

2020년 원자력기기 및 열유체 분야 연구동향

김동역*

1. 서 론

본 연감에서는 2020년 한국유체기계학회 하계/동계 학술대회 및 학술논문집에 발표된 원자력기기 및 열유체 분야 관련 연구결과를 소개·분석하고자 한다. 해당 분과에서는 실현, 해석, 측정기법개발, 대형실험설비 구축 등 다양한 분야에서 약 30 여편의 논문이 발표되었다. 기존의 원자로 열유체 분야에서 주로 수행되어 왔던 압력배관 파단 사고에 대한 안전해석관련 연구 뿐만 아니라 인쇄기판형 열교환기 및 판형 열교환기의 원자력 발전소 적용과 관련된 연구가 새롭게 주목을 받고 있는 것으로 판단된다. 또한, 다양한 분야의 기술이 집약된 원자력 발전소의 특성상 비교적 다양한 열유체 기기에 대한 연구가 광범위하게 수행되었다. 본 연감에서는 지난 1년간의 연구논문을 고정밀 측정, 상변화 열전달, 안전시스템, 여과배기 시스템, 열교환기 및 증기발생기, 유체기기 해석, 실험방법 개발 및 설비구축, 기타로 구분하여 소개하고자 한다.

2. 고정밀 측정

원자로 열수력 분야에서는 그동안 원자력발전소 사고 상황에서 발생하는 이상유동현상을 물리적·정량적으로 설명하기 위해 고정밀 측정기법의 개발이 꾸준히 이루어져 왔다. 단상유동과 달리 이상류에서는 빠르고 복잡성이 높은 액체 및 기체의 유동이 발생하며 두 상간의 계면현상에 대한 물리적 모델을 개발하기 위해 고정밀 측정이 요구된다.

양진화 등⁽¹⁾은 한국원자력연구원에서 개발된 가압경수 일체형 원자로인 SMART 내 피동격납건물냉각계통에서 발생하는 증기 직접접촉응축 현상을 실험적으로 구현하였다. 또한, 고속가시화 및 3차원 재구성 기법을 적용하여 고속의 기포응축거동을 분석할 수 있는 측정방법론을 개발하였다.

문정민⁽²⁾ 등은 이상유동 내 국소기포거동을 높은 정확도로 측정할 수 있는 단일 광섬유 센서 프루브 측정기법을 개발하고, 이를 실험적으로 검증하였다. 검증 실험결과, 단일 광섬유 프루브는 기존의 2중 광섬유 센서에 비해 측정성능

은 부족하였으나, 센서 삽입에 의한 유동교란을 최소화할 수 있는 장점이 있는 것으로 나타났다.

김태호⁽³⁾ 등은 원자력 발전소의 중요한 안전이슈인 재관수 현상에서 액적거동을 측정하기 위해 단일 광섬유 프루브 측정시스템을 적용하여 고속의 국부 액적거동을 측정하였다. 이를 통해 재관수 현상에서 발생하는 액적분포 및 속도를 정량적으로 측정하였으며 이 결과는 원자로 안전해석 코드의 개선에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

3. 상변화 열전달

비등 및 응축 등 상변화 열전달 현상은 원자력 발전소의 정상운전조건 및 사고상황에서 매우 중요하게 다루어지는 이슈이다. 그러므로 상변화 현상에 대한 신뢰성있는 모델개발 및 해석방법론은 원자력 발전소의 안전한 운전 및 사고대처에 필수적이다. 이로 인해 원자로 열수력 분야에서는 해당분야에 대한 방대한 연구가 이루어져 왔다.

김휘용 등⁽⁴⁾은 최근 이슈가 되고 있는 기계학습 기법을 활용하여 시각유로 내 과냉 임계열유속을 예측하기 위한 모델을 개발하였다. 이 모델은 기존에 개발된 이론적·경험적 임계열유속 모델보다 우수한 예측성능을 나타냈으며, 향후 인공지능 기술의 원자로 열수력 분야 적용 가능성을 보여주는 의미있는 결과이다.

안태환 등⁽⁵⁾ 및 양진화 등⁽⁶⁾은 중소형 원자로인 SMART 내 피동격납용기 안전계통에서의 수직관 응축 열교환기에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 실험조건은 관내 증기의 강제대류⁽⁵⁾ 및 자연대류⁽⁶⁾ 조건으로 구분할 수 있다. 강제대류 조건에서는 응축열전달이 비교적 원활하게 발생하였으나, 자연대류 조건에서는 관 하류에서의 비응축가스 누적으로 인해 응축열전달 성능이 현저히 저하되는 것으로 나타났다.

4. 원자로 안전시스템

전통적으로 원자로 안전시스템에 대한 연구는 원자력기술 분야에서 가장 광범위하고 활발하게 이루어져 왔다. 최

* 중앙대학교 에너지시스템공학부
E-mail : dekim@cau.ac.kr

근에는 주로 피동안전시스템의 신뢰성 및 효율성에 대한 연구가 수행되고 있다.

신수재 등⁽⁷⁾은 원자로 냉각재 상실사고 시 노심에 냉각수를 보충하기 위한 안전시스템인 노심보충탱크에 대한 수치적 연구를 수행하였다. 해석 변수는 노심보충탱크 형상이었으며, 주요 결과로 탱크 부피가 유지된 상태에서 탱크 높이를 증가시킬 경우(탱크 직경 감소) 초기 냉각수 주입량이 증가하며 탱크 고갈시간이 감소하는 것을 수치적으로 확인하였다.

신수재 등⁽⁸⁾은 일체형 중소형원자로인 SMART에 배치된 노심보충탱크에서의 압력 작동 설정치가 원자로 안전에 미치는 영향에 대한 수치적 연구를 수행하였다. 해석결과 노심보충탱크의 작동압력을 약 4 MPa 이상으로 설정해야 원자로 내 노심이 노출되지 않는다는 결과를 도출하였다.

박홍범 등⁽⁹⁾은 개방수조형 연구용 원자로의 안전기기인 플랩밸브의 열수력적 안전특성에 대한 수치적 연구를 수행하였다. 이를 통해 원자로냉각수 펌프의 정지 이후부터 자연대류 유동 형성까지의 원자로 노심주변 냉각수 과도거동에 대한 수치해석 데이터를 획득하였다.

강경준 등⁽¹⁰⁾은 중소형원자로인 SMART 내 격납용기 안전계통에 대한 해석연구를 수행하였다. 해석을 통해 주증기 배관 파단 사고 시 격납용기 내 압력 및 온도거동을 정량적으로 분석하였다. 해석결과 격납용기 압력 및 온도는 최대 250 kPa 및 220 °C까지 상승할 수 있으며 향후 비상냉각탱크의 작동에 의해 격납용기의 압력이 서서히 감소하는 것으로 나타났다.

5. 격납용기 여과배기 시스템

격납용기여과배기계통은 핵연료 등의 원자로 내 고준위 방사성 물질이 격납용기 내부로 유출되고 격납용기 압력이 설계치 이상으로 상승하는 상황에서 방사성 물질의 외부배출을 차단할 수 있는 핵심적인 시스템이다. 이에 따라 이 시스템과 관련된 국내 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

김재철 등⁽¹¹⁾은 중수로형 원자로의 발전소정전사고 및 소형냉각재파단사고가 동시에 발생하는 상황에서의 격납용기 배기계통을 통한 핵분열생성물 방출저감을 수치적으로 평가하였다. 그 결과 격납용기배기계통의 작동은 기존 원자로 대비 중대사고 상황에서 핵분열 생성물의 외부 배출을 현저히 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.

이두용 등⁽¹²⁾은 기존 미국 및 유럽에서 개발된 격납용기 여과배기계통의 국산화 개발 성공에 대한 내용을 소개한다. 논문에 따르면 4년간의 연구개발을 통해 시스템의 국산화 개발에 성공하였으며 이를 통해 설계 및 성능검증 원천기술을 확보한 것으로 판단된다.

6. 열교환기 및 증기발생기

열교환기 및 증기발생기 분야의 연구는 원자로 피동안전계통의 설계 및 최적의 원자력발전소 설계·건설 관점에서 매우 중요하다. 최근, 열교환기 제작기술의 획기적인 발전으로 기존의 열전달 성능 및 유동특성을 유지하면서 체적을 최소화할 수 있는 기술이 개발되었으며, 원자력 분야에서도 이러한 최신기술을 적용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

강진훈 등⁽¹³⁾은 소형 원자로에 적용가능한 판형 열교환기에 대해 단상 및 비등·응축 상변화 열전달 상황을 모의할 수 있는 1차원 해석코드를 개발하였다. 이 코드를 활용하여 다양한 유동 변수에 대한 열전달 해석을 수행하여 데이터베이스를 구축하였다.

최선락 및 임성혁⁽¹⁴⁾은 소듐냉각고속로(SFR)에서 핵심적인 안전이슈인 소듐-물 반응을 저감할 수 있는 구리밀봉 증기발생기(CBSG)의 개념을 소개하고 CBSG의 열유동 설계코드 개발내용을 상세히 설명하였다. 이러한 결과는 그동안 높은 효율 및 성능에도 불구하고 소듐-물 반응 위험성으로 인해 우려를 받았던 SFR 안전성 향상에 큰 기여를 할 것으로 판단된다.

김석 및 김상지⁽¹⁵⁾는 소형원전 적용을 위한 인쇄기판형 증기발생기의 적용성에 대한 수치적 평가를 수행하였다. 해석결과 반원형 유로형상의 열교환기가 원형 및 사각 형태 유로 형상 열교환기에 비해 우수한 증기발생 열교환 성능을 보유한 것으로 나타났다.

강경준 등⁽¹⁶⁾은 선박추진용 중소형 원자로의 사고 시 작동하는 잔열제거계통 내 공기냉각탑에 대한 유동해석을 수행하였다. 해석결과 냉각탑 하부 물탱크의 존재유무는 시스템의 냉각성능에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

강경준 등⁽¹⁷⁾은 중소형원자로 격납용기 피동냉각에 활용되는 재장전수조 내 히트파이프의 응축부 설계에 대한 연구를 수행하였다. 이를 통해 330 MW 열출력의 원자로에서 수조 온도를 약 70 °C로 유지하기 위한 히트파이프 응축부의 정량적인 사이즈 및 요구되는 배관 개수 등의 설계 데이터를 도출하였다.

김석 및 김상지⁽¹⁸⁾는 지그재그 형상의 채널로 이루어진 인쇄기판형 증기발생기의 설계 최적화 연구를 수행하였다. 설계를 위해 고려한 변수는 열교환기 길이 및 체적, 1차측 및 2차측의 압력강하이며 각각에 대한 해석결과를 보고하였다.

장정봉 등⁽¹⁹⁾은 인쇄기판형 열교환기의 지그재그형 채널의 기울임 각도에 따른 열수력 성능에 대한 수치해석 연구를 수행하였다. 이를 통해 해당 형상의 채널을 보유한 열교환기에 대한 유동압력강하 및 열전달 상관식을 도출하였다.

윤정 등⁽²⁰⁾은 소듐냉각고속로에 활용되는 피동형 공냉잔열제거계통에 대한 실험적·수치적 연구를 수행하였다. 실험

제 소뿔을 유체로 활용한 실험을 수행하여 소뿔 및 공기의 다양한 열수력 조건에 대한 열교환 실험데이터를 획득하였으며 이를 MARS-LMR코드를 활용하여 획득된 해석결과와 비교·분석하였다. 해석결과는 실험결과를 대체로 적절히 모의하는 것으로 나타났다.

7. 유체기기 해석

원자력발전소 내에는 다양한 유체기기들이 존재하며 이러한 기기를 통한 유체거동의 해석은 원자로의 효율적 운전 및 안전성 향상을 위해 매우 중요하다. 유체기기 해석은 1차원 해석코드, 전산유체역학(CFD) 코드 등을 통해 다양하게 이루어지고 있다.

어동진 등⁽²¹⁾은 원자로 격납용기 내 누설감지 시스템의 검증에 관한 시험설비를 설계 및 구축하고 누설유량에 대한 예비해석을 수행하였다. 실험장치는 원자로의 실제 운전조건인 150기압, 300°C의 열수력 조건을 구현할 수 있도록 설계되었으며 누설위치 및 유량을 제어 및 측정할 수 있도록 구축되었다. 예비해석은 MARS-KS를 활용하여 수행하였다.

이공희⁽²²⁾는 원자로에 설치되는 평판 오리피스 유량계 주변의 곡관부로부터 인한 유동특성 변화에 대한 수치적 연구를 수행하였다. 해석결과, 곡관부에서 발생하는 원심력 및 곡관부 사이의 직관길이가 오리피스 유량계의 성능에 영향을 줄 수 있는 것으로 나타났다.

이공희⁽²³⁾는 원자력발전소 내 안전시스템 관련 펌프에서 발생할 수 있는 캐비테이션 현상에 대한 수치해석을 수행하였다. 흡입구 압력에 따른 캐비테이션 유동에 대한 정량적인 결과를 도출하였다.

장승언 등⁽²⁴⁾은 원자력발전소 사용후핵연료시스템에 활용되는 3축 편심 나비형 밸브에서 발생할 수 있는 캐비테이션 현상 및 내진현상에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 해석결과 밸브가 저개도로 열려있는 상황에서 공동현상이 발생할 수 있는 것으로 나타났으며 이는 밸브의 손상을 발생시킬 수 있으므로 기술적 고려가 필요하다. 또한, 내진 해석결과 고려된 밸브 모두 적합한 내진성능을 보유한 것으로 나타났다.

이예준 및 김정우⁽²⁵⁾는 원자로 노심 내 부수로 유동에 관한 RANS해석 격자 민감도 및 난류모델 선정에 관한 연구를 수행하였다. 격자 민감도의 경우 Cutcell 격자를 활용하는 것이 최적으로 나타났고, 난류모델은 Standard k- ϵ model이 기존의 실험데이터를 가장 정확하게 모의하는 것으로 나타났다.

정용주 등⁽²⁶⁾은 초임계 이산화탄소 발전사이클에서 활용되는 핵심기기인 압축기 내 임펠러 후향각 설계에 관한 실험적·수치적 연구를 수행하였다. 연구를 통해 건식냉각을 적용할 경우 압축기 입구온도가 상승하여 고후향각 압축기

의 설계가 필요한 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 실험 및 수치해석을 통해 증명되었다.

유혜준 및 김정우⁽²⁷⁾는 원자로 노심 유동영역 중 봉다발 영역에서의 유동특성을 해석하기 위해 편심환형관으로 유동영역을 근사하여 해석을 수행하였다. 해석결과, 격자수의 증가에 따라 수치오차가 감소하는 것으로 나타났으며, 난류모델의 경우 RSM SSG모델이 예측성능이 가장 우수한 것으로 나타났다.

8. 실험방법 개발 및 설비구축

원자력발전소의 특성상 소내 핵심 열유체 기기 및 전체시스템의 성능 및 안전성 평가를 위해서는 비교적 대형 실험설비의 구축 및 실험방법론 개발이 요구된다. 이러한 중대형 실험설비의 구축 및 실험방법론 개발은 소요되는 비용 및 인력으로 인해 주로 한국원자력연구원 등의 대형 연구기관에서 수행되어 왔다.

배병언 등⁽²⁸⁾은 가압형 경수로의 핵심기기인 원자로냉각재펌프의 성능평가를 위한 기술을 개발하고 성능시험을 수행하였다. 대상 원자로는 APR1400 노형인 신고리 5,6호기이다. 실제 원자로 운전조건에서 냉각재펌프의 수력성능, 정지-기동, 연속운전, 관성서행 시험 등을 수행하였다.

김기환 등^{(29),(30)}은 증기발생기 습분분리기에서 발생하는 물-증기 이상유동 현상을 모의 및 분석하기 위해 물-공기 이상유동 실험장치를 구축하고 실험적 연구를 수행하였다. 유체의 상이성을 고려하여 상사방법론을 적용하였으며, 연구를 통해 획득된 실험 데이터베이스를 기존의 물-증기 실험 데이터베이스와 비교분석하였다. 이를 통해 상사실험의 실제상황 모의 적절성을 검증하였다.

9. 기타 연구

박상욱 등⁽³¹⁾은 기존 원자로안전해석을 위해 활용되는 MARS-KS 코드의 해양원전 안전해석 적용을 위한 코드개선 연구를 수행하였다. 기존의 MARS-KS 동적운동모델 개선에 대한 선행연구결과를 분석하고, 해양원전에서 발생할 수 있는 다차원 현상 해석을 위한 교차유동 해석모델 개발 및 기술적 개선연구 현황을 소개하였다.

윤희철 등⁽³²⁾은 최근 큰 이슈가 있는 원전해체에 따른 방사성폐기물 처리를 위한 플라즈마토치 시스템에 대해 소개하였다.

10. 결 론

본 연감에서는 2020년에 한국유체기계학회에 발표된 원자력 기기 및 열유체 분야 연구에 대해 소개 및 설명하였다.

대내외의 부정적 이슈들로 인해 원자력 연구계가 다소 침체되어 있던 시기임에도 불구하고 학계·연구계·산업계에서 비교적 활발한 연구가 진행된 것으로 판단된다.

기존의 경수형 원자로 안전성 연구현안에 추가로 소형원전 안전성, 고정밀 측정, 집적화된 열교환기 및 증기발생기 기술의 적용을 위한 새로운 연구분야가 주목할만하다. 이외에도 기계학습, 심화학습 등 인공지능 기술을 활용한 원자로 이론 및 안전연구의 확대가 기대되며 3D 프린팅, 나노기술 등 4차 산업혁명 기반 제조기술이 적용된 원자로 열유체 기기의 개발도 새로운 연구분야 될 수 있을 것으로 전망된다.

References

- (1) 양진화, 한기석, 최중휘, 류성욱, 박현식, 2020, “3차원 재구성 기법을 활용한 직접접촉응축 기포 가시화 실험,” 한국유체기계학회 학계학술대회 논문집.
- (2) 문정민, 김태호, 정재준, 윤병조, 2019, “국소 기포 변수 측정을 위한 단일 광섬유 센서 프로브의 개발,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (3) 김태호, 김경두, 정재준, 윤병조, 2020, “대형냉각재상실사고 재관수 조건에서 단일 광섬유 프로브를 이용한 액적 변수 측정,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (4) 김희웅, 강진훈, 박진영, 정재준, 윤병조, 2020, “기계학습 기법을 응용한 과냉 임계열유속 모델 개발,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (5) 안태환, 양진화, 배황, 박현식, 2020, “수조 내 수직관 열교환기 응축 실험: Part 1. 강제순환조건,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (6) 양진화, 안태환, 배황, 박현식, 2020, “수조 내 수직관 열교환기 응축 실험: Part 2. 자연순환조건,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (7) 신수재, 유승엽, 김영인, 2020, “냉각재상실사고 시 노심 보충탱크 형상이 원자로냉각재계에 미치는 영향,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (8) 신수재, 유승엽, 김영인, 2020, “사고시 압력평형식 안전주입탱크의 작동 설정치가 일체형 원자로에 미치는 영향,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (9) 박홍범, 서경우, 김성훈, 2020, “연구용 원자로에서 플랩 밸브를 통한 자연대류 냉각,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (10) 강경준, 강한욱, 김종욱, 2020, “중소형원전의 격납건물 압력저감계통에서 주증기라인 소형과단 사고시 열수력 평가,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (11) 김재철, 박창환, 김희동, 2020, “격납건물여과배기계통 운전방식에 따른 환기방출 평가,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (12) 이두용, 방영석, 이병철, 2020, “중대사고 시 원자로건물 파손 방지를 위한 여과배기계통 개발,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (13) 강진훈, 박진영, 이병진, 정장규, 윤병조, 2020, “1차원 해석 코드를 이용한 편형 열교환기의 응축성능 분석,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (14) 최선락, 임성혁, 2020, “구리밀봉 증기발생기 설계코드의 개발과 이를 이용한 TRU 함유 노심계통의 증기발생기 설계,” 한국유체기계학회 논문집 제 23권 5호, pp. 50-56.
- (15) 김석, 김상지, 2020, “미세 반원형 유로를 갖는 인쇄기판형 증기발생기의 열적 성능,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (16) 강경준, 유용환, 김수형, 2020, “선박용 중소형원자로에서 잔열제거계통의 공기냉각탑 유동해석,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (17) 강경준, 강한욱, 김종욱, 2020, “중소형원전에서 격납건물의 재강전수조내 히트 파이프를 이용한 피동제거계통의 응축부 크기계산,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (18) 김석, 김상지, 2020, “지그재그 유로를 갖는 인쇄기판형 증기발생기의 크기 최적화,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (19) 장정봉, 조현준, 유승엽, 김상지, 2020, “지그재그형 유로의 열수력 성능에 대한 기울임 각도의 영향,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (20) 윤정, 김형모, 이제환, 민재홍, 2020, “편형 소듐-공기 열교환기의 자연순환 특성,” 한국유체기계학회 논문집 제23권, 5호, pp.28~35.
- (21) 어동진, 김우식, 권태순, 2020, “누설감지시스템 성능평가를 위한 고압시스템 소형과단류 해석,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (22) 이공희, 2020, “수직 평면상의 다중 90° 곡관부 사이의 직관 길이가 오리피스 유량계 예측 정확도에 미치는 영향에 관한 수치적 연구,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (23) 이공희, 2020, “원심펌프 내부의 캐비테이션 유동에 관한 정상상태 해석,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (24) 장승언, 조성휘, 장영운, 전인수, 이원희, 김홍집, 2020, “원자력발전소용 3축 편심 나비형 밸브의 저개도 공동현상에 대한 수치적 연구 및 밸브에 대한 내진해석,” 한국유체기계학회 논문집 제 23권 3호, pp. 42~47.
- (25) 이에준, 김정우, 2020, “원자로 봉다발 유동에 대한 RANS 해석 타당성 검토,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (26) 정용주, 조성국, 이정익, 2020, “초임계 이산화탄소 압축기 고후향각 임펠러 적용 가능성에 대한 연구,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (27) 유혜준, 김정우, 2020, “편심 환형관에 대한 RANS 해석 타당성 검토,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (28) 배병연, 김석, 조윤재, 최해섭, 전우진, 윤영중, 박종국, 조석, 2020, “신고리 5,6호기 원자로냉각재펌프(RCP) 성능평가 시험기술 개발,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (29) 김기환, 김우식, 이재봉, 어동진, 최해섭, 전우진, 신용철, 2020, “증기발생기 습분분리기 습분동반율에 대한 물/공

- 기 실험적 연구,” 한국유체기계학회 논문집 제23권, 6호, pp. 10~17.
- (30) 김기환, 김우식, 이재봉, 어동진, 최해섭, 전우진, 신용철, 2020, “척도방법론을 통한 습분분리기 습분동반율 실험방법론 개발,” 한국유체기계학회 동계 학술대회 논문집.
- (31) 박상욱, 김건우, 조형규, 2020, “해양원전 안전해석을 위한 MARS-KS 개선 현황,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.
- (32) 윤희철, 김낙점, 조용호, 이태웅, 조성민, 정정수, 2020, “해체원전 방사성폐기물 처리를 위한 플라즈마토치 시스템,” 한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집.