2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Non-mixing Vane 지지격자와 Hybrid 지지격자의 압력강하 비교 실험

An Experimental Study on the Pressure Drop Comparison with Non-mixing Vane and Hybrid Spacer Grids

장석규, 천세영, 김복득, 전태현, 오동석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

핵연료봉 지지격자의 수력성능을 검증하기 위하여 5x5 핵연료다발에 두가지 형태의 지지격자(Non-mixing vane(Plain) type, Swirl mixing-vane(Hybrid) type)를 장착하고 상온 상압 압력강하 실험을 수행하였다. 실험범위는 Reynolds 수 10,000에서 100,000 범위에서 실시하였으며 실험조건은 loop 온도 28 ℃ 내외, 유량 2.5~25.5 kg/s 범위에서 수행하였다. Test section 6개 지점에서의 압력강하 측정구간으로부터 지지격자의 압력강하 및 핵연료봉 마찰손실을 측정하였다. 측정된 압력강하 실험자료로부터 지지격자 압력손실계수 및 핵연료봉 마찰손실계수를 산정하였다. 지지격자의 압력손실계수는 Re수 50000까지 Re수가 증가함에 따라 감소하고 이후에는 거의 일정한 값을 갖는 것으로 나타나 기존의 자료와 유사한 경향을 보였다. 와류 혼합날개에 의한 압력손실계수 증가는 두 지지격자의 압력손실자료를 비교하였을 때 15~18 % 정도인 것으로 나타났다. 핵연료봉 마찰손실계수는 두 경우의 실험에서 서로 잘 일치하였으며 원형관 마찰계수 상관식을 적용함으로써 비교적 잘 예측될 수 있는 것으로 판단되었다.

Abstract

The pressure drop test at atmospheric condition was performed to verify the hydraulic performance of two kinds of spacer grids i.e., Non-mixing vane(Plain) type and Swirl mixing-vane(Hybrid) type. These were installed in the test section which had square-arrayed 5x5 fuel assembly for each tests. The Reynolds number was the

range of 10000 to 100000. The test loop conditions were the temperature of 28 ℃ and the flow rate of 2.5~25.5 kg/s. The pressure drop of spacer grid and the friction loss of fuel rods were measured at six locations of the test section. The pressure drop loss coefficients of the spacer grids and the friction loss coefficients of the fuel rods were evaluated from the measured pressure drop data. The pressure loss coefficients of the spacer grids were decreased as increasing the Re number until Re = 50000, and after that, these were remained almost constant similar to the existing literature. The increment of the pressure loss coefficients causing by the swirl mixing-vane was around 15~18 % when comparing two pressure losses of the spacer grids. The friction loss coefficients were agreed well with two tests. It is supposed that the friction loss coefficients of the fuel rods can be reasonably approximated by using the correlation for tubular friction factor.

1. 서 론

국내 경수로심에서의 핵연료 다발은 14x14, 16x16 혹은 17x17의 사각 봉배열 형태로 3.85 m 정도의 길이를 갖는다. 노심내에서 핵연료 다발 양단은 upper guide structure와 lower support structure로 고정되어 있으며 봉다발들은 길이방향으로 일정하게 7~8개의 핵연료 지지격자가 장착되어 핵연료봉 간격을 일정하게 유지시켜 준다. 핵연료 지지격자는 일차적으로 냉각재의 고온고압 유동조건에서 핵연료봉들의 위치 및 간격을 정확하게 유지시켜 주는 역할을 한다. 또한, 부차적 목적으로 지지격자에 혼합날개를 부착하여 핵연료 부수로 간의 냉각재를 서로 혼합시켜 열전달을 증진시키는 역할을 하는데 근래에는 핵연료 지지격자 설계에 있어 이러한 냉각재 혼합 성능 개선이 더욱 강조되고 있는 실정이다. 한편, 핵연료 다발에 지지격자를 장착함으로써 유동저항을 유발하여 압력강하 증대로 인한 수력적 penalty를 가져오기도 한다. 더욱이 부수로 간 냉각재 혼합 성능을 높이기 위하여 여러 가지 형태의 날개를 부가함으로써 압력손실은 더욱 커질 수 있다. 따라서 핵연료 지지격자는 난류 혼합성능을 높이면서 압력손실을 최소화하는 것이 설계의 관건이다.

핵연료 지지격자의 압력손실 관련 연구로는 Rehme(1973)[1], Rehme와 Trippe(1980)[2], Yao 등(1982)[3] 그리고 Madni 등(2002)[4] 등이 있다. Rehme(1973)는 grid 타입과 wire 타입의 지지격자들에 대하여 압력강하 실험을 수행한 다음 유로의 plugging을 고려한 일반화된 압력손실 계수의 상관관계를 제안하였다. Rehme와 Trippe(1980)는 핵연료봉 마찰손실 및 핵연료 지지격자의 압력손실을 예측하는 상관식을 층류와 난류영역에 대하여 제안하였다. Yao 등(1982)[3]은 지지격자가 봉다발에서의 열전달을 증진시키는 현상을 압력손실과의 상사성을 이용하여 연구하였다. Madni 등(2002)[4]은 Framatome에서 운영

하는 PHTF 실험장치의 수력적 실험자료 생산 및 압력손실 산정 방법을 설명하였다. 본 실험은 Yang 등(1998)이 split-vane 타입 지지격자의 압력강하 실험한 것과 같은 방법으로 non-mixing vane(Plain) 타입과 Hybrid 타입의 지지격자에 대하여 압력강하 실험을 수행하였다. 두 지지격자의 실험자료로부터 Hybrid 타입 지지격자에 장착된 와류 혼합날개의 압력강하 효과를 산정, 비교하였다. 또한, 얻어진 지지격자의 마찰 및 압력손실 자료를 기존의 자료와 비교, 검토하였다.

2. 실험장치

2.1 실험장치 구성

실험장치는 그림 1에서 보는 바와 같이 냉각수조, 순환펌프, 시험대로 구성되는 순환 loop로 구성되어 있다. 실험 중 loop의 조건은 유량계, 온도 및 압력 센서로 감시되며 시험대에 장착된 다수의 압력센서로부터 전달된 압력 측정신호는 data acquisition system에 의하여 수집, 처리된다. 냉각수조는 900 liter의 직립원통형으로 냉각수의 온도조절을 위하여 코일형상의 cooler와 heater가 각각 장착되어 이들을 제어하는 controller를 통하여 설정온도를 일정하게 유지하는 기능을 할 수 있다. 냉각수 순환펌프는 loop 내에 유량을 형성하는데 펌프의 회전속도를 조절함으로써 유량값을 임의로 조절할 수 있다. Loop의 배관 및 주요 component에는 운전조건을 정확하게 유지하기 위하여 유량 및 시스템 온도, 압력 등을 감시, 제어하기 위한 계측기가 설치되어 있는데 이들의 기술사양은 표 1에 나타난 바와 같다.

2.2 Test Section

Test channel은 5x5 핵연료 다발이 장착될 수 있도록 사각 채널형상(68x68 mm)이며 재질은 아크릴을 사용하였다. Test channel의 길이는 하단에서의 입구 효과와 상단의 출구효과를 줄이기 위하여 하단과 상단 지지격자를 장착하고 중간에 지지격자를 둠으로써 두 구간의 span중 상류구간에서 유동을 안정화시킨 다음 하류구간에서 정확한 측정자료를 얻도록 제작하였다. Test channel의 사양은 그림 2에 나타나 있다. Test channel 내에 삽입되는 5x5 모의 핵연료 다발은 직경 9.5 mm의 실제 핵연료봉으로 구성되었으며 P/d = 1.347, W/d = 0.884이다. 실험에 사용된 지지격자(spacer grid)는 non-mixing vane 지지격자와 Hybrid 지지격자인데 두 지지격자의 strap에서의 형상은 동일하며 단지 Hybrid 지지격자의 strap 하류 쪽에는 선회유동을 유발하는 mixing vane이 장착되어 있다. 이들의 기술사양은 표 2와 같으며 외관 형상은 그림 3과 같다.

2.3 계측 및 실험자료 수집

Test section에서의 지지격자 및 핵연료 다발의 수력 성능 실험을 위하여 구간별 압력강하를 측정하여야 한다. 이를 위하여 6개의 차압측정기를 사용하였는데 측정기들의 기술사양은 표 1에 나타나 있다. 실험 중 loop와 test section에서의 센서로부터 발생하는 유량, 압력, 온도의 실험자료는 signal conditioner를 거쳐 data acquisition unit (Agilent 34670A)에서 처리되며 이들 실험자료는 PC의 모니터 상에 표시되고 파일로 저장된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험수행

두 가지 지지격자에 대한 5x5 핵연료 다발 압력강하 실험은 Reynolds 수 10,000에서 100,000 범위에서 실시하였는데 loop 온도 28 ℃ 정도에서 유량은 2.5에서 25.5 kg/s 정도의 범위를 갖는다. 실험범위 사이의 측정 구간은 21개로 나누었으며 각 측정조건은 시스템의 온도, 유량에 따라 약간씩의 차이가 있을 수 있는데 실험 matrix의 한 예가 표 3에 나타나 있다. 실험의 수행방법은 먼저 loop의 냉각수 온도를 heater와 cooler를 가동하여 일정온도(28 ℃)로 맞춘다. 본격적인 실험은 저유량에서 고유량으로 조건을 바꾸며 수행하는데 저유량 실험에서 펌프속도를 최저로 하고 우회밸브를 개방한 상태에서 주배관의 밸브를 조절하여 유량을 맞추고 이후 유량 증가에 따라 밸브 개폐와 펌프속도를 조절하면서 최대 유량조건까지 실험을 수행하였다. 각 실험조건 마다 대략 100개의 data를 sampling하여 평균을 취하였다. 유량측정에 있어 그림 4에서 보는 바와 같이 저유량계에서는 RMS 오차가 0.66 % 이내로 안정적이었으며 고유량계에서는 낮은 유량측정 구간에서 측정불안정이 다수 감지되었다. 고유량 측정에서 오차가 큰 불안정 실험자료는 모두 제거하였으며 유효 측정신호에 대한 RMS 오차는 최대 1.45 % 이내였다. 실험수행 중의 loop 압력은 그림 5에서 보는 바와 같이 유량이 증가함에 따라 증가하며 측정신호의 RMS 오차는 0.24 % 이내로 안정적이었다. 실험 중의 loop 온도는 그림 6에서 보는 바와 같이 28 ℃ 정도로 유지하였으며 Hybrid 지지격자 고유량 실험에서 30~32 ℃ 범위의 온도를 나타냈는데 이는 고온 기상조건에 의하여 수조의 냉각성능이 떨어졌기 때문이다. 이상에서 본 바와 같이 유량, 압력 그리고 온도 등 loop의 실험조건은 실험수행 중 전반적으로 정확하게 유지되었다.

3.2 실험결과

각 실험경우에 대한 압력강하 실험자료는 지지격자에 대하여 세 가지(DP-1(입구),

DP-3(중간), DP-5(출구)), 핵연료봉 구간에 대하여 두 가지(DP-2(하단), DP-4(상단)) 그리고 중간 지지격자와 상단 핵연료봉 구간의 압력강하(DP-6=DP-3+DP-4) 등 6개이다. 지지격자의 압력강하 실험자료는 입구와 출구에서 배관 곡면부의 기하형상으로 인한 유동 왜곡으로 인하여 오차발생 가능성이 크므로 참고자료로 활용하고 신뢰할 만한 자료로서 중간 지지격자의 압력강하 값을 사용하였다. Test section 입구 및 출구 지지격자의 압력강하는 중간 지지격자의 압력강하에 비해 입, 출구 효과로 인하여 크게 나타난다. 지지격자 압력강하에 비해 핵연료봉의 마찰손실에 의한 압력강하는 두 구간(DP-2, DP-4)에서 별 차이가 나타나지 않았다. 그림 7과 8은 실험자료 중 정확한 실험조건의 중간 지지격자 압력강하(DP-3)와 상단 핵연료봉 마찰손실(DP-4)에 대한 측정값을 나타낸 것이다. 실험수행 중 측정범위를 달리하는 두 개의 유량계를 사용하였는데 유량 측정의 중복범위에서 약간의 압력 및 마찰손실 계수값 불일치가 발생하였다. 이는 유량계 측정 한계영역 부근에서 오차가 커지는 것과 두 유량계의 bias 오차가 복합적으로 작용하여 생긴 것으로 보여진다. 이로 인한 압력손실계수와 마찰계수의 상대오차는 각각 3 % 정도 발생하는 것으로 나타났다. Test section에 대한 압력강하 실험자료로부터 지지격자의 압력손실계수와 핵연료봉의 마찰손실계수를 다음과 같이 산출하였다.

Test section의 유로면적은 다음과 같다.

$$A = A_{T/S} - A_{rods} = 2852 \text{ mm}^2$$

$$P = P_{T/S} - P_{rods} = 1018 \text{ mm}$$

$$D_h = 4*A/P = 11.2 \text{ mm}$$

레이놀즈수는 test section 내 봉다발 유로면적과 수력직경을 토대로 하여 식 (1)과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{V D_h}{\nu} \tag{1}$$

본 실험에서 최종적으로 생산되는 압력손실계수 및 마찰손실계수는 다음과 같이 정의된다.

지지격자 압력손실계수 :

$$K = \frac{\triangle P}{(\frac{\rho V^2}{2})} - f\frac{l}{D_h} \tag{2}$$

여기서 △P에 해당되는 실험자료는 DP-1. DP-3, DP-5의 측정값이다.

핵연료봉 마찰손실계수 :

$$f = \left(\frac{D_h}{l}\right) \frac{\triangle P}{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)} \tag{3}$$

여기서 △P에 해당되는 실험자료는 DP-2, DP-4의 측정값이다.
위 정의에 의하여 산출된 지지격자들의 압력손실계수 중 정확한 실험조건의 압력손실계수 결과가 그림 9에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 압력손실계수는 Re수 50000까지는 Re수가 증가함에 따라 감소하다가 이후에는 거의 일정한 값을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 Rehme[1]의 실험결과 중 honey-comb type 지지격자와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 압력손실계수의 값은 본 실험대상 지지격자와 차이를 보이고 있는데 이는 지지격자의 기하형태 및 실험조건 등이 서로 다르기 때문에 정확한 비교는 어려운 실정이다. 또한 Rehme와 Trippe[2]의 실험결과에서는 SII 지지격자의 압력손실계수 및 경향이 본 실험결과와 유사한 것으로 나타났는데 SII 지지격자의 정확한 형상은 언급되어 있지 않다. 본 실험에 사용된 두 지지격자는 strap의 구조(spring, dimple 등)가 동일하며 Hybrid 지지격자는 Plain 지지격자에 비하여 지지격자 상단에 와류 혼합날개를 부착한 구조적 차이를 갖는다. 따라서 그림 9에서 나타난 압력손실계수의 차이는 전적으로 와류 혼합날개의 추가적 압력손실을 나타낸 것이다. Re수 30000 이하에서는 혼합날개에 의한 압력손실계수가 평균 17 % 정도 증가하며 Re수 50000 이상에서는 평균 16 % 정도 증가하여, 전체적으로 혼합날개에 의한 압력손실계수 증가는 대략 15~18 % 정도인 것으로 나타났다. 근래의 핵연료봉 지지격자 설계 추세는 핵연료봉 지지뿐만이 아니라 열전달 성능향상을 위한 부수로 간 난류혼합을 위하여 지지격자에 혼합날개를 장착하는 경향이다. 따라서 본 실험에서 보여진 바와 같이 부가적인 지지격자의 압력손실은 피할 수 없다. 이에 대하여 Rehme와 Trippe[2]는 부가적 압력손실의 저감 방안으로서 지지격자의 leading edge 및 용접부위의 연마 상태를 개선함으로써 압력손실을 현저히 낮출 수 있다고 언급하였다.

그림 10은 핵연료봉 상단 구간에서의 마찰손실계수를 위 (3)식의 정의에 의하여 나타낸 것이다. 핵연료봉의 마찰손실계수는 장착된 지지격자의 형상에 상관없이 핵연료봉 표면의 상태에 의해서만 결정되어 지므로 그림 10에서 나타난 두 경우의 손실계수 분포는 타당한 결과로 보여진다. 핵연료봉 부수로의 마찰손실계수에 대하여 식 (4)의 Moody[6]의 원관에 대한 마찰손실계수 상관식을 적용했을 때 표 4에서 보는 바와 같이 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다.

$$f = 0.184\ Re^{-0.2} \tag{4}$$

Madni 등[4]은 Moody의 상관식 계수를 0.203으로 수정하여 제안하였는데 표 4에서 보는 바와 같이 본 실험의 측정값과는 오히려 편차가 있는 것으로 나타났다. Yang 등[5]은 split vane을 갖는 FOCUS 지지격자에 대하여 본 실험과 유사한 실험을 수행하였는데 본 실험의 Hybrid 지지격자의 압력손실계수 값이 FOCUS 지지격자에 비하여 약간 높은 것으로 나타났다. 또한 핵연료봉 마찰손실계수는 두 실험에서 잘 일치하는 것으로 나타났다.

5. 결론

핵연료봉 지지격자의 수력성능을 검증하기 위하여 5x5 핵연료다발에 두가지 형태의 지지격자(Non-mixing vane(Plain) type, Swirl mixing-vane(Hybrid) type)를 장착하고 상온 상압 압력강하 실험을 수행하였다. 정확한 실험을 위하여 실험장치 및 계측기의 안정된 정상상태 유지가 요구되었는데 유량은 1.45 %, 압력 7 % 이내의 표준편차로 안정된 측정값을 유지하였다. Test section에서의 압력강하 측정구간은 6 곳이었는데 지지격자의 압력강하 측정이 3곳, 핵연료봉 마찰손실 측정이 2 곳이었으며 한 곳은 핵연료봉과 지지격자의 압력손실을 측정하였다. 측정된 압력강하 실험자료로부터 지지격자 압력손실계수 및 핵연료봉 마찰손실계수를 산정하였다. 지지격자의 압력손실계수는 Re수 50000까지 Re수가 증가함에 따라 감소하고 이후에는 거의 일정한 값을 갖는 것으로 나타나 기존의 자료와 유사한 경향을 보였다. 와류 혼합날개에 의한 압력손실계수 증가는 두 지지격자의 압력손실자료를 비교하였을 때 15~18 % 정도인 것으로 나타났다. 핵연료봉 마찰손실계수는 두 경우의 실험에서 서로 잘 일치되게 나타났으며 Moody[6]의 원형관 마찰계수 상관식을 적용함으로써 비교적 잘 예측될 수 있는 것으로 판단되었다. 이상의 결과로부터 언급될 수 있는 결론은 다음과 같다.

(1) 본 실험에서 얻어진 non-mixing-vane 지지격자의 압력강하 실험자료는 향후 개발될 여러형태의 mixing-vane 지지격자 설계에 기본자료로 유용하게 활용될 수 있다.

(2) 핵연료봉 지지격자의 혼합날개 장착에 의한 압력손실 증가는 지지격자의 leading edge 및 용접부의 연마를 개선함으로써 완화시킬 수 있다.

(3) 핸연료봉 지지격자의 보다 정확하고 광범위한 실험자료를 확보하기 위해서는 test section의 길이를 충분히 하고 넓은 범위의 유량에 대하여 실험을 수행할 수 있는 실험장치의 제작이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기 연구개발과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

기호설명

A	봉다발 유로면적, mm^2
D_h	수력직경, m
f	마찰손실계수
K	압력손실계수
l	마찰길이, m
P	수력길이, m
Re	레이놀즈수
V	봉다발에서 유속, m/s
ν	동점성계수, m^2/s
ρ	유체밀도, kg/m^3
△P	차압, kPa

6. 참고문헌

[1] Rehme, K., "Pressure drop correlations for fuel element spacers", Nuclear Technology, Vol. 17, January 1973

[2] Rehme, K., "Pressure drop and velocity distribution in rod bundles with spacer grids", Vol. 62 Nuclear Engineering Design, 1980

[3] Yao, S. C. et al., "Heat transfer argumentation in rod bundles near grid spacers", Transactions of the ASME, Vol. 104, Feb. 1982

[4] Madni, I. K. et al., "Development of correlations for pressure loss/drop coefficients obtained from flow testing of fuel assemblies in Framatome ANP,s PHTF", Proceedings of ICONE10, 2002

[5] Yang, S. K. et al., "Turbulent flow through spacer grids in rod bundles", Transactions of the ASME, Vol. 120, Dec. 1998

[6] Moody, L. F., "Friction factors for pipe flow", Trans. ASME, Nov. 1944

표 1 계측기 기술사양

Location	Tag Name	Variable	Model	Calibration Range	Error
Loop	FT-1(3.0″)	m	HOX3-40-650-T-1 (RPM51S)X-F1SS-CE	0~40.899 kg/s	±0.32 %
	FT-1(1.5″)	m	HO11/2X11/2-8-130-T-1 (RPM51S)X-F1SS-CE	0~8.188 kg/s	±0.31 %
	PT-1	P	Rosemount 3051CG	0~600 KPa	±0.05 %
	TE-1	T	Watlow, T-type, Unground	0~200 ℃	±0.4 %
Test Section	DP-1	P	Rosemount 3051CD	0~60 KPa	±0.05 %
	DP-2	P	Rosemount 3051CD	0~60 KPa	±0.05 %
	DP-3	P	Rosemount 3051CD	0~60 KPa	±0.05 %
	DP-4	P	Rosemount 3051CD	0~60 KPa	±0.05 %
	DP-5	P	Rosemount 3051CD	0~60 KPa	±0.05 %
	DP-6	P	Rosemount 3051CD	0~150 KPa	±0.05 %

표 2 지지격자의 기하학적 사양

Dimension (mm)	Hybrid	Plain
Rod Array	5 x 5	5 x 5
Rod Diameter	9.5	9.5
Rod Pitch	12.8	12.8
Strap Thickness	0.48	0.48
Strap Width	66.6	66.6
Vane Angle (°)	35	-

표 3 지지격자 성능실험 Test Matrix

실험순서	Reynolds Number	Flow Rate (kg/s)	Average Velocity (m/s)
1	10000	2.5521	0.896
2	11220	2.8635	1.006
3	12589	3.2128	1.128
4	14125	3.6049	1.266
5	15849	4.0447	1.421
6	17783	4.5383	1,594
7	19953	5.0920	1.788
8	22387	5.7133	2.007
9	25119	6.4105	2.252
10	28184	7.1927	2.526
11	31623	8.0703	2.835
12	35481	9.0550	3.180
13	39811	10.1599	3.568
14	44668	11.3996	4.004
15	50119	12.7906	4.492
16	56234	14.3511	5.041
17	63096	16.1024	5.656
18	70795	18.0672	6.346
19	79433	20.2717	7.120
20	89125	22.7452	7.989
21	100000	25.5205	8.963

표 4 핵연료봉 마찰계수 비교

Reynolds Number	Measured	Predicted	
		Moody [6]	Madni [4]
21527	0.0264	0.0250	0.0276
52715	0.0206	0.0209	0.0231
107474	0.0172	0.0181	0.0200

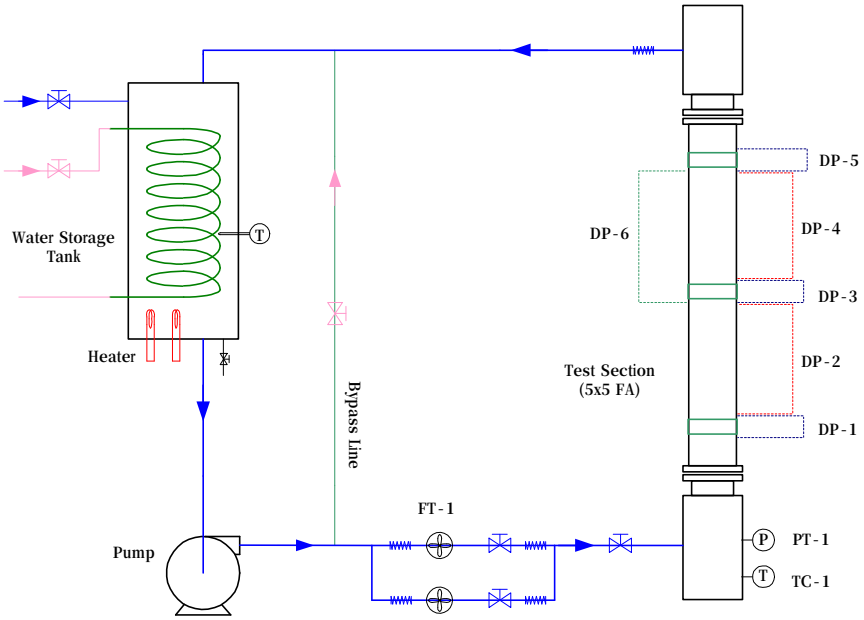


그림 1 실험장치 개략도

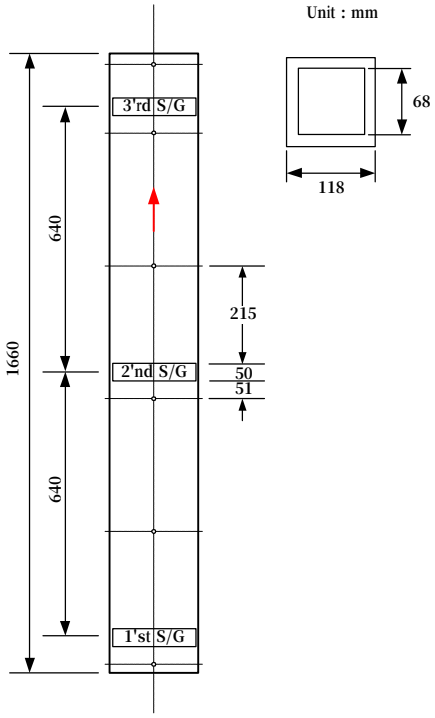
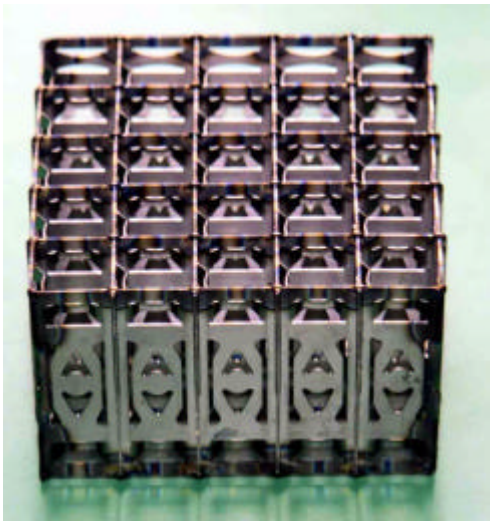
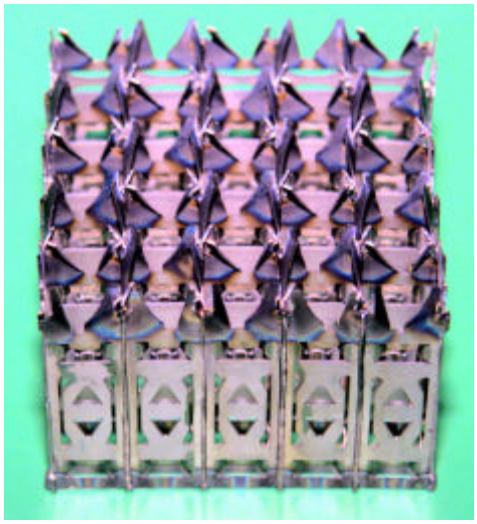


그림 2 Test section 압력 측정위치 및 기하학적 사양

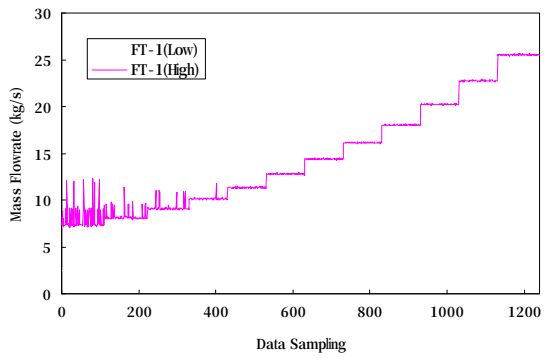


(a) Non-mixing vane type (Plain)

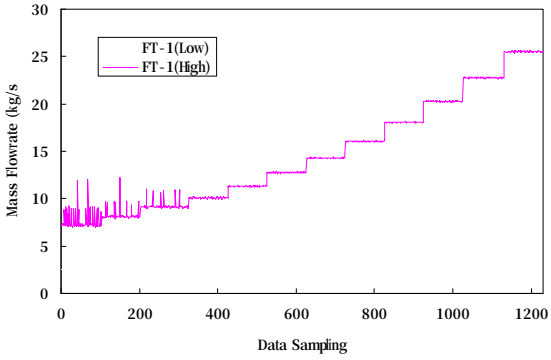


(b) Swirl mixing-vane type (Hybrid)

그림 3 실험대상 지지격자

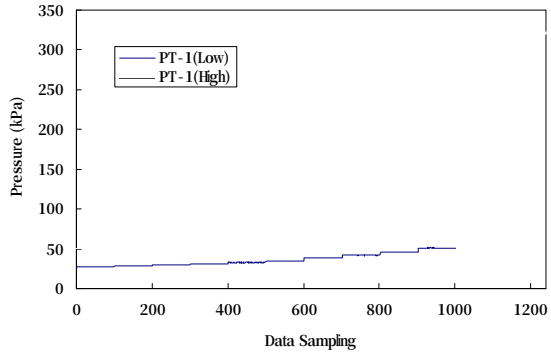


(a) Plain

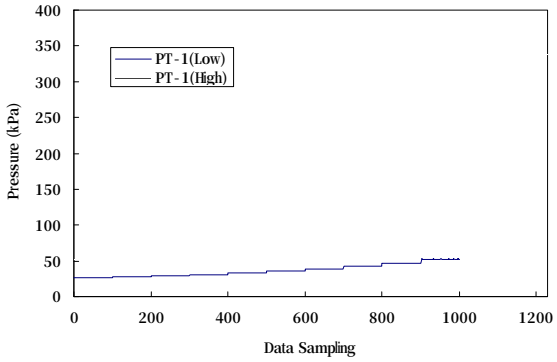


(b) Hybrid

그림 4 Loop 유량 측정 이력

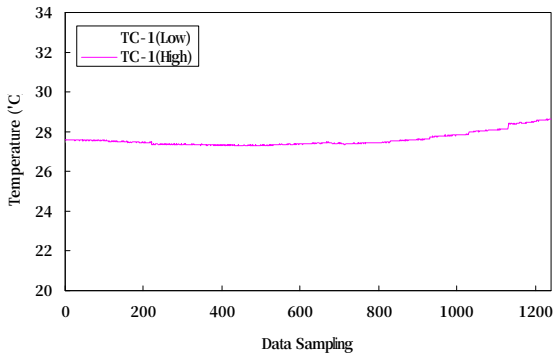


(a) Plain

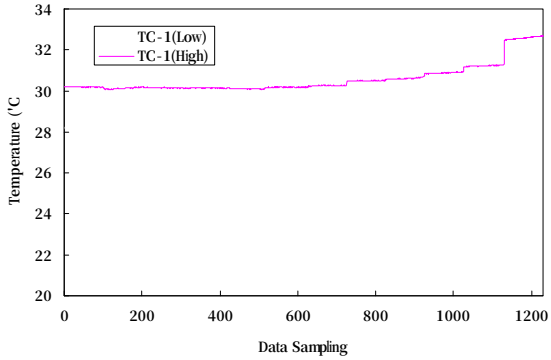


(b) Hybrid

그림 5 Loop 압력 측정 이력

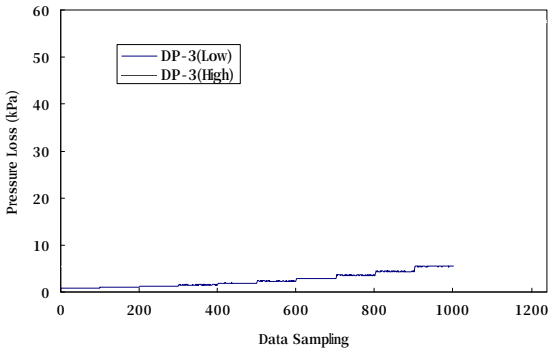


(a) Plain

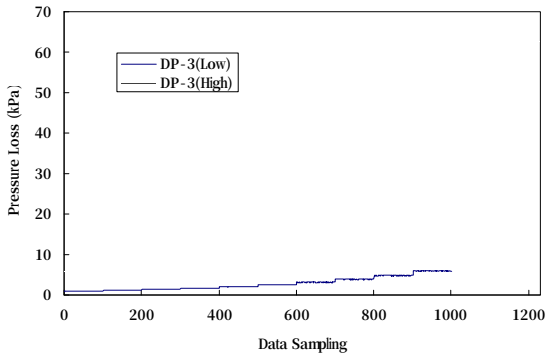


(b) Hybrid

그림 6 Loop 온도 측정 이력

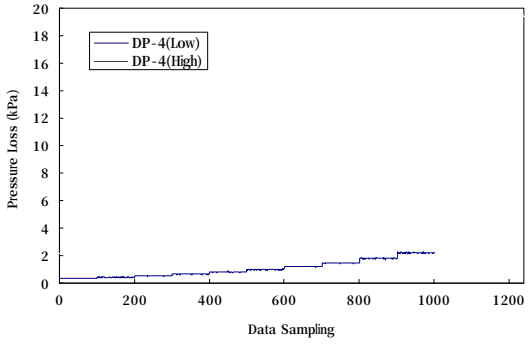


(a) Plain

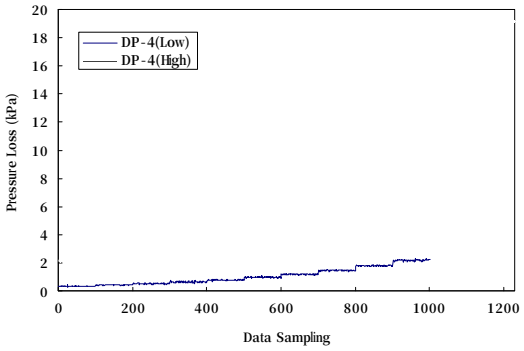


(b) Hybrid

그림 7 지지격자 압력강하 측정 이력



(a) Plain



(b) Hybrid

그림 8 핵연료봉 마찰손실 측정 이력

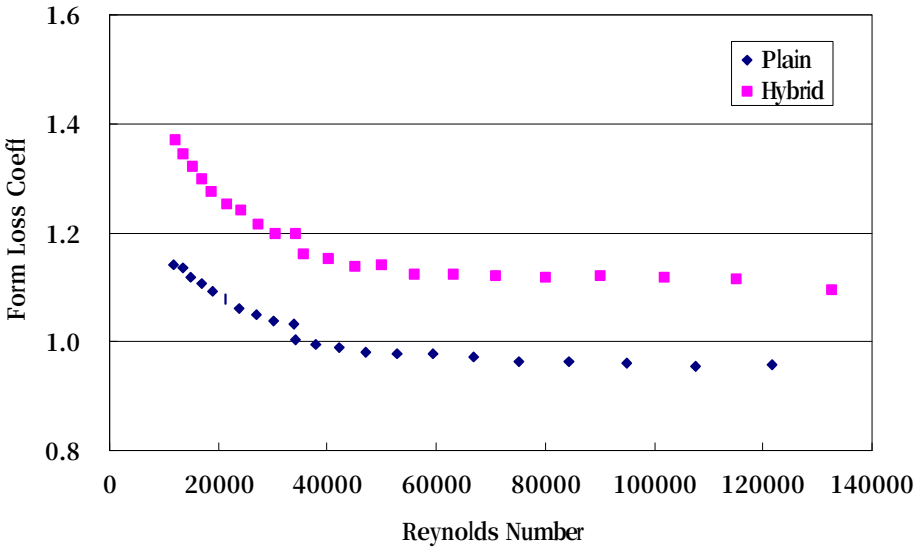


그림 9 지지격자 압력손실계수 비교

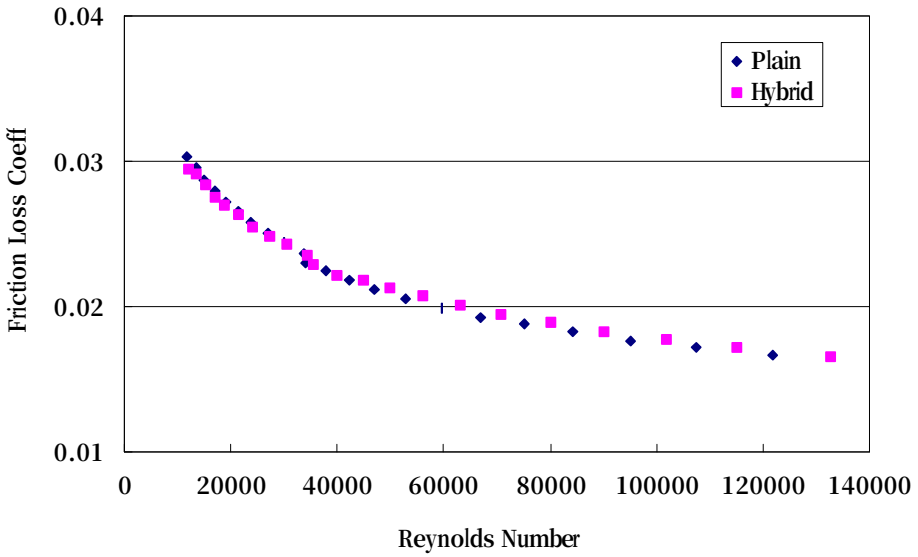


그림 10 핵연료봉 마찰손실계수