

소음·진동 제어를 위한 방진합금 개발

Development of High Damping Alloys for Reduction of Noise and Vibration

백승한* · 김정철** · 한동운** · 백진현** · 김태훈**

Seung-Han Baik, Jung-Chul Kim, Dong-Woon Han, Jin-Hyun Baik and Tai-Hoon Kim

Key Words : Damping Alloys(방진합금), Specific Damping Capacity(비감쇠능), Fe-Mn Binary System(철-망간 2원계 합금)

ABSTRACT

Conventional methods for reducing vibration in engineering designs (i.e. by stiffening or detuning) may be undesirable or inadequate in conditions where size or weight must be minimized or where complex vibration spectra exist. Alloys which combine high damping capacity with good mechanical properties can provide attractive technical and economic solutions to problems involving seismic, shock and vibration isolation.

To meet these trends, we have developed a new high damping Fe-17%Mn alloys. Also, the alloy has advantages of good mechanical properties and more economical than any other known damping alloys(1/4 times as cost of non-ferrous damping alloy). Thus, the high damping Fe-17%Mn alloy can be widely applied to household appliances, automobiles, industrial facilities and power plant components with its excellent damping capacity(SDC,30%) and mechanical property(T.S 700MPa). It is the purpose of this paper to introduce the characterization of the high damping Fe-17%Mn alloy and the results of retrofit several such applications.

1. 서 론

소음과 진동을 방지하기 위해서 종래에는 진동체에 오일 댐퍼나 에어댐퍼를 설치하여 진동에너지를 흡수시키거나(system damping), 금속과 금속사이에 점탄성이 큰 고분자 재료를 끼워서 진동 에너지를 흡수시키는 방법(structure damping)을 강구해 왔었다. 그러나 이러한 구조적 방법에 의해서는 진동과 소음을 제거하는 데 있어서 많은 문제점들이 내포되어 있을 뿐만 아니라, 공업적 이용 면에서도 그 한계성을 벗어날 수가 없다^{1),2)}.

따라서 최근에 와서는 금속재료 그 자체가 진동 에너지를 직접 흡수하게 하는 적극적인 방식(material damping)으로 방진대책이 전환되면서 방진합금의 개발에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다^{3)~6)}. 선진국의 방진합금 연구사례로

는 미국에서 1960년대부터 군사적인 목적으로 개발이 시작되어 "Sonostone"이라는 상품명으로 Mn-Cu계 합금⁷⁾이 개발되어 사용되어진 바 있다. 산업목적으로 일반 착암기에 적용한 경우 소음도가 110dB 정도인데 반하여 이 합금을 이용하면 98dB로 낮출 수 있다는 보고가 있으며, 현재에는 잠수함 스크류, 착암기 등에 응용되어 소음을 약 1/5 정도로 감소시킨 사례가 있다. 일본에서는 Fe-Cr계⁸⁾, Fe-Al-Si⁹⁾ 등의 합금을 개발하여 "Silentalloy", "Serena" 등의 상품명으로 시판되어, 주로 철도 및 선박 관련 부품으로 응용되고 있다고 한다.

그러나 그간 여러 연구자들에 의해 개발된 방진합금(Mn-Cu 합금, Cu-Al-Ni 합금¹⁰⁾, Ni-Ti 합금¹¹⁾, Fe-Al-Si 합금, Fe-Cr 합금)들은 구성원소의 가격이 고가이고, 가공성이 불량하며, 합금제조공정이 까다롭고 제조비용이 비싼 단점이 있기 때문에 특수한 공업적 및 상업적 목적에만 그 용도가 국한되어 왔을 뿐 일반적 용도에는 경제성 때문에 선진국에서도 실용화가 어려운 실정이다. 이에 반하여 국내에서는 방진 및 방음 문제를 주로 기계공학적인 설계 등으로 해결해 왔었으나, 최근에 와서 소음진동규제법이 까다롭게 적용되면서 기계적 해결방법으로는 그 한계가 있음을 본 연

* (주)우진 신금속재료연구소
E-mail : shbaik@woojininc.com
Tel : (031) 379-3420, Fax : (031) 379-3134

** (주)우진 신금속재료연구소

구실에서는 새로이 인식하여 Fe-Mn 2원계 합금에 대해 연구한 결과, 높은 진동감쇠능을 나타내며 기계적 성질 또한 매우 우수하다는 사실을 처음으로 밝혀내어 보고한 바 있으며^{12)~20)}, 현재는 핵심기술인 재료개발을 완료하여 개발된 재료를 적재적소의 부품에 적용하여 여하히 소음진동제어를 효과적으로 할 수 있는 가에 대해 국가지정연구실 사업과제를 통하여 검증하는 과정 중에 있다.

따라서 본 보에서는 지금까지 개발된 각종 방진합금과 본 연구진에 의해 개발된 Fe-17%Mn 방진합금의 특성비교와 아울러 Material Damping을 적용한 소음·진동 제어효과 및 방진합금의 응용에 대한 실용화 가능성에 대해 검토하고자 하였다.

2. 방진합금의 연구개발 동향

방진특성은 초소성 및 형상기억효과(초탄성효과)와 병행해서 기능의 3대 특성으로서, 최근 특히 주목을 받고 있다. 방진합금은 십수년전 미국과 영국에서부터 발단이 되면서, Nitinol(NiTi)¹¹⁾ 등의 쌍정형 합금이 개발된 이래, 주목의 대상이 되어 왔다. 방진합금은 종래처럼 진동과 소음을 구조적 방식(system damping 및 structure damping)에 의해서 완화하는 것이 아니라, 금속재료 그 자체가 갖는 큰 감쇠능을 이용해서 진동 및 소음의 발생원을 없애버리는 것으로, 종래와는 전혀 다른 발상으로부터 탄생된 재료이다. 납이나 마그네슘처럼 금속음이 없고 철강처럼 강도가 높은 재료, 즉 감쇠능이 크고 인장강도가 높은 재료를 방진합금이라 부른다. 현재까지 개발된 방진합금의 진동감쇠능과 인장강도와의 관계를 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 비감쇠능(SDC)은 항복응력 σ_y 의 1/10의 응력진폭을 이용하여 표현했다.

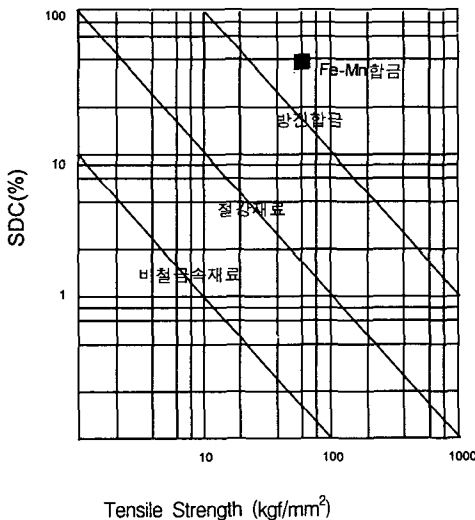


Fig 1. Tensile Strength and Specific Damping Capacity of various alloys.

이러한 진동감쇠능을 나타내는 척도중의 하나인 비감쇠능으로 방진합금을 분류하면 다음과 같다.

고 감쇠능재료(High-damping material)

: SDC > 10%

중 감쇠능재료(Moderate-damping material)

: SDC = 1~10%

저 감쇠능재료(Low-damping material)

: SDC < 1%

3. 방진합금의 진동감쇠

재료의 진동감쇠능은 재료자체 내에서 진동에너지를 소모시키는 능력이라고 말할 수 있다. 진동감쇠를 일으키는 주요한 형태로는 완화형(relaxation type), 공명형(resonance type) 및 이력형(hysteresis type)의 3가지로 대별할 수 있다²¹⁾. 완화형에 의한 감쇠는 진동의 진폭에 의존하는 것이 아니라 진동수에 의존하는 것으로, 이 경우 진동감쇠능은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{\Delta E}{E} = 2 \left(\frac{\Delta E}{E} \right)_{\max} \left[\frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \right] \quad \text{--- ①}$$

여기에서 τ 는 침입형 고용원소의 확산에 의해 생기는 최대 의탄성 변형율의 1/e 값으로 떨어지는데 걸리는 시간이며, 위 식에서 $\omega\tau = 1$ 인 특정진동주파수에서 최대 감쇠능을 보인다. 또 완화시간은 확산에 의존하는 것으로 Arrhenius 식 ($\tau = \tau_0 \cdot \text{EXP}(Q/RT)$)에 따라 변하므로 온도에 따라 감쇠능이 변하게 된다. 따라서, 최대 감쇠능을 나타내는 점을 결정하는 데는 두 가지 방법이 존재한다. 즉,

- 1) 온도를 일정하게 하고 진동수를 변화시키는 법
- 2) 진동수를 일정하게 하고 온도를 변화시키는 법

이런 완화형 감쇠는 금속내부의 확산, 석출, 규칙배열 등 여러 제반사항을 알아내는데 유용한 장점을 갖고 있으나, 방진의 측면에서는 크게 기여하지 못하기 때문에 방진합금의 개발에는 크게 고려되지 않고 있다.

공명형은, 완화형과 마찬가지로 감쇠능이 진동의 진폭에 의존하는 것이 아니라 진동수에 의존하는 것으로 이 경우 최대 감쇠능은 공명진동수일 때 나타나게 된다. 그러나 이러한 형태의 감쇠능도 방진합금의 측면에서는 그 역할이 크게 중요하지는 않다.

이력형은 외부에서 응력을 가할 때와 응력을 제거할 때의 응력-변형률 경로가 서로 다름으로 인해 생기는 감쇠형태이다. 이때 이력손실에 해당하는 만큼의 에너지가 감쇠의 원인이 된다. 따라서, 이 형태의 감쇠능은 진동수와는 무관하며 변형진폭에 크게 의존하는 특징이 있다. 이러한 이력형은 진동수와 관계없이 큰 감쇠능을 나타내는 경우가 있으므로, 공

업적으로 방진효과를 가질 수 있다. 이 종류의 방진합금이 이력손실을 갖는 기구는, 합금의 금속학적인 성질에 의한 것으로 유형별로 보면 1) 복합형 2) 강자성형 3) 전위형 4) 쌍정형의 4가지로 나눌 수 있다.

4. 감쇠기구와 대표적인 합금

표 1에는 각 방진기구의 특징과 이력형에 속하는 방진합금의 감쇠기구와 그 각각의 대표적인 합금들에 대해 나타내었으며, 각각의 특징에 대해서는 다음과 같다.

1. 복합형 방진합금

- 가) 현미경 조직이 복잡하며, 2상으로 이루어져 있다.
- 나) 강하고 인성이 많은 기지에 연한 제 2상이 있는 경우, 기지와 제 2상과의 계면에서 소성유동 또는 점성유동이 생기기 쉽게 되어 외부의 진동에너지가 이들의 유동에 소비되기 때문에 진동이 줄어든다.
- 다) 기지에 비해 제 2상의 강도가 작고 소성유동이 쉽게 일어나는 것이 중요하다.
- 라) 큰 감쇠능이 고온에서도 용이하게 얻어진다는 잇점이 있다.

2. 강자성형 방진합금

- 가) 강자성형 재료는 외부의 응력에 따라 자구벽의 가역적인 이동으로 자기-기계적 이력손실이 생기고, 이것이 진동 에너지를 소모한다.
- 나) Curie temperature까지 사용할 수 있는 잇점을 갖는 반면, 자장 중 또는 정하중하에서 감쇠능이 저하되는 단점이 있다.
- 다) 순철의 경우, 냉간가공을 하거나 또는 C, N 같은 침입형 불순물 원자의 함유량이 증가하면 감쇠능이 현저히 감소되는 것이 확인되고 있다. 이것은 전위나 침입형 원자가 자구벽의 이동을 방해하는 결과로 이해할 수 있다.
- 라) 자구벽의 이동을 용이하게 하기 위하여 특수한 열처리를 거쳐 결정립을 조대화시킬 필요가 있다. 따라서 열처리 비용이 비싸다. 한편, 가공하면 격자결함이 생기거나, 결정립이 미세화되거나 하여 감쇠능이 저하되는 단점이 있다.

3. 전위형 방진합금

- 가) Granato-Lücke의 이론에 의하면, 전위에 의한 감쇠는 변형진폭에 의존하는 부분과 의존하지 않는 부분으로 나눌 수 있는데, 일반적으로 진동이 문제가 되는 것은 수 Hz에서 가청 주파수의 상한부근인 20kHz까지로, 이러한 진동수영역에 있어서는 변형진폭에 의존하는 부분이 중요하다.
- 나) 비교적 작은 응력에서 전위가 이탈할 수 있도록, 약한 고착점을 형성하는 불순물이 최적의 loop길이를 형성하기에 알맞게 적당량 함유되는 것이 필요하다.
- 다) 이 형태의 방진합금은 가격이 저렴하나, 약 150℃ 이상에서 사용하면 변형시효(strain aging)가 발생하므로 감쇠능이 상당히 저하되는 단점이 있다.

4. 쌍정형 방진합금

- 가) 이것은 보통의 기계적 쌍정이나 아닐링 쌍정이 아니라, 마르텐사이트 변태 시에 수반되는 미세한 변태 쌍정에 의한 감쇠이다.
- 나) 강에서 볼 수 있는 마르텐사이트는 일단 마르텐사이트 plate가 발생하면 온도강하에 따라 그것이 성장하는 것이 아니라, 다른 장소에서 마르텐사이트 plate가 발생하여 변태량이 증가한다. 그러나 Ni-Ti합금 등에서 볼 수 있는 마르텐사이트는 이와는 달리 일단 발생한 마르텐사이트 결정이 온도의 상승, 하강에 따라 수축하거나 성장한다.
- 다) 이러한 열탄성 마르텐사이트에 있어서 쌍정경계는 특히 이동하기 쉬우며, 이로 인해 큰 감쇠능을 나타낸다.
- 라) 이와 유사한 변태 쌍정이 자기변태에 의해서 생기는 특별한경우의 예로서는 Mn-Cu 합금이 있다.

Type	Damping Mechanism	Alloy System	Example
Natural Composite	Viscous flow (or plastic flow) across phase boundaries between matrix and the second phase	Fe-C-Si Al-Zn	Grey cast iron Rolled nodular cast iron
Ferro-magnetic	Magneto-mechanical static hysteresis due to irreversible movement of ferromagnetic domain-walls	Fe and Ni Fe-Cr Fe-Cr-Al Fe or Ni base	T.D. Nickel 12%Cr-steel Silentalloy Gentalloy
Dislocation	Static hysteresis due to the movement of dislocation loops breaking away from pinning points by impurity atoms	Mg Mg-0.6%Zr Mg-Mg ₂ Ni	KIXI alloy
Twin-boundary (or phase boundary)	Movement of internal twin boundaries in thermoelastic martensite or movement of the interface between the martensite and the high temperature phase	Mn-Cu Mn-Cu-Al Cu-Al-Ni Cu-Al-Zn TiNi	Sonoston Incramate

Table 1. Classification of high damping alloys.

5. 본 연구결과의 응력유기 변태형 방진합금

일반적으로 마르텐사이트 변태는 고온상을 급냉하면 M_s 점에서 부터 마르텐사이트가 생성되기 시작하여 M_f 점에서 변태가 거의 완료된다. 그러나 $M_s < T < M_f$ 점인 온도T에 급냉하면, 이 온도에서 발생되는 양 상의 화학적 자유에너지차와 마르텐사이트 생성에 동반되는 비화학적 자유에너지가 같을 때까지 마르텐사이트가 생성되어 양 상의 혼합조직이 평형으로 존재하게 된다. 이러한 상태에 반복적으로 응력을

가하면, 양상의 계면에서 모상↔마르텐사이트의 가역적인 변화가 일어남에 의해서 외부에서 가한 에너지를 소모하게 된다.

이러한 새로운 감쇠모델을 갖는 감쇠기구¹⁴⁾는 본 연구실에서 처음으로 제안한 것으로, 이 기구에 의해서 감쇠능을 나타내는 합금이 Fe-Mn 2원계 합금이란 것을 밝혀 내었으며, 합금설계 및 제조공정을 개발하여 물성치를 더욱 향상시켰으며, 현재로서는 철계 합금 중에서는 가장 경쟁력이 있는 물성치를 갖는 대표적인 재료로 주목받고 있다.

표 2에서는 Fe-17%Mn방진합금의 진동감쇠능(SDC,%)과 기계적 성질 등의 물성치에 대해 나타내었으며, 실용화 가능한 공업적 용도측면에 대해서는 표 3에 나타내었다.

그림 2는 Fe-Mn 2원계 합금 중에서 가장 우수한 물성치를 갖는 Fe-17%Mn합금에서 진폭변형률에 따른 진동감쇠능의 변화를 보여주고 있다. 변형률이 커질수록 진동감쇠능이 급격하게 증가하고 있는데, 이에 대해서는 외부의 응력이 클수록 v/ε 계면의 이동이 보다 쉬워지기 때문에 그 만큼 진동감쇠효과가 크다고 생각되며, 이는 앞서 논의된 이력형 감쇠기구의 전형적인 특징인 진폭의존성을 보여주고 있다.

진폭이 클수록 감쇠효과가 더 커지는 이러한 특징은 이 합금의 실용화에 더욱 기대를 걸게 하는 요소이기도 하다.

Field	Example of Uses
Flight & Space Vehicle	Gyrocompass, Engine cover and Turbine blade for Rocket, Missile, Jet plane, etc.
Automobile	Car-body, Diskbrake, Rotary part of engine, Transmission, Air-cleaner, Cylinder-head cover, Timing-gear cover or head cover, Floor, Dash-panel, Roof, Door or door-beam, etc.
Machinery	Press, Chain-guide or gear for chain-conveyer, Generator, Air-blower, Compressor, etc.
Engineering & Construction	Rock drill for a bridge, Expansion Joint, Steel reinforcing and steel frame for a skyscraper, etc.
Railroad	Rail, Crossing Rail, Railroad bridge, Soundproof wall, Structural material for subway, etc.
Ship	Rotary part of engine, Screw, etc.
Electronic Product	Air-conditioner, Washing machine, Audio Speaker, Spring, Refrigerator, etc.
Office Automation	Typewriter, punch, etc.

	Fe-17%Mn alloy
Tensile Strength (Kg/mm ²)	more than 70
Yield Strength (Kg/mm ²)	more than 35
Elongation (%)	38
Hardness (HR _B)	more than 92
Charpy Impact Energy (J)	197.5
Thermal Expansion Coefficient (α)	$1.84 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$
Gravity (g/cm ³)	7.7
Specific Damping Capacity (%)	more than 30

Table 2. Mechanical properties of Fe-17%Mn alloy.

Table 3. Example of practical uses.

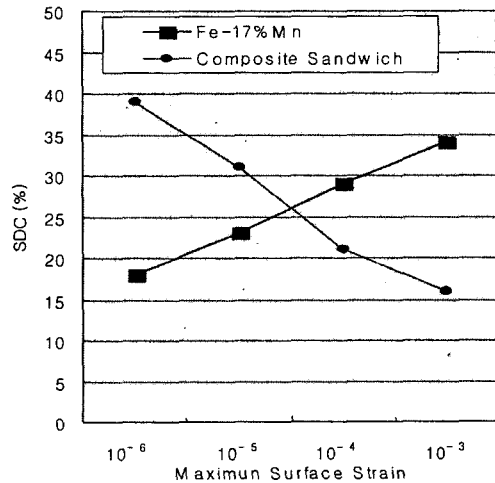


Fig.2 Variation of specific damping capacity with maximum surface strain in Fe-17%Mn alloy and Composite Sandwich.

4. 결론

본 연구에서는 Fe-Mn 2원계 합금의 기계적 특성 및 방진특성을 향상시키기 위하여 재료의 합금설계 및 제조공정을 개발한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 선진국에서 이미 개발된 비철계 방진합금에 비해 기계적 성질, 내후성, 진동감쇠특성, 기계가공성, 성형성 및 재료의 가격 측면에서 국제적으로도 경쟁력 있는 소재의 개발이 이루어 졌다.
- 2) 따라서 확보한 연구결과를 활용하여 향후에는 소음진동이 문제가 되는 교량의 교좌, 강구조물, 스틸계단, 착암기 등의 건설 분야, 자동차 차체, 엔진 실린더 블럭, 오일팬, 철도 이음매 레도판, 철도차량 연결기, 방진레도 등의 수송 분야, 산업 및 일반기계 등 여러 분야의 재료사용자와 협의하여 용도 개발을 위한 대체 부품을 선정하여 실장시험을 통해 소음진동제어효과를 파악하고자 한다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실(NRL) 사업의 지원을 받아 이루어졌으며, KISTEP 관계자 여러 분에게도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) R.de Batist, 1983, "High Damping Materials : Mechanism and Application", *Journal de Physique*, 44, pp.c9-39~c9-50.
- (2) A.S.Nowick, 1977, "Anelasticity : An Introduction", Vol.6, Part A, pp.1~28.
- (3) 佐佐木雄貞, 遠藤, 1984, "騒音・振動制御用制振材料", *鐵と鋼* 70, pp.166~171.
- (4) 杉本孝一, 1974, "鐵と鋼", 14, 127.
- (5) 川邊尚志, 榮原改造, 1980, "日本金屬學會誌", 44, 776.
- (6) X.W.Wang, 1989, "Scripta Metallurgica", 23, 507.
- (7) A.V.Siefert and F.T.Worrell, 1951, "The Role of Tetragonal Twins in the Internal Friction of Copper-Manganese Alloys", *J. Appl. Phys.*, Vol.22,

pp.1257~1259.

- (8) K.Sugimoto, 1981, "Internal Friction Phenomena Associated with Diffusionless Phase Transformation in Alloys", *Journal de Physique*, 42, c-971.
- (9) 日本鋼管株式會社, 1994, "NKK SERENA, 新しい制振合金". Cat., No.131-031
- (10) I.B.Kekalo, 1986 "Encyclopedia of Materials Science and Engineering", Vol.3, Pergamon Press, pp. 2127 ~2131.
- (11) O.Mercier, K.N.Melton and Y.de Preville, 1979, "Low-Frequency Internal Friction Peaks Associated with the Martensite Phase Transformation of NiTi", *Acta Metall.*, 27, pp.1467~1475.
- (12) C.S.Choi and Woojin OSK Corp., 1992, "Korea Pat., No. 057437", "U.S. Pat.,No.5290372"
- (13) S.H.Baik, 1995, "Effects of carbon content on Damping Capacities and Mechanical Properties of Fe-17wt%Mn Martensitic Alloy", *CAMP-ISIJ* Vol.8, pp.690.
- (14) C.S.Choi, J.D.Kim, T.H.Cho, S.H.Baik and G.H.Ryu, 1992, "Damping capacities in Fe-X%Mn Martensitic Alloys", *Proc. of ICOMAT-92*, pp.509~514.
- (15) 백승환, 오영선, 지광구, 최종술, 1996, "Fe-17%Mn-X%C 마르텐사이트 합금의 진동감쇠능에 미치는 시효의 영향", *대한금속학회지*, Vol.34, No.5
- (16) S.H.Baik, J.C.Kim, K.K.Jee, M.C.Shin and C.S. Choi, 1995, "Effects of carbon content and cold working on damping capacity and mechanical property of Fe-17%Mn martensitic alloy", *JOURNAL DE PHYSIQUE IV*, Volume 5, C8-391~ C8-396
- (17) 백승환, 1995, "Development and Application of high Mn Damping Alloy", *대한금속학회 춘계발표대회 개요집*, pp.63.
- (18) 백승환, 김정철, 지광구, 신명철, 최종술, 1996, "Fe-17wt%Mn 합금의 진동감쇠능에 미치는 탄소와 티타늄 첨가의 영향", *열처리공학회지*, Vol.9, No.1, pp.53.
- (19) 백승환, 김정철, 지광구, 최종술, 1996, "열처리공학회지", Vol.8, No.2, July, pp.113~119.
- (20) 백승환, 김정철, 지광구, 신명철, 최종술, 1996, "열처리공학회지", Vol.8, No.3, pp.197~204.
- (21) A. W. Cocharde, 1956, "High Damping Ferromagnetic Alloys", *Trans. AIME*, Oct., pp. 1295~ 1296.