

## 하나로 FTL의 핵적 특성 분석

### Reactor Physics Analysis of HANARO Fuel Test Loop

서철교(cgseo@kaeri.re.kr), 이병철, 김헌일, 심봉식, 이정영

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

하나로에서 PWR 및 CANDU 핵연료의 조사 시험을 위하여 핵연료조사시험설비를 개발하고 있다. 발전소와 동등한 고온, 고압을 유지하기 위하여 이중 압력관을 사용하며 각각의 핵연료에 맞는 내부 구조를 가지도록 하였다. 3개의 핵연료봉을 조사 시험할 수 있도록 설계하였으며, PWR 핵연료는 70 cm, CANDU 핵연료는 50 cm의 유효길이를 갖는다.

조사 시험 요건을 만족시키기 위하여 노심의 IR1을 조사위치로 선정하였고, 이중 압력관의 재질은 SS321을 사용하였다. 안전성 분석과 성능 평가를 위해 PWR 핵연료의 농축도는 4.0 w/o, CANDU 핵연료는 1.5 w/o에 대하여 표본 핵설계를 하였다. 하나로 노심에 미치는 핵연료조사시험설비의 반응도 영향은 제한치 이내였으며, 시험 핵연료봉의 선출력 및 피복재에서의 고속 중성자속 준위는 이용자의 요구 조건을 만족시키는 것으로 나타났다.

#### Abstract

HANARO fuel test loop is under development for testing PWR and CANDU fuel elements in HANARO. To maintain the thermal-hydraulic condition equivalent to the power plant, the double pressure tube is employed and gets its specific internal structure. HANARO fuel test loop accommodates up to 3 pin fuel rods, and the active length for PWR is 70 cm, and 50 cm for CANDU.

To satisfy the irradiation requirements, its position is determined to be IR1 and the material of the double pressure tube is selected as SS321. The sample nuclear design is conducted for the safety analysis and evaluation of its characteristics, for the 4.0 w/o enrichment on PWR fuel and the 1.5 w/o

enrichment on CANDU fuel. As the result of reactor physics analysis, it is confirmed that HANARO fuel test loop is within the limitation of reactivity effect at HANARO and the linear power at the test fuel and the fast neutron flux level at its fuel cladding meets the user's requirement.

## 1. 서론

열출력 30 MW의 하나로는 높은 중성자속을 제공하고 있으며 현재 여러 가지 재료 및 핵연료의 조사 시험이 활발히 이루어지고 있다. 하나로는 개방 수조형의 연구로이기 때문에 하나로에서의 조사 시험은 저온, 저압의 환경에서 이루어진다. 또한, 하나로의 냉각은 순수한 경수를 사용하기 때문에 발전소와 같은 수화학적 조건을 모사할 수 없다. 발전용 원자로의 환경에서 조사 시험을 하기 위해서는 고온, 고압을 유지할 수 있는 특별한 시험 장치가 필요하며, 이 시험 장치는 발전소와 같은 수화학적 조건을 모의할 수 있는 냉각 계통을 가져야 한다. 이에 따라 하나로에서 고온, 고압의 발전로 환경에서 조사 시험할 수 있는 핵연료조사시험설비(FTL, Fuel Test Loop)가 개발되고 있다.

이용자의 요구조건인 선출력 및 핵연료 피복재에서의 고속 중성자속(>1.0 MeV) 목표값  $1 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>-s을 만족시키기 위해 고속 중성자속 준위가 높은 노심내의 IR1 조사공을 핵연료시험설비 위치로 선정하였다.

FTL을 이용하여 다양한 핵연료 조사 시험을 수행할 수 있겠지만 PWR 및 CANDU 핵연료를 조사 시험하는 것을 기본 가정으로 하고 있다. 본 논문에서는 조사 시험이 예상되는 표본 PWR 및 CANDU 핵연료에 대하여 노심 특성을 분석하였다.

## 2. 하나로 FTL의 노심 특성

하나로에 설치될 FTL은 노내 시험부인 IPS(In-Pile System)와 노외 공정설비인 OPS(Out-Pile System)로 구성된다. OPS는 노심에서 먼 거리에 있으므로 노심 특성에 영향을 거의 주지 않는다. IPS는 노심내 조사공인 IR1에 위치하는데, 크기를 고려할 때 많은 핵연료봉을 조사 시험할 수 없다. 발전소와 같은 높은 압력이 유지되어야 하므로 압력관의 부피 때문에 최대 3개의 PWR 및 CANDU 핵연료를 조사 시험할 수 있는 3-Pin 핵연료조사시험설비를 설계하였다. 여러 분야의 분석을 통하여 제안된 IPS 및 시험 핵연료의 재원은 표 1과 같다.

표 1. 시험 핵연료 및 IPS 제원

핵연료	PWR	CANDU
UO <sub>2</sub> 소결체 외경 (mm)	8.19	12.154
피복재 (zircaloy-4) 두께 (mm)	0.57	0.42
핵연료 외경 (mm)	9.50	13.08
핵연료 밀도 (g/cc)	10.45	10.45
핵연료봉 pitch (mm)	13.8	14.898
핵연료 길이 (mm)	70.0	50.0
유동관 내경 (mm)	40.0	40.0
유동관 외경 (mm)	44.0	44.0
내부압력관 내경 (mm)	46.0	46.0
내부압력관 외경 (mm)	54.0	54.0
외부압력관 내경 (mm)	58.0	58.0
외부압력관 외경 (mm)	70.0	70.0

노심 특성 분석을 위한 반응도 효과, 중성자속, 선출력 등을 알아보기 위해서는 MCNP[2]를 이용하고, 연소 특성을 추적하기 위해서는 HELIOS[3]를 사용하였다. 그림 1은 PWR 시험 핵연료가 들어있는 IPS가 IR1에 장전되는 경우에 대한 MCNP 계산 모델의 평면도이다.

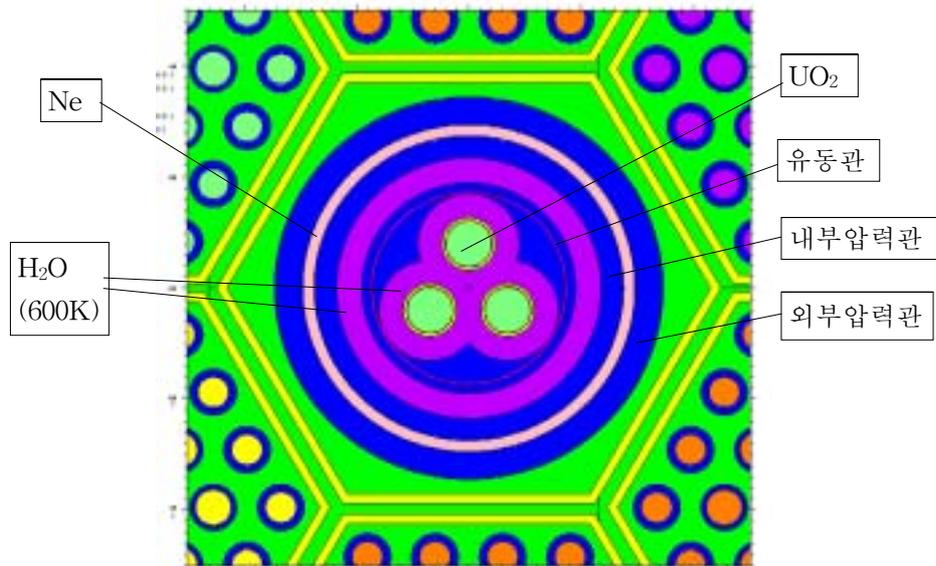


그림 1. PWR 시험 핵연료가 IR1에 장전된 IPS에 대한 MCNP 계산 모델

기본 노심 모형은 36봉 핵연료집합체 20개와 18봉 핵연료집합체 12개가 장전되어 있는 하나로의 완전 장전 노심이다. 표본 핵설계를 위해서는 하나로 평형 노심을 적용하였는데 이 평형 노심의 노심 전체 평균 연소도는 29.41 %U-235이다.

## 2.1 핵연료 농축도

FTL의 표본 핵설계를 위하여 확인해야 하는 주요 인자는 각 핵연료 농축도에 따른 반응도 효과, 핵연료 피복재에서의 고속 중성자속, 선출력 밀도 등이 선택되었다. PWR 핵연료의 농축도는 3.0, 4.0, 및 5.0 w/o의 3가지 경우이고, CANDU 핵연료는 0.711, 1.5, 및 3.0 w/o이다. 농축도에 따른 주요 인자의 비교는 표 2에 나타내었다.

표 2. 농축도에 따른 주요 인자의 비교

구분		PWR			CANDU		
		3.0 w/o	4.0 w/o	5.0 w/o	0.711w/o	1.5 w/o	3.0 w/o
비교 항목							
반응도 효과 (mk)		-8.58	-8.95	-8.43	-9.56	-8.92	-8.70
고속 중성자속 (n/cm <sup>2</sup> -s)	최대	1.55E+14	1.60E+14	1.67E+14	1.26E+14	1.35E+14	1.45E+14
	평균	1.01E+14	1.04E+14	1.07E+14	9.76E+13	1.02E+14	1.12E+14
선출력 (kW/m)	최대	44.30	53.69	61.02	30.23	52.16	83.32
	평균	29.37	35.59	41.01	22.76	39.16	63.44

반응도 효과를 나타낼 때는 IR1에 모의 핵연료집합체가 장전되어 있는 노심을 기준으로 하였다. 시험 핵연료를 추가로 장전하지만 IPS 압력관의 재질이 중성자 흡수를 많이 하므로 음(-)의 반응도 영향을 준다. 계산된 임계도의 통계 오차를 고려해볼 때 반응도값은 -10 mk 이내에 있을 것으로 추정된다. 하나로의 고정 실험물에 대한 반응도 변화에 대한 제한치인 12.5 mk를 초과하지 않으므로 IPS의 재질 및 설계는 적합하다.

핵연료 농축도에 따른 피복재에서의 최대 고속 중성자속은 핵연료 농축도가 증가함에 따라 조금씩 증가하고 있으며, PWR 핵연료의 경우에 1.55~1.67x10<sup>14</sup> n/cm<sup>2</sup>-s로 목표값인 1x10<sup>14</sup> n/cm<sup>2</sup>-s을 충분히 만족시키고 있다.

각 시험 핵연료봉에서의 선출력은 최대 및 평균 선출력으로 나타내었다. 최대 선출력 제한치는 이용자의 요구 조건 및 사고 해석 결과에 따라 결정된다. PWR 시험 핵연료에 대해서 최대 선출력 제한치를 40 kW/m로 할 경우 농축도가 3.0 w/o일 때는 제한치 보다 10% 정도 높게 나타났으며, 농축도가 4.0 w/o나 5.0 w/o일 때는 30~50% 초과하였다.

높은 선출력 문제를 극복하기 위해서는 시험 핵연료봉의 농축도를 낮추거나 원자로 출력을 낮추는 것이다. 농축도를 낮추는 것이 가장 간단하며 추가적인 부담이 없으므로 바람직한 것처럼 보인다. 그러나 농축도를 낮추어 조사 시험하는 경우에는 높은 연소도에서는 선출력이 낮아지기 때문에 조사시간이 길어진다. 핵연료를 개발하는 이용자의 입장에서는 당연히 조사시간이 짧은 것이 유리하므로 하나로 출력을 조절하기를 원할 것이다. 농축도 및 운전 조건을 결정하기 위해 필요한 것은 최대 선출력과 출력 준위에 따른 핵연료봉의 연소 특성이다. 노심 출력 30 MW에 대하여 연소도에 따른 최대 선출력 변화를 살펴보았으며 그림 2에 나타내었다.

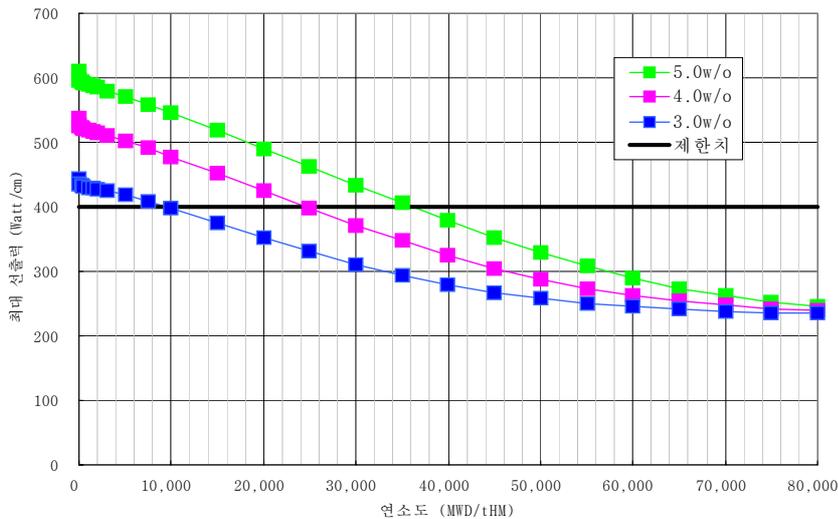


그림 2. PWR 시험 핵연료의 연소도에 따른 최대 선출력 변화

낮은 연소도에서는 3가지 농축도의 모든 시험 핵연료봉이 제한치를 초과하지만 높은 연소도에서는 제한치 이내이다. 최대 선출력을 제한치 이하로 조사시키기 위하여 노심 출력을 낮추어 운전해야 한다. 일정하게 노심 출력을 낮추는 경우보다는 시험 핵연료봉의 연소가 진행되어 선출력이 충분히 떨어지면 노심 출력을 단계적으로 높이는 방법을 적용하는 것이 조사시간을 보다 효과적으로 줄일 수 있다.

3가지 농축도에 대하여 노심 출력 20~30 MW 영역에서 적절한 출력 조절로 최대 선출력 제한치 미만으로 조사 시험할 수 있는 것으로 나타났다. 농축도가 높을수록 노심 출력 조절을 오랫동안 해야 하지만 높은 연소도에서 선출력이 높기 때문에 빠른 조사 시험이 가능하다. 농축도가 높을수록 높은 연소도에서 최대 선출력 제한치를 초과하지 않는 범위 내에서 노심 출력을 변화시키는 효과는 커진다. 연소도 70,000 MWD/tHM까지 도달하기 위해 필요한 조사일은 일정한 출력으로 조사시킬 때 보다 5.0 w/o에서는 27%, 4.0 w/o에서는 24%, 3.0 w/o에서는 13%가 줄었다. 농축도에 따른 조사일을 비교해 볼 때 4.0 w/o는 3.0 w/o와 큰 차이를 보여주지만 5.0 w/o에 대해서는 큰 차이가 없다. 즉 4.0 w/o의 핵연료 농축도를 사용

하는 것이 가장 효과적임을 알 수 있다.

CANDU 핵연료의 최대 선출력 제한치를 60 kW/m로 할 경우 농축도가 1.5 w/o까지는 적당하나, 농축도가 3.0 w/o일 때는 제한치를 40% 이상 초과한다. PWR 핵연료의 경우와 마찬가지로 HELIOS를 사용하여 3가지(0.711, 1.5, 3.0 w/o) 농축도의 CANDU 핵연료에 대하여 연소 특성을 알아보았다. 연소도에 따른 최대 선출력 변화는 그림 3에 나타내었다. CANDU 핵연료의 경우는 PWR 핵연료의 경우와 아주 다른 현상을 보여주고 있다. 농축도가 낮은 경우는 연소도가 진행됨에 따라 오히려 선출력이 높아진다. 농축도 1.5 w/o의 경우는 연소도에 따른 출력 변화가 없으므로 이상적이라 할 수 있다. 즉 CANDU 핵연료의 조사 시험은 추가적인 노심 출력의 조절을 필요치 않는다.

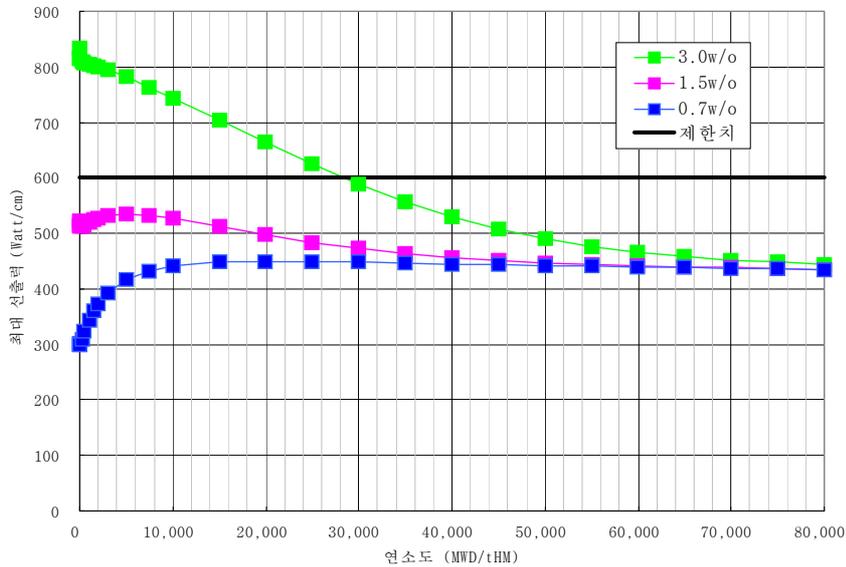


그림 3. CANDU 핵연료의 연소도에 따른 최대 선출력 변화

## 2.2 표본 시험 핵연료

농축도에 따른 특성을 분석한 결과 PWR 시험 핵연료는 4.0 w/o, CANDU 시험 핵연료는 1.5 w/o가 하나로 FTL에 시험하기 적당함을 알았다. 이러한 각 시험 핵연료에 대해서 하나로 운전조건에서의 선출력 변화, 핵 발열량 분포, IPS에서의 중성자속 분포, 기포 출력 계수, 붕소 농도 변화 등을 알아보았다. 시험 핵연료의 출력 분포는 하나로의 제어봉 위치에 가장 큰 영향을 받는데, 하나로의 제어봉은 노심 조건에 따라 200~550 mm에 위치한다. 제어봉 위치를 50 mm 단위로 구분하여 선출력을 얻었으며 PWR 핵연료는 그림 4, CANDU 핵연료는 그림 5에 나타내었다. 최대 침투 출력은 핵연료 형태와는 상관없이 제어봉 350 mm에서 나타난다. 최대 침투 계수는 PWR은 1.43, CANDU는 1.29이다.

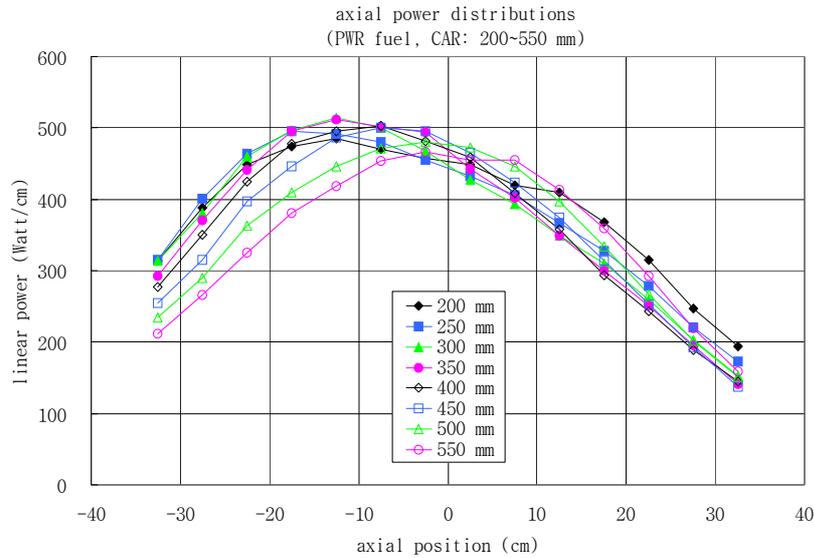


그림 4. PWR 시험 핵연료의 출력 분포

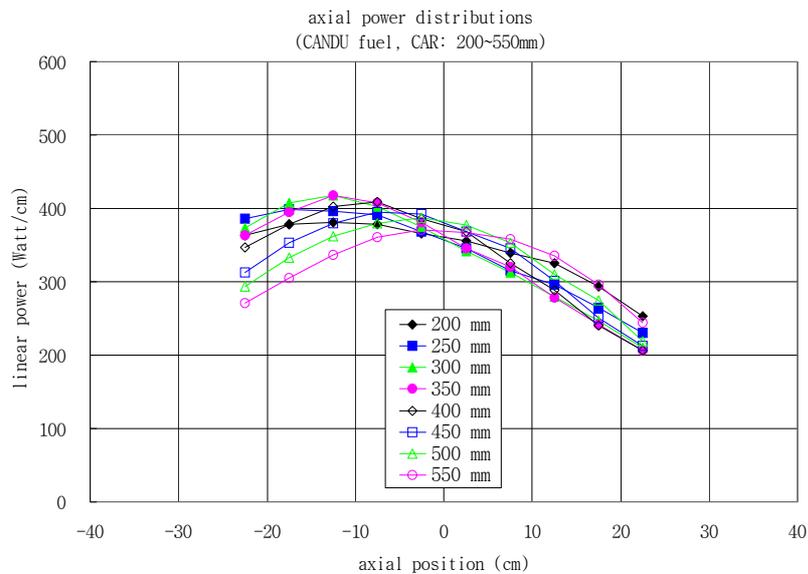


그림 5. CANDU 시험 핵연료의 출력 분포

감마 및 중성자에 의한 핵 발열량 분포도 제어봉에 영향을 받아 제어봉 높이 350 mm에서 발열량이 가장 크다. 축방향 변화는 핵연료의 선출력 분포보다 그 변화가 심하지는 않다. 횡방향으로는 외부 압력관에서 최대 발열이 생성되는데 외부 압력관은 하나로의 냉각수로 냉각되기 때문에 중요하지 않다. 최대 비발열량은 PWR은 5.0 Watt/g, CANDU는 4.8 Watt/g이다. FTL의 냉각 계통에 기여하는 핵 발열량에 의한 출력은 PWR은 21.3 kW, CANDU는 22.7 kW이다.

IPS의 각 부분에 대한 열 및 고속 중성자속 분포를 그림 6 및 7에 나타내었다. 중성자속의 분포는 시험 핵연료의 형태에 따라 크게 변하지 않는다. 이

것은 IPS의 중성자는 하나로 핵연료에 의해 생성되는 중성자가 거의 대부분이기 때문이다.

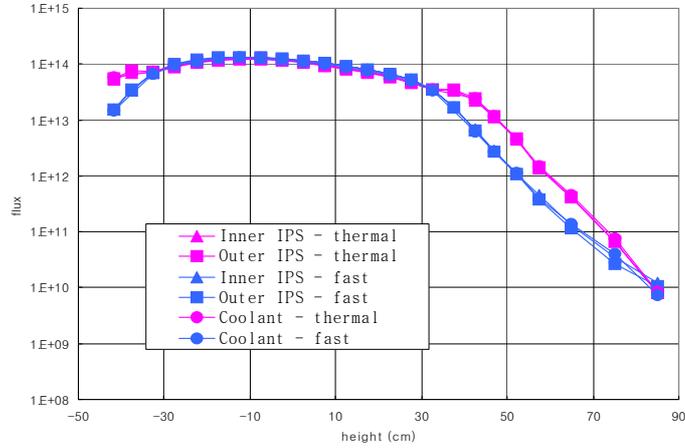


그림 6. IPS에서의 축방향 중성자속 분포 - PWR

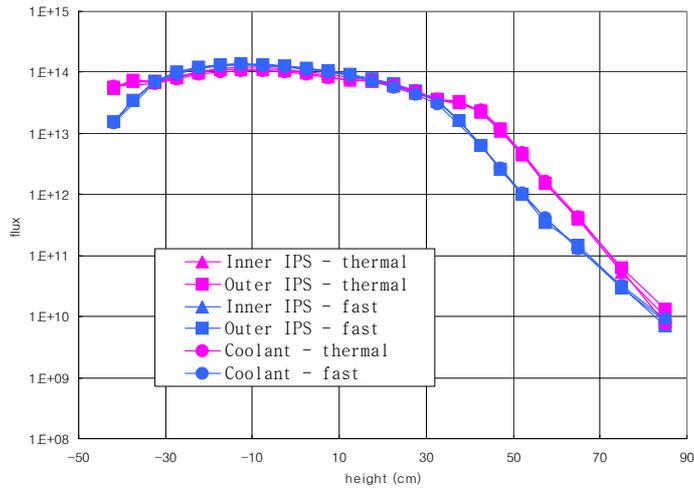


그림 7. IPS에서의 축방향 중성자속 분포 - CANDU

FTL에서 시험 핵연료의 출력은 하나로 출력 준위에 의해 결정되기 때문에 일반적으로 정의된 반응도 계수는 중요하지 않다. 그러나 IPS 내의 냉각수에서 생성된 기포가 시험 핵연료의 출력에 크게 영향을 줄 수 있다. 기포 출력계수가 양(+)일 경우, 어떤 사고로 인해 하나로가 비상 정지되었을 때 시험 핵연료의 출력이 충분히 감소되기 전에 IPS 내에서 기포가 형성되어 시험 핵연료의 출력이 급격히 증가할 가능성이 있기 때문이다. 따라서 PWR 및 CANDU 핵연료를 시험하기 위해 설계된 IPS 구조에 대하여 기포 출력 계수를 확인해야 한다. 기포 출력 계수는 FTL 냉각수의 밀도 변화에 따른 출력 변화로 나타낼 수 있다. 그림 1의 결과에

따르면 시험 핵연료의 출력은 냉각수의 밀도가 낮아짐에 따라 낮아진다. 기포 생성에 따라 시험 핵연료의 출력이 낮아져 기포 출력 계수가 음(-)이 되므로 FTL은 기포 생성에 대하여 고유 안전성을 가진다고 할 수 있다.

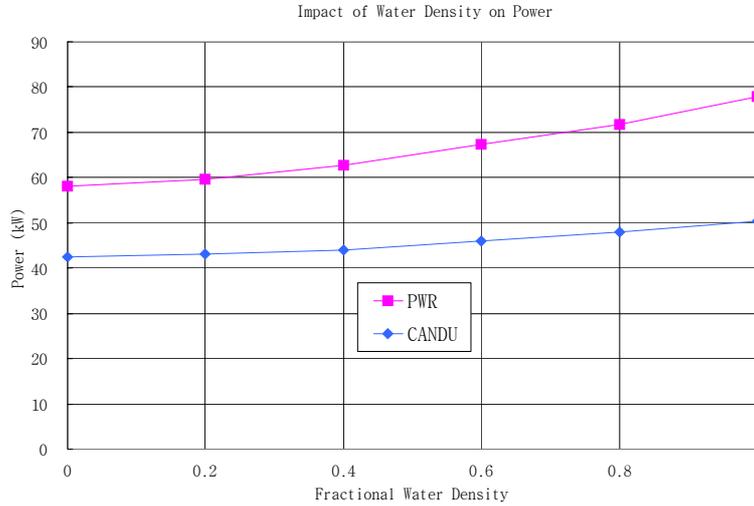


그림 8. 냉각수 밀도에 따른 출력 변화

발전용 원자로에서는 임계도를 조절하기 위하여 붕소 농도를 제어하지만 하나로 FTL에서는 이러한 역할을 기대할 수 없다. 단지 수화학적 측면의 원자로 환경을 구현하기 위해서 붕소가 필요하다. 하나로 FTL에서 붕소 농도를 임의로 조절할 수 있는 화학적 체적제어 계통의 필요성 여부를 판단할 기초 자료를 만들기 위해 중성자 흡수에 의한 붕소 농도의 변화를 정량적으로 알아보았다. 붕소는 강한 중성자 흡수 물질로 핵변환을 일으키기 때문에 붕소 농도의 변화가 있는데, 붕소 농도의 변화가 작다면 화학적 체적제어 계통이 필요하지 않을 것이다.

붕소는 B-10(19.9%)과 B-11(80.1%)로 구성되어 있으며, 중성자 반응을 일으키는 주요 반응은  $B^{10}(n, \alpha)Li^7$ 으로 매우 크기 때문에 나머지 반응은 무시할 수준이다. FTL에 처음 붕소가 삽입된 후에 농도 조절이 없다고 가정하면 FTL 내의 B-10 농도 또는 전체 원자수의 변화율은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dN_B}{dt} &= -RN_B, \\ &= -\sigma_{eff}\phi f_{core}N_B, \end{aligned} \quad \text{----- (1)}$$

여기서,  $R$ 은 핵반응에 의한 B-10의 제거율이며,

$f_{core}$ 은 B-10을 포함하는 FTL 냉각수의 중성자 반응이 일어나는 영역의 부피와 전체 부피의 비이다.

$R$ 은  $\sigma_{eff}$ ,  $\phi$ ,  $f_{core}$ 로 구성되어 있는데 거의 변화가 없으므로 상수로 가정할 수 있다. 식 (1)으로부터 시간에 따른 B-10의 초기 농도에 대한 비율은 다음 식으로 표

현할 수 있다.

$$\frac{N_B}{N_B^0} = e^{-\sigma_{eff}\phi f_{core} t} \text{-----} (2)$$

FTL 전체 냉각수는 834.94 l이고 노심 내 IPS의 냉각수 부피는 892.645 cc이므로  $f_{core}$ 은 1.069E-3이다.  $\sigma_{eff}\phi$ 는 노심 계산으로부터 직접 구할 수 있으며 계산 결과 1.878E-7로 나타났다. 하나로 이용율을 0.69로 가정할 때 B-10 농도의 변화 및 B의 농도 변화는 표 3과 같다.

표 3. B-10과 전체 붕소의 농도 변화

운전 시간 (년)	초기 농도에 대한 비율	
	B-10	전체 붕소
1	0.9956	0.9991
2	0.9912	0.9982
3	0.9870	0.9974
4	0.9827	0.9965
5	0.9784	0.9957

5년 동안 붕소를 주입하지 않고 FTL을 운전할 경우에 B-10의 농도는 2.2% 줄어들고 전체 붕소는 0.5% 줄어든다. B-10의 핵반응이 일어나는 부피의 비가 전체 FTL 부피에서 0.1%로 매우 작고 전체 붕소에서 B-10이 차지하는 비율이 약 20%이기 때문에 전체 붕소의 변화는 작다.

#### 4. 결론

하나로의 IR1 조사공에 IPS를 설치하여 조사 시험하는 경우에 대하여 노심 특성을 분석하였다. 적절한 표본 시험 핵연료를 선택하기 위하여 시험 핵연료의 농축도에 따른 반응도 효과, 중성자속, 선출력 밀도 등을 먼저 분석하였다. 반응도 변화는 10 mk 이내에 있는 것으로 나타났다. 조사 실험물에 대한 하나로의 반응도 변화에 대한 제한치인 12.5 mk를 초과하지 않으므로 IPS의 재질 및 설계는 적합하다. 핵연료 피복재에서의 고속 중성자속은 IR 조사공이 노심 내에 있으므로 고려된 모든 핵연료에 대하여 목표값  $1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2\text{-s}$ 을 만족시키고 있다. PWR 핵연료의 최대 선출력 제한치를 40 kW/m로 할 경우 하나로 출력의 조절이 필요한데 핵연료 농축도가 4.0 w/o일 때 가장 효과적인 것으로 나타났다. CANDU 핵연료의 최대 선출력 제한치를 60 kW/m로 할 경우 농축도가 1.5 w/o이하일 경우가 하나로의 출력 조절을 필요하지 않고 적당한 것으로 나타났다.

4.0 w/o의 PWR 시험 핵연료와 1.5 w/o의 CANDU 시험 핵연료에 대한 하나로

FTL의 특성은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 최대 침투 출력은 핵연료 형태와는 상관없이 제어봉 350 mm에서 나타난다. 최대 침투 계수는 PWR은 1.43이며 CANDU는 1.29이다.
- 2) 감마 및 중성자에 의한 최대 핵 발열량은 PWR은 5.0 Watt/g, CANDU는 4.8 Watt/g이다.
- 3) FTL의 냉각 계통에 기여하는 핵 발열량에 의한 출력은 PWR은 21.3 kW, CANDU는 22.7 kW이다.
- 4) 기포 생성에 따라 시험 핵연료의 출력이 낮아져 기포 출력 계수가 음(-)이므로 FTL은 기포 생성에 대하여 고유 안전성을 가진다.
- 5) PWR 핵연료 조사 시험할 때 5년 동안 붕소를 주입하지 않고 FTL을 운전할 경우에 B-10의 농도는 2.2% 줄어들고 전체 붕소는 0.5% 줄어든다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

### 참고 문헌

- [1] 이병철 및 김학노, "하나로의 핵연료 조사설비 성능요건 검토," 기술보고서, KAERI/TR-1592/2000, 한국원자력연구소, 2000. 6.
- [2] J. F. Briesmeister (Editor), "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code," LA-12625-M, Los Alamos National Lab. 1993.
- [3] E. A. Villarino, R. J. J. Stamm'ler, A. A. Ferri, J. J. Casal, "HELIOS: Angularly Dependent Collision Probabilities," *Nucl. Sci. & Eng.*, 112, 16. 1992.