'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

기화 열전달시 물-공기 수직유동에서의 액막 계면 마찰계수에 대한 실험적 연구

An Experimental study for the interface shear stress of near vertical air-water separated flow on evaporation

권 혁, 박군철
서울대학교 서울 특별시 관악구 신림동 산 56-1

요 약

현재 연구는 거의 수직한 벽면(87°)에서 자유 낙하하는 액막과 상향하는 공기에 의해 발생하는 액막 계면에서의 전단응력을 조사하였다. 액막에서의 전단응력을 측정하기위해 측정되는 측정 변수는 시험체적부의 차압, 건조공기의 속도, 액막의 유량, 벽면 및 공기의 온도이다. 이들 변수들에 대한 불확실성을 계산한 결과는 측정된 측정차압에 대해 약 1% ~ 10%로 공기 유속에 따라 증가하였다. 액막이 흐르는 수직 벽면은 직접 가열 방식으로 열속을 발생하며, 발생된 열속은 액막을 통하여 상향하는 건조한 공기로 전달된다. 이때 벽면에 접해있는 액막은 기화하며, 기화된 액막은 건조한 공기로 전달되게 된다. 이처럼 기화열전달이 존재 시 응축 열전달과는 반대로 액막으로 부터 blowing 효과가 발생하여 건조공기의 차압을 증가시키게 되며 이러한 현상은 실험결과에서 관찰되었다. 기화 열전달이 존재하는 경우에 대한 계면 마찰계수를 상관식 화하였으며, 이를 이용하여 계산한 기화 열전달계수는 기존의 열전달이 없는 경우를 사용하여 계산한 결과보다 실험치를 잘 예측하였다.

Abstract

The object of experiment is improved model of evaporative heat transfer coefficient using interfacial friction factor on evaporation. Experiments have been conducted with near-vertical(87°) flat plate on evaporation for air-water countercurrent stratified flow. Experiment facility is consisted of 1.7m length and 0.2 X 0.005m cross section, the one side direct heating system which have 10kw power capacity. The interfacial shear stress, pressure drop and temperatures in test section were measured. These parameters were measured by DP-103 pressure transducer, K-type thermocouple, RTD and Hot Wire Anemometer(HWA). Experimental results were inclination as increased interfacial shear stress with increased the evaporation rate. Interfacial shear stress was increased as increased water flow rate and air flow rate too. For the evaluation of the measured evaporative heat transfer coefficients and physical understanding of the evaporation phenomena, the evaporative heat transfer coefficients were obtained through the simple calculation process by the use of mass transfer coefficient correlation and the experimental data of wavy film surface effect on shear and on evaporation.

1. 서론

액막에 의한 냉각과 공기유동에 의한 대류현상을 이용하는 복합 열전달기구는 원자로의 피동격납냉각계통(PCCS)에서 이용하고 있다. PCCS는 westinghouse사의 신형원자로인 AP-600 원자로의 안전성을 향상시키기 위해 채택된 피동안전계통으로 철재격납용기와 콘크리트 격납체로 된 이중 격납용기 구조로 구성되어있으며, 내부의 철재 격납용기는 완전히 밀폐되어 있어 사고시 방사능 물질의 유출을 방지하며, 콘크리트 격납체에 설치된 살수 장치로 부터 분사된 물은 철재 격납용기외벽을 타고 내려와 철재 용기벽을 냉각시키며 외벽을 따라 자유 낙하한 액막은 기화하게 된다. 기화된 액막은 철재 격납용기와 콘크리트 외벽사이의 간격으로 상향하는 공기로 전달되어 수증기 공기 혼합체를 이루며 대기로 방출된다. 이러한 냉각계통의 해석을 위해서는 액막에서의 기화 열전달량과 철재격납용기와 외곽의 콘크리트 구조체 사이의 공기의 대류 열전달량을 예측하여야 한다. 특히 액막 위에 공기에 의해 유도되는 전단응력이 있는 경우 액막에서의 기화 열전달량은 자유 낙하하는 액막과는 다른 경향을 띄고 있다. 이 현상을 이해하기 위해 공기에 의해 전단응력이 유도된 액막에서의 거동에 대한 실험이 필요하게 된다.

하향하는 액막에서의 유동과 상향하는 공기의 유동에 의해 형성되는 액막에서의 유체역학적 동특성은 액막의 파동현상으로 표현되며, 이러한 파동은 공기의 유속이 증가함에 따라 그 형상이 변화하게 된다. 변화하는 파동의 형상은 2-D, 3-D, 그리고 Roll wave 형상으로 변화하게 된다. 일반적으로 파동에 대한 수학적 모델링은 Roll-wave 영역에 국한되어 있으며, 2-D 및 3-D에 대한 모델링은 그 형상의 불규칙성으로 인해 수학적 모델링이 없다. 일반적으로 액막의 두께가 얇고 공기의 유속이 15m/s 이하인 경우 액막의 파동형상은 2-D 형상을 가지게 된다. 이러한 2-D 형상을 가지며 내려오는 액막 유동의 경우 액막 계면에서 발생하는 파동에 의한 열 및 운동량 전달량은 Roll-wave 영역에 비해 매우 작다. 따라서 2-D 액막 유동의 경우에는 액막에서의 개별적인 wave에 대한 모델링은 의미가 없게 되므로 현재 실험 경우에는 이들 개별적인 wave에 대한 모델링을 제시하지 않아도 그 물리적 조건에 위반되지 않는다.

기화 열전달이 발생하는 경우에 대한 연구는 chun & seban(4)이 최초로 정량화된 상관식을 제시하였으며, 이후 많은 연구에서 chun의 연구를 기반으로 상관식 및 데이터의 불확실성을 줄이는 방향으로 연구가 진행되었다. 그러나 이들 연구들의 기하학적 형태는 환상관이거나 파이프 유동의 경우에 국한되어 있다. 최근 PCCS와 관련하여 Ambrosini(6)와 본 대학의 Kang(5)이 사각채널에 대하여 기화 열 전달량을 측정하였다. 이들 실험 결과들에서 보여지는 경향은 기화 열전달량이 적은 경우는 액막에서의 파동효과가 열 전달량을 향상시키는 지배인자이며, 기화 열전달량이 많은 경우는 기화열전달에 의한 blowing 효과가 파동효과보다 더 크게 기화 열전달계수의 크기에 기여한다. 그러므로 기화 열전달량이 많은 높은 열속지역에서 blowing 효과를 반영하지 않는 경우 기화 열전달계수를 30%이상 낮게 평가하는 오류를 범하게 된다.

액막에서 기화 열전달이 발생하는 경우 액막에서 기화된 수증기는 blowing 효과로 인해

액막 계면에서 기상으로 농도 구배가 발생하고 이 구배에 따라 확산하게 된다. 확산되는 수증기는 주 유동방향과는 수직한 방향으로의 운동량 및 열속을 발생시키며 이로 인해 전체 시험 체적부의 차압을 증가 시키게 된다. 이러한 수직방향의 운동량 및 열속을 레이놀즈 플럭스라 하며 이들 운동량 및 열속을 측정하거나 계산함으로써 액막에서 기상으로의 물질 전달량을 예상할 수 있고, 계산된 레이놀즈 플럭스를 이용하여 기화열전달이 존재하는 경우에서의 액막 계면 마찰계수를 유도할 수 있다.

본 연구에서는 자유 낙하하는 물막과 상향하는 공기유속이 서로 대항류를 흐르고, 액막 계면에서는 균일 열속조건으로 기화열전달이 발생하는 상황하에서 액막 계면에서의 계면 마찰계수를 측정하였다. 계면 마찰계수에 영향을 주는 실험 변수들은 액막의 유량, 공기의 유속,벽면에서의 열속으로 정하여 해석하였으며, 각 변수들의 실험범위는 표 1 에 나타내었고, 이들 변수들의 계측에 의해 발생되는 불확실도를 정량화하였다. 불확실도의 평가결과로 나타나는 전체 시험체적부의 불확실도는 최대 10%였다. 이 범위의 신뢰도 구간내의 데이터를 이용하여 시험 체적부의 차압을 계산식과 비교하여 검증하였고, 기화열전달계수를 측정하여 실험값과 비교하였으며, 최종적으로 기화열전달이 존재하는 경우에서의 계면 마찰계수에 대한 상관식을 도출하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구를 위한 실험장치는 실험부와 실험변수 조정을 위한 주변 장치들로 구성되어 있으며, 주변 장치들은 크게 풍동부와 온도 조절부, 액막 유량 조절부로 구성되어 있다. 그림 1 은 실험장치에 대한 전체 개략도이며, 그림 2 는 액막 계면에서의 운동량 및 열교환이 발생하는 실험부의 측면도이다. 실험부의 길이는 1700㎜ 이고 단면적은 너비 200㎜ X 높이 50㎜ 로 구성되어 있다. 실험부의 아래 판은 SUS-316 을 이용한 직접 가열방식으로 균일 열속조건을 유지시켰으며, 반대쪽 윗 판은 두께 10㎜ 의 방탄아크릴을 사용하여 액막에서의 유동형상을 가시화 하였다. 시험체적부의 양 옆면 역시 Pyrex-glass 를 이용하여 가시화가 가능하도록 제작하였다. 실험부의 열속을 균일하게 유지시켜주기 위해 가열판 뒷면을 단열처리하였으며, 액막이 균등하게 퍼지도록 하기위해 가열벽면을 #500 으로 벽면을 처리하였다.

액막은 항온조를 통하여 일정한 온도로 유지되어 실험부 상부의 수조부를 통해 자유낙하 하도록 설계되어 있다. 상부에 장착되어 있는 수조부는 벌집 모양판과 #300 철망을 통하여 균일한 속도로 균등하게 살수되도록 설계되어 있으며, 수조부를 통해 나오는 물은 벽면처리된 가열벽면을 따라 자유 낙하하도록 설치되었다. 액막의 유량은 터빈유량계(Turbine flowmeter)를 사용하여 측정 조절하였다.

예비시험 및 불확실도 평가 시 액막 계면에 가장 영향을 미치는 변수는 난류강도였으며, 이 값을 10%이내로 유지하여야 계면 전단응력의 결과치의 오차가 10%이내로 유지되었다. 따라서 이를 위해 풍동을 설계 제작하여 설치하였으며, 열선 풍속계를 이용하여 설치된 풍동

에서 측정한 난류강도는 5% 이하였다. 풍동을 통해 시험 체적부로 유입되는 공기의 속도분포는 균일 분포를 유지하였다. 또한 너비와 높이의 비를 4:1로 설계하여 시험체적부내의 속도분포가 2-D 속도분포를 유지하도록 하였다.

2.2 액막 계면 전단응력의 계산

수직한 벽면에서 자유 낙하하는 액막과 상향하는 공기에 의해 형성되는 액막 계면에서의 마찰계수는 그림 3 과 같은 제어체적에서 운동량 평형식으로부터 계산된다.

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{tot} = \frac{r\,dv_2^2}{dz} + \frac{r\,v_i\,dv_2}{dz} + r g \cos q + \left(\frac{dP}{dz}\right)_{Fric} + \left(\frac{dP}{dz}\right)_i \qquad (1)$$

기상을 기초로 하여 운동량 평형식을 세우면, 식(1)과 같이 표현되며 시험체적부의 전체 차압은 가속항, 기화 열전달속항, 중력항, 벽면 마찰항, 그리고 계면항의 합으로 표현된다. 식(1)을 측정하려는 대상에 대한 식으로 재표현하면 식(2)와 같이 표현된다.

$$t_i(U_\infty) = \frac{H-h_m}{L}\cdot\Delta P + \frac{2(H-h_m)+W}{W}\cdot t_{sw}(U_\infty) + W\cdot(H-h_m)\cdot gr\cos q \qquad (2)$$

식(2)와 식(1)을 비교하면 기화 열전달속항과 가속항이 생략되어 있다. 일반적으로 가속항은 다른 항들에 비해 상대적으로 작은 값이므로 생략하였으며, 기화 열전달속항에 대해서는 주 흐름방향에 수직으로 상향하는 기화 열전달량의 계면 속도를 측정할 수 없다. 따라서 이항은 Linehan 의 보정인자 방법으로 보상하였다.

Linehan 이 제안한 보상방법론에 대한 타당성 검토는 응축열전달이 존재하는 상황하에서 Kim&Bankoff(4)가 적용하여 건조한 공기에 의해 얻어진 결과를 기초로 하여 응축 열전달이 존잿하는 경우를 보상하였으며 이에 대한 결과들을 Wallis 및 Mickley,et al 등의 모델과 비교하였다. 실험결과와 타모델을 사용한 결과를 비교시 이론 값들은 공기의 레이놀즈수가 증가함에 따라 실험값보다 40% 낮은 값을 예측하였다. 그러나 Linehan 이 제안한 모델을 사용할 경우 그 오차를 20% 이내로 줄일 수 있었다. Linehan 이 적용한 보상방법은 식(3)과 같이 나타난다.

물질전달에 기인한 운동량 증가분은 식(3)과 같이 모델링하며,

$$\frac{f_i}{f_{i,a}} = \exp\left(\frac{f}{2f_{i,a}}\right) + \frac{f}{2f_{i,a}} \qquad (3)$$

$$f_i = \frac{2|t_i|}{r_g(U_g+U_i)^2} \qquad (4)$$

여기서 f_i 는 기화열전달이 있는 경우의 계면 마찰계수이고, $f_{i,a}$ 는 건조한 공기에 대한 계면 마찰계수이다. f 는 레이놀즈 플럭스이며 이는 물질전달이 있는 경우, 물질 전달하는 방향 및 그 양을 예측하기 위한 가상적인 플럭스이고 기화열전달에 의해 기화된 양을 계면

둘레(perimeter)로 나누어준 양으로 모델링 된다.

3.실험결과 및 고찰

3.1 공기의 레이놀즈수에 대한 영향

액막 계면의 마찰계수에 대한 공기의 레이놀즈수의 영향을 고찰하기 위하여 기화열전달을 가하지 않은 상황하에서 공기의 레이놀즈수를 5000 ~ 80000 까지 변화 시켜 실험을 수행 하였으며 그 결과를 그림 4 에 나타내었다.

공기의 레이놀즈수가 증가함에 따라 액막 계면의 전단응력은 증가하며, 이는 공기의 레이놀즈수의 증가가 시험 체적부 벽면의 전단응력을 증가 시키고 시험체적부의 압력 차 역시 증가 시키므로 전체 액막 계면의 전단응력은 증가하게 된다. 공기의 레이놀즈수가 30000 이하의 경우는 공기가 층류에서 난류로 천이해 가는 영역이다. 천이영역에서의 계면 마찰계수의 기울기는 난류구간보다 높은 기울기값을 가지고, 난류영역에서는 기울기 값이 상수로 수렴하는 경향을 보였다.

3.2 액막의 레이놀즈수에 대한 영향

그림 5 는 액막의 레이놀즈수에 따른 계면 마찰계수의 영향을 나타낸 그림이며, 액막 레이놀즈수가 증가함에 따라 계면 마찰계수 역시 선형적으로 증가하였다.

액막의 레이놀즈수가 일정한 경우에서는 공기의 레이놀즈수가 증가함에 따라 계면 마찰계수 역시 증가하는 경향을 보였다. 천이영역과 난류영역에서는 계면 마찰계수값이 점프하였으며 난류영역의 기울기 값이 천이영역에 비해 작고 일정한 값으로 수렴하는 경향을 그림 5 에서 확인할 수 있었다.

일반적으로 관내의 마찰계수는 Moody 선도를 이용하여 공기의 레이놀즈수와 관내의 거칠기 인자로부터 얻어진다. Moody 선도에서의 거칠기 인자의 변화경향은 거칠기 인자가 증가함에 따라 관내 마찰계수값이 증가하며, 완전히 거친 영역에서는 관내 마찰계수가 일정한 기울기로 접근한다. 이러한 경향은 그림 5 에서도 관찰되어진다. 이러한 유사성이 관찰되는 이유는 액막 계면 파형은 공기의 레이놀즈수가 증가함에 따라 진폭이 커지고, 2-D 에서 3-D 로 진행하게 됨에 따라 액막표면이 더 거칠어 지기 때문이다. 단상유동 관내 거칠기가 증가함에 따라 관내 마찰계수가 증가하는 것처럼 파형이 불규칙해지고 진폭이 커져감에 따라 액막 계면 마찰계수 역시 증가하는 경향을 그림 5 에서 보여준다. 그림 5 의 결과를 바타으로 관내 단상유동의 관내유동 거칠기와 이상유동에서의 액막 계면파의 형상은 상사계임을 유추할 수 있다.

3. 레이놀즈 플럭스의 영향

레이놀즈 플럭스는 대류 물질 및 열전달을 이해하기 위해 도입한 가상적인 질량속이며, 공학적으로 복잡한 계를 해석하기에 유용한 도구로서 사용되고 있다. 액막과 기상이 서로 만나는 액막 계면에서, 벽면으로부터의 열속을 받은 액막은 기화하며 기상으로 증기 및 열

을 전달한다. 이 때 이동하는 질량 및 열속은 공기의 유동 방향에 수직하게 작용하며, 액막 계면의 전단응력을 증가 시킨다.

레이놀즈 플럭스의 모델링은 식(5)에서 주어지며

$$f = \frac{\dot{m} A}{P_i} \tag{5}$$

여기서 $\dot{m}$ 은 액막 계면에서의 질량 유량이고, P_i 는 액막 계면둘레이다. 액막 계면에서의 파동형상은 2-D 형상이므로 액막계면에서의 계면둘레를 시험체적의 둘레로 계산하여도 오차가 크지 않다. 계면에서의 국부적인 증기유량은 아래의 방정식으로부터 그 해를 얻을 수 있다.

$$\dot{m}_{evap} = \frac{h_{fg}(T_i)}{q''_{evap}} \tag{6}$$

레이놀즈 플럭스의 영향을 평가하기 위해 식(7)과 같이 프란틀 수에 대해 액막 계면 마찰계수의 영향을 평가하였으며, 평가된 결과는 그림 6 에서 보여 주고 있다.

$$\mathrm{Pr} = \frac{n}{a} = \frac{\text{운동량의확산율}}{\text{열 확산율}} \tag{7}$$

온도가 증가함에 따라 액막의 프란틀 수는 증가하며, 프란틀수가 증가함에 따라 액막 계면의 마찰계수는 감소하며, 기화 열전달량이 증가함에 따라 계면 마찰계수 역시 감소하였다. 이러한 감소경향은 blowing 효과에 의한 것으로 blowing 효과가 커짐에 따라 마찰계수는 공기 레이놀즈의 경향처럼 대수적으로 감소하게 된다. 공기 레이놀즈와의 유사성이 관찰되는 이유는 액막 계면에서의 blowing 에 의한 주 흐름방향의 공기유량과는 다른 계면에 수직한 속도척도가 존재함을 의미하며, 기화 열전달량이 증가함에 따라 이 속도척도의 값은 무시할 수 없게 된다.

3.4 액막 계면마찰계수에 대한 상관식

액막 계면엣의 마찰계수는 공기와 액막 레이놀즈 수와 함께 레이놀즈 플럭스에 대한 표현식을 프란틀수를 사용하여 모델링하였다.

$$f_i = a\,\mathrm{Re}_{air}^{b}\,\mathrm{Re}_{film}^{c}\,\mathrm{Pr}^{d} \tag{6}$$

식 (6)에서 사용된 각 무차원수의 정의는 다음과 같다.

$$\mathrm{Re}_{film} = \frac{4\Gamma_{film}}{m_{film}}, \Gamma_{fillm} = \frac{\dot{m}_{film}}{W}$$

$$\mathrm{Re}_{air} = \frac{\rho V_{air} D_h}{\mu_{air}}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}$$

실험 결과를 이용하여 식(6)의 계수 a와 지수 b,c,그리고 d의 값을 구하였으며 다음과 같은 상관식을 도출하였다.

$$f_i = 144\,\mathrm{Re}_{air}^{-0.844}\,\mathrm{Re}_{film}^{0.065}\,\mathrm{Pr}^{-0.19} \qquad (7)$$

여기서 식(7)의 상관식을 도출하기 위해 사용된 각변수의 범위는 다음과 같다.

$340 < \mathrm{Re}_{film} < 2307$

$7000 < \mathrm{Re}_{air} < 60000$

$2.5696 < \mathrm{Pr} < 6.7915$

이 상관식의 결과를 이용하여 기화 열전달계수에 대한 평가를 수행한 결과는 그림 7과 같으며 평가된 결과는 기화 열전달량이 낮은 영역에서는 열전달이 없는 경우의 상관식과 유사한 결과를 예측하였지만, 기화 열전달량이 높은 영역에서는 기화 열전달량을 고려하지 않은 결과를 사용한 계산은 실험치를 30% 이상 낮게 평가하는데 반해 고려된 계산식은 실험 결과와 일치하는 것을 그림 7에서 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 기화 열전달이 존재하는 경우 액막계면에서의 계면 마찰계수를 상관식화 하였으며, 이를 SNU-Simple Algorithm에 삽입하여 기화 열전달계수를 계산하여 결과를 얻어 내어 기존의 결과와 비교하였다. 그리고 공기의 레이놀즈수, 액막의 레이놀즈수, 수정된 프란틀수에 대한 액막계면 마찰계수의 변화를 실험적으로 수행하여 다음과 같은 결론을 얻어 내었다.

1) 액막의 유량이 증가함에 따라 액막 계면의 전단응력은 증가한다.
2) 기화 열전달량이 증가함에 따라 액막 계면의 전단응력역시 증가한다.
3) 액막 유량이 증가함에 따라 액막에서의 파동효과가 증가한다.
4) 기화 열전달량이 많은 경우 blowing 효과가 발생하며 열전달량이 증가함에 따라 blowing 효과도 증가하였다.
5) 액막 유량이 증가함에 따라 기상의 속도 분포는 액막쪽으로 편향하였다.
6) 실험을 통해 기화열전달이 존재하는 경우에서의 액막 계면 마찰계수에 대한 상관식을 도출하였다.

참고문헌

1. H.J.Kim, " Local properties of countercurrent stratified steam-water flow," Ph.D thesis,Northwestern Univ.,1983
2. 이한춘, 박수기, 김무환, " 혼합증기와 물의 직접 접촉 응축 열전달 현상," '98춘계학술대회.,1998
3. H.C.Kang, M.H.Kim, " The relation between the interfacial shear stress and the wave motion in a stratified flow," Int.J.Multiphase flow Vol19,No1,pp 35-49,1993
4. Y.M.Kang, " A study on the evaporative heat transfer coefficient in PCCS," Ph.D thesis, Seoul National Univ.,1997
5. K.R.Chun, R.A.Seban, " Heat transfer to evaporating liquid films," J.of heat transfer, November, 1971
6. W.Ambrosini, et al, " Heat transfer from a plate cooled by a water film with count-current air flow," Proceeding of ICNT,PISA,1994

Condition	Unit	Vertical film flow
Inclined angle	deg	87
Water flow rate	*lpm*	3.7-15.24
Air velocity	m/s	0-12
Inlet water Temp	°C	70
Power	V A	5 Volt 1000Amp

표 1. 실험 조건표

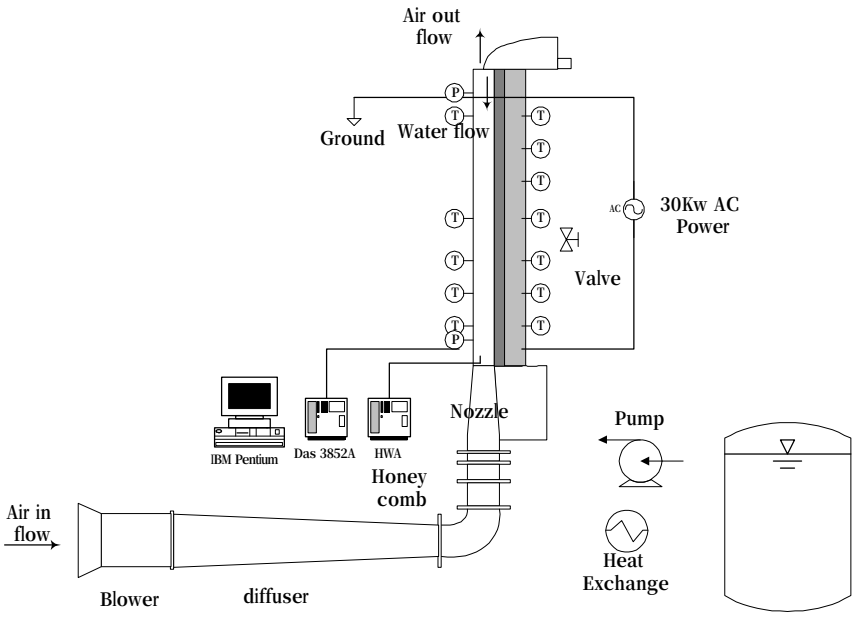


그림 1. 실험 장치의 전체 개략도

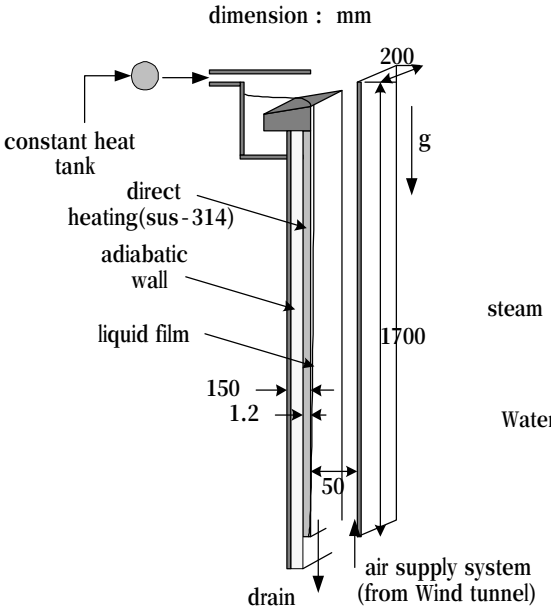


그림 2. 시험체적부의 측면도

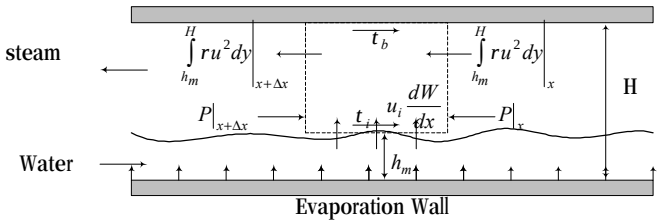


그림 3. 운동량 보존방정식을 위한 제어체적

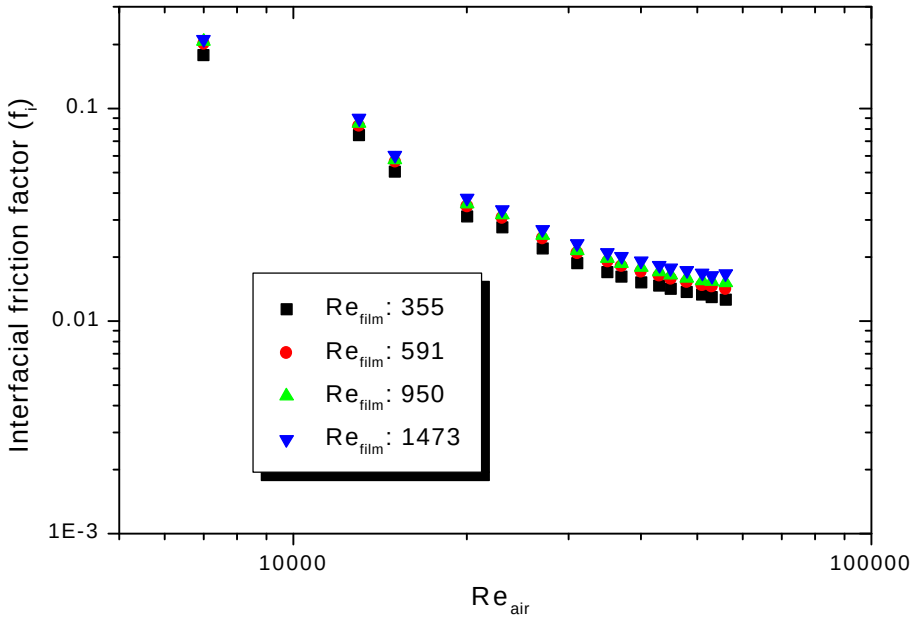
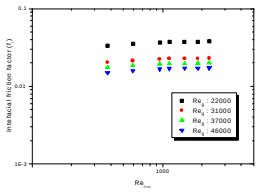


그림 4.공기의 레이놀즈 수에 따른 액막계면 마찰계수의 변화



100

그림 5 액막 레이놀즈 수에 따른 액막계면 마찰계수의 변화

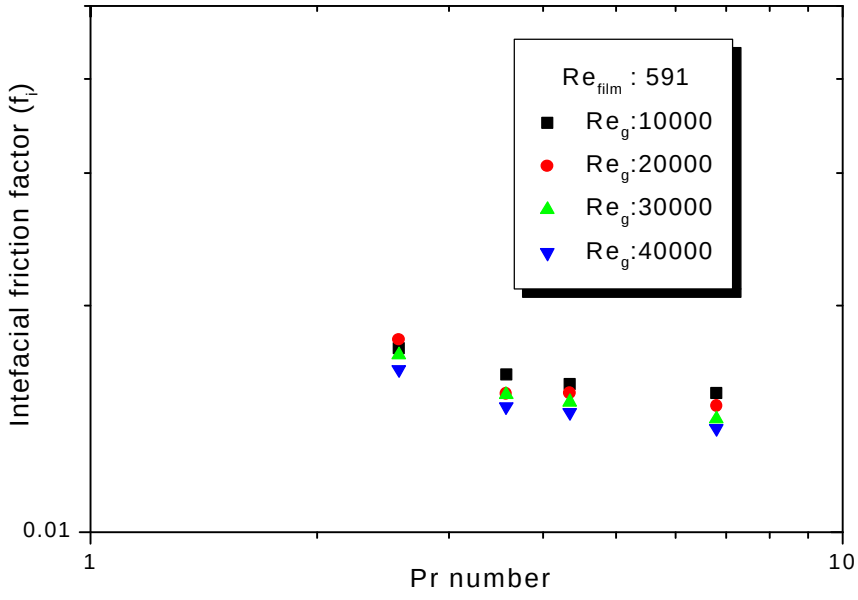


그림 6. 액막 프란틀 수에 따른 액막계면 마찰계수의 변화

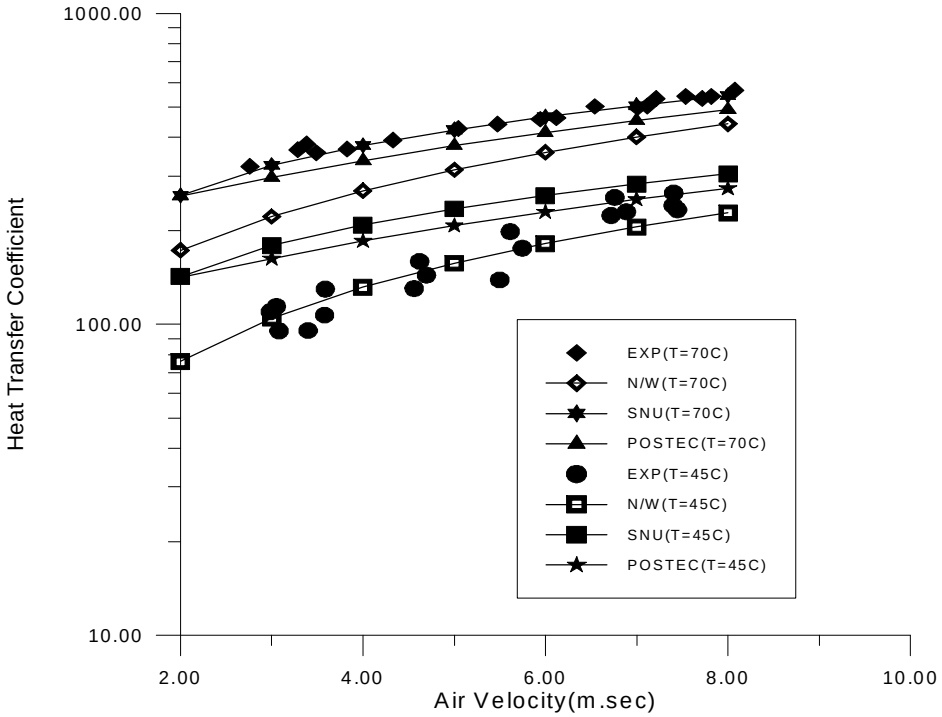


그림 7. Interfacial shear stress **모델링에 따른 기화열전달계수 계산값과 실험값의 비교**