

J-A모형에 기초한 웨리트의 자기리력특성의 온도의존성에 대한 연구

리경수, 송금성

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《물리학부문에서는 지금 세계적으로 많이 연구되고있는 극한상태에서의 물질의 성질과 플라스마와 레이저, 초음파와 반도체, 유전체 그리고 자성체에 대한 연구사업도 더 심화시켜 거기에서 이룩된 성과를 생산에 적극 도입하여야 합니다.》(《김정일전집》 제4권 31페이지)

강자성재료는 동적자화과정에 온도가 증가하며 자기적특성이 변한다. 강자성자심의 동작특성을 정확히 모형화하자면 강자성재료의 온도의존성을 밝혀야 한다. 최근 J-A모형을 리용하여 자기리력에 주는 여러 파라미터들의 효과들을 연구하고있다.[1, 2] 열효과는 림계지수, 큐리온도와 함께 리력파라미터들의 온도의존성을 통해서 연구할수 있다.

론문에서는 미시구조파라미터들을 온도의 함수로 표시하여 모형을 세우고 코발트웨리트에 대하여 온도에 따르는 포화자화세기와 자기리력곡선을 계산한 다음 실험값과 비교하여 모형의 정확성을 확인하였다.

1. J-A모형

J-A모형[3]에서 강자성물질의 자화세기 M 은 비가역성분 $M_{\text{비가역}}$ 과 가역성분 $M_{\text{가역}}$ 의 합으로 표시된다. 즉

$$M = M_{\text{가역}} + M_{\text{비가역}} \quad (1)$$

비가역자화성분을 자기마당세기에 관하여 미분하면

$$\frac{dM_{\text{비가역}}}{dH} = \frac{M_{\text{무리력}} - M_{\text{비가역}}}{k \cdot \text{sgn}\left(\frac{dH}{dt}\right) - \alpha(M_{\text{무리력}} - M_{\text{비가역}})} \quad (2)$$

으로 된다. 여기서

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

이며 $M_{\text{무리력}}$ 은 무리력자화세기, α 는 자구결합결수, k 는 상수이다.

랑쥬뱅함수를 리용하여 $M_{\text{무리력}}$ 을 표시하면 다음과 같다.

$$M_{\text{무리력}} = M_{\text{포화}} \left(\text{cth} \frac{H_{\text{유효}}}{a} - \frac{a}{H_{\text{유효}}} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial M_{\text{무리력}}}{\partial H_{\text{유효}}} = \frac{M_{\text{포화}}}{a} \left[1 - \text{cth}^2 \left(\frac{H_{\text{유효}}}{a} \right) + \left(\frac{a}{H_{\text{유효}}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

여기서 $M_{\text{포화}}$ 는 자심재료의 포화자기세기이고 a 는 자구밀도이며

$$H_{\text{유효}} = H + \alpha M \quad (6)$$

이다.

가역자화성분 $M_{\text{가역}}$ 을 자기마당세기에 관하여 미분하면

$$\frac{dM_{\text{가역}}}{dH} = c \left(\frac{dM_{\text{무리력}}}{dH} - \frac{dM}{dH} \right) \quad (7)$$

이다. 여기서 c 는 가역인자이다.

그러므로

$$M_{\text{가역}} = c(M_{\text{무리력}} - M) \quad (8)$$

$$\frac{dM}{dH} = \frac{1}{1+c} \frac{M_{\text{무리력}} - M_{\text{비가역}}}{\text{sgn}(\dot{H}) \cdot k - \alpha(M_{\text{무리력}} - M_{\text{비가역}})} + \frac{c}{1+c} \frac{dM_{\text{무리력}}}{dH} \quad (9)$$

이다. 여기서

$$M_{\text{무리력}} - M_{\text{비가역}} = (1+c)(M_{\text{무리력}} - M)$$

이며 k 는 고정인자이다.

식 (8)대신에

$$M_{\text{가역}} = c(M_{\text{무리력}} - M_{\text{비가역}})$$

을 리용하면 식 (9)는

$$\frac{dM}{dH} = (1-c)\delta \frac{M_{\text{무리력}} - M}{\text{sgn}(\dot{H}) \cdot k(1-c) - \alpha(M_{\text{무리력}} - M)} + c \frac{dM_{\text{무리력}}}{dH} \quad (10)$$

으로 된다. 여기서

$$\delta = \begin{cases} 0, & \text{sgn}(\dot{H}) \cdot (M_{\text{무리력}} - M) \leq 0 \\ 1, & \text{sgn}(\dot{H}) \cdot (M_{\text{무리력}} - M) > 0 \end{cases} \quad (11)$$

이다.

2. 자기리력파라미터들의 온도의존성

열효과는 리력파라미터들 즉 포화자화세기 $M_{\text{포화}}$, 자구결합결수 α , 고정인자 k , 가역인자 c 의 온도의존성을 통해서 모형에 반영할수 있다.

와이스의 분자마당리론에 의하면 포화자화의 온도의존성은

$$M_{\text{포화}}(T) = M_{\text{포화}}(0) \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^\beta \quad (12)$$

으로 표시된다. 여기서 $M_{\text{포화}}(0)$ 은 0K에서의 포화자화세기이고 T_c 는 큐리온도, β 는 림계지수이다.

연자성체에서 고정인자는 보통 보자력과 같다. 즉 $k \approx H_c$ 이다. 강자성재료의 보자력이 온도에 따라 지수함수적으로 감소하므로 고정인자 k 도 온도에 따라 지수함수적으로 변한다. 즉

$$k(T) = k(0) \exp\left(\frac{-2T}{\beta T_c}\right) \quad (13)$$

여기서 $k(0)$ 은 0K에서의 고정인자이다.

자구밀도 a 는 명백히 온도의 함수이지만 온도에 따르는 변화가 매우 작으므로 고려하지 않는다.

등방성물질의 경우에 자구결합결수 α 는

$$\alpha = \frac{3a}{M_{\text{포화}}} - \frac{1}{\chi'_{\text{무리력}}} \quad (14)$$

이다. 무리력자화를 $\chi'_{\text{무리력}}$ 이 큰 경우에 두번째 항은 무시할수 있으며 식 (12)를 고려하면

$$\alpha(T) = \frac{3a}{M_{\text{포화}}(0)} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{-\beta} = \alpha(0) \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{-\beta} \quad (15)$$

이다. 여기서 $\alpha(0)$ 은 0K에서의 자구결합결수이다.

등방성재료인 경우에 가역인자 c 는

$$c = \frac{3a}{M_{\text{포화}}} \chi'_{\text{무리력}} \quad (16)$$

이다.

초기자화를 $\chi'_{\text{초기}}$ 와 식 (12)를 리용하면

$$c(T) = \frac{3a}{M_{\text{포화}}(0)} \chi'_{\text{초기}} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{-\beta} = c(0) \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{-\beta} \quad (17)$$

이며 여기서 $c(0)$ 은 0K에서의 가역인자이다.

3. 모의 및 결과해석

우에서 진행한 연구에 기초하여 먼저 코발트웨리트에 대한 온도에 따르는 포화자화 세기를 계산하고 실험값[4]과 비교하였다.(그림 1) 그림 1에서 실선은 계산곡선이며 *표시는 측정값을 나타낸다. 이 곡선으로부터 얻은 림계지수는 0.4이다.

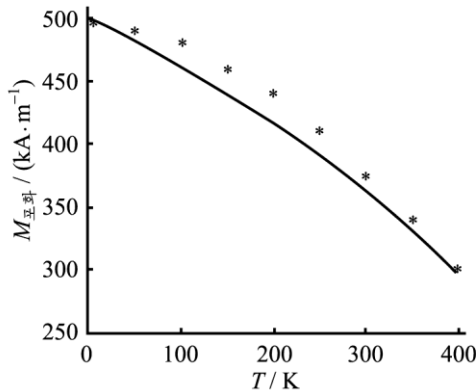


그림 1. 온도에 따르는 포화자화의 변화

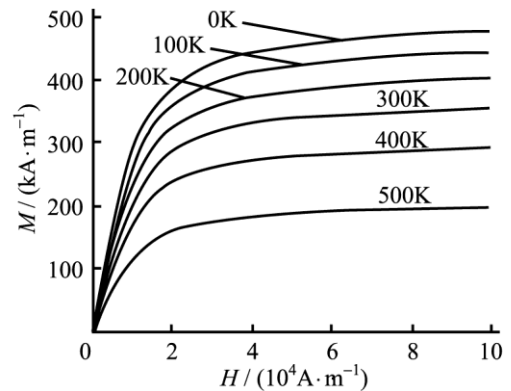


그림 2. 자화의 온도의존성

0K - 500K의 온도범위에서 온도의존자화곡선을 얻었다.(그림 2) 온도가 큐리점근방($T_c = 550\text{K}$)까지 증가할 때 리력곡선은 점차적으로 평탄해지며 큐리점이상에서는 상자성을 나타낸다.

그림 3에 코발트웨리트에 대한 보자력의 온도의존성을 보여주었다. 온도의존모형으로부터 얻은 계산결과와 큐리온도가 550K인 코발트웨리트($\text{Co}_{1.4}\text{Ge}_{0.4}\text{Fe}_{1.2}\text{O}_4$)에 대한 실험결과[4]를 비교하였다. 보자력은 온도에 따라 지수함수적으로 감소하며 모형의 계산결과와 실험결과가 일치한다는것을 알수 있다.

그림 4에 모형으로부터 얻은 코발트웨리트의 자기리력곡선을 보여주었다. 온도가 큐리점에 다가감에 따라 리력곡선은 평탄해지며 큐리점이상에서는 상자성을 나타낸다.

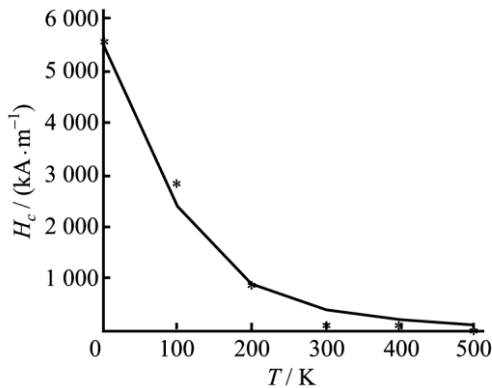


그림 3. 보자력의 온도의존성

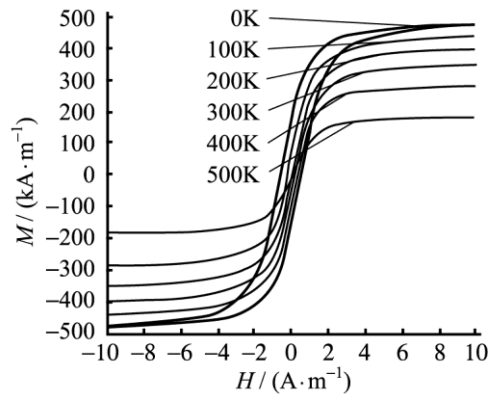


그림 4. 온도에 따르는 자기리력곡선

열효과는 네가지 리력파라미터들을 통해 반영하였다. 이 모형에서 림계지수와 큐리온도가 새로운 파라미터로 반영되었다. 높은 온도에서는 계산값과 측정값이 차이난다. 그것은 자구밀도 a 가 온도에 관계되지 않는다고 보았기때문이다. 여러 리력파라미터들에 대한 림계지수를 받아들이고 자구밀도의 온도의존성을 반영한다면 모형이 더 개선될것이다. 코발트웨리트의 경우에 계산결과와 측정값은 잘 일치한다.

맺 는 말

J-A모형에서 미시파라미터들의 온도의존성을 고려하면 웨리트의 온도에 따르는 포화자화세기와 자기리력특성을 정확히 계산할수 있다.

참 고 문 헌

- [1] K. Hergli et al.; Physica B: Physics of Condensed Matter, [dio.org/10.1016/j.physb.2017.09.126](https://doi.org/10.1016/j.physb.2017.09.126).
- [2] F. Sixdenier et al.; IEEE Trans. Magn., **52**, 3, 7300104, 2016.
- [3] D. C. Jiles et al.; IEEE Trans. Magn., **25**, 5, 3928, 1989.
- [4] A. Raghunathan et al.; IEEE Trans. Magn., **45**, 10, 3954, 2009.

주제110(2021)년 3월 5일 원고접수

Temperature Dependence of the Magnetic Hysteresis in Ferrite Based on the J-A Model

Ri Kyong Su, Song Kum Song

In this paper, we analyzed the temperature dependence of the magnetic hysteresis in ferrite magnetic core using the temperature dependence of J-A model's microstructure parameters and compared the results with the measurement curve of Co ferrite.

Keywords: J-A model, magnetic hysteresis, ferrite