상온 능동형 자기 재생 냉동기의 개발

Development of the active magnetic regenerative refrigerator for room temperature application

박인명^{1,*}, 김영권², 정상권³

I. Park^{1,*}, Y. Kim², S. Jeong³

Abstract: In this paper, an investigation of a room temperature active magnetic regenerative refrigerator is carried out. Experimental apparatus includes two active magnetic regenerators containing 186 g of Gd spheres. Four E-type thermocouples are installed inside the Active magnetic regenerator(AMR) to observe the instantaneous temperature variation of AMR. Both warm and cold heat exchangers are designed for large temperature span. The cold heat exchanger, which separates the two AMRs, employs a copper tube with length of 80 mm and diameter of 6.35 mm. In order to minimize dead volume between the warm heat exchanger and AMRs, the warm heat exchangers are located close to the AMRs. The deionized water is used as a heat transfer fluid, and maximum 1.4 T magnetic field is supplied by Halbach array of permanent magnets. The AMR plate, which contains the warm and the cold heat exchangers and the AMRs, has reciprocating motion using a linear actuator and each AMR is alternatively magnetized and demagnetized by a Halbach array of permanent magnet. Since the gap of the Halbach array of permanent magnets is 25 mm and two warm heat exchangers have the motion through it, a compact printed circuit heat exchanger (PCHE) is used as a warm heat exchanger. A maximum no-load temperature span of 26.8 K and a maximum cooling power of 33 W are obtained from the fabricated Active Magnetic Regenerative Refrigerator (AMRR).

Key Words: magnetic refrigeration, active magnetic regenerator, magnetocaloric effect.

1. 서 론

자기 냉각시스템(magnetic refrigeration)은 지구 온난화와 오존층 파괴를 유발하는 환경에 유해한 프레

Fig. 1. Active magnetic regenerator.

온 가스 대신에 고체 냉매를 사용하고 압축기 대신 자석을 사용하여 물질을 냉각시키는 기술이다. 이러한 자기냉각기술은 자기열량효과에 기반을 둔 것인데 자기열량효과 (magnetocaloric effect)란 단열상태에서 강자성물질에 외부에서 강한 자기장을 걸어 자화시키면 자성 물질의 온도는 증가하고 탈자화시키면 온도가 내려가는 현상을 말하며 1881년 Warburg에 의해 철에서 최초로 발견되었다.

현재 연구되고 있는 자기냉동기는 크게 두가지로 나누어 볼 수 있다. 한가지는 단열 탈자 냉동기 (ADR, Adiabatic Demagnetization Refrigerator)로 일반적인 압축, 팽창 사이클 냉동 시스템으로는 도달할 수 없는 1 K이하의 매우 낮은 온도에서의 냉각에 사용되고 있으며 실제로 우주에서 작동하는 극저온 냉동기로 응용되고 있다. 다른 하나는 능동형 자기 재생식 냉동기 (AMRR, Active Magnetic Regenerative Refrigerator)이다[1]. 이는 단열 탈자 냉동기와는 달리 자성 냉매를 재생기의 재생 물질로써 사용하고 유체가 그 재생기 내부를 왕복하면서 열전달을 한다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 일반적인 재생기와 외관이 비슷하지만 재생기 자체가 외부 자기장의 변화에 의해서 열용량이 변화하는 효과를 가지고 있기 때문에 일반적인 재생기와 구분하여 능동형 재생기(active regenerator)라고 한다. 능동형 자기 재생식 냉동기는 재생기의 길이방향으로 온도구배가 발생하고 각 부분이 캐스케이드(Cascade) 냉동사이클의 한 단계로서 작동하여 단열 탈자 냉동기에 비해 열역학적 효율은 낮으나 작동온도범위가 넓어지는 장점이 있다.

능동형 자기 재생식 냉동기는 상온에서의 적용을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 자성 냉매에 자기장을 인가시킬 때는 초전도 자석이나 전자석, 또는 영구 자석을 사용해야 한다. 먼저 초전도 자석은 물질의 초전도 상태를 유지하기 위하여 극저온으로 냉각을 시켜주어야 하므로 상온 자기 냉동기에는 적합하지 않다. 전자석 또한 자기장을 인가해주려면 전력이 필수적이고 초전도체가 아니므로 자기장을 강하게 하기 위하여 전류를 많이 흘려주게 되면 열이 발생하여 자기장을 증가시키는 데 한계가 존재한다. 따라서 상온 자

¹학생회원 : KAIST 기계공학과 박사과정

²정 회 원 : KAIST 기계공학과 박사과정

³정 회 원 : KAIST 기계공학과 교수

*교신저자 : impark@kaist.ac.kr

원고접수 : 2012년 06월 23일

심사완료 : 2012년 09월 25일

게재확정 : 2012년 09월 25일

Fig. 2 Dimension of the permanent magnet.

기 냉동기의 연구에 있어서 영구자석과 자성 냉매의 상대적인 왕복 운동을 통하여 자성 냉매를 자화 또는 탈자화시키는 방법을 널리 사용하고 있다.

왕복형 시스템은 다시 두 종류의 시스템으로 나누어 볼 수 있다. 하나는 AMR 길이방향으로 왕복하여 탈자화 되는 것이고 다른 하나는 AMR 길이의 수직 방향으로 왕복하는 것이다. AMR 길이방향으로 왕복하는 시스템은 작동 유체의 유로를 간편하게 제작할 수 있다는 장점이 있지만 AMR의 길이에 따라 작동주파수가 작아지는 단점이 있다. 반면 AMR 길이에 수직 방향으로 왕복하는 시스템은 AMR 길이와 작동 주파수는 무관하다. 영구 자석을 사용하여 자기장을 인가할 때 자기장을 인가하는 곳의 높이는 한정되어 있으므로 AMR의 길이에 따라 시스템의 자성 냉매의 양이 결정된다. AMR은 작동 주파수와 자성 냉매의 양이 증가함에 따라 작동 성능이 높아지게 되는 데 AMR 길이방향으로 왕복하는 시스템은 AMR의 길이와 작동 주파수가 반비례하기 때문에 근본적으로 한계점을 가지고 있다. 그러나 AMR 길이에 수직 방향으로 왕복하는 시스템은 Nakamura et al.[2]과 Zheng et al.[3]의 연구에서 보고되고 있지만 모두 실험 결과가 없고 다만 해석기법만 제시된 상태이다. 기존 연구에서 볼 수 있듯이 AMR의 길이와 수직인 방향으로 AMR을 왕복 운동시키는 시스템은 거의 연구가 진행이 되고 있지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 AMR의 길이와 수직인 방향으로 AMR을 왕복 운동시켜 자화, 탈자화를 수행하는 자기 냉동시스템을 제작하였고 그에 대한 결과에 대하여 기술하였다.

Fig. 3. Magnetic field distribution along to the AMR movement.

Fig. 4. Schematic diagram of the fabricated AMR system.

2. 실험 장치 구성

2.1. 영구 자석

영구자석은 6개의 네오디움 자석 (Nd-Fe-B magnet, N50)이 할박 어레이(Halbach array)로 배치되어 있다. Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 상단에 3조각, 하단에 3조각이 화살표와 같은 방향으로 자화되어 배치되어 상단과 하단 사이의 중심부 높이 25 mm, 길이 200 mm에서 최대 1.4 T의 자속 밀도가 흐르게 하였다. 영구 자석 바깥부분은 철(Iron)재질의 요크(Yoke)가 둘러싸고 있어 중심부분의 자속밀도 손실을 최소화하였다. AMR이 자석의 중심부로 왕복 하면서 자화, 탈자화가 된다. AMR이 왕복하는 방향으로 자속밀도의 측정값을 Fig. 3에서 나타내었다. 이때 AMR의 이동거리는 80 mm이고 축의 수직인 방향으로 움직이기 때문에 AMR의 길이에 영향을 받지 않는다.

2.2. AMR 시스템

Fig. 4는 전체 AMR 시스템을 나타내고 있다. 탠덤(Tandem)방식으로 2개의 AMR 사이에 저온부 열교환기가 위치해 있다. 하나의 AMR이 자화되면 다른 하나의 AMR이 탈자화되는 구조로 인하여 유량이 흐를 때마다 저온부 열교환기는 열을 흡수하게 된다. 따라서 하나의 AMR을 가진 시스템과 동일한 주파수로 작동을 하였을 때 보다 두 배의 냉각효과를 가지게 된다. 저온부 열교환기는 Fig. 5에 묘사한 것과 같이 1/4 인치 구리 튜브로 제작하였으며, 외부 표면에 저항 10 Ω인 니크롬선이 감겨있어 직류전원공급장치(DC power supply)로 전류를 흘려보내어 냉각 부하

Fig. 5. Schematic diagram of cold-end heat exchanger.

Fig. 6. Linear actuator and the AMR system on the AMR plate.

를 주었고 디지털 멀티미터(Fluke 187, Keithley 175A)를 이용하여 전류를 측정하였다. 구리 튜브와 니크롬선 사이에는 서멀 구리스(NANOTIM TGS A300)를 도포하여 접촉 열저항을 최소화하였고 에폭시(Stycast 2850FT)로 고정하였다. Fig. 6에서 두 쌍의 AMR과 저온부 열교환기가 연결되어 있는 모습을 나타내고 있다. AMR은 1/2 인치 스테인레스 스틸(Stainless steel) 튜브에 지름 0.3~0.7 mm인 가돌리늄 파우더(Gd powder) 93 g을 충전하여 양쪽 끝을 스테인레스 스틸 메쉬(200 mesh)로 막고 황동(Brass) 덮개(Cover)와 튜브를 납땜하여 마무리하였다. 또한 AMR 내부에 총 4개의 지름 32 AWG인 E형 열전대(E-type thermo couple)를 삽입하여 내부의 온도변화를 측정하였다.

저온부 열교환기의 반대편에는 고온부 열교환기가 바로 연결되어 있어 효과적으로 열을 제거할 수 있도록 하였다. 고온부의 열교환기는 효율이 뛰어나야 하고 영구 자석의 사이로 왕복운동을 하기 때문에 높이가 25 mm 이하이어야 한다. 따라서 공기와의 접촉면적이 넓고 냉각팬이 필요한 공냉식 열교환기 대신 항온조의 물을 순환시켜 작동유체를 냉각하는 수냉식 열교환기를 사용하였다. 고효율의 열교환기를 얻기 위해서는 열전달 면적을 넓혀야 하기 때문에 제한된 공간으로 인하여 일반적인 판형 열교환기에 비해 작고 효율이 높은 PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger)[4]를 제작하여 사용하였다. 본 연구에서 사용하는 PCHE는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 높이 0.3 mm, 폭 0.4 mm의 채널로 구성되어 있으며, 매우 작은 채널 크기로 인하여 기존의 판형 열교환기와는 다른 제조 공정이 요구된다. PCHE는 마이크로 포토 에칭(Micro photo etching)과 확산 접합(Diffusion bonding) 기술을 사용하여 제작한다.

Fig. 7. Channels of PCHE.

Table 1. Accuracy of sensors used in the experiment.

Sensor	Accuracy
E-type thermocouple	±1.0 K
Absolute pressure transducer	±0.3 kPa
Ammeter (Fluke 187)	± 0.4 mA

마이크로 포토 에칭은 스테인리스 금속 판막에 유체가 통과할 마이크로 채널을 정밀하게 가공하는 기술이고, 확산접합은 고체의 결합 과정으로 용융점 아래에서 금속판을 압착하여 두 금속을 접합하는 기술이다. 이러한 확산접합을 사용하여 두 금속을 접합하면 접촉 경계면이 모재와 같은 물리적, 기계적 성질을 갖게 된다.

2.3. 구동부

본 실험 장치에서는 총 두개의 선형이송기(Linear actuator)를 사용하고 있다. Fig. 6에 묘사되어 있는 것처럼 AMR, 열교환기를 고정하고 있는 AMR 판(AMR plate)은 LinMot사의 선형이송기(E1100-XC)에 연결되어 있어 왕복운동을 하게 된다. 이 왕복운동을 통하여 판에 고정되어 있는 AMR이 자화, 탈자화하게 된다. 선형 이송기의 제어는 LabView 프로그램을 사용하였다. 작동 유체를 왕복운동시키는 디스플레이서(Displacer)로는 스테인레스 스틸 재질의 더블 액팅 실린더(Double acting cylinder)를 사용하였고 이는 LIMO사의 선형이송기(EZHP6C-10)를 통하여 피스톤을 움직인다. 이 선형이송기는 AVR 모듈(Atmega 128L)에서 나오는 펄스 신호를 받아서 속도와 이동거리를 제어하게 된다. AVR 모듈은 LabView 프로그램에서 나오는 신호를 통하여 AMR 판과 디스플레이서 피스톤의 왕복운동을 동기화 시킨다. 디스플레이서 양쪽 출구에는 두개의 압력계(Sensotec)가 연결되어 있어 실험시 피스톤을 움직일 때 발생하는 전체 시스템의 압력강하를 측정하였다.

2.4. 전체 시스템 사양

실험 장치의 구체적인 사양은 Table 2에 나타나있다. 자기장은 0 T에서 1.4 T까지 인가를 할 수 있으며 작동 주파수는 0.5 Hz이다. 작동 유체는 탈이온수(Deionized water)를 사용하였고 고온부의 온도는 300 K, 305 K으로 설정하였다. AMR의 내경은 12 mm, 길이는 160 mm이고 총 두개의 AMR이 사용되

Table 2. AMRR specifications.

Property	Range
Magnetic field	0 - 1.4 T
Heat transfer fluid	Deionized water
Regenerator inner diameter	12 mm
Regenerator length	160 mm
Diameter of Gadolinium	0.3 - 0.7 mm
Mass of Gadolinium	186 g
Porosity	38 %

었다. AMR에는 지름 0.3 ~ 0.7 mm의 구 형태를 띄고 있는 가돌리늄이 충전되어 있고 AMR 하나당 93 g, 총 186 g이 사용되었다. 마지막으로 AMR의 공극률 (porosity) 은 0.38로 측정되었다.

3. 실험 조건 및 결과

3.1. 실험 조건

실험은 저온부의 냉동 부하가 없을 때와 저온부에 냉동 부하를 걸었을 경우로 각각 진행되었다. 실험 조건은 Table 3에 나타난 바와 같다. 저온부에 냉동 부하가 없을 때 고온부 열교환기에 유입되는 유체의 온도를 300, 305 K으로 설정하여 실험을 수행하였다. 질량유량은 5 ~ 20 g 범위 사이로 설정하여 AMR 내부에 설치된 4개의 E형 열전대로 AMR 내부 온도를 측정하였다. 작동시 AMR에 자기장이 인가되었을 때 저온부에서 고온부로 질량유량이 흐르고 AMR이 탈자화되었을 때 고온부에서 저온부로 질량유량이 흐르도록 하였다. 또한 저온부 열교환기에 직류전원공급기를 통하여 10 Ω의 니크롬선에 전류를 가하여 냉동 부하를 주었고 동일하게 AMR 내부 온도를 측정하였다. 최대 냉동 부하는 질량 유량에 따라 변화였고 30 g/s일 때 최대 33 W까지 인가하였다.

3.2. 실험 결과

Fig. 8는 무부하시 고온부와 저온부의 온도차이 평균을 나타낸 것이다. 본 연구의 자기 냉동기는 유동이 한쪽 방향으로만 흐르지 않고 왕복 운동을 하기 때문에

Fig. 8. Temperature difference between warm-end and cold-end of the AMR without cooling load.

Table 3. Operating conditions of the experiment.

Conditions	Value
Mass flow rate	5 - 30 g/s
Heat rejection temperature	300, 305 K
Cooling power	0 - 33 W
Operating frequency	0.5 Hz

AMR의 온도는 주기적으로 변하게 된다. 따라서 고온부와 저온부의 온도차이를 Fig. 8에서 주기적 평형상태일 때 각각 T1, T4의 온도를 평균을 내어 구하였다. 최고 온도차이는 고온부 열교환기 온도 305 K, 질량 유량 10 g/s를 왕복시켰을 때 26.8 K으로 측정되었다. 고온부 열교환기 항온조의 온도가 300 K일 때는 모든 질량 유량 구간에서 온도 차이가 작음을 확인하였다. Fig. 9은 질량 유량이 10 g/s일 때 냉각과정을 보여 주고 있다.

Fig. 10은 냉동용량에 따른 양 끝단의 온도 차이를 도시한 그래프이다. 이 때 고온부 열교환기 항온조의 온도는 300 K으로 고정하여 실험하였다. 결과를 보면 5 g/s를 제외하고 질량 유량이 작을수록 고온부와 저온부의 온도차이가 큰 경향을 보이고 있다. 하지만 최고 냉동 부하는 질량 유량에 비례하여 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

Fig 9. Temperature distribution of the AMR.

Fig 10. Temperature difference between warm-end and cold-end of the AMR with cooling load.

4. 결 론

자기열량효과를 가지는 자성 냉매를 이용한 새로운 개념의 자기 냉동기를 제작하였다. 탠덤 방식으로 AMR 사이에 저온부 열교환기를 위치시켜 효율적으로 저온부의 온도를 내리도록 하였으며 AMR 길이의 수직인 방향으로 왕복 운동하는 자기 냉동기를 설계하고 실제로 구현하여 성능을 측정하였다. 본 연구에서 제작한 자기 냉동기 성능은 최대 냉각 용량 33 W, 최대 온도 차이(temperature span) 26.8 K을 기록하였다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 휴먼인지환경사업본부-신기술융합형 성장동력사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012K001433)

참 고 문 헌

- [1] Barclay, J.A., Steyert, W.A., "Active magnetic regenerator", US patent No.4332135., 1982.
- [2] Nakamura, K., Kawanami, T., Hirano, S., Ikegawa, M., Fumoto, K., "Improvement of room temperature magnetic refrigeration using air as heat transfer fluid" In : Thermal Issues in Emerging Technologies, ThETA 2, Cairo, Egypt, 17-20 December, pp. 323-330, 2008.
- [3] Zheng, Z.G., Yu, H.Y., Zhong, X.C., Zeng, D.C., Liu, Z.W., "Design and performance study of the active magnetic refrigerator for room - temperature application", International Journal of Refrigeration 32, pp. 78-86, 2009.
- [4] Jin Hyuck Kim, Seungwhan Baek, Sangkwon Jeong, Jeheon Jung, "Hydraulic performance of a microchannel PCHE", Applied Thermal Engineering, Vol.30, pp. 2157-2162, 2010.

저 자 소 개

박인명(朴稜皿)

1984년 10월 23일생, 2010년 한동대학교 기계제어공학부 졸업, 2012 KAIST 기계항공시스템학부 졸업(공학석사), 현재 KAIST 기계항공시스템학부 박사과정.

김영권(金永權)

1978년 12월 02일생, 2004년 연세대학교 공과대학 기계전자공학부 졸업, 2006년 KAIST 기계항공시스템학부 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 기계항공시스템학부 박사과정.

정상권(丁常權)

1962년 08월 16일생, 1985년 서울대학교 공과대학 기계공학과 졸업, 1987년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1992년 MIT 기계공학과 졸업(공학박사), 1992년~1995년 MIT-Plasma Fusion Center 연구원, 현재 KAIST 기계항공시스템학부 교수.