2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

신형 상·하단고정체가 장착된 시험집합체의 압력강하 성능 평가

Pressure Drop Performance Evaluation for Test Assemblies with the Newly Developed Top and Bottom Nozzles

이성기, 박남규, 서정민, 김형구, 이준노, 김규태
한전원자력연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 493

요 약

신형 상하단고정체가 장착된 시험집합체 및 기존 상업생산중인 가디안 핵연료 시험집합체 1 다발을 각각 제조하여 압력강하시험 등의 수력적시험을 수행하였다. 시험결과, 1 종의 신형 상단고정체 및 2 종의 신형 하단고정체를 각각 장착한 시험집합체가 기존 가디안 집합체 보다 하단고정체 위치에서 압력강하 손실계수 값이 60.9 %, 90.4 % 정도 크게 나타났으며, 이는 이물질 성능향상을 위해 하단 고정체 유로판 위에 이물질 여과기 판을 부착한데 기인한 것이다. 또한 동일형상의 중간지지격자 및 유사한 형상을 하고 있는 상단 고정체 위치에서 압력 손실계수 값은 별다른 차이가 없이 유사한 것으로 나타났다. 따라서 시험집합체 전체 기준으로 했을 경우에는 그 차이가 모델 A 와 B 의 경우 각각 14.2 %와 21.9 %로 나타났으며, 실제 집합체 크기 기준으로 고려할 때 압력강하 값은 10 % 내외에 이를 것으로 판단된다. 종합적인 수력적 성능평가 결과를 고려할 때 모델 A 가 모델 B 보다 수력적 성능이 우수한 것으로 나타났다.

Abstract

To perform the hydraulic test for the newly developed top and bottom nozzles, two kinds of test assemblies were manufactured i.e. one is the test assembly which has the newly developed top and bottom nozzles and the other is Guardian test assembly which is commercially in mass production now. The test results show that the test assembly with one top nozzle and two bottom nozzles has a greater pressure loss coefficient than Guardian test assembly by 60.9 % and 90.4 % at the bottom nozzle location. This cause is due to the debris filtering plate for bottom nozzle to improve a filtering efficiency against foreign material. In the region of mid grid and top nozzle, there is no difference in pressure loss coefficient between the test assemblies since the component features in these regions are very similar or same each other. The loss coefficients are 14.2 % and 21.9 % for model A and B respectively in the scale of test assembly, and the value would be within the 10 % in the scale of real fuel assembly. As a result of hydraulic performance evaluation, Model A is superior to Model B.

1. 서 론

핵연료의 상·하단고정체는 안내관 및 지지격자와 더불어 핵연료의 골격을 이루고 있으며, 원자로 내부구조물 위에 놓여져 핵연료를 지지하고 연료봉에 냉각재의 유동을 균일하게 분배하는 등의 중요한 기능을 수행하고 있다. 특히 하단고정체는 냉각수의 유동을 위한 유로 구멍과 안내관 및 계측관과의 체결을 위한 구멍 등이 있는 유로판과 핵연료의 위치를 유지시키는 다리 등으로 구성되므로 핵연료의 수력적 특성에 많은 영향을 준다. 최근 핵연료의 개발추세는 고연소도를 추구하면서 손상을 극소화 하려는 등 경제성과 안전성을 높이기 위해, 핵연료 손상원인의 대부분을 차지하는 것으로 밝혀진 이물질의 여과 및 포획 성능을 향상 시키고 압력강하 특성도 요구조건에 맞추기 위한 새로운 개념의 하단고정체 모델 개발이 이루어지고 있는 추세이다.

본 연구에서는 압력강하 특성과 이물질 여과성능이 향상된 하단고정체 모델을 개발하기 위하여 기존 하단고정체 모델과 외국의 모델을 참고로 하여 도출된 그림 1 과 같이 10 종의 후보모형 중 이물질여과 성능과 압력강하 분석등의 해석방법론을 정립하여 여러 후보모형의 객관적 성능평가를 수행 하였다. 이들 후보모형의 크기는 단면이 78㎜×78㎜ 이고 높이는 15.88㎜ 로 제작되었다. 이들 형상에 대하여 간략하게 소개하면 DF1 은 기존의 원형유로 형상을 가지고 있는 하단고정체 모형으로 다른 후보모형과의 비교를 위해 선택되었다. DF2 ~DF7 은 기존의 하단고정체 유로 구멍에서 유로 구멍을 세분하여 통과할 수 있는 이물질의 크기를 줄이는 것이 기본적인 개념으로, 이러한 기능을 가지는 이물질 여과장치를 부가한 모델이다. DF4 ~DF7 은 이물질 여과장치가 장착되어도 압력강하 성능을 유지하도록 유로 면적을 늘리기 위해 유로 구멍의 형상을 원형에서 사각형으로 변경하였다. DF2 는 유로 구멍이 분할되도록 날개를 갖는 여과장치를 유로 구멍에 삽입하는 방법을 선택하였으나, DF3 ~DF7 은 삼각형 및 사각형 등의 유로를 가지는 얇은 이물질 여과장치를 5×5 배열의 유로구멍을 갖는 기본형 위에 올려놓은 형태이다. DF8 ~ DF10 은 하단고정체 자체에서 이물질 여과기능을 가지고 있는 후보모형이다. DF8 의 전체 형상은 계란판과 같이 일정하게 돌출부가 있고 이 돌출부에 십자형 여과체를 만들어 이물질을 여과하는 기능을 갖춘 후보모형이다. DF9 는 판을 절곡하여 길이방향으로 비닐하우스 형상을 만들고 여기에 미세한 유로 구멍을 만들어 이물질 여과 기능을 제공하는 모델이며, DF10 은 SIEMENS 사의 하단고정체 모형과 유사한 모형으로 여러 개의 판으로 하단고정체를 구성하며 판과 판사이가 유로 구멍의 역할을 수행하면서 이물질 여과기능도 동시에 제공한다.

또한 하단고정체 후보모델들에 대한 3 차원 모델링을 완성하고, 유한요소 해석과 유동장해석에 필요한 해석 모델을 구성하였으며 응력해석과 유체의 거동을 분석 하는 등 일련의 개발단계를 거쳐 모든 후보모형들에 대한 성능시험 및 하단고정체 후보모델들에 대한 설계변수에 대한 민감도 분석 결과를 이용하여 2 종의 하단고정체 주 후보모형(그림 2 참조)을 설계하였다[1,2]. 또한 유사한 평가절차를 거쳐 1 종의 상단 고정체(그림 3 참조) 주후보 모형도 아울러 선정하였다[3].

이 들 상하단 고정체 주후보 모형에 대한 수력적 성능을 평가하기 위한 시험을 그림 2 와 같이 두 종류의 이물질 여과 필터를 부착한 하단고정체 후보모형을 실물 크기로 제작하였다. 또한 이 하단고정체 후보모형은 그림 3 및 4 와 같이 상단고정체 주후보모형, 세개의 지지격자를 포함하는 길이가 짧은 시험 핵연료집합체의 구성요소로 사용되었으며, 이 집합체의 연료봉에는 납 펠렛을 장입하였다. 한편 신형 핵연료와의 비교 성능 실험을 위해 가디안 집합체를 선정 하였으며 역시 동일한 크기로 제작하여 납 펠렛을 사용한 연료봉을 장입 하였으며, 상하단고정체는 현재 상

업 생산중인 실 제품을 그래로 사용하였다. 이들 시험 핵연료 집합체는 이전 한국표준형 핵연료 집합체에 대한 압력강하 시험 사양과 유사한 시험장비를 구비하고 있는 일본 핵연료회사(NFI)에서 이물질 여과성능과 압력강하시험을 수행하였다.

따라서 본 연구에서는 NFI 사에서 수행된 신형 상하단고정체가 장착된 시험집합체에 대한 압력강하 시험 결과를 토대로 압력강하 특성을 기존 가디안 핵연료와 비교분석하여 신형 핵연료의 수력적 특성을 진단 및 평가하여 최종 주후보 모형 선정에 평고자료로 활용하고자 한다.

2. 압력강하시험

2.1 시험 방법 및 조건

NFI 사의 Kumatory 공장에서 수행된 압력강하 및 이물질 여과 시험은 그림 5 에서보는 바와 같이 수력적 시험 루프 장치를 이용하여 시험을 수행하였다. 그림 6 은 이 시험설비의 유로 흐름도를 보여주고 있다. 한편 일반적인 시험조건 사항은 최대 냉각수 온도가 70 ℃ 이며, 압력은 대기압이다. 하지만 아크릴 시험 쉬라우드가 사용되는 경우에는 40 ℃ 로 제한된다. 본 시험집합체에 대한 시험조건은 상기 조건내에서 표 1 과 같이 시험조건을 정하였다. 압력강하 시험 및 이물질 여과시험은 동일한 펌프를 이용하여 시험을 수행하며, 각각의 시험은 파이프의 밸브 연결을 바꾸어서 시험을 한다. 압력강하량이 측정되는 압력 탭(pressure tap)이 설치된 위치는 그림 7 과 같다. 시험 중 압력강하는 유량의 증감에 따라 21 단계로 측정되며, 유량 및 압력 차 산출기 결과값(differential pressure transducer output)은 10 초에 걸쳐서 저장되고 각 측정단계마다 이러한 과정이 반복된다. 세부적인 시험 순서는 우선 쉬라우드를 세팅하고 앞서 설명한 압력 차 산출기 및 압력 탭을 설치한후 온도 조절을 시작한다. 그리고 측정 장치를 준비하고 압력관 외에서 공기를 흡입하여 냉각수의 누수 여부를 확인한다. 다음으로 온도조절을 마치고 유량 조절 및 각 단계별 유량을 측정한다. 시험중에는 시험 데이터의 재생산성을 확인하고 단계별 최소한 두번이상의 시험을 수행한다. 통상 한가지 종류의 집합체에 대한 시험은 시험결과의 확인까지 3 일 이상이 소요된다. 시험은 2 개의 시험 집합체 3 종에 대하여 수행된다. 즉 하나는 현재 상업생산중에 있는 가디안 핵연료에 대해 먼저 시험을 수행한후 나머지 한 집합체에 2 종의 하단고정체를 장착하여 시험을 수행하였다. 보다 자세한 시험방법, 절차 및 결과는 참고문헌[4]에 수록되어 있다.

2.2 시험 결과의 산출

시험결과는 그림 8 과 같은 절차에 의거 압력강하 및 유량을 측정한다. 압력강하량의 측정원리는 유체 에너지 보존법칙의 하나인 베르누이 방정식 원리에 의거 측정 및 산출된다. 즉, 에너지 보존 법칙은 유체계에도 적용되며 일반적으로 정상상태에서의 에너지 방정식은 다음과 같다[5].

$$\frac{p_1}{r} + \frac{1}{2}a_1 V_1^2 + gz_1 = \frac{p_2}{r} + \frac{1}{2}a_2 V_2^2 + gz_2 + h_{losses} \quad (1)$$

여기서 p, r, V, g, z 는 각각 유체의 압력, 밀도, 속도, 중력 가속도, 위치를 의미한다. 그리고 하첨자 1, 2 는 검사체적의 입구와 출구를 의미한다. 또한 유체가 출입하는 과정에서 출입단면의 속도는 일정하지 않기 때문에 이를 보상하기 위한 수정계수 a 를 도입하였다. 위의 등식 오른쪽의 마지막 항은 에너지 손실을 의미한다.

관속을 흐르는 유체는 관내 유속, 조도(roughness)등의 영향과 관내의 급격한 기하학적 변화등에

기인하여 에너지 손실이 발생한다. 이러한 에너지 손실로 압력강하 형상이 나타나며 핵연료집합체의 시험결과에서도 볼 수 있다. 전술한 바와 같이 핵연료집합체에 대한 압력강하실험은 40°C, 60°C 의 온도조건에서 유속을 달리하면서 각각 수행되었고, 이 조건은 대략 47,000~148,000의 Reynold 수(Re) 구간에 해당한다. 자세한 압력강하량 값 산출에 사용된 식은 식(1)에 의거하여 다음과 같은 항목으로 나눌수 있다.

$V_{in}=FR*0.001/(60*S_{in})$ (2)

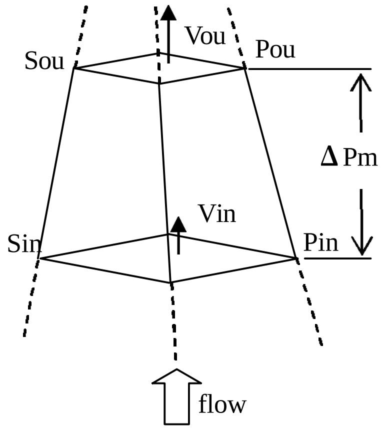
$V_{out}=FR*0.001/(60*S_{out})$

$\Delta P=(P_{in}+\rho V_{in}^2/2g)-(P_{out}+\rho V_{out}^2/2g)$ (3)

$=(P_{in}-P_{out})-\rho(V_{out}^2-V_{in}^2)/2g$

$=\Delta P_m-\rho(V_{out}^2-V_{in}^2)/2g$

$K_{in}=\Delta P*2g/\rho V_{in}^2$ (4)



여기서

- ΔP: static pressure drop(kgf/㎡)
- ΔP_m: measured pressure drop(kgf/㎡)
- ρ: water density depended on the temperature(kg/㎥)
- g: gravity (m/sec^2)
- P_{in}: static head in the upstream region (kgf/㎡)
- P_{out}: static head in the downstream region (kgf/㎡)
- V_{in}: axial flow velocity in the upstream region (m/sec)
- V_{out}: axial flow velocity in the downstream region (m/sec)
- S_{in}: cross-sectional flow area in the upstream region (㎡)
- S_{out}: cross-sectional flow area in the downstream region (㎡)
- FR: flow rate (litter/min.)

3 시험 결과

상기 2 절에서 언급된 바와 같이 측정된 압력 강하량과 유로에 대한 정보 등을 압력손실계수로 전환하기 위하여 다음과 같은 식을 사용한다.

$$K_x = DP_x \frac{2gA^2}{rQ^2} - f\frac{l_x}{De} + \left[(\frac{A}{A_D})^2 - (\frac{A}{A_U})^2 \right] \qquad (5)$$

여기서

- A : Test flow area of FA (cross-section area of flow housing cross section area of rods in bare rodded region), cm^2
- ρ : Fluid density, kg/cm^3

ν : Fluid viscosity of area A, m^2/sec

Q : Fluid flow rate, ι/min

Re: Reynolds Number

De: Equivalent hydraulic diameter of cross-section area A, cm

f : Friction factor, 0.186 * $Re^{-0.2}$ (Re : Reynolds number)

DP_x : Pressure differential measured by differential pressure transducer “x”, kg/cm^2

K_x : Pressure loss coefficient derived from DP_x

A_U : Flow area at upstream pressure tap of DP_x

A_D : Flow area at downstream pressure tap of DP_x

위식에서 마지막 항은 냉각수가 상승 및 하강 압력 탭위치에서 유로면적이 다른 경우 측정된 압력 강하에 대한 보정을 해주기 위한 식이다. 한편 레이놀드 수(Re)는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathrm{Re} = \frac{Q}{A}\frac{De}{n} \qquad (6)$$

최종 시험 결과는 압력강하 손실계수와 상기 레이놀드 수로 도시되며, 다음과 같은 곡선 접합식(curve fitting)으로 상관관계를 나타낸다.

$$K = a * \mathrm{Re}^{b} \qquad (7)$$

여기서 a, b 는 식 (7)의 레이놀드 함수로 표현되는 압력손실계수식에서 상수를 나타낸다.

위와 같은 절차에 의거 2 개의 시험집합체에 대한 각 위치별로 압력강하에 대한 결과 및 고찰을 영역별로 다음절과 같이 수행하였다.

3.1 입구 영역 (Inlet Region)

그림 7 에서 보는바와 같이 입구 영역은 하단 고정체가 위치한 영역이며, 전술한 바와 같이 신형 하단고정체 모델 A 및 모델 B 는 이물질 여과기를 제외한 모든 사양은 동일하다. 즉 모델 A 는 비닐하우스 형상을 하고 있으며, 모델 B 는 간격이 좁은 격자형상 판을 얹힌 형상이다. 따라서 이들 차이에 기인하여 압력강하 값이 다르게 나타나며, 가장 먼저 시험을 수행한 가디안 핵연료 시험집합체 결과값과 비교하였을 경우 그림 9 에서 보는 바와 같이 레이놀드 수가 500,000 에서 모델 A 의 경우에는 60.9%, 모델 B 의 경우는 약 90.4%정도 크게 나타났다. 이것은 가디안 핵연료의 경우 이물질 여과기가 하단고정체에 있지 않고 최하단 지지격자에 있으며, 이로인해 냉각수 입구 영역에서 유로 면적이 상대적으로 신형하단고정체 후보모형보다 넓다. 또한 모델 A 의 경우에는 비닐하우스 형상의 필터가 유체와의 접촉면적을 극대화 하여 유체의 이동량을 모델 B 에 비해 많도록 설계되어 상기의 압력차이가 발생하였다. 즉 동일한 입구 유속, 입구면적을 가정하면 출구에서의 속도는 질량보존 법칙에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$V_2 = \frac{S_1}{S_2}V_1 \qquad (8)$$

여기서 S 는 유체가 통과하는 단면의 면적을 뜻하며, 하첨자 1, 2 는 입구와 출구를 의미한다. 두 모델의 속도 수정계수 a 가 같을 때, 식(8)을 식(1)에 대입하면 주름진 구조의 비닐하우스형 모델 A 의 경우는 B 에 비해 유체와의 접촉면적이 크므로 유체의 저항이 적어 압력강하는 작게 됨을

확인할 수 있고, 이 사실은 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 한편, 이곳에 적용된 식(5)의 손실계수 방정식은 다음과 같다.

$$K_x = DP_2 \frac{2gA_2^{\ 2}}{rQ^2} - f\frac{17.43}{1.1379} + 0.7807 \qquad (9)$$

3.2 출구 영역 (Inlet Region)

출구영역[(ΔP-10) – (ΔP-9) + (ΔP-8)]은 그림 7 에서 보는 바와 같이 상단 고정체가 위치하는 영역으로 가디안 시험 집합체를 제외하고는 모델 A 와 모델 B 시험집합체 모두 본 연구에서 개발된 신형 상단고정체를 장착하여 제조되었다. 이 신형 상단고정체의 형상은 유로판의 유로구멍 형상등의 미소한 설계차이 등을 제외하고는 가디안 핵연료집합체의 상단고정체와 매우 유사하다. 따라서 그림 10 에서 보는바와 같이 시험 결과도 3 개의 시험집합체 모두 비슷하게 산출되었다. 즉, 레이놀드 수가 500,000 에서 모델 A 의 경우 가디안 핵연료 보다 0.9 %, 모델 B 의 경우에는 0.1% 정도 압력강하량이 적게 산출되었다.

이곳에 적용된 식(5)의 손실계수 방정식은 다음과 같다.

$$K_{outlet} = DP_{outlet} \frac{2gA_3^{\ 2}}{rQ^2} - f\frac{14.43}{1.1235} + 0.5283 \qquad (10)$$

3.3 시험집합체 전 영역

시험 집합체 전체를 고려하였을 경우 압력강하 손실 계수값은 레이놀드 수가 500,000 에서 모델 A 의 경우 가디안 핵연료 보다 14.2 %, 모델 B 의 경우에는 21.9 % 정도 압력 손실계수 값이 크게 산출되었다. 여기에 적용된 손실계수 방정식은 다음과 같다.

$$K_{10} = DP_{10} \frac{2gA_3^{\ 2}}{rQ^2} - f\frac{129.87}{1.1235} + 0.2728 \qquad (11)$$

시험 집합체의 중간 지지격자 경우에는 동일 사양의 지르칼로이 지지격자를 장착하며, 앞절에서 논의된 바와 같이 상단고정체의 경우에는 압력 손실계수 값의 차이가 미미함을 감안 하였을 때 주 차이는 3.1 절에서와 같이 하단고정체에 기인한것이다. 즉 이물질 여과 성능 향상을 위하여 유로판 구멍을 보다 조밀하게 설계하여 결과적으로 압력강하량을 증대시키는 효과를 가져왔다. 하지만 모델 A 의 경우에는 이물질 여과 판이 핵연료 집합체 축방향으로 돌출된 형상으로 인하여 유체와 닿는 입구면적이 증대함에 따라 결과적으로 모델 B 보다 압력강하 값이 적게 나타났다.

4. 결론

개발된 신형 상하단 고정체의 압력강하 및 이물질 여과 성능 등의 수력학적 평가를 위하여, 이 상하단고정체가 장착된 시험집합체 1 다발 및 기존 상업생산중인 가디안 핵연료 시험집합체 1 다발을 각각 제조하였다. 신형 상하단고정체가 장착된 시험체는 2 종의 이물질 여과장치가 부착된 하단고정체를 착탈하는 방식으로 시험을 수행하였으며, 일본 NFI 사로 이송되어 압력강하 및 이물질 여과시험을 수행하였다. 본 연구에서는 이 수력시험결과에 대한 압력강하 성능평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

2 종의 신형 하단고정체에 대한 압력강하 시험 결과는 기존 가디안 집합체 보다 60.9 %, 90.4 % 정도 크게 나타났으며, 이는 이물질 성능향상을 위해 유로판 위에 이물질 여과기 판을 부착한데 기인한 것이다. 또한 동일형상의 중간지지격자 및 유사한 형상을 하고 있는 상단 고정체는 압력 손실계수 값에 있어서 별다른 차이가 없이 유사한것으로 나타났다. 따라서 시험집합체 전체를 기준으로 했을경우에는 그 차이가 14.2 %와 21.9 %로 나타났다. 따라서 실제 집합체 크기에서 고려할 때 압력강하 값은 10 % 내외에 이를것으로 판단된다. 또한 이물질 여과 성능[6] 등을 고려할 때 이정도의 추가 압력강하 상승값은 수용가능한 값이라 사료되며, 종합적인 수력적 성능시험을 고려할 때 모델 A 가 모델 B 보다 우수한 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

[1] "경수로용 핵연료 상단고정체 유로판에 대한 압력강하 민감도 분석", 2001 춘계 원자력학회 논문집, 류계열 등, 한전원자력연료주식회사, 2001.

[2] "경수로용 하단고정체 유로모형에 대한 압력강하 평가", 2001 추계 원자력학회 논문집, 김홍주 등, 한전원자력연료주식회사, 2001.

[3] "신형 경수로용 상단고정체 성능평가", 2002 추계 원자력학회 논문집, 이성기 등, 한전원자력연료주식회사, 2001.

[4] NFK-MM-0210037, "The Test Report of the Debris Filter Test and Pressure Drop Test for KNFC Newly Developed Top and Bottom Nozzle", Nov., 2002, NFI

[5] F.M. White, "Fluid Mechanics", 1995, McGraw-Hill

[6] "한국 표준형 핵연료 집합체용 신형하단고정체의 이물질 여과성능", 2003 춘계 원자력학회 학술발표 논문집, 김형구 등, 한전원자력연료주식회사, 2003. 5.

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기계획사업인 신형핵연료 상하단고정체 개발과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

표 1. 압력강하 시험 조건

Item		Setting Value
Temperature (^{o}C)		40, 60
Pressure		Atmospheric
Flow Rate (litter/min)	During flow rate up	4000 to 9000 (increase by 500)
	During flow rate down	8750 to 4250 (decrease by 500)
Reynold's Number		Around 47,000 ~ 148,000

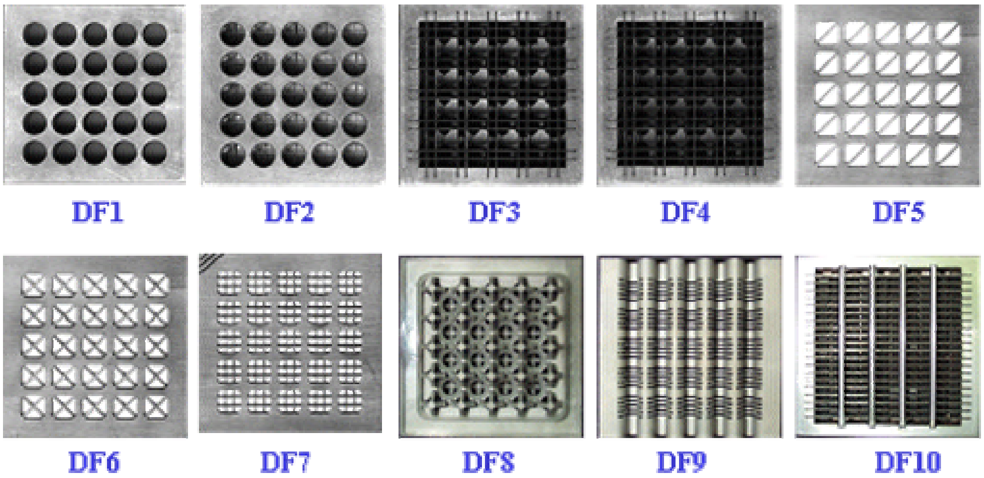
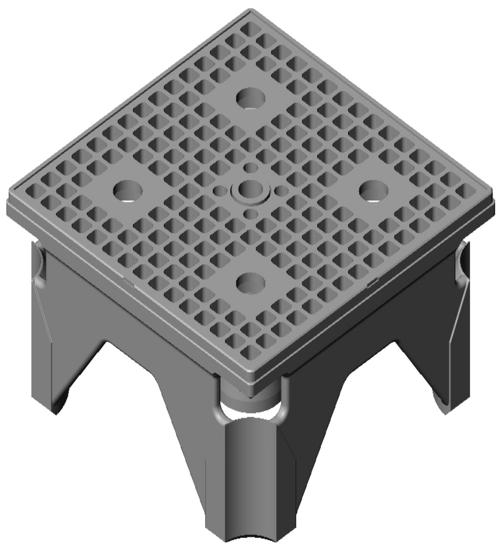


그림 1. 하단고정체 유로판 후보모형



2-A. 이물질여과장치 부착전

2-B. Type A(비닐하우스형

2-C. 사각분할형

그림 2. 이물질 여과장치가 부착된 신형 하단고정체

그림 3. 신형 상단고정체 주후보모형

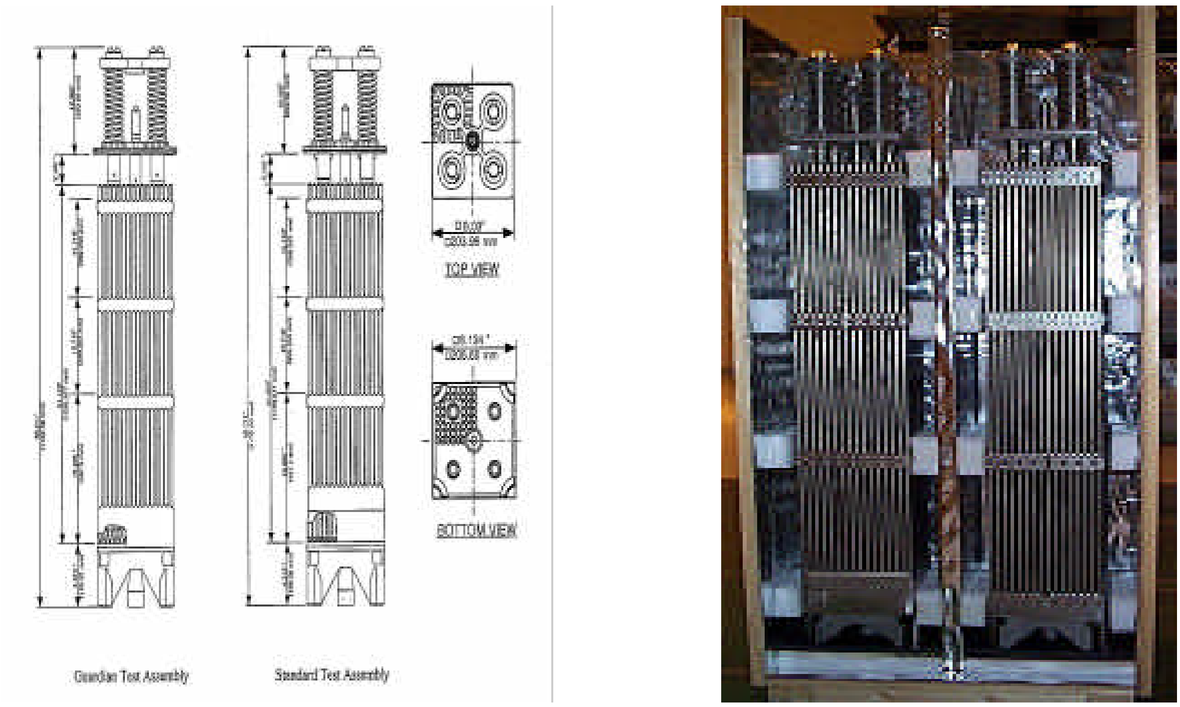


그림 4. 시험 집합체 주요사양 및 실물 형상

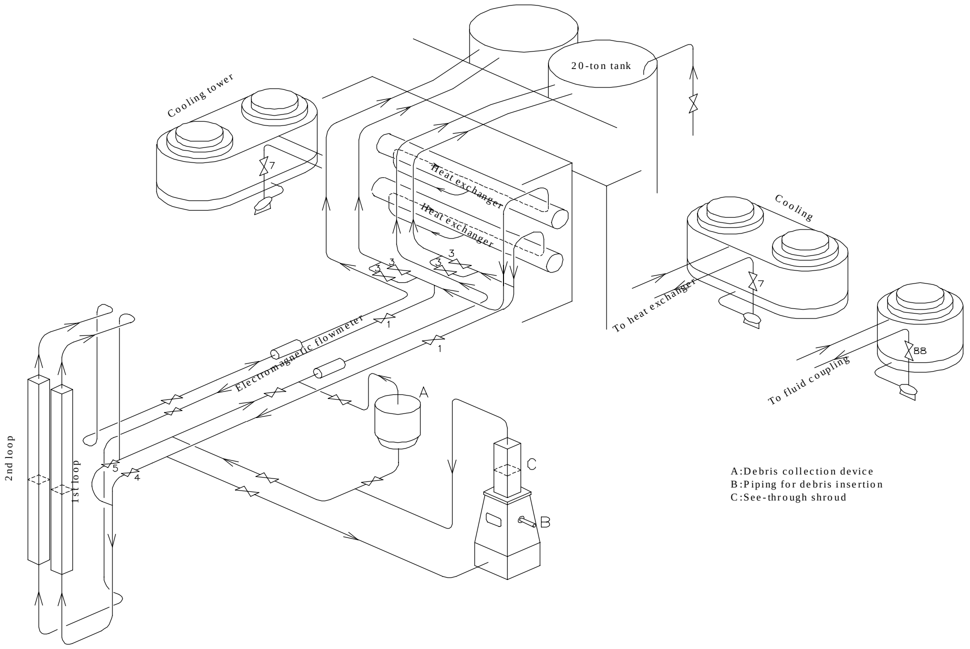


그림 5. 수력시험 시험 루프

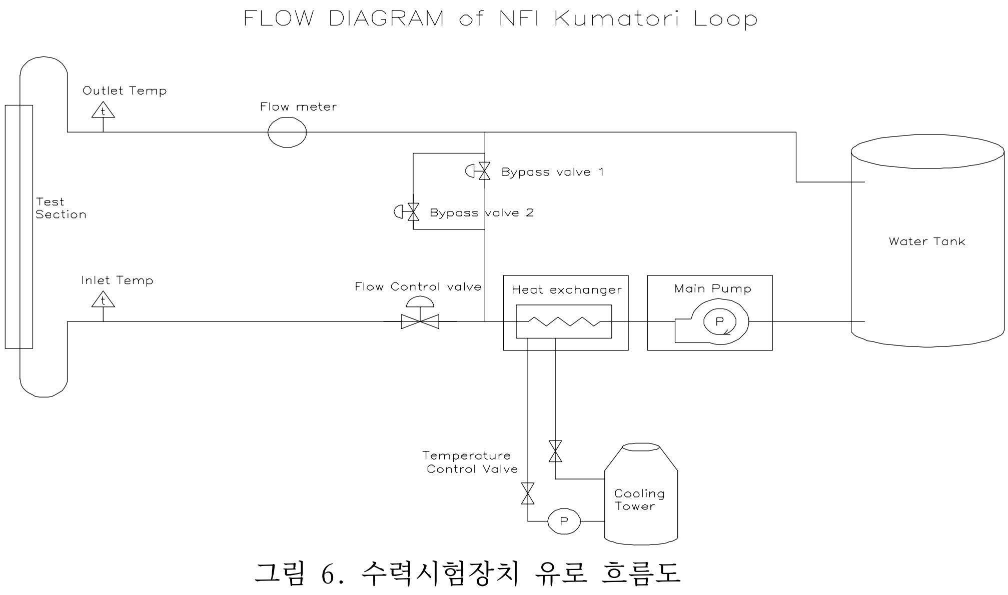


그림 6. 수력시험장치 유로 흐름도

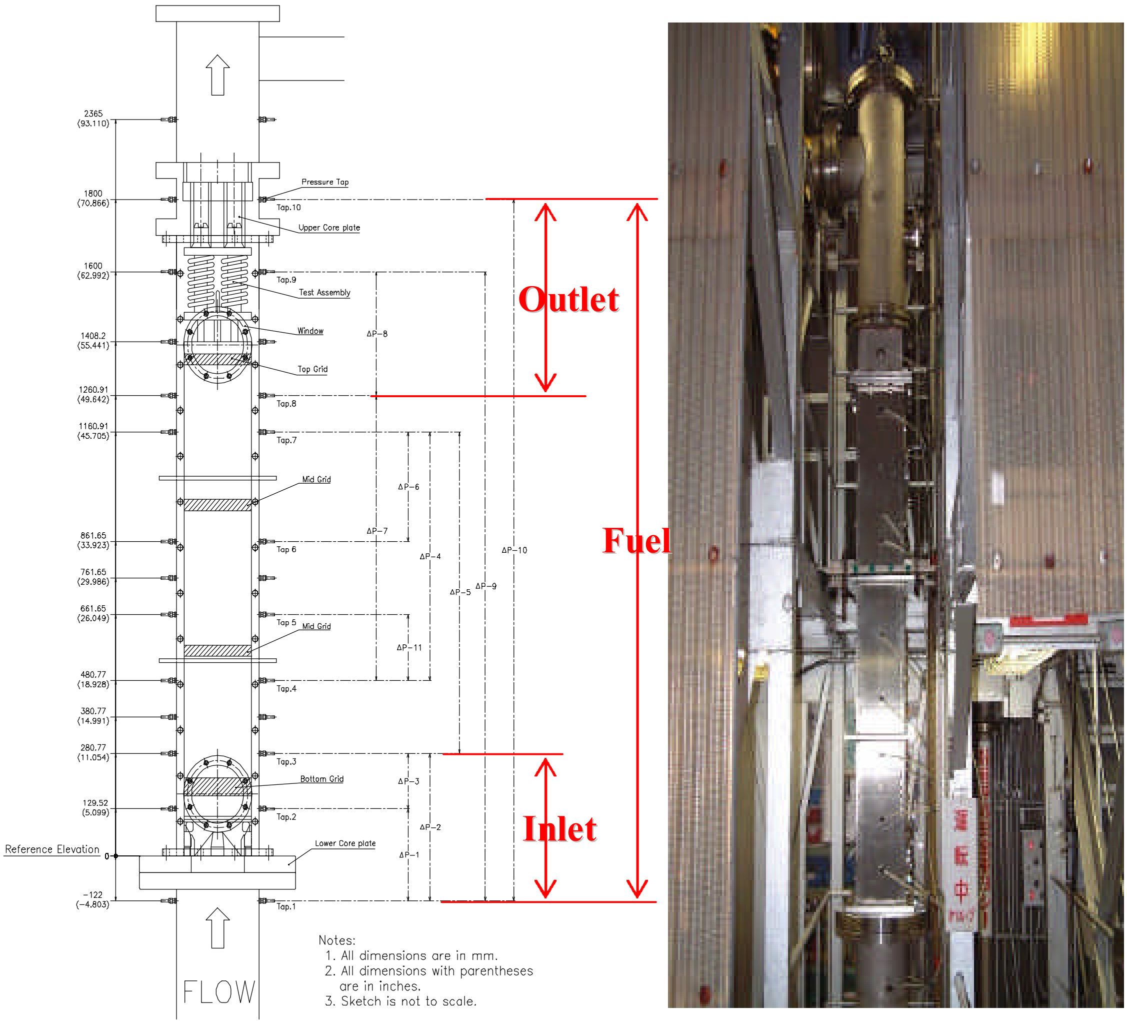
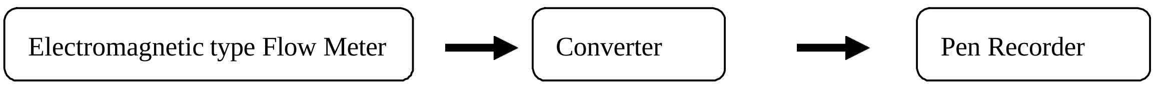


그림 7. Pressure tap installation location and measurement region.

8-A. Pressure drop measurement



8-B. Flow rate measurement

그림 8. Flow Chart of Data acquisition system

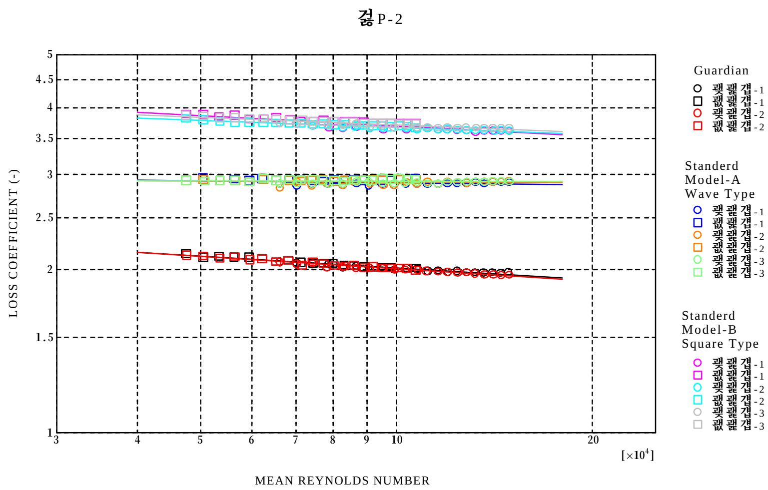


그림 9. 압력강하시험 결과 (ΔP-2, 하단고정체)

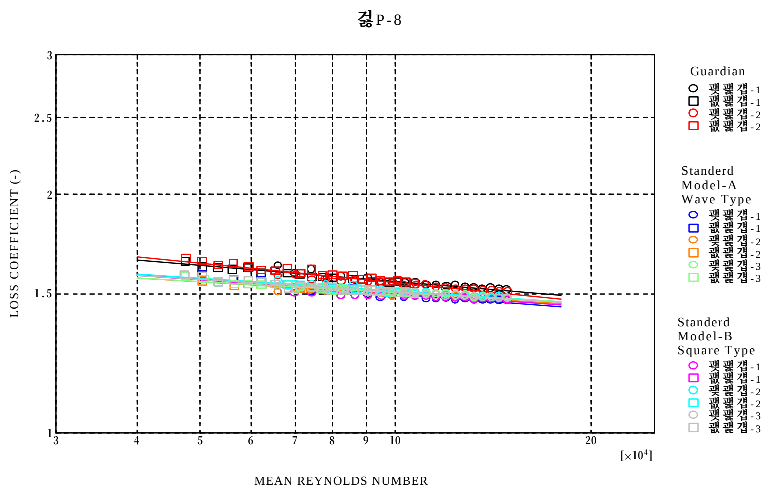


그림 10. 압력강하시험 결과 (ΔP-8, 상단고정체)

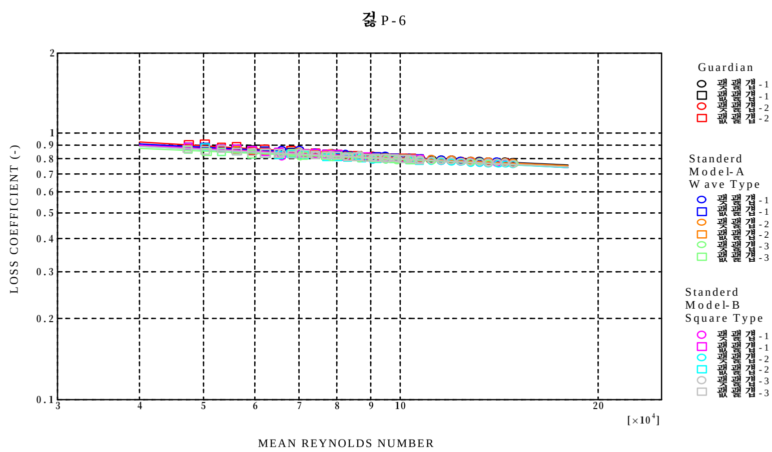


그림 11. 압력강하시험 결과 (ΔP-6, 중간지지격자)