

저온 PCM을 이용한 열저장

현재 보급되어 있는 대부분의 축열시스템은 일반적으로 물(얼음)을 PCM으로 사용하는 빙축열 방식이다. 본 원고에서는 0°C 이하의 상변화온도를 갖는 저온PCM에 대한 기본 개념과 응용범위 대하여 소개하고자 한다.

백 중 현

현재 보급되고 있는 빙축열 및 수축열식 축열시스템은 주로 발전설비의 부하 조절용으로, 즉 상대적으로 전력수요가 적은 심야 시간대에 냉열을 축열하고, 주간에는 심야에 축열된 냉열을 냉방에 이용하여 주간 시간대의 냉방용 전력수요를 낮춰 주는 방식의 냉방시스템으로, 국가 전력수급의 안정화 및 전력 피크 부하의 평준화에 주 목적을 두고 개발, 보급되기 시작하였다.

특히 빙축열시스템은 PCM(phase change material)으로 0°C의 상변화온도를 갖는 물을 사용하여 얼음이 녹을 때의 잠열을 냉방에 이용한다. 이때 물의 잠열량은 약 80kcal/kg이며 사용온도대에서 고체-액체 상변화 열량으로는 여타 다른 물질에 비하여 매우 높은 특징을 갖고 있어, 축열조의 용량을 최소화할 수 있다. 또한 환경친화적인 물질로 주변에서 널리 접할 수 있어 거부감이 없고, 경제적인 장점을 갖고 있다.

그러나 축열된 열량과는 관계없이 사용하고자 하는 온도가 0°C 이하인 경우에는 이에 적합한 상변화 온

도를 갖는 저온 PCM이 필요하며, 사용되는 PCM의 물리적, 화학적 특성을 고려한 시스템의 설계가 이루어져야 한다. 현재 일부 선진국을 중심으로 저온용 축열재를 이용하여 산업·상업분야는 물론 요즈음 각광 받고 있는 IT, BT, ET 분야로의 응용이 활발하게 진행되고 있다.

본 원고에서는 이러한 흐름에 맞추어 저온 PCM에 대한 기본적인 이해와 응용분야에 대하여 소개하고자 한다.

잠열재(PCM)와 공융액(Eutectic Solution)

현재 사용되고 있는 잠열재는 구성물질이 단일성분인 것과 두 가지 이상의 물질이 혼합된 복수성분인 것으로 분류할 수 있다. 표 1에서 보는 바와 같이 단일물질계의 PCM중 대표적인 물(H₂O)의 경우 단일(순수) 물질이므로 다른 대부분의 단일물질과 같이 일정한 상변화 온도와 잠열량을 갖고 있다. 즉, 고체-액체간의 상변화 현상이 오직 한 점(melting point)에서 이

<표 1> 단일물질계와 혼합물질계의 PCM 예

단일물질	융점(°C)	잠열량(kJ/kg)	밀도(g/cm ³)	혼합물질	융점(°C)	잠열량(kJ/kg)	밀도(g/cm ³)
Heptanone-4	-33	209	0.82	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	89	160	1.64
n-Undecane	-26	141	0.74	Ba(OH) ₂ · 8H ₂ O	78	266	2.18
Ethelene glycol	-11.5	179	1.11	NaCH ₃ COO · 3H ₂ O	58	264	1.48
n-Dodecane	-9.6	211	0.75	Na ₂ S ₂ O ₂ · 5H ₂ O	48	197	1.73(1.67)
Water	0	333	1	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	32.4	251	1.46(1.33)
Sodium hydrogen phosphate	36.1	280	1.45	CaCl ₂ · 6H ₂ O	29.9	192	1.71(1.62)

백 중 현 한국생산기술연구원(pjh6240@kitech.re.kr)

루어진다. 난방용 또는 자연냉방분야에 주로 사용되고 있는 수화물(水和物)의 경우는 복수성분의 잠열재로 두 가지 이상의 혼합물 또는 화합물로 이루어진 물질로서 혼합성분에 따라 고유의 상변화 상태를 갖게 된다. 그림 1은 그 중 2개의 물질이 혼합되어 공유점을 갖는 대표적인 상태를 나타내고 있다.

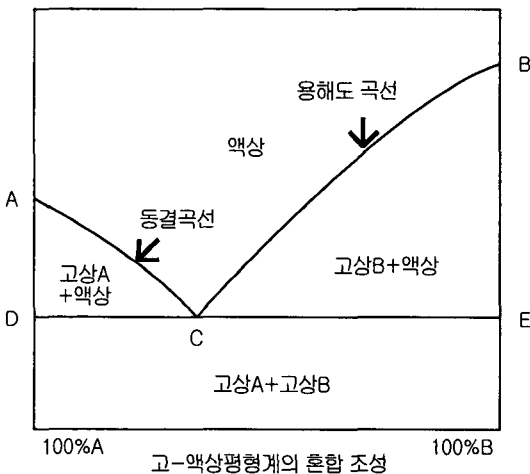
그림 1로부터 주변에서 흔히 관찰되는 일반 수용액 상태의 냉각·동결과정을 다음과 같이 설명할 수 있다. 어떤 임의의 농도를 갖는 수용액이 특정온도에서 상태점 x에 위치하고, 이 용액을 냉각시킨다면 Y축(온도)을 따라 수직으로 하강하게 되어 동결곡선 AC선과 만나게 된다. 이때부터 A성분의 결정이 석출되기 시작하며, 계속적인 온도하강에 따라 AC선을 타고 C점에 다다르게 된다. 이 과정에서는 A성분의 결정(solid)과 A+B성분의 용액(liquid)이 공존하면서 C점으로 향할수록 점점 더 많은 A성분의 결정이 형성되고, 용액량은 상대적으로 줄게된다. 감소하는 용액의 조성농도는 A성분의 감소(결정으로 석출)와 B성분의 농도증가로 C점의 농도조성까지 이르게 된다. 현재 H₂O-EG(ethylene glycol)의 혼합물을 이용한 슬러리아이스시스템에서도 역시 A성분의 결정(얼음) 석출과 함께 용액내 EG농도의 상승현상을 관찰할 수 있다. C점에 이르게 되면 마지막 남아 있는 용액이 전

부 결정화하게 되며, 이때 전체 결정중 A성분과 B성분의 조성비는 CE/CD로 형성된다. 만약 최초의 용액 조성비가 C점에 있고 그 상태점이 수직선상의 상부에서부터 냉각된다면, 앞에서 설명한 부분적인 결정석출(동결)과정을 거치지 않고 곧바로 C점과 만나게 될 것이며, 단일물질처럼 한 점에서 액체-고체의 상변화과정을 거치게 된다. 이와 같이 동결개시부터 완료까지 농도 변화 없이 순수물질과 마찬가지로 일정한 온도에서 상변화하는 특성의 용액을 공유용액(eutectic solution)이라 하며 C점을 공유점(eutectic point) 또는 공점(cryohydric point)이라 한다.

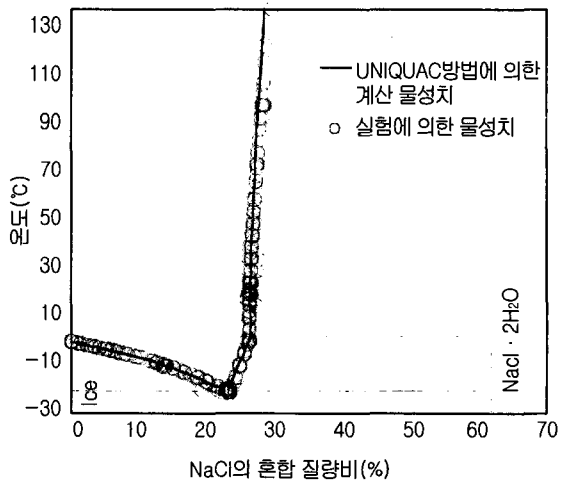
이제 저온 PCM의 기본적인 예로 NaCl-H₂O계에 대한 상변화 과정을 살펴보기 위하여 그림 2와 같은 상태를 참조할 수 있다.

그림 2의 상변화 상태에서 보는 바와 NaCl-H₂O계에서는 1개의 공유점(eutectic point)과 1개의 포정점(peritectic point)이 있음을 알 수 있다. 중요한 것은 NaCl-H₂O계의 공유점이 NaCl 21.3 wt% 농도(어떤 문헌에서는 23%로 주장)에서 -21.3℃의 공유점 온도를 갖고 있으며, 공유점 이하의 온도에서 고체결정의 성분은 얼음과 NaCl·2H₂O의 혼합조성으로 이루어진다.

이와 같이 2가지 이상의 혼합 또는 화합물로 이루



[그림 1] 이성분계(binary system)의 기본 상변화 상태도



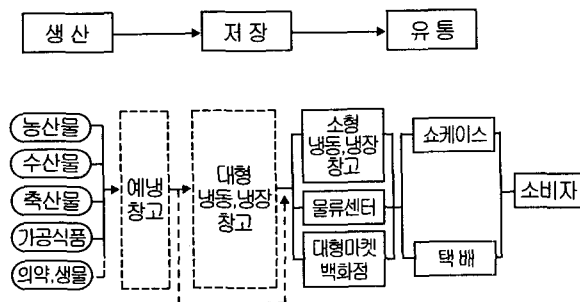
[그림 2] NaCl-H₂O계의 상변화 상태도

어진 잠열재의 경우, 공용점의 농도를 갖추고 있어야만 단일물질에서와 같이 일정한 상변화온도와 그 온도에서의 잠열량이 보장될 수 있다. 일반적으로 공용액에 대한 정의를 올바르게 인지하지 못하고 목표 온도에서 부분적으로 상변화하는 물질을 공용액이라고 인지하는 경우가 많아, 실제 적용시 잠열량 미달 또는 적정온도유지의 실패요인이 되고 있다.

PCM의 조건 및 사용범위

대부분의 저온잠열재는 앞에서 설명한 공용점을 갖는 혼합 또는 화합물질이며, 단일물질의 경우는 일반적으로 비싼 편이어서 경제적 이유로 배제되는 경우가 많아 소량 또는 특수한 요구조건이 있을 경우에만 고려의 대상이 되고 있다. 이러한 저온 PCM이 실제 축열시스템에 적용·실용화되기 위하여 갖추어야 할 조건을 살펴보면 다음과 같다.

- 사용온도에 적합한 공용점을 가진 용액
- 잠열량 및 기타 열물성치(thermal properties)가 우수한 용액
- 부식성이 작고, 화학적으로 안정된 물질
- 장기간의 주기적인 동결·해빙과정에서 변형이 없는 물질(상분리현상 포함)
- 가격이 저렴하고 환경유해성이 적은 물질



[그림 3] 저온 유통시스템의 적용범위

이 밖에도 과냉각현상에 대한 해결 방법과 동결특성 및 결정성장 형태 등을 고려한 적절한 시스템설계가 반드시 동반되어야 한다.

저온 PCM을 이용한 축열시스템이 적용될 수 있는 대표적인 산업으로는 저온 유통시스템이 가장 유력하리라 판단된다. 그림 3에서 보는 바와 같이 여기서 의미하는 저온 유통의 범위는 생산과정부터 제품이 최종 소비자에 이르기까지의 저장, 유통의 전 범위를 포함한다. 현재 국내의 유통산업은 규모 면이나 질적인 면에서 모두 괄목할만한 성장세를 유지하고 있다. 특히 국민생활수준의 향상과 식생활의 서구화로 인하여 인스턴트식품(fast food)류, 육류, 냉동생선류 및 채소류등의 저온유통이 날로 증가되고 있으며, 이에 따라 식품의 장·단거리 운반수단으로 사용되는 냉동차량 및 저온저장창고, 쇼케이스, 소포장용 냉동박스 등과 관련된 산업 역시 지속적인 성장을 거듭하고 있다.

사용하고자 하는 저온 PCM의 선정은 적용온도에 가장 큰 관계가 있으며, 특히 냉동·냉장을 위한 PCM의 적정 상변화온도는 축열시스템의 방법에 따라 사용온도(고내온도)보다 5℃~10℃ 정도 낮게 선정되어야 한다. 참고로 저온창고의 냉장실 급별 및 유통과정시 품목별 보관온도와 이에 대응하는 저온잠열재의 적정한 상변화 온도 선정 예를 표 2와 표 3에 나타내었다.

<표 2> 냉장실 급별 보관온도 및 PCM 적용온도

냉장실 급별	보관온도	PCM 상변화 온도
C ₁ 급	+10℃~-2℃	0℃, -5℃
C ₂ 급	-2℃~-10℃	-10℃, -15℃
C ₃ 급	-10℃~-20℃	-15℃, -25℃
F급	-20℃이하	-25℃이하

<표 3> 유통물품의 품목별 적용기준(일반적)

운송물품	아이스크림	냉동식품	생선 어패류	생선 어채류	생선 과실류	생선 육류	유제품	제과류
고내온도(℃)	-25~-20	-18~-10	0~+3	0~+15	+1~+16	+2~+7	+2~+10	+3~+22
PCM상변화 온도(℃)	-32~-25	-25~-20	-5~0	-5~+10	+5~+10	-3~+0	-3~+0	-3~+15

저온 PCM의 응용분야 및 가능성

저온잠열재의 대표적인 응용분야는 다음과 같다.

- 우주항공, 첨단무기, 전자·계측·통신기기(TEM)의 히트싱크(heat sink)/ 의약, 생물·생화학물질의 보관·운반 및 물리치료 의학기기 등의 첨단산업분야
- 열펌프(heat pump), 히트파이프(heat pipe), 열회수(heat recovery)시스템과 연계한 에너지이용효율 극대화분야
- 심야전력을 이용한 축냉(저온 PCM 축냉식 냉장 및 냉동등) 및 각종 산업분야에서 냉각과정의 에너지이용 합리화분야
- 레저용 선박, 수산업, 주방용품 등의 생활산업분야
- 농/수/축산물의 생산/저장/유통 등의 식품산업분야

위에서 언급한 다양한 응용분야에 대하여 저온축열시스템은 다음과 같은 장점을 바탕으로 실제 적용분야의 확대를 도모할 수 있을 것으로 사료된다.

- 시간대별, 유형별 불규칙한 부하형태에 관계없이 운전 및 설정온도가 일정하게 유지 (제품의 품질향상, 장치의 소형화 및 피크 부하대의 효과적인 대처가능)
- 부하예측에 의한 효과적인 운전 (응용분야에 따라 부하의 예측이 가능한 경우 축열율 분배에 의한 경제적 운전가능)
- 항시 운전에 의한 시스템이용의 극대화(산업용 특성에 따른 1년 365일 운전)
- 냉동·냉장, 쇼케이스, 냉동차 등에서의 고습도 유지 (고내의 습도가 일반식에 비하여 높게 유지되어 제품의 신선도 유지가 용이)
- 경상운영비 및 운송비 절감 (야간에 축적된 냉열

을 주간에 방열하므로 운전시 연료비 절감)

- 심야전력이용가능 (심야전력사용이 이루어질 경우 저렴한 가격의 심야전력을 이용하여 야간에 축열할 수 있음)

지금까지 저온 PCM을 이용한 기술은 미국의 국방부나 NASA 등에서 특수목적용을 갖고 개발하여 사용하고 있으며, 일반적으로는 냉동탑차나 물품우송용 저장박스, 선박·항공기의 냉동창고 등에 사용되어 왔다. 최근 들어 일본의 미쓰비시사에서는 +55℃ ~ -21℃ 사이에 다양한 PCM을 시장에 내놓고 냉동·냉장은 물론 열펌프, 히트파이프와 연계한 냉·난방, 폐열회수 등의 분야에도 진출하고 있으며, 기타 빙축열 업체에서도 유가공제품이나 농산물의 냉장 등 산업분야로의 적용을 확대하고 그 결과를 적극 홍보하고 있다.

맺은말

저온 PCM을 이용한 축열시스템 기술은 지금까지 국내 현장에 적용된 사례가 거의 전무하며, PCM 개발과 아울러 이 분야에 대한 체계적인 기술정립도 미진한 상태이다. 지금까지는 주로 미국과 유럽에서 기술개발이 이루어져 왔으며, 일본이 상업화의 초기단계에 있을 뿐이다. 그러나 저온 PCM을 이용한 기술의 근간이 빙축열시스템과 유사하므로, 이와 관련된 국내 기술력과 다양한 응용분야, 에너지이용 합리화라는 요인 등을 놓고 볼 때 저온 PCM이용 축열기술은 단순한 건물의 냉·난방분야를 넘어, 적용하고자 하는 산업분야의 운용시스템에 따라 경제성 및 생산제품의 품질측면에서 강점을 가지고 앞으로 국내의 축열분야중 비중 있는 역할을 수행할 수 있을 것으로 생각된다. ㉔