



# 핵연료 노내 조사 시험 설비 노내 시험부의 설계

지대영 · 박국남 · 이종민 · 이정영 · 김영진

한국원자력연구소 하나로이용연구단

**핵**연료 노내 조사 시험 설비(FTL ; Fuel Test Loop)는 노내 시험부(IPS ; In-Pile Test Section)와 노외 공정 계통(OPS ; Out-of-Pile System)으로 구성되어 있다.

노내 시험부는 노외 공정 계통에서 제공되는 압력, 온도 및 수질 환경하에서 시험 핵연료를 조사한다.

노내 조사 시험 설비의 조사 시험 핵연료는 이용자의 요구 사항과 노심 조사공의 크기를 고려하여 3 봉(Pin)으로 결정하였다.

노내 시험부는 외부 압력관, 내부 압력관, 노내 시험부 헤드, 내부 조립체 그리고 시험 핵연료 운반체로 구성된다. 노내 시험부는 하나로의 침니 안에 있는 안쪽면 거리(지름)가 74mm인 하나로 유동관(IR1)에 설치된다.

침니 상부로 돌출되는 노내 시험부 헤드는 밀폐된 플랜지와 관통부 배관으로 연결된다. 노내 시험부는

길이 5.7m, 바깥 지름 68mm의 크기를 가지며 하나로 유동관 안쪽 원주방향 틈새는 3mm이다.

노내 시험부의 설계 및 기술 개발을 통하여 노심 내 압력 용기 재질을 스테인리스강으로 정하였다.

가압경수로 시험 핵연료와 중수로 시험 핵연료 핀을 같이 사용할 수 있는 노내 시험부 압력 용기 조립체가 설계되었다.

특히 설계에 있어서는 핵연료 교체에 따른 간섭을 최소화하고자 하였으며 이러한 사항들을 종합하여 노내 시험부에 대한 설계가 이루어졌다.

## 서론

핵연료 노내 조사 시험 설비는 이용자의 요구 사항을 만족하도록 노내 시험부를 하나로 노심 내의 IR1 조사공에 설치하며, 노심 조사공의 크기를 고려하여 조사 시험 핵연료

는 3개봉(Pin)으로 결정하였다.

시험 핵연료의 냉각수는 노내 시험부 헤드의 하부 연결관을 통해서 시험 핵연료가 설치된 내부 압력관으로 유입되어 시험 핵연료를 통과한 뒤 노내 시험부 헤드에 있는 상부 연결관을 통해서 흘러나간다.

노심 조사공의 크기와 이용자 요구 사항으로부터 시험 핵연료봉의 치수 및 노내 시험부의 운전 조건이 설정되었으며 길이 5.7m 지름 68mm의 외부 형상과 내부의 유동, 단열 그리고 시험 핵연료봉의 교체를 고려한 설계 등이 수행되었다.

설계 압력 및 온도를 고려한 내·외부 압력 용기의 두께 설정 및 재질 선정을 하여 냉각수의 유동 공간 확보를 고려한 내부 압력 용기의 채널 하부 및 시험 핵연료 유동관의 형상을 설계하였다.

노내 시험부 중심에서부터 수조 수까지의 열손실을 검토하여 내·외부 용기의 겹에 충전할 가스를 선

〈표 1〉 시험 핵연료봉의 주요 치수

시험 핵연료 제원	가압경수로형	중수로형
봉 길이	700mm	500mm
봉 지름	9.5mm	3.08mm

〈표 2〉 노내 시험부의 최대 운전 조건

운전 조건	가압경수로형	중수로형
발생 열	112.3kW	116.2kW
냉각수 압력	15.5 MPa	10.0 Mpa
냉각수 출구 온도	312.0℃	290.0℃
냉각수 입구 온도	300.3℃	276.7℃
냉각수 유량	1.6kg/s1.	63kg/s

정하였다.

노내 시험부 헤드의 온도를 개략적으로 계산하여 오링의 사용 가능성을 검토하고 설계하였다.

내부 조립체 및 시험 핵연료 운반체는 시험 핵연료 및 시험 핵연료 유동관을 지지하며 입·출구 유동을 분리한다.

**설계 기준 및 설치 요건**

노내 시험부는 최대 3개의 시험 핵연료봉이 수용 가능하며 동일한 노내 시험부 용기로 가압경수로 시험 핵연료와 중수로 시험 핵연료를 시험할 수 있다. 그것은 노내 시험부 내 핵연료봉의 교체가 가능하다는 것을 의미한다. 시험 핵연료 봉의 주요 치수는 〈표 1〉과 같다.

노내 시험부는 하나로 노심에 있는 IR1 조사공에 설치되며 노내 시험부의 주변 환경은 노내 시험부 바깥 표면에는 50℃ 이하의 하나로 냉각수가 강제 대류로 흐르고 있고 IR 조사공이 위치하는 노심부는 높은 중성자와 감마 플럭스가 나타난다.

수조 내 배관을 포함한 노심 외부에는 노심으로부터 멀어질수록 중성자와 감마 플럭스가 낮아진다. 노내 시험부의 최대 정상 운전 조건은 〈표 2〉와 같다.

노내 시험부는 원자로심을 보호하기 위해 설계 압력을 수용할 수 있는 이중의 압력 용기로 이루어진다. 노내 시험부와 노외 공정 계통의 연결은 탈·부착이 용이하도록 하여야 하며 노내 시험부는 노내 시험부내의 냉각수와 하나로 수조수 사이에 단열층을 갖도록 하여 열손실이 최소화 되어야 한다.

노내 시험부는 정상 운전 조건에서 뿐만 아니라 일반적인 기동, 정지, 운전의 과도상태 및 예상 운전 사고에서 기능을 유지하여야 한다.

노내 시험부는 핵연료 노내 조사 시험 설비의 설계 요건서에 정의한 바와 같이 설계 기준에 따라 압력 경계를 효과적으로 유지하여야 하며 원자로에 어떠한 위험도 주지 않아야 한다.

그것은 수조 내 배관과 그 연결부의 파손, 지진을 포함한 어떠한 사고도 노내 시험부 자체나 하나로에

어떠한 영향도 발생시키지 않아야 한다. 노내 시험부의 설계는 하나로 운전 제한 조건을 만족하여야만 하며 노내 시험부의 설계 수명은 최소한 3년이 보장되어야 한다.

이것은 특히 중성자나 감마 손상 효과를 고려하여 노내 시험부에 적용되는 수명 기간이며 20년인 노외 공정 계통의 수명 기간보다는 짧다.

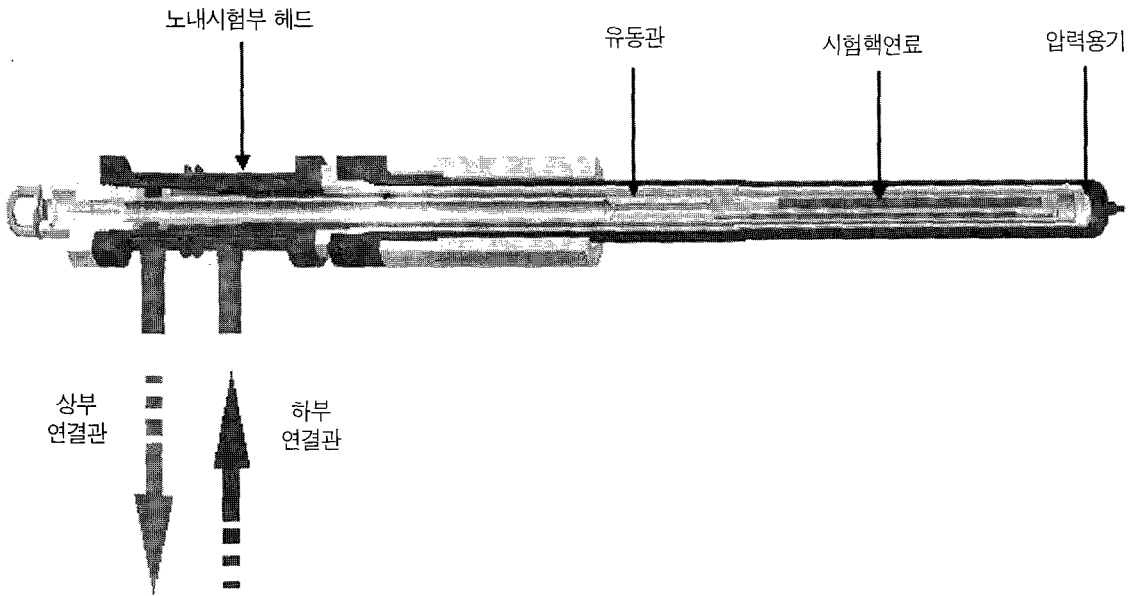
노내 시험부 중 설계 수명이 짧은 부분은 가능한 한 필요에 따라 교체 가능하도록 한다. 수조 내에 장전되는 원통형의 노내 시험부 압력 용기의 형상은 유동이 시험 핵연료를 돌아다니는 re-entrant형으로 되도록 하여 노내 시험부가 하나로 노심에 안정하게 설치되도록 한다.

외부 압력관은 2차 격납 용기가 되고 전체 루프 압력에 대응한 설계가 필요하다.

안전을 위하여 외부 압력관 설계 온도를 노내 시험부 전체 루프 온도로 설계한다. 실제 외부 압력관의 온도는 하나로 정상 운전시 수조 온도에 근접할 것이며 내부 압력관이 파손될 경우의 온도는 수조수와 루프 물 사이의 중간 온도에 접근할 것이다.

네온 가스로 충전된 중간층은 단열층 역할을 한다. 이것은 이중 격납 용기에 의해서 형성되며 노내 시험부로부터의 과도한 복사열을 막는다.

내부 압력관은 냉각수가 최대 설



〈그림 1〉 노내 시험부의 주요 구성

계 유량으로 흐르는 조건을 기준으로 설계되어야만 한다.

유동관 튜브에서 냉각수 유로의 면적은 노내 시험부 안에서 냉각수 유속과 압력 강하가 일어날 수 있도록 충분히 고려되어야 한다.

이상적인 유동관 튜브는 입구측에서 열이 냉각수에 전달되는 것을 감소시키기 위하여 단열층이 설치되어야 한다.

### 노내 시험부의 설계

노내 시험부의 주요 구성은 〈그림 1〉과 같으며 지름 68mm, 길이 5.7m의 2중 압력 용기 구조를 갖는다. 노내 시험부는 지름 74mm의 하나로 IR 1 조사공 안에 들어가고 침니에 의해 둘러싸여 있다. 침니 위로 나오는 노내 시험부 헤드는 밀폐된 플랜지와 배관에 의해 연결된다.

노내 시험부는 주로 스테인리스강으로 제작된다. 노내 시험부의 전체 중량은 3개의 핵연료를 포함하여 약 130kg로 추정된다.

노내 시험부 압력 용기 조립체는 외부 압력관, 내부 압력관, 노내 시험부 헤드(또는 헤드), 내부 조립체 및 시험 핵연료 운반체로 구성된다.

시험 핵연료 교체시에 분해할 수 있는 시험 핵연료 운반체는 내부 조립체의 바닥에 부착된다.

노내 시험부가 원자로에 나쁜 영향을 주지 않아야 한다는 기본 원칙을 준수하기 위한 설계는 class 1으로 분류하여 핵연료 외부에 이중의 압력 용기가 배치되도록 하였다.

원자로의 IR1 조사공에 설치될 노내 시험부의 필수 설치 조건에 의해 부품들이 환상으로 침니 위쪽 노내 시험부 헤드까지 이어지도록 설계하였다. 밀폐된 헤드는 방사선량이 높지 않을 것이다.

수작업을 통해서 연결부의 볼트 분해와 분리 작업이 가능하고, 작업 하기가 훨씬 더 용이하게 하였다. 따라서 밀폐(seal) 장치들의 방사화 손상이나 원자로 노심 유동에 미치는 영향 등을 피할 수 있다.

노내 시험부의 배치는 가동중 검사에서 내부 압력관과 외부 압력관의 분리, 압력 용기의 교체와 용기 재료 조성, 노내 시험부 내의 중성자 조건에 따라 벽 두께의 변경이 가능하다.

시험 핵연료는 내부 중심봉과 시험 핵연료 유동관에 의하여 지지된다. 시험 핵연료 유동 분리관에 의한 지지는 위쪽 방향으로 흐르는 물에서 핵연료 핀에 의한 지지보다 더욱 튼튼하게 지지된다.

시험 핵연료 유동관은 내부 중심봉보다 5에서 10배 정도 더 강도가 크다. 핵연료 지역에서 시험 핵연료 유동관의 바닥은 분리가 가능하도

록 설계되었다.

그래서 핵연료는 짧은 시험 핵연료 운반체로 이동이 가능하다. 이것은 그 자체가 조사될 핵연료 봉의 수와 지름에 맞도록 형성된 유동 영역을 이루도록 설계되었으며 내부 구조를 볼 수 있는 상태에서 취급이 용이하다.

시험 핵연료 유동 분리관과 내부 지지봉에 의한 핵연료의 지지와 분리할 수 있는 내부 조립체는 장치 케이블이 내부 지지봉을 따라가도록 되어 있다. 이것이 핵연료봉이 내부 지지봉에 의해서 지지되고, 그것들이 다양한 유동 단면적을 구현하는 최적의 설계가 된다.

중심 지지봉과 시험 핵연료 유동관은 형상이 단순하면서도 핵연료로부터 노내 시험부 헤드부까지 시험 장치의 케이블을 연결할 수 있는 이점이 있다.

헤드 설계에 있어서 큰 영향을 미치는 또 다른 요소는 시험 핵연료 교환에 대한 방법이다.

시험 핵연료는 주냉각수가 흐르는 노내 시험부로부터 분리되어 이동할 수 있는 내부 조립체에 의해 지지되기 때문에 수조수의 수위를 내리지 않고 시험 핵연료를 교환할 수 있다. 이것은 특별한 부품의 조합없이 수중에서 원격으로 동작하기에 내부 조립체와 결합되는 헤드 설계에 영향을 준다.

노내 시험부 길이의 대부분을 차

지하는 이중 용기는 노내 시험부 주위의 차가운(50℃) 수조수와 노내 시험부 내의 뜨거운(300℃) 냉각수 사이에 단열층을 형성한다.

단열층은 높은 온도의 물을 가지고 있는 노내 시험부 헤드 부분에서도 요구된다. 그와 같은 단열은 금속 부품의 내부 형상에 의해서 얻어질 가능성은 없어 보인다. 따라서 노내 시험부 헤드의 관련 부품 주위에 외부 단열층 형태가 요구된다.

일반적인 단열은 수중에서 효과적인 누설 방지에 의해서 단열 유지가 필요하므로 열전도성이 낮은 공기층에 의해 이루어진다. 노내 시험부 헤드는 단열재나 가스층을 갖는 스테인리스강으로 만든 누설 방지 덮개를 기본으로 한다. 하지만 연성이 떨어지기 때문에 스테인리스강보다 알루미늄 합금이 사용된다.

### 1. 외부 압력관 및 내부 압력관

IR1 조사공 내부의 육각형의 하나로 유동관은 마주보는 면의 내부 치수가 74.4mm이다. 외부 압력 용기를 위한 적절한 바깥 지름은 68.0mm로 하였다. 이것은 유동관과 3.2mm의 최소 틈새가 주어진다.

외부 압력 용기는 바깥 표면에서 약 50℃의 원자로 냉각수 유동에 의해서 직접 냉각된다. 따라서 외부 압력 용기의 온도는 약 50℃에 거의 근접할 것이다.

내부 압력 용기의 파단 사고시 FTL 냉각수가 외부 압력 용기에 접촉되게 된다. 외부 압력 용기에 도달되는 물의 온도는 300℃로 잠재적인 전출력 운전 온도가 된다. 300℃가 외부 압력 용기의 최대 온도라 할지라도 수조수 온도에 가까워질 것이므로 중간 온도 이상으로 올라가지는 않을 것이고, 외부 압력 용기의 설계 조건이 17.5 MPa, 350℃이므로 문제가 되지 않는다. <그림 2>는 외부 압력관과 내부 압력관의 3차원 형상을 나타낸다.

외부 압력관은 전체 루프의 설계 압력과 온도에 따라 설계되었다. 외부 압력관은 321타입 스테인리스강을 사용할 때 두께는 5mm로 하였다. 용기는 하나로 유동관 spider에 위치하며 반구형 캡으로 바닥을 막아주었다.

9개의 SPND(Self Powered Neutron Detectors)가 용기의 바깥쪽에 점용접으로 부착된 포켓에 넣어진다. 이것들은 원주 방향 3축에서 축당 3개의 위치에서 모니터링 되어 IR홀에서의 중성자 플럭스를 측정한다. 물론 IR 조사공 아래 하나로 유동관 안쪽 중심에 위치하는 용기의 바깥쪽에 공간이 접하게 된다.

외부 압력관의 상부 끝에서의 벽 두께는 체결을 위해서 두께가 두꺼워진다. 그 여분의 두께는 노치 효과에 의해 상부 플랜지에서 발생되

는 응력을 감소시킨다.

상부 플랜지는 압력 용기 사이에 가스 충전 공간을 위해 연결 지점 이 설치되어 있다. 가스는 하나의 연결점으로부터 측정되고, 이는 중간 가스층 압력을 온라인상에서 모니터링 할 수 있다.

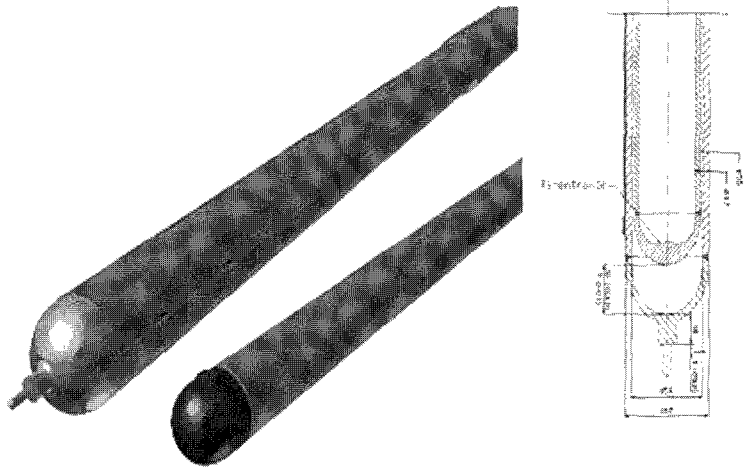
상부 플랜지는 실링과 볼트에 의해서 헤드와 결합된다. 상부 플랜지는 용접 결합을 하는 것도 가능하지만 필요시 외부 압력관을 교체할 수 있도록 분해 가능하도록 조립한다. 허용 온도가 Elastomer 밀폐 봉인의 최대 허용치(약 200°C)보다 더 높은 온도이므로 금속 오링을 사용한다.

내부 압력관 역시 외부 압력관과 마찬가지로 전체 루프 설계 압력과 온도로 설계하였다.

내부 압력관은 321타입 스테인리스강을 사용할 때 4mm의 두께를 갖는다.

내부 압력관 상부 플랜지로부터 분리되는 하부 바닥의 플레인 튜브는 반구형 캡에 의해서 닫혀있다. 그 캡은 <그림 3>에서 보여준 바와 같이 내부적에서 냉각수 유동이 180도 회전하도록 형상을 고안하였다. 원칙적으로 내부 압력관은 헤드에 용접할 수 있지만 분리 가능하도록 조립하여 필요시 내부 압력관을 교체하고자 하는 것이다.

내부 압력관의 상부 플랜지는 연결 형태에 있어 외부 압력관의 상부



<그림 2> 외부 압력관과 내부 압력관

플랜지에 의해서 둘러 싸여진다. 금속 이중 밀봉 구조는 플랜지의 외경 전체에 적용된다. Helicoflex나 유사한 형태의 밀폐 봉인을 사용하는 것으로 하였다.

Collar insert가 상부 플랜지의 구멍에서 보인다. 이것의 단열 목적으로 제공하는 플랜지 부분에서 침체된 물층을 가두어두는 것과 오링에서의 온도를 낮추기 위함이다. 이 부분에 대한 설계는 온도, 열팽창, 밀폐와 응력을 고려하여 특별히 주의하여야 한다.

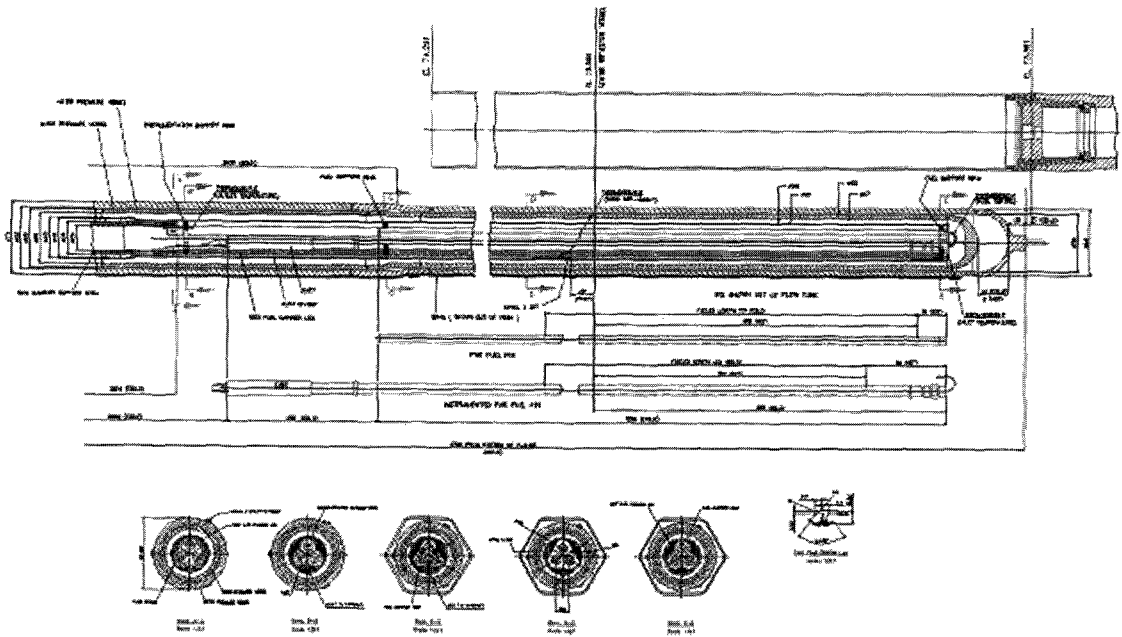
노내 시험부 압력 용기의 벽 두께 계산은 압력 용기의 재료를 스테인리스강으로 가정하였다. ASME III에 따른 설계 응력의 강도는 350°C에 비하여 약간 보수적인 온도인 370°C의 설계 온도에서 적용할 수 있다.

제한된 공간에서의 설계를 위하

여 321타입 스테인리스강(SA-213, 튜브, SA-479, 봉)을 선택하였다. 이 스테인리스강은 압력관 두께를 계산했을 때 저탄소 계열 스테인리스강(TP316L과 TP316 LN)보다 강하다.

노내 시험부 채널 하부 코너에서 설계 유량 2kg/s일 때 냉각수의 유속은 5.1m/s이다. 실제로 최대 유동량 1.6kg/s에서 유속은 4.2m/s이다. 이들 기본적인 계산에서 가압경수로 시험 핵연료봉을 수용하는 부품의 치수를 <그림 3>과 같이 나타냈다.

노내 시험부에서 유동을 위한 내부 압력 용기의 내하부에서 유동 re-entrance를 필요로 하며 이 때 가정된 설계 유속은 5m/s이고 질량 유량은 2.0kg/s이다. 이에 따라 냉각수의 바깥 지름과 유동 annulus의 요구되는 안지름을 결정하



〈그림 3〉 노내 시험부 압력관의 하부 치수

였다. 〈표 3〉은 노내 시험부 압력 용기의 주요 치수를 나타낸다.

노내 시험부는 300℃ 근처의 냉각수를 저장하고 있으며 50℃의 수조수에 의해서 둘러싸여 있다. 두 개의 압력 용기 사이의 열 전달을 제한하는 열적 경계를 포함한다. 정상 운전에서 열 손실은 배관이 수조에 들어가는 지점에서 냉각수 입구 온도가 떨어지게 될 것이다. 이 온도 강하는 정량적으로 표시될 필요가 있다.

노내 시험부의 하나로 수조에 의한 열 손실은 시험 핵연료로부터 장기 붕괴 열 손실을 제공한다. 이것은 정상 운전과 비상시의 운전을 포함한다. 이 손실은 정지될 수 있는 노의 공정 계통이나 비상 냉각수 시스템, 시험 핵연료의 강제 대류 냉각 시간을 결정하기 위해서 냉각수 양을 정할 필요가 있다.

수조내 배관의 단열 설계 단계에서 더욱 상세하게 설계되었다. 더구나 붕괴열 손실 관점으로부터 수조내 배관 열 손실의 증대는 단열과 관련되지만 분명하지는 않다.

노내 시험부의 하나로 수조에 의한 열 손실로부터의 복사열 손실은 내부 압력 용기와 외부 압력 용기 사이의 원주 방향 갭 2mm의 열 저항에 의해서 크게 될 것이다.

가스 공간의 의미상 지름은 56mm이고 노내 시험부의 하나로 수조에 의한 열 손실 전체 길이는 개략적으로 5m이다. 열 손실을 가능한 한 적게 하기 위하여 단열층의 충전 가스로 네온을 사용하였다.

## 2. 노내 시험부 헤드(또는 헤드)

노내 시험부 헤드의 하부 플랜지는 내·외부 압력관의 플랜지와 연결된다. 〈그림 4〉와 같이 헤드는 두

개 오링 사이의 공간을 위한 모니터 링 지점에 설치된다. 단열 collar는 헤드까지 연장되었다.

헤드의 중간 부분은 냉각수의 입출구를 위한 2개의 1인치 스케줄 80의 노즐이 있다. 주몸체로부터 파생되어 덮여진 얇은 게이지용 스테인리스강은 냉각에 사용되는 주위의 수조수로부터 열적으로 차단되며 그 공간은 가스로 채워질 것이다.

단열 갭의 유지 보수는 상세 설계 단계에서 결정될 것이며 단열재나 배관이 안정되게 설치된다. 벨로즈나 주름관은 커버와 주몸체 사이에 발생하는 다른 열 팽창에 견딜 수 있도록 설계되어 커버에 설치될 것이다. 또한 응력을 수용하고, 설계를 최적화하고자 주몸체 부분에 용접 부위는 없도록 하였다.

헤드 상부는 내부 조립체의 조립 및 분해를 위해 열린다. 헤드 상부

〈표 3〉 노내 시험부 압력 용기의 주요 치수

부품과 특성	바깥 지름	안지름	벽 두께 또는 원주상의 갭
Flow tube와 외부 압력관 사이의 원자로 냉각 채널	74.4mm	68.0mm	3.2mm
외부 압력관	68.0mm	59.0mm	4.5mm
압력관 사이의 공간	59.0mm	55.0mm	2.0mm
내부 압력관	55.0mm	47.0mm	4.0mm
냉각수 채널 바닥 끝	47.0mm	39.0mm	4.0mm
시험 핵연료 유동관	38.0mm	35.0mm	1.5mm

는 내부 조립체를 위한 밀폐 상태를 모니터링하기 위해 탭홀을 가공했다. 이 부분은 냉각수가 흐르는 지역으로부터 떨어져서 열적으로 차단할 필요는 없다.

헤드 온도에 대한 고려에서 헤드는 단열되지 않는 것으로 되었으며 필요하면 용이하게 원격으로 제거할 수 있는 것으로 하였다. 헤드에서의 표면 보일링은 피했다. 이 경우에 안전하게 하는 것은 문제가 없다. 이것은 헤드가 FTL 냉각수의 유동을 포함하지 않으며 그것은 헤드 부분 안에 냉각수로부터 흐르는 열의 제한을 축 방향으로 열층을 설치하는 부분이다.

### 3. 내부 조립체 및 시험 핵연료 운반체

내부 조립체 하부는 〈그림 5〉와 같이 록킹핀이 부착된 시험 핵연료 운반체가 부착되어 있다.

열전대의 끝은 냉각수 입출구 온도를 모니터링하기 위하여 내부 조립체의 바닥에 위치한다. 내부 조립체의 끝 부분과 시험 핵연료 운반체는 설치 위치 확보와 누설 유동을 최소화하기 위해 겹쳐져 있다.

시험 핵연료 유동관은 내부 조립체 길이의 대부분을 차지한다. 시험 핵연료 유동관은 더 따뜻한 출구쪽 물과 입구쪽 물을 분리한다. 시험 핵연료 유동관은 내부 조립체를 가로지르는 열 전달을 최소화하기 위

해 물이 채워진 갭이 설치된 이중 구조를 보여준다.

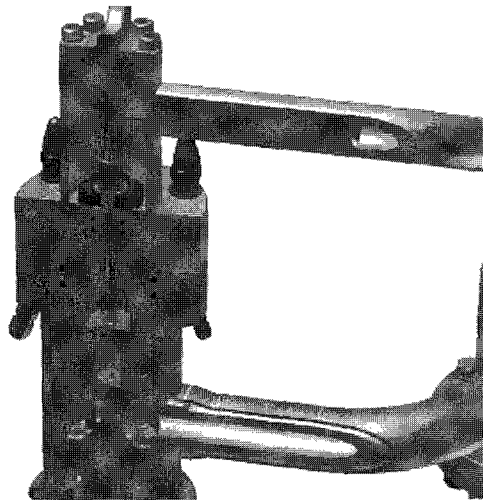
물이 채워진 갭은 주로 두께가 1.0에서 1.5mm로 상부와 하부의 2개의 작은 홀을 통해 시험 핵연료 유동관 위로 순환한다. 시험 핵연료 유동관을 가로지르는 최대 열 전달을 나타내는 계산은 시험 핵연료 유동관의 길이에서 3kW보다 더 크지는 않은 것 같다. 이것은 물의 온도 변화가 1°C 이하인 것으로 나타났다.

시험 핵연료 유동관은 그것의 길이에 대한 공간을 대신하여 내부 용기 벽에 위치한다. 시험 핵연료 유

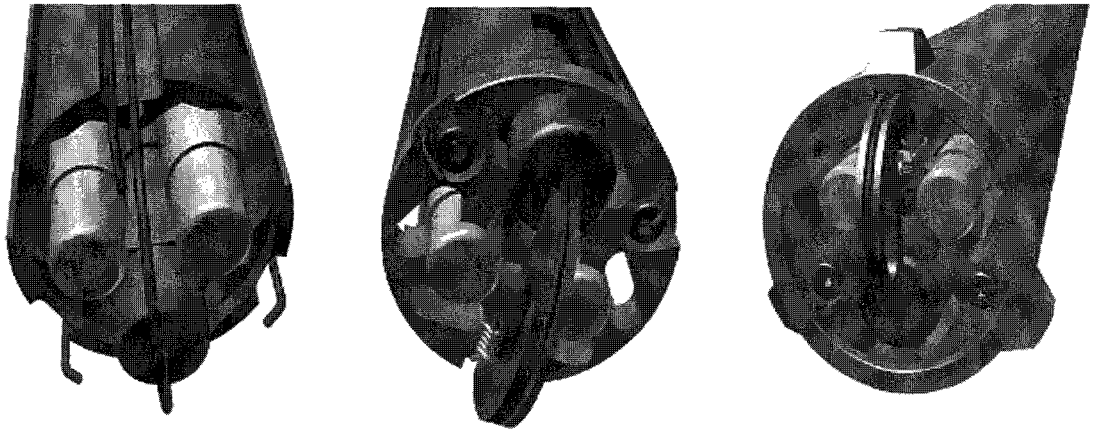
동관은 헤드에서 주냉각 입구와 연결된다. 이 지점은 헤드의 홀에 있는 돌출부이다. 이 돌출부는 2개의 기능을 하는데 하나는 내부 조립체의 주요 부분의 무게를 지지하는 것이고, 또 하나는 두 개의 주냉각 유동을 분리하는 밀봉을 제공한다.

입구 유동과 출구 유동 사이의 압력의 차이는 밀봉이라는 관점에서 볼 때 충분치 않다. 이 지점에서 출구 노즐을 통해서 출구 냉각수가 빠져나가도록 시험 핵연료 유동관이 열려있다.

출구 노즐의 탄성 조인트는 밀폐



〈그림 4〉 노내 시험부 헤드



〈그림 5〉 내부 조립체 및 시험 핵연료 운반체

플랜지의 내부 조립체의 주요부에 연결되어 있다. 탄성 조인트는 밀폐부와 실링 돌출부인 2개의 연결부를 필요로 한다. 탄성 조인트는 공차나 열 팽창에 상관없이 두 부분에서 연결이 유지되도록 해야 한다.

슬롯에서의 핀들은 들어올리는 힘과 밀폐 봉인 돌출부에서 positive 안착력이 작용하는 요소들이다. 측정 장치의 인입선을 위한 압력 경계에서의 배치는 밀폐 플랜지의 중심을 통해서 지나도록 하였다.

시험 핵연료 운반체는 내부 조립체의 바닥에 붙어 있다. 시험 핵연료 운반체는 운반체의 상부와 바닥에서 spider 구조에 사용하여 시험 핵연료 핀을 지지한다.

상부 구조는 단지 위치만을 제공하는 데 비해 하부 구조는 지지와 위치를 제공한다. 또한 운반체는 시험 핵연료 유동관의 기능을 수행한다. 이중 벽 구조는 더 작은 PWR 핀을 넣어 사용할 때 가능하다. 분리 가능한 운반체를 만들 때의 이점은 실험에 알맞게 내부 형상을 만들 수 있다는 것이다. 운반체는 스테인리스강이나 지르코늄 합금으로 만

들 수 있다.

### 결론

가압경수로와 중수로 시험 핵연료를 시험할 수 노내 시험부의 설계 기준으로 시험 핵연료봉의 치수 및 노내 시험부의 운전 조건이 설정되었으며 길이 5.7m, 지름 68mm의 노내 시험부의 외부 형상과 노내 시험부 내부의 유동, 단열 그리고 핵연료봉의 교체를 고려한 형상 설계 등이 수행되었다.

17.5MPa의 설계 압력 및 350°C의 온도를 고려한 내·외부 압력 용기의 두께 설정 및 재질로는 321 스테인리스강 선정을 하였다. 냉각수의 유동 공간 확보 및 순환을 고려한 내부 압력 용기의 채널 하부 및 시험 핵연료 유동 분리관을 설계 하였다.

노내 시험부 고온 냉각수의 하나로 수소수에 의한 열 손실을 검토하여 내·외부 용기의 갭에 충전할 가스를 네온으로 선정하였다. 노내 시험부 헤드의 온도를 계산하여 오링의 사용 가능성을 검토하고 이에 따

른 오링부의 형상을 설계하였다.

내부 조립체 및 시험 핵연료 운반체는 시험 핵연료 및 시험 핵연료 유동 분리관을 지지하며 입·출구 유동을 분리하도록 하였다.

본 연구는 원자력연구개발 중장기계획사업에 의해서 수행되었다.

### 〈참고 문헌〉

1. “하나로 안전성분석보고서”, KAERI/TR-710/96, 한국원자력연구소, 1996.
2. 노내시험시설 설치 타당성 검토를 위한 기술분석, KAERI/CR-112/01, 이정영 외, 2001. 3
3. 3-Pin 핵연료 노내 조사 시험설비 설계 요건서, FL-070-DR-K001, 김준연 외, 2002. 7
4. 하나로 3-Pin Fuel Test Loop에서의 노내 시험부 개념설계, KAERI/TR-2541/2003, 박국남 외, 2003. 7
5. 3-Pin 핵연료 노내 조사 시험설비 Design Manual- 기계분야, HAN-FL-E-070-DM-H001, Rev. 0, 2004.