대한설비공학회 2008 동계학술발표대회 논문집 pp. 186 ~ 191

08-W-033

영구자석 배열을 이용한 능동형 자기재생 냉동기에 대한 실험적 연구

김 영 권†, 정 상 권
한국과학기술원 기계공학과

Experimental investigation on the room temperature active magnetic regenerator with permanent magnet array

Youngkwon Kim, Sangkwon Jeong

ABSTRACT: In this study, a room temperature AMRR (Active magnetic regenerative refrigerator) was fabricated, and experimentally investigated. Gadolinium (Gd) was selected as a magnetic refrigerant with Curie temperature of 293 K. Permanent magnet was utilized to magnetize and demagnetize the AMR. To produce large magnetic field above 1 T in the magnetic refrigeration space, a special arrangement of permanent magnets, so called Halbach array, is employed. Sixteen segments of the permanent magnets magnetized different direction, constitute a hollow cylindrical shaped permanent magnet. The AMR is reciprocated along the bore of the magnet array and produces cooling power. Helium is selected as the working fluid and a helium compressor is utilized to supply helium flow to the regenerator. The fabricated AMRR has different structure and compared to a convectional AMRR since it has an additional volume after the regenerator. Therefore, the cooling ability is generated not only by magnetocaloric effect of magnetic refrigerant but also by the pulse tube effect. It is verified that the cooling ability of AMR is increased due to the magnetocalric effect by the fact that the temperature span becomes 16℃ while the temperature span is only 8℃ when the magnetic field is not applied to the regenerator.

Key words: magnetic refrigeration (자기냉동), active magnetic regenerator(능동형 자기 재생기), magnetocaloric effect (자기열량효과), Halbach array (영구자석 배열)

1. 서 론

자기 냉동은 특정 물질의 자성 재료에 자기장을 가해주거나 제거하면 물질의 엔트로피나 온도가 변화하는 현상인 자기 열량 효과(magnetocaloric effect)를 이용하는 냉동방법이다.[1] 이는 최초에는 일반적인 냉동 시스템으로 도달할 수 없는 1 K 이하의 매우 낮은 온도에 도달하기 위해 사용되었으나, 자기 열량 효과가 큰 여러 가지 물질들이 발견됨으로써 현재에는 극저온 영역 뿐 아니라 상온 영역에까지 넓은 범위에서의 연구가 활발히 이루어지고 있다.[2, 3] 자기 냉동은 일반적인 냉동기와는 달리 자기열량효과를 가지는 고체를 냉매로써 사용하고 기체 사이클의 압축기에 의한 압축 및 팽창 과정을 자석에 의한 자화(magnetization) 및 탈자화(demagnetization) 과정으로 대체하여 냉동효과를 얻는다. 이처럼 영구 자석이나 전자석 또는 초전도

† Corresponding author
Tel.: +82-42-350-3079; fax: +82-42-350-8207
E-mail address: ykkim78@kaist.ac.kr

자석이 압축기를 대신하기 때문에 소음, 진동이 적으며, 자성재료의 자기엔트로피 밀도가 기존의 기체 냉매에 비해 크기 때문에 소형화가 가능하다. 하지만 자성 냉매의 자기 열량 효과는 특정 온도 범위에서만 크게 나타나기 때문에 자기 냉동기는 냉매의 전이 온도 부근의 좁은 온도 범위에서만 적용이 가능한 단점이 있다. 예를 들어 가돌리늄(Gadolinium, Gd)과 같은 경우 293 K 부근에서 상자성(paramagnetism)에서 강자성(ferromagnetism)으로의 전이를 거치며 최대의 자기열량 효과를 보인다.[4]

일반적으로, 자기 냉동방식은 자성냉매 덩어리를 사용하여 자화 되어 온도가 증가하였을 때 고온부 열교환기와 연결하고, 탈자화되어 온도가 감소하였을 때 저온부 열교환기와 연결하여 냉동효과를 얻는 방식의 냉동기 (ADR, Adiabatic Demagnetization Refrigerator) 와 자성냉매를 재생기의 물질로써 사용하고 유체를 사용해서 열전달을 하는 능동형 자기 재생 냉동기 (AMRR, Active Magnetic Regenerative Refrigerator)를 사용하는 방식이 있다. ADR 시스템의 경우 자성냉매 덩어리가 전체적으로 동일한 온도를 가지고 자화 및 탈자화 과정에 의해 온도가 변화하므로 앞에서 언급하였듯 전이온도 부근의 좁은 온도범위에서만 적용이 가능하며, 자화 및 탈자화 되는 동안 고·저온 열교환기에 주기적으로 단속이 가능한 열스위치(heat switch)가 필요한 단점이 있다. 하지만 능동형 자기 재생 냉동기의 경우에는 열스위치가 필요 없으며, 재생기의 길이방향으로 온도구배를 가지므로 재생기의 양 끝단에서 보다 큰 온도 차이를 가진 상태로 작동이 가능한 장점이 있다. 본 연구에서는 상온에서 큰 자기 열량효과를 가지는 가돌리늄을 사용한 능동형 자기 재생기와, 큰 자기장을 얻을 수 있도록 영구자석 배열을 사용하여 능동형 자기 재생 냉동기를 제작하였으며 성능 평가를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

능동형 자기재생기의 가장 핵심적인 부분은 원하는 온도범위에서 큰 자기열량 효과를 가지는 자성냉매와 이 냉매에 자기장을 가해줄 수 있는 강한 자석, 그리고 열전달 매체로 사용되는 유체이다.

2.1 영구자석 배열 (Halbach array)

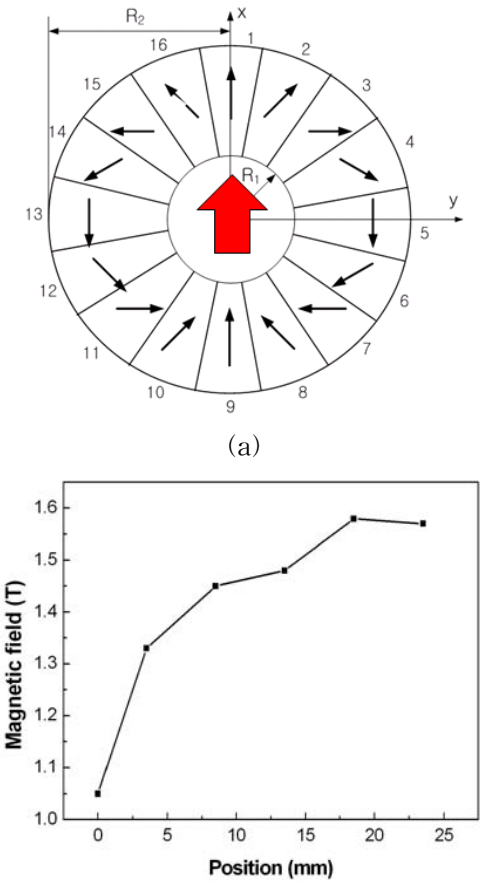


Fig. 1 (a) Schematic diagram of permanent magnet array that has 16 segments and (b) measured field distribution in the bore of the magnet array (z-direction)

본 연구에서는 자성냉매에 자화 및 탈자화를 구현하기 위해 영구자석 배열을 사용하였다. 일반적인 영구자석은 자석의 외부에서 1 T 이상의 강한 자기장을 얻기가 매우 힘들다. 하지만 Fig. 1의 (a)와 같이 적당한 방향으로 자화된 쐐기형태의 영구자석 조각들을 배열함으로써, 자석의 중심부분에 자기장이 집중되어 매우 큰 자기장을 얻을 수 있다. 이를 일반적으로 Halbach array라고 한다.[5]

이상적인 경우, 즉 무한히 긴 영구자석 조각들이 연속적으로 자화되어 있다고 했을 때, 영구자석 배열의 중심에서 얻을 수 있는 자장의 세기(B)는 배열된 각 자석 조각의 잔류자장(retentivity, B_r)과 내부 반지름(R_i)와 외부 반지금(R_o)에 의해 식 (1)과 같이 나타난다.

$$B=\begin{cases} B_r \ln\left(\dfrac{R_o}{R_i}\right) & \text{for } R < R_i \\ 0 & \text{for } R > R_o \end{cases} \qquad (1)$$

실제로는 자석 조각들의 잔류자장뿐만 아니라 보자장(coercivity)과 길이, 자석조각의 개수에 따라 자장의 세기가 달라지며 이는 수치해석적[6, 7]으로 계산이 가능하다. 일반적으로 많은 조각을 사용할수록 자석의 길이가 길수록, 내경과 외경의 비가 클수록 큰 자장을 가진다. 뿐만아니라, 자석의 중심에서 거리와는 상관없이 균일한 자장을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 16개의 영구자석 조각을 사용하여 내경 16 mm, 외경 76 mm, 길이 47 mm인 영구자석을 제작하였다. 각 조각들은 일반적으로 구할 수 있는 네오디뮴계열의 자석(NdFeB, N41H)을 사용하였다. Fig. 1의 (a)에서 16개 중 i 번째 영구자석 조각은 수직축에 대해서 $\pi(i-1)/4$의 각도로 자화되어 있다. 각 조각들은 일반적으로 많이 사용되는 틀을 제작하고 각 조각들을 끼워 넣는 방식이 아닌 접착제를 사용하여 직접 붙여서 제작하였다. 결과적으로 제작된 영구자석은 내부에서 길이방향으로 자기장의 세기가 변화하며, Fig. 1의 (b)와 같이 중심(23.5 mm)에서는 약 1.57 T, 영구자석의 윗면(0 mm)과 아랫면에서는 약 1.0 T의 자기장을 얻을 수 있었다.

2.2 자성냉매: 가돌리늄(Gd)

자성냉매는 적용하고자하는 온도범위에서 큰 자기 열량효과를 가져야 하며 상온영역에서는 293 K 부근에서 큐리온도(Curie temperature)를 가지는 가돌리늄이 자성냉매로써 많이 사용되고 있다. 자성냉매의 자화(magnetization), 자기 엔트로피(magnetic entropy), 비열(specific heat)은 자기 재생기 제작에 꼭 중요한 정보이며, 본 연구에 사용될 가돌리늄에 대해서는 자화를 측정하였으며 그 결과는 Fig. 2와 같다. 가돌리늄은 작은 덩어리(ingot)형태로 구입하였으며 이를 액체질소로 냉각한 후 가공하여 비정형의 분말로 분쇄하였다. 가공된 가돌리늄 21 g을 사용해서 재생기를 제작하였다.

2.3 실험장치 및 작동

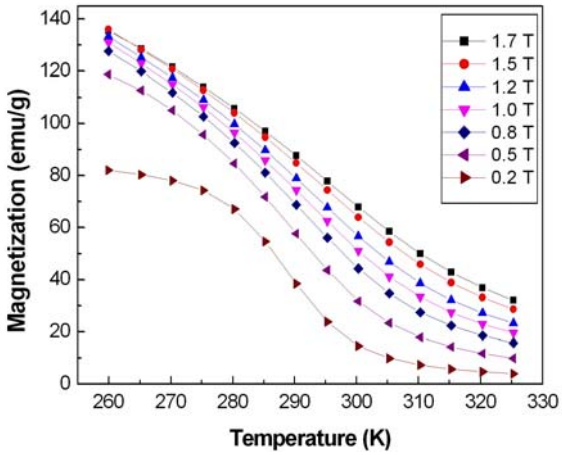


Fig. 2 Measured magnetization of Gd according to temperature and applied field

실험 장치는 Fig. 3과 같다. 헬륨 압축기(CTI8000)와 회전밸브(rotary valve)를 사용하여 고압과 저압의 왕복유동을 자기 재생기에 공급하며, 압축기의 고압부에 니들밸브(valve #1)를 설치하고 출구에 고압부와 저압부를 연결하고 중간에 니들밸브(valve #2)를 설치하여 공급되는 유동의 압력진폭과 유량을 조절하였다. 회전밸브의 출구에는 압력계를 설치하여 공급되는 헬륨의 압력파형을 측정하였다. 재생기의 전단에는 핫필름 센서(Hot-film sensor, TSI)를 설치하여 공급되는 유량을 측정하였다. 외경 1/2인치의 얇은 스테인리스 스틸 튜브로 제작된 재생기내부에는 앞서 언급한 가돌리늄 분말이 들어있으며 그 내부에는 7개의 열전대(thermocouple)을 설치하여 내부의 온도를 측정하였다. 열전대의 위치는 재생기 왼쪽의 고온부분 (T1)에서 3.5 cm (T2), 10 cm (T3), 10 cm (T4), 10 cm (T5), 10 cm (T6), 3.5 cm (T7)간격으로 설치되어 있다.

이와 같은 재생기는 선형 이송기(linear actuator, Oriental motor)를 사용하여 영구자석 배열의 내부로 왕복운동을 하게 되며 왕복운동을

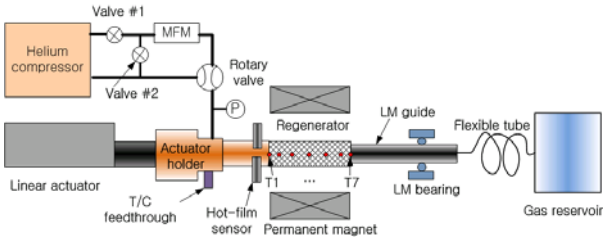


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

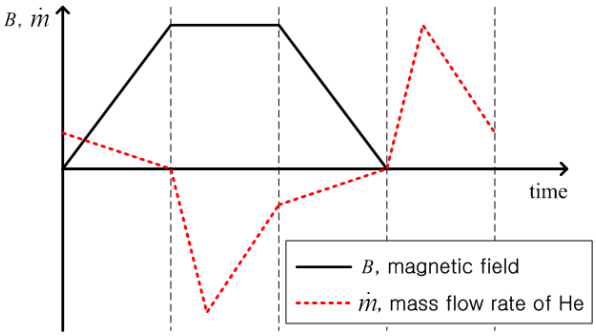


Fig. 4 Magnetic filed and mass flow rate variation during 1 cycle

위한 가이드가 재생기의 후단에 내경 10 mm의 스테인리스 스틸 튜브로 연결되어 있으며 이는 베어링을 통해 지지된다. 재생기 내부로 충분한 유량을 공급해주기 위해 약 300 cc의 기체 저장소(buffer volume)가 설치되어 있으며 왕복운동에 저항이 없도록 유연한 플라스틱 튜브를 재생기 부분과 연결하였다. 선형 이송기와 로터리 밸브는 스테핑 모터에 의해 구동되며, 이는 DSP 모듈(Digital Signal Processing module)에서 공급되는 펄스 신호에 의하여 동기화되어 작동한다.

이와 같은 능동형 자기 재생기는 선형 이송기에 의해 자석의 내부로 왕복하여 자화 및 탈자화를 구현하고 이에 맞게 적절히 유동을 공급하여 재생기의 후단에서 냉각효과를 얻을 수 있다. 개략적인 작동과정은 Fig. 4에서 보는 바와 같다.

1. 재생기가 멈추어 있는 동안 로터리 밸브로부터 고온의 헬륨이 공급된다.
2. 재생기가 자석의 내부로 이동하여 자화되는 동안 같은 방향으로 헬륨이 계속 공급된다.
3. 재생기가 자석의 내부에 멈추어 있는 동안 유동의 방향이 바뀌어 재생기의 후단에서 저온의 헬륨이 공급된다.
4. 재생기가 자석의 외부로 이동하여 탈자화되는 동안 같은 방향으로 헬륨이 계속 공급된다.

3. 실험결과 및 고찰

제작된 실험 장치는 헬륨 압축기를 사용하였기 때문에 재생기에 공급되는 헬륨의 압력이 시간에 따라 변화하며, 재생기 이후에 설치된 선형 가이드와 기체 저장소에 의해 일반적인 능동형 자기 재생기와는 다른 특성을 보인다. 공급되는 헬륨의 압력 변화에 따른 기체의 압축 및 팽창효과에

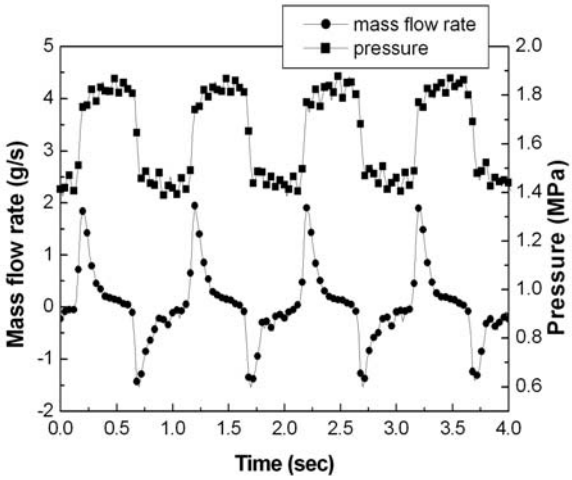
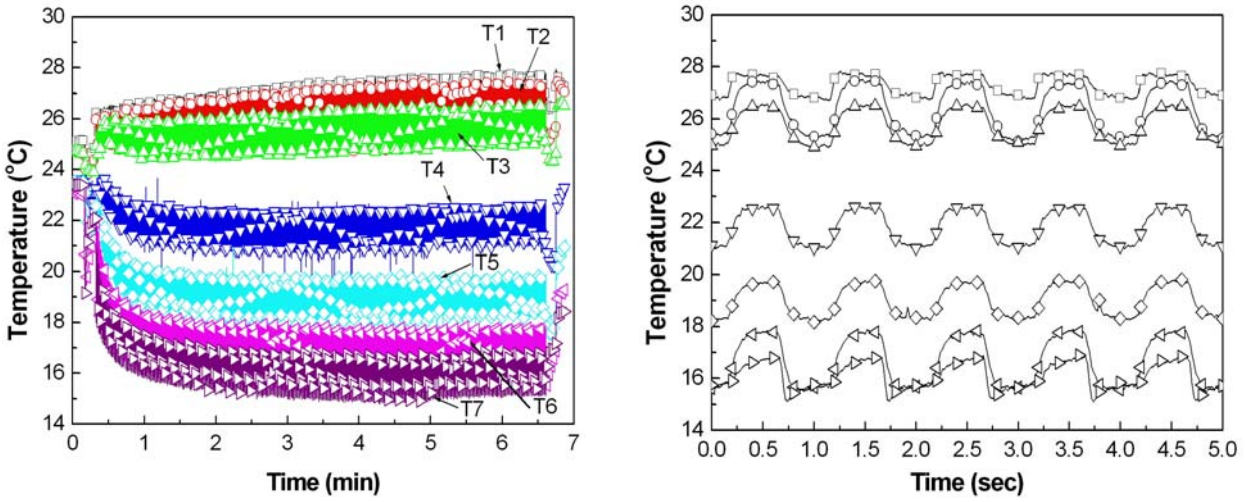


Fig. 5 Mass flow rate and pressure fluctuation at the steady-state operation

의한 냉각효과와 실험장치 전체가 맥동관 냉동기와 비슷한 형상을 하고 있기 때문에 자기 열량효과 없이도 냉동효과가 나타날 것이다. 실제로 헬륨 압축기 후단에 설치된 두 개의 밸브가 없는 경우 압력진폭은 저압측에서 0.8 MPa, 고압측에서 1.9 MPa의 압력을 가진다. 그러므로 헬륨 압축기 후단에 설치된 밸브를 조절하여 압력 진폭을 감소시켜서 실험을 수행하였다. 온도가 정상상태에 도달하였을 때, 재생기에 공급되는 압력, 질량유량을 측정하였으며 그 결과는 Fig. 5와 같다. 압력변화는 약 1.4 MPa에서 1.85 MPa이며 질량유량은 고압으로 유지되는 동안 회전밸브에서 재생기 쪽으로 유입되며 저압인 동안 재생기에서 회전밸브 쪽으로 이동한다. 이와 같은 압력 및 질량유량 조건을 가지고 재생기를 이송시키지 않은 상태에서, 즉 자화 및 탈자화 과정이 없는 경우와 선형 이송기를 작동시켜 재생기를 자화 및 탈자화시킨 경우 온도변화와 정상상태의 온도 진폭은 Fig. 6과 7에 각각 도시되어 있다.

자기 재생기의 작동이 없이 유량만 공급한 경우에도 Fig. 6에서 보듯이 냉각효과가 나타난다. 이는 약간의 압력변동에 의해 재생기 이후에 부착된 선형 가이드, 튜브, 기체 저장소가 각각 맥동관 냉동기의 맥동관(pulse tube), 관성관(inertance tube), 가스 저장소의 역할을 하기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 6의 (b)에 나타난 각 부분의 온도는 Fig. 5에서 나타난 질량 및 압력 파형과 동일한 상(phase)으로 진동하고 있으며 이는 재생기 내부의 온도변화가 및 냉각효과가

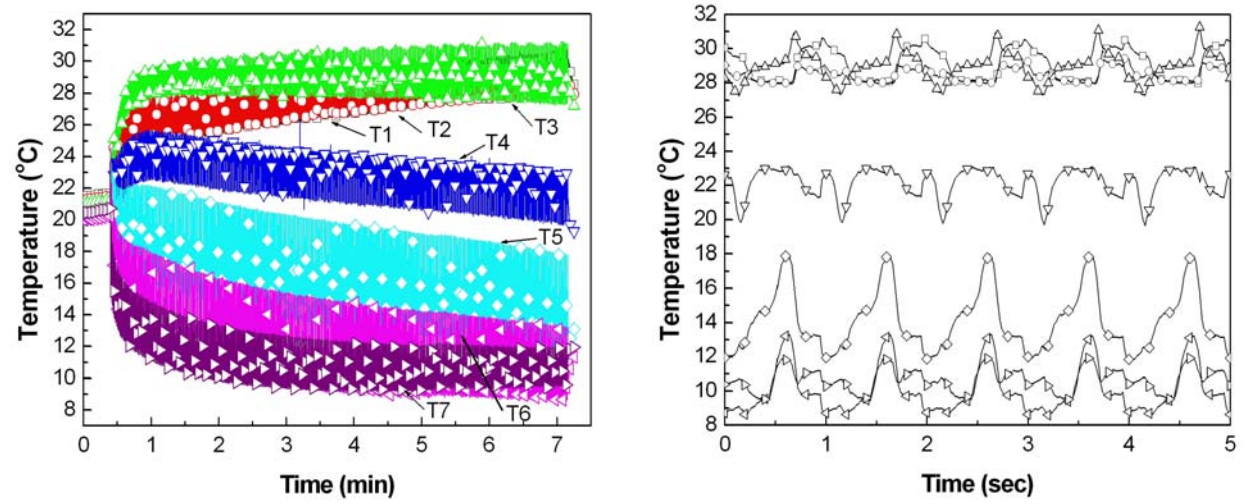


(a) (b)

Fig. 6 (a) Cool-down history with averaged temperature and (b) steady-state temperature fluctuation of regenerator without motion of AMR (no magnetocaloric effect) (T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7)

기체의 압축·팽창 및 맥동관 효과에 의한 냉각이라고 볼 수 있다. 이때 재생기 양 끝단의 온도 차이는 약 8℃정도가 된다. 이는 T1의 변화 중 가장 낮은 부분과 T7의 변화 중 가장 높은 부분을 기준으로 계산하였다.

같은 조건에서 재생기를 1 Hz로 자화·탈자화 시킨 경우 재생기 양 끝단의 온도 차이는 약 16℃정도로 이전의 경우에 비해 증가하였다. 이를 통해서 자기 열량효과에 의한 냉각효과가 나타남을 알 수 있다. 또한 이 경우에는 이전 실험에 비해 각 부분의 온도변화 진폭이 커진 것을 알 수 있다. 이전에는 온도의 진폭이 1℃에서 2.5℃ 정도이지만 Fig. 7의 (b)에서 보듯이 재생기를 작동시킨 경우 온도 진폭이 최소 3℃ 이상으로 증가하였으며 특히 T5의 경우에는 6℃ 정도로 증가한 것을 확인 할 수 있으며 이 역시 가돌리늄



(a) (b)

Fig. 7 (a) Cool-down history with averaged temperature and (b) steady-state temperature fluctuation of regenerator with the motion of AMR (including magnetocaloric effect) (T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7)

의 자기 열량효과가 반영되어 발생한 현상이다. 하지만, 일반적인 자기 냉동기에서 성능을 평가하는 기준 중 하나인 재생기 양 끝단의 온도 차이(temperature span)를 본 실험 장치에 의한 결과와 비교하는 것은 무리가 있다. 일반적인 자기 재생기의 경우 저온부의 열을 반대쪽인 고온부로 이동시켜 고온부의 온도가 크게 증가하지만 본 실험장치의 경우 맥동관 효과가 같이 나타나므로 펄스튜브 역할을 하는 선형 가이드의 내부에서도 열펌핑 현상이 나타나기 때문이다.

앞의 결과와는 달리 각 부분의 온도변화 양상이 서로 다르게 나타난다. 이는 자기장의 변화에 의한 가돌리늄의 온도변화와 헬륨 유량변화에 의한 열전달의 변화에 의해 발생하는 현상이다.

4. 결 론

본 연구에서는 가돌리늄을 사용하여 상온 능동형 자기 재생 냉동기를 제작하였다. 제작된 냉동시스템은 다른 연구자들에서 의해 제작된 냉동기와는 달리 헬륨 압축기를 사용하고 전체적으로 맥동관 냉동기와 같은 형태를 가지고 있다. 그러므로 냉동기의 냉각효과는 기체의 압축 및 팽창효과에 의한 냉각효과가 함께 나타나지만 자기열량효과가 없는 경우 재생기 양 끝단의 온도 차이가 약 8 ℃인데 비해, 재생기의 자화 및 탈자화에 의해 양 끝단의 온도 차이가 가 16 ℃로 증가하는 것을 확인하였으며 이를 통해 간접적으로 자성 냉매에 의한 냉동효과를 확인 할 수 있었다. 강한 자기장을 얻기 위해 제작된 영구자석 배열은 최대 1.57 T의 큰 자기장을 얻을 수 있었지만, 자석의 길이방향으로 자기장의 세기가 변화하기 때문에 재생기의 위치에 따라 한 주기 동안 겪는 자기장의 변화가 달라진다.

본 연구를 통해 가돌리늄을 사용한 능동형 자기 재생 냉동기의 냉동효과를 확인할 수 있었으나, 냉동시스템의 성능을 최적화하기 위해 앞서 언급한 복잡한 자기장의 변화에 의해 온도 및 물성이 변화하는 자성냉매와 헬륨과의 열전달 현상을 고려한 해석적인 연구가 필요할 것이다. 그리고 이와 같은 연구를 통해 일반적인 맥동관 냉동기의 재생기 부분에 자성 냉매를 사용해서 냉동효과를 높일 수 있는 복합적인 형태의 새로운 냉동시스템에 대한 기본적인 연구가 가능할 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R0A-2007-000-20062-0).

참고문헌

1. Tishin, A. M., and Spichkin, Y. I., The magneocalic effect and its application, Institute of Physics Publishing
2. Yu, B. F., Gao Q., Zhang, B., Meng, X. Z., and Chen, Z., 2003, Review on research of room temperature magnetic refrigeration, Int. J. Refrig., vol. 26, pp. 622-636.
3. Zhang, L., Sherief, S. A., DeGregoria, A. J., Zimm, C. B., and Veziroglu, T. N. 2000, Design optimization of a 0.1 ton/day active magnetic regenerative hydrogen liquefier, Cryogenics, vol. 40, pp. 269-278
4. Dan′kov, S. Y., 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, 3478-3490
5. Halbach, K., 1980, Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material, Nucl. Instrum. Methods, vol. 169, pp. 1-10
6. Xu, X. N., Lu, D. W., Yuan, G. Q., Han, Y. S. and Jin, X., 2004, Studies of strong magnetic field produced by permanent magnet array for magnetic refrigeration, J. Appl. Phys., Vol. 95, No. 11, pp. 6302-6307
7. Lee, S. J., Kentel, J. M., Pecharsky, V. K., and Jiles, D. C., 2002, Permanent magnet array for the magnetic refrigerator, J. Appl. Phys., Vol. 91, No. 10, pp. 8894-8896