

증용량 송전선 강심용 고강도 인바합금에 있어서 탄소 첨가의 영향

김봉서, 유경재, 이희웅, 김병걸
한국전기연구소

Effects of Carbon Addition in High Strength Invar Alloy for Transmission Line

Bong-Seo Kim, Kyung-Jae Yoo, Hee-Woong Lee, Byung-Geol Kim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - To study invar alloy as a core material for large ampacity over-head transmission line which have high strength and low thermal expansion coefficient simultaneously, thermal expansion coefficient, physical properties and hardness of Fe-Ni-Co-xC alloy have been studied. It is necessary that invar alloy possess 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 carbon addition related with mechanical and physical properties. It was found that the thermal expansion coefficient and hardness were increased with carbon addition for whole composition range but the saturation magnetization was decreased except for the range of 0.1~0.4%C

1. 서 론

전력수요의 급격한 증가에 대응하기 위해서 발전용량의 증대뿐만 아니라 송전 용량 증대가 요구되고 있다. 송전 용량의 증대 방안 중의 하나로 전선의 제질 및 구조를 개선하는 방법이 있다. 이 방법은 기존의 송전선로를 그대로 사용하거나 선로 건설 비용을 최소화할 수 있는 증용량 방안으로 매우 경제적이다.

기존의 인바합금은 Fe-36.5%Ni 조성으로 열팽창계수가 $1.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로서 약 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 탄소강과 비교하면 매우 작지만 인장강도가 일반 탄소강에 비해 작아서 구조용 재료로 사용하기가 어려운 실정이다. 이러한 기계적, 물리적 기타 특성을 해결하기 위하여 합금 원소를 첨가하거나 열처리 및 가공방법을 달리하여 개선하고자 하는 연구가 진행되었다. 그러나 송전선의 강심으로 적용하기 위해서는 최소 1300MPa 이상의 강도 특성을 가져야 되는데, 기존의 인바 합금들은 강가공에 의해 이러한 강도문제를 해결하고 있지만 강도 향상에 제한이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 저열팽창 특성을

유지하면서 고강도 특성을 가지는 Fe-Ni-Co 3원계 합금에 대한 연구가 최근에 많이 진행중이다.

본 연구에서는 송전선의 증용량 송전선에 도체의 온도 상승에 수반되는 전선의 처짐(이도) 문제를 해결하기 위해 강심으로 적용되는 고강도 저열팽창 Fe-Ni-Co 3원계 인바 합금 강심에 있어서 구조상태에서 탄소 첨가의 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 고순도의 전해철, 니켈, 코발트를 주원료로 하고 여기에 탄소를 0~2.5wt%까지 첨가하였다. 원료의 용해는 진공유도용해로를 사용하였고, 탈산제를 첨가하여 용탕을 탈산한 후, 각형의 몰드에서 주조하여 시편을 제조하였다.

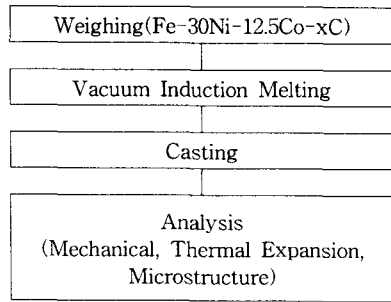


Fig. 1 Experimental Procedure

이렇게 제조된 인바 합금의 특성 평가를 위해, 먼저 열팽창 계수는 TMA (Thermo-mechanical analysis)를 이용하였고, 이때의 승온속도는 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 하였으며, 이 열분석 결과로부터 50~300 $^{\circ}\text{C}$ 구간에서 열팽창계수를 측정하였다. 열팽창 계수의 측정 온도를 50~300 $^{\circ}\text{C}$ 의 넓은 온도 범위로 한 것은 실제 증용량 송전을 하게 되면 연속전류의 경우에는 210 $^{\circ}\text{C}$ 까지 승온하게 되고 또한 단시간 또는 순간 전류의 경우에는 보다 고온까지 승온하게 되어 이러한 온도 특성을 고려하여 열팽창계수의 측정 범위를 정하였다. 또한 재료의 경도는 Vickers 경도기를 이용하여 측정하였으며, 재료의 미세조직은 광학현미경으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2에 Fe-Ni-Co 3원계 합금의 주조상태에서 탄소의 첨가에 따른 열팽창 계수의 변화를 나타내었다. 탄소가 첨가되지 않은 경우에 있어서 열팽창 계수는 약 $6.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 나타났고, 이것은 Fe-Ni-Co 3원계 열팽창 계수 등가곡선(Fig. 3)에서 알 수 있듯이 Ni 조성이 약 30% 부근에서는 Ni 조성의 작은 변화에도 열팽창 계수가 급격히 변하기 때문에 높게 났다. 탄소가 첨가되면 약 0.4%까지는 급격히 증가하다가 약 0.4%를 기준으로 해서 기울기가 변하고 다시 약 1.0%를 기준으로 포화되는 특성을 보였다. 그러나 탄소의 함량이 0.5% 이상이 되면 열팽창 계수가 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 이상이 되고, 인바 특성이 약화됨으로 인해 저열팽창 특성을 가지는 인바 합금으로 적용이 어렵게 된다.

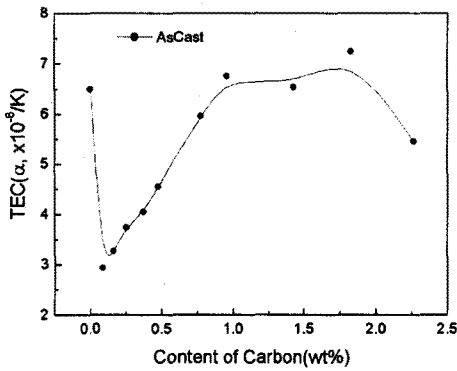


Fig. 2 Variation of thermal expansion coefficient with carbon content

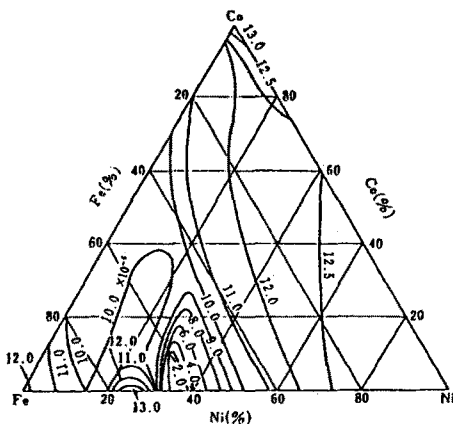


Fig. 3 Contour line of α in Fe-Ni-Co alloy

이것은 Fe-Ni(34~40% 이상)에 탄소를 첨가하여 열팽창 계수의 변화를 조사한 기존의 결과와 크게 다르지 않은 유사한 결과를 나타내었다. 즉 Fe-Ni-Co계와

Fe-Ni-Co-C 합금계가 탄소의 첨가에 대해 유사한 열팽창 특성을 가지고 있었다. 이와 같이 탄소의 양에 따른 열팽창 계수의 변화의 원인을 조사하기 위하여 이 합금계에 대하여 포화자화 값을 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 탄소를 첨가하지 않은 조성에서는 포화자화 값이 약 162.5emu/g 정도로 포화 자화 값이 높았으나 탄소가 첨가되면 감소했다가 약 0.4%까지 다시 증가하였고 0.5%부터는 다시 감소하였고, 1.0% 이상에서는 기울기의 감소 경향이 더욱 증가하였다. 이것은 Fig. 2의 열팽창 계수와 일정한 상관 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 즉 탄소를 첨가하지 않은 조성에서는 열팽창 계수와 포화 자화 값이 모두 높게 나타났고, 0.1~0.4%의 범위에서는 증가하였으며, 0.5~1.0%의 범위에서는 열팽창 계수의 증가 경향이 약간 감소하였지만, 포화 자화 값은 감소하였고, 1.0% 이상에서는 열팽창 계수는 포화되는 특성을 나타내었지만, 포화자화 값의 감소 기울기는 둔화하였다. 이상과 같이 열팽창 계수는 포화 자화 값에 직접적인 영향을 받는 것으로 고려되어진다.

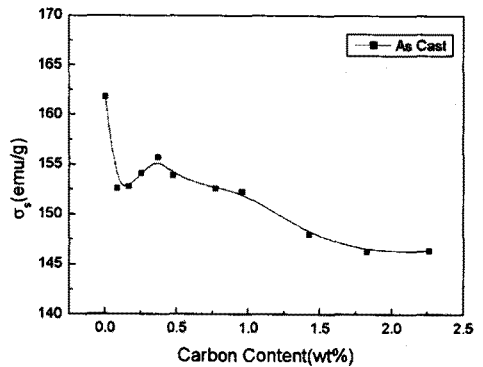


Fig. 4 Variation of magnetic saturation with carbon content

이것은 Matsumoto에 의해 고찰된 식 (1)에 나타난 포화자화(M_s)/큐리온도(T_c), 열팽창 계수의 관계에 대하여 나타낸 것과 같이 포화 자화와 열팽창 계수에는 직접적인 관계가 있음을 알 수 있다.

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

여기서 α 는 열팽창계수, δ 는 강자성 팽창의 정도를 나타내는 기울기이며 k 는 상수이다. 위의 식 (1)에서는 포화 자화 M_s 가 증가함에 따라 열팽창 계수 α 는 감소하지만 이것이 단지 포화자화 값에는 의존하는 것이 아니라, 포화자화와 큐리 온도의 비에 직접적으로 관계되는 것이기 때문에 정확한 관계식을 도출하기는 어려운 상태이다. 즉 Matsumoto에 의해 고찰된 식 (1)을

Fe-Ni-Co 3원계 합금에 직접적으로 적용하는 것이 타당한지는 보다 많은 실험 데이터가 필요하지만, 포화 자화값이 열팽창계수에 직접적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

그러나 포화자화 값의 절대적 크기는 초기의 0.1~0.4%까지는 일부 증가하였지만, 전체적인 경향은 탄소의 첨가에 따라 감소하였다. 이것은 금속 중에서 강자성체의 대표적인 Fe, Co, Ni로 이루어진 합금계에서는 첨가 원소가 함유되는 양에 비례하여 포화 자화 값이 변하는 것을 알 수 있다.

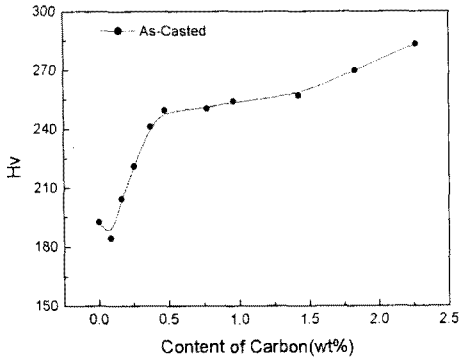


Fig. 5 Variation of hardness with carbon content

Fig. 5에는 탄소의 첨가량에 따른 경도의 변화를 나타낸 것으로 초기에 탄소가 첨가되지 않은 조성은 Ni의 함량이 낮아서 탄소가 0.1% 첨가된 조성보다 약간 높게 나타났지만, 일반적으로 탄소의 양이 증가하게 되면 탄소가 매트릭스인 Fe-Ni-Co 격자에 침입형으로 고용하게 되어 고용강화에 의해 경도가 증가하게 된다. 이 결과에서도 알 수 있듯이 약 0.5%까지는 급격히 증가하다가 0.5% 이상의 조성에서는 완만하게 증가함을 알 수 있다. 이것은 Fe-Ni-Co 상태도 상에서 탄소의 조성이 0.5% 부근을 기준으로 해서 상태도 상의 변화가 있음을 나타내고 있다.



Fig. 6 Microstructure of Fe-30Ni-12.5Co-xC
(a) 0% C (b) 1.5% C

Fig. 6에는 탄소를 첨가하지 않은 조성과 1.5%를 첨가한 시편의 미세 조직을 나타낸 것으로 전형적인 주조 조직을 나타내고 있다.

4. 결 론

저열팽창 특성을 유지하면서 고강도 특성을 가지는 Fe-30%Ni-12.5%Co 3원계 합금에 탄소를 첨가하여 진공유도 용해하여 주조한 합금의 열팽창 계수 및 다른 물리적 특성을 측정된 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 탄소의 첨가량이 증가함에 따라 열팽창 계수는 증가하였다.
- (2) 포화 자화 값은 탄소의 첨가량에 따라 0.1~0.4%까지는 증가하다가, 0.5% 이상에서는 계속 감소하였다.
- (3) 열팽창 계수는 포화자화의 변화와 관계가 있고, Fe-Ni-Co-C 합금계에서는 탄소의 양이 0.4%, 1.0% 조성 부근에서 다른 특성으로 변화하였다.
- (4) 탄소의 양에 따라 경도는 0.4%까지는 급격하게 증가하다가 0.5% 이상의 조성에서는 완만하게 증가하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] C. E. Guillaume, 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", Addison-Wesley Publishing Co. 1972
- [5] M. Hatate, H. Sumimoto, K. Nakamura, Japan Inst. Metals, Vol. 54, No. 9, p.1036-1040, 1990
- [6] 木夏本新一: 素形材, 29, 1989, 16
- [7] D. D. Johnson, F. J. Pinski, J. B. Stauton, B. L. Gyorfy, G. M. Stocks: Physical Metallurgy of Controlled Expansion Invar-Type Alloys, Kenneth C. Russel, Darrel F. Smith, TMS, 1989, p.4.
- [8] 문병문, "인바형 저열팽창 주조재료의 개발 및 활용 현황", 大韓金屬學會會報, 12권 2호, pp245~250, 1999.
- [9] K. Sato, T. Ohno, Y. Masugata, N. Shimada, H. Shiga "送電線用新高强度低熱膨脹合金線", 日立金屬技報, Vol. 12, 1996, p.49
- [10] M. Hatate, H. Sumimoto, K. Nakamura "Influence of Carbon and Nickel on Linear Thermal Expansion Coefficient in Low Thermal Expansion Fe-Ni-C alloys", 日本金屬學會紙, Vol. 54, No. 9, 1990, p.1036-1040