

열에너지저장 : 제 문제에 대한 고찰(3)

Thermal Energy Storage : Some Views on Some Problems (3)

이 준 식
Joon Sik Lee

6. 열저장의 시험 및 평가

6.1 CEC 시험 프로그램

“무엇이 좋은 저장인가?” 이것은 좋은 질문이기는 하나 대답하기는 어렵다. 보통의 기준은 단열이 잘 되어야 한다는 것과 짧은 시간에 축열과 방열이 이루어져야 한다는 것이다. 결과적으로 축열조는 과도하게 단열되고 큰 용량의 열교환기가 설비된다. 이렇게 하는 것은 비용이 많이 들고 성공하리라는 보장도 없다. 왜냐하면 여분의 과도한 단열은 짧은 기간의 축열에서는 불필요하며 어떤 적절한 크기보다 더 큰 면적의 열교환기를 사용하더라도 성능에서는 단지 미소한 증가만을 얻을 수 있기 때문이다.

시스템의 계산에 있어서 우리는 보통 내부 과정을 무시한 채 블랙박스적인 열균형에만 의존한다. 개발되어 이용되고 있는 대부분의 온수저장에 대하여 ASHRAE, NBS 그리고 Commission of European Communities(CEC)에 의해 시험기준이 마련되어 있다. 이러한 것들은 쉽게 얻을 수 있는 데이터의 측정 원칙에 근거를 두고 있다. 즉, 입구와 출구 온도, 질량유량을 말한다. 시험전에 축열조는 균일온도에 도달해야 한다. 이것은 시간의 낭비

를 가져오며 실제 작동조건을 거의 만족시키지 못한다. 종종 입구 및 출구의 온도차가 상당히 작으므로 측정정확도가 높아야 한다. 모든 이러한 시험들은 앞에서 언급한 조건에 초점을 둔다. 즉 주위로의 열손실과 내부의 열교환이다. 따라서 다음과 같은 질문이 있을 수 있다. 이러한 것들이 축열조에 대한 유일한 수단이거나 또는 가장 특성적인 기준인가? 열성층화는 어떤 역할을 하는가? 이 성층화는 어떻게 생성되며 파괴되는가? 이것은 어떤 적절한 양으로 평가되고 기록될 수 있는가?

현재 Commission of the European Communities는 현열 및 잠열축열기구에서의 단기 열저장에 대한 표준시험프로그램을 개량하기 위하여 “Solar storage testing programme”을 후원하고 있다.²²⁾ 다음의 파라미터들이 축열기구의 성능을 지배한다고 인식되고 있다.²³⁾

축열물질의 열용량 : $(mc)_S$

열전달 유체의 용량 : $(mc)_F$

유동모우드($m_F=0$)에서 축열조로부터 주위로의 열손실 : $(UA)_{Sa}$ 또는 유체로부터 주위로의 열손실 : $(UA)_{Fa}$

열전달유체와 열저장물질 사이의 열교환기율* : UA

축열의 성층화 정도 : NI

* 곱 UA는 J/sK의 차원에서 볼 때 열용량율(heat capacity rate)이며 W/K의 차원으로 볼 때는 열용량(heat rate capacity)이다. 종종 열교환기의 열용량(thermal capacity of heat exchanger)이라고도 불리운다. 이 곱은 열교환기 계산에 가장 널리 쓰이므로 열교환기율(heat exchanger rate)이라고 부르는 것이 더 시사적이다.

유류의 많은 실험실에서 여러가지 다른 축열조에 대한 시험방법이 개발되었으며 비교할 수 있는 시험조건에 대하여 이러한 주요 파라미터를 얻기 위한 규정과 필요조건에 대하여 노력을 기울여 왔다. 이러한 파라미터들은 유량, 온도 및 시간에 따라 달라지며 상변화, 열전달유체의 형태, 축열조의 구조 등에 의해 영향을 받을 수 있다. 열저장물질과 전달유체의 열용량을 결정하는 것은 비교적 쉬우나 열손실 파라미터를 측정하는 것은 더 어려우며 UA와 NI를 결정하는 데는 문제가 많다. 문헌 [23]에 UA와 NI를 결정하기 위한 수치적인 그리고 실험적인 방법이 제시되어 있으나 단지 두개의 입출구를 가진 팽창형(expansion type) 축열에 대한 것이다. 이것은 그림 11에 나타낸 것과 같은 선형모델과 식(6.1)과 (6.2)에 기초를 두고 있다.

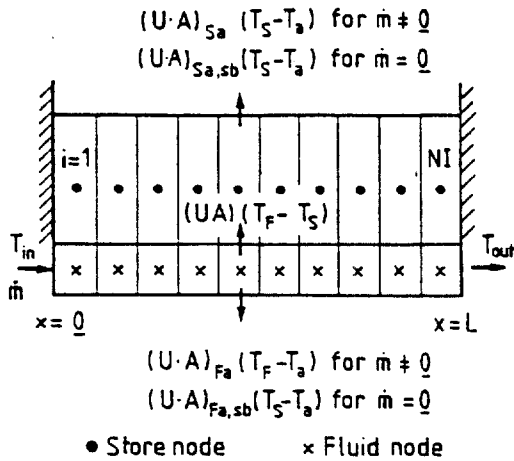


그림 11. 축열의 일반화된 노우드의 모델²³⁾

그림 11의 각 노우드 $i=1$ 에서 NI까지에 대한 전달유체의 온도변화에 대하여

$$\begin{aligned}
 \frac{(mc)_F}{NI} \cdot \frac{\partial T_F}{\partial t} + \frac{(\dot{m}c)_F L}{NI} \cdot \frac{\partial T_F}{\partial x} &= \frac{UA}{NI} (T_S - T_F) \\
 + \frac{\lambda_F V_F}{NI} \cdot \frac{\partial^2 T_F}{\partial x^2} + \frac{(UA)_{F_a}}{NI} (T_a - T_F) \\
 + \frac{(UA)_{S_b, F_a}}{NI} (T_a - T_F) &\dots\dots\dots (6.1)
 \end{aligned}$$

이며 그림 11의 각 노우드 $i=1$ 에서 NI까지의 열저장물질의 온도변화에 대하여

$$\begin{aligned}
 \frac{(mc)_S}{NI} \cdot \frac{\partial T_S}{\partial t} &= \frac{UA}{NI} (T_F - T_S) + \frac{\lambda_S V_S}{NI} \cdot \frac{\partial^2 T_S}{\partial x^2} \\
 + \frac{(UA)_{S_a}}{NI} (T_a - T_S) + \frac{(UA)_{S_b, S_a}}{NI} (T_S - T_a) \\
 \dots\dots\dots (6.2)
 \end{aligned}$$

유동모우드($\dot{m}=0$)에서는 대류가 지배적이어서 전도항(λ_F, λ_S)는 무시할 수 있을 만큼 작으며 대기손실(standby loss) $(UA)_{S_b}$ 는 일어나지 않는다. 반면에 대기중에는 $\dot{m}=0$ 이고 유동모우드손실 $(UA)_{F_a}, (UA)_{S_a}$ 는 일어나지 않는다. 어떤 모우드에서나 캡슐에 들어있는 저장물질에 대하여 $(UA)_{S_a}=0$ 이며 담긴(embedded) 열교환기에 대하여 $(UA)_{F_a}=0$ 이다. NI=1인 단일 노우드모델은 이상적으로 충분히 혼합된 저장을 뜻하며 NI=10의 경우에 이상적으로 충분히 성층화된 저장이라고 가정한다. 식(6.1)에 따르면 입구온도의 온도 맥동은 충분히 혼합된 저장의 경우(NI=1) 즉 시 출구온도에 반응을 일으킨다. 충분히 성층화된 경우에는 이 반응이 주재시간 $t_{res} = (mc)_F / (\dot{m}c)_F$ 만큼 지연되어 일어난다. 부분적으로 성층화된 저장에서의 시간지연은 0과 t_{res} 사이이다. 열용량 $(mc)_F, (mc)_S$, 유량 \dot{m}_F 그리고 손실 파라미터 $(UA)_{F_a}, (UA)_{S_a}$ 가 주어지든지 사전에 검사에 의해 결정되면 주어진 단계의 입구온도에 대하여 식(6.1)과 식(6.2)로부터 출구온도가 계산될 수 있다. 이 계산값은 실험값과 비교될 수 있다. 실험과 계산결과의 자승평균제곱(root mean square)오차를 최소화함으로써 UA와 NI에 대하여 가장 잘 맞는 자료를 얻을 수 있다.

아래와 같은 방법으로 쉽게 근사적으로 구할 수 있다. 충분히 혼합된 저장에 대하여 유체의 용량과 열손실을 무시하면 축열에 대한 저장효율 η_c 는 다음과 같이 유도된다.

$$\eta_c = \frac{T_S(t) - T_{Si}}{T_{Fi} - T_{Si}} = 1 - e^{-\epsilon t / t_f} \dots\dots\dots (6.3)$$

축열내의 열교환기의 유효율 ϵ 은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{T_{Fi} - T_{Fout}}{T_{Fi} - T_{Si}} = \epsilon = 1 - e^{-UA / (\dot{m}c)_F} = 1 - e^{-NTU} \dots\dots\dots (6.4)$$

그리고 충전시간 t_f 는

$$t_f = (mc)_S / (\dot{m}c)_F \dots\dots\dots (6.5)$$

이다. 시간의 함수인 유체 출구온도 $T_{Fout}(t)$ 는 위에서 언급한 이상화를 적용하면 식(6.1)로부터 계산될 수 있다.

$$\frac{T_{Fout}(t) - T_{Si}}{T_{Fi} - T_{Si}} = \theta_{out} = 1 - \epsilon e^{-\epsilon \nu t_f} \dots (6.6)$$

여기서, T_{Fi} 는 단계적인 일정 유체 입구온도이며 T_{Si} 는 시험 시작시의 축열조의 온도이다. 출구온도가 충전시간 t_f 에서 측정되었다면 열교환기의 유효율은 다음과 같은 초월함수의 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\epsilon \cdot e^{-\epsilon} = 1 - \theta_{out}(t_f) \dots\dots\dots (6.7)$$

ϵ 과 식(6.4), NTU 값으로부터 열교환기 UA를 계산하고 열교환기의 표면적 A를 알면 열관류계수 U를 구할 수 있다. 충분히 혼합된 저장인자 또는 성층화된 저장인자는 다음과 같은 추론에 의해 알 수 있다. 완전한 열교환기의 경우 $UA \rightarrow \infty$, 열효율 $\epsilon = 1$ 이며 충전시간에서의 최대한의 축열효율은 다음과 같다.

$$\eta \leq 1 - e^{-1} \leq 0.632 \dots\dots\dots (6.8)$$

열손실을 무시할 때 충분히 성층화된 축열인

경우의 θ_{out} 이 충분히 혼합된 축열의 경우보다 작다(또는 $NTU < 0.75$ 이면 같다)는 것을 식(6.1)과 식(6.2)로부터 유도할 수도 있고 소위 Schumann 선도(θ_{out} vs. NTU)로부터도 알 수 있다. 그러나 식(6.1)에서의 유체열용량은 그대로 유지된다. 따라서 식(6.7)로부터 완전한 열교환기를 가진 충분한 혼합 축열의 경우

$$\theta_{out}(t_f) = 0.632 \dots\dots\dots (6.9)$$

이 되며 이 보다 작은 값은 성층화를 뜻한다. 이 방법이 현열과 잠열 축열에 있어서 충분히 정확한 UA와 NI데이터를 줄 수 있는지 그리고 어느 정도까지 이 모델이 적용 가능한지에 대해서는 여전히 검토되어야 한다.

6.2 열저장의 엑서지 평가

좋은 열저장은 어떻게 성층화를 다루는가 하는 문제에 대하여 엑서지의 개념으로부터 그 해답과 적절한 양을 찾을 수 있다. 한 예로 그림 12²⁶⁾에서와 같은 두 개의 보통의 온수축열조에 대하여 이론적으로 엑서지 평가를 수행하고 실험결과와 비교한다.

어떠한 현열축열도 3단계의 엑서지를 거치며 결과적으로 엑서지의 손실을 가져온다. 즉 충전단계, 대기단계, 방출단계를 말한다. 각 단계에 대하여 엑서지효율이라고 부르는 엑서

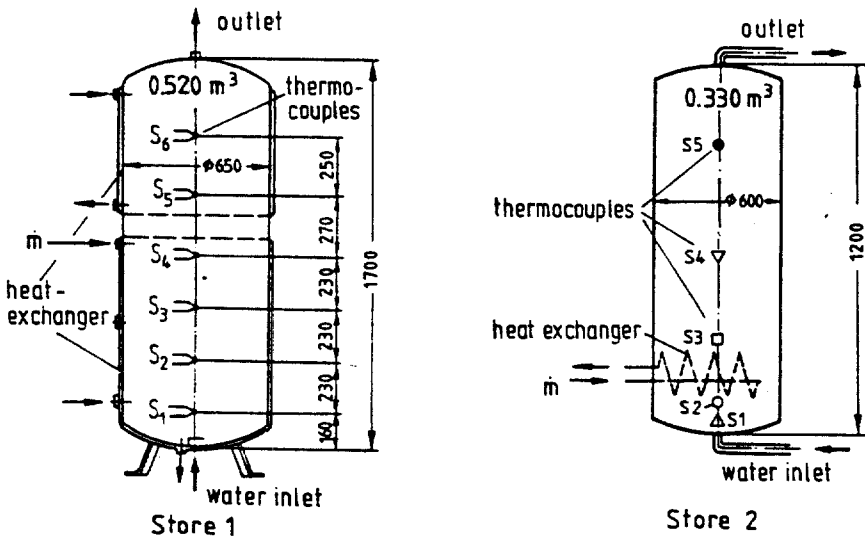


그림 12. 실험과 비교를 위한 온수 축열조

지양의 비는 다음과 같이 정의된다.

$$\zeta(t) = E_x(t) / E_{x \max}(t) \dots\dots\dots (6.10)$$

관련된 에너지와 마찬가지로 엑서지도 시간의 함수이다.

충진과정: 엑서지의 충진 효율(exergetic charge efficiency)은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\zeta_c(t) = \frac{E_{xS}(T_S(t)) - E_{xS}(T_{S0})}{\int_0^t \dot{E}_{xF}(T_{Fin}) dt - \int_0^t \dot{E}_{xF}(T_{S0}) dt} \dots\dots\dots (6.11)$$

이 비는 최대로 축열할 수 있는 엑서지에 대한 실제 축열된 엑서지의 비이다. 이 정의는 문헌 [22]에서 사용된 에너지효율에 해당된다.

$$\eta(t) = \frac{\int_0^t \dot{m}_{FCF}(T_{Fin} - T_{Fout}) dt - \int_0^t Q_{Loss} dt}{\dot{m}_{FCF}(T_{Fin} - T_{S0}) t} \dots\dots\dots (6.12)$$

충분히 혼합된 축열에서는 성층화에 대한 가

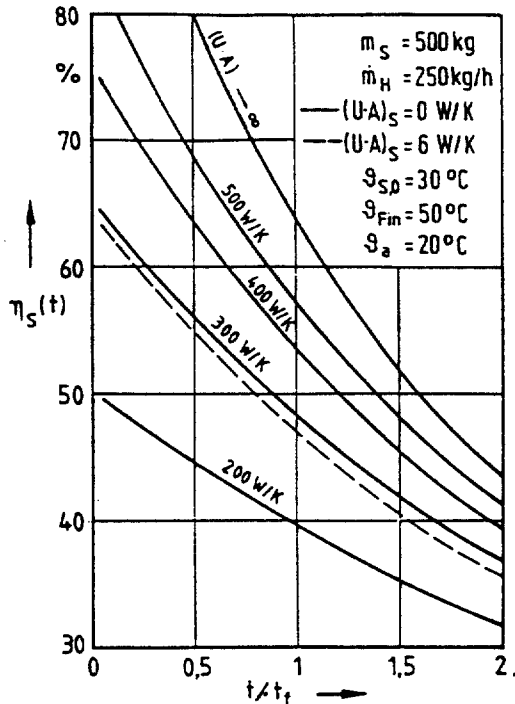


그림 13. 온수저장에 대한 에너지 충진 효율 (충분히 혼합된 경우)

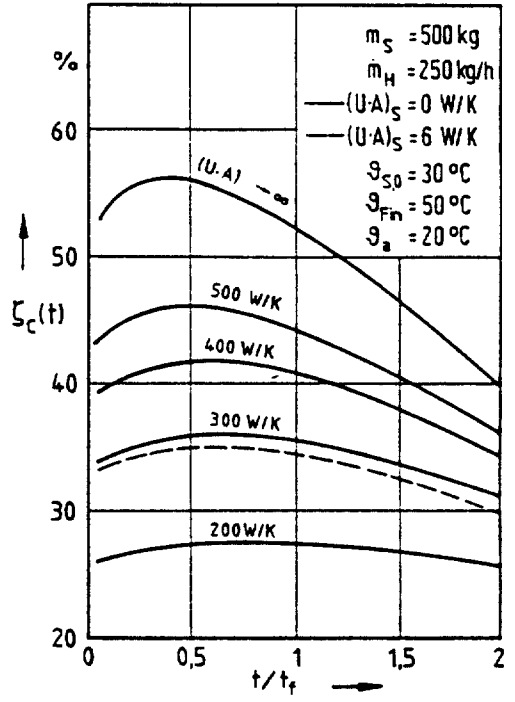


그림 14. 온수저장에 대한 엑서지 충진 효율 (충분히 혼합된 경우), θ_S0 = 30 °C

정없이 엑서지효율이 계산될 수 있다. 연역적으로 충분히 혼합된 축열은 주어진 에너지에 대해서 최소의 엑서지를 포함한다. 그러므로 충분히 혼합된 축열의 엑서지효율은 최소값을 가지며 성층화축열의 경우 이 값보다 크다. 따라서 실험결과와의 비교를 통하여 실제 성층화와 이상적인 플러그유동(ζ = 1)으로의 접근을 알 수 있다(알려진 UA_{hx}에서). 에너지효율과 엑서지효율에 대하여 그림 13(식(6.12))에 따른) 과 그림 14(식(6.11))에 따른)에 비교하였다.

두 경우에 대하여 표시된 파라미터들은 동일하다. 시간척도는 충진시간을 기준으로 하였다.

$$t_f = \frac{(mc)_S}{(mc)_F} \approx \frac{m_S}{\dot{m}_F} \dots\dots\dots (6.13)$$

이것은 이론적으로 축열조의 내용물을 교체하는데 걸리는 시간이다.

그림 13에서 충진과정이 시작될 때 에너지효율이 높았다가 시간이 지남에 따라 저하된다. 이는 저장능 에너지의 감소하는 양이 실제로

저장됨을 뜻한다.

그림 14에서는 엑서지효율이 충전시간의 전 반부에서는 증가하다가 이후에는 감소하는 것을 보여준다. 이러한 경향은 초기 축열조 온도 $T_{S0} = 30 + 273 = 303\text{K}$ 그리고 주위 온도 $T_a = 293\text{K}$ 의 시작단계에서 축열조 내용물의 엑서지값이 낮기 때문이다. 이후 $T_{Fin} = 323\text{K}$ 의 엑서지 유입이 비교적 높기 때문에 증가되는 양의 엑서지가 저장된다. 이 이후 충전유체와 저장유체 사이의 구동 온도차가 작아질수록 더 많은 저장가능 에너지가 사용되지 않은 저장을 통과한다.

열교환기율 UA의 영향도 있다. 물론 이것은 대단히 낮지는 않다. 즉 $UA \approx 200\text{W/K}$ 이다. 그러나 면적으로 봐서 25%의 증가에 해당하는 400W/K에서 500W/K까지의 증가는 단지 4%의 효율의 증가를 가져올 뿐이다. 저장의 열손실 파라미터—여기서는 $(UA)_{Sa} = 6\text{W/K}$ 로 가정하였다—는 작은 영향을 나타낸다. 이 경우는 $UA = 300\text{W/K}$ 에 대하여 나타

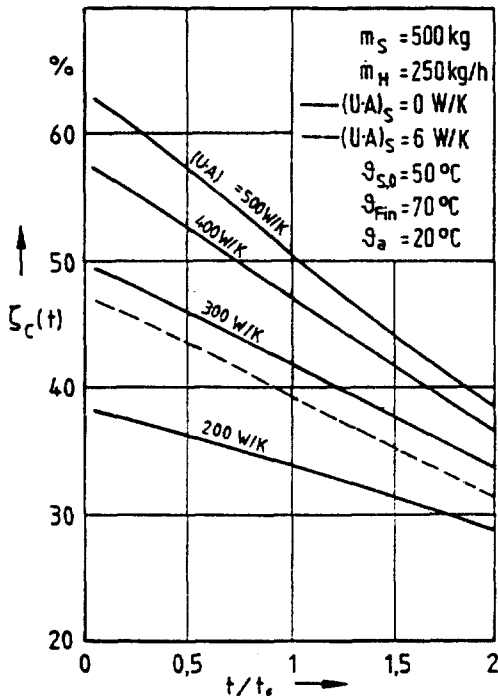


그림 15. 온수저장에 대한 엑서지 충전 효율 (충분히 혼합된 경우), $\theta_{S0} = 50^\circ\text{C}$

내었다(점선). 반면에 다른 모든 곡선은 무시할 만한 손실에 대한 것이다.

그림 15는 축열조의 초기 엑서지값이 비교적 높은 $T_{S0} = 323\text{K}$ 일 때 엑서지효율 곡선이 그림 13의 에너지효율과 마찬가지로 단조감소함을 보여준다. 이 때는 축열조의 온도수준이 비교적 높으므로 열손실의 영향이 커진다.

엑서지 충전 효율에 대한 유량의 영향을 그림 16에 나타내었다.

유량과 충전시간은 반비례한다. 축열조가 거의 영인 유량으로 충전된다면 충전시간은 무한히 길게 된다. 열역학적으로 이것은 모든 저장 가능 엑서지가 저장되는 이상적인 상태이다. 따라서 그림 16의 모든 곡선은 이 경우에 대하여 100% 쪽으로 접근하는 경향을 보인다. 반면에 유량이 클 때는 대부분의 엑서지가 활용되지 못한 채 열교환기를 통하여 지나가고 축열조로 전달되지 않는다. 열교환기

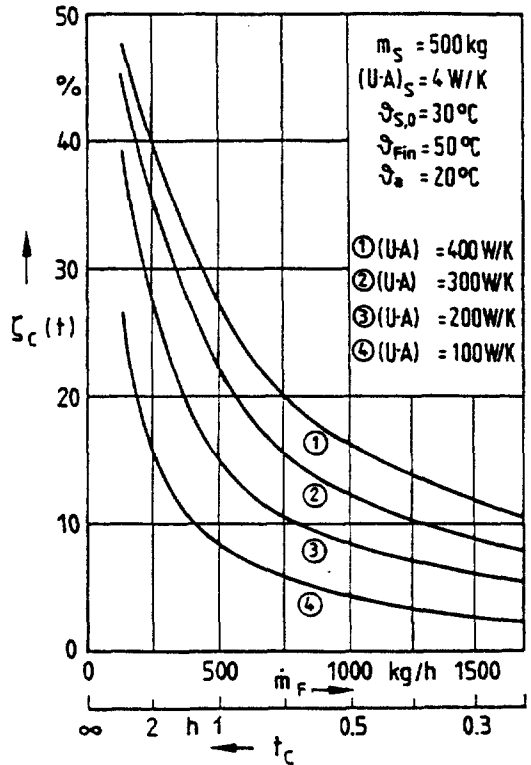


그림 16. 여러가지 열교환기율 $(UA)_{hx}$ 에 대한 엑서지 충전 효율 대 질량유량 또는 충전시간(충분히 혼합된 경우)

의 성능이 낮으면 즉 UA가 낮으면 엑서지효율이 낮다. 이러한 결점을 보완하기 위해 좋지 않은 열교환기를 큰 유량으로 채우는 것은 도움이 되지 못한다. 반면에 충전시간이 오래 걸리더라도 열교환기의 성능이 나쁠 경우 적은 유량을 사용하는 것이 유리할 것이다. 초기축열 T_{S0} 와 계단 입구온도 $\Delta T = \Delta \theta = T_{Fin} - T_{S0}$ 의 영향에 대하여도 고찰하였다. 초기 축열조 온도가 주위 온도보다 20K 또는 그 이상 높으면 계단 입구온도의 영향뿐 아니라 엑서지 충전 효율에 대한 영향도 작다. 요약하면 큰 엑서지 충전 효율을 얻기 위해서는 좋은 열교환기를(여기서는 약 400W/K), 주위온도보다 20K 더 높은 초기 축열온도, 작은 유량 등이 요구된다. 다른 파라미터의 영향은 이차적이다. 물론 적은 온도 단계로 진행하는 것이 큰 온도보다는 열역학적으로 합리적이며 작동조건이 허락한다면 연속적인 단

계 축열이 유리하다.

대기과정 : 엑서지 대기 효율은 다음과 같이 정의된다.

$$\zeta_{sb}(t) = \frac{T_S(t) - T_a(1 + \ln T_S(t)/T_a)}{T_{S0} - T_a(1 + \ln T_{S0}/T_a)} \quad (6.14)$$

이것은 충전이 끝났을 때 $[T_{S0}(\text{대기}) = T_S(t_c)(\text{충진})]$ 의 가용 엑서지에 대한 대기시간 t_{sb} 이후의 가용 엑서지의 비이다. 충전과정에서와 마찬가지로 대기에서의 엑서지 효율도 충분히 혼합된 저장에서 최소가 된다. 충분히 혼합된 저장의 엑서지 효율에 대한 대기시간의 영향이 그림 17에 나타나 있다.

효율은 시간에 따라 점진적으로 감소한다. 초기 입구온도 $T_{S0} = \theta_{S0} + 273$ 의 영향을 작을 보여 준다. 저장 손실율 $(UA)_S$ 의 영향이 지대함을 보여 준다. 특히 긴 대기시간의 경우 그러하므로 여기서는 좋은 단열이 필수적이다(충진의 경우는 그렇지 않다).

방출과정 : 엑서지 방열출 효율은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\zeta_{dc}(t) = \frac{\int_0^t E_x T_{Sout}(t) dt - \int_0^t E_x(T_{Sin}) dt}{m_x c_S [T_{S0} - T_a(1 + \ln T_{S0}/T_a)]} \quad \dots \dots \dots (6.15)$$

이것은 방출이 시작될 때 $[T_{S0}(\text{방출}) = T_S(t_{sb})(\text{대기})]$ 의 축열조의 가용엑서지에 대한 어떤 시간 동안에 방열된 엑서지의 비이다. 단기 온수 축열조는 보통 팽창형이다. 즉 방열하는 동안 하부에서 유입되는 찬물이 상부에 있는 더운 물을 몰아낸다. 최대 엑서지(그리고 에너지)는 혼합되지 않고 열적인 전도가 없는 플러그 유동상태에서 방출된다. 방출시간 $t_{dc} = m_S / \dot{m}_F$ 동안 이러한 유동은 100%의 방출효율을 갖는다. 여기서 이것을 이론적으로 가능한 값이라고 보고 실험 데이터와의 비교를 통하여 어떻게 이 값이 가까이 근접해 가는가를 보인다.

어떠한 비교에서도 충전과 방출 기간을 나타내는 것은 중요하다. 명확한 값은 충전/방출시간 $t_f = t_{dc}$ 일 것이다.

이론적으로 구한 엑서지 효율과 실험 데이터로부터 계산한 것을 비교하여 표에 나타내

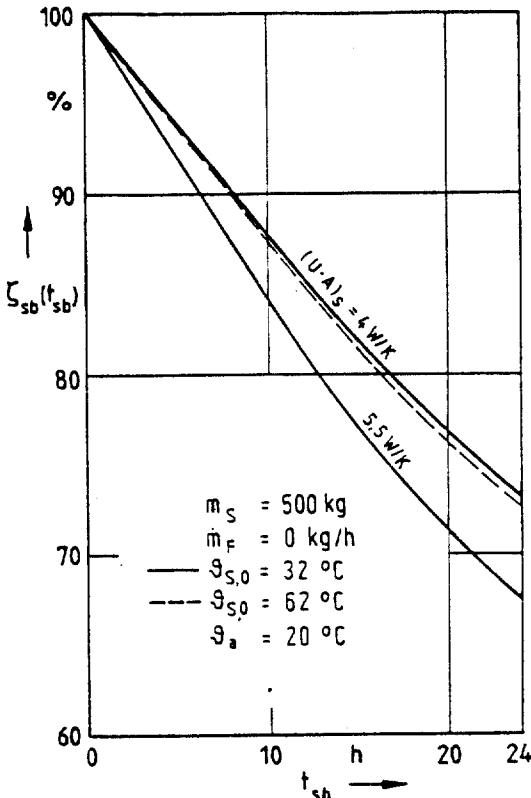


그림 17. 충분히 혼합된 온수저장에 대한 엑서지 대기 효율 대 시간

Efficiencies	Store I		Store II	
	expe- riment	theory	expe- riment	theory
$\zeta_c(t_f)$ %	47.3	46.9	42.6	41.9
$\zeta_{sb}(22h)$ %	77.2	70.7	73.9	65.3
$\zeta_{dc}(t_{dc})$ %	92.3	100.0	87.4	100.0

었다.

두 축열조의 실험적 전효율은 다음과 같다.

$$\text{축열 I} : = 0.473 \cdot 0.772 \cdot 0.923 = 33.7\%$$

$$\text{축열 II} : = 0.426 \cdot 0.739 \cdot 0.874 = 27.5\%$$

명백히 축열 I이 축열 II보다 우수하다. 그러나 방출효율은 직접 비교될 수 없다는 것에 유의할 필요가 있다. 왜냐하면 축열 II의 방출의 경우 초기 입구온도가 주위온도와 단지 10K 만큼 다르기 때문이다(축열 I의 경우: 40K). 대기시간 동안 두 축열조 모두에서 성층화가 발달한다. 두 경우에 있어서 실험결과가 충분히 혼합된 상태에 대한 이론값을 능가한다. 전체적으로 축열 I이 더 성층화가 잘 된 것으로 보인다. 왜냐하면 외부손실이 거의 같으므로 축열 II에서 더 높은 내부손실이 있다. 방출은 이상적인 플러그 유동으로 이루어질 수 없으나 축열 I의 경우 축열 II보다 이상적인 상태에 더 근접한다.

엑서지 평가는 따라서 내부과정에 대한 괄목할 만한 정보를 준다. 그러나 이를 위해서

는 내부온도를 알아야 한다. 이에 대한 측정 은 언제나 가능한 것은 아니며 부가적인 비용이 소요된다. CEC 그룹에서 개발하고 있는 방법에 의해 쉽게 얻을 수 있는 온도의 측정으로부터 성층화에 대한 정보를 얻을 수 있으면 엑서지 평가는 축열의 평가에 대하여 더 진보된 중요한 성질의 판단 기준을 제공해 줄 것이다.

참 고 문 헌

22. CEC Commission of the European Communities, *Recommendations for European Solar Storage Test Methods*, Eur; 920, Office for official publications of the EC; Luxembourg 5, Boite Postale 1003, Nov. 1984.
23. Marshall, R., Identification of UA in Thermal Storage Devices - Two Methods, *Int. J. Solar Energy*, vol.3, pp.341-354, 1985.
24. Chandra, P., Considerations in rock-bed thermal storage systems, *Renewable Energy Review J.*, vol.4, pp.28-46, 1982.
25. Kübler, R., and Kallweit, J., Die Bewertung von Warmwasserspeichern mit Hilfe der Exergie, Internal Report Inst. f. Thermodynamik u. Wärmetechnik, Universität Stuttgart, 1984.