

회전식 자기냉동장치에 대한 실험적 연구

이 중 석[†], 홍 정 호^{*}

강릉대학교 정밀기계공학과, *강릉대학교 대학원

Experimental Study on a Rotary Magnetic Refrigeration Device

Jong Suk Lee[†], Jeong Ho Hong^{*}

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

^{*}Graduate School, Kangnung National University, Gangwon-do 210-702, Korea

(Received August 16, 2004; revision received September 22, 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 demagnetized. A rotary magnetic refrigeration device using gadolinium (Gd) ribbon and permanent magnets was constructed for experimental study. Gd ribbon attached around a rotating wheel is cyclically magnetized and demagnetized by permanent magnets and exchanges heat with liquid in the surrounding container. Temperature of the liquid in each divided section of the container was measured and the experimental results obtained in this study were discussed.

Key words: Magnetic refrigeration device(자기냉동장치), Magnetocaloric effect(자기열량효과), Gadolinium ribbon(가돌리늄 리본), Permanent magnet(영구자석)

1. 서 론

몬트리올 의정서가 오존층 파괴물질의 사용을 많이 제한하고 있지만, 지구온난화의 문제는 아직 완전히 해결되고 있지 않다. 따라서, 과학기술자들은 기존의 증기압축식 냉동에 사용되어 온 프레온을 대체할 새로운 대체냉매의 개발과 과거에 사용했던 천연냉매를 사용하는 방법에 대한 연구를 지속하는 한편, 열전냉동, 열음향냉동, 흡수/흡착냉동, 그리고 자기냉동 등과 같은 새로운 냉동 기술에 대해서도 많은 연구를 하고 있다.⁽¹⁾

자기냉동은 자성재료를 냉매로 사용하기 때문에 기존의 증기압축식 냉동에서 사용하는 CFC, HCFC 등의 냉매가 가지고 있는 오존층 파괴 등

의 문제를 발생시키지 않으며, 대체냉매인 HFC가 가지고 있는 지구온난화의 문제도 일으키지 않으므로 인체나 환경에 무해하다는 점에서 친환경적인 냉동기술이라고 할 수 있다. 게다가 자기냉동기는 소형으로 만들 수 있는데, 이는 자성재료의 자기엔트로피 밀도가 기존의 냉매가스의 그것보다 크기 때문이다. 자기냉동에 필요한 자기장은 전자석, 초전도자석 또는 영구자석 등에 의해 제공될 수 있으며, 자기냉동은 전력소모, 소음, 진동 등이 발생하는 압축기를 필요로 하지 않는 것이 최대의 장점이다.

자기냉동의 역사는 120년이 넘는데, 1881년에 Warburg⁽²⁾가 큐리온도 부근의 철에서 자기열량 효과를 처음으로 발견하면서 시작되었다. 1926년과 1927년에 Debye⁽³⁾와 Giaque⁽⁴⁾가 각각 이러한 효과를 이용하여 극저온을 얻는 방법을 제안하였으며, 이것은 1933년에 Giaque and MacDougall⁽⁵⁾에 의해 실증되었는데, 그들은 자기장을 8 kOe에

[†] Corresponding author

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

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

서 0으로 천천히 줄임으로써 $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ 샘플을 3.4 K에서 0.53 K로 냉각시켰다. 이와 같은 방법은 단열소자법(adiabatic demagnetization)으로 불리며, 현재에도 0.0001 K 이하의 온도에 도달하는 데에 사용된다.

1976년에 Brown⁽⁶⁾은 최초로 실온에서 작동하는 자기냉동기를 보고한 바 있다. 그는 가돌리늄(Gd)을 자기냉매로 사용하여 유체(물 80%와 에틸알코올 20%)를 재생시킴으로써 7 T(tesla)의 큰 자기장에서 47°C의 온도차(고온부 46°C, 저온부 -1°C)를 얻었다. 자기냉동에서의 두 가지의 중요한 진전은 1997년에 미국의 Astronautics사와 Ames Lab의 공동연구팀⁽⁷⁻⁹⁾이 (1) 자기냉동이 실온에서도 실현 가능한 기술이며, 증기압축식 냉동에 필적할 만하다는 것을 보인 것과 (2) 이미 알려져 있던 자기냉매보다 자기열량효과가 훨씬 큰 새로운 재료를 발견한 것이다. 이로써 자기냉동에 대한 관심과 기대가 한결 커졌으며, 실온 부근의 자기냉동에 대한 연구가 더욱 활발해지고 있다.

Bohigas et al.⁽¹⁰⁾은 영구자석을 이용한 실온 자기냉동장치를 구성하여, 0.3 T의 자기장 하에서 고온부와 저온부 사이에서 1.6 K의 온도차를 얻었다. 그들은 자기냉매로는 가돌리늄 리본을 사용하였고 열전달유체로는 올리브오일을 이용하였는데, 자기장의 세기를 0.95 T로 증가시킴으로써 5 K의 온도차를 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 Bohigas et al.의 실험장치와 유사한 회전식 자기냉동장치를 구성하고 이를 이용한 실험 결과 및 고찰과 열역학적 해석을 소개하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 본 연구를 위해 제작된 회전식 자기냉동 실험장치의 구성도이다. 모터에 연결되어 구동되는 축(axle)에 부착된 아크릴 원판(지름 8 cm, 두께 1 cm)의 둘레에 두께 0.5 mm의 가돌리늄 리본이 접착되어 있으며, 이 원판(wheel)은 열교환기의 역할을 하는 액체(liquid)로 채워진 용기(안지름 11 cm, 두께 1 cm) 안에서 회전하도록 구성되었다. 이 용기(container)의 안쪽과 원판을 둘러싸고 있는 가돌리늄 리본과의 사이에 있는 공간을 8개의 칸(번호순)으로 나누어서, 각 공간의 중간지점에 열전대를 배치하여 그 공간에 채워진 액체의 온도를 측정할 수 있게 하였다.

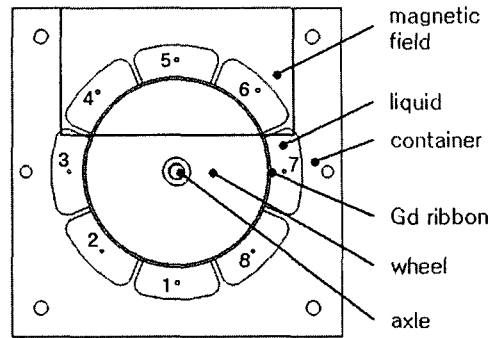


Fig. 1 Schematic frontal view of the device.

용기 상부의 양쪽면에 영구자석을 부착하여 자기장을 형성시키고, 원판이 회전함에 따라 그 둘레에 접착되어 있는 가돌리늄 리본이 자기장에 들어갈 때는 온도가 올라가고, 자기장에서 나오면 온도가 내려가는 현상이 반복된다.

자기냉매(가돌리늄 리본)가 자화에 의해 발열이 되는 부분에서는 냉매로부터 액체로의 대류열 전달에 의해서 액체의 온도가 올라가고, 반대로 소자에 의해 냉각이 되는 부분에서는 액체로부터 냉매로의 열전달에 의해서 액체의 온도가 떨어지게 된다. 본 실험에서는 원판의 회전속도를 변화시키며 용기 내의 8개로 나뉜 칸에서의 액체의 온도변화를 측정하였다.

본 실험장치에 사용된 가돌리늄 리본(두께 0.5 mm)은 중국의 Metall Rare Earth Limited로부터 구입하였으며 순도는 99.9%이다. 이것은 Ames Lab에서 제조한 순도 99.99%의 다결정 가돌리늄 샘플⁽¹¹⁾(두께 1 mm)보다는 자기열량효과가 조금 떨어진다.

한편 자기장을 형성하는 데 사용된 영구자석은 상용 NdFeB 자석으로, 50×50×25 mm(큰 자석)와 60×30×5 mm(작은 자석)의 두 종류를 사용하였다. 14 mm 떨어진 한 쌍의 큰 자석과 작은 자석은 각각 그 중간지점에서 0.6 T와 0.3 T의 자기장을 형성하였는데, 자기장의 세기를 크게 하기 위하여 한쪽에 4개씩의 자석을 붙여서 사용하면 자기장의 세기는 각각 0.9 T와 0.5 T로 증가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 둘레에 가돌리늄 리본이 접착된 회전 원판이 들어 있는 용기 상부의 양쪽에 작은 자석

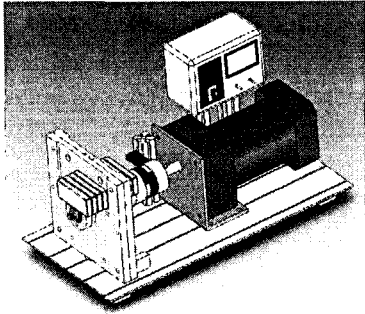
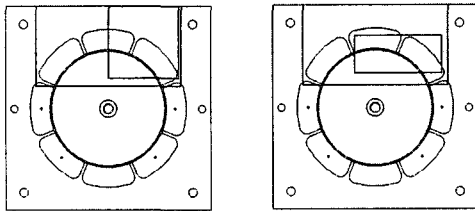


Fig. 2 Schematic of the experimental setup.



(a) Big magnet (b) Small magnet

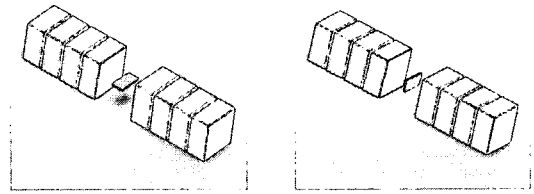
Fig. 3 Position of permanent magnets.

4개씩을 부착한 실험장치의 모습이다. 영구자석의 크기와 실험장치의 구조상의 제약으로 인하여 의도했던 자기장의 영역을 형성하지 못한 채 실험을 수행하였다. Fig. 3은 큰 자석(a)과 작은 자석(b)을 부착시킨 위치를 나타낸다. 결과적으로 가돌리늄의 가열과 냉각에 의한 용기 내의 물의 온도변화 및 온도차는 비교적 작게 나타났다.

3.1 가돌리늄의 자기열량효과

실온에서 작동되는 대부분의 자기냉동기는 가돌리늄을 자기냉매로 사용하는데, 이는 가돌리늄의 큐리온도가 293 K이며 이온당 자기모멘트가 매우 크기 때문이다. 등온자화과정에서 가돌리늄의 엔트로피변화는 자기장의 세기가 1 T일 때 큐리온도 부근에서 3.2 J/kg·K이다.⁽¹⁰⁾

본 연구에서 사용된 중국산 가돌리늄(99.9%) 리본의 자기열량효과를 Ames Lab에서 제조한 고순도(99.99%)의 샘플⁽¹¹⁾과 비교하였다. Fig. 4는 4개씩 붙인 큰 자석들 사이의 거리가 14 mm가 되게 하고, 그 사이에 가돌리늄 샘플을 자기장과 수평(a)과 수직(b) 방향으로 넣었다(In) 빼내면서(Out) 샘플의 온도변화를 측정하는 모양이다.



(a) Horizontal (b) Vertical

Fig. 4 Measurement of the MCE of Gd sample in the magnetic field.

Table 1 Results of the MCE measurement

| ΔH | Meas. mode | Sample A | Sample B | B/A(%) | |
|------------|------------|----------|----------|--------|----|
| 0.5 T | H | In | +1.20 | +1.00 | 83 |
| | | Out | -1.30 | -1.07 | 82 |
| | V | In | +0.78 | +0.62 | 79 |
| | | Out | -0.83 | -0.65 | 83 |
| 0.9 T | H | In | +2.03 | +1.92 | 95 |
| | | Out | -2.32 | -2.30 | 99 |
| | V | In | +1.49 | +1.21 | 81 |
| | | Out | -1.58 | -1.34 | 85 |

Sample (A: Ames Lab, B: Metall Rare Earth Ltd.)

Table 1은 두 가지의 가돌리늄 샘플에 대해 0.5 T(작은 자석 4개씩)와 0.9 T(큰 자석 4개씩)의 자기장에서 수평/수직 방향으로 In/Out될 때의 온도변화를 정리한 표이다. 샘플 B(중국산)와 샘플 A(Ames Lab 제조)의 온도변화의 비(B/A)를 보면, 0.5 T에서는 평균 82%, 0.9 T에서는 샘플이 자기장에 수평 방향일 때는 97%, 수직 방향일 때는 83%의 자기열량효과를 보이는 것으로, 샘플의 순도에 따라 상당한 차이가 있음을 보여준다.

한편, 본 연구에 사용된 다결정 가돌리늄은 자기결정방성은 갖고 있지 않은 등방성(isotropic) 재료이지만, 실험에 사용된 10×20×1~1.5 mm인 샘플에서는 길이가 긴 방향으로 자기열량효과가 더 크게 나타나는 형상자기방성을 보인다. 수직(V) 방향일 때와 수평(H) 방향일 때의 온도변화의 비(V/H)는 0.5 T에서 평균 63%, 0.9 T에서는 들어갈 때 68%, 나올 때 63%로 나타났다.

3.2 온도변화 및 온도차

Fig. 5는 둘레에 가돌리늄 리본이 집착된 원판

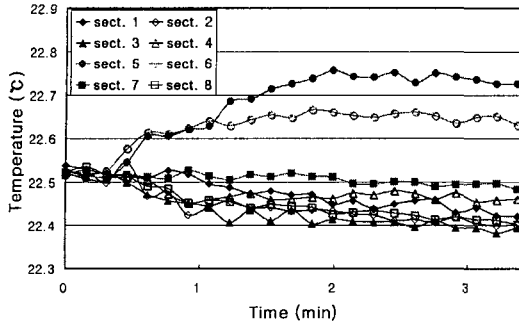


Fig. 5 Variation of temperatures in 8 sections.

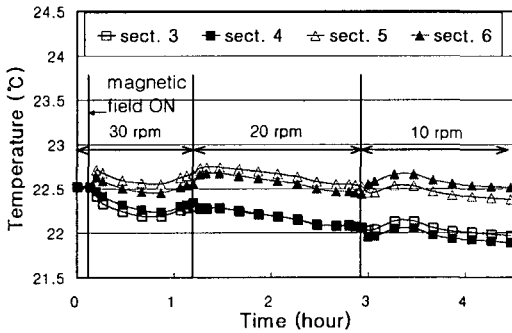


Fig. 6 Change of temperatures with the rpm.

의 회전속도를 30 rpm으로 돌리기 시작할 때 용기 내에 있는 8개의 칸에서의 물의 온도변화를 측정할 결과를 나타낸 것이다. 원판이 돌기 시작하면 자기장이 형성된 부분(5, 6)의 온도는 올라가고 자기장 바깥의 부분(1, 2, 3, 4, 7, 8)의 온도는 떨어지는 현상이 명백하게 나타난다.

Fig. 6은 원판의 회전속도를 30 rpm으로 시작하여 점차적으로 20 rpm, 10 rpm으로 낮추면서 자기장이 형성된 고온부(5, 6)와 자기장 바깥의 저온부(3, 4)의 온도변화를 나타내는데, 그 온도차는 회전속도가 일정하게 유지되는 동안은 변하지 않고, 회전속도가 줄어들때 따라 온도차가 조금 더 벌어지는 것을 볼 수 있다. 용기 내의 물의 온도는 대체적으로 실내의 온도에 따라 변화하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 실험장치의 용기가 아크릴로 제작되었고 단열을 하지 않았기 때문에 실험실 내의 공기와의 열교환으로 인해 물의 온도가 영향을 받는 것으로 여겨진다.

Fig. 7은 Fig. 6에 나타난 세 가지의 rpm에서 용기의 나누어진 영역 내에 있는 물의 평균 상대 온도를 막대그래프로 나타낸 것으로, 원판의 회전속도가 변함에 따라 최고온도와 최저온도의 위

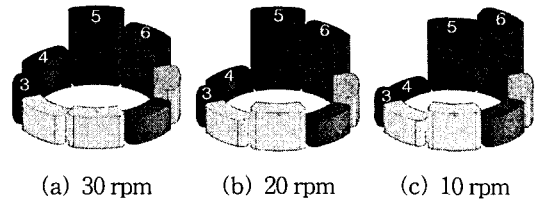


Fig. 7 Bar graphs representing the average relative temperatures in 8 sections.

치가 변화하는 모습을 보여준다. 영구자석의 부착으로 인해서 자기장이 형성된 영역은 Fig. 3에 표시한 바와 같이 5번과 6번이다.

회전속도가 30 rpm일 때는 5번과 3번 영역에서 각각 최고와 최저 온도가 되며, 10 rpm에서는 6번과 4번에서 각각 최고와 최저 온도를 갖게 된다. 이것은 원판에 접촉된 가돌리늄 리본이 자기장 안으로 들어가고 나가는 속도가 느려짐에 따라, 최고 온도와 최저 온도의 영역이 자화가 시작되는 지점(6번)과 소자가 시작되는 지점(4번) 쪽으로 이동하는 것으로 볼 수 있다. 이러한 결과는 가돌리늄 리본과 물과의 대류열전달이 그리 크지 않아서 원판의 회전속도가 느릴 때야야 충분한 열전달이 일어나기 때문으로 여겨진다.

이 실험에서의 자기장의 세기는 0.9 T 정도이며 고온부와 저온부 사이의 평균적인 온도차는 30 rpm에서 0.4°C, 20 rpm에서 0.5°C, 10 rpm에서 0.7°C 정도로서, Bohigas et al.⁽¹⁰⁾이 보고한 1.6 K(0.3 T)와 5 K(0.95 T)와는 상당한 차이를 보인다. 이러한 원인은 본 실험에서의 자기장의 영역이 충분하지 못한 점을 들 수 있으며, 물과 올리브 오일의 차이도 고려해 볼 수 있다. 본 연구에서도 용기 내에 물 대신 올리브 오일을 넣고 실험해 보았으나, 결과는 별로 차이가 없었다.

한편, 본 실험 결과에서는 원판의 회전속도가 감소함에 따라 고온부와 저온부의 온도차는 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이것도 Bohigas et al.이 보고한 바와는 상반된 결과이다. 그들은 자기장의 세기가 0.3 T일 때 4 rpm에서 0.8 K, 20 rpm에서 1.4 K의 온도차를 얻었으며, 회전속도의 증가에 따라 온도차가 증가한다고 하였다.

3.3 기타 사항

본 연구에서는 앞에 제시한 실험 결과 이외에도 여러 가지의 실험(실내공기와의 차단, 1겹과 2

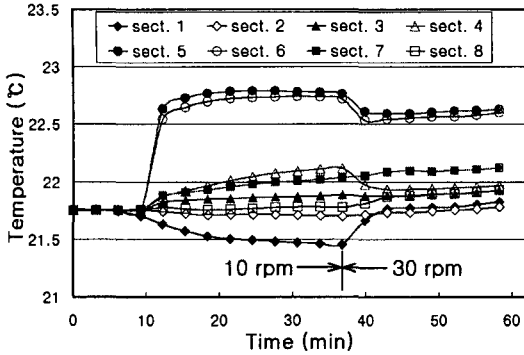


Fig. 8 An experimental result in early stage.

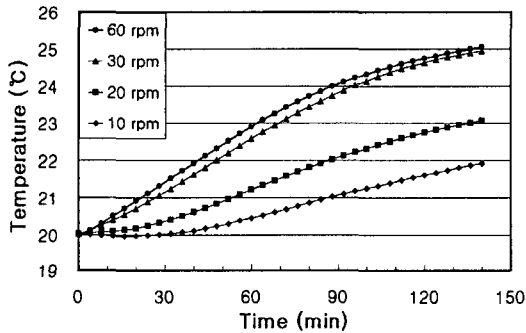


Fig. 9 Variation of average temperature of the water in the container due to friction.

접의 가돌리늄 리본 등)을 수행하였으나 큰 차이는 없었으며, 시간이 지남에 따라 실험장치의 성능이 열악해지는 것으로 나타났다. Fig. 8은 초기의 실험 결과로, 0.8 T의 자기장 하에서 10 rpm일 때의 온도차가 1.3°C에 달하며, 30 rpm에서는 0.8°C를 넘었으나 이러한 온도차는 재현되지 않았다.

한편, 아크릴로 제작된 원판과 그 둘레를 둘러싸고 있는 가돌리늄 리본은 용기와 직접 접촉한 상태에서 회전하며 마찰을 일으키는 것으로 보인다. Fig. 9는 원판을 회전시킬 때 용기 안에 들어 있는 물의 평균 온도의 변화를 나타낸 것이다. 원판의 회전속도가 증가함에 따라 마찰이 커져서 물의 평균 온도도 상승하는 것을 볼 수 있다.

3.4 열역학적 해석

회전하며 자화 및 소자되는 가돌리늄의 질량은

$$\dot{m} = \lambda r \omega \quad (1)$$

여기서 λ 는 선밀도, r 은 리본의 반지름, ω 는 각속도이다. 그러면 방출되거나 흡수되는 열량은

$$\dot{Q} = T_{Gd} \Delta S_M \dot{m} \quad (2)$$

이 된다.

한편, 에너지 평형에 의하여

$$\dot{Q} = m_w c_w \dot{T} + \alpha(T - T_o) \quad (3)$$

여기서 마지막 항은 물로부터 외기로의 열전달률을 나타낸다. α 는 이웃하는 물과의 혼합과 외부 열손실을 포함하는 유효 열전달계수이다.

α 를 0으로 가정하면

$$\dot{T} = T_{Gd} \Delta S_M \frac{\lambda r \omega}{m_w c_w} \quad (4)$$

로 되며, 온도(T)는 시간과 각속도에 비례한다.

본 실험에서 회전속도가 증가함에 따라 온도차가 작아지는 경향은 식(4)에 의거하면 잘못된 결과로 여겨진다. 단, 위의 열역학적 관계식들이 적용되기 위해서는 자성재료와 열전달유체 사이의 대류열전달이 충분히 크다는 조건이 만족되어야 한다고 볼 수 있다.

위의 식들은 열역학적 한계를 나타내며, 실험장치의 최대 냉각능력을 결정한다.⁽¹⁰⁾ 본 실험장치에 대해서 식(1)과 (2)를 적용하여 질량 유입/유출률과 열방출 또는 흡수율을 계산해 보면,

$$\begin{aligned} \dot{m} &= (7.9 \times 10^3 \times 0.0005 \frac{\text{kg}}{\text{m}}) (0.04 \text{ m}) \left(\frac{2\pi (\text{rpm})}{60 \text{ s/min}} \right) \\ &= 0.000165 (\text{rpm}) \text{ kg/s}, \\ \dot{Q} &= (293 \text{ K}) (3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}) (0.000165 (\text{rpm}) \text{ kg/s}) \\ &= 0.145 (\text{rpm}) \text{ W}. \end{aligned}$$

예를 들면, 원판의 회전속도가 10 rpm일 때 본 실험장치의 최대 냉각능력은 1.45 W가 된다.

4. 결론

본 연구에서는 자기열량효과가 큰 자성재료인 가돌리늄 리본과 상당히 높은 자기장을 형성하는 영구자석인 상용 NdFeB 자석을 이용한, 실온에서 작동하는 회전식 자기냉동 실험장치를 구성하

고 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 0.5 mm 두께의 비교적 작은 양의 가돌리늄과 상용 영구자석을 이용한 실험장치에서, 고온부(발열부)와 저온부(냉각부)가 형성되는 것을 보임으로써 자기냉동의 원리를 실증하였다.

(2) 14 mm 떨어진 한 쌍의 상용 NdFeB 자석(50×50×25 mm) 중간지점에서 0.6 T의 자기장이 형성되었으며, 한쪽에 4개씩의 자석을 붙여서 사용하면 자기장의 세기는 0.9 T로 증가하였다.

(3) 중국산 가돌리늄 샘플의 자기열량효과(온도 변화)는 Ames Lab의 고순도 샘플과 비교해서, 0.5 T에서는 평균 82%, 0.9 T에서는 평균 90% 정도로, 샘플의 순도에 따라 상당한 차이가 있음을 보여준다.

(4) 샘플의 길이 방향과 자기장의 방향이 수직(V)일 때와 수평(H)일 때의 온도변화의 비(V/H)는 0.5 T에서 평균 63%, 0.9 T에서는 평균 66% 정도로, 자기냉매의 자기열량효과가 자기장의 방향에도 상당한 영향을 받는 것을 보여준다.

(5) 고온부와 저온부 사이의 온도차는 원판의 회전속도가 일정하게 유지되는 동안은 변하지 않고, 회전속도가 줄어들어 따라 온도차가 조금 더 벌어졌는데, 자기장의 세기가 0.9 T 정도일 때 평균적인 온도차는 30 rpm에서 0.4°C, 20 rpm에서 0.5°C, 10 rpm에서 0.7°C 정도였다.

본 실험에서 측정된 결과는 참고문헌⁽¹⁰⁾에 보고된 수치에 못 미치거나, 회전속도와 온도차와의 관계는 상반된 결과를 보이기도 했다. 이에 대해서는 실험장치의 재구성 및 좀더 정확한 실험을 통한 추가연구가 필요하다고 여겨진다. 하지만, 본 연구를 통해 가돌리늄과 영구자석을 이용한 회전식 자기냉동기의 원리를 실증하였으며, 샘플의 길이가 긴 방향으로 자기열량효과가 더 크게 나타나는 형상자기이방성을 확인하였다.

후 기

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

참고문헌

1. Yu, B. F., Gao, Q., Zhang, B., Meng, X. Z. and Chen, Z., 2003, Review on research of room temperature magnetic refrigeration, *Int. J. Ref.*, Vol. 26, pp. 622-636.
2. Warburg, E., 1881, Magnetische untersuchungen, *Ann. Phys. Chem.*, Vol. 13, pp. 141-146.
3. Debye, P., 1926, Einige bemerkungen zur magnetisierung bei tiefer temperatur, *Ann. Physik.*, Vol. 81, pp. 1154-1160.
4. Giauque, W. F., 1927, A thermodynamic treatment of certain magnetic effects. A proposed method of producing temperatures considerably below 1° absolute, *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 49, pp. 1864-1870.
5. Giauque, W. F. and MacDougall, D. P., 1933, Attainment of temperatures below 1° absolute by demagnetization of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$, *Phys. Rev.*, Vol. 43, p. 768.
6. Brown, G. V., 1976, Magnetic heat pumping near room temperature, *J. Appl. Phys.*, Vol. 47, pp. 3673-3680.
7. Gschneidner, K. A., Jr., Pecharsky, V. K. and Zimm, C. B., 1999, Magnetic cooling for appliances, *Proc. 50th Ann. International Appliance Tech. Conf.*, West Lafayette, IN, pp. 144-154.
8. Pecharsky, V. K. and Gschneidner, K. A., Jr., 1999, Magnetocaloric effect and magnetic refrigeration, *J. Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 200, pp. 44-56.
9. Gschneidner, K. A., Jr., Pecharsky, V. K., Pecharsky, A. O. and Zimm, C. B., 1999, Recent developments in magnetic refrigeration, *Materials Science Forum*, Vols. 315-317, pp. 69-76.
10. Bohigas, X., Molins, E., Roig, A., Tejada, J. and Zhang, X. X., 2000, Room-temperature magnetic refrigerator using permanent magnets, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 36, No. 3, pp. 538-544.
11. Lee, J. S., 2004, Demonstrative experiments on the magnetocaloric effect of gadolinium, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 383-389.