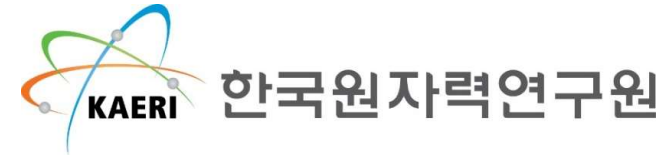


2022년 KNS 추계학술대회
원자력발전소 운전지원시스템 개발 Workshop



인공지능 기반 하나로 운전지원시스템 개발 현황

김승근

한국원자력연구원 인공지능응용전략실

2022.10.19 (수)

Contents

I. 서론

II. 이상탐지 시스템

III. 2차냉각계통 의사결정지원 시스템

IV. CCTV 영상 기반 노심 감시 시스템

V. 결론

I. 서론

I. 서론

- 하나로(HANARO, High-flux Advanced Neutron Application ReactOr)
 - 1995년에 준공된 열출력 30 MW의 다목적 연구용 원자로.
 - 기초 과학, 신소재/첨단부품 개발, 원자력 재료 연구, 동위원소 생산 등에 이용.
 - 방사성동위원소 생산시설, 열중성자/냉중성자 연구시설, 핵연료 노내조사시험설비 등 포함.
 - 현재까지 100주기 이상 운전 (1주기는 약 4주 운전).



하나로 원자로 건물 전경



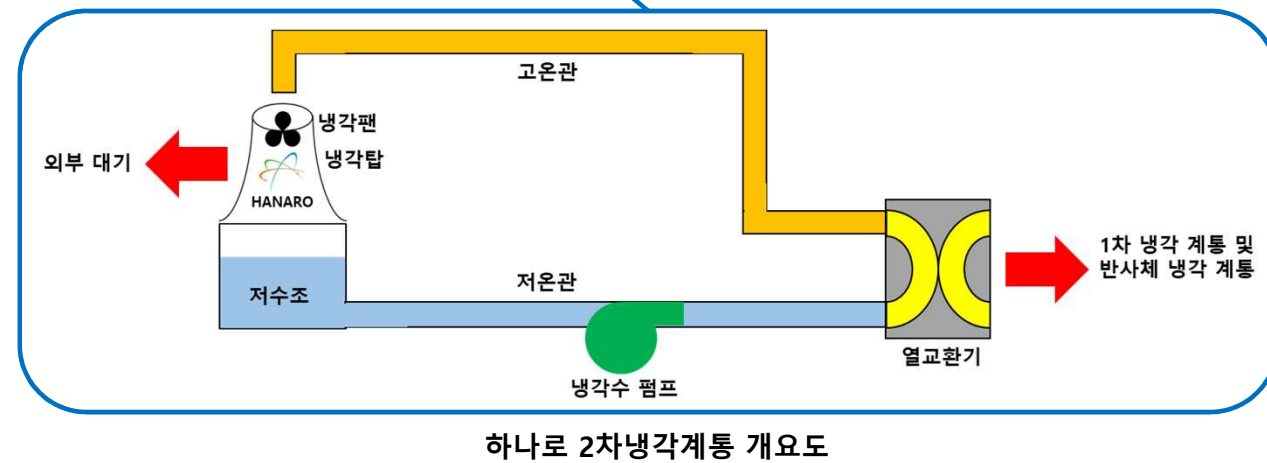
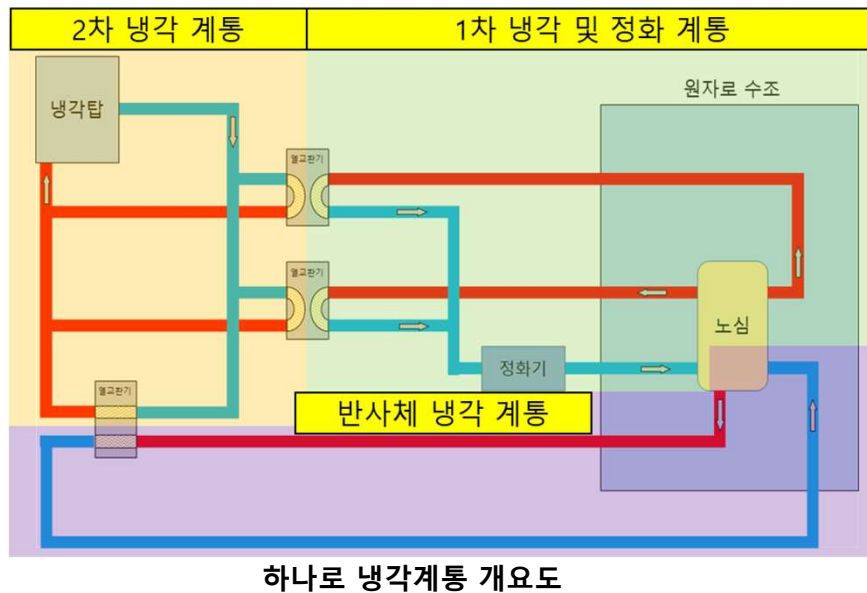
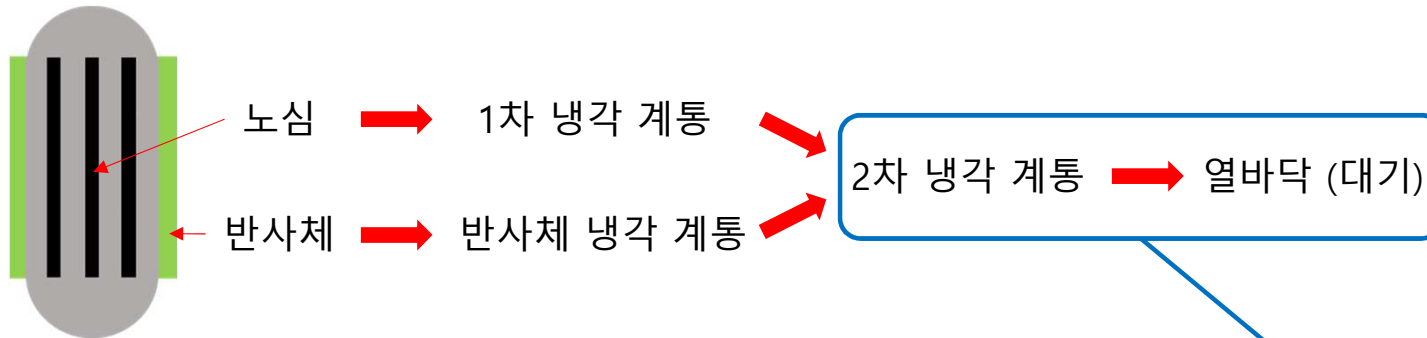
열중성자 연구시설



냉중성자 연구시설

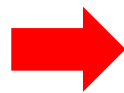
I. 서론

• 하나로 냉각 계통



I. 서론

- 원자력 분야에서의 인공지능 - 제어/자동화 관점에서,
 - 인적 오류 저감 : 2012~2021년 사이 국내에서 발생한 원전 사건(incident) 118건 중 인적 오류로 인한 사건이 15건(12.7%).
 - 운영 효율 향상 : 현재 개발 중인 SMR(Small Modular Reactor)의 개념 상 소수의 인원으로 효율적인 운영이 가능해야 함.


 기존 운전원의 업무를 **도움** : 운전지원시스템(operation support system)
 기존 운전원의 업무를 **대신 수행** : 운전 자동화(automation)/자율운전(autonomous operation)

	LEVEL OF AUTOMATION	ROLES				Workflow
		MONITORING	GENERATING	SELECTING	IMPLEMENTING	
Manual system	1. Manual Control	Human	Human	Human	Human	
	2. Action Support	Human/Computer	Human	Human	Human/Computer	
	3. Batch Processing	Human/Computer	Human	Human	Computer	
	4. Shared Control	Human/Computer	Human/Computer	Human	Human/Computer	
Automated system	5. Decision Support	Human/Computer	Human/Computer	Human	Computer	
	6. Blended Decision Making	Human/Computer	Human/Computer	Human/Computer	Computer	
	7. Rigid System	Human/Computer	Computer	Human	Computer	
	8. Automated Decision Making	Human/Computer	Human/Computer	Computer	Computer	
Autonomous system	9. Supervisory Control	Human/Computer	Computer	Computer	Computer	
	10. Full Automation	Computer	Computer	Computer	Computer	

Level of automation(LOA) Taxonomy (Endsley and Kaber, 1999)

I. 서론

- 인공지능 기반 하나로 운전지원시스템 개발

- 최신 인공지능 기술은 다양한 분야에서 혁신적인 성능을 보이고 있으나, 원자력 분야에는 곧바로 적용하기 어려움.
 - 안전 필수 시스템 (safety-critical system)
 - 데이터 부족
 - 인공신경망의 black-box 특성
 - 명확한 규제 지침 미수립
 - ...
- 하나로 원자로를 대상으로 운전지원시스템을 시범적으로 적용.
 - 상용원전에 비해 단순한 계통으로 구성되어 운전지원시스템 개발 또한 단순함.
 - 짧은 가동주기로 데이터 확보 및 개선사항 적용이 쉬움.
 - 하나로 운영 측면에서도 운영 효율성 및 가동율 향상 등에 도움이 될 수 있음.
- 원자력연구원 내, '하나로 및 연구시설 운영 지능화 플랫폼 구축' 과제 진행 중.
 - 하나로 원자로에 대하여, **이상탐지 시스템, 2차냉각계통 의사결정지원 시스템, CCTV 영상 기반 노심 감시 시스템** 개발 진행 중.

II. 이상탐지 시스템

II. 이상탐지 시스템

• 개요

- 후쿠시마 사고 이후 보고사건의 기준이 강화됨 : 기존 '원자로보호계통 동작'에서 '원자로 정지'로 기준 변경.
- 실제 문제가 발생하기 전 이상탐지를 수행함으로써 운영 안정성 향상.
 - 이상탐지(anomaly detection) : 주어진 데이터, 시스템 등에서 사전 정의된 정상 범주를 벗어나는 경우 탐지.

• 연구 목표

- 최종 목표 : 하나로 이상탐지 시스템 개발
- 세부 목표 :
 - 하나로 이상탐지 모델 개발
 - 하나로 이상탐지 시스템 prototype 개발

4. 연구용원자로 등 시설에 적용되는 보고사건

보고대상	보고 시한		사건 등급 평가
	구두보고(*)	상세보고	
1. 시설의 고장, 인적실수에 의하여 원자로가 정지된 경우. 다만, 시설 외부의 순간정전에 의한 원자로정지는 제외한다.	4시간	60일 이내	○
2. 운영기술지침서의 운전제한조건이 적용되는 상황에서 공학적 안전설비가 작동하였을 경우. 다만, 시험의 일환으로 작동된 경우를 제외하며, 오작동에 의한 경우를 포함한다.	4시간	60일 이내	○
3. 시설에서 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 예상하지 못한 방사성물질의 누설이 발생한 경우 가. 누설에 의하여 관련 방사선감시기의 고방사선경보가 작동하였거나 작동되어야 했을 때. 다만, 중수를 사용하는 시설에서 공기중 삼중수소농도감시기의 경우를 제외한다. 나. 냉각 또는 감속을 위하여 사용된 중수가 24시간 동안 50kg 이상 시설내부로 누설된 때	즉시	60일 이내	○

연구용원자로 등 시설에 적용되는 보고사건 (원안위 고시 개정 제2018-3호)
 <출처: 원안위 보고공개규정해설서>

II. 이상탐지 시스템

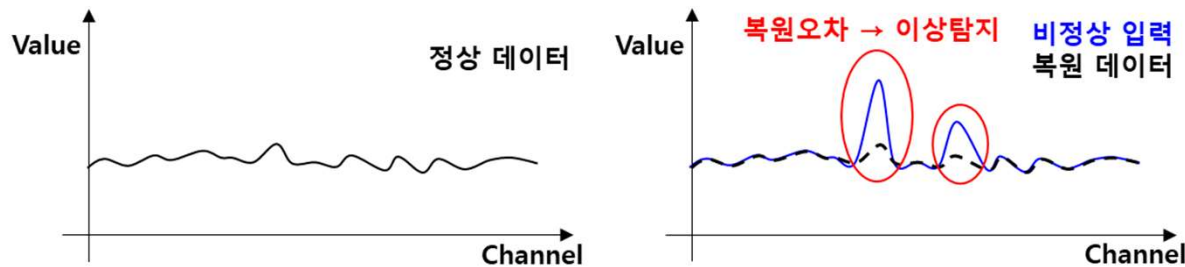
1. 하나로 이상탐지 모델 개발

- 개요
 - 원자로 정지가 발생하지 않은 경우를 정상(normal), 발생한 경우를 비정상(abnormal)으로 정의.
 - 실제 원자로 정지가 발생하기 전 이상을 탐지하고 알림으로써 운전원 대응 시간 확보.
- 데이터 취득
 - 2010년부터 2014년 까지에 해당하는 65주기부터 96주기까지의 36개 주기 데이터를 이용.
 - 총 36개 주기 중,
 - 원자로 정지가 발생하지 않은 주기 18주기 : 정상 데이터로 이용.
 - 원자로 정지가 발생한 주기 18주기 : 비정상 데이터로 이용.
 - 1분 간격으로 기록된 184 가지의 하나로 상태 변수 데이터를 데이터베이스로부터 추출.
 - 원자로 계통
 - 냉중성자원(cold neutron source, CNS) 계통
- 데이터 전처리(data pre-processing)
 - 누락값을 이전 값이나 0으로 대체.
 - 최소-최대 정규화(minimum-maximum normalization)를 적용하여 모든 변수 값의 범위를 0과 1 사이로 되도록 함.

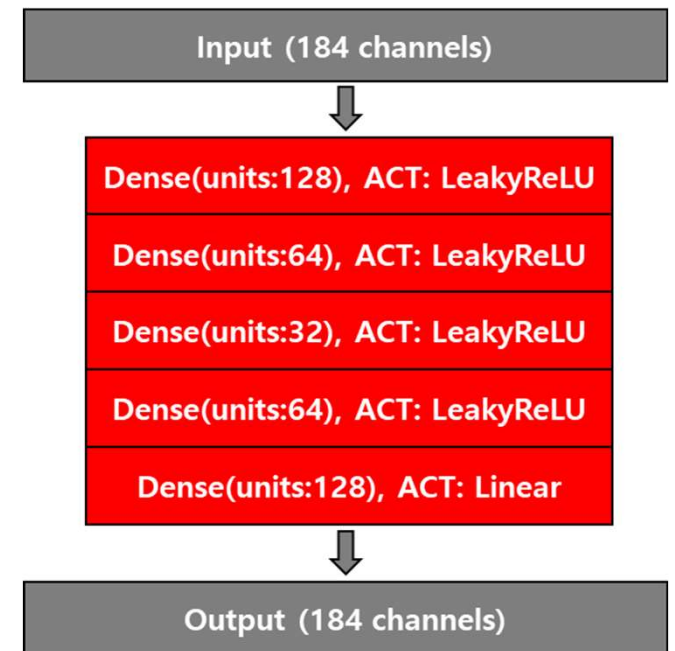
II. 이상탐지 시스템

• 모델 개발

- 데이터기반 이상탐지 방법론 중에서도 복원오차(reconstruction error)에 기반한 방법론 적용.
- 모델의 입력과 출력이 같은 차원을 가짐.
- 모델은 주어진 정상 데이터로부터, 입력과 출력 사이의 복원오차를 최대한 줄이는 방향으로 학습.
 - 정상 범주에 속하는 데이터가 주어질 경우, 입력과 출력 사이의 복원오차가 작음.
 - 비정상 범주에 속하는 데이터가 주어질 경우, 입력과 출력 사이의 복원오차가 큼.
- 복원오차 threshold를 정함으로써 정상 데이터와 비정상 데이터를 분류.
- 전체 변수에 대한 평균 복원오차와 top-K 복원오차를 모두 확인.



복원오차 기반 이상탐지 방법론 개념도

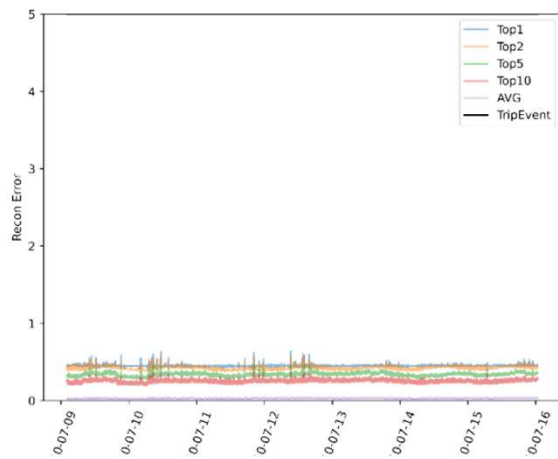


이상탐지 모델 구조

II. 이상탐지 시스템

• 모델 검증

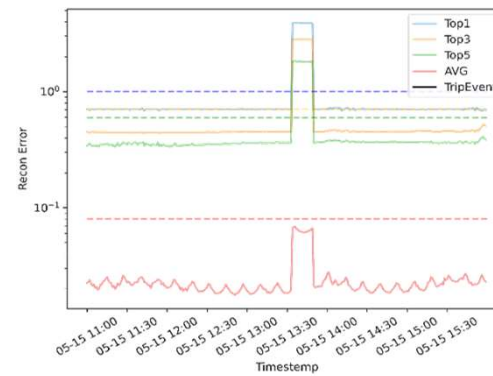
- 검증 데이터의 평균 복원오차로부터 이상탐지를 위한 threshold 설정.
- 일부 데이터에 대하여, 원자로 정지 발생 전 복원오차가 증가하는 추세를 확인.



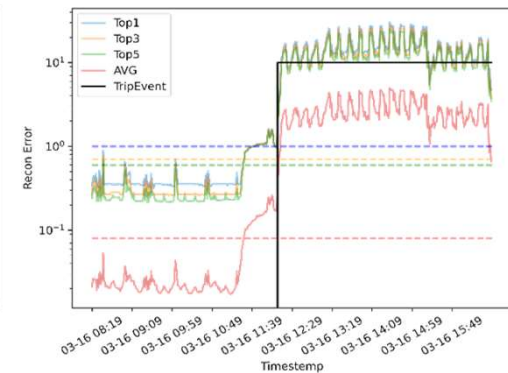
정상 데이터의 복원오차

Detection type	The number of AD events			
	Top 1	Top 3	Top 5	AVG
Early detection	4	4	4	2
On-time detection	8	8	8	9
Late detection	4	4	4	3
Detection failed	3	3	3	5
Nuisance detection	3	3	3	2
Total	19	19	19	19

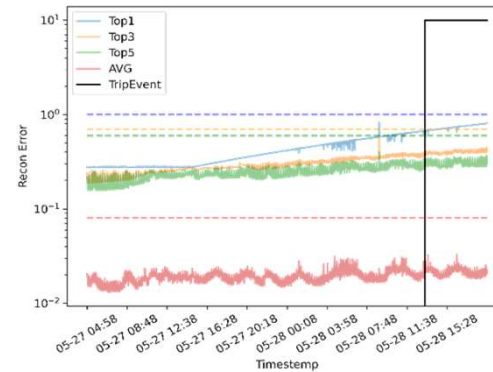
이상탐지 모델 검증 결과



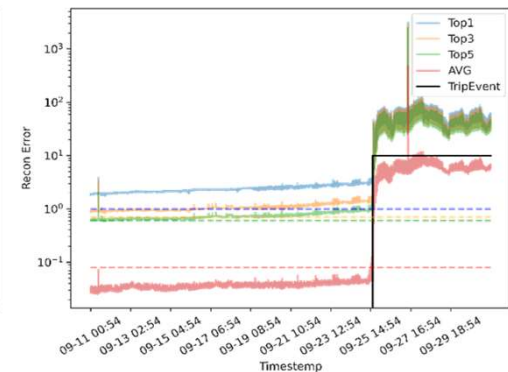
정상



정지용 펌프 관련 이상



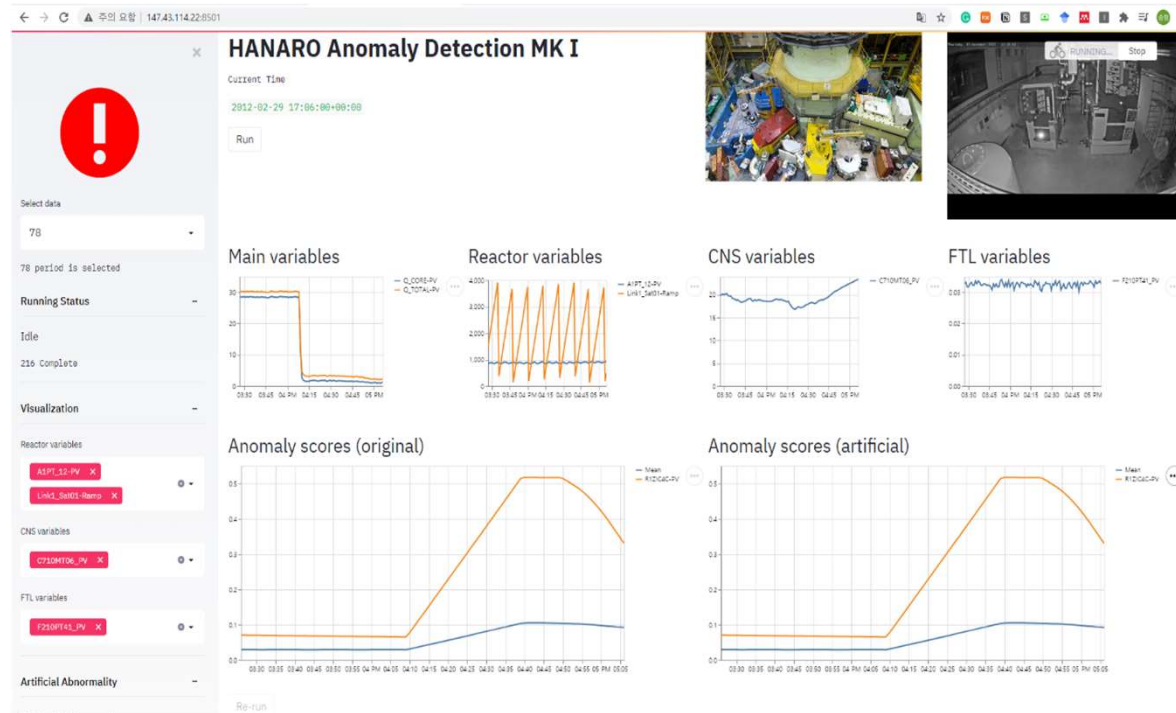
제어봉 관련 이상



냉증성자원 관련 이상

II. 이상탐지 시스템

- 하나로 이상탐지 시스템 prototype 개발
 - 하나로 DB와의 실시간 연동을 위한 데이터 송수신 모듈 개발.
 - GUI (graphical user interface) 개발을 통한 효율적 정보 제공.
 - 이상탐지 모델과의 연동을 통한 이상탐지 결과 도출.
 - 2021년부터 하나로 주제어실에 설치 및 지속적인 개선 진행중.

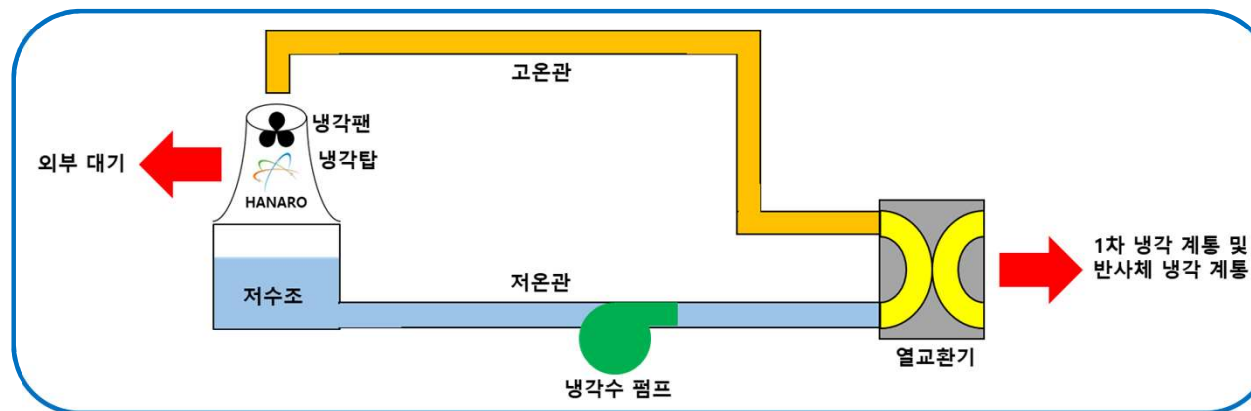


하나로 이상탐지 시스템 prototype 화면

III. 2차냉각계통 의사결정지원 시스템

III. 2차냉각계통 의사결정지원 시스템

- 개요
 - 하나로 2차냉각계통은 냉각수 펌프를 통해 [저수조 → 저온관 → 열교환기 → 고온관 → 냉각탑 → 저수조] 유로 형성.
 - 냉각탑에 설치된 네 대의 냉각팬을 운전하여 열제거를 용이하게 함.
 - 각 냉각팬은 정지/저속/고속 모드로 운전.
- 하나로 2차 냉각 계통의 거동은 기상 상황과 밀접한 관련이 있음.
- 냉각팬을 자동 모드로 운전할 수 있으나, 자동 모드의 운전 로직은 기상 상황을 고려하지 않아 잘 사용되지 않음.
- 운전원들은 경험에 의존하여 냉각팬을 운전하고 있으며, 이는 비효율성과 업무부하를 야기함.



하나로 2차냉각계통 개요도

III. 2차냉각계통 의사결정지원 시스템

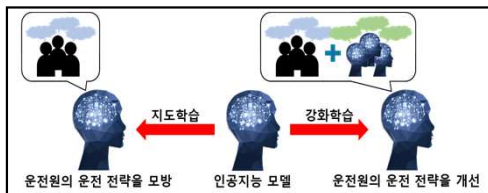
• 연구 목표

- 최종 목표 : 하나로 2차냉각계통 의사결정지원 시스템 개발
- 세부 목표 :
 - 하나로 2차냉각계통 냉각팬 운전모드 예측모델 개발
 - 하나로 2차냉각계통 거동예측모델 개발
 - 하나로 2차냉각계통 의사결정지원 시스템 개발



2차냉각계통 냉각팬 운전모드 예측모델 개발

특정 조건에서 운전원이 어떻게 냉각팬을 운전했는지 예측.



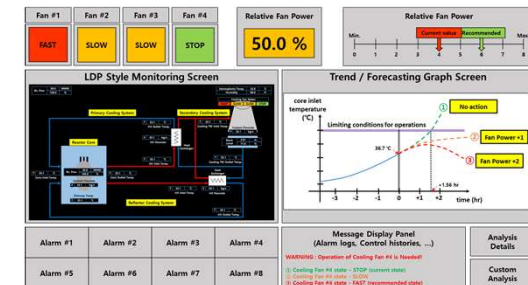
2차냉각계통 거동예측모델 개발

냉각팬 운전모드에 따른 2차냉각계통의 미래 거동을 예측.

2차냉각계통 의사결정지원 시스템 개발

개발된 모델에 기반한 의사결정지원 시스템 개발.

2차냉각계통 의사결정지원 시스템 개발 과정

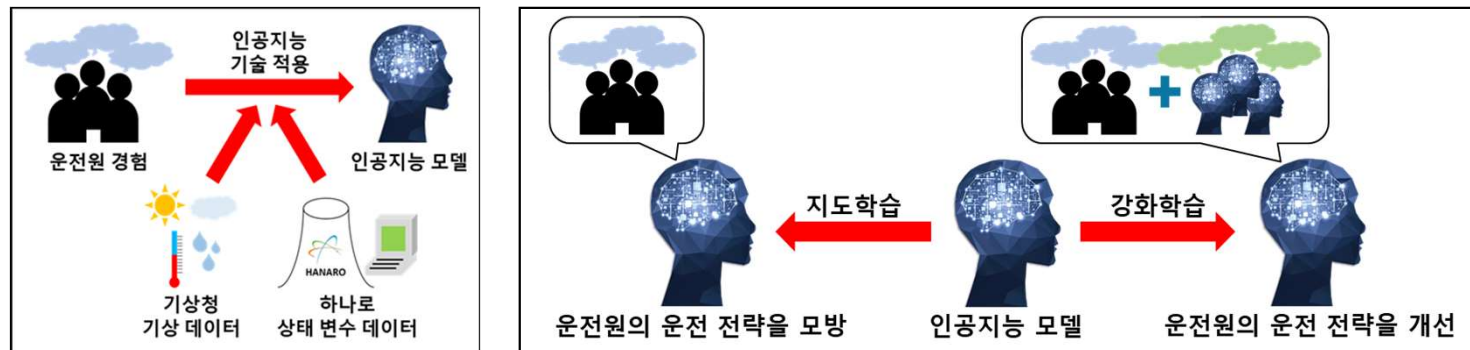


III. 2차냉각계통 의사결정지원 시스템

1. 2차냉각계통 냉각팬 운전모드 예측 모델 개발

• 개요

- 운전 변수 데이터, 과거 운전 이력, 기상 데이터에 기반하여 특정 상황에서 운전원이 어떻게 냉각팬을 운전했는가를 예측.
- 지도학습에 기반하여 운전원의 운전 전략을 '모방' 또는 강화학습에 기반하여 운전원의 운전 전략을 '개선'.



하나로 2차냉각계통 냉각팬 운전모드 예측모델 개발 개요

III. 2차냉각계통 의사결정지원 시스템

• 데이터 취득

- 하나로 데이터 (하나로 상태 변수 데이터, 기존 냉각팬 운전 기록)
 - 2010년부터 2014년 까지에 해당하는 65주기부터 96주기까지의 36개 주기 데이터를 이용.
 - 2차냉각계통의 운전과 관련된 26개 변수를 선정.
 - 1분 간격으로 기록된 하나로 상태 변수 데이터를 데이터베이스로부터 추출.
- 기상 데이터
 - 대전 기상청에서 측정한 2010년부터 2014년까지 1시간 간격으로 측정된 기상 데이터를 취득.
 - 2차냉각계통의 거동과 직접적인 연관성이 있을 것으로 예상되는 2개 변수(기온, 습도)를 선정.
 - 측정 지점(대전 기상청)과 하나로 원자로 사이의 기상 조건이 동일하다고 가정.
 - 한 시간 동안의 기상 상황은 동일하게 유지된다고 가정.

선정된 하나로 및 기상 관련 변수 목록

범주 (개수)	변수 (개수)
노심 (4)	열출력 (2), 노심 입구 온도 (1), 노심 출구 온도 (1)
1차냉각계통 (6)	냉각수 유량 (2), 열교환기 입구 온도 (2), 열교환기 출구 온도 (2)
2차냉각계통 (13)	냉각수 유량 (2), 냉각탑 입구 온도 (2), 냉각탑 출구 온도 (2), 냉각탑 입구/출구 온도 차 (2), 저수조 수위 (1), 저수조 수온(1), 저수조 수위 경보 (2), 냉각팬 운전 모드 (1)
반사체냉각계통 (3)	냉각수 유량 (1), 열교환기 입구 온도 (1), 열교환기 출구 온도 (1)
기상 (2)	기온 (1), 습도 (1)

III. 2차냉각계통 의사결정지원 시스템

- 데이터 전처리(data pre-processing)
 - 누락값을 이전 값이나 0으로 대체.
 - 최소-최대 정규화를 적용하여 모든 변수 값의 범위를 0과 1 사이로 되도록 함.
 - 냉각 능력에 따른 라벨링(labeling)을 진행.
 - 운전 모드를 냉각 능력에 따라 분류함으로써, 클래스(class) 간 차이의 정도를 효과적으로 고려.
 - 각 냉각팬의 저속 모드와 고속 모드 사이의 냉각 능력이 2배 차이난다고 가정.
 - 상대적 냉각 능력이 0과 1사이의 값을 갖도록 정규화하여 라벨링을 진행.

운전 모드와 그에 따른 상대적 냉각 능력

운전 모드 (정지/저속/고속 개수)	상대적 냉각 능력 (정지=0, 저속=1, 고속=2)
(4, 0, 0)	0
(3, 1, 0)	1
(2, 2, 0), (3, 0, 1)	2
(1, 3, 0), (2, 1, 1)	3
(0, 4, 0), (1, 2, 1), (2, 0, 2)	4
(0, 3, 1), (1, 1, 2)	5
(0, 2, 2), (1, 0, 3)	6
(0, 1, 3)	7
(0, 0, 4)	8

III. 2차냉각계통 의사결정지원 시스템

- 훈련 데이터, 검증 데이터, 시험 데이터를 계절의 영향을 고려하여 나눔.
 - 전체 36개 주기에 대한 데이터 중,
 - 훈련 데이터 : 24개 주기에 대한 데이터
 - 검증 데이터 : 6개 주기에 대한 데이터
 - 시험 데이터 : 6개 주기에 대한 데이터

검증 데이터 및 시험 데이터 정보

검증 데이터		시험 데이터	
주기 명	운전 기간	주기 명	운전 기간
66주기	10.06.14 ~ 10.07.22	71주기	11.03.15 ~ 11.04.11
70주기	11.01.30 ~ 11.02.20	77주기	12.01.16 ~ 12.02.15
74주기	11.09.05 ~ 11.10.03	83-1주기	12.10.25 ~ 12.11.02
84-1주기	12.12.03 ~ 12.12.19	89-1주기	13.08.05 ~ 13.08.19
86-1주기	13.03.04 ~ 13.03.18	91주기	13.12.06 ~ 14.01.13
88주기	13.07.01 ~ 13.07.28	96주기	14.06.30 ~ 14.07.10

III. 2차냉각계통 의사결정지원 시스템

- 데이터 증강(data augmentation)
 - 데이터 증강 기법을 적용하여 데이터 불균형(data imbalance) 문제 완화.
 - 잡음(noise) 추가를 통한 데이터 증강
 - 평균 0, 분산 1의 가우시안 분포(Gaussian distribution)에서 샘플링한 값에 0.005를 곱하여 이를 입력 변수에 잡음으로 추가.
 - 생성된 데이터는 기존 데이터와 같은 라벨을 가짐.
 - 내삽(interpolation)을 통한 데이터 증강
 - 냉각 능력이 A 인 데이터와 냉각 능력이 B 인 데이터에 대하여 선형 내삽(linear interpolation)을 수행.
 - 생성된 데이터는 상대적 냉각 능력을 $\frac{A+B}{2}$ 로 가정.

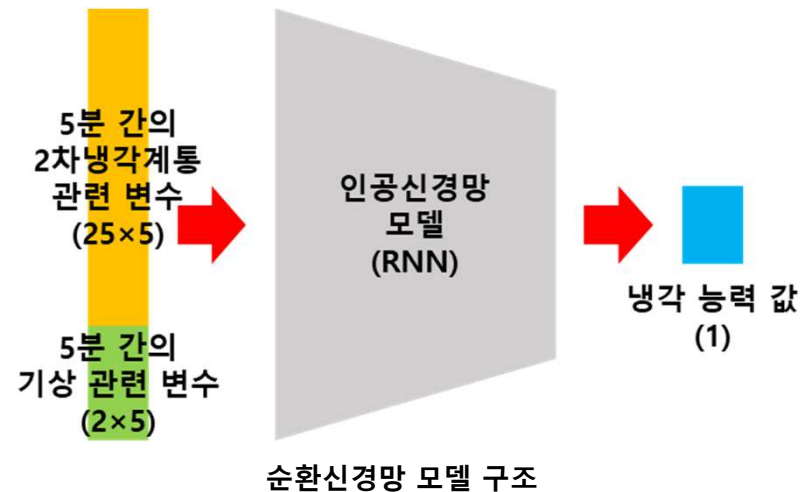
데이터 증강 전후 데이터 수 비교

상대적 냉각 능력	데이터 수 (증강 전)	데이터 수 (증강 후)
0	150,233	151,902
1	5,342	144,000
2	116,849	152,872
3	304,423	304,423
4	236,596	247,503
5	179,240	203,912
6	111,519	144,000
7	72,335	146,448
8	102,133	179,211
총 합계	1,278,720	1,674,271

III. 2차냉각계통 의사결정지원 시스템

- 모델 개발

- 주어진 상황에 대하여 이전에 적용되었던 냉각 능력을 예측하도록 하는 회귀 모델을 개발.
- 순환신경망(RNN, Recurrent Neural Network) 모델 적용.
 - 1개의 LSTM(Long Short-Term Memory) 층과 그 후단의 2개의 완전연결 층으로 구성.
 - 출력 층에서는 sigmoid 활성화 함수(activation function), 그 이외의 층에서는 ReLU(Rectified Linear Unit) 활성화 함수 적용.



III. 2차냉각계통 의사결정지원 시스템

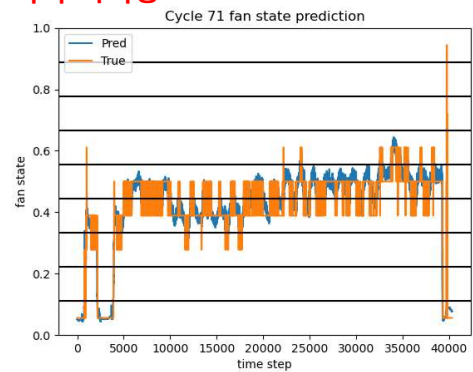
- 모델 검증

- 기상 조건을 입력에 포함하지 않는 경우 정확도가 큰 폭으로 하락(약 40%).
 - 2차냉각계통의 거동 및 냉각팬 운전 모드 결정 과정에서 기상 조건이 중요하게 작용함.
- 완전연결신경망보다 순환신경망이 더 좋은 성능을 보임.
 - 운전원들이 냉각팬 운전 모드의 결정 과정에서 운전 변수들의 시계열(time-series)성을 고려했을 것이라 유추 가능.
- 데이터 증강을 수행하지 않았을 때보다 수행했을 때 더 좋은 성능을 보임.
 - 데이터 불균형 문제의 해소가 모델 개발 과정에서 중요한 역할을 수행.

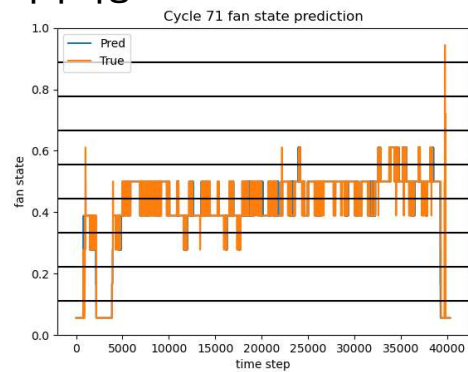
모델 간 성능(정확도) 비교

모델	완전연결신경망		순환신경망	
데이터증강 여부	증강 전	증강 후	증강 전	증강 후
훈련 데이터	77.0%	89.8%	87.2%	93.4%
검증 데이터	81.1%	87.3%	84.1%	90.7%
시험 데이터	77.2%	87.5%	83.7%	91.2%

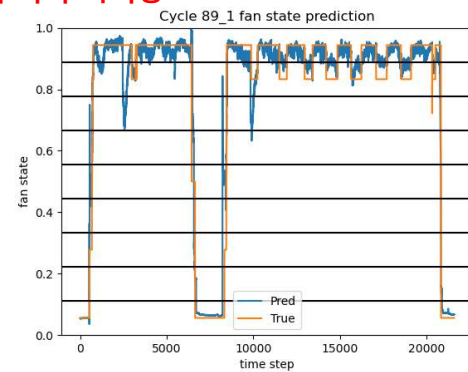
후처리 미적용



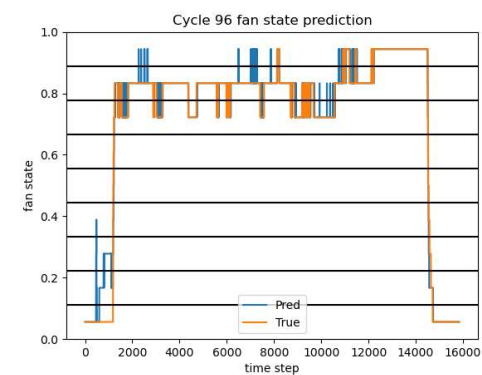
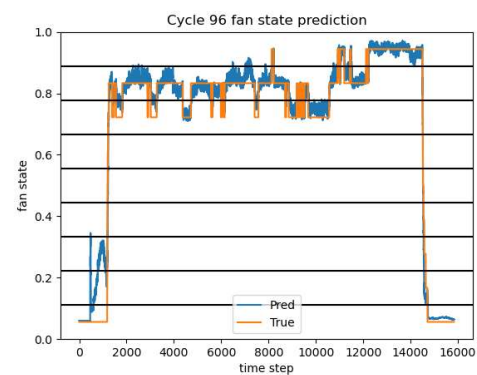
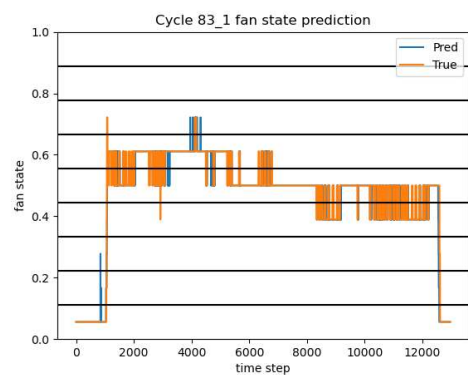
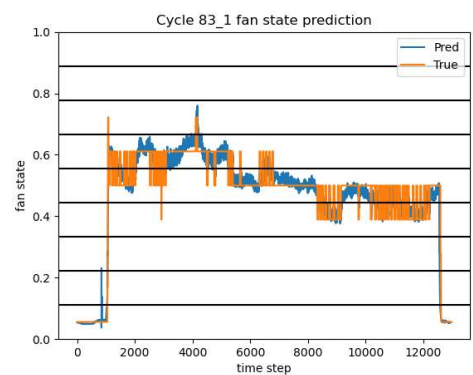
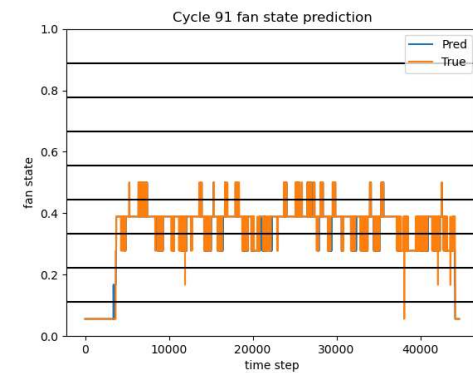
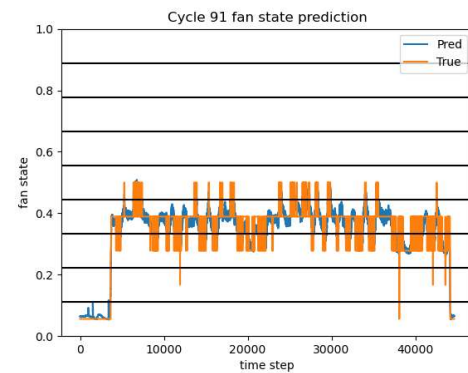
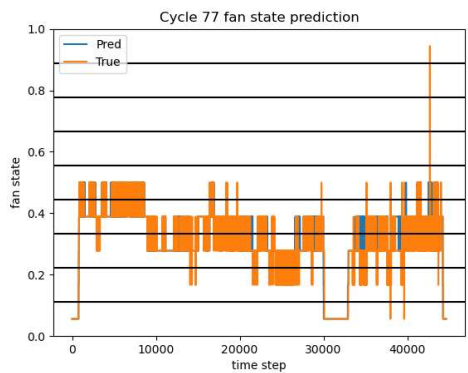
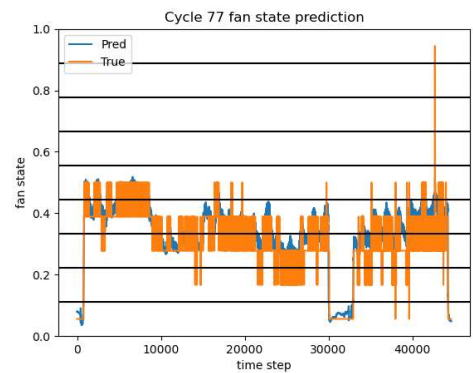
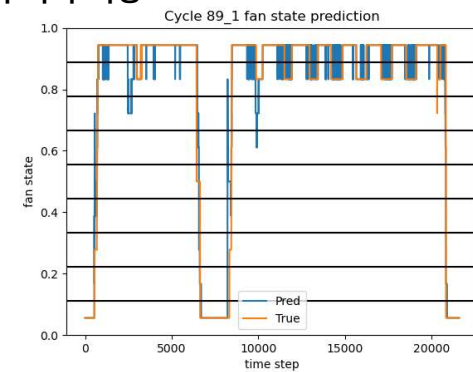
후처리 적용



후처리 미적용



후처리 적용

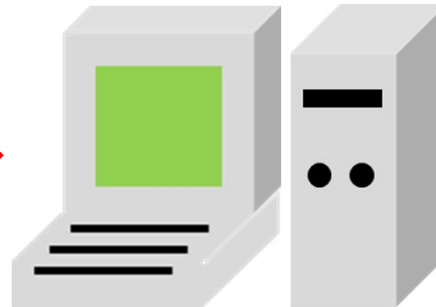
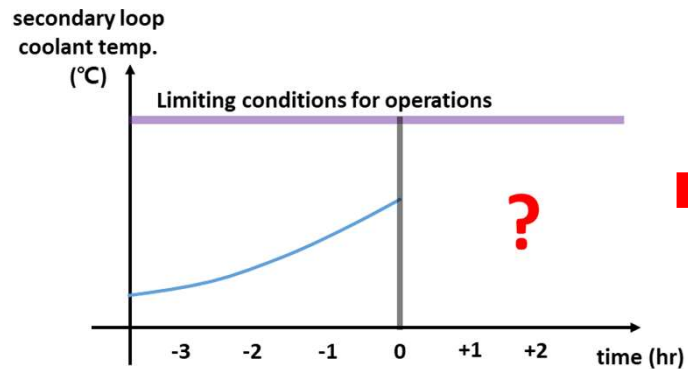


III. 2차냉각계통 의사결정지원 시스템

2. 2차냉각계통 거동예측모델 개발

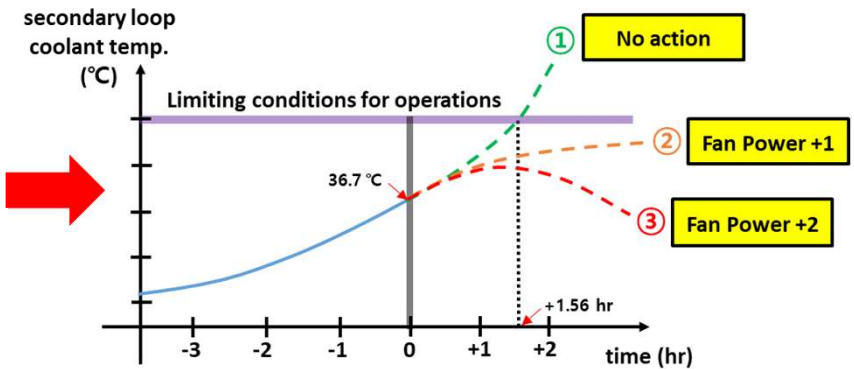
- 개요

- 냉각팬 운전에 따른 2차냉각계통 및 주요 변수의 거동을 예측.
- 운전제한조건(LCO, limiting conditions for operations) 도달 여부 및 도달 시간 도출.
- 데이터 기반 모델 및 물리모델 개발.



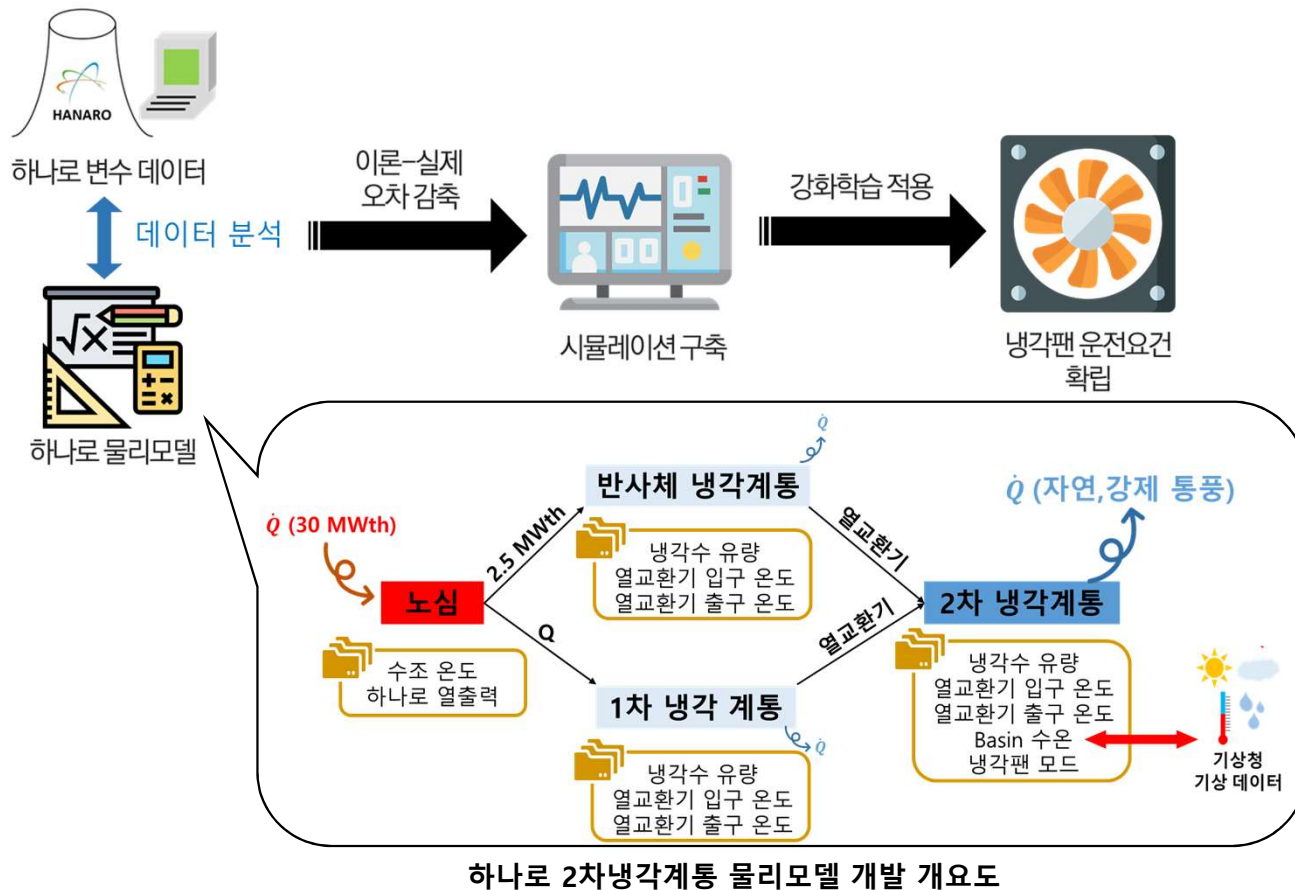
인공지능 또는 물리 모델을
이용한 시뮬레이션

하나로 2차냉각계통 거동예측모델 개발 개요



III. 2차냉각계통 의사결정지원 시스템

- 열수력 방정식을 통한 하나로 냉각 계통의 1D 물리 모델 구현.
- 하나로 냉각계통 구조 형상을 방정식으로 구축 시 현실 데이터와 오차 발생.
→ 보유중인 하나로 데이터를 통해 물리 모델과 현실의 차이를 극복하는 시뮬레이션 구축.
- 물리 모델을 통해 강화학습을 적용하여 냉각팬 운전 요건 확립.

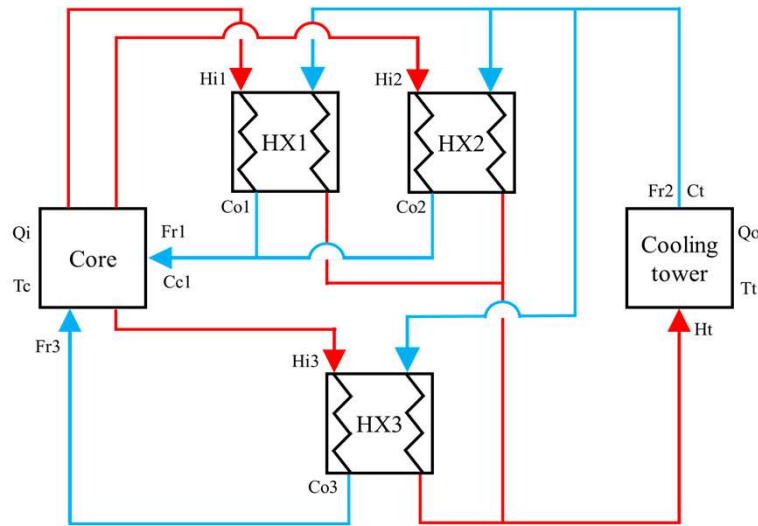


III. 2차냉각계통 의사결정지원 시스템

- 하나로 데이터를 활용한 물리 모델 상수 값 수정.
- 다양한 변수의 변화에 따른 냉각탑 입구 온도 변화 도출.

[주요 변수]

- 하나로 열출력 (28~30 MWth)
- 냉각팬 모드 (4개 냉각팬)
[정지, 저속 (880 rpm), 고속 (1770 rpm)]
- 열교환기 온도 및 유량
- 외부 날씨 환경



$$\checkmark Q_i = cm \frac{dT_c(t)}{dt} + c\dot{m}\Delta T_{HX1} + c\dot{m}\Delta T_{HX2} + c\dot{m}\Delta T_{HX3} + Q_{o1}(t_1) + Q_{o3}(t_3)$$

$$\checkmark c\dot{m}\Delta T_{HX1} + c\dot{m}\Delta T_{HX2} + c\dot{m}\Delta T_{HX3} + cm \frac{dT_t(t)}{dt} + Q_{o2}(t_2) = Q_o(t_{weather}, fan)$$

하나로 2차냉각계통 물리모델 모델링

하나로 2차냉각계통 물리모델 변수 표

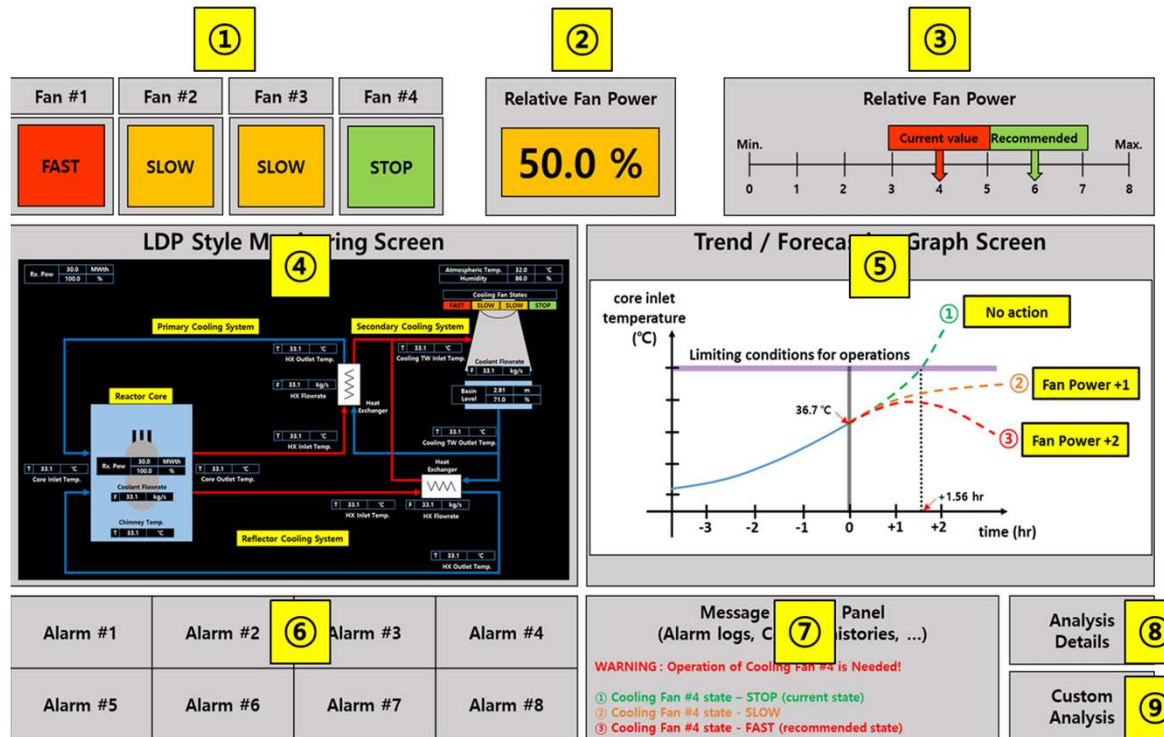
변수 목록	변수명 (TagName)	심볼
하나로 열출력	R1JI05A-PV, R1JI05C-PV	Qi
1차 냉각 입구 온도	W1TE_36-PV	Cc1
하나로 침니 온도	R1TI_01-PV	Tc
노심 냉각수 유량	W1FT_34-PV	Fr1
1차 냉각계통 열교환기 입구 온도	W1TE_14-PV	Hi1
	W1TE_24-PV	Hi2
1차 냉각계통 열교환기 출구 온도	W1TE_16-PV	Co1
	W1TE_26-PV	Co2
2차 냉각계통 냉각탑 입구 온도	R1TI06A-PV, R1TI06B-PV	Ct
2차 냉각계통 냉각탑 출구 온도	R1TI06C-PV, R1TI06D-PV	Ht
2차 냉각계통 유량	R1FI08A-PV, R1FI08B-PV	Fr2
2차 냉각계통 Basin 수온	W3TE_07-PV	Tt
2차 냉각계통 냉각팬 #1~#4 제어 명령 (off, 저속, 고속)	W3MD_02-PV	Qo
반사체 냉각계통 유량	M1FT_06-PV	Fr3
반사체 열교환기 입구 온도	M1TE_05-PV	Hi3
반사체 열교환기 출구 온도	M1TE_08-PV	Co3

III. 2차냉각계통 의사결정지원 시스템

3. 2차냉각계통 의사결정지원 시스템 개발

• 개요

- GUI를 통한 효율적 정보 제공.
- 냉각팬 운전모드 예측모델 및 거동예측모델과의 연동을 통한 의사결정 지원.
- 시설 운영 효율성 증가 및 업무부하 저감.



하나로 2차냉각계통 의사결정지원 시스템 GUI (초안)

주요 기능

- 현재 냉각팬 상태에 대한 정보 제공
- 주요 변수/경보에 대한 정보 제공
- 주요 변수 거동 예측
- 과거 이력 열람
- 분석 결과 열람
- 냉각팬 운전 모드 추천
- 사용자 지정 분석

GUI 구성 요소

- ① 현재 냉각팬 상태 표시 패널
- ② 현재 상대적 냉각 능력 표시 패널
- ③ 현재/추천 상대적 냉각 능력 표시 패널
- ④ 주요 모니터링 변수 표시 패널
- ⑤ 거동예측모델 결과 표시 패널
- ⑥ 주요 경보 표시 패널
- ⑦ 메시지 표시 패널
- ⑧ 구체적 분석 결과 열람 버튼
- ⑨ 사용자 지정 분석 수행 버튼

Fan #1

FAST

Fan #2

SLOW

Fan #3

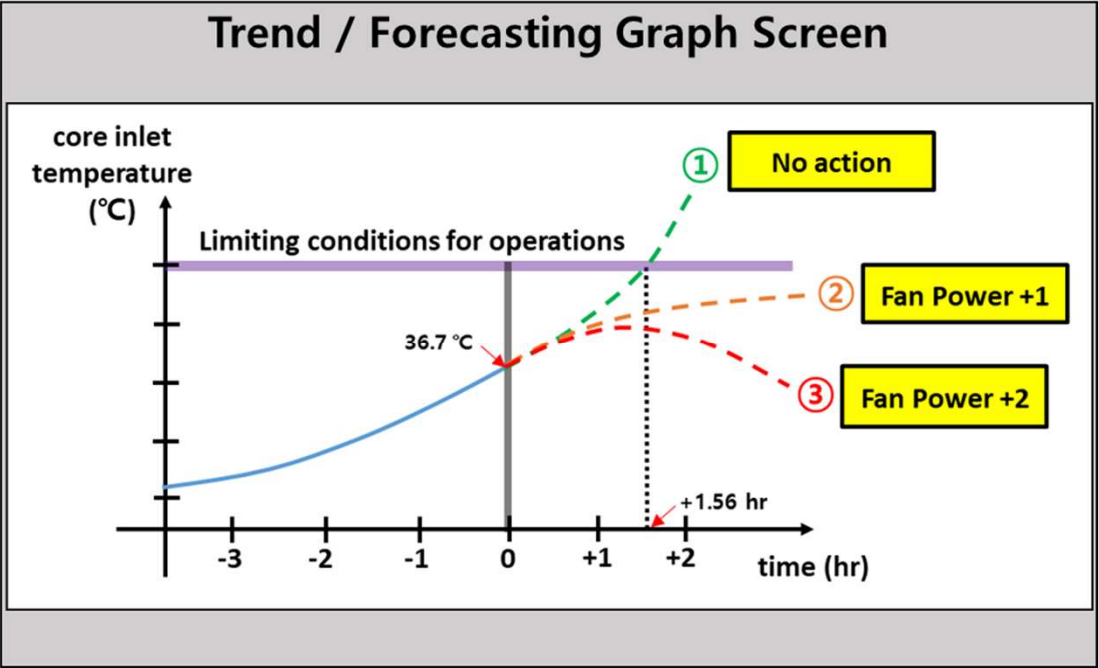
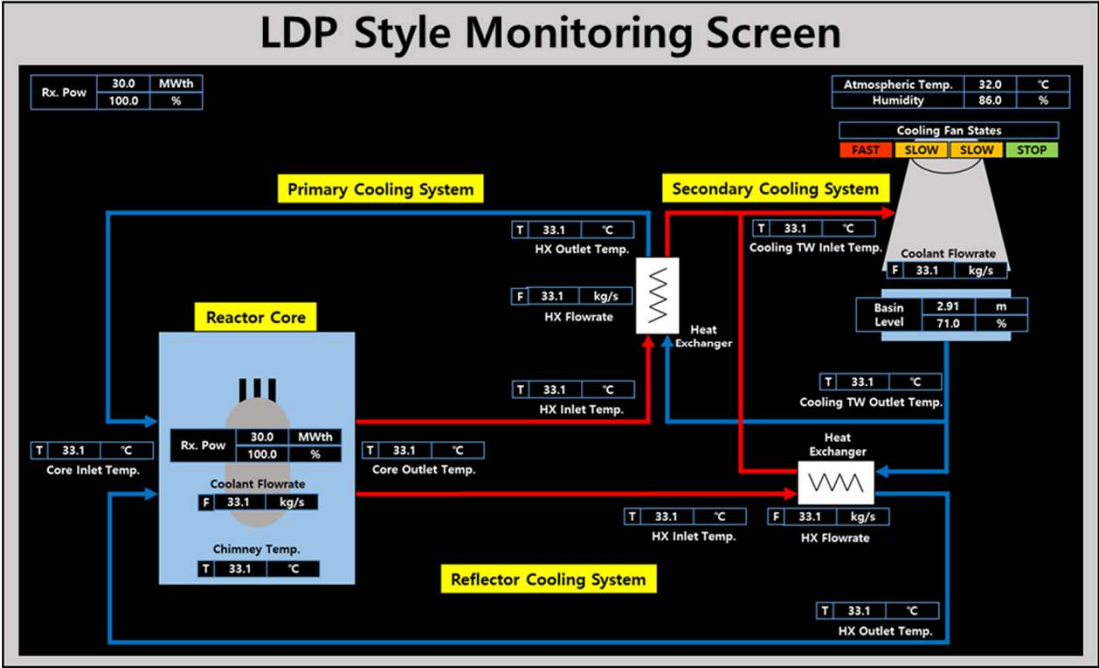
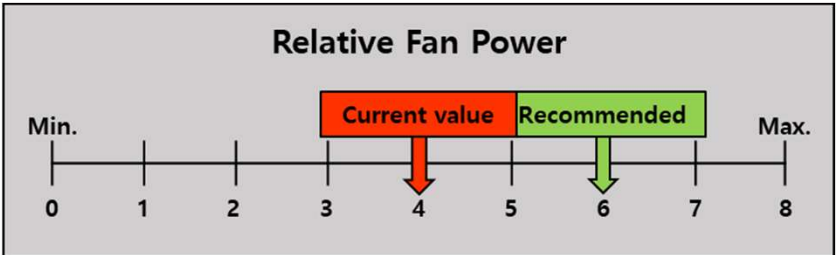
SLOW

Fan #4

STOP

Relative Fan Power

50.0 %



Alarm #1	Alarm #2	Alarm #3	Alarm #4
Alarm #5	Alarm #6	Alarm #7	Alarm #8

Message Display Panel
(Alarm logs, Control histories, ...)

WARNING : Operation of Cooling Fan #4 is Needed!

① Cooling Fan #4 state – STOP (current state)
② Cooling Fan #4 state - SLOW
③ Cooling Fan #4 state - FAST (recommended state)

Analysis Details
Custom Analysis

IV. CCTV 영상 기반 노심 감시 시스템

IV. CCTV 영상 기반 노심 감시 시스템

- 개요

- 하나로는 개방수조형(Open-Tank-in-Pool) 원자로로, 노심 및 수조를 감시하는 CCTV가 존재.
- 운전원은 해당 CCTV 영상을 통해 실시간으로 기포 등의 이상이 발생하는지를 감시.
 - 지속적인 노심 내 기포 발생은 핵연료 피복에 균열이 존재함을 의미.
- 노심에서 발생하는 기포를 자동으로 탐지하도록 하여 업무부하 저감.

- 연구 목표

- 최종 목표 : CCTV 영상 기반 노심 감시 시스템 개발
- 세부 목표 :
 - 노심 기포 탐지 모델 개발
 - CCTV 영상 기반 노심 감시 시스템 prototype 개발

IV. CCTV 영상 기반 노심 감시 시스템

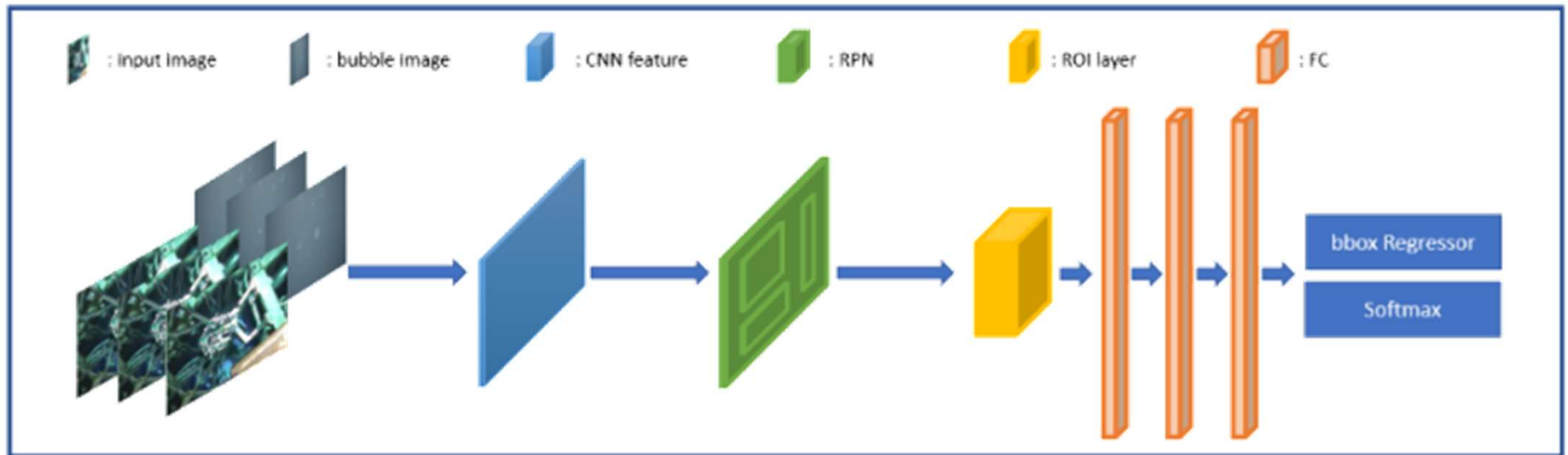
1. 노심 기포 탐지 모델 개발

- 데이터 취득

- 실제 데이터의 양이 부족하므로 합성 데이터를 이용.
 - 실제 원자로에서 기포가 발생하는 경우가 적음.
 - 데이터 용량 문제로 데이터 저장 기간이 짧음.

- 합성 데이터 생성

- 3차원 게임 엔진인 UNREAL 엔진을 이용하여 노심 영상 데이터에 기포를 추가.



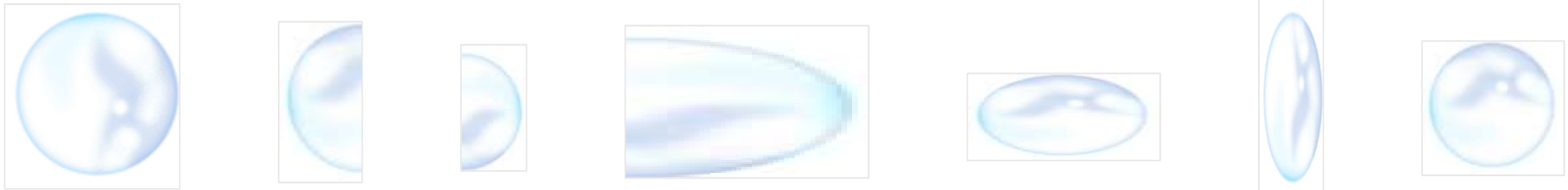
노심 기포 탐지 모델 구조

IV. CCTV 영상 기반 노심 감시 시스템

• 모델 개발

- 대표적인 이미지 인식(image recognition) 모델 중 하나인 ResNet-101 을 기반으로 기포 탐지 모델 개발.
 - ResNet-101 은 101개의 층으로 구성된 합성곱 신경망(CNN, convolutional neural network).
 - 전이 학습(transfer learning) 및 fine-tuning 을 통하여 기포 탐지에 특화된 모델 개발.
- 기포 탐지의 어려움 :
 - 기포의 크기가 일반적으로 매우 작음.
 - 기포의 모양이 다양함.
- Multi-task 손실함수 도입.
 - 분류에 대한 손실함수와 회귀에 대한 손실함수를 모두 이용.

$$L(\{p_i\}, \{t_i\}) = \frac{1}{N_{cls}} \sum_i L_{cls}(p_i, p_i^*) + \lambda \frac{1}{N_{reg}} \sum_i p_i^* L_{reg}(t_i, t_i^*)$$

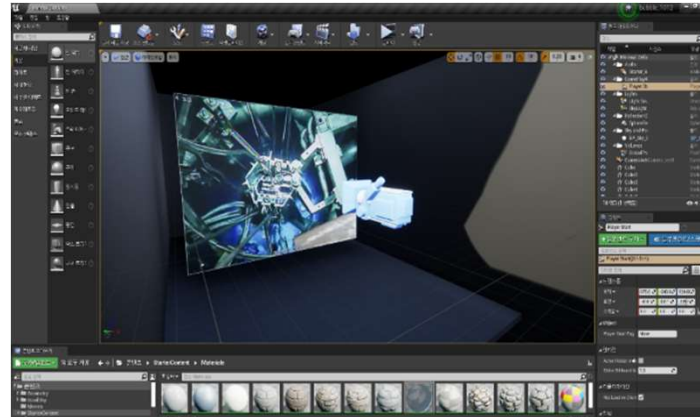


다양한 모양과 크기의 기포 이미지 예시

IV. CCTV 영상 기반 노심 감시 시스템



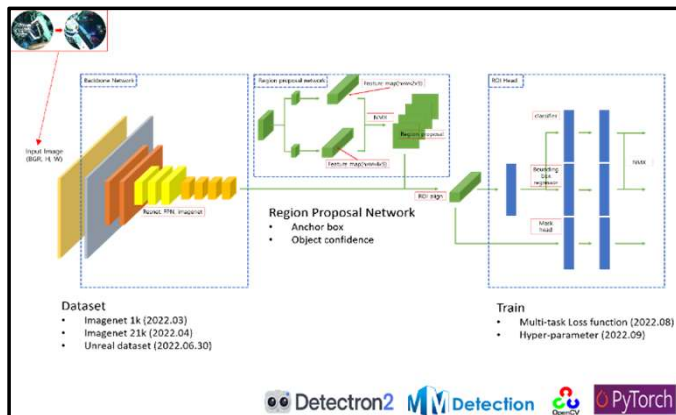
1. 원본 데이터 (기포 없음)



2. UNREAL 엔진을 이용한 3D 그래픽 작업



3. 데이터 생성 (기포 포함)



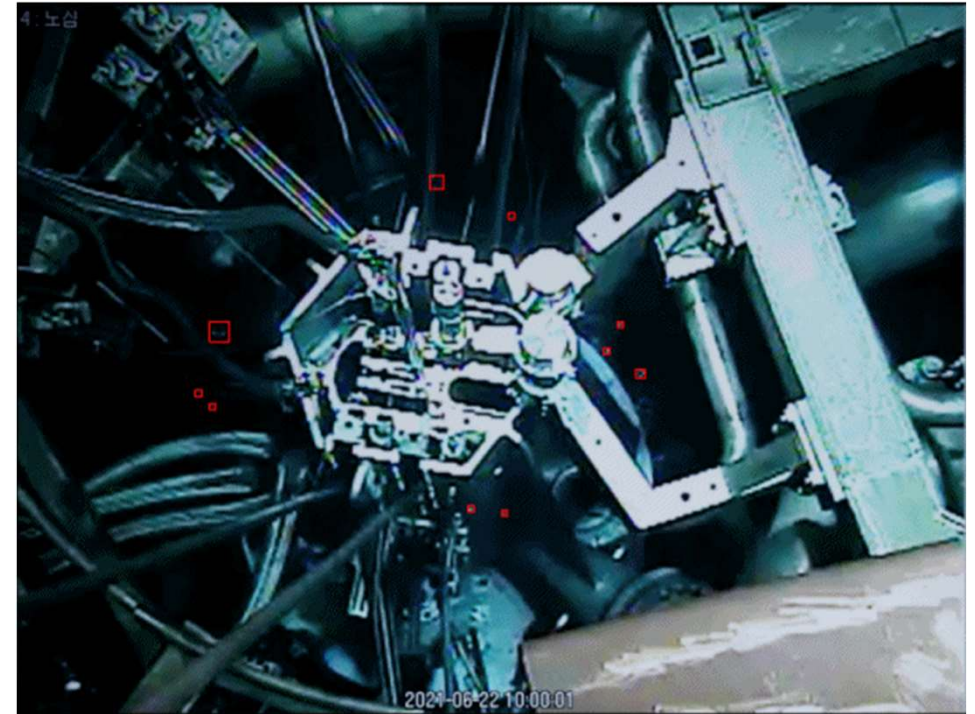
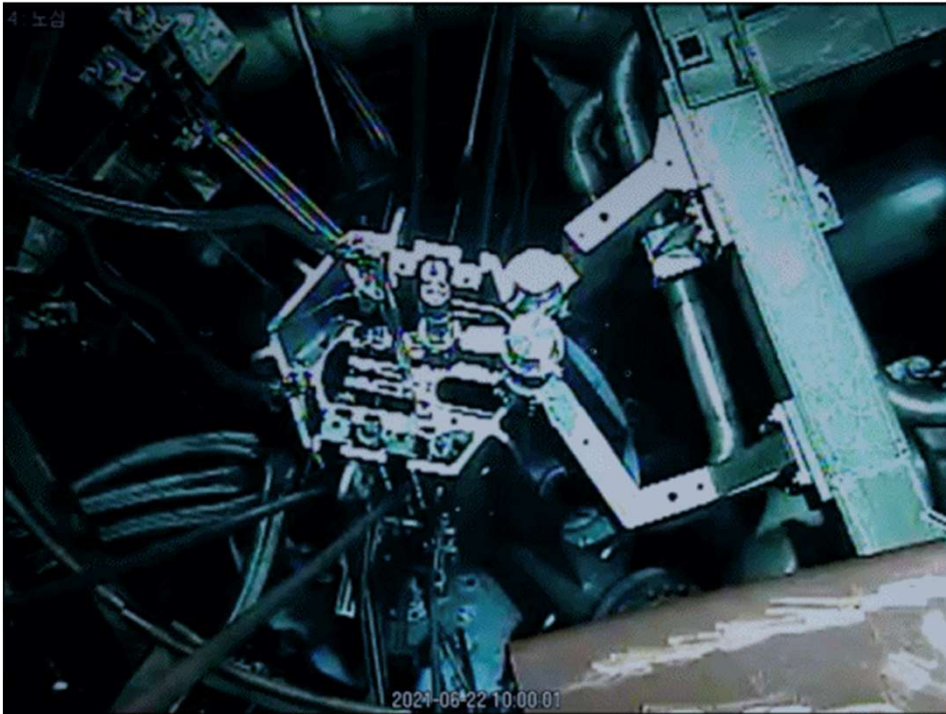
4. 인공지능 모델 개발



5. 모델 검증

IV. CCTV 영상 기반 노심 감시 시스템

- 모델 검증
 - 매우 작은 크기의 기포도 잘 탐지함을 정성적으로 확인.



노심 기포 탐지 모델의 기포 탐지 예시

2. CCTV 영상 기반 노심 감시 시스템 prototype 개발

- 시스템 prototype 개발 진행중.

V. 결론

V. 결론

• 요약

- 하나로 원자료를 대상으로 다양한 운전지원시스템을 개발중.
 - 이상탐지 시스템
 - 2차냉각계통 의사결정지원 시스템
 - CCTV 영상 기반 노심 감시 시스템
- Prototype 개발/적용을 통한 적용가능성 확인 및 개선사항 도출할 계획.

• 향후 계획

- 각 모델/시스템의 성능 향상
- 2차냉각계통 의사결정지원 시스템 prototype 개발
- CCTV 영상 기반 노심 감시 시스템 prototype 개발

Acknowledgment

본 연구는 한국원자력연구원 연구개발 프로그램의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. KAERI-524450-21).

감사합니다.