1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1999. 7.19-21

고강도 저열팽창 인바합금에 있어서 Co 첨가의 영향

김봉서, 조영암, 유경재*, 권해웅*, 이희웅, 김병걸
한국전기연구소, 부경대학교 재료공학과*

Effects of Co Addition in High Strength and Low Thermal Expansion Invar Alloy

Bongseo Kim, Kyungjae Yoo*, Haewoong Kwon*, Byunggeol Kim
Korea Electrotechnology Research Institute, Pukyong National University*

Abstract - To investigate invar alloy as a core material for increased capacity over-head transmission line which have high strength and low thermal expansion coefficient, hardness and thermal expansion coefficient of Fe-Ni-Co alloy have been studied. It is necessary that invar alloy have low thermal expansion coefficient and high strength for increased capacity over-head transmission line .

In this paper, we tried to find out the effect of Ni and Co which has ferromagnetic properties and high saturation magnetization

It was found that Ni decrease thermal expansion coefficient and hardness, Co decrease thermal expansion coefficient but increase hardness in Fe-xNi-Co system, In Fe-(29-x)Ni-Co system, the material has no low thermal expansion properties substituting Co instead of Ni in concentration range of 1~7%Co.

1. 서 론

산업발전에 따른 전력수요의 증가에 대응하기 위해서는 발전용량의 증대뿐만 아니라 송전선로의 용량 증대가 필수적이다. 송전선로의 용량증대 방안으로는 전선의 크기를 대형화하거나 다도체화라는 방법과 송전선로를 신규로 건설하는 방법이 있다. 그러나 전선크기의 대형화나 다도체화하는 방법은 송전선로 및 기타 송전시설의 보강이 수반되어 막대한 건설비가 요구된다. 따라서 기존의 송전시설을 사용하여 건설비용을 최소화할 수 있는 증용량 방안이 가장 효과적이다.

본 연구에서는 송전선의 증용량화시에 도체의 온도 상승에 수반되는 전선의 처짐을 억제하기 위해 사용 가능한 고강도 저열팽창 인바합금의 기본 물성과 합금원소의 영향에 대하여 조사하였다.

기존의 인바합금은 Fe-36.5%Ni 조성으로 열팽창계수가 1.2×10^{-6}/℃로서 약 12×10^{-6}/℃의 탄소강과 비교하면 매우 작지만 인장강도가 일반 탄소강에 비해 작아서 구조용 재료로 사용하기가 어려운 실정이다. 이 저열팽창 특성을 송전선에 적용하게 되면 송전시 발생하는 열에 의한 전선의 처짐을 방지할 수 있지만 인장강도의 개선이 필요하다. 초기에 개발된 인바합금의 기계적 특성을 개선하기 위하여 최근에 Fe-Ni-Co 3성분계를 기본 성분으로 하는 고강도 저열팽창 인바 합금에 대한 연구가 진행되고 있다.

그래서 본 연구에서는 송전선의 강선으로 적용이 가능한 재료로 고강도특성과 저열팽창 특성을 동시에 만족시키기 위해 Fe-(29~30)Ni-12.5Co 합금을 기본 조성으로 하고, 이 합금의 기본 물성을 조사하였으며, 이 조성에서 Co의 양을 변화시키면서 고강도 저열팽창 합금으로서의 물성을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 합금은 유도용해로에서 용해하였으며 용해된 합금을 용체화처리를 위해 900℃에서 2시간 유지한 후 수냉처리를 하였다.

이렇게 제조된 인바합금의 특성 평가를 위해 TMA (Thermo-mechanical analysis)를 이용하였고, 이때 열분석기의 승온 속도는 10℃/min으로 하였으며, 이 열분석 결과로부터 50~300℃ 구간에서 열팽창계수를 측정하였다. Vickers 경도기를 이용하여 경도를 측정하였으며 X-선 회절기를 이용하여 인바 합금의 상을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1에 Fe-Ni-Co 3원계 합금의 열팽창계수의 등가곡선을 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 Fe에 Ni이 약 30~40% 조성 범위와 Co가 약 10%까지 첨가되면 열팽창계수가 2.0×10^{-6}/℃이하의 저열팽창 특성을 가지고 있다. Ni이 오스테나이트 안정화 원소로 작용하여 기계적 특성의 향상에 기여하지 못할 것으로 예상되지만, Co는 페라이트 안정화원소이기 때문에 기계적 특성 향상에 기여할 것으로 생각된다.

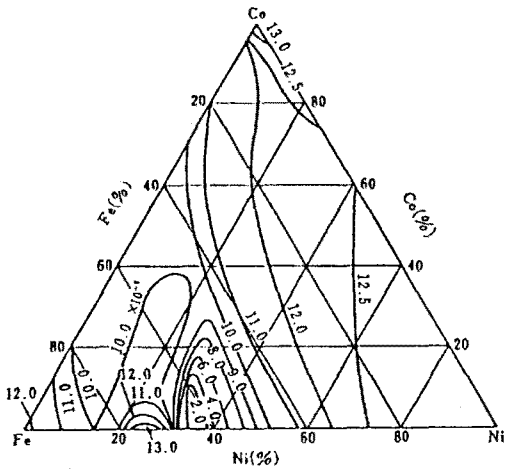

Fig. 1 Contour line of α in Fe-Ni-Co alloy

그래서 본 연구에서는 저열팽창 특성을 유지유지하면서, 고강도 특성을 가지기 위해 Fe-Ni-Co를 기본 원소로 하고 Ni를 25~30%으로 하였으며, Co를 0~15% 첨가하여 Fe-29Ni-12.5Co를 기본 조성으로 실험을 진행하였다.

먼저 Fe-Ni-Co합금계에서 Ni의 양을 25%에서 30%까지 변화시켜 열팽창계수를 측정하였고 그 결과를 그림 2에 나타내었다. Ni의 양이 25~28%까지는 열팽창계수(α)의 변화가 거의 없고, α 값이 11×10^{-6}/℃의 크기로서 탄소강과 비슷한 수준이었으며, 인바 특성을 나타내지 못하고 있다. 그러나 Ni의 양이 29% 이상이 되면 α가 급격히 감소하여 인바 특성을 나타내기 시작한다. 또한 29~30% Ni을 첨가한 경우, 주조상태에서의 α가 용체화처리한 시편 보다 큰 것은 인바 특성에 중요한 영향을 미치는 Ni의 분포가 주조상태에서는 초정 수지상 내에서의 조성과 기지 조직에서의 차이가 크기 때문이다. 그러나 용체화 처리를 하게 되면 안정한 조직이 얻어지고 또한 Ni의 분포가 균일하게 되어 α값이 주조상태보다 작아지게 된다. 이상의 α 측정 결과로부터 29%이상의 Ni가 첨가되고 용체화처리를 하게 되면 α가 5×10^{-6}/℃이하가 되어 실제 송전선에 적용이 가능할 것으로 생각된다.

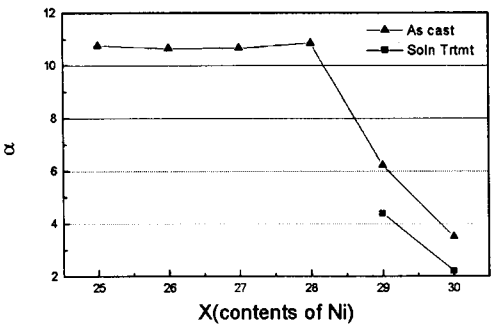

Fig. 2 Thermal expansion coefficient in Fe-(25~30)Ni-12.5Co-0.24C alloy

이때 Ni 조성별로 경도를 측정하여 그림 3에 그 결과를 나타내었다. Ni 양이 증가하면 경도가 점차 감소하는 것으로 나타나 있는데 이것은 다음의 X-선 회절 결과와 연관시켜 보면 간단히 알 수 있다. 즉 Ni의 양이 증가하게 되면 기지 조직인 α-Fe 상에서 γ-FeNi 상의 분율이 증가하게 되어 경도는 감소하게 된다. 25%Ni에서는 경도가 약 310정도이지만 30%Ni가 되면 약 160정도로 감소하게 되어 재료의 경도 감소가 매우 심한 것을 알 수 있다.

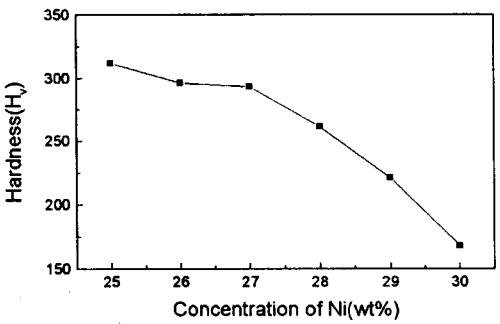

Fig. 3 Hardness(H_v) with Ni contents in Fe-(25~30)Ni-12.5Co-0.24C alloy

Ni의 양이 변할 때의 X-선 회절결과를 그림 4에 나타내었다. Ni의 양이 25~27%에서는 순수한 α-Fe만이 검출되었으나 28%에서는 γ-FeNi가 미량 존재하고 있고 29%이상의 조성에서는 완전히 γ-FeNi가 확인되고 있다. 즉 Ni의 양이 적을 때에는 상대적으로 경도가 큰 α-Fe가 주된 상으로 존재하고 Ni의 양이 증가하게 되면 오스테나이트 구조를 가지는 γ-FeNi가 생성되어 경도를 감소시키고 있다. 또한 이것을 열팽창계수와 연관시키면 α-Fe는 인바특성을 나타내지 않는 상이고, 인바특성은 γ-FeNi에 영향을 받는 것을 나타내고 있다. 즉, 기지내에 γ-FeNi가 일정량 이상 존재하여야만 인바특성을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

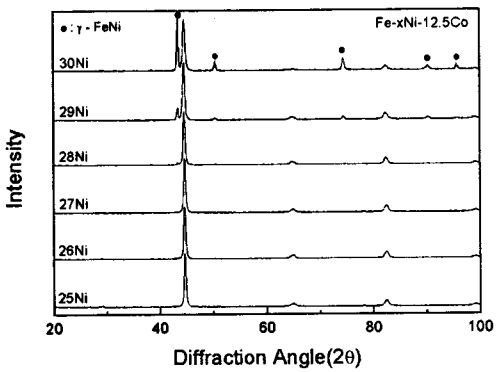

Fig. 4 XRD patterns of Fe-(25~30)Ni-12.5Co-0.24C alloy

또한 이 γ-FeNi 상은 면심 입방구조를 가지고 있으며, 동일한 γ-FeNi상 내에서도 강자성과 반강자성 특성을 동시에 가지고 있는 것으로 보고되고 있다. 그래서 본 연구에서는 강자성 재료인 Fe, Ni 이외에 Co의 양을 변화시켰다. 우선, Fe-29Ni 조성에서 Co를 15%까지 첨가하여 열팽창 계수와 경도를 측정한 결과를 그림 5와 6에 나타내었다.

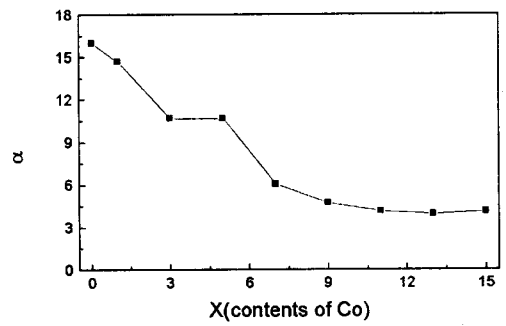

Fig. 5 Thermal expansion coefficient in Fe-29Ni-xCo-0.24C alloy

그림 5에 나타낸 바와 같이 Co의 양이 증가하면 열팽창 계수가 감소함을 알 수 있다. 이때 Co의 양이 약 11%이상이 되면 열팽창계수가 4×10^{-6}/℃ 이하로 되어 양호한 인바 특성을 가지게 된다. 이것은 Matsumoto에 의해 고찰된 식 (1)에 나타난 포화자화(M_s)와 퀴리온도(T_c)의 비에 관계된 것으로 포화자화가 증가하게 되면 열팽창계수는 감소함을 알 수 있다.

$$\alpha = \tan\delta - \frac{kM_s}{T_c} \qquad (1)$$

여기서 α는 열팽창계수, δ는 강자성 팽창의 정도를 나타내는 기울기이며 k는 상수이다. 즉 포화자화 값이 큰 Co를 첨가하게 되면 열팽창계수가 감소하게 된다. 동일한 조건에서 Co의 양을 변화시키면서 경도를 측정한 결과를 그림 6에 나타내었다. 경도의 변화는 Co의 양이 증가하면 직선적으로 증가하다가 9%에서 최대치를 나타내고 그 이상의 조성에서는 약간 감소하는 경향을 나타낸다. 초기에 Co를 첨가할 경우에 경도가 증가하는

것은 Co가 페라이트 안정화 원소이기 때문에 α상이 상대적으로 안정화하게 되어 경도가 증가하고, 9% 이상에서는 포화되어 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 이 결과로부터 저Co 조성에서는 경도가 낮고 α가 커서 송전선용 강심으로의 적용이 어렵지만, Co 양이 약 10%이상에서는 일정 경도 이상에서 인바합금을 냉간가공하면 보다 경도를 향상시킬 수 있고 또한 $4x10^{-6}$/℃ 정도의 열팽창 특성도 가질 수 있기 때문에 강심으로의 적용이 가능할 것으로 예상된다.

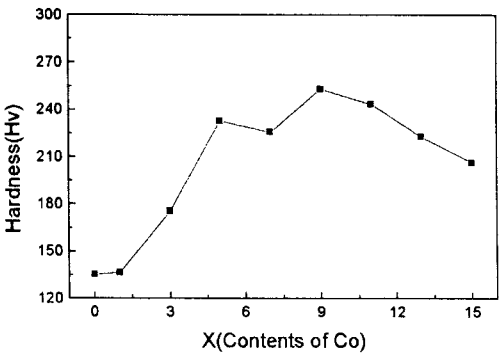

Fig. 6 Hardness(H_v) with Ni contents in Fe-29Ni-xCo-0.24C alloy

그러나 Ni 대신에 Co를 치환할 경우에는 다른 특성이 나타나게 된다. 이 결과를 그림 7과 8에 나타내었다. 그림 7에는 Ni와 Co양을 29%로 고정시켜 놓고 Ni 대신에 Co를 치환하였을 때 열팽창계수의 변화를 나타내었다. 열팽창계수 변화는 Co의 양에 따라 약간의 변화는 있었지만, 그 크기가 $11\sim15x10^{-6}$/℃로서 일반 탄소강과 다르지 않았고 인바특성을 나타내지 않았다.

강도는 Co의 양이 증가함에 따라 증가하다가 4%Co에서 최대가 되어 포화되는 경향을 나타내었고 이것은 Co가 α상을 형성시켜 경도의 증가를 초래하는 것으로 생각된다.

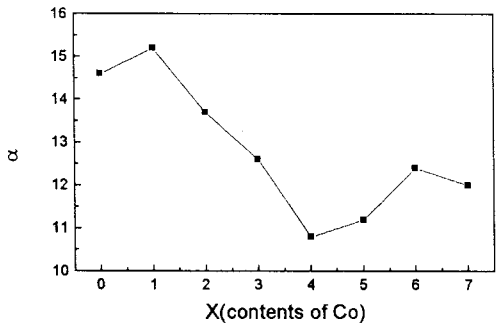

Fig. 7 Thermal expansion coefficient in Fe-(29-x)Ni-xCo-0.24C alloy

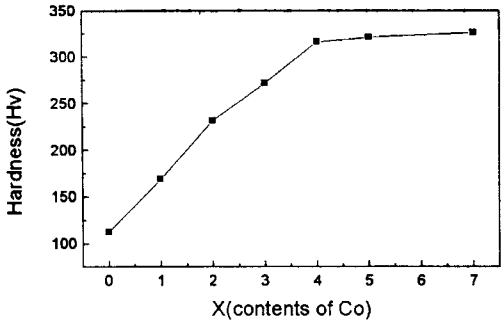

Fig. 8 Hardness(H_v) with Ni contents in Fe-(29-x)Ni-xCo-0.24C alloy

4. 결 론

저열팽창 특성을 가지고 있는 인바합금을 송전선용 강심에 적용하기 위한 기본 연구로서 저열팽창 특성을 가지면서 강도도 요구되는 고강도 저열팽창 합금의 제조를 위해 900℃에서 2시간 용체화처리 하여 제조한 인바 합금에서 Ni와 Co의 양를 변화시켜 기본 특성을 조사한 결과 다음과 같았다.

(1) Fe-xNi-12.5Co에서 Ni의 양이 29%이상에서 저열팽창 특성을 나타내었고, Ni의 양에 따라 γ-FeNi 상의 생성에 의해 경도는 감소하였다.

(2) Fe-xNi-12.5Co에서 29% 이상의 Ni 농도에서는 α-Fe와 γ-FeNi 상이 공존하였다.

(3) Fe-29Ni-xCo에서 Co 양이 증가하면 포화자화 값이 증가하여 열팽창계수는 감소하고, 경도는 9%까지는 증가하다가 그 이상에서는 약간 감소한다.

(4) Fe-(29-x)Ni-xCo에서 Ni 대신에 Co를 치환하게 되면 저열팽창특성은 나타나지 않았고, 기지내에 α상의 분율이 증가하기 때문에 경도는 증가하였다.

[참 고 문 헌]

[1] C. E. Guilllaume, Compt. Rend. Acad. Sci. Paris, 124, p.1515, 1897

[2] H. Matsumoto, Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ., 20 p.101, 1931

[3] H. Maruyama, J. Phys. Soc. Jpn, 55, 2834, 1986

[4] B. D. Cullity, "introduction to Magnetic Materials", Addision-wesley Publishing Co.) 1972

[5] M. Hatate, H. Sumimoto, K. Nakamura, J. Japan Inst. Metals, Vol. 54, No. 9, p.1036-1040, 1990