2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

하향 유로에서의 증기-물 계면 응축 열전달 상관식 비교

The Comparison of Steam-Water Interfacial Condensatin Heat Transfer Correlation in Vertical Channel

이상원*, 김한곤, 김병섭, 오승종
전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

차세대원자로 (KNGR)는 기존원전과 달리 안전주입수가 원자로용기에 직접 주입되는 DVI (Direct Vessel Injection) 방식을 채택하고 있다. 이러한 DVI 방식의 채택으로 대형냉각재상실사고 발생시 기존의 저온관 주입방식과는 다른 현상들이 발생할 가능성이 있다. 이에 따라 TRAC-M/F77 코드를 이용하여 KNGR의 대형냉각재상실사고 평가를 수행중에 있다. 강수관내에서의 3차원적인 수력학적 현상들 이외에 DVI 채택으로 고려해야 하는 현상이 강수관내에서의 물-증기의 응축현상이다. 본 논문에서는 현재 수행중인 수직 사각채널에서의 증기-물 열전달 실험 결과와 TRAC 코드의 열전달 상관식을 비교함으로써 TRAC 코드의 열전달 상관식을 평가하였다. 평가결과, 실험과 같은 조건에서는 TRAC 코드의 상관식이 실험 결과에 비해 열전달 계수를 크게 예측하는 것으로 나타났다. 따라서 TRAC 코드를 이용한 대형냉각재상실사고 해석시 강수관 상부에서의 열전달에 대한 민감도 분석이 수행되어 열전달 상관식의 불확실도가 미치는 영향이 평가되어야 할 것이다.

Abstract

Safety injection water is injected into the reactor vessel downcomer directly in Korean Next Generation Reactor (KNGR). Due to the adoption of direct vessel injection (DVI) method, thermal hydraulic phenomena different from existing cold leg injection plants can be occurred during large break loss of coolant accidents (LBLOCAs). Therefore, safety evaluation against LBLOCA has been performed for KNGR using TRAC-M/F77 code. One of the important phenomena is steam-water condensation in the upper downcomer. In this paper, heat transfer correlation of TRAC code is evaluated through the comparison between the correlation and the experiment results for steam-water heat transfer in vertical rectangular channel. As a result, TRAC code predicts the heat transfer coefficient larger than those of experiment results. Therefore, in LBLOCA analysis using TRAC code, the sensitivity studies for heat transfer in upper downcomer should be performed to evaluate the uncertainty.

1. 개 요

차세대원자로 (KNGR)는 기존원전과 달리 안전주입수가 원자로용기에 직접 주입되는 DVI (Direct Vessel Injection) 방식을 채택하고 있다. <그림 1>에서 보듯이 주입되는 안전주입 노즐의 위치는 높이 상으로는 저온관 중심에서 83 인치 (2.1m) 상부에 있으며, 각도 상으로는 각 저온관에서 고온관 쪽으로 15° 떨어진 곳에 위치하고 있다. 안전주입배관의 위치가 저온관 중심에서 83인치 상부에 위치한 가장 큰 이유는 사고시 저온의 냉각수가 고온의 원자로 용기에 주입되었을 경우 원자로 용기의 취약부인 Belt Line에서의 가압 열충격 (Pressurized Thermal Shock) 가능성을 제거하기 위해 충분한 혼합이 이루어지도록 하기 위한 것이다.

이러한 DVI 방식의 채택으로 대형냉각재상실사고 발생시 기존의 저온관 주입방식과는 다른 현상들이 발생할 가능성이 있다. 다른 현상이 일어날 수 있는 주된 이유는 다음과 같다. 저온관 주입방식일 경우 안전주입수가 저온관내로 주입되므로 저온관내에서 증기와의 혼합 및 응축이 발생한다. 또한 저온관을 지나 강수관으로 유입된 증기가 파단된 저온관으로 방출될 때 안전주입수의 유로가 증기의 흐름을 방해하지 않는다. 반면에 DVI 방식인 경우에는 증기와의 응축이 강수관 내에서 발생하며, DVI로 주입된 안전주입수와 저온관으로 유입된 증기의 유로가 서로 달라 복잡한 열수력 현상의 발생이 예상된다.

현재 설계에 사용되는 해석 코드는 이러한 현상의 가능성이 고려되지 않은 상태에서 개발되었으므로, 이러한 열수력 현상들이 사고의 결과에 어떤 영향을 미치는가는 강수관내에서 발생하는 현상들을 모사할 수 있는 해석코드를 이용해서 평가하는 것이 가장 현실적인 방법이라고 판단된다. 이에 따라 International 2D/3D Program의 일환으로 수행된 UPTF 실험에 Benchmarking이 수행된 TRAC-M/F77 코드를 이용하여 KNGR의 대형냉각재상실사고 평가를 수행중에 있다.

TRAC 코드는 원자로 용기를 3차원으로 모사할 수 있으며, KNGR DVI와 유사한 UPTF 실험에 Benchmarking이 수행되는 등 DVI로 인한 강수관내의 3차원 현상들을 모사하는데는 충분한 능력을 가지고 있다고 판단된다.

강수관내에서의 3차원적인 수력학적 현상들 이외에 DVI 채택으로 고려해야 하는 현상이 강수관내에서의 물-증기의 응축현상이다. 저온관 주입방식의 경우 대부분의 응축현상은 수평배관인 저온관내에서 일어난다. 따라서 수평배관에서의 증기-물에 대한 많은 열전달 실험들이 수행되었으며, TRAC 코드가 가지고 있는 열전달 상관식도 수평배관에서의 실험결과를 바탕으로 개발된 것이다. 하지만 DVI 주입방식의 경우에는 대부분의 응축 현상이 수직의 하향유로에서 발생한다. 따라서 개발된 상관식과는 다른 구조를 갖는 하향유로에서의 열전달 상관식에 대한 평가가 수행되는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 현재 수행중인 수직 사각채널에서의 증기-물 열전달 실험 결과와 TRAC 코드의 열전달 상관식을 비교함으로써 TRAC 코드의 열전달 상관식을 평가하고자 한다.

2. TRAC 코드의 열전달 상관식

TRAC 코드의 계면 열전달 상관식은 bubbly-slug flow, annular-mist flow, transition flow, stratified flow등 각각의 유동양식에 따라 다른 상관식을 사용한다.[1] 유동양식의 결정은 기공율 및 질량유량을 고려하여 결정하며, 기공율이 0.75이상인 경우는 annular-mist

flow 영역에 해당하며 이 경우 계면 총합 열전달 계수는 식 (1)과 같다.

$$H=(1-W_f)(H_{drop}+H_{film})+W_f H_{drop,\max} \quad (1)$$

여기서, $W_f = 0$, if $\max(V_f, V_g) < 10 V_c$

$= 0.5 \max \frac{(V_f, V_g)}{V_c} - 5$, if $10 V_c \le \max(V_f, V_g) \le 12 V_c$

$= 1, \max(V_f, V_g) > 12 V_c$, if $\max(V_f, V_g) > 12 V_c$

H : overall heat transfer coefficient[W/K]

Wf는 Helmholtz instability가 발생하는 속도(Vc)의 함수로 나타나는 가중치로 액체 또는 기체의 속도가 고속일 경우는 모든 열전달이 droplet에 의해 발생함을 의미한다. 그러나 본 논의에서 언급하는 범위에서는 Wf 값은 0이며, 따라서 전체적인 열전달은 film에 의한 열전달과 droplet에 의한 열전달로 나누어지며, 각각의 응축열전달 상관식은 아래와 같다

- film heat transfer : Bankoff correlation[2]

$$St = 0.0045 \left[\frac{G_g \mu_f}{G_f \mu_g}\right]^{1/3} = 0.0045 \left[\frac{\rho_g V_g \alpha \mu_f}{\rho_f V_f (1-\alpha) \mu_g}\right]^{1/3} \quad (2)$$

여기서 $St \equiv \frac{Nu}{Re_f \Pr_f} = \frac{h}{G_f C p_f}$ (3)

- droplet heat transfer : Ryskin correlation

$$Nu = 2 + \sqrt{V_{\max}^{*} \, Pe} \quad (4)$$

KNGR DVI 주입시 강수부 거동 예비분석 결과에서는 응축열전달의 경우 droplet보다는 film에 의한 응축이 지배적일 것으로 판단되며, 따라서 본 논의에서는 film 열전달 상관식의 타당성 파악으로 범위를 제한하고자 한다.

3. 수직 사각채널에서의 열전달 실험[4]

2절에서 설명한 Annular-Mist 유동영역에서의 열전달 상관식을 평가하기 위해 한국과학기술원에서 수행중인 수직 사각 채널에서의 열전달 실험 결과를 사용하였다. 실험에 사용된 장치는 <그림 2>와 같다. 물은 사각채널의 상단에서 필름 형태로 주입되며, 증기는 상단 또는 하단으로 주입되어 Co-Current, Counter-Current 실험을 수행할 수 있도록 제작되어 있다. 사각채널의 단면은 65×35 mm의 사각형이며, 본 논문에 사용된 결과는 채널의 길이가 400 mm인 경우의 데이터들이다.

실험 결과 중 본 논문에 사용된 데이터의 수는 41개이며 이중 39개의 데이터는 Co-Current 실험 데이터이며, 2개만이 Counter-Current 실험 데이터이다. 실험에 사용된 주요 조건들은 <표 1>과 같다.

<표 1> 분석에 사용된 실험데이타들의 실험조건

변 수 명	실험범위
압 력 (kPa)	100.9
물 온도 (℃)	23.0
증기 온도 (℃)	100.0
물 유량 (kg/s)	0.085 ~ 0.22
증기 유량 (kg/s)	0.0066 ~ 0.015

4. 열전달 계수의 비교 분석

TRAC 코드에서 사용하는 열전달 상관식의 타당성 파악을 위하여 코드내 계면 열전달 상관식이 계산된 Subroutine을 이용하여 상기 실험조건에서 도출된 열전달 계수와의 비교를 수행하였다. 실험에서 계산된 열전달 계수는 test section내의 총에너지 전달량을 바탕으로 응축된 증기의 잠열이 모두 액체의 내부 에너지 상승에 기여한다고 가정하고 LMTD 방법론을 이용하여 계산하였다. 이때 열전달 면적은 surface wave에 의한 열전달면적 상승은 고려대상에서 제외되었다.

$$Q_{total} = h_{\log} A \Delta T_{\log} \quad (5)$$

여기서, $\Delta T_{\log} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\log(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$, $\Delta T_1 = T_{g,i} - T_{f,i}, \Delta T_2 = T_{g,o} - T_{f,o}$ (6)

분석 결과는 <그림 3> 및 <그림 4>에 도시하였다. 대체적으로 실험결과보다 TRAC 코드의 열전달 상관식의 경우가 대략 5-10배 정도 열전달을 크게 예측하였다. 유량에 대한 민감도는 증기유량 및 액체유량 증가에 따라 열전달 계수가 증가하는 경향을 보였으나, 액체유량 변화에 더욱 민감한 결과를 나타내었다.

이러한 열전달 계수의 차이는 Stanton number의 정의가 TRAC 코드와 Bankoff 상관식에서 상이함에 따라 나타난 결과로 파악된다.

- TRAC 코드에서 사용하는 Stanton number :

$$St = \frac{h_{trac}}{\rho_f v_f C p_f} \quad (7)$$

TRAC 코드에서의 Stanton number는 증기가 흐르고 있는 배관내에 과냉각수가 주입되는 경우를 대상으로 정의되었다. 이는 저온관에 안전주입수가 주입되는 경우에는 타당한 것으로 판단된다. 반면에, Bankoff 상관식에서는 배관내에 물이 stratified flow를 형성하고 있을 경우를 대상으로 정의되었다.

- Bankoff 상관식에서 사용하는 Stanton number :

$$St = \frac{h_{bankoff}}{G_f Cp_f} = \frac{h_{bankoff}}{\rho_f (1-\alpha) v_f Cp_f} \tag{8}$$

$$\therefore H_{trac} = \frac{H_{bankoff}}{(1-\alpha)} \tag{9}$$

상기 식 (9)에 따라 예를들어 기공율이 0.9인경우는 10배의 차이가 나타나며 이러한 요인으로 인하여 TRAC 코드의 경우 응축율을 매우 크게 예측하는 것으로 파악된다.

Bankoff 상관식에서 정의한 Stanton number를 이용하여 실험결과와 비교한 결과 <그림 5>와 같이 실험에 비하여 열전달 계수가 낮은 경향을 보이나 비교적 수용할 만한 결과를 나타내었다.

5. 결론 및 향후 연구방향

기존원전과 달리 DVI 방식을 채택하고 있는 KNGR은 대형냉각재상실사고시 기존의 저온관주입방식과는 다른 현상들이 나타날 것으로 예상되고 있다. 발생 가능한 현상을 크게 구분하여 강수관 내부에서의 3차원적 유동 현상과 강수관 상부에서의 열전달 현상으로 요약된다. 이중 강수관 상부에서의 과열증기와 과냉각수의 열전달 현상을 파악하기 위해 실험을 수행중에 있다.

현재까지 생상된 실험 결과들을 TRAC의 Annular-mist 유동영역에서의 열전달 상관식과 비교하였다. 실험이 수행된 조건에서는 TRAC 코드의 열전달 상관식이 증기 응축율을 높게 예측하는 것으로 나타나고 있으나, 현재까지 수행된 실험이 소규모의 실험실 조건에서 수행된 것이므로 향후 보다 많은 실험결과의 축적 및 실험조건의 확장을 통해 평가가 되어야 할 것으로 판단된다. 아울러 대형냉각재상실사고 해석시 강수관내에서의 열전달에 대해서는 불확실성에 대한 민감도 분석이 수행되어 전체적으로 사고전개과정에 미치는 영향이 평가되어야 할 것이다.

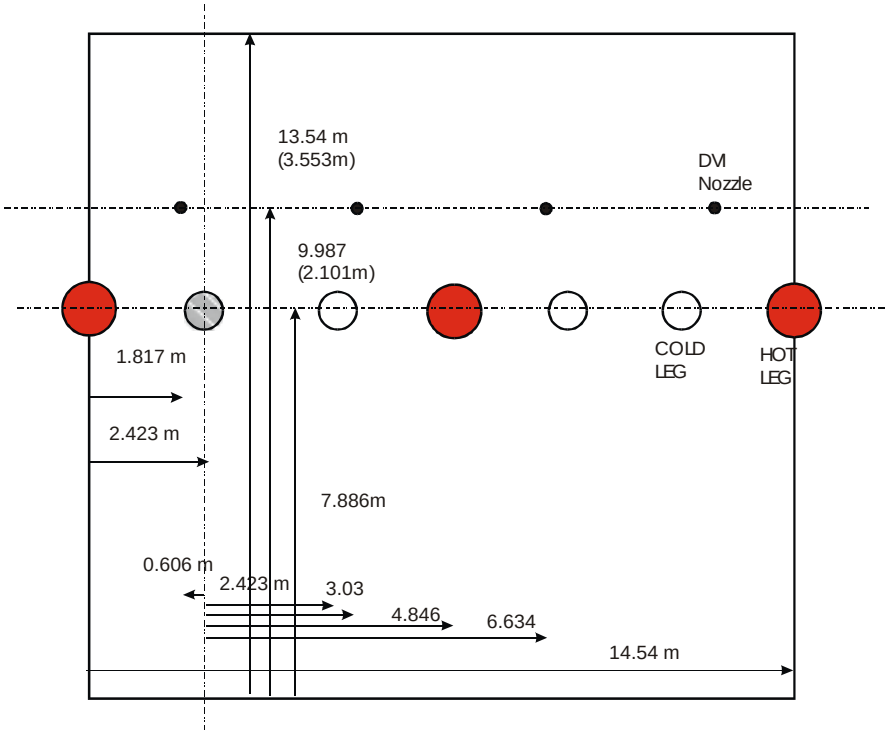
참고문헌

[1] TRAC-PF1/MOD2 Code Manual, "Volume I : Theory Manual", *NUREG/CR-5673*

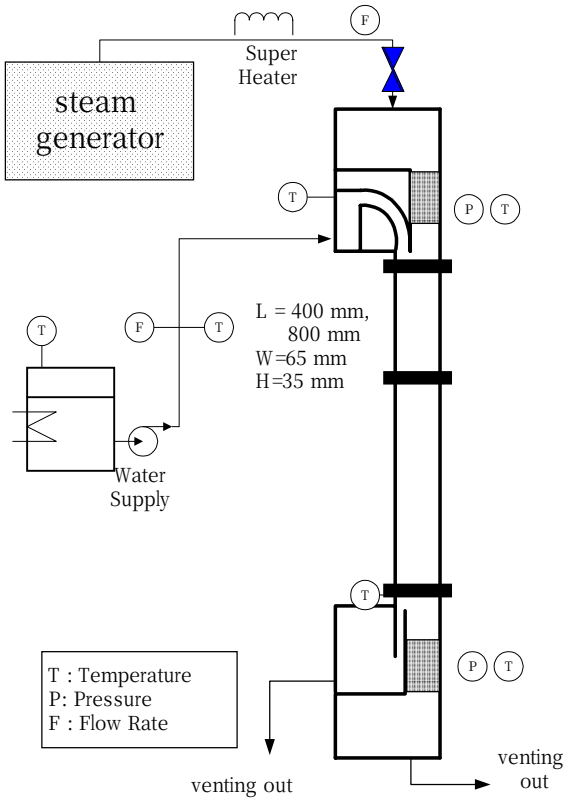
[2] S. G. Bankoff, "Some Condensation Studies Pertinent to Light Water Safety," *Int. J of Multiphase Flow*, 51-67(1980)

[3] G. Ryskin, "Heat and Mass Transfer from a Moving Drop-Some Approximate Relation for the Nusselts Number," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 741-749(1987)

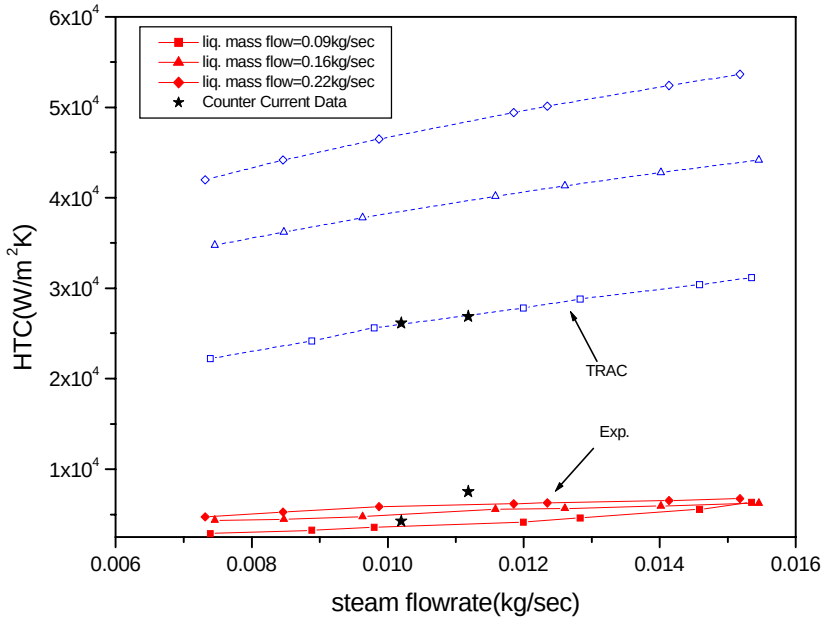
[4] 차세대원자로 기술개발(III) 핵심기술과제 중간보고서 “과열증기와 과냉각수의 혼합현상 연구,” 한국전력공사 (2000)



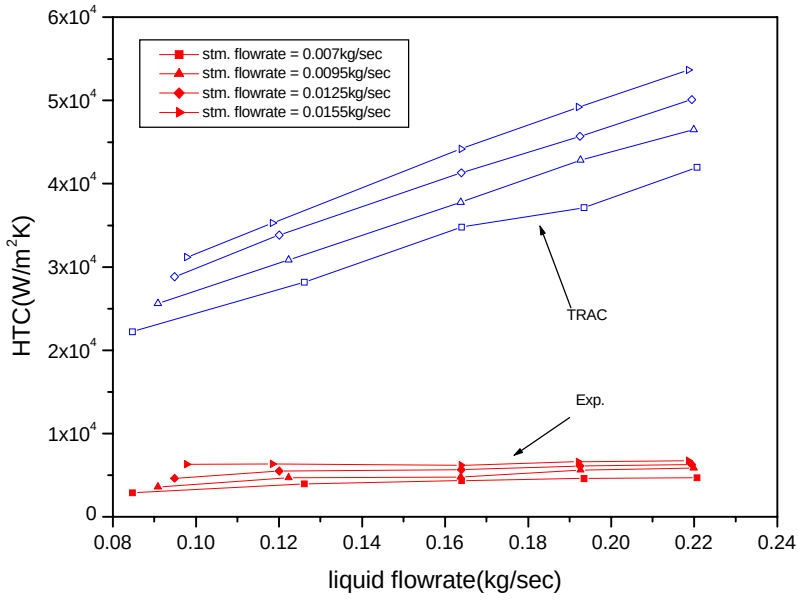
<그림 1> KNGR DVI 배치도



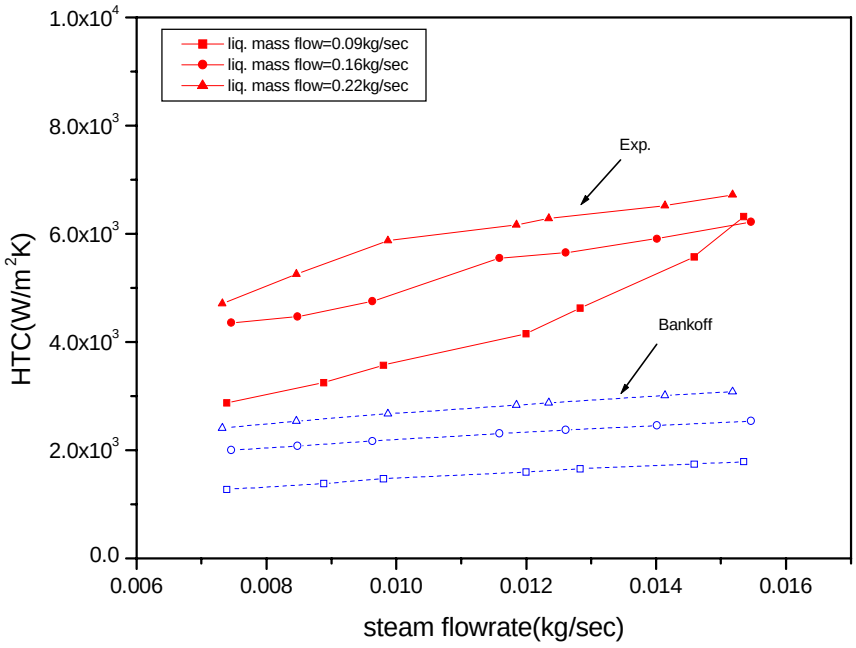
<그림 2> 증기-물 열전달 실험장치



<그림 3> 증기유량에 대한 TRAC코드 상관식과 실험결과의 응축열전달계수 비교



<그림 4> 액체유량에 대한 TRAC코드 상관식과 실험결과의 응축열전달계수 비교



<그림 5> 증기유량에 대한 Bankoff 상관식과 실험결과의 응축열전달계수 비교