

2017년 원자력기기 및 열유체 분야 연구동향

김인국 · 방인철*

1. 서 론

본 특집에서는 2017년 한국유체기계학회의 논문집과 한국유체기계학회의 발표들을 조사하여 국내 원자력기기 및 열유체 분야의 연구동향을 소개하였다. 원자력기기 및 열유체 분야는 원자력 발전소의 안전성과 전력 생산 효율에 밀접한 관련이 있는 분야로 원자로냉각재 계통과 증기발생기를 포함한 2차계통의 거동과 안전계통을 포함하고 있다. 연구동향의 주요내용은 핵연료 임계열유속 증진, 피동안전계통, 일체형 원자로, 사용후핵연료 저장수조 기타 원자력기기로 분류하여 구성하였다.

2. 임계열유속 증진 기술 관련 연구

임계열유속 증진 연구는 원전의 에너지 효율과 핵연료의 안전성에 직접적으로 관련된 연구분야로 한국유체기계학회에서는 원자로 부수로 내의 혼합날개의 개선을 통한 스웰/횡방향 유동특성 변화와 마이크로 표면 제어를 통한 임계열유속 증진에 관한 연구들이 발표되었다.

박한얼 등⁽¹⁾은 원자로 핵연료 집합체 내 유동혼합을 통해 과열지점 생성을 방지하고 임계열유속을 증진하기 위하여, 기존 혼합날개를 회전형 혼합날개로 대체하는 개념을 소개하고 실험을 통한 혼합형 회전날개의 유동특성을 분석하였다. 2×3의 채널을 부수로 대비 1:2.5 비로 증가시켜 질량유속 400-680 kg/m²s에서 PIV 가시화 실험을 수행하여 횡방향 유동장을 높이에 따라 분석하였다. 그 결과 기존의 고정 혼합날개가 가장 큰 횡방향속도를 보이지만 국부적으로 낮은 횡방향속도가 생성되는 지점이 형성되며 국부적인 과열 지점을 형성할 수 있음을 확인하였으며, 이에 반해 회전 혼합날개는 균일한 교차류를 형성함을 확인하였다.

심동일 등⁽²⁾은 FOTS 물질의 증착을 이용하여 실리콘 평판의 표면 젖음성 및 친수성 소수성 표면 제어에 따른 기포의 탈착특성을 실험적으로 분석하였다. 10 mm×100 mm 실리콘 평판과 2 μm 길이의 나노 와이어를 사용하여 친수성 특

성이 증대될수록 기포의 크기가 작아지고 기포와 작동유체 사이의 접촉각 또한 줄어드는 것을 관찰하였다. 결과적으로 친수성 표면에서 기포의 발생이 늦게 일어나지만 작은 기포가 빠르게 탈착되어 열전달 계수와 임계열유속 모두 증진됨을 확인하였다. 4가지 표면(SiNW, Bare Si, Si+FOTS, SiNW+FOTS) 중에서 초친수 표면인 SiNW에서 가장 높은 임계열유속 증진(88%)을 보였다.

이남규 등⁽³⁾은 마이크로-나노 복합구조를 이용한 임계열유속 증진 연구를 수행하였다. DRIE (Deep Reactive Ion Etching) 기법을 이용하여 30 μm 깊이의 구조를 형성하고 RTD (Resistance Temperature Detector)를 이용하여 온도와 열유속을 측정하였다. 마이크로-나노 복합구조는 비등 기포간의 응집을 억제하고 나노 구조물을 통해 포의 크기를 감소시켜, 임계열유속이 증진됨을 확인하였다.

3. 피동안전계통 관련 연구

2011년 후쿠시마 원전 사고 이후로, 전력상실 사고시 (Station Blackout) 펌프를 포함한 능동형 안전계통에 대한 우려가 높아짐에 따라, 외부 전원이 필요하지 않은 피동형 안전계통에 대한 연구가 국내외에서 활발하게 진행되고 있다.

고민석 등⁽⁴⁾은 사고시 원자로 건물의 내부 압력과 온도, 원자로건물 피동냉각계통의 거동을 확인하기 위한 모의 원자로 건물 실험장치의 예비 연구를 수행하였다. 실험장치는 1/288의 부피비와 원자로건물 내 유동왜곡을 최소화하기 위하여 종횡비를 1/6.6으로 설계하였다. 원자로에서 생성되는 증기를 열원으로, 피동열제거원의 열전달 면적비와 체적비가 1/203.6과 1/288로 유도됨을 확인하였다.

국내에서 APR+용 피동보조급수계통(Passive Auxiliary Feedwater System)의 작동시간을 증가시키기 위한 방안으로 피동 공냉식 열교환기를 통한 증기 포집방안이 고려되고 있다. 전성수 등⁽⁵⁾은 계통해석코드(MARS)를 이용한 성능분석으로 피동보조급수 계통이 72시간 이상의 장기냉각이 가능함을 확인하였다.

* 울산과학기술원(UNIST) 기계항공 및 원자력공학부(Ulsan National Institute of Science and Technology, School of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering)
교신저자, E-mail : icbang@unist.ac.kr

이승태 등⁽⁶⁾은 보조급수계통의 공냉 열교환기 튜브다발의 열전달 및 압력강하에 대한 실험을 통하여 평균 공기 속도 0.5–2.5 m/s 범위에서 열전달 계수와 압력강하에 대한 정량적 결과를 얻었고 실험상관식들에 비하여 다소 낮게 예측됨을 확인하였다. 그리고 권태순 등⁽⁷⁾은 핀튜브 열교환기에 대한 열전달 특성을 실험을 통하여 분석하였다. 핀튜브 내부는 증기가 흐르고 외부는 공냉식 자연순환 냉각방식을 고려하였으며, 실험에서는 유속을 0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 m/s로 조절하며 해석을 수행하였다. 이를 통하여 122 kPa와 155 kPa 포화 증기조건, 122 kPa 과열증기 조건에 대하여 증기응축 열전달계수를 도출하였다.

4. 일체형 원자로 관련 연구

일체형 원자로(SMART)는 원자로 노심, 가압기, 냉각재 펌프, 가압기 등의 1차계통기기를 단일용기에 내장하고 있는 원자로이다. 이러한 구조는 1차계통의 소형화를 통한 배관의 감소와 대형배관이 존재하지 않기 때문에 배관파단에 의한 대형냉각재상실 사고가 발생하지 않는 장점을 지닌다. 일체형 원자로에서는 단일용기 내에 다수의 원자력기기가 조밀하게 구성되어 있기에 원자로의 정상운전 및 과도 운전 상태에서의 용기 내 압력 및 유량을 예측하는 것이 중요하다.

일체형 원자로의 가압기는 국내 상용대형원전과 달리 원자로 용기 상부에 내부 압력을 조절하는 증기가압기가 존재한다. 따라서 노심 출력 변화에 따른 원자로 내 열팽창/수축에 따라 가압기의 수위와 압력이 변화하게 되며, 원자로 압력은 안전제한치 이하를 유지하여야 한다. 이민규 등⁽⁸⁾은 원자로 내부를 검사체적(가압기, 원자로냉각재계통, 정제 구간)으로 분리하여 질량, 에너지, 열전달에 대한 방정식을 기반으로 과도해석을 수행하였다. 계산 결과로 출력변화에 따라 가압기 수위의 변화가 관찰되지만 증기가압기의 고위수 경보 및 저수위 경보 기준 내에서 운전됨을 확인하였다.

이민규 등⁽⁹⁾은 원자로 정지운전시의 가압기 살수계통의 과냉 조건에 따른 냉각성능을 평가하였다. 질량보존 방정식 및 에너지보존 방정식을 기반으로 살수 유량을 선정하였으며, 31.3–81.3°C 과냉 조건에 대하여 계산을 수행하였다. 41.3–81.3°C 과냉 조건에서는 살수유량을 충족하였고 31.3°C 과냉 조건의 경우, 요구 살수 유량이 살수 계통의 유량을 초과하는 결론을 얻었다.

일체형 원자로에 대한 피동잔열제거 계통에 관한 연구도 활발히 진행되고 있는 분야 중 하나이다. 문주형 등^(10,11)은 국내의 비안전계통에 대한 규제요건을 정리하고 이에 따른 일체형 원자로인 스마트원자로의 피동안전계통 설계시 국외 요건을 참조하여 설계하는 것을 제안하였다. 그리고 스마트원자로의 피동잔열제거계통의 성능을 모의하기 위하여 MATLAB 소프트웨어를 이용한 성능 해석 프로그램을 개발하여, 피동잔

열제거계통 내부의 충전율(Filling Ratio)에 따른 원자로 냉각재계통의 온도변화와 피동잔열제거계통의 냉각성능을 평가하였다. 해석결과 피동잔열제거계통의 충전율은 사고 초기의 냉각성능에 큰 영향을 주고 장기냉각시의 영향은 미미하게 나타나는 것을 확인하였다.

5. 사용후핵연료 저장수조 관련 연구

후쿠시마 원전사고 이후, 원자력발전소 내의 사용후핵연료 저장수조의 안전에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 한국원자력학회 학술회의에서는 외부 전원없이 피동적으로 냉각이 가능한 히트파이프를 이용한 냉각계통과 지진 발생조건에서의 저장수조의 거동분석에 대한 발표가 수행되었다.

임창완 등⁽¹²⁾은 다분지형 히트파이프를 이용한 사용후핵연료 저장수조의 피동형 냉각계통에 대하여 소개하고 1개의 증발부와 12개의 냉각부를 지니는 다분지형 히트파이프의 냉각 성능을 실험적으로 도출하고 이론해석과 비교하였다.

이강희 등⁽¹³⁾은 지진발생조건에서의 사용후핵연료 저장수조의 1/20 비의 축소 모형 수조를 이용한 예비실험을 수행하였다. 주파수에 따라서 슬로싱 파형과 파고, 조파압력 등의 시험자료를 얻었다.

6. 기타 원자력기기 관련 연구

원자력기기와 관련하여 소듐냉각고속로의 증기발생기 개발,⁽¹⁴⁾ 발전기 리테이어링 평가,^(15,16) 파이프 열처리공정에 따른 열전달 성능평가 등^(17,18)과 관련된 발표가 수행되었다. 증기발생기 및 열교환기의 성능 평가를 위한 해석 사례들이 발표되었으며 기타 기기들에 대한 건전성 평가 등이 소개되었다.

7. 결 론

2017년 한국원자력학회 논문과 한국원자력학회에서 발표된 논문을 바탕으로 원자력기기 및 열유체 분야의 연구동향을 확인하였다. 열적 한계로서 핵연료 임계열유속 증진을 위한 부수로 유동제어, 열전달 표면 특성 제어에 대한 꾸준한 연구결과가 보고되는 가운데, 후쿠시마 원전사고의 영향으로 피동안전계통에 대한 연구와 사용후핵연료 저장수조의 안전성과 관련된 해석이 높은 비중을 차지하였다. 그리고 중소형원전인 스마트원자로와 관련된 내부 거동 예측을 위한 계통 민감도 분석 등의 연구가 발표되었다. 최근 원자력 안전에 관련한 문제가 크게 대두됨에 따라, 앞으로도 원전의 안전성을 증진시킬 수 있는 연구 성과들이 발표될 것으로 기대하며, 다양한 원자력기기 및 열유체 연구 분야들의 우수한 연구성과가 발표되기를 기원한다.

References

- (1) 박한얼, 방인철, 2017, “회전 혼합 날개의 교차류 균일화 효과를 통한 원자로 부수로 내 임계열유속 증진 전략,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집, pp. 389~390.
- (2) 심동일, 이동휘, 최지홍, 이남규, 최승영, 조형희, 2017, “표면 젖음성에 따른 기포 거동 및 비등 열전달 특성 연구,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집, pp. 393~394.
- (3) 이남규, 이동휘, 김범석, 최지홍, 조형희, 2017, “마이크로-나노 복합구조물을 이용한 임계열유속 특성 연구,” 한국유체기계학회 하계 학술대회, pp. 313~314.
- (4) 고민석, 권구원, 추연준, 홍승준, 배병인, 강경호, 2017, “모의 원자로건물 피동열침원 및 내부격실 설계,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집, pp. 401~402.
- (5) 전성수, 홍승준, 배성원, 권태순, 2017, “계통해석코드를 이용한 피동 공랭식 열교환기 모델링 및 성능 분석,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집, pp. 299~300.
- (6) 이승태, 주인철, 권태순, 2017, “원형핀 튜브 열교환기 공기냉각 열전달 측정,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집, pp. 297~298 .
- (7) 권태순, 박길원, 설효성, 2017, “핀튜브 열전달 특성,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집, pp. 301~302.
- (8) 이민규, 문주형, 한훈식, 김석, 김영인, 2017, “일체형 원자로의 선형출력변화에서 증기가압기에 대한 과도해석,” 한국유체기계학회 논문집, 20권, 6호, pp. 57~62.
- (9) 이민규, 김석, 유승엽, 윤주현, 김영인, 2017, “가압기 살수 온도가 일체형 원자로의 감압에 미치는 영향,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집, pp. 309~310.
- (10) 문주형, 김영인, 2017, “비안전계통 규제요건을 반영한 피동안전계통 연구,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집, pp. 399~400.
- (11) 문주형, 기준우, 김석, 김우식, 김영인, 2017, “피동잔열제거계통 성능 예측,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집, pp. 327~328.
- (12) 임창환, 김형대, 2017, “사용후핵연료 저장수조 피동냉각용 다분지형 히트파이프 성능에 대한 실험적 연구,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집, pp. 319~320.
- (13) 이강희, 강홍석, 오동석, 윤경호, 권태순, 방제건, 전태현, 김수호, 박원만, 2017, “사용후핵연료 저장조의 슬로싱 해석과 모형수조를 이용한 지진모의시험,” 한국유체기계학회 동계 학술대회, pp. 403~404.
- (14) 권길성, 김석, 조현준, 김영인, 김상지, 2017, “소듐냉각고속로용 차세대 증기발생기 개발 전략,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집, pp. 317~318.
- (15) 김낙점, 윤희철, 모민환, 2017, “유도가열에 의한 발전기 리테이닝 링의 현장적용 결과에 대한 관찰,” 한국유체기계학회 동계 학술대회, pp. 391~392.
- (16) 김낙점, 모민환, 박기열, 2017, “유도가열에 의한 발전기 리테이닝 링의 팽창량에 대한 고찰,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집, pp. 307~308.
- (17) 고준호, 이근식, 2017, “한여름과 한겨울 대기조건이 열처리공정에 미치는 영향,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집, pp. 305~306.
- (18) 박준수, 조형희, 2017, “USC 보일러 입구 온도 분포 변화에 따른 내부 열교환기 표면 온도 및 스팀 온도 분포 예측,” 한국유체기계학회 논문집, 20권, 6호, pp. 49~56.