

연구용 원자로의 이상 진단을 위한 딥러닝 모델 연구

류승형 (Seunghyoung Ryu)

한국원자력연구원 지능형컴퓨팅연구실

Tel : 042-866-6521

E-mail : ashryu@kaeri.re.kr

전병일 (Byoungil Jeon)

한국원자력연구원 지능형컴퓨팅연구실

Tel : 042-866-6148

E-mail : bijeon@kaeri.re.kr

유용균 (Yonggyun Yu)

한국원자력연구원 지능형컴퓨팅연구실

Tel : 042-868-8160

E-mail : ygyu@kaeri.re.kr

초록 (Abstract)

연구용 원자로의 안정적인 운영을 위해서는 시스템의 상태를 파악하는 것이 필수적이며, 이를 위해 계통에 부착된 다수의 센서로부터 실시간으로 데이터를 확보하고 운영 시스템과 연계하여 활용할 수 있다.

본 연구에서는 연구용 원자로에서 발생하는 약 200여 채널의 다변량 시계열 데이터를 기반으로 시스템의 이상을 진단할 수 있는 기계학습 기반의 이상 진단 모델을 제시하였다. 특히, 최근 급속도로 발전하고 있는 딥러닝 기법 중 생성적 모델을 활용한 연구용 원자로의 이상 진단 프레임워크를 설계하였으며, 정상 운영 데이터를 학습함으로써 비정상 상태 분류를 수행하고 원자력 분야 내 인공지능 모델의 적용 가능성을 살펴보았다

서론

2011년 후쿠시마 원전사고 이후 원자력 발전의 안전성에 대한 논의가 범국민적 이슈로 부상됨에 따라, 원자력 에너지에 대한 신뢰성을 강화하기 위해 관련 연구 개발 및 투자가 활발히 이루어지고 있다 [1]. 한편, 최근 급속도로 발전하고 있는 인공지능, 사물인터넷, 디지털트윈, 5G 등의 4차산업 기술들은 사회 전반에 걸쳐 커다란 변화를 불러왔으며, 이에 발맞추어 원자력 분야에서도 인공지능을 접목한 융합기술 연구가 증가하고 있는 추세이다[2]. 딥러닝 기술은 원자로의 과도 상황 탐지[3], 이상 탐지[4], 수위 예측[5], 누설 탐지[6] 등 다양한 분야에 적용이 가능하다.

본 논문에서는 원자로 운영 안정성 강화를 위한 딥러닝 기반의 이상 진단 모델을 제시하였다. 원자로의 이상 진단을 위한 기존의 연구들은 시계열 센서 데이터를 기반으로 인공신경망[3,7,8], 동적필터링 [9], 은닉마르코프체인[10] 등의 방법론을 적용하였다. 본 연구에서는 딥러닝 모델 중 VAE[11], GANomaly[12]와 같은 생성적 모델을 바탕으로 비지도학습 기반의 이상 진단 모델을 개발하였다. 특히 한국원자력연구원의 연구용 원자로인 '하나로'에서 획득한 다변량 시계열 데이터를 활용하여 모델을 개발하고 비정상주기에 대한 테스트를 수행하여 딥러닝 모델의 적용 가능성을 살펴보았다.

데이터 셋

● 하나로 (Hi-flux Advanced Neutron Application Reactor)

- 우라늄의 핵분열 연쇄반응에서 생성된 중성자를 이용해서 다양한 연구개발을 수행하는 열출력 30 MW 규모의 연구용 원자로.
- 한국원자력연구원이 우리기술로 설계/건설하여 1995년부터 운영 중.
- 중성자 이용 기초과학 연구, 의료 및 산업용 방사성 동위원소 개발, 핵연료 및 원자로 재료 개발, 중성자 핵변환 도핑 서비스, 방사화 분석 이용 극미량 재료 성분 분석 등 다양한 연구 분야에 활용.
- 4주 운전 - 2주 정지를 원칙으로 운영 중.



Figure 1. 연구용 원자로 "하나로"



Figure 2. 원자로 센서 데이터의 구성

● 데이터셋 구성

- 운전 구간 데이터 / 정지 구간 데이터
- 정상 주기 : 일반적으로 4주 운전 - 2주 정지
- 비정상 주기 : 운전 중 비정상/불시정지 상황이 발생하여 출력 감발/정지를 수행한 주기.
- 정상 주기 내 운전 구간에서의 센서 데이터를 학습에 사용

● 데이터 전처리

- Time Window : 30분
- Sampling rate : 1분
- Stride : 10분
- Min-max Normalization

Table 1. 데이터셋 구성

구분	주기	데이터 수 (정상/비정상)
정상 주기	18	58285 / 0
비정상 주기	7	20672 / 2287

프레임워크

Table 2. 모델 구조 상세

모델	VAE	GANomaly
Encoder	Input(6630)-FC(128)-BN-LReLU-FC(64)-BN-LReLU-FC(32)	
Decoder	Input(32)-FC(64)-BN-LReLU(128)-BN-LReLU-FC(6630)	
Network structure	Encoder-FC(32)-FC(32)-Resampling-Decoder	Generator: Encoder1-Decoder1-Encoder2 Discriminator: Decoder2-FC(1)-Sigmoid
Optimizer	Adam	
Learning rate	1e-3	1e-4
Epoch	50	100
Batch	256	
Anomaly Score	Mean squared error of x	Mean absolute error of z

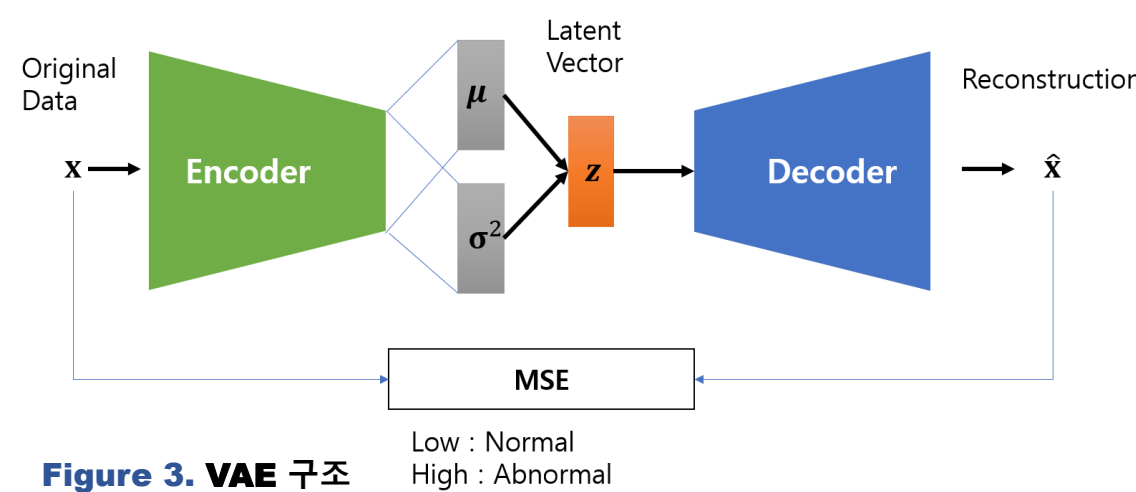


Figure 3. VAE 구조

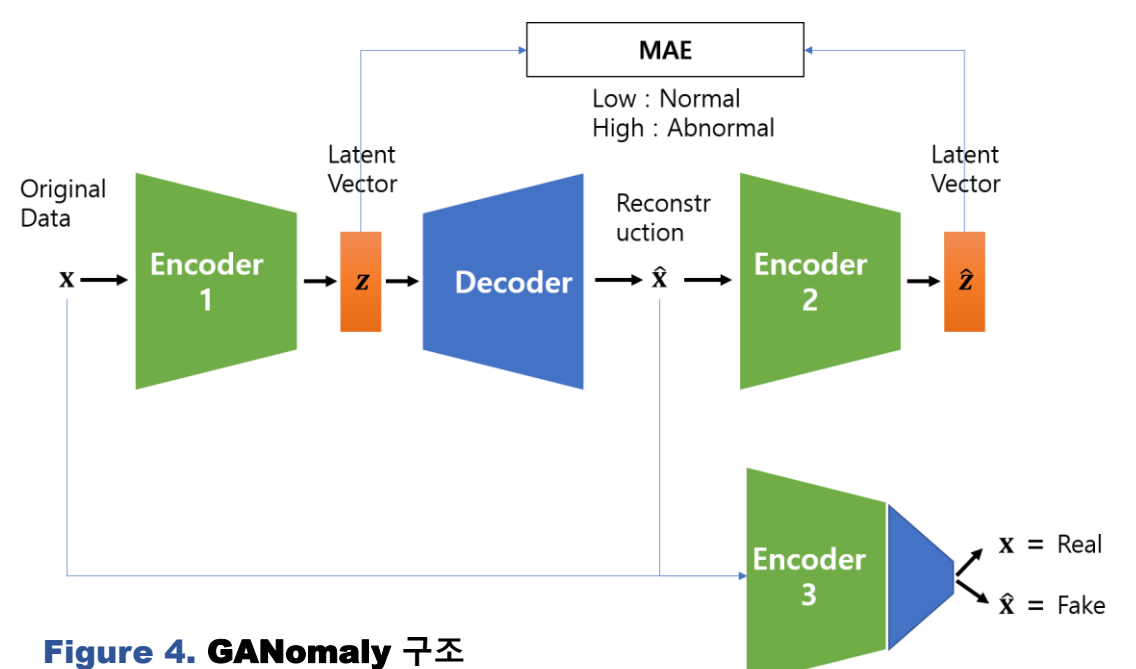


Figure 4. GANomaly 구조

정상 주기 데이터 학습 결과 분석

● 정상 주기 데이터 학습

- 정상 주기 내 운전 구간에 해당하는 약 5.8만개의 데이터로 네트워크를 학습함.
- VAE, GANomaly 네트워크를 통해 복원된 데이터를 바탕으로 복원 오차를 계산.

Table 3. 트레이닝셋 복원오차

MSE	VAE	GANomaly
평균	0.034	0.0028
중앙값	0.027	0.0024
최대	0.280	0.0418
최소	0.018	0.0006

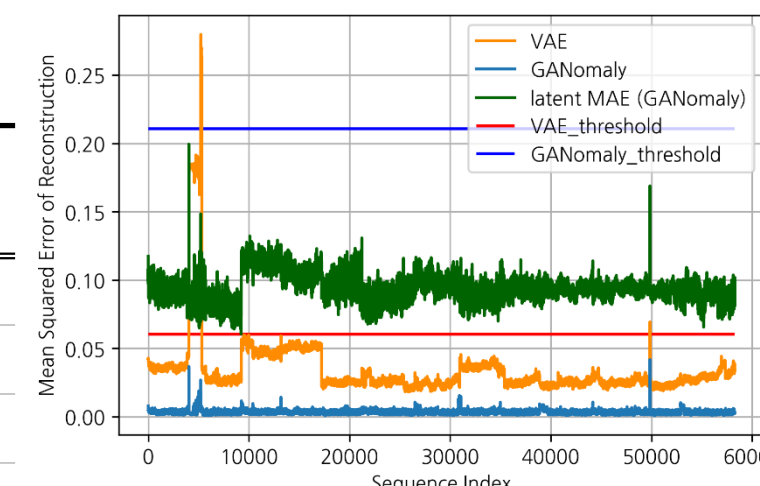


Figure 5. 전체 트레이닝셋에 대한 복원오차 그래프

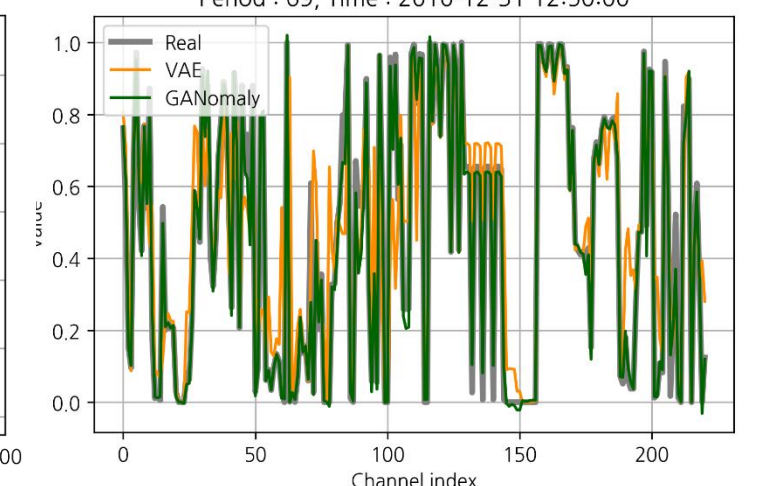


Figure 6. 특정 시각의 채널데이터 복원 결과

이상 분류 결과 분석

● 비정상 주기에 대한 Anomaly Score 비교

- VAE : MSE(x, \hat{x})
- GANomaly : MAE(z, \hat{z})

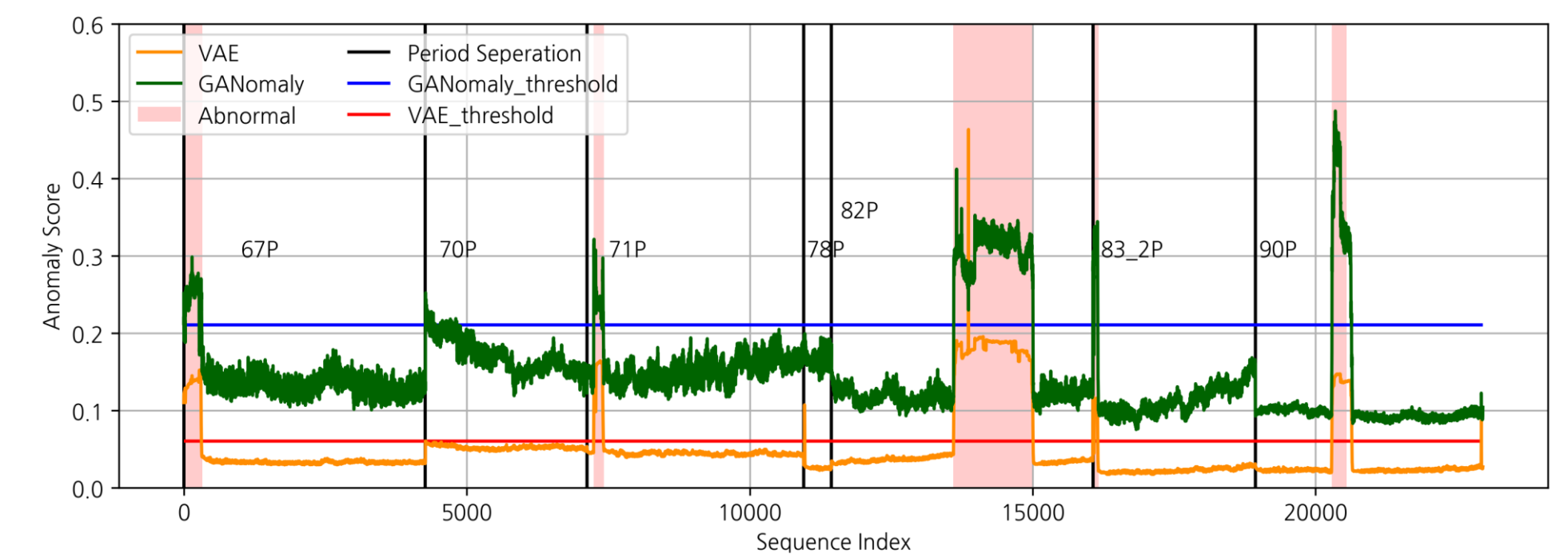


Figure 7. 전체 테스트셋에 대한 Anomaly Score 그래프

● 주기별 비정상 구간 Anomaly Score 변화

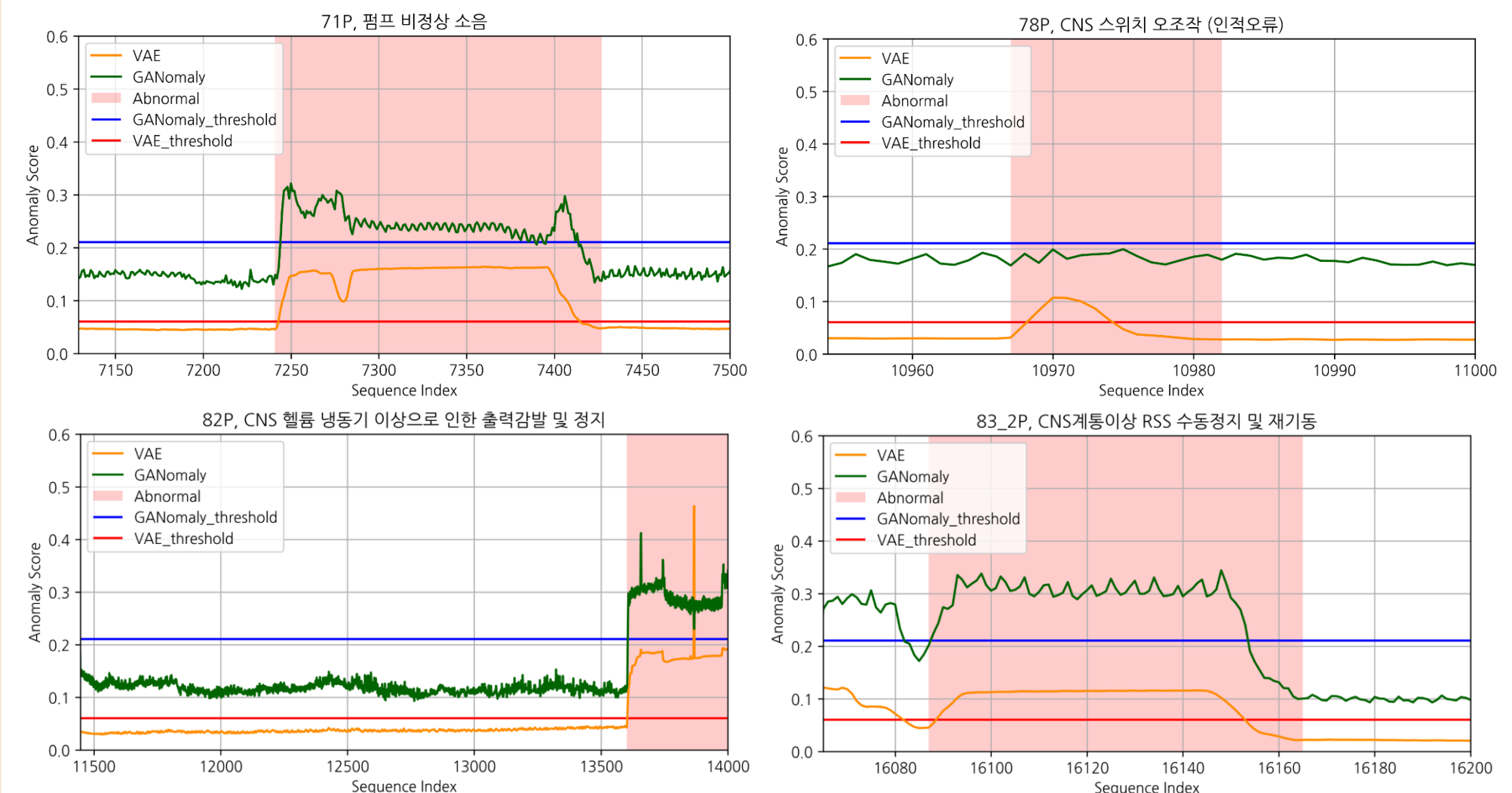


Figure 8. 주기별 비정상 구간에 대한 Anomaly Score 확대 그래프

● 이상진단 결과에 대한 ROC 및 Precision-Recall 곡선

- 이상점수(Anomaly Score)를 바탕으로 threshold에 따른 ROC 및 Precision-Recall 계산
- 복원 데이터에 대한 오차(MSE)의 경우 VAE가 GANomaly보다 높음.
- 반면 진단 성능을 나타내는 AUC의 경우 VAE가 GANomaly보다 높음.

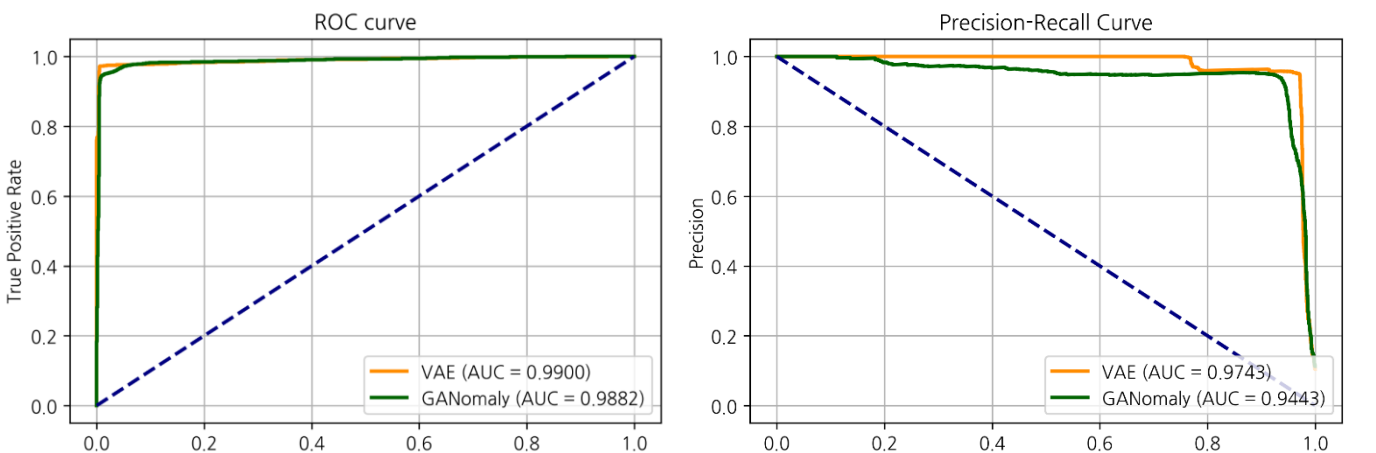


Figure 9. 모델별 ROC / Precision-Recall 곡선

결론

본 연구는 VAE, GANomaly를 활용한 원자로의 이상 진단 모델을 제시하였으며, 특히 연구용 원자로인 하나로에서 발생하는 실제 데이터를 활용하여 모델 학습 및 테스트를 수행하였다. 실험 결과 이상 상태 데이터가 정상 상태에 비해 높은 복원 오차를 갖는 것을 확인하였다. 이를 통해 원자로 이상 진단에 있어서 딥러닝 모델의 적용 가능성을 살펴보고, 나아가 이상 진단뿐만 아니라 예측까지 가능한 모델로 확장될 수 있다.

Reference and Acknowledgement

- [1] 홍사균, 최용원, 장현섭, 이영준, "후쿠시마 원전사고 이후 원자력발전을 둘러싼 주요 쟁점과 향후 정책방향", STEPI Insight 제84호, 과학기술정책연구원, 2011
- [2] 이수동, 류승형, 임경태, 유용균, "빅데이터 분석을 통한 원자력 분야 인공지능 관련 연구동향 분석", 기술현황분석보고서, 한국원자력연구원, 2020
- [11] Kingma, Diederik P., and Max Welling. "Auto-encoding variational bayes." arXiv preprint arXiv:1312.6114 (2013).
- [12] Akcay, Samet, Amir Atapour-Abarghouei, and Toby P. Breckon. "GANomaly: Semi-supervised anomaly detection via adversarial training." Asian Conf. on computer vision. Springer, Cham, 2018.