

열시스템에서의 순간 기화 용기가 갖는 열역학적 기능

A Thermodynamical Review of Flash Vessels in Thermal Systems

김윤제·황인주 / 성균관대학교 기계공학부 교수

본고는 증기 및 냉동 사이클에서 열효율을 높이고 운용 경비를 줄이기 위해 배열 회수 장치, 탈기, 중간 냉각기, 증기 분사 냉동기 등으로 널리 사용되고 있는 순간 기화 용기의 유용성과 열역학 고찰 및 기초설계 방안에 대한 내용이다. <편집자註>

1. 서론

동력의 근원으로서 증기는 터빈 구동 장치의 작동 유체로 사용되며, 가정용, 산업용 그리고 상용적으로 사용되는 열교환 장치등의 광범위한 분야에 이용되고 있다. 증기는 또한 흡수식 냉동기와 같은 냉동 사이클의 열원으로 사용되며, 현재 국내에서도 에너지 공급 비중이 높아진 원자력 발전도 원자로 내에서의 열교환에 의한 발생 증기로 동력을 얻고 있다.

저압에서 기관을 나가는 증기(폐기)는 대기중으로 배출될 수 있으며, 계속적인 기관의 운전을 위하여 새로운 급수가 일정하게 공급되어야 한다.

그러나 응축기를 사용하여 이러한 폐기를 대기로 버리지 않고 응축수를 회수하여 기관의 열효율을 향상시키는 Rankine 사이클이 개발된 이래 인류는 보다 높은 열효율 기관을 갖기 위해 많은 노력을 해왔다. 또한 냉동 기술에 있어서는 신냉매의 출현과 제어 기술의 진보에 따라 눈부신 발달이 있었으며, 상온 이하의 과정을 필요로 하는 공업에의 적용과 일상 생활과 관련이 있는 냉방 및 냉장 등에 이용되어 인간의 문화 생활에 많은 혜택을 주고 있다. 그러나 단순 냉동 및 증기 사이클의 열효율은 현재 거의 한계점에 도달하여 작동 유체 및 신소재 또는 에너지 절약 장치등의 개발 없이 플랜트 및 기관의 효율 증대를 바라는 것은

불가능하다.

최근 물과 암모니아 혼합물을 작동 유체로 개발되고 있는 Kalina 사이클은 비록 완전한 로랜츠 사이클은 아니지만 기존의 Rankine 사이클에 순간 기화 용기(flash vessel)와 증발기, 응축기를 덧붙인 복합 사이클로서 열효율이 높아 많은 각광을 받고 있다. 시스템의 보조 장치로서 순간 기화 용기는 2차적인 가열이나 공정 사용을 위한 저압 증기원, 고온의 응축액을 냉각하는 수단, 또는 각기 다른 압력으로 작동되는 증기 장치에서 얻어진 응축액을 일정한 낮은 압력을 갖는 응축액으로 변환하는 장치등으로 사용될 수 있다.

기능상으로 순간 기화 용기는 크게 排出型과 加壓型 용기로 구분할 수 있는 데, 배출형 용기(vented flash vessel)란 에너지 절감 효과를 위하여 대기중으로 직접 방출되는 폐기를 배출 응축기(vent condenser)와 같은 열교환기를 이용하여 작동유체의 응축열 및 응축수를 회수할 수 있으며, 순간 기화 용기 내로 회수되는 물은 중력에 의하여 펌프 수용기(pump reservoir)로 보내진다. 이때 펌프 수용기에 있는 증기를 대기로 분출하는데 이러한 기능의 용기를 배출형이라 한다.¹

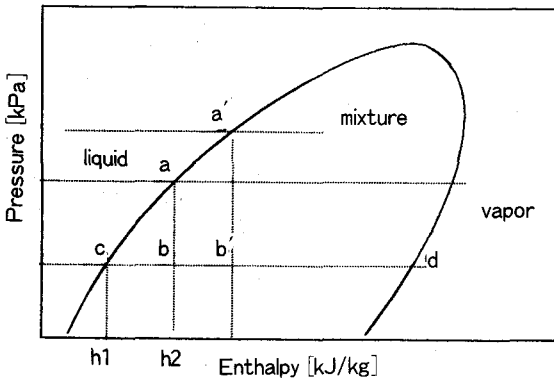
한정된 에너지원으로 인하여 에너지 절약과 냉동 및 증기 시스템의 열효율 증대 방안이 매우

중요하게 인식되고 있으며, 시스템의 설계 개념에 많은 영향을 주고 있다. 이에 본 고에서는 증기 및 냉동 사이클에서 열효율을 높이고 운영경비를 줄이기 위해 배열 회수 장치, 탈기기(deaerator), 중간 냉각기, 증기 분사 냉동기 등으로 널리 사용되고 있는 순간 기화 용기의 유용성과 열역학적 고찰 및 기초설계 방안에 대해서 논하고자 한다.

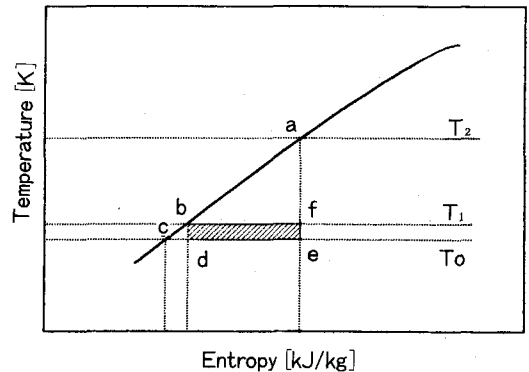
2. 이론적 배경

[Fig. 1]의 압력-엔탈피 선도에서와 같이 Flash'란 본래 고온·고압의 작동유체(a)가 저압부위(b→c)로 흐를 때 일어나는 갑작스런 증발 현상에서 유래한 것으로 열역학적인 표현으로는 고압에서 응축액의 엔탈피(h_2)와 저압에서 응축액의 엔탈피(h_1)의 차라고 표현할 수 있다. [Fig. 1]의 c-d의 위치에서는 액체와 증기가 혼합되어 있는데, 이 증기는 저압·저온 상태의 응축액(c)이 유지되도록 소량의 응축이 현열(sensible heat)을 제거하면서 형성된 것이다. 이러한 현상은 만약 작동 유체가 밸브를 통한 압력 강하가 충분히 클 때 상대적으로 저온에서도 일어날 수 있다.²

응축열의 배열 회수 장치(heat recovery



[Fig. 1] Schematic diagram of flashing process



[Fig. 2] Efficiency of Ideal Carnot Cycle

equipment)로서 순간 기화 용기는 응축액의 엔탈피를 가장 효율적으로 사용케 하는 일종의 압력 용기이며, 이에 대한 열역학적인 유용성은 다음과 같이 평가할 수 있다. [Fig. 2]의 온도-엔트로피 선도에서와 같이, 유용한 응축열을 배열 회수 장치에 의해 절대 온도 T_1 에서 T_2 까지 가열하는 열원으로 이용하고, 압력에 의한 손실과 팽창 일을 무시한다면, 온도 변화로 전달되는 단위 열량은 열역학 법칙으로 부터

$$dQ=dH=C dT \quad [1]$$

$$Q=C_p(T_2-T_1)$$

가 되며, C_p 는 정압비열을 나타낸다.

만약, 냉각수 온도를 T_0 라 하면 T_1 과 T_0 간의 온도차가 작아 이상적인 Carnot 사이클로 간주하면 열사이클 효율은 Fig. 2의 사각형 bdef 면적으로 표시되며, 다음과 같다.

$$\eta = \frac{T_1-T_0}{T_1} \quad [2]$$

또한, 주어진 열량으로 얻어지는 동력은 식[1], [2]로부터

$$W_1=Q_1\eta=C_p(T_2-T_1) \frac{T_1-T_0}{T_1} \quad [3]$$

가 되며, 식[3]으로부터 미분하여 최대 동력을 얻을 수 있는 T_1 은

$$T_1 = \sqrt{T_0 T_2} \quad [4]$$

가 된다. 이에 상응하는 최대 동력은 다음과 같이 표현된다.

$$(W_1)_{\max}=C_p[(T_2+T_0)-2\sqrt{T_0 T_2}] \quad [5]$$

한편, 최대 동력을 얻을 때의 효율은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\eta_m=1-\sqrt{\frac{T_0}{T_2}} \quad [6]$$

위 결과에서 보듯이 최대 효율은 Carnot 사이클의 효율과는 달리 1/2 승에 비례하며, 열용량에 관계없이 열원의 온도차에 의하여 결정한다.

이렇게 저온을 기준하여 고온의 응축열로 부

터 얻어지는 최대 일량은 가용에너지(available energy) 또는 exergy라 하며, 다음식으로 표현한다.

$$E=C_p \int_{T_0}^{T_2} \frac{T-T_0}{T} dT=C_p \left[(T_2-T_0)-T_0 \ln \frac{T_2}{T_0} \right] \quad [7]$$

위의 결과는 또한 이상적인 최대 동력을 얻기 위하여 Fig. 2의 구간, c-e를 미소 구간으로 나누 무한단 Carnot 사이클의 일량을 나타낸다. 이렇게 주어진 exergy를 기준으로 하여 exergy 효율을 구하면,

$$\eta_e = \frac{W_2}{E} \quad [8]$$

가 된다. 여기서 W_2 는 응축 회수열에 의한 단위 출력을 나타내며, 이러한 회수열 사이클을 엑서지 사이클이라 한다.

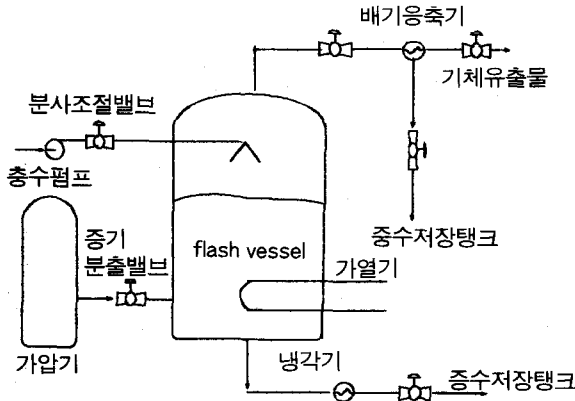
3. 열시스템에서의 응용

1)원전의 탈기기(deaerator)

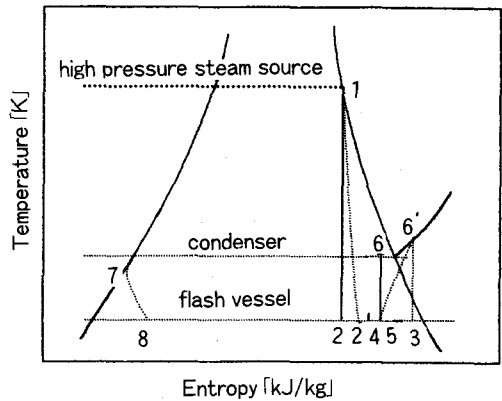
본 절에서는 개량형 Rankine 사이클의 하나로 현재 (CANada Dguterium Uranium)형중수로 원전에서 계통의 하나인 압력 및 체적 제어 계통(Pressur and inventory system)에서 압력용기로 이용되고 있는 脫氣滲穢탱크(degasser-condenser tank)를 예를 들고자 한다.

[Fig. 3]에서 보는 바와 같이 가압기(pressurizer)로 부터 배출되는 증기나 열수송 계통으로부터 탈기 용액 또는 작동 유체인 중수(heavy water, D.O)를 회수하기 위하여, 응축된 중수는 냉각기를 통하여 중수 저장탱크 및 重水 充水펌프로 보내지는데, 이때 응축기 수위는 냉각기 하류에 있는 제어 밸브에 의하여 조절된다. 분사 조절 밸브를 통하여 중수 중수 펌프로 부터 응축기 저온의 중수가 공급되며, 전기 가열기를 이용하여 용기내 압력을 조절한다.

熱輸送系統 압력이 상승하는 것을 방지하기 위하여 제어 계통에 의해 자동으로 작동되는 2개



[Fig. 3] Schematic diagram of CANDU pressure and inventory control system.



[Fig. 4] Steam-Jet refrigeration cycle

의 압력 완화 밸브(Pressure relief valve)가 열수송 회로마다 설치되어 있는데 이는 증기와 증기수의 혼합 유체를 탈기 응축기로 배출함으로써 계통의 압력을 완화시키기 위한 것이다. 탈기 응축탱크로 유입되는 탈기 증수 유동은 순간 기화에 의하여 매우 미세한 입자로 분사 확산되는데, 이러한 분사 확산은 냉각제의 순도를 높이기 위한 탈가스화를 촉진시킨다. 또한, 용해되지 않는 가스는 배출 응축기를 통과하면서 증수증기 회수계통(vapour recovery system)으로 분출된다.

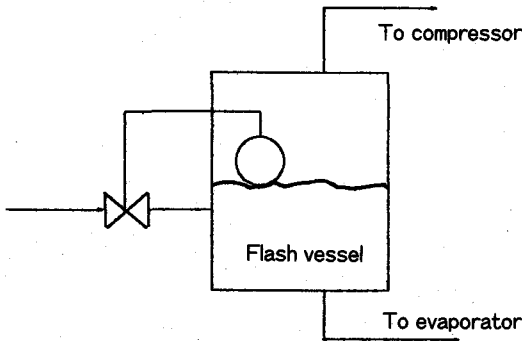
2) 냉각수의 생성

증기 분사 냉동 장치(steam-jet water vapour refrigeration)와 같은 냉동 기관에서 이용되고 있는 순간 기화 용기는 무해하고 저렴한 냉매로 사용되고 있는 수증기로부터 증발 잠열을 흡수하기 위한 기능을 갖고 있다.

밀폐 용기에 물과 공기를 함께 넣고 진공 펌프로 공기를 제거하면 용기 내의 압력은 떨어지고 물의 일부는 증발하게 된다. 이때 증발 잠열을 흡수하면, 나머지 물은 저온 상태로 되어 냉매로 사용되는데, 대용량의 기관에서는 진공 펌프 대신 증기가 분출하여 저압의 진공 상태를 만드는 이젝터(ejector)를 사용하고 있다. 이러한 증기 분

사 냉동법은 [Fig. 4]의 온도-엔트로피 선도에서와 같이 저온을 얻기 위하여 증발 압력을 아주 낮게 해야 하며, 보일러에서 나오는 고압증기나 廢氣를 이젝터의 노즐에서 고속으로 분사시켜, 이 운동 에너지를 이용하여 순간 기화 용기 내의 공기와 증기를 흡인하며 고압 증기와 함께 응축기로 보낸다. 이때 공기와 증기의 혼합 유체는 확산기(diffuser)를 통과할 때 운동 에너지가 압력 에너지로 바뀌어져 응축 압력까지 높아진다. 또한, 응축기는 고압의 작동증기와 순간 기화 용기로 부터 나오는 발생증기를 응축해야 하므로 다량의 응축수를 필요로 한다.

순간 기화 용기내의 압력은 이젝터의 흡인 작용에 의하여 고진공이 되며, 용기의 상단에서 분사되는 물의 일부를 증발시키게 되는데, 이때 발생 증기가 증발 잠열을 흡수하여 나머지 물을 냉각시켜 냉동효과를 올린다. 하지만, 증기 펌프에 의하여 제공되는 냉각수 온도는 보통 4~21℃이며 4℃ 이하의 온도는 얼음이 얼게 될 우려가 있으므로 비실용적이다. 응축기로부터 응축된 물은 다시 보일러로 보내지며, 목적 달성 후 온도가 상승된 물은 다시 증발기로 회수된다. 이때 증발로 인하여 적어진 순간 기화 용기 내의 유량은 float 밸브를 이용하여 적절한 급수



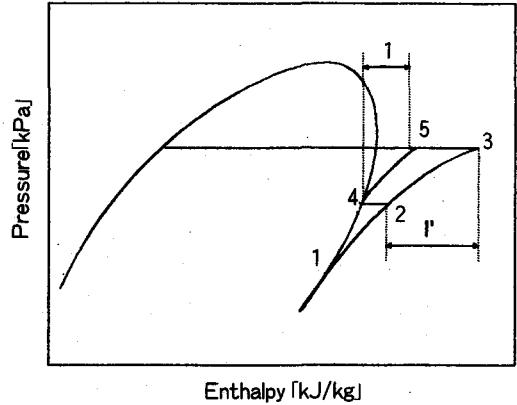
[Fig. 5] Flash vessel for removing flash steam

를 받아 일정 수위를 유지할 수 있다.

3)기액 분리 및 중간 냉각기

증기 압축 냉동 사이클에서 순간 기화 용기는 크게 flash증기의 제거 장치와 중간 냉각 장치로 사용될 수 있다. 응축기와 증발기 사이의 교축 과정을 통하여 발생한 flash증기는 증발기에서 열흡수 효과를 저하시키므로 flash증기를 제거하기 위하여 [fig. 5]와 같은 순간 기화 용기를 사용하여 flash증기 압축기로 보내 재 압축하고 flash효과로 과냉된 응축액은 증발기로 보내어져 효율을 향상시킨다.

증기 압축 냉동 사이클에서 낮은 증발 온도가 요구되는 경우에 증발 압력 또한 대단히 낮게 되는데, 한 대의 압축기로 증발 압력에서 응축 압력까지 냉매를 압축하면 압축비가 커지고 압축기의 체적 효율이 저하되며 냉매의 토출 온도가 상승하여 시스템의 전체 효율에 좋지 않은 결과를 초래한다. 이런 경우 다단 압축에 순간 기화형 중간 냉각기를 사이클에 적용하면 고압축 압축기로 유입되는 냉매 증기의 온도를 낮출 수 있고 비체적이 감소하여 단위 증기량당 압축일을 감소시킬 수 있다. 2단 압축에서의 중간 냉각 효과는 [Fig. 6]의 압축 과정(4-5)이 갖는 엔탈피 변화량(1)과 또다른 압축과정(2-3)이 갖는 엔탈피 변화량(1')



[Fig. 6] Cooling effect refrigeration in two-stage compression

을 비교하면 잘 알 수 있다(1<1'). 실제에 있어서는 냉매의 열역학적 특성에 근거해서 유용성을 판단해야 한다.⁴⁻⁶

4. 순간 기화 용기의 기초 설계 및 설치

전술한 바와 같이 순간적으로 기화되는 증기는 직접적으로 고압의 응축액을 저압계통으로 유출시킴으로써 얻을 수 있으나 순간 기화 과정을 조절하기 위하여 보조장치를 갖춘 압력 용기를 이용하고 있다.

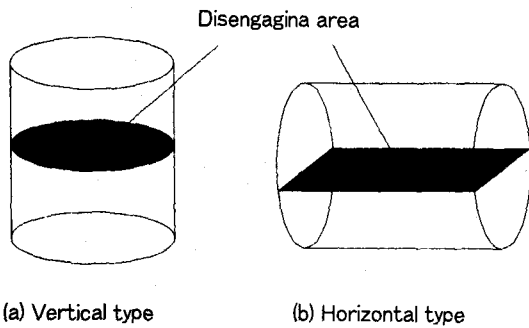
이러한 용기는 수직 또는 수평으로 설치될 수 있는데, 보통 수직으로 설치하고 있다. 그 주된 이유는 작동 유체와 증기의 완전한 분리를 할 수 있어 질(quality)이 양호한 증기를 얻을 수 있기 때문이다.⁷

수직 용기의 설계에 있어서 가장 중요한 점은 용기의 내부 직경으로서 보일러수가 수적(droplets) 또는 거품이 되어서 증기와 더불어 반출되는 현상, 즉 습분 동반(carry over)을 최소화하기 위하여 순간 기화되는 속도가 작도록 충분히 넓은 내부 단면적을 갖추어야 한다. 만약 내부 직경이 충분히 커서 상승 속도가 충분히 작다면 용기의 높이는 그다지 중요하지 않지만 실용성을 갖추기 위해서는 적어도 0.6~0.9m를 넘어

야 한다.⁸ 여기서 증기의 발생 속도는 다음과 같이 정의 한다.

$$V = \frac{Q}{A} \quad [9]$$

V = 증기 발생 속도 [m/s], Q = 증기 발생량 [m³/s]
A = 용기의 단면[m²]



[Fig. 7] Two types of flash vessel and disengaging area

순간 기화를 고려한 압력 용기 설계는 여러 방법이 있지만, 특히 간단하고 널리 이용되고 있는 방법으로 열평형법(heat balance method)이 있다. 이것은 Fig. 1과 같은 압력-엔탈피 선도에서 증발 엔탈피(enthalpy of evaporation)를 이용한 가용열에 의해 얼마나 많은 증기가 응축액으로부터 생성되는가를 알 수 있는데 이를 순간 기화율(flash rate of steam)이라 하며 다음과 같이 표현된다.

$$X = \frac{h_2 - h_1}{h_{fg}} \times 100 \quad [10]$$

X = 순간 기화율 [%]

h₁ = 저압에서 작동 유체의 엔탈피 [kJ/kg]

h₂ = 고압에서 작동 유체의 엔탈피 [kJ/kg]

h_{fg} = 저압에서 작동 유체의 증발 잠열 [kJ/kg]

순간 기화 용기의 체적이 순간 기화량과 용기 내 응축액의 합보다 커야 하는데, 이는 순간 기화

율과 기화 용기에 부착된 모든 장치의 응축 증기량을 합하여 용기내로 유입되는 총응축량을 고려하여 계산할 수 있으며, 이에 따라 용기의 크기가 결정된다.

다른 방법으로는[Fig. 7]도시된 유휴 단면적(disengaging area)을 이용하는 것인데, 유휴 단면적이란 증기가 액체로부터 유출되어 나오는 표면으로 정의되며 수직 용기에는 응축액이 정확히 절반이 찼을 때 형성된 사각 단면을 의미한다. 유휴 단면적을 이용하면 요구되는 증기량 또는 응축량을 만족시킬 수 있는 순간 기화 용기의 직경을 계산할 수 있다. 이는 주어진 증기의 속도와 함께 각기 다른 압력 및 압력 강하로 인한 flash 증기량을 식[10]으로 부터 구하여 용기의 단면적과 크기의 상관 관계를 결정하는 방법이다.

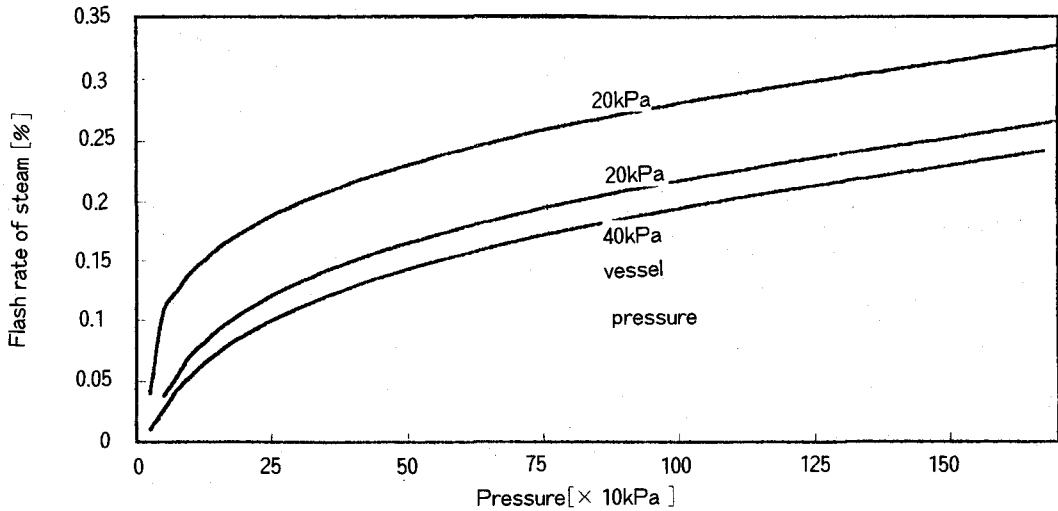
증기표를 이용하여 계산된 결과들은[Fig. 8]과 같이 나타낼 수 있으며, 사용 빈도가 많은 경우에 도표화시켜 놓으면 차후 설계시 반복 계산되는 번거러움을 피할 수 있다. Fig. 8 (a), (b)에서는 순간 기화 용기 내의 압력이 2kPa, 20kPa, 40kPa로 고정되어 있고, 증기 발생 속도가 각각 1m/s, 3m/s일때 고압측의 압력 변화에 따른 순간 기화율 및 응축량에 대하여 나타내었다. 이 결과는 고압측 압력이 변화함에 따른 기화율은 증가하고 응축량은 감소하고 추세를 보이고 있다. 응축량 및 증기 발생량에 대하여 적정 속도를 고려하면 [fig. 9]의 (a), (b)에서 처럼 유휴 단면적을 구할 수 있고, 최종적으로 내부 전체 체적을 결정할 수 있다. 실용적으로는 적절한 안전 계수(safety factor)를 곱해야 한다.

참고로 수직형에는 응축액의 높이에 관계없이 유휴 단면적이 일정하므로 수평함에 비해 용기의 형상에 의한 영향을 덜 받는다. 또한 고압의 액체가 응축액의 표면 위에서 분사될 경우에는 실제적인 유휴 단면적이 커지기 때문에

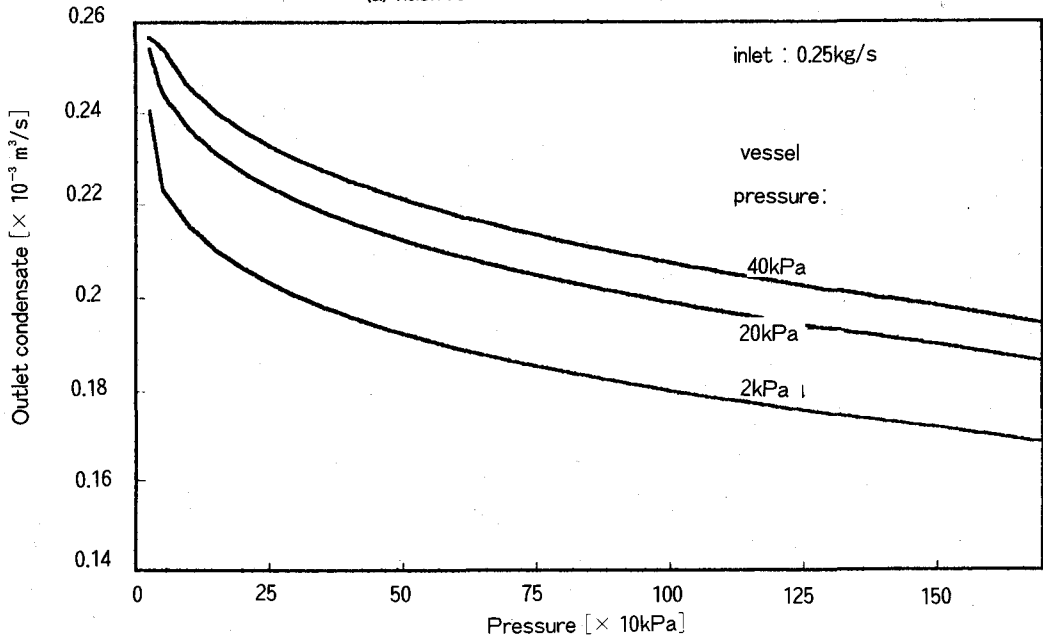
응축액의 표면적을 줄여 용기를 작게 설계할 수 있다. 사용조건, 사용목적에 따라 flash증기의 속도는 압력제어밸브, 와류발생장치 등을 이용하여 조절할 수 있으며 증기사이클에서 3m/s이하, 냉동 사이클에서 1m/s이하가 적절

하다.⁵

순간 기화 용기의 설치시 고려할 점은, 압력 용기의 고장시 응축액이 직접 펌프수용기로 우회하여 돌아갈 수 있는 凝結側管을 설치해야 하며, 펌프 수용기에는 적절한 증기 배출 장치나 응축액

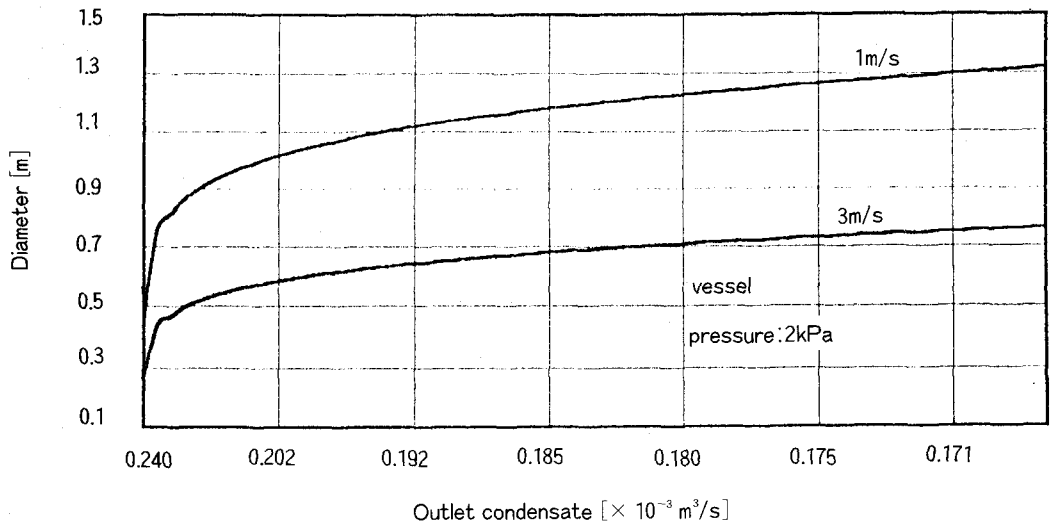


(a) flash rate of steam in each pressure drop.

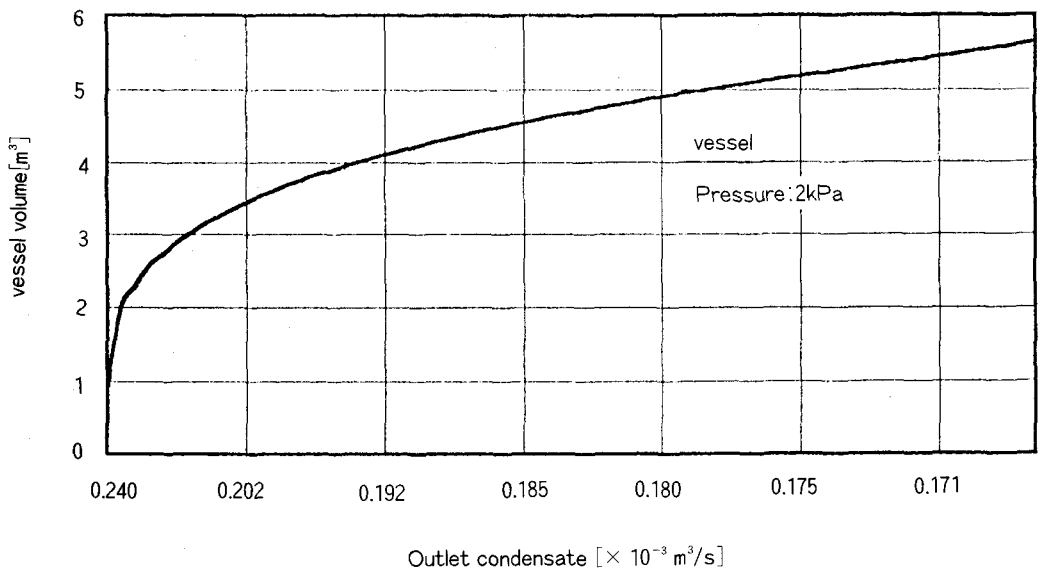


(b) Outlet condensate rate to pressure drop

[Fig. 8] Flash rate and outlet condensate with inlet flow rate 0.25kg/s



(a) Internal diameter of flash vessel for outlet condensate



(b) Volume requirement of flash vessel for outlet condensate.

[Fig. 9] Internal diameter and volume requirement of flash vessel with inlet flow rate 0.25kg/s

의 냉각 장치를 구비한다. 또한, 압력계를 구비하여 용기내의 압력을 측정하며, 압력 용기 하류에 응축 부하를 유지할 수 있는 용기판 설치를 고려해야 한다.

또한, 순간 기화 용기내 압력은 용기로부터 감압 장치(탈기기 또는 저압 증기 장치)까지 증기 분출관을 연결하여 조절할 수 있다. 이러한 경우 순간 기화 용기내의 압력 강하시 역류 방지를 위한 check밸브를 반드시 설치해야 하며, 용기내 압력 조절을 최대화하기 위하여 배압 밸브를 이용할 수 있으며, 전 계통의 과압 방지를 위하여 압력 완화 밸브를 설치한 가압형 순간 기화 용기 (pressurized flash vessel)가 있다. ¹

온도조절 공기배출 장치(thermostatic air vent)를 이용하여 운전중에 非溶解性가스의 축적을 방지할 수 있지만, 순간 기화 용기 또는 보조 장치와의 연결 계통에서 열손실 때문에 실제 생성되는 flash증기량은 항상 계산량보다 작게 되는데 적절한 단열이 필요하다. 만약, 차가운 물이 고온의 압력용기로 유입시, 眞空遮斷器 (vacuum breaker)나 압력 완화 밸브를 설치하여 수격 현상(water or steam hammer)과 같은 과도한 압력과 생성을 방지해야 한다. 끝으로, 설치시 경제성과 함께 제규정이나 코드를 따라 계통의 안정성 확보에 주력해야 한다.

5. 결론

부존 자원이 부족한 우리는 최근의 늘어만 가는 전력 수요등 에너지 비용의 증대 뿐 아니라, 보다 쾌적한 환경 보존을 위하여 효율적인 에너지의 이용이 필요하다. 이러한 측면에서 열 시스템의 효율 증대를 목표로 설치하고 있는 순간 기화 용기의 열역학적 개념과 실제적인 각 시스템에서의 역할 및 특성, 그리고 이의 기초 설계 및 설치 문제에 대하여 고찰 하였다.

특히, 설계 방법에 있어서 증기의 습분 동반으

로 인한 시스템의 효율 저하를 방지하기 위하여 증기 및 응축액의 적정 발생 속도를 보장해 주는 유휴 단면적을 고려하여 순간 기화 용기의 크기, 즉 직경 및 전체 체적을 결정하는 것이 합리적이며, flash증기 및 응축액의 필요량과 고압측 공급 유량에 따라 적절한 설계 조건을 결정할 수 있음을 보였다.

간단한 열역학적 원리를 이용하여 운용되는 순간 기화 용기는 저렴한 경비와 약간의 추가 동력으로 에너지 사용 밀도와 열효율을 향상시킬 수 있기 때문에 냉동및 증기 계통에서 부가 장치로서 선호되고 있다. 따라서, 향후 각 시스템의 효율성 증대를 위하여 보다 체계적이고 최적화된 계통 설계에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. Ahlgren, R.C.E. ASHRAE, 1991, "Flash Tanks for Steam and Boiler Systems".
2. Langley, B. C., 1990, "Heating, Ventilating, Air Conditioning, and Refrigerating", Chapter 8.
3. Design Manual for Pressure and Inventory Control System 86-33300/63330-DM-000, 1992, Atomic Energy of Canada Limited.
4. ASHRAE, 1986, "Refrigeration Handbook", Chapter 1.
5. Stoecker, W.E., 1987, "Refrigeration and Air Conditioning", Chapter 16.
6. Dossat, R.J., "Principles of Refrigeration", PP.477~480.
7. ASHRAE, 1989, "Handbook-Fundamentals", Chapter 33, Atlanta, Georgia
8. ASHRAE, 1989, "Handbook-Steam Systems", Chapter 12, Atlanta, Georgia