

일체형원자로 모듈형 증기발생기 자연대류 현상 파악 연구

이상민, 김재학, 이상원, 박군철
서울대학교
서울시 관악구 신림동 산 56-1

요약

중소형 일체형 원자로의 자연대류 실험 및 해석을 통해 일체형 원자로의 자연대류에 의한 잔열 제거 기능의 특성 및 피동 안전성을 파악하였다. 이를 위해 일체형 원자로 축소 실험장치를 이용한 자연대류 실증 실험을 수행하였으며, 실험 결과를 RETRAN-03와 COMMIX-1B 코드 해석 결과와 비교, 검증하였다. 실험 결과 일부 증기발생기의 열제거 기능 상실이 발생한 경우에도 노심으로 유입되는 냉각재의 온도가 균일하게 분포하여 피동 잔열 제거가 원만히 일어남을 알 수 있었고 해석 결과와 일치하였다.

1. 서론

비원전 분야에 원자력 이용 확대를 위해 IAEA를 중심으로 지역난방, 열병합발전, 해수 담수화 및 추진기관에 사용될 수 있는 중소형 원자로의 개발이 원자력 선진국에서 활발히 추진중이며 개도국들도 크게 관심을 보이고 있다. 우리나라에서도 원자력 중장기 연구계획에 의해 한국 원자력 연구소에서 330 MWt 일체형 중소형로 SMART(Small and Medium Advanced Integral Reactor)를 개발중이다^[1]. 이는 그 목적상 고도의 안전성을 요구하여 기존 루프형 원전에서 발생 가능한 LOCA 사고와 같은 대형 사고를 방지하고 피동형 원전의 안전성을 극대화하기 위해 1차계통의 중요한 계통을 압력용기 내에 포함하는 일체형 원전이 제안되고 있다.

본 연구에서는 중소형 일체형 원자로에 대한 자연대류 실험 및 해석을 통하여 일체형 원자로의 자연대류 특성 및 피동 안전성을 파악하기 위하여 SMART를 모사한 일체형 원자로 축소 Loop 제작 및 자연대류 실험, 그리고 RETRAN-03^[2]와 COMMIX-1B^[3] 코드를 이용하여 실험장치에 대한 해석을 수행하였다. 특히, 여러 가지 사고 조건 모사를 위해 8개의 증기발생기 중 일부 Module의 냉각 기능 상실시 발생하는 현상을 관찰하였다. 이와 같은 해석 및 실험 연구에 의해 얻어진, 통상의 기존 분리형 원자로와는 다른 일체형 원자로에서의 자연대류 특성 및 여러 가지 현상에 대한 연구 결과는 앞으로의 중소형 일체형 원자로 및 선박용 원자로의 설계에 있어서 매우 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 자연대류 실험

2.1 실험장치

자연대류 현상에서 가장 중요한 구동력은 loop 내 온도차에 의한 부력항이고 이것은 높이와 직접적으로 연관이 있다. 본 실험에서는 Ishii 등에 의해 제안된 scaling 방법으로 원자력 연구소에서 개념설계중인 소동력 일체형 원자로 SMART를 모사하였다^[4]. 전체 길이 비(λ)를 1/2, 유로의 단면적 비(σ)를 약 1/100로 설계하였고 사고 후 잔열을 부피 비와 전열 용량을 고려하여 최대 출력을 40kW로 결정하였다. SMART는 일체형PWR 방식이므로 일차측은 단상유동이고 증기발생기를 관통하는 이차측은 증기 발생기 입구에서는 단상이고 출구에서는 과열증기이지만, 본 실험에서는 일차측의 거동파악에 주안점을 두고 이차측을 단상으로 유지하고 있으며 이런 이유로 실험장치의 압력은 대기압 상태를 유지하였다.

실험장치는 노심 구조물과 증기발생기 등을 포함한 원자로 용기와 2차측 냉각수 양을 조절하기 위한 flowmeter가 장착된 밸브장치로 구성되어 있다. 원자로 용기의 단면은 그림 1에 나타내었으며 총 길이는 3190mm이며 외경은 355.2mm, 노심 내경은 165.2mm이다. 용기내에는 전열봉을 포함한 노심구조물과 8개의 모듈형 helical coiled 증기발생기가 장착되어 있다. 노심은 내경이 165.2mm, 높이가 2870mm, 두께가 3mm인 스테인레스 스틸 파이프를 이용하였다. 그리고 노심 구조물의 윗부분에서 약 200mm 아래부분에 7자 모양의 2인치 pipe를 양쪽에 설치하여 전열봉에서 가열된 일차냉각수가 지나고 고온관을 모사하였다. 고온관을 지난 일차냉각수는 증기발생기로 균일하게 유입될 수 있도록 만들어진 상부확산판을 거쳐 증기발생기를 통과한다. 증기발생기는 SMART에 사용될 모듈형 helical coiled 증기발생기를 모사하기 위하여 3/8인치 동관을 이용하였고 모듈의 개수는 모두 8개이다. 유로는 증기발생기 내부로만 흐르며 바깥쪽 물과 차단되도록 알루미늄 판을 이용하여 제작되었고 전체 열전달 면적(heat transfer area)은 2.234 m^2 이다.

그리고 자연대류 유량은 노심에서 연결된 두 개의 고온관 부분에서 초음파 유량계로 측정하였으며 증기발생기 내부, 전열부상부, 노심상부의 고온관 입구, 원자로 용기 하부의 온도를 측정하였다.

2.2 실험 조건 및 결과

실험은 노심 출력 40 kW, 증기발생기 2차측 유량이 48 lpm인 경우 증기발생기가 모두 정상 작동 조건 및 일부 증기발생기 열제거 기능 상실시에 대한 실험을 수행하여 자연순환 유량과 노심 및 증기발생기 입출구에서의 온도차 변화를 살펴보았다. 실험결과 온도 및 유량은 표 1에서 요약하여 보였고 시간에 따른 온도와 유량의 경향을 그림 3에서 6에 나타내었다.

노심 출력 40 kW, 증기발생기 2차측 총유량 48 lpm일 때 모든 증기발생기 모듈이 정상적으로 열제거 기능을 가진 경우 전체적인 자연순환 유량은 약 35 lpm, 노심입출구 온도차는 17°C 정도의 값을 가졌다. 또한 여러가지 증기발생기 기능 상실 조건하의 실험에서 8개 증기발생기 모듈 하단으로 부터 150mm 떨어진 곳에서의 온도가 증기발생기 기능 상실 조건과는 관계없이 온도차가 없는 것으로 측정되었다. 이러한 현상은 노심에서 가열된 유체가 정상작동하는 증기발생기를 통과하는 경우에 열을 제거당하게 되고 그로 인해 상부 확산판을 거친 유체가 그쪽 방향으로 대부분 유로를 형성하게 되는 반면, 기능 상실한 증기 발생기 쪽으로는 유체의 흐름이 거의 생기지

않음으로 해서 나타나는 것으로 파악된다. 표 1에서 실험 b,c의 1,2,8번 증기발생기와 4,5,6번 증기발생기가 기능을 상실한 비대칭적인 기능 상실 조건의 경우 두 개의 고온관에서 생성되는 유량이 차이가 남을 알 수 있으며 고온관 1과 2에서의 유량이 약 1.5 lpm 정도 차이를 보이고 있다. 이것은 앞에서 언급한 대로 1,2,8번 증기발생기가 정상작동하지 않는 경우 이를 통과하는 유량이 4,5,6번 증기발생기를 통과하는 유량에 비해 작기 때문에 정상상태에 도달하게 되면 이와같은 유량차이가 형성되는 것으로 판단된다. 또한 실험 b에서 3번 증기발생기의 2차측 유량을 차단함으로써 열제거 기능을 상실한 경우와 3번 증기발생기가 정상작동하는 경우의 증기발생기 입, 출구 및 내부에서의 온도 측정 결과를 비교해 보면 기능 상실한 모듈의 경우에도 정상 작동되는 증기발생기와 마찬가지로 증기발생기 내부의 온도분포를 그대로 유지하고 있음을 볼 수 있다.(그림3)

3 실험장치 해석

일체형 원자로 자연순환 특성 파악을 위한 수치해석적 연구와 해석 도구의 개발을 위해 본 연구에서는 RETRAN-03와 COMMIX-1B를 이용하여 여러 가지 조건 하에서의 유동장 및 온도장 상세해석을 수행하였다.

먼저 RETRAN-03 코드를 상온, 대기압 상태에 적합하도록 개선하였으며, 또한 헬리컬 코일 증기발생기에 적합한 Zukauskas 열전달 모델을 추가하였다^[9]. 실험장치와 동일한 조건 하에서의 해석을 위해 모듈형 증기발생기 8개와 각각의 증기발생기 코일을 모델링하였으며, 노심과 증기발생기 부분을 각 높이 방향으로 3개의 제어체적으로 나누었다. 증기발생기가 모두 정상작동하는 경우 1차계통 유량은 25 lpm 정도가 되었고, 노심 입출구 온도차는 약 17℃ 정도로 나타났다. 정상상태 도달 후 고온관 1 아래에 위치한 증기발생기 모듈 1번과 2번의 열제거 능력이 상실된 경우에 대한 계산 결과, 기능 상실된 증기발생기 모듈로는 1차 냉각수의 흐름이 없어지고, 나머지 증기발생기 모듈로 1차 냉각수가 흘러들어가는 현상을 보였다.

유동장 상세해석을 위한 COMMIX-1B 계산에서는 이용하여 원통형 좌표계에서 반경 방향으로 7-11개, 방위각 방향으로 8-40개, 축방향으로 42-65개의 노드를 이용하여 계산을 한 후 최종적으로 반경 방향 7개, 방위각 방향 8개, 축방향 42개의 노드를 채택하였다. 증기발생기가 모두 정상작동하는 경우 열출력 40 kW일 때 전체 유량은 약 40 lpm, 노심과 증기발생기 입출구 온도차는 약 15℃ 정도로 나타났으며 고온관 바로 아래에 위치한 증기발생기로의 유량이 다른 모듈로의 유량의 2배 정도로 나타났다. 증기발생기 모듈 1개 또는 2개의 열제거 기능 상실 조건에서는 열제거 기능이 상실된 증기발생기로는 자연순환 유량이 형성되지 않았으며 전체 유량은 큰 변화없이 나머지 증기발생기로 흐르는 유량이 고르게 증가하였다. 따라서 증기발생기 출구에서의 온도차는 1℃ 미만이며 노심 입구에서는 거의 동일한 온도분포를 갖는다. 기능 상실된 증기발생기 모듈로 유량이 형성되지 않는 원인을 살펴보면, 정상 작동되는 증기발생기에서의 차압과 기능상실된 증기발생기에서의 차압이 동일하게 되는 시점에서 각 모듈로의 유량이 결정된다. 따라서, 각 증기발생기 입출구에서의 차압이 일정하다고 가정할 때, 전체유량과 열제거량, 그리고 압력손실계수에 의해 각 증기발생기 모듈의 유량이 결정될 수 있으며 이러한 관계에 의해 기능 상실된 모듈의 유량이 거의 형성되지 않는 결과가 나타날 수 있다. 따라서, 여러 가지 사고 조건에 대한 계산 결과 그림 4와 같이 확산판 영역과 다운커머 영역에서 냉각수의 혼합이 용이하게 이루어짐을 확인하였으며, 노심 입구로의 온도 분포도 균일한 것을 알 수 있었다.

해석 결과 전체적인 유량에 있어서는 실험 결과보다 20% 정도 많았으며, 반대로 온도차는 작게 계산된 것을 알 수 있다. 이것은 시스템 전체에 있어서의 유로 저항이나 마찰에 의한 압력 손실 계수가 실험장치의 실제값보다 약간 작게 모사된 결과이다.

4. 결 론

현재 개념설계 중인 증소형 일체형 원자로에 대한 계통특성 및 자연대류에 의한 피동 안전성의 파악을 위한 해석 및 실험적 연구를 수행하였으며, 결과는 다음과 같다.

일체형 원자로 축소 자연대류 실험 결과, 2차측으로의 열제거 기능이 상실된 증기발생기 모듈로는 1차측 냉각재의 흐름이 형성되지 않는 것으로 판단되었다. 기능 상실된 증기 발생기 위치에 따른 영향을 살펴 보면, 열제거 기능이 상실된 증기발생기 쪽의 고온관으로의 유량이 약간 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 일부 증기발생기의 열제거 기능 상실이 발생한 경우에도 노심으로 유입되는 냉각재의 온도가 균일하게 분포하였다.

상기 실험에 대한 검증 및 해석 모델 개발을 위해 RETRAN-03 코드 및 COMMIX-1B 코드를 이용한 해석을 수행하였다. 특히 8개의 모듈형 증기발생기 중 일부 모듈이 열제거 기능을 상실한 경우에 대한 유량 및 온도 분포 특성의 파악에 중점을 두었다. 해석 결과, 실험의 결과와 마찬가지로 2차측 급수 차단에 의해 열제거 기능을 상실한 증기발생기 모듈로는 1차측 냉각재의 흐름이 거의 형성되지 않고 정체되는 현상이 나타났으며, 따라서 증기발생기 출구 및 노심 입구에서의 온도분포가 문제시되지 않았다.

일체형 원자로 구조 특성에 따른 고유의 자연대류 특성과 유체의 거동 파악을 위해서는 유동가시화를 통한 각 고온관과 증기발생기 모듈, 그리고 Downcomer 영역에서의 2차원 또는 3차원적인 유동장에 대한 연구가 필요할 것이며 또한 선박용 일체형 원자로에 대한 연구로써 선체의 요동이나 경사에 따른 유동장 및 온도장의 변화에 대한 현상 파악, 특히 펌프에 의한 강제 대류가 아닌 자연대류 조건 하에서의 열수력적 특성 파악을 위한 실험적 연구 및 해석 모델의 개발이 향후의 연구로써 매우 기대되는 분야이다.

참고문헌

- [1] 장문희, 이두정, "신형 원자로 계통개념 연구", KAERI/RR-1483/94, 1995
- [2] C.E.Peterson, J.H.McFadden, "RETRAN-03 Manul Volume 1,2,3", NP-7450-CCML, 1991
- [3] H.M.Domanus, Y.S.Cha, et.al, "COMMIX-1B:A Three Dimensional Transient Single-Phase Computer Program for Thermal-Hydraulic Analysis of Single-Component and Multi-Component Engineering Systems", NUREG/CR-4348, 1985
- [4] M. Ishii and I. Kadaoka, "Scaling laws for thermal-hydraulic system under single phase and two phase natural circulation", Nuclear Engineering and Design 81, pp411-425, 1984
- [5] A.ZUKAUSKAS, "Heat Transfer from Tubes in Crossflow", Advances in Heat Transfer, vol.8, 1972

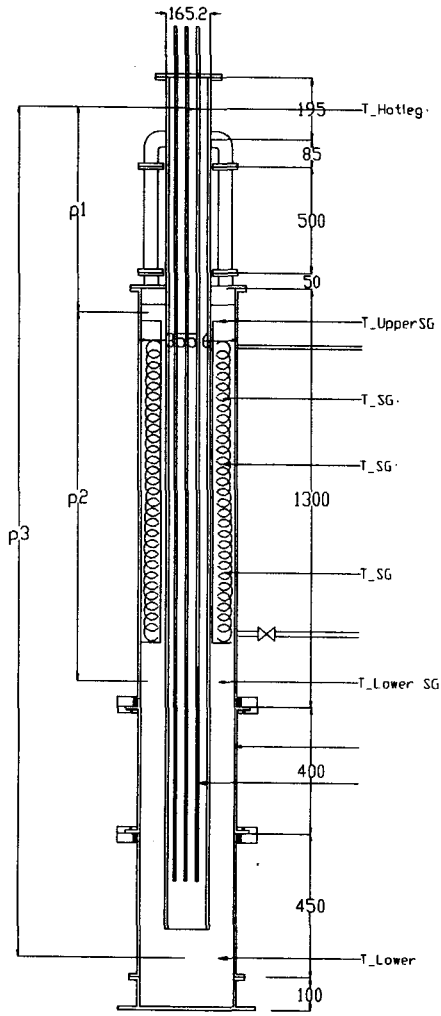


그림 1 실험장치 단면도 및 측정위치

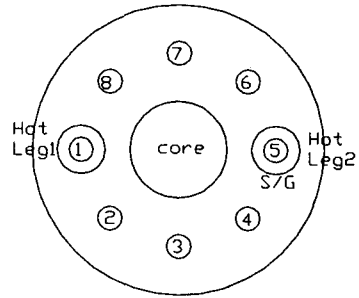


그림 2 증기발생기 위치

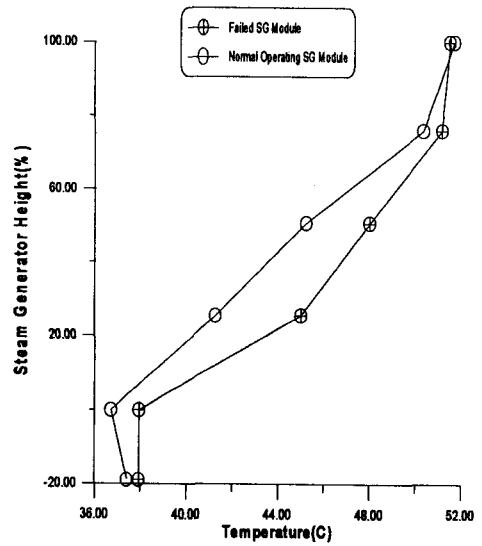


그림 3 증기발생기 3 기능상 실시 증기발생기내 온도분포(실험 h)

그림 6 증기발생기 1번 기능 상실시 자연순환에 의한 온도 분포 단면도

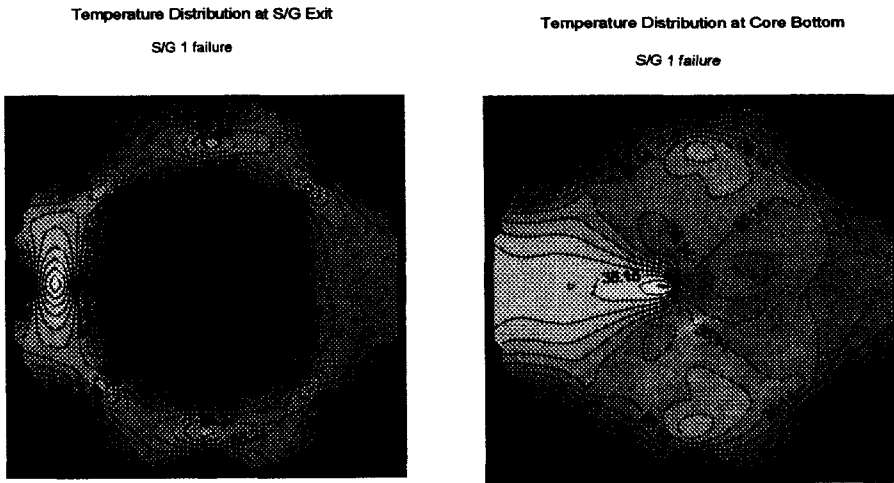


표 1 실험조건 및 결과 요약

	출력 (kW)	2차측유량 (LPM)	증기발생기 실패조건	증기 발생기 상부온도	증기 발생기 하부온도	고온관 1의 유량 (LPM)	고온관 2의 유량 (LPM)
실험1-a	40	48	X	54.53	37.70	16.33	16.04
실험1-b	40	48	1,2,8	64.95	47.27	16.99	20.87
실험1-c	40	48	4,5,6	65.24	47.91	18.28	17.49
실험1-d	40	48	1,5	60.05	42.39	16.22	17.03
실험1-e	40	48	3,7	60.96	45.06	17.86	18.96
실험1-f	40	48	5	52.31	35.19	16.69	19.06
실험1-g	40	48	4,5	58.69	41.44	16.03	18.26
실험1-h	40	48	3	51.71	36.71	18.78	19.35