2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# 하나로에서의 핵연료 조사설비 성능요건 검토

## Study on the Requirement for the Fuel Test Loop Performance in the HANARO

이병철, 김학노, 이충성

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

하나로에 설치를 검토하고 있는 핵연료 조사시험 설비의 성능 요건을 분석하기 위하여 반사체 영역의 LH공과 외부 노심의 조사공인 OR3공을 대상으로 In-pile Section (IPS) 에서 천연우라늄의 CANDU 핵연료 및 농축도가 각각 3.5%, 5%인 PWR 핵연료를 다발, 7-pin 및 1-pin 등의 형태로 조사할 때 예상되는 선출력 및 중성자속을 분석하였다. CANDU 핵연료에 대해서는 모든 경우에 목표 선출력 60kW/m에 도달하지 못하였으나 PWR 핵연료에 대해서는 LH공에서 농축도 5%의 다발을 조사할 경우에만 일부 핵연료에서 목표 선출력 40kW/m를 얻을 수 있었다. OR3공에서는 IPS 재질로 zircaloy-4를 사용하면 농축도에 관계없이 목표 선출력 이상을 얻을 수 있었고, SS316을 사용하면 농축도가 5%인 경우에 목표 선출력 이상을 얻을 수 있었다. 핵연료 피복재에서의 고속중성자속(E>0.821MeV)은 모든 경우에 목표값인 $10^{14}$ n/cm$^2$-sec에는 미치지 못하였다. 그러나, 노심 연소 효과, 연료 대 감속재 수밀도 비의 최적화 등을 위한 민감도 분석 결과 LH공에서 1또는 7-pin을 조사할 경우 농축도를 높이면 PWR과 CANDU 핵연료 모두 목표 선출력에 도달할 수 있을 것으로 예상되었다.

### Abstract

To investigate the performance requirements of the Fuel Test Loop (FTL) facility to be considered to install at the HANARO, the achievable linear power at test fuel pin(s) and neutron flux levels at the cladding for LH hole in the reflector region and OR3 in the outer core region were analyzed in the IPS (In-pile Section), which accommodates CANDU or PWR test fuel. The enrichment of test fuels was assumed as natural uranium for CANDU and 3.5% or 5% for PWR and the test fuel configuration was bundle or 7-pin in LH hole but 1-pin in OR site. For the CANDU test fuels, the target linear power of 60kW/m can not be achieved for all cases. For the PWR test fuels at LH, the target linear power of 40kW/m can be obtained at some fuels for only the case of 5% bundle irradiation. At OR3, the linear power for the PWR fuel irradiation with the use of zircaloy-4 IPS can reach the target value regardless of the fuel enrichment, but that with the use of SS316 IPS can reach the target value for only the 5% enrichment. The target fast neutron flux at the fuel cladding of $10^{14}$ n/cm$^2$-sec can not be achieved in any case. Through sensitivity studies for the core burnup effect, optimization of the ratio of fuel-to-moderator number density, etc., however, the target linear power for the PWR and CANDU fuel irradiation in case that 1 or 7-pin is irradiated, is expected to be achieved if enriched fuel is used .

## 1. 서론

발전용 원자로의 핵연료를 조사시험하기 위해서는 발전로의 운전조건과 유사한 환경을 만들어 주어야한다. 미국의 ATR, 카나다의 NRU, 일본의 JMTR, 벨기에의 BR2, EU가 운영주체이며 Norway에 위치한 HBWR, 프랑스의 OSIRIS 등이 이와 같은 특수 목적을 갖고 설계되었으며 운영되고 있는 연구로이다. 이들은 원자로 출력이 높고 조사공의 위치도 노심내에 위치하거나 노심에 매우 근접하여 확보되어 있다. 조사공내에 시료를 설치하고 조사 조건을 시험 요건에 맞도록 유지·조절할 수 있기 위해서는 캡슐이나 rig, 또는 loop이 필요하다[1,2].

하나로의 경우에는 핵연료의 조사시험용 조사공의 위치 확보와 관련하여 침니 외부에 위치하지만 노심에 가장 근접한 위치에 LH조사공을 확보하도록 설계시에 고려하였다. 여기서는 하나로에 설치하는 것을 검토하고 있는 핵연료 조사시험 설비의 기술적 타당성을 확인하기 위해 수행한 핵연료 조사시험설비의 성능 요건을 분석한 결과를 정리하였다. 분석 대상이 되는 노내조사설비의 기하학적 구조를 기술하였으며, 반응도 효과, 중성자 스펙트럼, 중성자속 및 조사시험 핵연료의 출력 등을 상세히 평가하여 이용자로 하여금 이용 설비의 설치 필요성에 대한 선택이 가능하도록 하였다.

## 2. 분석 및 토의

### 2.1 조사공 및 노내조사시험설비

하나로의 LH 조사공은 내경이 150mm이고 두께가 5mm인 지르칼로이로 되어있다. 이것은 CANDU의 압력관과 칼란드리아관의 크기가 고려되어 결정된 것으로 노내조사시험설비가 설치될 경우에 CANDU 1다발을 시험할 수 있도록 한 것이다. 그림 1은 하나로 평면도이다.

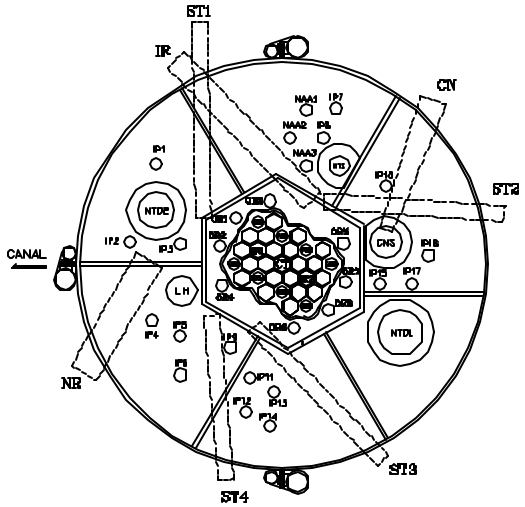


그림 1. 하나로의 평면도

분석에서는 천연우라늄을 사용하는 CANDU 핵연료와 농축도가 3.5% 및 5.0%인 PWR 핵연료를 대상으로 LH 조사공에서 다발 및 7-pin으로 조사되는 경우에 대해 분석하였으며 추가로 OR공에서 1-pin을 조사시킬 경우에 대해서도 분석하였다. 다발 형태로 조사시킬 경우에는 CANDU 형은 37-pin 다발을, PWR형은 32-pin 다발을 대상으로 하였다. 핵연료의 밀도는 10.45 g/cc 이다.

핵연료 및 IPS를 구성하고 있는 flow tube 및 pressure tube는 LH에서 다발을 조사할 경우에는 Zr-2.5%Nb을, 7-pin으로 조사할 경우에는 zircaloy-4를 사용하였다. OR3에서 조사하는 1-pin의 경우에는 SS316 및 zircaloy-4에 대해 각각 계산하였으며 이때 flow tube 및 pressure tube의 제원은 동일하게 하였다. 표 1은 조사 핵연료에 따른 핵연료 제원 및 조사시험설비의 제원을 정리한 것이다.

표 1. FTL 분석을 위한 핵연료, flow tube 및 pressure tube의 제원 (단위: cm)

| FTL 종류 | 다발 (LH) | | 7-pin (LH) | | 1-pin (OR3) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 핵연료 종류 | CANDU (37 pin) | PWR (32 pin) | CANDU | PWR | CANDU | PWR |
| | Nat U | 3.5%, 5% | Nat U | 3.5%, 5% | Nat U | 3.5%, 5% |
| $UO_2$ 외경 | 1.21 | 0.819 | 1.2154 | 0.8198 | 1.2154 | 0.8198 |
| Clad 내경 | 1.226 | 0.8356 | 1.2243 | 0.8363 | 1.2243 | 0.8363 |
| 핵연료 외경 | 1.31 | 0.95 | 1.3081 | 0.9507 | 1.3081 | 0.9507 |
| 핵연료 길이 | 50 | 70 | 50 | 70 | 50 | 70 |
| Flow Tube 내경 | 10.34 | | 5.3 | | 2 | |
| Flow Tube 외경 | 10.74 | | 5.7 | | 2.4 | |
| Inner Pressure Tube 내경 | 12.07 | 11.15 | 6.9 | | 3.0 | |
| Inner Pressure Tube 외경 | 13.524 | 13.39 | 8.1 | | 3.8 | |
| Outer Pressure Tube 내경 | 13.924 | 13.98 | 8.7 | | 4.4 | |
| Outer Pressure Tube 외경 | 14.635 | 14.78 | 10.2 | | 5.6 | |
| IPS 길이 | 120 | | | | | |
| 재질 | Zr-2.5%Nb | | Zircaloy-4 | | SS316 or Zircaloy-4 | |

## 2.2 기본 분석 결과 및 평가

분석은 하나로가 30MW로 운전되는 경우에 대해 노심에 장전된 핵연료를 모두 새 핵연료로 가정하여 MCNP를 이용하여 수행하였다. 그림 2는 LH공에서 CANDU 37-pin 다발을 조사시킬 때의 단면도이다.

### 2.2.1 반응도 변화

LH나 OR3에 IPS에서 핵연료를 조사할 경우 반응도 변화는 OR3에서 1-pin을 조사할 경우가 가장 크게 나타났으며 모두 1.9 mk 이하로 하나로 운영기술지침서의 조사물에 의한 반응도 제한치 12.5 mk를 충분히 만족하고 있다.

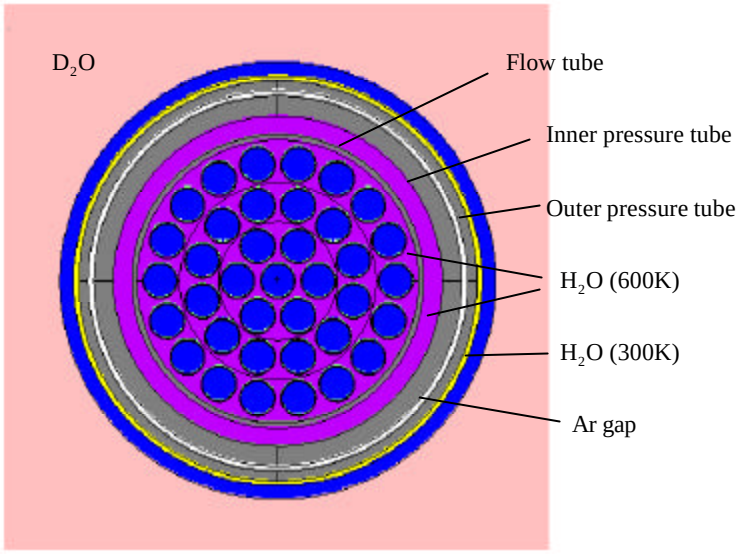


그림 2. LH 공에서 CANDU 37-pin 다발 조사시 단면도

### 2.2.2 중성자 에너지 스펙트럼

IPS flow tube 내부에서의 중성자 스펙트럼은 CANDU 핵연료 및 PWR 핵연료에서 비슷하게 나타났다. LH공에서는 다발로 조사할 때가 7-pin으로 조사할 때보다 열중성자 영역은 낮으나 열외중성자 및 고속중성자 영역에서는 높았다. 이는 flow tube내에서 핵연료에 대한 물의 부피 비가 다발의 경우가 7-pin 경우에 비해서 훨씬 크기 때문이다. OR3에서 1-pin을 조사할 경우는 IPS 재질이 SS316일 때가 zircaloy-4일 때에 비해서 열중성자 영역에서는 낮게, 열외중성자 및 고속중성자 영역에서는 높게 나타났다. LH공과 OR3공을 비교하면 열외중성자 영역에서는 노심에서 가까운 OR3공에서 높았으며 열중성자 및 고속중성자 영역에서는 LH공에서 조금 높게 나타났으나 그 차이는 크지 않았다. 그림 3은 CANDU 핵연료 조사시 IPS flow tube 내부에서의 중성자 스펙트럼이다.

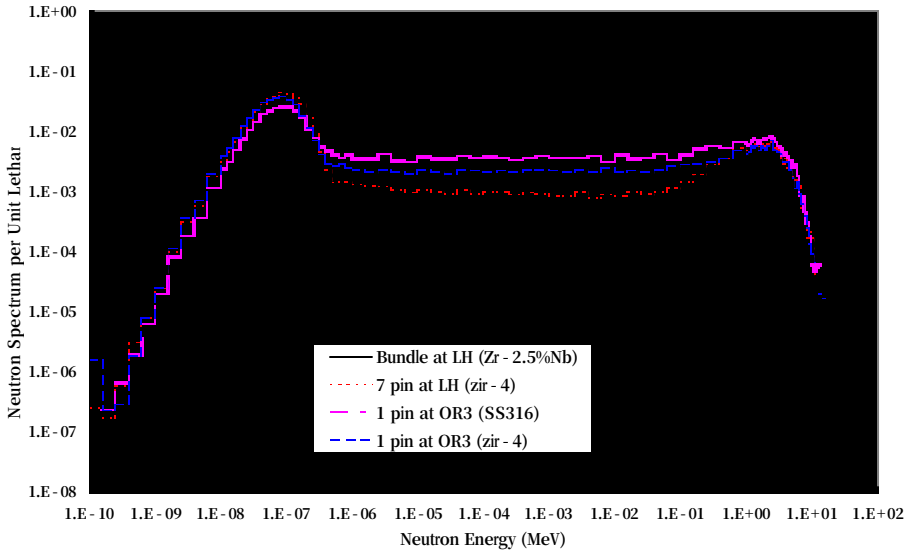


그림 3. LH 및 OR3 에서 CANDU 핵연료 조사시 flow tube 내에서의 중성자 스펙트럼

2.2.3 중성자속

IPS flow tube 및 핵연료 피복재에서의 최대 및 평균 중성자속은 표 2와 같다. LH공에서 조사할 경우, IPS내 핵연료 피복재에서 열중성자속(E<0.625eV)은 다발보다는 7-pin으로 조사할 경우가 30% 이상 증가하였으나 고속중성자속(E>0.821MeV)은 7-pin으로 조사할 경우가 다발로 조사할 경우에 비해 20% 이상 감소하였다. 이는 flow tube내에서 핵연료 대 물의 부피 비가 다발로 조사할 때가 7-pin으로 조사할 때에 비해 약 2배(CANDU) 및 1.3배(PWR)로 크기 때문이다. CANDU 핵연료의 경우 다발 및 7-pin으로 조사할 때 핵연료 피복재에서의 축방향 평균 고속중성자속은 각각 $1.3x10^{13}n/cm^2$-sec 및 $1.1x10^{13}n/cm^2$-sec 였다. 또한 농축도가 5%인 PWR 핵연료의 경우 다발 및 7-pin으로 조사할 때 핵연료 피복재에서의 축방향 평균 고속중성자속은 $2.7x10^{13}n/cm^2$-sec 및 $2.2x10^{13}n/cm^2$-sec 였다.

표 2. LH 및 OR3 에서 CANDU 및 PWR 핵연료 조사시 중성자속 분포

| 조사위치 | | LH bundle (Zr-2.5%Nb) | | | LH 7-pin (zir-4) | | | OR3 1-pin (SS316) | | | OR3 1-pin (zir-4) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 핵연료 종류 | | CANDU | PWR | PWR | CANDU | PWR | PWR | CANDU | PWR | PWR | CANDU | PWR | PWR |
| 농축도 | | Nat. U | 3.5% | 5.0% | Nat. U | 3.5% | 5.0% | Nat. U | 3.5% | 5.0% | Nat. U | 3.5% | 5.0% |
| Flow tube내에서의 축방향 중성자속 ($x10^{13}$ n/cm²-sec) | | | | | | | | | | | | | |
| Fast-1 | 최대 | 4.69 | 7.54 | 8.74 | 3.19 | 4.47 | 5.16 | 13.7 | 14.4 | 14.4 | 15.9 | 17.5 | 18.8 |
| | 평균 | 3.98 | 5.78 | 6.82 | 2.63 | 3.46 | 3.98 | 10.9 | 10.1 | 10.4 | 13.0 | 13.1 | 13.8 |
| Fast-2 | 최대 | 1.54 | 2.55 | 3.07 | 1.11 | 1.72 | 2.11 | 2.61 | 2.95 | 3.31 | 3.43 | 4.63 | 5.36 |
| | 평균 | 1.30 | 1.99 | 2.39 | 0.92 | 1.37 | 1.64 | 1.98 | 2.08 | 2.34 | 2.77 | 3.40 | 3.93 |
| Thermal | 최대 | 5.98 | 6.40 | 5.88 | 8.77 | 8.18 | 7.74 | 10.3 | 10.3 | 10.1 | 26.3 | 25.1 | 24.3 |
| | 평균 | 5.05 | 5.16 | 4.73 | 7.72 | 6.61 | 6.21 | 8.77 | 7.71 | 7.39 | 22.3 | 19.8 | 18.9 |
| 핵연료 피복재에서의 축방향 중성자속 ($x10^{13}$ n/cm²-sec) | | | | | | | | | | | | | |
| Fast-1 | 최대 | 4.69 | 8.03 | 9.39 | 3.51 | 5.31 | 6.10 | 14.7 | 15.8 | 15.5 | 16.5 | 18.7 | 20.0 |
| | 평균 | 3.98 | 6.16 | 7.27 | 2.88 | 4.11 | 4.78 | 11.4 | 10.5 | 10.9 | 13.6 | 14.0 | 15.0 |
| Fast-2 | 최대 | 1.52 | 2.88 | 3.49 | 1.30 | 2.27 | 2.79 | 2.61 | 3.43 | 3.85 | 3.58 | 5.59 | 6.33 |
| | 평균 | 1.30 | 2.26 | 2.69 | 1.07 | 1.85 | 2.22 | 2.06 | 2.37 | 2.71 | 2.89 | 4.08 | 4.89 |
| Thermal | 최대 | 5.94 | 5.35 | 4.66 | 8.54 | 6.80 | 6.07 | 10.6 | 9.47 | 9.87 | 27.2 | 23.8 | 22.5 |
| | 평균 | 4.97 | 4.27 | 3.74 | 7.58 | 5.47 | 4.88 | 9.00 | 7.31 | 6.94 | 22.6 | 18.4 | 17.3 |

* Fast-1 : E> 0.625eV
* Fast-2 : E> 0.821MeV
* Thermal : E< 0.625eV

OR3공에서 1-pin을 조사할 경우에는 IPS 재질인 SS316과 zircaloy-4의 $(n,\gamma)$ 단면적 차이에 의해 중성자속이 큰 차이를 보이고 있다. 축방향 평균 열중성자속 및 고속중성자속은 zircaloy-4를 사용

함으로써 SS316일 때와 비교하여 각각 2.5배 및 40% 이상 증가하였다. IPS 재질이 SS316일 때 CANDU 1-pin의 경우 축방향 평균 고속중성자속은 $2.1x10^{13}n/cm^2$-sec 였으며, 5% PWR 1-pin의 경우에는 $2.7x10^{13}n/cm^2$-sec 였다.

IPS의 flow tube내에서의 중성자속은 핵연료 피복재에서의 중성자속의 경우와 유사하였다.

이상의 결과로 볼 때 시험 핵연료의 기하학적 구성 및 농축도 증가에 상관없이 LH나 OR 조사공에서 상용로에서의 고속중성자속 $10^{14}$ $n/cm^2$-sec 과 유사한 중성자속을 얻기는 어려울 것으로 예상되었다.

### 2.2.4 선출력

IPS를 이용하여 핵연료를 조사시킬 때 연료봉에서의 출력은 축방향으로 5cm 간격으로 분포를 구하였다. 표 3은 각 조사조건에서 예상되는 각 연료봉에서의 최대 및 평균 선출력이다. LH공에서 다발로 조사할 경우 최대 선출력은 CANDU 핵연료는 16.5kW/m, PWR 핵연료는 30.4kW/m (농축도 3.5%) 및 40.5kW/m (농축도 5%) 로 예상되었다. 또한, 평균 선출력은 각각 8.2kW/m (CANDU), 14.2kW/m(3.5% PWR) 및 17.2kW/m (5% PWR) 로 나타났다. PWR 핵연료의 경우 농축도가 5%인 경우가 3.5%인 경우보다 평균 선출력은 20% 이상, 최대 선출력은 약 30% 증가하였으나 농축도의 비율(약 43%) 만큼 증가하지는 않았다. LH공에서 7-pin을 조사할 경우 최대 선출력은 15.7kW/m (CANDU), 26.2kW/m (3.5% PWR) 및 33.1kW/m (5% PWR) 로, 평균 선출력은 12.0kW/m (CANDU), 18.2kW/m (3.5% PWR) 및 22.2kW/m (5% PWR)로 예상되었다. 7-pin을 조사할 때의 선출력은 다발을 조사할 때와 비교해서 최대값은 5 17% 낮게 나타났으나 평균값은 28 47% 높게 나타났다. 이것은 다발 조사의 경우에는 7-pin 조사의 경우보다 일부 핵연료는 노심쪽으로 더 가깝게 위치하기 때문에 최대 선출력이 더 높게 나타났고, 평균 선출력은 7-pin 조사의 경우에 핵연료가 중심에 몰려있기 때문이다.

표 3. LH 및 OR3에서 CANDU 및 PWR 핵연료 조사시 선출력 분포

| 조사위치 | | LH bundle (Zr-2.5%Nb) | | | LH 7-pin (zir-4) | | | OR3 1-pin (SS316) | | | OR3 1-pin (zir-4) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 핵연료 종류 | | CANDU | PWR | PWR | CANDU | PWR | PWR | CANDU | PWR | PWR | CANDU | PWR | PWR |
| 농축도 | | Nat. U | 3.5% | 5.0% | Nat. U | 3.5% | 5.0% | Nat. U | 3.5% | 5.0% | Nat. U | 3.5% | 5.0% |
| 선출력 (kW/m) | | | | | | | | | | | | | |
| Max. | 최대 | 16.51 | 30.42 | 40.50 | 15.70 | 26.19 | 33.12 | 18.87 | 34.88 | 44.78 | 47.38 | 87.61 | 113.76 |
| Avg. | 최대 연료봉 | 13.36 | 24.09 | 30.48 | 13.58 | 20.61 | 25.29 | 15.23 | 25.83 | 33.48 | 39.39 | 66.39 | 85.68 |
| | 전체 | 8.17 | 14.21 | 17.18 | 12.03 | 18.24 | 22.17 | - | - | - | - | - | - |

OR3공에서 1-pin으로 조사할 경우 IPS 재질로 SS316을 사용하면 CANDU 핵연료는 최대 선출력이 18.9kW/m로, 평균 선출력은 15.2kW/m로 예상되었으며, PWR 핵연료는 농축도가 5%일 때 최대 및 평균 선출력이 44.8kW/m 및 33.5kW/m로 예상되어 LH공에서 7-pin을 조사할 경우보다 최대 선출력은 20 35%, 평균 선출력은 20 50% 증가하였다. 한편, IPS 재질을 zircaloy-4로 바꾸면

zircaloy-4의 핵특성으로 인하여 선출력이 크게 증가하였는데 CANDU 핵연료 조사시 최대 및 평균 선출력은 각각 47.4kW/m 및 39.4kW/m 였으며, 농축도 5%의 PWR 핵연료 조사시에는 113.8kW/m 및 85.7kW/m로 예상되어 LH공 7-pin 경우보다 최대 및 평균 선출력이 3배 이상 증가하였다. 그림 4 6은 각 조사조건에서의 선출력 분포이다.

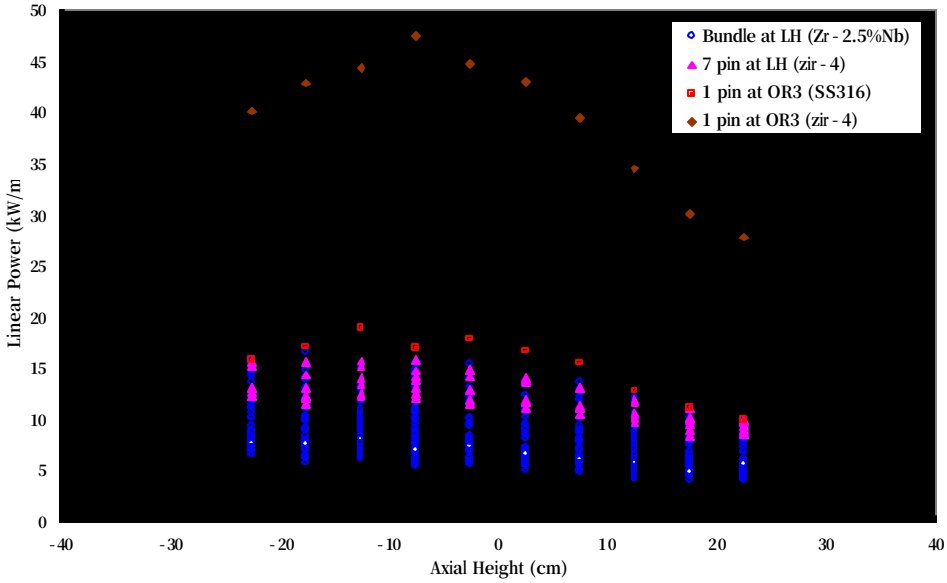


그림 4. LH 및 OR3 에서 CANDU 핵연료 조사시 선출력 분포

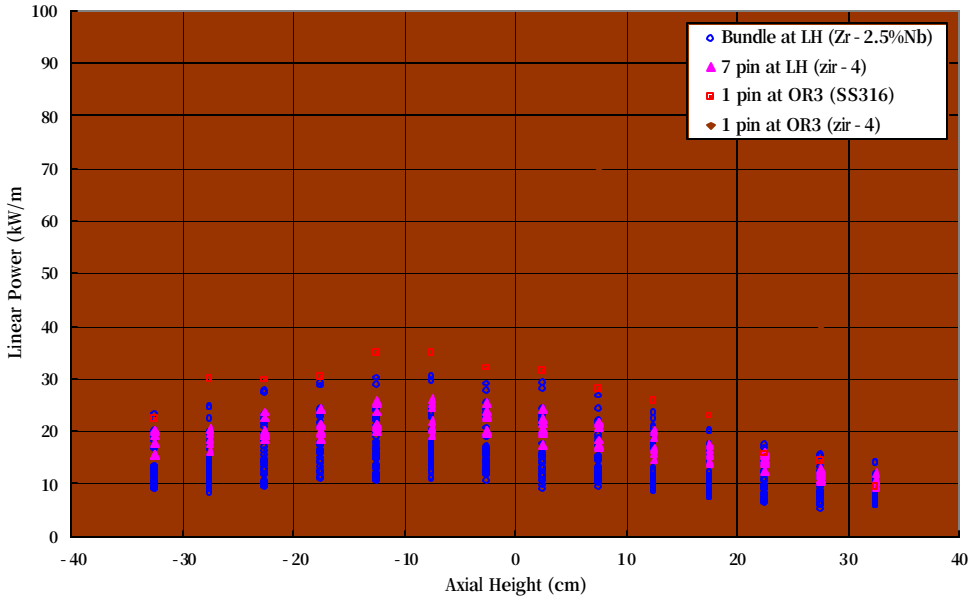


그림 5. LH 및 OR3 에서 농축도 3.5% PWR 핵연료 조사시 선출력 분포

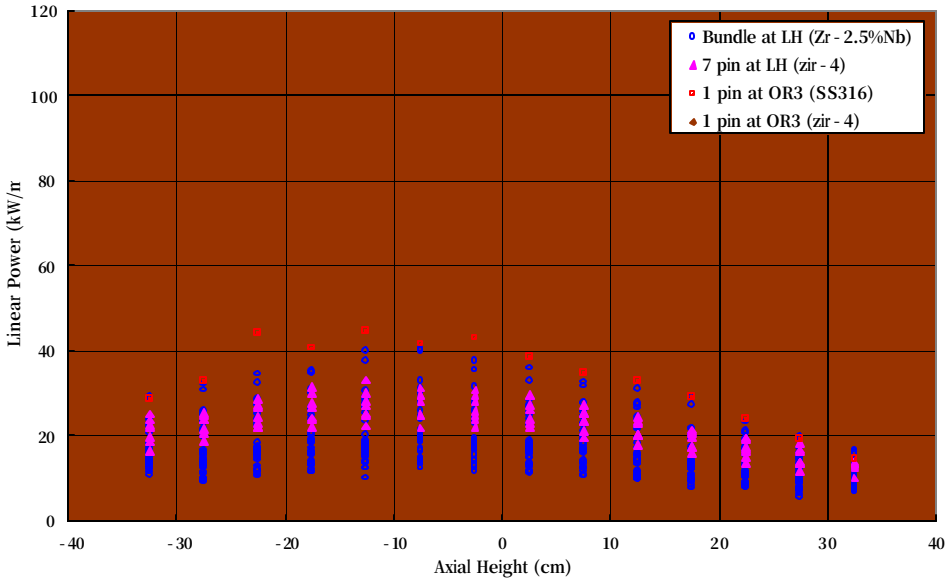


그림 6. LH 및 OR3 조사공에서 농축도 5.0% PWR 핵연료 조사시 선출력 분포

## 2.3 상세 분석

위의 결과들로부터 LH공에서 핵연료를 조사시키게 될 경우 예상되는 선출력 및 핵연료 피복재에서의 고속중성자속이 조사시험에서 목표로 하고 있는 최대 선출력 60kW/m(CANDU 핵연료), 40kW/m(PWR 핵연료) 및 핵연료 피복재에서의 고속중성자속 $10^{14}$ n/cm$^2$-sec과 비교하여 만족스럽지 못하였다. 앞의 분석 결과들은 노심의 핵연료를 새 핵연료로 가정하고 IPS 크기가 최적화되지 않은 등 조사시험 핵연료에서의 출력이 보다 증가될 수 있는 여러 가지 사항들이 충분히 반영되지 않은 것이다. 따라서, 계산에서 추가로 고려할 수 있는 요인 및 IPS 설계 최적화를 통하여 선출력 및 고속중성자속이 어느 정도 증가할 수 있는지 확인하기 위하여 LH공에서 7-pin을 조사시킬 경우에 대해 추가 상세 분석을 수행하였다.

### 2.3.1 노심의 연소효과

실제 IPS에서 핵연료를 조사시킬 때는 노심이 연소된 상태에 있으므로 연소효과에 의한 영향을 평가하기 위하여 노심계산에서 구한 하나로 평형노심에서의 각 다발 연소도를 이용하였다. 그림 7은 평형노심의 각 다발 연소도이며 노심의 평균 연소도는 25.1%이다. MCNP 계산에서는 핵연료의 구성 성분으로 연소효과에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 U235양만을 변화시켰다.

각 연료봉에서 예상되는 최대 및 평균 선출력은 표 4와 같다. 5% PWR 핵연료의 경우 각 pin에서의 최대 선출력의 평균값은 11.5% 증가하였으며, 7-pin 전체의 평균 선출력은 8.1% 증가하였다. 이는 노심의 평균 연소도에 비하여 선출력 증가율이 낮으나 핵연료의 연소도를 보다 상세하게 고려한다면 조사 핵연료에서의 선출력은 약 15% 증가할 것으로 추정된다[3]. 한편, 핵연료 피복재에서의 고속중성자속은 5% 증가에 그쳤다.

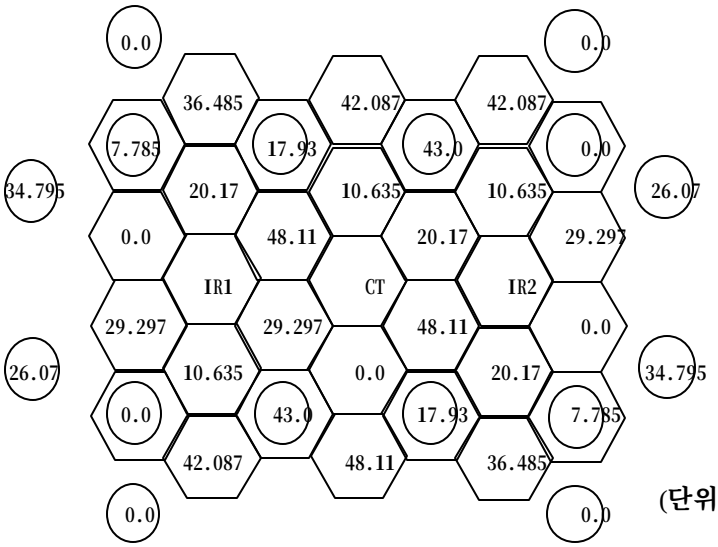


**그림** 7. IPS **에서의 노심 연소 효과 분석에 사용된 하나로 평형노심에서의 각 다발 연소도**

**표** 4. LH **공에서** 7-pin PWR **핵연료 조사시 노심 연소 효과에 의한 선출력 변화**

| **노심 상태** | | **선출력** (kW/m) | | | | | | | **평균** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Pin 1 | Pin 2 | Pin 3 | Pin 4 | Pin 5 | Pin 6 | Pin 7 | |
| 3.5% PWR 7-pin at LH | | | | | | | | | |
| Clean core (C) | **최대** | 20.15 | 25.40 | 26.19 | 24.54 | 20.80 | 21.15 | 23.09 | 23.05 |
| | **평균** | 15.94 | 20.12 | 20.61 | 19.14 | 17.09 | 16.79 | 17.99 | 18.24 |
| Burned core (B) | **최대** | 23.06 | 28.87 | 28.46 | 27.90 | 23.75 | 23.66 | 24.76 | 25.78 |
| | **평균** | 17.85 | 21.15 | 22.25 | 21.45 | 19.02 | 18.58 | 19.47 | 19.97 |
| (B-C)/C (%) | **최대** | 14.44 | 13.66 | 8.67 | 13.69 | 14.18 | 11.87 | 7.23 | 11.75 |
| | **평균** | 11.98 | 5.12 | 7.96 | 12.07 | 11.29 | 10.66 | 8.23 | 9.60 |
| 5.0% PWR 7-pin at LH | | | | | | | | | |
| Clean core (C) | **최대** | 22.26 | 30.19 | 33.12 | 28.22 | 24.91 | 25.13 | 29.61 | 27.63 |
| | **평균** | 18.29 | 24.81 | 25.29 | 23.33 | 20.73 | 20.28 | 22.48 | 22.17 |
| Burned core (B) | **최대** | 26.75 | 32.90 | 34.47 | 32.21 | 30.33 | 28.33 | 30.74 | 30.82 |
| | **평균** | 20.70 | 26.53 | 27.22 | 24.89 | 22.62 | 21.84 | 24.01 | 23.97 |
| (B-C)/C (%) | **최대** | 20.17 | 8.98 | 4.08 | 14.14 | 21.76 | 12.73 | 3.82 | 11.52 |
| | **평균** | 13.18 | 6.93 | 7.63 | 6.69 | 9.12 | 7.69 | 6.81 | 8.12 |

### 2.3.2 연료 대 감속재 비 조절 (IPS 크기 최적화)

LH공의 시편으로 들어오는 중성자원의 대부분은 인근의 중수 반사체이므로 시험 핵연료를 둘러싸고 있는 경수의 양을 줄이면 출력 밀도가 증가할 것으로 기대할 수 있다. 따라서, 7-pin으로 조사시킬 경우 IPS flow tube내의 핵연료와 물의 수밀도 비가 실제 PWR 경우와 비슷하도록 flow tube의 크기를 줄여 핵연료에서의 선출력 변화를 분석하였다. 표 5는 IPS내 flow tube 크기를 조절하기 전과 후의 IPS 제원을 비교한 것이다. 기존 분석에 사용된 모델에서는 핵연료와 물의 단면적 비는

표 5. IPS 크기를 최적화가기 전, 후의 IPS 제원 비교 (단위: cm)

| IPS | LH 7-pin PWR | |
|---|---|---|
| | 최적화 전 | 최적화 후 |
| $UO_2$ 외경 | 0.8198 | 0.7849696 |
| 피복재 내경 | 0.8363 | 0.80112 |
| 핵연료 외경 | 0.9507 | 0.91512 |
| Flow tube 내경 | 5.3 | 3.9 |
| Flow tube 외경 | 5.7 | 4.3 |
| Inner Pressure Tube 내경 | 6.9 | 5.3 |
| Inner Pressure Tube 외경 | 8.1 | 7.2 |
| Outer Pressure Tube 내경 | 8.7 | 7.8 |
| Outer Pressure Tube 외경 | 10.2 | 10.4 |
| 재질 | Zircaloy-4 | |

0.29이고, flow tube를 줄였을 때의 비는 0.62로 크게 증가하였다. 표 6은 5% PWR 핵연료에 대한 분석 결과를 정리한 것이다. 최대 선출력의 평균값은 20.9% 증가하였으며, 7-pin 전체의 평균 선출력은 16.8% 증가하였다. 따라서, IPS 크기를 최적화함으로써 선출력은 15% 이상 증가할 수 있을것으로 예상할 수 있다. 한편, 핵연료 피복재에서의 고속중성자속은 10% 정도 증가하였으나 목표치에는 훨씬 미치지 못하였다.

표 6. LH 공에서 7-pin PWR 핵연료 조사시 IPS 최적화에 의한 선출력 변화

| IPS 조건 | | 선출력 (kW/m) | | | | | | | 평균 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Pin 1 | Pin 2 | Pin 3 | Pin 4 | Pin 5 | Pin 6 | Pin 7 | |
| 5.0% PWR 7-pin at LH | | | | | | | | | |
| 모의다발 (A) | 최대 | 22.26 | 30.19 | 33.12 | 28.22 | 24.91 | 25.13 | 29.61 | 27.63 |
| | 평균 | 18.29 | 24.81 | 25.29 | 23.33 | 20.73 | 20.28 | 22.48 | 22.17 |
| 하나로 18봉다발 (B) | 최대 | 27.38 | 37.50 | 36.49 | 33.31 | 32.76 | 31.66 | 32.40 | 33.07 |
| | 평균 | 21.82 | 28.61 | 29.31 | 26.96 | 25.27 | 24.27 | 25.53 | 25.97 |
| (B-A)/A (%) | 최대 | 23.00 | 24.21 | 10.18 | 18.04 | 31.51 | 25.98 | 9.42 | 19.69 |
| | 평균 | 19.30 | 15.32 | 15.90 | 15.56 | 21.90 | 19.67 | 13.57 | 17.14 |

### 2.3.3 Booster 효과

IPS 외부와 LH공 튜브 사이의 공간에 하나로 핵연료를 배치하여 IPS내 핵연료에서의 선출력이 증가하는지를 확인하였다. 이 효과는 본 분석 이전에 PWR 핵연료 3-pin이 조사될 경우에 대해 수행하였던 것으로 결과를 간략히 정리하였다. 분석은 18개의 하나로 표준 핵연료봉을 IPS 주위에 배치하여 각 pin에서의 선출력을 구하였다.

5% PWR 핵연료의 경우 IPS내 시험 연료봉에서의 최대 선출력은 17.2 19.4kW/m, 평균 선출력은 13.2 14.7kW/m로 나타나 booster 효과를 위해 IPS 바깥에 배치한 하나로 핵연료에서의 출력 분담으로 인해 각 pin에서의 출력은 7-pin의 경우보다 감소하여 이 효과는 없는 것으로 나타났다. 한편, 핵연료 피복재에서의 고속중성자속은 20% 정도 감소한 것으로 나타났다.

### 2.3.4 OR4에 하나로 18봉 다발 장전 효과

LH공의 IPS내 핵연료에서의 출력을 높이기 위한 하나의 방법으로써 LH공과 가장 가까운 OR4공에 하나로 18봉 다발을 장전하여 그 효과를 분석하였다. 5% PWR 핵연료를 대상으로 분석한 결과는 표 7과 같은데 IPS내 핵연료에서 최대 선출력의 평균값은 33.1kW/m, 7-pin 전체의 평균 선출력은 26.0kW/m로 예상되어 IPS 크기를 최적화하였을 때의 상승효과와 비슷한 19.7% 및 17.1%의 증가 효과가 각각 있었다. 핵연료 피복재에서의 고속중성자속은 약 20% 증가하였다.

표 7. LH 공에서 7-pin PWR 핵연료 조사시 OR4 에 하나로 18 봉 다발 장전에 의한 선출력 변화

| IPS 조건 | | 선출력 (kW/m) | | | | | | | 평균 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Pin 1 | Pin 2 | Pin 3 | Pin 4 | Pin 5 | Pin 6 | Pin 7 | |
| 5.0% PWR 7-pin at LH | | | | | | | | | |
| 최적화 전 (B) | 최대 | 22.26 | 30.19 | 33.12 | 28.22 | 24.91 | 25.13 | 29.61 | 27.63 |
| | 평균 | 18.29 | 24.81 | 25.29 | 23.33 | 20.73 | 20.28 | 22.48 | 22.17 |
| 최적화 후 (A) | 최대 | 27.06 | 38.03 | 38.75 | 33.10 | 32.35 | 30.95 | 33.08 | 33.33 |
| | 평균 | 20.75 | 29.68 | 29.38 | 27.16 | 24.68 | 23.69 | 26.02 | 25.91 |
| (A-B)/B (%) | 최대 | 21.56 | 25.97 | 17.00 | 17.29 | 29.87 | 23.16 | 11.72 | 20.94 |
| | 평균 | 13.45 | 19.63 | 16.17 | 16.42 | 19.05 | 16.81 | 15.75 | 16.75 |

### 2.3.5 IPS 외부에 Al, MgO, Bi 충진 효과

7-pin 조사의 경우에 IPS와 LH공 tube 사이에 공기를 채우는 것으로 가정하였다. 이 경우 조사 핵연료에서 발생한 고속중성자의 대부분은 중수 반사체로 그냥 나가버리므로 출력 밀도는 높더라도 고속중성자속은 낮을 수밖에 없다. 만일 이곳에 고속중성자 산란 단면적과 질량수가 어느 정도 큰 물질을 채우면 고속중성자의 일부가 반사되어 시료로 되돌아 올 것을 기대할 수 있다. 이를 확인하기 위하여 공기 대신에 Al, MgO, Bi 등을 채워 선출력 및 고속중성자속의 변화를 분석하였다.

MgO와 Bi의 경우 최대 선출력은 32.6kW/m 및 33.3kW/m, 7-pin 전체 평균 선출력은 21.5kW/m 및 21.9kW/m로 공기의 경우와 비교하여 거의 변화가 없었으며, 핵연료 피복재에서의 고속중성자속도 변화가 없었다. Al의 경우 최대 선출력은 26.9kW/m, 7-pin 전체 평균 선출력은 19.2kW/m로 20% 정도 감소하였고 핵연료 피복재에서의 고속중성자속도 10% 정도 감소하였다.

## 3. 결론

하나로에 설치를 검토하고 있는 핵연료 조사시험 설비의 기술적 타당성 확인을 위해 LH공 및 OR3공에서 IPS를 이용하여 CANDU 또는 PWR 핵연료를 각각 37-pin과 32-pin의 다발, 7-pin 및 1-pin 형태로 조사할 경우 예상되는 중성자속 및 출력을 분석하였다. 시험핵연료 조사에 요구되는 최대 선출력은 CANDU 핵연료의 경우는 60kW/m, PWR 핵연료는 40kW/m이며, 고속중성자속은 시험핵연료의 피복재에서 $10^{14}$ n/cm$^2$-sec 정도가 요구된다.

천연우라늄으로 구성된 CANDU 핵연료의 경우에는 모든 경우에 대해 목표 출력을 만족하지 못하였고, PWR 핵연료의 경우에는 LH공에서 농축도가 5%인 다발을 조사할 경우에만 노심쪽으로 위치한 일부 연료봉에서 목표 출력을 만족하였다. 따라서, 목표 출력 달성 가능 여부를 알아보기 위해 노심의 연소 효과, 연료 대 감속재 수밀도 비의 최적화 등 선출력에 영향을 미칠 수 있는 요인들을 고려하여 민감도 계산을 수행한 결과 선출력은 현재의 분석 결과보다 최소 30% 이상 증가할 수 있을 것으로 추정되었다.

향후 하나로에 핵연료 조사설비를 설치하게 될 경우 상세설계를 통하여 노심의 연소 효과 등을 상세히 고려하고 IPS 설계를 최적화한다면 PWR 핵연료 조사에 요구되는 목표 선출력은 충분히 만족할 수 있을 것으로 예측된다. 또한, PWR 핵연료에 대한 분석 결과로 추정할 때 CANDU 핵연료도 농축도를 높여 조사한다면 목표 선출력을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 그러나, 핵연료 피복재에서의 고속중성자속은 목표값을 얻을 수 없을 것으로 예상된다.

마지막으로 분석을 수행한 OR 조사공 이용 방안은 높은 선출력을 얻을 수 있으나 타 계통과의 간섭에 따른 설치의 어려움, 원자로의 안전성과의 관계 및 하나로 이용분야 다변화의 걸림돌 등을 고려하여 배제할 것이다.

## 감사의 글

본 논문은 과학기술부의 연구비 지원에 따라 수행된 결과입니다.

## 참고문헌

1. 노내시험시설 설계 건조, KAERI/RR-1357/93, 과학기술처, 1993.
2. 노내시험시설 설계 건조 최종보고서, KAERI/RR-1902/98, 과학기술부, 1999.
3. KAERI 내부 메모, 2000.