

## 2019년 원자력기기 및 열유체 분야 연구동향

이민호\* · 방인철\*\*

### 1. 서 론

본 특집의 목적은 원자력기기 및 열유체 분야의 연구 동향을 파악하는데 있다. 이를 위해 2019년 한국유체기계학회의 논문집과 한국유체기계학회의 발표들을 토대로 국내 원자력기기 및 열유체 분야의 연구동향을 소개하였다. 원자력기기 및 열유체 분야는 정상 상태에서의 원자력 발전소의 효율성과, 사고 상황에서의 안전성과 관련된 분야이다. 연구동향의 주요내용은 자연순환 및 기기작동을 주 내용으로 하는 피동 안전성, 원전에서 자주 이슈가 되었던 냉각수 누설 및 밀봉, 차세대 원전인 소듐냉각고속로, 설계기준사고 및 초과사고 해석, 최근 원자력계의 화두인 계통해석코드의 다중스케일 적용, 연구로 관련 연구, 기타 원자력기기 및 열유체로 분류하여 구성하였다.

### 2. 피동안전계통 관련 연구

원자로의 피동 안전성에 대한 중요성은 2011년 후쿠시마 사고에서 얻었던 가장 큰 교훈 중의 하나이다. 전원 상실 상태에서 작동할 수 있는 피동 안전 계통들에 대한 관심이 증가하였고, 그 경향은 지금까지 계속되고 있다.

박지환 등<sup>(1)</sup>은 한국형 소형 원전인 SMART 에서의 자연대류 현상을 모의하는 개별효과 실험을 수행하였고, 이를 MARS-KS라는 원자력 계통해석코드로 검증하였다. 자연순환 유량은 약 10% 내외로 예측가능했으며, 보다 정밀한 예측을 위해서는 형상정보에만 기반하기보다는 밀도 평균으로 높이차를 정의하고 증기발생기의 현실적인 온도 산정이 필요하다는 것을 확인하였다.

김찬수 등<sup>(2)</sup>은 소듐냉각고속로에서 적용되는 피동안전계통인 원자로공동냉각계통의 외부 공기 자연순환 냉각에 대한 척도 해석 방법을 개발하였고, 기존 방법론과의 차이점은 높이비에 따른 혼합대류 열전달의 정량화였다. 이를 통해 원자로공동냉각계통에서 중요한 안전 인자중 하나인 원자로 용기 외벽 온도를 보다 잘 예측할 수 있었다.

정우림 등<sup>(3)</sup>은 전원상실을 동반한 지진으로 인한 최종 열침원 상실 사고에 대하여 원자력 발전소의 사고 전개를 MARS-KS 코드를 사용하여 연구하였다. 해당 사고 과정에서 주증기 대기 방출밸브는 보조 급수가 이루어질 때만 그 효과를 장담할 수 있으며, 이를 통해 1차측의 온도와 압력을 낮출 수 있음으로 사고 완화에 기여한다. 터빈작동 보조급수펌프의 관리가 전체적인 사고 완화에 중요하며, 주증기 대기 방출밸브의 수동 개방 시, 그 고착에 유의하여야 한다는 결론을 내렸다.

최치웅 등<sup>(4)</sup>은 SPACE 코드를 활용하여 1차측 풀에 담긴 열교환기를 통한 피동 열제거 계통인 PERSEO를 해석하였다. 전체 거동은 잘 해석하였으나, injector가 노출되는 구간에서 비물리적인 현상이 관찰되었으며, 정확한 해석을 위해서는 다차원 모델링과 정확한 압력강하 모델이 필요하다고 보고하였다.

### 3. 냉각수 누설 및 밀봉 관련 연구

원자력 발전소의 압력은 높고 압력경계에 있는 밸브, 혹은 밀봉이 필요한 부분이 많다. 전체 원자력 발전소의 효율 및 안전에도, 혹은 방사능 누출의 저지를 위해서도 냉각수의 누설 및 밀봉은 잘 감시되고 기준치 이하로 억제되어야 한다.

김연식 등<sup>(5)</sup>은 원자로계통에 존재하는 주요 기기 및 부품에 대한 누설 특성을 연구하였다. 주요 누설 가능 지점으로 용접부를 꼽고 있으며, 이는 용접부 자체의 취약성에서 기인한 것이다. 부품간 용접부 뿐이 아닌 부품에 존재하는 용접부에서도 누설 가능성이 높으며, 현재의 감지장치는 소량누설 감시에 취약하여 이를 위해 센서튜브의 개선개념을 소개하였다. 누설시 유량을 예측하기 위한 임계유량 모델들도 검토되었으며, 누설 자체와 크랙 크기에 따른 누설 특성도 평가되었다.

권태순 등<sup>(6)</sup>은 원자로 계통에 대한 누설 감지 계통을 개발하였다. 현재 안전 제한치인 1gpm보다 낮은 0.5gpm의 누설 유량을 감지할 수 있는 누설 초집 센서를 설계하였고, 누설물의 효율적인 포집을 위해 흡입- 및-방출 형을 제안하였다.

\* 울산과학기술원(UNIST) 기계항공 및 원자력공학부 석박사통합과정 5년차

\*\* 울산과학기술원(UNIST) 기계항공 및 원자력공학부 교수

E-mail : icbang@unist.ac.kr

박지훈 등<sup>(7)</sup>은 원자로 냉각재 계통의 소량 누설 현상을 분석하기 위해 적외선 열화상 방법을 사용하였다. 파단 크기를 변경하면서 실험을 진행하였고 실제 원전과 유사한 단열재를 사용하였다. 배관에 보온재가 없는 경우는 열화상 카메라를 이용하여 육안으로 식별이 불가능한 크기의 누설을 판단할 수 있었다. 보온재가 있는 경우에도 증기의 유동을 열화상 카메라가 관측할 수 있기 때문에 유용한 방법임을 실증하였다.

조석 등<sup>(8)</sup>은 최근 국산화에 성공한 원자로 냉각재 펌프의 축 밀봉과 관련하여 그 밀봉체의 성능검증시험을 수행하였다. 장기 전원상실시에 가장 취약한 부분이라 할 수 있는 원자로 냉각재 펌프의 축 밀봉 성능에 대하여 고온고압 시험조건, 포화상태 및 저온저압 시험 조건에 대하여 시험을 수행하였고, 축 밀봉체를 통한 누설은 저온저압 시험에서 처음 관찰되었다.

어동진 등<sup>(9)</sup>은 누설감지 시스템 개발을 위한 열유체 예비 해석을 수행하였으며, MARS-KS를 사용하여 진행하였다. 현재 안전기준치인 1gpm의 누설유량을 위해서는 1차계통에서 약 0.93 mm의 파단 크기가 필요하며, 그로 인한 원전의 공기조화 설비는 그 상부에서는 별 영향이 없으며, 하부에서는 지속적인 온도 상승을 일으켰다.

강창우 등<sup>(10)</sup>은 원자로 냉각재 계통이 아닌 2차측에서의 급수가열기 전열관의 누설 예측 특성을 연구하였다. 얇은 전열관 두께를 가지는 저압 급수가열기의 손상 가능성이 비교적 높으며, 누설에 따른 운전변수의 변화를 주파수 분석 기법을 통해 알 수 있음을 확인하였다.

어동진 등<sup>(11)</sup>은 누설감지에 사용되는 포집관 내부 온도분포를 예측하였다. 소유량 감지를 위한 포집관은 일차계통 배관 표면에 설치되며, 그 온도 변화와 천이 특성을 CFD와 MARS 코드를 사용하여 연구하였다. 포집관 내부 유체의 온도는 외부의 온도에 순응하며, 두 방법에 대하여 일치된 결과를 얻었다.

김우식 등<sup>(12)</sup>은 누설 감지 포집관의 습공기 유입에 따른 현상을 해석하였다. 기존의 방식과는 다른 흡입- 및-방출형의 센서에 대하여 해석을 수행하였다. 주어진 조건 하에서 습공기의 유입은 잘 이루어졌으나, 각 포집부에 따라 유량의 편차가 크게 발생하였기 때문에를 개선하기 위한 구조 및 운전 방법의 개선이 필요하다고 주장하였다.

#### 4. 소듐냉각고속로 관련 연구

소듐냉각고속로는 제 4세대 원전중 하나로, 냉각재로서의 소듐의 우수한 물성치 때문에 각광받고 있는 원자로이다. 한국에서도 연구가 이루어진 바 있으며, PGSFR이라는 원자로를 설계 완료한 바 있다.

임성혁 등<sup>(13)</sup>은 소듐의 큰 반응성으로 인해 일어나는 소듐-물 간의 접촉을 막기 위하여 구리밀봉 증기발생기를 개념

설계 하였다. 이중벽관, 이중전열유로, 구리밀봉 개념이 검토되었으며, 구리밀봉방식이 타 방식보다 낮은 소듐-물 반응 발생 빈도를 가졌다.

유승호 등<sup>(14)</sup>은 유량상실 조건에서의 중간열교환기의 열유동 분포를 수치해석을 통하여 연구하였다. 안전해석 코드와 STAR-CCM+ 코드 둘 간의 결과를 비교하였으며, 단열재와 고체 구조물을 통한 열유동 발생 가능성을 확인하였다. 소듐의 정체는 전열관의 온도 차이를 만들며, 이는 유동의 완충영역에서 일어남을 확인하였다.

이성현 등<sup>(15)</sup>은 지진 하중에서의 PGSFR 펌프 구조 건전성을 평가하였다. 결론적으로 안전정지지진에 해당하는 0.3g의 횡방향 가속도에도 모든 평가 단면에서 응력 허용치 기준을 만족함을 보였다.

윤정 등<sup>(16)</sup>은 핵연료 손상에 의한 핵분열 생성물의 노심 외부 검출 가능성을 보고 그 검출기 위치의 선정 위해 냉각재의 풀 내부 체류시간을 계산하였다. 노심 출구와 가까운 고온풀은 그 구조상 검출기의 설치가 어렵고, 그보다 먼 중간열교환기 부근에서는 지발중성자 반감기 대비 체류시간이 길어서 설치가 부적합한 것으로 나타났다.

김우식 등<sup>(17)</sup>은 고온풀과 커버그스의 혼입 방지 설계 확인을 위한 시험장치에서 PIV를 활용하여 고온풀 내 유동을 가시화하였다. 노심 출구에서 나온 유체는 일부는 자유 표면을 따라, 일부는 수평방향으로 흘러 중간열교환기로 흘러감을 확인하였다.

김찬수 등<sup>(2)</sup>은 소듐냉각고속로에서 적용되는 피동안전계통인 원자로공동냉각계통의 외부 공기 자연순환 냉각에 대한 척도 해석 방법을 개발하였고, 기존 방법론과의 차이점은 높이비에 따른 혼합대류 열전달의 정량화였다. 이를 통해 원자로공동냉각계통에서 중요한 안전 인자중 하나인 원자로 용기 외벽 온도를 보다 잘 예측할 수 있었다.

#### 5. 설계기준사고 및 초과사고 관련 연구

설계기준 초과사고에 대한 연구는 그 발생이 다시금 증명된 후쿠시마 이후에 그 중요성이 환기되었다. 전원 상실과 안전 계통들의 작동, 나아가 피동성에 관한 내용이 주를 이루고 있다.

윤영철 등<sup>(18)</sup>은 전원상실사고를 대비하여 존재하는 원전의 비상디젤발전기의 연료분사펌프의 진단신호를 분석하였다. 이는 디젤발전기의 안정적인 전원 공급과 관련이 있으며, 운전 부하와 연소 특성의 상관관계가 연구되었다. 그 물리적 신호는 연료분사펌프의 토출밸브 후단의 진단신호의 위상이며, 이는 연소압과 비교되어 실제 연료가 분사된 위상과 동일하게 간주될 수 있음을 보였다.

신수재 등<sup>(19)</sup>은 냉각수를 보충하는 노심보충탱크의 주입 성능에 관하여 수치적으로 연구를 진행하였으며, 주요 설계인

자들이 노심보충탱크의 주입 성능에 미치는 영향에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 설치위치가 높아지고, 배관의 유로저항 값이 낮아질수록 노심보충탱크 유량은 증가하였다.

윤범수 등<sup>(20)</sup>은 SPACE 코드를 활용하여 설계기준 초과사고 중 하나인 다중고장사고에 대한 대처기술 개발 현황을 분석하였다. 다중고장사건을 선정하고 그 해석을 위한 통합 안전해석코드를 개발 과정을 소개하고 있다. 안전해석 코드의 개발에서는 현상에 대한 우선순위표 개발, 검증 매트릭스 개발, 핵연료 거동평가 모델 개발을 통해 시나리오를 검증하였으며, 그 해석 결과를 검증하는 실험을 수행하였다. 또한 해석 방법론을 개발하고 이를 바탕으로 다중고장사고 대처기술을 개발하였다.

유일용 등<sup>(21)</sup>은 과도현상의 고정밀 평가를 위하여 반응도 부가 사고, 노심 비정상출력분포 등과 같은 다물리 현상을 해석하기 위한 코드의 개발 및 통합 연구를 다뤘다. 필요한 코드는 노심 동특성 코드, 부수로 코드, 핵연료 성능해석 코드, 수화학 코드 등이 있고 이를 연계하는 플랫폼이 필요하다. 그 결과를 OPR1000의 반응도 기인사고의 경우에 대해 예비평가를 수행하였다.

송우진 등<sup>(22)</sup>은 OPR1000 원전의 증기발생기 전열관 파단 사고에 대하여 안전주입수의 영향을 평가하였다. 현행 안전주입 전략은 냉각재 상실사고에 기반하였기 때문에, 파단측의 증기발생기 수위 증가 등의 문제가 있다. 연구 결과에 따르면 현 안전주입수의 25% 유량만으로도 노심의 냉각수 재고량을 노심 손상 없이 회복시킬 수 있으며, 오히려 안전주입수의 과주입은 증기발생기 수위 증가를 통한 환경으로의 방사능 누출 가능성을 늘린다.

신정욱 등<sup>(23)</sup>은 APR1400 원전의 안전 주입시스템의 가스 축적시의 동적 배기를 평가하였다. 공기 등의 비응축성 가스의 축적은 계통 작동에 악영향을 미치거나 계통 내로 누설 시, 펌프의 공동현상 및 수격현상을 일으킬 수 있다. 따라서 이를 방지하기 위해 펌프의 기동 및 정지를 반복하는 동적배기를 통하여 배기 불가능한 지점의 비응축성 가스를 내보내는 것의 유효성을 평가하였다. 그러나 MARS-KS 코드 해석결과, 동적배기를 수행하여도 안전주입계통 상부의 공기는 제거되지 않았다. 따라서 안전주입배관의 충수상태 점검에 대한 중요성을 환기하고 있다.

정우림 등<sup>(24)</sup>은 전원상실을 동반한 지진으로 인한 최종 열침원 상실 사고에 대하여 원자력 발전소의 사고 전개를 MARS-KS 코드를 사용하여 연구하였다. 해당 사고 과정에서 주증기 대기 방출밸브는 보조 급수가 이루어질 때만 그 효과를 장담할 수 있으며, 이를 통해 1차측의 온도와 압력을 낮출 수 있으므로 사고 완화에 기여한다. 터빈작동 보조급수 펌프의 관리가 전체적인 사고 완화에 중요하며, 주증기 대기 방출밸브의 수동 개방 시, 그 고착에 유의하여야 한다는 결론을 내렸다.

최용석 등<sup>(24)</sup>은 반응도기인사고를 모의하는 강제유동 비등열전달 실험을 수행하였다. 반응도삽입에 의한 급격한 노심출력의 상승을 펄스전원과 히터를 사용하여 모사하였다. 튜브 내벽에서 유체로 전달되는 열량은 역 열전도도 계산을 통해 이루어졌다. 출력펄스 시에 큰 폭의 온도 상승이 관찰되었고, 열유속의 변화에 따른 핵비등, 핵비등이탈, 막비등, 재적심 현상이 관찰되었다.

최용석 등<sup>(25)</sup>은 ANSYS-FLUENT를 이용하여 연구용 원자로 상부에서 이루어지는 열 성층화를 연구하였다. 계산 결과는 실제 원자로와 비교적 잘 일치하였으나, 난류 모델의 혼합 효과가 실제보다 약간 저평가 되는 것을 확인하였다.

강경준 등<sup>(26)</sup>은 격납건물 감압 및 냉각을 위해 사용되는 살수냉각 계통에 의한 압력거동을 증소형원자로에서 분석하였다. GOTHIC이라는 열수력 코드를 통하여 계산한 결과로, 300MW 열출력을 지니는 원자로의 경우, 격납건물 압력을 192시간 까지 제한치 이하로 유지하기 위하여 200gpm 이상의 살수가 요구된다고 밝혔다.

## 6. 계통해석코드의 다중스케일화 관련 연구

현재 사용되는 계통해석코드들은 1차원 단순화 모델이다. 비교적 단순한 모델임에도 불구하고 실제 원자력 발전소의 사고를 모의하고 충분히 해석 할 수 있었지만, 보다 높은 안전 기준에 부합하는 복잡한 3차원 현상들을 해석하기 위하여 다중스케일화와 타 코드와의 결합 등이 연구되고 있다.

유진성 등<sup>(27)</sup>은 MARS-KS의 다중스케일 해석을 위해 STAR-CCM+와 연계하는 방법을 연구하였다. 단상열전달 문제에 대해, 간격일치와 열 균형을 통하여 그 연계 적절성을 확인하였다.

추연준 등<sup>(28)</sup>은 격납용기 해석코드 CAP의 파이프 모델 개발 및 검증 현황을 보고하였다. 파이프의 열 및 질량 전달 모델, 벽면 비등 모델 등을 구축하였고, COPAIN 응축 실험을 통하여 검증하였다.

이재룡 등<sup>(29)</sup>은 원자로 증기관 파단 사고를 다물리/다중스케일 기법을 이용하여 해석하였다. 중성자동역학코드, 안전해석코드, 기기스케일 열수력코드 셋을 혼합하였으며, 최종적으로 노심의 출력 비대칭과 그에 따른 최소 임계열유속 지점을 확인하였다.

이승준 등<sup>(30)</sup>은 원자로 냉각재사고를 3차원적으로 해석하였다. 기기스케일 열수력코드인 CUPID-RV가 사용되었으며, 실제 벌어지는 열수력 현상들을 3차원적으로 잘 예측함을 확인하였다.

## 7. 연구로 관련 연구

19년도에 건설허가를 획득한 기장 연구로 관련한 연구가

활발하게 이루어지고 있다. 해당 연구로의 열출력은 15MW 규모이며 열수력적 측면과 그 안전성에 대한 연구가 이루어졌다.

박홍범 등<sup>(31)</sup>은 수위가 일차 냉각계통 펌프가 수조보다 낮은 경우에 설치될 경우, 수조수의 상실을 일으키는 사이폰 현상을 차단하기 위한 연구를 진행하였다. 이를 위해 밸브 중 글로브 밸브와 게이트 밸브의 장단점이 비교되었고, 결론적으로 끼임의 우려가 없는 글로브 밸브를 사용하기로 결론 내렸다.

김다용 등<sup>(32)</sup>은 역지밸브 설치에 따른 펌프 관성서행유량에의 영향을 분석하였다. 역지밸브는 평소에는 작동하지 않는 예비 펌프를 역류로부터 보호하는 밸브이며, 그 존재로 인해 유동 저항이 증가하여 관성서행시 유량 감소의 우려가 있다. 유량 감소폭은 서행의 후기에서 그 폭이 더 컸으며, 관성서행유량은 연구로에서 중요한 의미를 가지는 만큼 설계시 이를 고려할 필요가 있다.

박홍범 등<sup>(33)</sup>의 후속 연구로, 사이폰 차단밸브의 성능이 수치적으로 연구되었다. 기존의 사이폰 차단 밸브가 사이폰 현상을 효과적으로 감소시켰으며, 그 척도인 undershooting height가 만족스러웠으므로 그 설계가 적합하다는 결론을 내렸다.

## 8. 기타 원자력 기기 및 열유체 관련 연구

기타 연구들은 열수력 현상에 대한 기초적인 연구들이 주를 이루었다. 최근 이슈가 되는 빅 데이터의 접목이나 지진 관련 연구 등도 연구되고 있다.

박병하 등<sup>(34)</sup>은 초고온 가스로의 적용이 용이한 인쇄회로형 열교환기 선택 및 설계를 연구하였다. 해당 운전 조건에서, 설계 요건을 유체 압력으로 설계하느냐, 그 차압으로 설계하느냐에 따라서 4배의 체적 차이가 났으며, 그 차이는 모듈의 개수에 의해 기인한다.

이강희 등<sup>(35)</sup>은 원자력 발전소의 냉각재 순환 시에 발생하는 압력섭동 및 진동 신호에 대한 연구를 진행하였다. 1/5로 축소된 모의 실험장치에서 진행하였으며, 출력 스펙트럼 분포를 통해 주파수에 따라 분석하였다. 그 대부분은 펌프에 의하여 발생하였으며, 주기성이 두드러졌다.

강경준 등<sup>(36)</sup>은 소형 원전인 SMART의 재장전 수조의 열성층화를 해석하였다. 사고 시 재장전수조로 유입되는 증기로 인해 재장전수조 내에 자연순환으로 인해 이뤄지는 열적 성층화를 확인하였다.

이혁순 등<sup>(37)</sup>은 보조급수펌프의 우회배관 다단오리피스 후단에서 발생한 누설의 원인을 공동현상 및 진동에서 찾았던 연구 결과이다. 그 유량이 증가하면서 진동은 급격하게 증가하였고, 그에 따른 공동현상이 발생하여 배관이 파손되었고 누설이 발생했다고 밝혔다. 이를 방지하기 위해서는 그

유량을 공동현상이 발생하지 않는 특정 유량 이하로 유지할 필요가 있다고 주장하였다.

김태호 등<sup>(38)</sup>은 분율, 속도, 직경 등 국소 액적 변수를 측정하기 위하여 단일 광섬유 센서를 적용하였으며 그 결과에 대하여 논의하고 있다. 액적 분율은 고속카메라와의 연동을 통해, 속도는 접촉 신호와 그 시간당 감소율로, 직경은 액적 현의 길이 분포함수를 통하여 측정하였다. 모든 변수에 대하여 그 측정 성능에 대한 검증이 완료되었다.

허재석 등<sup>(39)</sup>은 작은파이프와 차별되는, 큰 파이프에서의 기포류와 슬러그류의 거동을 검증하였고, 그 결과를 SPACE 코드에 구현하였다. 계면 면적의 정확한 예측을 통하여 계면 마찰에 대한 예측 성능을 향상시켰고, 이를 통해 전반적인 유동의 거동을 잘 예측할 수 있었다.

유병현 등<sup>(40)</sup>은 과냉 핵비등 모델을 데이터 어시밀레이션을 통하여 보정하였다. 데이터 수집을 통하여 핵비등 성능에 영향을 미치는 인자들을 정리하였으며, 데이터 어시밀레이션을 통하여 이에 대한 자료를 확보하였다.

김기환 등<sup>(41)</sup>은 터빈으로의 액적 유입을 방지하는 증기발생기 습분분리기에 대한 실험적 연구를 진행하였다. 척도해석을 통하여 1/2 스케일과 실제 스케일 모형을 모두 만들어서 실험하였으며, 물-공기로 물-증기를 모사하여 실험하였다. 이상혼합류의 경우에는 상사법칙의 한계가 관찰되었다.

김기환 등<sup>(42,43)</sup>은 봉산 희석사고의 혼합 예비실험 및 본 실험을 진행하였으며, 사건의 감지 및 종결에 필요한 시간을 축소실험을 통하여 관찰하였다. 실험은 REMIX 라는 실험장치에서 이루어졌으며, 기존에 사용되던 완전혼합 가정의 타당성을 확인하였다.

박원만 등<sup>(44)</sup>은 지진 발생 시 진동으로 인한 사용후 핵연료 저장조의 물 넘침량을 예측하는 방법을 개발하였다. 넘침량에 영향을 주는 것은 진폭과 주파수이며, 진폭이 커질수록 넘침량이 늘어났다. 그러나 주파수는 수조의 길이와 그 고유진동 및 공진과 상관이 있었다는 결론을 얻었다.

윤현기 등<sup>(45)</sup>은 강제순환 운전시에도 작용하는 자연순환 구동력이 계통 유량이 미치는 영향을 평가하였다. 비정상적인 펌프 작동 시, 압력손실곡선과 펌프 성능곡선, 그리고 간략한 단상 자연순환유량의 조합으로 예측할 수 있다고 보고하였다.

## 9. 결 론

2019년 한 해 동안 한국유체기계학회의 논문과 학회에서 발표된 논문을 바탕으로 원자력기기 및 열유체 분야의 연구 동향을 확인하였다. 피동안전은 여전히 주목받는 분야이다. 최근 몇 번 보고되었던 냉각수 누설과 관련된 연구가 주목받게 되었고 이는 누설의 감지에 초점을 맞추어 진행되었다. 소듐냉각고속로 연구는 그 주목도가 상대적으로 떨어졌으나

안전계통을 위주로 여전히 진행되고 있다. 설계기준 및 초과 사고에 대한 연구들은 원자력 안전의 기본 분야이며 꾸준히 연구되고 있다. 특이할만한 사항으로는 계통해석코드의 다중스케일화가 있으며, 이는 현존하는 MARS-KS 코드와 타다중스케일 코드, 노심코드와의 결합이다. 19년도에 허가받은 가장 연구로 관련된 연구들 또한 진행중이다. 이들 중, 새롭게 대두되었다고 볼 수 있는 연구 분야는 냉각수 누설, 계통해석코드의 다중스케일화, 그리고 연구로 관련 연구이다. 해당 주제들에 대해서 원전 안전 증진에 기여할 수 있는 좋은 연구 성과가 나올 것으로 기대한다. 기존 주제들까지 포함하여 더욱 다양해진 원자력기기 및 열유체 연구 분야에서 우수한 연구성과가 발표될 수 있기를 기원한다.

## References

- (1) 박지환, 한기석, 전병국, 윤은구, 방운곤, 박현식, 2019, "SMART 원자로 자연대류 현상 모의 개별효과실험 및 해석," 한국유체기계학회 논문집, 22권, 1호, pp.41~48
- (2) 김찬수, 김용선, 2019, "높이가 다른 시험결과 비교를 통한 공랭식 원자로공동냉각계통 적도해석 개발," 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (3) 정우림, 정재준, 2019, "최종열제거원 및 전원상실 사고 시 운전원 수동조치에 따른 원자력 발전소 사고해석," 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (4) 최치용, 하귀석, 김경두, 2019, "SPACE코드를 활용한 PERSEO No.7-Part2 검증 해석," 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (5) 김연식, 어동진, 김우식, 권태순, 2019, "원자로계통내 주요 기기/부품에서의 누설특성 연구," 한국유체기계학회 논문집, 22권, 6호, pp.30~35
- (6) 권태순, 김우식, 어동진, 최청열, 2019, "원자로계통 누설감지 계통 개발," 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (7) 박지훈, 안예지, 유쾌환, 나만균, 2019, "적외선 열화상을 이용한 RCS 소량 누설 현상 분석," 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집
- (8) 조석, 김석, 배병언, 조윤제, 전우진, 운영중, 김연식, 2019, "SBO 조건에서의 APR1400 원자로 냉각재펌프 축밀봉체 성능검증시험," 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (9) 어동진, 김우식, 권태순, 2019, "누설감지 시스템 개발 및 검증을 위한 열유체 예비해석," 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (10) 강창우, 윤병조, 2019, "원전 급수가열기 전열관 누설 예측 특성 연구," 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (11) 어동진, 김우식, 최대경, 최청열, 권태순, 2019, "누설감지용 포집관 내부 온도분포 예측," 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (12) 김우식, 최대경, 최청열, 어동진, 권태순, 2019, "누설감지 포집관 스팀기 유입특성에 대한 수치 해석," 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (13) 임성혁, 홍종간, 유승호, 한지용, 최선락, 2019, "소듐-물 반응을 극소화하기 위한 구리밀봉 증기발생기의 개념 설계," 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (14) 유승호, 이현우, 최선락, 주영상, 이태호, 2019, "유량상실 조건에서 중간 열교환기의 열유동 분포 수치 해석," 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (15) 이성현, 이재한, 김성균, 김태완, 2019, "지진 하중을 받는 PGSFR 일차열전달계통 펌프의 구조건전성 평가," 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (16) 윤정, 이재환, 2019, "소듐냉각고속로 풀 내부 소듐 체류시간 계산," 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (17) 김우식, 최용석, 김석, 최해섭, 어동진, 2019, "PGSFR IHX 가스혼입 시험장치를 이용한 고온풀 내 유동 가시화," 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (18) 윤영철, 이혁순, 2019, "원전 비상디젤발전기 연료분사펌프 진단신호 분석," 한국유체기계학회 논문집, 22권, 4호, pp.37~42
- (19) 신수재, 유승엽, 김영인, 2019, "노심보충탱크 주입성능에 대한 수치적 연구," 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (20) 윤범수, 고재화, 2019, "SPACE 코드를 활용한 DEC 대처 기술 개발 현황," 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (21) 유일용, 2019, "RIA(Reactivity-Initiated Accident)-AOA(Axial Offset Anomaly) 평가용 자체 코드 개발 및 코드 통합 연구," 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (22) 송우진, 윤병조, 2019, "OPR1000 SGTR 사고 시 안전주입수 유량 영향 평가," 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (23) 신정욱, 윤병조, 2019, "APR1400 원전 안전주입계통 가스 축적 시 동적배기 평가," 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (24) 최용석, 전병국, 박종국, 문상기, 2019, "반응도기인사고 모의 급속과도 조건 강제유동 비등열전달 실험," 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집
- (25) 최영석, 2019, "Numerical Study of Hot Water Layer in Research Reactor Pool," 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (26) 강경준, 강한옥, 정문, 김중욱, 2019, "중소형원자로에서 살수냉각에 의한 격납건물내 압력저동," 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (27) 유진성, 최대경, 최청열, 조형규, 2019, "다중스케일 열수력 해석을 위한 MARS-KS 와 STAR-CCM+ 연계 및 예비해석," 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (28) 추연준, 이제희, 홍순준, 2019, "CAP 코드 Pipe 모델 개발 및 검증 현황," 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (29) 이재룡, 박익규, 조윤제, 이승준, 윤한영, 2019, "다물리/다중스케일 기법을 적용한 원자로 증기관 파단사고 해석," 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (30) 이승준, 박익규, 조윤제, 이재룡, 윤한영, 2019, "CUPID-RV코드를 활용한 원자로 냉각재상실사고 3차원해석," 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.

- (31) 박홍범, 정민규, 박기정, 서경우, 2019, “연구로에서 벨브 타입에 따른 사이폰 차단 현상 분석,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (32) 김다용, 윤현기, 김성훈, 2019, “연구용 원자로에서 역지벨브 설치에 따른 펌프 관성서행유량 감소에 대한 설계영향 분석,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (33) 박홍범, 정민규, 김다용, 김성훈, 2019, “연구용 원자로에서 실제 일차계통 배관 형상에 따른 사이폰 차단벨브의 성능 전산유체역학 해석,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (34) 박병하, 김용완, 김응선, 2019, “초고온가스로 적용을 위한 인쇄기판형 열교환기 선택 및 설계,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (35) 이강희, 강홍석, 권태순, 김기환, 김우식, 2019, “대형원전 냉각재 순환계통 모의 유동실험의 압력섭동과 진동응답 신호주기성 분석,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (36) 강경준, 정문, 강한욱, 2019, “SMART 원자로에서 격납건물내 재장전수조에서의 CFD해석,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (37) 이혁순, 최문호, 2019, “공동현상에 따른 다단오리피스 배관 고진동 영향고찰,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (38) 김태호, 배병진, 정재준, 김경두, 윤병조, 2019, “단일 광섬유 센서를 이용한 국소 액적 변수 측정 방법,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (39) 허재석, 김경두, 하귀석, 2019, “ATLAS와 LSTF 실험을 이용한 큰 사이즈 파이프에서의 기포류와 슬러그류 거동 검증,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (40) 유병현, 허재석, 윤승현, 2019, “데이터 어시밀레이션을 활용한 과냉 핵비등 모델 보정,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (41) 김기환, 김우식, 이재봉, 어동진, 2019, “증기발생기 습분분리기 실험적 연구,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (42) 김기환, 김우식, 권태순, 어동진, 최해섭, 신효성, 전우진, 이상섭, 임상규, 2019, “부주의한 봉산희석사고의 혼합 예비실험,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (43) 김기환, 김우식, 권태순, 어동진, 2019, “운전모드 4에서 노심입구 봉산혼합 실험,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (44) 박원만, 손성만, 최대경, 이강희, 강홍석, 최청열, 2019, “지진 발생 시 사용후핵연료저장조 냉각수의 넘침량 예측 방법 개발,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (45) 윤현기, 장대석, 2019, “강제순환 운전 시 자연순환력이 계통 유량에 미치는 영향 평가,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.