2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

PLUS7 연료에 대한 열적 성능 평가

The Thermal Performance Evaluation for PLUS7 Fuel

박성규, 임종선, 남기일, 권정택, 박응준
한전원자력연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 493번지

요 약

혼합날개 지지격자를 장착한 PLUS7 연료가 한국 표준형 원자로용으로 개발되었다. 개발 과정에서 PLUS7 연료에 대한 임계 열속 시험이 수행되었고 그 임계 열속 시험 자료를 근거로 임계 열속 상관식 KCE-1이 개발되었다. PLUS7 연료와 표준 연료에 대한 각각의 임계 열속 시험 자료를 비교 한 결과, PLUS7 연료가 표준 연료에 비해 평균 12.8%의 열적 성능 향상을 보였으며, 표준 연료로 설계된 울진 5&6호기 노심에 대하여 PLUS7 연료로 대체하여 노심의 AOPM(Available Over Power Margin)을 계산한 결과, PLUS7 연료의 열적 성능이 표준 연료에 비해 약 14.8% 증가한 것으로 평가되었다.

Abstract

The PLUS7 Fuel was developed with advanced mixing vane grids for Korean Standard Nuclear Plants(KSNP). A series of CHF tests were performed for the PLUS7 fuel and the KCE-1 CHF correlation was developed, based on the CHF data. It was confirmed that the thermal performance of the PLUS7 fuel is increased by 12.8% in average compared to that of KSNP standard(STD) fuel, through the direct comparison of CHF data for the PLUS7 and the STD fuels. Also, it was evaluated that the thermal performance of the PLUS7 is 14.8 % higher than that of the STD fuel in the standpoint view of the available over power margins for the UCN 5&6 core.

1. 서 론

과학기술부 원자력 중장기 사업계획의 일환으로 한국 표준형 원자로용 개량핵연료인 PLUS7이 개발되었다. PLUS7 연료는 한국표준형 원자로의 표준 연료 대비 연료봉 직경이 감소되었으며 중간지지격자에 혼합날개가 부착되었다. 개발 과정에서 PLUS7 연료에 대한 임계 열속 시험이 수행되었고 그 임계 열속 시험 자료를 근거로 KCE-1 임계 열속 상관식(Critical Heat Flux Correlation)이 개발되었다.

본 논문에서는 새로이 개발된 PLUS7 연료에 대한 설계 특징 및 임계 열속 시험 과정을 간략히 설명하고 KCE-1 임계 열속 상관식 개발 과정을 기술하고자 하였다. 또한, 표준 연료와 PLUS7 연료의 임계 열속 시험 자료의 고온봉 출력을 비교하는 방법과 표준 연료로 설계된 울진 5&6호기 노심을 PLUS7 연료로 대체하여 노심의 AOPM(Available Over Power Margin)을 비교하는 방법으로 PLUS7 연료의 열적 성능을 평가하고자 하였다.

2. PLUS7 연료 설계 특징

PLUS7 연료는 해체/재조립이 용이한 상단고정체, 이물질여과 소구경 하단고정체, 상단 인코넬 지지격자, 혼합날개 부착 중간 ZIRLO 지지격자, 하단 인코넬 지지격자, 이물질여과 보호 지지격자, 4개의 안내관과 1개의 계측관 및 16x16 배열의 연료봉으로 구성되어 있다.(그림 1, 2 참조) 피복관의 재질은 영역평균연소도 55,000MWD/MTU 이상의 고연소 성능 확보를 위하여 Zry-4재질 피복관 대신 ZIRLO재질 피복관이 사용되었다. 연료봉에 의한 압력 강하량 감소 및 우라늄 이용률 향상을 위하여 연료봉 직경은 0.374인치로 기존의 표준 연료봉의 직경(0.382인치)에 비해 약간 감소되었다. 열적 여유도 향상을 위하여 중간 지지격자에 혼합날개를 부착하였으며 연료봉과 스프링/딤플 사이의 접촉 형상이 면이 되도록 Contour 스프링/딤플을 개발되었다. 한편 혼합날개가 부착된 중간 지지격자에 의한 압력 강하량 감소를 위하여 냉각재 흐름에 의한 저항이 작게 되도록 수평 방향의 스프링/딤플이 개발되었으며 프레팅 마모 저지성능 향상을 위하여 상하단 모두에 인코넬-718재질의 지지격자가 사용되었다. 이물질여과 성능 향상을 위하여 하단 고정체의 유로 구경이 표준 연료 대비 약 1/2정도로 축소되었다. 또한, 이로 인한 압력강하량 증가를 최소화하기 위해 원형 유로 및 슬롯 유로가 혼합된 유로판이 개발되었으며, 소구경 하단고정체를 통과할 수 있는 이물질을 차단하기 위하여 하단고정체 상단에 인코넬 재질의 보호지지격자가 부착되었다.

3. KCE-1 임계 열속 상관식

3.1. 임계 열속 시험

PLUS7 연료 개발 과정에서, 연료의 열적 성능을 확인하고 임계 열속 상관식을 개발하기 위하여 임계 열속 시험이 미국 뉴욕 시에 위치한 콜럼비아 대학의 시험시설(HTRF, Heat Transfer Research Facility)에서 수행되었다[1, 2]. 시험에 사용된 시험부(test section)는 6x6 배열로 이루어져 있으며, 그림 3에 보여진 것처럼 혼합날개를 가진 9개의 지지격자와 혼합날개가 없는 두개의 지지격자가 부착되어 있다. 시험부는 전형적 수로(typical channel)를 모사하기 위한 전형적 시험부와 안내관 수로(thimble channel)를 모사하기 위한 안내관 시험부의 두 가지 형태를 갖는다(그림 4, 5 참조). 시험부의 봉 배열은 임계 열속 측정 시 냉벽 효과(cold wall effect)를 감소시켜 시험부 가장자리 봉의 임계 열속 발생 가능성을 최소화 하기위해 6x6로 결정되었다. 지지격자의 혼합날개로 인한 지지격자 하류의 강력한 교차류가 시험부의 반경방향 엔탈피 분포를 균일하게 만들고 가장자리 봉의 임계 열속 발생 가능성을 증가시킨다. 시험부 가장자리 봉의 임계 열속 발생은 실제 원자로심에서 나타나는 일반적인 경향이 아니고 시험부 가장자리의 혼합날개 방향과 냉벽으로 인하여 시험부가 실제 집합체를 적절히 모사하지 못하였기 때문에 나타나는 것이다. 그러므로, 시험부 배열을 증가시킴으로써 가장자리 봉의 임계 열속 발생을 감소시키고 임계 열속 시험이 원자로심을 보다 더 적절히 모사하도록 할 수 있다. 또한, 6x6 배열이 제어봉 안내관 주변의 형상을 5x5 배열보다 더 정확히 실제 집합체를 모사할 수 있다. 6x6 배열을 사용한 PLUS7 연료에 대한 임계 열속 시험에서는 시험부 가장자리 봉에서 임계 열속이 발생하지 않았다. 시험부의 기하학적 특징은 표1과 같으며, 비균일 축방향 및 반경방향 출력 분포와 제어봉 안내관 존재 유무를 모사하도록 설계되었다. 임계 열속 시험을 위한 시험점들은 표 2와 같은 변수들의 구간에서 적절히 분포되도록 선정하였다.

200여 개의 임계 열속 시험 자료 중 일부는 PLUS7 연료의 열적 성능을 표준 연료와 비교하기 위하여 표준 연료의 임계 열속 시험 자료와 동일한 조건에서 시험이 수행되었다.

3.2. 임계 열속 상관식 개발

PLUS7 연료에 대한 임계 열속 상관식 KCE-1은 한국 표준형 원전 설계에 사용되어온 CE-1상관식[3]과 동일한 형태로 개발되었다.

$$q''_{CHF,U} = \frac{B_1 (d/d_m)^{B_2} \left[(B_3 + B_4 P)(G/10^6)^{(B_5+B_6)} - (G/10^6)\, c\, h_{fg} \right]}{(G/10^6)^{(B_7 P + B_8 (G/10^6))}} \qquad (1)$$

여기서,

$q''_{CHF,U}$	critical heat flux for uniform axial power, *MBtu/hr-ft²*
P	pressuer, *psia*
d	heated diameter of subchannel, *inches*
d_m	heated diameter of matrix subchannel, *inches*
G	local mass velocity at CHF location, *lbm / hr-ft²*
c	local coolant quality at CHF location, decimal fraction
h_{fg}	latent heat of vaporization, *Btu/lbm.*

상관식 개발을 위한 국부 유동 조건 예측에는 TORC코드[4]를 사용하였다. PLUS7 연료에 대한 임계 열속 시험 자료는 균일 축방향 분포에 대한 임계 열속 자료가 없고 단 한 가지 비균일 축방향 분포에 대한 자료로만 이루어져 있기 때문에 상관식 개발 시, 임계 열속 시험 자료들을 균일 축방향 분포에 대한 자료로 가정하였다. 일반적으로 비균일 축방향에 대한 임계 열속 값이 균일 축방향 출력에 대한 임계 열속 값보다 작다는 것은 알려져 있기 때문에 위의 가정을 사용하여 상관식을 개발하고 상관식을 적용할 때 비균일 축방향 출력 분포에 대한 보정인자인 Tong의 F 인자[5]를 사용하는 것은 보수적인 상관식 개발 방법이다.

KCE-1 상관식의 계수들은 비선형 다중 회귀분석을 통하여 생산되었다. 모든 계수들의 방향성은 CE-1 상관식의 계수들과 동일하였으나, 제어봉 안내관 냉벽 효과에 대한 보정계수 B_2값이 CE-1 상관식보다 약 1/5로 감소하였다. 이는 지지격자 혼합날개로 인하여 제어봉 안내관의 냉벽 효과가 급격히 줄었다는 것을 의미한다. KCE-1 상관식의 예측 성능은 그림 6부터 9까지 보여진다. 그림 6에서 KCE-1 상관식 예측치를 측정치와 비교하였다. 모든 자료가 측정치 대 예측치가 1인 대각선을 따라 적절히 분포되어 있음을 알 수 있다. 그림 7, 8, 9는 압력, 유량, 국부 건도(local quality)의 변화에 따른 임계 열속 측정치 대 예측치(M/P)의 분포를 보여 준다. 그림 7에서 압력 1400 psia 부근에서 M/P 값들이 1보다 위쪽으로 분포되어 있음을 볼 수 있다. 이것은 KCE-1 상관식이 저 압력에서 보수적으로 예측하고 있다는 것을 나타낸다. 그림 8과 9에서 보듯이 유량과 국부 건도의 변화에 따라 M/P 값들이 1부근에 적절히 분포되어 있어 상관식 계수가 적절히 선정되었음을 나타낸다.

PLUS7 연료에 대한 임계 열속 상관식 KCE-1의 적용 구간은 다음과 같다.

System Pressure	[*psia*]	1395	to	2415
Local Quality	[-]	-.150	to	0.275
Local Mass Velocity	[*Mlbm / hr-ft²*]	0.85	to	3.15
Heated equivalent diameter,	[*in*]	0.4976	to	0.7152

4. 열적 성능 평가

4.1. 임계 열속 시험 자료

PLUS7 연료의 열적 성능을 평가하기 위하여 3.1절에서 선정된 PLUS7 연료와 기존 연료의 임계 열속 시험 자료들의 봉 다발 출력을 다음식으로 비교하였다.

$$Increase\ Power = \frac{P_{KCE1} - P_{CE1}}{P_{CE1}} \times 100 \qquad (2)$$

여기서, P : CHF rod average heat flux

위식으로 계산된 봉 다발 출력 비교 결과는 그림 10에 보여진 것처럼 PLUS7 연료가 표준 연료에 비해 최소 3.8%, 최대 24.0%, 평균 12.8% 열적 성능이 향상됨을 보여주고 있다. 한편, 비교 자료를 주요 변수별로 분석한 결과 압력이 낮고 유량이 적을수록 열적 성능이 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 혼합 날개의 영향이 압력이 낮고 유량이 적을수록 크다는 것을 의미한다.

4.2. 울진 5&6호기 노심에 적용

울진 5&6호기 초기 노심은 표준 연료를 사용하여 노심 열수력 설계가 완료되었다. 이 노심에 대하여 표준 연료 대신 PLUS7 연료로 대체하여 노심의 열적 여유도 모형을 재생산하였다. 생산된 열적 여유도 모형과 기존 노심의 열적 여유도 모형에는 KCE-1 과 CE-1 임계 열속 상관식이 각각 내장되어 DNBR 계산에 사용된다. 두 모형을 사용하여 다음의 운전 조건에서 노심의 AOPM을 각각 계산하였다.

Operating Condition			
	Pressure,	*psia*	2250
	Inlet Temperature,	^{o}F	564.5
	Flow Rate	%	100.0 of system flow rate
	DNBR	-	1.30
Available Over Power Margin			
	STD Fuel	%	20.48
	PLUS7 Fuel	%	35.25

계산 결과, PLUS7 연료의 열적 성능이 표준연료에 비하여 약 14.8% 증가됨을 확인하였다.

5. 결론

혼합날개 지지격자를 장착한 PLUS7 연료가 한국 표준형 원자로용으로 개발되었다. 개발 과정에서, PLUS7 연료의 열적 성능을 평가하고 임계 열속 상관식을 개발하기 위하여 임계 열속 시험이 수행되었고 그 임계 열속 시험 자료를 근거로 PLUS7 연료에 대한 임계 열속 상관식 KCE-1이 보수적인 방법으로 개발되었다. 시험 자료 분석 결과, 지지격자 혼합날개의 영향으로 제어봉 안내관의 냉각 효과가 급감하였으며, 특히 저압력 저유량 구간에서 혼합날개의 영향이 더 크게 나타났다. PLUS7 연료의 열적 성능을 평가하기 위

하여, PLUS7 연료와 표준 연료의 임계 열속 시험 자료를 각각 비교하였고, 표준 연료로 설계된 울진 5&6호기 노심에 PLUS7 연료를 대체하여 노심의 열적 여유도 모형을 생산하고 AOPM을 계산하여 비교하였다. 임계 열속 시험 자료를 비교한 결과는 PLUS7 연료가 표준 연료에 비해 최소 3.8%, 최대 24.0%, 평균 12.8%의 열적 성능이 향상됨을 보였으며, 노심의 열적 여유도 모형으로 계산된 AOPM을 비교한 결과는 PLUS7 연료의 열적 성능이 표준 연료에 비해 약 14.8% 증가한 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. CU-HTRF-2001-W1010, "Critical Heat Flux Tests on PWR Fuel Assemblies for Westinghouse Electric Company Test No. 101.0", August 2001.
2. CU-HTRF-2001-W1020, "Critical Heat Flux Tests on PWR Fuel Assemblies for Westinghouse Electric Company Test No. 102.0", August 2001.
3. CENPD-162-P-A, "C-E Critical Heat Flux, Critical Heat Flux Correlation for C-E Fuel Assemblies with Standard Spacer Grids, Part 1 Uniform Axial Power Distribution", September 1976.
4. CENPD-161-P-A, "TORC Code, A Computer Code for Determining the Thermal Margin of Reactor Core", April 1986.
5. Tong, L. S., "Boiling Crisis and Critical Heat Flux", U. S. Atomic Energy Commission, 1972.

표1. 임계 열속 시험에 사용된 PLUS7 연료의 기하학적 특징

Test Class	Fuel Type	Rod Diam.[in]	Rod Pitch [in]	Heated Length[in]	Grid Spring[in]	Guide Tube	GT Diam.[in]	Axial Shape	Grid Material
Typical	16 x 16	0.374	0.506	150.0	15.7	No	N/A	1.475 cos	ZIRLO™
Thimble	16 x 16	0.374	0.506	150.0	15.7	Yes	0.980	1.475 cos	ZIRLO™

표2. 임계 열속 시험구간

매 개 변 수	시 험 구 간
압력, *psia*	1400 ~ 2490
질량 유속, $Mlbm/hr\text{-}ft^2$	0.90 ~3.70
입구 온도, ^oF	250 ~ 637

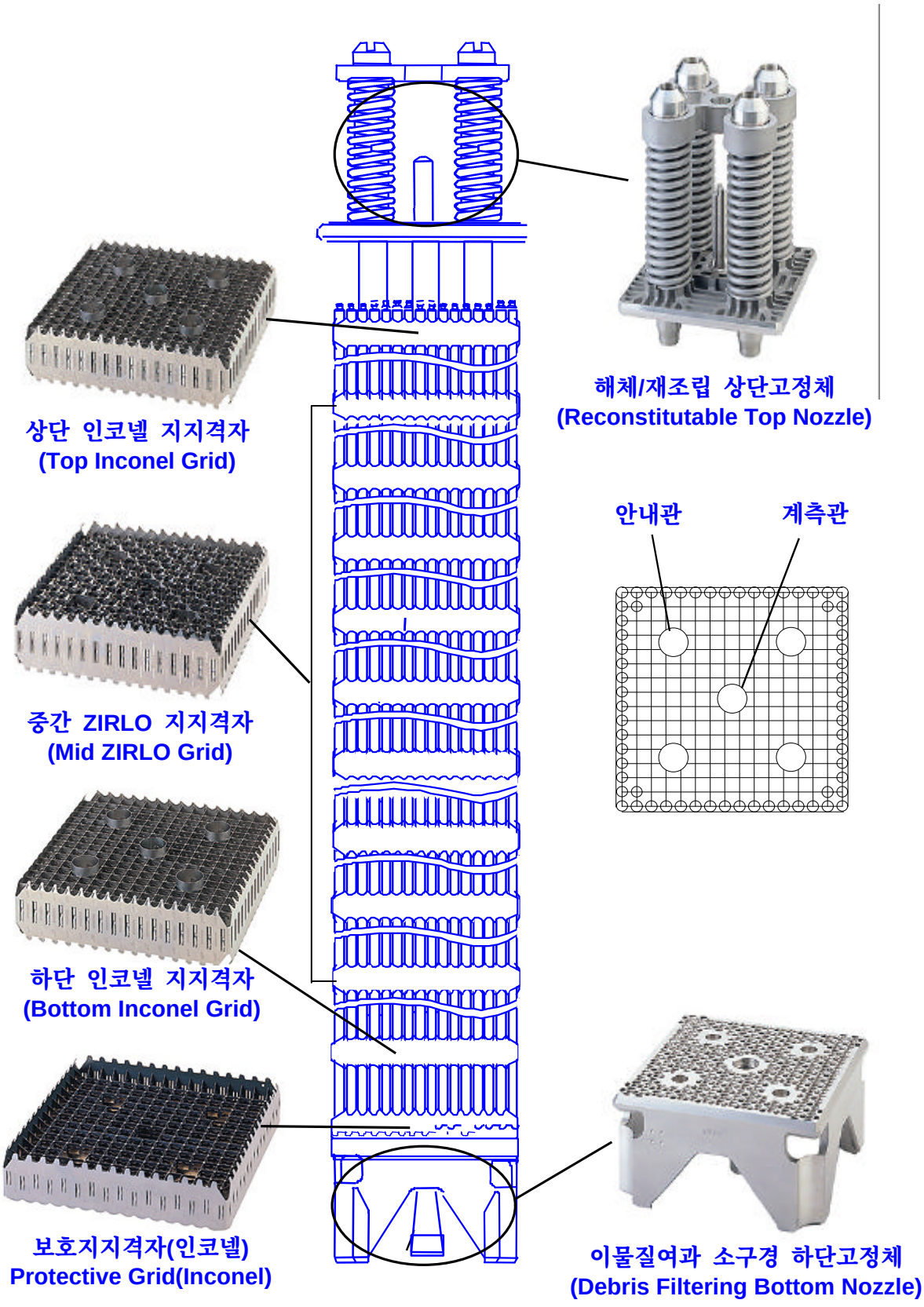
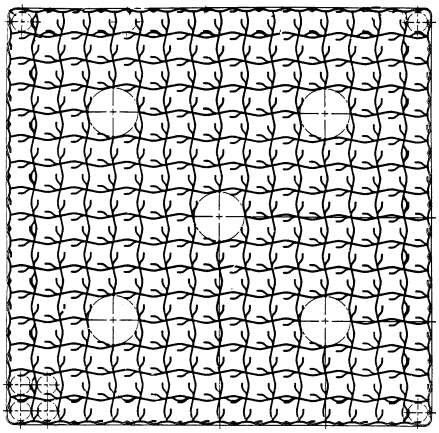
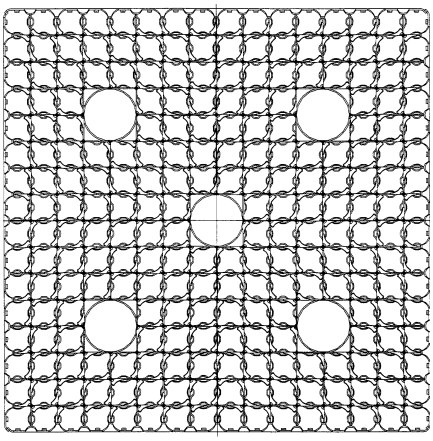


그림 1. PLUS7 집합체 형상

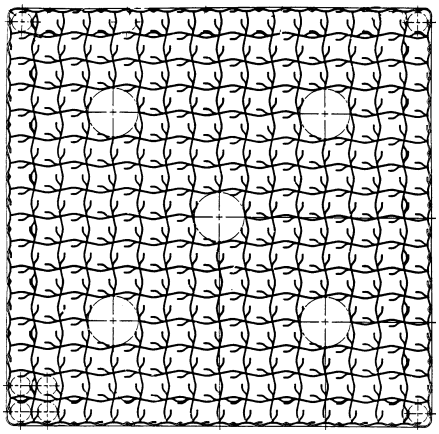
KSNP 연료

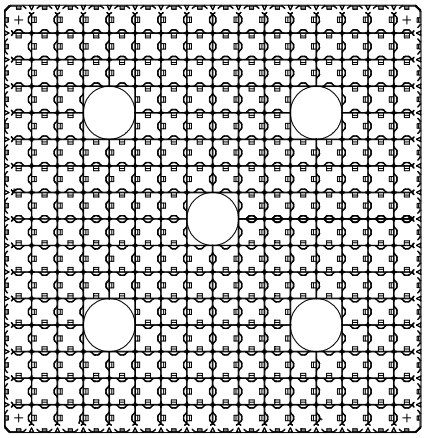
PLUS 7 연료



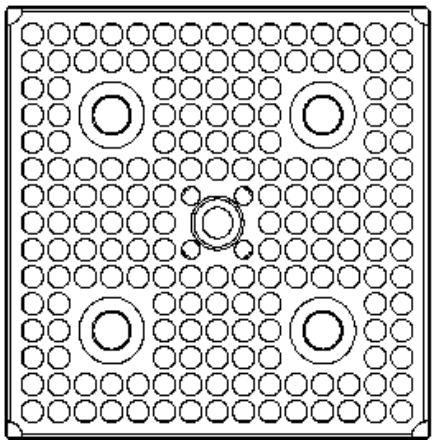


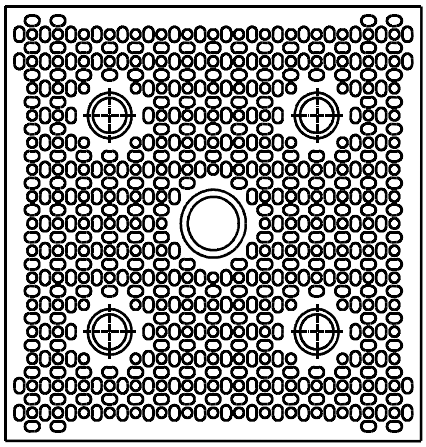
< 중간 지지격자 >





< 상하단 지지격자 >





< 하단 고정체 >

그림 2. 지지격자 및 하단고정체 형상

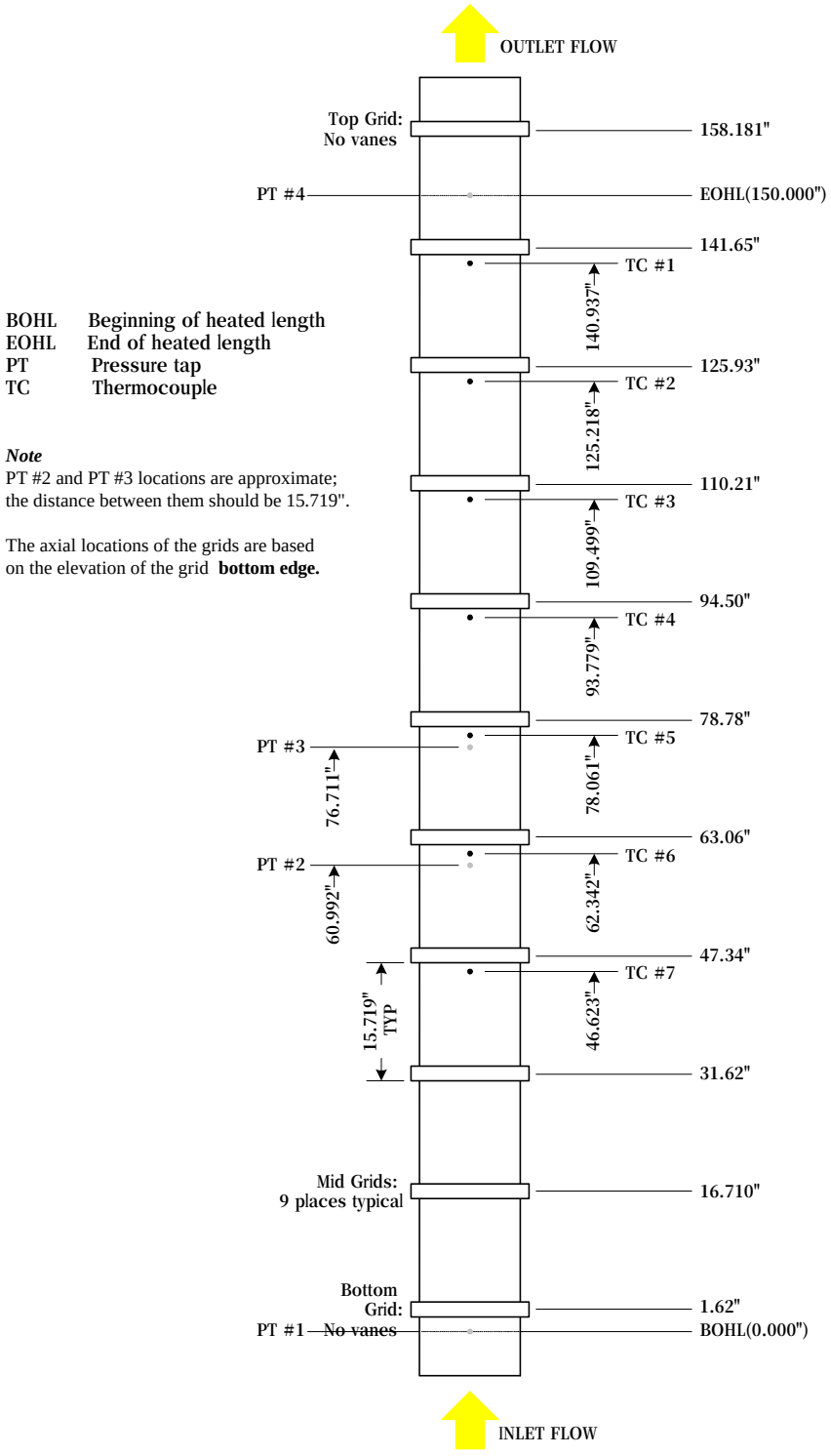


그림 3. PLUS7 연료에 대한 임계 열속 시험부 축방향 구조

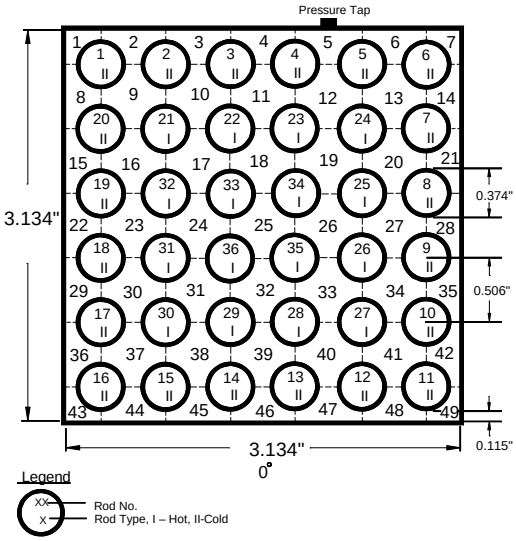


그림 4. 전형적 시험부(typical test section)

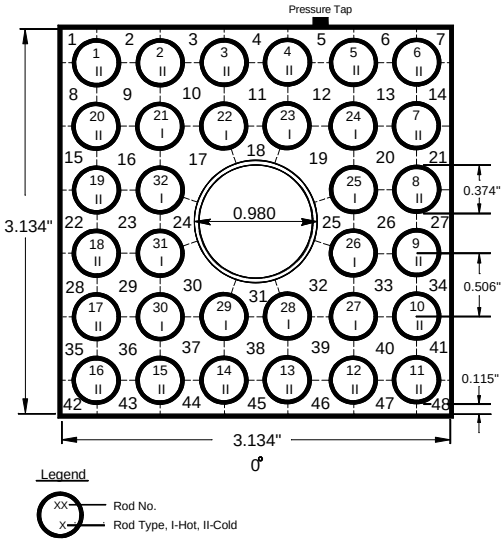


그림 5. 안내관 시험부(thimble test section)

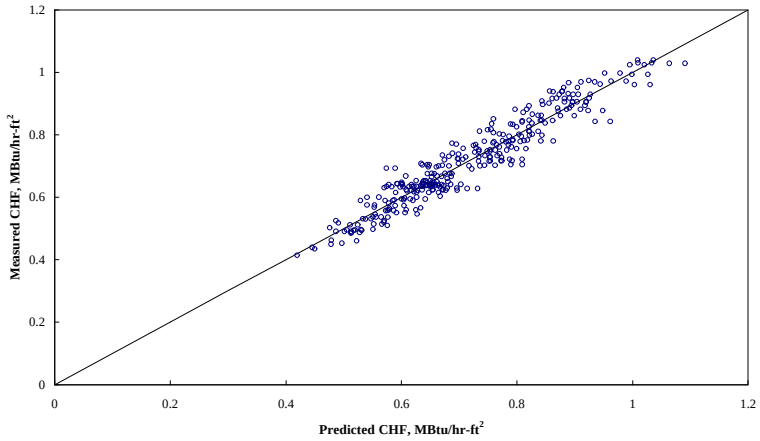


그림 6. KCE-1 임계 열속 상관식의 예측 성능

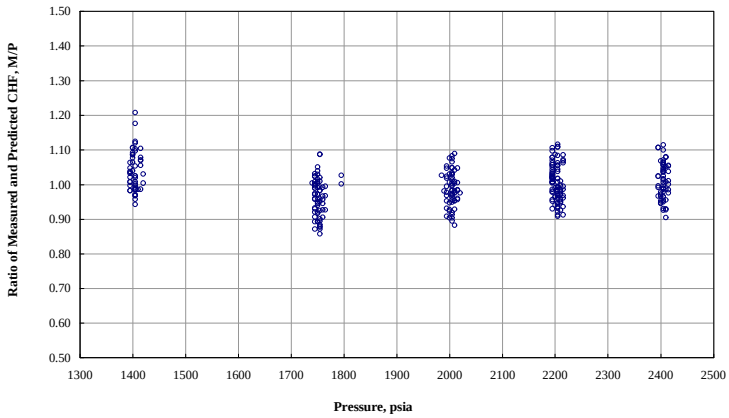


그림 7. 압력 변화에 따른 KCE-1 임계 열속 상관식의 예측 성능

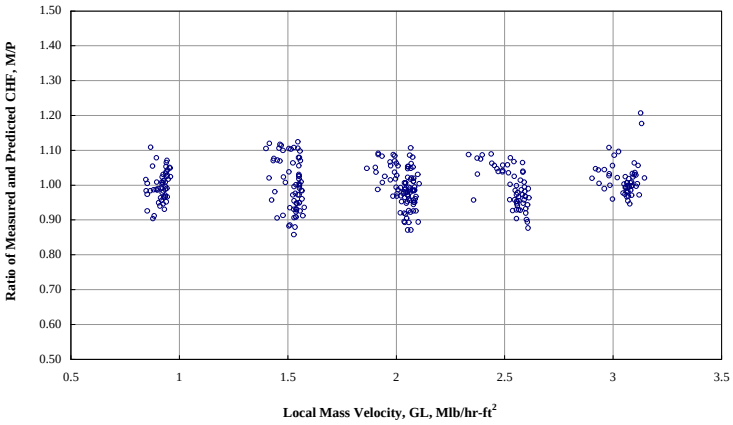


그림 8. 유량 변화에 따른 KCE-1 임계 열속 상관식의 예측 성능

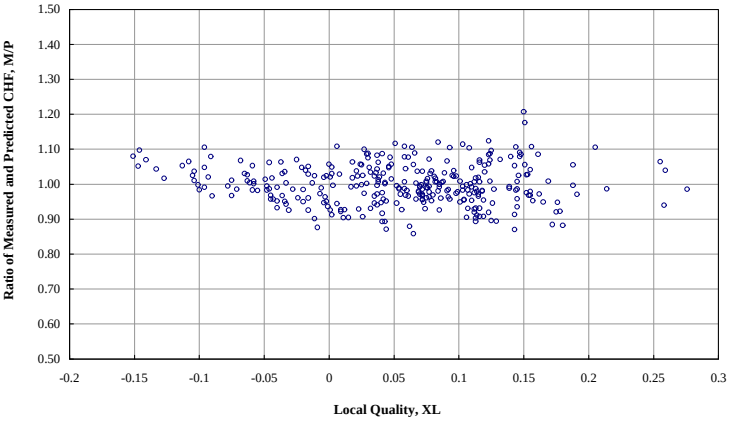


그림 9. 국부 건도에 따른 KCE-1 임계 열속 상관식의 예측 성능

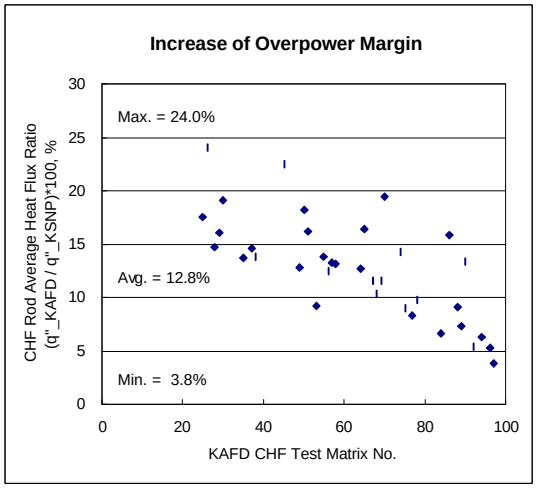


그림 10. 기존 연료와 PLUS7 연료에 대한 임계 열속 시험 자료 비교