



STACIR용 초고강도 인바합금선 개발

한국전기연구원 / 김병걸, 김봉서, 이희웅
일진전기 / 이석호, 최진용, 홍순갑

1. 서론

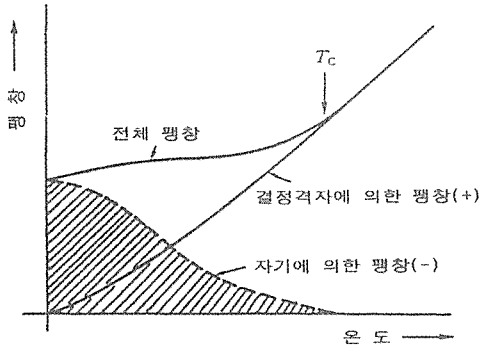
대부분의 금속 재료는 외부로부터 열이 가해지면 팽창한다. 보통, 온도 1℃의 상승으로 10⁻⁵정도, 즉 길이 1m 물질은 0.01mm 팽창한다. 그 열팽창 특성은, 금속, 합금이 가지는 특유한 값으로, 저온으로부터 고온으로 이르는 넓은 온도범위에서 복잡하게 변하지만, 응용상 2종류로 크게 나뉜다. 하나는 고폽창특성에 있어서 2~3×10⁻⁵/℃의 열팽창 계수를 가지고, 바이메탈과 같은 금속으로 사용되어진다. 또 하나는 인바(열팽창율이 불변하는 invariable에서 유래)로 불리는 저열팽창 합금으로, 이것은 10⁻⁶으로 한 차원이 낮은 열팽창을 나타내는 특이한 성질을 가진다. 고폽창 재료에 있어서도 여러 가지 흥미 있는 성질을 가지고 있지만, 본 발표의 범위를 벗어나기 때문에 저열팽창 재료에 초점을 맞추어 재료의 특성을 간단히 나타내고자 한다.

2. 인바현상과 자성

금속, 합금은 가열됨에 따라 원자의 열진동이 증가하게 되어 온도에 대해 직선적인 체적 변화, 즉 열팽창을 일으킨다. 한편, 강자성체는 결정 격자 외에 자기적인 격자를 이루고 있는 것으로 생각되고, 이것을 가열하면 결정격자는 그림 1과 같이, 일반적인 격자진동의 비조화성에 의해 직선적인 열팽창을 나타내는 것에 비해, 자기적인 결정격자는 온도에 따라 자성이 약해져서 수축한다. 이 두 개를 종합한 전체의 길이변화(연신)를 보면, 자기변태온도(Curie 온도), T_c까지는 열팽창이 매우 낮은 것을 알 수 있다. 이 열팽창을 낮추는 것을 자발체적자왜라 하고, 그 값을 격자 진동에 의한 통상의 열팽창을 상쇄할 정도로 큰 인바 특성을 얻을 수 있고, Fe-36.5Ni 합금에서는 10⁻³~10⁻⁴의 매우 작은 값을 나타낸다고 알려져 있다.

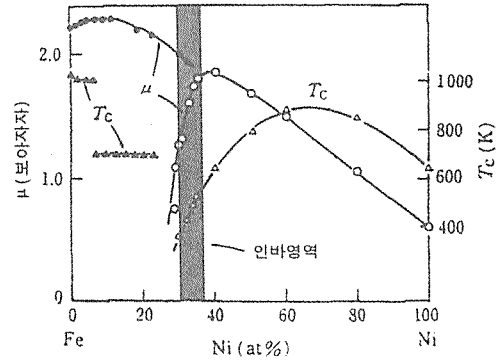
인바효과를 나타내는 Fe-Ni계, Fe-Pt계, Fe-Pd계 혹은 (Fe-Co)Cr계 합금의 평형상태도를 보면,

〈그림 1〉 결정격자, 가지격자 및 이를 종합한 전체 팽창과 자발체적자와



순철의 체심 입방 격자(bcc) α 상으로부터 면심입방 격자(fcc) γ 상으로 변하는 조성을 경계로 해서 비정상 열팽창, 즉 인바 현상이 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이 비정상 특성을 자성의 관점에서 보면, 인바 합금에서는 자화가 소멸하는 T_c 이상에서는 순철과 같은 $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 정도의 값을 가진다. 이 결과는, 명확히 자성과 인바 효과가 밀접한 관계를 가지고 있다는 것을 나타내고 있다. 인바 합금의 자기 모멘트 및 T_c 와 조성과의 관계는 매우 특이한 관계에 있다. 그림2에서는 한 예로서 Fe-Ni계 합금에 대하여 나타내고 있다. 그림과 같이 인바 효과를 나타내는 조성으로부터 철쪽의 bcc α 상으로부터 자기 모멘트 μ 는 Ni 함유량의 증가와 함께 단순히 감소하고 있다. 그러나 인바 효과가 보여지는 반대측의 fcc- γ 상으로 변하면, 자기 모멘트 및 T_c 는 먼저 격감하고, 급속히 회복하고 외대점을 가지고, 이상의 통상의 합금과 같이 단순히 감소하고 있다. 이와 같은 현상은 이전부터 알려져 있었지만, 1960년대에 들어서야 금속 합금계의 강자성, 반강자성의 원

〈그림 2〉 Fe-Ni계 합금의 자기 모멘트 μ 및 T_c 의 조성 의존성(○△:fcc, ●▲:bcc)



인으로 중요한 과제로서 세계의 자성물리 연구자를 중심으로 많은 연구가 진행되었고, 최근 보여지고 있는 비정질 상태에서의 인바현상 등과 함께 그 원인 규명 연구가 진행되어지고 있다.

3. 인바합금과 그 응용

〈표 1〉에 대표적인 인바 합금을 종류별로 나누는 것을 나타내고 있다. 인바 현상은 강자성체로 제한되지 않고, 반강자성체에서도 보여지고, 또 비정질과 같은 특수한 구조를 가지는 합금에 있어서도 나타나는 것을 알 수 있다. 여기서는 강자성체를 나타내는 것과 반강자성을 띄는 것에 대하여 서술하고 마지막으로 2, 3개의 특수한 용도를 소개한다.

3-1. 강자성 인바합금

가장 대표적인 것은, 앞에서 나타낸 Fe-36.5Ni에 소량의 C를 첨가한 합금이지만, 용도의 확대에

〈표 1〉

대표적인 인바합금의 제특성(소둔상태)

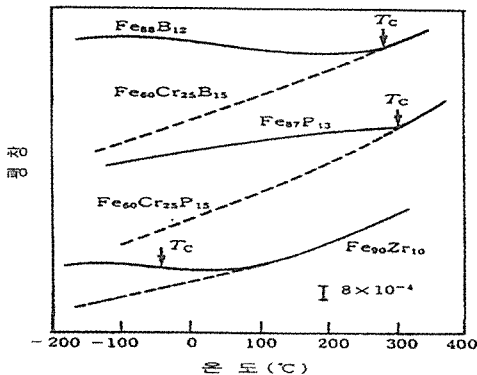
조성(MASS%)	열팽창계수($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	자기변태점	자기적성질
Fe-35.5Ni	1.2	232	강자성
Fe-32Ni-5Co	0.1	230	강자성
Fe-53Pt	-23.7	80	강자성
$(\text{Zr}_{0.7}\text{Nb}_{0.3})\text{Fe}_2$	-2.0	109	강자성
Cr-4.3Fe-0.5Mn	0.5	80	반강자성
Mn-25Ge	-0.9	100	반강자성
Fe-3.8B	0.3	327	강, 비정질
Fe-17.7Ni-15.2Zr	0	200	강, 비정질

따른 개량형으로서, 150°C 정도까지의 넓은 온도 범위에서 열팽창계수가 작은 Fe-32Ni-5Co의 super invar 합금, 내식성의 개량을 위해 만든 Fe-54Co-9.5Co의 stainless invar 합금, 혹은 이것에 한 개 내지 몇 종류의 원소를 첨가해서 강도와 가공성을 향상시킨 Fe-Ni계 다원합금이 있다. 이러한 합금은 fcc의 γ 단상합금이고, 자기적으로는 어느 종류의 반강자성 상태가 포함된 강자성이 약해진 상태의 것이 대표적이다. 이것에 반해 Fe-55Pt 합금은 γ 단상의 강자성체이기 때문에, 큰 음의 열팽

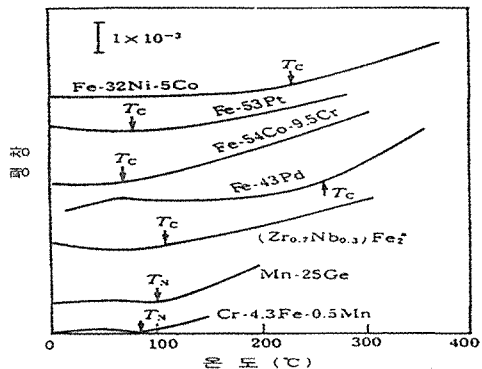
창 계수가 얻어지는 특이한 합금이다. $(\text{ZrNb})\text{Fe}_2$ 합금은 Laves 상형 합금이고, 강자성 외에 준강자성이 혼재하는 복잡한 자기적 구조를 가진다. 〈그림 3〉에는 인바합금의 몇 가지 예에 대하여 열팽창 곡선을 나타낸 것이다.

이 중에서 Fe-43Pd 합금은 평형 상태도에서는 $\alpha + \gamma$ 의 2상이지만, 고온의 γ 상으로부터 급냉되고 상온에서 γ 단상을 얻은 경우에 처음으로 인바 특성이 발휘된다. 자기적으로는 Fe-Ni계와 같은 거동을 한다. 다음으로 용융상태로부터 10⁵°C/sec 전후의 고

〈그림 3〉 각종 인바합금의 열팽창 곡선



〈그림 4〉 각종 인바합금의 열팽창곡선



속에서 냉각하여 제작한 비정질 합금은 액체상태가 그대로 급냉되었고, 소위 glass 상태를 나타내지만, 미시적으로는 어떤 종류의 격자를 형성하면 수축되고, 그 격자 진동은 결정질 합금과 같이 비조화적인 온도변화를 하는 것으로 생각된다. 실제, <그림 4>에서와 같이 비조화적인 온도변화를 하는 것으로 생각된다. 실제, <그림 4>에서와 같이 Fe-25Cr-15B 합금은 단순한 열팽창 곡선을 나타내고 있다. 한편, Fe-B계, Fe-P계 및 Fe-Zr계 합금에 있어서는 Tc 이하에서의 큰 자발체적자왜가, 온도상승에 따라 통상의 열팽창을 상쇄할 정도로 크기 때문에 전형적인 인바 특성을 나타낸다. 이외에도 최근, Fe-희토류계 혹은 Co-희토류계를 시작으로 해서 많은 비정질 강자성 합금에서 인바 특성이 보여지고 있고, 그 원인이 연구되어지고 있다. 비정질 인바합금의 큰 특징은, 그림 3의 결정질 합금과 비교해서 알 수 있듯이, Tc 이하에서의 저열팽창 영역이 매우 넓다. 이것은 거시적인 결정격자를 만들지 않기 때문에 장점이 있고, 응용성은 점차 확대될 것이다.

3-2. 반강자성 인바합금

종래의 인바합금은, 앞에서 나타낸 것과 같이 강

자성체이고, 10^{-6} order의 자왜를 가진다. 이 때문에 응용상의 여러 가지 제약이 있다. 예를 들면, 컬러 TV의 새도우 마스크는 외부 자계에 의해 ΔE 효과와 Joule 효과를 일으키고 미세한 색상차이를 만들고, VTR의 헤드 지지부에서는 자속선의 산란에 의해 음질의 균형이 매우 나빠진다. 이 외에도 전자현미경의 부품과 원자력 관계의 기기 등 외부자계의 영향을 기피하는 용도는 많고, 이 때문에 비자성의 인바합금이 필요하다. 비자성이라고 해도 인바 효과를 생성시키기 위해서는 몇 가지의 자성이 관계될 필요가 있다.

그림 3과 같이 Mn-Ge계 및 Cr-Fe-Mn계 합금은, 각각 6방 격자 및 체심입방 격자와 같이 결정구조가 다르지만, 두 합금 모두 반자성체이고 강자성의 인바 합금과 같은 정도의 자기체적 효과를 가지는 우수한 비자성 인바합금이다. 그러나 두 합금과 함께 인바 특성을 나타내는 온도범위가 좁은 것에 주조, 압연, 인발 등의 가공성이 나쁜 결점이 있고, 이러한 단점들의 개선이 요구되고 있다.

3-3. 인바합금의 용도

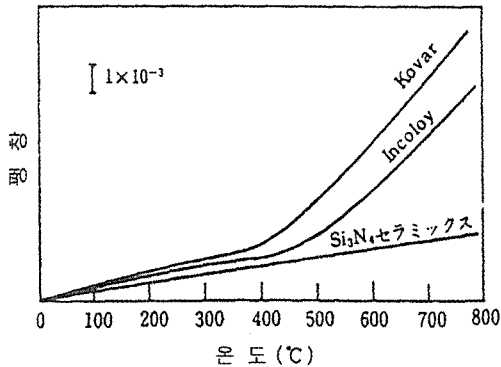
인바합금의 용도는 다양하지만, 크게 나누어 2종류가 있다. 하나는 강도가 필요하지 않는 저열팽창

<표 2>

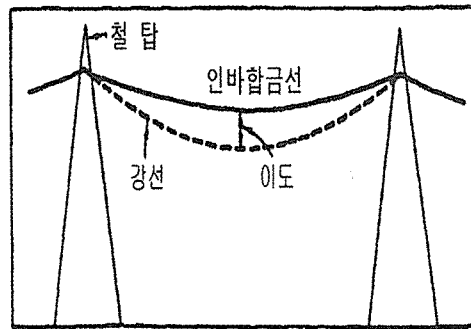
인바재료의 일반적 용도

(I) 저열팽창특성 이용	정밀기기	표준자, 각종 온도 조절장치, 레이저 광원의 기기부품
	접착	IC 리드 프레임, 새도우 마스크
(II) 저열팽창특성 + 강도이용	인장강도	LNG 저장용 용기, 전자현미경 지지대, 구조용 세라믹스와의 접합제, 송전선
	고온고압	항공기 부품, 가스터빈, 공해대책 기기부품

〈그림 5〉 Kovar 및 Incoloy 합금과 Si_3N_4 세라믹스와 열팽창곡선의 비교



〈그림 6〉 Al피복 인바합금선과 강심의 이도 모식도



성 만을 이용하는 것이고, 다른 하나는 어느 정도 저열팽창 특성을 희생하고서도 강도를 크게 향상시킨 것으로, 그 주요한 용도는 〈표 2〉에 (I) 및 (II)로 분류해 놓았다. 이 중에서 (I)에 있어서는, 지금까지 많은 문헌에서 소개되어 있기 때문에, 여기서는 (II)에 대해서 간단히 설명하고자 한다.

인바합금을 구조용 세라믹스와 접합재료로 사용하는 경우, 인장강도를 가능한 한 크게 하는 것 외에 넓은 온도범위에서 세라믹스와 같은 열팽창 계수를 가지는 것이 필요하다. 그림 5에서는 Si_3N_4 세라믹스와 Incoloy 및 Kovar의 열팽창 곡선을 비교해 놓았다. 모든 합금에서 이러한 Curie 온도 400°C 부근 이하에서는 세라믹스와 같은 열팽창 계수를 가지기 때문에 응용성은 높지만, 현재로는 800°C 정도까지의 저열팽창성이 요구되고 있기 때문에 연구가 계속 진행되고 있다. 그림 6은 송전선으로의 응용 예이다. 잘 알려진 것과 같이 송전선은 외기 온도의 변화에 따라 팽창수축하고 철탐에 부담을 주지 않게 하기 위하여 상당한 처짐을 가지고

걸쳐져 있다.

인바합금을 강심으로 해서 외층을 Al으로 피복한 송전선은, 처짐의 양이 적어지기 때문에 이로 인한 장애를 방지하는 비용이 감소하는 이점이 있다. 전동 톱은 1300rpm으로 고속회전하기 때문에 목재와의 사이에 마찰열에 의해 떨림이 생기고 절단부피가 크게 된다. 이 전동 톱에 인바합금을 적용해서 절단부피를 줄인 결과, 연간 약 2만호(戶)분의 목재의 절약이 가능하였다. 또 Fe-Ni합금에 2%전후의 C와 Si를 첨가해서 저열팽창 특성을 가지는 인바주철은 공작기계, 예를 들면, jig grinder의 스피indle 헤드 부분에 응용되고, 공작 정밀도를 비약적으로 향상시키고 있다.

4. 결론

인바 합금은 오래되고 새로운 재료이다. 인바 특성의 원인은 명확히 밝혀지지 않았지만, 이것은 따로 새로운 형태의 합금이 발견되고 응용성도 확대

되고 있다. 또 최근의 신소재 개발분야는 눈에 띄는 것이 있지만, 금속의 부품과 구조물이 있는 한 열팽창은 피할 수 없는 문제이고, 여러 용도로 정확히 대응할 수 있는 재료의 요구는 많다. 특히 최근에는 저열팽창 보다도 중열팽창 재료의 수요가 많고, 대신에 강도, 내식성, 전도성, 가공성 등 몇 가지 조건

이 더해져 있기 때문에 이 방면으로의 대응이 되지 않고 있는 실정이다. 또, 인바특성은 Elinvar 특성 (탄성율이 온도에 대해 불변)도 수반한다. 합금에 따라서는 인바-Elinvar의 2 특성을 동시에 만족하는 것도 있다.

