

좁은 사각 유로 내 하향류 유동 조건에서 임계열유속 실험 연구

김휘웅 · 윤병조[†] · 박진영 · 박종학* · 채희택* · 박 철*

부산대학교 기계공학부, *한국원자력연구원

(2015년 8월 10일 접수, 2015년 12월 28일 수정, 2015년 12월 30일 채택)

Experimental Investigation of the CHF for the Narrow Rectangular Channel in the Downward Flow

Hui Yung Kim, Byong Jo Yun[†], Jin Yeong Bak, Jong Hark Park*, Heetaek Chae*, Cheol Park*

School of Mechanical Engineering, Pusan National University,

*Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI)

(Received 28 August 2015, Revised 28 December 2015, Accepted 30 December 2015)

요 약

요르단 수출용 연구용 원자로(JRTR, Jordan Research and Training Reactor)에 사용되는 판형핵연료(Plate-type-fuel)의 부수로를 모의하는 좁은 사각 유로에서 하향류 유동 조건의 임계열유속(CHF, Critical Heat Flux) 실험 연구가 수행되었다. 실험은 연구용 원자로 인허가 요건을 만족하는 유동 조건에서 수행되었으며 크기가 다른 두 가지 시험부를 이용하였다. 두 시험부는 각각 피선몰리(Fission moly) 우라늄 타겟의 부수로와 판형핵연료의 부수로를 모의하며 모두 원형과 같은 크기로 제작되었다. 각 시험부에 대해 임계열유속 실험이 수행되었으며 이를 통해 임계열유속에 영향을 주는 변수를 분석하였다. 그리고 실험결과를 기존의 임계열유속 모델과 비교하였으며 모델의 예측 정확도를 제시하였다. 이를 통해 좁은 사각 유로 내 하향류 유동 조건에서의 임계열유속 예측에 대한 기존 모델의 적용성을 분석하였다.

주요어 : 연구용 원자로, 임계열유속, 하향류, 좁은 사각 유로

Abstract - Experimental investigation was carried out on the CHF(Critical Heat Flux) under downward flow condition in narrow rectangular channels simulating subchannel of plate-type-fuel for JRTR(Jordan Research and Training Reactor). The experiments covers the license requirement of the research reactor. Two test sections used in this study simulate full scale subchannels for fission moly uranium target and plate-type-fuel, respectively. From the experimental results, the parameters affecting on the CHF are investigated. By using experimental data, the existing CHF prediction models were evaluated. Finally, the applicability of correlations were analysed to predict CHF in the narrow rectangular channel under the downward flow condition.

Key words : research reactor, critical heat flux, downward flow, narrow rectangular channel

1. 서 론

요르단 수출용 연구용 원자로는 노심 냉각효율의

증대와 고밀도 중성자속을 얻기 위해 그림 1과 같은 판형핵연료를 채택하였다. 또한, 연구용 원자로는 수조 표면에서의 방사성 물질의 유출을 최소화하기 위해 정상상태 조건에서 하향류 강제 순환으로 운전된다. 판형핵연료를 사용하는 연구용 원자로는 봉형핵연료를 사용하는 연구용원자로와는 달리 노심에 유입되는

[†]To whom corresponding should be addressed.
School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, South Korea, 609-735
Tel : 051-510-2484 E-mail : bjjun@pusan.ac.kr

냉각수가 좁은 간극(Gap)을 가진 사각 유로를 통해 흐르게 된다. 이 때, 유로 내에서 발생하는 열수력적 현상과 특성이 봉형핵연료와는 다를 것으로 예측된다. 이에 따라 봉형핵연료의 부수로에 대해 개발된 기존 열수력 현상 예측 모델을 판형핵연료의 열수력적 안전성 평가에 직접 적용하기에는 많은 불확실성이 존재한다. 따라서 판형핵연료의 부수로와 같은 좁은 간극을 가진 사각 유로에서의 열수력적 거동에 대한 연구의 필요성이 크다.

일반적으로 연구용 원자로 노심 설계 시에 고려되어야 하는 주요 열수력 현상으로는 핵비등개시점(ONB, Onset of Nucleate Boiling)과 임계열유속(CHF, Critical Heat Flux) 등이 있다. 이 중에서 임계열유속은 원자로 안전과 직접 관련된 중요한 현상이다. 핵연료 표면에서의 임계열유속이 발생하면 핵연료 표면 온도가 급격히 상승하여 결국 핵연료의 손상을 초래한다. 이러한 임계열유속 현상에 대한 대부분의 기존 연구는 원형관에서 상향류 유동 조건을 대상으로 수행되었다. 반면 좁은 간극을 갖는 판형핵연료 부수로에 대한 연구는 국내에서 본격적으로 수행된 바가 없으며 이에 대한 열수력 연구 및 실험 데이터베이스가 부족한 실정이다. 따라서 하향류 유동이 형성되는 판형핵연료 부수로에서 임계열유속 실험데이터와 정확한 예측 모델이 필요하다.

본 연구에서는 요르단 수출용 연구용 원자로에서 사용하게 될 판형핵연료를 대상으로 임계열유속 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 임계열유속 실험은 피션몰리(Fission moly) 우라늄 타겟의 부수로와

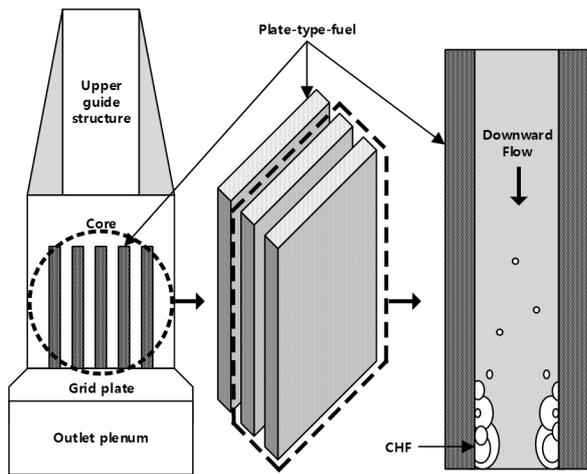


Fig. 1. Schematic of CHF phenomena in subchannel of plate-type-fuel for research reactor

판형핵연료(Plate-type-fuel)의 부수를 각각 모의한 두 가지 종류의 좁은 간극을 가진 사각 유로에서 수행되었다. 또한, 사각 유로의 임계열유속 예측에 사용될 수 있는 기존 상관식을 조사하고 본 실험을 통해 얻은 실험데이터를 이용하여 평가하였다.

2. 판형핵연료 임계열유속 실험

2-1. 실험장치

본 연구에서 사용된 임계열유속 실험장치는 냉각재가 순환하는 주유로와 임계열유속 현상을 모의하는 시험부로 구성된다. 그림 2는 판형핵연료 임계열유속 실험장치의 개념도를 나타낸다. 실험장치의 주유로는 수조(Water tank), 펌프(Pump), 예열기(Preheater), 기수분리기(Separator), 응축기(Condenser), 열교환기(Heat exchanger), 가압기(Pressurizer), 제어 밸브(Control valve) 그리고 계측기로 구성되었다. 주유로 내 펌프, 예열기, 가압기, 제어 밸브는 시험부 입구의 유동 조건을 일정하게 유지하는 역할을 한다. 기수분리기는 시험부에서 발생한 물과 증기 혼합물을 물과 증기로 각각 분리한다. 분리된 증기는 응축기를 통해 응축되며 응축수와 분리된 물은 열교환기를 통해 냉각되어 재순환된다. 시험부의 압력은 가압기 및 제어 밸브를 이용한 증기의 응축량 조절을 통해 제어된다. 실험장치는 주유로에 설치된 밸브를 통해 하향류 뿐만 아니라 상향류에서도 운전이 가능하도록 설계되었다.

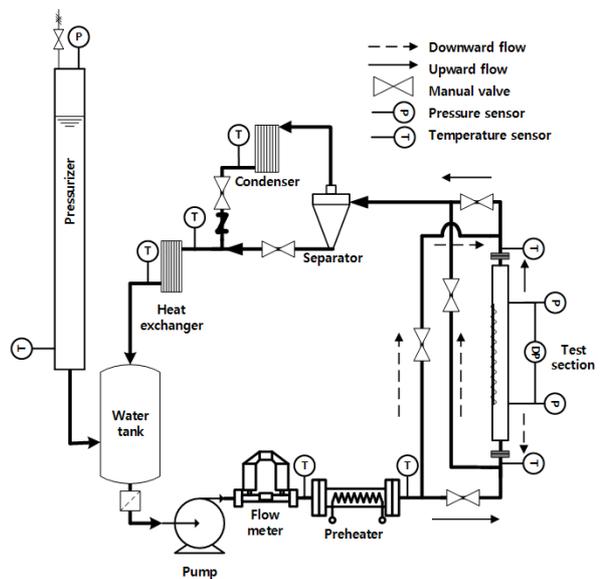


Fig. 2. Flow diagram of CHF test facility

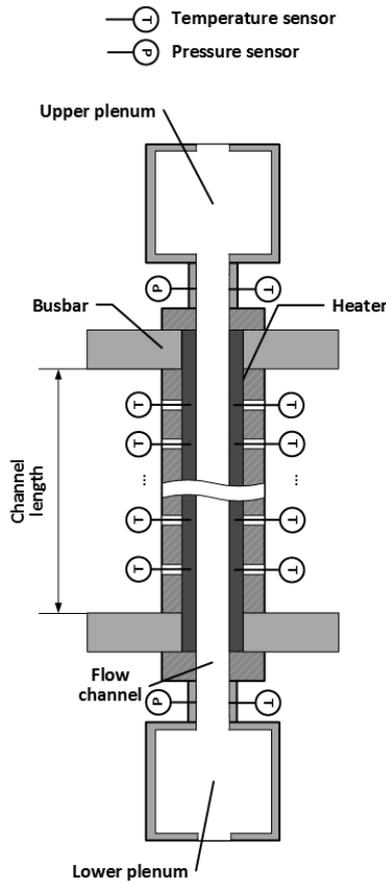


Fig. 3. Schematics of test section

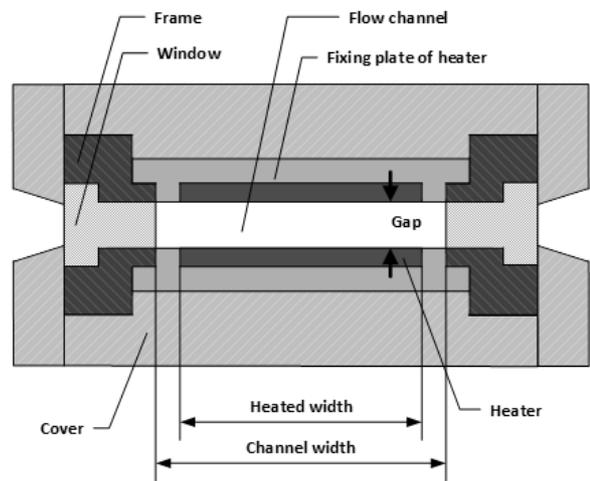


Fig. 4. Detailed cross-sectional view of test section

Table 1. Test section geometry

Test section	Type1	Type2
Channel width (L_w , mm)	44.6	66.6
Heated width (L_h , mm)	40.0	62.0
Gap (L_g , mm)	2.58	2.35
Channel length (L , mm)	182	640

Table 2. Major measurement instruments with uncertainties

Parameter	Measurement instrument	Measurement uncertainty
Mass flow rate	Coriolis mass flow meter	0.25 g/s
Coolant & wall temperature	K-type thermocouple	0.66 K for coolant 1.89 K for wall
Pressure	Pressure transmitter	0.8 kPa
Differential pressure	Pressure transmitter	0.8 kPa
Power	Power meter & Shunt	0.57 kW

임계열유속 실험에서 사용된 시험부는 두 가지 형태이며, 같은 기하학적 구조로 설계되었다. Type1과 Type2의 시험부는 각각 연구용 원자로의 피선물리 우려늄 타겟과 연구용 원자로 정상상태 운전 시에 사용하는 판형핵연료의 부수로를 대상으로 제작되었다. 그림 3은 시험부의 개념도를 나타낸다. 시험부 히터(Heater)는 열변형률이 작은 Invar로 제작되었으며 직접 가열 방식으로 작동된다. 그리고 히터는 좁은 간격을

가진 사각 유로에서 양면 가열을 모의할 수 있도록 설

치되었다. 냉각재와 접촉하지 않는 히터 후면에는 유로 길이 방향을 따라가며 K형 열전대가 13개가 장착되었으며 CHF 판정을 위한 히터 후면 온도를 측정한다.

그림 4는 시험부의 상세한 단면 형상을 보여주며 각 시험부의 기하학적 치수는 표 1과 같다. 시험부의 몸체(Frame) 측면에는 유로 내부의 유동을 관찰하기 위해 폴리카보네이트로 제작된 투시창(Window)이 설치되었다. 히터는 열경화성 수지 인 베이클라이트로

제작된 히터 고정용 후판(Fixing plate of heater)에 고온용 실리콘으로 접착되었다. 히터 고정용 후판과 투시창을 고정하기 위해 몸체 외부에 커버(Cover)가 장착되었으며 커버는 기계적 강도와 강성이 큰 PEEK로 제작되었다.

또한, 시험부 내부로 공급되는 냉각재의 질량유량은 코리올리스 유량계를 사용하여 측정되었다. 시험부의 입·출구에서의 압력과 온도는 각각 압력 트랜스미터와 K형 열전대를 통해 측정되었다. 히터의 열유속은 두 개의 히터에 공급되는 전력을 각각 측정하여 얻어지며 전력은 전력계와 분류기를 사용하여 측정되었다. 실험에 사용된 계측기의 종류와 측정 불확실도는 표 2와 같다.

2-2. 실험 수행 및 실험 조건

실험장치는 직접 가열 방식의 히터를 사용하므로 통전을 방지하기 위해 냉각재로 초순수(Deionized water)를 사용하였다. 실험은 다음과 같은 과정으로 진행되었다. 우선, 실험장치에 냉각재를 충수한 뒤 비응축성 기체는 탈기 운전을 통해 제거한다. 냉각재 준비가 완료된 후 주유로를 조작하여 실험을 위한 유량, 입구 냉각재 온도, 출구 압력 조건을 설정한다. 이후, 시험부의 히터를 가동하며 실험은 임계열유속이 감지될 때까지 시험부 히터의 출력을 단계적으로 상승시켜 진행된다. 임계열유속은 히터 후면의 온도와 유로 내부의 화상 판독을 통해 감지하였다.

전자는 히터 온도가 설정값 이상의 고온 값에 도달할 경우, 후자는 금속의 온도 상승에 따른 발광을 화상으로 포착한 경우 임계열유속을 감지한다. 히터 후면 온도 측정을 통한 감지 방법은 열전대가 설치된 지점에서는 감지가 빠르나 설치되지 않은 지점에서는 감지가 느리다. 반면에 화상 판독을 이용한 방법은 임계열유속 감지 범위가 넓어 열전대가 설치되지 않은 곳에서 임계열유속 발생을 감지할 수 있으나 화상 처리로 인해 반응 속도가 느린 단점이 있다. 방법별로 위와 같은 장단점이 존재하며 서로의 단점을 보완하고자 두 가지 방법을 동시에 사용하였다.

열출력 측정은 임계열유속의 정확도에 직접 영향을 미치기 때문에 실험 수행 시에 정밀하게 이루어져야 한다. 일반적으로 임계열유속이 발생하게 되면 가열면의 급격한 온도 상승으로 히터의 저항이 증가하여 이에 따라 열출력이 감소하게 된다. 이러한 이유로 인해 임계열유속이 발생하기 직전의 정상상태 데이터를

Table 3. Test conditions

Flow direction	Downward flow
Heat input (kW)	9 ~ 190
Heat flux (kW/m ²)	538 ~ 4026
Mass flux (kg/m ² s)	91 ~ 2739
Inlet coolant temperature (°C)	37 ~ 80
Outlet pressure (kPa)	120 ~ 224

임계열유속 데이터로 판정하였다.

표 3은 본 연구의 실험 조건을 나타낸다. 임계열유속에 영향을 미치는 주요 유동 변수는 유동 방향(Flow direction), 질량유속(Mass flux), 입구 냉각재 온도(Inlet coolant temperature) 그리고 출구 압력(Outlet pressure)이다. 실험에서는 연구용 원자로 인허가 요건을 참고하여 실험의 유동 조건을 결정하였다.

3. 선행연구 고찰

3-1. Kaminaga 등의 상관식(1998)[1][2][3]

Kaminaga 등은 임계열유속 발생 메커니즘을 질량유속 및 CCFL 조건, 정상상태 유동 조건 등에 따라 세 가지 영역으로 나누어 임계열유속을 예측할 수 있는 상관식을 제시하였다. 영역별로 임계열유속은 식 (1) - (4)로 예측되며 영역의 경계는 식 (5) - (7)의 무차원화 된 질량유속으로 결정된다. 이 중에서 낮은 질량유속 및 하향류에서의 임계열유속 상관식은 Mishima 등[4][5]의 연구 내용이다. 개발된 상관식은 좁은 간극을 가진 사각유로에서의 상향류 및 하향류 유동 조건에서 사용가능하다.

$$q_{CHF,1}^* = 0.005 |G^*|^{0.611} \left(1 + \frac{5000}{|G^*|} \Delta T_{SUB,o}^* \right) \quad \text{for } G^* > G_1^* \quad (1)$$

$$q_{CHF,1}^* = 0.005 |G^*|^{0.611} \quad \text{for upward flow} \quad (2)$$

$$q_{CHF,2}^* = \frac{A}{A_H} \Delta T_{SUB,in}^* |G^*| \quad \text{for downward flow} \quad (3)$$

[4][5]

$$q_{CHF,3}^* = 0.7 \frac{\sqrt{L_w/\lambda}}{\{1 + (\rho_g/\rho_l)^{1/4}\}} (1 + 3\Delta T_{SUB,in}^*) \quad [4]$$

$$G_1^* = \left(\frac{0.005}{\frac{A}{A_H} \Delta T_{SUB,in}^*} \right)^{\frac{1}{0.389}} \quad [5]$$

$$G_2^* = \left[140 \frac{A}{A_H} \frac{\sqrt{L_w/\lambda}}{\{1 + (\rho_g/\rho_l)^{1/4}\}^2} (1 + 3\Delta T_{SUB,in}^*) \right]^{\frac{1}{0.611}} \quad [6]$$

$$G_3^* = 0.7 \frac{\sqrt{L_w/\lambda}}{\{1 + (\rho_g/\rho_l)^{1/4}\}^2} \frac{1 + 3\Delta T_{SUB,in}^*}{\Delta T_{SUB,in}^*} \quad [7]$$

Kaminaga 등이 사용한 데이터 중 연구용 원자로 판형핵연료에 적용할 수 있는 실험데이터의 질량유속 범위는 0 - 2440kg/m²s이다. 이는 요르단 수출용 연구용 원자로의 판형핵연료의 인허가 요건보다 낮은 질량유속에 해당한다.

3-2. Kureta와 Akimoto의 상관식(2002)[6]

Kureta와 Akimoto는 좁은 간극을 가진 사각 유로에서 임계열유속 연구를 수행하였다. 임계열유속이 발생할 때의 열역학적 건도를 임계 건도(Critical quality)로 정의하였으며 두 변수의 관계를 정량화하기 위해 무차원 임계열유속 변수 K⁺를 도입하였다. 상관식은 K⁺ 및 이용 가능한 임계열유속 실험데이터의 곡선 적합(Curve fitting)을 통해 개발되었다. Kureta와 Akimoto가 제시한 상관식은 식 (10)과 같으며 실험데이터와 예측값을 비교한 결과, 45%의 표준편차를 가진다고 보고하였다.

$$K^+ \equiv \left(\frac{q_{CHF}}{Gh_{fg}} \right) \left(\frac{G\nu}{\sigma} \right)^{0.5} = C_1(x_{ex,CHF} + C_2), \quad [10]$$

$$C_1 = \left[6.9 \left(\frac{P_h}{P_w} \right)^2 - 10 \left(\frac{P_h}{P_w} \right) + 2 \right] \times 10^{-3},$$

$$C_2 = -0.75 \left(\frac{P_h}{P_w} \right)^2 + 0.9 \left(\frac{P_h}{P_w} \right) - 0.28$$

3-3. Hall과 Mudawar의 상관식(2000)[7]

Hall과 Mudawar는 원형관에서 상향류 과냉 유동 조건의 임계열유속 상관식을 제시하였다. 제시된 상관식은 과냉 유동 조건에서 수행된 원형관 실험인 PU-BTPFL(Purdue University-Boiling and Two-Phase Flow Laboratory) 데이터베이스를 기초로 하고 있다. 상관식은 각각 출구 유동 조건과 입구 유동 조건을 고려하여 다음의 두 가지 형태로 개발되었다.

$$\frac{q_{CHF}}{Gh_{fg,o}} = C_1 \left(\frac{G^2 D_h}{\rho_l \sigma} \right)^{C_2} (\rho_l/\rho_g)^{C_3} [1 - C_4 (\rho_l/\rho_g)^{C_5} X_o] \quad [8]$$

for outlet condition

$$\frac{q_{CHF}}{Gh_{fg,o}} = \frac{C_1 \left(\frac{G^2 D_h}{\rho_l \sigma} \right)^{C_2} (\rho_l/\rho_g)^{C_3} [1 - C_4 (\rho_l/\rho_g)^{C_5} X_i^*]}{1 + 4C_1 C_4 \left(\frac{G^2 D_h}{\rho_l \sigma} \right)^{C_2} (\rho_l/\rho_g)^{C_3 + C_5} (L/D_h)}$$

for inlet condition

$$X_i^* = \frac{h_i - h_{f,o}}{h_{fg,o}}, \quad C_1 = 0.0722, \quad C_2 = -0.312, \\ C_3 = -0.644, \quad C_4 = 0.900, \quad C_5 = 0.724$$

상기 상관식은 수력학적 지름(Hydraulic diameter), 질량유속, 압력, 열역학적 건도(Thermodynamic quality)를 통해 임계열유속을 예측한다. 저자는 과냉 비등의 실험데이터와 예측값을 비교한 결과, 출구 유동 조건의 상관식은 -2.1%의 평균 오차와 31.6%의 RMS 오차를 나타내며 입구 유동 조건의 상관식은 -2.0%의 평균 오차와 14.3%의 RMS 오차를 나타낸다고 보고하였다.

3-4. CHF look-up table(2007)[8]

Groeneveld 등은 임계열유속을 예측하기 위해 8 mm 원형관의 데이터로 정규화된 실험데이터 बैं크를 제시하였다. CHF look-up table은 다른 임계열유속 예측 방법보다 사용하기 쉬우며 방대한 실험데이터를 기반으로 하여 적용범위가 넓은 장점이 있다. CHF look-up table은 8 mm 원형관에 대해서는 식 (11)과 같이 수력학적 지름, 압력, 질량유속, 열역학적 건도를 직접 대입하여 임계열유속을 예측할 수 있다. 적용 대상의 수력학적 지름이 8 mm와 다른 경우는 식 (12)를 통해 임계열유속을 예측한다.

$$q_{CHF} = f(D_h, p, G, x_{eq}) \quad (11)$$

$$q_{CHF} = f(8 \text{ mm}, p, G, x_{eq}) \left(\frac{D_h}{8 \text{ mm}} \right)^{-1/2} \quad (12)$$

$$x_{eq} = 4 \frac{q_{CHF}}{G h_{fg}} \frac{L}{D_h} - \frac{\Delta h_i}{h_{fg}}$$

CHF look-up table을 통해 임계열유속을 예측하는 방법은 두 가지로 직접 대입법(DSM, Direct Substitution Method)과 열평형법(HBM, Heat Balance Method)이다. 저자는 과냉 비등 조건에서 직접 대입법의 RMS 오차는 14.74%, 열평형법의 RMS 오차는 7.08% 이라 보고하였다.

4. 실험 결과 및 상관식 평가

4-1. 실험 결과

그림 5는 질량유속에 따른 임계열유속을 보여준다. 실험결과, 임계열유속은 질량유속이 증가함에 따라 증가한다. 그러나 질량유속이 약 220 kg/m²s 미만의 낮은 질량유속 조건에서는 질량유속에 관계없이 일정한 임계열유속 값이 나타나는데 이는 Mishima[4][5]와 Kaminaga 등[1]이 언급한 최소 임계열유속과 같다. 또한, 그림에서와같이 임계열유속은 시험부의 종류에 따라서도 달라진다. 즉, 유로 간극에 대한 유로 길이의 비(L/L_g)가 큰 시험부(Type2)에서는 작은 시험부(Type1)에 비해 임계열유속이 낮다. 그 이유는 다음과 같다. 유로 간극에 대한 유로 길이의 비가 크면 같은 질량유속과 열유속 조건에서 유체로의 열전달량이 크

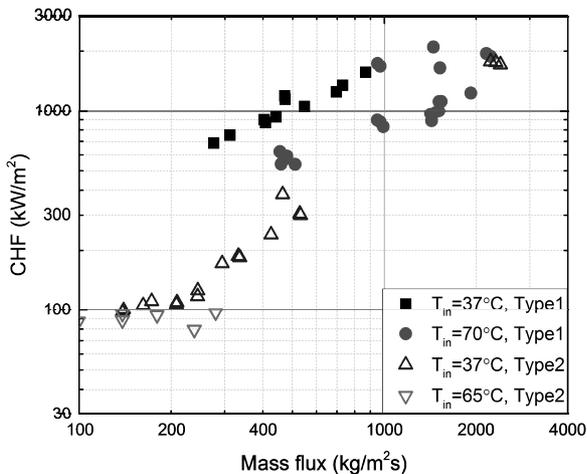


Fig. 5. CHF according to the mass flux

다. 이로 인해 히터 후단에서의 냉각재 온도가 높아지게 되어 임계열유속이 발생하기 쉽기 때문이다.

앞의 결과로부터 임계열유속은 냉각재 온도에 대해 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다. 이러한 실험데이터의 경향을 자세히 분석하기 위해 그림 6에 입구 냉각재 온도에 따른 임계열유속 실험데이터를 나타내었다. 분석결과, 임계열유속은 입구 냉각재 온도가 증가함에 따라 감소한다. 즉, 입구 냉각재 온도의 증가에 따라 입구 과냉도가 낮아지게 되므로 히터 후단에서의 냉각재가 포화 시점에 도달하는 데 필요한 열유속이 감소하고 이는 결국 임계열유속이 쉽게 발생되도록 한다. 이러한 입구 과냉도에 대한 실험데이터의 경향성은 Kaminaga 등[2][3]의 연구 결과와 유사하다.

그림 7은 위와 같은 조건에서 출구 냉각재 온도에

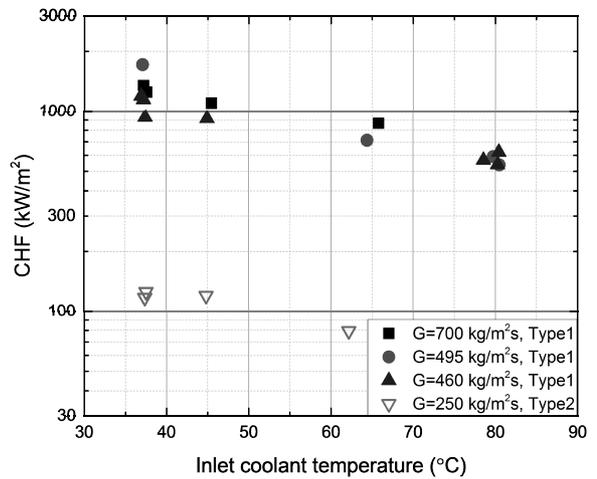


Fig. 6. CHF according to the inlet coolant temperature

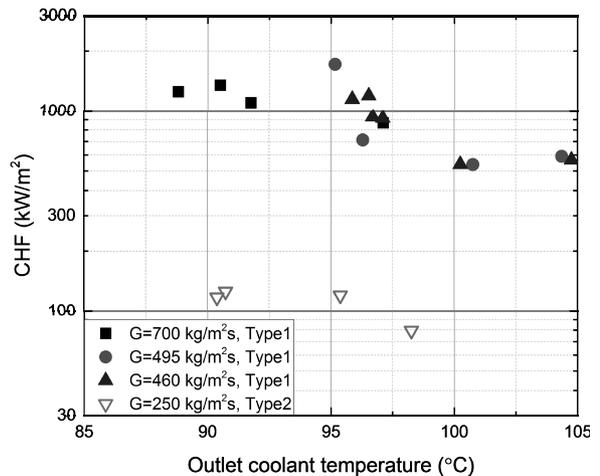


Fig. 7. CHF according to the outlet coolant temperature

따른 임계열유속을 보여준다. 분석결과, 임계열유속은 출구 냉각재 온도가 증가함에 따라 감소한다. 이는 출구 냉각재 온도가 높을수록 출구 과냉도가 낮아지게 되어 비등이 쉽게 발생되므로 임계열유속이 감소하는 것으로 판단된다. 이와 달리 Kaminaga 등[3]은 높은 질량유속 조건(810 - 10000 kg/m²s)에서만 출구 과냉도가 임계열유속에 영향을 미친다고 보고하였다. 이러한 연구결과는 본 실험 결과의 경향과 다르며 낮은 질량유속 조건에서도 임계열유속 예측 시에 출구 과냉도가 고려되어야 함을 의미한다.

4-2. 기존 상관식 평가

생산된 실험데이터를 사용하여 하향류 유동조건인 판형핵연료 부수로에 대한 기존의 임계열유속 예측 모델을 평가하였다. 평가에는 3절에서 조사된 임계열유속 예측 모델을 사용하였으며 각 예측 모델의 적용 조건은 표 4에 나타내었다.

실험데이터에 대한 임계열유속 모델의 예측 결과는 그림 8, 그림 9에 나타내었다. 그리고 유로 형상과 유동방향이 임계열유속에 미치는 영향을 고려하기 위해 각각 Kaminaga 등[1]의 구분법과 Mishima와 Nishihara[9]의 구분법을 적용하였다. 그래프에서 속이 채워진 기호(Solid symbol)는 각 연구에서 언급된 유로 형상[1]과 유동 방향[9]의 영향을 받지 않는 높은 질

량유속 조건이다. 또한, Hall과 Mudawar의 상관식을 평가 시 본 연구에서 수행된 실험의 유동 조건에서 사용이 권장되는 입구 조건 상관식을 이용하였다. 그리고 CHF look-up table을 이용한 임계열유속 예측은 열평형법으로 수행되었으며 이는 과냉 비등 영역에서 열평형법의 오차가 작기 때문이다.

Kaminaga 등[3]이 제시한 임계열유속 상관식은 본 연구의 실험 조건과 같은 유로형상 및 유동조건에 적용할 수 있다. 임계열유속 실험데이터에 대한 상관식의 예측 결과는 평균 오차 -1.41%, RMS 오차 19.85%로 가장 작은 오차를 보였다. Kureta와 Akimoto[6]의 상관식은 사각 유로의 상향류 유동조건에서 적용할 수 있는 상관식이며 임계열유속 실험데이터보다 높은 예측값을 나타낸다. 이러한 이유는 Kureta와 Akimoto 상관식이 단면 가열 조건의 임계열유속 데이터를 기반으로 개발되었다는 점과 접수길이에 대한 가열길이의 비(P_h/P_w)가 양면 가열조건과 원형관 대비 절반으로서 유체의 열전달 조건이 다르기 때문이다. Hall과 Mudawar[7]의 상관식은 그림 8과 그림 9에서와같이 Kaminaga 상관식 다음으로 예측 정확도가 높다. 또한 Hall과 Mudawar의 상관식은 기존의 Kaminaga 등과 Mishima와 Nishihara의 연구결과와는 달리 유로 형상과 유동 방향 조건이 실험과 차이가 있음에도 불구하고 실험데이터를 잘 예측한다. CHF look-up ta-

Table 4. Applicable conditions of CHF prediction models

CHF prediction model	Channel geometry	Flow direction
Kaminaga et al. correlation[3]	Narrow rectangular channel	Downward flow & Upward flow
Hall and Mudawar correlation[6]	Tube	Upward flow
Kureta and Akimoto correlation[7]	Narrow rectangular channel	Upward flow
CHF Look-up table[8]	Tube	Upward flow

Table 5. Error statistics of CHF prediction models

CHF prediction model	Avg. error	RMS error
Kaminaga et al. correlation[3]	-1.41%	19.85%
Hall and Mudawar correlation[6]	-4.61%	29.18%
Kureta and Akimoto correlation[7]	26.90%	43.39%
CHF Look-up table[8]	36.21%	56.49%

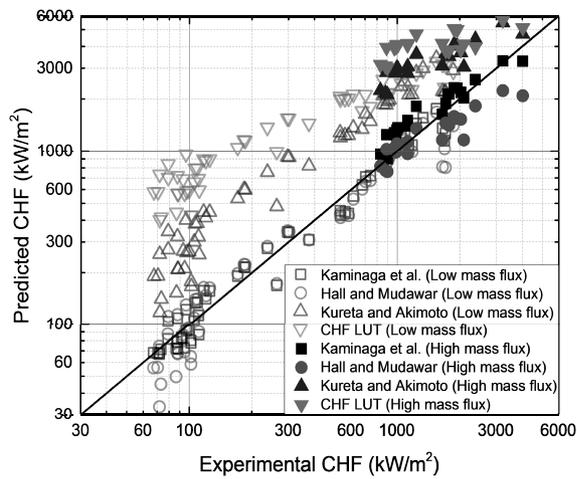


Fig. 8. Comparison of CHF prediction against present experimental data (categorized by Mishima and Nishihara classification[9])

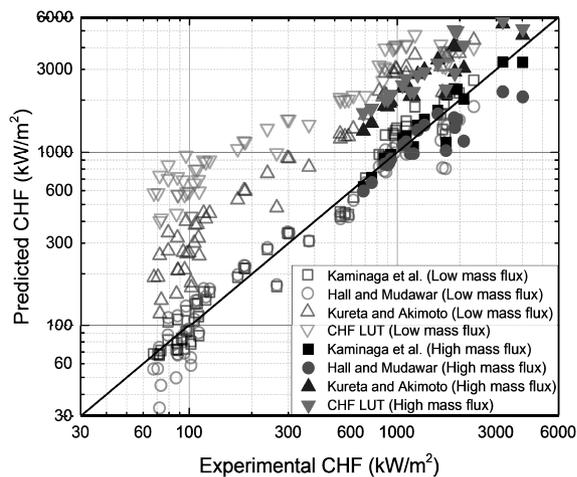


Fig. 9. Comparison of CHF prediction against present experimental data (categorized by Kaminaga et al. classification[1])

ble[8]을 이용한 예측 방법은 원형관의 상향류 유동 조건에서 적용가능하며 유사한 적용 범위를 가진 Hall 과 Mudawar의 상관식과는 다르게 본 임계열유속 실험데이터의 예측능력이 떨어진다.

각 임계열유속 예측 모델의 실험데이터 예측에 대한 오차는 표 5에 나타내었다. 위에서 언급된 예측 모델 중, Kaminaga 등이 제시한 임계열유속 상관식이 가장 높은 정확도를 보였으며, CHF look-up table은 실험데이터를 예측하지 못하였다.

5. 결론

본 연구에서는 요르단 수출용 연구용 원자로에 사용되는 관형핵연료 부수로를 모의하는 좁은 간극을 가진 사각유로에서 임계열유속 실험을 수행하였다. 실험장치는 요르단 수출용 연구용 원자로 인허가 조건의 유동을 구현할 수 있도록 설계되었다. 실험은 두 가지 시험부를 이용하여 수행되었다. 두 시험부 모두 원형과 같은 크기로 제작되었으며 각각 연구용 원자로 피션몰리 우라늄 타겟의 부수로와 관형핵연료의 부수로를 모의한다. 실험 조건은 인허가 조건을 참고하여 결정되었으며 총 82개의 임계열유속 실험데이터가 생산되었다. 실험결과, 임계열유속은 질량유속이 증가함에 따라 증가하며, 입구 및 출구 냉각재 온도가 증가함에 따라 감소하는 것을 보였다. 실험결과를 기존의 임계열유속 모델과 비교하였으며 이를 통해 각 모델의 관형핵연료 임계열유속 예측에 대한 적용성을 분석하였다. 적용 조건이 실험 조건과 부합하는 Kaminaga 등[3]의 상관식은 생산된 임계열유속 실험데이터를 가장 잘 예측하였다. Kureta와 Akimoto[6]의 상관식은 본 실험조건과 달리 단면 가열, 상향류 유동을 목표로 개발된 상관식이며 고유속 조건에서 예측 정확도가 높았다. Hall과 Mudawar[7]의 상관식은 기존의 연구 결과와는 달리 유로 형상과 유동 방향이 차이가 있음에도 불구하고 유속과 관계없이 임계열유속 실험데이터를 잘 예측하였다. CHF look-up table[8]을 이용하여 생산된 임계열유속 실험데이터를 예측하는 경우 가장 큰 오차를 나타냈다. 위와 같은 결과로부터 관형핵연료 부수로에서 저유속 조건의 임계열유속 예측은 적용 조건이 같은 상관식을 사용해야 하며 고유속 조건에서는 적용 가능한 유로 형상과 유동 방향이 차이가 있는 상관식으로도 임계열유속 예측 가능함을 알 수 있다. 그러나 정확한 임계열유속 예측을 위해서는 유로의 기하학적 형상과 유동 방향이 임계열유속에 미치는 영향을 정량화하는 연구가 필요하다.

기호설명

A : 유로 단면적 (m^2)

A_H : 가열 단면적 (m^2)

C_p : 비열 (kJ/kgK)

D_h : 수력학적 지름 (m)

g : 중력 가속도 (m/s^2)

G : 질량유속 (kg/m^2s)

G^* : 무차원화 된 질량유속
 $(= G/\sqrt{\lambda(\rho_l-\rho_g)\rho_g g})$

h : 엔탈피 (kJ/kg)

h_{fg} : 잠열 (kJ/kg)

k : 열전도도 (W/mK)

L : 유로 길이 (m)

L_g : 사각 유로의 간극 (m)

L_h : 사각 유로의 가열 폭 (m)

L_w : 사각 유로의 폭 (m)

\dot{m} : 질량유량 (kg/s)

p : 압력 (kPa)

P_h : 가열 길이 (m)

P_w : 접수 길이 (m)

q_{CHF} : 임계열유속 (kW/m^2)

q_{CHF}^* : 무차원화 된 임계열유속
 $(= q_{CHF}/h_{fg}\sqrt{\lambda(\rho_l-\rho_g)\rho_g g})$

T : 유체 온도 (K)

ΔT_{SUB} : 과냉도 (K)

ΔT_{SUB}^* : 무차원화 된 과냉도 ($= C_p\Delta T_{SUB}/h_{fg}$)

u : 평균 유속 (m/s)

x : 건도

x_{eq} : 열역학적 건도

$x_{ex,CHF}$: 임계 건도 $(= x_{in} + \frac{4L}{D_h} \frac{q_{CHF}}{Gh_{fg}})$

Greek symbols

ν : 동점성 계수 (m^2/s)

μ : 점성 계수 ($N \cdot s/m^2$)

λ : 임계파장 ($= \{\sigma/(\rho_l-\rho_g)g\}^{1/2}$)

ρ : 밀도 (kg/m^3)

σ : 표면장력(N/m)

Subscripts

g : 기상

l : 액상

i, in : 입구

o : 출구

감사의글

본 연구는 한국연구재단 원자력연구개발 사업(NRF-2015M2B2A9029358)과 한국원자력안전위원회의 원자력 안전연구센터 사업(한국원자력안전재단 과제번호 1305011)의 지원으로 수행되었음

References

1. Sudo, Y., et al. "Experimental study of differences in DNB heat flux between upflow and downflow in vertical rectangular channel.", Journal of Nuclear Science and Technology, 1985, 22.8, 604-618.
2. Sudo, Y., and Kaminaga, M., "A new CHF correlation scheme proposed for vertical rectangular channels heated from both sides in nuclear research reactors.", Journal of heat transfer, 1993, 115.2, 426-434.
3. Kaminaga, M., Yamamoto, K., and Sudo, Y., "Improvement of critical heat flux correlation for research reactors using plate-type fuel.", Journal of Nuclear Science and Technology, 1998, 35.12, 943-951.
4. Mishima, K., "Boiling burnout at low flow rate and low pressure conditions.", Dissertation Thesis, Kyoto Univ., 1984.
5. Mishima, K., et al. "CHF correlations related to the core cooling of a research reactor", Proc. Int. Mtg on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, 1984.
6. Kureta, M., and H. Akimoto. "Critical heat flux correlation for subcooled boiling flow in narrow channels." International journal of heat and mass transfer, 2002, 45.20, 4107-4115.
7. Hall, David D., and Issam Mudawar. "Critical heat

- flux (CHF) for water flow in tubes—II.: Subcooled CHF correlations." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43.14, 2605-2640.
8. Groeneveld, D. C., et al. "The 2006 CHF look-up table." *Nuclear Engineering and Design*, 2007, 237.15, 1909-1922.
 9. Mishima Kaichiro, and Hideaki Nishihara. "Effect of channel geometry on critical heat flux for low pressure water." *International journal of heat and mass transfer*, 1987, 30.6, 1169-1182.