

가돌리늄의 자기열량효과에 대한 실증실험

이 중 석[†]

강릉대학교 정밀기계공학과

Demonstrative Experiments on the Magnetocaloric Effect of Gadolinium

Jong Suk Lee[†]

Department of Precision Mechanical Engineering, Kangnung National University, Gangwon-do 210-702, Korea

(Received July 9, 2003; revision received March 8, 2004)

ABSTRACT: Magnetic refrigeration is based on the magnetocaloric effect (MCE)—the ability of some materials to heat up when magnetized and cool down when removed from the magnetic field. The available techniques for studying the MCE are: (1) direct measurements by monitoring the change in the material's temperature during the application or removal of the magnetic field; and (2) indirect calculations from the experimental data of magnetization and/or specific heat as a function of the temperature and magnetic field. The MCE of gadolinium (Gd) has been demonstrated by direct measurements of temperature change, and isothermal magnetic entropy changes and adiabatic temperature changes have been calculated.

Key words: Magnetocaloric effect(자기열량효과), Gadolinium(가돌리늄), Direct measurement(직접측정), Magnetization(자화), Specific heat(비열)

1. 서 론

자성재료에 자기장을 걸어 주면 가열되고 자기장을 제거하면 냉각되는 성질이 있는데, 이를 자기열량효과(magnetocaloric effect)라고 하며, 이것을 이용해서 저온을 생성시키는 방법을 자기냉동(magnetic refrigeration)이라고 한다.⁽¹⁾

자기열량효과에 대한 연구는 물리현상 자체의 중요성 이외에도 이 효과가 큰 재료를 환경친화적이고 에너지 효율이 좋은 자기냉동기, 에어컨, 열펌프 등에 자기냉매로 이용할 수 있다는 점에서 기술적인 중요성을 가지고 있다. 이로 인해서 세계적으로는 자기열량효과와 자기냉동에 대한 연

구가 점점 증가하고 있는 추세이다.

1997년 Astronautics/Ames Laboratory 연구팀이 상온에서 연속으로 작동하는 실증실험용 자기냉동기[초전도 전자석을 이용해서 1.5~5 T의 자기장을 걸어 주며, 직경이 150~300 μm 인 가돌리늄(Gd)구가 들어 있는 2개의 자기냉매층을 사용한 왕복식 장치]⁽²⁾ 및 거대한 자기열량효과를 가진 새로운 재료[Gd₅(Si_xGe_{1-x})₄]를 발표한 것을 기점으로, 상온에서의 자기냉동과 새로운 재료에 대한 연구가 보다 활발히 이루어지고 있다.

Gd₅(Si_xGe_{1-x})₄ 화합물(0 ≤ x ≤ 0.5)은 거대한 자기열량효과를 보일 뿐만 아니라 x값의 변화에 따라 큐리온도를 30~275 K로 조절할 수가 있다.^(3,4) 이 화합물은 상온에서 자기냉매로서 가장 좋다고 알려졌던 가돌리늄보다 자기열량효과가 2배 정도 큰 것으로 발표되었다. 최근에는 이 화합물보다 자기열량효과가 더 크거나 이에 필적할 만하고

[†] Corresponding author

Tel.: +82-33-640-2393; fax: +82-33-640-2390

E-mail address: jslee@kangnung.ac.kr

보다 값이 싸서 자기냉매로 적합하다는 재료에 대한 연구결과가 보고되고 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

자기열량효과는 단열온도변화(ΔT_{ad}) 또는 등온자기엔트로피변화(ΔS_M)로서 측정되거나 계산될 수 있으며, 이들은 온도(T)와 자기장의 변화(ΔH)의 함수이다. 자기열량효과를 측정하는 방법으로는 자기장을 걸어 주거나 제거할 때 재료 내에 발생하는 온도변화를 직접 측정하는 방법과 자화(magnetization)나 비열(specific heat)을 온도와 자기장의 함수로 측정된 데이터로부터 계산하는 방법이 있는데, 전자를 직접측정방법, 후자를 간접측정방법으로 크게 구분할 수 있다.

본 논문에서는 좋은 자기냉매재료로서 알려진 가돌리늄의 자기열량효과에 대한 실증 실험으로, 자기장의 변화에 의한 가돌리늄 샘플의 온도변화를 직접 측정하고, 실험적으로 측정된 자화 및 비열 데이터로부터 등온자기엔트로피변화와 단열온도변화를 계산한 결과를 제시하고자 한다.

2. 직접 측정 방법

직접 측정 방법은 자기장이 H_I 와 H_F 일 때 샘플의 온도(T_I 와 T_F)를 측정하는 방법이다. 여기서 첨자 I 와 F 는 각각 초기와 최종 상태를 의미한다. 일반적으로 초기의 자기장(H_I)은 0으로 놓으며, 이때 샘플은 자화된다. 가역과정에서는 샘플이 소자될 때도 자기열량효과를 측정할 수 있는데, 이 경우에는 $H_F=0$ 이다. 이 방법으로 측정되는 단열온도변화 $\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H} = T_F - T_I$ 가 된다.

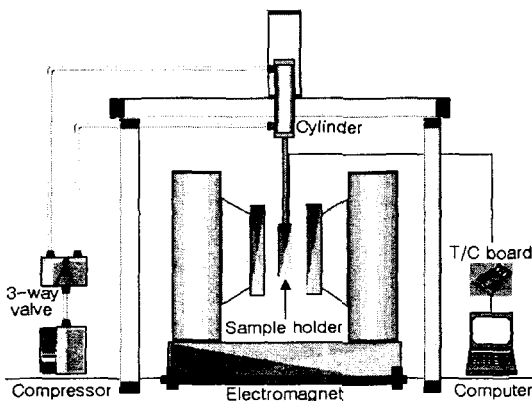


Fig. 1 Schematic of experimental setup.

2.1 실험장치 및 방법

Ames Laboratory에서 제조한 순도 99.99%의 다결정 가돌리늄(Gd) 샘플에 대해 자기장이 변할 때의 온도변화를 측정하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 구성도로서, 공압으로 샘플홀더를 이동시키며, 충남대학교 고기능성자성재료연구센터 보유의 전자석을 이용하여 실험을 수행하였다. Fig. 2는 아크릴로 만든 샘플홀더의 모습으로, 크기가 다른 두 샘플(A : $10 \times 20 \times 1.5$ mm, B : $5 \times 10 \times 1$ mm, 각각 한 쌍) 사이와 홀더의 중간지점에 원판 모양으로 납작하게 누른 열전대의 접점을 위치시켰다. 세 개의 접점에서의 온도변화를 직경 0.0795 mm의 K-type T/C(열전대)와 Keithley T/C board를 사용하여 측정하였으며, 컴퓨터에 연결하여 데이터를 저장하였다.

일차적으로 가돌리늄 샘플을 자기장이 인가되지 않은 전자석의 중심부에 놓아 두고, 전자석에 전류를 흘려 자기장의 세기를 각각 1 T, 1.5 T, 2 T(tesla)로 변화시킬 때 가돌리늄 샘플에 발생하는 온도변화를 측정하였다(실험 I). 다음에는 전자석 중심부에서의 자기장의 세기를 각각 1 T, 1.5 T, 2 T로 유지하도록 해놓고, 가돌리늄 샘플을 자기장이 없는 지점(전자석의 중심부로부터 20 cm 떨어진 곳)으로부터 자기장이 걸려 있는 전자석의 중심부로 이동시킬 때 가돌리늄 샘플에 발생하는 온도변화를 측정하였다(실험 II). 이때 샘플이 이동하는 시간은 대략 1초 정도 걸렸으며, 측정시간은 60초간이었다. 또한 반대과정, 즉 자기장이 걸려 있는 전자석의 중심부에 있던 샘플을 자기장이 걸려 있지 않은 전자석 바깥으로 이동시킬 때 가돌리늄 샘플에 발생하는 온도변화도 측정하였다(실험 III).



Fig. 2 Sample holder with two samples.

2.2 실험결과

2.2.1 실험 I

Fig. 3은 샘플홀더를 자기장이 인가되지 않은 전자석의 중심부에 놓아 두고, 전자석 중심부에서의 자기장의 세기를 0으로부터 2 T로 변화시킬 때 크기가 다른 두 개의 가돌리늄 샘플과 샘플홀더 가운데 부분에 있는 공기의 온도가 변화하는 모습을 보여준다. 자기장을 2 T까지 인가시키는데 걸린 시간은 약 15초였다. 가돌리늄 샘플의 온도상승은 큰 샘플(A)이 2.3℃, 작은 샘플(B)이 2.0℃ 정도이며, 두 경우 모두 피크에 도달한 후 샘플의 온도가 완만하게 떨어지는 것을 볼 수 있는데, 이는 샘플이 상대적으로 낮은 온도인 주위로의 열전달로 인해 식어지는 것임을 알 수 있다. 자기장에 의해 온도가 상승한 샘플로부터 주위로 열전달이 일어나에 따라 샘플 사이에 있는 공기의 온도가 서서히 상승하는 것을 보여준다.

Table 1은 실험 I에서 측정된 결과를 요약한 표이다. 샘플 A와 B에 대해 각각 자기장을 걸어 주기 전의 온도(T_I)와 걸어 준 후에 도달한 최고온도(T_F), 그리고 꺾호 안에는 이때의 온도상승(ΔT , ℃)을 나타낸다. 자기장의 변화가 클수록 그리고 초기온도가 높을수록(큐리온도 20℃에

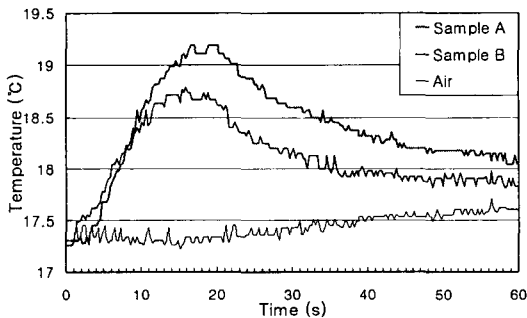


Fig. 3 Result of experiment I ($\Delta H=2 T$).

Table 1 Temperature changes (°C) in Exp. I

Sample	$\Delta H=1.0 T$	$\Delta H=1.5 T$	$\Delta H=2.0 T$
A	14.7~15.9 (1.2)	14.3~16.2 (1.9)	14.4~16.7 (2.3)
	17.4~19.0 (1.6)	18.2~20.6 (2.4)	18.3~21.2 (2.9)
B	14.8~15.8 (1.0)	14.5~16.0 (1.5)	14.5~16.4 (1.9)
	22.1~23.6 (1.5)	21.0~23.1 (2.1)	20.0~22.4 (2.4)

Sample (A : 10×20×1.5 mm, B : 5×10×1 mm)

가까울수록) 온도상승이 커짐을 볼 수 있다.

2.2.2 실험 II

Fig. 4는 전자석 중심부에서의 자기장의 세기를 2 T로 유지한 상태에서 샘플홀더를 자기장 밖으로부터 안으로 이동시켰을 때 두 샘플과 사이의 공기온도가 변화하는 모습을 보여준다. 샘플홀더가 이동하는 데 걸린 시간은 1초 정도이며, 이때 샘플 B의 온도가 순간적으로 올라갔다가 떨어지는 피크가 나타났는데, 이것은 열전대가 이루는 폐회로에 자기장의 변화로 인한 전자유도가 발생하여, 그 기전력이 열전대에 의해 측정되는 온도에 중첩된 때문이다. 한편 샘플 A와 공기의 온도를 측정하는 열전대에서는 이러한 전자유도 현상에 의한 노이즈가 샘플 B에서와는 반대방향으로 미약하게 나타났다. 노이즈를 무시하면, 큰 샘플(A)과 작은 샘플(B)에서 측정된 온도변화는 각각 3.4℃와 3.1℃로 볼 수 있다.

Table 2는 실험 II에서 측정된 결과를 요약한 표이다. 자기장의 변화에 의한 샘플의 온도상승은 자기장의 변화량(ΔH)에 따라 큰 차이를 보이는데, $\Delta H=2 T$ 일 때 $\Delta T=4.0℃$ 이다. 실험 I과 실험 II를 비교해 보면 같은 세기의 자기장이라도 인가되는 속도가 빠를수록 샘플에 발생하는 온도변화가 크다는 것을 알 수 있다.

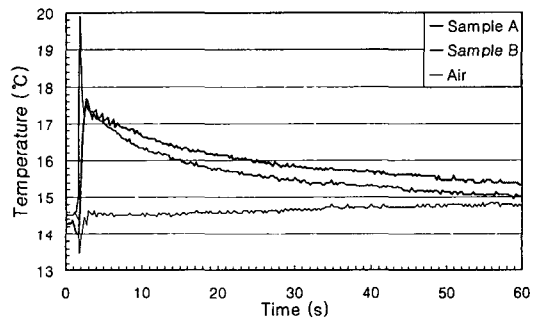


Fig. 4 Result of experiment II ($\Delta H=2 T$).

Table 2 Temperature changes (°C) in Exp. II

Sample	$\Delta H=1.0 T$	$\Delta H=1.5 T$	$\Delta H=2.0 T$
A	14.4~16.0 (1.6)	14.2~16.5 (2.3)	14.3~17.7 (3.4)
	17.6~19.6 (2.0)	18.3~21.7 (3.4)	18.2~22.2 (4.0)
B	14.6~15.9 (1.3)	14.3~16.6 (2.3)	14.5~17.6 (3.1)
	22.0~24.0 (2.0)	20.7~23.8 (3.1)	20.2~24.2 (4.0)

Sample (A : 10×20×1.5 mm, B : 5×10×1 mm)

2.2.3 실험 III

Fig. 5는 전자석 중심부에서의 자기장의 세기를 2 T로 유지한 상태에서 샘플홀더를 자기장 안으로부터 밖으로 이동시켰을 때의 온도가 변화하는 모습을 보여준다. 샘플 A와 샘플 B에서 측정된 온도변화는 각각 -2.6°C 와 -2.8°C 로 큰 샘플에서의 온도감소가 약간 작게 측정되었다. 여기서는 큰 샘플의 온도가 순간적으로 1.5°C 정도 상승하였다가 자기장이 감소함에 따른 효과로서 온도가 떨어지는 것을 관측할 수 있다.

전자유도에 의해 발생하는 피크의 방향과 피크가 발생하는 샘플이 실험 II에서와는 반대이다. 한편 샘플홀더 중간의 공기온도를 측정하는 열전대에서 감지된 피크의 방향도 실험 II에서는 온도가 감소방향이었던 것이 실험 III에서는 증가방향으로 바뀌었다.

Table 3은 실험 III에서 측정한 결과를 요약한 표이다. 실험 II와 III을 비교해 보면 대체적으로 여자되는 경우(실험 II)의 온도변화(+값)가 소자되는 경우(실험 III)의 온도변화(-값)보다는 약간 크게 나타난다.

전체적으로 가장 현저하게 나타나는 현상은 자기장의 세기의 변화가 커질수록 샘플의 온도변화가 커지는 것이다.

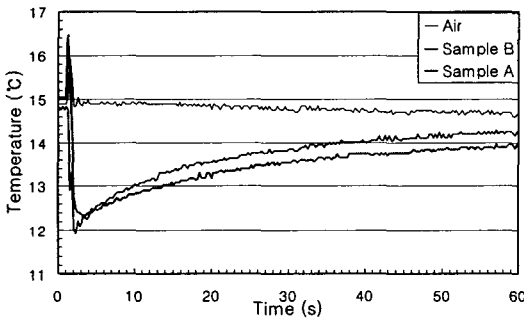


Fig. 5 Result of experiment III ($\Delta H=2\text{T}$).

Table 3 Temperature changes ($^{\circ}\text{C}$) in Exp. III

Sample	$\Delta H=1.0\text{T}$	$\Delta H=1.5\text{T}$	$\Delta H=2.0\text{T}$
A	14.8~13.6 (1.2)	14.8~12.8 (2.0)	15.0~12.2 (2.8)
	18.1~16.4 (1.7)	19.2~16.4 (2.8)	19.2~15.7 (3.5)
B	14.7~13.4 (1.3)	14.6~12.4 (2.2)	14.8~12.0 (2.8)
	22.4~20.3 (2.1)	21.2~18.2 (3.0)	20.4~16.8 (3.6)

Sample (A : $10 \times 20 \times 1.5\text{ mm}$, B : $5 \times 10 \times 1\text{ mm}$)

2.2.4 추가실험 및 고찰

실험 II와 실험 III에서 샘플홀더의 이동거리는 20 cm로서, 전자석의 중심으로부터 20 cm 떨어진 곳에서의 자기장은 없는 것으로 간주하였다. 그러나 전자석의 중심으로부터 20 cm 떨어진 곳에서의 자기장은 중심에서의 10% 정도의 크기로 측정되었다. 중심으로부터의 거리(x)에 따른 자기장의 세기(H)를 측정한 결과를 Table 4에 정리하였다. 중심으로부터 30 cm 떨어진 곳에서는 중심의 2% 정도만이 측정되므로, 샘플홀더의 이동거리를 30 cm로 늘려서 추가실험을 하였다.

Fig. 6은 샘플홀더의 이동거리는 30 cm, 자기장의 세기는 0.5~2.0 T, 실온은 $14 \sim 28^{\circ}\text{C}$ 로 하였을 때 샘플 A와 B에서 측정된 온도변화와 샘플 A에 대한 2차 다항식의 추세선을 나타낸 것이다. 자기장의 변화에 따른 온도변화는 샘플의 크기에는 거의 무관하며, 가돌리늄의 큐리온도인 20°C 부근에서 가장 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 자기장의 변화가 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 T일 때 20°C 부근에서의 온도변화는 각각 평균 0.8, 2.0, 3.0, 4.1°C 정도로 나타난다. 이 온도변화는 참고 문헌⁽⁸⁾의 수치($\Delta H=2\text{T}$, $\Delta T=5.8^{\circ}\text{C}$)에는 못 미친다.

이상의 실험결과들을 종합해 보면 자성재료의 자기열량효과(그중에서 단일온도변화)는 자기장의 변화가 클수록, 그 변화하는 속도가 빠를수록, 그리고 큐리온도에 가까운 온도에서 크게 나타나는 것임을 확인할 수 있었다.

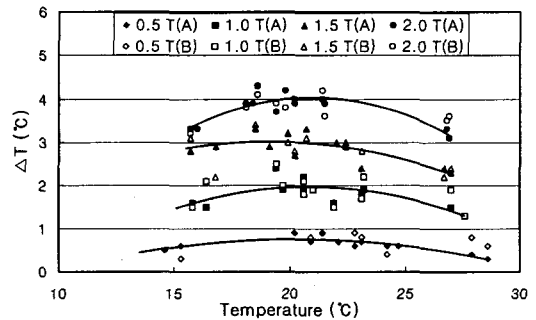


Fig. 6 Temperature change in magnetic field.

Table 4 Magnetic field around electromagnet

$x\text{ (cm)}$	0	5	10	15	20	25	30
$H\text{ (T)}$	2.0	1.9	0.9	0.4	0.2	0.09	0.04

3. 간접 측정 방법

자기열량효과는 측정된 자화(magnetization) 및 비열(specific heat) 데이터를 이용하여 계산할 수가 있다. 이러한 간접측정방법으로는 (1) 자화측정법: 자화를 측정하고 Maxwell 관계식을 이용하여 자기엔트로피변화(ΔS_M)를 계산하고, 자기장이 없을 때의 비열(C_0)을 이용하여 단열온도변화(ΔT_{ad})를 계산하는 방법과 (2) 비열측정법: C_0 와 자기장 하에서의 비열(C_H)을 측정하여 자기장이 없을 때의 엔트로피(S_0)와 자기장 하에서의 엔트로피(S_H)를 결정하고 이들로부터 ΔS_M 과 ΔT_{ad} 를 계산하는 방법이 있다.⁽⁹⁾

이들 방법에 대한 설명과 측정된 데이터로부터 자기열량효과를 계산하는 데 사용되는 열역학적 관계식 등은 참고문헌⁽¹⁰⁾에 자세히 나와 있다.

3.1 자화 및 비열 측정

간접측정방법을 이용하여 자기열량효과를 계산해 보기 위해서 가돌리늄 샘플에 대한 자화와 비

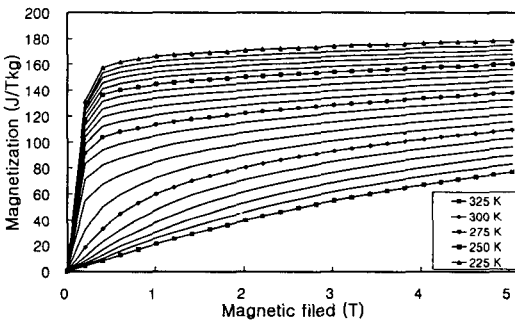


Fig. 7 Magnetization isotherms in Gd.

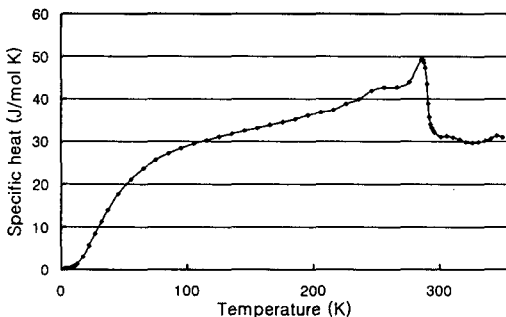


Fig. 8 Specific heat of Gd measured in 0 T.

열을 측정하였다. Fig. 7은 서울대학교 재료공학부에서 자성측정시스템(MPMS)으로 측정된 자화-자기장(M-H) 선도로서, 225 K와 325 K의 온도범위에서 $\Delta T=5$ K 간격으로 일정한 온도를 유지하며, $\Delta H=0.2$ T 간격으로 자기장을 변화시키면서 측정된 결과를 나타낸 것이다. 자화측정법은 이 데이터를 이용해서 자기엔트로피변화를 계산할 수가 있다. Fig. 8은 한국기초과학지원연구원 국가지정연구실에서 물성측정시스템(PPMS)으로 측정된 비열-온도 곡선으로 자기장이 없는 상태에서 측정된 것이다. 비열측정법을 이용하여 자기열량효과(자기엔트로피변화와 단열온도변화)를 계산하기 위해서는 자기장이 가해진 상태에서의 비열이 필요한데, 몇 번의 시도에도 불구하고 자기장의 영향으로 샘플이 홀더에서 떨어지는 이유로 인하여 측정되지 못하였다.

3.2 자기열량효과 계산

3.2.1 자기엔트로피변화

자화측정법은 자기장과 온도의 함수로서 측정된 자화 데이터를 이용하여 자기엔트로피변화를 계산할 수 있는데, 다음 식을 사용한다.

$$\Delta S_M(T)_{\Delta H} = \int_{H_i}^{H_f} \left(\frac{\partial M(T, H)}{\partial T} \right)_H dH \quad (1)$$

식(1)을 사다리꼴의 법칙을 이용하여 수치적분의 형태로 나타내면 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$\Delta S_M(T_{av})_{\Delta H} = \frac{\delta H}{2 \delta T} \left(\delta M_1 + 2 \sum_{k=2}^{n-1} \delta M_k + \delta M_n \right) \quad (2)$$

여기서 T_u 와 T_l 은 등온선의 온도, $T_{av} = (T_u + T_l)/2$, $\delta T = T_u - T_l$, $\delta H = \Delta H / (n - 1)$, n 은 각 등온선에서의 측정수, 그리고 $\delta M_k = [M(T_u)_k - M(T_l)_k]$ 이다.

본 연구에서 측정된 자화 데이터(Fig. 7)를 식(2)를 이용하여 수치적분한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 자기장의 변화(ΔH)가 1~5 T일 때의 자기엔트로피변화(ΔS_M)가 온도의 함수로 나타나 있다. ΔH 가 2 T와 5 T일 때의 ΔS_M 은 각각 0.8 J/mol·K와 1.5 J/mol·K로서, 이는 참고문헌⁽⁸⁾

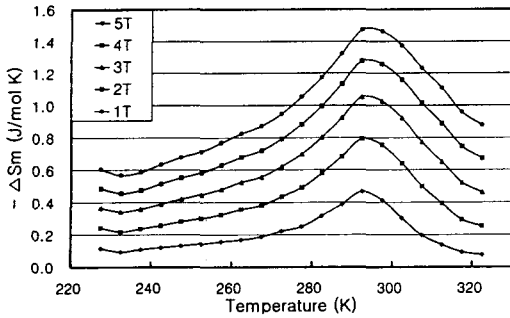


Fig. 9 Magnetic entropy changes in Gd.

에서의 결과[각각 0.79 J/mol·K와 1.53 J/mol·K]와 2% 이내의 오차로 일치한다.

3.2.2 단열온도변화

비열측정법은 일정한 자기장 하에서 측정된 비열 데이터로부터 서로 다른 자기장 하에서의 총 엔트로피를 온도의 함수로 구하고, 이를 이용하여 자기엔트로피변화와 단열온도변화를 계산하는데, 먼저 다음 식을 사용한다.

$$S(T)_H = \int_0^T \frac{C(T)_H}{T} dT + S_{0,H} \quad (3)$$

여기서 $S_{0,H}$ 는 영도(zero-temperature) 엔트로피이며, 응집계(condensed system)에서는 자기장에 관계없이 일정하다. 식(3)을 사다리꼴의 법칙을 이용하여 수치적분하면 다음과 같이 된다.⁽¹¹⁾

$$S(T_n)_H = \frac{1}{2} \left[C(T_1)_H + \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \left(\frac{C(T_i)}{T_i} + \frac{C(T_{i+1})}{T_{i+1}} \right) \times (T_{i+1} - T_i) \right\} \right] \quad (4)$$

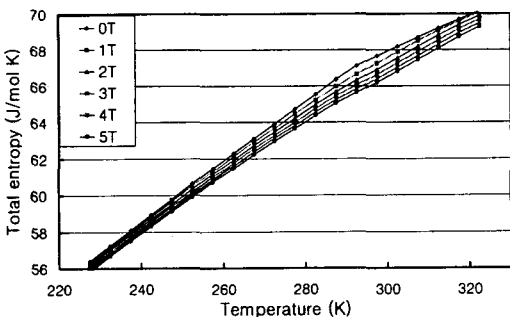


Fig. 10 Total entropy functions of Gd.

여기서 H 는 임의의 자기장을 나타내며, n 은 T_1 과 T_n 사이에서 측정된 비열 데이터의 개수이다. $C(T_1)_H$ 는 실험의 최저온도인 T_1 과 $T=0$ K 사이의 빠져 있는 비열 데이터를 보정하는 항이며, $C(T=0)_H=0$ 으로 가정한다.

자기장이 0에서 H 로 변할 때의 자기엔트로피 변화와 단열온도변화는 다음 식으로 계산된다.

$$\Delta S_M(T)_{\Delta H} = [S(T)_H - S(T)_{H=0}]_T \quad (5)$$

$$\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H} = [T(S)_H - T(S)_{H=0}]_S \quad (6)$$

임의의 자기장에서의 $S(T)_H$ 는 식(5)를 이용하여 $\Delta S_M(T)_{\Delta H}$ 와 $S(T)_{H=0}$ 으로부터 구할 수 있다.

본 연구에서 측정된 비열 데이터(Fig. 8)를 식(4)를 이용하여 수치적분하여 자기장이 0일 때의 총엔트로피 $S(T)_{H=0}$ 을 구하고, 이 값과 자화 데이터로부터 계산한 $\Delta S_M(T)_{\Delta H}$ (Fig. 9)를 식(5)에 대입하여 자기장 하에서의 총엔트로피 $S(T)_H$ 를 구한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

이제, 식(6)을 이용하여 단열온도변화를 계산할 수가 있다. 먼저 Fig. 10에서 5K 간격의 온도로 계산된 $S(T)_{H=0}$ 을 선형보간하여 285~300 K의 범위에서 1K 간격으로 자기장이 0일 때의 총엔트로피를 구한 다음, 자기장(1~5 T) 하에서의 총엔트로피가 이 값들에 해당하는 온도를 선형보간으로 계산한 후, 식(6)에 대입하여 단열온도변화를 구한 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11에 나타난 단열온도변화(ΔT_{ad})는 가돌리늄의 큐리온도(293 K) 부근에서 가장 큰 것을 확인할 수 있으며, 자기장의 변화(ΔH)가 2 T와 5 T일 때의 ΔT_{ad} 는 각각 6.5 K와 12.2 K로서, 이

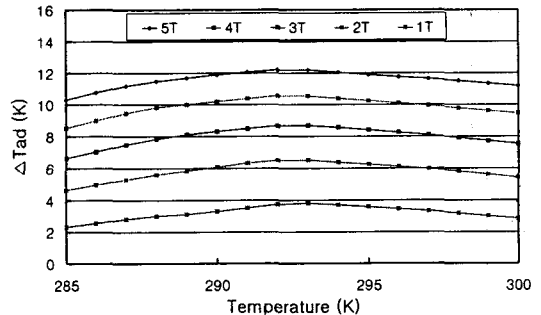


Fig. 11 Adiabatic temperature change in Gd.

는 참고문헌⁽⁸⁾에서의 결과[각각 6.4 K와 12.0 K]보다는 조금 크지만, 2% 이내의 오차로 일치한다.

4. 결 론

본 연구에서는 순수물질 중에서 자기열량효과가 가장 크다고 알려진 가돌리늄의 자기열량효과에 대한 실증실험을 수행하여, 직접측정방법으로 온도변화를 측정하고 간접측정방법(자화-비열 측정법)을 이용하여 자기엔트로피변화와 단열온도변화를 계산하였다.

본 실험에서 직접 측정된 온도변화($\Delta H=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ T일 때 $\Delta T=0.8, 2.0, 3.0, 4.1^\circ\text{C}$)는 참고문헌에 보고된 수치($\Delta H=2$ T, $\Delta T=5.8^\circ\text{C}$)에는 못 미쳤으나, 가돌리늄의 자기열량효과에 대한 경향은 정성적으로 확인할 수 있었다. 이러한 차이가 나는 가장 큰 이유는 본 실험에서 샘플홀더의 온도를 제어하거나 진공 또는 단열이 이루어지지 않은 조건 하에서 실험이 수행되었기 때문으로 볼 수 있다.

한편, 가돌리늄 샘플을 이용해서 측정한 자화 및 비열 데이터로부터 자기엔트로피변화와 단열 온도변화를 계산하였다. 본 연구에서 구한 자기열량효과를 참고문헌에서의 결과와 비교해 보면, 자기엔트로피변화는 조금 낮고 단열온도변화는 조금 높은 것으로 나타나는데, 둘 다 2% 이내의 오차로 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 지원(R05-2002-000-00984-0)에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Lee, J. S., 2000, Principle of magnetic refrigeration and recent developments, Proceedings of the SAREK 2000 Summer Annual Conference (III), pp. 1092-1097.
2. Zimm, C. A., Jastrab, A., Sternberg, A., Pecharsky, V. K., Gschneidner, K. A. Jr., Osborne, M. G. and Anderson, I. E., 1998, Description and performance of a near-room temperature magnetic refrigerator, Adv. Cryo. Eng., Vol. 43, pp. 1759-1766.
3. Pecharsky, V. K. and Gschneidner, K. A. Jr., 1997, Giant magnetocaloric effect in Gd₅(Si₂Ge₂), Phys. Rev. Lett., Vol. 78, No. 23, pp. 4494-4497.
4. Pecharsky, V. K. and Gschneidner, K. A. Jr., 1997, Tunable magnetic regenerator alloys with a giant magnetocaloric effect for magnetic refrigeration from ~20 K to ~290 K, Appl. Phys. Lett., Vol. 70, No. 24, pp. 3299-3301.
5. Wada, H. and Tanabe, Y., 2001, Giant magnetocaloric effect of MnAs_{1-x}Sb_x, Applied Physics Letters, Vol. 79, No. 20, pp. 3302-3304.
6. Fujieda, S., Fujita, A. and Fukamichi, K., 2002, Large magnetocaloric effect in La(Fe_xSi_{1-x})₁₃ itinerant-electron metamagnetic compounds, Applied Physics Letters, Vol. 81, No. 7, pp. 1276-1278.
7. Zhu, H., Song, H. and Zhang, Y., 2002, Magnetocaloric effect in layered perovskite manganese oxide La_{1.4}Ca_{1.6}Mn₂O₇, Applied Physics Letters, Vol. 81, No. 18, pp. 3416-3418.
8. Dan'kov, S. Yu., Tishin, A. M., Pecharsky, V. K. and Gschneidner, K. A. Jr., 1998, Magnetic phase transitions and the magnetothermal properties of gadolinium, Physical Review B, Vol. 57, pp. 3478-3490.
9. Pecharsky, V. K. and Gschneidner, K. A. Jr., 1996, Comparison of the magnetocaloric effect derived from heat capacity, direct, and magnetization measurements, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 42, pp. 423-430.
10. Lee, J. S., 2002, Methods for evaluating magnetocaloric effects and thermodynamic relations, Proceedings of the SAREK 2002 Winter Annual Conference, pp. 17-22.
11. Pecharsky, V. K. and Gschneidner, K. A. Jr., 1999, Magnetocaloric effect from indirect measurements: magnetization and heat capacity, Journal of Applied Physics, Vol. 86, pp. 565-575.