

자기냉동/냉장고와 공조기

출처: pp. 170-182 in Proceedings Domotechnica Appliance Engineering Conference, March 7-9, 2001, Cologne, Germany (Conference International, Inc., Largo, Florida)
 Karl A. Gschneidner, Jr. and Vitalij K. Pecharsky, Ames Laboratory;
 Carl B. Zimm and Alexander Sternberg, Astronautics Corporation of America
 (본 논문의 번역에 대해 주저자인 Gschneidner 박사의 허락을 받았음)

이 종 석

환경친화적인 가정용 자기 냉동/냉장고와 공조기의 개발 상황을 개괄적으로 기술하였으며, 중점은 냉동/냉장고에 있다. 15 kOe 정도의 자기장과 가돌리늄 구를 이용한 2단 자기 냉동/냉장고에 대한 초기 설계와 모델링은 총성능계수는 3, 총냉각능력은 120W에 이를 수 있다는 것을 보여준다. 고강도의 영구자석 배열의 설계를 개관하였으며 자기 냉동/냉장고에 대해 23 kOe 정도의 유효한 자기장이 얻어질 수 있고 이로 인해 성능계수와 냉각능력을 증가시킬 수 있는 것으로 비춰진다. 거대한 자기열량효과를 가진 재료인 $Gd_5(SixGe_{1-x})_4$ 를 킬로그램 단위로 생산하는 방법이 성공적으로 개발되었으며 이 재료들이 비싸지 않은 가격에 구해질 수 있을 것으로 확실시된다.

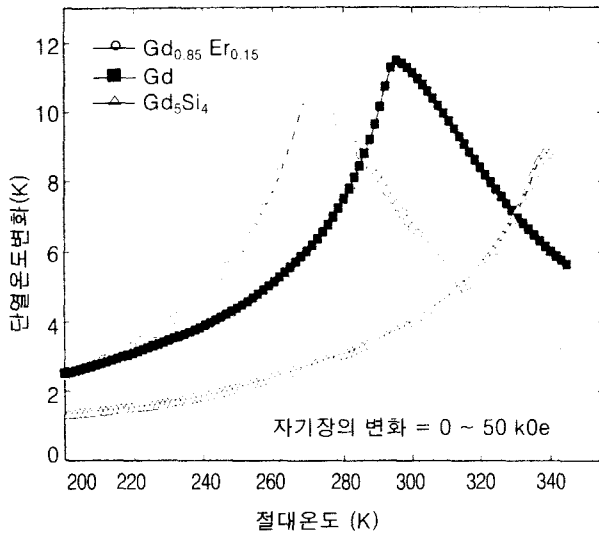
서론

자기열량효과(magnetocaloric effect)는 가해진 자기장에 대한 자성고체의 반응으로서 고체의 온도 변화로 나타난다. 이 효과는 약 120년 동안 알려져 왔다. 자기정렬온도(magnetic ordering temperature)부근의 강자성체에 있어서 쌍을 이루지 않은 3d(철과 주기율표상의 그 이웃물질) 또는 4f(자성 란탄계물질) 궤도의 전자들이 자기장에 의해 서로 평행하게 배열될 때 샘플의 온도는 올라간다. 자기장이 제거되면 이 전자들은 불규칙하게 배열되며 재

료의 온도는 내려간다. 강자성체에서의 자기정렬온도는 큐리(Curie)온도(T_c)라고 불리며 자기열량효과는 보통 이 온도에서 최대값을 갖는다. 자기 냉동/냉장고와 공조기에 사용 가능한 3가지 재료의 자기열량효과가 그림 1에 나타나있다. 주목할 만한 점은 눈에 떨 만큼의 자기열량효과를 얻기 위해서는 작동온도가 그 재료의 큐리온도 부근이어야 한다는 것이다. 또한 자기열량효과는 자기장이 변할 때에만 관찰되는데, 이는 전자석(또는 초전도 솔레노이드)을 켜고 끄거나 자성재료를 일정한 자기장 안이나 밖으로 움직일 때 발생된다. 자기 냉동/냉장고와 공조기는 1~10 Hz로 작동할 필요가 있기 때문에 전자는 실질적이지 않다. 따라서 이러한 장치들은 자석이 고정되어있고 자기냉매가 움직이거나, 또는 자기냉매가 고정되어있고 자석이 움직이는 두 가지 중의 한 방법으로 작동될 필요가 있다.

최초로 자기냉각을 실증해 보인 것은 Giaugue와 MacDougall로서 이들은 자기장을 8 kOe에서 0으로 천천히 줄임으로써 $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ 샘플을 3.4 K에서 0.53 K로 냉각시켰다. 이 기술은 단열소자법으로 알려져 있으며, 이것은 단순한 1단계(one step) 과정이다. 이 방법은 현재에도 0.0001 K이하의 온도에 도달하는 데 사용된다. (Oe는 자기장의 세기 또는 자계강도의 cgs단위인 oersted, K는 절대온도 kelvin을 의미한다: 역자 주)

연속적인 냉동을 얻기 위해서는 자기장이 증가할 때 자



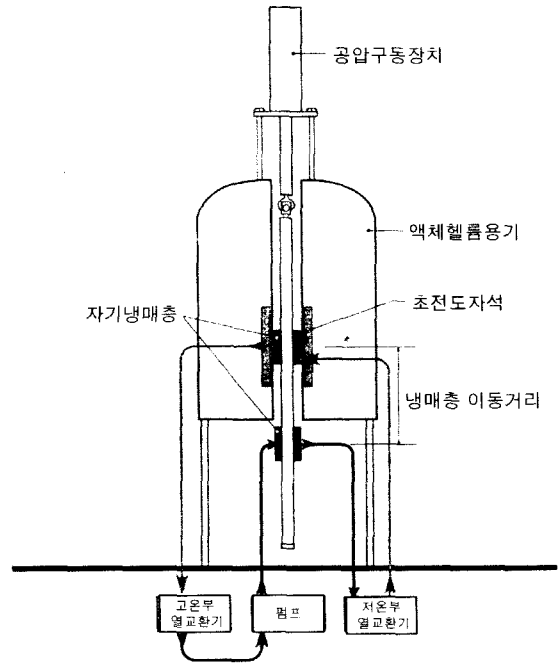
[그림 1] $Gd_{0.85}Er_{0.15}$, Gd, Gd_5Si_4 에 대한 자기열량효과(ΔT_{ad})와 온도 (T) 선도

성재료에 발생하는 열을 제거해 주어야 한다. 이것은 중기 압축 냉동기에서의 압축과정에 해당한다. 그리고 나서 소자과정 동안에 열회로를 구성하여 부하를 냉각하게 되는데 이것은 증발기에서의 가스팽창 과정에 해당한다. 이 두 단계를 반복해 줌으로써 냉동이 이루어진다.

연속으로 작동하는 자기냉동기가 최초로 실증된 것은 1950년대이며, 4.2 K 이하의 온도로 냉각되도록 설계되었다. 1970년대 중반에 Brown은 가돌리늄(Gd) 금속이 상온 냉각에 사용될 수 있다는 것을 보였다. 1997년 2월에 미국의 Ames 연구소(아이오와주립대)와 Astronautics사의 공동연구팀은 자기냉동이 실현 가능한 기술이며 중기 압축냉동에 필적할 만하다는 것을 보인 실증실험장치의 성공적인 작동을 공개한 바 있다. 이러한 비약적 전진에 이르게 했던 여러 역사적인 사건들에 대한 자세한 내용은 저자들의 다른 논문들에서 찾아볼 수 있다.

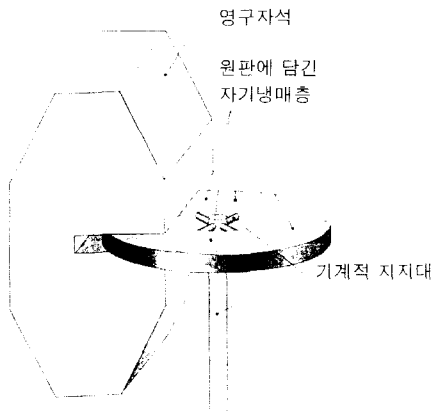
실증실험장치

그림 2는 Astronautics/Ames Laboratory 연구팀이 제



[그림 2] Astronautics/Ames Laboratory 연구팀이 제작한 실증실험장치의 개념도

작한 실증실험장치의 개략도이다. 자기냉매는 2개의 베드에 담겨있으며, 각각의 베드는 1.5 kg의 Gd 구(지름 150~200 μ m)로 채워져 있다. 베드들은 하나가 자기장으로 들어가면 다른 하나는 자기장으로부터 나오으로써 자기력을 상쇄시키고 자기일을 회복시키도록 구동장치 위에 장치되어 있다. 공압 구동장치는 3초마다 두 개의 베드를 자기장 안과 밖으로 움직여준다. 따라서 사이클 주파수는 0.17 Hz이다. 자기장은 초전도 솔레노이드에 의해 형성되며, 어떤 운전에서 초전도 자석이 연속적 모드로 작동할 때, 그 크기는 일정하게 유지된다. 자기장의 세기는 0부터 50 kOe까지 변화될 수 있다. 베드가 자화될 때 열을 제거하기 위해 물이 열전달 매질로 이용되며, 이와 동시에 소자되는 베드에서는 물이 냉각된다. 전체 시스템의 성능을 평가하기 위해 장치내의 온도와 유체유량을 측정하였다. 자세한 내용은 Zimm 등의 논문에 발표되었다.



[그림 3] 회전식 자기냉각장치의 개념도

냉각능력 (cooling power), 성능계수 (COP), 효율 (efficiency) 그리고 온도범위 (고온부와 저온부 열교환기 사이의 온도차이)는 자기장의 세기, 열전달유체의 유량, 주파수 등에 의존한다. 일반적으로 자기장의 세기가 클수록 냉각능력, 성능계수, 효율 그리고 온도범위가 크다. 서로 배치되는 경우도 있는데, 예를 들면, 일정한 자기장과 유량에 대해서 온도범위를 줄이면 냉각능력, 성능계수, 그리고 효율이 증가한다.

열전달유체의 유량은 냉각능력에 지대한 영향을 미친다. 냉각능력은 유량이 증가함에 따라 점점 커져서 최대 값에 도달한 후에는 감소한다. 또한 자기장도 영향을 미친다. 말하자면 자기장의 세기가 3 T (tesla)보다 작을 때는 최고 성능이 분당 4리터의 유량에서 나타나는 반면 자기장의 세기가 4 T 이상일 때는 최고 성능이 분당 5리터의 유량에서 나타났다 (여기서 T는 자속밀도의 단위인 tesla (=webers/m²)를 의미하며, 1 tesla는 10⁴ gauss에 해당한다 : 역자 주).

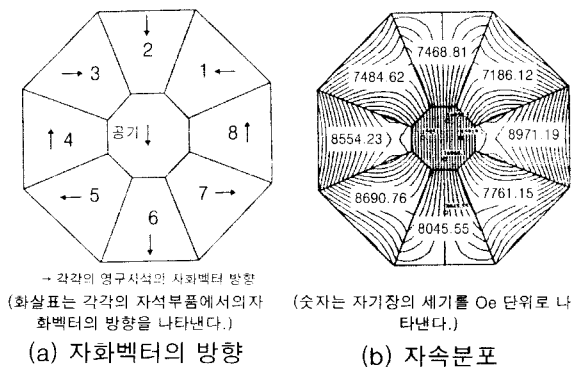
냉각능력은 이 장치의 최고주파수 (0.17 Hz)까지는 주파수에 비례하여 증가된다. 저자들은 이러한 경향이 최소한 10 Hz까지는 지속될 것이라고 예상하지만 증명 필요하다.

<표 1> 2단 자기 냉동/냉장고의 모델링 결과

항목	냉동실	냉장실	전체
저온부 온도, ℃(F)	-12 (10)	-1 (30)	-12 (10)
고온부 온도, ℃(F)	-1 (30)	32 (90)	32 (90)
유체	에틸렌글리콜40%	물	-
펌프일률, W	1.3	6.4	7.7
냉각능력, W	40.0	127.0	120.0
열방출률, W	47.0	160.0	160.0
소요전력, W	6.7	32.7	39.4
성능계수(COP)	6.0	3.85	3.0
효율(카르노효율의%)	51.4	49.0	-

Astronautics/Ames Laboratory 실험장치는 몇 가지 주목할만한 기록을 세웠다. 5 T의 자기장에서 600W의 기록적인 냉각능력을 얻었다. 이것은 Astronautics사의 40 K 극저온 냉동기에서 얻어진 것의 20배이며 상온에서 작동하는 이전의 어느 자기냉각기보다 100배나 좋은 성능이다. 5 T에서 기록적인 성능계수인 16이 얻어졌는데 이것은 카르노 효율의 60%에 해당한다. 최대 온도범위는 38℃가 얻어졌는데, 이때는 냉각능력 (~100 W)이나 성능계수가 줄어들게 된다. 실증실험용 장치는 별다른 유지보수나 고장이 없이 18개월 동안 1500시간 이상 작동되었다.

최근에 나고야시의 중부전력회사(Chubu electric power Co.)와 요코하마시의 토시바(Toshiba)사의 일본연구팀은 저자들의 결과를 증명하였다. 그들은 저자들의 장치와 비슷한 장치를 제작하였는데, 2.2kg의 Gd 금속(저자들은 3kg)을 사용하였고 4 T의 초전도자석을 이용하여 열방출온도 32℃일 때 -2℃의 저온부에서 80 W의 냉각능력을 얻었다. 저자들은 5 T의 자기장에서 32℃의 온도범위에 대해 100 W 정도의 냉각능력을 얻었다. 중부전력회사의 실증실험장치에서 얻어진 결과는 Gd 질량, 온도범위, 그리고 자기장의 차이를 고려한다면 저자들의 결과와 잘 맞다고 볼 수 있다.



[그림 4] 영구자석배열

회전식 자기 냉동/냉장고 원형

실증실험용 자기냉동기의 성공적인 운전 이후에 가정용 냉동/냉장고를 위한 고효율 회전식 원형장치의 설계에 대한 연구가 Astronautics사에서 이루어져왔다. 이 와 동시에 이 냉동/냉장고 원형에 사용될 영구자석 배열에 대한 연구와 거대한 자기열량효과를 가진 재료인 $Gd_5(Si_xGe_{1-x})_4$ (여기서 $x \leq 0.5$)를 킬로그램 단위로 생산하는 과정의 개발에 위한 연구가 Ames연구소에서 진행 중이다.

설계와 모델링 연구

회전식 자기 냉동/냉장고의 개략도가 그림 3에 나타나 있다. 설계와 모델링 연구는 미국시장에서 평균크기의 전형적인 가정용 냉동/냉장고(냉장실과 냉동실 조합)에 대해 이루어졌다. 냉장실(-1°C, 30°F)과 냉동실(-12°C, 10°F)의 서로 다른 냉각조건을 만족시키기 위해, 각각 별도의 $Nd_2Fe_{14}B$ 영구자석 배열(아래 참조)과 능동 자기재생기(active magnetic regenerator, AMR) 재료를 가진 2단(two stage)의 장치가 고안되었다. 냉동실로부터 제거된 열은 냉장실의 저온부 열교환기로 소산되고, 이 열은 냉동/냉장고의 고온부 열교환기에서 실내공기로 배출된다. 냉장실에 사용되는 AMR 자기냉매로는 가돌리늄 금속이 선택되었다. 이 원형은 초당 0.25회전

의 주파수로 작동하는 것으로 가정하고 영구자석은 15 kOe(다음절 참조)의 자기장을 발생시키는 것으로 가정하였다. 2단 자기 냉동/냉장고에 대한 계산결과는 표 1에 요약되어있다.

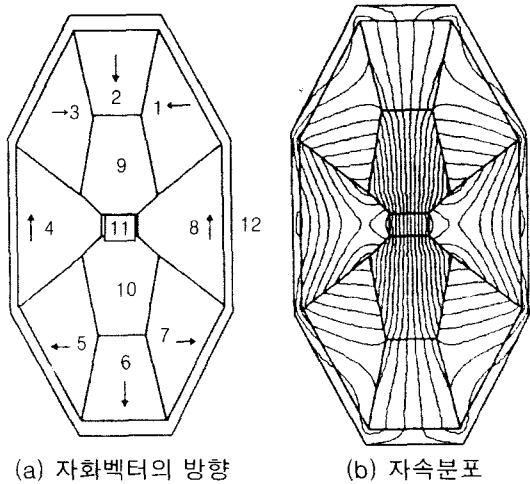
표 1에 나타난 데이터로부터 볼 수 있듯이 2실로 구성된 냉장고는 카르노 효율의 50%로 작동하는데, 성능계수는 냉동실이 6, 냉장실이 3.85로서, 전체적으로는 3.0의 성능계수를 갖는다. 이 성능(즉, 성능계수)은 현재의 증기 압축 냉동/냉장고에서 얻어지는 것과 비슷한 정도이다.

효율과 성능계수는 냉동/냉장고를 더 높은 주파수로 작동시키고 개선된 설계의 영구자석 배열을 이용함으로써 향상시킬 수 있다. 상세한 모델링 연구 없이 얼마나 향상될 것인가를 예측하는 것은 어려우며 가까운 미래에 시험이 수행될 것이다. 아래에 설명된 대로 저자들은 자기냉매에 의해 느껴지는 자기장의 세기를 최소 50%까지 증가시킬 수 있는 복잡한 다부품 영구자석 배열을 설계하였다. 실증실험장치로부터의 경험에 비추어 볼 때 저자들은 효율이 카르노효율의 60% 정도까지 증가하고, 성능계수도 50% 정도 즉, 냉동실은 9, 냉장실은 5.8, 전체적으로는 4.5 정도까지 증가할 것으로 예상한다.

영구자석의 배열

현재 구할 수 있는 최상의 영구자석인 $Nd_2Fe_{14}B$ 는 가로 세로비가 2:1(길이가 폭의 2배)인 두 개의 막대자석말단 사이의 간격이 0.5인치(1.25 cm)에서 10 kOe 정도의 자기장을 발생시킨다. 극간 간격에 자속선을 밀집시키고 자속의 귀환로를 향상시켜 줌으로써 간격 사이의 자기장을 크게 할 수 있다. 이것은 그림 4a에 나타난 바와 같이 배열의 자속을 최적화시키도록 자화벡터를 배열한 8개의 $Nd_2Fe_{14}B$ 자석조각(첫 문장에서 말한 단순한 배열에서의 2개 대신)을 이용하여 이루어졌다. 자속선은 그림 4b에 나타난 바와 같으며, 가운데 공간에 형성된 자기장은 16 kOe 정도이다.

조각의 수를 증가시킬 수도 있지만, 자기장의 증가가 작기 때문에 추가되는 자석 조각의 제조 및 조립 비용의 증



[그림 5] 중공원통형 연구자석배열

가가 자기장의 증가보다 더 크다.

자기장을 증가시키기 위해 그림 5a에서 보는 바와 같이 가로세로비를 2:1로 변화시켰다. 또한 그림 5b에서 보는 바와 같이 공간(부분 11)에 자속을 증가시키기 위해 FeVCo로 된 2개의 연자석 극편(부품 9와 10)을 부품 2와 6 사이에 삽입하였다. 자속 손실을 막고 자기장의 세기를 증가시키기 위해 연철자석 외피(부품 12)로 배열 주위를 둘러싸게 하였다. 예상했던 대로 이러한 변경은 공간에서의 자기장을 26 kOe까지 높여주었다.

AMR 자기냉매가 자기장을 느끼도록 하기 위해 배열에 홈을 뚫을 필요가 있다. 이것은 부품 4나 8에 0.5인치(1.25 cm) 폭의 홈을 잘라냄으로써 가장 효과적으로 이루어졌다. 가운데 공간에서의 자기장은 이제 24 kOe 정도로 감소했다.

지금은 이러한 자석을 만들고 그림 5에서처럼 설계된 홈을 가진 자석 배열이 예상한 대로 성능을 발휘하는지 시험하는 과정에 있다.

Gd₅(Si_xGe_{1-x})₄의 생산

Gd₅(Si_xGe_{1-x})₄ 화합물은 x의 값에 따라 자기열량효

과가 달라진다. x≤0.5에서 거대한 자기열량효과가 나타나는데, 이것은 비슷한 자기정렬온도를 갖는 다른 재료에서보다 50~200% 큰 값이다. 18개월 전까지는 Gd₅(Si_xGe_{1-x})₄ 화합물은 아크용융법에 의해 10~25 g의 인곳(ingot)으로 만들어졌으며, 대부분 Ames연구소에서 만든 고순도 Gd 금속을 사용하였다. 자기 냉동/냉장고는 대당 1 kg 정도의 자기냉매를 사용할 것이기 때문에 이러한 재료를 대량으로 생산하는 방법을 개발할 필요가 있다. 또한 상용(값싼) Gd은 자기열량효과를 파괴하는 탄소함량이 많은 것으로 밝혀졌다. 이러한 문제점들과 몇 가지 다른 문제들은 해결되었으며, 현재는 한 번에 Gd₅(Si_xGe_{1-x})₄ 화합물을 1kg씩 만들 수 있게 되었다. 이렇게 만든 재료의 자기열량효과는 고순도 Ames연구소 Gd을 사용해 이론양의 Gd+Si+Ge를 아크용융하여 만든 Gd₅(Si₂Ge₂)의 자기열량효과의 2/3~3/4 정도이다. 이 재료를 만드는 자세한 방법은 다른 논문에 발표되었다.

고온 자기냉동재료는 325 K의 자기정렬온도를 가질 필요가 있기 때문에, 이 조건을 만족시키는 가장 좋은 재료는 0.9≤x≤1.0 범위의 Gd₅(Si_xGe_{1-x})₄이다. 이 재료를 kg 단위로 만드는 방법이 같은 논문에서 논의되었다.

아직 해결해야 할 중요한 문제중의 하나는 Gd₅(Si_xGe_{1-x})₄ 재료를 AMR 베드에서 사용될 수 있도록 지름이 150~300 μm인 작은 구로 만드는 것이다. 앞으로 18개월 동안 이런 면의 자기냉동재료 연구에 노력을 집중할 것이다.

환경적 고려사항

자기냉동은 환경친화적 기술이다. 이것은 오존층 파괴 물질(CFC's), 독성물질(NH₃)이나 온실가스(HCFC's와 HFC's)를 사용하지 않는다. 자기냉매는 무독성이고 강자성인 란타넘계금속 또는 그 화합물들이다. 열전달매체도 환경적으로 안전한 물이나 물-부동액(자동차에 사용되는 것과 비슷한), 또는 헬륨이나 공기와 같은 가스이다.

게다가 자기냉각은 에너지 사용에 있어서 기존 냉각시스템보다 30%정도 작게 사용할 것으로 예상되기 때문에, 에너지 소비량을 감소시키고 대기로 방출되는 CO₂의 양을 줄여줄 수 있다. 대기로 방출되는 온실가스의 감소는 그런 가스배출에 대한 교토(Kyoto) 목표치를 만족시키는 데 기여할 것이다.

요약

1990년대 중반부터 후반에 걸쳐 미국의 Astronautics사와 Ames연구소에 의한 공동연구결과는 자기냉동이 실현 가능한 기술이며 가스액화, 음식 냉동 및 저장, 대규모 건물 공조 등에 있어서 기존의 증기압축냉동에 필적할 만하다는 것을 밝혔다. 더 최근의 연구와 개발 노력은 자기장 원(source)으로 Nd₂Fe₁₄B 영구자석배열을 이용한 회전식 자기냉동기가 가정용 공조기나 냉동/냉장고에 사용될 수 있음을 나타내고있다. Gd 금속구를 사용한 2단 자기 냉동/냉장고의 예비설계는 냉동실 온도가 -12℃(10°F), 냉동실 온도가 -1℃(30°F)에서 전체 성능계수 3 그리고 냉각능력 120 W를 얻을 수 있음을 제시한다. 자기장 원으로서 개선된 영구자석 배열을 이용한다면 카르노 효율의 60%와 성능계수 4.5에 이를 수 있을

것으로 보여진다. 그리고 자기냉동은 오존층 파괴물질(CFC's)이나 온실가스(HCFC's와 HFC's)를 사용하지 않기 때문에 깨끗한 환경을 만드는데 기여한다.

동시에 상용 Gd으로부터 거대한 자기열량효과를 가진 재료인 Gd₅(Si₂Ge₂)를 kg 단위로 생산할 수 있는 정도로 연구가 진전되었다. 이 신재료를 저렴한 가격에 얻을 수 있게 됨으로써 Gd 금속을 자기냉매로 사용하도록 설계되었던 공조기나 냉동/냉장고의 효율이 더 좋아질 것으로 예상된다.

후기

Ames연구소에서의 연구는 Astronautics사와의 공동연구개발협약(CRADA)을 통해 미국 에너지성(DOE), 과학실(Office of Science), 첨단과학연산 기술연구부의 지원으로 수행되었다. 저자들은 영구자석배열에 대한 미발표의 정보를 제공해 준 Ames연구소 동료인 David Jiles 교수와 이성재씨에게 감사한다. 저자들은 또한 그들의 실증실험용 자기냉동기에 대한 미발표의 정보를 이 논문에 포함하도록 허락해 준 중부(Chubu)전력회사의 Hirano 박사에게 감사한다.