

2-PCM 잠열축열 시스템의 열역학적 성능

이 세 균*, 우 정 선**, 이 재 효***, 김 한 덕****

Thermodynamic performance of 2-PCM latent heat thermal energy storage system

S. K. Lee, J. S. Woo, J. H. Lee, H. D. Kim

(Received July 21, 1999; revision received October 8, 1999)

ABSTRACT

This paper investigates the thermodynamic performance of latent heat thermal energy storage system using two phase change materials(2-PCM system). The thermodynamic merit of using 2-PCM is clear in terms of exergetic efficiency, which is substantially higher than that of 1-PCM system. Optimum phase change temperature to maximize the exergetic efficiency exists for each case. The heat transfer area ratio of high temperature storage unit, X , becomes another important parameter for 2-PCM system if the phase change temperatures of given materials are different from those of optimum conditions. It is a good approximation for X_{opt} to be 0.5 when optimum phase change temperatures are used. Otherwise X_{opt} is determined differently as a function of given phase change temperatures.

Key words : Exergetic efficiency(엑서지효율), Latent heat(잠열), Thermal energy storage(축열), PCM(상변화 물질)

기 호 설 명

A : 열전달 면적
 $(\dot{m}c_p)_c$: 축열시 열용량을
 $(\dot{m}c_p)_d$: 방열시 열용량을
 N : 전달단위수
 Q : 축열 또는 방열에너지
 Q_r : 에너지 회수율, 식(25)

q : 열전달율
 T : 온도
 T_d : 무차원온도
 T_h : 열원온도
 T_l : 축열시 유출온도, Fig.3
 T_{ll} : 유출온도, Fig.5
 T_m : 상변화온도
 T_{mr} : 상변화 온도비
 T_0 : 사상태온도
 T_{out} : 축열시 유출온도, Fig.1
 T_s : 방열시 유출온도, Fig.1

* 충북대학교 기계공학부
 (E-mail address : leesk@trut.chungbuk.ac.kr)

** 한국에너지기술연구소

*** 건국대학교 기계공학부

**** 충북대학교 대학원

- T_u : 방열시 유출온도
 T_x : 축열시 중간온도, Fig.3
 T_y : 방열시 중간온도, Fig.3
 ΔT : 온도차
 t_c : 축열시간
 t_d : 방열시간
 t_{cc} : 변경된 축열시간, 식(29)
 t_{ll} : 추가 가동시간, 식(28)
 X : 열전달 면적비, 식(12)

그리스문자

- Φ : 엑서지 효율

하첨자

- d : 무차원 또는 방열
 c : 축열
 opt : 최적
 1 : 고온축열실
 2 : 저온축열실

1. 서론

에너지의 과도한 이용이 환경에 미치는 부정적인 영향과 더불어 에너지의 합리적 이용에 관한 관심이 점차 높아지고 있으며 에너지 저장시스템은 이러한 관점에서 중요한 장치로 인식되어 가고 있다. 에너지는 그 수요와 공급에 있어서 시간, 장소, 용도 등의 요인들에 의하여 흔히 불일치 현상이 발생되며 이러한 경우에 수요와 공급을 조화롭게 연결시켜주는 역할이 축열시스템에 의하여 수행된다.

잠열축열시스템은 에너지 저장 수단으로 상변화물질인 PCM(phase change material)의 용해잠열을 이용한 시스템으로 현열축열에 비하여 비교적 다량의 축열이 가능하며 열의 흡수와 방출이 일정온도에서 이루어지는 등 매우 우수한 축열시스템이다.

축열시스템의 성능에 관하여서는 비교적 근래에 발표된 열역학 제2법칙 해석에 관한 연구⁽¹⁻³⁾

가 상당한 주목을 받고 있다. 특히 잠열축열 시스템에서는 엑서지 효율을 최대화 하는 최적 상변화온도가 존재하기 때문에 더욱 흥미롭다. 가장 단순한 축열조건에서 이 최적 상변화온도 $T_{m,opt}$ 는 사상태(dead state)온도 T_o 와 열원온도 T_h 에 의하여 다음식과 같이 표현된다⁽⁴⁾.

$$T_{m,opt} = (T_o T_h)^{1/2} \quad (1)$$

위 식은 단일 PCM 축열시스템에서 축열과정만 고려하고 방열과정의 비가역현상은 무시하였을 경우에 얻어질 수 있는 결과이며, 실제적인 조건을 부여함에 따라 $T_{m,opt}$ 는 변해 나간다.

여기서 실제적인 조건이란 축열실 내부에서 발생하는 열원과 축열매체 사이의 열전달에 의한 비가역 현상을 축열과 방열과정에서 어떻게 모델링 하는가에 따라 주로 결정되는 요소들이다. De Lucia 와 Bejan⁽⁴⁾은 축열실 내부로 유입되는 열원유체에 잘 혼합된 조건(well mixed condition)을 적용하여 균일온도로 가정하고 방열 과정은 가역과정으로 이루어지는 잠열축열 모델을 설정하여 열역학 제2법칙 해석을 수행하였고 Aceves 등⁽⁵⁾은 열원유체가 축열실 내부에서 지수적 온도분포를 갖는 것으로 가정하여 축열과 방열과정에서의 엑서지 효율을 규명한 바 있다.

본 연구에서는 De Lucia 등⁽⁴⁾이 설정한 균일온도 모델에 비가역 손실이 있는 실제의 방열과정을 추가하고 또 해석범위도 최적상변화 온도와 최적에서 이탈 된 경우를 다 고려하여 보다 포괄적인 열역학적 해석을 수행한다.

축열실 내부의 온도분포에 관하여 언급하면 균일온도 모델은 유량이 적고 검사체적 내부에 포함된 양은 많은 경우에 적당하고 더욱이 열전달 성능을 향상시키고자 휘젓기 등의 교란이 있을 경우에는 더욱 적절하다. 그 외의 경우에는 지수적 분포 모델이 적당하다고 사료된다.

잠열축열시스템의 열역학적 성능을 향상시키기 위하여서는 상변화 온도가 각기 다른 여러개의 축열매체를 사용하는 다매체 잠열축열시스템이 있다^(6,7). 다매체 잠열축열시스템에서도 최적 상변화 온도는 열역학적 해석의 주요 관심사가 된다. 본 연구에서는 이러한 다매체 시스템 중 가장 단순한 2매체 잠열축열시스템을 해석대상으로 하였

고, 이러한 2매체 시스템에서는 두 축열실의 상대적 크기의 조절이 성능향상을 위한 새로운 변수로 나타남을 보이게 된다.

축열시스템의 엑서지 출력 최대화에 관심을 갖는 것은 이 출력을 단순난방, 또는 가열작업이 아닌 동력용(power generation)으로 사용하려고 할 때 의미가 있는 것임을 밝혀준다. 또한 본 연구에서는 축열매체의 수에 따라 1-PCM 시스템, 2-PCM 시스템으로 표기하기로 함도 아울러 밝혀준다.

2. 잠열축열제에 의한 에너지회수 모델

2-PCM 시스템을 논하기에 앞서 1-PCM 시스템을 먼저 설명한다. Fig. 1은 1-PCM 시스템의 에너지회수에 관한 개략도이다. 축열매체는 온도 T_m 에서 상변화가 이루어지며 열원유체의 온도는 T_h , 축열시의 열용량은 $(\dot{m}c_p)_c$ 이다. 또한 위에서 언급한 바와 같이 축열실 내부의 유체온도는 잘 혼합된 균일온도이다. 즉 열원유체는 축열실 내부로 유입되어 즉시 균일온도인 T_{out} 이 되며 유출도 이 온도로 이루어진다. 유출된 후에는 더 이상 이용되지 않고 주위로 버려져 사상온도인 T_o 로 확산된다.

잠열형태로 저장된 열에너지는 일정시간 단열 상태에서 보관되었다가 온도 T_o , 열용량을 $(\dot{m}c_p)_d$ 인 유체에 의하여 그림에서 보는바와 같이 온도 T_s 로 회수된다. 여기서 하첨자 c 와 d 는 각각 축열(charge) 및 방열(discharge)을 의미한다.

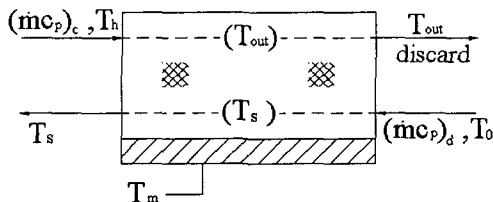


Fig. 1 Schematic of 1-PCM charge-discharge cycle.

PCM은 켈솔 또는 용기내부에 들어 있으며 외부 유체와의 사이에 열전달을 q 는 접촉면적을 A , 온도차를 ΔT 라 하면 $q = UA\Delta T$ 로 나타 낼 수 있다. 여기서 U 는 총괄열전달 계수로 축열 또는 방열 과정중에 일정한 것으로 가정한다. 그러나 축열과 방열사이에서는 다를 수 있다.

작동유체의 정상상태 유동이 가능하도록 축열-방열 사이클은 축열매체의 상변화구간에서만 작동되도록 하며 축열시 저장된 에너지는 전부 방열시 회수되도록 한다. 따라서 다음 식이 성립한다.

$$(\dot{m}c_p)_c(T_h - T_{out})t_c = (\dot{m}c_p)_d(T_s - T_o)t_d \quad (2)$$

여기서 t_c , t_d 는 각각 축열과 방열시의 가동시간이다. 축열과 방열과정 사이에 위와 같은 에너지 균형이 이루어지지 않으면 시스템의 가동회수가 늘어남에 따라 잠열구간에서 벗어나 현열구간으로 갈 수가 있고 그러면 시스템은 일정온도의 출력을 내지 못하게 된다. 이러한 비정상 가동은 축열성능의 감소 뿐 아니라 출력을 동력생산용으로 사용할 때 효율감소의 주요 원인이 된다.

본 연구에서는 유체유동에 따른 압력강하와 이에 따른 비가역 손실(irreversibilities)은 작은 것으로 가정하여 무시한다.

이상과 같은 가정하에, 전달단위수(number of transfer units) N 을 식(3)과 같이 정의하면 열전달은 식(4)와 같이 표현된다.

$$\left(\frac{UA}{\dot{m}c_p}\right)_c = N_c \quad (3)$$

$$N_c(T_{out} - T_m) = T_h - T_{out} \quad (4)$$

식(4)를 약간 변형하면

$$\frac{N_c}{1 + N_c}(T_h - T_m) = T_h - T_{out} \quad (5)$$

여기서 하첨자 c 는 축열(charge)을 의미한다.

방열시에도 이와 비슷한 관계가 성립하며 다음과 같이 표현된다.

$$\left(\frac{UA}{mC_p}\right)_d = N_d \quad (6)$$

$$\frac{N_d}{1+N_d}(T_m - T_0) = T_s - T_0 \quad (7)$$

여기서 하첨자 d 는 방열(discharge)을 의미한다.

이상을 종합하여보면 온도 T_h 의 열원유체로부터 열에너지를 공급받아 축열하였다가 온도 T_s 의 유체로 방열하는 결과이며 이상의 축, 방열과정의 에너지를 엑서지로 환산하여 엑서지 효율 Φ 로 표시하면 다음과 같다.

$$\Phi = \frac{\{T_s - T_0 - T_0 \ln(T_s/T_0)\}}{\{T_h - T_0 - T_0 \ln(T_h/T_0)\}} \times \frac{(mC_p)_d t_d}{(mC_p)_c t_c} \quad (8)$$

여기서 무차원 온도 T_d 를

$$T_d = T/T_0 \quad (9)$$

로 정의하고 식(8)에 식(2)를 결합하여 무차원 온도로 표시하면 식(8)은 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi = \left(\frac{T_{ds} - 1 - \ln T_{ds}}{T_{dh} - 1 - \ln T_{dh}}\right) \left(\frac{T_{dh} - T_{d,out}}{T_{ds} - 1}\right) \quad (10)$$

여기서 T_{dh} , $T_{d,out}$, T_{ds} 는 각각 T_h , T_{out} , T_s 를 식(9)에서와 같이 사상태 온도 T_0 로 나눈 무차원 온도들이다. 무차원 온도는 식(9)에서와 같이 쉽게 산출되므로 앞으로의 논의에서는 온도와 무차원온도를 편리해 따라 함께 사용하고자 한다. 또 그래프에서는 전부 무차원 온도로 표시할 것이다.

축열과 방열과정에서 N 값이 다를 수 있지만 가장 일반적인 경우는 같은 N 값에 의하여 성능을 산출하는 방법이다. 따라서

$$N_c = N_d = N \quad (11)$$

이라는 조건을 추가하여 축열시스템의 엑서지효

율 Φ 를 최대화 하는 최적 상변화온도와 그때의 Φ 값을 N 과 T_{dh} 의 함수로 표시한 그림이 Fig. 2 이다. 그림에서 보는바와 같이 Φ 는 N 값에 따라 민감하게 변화하며 최적상변화 온도 $T_{dm,opt}$ 는 N 보다는 T_{dh} 에 주로 의존하여 변화함을 알 수 있다.

3. 2-PCM시스템

단일 축열매체에 의한 성능은 Fig. 2에서 보듯이 매우 낮는데 그 이유는 잠열구간에서는 매체의 온도가 일정하므로 온도차에 의한 비가역손실이 크게 나타나기 때문이다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 다매체 잠열축열시스템이 연구되고 있다^(6,7). 본 연구에서는 이중에서 가장 단순한 2-PCM 시스템을 선택하여 서론에서 언급한 바와 같이 기존의 연구보다 실제적 조건을 추가한 모델의 설정 위에 해석범위도 최적상변화온도와

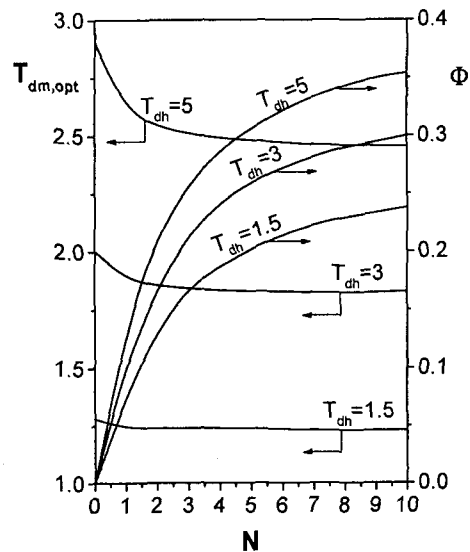


Fig. 2 Optimum melting temperature and exergetic efficiency as a function of N (1-PCM System).

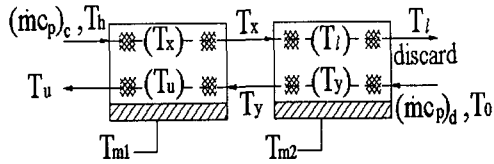


Fig. 3 Schematic of 2-PCM charge-discharge cycle.

최적에서 이탈 된 경우까지 고려하고자 한다. Fig. 3에서는 서로 다른 상변화 온도를 갖는 2개의 축열매체에 의한 축열 및 방열과정을 보이고 있다. 온도 T_h 의 열원유체는 상변화 온도 T_{m1} 인 고온 축열실을 통과하면서 온도가 T_x 로 되고 다시 상변화온도가 T_{m2} 인 저온축열실을 통과하면서 온도가 T_l 로 되며 더 이상 이용되지 않고 버려져 주위로 확산된다. 이와같이 축열된 열에너지는 일정시간 단열된 상태에서 보존된 후 방열과정에서 유용한 열에너지로 회수된다. 그림에서 보는바와 같이 방열과정에서는 온도 T_o 의 유체가 유입되어 저온축열실에서 온도 T_y 로, 다시 고온축열실을 통과하면서 온도 T_u 로 되어 유출된다.

여기서 총괄열전달계수 U 값은 고온 및 저온 축열실에서 같다고 가정하고, 고온 및 저온 축열실의 열전달 면적을 각각 A_1, A_2 , 전체면적을 $A(=A_1+A_2)$ 라 하자. 축열시와 방열시의 전달 단위수 N_c 및 N_d 는 각각 식(3)과 식(6)으로 표현되며 식(11)의 조건이 여기서도 적용되어 $N_c=N_d=N$ 이 된다고 하자. 또한 고온 및 저온 축열실의 열전달 면적비를 나타내는 계수 X 를 다음과 같이 정의한다.

$$A_1 = XA \quad (12)$$

$$A_2 = (1-X)A \quad (13)$$

그러면 고온 및 저온 축열실의 전달단위수

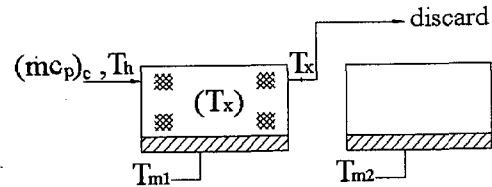


Fig. 4 Additional charge process for high temperature storage unit.

N_1, N_2 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$N_1 = XN \quad (14)$$

$$N_2 = (1-X)N \quad (15)$$

또한 식(5)와 식(7)이 유도된 것과 같은 방법에 의하여 다음 표현이 가능하게 된다.

$$T_h - T_x = \frac{N_1}{1+N_1} (T_h - T_{m1}) \quad (16)$$

$$T_x - T_l = \frac{N_2}{1+N_2} (T_x - T_{m2}) \quad (17)$$

$$T_y - T_o = \frac{N_2}{1+N_2} (T_{m2} - T_o) \quad (18)$$

$$T_u - T_y = \frac{N_1}{1+N_1} (T_{m1} - T_y) \quad (19)$$

축열실의 주기적 가동을 위하여서는 각 축열실의 축열량과 방열량이 같아야 하며 2-PCM 시스템에서 이 조건을 충족하기는 비교적 까다롭다. 즉 일정시간 축열후 방열과정에서 저온축열실의 열회수가 끝났을 때 아직 고온 축열실에는 열에너지가 남아있는 경우, 또는 고온 축열실의 회수가 끝났을 때 저온 축열실에 남아있는 경우가 있을 수 있다. 따라서 이를 미리 예측하여 축열량을 조절하여 주므로써 방열시에 정상가동, 즉 방열과정 중에 일정 출력온도 T_u 를 얻을 수 있다.

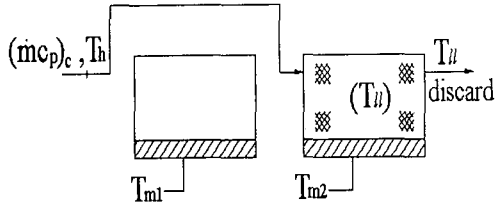


Fig. 5 Charge process for low temperature storage unit only.

축열량 조절에는 여러 가지 방법이 있을 수 있으나 본 연구에서는 다음과 같은 단순한 방법을 택하였다. 즉 저온축열실을 기준으로 여기서 열회수가 끝났을 때 고온축열실의 방열량이 축열량보다 큰지 작은지를 판단하여 큰 경우 그만큼 축열을 더해주고(Fig. 4 참조), 작은 경우 그만큼 축열을 덜해주는 방법이다(Fig. 5 참조).

Fig. 5의 경우 저온축열실에 직접 온도 T_h 의 열원유체가 유입되므로 유출온도는 Fig. 3의 경우와는 달라지며 여기서는 이 온도를 T_{II} 로 표기한다. 온도 T_{m1} 과 T_{m2} 가 적절히 선정되어 두 축열실의 열회수가 동시에 끝난다면 이와 같은 조절은 필요치 않으며 이 경우가 2-PCM 시스템의 최적성능이 된다. 그러나 조절이 필요한 경우에는 축열실 크기의 변화를 통하여 성능을 최대화 할 수 있음도 아울러 보일 것이다.

이상의 내용을 식으로 표현하면 다음과 같다. 고온 및 저온 축열실에서 시간 t_c 동안의 축열량을 각각 Q_{d1} , Q_{d2} 라 하고 시간 t_d 동안의 방열량을 각각 Q_{d1} , Q_{d2} 라 하면

$$Q_{d1} = (\dot{m}c_p)_c (T_h - T_x)t_c \quad (20)$$

$$Q_{d2} = (\dot{m}c_p)_c (T_x - T_l)t_c \quad (21)$$

$$Q_{d1} = (\dot{m}c_p)_d (T_u - T_y)t_d \quad (22)$$

$$Q_{d2} = (\dot{m}c_p)_d (T_y - T_o)t_d \quad (23)$$

여기서 저온축열실을 기준으로 $Q_{d2} = Q_{d1}$ 의 조건에 의하여

$$\frac{(\dot{m}c_p)_d t_d}{(\dot{m}c_p)_c t_c} = \frac{T_x - T_l}{T_y - T_o} \quad (24)$$

또한

$$Q_r = \frac{Q_{d1}}{Q_{d2}} \quad (25)$$

을 정의하고 $Q_r > 1$, $Q_r < 1$ 그리고 $Q_r = 1$ 인 경우에 대하여 각각 성능표현을 하여보자.

$Q_r > 1$ 인 경우에는 t_c 동안의 축열이 끝난후 Fig. 4에서와 같이 고온 축열실에 별도의 축열을 해주어야 하며 이 별도 축열에는 $(Q_r - 1)t_c$ 의 시간이 소요된다. 따라서 이 경우 엑서지 효율은 다음과 같다.

$$\phi = \left\{ \frac{(T_u - T_o) - T_o \ln(T_u/T_o)}{(T_h - T_o) - T_o \ln(T_h/T_o)} \right\} \times \left(\frac{T_x - T_l}{T_y - T_o} \right) \frac{1}{Q_r} \quad (26)$$

$Q_r < 1$ 인 경우에는 고온축열량을 적절히 감소시킬 필요가 있으므로 축열시간이 $Q_r t_c$ 에 도달하면 Fig. 5에서와 같이 고온 축열실을 by-pass시킨다. 이 경우 저온축열실의 작동조건이 바뀌며, 저온축열실의 유출온도 T_{II} 은 다음 식으로 계산된다.

$$T_h - T_{II} = \frac{N_2}{1 + N_2} (T_h - T_{m2}) \quad (27)$$

축열량은 식(21)과 같아야 하므로 위와 같이 변화된 조건하에서의 가동시간 t_{II} 은 다음식으로 구한다.

$$(\dot{m}c_p)_c (T_h - T_{II})t_{II} = Q_{d2}(1 - Q_r) \quad (28)$$

따라서 이 경우의 총 가동시간 $t_{cc}(=Q_r t_c + t_{II})$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_{cc} = \left\{ Q_r + \frac{T_x - T_l}{T_h - T_{II}} (1 - Q_r) \right\} t_c \quad (29)$$

그러면 엑서지효율 ϕ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\phi = \left\{ \frac{(T_u - T_0) - T_0 \ln(T_u/T_0)}{(T_h - T_0) - T_0 \ln(T_h/T_0)} \right\} \times \left(\frac{T_x - T_l}{T_y - T_0} \right) \frac{t_c}{t_{cc}} \quad (30)$$

윗식의 t_c/t_{cc} 는 식(29)에서 구할 수 있다.

Q_r 이 1보다 크거나 작은 경우는 Fig. 4와 Fig. 5에서 보는 바와 같이 에너지의 부분적 낭비가 $Q_r = 1$ 있게 된다. T_{m1} 과 T_{m2} 가 적절히 선정되어 이 되면 이와 같은 낭비는 없어진다.

또 이 경우 엑서지효율은

$$\phi = \left\{ \frac{(T_u - T_0) - T_0 \ln(T_u/T_0)}{(T_h - T_0) - T_0 \ln(T_h/T_0)} \right\} \times \left(\frac{T_x - T_l}{T_y - T_0} \right) \quad (31)$$

로 표현되며 이 식은 식(26) 또는 식(29) $Q_r = 1$ 을 대입하여도 얻을 수 있다.

ϕ 는 열역학적 완전성에 접근도를 나타내며 식(26), (30), (31)을 식(14)-(19)와 함께 본다면 ϕ 는 T_{m1} , T_{m2} , T_h , N , X 의 함수임을 알 수 있다. 식(9)에서와 같은 무차원온도 T_d 로서 표시하면 $\phi(T_{dm1}, T_{dm2}, T_{dh}, N, X)$ 의 관계가 됨을 알 수 있다.

4. 최적 상변화 온도

축열조건 즉 T_h 와 N 이 주어졌을 때 ϕ 를 최대화하는 상변화 온도 T_{m1} 과 T_{m2} 를 찾고자 한

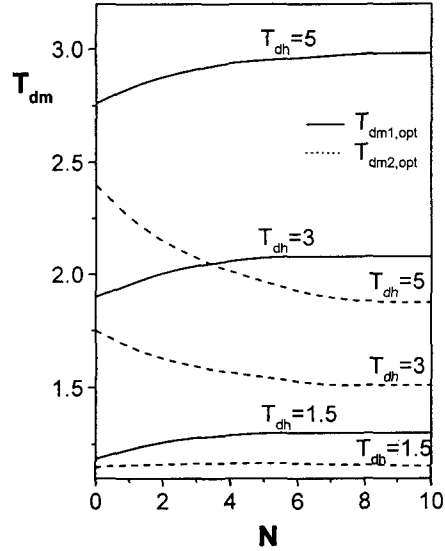


Fig. 6 Optimum phase change temperature as a function of N.

다. 계산 방법은 주어진 N 과 T_h 하에서 변수인 T_{m1} 과 T_{m2} , 그리고 X 를 일정한 범위 내에서 독립적으로 변화시키며 ϕ 를 구하고 서로 비교하여 최대값 ϕ 를 결정하고 그때의 상변화 온도와 X 를 최적값으로 한다. 계산에 사용된 식은 식(26)

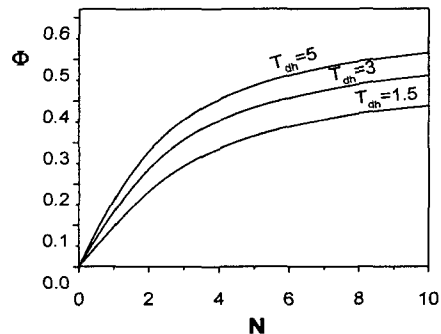


Fig. 7 Optimum exergetic efficiency as a function of N.

Table 1 The ratio of Φ of 2-PCM system (Fig. 7) to Φ of 1-PCM system (Fig. 2)

| T_{dh} \ N | 1 | 3 | 5 | 10 |
|----------------|------|------|------|------|
| 1.5 | 1.26 | 1.49 | 1.56 | 1.63 |
| 3 | 1.27 | 1.43 | 1.48 | 1.53 |
| 5 | 1.25 | 1.38 | 1.43 | 1.47 |

과 식(30)으로 먼저 식(24), (25)에서 Q_r 을 구하고 이에 따라 식(26)과 (30)중에 선택하여 사용한다. 계산결과 최적 값은 위에서 언급한 바와 같이 $Q_r=1, X=0.5$ 근처에서 나타나게 된다. 주의깊은 계산 결과 최적성능을 주는 $Q_{r,opt}$ 는 1 ± 10^{-4} 범위내에, X_{opt} 는 0.5 ± 0.002 범위내에 있음을 알게 되었다. 따라서 $Q_{r,opt}=1, X_{opt}=0.5$ 는 좋은 근사로서 무리가 없다고 생각된다. mc_p 와 U 가 일정할 때 N 은 열전달 면적에 비례하므로, 축열실의 크기와 열전달 면적이 또한 비례한다고 가정하면 $X_{opt}=0.5$ 는 두 축열실이 같은 크기로 나누어 졌다는 것을 의미한다. 즉 두 축열실 중 한쪽이 크고 다른쪽이 작으면 열전달에 의한 비가역손실은 한쪽에서 감소하고 다른쪽에서 증가하나 감소효과보다 증가효과가 더 커진다는 것이다. 따라서 같은 크기로 나누는 것이 바람직하며 이 결과는 Lim 등⁽⁶⁾과 Aceves 등⁽⁷⁾의 연구에서도 언급하고 있다.

Fig. 6에서는 N 과 T_h 에 따른 최적 상변화 온도 $T_{dm1,opt}$ 와 $T_{dm2,opt}$ 를 보이고 있다. 그림에서 온도는 전부 무차원화시켜 표기하였다. 여기서도 1-PCM 시스템과 비슷한 양상을 보이고 있다. 즉 무차원 최적 상변화 온도인 $T_{dm,opt}$ 는 N 보다는 열원온도인 T_{dh} 에 의하여 민감하게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 그러나 엑서지 효율은 반대로 T_{dh} 보다 N 에 의하여 큰 영향을 받음을 Fig. 7에서 볼 수 있다. 즉 N 값과 관계된 축열실의 크기를 증가시키면 열전달에 따른 비가역손실은 줄어들어 엑서지 효율은 증가하며 그 효과는 N 값이 낮을수록 커짐을 알 수 있다.

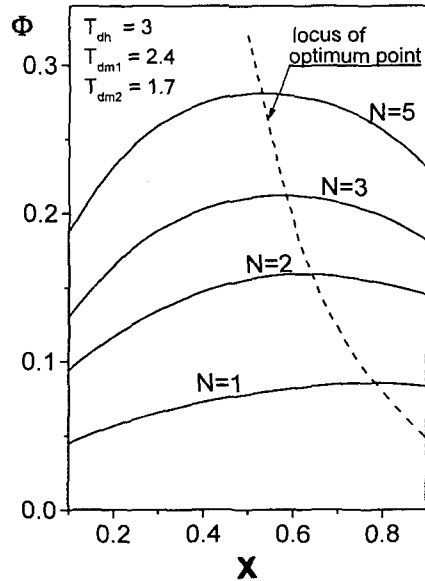


Fig. 8 Exergetic efficiency as a function of X .

또한 Fig. 7을 Fig. 2와 비교하여 보면 2-PCM 시스템의 이점을 알 수 있다. 같은 T_{dh} 와 N 값에서 2-PCM 시스템은 1-PCM 시스템에 비하여 상당한 성능향상을 보이고 있다.

Table 1에서는 두 시스템의 성능을 비교한 수치 내용을 구체적으로 보여주고 있으며 전반적으로 약 40% 이상의 성능향상이 있음을 알 수 있다.

5. 축열실 크기의 변화에 따른 성능 변화

원하는 조건의 PCM이 항상 공급될 수 있는 것은 아니며 경우에 따라서는 PCM 선택의 폭이 상당히 제한 될 수도 있다. 즉 가용할 수 있는 PCM의 상변화 온도인 T_{dm1} 과 T_{dm2} 가 Fig. 6에서와는 다르게 주어진 경우에 축열실의 상대적 크기와 관계된 파라미터인 X 를 변화시킴에 따라 향상된 Φ 값을 얻을 수 있음을 본 연구에서 밝히고자 한다.

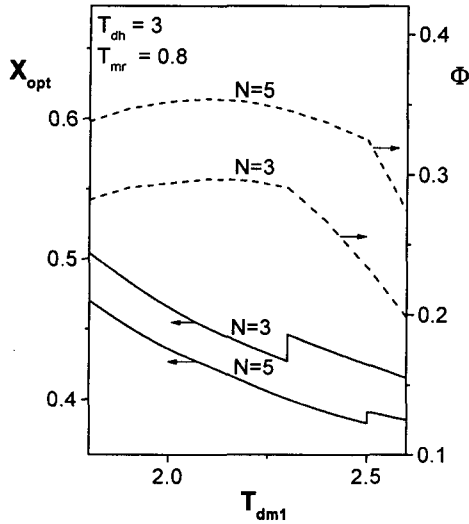


Fig. 9 X_{opt} and Φ for given melting temperatures($T_{dh}=3$, $T_{mr}=0.8$ case).

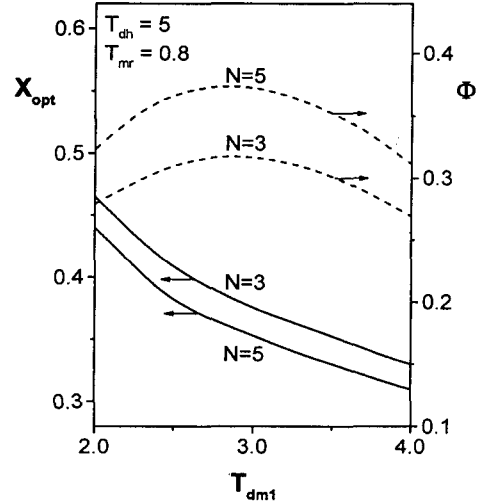


Fig. 11 X_{opt} and Φ for given melting temperatures($T_{dh}=5$, $T_{mr}=0.8$ case).

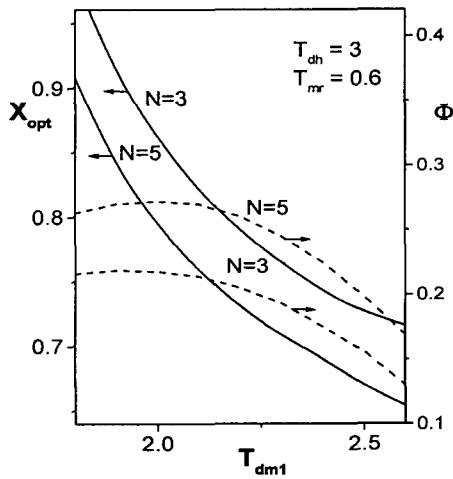


Fig. 10 X_{opt} and Φ for given melting temperatures($T_{dh}=3$, $T_{mr}=0.6$ case).

여기에서 계산 과정은 T_{m1} 과 T_{m2} 가 주어진 상태이고 X 만을 변화시키면 되므로 훨씬 간단해

지며 Q_r 을 먼저 구하고 그 값에 의하여 식 (26)과 (30)중에서 선택하여 Φ 를 구하는 과정은 위에서와 같다.

Fig. 8에서는 2개의 상변화 물질 ($T_{dm1}=2.4$, $T_{dm2}=1.7$)을 가지고 주어진 열원유체의 조 ($T_{dh}=3$)하에 축열시스템을 구성 할 경우의 축열성능을 보이고 있다. 전체 전달단위수 N 이 일정한 조건하에 X 를 변화시키면 Φ 가 최대가 되는 X_{opt} 가 존재함을 알 수 있다. 이 X_{opt} 는 위에서 언급한 0.5와는 다르며 주어진 조건에 의하여 그 값이 결정된다.

상변화 온도가 Fig. 6의 최적온도에서 이탈됨에 따라 발생하는 비가역손실에는 열전달에 따른 손실과 축열량과 방열량 사이의 불균형 해소(Fig. 4, 5 참조)에서 오는 손실이 있다. X_{opt} 가 존재하는 주요 이유는 이와 같은 불균형 해소에서 오는 손실이 두 축열실의 크기조절(또는 전달단위수 조절)에 의해서 조절되기 때문이다. 이와같이 변화는 물질의 선택에 제한이 있을 경우 2-PCM 시스템에서는 축열실의 크기조절이 축열성능에 영향을 주며 주어진 조건하에서 최대성능을 주는

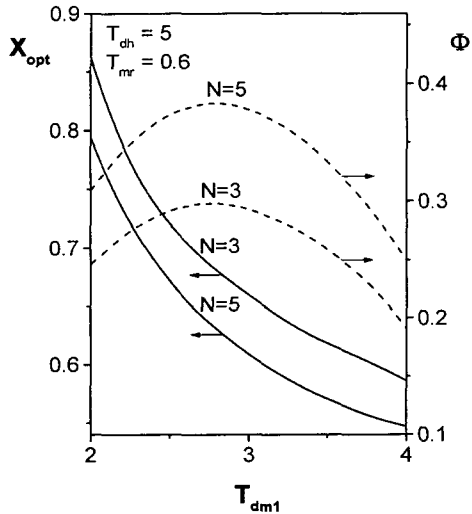


Fig. 12 X_{opt} and Φ for given melting temperatures ($T_{dh}=5$, $T_{mr}=0.6$ case).

X_{opt} 가 존재하게 된다.

Figs. 9-12에서는 주어진 상변화 온도의 조건하에 X_{opt} 와 Φ 값을 나타내고 있다. 이 그림에서는 두 상변화온도를 나타내기 편리하도록 상변화 온도비 T_{mr} 을 다음과 같이 정의한다.

$$T_{mr} = \frac{T_{m2}}{T_{m1}} \quad (32)$$

따라서 이 그림에서는 T_{dm1} 과 T_{mr} 에 의하여 T_{dm2} 는 결정된다.

Fig. 9에서 보면 X_{opt} 의 값이 평활하게 변하지 않고 급격히 변화하는 점이 있으며 또 그때의 Φ 값도 기울기가 불연속적으로 변함을 알 수 있다. 이와 같은 경우는 축열시스템의 작동이 Fig. 4에서 Fig. 5로 바뀌게 될 때 나타나며 이와 같은 특이점 때문에 전체적인 작동범위를 그래프로 나타내기는 쉽지 않다.

Figs. 10-12에서는 주어진 범위 내에서 이런 특이점이 보이지 않는다.

6. 결론

본 연구는 2개의 상변화 물질을 이용한 잠열축열시스템의 열역학적 해석으로 비교적 단순화된 가정에 의하여 설정된 모델에 관하여 연구가 수행되었으나 그 결과는 정성적인 관점에서 일반적인 결론으로 보아도 큰 무리는 없는 것으로 생각된다.

본 연구를 통하여 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 주어진 열원과 축열실의 조건하에서 축열시스템의 엑서지 효율을 최대화 하는 최적상변화 온도가 존재한다.

(2) 위와 같은 최적상태는 $X=0.5$, $Q_r=1$ 근처에서 이루어진다.

(3) 상변화 물질의 선택이 제한된 경우에는 축열실의 크기 조절을 통하여 성능을 조절할 수 있으며, 이 경우 성능을 최대화 하는 X_{opt} 가 존재한다.

이와 같이 성능을 향상시킬 수 있으나 그 성능은 여전히 만족할만한 수준이 되지 못한다. 따라서 이상의 해석 방법을 3, 4, 5,..... PCM 시스템으로 연장하여 적용할 수 있으며 본 연구의 수행과정에서 얻은 경험은 이와같은 다매체축열시스템의 연구에 도움이 될 것이다.

REFERENCE

1. Bejan, A., 1978, Two thermodynamic optima in the design of sensible heat units for energy storage, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 100, pp. 708-712.
2. Krane, R. J., 1987, A second law analysis of the optimum design and operation of thermal energy storage system, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 43-57.
3. Taylor, M. J., Krane, R. J., and Parsons, J. R., 1991, A second law analysis of sensible heat thermal energy storage systems with a distributed storage element, Part I and II, *ASME Journal of Energy Resources Technology*, Vol.

- 113, pp. 20-32.
4. De Lucia, M., and Bejan A., 1990, Thermodynamics of energy storage by melting due to conduction or natural convection, ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 112, pp. 110-116.
 5. Aceves-Saborio, S., Nakamura H., and Reistad, G. M., 1994, Optimum efficiencies and phase change temperatures in latent heat storage systems, ASME Journal of Energy Resources Tehnology, Vol. 116, pp. 79-86.
 6. Lim, J. S., Bejan, A., and Kim, J. H., 1992, Thermodynamic optimization of phase change energy storage using two or more materials, ASME Journal of Energy Resources Technology, Vol. 114, pp. 84-90.
 7. Aceves, S. M., Nakamura, H., Reistad, G. M., and Martinez-Frias, J., 1998, Optimization of a class of latent thermal energy storage systems with multiple phase-change materials, ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 120, pp. 14-19.