



실온 자기냉동 시스템의 최근 연구개발 동향

신 승 훈 / 대우 일렉트로닉스 가전기술연구팀 (shshin@dwe.co.kr)
이 중 석 / 강릉대학교 정밀기계공학과 (jslee@kangnung.ac.kr)

서론

2005년 9월 27~30일에 걸쳐 스위스 몽트뢰(Montreux)에서 열린 제1회 실온 자기냉동 국제 학술대회에서는 50편에 달하는 자기냉동 시스템 및 재료에 관한 연구결과가 발표되었다. 자기냉동의 원리가 알려진 것은 120년이 넘지만, 실온 자기냉동이 시스템적으로 실증이 된 것은 1997년 미국의 Astronautics사와 Iowa 주립대 Ames 연구소가 초전도자석과 가돌리늄(Gd)을 사용하여 만든 300 W급 왕복식 시스템이 최초라고 할 수 있다. 자기냉동 기술은 상용화를 염두에 두고 시스템 개발, 자기재료 개발 등의 두 분야로 나뉘어 발전하고 있는데, 이번 학술대회에서도 여기에 초점이 맞춰져, 초전도자석 대신 영구자석을 사용하는 것, 왕복식 시스템을 회전식 시스템으로 바꾸는 것, 가돌리늄(Gd)을 포함한 희토류 재료 외에 전이원소 계열의 자기재료를 개발하는 것 등에 관한 연구가 주류를 이루었다.

본 고에서는 제1회 실온 자기냉동 국제 학술대회에서 발표된 17편의 자기냉동 시스템에 관한 논문 중에서 기술적으로 중요한 것을 국가별로 요약하여 실는다.

미 국

Astronautics사, Iowa 주립대 Ames Laboratory, University of Wisconsin 등에서 공동연구가 진행되

고 있다. Astronautics사는 회전식 자기냉동기를 개발해, 희토류 재료와 전이원소 재료를 시험한 연구 결과를 발표했다.

(1) Astronautics사

Carl Zimm 박사가 회전식 자기냉동기의 구조와 성능에 대해 발표했다. 회전식 자기냉동기는 동사가 2001년부터 시험해 온 것인데, 1997년에 만들었던 4행정 사이클 왕복식 자기냉동기의 개념을 유지하면서, 운전주파수를 높이고 중심부에 있는 베드의 크기를 Compact Disk(CD) 크기 정도로 줄인 것이다. 운전주파수를 높이면 자기재료를 적게 사용하고도 동일한 냉동능력을 얻을 수 있기 때문에 운전주파수를 높이는 것은 실용화의 측면에서 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다.

실제로 왕복식 자기냉동기는 3 kg 정도의 자기재료로 0.16 Hz로 운전됐지만, 회전식 자기냉동기는 150~170 g 정도의 자기재료로 2~4 Hz로 운전되었다. (Proceeding에는 2~4 Hz로 표현됐지만 발표 당시 Zimm 박사는 5~10 Hz로 운전한 결과도 소개했다.) 자기재료의 비용만으로 두 시스템을 비교한다면 왕복식의 5% 수준으로 줄어든 셈이다. 이 점에 관해 Astronautics사의 Steven Russek 박사는 마지막 날 오전 세션의 Keynote에서 수 년 내에 컴프레서를 쓰는 시스템의 40% 가격으로 자기냉동기를 만들 수 있게 될 것으로 예상했다(냉방능력 10,000 kcal 급 공조기 기준).

회전식 자기냉동기의 구조는 그림 1과 그림 2에 보이는 것과 같이 1.5 Tesla 세기의 Nd₂Fe₁₄B 영구자석과 이 영구자석을 주기적으로 통과하는 원반으로 이루어져 있다. 원반은 3부분으로 분할되어 있는데, 3부분이 독립적으로 왕복식 냉동기의 핵심인 AMR(Active Magnetic Regenerator) 역할을 할 수 있도록 고온부, 저온부 냉각수가 배열되어 있다. 전체적으로 본다면 소형 AMR 3개를 원반 위에 병렬로 연결한 것이라고 할 수 있다.

(AMR은 밀폐된 chamber 속의 자기재료가 순차적으로 높은 온도에서 자화될 수 있도록 냉각수의 방향과 자화시기를 조절한 것으로서, 각 자기재료는 2~3℃ 정도의 온도변화를 일으키지만, AMR 전체적으로는 부분적인 온도차가 더해져 10~15℃ 정도의 온도폭을 갖도록 만들어진 것이다.(자세한 구조에 관해서는 Vitalij K. Pecharsky, Karl A. Gschneidner Jr., 1999, "Magnetocaloric Effect and Magnetic Refrigeration," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 200, pp.44~56. 참조)

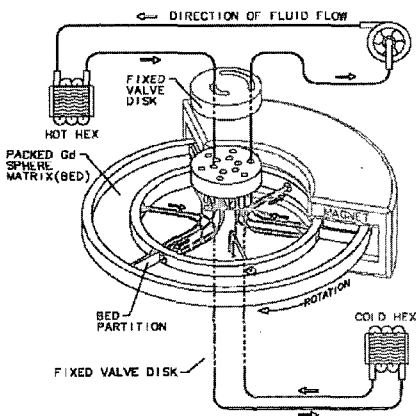
자기재료는 Gd(지름 425 ~ 500 μm), GdEr 합금(Gd 94%, Er 6%, 지름 250 ~ 355 μm)을 조합해서 사용하거나, La(Fe_{0.88}Si_{0.12})₁₃H₁₁(불규칙 형상 250 ~ 500 μm)을 단독으로 사용하였다. Gd과 GdEr 합금은 AMR 내부에 반반 사용됐는데, Gd이 고온측에, GdEr이 저온측에 사용되었다. 두 재료를 연속해서 배열한 것은 GdEr의 큐리 온도가 Gd보다 낮은 점을 이용해

AMR 전체의 온도폭을 넓히기 위한 것이다. LaFeSiH 재료는 시험개발 중인 것이기 때문에 단독으로 사용됐다. LaFeSiH 재료는 일본의 Tohoku 대학 재료과학과에서 만든 것인데, Astronautics사에 평가를 의뢰한 것으로 추측된다. (재료를 연구하는 그룹과 시스템을 연구하는 그룹 간의 국제적 협력관계는 이 외에도 몇 군데 더 있다는 것을 알게 되었다.)

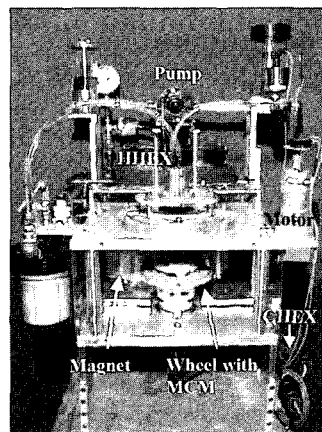
회전식 자기냉동기의 성능은 COP[W/W]로 온도차가 10℃일 때 120%, 15℃일 때 80%, 18℃일 때 50% 정도로 발표되었다. 수치만으로는 증기압축식 냉동기에 미치지 못하지만, 최근의 컴프레서가 효율 80% 수준의 모터를 쓰는 것에 비해, 자기냉동기는 부하 크기에 맞도록 전용으로 개발된 고효율 모터를 쓰지 않았다는 점을 감안하면, 자기냉동기의 성능이 컴프레서 시스템에 크게 접근했다고 할 수 있다.

(2) University of Wisconsin

Astronautics사의 왕복식 AMR의 열교환 특성을 수치적으로 해석한 것을 발표했다. AMR 내부의 냉각수와 자기재료에 관한 에너지 방정식을 각각 풀었는데, 계산의 편의를 위해 냉각수의 온도는 유동방향으로 1차원으로 가정했고, 축방향 전도는 무시했다. 자기재료의 온도도 냉각수가 흐르는 방향으로 1차원으로 가정했지만 에너지 방정식에 축방향 전도, AMR이 자장에 들어가면서 받게 되는 Magnetic Work, 자기재료 사이에 포집된 냉각수의 영향을 포



[그림 1] Astronautics사의 회전식 자기냉동기(구조도)



[그림 2] Astronautics사의 회전식 자기냉동기(사진)



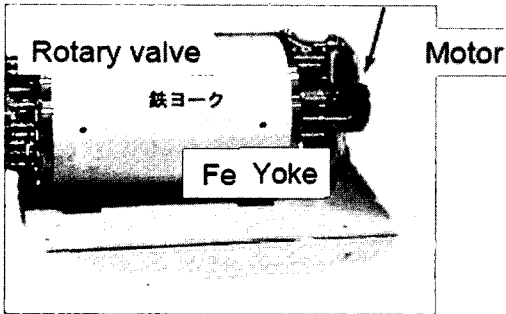
합하였다. 이 수치모델은 자기재료 사이에 포집된 냉각수의 영향, 자기재료 내부의 온도구배에 관한 실험적 보정을 거쳐, Space Cooling과 수소를 액화하는 자기냉동시스템의 기초설계에 응용되었다.

일본

Tokyo 공업대, 中部電氣(Chubu Electric Power), Toshiba 등이 공동연구를 하고 있고, Kyoto 대가 전이원소 재료에 관한 연구를, Hokkaido 대가 공냉식 시스템을 연구한 결과를 발표했다.

(1) Tokyo 공업대

Okamura Tetsuji 교수가 中部電氣, Toshiba와 공동 개발 중인 회전식 자기냉동기의 구조와 성능에 대해 발표했다. 中部電氣와 Toshiba도 2001년도에 4 Tesla 세기의 초전도자석과 AMR을 이용한 4행정 사이클 왕복식 자기냉동기를 만들었는데, 미국의 Astronautics사와 마찬가지로 이를 영구자석을 쓰는 회전식으로 개량한 것이다. 이들의 회전식 자기냉동기는 그림 3과 그림 4에 보이는 것과 같이 지름 27 cm, 길이 40 cm의 Fe yoke 내부에 0.77 Tesla 세기의 영구자석 2개를 마주보게 놓고, 큐리온도가 다른 4종류의 자기재료 Gd_{0.91}Y_{0.09}(4℃), Gd_{0.94}Dy_{0.16}(5℃), Gd_{0.87}Dy_{0.13}(7℃), Gd_{0.89}Dy_{0.11}(10℃)를 차례로 250 g 씩 채운 AMR 4개로 이루어져 있다. AMR이 4개이므로 필요한 자기재료는 모두 4 kg이 된다. (자기재료는 모두 지름 600 μm 수준의 구형이고, 각 자기재료 사이에는 mesh를 설치해 재료가 섞이지 않도록 했다.)



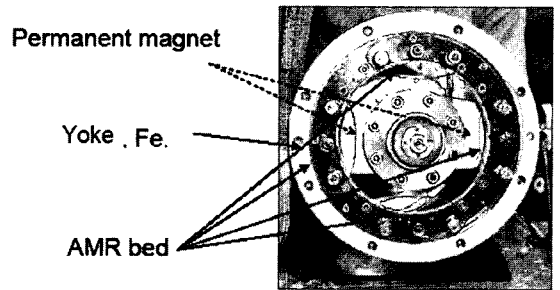
[그림 3] Totyo 공업대의 회전식 자기냉동기

2개의 자석은 모터의 구동에 의해 90° 씩 회전과 정지를 반복하는데, 정지 위치가 AMR의 위치와 일치하도록 조절되기 때문에 AMR 2개는 자장 속에, 나머지 2개는 자장을 벗어난 상태에 있게 된다. 2개의 AMR에서 동시에 냉각효과를 얻을 수 있지만, 냉각수는 4개의 AMR을 모두 지나야 하기 때문에 펌프 손실이 클 수 있는 구조라고 할 수 있다.

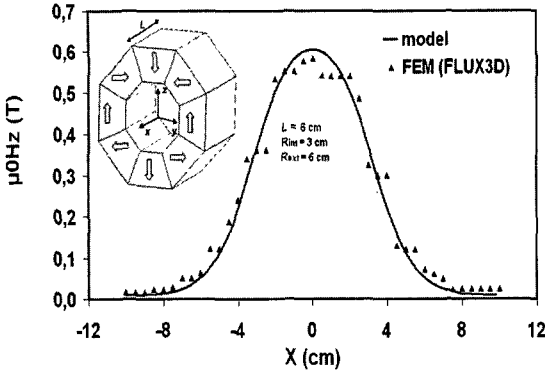
일본이 제조업 강국이기 때문에 발표장에는 다른 때보다 많은 사람들이 모여 들었는데, 성능은 고온부와 저온부의 온도차 약 8℃, 운전주파수 0.42 Hz로 운전했을 때 COP[W/W]가 60% 정도 밖에 되지 않았다. (Okamura 교수는 입력[W]과 출력[W]의 비로 정의한 COP 대신, 고온부와 저온부의 열전달량의 비, Q_L/(Q_H-Q_L)로 COP를 계산해 400~600% 정도로 발표했는데, 시스템이 완전히 단열된 상태가 아니기 때문에 총입력은 Q_H-Q_L 보다 훨씬 클 수 있고, 컴프레서 시스템과 동일한 기준으로 계산하면 COP 수치는 많이 낮아질 수 있다. 발표 후 이것에 대한 질문이 있었는데, 실제로 펌프의 입력으로 COP를 계산해 보면 60% 정도가 된다. 그러나 전체적으로 시험개발 중인 물건이므로, 부하 크기에 맞춘 전용 모터를 사용하고, AMR에서의 열누설 손실, 불완전한 1차 단열냉각, 펌프손실 등을 개선하면 효율이 크게 좋아질 것으로 예상된다.)

(2) Hokkaido 대

Tsuyoshi Kawanami 박사가 공냉식 AMR을 시험한 내용을 발표했다. 지금까지 자기냉동기는 물, 알코올과 같은 액체를 냉각제로 사용하는 시스템 뿐이었



[그림 4] Totyo 공업대의 회전식 자기냉동기(단면)



[그림 5] Halbach Cylinder 내의 자기장

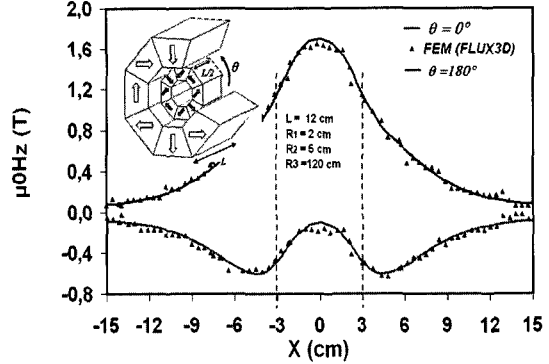
지만, Hokkaido 대에서 처음으로 공기를 사용하는 시스템을 발표했다. Hokkaido 대 연구팀은 Gd 재료의 크기, 공극률에 따른 최적 풍량을 실험적으로 확인한 뒤, 간단한 수치계산 모델을 만들어 실험결과와 비교해 두 결과가 일치하는 것도 확인했다.

프랑스

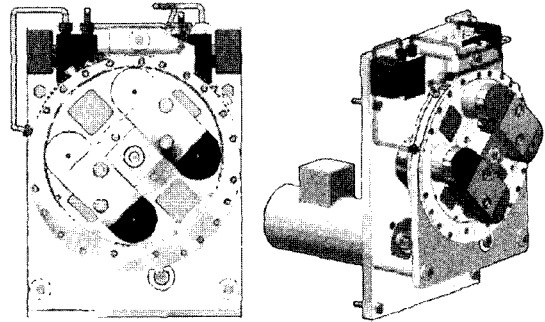
Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (LEG)가 자장의 세기를 강하게 할 수 있는 연구를 하고 있으며, LEG 내의 3개의 연구소가 재료(Material), 시스템(System), 열 사이클(Thermal cycle)의 세 분야에 대해 분업과 협력을 하고 있다. 이와 별도로 Cooltech Appliances와 National Institute of Applied Science는 상용화에 관한 연구를 수행하고 있는데, 2006년에 자기냉동기술을 적용한 상품을 출시한다고 한다.

(1) Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble

자장을 세게 하기 위한 연구내용을 발표했다. 자화 방향이 다른 8개의 자석을 실린더 형태로 조립한 Halbach Cylinder, Double Halbach Cylinder에 대해 FEM 해석을 하고, 왕복식 AMR에 적용해 성능시험을 했다. 그림 5와 그림 6은 각각 Halbach Cylinder와 Double Halbach Cylinder에 대한 FEM 해석결과를 보여준다.



[그림 6] Double Halbach Cylinder 내의 자기장



[그림 7] Cooltech사의 회전식 자기냉동기

(2) Cooltech Appliances, National Institute of Applied Science

Cooltech Appliances는 AIRFI라는 투자회사의 투자를 받아 2006년에 자기냉동기를 출시할 예정인 회사로, 성공한다면 자기냉동기를 세계에서 가장 빨리 시장에 상용화하는 회사가 된다. 학술대회 기간 중에 일대일 면담(Face-to-Face Meeting) 세션에서 Cooltech 기술자를 만날 수 있었는데, 자기들이 개발 중인 상품에 대해 자신감이 있었고, 자기들이 출시를 앞둔 탓이었지만 대형 가전사의 상용화 스케줄에 상당한 관심을 갖고 있었다.

Cooltech사가 개발 중인 자기냉동기는 그림 7에 보이는 것과 같이 단열특성이 좋은 합성재료로 만든 회전원판 주위에 90° 간격으로 1~2.4 Tesla 세기의 영구자석을 4개 배열한 후, 두께 0.65 mm의 Gd 박



판을 0.2 mm 간격으로 15매 쌓은 AMR 조립체를 8 개, 45° 간격으로 고정된 원판 위에 조립한 구조로 되어 있다. 8개의 AMR 조립체는 4개씩 냉각수가 통하게 연결되어 있어, 자석이 회전함에 따라 4개는 자장 속에, 4개는 자장을 벗어난 상태에 있게 된다. 미국의 Astronautics사가 Gd 파우더를 이용해 만든 왕복식 AMR을 발표한 이래 대부분 파우더 형태의 자기재료를 사용한 것에 비해, Cooltech사는 박판을 적층함으로써 펌프손실을 줄이는 방법을 생각해 낸 것이라고 할 수 있다. 자기재료를 박판으로 만들어 펌프손실을 줄이는 것과 자기재료의 단면적이 줄어드는 것 사이에는 효율적인 측면에서 trade-off의 관계가 있겠지만, 박판을 쓰는 쪽이 내부구조를 복잡하게 만드는 mesh를 쓰지 않아도 된다는 점에서 상용화 측면에서 유리한 점이 많겠다는 생각을 개인적으로도 하게 됐다.

Cooltech사는 자사 제품이 온도차 약 12°C에서 운전될 때 100~360 W의 냉동능력을 내고 COP는 500%를 넘는다고 발표했다. 양산이 될 때, 어느 정도의 수준을 유지하게 될지는 지켜보아야 하겠지만, 미국 Astronautics사와 일본 Tokyo 공업대에서 발표한 자기냉동기와 비교해보면 파우더 대신 박판을 사용하는 효과가 상당하다는 것을 알 수 있다.

중 국

X'ian Jiatong 대와 Nanjing 대에서 왕복식 시스템을 시험한 내용을 발표했다. X'ian Jiatong 대는 컴프레서 연구에 집중하고 있는 학교인데 최근에 자기냉동기술로 연구분야를 확대했다.

(1) X'ian Jiatong 대

300~750 μm 범위의 $\text{Gd}_5\text{Si}_2\text{Ge}_2$ 파우더로 왕복식 AMR을 만들어 여러 운전 조건에서 시험한 결과를 발표하였다. 1 Tesla 정도의 영구자석을 사용했으며, COP는 Tokyo 공업대에서와 같이 고온부와 저온부의 열전달량의 비로 계산했다.

(2) Nanjing 대

$\text{Gd}_5\text{Si}_2\text{Ge}_2$ 와 $\text{Gd}_5\text{Si}_{1.895}\text{Ge}_{1.89}\text{Ga}_{0.03}$ 파우더로 왕복식 AMR을 만들어, Gd만을 사용했을 때와 비교함으로써 두 재료의 가능성을 평가하였다. 두 재료를 연속으로 배열해 고온부와 저온부의 온도차를 15~22°C 정도 만들기는 했지만, 재료의 순도에 자석이 없어 뚜렷한 결론을 내지는 못했다.

결 론

1997년에 미국의 Astronautics사가 초전도자석과 가돌리늄을 사용하여 실온에서 연속으로 작동하는 왕복식 자기냉동 시스템을 발표한 이래, 현재는 영구자석을 이용한 회전식 시스템의 개발이 주를 이루고 있다. 자기재료로 300~500 μm 정도의 파우더를 쓰는 것이 지금까지의 추세였는데, 펌프 손실을 줄이기 위해 얇은 박판을 쓰는 시스템이 개발됐고, 2006년 출시를 앞두고 있다. 자기냉동기술은 친환경적이고, 효율을 향상시킬 수 있는 여지가 많아, 머지않은 장래에 증기압축식 냉동기술을 대체할 신기술로 자리잡게 될 것으로 예상된다. 미래 신기술의 하나로 대우 일렉트로닉스는 강릉대학교와 공동으로 자기냉동기술을 개발하고 있다. (㉔)