

## 감압온도 및 전해전류변화에 따른 감압증발특성 연구

이기우, 장기창, 전원표, 박기호, 이계중, 라호상, 박일환\*  
한국에너지기술연구소, \*한국기술교육대학교

The Characteristics of Flashing Evaporation by Pressure Drop and Electrolysis Current

Ki-Woo Lee, Ki-Chang Chang, Won-Pyo Chun, Ki-Ho Park, Kye-Jung Lee,  
Ho-Sang Ra, Il-Hwan Park\*  
Korea Institute of Energy Research, \*Korea Univ. of Tech & Edu.

### 1. 서론

감압증발의 효율을 향상시키기 위한 방법으로 액주내의 기포생성에 의한 자기 미립화를 수반하는 과열액분류의 증발을 분사 감압증발이라고 하며, 특히 적절한 방법으로 액체내에 기포핵을 공급하는 경우에는 매우 좋은 증발성능이 얻어 진다는 것이 보고되어 있다. 따라서 본 연구에서는 온배수를 감압증발시켜 저온저압의 증기를 제조하여 MVR로부터 승온승압에 의해 고온의 증기를 얻기위한 것이 연구의 목적이므로, 증발효율향상을 위해 기포핵 공급용 전해전류장치를 설치하고, 감압증발용의 노즐을 원통형 튜브로 대체하기위해 튜브형 노즐로 부터 과열액을 급격히 감압시켜 자기미립화에 의한 증발을 유도하여 전해전류가 증발효율에 미치는 영향을 실험적으로 연구하고자 작동액체로써 물을 사용하고, 액체유량, 과열도 및 기포핵 공급용의 전해전류량을 변화시켜 실험을 수행하였다.

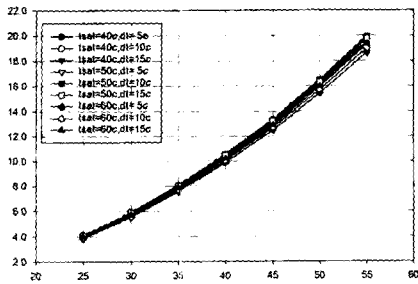
### 2. 이론에 의한 증발량 계산

#### (1)에너지밸런스에 의한 감압증발량

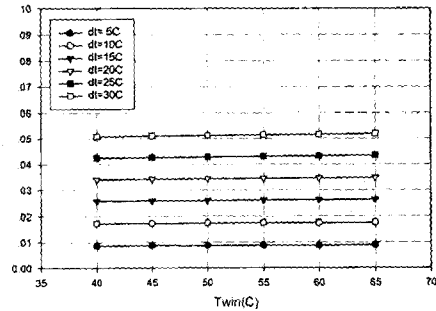
감압증발 시스템에서 액체를 증발시킬 때 열역학적 해석 모델에 의해 수식을 전개할 수 있으며, 유입된 액체가 노즐을 통해 감압실내에 분사되어 증발한 후 증기는 증기압축기에 의해 사용처로 송출되고, 증발하지 않은 액체는 펌프에 의해 외부로 배출시킨다. 이때 이 시스템의 에너지보존의 식과 질량보존의 식으로부터 유속에 의한 수두와 입출구높이차이에 의한 수두가 영향을 미치는 양은 현열과 증발잠열에 의한 엔탈피영향에 비하여 무시가능한 정도이므로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{M_{e,g}}{M_{i,f}} = \frac{(h_{i,f} - h_{e,f})}{(h_{e,g} - h_{e,f})} \quad (1)$$

여기서,  $M$ 은 질량,  $h$ 는 엔탈피, 첨자  $i$  및  $e$ 는 유입 및 유출,  $f$  및  $g$ 는 액체 및 증기를 의미한다. 따라서 실제 감압증발 현장에 적용시에는 노즐의 직경을 가능한 크게 하여 증발이 이론증발의 100%에 근접하도록 설계하여야 하므로 감압온도차에 따른 노즐직경변화와 유입액체량의 관계를 [그림 1]에 나타내었고, 표준대기압상태의 온수가 감압탱크내로 유입될 때 감압도에 따른 유입온수에 대한 발생증기량의 비를 [그림 2]에 나타내었다.



[그림 1] 노즐직경과 감압온도에 따른 유입액체량의 관계



[그림 2] 유입 온도온도별 감압온도차에 의한 발생증기량의 비

## (2) 감압실의 높이와 증발효율의 관계

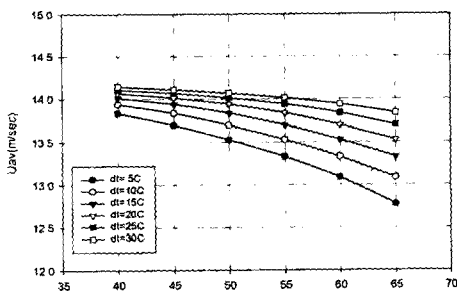
감압증발이 이론증발효율의 100%에 근접하도록 설계하기 위해서는 감압실내에 일정한 시간동안 유입된 유체가 체류하도록 하여야 하므로, 유체의 속도에 따라 감압실내의 높이가 이 체류시간을 만족하도록 결정되어야 하며, 감압증발의 시간과 감압증발의 관계를 파악할 필요가 있다. 감압증발과정은 증발지연시간  $t_0$ 을 경과한 후, 액체온도가 급속히 떨어지는 초기와, 비교적 완만하게 떨어지는 후기의 2단계로 구분되고 있으며, 각각의 단계에서, 분류증심축상의 무차원액체온도,  $\theta$ 는 감압탱크내 액체의 체류시간,  $t$ 에 대한 식으로 표시하고 있다. 실제증발량과 이론증발량의 비율로 정의되는 감압증발효율  $\eta$ 는

$$\eta = 1 - \frac{1}{1 + k\Delta T_s [t - (\rho d^2 / \Delta P_s)^{1/2}]} \quad (2)$$

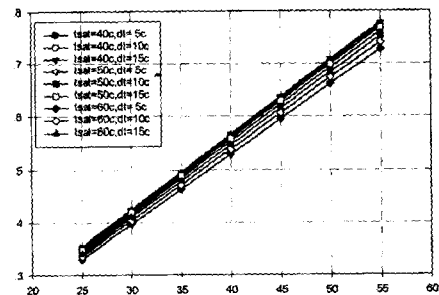
로 정리하고 있다. 여기서  $k$ 는 액체의 물리적 성질, 작동조건 등의 효과를 고려한 실험계수이고,  $\Delta P_s$ 는 과열도  $\Delta T_s$ 에 대한 포화증기압의 차이이다. 여기서  $t$ 는 액체의 유동변화에 대한 시간으로 초기평균유속을  $u_m$ 이라고 하면

$$t_z = \frac{z}{u_m} \quad (3)$$

이고, 실제 감압증발 열교환기를 설계시에는  $t_{zmin} > t_0$ 이 되도록 하여야 하므로 열교환기의



[그림 3] 유입온수온도와 감압온도차에 따른 이론평균유속



[그림 4] 노즐직경과 감압온도차에 따른 감압실내의 최소높이

최소높이  $z_{\min}$  는

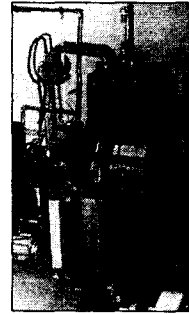
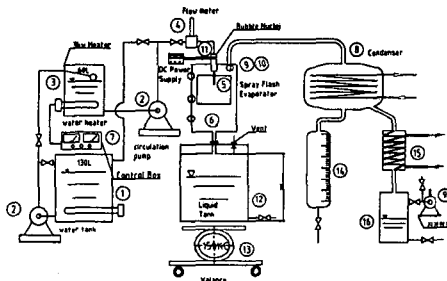
$$z_{\min} = u_{av} * t_o \quad (4)$$

로 계산가능하다. 감압온도차에 따른 평균유속은 [그림 3]과 같고, 노즐직경과 감압온도차에 따른 최소높이는 [그림 4]와 같이 계산가능하게 된다.

### 3. 감압증발 성능실험

#### (1) 실험장치

감압증발방식에 의한 열회수시스템의 구성은 [그림 5]에 나타난 바와같다. 본연구에서는 온배수로부터 감압증발시켜 저온저압의 증기를 제조하여 MVR로 승온승압시켜 고온의 증기를 얻는 것이 연구의 목적이므로 분사감압방법에 의해 급격히 감압시켜 자기미립화에 의한 증발을 유도하고자 하는 실험장치를 구성하는 것으로 하였다. 노즐로부터 감압탱크내에 과열액을 방출하면 분사형태로 분사가 되어 감압증발이 발생하며, 증발효율에 영향을 미치는 인자로는 액체온도, 액체유량, 과열도, 노즐경이므로 이의 변화에 따른 감압증발효율에 대한 자료를 도출하고 성능실험장치를 구성하였다.



[그림 5] 전해발생 감압증발실험장치의 계통도 및 사진

#### (2) 실험방법

실험방법은 자기미립화에 의한 분사효과를 고찰하기 위해서 공급온수 및 포화온도차 그리고 백금전극에 공급하는 직류전류의 변화를 수행하였으며, 노즐직경 2.5mm에 대해 유출액체의 온도  $T_o$ 를 40°C, 50°C 및 60°C로 하고, 감압탱크내의 압력을 낮추어 액체의 과열도  $\Delta T_s$ 를 5°C, 10°C 및 15°C범위로 변경시켜 감압증발량 및 감압증발효율을 실험하는 것으로 하였다. 또한 직류전류의 변화는 0, 20, 60, 110mA로 변화시키면서 성능실험을 수행하고 이의 가시화를 위해서 디지털카메라로 촬영하여 분사효과를 분석할 수 있도록 하였다.

### 4. 실험결과 및 검토

#### (1) 감압온도차 및 전해전류량에 따른 증발현상

이론적고찰에서 검토한 바와같이 자기감압증발은 감압실내에 유입된 온수액체의 현열에 의해 일부증기가 발생하는 것으로, 유입된 액체가 일정한 증발지연시간을 경과한 후에 증발이 이루어지는 것으로 보고되고 있다. 따라서 증발지연시간을 단축하기위해서는 유입되는

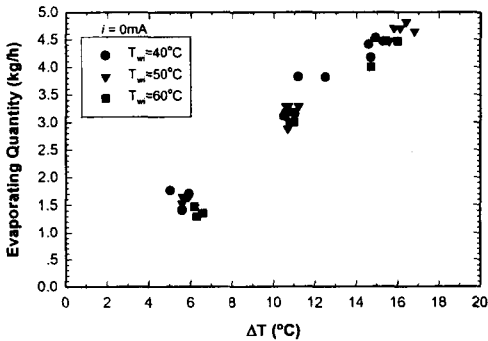
액체의 입자를 분해시키는 방법이 고려되고 있으며, 그 방법중의 하나가 전해전류를 공급하여 분해시키는 것이다. 본 연구에서도 감압온도차, 전해전류량을 변화시켜 감압증발효과를 실험하였으며, 노즐에서의 분무현상을 관찰창을 통해 [그림 6]과 같이 가시화하여 나타내었다.



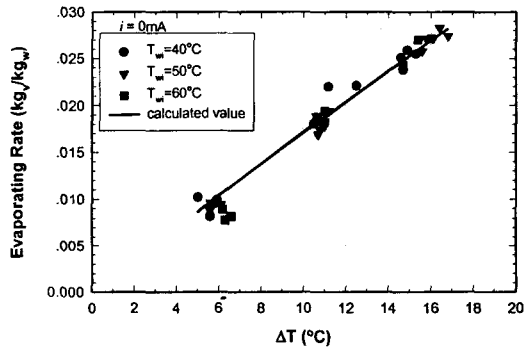
$i=20\text{mA}$                        $i=120\text{mA}$                        $i=20\text{mA}$                        $i=120\text{mA}$   
 $T_0=50^\circ\text{C}, dt=5^\circ\text{C}$                        $T_0=50^\circ\text{C}, dt=10^\circ\text{C}$   
 [그림 6] 감압온도차 및 전해전류량에 따른 증발현상

### (2) 자기미립화가 없을 때 증발효과

자기미립화용 백금선양극에 직류전원을 공급하지 않아 자기미립화가 이루어지지 않도록 하였을 때 공급온수온도 및 포화온도차에 따른 증발효과를 고찰하기 위해서 공급온수온도를 40, 50, 60°C로 하고 그 각각에 대해서 포화온도차를 5, 10, 15°C로 하여 성능실험을 수행하였다. [그림 7]은 공급온수온도 및 포화온도차에 따른 증발량을 나타낸 것으로서 포화온도차가 같을 때 공급온수온도가 낮을수록 증발량도 증가하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 포화온도차의 증가에 따라 증발량도 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있으며, [그림 8]에서 포화온도차에 따른 증발율을 계산치와 측정된 증발율의 값을 나타낸 것에서는 공급온수온도 및 포화온도차에 따른 증발율은 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.



[그림 7] 포화온도차에 따른 실제증기발생량

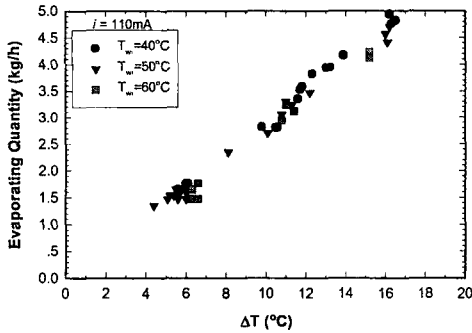


[그림 8] 포화온도차에 따른 증기발생율

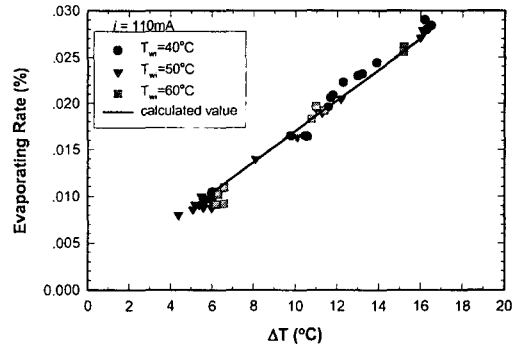
### (3) 자기미립화가 있을 때 증발효과

자기미립화용 백금선 양극에 직류전원 110mA를 공급하였을 때 공급온수온도 및 포화온도차에 따른 증발효과를 고찰하기 위해서 공급온수온도를 40, 50, 60°C로 하고 각각에 대해서 포화온도차를 5, 10, 15°C로 하여 성능실험을 수행하였다. [그림 9]는 공급온수온도 및 포화온도차에 따른 증발량을 나타낸 것으로서 포화온도차가 같을 때는 이론에서 검토한 바와

같이 온수온도에 따른 증발량변화는 적으며, 포화온도차의 증가에 따른 증발량은 선형적으로 증가하고 있다. 그리고 [그림 10]은 포화온도차에 따른 증발율을 계산치와 측정값으로 나타낸 것으로서 공급온수온도 및 포화온도차에 관계없이 거의 일치하는 것으로 나타났다.



[그림 9] 포화온도차에 따른 실제증기발생량



[그림 10] 포화온도차에 따른 증기발생율

#### (4) 직류전류변화에 따른 증발효과

자기미립화를 시키기 위한 백금선 양극에 직류전원을 0, 20, 60, 110mA로 변화시켰을 때 공급온수온도를 50°C로 하고 포화온도차에 따른 증발효과를 고찰하기 위해 포화온도차를 5, 10, 15°C로 하여 성능실험을 수행하였다. [그림 11]은 공급온수온도가 50°C일 때 직류전류의 변화에 따라서 포화온도차에 따른 증발량을 나타낸 것으로서 포화온도차가 같을 때 공급온수온도가 낮을수록 증발량도 증가하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 포화온도차의 증가에 따라 증발량도 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 [그림 12]는 포화온도차에 따른 증발율을 계산치와 측정된 증발율의 값을 나타낸 것으로서 전류의 변화에 따라서 약간의 증발율이 변화하고 있으며, 전류량이 증가할수록 증발율도 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 [그림 13]은 이론적으로 계산한 증발량과 실제 성능실험으로 측정된 증발량의 비를 나타낸 것으로서 포화온도가 적을수록 전류량증가의 효과가 크게 나타나고 포화온도차가 클수록 감압증발효율은 증가하고 있음을 알 수 있으며, 증발효율은 90% 이상을 나타내고 있다.

따라서 실험으로부터 증발효율이 100%에 근접하도록 감압증발실의 높이를 계산하기 위해서는 증발효율식에서 상수인 k 값을 구하는 것이 필요하며, 실험값으로부터  $T_0=40^\circ\text{C}$  및  $60^\circ\text{C}$ 의 경우에  $i=120\text{mA}$ 에 있어서 k의 평균치는 70으로 유사실험에서 발표된 값 68~91과 비교하면 신뢰성있는 값으로 판단된다.

## 5. 결론

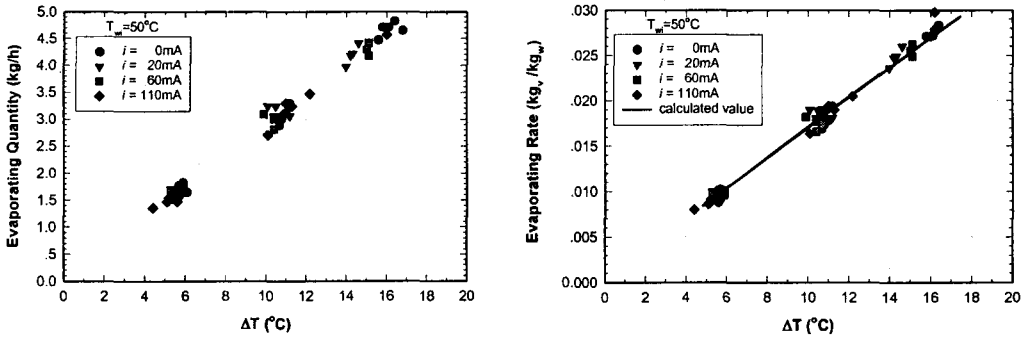
본 연구에서는 온배수를 자기감압증발시켜 저온저압의 증기를 제조하여 MVR로부터 승온승압에 의해 고온의 증기를 얻는 것을 연구의 목적으로하여 감압증발이 100%될 수 있도록 증발지연시간과 높이, 증발효율을 계산할 수 있도록 이론적으로 검토하였으며, 증발효율 향상을 위해 기포핵 공급용 전해전류장치를 설치하고, 감압증발용의 노즐을 원통형 튜브로 대체하기위해 튜브형 노즐로부터 과열액을 급격히 감압시켜 자기미립화에 의한 증발현상을 실험하여 다음과같은 결론을 얻었다.

(1) 감압유체로서 온수를 사용하고, 액체온도, 과열도 및 기포핵발생용의 전해전류량을 변화시킨 결과 온수온도가 낮고, 감압온도차가 적은 경우에는 전해전류가 증발효과향상에 기

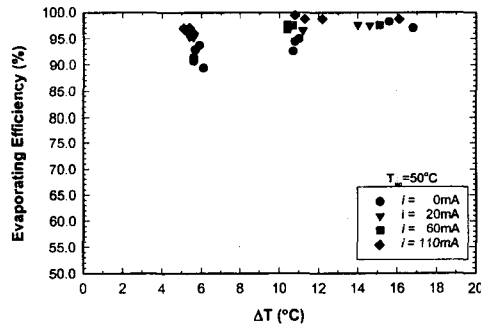
여하는 것으로 나타났다.

(2)유입온수량과 감압에 의한 증기발생량의 비는 유입온수온도에는 영향이 적으나 감압온도차에 따라서는 크게 영향을 받으며, 유입 온수량에 대한 증기발생량의 비가 감압온도차 5°C에서 0.009, 감압온도차 30°C에서 0.05로 증기발생량이 극히 낮아 일정량의 증기발생을 위해서는 다량의 유입온수가 필요하므로 공정에 적용시에는 적용처의 사전검토가 요구된다.

(3)감압증발에 원통형의 노즐로부터 증기발생에서 자체감압차에 의해 액체의 유입과 증기발생이 가능하며, 감압증발의 효율예측에 필요한 k값을 70정도로 사용하면 간이식에 의해 액체온도, 노즐직경 및 과열도 등이 주어지면 증발효율예측이 가능하도록 하였다.



[그림 11] 직류전류변화에 따른 실제증기발생량 [그림 12] 직류전류변화에 따른 증기발생율



[그림 13] 직류전류변화에 따른 감압증발효율

### 참고문헌

1. 宮武 修, 大東慶久, 谷口芳弘, 스프레이플래시 증발효율 실험의 연구, 空氣調和衛生 工學論文集, No42, pp.49-57, 1990년 2월
2. Osamu Miyatake, Comparative Study of Flash Evaporation Rates, Desalination 96, pp.163-171, 1994
3. O.Miyatake, T.Tomimura, Y.Ide, M.Yuda, T.Fujii, Effect Liquid Temperature on Spray Flash Evaporation, Desalination 37, pp.351-366, 1981
4. 이기우 외, 감압증발 열교환기개발, 과학기술연구보고서, 1998
5. 박일환, 이기우, 김주형, 감압증발과정에 대한 해석, 대한기계학회99년도 춘계 학술대회 논문집, pp.687-692, 1999