MICE 기반 NO_x 생성 플라즈마 공정 가상 시운전 시스템 구현

정규원, 심훈보, 곽민준, 전창재*
세종대학교

kwsoosoo0815@gmail.com, hunbo00@sju.ac.kr, gminjun76@gmail.com, *cchun@sejong.ac.kr

MICE-based Virtual Commissioning System for NO_x Generation Plasma Processes

Kyuwon Jung, Hunbo Sim, Minjun Kwak, Chang-Jae Chun*
Sejong Univ.

요 약

본 논문은 NOX 생성 공정에서 발생하는 데이터 부족 문제와 실험 비용·시간 제약을 완화하기 위해 AI 기반 가상 시운전 플랫폼을 제안한다. 제한적인 실험 데이터 환경에서 변수 간 관계를 분석하기 위해 MICE(Multiple Imputation by Chained Equations) 알고리즘을 적용하여 예측 성능을 평가하였으며, 파이썬과 유니티(Unity)를 연동한 3D 가상 시뮬레이터를 구현하여 실제 실험 환경을 모사한 가상 시운전 환경을 구축하였다. 이를 통해 다양한 공정 변수에 대한 가상 실험 수행이 가능해졌고, 수치 데이터뿐만 아니라 시각 정보를 포함한 멀티모달 데이터 기반 분석 환경을 제공함으로써 공정의 효율적인 분석 및 공정 최적화 가능성을 제안한다.

Ⅰ. 서론

최근 인공지능 모델은 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 이러한 모델의 성능은 데이터의 양과 품질에 크게 의존한다. 그러나 충분하고 정제된 데이터를 확보하는 것은 여전히 어려운 과제이며, 특히 특정 도메인에서는 데이터 부족과 결측치 문제, 데이터 불균형 현상이 두드러지게 나타난다. NOX 생성 공정 도메인 또한 예외가 아니며, 실험 환경의 제약으로 인해 대규모 데이터 수집에 한계가 존재한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 결측치 보완 및 데이터 확장을 목적으로 MICE(Multiple Imputation by Chained Equations) 알고리즘을 적용한다. MICE 알고리즘을 통해 입력 피처를 다양하게 설정함으로써 결측 데이터를 보완하고, 나아가 가상 데이터를 생성함으로써 제한적인 데이터 환경에서도 보다 안정적인 분석이 가능하도록 한다.

한편, NOX 생성 공정과 같은 도메인에서의 실험은 높은 비용과 긴 소요 시간으로 인해 반복적인 실험 수행에 제약이 따른다. 이를 보완하기 위해 파이썬과 유니티를 연동한 3D 가상 시뮬레이터를 구현하였으며, 이를 통해 실제 환경과 유사한 조건에서의 실험을 가상 공간에서 수행할 수 있도록 하였다. 본 연구는 데이터 보완 알고리즘과 3D 시뮬레이션을 결합한 가상 시운전 환경을 구축함으로써, 실험 비용과 시간을 절감하고 효율적인 연구 수행 가능성을 제시한다.

Ⅱ. 본론

2.1 데이터셋

선행연구[1]에서는 공기 플라즈마 기반 NOx 생성 과정에서 실험 비용과 시간 문제를 완화하기 위해 Active Learning 기법을 활용하였다. 해당 연구는 제한된 실험 횟수 내에서 효율적으로 파라미터 공간을 탐색함으로써 NOx 생성의 에너지 효율을 향상시키는 데 초점을 맞추었다. 그러나 이러한 접근법에도 불구하고, 실험 기반 데이터에 대한 의존성은 여전히 존재하며, 실험 데이터의 특성상 데이터 희소성 및 변수 간 불균형 문제는 충분히 해소되지 않았다. 특히 다양한 입력 조건을 포괄하는 데이터 확보에는 근본적인 한계가 따른다.

이에 본 연구에서 이러한 한계를 데이터 관점에서 분석하기 위해, 선행연구[1]에서 사용된 공기 플라즈마 기반 NOx 생성 실험 데이터를 활용하였다. 해당 데이터셋은 제한된 실험 횟수로 수집된 데이터로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 MICE 알고리즘을 적용하였을 때 각 변수에 대한 예측 성능을 분석하는 데 초점을 맞추었다.

이를 위해 선행연구[1]의 문제 설정과 주요 입력·출력 변수를 유지한 상태에서, HONO, NO_2 , NO 등의 관련 피처를 추가로 고려하여 MICE 기반 예측 모델을 구성하였다. 각 피처에 대한 예측 결과와 실제 값을 비교함으로써, 제한적인 실험 데이터 환경에서도 변수 간 상관관계를 기반으로 한 예측 가능성을 평가하였다. 이러한 분석을 통해 결측치 및 데이터 희소성이 존재하는 구간에 대한 보완 가능성을 검토하고, 향후 가상 데이터 기반 분석으로의 확장 가능성을 제안하고자 한다.

2.2 MICE

본 연구에서는 변수 간 상관관계를 고려한 예측 성능 분석을 위해 [3] MICE 알고리즘을 적용하였다. MICE 는 각 변수를 순차적으로 회귀 모델링함으로써 데이터의 통계적 일관성을 유지하는 다중 대치 기법으로, 제한적인 실제 실험 환경에서도 변수 간 관계를 효과적으로 학습할 수 있다는 장점이 있다.

기존 연구[1]와 달리, 본 연구에서는 데이터셋의 관련 피처인 HONO, NO_2, NO 를 추가로 고려하여 MICE 기반 예측 모델을 구성하였다. 표 1 에서 확인할 수 있듯이, 각 피처에 대한 예측 결과는 실제 값과 높은 일치도를 보이며, 이는 추가 피처를 포함한 MICE 적용이 예측 성능 향상에 기여함을 보여준다.

이와 같은 MICE 적용 결과는 데이터 희소성, 결측치 및 일부 이상치가 존재하는 실험 데이터 환경에서도 변수 간 관계에 기반한 예측 모델 구성이 가능함을 보여준다. 특히 MICE 를 통해 결측 구간이나 관측이 제한된 조건에 대해 확률적 추정을 수행함으로써, 실제 실험만으로는 확보하기 어려운 조건을 포함한 데이터 생성이 가능하다. 이러한 데이터 기반 예측 모델은 이후 3D 가상 시뮬레이터

환경에서 다양한 공정 조건을 입력으로 활용하거나, 실제 실험으로 사전 검증이 어려운 조건을 포함한 시나리오 분석에 적용될 수 있다. 나아가, 이는 실제 공정 구축 이전 단계에서 공정 조건과 시스템 거동을 가상환경에서 사전에 검증하는 VC(Virtual Commissioning) 관점에서 활용 가능한 데이터 기반 모델로 확장될 수 있는 기반을 제공한다.

Variable	Reliability
HONO	0.9888
P_dis	0.9814
QC_NOx	0.9777
NO_2	0.9766
NO	0.9571
mA	0.9313
mm	0.9239
slm	0.9214
O_2frac	0.8516

표 1. MICE 기반 변수별 예측 결과

2.3 3D 가상 시뮬레이터 기반 VC 환경

NO_X 생성과 같은 실제환경에서의 실험은 제어 변수가 많고 공정 조건이 복잡하여, 최적화에 높은 비용과 긴 소요 시간이 요구된다. 이러한 특성으로 인해 반복적인 실험 수행에는 한계가 존재하며, 다양한 입력 조건을 포괄하는 실험 데이터 확보와 파라미터 공간 전반에 대한 탐색에도 제약이 따른다.

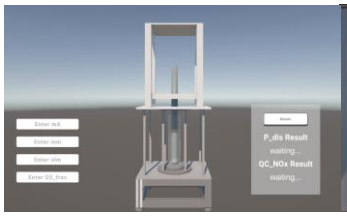

그림 1. VC 시뮬레이터 전체 구조

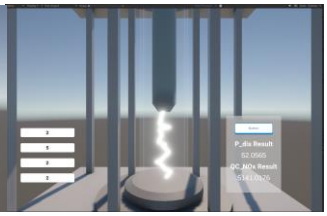

그림 2. MICE 적용 아크 발생 시각화

본 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 파이썬과 유니티(Unity)를 연동한 3D 가상 시뮬레이터를 구현하였다. 그림 1 에서 제시된 바와 같이, 해당 시뮬레이터는 실제 공정 환경을 모사한 VC 환경으로 구성되어 있으며, 전체 시스템 구조와 공정 변수 입력을 시각화하였다. 이를 통해 입력 파라미터 변화에 따른 시스템 거동을 가상 공간에서 직관적으로 관찰하고 분석할 수 있다.

가상 시뮬레이터는 파이썬 기반 데이터 처리 모듈과 유니티 기반 시각과 환경으로 구성되며, 파이썬에서 생성된 입력 파라미터는 실시간으로 시뮬레이터에 전달된다. 특히 임의의 공정 조건이 입력되었을 때, 기존 데이터셋에 존재하는 빈 데이터나 결측 구간에 대해서는 MICE 알고리즘을 통해 보완된 값을 추출하고, 이를 시뮬레이터의 입력값으로 활용하였다. 그림 2 는 이의 예시로, MICE 를 통해 보완된 입력 조건을 기반으로 가상환경에서 아크 발생 양상을 시각적으로 구현한 결과를 보여준다.

이와 같은 가상환경 시각화는 이상치 처리 전후의 시스템 거동 차이를 직관적으로 비교할 수 있게 하며, 실제 실험 환경에서 재현하기 어렵거나 위험을 수반하는 조건에 대해서도 가상환경에서 안전하게 실험을 수행할 수 있도록 한다. 이러한 특성은 실제 공정 적용 이전 단계에서 공정 조건과 시스템 반응을 사전에 검증하는 VC 관점에서 유용한 활용 가능성을 제시한다.

나아가, 본 연구에서는 3D 가상 시뮬레이터를 구현하여 현실 실험을 대체·보완할 수 있는 가상 실험 환경을 구축하였다. 해당 가상환경은 다양한 고정 변수를 물리적 제약 없이 조절할 수 있어, 사실상 무한대의 공정 시나리오 생성을 가능하게 하며, 수치 데이터뿐만 아니라 플라즈마 형상과 색상 등의 시각적 정보와 방전 소리와 같은 청각적 정보를 포함하는 멀티모달 데이터 기반 분석을 지원한다.

또한, 실제 장비에서 재현하기 어렵거나 안전상 위험이 수반되는 이상 상황이나 극한 조건을 가상환경에서 안전하게 모사할 수 있어, 정상 상태 데이터의 축적과 함께 이상치 발생 전후의 시스템 거동을 효과적으로 관찰할 수 있다. 이러한 가상환경 기반 학습은 비정상 동작의 조기 탐지 및 예측에 활용될 수 있으며, 더불어 가상환경에서 사전 학습된 모델을 실제 공정에 전이학습 방식으로 적용함으로써 초기 실험 데이터가 제한적인 상황에서도 효율적인 공정 최적화 및 제어 전략 수립이 가능하다.

Ⅲ. 결론

본 연구는 가상 데이터 생성, 3D 가상 실험 환경 구축, 그리고 비용 및 시간 절감이라는 세 가지 핵심 기여를 통해, 실제 공정에 대한 VC 기술의 실현 가능성을 제안한다. 이는 향후 공정 스케일업, 신규 시스템 설계, 안전성 검증 등의 기술에 있어 실질적인 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

향후 연구에서는 본 연구에서 구축한 가상환경과 멀티모달 데이터셋을 기반으로 이상치 탐지 및 이상 상황 예측에 초점을 맞춘 분석을 수행할 예정이다. 가상환경에서 안전하게 생성된 이상 상태 데이터를 활용하여 실제 공정의 비정상 동작을 조기에 감지하는 모델을 개발하고, 나아가 가상 시운전 단계에서 검증된 공정 조건과 제어 전략을 실제 장비에 적용하는 제어 실험으로 확장함으로써 VC 기반 공정 제어의 실효성을 검증할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 글로벌 TOP 전략연구단 지원사업(No.GTL25101-301)의 지원을 받아 수행 되었습니다. 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신방송혁신인재양성 (메타버스융합대학원)사업 연구 결과로 수행되었습니다 (IITP-2026-RS-2023-00254529).

참 고 문 헌

[1] K. Shao, X. Pei, D. B. Graves, and A. Mesbah, “Active learning-guided exploration of parameter space of air plasmas to enhance the energy efficiency of NOx production,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 55, no. 28, p. 284002, 2022

[2] L. Lin, *et al.*, “Data-driven prediction of the output composition of an atmospheric pressure plasma jet,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 57, no. 1, p. 015203, 2024

[3] van Buuren, S. and Groothuis-Oudshoorn, K., “mice: Multivariate Imputation by Chained Equations in R,” *Journal of Statistical Software*, vol. 45, no. 1, pp. 1- 68, 2011, doi:10.18637/jss.v045.i03.