

저유속 조건에서 3x3 봉다발을 이용한 Post-CHF 열전달에 대한 실험 연구

An Experimental Study on Post-CHF Heat Transfer in Low Flow Conditions Using a 3x3 Rod Bundle

문상기, 조석, 천세영, 박종국, 백원필
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

저유속 조건에서 3x3 봉다발을 이용하여 물-증기의 Post-CHF 열전달에 대한 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 저유속 조건에서 비균일한 수직 출력 분포를 갖는 3x3 봉다발에서의 Post-CHF 열전달 변수 경향을 파악하고, 저유속 조건에서의 기존 Post-CHF 열전달 상관식의 적용 가능성을 평가하였다. 평형건도가 1이하인 경우에도 실험대 출구 근처에서의 부수로 유체온도는 포화온도보다 높게 측정되었으며, 이는 Post-CHF 열전달 현상이 열적 비평형 상태에 있음을 의미한다. 열전달계수에 미치는 압력과 입구 과냉도의 영향은 관찰하기 힘들었으나, Post-CHF 열전달계수는 증기의 레이놀즈수에 따라 크게 증가하였다. 기존 상관식들은 실험에서 얻어진 Post-CHF 열전달계수를 신뢰성 있게 예측하지 못하였다.

Abstract

An experimental study on post-CHF heat transfer has been performed with 3x3 rod bundle using vertical two-phase flow in low-flow condition. In this study, the effects of various parameters on the post-CHF heat transfer have been investigated and an applicability of conventional post-CHF correlations in low-flow conditions has been estimated. Even if the equilibrium quality is less than 1, fluid temperatures of subchannel near the test section exit are larger than saturation temperature. This means that the post-CHF heat transfer phenomena are in thermal non-equilibrium state. Although the effects of pressure and inlet subcooling on post-CHF heat transfer was negligible, post-CHF heat transfer coefficients largely increase with Reynolds number of steam. Conventional post-CHF heat transfer correlations do not show reliable predictions of the post-CHF heat transfer coefficients.

1. 서 론

Post-CHF 열전달은 경수로의 LOCA(Loss-of-coolant accident) 사고 동안에 매우 중요한 역할을 한다. Blowdown, Refill, Reflood로 구분되는 LOCA 사고시 핵연료봉에서는 증기로의 Post-CHF 열전달이 발생한다. 따라서 LOCA 사고시 핵연료봉 피복재의 온도를 신뢰성 있게 예측하기 위해서는 Post-CHF 열전달 기구에 대한 정확한 이해와 Post-CHF 열전달을 예측할 수 있는 신뢰성 있는 상관식 혹은 모델이 필요하다. Post-CHF 열전달이 중요해지는 LOCA 사고 조건은 저유속 이상 유동이며, 기존의 Post-CHF 열전달 실험 연구는 주로 저압 조건에서 단순한 형상을 지닌 원형관 혹은 환상관을 이용하여 수행되어 왔다[1-3]. 따라서 봉다발을 이용한 고압 상태에서의 Post-CHF에 대한 기존 실험 연구는 빈약한 실정이다[1, 4]. 특히 경수로의 경우 핵연료봉은 비균일 수직 방향 출력 분포를 지니고 있지만, 기존의 Post-CHF 실험 연구들은 대부분 균일한 수직 방향 출력 분포를 갖는 실험대를 이용하여 실험이 수행되어져 왔다.

따라서 본 연구에서는 저유속 조건에서 비균일한 수직 방향 출력 분포를 갖는 3x3 봉다발을 이용하여 수직 상향류인 물-증기에서의 Post-CHF 열전달에 대한 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 저유속 및 광범위한 압력 조건하에서 Post-CHF 열전달 현상에 대한 변수 경향을 분석하고, 기존 Post-CHF 열전달 상관식들이 적용 가능성을 파악하였다. 실험에서 얻어진 Post-CHF 열전달 계수를 기존 상관식들과 비교하였으며, 이러한 상관식들이 저유속 및 고압 조건에서 적용 가능성에 대하여 분석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치 및 실험절차

Post-CHF 열전달 실험은 한국원자력연구소의 RCS 열수력 Loop를 사용하여 수행되었으며, 실험장치는 그림 1에 나타난 것처럼 순환펌프(Circulating Pump), 예열기(Preheater), 시험관, 기수분리기(Steam/Water Separator), 응축기, 가압기, 열교환기 등으로 이루어져 있다[5-8]. 유량의 측정은 오리피스 유량계를 사용하였으며, 저유량영역에서 관찰되는 유동의 진동은 실험대 입구에 설치된 밸브를 Throttling하여 제거하였다. 실험장치의 압력은 가압기에 설치된 40 kW의 가열봉을 사용하여 조절하였다. 실험대에는 핵연료봉을 모의하도록 수직방향 비균일 출력 분포를 갖는 가열 길이가 3673 mm인 9개의 가열봉이 압력용기 내에 설치된 Flow Housing 내부에 장전되어 있다. 가열봉의 직경 및 피치는 각각 9.52 mm 및 12.6 mm이다. 실험대에는 단순한 형상을 갖는 지지격자가 11개 설치되어 있다. 그림 2는 실험대의 구조 및 열전대의 위치를 보여준다. 가열봉에는 가열봉 표면 온도를 측정하고 임계열유속을 검출하기 위해 Sheath 직경이 0.5 mm인 K-Type 비접지형 열전대가 가열봉 하나당 축방향으로 6개 혹은 4개씩 부착되어 있다. 또한 같은 형태의 열전대가 가열구간 입구 및 출구 근처의 부수로에서의 유체 온도를 측정하기 위해 각각 16개씩 설치되어 있다. 부수로 유체 온도 측정용 열전대는 외경이 1.6 mm인 스테인레스 관내에 삽입

되었으며, 온도 측정 부위가 약 2 - 4 mm 정도 스테인레스 관 외부에 노출되어 있다. 그림 3에 나타난 것처럼 수직방향 출력 분포는 15개의 Step으로 균일하게 나뉘어져 있으며, 대칭적인 Cosine 분포를 모사한다. 가열봉의 평균 열유속에 대한 최대 열유속 및 최소 열유속의 값은 각각 1.40 및 0.45이며, 가열봉은 내부에 설치된 저항선에 교류를 통과시켜 간접적으로 가열된다.

Post-CHF 열전달 실험은 다음과 같은 순서와 방법으로 수행되었다. 먼저 실험대 입구에서의 유체 온도, 질량유속과 입구 압력을 설정된 실험 조건에 맞춘 다음, 실험대 가열봉 다발에 전원을 공급하고 서서히 가열 전력을 증가시킨다. 본 저자들이 수행하였던 3x3 봉다발에서의 임계열유속 값 근처에서 공급 전력을 미세하게 Step 상태로 증가시키면서 임계열유속 값이 기존에서 측정되었던 값과 일치하는지를 확인 한다[8]. 임계열유속이 발생한 후 실험대 입구에서의 유체 온도, 질량유속, 압력과 함께 실험대로의 총출력을 일정하게 수분 동안 유지하여 정상상태를 확인한 후 가열봉 벽면 온도 등을 측정한다. 실험 변수의 측정이 완료되면 실험대 총출력을 증가시켜 동일한 방법으로 가열봉 벽면 온도를 측정하였다. 가열봉을 보호하기 위하여 Post-CHF 실험은 가열봉의 최대 온도가 약 700 °C 가 될 때까지만 수행하였다. 임계열유속의 발생 판단조건은 가열봉 표면 온도가 갑자기 지속적으로 상승하는 현상으로 판단하며, 본 실험에서는 가열봉 표면의 온도가 유체 포화 온도보다 110 K 이상 초과하면 임계열유속이 발생한 것으로 판단하였다. 본 연구에서는 표 1에 나타난 것처럼 190개 시리즈(입구 과냉도, 압력, 질량유속, 가열봉 출력)의 Post-CHF 열전달 실험 데이터를 얻었다.

본 실험의 주요 측정변수는 실험대 입구와 출구 플레넘에서의 압력 및 유체 온도, 실험대 입구 질량유속, 가열봉 표면 온도, 가열봉다발에 공급된 전력 등이며, 측정된 신호는 모두 Workstation급 자료처리장치에서 자동적으로 수집/처리된다. 이들 측정변수의 불확실도는 Sensor 및 계측기기의 정밀도와 교정결과로부터 ANSI/ASME PTC 19.1 코드[9]의 방법을 사용하여 평가하였으며, 관찰된 불확실도는 압력, 유량 및 온도에 대하여 각각 자료처리장치 지시치의 $\pm 0.3\%$, $\pm 1.5\%$ 및 ± 0.7 K 이하였다. 가열봉다발에 공급된 전력 측정에 대한 불확실도는 $\pm 1.8\%$ 이하였으며, 열손실은 가열봉에 인가된 총출력에 비해 무시할 수 있었다.

2.2 실험데이터 변환

봉다발에서는 비가열 벽면이 존재하고, 부수로간의 유량, 엔탈피의 차이가 존재하기 때문에 각 가열봉에서의 국부 조건을 정확하게 알기 위해서는 부수로 코드의 해석이 필요하다. 하지만 본 연구에서는 부수로 코드를 통한 국부 조건을 계산하지 않고, 실험대 단면에서의 평균적인 건도, 유량, 온도 등의 값을 사용하여 Post-CHF 열전달계수를 분석하였다. 일반적으로 Post-CHF 조건에서는 증기의 온도가 포화온도보다 높고 평형 건도가 실제 증기의 건도와 다른 열적 비평형 상태를 보인다[1-3]. 그러나 증기의 과열도를 정확

하게 측정하는 것은 포화 액적 등의 영향으로 인해 현실적으로 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 열평형식에 의해 증기의 과열도 혹은 온도를 유추하였다.

실험대의 특정 위치 Z에서의 평형 건도(Equilibrium Quality) X_e 는 열적 평형 상태를 가정하여 실험대 입구 온도, 질량유속, 압력 및 Z까지의 총출력을 사용한 열평형식(Heat Balance Equation)에 의해 구하였다[4]. 평형 건도가 0에서 1사이인 경우에 증기 온도(T_v)와 물의 온도(T_l)는 포화온도 T_{sat} 와 같다고 가정하였다. 평형 건도가 1이상이면, 열평형식에 의해 과열 증기의 온도를 구하였다. 즉 증기의 온도는 다음의 식들에 의해 구해졌다.

$$T_v = T_l = T_{sat} \quad \text{for } 0 \leq X_e \leq 1 \quad (1)$$

$$T_v = f(P, i_v), \quad i_v = X_e i_{fg} + i_f \quad \text{for } X_e > 1 \quad (2)$$

Post-CHF 영역에서의 열전달계수는 국부 열유속과 벽면 과열도에 따라 다음의 식으로부터 구해진다.

$$h_{exp} = q''_{con}/(T_w - T_{sat}) \quad \text{for } X_e \leq 1 \quad (3)$$

$$h_{exp} = q''_{con}/(T_w - T_g) \quad \text{for } X_e > 1 \quad (4)$$

$$\text{where } q''_{con} = q''_w - q''_{rad} \quad (5)$$

여기서 q''_{con} 은 가열봉 표면으로부터 증기로의 복사 열전달을 제외한 순수한 대류 열전달 열유속을 의미한다. 봉다발과 같은 복잡한 형상을 갖는 실험대에서 복사열전달을 정확하게 계산할 수 있는 모델도 부족하며, 가열봉 표면, 액적, 증기 등의 복사 열전달과 관련된 물성치들에 대한 정보도 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 가열봉과 증기 사이의 복사열 전달만을 고려하였으며, 가열봉으로부터 증기로의 복사 열전달은 다음의 식에 의해 구하였다[4, 10].

$$q''_{rad} = e's(T_w^4 - T_v^4) \quad (6)$$

$$e' = (1/e_w + 1/a_g - 1)^{-1} \quad (7)$$

가열봉 표면의 Emissivity e_w 는 가열봉의 Sheath 재질인 인코넬 600의 표면 Emissivity 값인 0.84로 하였다. 증기의 Absorptivity a_g 는 증기의 Emissivity와 같다고 가정하였으며, Hottel의 그래프[10]로부터 각 압력에 따른 증기의 Emissivity 값을 사용하였다. 위의 식에 따라 복사열전달을 계산한 결과 총열유속에서 복사 열전달이 차지하는 비율(대부분의 경우 약 6% 이하)은 매우 작고, 사용하는 물성치들에 따라 복사 열전달량이 크게 변화하지 않았다. 또한 매우 낮은 질량유속과 높은 벽면온도 조건을 제외하고는 복사 열전달량은 매우 작게 나타났다.

일반적으로 가열봉다발에서는 가열봉의 위치 즉 부수로의 위치에 따라 유량, 엔탈피 및 복사열전달 등의 차이가 발생하여 가열봉의 위치에 따라 가열봉 벽면온도 혹은 열전달계수가 다르게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 실험대 중앙에 위치한 가열봉 5번에 대한 Post-CHF 열전달계수를 평가하였다. 일반적으로 가열봉 5번의 벽면 온도는 실험대 구석 위치를 제외한 가열봉들의 벽면 온도보다 약간 작은 값을 보였다. 이는 저유속 조건에서 봉다발 Post-CHF 열전달 현상의 특이한 점으로 판단된다[4].

3. 실험결과 및 논의

그림 4는 중앙에 위치한 가열봉 5번의 열전대 2번에서의 벽면온도 및 열전달계수 거동을 보여준다. 본 그림은 압력, 질량유속 및 입구 과냉도가 일정한 조건에서 실험대로의 출력을 미세하게 증가시키면서 Pre-CHF, CHF 및 Post-CHF 열전달 과정을 관찰한 결과이다. 그림4의 (a)에 나타난 것처럼 대부분의 국부 열유속은 대류 열전달에 의해 전달되어 복사열전달이 차지하는 비율은 무시할 수 있다. 그림 4의 (b) 및 (c)에서 CHF 이전의 Pre-CHF 영역에서는 열전달계수가 매우 커서 벽면온도는 포화온도에 가깝다. CHF 영역에서는 벽면이 Dryout 되고, 다시 Rewetting 되는 현상이 반복되면서 벽면온도와 포화온도의 차가 커지면서 벽면온도는 진동을 보인다. Post-CHF 영역에서는 벽면온도의 과열도가 매우 증가하지만, 상대적으로 벽면온도의 진동은 작아진다. 본 연구에서 수행된 CHF 조건에서의 유동양식은 대부분 환상류로 판단되기 때문에, Post-CHF 조건에서 유로의 대부분이 증기로 차 있고, 연속된 증기상에 포화 액적이 존재하는 Dispersed Flow Film Boiling 영역으로 판단된다. 따라서 Post-CHF에서 벽면에서의 열전달은 대부분 증기로의 대류 열전달에 의해 발생하며, 벽면온도는 안정된 거동을 보이는 것으로 보인다.

본 실험 조건(출구에서의 최대 건도는 약 1.05)에서 열적 평형으로 구한 증기의 온도 T_v 는 포화온도와 동일한 것으로 나타났다. 그러나, 그림 4의 (e)에 보인 것처럼 출구에서 측정된 5번 가열봉 근처의 부수로에서의 유체온도는 열유속이 증가함에 따라 포화온도보다 훨씬 크게 나타났다. 일반적으로 봉다발에서는 유량 및 엔탈피 차이에 의해 부수로의 유체온도가 동일하지 않지만, Post-CHF 영역에서의 실제 증기 온도는 포화온도와 다르다는 열적 비평형 상태를 간접적으로 보여주고 있다. 현재까지 Post-CHF 영역에서의 열적 비평형 상태, 즉 증기 온도가 포화온도보다 높고, 실제 증기의 건도는 평형 건도보다 작다는 사실은 일부 실험으로부터 간접적으로 알려졌지만 실제 증기의 온도를 정확하게 측정하기는 매우 어렵다[1-3]. 본 실험에서 측정된 부수로의 유체온도는 증기와 액적의 반복적인 접촉으로 인하여 진동하여 측정된 부수로 유체온도를 증기만의 온도로 정의하기 힘들지만, Post-CHF 영역에서의 증기의 온도가 포화 온도보다 높은 열적 비평형 상태를 보여주고 있다.

그림 5는 일정한 질량유속과 입구 과냉도 조건에서 열전달계수에 미치는 압력의 영향을 보여주고 있다. 그림에 나타난 것처럼 벽면과 증기의 온도차가 증가함에 따라 열전달계수가 감소한다. 그러나 압력의 영향은 거의 나타나지 않는다. 그림 6은 증기의 레이놀즈수에 따른 열전달계수의 거동을 보여주며, 입구과냉도의 영향은 거의 관찰할 수 없다. 열전달계수는 증기의 레이놀즈수에 따라 증가함을 알 수 있다.

실험에서 얻어진 열전달계수를 일반적으로 널리 사용하고 있는 다음과 같은 Post-CHF 열전달계수 상관식과 비교하였다.

- Film boiling heat transfer look-up table[11]
- Dougall-Rohsenow[12]

- Groeneveld 5.9 correlation[13]

그림 7에 나타난 것처럼 Look-up table은 열전달계수를 작게 예측하며, 나머지 두 개의 상관식은 열전달계수를 크게 예측하고 있다. 따라서 기존 Post-CHF 열전달 상관식들은 저유속 조건에서의 열전달계수를 신뢰성 있게 예측하지 못하고 있다.

4. 결론

저유속 조건에서 3x3 봉다발을 이용하여 광범위한 압력 조건하에서 물-증기의 Post-CHF 열전달에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) Pre-CHF, CHF를 거쳐 Post-CHF 열전달 영역에 도달함에 따라 벽면온도의 과열도가 크게 증가하여 Post-CHF에서의 열전달계수가 크게 감소하였다.
- (2) 평형건도가 1이하인 경우에도 실험대 출구 근처에서의 부수로 유체온도 측정값은 포화온도보다 크게 나타났으며, 벽면온도가 증가함에 따라 부수로 유체온도의 과열도는 크게 증가하였다. 이는 Post-CHF 열전달 과정이 열적 비평형 상태에 있음을 간접적으로 보여준다.
- (3) 열전달계수에 미치는 압력과 입구 과냉도의 영향은 관찰하기 힘들었다. 그러나 열전달계수는 기존에 알려져 있는 것처럼 증기의 레이놀즈수에 따라 증가하였다.
- (4) 기존에 널리 사용하고 있는 Post-CHF 열전달 상관식들은 실험 데이터를 신뢰성 있게 예측하지 못하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 과제의 지원으로 수행되었습니다. 본 실험을 수행하는 데 많은 도움을 주신 한국원자력연구소의 김복득씨와 윤영중씨께 감사를 드립니다.

기호 설명

a_g	emissivity of steam
Di_i	inlet subcooling
D_{hy}	hydraulic diameter
e_w	emissivity of heater surface
e'	effective emissivity
G	mass flux
h	heat transfer coefficient
i	enthalpy
i_{fg}	latent heat of vaporization
m	viscosity

P	pressure
Re_{gh}	Reynolds number of steam
ρ	density
q''	heat flux
T_l	liquid temperature
T_{sat}	saturation temperature
T_v	vapor temperature
X_e	equilibrium quality
Z	axial distance from bottom of heated length

subscripts

avg	average
con	conduction heat transfer
exp	experiment
l	liquid
e	equilibrium
f	saturated liquid
g	saturated vapor
m	measured
p	predicted
rad	radiation heat transfer
sat	saturation
v	vapor
w	wall

참고문헌

- (1) D. C. Groeneveld, "Post-dryout heat transfer: physical mechanisms and a survey of prediction methods," *Nucl. Eng. Design*, **32**, 283-294 (1975).
- (2) M. Andreani and G. Yadigaroglu, "Prediction methods for dispersed flow film boiling," *Int. J. Multiphase Flow*, **20**, 1-51 (1994).
- (3) J. C. Chen, "A short review of dispersed flow heat transfer in post-dryout boiling," *Nucl. Eng. Design*, **95**, 375-383 (1986).
- (4) H. Kumamaru, Y. Koizumi and K. Tasaka, "Investigation of pre- and post-dryout heat transfer of steam-water two-phase flow in a rod bundle," *Nucl. Eng. Design*, **102**, 71-84 (1987).

- (5) S. Y. Chun, H. J. Chung, S. K. Moon, S. K. Yang, M. K. Chung, T. Schoesse and M. Aritomi, "Effect of pressure on critical heat flux in uniformly heated vertical annulus under low flow conditions," *Nucl. Eng. Design*, **203**, 159-174 (2001).
- (6) S. Y. Chun, S. K. Moon, H. J. Chung, S. K. Yang, M. K. Chung and M. Aritomi, "Critical heat flux under zero flow conditions in vertical annulus with uniformly and non-uniformly heater sections," *Nucl. Eng. Design*, **205**, 265-279 (2001).
- (7) 문상기, 천세영, 최기용, 박종국, 백원필, "비균일 가열 수직 봉다발에서의 저유속 임계열유속에 대한 실험 연구," 2002 한국원자력학회 춘계학술대회 (2002).
- (8) S. K. Moon, S. Y. Chun, S. Cho, J. K. Park, W. P. Baek, "An experimental study on the low flow CHF in vertical rod bundle with non-uniform axial heat flux distribution," *Proc. of the 10th Int. Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics (NURETH-10)*, Oct. 5-11, Seoul, Korea (2003).
- (9) ANSI/ASME PTC 19.1, ASME Performance test codes, supplement on instruments and apparatus, Part 1, measurement uncertainty, ASME, New York (1985).
- (10) H. C. Hottel and A. F. Sarofim, Radiative Transfer, McGraw-Hill, New York (1967).
- (11) D. C. Groeneveld, L. K. H. Leung et al., "A look-up table for fully developed film-boiling heat transfer," *Nucl. Eng. Design*, **225**, 83-97 (2003).
- (12) R. S. Dougall and W. M. Rohsenow, Film boiling on the inside of vertical tubes with upward flow of the fluid at low qualities, MIT Report No. 9079-26 (1963).
- (13) D. C. Groeneveld, An investigation of heat transfer in the liquid deficient regime, Report AECL-3281 (1969).

표 1. Post-CHF 열전달 실험 조건

실험 변수	실험 조건
실험대 입구 압력, P (MPa)	1, 3, 6, 9
질량유속, G ($\text{kg/m}^2\text{s}$)	50 ~ 453
입구 과냉도, Di_i (kJ/kg)	75 ~ 350
국부 건도, X_e (-)	0.24 ~ 4.39
가열봉 평균 온도, $T_{w, \text{avg}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	~ 681
가열봉 과열도 $DT_w (= T_w - T_{\text{sat}})$ ($^{\circ}\text{C}$)	50 ~ 476
평균 열유속, q''_{avg} (kW/m^2)	92 ~ 706
가열봉 총출력, Q_T (kW)	90 ~ 698
No. of data series	190

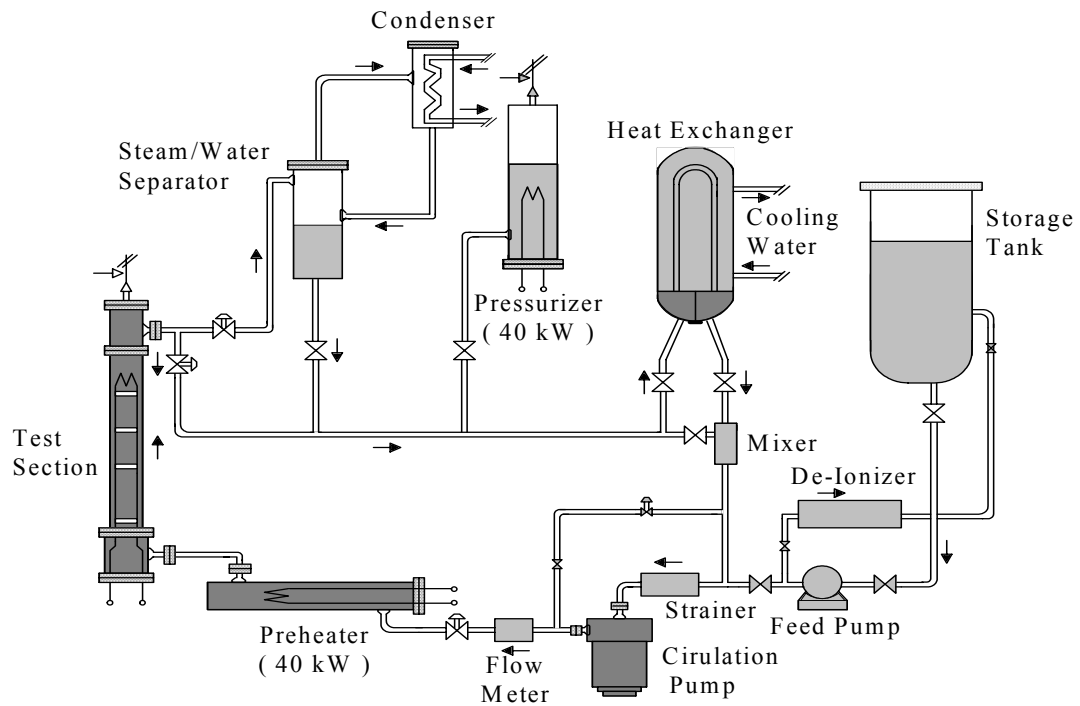


그림 1. 한국원자력연구소 RCS 열수력 Loop

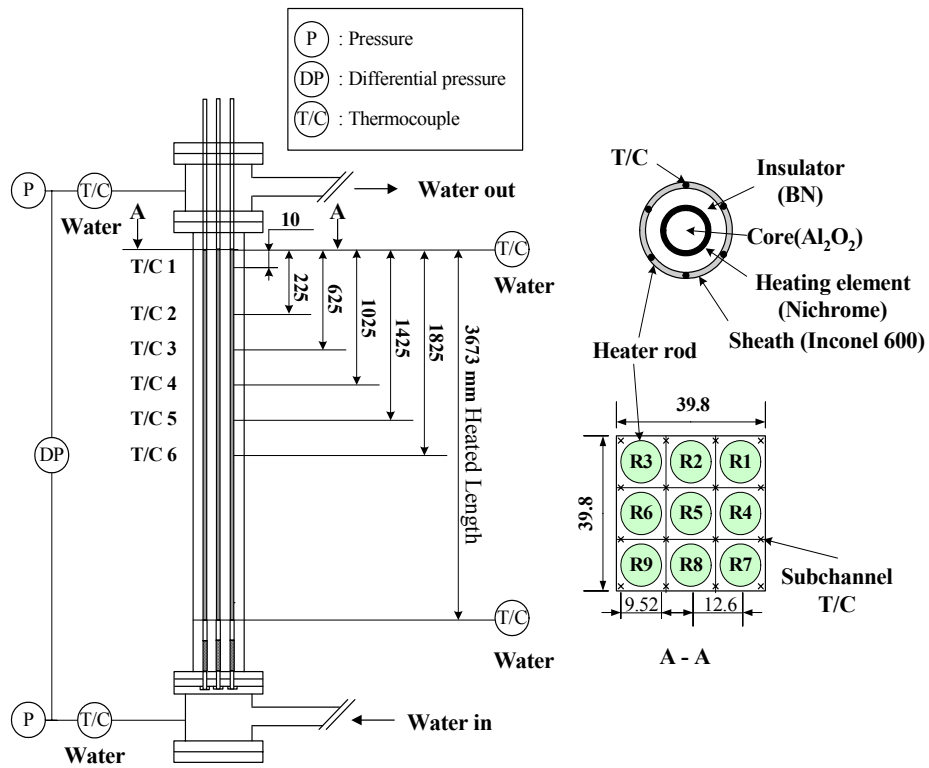


그림 2. 가열봉의 구조 및 열전대 위치

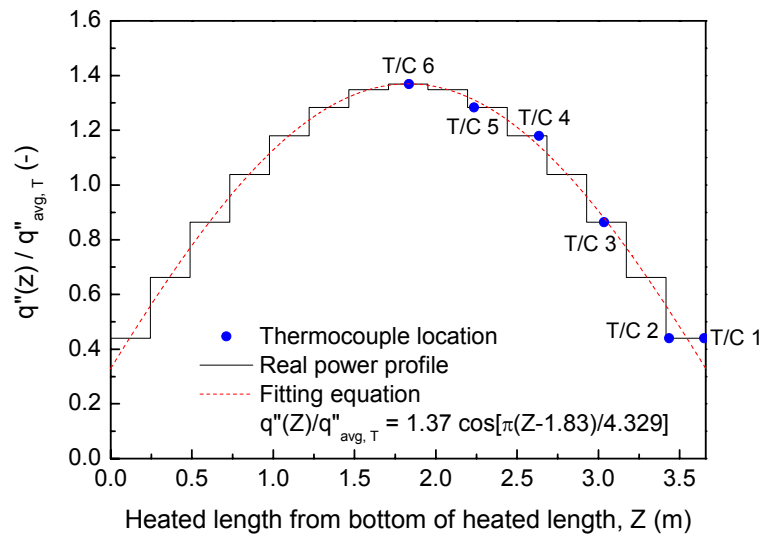
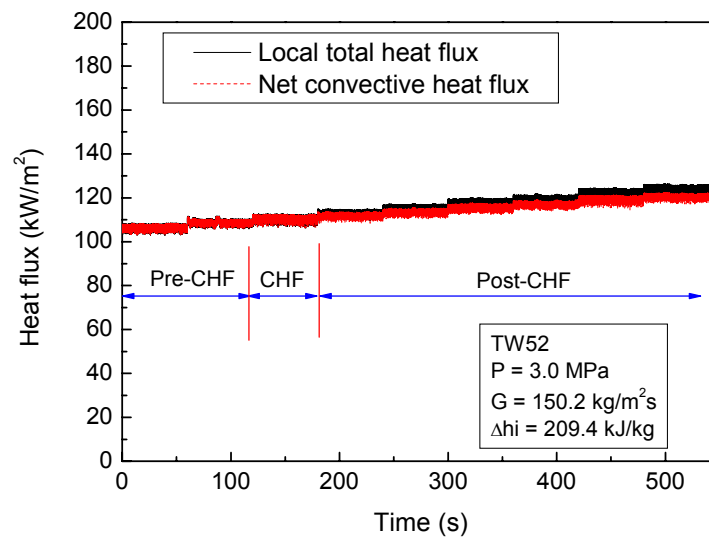
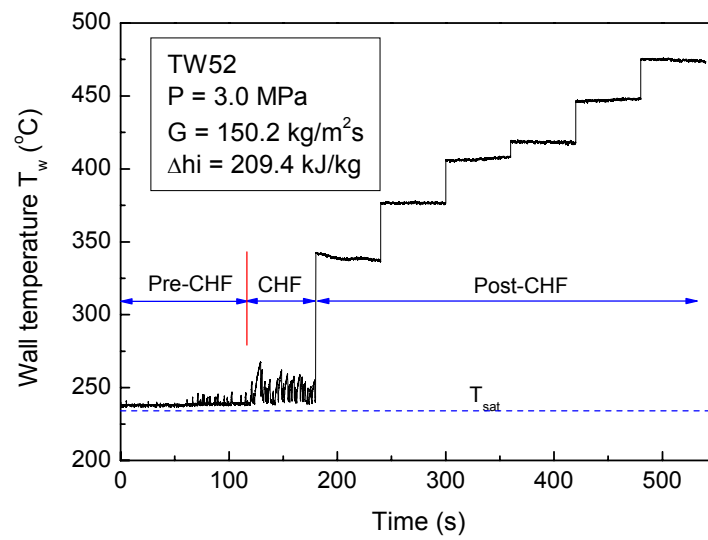


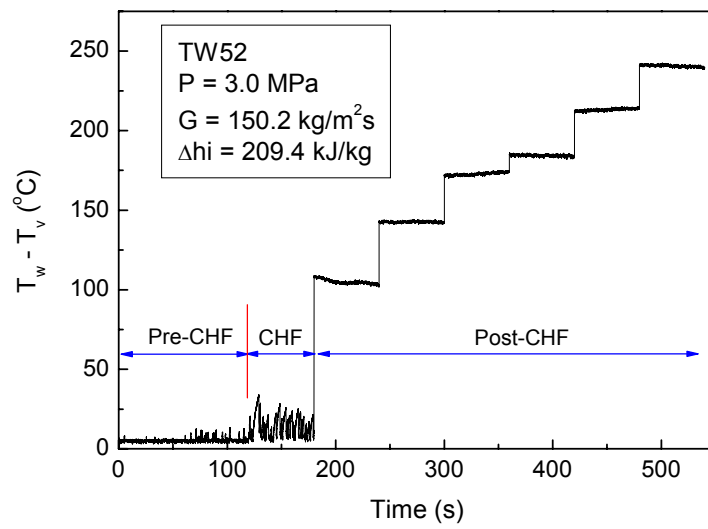
그림 3. 수직방향 열유속 분포



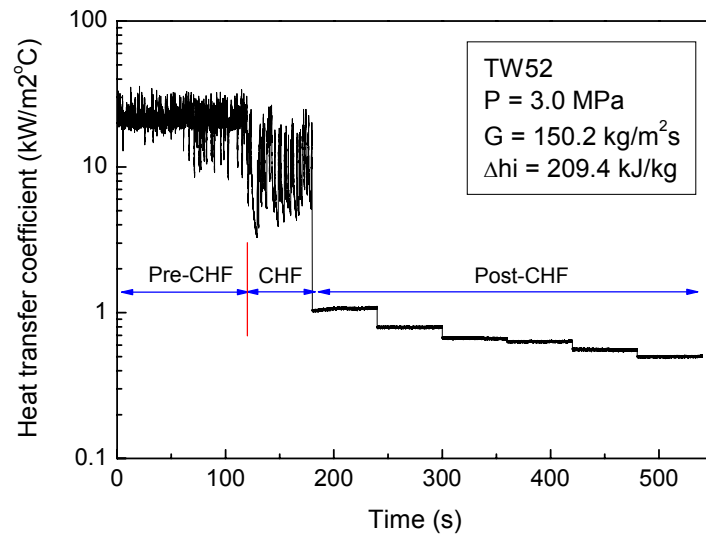
(a) 열유속



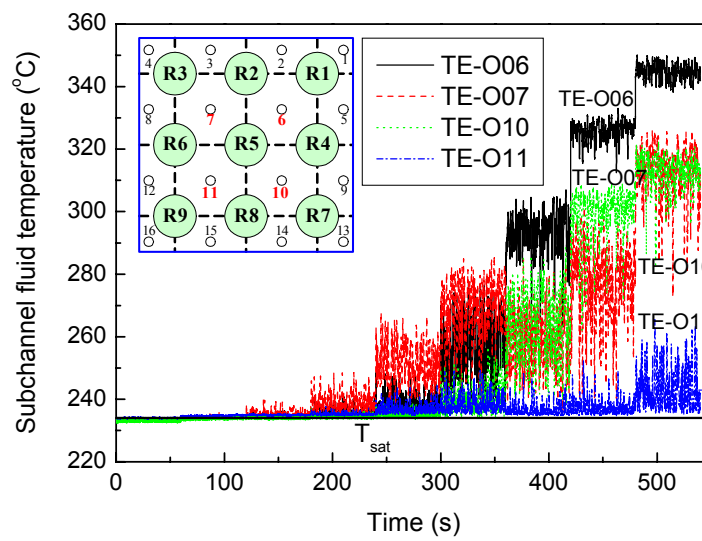
(b) 벽면온도 거동



(c) 벽면과 증기 온도차



(d) 국부 열전달계수



(e) 출구 근처 부수로 유체 온도 분포
 그림 4. 대표적인 열전달 거동

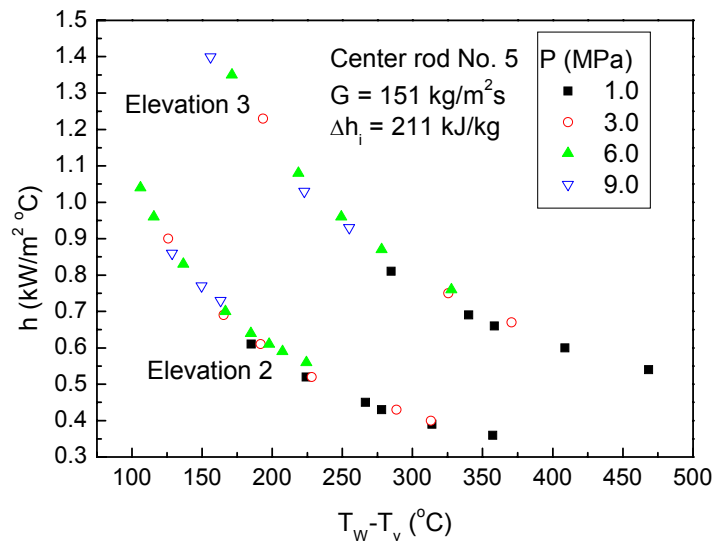


그림 5. 열전달계수에 대한 압력의 영향

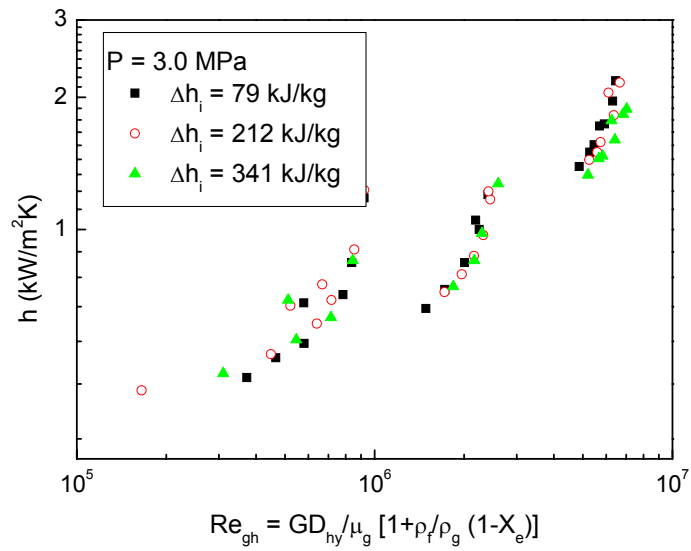


그림 6. 열전달계수에 대한 입구 과냉도의 영향

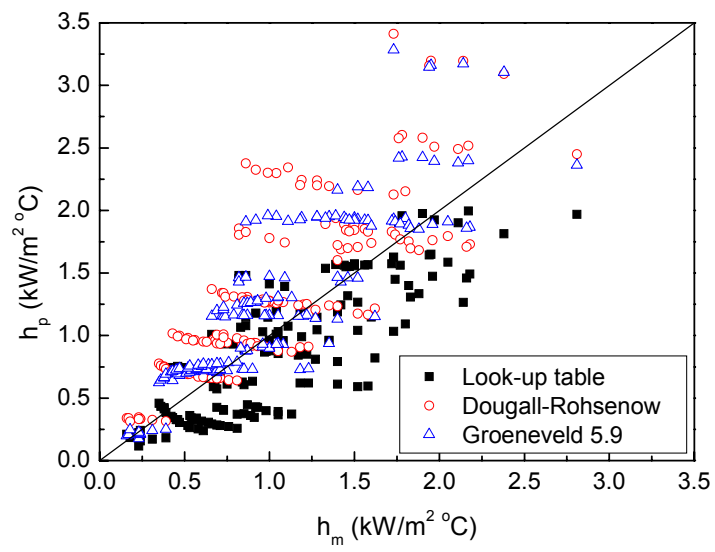


그림 7. 기존 상관식을 이용한 열전달계수 예측 결과