KAERI/RR-4601/2020
79517-20
보안과제( ), 일반과제(○)

다중현상, 복잡시스템을 해설하는 eXplainable AI 기반 신속해석모듈 개발과제 기획

Development plan of XAI based high speed analysis module for multiple phenomena and complex system

- 주요사업 R&D 신규 과제 기획보고서 -

KAERI

한국원자력연구원

KAERI

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

이 보고서를 “다중현상, 복잡시스템을 해설하는 eXplainable AI 기반 신속해석모듈 개발” 과제의 연구보고서로 제출합니다.

2020년 12월 31일

주관연구기관명 한국원자력연구원

주관연구책임자 박해민

연 구 원 도성주

원종혁

유병현

허재석

KAERI

KAERI

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td colspan="2">79517-20</td><td>해당단계
연구기간</td><td colspan="2">2020.09.16.
~2020.12.31.</td><td>단계구분</td><td>-</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="6">자체연구개발사업</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="6">-</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="6">다중현상, 복잡시스템을 해설하는 eXplainable AI 기반 신속해석모듈 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="6">-</td></tr>
<tr><td rowspan="6">연구책임자</td><td rowspan="6">박해민</td><td rowspan="3">해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 5명</td><td rowspan="3">해당단계
연 구 비</td><td>정부</td><td>3,000 천원</td></tr>
<tr><td>내부 5명</td><td>기업</td><td>0 천원</td></tr>
<tr><td>외부 0명</td><td>계</td><td>3,000 천원</td></tr>
<tr><td rowspan="3">총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 5명</td><td rowspan="3">총 연구비</td><td>정부</td><td>3,000 천원</td></tr>
<tr><td>내부 5명</td><td>기업</td><td>0 천원</td></tr>
<tr><td>외부 0명</td><td>계</td><td>3,000 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속부서명</td><td colspan="3">한국원자력연구원 혁신SMR원자로개발부</td><td>참 여 기 업 명</td><td colspan="2">-</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 : -</td><td colspan="3">상대국 연구기관명 : -</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="3">연구기관명 :-</td><td colspan="3">연구책임자 : -</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내로 작성합니다.)</td><td>보 고 서 면 수</td><td colspan="2">42p.</td></tr>
<tr><td colspan="8">■ 복잡시스템을 비롯한 여러 공학분야 해석코드의 computing cost가 점차 높아짐
■ AI 고유의 ‘black box’ 특성 때문에 적용에 한계가 있음. AI 예측모델의 예측신뢰성 확보 필요
■ 연구개발 목표
- 복잡시스템을 해석하는 시스템코드의 계산을 가속하는 AI 해석모듈 개발
- 물리현상 예측 AI 모델에 대한 eXplainable AI (XAI) 기법으로 예측메커니즘 규명
■ 연구개발 내용
- 복잡시스템 해석코드 AI solver 구현
- 물리적 현상에 대한 AI 예측모델 개발
- XAI 방법론을 이용한 AI 모델 해독
- 검증계산을 통한 AI 기반 해석모듈 성능 확인</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한글</td><td colspan="6">인공지능, 솔버, 설명가능 인공지능, 계산가속, 시스템코드</td></tr>
<tr><td>영어</td><td colspan="6">Artificial intelligence, Solver, XAI, Calculation acceleration,
System code</td></tr>
</table>

KAERI

요 약 문

Ⅰ. 제 목

다중현상, 복잡시스템을 해설하는 eXplainable AI 기반 신속해석모듈 개발과제 기획

Ⅱ. 연구하고자 하는 대상

- 시·공간 물리량 변화를 계산하는 지배방정식의 해를 구하는 AI solver 개발
- 이론적인 이해도와 예측정확도가 낮은 현상에 대한 AI 예측모델 개발
- eXplainable AI (XAI) 기법을 이용해 구현한 AI 예측모델의 예측메커니즘 규명

Ⅲ. 기존 연구 및 현재 기술의 한계

- 기존 시스템코드의 경우 과도현상을 해석할 때 길게는 1주 이상의 계산시간이 소요
- 일부 물리적 현상의 경우 현상학적 이해도 향상에 대한 한계에 도달
- AI 고유의 'black box' 특성 때문에 공학분야 적용에 한계가 있음

Ⅳ. 연구 수행 내용

- 복잡시스템 해석코드 AI solver 구현
- 물리적 현상에 대한 AI 예측모델 개발
- XAI 방법론을 이용한 AI 모델 해독
- 검증계산을 통한 AI 기반 해석모듈 성능 확인

Ⅴ. 혁신적 차별성 및 기대효과

- 기본적인 Physical law를 기반으로 PDE를 푸는 모든 공학분야에 활용가능
- Solver의 computing burden 절감에 따라 계산영역 (혹은 해상도) 확장
- 설명가능한 인공지능 (XAI)을 강제하는 세계적 규제 흐름에 선제적 대응
- AI 해석모듈의 계산 가속 효과에 따른 복잡시스템 운영 지원역할에 효과적

SUMMARY

Ⅰ. Project Title

Development plan of XAI based high speed analysis module for multiple phenomena and complex system

Ⅱ. Objective of the Project

- Development of AI solver calculating the change of physical quantities
- Development of AI model for phenomena predicting with low accuracies
- Investigation of prediction mechanism of the developed AI model using XAI

Ⅲ. Limitation of the Existing Researches

- Consuming over 1 week for transient analysis using the existing system code
- Approaching limitations for the improvements of understanding for some phenomena
- Limitation of application to engineering fields due to 'AI black box'

Ⅳ. Scope and Contents of Project

- Development of AI solver in system analysis code
- Development of AI model for TH phenomena
- Description for the developed AI model using XAI
- Investigation of the effect of the developed AI model via test calculations

Ⅴ. Proposal for Applications

- Engineering fields solving partial derivative equations based on physical law
- More detailed analysis via reducing the computing burden of solver
- Preemptive measures for the international regulation demanding XAI
- Operator support of complex system with high speed AI module

CONTENTS

SUMMARY ····· 5

Chapter 1. Project outline ····· 11

Chapter 2. Project plan ····· 15
Section 1. Worldwide policy and literature survey ····· 17
Section 2. Project needs ····· 19
Section 3. Project objectives and evaluation points ····· 21
Section 4. Project plans ····· 25
Section 5. Relationship with the existing research activities ····· 27
Section 6. Innovative points and expected effects ····· 28
Section 7. Budget ····· 29
Section 8. Self-review ····· 30

Chapter 3. Reference ····· 35

RESPONSE FOR REVIEW ····· 39
BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET ····· 42

KAERI

목 차

요약문 ····· 5

제1장 과제 개요 ····· 11

제2장 과제 계획 ····· 15
제1절 국내·외 현황 분석 ····· 17
제2절 사업의 필요성 및 시급성 ····· 19
제3절 사업 목표 및 평가주안점 ····· 21
제4절 사업 수행 계획 ····· 25
제5절 선행 성과와의 연계 방안 ····· 27
제6절 기대 효과 및 성과 활용 ····· 28
제7절 소요 예산 ····· 29
제8절 자체 검토 ····· 30

제3장 참고문헌 ····· 35

평가의견반영표 ····· 39
서지정보양식 ····· 41

KAERI

그림 목차

그림 1. 연구개발 로드맵 ····· 21

KAERI

KAERI

제1장

과제 개요

KAERI

KAERI

제1장 과제 개요

1. 사업의 필요성

○ 복잡시스템을 비롯한 여러 공학분야 해석코드의 computing cost가 점차 높아지고 있고, 계산가속에 큰 효과가 있는 AI 방법론을 활용해 계산속도를 향상시킬 필요가 있음

○ AI 고유의 'black box' 특성 때문에 공학분야 적용에 한계가 있고, eXplainable AI 기법을 이용해 구현한 AI 예측모델의 예측메커니즘을 규명함으로서 AI 모델의 예측신뢰성을 확보할 필요가 있음

2. 단계 목표

○ 복잡시스템을 해석하는 시스템코드의 계산을 가속하는 AI 해석모듈 개발

○ 개발한 모든 AI 모델에 대해 eXplainable AI 기법으로 예측메커니즘을 규명

3. 투입		4. 활동
연구 기간	3년	■ 복잡시스템 해석코드 AI solver 구현 - 미분방정식, 행렬계산을 풀이하는 기존 보존식 계산을 대체하는 AI 모델 개발
연구비 (장비비 포함 직접비)	1,050 (백만원)	■ 물리적 현상에 대한 AI 예측모델 개발 - 예측정확도 개선이 필요하거나 해석에 많은 계산시간이 소요되는 열수력 현상을 예측하는 AI 모델 개발 ■ XAI 방법론을 이용한 AI 모델 해독 - 물리적 현상 예측 AI 모델에 적합한 XAI 방법론 선정하여 AI 모델 해석
연평균 내부 인력	3.5 (M/Y)	■ 검증계산을 통한 AI 기반 해석모듈 성능 확인 - 개발한 AI 모델, solver를 기반으로 기존 복잡시스템해석코드에 적용하여 검증계산을 통해 계산 가속 및 정확도 개선 확인

5. 결과(산출)

■ 정성적 성과
- AI PDE solver
- AI 현상예측모델
- 설명가능 인공지능 프레임

■ 정량적 성과

- 보고서: 9건
- 논문: 3건
- 학회발표: 12건

6. 파급효과	7. 수혜자 및 혜택
■ 계산시간 단축에 따른 복잡시스템 설계공정 단축 효과 ■ 복잡시스템 안전성 평가 기간 단축 및 비용절감 효과	■ SMR 설계공정 단축 - 한국수력원자력, 한국원자력연구원

■ 물리법칙 기반 AI 기술에 대한 KAERI의 국제적 위상 제고 ■ AI 예측 불확실성에 대한 의구심 해소	■ AI PDE solver - 계산가속이 필요한 모든 공학분야 - 한국원자력연구원, 항공우주연구원, 기상청 등

제2장

과제 계획

제1절 국내·외 현황 분석
제2절 사업의 필요성 및 시급성
제3절 사업 목표 및 평가주안점
제4절 사업 수행 계획
제5절 선행 성과와의 연계 방안
제6절 혁신적 차별성 및 기대 효과
제7절 소요 예산
제8절 자체 검토

KAERI

KAERI

제2장 과제 계획

제1절 국내·외 현황 분석

□ 산업·정책적 분석

○ 설명가능한 인공지능 (eXplainable AI, XAI)에 대한 세계적 추세

- 금융, 의료, 공학분야 등 전문분야를 비롯한 실생활 분야에 AI 가 활발하게 활용되고 있음
- 규제가 강한 의료, 원자력 분야의 경우 설명가능한 인공지능이 필수임
- 유럽과 미국에서는 설명가능 인공지능을 강제하는 분야를 확장하고 있는 추세임

  * 유럽연합 General Data Protection Regulation 발효 (2018년)

  → 인공지능 알고리즘에 의해 자동으로 결정된 사안에 대해 회사의 설명을 강제

  * 미국 Equal Credit Opportunity Act/Fair Housing Act

  → 신용도 결정 및 주택 담보 대출 등 주요 금융 결정에 대해서 이유를 제시하도록 강제

○ 국가 과학정책 추세

- 낡은 시스템의 쇄신과 도전과 혁신을 강조하는 정책기조
- 4차 산업혁명 대응에 대해서 데이터 중심 사회로의 이행 가속화를 위한 통합플랫폼 구축을 강조
- 낡은 시스템을 대체하고 4차 산업혁명 대응을 위한 정책에 부응하여 과학기술분야에서는 수치해석 플랫폼의 핵심이 되는 solver를 혁신적으로 개선할 필요가 있음

○ 우리 연구원 R&R 분석

- 원자력기술개발로 사회에 공헌하고 신성장 혁신 분야 개척에 중점
- 4차 산업혁명에 대해서는 4차 산업 기술과 원자력기술을 접목하는 융복합 신기술 개발 추구
- 우리 연구원의 궁극적인 타겟인 원자력발전소라는 거대복잡시스템을 해석하는 기존의 프레임은 선진기술과 융합하여 퀀텀점프해야할 시기라고 판단됨

□ **수요자(사용자) 분석**

○ 시스템 성능 및 안전의 신속해석에 대한 수요

- 한국 고유브랜드의 소형원자로 설계 필요성이 대두되고 있음
  KAERI의 SMART개발단, 혁신SMR개발단에서 소형원자로 설계가 진행되고 있음
  한국수력원자력에서는 혁신SMR 설계 착수 예정임
- 기존의 성능 및 안전해석 절차는 해석코드의 긴 계산시간 때문에 설계에 많은 시간이 소요됨
- AI 기술을 접목하여 설계 최적화의 신속화 효과를 보인 사례가 많으며, 새로이 추진하는 소형원자로 설계에도 기존 시스템 해석기술에 AI 기술을 접목하여 설계과정 또한 혁신적으로 개선할 필요가 있음

○ 데이터에 더해 기본 물리적 법칙을 학습하는 AI 기술에 대한 수요

- 데이터만을 학습시킨 경우 데이터 수가 충분하지 않은 구간에 대해 AI가 잘못 예측하는 실수를 범하는 사례가 많음
- AI가 결과론적인 데이터만 학습시킬 경우 내재된 원리는 모른 채 겉보기 패턴만 예측할 수 있어 조건이 조금만 달라져도 예측성능이 크게 떨어지는 경우가 발생
- 데이터에 내재된 기본 물리적 법칙을 학습시키려는 시도가 세계적으로 시작되고 있으며, Physics Informed Machine Learning이라는 분야가 새로이 생성됨
- 기본 물리적 법칙을 학습하는 AI 기술이 'black box' 문제를 해결할 수 있다는 가능성도 제기되고 있음

○ 설명가능한 인공지능에 대한 과학자들의 수요

- 현재 일반인들도 데이터만 충분히 있다면 잘 예측하는 AI 모델을 개발할 수 있는 소프트웨어적 인프라가 충분히 갖춰짐
- 문제는 AI가 공학적으로 (또는 정량적으로) 믿을 수 있는 결과를 제공하는지에 대한 신뢰성이 없음
- 과학자들이 가지고 있는 전문적인 논리와 유사한 과정으로 AI가 예측하고 있는지 확인하는 것이 과학자들의 역할
- 시민들의 안전과 직결된 원자력 분야의 경우 오예측의 리스크가 큰 만큼 설명가능한 인공지능이 필수적인 분야라 판단됨

제2절 사업의 필요성 및 시급성

□ 필요성

○ 공학적 수치해석의 핵심 PDE solver와 computing burden 증가

- 공학적 수치해석의 경우 각 분야의 물리적 법칙을 기반으로 시간, 공간에 대한 물리량 변화를 편미분방정식 (partial derivative equation, PDE)을 계산하는 것이 핵심임
- 실생활과 밀접하게 관련되어 있는 전산유체역학 (CFD)의 경우 공력해석, 원전 3차원 해석, 기상예측 등의 분야에 활용되고 있고, 계산영역 (혹은 해상도)의 규모가 점점 커지고 있는 실정임
- 점진적으로 증가하는 계산량을 현재 하드웨어의 발전에 의존하고 있는 실정임

○ 기존 시스템 코드의 계산량 증가와 소프트웨어적 방법론 혁신 필요

- 과거 보수적인 해석에서 현재 최적계산이 추구되는 패러다임 변화에 따라 solver의 계산 영역 확장이 요구되어 왔음
  (Two-phase three field, 3차원 계산 요구)
- Solver의 계산속도 가속을 위해 시뮬레이션 데이터 기반 AI 학습, neuralPDE 방법론이 제시되었고, 간단한 편미분방정식 풀이에 계산시간 절감에 큰 효과를 확인함
- 현재 시스템코드의 solver는 편미분연립방정식을 풀고 있으며, AI 방법론 적용을 통해 계산 가속에 큰 효과를 기대할 수 있음
- 시스템 코드의 탄생부터 그 중심을 자리잡고 있던 solver를 AI solver로 대체함으로서 혁신적인 진화를 추구할 필요가 있음

○ 설명가능한 인공지능의 필요성

- 설명가능한 인공지능을 강제하는 규제가 세계적으로 시작단계임
- 공학분야에서 정량적인 값을 다루는 전문가들은 단지 AI가 예측정확도만 높다는 것은 불충분하고 왜 잘 예측하는지가 규명이 되어야 AI를 활용할 수 있다고 판단하고 있음

□ 시급성

○ 고도화된 AI 기술의 활용성 증진

- AI 기술이 이미 고도화 되었지만 'black box'라는 한계점에 막혀 공학분야에 제대로 활용되지 못하고 있음
- 설명가능한 인공지능 기술을 통해 'black box'라는 장애물을 제거하는 것이 절실한 실정이고 이를 통해 AI 기술 활용 극대화를 이룰 수 있음

○ 원리를 학습하는 AI로 패러다임 변화

- 데이터 중심의 학습이 주를 이루면서 AI의 한계점이 드러나고 기대감이 하락하고 있는 실정임
- 인간을 닮기 위한 인공지능이라면 원리를 학습해야 함
- 물리적 법칙을 기반으로 한 solver를 학습함으로서 AI의 능력을 진일보할 수 있는 계기가 필요

KAERI

제3절 사업 목표 및 평가주안점

▣ 연구개발 최종 지향 목표

○ 기존 해석모듈 대비 계산시간 90% 이상 단축 (계산속도 10배 이상)

○ AI black box를 glass box로 풀어냄으로써 세계최초 AI 머신의 인허가 획득

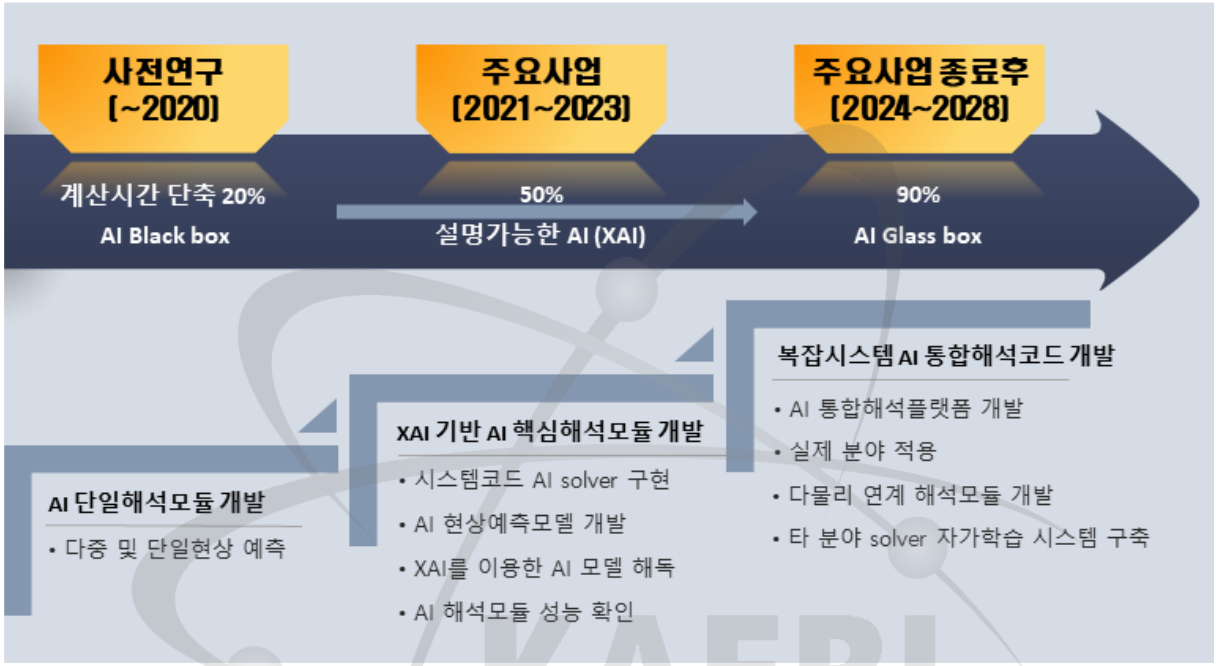

그림 1. 연구개발 로드맵

▣ 사업 목표

총 사업 목표	단계 목표
과제명 : 다중현상, 복잡시스템을 해설하는 eXplainable AI 기반 신속해석모듈 개발	
○ 복잡시스템을 해석하는 시스템코드의 계산을 가속하는 AI 해석모듈 개발 ○ 개발한 모든 AI 모델에 대해 eXplainable AI 기법으로 예측메커니즘을 규명	○ (1차년도) 단일해석모듈 기준 계산시간 50% 이상 단축 ○ (2차년도) 복잡시스템 해석시간 30% 이상 단축 ○ (3차년도) 복잡시스템 해석시간 50% 이상 단축, 구현한 AI 모델의 해설집 발간

KAERI

▣ 연차별 성과목표

과제명 : 다중현상, 복잡시스템을 해설하는 eXplainable AI 기반 신속해석모듈 개발

성과목표	연차별 성과목표		
	1차년도 목표	2차년도 목표	3차년도 목표
1. 복잡시스템을 해석하는 시스템코드의 계산을 가속하는 AI 해석모듈 개발			
1-1 AI solver 개발	- 1D, 3D simulation data 구축 - NeuralPDE 방법론 확립	- AI 1D solver 개발 - AI 3D solver 개발	- AI solver 통합
1-2 물리현상 예측 AI 모델 개발	- CHF 벽면온도 AI 모델 개선 - 임계유동 학습 data 구축	- 임계유동 AI 모델 개발	
2. 개발한 모든 AI 모델에 대해 eXplainable AI 기법으로 예측메커니즘을 규명			
2-1 XAI 방법론을 이용한 AI 모델 해독	- XAI 방법론 선정 - HW 인프라 구축	- XAI 예비해석 (방법론 검증)	- XAI 상세해석 (모든 AI 모델 대상) (모든 학습데이터 대상)
2-2 XAI 결과 적용 및 AI 해석모듈 성능 확인		- XAI 결과 반영, AI 모델 최적화 - 시스템 코드 내 AI 모델 탑재	- 계산 가속 효과 확인 - 정확도 개선 확인
■ 연차별 정량적 성과	단일모듈 기준 계산시간 50% 이상 단축 - 보고서: 2건 - 학회발표: 2건	복잡시스템 해석시간 30% 이상 단축 - 보고서: 3건 - 논문: 1건 - 학회발표: 4건	복잡시스템 해석시간 30% 이상 단축, AI 모델 해설집 발간 - 보고서: 4건 - 논문: 2건 - 학회발표: 6건

▣ 목표 설정근거 및 평가주안점

과제명 : 다중현상, 복잡시스템을 해설하는 eXplainable AI 기반 신속해석모듈 개발

세부성과 목표번호		목표 설정근거	평가주안점	가중치 (%)
1-1 (1)	단계	- 시스템 거동의 핵심이 되는 물리량 변화를 계산하는 모듈	- 예측정확도 유지, 계산속도 개선	20
	1차년	- AI에 양질의 학습데이터를 제공해야 함	- 데이터 범위, 양	
1-1 (2)	단계	- 시스템 거동의 핵심이 되는 물리량 변화를 계산하는 모듈	- 예측정확도 유지, 계산속도 개선	20
	1차년	- 다수의 편미분 방정식으로 구성된 지배방정식을 풀 수 있는 neuralPDE 툴을 구축해야 함	- 방법론 활용가능성	
1-2 (1)	단계	- CHF 벽면온도 계산에 대해 중요도 대비 많은 계산시간 할애	- 예측정확도 개선, 계산속도 개선	20
	1차년	- 고도화된 AI 방법론 적용		
1-2 (2)	단계	- 임계유동 현상에 대해 중요도 대비 많은 계산시간 할애	- 예측정확도 유지, 계산속도 개선	
	1차년	- AI에 양질의 학습데이터를 제공해야함	- 데이터 범위, 양	
2-1	단계	- 공학분야에 적합한 XAI 방법론 선정 및 적용프로세스 정립	- 물리적 이해와의 일치성	40
	1차년	- 비선형 회귀문제에 적합한 XAI 방법론 선정 - 데이터 전 범위에 대한 설명가능 인공지능을 위한 HW 구축	- 물리적 이해와의 일치성	
2-2	단계	- AI 모델 정확도 향상 및 신뢰성 향상을 위해 예측메커니즘 타당성 확인과정 필요	- AI에 설명가능 인터페이스 제공 여부	0
	1차년	- AI 모델 개발 이후 2차년도부터 최적화 단계에 적용		

산출

■ 정성적 성과 요약 - AI solver 개발 기반 마련 - 현상예측 AI 모델 개선 - 물리현상예측 AI 모델에 설명가능 프레임을 제공하는 첫 사례 제공	■ 정량적 성과 - 보고서: 2건 - 학회발표: 2건

[정량적 결과물 예상 목록]

- CHF 벽면온도 계산 AI 모델 개선 보고서 및 학회발표
- 공학분야 XAI 방법론 타당성 연구 보고서 및 학회발표

▣ 1차년도 과제원별 목표

성 명 : 박해민 (혁신SMR원자로개발부) 연 참여율 (0.8)M/Y

년도	세부성과 목표번호	상 세 수 행 업 무	성과물	참여율 (M/Y)
1차년	1-1	- 1D simulation 데이터 생산	- 1D solver 빅데이터	0.4
	1-2	- CHF 벽면온도 예측 AI 모델 개선	- CHF 벽면온도 AI 모델	0.2
	2-1	- XAI 방법론 타당성 검토	- XAI 기술보고서	0.2

성 명 : 도성주 (디지털가상원전기술개발부) 연 참여율 (0.7)M/Y

년도	세부성과 목표번호	상 세 수 행 업 무	성과물	참여율 (M/Y)
1차년	1-1	- 3D simulation 데이터 생산	- 1D solver 빅데이터	0.3
	2-1	- XAI 방법론 선정 (Gradient*Input 방법론)	- XAI 기술보고서	0.4

성 명 : 원종혁 (다목적원자로기술개발부) 연 참여율 (0.6)M/Y

년도	세부성과 목표번호	상 세 수 행 업 무	성과물	참여율 (M/Y)
1차년	2-1	- XAI 방법론 선정 (LRP 방법론)	- XAI 기술보고서	0.5
	2-1	- HW 인프라 구축	- GPU 클러스터	0.1

성 명 : 유병현 (디지털가상원전기술개발부) 연 참여율 (0.7)M/Y

년도	세부성과 목표번호	상 세 수 행 업 무	성과물	참여율 (M/Y)
1차년	1-1	- NeuralPDE 방법론 정립	- NeuralPDE 프로그램 구축	0.5
	2-1	- XAI 방법론 타당성 검토	- XAI 기술보고서	0.2

성 명 : 허재석 (디지털가상원전기술개발부) 연 참여율 (0.7)M/Y

년도	세부성과 목표번호	상 세 수 행 업 무	성과물	참여율 (M/Y)
1차년	1-2	- 임계유동 simulation 데이터 생산	- 임계유동 빅데이터 생산	0.5
	2-1	- XAI 방법론 타당성 검토	- XAI 기술보고서	0.2

KAERI

제4절 사업 수행 계획

성과목표 1 : 복잡시스템을 해석하는 시스템코드의 계산을 가속하는 AI 해석모듈 개발

□ 사업(연구개발) 범위

○ 기존 시스템코드 solver의 계산속도를 가속

○ 계산시간이 많이 소요되는 특수 열수력 현상

□ 수행 내용

○ 복잡시스템 해석코드 AI solver 개발

- 시스템코드 내 지배방정식 풀이 모듈 시뮬레이션에 기반한 AI 1D solver 개발
- NeuralPDE를 활용한 AI 1D solver 개발 (PINN:DeepXDE, Julia:neuralPDE)
- Warmup-Inference-Refinement 기법을 활용한 AI 3D solver 개발

○ 다중 및 단일 물리적 현상에 대한 AI 예측모델 개발 (정확도 개선, 계산가속)

- CHF 벽면온도 예측 AI 모델 개선: 효율적인 NN scheme 적용 (예측정확도 개선)
- 임계유동 예측 AI 모델 개발: PDE 기반의 R-T 모델을 AI로 구현 (계산 가속)

○ AI 해석모듈 성능 확인

- 개발한 AI solver, AI 모델을 기존 시스템해석코드에 적용
- 대표검증문제, 대표사고경위를 선정하여 계산 가속 및 정확도 개선 효과 확인

□ 성과 달성 방안 및 추진 전략

○ 우리연구원 전문가 풀 활용

- 소속부서 전문가 풀 활용 (복잡시스템, 전산, 수치 해석)

○ AI 적용전문가 커뮤니티 형성

- 국내외 학회 및 워크샵 참가를 통한 AI 적용분야 커뮤니티 형성
  (국제학회-NeurIPS, ICML, 국내학회-한국인공지능학회)

○ SW 인프라 고도화

- 고효율 SW 선정을 통한 AI 학습효율 극대화
- AI 모델 적용 시 high-level 프로그래밍 스킬 적용

성과목표 2 : 개발한 모든 AI 모델에 대해 eXplainable AI 기법으로 예측메커니즘을 규명

□ **사업(연구개발) 범위**

○ XAI 방법론을 이용한 AI 모델의 예측메커니즘 해석

○ XAI 해석내용을 적용하여 AI 모델 예측성능 개선

□ **수행 내용**

○ XAI 방법론을 이용한 AI 모델 해독

- 물리적 현상 예측 AI 모델에 적합한 XAI 방법론 선정 (Gradient*input, LRP 등)
- 개발한 AI solver, AI 모델을 대상으로 XAI 해석
- XAI 해석 결과를 적용하여 AI 학습 지원 및 평가

□ **성과 달성 방안 및 추진 전략**

○ AI 이론전문가 집단 활용

- 학계 중심의 AI 및 XAI 이론전문가 집단 활용 (자문비, 연구개발서비스비 활용)
- XAI 적용법 고도화에 활용

○ HW 인프라 확충

- 딥러닝, XAI 용 클러스터 구축을 통한 연구효율 극대화 (CPU & GPU)

제5절 선행 성과와의 연계 방안

과제명 : 다중현상, 복잡시스템을 해설하는 eXplainable AI 기반 신속해석모듈 개발	
연계성	**차별성**
[비교 부서명] : 지능형컴퓨팅연구실 - 머신러닝을 위한 AI 기술 적용 측면에서 공통점이 있음 - 고성능의 GPU 활용이 필요하다는 측면에서 high-end HW 구축 후 공유가 필요함	[비교 부서명] : 지능형컴퓨팅연구실 - 본 과제는 데이터만 학습하는 머신러닝과는 다르게 Physics 기반의 인공지능을 추구함 - 설명가능 인공지능을 구현하고자 함

[추가 설명]

- 세계적인 동향을 살펴보면 AI black box를 극복하고자 하는 방법으로 두 가지 방안이 제시되고 있음
  (1) 기본 물리법칙을 학습한 AI : 단순한 패턴을 인식하는 것이 아니라 내재된 원리를 학습
  (2) 설명가능 인공지능 (XAI) : 가장 직접적인 방법

KAERI

제6절 혁신적 차별성 및 기대 효과

□ 혁신적 차별성 및 기대 효과

○ 기본 physical law를 학습한 AI solver

- 기본적인 physical law를 기반으로 PDE를 푸는 모든 공학분야에 활용가능
- Solver의 computing burden 절감에 따라 계산영역 (혹은 해상도) 확장

○ 빅데이터에 더해 내재된 원리까지 학습하는 공학적 머신러닝

- 정확도 뿐만 아니라 원리 설명을 요구하는 전문공학분야에 활용성 증대
- 설명가능한 인공지능 (XAI)을 강제하는 세계적 규제 흐름에 선제적 대응

○ 정확 할수록 느리다? → 정확하면서 빠르다

- AI 해석모듈의 계산가속효과에 따른 복잡시스템 설계공정 단축, 설계비용 절감
- 원전과 같은 복잡시스템의 안전성 평가시간 단축 및 평가비용 절감
- 실시간에 가까운 계산속도가 기대됨에 따라 복잡시스템 운영 지원역할에 효과적

□ 성과 활용

○ 시간, 공간에 대한 물리량 변화를 계산하는 AI PDE solver 활용

- (Navier-Stokes equation) 공력해석, 일기예보, 원자력 계통 3차원 해석
- (Schrodinger equation) 양자역학 양자파동 해석
- (Maxwell's equation) 전자기학 전자기장 해석

○ XAI 해석내용을 기반으로 인허가 획득

- AI solver, AI 물리현상예측모델을 기반으로 구성된 AI 시스템코드의 인허가 획득

제7절 소요 예산

▣ 단계

분류	1차년도		2차년도		3차년도		총 연구비 (직접비) (백만원)	연평균 내부 인력 (M/Y)
	연구비	인력	연구비	인력	연구비	인력		
세부	45,000	3.5	30,000	3.5	30,000	3.5	105,000	10.5

▣ 1차년도

성과 목표번호	세부 성과목표	1차년도 연구비 (직접비) (백만원)	1차년도 내부 인력 (M/Y)
1	1-1. (1) 1D, 3D simulation data 구축	8,000	1.2
	1-1. (2) NeuralPDE 방법론 확립		
	1-2. (1) CHF 벽면온도 AI 모델 개선	4,000	0.7
	1-2. (2) 임계유동 학습 data 구축		
성과 목표 1 합계		**12,000**	**1.9**
2	2-1. (1) XAI 방법론 선정	33,000	1.6
	2-1. (2) HW 인프라 구축[1)]		
성과 목표 2 합계		**33,000**	**1.6**
합계		45,000	3.5

[1)]GPU 클러스터: NVIDIA DGX A100

- GPUs: 8x NVIDIA A100 Tensor Core GPUs
- GPU memory: 320 GB
- CPU: Dual AMD Rome 7742, 128 cores total, 2.25 GHz (base)
- System memory: 1TB
- Storage: 2x 1.92TB M.2 NVME drives, internal storage 15TB U.2 NVME drives

제8절 자체 검토

□ 기관 고유임무와의 부합성 검토

○ AI 관련 우리연구원 R&R

- 원자력기술개발로 사회에 공헌하고 신성장 혁신 분야 개척에 중점
- 4차 산업 기술과 원자력기술을 접목하는 융복합 신기술 개발 추구

○ 제안과제 부합성

- 우리 연구원의 궁극적인 타겟은 원자력발전소이며, 원자력공학 기술을 통해 사회에 공헌할 수 있는 혁신분야 개척 추구
- 원자력발전소라는 거대복잡시스템을 해석하는 기존의 프레임은 설명가능 AI와 융합하여 퀀텀점프해야 할 시기라고 판단됨

□ 국가 R&D 정책과의 연계성

○ 국가 정책 기조

- 낡은 시스템의 쇄신과 도전과 혁신을 강조하는 정책기조
- 4차 산업혁명 대응에 대해서 데이터 중심 사회로의 이행 가속화를 위한 통합플랫폼 구축을 강조

○ 제안과제 연계성

- 낡은 시스템을 대체하고 4차 산업혁명 대응을 위한 정책에 부응하여 과학기술분야에서는 수치해석 플랫폼의 핵심이 되는 solver를 혁신적으로 개선할 필요가 있음

□ 내·외부 지적사항에 대한 수정·보완 사항

○ 외부전문가 의견서

"다중현상, 복잡시스템을 해석하는 eXplainable AI 기반 신속해석모듈 개발" 과제 신청서에 대한 검토 의견 작성자:윤수종(sujong.yoon@inl.gov) 작성일자: 09/08/2020

1. 연구과제의 필요성

본 연구과제 제안서는 원자력 시스템의 안전해석에 이용되는 전산유체해석코드의 성능을 향상시켜 계산에 필요한 시간을 단축시키기 위한 인공신경망 기반 인공지능 모델을 개발하는 것을 목표로 한다.

인공신경망 기반 인공지능 모델의 경우 인공신경망 노드의 가중치를 결정하는 학습 과정이 역전파기법을 통해 자동화되어 있고 신경망의 은닉층이 다층으로 구성되어 있는 경우 학습 과정에서 인공지능이 입력데이터의의 어떤 특성을 어떻게 추출하여 최종 결과를 도출하는지를 파악하는 과정이 난해하다.

이러한 인공신경망 기반 인공지능의 한계를 극복하고자 최근 eXplainable AI (설명가능한 인공지능, XAI)에 대한 연구가 전세계적으로 활발히 이뤄지고 있고, 이는 인공지능 기법을 원자력 안전 및 열수력 분야에 도입하고 인공지능 모델의 예측신뢰성을 확보함에 있어서 중요한 주제이며 반드시 연구가 필요한 주제로 사료된다.

2. 연구과제의 타당성

원자력 안전 및 열수력 해석 시스템코드는 사고 시 원자로 내에서 발생할 수 있는 다상 유동 상변화를 포함한 과도현상을 해석하기 위해 사용되는데 이러한 복잡한 물리적 현상에 대한 해석해는 존재하지 않기 때문에 전산유체기법을 통해 근사해를 도출하고 있으며 이러한 근사해를 도출하는 과정에서 발생하는 메움 문제를 해결하기 위해서 실험데이터로부터 도출된 상관식이나 수학적 모델이 적용된다.

기존에 수행된 연구의 경우 이러한 실험 상관식을 인공지능 모델로 대체하여 계산시간을 단축하였는데 이는인공신경망 모델의 경우 모델 학습 과정을 제외하면 계산 수렴을 위한 반복 계산을 요구하지 않기 때문이다. 기존의 상관식 기반 해석 방법론에 비교해봤을 때 인공신경망 기반 인공지능 모델의 경우 동일한 데이터를 대상으로 보다 향상된 정확성을 기대할 수 있으며, 추가 데이터가 확보되었을 때 이를 반영할 수 있는 확장성도 더 뛰어나다는 장점이 있다. 이러한 인공신경망 기반 인공지능 모델을 도입한 원자력 안전 및 열수력 해석 시스템 코드는 향후 원자력 발전소 내의 복잡한 계측데이터로부터 발전소의 상태를 실시간으로 분석, 예측하는 디지털 트윈 (Digital Twin) 시스템을 구축하는데 핵심적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

다만 기존의 수식 혹은 표 형태의 실험 상관식을 인공신경망 기반 인공지능 모델로 대체할 경우 코드 검증 (Verification & Validation)이 수행되어야 하므로, XAI 방법론과 더불어 추후에 인공신경망 기반 시스템코드의 검증 방법론도 개발되어야 할 것으로 사료된다.

연구 내용 중 질량, 운동량 및 에너지 보존방정식을 풀 수 있는 AI Solver 구현을 제시하고 있는데, AI Solver 에 대한 정확한 정의가 제시될 필요가 있다. 최근 AI를 이용하여 편미분방정식의 해를 구하는 연구들이 보고된 바가 있으나, 아직 기초연구단계에 불과하고 복잡시스템 해석코드의 지배방정식들의 해를 도출하는 AI Solver를 개발하는 것은 단기

간 내에 달성하기 어려운 목표로 예상된다. 특히 기존의 시스템해석 코드는 First-principle 기반으로 범용성을 갖고 있으나, 데이터 기반의 인공지능 모델이 그러한 범용성을 갖는 것을 증명하기 어렵다고 생각된다.
단일 및 다중 물리적 현상에 대한 인공지능 모델을 개발하고자 하는 연구내용은 기술적으로 타당하다고 사료된다. 이 경우, 시스템 코드 내에 다수의 인공지능 모델들이 구축될 것으로 예상되며, 여러 인공지능 모델 간에 상호작용 유무에 따라 통합모델 개발이 필요할 수 있을 것으로 보인다.
현재 다양하게 제시되어 있는 XAI 방법론에 대한 평가를 통해 물리적 현상 예측에 적합한 XAI 방법론을 선정하는 것은 합리적인 연구 추진 전략으로 생각된다. 또한 향후 더 증대될 것으로 예상되는 기계학습용 클러스터를 구축하는 것은 매우 바람직하다고 생각된다.

3. 연구과제의 차별성
전산유체해석 (Computational Fluid Dynamics) 코드의 경우 난류모델의 메움 문제를 해결하는데 인공지능을 도입하여 해석 정확성을 높이는 연구들은 보고된 바가 있으나 이를 원자력 안전 및 열수력 시스템 해석 코드의 해석 과정에 도입한 경우는 매우 드물다. 시스템 코드의 경우 실험 데이터에 대한 의존도가 CFD 코드에 비해 높기 때문에 인공신경망 기반 인공지능 모델을 통한 성능향상이 클 것으로 기대된다.

- 전반적으로 XAI의 필요성에 공감하고 AI의 활용성 증대에 올바른 방향이라는 의견이었음.
- AI solver에 대한 실현가능성과 범용성에 대해서 한계점을 지적했는데, 관련 연구사례를 조사하여 보완함. 대표적인 사례로 최근 속도장을 AI로 구하는 California 대학의 연구사례가 있었으며 범용성 또한 확인됨. 기존 시스템코드의 solver 풀이과정을 고려하면, 속도장이 주어지면 나머지 물리량은 쉽게 구할 수 있는 풀이법이 가능함. 또한 neural network의 역전파방법의 수학적인 방법을 이용해 편미분 방정식을 풀이하는 neuralPDE 방법론이 개발되어 있으며, 이를 이용한 python 기반의 여러 코드가 개발되어 있음.

○ 기획평가위원 평가의견

순번	검토 의견
1	AI를 적용한 시스템 코드 계산 가속은 고장·사고의 신속한 대응 등에 중요하고, 설명 가능한 인공지능(XAI)은 적용 기술의 검증이 중요시되는 원자력 분야에서 중요한 역

	할을 할 수 있음. 그리고 과제 제안그룹이 관련 연구를 수행할 역량을 갖추고 있다고 판단함
2	그러나 주요 사업으로 추진되기 위해서는 다음과 관점의 보완이 필요함 - 목표는 분명하게 기술되어 있으나 구체적인 방법론이 제시되고 있지 않으므로, 3년 후의 성과 목표, 현재 확보된 기술, 과제를 통해 확보하고자(확보해야) 하는 기술, 3년 후의 후속 연구/응용 계획을 구체적으로 제시 - 현재 확보기술과 비교하여 일정 수준의 성과를 거두기 위해 확보해야 하는 기술들이 매우 도전적으로 판단되는데, 구상 중인 구체적인 확보 전략 제시 - 계산 가속 AI 모듈과 설명 가능 AI가 별개의 주제로 보이는데, 이를 함께 다루면서 높은 수준의 기술을 개발할 수 있다고 생각하는 근거 - 과제가 성공적으로 추진되었을 경우 성과 활용 및 기대효과의 구체화
3	제안된 주제의 연구를 기존 과제 또는 예타사업으로 추진하지 않고 별도의 주요사업으로 추진해야만 하는 설득력 있는 논리가 필요함.
4	특정 열수력 현상에 대한 인공신경망 모델링에 대해서는 25년 전 직접 좋은 결과를 경험하기도 해서 더욱 발전한 AI 기술의 적용성에 의문이 없지만, 미리 예상하기 어려운 시나리오까지 다뤄야 하는 시스템코드에 AI 모듈을 적용한 계산 가속의 실효성에 대해서는 잘 모르겠음. 성공적인 과제 수행을 위해서는 깊이 있는 탐색 연구가 선행되면 좋을 것 같은데, 이미 이루어진 예가 있거나 구체적인 전략이 있다면 제시하기 바람.

- AI solver에 대한 구체적인 방법론을 보완함. 기존의 방식대로 시뮬레이션 데이터를 학습하는 방식과 더불어 neural network의 역전파방법을 이용한 neuralPDE 방법론 또한 효과적인 방법으로 고려됨. neuralPDE 방법론은 편미분방정식을 푸는 수학적인 방법론으로 ‘black box’라는 한계점을 원천적으로 배제할 수 있음.

- 설명가능 AI는 향후 본 과제의 AI 모델 개발 뿐만 아니라 모든 인공지능 분야에서 반드시 함께 구현이 되어야 함. 별개의 주제가 아니라 동시에 수반되어야 하는 분야라는 인식의 전환이 필요함.

- 기존 주요사업의 경우 연구원의 필수 시설 및 분야에 필요한 운영, 지원을 위한 사업이었으나, 이번 주요사업의 경우 ‘원자력 이용의 패러다임을 바꾸고 새로운 가치를 창출하여 국가경제 발전에 기여할 수 있는 파격적이고 혁신적인 연구개발을 지원’ 하는 것이 목적임. 융합공학의 대표연구기관인 우리 원자력연구원에서 공학 수치해석의 필수 분야인 편미방 solver를 AI로 풀어냄으로써 공학분야 전반에 기여할 수 있을 것이라 판단됨. 주요사업의 목적이 기존과 같다면 타 연구개발사업으로 추진하는 것이 옳음.

- 설명가능 AI의 경우 AI 이론학자들이 최근 많은 방법론을 개발하고 있으나 적용연구

는 거의 이루어지지 않은 것이 현실임. 하지만 AI의 'black box' 한계점 극복을 위한 설명가능 AI의 필요성은 모두가 공감하기 때문에, 설명가능 AI 적용분야에 선제적인 역할을 할 필요가 있음.

□ 평가위원 검토의견 반영 내역

구분	검토항목	검토의견	반영여부	반영내용
정책적 부합성	기관 고유임무 및 주요사업 부합성	주요사업 성격에 부합하는 구체적인 성과 및 활용계획	일부 반영	30p, 제8절에 반영
		타 연구개발사업과의 차별성	미반영	
연구개발 내용 보완	방법론	기 확보 기술, 개발할 기술을 구체적으로 제시	반영	25~26p, 제4절에 반영
	실현가능성	구체적인 달성전략 제시	미반영	위 항목과 일치함
	연계성	AI 솔버와 설명가능 AI와의 연계성	반영	19~20p, 제2절에 반영

KAERI

제3장

참고문헌

KAERI

KAERI

제3장 참고문헌

[1] S.M. Son et al. "Preliminary CFD Analysis for HVAC System Design of a Containment Building," *2016 KNS Autumn*, Oct. 27-28, 2016, Gyeongju, Korea.

[2] T. Hohne et al. "Application of CFD Codes in Nuclear Reactor Safety Analysis," *Science and Technology of Nuclear Installations,* Vol. 2010, 198758, 2010.

[3] W. Dong et al. "Adaptive Neural Network-Based Approximation to Accelerate Eulerian Fluid Simulation," *Supercomputing'19 (SC19),* Nov. 17-22, 2019, Denver, Colorado, USA.

[4] J. Heo et al. "Estimation of Modeling Uncertainties for Multi-Scale Reflood Tests Using Neural Network Based Surrogate Models," *BEPU2018,* May 13-19, 2018, Lucca, Italy.

[5] H.M. Park et al. "Uncertainty Quantification for Multi-Scale Reflood Tests Using Neural Network Based Surrogate Models," *2018 KNS Autumn,* Oct. 25-26, 2018, Yeosu, Korea.

[6] O. Obiols-Sales et al. "CFDNet: A Deep Learning-based Accelerator for Fluid Simulations," *International Conference on Supercomputing (ICS'20),* Jun. 29-Jul. 2, 2020, Barcelona, Spain.

[7] H.M. Park et al. "Wall Temperature Prediction at Critical Heat Flux Using a Machine Learning Model," *Annals of Nuclear Energy,* Vol. 141, 107334, 2020.

[8] 허성만 등, "딥러닝 안에서 일어나는 과정을 해석하는 설명가능인공지능 기술," *PyCon Korea 2019,* Sep. 15-18, 2019, Seoul, Korea.

[9] D. Gunning, "Explainable Artificial Intelligence (XAI)," *Defence Advanced Research Projects Agency (DARPA)*, 2017.

[10] L. Lu et al. "DEEPXDE: A Deep Learning Library for Solving Differential Equations," *arXiv* preprint arXiv:1907.04502v2, 2020.

[11] 한국수력원자력(주), 한국전력기술, 한국원자력연구원, 한전원자력연료, *SPACE 3.0 매뉴얼 Volume 1 이론 매뉴얼.* TR-KHNP-0032, 2017.

[12] W.J. Nam et al. "Relative Attributing Propagation: Interpreting the Comparative Contributions of Individual Units in Deep Neural Networks," *arXiv* preprint arXiv:1904.00605v4, 2019.

KAERI

평가의견 반영표

과제명 : 다중현상, 복잡시스템을 해설하는 eXplainable AI 기반 신속해석모듈 개발

부서명: 혁신SMR원자로개발부	**과제책임자: 박해민**

평가위원 요구사항	평가위원 요구사항 반영내용 요약	비고
■ 주요사업으로 추진해야 할 필요성이 높지 않음. 원내에서 시급히 추진해야 할 사안이 아님.	■ 제2절에 필요성 및 시급성 강조	19~20p
■ 기존 AI 부서에서 추구하는 내용과 큰 차별성이 보이지 않음.	■ 원리를 학습하는 AI로 패러다임 변화를 강조	20p
■ 주요사업으로 독자적으로 수행하기 보다는 현재 수행하고 있는 업무에서 역무를 확장해서 수행하며 추진하거나, 미래전략본부의 AI부서와 협업을 통해 일을 추진하는 것이 바람직함.	■ 지능형컴퓨팅연구실과 연계성 및 차별성 기술	27p
■ AI를 적용한 시스템 코드 계산 가속은 고장·사고의 신속한 대응 등에 중요하고, 설명가능한 인공지능(XAI)은 원자력 분야에서 중요한 역할을 할 수 있음.	■ 미반영	
■ 구체적인 연구목표를 설정하여 추진하기 바람.	■ 미반영	
■ 발표자료 및 과제계획 요약에 대한 평가 의견은 다음과 같음 - 본 과제는 인공지능컴퓨팅연구실과 협업하여 추진하는 것이 바람직하다고 사료됨. - 목표 달성을 위한 구체적인 방법론이 제시되기 바람. - 예산 사용 계획에 대해 구체적인 H/W비용 산출 내역을 포함하기 바람. - 성과물 활용 계획과 과제 수행 시의 기대효과가 구체적으로 설명되기를 바람.	■ 지능형컴퓨팅연구실과 연계성 및 차별성 기술 ■ GPU클러스터 상세사항 기술	27p 29p
■ 설명 가능한 인공지능(XAI)을 활용하여 AI 예측 결과의 신뢰성을 확보할	■ 미반영	

수 있는 세계 최조의 AI 머신의 인허가까지를 목적으로 하는 도전적인 과제임 - XAI가 예측 결과의 신뢰성을 높일 수 있는 과정을 보다 구체적인 예시를 활용하여 보여주는 전략이 필요함 - 도전적인 과제인만큼 주요사업의 정량적 성과를 보강할 필요가 있음 (특허 확보 전략 등)		
■ 연구내용의 혁신성과 중요도가 높은 제안으로 판단됨.	■ 미반영	
■ 4차 산업혁명과 함께 계산수학 영역의 패러다임이 바뀌어 가는 시점에서 연구원내의 수학라이브러리, M&S 체계에 대한 선제적 변화 연구로써 필요함	■ 미반영	
■ 기존 AI 연구실과 협업 관계를 유지하고, 특히 HW 구축시 소형의 대량 시스템 구축보다 협업하여 대형의 HW 구축을 권고	■ 반드시 반영되어야 한다고 여겨지나, 추후 과제 진행 시 협의되어야 하는 부분이라 판단됨	
■ 제안하는 과제의 연구결과를 검증하기 위한 사전단계로써 프로토타이핑을 해야 할텐데 원자력발전소의 복잡 시스템 중 테스트배드를 선정하기를 바람	■ 본 과제의 AI 모델은 수학적 풀이과정을 학습하는 것으로 검증을 위한 실험적 테스트배드는 필요없음.	
■ 복잡시스템들에 대한 데이터셋을 어떻게 구성할 것인지에 대한 계획이 모호함	■ 시뮬레이션 데이터를 구성하여 학습할 계획. 실험결과만 학습데이터로 사용할 수 있는 것이 아님. 복잡시스템 해석을 위한 솔버 풀이과정을 AI로 구현하고자 하는 것임.	

서지정보양식

<table>
<tr><td>KAERI보고서번호</td><td colspan="2">KAERI/RR-4601/2020</td><td>보고서 종류</td><td colspan="2">연구보고서</td></tr>
<tr><td>제 목 / 부 제</td><td colspan="5">다중현상, 복잡시스템을 해설하는 eXplainable AI 기반 신속해석모듈 개발과제 기획</td></tr>
<tr><td>연구책임자 및
부 서 명</td><td colspan="5">박해민 / 혁신SMR원자로개발부</td></tr>
<tr><td>연구자 및 부서명</td><td colspan="5">도성주 / 디지털가상원전기술개발부
원종혁 / 다목적원자로기술개발부
유병현 / 디지털가상원전기술개발부
허재석 / 디지털가상원전기술개발부</td></tr>
<tr><td>출 판 지</td><td>대전</td><td>발 행 일</td><td>2020.12.31.</td><td>총 페이지</td><td>42p.</td></tr>
<tr><td>공 개 여 부</td><td colspan="2">공개(O), 비공개( )</td><td rowspan="3">참고사항</td><td colspan="2" rowspan="3">표(0)개, 그림(1)개,
참고문헌(12)개</td></tr>
<tr><td>비 밀 여 부</td><td colspan="2">대외비( ), __ 급 비밀</td></tr>
<tr><td>INIS 공개여부</td><td colspan="2">공개(O), 비공개( )</td></tr>
</table>

초록 (15-20줄 내외)

본 보고서는 다음의 연구목표에 대해 세부적인 과제를 기획한 내용을 담은 보고서이다. 본 과제의 목적은 첫째, 시스템해석코드의 computing burden을 줄이기 위해 AI 방법론을 이용하여 계산을 가속하는 것이고, 둘째, AI 방법론의 고질적인 문제인 'black box' 문제를 극복하기 위해 설명가능한 인공지능(eXplainable AI, XAI) 방법론을 이용하여 개발한 AI 모델의 예측 메커니즘을 규명하는 것이다. 시스템코드의 핵심인 지배방정식을 AI 솔버로 계산하고, 계산시간이 많이 소요되는 임계열유속 벽면온도, 임계유동과 같은 특수현상에 대해서 AI 예측모델을 개발함으로서 계산속도를 급진적으로 높이는 것이 주요 내용이다. 또한 개발한 AI 모델을 XAI 방법론으로 해설함으로써 'black box' 한계점을 극복하고 예측신뢰성을 높이고자 한다. 궁극적으로는 XAI가 기반이 된 AI 시스템해석코드를 개발하여 세계 최초로 AI 해석머신의 인허가 획득을 이루고자 한다.

주제명키워드 (10단어내외)	인공지능, 솔버, 설명가능 인공지능, 계산가속, 시스템코드

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

KAERI Report No.	KAERI/RR-4601/2020		Report Type	Research Report	
Title / Subtitle	Development plan of XAI based high speed analysis module for multiple phenomena and complex system				
Project Manager and Department	Hae Min Park / Innovative SMR Development Division				
Researcher and Department	Seong Ju Do/Virtual Nuclear Power Plant Technology Development Division Jong Hyuck Won/Versatile Reactor Technology Development Division Byung Hyun You/Virtual Nuclear Power Plant Technology Development Division Jaeseok Heo/Virtual Nuclear Power Plant Technology Development Division				
Publication Place	Daejeon	Date of Publication	2020.12.31.	Total number of page	42p.
Open	Open(O), Closed ( )		Reference	Tabs. (0) Fig. (1) Refs. (12)	
Classified	Restricted( ),__Class Document				
INIS Open	Open(O), Closed ( )				

Abstract (15-20 Lines)

This report includes contents of the project for the following purposes. The first purpose of this project is to accelerate the calculation of the system analysis code to reduce a computing burden. The second purpose is to clarify the prediction mechanism of the developed models for overcoming the 'black box' limit. The main research topic is the dramatic increase of the calculation speed of the system analysis code via an AI solver calculating the governing equations, and via AI models predicting the CHF wall temperature and the critical flow which requires long computing time. Also, the 'black box' limit will be solved and consequently the developed AI model will have better reliability via the XAI methodology. For the final goal, the AI system analysis code based on XAI will obtain the license for nuclear design and safety regulations.

Subject Keywords (About 10 words)	Artificial intelligence, Solver, XAI, Calculation acceleration, System code

주 의

1. 이 보고서는 한국원자력연구원에서 시행한 다중현상, 복잡시스템을 해설하는 eXplainable AI 기반 신속해석모듈 개발의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 한국원자력연구원에서 시행한 다중현상, 복잡시스템을 해설하는 eXplainable AI 기반 신속해석모듈 개발의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표하거나 공개하여서는 아니 됩니다.