

SAMRT-P 노심에 대한 CHF 상관식 체계 개발

Development of a CHF Correlation System for SMART-P Core

황대현, 서경원, 이정찬, 장문희

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

SMART-P 노심 조건에 적용하기 위한 CHF 상관식 체계를 개발하였다. SMART-P 노심은 기존 가압 경수로보다 낮은 출력 밀도와 저유속 조건에서 운전되며, 핵연료 집합체는 조밀한 비정방형 연료봉 배열로 구성되어 있다. CHF 상관식 개발을 위하여 여러 가지 형태의 19-봉 및 55-봉 실험집합체에 대한 CHF 실험 자료를 생산하였다. 실험집합체 내부의 국부 물성치는 MATRA-SR 부수로 해석 코드를 사용하여 계산하였으며, MATRA-SR 코드의 입력으로 사용되는 부수로 간의 난류혼합인자는 19-봉 집합체에 대한 열 혼합 실험 자료 분석을 통하여 0.05로 평가되었다. 고온 부수로의 엔탈피 상승을 변수로 사용하는 국부조건 개념의 CHF 상관식을 개발하였으며 실험자료를 분석한 결과 상관식 한계 CHF는 1.15로 평가되었다.

Abstract

A CHF correlation system has been developed for the SMART-P core that is designed to be operated at low power density and low coolant mass velocity in comparison with existing PWRs. The fuel assembly consists of tightly spaced non-square lattice rod arrays. Manifold test bundles including 19-rods or 55-rods were employed for the generation of CHF data. The local thermal hydraulic conditions in the test bundles were calculated by the subchannel analysis code MATRA-SR. The turbulent mixing parameter of the test bundle was evaluated as 0.05 from the analysis of the thermal mixing test data. Based on the local conditions calculated by MATRA-SR, SSF-2 CHF correlation has

been developed with the 95/95 CHF tolerance limit of 1.15.

1. 서론

SMART-P 노심의 주요 열수력 설계 변수들을 기존 경수로 노심 조건과 비교하여 표 1에 제시하였다. SMART-P 노심의 운전 압력 및 노심 냉각재 온도 상승은 가압경수로와 유사하다. SMART-P 노심의 입구 냉각재 온도는 기존 경수로보다 낮는데, 이로 인하여 열적 안전성은 향상되었으나 원자로의 열효율 관점에서는 가압경수로보다 불리한 면이 있다. 연료봉 평균 선출력은 경수로의 약 30% 정도로서 금속 연료를 사용하는 SMART-P 노심이 연료 온도 관점에서 충분한 여유도를 가질 수 있도록 해준다.

표 1. SMART-P 노심 조건 비교

	SMART-P	PWR (Kori-3)
P_{th} , MW _{th}	65	2775
\dot{m} , kg/s	350	13746
T_{in} , °C	35	37
P_{in} , bar	147	155
q_{max} , W/cm	295	157
q_{avg} , W/cm	15843	41448
T_{out} , °C	50	178
q''_{max} , W/cm ²	275	291
q''_{avg} , W/cm ²	23	60
L , m	0.8	3.65
\dot{m}'' , kg/m ² /s	1100	3300
P_{CHF} , bar	0.15	1.5

SMART-P 노심을 구성하고있는 원통형 집합체는 매우 조밀한 삼각형 격자 구조를 갖는 SSF(Self-sustained Square Finned) 핵연료봉 다발로 이루어져있다. SSF 연료는 단면 형태가 사각형이며 축방향으로 형성되는 나선형 핀 때문에 연료봉 간의 갭이 유지된다. 핵연료 집합체의 수력 직경은 약 3 mm 정도로서 매우 작으며, 따라서 집합체의 압력손실 계수는 혼합날개 지지격자가 부착되어 있는 경수로 핵연료 집합체의 압력 손실 계수보다 더 크다. 그러나 질량 유속이 경수로의 1/3 정도이며 연료 길이가 짧으므로 노심 압력 강하는 경수로 노심의 약 10% 정도로 나타난다.

SMART-P 노심의 CHF 여유도를 기존 경수로 노심과 비교해보면 노심 입구 온도, 평균 열속, 그리고 노심 길이의 감소로 인하여 열적 여유도가 증가하지만, 낮

은 질량 유속으로 인하여 열적 여유도는 감소하게 된다. 특히 집합체의 CHF 특성은 채널 기하 형태에 의해 크게 달라질 수 있으므로 SSF 연료 집합체에서의 CHF 특성은 기존 경수로용 연료 집합체와 다를 것으로 예상된다. 본 연구에서는 CHF 실험 및 상관식 체계 개발을 통하여 SMART-P 노심에 대한 국부조건 개념의 CHF 해석 체계를 개발하였다.

2. CHF 실험

2.1 실험 개요

SSF 실험 집합체를 사용한 CHF 실험은 러시아 IPPE 연구소의 실험 장치에서 수행되었다. 실험은 water-loop 과 Freon-loop에서 수행되었으며, 여러 종류의 19-봉 실험집합체와 한 종류의 55-봉 집합체를 사용하여 실험 자료를 생산하였다. 19-봉 집합체의 경우 중심 연료봉 주위에 3겹의 부수로 채널이 둘러싸고 있는데 이는 가압경수로 노심의 CHF 상관식 개발에 주로 사용되고 있는 25봉 실험집합체의 경우와 유사하다. 실험 집합체의 기하 형태는 표 2에서 보듯이 가열길이의 영향, 반경방향 및 축방향 출력 분포의 영향, 비가열봉의 영향, 그리고 집합체 크기의 영향 등을 체계적으로 파악할 수 있도록 선정하였다. Freon-loop에서 수행된 실험 자료는 적절한 scaling을 통하여 water-loop 자료와 함께 사용될 수 있으나, 본 논문에서는 이에 대한 분석 결과를 기술하지 않았다.

표 2. SSF 실험집합체 특성 자료

TS name	H1W	L1W	L2W	L6W	L7W	L4W
No. heater rods	19	19	19	18	54	19
No. unheated rods	0	0	0	1	1	0
Heated length, m	0.8	0.8	0.4	0.8	0.8	0.8
Bundle hydraulic dia, mm	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
Bundle heated equi. dia., mm	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Power distribution, radial	U	NU	NU	NU	NU	U
axial	U	U	U	U	U	Cosine
Working fluid	water	water	water	water	water	water
Number of data points	55	105	60	46	46	60

(U: Uniform, NU: Non-uniform)

19봉 실험집합체의 단면 형태는 그림 1에 제시하였다. 정육각형 배열로 만든 실험집합체의 내접원 지름은 31.6 mm이다. 가열봉의 네 모퉁이에는 사각형의 핀(fin)이 부착되어 있으며, 나선형 핀의 축방향 피치는 400mm 이다. CHF 발생 조건에서는 약간의 열출력 증가에도 가열면의 온도가 급격하게 상승하는데, 가열면 온도 측정을 위하여 0.5 mm 굵기의 와이어 열전대가 사용되었다. 실험 도중 CHF로 인한

가열봉 파손을 방지하기 위하여 가열면 최대 온도를 섭씨 450도 내지 500도 이하로 제한하였다. 실험 범위는 압력이 60 ~ 180 bar, 질량 유속이 150 ~ 2000 kg/m²/s, 그리고 채널 입구에서의 냉각수 과냉도는 섭씨 10도 ~ 120도이며, 이 조건에서 측정된 CHF의 크기는 140 ~ 2500 kW/m², 임계 건도는 -0.37 ~ +0.78로 나타났다.

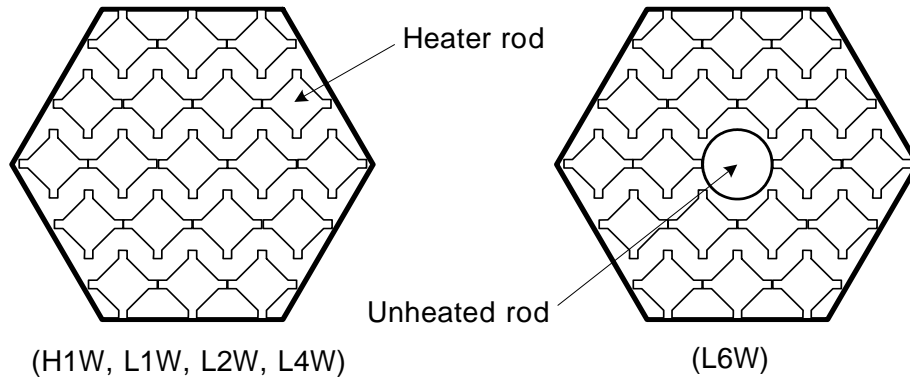


그림 1. 19-봉 SSF 실험집합체 단면 형태

2.2 SSF 집합체 실험 자료 특성

그림 2는 출력 분포가 균일한 실험집합체(H1W)에서 측정된 CHF 실험 자료를 국부 건도에 대하여 나타낸 것이다. 그림은 동일한 유속 및 압력 조건에서 국부 건도가 증가하면 CHF는 항상 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 건도가 높아질수록 그 기울기가 점차 완만해지는 일반적인 경향이 SSF 집합체 실험에서도 나타나는 것을 알 수 있다. 동일한 국부 건도 및 유속 조건에서 압력이 증가하면 CHF는 감소한다. 실험 자료에서 직접 확인되지는 않지만 동일한 유속 조건을 표시한 각각의 선분을 연장시켜보면, 낮은 건도 조건에서는 질량 유속이 증가함에 따라 CHF가 증가하지만 건도가 높아지면 그 경향이 반대로 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 3은 가열 길이의 영향을 알아보기 위하여 L1W 집합체(가열길이=0.8m)와 L2W 집합체(가열길이=0.4m)의 CHF 실험 자료를 서로 비교하여 나타낸 것이다. 입구 조건이 동일한 경우 가열 길이가 짧은 실험 집합체의 임계 건도는 가열 길이가 긴 경우보다 항상 낮으며 CHF는 더 크게 나타난다. 만일 채널의 입구 조건 영향이 CHF 발생 위치에서 나타나지 않는다면, 국부 조건이 동일하고 가열길이가 다른 두 채널의 CHF는 ‘국부조건 가설’에 따라서 동일하게 측정되어야 한다. SSF 집합체의 경우 수력 직경이 매우 작으므로 채널 입구의 영향이 CHF 발생 위치인 채널 출구에서 크게 나타나지 않을 것으로 예상된다. 이를 확인하기 위하여 가열 길

이가 짧은 L2W 실험 집합체의 CHF 측정 자료 중 입구 온도를 아래와 같이 보정하여 이를 L1W 실험 자료와 비교하였다.

$$T_{in}^{mod} = T_{in} - \frac{4\Delta Lq''}{d_{he,FA} c_p G}$$

여기서 ΔL 은 L1W와 L2W의 가열길이 차이이며, $d_{he,FA}$ 는 실험집합체의 가열직경, 그리고 T_{in}^{mod} 는 길이가 짧은 L2W 채널을 가상적으로 L1W 채널 길이만큼 늘였을 때의 입구 온도를 의미한다. 채널 입구의 영향이 없다면 L1W 자료와 수정된 L2W 자료는 서로 겹쳐 보여야 하는데, 그림 3에서 보듯이 저유속 조건에서는 거의 겹쳐 지지만 유속이 증가할수록 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 유속 증가에 따라 채널 입구의 영향이 나타나는 것으로 판단된다.

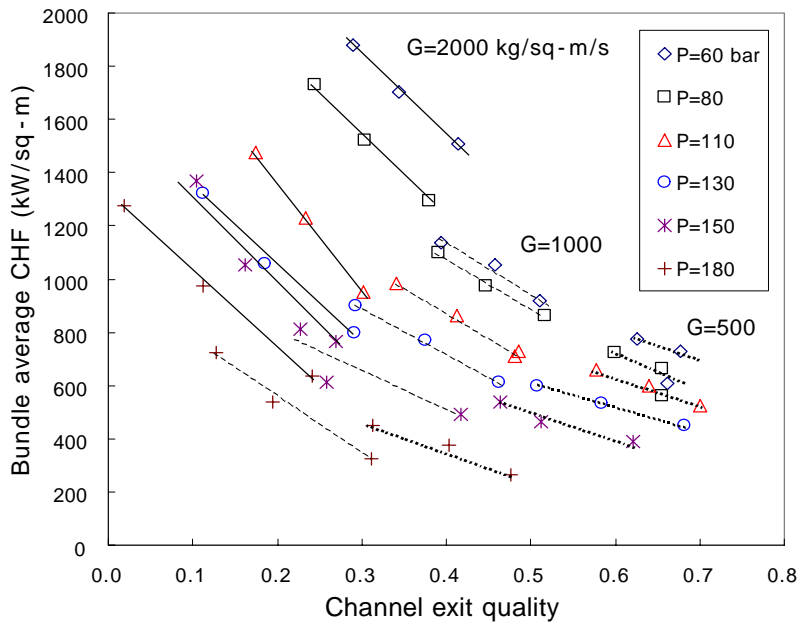


그림 2. SSF 집합체 실험자료에 나타난 압력, 질량유속 및 국부건도의 영향

축방향 출력 분포의 영향은 채널의 가열길이와 출력 분포 형태, 그리고 국부 유동장 특성 등이 복합적으로 영향을 주어 나타나는 것으로 알려져 있다. SSF 실험 집합체의 경우 축방향 비균일 출력 분포 (cosine 분포) 조건에서의 집합체 평균 CHF를 축방향 균일 출력 분포 조건에서의 CHF와 비교해보면, 그림 4에서 보듯이 고압력 조건에서는 서로 비슷하며 압력이 낮아질수록 CHF가 더 커지는 것으로 나타났다.

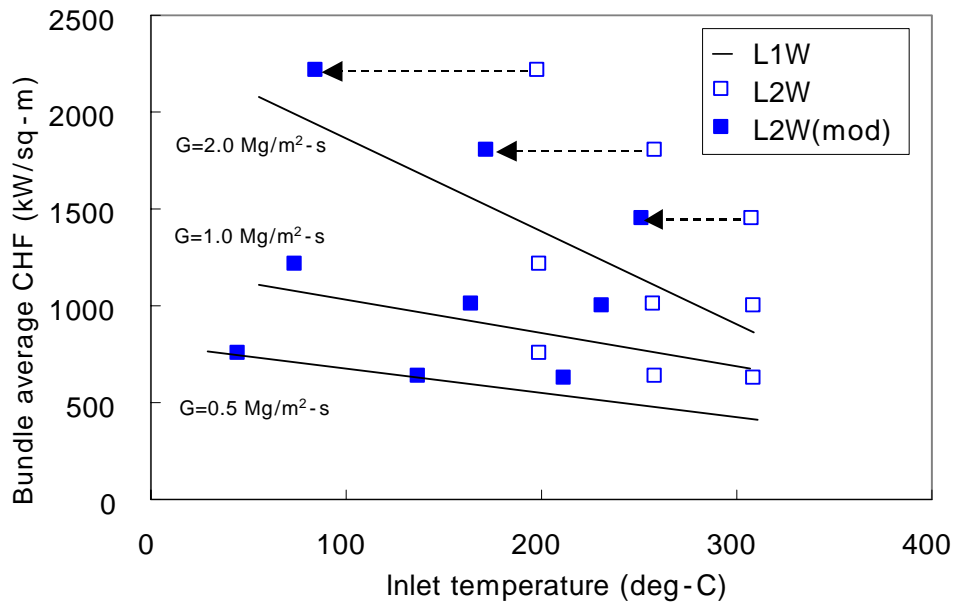


그림 3. SSF 집합체 실험자료에 나타난 가열길이의 영향

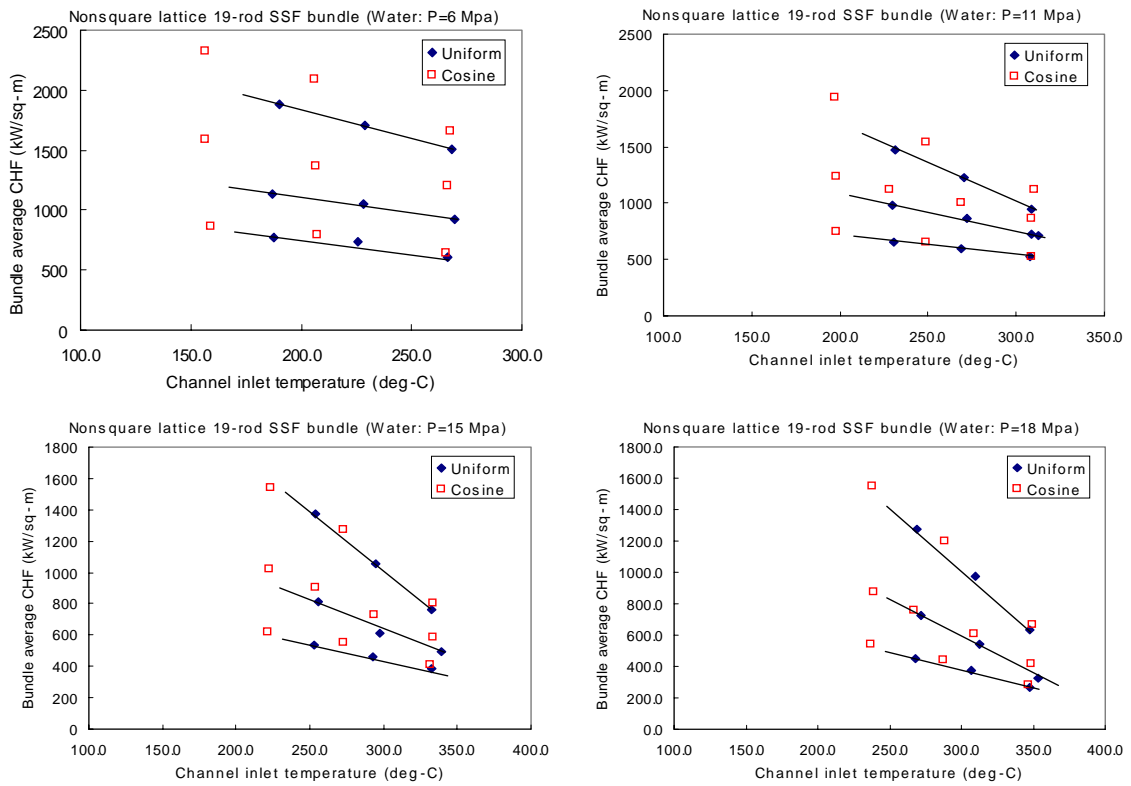


그림 4. SSF 집합체 실험자료에 나타난 축방향 출력분포의 영향

3. 실험집합체에 대한 부수로 해석

3.1 열혼합 실험

19-봉 SSF 실험 집합체를 사용한 열혼합 실험은 IPPE의 water-loop에서 수행되었다. 실험 집합체는 열출력 크기에 따라 두 구역으로 구분되는데, 저온 영역에는 12 개의 가열봉이 포함되며 이와 마주보는 고온 영역은 7 개의 가열봉으로 구성되어 있다. 고온 영역 가열봉의 평균 열출력은 저온 영역 평균보다 약 4 배 정도 크다. 모든 실험 조건에서 부수로 출구 온도는 미포화 상태를 유지하며, 27 군데 부수로 출구 지점에서 냉각재 온도를 측정하였다. 실험은 압력이 50 ~ 180 bar, 평균 질량 유속이 100 ~ 2000 kg/m²/s 인 범위 내에서 수행되었다.

3.2 부수로 해석

SSF 실험 집합체 내의 국부 열수력장 분포 자료는 국부조건 CHF 상관식 개발을 위해 필요하다. 부수로 단위의 국부 엔탈피 및 유속 분포는 MATRA-SR 코드[1]를 사용하여 계산하였다. MATRA-SR과 같은 부수로 해석 코드는 축방향 주유동이 부수로 간의 교차류보다 상당히 크다는 가정으로부터 개발되었으며, 이로 인하여 난류 혼합이나 교차류와 같은 부수로 간의 상호 작용에 대한 모델이 코드의 정확도에 큰 영향을 준다. SSF 실험 집합체에 대한 부수로 해석을 위하여 가열봉은 가상적인 원통형으로 가정하였다. 가열봉 간의 갭 크기는 나선형 핀의 접촉으로 인하여 생기는 국부적인 갭의 최대값 및 최소값을 산술 평균하여 결정하였다. 부수로 간의 난류 혼합은 동일 질량 교환 모델을 사용하여 평가하며, 이 때 부수로 간의 횡방향 난류 요동 속도와 축방향 주 유동 속도의 비로서 표현되는 난류 혼합 인자의 최적치는 열혼합 실험 자료 분석을 통하여 평가하였다. 이를 위하여 여러 가지 난류 혼합 인자 값에 대하여 계산된 부수로 출구 온도 분포 자료를 실험 자료와 비교하여 평균 rms 오차를 계산하였으며, 이 오차가 최소값을 갖는 조건에서 난류 혼합 인자의 최적치를 결정하였다. 그림 5는 임의의 열혼합 실험 자료에 대한 MATRA-SR 코드의 부수로 출구 온도 분포 예측 성능을 보인 것이다. 난류 혼합 인자의 최적치는 0.05로 평가되었으며, 이 경우 그림에서 보듯이 부수로 출구 온도 분포 예측치는 실험치와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

4. 국부조건 CHF 상관식 개발

4.1 국부조건 CHF 상관식 형태

SMART-P 노심 해석에 적용할 국부조건 CHF 상관식의 기본 형태는 표 3에 제시하였다. 상관식은 SSF 실험 자료로부터 경험적으로 도출된 축방향 비균일 출력 분포의 영향에 대한 보정 인자를 포함하고 있으므로 임의의 축방향 출력 분포 조건에 적용할 수 있다. 상관식 계수들은 비선형 회귀분석 방법을 사용하여 최적화하였다. CHF 상관식은 고온 부수로에서의 엔탈피 상승을 변수로 사용하고 있는데, 집합체 내의 고온 부수는 횡방향으로 개방되어있으나 일반적으로 고온부수로 엔탈피 상승은 출력 변화에 대하여 거의 선형적으로 비례하므로 상관식으로 계산되는 CHF 여유도는 열출력 여유도와 유사하다.

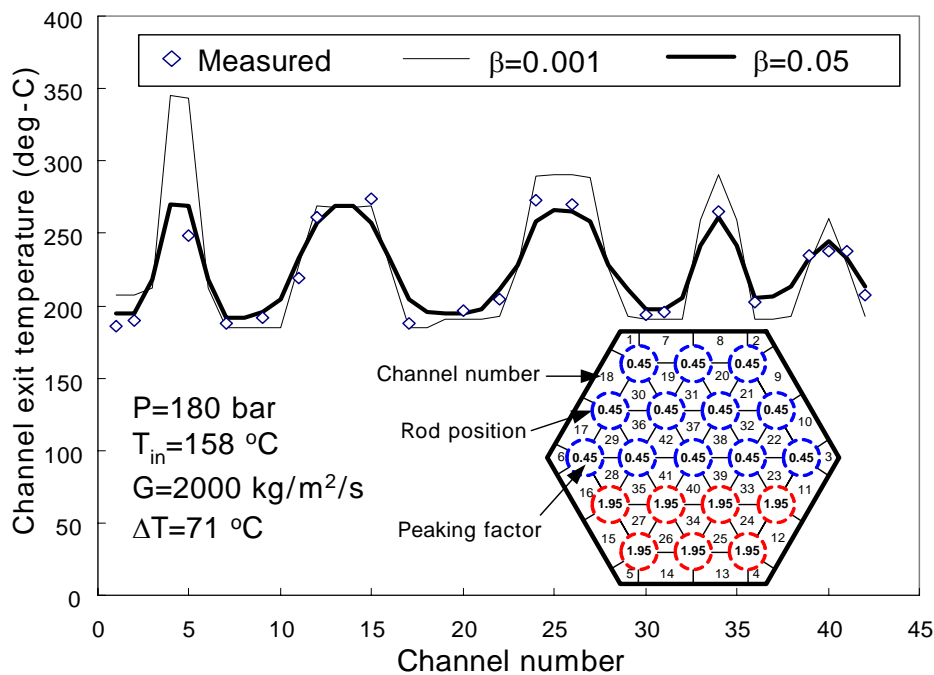


그림 5. MATRA-SR 코드를 사용한 열혼합 실험자료 분석

4.2 CHF 상관식 성능 평가

(가) SSF 집합체 CHF 실험 자료에 대한 예측 성능

축방향 출력 분포가 균일한 경우 CHF는 고온 연료봉의 끝부분에서 처음 발생하며, 횡방향 출력 분포가 균일한 경우에는 집합체 중심 채널에서 먼저 CHF가 발생하는 것으로 나타났다. 그림 6은 축방향 균일 출력 분포를 갖는 SSF 집합체 CHF 실험 자료에 대한 SSF-2 상관식의 예측 성능을 보인 것이다. 모두 311개의 실험 자료에 대하여 P/M의 평균 및 표준 편차는 각각 1.004 및 0.078로 평가되었으며, 질량유속, 압력, 국부 건도와 같은 주요 상관식 변수들에 대하여 P/M의 오차가 고

르게 분포되어 있는 것으로 나타났다. 축방향 출력 분포가 비균일한 경우에는 채널을 여러 개의 축방향 노드로 구분하여 CHF 계산치와 국부 열속간의 비가 최소인 지점에서 P/M을 평가한다. 축방향 cosine 출력 분포를 갖는 L4W 실험 집합체의 축방향 출력 침투치는 1.47이며, 그림 7에서 보듯이 주요 상관식 변수에 대하여 P/M이 고르게 분포하는 것으로 나타났다. P/M의 평균 및 표준 편차는 60 개의 실험 자료에 대하여 각각 0.998 및 0.072로 평가되었다.

표 3. SSF-2 국부조건 CHF 상관식의 형태

$q''_{CHF} = \frac{A \cdot F_1 - \chi_{in}}{C \cdot F_2 \cdot F_{APS} + \frac{[\chi(z) - \chi_{in}]}{q''_{local}(z)}}$
<p>where,</p> $A = a_1 P_r^{a_2} G_r^{a_5 + a_7 P_r}, \quad C = a_3 P_r^{a_4} G_r^{a_6 + a_8 P_r}$ $F_1 = \left\{ b_1 + b_2 P_r (1 - P_r) \right\} \left(\frac{d_{he, ch}}{d_{he, FA}} \right)^{b_3}, \quad F_2 = b_4 \left(\frac{z}{d_{he, ch}} \right)^{b_5}$ $F_{APS} = 1 - c_1 \left \frac{dF}{dz} \right (1 - A.O.)^{c_2}$
<p>q''_{CHF} = local critical heat flux (kW/m²) $q''_{local}(z)$ = local heat flux at z (kW/m²) P_r = reduced pressure (P/P_{critical}) G_r = dimensionless mass flux (G/G_{ref}) $d_{he, ch}$ = heated equivalent diameter of hot channel $d_{he, FA}$ = heated equivalent diameter of fuel assembly $\left \frac{dF}{dz} \right$ = slope of axial power shape from the peak to the end of the channel A.O. = axial offset</p>

(나) 상관식의 parametric trend 분석

주요 열수력 변수들에 대하여 SSF-2 상관식의 CHF 예측 경향을 평가하여 기존 상관식과 비교하였다. 이를 위하여 EPRI-1 상관식[2], KfK-3 상관식[3], 그리고 AECL 1995 CHF table[4]을 비교 대상으로 선정하였다. EPRI-1 상관식은 가압 경수로 조건에서 수행된 정방향 및 비정방향 집합체에 대한 CHF 실험 자료를 사용하여 개발되었으며 적용 범위가 매우 넓다. 그러나 SSF 집합체와 같이 조밀한 격자 구조를 갖는 집합체는 EPRI-1 상관식의 수력 직경 적용 범위를 벗어난다. KfK-3

상관식은 고전환로에 사용되는 조밀 격자 집합체에 적용하기 위하여 개발된 것이다. 이는 나선형 핀에 대한 보정 인자를 포함하고 있으며 원통형 가열봉에 대한 제한적인 실험 자료에 대하여 예측 성능이 검증되었다. AECL CHF table은 원형관에 대하여 광범위하게 적용되는 CHF 예측 모형이다. 그림 8은 질량유속, 압력, 그리고 국부 건도에 대한 CHF 상관식의 예측 경향을 비교한 것이다. 입구 온도 및 압력이 일정한 조건에서 질량 유속에 대한 CHF 예측 경향은 상관식들이 모두 비슷한 것으로 나타났다. 입구온도 및 질량 유속이 일정한 경우 SSF-2 상관식의 압력에 대한 예측 경향은 KfK-3 상관식과 유사하다. CHF 예측 경향을 분석한 결과 SSF-2 상관식은 전반적으로 KfK-3 상관식과 유사한 경향을 나타내는 것으로 나타났다.

(다) 상관식 한계 CHF

모든 출력 분포 자료를 포함하는 SSF 집합체 CHF 실험 자료에 대한 SSF-2 상관식의 예측 불확실도를 평가하여 상관식 한계 CHF를 결정하였다. 그림 9는 M/P의 dots 분포를 정규분포 곡선과 비교한 것이다. D'-test 방법[5]을 사용하여 분석한 결과 M/P 분포는 95% 신뢰도로서 비정규분포하는 것으로 나타났으며, 따라서 상관식 한계 CHF는 dots 분포와 무관하게 적용되는 통계적 방법[6]을 사용하여 1.15로 평가되었다. 임의의 조건에서 CHF가 발생하지 않을 확률이 5% 이하가 되려면 CHF 계산치가 그림 10의 95/95 tolerance limit 보다 큰 쪽에 있어야 한다. 실험 자료의 경우 이 영역에 해당하는 자료수는 전체 자료수의 2.7%인 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구를 통하여 나타난 주요 결론은 아래와 같다.

- (1) SMART-P 노심의 SSF 집합체를 모사하는 19봉 및 55봉 실험 집합체를 사용한 CHF 실험을 러시아 IPPE 연구소에서 수행하였으며, 이로부터 상관식 개발에 필요한 water-loop CHF 실험 자료를 생산하였다. 주요 열수력 설계 변수 및 가열 길이, 축방향 출력 분포 등의 영향에 대한 실험 자료 분석을 통하여 SSF 집합체의 CHF 특성을 검토하였다.
- (2) 부수로 해석 코드 MATRA-SR의 난류혼합인자 평가를 위하여 19봉 집합체에 대한 열혼합 실험을 수행하였으며, 실험자료 분석 결과 난류혼합인자의 최적치는 0.05로 평가되었다.
- (3) 집합체 CHF 실험 자료와 MATRA-SR 코드를 사용하여 국부조건 개념의 SSF-2 CHF 상관식을 개발하였다. SSF 집합체 실험 자료에 대하여 SSF-2 상

관식의 P/M 예측 정확도를 평가하였으며, 주요 열수력 변수들에 대한 CHF 예측 경향을 기존 상관식과 비교하였다. 95/95 개념의 상관식 한계 CHF는 1.15로 평가되었다.

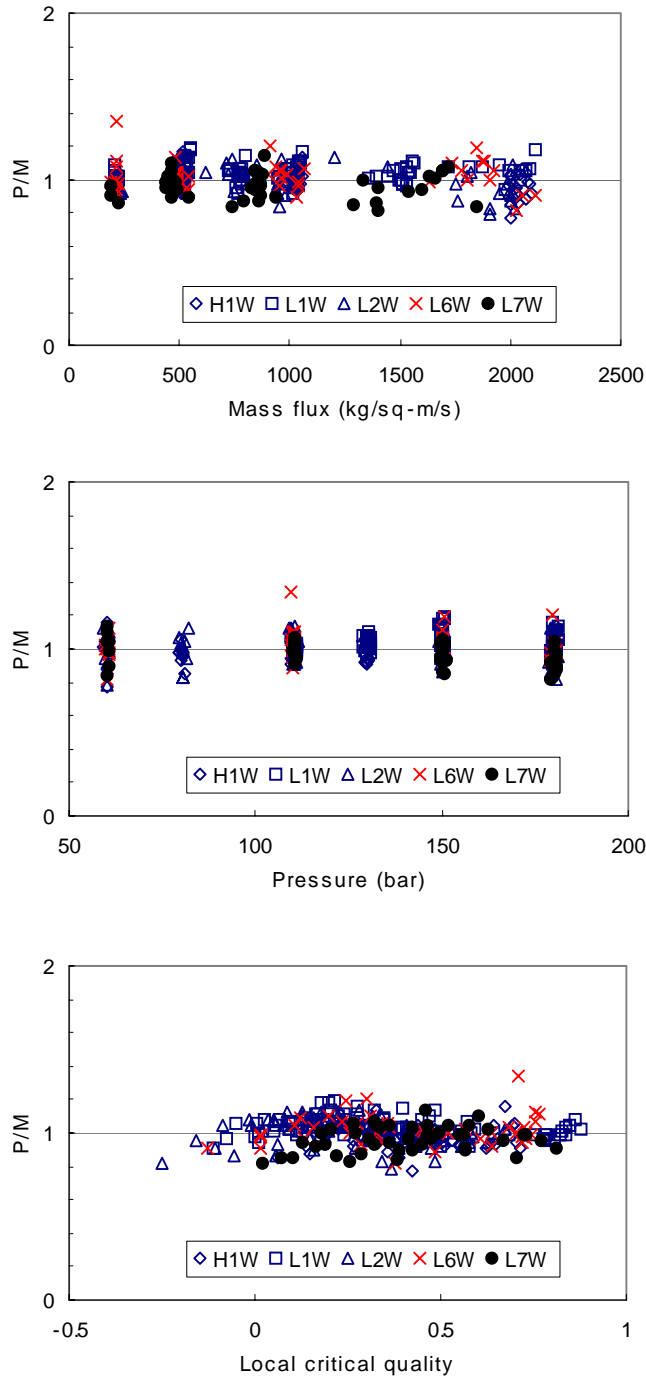


그림 6. SSF 집합체 축방향 균일 출력분포 실험자료에 대한 SSF2 상관식 예측 성능

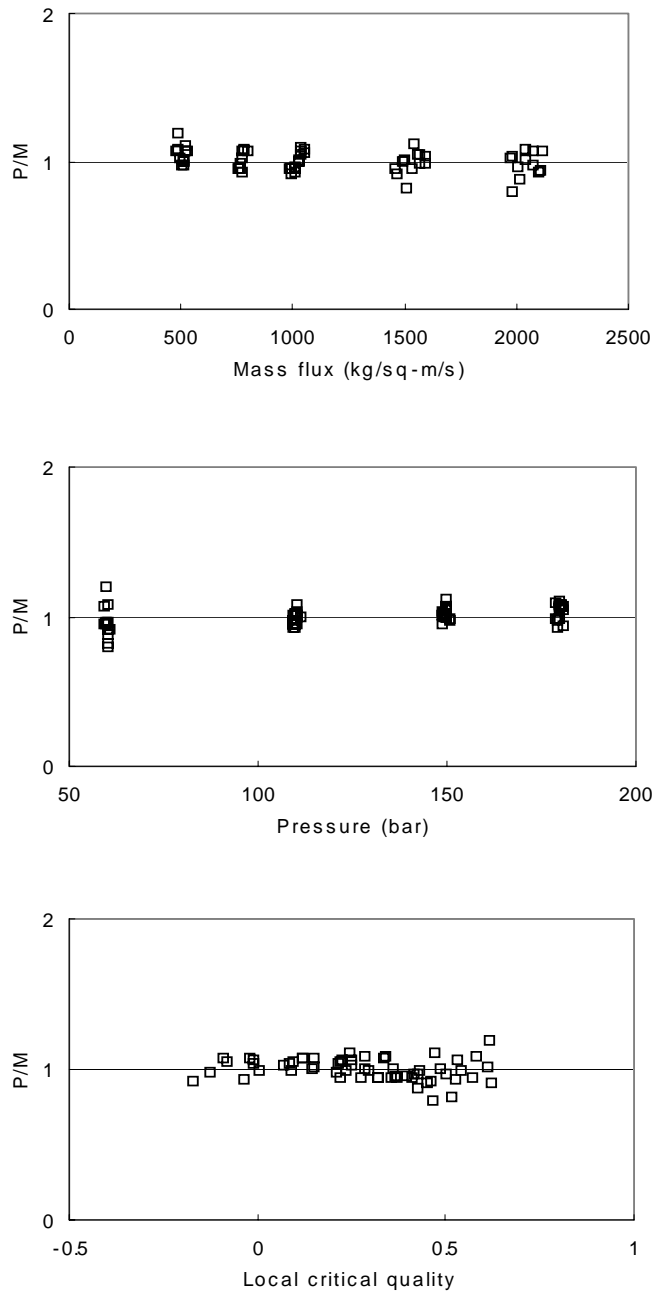


그림 7. SSF 집합체 축방향 비균일 출력분포 실험자료에 대한 SSF2 상관식 예측 성능

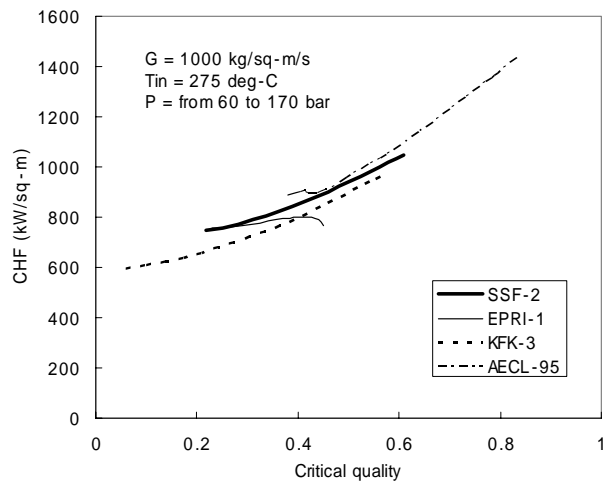
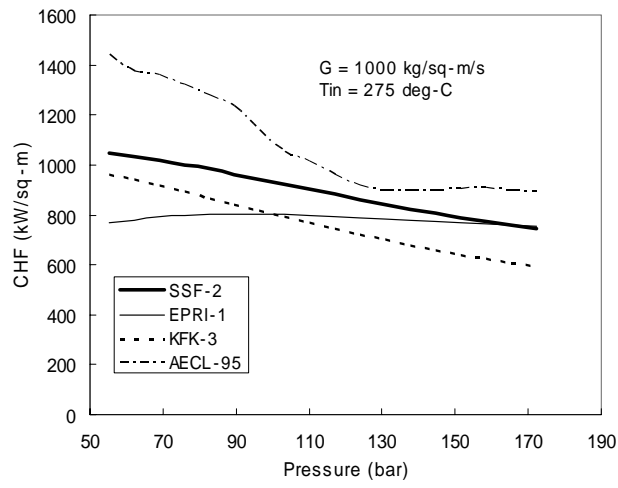
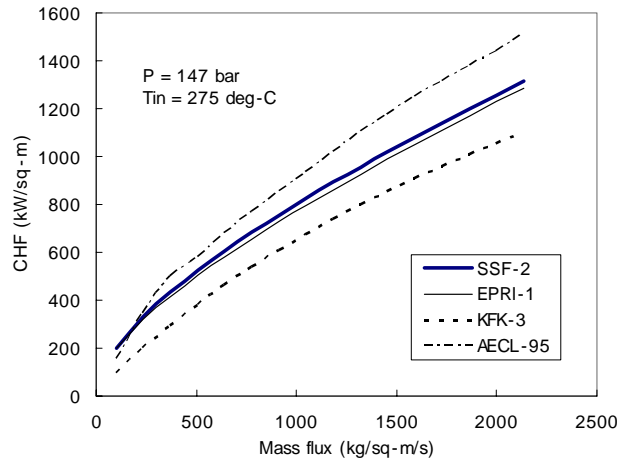


그림 8. SSF2 상관식의 CHF 예측 경향 비교

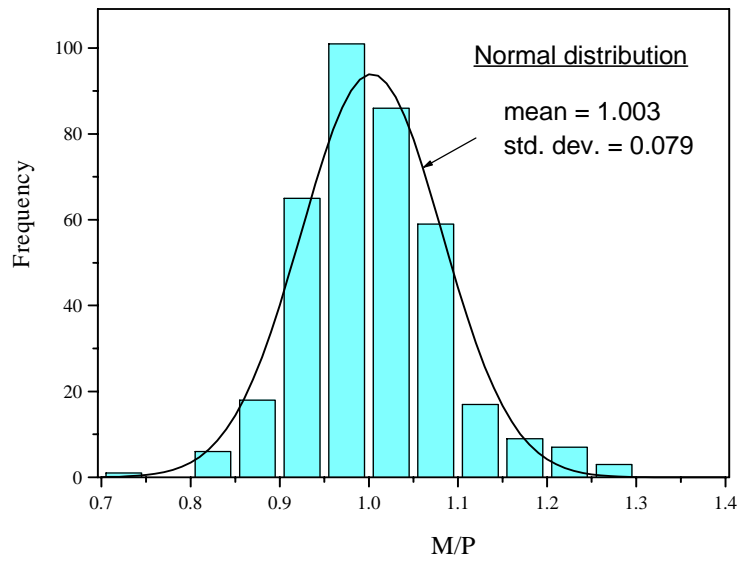


그림 9. SSF-2 상관식의 M/P 뜻수 분포

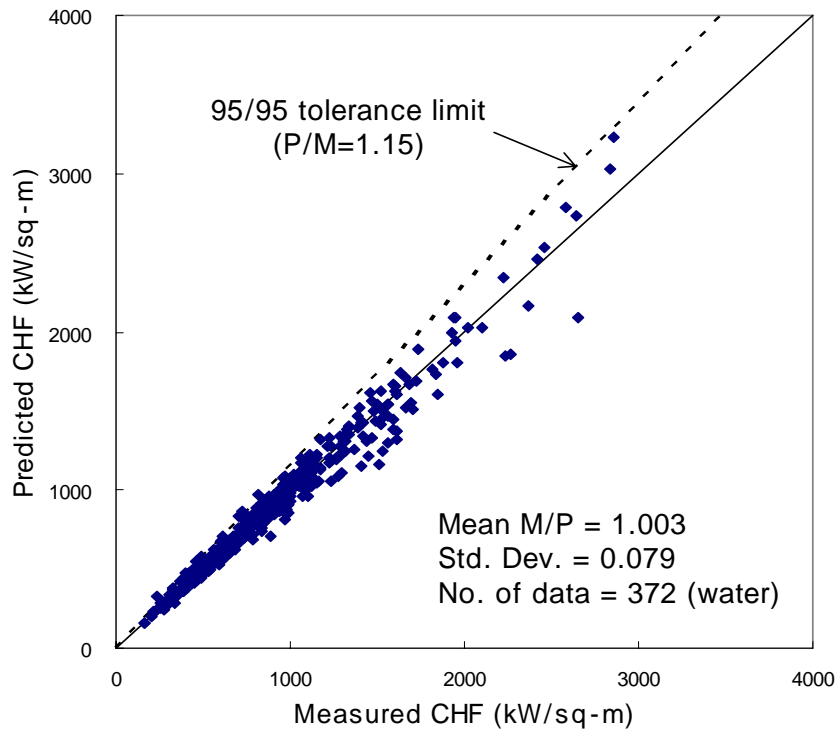


그림 10. SSF-2 상관식의 95/95 tolerance limit.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] 황대현, 전산프로그램 확인 및 검증 보고서: MATRA-SR Version 1.0, SMP65-CA-VV120-01 Rev.0, 2002.
- [2] D.G. Reddy and C.F. Fighetti, Parametric Study of CHF Data Volume 2. A generalized subchannel CHF correlation for PWR and BWR fuel assemblies, EPRI-NP-2609, 1983.
- [3] M.D. Donne, CHF-KfK-3: A critical heat flux correlation for triangular arrays of rods with tight lattices, KfK-4826, 1991.
- [4] D.C. Groeneveld, et. al., The 1995 look-up table for critical heat flux in tubes, Nuclear Engineering Design, 163, pp.1-23, 1996.
- [5] ANS, Assessment of the assumption of normality, ANSI N15.15, 1974.
- [6] M.G. Natrella, Experimental Statistics, table A-31, NBS Handbook 91, 1963.