



# THEME 02

## 원자로 효율 향상을 위한 이중냉각핵연료 유동설계 방안

조 형 희 | 연세대학교 기계공학부 교수 | e-mail : hhcho@yonsei.ac.kr  
 김 경 민 | 연세대학교 BK21 연구교수      김 태 환 | 연세대학교 기계공학부 박사과정  
 인 왕 기 | 한국원자력연구원 책임연구원      신 창 환 | 한국원자력연구원 선임연구원

이 글에서는 가압경수로의 성능 향상을 위해 연구 중인 이중냉각핵연료를 소개하고, 성능 향상을 위해 수행 중인 실험 및 수치해석을 이용한 유동설계 방법을 소개하고자 한다.

### 초고연소도 이중냉각핵연료 기술

원자력 에너지 이용률을 향상시키기 위해서는 원자력발전소를 신규로 건설하여 발전량을 증가시키거나 기존의 원자력발전소의 출력을 증가시켜야 한다. 원자력발전소를 신규로 건설하는 것은 많은 재원이 소용되나 기존 원자력 발전소의 출력을 증가하는 경우에는 상대적으로 비용이 적게 소용되므로 많은 연구가 출력 증가를 위해 수행되고 있다.

기존 발전소를 그대로 이용하면서 출력을 크게 증가시키기 위해서는 핵연료의 설계 변경을 통해 핵연료의 온도를 낮추어야 한다. 핵연료의 온도를 낮추기 위해서는 원자로 내 냉각수와 접촉하는 핵연료봉의

면적을 증가시키는 것이 가장 효과적이다. 이를 위해 기존 핵연료 구조와 같이 외부에 냉각수가 접하게 하면서 연료봉 내부에도 유로를 형성시켜 냉각수가 흐르도록 하는 구조가 필요하다. 즉, 그림 1과 같이 연료봉 구조를 내부와 외부 표면을 가지는 도넛 모양으로 변경하여, 환형 소결체가 장입되도록 하는 구조일 것이다. 이와 같은 구조를 이중냉각핵연료(Dual-Cooled Fuel)라 부르며, 이는 기존의 원형 연료봉에 비해 냉각수와와의 접촉 면적이 크게 증가하여 온도를 더욱 저감시켜 원자력 발전소의 출력을 올릴 수 있는 기술이다.

이중냉각핵연료의 개념은 오래 전부터 고안되었던 것으로서 실제로 설계 단계로까지 연구된 적은 거의 없었으나, 원전운용의 혁신적인 경제성 제고를 위해

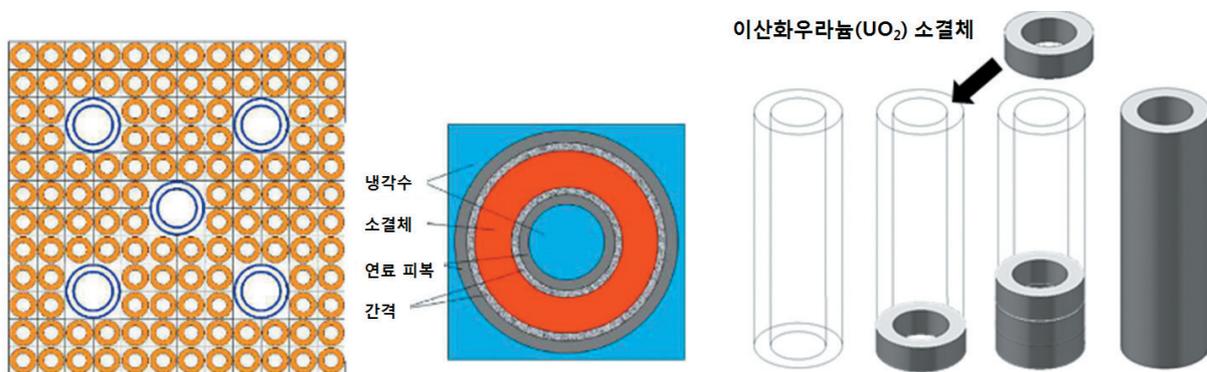


그림 1 이중냉각핵연료 구조 [출처 : 인왕기 등, 한국전산공학회, 2011]

이중냉각핵연료에 대한 개념설계를 미국 MIT와 관련 회사가 참여하여 연구를 진행해왔으며 그리고 국내에서는 한국원자력에 적용을 위해 한국원자력연구원에서 고성능 핵연료인 이중냉각핵연료를 개발 중에 있다. 한국원자력연구원은 이와 같은 연구를 통해 이중냉각핵연료를 OPR1000 원자로에 적용하여 원자로 일차계통의 주냉각수 펌프를 교체하지 않고 원자로 열출력을 20% 이상 증가시키고 핵연료 최고 온도를 기존 핵연료에 비해 30% 이상 감소시키는 것을 목표로 하고 있다.

### 이중냉각핵연료에서의 유동설계 방법

모든 원자로의 원자로 내부구조물은 사용 수명 기간 동안 정상상태 및 과도운전 상태의 진동 하중에 견딜 수 있도록 설계되어야 하므로, 설계 시 구조물에 진동특성과 구조물에 작용하는 다양한 하중에 대한 분석과 평가가 필요하다. 특히, 원자로 운전 시 원자로 내부를 순환하는 냉각재는 원자로 구조물에 작용하는 주요한 하중이 될 수 있으므로 이에 대한 평가와 평가 기법의 개발이 필요하다. 따라서 유동하중에 의한 발생하는 유체유발진동에 대한 연구 역시 이중냉각핵연료 개발에서 중요한 연구 중 하나라고 할 수 있다. 이를 위해 이중냉각 연료봉의 내부 및 외부 유로를 흐르

는 유체하중에 의한 Buckling instability, 연료봉 외부의 교차류에 의한 Vortex shedding, 펌프날개의 회전에 기인하는 Acoustic resonance, 그리고 교차류와 축류의 유동에 의해 발생할 수 있는 Fluid-elastic instability와 Turbulence buffering 등을 판단해야 한다. 더욱이 기존 원자로의 핵연료 봉을 똑같은 개수로 변경할 때는 현재 연료봉 사이에 간격보다 협소해지기 때문에, 협소해진 공간에서 발생할 수 있는 난류 특성도 고려가 되어야 한다.

앞서 언급한 바와 같이 이중냉각 환형 핵연료가 기존의 원통형 핵연료와 외부적으로 크게 다른 특징은 고립 내부수로를 갖고 있다는 것과 핵연료에서 발생한 열이 양쪽으로 분리되어 전달된다는 것 그리고 봉과 봉 사이의 간극이 매우 협소하다는 것이다. 이렇게 협소해진 연료봉 사이에서는 부수로 간 열수력적 불균형이 커져 그림 2와 같이 규칙적인 난류를 발생시킬 수 있다. 따라서 이중냉각 핵연료 기술 개발을 위해서는 그림 2와 같은 핵심유동현상에 대한 실험을 수행하여 상용화에 필요한 database의 확보가 필수적이다. 따라서 이 글에서는 냉각재의 유동으로 인하여 이중냉각 핵연료 사이에서의 유동난류 측정하기 위한 모사실험 장치를 설명하고, 모사실험 형상에서 수치해석을 실행하고 서로 비교하여 수치모델을 개발하는 연구를 설명하고자 한다.

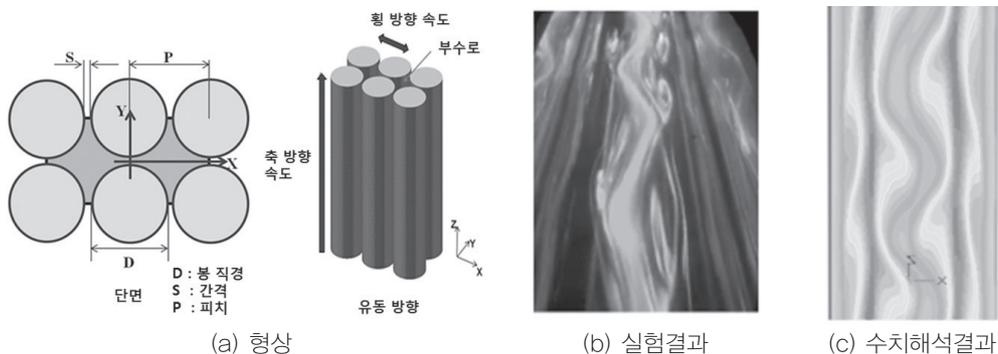


그림 2 이중냉각핵연료 사이에서의 유동 불안정성(유동가시화 실험결과)

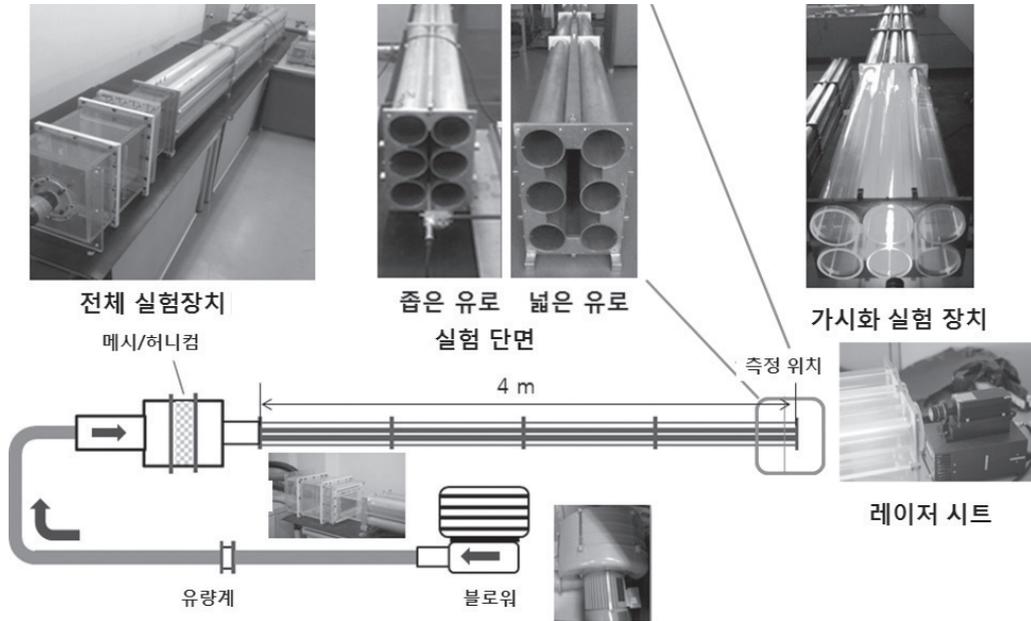


그림 3 이중냉각핵연료 유동 불안정성 실험장치

우선, 유동설계 연구 중 하나로 좁은 간격(이중냉각 핵연료)과 넓은 간격(기존 핵연료봉)의 배열 원자로 노심 봉다발 부수로 내의 난류 혼합 특성에 대한 연구를 수행하기 위한 실험 장치의 구성은 그림 3과 같다. 본 실험에서는 실험장치 내 작동유체를 봉다발 모의 부수로로 지나게 하여 완전 발달시키고, 유속 및 난류 강도, 주파수 분석을 통해 유동의 준주기적 특성을 확인하는 연구가 수행되었다. 이중냉각핵연료 구조와 기존 핵연료봉 구조의 유로를 모사하기 위하여 실험 장치를 제작하였으며, 난류 및 속도 측정은 출구 전방에서 측정하였다. 그리고 이와 같은 형상에서 수치해석을 통해 그 결과를 비교하여 적합한 수치모델을 정립하였다.

### 이중냉각핵연료에서의 유동 특성

좁은 간격(이중냉각핵연료)과 넓은 간격(기존 핵연료)의 두 경우에 대하여 부수로의 가장 좁은 영역인

간극 중심에서 횡방향 속도 측정을 수행하였다. 그림 4의 시간에 따른 횡방향 속도를 통해 좁은 간격인 그림 4(a)의 경우 부수로 간극을 중심으로 좌우로 흔들리는 속도 성분이 존재하며 주기적인 형태를 보이는 반면 넓은 간격의 경우인 그림 4(b)의 경우 흔들림과 주기성 없이 횡방향 속도는 일정하다. 횡방향으로 흔들리는 속도 성분이 부수로 간의 혼합을 일으키며 축방향 속도에도 같은 주기로 영향을 준다는 것을 확인하였다. 이와 같은 난류특성은 냉각재를 혼합해 주기 때문에 열전달을 향상시키기도 하지만, 반면에 주기적인 진동을 유발하여 핵연료봉의 파손을 유발할 수도 있기 때문에 고유한 특성 파악이 중요하다. 따라서 이러한 고유한 특성을 분석하기 위해 간극의 크기 및 배열, 유량 등에 따른 특성에 대한 데이터베이스를 축적하는 것이 중요하다.

그림 4에서 확인할 수 있듯이 주파수 분석 결과 좁은 간격의 부수로 횡방향 속도 성분은 100Hz 미만의 주파수에서 밴드 형태의 주파수 peak를 보여 준주기

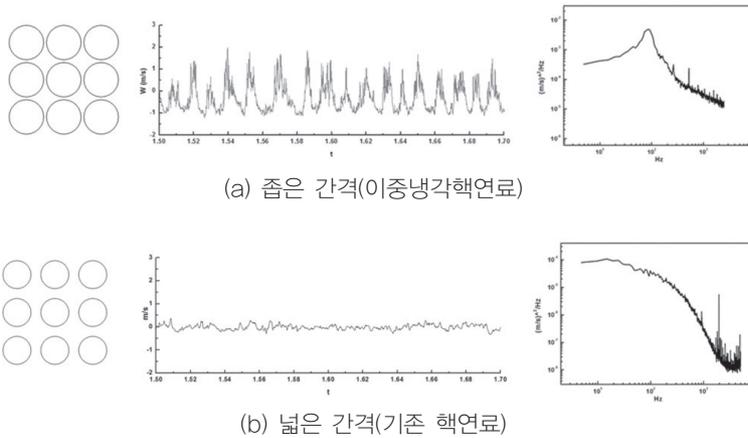


그림 4 이중냉각 연료봉 설치에 따른 유동 불안정성 결과

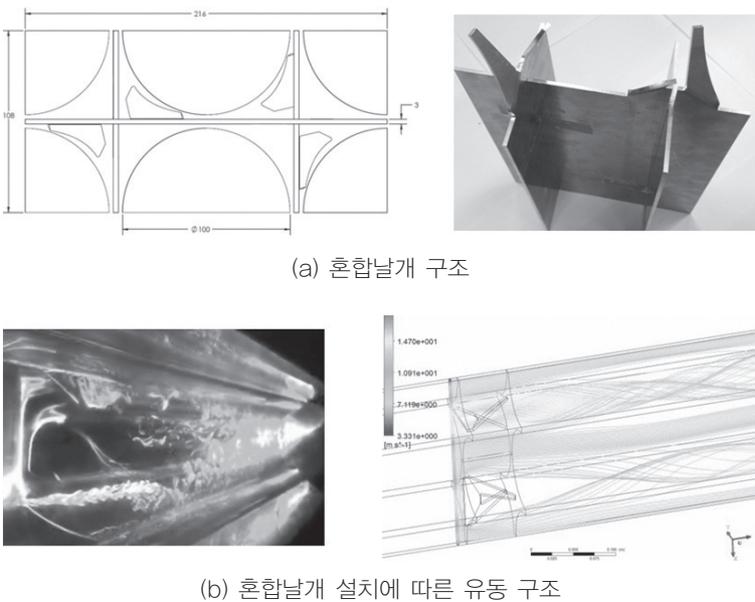


그림 5 좁은 간격 이중냉각 연료봉 혼합날개 설치에 따른 유동 불안정성 결과

적 유동 특성을 보인다. 이에 반해 넓은 간격의 경우 주파수 peak가 나타나지 않았다. 다시 말하자면, 기존 핵연료에서 나타나지 않았던, 유동 특성이 이중냉각 핵연료 봉 배치에서는 나타난다는 것이다. 이와 같은 유동 특성을 잘 활용하면 기존 핵연료에서 사용하는 혼합날개를 사용하지 않아도 되는 장점도 가질 수 있다. 즉, 혼합날개를 사용하지 않으므로 압력강하를 줄

일 수 있는 이점이 있다. 따라서 최대의 난류 특성을 찾는 연구도 병행되고 있다.

따라서 본 연구를 통해 기존 넓은 간격을 가진 연료봉에서 나타나지 않았던 유동 불안정성에 의해 유동 혼합 특성을 확인하였고, 기존의 핵연료를 이중냉각 핵연료로 대체하였을 때 혼합날개 없이도, 열전달을 더욱 향상시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

앞서 언급한 기존 원자로 연료봉에서 사용하고 있는 지지격자는 연료봉다발의 간격을 일정하게 유지시켜주어 유로를 확보하고 진동을 줄여주고 있으며, 유동혼합 안내판을 형성하여 지지격자 근처에서 가장 활발한 유동 혼합을 일으켜 열전달을 향상시키는 방법이다. 더욱이 혼합날개는 부수로 내에 와류 유동을 발생시켜 난류를 발생시키는 기능을 하고 있다. 원자로에 대한 연구 중 최대한의 열전달 성능을 발휘하는 것이 중요한 문제이므로, 본 연구에서도 혼합날개를 이용하여 협소한 유로를 형성하는 이중냉각핵연료 구조에서도 최대한의 열전달 향상을 목표로 혼합날개 설치에 따른 난류 유동 특성에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

따라서 이중냉각 연료봉 구조에서도 더욱 난류를 촉진시키기 위해 그림 5(a)와 같이 혼합날개를 설치하여 실험하였다. 또한, 혼합 정도를 판단하기 위해 혼합날개 설치에 따른 부수로의 가장 좁은 영역인 간극 중심에서 횡방향 속도 측정을 수행하였다. 혼합날개에 의해 발생한 난류는 혼합날개가 없을 때 나타나는 크기가 큰 와류와 반대로 작은 와류들이 빠르게 발생



하였다. 즉, 좁은 간격에서도 혼합날개를 이용하여 열전달이 충분히 조절 가능함을 확인하였다. 혼합날개에 대한 연구는 앞으로 많은 연구를 통해 최적설계를 찾아가는 연구가 진행될 것이다. 이와 같은 유동연구뿐만 아니라 더 나아가 열전달과 연계시키는 연구가 더욱 진행될 것이다.

### 맺음말

본 연구결과를 통해 획득된 이중냉각핵연료 열수력 핵심기술 및 실용화 데이터베이스를 통해 이중냉각핵연료의 열수력적 특징을 파악할 수 있다. 이와 같은 이중냉각 핵연료 봉의 특성은 내측과 외측에 수로가 있으며 연료봉 간격이 원통형핵연료에 비해 작다는 것이다. 따라서 이중냉각핵연료의 열수력적 성능 평가를 위해 내측/외측 수로의 열 분배율, 외측 부수로 사이의 난류혼합 및 핵연료다발 압력손실 자료가 필수적이다. 본 과제에서 수행된 협소 핵연료 봉다발 외측 부수로 사이의 난류혼합 실험을 통해 압력손실 및 열전달량 계산에 필요한 난류혼합계수 검증자료의 확보를 통해 앞으로 이중냉각핵연료 개발에 토대가 될 것으로 보인다.

현재 이중냉각핵연료 열수력 핵심기술 검증 방법 및 확보된 고정밀 열유동 측정기술은 이중냉각핵연료 개발의 열수력적 기술과제인 협소 핵연료 봉다발 난류혼합계수를 측정에도 기여하여 이중냉각핵연료 출력증강 노심의 타당성 검증자료로 사용될 것이다. 현재 개발된 측정기술은 열선(hot wire) 속도계뿐만 아니라 레이저 광학을 이용한 첨단 유동장 측정기법을 이용하므로, 향후 노심 열유동 특성 검증을 위한 고정밀 실험장비와 측정기술을 연구하는 연구자들에게 참

고가 될 것으로 사료된다.

이와 같은 단위 기술은 원자력발전소 증기발생기 튜브의 유동유발진동과 관련된 유체탄성불안정성에 의한 튜브 파손을 해결하는 데 사용될 수 있으며, 유체설계 기술은 다양한 산업들과도 연관되어 있기 때문에 그 파급효과는 클 것이다. 다시 말하자면, 유체의 흐름에 의한 유체탄성불안정성은 외부유체의 회유동속도가 임계속도를 초과하는 영역에서 발생하는 일종의 자기 여기 진동이므로, 유체탄성불안정성에 의한 과도한 피로에 의해 결국 파괴되기도 한다. 따라서 이러한 유동적 특성을 파악하는 것이 원자력 발전소 열수력 설계에서 필수적이므로 현재 언급된 방법들은 다양하게 활용될 수 있을 것이다.

또한, 연구를 통해 확보된 가압 경수로 출력 증강을 위한 이중냉각핵연료 노심 열수력 특성실험 및 검증 데이터베이스는 최근 원자력에너지 경쟁력의 상대적 우위로 인해 국내외적으로 원전산업이 더욱 활성화되는 데 이용될 것이며, 국내의 경우 2030년까지 10기의 원자로를 추가로 건설할 계획이며 UAE 원전수출을 계기로 향후 원자로 해외수출의 기대치가 높아짐에 따라 그 파급효과는 더욱 클 것으로 사료된다. 더욱이 신규 원전 부지 확보의 어려움 및 초기 건설비용의 증가로 인해 신규원전의 경우 대용량/고출력 원자로의 수요가 증가하고 있으며 가동원전의 경우 원자로 출력증강사업이 활발하게 진행되고 있기에, 이중냉각핵연료는 신규 및 가동중 원자로의 출력증강을 목표로 활발히 개발될 것이다.