

LNG선용 / 발전설비용 가변 오리피스형 과열도

최두열[†], 이종수⁺⁺, 최현규⁺⁺⁺, 최순호⁺⁺⁺⁺

Variable Orifice De-super Heater for LNG Carrier or Power Plant

Du-Yeal Choi[†], Jung-Soo Lee⁺⁺, Hyun-Kue Choi⁺⁺⁺ and Soon-Ho Choi⁺⁺⁺⁺

Abstract : Desuperheater is a passive device to control the temperature of steam in various plants. However, in spite of its simple structure, the accurate prediction of a desuperheater is very difficult because there are many designed factors for the design of a desuperheater. In this study, the theory of heat transfer phenomena in a desuperheater was developed and the various design factors are evaluated. As a results, we confirmed that the droplet size of 30 - 200 μ m is best effective for the performance of a desuperheater.

Key words : Super heated steam(과열증기), Desuperheater(과열저감기), Droplet size(액적직경)

1. 서론

LNG선, 케미컬 운반선 등에서는 선박의 폭발위험의 방지 및 증발된 다량의 LNG 가스의 재응축, 그리고 화력 및 원자력 발전소의 보조기기 가동을 위하여 증기터빈 계통이 일반적으로 이용된다. 이상과 같이 다량의 증기가 사용되는 경우 보일러에서 사용처까지는 수송상의 열효율과 작은 구경의 증기관 사용을 위하여 고온고압상태로 증기를 보낸 후, 사용목적에 맞도록 증기의 압력과 온도를 조절하여 사용한다. 일반적으로 증기의 열역학적 상태를 조절하는 방법으로는, 과냉상태의 수적과 과열증기가 직접 접촉하는 방법, 열교환기에 의한 간접 접촉법 등이 있으나, 증기혼합장치의 간략화와 경제성 측면에서 과열증기 라인에 물을 직접 분사시키는 Desuperheater가 가장 많이 선택되고 있다.

Desuperheater의 설계에 요구되는 핵심기술은 주어진 조건에 상응하는 냉각용 액적 분무 기술과 분무된 냉각용 액적과 유동중인 과열증기사이에서의 열/물질전달 촉진기술이며, 액적 증발에 대한 기초 연구로 Lee[1] 등은 고온의 외부 유동장에 연료 액적의 증발에 미치는 인자로 액적표면의 온도, 외부 기체의 압력, 액적의 증기압, 액체 표면의 증기압, 액적주위 기체 분압 등의 영향에 관하여 수치해석을 실시하였다. 외부 유동에 속도와 증발율에 관한 상관 관계식으로 $k_s = k_{s0}(1 + 0.059 Re^{0.5})$ 을 제시하고 있다.

또한 1995년 V.P.Carey[2]등 단일 액적에 대하여 Monte-Carlo Direct-simulation을 이용하여 열전달 관계식을 발표하고 있으며, H.R.Jacobs[3]에 의하여 직접 접촉 열전달 관계식이 체계적으로 정리되어 있어, 분무 액적의 증발과 열전달 관계를 규명하고 있다.

2. Desuperheater의 구조 및 작동원리

Desuperheater 내부유동은 그림 1과 같이, 유량제어소자, 액적발생 기구 및 혼합 챔버로 구성되어 있으며, 과열증기가 하부로부터 공급되면 유량과 유량제어소자에 의하여 유동평형을 유지한다. 과열증기가 제어소자의 유량제어에 따라 챔버내로 공급되는 동안 과열도를 제어하기 위하여 공급되는 냉각수는 액적발생 기구에서 50~200 μ m 정도의 액적상태로 과열증기와 혼합이 이루어진다. 분무된 액적은 과냉각 상태에서 과열증기와 혼합, 액적이 포화온도까지 가열되는 현열교환과 이후 액적이 증발되는 잠열

열교환 과정을 통하여 과열증기의 과열도를 조절하게 된다. 과열저감기 내에서의 유동은 과열증기와 액적이 혼합되어 있는 기-액 이상유동, 증발 열전달, 이로 인한 열물성치의 변화 등이 복잡하게 이루어짐으로 이에 대한 이론적 해석은 매우 어려우며, Desuperheater의 설계를 위해서는 이상유동 및 열전달에 대한 깊은 이해를 요구한다.

3. 유동을 고려한 액적의 증발

Desuperheater에서 대부분의 영역을 차지하는 과열증기-액적의 이상유동 영역이며, 과열증기와 액적간의 온도분포 및 압력분포는 그림 2와 같다.

그림2에서 보는 바와 같이 과열증기로부터 액적 표면으로 공급된 에너지에 의하여 액적이 증발되고, 과열증기의 과열도는 작아진다. 이때 액적내부의 온도가 포화온도로 일정할 경우에는 현열의 영향을 무시할 경우 과열증기와 액적간의 열평형 식은,

$$\rho_L \lambda_{LV} \frac{dR_d}{dt} = -k_m \left(\frac{\partial T_m}{\partial R} \right)_r = -h_Q (T_\infty - T_d) \quad (1)$$

미소체적내의 액적 균으로 전달된 총열량은,

$$Q_{gd} = h_{gd} \cdot A_d \cdot (T_g - T_s) \quad (2)$$

이때 액적과 과열증기 사이의 열전달 관계식은,

$$N_D = \frac{2 \ln(Ja + 1)}{Ja}, \quad Ja = \frac{C_{pv}(T_g - T_s)}{h_{lv}}, \quad N_D = \frac{k_v h_g}{D} \quad (3)$$

식(2)와 식(3)을 이용하여 과열증기와 액적간의 열전달 계수를 계산하고 이에 따라 과열증기의 온도, 액적의 직경, 열물성치를 재계산하며 액적의 수명을 계산할 수 있다. 식(2)와 식(3)을 이용하여 계산한 결과를 그림 3에 초기 액적의 직경 50 μ m, 100 μ m에 대한 액적직경-시간 관계, 그림 4에는 Nu - 증기온도, 그리고 그림 5에는 액적 표면 열전달계수 - 증기 온도의 관계를 나타내고 있다.

과열증기로부터 전달된 열량에 의하여 증발된 액적 증발량과 액적의 직경 (d)과의 관계식은 다음과 같다.

$$W_{dg} = \frac{Q_{gd}}{H_{fg}} \quad (4)$$

+ 최두열 (한국열유체기술사 팀장), E-mail:ok01910@kornet.net, Tel: 055) 337-8678
 ++ 이종수, 한국열유체기술사 대표
 +++ 최현규, 군산대학교 동력시스템공학전공
 ++++ 최순호, 한국해양대학교 기관시스템공학부

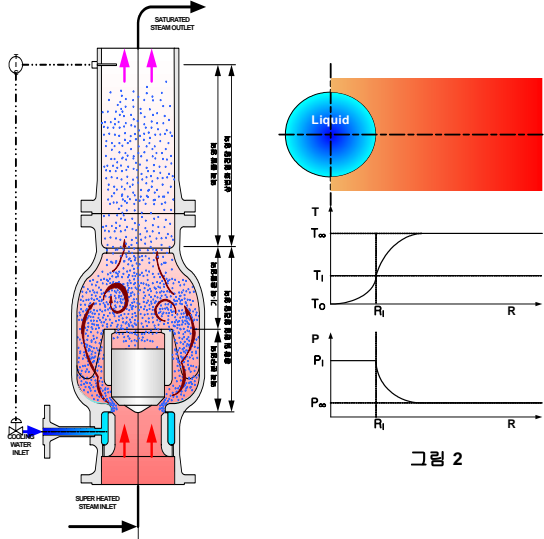


그림 1 과열 저장기의 구조 및 원리

$$d_2^3 = d_1^3 - \frac{W_{dg}}{\rho_l \frac{\pi}{6} N}, N(\text{액적개수}) = \frac{6G_d}{\pi d^3 P_d u_d \Delta x} \quad (5)$$

냉각수에서 발생하는 액적은 직경이 작을수록 액적 수량은 증가하며, Desuperheater에서 발생하는 평균 액적 직경은 30~200 μm 정도이다.

그림 3에서 보는 바와 같이 분무 액적 직경이 50 μm 이하의 경우에는 액적이 0.2초, 100 μm 인 경우에도 0.8초 정도가 소요됨을 알 수 있다. 따라서 스팀 혼합기에서 안정적이고 효율적으로 사용하기 위해서는 초기에 분무되는 액적 직경을 100 μm 이내로 제어하는 기술이 매우 중요함을 알 수 있다.

그림 4는 증기 온도와 액적 직경에 따른 NuD를 나타내며, Ja=0 일 경우에는 NuD = 2.0으로 잘 알고 있는 바와 같이 유동 중의 액체와 고체구간의 열전달 관계식으로 된다. 그림에서 보는 바와 같이 과열도가 증가함에 따라 약 30% 정도가 감소함을 알 수 있다. 또한 그림 5에는 액적 직경과 증기의 온도에 따른 액막 열전달 계수를 보여주고 있다. 난류 열전달 관계식으로 Ahmad & Yovanovich에 의하여 다음 식이 제안되기도 하였다.

$$Nu_D = 2.0 + \frac{0.775 Re_D^{1/2} Pr^{1/2} / \sqrt{(2\gamma + 1)}}{\left[1 + \left(\frac{1}{(2\gamma + 1)^3 Pr}\right)^{1/6}\right]} \quad (6)$$

Desuperheater의 초기에는 일시적으로 발생하는 환상 분무류 영역이 존재하나 전체에 미치는 영향은 미미하다고 보고 본 계산에서는 무시하였으나, 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

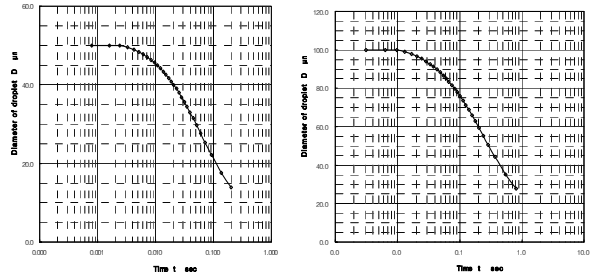
4. 제어소자 내부의 액적유동

액적분무와 증기의 혼합 및 유동은 스팀 혼합기의 성능을 좌우하는 중요한 요소이며, 3장에서 살펴본 바와 같이 스팀 혼합기가 원활하게 작동하려면 분무 액적 직경을 100 μm 이내로 유지 시켜 줄 필요가 있다.

유동 액적의 운동방정식은,

$$\frac{du}{dt} = \left(\frac{P_d - P}{P_d}\right)g - \frac{3}{4} C_d \frac{u^2}{d} \frac{\rho}{\rho_d} \quad (7)$$

$$C_D = \frac{24(1 + 0.15 Re^{0.687})}{Re}, \quad 0 < Re < 800 \quad (8)$$



(a) 50 μm

(b) 100 μm

그림 3 액적직경-시간곡선

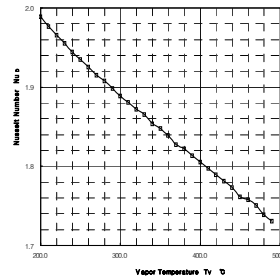


그림 4 Nu - 증기온도

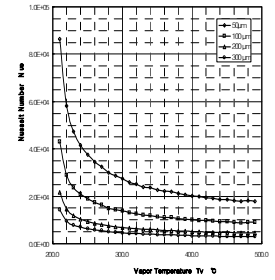


그림 5 액적표면 열전달계수

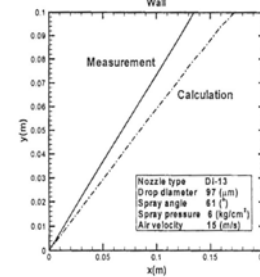


그림 5 분무액적의 유동

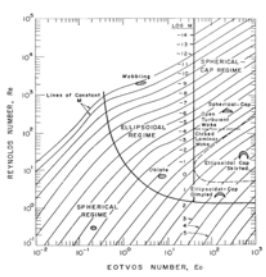


그림 6은 식(7)을 이용하여 계산된 분사액적의 유동 결과와 실험결과를 비교한 것으로 유동기체 중에 분무된 액적이 벽면에 충돌되는 축방향의 거리를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 분무된 액적이 벽면에 충돌하는 거리가 계산 값이 실험값보다 약간 크게 나타나고 있는데, 이것은 상기의 액적유동 계산에 있어서 액적 직경을 평균값으로 적용하고, 실제로 다양한 벨 모양 분포도를 가지는 다양한 액적 형태를 가지기 때문으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 이상현(1993), 고온외부 유동장이 연료 액적의 증발에 미치는 영향에 관한 수치연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
- [2] V. P. Carey (1995), "Stochastic modeling molecular transport to an evaporating micro-droplet in a superheated gas", Heat transfer, Vol.117 pp.432.
- [3] H. R. Jacobs (1988) "Direct contact heat transfer", Hemisphere publishing co., pp.223.
- [4] G. S. H. Lock(1994), Latent Heat Transfer An introduction to Fundamentals, Oxford University Press, pp.190~ 224.
- [5] (사)한국선급(1997), LNG선 HEAT BALANCE 계산용 전산 프로그램 개발 최종보고서.
- [6] A. F.Mills(1995), HEAT & Mass Transfer, IRWIN, INC.