

## 4-펌프 평형운전 조건에서 유속 분포에 대한 실험적 연구

김기환\*† · 김요한\* · 최해섭\* · 설효성\* · 임병준\* · 김우식\* · 어동진\*

### Experimental Investigation on the Hot Leg Flow Velocity Distribution Under 4-Pump Balanced Flow Condition

Kihwan Kim\*†, Yo Han Kim\*, Hae-Seob Choi\*, Hyosung Seol\*, Byung-Jun Lim\*, Woo-Shik Kim\*, Dong-Jin Euh\*

Key Words : APR1000 reactor(APR1000 원자로), core flow test facility(유동분포실험장치), Hot Leg Velocity(고온관 유속)

#### ABSTRACT

The velocity distribution of the hot leg coolant is crucial for improving the accuracy of the measurement of coolant flow rate based on the heat balance method in reactor. In this study, the velocity profiles were measured using a core flow test facility scaled down to 1/5th of the APR1000 reactor. An automated traversing measurement system, equipped with a Pitot tube, airfoil, swivel flange, and linear stages, was developed to measure the axial velocity profiles at 186 points across six angular sections on the hot leg. This study introduces the experimental methods used to measure the velocity profiles and provides a quantitative evaluation the 2D coolant velocity distribution based on measured data.

#### 1. 서 론

원자로 냉각재 시스템(Reactor Coolant System)에서 냉각재의 출력과 유량을 계측하는 방법은 고온관(HL, Hot Leg)과 저온관(CL, Cold Leg)에 설치된 저항 온도 계측기에서 취득된 온도값으로 열 균형 방법(Heat balance method)을 이용하는 것이다. 열 균형 방법은 증기발생기에서 발생하는 출력을 기준으로 고온관과 저온관 사이의 엔탈피 차이를 이용하여 냉각재 유량을 환산하는 방법으로, 현재 한국 표준형 원전에서 냉각재 유량을 예측하는 방법으로 사용되고 있으며 다음 식과 같이 나타낼 수 있다<sup>(1)</sup>.

$$\dot{m} = \frac{Q_{th}}{h_{hot} - h_{cold}} \quad (1)$$

$Q_{th}$  : 원자로 증기발생기 열 출력(J/sec)

$h_{hot}$  : 고온관 냉각재 엔탈피(J/kg)

$h_{cold}$  : 저온관 냉각재 엔탈피(J/kg)

식(1)을 통해 냉각재의 유량을 정확하게 예측하기 위해서는 고온관 및 저온관에서 측정되는 4개 지점의 평균온도에 대하여 산정되므로 불확도가 충분히 고려되어야 한다.

원자로의 안전성을 보장하기 위한 수단 중 하나로 불확도는 운전 범위를 제한하는 임계치를 설정하는 기준으로 활용된다. 노심부 설계 열적 안전성과 구조물의 기계적 안전성, 전열관 관막음이나 침적 등의 운영 안전성을 고려할 때, 단계별로 불확도를 고려할수록 허용 운전범위는 더욱 축소된다. 현재 운영 중 사용되고 있는 고온관 및 저온관에서 측정되는 평균 온도에 기반한 유량 측정 방법론도 상당한 보수성을 가지고 있는 상황이다.

증기발생기로부터 저온관으로 유입되는 냉각재는 원자로 용기(RPV, Reactor Pressure Vessel)에 독립적으로 설치된 유로를 통하므로 평균온도에 대한 불확도는 크지 않으나, 고온관의 경우는 다르다. 고온관은 냉각재가 노심부를 지나서 바로 나오는 노즐부이므로 노심의 출력분포도 고온관의 온도에 영향을 미치고 또한 원자로 용기에 부착된 저온관과 달리 냉각재의 유동이 상부안내구조물 등을 거치면서 수평 방

\* 한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute)

† 교신저자, E-mail : kihwankim@kaeri.re.kr

향으로 급격하게 변경되는 구조물의 영향도 있으며, 그리고 원자로 용기와 노심배럴 사이 고온관 연결부의 우회 유로 등 다양한 요소로 인하여 고온관 내부에서의 온도 및 유속 분포가 고온관 단면에서 불균일함은 여러 선행 연구에서 확인된 바가 있다<sup>(2,3,4)</sup>. 고온관 단면에서 속도 및 온도 분포의 불균일함은 앞서 열균형 방법론을 이용한 엔탈피를 산정하기 위한 기준 온도인 체적온도를 산정함에 있어 다음 식과 같이 단면적에 대한 온도 편차의 면적분으로 계산되므로, 이로부터 유발되는 불확도는 유량 산정에 있어 공학적으로 충분히 영향을 미치게 된다.

$$T_{Avg.} = \frac{\int_r \rho C_p T(r) V(r) dA}{\int_r \rho C_p V(r) dA} \quad (2)$$

여기서,  $T_{Avg.}$ 는 체적온도,  $r$ 은 고온관 단면의 반경방향,  $\rho$ 는 밀도  $C_p$ 는 비열,  $T$ ,  $V$ 는 국부적인 온도 및 속도를 나타낸다. 밀도 및 비열 또한 고온관 단면에서 국부적으로 온도가 다르다면 고려되어야 할 중요한 열물성이다. 그러므로 고온관 내부 단면에서 온도와 유속 분포 불균형으로 인한 불확실성을 줄이면, 냉각재 유량에 대해 기준에 보수적으로 고려하던 가정들에 대한 불확도를 줄일 수 있으며, 이는 원자로의 운전 성능, 경제성, 그리고 안전성을 동시에 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 체코 수출형 원전인 APR1000 원자로에 대하여 실증 수력 실험 장치<sup>(5)</sup>인 유동분포실험 장치를 이용하여 고온관 수직 단면에서 유속을 측정할 실험에 대하여 기술한다. 노심유동분포 실험장치는 척도해석을 통해 원자로 용기 내부 유동과 고온관 노즐에 대한 상사성이 엄격하게 보존된 장치로 1/5 축소 모형으로 구축되어 있고 설계 인허가 과정에 필요한 실증 실험데이터를 생산하는 장치이다. 그러므로 노심유동분포장치의 활용도를 극대화하여 고온관에서 유속 분포 등의 실증 참조 실험데이터를 생산하여 설계와 운영에 기여하는 것이 본 연구의 목적이다.

## 2. APR1000 노심유동분포 실험장치

### 2.1 장치 개요

노심유동분포 실험장치는 원자로 내부와 노심부에서 냉각재의 유동을 정량적으로 평가하기 위해 1/5 선형 축소비로 제작된 실증 실험 장치이다. 1/5 축소 모델은 기하학적, 운동학적, 역학적 상사성을 보존하도록 설계가 되어 참조 원전의 수력학적 특징을 보존하고 특히 노심부에서는 오일러 수의 비율이 1/1이 되도록 설계가 되어 구축되어 있다<sup>(5)</sup>.

본 실험 장치는 원자로 내부 냉각재 유동을 모의하는 것에

중점을 두기 때문에 실제 원자로 운전 조건인 고온, 고압이 아닌 저온 저압 상태에서 작동할 수 있도록 설계/제작되었으며 실험이 수행되는 동안 실험 장치의 압력은 5 bar 이내, 냉각재의 온도는 60°C의 정상상태 조건을 유지한다. 실험 장치의 주요 구성은 원자로 모의 용기와 2개의 고온관, 4개의 저온관과 각 저온관 노즐부를 포함하며, 냉각재 순환을 위해 유체 기기인 4개의 펌프와 열교환기, 가압기 등으로 시스템이 구성되며 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

Fig. 2는 원자로 용기 내부에서 냉각재의 유동을 간략하게 나타낸 개략도이다. 4개의 저온관 펌프를 통하여 독립적으로 유입되는 냉각재는 저온관을 통과하여 원자로 용기 (Reactor vessel)와 노심 배럴(Core barrel) 사이에 존재하는 원자로 외곽 환형부인 강수부(Downcomer)를 통해 원자

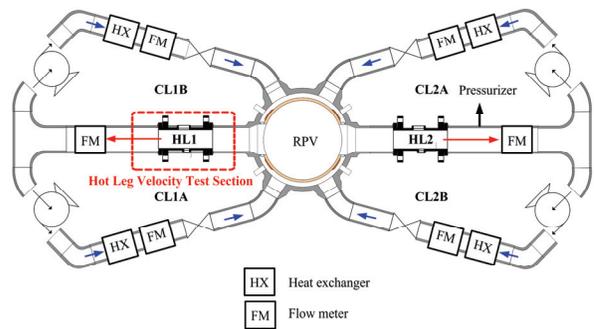


Fig. 1 System configuration of the experimental facility

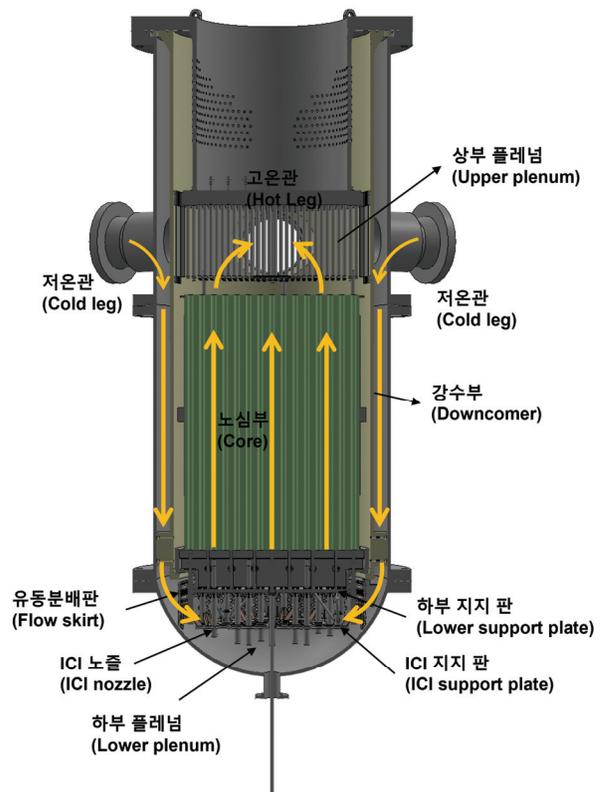


Fig. 2 Schematic of internal flow path in reactor vessel

Table 1 Summary of scaling parameters

Parameter	APR1000	Scaling Ratio	Model
Temperature [°C]	310	-	60
Pressure [MPa]	15	-	0.2 - 0.5
Length ratio [-]	1	$l_R$	1/5
Height ratio [-]	1	$l_R$	1/5
Area ratio [-]	1	$l_R^2$	1/25
Volume ratio [-]	1	$l_R^3$	1/125
Aspect ratio [-]	1	1	1.0
Velocity ratio, [-]	1	$V_R$	1/2
Mass Flow ratio, [-]	1	$\rho_R V_R l_R^2$	1/35.6
Density ratio [-]	1	$\rho_R$	1.40
Viscosity ratio [-]	1	$\mu_R$	5.57
Core Re ratio [-]	1	$\rho_R V_R^2 D_R / \mu_R$	1/2.9
DP ratio [-]	1	$\rho_R V_R^2$	1/2.85

로 하부 플레넘(Lower plenum)으로 이동한다. 이후 유동분배판(Flow skirt), ICI 노즐(ICI nozzle), ICI 지지 판(ICI support plate), 하부 지지 판(Lower support plate)과 같은 노심하부구조물(Lower Support Structure)을 통과한 후 유동 방향이 수직으로 변경되어 177개의 노심 모의기가 있는 노심부를 통과하게 된다. 이후 상부플레넘(Upper plenum)을 통과한 냉각재가 180도 간격으로 설치되어 있는 2개의 고온관을 통해 양분되어 원자로 용기를 빠져나가 다시 4개의 저온관 펌프로 분배되며 순환하는 루프를 구성한다. 저온관 유입부터 고온관으로 유출되기까지 냉각재가 지나가는 모든 내부 유로는 기하학적으로 보존이 되어 있으며, 특히 노심부의 핵연료집합체 부분을 모의하는 노심부 또한 압력강하가 보존되어 있으므로 내부 유동은 실제 참조 원전의 유동을 대변한다고 할 수 있다. 장치에 대한 참조 원전 대비 척도비를 Table 1에 요약하였다.

### 2.2 고온관 유속 측정 시험부

노심유동분포 실험 장치에서 고온관 내부 냉각재의 유속을 측정하기 위해 고온관에 별도의 시험부를 제작하였다. 고온관의 내경은 실제 참조 원전의 내경을 1/5 선형비로 축소, ±0.1mm 공차로 모의하였으며, 원자로 용기와 연결되는 연결부의 형상도 동일하게 모의하였다.

고온관의 전 단면에서 유속 분포를 측정하기 위해서는 2차원의 도메인에서 유속이 측정되어야 한다. 고온관 단면은 Fig. 3과 같이 각도별, 위치별로 원통형 좌표계를 이용하여 세분화하였다. 본 연구에서는 고온관의 수직 단면에서 측방향 속도 성분만을 측정하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 미국 United Sensor Inc. 에서 제작된 계측부의 내경이 1/4

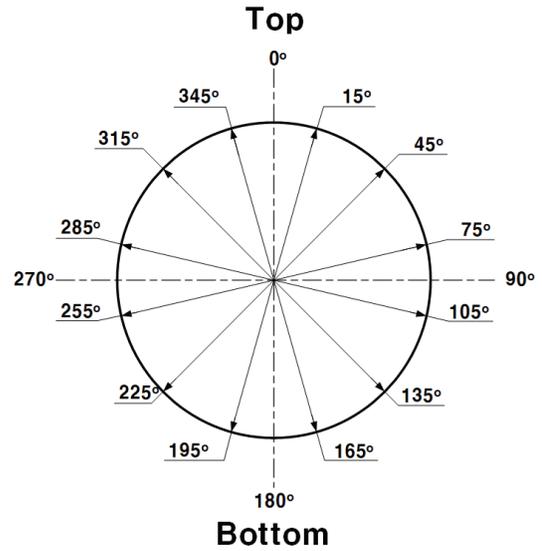


Fig. 3 Measurement points on the hot leg cross section

인치인 피토-정압관을 이용하여 동압 성분을 측정하였다. 측정된 차압은 동일 유선상에 베르누이의 정리를 이용하여 아래식과 같이 간단히 유속으로 변환할 수 있다. 측정된 정압과 전압의 차이는 ±250kPa의 측정 범위를 가지고, 실험조건에서 ±0.025%의 정확도를 보장하는 Rosemount 3051S Series 차압계를 이용하였다.

$$\frac{\rho V_1^2}{2} + P_1 = \frac{\rho V_2^2}{2} + P_2 = Constant \quad (3)$$

$$V = \sqrt{\frac{2(P_{total} - P_{static})}{\rho}} \quad (4)$$

$P_{total}$  : 유체의 전압(N/m<sup>2</sup>)

$P_{static}$  : 유체의 정압(N/m<sup>2</sup>)

Fig. 3의 6종류의 각도에 따라 측정하며, 각 각도에 위치에 해당하는 지름선상에서 최소 30개의 측정 포인트를 측정하였다. 단일 계측기로 라인별, 각도별 등의 2차원 도메인에서 측정하기 위해서는 시험 중 계측기기가 이동될 수 있도록 회전부와 이송부가 동시에 구현되어야 한다.

본 연구에서는 회전부는 별도로 특수 주문 제작한 회전형 플랜지를 고온관 측정부 양단 플랜지에 설치하여 중앙부가 자유단으로, 플랜지 양단 고정부를 해체할 필요가 없도록 실험대를 제작하였다(Fig. 4). 이는 측정부의 압력 경계가 유지되게 함으로써 실험 수행 중 운전원이 측정부를 회전시켜 각도를 조정시킬 수 있음을 의미한다. 계측기의 이송부는 ±45μm 이내의 측방향 정확도를 보장하는 스텝 모터로 구동되는 선형 이송 장치(Motorized Linear Slide T-LSR 300A,

4-펌프 평형운전 조건에서 유속 분포에 대한 실험적 연구

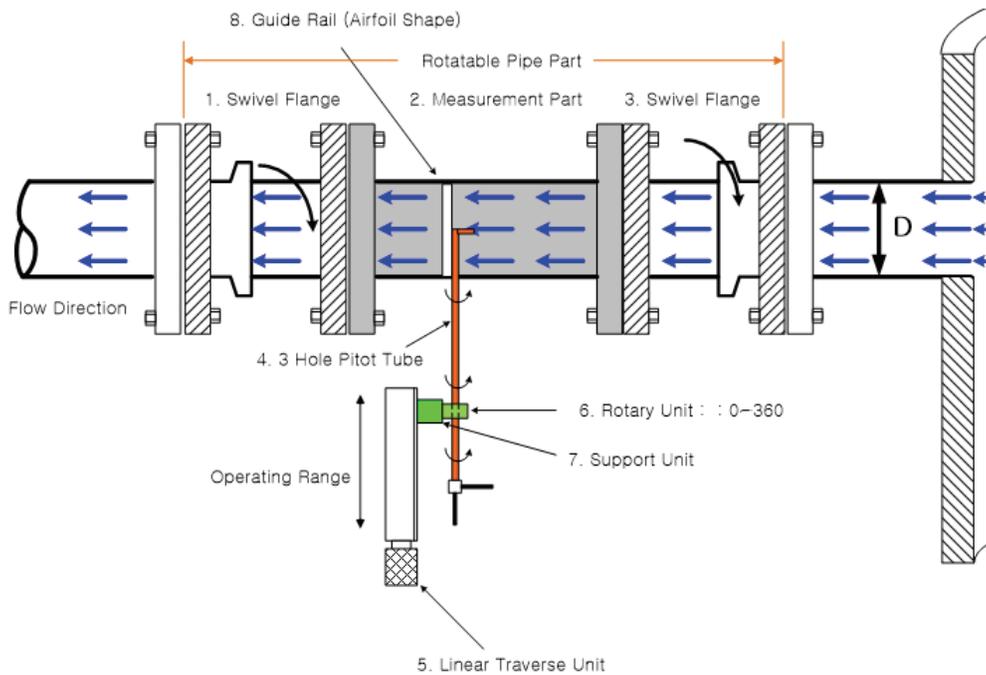


Fig. 4 Schematic of velocity measurement apparatus

Zaber Tech.)를 활용하여 구현하였다. 선형 이송부에는 별도의 피토-정압관 지지부를 설치하여 측정부가 지름 선상을 따라 정교하게 이송할 수 있도록 제작하였다.

척도해석의 결과에 따라 참조 원전의 정상운전 조건에 해당하는 유량 범위에 해당하는 고온관의 유속범위는 대략 4~6m/s이며, 관내에서 강한 운동량을 가진 냉각재의 유동으로 인해 피토-정압관의 정렬과 피토-정압관의 지지부(stem)가 변형되거나, 심지어 유체 유발 진동에 의한 영향을 받을 수 있다. 따라서 계측부의 축선과 유선 사이의 축심각을 일치시키고 진동에 의한 계측 신호 건전성을 유지하기 위해 피토-정압관 후면에 유동 왜곡을 최소화 할 수 있는 airfoil 형태의 지지대를 설치하였다. 피토-정압관의 측정부 팁의 위치는 고온관 노출부가 시작되는 위치를 기준으로 고온관 직경의 약 3.03배의 거리에 위치하고 있으며, 현장 설치 사진은 Fig. 5와 같다.

### 3. 유속 측정 실험

#### 3.1 실험조건 및 절차

고온관 내부에서 냉각재의 유속 분포를 정량적으로 평가하기 위해 4-펌프 평형 운전 조건에서 실험이 수행되었으며 주요 수력 조건을 Table 2에 제시하였다. 유동분포실험장치는 목표 운전 조건 하 온도, 압력, 유량이  $\pm 1\%$  이내의 변동 폭 이내로 유지되는 준정상상태(Quasi-steady state)에서 실험이 수행되었으며, 각 주요 변수에 대하여 sampling rate 은 10hz, 대략 30분 이상 운전 조건이 유지되도록 하였다.

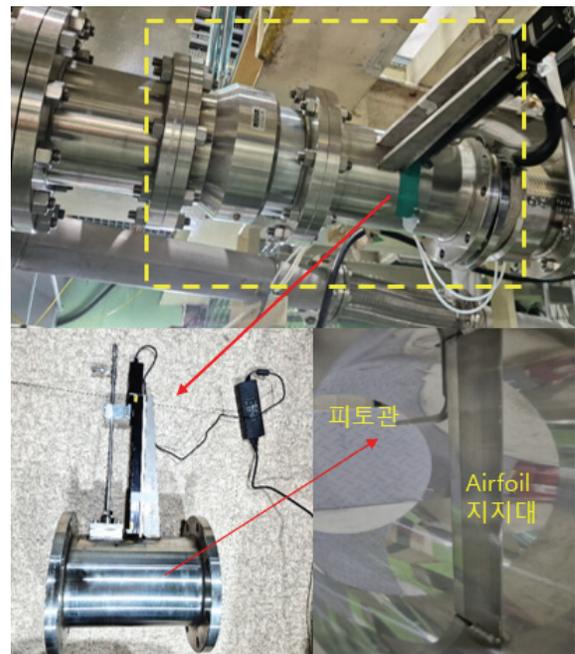


Fig. 5 Picture of velocity measurement apparatus

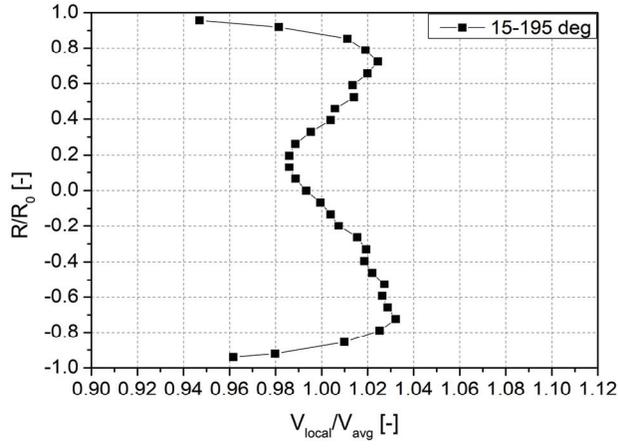
Table 2 Summary of test conditions

Hydraulic Parameters	$\bar{X}$	$\sigma/\bar{X}(\%)$
System pressure, kPa	190.1	0.18
System temperature, °C	59.9	0.09
Cold leg 1 mass flow rate, kg/s	100.0	0.005
Cold leg 2 mass flow rate, kg/s	100.0	0.005
Cold leg 3 mass flow rate, kg/s	100.0	0.005
Cold leg 4 mass flow rate, kg/s	100.0	0.005

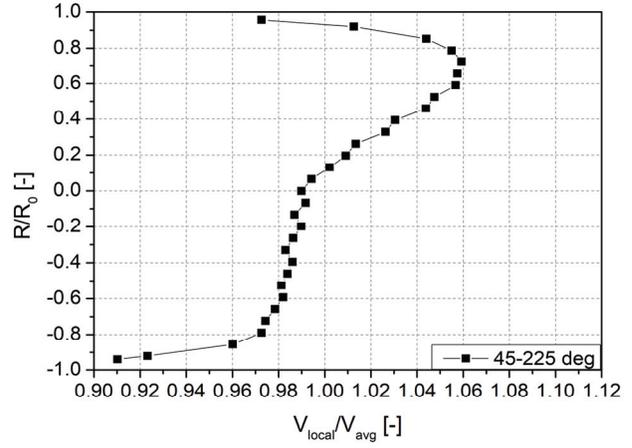
시험조건에 대한 측정 평균값과 변동계수를 Table 2에 함께 나타내었다.

고온관 단면의 유속 분포를 전단면에서 정량적으로 측정하기 위해 Fig. 3과 같이 15°-195°, 45°-225°, 75°-255°,

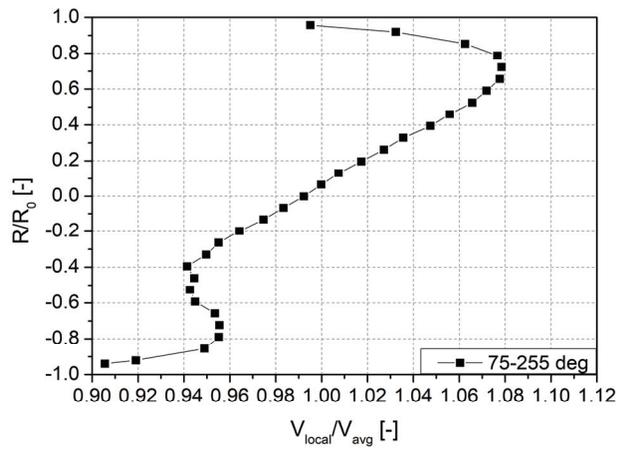
105°-285°, 135°-315°, 165°-345°로 표현되는 총 6개 각도에 대하여 측정부를 선상에서 이동하면서 차압을 측정하였다. 각각의 각도마다 직경 방향으로 30개 지점에서 10 Hz로 60초씩 차압을 측정하여 고온관 내부 정량적인 유속 데이터



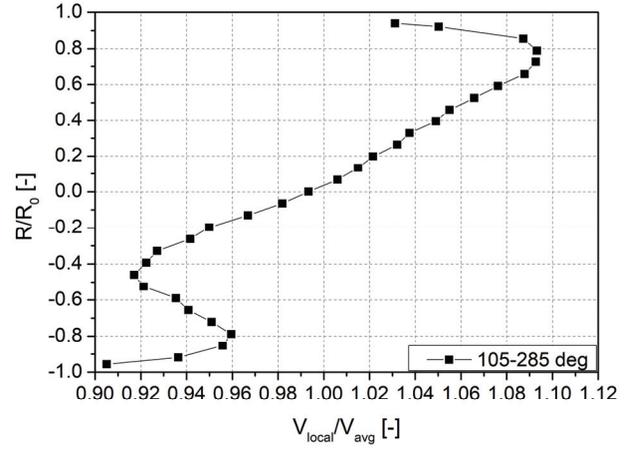
(a) 15°-195°



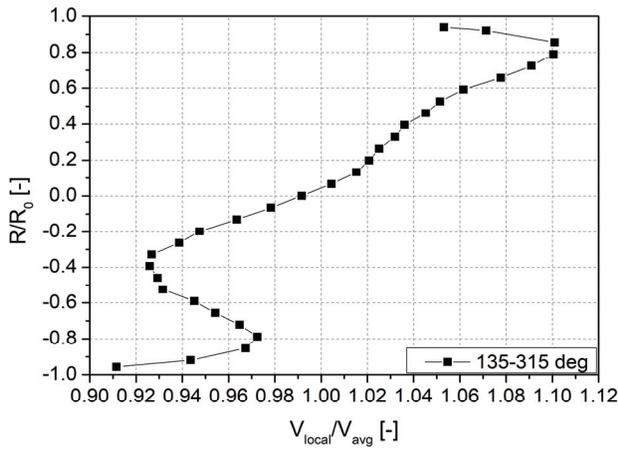
(b) 45°-225°



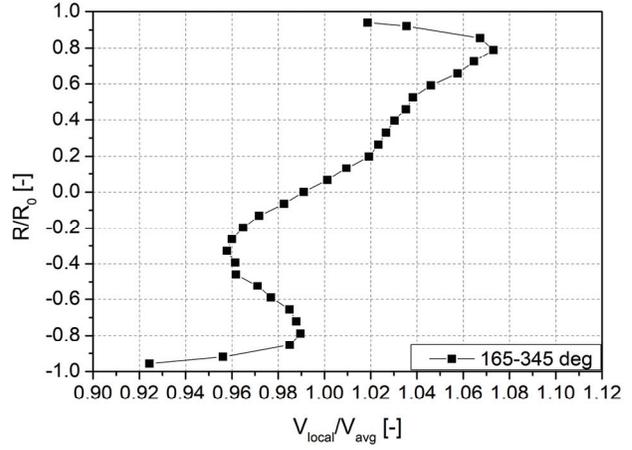
(c) 75°-255°



(d) 105°-285°



(e) 135°-315°



(f) 165°-345°

Fig. 6 Non-dimensional hot leg velocity profiles for varying angle

로 변환하였다.

차압으로부터 산정된 국부 유속은 모든 각도와 지점에 대하여 얻어진 속도의 평균값(식(6))으로 나누어 무차원화 된 속도로 결과를 나타내었다.

$$V_{ratio} = \frac{V_{local}}{V_{avg}} \quad (5)$$

$$V_{avg} = \frac{\sum_{\theta=1}^6 \sum_{k=1}^N V_{\theta,k}}{6N} \quad (6)$$

$\theta$  : 고온관 유속 측정 각도 개수

$N$  : 직경 방향 고온관 측정 위치 개수

### 3.2 측정 결과 및 토의

4-펌프 평형 운전 조건에서 6개 각도에 대해 측정한 고온관 단면에서 무차원 속도 비율 분포를 무차원화 된 고온관 반경에 대하여 Fig. 6과 같이 나타내었다. 고온관 중심은 무차원 반지름이 0이 되는 지점이며, 15°, 45°, 75°, 105°, 135°, 165° 각도는 수평지점에서 위쪽인 양의 반지름 구간을 의미한다.

실험 결과 15°-195° 구간에서는 속도 분포가 위치에 따른 치우침 없이 원점을 기준으로 대칭의 모양을 이루고 있다. 최소, 최대 속도 비율은 최소 속도 비율은 평균 속도에 비해 약 0.95이며, 최대 속도 비율은 평균 속도 대비 약 1.03 정도로 나타난다. 15°-195°를 제외한 나머지 5개 각도 조건에 대하여 무차원 속도 분포는 양의 반경 방향 부근에서 높은 값을 가지며 음의 반경 방향 끝 지점인 고온관 벽면 지점에서 가장 낮은 값을 나타냈다. 이 구간에서 대부분의 최소 속도 비율은 0.90에서 0.93 사이에 위치하였다. 15°-195°를 제외한 조건에서 최댓값은 45°-225°에서 1.06, 75°-255°에서 1.08, 105°-285°에서 1.09, 135°-315°에서 1.10, 165°-345°에서 1.10으로 45°-225° 구간부터 135°-315° 구간까지는 최댓값이 증가했다가 이후 165°-345° 구간에서 감소하는 경향을 확인했다. 양의 반경 방향 부근에서 최댓값을 갖는 조건들 중에서 45°-225° 구간에서는 무차원 속도 비율이 음의 반지름으로 방향으로 진행함에 따라 속도가 점차 감소하는 경향을 나타내었지만 그 이외의 조건들인 75°-255°, 105°-285°, 135°-315°, 165°-345° 구간에서는 무차원 속도 비율이 음의 반지름 방향으로 진행함에 따라 단조 감소하는 것이 아니라 일시적으로 증가했다가 다시 최저점에 도달했다. 고온관 전체에 대한 속도 비율 분포를 평가하기 위해 Fig. 7과 같이 color contour map으로 속도 비율 분포를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 90°~150°, 반경비율 0.6~0.8 주

변 고온관 우측 하단부에서 속도가 가장 빨랐으며, 210°~330°, 반경 비율 -1.0 주변 위치에서는 속도가 가장 낮은 것을 확인하였고, 고온관에서 나온 유동이 한쪽으로 치우쳐 회전 유동을 유발하는 형태로 관측이 되었다.

실제 고온관 에서 예상되는 속도 분포는 상부에서 높고 하부에서는 낮은 분포를 나타낸다<sup>(1)</sup>. 이는 실제 원자로의 경우에는 노심 출력의 고온 영역의 영향과 노심 배열에 위치한 고온관 노즐부의 미세한 gap을 통해 강수부로부터 유입되는

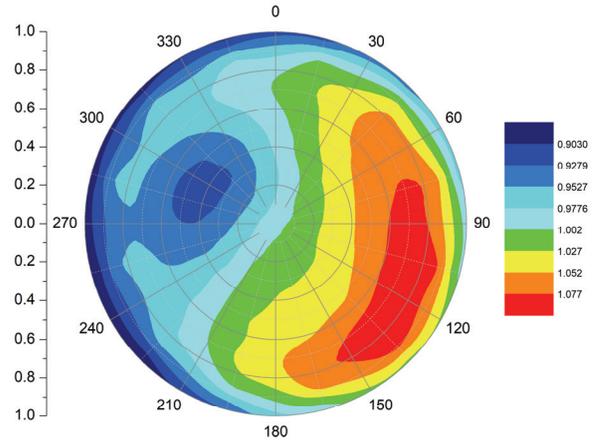


Fig. 7 Contour map of non-dimensional velocity distribution

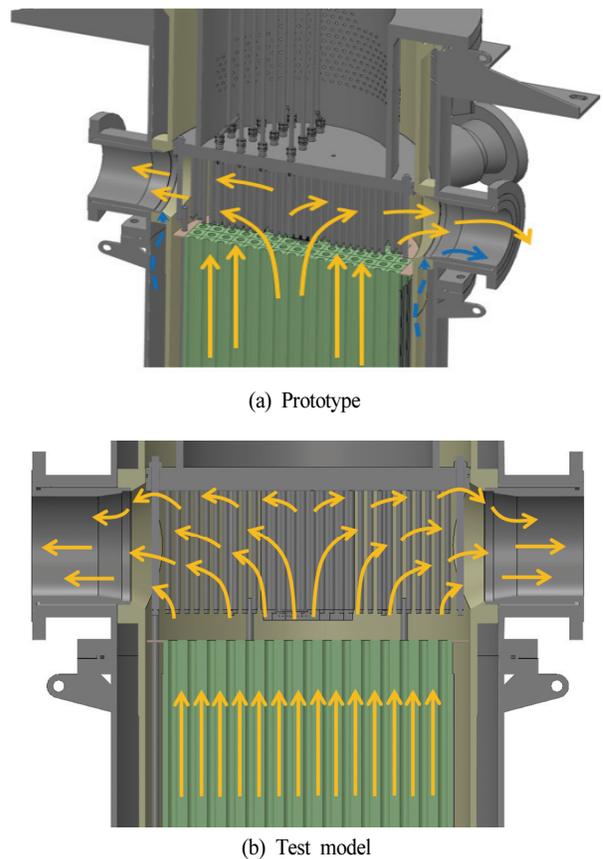


Fig. 8 Flow path around the upper guide structure region

우회 유로를 통한 차가운 냉각재의 영향(Fig. 8, (a))등으로 인한 열출력과 구조물의 형상에 대한 영향 때문이다. 실제 노심유동분포 실험 장치는 원자로 용기로 유입되는 저온관과 고온관의 질량 평형을 만족하기 위해 해당 우회 유로 영역을 모의하지 않고, 별도로 열출력을 모의하지 않으므로 순수 구조물의 형상과 운동량에 대한 영향으로만 유동 방향이 결정되는 차이가 있다. 그러므로 Fig. 7과 같이 속도 분포는 있으나 마치 회전하는 유동처럼 유동이 형성되는 것으로 유추된다. 원자로 용기 상부 넓은 영역에서 급격하게 유동 면적이 줄어든 고온관으로 양분되는 냉각재는 충분한 관성으로 인하여 Fig. 7의 고온관 단면에서 유속 분포는 일정 구간 유지될 것으로 유추된다. 그러므로 본 실험에서 측정된 속도 분포를 활용하여 설계단계에서 보정 인자를 유추하는데 있어 단일 유속 분포를 가정하여 산정하는 기존방식보다 보수성을 경감시킬 수 있는 실험 데이터로 활용 가치는 충분하다고 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 APR1000 원자로의 정상 운전 조건인 4-펌프 평형 운전 조건에서 고온관 유속 측정 실험데이터를 확보하기 위해 한국원자력연구원에 구축된 노심유동분포 실험 장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 고온관 유속 측정부는 고온관 수직 전단면에서 축방향 속도 분포를 정량적으로 측정할 수 있도록 피토-정압관을 활용하여 고안되었다. 총 6개의 각도로 구역을 나누고, 각 각도별 지름선상의 30개의 실험데이터를 측정하여 실증 실험데이터를 구축하였다. 실험결과 고온관의 단면에서는 각도별로 정형화된 패턴은 없지만 모든 유속 결과는 평균값 대비 대략 0.90~1.10의 비율로 유속이 변화하는 분포를 나타내었고, 중심축을 기준으로 분포가 나누어짐을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 국내에서 유일한 모의 실증 실험장치인 노심유동분포 실험 장치를 활용하여 고온관 유속측정 실험을 수행하였다. 본 연구에서 확보한 실증 실험데이터는 원자력

설계 유관기관에 제공되어 기존 균일속도 유량 평가 방법론에서 유발되는 보수성을 경감하는 목적으로 속도 분포를 제공하여 활용될 수 있을 것이라 기대한다. 추후 고온관 내 유속분포 측정 뿐 아니라 본 연구와 별개로 열출력을 고려한 추가 연구 및 방법론 개발은 필요하며, 전산유체역학방법론으로 열출력을 고려한 방법론을 구현하고 검증하는데 있어서도 본 실험데이터는 충분히 활용할 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20217810100010)

#### References

- (1) Yoon-Jae Choe, 2003, "A Study on Distribution Characteristics of Temperature and Velocity in the Hot Leg Pipes for KSNP", Master's thesis, Chungnam National University.
- (2) Jang, H. C., Oh, S. M., Lee, B. J., Cheong, J. S., & Baik, S. J., 2000, "An analysis of the hot leg thermal stratification effect on the hot leg temperature measurement for KSNP", Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Taejeon, Korea, October.
- (3) Jang, H. C., Lee, B. J., Kim, S. H., Cheong, J. S., Baik, S. J., & Lim, C. J., 2008, "A Correlation between the Core Thermal Power Distribution and Hot Leg RTD Temperature.", Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, PyeongChang, Korea, October.
- (4) Kim, H., Jang, H. C., Yune, S., & Park, S., 2017, "A Study on Measuring Hot Leg Temperature with Core Exit Thermocouple in In-Core Instrumentation Guide Tube.", Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Jeju, Korea, May.
- (5) Kim, K., Kim, W.S. Choi, H.S., Seol H., Lim. B.J. Euh. D.J., 2024, "An experimental evaluation of the APR1000 core flow distribution using a 1/5 scale model" Energies, 2714.