논문 2023-18-14

식품 및 축산물 금속검출기를 위한 네트워크 기반 자동화 시스템 설계

(Design of Network-based Automation System for Detecting Metallic Objects in Food and Livestock)

조 항 석, 이 동 익*
(Hang-Seok Cho, Dongik Lee)

Abstract : This paper presents a network-based automation system for the detection of metallic objects in food and livestock. A metal detector is a core equipment used for the inspection required by HACCP. Since the existing metal detectors are manufactured as a single-body equipment, it is difficult to take into account various user requirements for the system. In order to overcome the drawback, this study presents a network-based automation system for metal detector utilizing an industrial fieldbus and modular components. The proposed system can effectively consider the various customer requirements and control schemes. The proposed system can also achieve the improvement in speed and success rate of detecting metallic objects. The effectiveness of the proposed system is demonstrated through a various experiments.

Keywords : Metal Detector, HACCP, Automation, Networked System, Belt Conveyor Modeling

Ⅰ. 서 론

현대 사회에서 건강과 위생에 관한 식품 안전의 중요성은 아무리 강조해도 지나침이 없다. 정부는 식품에 사용될 수 없는 부적합한 첨가물, 이물질, 유독·유해 물질 등의 함유에 관한 규제를 식품위생법으로 명확히 정의하고 엄격하게 시행하고 있다 [1]. 최근에는 식품 관련 기준 적합도를 표시하는 식품 인증제 역시 확대되고 있다. 대표적인 인증제로 HACCP (hazard analysis critical control point), 농림수산식품부 및 농림축산식품부의 친환경 인증을 수행하는 GAP (good agricultural practices), 유기농·무농약·무항생제·유기가공식품 인증, KS (Korean industrial standards) 인증 가공식품 등이 있다 [2]. 이 가운데 식품안전관리 인증의 기준이 되는 HACCP은 유해성 분석과 관리사항을 강조한다. 즉, 식품의 초기 양산부터 출하까지 전체 공정을 지속적으로 관리함으로써 식품의 안전성과 신뢰도를 확보하고 품질을 보증하는 체계적이고 효율적인 관리 시스템이다 [3].

HACCP에서 요구하는 검사 기준 가운데 생산 시스템의 외포장 직전에 실시하는 '중금속 및 금속성 이물질 검사' 공정이 있다. 2022년도 식품안전 관리 지침에 따르면 농·임산물, 수산물 등을 금속 재질의 분쇄기로 분쇄하는 경우 금속검출기를 사용하여 상기 검사를 진행하여야 한다 [4]. 금속검출기는 식품 생산 과정에서 혼입될 수 있는 중금속 및 금속성 이물질을 미리 감지하여 판별하고 제거하는 장비이다.

금속검출기의 동작 원리를 살펴보면, 사각형 또는 원형의 송·수신 코일에 전자장을 발생시킨 후 생성되는 전기 신호의 균일성을 측정하여 코일 내부에 포함된 자성 물질 또는 전도성 물질을 감지한다 [5]. 일반적으로 컨베이어 반송 방식 금속검출기가 사용된다. 구동 중인 컨베이어 위에 금속 함유 제품이 감지되면, 컨베이어가 정지한 후 작업자가 수동으로 이를 제거하고 HMI (human machine interface) 상의 재기동 스위치를 입력하여 재가동한다. 기존 금속검출기는 제작사에 의해 일체형 제품으로 생산되며 이를 위해 PCB (printed circuit board) 기반의 자체 개발 제어기를 사용한다. 그 결과 고객의 요구사항을 반영하기 어려운 단점이 있다. 고객의 요구사항이 추가 또는 변경될 경우 실제 제품에 반영하는 것이 제한적일 뿐 아니라 PCB 제어기를 재설계하는 번거로움이 발생한다.

본 논문에서는 다양한 고객 요구사항을 유연하게 반영할 뿐 아니라 시스템의 효율성도 개선할 수 있는 금속검출기를 제안한다. 먼저 PCB 기반 제어기를 대신하여 산업용 자동화 시스템과 발전소 등에 사용되는 PLC (programmable logic controller) [6]를 이용한다. 검사대 위에 놓인 제품의 공급, 불량품 판별 및 제거, 양품 통과까지 전 공정을 모듈화 및 네트워크 기반으로 자동화하고 다양한 데이터를 모니터링할 수 있도록 설계한다. 이를 위해 금속검출기의 부품에 대한 수학적 모델링을 도출하고 이를 기반으로 제품의 속도, 판별 성능, 안전 계수, 마찰 계수 등에 대한 설계 파라미터를 체계적으로 선정한다. 제안된 금속검출기를 실제 제작하여 효용성을 검증한다.

*Corresponding Author (dilee@ee.knu.ac.kr)
Received: Mar. 2, 2023, Revised: Apr. 30, 2023, Accepted: May 4, 2023.
H. S. Cho: Kyungpook National University (M.S. Student)
D. I. Lee: Kyungpook National University (Prof.)
※ 이 논문은 2022학년도 경북대학교 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었음.

ⓒ IEMEK J. Embed. Sys. Appl. 2023 Jun. 18(3) 109-116
ISSN : 1975-5066
http://dx.doi.org/10.14372/IEMEK.2023.18.3.109

SMART FACTORY AUTOMATION SYSTEM			
OPC UA Server	SCADA/POP	PROCESSOR	CONTROLLER
AI	VR/XR/MR	SENSOR	CPS
HMI	ROBOT	IOT	SOFTWARE
ACTUATOR	NETWORK	DEVICE	ETC.

그림 1. 공정 자동화 시스템 구성 요소
Fig. 1. Common components for factory automation system

Ⅱ. 금속검출기 구성 요소

1. 시스템 구성 요소

본 논문에서 다루는 금속검출기의 자동화는 전형적인 공정 자동화 문제 중 하나로 볼 수 있다. 최근에는 농축산 관련 공정 자동화 기술에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다 [7-9].

일반적으로 공정 자동화에 요구되는 구성 요소는 그림 1과 같다. 이 가운데 금속검출기에서 필요한 핵심 요소는 제어컴퓨터, 센서, 액추에이터, 시스템 운용 소프트웨어, 통신 네트워크 등을 포함한다. 각 요소에 대한 상세한 설명은 아래와 같다.

1.1 제어컴퓨터

제어컴퓨터는 자동화 시스템의 모든 요소를 관리하고 제어, 측정, 분석 등을 수행한다. 본 논문은 산업 네트워크 자동화에 관련된 실험으로, PCB 기반 제어기를 제외하고, 신뢰성과 안정성이 뛰어나고 모듈화 및 네트워크 적용에 용이한 PLC를 제어기를 활용한다 [10, 11].

PLC는 제어에 필요한 센서 및 액추에이터 관리, 주요 데이터의 수집 및 관리를 위한 HMI 기능을 함께 수행한다. 본 논문에서는 PLC를 위한 국제표준 프로그래밍 언어 IEC 61131-3 [12]을 이용하여 공정 제어를 구현한다.

1.2 센서

공정 자동화 시스템에서는 물체의 위치, 상태, 온도, 습도, 금속 유무, 속도, 전기적 신호, 빛, 열 감지 등의 다양한 센서가 활용되고 있다. 4차산업혁명 기술의 발전과 함께 센서의 활용도가 급속히 증가하고 있으며, 최근에는 인공지능이 적용된 지능형 센서도 개발되고 있다 [13]. 본 논문에서는 금속 및 비금속 물질의 판별과 위치 검출을 위해 금속 센서 (inductive proximity sensor), 용량형 센서 (capacitive proximity sensor), 광 센서 (optical proximity sensor), 마그네틱 스위치 (magnetic switch)를 적용한다.

1.3 액추에이터

액추에이터는 공기, 유체, 전기 등의 에너지원을 받아 기계적인 동력으로 변환하는 장치이며, 직선, 회전, 진동 운동을 만들 수 있다. 일반적으로 공압 실린더, 유압 실린더, 모터, 밸브, 펌프 등이 사용된다 [14]. 본 논문에서는 전기모터와 실린더에 사용한다.

1.4 시스템 운용소프트웨어

IEEE는 다음과 같이 시스템 운용소프트웨어를 정의한다: "컴퓨터 프로그램, 절차 및 컴퓨터 시스템의 작동과 관련된 문서 및 데이터" [15]. 본 논문에서는 금속검출기의 제어, HMI, 통신 등에 필요한 시스템 운용소프트웨어를 설계한다.

1.5 통신 네트워크

본 논문에서는 실시간 전송을 지원하는 산업용 네트워크를 사용하여 금속검출기의 구성 모듈과 요소들의 데이터를 공유한다. 산업 현장에서는 소음, 온도, 습기, 진동 등 열악한 환경 요소가 존재하며, 자동화 장비의 통신 불안정은 기업의 큰 손실로 이어진다. 따라서 자동화 시스템의 통신 네트워크는 안정적 성능과 높은 신뢰성이 요구된다 [16]. 대표적인 산업용 통신 프로토콜에는 CAN, modbus, profinet, CC-link, RS-485 등이 있다.

1.6 컨베이어

금속검출기에서 검사를 수행할 식품의 운반을 위해 사용된다. 효율적 설계를 위해서는 벨트, 베어링, 롤러, 모터, 풀리 등 다양한 요소와 구조에 대해 충분한 주의와 연구가 필요하다 [17].

2. 시스템 모델링

컨베이어, 펌프, 발전기 등 모터가 들어가는 장비 또는 시스템의 경우, 해당 요구사양에 맞도록 모터를 선정하는 것이 그 시스템의 신뢰성, 경제성, 성능 등을 좌우하는 중요한 요소이다. 모터의 모델링은 구동 기구, 요구 사양, 환경 등에 따라 다양한 관계식을 적용할 수 있다. 본 논문에서 다루는 반송 방식 컨베이어 금속검출기는 이송 제품이 직선 운동을 하는 평면상의 벨트 컨베이어를 고려하여 구동 모터를 모델링하고 필요한 설계인자를 도출한다.

2.1 모델링 고려 사항

모터의 선정은 환경, 제어 사양, 기구 조건 등 여러 변수에 따라 다양한 고려 사항이 존재하며, 그에 따른 모델링도 달라질 수 있다. 본 논문에서는 다음과 같은 사항을 중점적으로 고려한다.

먼저, 모터에 부착될 기구 조건에 대한 정보를 수집 및 선정한다. 즉, 모터의 구동 방식인 랙피니언 (rack and pinion), 벨트와 와이어 (belt and wire), 볼 스크류 (ball and screw), 풀리 (pulley), 롤러 (roller) 등을 선정한다. 이어서 무게, 치수, 외력, 계수 등 부하에 관한 정보를 수집 및 선정한다. 또한 고객 요구 사양 또는 시스템 사양으로 이송 속도, 정확도, 가동 시간, 사이클 타임, 생산 속도, 환경 등을 고려한다. 끝으로 상기 데이터를 참고하여 모터의 필요 토크 및 부하 토크, 관성 모멘트, 안전 계수, 감속비 등을 고려한 수학적 모델링을 진행한다. 이와 같이 도출된 모델을 이용하여 요구 사양을 충족하는 모터와 감속기를 선정한다 [18].

2.2 기구물 및 요구 사양

그림 2와 같이 벨트 컨베이어를 설계한 후 기구에 대한 조건과 요구 사양을 선정한다. 실제 제품을 소형화하여 재구성하였으며 각 데이터 및 고려 항목은 다음과 같다. 벨트와 이송 제품의 총 무게 m_1, 모터와 연결된 롤러의 무게 m_2, 롤러의 지름 D_1, 외력 F_1, 미끄럼면의 마찰 계수 μ_1, 벨트와 롤러의 효율 η_1, 감속기의 전달 효율 η_2, 벨트의 속도 $V_1 \pm 10\%$을 고려하며 롤러1과 롤러2의 무게와 지름은 같다.

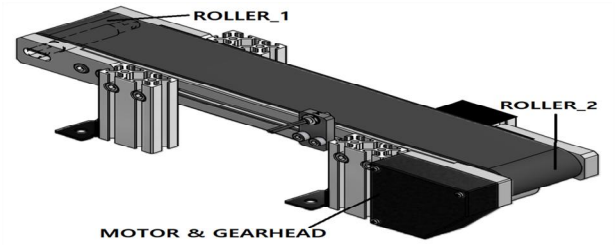

그림 2. 컨베이어 벨트
Fig. 2. Conveyor belt

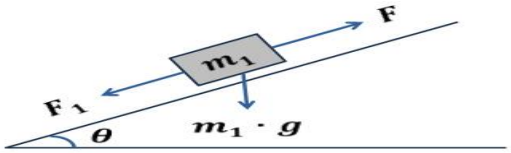

그림 3. 경사면 이동 시 힘의 관계
Fig. 3. Relationship of forces in slope movement

2.3 감속비

롤러 컨베이어 속도는 식 (1)과 같으므로 롤러 속도 (구동 기어 속도) N_1는 식 (2)와 같이 기술할 수 있다.

$$V_1 = N_1 D_1 \pi, \tag{1}$$

$$N_1 = \frac{V_1}{D_1 \pi}. \tag{2}$$

감속비의 계산식은 다음과 같이 표현한다.

$$i = \frac{z_1}{z_2} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{N_2}{N_1}. \tag{3}$$

여기서 구동 기어 이수 z_1, 피동 기어 이수 z_2, 구동 기어 지름 d_1, 피동 기어 지름 d_2, 피동 기어 회전수 N_2을 나타낸다. 피동 기어 회전수는 AC 모터의 경우, 아래와 같은 식 (4)을 만족하며, 주파수 f_1, 극 수 P_1이다. DC 모터의 경우 해당 모터의 사양에 표기되어 있다.

$$N_2 = \frac{120 f_1}{P_1}. \tag{4}$$

2.4 필요 토크

그림 3에서 수평면을 이동할 시, 이동하는 힘 F는 식 (5)의 관계를 갖는다. 미끄럼면의 마찰력 F_f는 관계인 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = m_1 \mu_1 g, \tag{5}$$

$$F_f = m_1 \mu_1 g + F_1. \tag{6}$$

회전 모멘트 T는 식 (7)의 관계를 갖는다. 벨트와 롤러의 효율 η_1을 고려하여 감속기 출력축 부하 토크 T_L는 다음과 같이 정의한다.

그림 4. 점 질량 관성 모멘트 관계
Fig. 4. Point mass inertial moment relationship

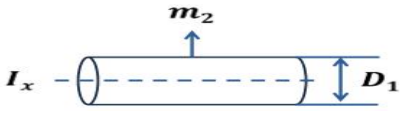

그림 5. 고체 원주의 관성 모멘트 관계
Fig. 5. Inertial moment relationship of solid column

$$T = Fr, \tag{7}$$

$$T_L = \frac{F_f D_1}{2\eta_1}. \tag{8}$$

식 (8)에서 안전 계수 S는 1.5~2를 고려하여, 감속기 출력축의 총 부하 토크 T_{LS}는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{LS} = T_L S. \tag{9}$$

위 관계식으로부터 모터와 감속기를 선정한다. 이어서 모터의 출력축 토크 T_{Motor}는 식 (10)을 이용하여 도출한다. 선정한 모터의 기동 토크 T_r이 식 (11)의 조건에 만족하는지 확인한다.

$$T_{Motor} = \frac{T_{LS}}{i\eta_2}, \tag{10}$$

$$T_{Motor} < T_r. \tag{11}$$

2.5 관성 모멘트

그림 4와 같이 점의 질량의 경우 식 (12)와 같은 관성 모멘트 I_1의 관계를 갖는다.

$$I_1 = m_1 r^2 = m_1 (\frac{C}{2\pi})^2. \tag{12}$$

C는 원둘레를 의미한다. 만약 이산적인 질량 m_i 또는 연속적인 질량 δm이 분포 할 경우, 각각 (13), (14) 관계식을 참고한다.

$$I = \sum_i m_i r_i^2, \tag{13}$$

$$I = \int_0^M r^2 \delta m. \tag{14}$$

그림 5에서 고체 원주 (롤러) 관성 모멘트 I_x는 식 (15)의 관계가 성립한다. 여기서 롤러는 총 2개이므로, $2I_x$와 같이 표현할 수 있다. 총 감속기 출력축의 부하 관성 모멘트 I_T는 식 (16)과 같은 관계를 갖는다. 선정한 감속기의 허용 부하 관성 모멘트 I_A는 식 (17)의 관계식을 만족하여야 한다.

$$I_x = \frac{1}{2} m_2 r^2 = \frac{m_2}{2} (\frac{C}{2\pi})^2, \quad (15)$$

$$I_T = I_1 + 2I_x, \quad (16)$$

$$I_T < I_A. \quad (17)$$

Ⅲ. 금속검출기 자동화 시스템 설계

본 논문에서는 그림 6과 같이 금속과 비금속의 제품이 혼재하는 적재함으로부터 제품을 자동 공급하여 금속과 비금속을 판별한 후, 금속과 비금속을 분류하여 배출 및 적재하는 자동화 시스템을 설계한다. PLC, HMI, 네트워크, 전기적 신호 등을 이용하여, 생산 공정 현황, 데이터 등을 모니터링하고 공정을 관리할 수 있도록 구현한다. 컨베이어 반송 방식 시스템의 모델링을 통하여 고객 요구 사양 및 성능을 만족하는 모터와 감속기를 선정하여 적용한다.

1. 제어기 설계

그림 7에서 'a'는 Q61P 모듈이며, AC 전원 입력 시 DC5V, 6A를 출력하는 전원 공급 장치이다. 'b'는 Q03UDV 모듈이며, CPU 및 PLC라 불린다. 현대의 PLC는 단순한 순차 제어가 아니라 모든 제어 요소와 지속적인 컴퓨터 개발 기술이 복합적으로 연결된 고신뢰성의 산업용 컴퓨터이다 [19]. 즉 본 시스템의 모든 제어, 신호, 통신 체계를 총괄하는 핵심 장치이다. 'c'는 QX40 모듈로 디지털 입력 모듈이다. 전기적 신호 타입에 따라, 포토 커플러 (photo coupler), 릴레이 (relay), NPN 트랜지스터 (positive common), PNP 트랜지스터 (negative common) 등으로 나뉜다. 본 논문에서는 NPN 트랜지스터 타입에 포토커플러 방식을 적용하였다. 'd'는 QY10 모듈로 디지털 출력 기능을 수행한다. 실린더, 모터, 램프, 타 제어기 등으로 출력 신호를 내보낸다. 디지털 입력 모듈과 같이 전기적 신호 타입에 따라 신호 체계가 다르다. HMI는 PLC와의 인터페이스를 통하여 다양한 데이터와 상태를 확인할 수 있다. 고객이 원하는 데이터와 입/출력 신호를 빠르게 적용하고 업데이트 및 기능 추가/제거가 용이하도록 다양한 기능을 제공한다.

2. 센서 모듈 구성

센서는 제어기의 디지털 입력 모듈과 결선을 진행했다. 본 논문에서 사용한 센서의 종류는 크게 4가지며, NPN 트랜지스터 타입의 마그네틱 스위치, 유도형 광센서, 용량형 광센서, 광 근접 센서를 사용하였다. 아래 내용은 참고문헌 [20, 21]에 근거한다.

마그네틱 스위치는 시스템에 사용되는 모든 실린더에 그림 8와 같이 부착되어 있다. 실린더의 구조 중 피스톤 로드의 뒷부분에 영구 자석이 부착되어 피스톤 로드의 전진 및 후진 시 그 영구 자석이 마그네틱 스위치에 감지되는 원리이다 [20]. PLC와 HMI를 통하여 실린더의 전/후진 상태를 확인할 수 있다.

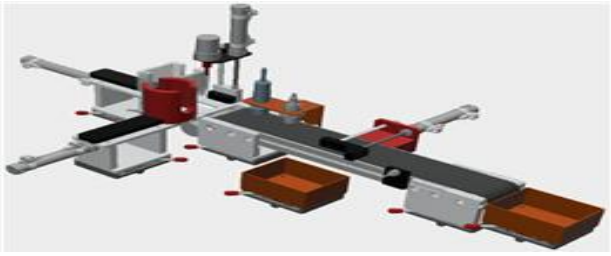

그림 6. 자동화 컨베이어 반송 방식 금속검출기 3차원 기구 설계
Fig. 6. 3D design drawing for automatic conveyor transfer type metal detector

그림 7. 프로세서
Fig. 7. Processor

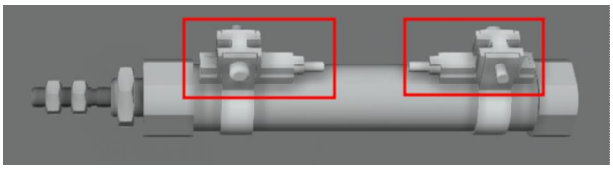

그림 8. 마그네틱 스위치
Fig. 8. Magnetic switch

유도형 광센서는 금속 도체의 감지에 사용되며, 이는 페라이트 코어에 코일을 감음으로써 유도 코일이 형성된다. 여기에 교류 전류를 흘리면 전자기장이 형성된다. 전자기장 내부로 금속 도체 투입 시 금속 도체에 와전류가 흐르며 열손실이 일어나므로 저항과 인덕턴스의 임피던스 값이 변화하는데, 이 값을 이용하여 금속을 검출한다.

용량형 광센서는 정전기장이 생성되고 유도형 광센서와 유사하지만, 저항과 인덕턴스의 임피던스 변화가 아닌 커패시턴스의 임피던스 값의 변화를 이용한다. 유전율 상수에 따라, 액체, 비금속, 금속의 검출이 가능하다. 따라서, 유도형 광센서는 금속 검출, 용량형 광센서는 비금속 검출에 적용한다.

광섬유 센서는 직접 반사 검출 방식이며, 앰프를 통해 평행한 두 케이블 중 한 곳으로 광 투과를 진행한다. 이때, 물체가 놓이면 반사광이 다른 한 케이블로 진입하는 데 이를 감지한다. 여기서 광섬유 센서는 물체의 유무를 확인하기 위해 부착한다.

3. 액추에이터 구성

본 논문에 사용된 액추에이터는 그림 9와 같이 4가지로 나뉜다. 'a'는 복동 실린더 (double acting cylinder)이며, 이 중 솔레노이드 밸브를 이용한다. 'b'와 'c'는 단동 실린더 (single acting cylinder)이며, 싱글 솔레노이드 밸브를 사용한다. 'a'는 적재함에 제품이 있을 시 배출을 진행하고, 'b'는 배출된 제품을 컨베이어 반송 방식 금속검출기로 공급한다.

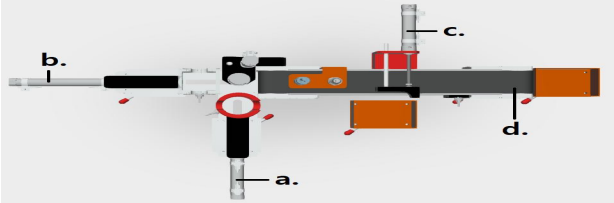

그림 9. 액추에이터 평면도
Fig. 9. Actuator floor plan

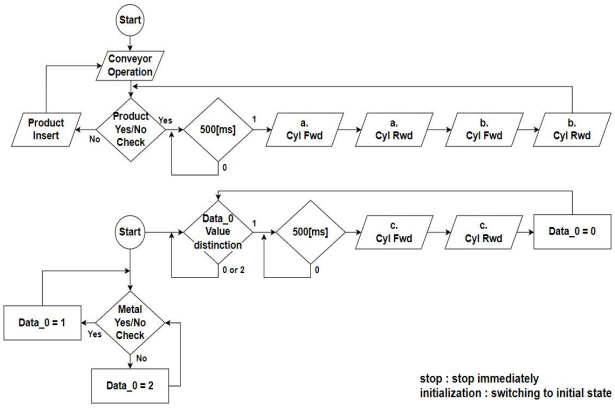

그림 10. 공정 자동화 시스템 순서도
Fig. 10. Automation system flow chart

'c'는 금속 검출 시 불량 적재함으로 배출하는 역할을 담당한다. 'd'는 전기모터로 컨베이어 구동 동력의 근원이며 제품의 이송을 진행한다.

4. 시스템 운용 소프트웨어 구성

GX_Works2는 PLC (Q03UDV)의 소프트웨어로 프로세서, 액추에이터, 센서, 네트워크의 요소에 대해 파라미터 설정 및 신호 처리, 네트워크 통신 설정, 프로그램 로직 작성 등이 가능하다. XP_Builder는 HMI 소프트웨어로 TCP/IP 프로토콜을 이용하여 PLC의 데이터 및 상태 외의 신호를 받아 화면상의 표기가 가능하다. PLC로의 데이터 입력, 디지털 입력 등의 신호 출력 등 다양한 작화 구현이 가능하다. 본 시스템의 구동에 대한 공정 순서도는 그림 10과 같으며, 위에서 언급한 명칭과 같도록 구성하였다.

위 프로그램 개발은 PLC 소프트웨어의 LD (ladder logic diagram) 언어와 ST (structured text) 언어를 이용하여 진행한다. 여기서 LD 언어는 릴레이 회로를 기반으로 작성하는 그래픽 언어이며, 주 공정 운용 프로그램에 개발에 사용하고, ST 언어는 텍스트 언어로 수치 연산, 통신, 데이터 처리에 관한 프로그램 개발에 사용한다.

5. 통신 네트워크 구성

산업용 네트워크는 다양한 프로토콜이 존재하며 본 연구는 TCP/IP 프로토콜 방식의 반 이중 통신 방식으로 그림 11과 같이 구성한다.

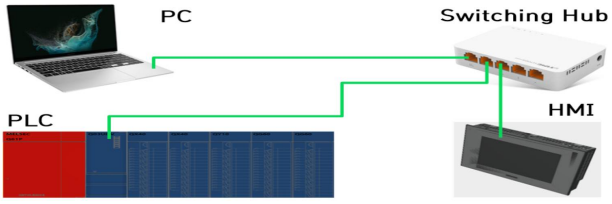

그림 11. 네트워크 구성도
Fig. 11. Network configuration

그림 12. 컨베이어 기구 구성도
Fig. 12. Configuration of conveyor belt

6. 컨베이어 파라미터 선정

6.1 기구물 사양

그림 12에서 벨트와 이송 제품의 총무게 $m_1 = 3.87kg$, 모터와 연결된 롤러의 무게 $m_2 = 0.2kg$, 롤러의 지름 $D_1 = 30mm$, 외력 $F_1 = 0N$, 미끄럼면의 마찰 계수 $\mu_1 = 0.3$, 벨트와 롤러의 효율 $\eta_1 = 0.9$, 감속기의 전달 효율 η_2, 벨트의 속도 $V_1 = 85mm/\sec \pm 10\%$와 같이 선정하였다. 기타 외부 외력은 존재하지 않으며, 롤러1과 롤러2의 무게와 지름은 같다. 또한, 모터에서 롤러2로의 동력 전달 요소인 모터 측 풀리, 타이밍벨트, 롤러2 측 풀리 3가지의 전달 효율 $\eta_3 = 1$은 손실이 없다고 가정한다.

6.2. 감속비

롤러 속도 N_1는 식 (2)에 의해 $N_1 \fallingdotseq 54.1 \pm 5.4 rev/\min$ 로 주어진다. 피동 기어 회전수 N_2는 컨베이어 반송 방식 금속 검출기의 기준으로 대부분 AC 모터를 사용한다. AC 모터의 경우, 식 (4)에 의해 값을 구할 수 있다. 본 논문에서 설계한 시스템은 소형화 장비이므로 $N_2 = 5000\,rpm \pm 1\%$의 DC 모터로 대체하여 계산한다. 감속비 i는 식 (3)에 의해 $i \fallingdotseq 83 \sim 104$이므로 범위 내의 $i = 104$을 선정한다.

6.3 필요 토크

미끄럼면의 마찰력 F_f는 식 (6)의 관계로 인해 $F_f \fallingdotseq 11.4N$ 으로 주어진다. 감속기 출력축 부하 토크 T_L는 식 (8)에 의해 $T_L = 0.19Nm$이 산출되며, 안전 계수를 고려한 T_{LS}는 식 (9)에 의해 $T_{LS} = 0.38Nm$이다. 위 값으로부터 모터와 감속기의 선정 사양은 아래 표 1 및 표 2와 같다. 최종적으로 선정한 모터가 식 (11)의 조건에 만족하는지 검토한 후, 만족하지 않을 경우 해당 모터보다 $1size$ 상위 제품을 선정하여 재검토한다.

6.4 관성 모멘트

선정한 감속기의 관성 모멘트를 산출한다. 벨트와 이송 제품에 관한 관성 모멘트 I_1는 식 (12)에 의해 $I_1 = 87 \times 10^{-5} kgm^2$의 값을 얻는다. 롤러1의 관성 모멘트 I_x는 식 (15)의 관계로, $I_x = 2 \times 10^{-5} kgm^2$이다. 이때, 롤러1은

표 1. 모터 사양
Table 1. Motor specifications

model name	$GM6A-3229E$
rated torque	$62\,gfcm$
rated speed	$5{,}000\,rpm$
rated current	$210\,mA$
no load speed	$6{,}200\,rpm$
no load current	$60\,mA$
rated power	$3.17\,W$

표 2. 감속기 모터 사양
Table 2. Reducer motor specifications

model name	$GM6A-3229$
reducer length	$29.6\,mm$
weight	$192\,g$
reduction ratio	$1/104$
rated torque	$3.8\,kgfcm$
rated speed	$48\,rpm$
no load speed	$59\,rpm$

롤러2와 일치하므로 이 두 부품의 관성 모멘트는 $2I_x$가 성립한다. 총 감속기 출력축의 부하 관성 모멘트 I_T는 산출한 관성 모멘트의 총합이므로 $I_T = 91\times10^{-5}\,kgm^2$이다. 이때 선정한 감속기의 허용 부하 관성 모멘트 I_A는 식 (17)의 관계를 만족하므로 컨베이어 벨트 구동에 문제가 되지 않는다.

Ⅳ. 시스템 구현 및 성능 검증

1. 시스템 구현

그림 13은 본 논문에서 제시한 사항을 적용하여 구현한 자동화 컨베이어 반송 방식 금속검출기이다. 다양한 실험을 통해 본 논문의 연구 결과를 검증하였다.

2. HMI 구현

본 논문에서 설계한 시스템은 다양한 HMI 화면을 포함하고 있다. 그림 14는 공정 시작, 정지, 초기화 지령을 내리고 목표 수량 (target value) 입력 시 해당 수량을 배출 후 공정이 정지하는 것을 보여주며, 금속과 비금속의 검출 비율을 확인할 수 있다.

그림 15은 액추에이터 및 센서의 상태 및 동작 상황의 확인 및 수동 조작이 가능하며, 오동작 및 기계 결함의 파악이 가능하다.

그림 16은 각종 생산 현황과 모터 성능, 속도, 실린더 구동 횟수, 시스템 스캔 타임, 공정 구동 시간, 양품과 불량률 등의 데이터 취득을 진행하고 있다.

본 시스템의 성능을 확인하기 위해 모델링을 통해 추정한 속도와 실제 속도 사이의 오차, 그리고 금속 이물질 판별률에 대한 데이터를 획득하였다. 그림 17에 제시한 그래프와 같이 벨트의 목표 속도 $V_1 = 85\,mm/\sec \pm 10\%$에 대해 현재 속도를 초 단위로 읽어와 평균 속도를 제시한다.

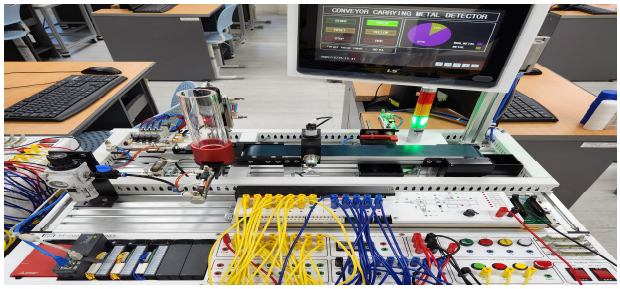

그림 13. 제안한 시스템의 구현 사진
Fig. 13. Picture of proposed system

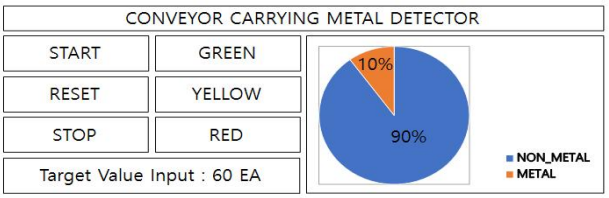

그림 14. HMI 화면 구성 1
Fig. 14. HMI screen configuration 1

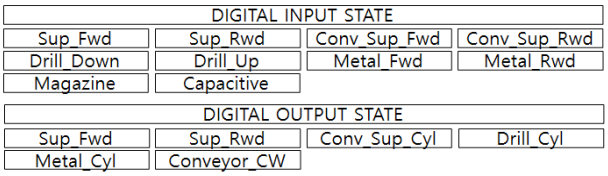

그림 15. HMI 화면 구성 2
Fig. 15. HMI screen configuration 2

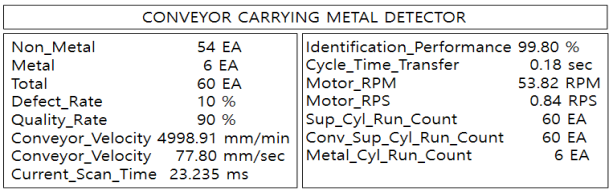

그림 16. HMI 화면 구성 3
Fig. 16. HMI screen configuration 3

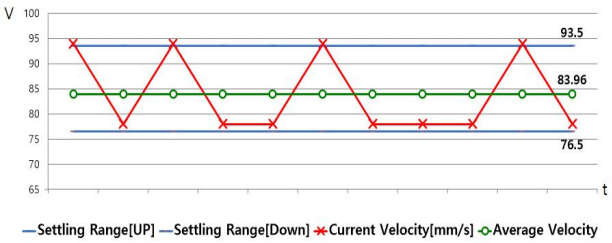

그림 17. HMI 화면 구성 4-1
Fig. 17. HMI screen configuration 4-1

그림 18은 목표 수량에 대하여, 양품, 불량, 총 투입 수량의 확인 즉 판별률에 관한 확인이 가능하며, 실시간으로 반영된다.

그림 19는 목표 속도와 현재 속도에 관한 성능 표이다. 현재 속도의 평균과 목표 속도를 비교하여 1분 간격으로 출력한다.

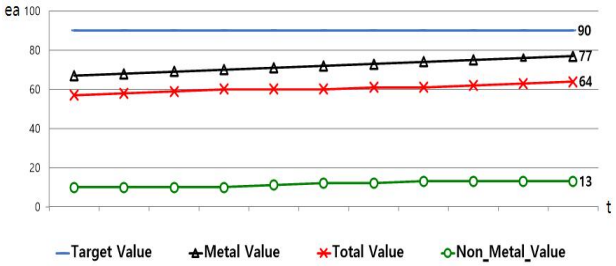

그림 18. HMI 화면 구성 4-2
Fig. 18. HMI screen configuration 4-2

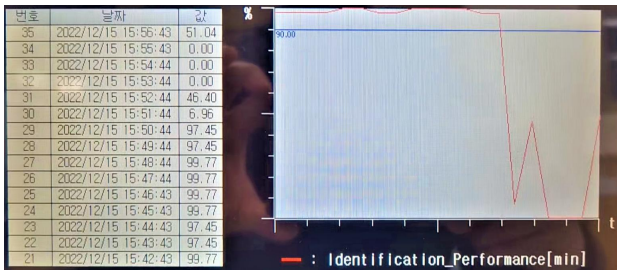

그림 19. HMI 화면 구성 5
Fig. 19. HMI screen configuration 5

표 3. 금속, 비금속 판별 성능 지수
Table 3. Metal, non-metal discrimination performance index

	Number of foods containing heavy metals [EA]	Number of foods free of heavy metals [EA]	Number of heavy metal foods detected [EA]	Detection rate [%]
1st	480	0	480	100
2nd	240	240	240	100
3rd	100	380	100	100
4th	10	470	10	100
5th	0	480	0	100
ALL	830	1570	830	100

3. 실험 결과

표 3은 20분 동안 비금속과 금속의 비율을 매번 다르게 총 5회 투입하였을 때의 판별률이다.

그림 20는 30분 동안 1분 단위로 수학적 모델의 속도 $V_1 = 85mm/\sec \pm 10\%$와 실제 분당 컨베이어 평균 속도와의 오차를 나타낸다. 1차는 정지 상태, 2차는 정지 후 기동하는 영역으로 평균 성능이 저조한 상태를 보이며, 3차 이후 안정적인 영역에 들어오는 것을 확인하였다. 공정 시작에서 정상상태에 도달하기 전까지 일시적으로 오차가 크게 나타나지만, 실제 시스템은 정상상태에서 운용하므로 문제가 되지 않는다.

그림 21은 실험 결과 데이터를 기반으로 작성된 성능 지수 그래프이다. 위와 같이 1차, 2차는 낮은 성능 지수가 도출되나, 3차 이후 최저 95.1%이상의 높은 성능을 유지하는 것을 확인하였다.

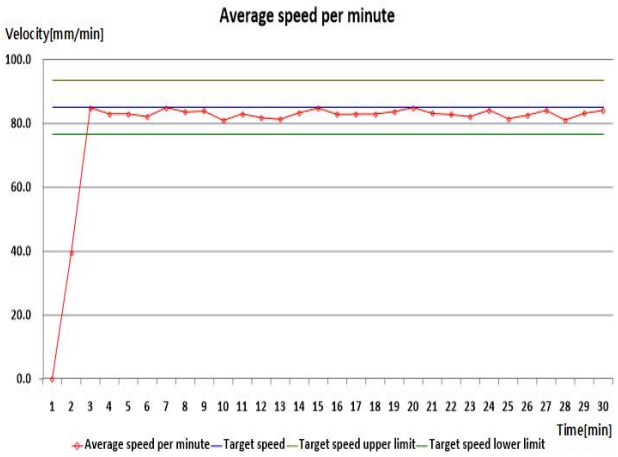

그림 20. 분당 평균 속도 그래프
Fig. 20. Average speed per minute graph

그림 21. 성능 지수 그래프
Fig. 21. Performance indices graph

V. 결 론

본 논문에서는 식품에 혼입된 금속을 검출하는 컨베이어 반송 방식 금속검출기를 위한 네트워크 기반 자동화 시스템을 제안하였다. 금속검출기는 HACCP에서 요구하는 '중금속 및 금속성 이물질 검사'에 활용되는 핵심 장비이다. 기존의 금속검출기는 일체형으로 제작된 탓에 시스템의 변경이 어려웠으며, 그 결과 기업과 고객의 다양한 요구사항을 적절히 반영하기 어려웠다. 본 논문에서는 기존의 일체형 시스템을 모듈화하고 네트워크 기반으로 자동화하였다. 이를 통해 고객과 기업의 다양한 요구사양과 제어 조건을 효과적으로 반영할 수 있으며, 금속 검출률과 검출속도 면에서 개선된 결과를 보였다. 제안된 시스템은 식품 검사 및 품질에 대한 균일화, 양산 수량 증대, 불량률 감소 등을 통해 기업의 지속적인 성장과 혁신에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] Food Sanitation Act [Enforced on July 27, 2021], Law No. 18363, July 27, 2021 (in Korean).

[2] G. H. Jung, “Ways to Improve Food Safety Certification System,” Health and Welfare Forum, Vol. 113, pp. 68-77, 2006 (in Korean).

[3] G. S. Sin, “The Concept and Necessity of HACCP,” Journal of the Korean Veterinary Medical Association, Vol. 42, No. 6, pp. 534-544, 2006 (in Korean).

[4] Food Safety Management Guidelines, Ministry of Food and Drug Safety, Administrative Publication Registration Number 11-1471000-000040-10, 2022 (in Korean).

[5] S. I. Cho, C. H. Jeong, N. J. Choi, “Preliminary Study for Developing Metal Detector in Food,” Journal of the Korean Society of Agricultural Machinery, pp. 157-163, 1997 (in Korean).

[6] S. Y. Lee, H. K. Lee, “A Study on the Enhancement of Reliability for PLC Control System,” Proceedings of KIIEE Annual Conference, pp. 267-272, 1999 (in Korean).

[7] G. S. Park, T. T. Tran, V. C. Dang, K. J. Gil, Y. B. Shin, J. W. Choi, J. W. Kim, ”A Development of Real-time Monitoring System in Industrial Factory Based on Cloud Platform Using IoT Device,” IEMEK J. Embed. Sys. Appl., Vol. 13, No. 1, pp. 25-32, 2018 (in Korean).

[8] Y. W. Kim, S. H. Paik, Y. J. Jon, D. K. Lee, H. B. Park, ”Implementation of Real-Time Monitoring System for Livestock Growth Environment Information Using Wireless Sensor Network,” IEMEK J. Embed. Sys. Appl., Vol. 7, No. 6, pp. 301-309, 2012 (in Korean).

[9] Y. Park, J. Moon, ”Smart Dairy Management System Development Using Biometric/Environmental Sensors and Farm Control Gateway,” IEMEK J. Embed. Sys. Appl., Vol. 11, No. 1, pp. 15-20, 2016 (in Korean).

[10] M. F. R. Al-Okby, S. Neubert, T. Roddelkopf, K. Thurow, “Mobile Detection and Alarming Systems for Hazardous Gases and Volatile Chemicals in Laboratories and Industrial Locations,” Sensors, Vol. 21, No. 23, pp. 8128, 2021.

[11] P. Kopacek, B. Kopacek. “End of Life Management of Automation Devices,” IFAC Proceedings Volumes, Vol. 45, No. 6, pp. 534-539, 2012.

[12] I. E. C. 61131-3: Programmable Controllers - part 3: Programming Languages, International Standard, Second Edition, International Electrotechnical Commission, Geneva, 1, 2003.

[13] H. J. Kim, H. B. Jin, W. S. Yeom, I. K. Kim, K. H. Park, “Intelligent Sensor Technology Trend for Smart IT Convergence Platform,” Electronics and Telecommunications Trends, Vol. 34, No. 5, pp. 14-25, 2019 (in Korean).

[14] B. Hannaford, J. Winters, “Actuator Properties and Movement Control: Biological and Technological Models,” Multiple Muscle Systems: Biomechanics and Movement Organization, pp. 101-120, 1990.

[15] M. A. IEEE Standards Coordinating Committee, “IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology(IEEE std 610.12-1990),” Los Alamitos. CA: IEEE Computer Society, pp. 1-84, 1990.

[16] Z. Lin, S. Pearson, “An Inside Look at Industrial Ethernet Communication Protocols,” Texas Instruments, White Paper, 2013.

[17] A. Prikhodko, “Dynamic Analysis of Intermittent-motion Conveyor Actuator,” Actuators, Vol. 10, No. 8, pp. 174, 2021.

[18] O. Motor, “Motor Sizing Calculations,” Orientalmotor, 2013.

[19] U. K. Gwon, J. H. Park, R. H. Jang, “Trends and Prospects of PLC-related Technology, ” The Magazine of the IEIE, Vol. 23, No. 12, pp. 44-57, 1996 (in Korean).

[20] T. Reininger, F. Welker, M. Von Zeppelin, “Sensors in Position Control Applications for Industrial Automation,” Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 129, No. 1-2, pp. 270-274, 2006.

[21] M. Gajjar, Mobile Sensors and Context-Aware Computing, Morgan Kaufmann Publishers, 2017.

Hangseok Cho (조 항 석)

2021 Mechanical Engineering from Yeungnam University College (B.S.)

2023~Industrial Engineering from Kyungpook National University (M.S. Student)

Career:

2017~2019 Control System Engineer, IEG

2019~Painting System Genaral Manager, DASEO

Field of Interests: Manufacturing automation, Control system, Painting system, Network system

Email: gkdtjr0101@gmail.com

Dongik Lee (이 동 익)

1987 Electronics Engineering from Kyungpook National University (B.S.)

1990 Electronics Engineering from Kyungpook National University (M.S.)

2002 Complex Systems Control Engineering from Sheffield University, U.K. (Ph.D.)

2005~Electronic and Electrical Engineering from Kyungpook National University (Prof.)

Career:

1990~1997 Researcher, Agency for Defense Development

2002~2005 Co-founder and CTO, DRTS Ltd, U.K.

Field of Interests: Design of real-time networked control for various safety-critical applications, including autonomous underwater vehicles, wind turbines, and intelligent automobiles

Email: dilee@ee.knu.ac.kr