

MARS 코드의 수평관내부 응축열전달 모델 평가 및 개선

이현진 · 안태환 · 윤병조 · 정재준[†]

부산대학교 기계공학부

(2015년 12월 15일 접수, 2016년 1월 25일 수정, 2016년 1월 29일 채택)

Assessment and Improvement of the Horizontal In-Tube Condensation Heat Transfer Model in the MARS code

Hyun Jin Lee, Tae Hwan Ahn, Byong Jo Yun, Jae Jun Jeong[†]

School of Mechanical Engineering, Pusan National University (PNU)

(Received 15 December 2015, Revised 25 January 2016, Accepted 29 January 2016)

요 약

최근 원자력 발전소의 안전성을 획기적으로 향상시키기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 특히 피동냉각계통의 연구개발이 아주 중요하게 부각되고 있다. 피동냉각계통의 열전달 방식으로는 응축열전달 양식이 주로 채택되고 있다. 이와 같은 맥락에서 부산대학교 Ahn & Yun (Ahn 등, 2014)은 새로운 수평관내부 응축 모델을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 먼저 Ahn & Yun 이 제시한 수평관 응축 모델을 MARS 코드에 삽입하고 PASCAL 실험데이터를 이용하여 평가하였다. 이 평가결과를 통해 Ahn & Yun 모델의 코드적용에 있어 문제점을 규명하고 새로운 적용방법론을 적용하여 다양한 실험데이터로 다시 평가함으로써 MARS 코드의 향상된 응축 열전달 해석 능력을 확인하였다.

주요어 : 수평관내부 응축, 응축모델 평가, MARS 코드

Abstract - Extensive researches have been carried out for enhancing the safety of nuclear power plants and, especially, the development of passive cooling systems, such as passive containment cooling system (PCCS) and passive residual heat removal system, is increasingly important, where condensation is a crucial heat transfer mechanism. Recently, Ahn & Yun et al. developed a horizontal in-tube condensation heat transfer model as one of the activities for the PCCS development. In this work, we implemented the Ahn & Yun 's condensation heat transfer model into the MARS code and assessed it using the PASCAL experimental data. Based on the results of the assessment, we identified the limitations of the Ahn & Yun 's model and suggested a modified Ahn & Yun 's model, and assessed the model using various experimental data.

Key words : Horizontal in-tube condensation, assessment of the condensation model, MARS code

1. 서 론

원자력발전소에서 중대사고가 발생하는 경우의 안

전성을 근본적으로 향상시키기 위한 연구개발이 활발하게 진행되고 있다. 특히 신형원자로 개발의 일환으로 피동격납용기냉각계통 및 피동잔열제거계통 등의 피동냉각계통 관련 연구가 다양하게 수행되고 있다.

피동냉각계통은 외부전원을 활용하지 않고 주로 중력에 의해 구동되며 효과적인 열제거를 위해 응축열

[†]To whom corresponding should be addressed.
School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, South Korea, 609-735 Korea
Tel : 051-510-2455 E-mail: jjjeong@pusan.ac.kr

전달을 많이 활용한다. 이때 수직 혹은 수평 전열관을 이용하는 열교환기가 사용된다. 그 중에서도 수평관 (혹은 수평에 가까운 경사관) 열교환기가 수직관 열교환기에 비해 구조적으로 유리하기 때문에 수평관 열교환기에 많은 연구의 초점이 맞춰지고 있다.

수평관 내부 응축 열전달과 관련하여 국외에서는 독일의 SWR1000 발전소의 수평관 열교환기를 모의한 NOKO[1] 실험, ABWR-II의 PCCS를 모의한 JAEA-PCCS[2], 그리고 BWR PCCS의 수평형 열교환기를 모의하기 위한 Purdue-PCCS[3] 등의 실험이 수행되었다.

국내에서는 한국원자력연구원에서 APR+에 적용될 피동보조급수계통(Passive auxiliary feedwater system; PAFS)의 냉각성능을 입증하기 위한 개별효과 실험장치 PASCAL[4]과 종합효과 실험장치 ATLAS-PAFS[5]을 제작하여 실험을 수행하였고, KAIST에서는 SCOP[6]이라는 실험장치를 제작하여 고온고압환경에서의 수평 응축열교환기의 성능을 평가하였다.

수평관 응축열교환기를 이용한 피동냉각계통이 차세대 원전의 보편적인 설비가 되어가는 추세에 맞춰, 이를 분석하고 평가하기 위한 열수력안전해석 코드의 수평관내부 열전달 모델의 개선이 필요하다. 이에 따라, 부산대학교에서는 최적 안전해석코드 MARS[7]의 수평관 내부 응축현상 예측능력을 향상시키기 위해 새로운 응축열전달 모델을 개발하고 있으며, Ahn & Yun 등이 수평관내부 응축 열전달 모델을 제시한 바 있다[8].

본 연구에서는 Ahn & Yun 등이 제시한 수평관내부 응축열전달 모델을 MARS 코드에 삽입하고, PASCAL 실험데이터를 이용하여 MARS 코드의 수평관 응축현상 예측 능력을 평가하였다. 이를 통해 Ahn & Yun 모델의 한계와 문제점을 파악하고 Ahn & Yun 모델을 개선하였다. 수정된 Ahn & Yun 모델을 다양한 실험 데이터로 평가하여 타당성을 보였다. 이 평가는 비응축성 기체가 존재하지 않는 경우와 존재하는 경우의 실험 해석으로 나누어 수행하였다.

2. 수평관내부 응축열전달 모델

기존 MARS 코드에서 수평관내부 응축열전달 모델로서 Chato 막 응축열전달 상관식[9]과, Shah 응축 열전달 상관식[10]을 사용하며 계산된 결과중 큰값을 응축 열전달 계수로 사용한다.

2-1 Chato 모델

응축에 관한 최초의 연구는 Nusselt[11]에 의해 수행되었고, 수직 평판에서 흘러내리는 층류 응축막의 두께로부터 평균 열전달 계수를 계산하기 위한 응축 모델을 다음과 같이 정의하였다.

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}L}{k_l} = 0.943 \left[\frac{\rho_l(\rho_l - \rho_g)gh_{fg}L^3}{k_l\mu_l(T_{sat} - T_s)} \right]^{1/4} \quad (1)$$

수평관 내부의 응축막 두께가 관의 지름에 비해 매우 작다고 가정하면, 앞선 Nusselt 모델을 Fig. 1과 같은 조건으로 고려할 수 있다. 수평관 내부의 응축막을 수평 실린더 외벽의 응축막과 유사하다고 가정하고, 실린더 외벽의 응축막에 관한 힘 평형식에서 응축수의 체적력인 중력 항을 $g \sin\beta$ 로 수정하고 에너지 평형식을 원주 범위에 대해 적분하면 다음과 같은 수정된 평균 Nusselt 수를 얻을 수 있다.

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}L}{k_l} = 0.725 \left[\frac{\rho_l(\rho_l - \rho_g)gh_{fg}L^3}{k_l\mu_l(T_{sat} - T_s)} \right]^{1/4} \quad (2)$$

여기에 Chato는 하부에 존재하는 응축수에 의한 열전달을 무시하고, 이에 대한 비율을 고려하기 위해 상수 0.725 대신 0.296를 적용하였다[9].

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}L}{k_l} = 0.296 \left[\frac{\rho_l(\rho_l - \rho_g)gh_{fg}L^3}{k_l\mu_l(T_{sat} - T_s)} \right]^{1/4} \quad (3)$$

2-2 Shah 모델

MARS 코드에 관내 응축 열전달 상관식으로 사용되는 Shah의 상관식은 환형류에 적용할 수 있는 대표적인 선형적 응축 열전달 상관식으로 많은 실험데이터를 통해 검증되었다[10].

$$Nu = 0.023 Re_{ls}^{0.8} Pr_l^{0.4} \times \left[1 + \frac{3.8}{P_{red}^{0.38}} \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.76} \right] \quad (4)$$

여기에서 P_{red} 는 환산압력으로 유체의 임계압력에 대한 시스템의 압력비이다.

위 상관식은 0.002 ~ 0.44의 환산 압력 범위, 10.8 ~ 210 kg/m²s의 질량 유속 범위에서 적용가능하다.

2-3 Ahn & Yun 모델

Ahn & Yun은 MARS 코드로 수평관 응축실험인 PASCAL을 해석한 결과, MARS 코드에서 사용하는 응축열전달 모델이 열전달 계수를 상대적으로 낮게 예측하는 것을 확인하였다. 이를 개선하기 위한 목적으로 새로운 응축열전달 모델 패키지를 개발하였다[8].

Ahn & Yun은 관 상부의 증기 응축, 관 하부의 응축수 대류에 의한 두 가지 열전달 현상을 고려하기 위해 막 응축과 대류 열전달에 기반을 둔 새로운 열전달 상관식을 제시하였다[8]. 우선 막 응축의 경우 기존의 Nusselt 모델을 기반으로하고, 상 경계면 전단효과를 고려하기 위해 증기의 레이놀즈수를 추가하여 다음과 같은 상관식을 제시하였다.

$$h_{film} = 0.729(1 + 8.7 \times 10^{-4} Re_g^{0.57}) \times \left(\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_g)h_{fg}k_l^3}{\mu_l D(T_{sat} - T_w)} \right)^{1/4} \quad (5)$$

하부 응축수에서 발생하는 대류 열전달은 단상유동과 같은 열전달 기전을 갖는 것으로 가정하여 Dittus and Boelter (1930) 상관식을 사용하였다.[13]

$$h_{convective} = 0.023 Re_l^{0.8} Pr^{0.4} \left(\frac{k_l}{D_{hl}} \right) \quad (6)$$

응축과 대류를 통해 관 상,하부에서의 열전달계수가 각각 계산되면 이를 수위각도로 가중평균하여 최종적인 평균 열전달계수를 정의하였다. 이때 사용되는 수위각도는 Fig. 2와 같다.

$$h = \frac{h_{film}(2\pi - \gamma_1) + h_{convective}\gamma_1}{2\pi} \quad (7)$$

여기에서
환형류: $\gamma_1 = 2\pi$, (8)

파형류: $\gamma_1 = 2\pi(0.52(1 - \alpha)^{0.374} + 0.26Fr^{0.58})$ (9)

성층류: $\gamma_1 = \gamma_s$. (10)

3. PASCAL 실험데이터를 이용한 기존 Ahn & Yun 응축열전달 모델 평가

3-1 PASCAL 실험

PASCAL 실험장치는 한국원자력연구원에서 개발한 피동냉각계통 축소모의 실험장치이다[4].

Fig. 3과 4는 PASCAL 응축관의 형상 수치 및 각 계측기 모듈의 위치와 반지름 방향으로의 분포를 나타낸 그림이다. 응축관을 따라 11개 지점에 계측기 모듈이 설치되어 있다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 응축관은 가로로 누운 U자관이다. 응축관의 내경과 외경은 각각 44.8mm, 50.6mm 이며, 전체 길이는 8.4m이다. 응축관은 3.22m의 경사구간과 반지름 0.2667m의 곡관구간, 다시 3.22m의 경사구간으로 이뤄진다. 이 때, 경사관의 각 기울기는 위쪽 아래쪽 모두 3°이다. 이 응축관이 잠겨있는 냉각탱크의 길이는 6.7m이고, 너비와 높이는 각각 0.112m, 8.9m이다.

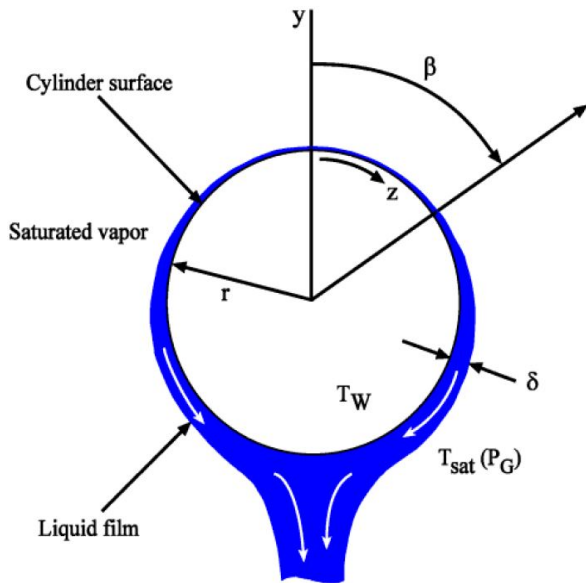


Fig. 1. 수평 실린더 외벽에서의 막 응축 모델링[8]

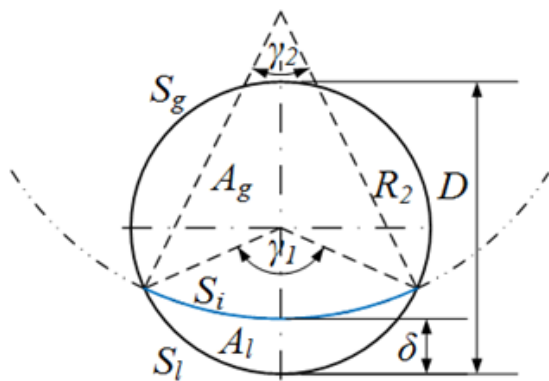


Fig. 2. 기하학적 변수[8]

3-2 MARS 코드 모의 및 해석결과

기존 MARS 코드 응축열전달 모델과 Ahn & Yun 모델의 성능평가를 위하여, PASCAL 실험 데이터 중 증기발생기 전열기의 열출력을 기준으로 300 ~ 750 kW의 총 여섯 가지 준정상상태 케이스를 선정하였다. Table 1은 선정한 실험케이스의 경계조건을 정리한 것이고 MARS 코드 계산을 위해 PASCAL 실험장치를 Fig. 5와 같이 모의하였다.

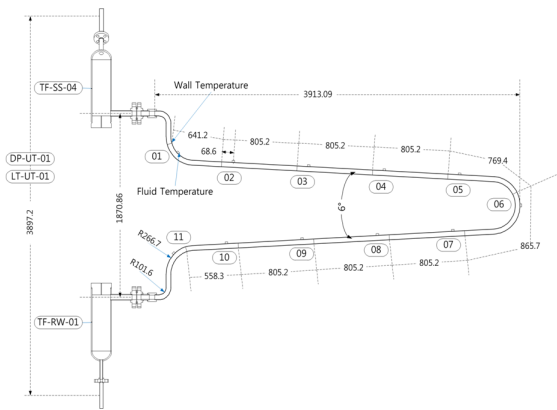


Fig. 3. PASCAL 응축관의 형상 및 수치[4]

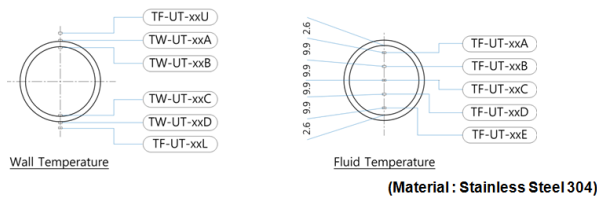


Fig. 4. PASCAL 응축관의 계측기 위치[4]

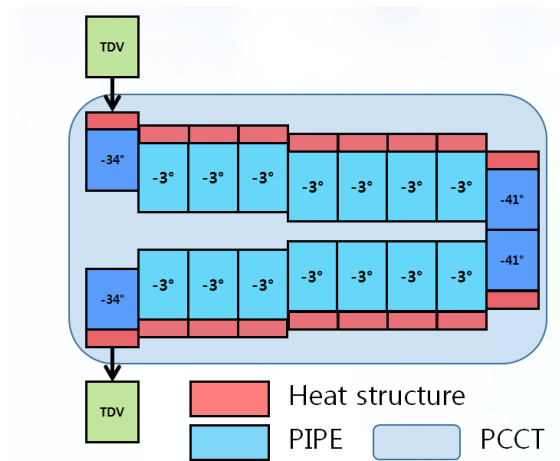


Fig. 5. PASCAL 실험을 위한 MARS 코드 노드화

Fig. 6은 열유속(Heat flux) 실험값과 계산값의 비교를 보여준다. Ahn & Yun 모델도 상대적으로 높은 압력에서는 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다. PASCAL 실험을 이용한 모델 평가 결과, Ahn & Yun 모델은 고압 조건에서는 기존 MARS 응축 모델에 비해 개선되었다고 보기 어렵다. 이는 Ahn & Yun 모델이 잘 맞는 적용범위가 한정되어 있음을 의미한다고 볼 수 있다.

기존의 Ahn & Yun 모델에는 기포율 예측모델이 포함되어 있다[8]. 즉, Ahn & Yun 모델로 응축열전달계수를 구할 때는 MARS 코드에서 계산한 기포율이 아닌 모델 내부의 자체 기포율 예측 모델이 예측한 값을 사용하게 된다. 이는 MARS 코드로 계산할 때 오차를 야기할 수 있다. 따라서 기존 Ahn & Yun 모델을 MARS 코드가 계산하는 기포율을 사용하도록

Table. 1. PASCAL 준정상 상태 실험 경계조건[4]

	SS-200	SS-300	SS-400	SS-540	SS-650	SS-750
	-P1	-P1	-P1	-P1	-P1	-P1
Heat Power (kW)	199.8	299.8	399.9	540.0	650.1	750.2
PCCT Water Level (m)	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3
Inlet Pressure (MPa)	0.845	1.342	1.971	3.220	4.698	6.736
Inlet Temperature (°C)	175.2	194.6	213.0	239.1	261.3	284.4
Inlet Flowrate (kg/s)	0.09365	0.1469	0.2037	0.2953	0.3651	0.4302

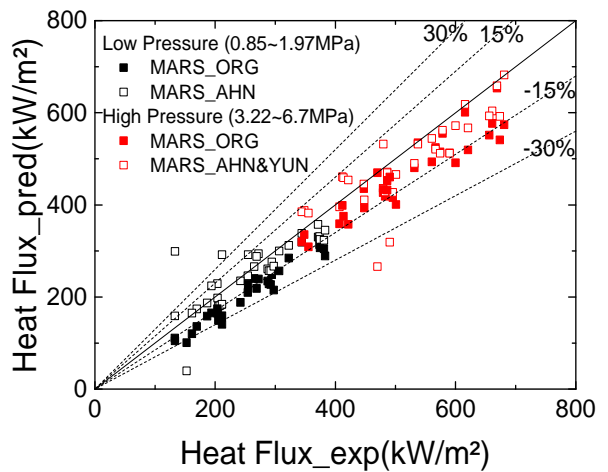


Fig. 6. PASCAL 국소지점의 열유속 비교

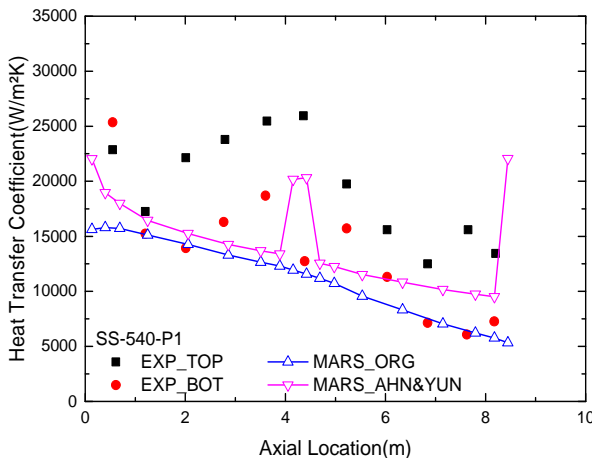


Fig. 7. PASCAL 실험 열전달계수 계산 결과

수정할 필요가 있다. 또한 Fig. 7을 보면 응축열전달 계수가 급격히 증가하거나 감소하는 부분이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이런 현상이 발생하는 부분은 전체 해석영역 중 수직관으로 이뤄진 부분인데, Ahn & Yun 모델은 수평관 및 완만한 경사관에서의 응축 열전달 현상을 예측하기 위해 만들어진 모델임으로, 수직 영역에서는 적용하기에 적절치 않아 발생한 결과이다. 따라서 적절한 수정이 필요하다.

4. Ahn & Yun 모델 수정 및 평가

4-1 Ahn & Yun 모델 수정

고찰한 바와 같이, Ahn & Yun 모델의 자체적인 기포율 예측모델 사용과 수직관 영역에서의 열전달계수가 급상승하는 문제는 개선되어야 한다. 따라서 본 절에서는 Ahn & Yun 모델 사용 시 MARS 코드의 기포율을 이용하고 수직관 구간에서의 열전달계수가 급상승하는 문제가 개선될 수 있도록 Ahn & Yun 모델을 수정하고 여러 실험데이터들을 이용하여 수정된 Ahn & Yun 모델을 평가하였다.

4-1-1 MARS 기포율 기반 막응축 모델 상관식 수정

기존의 Ahn & Yun 모델은 응축관의 경사도에 따라 기포율의 변화를 예측하기 위해 2유체모델을 기반으로 하는 각 상에 대한 1차원 완전발달 정상상태 운동량 방정식을 사용하고, 각 상의 압력강하가 같다는 가정을 활용하여 기포율 $\alpha = A_g/A$ 을 계산하였다[8]. 이렇게 산출한 기포율은 막응축 상관식 식 (5)를 정의하는데 사용되었다. 그러나 MARS 코드 내에서 이미

기포율을 계산하고 있으므로 이와 별도로 기포율을 정의하는 것은 코드 사용자에게 혼란을 야기할 수 있다. 따라서 식 (5)를 MARS 코드의 기포율을 사용하도록 다시 정의하기 위해 Table 1의 PASCAL 실험데이터를 기반으로 하여 아래와 같이 상관식을 수정하였다.

$$h_{film} = 0.7734(1 + 3.72 \times 10^{-3} Re_g^{0.45}) \times \left(\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_g)h_{fg}k_l^3}{\mu_l D(T_{sat} - T_w)} \right)^{1/4} \quad (11)$$

또한, 수평 성층류의 경우 그림 2에서 증기-물 경계면에 대해 수위각도를 정의한 바 있다. 그러나 현재 제시된 수위각도 모델[8]은 코드에 적용시 수치적 불안정성을 야기하는 경우가 있어서 다음과 같이 코드 내에서 사용되는 평편한 계면 모델을 사용하였다.

$$\alpha = 1 - \frac{1}{2\pi}(\gamma - \sin\gamma) \quad (12)$$

수정된 모델에서는 환형류의 경우 막응축과 대류응축을 각각 계산하여 더 큰 값을 사용하고 성층류의 경우 식 (7)과 같이 막응축과 대류응축 계산 결과를 수위각도로 가중평균하여 열전달 계수를 도출한다.

환형류:

$$h_{cond} = \max(h_{film}, h_{convective}) \quad (13)$$

성층류:

$$h_{cond} = \frac{h_{film}(2\pi - \gamma_1) + h_{convective}\gamma_1}{2\pi} \quad (14)$$

4-1-2 수직 구간 열전달계수 급상승 문제 개선

수직 구간에서 열전달계수가 급상승하는 원인을 알아보기 위하여 Ahn & Yun 모델을 막응축과 대류 열전달로 구별하여 독립적으로 계산하였다. 그 결과, Fig. 8과 같이 관 하부의 대류 응축상관식으로 사용되는 Dittus and Boelter 상관식[12]을 이용한 계산에서 수직구간에서 열전달계수가 급상승하는 것을 확인하였다. 이러한 급상승의 원인을 파악하기 위해 Dittus and Boelter 상관식을 분석하였다.

$$h_{convective} = 0.023 Re_l^{0.8} Pr^{0.4} \left(\frac{k_l}{D_{hl}} \right) \quad (15)$$

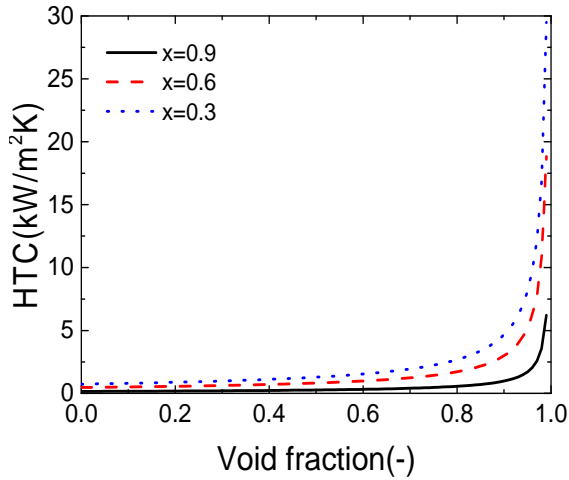


Fig. 8. 기포율에 따른 열전달계수의 민감도

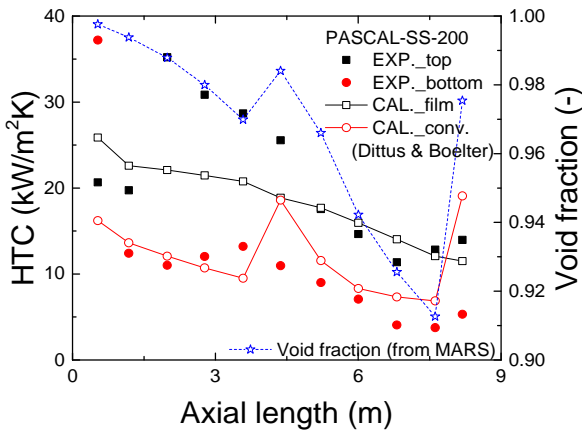


Fig. 9. 기존의 Ahn & Yun 모델 독립계산결과 및 기포율

식 (15)에서 사용된 레이놀즈수는 다음과 같다.

$$Re_l = \frac{G(1-x)D_{hl}}{\mu_l(1-\alpha)} \quad (16)$$

응축수의 레이놀즈수는 식 (16)와 같이 액체상의 실제속도로 정의되며 분모에 기포율을 포함하고 있다. Dittus and Boelter 상관식은 Ahn & Yun 모델에서 적용될 때 Fig. 8과 같이 기포율이 1에 근접함에 따라 무한대로 발산하는 문제를 보인다. PASCAL 실험의 대부분의 측정지점에서는 기포율 0.9에서 1.0 사이에 분포하므로, Fig. 9에서와 같이 하부의 열전달 계수가 기포율 분포에 따라 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있다.

성층류의 하부에 적용할 열전달계수에 대해 이러한 기포율 민감도를 배제하기 위하여, Dittus and Boelter

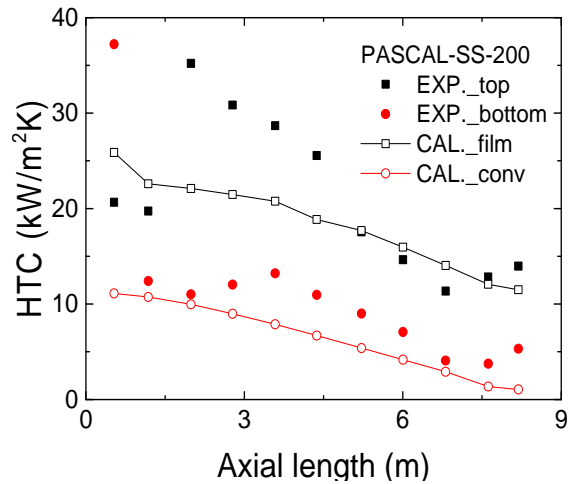


Fig. 10. 수정된 Ahn & Yun 모델로 PASCAL-SS-200-P1 관 상하부 독립계산결과

상관식 대신 기존 MARS 코드의 응축모델인 식 (17)의 Shah 상관식을 사용하였다.

$$h_{convective} = 0.023 Re_{ls}^{0.8} Pr_l^{0.4} \times \left[1 + \frac{3.8}{P_{red}^{0.38}} \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.76} \right] \left(\frac{k_l}{D} \right) \quad (17)$$

Shah 상관식에 사용된 레이놀즈수의 정의는 다음과 같다.

$$Re_{ls} = \frac{GD(1-x)}{\mu_l} \quad (18)$$

위의 식은 액체상의 겉보기 속도로부터 정의되므로 식 (16)의 레이놀즈수와 달리 기포율이 포함되어있지 않아, 기포율에 대한 민감도를 배제하여 코드의 안정성을 높이는 효과를 기대할 수 있다.

Fig. 10은 Shah 상관식을 이용하여 PASCAL-SS-200 계산을 다시 수행한 결과이며 Fig. 9의 불연속성이 제거된 것을 알 수 있다.

4-2 수정한 Ahn & Yun 모델의 MARS 코드 적용 및 평가

수정된 Ahn & Yun 모델을 MARS 코드에 적용하여 평가하였다. 본 평가에서는 수정된 Ahn & Yun 모델을 환형류와 성층류에서 사용하며 경사도가 0°인 수평에서부터 -30°인 하향류로 한정하여 적용하였다. 그 외의 조건에서는 MARS 코드의 기존 모델을 사용하였다.

Table 2. 실험장치 규격 및 실험조건

	PASCAL	KAIST -SCOP	ATLAS -PAFS	JAEA -PCCS	Purdue -PCCS
관 길이 [m]	8.4	8.4	4.77	9	3
관 내직경 [mm]	44.8	44.8	30.8	29	27.5
기울기 [°]	3	3	3	0	0
비응축성 기체 분율 [%]	0	0	0	1	1, 20
증기 질량유량 [kg/s]	0.09-0.43	0.15-0.18	0.4277	0.048	0.006-0.035
압력 [MPa]	0.8-6.7	1.2-1.88	7.81	0.7	0.1-0.4

모델 평가는 비응축성 기체가 존재하지 않는 경우와 존재하는 경우로 나누어 수행하였다. 비응축성 기체가 존재하지 않는 경우의 실험으로 PASCAL 및 KAIST-SCOP 개별효과실험과 ATLAS-PAFS 종합효과실험 자료를 활용했다. 비응축성 기체가 존재하는 경우로는 JAEA-PCCS와 Purdue-PCCS 개별효과실험 자료를 사용하였다. 수정된 Ahn & Yun 의 모델이 적용된 MARS 코드로 해석하고, 그 결과를 기존의 MARS 코드로 해석한 결과와 비교하였다. 본 평가는 0.1 MPa - 7.81 MPa 사이의 압력, 0.09 kg/s ~ 1.01 kg/s 사이의 유량 범위의 실험결과를 이용하였다. 자세한 실험 관련 자료는 Table 2에 요약되어 있다.

4-2-1 PASCAL 실험

Fig. 11은 수정된 Ahn & Yun 모델을 MARS 코드에 적용하여 케이스 별로 PASCAL 실험의 열유속을 각각 계산하여 실험값과 동일한 위치에서 비교한 그래프이다.

기존의 Ahn & Yun 모델이 고압조건에서 예측능력이 떨어지는 것에 비해 수정된 Ahn & Yun 모델의 열유속이 전체적으로 조금 더 높고 고압 조건에서도 비교적 열전달 예측을 잘 하고 있다.

Fig. 12는 PASCAL 실험 장치를 실제와 동일하게 모의한 후 증기발생기 전열기의 열출력에 따른 응축관 입구 압력을 나타낸 그래프이다. 기존의 Ahn & Yun 모델이 상대적으로 저압영역에서는 실험을 잘 예측하나 고압으로 갈수록 예측능력이 떨어지는 것을 알 수 있다. 반면에 수정된 Ahn & Yun 모델은 저압영역에서부터 고압영역까지 골고루 실험을 잘 예측하고 있는 것을 알 수 있다.

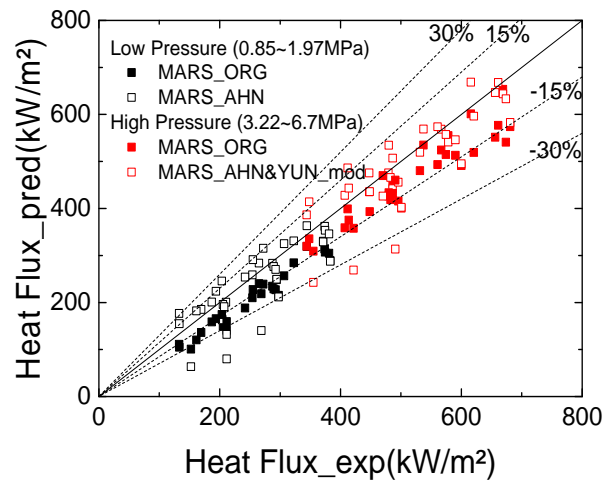


Fig. 11. 수정된 Ahn & Yun 모델을 이용하여 PASCAL 국소지점에서의 열속 비교

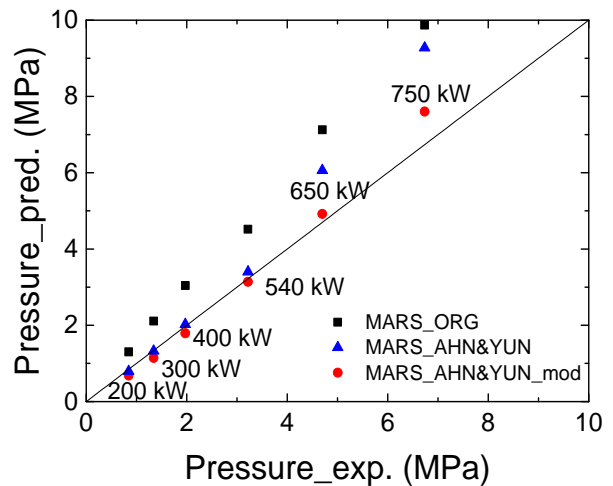


Fig. 12. 증기발생기 열출력별 압력 비교

4-2-2 KAIST-SCOP 실험

KAIST-SCOP 실험 장치는 KAIST에서 고온고압 환경에서의 수평형 응축열교환기의 성능을 평가하기 위해 구축되었다[6].

KAIST-SCOP 실험장치의 응축관은 내경 44.8mm, 두께 3mm, 8.4m의 길이의 U자 관이다. 그중 직선부는 각각 3.2m이고 3도의 기울기로 기울어져 있다. Fig. 13은 응축관의 열전대 설치 위치를 나타낸 것이다. 응축

Table 3. KAIST-SCOP 실험 경계조건

Case	Inlet Pressure (MPa)	Inlet Temperature (°C)	Inlet Flowrate (kg/s)
1	1.2049	175.2	0.15
2	1.41585	203.5	0.16
3	1.88514	211.46	0.18

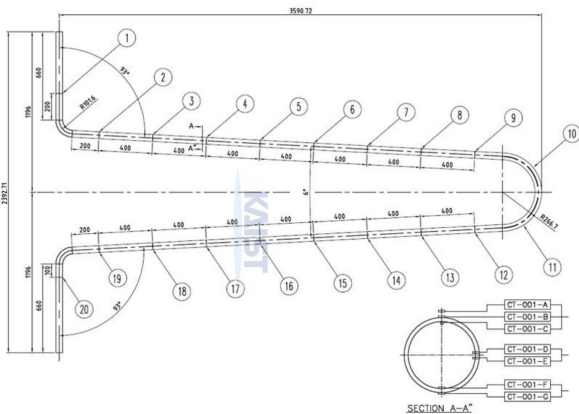


Fig. 13. KAIST-SCOP 응축관의 열전대 설치 위치[6]

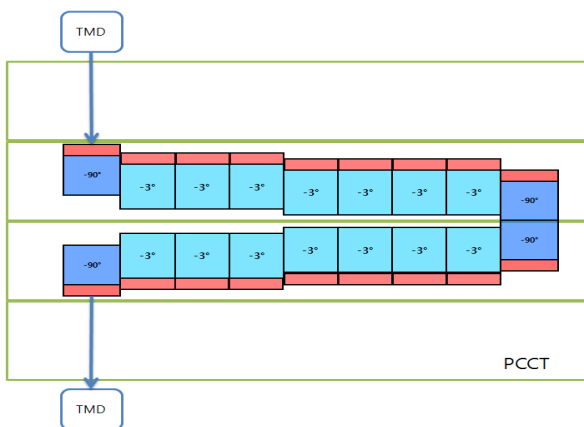


Fig. 14. KAIST-SCOP을 위한 MARS 코드 노드화

탱크는 너비 4.6m, 폭 0.8m, 높이 2m로 이루어져 있다.

실험장치의 케이스별 경계조건은 Table 3과 같고 MARS 코드로 계산하기 위하여 Fig. 14와 같이 모의 하였다.

Fig. 15는 KAIST-SCOP 실험의 열유속을 케이스 별로 각각 계산하여 실험값과 동일한 위치에서 비교한 그래프이다. 수정된 Ahn & Yun 모델이 기존 MARS 코드에 비해 열속을 더 크게 예측하는 것을 알 수 있다. 또한 수정된 Ahn & Yun 모델의 계산값이 15%오차 이내에 더 많이 몰려 있는 것을 알 수 있다.

4-2-3 ATLAS-PAFS 실험

ATLAS-PAFS 실험 장치는 다목적 종합효과 실험 장치인 ATLAS의 증기발생기 중 하나에 피동보조급수계통(PAFS)를 설치하여 피동보조급수계통의 영향을 알아보는 실험이다[5]. 본 평가에서는 여러 사고 시나리오 중, 증기발생기에서 물을 공급하는 주급수관이 파단 되는 FLB(Feedwater Line Break) 사고 시나리오를 이용하였다.

피동보조급수계통의 응축관은 내경 30.8mm, 길이 4.77m의 U자 관 3개로 이루어져 있고 직선부는 3도

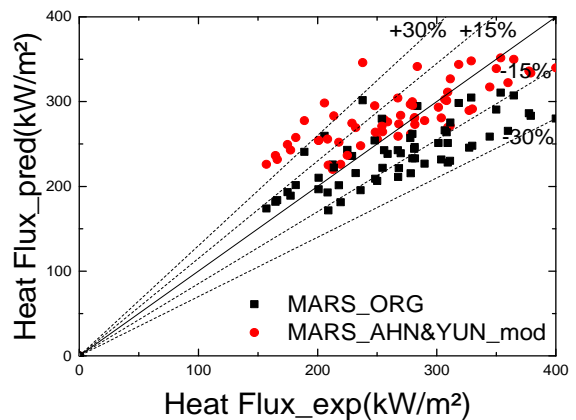


Fig. 15. KAIST-SCOP 국소지점의 열속 비교

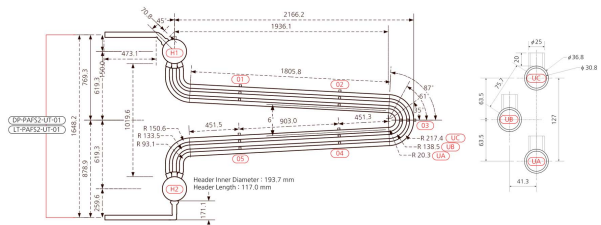


Fig. 16. ATLAS-PAFS의 응축관 열전대 위치[5]

기울어져 있다. 응축탱크는 너비 5.065m, 폭 0.34m, 높이 6.5m로 이루어져 있다. Fig. 16처럼 5군데의 위치에 계측기가 존재하여 실험데이터들을 계측하고 있다.

ATLAS-PAFS 실험 장치를 MARS 코드로 해석하기 위하여 피동보조급수계통을 Fig. 17과 같이 모의하였다. 3개의 응축관을 모두 모의하는 대신 3개의 응축관의 단면적을 합친 면적을 단면적으로 하는 응축관 1개로 모의하였다.

Fig. 18은 증기발생기의 압력거동의 실험값과 MARS 코드로 계산한 결과를 비교해 놓은 그래프이다. 피동보조급수계통이 달린 증기발생기 2번의 압력거동을 살펴보면 기존의 MARS 코드가 압력을 과예측하고 수정된 Ahn & Yun 모델이 압력을 더 정확하게 예측하는 것을 알 수 있다.

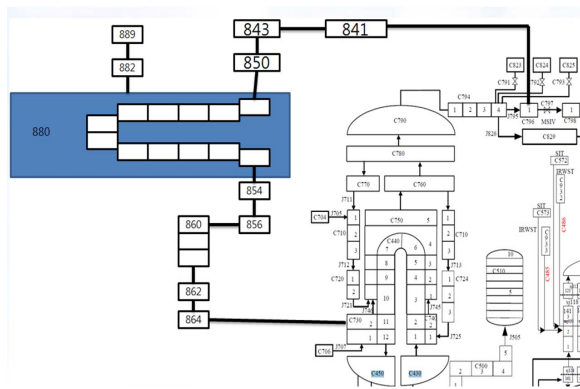


Fig. 17. ATLAS-PAFS 실험을 위한 MARS 코드 노드화

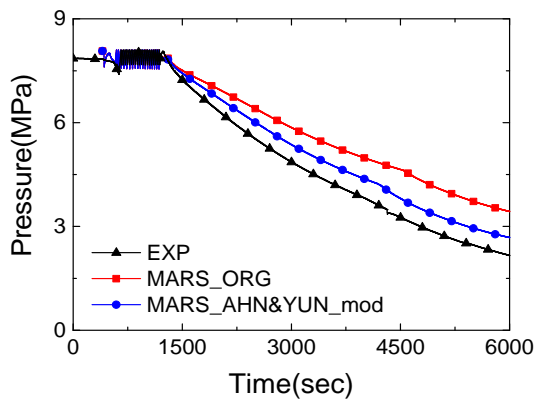


Fig. 18. ATLAS-PAFS FLB 사고시나리오의 증기발생기2 압력거동

4-2-4 JAEA-PCCS 실험

Japan Atomic Energy Agency(JAEA)에서 ABWR-II를 위한 수평형 열교환기가 달린 Passive Containment Cooling System(PCCS)를 제안하였고 PCCS에 달린 수평형 열교환기의 열수력적 거동을 추정하고 수행능력을 검증하기 위해 실험이 수행되었다[2].

응축관은 두 개의 4m 직선관과 반지름이 0.3m인 곡관으로 이루어져 있다. 응축관의 안쪽 직경은 29mm이고 두께는 1.4mm이며, 0.25m ~ 1m 길이의 16개의 셀로 이루어져 있다. 다른 실험들과 달리 응축관을 냉각시키는 2차 측이 큰 수조가 아니라 응축관을 둘러싸는 관의 형태로 제작되었다. 냉각수관의 지름은 43mm이고 냉각수관이 전체적으로 연결되어 있는 것이 아니라

Table 4. JAEA-PCCS 실험 경계조건

Inlet P (MPa)	Quality	Inlet Velocity (m/s)	Air Mass Fraction (AMF)
0.7	0.99	20.0	0.01

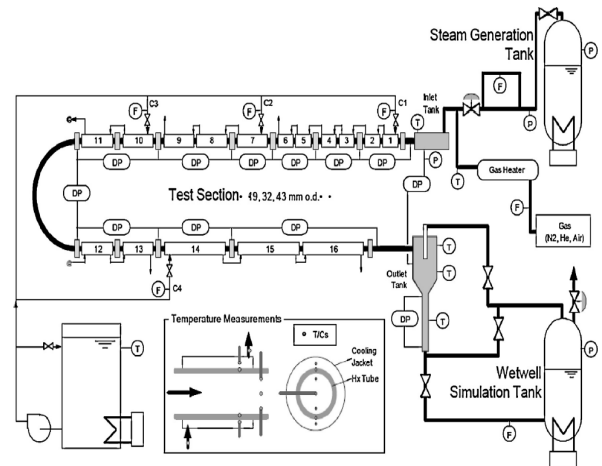


Fig. 19. JAEA-PCCS 개략도[2]

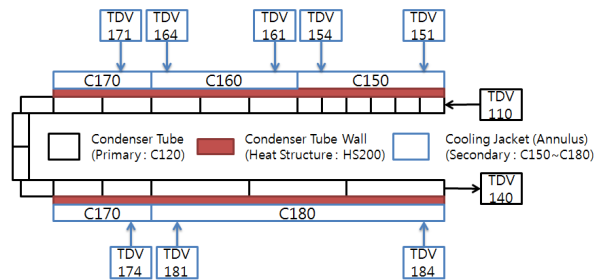


Fig. 20. JAEA-PCCS를 위한 MARS 코드 노드화

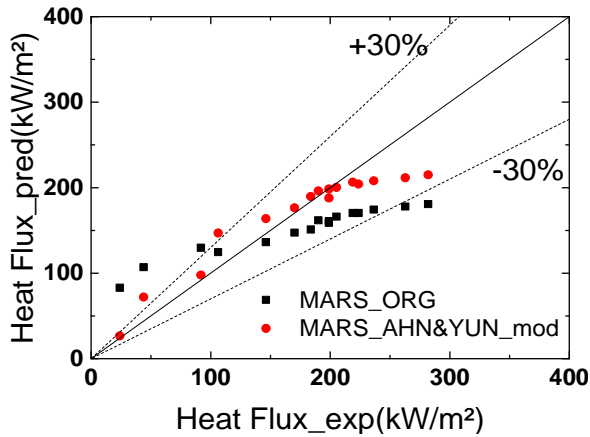


Fig. 21. JAEO-PCCS 국소지점의 열유속 비교

네 부분으로 나누어져 있다.

JAEO-PCCS 실험장치의 경계조건은 Table 4와 같고 MARS 코드로 해석하기 위해 Fig. 20과 같이 모의하였다.

같은 위치에서의 열유속 실험값과 계산값을 비교한 Fig. 21을 보면, 새로 개발된 응축 열전달 모델이 실험값에 전체적으로 더욱 근접한 것을 알 수 있다.

4-2-5 Purdue-PCCS

Fig. 22는 Purdue 대학에서 만든 실험장치 개념도이다. 이중 시험구간은 응축관과 응축관을 둘러싸고 있는 냉각수관으로 이루어져 있고 증기와 냉각수가 서로 반대방향으로 흐르도록 되어있다. 시험구간의 기하학적 구조 수치는 다음과 같다. 응축관의 길이 3m, 내직경 27.5mm, 두께 2.1mm, 그리고 냉각수관의 외직경은 63.5mm이다.

실험 케이스별 경계조건은 Table 5와 같고 실험 장치를 MARS 코드로 해석하기 위해 Fig. 23과 같이 모의하였다.

Fig. 24는 비응축성 기체가 1% 포함되었을 때의 열유속 실험값과 계산값을 동일위치에서 비교해 놓은 그래프이다. 정확한 차이를 알기 위하여 Table 6(a)과 같이 평균 편차와 평균 절댓값 편차를 계산해본 결과, 평균 편차는 조금 개선된 반면 평균 절댓값 편차에서 많은 개선을 보였다.

Fig. 25는 비응축성 기체가 20% 포함되었을 때의 열유속 실험값과 계산값을 동일위치에서 비교해 놓은 그래프이다. Table 6(b)의 평균 편차와 평균 절댓값 편차를 보면 두 모델 간에 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 비응축성 기체의 영향에 대한 코드의 예측성능 개선은 적다.

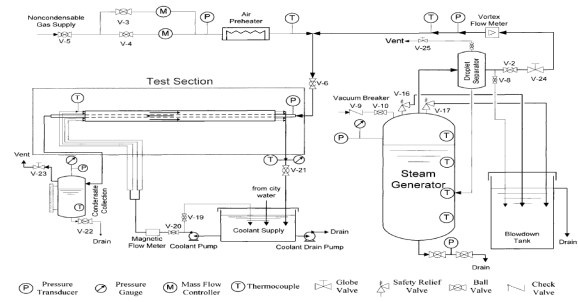


Fig. 22. Purdue-PCCS 개념도[3]

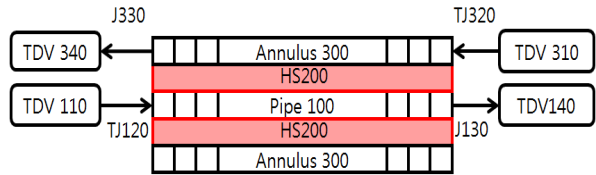


Fig. 23. Purdue-PCCS를 위한 MARS 코드 노드화

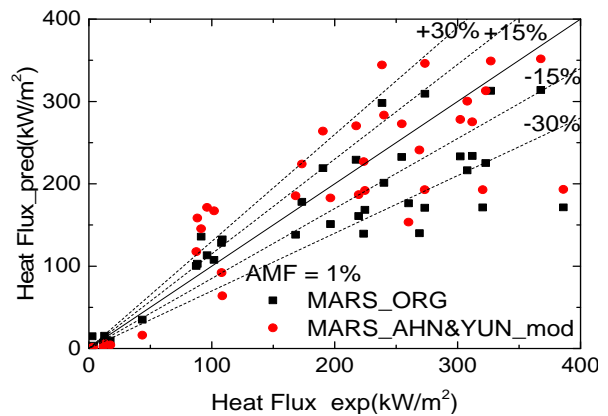


Fig. 24. Purdue-PCCS 국소지점의 열유속 비교 (AMF=1%)

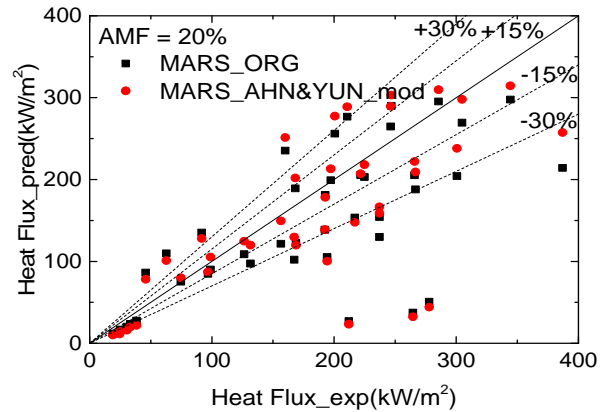


Fig. 25. Purdue-PCCS 국소지점의 열유속 비교 (AMF=20%)

Table 5. Purdue-PCCS 실험 경계조건

Test NO.	Inlet Pressure (kPa)	Inlet Steam Mass Flow Rate (g/s)	Air Mass Flow Rate (g/s)	Inlet Air Mass Fraction (AMF)	Coolant Inlet Temperature(°C)	Coolant Inlet Mass Flow rate (kg/s)
7	104.42	6.01	0.06	0.009885	45.00	1.48
20	201.57	5.85	0.06	0.010152	45.00	1.48
18	201.20	23.63	0.24	0.010054	45.00	1.48
24	401.26	11.44	0.11	0.009524	45.00	1.48
27	401.26	23.19	0.23	0.009821	45.00	1.48
46	403.31	35.14	0.35	0.009862	45.00	1.48
11	109.47	5.93	1.51	0.202957	45.00	1.48
16	201.12	6.16	1.49	0.194771	45.00	1.48
35	201.06	23.15	5.91	0.203372	45.00	1.48
53	398.83	11.45	2.89	0.201534	45.00	1.48
54	400.51	23.02	5.73	0.199304	45.00	1.48
42	401.62	34.48	8.54	0.198512	45.00	1.48

Table 6. 두 모델 계산결과와 평균 편차(ϵ_{avg})와 절댓값 평균 편차($\epsilon_{ABS-avg}$)

(a) AMF=1%

	MARS_ORG	MARS_Ahn & Yun
평균편차	0.359957	0.336061
절댓값 평균편차	0.818529	0.422514

(b) AMF=20%

	MARS_ORG	MARS_Ahn & Yun
평균편차	0.271298	0.267155
절댓값 평균편차	0.329377	0.329041

5. 요약 및 결론

본 연구는 계통열수력분석코드 MARS의 응축열전달 계산능력을 증진을 목표로 수행되었다.

이를 위해 먼저 Ahn & Yun 등이 개발한 수평관 내부 응축 열전달 모델 패키지를 MARS 코드에 적용하고 PASCAL 실험 자료를 이용하여 기존모델과 비

교·평가를 수행하였다. 이 모델은 수평 및 낮은 하향 경사관(경사도 30° 이하) 내부의 성층류 및 환형류에 적용가능하다. 이 평가 결과를 바탕으로 Ahn & Yun 모델의 문제점을 규명하고 수정안을 제시하였다. 그 다음, 수정한 Ahn & Yun 모델을 다양한 기하형태 및 열수력 조건의 실험데이터들을 이용하여 기존 MARS 코드의 해석결과와 비교·평가하였다. 평가결과는 다음과 같이 요약된다.

- 비응축성 기체가 없는 수평관 응축 실험 중 PASCAL 실험을 해석한 결과, 기존 MARS 코드의 응축 모델은 열전달을 전체적으로 낮게 예측하는 것으로 나타났다. 그에 비해 수정된 Ahn & Yun 모델은 비교적 실험값을 잘 예측한다. KAIST-SCOP 실험 해석의 경우도 수정된 Ahn & Yun 모델이 기존 MARS 코드에 비해 다소 잘 예측하는 것을 보여주고 있다. ATLAS-PAFS 실험 해석의 경우도 증기발생기의 압력거동을 비교해 봤을 때, 수정된 Ahn & Yun 모델의 열전달 능력이 더 뛰어난 것을 알 수 있었다. 특히, 수정된 Ahn & Yun 모델은 원래의 모델에 비해 고압 조건에서도 열전달 예측 능력이 향상되는 것을 확인하였다.
- 비응축성 기체가 존재하는 수평관 응축현상에 대해서도 모델을 평가하였다. JAEA-PCCS 실험을

모의한 결과, 수정한 Ahn & Yun 모델이 기존 MARS 코드보다 열유속을 더 정확하게 예측하였다. Purdue-PCCS 실험의 경우도 비응축성 기체가 1%인 경우 수정된 Ahn & Yun 모델이 조금 더 정확한 예측능력을 보여주지만 비응축성 기체가 20%인 경우엔 기존 MARS 코드와 예측능력에 큰 차이가 없다.

결론적으로 개선된 Ahn & Yun 모델은 수평 및 낮은 하향 경사관 내부 성층류 및 환형류 조건에서 발생하는 응축열전달 현상을 해석하는데 유용한 것으로 평가된다. 본 평가에는 0.1 MPa - 7.81 MPa 사이의 압력, 0.09 kg/s ~ 1.01 kg/s 사이의 유량 범위의 실험결과를 이용하였다. 다만, 비응축성 가스의 농도가 높은 경우에는 기존 MARS 코드의 해석결과와 큰 차이가 없어 향후 개선이 필요하다.

기호 설명

A_g	기체면적
A_l	액체면적
D	등가직경
\overline{Nu}	누셀트수
Pr_l	액체의 프란틀수
P_{red}	환산압력
Re_g	기체의 레이놀즈수
Re_l	액체의 레이놀즈수
Re_{ls}	액체의 겉보기 속도로부터 정의된 레이놀즈 수
S_g	기체의 접촉길이
S_i	계면의 접촉길이
S_l	액체의 접촉길이
g	중력
\overline{h}	열전달계수
$h_{convective}$	대류 열전달계수
h_{film}	막응축 열전달계수
h_{fg}	증발잠열
k_l	액체의 열전도도
x	건도

α	기포율
γ_1	수위각도
τ_i	계면 전단응력
μ_l	액체의 점성계수
ρ_g	기체의 밀도
ρ_l	액체의 밀도
τ_i	계면 전단응력
τ_{wg}	벽과 기체 사이의 전단응력
τ_{wl}	벽과 액체 사이의 전단응력

후 기

이 논문은 원자력안전위원회 원자력안전연구센터 사업 (한국원자력안전재단 과제번호 1305011)의 지원으로 수행되었다.

References

- Schaffrath, A., Prasser, H.M., Forschungszentrum Rossendorf e.V, Dresden, "Theoretical support to the NOKO experiments." FZR-224, Forschungszentrum Rossendorf (1998).
- Kondo M., and H. Nakamura., Y. Kukita, T. Kurita, K. Arai, and T. Okazaki, "Primary-side two-phase flow and heat transfer characteristics of a horizontal-tube PCCS condenser." ICONE14, 89652 (2006).
- Wu, T. "Horizontal in-tube condensation in the presence of a non-condensable gas," PhD. Dissertation, Purdue university (2005).
- KAERI. "Experimental study on cooling performance for PAFS (Passive Auxiliary Feed-water System) with the separate-effect test facility" 9-017-A599-002-053, Rev.00 (2012).
- KAERI, "Integral effect test on operational performance of the PAFS (Passive Auxiliary Feed-water System) for a FLB (Feed-water Line Break) accident", 9-017-A599-002-059, Rev.00 (2012)
- C.W. Shin, "Condensation experiment of high pressure steam in an inclined single tube of passive auxiliary feedwater system in APR+" KAIST

- Master's Thesis (2012).
7. J.J. Jeong, K.S. Ha, B.D. Chung and W.J. Lee, "Development of A Multi-dimensional Thermal-Hydraulic System Code, MARS 1.3.1," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 26, no. 18, pp. 1611-1642 (1999).
 8. T.H. Ahn, B.J. Yun, J.J. Jeong, K.H. Kang, Y.S. Park, "Development of a new condensation model for the nearly horizontal heat exchanger tube under the steam flowing conditions", *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2014).
 9. Chato, J.C., "Laminar condensation inside horizontal and inclined tubes." *ASHRAE J.* 4 (2), 52-60 (1962).
 10. Shah, M. M. "A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 22.4 547-556 (1979).
 11. Nusselt, W. "The surface condensation of water vapour." *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure* 60, 541-546 (1916).
 12. Dittus, F. W., and L. M. K. Boelter. "Heat transfer in automobile radiators of the tubular type." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 12(1) 3-22 (1985).