

RESEARCH ARTICLE

## 음압방식을 이용한 미세파각 갈색란 검출장치 개발

소준휘<sup>1</sup>, 조성용<sup>2</sup>, 황선호<sup>1</sup>, 윤승철<sup>3</sup>, 이승현<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 스마트농업시스템학과, <sup>2</sup>충남대학교 바이오시스템기계공학과, <sup>3</sup>USDA U.S. National Poultry Research Center

## Development of brown egg micro-crack detection system using modified pressure method

Jun-Hwi So<sup>1</sup>, Seong Yong Joe<sup>2</sup>, Seon Ho Hwang<sup>1</sup>, Seung-Chul Yoon<sup>3</sup>, Seung Hyun Lee<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Smart Agriculture Systems, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea

<sup>3</sup>Quality and Safety Assessment Research Unit, U.S National Poultry Research Center, USDA-Agricultural Research Service, Athens, GA, USA

\*Corresponding author: seunglee2@cnu.co.kr

### Abstract

Cracked egg is susceptible to microbes and can contaminate other normal eggs. Eggs with hairline crack should be removed in advance, but hairline crack on eggs is difficult to detect. There are various techniques for detecting micro-cracked eggs, among which the negative pressure method of expanding cracks in eggs has high accuracy. In this study, cracked egg detection system was developed using the negative pressure method. The negative pressure method can be combined with a machine vision device to accurately detect the micro-cracked egg. A vacuum chamber and vacuum pump have been developed to create negative pressure around the egg. Inside the vacuum chamber, rotating and lighting system were installed to candling and rotating the eggs. The image of the egg was acquired with the camera installed at the top of the chamber, and the micro-crack was identified through the developed image processing algorithm. The key to the algorithm is to identify cracks by comparing an egg image at vacuum with an egg image at atmospheric pressure. In order to compensate for the slow processing speed of the negative pressure method, a vacuum chamber was developed so that two units were connected and performed crosswise. It is judged that the vacuum pressure method-based micro-cracked egg detection system can be effectively used in small farms and institutions.

**Keywords:** Egg micro-crack, Negative pressure, Image processing



### OPEN ACCESS

DOI: <https://doi.org/10.12972/jame.20220008>

Received: November 08, 2022

Revised: November 14, 2022

Accepted: November 15, 2022

Copyright: © 2022 Journal of Agricultural Machinery Engineering



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## Introduction

계란은 가격이 저렴한 고단백 식품이기 때문에 가장 수요가 높은 농산물 중 하나로 꼽힌다(Lutter, Iannotti and Stewart, 2018; Yeh, Menozzi and Torok, 2020). 그러나 계란의 껍질은 약한 충격에도 쉽게 파손될 수 있기 때문에 선별, 포장 및 유통 과정에서 주의가 요구된다(Lin et al., 2018). 깨진 계란은 균열을 통해 먼지 등 이물질 뿐만 아니라 *Salmonella* 등 병원균이 침투하여 계란 내용물이 오염될 우려가 크다(Hara-Kudo et al., 2001; Liu et al., 2017). 또한, 계란 선별 과정에서 매우 작은 균열이 발생한 계란이 검출 및 제거되지 못할 경우 유통 중 균열이 확장되고, 유통 과정에서 교차오염의 위험이 발생하여 가공류 산업에 경제적 손실을 야기할 수 있는 원인이 된다(Barnett et al., 2004; Bain et al., 2006). 깨진 계란은 빛 소스를 껍질에 투과하는 캔들링(Candling) 방식으로 균열을 발견하여 검출된다(Ragni et al., 2010). 그러나 계란 껍질에 발생한 미세한 균열은 파손이 심한 계란과 다르게 육안으로 확인이 어려워 쉽게 검출하지 못한다(Khabisi et al., 2012). 그렇기 때문에 계란 생산 및 선별에서 미세 파각란을 자동으로 검출하는 공정이 가장 중요한 공정 중에서 하나로 대두되고 있다. 현재 미세 파각란을 검출하는 기술은 크게 머신 비전(Machine vision)을 이용한 방법, 음향반응(Acoustic response)을 이용한 방법, 음압(Negative pressure)을 이용한 방법이 있으며, 대다수의 글로벌 계란 선별기 제조업체는 음향반응법을 채택하여 적용시키고 있다(Lawrence et al., 2008; Yoon et al., 2012; Omid et al., 2013; Sun et al., 2013; Guanjun et al., 2019; Kertész et al., 2021; Botta et al., 2022). 음향반응법은 작은 타격볼로 계란 표면을 타격하여 발생하는 진동 혹은 음향을 분석하여 미세 파각란을 검출하는 방법으로, 계란 검사에 필요한 시간이 매우 짧고, 연속적으로 이송되는 계란에 대하여 실시간으로 검사가 가능한 장점이 있다(Pan et al., 2011; Sun et al., 2020). 계란의 높은 공급량과 수요량을 충족하기 위해서는 빠른 선별 속도가 요구되기 때문에 현재 계란 선별기에 음향 방식의 미세 파각란 검출기를 함께 도입하여 활용되고 있다. 그러나 일반적인 계란 선별 시스템은 규모 및 비용이 상당하기 때문에 소규모의 계란을 취급하는 농가 및 기관 등에서는 소형화되고 정확성이 더 높은 미세 파각란 검출 장치가 비용적으로 더욱 효율적일 수 있다. 음압 기반 미세 파각란 검출 기술은 음향 방식보다 검출 속도가 상당히 느리지만 기계적인 방법과 머신 비전 방법을 융합하여 진공 조건 및 영상 처리 알고리즘에 따라 더 높은 검출 정확도를 얻을 수 있어 소규모 생산 농가에서 보다 적극적으로 활용될 수 있다(Priyadumkol et al., 2017; Sun et al., 2020).

따라서 본 연구에서는 음압 방법 및 머신 비전 시스템을 활용하여 미세 파각란을 검출하는 것을 목적으로 하였으며, 기존 연구 내용을 바탕으로 음압 미세 파각란 검출 장치를 개발하였다.

## Materials and Methods

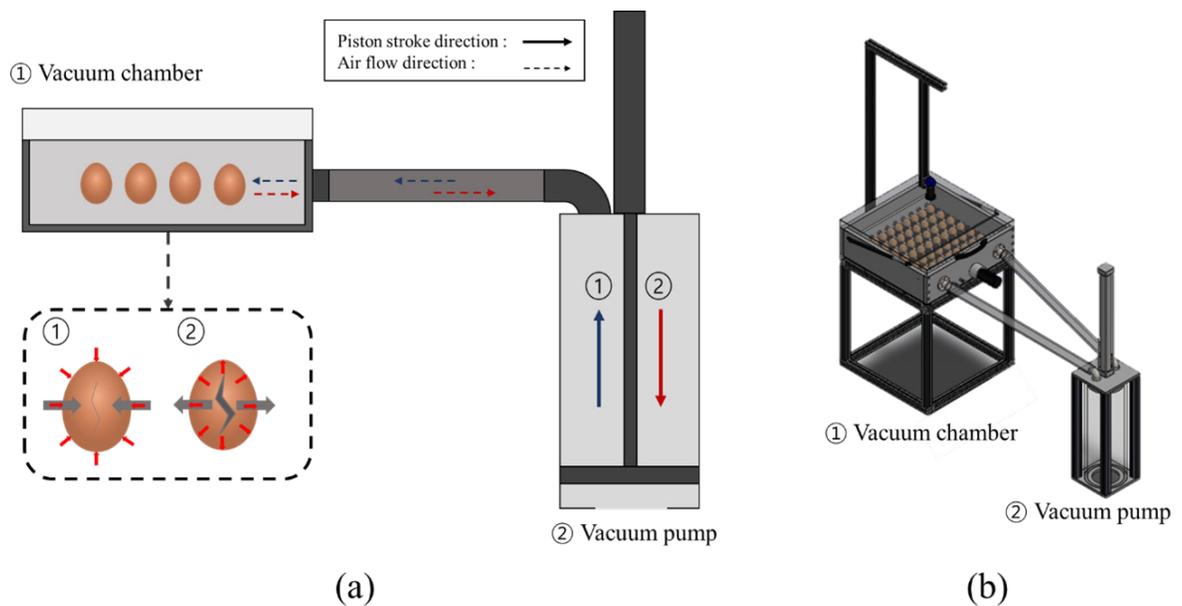
### 음압 방법

계란의 균열은 음압 방법을 이용하여 검출될 수 있다. 음압 방법은 대기압에서 단혀있는 계란의 균열을 진공압을 이용하여 계란 껍질의 외부 및 내부의 압력 차를 발생시킴으로써 압력차로 인하여 균열이 팽창되는 원리를 활용하여 미세 파각란을 검출하는 방법이다(Fig. 1a). 음압 방법은 머신 비전 시스템을 함께 사용하여 기존에 활용되었던 계란 캔들링 방식 혹은 머신 비전 방법의 정확성을 향상시킬 수 있는 방법이다. 일반적인 머신 비전 기반의 미세 파각란 검출 기술은 육안으로도 쉽게 확인이 가능한 크기의 균열은 쉽게 식별할 수 있지만, 매우 작은 미세한 균열(Hairline crack)은 식별 정확도가 크게 저하된다. 미세한 균열에 대하여 음압 방법으로 팽창시킨 균열 영상을 획득하여 영상 처리를 통해 균열을 식별할 경우 최대 99.6%의 정확도 및 0.3%의 거짓 양성 결과를 얻을 수 있는 것으로 보고되었다(Yoon et al., 2012). 높은 검출 정확도에도 불구하고, 음압 방법은 검출 속도가 매우 오래 걸리는 한계점을 갖고 있다. 음압 방법을 이용한 미세 파각란 검출 시스템은 크게 계란을 배치할 수 있는 진공 챔버, 챔버 내부에 진공압을 생성할 수 있는 진공 펌프, 챔버 내부의 계란의 전체 표면을

검사할 수 있도록 계란을 회전시키는 회전 장치 및 계란의 영상을 획득하기 위한 머신 비전 시스템으로 구성된다. 음압 방법은 단순히 진공으로 계란의 깨진 부분을 팽창시키기 위하여 사용되기 때문에 시스템 자동화를 위해서는 머신 비전과 연동되는 것이 필수적이다. 또한, 촬영된 계란의 표면에서 균열을 식별하기 위하여 영상 후처리 알고리즘이 개발되어야 한다.

## 음압 미세 파각란 검출 장치

본 연구는 음압 방법을 활용한 미세 파각란 검출 기술의 국산화를 목표로 하여 음압 장치를 개발하였으며, 장치의 개략도는 Fig. 1b와 같다. 순간적인 진공압을 견딜 수 있는 진공 챔버와 단축 공압 실린더(MDDBB50-600Z, SMC, Japan)를 사용하여 1 행정으로 챔버 내 압력을 원하는 만큼 강하시킬 수 있도록 하는 크기의 진공 펌프를 제작하였다. 챔버 내부에는 LED 모듈모듈(SinkPAD-II™ Rebel STAR/O, Luxeon Star LEDs, Canada) 및 개발된 계란 회전 장치가 설치되며, 진공 챔버의 상단에는 계란의 표면을 촬영하기 위한 Vision 카메라(mvBlueFOX3-2, Matrix vision, Germany)가 설치된다. 또한, 카메라는 PC와 연결되어 실시간으로 영상을 획득하고, 이미지 처리 작업을 통해 균열이 있는 계란을 검출할 수 있도록 개발하였다. 시스템의 모든 과정을 연동하기 위하여 마이크로 컨트롤 유닛인 Arduino Uno가 사용된다.



**Fig. 1.** Modified pressure method (a) Principle of the modified pressure method for hairline crack of egg, (b) Schematics of the modified pressure system

## 계란 영상 처리 알고리즘

음압 방법은 단독으로 계란의 균열을 검출하기 어려우며, 머신 비전 시스템과 함께 활용되어야 한다. 또한, 머신 비전으로 획득한 영상은 영상 처리를 통해 후처리되어야 한다. 영상 처리 알고리즘은 Matlab 2021a를 활용하여 개발되었다. 계란 표면의 균열을 정확하게 판별하기 위하여 계란 외 배경 및 계란의 기포로 인한 노이즈를 제거하였으며, 계란의 테두리 및 계란 표면의 균열은 Matlab 소프트웨어 내장 함수인 edge 함수로 검출하였다. 최종적으로 계란의 대기압 영상과 진공압 영상을 비교하여 균열의 정확도를 향상시켰다.

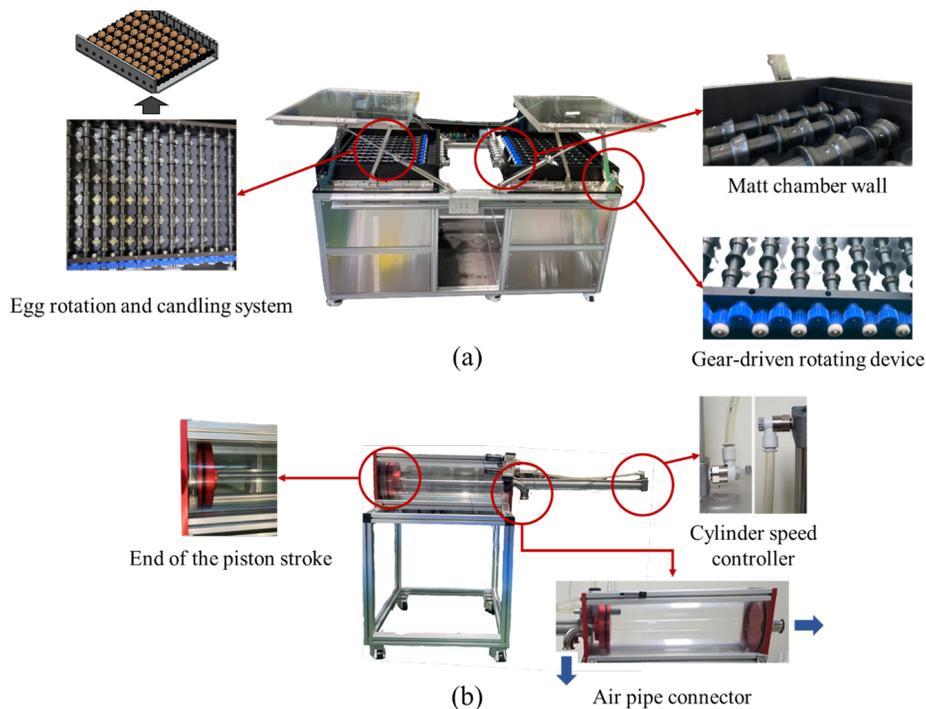
## Results and Discussion

### 진공 시스템

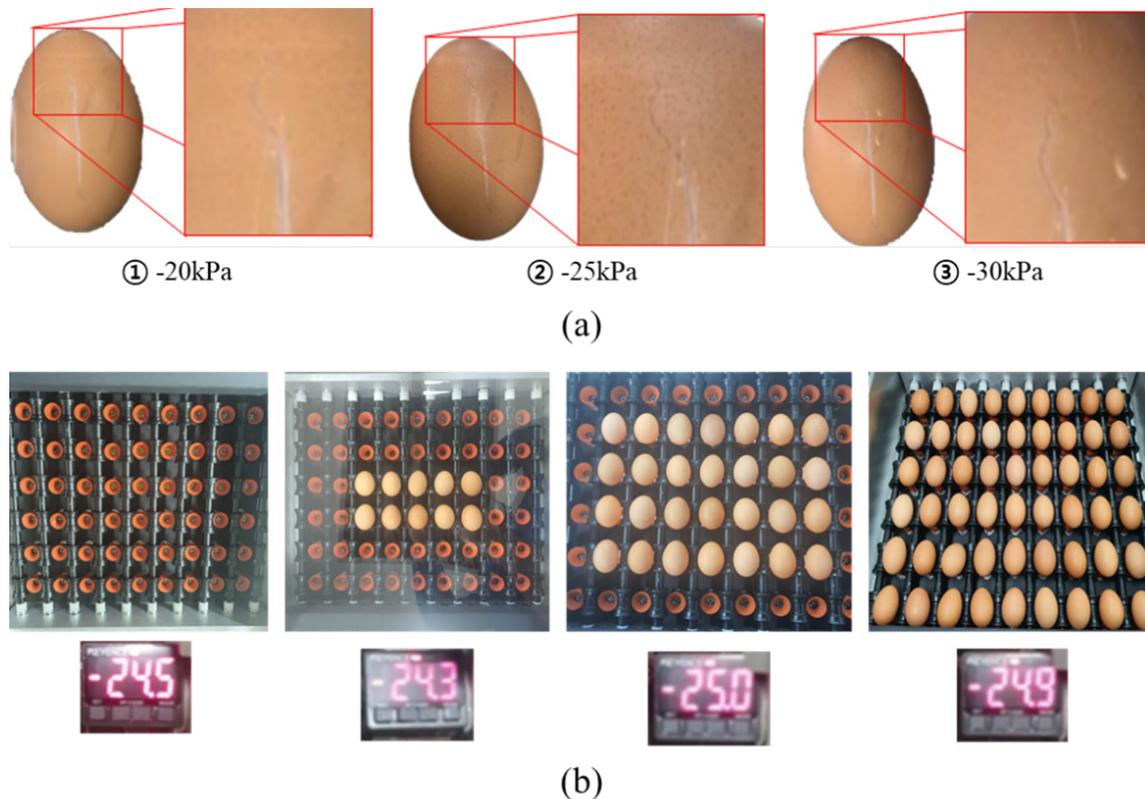
진공 챔버 및 진공 펌프는 음압 장치의 핵심이다. 진공 챔버는 순간적인 진공압에 견딜 수 있어야 하며, 진공 펌프는 매우 짧은 시간에 챔버 내의 공기를 흡기 및 배기할 수 있어야 하므로 서로 적절한 크기의 챔버와 펌프가 요구되었다. 진공 챔버 및 진공 펌프의 설계 특성은 Fig. 2에 나타났다. 진공 챔버의 내부 크기는 670 mm (L) x 610 mm (W) x 105 mm (H)로 약 0.043 m<sup>3</sup>의 체적으로 설계 및 제작되었으며, Fig. 2a와 같다. 챔버 내부의 계란 영상을 원활하게 획득하기 위해서는 챔버의 상부가 투명해야 하기 때문에 상판은 투명 아크릴 소재로 선정되었으며, 진공에 의한 힘 현상을 방지하기 위하여 5cm의 두께로 제작되었다. 챔버의 벽면 및 하부는 알루미늄 소재로 선정하여 진공을 견딜 수 있도록 하였고, 무광 처리를 하여 빛 반사를 최소화하였다. 또한, 상판의 개폐를 위하여 측면에 두개의 지지대 및 공압 실린더를 설치하였으며, 개폐뿐만 아니라 강하게 고정시켜 진동 등에 의한 노이즈를 최소화하였다. 펌프는 공압 실린더, 아크릴 소재의 플런저 펌프, 알루미늄 소재의 원형 피스톤 및 솔레노이드 밸브로 구성되었다(Fig. 2b). 솔레노이드 밸브로 피스톤을 작동시켰고, 공압 실린더에는 스피드 컨트롤러가 설치되어 피스톤 행정 속도를 조절할 수 있도록 하였다. 또한, 행정 거리를 펌프의 높이보다 짧게 하여 피스톤이 펌프의 끝단에 부딪혀 충격에 의한 진동이 발생하지 않도록 하였다. 플런저 펌프는 공급되는 압축공기의 압력에 따라 챔버 내부에 최대 -35 kPa의 진공압을 생성할 수 있었다. Lawrence et al. (2008)은 균열이 없는 정상란은 -254 mmHg(약 -34 kPa)의 반복되는 진공압을 견딜 수 있으며, 균열이 있는 파각란은 -200 mmHg(약 -30 kPa)의 진공압에서 균열을 원활하게 팽창시킬 수 있다고 보고하였다. 실험에 사용된 갈색란은 백색란보다 약 0.2 mm 두꺼운 0.6 mm의 두께를 가지고 있기 때문에 -20 kPa, -25 kPa, -30 kPa의 각 압력에 따른 파각란의 팽창 차이를 비교하였다(Fig. 3a). -20 kPa의 압력은 계란의 균열을 확실하게 팽창시키기 어려웠으며, -30 kPa의 압력은 계란의 균열이 육안으로 보일 정도로 클 경우에는 계란이 파손되기도 하였다. 따라서, 계란의 파손 위험이 있는 -30 kPa 보다 낮은 -25 kPa의 압력이 최적의 압력 조건으로 판단되었다. 또한, 계란의 개수에 따른 내부 진공압 변화 및 팽창 크기 변화를 비교하였을 때, 계란의 개수는 거의 영향이 없는 것으로 나타났다(Fig. 3b).

### 머신 비전 및 계란 회전 시스템

계란 껍질은 빛이 투과되기 때문에 계란의 뒷면에 조명을 설치하여 계란을 검사할 수 있으며, 음압 방법에서도 마찬가지로 팽창된 균열이 강조될 수 있도록 캔들링 방법이 사용되었다. 진공 챔버 내부에 각 계란을 투과할 수 있도록 LED 모듈 모듈이 배치된 계란의 하단부에 설치되었다. 머신 비전 카메라는 CMOS 카메라가 사용되었으며, 챔버 중앙부 상단에 설치되었다. 설치된 카메라는 아두이노 및 PC와 연결되며, wxPropView v2.40 카메라와 연동 소프트웨어를 통해 카메라의 Exposure (us), Saturation (%), Gain (dB), Black level (%), White Balance R (%), White Balance B (%) 등을 조절하였다. 또한, LED의 밝기는 LED 모듈 드라이버를 사용하여 조절하였다. 광원의 세기 및 카메라 설정 값에 따른 균열 팽창의 명확도를 비교하였을 때, LED의 밝기가 세질수록 계란 외 주변 배경이 영상에 획득되어 노이즈가 발생할 우려가 생겼으며, 암실에서는 약한 광원에도 팽창된 균열이 획득한 영상에서 명확하게 확인되었다(Fig. 4). 계란을 거치 및 회전시키는 회전 장치는 상업용 계란 이송 롤러를 사용하였다. 계란 이송 롤러는 마찰력이 높고, 계란을 안정적으로 배치할 수 있도록 설계되었으며, 빠른 속도에도 계란을 파손시키지 않고 회전시킬 수 있다. 계란 회전 장치는 스테핑 모터를 사용하여 구동하였는데, 산업용 타이밍 벨트는 연결된 롤러의 기어 부분을 마모시켰고, 마모된 롤러는 롤러의 회전을 방해하였다. 이를 해결하고자 롤러는 기어 방식으로 연결되어 큰 동력도 견딜 수 있도록 설계 및 제작되었다(Fig. 5a). 개발된 계란 회전 장치는 계란의 전체 표면을 카메라를 통해 획득하기 위하여 계란을 1/3바퀴 회전 및 반대 방향으로 2/3바퀴 회전하도록 설정되었다(Fig. 5b).



**Fig. 2.** Characteristics of the vacuum chamber and vacuum pump fabricated in this study (a) vacuum chamber (b) vacuum pump



**Fig. 3.** Comparison of (a) egg crack expansion size according to vacuum pressure and (b) vacuum pressure depending on the number of eggs

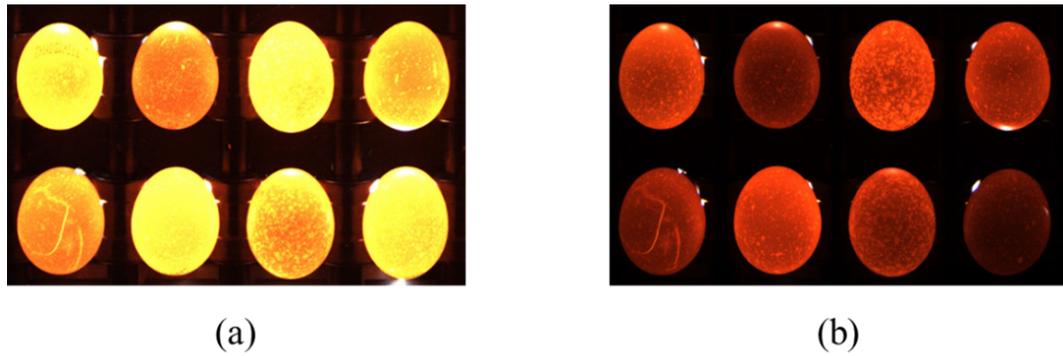


Fig. 4. Difference in image brightness depending on the camera parameters

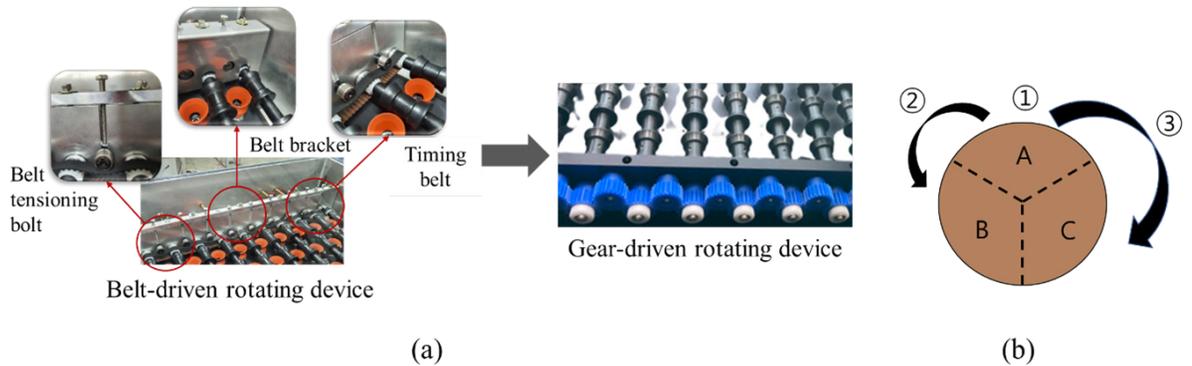


Fig. 5. (a) Design supplements for egg rotating device (b) Egg rotation sequence for whole egg image acquisition

### 계란 영상 처리 시스템

머신 비전 시스템을 통해 획득한 계란 영상은 개발된 계란 균열 판별 알고리즘에 의해 후처리된 후 최종적으로 미세 파각란의 유무를 검사하게 된다. Fig. 6는 본 연구에서 개발된 영상 처리 알고리즘을 나타낸다. 진공압에서 팽창된 균열을 발견하는 것이 핵심이며, 대기압에서 계란 영상( $I_a$ )과 진공압에서 영상( $I_v$ )을 획득하여 두 영상을 합성하여 비교함으로써 균열을 찾을 수 있다. 대기압 및 진공압에서 얻은 영상은 균열의 크기에서 상당한 차이가 발생하기 때문에 이를 비교함으로써 검출 정확도가 향상되었다. 대기압 및 진공압 영상의 뒷배경 제거 작업을 위한 마스크 이미지( $I_m$ )를 생성하기 위하여 최적의 임계값( $T_{r1}$ ,  $T_{r2}$ )을 검출하였으며, 생성된 마스크 영상을 통해 대기압 및 진공압 영상을 마스킹하여 뒷배경이 제거된 영상( $I_{re1}$ ,  $I_{re2}$ )을 획득하였다. 노이즈가 제거된 두 영상( $I_{re1}$ ,  $I_{re2}$ )의 차이에서 균열을 확인할 수 있었으나, 균열과 함께 계란 표면의 기포로 인한 매우 작은 노이즈가 함께 발견되었다. 기포 노이즈는 매우 작은 픽셀로 구성되어 있었으며, 균열 검출을 방해하는 요소인 계란의 기포를 제거할 수 있는 최적의 임계값( $T_m$ )보다 크기가 큰 픽셀의 집합을 균열( $I_d$ )로 판별하였다. 알고리즘은 최종적으로 균열 영상과 마스크 영상을 합성하여 균열이 있는 계란 영상( $I_d$ )을 획득하여 균열 픽셀이 있는 계란을 미세 파각란으로 판별하였다. Fig. 7은 영상 처리 알고리즘에 따른 계란 영상의 결과를 나타낸다.

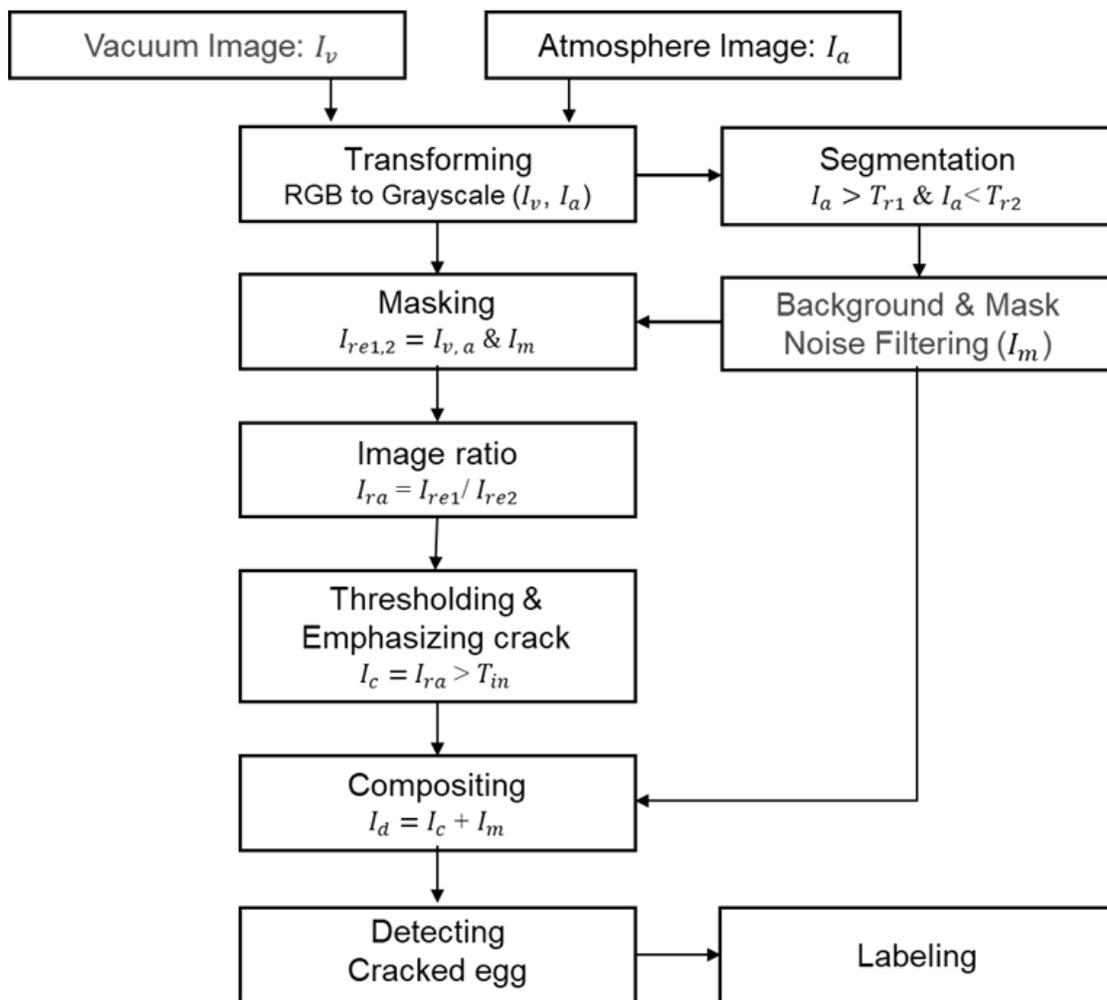


Fig. 6. Image processing algorithm for detecting hairline crack on egg surface

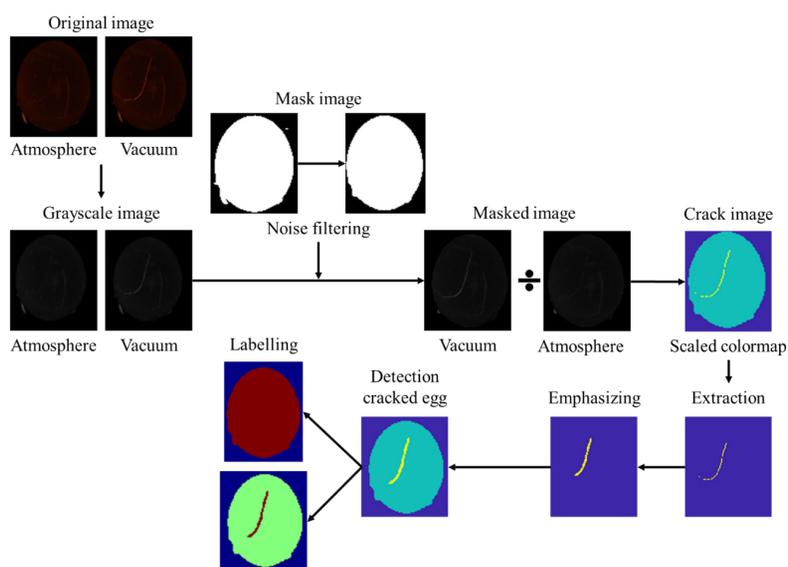


Fig. 7. Results for each image processing step of detecting hairline crack on egg surface

## 음압 기반 미세 파각란 검출 시스템

본 연구에서는 최종적으로 음압 방법을 활용한 미세 파각란 검출 장치를 개발하였으며, 최종 검출 공정은 Fig. 8과 같다. 일반적인 음압 방법을 이용한 미세파각란 검출 시스템(Fig. 1b)는 계란을 직접 투입 및 제거하기 때문에 연속식이 불가능하고, 검출 공정 시간이 길어 상당한 시간이 소요되었다. 그러므로 음압 방식의 한계인 검출 과정의 소요 시간을 단축시키기 위하여 본 연구에서는 진공 챔버 2대를 연결하여 1대에 계란이 배치되는 동안 나머지 1대는 검출 공정이 수행되도록 하였다(Fig. 2b). 진공 펌프의 양측에 연결되어 교대로 수행되도록 함으로써 효율성을 가중시켰다. 머신 비전 시스템은 챔버 사이 중앙부에 설치된 거치대에 설치되며, 모터를 사용하여 회전하여 챔버로 이동되었다. 챔버의 개폐는 수동 스위치로 작동되며, 검출 공정은 MCU 및 PC로 연동되어 시작 스위치를 통해 자동으로 수행되었다. Fig. 9는 본 연구에서 개발된 Matlab 기반의 계란 판별 프로그램을 나타낸다. 대기압 및 진공압의 영상이 wxPropView v2.40를 사용하여 획득될 경우 프로그램에서 내장된 알고리즘에 따라 균열을 검출하였다. 시스템 공정에 따라 대기압 및 진공압의 계란 영상이 3 반복 촬영되며, 프로그램에서 자동으로 대기압 영상과 진공압 영상을 영상 처리하였다. 영상 처리된 각 영상은 합성되어 최종적으로 프로그램에서 균열이 있는 계란을 분류되었다. 또한, 프로그램 내부에서 영상을 촬영하여 수동적으로 영상처리를 통해 임의의 계란 세트를 검사할 수 있으며, 계란의 균열을 판별하는 알고리즘의 임계값은 프로그램 내부에서 설정할 수 있다.

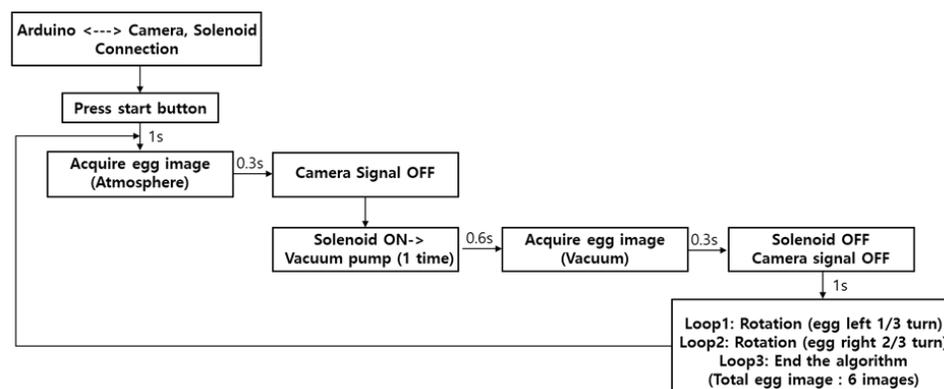


Fig. 8. Egg crack detection process using developed multi vacuum pressure system in this study

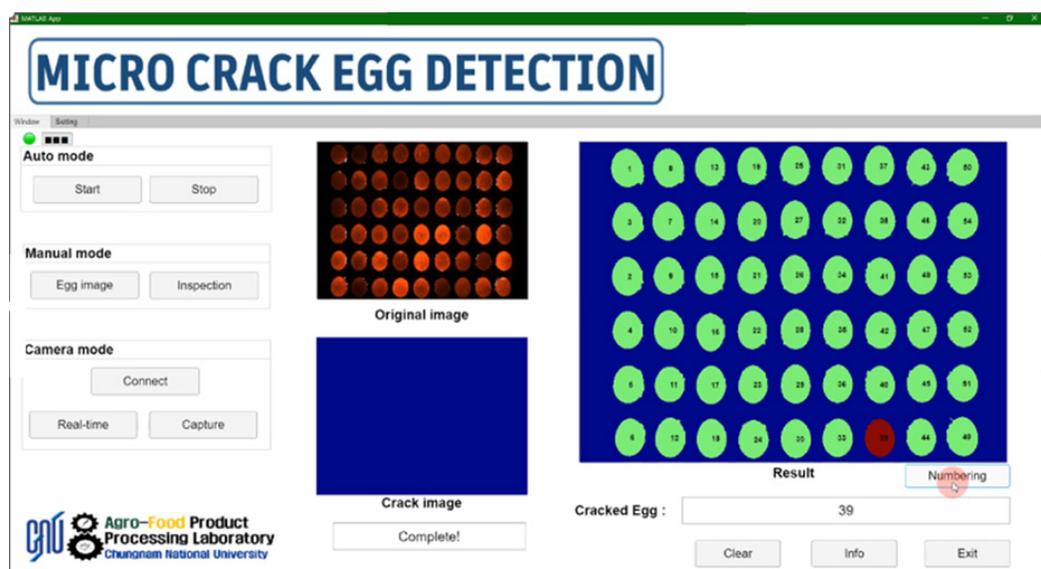


Fig. 9. Result of the detecting the cracked egg using the egg crack detection program developed with Matlab software

## Conclusion

일반적인 음압 방식의 미세 파각란 검출 시스템은 다른 방식에 비해 검출 속도가 매우 느리기 때문에 큰 한계점을 가지고 있다. 본 연구에서는 음압 방식의 한계점을 극복하기 위하여 진공 챔버를 2대로 확장한 미세 파각란 검출 시스템을 개발하였다. 진공 챔버가 2대이기 때문에 1대에 소요 시간이 긴 검출 공정이 수행될 동안 다른 1대에서는 계란을 투입시킬 수 있기 때문에 공정의 효율성을 향상시킬 수 있었다. 본 연구에서 개발된 미세 파각란 판별 알고리즘은 시스템의 영상 장치를 통해 획득한 대기압 및 진공 압에서 계란 영상을 바탕으로 균열을 검출할 수 있었다. 그러나 개발된 검출 시스템은 알고리즘이 탑재된 소프트웨어와 연동되지 않았기 때문에 자동화 구축 단계는 미흡한 부분으로 판단되어 향후 하드웨어와 소프트웨어의 통합 구축이 필요하다. 본 연구에서 개발된 음압 기반의 미세 파각란 검출 장치의 초기 모델은 농가에 보급하는 것을 목표로 하여 향후 실증 평가를 통해 시스템을 최적화함으로써 계란 농가의 경제 성장 및 국내 유통 계란 품질 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## Acknowledgements

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원 첨단농기계산업화기술개발사업의 지원(120104-03-3-HD020)으로 수행되었음.

## References

- Bain MM, Dunn IC, Wilson PW, Joseph N, De Ketelaere B, De Baerdemaeker J, et al. 2006. Probability of an egg cracking during packing can be predicted using a simple non-destructive acoustic test. *British Poultry Science* 47: 462–469.
- Barnett DM, Kumpula BL, Petryk RL, Robinson NA, Renema RA, Robinson FE. 2004. Hatchability and early chick growth potential of broiler breeder eggs with hairline cracks. *Journal of Applied Poultry Research* 13: 65–70.
- Botta B, Gattam SSR, Datta AK. 2022. Eggshell crack detection using deep convolutional neural networks. *Journal of Food Engineering* 315: 110798.
- Guanjun B, Mimi J, Yi X, Shibo C, Qinghua Y. 2019. Cracked egg recognition based on machine vision. *Computers and Electronics in Agriculture* 158: 159–166.
- Hara-Kudo Y, Sakakibara Y, Konuma H, Sawada T, Kumagai S. 2001. Laying season and egg shell cracks on the growth of *Salmonella Enteritidis* in the egg albumen during storage. *Journal of Food Protection* 64: 1134–1137.
- Kertész I, Zsom-Muha V, András R, Horváth F, Németh C, Felföldi J. 2021. Development of a novel acoustic spectroscopy method for detection of eggshell cracks. *Molecules* 26: 4693.
- Khabisi MM, Salahi A, Mousavi SN. 2012. The influence of egg shell crack types on hatchability and chick quality. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences* 36: 289–295.
- Lawrence KC, Yoon SC, Heitschmidt GW, Jones DR, Park B. 2008. Imaging system with modified-pressure chamber for crack detection in shell eggs. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety* 2: 116–122.
- Lin H, Xu PT, Sun L, Bi X kun, Zhao J wen, Cai J rong. 2018. Identification of eggshell crack using multiple vibration sensors and correlative information analysis. *Journal of Food Process Engineering* 41: e12894.

- Liu YC, Chen TH, Wu YC, Tan FJ. 2017. Determination of the quality of stripe-marked and cracked eggs during storage. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 30: 1013–1020.
- Lutter CK, Iannotti LL, Stewart CP. 2018. The potential of a simple egg to improve maternal and child nutrition. *Maternal and Child Nutrition* 14: e12678.
- Omid M, Soltani M, Dehrouyeh MH, Mohtasebi SS, Ahmadi H. 2013. An expert egg grading system based on machine vision and artificial intelligence techniques. *Journal of Food Engineering* 118: 70–77.
- Pan L qing, Zhan G, Tu K, Tu S, Liu P. 2011. Eggshell crack detection based on computer vision and acoustic response by means of back-propagation artificial neural network. *European Food Research and Technology* 233: 457–463.
- Priyadumkol J, Kittichaikarn C, Thainimit S. 2017. Crack detection on unwashed eggs using image processing. *Journal of Food Engineering* 209: 76–82.
- Ragni L, Cevoli C, Berardinelli A. 2010. A waveguide technique for non-destructive determination of egg quality parameters. *Journal of Food Engineering* 100: 343–348.
- Sun L, Bi XK, Lin H, Zhao JW, Cai JR. 2013. On-line detection of eggshell crack based on acoustic resonance analysis. *Journal of Food Engineering* 116: 240–245.
- Sun L, Feng S, Chen C, Liu X, Cai J. 2020. Identification of eggshell crack for hen egg and duck egg using correlation analysis based on acoustic resonance method. *Journal of Food Process Engineering* 43: e13430.
- Yeh C-H, Menozzi D, Torok A. 2020. Eliciting Egg Consumer Preferences for Organic Labels and Omega 3 Claims in Italy and Hungary. *Foods* 9: 1212.
- Yoon SC, Lawrence KC, Jones DR, Heitschmidt GW. 2012. Improved modified pressure imaging and software for egg micro-crack detection and egg quality grading. *Applied Engineering in Agriculture* 28: 283–293.