

전기열량 효과 (Electrocaloric Effect)와 기술 현황



류주현 교수, 이갑수 박사과정, 김유석 석사과정 (세명대학교 전기공학과)



1. 서론

지난 수십 년에 걸쳐서 과학기술이 눈부시게 발달하여 산업은 빠른 속도로 급성장하였고 생활수준 또한 눈에 띄게 상승하였다. 산업과 생활수준이 발달함에 따라서 삶의 질은 향상되었지만, 그에 따라서 산업폐기물과 같은 부산물 또한 많은 양이 배출되었다. 부산물 중의 대부분이 환경파괴와 온실효과의 원인이 되었으며, 그로 인해서 지구의 온도는 상승하였고, 기후는 급격하게 변화하였다. 대표적으로 이산화탄소 및 냉장고, 에어컨 등과 같은 냉각장치들에서 사용되는 프레온 가스의 무분별한 사용은 온실효과를 촉진하고 오존층을 파괴시킬 수 있다. 따라서 국제조약은 지구의 환경을 보호하기 위해서 프레온 및 이산화탄소의 배출량을 제한하기로 하였다.

한편으로, 지난 수년간 각종 산업과 생활에 전반적으로 사용되는 전자, 통신기기의 핵심 부품소재들의 발전은 고집적화, 소형화, 경량화에 많은 초점이 맞추어져 있었다. 초소형 시스템에 관한 관심과 기대가 갈수록 증대되면서 MEMS (Micro Electro Mechanical System)은 첨단 기술 산업으로 21세기에 들어 우리나라를 비롯한 세계 각국에서 연구개발이 활발하게 이루어지고 있는 산업 분야이다. 초소형 정밀기계의 특징은 소형화, 경량화, 다기능화, 고속

화, 지능화 등이 있으며, 이러한 기술적 특징은 상용화되는 제품경쟁력의 핵심이며, 고부가가치를 이룰 수 있는 주요 요인이 된다. 그러나 부품들과 휴대용 전자기기들은 소비자의 욕구에 따라 고성능화와 더불어 휴대성이 강조되어 얇아지고 있기 때문에 내부의 발열 문제는 점차 중요한 이슈로 부각되고 있다.

현재, 이러한 냉장고, 에어컨 및 초소형 정밀기계의 냉각 수요가 급증하면서 냉각시장 및 냉각산업이 거대해지고 있는 실정이며, 냉각 산업 및 시장의 거대화에 발맞춰 고 집적 전자회로, LED, LD 등에서의 발열문제와 냉장고, 에어컨 등과 같은 냉각장치들에서 기존의 증기압축냉각 사이클 (VCC : Vapor Compression Cycle) 냉각, 냉매를 이용한 냉각 및 수동 냉각방식들을 대체할 수 있는 냉각 기술의 개발이 절실히 요구되어지고 있다. 따라서 본고에서는 새로운 냉각기술인 전기열량 효과 (ECE, Electrocaloric Effect)에 대해서 소개하고 기술 개발 현황 및 연구동향에 대해서 설명하고자 한다.

2. 전기열량 효과 소재개발 역사와 기술 개요

2.1 전기열량 효과 소재개발 역사

EC 효과의 첫 번째 실험은 Rochelle salt에



서 수행되었고 Kobeco와 Kurtshatov에 의해서 1930년에 보고되었으나, 온도의 변화는 크지 않았기 때문에 1956년이 되어서 EC 효과는 다시 논의 되었다. EC 효과는 인가된 주기적인 전계는 EC 재료의 온도를 변화할 수 있는 것을 말하며 1960년대와 1970년대에 Bulk물질에서 집중적으로 연구되어 왔으나, 결국 상당한 온도변화를 나타내지 못하고 실용화가 되지 못하였다. 부품과 냉각 시스템의 설계에서 최근 연구개발은 3K의 온도변화가 현재의 냉각 시스템과 비슷한 냉각 비용을 가진 EC 고체상태 냉각시스템을 구성하기 위해서 충분하다는 것을 나타내었다 [1-5]. 또한, 6 K에 온도변화로 증가함으로써 비용은 반으로 줄었다. 최근 Mischenko 등은 SCIENCE지에서 박막필름에서 48 MV/m은 인가했을 때 12 K의 온도변화를 일으킬 수 있는 소위 거대한 EC 효과를 제안했다. 이것은 EC 물질에 대한 새로운 관심을 촉발시켰다 [6].

2.2 전기열량 효과 기술 개요

새로운 냉각 기술들은 두 가지 원칙을 기반으로 하고 있다. 첫 번째는 단열 소자냉각이고 두 번째는 단열 분극냉각이다. 여기서 단열 분극냉각은 소위 강유전 냉각으로 불리며 강유전재료의 전기열량효과 (ECE, Electrocaloric Effect)를 이용한 냉각기술을 말한다. 전기열량효과 (ECE, Electrocaloric Effect)는 물리적인 현상으로 전계 하에서의 특정 재료에 대한 단열온도변화 (Adiabatic temperature change)를 이용한다. 이상적으로, ECE 냉각 사이클은 그림 1과 같은 원리로 일어난다.

(1) 1단계 : 단열 분극화 (Adiabatic polarization) 라 불리며, 외부에서 전계가 가해지게 되면 쌍극자가 전계방향으로 가지런히 배열되고 전체엔트로피를 일정

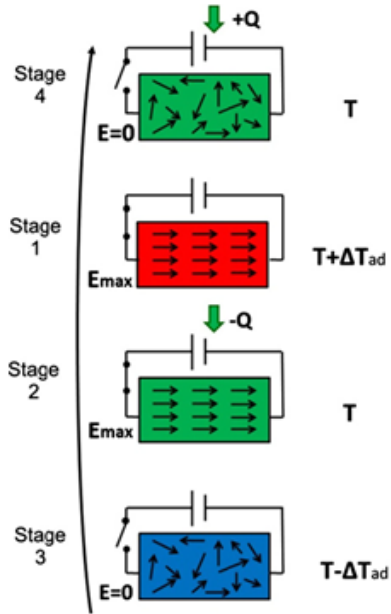


그림 1. 전기열량 효과 (Electrocaloric effect)의 기본적인 Cycle.

하게 유지하기 위해 전기열량 재료의 온도가 올라간다.

- (2) 2단계 : 등전위 엔탈피 전송 (Isoelectric enthalpic transfer)이라 불리며, 열은 제거된다. 전계는 열의 재흡수로부터 다이폴의 배열을 유지하기 위해 일정하게 유지된다.
- (3) 3단계 : 단열 탈분극화 동안 전계가 제거되면 쌍극자는 방향성을 잃는다. 에너지 (=엔트로피)는 열 엔트로피에서 쌍극자 엔트로피로 전송되고 전기열량 재료는 냉각된다.
- (4) 4단계 : 등전위 엔트로피의 전송은 카르노사이클과 비슷하다. 전계가 0으로 유지됨으로써 전기열량 재료의 작용은 냉각환경보다 더 온도가 내려간다. 발열원으로 부터 열을 흡수함으로써



원래의 상태로 돌아가 재사용이 가능하다.

위의 한 사이클을 반복함으로써 냉각이 가능하며, 물질의 EC 효과가 클수록 더 큰 냉각력을 가지고 EC 효과는 온도와 인가된 전계 모두에 매우 큰 영향을 받는다. EC 효과를 보이는 대부분의 물질은 세라믹들이다.

2.3 엔트로피와 EC효과

EC 효과를 이해하는 과정에서 가장 중요한 것은 인가되는 전계에서 엔트로피와 분극 변화 사이의 연관성이다. 큰 EC 효과를 위해 큰 엔트로피 변화는 분극변화와 관련되며, 이것은 외부전계에 의해 유전체에서 유도된다. 이러한 큰 분극의 변화는 강유전체 전이가 일어나는 조건에서 가장 잘 충족되어짐으로 EC 효과는 상전이 온도에서 가장 강하게 나타나며, 상유전체상으로 전이함으로써 서서히 사라진다.

$$\Delta S = -\int_{E_1}^{E_2} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_E dE$$

< 엔트로피의 변화를 나타내는 식 >

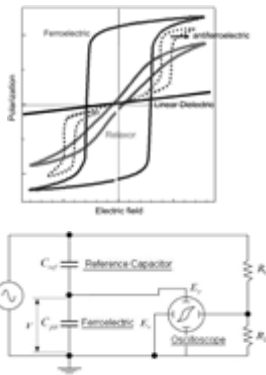


그림 2. Sawyer-Tower circuit과 강유전체 히스테리시스 루프.

EC 효과는 전계가 일정할 때 분극의 온도의존성을 측정함으로써 간접적으로 측정될 수 있다. 간접적 계산을 위한 실험 절차는 다른 온도에서 잔류분극 히스테리시스의 측정과 함께 시작한다. 구체적인 전계의 범위 ($E_2 - E_1$) 이내에 잔류 분극값 측정으로부터 온도에 대하여 추출되어지고 그려진다. $(\partial P / \partial T)_E$ 식을 얻는 것은 그려진 데이터의 다항접합 또는 수치미분을 사용하는 것이 가능하다. 특히, 상전이가 온도범위 부근에서 일어날 때, 온도에 따른 열용량을 아는 것은 또한 중요하다. EC 효과는 아래의 식에 의해 계산되어진다.

$$\Delta T = -T \int_{E_1}^{E_2} \frac{1}{C_E(T, E)} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_E dE$$

< EC 효과에 대한 계산식 >

여기에서 ΔT 는 역으로 할 수 있는 단열 온도 변화, C_E 는 시편의 열용량, E_1 과 E_2 는 각각 초기에 인가된 전계와 마지막으로 인가된 전계를 나타낸다. 가령 Maxwell 관계 $(\partial P / \partial T)_E = (\partial S / \partial E)_T$, $(\partial P / \partial T)_E$ 의 값은 $P(T)$ 데이터의 숫자로 나타낸 미분으로부터 얻을 수 있다 [1-5].

3. 연구 동향

현재 EC 효과는 Bulk, Thick films, Thin films, Polymers 등에서 연구되고 있으며 각 소자 별로 전계에 대한 온도변화는 그림 3 그래프와 같이 분포되어있다.

또한, 최근 연구자들은 폴리머가 세라믹 물질들보다 일곱 배의 열 흡수 능력을 가지는 것으로 찾아냈다. 연구되고 있는 폴리머들은 전기장 하에서 정렬하는 양극성 분자들로 이루어져 있는데, 엔트로피의 감소로 인해서 10℃에 이르는 단열 온도 변화를 가지



고 있다. 이러한 온도 변화는 Bulk 세라믹에
서보다 10배 정도 높은 것이며 세라믹에 비
해 높은 분자 이동도를 가지는 폴리머의 특
성 때문이다.

메릴랜드대 (The University of Maryland)
에서는 형상기억합금을 이용한 냉각기를 개
발하였는데 사이클은 형상기억합금의 특이한
성질인 응력이 주어진 상태에서 물질이 다른
상으로 변화하면 열을 흡수함으로써 원래의
모양으로 되돌아오는 현상 때문에 일어난다.
더 많은 열을 제거하기 위해 형상기억합금은
물체나 방열판에 노출되고, 얻었던 열을 방
출하면서 다시 낮은 온도로 돌아오게 되어
재 작동할 수 있게 된다 [7].

4. 결론

전기열량 효과 (Electrocaloric effect)는 재
료의 엔트로피 변화로 인해 생기는 온도 변
화이다. 이러한 EC 효과는 이전에 사용되던
냉각 기술을 대체할 수 있는 새로운 냉각 기
술으로써, 처음 EC 효과가 발견 되었을 때 작
은 온도 변화로 많은 관심을 받지 못했지만,
2006년에 거대한 EC 효과가 게재되고 알려
지면서 EC 효과는 다시 재조명 받고 있다.

현재 박막을 기반으로 하는 마이크로-냉각
물질들은 좋은 특성가지고 있기 때문에 실생
활에 활용 가능하며 박막의 EC 온도 변화와
요구되는 전압은 Micro 크기의 부품에 사용
가능하다. 하지만 지금까지 연구에서는 몇
몇의 산화물에 대해 연구가 진행되어 왔으나
방대한 극성 재료에 대해서 좀 더 포괄적이
고 체계적인 연구가 필요하다. 또한 납을 포
함하고 EC물질들이 대체적으로 좋은 EC 효
과를 보여주고 있지만 환경 문제를 위해서
납을 포함하지 않는 Pb-free재료에 대한 EC
효과가 개발 되어야 한다. 지금까지의 EC 효
과는 연구단계에 있기 때문에 실생활에 사용
될 수 있으려면 많은 연구 개발이 필요한 실

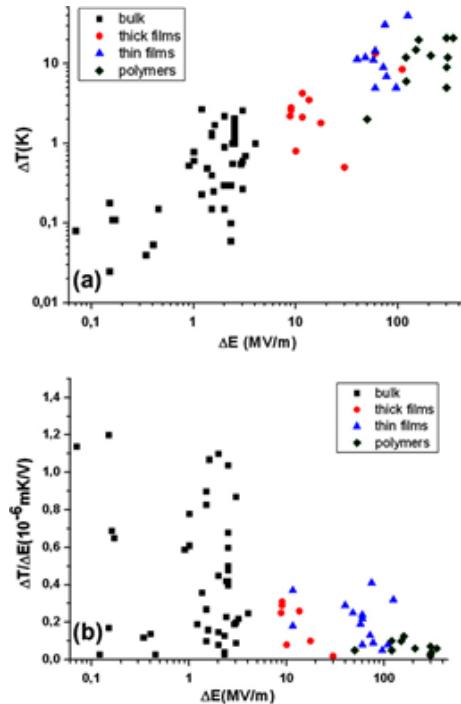


그림 3. Bulk, Thich films, Thin films, Polymers
의 전계 (ΔE)에 따른 온도변화 (ΔT).



그림 4. 특별히 설계된 폴리머 필름 (0.4~2.0 μm)(출처: www.impactlab.net).

정이다 [8,9].

참고 문헌

- [1] Koveco. P, Kurtchatov. IV, "Dielectric properties of Rochelle salt crystal", Z Phys 66 192-205 (1930).
- [2] Gänicher. H, "Induzierte Ferroelektrizität von SrTiO₃ bei sehr tiefen Temperatur und über die Kalterzeugung durch adiabatic Entpolarisierung", Helv Phys Acta 29 210-212 (1956).
- [4] Sintavski. YV, Lugansky. GE, Pashov ND, "Electrocaloric refrigeration: investigation of a mode, and prognosis of mass and efficiency index", Cryogenics 32 28-31 (1992).
- [5] Sintavskii. YV, "Analysis of the efficiency of an electrocaloric cryorefrigerator", Chem Pet Eng 31 501-506 (1995).
- [6] Mischenko. AS, Zhang. Q, Scott. JF, Whatmore. RW, Mathur. ND, "Giant electrocaloric effect in thin-film PbZr_{0.95}Ti_{0.05}O₃", Science 311 1270-1271 (2006).
- [7] J. Dieckmann (ASHRAE member), A. Cooperman, J. Brodrick (ASHRAE member, PhD), "ASHARE Journal September, pp.28-36 2010.
- [8] M. Valant, "Electrocaloric materials for future solid-state refrigeration technologies", Prog. Mater Sci, 57 980-1009 (2012).
- [9] J.F.Scott, "Electrocaloric Materials", Annu. Rev. Mater. Res, 41 229-240 (2011).



저자약력



성명 : 류주현
 ◆ 학력
 • 1984년 연세대학교 공과대학 전기공학과 공학사
 • 1987년 연세대학교 대학원 전기공학과 공학석사
 • 1990년 연세대학교 대학원 전기공학과 공학박사

◆ 경력

- 1991년 - 현재 세명대학교 전기공학과 교수
- 2006년 - 2007년 대한전기학회 충북지회 회장
- 2009년 - 2009년 한국전기전자재료학회 총무이사
- 2010년 - 2011년 한국전기전자재료학회 편집이사(학회지편집위원장)
- 2012년 한국전기전자재료학회 부회장



성명 : 이갑수
 ◆ 학력
 • 2006년 세명대학교 공과대학 전기공학과 공학사
 • 2008년 세명대학교 대학원 전기공학과 공학석사
 • 현재 세명대학교 대학원 전기공학과 박사과정



성명 : 김유석
 ◆ 학력
 • 2013년 세명대학교 공과대학 전기공학과 공학사
 • 현재 세명대학교 대학원 전기공학과 석사과정

