

동심 원통형 Halbach 배열 영구자석을 이용한 상온 자기냉동장치[§]

이 창 호* · 이 종 석**†

* 강릉원주대학교 대학원, ** 강릉원주대학교 정밀기계공학전공

Magnetic Refrigeration Apparatus at Room Temperature Using Concentric Halbach Cylinder Permanent Magnets

Changho Lee* and Jong Suk Lee**†

* Graduate School, Gangneung-Wonju Nat'l Univ.,

** Dept. of Precision Mechanical Engineering, Gangneung-Wonju Nat'l Univ

(Received July 12, 2016 ; Revised November 14, 2016 ; Accepted November 27, 2016)

Key Words: Magnetic Refrigeration(자기냉동), Room Temperature(상온), Gadolinium(가돌리늄), AMR(Active Magnetic Regenerator, 능동형자기재생기), Halbach Cylinder(원통형 Halbach 배열), Permanent Magnet(영구자석)

초록: 근래에 들어서 증기 압축식 냉동시스템으로 인한 대기환경 오염문제를 해결하기 위해 국제적 공조의 분위기가 형성되고 있다. 그래서 그 환경오염의 주원인으로 지적되는 CFC 냉매를 대체하는 냉동 기술이 큰 주목을 받고 있다. 자기냉동은 물질의 자기열량효과를 이용하여 저온을 생성시키는 방법으로, CFC 냉매를 사용하는 대신에 고체 냉매를 사용함으로써 친환경적인 냉동 기술이라고 할 수 있다. 또한 전력 소모와 소음이 큰 압축기를 사용하지 않고, 자기장의 변화에 따른 재료의 온도 변화를 이용하여 저온부와 고온부의 온도차를 발생시킬 수 있어서 효율적인 냉동시스템으로 간주된다. 본 논문에서는 동심 원통형 Halbach 배열의 영구자석을 이용한 자기냉동장치를 제작하고, 이 장치를 이용하여 실험한 결과를 소개하고자 한다.

Abstract: Recently international cooperations are formed to deal with the environmental pollution of the atmosphere generated by the vapor compression refrigeration system. A refrigeration technique, which can replace existing CFC refrigerants that are the main cause of environmental contamination, has received greater attention. Magnetic refrigeration is a refrigeration technique using the magnetocaloric effect of the magnetic material, and is an eco-friendly refrigeration technology using the solid refrigerant instead of CFC refrigerants. Also it is regarded as an efficient refrigeration system to generate temperature difference between high and low sides using the temperature change of magnetic refrigerants according to the change of magnetic field, instead of using power-consuming and noisy compressor. In this paper, we introduce the magnetic refrigeration apparatus using concentric Halbach cylinder permanent magnets and the experimental results using the apparatus.

1. 서 론

자기냉동은 물질의 자기열량효과를 이용하여

저온을 생성시키는 방법이다. 자기열량효과(magnetocaloric effect)는 자성재료에 자기장을 걸어주면 재료의 온도가 올라가고, 반대로 자기장을 제거하면 온도가 내려가는 특성을 말하는데, 물질의 자기열량효과는 Curie 온도(Magnetic Ordering Temperature, Tc)에서 최대가 된다. Curie 온도는 자성체가 강자성으로부터 상자성으로 천이할 때

§ 이 논문은 대한기계학회 강연지회 2016년도 춘계 학술대회(2016.5.20., 한라대학교) 발표논문임

† Corresponding Author, jslee@gwnu.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

의 온도를 말한다.

기존의 증기 압축식 냉동시스템에서 냉매로 사용된 프레온 가스는 자기냉동시스템에서는 고체 냉매로 대체가 된다. 본 논문에서는 상온인 21°C의 Curie 온도에서 최대 자기열량효과를 갖는 가돌리늄(Gd)을 고체냉매로 사용한 자기냉동 시스템에 대한 연구 결과를 제시하고자 한다.

Fig. 1은 자기냉동사이클의 원리를 보여준다. A에서 B의 과정은 불규칙하게 배열된 전자스핀들을 가진 고체냉매에 자기장을 걸어주면 전자스핀들이 나란하게 정렬이 되면서 자기 엔트로피는 감소하게 되며, 자기 엔트로피가 감소함에 따라 그 보상작용으로 고체냉매의 온도가 상승하게 된다. B에서 C의 과정은 온도가 상승한 고체냉매를 물과 같은 유체를 사용하여 열을 외부로 방출시킴으로써 냉각하는 과정이고, C에서 D의 과정은 A-B과정과 반대로 자기장을 제거하게 되면 나란히 정렬되어 있던 스핀들이 다시 불규칙하게 배열되면서 자기 엔트로피는 상승하게 되고 그에 대한 보상작용으로 고체냉매의 온도가 감소하여 외부로부터 열을 흡수하게 된다. 외부로부터 열을 흡수하는 과정을 통해 주위의 온도를 감소시키는 효과를 얻게 된다. 그래서 A-B과정에서 발생된 열은 고온부에 저장하고, C-D과정에서 냉각된 열은 저온부에 저장하는 과정을 계속해서 반복하면 우리가 원하는 냉동의 목적을 이룰 수 있게 된다.

능동형 자기 재생식 냉동기(AMRR, Active Magnetic Regenerative Refrigerator)는 자성 냉매를 재생기의 재생 물질로써 사용하고 유체가 그 재생기 내부를 왕복하면서 열전달을 하는 방식이다. 상온 자기냉동기의 연구에 있어서 영구자석과 자성 냉매의 상대적인 왕복 운동을 통하여 자성 냉매를 자화 또는 탈자화시키는 방법을 널리 사용하고 있다.⁽²⁾ 왕복식 시스템은 AMR 베드의 길이 방향으로 왕복하여 자화/탈자화시키는 시스템⁽³⁾과 AMR 베드 길이의 수직 방향으로 왕복하는 시스템⁽²⁾으로 나누어진다.

왕복식 시스템 이외에도 베드 또는 영구자석이 회전하면서 자기장의 변화를 주는 회전식 시스템^(4,5)과 AMR 베드를 고정시키고 베드 외부에 설치된 원통형 영구자석을 회전시켜서 자기장을 변화시켜주는 동심 원통형 시스템^(6,7) 등 다양한 방식의 상온 자기냉동기가 연구되고 있다. 캐나다의 빅

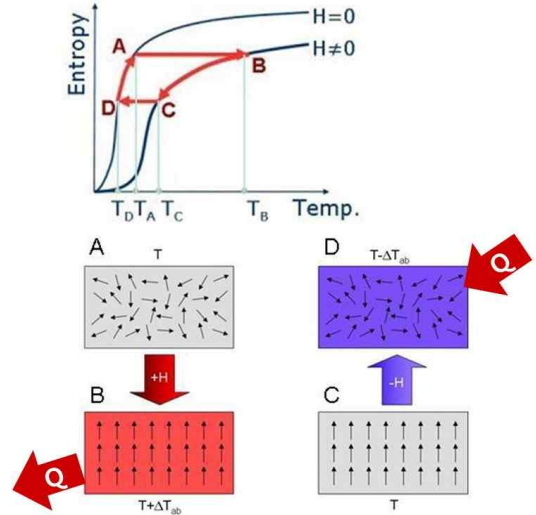


Fig. 1 Principle of Magnetic Refrigeration⁽¹⁾

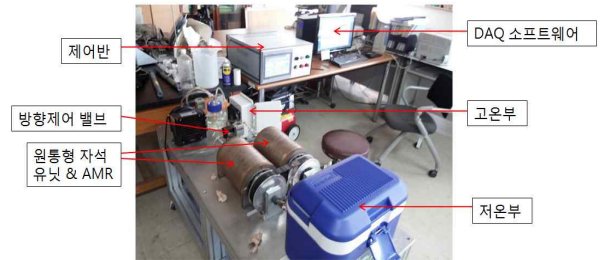


Fig. 2 Magnetic refrigeration apparatus

토리아대학 연구팀은 동심 원통형 영구자석을 이중⁽⁶⁾ 또는 삼중⁽⁷⁾으로 배열한 시스템을 제작하여 성능을 실험하였다.

본 연구에서는 국내에서 처음으로 동심 원통형 영구자석을 이용한 상온 자기냉동장치를 제작하고, 그 성능을 실험하는 것을 목적으로 하였다.

2. 상온 자기냉동장치

자기열량효과의 성질을 이용한 자기냉동장치는 자석, 고체냉매, 그리고 장치시스템으로 구성된다. Fig. 2는 본 연구에서 제작한 자기냉동장치의 모습을 보여준다.

본 연구에 사용된 시스템에서는 고체냉매로써 Gadolinium(Gd, Tc = 294 K)을 직경 250 μm 정도의 sphere 형태로 가공하여 파이프 형상의 AMR 베드에 넣어서 사용하였다(Fig. 3).

동심 원통형 자석은 한 개의 어셈블리에 직경이 서로 다른 두 개의 원통형 자석이 결합되어

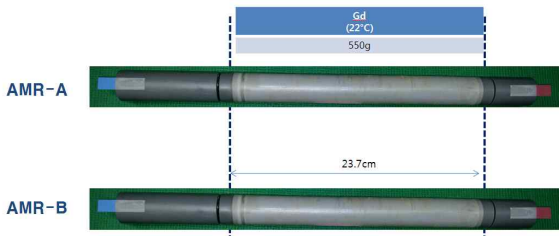


Fig. 3 AMR beds

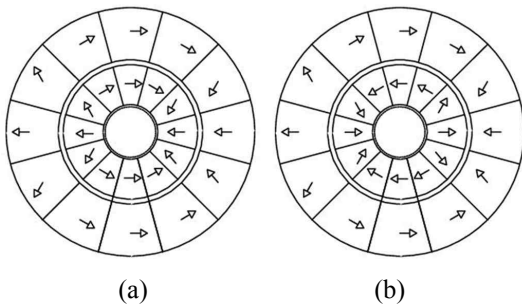


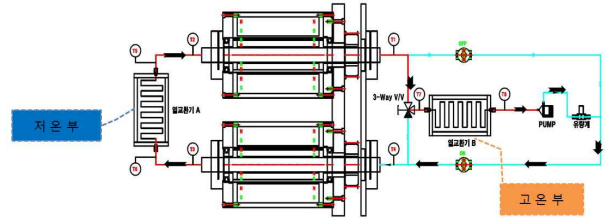
Fig. 4 Concentric cylinder halbach permanent magnet

있다. 직경이 작은 자석원통은 큰 자석원통 내부에 위치하며, 직경이 큰 외측 원통자석은 고정되어 있고 내측에 있는 작은 직경의 원통자석이 회전할 수 있다.

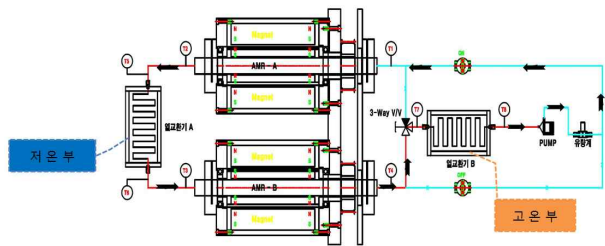
각 원통자석은 Halbach 배열로 결합이 되어 있는데, 각 자석 세그먼트마다 자기장의 방향이 존재한다. Fig. 4는 동심원통형 자석 어셈블리의 단면을 나타내는데, 화살표는 각 자석 세그먼트의 자기장 방향을 나타낸다. 외측과 내측의 자석 세그먼트들이 모여서 각각 하나의 Halbach 자석으로 작용하고, 이 Halbach 자석들의 자기장이 같은 방향이면 그 자석 어셈블리의 전체 자기장은 최대가 되고(a), 자기장의 방향이 서로 반대이면 전체 자기장은 최소가 된다(b). 또한, 원통 중앙에서의 자기장 크기가 가장자리에 비해 더 크다.⁽⁸⁾

Fig. 5는 본 연구에 사용된 자기냉동장치의 개요도인데, 시스템에서는 자석 어셈블리와 AMR 베드가 각각 2개씩 설치되어 있다. 내측자석이 회전에 따라 각 자석 어셈블리의 자기장의 세기는 최대 또는 최소가 된다. 영구자석을 이용한 상온자기냉동 시스템에 현실적으로 적합한 자기장의 세기는 1.5 T(tesla) 정도⁽⁹⁾이며, 본 연구에서 자기장의 세기는 1.6 T로 설정하였다.

병렬로 나란히 배치된 두 개의 자석 어셈블리의 왼쪽에 저온부를 설치하고 오른쪽에는 고온부를 설치하여, 자기장이 최대인 어셈블리 내부에



(a) Clockwise flow



(b) Counterclockwise flow

Fig. 5 Schematic of magnetic refrigeration apparatus

있는 AMR을 통과하는 물은 오른쪽 고온부에, 그리고 최소인 어셈블리를 통과하는 물은 왼쪽 저온부로 흐르게 된다.

본 연구에서는 AMR베드 입·출구에서의 온도 변화를 실시간으로 측정하였고, 열교환 시간은 온도 차이를 가장 크게 갖는 최적의 AMR사이클의 주파수를 찾기 위해 2초~4초의 열교환 시간을 주어 실험하였다. 유체의 유량은 0.6 lpm(10 cc/s) 이고, 유체의 흐름방향은 자석 어셈블리와 고온부 사이에 설치된 삼방밸브에 의해 제어된다. 두 개의 AMR 베드는 두 개의 원통형 자석 어셈블리 중앙에 각각 위치하고, 자석 어셈블리의 내측 원통자석들을 전기 모터에 의해 주기적으로 180° 회전시켜줌으로써 자기장을 최대 또는 최소가 되게 한다.

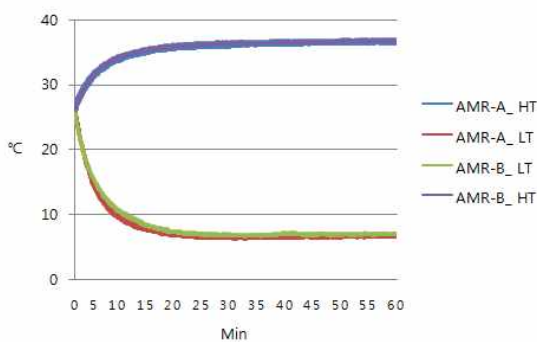
3. 실험 및 결과

본 연구에서는 시스템의 고온부와 저온부의 온도변화는 냉동부하가 없는 상태에서 측정하였다. 시스템의 고온부는 외부와 자연대류에 의해 열교환이 이루어지도록 팬을 가동하지 않았고, 저온부는 100 mm의 단열 체임버 내부에 설치하여 열의 출입을 차단한 상태에서 온도변화를 측정하였다. 정상상태에 도달하는 시간과 고온부와 저온부의 온도차가 Table 1에 정리되어 있다.

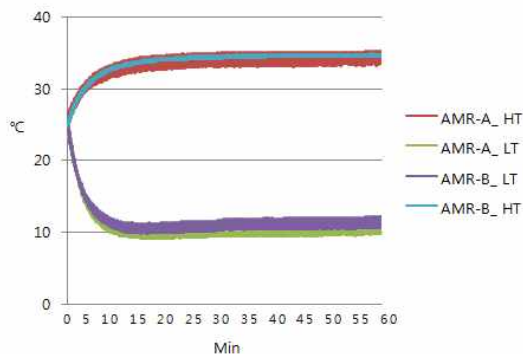
열교환 시간은 1초~10초의 실험 결과 중에서,

Table 1 Temperature spans with no load

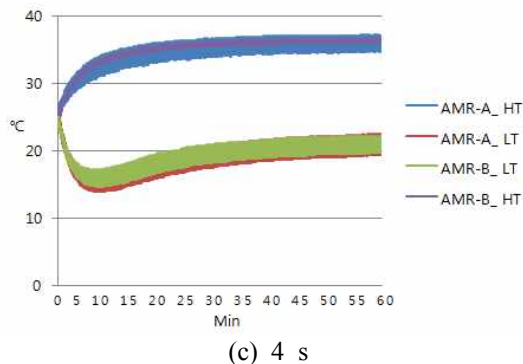
Run time (Min)	HX time (Sec)	Start temp. (°C)	ΔT (°C)		Time for steady-state (Min)
			AMR-A	AMR-B	
60	2	26	30.9	30.3	20
	3	25	26.1	25.1	15
	4	25.5	-	-	unsteady
120	2	20	30.5	30.6	20
	3	21	30.7	30	15
	4	20	-	-	unsteady



(a) 2 s



(b) 3 s



(c) 4 s

Fig. 6 Temperature changes during operation

좋은 온도변화를 나타낸 2초, 3초, 그리고 4초로 하였으며, 정상상태에서의 평균 온도차는 25°C~30°C 이고, 2초에서 최대 온도차 30.9°C를 보였다.

본 실험에서 저온부는 외부와 열교환이 되지 않도록 단열을 하였으며, 고온부는 외부에 노출 시켜 놓아 고온의 열이 외부로 방출 되도록 하였다. 따라서 저온부에서는 초기온도로부터의 온도변화가 큰 반면, 고온부에서는 저온부에서만 온도변화가 크지가 않았다.

Fig. 6은 두 개의 AMR 베드 입·출구에서의 온도변화를 실시간으로 측정된 결과를 보여준다. Table 1에 정리되어 있는 60분간 작동한 결과를 살펴보면, 열교환시간이 2초일 때 가장 큰 온도차(30°C 이상)를 보인다(a). 정상상태에 도달하는 시간은 열교환시간이 3초일 때가 가장 빠르게 나타나며(b), 열교환시간이 4초일 때는 2초와 3초에서처럼 정상상태에 도달하지 못하고, 온도차도 크지 않은 결과를 보여준다(c).

4. 결 론

본 연구에서는 동심 원통형 영구자석을 이용한 상온 자기냉동장치를 제작하고, 성능을 실험하였다. 자기열량재료인 가돌리늄을 직경 250 μm 정도의 구 형태로 가공하여 AMR 베드에 채우고, 원통형 Halbach 배열 영구자석 어셈블리의 자기장은 최대 1.6 T가 되도록 구성하였다.

본 연구에서 제작한 자기냉동장치를 이용한 실험 결과는 아래와 같다.

- (1) 두 개의 AMR 베드 입·출구와 고온부와 저온부에서 온도변화를 실시간으로 측정하였다.
- (2) 냉각부하가 없는 상태에서, 고온부와 저온부의 최고 온도차는 열교환 시간이 2초일 때 30.9°C이었다.
- (3) 열교환 시간이 3초일 때 가장 빨리 정상상태에 도달하였다.
- (4) 열교환 시간이 4초일 때에는 정상상태에 도달하지 않고 시스템의 운전이 불안정해졌다.

본 연구에서 제작한 자기냉동장치는 고체냉매로서 순수 가돌리늄을 사용하였으며, Halbach 구조의 영구자석을 이용하여 자기장의 크기 변화를 극대화시켰다. 이 장치를 이용하여 시스템의 저온부와 고온부 및 AMR 베드의 입구와 출구에서의 온도변화를 측정하고 그 결과를 정리하였다.

본 연구에서는 시스템의 COP 계산이 이루어지지 않았다. 연구의 주된 목적이 극대화된 자기장의 변화를 이용한 자기냉동장치의 성능, 즉 저온부와 고온부의 온도차를 얻는 것이었다. 이 장치

의 COP는 영구자석의 회전을 위한 모터와 열교환 유체의 흐름을 위한 펌프에 투입된 소요전력 그리고 저온부에서의 열전달률, 즉 흡열되는 열량을 측정함으로써 계산될 수 있다.

향후에는 시스템의 COP 계산이 가능하도록 설비를 보완하고 성능을 향상시킬 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다. 또한 희토류금속인 가돌리늄보다 값이 싼 자기냉매 소재를 이용하거나 작동온도가 다른 자기냉매를 여러 층으로 배열한 시스템에 대해서도 연구할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 신기술융합형성장동력 사업본부 “자기냉각액화물질융합연구단”의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (2015055808).

참고문헌 (References)

(1) Navigant Consulting, Inc., 2009, "Energy Savings Potential and R&D Opportunities for Commercial Refrigeration," Report Prepared for the Building Technologies Program, US DOE. September 2009.
 (2) Park, I., Kim, Y. and Jeong, S., 2012, "Development of the Active Magnetic Regenerative Refrigerator for Room Temperature Application,"

Superconductivity and cryogenics, Vol. 14, No. 3, pp. 60~64.
 (3) Lee, J. S., 2015, "Experimental Results for Active Magnetic Regenerative Refrigeration Apparatus using Twin Beds," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 5, pp. 2237~2241.
 (4) Lee, J. S. and Hong, J. H., 2004, "Experimental Study on a Rotary Magnetic Refrigeration Device," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 1101~1106.
 (5) Okamura, T., Yamada, K., Hirano, N. and Nagaya, S., 2006. "Performance of a Room-temperature Rotary Magnetic Refrigerator," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 29, pp. 1327~1331.
 (6) Tura, A. and Rowe, A., 2011, "Permanent Magnet Magnetic Refrigerator Design and Experimental Characterization," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 34, pp. 628~639.
 (7) Arnold, D. S., Tura, A., Ruebsaat-Trott, A. and Rowe, A., 2014, "Design Improvement of a Permanent Magnet Active Magnetic Refrigerator," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 37, pp. 99~105.
 (8) Baek, U. B., Lee, J. S., Yu, S.-C. and Ryu, K.-S., 2014, "Magnetic Shielding Effect on Halbach Cylinder used in Magnetic Refrigerators," *Journal of Magnetism*, Vol. 19, No. 4, pp. 349~352.
 (9) Jeong, S. and Kim, Y. K., 2011, "Magnetic Refrigeration," *Journal of the KSME*, Vol. 49, No. 9, pp. 20~25.