

원자로 내 핵연료조사시험용 압력용기조립체 설계

박국남[†] · 이종민* · 지대영* · 박수기* · 이정영* · 김영진*

Design of Vessel Assembly for Fuel Irradiation Test in Reactor

Kook Nam Park, Jong Min Lee, Dae Young Chi, Su Ki Park,
Chung Young Lee and Young Jin Kim

Key Words : HANARO(하나로), Fuel Test Loop(핵연료 노내조사시험설비), In-Pile Test Section(노내시험부), Out-of Pile System(노외공정계통), IPS Vessel Assembly(노내시험부 압력용기조립체)

Abstract

The Fuel Test Loop (FTL) consists of In-Pile Test Section (IPS) and Out-of-Pile System (OPS). The test condition in IPS such as pressure, temperature and quality of the main cooling water, can be controlled by the OPS. The FTL has been developed to be able to irradiate three pins to the core irradiation hole (IR1 hole) by considering for its utility and user's irradiation requirement. The IPS vessel assembly (IVA) consists of IPS head, outer pressure vessel, inner pressure vessel, inner assembly and test fuel carrier. The IVA is approximately 5.6 m long and fits within a 74 mm in diameter envelope over the full height of the chimney. Above the top of the chimney, the head of the IPS is enlarged to allow the closure flanges and pipe work connections. IVA was designed to test the CANDU and PWR nuclear fuel pin together. Specially, wished to minimize interference by nuclear fuel change in design and synthesize these items and shape design for IVA.

기호설명

- P : 설계압력 (kPa)
R : 용기 안쪽 반지름 (mm)
Ro : 용기 바깥쪽 반지름 (mm)
S_m : 설계 응력 집중치 (kPa)
t : 두께 (mm)
A : 유동단면적 (mm²)
Q : 체적유량 (kg/s)
V : 유속 (m/s)
d_{min} : 최소지름(mm)

1. 서론

핵연료 노내조사시험설비(FTL)는 상용로 운전 조건에서 핵연료의 성능시험 및 검증시험을 할 수 있는 종합 핵연료시험시설이다. 이 설비는 노내시험부(IPS)와 노외공정계통으로(OPS) 구성되며 노내시험부는 압력용기조립체(IVA), 수조내 배관 및 이들의 지지대로 이루어 졌다. FTL은 중성자속이 높은 곳에서 핵연료를 조사시험하고자 하는 이용자의 요구사항을 고려하여 하나로 노심내의 IR1 조사공에 IVA를 설치하며, 노내조사공의 크기를 고려하여 조사시험 핵연료봉 3개를 장착할 수 있도록 하였다.

IVA와 노외공정계통의 연결은 탈·부착이 용이하도록 하였으며 IVA의 설계는 IVA내의 높은 온도(300℃)의 냉각수와 낮은 온도(50℃)의 하나로 수조수 사이에 단열층을 갖도록 설계했다. IVA는 3-Pin FTL의 정상운전조건에서 뿐만 아니라 일반적인 기동, 정지, 운전의 과도상태 및 예

[†] 한국원자력연구소 하나로이용연구단
E-mail : knpark@kaeri.re.kr
TEL : (042)868-2275 FAX : (042)868-8364

* 한국원자력연구소 하나로이용연구단

상 운전사고에서 정상적인 기능을 유지해야만 한다.

위의 노심 내 조사공의 크기와 이용자의 요구 사항 등을 고려하여 FTL 운전조건이 설정되고 IVA 내부의 유동, 단열, 설계압력, 온도 및 시험 핵연료봉의 교체를 고려한 내·외부 압력용기의 두께 및 시험 핵연료봉의 치수가 결정되었다.

2. IVA 운전조건 및 설계

2.1 IVA 운전 조건

하나로 조사공에 설치된 IVA 바깥 표면에서는 50℃ 이하의 하나로 냉각수가 강제대류로 흐르고 있고, 노심 내의 IR 조사공의 중성자와 감마 플럭스는 높다. 수조 내 배관을 포함한 노심 외부 즉 노심으로부터 멀어질수록 중성자와 감마 플럭스가 낮아진다. 상용로의 운전조건을 고려하여 설정된 IVA 의 정상운전조건은 Table 1 과 같다.⁽¹⁾

Table 1 IVA Operating Condition

	PWR	CANDU
Generating Heat	112.3 kW	116.2kW
Cooling Water Pressure	15.5 Mpa	10.0 Mpa
Cooling Water Outlet Temperature	312.0 ℃	290.0 ℃
Cooling Water Inlet Temperature	300.3 ℃	276.7 ℃
Cooling Water Flow Rate	1.6 kg/s	1.63 kg/s

IVA 는 설계기준에 따라 압력경계를 효과적으로 유지하여야 하며 IVA 자체, 수조내 배관 및 연결부의 파손, 지진을 포함한 어떠한 사고시에 도 하나로에 부정적인 영향을 주지 않아야 한다.

2.2 IVA 설계

육각형 모양의 내벽간 거리가 74 mm 인 IR 조사공 안에 삽입되는 노내시험부 압력용기조립체 (IVA, IPS Vessel Assembly)는 Fig.1 과 같이 원자로 본체의 침니에 의해 둘러싸여 있다. 침니 위로 나오는 노내시험부 헤드의 입출구는 Hiltap 등에 의해 수조내 배관과 연결된다. IVA 는 원자로에 부정적인 영향을 주지 않아야 한다는 기본원칙을 준수하기 위해 Class 1 으로 분류하였으며 시험핵연료 외부에 이중의 압력용기가 배치되도록 설계하였다.

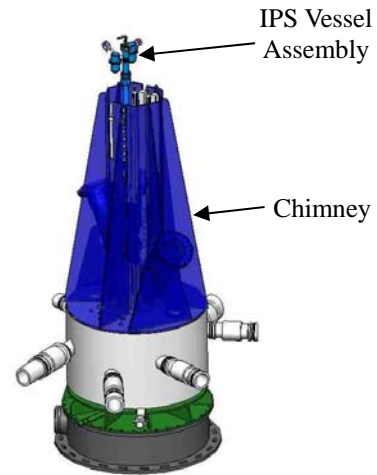


Fig. 1 IVA in the Reactor

IVA 설치시 하나로와의 간섭이 없도록 하기 위해 부품들이 원통형상으로 침니 위쪽까지 이어지도록 설계하였다. 따라서 Sealing 부분의 방사화 손상이나 원자로 노심 내에서의 유동에 미치는 영향을 피하도록 하였다.

IVA 는 노내시험부 헤드(IPS head), 외부압력용기(Outer Pressure Vessel), 내부압력용기(Inner Pressure Vessel), 유동분리관(Flow divider), 시험핵연료운반체(Test fuel carrier) 등 5 개의 주요부분으로 구성된다. IVA 내부에서의 냉각수는 Fig. 2 와 같이 노내시험부 헤드의 하부연결관을 통해서 내부압력관 안쪽으로 유입되고, 끝단에서 방향이 180° 굽어지면서 유동분리관 안쪽으로 흐른다. 이 냉각수가 시험핵연료를 냉각한 후 운반체

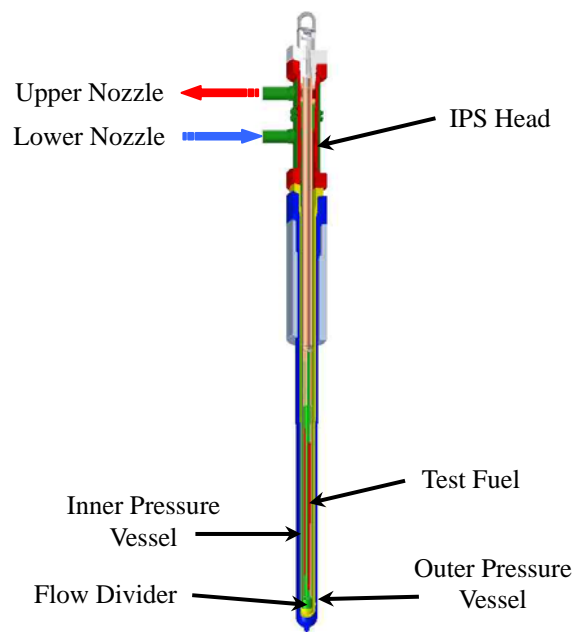


Fig. 2 Flow of Main Cooling Water

지지대를 통과하여 상부연결관을 통해서 흘러나간다.⁽²⁾ 외부압력용기와 내부압력용기 사이에 네온가스로 충전된 중간층은 단열층 역할을 하며 핵연료로부터 과도한 복사열을 막는다. 내부압력관은 최대 설계 냉각수 유량을 기준으로 설계되었다.

3. 상세 설계

3.1 노내시험부 헤드(IPS head)

IVA 길이의 대부분을 차지하는 이중용기는 IVA 주위 저온의 수조수와 IVA 내의 고온의 냉각수 사이에 단열층을 형성한다. 단열층은 높은 온도의 물을 가지고 있는 노내시험부 헤드부분에서도 요구된다. 그러나 내부에는 단열층을 형성할 만한 공간이 없으므로 외부에 단열층을 만들어야 한다. 노내시험부 헤드부분에서는 수중에서 열전도성이 낮은 공기층에 의해 단열이 이루어진다.

시험 핵연료는 주냉각수가 흐르는 IVA 로부터 분리되어 이동할 수 있는 내부조립체에 의해 지지되기 때문에 수조수의 수위를 내리지 않고 시험핵연료를 교환할 수 있다. 내부조립체가 조립되는 노내시험부 헤드는 방사선 영향을 받지 않고 수중에서 원격으로 시험핵연료 교환이 가능하도록 설계했다.

노내시험부 헤드는 Fig. 3 과 같이 3 개 부분으로 나누어져 있다. 상부는 내부조립체의 조립 및 분해를 위해 탑플랜지가 열린다. 탑플랜지와와의 Sealing 을 모니터링하기 위한 탭홀을 가공하고 그곳에 열전대가 장착되어 있다.

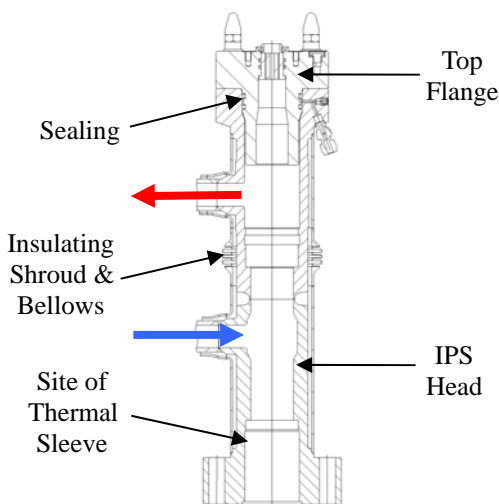


Fig. 3 IPS Head and Top Flange

중간부분은 냉각수의 입·출구 역할을 하는 2 개의 1 인치, 스케줄 80 의 노즐이 있다. 주 몸체에 연결되어 몸체를 덮고 있는 얇은 Insulating shroud 및 Bellows 는 주 몸체사이에 발생하는 열팽창과 냉각에 사용되는 주위의 수조수로부터 견딜수 있도록 설계되었다. 그리고 그 공간에는 네온가스로 채워진다.

노내시험부 헤드 하부의 플랜지는 내부압력관의 플랜지를 사이에 놓고 외부압력관과 볼트로 조립된다. 노내시험부 헤드 하부에는 내부압력관에 조립된 Thermal sleeve 가 노내시험부 헤드 하부까지 조립되어 냉각수와 수조수 사이의 급격한 온도차가 발생하는 열전달을 막기 위한 단열벽으로 설치되어 있다. 이와 같은 구조로 노내시험부 헤드에서 보일링이 발생되지 않도록 설계했다.

입구쪽은 노즐 부분은 주 냉각수의 유입시 정체현상이 발생되지 않고 유동이 원활하도록 Collar 형태로 제작하였다.

3.2 내·외부압력용기(Inner & Outer pressure vessel)

외부압력용기의 바깥쪽은 반구형 캡으로 Bottom 부분이 하나로 유동관 Spider 에 위치한다. 외부압력용기의 바깥지름 68mm, 두께 5mm 로 하여 유동관과 용기사이의 틈새를 3.2mm 정도로 하여 설치에 간섭이 발생하지 않도록 하였다. 외부압력용기 바깥쪽 표면은 약 50℃ 원자로 수조수의 유동에 의해 직접 냉각되어 외부압력용기의 온도는 50℃ 근처일 것이다.

내부압력용기의 파단사고시에는 가스로 채워져있는 두 압력용기 사이의 갭이 없어지고 외부압력용기 내에 FTL 주냉각수가 채워지게된다. 외부압력용기에 도달되는 주냉각수의 온도는 300℃ 로 잠재적인 전출력 온도가 된다. 그러나 외부압력용기의 온도가 수조수 온도에 가까운 쪽으로 내려가면서 중간온도 이상으로는 올라가지 않을 것이다. 따라서 외부압력용기의 설계조건이 17.5 Mpa, 350℃이므로 안전하다.

내부압력용기 내부에는 3 개의 핵연료봉이 조립된 내부조립체가 삽입되도록 하였고 두께는 4mm 이다. 내부압력용기의 재질과 두께는 외부압력용기와 같은 압력과 온도를 고려하여 설계하였다. 내부압력용기 하부의 Bottom 부분은 반구형의 캡에 의해서 닫혀 있다. 그 캡은 Fig. 4 에서와 같이 내부에서 주냉각수가 180° 돌아서 흐르도록 형상을 고안하였다.

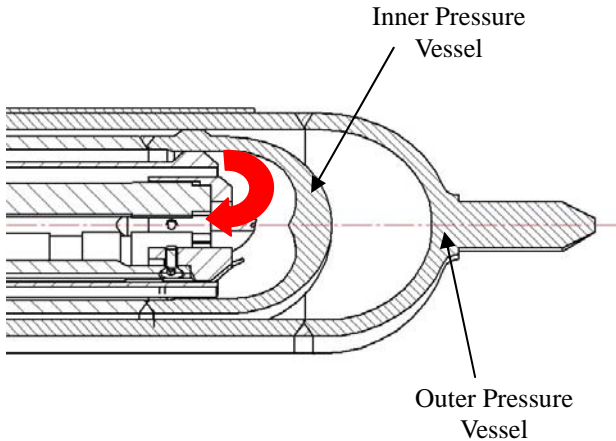


Fig. 4 Inner & Outer Pressure Vessel

노내시험부 헤드와 아래쪽으로 외부압력용기가 조립되며 Sealing 은 Helicoflex 를 사용하는 것으로 하였다. 내·외부압력용기 사이의 공간에는 원자로 수조수와의 단열을 위하여 불활성기체 (Ne)로 채웠다. 이와 같이 내·외부압력관의 설계는 온도, 열팽창, Sealing 및 응력을 고려하였다.

ASME III NB-3324.1 로부터 Cylindrical Shells 에서 대략적인 외부압력용기의 벽두께 t 는 다음 식 (1)로부터 얻을 수 있다.⁽³⁾

$$t = \frac{PR_o}{S_m + 0.5P} \quad (1)$$

$t = 4.75 \cong 5.0$ mm 라 하면 외부압력용기의 안지름은 58.0mm 이다. 내부압력용기 바깥쪽과 외부압력용기 안쪽 사이의 원주상의 갭은 2mm 이다. 따라서 내부압력용기의 바깥지름은 54.0mm 이다. 내부압력용기의 벽두께 역시 (1)식을 이용하고 부식을 고려하여 $t = 3.66 \cong 4.0$ mm 라 하면 내부압력용기의 안지름은 46 mm 이다.

노내시험부 압력용기의 벽두께 계산은 압력용기의 재료를 스테인레스 강으로 가정하였다. ASME III 에 따른 설계응력의 강도는 350℃에 비하여 보수적인 370℃를 적용하였다. 압력용기의 재질은 조사공의 제한된 공간에서의 설계와 외국의 경험을 바탕으로 321 타입 스테인레스강으로 정하였다.

IVA 하부 코너에서 설계유량이 2kg/s 일 때 냉각수의 유속은 5.1m/s 이다. 이들 기본적인 계산에서 PWR 핵연료 봉을 수용하는 부품의 치수를 Fig. 5 에 나타냈다.⁽³⁾

IVA 에서 유동을 위한 내부압력용기의 하부 코너에서 Re-entrance 를 필요로 한다.

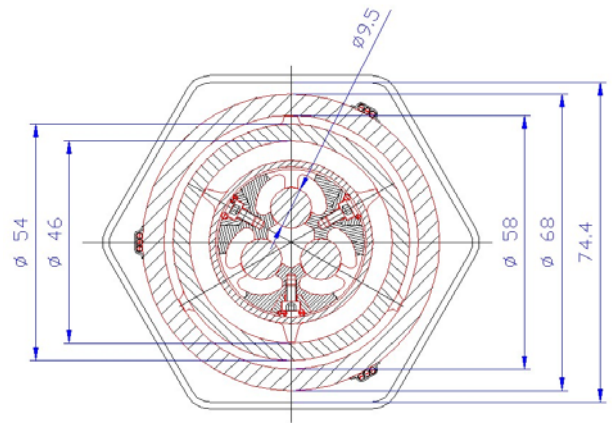


Fig. 5 Shape & Dimension of Horizontal Section of IVA

식 (2)에서 유동 단면적은 551mm² 이고 주냉각수의 바깥지름은 46mm, 유동 Annulus 의 요구되는 안지름은 38mm 이다. 이것은 핵연료부분에서의 유동분리관 두께가 1.5mm 정도가 되고 유동분리관과 내부압력용기 사이에서 단열층이 생긴다. 각 부품들의 지름 등은 Table 2 와 같다.

$$A = \frac{Q}{V} \quad (2)$$

Table 2 Parts Dimension of IVA

Unit : mm			
Parts or Position	Outer Diameter	Inner Diameter	Thickness or Gap
Gap Between Hanaro Flow Tube and IVA	74.4	68.0	3.2
Outer Pressure Vessel	68.0	58.0	5
Gap Between Inner Pressure Vessel and Outer Pressure Vessel	58.0	54.0	2.0
Inner Pressure Vessel	54.0	46.0	4.0
Fuel Assembling Area of Flow Divider	38.0	35.0	1.5

3.3 시험핵연료운반체(Fuel Carrier) 및 분리유동관(Flow Divider)

운반체지지대(Fuel carrier support stem)에 연결된 핵연료운반체는 Fig. 6 과 같이 상부의 운반체헤드(Fuel carrier head), 운반체다리(Test fuel carrier leg), 시험핵연료(Test fuel) 및 연료지지링(Fuel support ring)으로 구성된다. 운반체지지대는 고온의 주냉각수가 배출될 수 있도록 원주방향으로 6 개의 슬롯(Slot)이 형성되어 있다.

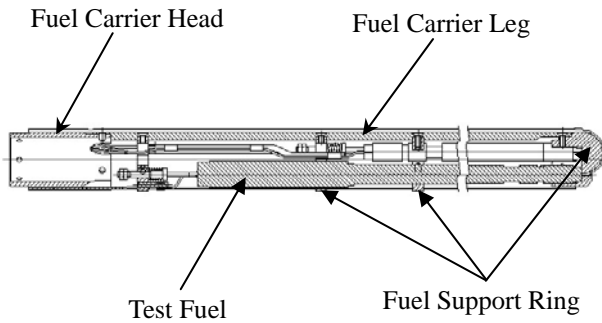


Fig. 6 Test Fuel Carrier

운반체헤드는 운반체지지대에 핵연료운반체를 탈·부착하는 역할을 한다. 운반체다리는 시험핵연료를 안내하는 역할을 하며 원주방향으로 120° 간격으로 세부분으로 분리되어있다. 4 개의 연료지지링은 이들 운반체다리를 결합시킴으로써 시험핵연료를 지지하는 역할을 한다. 연료지지링은 시험핵연료를 지지하면서 동시에 유동단면적을 확보할 수 있도록 설계가 되었다. 운반체지지대와 분리유동관은 형상이 단순하면서도 핵연료에서 노내시험부 헤드부분까지 케이블을 연결할 수 있도록 한다. 운반체지지대 하부는 잠금핀에 의해서 핵연료운반체가 조립되어 있다. 열전대의 끝단은 냉각수 입출구의 온도를 모니터링하기 위하여 시험핵연료운반체의 하부에 위치한다. 시험핵연료는 PWR의 경우 봉 지름이 9.5mm, 길이 700mm로 설계를 하였다.

분리유동관은 자체 길이가 3.85m로 내부조립체 길이의 대부분을 차지한다. 입구냉각수와 출구냉각수의 분리 및 단열역할을 하는 것으로 외부에 돌출부를 통해서 내부압력관과의 일정한 간격을 유지하게 된다. 분리유동관의 상부는 유동분리잠금링(Flow divider locking ring)의 체결을 통하여 위치가 고정되며 하부는 연료지지링과 1mm의 간격을 유지하도록 설계되었다. 물이 채워진 갭은 주로 두께가 1.0~1.5mm로 주냉각수 유동은 분리유동관 바깥쪽을 통해 내려가서 안쪽의 시험핵연료운반체 안쪽으로 올라간다.

분리유동관은 주냉각수 입·출구와도 직·간접으로 연결이 된다. 이부분은 노내시험부 헤드의 중간부분의 돌출부이다. 이 돌출부는 두가지 기능을 하는데 하나는 내부조립체를 지지하는 것이고 또 다른 하나는 주냉각수의 유동 방향을 정해주는 Seal 역할을 한다.

입구유동과 출구유동의 압력차를 이용한 유동분리라는 관점에서 노내시험부 헤드와 유동분리관 사이에서 Sealing이 충분치 않다는 생각이 있다. 이 부분에서 출구노즐부분은 출구 냉각수가 자유롭게 빠져나갈 수 있도록 분리유동관이 열려 있다.

4. 결론

PWR과 CANDU 핵연료를 시험할 수 있는 IVA의 설계기준으로 운전조건이 설정되었으며 길이 5.6m 지름 68mm의 IVA의 외부 형상과 IVA 내부의 유동, 단열 그리고 핵연료봉의 교체를 고려한 형상설계 등이 수행되었다. 17.5Mpa의 설계압력과 350°C의 온도를 고려한 내·외부압력용기의 두께 설정 및 321 스테인레스강으로의 재료선정을 하였다. 내부조립체는 운반체지지대 시험핵연료운반체를 지지하는 구조로 하였다. 그리고 분리유동관이 입·출구 유동을 분리하도록 설계하였다.

후 기

본 연구는 원자력연구개발과제에서 의해서 수행되었음.

참고문헌

- (1) J. Y. Kim, D. Y. Chi, B. S. Sim, S. H. Yang, J. Y. Lee, 2002, Design Criteria of 3-Pin Fuel Test Loop, FL-070-DR-K001, p 6.
- (2) K. N. Park, D. Y. Chi, S. K. Park, B. S. Sim, J. Y. Lee etc., 2003 Conceptual Design of In-Pool Parts for 3-Pin Fuel Test Loop for the HANARO, KAERI/TR-2541/2003, pp 29~37
- (3) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III NB-3300, 2001, p 89