

노심하부구조물이 노심유동분포에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

김기환*[†] · 김경문** · 최해섭* · 설효성* · 임병준* · 김우식* · 어동진*

Experimental Study of the Lower Support Structure Effect on the Core Flow Distribution

Kihwan Kim*[†], Kyung-Moon Kim**^{*}, Hae-Seob Choi*^{*}, Hyosung Seol*^{*},
Byung-Jun Lim*^{*}, Woo-Shik Kim*^{*}, Dong-Jin Euh*^{*}

Key Words : APR1000 reactor(APR1000 원자로); Core flow distribution(노심유동분포); Lower Support Structure(노심하부구조물)

ABSTRACT

The flow distribution characteristic at the reactor core is essential for the licensing and design process. An hydraulic test facility was established to simulate the internal flow of the APR1000 reactor at a reduced scale of 1/5. The design concept of the test facility with an applied scaling method was introduced briefly, and the effect of the lower support structure on the core inlet flow distribution was investigated experimentally, as a preliminary test. The flow characteristics were quantified and discussed from the directly measured flow rates of 177 fuel assemblies.

1. 서론

최근 체코 수출을 위한 한국형 원전은 APR1000으로 추진되고 있다. 이는 기존 2009년 아랍에미리트(UAE)에 수출한 APR1400 노형과 비교했을 때, 발전 용량은 줄었으나 신개념의 안전 계통을 추가함으로써 안전성 및 경제성을 강화하여 기술 경쟁력을 높인 노형이다. 최근 한국형 원전을 이집트, 폴란드 등 다양한 국가 등으로 수출하기 위한 노력을 하는 과정에서 원전 설계기술의 중요성과 필요성이 꾸준히 제기되고 있다. APR1000은 국내에서 가동 중인 OPR1000의 노형과 유사하며, 예전 1980년대 미국 컴버스천엔지니어링사(CE)의 SYSTEM 80 노형의 설계기술과 상당부분이 유사하다. 향후 발생할 수 있는 지적재산권의 분쟁을 피하고 한국형 APR1000의 수출 경쟁력을 확보하기 위해서는 독자적인 원전 설계기술을 확보해야 한다.

한국원자력연구원(KAERI)은 2021년부터 APR1000의 노심유동분포에 대한 원전기술을 확보하기 위해 (주)한국수력원자력과 공동연구를 착수하였다. 원자로의 노심 영역에서 복잡 다양한 구조물과 핵연료 집합체의 배치에 따라 분배되는 유동분

포는 핵연료 집합체의 설계와 열적마진(Thermal Margin)을 평가하고 원전의 수력 시스템 설계의 근거로 활용되는 중요한 정보이며, 국내 및 국외 인허가를 위해서는 참조 원전의 특성을 대변하는 실증 실험데이터가 필수적이다.

한국원자력연구원은 2023년에 참조 원전인 APR1000 원전의 크기를 1/5의 선형비로 축소 모델링한 노심 유동분포 실증 실험장치를 구축하였다. 노심유동분포 실험은 원자로 노심부 영역을 대상으로 하며, 입구와 출구 영역에서 유동분포 특성을 대변하는 유량과 압력분포를 정량화할 수 있다.

본 연구에서는 참조 원전인 APR1000과 동일한 유동 특성을 가지도록 수력학적 특성을 보존하는 설계개념을 적용하여 장치를 구축하였다. 노심부를 제외한 APR1000의 원자로 용기의 모든 내부 구조물은 기하학적 형상이 보존되어 제작되었으며, 177개의 핵연료집합체의 번들로 이루어진 노심 영역은 각각의 핵연료집합체를 모의하는 자체 개발된 노심모의기를 이용하여 모델링 하였다. 본 연구에서는 이를 위해 적용한 척도해석 방법론에 대하여 간략히 소개하고, 이를 통해 고온고압의 원전의 운전조건을 저온저압의 실험조건으로 도출하는 과정을 기술한다.

* 한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute)

** 한국핵융합에너지연구원(Korea Institute of Fusion Energy)

[†] 교신저자, E-mail : kiwhankim@kaeri.re.kr



Fig. 1 Schematic of 1/5 scaled reactor vessel

본 연구에서 대상으로 하는 제어 체적은 Fig. 1과 같이 원자로 용기와 고온관 및 저온관의 노즐 일부를 포함하는 영역으로 정의된다. 작동유체가 방사형으로 배치된 4개의 저온관으로부터 원자로 용기로 유입되어 원자로 용기의 내부 영역을 거쳐 순환되고 최종적으로 2개의 고온관을 통해 유출되는 유동이 형성되므로 저온관과 고온관의 노즐이 제어체적의 유동 경계영역에 해당한다.

Fig. 2는 원자로 용기 단면의 개념도로, 원자로 용기의 내부는 크게 하부 플레넘, 노심 영역, 상부 플레넘으로 구분된다. 저온관으로 유입되는 작동유체는 원자로 용기와 노심배럴 사이의 환형 공간인 강수부를 거쳐 하강 유로가 형성되며, 하부 플레넘으로 진입하면서 유동 방향이 급격하게 변한다. 하부 플레넘에는 유동 안정화 기구인 Flow Skirt, ICI 노즐, 노심을 지지하기 위한 하부 구조물(Lower Support Structure) 등으로 구성되어 있다(Fig. 3). 작동유체는 이러한 구조물의 유동 저항과 유동 분배 역할을 수행하는 오리피스 형태의 다양한 Bottom Plate를 지나면서 유동이 점차 안정화되고, 다시 수직 방향으로 유동이 형성되면서 노심으로 유입되는 과정을 거친다.

하부 플레넘으로 유입되는 작동유체는 Fig. 3과 같이 다양한 구조물의 유로를 통해 유입되고, 노심영역 하부에 위치한 구조물의 유동 저항이 균일하지 않으므로 노심으로 유입되는 유량 분포는 서로 동일하지 않다. ICI 노즐과 이를 지지하는 plate, bottom plate와 raised bottom plate 영역에는 무수히 많은 유동홀이 있지만 원주 방향으로 서로 대칭이 아니다. 그러므로 이러한 구조물 특성과 하부 플레넘에서 혼합되는 유동의 모멘텀의 차이로 인하여 노심 유동 분포의 특성이 달라지게 된다.

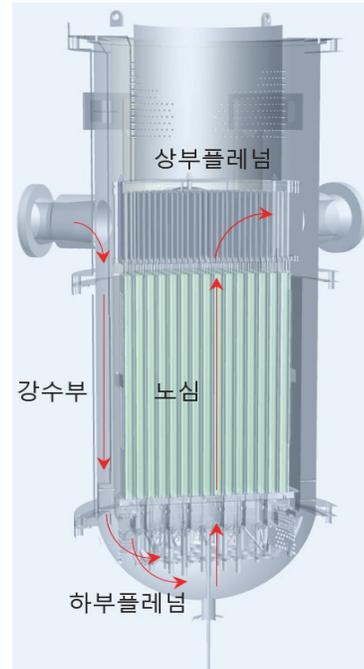


Fig. 2 Schematic of flow path in reactor vessel

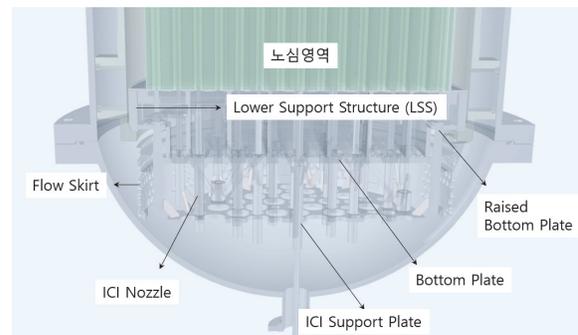


Fig. 3 Schematic of lower plenum region

노심유동분포 실험은 크게 3종류로 나누어진다. 원자로 용기로 유입되는 4개의 저온관에서 유입되는 유량비가 모두 동일한 4 펌프 평형 운전조건, 4 펌프로 운전이 되나 4개의 저온관에서 유입되는 유량비가 서로 차이가 있는 4 펌프 비평형 운전, 마지막으로 1대의 펌프가 고장난(Single Failure) 사고 상황을 모의하는 3 펌프 운전으로 분류된다. 4 펌프 비평형 운전은 4펌프 평형 운전 조건 대비 저온관간의 유량비 차이가 5%, 15 %로 불균일한 정도에 따라 2가지의 경우로 나누어진다. 여기서 15 %의 비평형 운전조건은 4 펌프로 운전하는 조건 중에서 하부 플레넘에서 유동 분포의 교란을 일으키는 가장 보수적인 조건이라고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 설계과정에서 필요로 하는 실험요건에 대한 실험을 수행하기에 앞서 상기와 같은 하부 플레넘에 위치한 노심하부구조물이 노심유동분포에 미치는 영향을 사전에 분석하는 것이다. 이를 위해 4 펌프 평형운전 조건에 대한 실험을 수행하고 그 결과를 4 펌프 15 % 비평형 운전조건

에서 수행한 결과와 비교하였다. 비평형 운전의 경우 하부 플레넘 구조물의 비대칭성의 영향을 확인하기 위해 4개의 저온관으로 유입되는 유량비 차이를 원주 방향으로 경계조건을 달리하면서 4종의 실험을 수행하였다. 177개의 핵연료 집합체를 모의하는 노심모의기에서 취득한 유량 정보로 노심 입구에서 각 핵연료집합체 위치별 유동분포를 비교 평가하여 그 특성을 정량화하고자 하였다.

2. APR1000 유동분포 시험장치

한국원자력연구원(KAERI)에서는 한국형 원전 APR+ 노형에 대하여 노심유동분포 실험을 위해 1/5 척도비를 가지는 노심유동 및 압력분포 실험장치(ACOP: APR+ Core Flow & Pressure)를 구축하였고 다양한 실험조건에서 실험을 성공적으로 수행한 바가 있다^(1,2). 본 연구에서는 기존에 구축된 실험장치의 설계개념을 그대로 준용하였으며, 주요 실험대인 원자로 용기를 APR1000을 모의할 수 있도록 제작하여 적용하였다. 본 절에서는 주요 실험대에 적용된 척도해석 방법론과 실험대에 대하여 간략히 기술한다.

2.1 척도해석

APR1000의 고온고압의 운전조건에서 순환하는 유동의 수력학적 특성을 모의장치에 그대로 모사하기 위해서는 상사성이 보존되어야 하며, 공학적으로 기하학적 상사성, 운동학적 상사성, 역학적 상사성이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 주요 관심사가 노심 영역이므로 노심에서 상사성을 만족하는 설계를 하였다.

기하학적 상사성은 APR1000 원자로와 실험 장치가 모든 선형 치수가 세장비를 유지한 상태에서 일정한 비로 축소되는 경우 같은 기하학적 형태로 보존된다. 본 실험장치에서는 모든 내부 구조물을 1/5의 선형 축소비로 축소하여 제작하였다. 동적 상사성은 원자로와 실험장치가 유체의 체적요소에 작용하는 힘이 동일한 비를 가질 때 얻어진다. 다만 기하학적 상사를 이룬다고 해서 운동학적 상사를 이루지 않으므로 본 연구에서는 역학적 상사가 노심에서 보존되는 방법을 적용하였다.

APR1000의 노심은 15×15의 배열로 177개의 HIPER (High Performance with Efficiency and Reliability) 핵연료 집합체로 구성되며⁽³⁾, 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 자체 개발된 동수의 노심모의기로 대체된다. 노심에서 역학적 상사가 보존되기 위해서는 식 (1)과 같이 오일러수가 1/1로 보존되어야 한다. 아래첨자 P, M은 각각 참조원전 및 실험장치를 나타내며, ρ는 밀도, ΔP는 축방향 압력강하, V는 노심에서 핵연료 집합체 유로를 지나는 속도이다. 정상운전 조건에서 APR1000의 노심을 지나는 속도 대비 노심모의기에서

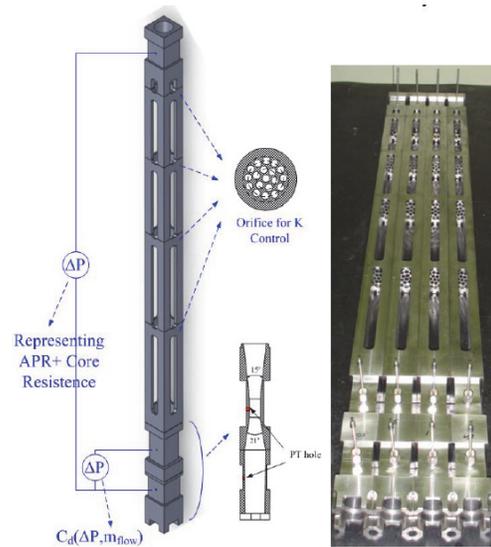


Fig. 4 Schematic and picture of core simulator

Table 1 Summary of scaling ratio in the core region

	APR1000 Fuel Assembly	Scaling Ratio
길이 (mm)	L	1/5
유동(Flow) 단면적(m ²)	2.352E-02	1/25
속도 (m/s)	5.09	1/2
Re	5.41E+05	1/3.14
온도 (°C)	311.6 (노심 입출구 평균)	
밀도(kg/m ³)	701.1	1.402
점도(Ns/m ²)	8.39E-05	5.57
출구압력 (Mpa)	15.513	
질량유량 (kg/s), FA당	83.90	1/37.75
압력강하 (kpa)	161.34	1/2.88

속도가 1/2이 되도록 설계하였고, 이 때 Re수의 비는 대략 1/40이나 유동영역은 원형과 같이 완전난류영역에 속한다. 실제 참조 원전의 압력강하값을 알고 있으므로 저온저압 조건에서 노심모의기에 인가되어야 하는 축방향 압력강하와 유량은 척도해석을 통해 산정 가능하다. 본 장치에 적용된 척도해석의 비를 요약하면 Table 1과 같다.

$$\frac{Eu_P}{Eu_M} = \frac{|\Delta P/\rho V^2|_P}{|\Delta P/\rho V^2|_M} = 1 \quad (1)$$

노심모의기는 Fig. 4와 같이 입구에 벤츨리 부가 있으며, 벤츨리부에서 측정된 차압을 이용하여 유량을 측정한다. 정확한 유량을 측정하기 위해서는 각 노심모의기 벤츨리 부의 정확한 유량계수 값이 있어야 하며, 177개의 노심모의기에 대하여 별도의 교정 실험⁽⁴⁾을 통해 얻은 유량계수를 이용하

였다. 또한 핵연료 집합체는 인접 핵연료 집합체와 유로가 자유롭게 형성되어 있으므로 횡유동이 존재하며, 이에 대한 특성이 노심모의기에서도 보존되어야 하므로 횡유동 특성 실험⁽⁵⁾을 수행하여 원형과 동일한 특성을 가지도록 제작되었다.

2.2 주요 실험대

노심의 핵연료 집합체를 제외한 모든 내부 유로는 기하학

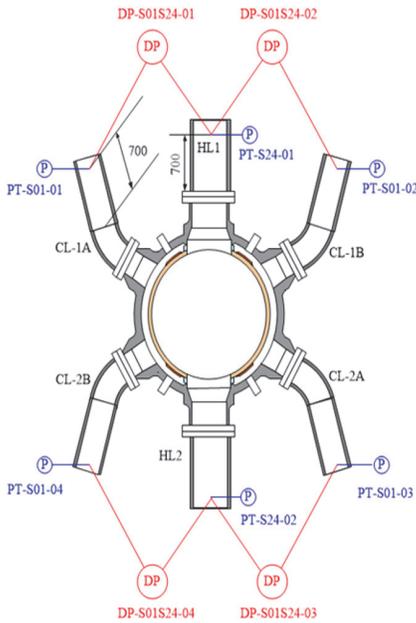


Fig. 5 System configuration of the test facility

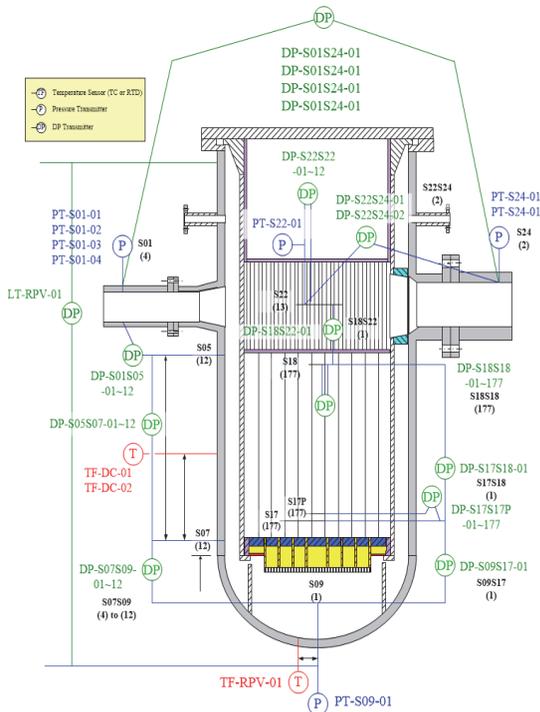


Fig. 6 Schematic of instrumentation of reactor vessel

적 상사성을 고려하여 냉각수의 유동특성을 보존할 수 있도록 동일하게 제작되었다. Fig. 5와 같이 실제 원자로의 용기와 입출구 노즐을 포함한 배관 일부를 제어체적으로 하고, 원자로 용기는 상부 플레넘을 제외한 내부구조물을 포함한 전 영역을 대상으로 모의하였다. 저온관 및 고온관은 주요 경계조건이므로 온도, 압력, 유량의 기본적 상태량을 측정할 수 있도록 하였고, 저온관을 통해 유입되는 냉각재는 강수부, 하부 플레넘, 노심, 상부 플레넘을 거쳐 고온관으로 유출되는데, 순환되는 유로에 대하여 주요 구조물 사이의 차압을 각각 측정함으로써 압력강하 특성을 구간별로 파악할 수 있도록 계측시스템을 구비하였다. Fig. 6은 원자로 용기 내부에 설치한 계측기기의 개략도를 나타낸다. P는 정압, DP는 차압, T는 온도 계측지점을 나타내며, S01~24는 임의로 부여한 계측지점(Station)을 일련번호로 구분하여 나타낸 것이다.

3. 노심입구 유량분포 실험

3.1 실험조건 및 절차

유동분포 실험은 3 bar 이내, 60°C 조건에서 4개의 저온관을 통해 유입되는 유량을 경계조건으로 하는 정상상태 실험이다. 본 연구에서는 4 펌프를 이용하여 4개의 저온관에 동일한 유량이 인가되는 평형운전 조건(4P Balanced Flow)과, 15% 유량의 차이가 있는 비평형 운전조건(4P Unbalanced Flow)에 대하여 실험을 수행하였고 이를 요약하면 Table 2와 같다. 실험장치의 온도와 압력이 일정하게 유지된 정상상태에 도달한 후, 노심모의기 벤츄리 부의 차압을 측정을 시작하며, 90초간 10hz로 데이터를 취득하여 유량값으로 산정한다. 차압계는 Rosemount사의 3051S 타입으로 Reading 값의 0.61%의 정확도를 가진다. 계측기기의 우연오차는 95%의 신뢰도로 평가하였고, 기기오차와 우연오차의 Root Mean Square의 총 불확도는 최대 1.038%로 나타났다.

3.2 노심입구 유동분포

Fig. 7은 4 펌프 평형운전조건에서 177개의 노심모의기의 평균유량 대비 각 개별 노심모의기의 유량으로 나타낸 무차

Table 2 Test Matrix

TEST	유량비	저온관 유량조건			
		CL1A	CL1B	CL2A	CL2B
4P 평형		0.250	0.250	0.250	0.250
4P 비평형	1	0.250	0.250	0.232	0.268
	2	0.250	0.250	0.268	0.232
	3	0.232	0.268	0.250	0.250
	4	0.268	0.232	0.250	0.250

원화된 유량 분포를 평면도로 나타낸 것이다. 최대 1.12 최소 0.87로 각각 평균유량 대비 87~112 % 범위에서 유량이 분포하는 것을 의미한다. 여기서 유량 분포의 범위가 좁으면

좁을수록 설계과정 및 안전 해석을 수행할 때 여유도 (margin)를 확보할 수 있다. Fig. 7에서 보듯이 주로 외곽 영역의 유량이 높게 나타나고, 안쪽 영역의 유량이 낮게 나타난다. 이는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 냉각재가 하부 플레넘에서 Flow Skirt를 지나고 바로 수직 방향으로 Raised Bottom Plate를 통과하여 유입되는 유량은 유동 저항의 영향이 작으므로 높은 유량을 나타내고, 하부 플레넘 중심 영역까지 모멘텀으로 인하여 충분히 하강한 유동은 상향 유동 시 차례로 ICI Support Plate와 Bottom Plate 등을 거쳐 유동 안정화 과정을 거치므로 상대적으로 낮은 유량을 나타낸다. ICI 노즐은 내부 영역에 배치되어 있지만 대칭 형상은 아니다. 또한 ICI 노즐을 지지하고 있는 구조물, ICI Support Plate, Bottom Plate, LSS (Lower Support Structure) 구조물 또한 전 단면에 걸쳐 대칭의 형상이 아니다. 그러므로 이러한 비대칭 구조물의 영향이 노심 유동분포에 미치는 영향을 살펴보기 위해 비형형 운전조건에서 Table 2와 같은 조건으로 추가 실험을 수행하여 무차원화된 유량 분포를 비교하였다.

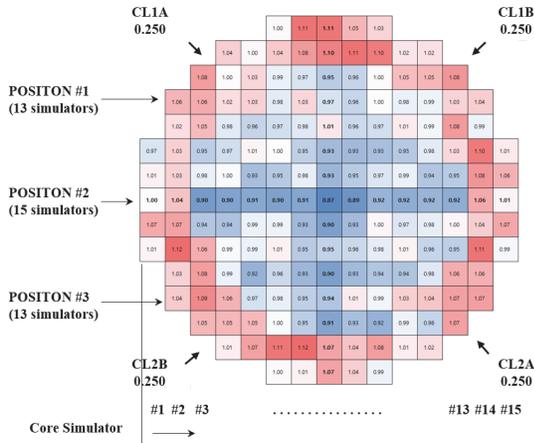
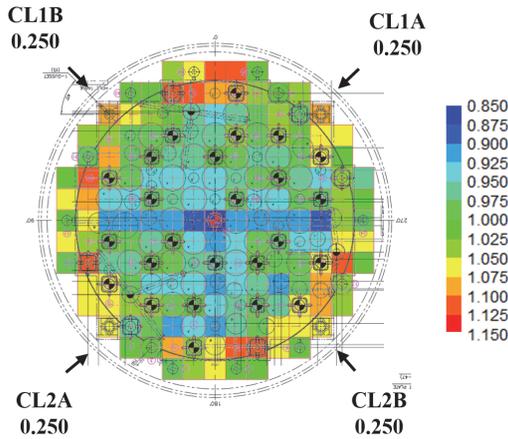
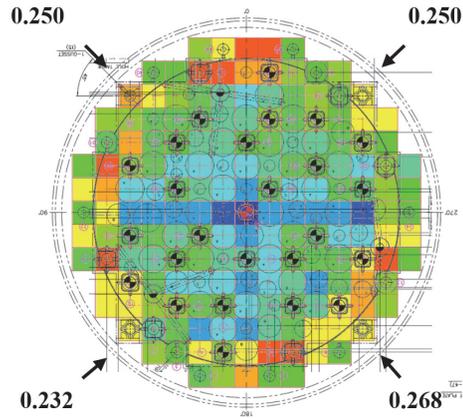


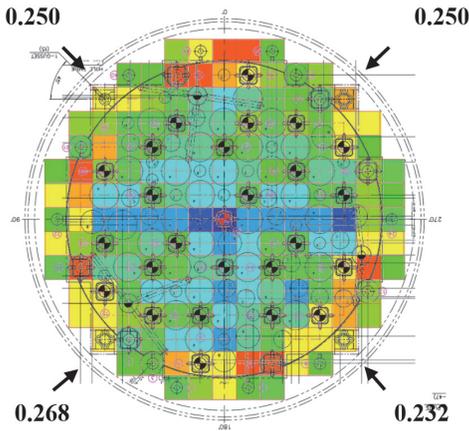
Fig. 7 Non-dimensionalized core inlet flow rate distribution of 4P balanced flow condition



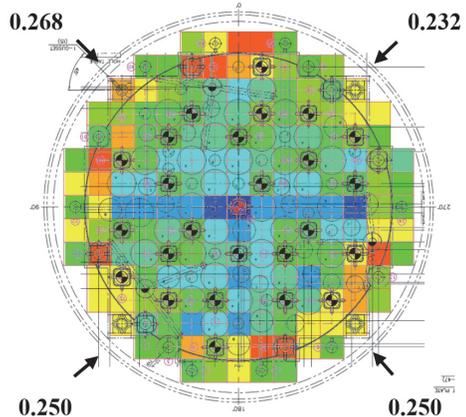
(a) 4 P balanced flow



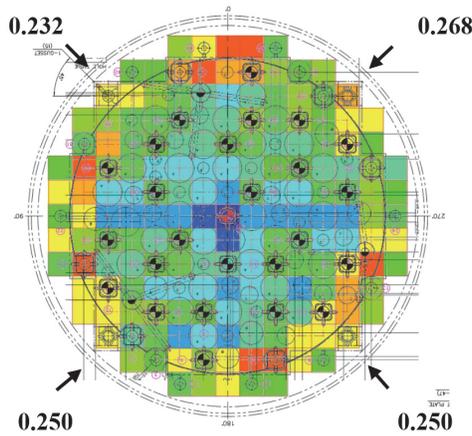
(b) 4 P Unbalanced flow #1



(c) 4 P Unbalanced flow #2



(d) 4 P Unbalanced flow #3



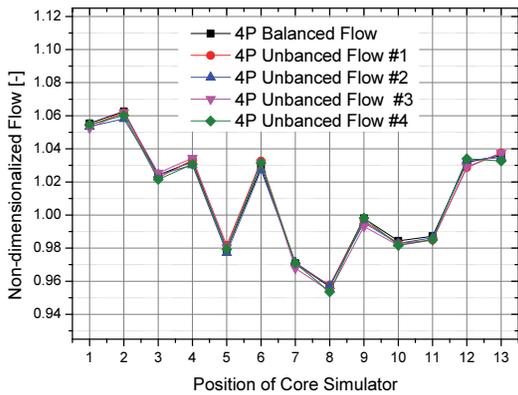
(e) 4 P Unbalanced flow #4

Fig. 8 Comparison of non-dimensionlized core inlet flow distribution varying test conditons

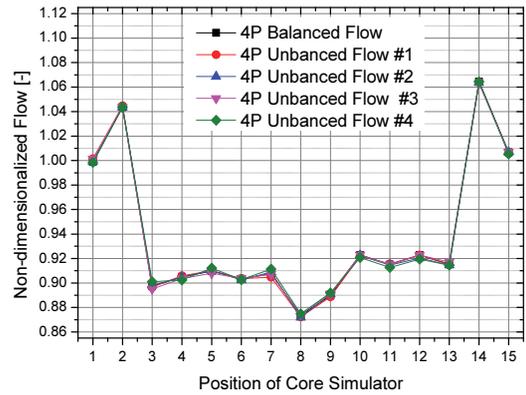
냉각재가 노심영역에는 도달하기까지 하부 플레넘의 복잡 다양한 구조물을 거쳐야 한다. 하부 플레넘에서는 노심으로 유입되는 상향 유동이 발생하므로, 직관적으로 이해하기 쉽도록 유동 방향과 일치시켜 배면도로 colored contour map 으로 도시하면 Fig. 8과 같다.

Table 2의 시험조건에서 4개의 저온관의 절대적인 유량의

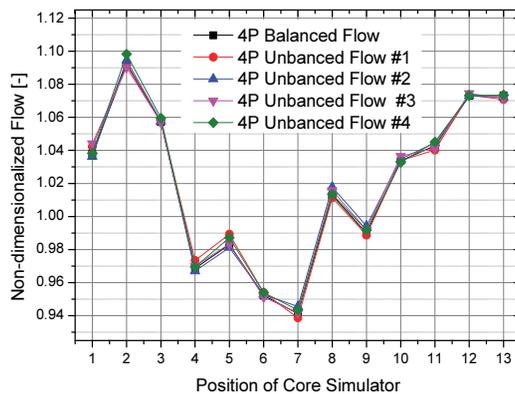
합은 실험의 종류와 상관없이 400 kg/s로 동일하고, 단지 각 저온관의 유량비만 다르다. Fig. 8 (a)의 4 펌프 평형운전 조건의 결과와 나머지 비평형 운전조건 결과인 (b)~(e)와 비교해 보면, 특정 저온관에서 높은 유량이 인가가 되더라도 해당 노심부의 영향은 크지 않다. 마찬가지로 낮은 유량이 인가가 되더라도 (a)의 결과와 비교했을 때 큰 차이가 발생



(a) Position #1



(b) Position #2



(c) Position #3

Fig. 9 Non-dimensionlized flow rates profiles along the positions

하지 않는다. 저온관에서 유입되는 유량의 차이는 강수부를 통해 하강하면서 하부 플레넘으로 유입되기 전까지는 유량에 따른 모멘텀이 유지가 되나, 하부 플레넘을 지나면서 그 영향이 감소됨을 알 수 있다. 결국 입구 유량의 차이가 15% 나더라도 상부 및 하부 좌우 측면에서 유의미한 노심 유동분포 차이가 없으므로 대부분의 유량이 충분히 혼합된다고 할 수 있다.

한편 다양한 하부 플레넘의 구조물들은 대칭 형상이 아니므로 유량의 차이에 따른 혼합에는 영향을 미치지 않으나, 고유한 유동 저항으로 작용함으로 그 차이가 있을 수 있다. Fig. 9는 Fig. 7의 노심부 단면을 기준으로 수평 방향에 따라 각 유량의 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 9에서 보듯이 모든 위치에서 좌우 대칭의 분포를 나타내지는 않는다. 다만 Fig. 9의 (a)는 좌측 유량이 높게 나오고 (c)는 반대의 경향을 나타내면서 전 단면의 분포도에 대하여 균형을 이루고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9 (b)는 중심부의 유동분포를 나타내며 앞서 (a)와 (c)에 비하여 다소 고른 분포도를 보여준다. 이는 중앙부로 갈수록 ICI 노즐 등의 구조물이 상대적으로 없어 유동 교란이 최소화 되어 안정화된 것으로 유추된다. 왜냐하면 그림 (a)와 (c)의 분포에서 인접 유량보다 상대적으로 큰 유량값이 나타나는 위치와 ICI 노즐의 위치가 대략 일치하기 때문이다. 이는 ICI 노즐이 위치한 곳은 ICI 노즐을 지지하는 구조물과 유동홀이 동시에 넓게 가공되어 있기 때문에 상대적으로 유동 저항이 작다고 할 수 있다. 전체적으로 중심부에서 좌우 유동 분포의 편차는 $\pm 1\%$ 정도의 차이가 있고, 이는 비대칭적인 LSS의 구조물의 영향에 기인한 것으로 유추된다. 다만 ICI Plate 외부 영역과 내부 영역은 그 차이가 확연히 남을 확인할 수 있다. 본 실험 결과를 통해 중심부 영역에서 유량이 가장 낮게 나타남을 알 수 있으며, 이는 강수부에서 하부 플레넘으로 급격하게 냉각재가 유입되면서 유동 방향이 변경되면서 플레넘 형상에 기인한 와류 발생으로 인해 실제 하부 플레넘 중심부까지 도달하는 유량이 작기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 APR1000 노형에서 독자적으로 확보되지 않은 노심유동분포의 실증데이터를 확보하기 위해 척도해석을 통해 1/5 선형비로 축소 모의한 실험장치를 구축하였다.

노심에서 역학적 상사성을 보존하기 위해 노심모의기와 핵연료 집합체의 오일러수가 동일하도록 실험조건을 적용하였으며, 3 bar, 60 °C 조건에서 정상상태 실험을 수행하였다. 하부 플레넘에서 다양한 구조물이 노심유동분포에 미치는 영향을 분석하기 위해 4 펌프 평형 및 비평형 운전조건을 포함한 5종류의 실험을 수행하였다. 핵연료집합체의 위치와 동수인 177개의 노심모의기 벤츄리 부를 활용하여 개별적으로 유량을 측정하였고, 실험 결과 LSS의 bottom plate, ICI 노즐 위치 등에 따라 유동 특성이 다름을 확인하였다. 본 실험 결과는 향후 수행 예정인 실증실험 결과를 분석하는데 활용될 예정이다.

후 기

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

References

- (1) Euh, D.J., Kim, K.H., Youn, Y.J., Bae, J.H., Chu, I.C., Kim, J.T., Kang, H.S., Choi, H.S., Lee, S.T., Kwon, T.S., 2012, "A flow and pressure distribution of APR+ reactor under the 4-pump running conditions with a balanced flow rate", Nuclear and Technology, Vol. 44, pp. 735-744.
- (2) Kim, K., Euh, D.J., Chu, I.C., Youn, Y.J., Choi, H.S., Kwon, T.S., 2013, "Experimental study of the APR+ reactor core flow and pressure distributions under 4-pump running conditions," Nuclear Engineering and Design, Vol. 265, pp. 957-966.
- (3) Suh, J.M., Park, N.G., Jeon K.L., Hwang, S.T., 2012, "Development of a Hi per PWR Fuel assembly for OPR1000 and APR1400", Proceedings of the 18th Pacific Basin Nuclear Conference, Busan, Korea, 18-23 March.
- (4) Kim, K., Chu, I.C., Euh, D.J., Kwon, T.S., 2012, "Calibration tests of fuel assembly simulator of APR+ reactor", Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Kyungju, Korea, 25-26 October.
- (5) Kim, K., Chu, I.C., Choi, H.S., Euh, D.J., Kwon, T.S., 2012, "Cross flow tests of APR+ core simulator", Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Kyungju, Korea, 25-26 October.