

송전선 강심용 Fe-Ni-Co-C 합금의 열팽창계수에 미치는 자기적 특성의 영향

김봉서, 김병걸, 이희웅  
한국전기연구원 신소재응용그룹

Effects of Magnetic Characteristics on Coefficient of Thermal Expansion in Fe-Ni-Co-C Invar Alloy for Transmission Line

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

**Abstract** - Generally, Invar alloy shows very low thermal expansion characteristics, lower than  $2 \times 10^{-6}/K$  approximately. To apply Fe-Ni-Co-C Invar alloy as a core material for large ampacity transmission line we studied the effects of magnetic properties on coefficient of thermal expansion. The coefficient of thermal expansion(CTE) suddenly decreases with addition of a little carbon(0.08%), increases with the increasing carbon and has a constant value at the composition over than 1.0%C. The trend of Curie temperature change with carbon is similar with that of CTE. Therefore, the CTE has a linear relationship with Curie temperature. However, the CTE linearly decreases with the ratio of saturation magnetization and Curie temperature( $\sigma_s/T_c$ ).

1. 서 론

경제 규모의 확대와 생활 수준의 향상에 따라 전력 수요가 급격히 증가하고 있다. 이러한 전력 수요에 적절히 대응하기 위해 송전 용량의 증가에 대한 연구가 진행되고 있다. 송전 용량의 증대 방안 중의 하나로 송전선 도체의 단면적을 증가시키는 방법이 주로 이용되고 있다. 그런데 송전선의 도체를 증가시키면, 도체에 Joule 열이 증가하게 되고, 이로 인해 전선의 온도가 증가하게 된다. 전선의 온도가 증가하게 되면, 전선의 열팽창으로 인해 이도(sag)가 증가하게 된다. 전선의 이도는 송전 용량별로 그 높이가 규격으로 정해져 있고, 이 기준을 만족시켜야 한다. 표 1은 연속운전시 전선의 이도에 대한 규격을 나타내고 있다.

Table 1 Specification of sag at continuous condition(90, 210°C) (unit:m)

Conductor	240mm <sup>2</sup>	330mm <sup>2</sup>	410mm <sup>2</sup>	480mm <sup>2</sup>
ACSR	9.44	9.77	9.42	10.8
STACIR	9.66	10.5	10.2	12.7
STACIR/AW	9.54	10.6	10.3	12.8
HSTACIR/AW	9.35	10.3	10.0	12.5

Table 1과 같이 ACSR의 경우에서는 90°C에서, 그리고 강심을 Invar 합금을 사용하는 전선에서는 210°C를 기준으로 하여 이도에 대한 규격을 만족시켜야 한다. 이상과 같이 송전 용량의 증가를 위해 내열 Al 도체

와 저열팽창이면서 고강도 특성을 가지는 강심이 필요하게 된다. 본 연구에서는 저열팽창 특성을 가지면서 고강도를 유지하는 Invar 합금의 열팽창계수에 대한 자기적 특성에 대하여 발표하고자 한다. 일반 Invar 합금은 Fe-36%Ni 조성이 일반적이고 이 합금을 기초로 하여 합금 원소를 첨가하고 냉간 가공하여 가공 경화시켜 강심으로 사용하고 있다.

기존의 Fe-36%Ni Invar 합금은 강가공에 의해 강도를 약 130kg/cm<sup>2</sup>정도까지 향상시키고 있지만, 본 연구에서는 기존의 Fe-36%Ni Invar 합금의 단점인 강도 특성이 향상되어, 고강도 특성을 나타내는 Fe-30%Ni-12.5%Co-C 합금 조성을 이용하였다. STACIR용 강심으로 사용되는 Invar 합금은 기본적으로 저열팽창 특성과 동시에 고강도 특성을 나타내어야 한다.

일반적으로 저열팽창 특성을 나타내는 Fe계 Invar 합금은 자기적 특성과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에, 본 연구에서는 Fe-30%Ni-12.5%Co-C의 온도에 따른 열팽창 특성을 조사하고, 이 합금의 열팽창 계수에 미치는 자기적 특성의 영향을 나타내고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험방법

기본 조성을 무게 비율로 Fe-30%Ni-12.5%Co-xC로 하고, 전해철, 전해 Ni, Co를 사용하여 칭량한 후, 탄소를 0~2.0%까지 조성을 제어하였다. 재료의 용해는 진공 유도 용해로(Vacuum Induction Melting furnace)를 사용하였고, 초기 진공을  $5 \times 10^{-5}$ Torr로 유지한 후에 Ar gas를 대기압까지 충전한 상태에서 재료를 유도 용해하였다. 용해된 용탕을 탈산 처리한 후 graphite 도가니에 주입하여 3.5cm x 7cm x 15cm의 크기로 주조하였다. 주조된 Invar 합금의 성분 분석은 ICP-AES와 탄소-황 분석기를 이용하여 분석하였고, 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

이상과 같이 탄소의 양을 변화시켜 주조된 Invar 합금의 열팽창 계수(CTE, Coefficient of Thermal Expansion)를 측정하기 위해 시편을 5x5x5mm의 크기로 절단하여, TMA(Thermo-Mechanical Analysis)로 각 온도 구간 별로 CTE를 측정하였다. 또한 TMA 결과로부터, 일정한 직선영역을 나타내는 온도인 150°C와 400°C에서의 접선의 교점으로부터 큐리(Curie) 온도를 측정하였다. 일반적으로 Fe계 Invar 합금은 포화자화 값이 가장 큰 원소들로 구성되어 있기 때문에 Invar 합금의 포화자화 값이 중요한 역할을 하게 된다.

그래서 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)를 사용하여 상온에서 탄소 조성별로 포화자화 값을 측정하였다.

Table 2. Analysis of Specimen(wt%)

Fe	Ni	Co	C
Bal.	30.58	12.59	0
Bal.	30.52	12.66	0.08
Bal.	30.45	12.64	0.15
Bal.	30.51	12.62	0.25
Bal.	30.50	12.67	0.37
Bal.	30.44	12.60	0.47
Bal.	30.48	12.68	0.77
Bal.	30.39	12.61	0.96
Bal.	30.41	12.69	1.43
Bal.	30.06	12.49	1.82

## 2.2 결과 및 고찰

### 2.2.1 열팽창 특성

탄소를 1.8%까지 첨가하여 주조 상태로 하여 제조하고, 상온~300°C의 온도 구간에서, 탄소의 조성에 따른 열팽창 계수의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 열팽창 계수는 탄소에 따라 일관된 변화를 나타내었고, 특히, 탄소가 첨가되지 않은 시편에서는 열팽창 계수가 약  $6.5 \times 10^{-6}/K$  정도로 매우 큰 값을 나타내었다. 그러나 탄소를 미량 첨가하게 되면 열팽창 계수는 급격히 감소하게 되어 약 0.08%C에서는 약  $2.9 \times 10^{-6}/K$ 의 우수한 열팽창 특성을 가지게 된다.

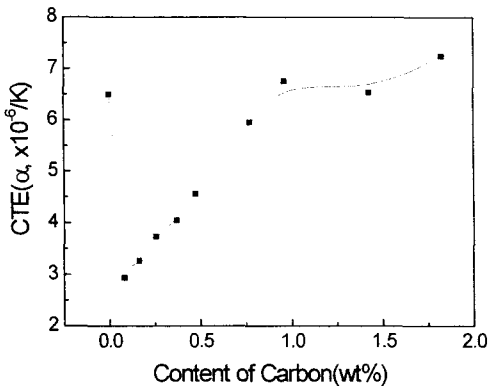


Fig. 1 Variation of mean coefficient of thermal expansion with carbon content in Fe-30%Ni-12.5%Co-xC Invar alloy

탄소 첨가량이 증가할수록 열팽창 계수도 선형적으로 증가하게 되고, 즉 Fe-30%Ni-12.5%Co Invar 합금에서는 약 1%C까지 탄소 양에 따라 직선적으로 증가한다. 그러나 1.0%C 이상의 조성에서는 열팽창 계수의 변화 경향이 다르게 나타나고, 이 조성 범위에서는 약  $7.0 \times 10^{-6}/K$  정도의 일정한 값을 가지게 됨을 알 수 있다.

Fig. 1에 나타난 열팽창 계수의 변화를 각 온도 구간 별로 나타내면 Fig. 2와 같다. 탄소를 첨가하게 되면 온도 구간별로 열팽창 계수의 변화를 크게 2 부류로

구별된다. 하나는 탄소를 첨가하지 않은 시편과 탄소를 첨가한 시편에서 열팽창 계수의 변화 경향은 차이를 보이고 있다. 탄소를 첨가하지 않은 시편은 온도에 따라 열팽창 계수의 변화가 관찰되지 않았고, 일정한 값을 나타내고 있다. 그러나 탄소를 첨가한 시편에서는 온도가 증가함에 따라 열팽창 계수가 감소하다가 약 200~250°C 부근에서 최소값을 나타내었다.

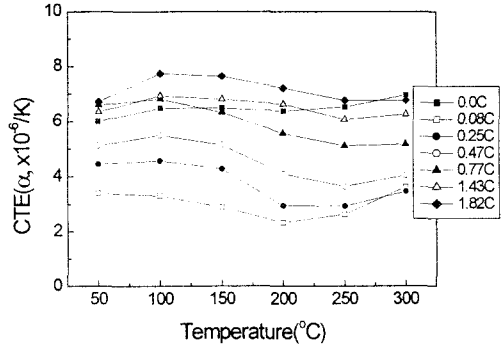


Fig. 2 Relation between coefficient of thermal expansion and temperature with carbon content in Fe-30%Ni-12.5%Co-xC Invar alloy

Fig. 2로부터, 열팽창 계수가 큐리 온도 이하에서 일정한 값을 나타내는 것이 아니라 온도에 따라 변하기 때문에 실제 재료의 사용 온도에 대한 특성이 파악되어야 함을 알 수 있다.

### 2.2.2 자기적 특성

일반적으로 Fe-Ni계 Invar 합금은 강자성체이고, Invar 특성이 자기적 특성과 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 그래서 본 연구에서는 Fe-Ni-Co-C 합금계에서 저열팽창(Invar) 특성과 자기적 특성과의 관계를 파악하기 위해 큐리온도와 포화자화 값을 측정하였다.

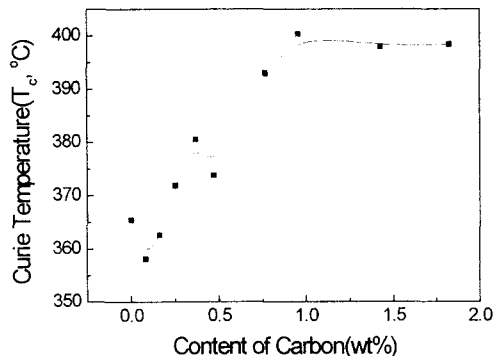


Fig. 3 Curie temperature change with carbon in Fe-30%Ni-12.5%Co-xC alloy

Fig. 3은 탄소 첨가량에 따른 포화자화의 변화를 나타낸 것으로, 탄소를 미량 첨가하면 큐리 온도가 감소후 탄소량에 따라 약 1.0%C까지는 지속적으로 증가하다가, 1.0%C 이상의 조성범위에서는 일정한 값을 가지고 있다. Fig. 3의 큐리 온도 변화 경향은 Fig. 1의 열팽창 계수의 변화 경향과 매우 유사함을 알 수 있다. Fig.

1과 Fig. 3의 결과를 큐리온도와 열팽창 계수의 관계로 다시 그리면 Fig. 4과 같은 결과를 얻을 수 있다. 즉, 큐리 온도가 증가할수록 열팽창계수는 직선적으로 증가하였다. 그러나 탄소를 첨가하지 않은 시편(dotted circle로 표시)에서는 이러한 직선적 관계를 만족시키지 못하는 것으로 나타났다.

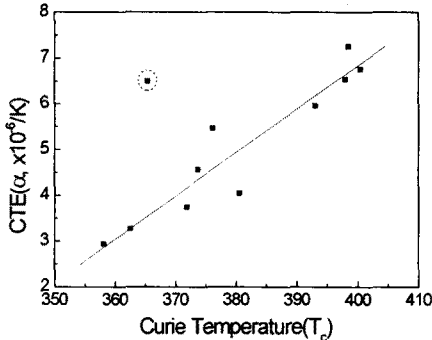


Fig. 4 Relationship of CTE and Curie temperature in Fe-30%Ni-12.5%Co-xC alloy

Fig. 5에는 탄소량에 따른 포화자화의 변화를 나타내었다. 포화자화의 변화 경향도 Fig. 1의 열팽창 계수의 변화와 일정 관계를 가지는 것으로 예상되어 Fig. 6과 같이 포화자화와 큐리 온도의 비( $\sigma_s/T_c$ )와 열팽창 계수의 관계로 나타내었다.

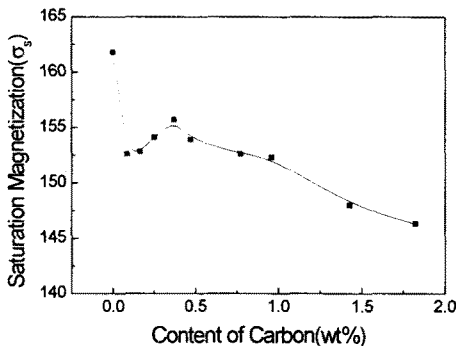


Fig. 5 Saturation magnetization change with carbon in Fe-30%Ni-12.5%Co-xC alloy

Fig. 6에 나타낸 바와 같이, 포화자화와 큐리 온도의 비( $\sigma_s/T_c$ )가 증가할수록 열팽창계수는 직선적으로 감소함을 알 수 있다. 그러나 이 관계에서도 탄소를 첨가하지 않은 시료(dotted circle)에서는 이러한 관계에서 벗어나 있었다. Fe-36%Ni Invar 합금에서 Matsumoto에 의해 제안된 포화자화와 큐리 온도의 비( $\sigma_s/T_c$ )와 열팽창계수의 관계식을 보면, 다음의 (1)식과 같이 나타내었다.

$$\alpha = \tan \delta - k(\sigma_s / T_c) \quad \text{---- (1)}$$

여기서,  $\alpha$ 는 열팽창 계수(CTE),  $\delta$ 는 강자성 팽창을 나타내는 상수,  $\sigma_s$ 는 포화자화,  $T_c$ 는 큐리 온도를 나타낸다. 위의 (1)식은 Fe-Ni계 Invar 합금에 대하여 나타내었지만, Fe-Ni-Co-C계 Invar 합금에도 적용 가능한 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 Fe-Ni-Co-C Invar 합금에서 열팽창 계수는 자기적 특성과 직접적인 관계가 있고, 특히 큐리온도가 증가할수록 열팽창계수는 직선적으로 증가하고, 포화자화와 큐리 온도의 비( $\sigma_s/T_c$ )가 증가하면 열팽창계수는 직선적으로 감소함을 알 수 있다. 그래서 우수한 저열팽창 특성을 가지는 재료를 제조하기 위해서는 큐리온도가 낮고, 포화자화와 큐리 온도의 비( $\sigma_s/T_c$ )가 큰 것이 요구됨을 알 수 있다.

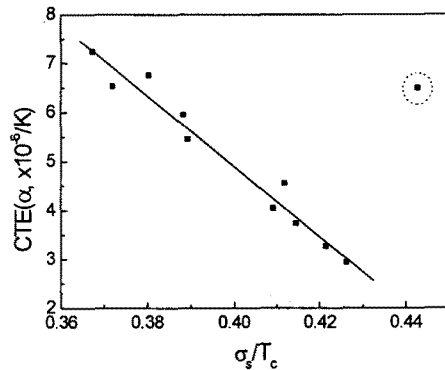


Fig. 6 Relationship of  $\sigma_s/T_c$  and CTE in Fe-30%Ni-12.5%Co-xC alloy

### 3. 결 론

송전 용량을 증가시키기 위한 증용량 송전선의 강심으로 적용 가능한 고강도 특성의 Fe-Ni-Co-C Invar 합금을 제조하여 주조상태에서 열팽창 특성과 자기적 특성의 관계를 조사한 결과 다음과 같다.

열팽창계수는 미량의 탄소가 첨가되면 급격히 감소하고, 계속적으로 탄소를 첨가하면 직선적으로 증가하다가 1.0% C 이상의 조성에서는 일정한 값을 가진다. 탄소량에 따른 큐리 온도의 변화 경향은 열팽창 계수의 변화 경향과 유사하고, 큐리 온도가 증가할수록 재료의 열팽창계수는 증가한다. 또한 포화 자화와 큐리 온도의 비( $\sigma_s/T_c$ )가 증가할수록 열팽창 계수는 직선적으로 감소하였다. 탄소를 첨가하지 않은 재료에서는 열팽창계수와 자기적 특성과의 일정한 직선적 관계에서 벗어나 있었다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 한국전력공사, "가공송전선 이도 설계 기준[(잠정)설계 기준-1211]"
- [2] H. Shiga et al, *Hitachi cable Review*, 11, 41 (1992)
- [3] Koji Sato, T. Ohno, Y. Masugata, N. Shimada, H. Shiga, *Hitachi Metals technical Report*, 12, 49-54 (1996)
- [4] M. Hatate, H. Sumimoto, K. Nakamura, *J. Japan Inst. Metals*, 54, 9, 1036-1040 (1990)
- [5] Z. Morita, T. Tanaka, *ISIJ*, 70, 11, 1575 (1984)
- [6] H. Matsumoto, *Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ.*, 20, 101 (1931)
- [7] H. Matsumoto, *Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ.*, 18, 195 (1929)