

공랭형 수직 흡수식 시스템의 적용에 관한 연구

김정국* 조금남**

*성균관대학교 대학원, **성균관대학교 기계공학부

A study on The Application of a Vertical Absorption System Cooled by Air

J. K. Kim* and K. N. Cho**

**Graduated school of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University*

***School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University*

ABSTRACT

In absorption system, the performance of the absorber is critical the overall system performance, size, and first-cost. The objective of this paper is to provide a comprehensive review of the significant effects that researchers have made to numerically analysis model the coupled heat and mass transfer process that occur during falling-film absorption and experimental researches. This study includes experimental work in the enhancement of absorption performance, the effect of the geometry of a vertical absorber, and the effect of configuration of absorption system. This paper is used to highlight key areas which need attention such as film and vapor hydrodynamics, especially the non-periodicity, instability, and recirculatory motion of waves in the vertical absorber case.

1. 서 론

최근 하절기 전력수요의 급증과 CFC계 냉매에 의한 환경오염이 국제적인 문제로 대두됨에 따라 이에 대한 대안으로 열구동 시스템인 흡수식 냉동시스템의 개발이 활발히 진행되고 있다. 이러한 흡수식 시스템 개발은 크게 전체 시스템 성능의 주요 요인인 흡수기의 흡수 성능 향상^(1,2)과 용액열교환기 및 시스템 제어에 의한 성능향상^(3,4)에 대한 이론적, 실험적 연구가 이루어지고 있다. 하지만, 이러한 시스템 개발은 대용량 수평형 수냉식 시스템을 중심으로 이루어지고 있으며, 소형 공랭형 흡수식 시스템에 대한 개발은 상대적으로 부족한 실정이다. 또한, 기존 수냉식 시스템의 소형화, 간략화 및 경제성 부여를 위해서는 공랭형 시스템의 개발이 요구되며, 이러한 시스템 공냉화 연구에 있어서 가장 주요한 과제는 전체 시스템 성능을 좌우하는 흡수기에서의 열 및 물질전달 특성에 대한 규명과 성능향상 방안에 대한 연구^(5,6)이며, 이를 위해 본 연구에서는 소형 흡수식 시스템의 공냉화 방안으로 평활관 및 스프링 장착관에 대한 실험^(7,8)에 이어서 H₂O/LiBr계 공랭형 수직 흡수기의 흡수성능에 대한 이론적 해석과 더불어 수직액막의 유동변화에 따른 흡수특성을 이론적으로 관찰하고 최적값을 예측함으로써 공랭형 흡수기 설계활용에 대한 기초자료로 제시하고자 한다.

2. 해석 모델 및 지배방정식

흡수식 냉동기의 공랭화를 위한 이론적 연구는 시스템의 주요 구성요소인 흡수기의 열 및 물질전달 특성에 대한 기초 연구^(5,6)와 더불어 액막 유동 특성에 따른 성능변화 및 흡수모델별 특성 비교등의 응용연구^(8,9)가 다양하게 이루어지고 있으며, 본 연구에서 흡수성능특성에 대한 해석모델의 기본 가정 조건 및 지배방정식은 다음과 같다.

2.1 지배방정식

Fig. 1은 수직형 흡수관의 내부 액막 유동에 관한 해석모델이며, 열 및 물질전달과정을 수치계산하기 위해 도입된 가정조건들은 다음과 같다.

- (1) 수용액과 냉매 증기의 물성치는 일정하다.
- (2) 흡수기 입구의 수용액 농도와 온도분포는 균일하며, 시스템 내 압력은 일정하다.
- (3) 유하 액막하는 수용액은 층류 유동이며, 수용액과 냉매증기 계면에서 유동에 의한 전단력은 작용하지 않는다.

상기된 가정조건과 냉매증기와 수용액막 계면의 열평형과 질량균형에 의한 물질확산방정식과 에너지방정식은 식(1), (2)와 같다.

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right) \quad (1)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \left(\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \quad (2)$$

여기서, u 는 유동방향에 대한 속도이며, \bar{u} 는 액막 평균유동속도이다.

층류 파동 유하액막 자체의 유동특성인 층류 파동의 경우, 식 (3),(4)의 연속방정식과 수용액의 유동방향(x) 및 관경방향(r)에 대한 Navier-Stokes eq.에 의해 해석될 수 있으며, 본 연구에서 주기파에 의한 액막두께 변화를 고려하였다.

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u \frac{\partial u_x}{\partial x} + v_r \frac{\partial u_x}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g + \nu \left\{ \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial r^2} \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + u \frac{\partial u_r}{\partial x} + v_r \frac{\partial u_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left\{ \frac{\partial^2 u_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} \right\} \quad (4)$$

여기서, p 는 압력, g 는 중력가속도이다.

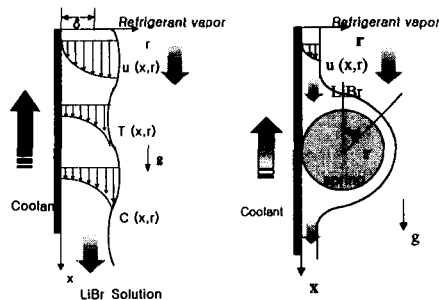


Fig. 1. Schematic of vertical tube absorber

2.2 경계조건 및 수치해법

흡수기의 입구($x=0$)에서 유하액막의 온도와 농도분포는 흡수기내 압력과 기/액경계면의 농도에 의해 결정되며, 경계면에서의 열유속은 반경방향의 열/물질 확산에 의한 열전달항으로 표현된다. 수직벽면에서는 물질전달이 일어나지 않으며, 액막에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$x=0 ; T=T_0, C=C_0 \quad (5)$$

$$r=r_1 ; T=f(C, P) \quad (6)$$

$$q_{\delta} = k \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_1} - (C_{P2} - C_{P1}) T \rho D \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=r_1} = Q_{abs} \dot{m}_v \quad (7)$$

\dot{m}_v 은 단위시간당, 단위면적당 수용액에 흡수되는 냉매증기의 양이다. 수직원관 내벽면 경계조건은 다음과 같다.

$$r=r_2; \dot{q}_w = \frac{(T_w - T_{air})}{\left(\frac{1}{h_0} + \frac{\delta_{tube}}{k_{tube}} \right)}, \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=r_2} = 0 \quad (8)$$

상기 기/액 경계면에 대한 경계조건들은 주기파에 의한 액막의 일정 반복으로 인해 일정한 반복성을 가지며, 식(1),(2)는 유한체적 방식에 의해 이산화시켜 풀었다. 유한 체적의 배열은 유동방향(x)과 반경방향(r)에 대해 균일 격자계를 구성하였다. 수직 액막의 유동 형태는 유동 입구, 기/액 경계면의 조건만 주어지므로 출구에 대한 조건이 결정되지 않은 상태이다. 따라서, 유동 진행 방향에서 계산영역에 대한 추가영역(계산영역의 1/2)을 설정하였으며, 이 영역의 출구경계조건은 $\partial C / \partial x = \partial T / \partial x = 0$ 으로 열/물질 전달이 일어나지 않는 것으로 간주하였다.

흡수과정에서 열/물질전달은 동시에 발생하며, 이에 대한 해를 구하기 위한 전체적인 수행순도는 fig.2와 같으며, 수렴정도는 10^{-5} 이하로 설정하였다.

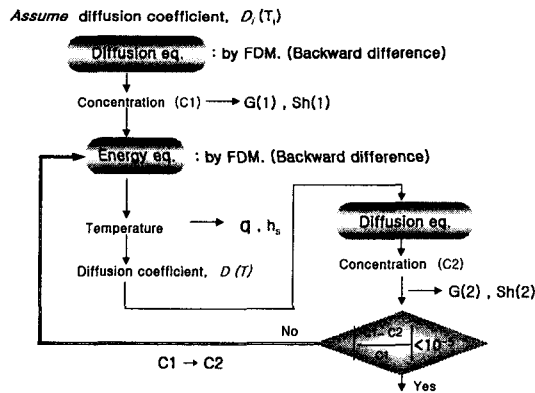
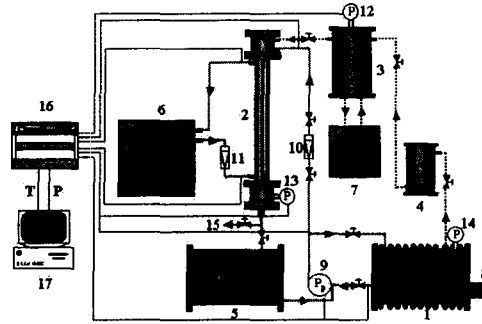


Fig. 2 Flowchart of the analysis

3. 실험 장치

본 연구의 해석결과를 비교 검증하기 위한 실험은 흡수관내 열 및 물질전달 특성에 관한 기존 수행연구의 결과^(7,8)를 인용하였으며, 실험장치의 주요 개략도는 Fig. 3과 같다. 실험장치에서 수직형 흡수관은 LiBr수용액에 의한 부식방지를 위해 스텐레스 강관(SUS316)으로 제작하였으며, 실험의 단순성과 냉각과정의 효율성을 높이기 위하여 수직관 외부에 환상 공간을 형성하여 일정한 온도의 냉각수를 공급하는 방식을 취하였다.



1. Generator 2. Absorber 3. Evaporator 4. Condenser 5. Weak solution tank
6-7. Constant Temp. bath 8. Heater 9. Magnetic pump 10-11. Rotameter
12-13. Vacuum Pressure gage 14. Bourdon tube pressure gage 15. Sampling-
trap 16. Yokogawa board 17. PC

Fig. 3 Experimental apparatus

4. 결과 및 고찰

4.1 액막 유동변화

흡수기내 수직액막 유동변화는 수용액 유량, 유동방향에 대한 수용액과 벽면 전단응력 및 파동주기에 따라 변화되며, Fig. 4는 해석 모델과 기존 실험 결과의 비교를 통해 주기와 조건에서 액막 유량 변화에 따른 파고의 영향을 보여주고 있다. 주기파에서 액막 레이놀즈수 100이하의 저유량 조건에서 해석모델 결과는 shadow photo-graph를 이용 파동의 종류와 액막 두께 및 유동변화를 실험적으로 관측한 Kapitza⁽¹¹⁾의 결과와 잘 일치됨을 관찰하였으며, Navier-stokes 방정식과 수정된 Galerkin 기법을 통해 파동액막의 거동을 해석한 Penev 등⁽¹²⁾의 모델과도 유사한 경향을 나타냄을 보여주고 있다. 액막 레이놀즈수 100이하의 저유량 조건에서 낮은 유량과 액막 자체의 점성력에 비해 상대적으로 큰 벽면 전단력으로 인해 액막 파고의 변화는 낮았으나, 유량 변화에 대한 액막변화의 증가율은 약 11~15.3%정도로 액막 레이놀즈수 100이상(증가율:5.2~8%)보다 크게 나타났다. 이러한 액막 유동의 변화는 흡수기 내 열 및 물질전달 성능을 변화시키는 주요인자로서 특히, 저유량 조건하에서 주기파에 의한 액막 변화는 흡수성능 예측에 큰 변수 요인이 되고 있으며, 이는 해석 모델에 의한 흡수기 내 열 및 물질 전달 특성변화 결과를 통해서 예측할 수 있다.

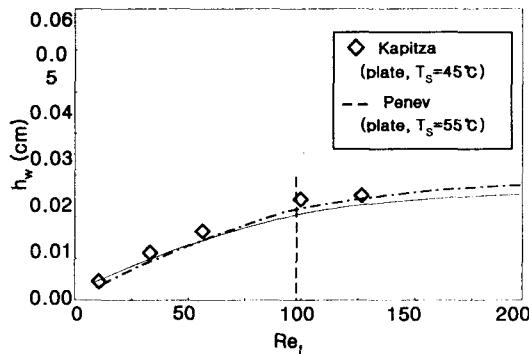


Fig. 4. Wave flow of solution compared with experimental data.

4.2 열전달

민관 및 스프링관의 열유속 변화는 기존 연구^(7,8)에서 수행되었으며, 본 연구에서는 민관의 균일 액막 조건과 삽입기구(스프링) 및 액막 유동 변화에 대한 열전달 특성변화를 이론적으로 수치계산하고, 기존 실험 결과와 비교하였다. Fig. 5와 6의 해석결과와 비교시 약12.5~25% 정도의 오차를 보여주고 있으며, 이는 액막 레이놀즈수 90이하의 저유량 조건시 낮은 액막 파괴 즉, 낮은 액막 유동변화에 따른 열전달 특성 저하와 실제 실험에서 관찰되었던 액막 레이놀즈수 90이하에서의 액막 벗겨짐 현상에 의한 불안정 액막과 열전달 면적의 감소로 인해 낮은 열유속을 보이는 것으로 판단된다. Grossman 등^(6,8)의 경우, 액막의 균일 두께, 동은 벽면 가정 조건으로 인해 유사한 온도 조건시 액막 레이놀즈수 80이하에서 낮은 열전달 특성을 보여주고 있다. 또한, Fig 6에서 보듯이 민관, Grooved tube 및 삽입기구인 스프링 간격이 변하는 경우에도 유사한 형태가 나타나고 있으며, 스프링에 의한 과도한 액막 유동을 가정한 수치 해석 결과에서도 관찰할 수 있다. 모든 유동조건과 스프링 간격에서 액막 레이놀즈수 90까지 열전달 계수의 급격한 상승폭을 보이며, 이후 다소 완만하게 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 냉각수 유량이 고정되었을 경우, 낮은 액막레이놀즈 수에서 수용액의 저유량과 얇은 액막 두께로 인해 전체 열전달량이 낮게 나타나는 것으로 사료된다. 또한, Grooved tube의 경우, 표면의 roughness에 의한 액막의 정체시간 증가와 관벽 두께의 미소한 감소에 의한 열전달률 증가로 인해 민관에 비해 약 2~3.1%정도의 미소한 증가폭을 보였으며, 스프링 관의 경우, 관내 정체시간 및 전체 열전달 면적 증가로 인해 민관, Grooved tube에 비해 최대 18%정도 증가되었다. 스프링 간격이 조밀한 경우, 스프링 직경에 의한 관벽 두께증가와 수용액의 표면장력에 의한 액막 유동의 저하로 인한 액막두께 증가가 전체 열저항으로 작용함으로써 열전달 특성이 감소한 것으로 보인다.

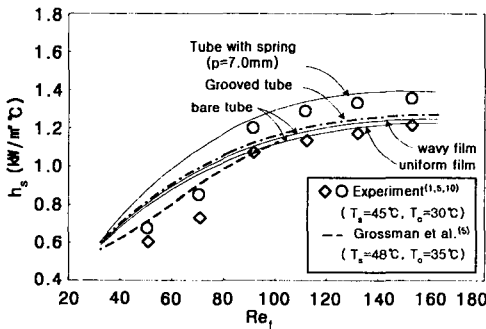


Fig. 5 Effect of Re_f on h_s .

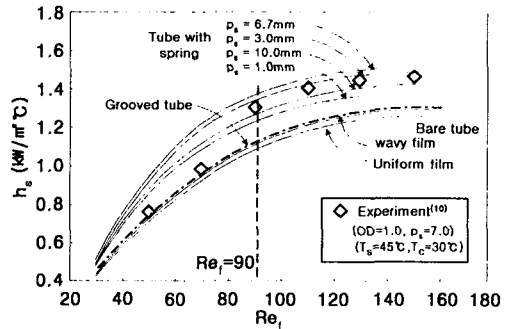


Fig. 6 Effect of surface shape on h_s

4.3 물질전달

Fig 7은 균일 액막 두께, 액막 유동변화 등을 적용한 수치해석과 검증실험에서 흡수기 내 흡수질량유속에 대한 액막 레이놀즈수의 영향을 보여주고 있다. 액막두께 균일 가정조건에서 수용액 온도에 따른 흡수질량유속의 증가율은 액막 레이놀즈수 80이하에서 최대 15~21%정도 급격하게 증가하는데 반해 80 이상에서는 증가폭이 크게 둔화되는 것을 볼 수 있으며, 표면장력에 의한 주기파 유동조건에서는 액막 두께 균일 조건에 비해 최대 4.0~10.2%까지 흡수질량유속이 향상됨을 보여주고 있다. Grooved tube의 경우, 표면의 roughness로 인해 미소한 관벽두께 감소와 액막 유동으로 인해 흡수질량유속이 약 0.9~1.5%정도 다소 증가하는 것으로 계산되었으나, 열전달률에 비해 그 증가폭은 매우 낮고, 이는 수용액 온도의 미소변화

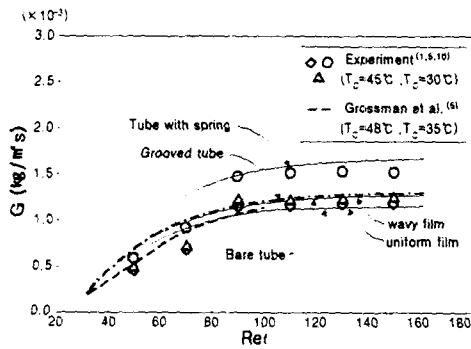


Fig. 7 Effect of Re_f on Absorption mass flux.

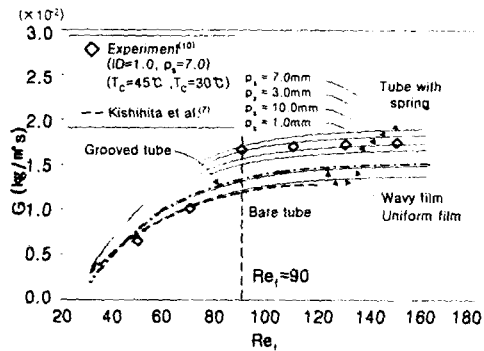


Fig. 8 Effect of surface shape on Absorption mass flux.

에 대한 확산계수의 변화폭이 거의 일정한 것이 주원인으로 판단된다. 또한, 유량 변화에 대한 흡수질량유속의 변화는 모든 유동조건에서 거의 유사한 경향을 나타냈으며, 동일한 조건에서 최대흡수질량유속을 나타낸 실험결과와 비교했을 때, 저유량 조건($Re_f=70$ 이하)에서 약 5.1~12.1%정도 수치계산이 높게 나타났으며, 이는 실제 흡수현상에서 나타난 액막유동의 저하 및 액막 벗겨짐 등의 원인에 의한 것으로 사료된다. Fig. 8은 삽입기구(스프링)과 Grooved tube에서 스프링 간격(p)과 관표면 변화시 흡수질량유속에 대한 액막 레이놀즈수의 영향을 보여주고 있다. 흡수질량유속도 열전달 계수의 경우와 유사하게 관표면의 rough-ness와 액막 유동에 의해 흡수질량유속이 다소 증가하였으나, 온도에 대한 확산계수의 미소변화로 인해 열전달 계수에 비해 증가폭이 낮았다. 또한, 스프링의 직경이 증가함에 따라 최대 11~23%정도 증가하였으며, 실험 조건에 적용된 스프링 간격을 기준으로 흡수모델에 의한 흡수성을 계산할 경우 민관에 비해 최대 8.9~20%정도 증가되는 것으로 계산되었다. Fig. 7, 8에서 수치 계산과 실험 결과에 다소 오차가 있으며, 이러한 경향은 초기 가정조건과 벗겨짐 현상에 의한 젖음성 불균일에 의한 것으로 사료되며, 민관에 대한 기존실험^(7,8)의 결과에서도 관찰되고 있다.

Fig. 8에서 안정된 액막유동과 균일 액막 유동조건을 가정한 흡수질량유속의 수치계산과 실험 결과^(7,8)를 비교시 액막레이놀즈수 80 이후에서 해석결과가 최대 29~43%정도 크게 나타났으며, 이는 열전달 특성과 동일한 원인으로 낮은 액막 레이놀즈수에서 액막 이탈현상에 의한 불안정한 액막 형성과 계면 교란이 동시에 발생하는데 기인하는 것으로 사료된다.

5. 결론

수직형 흡수기내 열 및 물질 전달특성의 규명과 유동특성 파악은 시스템 공랭화를 위해 가장 우선되어야 하는 연구중에 하나이며, 유동특성 및 전달 특성에 관한 본 연구의 주요결과는 다음과 같다.

- (1) 이론적 해석모델에서 유량 변화에 따른 과고의 변화는 균일액막 유동조건에 비해 약 9~10.2%정도 전달특성 향상을 나타냈으며, 액막레이놀즈수 100이하의 저유량 조건에서는 낮은 유량과 전단력으로 인해 액막의 과고 즉 유동현상이 낮게 나타남을 보였다.
- (2) 액막 레이놀즈수 변화에 따른 흡수성능변화에 대한 해석과 실험결과의 오차는 유량 변화에 따라 최대 12.5~25%정도였다.
- (3) 민관의 경우, 액막두께 균일조건에 비해 주기파의 액막유동조건에서 열전달 계수와 흡수

- 질량유속은 각각 최대 9.8%와 10.2%정도 크게 나타났으며, 실제 실험결과에서는 균일 액막과 액막 유동조건인 중간값을 보이고 있다.
- (4) 균일 액막 가정조건인 의한 해석과 주기파에 의한 실험결과의 오차정도는 열전달 계수와 흡수질량유속에서 각각 최대13.2%,와 12.1%정도였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-01484-0)와 일부 2003년도 BK21 핵심분야 사업비에서 지원되었으며 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Kashiwagi, T., Kurosaki, Y., Shishido, H.,1985. Enhancement of Vapour Absorption into a solution Using the Marangoni Effect, Transaction of the JSME(Part B), Vol. 51, No. 84, pp. 1002~1009.
2. Yoon, J. I., Oh, H. K. and Kashiwagi, T., 1995. Characteristics of Heat and Mass Transfer for a Falling Film Type Absorber with Insert Spring tube. Transaction of KSME, Vol. 19, No. 6, pp. 1501~1509.
3. MARK S. B. and Stephen H. D., 1993. Thermocapillary Breakdown of falling Liquid Film at High Reynolds numbers. Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.36. No. 7, pp. 1875-1881.
4. Yun, H. J., Cho, H. C. and Kang, Y. T., 2001. Cycle analysis of HGAX for reduction of generator temperature and obtaining hot water temperature.. Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference. pp. 27~32.
5. Hozawa, M., Inoue, M., Sato, J., and Imaishi, N., 1991. Marangoni convection during steam absorption into aqueous LiBr solution with surfactant. J. Chem. Eng. Japan, Vol. 24, No. 2, pp. 209-214.
6. Grossman, G, 1983. Simutaneous Heat and Mass Transfer in Film Absorption under Laminar Flow. Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 28. No. 4, pp. 357~371.
7. Kim, J. K. and Cho, K. N., 2002. Influence of Spring on The Absorption Performance of a Vertical Absorber Tube. Transaction of SAREK. Vol. 14, No. 10, pp.825~832.
8. Kim, J. K. and Cho, K. N., 2002. Analytical Study on the Improvement of Absorption Characteristics by Change of Flow in the Enhanced Tube with Spring. Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference. pp. 27~32.
9. G. Grossman , 1984. "Simultaneous Heat and Mass Transfer in Absorption of Gases in Turbulent Liquid Film", Int. J. of Heat and Mass transfer, Vol. 27, No. 12, pp. 2366~2376.
10. J. D. Killion and S. Garimella, 2001, A critical review of model of coupled heat and mass transfer in falling-film absorption.. Int. J. of Refrigeration, Vol. 24, pp. 755~797.
11. Kapiza P. L., 1965. Wave Flow of Thin Layers of a Viscous Fluid. Collected Paper of P. L. Kapitza, Pergamon Press.
12. Penev, V., Krylov, V. S., Boyadjiev, C. H. and Vorotilin, V. P., 1972. Wavy Flow of THin Liquid Films. Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.15, pp. 1395-1406.