

심야전력이용 냉방시스템용  
 캡슐형 빙축열조에 대한 1차원 모델 축방냉 성능 시뮬레이션

이경호, 주용진, 최병윤  
 한국전력공사 전력연구원

Performance Simulation of One-Dimensional Ice Storage Tank  
 Model for Refrigeration System Using Night Electricity

Kyoung-Ho Lee, Yong-Jin Joo, and Byoung-Youn Choi  
 Korea Electric Power Research Institute

Abstract

This paper describes one dimensional transient modeling of encapsulated ice storage tank and its experimental validation. This model simulates the performance of the tank for charge and discharge process with brine mass flow operating conditions.

사용기호

$A_c$	캡슐의 열전달 면적( $m^2$ )	$T_{ice}$	캡슐내 얼음의 온도( $^{\circ}C$ )
$C_p$	물의 비열(kcal/kg $^{\circ}C$ )	$T_{in}$	빙축열조 유입 브라인 온도( $^{\circ}C$ )
$C_{pb}$	브라인의 비열(kcal/kg $^{\circ}C$ )	$T_{out}$	빙축열조 유출 브라인 온도( $^{\circ}C$ )
$h_{fg}$	물의 융해잠열(kcal/kg)	$t^*$	특성시간(hr), 빙축열조체적/체적유량
$k$	입의의 계산단계	$U_c$	캡슐의 열전달계수( $W/m^2K$ )
$n$	입의의 검사체적내 캡슐의 개수	$u_i$	전브라인유량에 대한 빙축열조로의 유량비
$M_{ice}$	캡슐내 얼음의 질량(kg)	$V_{cv}$	입의의 검사체적의 체적( $m^3$ )
$T_w$	캡슐내 온도( $^{\circ}C$ )		
$T_i$	입의의 검사체적 유입 브라인 온도( $^{\circ}C$ )	그리스	문자
$T_b$	입의의 검사체적내 브라인 온도( $^{\circ}C$ )	$\rho_w$	물의 밀도(kg/ $m^3$ )
$T_o$	입의의 검사체적 유출 브라인 온도( $^{\circ}C$ )		

1. 서론

빙축열시스템은 여름철 피크 전력수요를 심야시간대로 이전을 통한 부하 평균화를 위하여 이용되고 있으며, 비축열식 냉방시스템에 비하여 초기 투자비용이 많이 소요되므로 주요 구성요소의 용량 감소를 위한 개발이 필요하고, 운전에너지 비용절감을 위해서는 경제적 운전 전략에 대한 연구가 필요하다. 이를 위해서는 시스템의 중요 구성요소 중의 하나인 빙축열조에 대한 성능 모델링을 통한 시뮬레이션이 실험적인 연구와 함께 병행되어야 한다. 현재까지 관외차빙형에 대한 성능 모델은 많이 개발이 되어오고 있지만, 동적제빙형과 캡슐형

빙축열조에 대한 모델링 연구는 많이 발표되고 있지 않다. Arnold [1]는 제조회사에서 제시한 캡슐의 열전달계수를 이용하고, 빙축열조를 미시적 규모와 거시적 규모로 나누어 모델링을 하였으나, 이에 대한 검증이나 자세한 빙축열조에 대한 성능분석은 이루어지지 않았다. 이에 이어 Arnold[2]는 단일 캡슐에 대한 축방냉 실험을 통하여 축방냉 초기의 열전달계수는 말기의 열전달계수에 비하여 약 4배 가량 더 큰 것을 확인하였다. 또한 Arnold[3]는 아이스 캡슐에 대하여 실험적인 연구를 수행하였다. 이를 통하여 축냉 및 방냉과정에서의 열전달계수는 과정이 진행되는 동안 현격하게 변화하는 것을 확인하였고, 단일 캡슐의 성능은 동적상사(dynamic similarity)가 만족되고 과냉각에 대한 정보를 알고있다면 빙축열조 성능을 예측하는데 적용이 가능하다고 제시하였다. 본 논문에서는 Arnold의 실험으로부터 얻은 캡슐의 열적 특성을 이용하여 캡슐형 빙축열조를 1차원으로 단순화시켜 모델링을 하였으며, 이를 1200ton-hr급 빙축열조의 시험결과와 비교하여 그 유용성을 확인하였고, 시뮬레이션을 통하여 운전조건에 따른 빙축열조의 축방냉특성을 분석하였다

## 2. 캡슐형 빙축열조 모델

### 2.1 캡슐의 축방냉 특성

브라인으로 채워진 캡슐형 빙축열조에는 수 많은 캡슐이 담겨져 있고, 캡슐 내에는 물이 들어 있다. 축냉과정에는 저온의 브라인이 캡슐로부터 열을 전달받으면서 캡슐내에는 얼음이 형성되며, 방냉과정에는 부하로부터 온도가 상승된 브라인이 캡슐을 통과하면서 캡슐내의 얼음이 용융에 의한 잠열을 받아 냉각되어 흘러 나가게 된다. 축냉과정에서는 얼음의 양이 많아 질수록 열전달계수가 감소하며, 방냉과정에서는 용융이 진행됨에 따라 열전달계수가 작아지게 된다.[2][3] 이러한 결과를 캡슐의 열전달계수 모델로 이용하였다.

### 2.2 빙축열조 모델

실제 상업용으로 이용되고 있는 캡슐형 빙축열조 유동형상을 Fig.1에 나타내었다. 브라인은 빙축열조의 상부로부터 잘 분배되어 하부로 흘러 내려가 출구로 나가게 된다. 문제의 간단화를 위하여 본 연구에서는 유동방향으로만 캡슐의 상태가 변화하며, 유동방향에 직각방향으로는 상태가 같은 것으로 가정하였다. 또한 캡슐간의 상대적인 위치이동은 없는 것으로 단순화시켜 해석하였다. 축냉 및 방냉과정에 대하여 각각 캡슐내의 물의 온도가 감소하여 얼음이 생기기 전까지의 현열과정, 얼음으로 상변화되는 잠열과정 그리고 얼음의 온도가 낮아지는 현열과정으로 나누어 생각할 수 있다. 각각의 과정에 대하여 빙축열조를 여러 개의 검사체적으로 나누고, 임의의 검사체적에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

#### 현열과정(물의 냉각)

$$\rho_w V_{ic} C_p P \frac{dT_w}{dt} = U_c m A_c (T_i - T_w) \quad , T_w(0) = T_b(0) \quad (1)$$

$$\dot{m}_b C_{pb} \frac{dT_b}{dt} = U_c A_c (T_w - T_o) + \dot{m}_b C_{pb} (T_i - T_o) \quad , T_b(0) = T_{out}(0) \quad (2)$$

#### 잠열과정(물-얼음의 상변화과정, $t \geq t_{ch}$ )

$$\dot{m}_b C_{pb} \frac{dT_b}{dt} = U_c A_c (T_w - T_o) + \dot{m}_b C_{pb} (T_i - T_o) \quad , M_{ice}(t_{ch}) = 0 \quad (3)$$

$$h_{fg} \frac{dM_{ice}}{dt} = U_c A_c (T_w - T_i) \quad (4)$$

현열과정(얼음의 냉각)

$$\rho_w V_{cv} C_p P \frac{dT_{ice}}{dt} = U_c n A_c (T_i - T_{ice}) \quad (5)$$

$$\dot{m}_b C_{pb} \frac{dT_b}{dt} = U_c A_c (T_{ice} - T_o) + \dot{m}_b C_{pb} (T_i - T_o) \quad (6)$$

위의 식(1)부터 (6)까지에 대하여  $\Delta t$ 의 시간간격에 대하여 임의단계  $k$ 와 다음 단계  $k+1$ 로 차별화하여 각 온도 해를 구하였다.

### 3. 모델 시뮬레이션 및 검증

안성 N-컨츄리클럽에 설치된 1200ton-hr급(냉동기 120ton) 빙축열시스템으로부터의 단위 시간당 축냉 및 방냉 성능결과와 모델계산결과를 비교하여 Fig.2에 나타내었다. 축냉초기 및 방냉초기를 제외하고는 잘 일치하고 있어, 모델의 유용성을 확인할 수 있다.

### 4. 축방냉 성능 분석

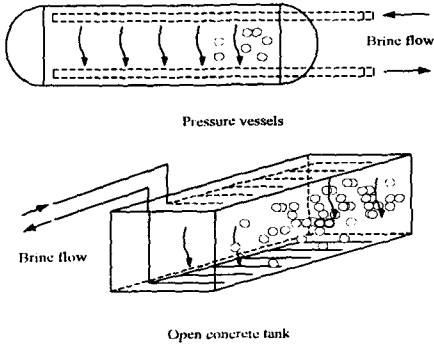
빙축열조의 축냉 및 방냉시의 성능을 수치적으로 분석하기 위한 방법으로, 1200ton-hr용량 빙축열조와 120ton 냉동기의 조건으로 축냉시 탱크3방밸브의 개도는 100% 개방, 방냉시 개도는 달리하여 빙축열조를 통과하는 브라인 유량조건에 따른 성능을 분석하였다. 빙축열조의 초기 브라인 저장온도는 10℃로 하였으며, 축냉시 냉동기 제빙효율은 73%로 두었다. 시간에 대해서는 특성시간  $t^*$ 를 전유량에 대한 빙축열조체적으로 정의하고, 시간을 이 특성시간으로 나누어 무차원화하였다. 무차원 잠열량은 빙축열조의 설계잠열용량으로 각 시간대 별로의 잠열량을 나누어 무차원화한 값이다. 무차원시간에 대한 잠열량의 변화를 Fig.3에 나타내었고, 무차원시간에 대한 축냉량 및 방냉량을 Fig.4에 나타내었다. 여기에서 매개변수를 빙축열조로 흘러들어가는 유량의 전유량의 비( $u$ )으로 하였다. 유량이 작을수록 방냉시간이 길어지고, 유량이 증가할수록 방냉시간이 짧아지고 있음을 알 수 있다. 한편 순간방냉량을 비교하여 보면, 전유량으로 흐를 때 초기 방냉량은 가장 크게 나타나고 유량이 감소할수록 방냉량이 작게 나타나고, 시간이 지날수록 유량에 의한 차이는 크게 나타나지 않음을 알 수 있다.

### 5. 결론

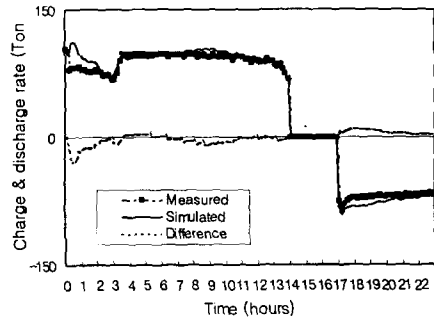
본 논문에서는 정적제빙형 빙축열조의 한 형태인 캡슐형 빙축열조에 대하여 1차원 비정상 상태의 모델에 대한 축방냉 계산결과를 실제 빙축열조로부터의 시험결과와 비교하여 유용성을 검증하였으며, 방냉시 유량변화에 따른 축냉 및 방냉과정에 대한 시뮬레이션을 수행하여 비교분석하였다. 빙축열조로의 브라인유동은 입구에서의 분배관에 의하여 빙축열조로 거의 균일하게 흐르는 것으로 가정한 1차원 모델이 실제 빙축열조의 특성을 근사하게 예측할 수 있으며, 방냉시 빙축열조로 흐르는 유량이 많을수록 방냉초기 방냉량에 큰 영향을 미치게 된다.

**참고문헌**

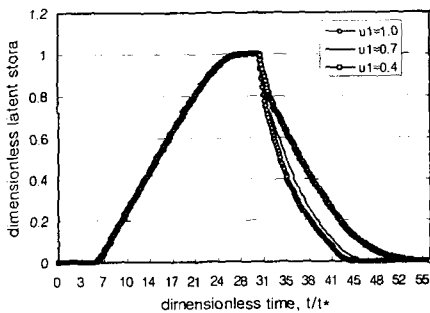
1. D.Arnold : "Dynamic simulation of encapsulated ice stores, part I - the model", ASHRAE Transactions AT-90-13-5, pp.1103-1110, 1990
2. D.Arnold : "Heat transfer characteristics of ice capsules for encapsulated cool storage systems", ASME/JSME Thermal engineering proceedings, Vol.3, pp.335-341, 1991
3. D.Arnold : "Laboratory performance of an encapsulated ice store", ASHRAE Transactions IN-91-20-3, pp.1170-1178, 1991
4. Design guide for cool thermal storage, Charles E. Dorgan & James S. Elleson, ASHRAE, 1993



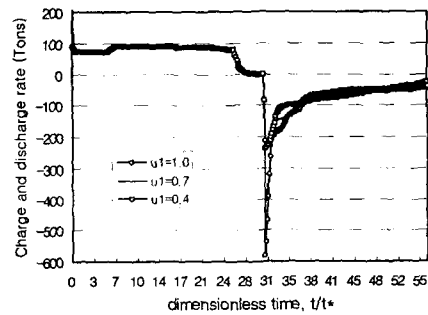
**Fig.1 Schematic of ice storage tank**



**Fig.2 Comparison of measured and simulated charge & discharge rate**



**Fig.3 Dimensionless latent storage for charge and discharge**



**Fig.4 Charge and discharge rate with dimensionless time**