



## ATHOS3 코드에 의한 고리1호기 증기발생기 열유동해석

Thermal-Hydraulic Analysis of Kori Unit-1 Steam Generator Using ATHOS3 Code

최석기<sup>\*1)</sup>, 남호윤<sup>1)</sup>, 김의광<sup>1)</sup>, 김형남<sup>2)</sup>, 장기상<sup>2)</sup>, 홍성열<sup>2)</sup>

Seok-Ki Choi, Ho-Yun Nam, Eui-Kwang Kim, Hyung-Nam Kim, Ki-Sang Jang and Sung-Yull Hong

This paper presents the numerical methodology of ATHOS3 code for thermal hydraulic analysis of Pressurized Water Reactor (PWR) steam generators. Topics include porous media approach, governing equations, physical models and correlations for solid-to-fluid interaction and heat transfer, and numerical solution scheme. The ATHOS3 code is applied to the thermal hydraulic analysis of steam generator in the Korea Kori Unit-1 nuclear power plant and the computed results are presented

## 1. 서론

현재 가동중인 원자력발전소에는 설계기준에 따라 1기당 2-4기의 증기발생기가 있다. 가압경수로의 증기발생기는 30-40 년간 작동되도록 설계되기 때문에, 이 수명기간 동안 증기발생기의 튜브와 내부구조물들은 유체유발진동, 피로, 바모, 부식, fretting 및 danting 등으로 영향으로 손상을 받게 된다. 이러한 기계학적 손상들은 기계학적 설계, 열수력 현상, 유체의 현상, 유체의 화학적 성질 및 재료의 특성들과 복잡하게 연관되어 있기 때문에 이들을 규명하기 위해서는 증기발생기의 내부의 열 유동 현상에 대한 정보가 필요하다.

지금까지 증기발생기 내부의 유동현상을 해석하기 위하여 많은 전산코드들이 개발되어 왔다. 이들 코드들 중 현재 가장 널리 이용되고 있는 코드는 EPRI 의 후원아래 개발된 ATHOS3 코드 [1]이다. ATHOS3 코드는 증기발생기 2 차측의 속도, 압력, 온도, 보이드율 (void fraction)과 튜브 내부의 온도 분포를 3차원적으로 해석하는 코드이다. ATHOS3 코드에 대한 정확성은 이미 많은 실험자료와 수치해를 비교하여 검증되어왔다. 이러한 검증의 적용에는 축소 모형실험과 실패크기 모형 실험 및 실제 운전중인 증기발생기에 대

한 묘사들이 포함되어 있으며, 모든 경우에 있어서 ATHOS3코드의 계산결과는 일반적으로 훌륭하게 일치하였다. 아직까지도 코드가 완전히 검증되려면 더 많은 적용과 검증이 필요한 것으로 사료되지만, 현재의 여건으로는 증기발생기 열수력 해석에 있어 ATHOS3 코드의 유용성은 매우 크다고 할 수 있다.

본 논문에서는 ATHOS3 코드를 중심으로 가압경수로 증기발생기 열유동 해석방법을 소개하고자 한다. 이 코드의 수치적 방법을 설명하고, ATHOS3 코드를 가동중인 고리 1 호기 증기발생기 열유동해석에 적용하여 계산결과를 설명하고자 한다.

## 2. 수치해석방법

## 2.1 수치기법

ATHOS3 코드의 이론적 배경을 간단히 살펴보면 튜브다발이나 튜브지지판 등의 유동저항체를 모형화 하기 위하여 다공질매질법 (porous media approach)을 사용하고, 유한체적법을 사용하여 지배방정식을 이산화하며, 엇갈림격자계를 사용하고 있다. 대류항 처리법은 상류차분도식 (upwind differencing scheme)을 사용하며, 난류 모델로는 대수난류점성모델 (algebraic turbulent viscosity model)을 사용하고 있다. 속도와 압력의 연RP는 SIMPLE 알고리즘을 사용한다. 이상 유체(two phase flow) 해석모델로 균질 유동 모델 (homogeneous floe model)과 대수 미끌림 유

- 1) 한국원자력연구소 칼리머기술개발팀  
(305-353 대전시 유성구 덕진동 150,  
Tel : 042-868-2993)
- 2) 전력연구원 원전설비지원그룹  
(305-380 대전시 유성구 문지동 103-16,  
Tel : 042-865-5535)

동 모델 (algebraic slip flow model)을 선택적으로 사용할 수 있다.

### 2.2 지배방정식

증기발생기 2차측 유동을 다공질매질법 (porous media approach) 과 이상유동 모델로 균질유동모델(homogeneous flow model)로서 해석할 때 지배방정식은 다음과 같이 체적다공을  $\beta$  (volume porosity)를 사용하여 표현할 수 있다.

(1) 질량보존식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta\rho) + \nabla \cdot (\beta\rho\vec{v}) = 0$$

(2) 원주방향 운동량 보존식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\beta\rho ur) + \nabla \cdot [\beta\rho\vec{v}ur - \beta\Gamma_{ur}\nabla(ur)] \\ = -\beta\left(\frac{\partial p}{\partial \theta} - \frac{2\Gamma_{ur}}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta}\right) - f_{\theta r} \end{aligned}$$

(3) 반경방향 운동량 보존식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\beta\rho v) + \nabla \cdot [\beta\rho\vec{v}v - \beta\Gamma_v\nabla(v)] \\ = -\beta\left(\frac{\partial p}{\partial r} + \Gamma_v\left(\frac{2}{r^3} \frac{\partial(ur)}{\partial \theta} + \frac{v}{r^2}\right) - \rho \frac{(ur)^2}{r^3}\right) - f_r \end{aligned}$$

(4) 축방향 운동량 보존식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\beta\rho w) + \nabla \cdot [\beta\rho\vec{v}w - \beta\Gamma_w\nabla(w)] \\ = -\beta\left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g\right) - f_z \end{aligned}$$

(5) 에너지 보존식

$$\frac{\partial}{\partial t}[\beta(\rho h - p)] + \nabla \cdot [\beta\rho\vec{v}h - \beta\Gamma_h\nabla(h)] = q_s$$

위의 2차측 에너지방정식으로부터 계산된 엔탈피 (h)와 압력이 2차측 유체의 상태를 결정한다. 이상영역에서 밀도, 건도(mass quality) 및 보이 드율(void fraction)은 다음의 식으로 계산된다.

증기발생기 1차측 유동은 가압된 단상유체의 유

$$x = \frac{h - h_{ls}}{h_{gs} - h_{ls}} \quad \alpha = x \frac{\rho}{\rho_{gs}} \quad \rho = \left[ \frac{1}{\rho_{ls}} + \left( \frac{1}{\rho_{gs}} - \frac{1}{\rho_{ls}} \right) x \right]^{-1}$$

동이며 증기발생기 모든 세관의 압력강하가 동일하다는 가정 하에 1차측 유체의 속도는 다음의 방정식으로 구한다[1].

$$V_p = V_{avg} \left( \frac{L}{L_{avg}} \right)^{-0.5}$$

위 식에서 L은 세관의 길이를 나타낸다. 일차측 유체의 온도는 1차원적으로 다음의 에너지방정식으로 구한다.

$$C_p \beta_p \rho_p \frac{\partial T_p}{\partial t} + C_p \frac{\partial}{\partial s} (\beta_p \rho_p v_p T_p) = q_p$$

### 2.3 교체와 유체간의 마찰항 처리법

증기발생기 내 튜브에 의한 유동저항항은 모든 방향의 운동방정식에 적용되고 경험상관식을 사용하여 계산하여야 한다. 축방향으로의 마찰 항  $f_z$  는 다음과 같이 표현된다. 이 식에서

$$f_z = f_a A_{sv} \frac{\rho w^2}{2} \Phi$$

$f_a$  는 축방향 fanning friction factor 이고  $\Phi$  는 two phase multiplier이다. 이들은 실험 상관식으로 계산된다. 튜브지지판 같은 집중저항체인 경우에도 다음과 같이 마찰항을 계산한다.

$$f_z = K \frac{\rho w^2}{2} \left( \frac{A_f}{A_d} \right)^2 A_f \Phi$$

위 식에서 K는 급확장 및 급축소에 의한 손실계수이고 튜브지지판 구멍의 모양이나 개수 등의 기하학적 사양에 의해 결정된다.

### 2.4 교체와 유체간의 열전달항 처리법

Fig.1 은 1 차유체, 튜브금속 및 2차유체 사이의 온도 분포의 한 예를 보여주고 있다. 이 그림에서 은 튜브벽 중심에서 금속온도를 나타낸다. 튜브를 통과하는 에너지 보존식을 수식으로 표현하면 다음과 같다.



$$\frac{C_{p,M} \beta_M \rho_M V}{\Delta t} (T_M^n - T_M^{n-1}) = -(Q_p + Q_s)$$

$$Q_s = AH_{M-S}(T_M - T_S) \quad Q_p = AH_{M-P}(T_M - T_P)$$

$$\frac{1}{H_{M-S}} = \frac{1}{H_M} + \frac{1}{H_S} + \frac{1}{H_F} \quad \frac{1}{H_{M-P}} = \frac{1}{H_M} + \frac{1}{H_P}$$

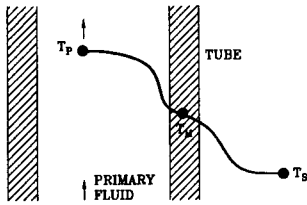


Fig.1 튜브 벽면 근처 온도 분포도

위 식에서  $H_M$ 은 벽반두께(half wall thickness)을 기준으로 한 튜브금속의 열전도도,  $H_S$ 는 2차측 유동과의 열전달계수,  $H_F$ 는 튜브 외부표면의 fouling resistance,  $H_P$ 는 1차측 유동과의 열전달계수를 나타낸다. 이들중 2차측 유동과의 열전달계수  $H_S$ 의 계산이 제일 어렵다. 이는  $H_S$ 가 이상유동의 발달과정에 형성되는 여러 유동영역에 너무 의존하기 때문이다.

## 2.5 난류모델

증기발생기 내부유동은 대부분 난류유동이므로 난류의 영향을 고려하여야 한다. 지금까지 이상유동, 특히 액체 - 증기의 유동에 대해서는 적절한 난류모델이 잘 개발되어져 있지 않다. 다행스럽게도 증기발생기 대부분의 영역에서 이차측 유동분포는 고체 - 유체간의 마찰 및 열전달항에 매우 영향을 받으므로 난류확산항의 정확한 계산의 필요성이 크지 않다. 그러므로 대수난류확산 모델이 매우 적절하다.

## 2.6 이상유동모델

증기발생기 내부 유동해석에 일반적으로 적용되고 있는 이상유동 모델은 균질모델(homogeneous model), 대수 미끄럼 모델(algebraic slip model)과 2유체 모델(two fluid model) 등이다.

(1) 균질 유동 모델 (homogeneous flow model): 균질 유동 모델에서는 액체(liquid)와 증기(vapor) 간의 속도 미끄럼(slip) 효과를 무시한다. 즉 액체와 증기가 같은 속도로 움직이고 모든 공간에서 열적평형(thermal equilibrium)을 이룬다고 가정한다. 가압경수로 증기발생기에서는 액체와 증기간의 속도 미끄럼 효과를 무시하여도 기하학적 및 열유속적 불균일이 고려되면 균질유동모델도 유용한 정보를 제공한다. 그리로 액체와 증기의 혼합물의 밀도가 증기발생기 전 영역에서 변화하므로 혼합물 유동의 부력효과가 상대적으로 적다.

(2) 대수 미끄럼 유동 모델 (algebraic slip model): 대수 미끄럼 유동 모델에서는 수직방향(중력방향)의 속도 미끄럼 영향은 고려하고 횡방향(transverse direction)의 속도 미끄럼 효과는 무시한다. 수직방향의 운동방정식 및 에너지 방정식에는 속도미끄럼 효과를 고려한 항이 첨가되며, 이들 방정식에 들어가는 액체와 증기와의 상대속도는 대수방정식인 상관식으로 처리된다. 대수 미끄럼 유동 모델이 균질 유동 모델의 단점을 보완하고 2유체 모델의 복잡함을 피할 수 있기 때문에 현재 가장 널리 이용되고 있다.

(3) 2유체 모델(two-fluid model): 2유체 모델에서는 액체와 증기 각각의 질량, 운동량 및 에너지 보존식을 푼다. 이들 방정식들에 존재하는 고체와 유체 및 액체와 증기간의 질량, 운동량 및 에너지 교환 항은 실험에 기초한 상관식으로부터 결정된다. 이 모델을 실제 유동계산에 적용할 때 가장 어려운 점은 액체와 증기간의 질량, 운동량 및 에너지 교환 항에 대한 정확한 물리학적 모델이나 실험상관식이 부족하다는 점이다. 이러한 물리학적 모델이나 상관식들이 이상유동의 발달과정에 따라 형성되나 구분하기 어려운 유동영역(bubble, slug, churn, annular)에 너무 의존한다는 것이다. 이 모델을 실제 유동계산에 적용하기에는 많은 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 2.7 경험상관식

고체와 유체의 마찰저항은 튜브군, 셀 및 shroud 벽을 거쳐가는 축류 및 횡류의 각종 형상들과 집중저항체(튜브지지판, 1차측분리기 등)에서 급확대와 급축수로 인한 손실들에 대한 경험관계식[2-5]을 사용함으로 계산된다. 2상유동 영역에서는 모든 저항손실들이 소위 말하는 two-phase multiplier[6-8]는 유동이 단상일 때

보다 2상일 때 발생하는 다소 큰 손실을 고려하기 위한 것이다. 1차측 열전달계수에 대해서는 Dittus-Boelter 의 관계식[9]이 사용된다. 2차측 단상 대류열전달계수 및 2상비등열전달계수에 대해서는 Rohsenow, Collier-Pulling 의 관계식 [10,11], Lellouche - Zoltar 의 관계식 [12], 축방향 대류유동에 대해서는 Dingee - Chastain 의 관계식[13], 횡단 대류유동에 대해서는 Dwer 의 관계식[14], 비등에 관해서는 Rhosenow 의 관계식[15,16]과 Chen의 관계식[17]들이 사용된다. 대수 미끌림 유동 모형 계산에 있어서는 Zuber 와 Findlay 의 기본 drift - flux 형태[18]에 대한 입력력으로 요구되는 분배매개변수와 vapor-drift 속도를 경험식으로부터 결정하기 위하여 Lellouche - Zoltar의 관계식[12], Zuber - Ishii의 관계식 [18,19] 및 Bankoff 의 관계식[20] 등을 선택적으로 사용한다.

### 3. ATHOS3코드의 구조

ATHOS3 코드는 ATHOS3 코드의 기하학적 사양을 계산하는 선처리 모듈인 ATHOS3GPP 와 열유동을 해석하는 ATHOS3 로 구성되어 있다. ATHOS3GPP 의 입력자료는 증기발생기 유형, 격자분포, 입구 및 출구에 대한 데이터, shell 과 shroud에 대한 데이터, stay - cylinder, 수직분할판 및 impingement 판 데이터, 습분분리가 데이터, 분배판데이터, 튜브지지판 및 배플 데이터 및 튜브변동데이터 등이다. ATHOS3 코드는 통상적인 가압경수로 증기발생기에 열수력 매개변수들의 정상상태 및 천이상태 거동을 계산하며, 정상상태 해석에서 계산되는 총괄변수들은, 1차 유체의 입구온도, 순환비(circulation ratio), 강수관을 제외한 셸 측의 2차측 저수량, 순환하는 물-수증기의 엔탈피 및 유량 및 강수관 액체저수량, 유량 및 평균엔탈피를 계산한다. 이러한 총괄 매개변수들을 계산하기 위하여 ATHOS3 코드는 먼저 1차유체 온도, 튜브-급속 벽내부 중앙온도, 2차측 2상유체로의 열유속, 2차측유체의 엔탈피 및 온도, 2차측 유체의 건도 및 보이드율, 수증기와 물 혼합물의 3방향 속도분포 및 2차측 압력등을 계산한다.

### 4. 고리 1호기 증기발생기 열유동해석

본 연구에서 고려하는 웨스팅하우스 모형

Deta-60 재순환식 증기발생기는 Tube Lane 에 수직인 수직평면에 해해서 기하학적으로나 열적으로 대칭으로 간주될 수 있으므로 ATHOS3 코드 계산에서는 대칭면을 경계로 한 증기발생기 반쪽 부분만 해석의 기학적 모형으로 선정되며, 계산 영역으로 한정되는 증기발생기의 유동장은 전술한 바와 같이 튜브고정판 상부면에서 1차 습분분리기 하부 입구면상까지의 공간이다. 본 연구에서는 계산격자를 튜브군 영역으로부터 Wrapper 안벽까지 위한 차분격자로 모형화하였으며 원통좌표계를 사용하여  $16(\theta) \times 14(r) \times 45(z)$  의 격자망을 구성하였다.

원주방향의 격자는 대칭면 및 고온측과 저온측 사이의 경계면의 근방을 상대적으로 더 조밀하게 구성하였으며, 2차 냉각재의 주된 유동방향이 축방향이고 튜브의 유체탄성진동 여기력은 횡단 유체의 속도와 밀도에 관계되어서 U-bend 영역에서의 유동조건에 관한 자료는 U-튜브의 유체탄성진동 해석에 있어서 매우 중요하므로 이 영역에서의 상세 계산결과 도출을 위하여 여타 영역에 비하여 상대적으로 보다 조밀하게 축방향 격자 구성을 하여 U-bend 영역은 16개의 축방향 Slab 들로 나누었으며 튜브 다발 상부의 개방실은 5개의 축방향 Slab들로 나누었다. 그리고 유동방향의 변동이 심한 강수관의 하부 튜브군 영역 입구와 유동분배판 상하부의 유동장의 상세 모사를 위하여 튜브고정판과 첫째 튜브지지판 사이를 5개의 축방향 Slab들로 조밀하게 나누고 튜브지지판들 사이 공간들을 3개씩의 축방향 Slab들로서 나타내었다.

Fig.2는 3-183각도 수직평면에서의 축방향 속도 분포를 보여주고 있다. 일반적으로 고온의 영역에서 속도가 빠르며, 저온영역에서는 증기발생기 상부로 전진함에 따라 조금씩 속도가 증가함을 알 수 있다. 고온영역에서는 비교적 저온영역보다 빠르게 속도가 증가함을 관찰할 수 있다. 계산영역의 최상단인 습분분리기 입구부분에서는 고온측에서 저온측으로 유동이 쏠리고 증기발생기 중심부에서의 속도는 감소함을 관찰할 수 있다.

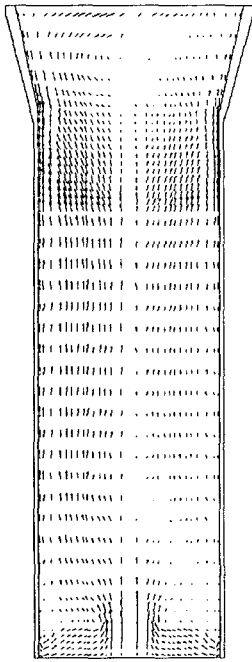


Fig.2 축방향 속도 분포도(3-183각도)

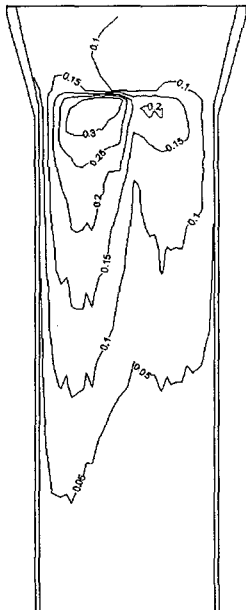


Fig.3 축방향 건도 분포도(3-183각도)

Fig.3은 3-183각도 수직평면에서의 건도(mass quality)의 분포를 보여주고 있다. 건도는 저온영

역에서는 비교적 서서히 변하며, 고온영역에서는 비교적 급격하게 변함을 관찰할 수 있다. 건도는 Wrapper의 반경이 확장하는 영역 근처에서 최고로 값이 높으며, 상부로 전진함에 따라 급격히 감소함을 보이는데, 이것은 고온측과 저온측의 유동의 혼합현상에 기인하는 것으로 보인다.

Fig.4는 3-183각도 수직평면에서의 보이드율(Void Fraction)의 분포를 보여주고 있다. 고온영역에서는 보이드율이 증기발생기 하부에서부터 급격히 변하며, 저온영역에서는 고온영역보다 약간 상부에서 건도가 증가함을 관찰할 수 있다. 건도와 같이 Wrapper의 반경이 확장하는 영역 근처에서 최고로 값이 높으며, 상부로 전진함에 따라 약간 감소함을 관찰할 수 있다. 습분분리기 입구에서의 보이드율은 0.7-0.8 쯤의 값을 갖음을 관찰할 수 있다.



Fig.4 축방향 보이드율 분포도(3-183각도)

### 5. 결론

증기발생기 유동해석에 널리 사용되고 있는 ATHOS3코드를 중심으로 증기발생기 열유동 해석법을 소개하고 실제 가동중인 고리 1호기 원자력발전소 증기발생기에 대한 해석결과를 일부분



소개하였다. 일반적으로 ATHOS3코드가 증기발생기 내부 열유동현상을 적절히 해석함을 보였고, 좀더 안정적이고 나은 해석결과를 얻기 위해서는 정확한 실험결과에 기초한 이상유동에 대한 마찰항 및 열전달 상관식의 개발이 필요하다.

### 참고문헌

- [1]Keeton, L. W., Singhal, A. K. and Srikantiah, G. S., 1986, ATHOS3: A Computer Program for Thermal-Hydraulic Analysis of Steam Generator, EPRI NP-4604-CCM, Vol. 1-3.
- [2]Grimisol, E.D.,1937, "Correlation and Utilization of New Data on Flow Resistance and Heat Transfer for Cross Flow over Tube Banks," ASME Trans. , Vol. 59, pp. 583.
- [3]Moody, L.F. , 1944, "Friction Factors for Pipe Flow," Trans. ASME, Vol. 66 pp. 671.
- [4]Bergelin, O.P. , 1950, Colburn, A.P. , and Hull, H.L. , Univ. of Delaware Eng. Expt. Station Bulletin No.2.
- [5]Jacob, M. , 1938, "Heat Transfer and Flow Resistance in Cross Flow of Gases Over Tube Banks," ASME, 60:381
- [6]Thom, J. R .S. , 1964, "Prediction of Pressure Drop During Forced Circulation Boiling of Water," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 7, pp. 709.
- [7]Owens, W.L. , 1961, "Two-Phase Pressure Gradient," Int. Heat Transfer Conference, Part II , pp. 363-368, Univ. of Colorado.
- [8]Martinelli, R.C. , and Nelson, D.B. 1948, "Prediction of Pressure Drop During Forced Circulation Boiling of Water," Trans. ASME 70:695
- [9]Dittus, F.W. , and Boelter, L.M. 1930, Univ. of California Publ. Eng., Vol. 2, pp. 443.
- [10] Rohsenow, W.M. , 1951, "A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling of Liquids," Trans ASME, Vol. 74, pp. 769.
- [11] Collier, J. G. , and Pulling, D. J., 1962, "Heat Transfer to Two-Phase Gas Liquid Systems, Part II : Further Data on Steam Water Mixtures," U.K. Report AERE-R-3809
- [12] Lellouche, G. S. , and Zolotar, B. A., 1982, "A Mechanistic Model for Predicting Two Phase Void Fraction for Water in Vertical Tubes, Channels and Rod Bundles," EPRI NP-2246-SR.
- [13] Dingee, D.A. , and Chastain, J.W. , 1968, "Heat Transfer from Parallel Rods in an Axial Flow," ASME, Reactor Heat Transfer Conference, pp. 462.
- [14] Dwyer, O.E. , et al, 1956, "Cross Flow of Water Through a Tube Bank at Reynolds Numbers up to a Million," Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 48, No. 10, pp. 1383.
- [15] Rohsenow, W.M., and Bergles, A.E., 1963, "The Determination of Forced Convection Surface Boiling Heat Transfer," ASME-AIChE paper 63-HT-22.
- [16] Collier, J.G. , 1972, "Convective Boiling and Condensation," McGraw Hill Maidenhead, U. K.
- [17] Chen, J.C. , 1963, "A Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow," ASME preprint 63-HT-34.
- [18] Zuber, N., and Findly, J.A. , 1965, "Average Volumetric Concentration in Two Phase Flow Systems," J. Heat Transfer, Vol. 87, pp. 453.
- [19] Ishii, M. , "One-Dimensional Drift-Flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion Between Phases in Various Two-Phase Flow Regimes," ANL-77-47, pp. 34.
- [20] Bankoff, S.G. , 1960, "A Variable Density Single-Fluid Model for Two-Phase Flow with Particular Reference to Steam-Water Flow," Trans. ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 82, pp. 265.