

2021년 원자력기기 및 열유체 분야 연구동향

김동역*

1. 서 론

본 연감에서는 2021년 한국유체기계학회 하계/동계 학술대회 및 학술논문집에 발표된 원자력기기 및 열유체 분야 관련 연구 결과를 소개·분석하고자 한다. 해당 분과에서는 원자로 열유체 및 시스템·기기 관련 다양한 분야에서 48편의 논문이 발표되었다. 기존의 원자로 열유체 분야에서 주로 수행되어 왔던 전통적인 열유체 공학분야 연구 뿐만 아니라 최근 급속히 발전하고 있는 머신러닝 등 인공지능 기술의 원자력분야 적용을 위한 연구가 새롭게 주목을 받고 있는 것으로 판단된다. 본 연감에서는 지난 1년간의 연구논문을 열유체 실험 및 해석, 원자력 시스템 및 기기, 측정기술, 머신러닝 분야로 구분하여 소개하고자 한다.

2. 열유체 실험 및 해석

원자로 운전조건 및 사고상황에서 발생할 수 있는 열유체 현상에 대한 분석 및 예측은 원자력 안전분야의 핵심적인 이슈이다. 이러한 원자로 열수력 분야의 최근 연구 동향은 고정밀 실험 데이터베이스 구축 및 다양한 스케일에 대한 수치 해석 연구로 요약될 수 있다.

강인엽 등⁽¹⁾은 강제대류 과냉 비등 조건에서 벽면에서 발생하는 증기기포를 활주 기포와 분출 기포로 구분하고 벽면 이탈직경 및 속도를 측정하였다. 이를 통해 두 종류의 기포 간 유의미한 차이점을 확인하였다.

강진훈 등⁽²⁾은 원자로 피동 격납건물 냉각계통에서 발생하는 관다발 외벽 증기응축에 대한 실험연구를 수행하였다. 응축 열전달이 장막효과 및 흡입효과에 현저한 영향을 받는 것으로 나타났으며, 이를 고려한 수정 응축열전달 상관식을 제안하였다.

나인식 등⁽³⁾은 원자로 중대사고 상황에서 발생할 수 있는 노심용융물 침수에 의한 제트파쇄 현상에 대한 CFD 해석을 수행하였다. 이를 통해 해석결과의 정성적 타당성을 평가하였다.

신동화 등⁽⁴⁾은 CFD 해석을 적용하여 원자로 배관의 유동

가속부식으로 인한 감속효과를 평가하고, 설계개선을 위한 배관 디자인을 제안 및 검증하였다.

김승수 등⁽⁵⁾은 수냉식 사용후 핵연료 저장조 내에서의 비등 열전달 현상에 대한 CFD 해석을 수행하고, 실험결과와 비교·평가하였다.

엄정현 등⁽⁶⁾은 고온 구체의 급속 냉각 현상에 대한 CFD 해석을 수행하고, 적용되는 난류모델에 따른 해석결과의 차이점을 분석하였다.

이제희 등⁽⁷⁾은 원자로-격납용기 연계 시스템 스케일 열수력 해석을 위한 방법론을 제안하고 이를 실험결과와 비교·검증하였다.

함정균 등⁽⁸⁾은 원자력 발전소 내 계통에 활용되는 판형 열교환기의 출구배관에서 발생할 수 있는 열성층화 현상에 대한 CFD 해석을 수행하였다.

이선일 등⁽⁹⁾은 원자로 가동시 발생하는 핵연료의 부풀림 및 산화층 성장에 의한 유동면적 감소로 인한 원자로 냉각수 유량변화에 대한 단순 해석을 수행하였다.

이동훈 등⁽¹⁰⁾은 CUPID 코드를 활용하여 곡관 내부에서의 이상유동에 의한 기포 분포에 대한 해석을 수행하고, 해석 결과를 기존의 실험결과와 비교·검증하였다.

Alatrash 등⁽¹¹⁾은 CUPID 코드를 활용하여 과냉 벽면비등 현상을 모의하고, 해석 결과를 기존의 실험데이터와 비교·검증하였다.

조운제 및 윤한영⁽¹²⁾은 CUPID 코드를 활용하여 냉각수-붕소 혼합현상에 대한 해석을 수행하고, 해석 결과를 기존의 실험결과와 비교·평가하였다.

손지현 등⁽¹³⁾은 CUPID 코드를 활용하여 원자로 격납건물 기체 혼합 특성에 대한 해석을 수행하였다. 해석결과를 기존 실험데이터와 비교하여 코드의 예측성을 평가하였다.

도성주⁽¹⁴⁾는 기존의 CUPID 코드에 멀티 그리드 알고리즘을 탑재하여 알고리즘의 안정성 및 속도개선 효과를 검증하였다.

박소현 및 김응수⁽¹⁵⁾는 노심용융물 노내 역류 현상을 모의하기 위해 완화입자유체동역학 기법을 활용한 전산해석체계를 개발하였다. 또한, 시스템 해석코드인 MARS코드와의 연

* 중앙대학교 에너지시스템공학부 (School of Energy System Engineering, Chung-Ang University)
E-mail : dekim@cau.ac.kr

계 방법론을 수립하였다.

김종태 등⁽¹⁶⁾은 원자로 중대사고 시 활용되는 피동수소재 결합기(PAR)에 대한 시스템 스케일 수치해석 코드를 개발하였다. 이를 활용하여 기존의 실험 데이터에 대한 예측성을 평가하였으며, SMART 및 APR1400 원자로에 코드를 적용하여 해석을 수행하였다.

박현선 등⁽¹⁷⁾은 원자로 중대사고 시 노심용융물 노내 역류 현상에 대한 대외류 모사해석(LES) 기법의 적용성을 분석하였다.

조영범 및 김응수⁽¹⁸⁾는 원자로 중대사고 시 핵연료 파편층 평탄화 현상에 관한 입자완화유체동역학-이산요소법 연계 전산해석 방법론을 개발하였다. 해석결과를 기존 실험데이터와 비교·검증하여 수치 방법론의 타당성을 입증하였다.

박일웅 등⁽¹⁹⁾은 APR1400 원자로 용기 외벽냉각 모의를 위한 MARS 코드 내 모델 개발을 수행하고, 이를 적용하여 코드 해석 결과를 분석하였다.

김석 및 김상지⁽²⁰⁾는 단순 해석 기법을 적용하여 인쇄기판형 증기발생기에 대한 전도 열저항 민감도 분석을 수행하였다.

김연식 등⁽²¹⁾은 원자로 사고상황에서 발생할 수 있는 임계유동에서의 Meta-stable 효과에 대한 모델평가 및 분석을 수행하였다. 추가적으로 오리피스 직경 변화에 따른 임계유동 특성에 대한 분석을 수행하였다.

3. 원자력 시스템 및 기기

원자력 발전소는 광범위한 과학·공학 분야 기술의 융합을 통해 설계·구축·운영된다. 이로 인해 최근에도 매우 다양한 원자력 시스템 및 기기에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다.

최대경 등⁽²²⁾은 상용 CFD 해석코드를 활용하여 원전 내 누설 감시시스템에 대한 해석 및 성능 평가를 수행하였다. 이를 위해 포집 시스템 내 증기-액체 상변화, 기체 혼합·확산, 열유동 현상 등을 복합적으로 모의할 수 있는 수치해석 방법론을 수립하였다.

강경준 등⁽²³⁾은 MARS 코드를 활용하여 선박용 일체형 원자로에 적용되는 피동냉각계통에 대한 열수력 해석을 수행하였다. 이를 통해 설계된 안전계통의 타당성을 검증하였다.

이대건 등⁽²⁴⁾은 자체개발된 해석코드를 활용하여 원자력 발전소 주급수계통 배관에 대한 피로해석을 수행하여 설계 수명의 타당성을 검증하였다.

박성일 및 정재준⁽²⁵⁾은 MARS 코드를 활용하여 증기발생기 세관판단사고 시 발생할 수 있는 원자로 냉각수 붕소희석 현상의 영향을 평가 및 분석하였다. 이를 통해 역류입 냉각 방법의 안전 타당성을 검증하였다.

김석 및 김상지⁽²⁶⁾는 인쇄기판형 증기발생기 열성능에 대

한 2차계통 급수 유량의 영향을 평가하기 위해 단순 모델을 활용한 수치해석을 수행하였다.

이공희 등⁽²⁷⁾은 상용해석 코드를 활용하여 원자로 사고 시 활용되는 보조급수 배관에서 발생할 수 있는 캐비테이션 현상 및 응답특성에 대한 수치해석 및 분석을 수행하였다.

김다용 및 박홍범⁽²⁸⁾은 기존 모델을 활용하여 원자로 내 역류방지밸브 폐쇄에 의한 수충격 현상에 분석을 수행하고 수충격 방지 방안을 제안하였다.

박홍범 및 서경우⁽²⁹⁾는 상용 CFD 코드를 활용하여 연구용 원자로 내 피동형 플랩밸브로 인한 압력손실을 계산 및 분석하였다.

박기정 등⁽³⁰⁾은 원자력 발전소용 주요 기기의 성능 검증을 위한 고온·고압 시험장치에 부착되는 배수계통 오리피스에 대한 개념설계를 수행하였다.

조석 등⁽³¹⁾은 APR1400용 원자로 냉각재 펌프의 50시간 성능시험 결과를 분석하였다.

정명진 등⁽³²⁾은 히트파이프 냉각 원자로에서의 노심 다물리 해석을 위해 오픈폼 및 기존 히트파이프 열해석코드(ANLHTP)의 연계해석 체계를 수립하고, 해석을 수행하여 타당성을 검증하였다.

문주형 등⁽³³⁾은 일체형 원자로 SMART에 적용되는 인쇄기판형 증기발생기의 열수력 성능 검증을 위한 시험요건을 개발하고, 시험장치의 척도해석 및 기본설계 사항을 제시하였다.

정준호 및 오진호^{(34),(35)}는 연구용 원자로에서 조사물의 장전 및 인출을 위해 활용되는 수력이송계통 연구를 위해 실험장치를 설계·구축하고 실험을 수행하였다.

김상지 및 김태우⁽³⁶⁾는 소듐냉각고속로에 활용되는 인쇄기판형 증기발생기의 열전달 특성에 대한 1차원 해석 및 CFD 해석을 수행하였다. 추가적으로, 소듐-물 반응에 의한 증기발생기 내 압력전파 거동을 기존의 코드를 활용하여 평가 및 분석하였다.

4. 측정기술

원자로 기기 및 열유체 분야에서는 다양한 현상에서 나타나는 물리량의 고정밀 측정을 위한 측정 기술의 개발이 꾸준히 이루어져 왔다.

김태호 등⁽³⁷⁾은 원자로 사고 시 나타날 수 있는 환상 분무 유동 상황에서의 액적 변수 측정을 위한 이중 광섬유 센서기법 개발 및 최적화를 수행하고, 이를 실험적으로 검증하였다.

문정민 등⁽³⁸⁾은 이상유동 상황 하에서 기포속도 및 기포 크기 측정을 위한 단일 광섬유 센서 프루브를 개발하여 실험을 통해 성능을 평가·분석하였다.

권태순 등⁽³⁹⁾은 가압 경수로 적용을 위한 소량 미확인 누

설 감지계통을 설계하고, 예비평가를 통해 설계 개념의 타당성을 검증하였다.

김병연 등⁽⁴⁰⁾은 액체금속로 용 액체금속 압력전송기에서 나타날 수 있는 온도 보정문제를 해결하기 위한 측정방법론을 개발하고 이를 실험적으로 검증하였다.

문정민 등⁽⁴¹⁾은 이상유동 국소 기포 변수 측정을 위한 2중 및 4중 광섬유 센서 프루브에 대한 수치해석 및 실험을 수행하여 측정 성능을 평가·분석하였다.

5. 머신러닝 적용기술

최근, 인공지능 기술의 급속한 발전과 함께 원자력 기술에 대한 머신러닝 기술 적용에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

최준성 및 김응수⁽⁴²⁾는 기존 유동가시화 실험연구에 널리 활용되는 입자영상유속계(PIV)기법의 분석해상도 한계를 극복하기 위한 기계학습 방법론을 개발하고, 우수성을 검증하였다.

김휘웅 등⁽⁴³⁾은 국소 임계열유속 모델 개발을 위해 기계학습 기법을 활용하였다. 획득된 결과를 기존 시스템 해석코드인 MARS 코드에 적용하고 기존 실험 데이터와 비교·검증하였다.

이소영 등⁽⁴⁴⁾은 기계학습 기법을 활용하여 과냉 비등 상황에서의 기포이탈직경에 대한 예측을 수행하였으며 이를 기존의 모델과 비교하여 검증하였다.

전준구 및 김성중⁽⁴⁵⁾는 기존의 CFD 해석 및 기계학습 기법을 연계하기 위한 수치해석 체계를 수립하고 이를 검증하였다.

김도현 등⁽⁴⁶⁾은 인공지능 기법인 자기조직화 지도 및 KREM 방법론을 결합하여 원자로 안전해석코드 내 구성방정식의 신뢰성 향상을 위한 분리효과실험 설계방법론을 제안하였다.

함재현 등⁽⁴⁷⁾은 원자로 중대사고 시 발생할 수 있는 노심 용융물-콘크리트 반응 현상 해석을 위한 기계학습 모델을 구축하였으며, 민감도 분석을 통해 모델의 타당성을 평가하였다.

송창현 등⁽⁴⁸⁾은 기계학습 기법을 활용하여 원자로 중대사고 해석을 위한 대안 모델 개발연구를 수행하였으며, 개발된 모델의 예측성능을 기존 해석코드의 계산 결과와의 비교를 통해 검증하였다.

6. 결 론

본 연감에서는 2021년에 한국유체기계학회에 발표된 원자력 기기 및 열유체 분야 연구에 대해 소개 및 설명하였다. 열유체 실험 및 해석, 원자력 시스템 및 기기, 측정기술 등의

전통적인 연구분야에 추가로 최근 이슈가 되고 있는 인공지능 기계학습 기법의 원자력 기술을 적용을 위한 연구가 새롭게 이루어지고 있으며, 향후 해당 연구분야의 발전이 기대된다.

References

- (1) Kang, I. Y., Park, I. W., Yu, J., Lee, Y-G. 2021, "Classification of detaching bubbles into lifting-off and ejecting bubble in subcooled flow boiling," Proceedings of the KSF 2021 Winter Annual Meeting, pp. 223-227.
- (2) Kang, J., Moon, J., Ko, Y., Yun, B., 2021, "Study of steam condensation with air on outer surface of vertical tube bundle under free convection condition," Proceedings of the KSF 2021 Winter Annual Meeting, pp. 233-234.
- (3) Ra, I., Eom, J., Tak, G., Jeong, H., 2021, "Simulation of corium jet breakup with STAR-CCM+," Proceedings of the KSF 2021 Winter Annual Meeting, pp. 228-230.
- (4) Shin, D-H., Kim, W-T., Hong, S-P., Ji, C. H., 2021, "Evaluation of design factors affecting pipe thinning in piping system using CFD," Proceedings of the KSF 2021 Winter Annual Meeting, pp. 235-240.
- (5) Kim, S-S., Bak, J-Y., Yun, B-J., 2021, "CFD analysis of boiling heat transfer for nuclear fuels in the spent fuel pool under natural circulation condition," Proceedings of the KSF 2021 Winter Annual Meeting, pp. 364-365.
- (6) Eom, J., Ra, I., Tak, G., Jeong, H., 2021, "Effect of turbulent model on the quenching of hot solid sphere," Proceedings of the KSF 2021 Winter Annual Meeting, pp. 366-368.
- (7) Lee, J., Hong, S-J., Ko, M. S., Kang, K-H., 2021, "A study about mixed boundary condition for the RCS coupled containment simulation experiment," Proceedings of the KSF 2021 Winter Annual Meeting, pp. 496-498.
- (8) Ham, J-G., Cho, H-H., Oh, D-W., Lee, H-H., 2021, "Comparison of thermal-flow analysis results inside a plate heat exchanger depending on the inlet and outlet port," Proceedings of the KSF 2021 Winter Annual Meeting, pp. 499-500.
- (9) Lee, S., Ryu, S. U., Park, K-J., 2021, "Effect of swelling and oxide layer growth on the mass flow rate in primary cooling system," Proceedings of the KSF 2021 Winter Annual Meeting, pp. 501-502.
- (10) Lee, D. H., Sohn, D., Seo, G. H., Lee, G-H., 2021, "Simulations of two-phase flow in 90 deg elbow using CUPID code," Proceedings of the KSF 2021 Winter Annual Meeting, pp. 507-508.
- (11) Alatrash, Y., Cho, Y. J., Yoon, H. Y., 2021, "Validation of subcooled flow boiling model in the CUPID code," Proceedings of the KSF 2021 Summer Annual Meeting,

- pp. 9-11.
- (12) Cho, Y-J., Yoon, H-Y., 2021, "Prediction of boron mixing in reactor core," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 12-14.
 - (13) Sohn, J. H., Cho, Y. J., Yoon, H. Y., 2021, "CUPID code validation on prediction of gas mixing in containment-analysis of OECD/NEA-HYMERES benchmark," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 15-16.
 - (14) Do, S., 2021, "Development and validation of multi-grid algorithm for accelerating CUPID code," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 17-19.
 - (15) Park, S-H., Kim, E. S., 2021, "Particle-based numerical modeling of in-vessel retention phenomena in nuclear severe accident-Preliminary analysis," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 72-74.
 - (16) Kim, J., Kim, D., Kim, H. T., 2021, "Numerical modeling of passive auto-catalytic recombiners for hydrogen mitigation in a containment," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 75-81.
 - (17) Park, H. S., Joo, D., Whang, S., You, D., 2021, "Application of LES modeling for highly turbulent natural convection in a molten corium pool during severe accidents in nuclear power plants," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 82-84.
 - (18) Jo, Y. B., Kim, E. S., 2021, "SPH-DEM simulation on debris bed self-leveling phenomena-Parametric study," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 85-86.
 - (19) Park, I. W., Lee, Y-G., Song, M. S., Kim, E. S., 2021, "Development of MARS-KS model for simulation of external reactor vessel cooling applied to APR1400," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 146-148.
 - (20) Kim, S., Kim, S. J., 2021, "Sensitivity of conductive thermal resistance to thermal performance of printed circuit steam generators with zigzag channels," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 331-332.
 - (21) Kim, Y-S., Kim, J-H., Eug, D-J., Kim, W-S., Kwon, T-S., 2021, "Investigation of characteristics on subcooled critical flowrate in orifices," The KSFM J. Fluid Machinery, 24(1), pp. 13-18.
 - (22) Choi, D. K., Kim, W-S., Euh, D-J., Kim, Y-S., Kwon, T-S., Choi, C., 2021, "Performance evaluation of the collection loop for a unidentified leakage detection in nuclear power plant," Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting, pp. 378-379.
 - (23) Kang, K. J., Park, W. S., Yoo, Y. H., Kim, S. H., 2021, "Conceptual evaluation of the combined passive cooling system in a reactor propulsion ship," Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting, pp. 478-482.
 - (24) Lee, D. G., Son, Y. J., Yuk, P. M., 2021, "Study on piping fatigue analysis for feedwater system," Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting, pp. 483-484.
 - (25) Park, S. I., Jeong, J. J., 2021, "Assessment of the boron dilution effect by the reverse flow during a steam generator tube rupture accident in a OPR1000," Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting, pp. 485-486.
 - (26) Kim, S., Kim, S. J., 2021, "Effects of secondary-side feedwater flow rate on thermal performance of printed circuit steam generators," Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting, pp. 489-490.
 - (27) Lee, G-H., Jhung, M-J., Bae, J-H., 2021, "Comparison of the vibration analysis result for the cavitating venturi with different divergent section geometry," Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting, pp. 487-488.
 - (28) Kim, D., Park, H. B., 2021, "Prevention plan for water hammer by check valve closure in nuclear fluid system," Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting, pp. 491-495.
 - (29) Park, H. B., Seo, K., 2021, "Analysis of pressure loss of flap valve in a research reactor," Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting, pp. 503-504.
 - (30) Park, K-J., Lee, S., Park, J. H., Choi, Y-S., 2021, "Conceptual design of drainage line orifice in high-temperature and high-pressure test loop for in nuclear power plant," Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting, pp. 505-506.
 - (31) Cho, S., Kim, S., Bae, B-U., Cho, Y-J., Jeon, W-J., Youn, Y-J., Kim, Y-S., 2021, "Production test results of reactor coolant pump of Shin-Hanul 1&2 plants," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 140-142.
 - (32) Jeong, M. J., Lee, S., Cho, H. K., 2021, "Establishment of thermal-structural code coupling system for multi-physics analysis of heat pipe cooled reactor core," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 143-145.
 - (33) Moon, J. H., Cho, H., Chang, C. B., Kim, S., Han, H. S., Kim, S. J., 2021, "Development of test requirements for thermal-hydraulic performance validation of printed circuit steam generators in an integral reactor," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 337-339.
 - (34) Jeng, J., Oh, J., 2021, "Transport of a capsule immersed in the pipe Part I. Theoretical equation and construction of experimental loop," The KSFM J. Fluid Machinery, 24(1), pp. 47-54.
 - (35) Jeng, J., Oh, J., 2021, "Transport of a capsule immersed in the pipe Part I. Theoretical equation and construction

- of experimental loop,” *The KSFM J. Fluid Machinery*, 24(1), pp. 55–66.
- (36) Kim, S. J., Kim, T., 2021, “Numerical analysis on the thermal performance and pressure propagation by the sodium–water reaction of the printed circuit steam generator for the sodium–cooled fast reactor,” *The KSFM J. Fluid Machinery*, 24(2), pp. 34–45.
- (37) Kim, T., Moon, J., Yun, B., 2021, “Development of double sensor optical fiber probe technique to measure local droplet parameters in an annular mist flow,” *Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting*, pp. 231–232.
- (38) Moon, J., Kim, T., Bak, J., Yun, B., 2021, “Evaluation of local bubble parameter measurement performance of single sensor optical fiber probe,” *The KSFM J. Fluid Machinery*, 24(1), pp. 27–35.
- (39) Kwon, T-S., Kim, J-R., Choi, C-K., Park, J-S., Choi, C-R., 2021, “Development of a unidentified RCS leakage detection sensor system less than 0.5 gpm,” *The KSFM J. Fluid Machinery*, 24(2), pp. 13–19.
- (40) Kim, B-Y., Lee, J., Cho, Y., Eoh, J., Kim, H., 2021, “Development of pressure transmitter compensating temperature effect for sodium–cooled fast reactor,” *The KSFM J. Fluid Machinery*, 24(6), pp. 56–61.
- (41) Moon, J., Kim, T., Ko, Y., Jeng, J. J., Yun, B., 2021, “Evaluation of the double and four optical fiber probe method for the measurement of local bubble parameters in the bubbly flow condition,” *Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting*, pp. 137–139.
- (42) Choi, J-S., Kim, E-S., 2021, “Spatial refinement for PIV velocity field using machine learning,” *Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting*, pp. 297–299.
- (43) Kim, H., Kang, J., Park, J., Jeong, J. J., Yun, B., 2021, “Development of local CHF model and its application to MARS-KS code for narrow rectangular channel using machine learning,” *Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting*, pp. 300–301.
- (44) Lee, S., Shin, S. G., Lee, J. I., 2021, “A study of computational fluid dynamics subcooled boiling constitutive relations improvement using machine learning technique,” *Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting*, pp. 302–303.
- (45) Jeon, J., Kim, S. J., 2021, “Finite volume method–based neural network to aid CFD simulation,” *Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting*, pp. 304–305.
- (46) Kim, D., Oh, C., Lee, J. I., 2021, “Safety system analysis code constitutive equation accuracy improvement methodology using self–organizing map and KREM method,” *Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting*, pp. 347–348.
- (47) Ham, J., Kim, S. H., Jung, J., Park, R-J., 2021, “Application of machine learning in sensitivity analysis of MCCl,” *Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting*, pp. 349–352.
- (48) Song, C. H., Choi, W., Bae, J. Y., Kim, S. J., 2021, “Feasibility analysis for developing a surrogate model to evaluate the effectiveness of a severe accident management,” *Proceedings of the KSFM 2021 Winter Annual Meeting*, pp. 353–355.