ISSN 1229-1889(Print)
ISSN 2287-9005(Online)
J Korean Soc Qual Manag Vol. 51, No.2: 283-296, June 2023
https://dx.doi.org/10.7469/JKSQM.2023.51.2.283

딥러닝 AI 솔루션을 활용한 전기자동차 헤어핀 권선 모터의 용접 품질향상에 관한 사례연구

이승준* · 심진섭* · 최정일**†

* 숭실대학교 대학원 IT정책경영학과
** 숭실대학교 경영학부

A Case Study on Quality Improvement of Electric Vehicle Hairpin Winding Motor Using Deep Learning AI Solution

Lee, Seungzoon* · Sim, Jinsup* · Choi, Jeongil**†

* Department of IT Policy and Management, Graduate School of Soongsil University
** College of Business Administration, Soongsil University

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study is to actually implement and verify whether welding defects can be detected in real time by utilizing deep learning AI solutions in the welding process of electric vehicle hairpin winding motors.

Methods: AI's function and technological elements using synthetic neural network were applied to existing electric vehicle hairpin winding motor laser welding process by making special hardware for detecting electric vehicle hairpin motor laser welding defect.

Results: As a result of the test applied to the welding process of the electric vehicle hairpin winding motor, it was confirmed that defects in the welding part were detected in real time. The accuracy of detection of welds was achieved at 0.99 based on mAP@95, and the accuracy of detection of defective parts was 1.18 based on FB-Score 1.5, which fell short of the target, so it will be supplemented by introducing additional lighting and camera settings and enhancement techniques in the future.

Conclusion: This study is significant in that it improves the welding quality of hairpin winding motors of electric vehicles by applying domestic artificial intelligence solutions to laser welding operations of hairpin winding motors of electric vehicles. Defects of a manufacturing line can be corrected immediately through automatic welding inspection after laser welding of an electric vehicle hairpin winding motor, thus reducing waste throughput caused by welding failure in the final stage, reducing input costs and increasing product production.

Key Words: AI Solutions, Deep Learning Model, Electric Vehicle Hairpin Motor, Improved Welding Quality

● Received 24 March 2023, 1st revised 30 March 2023, accepted 7 April 2023
† Corresponding Author(jichoi@ssu.ac.kr)
ⓒ 2023, Korean Society for Quality Management
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

최근 전기자동차는 유럽에서 탄소 배출 기준이 강화되고 자동차 제조사의 무공해 자동차의 생산 및 판매가 더욱 가속화됨에 따라 시장이 급속도로 확대되고 있다. 2025년에는 약 1,120만 대가 판매될 것으로 예상되며, 2030년에는 전체 자동차 시장에서 32%대의 비중을 차지하고 약 3,110만 대가 판매될 것으로 예상된다(Holman, 2020). 따라서 전기 자동차 시장이 급속도로 확대되는 만큼 고성능의 전기 자동차를 위한 구동 모터의 고출력 연구가 활발히 이뤄지고 있다(우민영 외, 2021).

전기자동차는 핵심부품인 구동 모터, 배터리, 컨버터로 구성되어있다. 전기 자동차의 구동 모터는 감속기와 회전축에 연결되고 토크를 바퀴에 전달하여 전기 에너지를 운동 에너지로 전환 시켜 마치 내연기관의 엔진과 같은 차량을 구동시키는 역할을 한다(김기찬, 2017). 일반적인 구동 모터의 권선 방식은 다수의 얇은 와이어를 슬롯에 감는 방식으로 고속에서의 표피효과(skin effect)가 적게 발생하는 장점이 있으나, 감겨있는 다수의 코일 사이의 공간 낭비로 인한 점적률의 저하가 발생하는 단점이 있다. 따라서 전기자동차용 전기 모터는 소위 헤어핀이라고 하는 직사각형 형태의 와이어를 기반으로 제작된다(Fleischer et al., 2017). 헤어핀은 원형 프로필의 와이어가 사용되는 기존의 코일 권선 기술과 비교해 스테이터 내 와이어를 더 가깝게 배열할 수 있다(Bocksrocker et al., 2020). Figure 1.과 같이 헤어핀 권선 방식은 상대적으로 굵은 와이어를 슬롯에 삽입하는 방식이다. 헤어핀 권선 방식은, 코일 사이의 공간 낭비가 없으므로 점적률을 극대화할 수 있어, 저항 감소로 인한 출력의 향상을 기대할 수 있다(특허출원 10-2017-0143933, 2017). 또한, 헤어핀 권선 방식은 일반적으로 모터에 사용되는 환선 구조에 비해 높은 점적률로 설계할 수 있어 모터의 크기를 줄이는 동시에 고출력의 설계를 할 수 있다(김희운 외, 2020). 이에 따라 전기 자동차 구동 헤어핀 권선 모터 생산 과정에서 가장 중요한 두 가지 핵심 부분은 핀들이 기계적으로 적절한 정렬 상태를 유지하도록 해야 하는 것과 헤어핀 정렬을 정확히 하여 결함이 발생하지 않도록 하는 것이다. 권선 형상이 정확해야 모터의 효율이 높아지기 때문에 헤어핀 정렬은 매우 중요하다. 결함이 있으면 완성된 권선에 작용하는 저항이 커져 전기적 효율이 낮아지고 모터의 기계적 강도가 저하될 수도 있다. 이를 위해 파이버 레이저를 이용한 레이저 용접기술이 사용된다(Coherent, 2019).

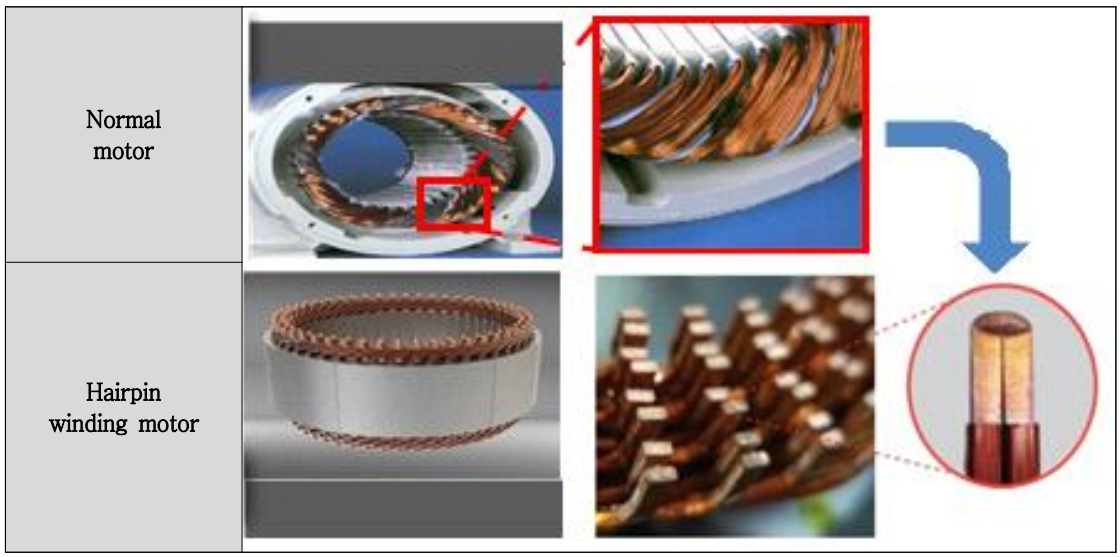


Figure 1. Comparison of Normal Motor and Hairpin Winding Motor

최근 세계적으로 4차 산업혁명 패러다임의 가속화와 함께 제조 선진국에서는 디지털 전환(digitaltrans- formation)을 통한 지속적인 경쟁우위 확보 및 강화방안을 모색하고 있다. 이를 위해 제조데이터와 AI의 현장적용 및 고도화를 강조하고 있다(김일중 외, 2022). 하지만 국내에서는 아직 용접 품질 점검을 위해 국가에서 지정한 표준시방서를 기준으로 육안으로 검사를 주로 진행하고 있고(국토교통부, 2019) 실제 제조 공정에서 많은 양의 제품을 육안으로 검사 시, 작업 효율 수준이 유지되다가 일정 시간 경과 후, 시각적 피로로 인하여 작업 효율이 급격히 하락하는 것으로 나타난다(이철응, 1994).

이를 극복하고자 용접된 비드를 기존의 육안으로 검사한 결과와 최신기술인 AI 딥러닝을 이용하여 검사한 결과를 비교했을 때 불량 검사 품질은 동일한 수준의 검사 결과가 관찰되었다(최세훈 외, 2021). 용접 불량 검출에 활용할 수 있는 시각 AI 중 합성곱 신경망(CNN : Convolutional Neural Network)은 AI 딥러닝 중 합성곱 연산을 사용하는 인공 신경망의 한 종류로 이미지 인식 및 검출에서 강력한 성능을 발휘하는 모델이다. 합성곱 필터를 통한 학습으로 이미지가 가진 특징 패턴을 추출할 수 있다. 또한, 특징을 직접 학습하기 때문에 특징을 수동으로 추출할 필요가 없으며, 기존 네트워크를 바탕으로 모델을 구성할 수 있다는 장점이 있어 이미지를 사용하는 딥러닝에 CNN을 사용하는 사례가 급증하고 있고 CNN을 활용하여 용접 분야 연구에 활발하게 적용되고 있다(이기동 외, 2021a).

또한 용접공정의 특징으로는 일단 용접이 완료되고 나면 그 이후에 전수검사 등을 할 수 있는 적절한 방법이 제안되어 있지 않으므로, 용접 품질을 높이기 위해서는 용접작업 시 실시간으로 모니터링 할 수 있는 시스템 개발의 필요성이 과거부터 연구되었다(황동수, 2012).

본 논문에서는 최근 판매량이 급격히 증가하고 있는 전기자동차 헤어핀 권선 모터의 용접 품질 공정을 대상으로 국내 딥러닝 AI 솔루션을 적용하는 실증 연구를 진행하고자 하였다. 또한, CNN을 이용하여 전기자동차 헤어핀 권선 모터의 레이저 용접 불량을 검출하는 시스템을 실제 구현하였고, 이를 기반으로 전기자동차 헤어핀 권선 모터의 레이저 용접 설비 공정에 실제로 적용한 결과 값을 도출하여 국내 전기자동차 헤어핀 권선 모터 품질 경쟁력 제고의 시사점을 제공하고자 하였다.

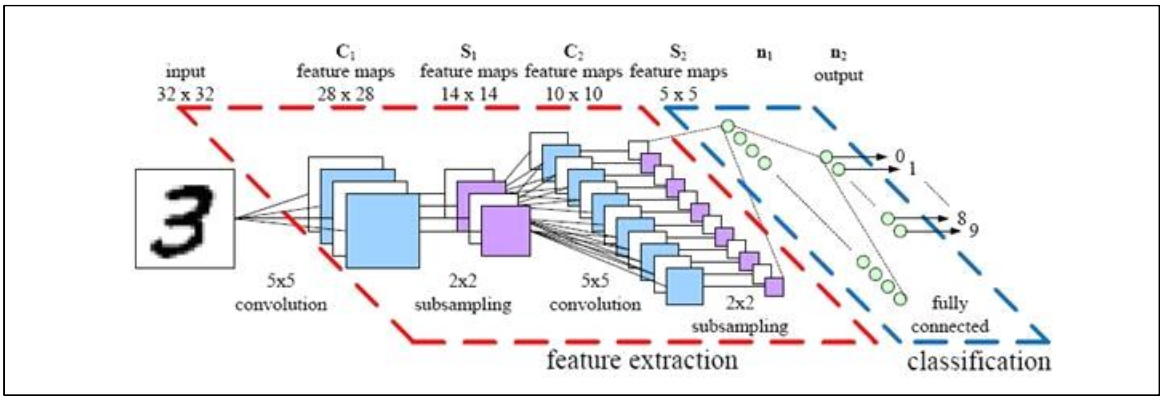
2. 이론적 배경

2.1 합성곱 신경망

최근 딥러닝 기반의 CNN은 다양한 분야, 특히 이미지 인식 분야에서 폭넓게 적용되며 높은 성능을 보였고 최근 몇 년간 많은 연구가 수행되었다(김기현 외, 2023). CNN은 합성곱 연산을 사용하는 인공 신경망의 한 종류로 이미지 인식에서 강력한 성능을 발휘하는 딥러닝 모델이다. 합성곱 필터를 통한 학습으로 이미지가 가진 특징 패턴을 추출할 수 있다. 또한 특징을 직접 학습하기 때문에 특징을 수동으로 추출할 필요가 없으며, 기존 네트워크를 바탕으로 모델을 구성할 수 있다는 장점이 있어 이미지 인식 및 검출을 사용하는 딥러닝에 CNN을 사용하는 사례가 급증하고 있다. CNN은 Figure 2.와 같이 합성곱층(Convolutional Layer)과 풀링층(Pooling Layer), 완전연결층(Fully Connected Layer)로 구성되어 있다(이권동 외, 2019).

합성곱층에서는 입력값이 커널(Kernel)안의 가중치로 연결되어 있으며 이미지의 영역을 강조하는 특성맵을 출력하여 다음 층으로 전달한다. 합성곱의 계산은 일정한 간격(Stride)으로 커널 윈도를 입력 데이터 위로 움직이며 수행된다. 합성곱층의 결과를 그대로 다음 층에 전달할 수 있지만, 대부분의 경우 다운샘플링(Down Sampling)의 한 종류인 풀링층을 거치면서 과학습(Over-Fitting)을 막고 노이즈에 강한 피처를 생성한다. 풀링은 최댓값 풀링(Max

Pooling), 평균값풀링(Mean Pooling) 등이 있으며 지정된 커널 윈도 크기에서 각각 최댓값, 평균값을 출력한다. 완전연결층은 일반적인 신경망과 같은 방식으로 이전 층의 노드와 다음 층의 노드가 모두 연결되는 층이다. CNN 모델에서 합성곱층과 풀링층의 반복은 이미지 내의 국부적인 특징을 포함하면서 전역적인 특징도 표현하여 완전연결층의 입력으로 전달하고 완전연결층은 최종 결과를 출력하게 된다(이기동 외, 2021b).



출처: http://parse.ele.tue.nl/cluster/2/CNNArchitecture.jpg

Figure 2. Convolutional Neural Network

2.2 헤어핀 권선 모터와 레이저 용접

전기 자동차용 구동 모터는 자동차의 엔진룸의 제한성으로 인해 고출력, 소형화가 요구된다. 그래서 점적률이 뛰어난 헤어핀 구조를 이용한 고정자 권선 설계가 주로 사용된다. 헤어핀 구조는 일반적으로 모터에 사용되는 환선 구조에 비해 높은 점적률을 이용하여 모터의 크기를 줄이는 동시에 고출력의 설계를 할 수 있다(김희운 외, 2020). 유연성과 높은 자동화 및 생산성 수준으로 인해 레이저 용접은 헤어핀 권선 모터의 문제를 해결하기에 적합한 도구이다(Bocksrocker et al., 2020). 이러한 헤어핀은 일반적으로 원형 프로필의 와이어가 사용되는 기존의 코일 권선 기술과 비교해 스테이터 내 와이어를 더 가깝게 배열할 수 있으며 그 결과 드라이브의 효율성이 높아진다. 또한 헤어핀 기반 권선 모터의 제조는 자동화 가능성이 크지만 새 유형의 전기 모터 제조를 완전히 자동화하는 과제는 각 헤어핀의 앞쪽 끝부분을 결합하는 것이며 이는 지금까지 기존의 권선 기술에서 필요하지 않았던 새로운 프로세스 단계이다(Glaessel et al., 2017). Fleischer 외(2017)는 자동차 파워트레인의 전기화에는 구리 기반 재료의 용접을 위한 새로운 솔루션이 필요하고 전기 모터 제조의 향후 추세는 분명히 소위 헤어핀이라고 하는 직사각형 형태의 와이어를 기반으로 하게 될 것이라고 하였다.

2.3 합성곱 신경망을 이용한 용접 품질향상 관련 선행 연구

CNN을 활용해 용접 불량 검출에 관한 기존 선행 연구는 주로 순환신경망을 활용한 저항점 용접 불량 검출 실험, CNN을 활용한 저항점 용접 불량 검출 실험과 해외의 CNN을 활용한 레이저 용접 검출사례연구에 대해 중점을 두어 왔다. 이기동 외(2021a)는 CNN을 활용하여 레이저 용접 불량 검출에 적용한 해외 모델의 활용사례, 평가, 시각화에 대한 사례연구를 통해 CNN이 레이저 용접 불량 검출의 활용을 강조하였다. 김태원 외(2020)는 CNN을 활용하여 용접표면이 매끄러운 이미지는 우수로 판별이 되었으며 표면이 거친 이미지는 불량으로 판별이 되었음을 실험하여

딥러닝을 사용하여 레이저 용접 비드의 품질 검사가 가능하다고 하였다. 최세훈 외(2021)는 용접된 비드를 기존의 육안으로 검사한 결과와 AI 딥러닝을 이용하여 이미지를 학습하여 검사한 결과를 비교했을 때 동일한 수준의 검사 결과가 관찰됨을 증명하였다. 강지훈 외(2019)는 인공 신경망의 이미지 인식기술을 활용하면 저항점 용접데이터의 이미지 속 패턴을 활용하여 용접성을 예측하는 것이 가능하다고 하였다. 황동수 외(2012)는 저항 용접공정의 실시간 용접 품질 모니터링 시스템은, 일단 용접이 완료되고 나면 그 이후에 전수검사 등을 할 수 있는 적절한 방법이 제안되어 있지 않으므로, 이런 분야에 대한 학계, 연구소와 전문기업 간의 협력으로 산업현장에 활용될 수 있는 용접 품질모니터링 시스템의 개발이 시급함을 강조하였다. 조용준 외(1998)는 퍼지시스템으로 적정전류 이하의 전류에서는 매우 효과적인 실시간 용접 품질 예측 결과를 얻을 수 있음을 연구하여 육안검사를 대체할 수 있는 실시간 용접 품질 예측 시스템을 강조하였다.

선행 연구 분석을 통해 기존 용접공정에서 실시간 모니터링의 필요성, AI 딥러닝을 이용한 용접 품질 판별의 가능성, CNN을 용접에 활용한 해외 사례연구 등을 확인하였다. 하지만 선행 연구에서는 산업군에 실제로 적용한 사례연구는 부족한 실정이며 본 논문에서는 상용 AI 솔루션과 연구를 위해 특수 제작한 전용 설비를 국내 전기자동차 헤어핀 권선 모터 레이저 용접 생산 공정에 실제로 적용하여 용접 불량 검출을 진행한 사례연구를 통하여 품질 경쟁력 향상에 기여하고자 한다.

3. 사례연구

본 논문에서는 전기자동차 헤어핀 권선 모터 레이저 용접 불량 검출을 위한 전용 설비를 제작하고 국내 상용 AI 솔루션과 결합하여 기존 전기자동차 헤어핀 권선 모터 레이저 용접 공정에 실제로 적용하였다. 이러한 구조를 실제 전기자동차 헤어핀 권선 모터 레이저 용접 공정에 적용하면 현재 헤어핀 권선 모터 레이저 용접 결과의 불량 여부를 육안으로 한 개씩 식별하던 방식에서 CNN AI를 활용하여 정확하게 측정되고, 전용 설비를 활용한 자동화 된 불량 검출로 신속하게 불량을 검출할 수 있게 된다. 따라서, 전기자동차 헤어핀 권선 모터의 불량률이 감소함에 따라 원자재 및 부자재 투입 비용 감소로 원가 절감의 효과를 얻을 수 있게 될 것이다.

3.1 사례연구 단계

본 연구의 사례연구의 핵심 단계는 크게 4가지 단계로 구성되는데 헤어핀 권선 모터 자료 수집 및 분석, 헤어핀 권선 모터 용접 불량 진단 장비 설계 및 제작, 분석 AI 모델 개발, 분석 AI 모델 성능 검증으로 구성된다. 1단계는 헤어핀 권선 모터 자료 수집 및 분석단계로 학습을 위한 용접 정상 및 용접 불량의 데이터를 Figure 3.과 같이 수집하였다.

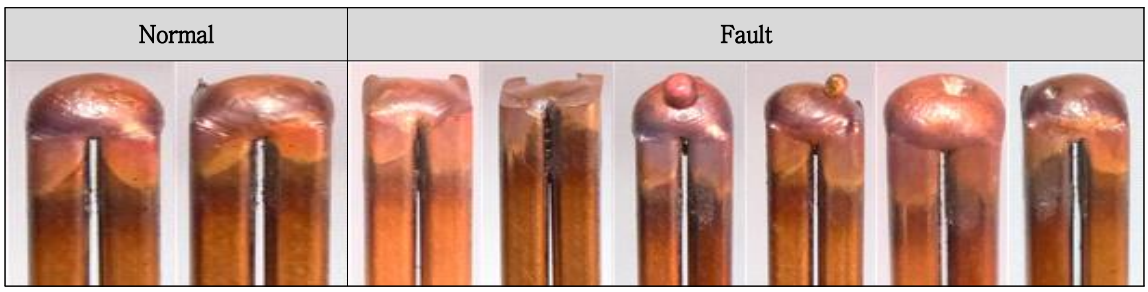


Figure 3. Welding Data of Hairpin Winding Motor

2단계는 헤어핀 권선 모터 용접 불량 진단 장비 설계 및 제작 단계로 카메라의 사양과 카메라 설치 개수 및 위치 분석을 하였다. 그리고 영상 획득 장치 및 통신, 서버 장비 제작과 헤어핀 권선 모터의 고정자 장착 장비를 제작하였으며, 헤어핀 용접 부위의 정상 및 불량 유무 확인을 위한 사용자 연계 장비를 Figure 4.와 같이 제작하였다.

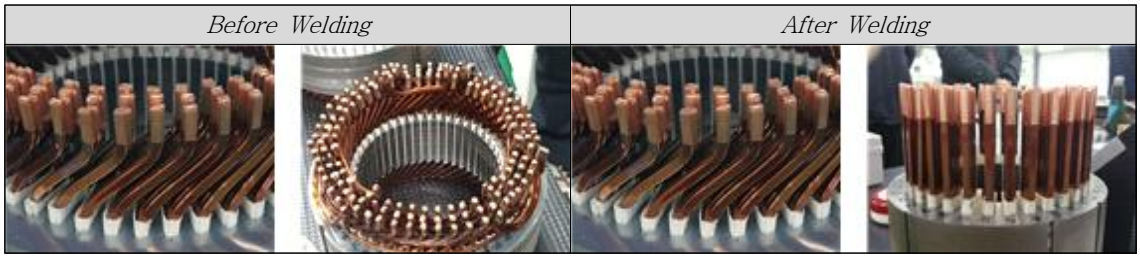


Figure 4. Equipment for Measuring Quality of Hairpin Motor

3단계에서는 분석 AI 모델 개발 단계로 용접 부위를 찾아내는 객체 검출(Object Detection) 모델 개발하였으며, 불량을 찾아내는 이미지 분류 모델 개발과 CNN 기반 모델을 개발하였다.

4단계에서는 분석 AI 모델 성능 검증 단계로 실시간 영상 데이터를 활용한 성능을 검증하였으며, 검사 결과는 Figure 5.와 같이 나타났다.

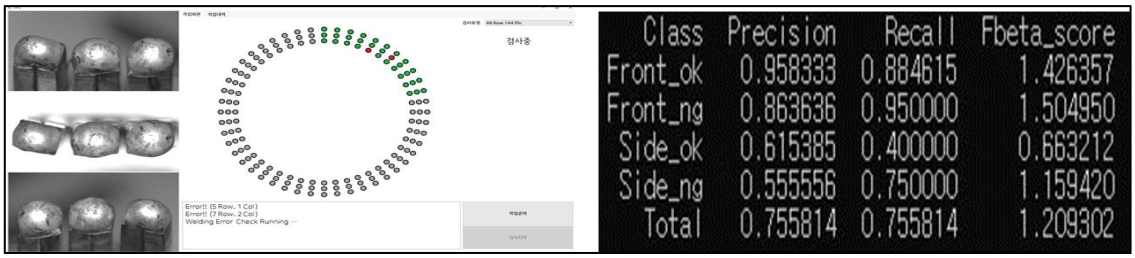


Figure 5. Test Result of Welding Fault Detection System for Hairpin Winding Motor

3.2 헤어핀 권선 모터 자료 수집 및 분석

헤어핀 권선 모터의 자료 수집은 용접 불량 판정을 위해 대각정면, 상면, 대각 후면의 영상으로 검사하여 불량 여부를 판정하기 위한 영상 각도를 결정하는 환경변수를 Figure 6.과 같이 설정하였으며, 용접 부위 및 불량 부분을 세부적으로 나누어 라벨링 작업을 진행하였다.

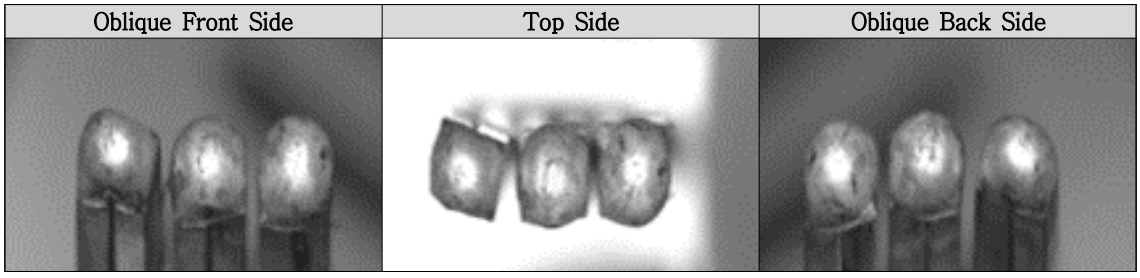


Figure 6. Environment Variables for Determining Video Angle

또한, 학습용 데이터를 생성하는 라벨링 작업을 위하여 촬영한 영상의 결과물을 용접 정상과 용접 불량으로 나누어 Figure 7.과 같이 수작업으로 분류하였다.

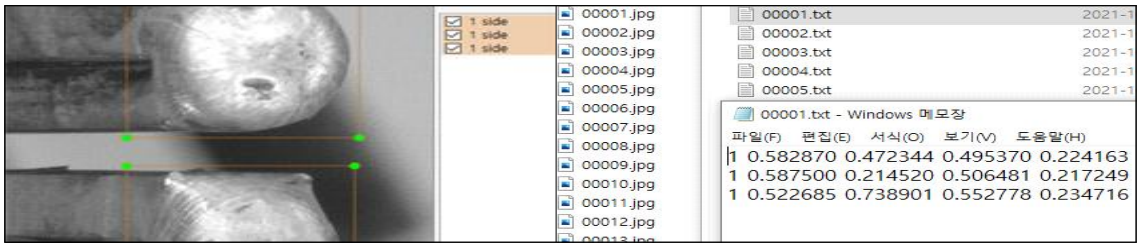


Figure 7. Labeling Task for Learning Data

다음으로는 AI 학습을 위한 검출용 AI Data 셋과 분류 AI Data 셋을 준비하였으며, 촬영한 영상정보에 특정하기 위한 좌표정보를 세트화한 검출용 AI 데이터셋을 준비하였고, 이는 Figure 8.과 같이 헤어핀을 촬영한 3열 이미지와 좌표 텍스트 정보로 구성되어있다.

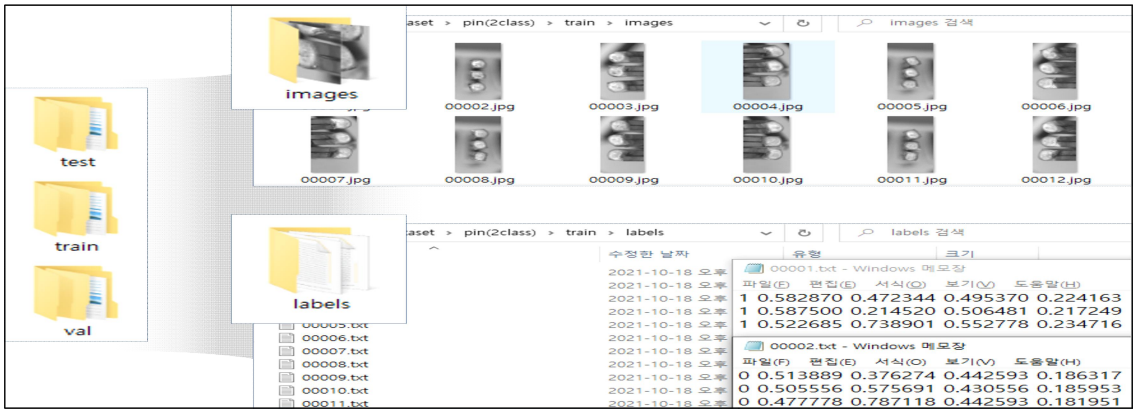


Figure 8. Data Set for AI Learning

최종 검출로 획득한 영상 이미지에 좌표정보 기반의 이미지를 획득하여 분류 AI 데이터 셋을 Figure 9.과 같이 준비하였다.

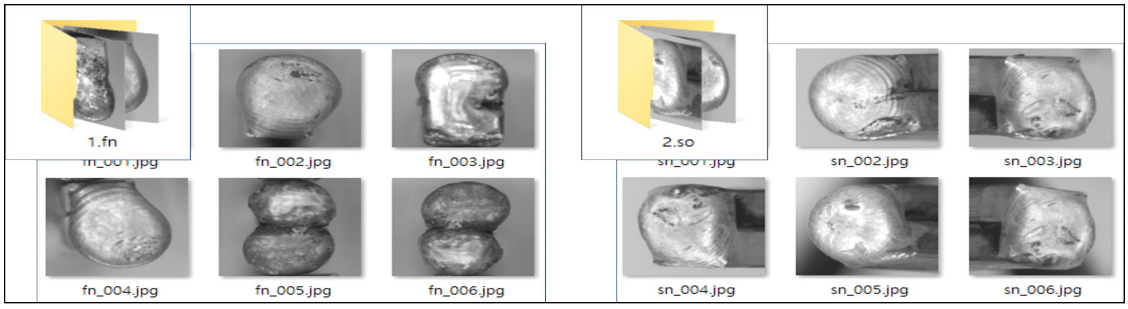


Figure 9. AI Data Set for Classification

3.3 헤어핀 권선 모터 용접 불량 진단 장비 설계 및 제작

헤어핀 권선 모터 용접 불량 진단 장비의 설계 및 제작 단계에서는 헤어핀 권선 모터 검사 및 데이터 수집을 위한 장비를 설계하였으며, 데이터 수집 및 용접부 검출용 AI 모델 설계 및 헤어핀 용접 불량 검출기 AI 모델을 Table 1.과 같이 설계하였다.

Table 1. Equipment and AI Model Design

Category	Content
Equipment Design for Motor Inspection and Data Collection	- Select and purchase industrial cameras, lenses, and lights for video shooting - Optical System Setup and Photography Considering Metal Reflectivity of Copper Welding - Optical System Design for Data Collection in Development Environment - Rotation table design for rotating hairpin motors of various diameters - Design of optical system for photographing hairpin motors of various diameters - Design of Optical System for Data Collection in Facility Environment
AI Model Design for Data Collection and Detection of Welding Area	- Considering small computational load to detect welds in real time - Consider a model in which multiple targets are detected and their location and size are output
AI Model for Detecting Defective of Hairpin Welding	- Consider a high accuracy classification model to improve the accuracy of defect determination - Consider low computational load to operate in parallel with welding sensing AI

위의 설계를 바탕으로 H/W 구성을 위해 개발환경 데이터취득 및 검사를 위한 회전 테이블, 제조 현장 데이터취득 및 검사를 위한 설비, 제조 현장 불량 감지 인식을 위한 디스플레이를 Figure 10.과 같이 제작하였다.

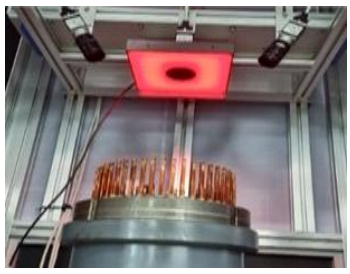
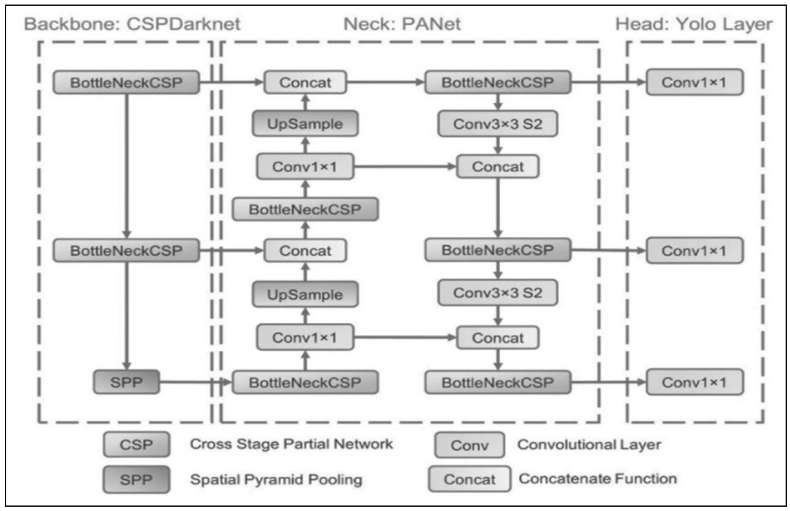
Category	Inspection Equipment	Rotating Table	Cameras and Lighting Devices
Content			

Figure 10. Hardware Manufacturing

3.4 분석 인공지능 모델 개발

본 연구에서는 용접 부위를 찾아내는 객체 검출모델과 찾아낸 객체(용접 부위)를 이미지로 전달받아 입력 데이터로 활용하여 불량을 찾아내는 이미지 분류 모델을 활용한 딥러닝 2-stage 구조의 AI 솔루션을 활용하였다. 기존 RCNN계열의 모델들은 일정 수준 이상의 정확성은 확보하였으나, 속도가 상대적으로 느려 실시간 위치 탐색에 활용

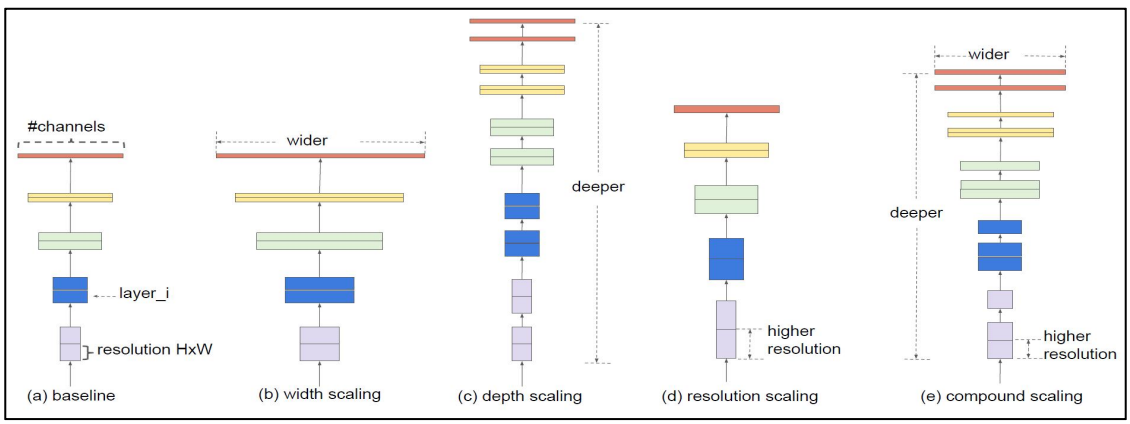
하기에는 한계가 있어 데이터 수집 및 용접부 검출용 AI 모델은 불량의 위치를 신속하게 찾기 위해 Figure 11.와 같이 특정 이미지 맵에서 신속하게 객체의 위치를 탐색할 수 있는 CNN계열의 객체 탐지 모델 YOLO v5s를 채택하였다(이형근 외, 2021). YOLOv5의 구조는 크게 CSPNet기반의 CSP-Darknet을 사용하여 이미지에서 특징 맵을 추출하는 Backbone과 추출된 특징 맵을 기반으로 물체의 위치를 찾는 부분인 Head로 나눌 수 있으며, Backbone과 Head는 Focus 모듈, Conv 모듈, C3 모듈, SPPF 모듈 등으로 이루어져 있다(이용환·김영섭, 2020).



출처: https://stackoverflow.com/questions/68230056/yolov5-basic-architecture-where-to-find

Figure 11. AI Model Logic for Detecting Welding Area(YOLO v5s)

헤어핀 용접 불량 분류기 AI 모델은 실시간 분류의 특성상 모델이 가벼우면서도 정확도가 뛰어난 EfficientNet-B2를 채택하였다. Figure 12.의 (b),(c),(d)와 같이 일반적인 이미지 최적화는 깊이, 너비, 해상도를 하나씩 조절 하지만 EfficientNet에서는 모델의 정확도를 높이기 위해 모델의 깊이(Depth), 너비(Width), 해상도(Resolution)를 효율적으로 조절할 수 있는 Figure 12.의 (e)와 같은 Compound Scaling 방법을 제안해 최고의 효율을 찾아냄으로 모델의 복잡도를 과도하게 증가시키지 않으면서 우수한 정확도를 달성했다(Tan and Le, 2019).



출처: Tan and Le(2019)

Figure 12. Comparison of Normal Scaling Method and Compound Scaling Method

3.5 분석 인공지능 모델 성능 검증 – (1)용접부 검출모델

카메라 영상에서 용접 부위를 찾아내어 용접 불량 분류기에 전달하는 용접부 검출 AI 모델의 성능을 검정하기 위해 일반적으로 객체 인식 분야에서 평가지표로 사용하는 mAP@.95를 지표를 사용하였으며, mAP뒤의 @.95는 실제 객체와 추론한 영역이 중복되는 크기인 IoU가 0.95 이상일 때의 평균 정밀도를 의미하며 객체 검출의 결과는 불량 분류기의 입력 데이터를 제공하는 역할을 수행하므로 IoU의 수치를 0.95로 설정하였다.

이때 IoU가 낮을 경우 이미지가 잘리는 등의 손실을 일으킬 수 있기에 입력 이미지로써 신뢰도를 보장할 수 있는 mAP@.95로 설정하였다. 테스트데이터는 용접부 검출모델 300장을 원본 데이터에 Flip/Rotation/Qaussin noise를 이용한 증강기법을 이용하여 생성한 10,500장으로 테스트하였고 훈련데이터는 훈련/검증/시험데이터를 8:1:1 비율로 적용하였으며, 성능을 검증한 결과 목표는 0.95로 설정하였고 결과는 0.99로 Figure 13.과 같이 높은 수치로 도출되었다.

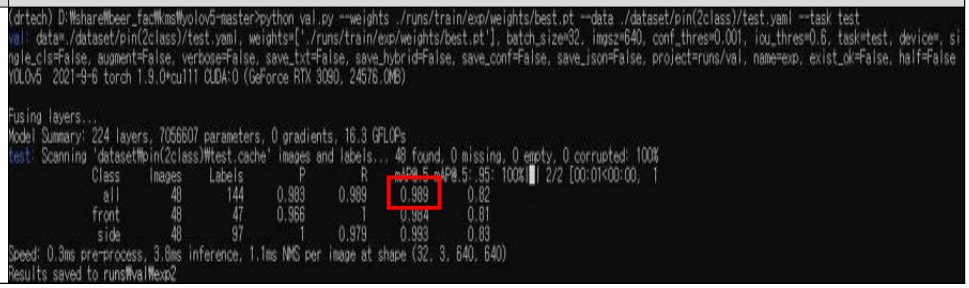
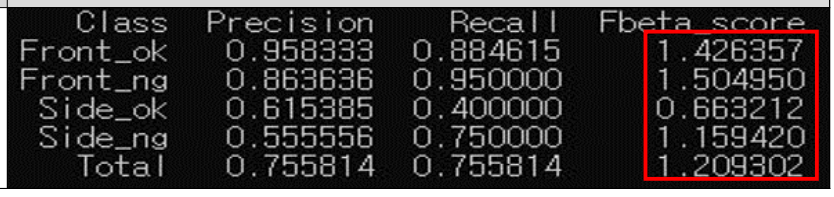
Category	Content
Test Results Screen	

Figure 13. Performance Validation of Analysis AI Models

3.6 분석 인공지능 모델 성능 검증 – (2)불량 분류 모델

용접부 검출 AI 모델에서 정보를 받아, 불량을 분류하는 불량 분류기 AI 모델에 대해 성능을 검증하기 위해 보편적으로 정밀도와 재현율 측정할 때 사용되는 지표인 Fβ-Score를 사용하였고 테스트데이터는 불량 진단 모델 350장을 원본 데이터에 Flip/Rotation/Qaussin noise를 이용한 증강기법을 이용하여 생성한 정상, 불량 각 5,000장씩 총 10,000장으로 테스트하였으며 훈련데이터는 훈련/시험데이터를 9:1 비율로 적용하였고 결과는 수직 촬영분은 목표인 1.5에 근접한 1.46이 나왔지만, 측면촬영은 0.91로 Figure 14.과 같이 목표치에 못 미치는 결과가 나와서 향후 조명 및 카메라 설정과 데이터 증강기법을 추가로 도입하여 보완할 예정이다.

Category	Content
Screen of Test Results	

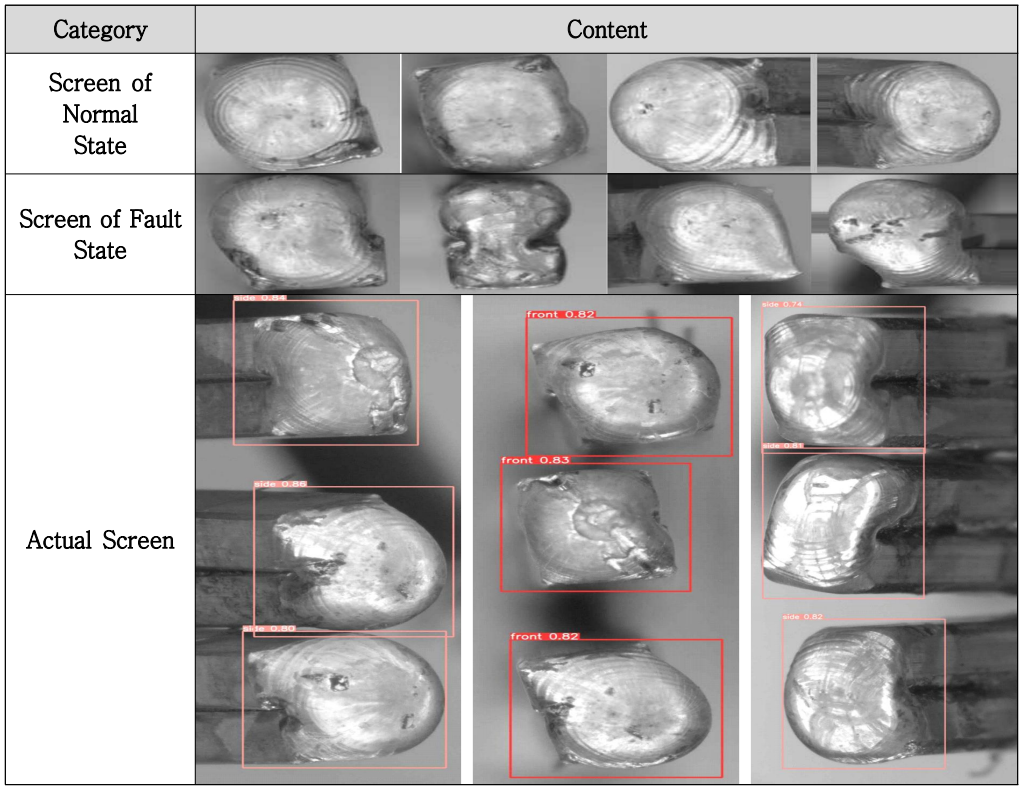


Figure 14. Defect Classification of Analysis AI Models

4. 연구 결과

본 연구는 전기자동차 헤어핀 권선 모터의 레이저 용접 품질을 향상하기 위해 국내 상용 AI 솔루션을 활용하고 전용 H/W를 제작하여 전기자동차 헤어핀 권선 모터 레이저 용접 불량 여부를 실시간으로 검출하여 실제 헤어핀 권선 모터 제작 환경에 적용하면 품질향상에 유의미한지에 대하여 연구하였다.

본 연구의 결과 값을 레이저 용접 부위 검출과 용접 부위 불량 검출로 각각 분석하였으며, 결과를 통해 도출할 수 있는 학문적 시사점은 다음과 같다. 첫째, 용접 품질에 관한 선행 연구에서 실시간 모니터링 시스템의 필요성과 CNN을 이용하여 레이저 용접 품질 불량 검출 사례에 관한 연구를 바탕으로 국내 CNN 솔루션을 실제 전기자동차 헤어핀 권선 모터 레이저 용접공정에 적용하여 품질향상을 입증했다는 것에 학문적 의의가 있다고 볼 수 있다. 둘째, 전기 자동차 헤어핀 권선 모터의 레이저 용접 공정에 CNN 기반 딥러닝 AI 솔루션을 적용하여 헤어핀 권선 모터 레이저 용접 결과물을 실시간으로 분석하는 것이 전기자동차 헤어핀 권선 모터 제조의 시간 단축과 더불어 품질향상에 기여 할 수 있다는 것을 규명하는 것에 학문적 의의가 있다고 볼 수 있다. 전기 자동차 헤어핀 권선 모터의 레이저 용접 공정에 실제로 적용하여 별도 테스트한 결과 레이저 용접부 결함이 실시간으로 검출되는 것을 확인할 수 있었으며, Figure 15.과 같이 용접부 검출 정확도는 mAP@.95 기준 0.99로 목표 품질 수준으로 달성되었으며 불량부 검출에 대한 정확도는 Fβ-Score 1.5 기준 1.18로 목표치에 못 미치는 결과를 확인할 수 있었다.

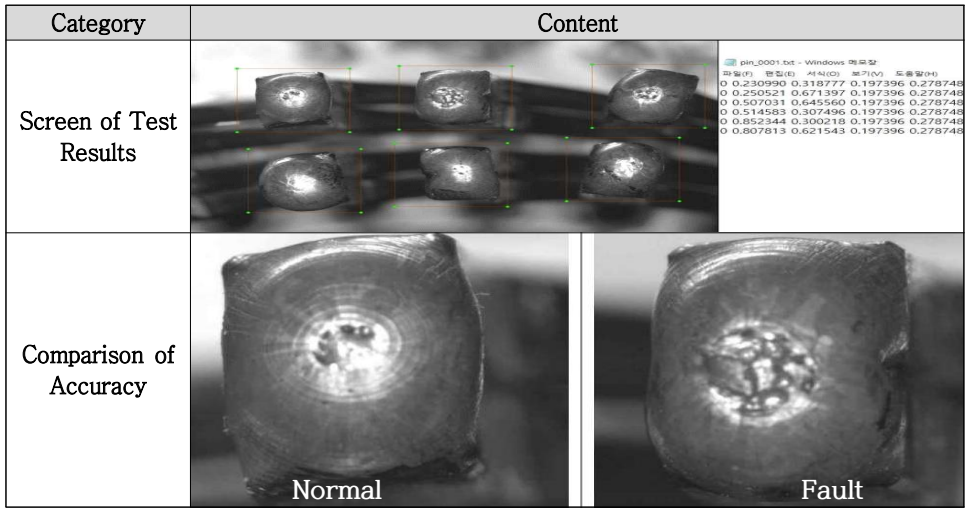


Figure 15. Test Result

본 연구의 실무적 시사점은 다음과 같다. 첫째, 전기자동차 헤어핀 권선 모터의 레이저 용접공정 이후 자동 용접검사로 제조라인에서 즉시 불량수정에 대응할 수 있어 최종 단계에서 용접 불량으로 인한 폐기처분량이 감소 되어 결과적으로 투입비용 감소 및 생산량 증가의 효과가 예상되며 이로 인하여 반품이 감소함으로써 제품의 신뢰도를 제고할 수 있다. 둘째, 용접검사 자동화로 생산시간 및 근로시간 단축의 효과 역시 기대할 수 있는 것으로 확인했다. 셋째, 향후 대량생산으로 데이터가 누적되고 AI 모델의 재학습이 진행됨에 따라 정확도가 향상될 것으로 기대하며 이로 인한 파생 효과 역시 더욱 증가할 것으로 예상된다. 넷째, 본 연구와 동일하게 상용 AI 솔루션을 활용하고 전용 H/W를 제작하는 방식으로 전기자동차 헤어핀 권선 모터의 레이저 용접 품질분야가 아닌 PET 병뚜껑 불량 검출, 타이어 제조 불량 검출, 전기기판 불량검출 등 CNN을 활용한 자동 불량 검출에 폭넓게 적용하여 손쉽게 사용할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구의 한계점으로는 첫째, 움직이는 영상을 후처리로 대비, 밝기, 선명도만 조정하여 사용하고 있지만, 향후에는 헤어핀 권선 용접 부위에 적합한 조명 및 색상 조정 등을 추가하여 기존 기법만으로는 부족한 부분을 보완하여 검출률을 더욱 높일 수 있을 것으로 예상된다. 둘째, 현재 증강기법은 세로 가로축으로만 대칭시키는 기법만을 사용중이지만 용접 불량 이미지에 적합한 증강기법을 탐색 및 적용할 예정이며 모델에 미치는 영향을 확인하기 위해 증강기법별 데이터셋을 구성하여 반복 학습 및 결과를 비교할 예정이다.

REFERENCES

Bocksrocker, O., Speker, N., Beranek, M., and Hesse, T. 2019. Reduction of Spatter and Pores in Laser Welding of Copper Hairpin Using Two Superimposed Laser Beams. Laser in Manufacturing Conference Munich 2019:1-8. Retrieved from https://www.wlt.de/lim/Proceedings2019/data/PDF/Contribution_370_final.pdf.

Cho, Yongjoon, Rhee, Sehyun and Um, Kiwoan. 1998. A Study of Real-Time Weldability Estimation of Resistance Spot Welding Using Fuzzy Algorithm. Journal of Welding and Joining 16(5):76-85.

Choi, Sehun, Han, Changmin, Kim, Taewon, and Choi, Haewoon. 2021. Assessment of Laser Joining Weld Quality by Visual Inspection, Computer Simulation, and Deep Learning. Applied Sciences 11(2):642-655.

Coherent. 2019. Laser Technology for Electric Vehicles. Laser Solutions 22(2):8-11.

Fleischer, J., Haag, S., and Hofmann, J. 2017. Quo Vadis Winding Technology? A Study on the State of The Art and Research on Future Trends in Automotive Engineering. Retrieved from https://www.wbk.kit.edu/downloads/2017_02_21_Studie_Wickeltechnik_final_EN.pdf.

Glaessel, T., Seefried, J., and Franke, J. 2017. Challenges in the Manufacturing of Hairpin Windings and Application Opportunities of Infrared Lasers for the Contacting Process. 7th Int. Elect. Drives Prod. Conf(EDPC) 1-7.

Holman, J. 2020. EVs to Make Up Third of New Cars Sold Globally by 2030: Deloitte. S&P Global Commodity Insights. July 28 2020. Retrieved from https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-in-sights/latest-news/electric-power/072820-evs-to-make-up-third-of-newcars-sold-globally-by-2030-deloitte.

Hwang, Dongsoo and Gho, Mihye. 2012. Development and Application of Realtime Weld Quality Monitoring System. Journal of Welding and Joining 30(1):44-50.

Jamie, H., Bryn, W., and Michael, W. 2022. Electric Vehicle Market Outlook. Deloitte Insight 7-8.

Kang, Jihun and Ku, Namkug. 2019. Verification of Resistance Welding Quality Based on Deep Learning. Journal of the Society of Naval Architects of Korea 56(6):473-479.

KCS 14 00 00. 2019. Structural Materials Corporation, Welding 2019.

Kim, Heewoon, Cho, Gyuwon, Ma, Junyung, and Song, Myongken. 2022. Winding Structure Design and Analysis of Traction Motor for EV using Hairpin Winding. The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers 2022.07:1065-1066.

Kim, Iljung, Kim, Woosoon, Kim, Joonyoung, Chae, Heesu, Woo, Jiyeong, Do, Kyungmin, Lim, Sunghoon, Shin, Minsoo, Lee, Jieun, and Kim, Heungnam. 2022. Discovering Essential AI-based Manufacturing Policy Issues for Competitive Reinforcement of Small and Medium Manufacturing Enterprises. Journal of the Korean Society for Quality Management 50(4):647-664.

Kim, Kichan. 2017. Trend and Issue of Traction Motor Technology for Electric Vehicle. Journal of the Korea Society of Automotive Engineers 39(2):40-44.

Kim, Kihyun, Kim, Seongmok, and Kim, Yongsoo. 2023. A Study on Optimization of Classification Performance through Fourier Transform and Image Augmentation. Journal of the Korean Society for Quality Management 51(1):119-129.

Kim, Taewon, Han, Changmin, and Choi, Heawoon. 2020. Welding Quality Inspection Using Deep Learning. Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers Spring Conference 18-18.

Lee, Cheoleung, Kang, Kyunghun, and Lee, Myunwoo. 1994. A Study on the Effect of Glare Amount and Exposure Time on Visual Fatigue in Visual Inspection Work. Proceedings of the Korean Operations and Management Science Society Conference, 1994.01, 569-579.

Lee, Gwondong, Maeng, Juhyung, and Song, Seokil. 2019. Mobility Mode Classification Method for Trajectory Data Using CNN. Journal of Korean Institute of Information Technology 17(12):13-20,

Lee, Hyunggeun, Hong, Yongmin, and Kang, Sungwoo. 2021. Identifying Process Capability Index for Electricity Distribution System through Thermal Image Analysis. Journal of the Korean Society for Quality Management 49(3):327-340.

Lee, Kidong, Yi, Sung, Hyun, Soonkeun and Kim, Cheolhee. 2021a. Review on the Recent Welding Research with Application of CNN-Based Deep Learning Part I: Models and Applications. Welding and Joining 39(1):10-19.

Lee, Kidong, Yi, Sung, Hyun, Soonkeun and Kim, Cheolhee. 2021b. Review on the Recent Welding Research with Application of CNN-Based Deep Learning Part II: Model Evaluation and Visualizations. Welding and Joining 39(1):20-26.

Lee, Yonghwan and Kim, Youngseop. 2020. Comparison of CNN and YOLO for Object Detection. Journal of the Semiconductor & Display Technology 19(1):85-92.

Oliver B., Nicolai S., Matthias B., and Tim H. 2020. Reduction of Spatter and Pores in Laser Welding of Copper Hairpin Using two Superimposed Laser Beams. Korean Society off Laser Processing 23(12):14-20.

Tan, M. and Le, Quoc V. 2019. Efficientnet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks. Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning. Long Beach, CA, PMLR 97. https://arxiv.org/pdf/1905.11946.

Woo, Minyeong, Noh, Sihun, Jun, Sungbae, Kim, Yongjae, and Jung, Sangyong. 2021. Analysis of Copper Loss Characteristic According to Conductor Configuration of Hairpin Winding on EV Propulsion Motors. Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers Conference 2021.11, 171-173.

저자소개

이승준 숭실대학교 대학원 IT정책경영학과에 박사과정 재학 중이며, 현재 DB손해보험 디지털 혁신조직에서 오픈이노베이션과 IT 및 정보보호 조직 혁신 담당자로 재직 중이다. 주요 연구 관심 분야는 인슈어테크, 인공지능, 빅데이터 등이다.

심진섭 숭실대학교 대학원 IT정책경영학과에 박사과정 재학 중이며, 현재 DB손해보험 디지털 혁신조직 총괄 임원으로 재직 중이다. 주요 연구 관심 분야는 서비스품질, 오픈이노베이션 플랫폼 등이다.

최정일 미국 University of Nebraska-Lincoln에서 경영학 박사학위를 취득하였으며, 프랑스 인시아드(INSEAD)에서 초빙연구원과 미국 Merrimack 대학에서 경영학부 교수를 역임한 후 현재 숭실대학교 경영학부 교수로 재직 중이다. 주요 연구 관심 분야는 디지털 품질경영, 효율적 서비스 운영 및 설계, IT기반의 서비스 혁신전략 등이다.