

## Self-spaced Square Finned 핵연료봉 다발에 대한 임계열유속 Critical Heat Flux for Self-spaced Square Finned Fuel Rods Bundle

천세영, 전형길, 황대현, 송철화, 이두정

한국원자력연구소  
303-353 대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

한국원자력연구소가 개발하고있는 신형원자로용 SSF 핵연료에 대한 CHF 실험을 수행하기 위해 기존 RCS 열수력 Loop의 개조를 통하여 저유량 CHF Test Loop, 외압에 인한 가열봉의 파손을 방지하기 위한 압력 평형관 방법 및 직류 전원공급장치를 개발, 제작하였다. SSF형 가열봉에 적용 가능한 상관식과 원통형 가열봉에 적용 가능한 기존 상관식과의 비교를 통하여 SSF 핵연료봉 다발의 CHF 성능은 기존 핵연료봉 다발에 비해 10~40 % 정도 우수한 것으로 예상된다. 기존 상관식의 적용 가능성을 평가하기 위해 SSF 핵연료봉 다발과 유사한 배열을 갖는 실험자료와 기존 상관식을 비교 검토한 결과 러시아 상관식을 포함하여 기존 상관식들은 SSF형 핵연료봉 다발의 개발이나 노심 안전해석에 사용하기에는 부적절하다고 판단되며 실험을 통한 CHF Data Base의 확보가 시급한 것으로 사료된다.

### Abstract

For the development of the advanced integral reactor for nuclear co-generation, KAERI is developing a new type fuel such as SSF fuel rods bundle. The existing RCS loop was modified. The very low flow test loop, pressure equalization line method and high performance D. C. power supply control system were developed newly to carry out the CHF test for the SSF fuel rods bundle. The SSF fuel bundle performance for the CHF is expected to be 10 % to 40 % higher than for the existing fuel bundle, from the results of comparison between the correlations for SSF type fuel and for the existing fuel. The CHF experimental data with rod lattice similar to SSF fuel bundle were compared with the existing correlations. The existing correlations including the Russian correlation, were evaluated to be not proper for the application to SSF fuel bundle development and reactor safety analysis. It was thus concluded that the experimental CHF data should be secured.

### 1. 서 론

한국원자력연구소는 원자력에너지의 활용증대 및 이용 다변화를 도모하고 안전성 및 운전성을 획기적으로 향상시키는 목적으로 신형원자로를 개발하고 있다. 이러한 신형

원자로에 적합한 핵연료로써 기존 경수로의 핵연료와는 현저하게 다른 사각형 (Self-spaced Square Finned : SSP) 핵연료봉 다발이 고려되고 있다. 이에 따른 핵연료 개발에는 임계열유속 (Critical Heat Flux : CHF) 실험이 필수적이다.

CHF란 일반적으로 핵비등에 의해 열전달이 좋아진 상태에서 갑자기 열전달이 나빠지게 되는 전환점에서의 가열표면 열유속으로 정의된다. CHF의 결과로 나타나게 되는 물리적인 현상은 원자로심과 같이 열유속이 제어되는 계통에서는 가열표면온도의 급격한 상승으로 나타나며, 열교환기와 같이 온도가 제어되는 계통에서는 가열표면 열전달 계수의 급격한 감소로 인한 열제거 능력의 저하를 나타나게 된다. 원자로심에서 CHF 현상이 일어나면 핵연료봉의 파손에 이를 가능성이 있다. 따라서 CHF는 핵연료봉의 건전성을 유지하는 한계를 나타내는 열수력 특성 파라미터이므로 이를 정확히 예측하는 것은 노심 안정성에 매우 중요하다. SSP 핵연료의 모양은 기존의 상용 경수로와 매우 다르다. SSP 핵연료는 그 모양이 사각형이고 네 모서리에 핀이 부착되어있으며 핵연료의 배열이 사각배열이 아닌 삼각배열이다. 이러한 핵연료는 노심의 냉각효를 측면에서 기존 핵연료에 비해 향상될 것으로 예상되나, 기존의 상용 경수로에 적용하는 상관식을 적용할 수가 없다. 따라서 SSP 핵연료에 대한 상관식의 개발은 필수적이며 또한 상관식개발을 위한 많은 실험이 필요하다.

SSP 핵연료에 대한 CHF 상관식을 개발하기 위하여 현재 한국원자력연구소와 러시아의 IPPE가 공동연구를 수행하고 있다. 러시아의 IPPE에서는 Freon과 물에 대한 CHF 실험이 수행되고 있으며 한국원자력연구소에서는 물에 대한 실험이 수행될 예정이다. 이에 따라 먼저 SSP 핵연료에 대한 CHF 실험을 수행할 수 있는 실험장치의 제작기술의 개발이 선행되어야한다. 한국원자력연구소에서는 이미 상용 경수로핵연료에 대하여 RCS 실험 장치를 구축하여 CHF 실험을 수행중에 있다.<sup>(1)</sup> 따라서 SSP 핵연료에 대한 CHF 실험을 위해 RCS 열수력 Loop를 개조하여 예비실험이 진행중에 있다.

본 연구는 한국원자력연구소에서 수행되는 SSP 핵연료에 대한 CHF 실험의 범위와 개발된 실험장치의 규모 및 특성을 기술하였으며, SSP 핵연료 다발의 우수성을 평가하고 또한 기존 상관식의 적용 가능성을 평가하기위해 유사한 배열을 갖는 실험결과와 기존 상관식을 비교 검토하였다.

## 2 SSP 핵연료 다발 CHF 실험

### 2.1 SSP 핵연료봉 다발

실험은 정상상태 강제순환 및 자연순환 조건에서 CHF 실험자료를 생산하여 상관식을 개발하기 위해서 수행된다. 대상 실험집합체는 SSP 핵연료를 모위한 7개의 가열봉으로 구성되며 축방향 출력분포는 균일 출력분포와 비균일 출력분포의 두 종류이다. 가열봉의 단면 모양은 사각형이며, 네 모서리에 Fin이 부착되어 있고 Fin은 가열봉 축방향으로 Twist되어있다. 이와 같이 아주 작은 단면을 가진 가열봉은 내부에 발열체를 설치하는 간접가열 방식을 쓸 수가 없기 때문에 피복관에 직접 통전하여 Joule 가열하는 직접가열방식으로 제작된다. 그림 1은 비균일 출력분포를 가진 가열봉 구조를 나타내고 있다. 가열봉의 재질은 Inconel 600이다. 가열길이는 800 mm이며 CHF를 검출하기 위한 열전대는 가열봉 내부에서 피복관에 부착된다. 열전대는 외경 0.5 mm인

Inconel계 Sheath를 가진 Chromel-Alumel 비접지형이 사용된다. 균일 출력분포 가열봉의 경우 4개의 열전대가 부착되었으며 비균일 가열봉에는 6개의 열전대가 부착되었다. 균일 출력분포 가열봉의 피복관 두께는 0.35 mm이지만 비균일 출력분포 가열봉은 축방향 위치에 따라 피복관 두께를 조절하여 출력분포를 갖도록 한다. 비균일 가열봉의 출력분포는 7개의 출력 Step을 가진 Power Ratio(국소 열유속과 평균 열유속의 비)가  $q''_{local}/q''_{ave}=0.46\sim 1.35$ 인 Chopped Cosine 형태이다. 그림 2은 Test Section의 유로 단면을 나타내고 있다. Test Section은 가열봉, 전기적 절연체인 Ceramic으로 이루어지는 Flow Housing, 그리고 압력을 견디기 위한 외부 금속관으로 이루어져 있다. 6각 Flow Housing내에 7개의 가열봉이 삼각 배열로 배치되어 있고 이 유로의 수력학적 등가직경은 약 3 mm이다.

## 2.2 실험장치

RCS 열수력 Loop는 최고 운전 압력이 16.0 MPa, 운전 온도 347 °C 및 유량 3 kg/s의 물 순환 Closed Loop이다. 본 실험장치의 자세한 내용 및 CHF 실험 방법은 참고 문헌<sup>1), 2)</sup>에 자세히 기술되어있으므로 SSP 핵연료봉 다발에 대한 CHF 실험을 위해 개조된 부분에 관해서 기술한다.

상관식 개발에 요구되는 CHF 실험자료의 열수력 조건은 압력범위 11.5~15.0 MPa이며, Test Section 입구온도는 220~280 °C 이다. 질량유속은 100~1500 kg/m<sup>2</sup>s, 또한 Test Section 유로의 수력학적 등가직경은 약 3 mm이다. 이와 같이 요구되는 유량 조건이 매우 낮은 것을 알 수가 있다. 기존 RCS 열수력 Loop의 Test Section으로는 이러한 조건을 만족할 수 없기 때문에 그림 3에 나타난 바와 같은 SSP 가열봉 다발에 대한 CHF 실험을 위한 새로운 Loop를 기존 Loop에 추가 설치하였다. CHF 실험은 기존 Loop의 Test Section 입, 출구의 격리 밸브를 닫고 주 순환펌프에서 배출된 순환용수의 대부분을 Heating Vessel로 우회시켜 적당한 유량을 SSP CHF Test Section으로 보내므로써 이루어진다. SSP CHF Test Loop의 배관은 1/2 inch(내경 11.8 mm) 이다. SSP CHF 실험 Loop에 설치된 계측기기는 열전대, 압력발신기, 차압발신기 및 유량계이다. 순환용수 온도의 측정은 Test Section 입구, Test Section 출구 및 유량계의 전단에서 이루어진다. 압력의 측정은 Test Section 입구, Test Section 출구 및 유량계의 전단에서 이루어지며 또한 Test Section을 지나는 동안의 압력강하를 측정하기 위하여 차압발신기를 설치하였다. 유량계는 Turbine Flowmeter를 설치하였다. 유량계의 측정 범위는 0.3~30 LPM이다. 유량계의 최대 운전 압력과 온도는 40 MPa와 650 °C이다. Test Section 입구의 유량은 주 순환펌프의 회전수 및 유량 제어밸브로 제어되며 입구 온도는 주로 예열기로 제어되나, 미세 조절은 SSP Test Loop 배관에 설치된 Tracing Heater로 이루어진다.

SSP 가열봉은 위에서 기술한 바와 같이 내부가 빈 얇은 피복관으로 되어있다. 따라서 고압 실험시, 외부 압력으로 인한 가열봉의 파손을 피하기 위해 가열봉 내부에 배압(Back Pressure)을 걸어야한다. 배압 System로써 “압력 평형관(Pressure Equalization Line)” 방법을 도입하였다. 즉 가열봉 내부와 RCS Loop의 가압기 상단부를 연결하여 항상 가열봉 내부 압력이 외부 압력 보다 약간 높은 압력을 유지하도록 하였다.

본 가열봉의 가열방식은 직접 통전 가열방식이다. 일반적으로 직접가열 방식은 낮은 직류 전압과 높은 전류가 요구된다. 기존 Test Section은 간접 가열방식에 적합한 전력 공급계통은 사용하고 있다. CHF 실험에서는 직접가열 가열봉이 사용되는 경우가 많으나, 전원공급장치에서 교류에서 직류로 변환할 때 발생하는 Ripple에 주의하여야한다. Ripple이 크면 시간에 따른 출력 변화가 생겨 출력 측정에 오차가 커지며 가열봉 표면의 온도가 고르지 못하게 되는 경우가 있다. 따라서 D. C. 75 Volt, 6000 A, 450 kW의 용량을 갖는 출력범위 10~100 %에서 Ripple이 1 %이하의 직류 전원공급장치를 개발, 제작하였다. Test Section에 공급되는 전력은 변압기에서 6상, 저전압으로 변환되고 정류기로 공급된다. 변압기에는 저부하일 때 Ripple을 줄이기 위해서 0~17 V, 0~35 V 및 0~75 V의 3종류의 텀을 설치하고 실험조건에 따라 적절한 전압범위를 쓸 수 있도록 하였다. 6상, 저전압 전원은 정류기에서 SCR Unit에 의해 6상, 전파정류(12 Pulse, SCR 2차제어)방식으로 직류 전원으로 정류되며 출력 전압은 이상제어(Phase Angle Control)방식으로 조절된다. 더 출력 전압의 고주파 성분을 없애기 위해 LC 회로를 통하여 가열봉에 전력을 공급함으로써 10~100 % 부하 범위에서 Ripple을 1 % 이하로 억제할 수 있었다.

상기와 같이 저유량에 대한 Loop 개발, 가열봉 외압에 인한 파손을 방지하기 위한 압력 평형관의 도입 및 직류 전원공급장치의 개발을 통하여 안정된 유량제어 성능, 가열봉의 신뢰성 및 가열봉에의 안정된 전력공급과 전력측정의 정밀화를 이루었다.

### 3. SSP 핵연료 다발에 대한 CHF 성능 및 상관식 평가

본 장에서는 SSP형 가열봉에 적용 가능한 상관식과 원통형 가열봉에 적용 가능한 기존 상관식의 비교를 통하여 SSP 핵연료봉 다발의 CHF 성능을 간접적으로 평가하였고 또한 기존 상관식의 적용 가능성을 평가하기 위해 SSP 핵연료봉 다발과 유사한 배열을 갖는 실험결과와 기존 상관식을 비교 검토하였다.

먼저 SSP형 핵연료 다발에 적용 가능한 러시아 상관식<sup>(a)</sup>과 원통형 핵연료봉 다발에 적용 가능한 EPRI-1<sup>(a)</sup> 및 KfK-3<sup>(b)</sup> 상관식으로 CHF를 계산하였다. SSP형 핵연료봉에 대한 러시아 상관식은 입구 조건 개념으로 러시아에서 개발된 것이다. KfK-3 상관식은 고전환로에 적용하기 위한 조밀 삼각격자 집합체에 대한 CHF 실험 자료로부터 개발된 것으로서, 피치와 핵연료봉 직경의 비가  $p/d > 1.02$  인 조건에 적용 가능하다. EPRI-1 상관식은 적용 범위가 매우 넓으며, 원래 국부 조건 개념으로 개발되었으며 본 분석에서는 입구 조건 개념으로 적용하였다. KfK-3 상관식 적용 시 와이어 램이 원통형 핵연료봉에 4 개 부착되어 있는 경우를 가정하였으며, 와이어 램 피치는 210 mm로서 러시아 상관식 개발에 사용된 SSP형 핵연료봉의 피치와 동일한 조건을 사용하였다. CHF 계산에 사용된 조건은 표 1에 나타나있다. 본 SSP 핵연료봉 다발과 유사한 조건에서 계산하기 위하여 7 핵연료봉 다발을 가정하여 유로의 수력학 등가직경을 3.0 mm, 가열구간 길이를 1.0 m로 하였다. 그림 4는 각 상관식에서 계산된 CHF 값을 비교한 것이다. 결과를 보면 SSP형 핵연료에 대한 러시아 상관식은 조밀 삼각격자 원통형 핵연료봉 다발에 적용되는 기존의 입구조건 개념 상관식에 비하여 약 10~40% 정도 CHF를 높게 예측하고 있다. 이로부터 SSP형 핵연료봉 다발에서의 CHF 성능은 동

일한 입구 조건에서 기존의 원통형 핵연료봉 다발에 대한 CHF 성능 보다 우수한 것으로 예상된다.

기존 CHF 상관식의 SSP형 핵연료봉 다발에의 예측 성능을 검토하기 위해 SSP형 핵연료봉 다발과 유사하다고 생각되는 삼각격자 원통형 핵연료봉 다발의 실험자료와 기존 CHF 상관식을 비교하였다. CHF 실험자료와의 비교에는 러시아, EPRI-1, PI-3P<sup>(6)</sup> 및 Bowring<sup>(7)</sup> 상관식이 사용되었다. CHF 실험자료는 그림 5 및 표 2와 같은 EPRI의 19 핵연료봉 다발에서 얻어진 압력범위 28~8.3 MPa의 실험자료<sup>(8)</sup>를 사용하였다. CHF 실험자료와 상관식을 비교한 결과를 그림 6~9에 보여준다. 이들 비교결과 중 러시아 상관식 만이 실험자료를 낮게 예측하고 나머지 상관식들은 실험자료를 높게 예측하는 경향을 나타내고 있다. 이는 러시아 상관식이 다른 상관식에 비해 CHF를 보수적으로 예측하는 것을 의미한다. 그러나 상관식들의 CHF 예측값들의 오차는 워낙 크고 넓은 범위에 분포하고 있어, 러시아 상관식을 포함하여 기존 상관식들은 SSP형 핵연료봉 다발의 개발이나 노심 안전해석에 사용하기에는 부적절하다고 판단되며 실험을 통한 CHF Data Base의 확보가 시급한 것으로 사료된다.

#### 4 결론

SSP 핵연료에 대한 CHF 실험을 수행하기 위해 기존 RCS 열수력 Loop를 개조하였고 저유량에 대한 Loop 개발, 가열봉 외압에 인한 파손을 방지하기 위한 압력 평형관의 도입 및 직류 전원공급장치의 개발을 통하여 안정된 유량제어 성능, 가열봉의 신뢰성 및 가열봉에의 안정된 전력공급과 전력측정의 정밀화를 이루었다. SSP형 가열봉에 적용 가능한 상관식과 원통형 가열봉에 적용 가능한 기존 상관식과의 비교를 통하여 SSP 핵연료봉 다발의 CHF 성능은 기존 핵연료봉 다발에 비해 10~40 % 정도 우수한 것으로 예상된다. 기존 상관식의 적용 가능성을 평가하기 위해 SSP 핵연료봉 다발과 유사한 배열을 갖는 실험자료와 기존 상관식을 비교 검토한 결과 러시아 상관식을 포함하여 기존 상관식들은 SSP형 핵연료봉 다발의 개발이나 노심 안전해석에 사용하기에는 부적절하다고 판단되며 실험을 통한 CHF Data Base의 확보가 시급한 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 연구, 개발 지원으로 이루어졌습니다.

#### 기호

- d : 핵연료봉 직경 (m)
- p : 핵연료봉 다발 피치 (m)
- $q''_{local}$  : 국소 열유속 ( $kW/m^2$ )
- $q''_{ave}$  : 평균 열유속 ( $kW/m^2$ )
- P/M : 예측치/측정치 (-)

참고문헌

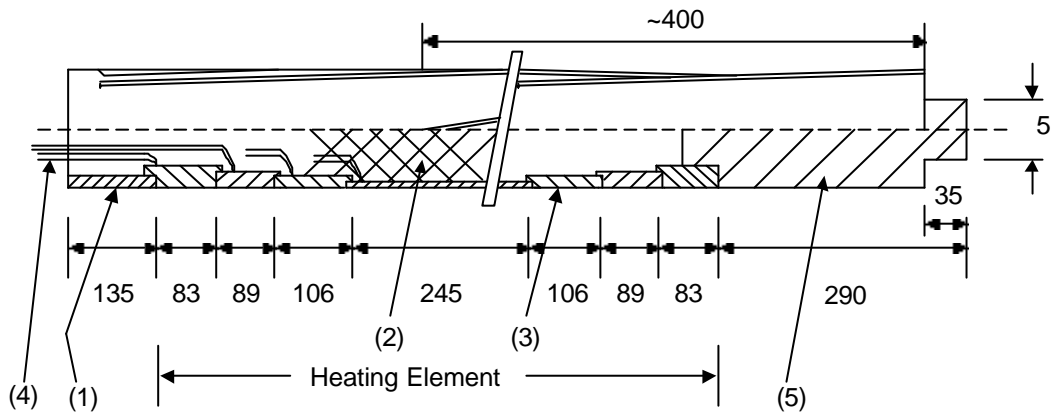
- (1) 천세영 외, "광범위한 압력조건하에서의 수직 환상유로의 임계열유속," 한국원자력 학회, '98추계학술대회, 제3분과 (A), (1998)
- (2) 정문기 외, "원전 안전계통 실증실험," KAERI/RR-1734/96, 35-123, (1997)
- (3) 황대현 외, "비정방형 집합체에서의 임계열유속 특성 분석," KAERI/TR-1047/98, (1998)
- (4) Reddy D. C. and Fighetti C. F., "Parametric study of CHF data, Vol. 2, generalized subchannel CHF correlation for PWR and fuel assemblies," EPRI-NP-2609, (1982)
- (5) Donne M. D., "Critical heat flux correlation for triangular array of rod with tight lattice," KfK-4826, Germany, (1991)
- (6) Ternica R. and Cizk J., "PI correlation for prediction of critical heat flux in PWR fuel assembly," NURETH-5, Paper 2B2, 227-234, (1992)
- (7) Bowring R. W., "A new mixed flow cluster dryout correlation for pressures in the range 0.6-15.5 MN/m<sup>2</sup>(90-2250 psia) - for use in a transient blowdown code," Heat and Fluid Flow in Water Reactor Safety, *Inst. of Mechanical Engineers*, 175-182, (1977)
- (8) Fighetti C. F and Reddy D. C., "Critical heat flux data, Vol. 3," EPRI-NP-2609, (1982)

표 1. SSP 핵연료봉 다발의 CHF 계산에 사용된 조건

Parameter	Value
Pressure, MPa	18
Hydraulic Diameter, mm	3.0
Heated Length, m	1.0
Inlet Temperature, °C	200

표 2. CHF 실험자료의 기하형태

Parameter	Value
Rod Diameter, mm	19.8
Heated Length, m	0.46 to 2.74
Spacer Type	grid
Grid Spacing, m	0.23 to 0.46
Hydraulic Diameter, mm	6.7
Heated Equivalent Diameter, mm	8.5 to 9.0
p/d Ratio	1.05
Fuel Rods Bundle	19 Rods Bundle
Pressure, MPa	2.8 to 8.3



- (1) upper power lead      (4) thermocouples      Unit : mm  
 (2) isolation material    (5) lower power lead

그림 1. SSP 비균일 출력 가열봉의 구조

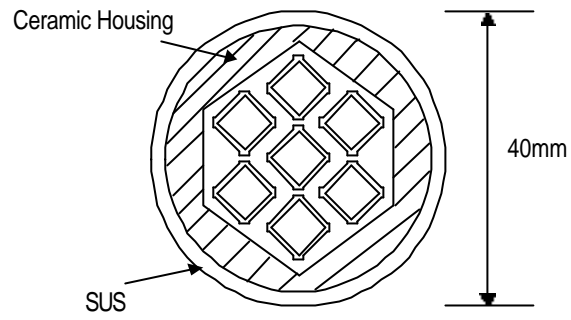


그림 2 SSF 7 가열봉 다발 Test Section의 단면도

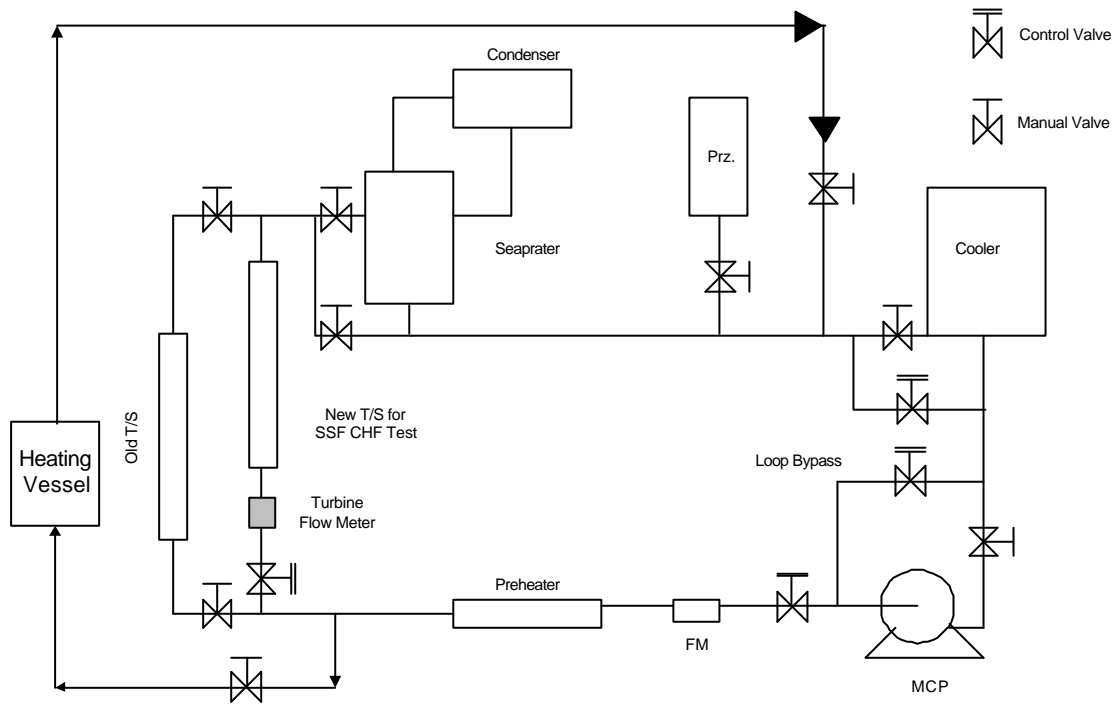


그림 3 RCS 열수력 Loop의 개략도



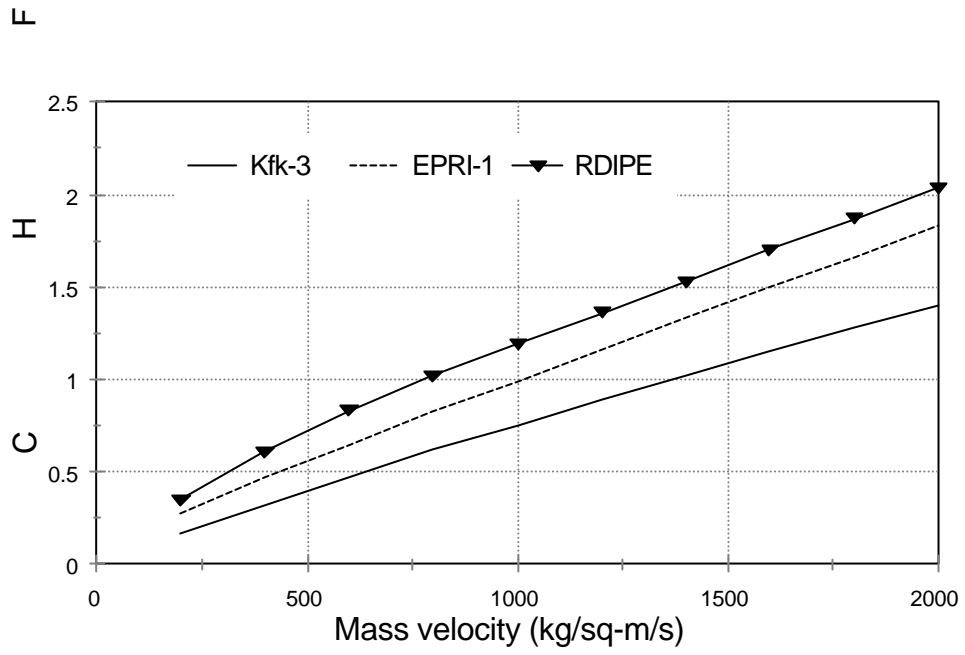


그림 4. 각 상관식에서 계산된 CHF 값의 비교

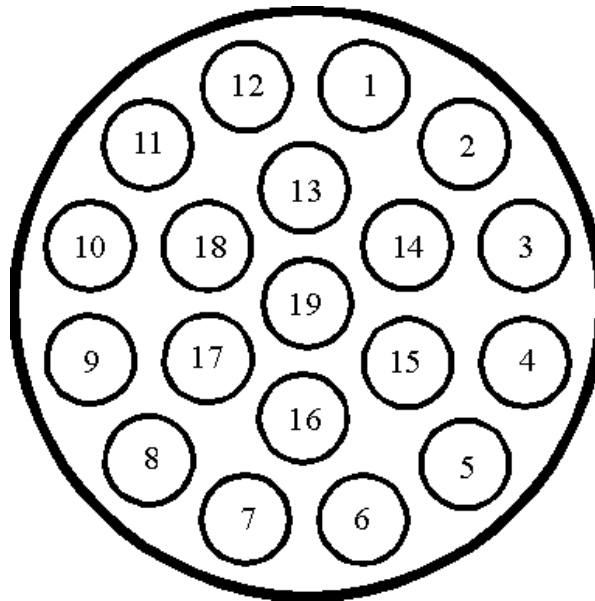


그림 5. 19 가열봉 다발의 형태

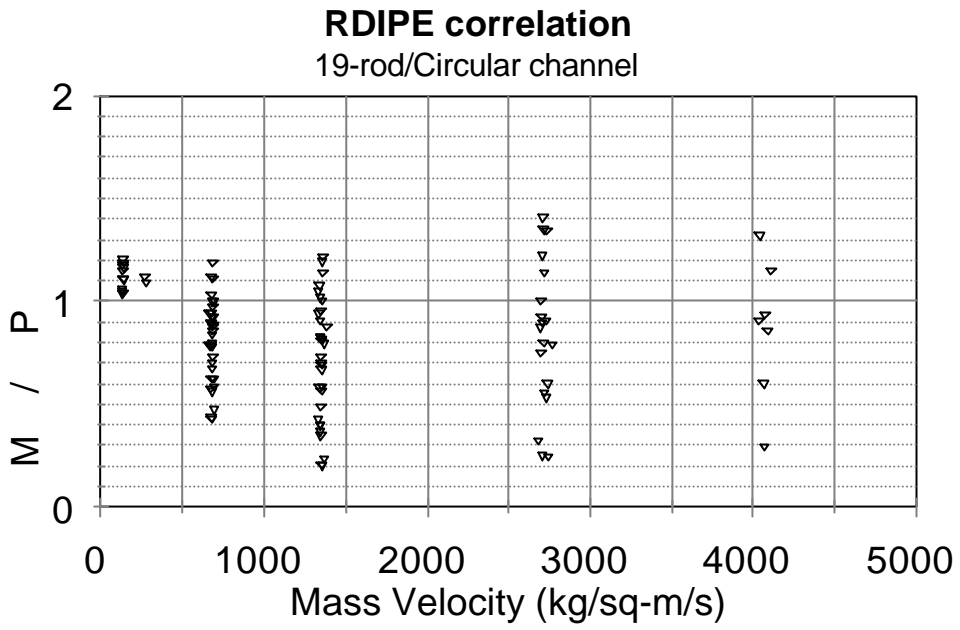


그림 6. 러시아 상관식과 CHF 실험자료의 비교

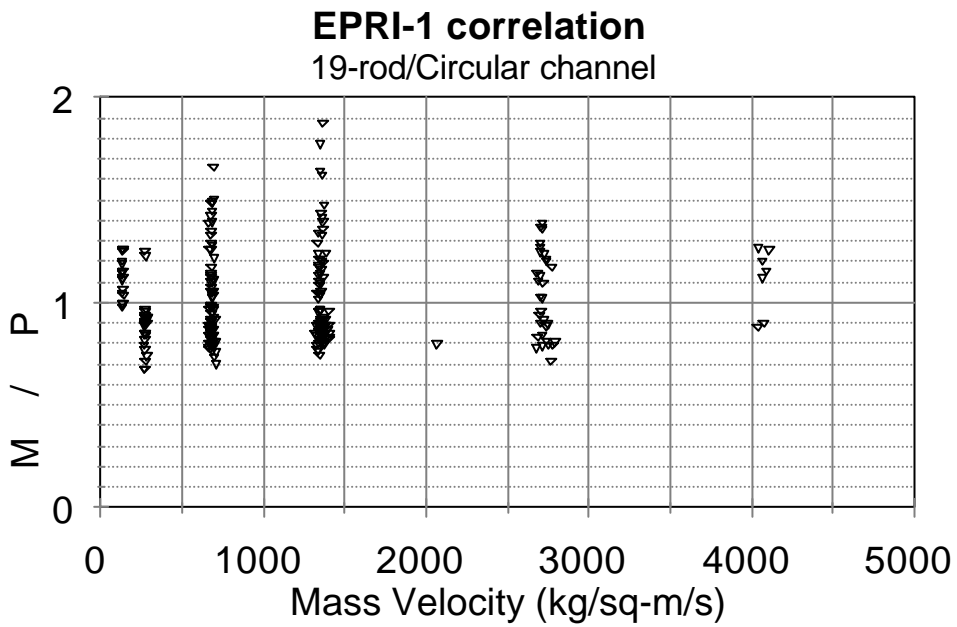


그림 7. EPRI-1 상관식과 CHF 실험자료의 비교

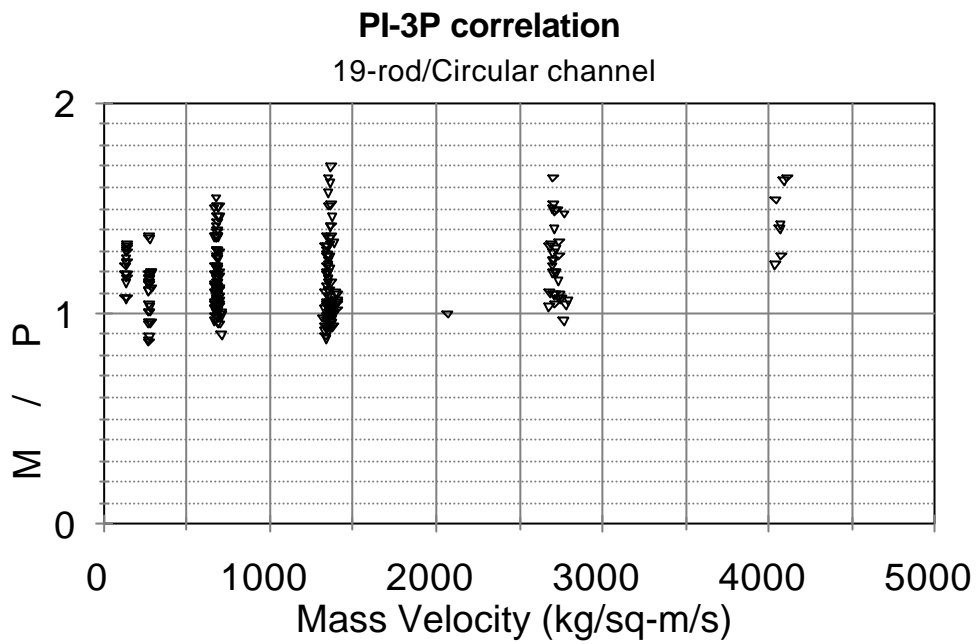


그림 8. PI-3P 상관식과 CHF 실험자료의 비교

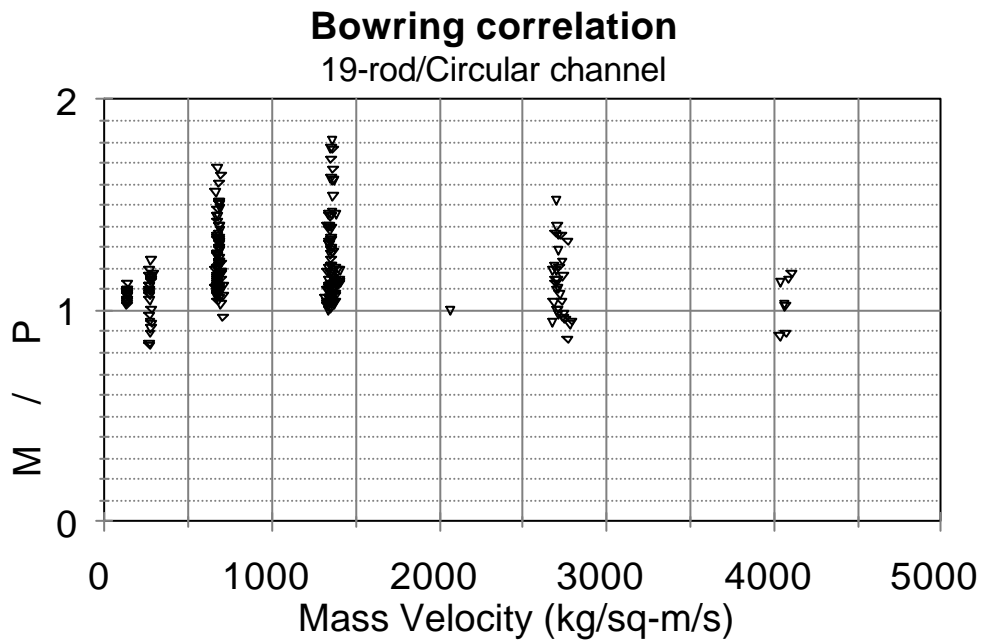


그림 9. Bowring 상관식과 CHF 실험자료의 비교