홈진 수직 증발관에서 유동 및 열/물질 전달 해석

Flow, Heat and Mass Transfer Analysis for Vertical Grooved Tube Evaporator

○박일석[1], 최도형[2] (한국과학기술원)

Il-Seouk Park and Do Hyung Choi

ABSTRACT : A numerical investigation for the flow, heat and mass transfer characteristics of the grooved evaporating tube with the films flowing down on both the inside and outside tube walls has been carried out. The condensation occurs along the outside wall while the evaporation takes place at the free surface of the inside film. The 3-D transport equations for momentum and energy are solved by using the FVM(Finite Volume Method). The free surface shape is tracked by the moving grid technique satisfying the SCL(Space Conservation Rule). Due to the secondary motion of the fluid, the film thins at the crest, while thickens at the valley. The velocity and temperature fields as well as the amounts of the condensed and evaporated mass have been successfully predicted for various operating conditions and groove shapes.

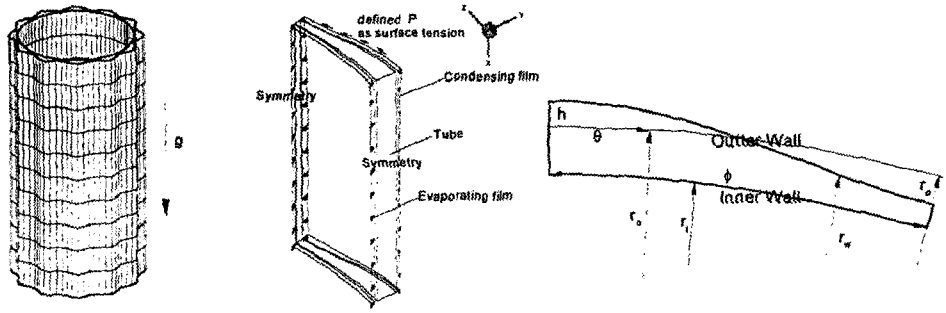
1. 서 론

액막이 수직 원관의 내·외벽을 타고 흐르며 각각 증발(evaporation)과 응축(condensation)이 동시에 발생하는 증발관에서는 원관의 내부에 차가운 액체가 액막의 형태로 유입되고 이로 인하여 원관의 바깥쪽에 정체된 상태로 존재하던 수증기가 원관의 외벽을 타고 흐르는 응축 액막을 형성하며 또한 이 응축 액막은 관 내벽을 타고 흐르는 액막의 자유표면에 증발 현상을 초래한다. 이러한 수직 증발관은 ME(Multi-effects Evaporator)[1] 담수화 공정의 증발부에 직접적으로 응용되어지고 증발과 응축 열전달 현상이 동시에 나타나는 많은 공학 문제에 응용 되어질 수 있다.

액막 유동에서 액막의 두께는 열전달 성능을 결정하는 중요한 인자임이 이미 이전의 연구들을 통해 증명되어진 바 있다.[2, 3, 4] 따라서 본 연구에서는 증발관 외벽에 Fig. 1 (a)에서 처럼 일정한 주기로 홈을 만들어 외부 액막의 두께가 표면장력의 영향에 의해 원주방향을 따라 다른 값이 되도록 하여 표면장력의 영향에 따라 유동 및 열전달 특성의 변화를 비교하려 한다. Fig. 1 (b)와 같이 외부액막에서 표면장력의 영향으로 인해 관 표면의 마루에서 골로 향하는 2차 유동이 발생하여 마루에서의 액막두께는 점차 얇아지며 골에서는 액막두께가 점차 두꺼워지게 됨에 따라 외부 액막 유동은 강한 3차원성을 띄게 되어 3차원 해석이 불가피해진다. 자유표면 경계조건의 하나인 운동학적 조건(kinematic condition)으로 부터 제어체적면 꼭지점의 새로운 좌표를 얻어 움직이는 격자계(moving grid system)를 구성하며, 이때 공간보존법칙(SCL, space conservation law)[5, 6]을 만족하도록 격자속도(grid velocity)를 정의하여 암시적인(implicit) 시간 전진 계산(time marching)을 한다.[7, 8, 9] 계산상의 편의를 위해 내·외부 액막과 관을 하나의 격자계로 묶었으며 고체영역은 고정된 격자계를 유지하며 불침투성 벽(impermeable wall)으로 처리하고 온도장에 대해서는 경계에서 확산계수를 고체영역과 액막영역의 양쪽 조화평균을 취하여 계산하였다.[10]

본 연구에서는 이상의 방법들을 이용하여 관 외벽에 만든 홈 주기 및 홈 높이 등을 변화 시킴에 따른 표면장력 효과의 영향에 따라 내·외부 액막을 통한 열전달 성능 및 유동 특성을 비교하여 응축 및 증발량을 예측한다.

1) 한국과학기술원 기계공학과 (305-701, 대전광역시 유성구 구성동 373-1, Tel. 042-869-3058)
2) 한국과학기술원 기계공학과 (Tel. 042-869-3018)



(a) (b) (c)

Fig. 1 Definition sketch.

2. 해석 방법

증발관 내·외부 유동해석을 위하여, 본 연구는 유체의 물성치들은 운전 범위에서 일정하고, 내·외부 액막의 자유표면에서는 포화상태가 유지되어 주어진 압력에 대해 일정한 포화온도가 유지된다고 가정하였으며 초기에 관의 외벽이 미소 두께의 응축액막으로 덮여 있는 상태에서 계산을 시작한다. 관 외벽의 모양은 Fig. 1 (c)에 보인바와 같이 평균 외반경 r_o에 정현파를 더한 형태로 다음과 같이 정의 하는데 여기서, r_w는 관의 중심에서 외벽까지의 거리를 나타내고 r_o는 관의 평균 외반경이고 h는 홈의 깊이를 나타내며 ϕ는 홈의 반주기, θ는 기준점으로 부터의 각도를 나타낸다.

$$r_w = r_o + h \times \cos(\theta/\phi) \tag{1}$$

2. 1 지배방정식

Fig. 1 (b)와 같이 홈의 반주기만을 계산 영역으로 잡고 양쪽 대칭면에 대칭조건을 사용하여 사용 격자계를 줄였다. 지배방정식은 다음의 3차원 비정상 층류 유동에 관한 공간 보존 법칙 (SCL, space conservation law)과 연속 방정식, 운동량 방정식 그리고 열전달식을 사용한다.

$$\frac{d}{dt}\int_V dV - \int_S \vec{v_g}\cdot d\vec{S} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{d}{dt}\int_V dV + \int_S (\vec{v} - \vec{v_g})\cdot d\vec{S} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{d}{dt}\int_V \vec{v}dV + \int_S [(\vec{v} - \vec{v_g})\vec{v} - T]\cdot d\vec{S} = \int_V \vec{s_v}dV \tag{4}$$

$$\frac{d}{dt}\int_V TdV + \int_S [(\vec{v} - \vec{v_g})T - q]\cdot d\vec{S} = \int_V s_T dV \tag{5}$$

위의 식들에서 좌변의 첫번째 항들은 격자의 모양이 시간에 따라 바뀜으로 생기는 체적 변화를 고려하고 있고, 대류항에 들어 있는 $\vec{v_g}$ 는 격자 속도(grid velocity)에 해당한다. 식(2)의 공간 보존식은 격자의 이동에 의한 미소체적의 모양과 위치 변화에 따른 공간의 보존을 나타낸 식이며 만약 이 식이 만족되지 않을 경우 미소량의 질량생성(mass source)이 나타나게 된다. 식(3)에

식(2)을 빼면 연속방정식은 정상상태의 고정된 격자계에 대한 것과 동일한 형태가 된다. 응력텐서(stress tensor) T는 $-p\,I+(2/Re)\,D$ 로 표시되며 p는 압력, I는 단위텐서, D는 변형률 텐서(rate of strain tensor)로 $1/2[\nabla\vec{v}+(\nabla\vec{v})^T]$로 표시된다. q는 열유속 벡터로 $1/RePr\,\nabla T$로 표시되며, $\vec{s_v}$와 s_T는 각각 운동량방정식과 열전달식의 생성항이다. 길이는 관의 평균 외경인 $2\cdot r_o$로 무차원화 되었고 속도는 1로 무차원하여 실제 물리량과 같은 값을 나타낸다. 온도는 관외부 증기의 온도와 내부 증기의 온도차로 무차원하여 내부 액막 자유표면에서 0, 외부 액막 자유표면에서 1의 값을 가지도록 하였다.

2. 2 초기조건 및 경계조건

관 자체는 불침투성 벽으로 정의하므로 두 액막과 벽의 경계들에서의 경계조건은 기술하지 않는다. 온도장 해석에서 경계면에서 확산계수를 고체벽과 액막의 조화평균으로 사용한다.

- 초기 조건 : 내부액막의 경우 주어진 유량에 대해 완전 발달되었을 때의 액막두께와 속도분포를 2차식으로 가정하여 사용하고 외부액막은 동일 두께의 2차원 평판위의 액막 속도 분포를 적용한다. 온도는 주어진 속도장에서 정상상태 해를 구하여 사용한다.
- 각 액막의 자유표면 : 운동역학적 조건(dynamic condition), 일정온도 조건

$$p=-x/We,\quad T=const. \tag{6}$$

- 각 액막의 입구 ($x=0$) : 초기조건과 같은 속도와 일정한 온도값
- 각 액막의 출구 : 출구 조건, $\partial^2\phi/\partial x^2=0$
- 대칭면 : 대칭면을 통과하는 유량이 없도록 $\partial\phi/\partial n=0$.

2. 3 Free Surface Tracking

자유표면이 있는 유동장은 내연기관의 실린더 내부유동처럼 경계의 움직임이 시간에 따라 알려져 있는 경우와 달리 시간에 따른 자유표면의 위치를 모르므로 경계의 위치를 해의 일부분으로 구해야 한다. 따라서 자유표면에서는 운동량 방정식의 해를 구하기 위해 힘의 균형을 나타내는 운동역학적 조건(dynamic condition)과 더불어 자유표면 위에 있는 입자들은 언제나 자유표면상에 있음을 나타내는 운동학적 조건(kinematic condition)이 필요하다.

본 연구에서는 자유표면을 통한 질량의 유출입은 응축 및 증발에 의한 것외엔 없으므로 운동학적 조건을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m'_{fs}=F_{fs}-\Omega_{fs}=m'_{c\,or\,e} \tag{7}$$

$m'_{c\,or\,e}$는 자유표면에서 응축(condensation) 및 증발(evaporation)되는 양이며, F_{fs}는 운동량 방정식을 풀어 나온 자유표면에서의 유량에 해당하고, Ω_{fs}는 시간에 따른 격자점의 이동으로 생기는 체적변화률을 나타낸다. 본 연구에서는 액막의 비정상거동을 관찰하는 것이 목적이 아니므로 매 시간마다 식(7)을 정확히 만족하도록 하는 암시적인(implicit) 해석은 필요하지 않고 다만 다음 시간에서의 자유표면 위치를 보정하기위한 조건으로 사용한다. 비 엇물림 격자계에서 제어체적면을 통한 체적변화 Ω_{fs}로부터 제어체적의 꼭지점들의 위치를 찾는데는 2차원의 경우 관계식이 찾아야하는 변수보다 항상 1개씩 적어 이를 해결하기 위해 The[8, 9]등은 체적변화 Ω_{fs}에 대해 엇물림 제어체적 개념을 도입하였다. 그러나 이 방법은 3차원 해석에 적용이 될 수 없어 본 연구에서는 Ω_{fs}로부터 제어체적면의 중심의 이동 위치를 구한 뒤 이들을 내삽하여 꼭지점들의 위치를 구하였다.

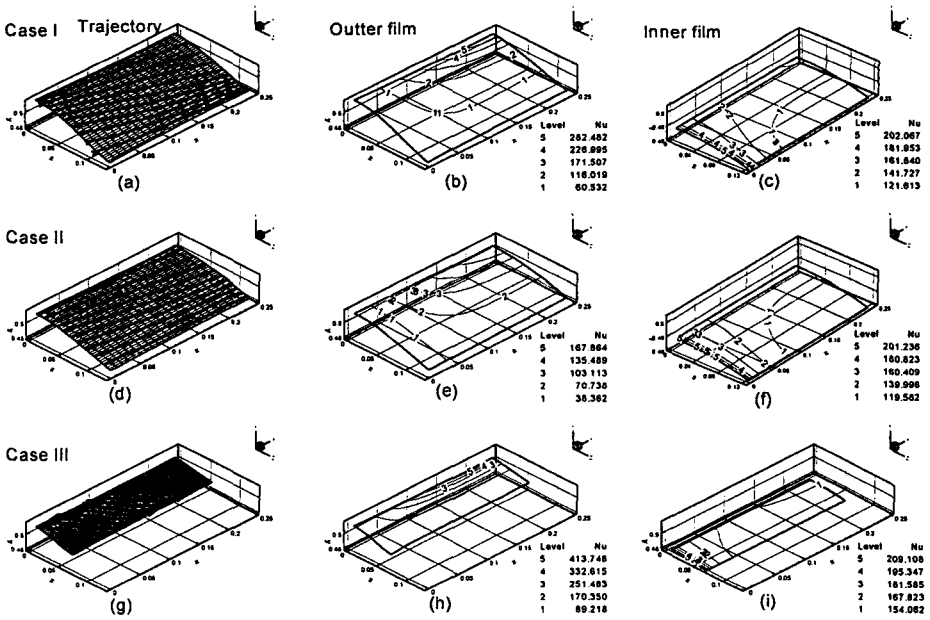


Fig. 2 Trajectory and Nu number distribution on the each film free surface.

3. 결과 및 고찰

홈진관의 형상이 열전달 및 유동특성에 미치는 영향을 고려하기 위하여 3가지 경우에 대한 계산을 수행하였다. case I은 홈의 반주기가 15°이고 무차원 홈 높이가 0.01인 경우이고 case II는 홈의 반주기는 역시 15°이고 홈높이를 반으로 줄인 0.005인 경우이다. case III은 홈의 반주기를 7.5°로 하고 홈 높이를 0.005로 한 경우이다. case II는 외벽의 곡면이 가장 완만한 경우로서 표면장력의 영향을 가장 덜 받는 경우이고 case I은 홈 높이를 증가시켜 표면 장력의 효과를 보고 있으며 case III은 홈주기를 줄임으로 표면장력의 영향이 커지도록 하였다.

Fig. 2에서는 각 경우에 대해 바깥쪽 액막 자유표면에서 입자들의 궤적과 양쪽 액막 자유표면에서 Nusselt 수 분포를 비교하고 있다. 우선 궤적에서 볼 수 있듯이 case III이 표면장력의 영향을 가장 많이 받아 마루로부터 골로의 2차유동이 가장 강하게 이뤄지고 있음을 알 수 있다. 이는 곳 마루 부분에서의 액막 두께 감소로 이어져 바깥 액막에서의 Nusselt 수 비교에서 알 수 있듯이 마루 부근에서 case III이 case II보다 약 두배이상 더 큰 Nusselt 수를 나타냄으로써 응축량이 많을 것으로 기대할 수 있다. 한편 안쪽 액막에서의 Nusselt 수 비교를 통해 상대적인 증발량을 예측할 수 있는데 입구 근처에 contour들이 모여 있는 것은 입구에서 일정한 온도조건을 사용 했기 때문이며, 하류로 내려가서 Nusselt 수들을 비교하면 역시 case III의 경우가 증발이 가장 잘 일어 나고 있음을 알 수 있다. 또한 case II의 경우에는 바깥 액막의 Nusselt 수 값들 보다 안쪽 액막의 값들이 두배 가량 큰 것으로 보아 응축량보다 증발량이 더 많을 것으로 나타났고 반대로 표면장력의 효과가 매우 큰 case III의 경우는 바깥액막에서의 응축량이 증발량 보다 훨씬 더 클 것으로 예상된다. 이는 표면장력의 영향이 커질수록 원주방향을 따른 바깥쪽 액막의 두께변화가 크며 또한 입자 궤적에서 볼 수 있듯이 2차유동이 강하게 나타나 강제대류의 영향이 있을 것으로 사료된다.

Fig. 3은 위의 3가지 경우에 대해 양쪽 액막의 자유표면에서 열유속의 크기를 비교한 것으로 $\theta = 0$이 마루이고 $\theta = \phi$가 골에 해당하는 위치이다. 먼저 Fig. 3 (a), (b)는 바깥쪽 액막에서의 열유속을 주유동방향을 따라가며 마루(a)와 골(b)에서 위의 세 경우의 값들을 비교한것인데

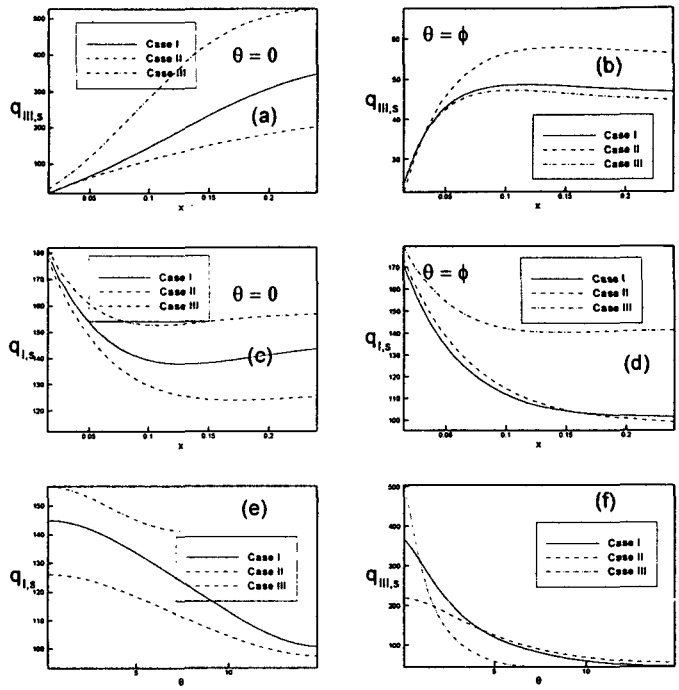


Fig. 3 Heat flux on the each film free surface.

case III의 경우 마루에서는 뛰어난 열전달 특성을 보이지만 골에서는 오히려 다른 두가지 경우보다 더 나쁜 성능을 보이고 있다. case I이 case II보다는 표면장력의 영향을 많이 받아 마루에서 더 많은 량의 응축을 보이며서 역시 골에서는 case II 보다 열효율이 떨어진다. Fig. 3 (c), (d)는 마루와 골에서 내부 액막 자유표면에서의 열유속을 나타내고 있는데 이것은 증발량과 직결되는 량이다. 그림에서 case III은 골과 마루 모든 곳에서 나머지 두가지 경우 보다 뛰어난 열전달 성능을 보이고 있다. case I은 case II보다 마루부분에서는 증발이 더 잘 일어나지만 골 근처에서는 특별한 차이를 보이지 않고 있다. Fig. 3 (e), (f)는 원주방향을 따라가며 내부액막의 열유속과 외부액막의 열유속을 비교한것인데 우선 내부액막의 열유속이 원주 방향을 따라 변하고 있는데 이것은 관의 외벽에 홈을 만들므로해서 내부액막에서의 열적거동까지도 3차원성을 띄게 함을 의미한다. case III의 경우 내부액막의 증발은 모든 곳에서 다른 경우들 보다 높은 열전달 성능을 보인 반면 바깥쪽 응축액막에서는 골로 갈수록 다른 두 경우들 보다도 못한 성능을 보이고 있다. case I과 case II를 비교하면 응축액막에서는 case I의 경우가 $\theta=0$인 마루에서는 더 많은 응축을 보이고 반대로 $\theta=\phi$인 골 근처에서는 case II보다 적은 응축량을 보이는데 반해 내부 증발액막에서는 전 구간에 걸쳐 case I의 경우가 더 많은 증발을 보이고 있다.

4. 결 론

표면장력의 영향으로 3차원 성질을 가지는 액막의 유동 및 열전달 해석을 수행하였으며 그 과정에서 움직이는 격자계에서 3차원 자유표면의 위치를 찾기위해 격자점들의 이동거리를 내삽하여 제어체적의 꼭지점 위치를 찾았다. 증발관의 열전달 성능 향상을 위해 관 외벽에 홈을 만들어 표면장력의 효과를 고려하므로써 액막의 두께가 원주 방향으로 변하고 따라서 열유속도 원주 방향을 따라 변하게 되어 홈이 없는 원관보다 열전달이 촉진 됨을 알았으며 홈은 외부액막뿐만 아니라 내부액막에까지 그 영향을 미쳐 내부액막의 증발량이 원주방향을 따라 변하는

등 3차원 성질을 띄게 한다. 홈의 형상은 표면장력의 강도와 연관되어 액막의 2차유동의 강도를 결정하고 열전달 측면에서는 홈의 존재로 인한 액막 두께변화와 2차유동에의한 강제 대류의 영향으로 열전달이 촉진되며 홈의 주기를 줄이는 것은 증발량을 늘이는데는 확실히 우수한 방법이나 그에 비례하는 많은 량의 응축액을 얻을 수는 없었다. 홈 높이의 증가도 증발량을 늘이는데 기여하고 있다. 더 많은 홈 주기와 홈 높이에 대한 계산을 통해 증발량과 응축량을 극대화하는 형상을 찾을 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 기계연구원의 해상 복합 플랜트 개발 사업의 위탁과제의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표한다.

참고 문헌

[1] A. H. Khan, 1986, *"Desalination Processes and Multistage Flash Distillation Practice,"* Elsevier.

[2] 박일석, 최도형, 1996, "수평원관상의 LiBr-H_2O 액막 흡수현상 해석", 제 125 호, pp. 670-679.

[3] Grossman, G., 1983, "Simultaneous Heat and Mass Transfer in Film Absorption under Laminar Flow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, No. 3, pp. 357-371.

[4] Nusselt, W., 1916, "Die Oberflachen Kondensation des Wasserdampes", *Zeitsehrit des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol. 60, pp. 541-546 and 569-575.

[5] I. Demirdzic, M. Peric, 1988, "Space Conservation Law in Finite Volume calculations of Fluid Flow", *Int. J. Num. Meth. Fluids*, Vol. 8, pp. 1037-1050.

[6] I. Demirdzic, M. Peric, 1990, "Finite Volume Method for Prediction of Fluid Flow in Arbitrarily Shaped Domains with Moving Boundaries," *Int. J. Num. Meth. Fluids*, Vol. 10, pp. 771-790.

[7] S. Muzaferija, M. Peric, 1997, "Compuation of Free-Surface Flows Using the Finite-Volume Method and Moving Grids", *Num. Heat Transfer, Part B*, Vol. 32, pp. 369-384.

[8] J. L. The, G. D. Raithby, and G. D. Stubley, 1994, "Surface-Adaptive Finite-Volume Method for Solving Free Surface Flows", *Num. Heat Transfer, Part B,* Vol. 26, pp. 367-380.

[9] J. L. The, 1993, " A Time Implicit Method for the Solution of Fluid Flow Problems with Moving Boundaries", PhD Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.

[10]M. Peric, 1985, "A Finite Volume Methods for the Prediction of Three-Dimensional Fluid Flows in Complex Ducts", PhD Thesis, University of London.