

자기공명영상을 활용한 무정란 조기 판별 기술 개발

김학성¹, 김성민^{2,3*}

¹여주자연농업고등학교, ²전북대학교 생물산업기계공학과, ³전북대학교 대학원 농축산식품융합학과

Early Detection of Infertile Egg Using Magnetic Resonance Imaging

Hak Sung Kim¹, Seong Min Kim^{2,3*}

¹Yeoju Self-Management Agricultural High School

²Department of Bioindustrial Machinery Engineering, Jeonbuk National University

³Department of Agricultural Convergence Technology, Graduate School, Jeonbuk National University

요약 본 연구의 목적은 MRI 장치를 이용하여 부화 과정에서 획득한 자기공명영상을 활용하여 부화 시간에 따라 변화하는 영상의 특징을 관찰할 수 있는 영상 처리 알고리즘을 개발하고, 영상의 특징을 이용하여 유·무정란을 판별할 수 있는 형상 지수를 개발하며, 그 값으로 정상 부화 여부를 판별할 수 있는 가능성을 구명하여 무정란의 조기 판별 기술을 개발하는 것이다. 산업용 MRI 시스템을 이용하여 40개의 유정란과 10개의 무정란 영상을 얻고 분석하였다. 계란을 38℃ 부화기에 넣어 3일 간 부화시키며 실험을 진행하였고 MRI는 시료를 부화기에 넣기 전과 부화기에 넣은 후 22시간, 32시간, 40시간, 48시간, 56시간, 64시간, 72시간에 걸쳐서 총 8번의 영상을 획득하였다. 연구 결과로 부화 중 노른자 형상의 변화를 정량화하기 위해 노른자의 윤곽선 추출 및 추출한 영상의 중심, 원형도, 장단축 비 등을 분석할 수 있는 영상 처리 알고리즘을 개발하였다. 계란 중앙 부위의 슬라이스 평균 영상 정보를 이용하여 노른자의 원형도와 장단축 비 등의 형상 지수를 구한 후 분석한 결과 유·무정란 판별율은 부화 56시간에서 각각 98.4% 및 82.5%를 나타내었다. 개발된 기술을 좀 더 보완하여 판별율을 높여 활용하면 유·무정란 판별을 3일 이내에 판별할 수 있으리라 생각된다.

Abstract The objectives of this study were to develop an image processing algorithm that can observe image characteristics that change with incubation time, to develop shape indices that can distinguish between fertile and infertile eggs using image characteristics, to investigate whether normal hatching can be determined using these indices, and to develop a technology capable of detecting infertile eggs. MRI acquisition was performed using an industrial MRI system and 40 fertilized and 10 infertile eggs. Eggs were placed in an incubator at 38°C for 3 days, and MR images were obtained 8 times at baseline (before samples were placed in the incubator) and at 22, 32, 40, 48, 56, 64, and 72 hours after placing samples in the incubator. An image processing algorithm was developed to analyze centroid, circularity, and the major-to-minor axis ratios to quantify yolk shape changes during incubation from extracted images. Average image information of three central slices was used to calculate shape indices useful for differentiating fertile and infertile eggs. The shape indices yolk circularity and major-to-minor axis ratio (determined after incubation for 56 hr) achieved discrimination rates of 98.4% and 82.5%, respectively. In summary, using shape indices would enable fertile and infertile eggs to be differentiated within 3 days.

Keywords : Infertile Egg Detection, Incubation, Magnetic Resonance Imaging, Image Analysis, Shape Indices

*Corresponding Author : Seong Min Kim(Jeonbuk National University)

email: smkim@jbnu.ac.kr

Received November 29, 2023

Accepted January 5, 2024

Revised January 2, 2024

Published January 31, 2024

1. 서론

병아리 생산을 위해서는 종계에서 생산된 유정란을 부화해야 하는데 부화율은 일정하지 않다. 부화기에서 부화가 되지 않는 이유는 크게 두 가지로 수정되지 않은 무정란이거나 부화 중 배자가 폐사한 부화 중지란이 되기 때문이다. 유·무정란의 조기 판별을 위해 다양한 비파괴 분석법이 적용되어 시도되고 있지만 실용화할 정도의 성과가 나오지 않고 있다. 현재 가장 확실하게 유정란과 무정란을 판별하는 것은 부화기 내에서 5일~7일간의 부화 과정을 거치며 발생하는 물성 변화와 혈관 형성을 감지하는 것이다. 38℃ 내외의 높은 온도에서 보관하는 것이므로 부화 판별 시에 이미 무정란의 신선도가 낮아 다른 용도로 사용하기 어려울 것으로 판단된다. 신선도는 난백의 높이와 난중의 무게를 측정하는 호우닛(HU: Haugh Unit, 이하 HU) 값으로 표현하는데 HU값이 높으면 신선도가 높고 낮으면 신선도가 낮다는 것으로 나타난다. 일반적으로 HU 값이 70 이상은 신선한 것으로 HU 값이 70 이하인 것은 신선하지 않은 것으로 판단하는데 25도 이상의 실온에서는 3일 만에 70 이하로 떨어지는 변화를 감지할 수 있다[1].

자기공명영상(MRI: Magnetic Resonance Imaging, 이하 MRI) 기술은 현재 의료 분야에서 비파괴적으로 인체의 내부 영상을 획득할 수 있는 도구로 많이 쓰이고 있고 농업 분야에서도 세계적인 연구자들이 다양한 농식품 시료를 대상으로 MRI를 활용하는 연구를 진행하였다 [2-6]. 특히 저장 중의 농식품의 품질 변화[7-9], 곡물의 침지 및 건조 등 수분의 이동 과정[10-12] 분석 등 시계열 MRI 데이터 분석 연구가 진행되었으나 국내의 관련 연구는 MRI 장비와 연구인력 부족으로 미진한 상황이다.

Coucke 등은 계란의 껍질에 타격을 가하여 발생하는 진동을 관찰하여 배자의 발달 정도를 판별할 수 있다고 하였다[13]. 약 100시간 후에 급격한 변화를 관찰할 수 있었다. Smith 등은 부화 중지란을 검출하는데 있어 백색 레그혼종의 알을 사용하였으며 각각 576 nm, 655 nm의 초분광 영상을 이용하였다[14]. 3일 경과 후 91%의 정확도를 보였다. 육용 갈색란은 576 nm, 682 nm(± 13 nm)의 영상을 이용하여 판별하였는데 3일 부화 후 정확도는 83%였다. Duce 등은 메추리 알의 부화 과정을 7.1 T MRI 장치를 이용하여 모니터링하고 3D 이미지 처리를 하였다[15]. 0~7일 동안 38℃에서 부화기에서 부화하면서 중간에 꺼내어 배아의 움직임을 줄이기 위해 3분간 냉각시킨 뒤 약 19℃에서 측정(실내 온도)

하였으며 자기장의 영향이 부화에 미치는 영향을 파악하기 위해 0일과 3일에 7시간을 자기장에 방치하였을 때 배자의 발달에 큰 지장이 없다고 하였다. 부화가 진행됨에 따라 알부민이 감소하고 배아 외 물질(EEF: Extra Embryonic Fluid)이 증가하지만 노른자의 총 부피는 5일 동안 큰 변화가 없었다고 하였다. Bamelis 등은 투과 스펙트럼을 측정하였을 때 백색란과 갈색란의 가시광 영역에서 스펙트럼의 형태가 크게 다르다고 하였고 유정란과 무정란을 구별할 때 백색란은 577/610 nm의 흡광비가 헤모글로빈의 생성에 따라 변한다는 것에 기초하여 108시간(4.5일) 이후에 가능하다고 하였으나, 갈색란의 경우 껍질 속의 protoporphyrin이 헤모글로빈과 유사한 광학적 특성을 보여 판별이 어렵다고 하였다[16].

이 연구의 궁극적인 목적은 한국에서 많이 생산되는 갈색 산란계 종인 하이라인 브라운(Hy-line brown) 계란을 대상으로 현재 농산물의 비파괴 품질 판정 및 성분 분석 연구에 도입되고 있는 MRI 기술을 이용하여 38℃ 부화기에 입식한 후 3일 이내에 배자, 배아의 발생이 이루어지고 있는 유정란과 아무런 발생의 흔적이 없는 무정란을 구별할 수 있는 기술을 개발하는 데 있다.

2. 재료 및 연구방법

2.1 재료 및 자기공명영상 획득

계란의 MRI 획득 및 분석을 통한 정상 부화 여부의 판명 가능성을 구명을 위해 실험에 사용된 40개의 유정란은 여주의 OO농장에서 구입하였고, 10개의 무정란은 평창의 $\Delta\Delta$ 대 목장에서 구입하였으며, 무게는 58 g ~ 62 g 사이의 것이었다.

MRI 획득 실험은 전북대학교 농업기계 ICT융합 연구소에 설치된 1.0 Tesla 영구자석 산업용 MRI 시스템을 이용하여 3일간 실행하였다. Fig. 1과 같이 MRI를 획득하기 위해 직경이 80 mm인 RF 코일을 사용하였고 항상 일정한 위치에서 영상을 획득할 수 있도록 홀더 안에 계란을 고정할 수 있는 트레이를 별도로 제작하였다. 트레이는 시중에 판매되고 있는 특란 10개의 크기를 측정하여 평균에 가까운 것을 골라 누운 상태로 안착될 수 있도록 모형을 만들었으며 방향이 바뀌지 않도록 키 홈을 만들어 표시하였다. 계란을 38℃ 부화기에 넣어 3일 간 부화시키며 실험을 진행하였고 MRI 측정은 시료를 부화기에 넣기 전, 부화기에 넣은 후 22시간, 32시간, 40시간, 48시간, 56시간, 64시간, 72시간에 걸쳐서 총 8번 실시

하였다. 자기공명영상 파라미터는 TR=14 ms, TE=4 ms, slice thickness=1 mm로 설정하고 Fig. 2과 같이 축 방향으로 64 슬라이스(slice) 영상을 얻었다.

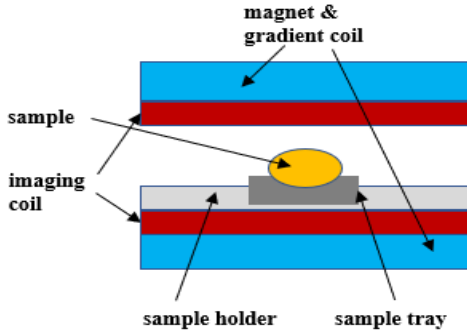


Fig. 1. Schematic cross-section diagram of a magnetic resonance imaging system showing a sample on a sample tray and holder in a RF imaging coil.

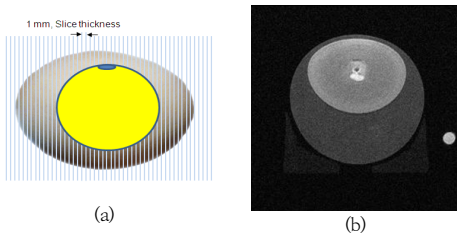


Fig. 2. Magnetic resonance image acquisition. (a) Magnetic resonance image acquisition direction and thickness (b) Acquired 32th slice of magnetic resonance image out of 64 slice images in axial direction

2.2 자기공명영상 처리 및 형상 지수 설정

얻어진 자기공명영상 처리 과정은 다음과 같다. MRI 장치로 얻어진 것 중, 중간 부분에 해당하는 28~37번째 슬라이스 영상을 대상으로 상용 소프트웨어(MATLAB, Mathworks, USA)를 이용하여 영상처리를 실시하였다.

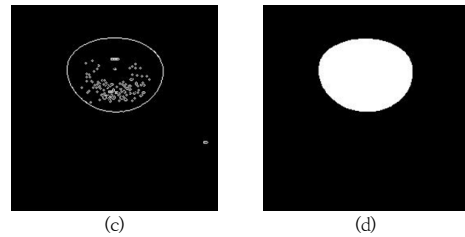
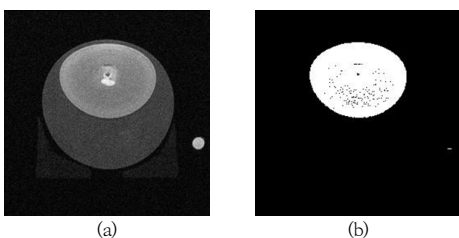


Fig. 3. Magnetic resonance image processing procedure. (a) Acquired magnetic resonance image (b) Thresholded image (c) Sobel filtered image (d) Segmented Yolk image

부화 과정 중에 노른자의 형상 변화를 계량적으로 표시하기 위해 일차적으로 Fig. 3처럼 영상 처리 과정을 거친 후, Fig. 4에 나와 있는 것처럼 노른자(난황)의 경계선(검은 실선), 면적(Area), 중심(Centroid), 장축(Maj_Ax)과 단축(Min_Ax) 길이, 경계선 길이(Boundary length) 및 흰자의 외곽 경계선(흰색 실선) 등을 구하였다. 다음으로 형상 변화를 나타내기 위한 지수로 원형도(Circularity), 장단축의 비(Ratio of major axis/ minor axis), 노른자 중심에서 상단 및 하단까지의 거리의 비($YLR=NL/SL$), 노른자 중심에서 껍질과 노른자 상단 사이의 거리($LD=NL_C-NL$) 등을 설정하였다. Fig. 4에서 노른자의 외곽선 중 흰색으로 나타난 부분은 노른자의 형상이 바뀔 때 따라 측정하여 계산되는 영역이다.

본 연구에서 얻어진 유·무정란의 부화 시간별 자기공명영상을 유정란과 무정란으로 구분하여 시간적 변화를 분석하였고 영상으로부터 얻은 노른자 단면적의 변화와 Table 1에 정의한 4개의 형상 지수 변화가 부화 시간에 따라 유·무정란을 판별할 수 있는 지표인지 분석하였다.

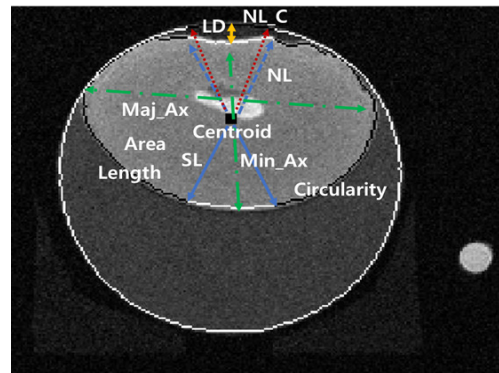


Fig. 4. Measurement variables to define shape index of yolk.

각종 측정 변수와 형상 지수에 대한 자세한 정의는 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Definitions of shape index presenting morphological features of yolk image during incubation. (Refer to Fig. 4)

Shape Index	Definition
CYE: Circularity of Yolk Ellipse	$\frac{4\pi A}{l^2}$: A = area of yolk. l = length of yolk boundary
ARY: Axial Ratio of the Yolk	Ratio of Major axis(Maj_Ax) to Minor axis(Min_Ax)
YLR: Yolk Length Ratio	Ratio of the length from the centroid to the top surface and the length to bottom surface of yolk (NL/SL)
YSD: Yolk Space Distance	Difference between the distance from the centroid to shell and the distance to the top surface of yolk (LD: NL_C - NL)

3. 결과 및 고찰

3.1 부화 시간에 따른 MR 영상에서의 형상 변화

3.1.1 유정란의 형상 변화

MRI 측정 장치에서 제공하는 이미지 파일은 256 × 256 픽셀의 해상도를 가지고 있는 DICOM 파일형식이다. 이 형식의 영상을 표시할 수 있는 소프트웨어(RadiAnt DICOM Viewer, Ver 3.4.3, Medixant, Poland)를 이용하여 수동으로 명도를 임의로 조절하여 시각적으로 가장 알아보기 쉬운 상태, 곧 가독성이 제일 좋은 상태로 만들어 Fig. 5처럼 노른자의 형상 변화를 관찰하였다.

시각적으로 관찰하였을 때 Fig. 5의 (b)처럼 부화 22시간에서 노른자 중심의 윗부분이 부풀어 오르고 이후 줄어들기 시작하여 40시간에서 많이 사라짐을 확인할 수 있었다. 부화 48시간에서는 윗부분이 아랫부분보다 길이가 줄어들어 있음을 알 수 있었다. 노른자의 단면적 (Area)은 부화가 진행됨에 점점 감소하는 경향을 나타내었고 원형도(Circularity)도 시간이 진행됨에 따라 원형에서 타원형으로 바뀔 때 따라 값이 감소하는 경향을 보였다. 노른자의 중심에서 노른자 윗부분과 아랫부분까지 길이의 비를 의미하는 YLR(Yolk Length Ratio)은 48시간에서 최대였다가 이후 감소하는 경향을 보였다. 이와 반대의 경향을 나타내는 것은 노른자 윗부분과 알 껍질 사이의 거리를 나타내는 YSD(Yolk Spcae Difference)

이다. 노른자의 윗부분이 부풀어 오르면서 껍질과의 거리는 줄어들지만 48시간 이후에서 노른자 윗부분이 사라지면서 공간은 늘어나게 되어 결과적으로 YSD값은 증가하였다. 노른자가 옆으로 퍼지면서 장축값(Maj_Ax)은 증가하였고 단축값(Min_Ax)은 감소하였으며 두 축의 비율인 ARY (Axial Ratio of the Yolk) 값은 증가하였다. 외형 추출 프로그램으로 영상 처리하였을 때 Fig. 5의 (a)처럼 처음 측정(0시간)에서 외형에서 폐곡선이 발생하지 않거나 모양이 일정하지 않는 경우가 다수 발생하였다. 외형 추출은 72시간의 부화 상태에서 가장 선명하였다. 부화 56시간 이후 노른자 영상의 외곽 부분이 뚜렷하지 못하여 마치 부화 중인 것으로 보이기도 하였다.

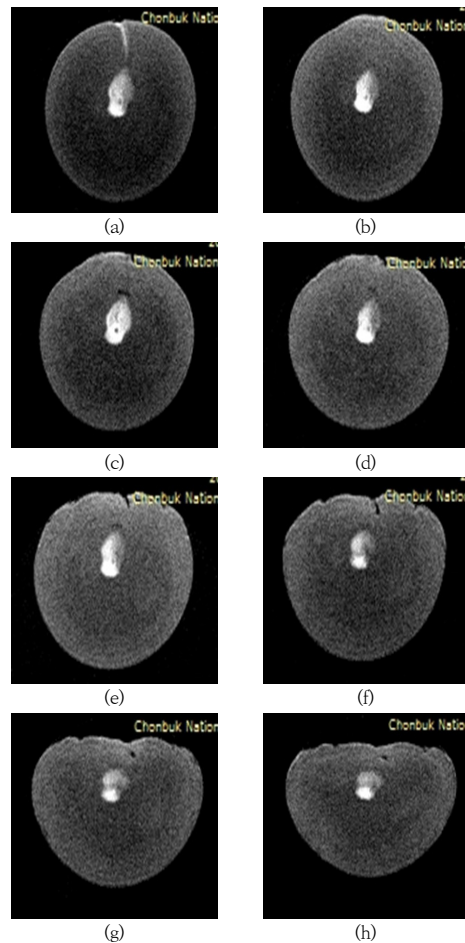


Fig. 5. Magnetic resonance images showing changes of fertile egg's yolk during incubation period. (a) 0 hr (b) 22 hr (c) 32 hr (d) 40 hr (e) 48 hr (f) 56 hr (g) 64 hr (h) 72 hr

3.1.2 무정란의 형상 변화

무정란은 부화 시간에 따라 외형상의 큰 변화는 없었다. Fig. 6을 보면 노른자의 중심에 있는 고형체인 라테브라에서 배반까지 이어지는 핵이 점점 없어지는데 신선도 저하에 따라 미약한 노른자의 형상 변화에 기인 것으로 여겨지며 이에 따른 노른자의 위치 이동에 영향을 받았을 것으로 생각된다. 부화 54시간 이후 노른자의 외곽이 뚜렷하게 나오지 않는 경우가 있었다.

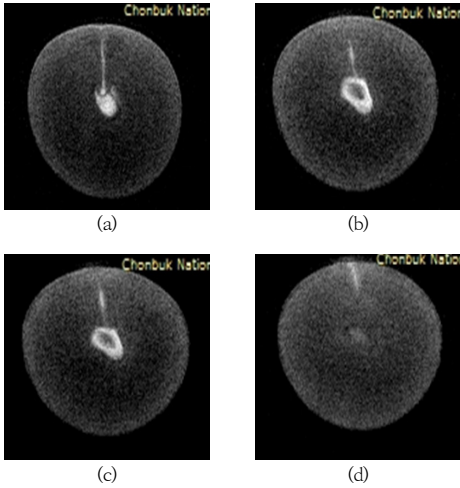


Fig. 6. Magnetic resonance images showing changes of infertile egg's yolk during incubation period. (a) 0 hr (b) 40 hr (c) 56 hr (d) 72 hr

3.2 정상 부화 판별용 형상 지수 개발

3.2.1 형상 지수의 대표값

계란이 트레이에 고정되어 있어도 부화, 난백의 변형이 생기는 수양화 등에 의해 노른자의 위치와 모양의 변형이 발생할 수 있다. 그러므로 1개의 슬라이스의 영상만을 가지고 형상 변화를 분석하는 것은 오차를 발생시킬 수 있다. 계란의 중앙부위에 3개 이상의 슬라이스를 대상으로 노른자 영상의 단면적의 크기를 비교하였다. 그 결과 Fig. 7에서와 같이 슬라이스 32, 33 및 34번의 노른자 단면적이 상대적으로 큰 것으로 분석되었기에 이들 3개 대표 슬라이스의 영상이 정중앙 값을 의미한다고 판단하여 각 형상 지수를 구한 다음, 이들을 평균하여 대표값으로 사용하였다.

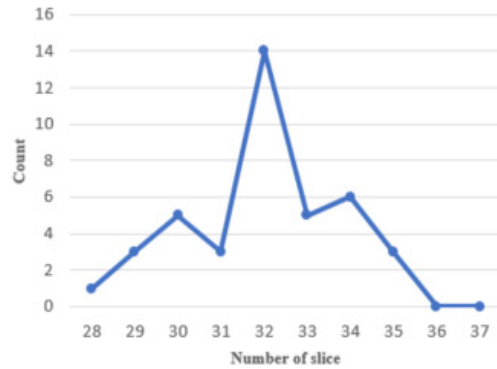


Fig. 7. Total number of images having the largest yolk area in each slice.

3.2.2 노른자의 단면적 변화

노른자의 단면적 변화를 살펴보면 Table 2와 같이 부화가 진행됨에 노른자의 단면적은 점점 감소하였다. 부화기에 들어가기 전에 측정한 영상을 분석한 값에 많은 오차가 발생하였으며, 부화기에 들어가기 전에 보관했던 실내 온도와 부화기 온도 차이에 기인한 것으로 여겨진다. 유정란은 부화 56시간 이후 단면적이 급격하게 줄어드는 것을 알 수 있었다. 이 값은 절대값을 나타내기 때문에 노른자의 크기에 영향을 받을 것으로 판단된다.

Table 2. Magnetic resonan change in yolk area of fertile and infertile egg during incubation.

Incubation hour	Fertile egg		Infertile egg	
	Average (pixel)	Stdev (pixel)	Average (pixel)	Stdev (pixel)
0	9056	957	8883	2661
22	8987	842	9029	460
32	8827	613	8863	626
40	8819	608	8761	588
48	8783	627	8863	602
56	8230	585	8892	600
64	8129	558	8869	586
72	8090	540	8670	533

3.2.3 노른자의 원형도 변화

노른자의 원형도는 Table 3에서와 같이 무정란은 거의 변화가 없으나 유정란은 부화 48시간부터 급격하게 변하는 것을 관찰할 수 있었다. 56시간에서 유정란의 평균 원형도는 0.909로 무정란의 0.970 ± 0.007 과 뚜렷이 구분되며 원형도 0.90을 기준으로 유정란과 무정란을 판

별한 결과 98%이상의 판별율을 나타냈다. 원형도는 유·무정란 판별에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3. Change in CYE(Circularity of Yolk Ellipse) of fertile and infertile egg during incubation.

Incubation hour	Fertile egg		Infertile egg	
	Average (a/u)	Stdev (a/u)	Average (a/u)	Stdev (a/u)
0	0.914	0.140	0.778	0.207
22	0.963	0.174	0.976	0.017
32	0.994	0.007	0.984	0.009
40	0.972	0.007	0.953	0.019
48	0.951	0.020	0.970	0.007
56	0.909	0.041	0.969	0.007
64	0.857	0.054	0.971	0.007
72	0.778	0.061	0.970	0.005

3.2.4 노른자의 반지름 비율 변화

계란의 부화 과정에서 Table 1에 정의한 노른자의 중심에서 하부 표면까지와 상부 표면까지의 길이 비의 변화는 Table 4에 정리하였다. 이 지수는 부화가 진행됨에 따라 노른자의 상부 변화를 나타내는 것으로 부화 40시간부터 유정란이 빠르게 감소하고 있으나 무정란은 증가하는 것을 알 수 있었다.

Table 4. Change in YLR(Yolk Length Ratio) during incubation.

Incubation hour	Fertile egg		Infertile egg	
	Average (a/u)	Stdev (a/u)	Average (a/u)	Stdev (a/u)
0	1.027	0.023	1.055	0.097
22	1.007	0.023	0.998	0.013
32	1.007	0.023	1.003	0.022
40	1.007	0.023	1.002	0.028
48	1.000	0.033	1.016	0.028
56	0.971	0.027	1.019	0.025
64	0.955	0.034	1.027	0.029
72	0.948	0.038	1.038	0.033

3.2.5 노른자 상부 공간의 수직 거리 변화

부화가 진행되는 과정에서 노른자 상부에 공간이 발생한다. 노른자 중심에서 껍질과 노른자 표면 사이에서 생기는 공간의 수직 거리를 측정된 결과를 Table 5에 정리

하였다. 이 결과에 의하면 부화 64시간 이후에도 유·무정란이 다수 혼재되어 있음을 알 수 있었다. 이는 계란 내의 절대적인 거리를 나타내기 때문에 계란의 크기에도 영향을 받을 것으로 판단된다.

Table 5. Change in YSD(Yolk Space Distance) during incubation.

Incubation hour	Fertile egg		Infertile egg	
	Average (a/u)	Stdev (a/u)	Average (a/u)	Stdev (a/u)
0	37.3	7.0	45.7	18.6
22	44.1	6.9	43.4	6.6
32	44.2	6.7	42.6	7.3
40	44.7	7.1	43.1	7.4
48	48.5	7.1	43.2	7.9
56	49.6	6.7	44.6	7.5
64	52.3	7.1	45.6	7.7
72	52.0	7.2	45.3	7.9

3.2.6 노른자 장단축 비의 변화

노른자 영상의 장단축비(장축/단축)를 부화 시간에 따라 측정된 결과를 Table 6에 정리하였다. 일반적으로 사용하는 타원의 이심률(Eccentricity)과는 다른 단순 비율값이며 유정란은 부화 기간 중 꾸준히 값이 증가하였으나 무정란은 부화 40시간부터 장단축비가 점점 증가하였다. 이 지수를 이용할 경우 부화 56시간에서 유·무정란의 판별율은 문턱값 1.30를 기준으로 82.5%로 나타났다.

Table 6. Change in ARY(Axial Ratio of the Yolk) during incubation.

Incubation hour	Fertile egg		Infertile egg	
	Average (a/u)	Stdev (a/u)	Average (a/u)	Stdev (a/u)
0	1.121	0.067	1.808	0.821
22	1.157	0.046	1.184	0.056
32	1.183	0.051	1.208	0.069
40	1.186	0.058	1.179	0.067
48	1.248	0.124	1.201	0.068
56	1.482	0.175	1.222	0.061
64	1.580	0.186	1.243	0.071
72	1.862	0.191	1.267	0.090

4. 결론

산업용 1.0 T MRI 장치를 이용하여 TR=14 msec, TE=4 msec으로 설정하고 부화란을 대상으로 축 방향의 64개 슬라이스 영상을 측정하고, 이 중에서 가운데 3개의 슬라이드를 영상 분석에 사용하였다. 부화 중 노른자 형태의 변화를 정량화하기 위해 노른자 영상의 윤곽선 추출, 중심(centroid), 원형도, 장단축 비 등을 분석할 수 있는 영상처리 알고리즘을 개발하였다. MR 영상의 관찰 결과 부화가 진행되면서 노른자의 중심 위치가 바뀌는 것을 확인하였다. 부화 22시간에 노른자에서 배아가 있는 부분이 부풀어 오르면서 노른자가 위로 올라가 껍질에 달라붙는 현상을 확인하였다. 이후 노른자가 작아지면서 껍질과 노른자 사이에 공간이 생성되는 것을 확인하였다. 유정란의 경우 배반 부근의 노른자 영상이 48시간 이후부터 원형에서 타원형으로 급격하게 변화하고, 원형도(circularity)는 감소하고 장축/단축의 비(axial ratio)는 반대로 증가하였다. 그러나 무정란은 상대적으로 이들 형상 지수의 변화가 크지 않았다. 64개의 단층 영상 중에서 중앙부 슬라이스(32번, 33번, 34번)의 노른자의 원형도와 장단축 비를 구하고, 이를 평균 내어 유·무정란을 판별한 결과 부화 56시간에서 판별율은 각각 98.4% 및 82.5%를 나타내었다. 개발된 기술을 좀 더 보완하여 판별율을 높여 활용하면 일반적으로 5일~7일 정도 걸리는 유·무정란 판별을 3일 이내에 판별할 수 있으리라 생각된다.

References

- [1] S. H. Kim, S. J. Lee, D. S. Lee, W. B. Cho, S. H. Lee, S. Borden, Y. A. Woo, H. J. Kim, "Non-Destructive Measurement of the Egg Freshness by Near Infrared Spectrometry", *Journal of the Korean Chemical Society*, Vol. 49, No. 6, pp.531-536, Dec. 2005. DOI: <https://doi.org/10.5012/jkcs.2005.49.6.531>
- [2] D. C. Joyce, P. D. Hockings, R. A. Mazucco, A. J. Shorter, "1H-Nuclear magnetic resonance imaging of ripening 'Kensington Pride' mango fruit", *Functional Plant Biology*, Vol. 29, No. 7, pp.873-879, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1071/PP01150>
- [3] S. M. Kim, R. Milczarek, M.J. McCarthy, "Fast Detection of Seeds and Freeze Damage of Mandarins using Magnetic Resonance Imaging", *Modern Physics Letters B*, Vol. 22, No. 11, pp.941-946, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0217984908015644>
- [4] L. Zhang, M. J. McCarthy, "Measurement and evaluation of tomato maturity using magnetic resonance imaging", *Postharvest Biology and Technology*, Vol. 67, pp.37-43, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.12.004>
- [5] K. K. Patel, M. A. Khan, A. Kar, "Recent development in applications of MRI techniques for foods and agricultural produce-an overview", *J. Food Sci. Technol.* Vol. 52, pp.1-26, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0917-3>
- [6] R. K. Srivastava, S. Talluri, S. K. Beebi, B. R. Kumar, "Magnetic Resonance Imaging for Quality Evaluation of Fruits: a Review", *Food Anal Methods*, Vol. 11, No. 10, pp.2943-2960, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12161-018-1262-6>
- [7] M. Musse, S. Quellec, M. F. Devaux, M. Cambert, M. Lahaye, F. Mariette, "An investigation of the structural aspects of the tomato fruit by means of quantitative nuclear magnetic resonance imaging", *PMagnetic Resonance Imaging*, Vol. 27, No. 5, pp.709-719, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mri.2008.11.005>
- [8] A. Ciampa, M. T. Dell'Abate, O. Masetti, M. Valentini, P. Sequi, "Seasonal chemical-physical changes of PGI Pachino cherry tomatoes detected by magnetic resonance imaging (MRI)", *Food Chem.*, Vol. 122, No. 4, pp.1253-1260, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.078>
- [9] S. H. Baek, J. G. Lim, J. G. Lee, M. J. McCarthy, S. M. Kim, "Investigation of the Maturity Changes of Cherry Tomato Using Magnetic Resonance Imaging", *Appl. Sci.*, Vol. 10, No. 15, 5188, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10155188>
- [10] L. N. Pietrzak, J. Fregeau-Reid, B. Chatson, B. Blackwell, "Observations on water distribution in soybean seed during hydration processes using nuclear magnetic resonance imaging", *Canadian Journal of Plant Science*, Vol. 82, No. 3, pp.513-619, 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.4141/P01-150>
- [11] P. K. Ghosh, D. S. Jayas, Marco L. H. Gruwel, Noel D. G. White, "Magnetic resonance image Analysis to explain Moisture Movement in Wheat Drying", *2004 ASAE Annual Meeting*, Paper number 043118, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.16741>
- [12] S. H. Baek, S. M. Kim, "Development of MRI Technique for Investigating Hydration Process of nctact Dried Green Coffee Bean", *Foo Eng. Prog.*, Vol. 24, No. 1, pp 15-22, 2020. DOI: <https://doi.org/10.13050/foodengprog.2020.24.1.15>
- [13] P. Coucke, E. Dewil, E. Decuyper, J. De Baerdemaker, "Measuring the mechanical stiffness of an eggshell using resonant frequency analysis", *British Poultry Science*, Vol. 40, pp.227-232, 1999. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00071669987647>
- [14] D. P. Smith, J. M. Mauldin, K. C. Lawrence, B. Park, G. W. Heitschmidt, "Detection of fertility and early development of hatching eggs with hyperspectral imaging", *Proc. 11th European Symposium on the*

Quality of Eggs and Egg Products, pp.176-180. 2005.

- [15] S. Duce, F. Morrison, M. Welten, G. Baggott, C. Tickle, "Micro-magnetic resonance imaging study of live quail embryos during embryonic development", *Magnetic Resonance Imaging*, Vol. 29, No. 1, pp.132-139, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mri.2010.08.004>
- [16] F. R. Bamelis, K. Tona, J. G. De Baerdemaeker, E. M. Decuyper, "Detection of early embryonic development in chicken eggs using visible light transmission", *British Poultry Science*, Vol. 43, No. 2, pp.204-212, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1080/00071660120121409>

김 학 성(Hak-Seong Kim)

[정회원]



- 2003년 2월 : 서울대학교 대학원 농업기계학과 (공학석사)
- 2017년 8월 : 서울대학교 대학원 바이오시스템공학과 (공학박사)
- 2012년 5월 ~ 2013년 2월 : 전북대학교 IT융복합농기계 종합기술 지원사업단 전문연구원
- 2018년 3월 ~ 현재 : 여주자영농업고등학교 농업기계 담당 교사

<관심분야>

농업용 전기전자, 스마트팜

김 성 민(Seong Min Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 서울대학교 대학원 농업기계학과 (농업석사)
- 1995년 12월 : University of California, Davis (공학박사)
- 2016년 7월 ~ 2017년 7월 : 국립농업과학원 농업공학부 부장
- 2006년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 생물산업기계공학과 교수

<관심분야>

농업비파괴센싱, 농업전기전자