

CANFLEX 핵연료다발의 지지체 높이가 임계열유속에 미치는 영향

The Effects of Bearing-Pad Height on the Critical Heat Flux of CANFLEX Fuel Bundle

전지수, 석호천
한국원자력연구소

요약문

수평 압력관을 갖는 CANDU-6 핵연료 채널에서는 압력관과 핵연료다발 사이에 기하학적 편심이 존재한다. 기존 지지체 높이(1.4mm)를 갖는 CANFLEX 전체(full-scale) 다발열에 대한 경수(water) 임계열유속(CHF) 시험 결과에 의하면 압력관 크립 증가에 따른 우회 유량(bypassing flow) 증가가 다발의 임계열유속을 크게 감소시킴을 알 수 있었다. 따라서, 핵연료다발의 지지체 높이가 증가(약 0.3mm)하면 다발의 편심도가 감소되어 열전달 성능이 향상될 것으로 예상되었다. 본 논문에서는 1.7 mm 및 1.8 mm 높이의 지지체가 부착된 CANFLEX 다발에 대한 경수 임계열유속 시험 자료를 조사하여 지지체 높이가 임계열유속에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, 측정된 드라이아웃 출력과 비등길이평균 임계열유속 자료 경향을 시험 계통(system) 유동 변수 및 국부(local) 유동 변수에 따라 조사하였다. 지지체 높이가 증가된 다발은 기존 CANFLEX 다발에 비교해서 드라이아웃 출력이 약 7~10% 향상되었다.

Summary

In CANDU-6 fuel channel, the geometrical eccentricity exists between fuel bundle and horizontal pressure tube. Based on the water CHF(critical heat flux) tests of the full-scale CANFLEX(CANDU Flexible) bundle string with the current bearing-pads of 1.4mm height, it was found that the increase of bypassing flow decreased significantly the CHF of fuel bundle with increasing the creep rate of pressure tube. So, the additional improvement of heat transfer performance is anticipated by increasing the height of bearing-pads(about 0.3mm) and reducing the eccentricity of fuel bundle. This paper presented the effects of bearing-pad height on the CHF by examining the water CHF test data of CANFLEX fuel strings equipped with 1.7mm and 1.8mm high bearing-pads. It also showed the data trends of the measured dryout power and the boiling-length-averaged CHF with respect to the test system flow parameters and local flow conditions. The high bearing-pad bundle is increased in dryout power by 7 to 10%, compared to the current CANFLEX fuel bundle.

1. 서론

한국원자력연구소(KAERI)와 캐나다원자력공사(AECL)는 1991년부터 중수로용 개량핵연료로서 CANFLEX(CANDU Flexible Fuelling) 핵연료다발을 공동 연구 개발하였다. 그 결과로서 현재까지 천연 우라늄을 사용하는 CANFLEX-NU(Natural Uranium) 핵연료다발에 대한 개발은 완료 단계에 있으며 캐나다 상업용 원자로인 Pt. Lepreau 발전소에서는 이미 1998년 9월부터 2000년 8월까지 24개의 핵연료다발이 성공적으로 시범 조사 장전[1]을 완료하였다. 국내에서는 1999년 8월에 CANFLEX-NU 핵연료다발에 대한 정부 설계 승인을 획득하였고 월성 1호기에 시범 조사 장전을 위한 프로그램으로서 2000년 11월 10일부터 “중수로용 개량핵연료 실용화연구” 과제가 착수되었다.

CANFLEX-NU 핵연료다발의 월성 1호기 시범 장전 조사 및 상용화를 위해서 필요한 최종적인 기술적 성능 검증 과정의 하나로서, CANFLEX-NU 핵연료다발의 열수력적 성능 검증을 위해서 경수를 사용한 Water CHF(Critical Heat Flux) 시험이 수행되었다. 이 시험은 일차적으로 1999년 2월부터 1999년 6월까지 전문 열수력 시험 기관인 캐나다 Stern Laboratories에서 완료[2,3,4,5]되었다. 이 시험의 주요 목적은 원자로 압력, 유량, 입구 온도 및 압력관 크립(Creep) 등을 고려하여 CANFLEX 핵연료다발의 CHF 상관식 도출 및 열수력 설계 해석에 필요한 다양한 범위의 CHF 자료, 압력강하 자료 및 열수력 성능 자료 등을 확보하는 것이다. 특히 본 실험은 원자로 운전 수명 기간 동안에 압력관 직경 변화를 고려하여 5.1% 크립, 3.3% 크립 및 크립되지 않은(Uncrept) 압력관에 대해서 수행하였다. 이 실험 결과를 근거로 CANFLEX-NU 핵연료다발의 37-핵연료봉다발에 대한 상대적 열적 성능 우수성이 검증되었을 뿐만 아니라 압력관 크립에 따른 열여유도 평가가 가능하게 되었다[3]. 그리고, 시험 자료 분석 결과로서 CHF 가 모두 다발의 하부 연료봉(bottom element)에서 발생하여 크립에 따른 유동 불균형에 큰 영향을 받음을 알 수 있었다.

이에 따라 CHF를 보다 향상시킬 수 있는 방안으로 핵연료다발 최외환봉(outer ring elements)에 설치되는 지지체(BP: bearing pads)의 높이를 기존 설계치 1.4mm에서 1.7mm 혹은 1.8mm 로 높이는 방안이 제시되었다. 1999년 11월부터 2000년 6월에 걸쳐 기존 1.4mm 지지체를 가진 다발(low BP 다발)에 대한 반복(repeat) 및 재현성(reproducibility) 시험과 1.7mm 혹은 1.8mm 지지체를 가진 다발(high BP 다발)에 대한 추가적인 water CHF 시험이 수행되었다. 시험의 수행 방법, 수행 절차 및 시험 유동 조건[2,4] 등은 low BP 다발인 경우와 동일하다.

본 논문에서는 low BP 다발과 high BP 다발의 시험 자료를 비교하여 지지체 높이 변화가 다발 내 부수로 유동장 및 드라이아웃 출력에 미치는 영향을 정량적으로 제시하였다. 그리고, 유량 및 입구 온도와 같은 시험 계통(system) 변수 조건에 따른 드라이아웃 출력 거동을 조사하고 질량 유속 및 건도와 같은 국부(local) 변수에 따른 비등길이 평균(BLA: boiling-length-averaged) CHF 거동[5] 등을 조사하여 시험 결과 자료가 각 변수에 따라 물리적으로 일관성(consistent) 있는 경향을 보이고 자료의 분산 정도가 적음을 제시하였다.

2. 지지체 높이를 증가시킨 이유

그림 1의 CANFLEX 핵연료다발 단면도에서 보는바와 같이 다발의 부착물은 인접한 핵연료봉 사이의 접촉을 방지하는 간격체(spacer), 임계열유속 향상용 버튼(button) 및 압력관과 최외환봉이 서로 접촉하는 것을 방지하는 마모체(wear pad)로서 21개 최외환봉에만 부착된 지지체(bearing pad)로 구성되어 있다.

CANDU-6 원자로의 수평 압력관에 장전되는 핵연료다발은 그림 2에서 보는바와 같이 압력관의 중심과 다발의 중심이 서로 일치하지 않기 때문에 기하학적 편심(eccentricity)이 존재한다. 압력관 상부 내벽과 핵연료다발 상부 연료봉 사이의 간격이 커져서 유량이 핵연료봉이 존재하지 않은 압력관 상부 내벽 쪽의 유로로 우회하는 유량(bypassing flow)이 많아져 핵연료봉에서 발생한 열을 효율적으로 전달하지 못하고 상대적으로 핵연료다발 하부 연료봉 주위의 유량을 감소시키는 결과가 된다. 이에 따라 1.4mm 지지체를 갖는 low BP 다발의 CHF 시험 자료[2]에 의하면 드라이아웃이 발생하는 위치가 대부분 그림 1의 다발 하부 3번, 2번, 21번 및 20번 연료봉(bottom element)에서 발생하였고 일부 자료는 4번, 6번 및 7번 연료봉에서 발생하였다.

그림 3은 1.4mm 지지체 높이를 가진 동일한 다발이 Uncrept 및 5.1% 크립된 압력관에 각각 장전된 경우에 가열봉 표면 온도 분포를 보여주는데 이들 모두는 압력관의 크립 조건을 제외하고는 압력 9 MPa, 유량 13.5 kg/s, 입구 온도 180 °C, 출력 2 MW 인 동일한 유동 조건에서 측정된 값이다. 압력관 크립이 증가할수록 상부 연료봉과 하부 연료봉의 온도 차이가 각각 $\Delta T=11$ °C(Uncrept) 에서 $\Delta T=33$ °C(5.1%) 로 증가하는 것을 알 수 있다. 하부 연료봉의 최고 온도도 228 °C(Uncrept) 에서 246 °C(5.1%) 로 각각 증가되어 압력관 크립이 증가할수록 유동 불균형 현상이 급격히 발생하는 것을 알 수 있다.

따라서, 핵연료다발의 외환봉에 설치되는 지지체(bearing pads)의 높이를 증가시켜 다발의 편심도를 줄이는 경우에 임계열유속을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 예상되었다. 지지체의 높이가 증가하는 경우 직접적으로 CHF가 발생하는 하부 압력관과 하부 연료봉 사이의 간격 유량(gap flow)이 증가하게 되며 상대적으로 다발 상부와 압력관 상부 사이의 우회 유량(bypass)이 감소한다. 그리고, 다발 중심 부수로 사이로 유량이 증가하고 이차 유동이 발달하여 다발의 엔탈피 불균형(enthalpy imbalance)이 감소하여 결과적으로 다발의 CHF를 증가시키게 된다.

3. 시험 자료 분석 결과

3.1 계통 변수 조건에 따른 드라이아웃 출력

그림 4~그림 6 는 1.7 mm 지지체 높이를 갖는 다발이 5.1% 크립 압력관에 장전된 경우에 대한 water CHF 시험 결과의 예로서, 입구 온도, 유량 및 출구 압력에 따라 측정된 드라이아웃 출력의 분포 경향을 보여주고 있다. 본 결과는 유량이 증가할수록 드라이아웃 출력은 증가하며 입구 온도가 증가할수록 감소할수록 드라이아웃 출력은 선형적으로 감소하는 일관된 경향을 보여주었고 시험 자료의 분산이 아주 적음(small scatter)을 알 수 있었다. 출구 압력이 드라이

아웃 출력에 미치는 영향은 유량 및 입구 온도의 영향과 비교해서 매우 적고 그 경향도 명확하지 않다. 1.8mm 지지체 높이 다발인 경우 압력의 영향은 거의 나타나지 않지만 1.7mm 지지체 높이 다발인 그림 6 에서는 유량 17 kg/s 이상인 자료에서는 압력이 증가할수록 드라이아웃 출력이 증가하는 경향을 일관되게 보여주고 있다.

3.2 국부 변수 조건에 따른 BLA CHF

그림 7~그림 10은 1.7 mm 지지체 높이를 갖는 다발이 5.1% 크립 압력관에 장전된 경우에 대한 water CHF 시험 결과의 예이며, CHF 발생 지점의 드라이아웃 건도, 질량 유속 및 압력에 따라 BLA CHF 분포 경향을 보여주고 있다. 본 실험 결과의 드라이아웃 건도에 따른 BLA CHF 분포 및 국부(local) CHF 분포 경향을 비교하면 국부(local) CHF 분포 경향은 압력관 크립이 증가할수록 BLA CHF 분포 경향보다 자료의 분산이 많아짐을 알 수 있었다. 드라이아웃 건도와 질량 유속이 BLA CHF에 미치는 선형적 관계는 비록 계통 변수에 따른 드라이아웃 출력 분포 경향보다 자료의 분산이 많지만 일관된 경향을 잘 보여주고 있다. 질량 유속과 BLA CHF의 선형적 관계 그림에서는 건도 영역이 가능한 적은 범위의 자료를 선택하였으며 과냉각 드라이아웃 조건(음의 건도)의 기울기가 포화 드라이아웃 조건(양의 건도)의 기울기 보다 약간 큰 것을 알 수 있었다. 압력이 증가할수록 BLA CHF가 약간 감소하는 경향을 보이는데 이는 드라이아웃 출력에 미치는 경향과 일치하지 않는 것처럼 보이지만 이것은 단지 압력이 변함에 따라 그림에서 선택된 건도 영역이 달라지기 때문이다.

3.3 압력관 크립의 영향

그림 11 은 high BP 다발에서 압력관 크립이 드라이아웃 출력에 미치는 영향을 도시한 것으로서 출구압력 11 MPa, 유량 17 kg/s 인 시험 결과를 비교하였다. 본 시험 결과에 의하면 3.3% 및 5.1% 크립된 경우는 Uncrept된 경우보다 드라이아웃 출력이 약 20% 및 30% 로 감소하였으며 이들 압력관 크립에 따라 드라이아웃 출력이 감소되는 양은 6MPa 및 9MPa 시험 자료에서도 비슷한 결과이었다. high BP 다발인 경우 Uncrept(1.8mm)된 경우와 3.3% 크립(1.7mm)된 경우 지지체 높이가 약간 차이가 있지만 직접적인 비교 자료로 이용하였다. 압력관 크립에 따른 상대적 드라이아웃 출력의 감소량은 low BP 다발인 경우와 비슷하게 나타났다.

초기 드라이아웃이 발생하는 위치는 하부 외환봉(2번, 3번, 21번, 20번)에서 대부분 CHF가 발생하였고 일부 자료는 4번, 6번 및 7번 연료봉에서 발생하였다. 지지체 높이가 증가하여 다발의 편심도가 감소하더라도 앞서 설명한 수평 핵연료 채널에서 여전히 유동 불균형에 존재하여 하부 연료봉 주위에서 CHF가 발생하였다. 드라이아웃이 발생하는 축방향 위치는 대부분 채널 출구 2번째 및 3번째 다발의 중간 간격체면 및 하류 버턴면 4곳에서 분산되어 발생하였고 일부 자료는 지지체면 및 상류 봉단 접합판에서 발생하였다. 압력관 크립에 따른 축방향 CHF 발생 위치는 low BP 다발[4]과 유사한 분포를 보여주었다.

3.4. 지지체 높이의 영향

그림 12는 동일한 압력관 크립 및 유동 조건에서 low BP 다발 및 high BP 다발의 드라이아웃 출력을 비교하여 지지체 높이가 드라이아웃 출력에 미치는 영향을 조사한 실험 결과들 중의 하나이다. 본 실험 결과에 의하면 high BP 다발(1.7mm & 1.8mm)인 경우 low BP 다발보다 드라이아웃 출력이 유동 조건에 따라 약 7~10% 증가하였다. 이는 앞서 기술된 지지체 높이의 증가가 유동에 미치는 영향에 기인하여 드라이아웃 출력이 증가되었음을 의미한다. 그러나, 1.7mm 및 1.8mm 높이 지지체의 드라이아웃 출력을 비교하면 서로 큰 차이가 없음을 알 수 있는데 이는 지지체 높이가 1.4mm에서 1.7mm로 증가(0.3mm)하는 동안에는 지지체 높이의 영향이 민감하게 나타나지만 1.7mm 이상에서는 그 영향이 어느 정도 포화 상태에 도달한 것으로 간주된다. 그리고, 1.4mm 지지체 다발에서 지지체의 마모로 인해 지지체 높이가 1.35mm 및 1.32mm 로 감소한 경우에도 급격한 드라이아웃 출력의 감소는 발견할 수 없는데 이는 지지체 높이의 감소량(0.05mm 및 0.08mm)이 매우 적어 유동에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

그림 13은 high BP(1.8mm) 다발과 low BP(1.4mm) 다발의 연료봉 표면 온도 분포를 보여주는데 이는 입구 온도 180 °C, 출구 압력 9 MPa, 유량 25 kg/s 및 다발 출력 8 MW 의 동일한 유동 조건 및 동일한 축방향 위치에서 측정된 값이다. 그림에서 보는바와 같이 단상류 유동 조건에서도 high BP 다발의 하부 연료봉과 상부 연료봉의 온도 차이($\Delta T=29$ °C)가 low BP 다발인 경우($\Delta T=42$ °C)보다 급격히 감소함을 알 수 있다. 또한, high BP 다발의 하부 연료봉 최고 온도($T=285$ °C)가 low BP 다발($T=290$ °C) 보다 약 5 °C 감소한 것을 알 수 있고 다발 중심 연료봉의 온도 분포가 보다 균일하게 되었음을 알 수 있다. 이는 지지체 높이 증가가 다발의 편심도를 감소시켜 상대적으로 다발 하부(bottom) 지역의 간격 유량(gap flow)를 증가시키고 다발내 부수로 사이 유동 불균형을 감소시키는 것을 정량적으로 보여주고 있다.

4. 결론

- 시험 자료를 계통 변수 및 국부 열수력 변수에 따라 분석한 결과에 의하면 드라이아웃 출력 및 BLA CHF는 자료의 분산이 적고 모두 일관된(consistent) 분포 경향을 보였다.
- 지지체 높이가 증가된 high BP 다발인 경우에도 압력관 크립에 따른 상대적 드라이아웃 출력 감소 경향과 드라이아웃 발생 위치는 low BP 다발과 유사하였다.
- 지지체 높이가 증가된 high BP 다발은 하부 연료봉 사이 간격 유량이 증가되어 엔탈피 불균형이 감소되며 드라이아웃 출력이 low BP 다발보다 약 7~10% 향상되었다.
- 지지체 높이가 1.4mm에서 1.7mm로 증가하는 경우에는 지지체 높이의 영향이 크게 나타났지만, 1.7mm 와 1.8mm 지지체는 서로 큰 차이가 없고 마모로 인한 지지체 높이의 감소는 유동에 큰 영향을 미치지 않은 것을 알 수 있었다.

5. 후기

본 논문은 과학기술부 중장기 과제 수행중 KAERI/AECL의 공동 연구 업무로 수행되었으며, 특히 CANFLEX 핵연료다발의 Water CHF 시험은 KAERI 와 AECL 이 캐나다 Stern Laboratories에 공동 투자하여 수행되었다. 본 시험 수행을 위해 많은 노력을 하신 R.A. Fortman, G.I. Hadaller, R.C. Hayes, D.Shin, F. Stern 등 많은 시험 기술자들에게 감사 드립니다. 또한 저와 함께 low BP 다발에 대한 시험을 수행하고 은퇴하신 AECL의 G.R. Dimmick 과 high BP 다발 시험을 수행한 D. Bullock 에게 감사 드립니다. 본 논문의 자료 분석에 많은 지도와 도움을 주신 L.K.H Leung 에게 감사 드리며 업무가 원활히 수행되도록 도움을 주신 W.R. Inch 에게 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] W. Inch, H.C. Suk, "Demonstration Irradiation of CANFLEX in Pt. Lepreau", IAEA Technical Committee Meeting on Fuel Cycle Options for LWRs and HWRs, Victoria, Canada, 1998.4
- [2] 전지수, 석호천, 박주환, "크립된 압력관에서 CANFLEX-NU 다발의 Water CHF 시험", 2000 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 2000.5.26
- [3] 전지수, 석호천, 박주환, "CANFLEX-NU 핵연료다발의 Water CHF 시험 자료 분석", 2000 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 2000.5.26
- [4] G.R. Dimmick, W.W. Inch, J.S. Jun, H.C. Suk, G.I. Hadaller, R.A. Fortman and R.C. Hayes, "Full Scale Water CHF Testing of the CANFLEX Bundle", the 6th International Conference on CANDU Fuel, Canadian Nuclear Society, 1999 September 26-29.
- [5] L.K.H. Leung, D.C. Groeneveld, G.R. Dimmick, D.E. Bullock, and W.W. Inch, "Critical Heat Flux and Pressure Drop for a CANFLEX Bundle String inside an Axially Non-Uniform Flow Channel", the 6th International Conference on CANDU Fuel, Canadian Nuclear Society, 1999 September 26-29.

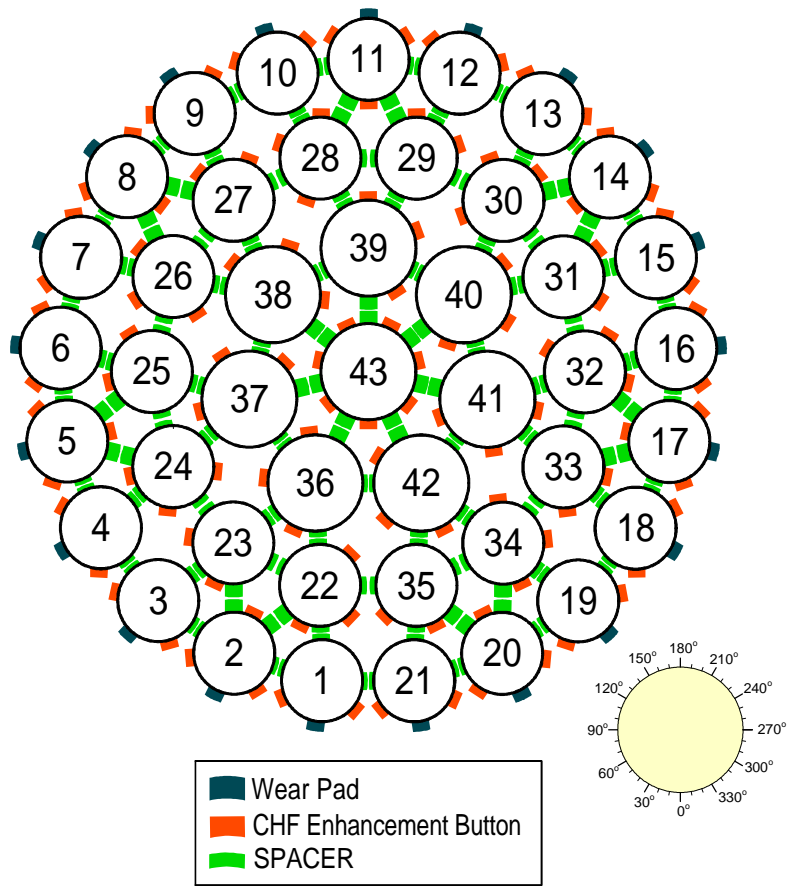


그림 1 CANFLEX Bundle Cross-Section

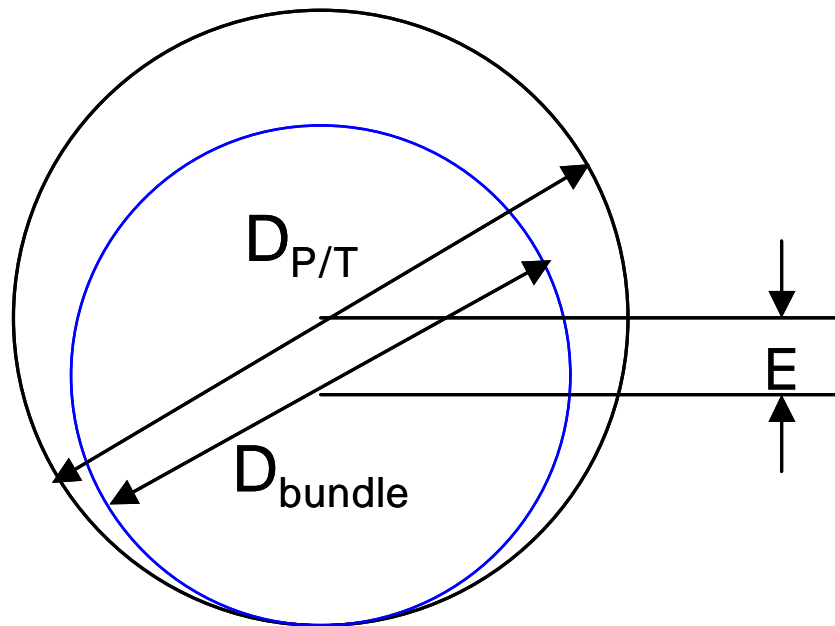
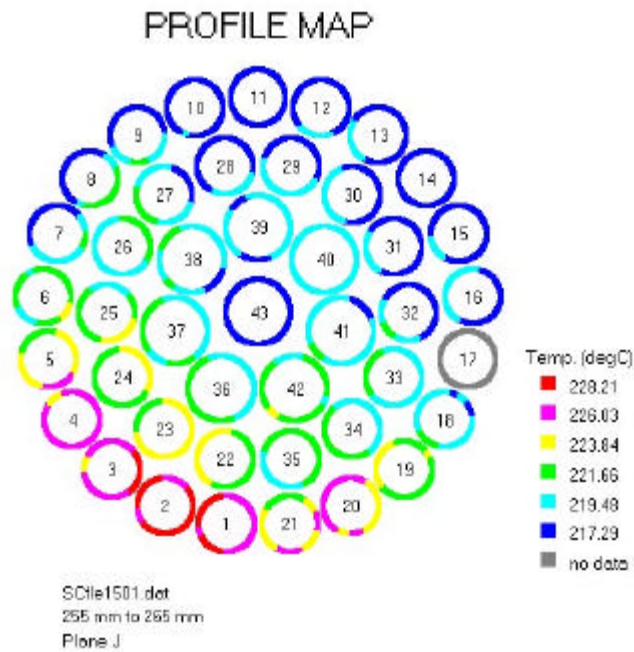
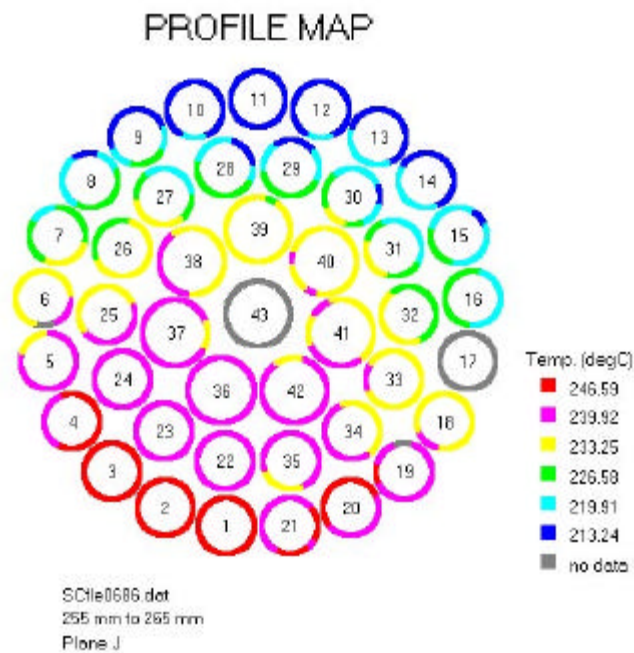


그림 2 The Definition of Eccentricity



(a) the Uncrept Tube(BP=1.40mm, $\Delta T=11$ °C)



(b) the 5.1% Crept Tube(BP=1.40mm, $\Delta T=33$ °C)

그림 3 The Enthalpy Distributions of Bundle in the Various Crept Tubes
($P_{out}=9$ MPa, $Q=2$ MW, $T_{in}=180$ °C, $W=13.5$ kg/s at J mid-plane)

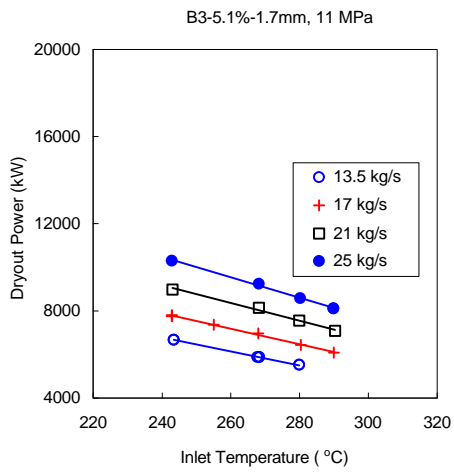


그림 4 Inlet Temperature Effects on Dryout Power in the 5.1% Crept Tube

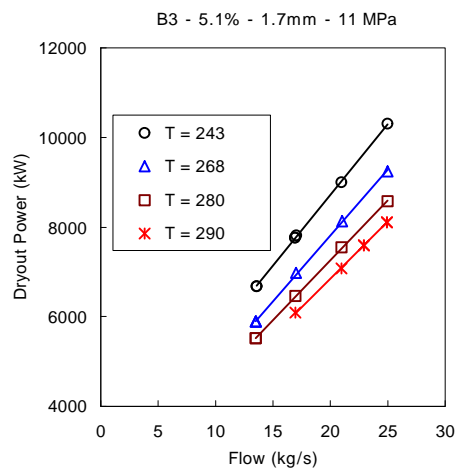


그림 5 Flow Effects on Dryout Power in the 5.1% Crept Tube

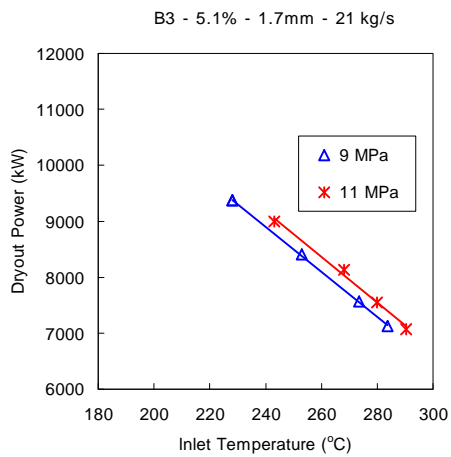


그림 6 Pressure Effects on Dryout Power in the 5.1% Crept Tube

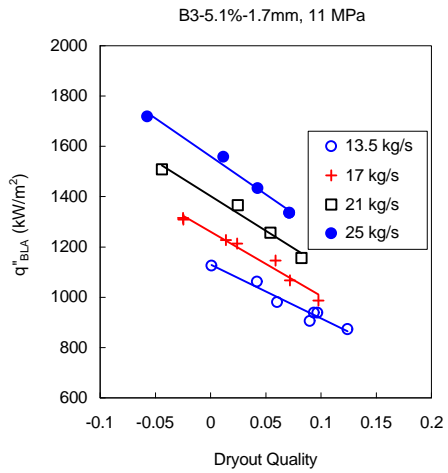


그림 7 Dryout Quality Effects on BLA CHF in the 5.1% Crept Tube

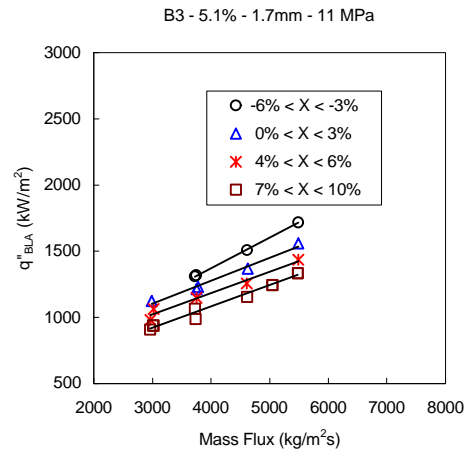
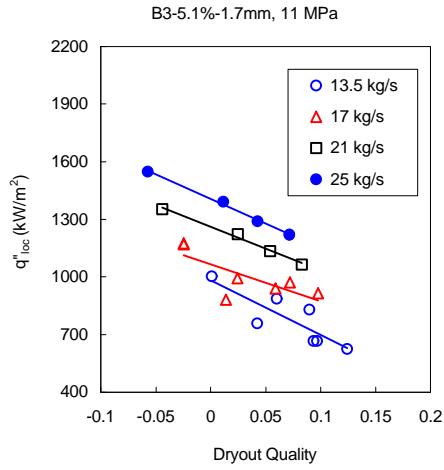


그림 8 Dryout Quality Effects on Local CHF in the 5.1% Crept Tube

그림 9 Mass Flux Effects on BLA CHF in the 5.1% Crept Tube

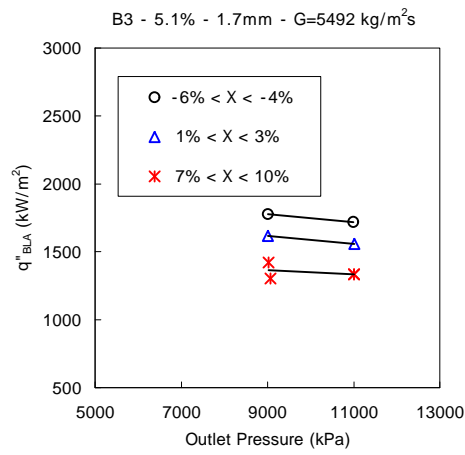


그림 10 Pressure Effects on BLA CHF in the 5.1% Crept Tube

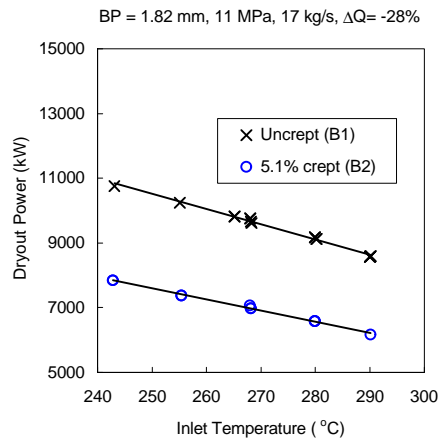


그림 11 Creep Effects on Dryout Power of CANFLEX Fuel Bundle with High BP

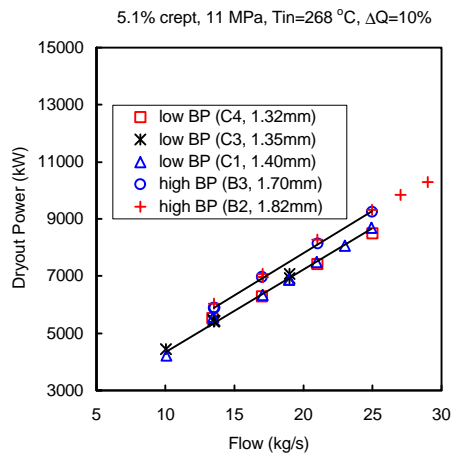
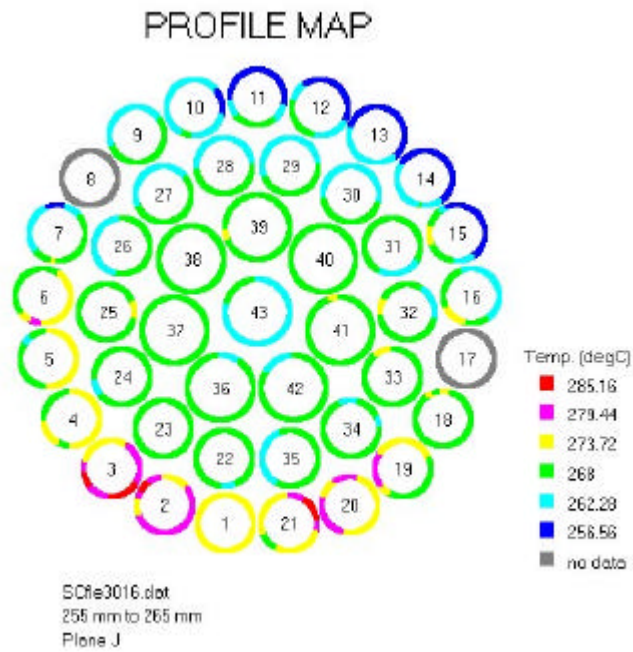
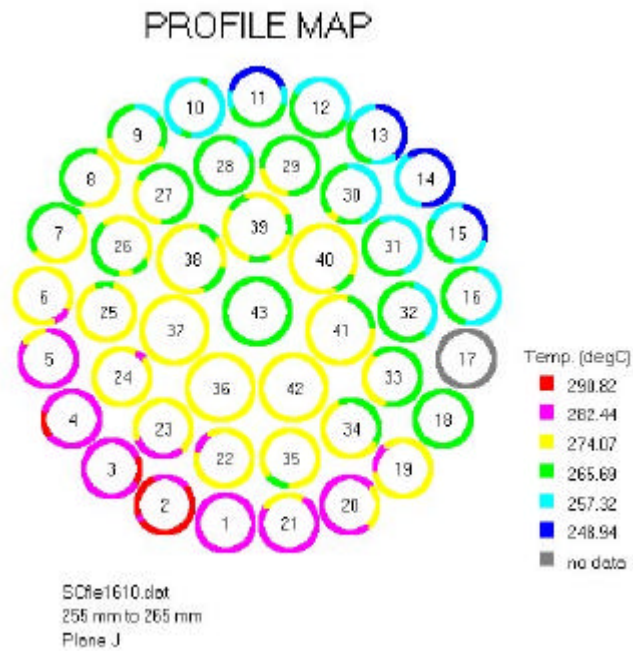


그림 12 BP Height Effects on Dryout Power of CANFLEX Fuel Bundle



(a) High BP Bundle (Uncrept, BP=1.82mm, $\Delta T=29$ °C)



(b) Low BP Bundle(Uncrept, BP=1.40mm, $\Delta T=42$ °C)

그림 13 The Enthalpy Distributions of High and Low BP Bundles
($P_{out}=9$ MPa, $Q=8$ MW, $T_{in}=180$ °C, $W=25$ kg/s at J mid-plane)