

심볼릭 회귀기법을 이용한 염색공장 텐터기 열풍팬 에너지 소비 효율화 방안 연구

이승용, 한진수, 박완기

한국전자통신연구원

lsy9892@etri.re.kr, hanjinsoo@etri.re.kr, wkpark@etri.re.kr

A Study on Energy Efficiency Improvement of Tenter Fans in Dyeing Plants Using Symbolic Regression

Seung-Yong Lee, Jinsoo Han, Wan-Ki Park

한국전자통신연구원 에너지ICT 연구실

요 약

본 논문은 염색공장 내에서 염색된 직물의 건조/코팅 등을 수행하는 텐터기의 동작과 관련하여, 텐터기 내부에 더운 공기를 확산시켜주는 열풍팬들의 모터 RPM 설정값들을 최적화하여 불필요한 에너지 소비를 방지하고자 심볼릭 회귀기법을 제안하는데 의의가 있다. 또한, 텐터기의 모터 RPM 설정 등을 이용하는 컨트롤러의 내부 적용을 고려하여 사칙연산을 기반으로 하는 최적 모터 RPM 조정 모델을 제시한다.

1. 서 론

텐터기는 각종 직물의 염색가공 공정 중에서 직물의 종류에 따라 일정 온도를 유지한 열풍으로 속도를 유지하면서 직물의 발수, 방축 등 가공효과를 부여하는 장비이다[1]. 그러나, 대부분의 텐터기의 조작에 있어, 숙련된 작업자의 경험에 의존하여 직물의 가공에 적합한 열풍기 모터 RPM, 온도 등을 조절하는 상황이며, 텐터기 내부 상황에 따른 변화가 텐터기 조작에 미반영되어 작업 시작부터 끝까지 동일한 셋팅값으로 운영되어지고 있다. 이는 텐터기의 운용에 사용되어지는 에너지 소비에 있어, 모든 열풍기 모터 RPM 값의 동일한 값 설정 및 텐터기 내부 상황 변화에 따른 RPM 값의 미변화로 인하여 실제로 직물의 가공에 필요한 에너지 소비보다 과하게 에너지 소비를 유발하고 있다는 판단에 텐터기 내부 상황변화에 따른 최적화된 열풍팬 RPM모터 제어 방안을 제시하게 되었다. 텐터기의 열풍팬 RPM모터 제어를 위한 데이터 확보를 위하여, 습도계, 에너지미터 등의 일부 센서 설치 및 Modbus를 이용한 텐터 데이터 모니터링 시스템을 구축하였으며, PySR기반의 심볼릭회귀기법을 적용하여 예측 정확성을 높였다.

2. 실험 환경 구성

본 연구에 활용된 텐터기는 원단을 퍼주는 원단 도입부, 두 개의 롤 사이로 원단을 통과시켜 짜주는 패더 망글부, 원단을 끌어들이는 오버피드부, 원단을 건조하고 식혀주는 4대의 챔버로 이루어진

챔버부, 챔버의 열을 배출하고 새로운 공기를 제공하는 덕트부, 공기를 정화하여 배출시키는 집진기로 구성된다. 본 연구에서는 챔버부의 내부 좌우에 대한 16개의 온도정보, 챔버내의 열풍기 모터 RPM 정보 8개, 챔버내 습도 정보 2개, 덕트부의 공기 배기팬 모터 RPM 정보 2개, 원단을 챔버내로 이동시키는 컨베이어벨트 속도 정보 1개, 텐터기 순시전력 정보 확보를 위한 전력량계 1개 등 30종의 데이터를 확보하였다[2]. 데이터 모니터링 시스템은 나이가라 프레임워크를 기반으로 1분 주기로 데이터를 저장하였으며, PySR기반의 심볼릭회귀기법에는 이상치를 제거한 3개월 데이터를 사용하였다. 그림 1은 실험에 사용된 텐터기의 모습과 기 개발된 데이터 모니터링의 데이터 수집 과정이다.



그림 1. 텐터기 및 데이터 모니터링 시스템 일부

심볼릭 회귀기법은 입력과 출력 변수간의 관계를 덧셈, 곱셈, 나누기 등의 연산자들 조합으로 최적의 수학적 표현식을 구현하는 데이터 기반 회귀 기법이다[3]. 또한, 텐터기 내부의 제어 로직으로의 C언어 등의 이식이 가능하다는 판단에 의하여 텐터기 열풍팬 모터 RPM 제어에 적용되었다.

3. 심볼릭회귀기법을 이용한 열풍팬 모터 RPM 생성

제안된 심볼릭 회귀기법을 이용한 열풍팬 모터 RPM 생성 기술은 텐터기 내부 데이터 수집, 수집된 데이터를 선수/PD/후발수 공정 및 나일론과 같은 특정 열풍팬 모터 RPM 셋팅값(1600, 1400, 800 RPM)을 기반으로 한 클래스 구분, 작업자들의 불특정 기기 조작에 의한 데이터 훼손 및 기기 오류에 따른 이상치 데이터 제거, 수집된 소수의 데이터를 이용하여 새로운 데이터를 생성하기 위한 클래스별 데이터 변화 확률 추출, 추출된 클래스별 변화 확률을 기반으로 한 새로운 데이터 생성, 덧셈/ 뺄셈/곱셈/ 나누기만을 이용한 심볼릭회귀 기법 적용 최적화 열풍팬 RPM 데이터 생성 모델 생성으로 나뉜다. 심볼릭 회귀 기법에 사용되는 텐터기 데이터는 기 구축된 모니터링 시스템으로부터 시계열 기반 CSV 파일을 추출하여 사용되며, 수집된 데이터들의 분석 및 특정 작업 설정 RPM을 기준으로 클래스를 구분하였다. 구분된 클래스의 이상치 제거는 통계학에서 많이 사용되는 4분위 알고리즘에 의하여 제거하였으며, 클래스별 8개의 모터 RPM(speed)에 있어 염색전은 열풍팬 모터 1번부터 8번으로 통과하며 가공되게 되므로, 현재 모터의 speed에서 다음 모터 speed로 넘어갈 때의 값을 비교하여 증가 또는 감소하는 패턴들을 기반으로 클래스별 speed 증가 또는 감소하는 확률을 산출한다. 그림 2는 클래스별 speed 변화 확률을 산출한 예시이다.

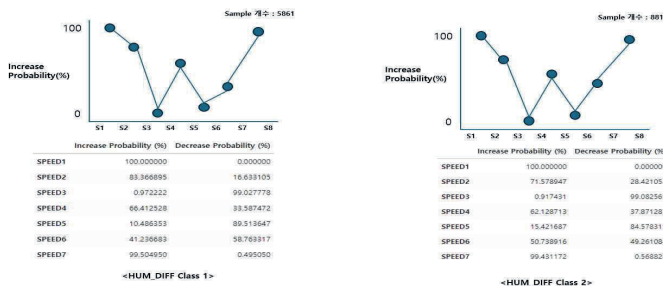


그림 2. 클래스별 speed 변화 확률 산출 예시

에너지 소비 절약을 위한 새로운 열풍팬 RPM 값 생성을 위한 심볼릭 회귀 기법의 입력 데이터로 활용하기 위하여, 위에서 언급한 클래스별 speed 변화 확률을 기반으로 기존 데이터들을 이용하여 새로운 데이터들을 생성하고, 생성된 데이터들을 기반으로 사칙연산 중심의 심볼릭 회귀기법을 적용하여 에너지 소비 절약을 위한 열풍팬 모터 RPM 산출 모델을 생성하였다. 이때, 새롭게 생성되는 부분은 독립변수(온도정보 16개, 습도 정보 2개, 배기팬 모터 RPM 정보 2개, 컨베이어벨트 속도 정보 1개, 전력량계 1개)를 제외한 종속변수(열풍팬 모터 RPM 8개)를 생성하게 된다. 산출 모델 생성에 있어 모터 RPM 중 1번의 경우에는 챔버부의 초입에 위치하여 값의 변화가 심하지 않으나 2번에서 8번까지의 모터 RPM 값들은 텐터기 내부상황에 의하여 값이 변화가 심하였다. 이에 1번의 값은 새로 생성된 기존 데이터들을 활용하나, 나머지 부분은 앞의 모터값들을 입력값으로 사용하게 설계하였다(예., speed3은 독립변수+SPEED1+SEED2). 그림3은 심볼릭 회귀기법을 이용한 사칙연산 기반 열풍팬 모터 RPM 산출식이다.

$$\begin{aligned}
 \text{SPEED1: } & (\text{HUM1} + \text{R_TEMP2}) + \frac{(\text{R_TEMP3} + \text{HUM1})}{(\text{R_TEMP3} + \text{L_TEMP2})} \\
 \text{SPEED2: } & -0. \text{IN}_{\text{FAN}} + \text{R_TEMP8} \\
 \text{SPEED3: } & (\text{IN}_{\text{FAN}} + \text{R_TEMP8}) - (\text{IN}_{\text{FAN}})^2 / \text{R_TEMP4} \\
 \text{SPEED4: } & \text{R_TEMP8} \\
 \text{SPEED5: } & \frac{\text{SPEED2}}{\text{R_TEMP1}} + \text{R_TEMP8} \\
 \text{SPEED6: } & \frac{\text{SPEED3}}{\text{R_TEMP3}} + \frac{\text{HUM1}}{\text{R_TEMP2}} + \text{R_TEMP8} \\
 \text{SPEED7: } & \text{R_TEMP8} \\
 \text{SPEED8: } & \text{R_TEMP8} - \left(\frac{\text{SPEED6}}{\text{L_TEMP2}} \right)
 \end{aligned}$$

그림 3. 열풍팬 모터 RPM 산출 결과

그림 4는 심볼릭 회귀기법을 이용한 열풍팬 모터 RPM산출 모델을 반영하여 후처리로 기존 작업 과정에서 관행처럼 셋팅하여 사용되어지는 모터 RPM정보에 대하여 품질은 유지한 채 에너지 소비를 줄여주도록 새롭게 생성된 열풍팬 값을 확인하는 프로그램이다.

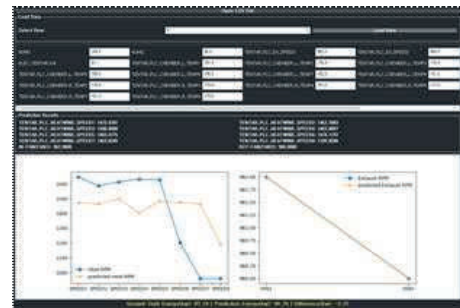


그림 4. 열풍팬 모터 RPM 산출 후처리 프로그램

현재, 위의 프로그램에서 산출된 값들을 작업 공정에 적용하여 품질을 유지하며 에너지 소비를 줄여주는 상태를 확인하였고, 보다 많은 누적 데이터를 확보하는 과정중에 있다.

4. 논의 및 고찰

본 논문에서는 염색공장에서 사용 되어지는 텐터공정 중에 에너지 소비를 줄이기 위하여 텐터기 상황에 따라 심볼릭회귀 기법을 이용하여 열풍팬 모터 RPM을 새롭게 생성하여 적용하는 방안에 대하여 제안하였다. 향후, 실시간으로의 적용을 위하여 염색기 컨트롤러 내부에 제안된 모델을 이식하여 사용할 예정이며 모델의 고도화를 위하여 데이터에 염색 직물의 무게, 천 종류 등의 정보 등을 보강할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 산업통상자원부(MOTIE) 및 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No.20202000000010, 에너지관리 시스템 확대를 위한 인공지능형복합 센서 개발 및 실증).

참 고 문 헌

- [1] 텐터기의 통합 제어시스템, 공개특허, 공개번호 10-2013-0123922
- [2] Jeong-In Lee, "The Optimization of Exhaust Fan Control for Energy Saving in Dyeing Factory Tenters", ICTC 2024 Proceedings
- [3] 신용우, "가변형상 제어 유체기기 성능 곡선 일반화 예측 기법에 관한 연구", 한국유체기계학회 하계학술대회 모음집 2025