 이로부터 이들은 제진특성과 직접적인 상관이 없다고 판단되었다. 그러나 이 합금의 집합조직 형성은 수냉의 경우(200) 및 노냉의 경우(110)가 우세하게 형성되어, 이 현상을 이 합금의 자화용이축 <100>과 관련시켜 수냉시의 제진특성 악화를 해석할 수가 있었다. 즉 수냉에 의해 180° 자구벽이 90° 자구벽에 비해 많이 형성되어 제진에 결정적 역할을 하는 90° 자구벽이 적어져 그 제진특성이 악화된 것이다.

Abstract : Fe-5.7%Al-1.1%Cr-0.5%Si damping alloys containing 0%C and 0.12%C were heat-treated at 800°C for an hour and then cooled by using some different methods. The damping behaviors of these alloys were observed by optical microscopy, X-ray diffraction and a specific damping capacity(SDC) test. Effect of cooling method on microstructures and the internal stresses of these alloys were negligible while the damping capacity of these alloys was considerably deteriorated by water quenching. The (200) texture was mainly developed by water quenching while the (110) texture by furnace cooling. These results were interpreted by the magnetization behaviors of the ferromagnetic α ferrite. The easy axis of magnetization in <100> direction means that <100> axis has more 180° magnetic domain walls than 90° ones. Thus, 180° magnetic domain walls were more formed by water quenching, which deteriorated the damping capacity of these alloys. Consequently, the amount of magnetic domain walls giving good damping capacity became less so that the damping capacity was poor in water quenching.

Key words : Fe-Al base damping alloy, specific damping capacity, texture, magnetic domain wall

1. 서론

최근 진동, 소음대책의 해결 방법으로서 가격이 안정된 제진합금(damping alloy)의 개발 및 실용화가 요구되어 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이중 철기 제진합금은 이 재료의 우수한 기계적 강도 및 가공성과 더불어 그 제진 성질이 좋아 많은 분야에서 응용이 기대된다. 특히 Fe-Al계 제진합금은 다른 합금에 비해 충분한 소요 특성을 보유하고 있을 뿐만 아니라 불순물에 덜 민감한 장점을 가지고 있어 실용화 가능성이 비교적 높은 재료이다. 현재 연구되고 있는 제진합금에는 에너지 소비방식에 따라 여러 가지 종류로 나눌 수 있는데, 본 연구에서 수행한 Fe-Al계 제진합금은 강자성형으로 자구벽(magnetic domain wall)이 이동하는 결과로 자기-기계적 정이력(magneto-mechanical static hysteresis)이 생겨, 이에 의한 에너지 손실이 일어나 제진 성질을 갖게 한다. 이와 같은 종류의 합금에는 Fe-Al계 외에 Fe-Co, Fe-Mo, Fe-Cr 등의 합금계에 Ni, Si, Al, Cu 등을 첨가한 여러 종류의 합금이 연구되고 있다.¹⁻¹⁴ 제진특성의 직접적인 원인이 되는 자구벽의 이동은 여러 가지 요인에 의하여 영향을 받는데, 특히 석출물이나 개재물 및 미소잔류응력이 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.¹⁵ 특히, 잔류응력은 이 재료의 제진특성에 치명적인 악영향을 미치기 때문에 적절한 열처리를 통해 제거해 주어야 한다. 이에 따라 응력제거를 위한 열처리를 하게 되는데, 이 때 일정한 온도로 가열한 후 수냉 또는 노냉함에 따라 그 제진특성이 현저하게 차이가 난다. 본 연구에서는 그 원인을 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

Fe-5.7%Al-1.1%Cr-0.5%Si 및 여기에 0.12%C가 함유된 합금을 진공유도용해로에서 각각 용해하였다. 주괴의 무게는 약 9kg이었으며 주괴 표면을 약 2mm 정도 제거한 후 900℃에서 열간단조, 이어서 열간압연하여 최종 두께가 2.3mm가 되도록 하였다. 열간압연된 2.3mm의 판재를 노말라이징하기 위해 950℃의 진공로에서 1시간 가열한 후 공냉을 하였다. 다음에 약 13%의 단면감소율로 냉간압연하여 두께 2mm의 판재로 만든 후 Fig. 1에 나타낸 바와 같은 제진특성 측정용 시편으로 가공하였다. 가공된 시편은 다시 800℃의 진공로에서 1시간 가열한 후 상온의 물에서 수냉, 노냉, 수냉 후 800℃×1시간 가열 후 노냉 및 600℃까지 노냉 후 공냉 등의 방법으로 각각 냉각하여 제진특성을 측정하였다. 제진특성은 감쇠능(SDC : specific damping capacity)으로 나타내었으며 다음 식과 같다.

$$SDC(\%) = \frac{A_n^2 - A_{n+1}^2}{A_n^2} \times 100$$

여기서 A_n 과 A_{n+1} 은 n 번째와 $n+1$ 번째 진폭의 크기이다.

SDC는 cantilever beam 방법에 의해 측정하였으며 (Fig. 2), 굽힘시 변형진폭은 변형이 가해지는 시편 표면에 strain gauge(KFG-5-120-CI-11N15C2, KYOWA Electronic Instrument, Co. Ltd)를 부착하고 동적변형증폭기를 연결시켜 탄성범위 이내에서 변형을 주어 진동진폭을 증폭시킨 후 컴퓨터에 저장하고 각각의 진폭을 측정하여 상기 식에 의해 감쇠능을 계산하였다. 미세조직은 광학현미경과 X-선회절(XRD, $\text{CuK}\alpha$)로 조사하였다.

3. 실험결과

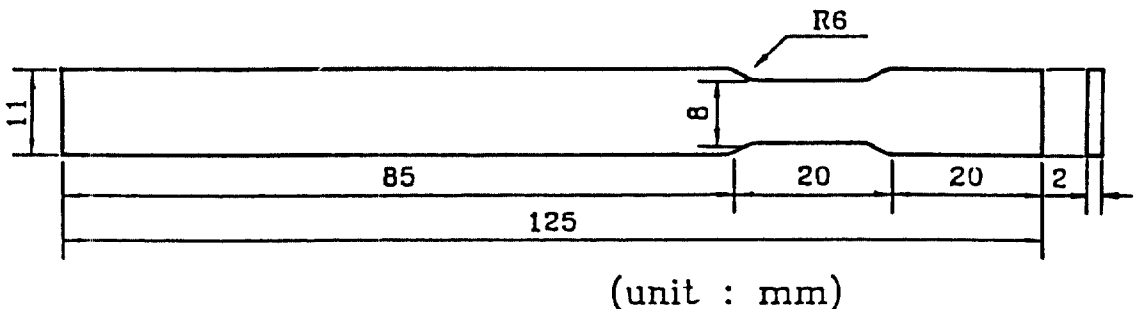


Fig. 1. Dimensions of a damping test specimen.

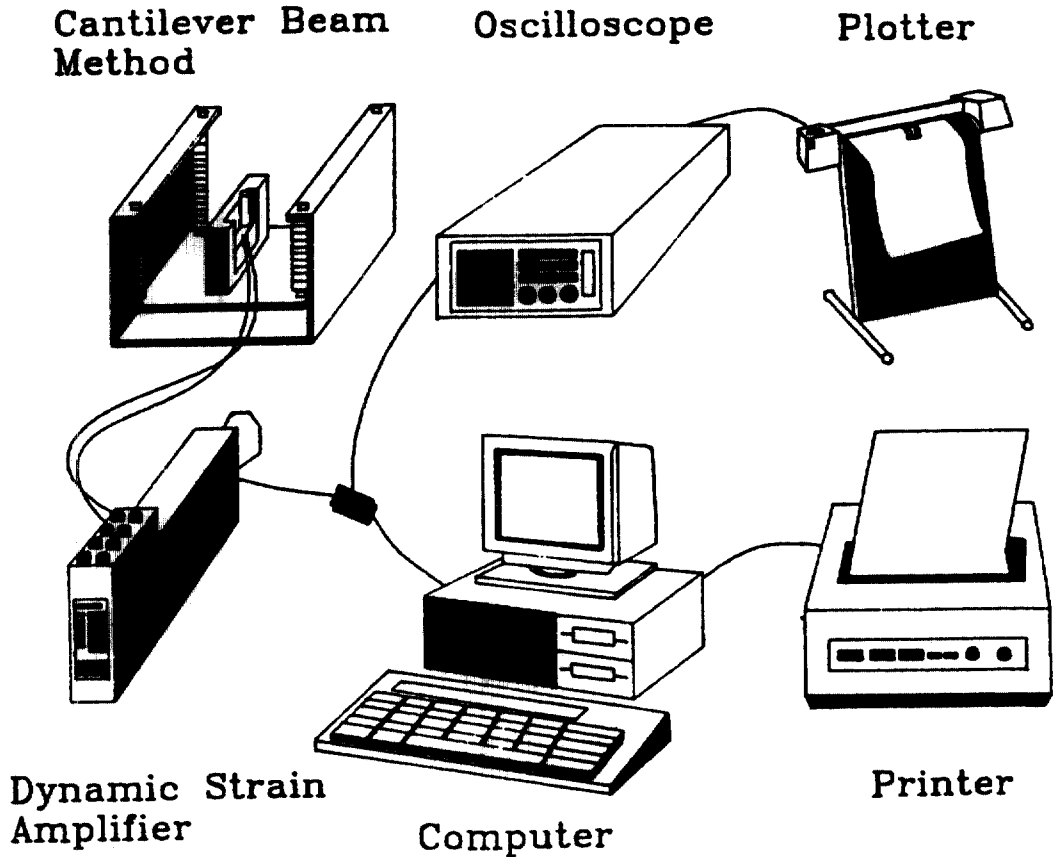


Fig. 2. Schematic diagram for SDC measuring apparatus.

3.1. 제진특성

Fig. 3은 Fe-5.7Al-1.1Cr-0.5Si 및 이 합금에 0.12% C가 함유된 합금에 대해서 800℃에서 1시간 가열 후 냉각방법을 달리함에 따른 SDC 변화 양상을 비교한 것이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 철계 제진합금의 전형적인 제진양특성을 나타내고 있다.¹⁶⁻¹⁷

또한 탄소가 함유됨으로써 탄소가 함유되지 않은 경우에 비해 그 SDC값이 10% 정도 감소하였으며, 이것은 전보²⁰의 연구에서도 확인된 것이었다. 그러나 수냉의 경우는 탄소 함유 여부에 관계 없이 제진이 거의 이루어지지 않았다. 한편, 수냉 시편을 다시 800℃에서 1시간 가열 후 노냉하면, 800℃에서 노냉한 경우와 거의 동일한 수준의 SDC로 회복됨을 알 수 있다. 또한 800℃에서 노냉시킨 경우에 비해 SDC에 있어서 큰 변화를 인정할 수는 없었다. 이것은 600℃ 이하에서는 이 재료의 미세조직에 아무런 변화가 일어나지 않기 때문

인 것으로 생각된다. Fig. 4는 Fig. 3에서 SDC 최대값(SDC_{max})을 구하여 각각의 냉각 방법에 대해 비교한 것이다. 수냉 경우와 노냉(수냉 후 노냉 포함) 경우에 비해 그 제진특성이 현저히 악화됨을 알 수 있다.

3.2. 광학현미경 관찰

각종 냉각방법에 따른 광학현미경 조직을 Fig. 5에 나타내었다. 노말라이징 및 13% 냉간가공 후 800℃에서 1시간 가열됨에 따라 재결정이 이루어졌으며 그 조직은 α -페라이트 단상이다. 또한 탄소 유무 및 냉각방법에 관계 없이 미세조직에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 냉각방법의 차이는 광학조직적인 측면에서는 아무런 영향을 미치지 않았다. 이것은 결정립 크기의 차이는 제진특성에 직접적인 영향을 미치지 않는다는 연구²⁰와 잘 일치하는 결과이다.

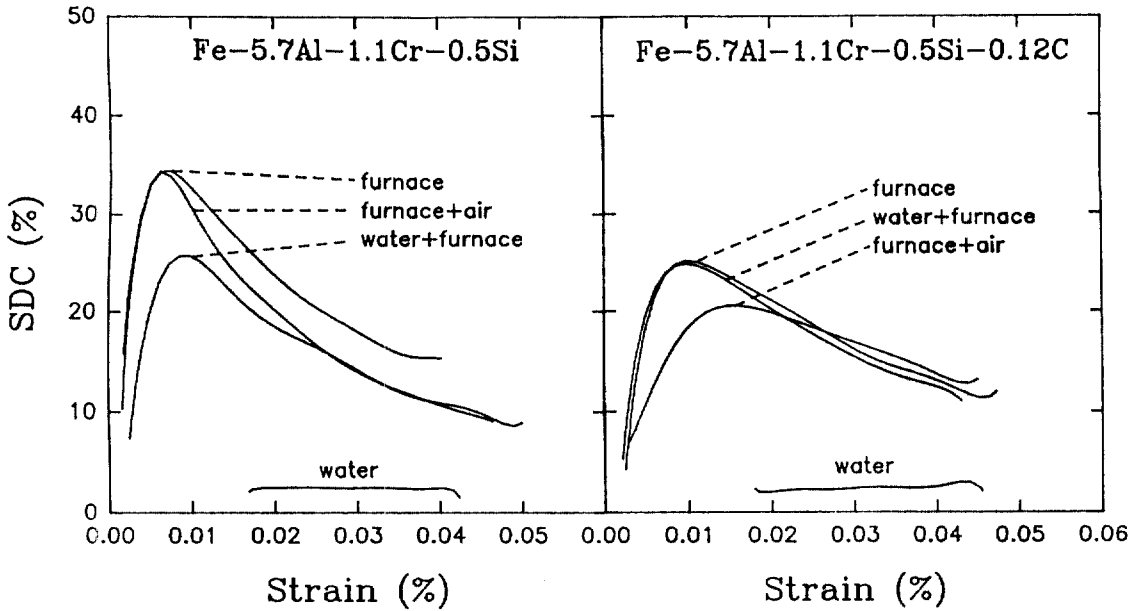


Fig. 3. Strain dependence of SDC values of Fe-5.7Al-1.1Cr-0.5Si and Fe-5.7Al-1.1Cr-0.5Si-0.12C annealed for 1hour at 800°C by various cooling methods.

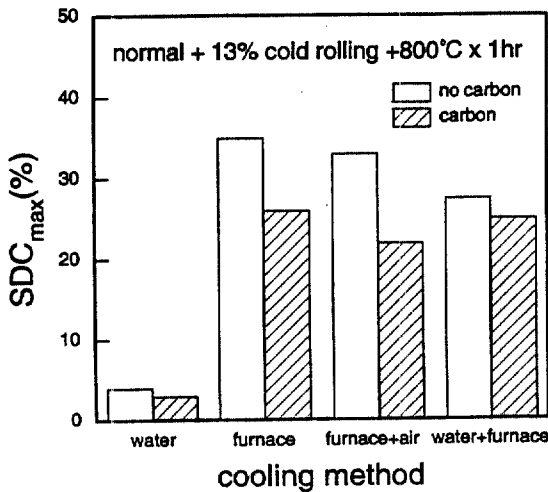


Fig. 4. Effect of cooling methods on maximum SDC (SDC_{max}) of Fe-5.7Al-1.1Cr-0.5Si and Fe-5.7Al-1.1Cr-0.5Si-0.12C.

3.3. X-선회절 관찰

Fig. 6은 Fe-5.7Al-1.1Cr-0.5Si 및 여기에 0.12%C가 함유된 합금을 노말라이징 및 13% 냉간압연하고 800°C에서 1시간 가열한 후 수냉, 노냉 및 수냉 후 노

냉한 경우의 XRD이다. 전보에서의 실험결과와 마찬가지로 α 페라이트 단상임을 알 수 있다. 한편, 수냉 및 노냉에 의한 잔류응력의 차이가 있을 것으로 예측하였으나 Fig. 6에서 보는 바와 같이 2 θ 값의 이동(line shift) 또는 면의 선폭증가(line broadening) 현상 등은 인지할 수 없었다. 다만 Fig. 6을 통해 분명히 나타나는 점은 수냉 및 노냉에 따라서 (110) 및 (200)면의 회절 강도가 차이가 난다는 점이다. 이에 따라서 각각의 격자면(hkl)에 대하여 측정된 X-선회절 강도를 다음과 같이 정의되는 집합조직계수(texture coefficient), $TC(hkl)$ ²¹로 환산하여 특정 격자면의 우선방위 정도를 조사하였다.

$$TC(hkl) = \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)} \bigg/ \frac{1}{n} \sum \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}$$

$I(hkl)$ 및 $I_0(hkl)$: 실험시편 및 표준시편(hkl)의 격자면에 대한 X-선 회절 강도.

n : 측정된 회절격자면수

특정 격자면의 $TC(hkl)$ 값이 1.0 이상으로 크게 증가하고 다른 격자면의 $TC(hkl)$ 값이 1.0이하로 될 때는 특정 격자면의 우선방위가 현저하게 형성된 것을 뜻한다.

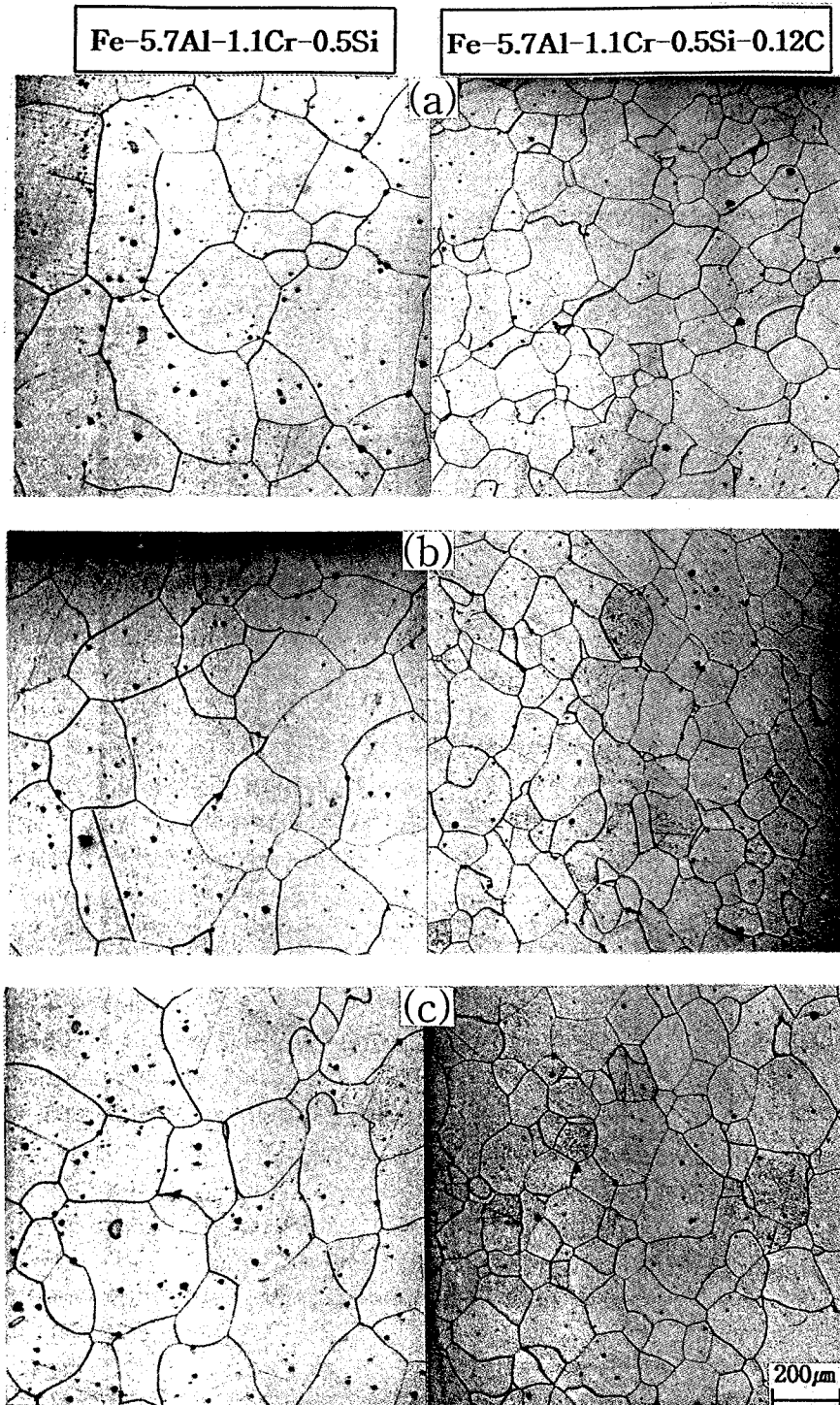


Fig. 5. Optical micrographs of Fe-5.7Al-1.1Cr-0.5Si and Fe-5.7Al-1.1Cr-0.5Si-0.12C annealed for 1 hour at 800°C by various cooling methods : (a) water quenching (b) furnace cooling (c) water quenching + furnace cooling.

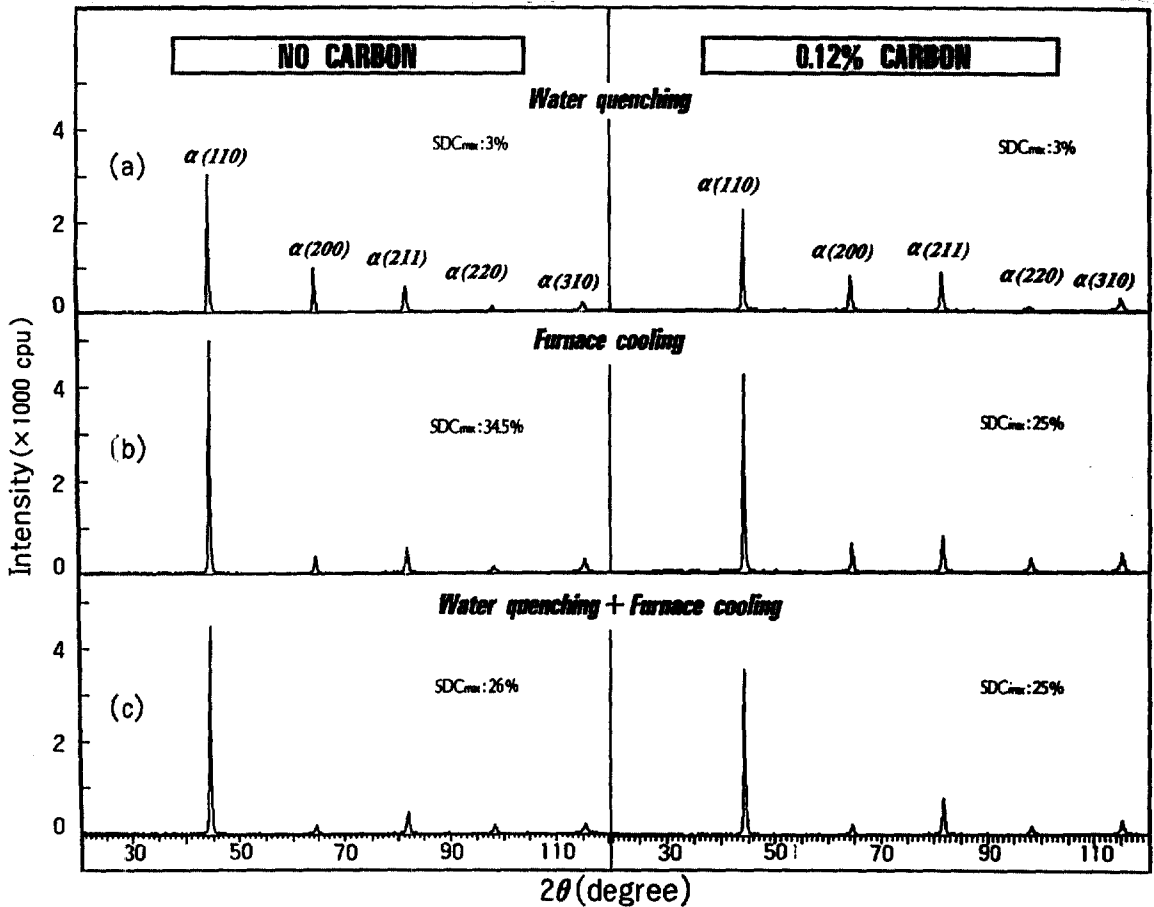


Fig. 6. X-ray diffraction patterns of Fe-5.7Al-1.1Cr-0.5Si and Fe-5.7Al-1.1Cr-0.5Si-0.12C annealed for 1 hour at 800°C by various cooling methods : (a) water quenching (b) furnace cooling (c) water quenching + furnace cooling.

Table 1에 냉각방법에 따른 우선방위 정도를 상기식에 따라 계산한 결과를 나타내었고, Fig. 7에 그래프로 나타내었다. Table 1 및 Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 800°C에서 1시간 소둔 후 노냉하면(수냉 후 노냉 포함) 수냉한 경우에 비해 (110)면의 $TC(110)$ 값이 크고, 수냉하면 노냉에 비해 (200)면의 $TC(200)$ 값이 크다.

4. 고찰

Fe-5.7Al-1.1Cr-0.5Si 및 여기에 0.12%C가 함유된 제진합금에 800°C에서 1시간 가열 후 냉각방법을 변화

시킨 결과 수냉한 경우와 노냉한 경우에 있어서 제진특성에 현저한 차이가 나타난다. 즉, 수냉을 하면 노냉한 경우의 제진특성이 거의 소멸되었으며 수냉 후 다시 가열하여 노냉하면 그 제진특성이 회복되었다. 그 원인을 광학현미경에 의한 미세조직을 통해 조사해 본 결과 결정립 크기 또는 존재상에 있어 아무런 차이가 없었다. 다음에 XRD를 통해서 잔류응력의 크기 또는 불규칙 변태의²² 유무 등을 조사한 결과 인지할 만한 잔류응력의 차이가 나타나지 않았으며 불규칙 변태도 나타나지 않았다. 그러나 Fig. 6의 XRD를 통해서 열처리방법에 따라 우선방위 특성이 나타남을 알 수 있

Table 1. Texture coefficients of reflection planes of various heat treated alloys.

alloy	heat treatment	reflection plane (I_0^{*2})				
		110(100)	200(20)	211(30)	220(10)	310(12)
Fe-5.7Al-1.1Cr-0.5Si	WQ*2	1.33	2.39	0.42	0.48	0.38
	FC*2	2.06	0.85	0.76	0.37	0.95
	WQ+FC*4	2.11	0.42	0.74	1.02	0.71
Fe-5.7Al-1.1Cr-0.5Si-0.12C	WQ	1.01	1.65	1.38	0.28	0.68
	FC	1.27	1.07	0.72	0.98	0.95
	WQ+FC	1.66	0.54	1.14	0.90	0.76

- * 1. Relative intensity of random(powder) specimen.
- * 2. 800°C × 1 hr × water quenching.
- * 3. 800°C × 1 hr × furnace cooling.
- * 4. 800°C × 1 hr × water quenching + 800°C × 1 hr × furnace cooling.

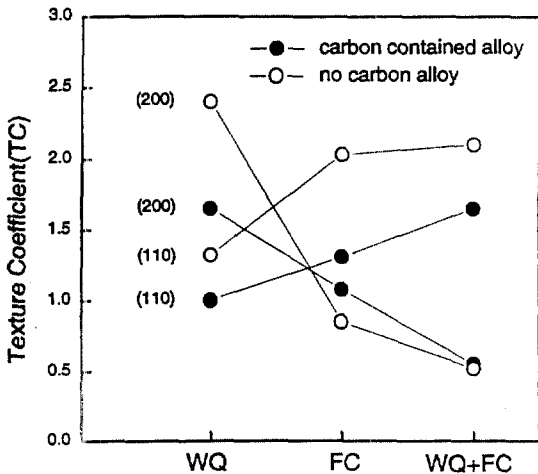


Fig. 7. Effect of cooling methods on texture coefficients of (111) and (200) for Fe-5.7Al-1.1Cr-0.5Si and Fe-5.7Al-1.1Cr-0.5Si-0.12C.

다. 이에 따라 우선방위 정도를 조사해 본 결과(Table 1 및 Fig. 7) 노냉한 경우는 (110)의 TC값이 증가되고 수냉 경우는 (200)의 TC값이 증가되어 우선방위가 형성되었음을 알 수 있다. bcc α -Fe는 그 자화특성에 있어서 이방성이 있음은 잘 알려져 있다.²³ 즉 <100>은 자화가 용이하고, <111>은 어려우며 <110>은 중간이다. bcc α -Fe의 <100>축이 자화가 용이하다는 것은 외부

자장에 의해 원자자기 모멘트가 <100> 방향으로 평행하게 일치되는 것이 용이하게 이루어짐을 의미하고, 이것은 서로 반대 방향의 자발자화영역(자구, magnetic domain)의 경계인 180° 자구벽이 쉽게 소멸됨을 의미한다. 따라서 α -Fe의 <100>은 외부 자장이 가해지기 전 자화가 용이한 180° 자구벽이 90° 자구벽에 비해 많이 존재하고 있었다고 판단할 수 있다. 한편, 강자성형 제진합금의 제진특성은 자기-기계적 정이력 때문에 나타나며, 이것은 90° 자구벽이 많을수록 그 이력효과가 크다.^{15, 20, 23} 왜냐하면 90° 자구벽이 180° 자구벽에 비해 쉽게 이동할 수 있어 90° 자구벽의 용이한 이동에 따른 에너지 손실이 180° 자구벽에 비해 크기 때문이다. 따라서 (200)의 TC값이 증가한 수냉의 경우는 자화가 어려운 축인 <111>은 없는 반면 자화가 쉬운 축인 <200>이 많이 존재하므로 180° 자구벽이 90° 자구벽에 비해 많이 존재하여 제진특성이 나쁘고 노냉 경우는 <200>에 비해 자화가 어려운 <111>이 많이 존재하여, 즉 180° 자구벽에 비해 90° 자구벽이 많이 존재하므로 노냉의 경우 제진특성이 증가된 것으로 해석된다. 이러한 해석은 Fe-3%Si 단결정으로 내부마찰을 측정할 결과 자화가 어려운 <111>이 가장 크고 <110>이 중간이고 자화가 용이한 <100>이 가장 작았던 실험 결과²⁴와 비교해 보아도 타당한 해석으로 판단된다. 즉 제진특성은 자기-기계적 정이력 때문에 나타나는 강자성체

금속의 특유한 자구벽의 이동에 강하게 의존하는데, 이에 크게 기여하는 90° 자구벽이 수냉합금의 경우 감소되어 제진특성이 악화된 것으로 해석된다. 90° 자구벽이 감소되었다고 보는 근거는 자화가 용이한 <200> 이 수냉에 의해 형성되기 때문이다. 본 실험에서 Fe-Al 합금의 제진특성에 현저한 영향을 미치는 인자로서 잔류응력의 효과를 배제할 수는 없을 것으로 사료된다. 왜냐하면 기계-자기적 정이력에 의한 제진은 내부 및 외부응력에 대단히 예민하기 때문이다. 그러나 본 연구의 실험 결과로서는 내부응력의 효과보다는 우선방위의 효과가 현저하였고 이것은 자성특성과도 일치하는 해석이었다.

5. 결론

Fe-5.7%Al-1.1%Cr-0.5%Si 및 0.12%C가 함유된 Fe-Al계 제진합금을 800°C에서 1시간 소둔 후 냉각방법을 달리하여 제진특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 탄소가 0.12% 첨가된 재료의 SDC_{max}값은 첨가되지 않은 것에 비해 약 10% 정도 감소되었다.
- 2) 800°C에서 1시간 소둔 후 수냉하여 그 제진특성이 소멸된 합금을 다시 800°C에서 1시간 소둔한 후 냉각하면 그 제진특성이 현저히 회복된다.
- 3) 냉각방법의 차이에 의해 결정립 크기는 변화가 없었으며 잔류응력의 차이는 본 연구의 경우 거의 무시할 정도였다.
- 4) 수냉에 의해 제진특성이 크게 악화되는 원인은 자화 용이축인 <200>가 많이 형성되어 제진특성에 크게 기여하는 90° 자구벽이 감소되었기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 1993년도 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 大嶽隆之, 高村登志傳, 石澤嘉一, 山田武海, 日本金屬學會報, **31**, 562(1992).
2. 増本量, 澤谷昭八, 北内正勝, 日本金屬學會誌, **43**, 471(1979).
3. H. Masumoto, S. Sawaya and M. Hinai, *Trans. JIM*, **20**, 285(1979).
4. H. Masumoto, S. Sawaya and M. Hinai, *Trans. JIM*, **20**, 410(1979).
5. H. Masumoto, S. Sawaya and M. Hinai, *Trans. JIM*, **22**, 607(1981).
6. H. Masumoto, M. Hinai and S. Sawaya, *Trans. JIM*, **24**, 891(1984).
7. H. Masumoto, M. Hinai and S. Sawaya, *Trans. JIM*, **27**, 401(1986).
8. M. Hinsi, S. Sawaya and H. Masumoto *Trans. JIM*, **29**, 428(1988).
9. L. Xiaodong and W. Baorong, *Materials Science and Engineering*, **B18**, L1~L3(1993).
10. 北内正勝, 澤谷昭八, 日本金屬學會春期大會講演概要, 230(1991, 4).
11. U. S. Pat. 4316743, 23(Feb. 1982).
12. U. S. Pat. 4204887, 27(May. 1980).
13. U. S. Pat. 4410374, 18(Oct. 1983).
14. 日本公開特許公報 : 平3-140439(1991)614.
15. 田中良平, "制振材料, 日本規格協會, 1992.
16. 北内正勝, 澤谷昭八, 増本量 : 日本金屬學會誌, **55**, 1410(1955).
17. A. W. Cochardt, *Trans. ASM.*, **47**, 440(1955).
18. G. Sumner and K. M. Entwistle, *J. Iron and Steel Inst.*, July, 238(1959).
19. M. Kornetizki, *J. Phys.*, (121), 560(1943).
20. 李震亨, 李文鍾, 李圭煥, 申明澈, *分析科學*, **8**, 195(1995).
21. G. C. Ye and D. N. Lee, *Plating and Surface Finishing*, **68**(4), 60(1981).
22. 李圭煥, V. A. Udoenko, 李鳳植, 趙權九, 申明澈 : 大韓金屬學會誌, **32**, 1499(1994).
23. B. D. Cullity, "Introduction to Magnetic Materials", 296, Addison Wesley Co., U. S. A, 1972.
24. M. B. Bever, "Encyclopedia of Materials Science and Engineering". vol. 3, p. 2127, Pergamon Press, MA, U. S. A, 1986