JKSCI

한국컴퓨터정보학회논문지
Journal of The Korea Society of Computer and Information
Vol. 31 No. 11, pp. 397-405, November 2026
https://doi.org/10.9708/jksci.2026.31.11.397

PLC and Raspberry Pi-Based Closed-loop PR Contamination Suppression System for Spin Coater Processes

Jae-Yung Song*, Seong-Hyun Park**, Beom-Seok Park***, Jae-Yong Park***

*Assistant Professor, Dept. of Semiconductor Engineering, Daelim University, Anyang, Korea
**Lecturer, Dept. of Computer Engineering, Kongju National University, Chungnam, Korea
***Students, Dept. of Semiconductor Engineering, Daelim University, Anyang, Korea

[Abstract]

This paper presents a PLC and Raspberry Pi-based system that combines DI water film formation during spin coating with selective cleaning based on post-process image inspection. The image-processing algorithm extracts red candidate regions in HSV color space and generates a cleaning request when an individual contour area exceeds 800 px² in five consecutive processed frames, subject to a retrigger cooldown condition. The request is transmitted to the PLC through MC Protocol to initiate a predefined cleaning sequence. In 50 trials with photoresist (PR) contamination, detection and cleaning occurred in 43 trials, while small PR residues were missed in seven trials, yielding a detection rate of 86.0%. Based on a nominal pump flow rate of 15 L/min and a cleaning duration of 10 s per trial, the estimated cleaning-water supply was 107.5 L. The difference from the 125.0 L calculated for cleaning in all 50 trials resulted from missed detections and therefore does not demonstrate effective water savings. The results demonstrate the feasibility of integrating vision detection with PLC-controlled cleaning. Further validation requires clean-case testing, threshold sensitivity analysis, post-cleaning residue assessment, and measurement of actual water consumption.

▸ **Key words**: PLC (Programmable Logic Controller), Spin Coating, Machine Vision, Closed-loop Control, Contamination Suppression

[요 약]

본 논문에서는 공정 중 DI Water 수막 형성과 공정 후 영상 검사에 따른 선택적 세정을 결합한 PLC 및 라즈베리 파이 기반 시스템을 제안한다. 영상 처리부는 HSV 색공간에서 적색 후보 영역을 추출하고, 개별 윤곽선 면적이 800 px²를 초과하는 상태가 연속 5개 처리 프레임에서 확인되면 재출력 대기 조건에 따라 세정 요청을 생성한다. 요청은 MC Protocol을 통해 PLC로 전달되어 세정 시퀀스를 실행한다. PR 오염 조건에서 50회 시험한 결과, 43회에서 검출 및 세정이 실행되었으며 작은 PR 잔류물에 대한 미검출은 7회 발생하여 검출률은 86.0%였다. 명목 유량 15 L/min과 회당 가동 시간 10초로 산출한 세정수 공급량은 107.5 L였다. 전 회차 세정 비교값인 125.0 L와의 차이는 미검출에 따른 세정 누락으로 발생하여 유효한 물 절감으로 해석하지 않았다. 본 결과는 영상 검출과 PLC 세정의 연동 가능성을 보여주며, 향후 정상 조건 시험, 임계값 민감도 분석, 세정 후 잔류물 평가 및 실제 물 사용량 계측이 필요하다.

▸ **주제어**: PLC, 스핀 코팅, 머신비전, 폐루프 제어, 오염 억제

• First Author: Jae-Yung Song, Corresponding Author: Seong-Hyun Park, Co-Author : Beom-Seok Park, Jae-Yong Park
*Jae-Yung Song (sjyung@daelim.ac.kr), Dept. of Semiconductor Engineering, Daelim University
**Seong-Hyun Park (a94270816@gmail.com), Dept. of Computer Engineering, Kongju National University
***Beom-Seok Park (duke4108@gmali.com), Dept. of Semiconductor Engineering, Daelim University
***Jae-Yong Park (jyon0124@gmail.com), Dept. of Semiconductor Engineering, Daelim University
• Received: 2026. 08. 19, Revised: 2026. 10. 27, Accepted: 2026. 11. 09.

Copyright © 2026 The Korea Society of Computer and Information
http://www.ksci.re.kr pISSN:1598-849X | eISSN:2383-9945
www.kci.go.kr

I. Introduction

반도체 제조 공정에서는 공정 품질을 유지하면서 물과 에너지를 효율적으로 사용하는 것이 요구된다. Yin과 Yang은 반도체 산업의 높은 자원 소비와 환경 영향을 논의하며 공정 최적화와 자원 관리의 필요성을 제시하였다[1]. 장비의 관측 상태에 따라 필요한 작업을 선택적으로 수행하는 방식도 이러한 접근에 해당하며, 자원 사용량과 공정 품질을 함께 평가해야 한다. 스핀 코팅은 회전하는 기판 위에 도포액을 분산시켜 박막을 형성하는 공정이다. Meyerhofer는 원심력, 점성 및 용매 증발을 고려한 막 형성 모델을 포토레지스트 실험과 비교하였으며[2], Sahu 등은 스핀 코팅의 막 형성 메커니즘과 공정 특성을 검토하였다[3]. Liu 등은 반도체 리소그래피에 적용되는 스핀 코팅의 모델링 방법과 향후 연구 과제를 정리하였다[4]. PR 잔류물 관리와 관련하여 Park 등은 자외선 및 현상액 노출에 따른 PR 표면 형상 변화와 잔류 입자의 제거 특성을 분석하였다[5]. 다만 해당 연구의 처리 조건과 본 시스템의 DI Water 공급 조건은 다르므로, 그 제거 효과를 직접 적용할 수는 없다. 본 연구에서는 공정 중 비산되는 감광액(Photoresist, PR)의 컵 내벽 부착과 공정 후 잔류물 관리에 주목한다. 영상 기반 검사와 관련하여 Gao 등은 특징 추출 방식에 따른 결함 인식 방법과 성능 평가 지표를 검토하였으며[6], Ren 등은 조명, 영상 획득 및 영상 분석을 포함한 머신비전 결함 검출 기술을 정리하였다[7]. Nahar 등은 AI 기반 산업제품 결함 검출 방법과 적용상의 과제를 검토하였다[8]. 구현 사례로는 Korodi 등이 라즈베리 파이와 OpenCV를 이용하여 자동차 제조 공정의 전자제어장치 검사 시스템을 구성하였으며[9], Su 등은 카메라, 라즈베리 파이, 스텝 모터 및 PLC를 통합하여 묘목 결손 검사와 보식 위치 결정을 위한 장치를 구현하였다[10]. 이들 연구는 적용 대상이 본 연구와 다르지만, 영상 판정 결과를 장비 동작과 연계하는 시스템 구성에 참고가 된다. 본 연구에서는 공정 중 DI Water 수막 형성과 공정 후 영상 검사에 따른 선택적 세정을 결합한 PLC 및 라즈베리 파이 연동 시스템을 제안한다. 영상 처리부는 HSV 색상 범위, 개별 윤곽선 면적 및 연속 프레임 조건으로 적색 오염 후보를 판정한다. 검출 이벤트는 Ethernet 기반 MC Protocol을 통해 PLC로 전달되며, PLC는 정해진 세정 시퀀스를 실행한다. PR 오염 조건에서 총 50회의 시험을 수행한 결과, 43회에서 검출 및 세정이 실행되었으며 작은 잔류물이 존재한 7회에서는 미검출이 발생하였다. 본 연구는 영상 검사와 PLC 세정을 연계한 시제품의 구현 및 반복 시험 결과를 제시한다. 또한 미검출에 따른 세정 누락을 유효한 자원 절감과 구분하여 해석하고, 검출 성능과 자원 사용량의 후속 검증 과제를 도출한다.

II. Preliminaries

2.1 Water Film Formation on the Cup Wall

컵 벽면을 따라 흐르는 수막의 유량과 두께 관계를 설명하기 위해 중력에 의해 흐르는 액막의 이상화 모델을 사용한다. Hu 등은 경사진 강판 위를 흐르는 물의 막 폭과 두께를 실험적으로 조사하였으며[11], Wang 등은 액막의 속도장을 측정하여 이론 모델과 비교하였다[12]. 이러한 연구는 액막의 거동을 설명할 때 공급 조건, 젖음 상태 및 모델의 적용 범위를 함께 고려해야 함을 보여준다. 본 연구에서는 정상상태, 비압축성 뉴턴 유체, 충분히 발달한 층류, 균일한 막 두께, 벽면 무미끄럼 및 자유표면 전단 무시를 가정한 이상화 모델을 적용한다. 수평면에 대한 벽면의 경사각을 α로 정의하면, 체적 유량과 막 두께의 관계는 식 (1)과 같다.

$$Q_f = \frac{\rho g b \sin \alpha}{3\mu} \delta^3 \tag{1}$$

여기서 Q_f는 수막 공급 유량(m³/s), ρ 는 유체 밀도(kg/m³), g 는 중력 가속도(m/s²), b 는 유동 방향에 수직인 유효 젖음 폭(m), μ 는 점성계수(Pa·s), δ 는 막 두께(m)이다. 수직 벽면에서는 $a = 90^\circ$ 이다. 식 (1)은 동일한 유체와 벽면 조건에서 유량이 막 두께의 세제곱에 비례하는 관계를 나타낸다. 컵 전체 둘레에 균일한 수막이 형성되는 경우에는 유효 젖음 폭을 컵의 젖은 둘레로 해석할 수 있다. 그러나 실제 컵에서는 분사 위치, 모서리, 표면 젖음성 및 국부적인 유량 차이에 의해 균일한 수막 가정이 성립하지 않을 수 있다. 따라서 식 (1)은 수막의 유량과 두께 관계를 설명하기 위한 기준 모델로 사용한다. 본 연구에서는 실제 막 두께와 표면 피복률을 측정하지 않았으므로 최소 수막 두께나 최적 공급 유량을 검증한 것으로 해석하지 않는다. 수막 형성의 목적은 컵 벽면의 잔류물 관리이며, PR 부착 및 재비산 저감 효과는 별도의 비교 실험을 통해 평가해야 한다.

www.kci.go.kr

2.2 Water Consumption in Condition-Based Cleaning

물 사용량을 비교할 때에는 공정 중 수막 형성에 사용되는 물과 공정 후 세정에 사용되는 물을 구분해야 한다. 공정 횟수를 N, 세정 유량을 Q_s, 회당 세정 시간을 T_c로 정의하고, 두 방식에서 세정 유량과 시간이 일정하고 같다고 가정하면 누적 공급량은 식 (2)와 같다.

$$V_{\text{fixed}} = V_{f,\text{fixed}} + NQ_sT_c,$$
$$V_{\text{cond}} = V_{f,\text{cond}} + Q_sT_c\sum_{i=1}^{N} u_i \quad (2)$$

여기서 $V_{f,\,fixed}$와 $V_{f,\,cond}$는 각각 매회 세정 방식과 상태 기반 세정 방식의 수막용 누적 공급량이다. u_i는 i번째 공정의 세정 실행 여부이며, 세정이 실행되면 1, 실행되지 않으면 0이다. 계산에는 유량과 시간의 단위를 일치시켜 적용한다. 공정 후 세정 단계의 공급량 차이는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V_{\text{clean}} = Q_sT_c\left(N - \sum_{i=1}^{N} u_i\right) \quad (3)$$

식 (3)은 세정 횟수 차이에 따른 공급량의 차이를 나타내며, 그 차이가 유효한 자원 절감임을 보장하지는 않는다. 오염이 없는 공정에서 적절하게 세정을 생략한 경우와 오염을 검출하지 못하여 필요한 세정을 누락한 경우를 구분해야 한다. 또한 명목 펌프 유량으로 산출한 값은 실제 토출량을 측정한 값과 구분한다. 전체 공정의 물 사용량을 평가하려면 수막용 사용량과 세정용 실제 토출량을 함께 계측해야 한다.

2.3 HSV Segmentation and Contour Area Decision

Kim 등은 HSV 색공간과 영상 처리 기법을 이용한 산업용 봉제기의 불량 검출 시스템을 구현하였다[13]. Wu 등은 윤곽선 정합을 활용한 산업제품의 표면 결함 검출 방법을 제안하였다[14]. 이들 연구는 색상 및 형상 정보를 활용한 영상 검사 사례에 해당한다. 본 시스템은 촬영 영상에서 설정된 적색 조건을 만족하는 영역을 오염 후보로 추출하고, 개별 윤곽선 면적을 이용하여 검출 여부를 판정한다. 구현에는 OpenCV의 HSV 색공간 변환과 inRange 함수를 사용한다. 다만 색상 조건의 충족은 PR의 화학적 식별을 의미하지 않으며, 본 연구의 판정 대상은 해당 촬영 조건에서 정의한 적색 오염 후보이다. 입력 영상을 HSV 색공간으로 변환한 후 색상 H가 0-10 또는 170-179, 채도 S가 80-255, 명도 V가 70-255인 픽셀을 추출한다. k 번째 프레임의 이진 마스크는 식 (4)와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} M_k(x,y) = \mathbf{1}(H_k(x,y) \in [0,10] \cup [170,179]) \\ \times \mathbf{1}(S_k(x,y) \in [80,255]) \\ \times \mathbf{1}(V_k(x,y) \in [70,255]) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $1(\bullet)$은 조건이 참이면 1, 거짓이면 0을 나타낸다. 마스크에서 외곽 윤곽선을 추출한 후 각 윤곽선의 면적을 계산한다. 이진 마스크에서 값이 1인 픽셀의 개수와 일치하지 않을 수 있다. k 번째 프레임에서 검출한 j 번째 윤곽선의 면적을 $a_{j,k}$ 윤곽선 수를 J_k라고 할 때 프레임의 대표 면적과 검출 상태는 식 (5)와 같다.

$$A_k = \begin{cases} \max\limits_{1\le j\le J_k} a_{j,k}, & J_k > 0, \\ 0, & J_k = 0, \end{cases}$$
$$d_k = \mathbf{1}(A_k > A_{\text{th}}), \qquad A_{\text{th}} = 800\ \text{px}^2 \quad (5)$$

면적이 정확히 800 px²인 경우는 검출 조건에 포함하지 않는다. 또한 분리된 여러 작은 영역의 면적을 합산하지 않으므로, 적색 영역의 총면적이 크더라도 각 윤곽선 면적이 기준 이하이면 해당 프레임은 미검출로 판정된다.

2.4 Consecutive-Frame Confirmation and PLC Trigger

일시적인 후보 검출이 즉시 세정 요청으로 연결되는 것을 제한하기 위해 연속 검출 조건을 적용한다. 성공적으로 읽어 처리한 프레임의 순서를 k , 이전 프레임의 출력 처리 후 카운터를 c_{k-1} 이라고 하면, 현재 프레임을 반영한 출력 전 카운터 $\tilde{c}_k$는 식 (6)과 같다.

$$\tilde{c}_k = \begin{cases} c_{k-1} + 1, & d_k = 1, \\ 0, & d_k = 0. \end{cases} \quad (6)$$

검출 이벤트는 연속 검출 카운터와 재출력 대기 조건이 동시에 충족될 때 발생한다.

www.kci.go.kr

$$e_k = \mathbf{1}(\tilde{c}_k \geq 5)\,\mathbf{1}(t_k - t_{\text{off}} > 1.0\ \text{s}) \quad (7)$$

여기서 t_k는 현재 판정 시각이며, t_{off} 는 프로그램에서 관리하는 직전 M600 OFF 기록 시각이다. 최초 이벤트의 허용 여부는 해당 시각 변수의 초기 설정에 따른다. 이벤트가 발생하면 M600에 ON을 기록하고, 프로그램에서 0.2초 대기한 후 OFF를 기록한다. 출력 이후 카운터는 0으로 초기화하며, 출력하지 않은 경우에는 $c_k = \tilde{c_k}$로 유지한다. Maślanka 등은 머신비전과 PLC 기반 제어를 연계한 품질 검사 시스템의 구현 사례를 제시하였다[15]. 본 시스템에서는 영상 처리부가 생성한 검출 이벤트를 PLC의 세정 요청으로 전달하도록 구성하였다. PLC 데이터 쓰기에는 pymcprotocol의 Type3E 인터페이스를 사용하며, Ethernet 기반 MC Protocol을 통해 내부 릴레이 M600의 ON/OFF 상태를 기록한다. 0.2초는 검출 이벤트 전달을 위한 프로그램의 설정 대기시간으로, 실제 PLC에서 관측되는 신호 폭은 통신 및 실행 지연의 영향을 받을 수 있다. 이 값은 세정 펌프의 가동 시간과 구분된다. 연속 5개 처리 프레임은 고정된 3초 지속 조건을 의미하지 않는다. 또한 프레임 획득 실패 시 카운터를 초기화하지 않는 처리에서는 실패 구간을 사이에 두고 검출 상태가 누적될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 판정 조건을 시간적으로 연속된 전체 촬영 프레임이 아닌 '연속 5개 처리 프레임'으로 명시한다.

2.5 Interpretation and Validation of the Area Threshold

면적 임계값 800 px²는 본 시제품에 적용한 고정 설정값이다. 현재 시험은 해당 값을 유지한 상태에서 수행되었으므로, 여러 임계값을 비교하여 최적값을 선정한 결과로 해석하지 않는다. 임계값의 영상 내 크기는 전체 영상 면적에 대한 비율과 등가 원 지름으로 표현할 수 있다.

$$r_A = \frac{A_{\text{th}}}{WH} \times 100\%, \qquad d_{\text{eq}} = 2\sqrt{\frac{A_{\text{th}}}{\pi}} \quad (8)$$

여기서 W 와 H 는 영상의 가로·세로 픽셀 수이며, d_{eq} 는 임계 면적과 같은 면적을 갖는 원의 지름이다. 800 px²에 대한 등가 원 지름은 약 31.92 px이다. 이는 임계값의 크기를 설명하는 기하학적 환산으로, 해당 크기의 PR을 실제로 검출할 수 있다는 보장이나 임계값 선정의 실험적 근거는 아니다. 실제 검출 가능 크기를 물리적 면적이나 길이로 표현하려면 영상 해상도, 촬영 거리 및 배율에 대한 보정이 필요하다. 작은 오염은 색상 후보로 추출되더라도 면적 조건이나 연속 프레임 조건을 만족하지 못할 수 있다. 임계값의 타당성을 평가하려면 정상·오염 영상에 정답 정보를 부여하고, 임계값 설정용 자료와 검증용 자료를 공정 사이클 단위로 분리해야 한다. 이후 동일한 영상에 여러 면적 임계값을 적용하여 검출률과 오탐률을 비교하되, HSV 범위와 연속 프레임 조건은 고정해야 한다. 본 연구에서는 이러한 임계값별 민감도 평가를 수행하지 않았으며, 800 px²의 최적성은 후속 검증 과제로 남는다.

III. Design of PLC-based Closed-loop Control System

3.1 System Architecture

본 연구에서는 스핀 코터 컵의 영상 검사 결과에 따라 공정 후 세정 여부를 결정하는 PLC 및 라즈베리 파이 연동 시스템을 구성하였다. 시스템은 영상 획득부, 영상 처리부, PLC 제어부 및 구동부로 구성되며, 전체 구조는 Fig. 1에 나타내었다. 영상 획득부는 라즈베리 파이 카메라와 스텝 모터 기반 이송 기구로 구성된다. 카메라는 컵 내벽의 상태를 촬영하고, 이송 기구는 카메라를 검사 대상 위치로 이동시킨다. 영상 처리부에서는 라즈베리 파이에서 실행되는 Python 프로그램이 입력 영상을 분석하여 적색 오염 후보의 검출 여부를 판정한다. 판정에는 II장에서 정의한 HSV 색상 범위, 개별 윤곽선 면적 및 연속 프레임 조건을 적용한다. PLC 제어부는 장비의 공정 순서와 구동부 동작을 담당한다. 라즈베리 파이에서 생성한 검출 이벤트는 Ethernet 기반 MC Protocol을 통해 PLC 내부 릴레이 M600으로 전달된다. PLC는 수신한 이벤트를 세정 요청으로 사용하여 DI Water 공급 장치의 동작 여부를 결정한다. 영상 처리부는 오염 후보의 판정을, PLC는 판정 결과에 따른 장비 동작을 담당하도록 기능을 구분하였다. 구동부는 카메라 이송용 스텝 모터와 DI Water 공급 장치로 구성된다. DI Water 공급은 공정 중 수막 형성과 공정 후 선택적 세정으로 구분한다. 전자는 컵 내벽의 잔류물 관리를 위한 공정 동작이며, 후자는 영상 검사 결과에 따라 실행 여부가 결정되는 동작이다.

본 시스템에서 페루프는 컵의 관측 상태를 세정 의사결정에 되먹임하는 구조를 의미한다. 제어 출력은 검출 이벤트에 따른 이산적인 ON/OFF 동작이며, 연속적인 오차 보정을 수행하는 PID 제어는 적용하지 않는다. 또한 본 연구

www.kci.go.kr

의 평가 범위는 검출과 세정 실행의 연동이며, 세정 후 재검사에 따른 반복 보정까지 포함하지 않는다.

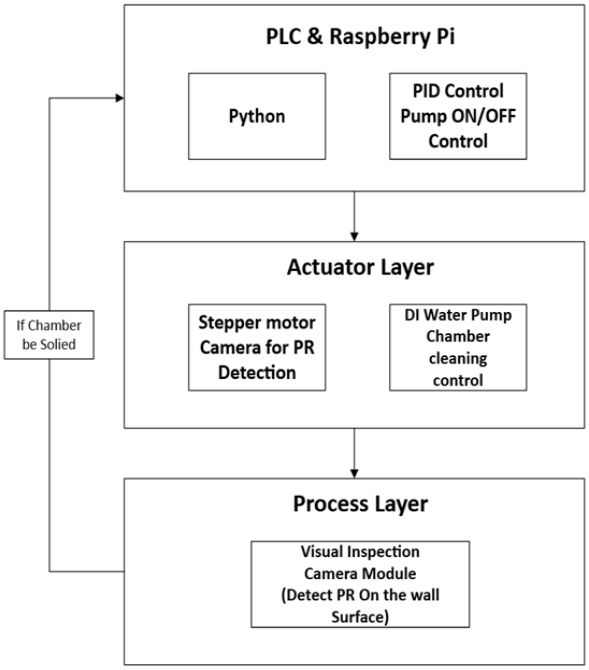

Fig. 1. Architecture of the PLC-based vacuum control system.

3.2 Implementation Environment

제안 시스템의 구현 환경은 Table 1에 나타내었다. PLC 프로그램은 GX Works3를 이용하여 구성하였으며, 영상 처리 프로그램은 라즈베리 파이에서 Python과 OpenCV를 이용하여 실행하였다. PLC와 라즈베리 파이 간 통신에는 pymcprotocol 라이브러리의 Type3E 인터페이스를 사용하였다.

Table 1. Hardware and software configuration of the prototype system.

Category	Configuration
PLC	Mitsubishi FX5U
Image Device	Raspberry Pi 4 Model B
Acquisition Device	Raspberry Pi Camera Module
Transport Device	Stepper Motor & Driver
Cleaning Device	DI Water Pump & Power Switch Gear
PLC Environment	GX Works3
Image Environment	Python, OpenCV, NumPy
Communication Library	pymcprotocol, Type3ED
Communication Method	MC Protocol over Ethernet
PLC Connection Settings	192.168.0.10, Port 5007
Detection Event Transfer Address	M600
Pump Nominal Flow Rate	15 L/min
Cleaning Pump Operation Time per Cycle	10초

영상 처리 프로그램의 주요 설정값은 Table 2에 정리하였다. 이 값들은 시제품의 동작을 위한 설정값이며, 모든 촬영 환경에 공통으로 적용되는 최적값을 의미하지 않는다.

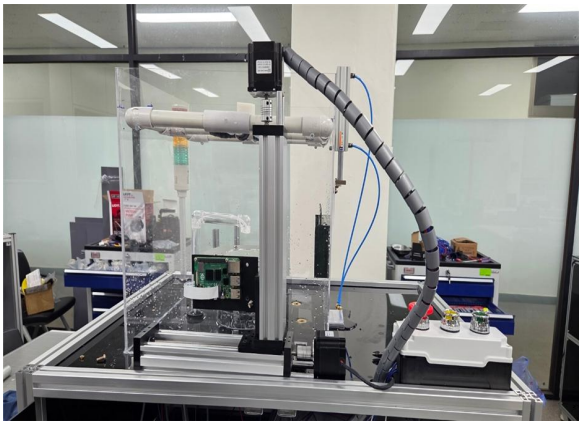

Fig. 2. Prototype of the PLC-based spin-coater system with vision-based cup cleaning.

Table 2. Parameters used in the image-based detection algorithm.

Item	Setting Value & Meaning
HSV Hue	H: 0-10 or 170-179
Saturation	S: 80-255
Value Range	V: 70-255
Area Condition	Individual contour area greater than 800 px^2
Detection Condition	5 consecutive processed frames
M600 ON Set Wait Time	0.2 seconds
Re-output Wait Condition	Greater than 1.0 second after recording previous M600 OFF

윤곽선 면적은 영상 픽셀좌표계에서 계산되므로 해상도와 촬영 배율의 영향을 받는다. 따라서 다른 장비나 촬영 조건에 적용할 때에는 동일한 기준값을 그대로 사용하는 대신 촬영 조건을 정리하고 검출 성능을 재평가해야 한다.

3.3 Control Algorithm

제안 시스템의 제어 절차는 공정 수행, 영상 검사, 검출 이벤트 전달 및 선택적 세정으로 구성된다. 전체 제어 흐름은 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 스핀 코팅 공정 중에는 컵 상부에서 DI Water를 공급하여 내벽에 수막을 형성한다. 공정 종료 후에는 카메라를 검사 위치로 이동시키고 컵 내벽의 영상을 획득하도록 설계하였다. 공정 중 수막 공급과 공정 후 세정은 서로 다른 단계로 구분하며, 공정 후 세정 여부는 영상 검사 결과에 따라 결정한다. 영상 처리 프로그램은 입력 프레임을 HSV 색공간으로 변환하고 Table 2

www.kci.go.kr

의 조건에 해당하는 적색 후보 영역을 추출한다. 이후 마스크의 외곽 윤곽선을 검출하여 각 면적을 계산한다. 면적이 800 px²를 초과하는 윤곽선이 하나 이상 존재하면 해당 프레임을 검출 상태로 판정한다. 서로 분리된 작은 영역의 면적은 합산하지 않는다. 검출 프레임에서는 연속 검출 카운터를 증가시키고, 미검출 프레임에서는 카운터를 0으로 초기화한다. 검출 상태가 연속 5개 처리 프레임에서 확인되고 재출력 대기 조건을 만족하면, 라즈베리 파이는 PLC의 지정된 내부 릴레이에 세정 요청 신호를 ON으로 기록한다. 이후 프로그램에서 0.2초 대기한 뒤 해당 신호를 OFF로 기록하고 카운터를 초기화한다. PLC는 세정 요청 신호를 수신하여 정해진 세정 시퀀스를 실행한다. 본 시험에서는 세정 펌프를 10초 동안 가동한 후 정지하도록 설정하였다. 따라서 세정 요청 신호 전달을 위한 0.2초 대기시간과 펌프의 10초 가동 시간은 서로 다른 제어 파라미터이다. 세정 생략은 검사 완료 후 해당 검사 구간에서 세정 요청이 발생하지 않은 경우에 결정하도록 설계하였다. 세정 요청 신호가 OFF인 상태만으로는 검사 진행 중인 상태와 검사 완료 후 미검출 상태를 구분할 수 없으므로, 검사 완료 상태를 별도로 확인할 수 있어야 한다. 또한 세정 요청은 펄스 형태로 전달되므로 PLC에서는 요청 수신과 세정 진행 상태를 구분하여 처리해야 한다. 검사 완료 확인과 수신한 세정 요청의 유지는 영상 검출 알고리즘과 구별되는 제어 요소이다. 본 연구에서는 검출에 따른 세정 실행 여부를 평가하였으며, 검사 완료 신호와 PLC 내부 상태 전이의 상세한 시간 특성은 별도로 계측하지 않았다.

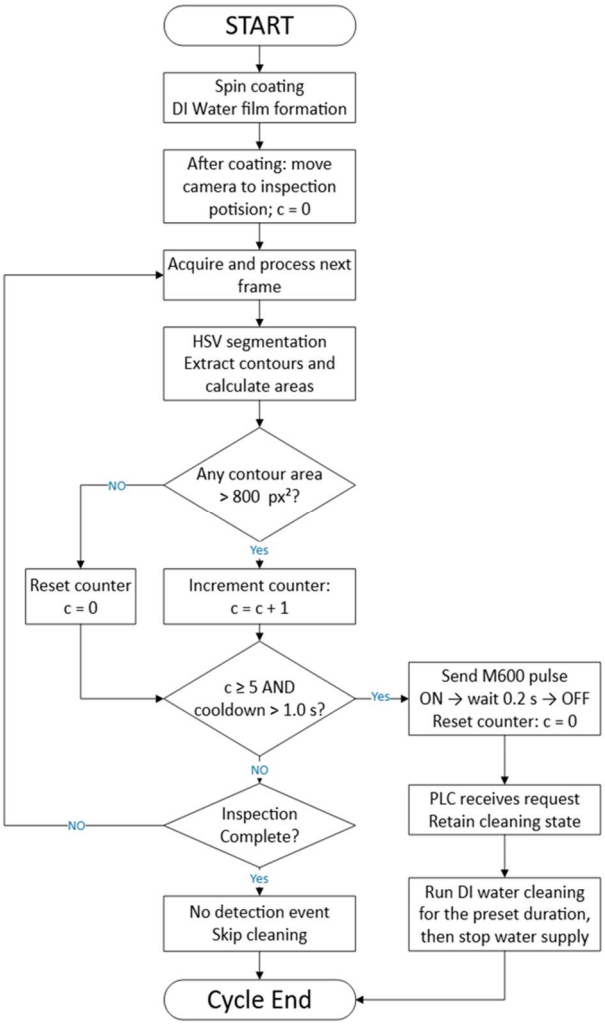

Fig. 3. Control sequence for post-process inspection and condition-based cleaning.

IV. Experiments and Results

4.1 Experimental Conditions

제안 시스템의 영상 검출 및 세정 연동 동작을 평가하기 위해 PR 오염이 존재하는 조건에서 총 50회의 시험을 수행하였다. 영상 처리에는 Table 2의 HSV 범위, 개별 윤곽선 면적 800 px² 초과 조건 및 연속 5개 처리 프레임 조건을 적용하였다. 각 시험에서는 PR 검출과 이에 따른 세정 실행 여부를 확인하였다. 세정에는 명목 유량이 15 L/min인 펌프를 사용하였으며, 세정 요청이 발생하면 회당 10초 동안 가동하였다. 세정수 공급량은 명목 유량과 가동 시간을 이용하여 산출하였다. 실제 토출량은 계측하지 않았으므로 산출값은 실측 사용량이 아닌 추정 공급량으로 제시한다. 본 시험에는 오염이 없는 정상 조건을 포함하지 않았다. 따라서 평가 지표는 오염 사례 검출률과 미검출률로 한정하였다. 세정 후 잔류 오염량과 웨이퍼 재오염 여부는 본 시험의 평가 항목에 포함하지 않았다.

4.2 PR Detection and Cleaning Results

총 50회의 시험 중 43회에서 PR이 검출되어 세정이 실행되었다. 나머지 7회에서는 작은 PR 잔류물이 존재하였으나 검출 이벤트가 발생하지 않아 세정이 실행되지 않았다. 결과는 Table 3에 나타내었다.

Table 3. PR detection and cleaning results for 50 contaminated test cases.

Evaluation Item	Result
Number of PR Contamination Tests	50
Number of Detection and Cleaning Executions	43
Number of Non-detections and Omitted Cleanings	7
Contamination Detection Rate (%)	86.0
Non-detection Rate (%)	14.0

www.kci.go.kr

검출률과 미검출률은 식 (9)와 같이 산출하였다.

$$R_{\mathrm{det}} = \frac{43}{50} \times 100 = 86.0\%,$$

$$R_{\mathrm{miss}} = \frac{7}{50} \times 100 = 14.0\% \quad (9)$$

이 결과는 설정된 시험 조건에서 영상 검출과 PLC 세정 동작이 연계됨을 보여준다. 동시에 작은 잔류물이 존재해도 세정 요청이 발생하지 않는 사례를 확인하였다. 검출률 86.0%는 오염 사례에 대한 검출 비율이며, 정상·오염 사례를 모두 포함한 전체 분류 정확도를 의미하지 않는다. 정상 시험이 없으므로 오탐률과 특이도는 산출하지 않았다. 또한 43회의 세정 실행은 구동 동작의 확인 결과이며, 모든 세정에서 PR이 완전히 제거되었다는 의미는 아니다.

4.3 Analysis of Missed Detections

미검출은 작은 PR 잔류물이 존재한 7회의 시험에서 관찰되었다. 다만 현재 결과만으로 원인을 카메라 성능으로 한정하기는 어렵다. 영상 내 잔류물 크기, 촬영 거리와 해상도, 조명 및 반사에 따른 색상 변화, 면적 임계값과 연속 프레임 조건이 검출 결과에 영향을 줄 수 있다. 본 알고리즘에서는 적색 후보가 추출되더라도 개별 윤곽선 면적이 800 px² 이하이면 해당 프레임을 미검출로 판정한다. 또한 면적 조건을 만족하는 프레임이 나타나더라도 연속 5개 처리 프레임에서 조건이 유지되지 않으면 검출 이벤트가 발생하지 않을 수 있다. 따라서 작은 잔류물에 대한 미검출은 영상 획득 단계와 판정 단계의 영향을 구분하여 분석해야 한다. 원인 분석을 위해서는 미검출 시험의 원본 영상과 이진 마스크, 프레임별 최대 윤곽선 면적 및 연속 검출 카운터를 함께 확인해야 한다. 이를 통해 색상 후보 추출 실패, 면적 조건 미충족 및 연속 프레임 조건 미충족을 구분할 수 있다. 본 시험에서는 이러한 중간 처리값을 이용한 정량적인 원인 분류를 수행하지 않았다. 면적 임계값은 모든 시험에서 800 px²로 고정하였으므로 해당 값의 최적성은 확인하지 못하였다. 향후에는 정상·오염 영상을 함께 확보하고 동일한 영상에 여러 임계값을 적용하여 검출률과 오탐률의 변화를 비교할 필요가 있다. 임계값 조정에 사용한 자료와 최종 평가 자료는 분리하여 설정값의 일반화 가능성을 확인해야 한다.

4.4 Estimated Post-process Cleaning Water Consumption

펌프의 명목 유량과 가동 시간을 기준으로 산출한 회당 세정수 공급량은 식 (10)과 같다.

$$V_{\mathrm{cycle}} = 15\ \mathrm{L/min} \times \frac{10}{60}\ \mathrm{min} = 2.5\ \mathrm{L} \quad (10)$$

동일한 조건으로 50회 모두 세정하는 비교 조건의 공급량은 125.0 L이며, 시험에서 세정이 실행된 43회의 공급량은 107.5 L이다. 계산 결과는 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Estimated post-process cleaning water consumption based on nominal pump flow.

Evaluation Item	Previous Cycle Cleaning Condition	Cleaning Execution Condition
Number of Tests	50	50
Number of Cleanings	50	43
Pump Nominal Flow Rate (L/min)	15	15
Pump Operation Time per Cycle (s)	10	10
Calculated Volume per Cycle (L)	2.5	2.5
Cumulative Calculated Volume (L)	125.0	107.5

전 회차 세정 조건은 동일한 유량과 시간을 적용하여 산출한 비교값이며, 별도로 수행한 대조 실험의 실측 사용량은 아니다. 두 조건의 계산 공급량 차이는 17.5 L로, 전 회차 세정 조건의 14.0%에 해당한다. 그러나 세정이 실행되지 않은 7회는 정상 상태에서 세정을 적절히 생략한 사례가 아니라 PR 미검출에 따른 세정 누락 사례이다. 따라서 이 차이를 오염 관리 성능을 유지하면서 달성한 세정수 절감으로 해석하지 않는다. 상태 기반 세정의 자원 절감 효과를 평가하려면 오염 사례에서 필요한 세정이 수행되는지와 정상 사례에서 불필요한 세정이 생략되는지를 함께 확인해야 한다. 본 시험은 오염 사례만 포함하므로 정상 상태에서의 세정 생략 효과를 평가할 수 없다.

또한 Table 4의 계산에는 공정 중 수막 형성에 사용된 DI Water가 포함되지 않는다. 전체 공정의 물 사용량을 비교하려면 수막용 사용량과 세정용 실제 토출량을 별도로 계측하여 합산해야 한다.

www.kci.go.kr

4.5 Discussion and Limitations

본 시험에서는 50회의 오염 사례 중 43회에서 검출과 세정 실행을 확인하였다. 이는 영상 판정 결과를 PLC의 세정 동작과 연계한 시제품의 동작 가능성을 보여준다. 반면 작은 PR 잔류물에 대한 7회의 미검출은 필요한 세정이 누락될 수 있음을 나타내며, 검출 성능의 보완이 필요하다. 현재 시험에서는 면적 임계값을 고정하였고 정상 조건을 포함하지 않았다. 따라서 임계값 변화에 따른 성능 차이와 정상 상태의 오탐 특성은 확인하지 못하였다. 후속 시험에서는 촬영 해상도, 거리, 조명 및 오염 크기를 기록하고, 독립적인 정상·오염 시험으로 판정 조건을 평가해야 한다. 세정수 공급량은 명목 유량을 이용한 계산값이며, 수막용 사용량과 실제 토출량은 측정하지 않았다. 세정 누락에 따른 공급량 감소를 자원 절감 성과로 해석할 수 없으므로, 검출 성능과 세정 후 잔류 오염을 함께 평가한 상태에서 물 사용량을 비교해야 한다. 생산성 영향도 별도의 계측이 필요하다. 미검출 7회에서 실행되지 않은 펌프 가동 시간의 합은 70초이지만, 이는 필요한 세정의 누락에 따른 값이므로 유효한 공정 시간 단축으로 볼 수 없다. 전체 사이클 비교에는 카메라 이동, 영상 획득·처리, 통신, 세정 및 복귀 시간이 모두 포함되어야 한다. 펌프 전력량과 세정 후 잔류 오염량, 웨이퍼 재오염 지표도 측정하지 않았다. 따라서 본 결과의 해석 범위는 영상 검출과 세정 실행의 연동 및 그 한계로 한정한다. 후속 연구에서는 미검출 원인 분석, 임계값별 성능 비교, 정상 조건의 오탐 평가 및 세정 전후 오염량 측정을 통해 시스템의 적용 범위를 구체화할 필요가 있다.

V. Conclusions

본 논문에서는 스핀 코터 컵의 영상 검사 결과에 따라 공정 후 세정 여부를 결정하는 PLC 및 라즈베리 파이 기반 시스템을 설계하고 구현하였다. 제안 시스템은 공정 중 DI Water 수막 형성과 공정 종료 후 영상 검사를 결합하며, HSV 색상 범위, 개별 윤곽선 면적 및 연속 프레임 조건을 이용하여 적색 오염 후보를 판정한다. 검출 이벤트는 MC Protocol을 통해 PLC로 전달되어 정해진 세정 시퀀스를 실행한다. PR 오염이 존재하는 조건에서 총 50회의 시험을 수행한 결과, 43회에서 검출 및 세정 실행을 확인하였으며 작은 PR 잔류물이 존재한 7회에서는 미검출이 발생하였다. 이에 따른 오염 사례 검출률은 86.0%, 미검출률은 14.0%였다. 이 결과는 설정된 시험 조건에서 영상 판정과 PLC 세정을 연동할 수 있음을 보여주며, 작은 잔류물에 대한 검출 성능의 개선 필요성을 제시한다. 명목 유량 15 L/min과 회당 펌프 가동 시간 10초를 기준으로 계산한 43회 세정의 공급량은 107.5 L였다. 50회 모두 세정하는 비교 조건의 계산 공급량은 125.0 L이지만, 두 값의 차이는 미검출에 따른 필요한 세정의 누락에서 발생하였다. 따라서 이를 유효한 자원 절감 성과로 해석하지 않았다. 상태 기반 세정의 절감 효과는 오염 관리 요구를 충족하는 조건에서 정상 사이클의 불필요한 세정이 감소하는지를 통해 평가해야 한다. 본 연구의 기여는 컵의 영상 판정과 PLC의 순차 제어를 연계한 시제품을 구현하고, 반복 시험에서 검출 결과와 세정 누락을 구분하여 제시한 데 있다. 다만 정상 조건의 시험과 임계값별 민감도 평가가 없어 오탐 특성 및 800 px^2의 선정 타당성을 확정하지 못하였다. 또한 실제 물 사용량, 펌프 전력량, 전체 사이클 타임 및 세정 후 잔류 오염을 측정하지 않아 장비 전체의 자원 효율과 오염 저감 효과를 평가하는 데 한계가 있다. 향후에는 촬영 조건을 정량화하고 미검출 영상의 색상 마스크, 윤곽선 면적 및 연속 검출 상태를 분석하여 판정 조건을 개선할 예정이다. 독립적인 정상·오염 시험을 통해 검출률과 오탐률을 평가하고, 세정 전후 잔류 오염과 실제 물 사용량을 함께 측정할 계획이다. 이를 바탕으로 필요한 세정의 누락을 줄이면서 자원 사용량과 공정 시간을 관리할 수 있는 시스템으로 발전시키고자 한다.

REFERENCES

[1] Y. Yin and Y. Yang, “Sustainable Transition of the Global Semiconductor Industry: Challenges, Strategies, and Future Directions,” Sustainability, vol. 17, no. 7, Art. no. 3160, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/su17073160

[2] D. Meyerhofer, “Characteristics of resist films produced by spinning,” Journal of Applied Physics, vol. 49, no. 7, pp. 3993–3997, 1978. DOI: https://doi.org/10.1063/1.325357

[3] N. Sahu, B. Parija, and S. Panigrahi, “Fundamental understanding and modeling of spin coating process: A review,” Indian Journal of Physics, vol. 83, no. 4, pp. 493–502, 2009. DOI: https://doi.org/10.1007/s12648-009-0009-z

[4] P. Liu, L. Huang, C. Zheng, Y. Bao, D. Gao, and G. Zhou, “Spin Coating in Semiconductor Lithography: Advances in Modeling and Future Prospects,” Microelectronic Engineering, vol. 298, Art. no. 112326, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mee.2025.112326

[5] J. Park, J. Lee, S. Han, H. R. Lee, and S. Q. Choi, “Removal Analysis of Residual Photoresist Particles Based on Surface

www.kci.go.kr

Topography Affected by Exposure Times of Ultraviolet and Developer Solution," Langmuir, vol. 38, no. 51, pp. 16134-16143, 2022. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02882

[6] Y. Gao, X. Li, X. V. Wang, L. Wang, and L. Gao, "A Review on Recent Advances in Vision-Based Defect Recognition towards Industrial Intelligence," Journal of Manufacturing Systems, vol. 62, pp. 753-766, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.008

[7] Z. Ren, F. Fang, N. Yan, and Y. Wu, "State of the Art in Defect Detection Based on Machine Vision," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, vol. 9, no. 2, pp. 661-691, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s40684-021-00343-6

[8] L. Nahar, M. Awrangjeb, and M. S. Islam, "AI-Enabled Defect Detection in Industrial Products: A Comprehensive Survey, Key Insights and Future Research Challenges," Advanced Engineering Informatics, vol. 69, Part D, Art. no. 104067, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.104067

[9] A. Korodi, D. Anitei, A. Boitor, and I. Silea, "Image-Processing-Based Low-Cost Fault Detection Solution for End-of-Line ECUs in Automotive Manufacturing," Sensors, vol. 20, no. 12, Art. no. 3520, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/s20123520

[10] P.-J. Su, T.-M. Chen, and J.-J. Su, "Simple and Affordable Vision-Based Detection of Seedling Deficiencies to Relieve Labor Shortages in Small-Scale Cruciferous Nurseries," Agriculture, vol. 15, no. 21, Art. no. 2227, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture15212227

[11] P. Hu, X. Huang, K. Bao, and G. Zhu, "Experiment Study on Film Width and Thickness of Free Falling Water Film on a Large Inclined Plate," Nuclear Engineering and Design, vol. 358, Art. no. 110445, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110445

[12] R. Wang, R. Duan, and H. Jia, "Experimental Validation of Falling Liquid Film Models: Velocity Assumption and Velocity Field Comparison," Polymers, vol. 13, no. 8, Art. no. 1205, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/polym13081205

[13] H. Kim, H. Lee, S. Ahn, W.-K. Jung, and S.-H. Ahn, "Broken Stitch Detection System for Industrial Sewing Machines Using HSV Color Space and Image Processing Techniques," Journal of Computational Design and Engineering, vol. 10, no. 4, pp. 1602-1614, 2023. DOI: https://doi.org/10.1093/jcde/qwad069

[14] H. Wu, Z. Luo, F. Sun, X. Li, and Y. Zhao, "An Improvement Method for Improving the Surface Defect Detection of Industrial Products Based on Contour Matching Algorithms," Sensors, vol. 24, no. 12, Art. no. 3932, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/s24123932

[15] M. Maślanka, D. Jancarczyk, and J. Rysinski, "Integration of Machine Vision and PLC-Based Control for Scalable Quality Inspection in Industry 4.0," Sensors, vol. 25, no. 20, Art. no. 6383, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/s25206383

Authors



Jae-Yung Song received his M.S. degree in Mechatronics Engineering from Korea University of Technology and Education in 2018. He is currently pursuing a Ph.D. in Computer Engineering at Kongju National University since 2026. Since 2024, he has been an Assistant Professor in the Department of Semiconductor and Engineering at Daelim University. His research and technical interests are focused on industrial automation and the convergence of PLC (Programmable Logic Controller) and PC-based programming to create intelligent control systems.



Seong-Hyun Park received the B. S. degree in College of Arts and Music from Chungnam National University, Korea in 2017. The M. S, and Ph. D. degrees in Computer Engineering from Kongju National University, Korea, in 2017, 2020. He is currently a teaching in the Department of Computer Science & Engineering. Kongju National University. He is interested in computer music, convergence Education. and Real Time System and Management and Clout computing and Communication.



Beom-Seok Park is currently pursuing his B.S. degree in Semiconductor Engineering at Daelim University, Korea, specializing in Semiconductor Equipment. His research is centered on the practical convergence of industrial automation technologies. He is particularly passionate about optimizing semiconductor manufacturing processes by integrating Programmable Logic Controllers (PLC) with advanced Python-based intelligent control systems to enhance productivity and equipment reliability.



Jae-Yong Park is currently pursuing his B.S. degree in Semiconductor Engineering at Daelim University, Korea, specializing in Semiconductor Equipment. His research and technical focus are on high-precision electrical system design, circuit wiring, and advanced PLC (Programmable Logic Controller) programming. He is dedicated to developing robust hardware architectures that ensure the stability and operational efficiency of semiconductor manufacturing equipment.

www.kci.go.kr