

하나로 선출력 제어를 위한 하프늄 분석 및 가공기술 연구

Study of the Hafnium Analysis and Fabrication Technology for HANARO LHGR Control

김대호, 서철교, 이찬복, 방제건, 김영민, 정연호, 양용식

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

연구로(하나로)에서 조사시험을 위해 제작된 경수로용 핵연료 무계장캡슐에는 선출력 제어를 위해 하프늄 튜브를 사용하였다. 이는 조사시험시 상용로의 연소조건과 유사하도록 선출력을 제어하는데 그 목적이 있다. 캡슐이 장착될 OR-4 조사공에서의 선출력을 계산하고 이에 따른 하프늄의 두께를 결정하였다. 또한, 하프늄 판재를 이용하여 튜브형태로 제작하기 위해 하프늄의 기계적 특성을 이용하여 가공방법을 결정하였다. 아울러, 하프늄 소재의 인장시험을 통하여 인장강도를 확인하였다.

Abstract

For the irradiation test at HANARO, non-instrumentation capsule was manufactured and hafnium tube was used to control LHGR of HANARO. Hafnium tube can control the irradiation condition of HANARO similar to that of commercial reactor. Hafnium tube thickness was determined by the LHGR calculated at OR-4 irradiation hole to be installed the non-instrumented capsule. To fabricate the hafnium tube with hafnium plate, the fabrication method was determined by using the hafnium mechanical properties. And the tensile strength of hafnium was confirmed by tensile test.

1. 서 론

경수로용 신형핵연료 개발과 연계하여 핵연료의 안전성과 고연소도화를 위해 개발된 큰결정립 UO_2 소결체의 노내 연소시험이 연구로인 하나로에서 무계장캡슐내에 장착되어 조사시험이 진행되고 있다. 이 조사시험은 대략 5년간의 증장기적 조사시험으로 시행할 계획이다. 본 무계장 캡슐에는 상단과 하단의 시험봉집합체가 그림 1과 같이 2단으로 구성되어 있고 각 시험봉 집합체의 외곽에 중성자 흡수체인 하프늄 튜브가 장착되어 있다. 하나로로 축방향 선출력 분포에 따라 핵적계산에 의해 선출력을 제어할 수 있도록 상단은 0.3mm 두께, 하단은 0.6mm의 두께로 하프늄 튜브를 설계하였다. 하프늄 튜브를 시험봉 집합체 외곽에 장착한 가장 중요한 이유는 시험 핵연료봉이 연소시 200 ~ 500 W/cm의 선출력에서 연소되어 가능한 상용로 연소상황과 유사하도록 환경조건을 만들어주는데 목적이 있다. 본 무계장 캡슐에 장착된 하프늄 튜브는 시험봉이 2년 정도 연소되어 대략 35 MWd/kgU 연소후 제거할 예정이며 이후 70 MWd/kgU까지 연소시킬 계획이다.

하나로의 정상 가동조건에서 OR-4 조사시험공에서 조사시험이 수행 중에 있으며, 상세한 하나로 조사 조건은 다음과 같다.

- 조사공 : 하나로 OR-4 조사공
- 시험 핵연료봉 선출력
 - 정상 운전시의 선출력 : 500 - 200 W/cm
 - 가능한 최대 국부 선출력(Hot Spot) : 688.1 W/cm
- 냉각수 유량 : 7.447 kg/sec
- 냉각수 압력 : 0.4 MPa
- 시험 핵연료 농축도 : 4.5 w/o
- 목표 연소도 : 1 차 조사시험 : ~ 35 MWd/kgU
2 차 조사시험 : ~ 70 MWd/kgU

이를 위해 시험봉의 핵적특성 및 예비 성능시험[1]이 수행되었으며 이를 근거로 시험봉 집합체의 위치를 결정하고 이 위치에서의 MCNP를 이용하여 하프늄의 두께를 결정하였다. 또한 결정된 하프늄의 두께에 대하여 조사시간을 추정하기 위해 HELIOS를 이용하여 연소기간[2]을 확인하였다.

하프늄의 재료적 특성은 주기율표상 4족에 속하는 금속원소로 지르코늄(원자번호 40)과 화학적 성질이 비슷하다. 하프늄은 지르코늄에서 하프늄을 분리할 때 선호되는 방법인 분별 결정과 증류는 이온 교환과 용매추출 기술로 대체된다. 이 금속 자체는 사염화하프늄을 마그네슘으로 환원(크롤 법)하거나 사요오드화물을 열분해해서 만든다. 하프늄 금속은 단단하고 스테인리스강과 같이 보인다. 하프늄은 열중성자를 잘 통과시키지 않고 내식성이 뛰어나기 때문에 원자로 제어봉을 만드는 데 사용된다. 하프늄은 철·티탄·니오브·탄탈 같은 전이금속과 합금을 만든다. 하프늄은 공기와 반응하지 않으며(산화물이나 질소화물의 보호막을 형성함), 약산에 녹지 않는다. 하프늄의 가장 흔한 산화상태는 +4이지만, 소수의 3가 화합물로 알려져 있다. 하프늄은 지르코늄과 화학적 성질이 유사한데, 이는 전자배열이 비슷하고 이온 반지름과 원자 반지름이 거의 동일하기 때문이다. 하프늄의 반지름은 란타넘 수축결과 지르코늄의 반지름과 일치한다. 천연 하프늄은 6개의 안정한 동위원소인 $^{174}\text{Hf}(0.2\%)$, $^{175}\text{Hf}(5.2\%)$, $^{177}\text{Hf}(18.5\%)$, $^{178}\text{Hf}(27.1\%)$, $^{179}\text{Hf}(13.8\%)$, $^{180}\text{Hf}(35.2\%)$ 의 혼합물이다.

본 캡슐에 사용된 하프늄은 프랑스 Framatome ANP의 CEZUS사에서 1.1mm의 판재형태로 수입하여 가공하였다. 참고로 튜브형태로 가공하기 위해서는 환봉을 수입하는 것이 바람직하나 수입가격이 판재에 비해 무려 30배 이상의 고가이며, 두께결정과 시험일정 등의 문제로 판재를 이용하였다. 환봉을 가공할 경우 발화성이 높아 와이어 컷터의 기술적 사용도 제한적이다. 수입된 판재는 여러 가지의 가공방법을 이용하여 원하는 수치의 튜브를 가공하였으나 실제 강성과 재료 특성에 의해 단순가공이 어렵고 판재를 원형형태의 튜브로 용접할 때의 용접조건을 결정하는데 많은 시행착오가 있었다. 본 하프늄 판재는 95% 이상의 순도를 갖고 있으며, 산세척 및 연마를 통한 표면처리로 마무리되었다. 본 연구를 통해 하프늄 판재를 이용하여 튜브를 가공하는데 필요한 가공조건을 결정하였다.

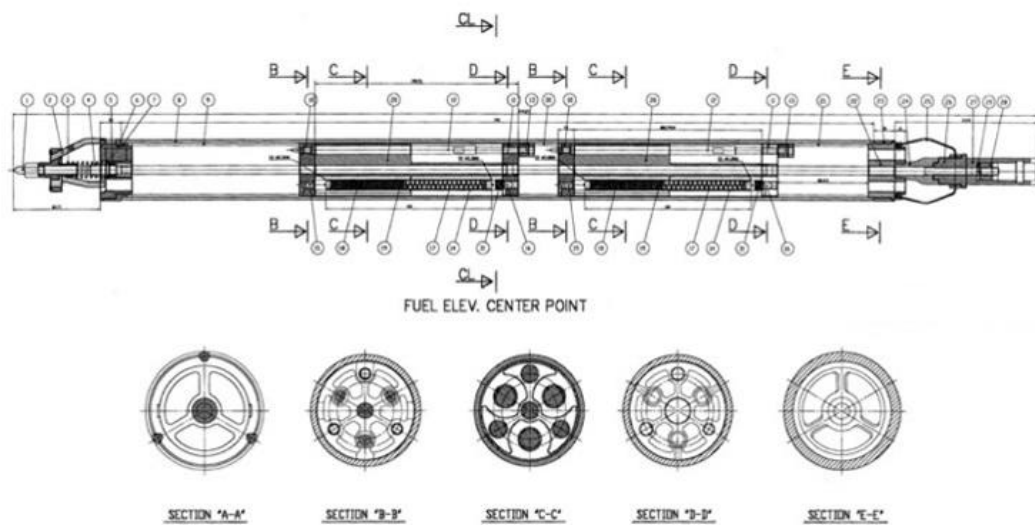


그림 1. 신형 UO_2 소결체 노내시험용 캡슐 개략도[8]

2. 하프늄 두께 결정

2.1. 방법

하나로에서 조사시험할 경수로용 신형소결체의 핵연료 무계장캡슐은 조사시험 초기의 높은 선출력을 제어하기 위하여 중성자 흡수체인 하프늄을 사용하였다. 하프늄의 두께에 따라 시험 핵연료봉의 선출력은 크게 변하기 때문에 적절한 두께의 하프늄이 사용되어야 한다. 조사시험을 주어진 조건에서 빨리 수행하기 위해서는 선출력을 높게 유지하여야 하므로 어떠한 조건에서도 최대 허용선출력을 초과하지 않고 가능한 높은 선출력을 유지할 수 있도록 하프늄의 두께를 결정하였다. 두께결정은 MCNP 모델을 이용하여 결정하고 결정된 하프늄의 두께에 따라 HELIOS를 이용하여 연소시간을 확인하였다[2]. 본 조사시험이 수행중에 하나로의 출력변화가 발생하며 이에 대한 분석도 함께 진행하였다.

노심 및 캡슐의 구조에 따라 MCNP 모델링을 통하여 계산을 수행하였으며, 하나로 출력상승에 따라 시험 핵연료봉이 30MW 출력에서 조사시험이 이루어질 예정이므로 이 출력 조건의 완전 장전노심에 대하여 분석하였다. MCNP 계산은 새 핵연료가 장전되어 있는 상태에 대하여 계산을 하였으나 실제로 캡슐은 연소된 운전노심에 장전되므로 분석할 때는 연소효과를 적절히 고려

하도록 하였다. 하프늄의 두께를 결정하기 위하여 MCNP 모델을 만들고 이에 대한 안전성 측면에서의 평가[3]가 수행되었다.

2.2 MCNP 모델 및 분석

경수로용 소형 소결체 조사시험을 위한 무계장캡슐에서 시험 핵연료봉의 위치를 MCNP 해석에 의한 축방향과 횡방향의 모델 결과를 제시한다. 이때의 중심은 하나로 노심의 구조적 축방향 중심위치를 기준으로 하였다. 하나로 OR-4 조사시험공의 위치에서 하나로 노심의 축방향 출력분포를 확인하고 무계장캡슐의 제원에서 시험 핵연료봉의 위치를 결정하였다. 시험 핵연료봉 집합체가 상단과 하단에 위치하게 되고 시험봉집합체의 외곽에 하프늄 튜브를 씌우게되어 있기 때문에 정확한 위치결정이 필요하다. 그림 2와 같은 MCNP 모델을 이용하여 시험봉 및 하프늄의 축방향과 횡방향에 대한 위치는 표 1과 2와 같이 결정되었다. 캡슐내의 시험 핵연료봉에서 소결체의 길이는 약 5 cm 이며 한개의 집합체에 3개의 시험 핵연료봉이 위치한다.

표 1. MCNP 모델에 의한 시험봉 및 하프늄 튜브의 축방향 위치

	시험 소결체 위치	하프늄 튜브의 위치
상 단	+ 10.0 ~ + 15.0	+ 4.284 ~ + 27.480
하 단	- 15.0 ~ - 10.0	- 20.716 ~ + 2.480

표 2. MCNP 모델에 의한 하프늄 튜브의 횡방향 위치

	하프늄 튜브의 위치	
	외경/내경(cm)	두께(mm)
상 단	2.50/2.47	0.3
하 단	2.50/2.44	0.6

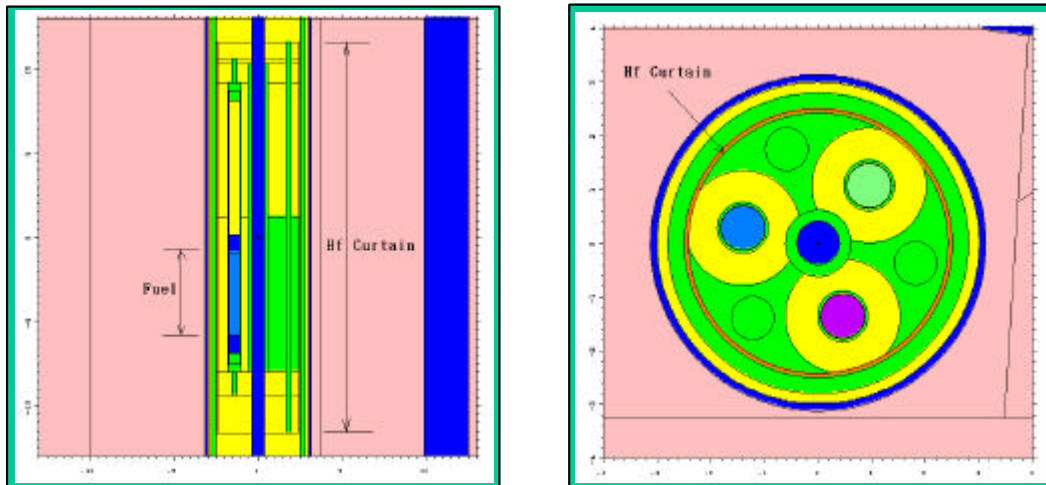


그림 2. 축방향 및 횡방향의 MCNP 모델

하프늄 튜브에 장착에 따른 안전성 분석[3]에서 고려되어야 하는 주요 인자는 제어봉의 영향, 하프늄의 순도, 하프늄 두께의 제작 공차, 연소 효과, Xe 포화 및 계산의 불확실도이다. 제어봉의 영향은 예상되는 운전 노심의 제어봉 위치별로 계산을 수행하면 얻을 수 있지만 많은 계산을 필요로 한다. 하나로의 운전이력에 따라 최대출력이 발생하는 제어봉 위치를 알고 있으므로 해당 제어봉 위치에서 계산하면 제어봉의 영향이 제대로 반영된다. 시험 핵연료봉이 아래에 있는 결

우는 제어봉 위치는 350mm이고, 위에 있는 경우는 제어봉 600mm이다.

하프늄 두께의 제작 공차는 5% 이내이지만 양의 공차만 적용하여 제작하였으므로 분석에 적용하지 않았다. 노심내의 연소효과는 캡슐의 장전시기에 따라 노심의 연소도가 다르게 되며, 캡슐이 장전되기 전에는 정확한 연소도를 미리 알 수 없으므로 예상되는 노심에 대하여 노심 연소효과를 보수적으로 적용하였다. 참고로 DUPIC 핵연료 캡슐의 분석[4]에서는 노심의 평균 연소도가 23.04%U-235일 때에 대하여 캡슐의 평균 선출력이 새로운 핵연료 노심에 비해 평균 17%가 높았다. 예상되는 노심은 DUPIC의 경우와 크게 다르지 않을 것으로 예상되기 때문에 노심 연소효과는 보수적으로 20%로 가정하여 적용하였다. Xe이 포화상태에 도달하면 노심의 평균 중성자속이 높아지므로 시험 핵연료봉에서의 중성자속도 높아진다. 시험 핵연료봉의 최대 선출력은 Xe이 없는 경우에 발생하며 Xe 포화 상태에 도달하면 선출력이 낮아진다. 전체 노심과 시험 핵연료봉에서 Xe 포화 상태에 도달하는 시점은 거의 같을 것이다. 노심이 Xe 포화 상태에 도달하여 노심 전체의 중성자속이 높아지더라도 시험 핵연료봉은 Xe 포화 상태에 도달하면 선출력은 낮아질 것이므로 결국 거의 변화가 없을 것이다. 따라서 Xe 포화의 효과는 고려하지 않는다.

계산의 불확실도는 MCNP 계산의 통계적 오차에서 95% 신뢰구간만 고려하도록 하였다. 하프늄 순도가 95%인 경우에 대하여 상단 하프늄 튜브 두께 0.3 mm, 하단 하프늄 튜브 두께 0.6 mm에 대하여 보수적 측면에서 노심의 Xe은 평형상태에 있고 시험 핵연료봉에는 Xe이 없는 것으로 계산하였다. 하나의 운전노심에 대한 MCNP 계산이 어려움으로 HANAFMS를 이용하여 운전노심에서의 선출력을 계산하고 상대오차의 비교에 의한 평가를 수행한 계산결과는 표 3에 요약하였다.

표 3. Xe 포화상태의 운전노심에 대한 선출력(W/cm)

<ul style="list-style-type: none"> • 핵연료 위치 : 상단(Hf Thickness : 0.3mm) • 축방향 소결체의 중심 : + 12.5 cm 								
제어봉 (mm)	봉 1	봉 2	봉 3	평균	hot spot factor	MCNP의 fsd ¹⁾	상대 오차 ²⁾	최대 선출력 ³⁾
350	381.6	343.1	367.6	364.1	1.18	0.0435	0.0372	466.7
400	397.7	357.6	383.1	379.5	1.17	0.0421	0.0360	477.9
450	428.4	385.3	412.7	408.8	1.13	0.0419	0.0023	483.8
500	477.2	429.2	459.7	455.4	1.19	0.0403	0.0257	577.3
550	511.2	459.7	492.4	487.8	1.18	0.0386	0.0133	603.6
600	529.7	476.3	510.2	505.4	1.18	0.0366	0.0021	618.3
<ul style="list-style-type: none"> • 핵연료 위치 : 하단(Hf Thickness : 0.6 mm) • 축방향 소결체의 중심 : - 12.5 cm 								
제어봉 (mm)	봉 1	봉 2	봉 3	평균	hot spot factor	MCNP의 fsd ¹⁾	상대 오차 ²⁾	최대 선출력 ³⁾
350	476.9	424.0	457.3	452.7	1.11	0.0368	0.0280	533.9
400	473.7	421.1	454.2	449.6	1.14	0.0365	0.0233	545.6
450	462.4	411.0	443.4	438.9	1.14	0.0377	0.0308	535.6
500	447.1	397.5	428.7	424.4	1.11	0.0375	0.0178	499.7
550	430.5	382.7	412.8	408.6	1.20	0.0377	0.0240	522.5
600	414.6	368.5	397.5	393.5	1.21	0.0372	0.0237	507.5

1) fsd: fractional standard deviation

2) 상대 오차 = abs(HANAFMS의 평균/MCNP의 평균-1)

3) 최대 선출력 = 평균 x hot spot factor x (1+MCNP의 fsd) x (1+상대 오차)

2.3 하프늄 튜브에 의한 선출력 변화

OR-4 시험조사공의 위치에서 하프늄 튜브를 설치하여 증성자 제어에 의한 선출력 변화를 분석하였다. HELIOS를 이용하여 하프늄의 선출력 제어에 의한 조사시간과 선출력변화를 분석한 결과 조사시험 목적에 부합한 500 W/cm ~ 200 W/cm의 범위에서 조사시험이 수행되는 것으로 확인하였으며, 이 때의 목표연소도인 70 MWd/kgU까지의 총 조사시간은 1,037일로 계산되었고, 35 MWd/kgU까지의 1차 조사시간은 457일, 하프늄 튜브를 제거하여 70 MWd/kgU까지의 2차 조사시간은 580일로 각각 확인되었다. 이 때 하나로의 출력증가를 예상하여 계산되었다. 상단의 하프늄 튜브 0.3 mm 장착과 하단의 0.6 mm 하프늄 튜브 장착시 연소도에 따른 선출력 변화는 표 4와 같고 이때의 전체 조사기간에서의 평균 선출력 변화는 그림 3과 같다.

표 4. 제어봉 450mm에서 평균 선출력 변화

상단 시험 핵연료봉 집합체 (하프늄 튜브 두께 : 0.3 mm)					하단 시험 핵연료봉 집합체 (하프늄 튜브 두께 : 0.6 mm)				
연소도 (MWd/MTU)	평균 선출력 (W/cm)	평균 비출력 (W/gU)	조사일수 (Days)	원자로 출력 (MW)	연소도 (MWd/MTU)	평균 선출력 (W/cm)	평균 비출력 (W/gU)	조사일수 (Days)	원자로 출력 (MW)
0	408.8	84.3	0.0	24	0	439.0	90.6	0.0	24
0	400.8	82.7	0.0	24	0	430.6	88.8	0.0	24
50	400.3	82.6	0.6	24	50	430.1	88.7	0.6	24
250	398.9	82.3	3.0	24	250	428.7	88.4	2.8	24
500	397.4	82.0	6.1	24	500	427.2	88.1	5.6	24
1000	395.1	81.5	12.2	24	1000	425.3	87.7	11.3	24
1500	393.1	81.1	18.3	24	1500	423.4	87.3	17.0	24
2000	391.4	80.7	24.5	24	2000	422.1	87.1	22.7	24
2999	387.8	80.0	36.8	24	3000	419.0	86.4	34.2	24
5000	380.1	78.4	61.9	24	4999	412.3	85.0	57.4	24
7500	369.9	76.3	93.7	24	7500	403.3	83.2	86.8	24
8750	364.5	75.2	110.1	24	10000	393.2	81.1	116.8	24
10000	448.6	92.5	126.7	30	11250	484.9	100.	132.2	30
11250	441.3	91.0	140.3	30	12500	477.8	98.6	144.7	30
12500	433.6	89.4	154.0	30	15000	462.4	95.4	170.1	30
14999	417.2	86.1	181.9	30	19998	427.4	88.2	222.5	30
20000	380.8	78.6	240.0	30	24999	387.5	79.9	279.2	30
24999	340.4	70.2	303.7	30	29999	343.5	70.8	341.8	30
29998	296.5	61.2	374.9	30	34998	297.1	61.3	412.3	30
34997	251.3	51.8	456.6	30	37500	462.6	95.4	0.0	30
39995	208.3	43.0	553.0	30	37500	458.8	94.6	0.0	30
44995	172.7	35.6	669.4	30	40000	405.3	83.6	26.4	30
49996	148.6	30.7	809.8	30	40999	386.7	79.8	38.4	30
54998	136.0	28.1	973.0	30	43500	344.2	71.0	69.7	30
59999	130.7	27.0	1151.2	30	45000	321.4	66.3	90.8	30
64999	128.9	26.6	1336.7	30	49996	265.9	54.8	166.2	30
69999	128.4	26.5	1524.7	30	54997	236.0	48.7	257.4	30
74999	128.4	26.5	1713.5	30	59999	223.0	46.0	360.2	30
79999	128.4	26.5	1902.3	30	64999	218.0	45.0	468.8	30
84999	128.5	26.5	2091.1	30	69999	215.7	44.5	580.1	30
					74999	214.4	44.2	692.4	30
					79999	213.3	44.0	805.5	30
					84999	212.4	43.8	919.1	30
					89999	211.4	43.6	1033.3	30
					94999	210.4	43.4	1148.0	30
					99999	209.4	43.2	1263.2	30

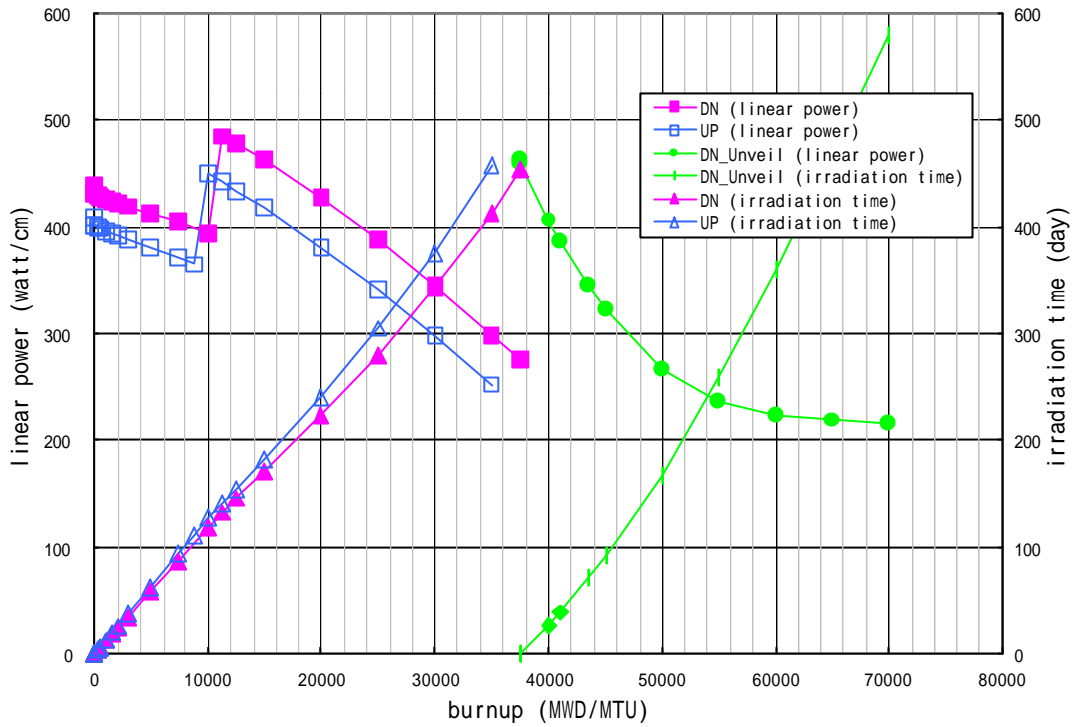


그림 3. 전체 조사기간에서의 평균 선출력 변화와 조사일

3. 하프늄의 가공기술

3.1 하프늄 재료

하프늄의 재료적 특성은 주기율표상 4족에 속하는 금속원소로 지르코늄(원자번호 40)과 화학적 성질이 비슷하다. 프랑스 Framatome ANP의 CEZUS사로부터 판재형태($1.05^{±0.06} \times 250^{+10/-0} \times 160^{+10/-0}$)로 수입되었다. 수입후 측정된 판재의 두께는 1.1mm였으며, 표 5와 같이 화학조성으로 판재의 표면은 세척과 연마처리 되어진 상태였다. 본 하프늄 판재는 하나로에서 사용하고 있는 Nuclear Grade Hafnium으로 ASTM B737 Grade R1에 해당하는 재질로 하나로에서 요구하는 하프늄의 불순물 제한치는 아래와 같다.

불순물 원소	함유량(ppm)	
	최대치	최소치
columbium	100	
iron	500	200
oxigen	400	100
silicon	50	
tin	30	
uranium 235	0.07	
zirconium	45000	

3.2 하프늄 튜브가공

초기 하프늄 튜브제작을 위해 1.1 mm 판재를 250t의 냉간압연을 통하여 0.3mm 및 0.6mm로 두께를 축소하여 튜브를 제작할 계획하였으나 실제 가공시 압연에 의해 재질특성이 변하여 상당히 높은 강성을 갖게됨으로서 튜브형태로의 제작이 불가능하였으며, 치구를 이용하여 원형을 유지하였으나 전자빔 용접에 의해 재료의 손상과 진원의 튜브상태를 유지하지 못하였다. 열처리의 플링작업을 수행하려 하였으나 그 효과가 극히 미약할 것으로 판단하여 판재의 물리적 변형을 최소화하고 튜브형태의 진원유지를 위해 기계가공을 선택하였다.

우선 1.1 mm의 하프늄 판재를 그림 4와 같은 단순한 장비를 이용하여 원형의 튜브를 제작하고, 그림 5와 같은 용접치구를 이용하여 전자빔 용접을 수행하였다. 용접치구는 내경 고정틀과 외경 고정틀로 구성되어 튜브가 진원이 유지된 상태에서 용접이 가능하도록 제작되었다. 이때의 용접조건은 표 6과 같으며, 용접길이는 극히 제한적이다. 하프늄의 재료 특성상 가공정화 경향이 큰 재료이므로 가공 정화층을 제거하기 위해 중절삭, 저속 가공하는 것이 좋으며 미세한 칩(chip)은 발화성이 강하므로 장비부근에는 모이지 않도록 한다. 공구는 초절이나 고속도강을 사용할 수 있으나 초절공구를 사용할 때 가공면이 깨끗하고 가공성이 좋다. 일반적으로 난삭재이므로 연마등 절삭을 이용한 가공은 피하고 표면처리는 다이아몬드 랩제등 랩핑처리를 하였다. 선반 가공조건은 표 7과 같으며 밀링조건은 표 8과 같다. 가공시 발생하는 칩이 절삭열에 의해 발화할 가능성이 있으므로 칩을 완전히 씻어낼 수 있도록 대량의 냉각수를 분출하면서 가공하도록 한다.

표 5. 수입된 하프늄 판재의 화학조성표

Heat NR : 272 383	Top of Ingot	Middle of Ingot	Bottom of Ingot
Elements(%)			
Hf	> 95	> 95	> 95
O	0.028	0.031	0.032
Zr	0.245	0.30	0.25
Impurities(pp m)			
Al	< 10	< 10	< 10
C	21	25	19
C + N	31	48	34
Co	< 5	< 5	< 5
Cr	< 10	< 10	< 10
Cu	< 10	< 10	< 10
Fe	253	284	325
H	4	5	< 3
Mg	< 10	< 10	< 10
Mn	< 10	< 10	< 10
Mo	< 5	< 5	< 5
N	10	23	15
Nb	< 30	< 30	< 30
Ni	< 10	< 10	< 10
Si	< 25	< 25	< 25
Sn	< 30	< 30	< 30
Ta	< 50	< 50	< 50
Ti	< 10	12	< 10
U	< 1.5	< 1.5	< 1.5
V	< 10	< 10	< 10
W	< 10	< 10	< 10

표 6. 하프늄 튜브의 EB 용접조건

구 분	단 위	Hafnium(Hf)	비 고
Acceleration Voltage	kV	150	
Beam Current	mA	3.6	
Focus Current	mA	530	
Focus Distance	mm	상, 표, 하	
Welding Speed	mm/min	500	
Timer	sec	26	
Slope # 3	-	60	
Slope # 4	-	60	
Vacuum	Torr	5×10^{-7}	

표 7. 하프늄 튜브의 선반가공시 가공조건

항 목	단 위	황 삭	정 삭
이송 속도	mm/rev	0.5	0.1
가공 속도	M/min	24 ~ 30	30 ~ 45
가공 깊이	mm	3 ~ 6	0.2 ~ 1

표 8. 하프늄 튜브의 밀링 가공조건

항 목	단 위	황 삭	정 삭
이송 속도	mm/rev	0.25	0.05
가공 속도	M/min	30 ~ 45	45 ~ 75
가공 깊이	mm	3 ~ 6	0.2 ~ 1

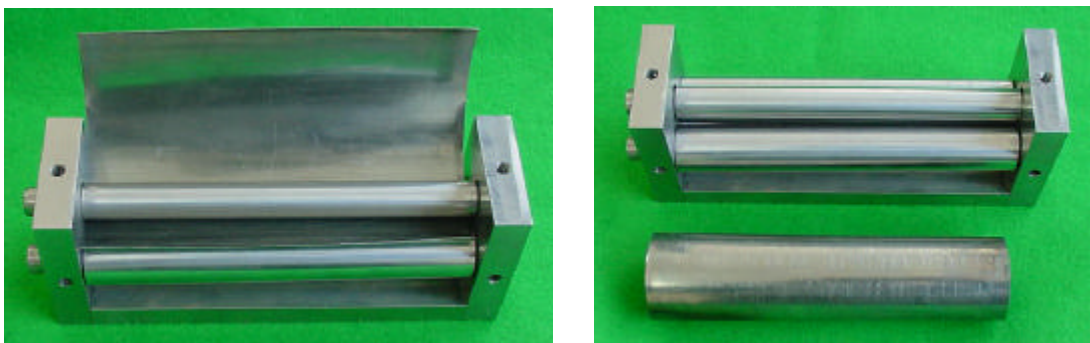


그림 4. 하프늄 판재의 튜브 가공을 위한 기계장비



그림 5. 하프늄 판재의 튜브 용접을 위한 고정치구

국내에서 하프늄의 용접경험이 없어 판재를 이용하여 용접조건을 확인하고 용접이 완료된 후 가공면과 용접상태를 확인하기 위해 조도검사 및 x-ray 투과시험을 통하여 가공상태를 확인한 결과 그림 6과 같이 양호한 상태로 가공된 것을 확인하였다.

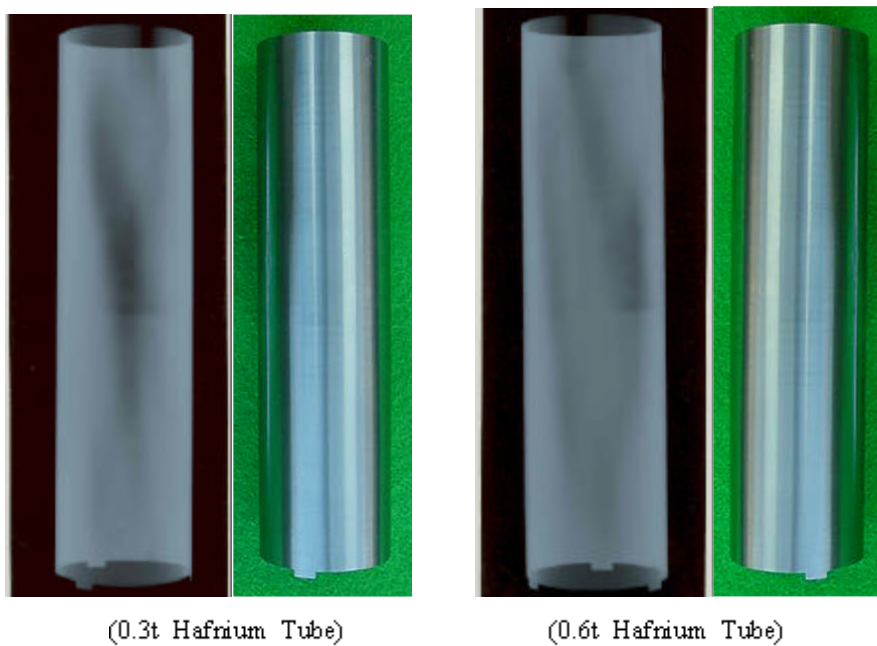


그림 6. 용접후 하프늄 튜브의 x-ray 투과시험

참고로 용접부의 인장시험은 시편의 회귀성 문제로 시험하지 못하였으나, 폭 10mm 하프늄 판재의 인장시험결과 0.3t 경우 최대 인장강도는 484 N/mm^2 이고, 0.6t 경우 최대 인장강도는 775 N/mm^2 로 나타났다.

4. 결론

경수로용 신형소결체의 연구로 노내 조사시험은 목표연소도인 70 MWd/kgU까지 달성하기 위하여 장기간의 조사시험을 수행하게 된다. 본 조사시험의 주요목적은 고연소도에 적합한 핵연료를 개발하고 이의 성능을 확인하는데 있기 때문에 시험조건을 상용로의 노심조건과 유사한 연소조건을 만들어주는 것이 중요하다. 따라서 초기 선출력이 높은 하나로의 OR-4 시험조사공에서 중성자의 제어를 통하여 시험목적에 부합하도록 중성자 흡수체를 적용하여 조사시험을 수행하고 있다.

중성자 흡수체로 하프늄을 선정하여 주어진 조사시험용 무게장캡슐의 제원[5]에 맞게 튜브형태로 제작하여 시험 핵연료봉 집합체를 감싸도록 설계하였다. 이 때 조사기간중 시험 핵연료봉이 200 ~ 500 W/cm 범위의 선출력에서 조사시험이 수행될 수 있도록 MCNP를 이용하여 하프늄 튜브의 위치와 두께를 결정하고 이에 따른 조사시간 및 선출력 변화를 확인하였다. 분석결과 상단 시험 핵연료봉 집합체에 설치된 하프늄의 두께는 0.3mm로 결정하였으며, 하단 시험 핵연료봉 집합체의 하프늄 튜브 두께는 0.6mm로 결정하였다. 이 때의 평균 선출력 변화는 200 ~ 500 W/cm 범위내에서 연소되는 것을 확인하였으며 35 MWd/kgU까지 연소에 걸리는 조사기간은 457일로 분석되었고, 하프늄 튜브를 제거하여 70 MWd/kgU 연소도까지 수행되는 2차 조사기간은 580일로 예상되었다. 하프늄의 재료적 특성은 주기율표상 4족에 속하는 금속원소로 지르코늄과 화학적 성질이 비슷하고, 고가의 금속이다. 따라서 본 연구에서는 하프늄 판재를 이용하여 튜브형태로 용접 후 기계가공을 통하여 제작하였다. 국내에서 하프늄의 용접경험이 없어 지르코늄의 용접조건을 참조로 하프늄의 전자빔 용접조건을 확보하였다. 하프늄의 재료 특성상 가공경화 경향이 큰 재료이므로 가공 경화층을 제거하기 위해 중절삭, 저속 가공하는 것이 좋으며 미세한 칩(chip)은 발화성이 강하므로 장비부근에는 모이지 않도록 한다. 공구는 초경이나 고속도강을 사용할 수 있으나 초경 공구를 사용할 때 가공면이 깨끗하고 가공성이 좋다. 일반적으로 난삭재이므로 연마등 절삭을 이용한 가공은 피하고 표면처리는 다이아몬드 랩제등 랩핑처리를 하였다. 선반 가공조건과 밀링조건은 지르코늄 합금[6]과 유사하나 약간의 차이를 확인하였다. 가공시 발생하는 칩(chip)이 절삭열에 의해 발화할 가능성이 있으므로 칩을 완전히 씻어낼 수 있도록 대량의 냉각수를 분출하며 가공하도록 주의해야한다. 본 연구결과는 연구로를 이용한 중성자 조사시험에서 중성자 제어를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 후기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력연구개발 중장기계획사업의 지원으로 수행되었으며 대우정밀주식회사 F.A팀의 기술지원으로 연구 수행되었다.

6. 참고문헌

- [1] 김대호 외 "고연소도 신형 UO₂ 소결체의 하나로 캡슐 조사시험을 위한 시험봉설계," KAERI/TR-1929/2001, 2001.10.
- [2] 서철교, 신형 소결체의 조사 시험을 위한 Hf 두께 결정, "HAN-RR-CR-900-01-067, 2001. 7.
- [3] 이찬복 외 "경수로용 UO₂ 신형소결체 조사시험계획서", KAERI/TR-2144/2002, 2002. 4.
- [4] 배기광 외 "DUPIC 핵연료 조사시험 설계 및 안전성분석보고서," KAERI/TR-1157/ 98, 1998.10.
- [5] 김대호 외 "경수로용 신형소결체 조사시험용 무게장캡슐 설계 및 제작", KAERI/ TR-2117/2002, 2002. 4.
- [6] 김대호 "경수로용 신형소결체 노내 조사시험용 무게장캡슐 및 안내관 제작구매시방서", APFCAP-PS-01-01, 2001. 11.