

## 혼합핵연료 시험연료봉 예비설계

### Preliminary Nuclear Design for Test MOX Fuel Rods

주형국, 김택겸, 정형국, 노재만, 손동성  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

국내에서 개발한 기술을 이용하여 제작될 혼합핵연료 시험핵연료 조사시험에 대비하여, 시험연료 사양에 대한 핵적 평가를 예비적으로 수행하였다. 구체적으로는 핵연료 조사 rig내의 시험연료봉들의 장전위치 결정, 그리고 원자로에 장전시 목표 선출력 및 연소도를 성취할 수 있는지를 예비설계를 통하여 평가하였다. 핵연료 조사 rig내에서의 시험연료봉들의 장전위치에 따른 출력분포의 변화는 크지 않기 때문에 시험연료봉 배열 형태는 조사 rig내에 설치될 측정장치를 고려하여 결정하였다. 시험핵연료는 driver 핵연료의 출력이 130 kW 정도인 노심 주변에 장전될 경우 목표 선출력을 맞출 수 있으며, 목표 연소도를 달성하기 위해서는 최소한 750일 정도 전출력으로 연소되어야 하는 것으로 나타났다.

#### Abstract

A preliminary neutronic evaluation for the test fuel was performed to determine the fuel rod position in the rig and to assure the achievement of target linear power and burnup. Since the fuel rod positions in the test fuel assembly do not affect the rod power distribution, the position of the test fuel rods in the rig was determined mainly from the consideration of instrumentation device installation. In order to achieve target linear power and burnup of the test fuel rods, the test fuel assembly rig needs to be loaded for at least 750 EFPDs in core periphery where the driver fuel assembly produces the power of about 130 kW.

## 1. 개요

혼합핵연료 가공공정의 일부가 국내에서 개발되었으며, 이 기술을 이용하여 제작되는 혼합핵연료 시험연료봉이 노내 조사시험 될 예정이다. 노내에 장전될 시험핵연료 조사 rig에는 6개의 시험연료봉이 장전될 예정이며, 이중 3개의 연료봉은 혼합핵연료봉, 나머지 3개는 Inert Matrix 연료봉이다.

시험연료봉 조사시험계획은 220 ~ 240 W/cm의 선출력으로 35 ~ 50 MWd/kgHM (HM: heavy metal) 정도의 연소도를 목표로하고 있다. 따라서 본 논문에서는 시험핵연료 사양에 대한 핵적 평가를 예비적으로 수행하였으며, 구체적으로는 조사시험 rig내에서의 시험연료봉들의 장전위치에 따른 출력분포 변화에 대한 평가, 출력밀도에 따른 출력분포 변화, 그리고 핵연료가 조사될 원자로 운전조건에서의 시험핵연료의 출력밀도 및 연소도 추정계산을 수행하였다.

## 2. 핵연료 조사시험 개요

### 2.1 시험연료봉 제원

시험핵연료 조사 rig에는 6개의 시험연료봉이 장전될 예정이며, 이중 3개의 연료봉은 혼합핵연료봉, 나머지 3개는 Inert Matrix 연료봉이다. 3개의 혼합핵연료봉중 일부가 우리연구소의 기술로 가공될 예정이다. 3개의 Inert Matrix 연료봉은 matrix물질로서 우라늄대신  $(Zr_{1-x-y-z}Y_xEr_yPu_z)O_2$ 의 산화물로 구성할 예정이다. 제안된 시험핵연료봉의 제원은 표1과 같다.[1]

표1. 혼합핵연료 및 IMF 핵연료 시험연료봉 제원

Fuel Number	1	2	3	4	5	6
Parameter	MOX-1	MOX-2	MOX-3	IMF-1	IMF-2	IMF-3
Fabrication Method	BNFL	Dry mill	Dry mill	Dry Mill	Co-Prec.	Co-Prec. (Dry Mill)
Pu-Content (wt%) (g/cc) <sup>a)</sup>	8.37 0.84	7.85 0.80	7.85 0.80	0.90	0.90	0.90
Pu-fissile (wt%) (g/cc) <sup>a)</sup>	6.13 0.62	5.90 0.60	5.90 0.60	0.68	0.68	0.68
Er Content (g/cc) <sup>a)</sup>	-	-	-	0.30	0.30	0.30
Target Burnup <sup>b)</sup> (MWd/KgHM) (KWd/cc)	~37 ~375	36.6 372	36.6 372	372	372	372

## 2.2 장전 원자로 및 Driver Fuel Assembly

시험핵연료봉이 장전될 원자로는 비등형 원자로로서 중수를 감속재와 냉각재로 사용하고 있다. 이 원자로는 정격출력이 18 ~ 20 MWt로서 D<sub>2</sub>O 감속재의 온도는 운전압력인 33 bar에서 약 240°C이다. 노심의 구성은 연소도가 30,000 MWd/tUO<sub>2</sub> 이하의 driver fuel assembly (spikes)가 대략 65 내지 70개, 그리고 30 내지 35개의 시험핵연료봉이 장전되는 핵연료 rig인 Instrumented Fuel Assembly (IFA's)로 구성되어 있다. driver fuel assembly 및 핵연료 rig은 pitch가 13 cm인 육방형 격자구조 형태로 그림1과 같은 노심을 구성하고 있다.

driver 핵연료집합체는 그림2와 같이 8개의 UO<sub>2</sub> 핵연료봉으로 구성되어 있다. 이 핵연료 rig은 냉각재의 유로와 핵연료 구조를 유지하기위해 중심부에 central tube가 존재하고 있다. 우라늄핵연료의 초기의 농축도는 6.0wt%이며, 유효노심에 해당되는 핵연료의 길이는 80cm이다. 정격출력에서는 shroud 내의 냉각재에는 약 50% void가 존재한다. 새로운 Driver fuel assembly는 보통 노심 중앙부(그림1에서 ring 1부터 4사이)에 장전되며, 약 15,000 MWd/tUO<sub>2</sub>의 연소도를 갖게되면 노심의 가장자리(그림1에서 ring 5부터 7사이)로 위치를 바꾸게된다. 바깥쪽 ring은 대략 25,000 MWd/tUO<sub>2</sub>의 평균 연소도를 갖게되며, 여기서는 약 130 kW의 출력을 내게된다.

그림3은 instrumented fuel assembly를 중심으로 6개의 driver fuel assembly가 둘러싸있는 전형적인 핵연료의 장전형태이다. 핵연료집합체 사이의 간격은 13cm이며, instrumented fuel assembly내에서의 시험연료봉 ring의 반경은 2.15 cm 이다.

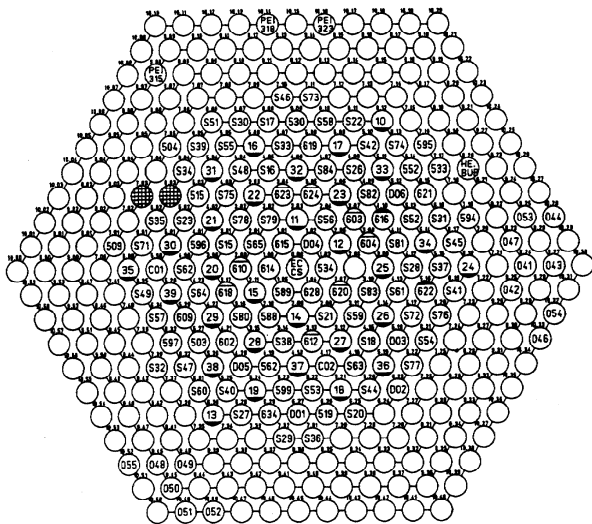
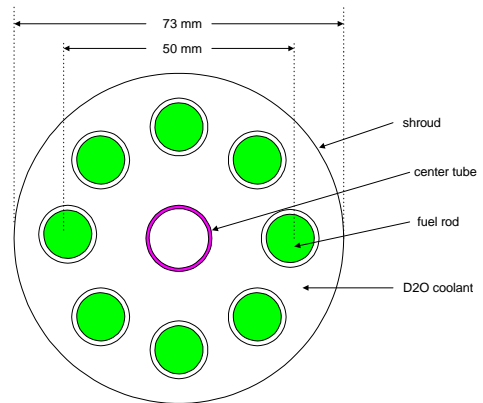


그림 1. 조사시험 원자로 노심 구조



FUEL ROD :	pellet diameter	= 10.50 mm
	clad outer diameter	= 12.25 mm
	clad inner diameter	= 10.67 mm
	gap	= 0.170 mm
	ring radius	= 25.0 mm
CENTER TUBE :	outer diameter	= 17.0 mm
	inner diameter	= 13.0 mm
SHROUD :	outer diameter	= 73 mm
	inner diameter	= 71 mm

그림 2. Driver 핵연료집합체 구조 및 제원

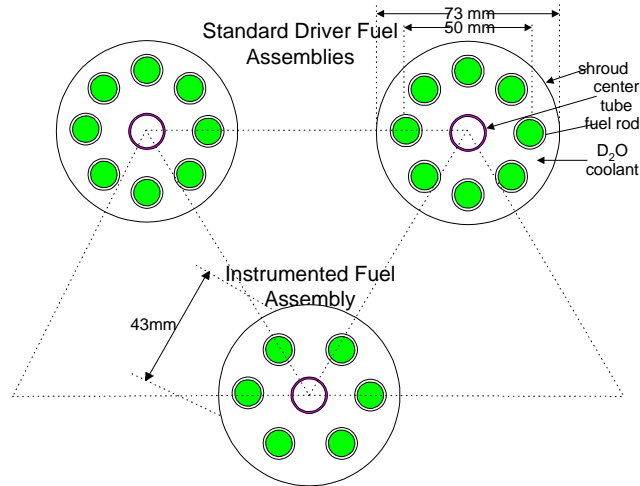


그림 3. Driver 및 시험연료집합체 장전 구조

### 3. 시험핵연료 장전 부분노심 계산

#### 3.1 시험핵연료 예비 설계 자료

**Driver  $UO_2$  핵연료 핵종 수밀도:** 참고문헌 2에 의하면 시험핵연료 조사 rig가 장전될 원자로 노심외곽의 Driver  $UO_2$  핵연료의 평균 연소도는 25,000 MWd/t $UO_2$ 이다. 본 예비설계에서는 시험핵연료 조사 rig를 중심으로 주변의 핵연료만을 고려하여 부분노심을 구성하였다. 시험핵연료 조사 rig 주변의 driver 핵연료에 대한 정확한 연소자료, 즉 연소도, 연소출력이력 등은 알려져 있지 않기 때문에, 격자코드를 이용하여  $UO_2$  핵연료의 평균 연소도에서의 핵연료 핵종의 수밀도를 계산하고, 이를 driver 핵연료에 대한 자료로 사용하였다.

**조사시험 원자로 출력밀도:** 원자로의 정격출력은 18 MWt이며, 원자로내에 장전 핵연료 집합체 수는 100개, 그리고 집합체당 80 cm 길이의 연료봉이 8개씩 장전되어 있다고 가정하고 출력 밀도를 36.5 W/gHM로 하였다. 이는 원자로내의 100개의 핵연료 위치에 모두 driver 핵연료가 장전될 경우 타당한 가정인데, 출력밀도에 대한 민감도 계산 결과 조사시험 rig내의 출력분포에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

**조사시험 원자로 감속재 및 냉각재 ( $D_2O$ ) 밀도:** 참고 문헌1에 의하면 핵연료 Shroud의 외부 및 center tube 내의  $D_2O$ 의 밀도는 33 bar에서 255 °C에 해당하는 값을 가지며, shroud 내부에는 50%의 void를 갖는다고 한다. 따라서 Shroud 외부 및 center tube 내부의 감속재 밀도는 0.908 g/cc로, Shroud 내부의 감속재 밀도는 0.55 g/cc로 가정하였다.

#### 3.2 HELIOS modeling

연소시험이 수행될 노심은 복잡한 연소이력을 갖고 있는 핵연료 집합체의 수가 많기 때문에 전체노심에 대한 계산은 현실적으로 수행이 어렵다. 따라서 시험핵연료를 중심으로 주변의 6개의

핵연료집합체가 이루는 부분노심에 대한 계산을 수행하고 이들 결과를 주변의 경계조건으로 사용하여 시험연료봉의 출력을 계산하는 것이 현실적이다. 따라서 본 예비설계에서는 부분노심을 구성하고 이에 대한 계산을 수행하였다. 그림4는 HELIOS 코드를 이용한 부분노심에 대한 모델링을 보여주고 있다. 그림에서 중앙부에 위치하고 있는 것이 시험핵연료 조사 rig이며 이 안에는 3개의 MOX 핵연료봉과 3개의 IMF 연료봉이 위치하고 있다. 부분노심의 경계면에 있는 시험핵연료 조사 rig 주변의 핵연료는 UO<sub>2</sub> driver 핵연료집합체이며, 경계면을 따라 주어진 경계조건은 "Periodic reflective boundary condition"을 적용하여 실제적으로 부분 노심이 독립된 하나의 작은 노심의 성격을 갖도록 하였다. 그림4에는 HELIOS 계산을 위한 노드 분할을 보이고 있는데, 핵연료봉 주변은 비교적 자세하게 분할하였으며, 핵연료집합체 shroud 밖의 지역은 비교적 넓게 분할하였다. 이 계산에 사용된 중성자의 에너지군수는 34그룹을 이용하였다. 또한 경우에 따라서는 그림4와 같이 시험연료집합체 주변에 6개의 driver 핵연료가 장전되지 않을 가능성도 있기 때문에, 주변에 3개의 driver 핵연료만이 존재하는 경우에 대한 계산도 수행하였다.

### 3.3 시험연료봉 위치 변화 및 출력준위 변화에 대한 계산

시험핵연료 조사 rig내에는 앞서서도 언급한바와 같이 3개의 MOX 연료봉과 3개의 Inert Matrix 연료봉이 장전될 예정이다. 핵연료 조사rig내의 가능한 핵연료봉의 배열 형태는 그림5에서와 같이 크게 3가지로 구분된다. loading 2는 MOX와 IMF 핵연료봉 들이 서로 분리되어 있는 형태이며, loading 3는 MOX와 IMF 핵연료봉 들이 잘 섞인 형태의 배열을 나타내고 있다. loading 1은 이들의 중간 형태를 나타내고 있다. 그림6은 위의 핵연료장전 형태별 각 연료봉의 주기초에서의 상대적 선출력을 보여주고 있는데, 핵연료 장전형태별로 출력분포의 변화는 그리 크지 않은 것으로 나타나고 있다. 따라서 핵연료 조사 rig내의 시험연료봉 들의 위치는 조사 rig내의 출력 분포 보다는 측정장비의 설비를 고려하여 그림7과 같은 형태로 결정하였다.

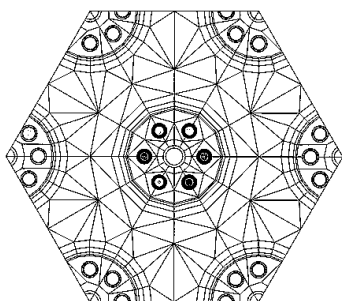


그림 4. 시험핵연료봉 예비설계를 위한 부분 노심 구조

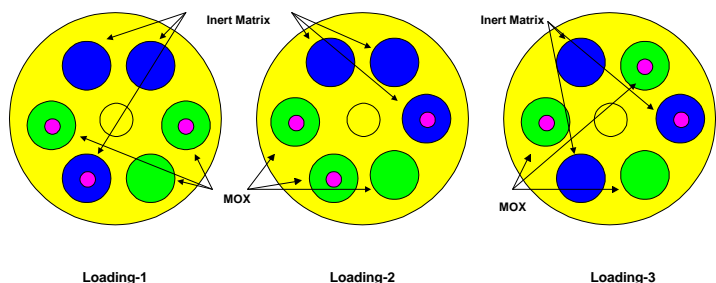


그림 5. 핵연료조사 rig내 시험연료봉 배열 형태들

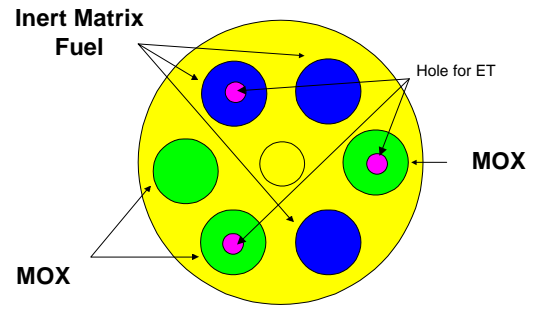
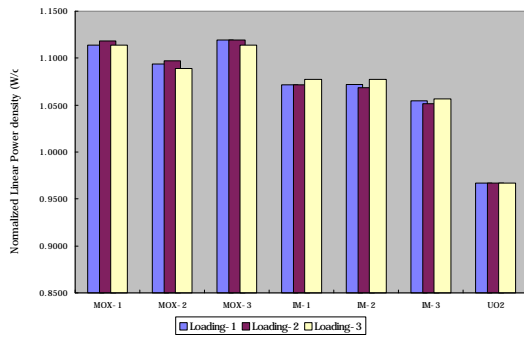


그림6. 시험연료봉 장전형태별 상대선출력 분포(주기초)      그림7. 조사 rig내의 연료봉 배열

시험핵연료 연소계산에 사용된 출력밀도는 36.4 kW/kgHM로 가정하였다. 출력밀도는 일반적으로 핵연료위치에 따라 달라지게 된다. 현재는 시험핵연료의 위치를 정확히 결정할 수 없기 때문에 출력준위를 20 kW/kgHM 및 50 kW/kgHM로 달리하여 시험연료봉의 연소도별 출력분포계산을 수행하여 그 영향을 분석하였는데, 출력준위 변화에 의한 시험연료 조사 rig 내의 출력분포는 별 차이를 보이지 않았다.

#### 4. 시험핵연료봉 출력 및 연소도 추정

시험핵연료 조사 rig의 위치는 결정되지 않았기 때문에 다음의 두 가지 경우를 가정하였다. 첫 번째 경우는 시험핵연료 주변의 6개 핵연료위치에 모두 UO<sub>2</sub> driver 핵연료가 장전되는 경우이며, 두 번째 경우는 시험핵연료 조사 rig 주위의 6개 핵연료위치 중에 3개 위치만 UO<sub>2</sub> driver 핵연료가 장전되는 경우이다. 그림8과 9는 위의 두 경우의 핵연료봉별 선출력 분포를 보여주고 있다. IMF핵연료의 경우 연소도가 진행되면서 출력이 매우 빠른 속도로 감소하는 것으로 나타났다. IMF핵연료는 플루토늄이외의 핵연료 물질이 존재하지 않기 때문에 연소가 진행되면서 새로운

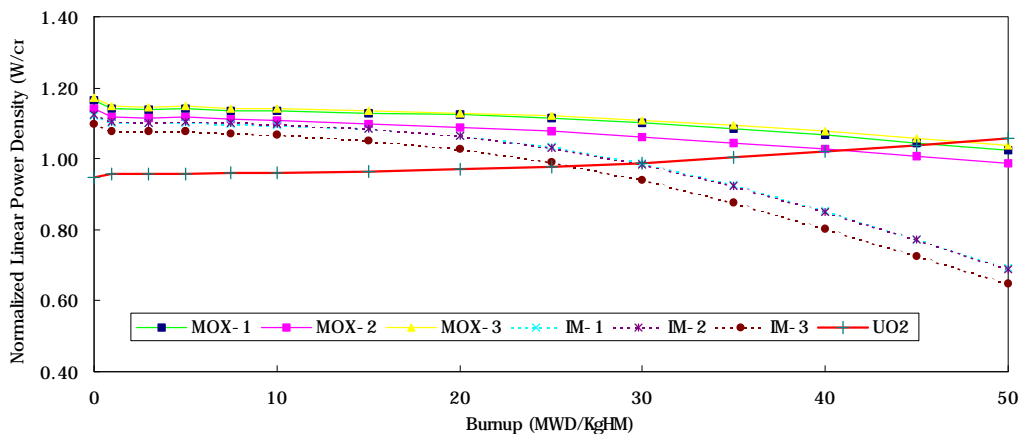


그림8. 경우1의 핵연료봉별 선출력 분포

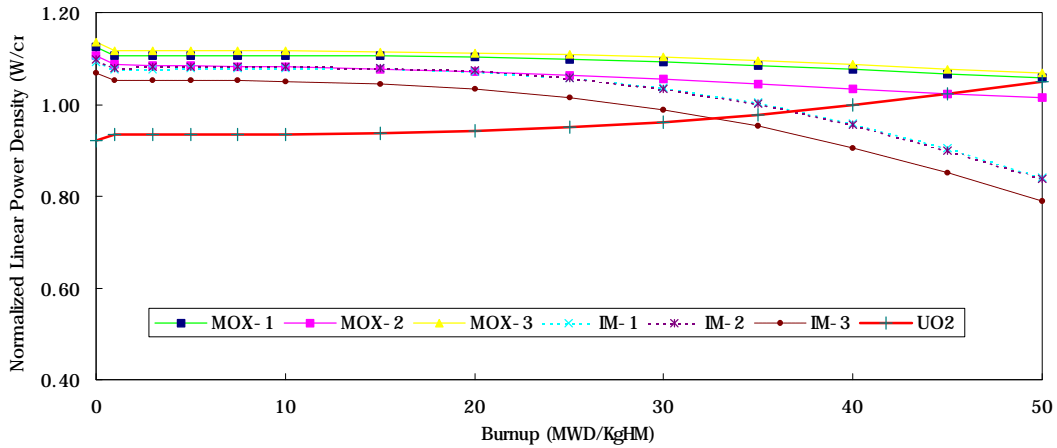


그림9. 경우2의 핵연료봉별 선출력 분포

fissile물질로의 전환이 혼합핵연료나 UO<sub>2</sub> 핵연료에 비해 거의 이루어지지 않기 때문이다. 여기서 연소도는 계산한 노심의 평균 연소도를 나타내고 있다.

연소시험 노심의 구성은 재장전 시마다 변화하기 때문에, 각 ring별로 driver 핵연료집합체의 전형적인 출력자료를 활용하기란 쉽지 않다. 즉 시험핵연료봉의 정확한 출력 및 연소도는 시험연료가 장전되는 노심을 실제로 설계를 수행할 경우만 알 수 있다. 그러나 현 상황에서 가능한 자료를 바탕으로, 시험핵연료의 목표 출력이나 연소도 달성 여부를 대략적으로나마 판단하는 것이

표2. 시험핵연료봉 연소도 추정자료

		MOX-1	MOX-2	MOX-3	IMF-1&2	IMF-3	UO <sub>2</sub> (Driver Fuel)
Pu Density (g/cc)		0.84	0.80	0.80	0.90	0.90	-
U Density (g/cc)		8.007	8.184	8.184	-	-	8.85
Pellet Area (cm <sup>2</sup> )		0.5027	0.5027	0.5281	0.5281	0.5027	0.8659
Linear Heavy Metal Mass (g/cm)		4.4474	4.5163	4.7445	0.47529	0.4524	7.6632
상대 선출력 평균치	경우 1	1.117	1.084	1.124	1.032	0.996	0.976
	경우 2	1.099	1.067	1.109	1.052	1.015	0.950
예상 선출력 (W/cm) (Driver 연료 출력을 130kW로 가정)	경우 1	227	220	228	210	202	198
	경우 2	223	217	225	213	206	193
예상연소도 (MWd/kgHM) (Driver 연료 출력을 130kW, 750 EFPD 운전 가정)	경우 1	38.3	36.5	36.0	298.2 (MWd/cc)	301.4 (MWd/cc)	-
	경우 2	37.6	36.0	35.6	302.5 (MWd/cc)	307.3 (MWd/cc)	-
예상연소도 (MWd/kgHM) (Driver 연료 출력을 130kW, 1000EFPD 운전 가정)	경우 1	51.1	48.7	48	397.6 (MWd/cc)	401.9 (MWd/cc)	-
	경우 2	50.1	48	47.5	403.3 (MWd/cc)	409.7 (MWd/cc)	-

필요하다. 위의 표 2는 예비설계 결과로부터 예상 출력 및 연소도를 유추하기 위한 자료 및 결과를 요약한 것이다. 이 원자로에서 한 개의 driver 핵연료집합체의 출력은 바깥쪽 ring의 경우 약 130 kW로부터 안쪽 ring의 경우 최대 약 400 kW 까지 가능한 것으로 알려져있다. 이 결과로부터 시험핵연료 조사 rig를 노심 주변에 장전하여 750 EFPD 내지 1000 EFPD 동안 연소시키면 목표 연소도 및 선출력을 얻을 수 있을 것으로 추정된다.

## 5. 결 론

국내에서 개발한 기술을 이용하여 제작될 혼합핵연료 시험핵연료 조사시험에 대비하여, 제안된 핵연료 사양에 대하여 핵적 평가를 예비적으로 수행하여 그 타당성을 분석하였다.

조사시험 rig내에서의 시험연료봉들의 장전위치에 따른 시험핵연료봉들의 출력분포의 변화는 크지 않기 때문에 핵연료봉 배열 형태는 시험핵연료봉 조사 rig에 설치될 측정장치를 우선적으로 고려하여 그림7과 같이 결정하였다. 또한 이 시험핵연료를 driver 핵연료의 평균 출력이 130 kW 정도인 노심 주변에 장전한다면 시험핵연료의 목표 선출력인 220 ~ 240 W/cm를 낼 수 있으며, 750일 이상 연소시키면 목표 연소도인 35 ~ 50 MWD/kgHM를 이룰 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

1. 주형국 외 “혼합핵연료 시험연료봉 예비설계,” 내부보고서, 한국원자력연구소.