

수직 사각채널에서 Wavy/Stratified 유동조건에서 기화열전달에 관한
상사성 연구

**An Analogy for Evaporative Heat Transfer with Wavy/Stratified Air-Water Flow
in Vertical Counter-Current Flow Conditions**

권 혁, 박군철

서울대학교

요 약

기화 열전달과 같은 물질전달을 수반한 경우에 대한 상사성을 유도하였다. 난류 단상유동에서 열 및 운동량과 관련된 Von-Karman 상사성을 이용하여 wavy/stratified 한 유동에까지 확장하였다. Nusselt 수는 실험과 이론에 의해 얻어진 결과와 일치하였다. 이러한 결과는 기화 및 응축 열전달과 같은 물질전달을 동반하는 열전달 계에서도 열 및 운동량 상사성이 성립함을 의미한다.

Abstract

An analogy for evaporative heat transfer with mass transfer was derived. From von-Karman analogy which has been applied between heat and momentum transfer in single phase turbulent flow, a modified Karman analogy was suggested at present paper. Nusselt number from this analogy showed good agreement with experimental results. Such a result shows that the analogy for a complex heat transfer mode between heat transfer and momentum transfer accompanying evaporation or condensation on the interface can be established.

1. 서 론

액막에 의한 냉각과 공기유동에 의한 대류현상을 이용하는 복합 열전달 기구는 화공 플랜트의 개스 흡착기, 화력 발전소의 응축기 그리고 원자로와 같은 높은 열유속 조건에서 운전되고 있는 공학기구를 냉각시키기 위해 이용되고 있다. 특히 원자력 발전소의 경우, AP-600 원자로의 피동 안전계통인 PCCS(Passive Containment Cooling System)는 이러한 복합 열전달 기구를 이용하여 발전소의 안전성을 현저히 높였다.[1-2, 13]

대부분의 유체에서 상 변화시 요구되는 기화열은 온도를 상승시키는데 필요한 비열에 비

해 높다. 따라서 중력에 의해 흘러내리는 얇은 물막에 의한 증발 냉각은 공기의 대류 열전달에 비해 매우 효과적인 냉각수단이라고 할 수 있다. 증발 또는 응축과 관련하여 수행된 연구에서 가스유동의 운동량, 열 및 수증기 전달현상과 물막 내부의 운동량과 열전달 현상을 경계면에서의 연속조건을 사용해 결합해야 하는 해석상의 어려움 때문에 대부분의 연구자들은 어느 한쪽에 관심을 가지고 연구를 수행하였다

Chun 과 Seban[3]은 tube 외벽을 따라 흘러내리는 물막의 증발량을 측정하여 원래의 Nusselt 상관식에 파동 효과를 반영한 상관식을 유도하였다. 그는 또한 층류로부터 난류로의 전이가 물막의 Reynolds 수 외에 Kapitza 수에 의존한다고 서술하고 있다. Shmerler 와 Mudawwar[14]는 난류 물막으로부터의 증발에 관한 실험을 수행하여 채널 평균 열전달 계수를 얻었으며 물막의 열적 발달 길이가 증발에 의해 늘어남을 관측하였다.

von-Karman[6]에 의해 단상 난류 경계층 유동에 관한 상세한 모델링이 수립된 이후, 열유속과 운동량속(momentum flux)의 상사성이 유도되었다. 단상유동에 관한 그의 모델을 Davis 와 Hung[5]은 이상유동 특히 wave 가 있는 성층화된 유동에 대해 von-Karman 상사성을 확장하여 Nusselt 수를 계산하는 방법을 제시하였다. 그의 연구에 의하면, 액막 표면의 wave 는 마치 단상유동의 난류처럼 속도가 증가함에 따라 증가하여 열전달을 향상 시킨다. 이렇듯 두 인자 난류량과 액막 wave 가 열전달에 미치는 영향이 상사함을 유도하여 새로운 상사성을 유도하였다.

물질전달의 경우, Corradini[4]가 운동량 전달과 열 전달간의 Reynolds analogy 를 물질 전달에 확장하여 강제대류 및 자연대류에 대한 응축모델을 유도하였다. 그는 응축량이 클 경우에는 Bird 가 제시한 보정인자를 사용하여 모델링하였다. Kim[10]은 Corradini 의 응축모델을 이용하여 물막 표면에서 발생하는 파동의 효과를 거칠기 인자로 환원하여 재정의하여 표현하였다. 최근에 Anderson 과 Corradini[11]는 AP600 격납건물 내부 응축열전달에 대한 실험을 수행하였고 실험결과를 해석하기 위해 McAdams 의 자연대류 열전달 상관식에 analogy 개념을 도입하고 보정인자를 사용한 모델을 사용하였다.

Siddique 와 Kazimi[15]는 수직관 내에서 비응축가스(공기 또는 헬륨)가 섞여 있는 수증기로부터의 응축에 대한 실험 및 이론적 연구를 수행하였다. 그들은 가스 지배방정식의 무차원화를 통해서 응축량을 결정하는 Sh 수가 Re 수와 Sc 수에 의존함을 유도하였고 이는 열 및 물질전달간에 상사성이 있음을 간접적으로 증명하는 것이다. 응축량 계산을 위한 해석모델에서 물막 내부의 열전달은 열전도에 의해 표현되며 물막/수증기 경계면에서의 전달현상 해석을 위해 analogy 가 사용되었다. 이 모델에서도 거칠기 인자를 이용해 파동효과가 포함되었는데, 가스의 Sc 수가 1 이하일 경우 파동효과는 무시할 만하다고 서술하고 있다.

이러한 결과로부터 본 연구에서는 기화열전달이 있는 액막에서 얻어낸 마찰계수 상관식을 이용하여 기화열전달이 있는 액막유동에까지 von-Karman 상사성을 확장하여 실험값들과 비교하였다.

2. 액막 계면 전단응력의 실험연구

2.1 액막 계면 마찰계수 측정 실험

기화 열전달이 존재하는 액막유동을 분석하기 위해 실험장치를 설계 제작 하였다. 제작된 실험장치는 실험부와 실험변수 조절을 위한 주변 장치들로 구성되어 있으며, 주변 장치들은 크게 풍동부와 온도 조절부, 액막 유량 조절부로 구성되어 있다. 그림 1은 실험장치에 대한 전체 개략도이며, 그림 2는 액막 계면에서의 운동량 및 열교환이 발생하는 시험 체적부의 개략도이다. 시험체적부의 길이는 1.7m 이고 너비 0.2m, 높이 0.05m의 사각채널로 되어 있다. 실험부의 아래 판은 SUS-316을 이용한 직접 가열방식으로 균일 열유속 조건을 만족하도록 설계 제작되었고 가열판 뒷면을 단열 처리하였으며, 윗 판은 두께 10mm의 아크릴을 사용하여 액막에서의 유동형상을 가시화 하였다. 시험체적부의 양 옆면 역시 Pyrex-glass를 이용하여 가시화가 가능하도록 제작하였다. 액막이 균등하게 퍼지도록 하기위해 액막과 직접 접촉하는 가열벽면을 가공하였다.

액막은 항온조를 통하여 일정한 온도로 유지되어 실험부 상부의 수조부를 통해 자유낙하 하도록 설계 제작되었다. 상부에 장착되어 있는 수조부는 벌집 모양판과 철망을 통하여 균일한 속도로 균등하게 살수 되도록 설계되어 있어서 수조부를 통해 나오는 물은 벽면 처리된 가열벽면에 접해 자유 낙하하도록 설치되었다. 액막의 유량은 터빈유량계(Turbine flow-meter)를 사용하여 측정 조절하였다.

예비시험 및 불확실도 평가 시 표 1에서 보여지는 결과처럼, 액막 계면에 가장 영향을 미치는 변수는 난류강도였고 이를 10%이내로 유지하기 위해 풍동을 설계 제작하였다. 열선 풍속계를 이용하여 설치된 풍동에서 측정된 난류강도는 5% 이하였다. 풍동을 통해 시험 체적부로 유입되는 공기의 속도분포는 균일 분포를 유지하였으며 너비와 높이의 비를 4:1로 설계하여 시험체적부내의 속도분포가 2-D 속도분포를 유지하도록 하였고 L/D를 26으로 설계 제작하여 완전발달조건을 만족시켰다. 표 2에서 본 연구에서 수행된 실험조건을 보여준다. 그림 3,4,5,6은 실험결과의 유효성을 평가하기 위한 초기 실험결과이다. 그림 3과 4로부터 시험체적부로 유입되는 공기의 속도분포가 균일 속도조건을 만족하고 시험체적부내의 차압의 RMS 값이 10% 이내임을 확인하였다. 또한 그림 5와 6으로부터 시험체적부내에서 측정할 차압구간이 완전발달영역이고, 벽면 전단응력은 Blasius 상관식과 유사함을 알 수 있다. 이런 결과를 바탕으로 실험에서 사용할 벽면 전단응력에 관한 기본 상관식으로 Blasius 형태의 상관식을 사용하였다.

2.2 액막 계면 전단응력과 마찰계수 상관식

수직한 벽면에서 자유 낙하하는 액막과 상향하는 공기에 의해 형성되는 액막 계면에서의 마찰계수는 그림 7과 같은 제어체적에서 운동량 평형식으로부터 계산된다.

$$\tau_i = - \left\{ \frac{d}{dx} \int_{\delta}^H \rho_g u_g^2 dy + u_i \frac{dw_g}{dx} \right\} - (H - \delta) \frac{dp_g}{dx} - \tau_b - \rho_g \cdot g \cdot (H - \delta) \sin \theta \quad (1)$$

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.

$$\tau_i(U_{\infty}) = \frac{H - h_m}{L} \cdot \Delta P + \frac{2(H - h_m) + W}{W} \cdot \tau_{sw}(U_{\infty}) + W \cdot (H - h_m) \cdot g \rho \cos \theta \quad (2)$$

식(2)를 이용하여 현재 연구를 위한 기화 열전달이 있는 경우에 대한 계면 마찰계수 상관식을 도출하면 식(3)과 같은 상관식을 얻을 수 있다.

$$f_i = 2.732 \times \text{Re}_g^{-0.2} \times \text{Re}_f^{-0.1} \text{Ja}^{-2.20} \quad (3)$$

본 상관식이 유효한 각 무차원수의 범위는 아래와 같다.

$$5333 \leq \text{Re}_g \leq 63996$$

$$194 \leq \text{Re}_f \leq 2214$$

$$2.523 \leq \text{Ja} \leq 10.784$$

현재 얻어진 상관식은 액막의 과냉정도를 평가하기 위해 Ja 수를 도입하여 액막에서 기화 열전달이 계면 전단응력에 끼치는 영향을 평가하였다. 또한 현재 연구에서 도출된 상관식을 다른 상관식과 비교하였으며 그림 8 과 9에서 보여준다. 그림 8 은 약 25% 이내에서 상관식으로 실험결과들이 모아짐을 보여준다. 그림 9에서 Wallis[16]와 POSTECH[7] 그리고 Northwestern Univ.[9]에서 수행한 결과들을 비교하고 있다. 특히 Northwestern 대학의 결과는 본 연구와 기하학적, 수력학적 조건은 유사하나 기화 열전달이 아닌 응축 열전달에서 실험한 결과를 상관식화 하였다. 이러한 응축열전달이 계면 전단응력에 미치는 효과가 기화열전달에 비해 높다고 일반적으로 알려져 있다. 그림 9에서처럼 응축이 전단응력에 미치는 영향이 기화열전달이 전단응력에 끼치는 영향보다 더 크게 나타났으며 물질전달이 있는 열전달 계수와 계면 전단응력과의 상관관계가 있음을 일면 유추할 수 있다.

2.3 SNU-기화 열전달 평가 모델

SNU-algorithm[8]을 이용하여 기화열전달계수를 평가하였다. 이 계산법은 기화 열전달계수를 대류에 의한 열전달과 기화열전달에 의한 열전달로 나누어 고려한다. 기화 열전달된 양을 예측하기 위해서 물질-운동량 유사성으로부터 기화된 질량유속을 구하고 이를 이용하여 기화열전달계수를 계산한다. 대류 열전달계수는 Colburn의 유사성으로부터 계산된다. 기

화열전달계수를 계산하는 방법론에 대한 순서도를 그림 10 에서 나타내었다.

그림 10 의 순서도처럼 3 가지 경우 즉 smooth wall, wavy interface, wavy evaporative interface 에 대하여 각각 계산을 수행하였고 실험값과 비교하였다. 그림 11 에는 실험값과 계산값의 결과를 보여주고 있다. 그림 11 에서 낮은 기화열속과 낮은 공기속도의 영역에서는 벽면 마찰계수를 고려한 경우가 실험값을 잘 모사함을 알 수 있다. 이는 기화열속과 액막의 파동효과가 거의 나타나지 않기 때문이다. 낮은 열속과 높은 공기유속에서는 액막의 파동효과가 중요시 되며, 따라서 벽면 마찰계수를 고려한 식은 실험값보다 낮게 예측하며, 파동효과를 고려한 마찰계수식이 실험값을 잘 모사하고 있다. 높은 기화열속 지역에서는 기화열전달을 고려한 마찰 계수식만이 실험치를 잘 모사한다. 고려하지 않은 두 경우는 실험치를 70% 이상 낮게 평가하였다. 기화열속이 높은곳에서 마찰계수를 이용한 analogy 를 적용할때는 기화열속이 고려된 마찰계수를 사용하여야 하며, 그렇지 않을 경우 기화되는 질량속을 실제값보다 낮게 평가하게 된다. 또한 기화열속이 높은영역에서는 액막에서의 blowing 효과가 wavy 효과보다 더 지배적임을 그림 11 에서 보여주고 있다.

3. 상사성(Analogy)

경계층(boundary layer) 유동에 관한 상사성 적용을 시작으로 많은 상사 이론들이 존재하고 있다. 이들 상사성의 근간이 되는 von-Karman 상사성을 자세히 들여다 본후 이를 air-water 이상유동 그리고 기화 액막 유동에 까지 확장하여 실험결과와 비교하였다.

3.1 단상 난류 상사성(von-Karman analogy)

난류영역을 층류와 난류영역과 그 사이에 buffer 층이 있다고 가정하여 각 영역에 따라 모델링하여 analogy 를 적용하였다. 시간 평균화된 길이방향으로의 온도장 및 속도장을 식(4)와 (5)처럼 모델링하여 다음을 얻었다.[6]

$$q_{w,x}'' = -\frac{\partial T}{\partial y}(k + \rho c_p \varepsilon_H) \quad (4)$$

$$\tau_{w,x} = -\frac{\partial u}{\partial y}(\mu + \rho \varepsilon_M) \quad (5)$$

아래와 같은 무차원 변수를 정의한다.

$$dy^* = \frac{dy}{\nu} \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (6)$$

$$dv^* = dv \sqrt{\frac{\rho}{\tau}} \quad (7)$$

$$\Phi'(y^*) = \frac{dv^*}{dy^*} = \frac{\nu\rho}{\tau} \frac{dv}{dy} \quad (8)$$

식 (4)과 (5)를 식(8)의 관계를 이용하여 정리하면 식(9)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\varepsilon}{\nu} = \frac{1}{\Phi'(y^*)} - 1 \quad (9)$$

(9)을 이용하여 난류 경계층 범위에서 적분하여 식(10)을 유도할 수 있다.

$$T_\delta - T_w = \frac{q''}{\rho c_p \sqrt{\tau/\rho}} \int_0^\delta \frac{dy^*}{\frac{\alpha}{\nu} - 1 + \frac{1}{\Phi'(y^*)}} \equiv M(\text{Pr}) \quad (10)$$

이를 다시 아래처럼 정리 할 수 있다.

$$\frac{\rho c_p (T_\delta - T_w)}{q''} - \frac{\nu_\delta \rho}{\tau} = \sqrt{\frac{\rho}{\tau}} (M(\text{Pr}) - K) \quad (11)$$

(11)식을 St 수와 표면마찰계수로 재정리하면 (12)식이 된다.

$$St = \frac{c_f}{2} \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{c_f}{2}} (M(\text{Pr}) - K)} \quad (12)$$

M(Pr)-K 를 모델링하기 위해 Nikruadse 의 난류 실험결과를 이용하여 식(13)과(14)처럼 모델링할 수 있다.

$$y^* = 5, \nu^* = y^* \quad (13)$$

$y^* = 5$ 에서 $y^* = 30$ 까지는

$$\Phi'(y^*) = \frac{dv^*}{dy^*} = \frac{5}{y^*} \rightarrow \nu^* = 5 \left[1 + \ln \frac{y^*}{5} \right] \quad (14)$$

위 두식을 이용하여 0에서 δ 까지 적분하여 정리하면 식(15)와 같은 식을 얻을 수 있고 이를 다시 Nu 수로 표현하면 (16)과 같은 von-Karman 상사성을 유도할 수 있다.

$$St = \frac{c_f}{2} \frac{1}{1 + 5\sqrt{\frac{c_f}{2}} \left[\text{Pr} - 1 + \ln \left(\frac{5}{6} \text{Pr} + \frac{1}{6} \right) \right]} \quad (15)$$

$$Nu = \frac{\sqrt{f/8} \text{Re}}{\left[5 + \frac{5}{\text{Pr}} \ln(5\text{Pr}+1) \right]} \quad (16)$$

3.2 물-공기 유동에서의 상사성

물-공기 이상유동에서 다음과 같은 항등 계면 전단응력을 가정하면 다음과 같은 운동 방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}\tau_w &= \tau + \frac{\Delta P}{L} y \\ \tau_w &= \tau_i + \frac{\Delta P}{L} \delta\end{aligned}\tag{17}$$

이식을 von-Karman 상사에 적용한 것처럼, (4)식에 대입하여 정리하면 열전달이 없는 동향 성층유동에 대한 열 및 운동량에 대한 analogy 를 유도할 수 있다[7]. 이 상사성의 수행결과는 식(18)과 같다.

$$Nu = \frac{D_{eq}}{(H - \delta)} \frac{\mu_g}{\mu_l} \frac{Re_g \sqrt{f_i \rho_l \rho_g}}{5 \left[1 + \frac{Pr_l}{Pr} \ln \left(1 + 5 \frac{Pr_l}{Pr} \right) \right]}\tag{18}$$

난류 Pr 수는 $0 < Pr_l < 16$ 범위에서는 Azer 와 Chao[5]가 제안한 식(19)와 같은 상관식을 이용하였다.

$$Pr_l = \frac{1 + 57 Re^{-0.46} Pr^{-0.58} \exp[-(y/y_0)^{0.25}]}{1 + 135 Re^{-0.45} \exp[-(y/y_0)^{0.25}]}\tag{19}$$

이러한 상사성은 경계층 유동의 운동량유속과 열유속이 상사계임을 확장하여 액막의 wave 에 의해 형성되는 난류 경계층과 열유속을 상사계로 가정하여 접근하였다. 이 상사성은 물질전달 즉 기화열전달이 없는 경우에 수행된 결과이지만, 이를 확장하면, 물질전달이 있는 물-공기 유동으로의 확장도 가능하다.

3.3 기화 액막 유동에서의 상사성

식(19)을 기화열전달이 있는 경우로 확장하기 위해 식(20)과 (21)을 이용하여 새로운 상사 관계식 식(22)을 유도하였다.[14]

$$\tau_i = \tau_{i,a} - (u_g - u_i) \frac{dm_g}{dx}\tag{20}$$

$$h = \frac{h_{fg}}{T_g - T_f} \frac{dm_g}{dx}\tag{21}$$

$$Nu = \frac{RePr(f_{i,evap} - f_i)}{Ja} \quad (22)$$

위의 세 상사성을 비교해보면, (16)식은 난류에 의한 운동량전달을 viscosity의 모델링을 통해 얻은 공식이고, 식(18)은 액막에서의 파동현상을 모델링하여 상사성을 수립하였으며, (22)식은 기화열전달을 고려하여 모델링하였다. 기화열전달에 기인한 에너지 증가분은 Ja 수로 표현됨을 식(18)과 식(22)을 비교하면 알 수 있다. 따라서 식(22)에서 기화열속에 대한 모델링을 삽입하여 재정리하면 식(23)처럼 모델링할 수 있다..

$$Nu = \frac{D_{eq}}{(H - \delta)} \frac{\mu_g}{\mu_l} \frac{Re_g \sqrt{f_{i,evap} \rho_l \rho_g / Ja}}{5 \left[1 + \frac{Pr_t}{Pr} \ln \left(1 + 5 \frac{Pr_t}{Pr} \right) \right]} \quad (23)$$

위의 식(22)를 이용하여 계산한 SNU-algorithm의 계산결과와 실험값들을 비교하였고 그림(12)에서 보여주고 있다. 그림(12)는 SNU-algorithm과 식(22)의 analogy를 이용한 계산식을 비교하였으며, 두 식 모두 실험값을 잘 모사하고 있다. 이는 기화열전달이 액막 유동의 경우에도 열 및 운동량 상사성을 직접 적용할 수 있고, 열유속과 전단응력간에 상사성이 존재함을 간접적으로 보여준다.

4. 결론

단상유동 난류 대류 열전달계수를 예측하기 위한 von-Karman 상사성을 수직 대향류에서 기화열전달이 있는 이상유동에 적용하기 위해 이를 수정하여 기화 열전달 계수의 실험치와 비교하였다. 일반적으로 이상유동 특히 물질전달이 있는 경우에서 열 및 운동량 상사성은 성립되지 않는 것으로 알려져 있으나 본 실험에서 수정된 열 및 운동량 상사성을 이용하여 해석한 바 실험값을 잘 예측하였다. 이러한 상사성이 성립한 이유는 기화 열속과 파동현상에 의해 액막 계면에서의 난류강도가 증가하는 상사계가 존재하기 때문이며, 상변화가 있는 이상 유동계에서도 열 및 운동량간의 상사성이 성립함을 본 연구를 통해 간접적으로 증명하였다.

기화 열전달이 있는 수직 대향 성층유동에 대한 정확한 해석을 위해서는 액막파동에 대한 3차원 데이터가 필요하다. 따라서 기화열속이 있는 액막 유동의 정확한 모델링을 위해서 액막파에 대한 연구가 첨부되어야 할 것이다.

Nomenclature

Roman

c_p : specific heat at constant pressure

f : friction factor

g : gravitational acceleration

K : thermal conductivity

h : heat transfer coefficient

H : channel height

Ja : Jacob number

M : mass flow rate

P : pressure

q : heat transfer rate

Re : Reynolds number

Sc : Schmidt number

T : mixture temperature

u : average velocity vector

W : channel width

Subscript

a : only air

f : friction

g : gravitation

i : interface

i, a : interface with dry air condition

$i, evap$: evaporative interface

참고문헌

1. Akai, M., Inoue, Aoki, S., Endo, K., 1980. Structure of a Cocurrent Stratified Two-Phase with Wavy Interface. Int.J.Multiphase Flow 6, 173-190.
2. Ambrosini, W., et al, 1994. Heat Transfer from a Plate Cooled by a Water Film with Count-current Air Flow. Proceeding of ICNT, PISA.

3. Chun, K.R., Seban, R.A., 1971. Heat Transfer to Evaporating Liquid Films. *Journal of Heat Transfer*.
4. Corradini, M.L., 1984. Turbulent Condensation on a Cold Wall in the Presence of a Noncondensable Gas. *Nuclear Technology* 64, 186-195.
5. Davis, E.James., 1969. an analogy for heat transfer with wavy/stratified gas-liquid flow. *AIChE Journal* 21(5), 872-878.
6. Kreith, F., 1973. *Principles of Heat Transfer*. Harper & Row.
7. Kang, H.C., Kim, M.H., 1993. The Relation between the Interfacial Shear Stress and the Wave Motion in a Stratified Flow. *Int.J.Multiphase flow* 19(1), 35-49.
8. Kang, Y.M., Park, G.C., 2001. An Experimental Study on Evaporative Heat Transfer Coefficient and Applications for Passive Cooling of AP600 Steel Containment. *Nuclear Engineering and Design* 204, 347-359.
9. Kim, H.J., 1983. Local Properties of Countercurrent Stratified Steam-Water Flow. Ph.D. Dissertation, Northwestern University, USA.
10. Kim, M.H., Corradini, M.L., 1990. Modeling of Condensation Heat Transfer in a Reactor Containment. *Nuclear Engineering and Design* 118.
11. M.H. Anderson, M.L. Corradini, 1996. Condensation in the presence of Noncondensable Gases: AP-600 Containment Simulation.
12. Park, G.C., et al., 2000. Two Phase Flow Measurement Method and Application. Daesun.
13. Peters F.E., et al., 1994. Advanced PWR Passive Containment Cooling Experimental Program. *Proceeding of International Conference on New Trends in Nuclear Thermo-hydraulics, PISA*.
14. Shmerler, J.A., Mudawwar, I., 1988. Local Evaporative Heat Transfer Coefficient in Turbulent Free-Falling Films. *Int.J. Heat and Mass Transfer* 31.
15. Siddique, et al. 1993. Local Heat Transfer Coefficient for Forced-Convection Condensation of Steam in a Vertical Tube in the Presence of Noncondensable Gas. *Nuclear Technology* 106.
16. Silver, R.S., Wallis, G.B., 1964. A simple Theory for Longitudinal Pressure Drop in the Presence of Lateral Condensation. *Proc. Instn. Mech. Engrs* 178(14), 339-375.

표 1. 실험 조건.

	Uncertainty 표현 수식	Uncertainty
폭에 따른 uncertainty	$\left(\frac{(H - h_m)(-2\tau_{sw}(U_\infty) - \rho_g g)}{w^2} \right) U_w$	0.0
액막 높이에 따른 uncertainty	$\left(\frac{2\tau_{sw}(U_\infty)}{w} + \frac{\Delta P + \rho_g g}{L} \right) U_{H-h_m}$	0.11%
시험체적부 길이에 따른 uncertainty	$\left(-\frac{(H - h_m)}{L^2} \Delta P \right) U_L$	0.0
밀도에 따른 uncertainty	$\left(\frac{g(H - h_m)}{w} \right) U_{\rho_g}$	0.002%
시스템 차압에 따른 uncertainty	$\left(\frac{(H - h_m)}{L} \right) U_{\Delta P}$	0.24%
벽면 마찰에 의한 uncertainty	$\left(1 + \frac{2(H - h_m)}{w} \right) U_{\tau_{sw}}$	1% intensity :0.5% 10% intensity:5.0%
중력에 의한 uncertainty	$\left(\frac{(H - h_m)\rho_g}{w} \right) U_g$	0.0

표 2. 실험 조건.

Parameter	Measuring	Range
Inlet Film Temperature	Inlet Temp. & Inlet Pressure	50 ~ 80 °C 1 atm
Heat Flux	Voltage & Current	0 ~ 30 kW/m ²
Film Flow Rate	Inner Water Flow Rate	0 ~ 30lpm (Film Reynolds number 0 ~ 2500)
Average Air Velocity	Inlet Velocity Profile	0.0 ~ 12.0 m/s (Air Reynolds number 0~ 60000)

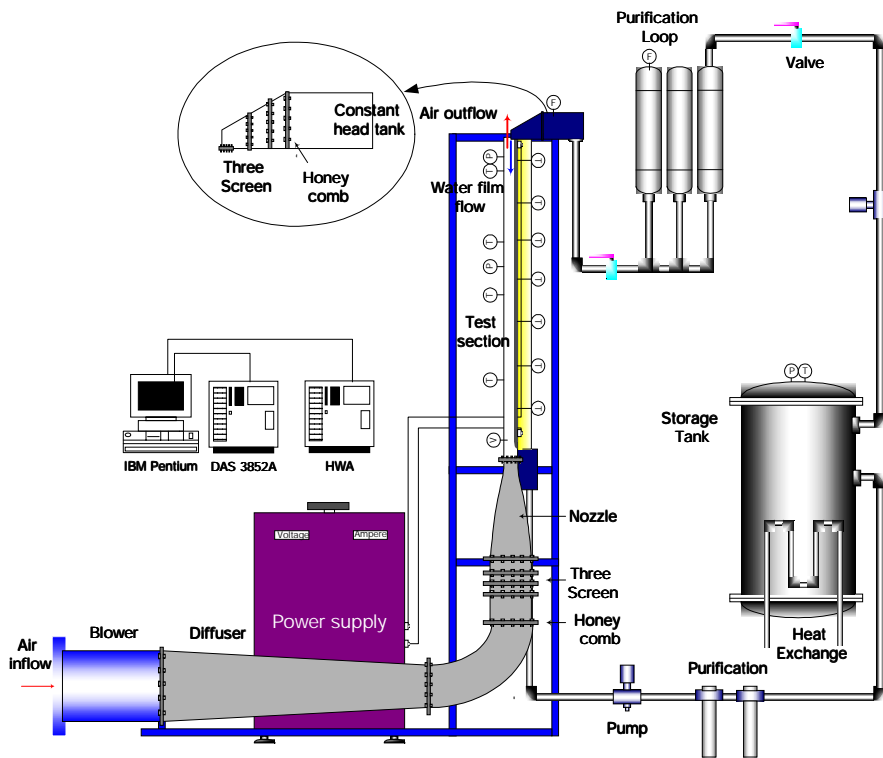


그림 1. 실험장치 전체도

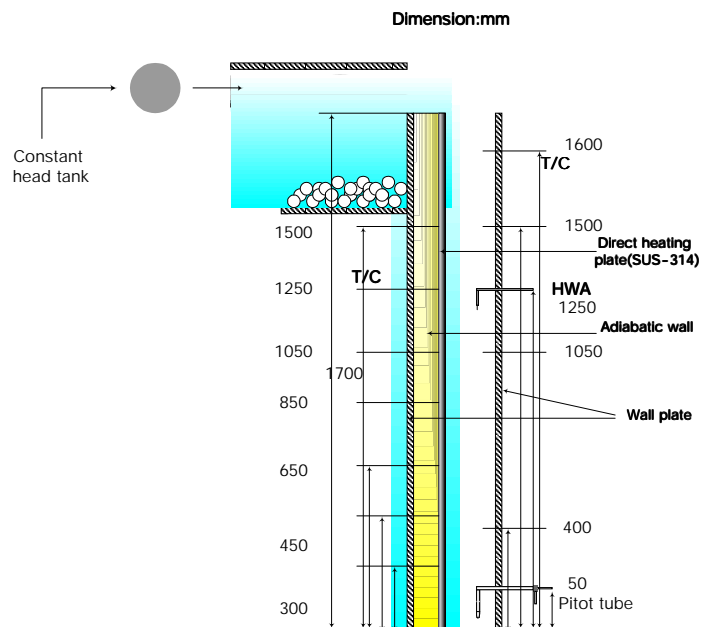


그림 2. 시험 체적부 측면도

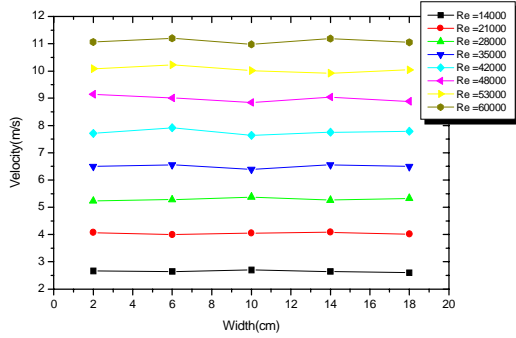


그림 3. 시험 체적부에서의 균일 속도분포도

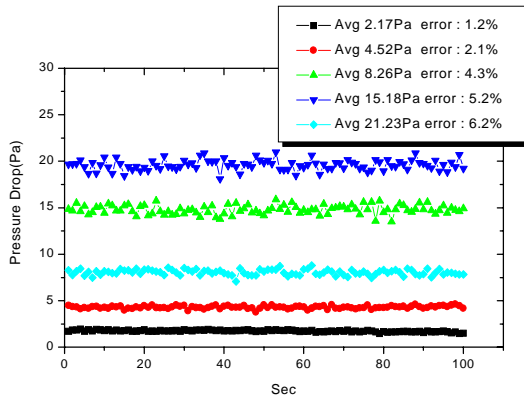


그림 4. 시험 체적부내에서의 시간에 따른 차압의 민감도 평가

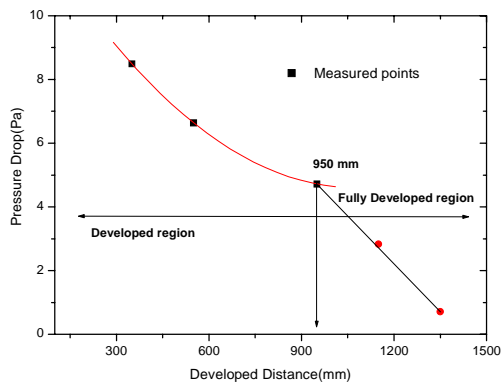


그림 5. 시험체적부의 완전발달 평가

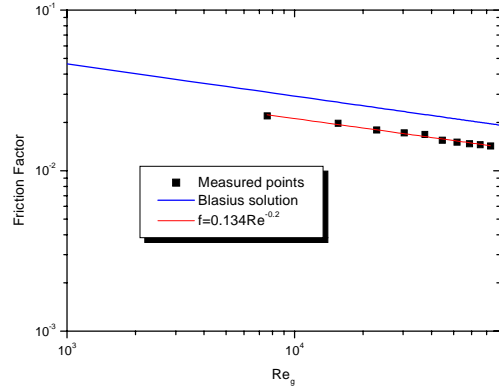


그림 6. 실험값과 Blasius 상관식과의 비교

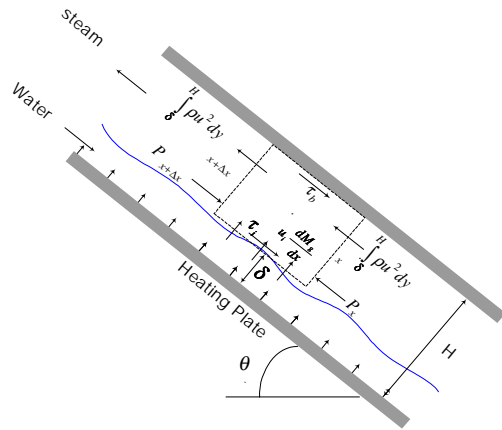


그림 7. 수증기-물 대향류에서의 제어체적

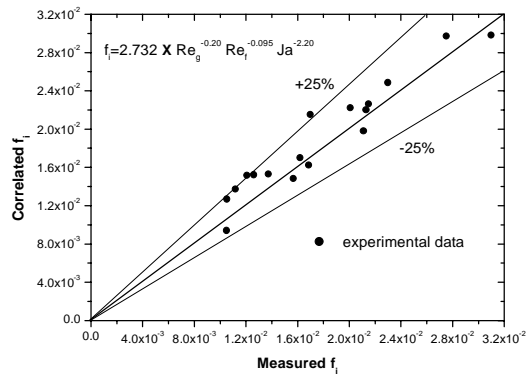


그림 8. 기화열전달에서의 계면 마찰계 수 상관식

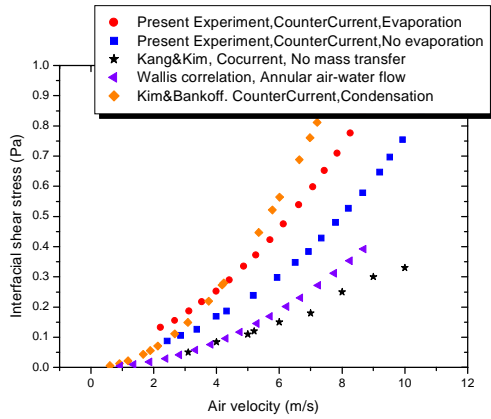


그림 9. 기화 액막 계면 마찰계수의 기존 상관식과의 비교

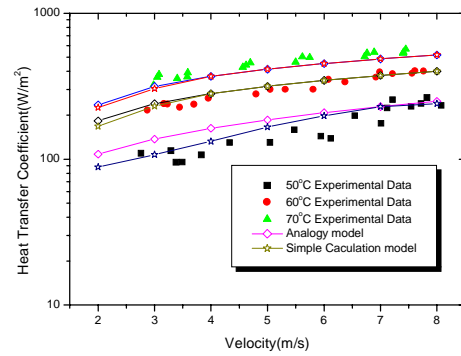


그림 12. 상사성과 SNU-algorithm 과의 비교

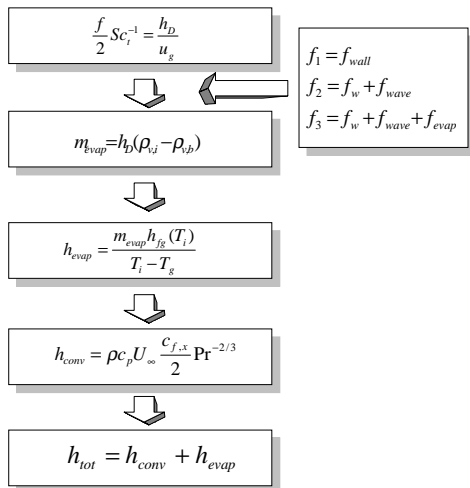


그림 10. SNU-계산의 순서도

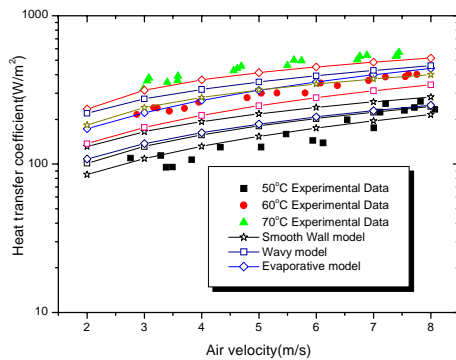


그림 11. 모델링에 따른 기화열전달계수와 실험값과의 비교