



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

투명 디스플레이의 열화 효과 분석을  
위한 **Symbolic Regression**  
기반 모델링 연구



인천대학교 정보기술대학원

컴퓨터공학 전공

임성용

2026년 02월

석사학위청구논문

투명 디스플레이의 열화 효과 분석을  
위한 **Symbolic Regression**  
기반 모델링 연구

지도교수 김지범

이 논문을 석사학위논문으로 제출함

2025 년 12 월

인천대학교 정보기술대학원

컴퓨터공학 전공

임 성 용

이 논문을 임성용의 컴퓨터 공학  
석사학위 논문으로 인준함

2025 년 12 월

심사위원장 박 문 주



심사위원 이 현 규



심사위원 김 지 범



# 국문초록

## 투명 디스플레이의 열화 효과 분석을 위한 Symbolic Regression 기반 모델링 연구

투명 OLED 디스플레이(Transparent Organic Light Emitting Diode Display)는 고투과성과 자발광 특성을 동시에 가지고 있어 다양한 분야(디지털 사이니지, 스마트 윈도우, 자동차용 헤드업 디스플레이(HUD) 등)에서 활용되고 있다. 현재는 외부 사용 증가로 인해 필름에 영향을 주는 자외선 조건에 따른 열화 분석과 제품의 신뢰성을 확보가 필요하다.

또한 기존의 열화 분석의 경우 선형(linear) 또는 지수(exponential) 모델이 주로 사용되었으나, 이러한 모델은 실제 열화 데이터에 포함된 이상치와 비선형 열화 특성을 충분히 반영하지 못한다.

본 연구에서는 투명 OLED의 열화 데이터에 포함된 이상치가 열화 모델의 예측 성능에 미치는 영향을 분석하고, 이상치 제거와 비선형 회귀를 결합한 열화 분석 방법을 제안한다. 시험은 UV, 색상, 밝기, UV차단 필름 으로 완전요인 설계를 진행하였으며, 총 32개 조건에서 2,166 시간 가속시험으로 총 4,992개의 상대 휘도 데이터를 확보하였다. 열화 모델 학습은 0-2,030 h 구간의 데이터로 제한하며, 학습 데이터에만 이상치 제거 후 Symbolic Regression, 선형, 지수 모델을 각각 구축했다. 또한 RANSAC, Z-score 의 전처리 방법 비교를 통해 이상치 제거 방식에 따른 모델 성능 차이를 분석한다.

이상치 방법 차이로는 Z-score는 분산에 의존하는 특성으로 인해 데이터의 급변하는 이상치를 제거하지 못한 반면, RANSAC은 추세를 기준으로 잔차가 큰 데이터를 제거함으로써 이상치를 효과적으로 제거하였다. Symbolic Regression은 복잡

도 4-6 범위의 수식으로 표현 가능한 모델을 산출하였다. 특히 RANSAC - SR을 적용한 모델은 학습에 사용되지 않은 최종 측정 시점에서의 예측 오차가 가장 적었으며 예측 성능이 가장 우수하였다.

추가로 도출된 열화 모델을 통해 조건별 특성을 분석한 결과, UV 조사, 휘도 구동 조건에서 열화가 가속되었다. 또한 RANSAC-SR 모델을 통한 열화 분석이 가능하고 통계적으로 유의미한 결과를 얻었음을 확인하였다.

본 연구는 RANSAC - Symbolic Regression을 모델을 통해 기존의 열화 분석이 가지는 이상치 처리와 비선형적 수식의 한계를 보완하였으며, 시간에 따른 열화를 분석 할수 있는 연속 모델로 재구성함으로써 열화 예측 정확도를 향상하는 방법론을 제시한다. 제안한 방법을 통해 투명 OLED 디스플레이뿐만 아닌 다양한 열화 데이터를 가진 디스플레이 및 소재의 분석 및 신뢰성 평가에도 적용할 수 있을 것으로 판단한다.

주제어 : 열화 , UV , RANSAC , Symbolic Regression , 가속

## 목차

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 국문초록 .....                     | i   |
| 목 차 .....                      | iii |
| 표 목 차 .....                    | v   |
| 그림목차 .....                     | vi  |
| <br>                           |     |
| <b>1. 서론</b> .....             | 1   |
| 1.1. 연구목적 .....                | 1   |
| 1.2. 연구방법론 .....               | 2   |
| 1.2.1 UV 가속 조사 및 특성 측정 .....   | 2   |
| 1.2.2 데이터 정제 및 이상치 제거 .....    | 3   |
| 1.2.3 예측 모델 구축 .....           | 4   |
| 1.2.4 모델 성능 평가 .....           | 5   |
| <br>                           |     |
| <b>2. 이론적 배경 및 선행 연구</b> ..... | 6   |
| 2.1. OLED 개요 .....             | 6   |
| 2.1.1 투명 OLED 개요.....          | 7   |
| 2.1.2 투명 OLED 열화.....          | 8   |
| 2.1.3 UV 차단 기술.....            | 10  |
| 2.2. 열화 분석 .....               | 11  |

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| 2.3. 모델식 : Symbolic Regression .....  | 12        |
| 2.4. 이상치 제거 : RANSAC .....            | 14        |
| <b>3. 시험 설계.....</b>                  | <b>16</b> |
| 3.1. 시험 설계.....                       | 16        |
| 3.1.1 제품 성능 평가 방법 .....               | 17        |
| 3.2. 가속시험 .....                       | 20        |
| 3.2.1 가속 시험 개요 .....                  | 20        |
| 3.2.2 가속 시험 설계 .....                  | 20        |
| 3.2.3 가속시험을 통한 열화 정도 확인 .....         | 21        |
| <b>4. 시험 결과 및 데이터 분석.....</b>         | <b>23</b> |
| 4.1. 열화 분석.....                       | 23        |
| 4.1.1. 열화 여부 확인 .....                 | 23        |
| 4.1.2. 이상치 제거.....                    | 26        |
| 4.1.3. RANSAC 평가 및 열화 모델 선정 .....     | 30        |
| 4.1.4. 시험 조건 및 모델에 따른 수식 확인 .....     | 32        |
| 4.1.5. 최종측정치 구간에서의 열화 예측 정확도 평가 ..... | 37        |
| 4.2. 조건에 따른 열화 평가 .....               | 42        |
| 4.3. 이상치 제거 및 열화 모델에 대한 최종 평가 .....   | 45        |
| <b>5. 결론 .....</b>                    | <b>47</b> |

## 표목차

|  |    |
|--|----|
| 표 3.1 실험 조건 .....                              | 19 |
| 표 4.1 최종 측정 시점의 평균 상대 휘도 .....                 | 25 |
| 표 4.2 모델 별 복잡도 평균 및 학습 데이터 보존률 .....           | 31 |
| 표 4.3 이상치 제거에 따른 MSE 결과 정리 .....               | 32 |
| 표 4.4 Rawdata의 각 시험조건 및 열화 모델별 수식 도출 .....     | 34 |
| 표 4.5 Z-score 의 각 시험조건 및 열화 모델별 수식 도출 .....    | 35 |
| 표 4.6 RANSAC의 각 시험조건 및 열화 모델별 수식 도출 .....      | 36 |
| 표 4.7 원본데이터의 각 측정치와 예측치 비교 .....               | 38 |
| 표 4.8 Z-Score로 이상치 제거 데이터의 각 측정치와 예측치 비교 ..... | 39 |
| 표 4.9 Z-Score로 이상치 제거 데이터의 각 측정치와 예측치 비교 ..... | 40 |
| 표 4.10 열화 예측에 대한 MSE 평가 .....                  | 41 |
| 표 4.11 조건별 열화율 평균 및 표준편차 .....                 | 42 |

## 그림목차

|  |    |
|--|----|
| 그림 2.1 OLED 장점 및 구조 .....                                | 6  |
| 그림 2.2 투명 디스플레이 .....                                    | 8  |
| 그림 2.3 디스플레이 번인 .....                                    | 9  |
| 그림 2.4 UV 차단 필름 적용에 따른 분광 특성 변화 .....                    | 10 |
| 그림 2.5 OLED의 시간에 따른 상대 열화변화 추이 .....                     | 11 |
| 그림 2.6 Symbolic Regression Methods: 전체 구조와 알고리즘 분류 ..... | 13 |
| 그림 2.7 RANSAC 회귀와 선형 회귀 비교 .....                         | 15 |
| 그림 3.1 시험 시료 .....                                       | 16 |
| 그림 3.2 실험 패턴 및 측정 위치 .....                               | 18 |
| 그림 4.1 최종 측정 시점까지의 상대 휘도 열화 .....                        | 24 |
| 그림 4.2 원본데이터와 RANSAC 추세선 검출 .....                        | 28 |
| 그림 4.3 원본데이터와 Z-score 추세선 검출 .....                       | 29 |
| 그림 4.4 RANSAC, Z-Score 이상치 제거 형태 비교 .....                | 32 |
| 그림 4.5 전체 주효과도 .....                                     | 42 |
| 그림 4.6 Training MES 평가 .....                             | 45 |
| 그림 4.7 Prediction MSE 평가 .....                           | 46 |

# 1. 서론

## 1.1. 연구목적

투명 OLED(Transparent Organic Light Emitting Diode) 디스플레이는 고효율과 자발광 특성을 동시에 구현하는 차세대 디스플레이 기술로, 디지털 사이니지, 스마트 윈도우, 자동차용 헤드업 디스플레이(HUD)뿐만 아니라 향후 확장현실(XR) 분야에서도 높은 확장성을 지닌다. 그러나 투명 OLED는 외부 환경 중 자외선(UV)에 큰 영향을 받으며 장기간 노출 시 유기 발광층의 산화 반응, 분자 구조 변형 등 다양한 열화 현상이 발생하고, 이로 인해 휘도 감소, 색좌표 변화, 투과율 저하 등 성능 저하가 나타난다. 또한 보호층과 투명 전극 역시 UV로 인해 물리적 및 화학적 안정성이 감소되어 전체 소자의 신뢰성을 저하시킨다는 점이 지속적으로 보고되고 있다 [1, 2].

이러한 문제를 해결하기 위해 UV 차단 필름이 적용되고 있으나, 투명 OLED는 발광과 투과가 동시에 요구되는 구조적 특성 때문에 차단 필름의 실제 효과를 정량적으로 평가한 연구는 다소 부족하다[1,3]. 또한 기존 연구에서는 열화 경향을 단순화하기 위해 선형(linear) 또는 지수(exponential) 모델을 적용해 왔으나, 실제 열화 곡선의 비선형적 구조를 충분히 설명하지 못한다는 한계가 있다[3, 4]. 이를 보완하기 위한 신경망 모델 내부의 연산 과정을 판단하기 어려운 '블랙박스(Black-box)' 특

성을 지닌다[5]. Rudin은 고위험 의사결정이나 신뢰성이 중요한 공학 시스템에서는 설명이 어려운 블랙박스 모델보다, 인간이 이해할 수 있는 형태의 해석 가능한 모델을 사용하는 것이 필수적임을 강조하였다[6]. 이에 따라 본 연구에서는 데이터로부터 수학적 수식을 직접 도출하여 물리적 해석이 가능한 Symbolic Regression을 핵심 방법론으로 채택하였다.

본 연구는 이러한 배경을 바탕으로 다음의 세 가지 목적을 설정하였다.

- 열화 조건 및 시간에 따른 열화량 측정
- 열화 데이터의 신뢰성 확보를 위해 이상치 제거 적용 및 전처리 방식(RANSAC, Z-score, 원본)에 따른 성능 검토.
- Symbolic Regression(SR)을 활용하여 모델식 도출 및 기존모델과 SR 모델의 열화 예측치와 모델 적합도 평가.

## 1.2. 연구방법론

본 연구는 투명 OLED의 UV 열화를 측정 후 이를 기반으로 수명 모델식을 확인하였다. 연구 절차는 가속 열화 시험, 데이터 정제와 이상치 제거, 회귀 모델 구축, 모델 적합도 및 열화 분석 네 단계로 구성된다.

### 1.2.1 UV 가속 조사 및 특성 측정

투명 OLED 샘플에 대해 UV 차단 필름 유무를 통해 실험군과 대조군을 구성하였으며, 4.5kW 제논 아크 램프를 사용하여 자외선 조사(370nm 파장)를 진행하였다.

시험을 통해 시간별로 광특성을 측정하여 데이터를 확보하였다.

## 1.2.2 데이터 정제 및 이상치 제거

측정 시 장비 노이즈, 순간적 발광 불안정, 환경 요인 등의 영향으로 이상값(outlier)이 포함되며, 이러한 값은 열화 모델의 학습 및 예측 정확도에 영향을 미친다. 본 연구에서는 열화 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 세 가지 전처리 조건을 비교하였다.

- 원본 데이터(이상치 제거 없음)
- Z-score
- RANSAC

Z-score 방법은 통계치로 이상치를 판단하는 방법으로 구현이 간단하지만, 분산 범위에 있는 이상데이터를 정상으로 판단할 수 있다.

반면 RANSAC(Random Sample Consensus)은 특정 분포를 가정하지 않고 예측값과의 잔차로 이상치를 찾는 방법이다. 또한 데이터를 80%:20%으로 사전에 분리 후 80% 조건에서 학습하고, 나머지는 검증하였다. 이는 전처리와 모델의 과적합을 방지하기 위함이다.

또한 열화 성능을 안정적으로 반영하기 위해 초기와 말기의 양단부 각각 3개 지점을 정상데이터로 강제 포함하였다.

### 1.2.3 예측 모델 구축

앞서 이상치 제거가 된 80%의 학습 데이터로 투명 OLED의 시간에 따른 열화를 모델링하였으며, 모델 평가를 위해 기존 연구에서 사용되는 선형 및 지수 회귀 모델과 같이 Symbolic Regression 회귀 모델을 구축하고 성능을 비교하였다.

모든 모델은 학습을 위해 0-2,030시간 데이터를 사용했으며, 학습된 모델을 이용하여 최종 측정 시점인 2,166시간을 예측 시점으로 설정하고, 예측값과 실측값을 비교하여 열화 예측 성능을 평가하였다.

각 모델의 구성은 다음과 같다.

- 선형 회귀(Linear Regression): 열화를 시간에 대한 일차 함수 형태로 표현
- 지수 회귀(Exponential Regression): 열화가 시간에 따라 비선형적으로 가속되는 특성을 지수 함수로 표현.
- Symbolic Regression(SR): 사전 정의된 수학 연산자 집합을 기반으로 데이터로부터 열화 수식의 구조와 계수를 동시에 표현

모든 모델의 입력 변수는 시간(t)으로 통일하였으며, SR 결과식에도 동일하게 표기하였다.

#### 1.2.4 모델 성능 평가

열화 모델의 적합도를 정량적으로 평가하기 위해 평균 제곱 오차(MSE, Mean Squared Error)를 사용하였다. MSE는 측정값과 예측값 간의 오차를 평균으로 계산한 척도로, 값이 작을수록 모델이 좀 더 정확히 재현함을 의미한다. 본 연구에서는 이상치 제거의 정확도와 모델 예측의 적합도를 평가하기 위해 MSE가 모델 비교에 가장 적합한 지표이다.



## 2. 이론적 배경 및 선행 연구

### 2.1. OLED 개요

OLED(Organic Light Emitting Diode)는 유기 화합물을 이용한 자발광 디스플레이 기술로, 전류가 인가되면 유기층 내에서 전자와 정공이 재결합하여 광자를 방출한다. 그림 2.1과 같이 애노드, 정공 수송층, 발광층, 전자 수송층, 캐소드로 구성되며, 각 층은 제품 성능 및 특성에 영향을 미친다.

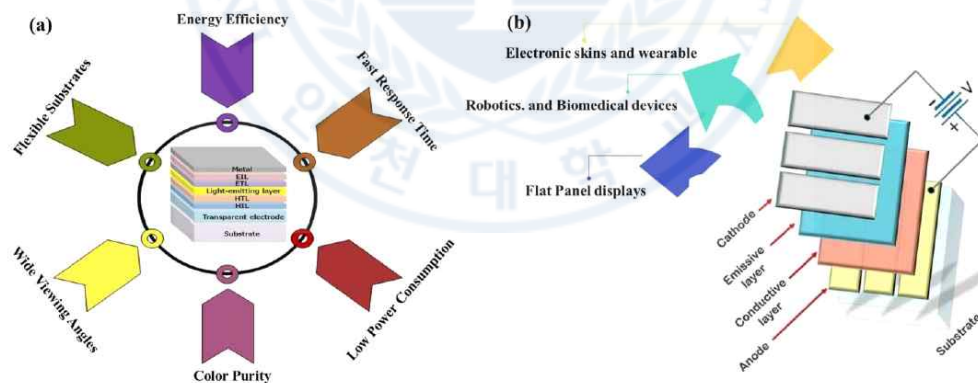


그림 2.1 OLED 장점 및 구조[1]

OLED는 기존의 LCD와 달리 백라이트가 없이 자체 발광이 가능하며, 구조가 단순하고 패널 두께가 얇아 디자인적으로 우수하다. 또한 명암비와 시야각에서 장점

을 갖는다. 이러한 특성을 통해 유연한 기판에서 사용이 가능하여 플렉서블 및 폴더블 디스플레이 구현도 가능하다[1]. 이와 같은 특성은 스마트폰, TV, 웨어러블 디바이스, 차량용 디스플레이 등 다양한 디스플레이 및 산업 분야에서 OLED의 활용 범위를 빠르게 넓히고 있다. 그러나 OLED는 유기 소재의 특성상 습기, 온도, 자외선 등의 외부 환경 요인에 큰 영향을 받으며, 이로 인한 열화 문제가 지속적으로 제기되고 있다. 특히 고휘도와 실외에서는 더욱 열화가 가속되며 이러한 문제로 인해 신뢰성 확보 및 열화 분석이 필수적으로 요구된다

### 2.1.1. 투명 OLED 개요

투명 OLED(Transparent Organic Light Emitting Diode) 디스플레이는 기본적인 OLED와 유사한 구조를 갖되, 빛의 방출과 외부광의 투과가 동시에 가능하게 개발된 기술이다. 이러한 기능으로 투명 OLED는 디지털 사이니지, 스마트 윈도우, 자동차 헤드업 디스플레이(HUD)와 같은 분야에서 활용되고 있으며, 증강현실(AR), 혼합현실(XR)으로도 적용범위가 확대되고 있다.

투명 OLED 구조는 유리 또는 플라스틱 기판 위에 애노드, 유기 발광층, 캐소드, 보호층으로 구성되며, 특히 투명 OLED에서는 양면 모두에서 빛의 방출과 외부광의 투과가 가능하도록 투명 전극이 필수적으로 사용된다. 이러한 구조에서는 전도성, 투과성, 계면 안정성 간의 상호관계를 고려하고, 광투과율과 발광 효율의 균형 확보가 중요하다[8, 9].

투명 OLED는 그림 2.2와 같이 어두운 조건에서 디스플레이 뒤에 있는 배경이 보이는 특성으로 인해 기존 디스플레이와 차별화되는 공간 활용이 가능하다. 특히

스마트 윈도우나 자동차 HUD에 적용될 경우, 디스플레이가 꺼졌을 때는 일반 유리 처럼 기능하고, 켜졌을 때는 정보 시각화가 가능한 스마트 기능이 구현된다. 이러한 특성은 혁신적인 사용자 경험을 제공한다..

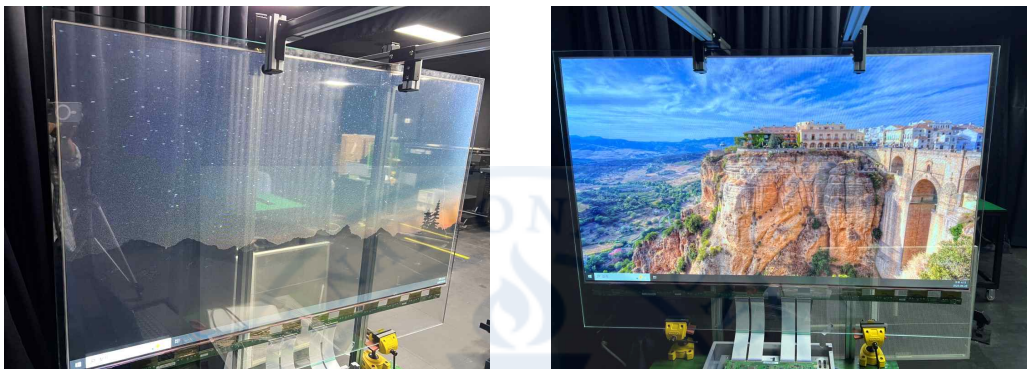


그림 2.2 투명 디스플레이

### 2.1.2. 투명 OLED 열화

OLED는 유기물로 이루어져 있어 자외선(UV), 온도, 습기 등 외부 자극에 매우 취약하다. 특히 280~400nm 범위의 낮은 파장에서 높은 에너지가 발생하는 자외선 조건에서 유기 발광층 내 분자 결합을 파괴하거나 산화 반응을 가속하여 열화를 발생시킨다. 이러한 열화를 통해 OLED의 휘도 저하 등 여러 성능 저하가 발생한다.

OLED 열화는 여러 조건에 대한 복합적 현상으로 구성되며, 대표적인 열화 메커니즘은 아래와 같다.

- 분자 구조 변화 → 에너지 준위 변화 → 전하 수송 불균형
- 계면 반응성 증가 → 전극-유기층 간 박리 또는 누설 전류 발생

- 광학적 비균일성 증가 → 색좌표 왜곡 및 이미지 품질 저하

OLED 열화 현상 가운데서도 번인(Burn-in)은 가장 대표적인 문제 중 하나로 꼽힌다. 번인은 특정 색 혹은 특정 픽셀이 반복적으로 사용되거나 고휘도로 장시간 구동될 때 열화 속도가 상대적으로 빨라져 그림 2.3와 같이 잔상 또는 밝기 불균일이 발생하는 현상이다. 특히 정적인 UI나 고휘도 화면을 지속적으로 표시하는 TV·스마트폰·자동차 디스플레이에서 자주 관찰되며, 초기 휘도 감소(Initial fast decay)와 색좌표 이동(Color shift)을 동반하는 것이 특징이다. 또한 OLED의 경우 기존 문헌에서는 청색 발광층이 가장 낮은 파장 영역에서 높은 에너지를 갖기 때문에 가장 빠르게 열화되고 있다고 연구 되었으며, 이를 ‘블루 열화 문제(Blue degradation)’으로 나타낸다[7].



그림 2.3 디스플레이 번인

### 2.1.3. UV 차단 기술

OLED의 UV 열화를 막기 위해 일반적으로 UV 차단 필름을 사용한다. UV 차단 필름은 그림 2.4와 같이 자외선을 흡수하거나 반사함으로써 유기물의 손상을 줄인다. 이런 보호막은 디스플레이의 광특성 향상과 보호를 위해 높은 광투과성과 함께 수분 차단, 열 차단을 모두 만족해야 하며, 이러한 특징은 투명 OLED에서 필수적인 요소가 된다[8, 9].

하지만 투명 OLED는 전후면 양측에서 빛이 투과되어야 하는 구조적 특성상, 보호막이나 차단막 사용 시 광 투과율 감소, 전기적 특성 저하 등의 문제가 생길 수 있다. 이에 보호 기술 개발 시에는 열화 억제 효과와 더불어 발광 성능 및 광학적 품질을 함께 평가할 수 있는 시험 방법이 필요하다.

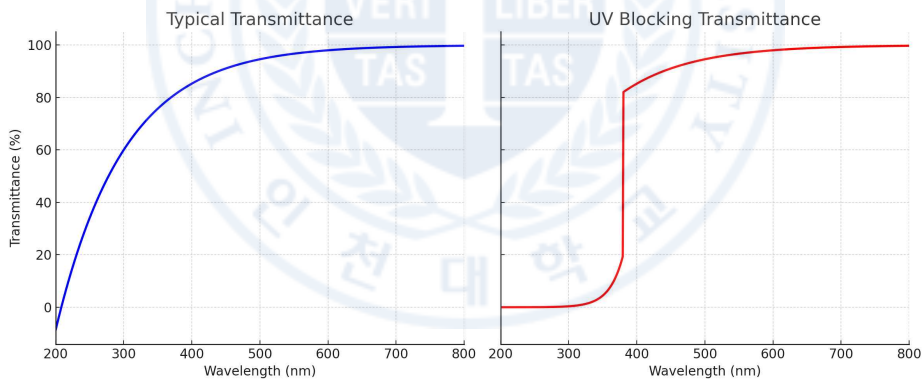


그림 2.4 UV 차단 필름 적용에 따른 분광 특성 변화

## 2.2 열화 분석

OLED는 서브픽셀 간 효율 차이와 픽셀 간 다른 활성화 에너지 등으로 인해 열화 정도가 다르며, 이러한 특징으로 인해 각각의 모델식이 필요하다. 또한 기존의 연구에서는 열화 모델을 단순한 선형으로 분석하였지만 이는 이상치를 검증하지 않았으며 선형과 지수 모델에서만 모델의 적합성을 확인하였다[4]. 특히 투명 OLED는 일반 OLED와 다른 소재로 제작한 투과형 전극 구조, 다층 광학 스택 등으로 인해 일반 OLED보다 복잡한 열화 형태가 나타나게 되며, 이러한 특징은 단일 함수 형태가 적합하지 않은 결과를 나타낸다. 또한 이상치가 포함된 데이터로 인해 열화 모델식이 실제 열화 모델식과의 차이가 발생하게 되며 이러한 차이로 인해 추정되는 열화의 예측치가 차이가 나게 된다. 결과적으로 그림 2.5와 같이 측정 구간에 따라 모델의 적합도가 달라지는 한계가 나타난다[4, 10].

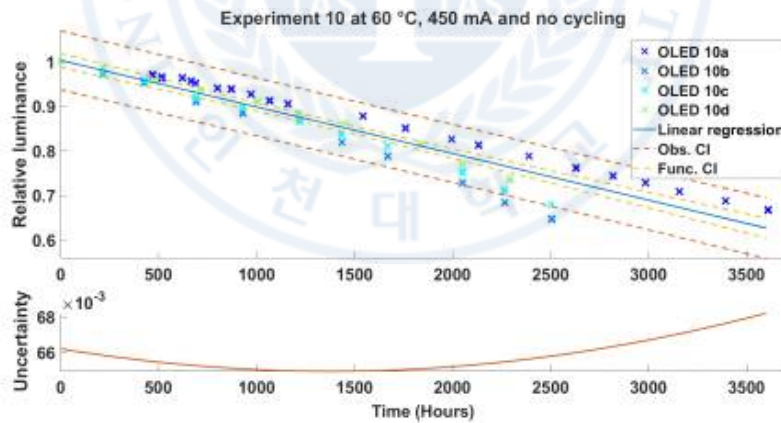


그림 2.5 OLED의 시간에 따른 상대 열화변화 추이[2]

## 2.3 모델식 : Symbolic Regression

최근에 Deep Learning을 활용하여 소자의 열화 패턴을 분석하는 연구가 활발히 진행되고 있다[11]. 하지만 이러한 방법은 수식을 출력하지 못해 실제 물리 모델과 반영하지 못하는 문제가 있다. 이와 다르게 Symbolic Regression(SR)은 사전에 정의된 함수 형태(Pre-defined form)를 가정하지 않고, 데이터 자체의 패턴을 가장 잘 설명하는 수학적 구조를 진화적으로 탐색한다[12] 또한 기존의 선형, 지수 모델은 파라미터가 제한되어 열화 패턴의 변곡점, 기울기 변화, 구간별 차이를 반영하기 어렵지만, SR이 배경지식 없이도 실험 데이터(Experimental Data)로부터 그림 2.6과 같은 다양한 접근 방식을 통해 밀토니안(Hamiltonian)과 같은 물리 법칙과 보존 법칙을 스스로 재발견할 수 있음을 증명하였다[13]. 이는 SR이 복잡한 열화 거동을 보이는 투명 디스플레이의 수명 모델링에 있어, 단순한 근사를 넘어 잠재된 열화 메커니즘을 수식화하는 데 매우 효과적인 도구임을 시사한다. 또한 SR은 출력된 결과치가 해석 가능한 수식으로 제공되므로, 열화 속도 변화, 조건별 영향성, 기울기 차이 등을 비교하며, 도출된 수식을 OLED의 열화 메커니즘과 연관 짓기에도 유리하다.

본 연구에서는 SR을 투명 OLED의 시간 기반 열화 모델을 구축하기 위한 핵심 도구로 채택하였으며, 각 조건별 열화를 수식화하여 열화 모델을 산출하였다.

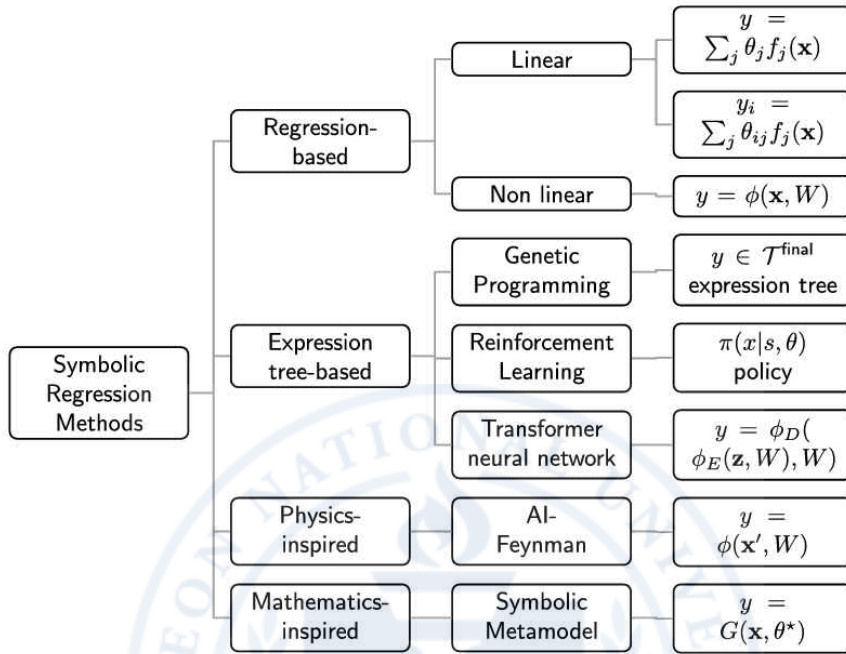


그림 2.6 Symbolic Regression Methods: 전체 구조와 알고리즘 분류[14]

## 2.4. 이상치 제거 : RANSAC

실험 데이터에는 다양한 원인(장비 오차, 순간적 발광 불안정, 외부 환경 등)으로 이상값(outlier)이 측정값에 포함될 수 있으며 이러한 값은 회귀 모델의 예측 성능을 저하시킨다. 일반적으로 Z-score를 통해 이상치를 제거하지만, Z-score는 통계치를 기반으로 이상치를 확인하기 때문에 비선형적 시계열 데이터에서는 분포 내 존재하는 중간 구간의 이상치를 놓칠 가능성이 있다.

반면 RANSAC(Random Sample Consensus)은 데이터셋 내에 존재하는 이상치(Outlier)의 영향을 배제하고 유효한 데이터만을 사용하여 모델 파라미터를 강건하게 추정하기 위해 제안된 반복적 알고리즘이다[14]. RANSAC(Random Sample Consensus)은 특정 분포를 가정하지 않고, 회귀 예측값과의 오차를 기반으로 이상을 확인하기 때문에 그림 2.7과 같이 급격한 변동이 존재하는 열화 데이터에서도 이상치를 확인할 수 있다. 또한 시계열의 양단 구간은 강제로 inlier로 지정하여(force\_k), 초기값과 최종값의 열화 추세가 왜곡되지 않도록 하였다.

본 연구에서는 RANSAC을 학습 데이터에만 적용하고 검증 데이터는 원본 상태로 유지하여, 이상치 제거가 과적합을 유발하지 않도록 설계하였다. 이후 SR을 적용하여 전처리 방식 차이가 열화 수식과 MSE에 미치는 영향을 비교하였다.

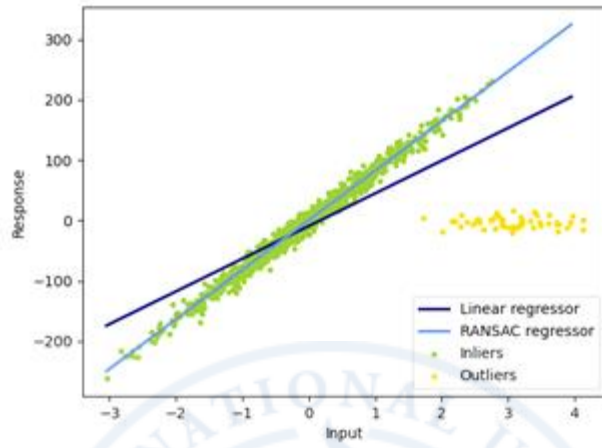
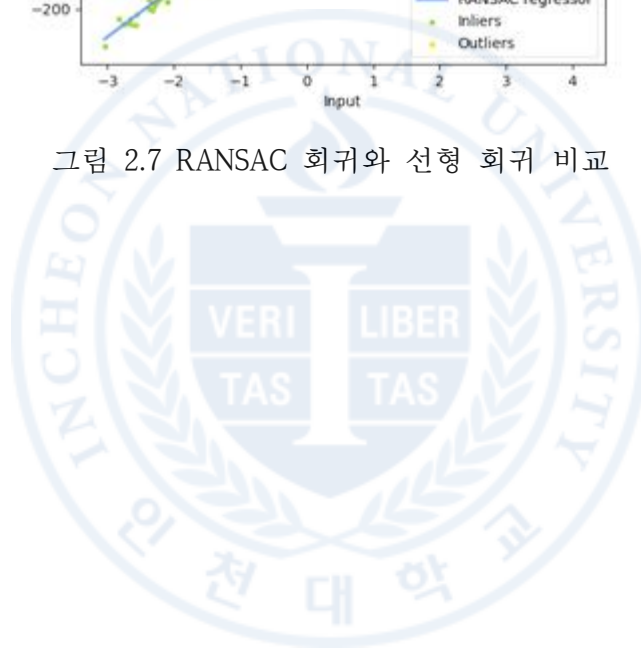


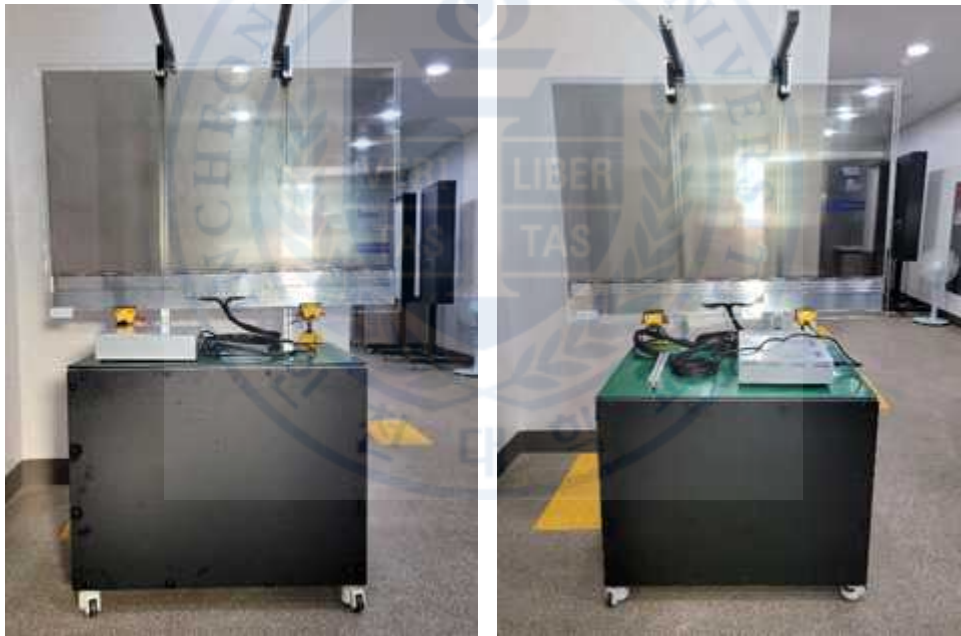
그림 2.7 RANSAC 회귀와 선형 회귀 비교



### 3. 시험 설계

#### 3.1. 시험 설계

투명 OLED 디스플레이의 UV 영향성 및 각 요인별 열화 정도를 정량적으로 평가하기 위해 UV 차단 필름이 부착된 제품(UV-Protected)과 일반 제품(Standard) 그림 3.1와 같이 준비하였다.



a) UV 필름 부착모델

b) UV 필름 미부착모델

그림 3.1 시험 시료

### 3.1.1. 제품 성능 평가 방법

본 연구에서는 투명 OLED 디스플레이의 열화 특성을 정량적으로 평가하기 위해 휘도(Luminance)를 주요 열화 지표로 선정하였다. 휘도는 OLED의 발광 효율 및 시인성과 직결되며, 사용 중 열화로 인해 가장 먼저 변화하는 특성이므로 열화 평가의 대표 지표로 활용된다.

실험 설계는 완전요인설계를 적용하여 다음의 독립변수를 조합하였다.

- 색상 4 조건(Red, Green, Blue, White)
- 밝기 2 조건(100%, 80%)
- UV 차단 필름 2 조건(UV-Protected, Standard)
- UV 조사 2 조건 (On, Off)

이를 통해 표 3.1와 같이  $4 \times 2 \times 2 \times 2 = 32$ 개의 실험 조건을 구성하였으며, 각 조건당 12번의 측정 포인트를 설정하여 제품의 휘도 초기 대비 변화를 확인하고, 제품 2개에 대하여 그림 3.2의 192개 측정 지점에서 휘도를 측정하였다.

측정 방법은 다음과 같이 표준화하였다. 분광방사휘도계를 사용하여 각 조건별 12개 포인트에서 휘도를 측정하였다. 모든 측정은 암실 환경(조도 < 1 lux)에서 측정 거리 500mm에서 수행되었다. 측정 주기는 주 1회로 진행하여 0시간부터 2,166시간까지 총 13개 시점에서 측정하였다. 측정 시작 전 30분 이상 샘플 안정화 시간을 확보하여 측정 신뢰도 확보를 하였다.

UV 조사 조건은 IEC 60068-2-5 규격을 참조하여 설계하였다. 제품의 좌측면에만 UV-A 램프(중심파장 370nm, 방사조도 60 W/m<sup>2</sup>)를 조사하고, 우측면은 가림막으로 차광하여 동일 샘플 내에서 UV 조사 유무에 따른 대조군을 형성하였다. [15]

데이터 처리는 각 측정점에서 초기 휘도 대비 변화율을 확인하여 열화 정도를 정량화하였으며, 이를 통해 색상, 밝기, UV 조건별 열화 패턴의 차이를 분석하였다.

이러한 체계적인 실험 설계를 통해 총 4,992개의 데이터셋을 확보하였으며, 이는 SR 모델 및 열화 분석에 충분한 규모의 데이터를 확보하였다.



그림 3.2 실험 패턴 및 측정 위치

표 3.1 실험 조건

| 색상    | 밝기 수준[%] | 시료번호        | UV폭로여부 | 측정포인트     |
|-------|----------|-------------|--------|-----------|
| White | 100      | 1(UV film)  | On     | 12 Point  |
| Red   | 100      | 1(UV film)  | On     | 12 Point  |
| Green | 100      | 1(UV film)  | On     | 12 Point  |
| Blue  | 100      | 1(UV film)  | On     | 12 Point  |
| White | 80       | 1(UV film)  | On     | 12 Point  |
| Red   | 80       | 1(UV film)  | On     | 12 Point  |
| Green | 80       | 1(UV film)  | On     | 12 Point  |
| Blue  | 80       | 1(UV film)  | On     | 12 Point  |
| White | 100      | 2(Standard) | On     | 12 Point  |
| Red   | 100      | 2(Standard) | On     | 12 Point  |
| Green | 100      | 2(Standard) | On     | 12 Point  |
| Blue  | 100      | 2(Standard) | On     | 12 Point  |
| White | 80       | 2(Standard) | On     | 12 Point  |
| Red   | 80       | 2(Standard) | On     | 12 Point  |
| Green | 80       | 2(Standard) | On     | 12 Point  |
| Blue  | 80       | 2(Standard) | On     | 12 Point  |
| White | 100      | 1(UV film)  | Off    | 12 Point  |
| Red   | 100      | 1(UV film)  | Off    | 12 Point  |
| Green | 100      | 1(UV film)  | Off    | 12 Point  |
| Blue  | 100      | 1(UV film)  | Off    | 12 Point  |
| White | 80       | 1(UV film)  | Off    | 12 Point  |
| Red   | 80       | 1(UV film)  | Off    | 12 Point  |
| Green | 80       | 1(UV film)  | Off    | 12 Point  |
| Blue  | 80       | 1(UV film)  | Off    | 12 Point  |
| White | 100      | 2(Standard) | Off    | 12 Point  |
| Red   | 100      | 2(Standard) | Off    | 12 Point  |
| Green | 100      | 2(Standard) | Off    | 12 Point  |
| Blue  | 100      | 2(Standard) | Off    | 12 Point  |
| White | 80       | 2(Standard) | Off    | 12 Point  |
| Red   | 80       | 2(Standard) | Off    | 12 Point  |
| Green | 80       | 2(Standard) | Off    | 12 Point  |
| Blue  | 80       | 2(Standard) | Off    | 12 Point  |
| 합계    |          |             |        | 384 Point |

## 3.2. 가속시험

### 3.2.1. 가속 시험 개요

가속시험(Accelerated Testing)은 제품이 실제 사용 환경에서 겪을 수 있는 열화 현상을 단기간 내에 재현하기 위하여 주요 스트레스 요인(온도, 습도, 자외선 등)을 인가하는 시험이다. 신뢰성 평가 및 열화 분석에 필수적이며, 장시간 사용에서 예상되는 열화 정도를 추정할 수 있다[4, 10].

가속시험은 가속 조건에 따라 열가속(Temperature Acceleration), 습도 가속(Humidity Acceleration), 광가속(Light/UV Acceleration), 기계적 반복 피로 가속 등으로 구분되며, 시험 목적에 따라 단독 또는 복합적으로 설계된다.

### 3.2.2. 가속 시험 설계

본 연구에서는 투명 OLED 디스플레이의 열화 양상을 단시간 내에 재현하기 위해 복합 가속 조건을 설정하였으며, 아래 세 가지 가속 시험 요소로 설정하였다. 가속 요인은 UV-A 조사와 밝기 수준(100%, 80%), 그리고 색상으로 선정하였다. 제품은 좌측면에만 UV를 조사하고 우측면은 차광하여 동일 샘플 내 on/off 비교가 가능하도록 구성한다. 모든 시험은 30℃ 항온 조건에서 연속 동작조건으로 진행하였다. UV 조사, 밝기 수준, 발광 색상(R/G/B/W)과 보호필름 적용 유무에 따라 시험 조건을 총 32개 조건으로 구성하고, 각 조건을 다수 측정 포인트로 반복 측정하여 시간에 따른 휘도 데이터를 측정한다.

### (1) 빈도 가속 (Frequency Acceleration)

제품을 지속적으로 동작시키는 방식으로, 실사용 환경보다 높은 구동 빈도 및 연속 발광 조건을 부여함으로써 전기적 스트레스를 집중적으로 누적시킨다. 이로 인해 발광층 내부의 전하 트랩, 계면 피로 누적, 재료 열화가 빠르게 진행되도록 유도한다.

### (2) UV-A 가속 (UV-A Acceleration)

IEC 60068-2-5 기준을 참고하여 중심 파장 370 nm, 방사 조도 60 W/m<sup>2</sup> 조건의 UV-A 램프를 사용한다. 제품 좌측 면에만 자외선을 조사하고, 우측은 차광 처리함으로써 동일 샘플 내에서 UV 조사 유무에 따른 상대적 열화 효과를 비교할 수 있도록 설계한다. UV-A는 유기 재료의 광화학 반응을 유발하여 발광층 분해, 색좌표 이동, 휘도 저하 등의 열화를 가속화한다[18].

### (3) 밝기 가속 (Luminance Acceleration)

밝기 수준을 100% 및 80%로 구분하여, 밝기가 클수록 에너지 증가와 함께 발광층 내 손상이 빠르게 진행되므로, 이를 통해 밝기에 따른 열화를 확인한다.

## 3.2.3. 가속시험을 통한 열화 정도 확인

가속시험을 통해 측정된 휘도는 시간에 따른 열화 정도를 평가하기 위한 핵심 값이며, 본 논문에서 열화를 정량적 평가하기 위해 사용하였다. 구체적으로 열화는 초기 휘도 대비 특정시점에서의 감소율로 정의한다.

모든 시험 조건에서 데이터를 확보한후 2,060시간까지를 모델 학습 구간으로 설정하고, 최종 측정치인 2,166시간에서 예측치를 분석하여 전처리 및 모델 종류에 따른 MSE 차이와 2,166 시간 예측치와 측정치의 MSE를 기반으로 해당 열화 모델의

타당성을 평가하였다. 또한 기존 모델과 같이 RANSAC-SR 모델을 통한 열화 분석의 통계적 검증 및 주효과도 분석의 가능성을 확인하여, 열화 분석 가능성을 확인하였다.



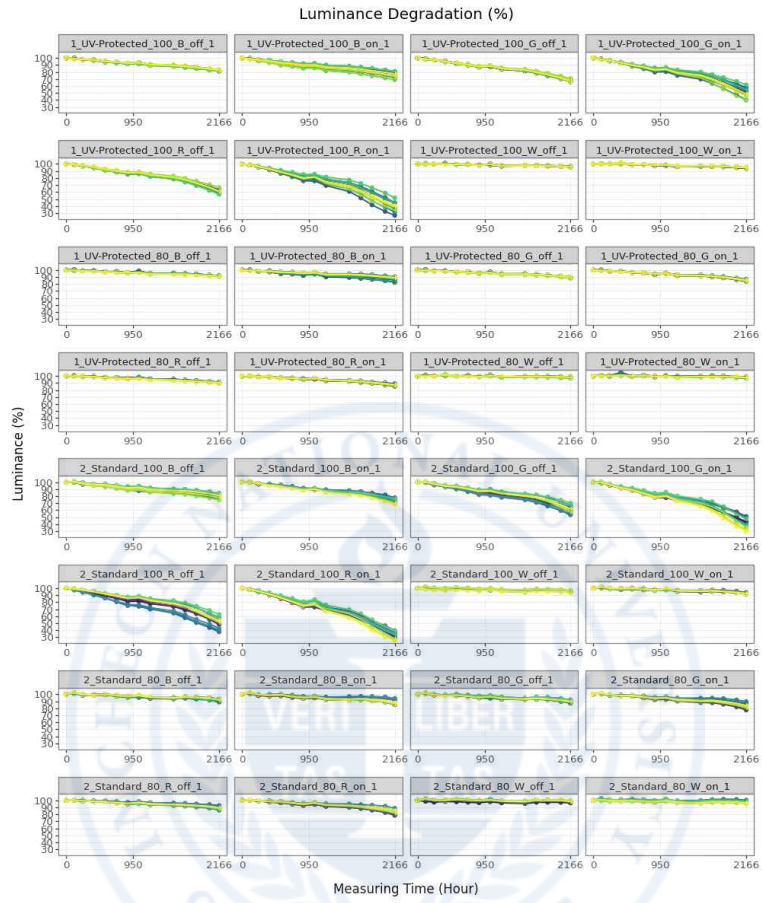
## 4. 시험 결과 및 데이터 분석

### 4.1. 열화 분석

OLED 디스플레이의 열화 특성을 분석하기 위해, 시간 경과에 따른 초기치 대비 휘도 감소율을 확인하고, 회귀 모델을 구성하였다. 열화 분석은 이상치 제거, 모델 선택, 예측 정확도 평가로 구성되며, 이를 통해 예측 정확도 평가를 통해 이상치 제거와 모델 선택의 우수성을 확인하고자 한다.

#### 4.1.1. 열화 여부 확인

초기 휘도 대비 마지막 측정 시점에서의 상대 휘도 평균값을 분석하여 열화 여부를 그림 4.1와 같이 열화 형태로 나타냈으며, 관련 데이터 중 최종 시간인 2,166 시간에서의 평균 상대휘도를 표 4.1처럼 확인하였다. 전체 실험에서 시간이 경과함에 따라 휘도가 감소하는 경향으로 확인되었으며, 이는 OLED 발광층의 유기물 열화와 부품 손상에 기인하는 것으로 판단된다.



<그림 4.1> 최종 측정 시점까지의 상대 휘도 열화

표 4.1 최종 측정 시점의 평균 상대 휘도

| Number | Sample       | Initial Brightness (%) | Emission Color | UV Exposure Condition | Final Measuring Time (h) | Average Final Relative Luminance (%) |
|--------|--------------|------------------------|----------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| 1      | UV-Protected | 100                    | Blue           | off                   | 2166                     | 81.90                                |
| 1      | UV-Protected | 100                    | Blue           | on                    | 2166                     | 76.35                                |
| 1      | UV-Protected | 100                    | Green          | off                   | 2166                     | 67.85                                |
| 1      | UV-Protected | 100                    | Green          | on                    | 2166                     | 50.40                                |
| 1      | UV-Protected | 100                    | Red            | off                   | 2166                     | 60.69                                |
| 1      | UV-Protected | 100                    | Red            | on                    | 2166                     | 38.85                                |
| 1      | UV-Protected | 100                    | White          | off                   | 2166                     | 95.95                                |
| 1      | UV-Protected | 100                    | White          | on                    | 2166                     | 94.46                                |
| 1      | UV-Protected | 80                     | Blue           | off                   | 2166                     | 91.24                                |
| 1      | UV-Protected | 80                     | Blue           | on                    | 2166                     | 87.70                                |
| 1      | UV-Protected | 80                     | Green          | off                   | 2166                     | 89.35                                |
| 1      | UV-Protected | 80                     | Green          | on                    | 2166                     | 85.36                                |
| 1      | UV-Protected | 80                     | Red            | off                   | 2166                     | 90.58                                |
| 1      | UV-Protected | 80                     | Red            | on                    | 2166                     | 86.86                                |
| 1      | UV-Protected | 80                     | White          | off                   | 2166                     | 98.19                                |
| 1      | UV-Protected | 80                     | White          | on                    | 2166                     | 97.82                                |
| 2      | Standard     | 100                    | Blue           | off                   | 2166                     | 80.52                                |
| 2      | Standard     | 100                    | Blue           | on                    | 2166                     | 73.77                                |
| 2      | Standard     | 100                    | Green          | off                   | 2166                     | 60.88                                |
| 2      | Standard     | 100                    | Green          | on                    | 2166                     | 42.43                                |
| 2      | Standard     | 100                    | Red            | off                   | 2166                     | 50.63                                |
| 2      | Standard     | 100                    | Red            | on                    | 2166                     | 33.04                                |
| 2      | Standard     | 100                    | White          | off                   | 2166                     | 95.04                                |
| 2      | Standard     | 100                    | White          | on                    | 2166                     | 92.44                                |
| 2      | Standard     | 80                     | Blue           | off                   | 2166                     | 91.72                                |
| 2      | Standard     | 80                     | Blue           | on                    | 2166                     | 87.88                                |
| 2      | Standard     | 80                     | Green          | off                   | 2166                     | 89.12                                |
| 2      | Standard     | 80                     | Green          | on                    | 2166                     | 82.90                                |
| 2      | Standard     | 80                     | Red            | off                   | 2166                     | 88.84                                |
| 2      | Standard     | 80                     | Red            | on                    | 2166                     | 83.30                                |
| 2      | Standard     | 80                     | White          | off                   | 2166                     | 98.40                                |
| 2      | Standard     | 80                     | White          | on                    | 2166                     | 97.77                                |

#### 4.1.2. 이상치 제거

본 연구에서는 RANSAC(Random Sample Consensus)과 Z-score, 원본의 3가지 방법을 비교하여 적용하였다.

Z-score 방법은 각 관측치의 분포를 계산하여 이상치를 판단한다.

$$Z_i = (x_i - \mu) / \sigma$$

여기서  $x_i$ 는  $i$ 번째 측정값이며,  $\mu$ 와  $\sigma$ 는 각각 전체 데이터의 평균과 표준편차이다. Z-score는 구현이 간단하고 계산 효율이 높지만, 평균과 분산에 기반해 있기 때문에 비정규성, 추세성 또는 이분산성이 존재하는 시계열 데이터에서는 임계 경계가 완화되어 갑작스러운 이상치를 놓칠 수 있는 한계를 가진다.

반면 RANSAC은 반복적 표본 추출을 기반으로 이상치에 강건한 회귀선을 도출하는 알고리즘으로, 특정한 분포 가정 없이 예측값 차이의 크기를 기준으로 이상치를 판단한다.

본 연구에서는 RANSAC을 훈련 데이터에 한정하여 적용하였으며, 검증 데이터는 원본 상태로 유지하였다. 이는 학습 단계에서는 이상치의 영향을 배제하면서도, 검증 단계에서는 실제 데이터 분포를 유지하여 모델의 일반화 성능을 공정하게 평가하기 위함이다. 또한 모델은 시험시간 0시간부터 2,030시간까지의 데이터를 기준으로 80%:20%으로 사전에 분리 후 80% 조건에서 학습하고, 나머지 조건에서 검증하였으며, 마지막 2,166시간의 데이터는 예측 정확도를 평가하기 위해 사용하였다. 두 전처리 방식 모두 시계열 열화 데이터의 특성을 고려하여 양단 구간의  $force\_k = 3$

을 적용하였다. 초기값과 말단값 각각 3개를 정상데이터에 강제로 포함함으로써 열화 추세의 시작과 종료가 안정적으로 유지되도록 하였으며, 이는 제품 수명에 대한 큰 변화가 있는 초기값과 말단값을 모델식에 포함하고자 함이다.

각 전처리 방식에서 사용한 주요 파라미터는 다음과 같다.

■ RANSAC 구현 시 사용된 주요 파라미터

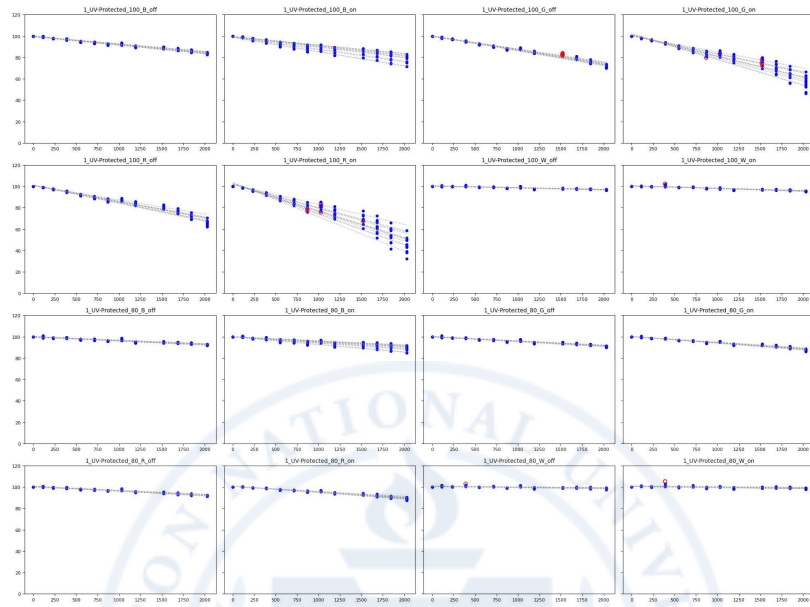
- min\_samples = 0.5: 초기 모델 구성에 사용할 샘플 비율
- residual\_threshold = 2: 정상 데이터 판정 임계값
- random\_state = 42: 재현성 확보를 위한 시드값
- test\_size = 0.2 : 전체 데이터 중 20%를 검증용(test set)으로 사용.
- force\_k = 3: 시계열 양단 3개 포인트 강제 포함

■ Z-Score 구현 시 사용된 주요 파라미터는 다음과 같다.

- z\_thresh = 1.5: 초기 모델 구성에 사용할 샘플 비율
- test\_size = 0.2 : 전체 데이터 중 20%를 검증용(test set)으로 사용.
- force\_k = 3: 시계열 양단 3개 포인트 강제 포함
- random\_state = 42: 재현성 확보를 위한 시드값

결과적으로 RANSAC은 그림 4.2와 같이 추세를 모형으로 흡수한 후 예측값 차이에 의해 이상치를 판단하므로 급격한 변동이 존재하는 열화 데이터에서도 안정적으로 이상치를 검출할 수 있다. 반면 Z-score는 그림 4.3와 같이 평균과 표준편차 값에 민감하게 의존하므로 시계열적 변화가 큰 데이터에서는 이상치 판별 경계가 넓어져 이상치 판별에 불리하다.

RANSAC Outlier Removal (Page 1/2)



RANSAC Outlier Removal (Page 2/2)

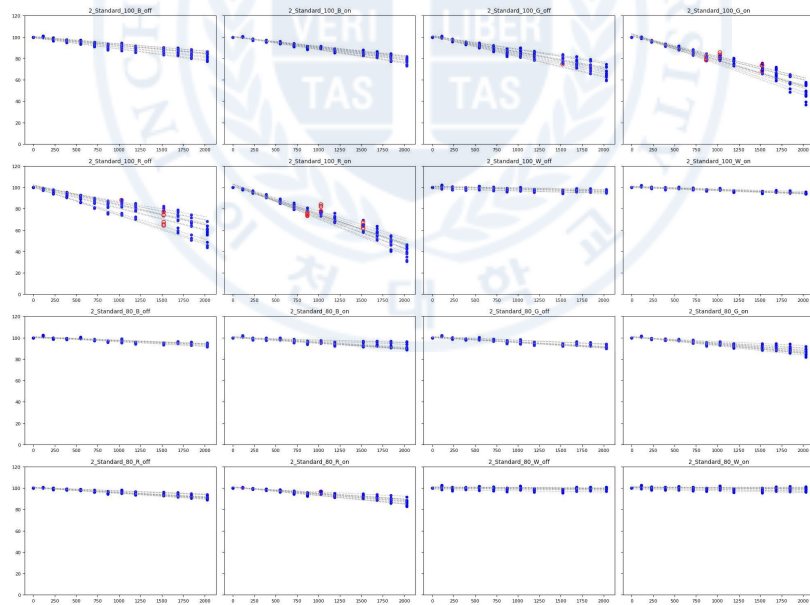
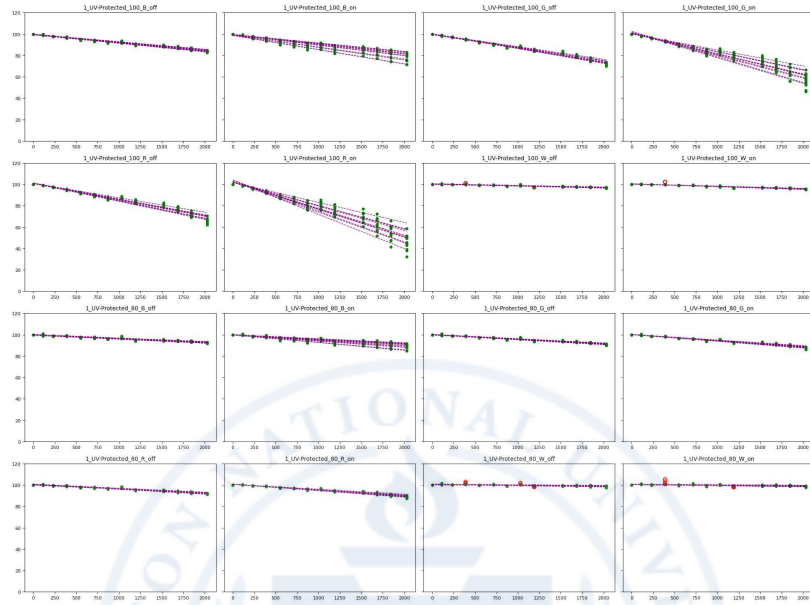


그림 4.2 원본데이터와 RANSAC 추세선 검출  
(Inlier : Blue dot, Outlier : Red dot)

ZSCORE Outlier Removal (Page 1/2)



ZSCORE Outlier Removal (Page 2/2)

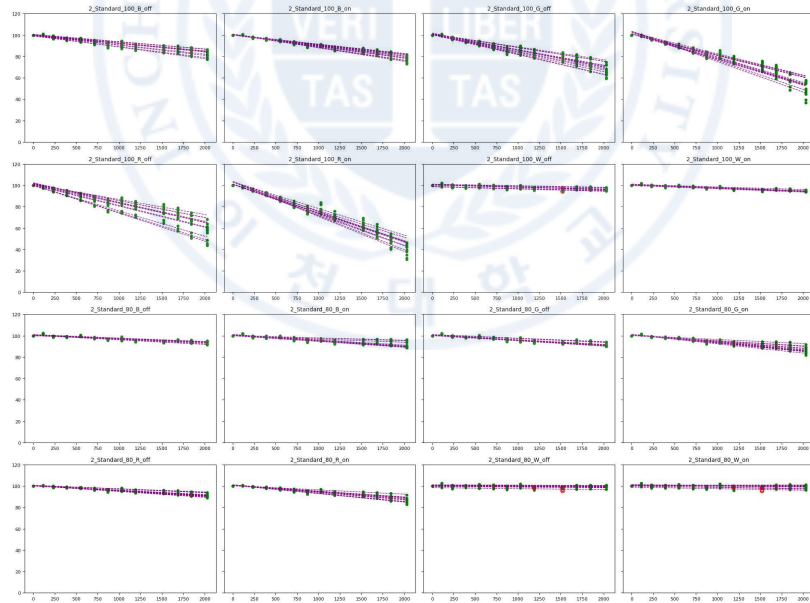


그림 4.3 원본데이터와 Z-score 추세선 검출  
(Inlier : Blue dot, Outlier : Red dot)

### 4.1.3. RANSAC 평가 및 열화 모델 선정

Symbolic Regression 구현에는 PySR(Python Symbolic Regression) 라이브러리를 사용하였으며, 주요 파라미터는 다음과 같다.

- iterations = 500: 진화 반복 횟수
- populations = 30: 병렬 개체군 수
- binary\_operators = ["+", "-", "\*", "/"]: 이항 연산자
- unary\_operators = ["exp", "log", "sqrt"]: 단항 연산자
- maxsize = 10: 최대 수식 복잡도
- loss = "loss(x, y) = (x - y)^2": MSE 손실함수
- model\_selection = "best"
- random\_state = 42

학습 데이터는 0 - 2,030 h 구간에서 Train/Validation(80:20)으로 분할하였으며, 모델 선택은 Validation MSE가 최소가 되는 수식을 기준으로 수행하였다. 이후 선택된 모델을 이용해 학습에 사용하지 않은 2,166 h 시점을 말단 예측 구간으로 설정하고, 실측값과의 오차를 비교하였다. SR 모델에서 도출된 수식의 입력 변수는 시간 t로 정의하였고, 코드 내부에서도 maxsize=10 내에서 과적합을 방지하였다. RANSAC과 Z-score, Rawdata의 3조건에 대해 Symbolic Regression을 적용한 결과, 표 4.2와 같이 세 방법 모두 복잡도(Complexity)는 약 5 수준으로 유사하게 나타났다. 이는 전처리 방식이 모델의 수식 구조를 단순화시키지 않았음을 의미한다. 또한 RANSAC으로 이상치 제거 시 이상치가 가장 많이 제거되었지만 Z-Score와 큰 차이가 없는 것을 확인하였다.

표 4.2 모델 별 복잡도 평균 및 학습 데이터 보존률

| 이상치 제거 방법 | 복잡도 평균      | 학습데이터 보존률 평균  | 이상치 제거률 평균    |
|-----------|-------------|---------------|---------------|
| Rawdata   | 4.88        | 1.000         | 0.0000        |
| Z-Score   | 4.88        | 0.9877        | 0.0123        |
| RANSAC    | <b>4.91</b> | <b>0.9872</b> | <b>0.0128</b> |

다만 MSE 분석에서는 전처리 방법에 따른 차이가 명확히 구분되었다. 표 4.3와 같이 학습용 데이터를 제외한 RANSAC의 검증용 MSE가 여러 모델 중 가장 적합한 것으로 확인되었다.

표 4.3 이상치 제거에 따른 MSE 결과 정리

| 이상치 제거 방법 | Train 데이터 기반 모델식 |                | 선형 MSE 평균치 | 지수형 MSE 평균치 |
|-----------|------------------|----------------|------------|-------------|
|           | 검증용 SR MSE 평균치   | 학습용 SR MSE 평균치 |            |             |
| Rawdata   | 6.67             | 3.64           | 6.68       | 7.65        |
| Z-Score   | 6.68             | 3.60           | 6.70       | 7.66        |
| RANSAC    | <b>6.51</b>      | 3.40           | 6.69       | 7.71        |

Z-score의 경우 이상치 제거를 약 1.2 % 진행하였으나, SR의 MSE를 확인한 결과 원본 데이터와 거의 차이가 없음을 확인하였다. 이는 Z-Score의 이상치 제거 방법이 그림 4.4와 같은 측정 중 발생한 갑작스러운 이상치를 제거하지 않고 통계에서 벗어난 데이터를 제거하여 측정 정확도 향상에 큰 영향이 없음을 확인하였다.

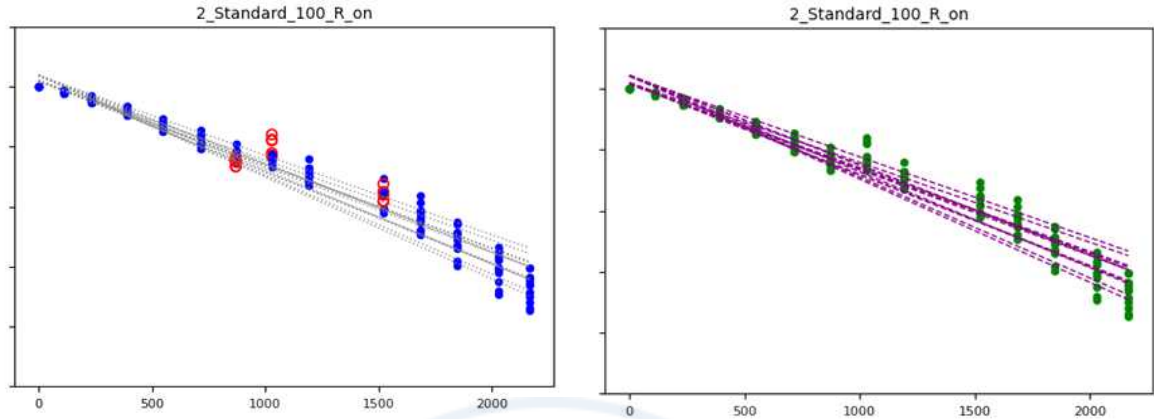


그림 4.4 RANSAC, Z-Score 이상치 제거 형태 비교  
(RANSAC: Blue dot, Z-Score : Green dot)

RANSAC의 경우 이상치 제거를 약 1.3% 진행하였으나, SR의 MSE를 확인한 결과 원본 데이터보다 0.16 감소하였다. 예측치 차이로 이상치를 식별하는 RANSAC에서 관련 데이터의 차이는 제거된 데이터가 모델 적합에 실질적으로 방해가 되는 포인트임을 나타낸다.

즉, RANSAC은 최소한의 데이터 손실로 이상치를 제거하고, Symbolic Regression이 회귀 모델 생성에 도움을 준 것으로 판단된다. 따라서 Symbolic Regression 기반의 비선형 회귀 모델의 이상치 제거에서 RANSAC이 가장 우수한 것으로 평가된다.

#### 4.1.4 시험 조건 및 모델에 따른 수식 확인

각 이상치 및 모델 평가를 위해 열화데이터를 통해 이상치 조건 및 모델에 따른 각각의 수식을 도출하였다. 표 4.4, 표 4.5, 표 4.6에는 이상치 처리(원본, RANSAC, Z-score)에 따라 Symbolic Regression(SR), 선형, 지수 모델의 수식을 정리하였다.

모든 모델의 경우 시간에 따른 열화를 분석할 수 있는 연속 모델로 재구성함으

로써 열화 해상도를 향상시킨다.

선형 및 지수 모델의 계수와 기울기는 SR 모델의 열화 추세와 유사한 범위를 보였으며, 방법에 따라 계수 값에 차이가 발생하더라도 열화 속도의 상대적인 순서는 비슷한 것으로 확인된다. 이는 세 가지 전처리 - 모델의 모든 조합에서 열화 추세를 안정적으로 재현하고 있음을 의미한다.



| 조건                       | SR 열화모델식                                   | 선형 열화모델식                         | 지수 열화 모델식                            |
|--------------------------|--|----------------------------------|--------------------------------------|
| 1_UV-Protected_100_B_off | $99.5902 + t^{*}(-0.0075862887)$           | $y = -0.007587 * t + 99.590456$  | $y = \exp(-0.000083 * t + 4.602856)$ |
| 1_UV-Protected_100_B_on  | $99.37868 - 0.009618304*t$                 | $y = -0.009618 * t + 99.378671$  | $y = \exp(-0.000108 * t + 4.602011)$ |
| 1_UV-Protected_100_G_off | $99.876236 + t^{*}(-0.012778154)$          | $y = -0.012778 * t + 99.876248$  | $y = \exp(-0.000148 * t + 4.610348)$ |
| 1_UV-Protected_100_G_on  | $100.833496 + t^{*}(-0.018921105)$         | $y = -0.018921 * t + 100.833422$ | $y = \exp(-0.000240 * t + 4.632128)$ |
| 1_UV-Protected_100_R_off | $\sqrt{2242.8735 - t} + 51.915363$         | $y = -0.015428 * t + 101.051577$ | $y = \exp(-0.000184 * t + 4.626440)$ |
| 1_UV-Protected_100_R_on  | $102.427635 - 0.024292456*t$               | $y = -0.024292 * t + 102.428060$ | $y = \exp(-0.000332 * t + 4.664326)$ |
| 1_UV-Protected_100_W_off | $100.28125 + t^{*}(-0.0016450898)$         | $y = -0.001645 * t + 100.281529$ | $y = \exp(-0.000017 * t + 4.608048)$ |
| 1_UV-Protected_100_W_on  | $100.43722 + t^{*}(-0.0023164477)$         | $y = -0.002316 * t + 100.437210$ | $y = \exp(-0.000024 * t + 4.609679)$ |
| 1_UV-Protected_80_B_off  | $99.86478 + t^{*}(-0.0035258753)$          | $y = -0.003526 * t + 99.864775$  | $y = \exp(-0.000037 * t + 4.604159)$ |
| 1_UV-Protected_80_B_on   | $\sqrt{10005.546 - t}$                     | $y = -0.005007 * t + 99.851883$  | $y = \exp(-0.000053 * t + 4.604470)$ |
| 1_UV-Protected_80_G_off  | $t^{*}(-0.00421593) - 1^{*}(-99.98348)$    | $y = -0.004216 * t + 99.983591$  | $y = \exp(-0.000044 * t + 4.605542)$ |
| 1_UV-Protected_80_G_on   | $\sqrt{9907.281 - t}$                      | $y = -0.005780 * t + 100.075113$ | $y = \exp(-0.000061 * t + 4.607057)$ |
| 1_UV-Protected_80_R_off  | $100.493164 + t^{*}(-0.0040318896)$        | $y = -0.004034 * t + 100.497116$ | $y = \exp(-0.000042 * t + 4.610666)$ |
| 1_UV-Protected_80_R_on   | $\sqrt{10081.891 - t}$                     | $y = -0.005421 * t + 100.650539$ | $y = \exp(-0.000057 * t + 4.612708)$ |
| 1_UV-Protected_80_W_off  | $100.53647 - 0.00081834977*t$              | $y = -0.000818 * t + 100.536472$ | $y = \exp(-0.000008 * t + 4.610523)$ |
| 1_UV-Protected_80_W_on   | $100.66226 + t^{*}(-0.00091137)$           | $y = -0.000911 * t + 100.662255$ | $y = \exp(-0.000009 * t + 4.611752)$ |
| 2_Standard_100_B_off     | $99.98071 - 0.007983306*t$                 | $y = -0.007983 * t + 99.980730$  | $y = \exp(-0.000087 * t + 4.606857)$ |
| 2_Standard_100_B_on      | $100.25 + t^{*}(-0.010564927)$             | $y = -0.010724 * t + 100.433100$ | $y = \exp(-0.000120 * t + 4.613642)$ |
| 2_Standard_100_G_off     | $100.80853 - 0.014971764*t$                | $y = -0.014972 * t + 100.808699$ | $y = \exp(-0.000178 * t + 4.622718)$ |
| 2_Standard_100_G_on      | $102.142204 + t^{*}(-0.02348185)$          | $y = -0.023482 * t + 102.142065$ | $y = \exp(-0.000317 * t + 4.658345)$ |
| 2_Standard_100_R_off     | $101.196175 + t^{*}(-0.018380111)$         | $y = -0.018380 * t + 101.196163$ | $y = \exp(-0.000231 * t + 4.634046)$ |
| 2_Standard_100_R_on      | $102.356445 + t^{*}(-0.02843361)$          | $y = -0.028434 * t + 102.356477$ | $y = \exp(-0.000417 * t + 4.679976)$ |
| 2_Standard_100_W_off     | $t^{*}(-0.0019308815) - 1^{*}(-100.29864)$ | $y = -0.001931 * t + 100.298638$ | $y = \exp(-0.000020 * t + 4.608162)$ |
| 2_Standard_100_W_on      | $100.65852 + t^{*}(-0.002958546)$          | $y = -0.002959 * t + 100.658496$ | $y = \exp(-0.000030 * t + 4.611952)$ |
| 2_Standard_80_B_off      | $100.58956 - 0.0034033547*t$               | $y = -0.003403 * t + 100.589575$ | $y = \exp(-0.000035 * t + 4.611268)$ |
| 2_Standard_80_B_on       | $\sqrt{10136.813 - t}$                     | $y = -0.005027 * t + 100.560326$ | $y = \exp(-0.000053 * t + 4.611430)$ |
| 2_Standard_80_G_off      | $\sqrt{10255.826 - t}$                     | $y = -0.004390 * t + 100.568343$ | $y = \exp(-0.000046 * t + 4.611312)$ |
| 2_Standard_80_G_on       | $100.92379 + t^{*}(-0.0069966116)$         | $y = -0.006997 * t + 100.923781$ | $y = \exp(-0.000075 * t + 4.616032)$ |
| 2_Standard_80_R_off      | $\sqrt{10224.675 - t}$                     | $y = -0.004301 * t + 100.321511$ | $y = \exp(-0.000045 * t + 4.608941)$ |
| 2_Standard_80_R_on       | $\sqrt{9914.305 - t}$                      | $y = -0.006549 * t + 100.849687$ | $y = \exp(-0.000070 * t + 4.615249)$ |
| 2_Standard_80_W_off      | $99.805954 - 10.74279/(106.33058 - t)$     | $y = -0.000615 * t + 100.536466$ | $y = \exp(-0.000006 * t + 4.610477)$ |
| 2_Standard_80_W_on       | $100.76208 + t^{*}(-0.0009923959)$         | $y = -0.000992 * t + 100.761770$ | $y = \exp(-0.000010 * t + 4.612739)$ |

표 4.4 Rawdata의 각 시험조건 및 열화 모델별 수식 도출

| 조건                       | SR 열화모델식                                    | 선형 열화모델식                         | 지수 열화 모델식                              |
|--------------------------|---|----------------------------------|--|
| 1_UV-Protected_100_B_off | $99.5902 + t^{*}(-0.0075862887)$            | $y = -0.00758665 * t + 99.5905$  | $y = \exp(-8.2528e-05 * t + 4.60286)$  |
| 1_UV-Protected_100_B_on  | $99.37868 - 0.009618304*t$                  | $y = -0.00961844 * t + 99.3787$  | $y = \exp(-0.000107719 * t + 4.60201)$ |
| 1_UV-Protected_100_G_off | $99.876236 + t^{*}(-0.012778154)$           | $y = -0.0127782 * t + 99.8762$   | $y = \exp(-0.00014821 * t + 4.61035)$  |
| 1_UV-Protected_100_G_on  | $100.833496 + t^{*}(-0.018921105)$          | $y = -0.0189211 * t + 100.833$   | $y = \exp(-0.000240242 * t + 4.63213)$ |
| 1_UV-Protected_100_R_off | $\text{sqrt}(2242.8735 - t) + 51.915363$    | $y = -0.0154282 * t + 101.052$   | $y = \exp(-0.000184259 * t + 4.62644)$ |
| 1_UV-Protected_100_R_on  | $102.427635 - 0.024292456*t$                | $y = -0.0242924 * t + 102.428$   | $y = \exp(-0.000331994 * t + 4.66433)$ |
| 1_UV-Protected_100_W_off | $100.23778 + t^{*}(-0.0016113764)$          | $y = -0.00161144 * t + 100.238$  | $y = \exp(-1.63438e-05 * t + 4.60761)$ |
| 1_UV-Protected_100_W_on  | $100.33594 + t^{*}(-0.0022567974)$          | $y = -0.00225498 * t + 100.332$  | $y = \exp(-2.30076e-05 * t + 4.60863)$ |
| 1_UV-Protected_80_B_off  | $99.86478 + t^{*}(-0.0035258753)$           | $y = -0.00352588 * t + 99.8648$  | $y = \exp(-3.66028e-05 * t + 4.60416)$ |
| 1_UV-Protected_80_B_on   | $\text{sqrt}(10005.546 - t)$                | $y = -0.00500704 * t + 99.8519$  | $y = \exp(-5.29391e-05 * t + 4.60447)$ |
| 1_UV-Protected_80_G_off  | $t^{*}(-0.00421593) - 1^{*}(-99.98348)$     | $y = -0.00421609 * t + 99.9836$  | $y = \exp(-4.40653e-05 * t + 4.60554)$ |
| 1_UV-Protected_80_G_on   | $\text{sqrt}(9907.281 - t)$                 | $y = -0.00578003 * t + 100.075$  | $y = \exp(-6.14869e-05 * t + 4.60706)$ |
| 1_UV-Protected_80_R_off  | $100.493164 + t^{*}(-0.0040318896)$         | $y = -0.00403438 * t + 100.497$  | $y = \exp(-4.19119e-05 * t + 4.61067)$ |
| 1_UV-Protected_80_R_on   | $\text{sqrt}(10081.891 - t)$                | $y = -0.00542063 * t + 100.651$  | $y = \exp(-5.71555e-05 * t + 4.61271)$ |
| 1_UV-Protected_80_W_off  | $100.45472 + t^{*}(-0.0007559876)$          | $y = -0.000755971 * t + 100.455$ | $y = \exp(-7.5905e-06 * t + 4.60972)$  |
| 1_UV-Protected_80_W_on   | $t^{*}(-0.00075390283) - 1^{*}(-100.45692)$ | $y = -0.000753858 * t + 100.457$ | $y = \exp(-7.57028e-06 * t + 4.60974)$ |
| 2_Standard_100_B_off     | $99.98071 - 0.007983306*t$                  | $y = -0.00798327 * t + 99.9807$  | $y = \exp(-8.69208e-05 * t + 4.60686)$ |
| 2_Standard_100_B_on      | $100.25 + t^{*}(-0.010564927)$              | $y = -0.0107237 * t + 100.433$   | $y = \exp(-0.000120399 * t + 4.61364)$ |
| 2_Standard_100_G_off     | $100.80853 - 0.014971764*t$                 | $y = -0.0149718 * t + 100.809$   | $y = \exp(-0.000177645 * t + 4.62272)$ |
| 2_Standard_100_G_on      | $102.142204 + t^{*}(-0.02348185)$           | $y = -0.0234817 * t + 102.142$   | $y = \exp(-0.00031721 * t + 4.65835)$  |
| 2_Standard_100_R_off     | $101.196175 + t^{*}(-0.018380111)$          | $y = -0.0183799 * t + 101.196$   | $y = \exp(-0.000230542 * t + 4.63405)$ |
| 2_Standard_100_R_on      | $102.356445 + t^{*}(-0.02843361)$           | $y = -0.0284337 * t + 102.356$   | $y = \exp(-0.000416952 * t + 4.67998)$ |
| 2_Standard_100_W_off     | $100.2913 - 0.0018951203*t$                 | $y = -0.00189518 * t + 100.291$  | $y = \exp(-1.9243e-05 * t + 4.60809)$  |
| 2_Standard_100_W_on      | $100.65852 + t^{*}(-0.002958546)$           | $y = -0.00295853 * t + 100.658$  | $y = \exp(-3.02832e-05 * t + 4.61195)$ |
| 2_Standard_80_B_off      | $100.58956 - 0.0034033547*t$                | $y = -0.00340349 * t + 100.59$   | $y = \exp(-3.49592e-05 * t + 4.61127)$ |
| 2_Standard_80_B_on       | $\text{sqrt}(10136.813 - t)$                | $y = -0.00502671 * t + 100.56$   | $y = \exp(-5.2665e-05 * t + 4.61143)$  |
| 2_Standard_80_G_off      | $\text{sqrt}(10255.826 - t)$                | $y = -0.00438972 * t + 100.568$  | $y = \exp(-4.56176e-05 * t + 4.61131)$ |
| 2_Standard_80_G_on       | $100.92379 + t^{*}(-0.0069966116)$          | $y = -0.00699661 * t + 100.924$  | $y = \exp(-7.48882e-05 * t + 4.61603)$ |
| 2_Standard_80_R_off      | $\text{sqrt}(10224.675 - t)$                | $y = -0.00430056 * t + 100.322$  | $y = \exp(-4.48614e-05 * t + 4.60894)$ |
| 2_Standard_80_R_on       | $\text{sqrt}(9914.305 - t)$                 | $y = -0.00654864 * t + 100.85$   | $y = \exp(-6.99801e-05 * t + 4.61525)$ |
| 2_Standard_80_W_off      | $99.97652 + 9.01026/(t - 106.77205)$        | $y = -0.00042481 * t + 100.507$  | $y = \exp(-4.23293e-06 * t + 4.61017)$ |
| 2_Standard_80_W_on       | $100.73066 + t^{*}(-0.0008284341)$          | $y = -0.000828234 * t + 100.73$  | $y = \exp(-8.2995e-06 * t + 4.61242)$  |

표 4.5 Z-score 의 각 시험조건 및 열화 모델별 수식 도출

| 조건                       | SR 열화모델식                               | 선형 열화모델식                         | 지수 열화 모델식                            |
|--------------------------|--|----------------------------------|--------------------------------------|
| 1_UV-Protected_100_B_off | $99.5902 + t*(-0.0075862887)$          | $y = -0.007587 * t + 99.590456$  | $y = \exp(-0.000083 * t + 4.602856)$ |
| 1_UV-Protected_100_B_on  | $99.37868 - 0.009618304*t$             | $y = -0.009618 * t + 99.378671$  | $y = \exp(-0.000108 * t + 4.602011)$ |
| 1_UV-Protected_100_G_off | $99.90332 + t*(-0.012906162)$          | $y = -0.012906 * t + 99.902552$  | $y = \exp(-0.000150 * t + 4.610704)$ |
| 1_UV-Protected_100_G_on  | $100.86304 + t*(-0.019116396)$         | $y = -0.019114 * t + 100.859429$ | $y = \exp(-0.000243 * t + 4.632507)$ |
| 1_UV-Protected_100_R_off | $\sqrt{2242.8735 - t} + 51.915363$     | $y = -0.015428 * t + 101.051577$ | $y = \exp(-0.000184 * t + 4.626440)$ |
| 1_UV-Protected_100_R_on  | $\sqrt{10127.171 - 3.773414*t}$        | $y = -0.024356 * t + 102.328838$ | $y = \exp(-0.000333 * t + 4.662152)$ |
| 1_UV-Protected_100_W_off | $100.28125 + t*(-0.0016450898)$        | $y = -0.001645 * t + 100.281529$ | $y = \exp(-0.000017 * t + 4.608048)$ |
| 1_UV-Protected_100_W_on  | $100.33594 + t*(-0.0022567974)$        | $y = -0.002255 * t + 100.331626$ | $y = \exp(-0.000023 * t + 4.608631)$ |
| 1_UV-Protected_80_B_off  | $99.86478 + t*(-0.0035258753)$         | $y = -0.003526 * t + 99.864775$  | $y = \exp(-0.000037 * t + 4.604159)$ |
| 1_UV-Protected_80_B_on   | $\sqrt{10005.546 - t}$                 | $y = -0.005007 * t + 99.851883$  | $y = \exp(-0.000053 * t + 4.604470)$ |
| 1_UV-Protected_80_G_off  | $t*(-0.00421593) - 1*(-99.98348)$      | $y = -0.004216 * t + 99.983591$  | $y = \exp(-0.000044 * t + 4.605542)$ |
| 1_UV-Protected_80_G_on   | $\sqrt{9907.281 - t}$                  | $y = -0.005780 * t + 100.075113$ | $y = \exp(-0.000061 * t + 4.607057)$ |
| 1_UV-Protected_80_R_off  | $100.493164 + t*(-0.0040318896)$       | $y = -0.004034 * t + 100.497116$ | $y = \exp(-0.000042 * t + 4.610666)$ |
| 1_UV-Protected_80_R_on   | $\sqrt{10081.891 - t}$                 | $y = -0.005421 * t + 100.650539$ | $y = \exp(-0.000057 * t + 4.612708)$ |
| 1_UV-Protected_80_W_off  | $100.53647 - 0.00081834977*t$          | $y = -0.000818 * t + 100.536472$ | $y = \exp(-0.000008 * t + 4.610523)$ |
| 1_UV-Protected_80_W_on   | $100.56741 + t*(-0.00085606636)$       | $y = -0.000856 * t + 100.567308$ | $y = \exp(-0.000009 * t + 4.610827)$ |
| 2_Standard_100_B_off     | $99.98071 - 0.007983306*t$             | $y = -0.007983 * t + 99.980730$  | $y = \exp(-0.000087 * t + 4.606857)$ |
| 2_Standard_100_B_on      | $100.25 + t*(-0.010564927)$            | $y = -0.010724 * t + 100.433100$ | $y = \exp(-0.000120 * t + 4.613642)$ |
| 2_Standard_100_G_off     | $100.80853 - 0.014971764*t$            | $y = -0.014972 * t + 100.808699$ | $y = \exp(-0.000178 * t + 4.622718)$ |
| 2_Standard_100_G_on      | $102.16211 + t*(-0.023731321)$         | $y = -0.023730 * t + 102.159495$ | $y = \exp(-0.000322 * t + 4.657163)$ |
| 2_Standard_100_R_off     | $101.19702 + t*(-0.018384097)$         | $y = -0.018382 * t + 101.196590$ | $y = \exp(-0.000231 * t + 4.634146)$ |
| 2_Standard_100_R_on      | $102.29622 + t*(-0.028692978)$         | $y = -0.028693 * t + 102.296214$ | $y = \exp(-0.000422 * t + 4.676116)$ |
| 2_Standard_100_W_off     | $t*(-0.0019308815) - 1*(-100.29864)$   | $y = -0.001931 * t + 100.298638$ | $y = \exp(-0.000020 * t + 4.608162)$ |
| 2_Standard_100_W_on      | $100.65852 + t*(-0.002958546)$         | $y = -0.002959 * t + 100.658496$ | $y = \exp(-0.000030 * t + 4.611952)$ |
| 2_Standard_80_B_off      | $100.58956 - 0.0034033547*t$           | $y = -0.003403 * t + 100.589575$ | $y = \exp(-0.000035 * t + 4.611268)$ |
| 2_Standard_80_B_on       | $\sqrt{10136.813 - t}$                 | $y = -0.005027 * t + 100.560326$ | $y = \exp(-0.000053 * t + 4.611430)$ |
| 2_Standard_80_G_off      | $\sqrt{10255.826 - t}$                 | $y = -0.004390 * t + 100.568343$ | $y = \exp(-0.000046 * t + 4.611312)$ |
| 2_Standard_80_G_on       | $100.92379 + t*(-0.0069966116)$        | $y = -0.006997 * t + 100.923781$ | $y = \exp(-0.000075 * t + 4.616032)$ |
| 2_Standard_80_R_off      | $\sqrt{10224.675 - t}$                 | $y = -0.004301 * t + 100.321511$ | $y = \exp(-0.000045 * t + 4.608941)$ |
| 2_Standard_80_R_on       | $\sqrt{9910.454 - t}$                  | $y = -0.006553 * t + 100.832835$ | $y = \exp(-0.000070 * t + 4.615064)$ |
| 2_Standard_80_W_off      | $99.805954 - 10.74279/(106.33058 - t)$ | $y = -0.000615 * t + 100.536466$ | $y = \exp(-0.000006 * t + 4.610477)$ |
| 2_Standard_80_W_on       | $100.76208 + t*(-0.0009923959)$        | $y = -0.000992 * t + 100.761770$ | $y = \exp(-0.000010 * t + 4.612739)$ |

표 4.6 RANSAC의 각 시험조건 및 열화 모델별 수식 도출

#### 4.1.5 최종측정치 구간에서의 열화 예측 정확도 평가

본 절에서는 표 4.7, 표 4.8, 표 4.9과 같이 각 모델의 열화 예측 성능을 평가하기 위해, 0 - 2,030시간에서 학습된 모델식을 통해 2,166시간의 열화를 예측하고 이를 실측값과 비교하였다. 해당 시점은 모델 학습에 전혀 사용되지 않은 시간 구간이며, 열화 모델의 성능을 직접적으로 평가할 수 있다.

열화 모델은 시간 경과에 따라 오차가 누적되는 특성을 가지므로, 학습 구간에서의 낮은 MSE가 예측 시점이 장기화될수록 오차가 더욱 커지게 된다. 따라서 본 연구에서는 최종 측정 시점에서의 예측 오차를 평가 항목으로 선정하여 모델의 수명 예측 신뢰성을 평가하였다.

비록 현재 제시한 예측구간의 100시간은 일반적인 시간보다 많이 적지만, 열화 모델의 특성상 초기의 작은 오차가 시간에 따라 누적되므로 시간이 증가하면 관련 오차가 증가하는 경향이 있다. 따라서 2,166시간에서 측정치와 예측치의 오차 평가는 모델의 예측 정확도를 평가하는 데 의미 있는 지표가 된다.

| 조건                       | 2,166시간<br>실제 초기치<br>대비 열화율 | 2,166시간<br>예상 초기치 대비 열화율 |       |       |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------|-------|
|                          |                             | SR모델                     | 선형모델  | 지수모델  |
| 1_UV-Protected_100_B_off | 81.90                       | 83.16                    | 83.16 | 83.35 |
| 1_UV-Protected_100_B_on  | 76.35                       | 78.55                    | 78.55 | 78.89 |
| 1_UV-Protected_100_G_off | 67.85                       | 72.20                    | 72.20 | 72.95 |
| 1_UV-Protected_100_G_on  | 50.40                       | 59.85                    | 59.85 | 61.09 |
| 1_UV-Protected_100_R_off | 60.69                       | 60.68                    | 67.63 | 68.57 |
| 1_UV-Protected_100_R_on  | 38.85                       | 49.81                    | 49.81 | 51.69 |
| 1_UV-Protected_100_W_off | 95.95                       | 96.72                    | 96.72 | 96.66 |
| 1_UV-Protected_100_W_on  | 94.46                       | 95.42                    | 95.42 | 95.36 |
| 1_UV-Protected_80_B_off  | 91.24                       | 92.23                    | 92.23 | 92.21 |
| 1_UV-Protected_80_B_on   | 87.70                       | 88.54                    | 89.01 | 89.09 |
| 1_UV-Protected_80_G_off  | 89.35                       | 90.85                    | 90.85 | 90.94 |
| 1_UV-Protected_80_G_on   | 85.36                       | 87.98                    | 87.56 | 87.79 |
| 1_UV-Protected_80_R_off  | 90.58                       | 91.76                    | 91.76 | 91.81 |
| 1_UV-Protected_80_R_on   | 86.86                       | 88.97                    | 88.91 | 89.05 |
| 1_UV-Protected_80_W_off  | 98.19                       | 98.76                    | 98.76 | 98.81 |
| 1_UV-Protected_80_W_on   | 97.82                       | 98.69                    | 98.69 | 98.72 |
| 2_Standard_100_B_off     | 80.52                       | 82.69                    | 82.69 | 82.96 |
| 2_Standard_100_B_on      | 73.77                       | 77.37                    | 77.20 | 77.77 |
| 2_Standard_100_G_off     | 60.88                       | 68.38                    | 68.38 | 69.21 |
| 2_Standard_100_G_on      | 42.43                       | 51.28                    | 51.28 | 53.08 |
| 2_Standard_100_R_off     | 50.63                       | 61.38                    | 61.39 | 62.41 |
| 2_Standard_100_R_on      | 33.04                       | 40.77                    | 40.77 | 43.67 |
| 2_Standard_100_W_off     | 95.04                       | 96.12                    | 96.12 | 96.05 |
| 2_Standard_100_W_on      | 92.44                       | 94.25                    | 94.25 | 94.35 |
| 2_Standard_80_B_off      | 91.72                       | 93.22                    | 93.22 | 93.27 |
| 2_Standard_80_B_on       | 87.88                       | 89.28                    | 89.67 | 89.71 |
| 2_Standard_80_G_off      | 89.12                       | 89.94                    | 91.06 | 91.07 |
| 2_Standard_80_G_on       | 82.90                       | 85.77                    | 85.77 | 85.93 |
| 2_Standard_80_R_off      | 88.84                       | 89.77                    | 91.01 | 91.06 |
| 2_Standard_80_R_on       | 83.30                       | 88.02                    | 86.66 | 86.80 |
| 2_Standard_80_W_off      | 98.40                       | 99.81                    | 99.20 | 99.23 |
| 2_Standard_80_W_on       | 97.77                       | 98.61                    | 98.61 | 98.60 |

표 4.7 원본데이터의 각 측정치와 예측치 비교

| 조건                       | 2,166시간<br>실제 초기치<br>대비 열화율 | 2,166시간<br>예상 초기치 대비 열화율 |       |       |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------|-------|
|                          |                             | SR모델                     | 선형모델  | 지수모델  |
| 1_UV-Protected_100_B_off | 81.90                       | 83.16                    | 83.16 | 83.44 |
| 1_UV-Protected_100_B_on  | 76.35                       | 78.55                    | 78.55 | 78.94 |
| 1_UV-Protected_100_G_off | 67.85                       | 72.20                    | 72.20 | 72.92 |
| 1_UV-Protected_100_G_on  | 50.40                       | 59.85                    | 59.85 | 61.05 |
| 1_UV-Protected_100_R_off | 60.69                       | 60.68                    | 67.63 | 68.53 |
| 1_UV-Protected_100_R_on  | 38.85                       | 49.81                    | 49.81 | 51.69 |
| 1_UV-Protected_100_W_off | 95.95                       | 96.75                    | 96.75 | 96.76 |
| 1_UV-Protected_100_W_on  | 94.46                       | 95.45                    | 95.45 | 95.47 |
| 1_UV-Protected_80_B_off  | 91.24                       | 92.23                    | 92.23 | 92.28 |
| 1_UV-Protected_80_B_on   | 87.70                       | 88.54                    | 89.01 | 89.10 |
| 1_UV-Protected_80_G_off  | 89.35                       | 90.85                    | 90.85 | 90.93 |
| 1_UV-Protected_80_G_on   | 85.36                       | 87.98                    | 87.56 | 87.70 |
| 1_UV-Protected_80_R_off  | 90.58                       | 91.76                    | 91.76 | 91.83 |
| 1_UV-Protected_80_R_on   | 86.86                       | 88.97                    | 88.91 | 89.02 |
| 1_UV-Protected_80_W_off  | 98.19                       | 98.82                    | 98.82 | 98.82 |
| 1_UV-Protected_80_W_on   | 97.82                       | 98.82                    | 98.82 | 98.82 |
| 2_Standard_100_B_off     | 80.52                       | 82.69                    | 82.69 | 82.98 |
| 2_Standard_100_B_on      | 73.77                       | 77.37                    | 77.21 | 77.70 |
| 2_Standard_100_G_off     | 60.88                       | 68.38                    | 68.38 | 69.27 |
| 2_Standard_100_G_on      | 42.43                       | 51.28                    | 51.28 | 53.05 |
| 2_Standard_100_R_off     | 50.63                       | 61.38                    | 61.39 | 62.47 |
| 2_Standard_100_R_on      | 33.04                       | 40.77                    | 40.77 | 43.68 |
| 2_Standard_100_W_off     | 95.04                       | 96.19                    | 96.19 | 96.20 |
| 2_Standard_100_W_on      | 92.44                       | 94.25                    | 94.25 | 94.29 |
| 2_Standard_80_B_off      | 91.72                       | 93.22                    | 93.22 | 93.27 |
| 2_Standard_80_B_on       | 87.88                       | 89.28                    | 89.67 | 89.78 |
| 2_Standard_80_G_off      | 89.12                       | 89.94                    | 91.06 | 91.15 |
| 2_Standard_80_G_on       | 82.90                       | 85.77                    | 85.77 | 85.95 |
| 2_Standard_80_R_off      | 88.84                       | 89.77                    | 91.01 | 91.08 |
| 2_Standard_80_R_on       | 83.30                       | 88.02                    | 86.67 | 86.81 |
| 2_Standard_80_W_off      | 98.40                       | 99.98                    | 99.59 | 99.58 |
| 2_Standard_80_W_on       | 97.77                       | 98.94                    | 98.94 | 98.93 |

표 4.8 Z-Score로 이상치 제거 데이터의 각 측정치와 예측치 비교

| 조건                       | 2,166시간<br>실제 초기치<br>대비 열화율 | 2,166시간<br>예상 초기치 대비 열화율 |       |       |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------|-------|
|                          |                             | SR모델                     | 선형모델  | 지수모델  |
| 1_UV-Protected_100_B_off | 81.90                       | 83.16                    | 83.16 | 83.35 |
| 1_UV-Protected_100_B_on  | 76.35                       | 78.55                    | 78.55 | 78.89 |
| 1_UV-Protected_100_G_off | 67.85                       | 71.95                    | 71.95 | 72.66 |
| 1_UV-Protected_100_G_on  | 50.40                       | 59.46                    | 59.46 | 60.71 |
| 1_UV-Protected_100_R_off | 60.69                       | 60.68                    | 67.63 | 68.57 |
| 1_UV-Protected_100_R_on  | 38.85                       | 44.20                    | 49.57 | 51.46 |
| 1_UV-Protected_100_W_off | 95.95                       | 96.72                    | 96.72 | 96.66 |
| 1_UV-Protected_100_W_on  | 94.46                       | 95.45                    | 95.45 | 95.47 |
| 1_UV-Protected_80_B_off  | 91.24                       | 92.23                    | 92.23 | 92.21 |
| 1_UV-Protected_80_B_on   | 87.70                       | 88.54                    | 89.01 | 89.09 |
| 1_UV-Protected_80_G_off  | 89.35                       | 90.85                    | 90.85 | 90.94 |
| 1_UV-Protected_80_G_on   | 85.36                       | 87.98                    | 87.56 | 87.79 |
| 1_UV-Protected_80_R_off  | 90.58                       | 91.76                    | 91.76 | 91.81 |
| 1_UV-Protected_80_R_on   | 86.86                       | 88.97                    | 88.91 | 89.05 |
| 1_UV-Protected_80_W_off  | 98.19                       | 98.76                    | 98.76 | 98.81 |
| 1_UV-Protected_80_W_on   | 97.82                       | 98.71                    | 98.71 | 98.63 |
| 2_Standard_100_B_off     | 80.52                       | 82.69                    | 82.69 | 82.96 |
| 2_Standard_100_B_on      | 73.77                       | 77.37                    | 77.20 | 77.77 |
| 2_Standard_100_G_off     | 60.88                       | 68.38                    | 68.38 | 69.21 |
| 2_Standard_100_G_on      | 42.43                       | 50.76                    | 50.76 | 52.44 |
| 2_Standard_100_R_off     | 50.63                       | 61.38                    | 61.38 | 62.41 |
| 2_Standard_100_R_on      | 33.04                       | 40.15                    | 40.15 | 43.04 |
| 2_Standard_100_W_off     | 95.04                       | 96.12                    | 96.12 | 96.05 |
| 2_Standard_100_W_on      | 92.44                       | 94.25                    | 94.25 | 94.35 |
| 2_Standard_80_B_off      | 91.72                       | 93.22                    | 93.22 | 93.27 |
| 2_Standard_80_B_on       | 87.88                       | 89.28                    | 89.67 | 89.71 |
| 2_Standard_80_G_off      | 89.12                       | 89.94                    | 91.06 | 91.07 |
| 2_Standard_80_G_on       | 82.90                       | 85.77                    | 85.77 | 85.93 |
| 2_Standard_80_R_off      | 88.84                       | 89.77                    | 91.01 | 91.06 |
| 2_Standard_80_R_on       | 83.30                       | 88.00                    | 86.64 | 86.79 |
| 2_Standard_80_W_off      | 98.40                       | 99.81                    | 99.20 | 99.23 |
| 2_Standard_80_W_on       | 97.77                       | 98.61                    | 98.61 | 98.60 |

표 4.9 Z-Score로 이상치 제거 데이터의 각 측정치와 예측치 비교

표 4.10은 이상치 제거 방법에 따른 SR, 선형, 지수 모델의 평균 MSE 비교 결과를 정리한 것이다. SR 모델의 예측 MSE는 원본 데이터와 Z-Score 조건에서 유사한 수준을 보였으나, RANSAC 적용 시 15.87로 감소하여 가장 우수한 성능을 나타냈다. 선형 모델 역시 RANSAC 조건에서 19.81로 상대적으로 낮은 오차를 보였으며, 지수 모델은 모든 조건에서 가장 큰 오차를 기록하였다.

표 4.10 열화 예측에 대한 MSE 평가

| 이상치 제거 방법 | 학습용 SR MSE 평균치 | 선형 MSE 평균치 | 지수형 MSE 평균치 |
|-----------|----------------|------------|-------------|
| 원본데이터     | 19.53          | 20.83      | 27.95       |
| Z-Score   | 19.59          | 20.90      | 28.04       |
| RANSAC    | 15.87          | 19.81      | 26.02       |

열화 예측의 경우 기존 모델(선형, 지수) 사용 시 RANSAC 적용할 경우 MSE에 대한 큰 이득이 없으나, SR을 통한 모델 피팅을 통해 MSE에 대한 큰 이득을 볼 수 있는 것을 확인하였다. 이와 같은 평가는 기존 중간 구간의 적합도(MSE)를 확인하는 방법과 다르게, 모델의 열화 예측 성능을 평가할 수 있다는 점에서 의의가 있다. 본 연구에서는 이러한 분석을 통해 RANSAC 기반 Symbolic Regression 모델이 열화 추정에 가장 적합함을 확인하였다.

## 4.2. 조건에 따른 열화 평가

본 절에서는 앞서 도출한 RANSAC - SR 열화 모델을 이용하여 각 조건에 대한 열화를 평가하였다. 이와 같이 평가된 열화율로 조건(밝기, 발광 색상, 자외선 노출)에 따른 열화 특성을 분석하였다. 표 4.11은 각 조건별 초기치 대비 열화율의 평균과 표준편차를 정리한 결과를 나타내며, 조건의 유의성은 유의수준 0.05에서 확인하였다.

각 조건에 대한 통계적 유의성 평가는 다음과 같다.

- Sample 조건은 통계적으로 유의하지 않았다.
- 휘도 조건은 통계적으로 매우 유의하였다.
- 발광 색상에 차이는 통계적으로 매우 유의하였다.
- 자외선 노출 조건에서의 차이는 통계적으로 유의하였다.

표 4.11 조건별 열화율 평균 및 표준편차

| Factor      | Level        | N  | 초기치 대비 열화율 평균 | 열화율 표준편차 | P-value |
|-------------|--------------|----|---------------|----------|---------|
| Sample      | UV-Protected | 16 | 81.6          | 17.6     | 0.646   |
|             | Standard     | 16 | 83.0          | 16.0     |         |
| Brightness  | 100%         | 16 | 72.6          | 18.6     | 1.21e-6 |
|             | 180%         | 16 | 92.0          | 4.5      |         |
| Color       | Blue         | 8  | 85.6          | 6.0      | 1.29e-5 |
|             | Green        | 8  | 75.6          | 15.3     |         |
|             | Red          | 8  | 70.6          | 21.6     |         |
|             | White        | 8  | 97.3          | 2.0      |         |
| UV Exposure | off          | 16 | 85.5          | 13.0     | 0.046   |
|             | on           | 16 | 79.1          | 19.5     |         |

그림 4.5는 전체 주효과도를 나타낸 것으로, 색상과 휘도가 열화에 큰 영향을 주는 것을 시각적으로 확인할 수 있다.

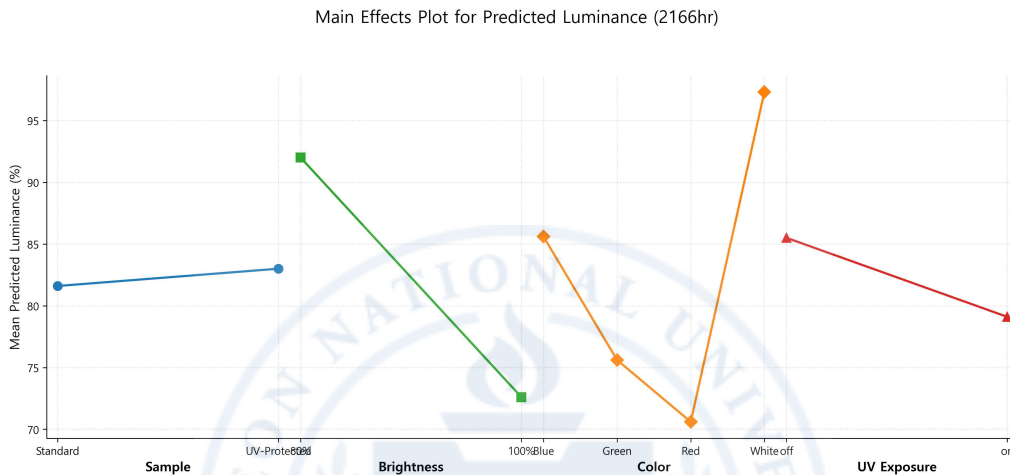


그림 4.5 전체 주효과도

제시된 열화율 데이터를 기준으로 주요 요인의 영향성을 분석한 결과는 다음과 같다.

- UV 조사 여부는 조사 조건에서 약 6.4%p 낮아졌다. 이는 자외선 조사 시 광화학적 열화가 심화되어 열화가 가속된 것으로 해석된다.
- 필름에 따른 차이는 약 1.4%p의 미세한 차이만이 나타났다. 이는 보호필름의 유무가 본 시험 조건에서 열화 억제 효과가 없었음을 나타낸다.
- 휘도는 100% 조건이 약 19.4%p 높은 유지율을 보였다. 구동 전류 밀도와 발열 증가가 고휘도 조건에서 열화가 가속된 것으로 해석된다.
- 발광 색상은 열화율을 결정하는 가장 영향력 높은 요인으로 나타났다. White는 평균 열화율 97.3%로 가장 높은 유지율을 보였으며, Blue, Green, Red 순으로 열화율

이 감소하였다. 특히 Red는 가장 큰 열화량 70.6%를 나타낸다.

즉, 발광색과 구동 밝기가 제품 열화에 가장 큰 영향을 미치며, UV 노출은 중간 수준의 영향만을 보이고, 보호필름의 효과는 거의 없음을 나타낸다.

이러한 UV 기인 열화 현상은 높은 에너지의 자외선이 유기 발광층 내 분자 결합을 직접적으로 절단(Bond breaking)하거나, 광산화(Photo-oxidation) 반응을 유발하여 비복사 재결합 센터(Non-radiative recombination center)를 형성하기 때문에 판단된다[16]. UV 조사가 유기 박막의 화학적 변형을 일으켜 소자의 구동 전압 상승과 휘도 저하를 가속화함을 보고한 바 있으며, 본 실험에서 관찰된 급격한 초기 휘도 감소 역시 이러한 광화학적 손상 메커니즘에 기인한 것으로 분석된다.

그리고 기존 OLED 열화 관련 연구에서는 Blue가 가장 짧은 수명을 갖는 것으로 널리 알려져 있다.[7] 그러나 본 연구의 결과에서는 White가 가장 높은 유지율을 보이고 Red가 가장 낮은 유지율을 보이는 등 일반 OLED 구조에서 보고되는 경향과 다소 상이한 패턴이 나타났다. 이러한 차이는 투명 OLED가 기존 RGB OLED와 다른 발광층 구성 및 재료 조합을 사용하는 점에서 열화 메커니즘이 다르게 형성한 것으로 추정한다.

이상의 결과는 단순 회귀식 기반의 기존 열화 해석과 같이 본 연구에서 적용한 RANSAC - SR 모델이 조건별 열화 추정이 가능한 것으로 확인하였다.

### 4.3. 이상치 제거 및 열화 모델에 대한 최종 평가

앞선 4.1절에서는 그림 4.6과 같이 이상치 제거 방법과 열화 모델 조합에 대한 이상치 제거 성능을 비교하였으며, 4.2절에서는 그림 4.7 두 조합에 대한 예측 성능을 비교하였고, RANSAC 기반 이상치 제거와 Symbolic Regression(SR)을 결합한 모델을 적용하여 시험 조건별 열화율을 정량적으로 분석하였다.

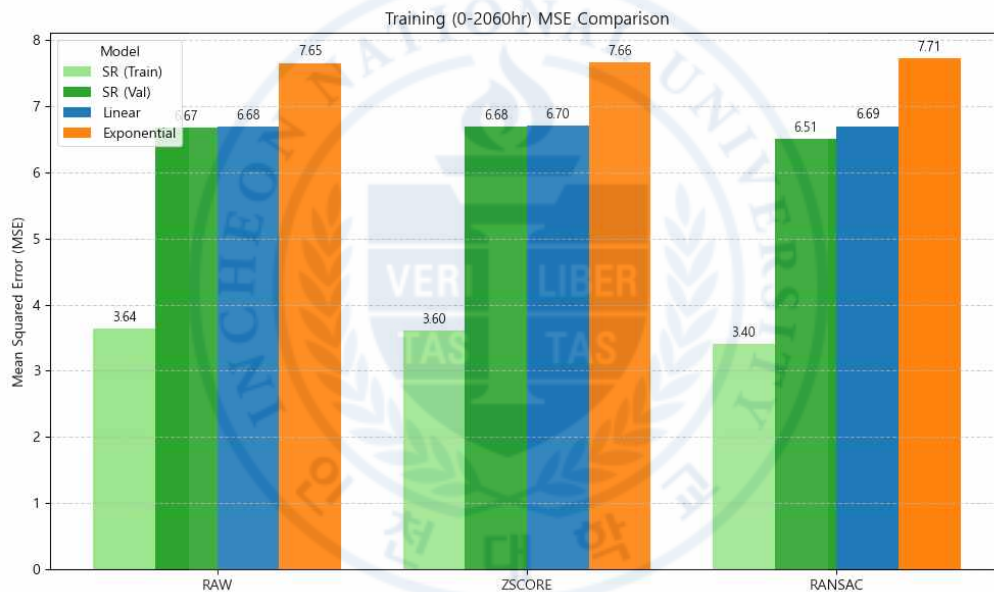


그림 4.6 Training MES 평가

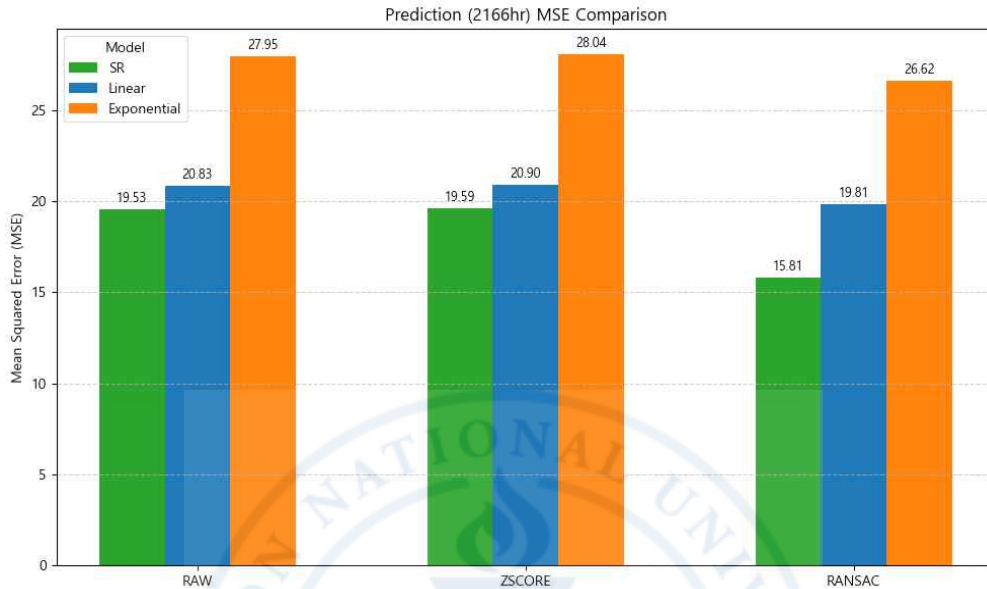


그림 4.7 Prediction MSE 평가

본 절에서는 이러한 분석 결과를 종합하여, RANSAC - SR 기반 열화 분석 방법의 타당성과 최종 열화 모델로서의 적합성을 검증하였다. 그 결과, 해당 모델은 학습 구간에서의 적합도와 예측 구간에서의 예측 정확도를 동시에 만족하는 것으로 확인되었다. 이에 본 논문에서는 RANSAC - SR 기반 모델을 투명 OLED 디스플레이의 최종 열화 모델로 선정하고, 이를 바탕으로 조건별 열화 거동을 정량적으로 분석함으로써 모델의 유효성을 검증하였다. 특히 RANSAC - SR 기반 모델은 기존의 열화 해석보다 실제 고장의 열화 추정치에 대해 높은 정확도를 제공한다는 점에서 연구적 의의를 갖는다.

## 5. 결론

본 연구에서는 투명 OLED 디스플레이의 사용 조건에 따른 열화를 분석 방법으로 RANSAC 기반 이상치 제거와 Symbolic Regression(SR) 결합하여 사용하였다. 시험 조건(보호 필름 유무, 휘도, 색상, UV 조사)을 완전 요인 설계로 구성하여 총 32개 조건에 대해 2,166시간까지 가속시험을 진행한 후 시간에 따른 상대 휘도 변화율을 기반으로 열화 모델 및 예측 성능을 평가하였다.

이상치 제거 방법 평가 결과, Z-score 기반 전처리는 전체 분산에 의존하는 특성으로 인해 추세식에서 통계 내 존재하는 갑작스러운 이상치를 제거하지 못하는 점을 확인하였다. 반면 RANSAC 기반 전처리는 열화 추세를 기준으로 잔차가 큰 이상치를 제거함으로써, Z-score보다 좀 더 유연한 이상치 제거가 가능하였다.

열화 모델 비교에서는 Symbolic Regression이 선형 및 지수 모델 대비 비선형 열화 특성을 보다 유연하게 반영함을 확인하였다. 특히 SR 모델은 제한된 측정 포인트로 구성된 저해상도 열화 데이터를 연속 함수 형태로 재구성함으로써, 시간 축상의 해상도를 향상시키는 특성을 가진다.

동일한 학습 구간(0~2,030 h)을 기준으로 모델을 학습한 뒤 최종 측정 시점(2,166 h)의 예측 성능을 비교한 결과, RANSAC 기반 이상치 제거 후 SR을 적용한 모델(RANSAC-SR)이 Rawdata 및 Z-score 기반 조합뿐만 아니라 선형 및 지수 모델 대비 예측 시점에서 측정치와 예측치 간 오차가 가장 작게 나타났다.

RANSAC-SR 모델은 이상치 제거를 통해 추세를 왜곡하는 이상치에 강건하고, 동시에 Symbolic Regression을 통해 열화 형태를 표현하여 조건별 열화율을 비교·분석하는 데 적합하다. 이러한 결과로 본 연구에서는 열화 예측 성능이 우수한

RANSAC-SR 기반 모델을 열화 분석에 사용하였다.

해당 RANSAC-SR 기반 열화 모델을 통해 조건별 열화를 유의미하게 분석한 결과, 휘도와 색상, UV 조사 여부는 통계적으로 유의함을 확인했지만, 보호 필름 적용 유무에 따른 차이는 유의하지 않았다. 밝기 조건은 80%가 100% 대비 상대 열화가 적으며, 발광 색상에서는 White가 가장 낮은, Red가 가장 높은 열화를 보였다. UV 조건에서는 조사 조건에서 높은 열화를 보였다. 이를 종합하면 본 시험 조건에서 열화율에 미치는 요인의 상대적 영향도는 Color, Brightness, UV Exposure, Sample 순으로 정리되었다. 이와 같이 관련 모델을 통한 열화 분석이 가능하며 통계적으로 유의미한 결과를 얻었음을 확인하였다.

이에 본 연구는 RANSAC과 Symbolic Regression을 결합한 열화 분석 방법을 통해 기존 회귀 기반 열화 분석이 가지는 이상치 처리와 정해진 열화 형태 가정의 한계를 보완하고, 시간에 따른 열화를 해석 가능한 연속 모델로 재구성함으로써 열화 예측 정확도를 향상시키는 방법론을 제시한다. 제안한 방법은 투명 OLED 디스플레이뿐만 아니라 다양한 시계열 열화 데이터를 갖는 디스플레이 및 기능성 소재의 열화 분석과 신뢰성 평가에도 적용 가능할 것으로 판단된다.

본 연구의 한계로는 조건별 반복 샘플 수가 적어서 통계적 검증이 충분하지 않고, 시험 조건이 사용 환경의 복합 스트레스를 모두 반영하지 못한 점이 있다. 향후 연구에서는 샘플 수를 더욱 확보하여 통계적 신뢰성을 높이고, 고온, 습도 등을 연속 변수로 포함한 열화 모델로 확장할 필요가 있다.

## 참고문헌

1. Naqvi, S. M. K. A., Baig, M. F., Farid, T., Nazir, Z., Liu, Z., Cai, W., Chang, S.(2023). Unraveling degradation processes and strategies for enhancing reliability in organic light-emitting diodes. *Nanomaterials*, 13(23), 3020.
2. 이재상 (2021). OLED의 수명과 미래. *인포메이션 디스플레이*, 22(6), 3-12.
3. Sun, G., Bai, Y., Zhang, Z. (2024). Overview of high-power LED life prediction algorithms. *Frontiers in Sustainable Energy Policy*, 3, 1343339.
4. Zhang, J. P., Zong, Y., Meng, Y., Pan, W. G. (2019). A life estimation model applied to organic light-emitting diodes. *Lighting Research & Technology*, 51(5), 761-772.
5. Ibrahim, M. S., Fan, J., Yung, W. K. C., Prisacaru, A., van Driel, W., Fan, X., & Zhang, G. (2020). Machine learning and digital twin driven diagnostics and prognostics of light-emitting diodes: A review. *Laser & Photonics Reviews*, 14(12), 2000254.
6. Rudin, C. (2019). Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nature Machine Intelligence*, 1(5), 206-215.
7. Tankelevičiūtė, E., Samuel, I. D. W. (2024). The blue problem: OLED stability and degradation mechanisms. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 15, 1234-1240.

8. Chen, R., Cao, K., Wen, Y., Yang, F., Wang, J. (2024). Atomic layer deposition in advanced display technologies: from photoluminescence to encapsulation. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 6, 032003.
9. 주성후, 양재웅 (2012). OLED 소자의 수명에 미치는 다층 보호막의 영향. *한국표면공학회지*, 45(1), 20-24.
10. 오길구, 김수경, 이창훈, 임홍우, 김명수, 오근태 (2015). 일반선형모델을 이용한 조명용 OLED의 가속수명시험모델식 연구. *한국신뢰성학회 학술대회논문집*, 177-186.
11. Ji, K., Lin, W., Sun, Y., Cui, L. S., Shamsi, J. (2023). Self-supervised deep learning for tracking degradation of perovskite light-emitting diodes with multispectral imaging. *Nature Machine Intelligence*, 5, 1205-1216.
12. Makke, N., Chawla, S. (2024). Interpretable scientific discovery with symbolic regression: a review. *Artificial Intelligence Review*, 57(1), Article 2.
13. Schmidt, M., & Lipson, H. (2009). Distilling free-form natural laws from experimental data. *Science*, 324(5923), 81-85.
14. Fischler, M. A., Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381-395.
15. IEC 60068-2-5. (2018). Environmental testing - Part 2-5: Tests - Test Sa: Simulated solar radiation at ground level and guidance for solar radiation testing. International Electrotechnical Commission.
16. Cho, H., et al. (2019). Degradation of OLED performance by exposure to UV irradiation. *RSC Advances*, 9(63), 36963-36969.

## **ABSTRACT**

### **Symbolic Regression - Based Modeling for Degradation Analysis of Transparent Displays**

Seong Yong, Lim

Department of Computer Engineerin

Incheon National University

Transparent Organic Light Emitting Diode (OLED) displays are utilized in various fields, such as digital signage, smart windows, and automotive Head-Up Displays (HUDs), due to their dual characteristics of high transmittance and self-emission. With the increasing outdoor application of these displays, it has become crucial to analyze degradation under ultraviolet (UV) conditions, which affect the films, and to ensure product reliability. However, conventional degradation analysis has primarily relied on linear or exponential models, which fail to sufficiently account for outliers and the non-linear degradation characteristics inherent in actual data.

This study analyzes the impact of outliers in transparent OLED degradation data on predictive performance and proposes a degradation analysis method that combines outlier removal with non-linear regression. Experiments were conducted using a full factorial design involving UV exposure, color, brightness, and UV-blocking films. A total of

4,992 relative luminance data points were obtained from accelerated testing over 2,166 hours under 32 distinct conditions. Model training was restricted to the 0 - 2,030 h interval. Symbolic Regression (SR), linear, and exponential models were constructed after applying outlier removal exclusively to the training dataset. Furthermore, the study analyzes differences in model performance based on the outlier removal method by comparing RANSAC and Z-score preprocessing techniques.

Regarding outlier removal, the Z-score method failed to eliminate rapidly fluctuating outliers due to its dependence on variance. In contrast, RANSAC effectively removed outliers by identifying data points with large residuals based on the underlying trend. Symbolic Regression generated models expressible as mathematical formulas within a complexity range of 4 to 6. Notably, the model applying RANSAC-SR demonstrated superior predictive performance, exhibiting the lowest prediction error at the final measurement point, which was excluded from the training set.

Analysis of condition-specific characteristics using the derived degradation models revealed that degradation was accelerated under UV irradiation and high-luminance driving conditions. Additionally, it was confirmed that degradation analysis using the RANSAC-SR model is feasible and yields statistically significant results.

This study presents a methodology to enhance degradation prediction accuracy by overcoming the limitations of conventional outlier processing and non-linear modeling through the RANSAC-Symbolic Regression model. This approach reconstructs degradation data into a continuous model capable of time-dependent analysis. The proposed method is expected to be applicable not only to transparent OLED displays but also to the analysis and reliability evaluation of various displays and materials exhibiting degradation characteristics.

**Key Words :** degradation , ultraviolet , RANSAC ,  
symbolic regression , accelerated lifetime

