

시계열 다중출력 회귀를 이용한 염색 공정의 130℃ 유지시간 단축에 관한 연구

이정인, 한진수, 박완기*

한국전자통신연구원

jilee, hanjinsoo, *wkpark@etri.re.kr

Reducing 130℃ Holding Time in Dyeing Processes via Time-Series Multi-Output Regression

Lee Jeong In, Han Jin Soo, Park Wan Ki*

Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

본 논문은 염색기에 투입되는 원단별 분단위 염색공정 복합센서 시퀀스(색도, 전도도, pH)를 입력으로 하여 향후 1-10분 흡진율(%)를 동시에 예측하고, 예측 결과를 바탕으로 130℃ 유지시간(기존 40분)의 안전한 단축 가능성을 정량 평가한다. 예측 알고리즘으로는 LSTM/GRU, Transformer1D, Conv1D, LightGBM/ExtraTrees를 비교하고 LOT별 스케일링 효과를 분석하여 현장 적용성을 검증한다.

I. 서론

염색 공정에서 목표 색도에 도달한 이후에도 균일한 염색 품질 불량을 최소화 하기 위하여 보수적으로 긴 유지시간을 부여하는 관행은 에너지·시간 낭비를 초래한다[1]. 본 연구는 LOTNO별 분 단위 센서 시계열을 이용하여 향후 1-10분 색도(K/S)를 예측하고, 이를 바탕으로 130℃ 유지시간의 단축 타당성을 정량적으로 평가한다[2]. 핵심 기여는 (1) 다양한 시계열 모델 성능 비교, (2) LOTNO별 스케일링의 영향 분석, (3) 단축 시나리오별 시간 절감량 및 품질 리스크(초과입계율) 정량화이다.

II. 본론

본 절에서는 LOT단위로 수집된 분 단위 복합센서 시계열을 입력으로 하여 향후 1분부터 10분까지의 흡진율(%)을 동시에 예측하는 다중출력 회귀 문제를 정의하고, 예측 결과를 바탕으로 130℃ 유지시간의 단축 가능성을 정량적으로 평가한다.

우선 입력과 출력의 형식을 다음과 같이 정의한다. 각 시점 t 에서 모델의 입력은 w 분의 시계열 윈도우로, 한 시점의 피쳐 벡터는 $x_t = [\text{colorimter}, \text{conductivity}, \text{pH}]$ 로 구성이 된다. 출력은 향후 $h=1, \dots, 10$ 에 대한 흡진율 y_{t+1}, \dots, y_{t+10} 이 된다. 모델링 측면에서는 시퀀스 특성을 직접 학습하는 딥러닝 계열 모델과 빠른 추론이 가능한 트리 기반 모델을 비교하였다. 시퀀스 모델로는 장단기 의존성 포착에 적합한 LSTM과 GRU, 지역적 패턴 포착을 위한 Conv1D 후 전결합층(Dense)을 조합한 구조, 그리고 자기-어텐션 기반의 1차원 Transformer 블록을 사용하였다. 각 딥러닝 모델은 입력으로 윈도우 길이 w , 피쳐 차원 3을 받아 마지막에 크기 $h (=10)$ 의 선형 출력층을 연결하여 다중 출력 벡터를 직접 예측하도록 설계하였다. 반면 트리 기반 모델로는 LightGBM 및 ExtraTrees를 채택하였고, 이들에 대해서는 입력 시퀀스를 2차원 특징 벡터 형태로 평탄화(reshape) 한 뒤 scikit-learn의 MultiOutputRegressor 래퍼를 사용하여 각 horizon을 독립적으로 학습시켜 다중출력 확장 방식을 적용하였다. 하이퍼파라미터는 각 모델별로 검증 데이터에서 그리드 혹은 랜덤 탐색을 통해 최적값을 찾았으며, 대표적으로

LSTM 계열은 은닉 유닛 수($\{32, 64, 128\}$), 학습률($\{1e-3, 5e-4\}$), 드롭아웃 비율($\{0.1, 0.2\}$) 등을 탐색하였다. 학습은 Adam 옵티마이저를 기본으로 배치 크기 32, 최대 epoch 100, 조기중단(early stopping; patience=10, 검증 손실 기준)을 적용하여 과적합을 방지하였다. LightGBM은 $n_estimators=500$, $learning_rate=0.05$ 등의 범위에서 탐색하였다.

III. 결론

본 논문에서는 LOTNO별 분 단위 센서 시계열로 향후 1-10분 색도(K/S)를 예측하고 130℃ 유지시간 단축 가능성을 평가하였다. 다양한 알고리즘 비교 결과 LightGBM·ExtraTrees 등 트리 기반 모델이 전체 호라이즌에서 가장 우수한 예측 성능과 낮은 오차 분산을 보였으며, 그 결과 단축 적용 시 품질 불량률도 낮게 유지되었다. 실무적으로는 연산·메모리 제약이 있는 현장 제어기에는 트리 기반 모델을 우선 적용하고, 중앙서버에서는 시계열 딥러닝 모델을 보조적으로 운영하여 주기적 보정·모니터링을 수행하는 하이브리드 전략이 필요하다. 마지막으로 본 논문의 결과는 LOT별 스케일링과 불확실성(신뢰구간) 고려가 유지시간 단축의 안전성과 신뢰성 확보에 핵심적임을 시사한다. 향후 연구에서는 제안한 시계열 회귀모델과 예측 불확실성 기반의 보수적 단축 정책을 통합한 파일럿 적용을 통해 에너지·시간 절감 효과와 품질 리스크를 현장 수준에서 정량적으로 검증하는 것이 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE) 및 한국에너지기술연구원(KETEP) 연구비 지원에 의한 연구임 (No. 20202000000010).

참고 문헌

- [1] 이정인, 한진수, and 박완기. "염색공정 에너지 절감을 위한 다기능 복합센서 현장 적용 분석." 한국통신학회 학술대회논문집 (2024): 106-107.