

부산대학교 기계공학부 원자력시스템전공

원자력열수력연구실 (Nuclear Thermal Hydraulics Laboratory) 탐방

작성자: 부산대학교 기계공학부 대학원생 문정민

1 머리말

부산대학교 원자력열수력연구실은 기계공학부 내에 원자력시스템전공이 설립된 해인 2011년 9월에 개설되었다. 연구실에서 수행되는 주요 연구 분야는 1) 신형 원자로의 주요 설계 개념인 신안전계통 및 피동안전계통 관련 핵심기술 개발 및 실증 실험, 2) 원자로계통 해석 체계 개발을 위한 기초 물리현상 실험 및 실험 데이터를 이용한 단상 및 다상 물리 모델 개발, 그리고 3) 다상유동 조건에서 고정밀 열수력 변수 데이터 취득을 위한 측정기술 개발 및 검증 연구 등으로 나뉜다. 이를 위해 본 연구실에는 원자력 발전소 계통을 모의하는 실험 장치와 비등이나 응축과 같은 기초 열수리학 현상을 모사할 수 있는 실험 시설들 (그림 1)이 구축되어 있다. 또한, 열전대, 압력계, 레이저 속도 측정장비 (PIV), 광섬유 센서 등의 고정밀 계측 장비와 드릴, 선반 등의 가공 장비가 갖춰져 있어 다양한 실험 연구와 이를 활용한 열수력 물리 모델 개발이 진행되고 있다. 현재 연구실의 구성원은 교수 1명, 박사과정 5명, 석사과정 2명이다. 상세 구성원 및 주요 연구 활동은 연구실 홈페이지 (<https://nsthel.pusan.ac.kr/>)에서 확인 가능하다.



그림 1 부산대학교 원자력열수력연구실에 구축된 실험 시설

2 주요 연구분야 및 내용

2.1 열수력 실험 연구

본 연구실에는 기존 원전 계통과 최근 개발 중인 차세대 원전의 신안전 계통 및 피동안전 계통 정밀 해석 체계 개발을 위한 다양한 실험연구가 진행되고 있다. 본 실험실 탐방에서는 최근 수행되었거나 수행 중인 연구에 대해서 소개하고자 한다.

2.2.1 고온 고압 과냉각 비등 연구

과냉각 비등 실험은 원전 설계 및 안전해석 코드의 원전 운전 및 사고 조건 비등 열전달에 대한 예측능력 향상을 위해 다양한 유로 및 유동 조건에서 수행되어 왔다. 그러나 기존 실험들은 대부분이 낮은 압력조건에서 수행되었으며, 고온 고압의 경우 측정의 어려움으로 1차원 기포율 변수만 측정되어 비등 열전달을 평가하고 관련 모델을 개선하는데 한계가 있다. 본 연구에서는 실험실에서 자체 개발한 고온 고압용 국소 광섬유 센서를 환형관 유로에 적용하여 최대 110기압 조건에서의 비등 실험데이터를 생산하는 것을 목표로 진행하고 있다 (그림 2). 본 연구에서 얻어질 실험데이터는 국내 원전 안전해석 체계의 비등열전달 예측 성능 평가, 관련 모델 개선 그리고 기술 고도화를 위한 기초데이터로 활용될 것이다.

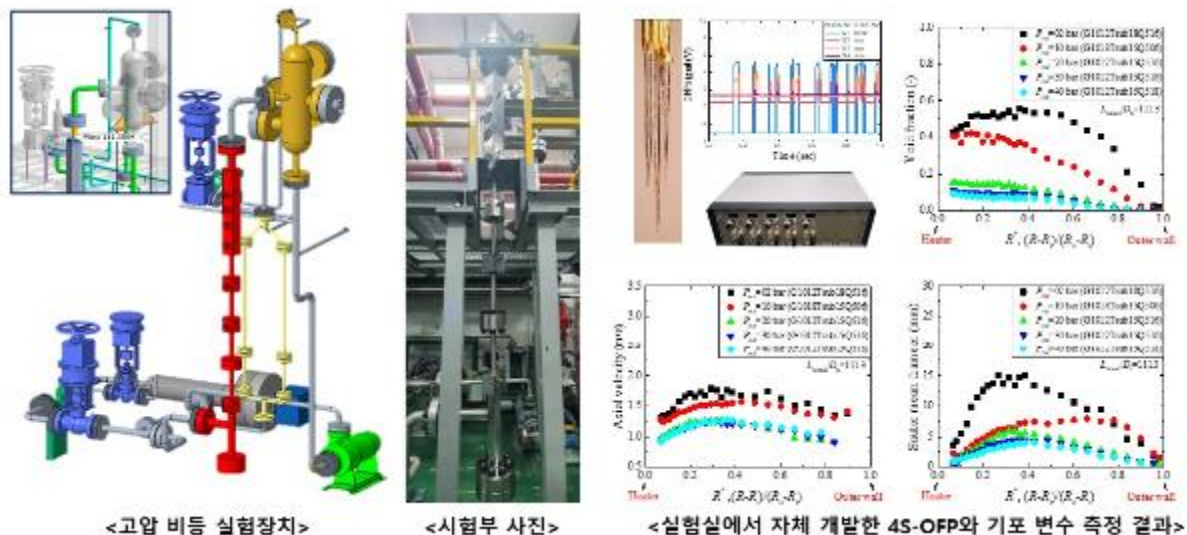


그림 2 고온 고압 과냉각 비등 실험 연구

2.2.2 좁은 사각유로에서의 임계열유속

부산 기장군에 건설 중인 신형 연구용 원자로는 노심에 판형 핵연료를 채택하고 있으며, 정상유동 조건에서 하향류로 운전된다. 이때 원자로 핵연료의 안정성 확보 및 설계 최적화를 위해서는 정밀한 임계열유속 (Critical Heat Flux, CHF) 예측이 필요하다. 그러나 하향류로 운전되는 좁은 사각유로에서의 임계열유속은 유동 조건, 질량유속, 압력, 열역학적 건도, 수력학적 직경 뿐만 아니라 발열체의 폭, 두께, 물성치 등 다양한 인자들에 복합적으로 영향을 받아 실험 연구가 필수적이다. 본 연구에서는 상기의 유동조건에서 다양한 설계 인자에 따른 임계열유속 현상을 실험적으로 고찰하고 이를 예측하는 모델을 개발하였다. 특히, 본

연구에서 생산된 실험 데이터는 요르단 수출 연구로와 기장 연구로의 인허가 자료로 활용되고 있다 (그림 3).

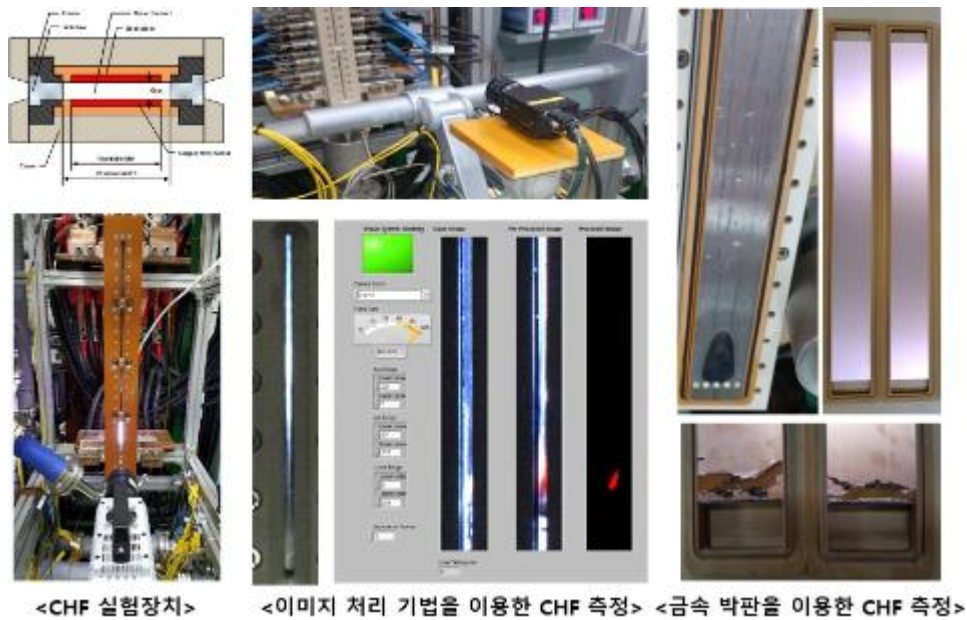


그림 3 좁은 사각유로에서의 임계열유속 연구

2.2.3 피동격납건물 냉각계통 (PCCS)에서의 응축 열전달 연구

국내외에서 원자력 발전소의 안전성 향상을 위해 다양한 피동안전계통이 개발되고 있다. 그중 피동격납건물 냉각계통은 원자력 발전소의 격납건물 내부로 증기가 방출되는 사고 발생 시 방출된 증기를 열교환기 외벽에서 응축시키는 계통이다. 본 연구에서는 차세대 원자력 발전소 iPOWER에 채택된 튜브 다발형 PCCS의 설계를 위한 튜브 다발 외벽에서의 증기 응축 열전달 성능 평가 실험장치를 구축하고 번들 형상, 튜브 직경, 압력, 비응축성 기체분율, 기울기 등 다양한 조건에서의 응축 열전달 계수를 실험적으로 연구하였다 (그림 4).

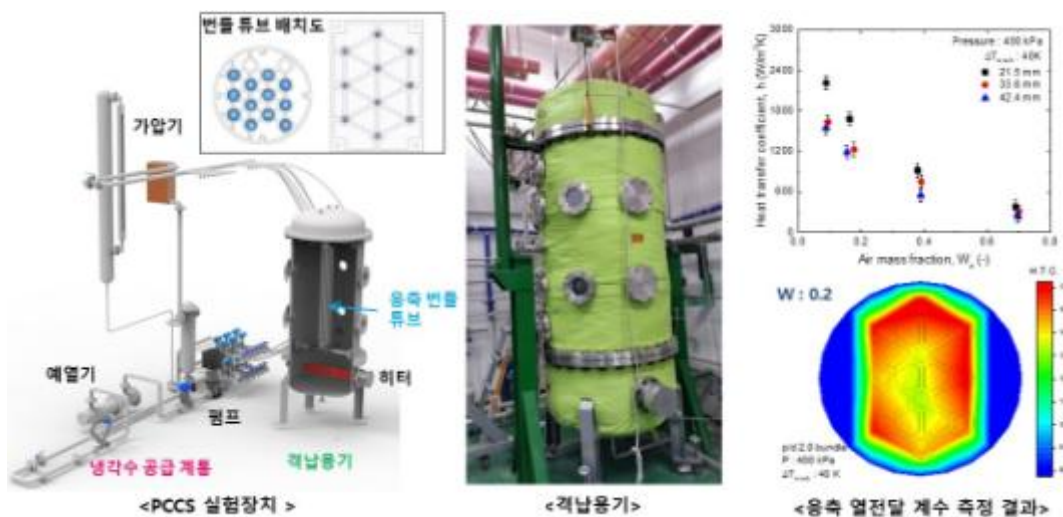


그림 4 PCCS에서의 응축 열전달 측정 연구

2.2.4 대형냉각재상실사고 (LBLOCA)에서의 액적 거동 연구

대형냉각재상실사고 시 노심에서 생성되는 액적 거동은 핵연료 침투 피복재 온도 (Peak Cladding Temperature)에 직접적으로 영향을 주는 인자이다. 본 연구에서는 실험기술의 한 계로 실험연구가 부족했던 LOCA 사고 시 재관수 단계에서의 국소 액적 변수 거동을 실험 적으로 연구하였다. 실험은 액적 생성과 증발, 그리고 비등이 복합적으로 동반된 재관수 단 계에서 유동 조건에 따른 액적 거동을 살펴보기 위해 1) 수직/수평관에서의 물-공기 실험, 2) 역환상류 물-공기 조건에서의 액적 측정 실험, 3) 물-증기 Reflood 실험을 단계적으로 수 행하였다 (그림 5). 실험으로 구축된 액적 변수 실험데이터는 LBLOCA 사고 시 핵연료 집합 체로 구성된 실제 노심의 내부의 복잡한 유동 현상을 규명하기 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.



그림 5 LBLOCA에서의 액적 거동 측정 연구

2.2.5 자연순환 및 유동 불안정성 실험 연구

신형 원자력 발전소의 피동안전계통 및 해상용 원전에서는 운전 조건에 따라 자연순환 유동이 발생한다. 그러나 이와 같은 자연순환 유동 조건에서의 열전달, 유동 불안정성 등에 관한 기초 연구는 취약한 실정이다. 본 연구에서는 40기압, 250°C의 고온 고압 단상 및 2상 유동 조건에서의 자연순환 열수력 특성과 유동 불안정성을 고찰하기 위한 실험을 수행하고 있다 (그림 6). 본 연구를 통해 생산될 자연순환 조건 열전달과 유동 불안정성 실험 데이터는 원자로 시스템의 자연대류 운전에 필수적인 핵심 열수력 현상 해석을 위한 기반기술로 활용될 것이다.

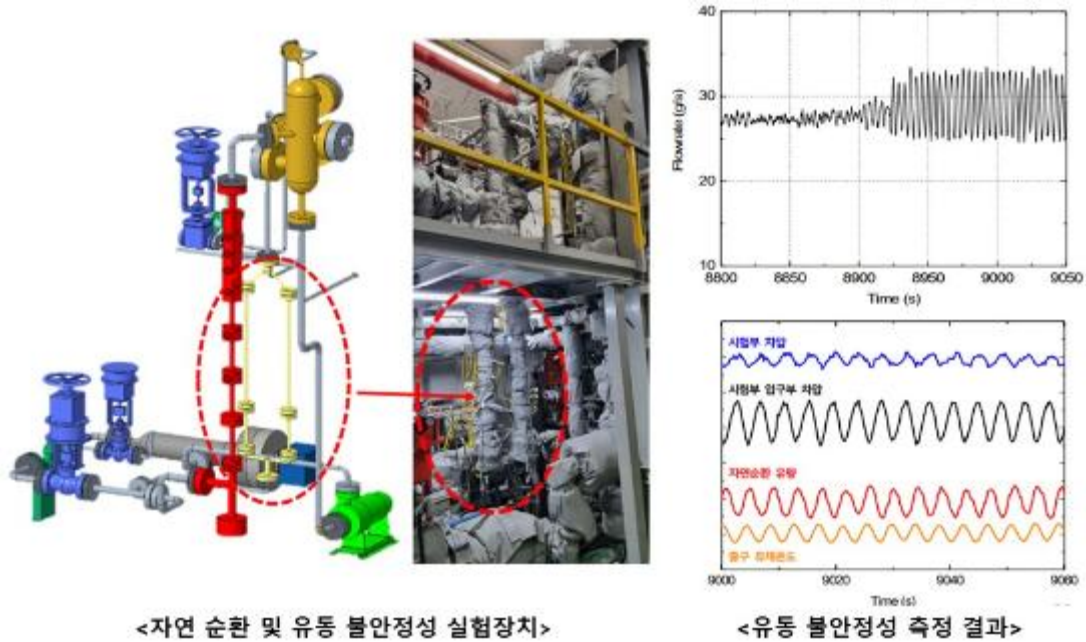


그림 6 자연 순환 및 유동 불안정성 실험 연구

2.2.6 2상 유동 물리 모델 개발

본 연구실에서는 앞서 기술한 실험들에서 생산한 국소 2상 유동 변수 분포 데이터와 문헌 조사를 통해 구축한 실험데이터베이스를 이용하여 국소 스케일의 전산유체 (CFD) 코드 뿐만 아니라 계통 스케일의 해석코드에 적용할 수 있는 2상 물리 모델을 개발하고 있다 (그림 7). 최근에는 시스템에 내재된 부차적 매개변수의 영향을 파악할 수 있는 기계학습 기법을 적용하여 다양한 열수력 변수들의 영향을 분석하고 이를 기반으로 비등, 응축 및 임계열유속 모델을 개발하고 있다 (그림 8).

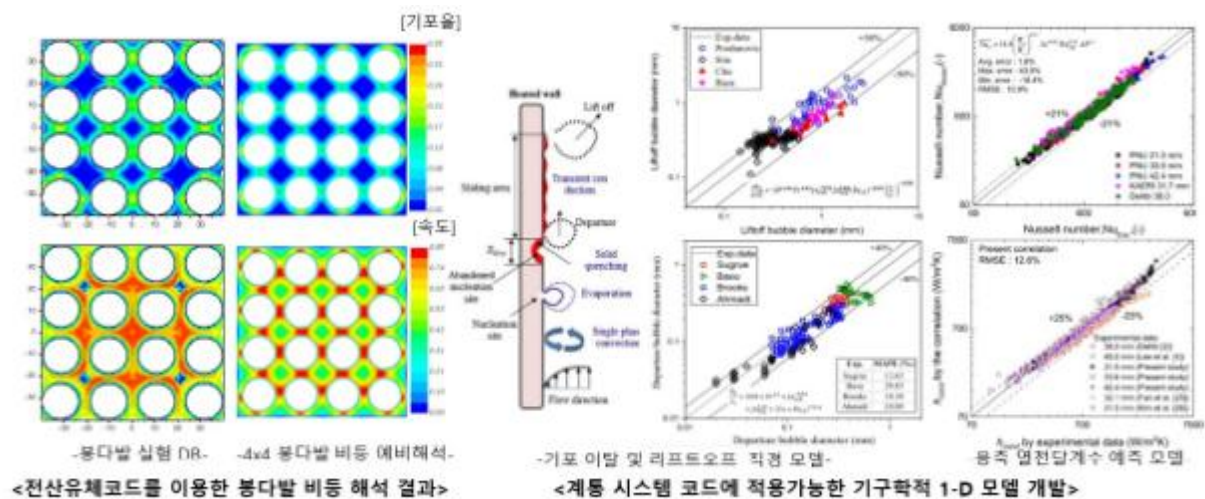


그림 7 실험데이터 기반의 2상 유동 물리 모델 개발

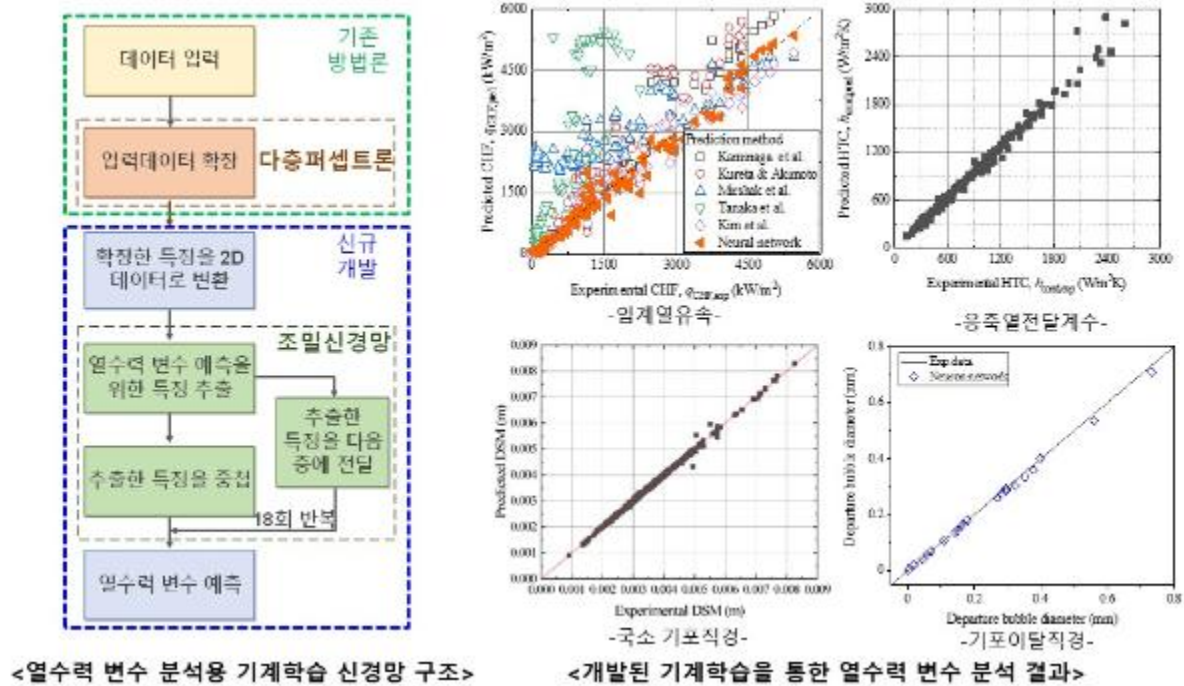


그림 8 기계학습을 활용한 열수력 변수 분석

2.3 열수력 변수 측정용 센서 개발

본 연구실에서는 열수력 실험 연구를 위해 액막 및 파형 측정을 위한 평형 와이어 센서와 벽면 매립 센서, 레이저를 이용한 2상 유동 적용 기술 그리고 국소 기포 및 액적 측정을 위한 광섬유 센서 프로브 측정 기법을 개발하고 있다 (그림 9). 개발된 측정 기술 및 센서는 앞서 기술한 실험들에서 다양한 고정밀 열수력 실험데이터 생산에 활용되고 있다. 특히, 실험데이터의 품질 향상을 위해 측정기술 개발 및 실험에 품질보증절차 (QA)를 도입하고 있다.

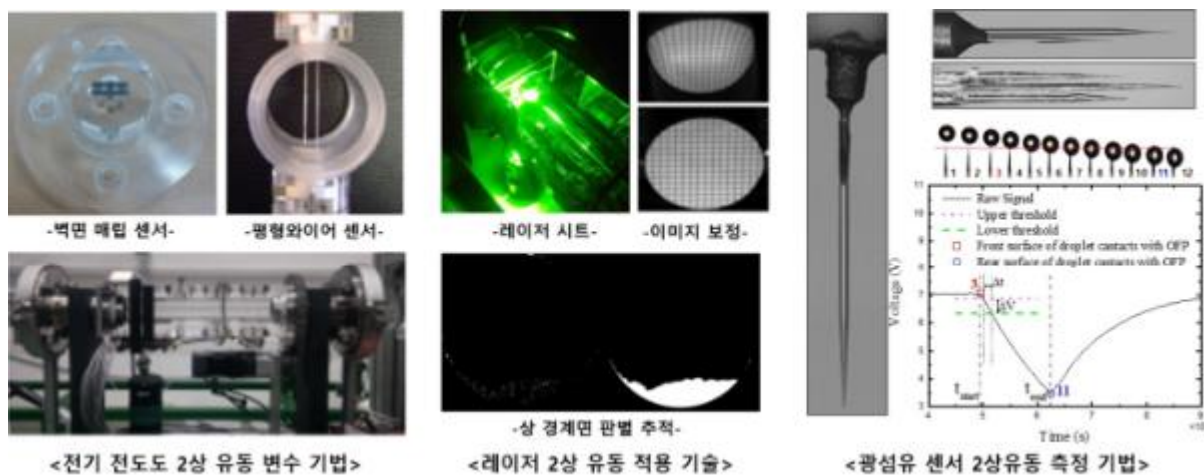


그림 9 고정밀 2상 유동 변수 측정 기법

3 연구역량 강화 활동 및 연구성과

3.1 국내외 전문학회 및 연구소와의 기술 교류

본 연구실은 원자력학회, 한국유체기계학회, 대한기계학회 등 다양한 산업 분야의 학술대회 참여와 국내외 연구소와의 워크숍을 통해 상호기술을 교류함으로써 국내외 열수력 기술 개발에 기여할 뿐 아니라 종합분석 및 커뮤니케이션 능력을 갖춘 고급인재 양성에 힘쓰고 있다.

3.2 연구역량 강화 활동

부산대학교 원자력시스템전공에서는 다양한 전공 분야의 원자력 세미나를 매년 15회 이상 개최하여 열수력 분야 외 다양한 연구 분야를 접할 수 있는 기회를 제공하고 있다. 더불어, 동절기에 개최되는 해외 석학 교수 초청 단기강좌를 통해 연구과제 수행 과정에 수반되는 자료 취득 및 관리, 보고서 및 논문 작성, 발표 능력 향상 등 개인의 연구역량을 강화할 수 있게 하고 있다.

3.3 연구성과

본 연구실에서는 2011년부터 현재까지 70편 이상의 SCI 논문, 120편 이상의 논문을 학회지에 제출하였고, 1건의 국내특허 등록, 1건의 해외특허 출원을 하였다. 더불어 한국원자력학회, 한국유체기계학회, 한국기계학회 등의 다양한 전문학회로부터 총 10건 이상의 수상 성과를 내었다. 본 연구실에서 배출된 졸업생은 석사 1명, 박사 4명으로 한국원자력연구원, 한국원자력안전기술원, 한국기계연구원, 미시간 대학과 같은 국내외의 우수한 연구소 및 대학에서 연구원으로 활약하고 있다.

4 맺음말

부산대학교 원자력열수력연구실에서는 국내 원자력 열수력 분야의 기초 기술발전과 고급 전문 인력양성을 위해 다양한 첨단 열수력 실험 및 관련 모델 개발 프로그램을 운영하고 있다. 특히, 자체 개발한 측정 및 실험 기술들을 활용한 고정밀 열수력 실험데이터 생산 그리고 국내 고유 열수력 모델 개발 등에 기여함으로써 국내 원자력발전소의 안전성 향상 및 산업경쟁력 강화에 직간접적으로 기여하고 있다. 또한, 이러한 과정을 통해 교육받은 우수한 인력들은 국내 원자력계에서 원전 기술 개발을 선도하고 원전 안전 파수꾼으로 활약하고 있다.