

공조용 축열 시스템

임 종 성

Thermal Energy Storage System for Air Conditioning

Jong-Seong Lim



- 임종성(삼성전자 가전연구소)
- 1960년생.
- 열변환 시스템에서의 Energy Analysis 및 열유체를 전공하였으며 출열·축냉 시스템 Metal-Hydride Heat-Pump 및 자연 대류문제에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

에너지의 저장은 에너지 변환 시스템의 사용효율을 높여줄 뿐만 아니라 에너지를 효과적으로 사용할 수 있도록 해준다. 예를 들어, 일반 가정에서는 보일러 탱크를 이용하여 온수를 저장하여 세면, 취사 및 기타 목적으로 사용하며 공장에서는 폐열을 저장하였다가 건물의 난방용으로 활용할 수 있다. 위 방법 외에 전력 소모량이 적은 시기(off peak)에 냉방기를 가동하여 에너지를 저장하였다가 주간에 건물 냉방에 사용하는 축냉방식도 에너지 사용효율을 높이는 방법이 된다. 이와 같이 외부로 버려지는 에너지나 질과 가격 면에서 쉽게 구할 수 있는 시각에 에너지를 저장하였다가 필요시 사용하는 것은 에너지의 효율적인 사용 및 절약에 많은 도움이 된다.

폐열 또는 심야전력을 이용한 공조용 축열 시스템은 미국과 유럽 그리고 일본을 중심으로 발전해왔으며 그 중에서 유럽은 난방용 축열 시스템이, 미국과 일본은 주로 냉방용

축열 시스템이 발전하여 왔다. 국내에도 몇몇 공조기 제작 관련 업체들이 여름철 냉방용 빙축열 시스템을 도입하여 대형 건물들을 위주로 시공한 바 있다.

각 국가마다 계절은 다를지라도⁽¹⁾ 피크(peak) 전력 시간대는 전력의 효율적인 사용과 공급측면에서 크게 문제가 되고 있다. 우리나라의 경우 전력 사용 피크 철은 여름이며 최근 몇 년 사이에 냉방 공조기의 급격한 보급으로 인하여 상승하기 시작한 여름철 전력 수요량은 심각한 문제가 되고 있다(그림 1은 '90년도의 계절별 전력사용최대일을 나타낸다). 따라서 신속한 발전소의 증설이 불가피하게 되었는데, 수년 내에 수기의 대형 용량의 발전소를 건설한다는 것은 커다란 자금적, 기술적 압박이 아닐 수 없다. 그러나 만약 비수기(off peak period)에 에너지를 저장하였다가 피크시(peak period)에 냉방용으로 사용하게 된다면 원자력 발전소 2기 정도는 좀 늦게 완공해도 될 것이다. 이에 초점을 맞추어 한국전력(주)에서는 대형 건물에 대해 심야전력(22시에서 8:00시 사이) 할인율을 적용하여 축열 시스템의 보급

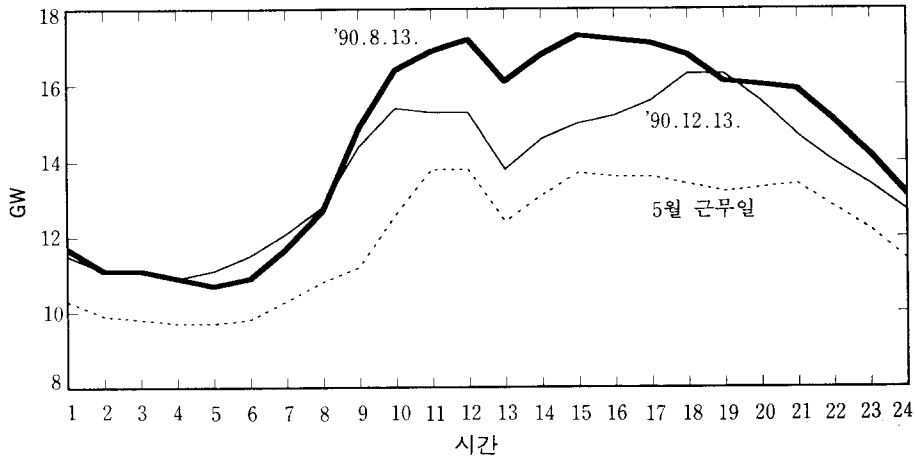


그림 1 1990년, 계절별 전기사용 최대일

에 적극적으로 힘쓰고 있다. 이에 힘입어 최근 몇 년 사이에 국내에도 공조용 축열 시스템 보급이 현저히 늘고 있으며 이에 투자하는 시공 업체도 늘고 있는 추세이다. 그러나 이에 대한 근본 연구는 아직 초보 단계에 머물고 있어 보다 효율적인 시스템 개발을 위해 우리 나름대로의 독자적 기술 개발이 절실히 요구되고 있다.

2. 열 에너지 저장 방법과 공조용 열 에너지 저장 시스템의 특징

열에너지 저장은 크게 뜨거운 에너지(hot energy)와 차가운 에너지(cold energy) 저장을 의미하는 것으로, 합축하여 '축열'이라는 표현으로 나타낼 수 있다. 공조용 축열 시스템의 종류는 축열 및 방열 방법 그리고 운전 방법에 따라 여러가지로 분류될 수 있다.

2.1 열 에너지 저장 방법

열 에너지를 저장하는 방법은 크게 현열(sensible heat)과 잠열(latent heat) 그리고 화학열(thermochemical heat)을 이용하는 등의 세 가지 형태가 있으며 이것들의 특징은 다음과 같다.

(1) 현열에 의한 축열

현열에 의한 에너지의 저장은 물질의 온도를 바꿈으로써 이루어진다. 이 때 에너지의 저장량은 축열 매개체(물질)의 질량과 비열 그리고 온도 변화에 따라 달라지게 된다. 축열재료는 물과 바위 그리고 흙과 세라믹 벽돌 등이 일반적으로 사용되며 열전달 매체로는 물과 공기 그리고 기름 등이 이용된다. 이들중 실질적인 빌딩의 냉난방을 위한 현열 매체로는 비열(1Kcal/Kg°C)이 가장 높은 물이 일반적으로 사용된다. 물을 사용하는 경우, 시스템 구성이 매우 간편해지는 반면 충분한 에너지를 저장하기 위해 큰 부피의 축열조를 필요로 하는 문제가 있다.

현열을 이용한 축열 방법의 한 예로는 지하 대수층을 이용한 축열 시스템(aquifer thermal energy storage system)이 있다. 이것은 1960년 중반부터 미국에서 본격적인 연구를 하였으며 1983년 알라바마 대학에서는 지하 축열 시스템을 이용한 Recreation Ceter 냉방 시스템 시공에 성공하였다.⁽²⁾ 그림 2는 지하 대수층을 이용한 에너지 저장 시스템 구성도이다. 그림에서 보는 바와 같이 겨울(대기온도 6°C 이하)에 냉각탑을 통하여 냉각된 물은 공급 우물(supply well)을

통하여 지하 대수층에 펌핑 저장되며 그 저장된 에너지는 여름에 역 방향으로 회수 우물(recovery well)을 통하여 회수되어 냉방 목적으로 사용된다.

지하 대수층 축열 시스템의 효율은 유량 회수 효율과 열 회복비에 의해 결정되며 시스템 가동 후 초기에는 열 회수율이 낮으나 사이클이 반복될수록 그 효율이 증가되는 특징을 가지고 있다. 이 지하대수층 축열시스템을 기존 냉난방 시스템과 결합해 사용하면 최대 50%까지의 에너지 절감이 가능하다.⁽³⁾

(2) 잠열에 의한 축열

잠열에 의한 축열은 저장 물질의 상변화시(고체에서 액체, 액체에서 고체) 생기는 열

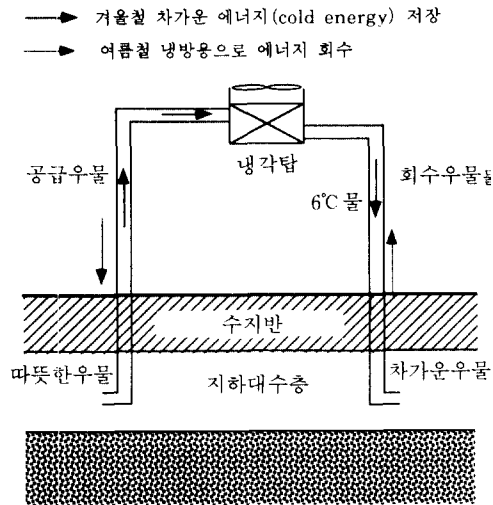


그림 2 지하 대수층 축열시스템

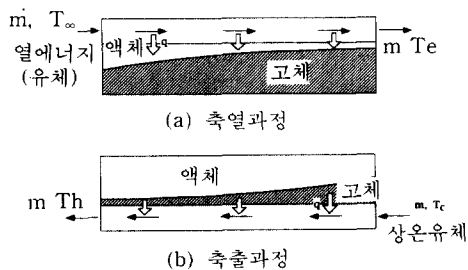


그림 3 잠열을 이용한 축열시스템의 에너지 축열 및 축출과정

의 입출입을 이용하여 열에너지를 저장함으로써 이루어진다. 즉 물질은 온도 변화에 따라 용해 또는 응고되며 이 때 많은 양의 열을 주위로부터 흡수 또는 방출하게 된다. 예를 들어, 물의 경우 고체에서 액체로 되는데 약 80Kcal/Kg의 잠열을 흡수하게 되는데 이 양은 같은 질량의 물이 80°C만큼 온도 변화하는데 필요로 하는 에너지 양이다. 따라서 물질의 상변화시 생기는 잠열을 이용하게 되면 적은 크기의 축열조로도 많은 양의 에너지를 저장할 수 있으며 그 회수 또한 매우 용이하다.

그림 3은 상변화 물질을 이용한 에너지의 저장(a)과 축출과정(b)을 2차원으로 도식화시킨 것이다. 그림의 상기도 축열과정을 나타낸 것으로 외부에서 유입된 뜨거운 열에너지가 상변화 물질(축열재)을 통과하면서 자신이 가지고 있는 열에너지의 일부를 상변화 물질에 전달함으로써 이루어진다. 일반적으로 축열시 사용되는 상변화 물질에는 물, 파라핀(Paraffin), 공용염(Eutectic Salt), Clathrate⁽⁴⁾ 및 폴리에틸렌글리콜(Poly Ethylene Glycol) 등의 다양한 물질이 있다. 이 중에서 가장 일반적인 물질은 물이며 이것은 낮은 융점으로 인하여 냉방 전용에 빙축열 시스템에서 사용된다. 파라핀은 융점이 상온이며 잠열(44Kcal/Kg)도 상당히 커서 냉난방용 공히 사용될 수 있다. 기타 공용염(Eutectic Salt), CLATHRATE 및 폴리에틸렌글리콜(Poly Ethylene Glycol) 등은 소금의 농도, 물분자와 다른 물질과의 결합상태, 그리고 분자 합성량(수)에 따라 그 용해점이 달라지며 그 용도가 결정된다.

(3) 화학열에 의한 축열

화학열(thermochemical)에 의한 에너지 저장은 물질의 화학 반응시 생기는 화학열을 이용한다. 일반적으로 화학반응은 물질이 엔탈피(enthalpy)가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 진행되며 이때 반응 전 물질과 반응 후 물질의 엔탈피 차만큼이 열로 발생하게 된다. 그

리고 역반응이 일어나는 경우엔 열을 주위로 부터 흡수하게 된다. 예를 들어, 수소흡착합금(Metal Hydrides)의 경우는 수소와 결합시 열을 발생시키고 수소를 내놓을 때 열을 흡수한다($M+H \rightleftharpoons MH+Q$)

그림 4는 다른 두 쌍의 수소흡착합금을 열 에너지 저장 매체로 사용하여 축열하는 경우의 과정도이며 그림 5와 같이 온도와 압력의 변화에 따라 작동 매체인 수소가 두 금속 사이를 옮겨 다니게 된다. 이 때 수소흡착합금의 베드(bed), M_1 과 M_2 에서는 열의 입출입이 일어나게 되며 발생된 열은 현열의 형태로 저장된다.⁽⁵⁾ 또한 이러한 수소흡착합금 여러 쌍을 직렬 또는 병렬로 연결하는 경우

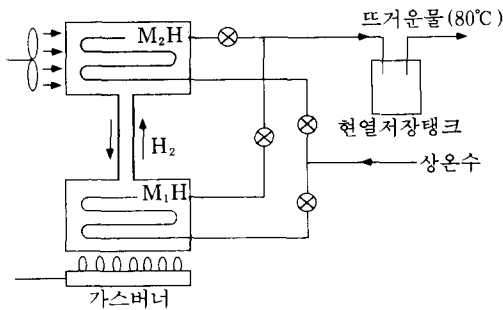


그림 4 수소흡착 합금을 이용한 열 에너지 저장 시스템

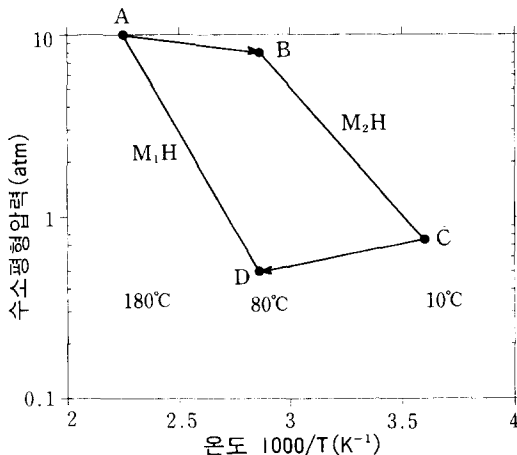


그림 5 수소흡착 압력의 온도 압력 평행곡선

에는 단순히 수소를 M_1 에서 M_2 금속으로 옮겨놓는 것만으로도 에너지 저장이 가능하다. 물론 이 경우에는 에너지 저장이 열의 형태가 아닌 포텐셜 에너지(potential energy) 형태 즉, M_1 금속 측의 엔탈피 증가로 저장되었다고 볼 수 있다.⁽⁶⁾

이 밖에 암모니아와 결합시 열의 입출입이 생기는 금속염(Metallic Salt)이 있으며 이러한 화학열에 의한 축열, 흡착식 또는 흡수식 축열 방식의 장점은 적은 온도차로도 반응이 가능하며 설치 가동 후 오랜 시간이 지나도 그 축열 효율이 떨어지지 않는다는 데 있다.

2.2 축열식 공조용 시스템의 구조와 특징

공조용 축열시스템은 폐열이나 심야전력을 이용하여 열 에너지를 앞에서 언급한 방법으로 저장하였다가 필요시 이 에너지를 축출하여 건물의 냉난방 목적으로 회수하여 쓰는 공조 시스템이다. 현재 건물의 공조용으로 가장 일반적으로 사용되는 축열 시스템은 잠열 축열 방식이다. 그림 6에 나타난 바와같이 축열식 공조용 시스템은 냉동기와 축열조 그리고 실내측 공조기로 구성된다. 여기서 사용되는 냉매는 일반적으로 프레온 가스, 저온에서 얼지 않는 브라인 그리고 실내측 공조기 열전달 매체인 물 등이 쓰인다. 이것들은 압축기와 펌프들에 의해 강제 순환되며 열에너지를 실내에 전달함으로써 우리가 원하는 냉방(또는 난방) 효과를 얻을 수 있다.

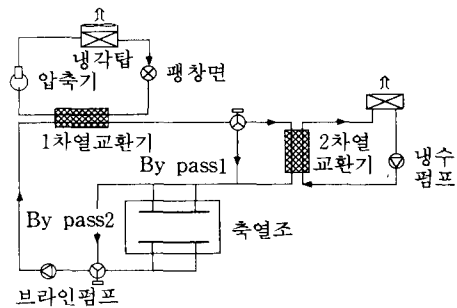


그림 6 축열식 공조 시스템

축열식 냉방 시스템의 경우, 심야에 냉동기를 가동하여 축열조에 에너지(cold energy)를 저장하였다가 필요시 주간에 이 에너지를 축열조로부터 회수하여 실내의 냉방용으로 사용한다. 이 때 시스템의 운영은 상황에 따라 여러 형태로 할 수 있으며 그 구체적인 작동 원리 및 운전 방식은 다음과 같다.

먼저 에너지 저장을 위한 축열 운전시 냉동기를 가동하여 1차 냉매(Freon gas)를 저온(0°C 이하)으로 만들며 이 때 얻어진 열에너지를 1차 열교환기를 통하여 2차 냉매인 브라인에 전달한다. 이 때 브라인은 2차 열교환기를 거치지 않고 Bypass 1를 통하여 축열조로 직접 흐르게 되어 에너지가 축열조에 저장된다.

방열 단독 운전의 경우, 냉동기는 가동되지 않고 브라인은 펌프에 의한 강제순환으로 축열조 내의 관으로 흐르게 되며 이 때 축열조 축열 매체로부터 저장된 에너지를 축출하게 된다. 그리고 회수된 열 에너지는 2차 열교환기를 통하여 실내측 공조기에 전달됨으로써 냉방이 실시된다.

방열 동시 운전의 경우, 냉동기와 브라인 펌프는 동시 가동된다. 브라인은 에너지를 축열조로부터 축출함과 동시에 1차 열교환기를 통하여 여분의 에너지를 공급받아 냉방에 충분한 온도(7~10°C)로 되며 이 차가운 에너지(cold energy)는 2차 열교환기를 통해 냉방으로 이용된다. 이것은 일반적으로 축열조 방열 능력이 냉방능력에 미치지 못하는 경우 실시하는 운전 방식이다.

냉동기 단독운전의 경우, 브라인은 1차 열교환기로부터 2차 열교환기 그리고 Bypass 2를 통하여 흘러 실제로 축열조는 아무런 역할을 하지 않는다. 이는 축열조의 방열이 완료되었거나 축열조의 방열이 임의 또는 자연적으로 지연되었을 경우에 실시한다.

난방 목적으로 축열식 공조용 시스템을 이용하고자 할 때는 냉방기의 가동을 열펌프

(heat pump) 형태로 하거나 폐열을 이용하여, 뜨거운 에너지를 2차 냉매에 공급한다. 이 때 축열조 내의 축열 물질은 난방에 적합한 용해점 물질을 사용하며 축열시 축열조 내의 상변화 물질은 액체로 되며 방열시에는 고체화되어 잠열을 난방의 에너지원으로 공급할 수 있게 된다.

2.3 방열 방식에 의한 축열식 공조용 시스템의 분류

축열조에 저장된 에너지를 어떻게 축출(방열)하는가 하는 것은 축열 과정과 더불어 중요한 과정이다. 방열 방식에는 일반적으로 직접 접촉 방식과 간접 접촉 방식이 있다.

(1) 직접 접촉 방식

직접 접촉 방열 방식은 그림 7에 나타난 바와 같이 방열시 축열 매체가 2차측 냉매 역할을 하는 방식이다. 다시 말하면 그림에서 냉방의 경우 축열 매체(물)는 축열조 내에서 축열관의 표면에서부터 응고가 진행되며 방열시에는 열교환기를 통해 주입된 상대적으로 높은 온도의 액체상태 냉매(물)에 의하여 축열관 표면의 바깥쪽 고체상태로부터 용해가 시작된다.

이 방식의 경우는 액체 상태의 냉매가 고체상태의 냉매와 항상 직접 접촉을 하므로 열 전달 효율이 좋다. 그러나 단점은 방열 동시 운전을 하거나 냉동기 단독운전을 위해

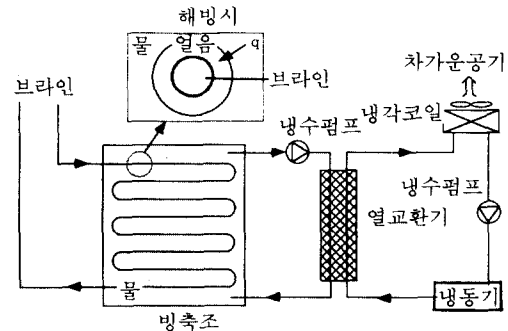


그림 7 직접접촉식 냉방 방식

서 냉동기의 2원화가 필요하다는 단점이 있다.

(2) 간접 접촉 방식

간접 접촉 방열 방식은 축열 매체와 냉매가 동일할 필요가 없다. 그림 8에 나타난 빙 축열 시스템의 경우 축열조 내에 축열 매체로 일반적으로 물이 사용되며 방열 냉매로는 브라인이 사용된다. 축열 운전시 물의 응고는 브라인 관의 표면에서 시작되며 방냉시에도 브라인 관의 표면에서부터 용해가 진행된다. 이 방식은 방냉시 관과 얼음 사이에 물이 차게 되므로 열전달 효율이 좋지 않은 반면 한 개의 냉동기로 필요로 하는 모든 종류의 운전을 할 수 있어 시스템의 소형화가 가능하여 직접 접촉식보다 경제적이다.

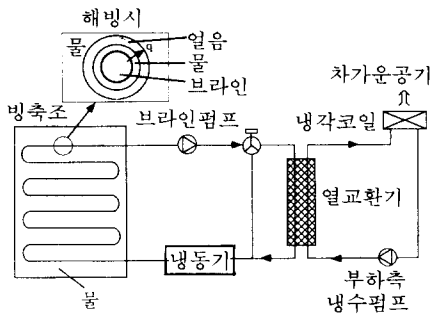


그림 8 간접접촉식 방냉 방식

3. 축열시 상변화과정 분석

앞에서는 여러가지의 에너지 저장방법과 축출방법들에 대하여 논하였다. 이러한 여러 방법 중 현재 가장 경제성이 있으며 열역학 효율이 높은 것은 잠열을 이용한 상변화 물질에의 축열 방식이다.

그림 9는 이러한 축열과정을 2차원으로 도식화시킨 것이다. 폐열 또는 외부에서 만들어진 열 에너지(T_{∞})는 축열조 내를 지나면서 축열제를 액체상태에서 고체상태로 변환시키게 되며 그 때 축열조는 상변화된 물질의 양에 비례한 잠열 에너지를 축적하게 된다. 이러한 축열과정 중에 생기는 열전달 과정으로 축열조 내에는 액체와 고체 상태의 경계면이 생기게 되며 그 경계면은 시간이 지날수록 고체상태의 축열제 쪽으로 전진하게 된다. 그림 9에 표시된 여러 기호중 \dot{m} 은 외부에서 유입되는 1차 물질(energy source)의 유입량의 비율(Kg/sec)을, C_p 는 정압 비열(J/KgK), T 는 온도(K)를 나타낸 것이다. 축열제의 용해온도(T_m)가 외부에서 유입된 유체의 관내에서의 온도(T_f)보다 낮을 경우, $T_m < T_f$, 축열제의 용해는 상부에서 하부로 진행되게 된다. 이 과정은 용해과정(melting process)이라 불리며 이 때의 용해

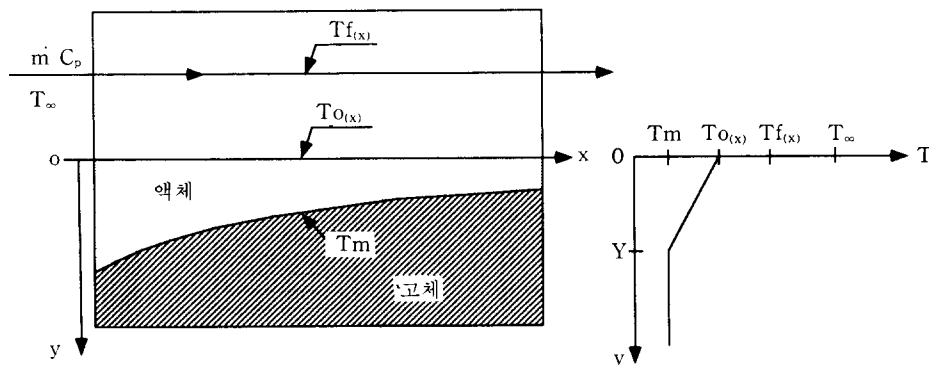


그림 9 축열조 내에서의 상변화 과정

속도와 축열제 내의 온도 분포는 축열 및 축출과정 분석에 중요한 역할을 한다.

시간에 따른 축열조 내에서의 용해과정은 앞에서 언급한 여러 기호들을 이용한 축열조 내의 열전달 및 에너지 보존 방정식을 이용하여 구할 수 있다.⁽⁷⁾ 여기에서 액체층을 통한 온도 분포는 선형이라 가정하여 간략한 열전달 식을 세울 수 있다.⁽⁸⁾ 이중 가장 관심이 되는 액체와 고체의 경계면과 축열조 내에서의 온도분포는 그림 10(a)와 10(b)에 나타난 바와 같으며 여기에 사용된 무차원 변수들의 정의는 다음과 같다. 무차원화된 온도는 식 (1)과 같다.

$$\theta = \frac{T - T_m}{T_\infty - T_m}, \quad \theta_0 = \frac{T_0 - T_m}{T_\infty - T_m} \quad (1)$$

무차원화된 액체와 고체 경계면은 식 (2)와 같다.

$$\sigma = Y \frac{h}{k} \quad (2)$$

여기에서 Y 는 상부로부터 축열제의 액체와 고체 경계면까지의 거리, k 는 축열제의 열전도도 그리고 h 는 용해 과정 중의 열전달 상수(heat transfer coefficient)를 나타내고 있다. 그리고 무차원화된 시간과 위치는 식

(3)과 같다.

$$\tau = t \frac{h^2 (T_\infty - T_m)}{k \rho h_{s1}}, \quad \xi = x \frac{h \rho}{m c_p} \quad (3)$$

여기서, p 는 열원(T_∞)에 접하는 축열제 주위 거리(perimeter), ρ 는 축열제의 밀도 그리고 h_{s1} 은 용해 잠열(latent heat)을 나타낸다.

그림 10(a)는 무차원 변수의 정의(식 1~3)를 이용하여 액체와 고체의 경계면(Y)을 그리고 그림 10(b)는 외부에서 유입되는 1차 물질(energy source)과 접하는 축열조의 표면에서의 온도를 각각 시간(τ)과 위치(ξ)의 무차원 함수로 나타낸 그림이다.

그림 10(a)의 경우, 축열제 액체면의 두께(σ)는 위치(ξ) 방향으로 감소되며 시간(τ)이 지남에 따라 증가한다. 그리고 같은 경향들은 그림 10(b)에 있어서도 관찰되며 이러한 결과들은 축열조의 크기와 축열 물질의 용해온도를 결정하는데 중요하게 이용된다.⁽⁹⁾

4. 맺음말

현재 세계가 당면하고 있는 에너지 문제에 현명하게 대처하기 위해선 폐열과 심야 전력을 활용한 축열 시스템의 저변 확대가 시급

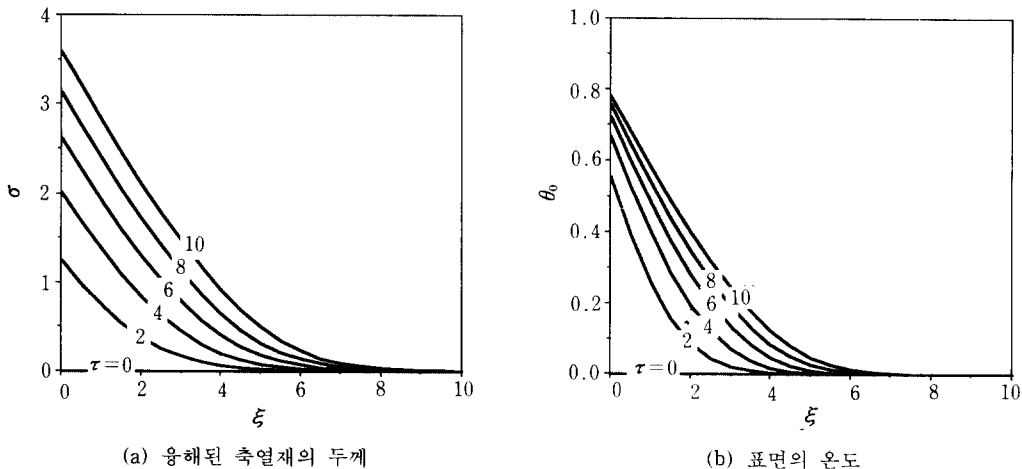


그림 10 용해된 축열제의 두께와 표면온도

하다. 특히 우리나라와 같이 냉난방으로 인한 계절별 전력 수요폭이 심한 나라에서는 공조용 축열 시스템 개발이 필요하다. 현재 우리나라에 보급되고 있는 것은 빙축열 시스템이 대부분인데 지역과 조건 그리고 용량에 따라 좀더 다양한 시스템 선택이 필요하다. 그리고 에너지의 축출 방법에 있어서도 전체 공조 시스템의 특성과 효율을 특히 고려해야 할 것이다.

축열 시스템의 핵심은 무엇보다도 축열조의 소형화(compact)와 축열 효율이다. 즉 되도록 작은 크기의 축열조로써 최대한 많은 에너지를 저장하며 또한 최대한 많은 에너지를 회수하는 것이다. 일반적으로 축열조에 열을 저장 그리고 축출하는 과정에는 에너지(useful energy)의 손실이 생기게 된다. 이는 열전달 과정 중에 시스템 내의 엔트로피의 증가로 생기는 필연적인 손실로 이것을 최소로 하는 설계 기술이 필요하다.⁽⁹⁾

현재 한전에서 실시하고 있는 여러 *정책에 힘입어 앞으로 2~3년 내에 공조용 축열 시스템 보급은 급격히 향상되리라 전망된다. 이 기회에 단순히 외국 기술에 의존하지 말고 우리에게 적합한 공조용 시스템 개발을 서두를 필요가 있다. 이를 위한 기업의 과감한 기술 투자와 학계의 관심이 절실히 요구된다.

* 설비지원금과 시간별 전력요금 자동화

참고문헌

- (1) Bosio, A., 1992, "The Advantage of Combining Hydraulic and Thermal Energy in Power Plants," Journal of Energy Resources Technology, Vol. 114, pp. 91~94.
- (2) Tomlinson, J. J. and Kannberg, L. D., 1990, "Thermal Energy Storage," ASME Magazine, pp. 68~72.
- (3) Karkheck, J., Dowell, J. and Beardsworth, E., 1977, "Prospects for District Heating in the United States," Science Vol. 195, pp. 948~955.
- (4) "Clathrate Thermal Energy Storage System," U.S. Patent No. 4821794, by Thermal Energy Storage Inc., 1989.
- (5) "Hot Water Supply Unit," U.S. Patent No. 4589479, by Matsushita Electric Industry Co., 1986.
- (6) "수소 흡착 합금을 이용한 축열 축냉 장치, 한국 특허 출원 번호 92-3780, 임종성, 삼성전자.
- (7) Jong-S. Lim, 1991, "Thermodynamic and Heat Transfer Optimization of Energy Storage and Extraction Processes," Ph. D. Thesis, Duke University.
- (8) Bejan, A., 1989, "Analysis of Melting by Natural Convection in an Enclosure," International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 5, pp. 245~252.
- (9) Lim, J. S., Bejan, A. and Kim, J. H., 1992, "Thermodynamic Optimization of Phase-Change Energy Storage Using Two or More Materials," Journal of Energy Resources and Technology, Vol. 114, pp. 84~90.