

계란 등급판정을 위한 파각란 자동 검사 시스템

최완규 이강진 손재룡 강석원 이호영

Automatic Eggshell Crack Detection System for Egg Grading

W. K. Choi K. Lee J. R. Son S. Kang H. Y. Lee

Abstract

Egg grading is determined by exterior and interior quality. Among the evaluation methods for the egg quality, a candling method is common to identify eggs with cracked shells and interior defects. But this method is time-consuming and laborious. In addition, practically, it is challenging to detect hairline and micro cracks. In this study, an on-line inspection system based on acoustic resonance frequency analysis was developed to detect hairline cracks on eggshells. A roller conveyor was used to transfer eggs along one lane to the impact position where each of eggs rotated by the roller was excited with an impact device at four different locations on the eggshell equator. The impact device was consisted of a plastic hammer and a rotary solenoid. The acoustic response of the egg to the impact was measured with a small condenser microphone at the same position as the impact device was installed. Two acoustic parameters, correlation coefficient for normalized power spectra and standard deviation of peak resonant frequencies, were used to detect cracked eggs. Intact eggs showed relatively high correlations among the four normalized power spectra and low standard deviations of the four peak resonant frequencies. On the other hand, cracked eggs showed low correlations and high standard deviations as compared to the intact. This method allowed a crack detection rate of 97.6%.

Keywords : Cracked eggs, Acoustic response, Normalized power spectrum, Correlation coefficient, Peak resonant frequency

1. 서 론

소비자들의 기호가 고품질 축산물을 선호하는 추세에 있기 때문에 계란의 품질을 평가하여 등급화 하는 것은 중요한 일이 되고 있다. 현재 우리나라에서 계란의 등급판정은 축산물 등급판정소에서 주관하고 있으며, 숙련된 등급판정사들이 계란의 선별공정에서 표본 추출된 계란들의 외관검사를 통하여 난각의 외관품질을 판정하고, 투광검사 및 할란검사를 통하여 난황, 난백, 이물질 및 호우단위 등의 내부품질을 판정한 후 품질등급을 부여한다. 또 표본 추출된 계란들의 파각란 검사를 실시하여 각 품질등급별 파각란 허용범위에 따라 등급을 다시 조정한다. 파각란은 난각에 금이 갔으나 난각막이 손

상되지 않아 내부 물질이 누출되지 않은 계란을 말한다(축산물 등급판정소, 2007).

현재 파각란의 검사는 등급 판정사가 개별 계란에 빛을 투광시켜 검사하지만 장시간 광에 노출될 경우 눈의 피로가 가중되어 오판 가능성이 있고, 또한 미세파각의 검출에는 어려움이 있다. 그리고 이러한 인력에 의한 등급판정은 주관적인 견해가 반영되어 논란의 여지가 있을 수 있기 때문에 등급판정의 객관화를 위해 기계화가 필요한 실정이다.

파각란을 기계적으로 검출하려는 연구는 영상처리와 음파 반응 등을 이용하여 행해져 왔다. 영상처리를 이용하여 Elster와 Goodrum(1991), 조와 권(1995), 그리고 이 등(2000)이 파각란을 검출하는 연구를 수행하였지만 검출 소요시간이 길고,

The article was submitted for publication on 2008-09-04, reviewed on 2008-09-22, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2008-10-06. The authors are Wan Kyu Choi, Researcher, KSAM member, Kangjin Lee, Senior Researcher, KSAM member, Jae Ryong Son, Sukwon Kang, Researcher, KSAM member, National Institute of Agricultural Engineering (NIAE), RDA, and Ho Young Lee, Graduate Student, KSAM member, Department of Biosystems Engineering, Seoul National University. Corresponding author: K. Lee, Senior Researcher, KSAM member, NIAE, RDA, Suwon, Korea; Tel: +82-31-290-1874; E-mail: <jini2002@rda.go.kr>.

통상적인 영상처리 기법으로는 빛이 잘 투과되지 않는 미세 파각란에 대해서는 검출에 어려움이 있었다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 Lawrence 등(2008)은 파각란을 검출하기 위하여 압력을 조절할 수 있는 챔버 속에 계란을 넣고 먼저 대기압 상태의 계란 영상을 얻은 다음, 챔버의 압력을 순간적으로 낮추면 미세 파각란의 경우 금이 간 부분이 확장되어 파각이 부각되는데 이 영상을 획득하여 두 영상을 비교함으로써 파각의 유무를 판별하였다. 그 결과 파각란의 경우 98.75%의 판별률을 나타내었고, 정상란의 경우는 100% 정확하게 판별하였다고 보고하였다.

한편, Cho 등(2000)은 난각의 크랙을 검사하기 위하여 계란의 침부와 둔부를 타격하여 발생하는 음파 반응을 이용하였고, 파워스펙트럼의 면적, 도심, 최대공진주파수를 판별인자로 이용하였을 경우 95%의 판별 성능을 보였다고 보고하였다. Ketelaere 등(2000)도 계란의 적도부를 타격하여 얻은 음파 신호의 주파수 특성을 분석하여 난각의 크랙을 검출하는 연구를 수행하였다. 이 연구에서 계란을 4회 타격하여 얻은 신호들의 피어슨 상관계수를 판별인자로 사용하였을 때 90%의 크랙 검출률을 보였다고 보고하였다. Jindal 등(2003)은 음파반응과 인공신경망을 이용하여 난각의 크랙을 검출할 수 있는 실험용 검사 시스템을 구축하였으며, 계란 적도부의 서로 다른 지점을 8회 타격하여 얻은 음파신호를 인공신경망에 의해 분석한 결과 98.7%의 판별 성능을 보였다고 보고하였다.

이처럼 영상처리나 음파 등을 이용하여 파각란을 검출하려는 연구가 행해졌지만 실제로 계란 선별시스템에 적용된 것은 음파를 이용한 파각란 검사기가 대부분이다. 영상처리 시스템의 경우 장치는 간단하지만 고가이고 이송라인 위에서 미세 파각란의 검출이 어려운 반면 음파를 이용한 파각란 검사기는 장치는 복잡하지만 영상처리 시스템에 비해 저렴하고 미세 파각란의 검출이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 현재 자동화된 양계장이나 대규모 계란 집하장에는 타음이나 진동을 이용한 외국인 파각란 검사기를 도입하여 운영하고 있지만 국내에서 개발되어 보급된 장비는 거의 없고, 특히 등급판정을 위한 소형화된 자동 파각란 검사장치는 그 필요성에도 불구하고 연구 개발이 미비하고, 실용화된 장비도 없다.

또한 기존의 음파를 이용한 파각란 검사 연구에서는 음파 신호를 주파수 분석한 파워스펙트럼 데이터를 판별인자로 주로 사용하였다. 이처럼 파각의 유무는 파워스펙트럼 분석만으로도 가능하지만 노이즈나 현장 적용에 대한 대책이 필요하였다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구에서 사용한 최대공진주파수, 상관계수와 같은 판별인자를 수용하고 최대공진주파수의 표준 편차와 같은 인자를 추가하여 각 인자들의 경계값을 다양하게 적용함으로써 현장 적용 시 판별률을 향상시키

고자 하였다.

본 연구는 외관검사, 투광검사, 중량측정, 할란 후 내부 이물질 및 난황색 검사, 난백높이 측정으로 행해지는 일련의 등급판정 과정을 자동화하기 위한 계란 등급판정 장치 개발의 일환으로 수행되었고, 숙련된 등급 판정사라 할지라도 눌러보아야 파각의 유무를 알 수 있는 미세 파각란을 포함한 계란의 파각 검사를 자동으로 수행하고, 판별 정확도를 향상시키기 위해 타음을 이용한 파각란 검사 시스템을 구축하고, 파각란 판별 알고리즘을 개발하여 판별 성능을 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 시험재료

다양한 시료를 확보하기 위하여 계란 선별장소 소매상에서 크기별로 왕란(68 g 이상), 특란(60~68 g), 대란(52~60 g), 중란(44~52 g) 등의 계란 842개를 구입하여 512개는 음파 특성 및 판별알고리즘 개발에 이용하였고, 330개는 개발된 시스템의 검증에 이용하였다. 여기서 44 g 미만의 소란은 계란 등급판정 시 제외되기 때문에 포함시키지 않았다. 시험 계란들의 중량과 적도부 직경을 측정한 결과를 그림 1에 나타내었다. 적도부 직경의 경우 타격장치의 타격거리 설정과 관계가 있는데 왕란과 중란의 직경은 최대 약 10 mm 정도 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

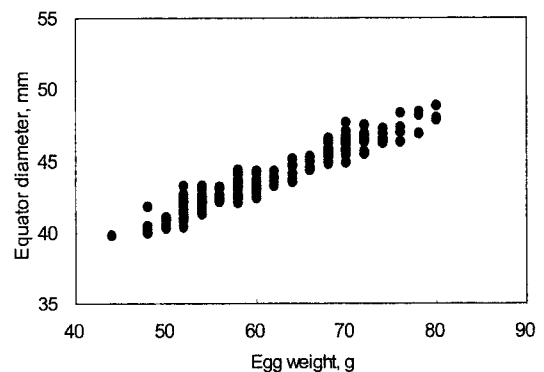


Fig. 1 The distribution of weight and equator diameter of used eggs.

시중에 유통되는 계란에서 발견되는 다양한 파각란의 형태를 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 왼쪽은 파각의 정도가 큰 파각란이고, 오른쪽으로 갈수록 미세 파각란으로서, 본 연구에서는 대부분 육안으로 확인하기 힘든 미세 파각란을 이용하였다.

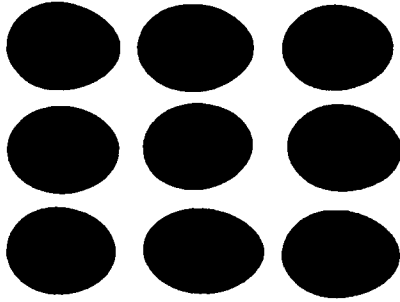
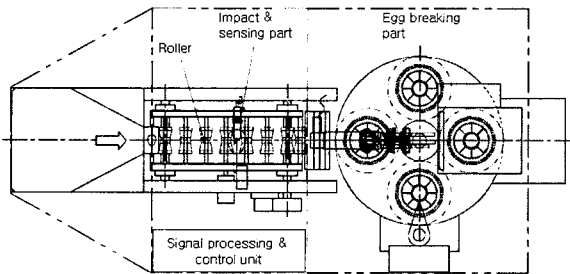


Fig. 2 The types of cracks on eggshells.

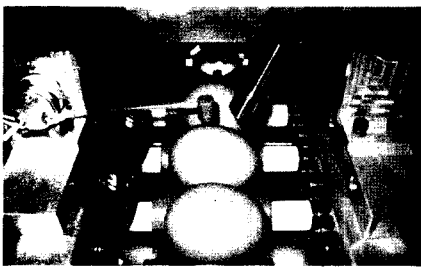
나. 파각란 검사 시스템

1) 시스템 구성

이송 로울러, 타격 및 음파 검출장치, 신호처리장치, 그리고 제어장치로 구성된 파각란 검사 시스템을 그림 3에 나타난 바와 같이 제작하였다.



(a) Schematic diagram



(b) Impact and sensing part

Fig. 3 Inspection system for cracks on eggshell.

계란 이송 로울러는 상용 계란 선별기에 적용되고 있는 것을 구입하여 1조 식으로 제작하였으며, 타격장치는 회전형 솔레노이드와 플라스틱 막대 그리고 플라스틱 햄머를 이용하여 제작하였다. 타격에 의한 음파 검출용 센서는 소형 콘덴서형 마이크로폰(OB-27, BSE Co., Korea)을 사용하였다. 계란의 진동 모드 모양과 그림 1에 나타난 계란의 적도부 직경을 고려하여 왕란의 최대 직경보다 5 mm 상부에 타격 햄머와 마이크로폰을 설치하였다. 솔레노이드의 회전에 의해서 최대 30 mm의 타격거리가 생기기 때문에 중란의 경우도 무리 없이 타격 할 수 있다.

계란의 음파 특성은 첫 번째 공진주파수와 많은 관련이 있으며, 계란의 진동 모드 중 첫 번째 공진주파수와 관련된 모드 모양은 타격지점 및 180도 반대지점에서 반응신호가 가장 크게 나타나기 때문에(최와 조, 2002) 계란의 적도부를 타격할 경우 음파 반응신호는 타격지점의 상부나 그 반대 지점에서 측정하는 것이 효과적이다. 그러나 타격지점의 반대편에 음파 검출장치를 설치할 경우 계란 이송 로울러에 방해받을 수 있어서 본 연구에서는 계란의 적도부 상부를 타격하고, 타격지점의 상부에서 검출하는 방식을 채택하였다.

2) 음파신호의 획득

계란을 호퍼에 투입하면 이송 로울러 위에 자동으로 계란이 올려지면서 1열로 진행한다. 계란이 타격부에 도착하면 전체 이송라인은 정지하고 타격부 이송 로울러만 제자리에서 회전하면서 계란을 약 1회전 시키는데, 이때 소요되는 시간은 약 2초 정도이다. 파각란의 판별 정확도를 향상 시킬 뿐만 아니라 파각란 검사 이외에 다른 공정을 위한 대기 시간을 고려하여 계란을 제자리에서 회전시키면서 타격하도록 하였다. 따라서 계란이 1회전 하는 동안 일정간격으로 총 4회의 타격과 음파신호 검출이 이루어지며, 여기서 검출된 음파 신호는 프리앰프를 거쳐 250 kS/s의 샘플링률을 가지는 데이터 수집장치(NI USB-6225, National Instruments, USA)를 통해 컴퓨터로 전달된다. 이때 계란 음파 신호의 샘플링률은 에일리아싱을 고려하여 20 kHz, 샘플수는 1024개로 설정하여 한 번 타격 후 0.0512초 동안 데이터를 획득하였다. 또한 계란의 크기에 따라 신호의 획득시점이 달라지기 때문에 A/D 지연시간 조절 및 신호처리를 통하여 신호가 일정한 시점에서 표시되도록 하였다. 개발된 마이크로폰 프리앰프와 타격장치 구동용 보드의 개략도를 그림 4에 나타내었다. 여기서 프리앰프의 전압이득은 약 18 dB이며, 타격 솔레노이드의 입력 전압과 전압 인가시간을 조절함으로써 타격강도와 타격 접촉시간을 조절할 수 있도록 하였다.

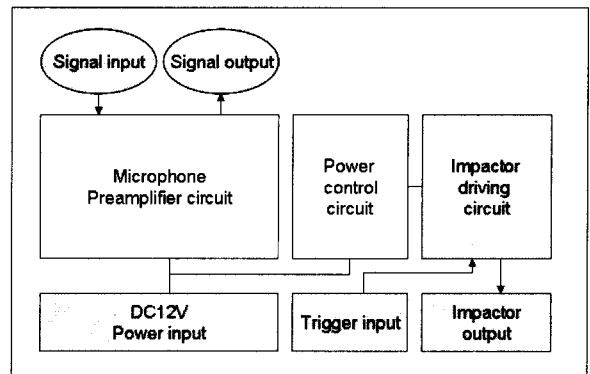


Fig. 4 Schematic diagram of microphone preamplifier and impactor driving board.

3) 음파 신호의 분석 및 성능평가

계란의 음파 신호처리 및 분석을 위하여 컴퓨터 프로그래밍 언어(Visual C++ 6.0, Microsoft Co., USA)를 이용하여 시스템 운용 소프트웨어를 개발하였다. 계란의 음파 신호처리 과정은 그림 5에 나타낸 바와 같다.

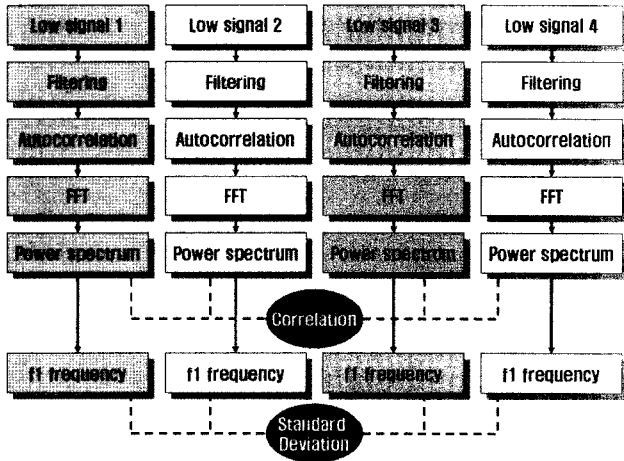


Fig. 5 Acoustic signal processing of eggshell.

4회 타격으로부터 얻은 음파 데이터들은 1,000~7,500 Hz 범위의 신호만 통과하는 IIR Butterworth 10차 대역통과 필터(Fig. 6)를 거쳐 자기상관을 구하였다. 자기상관을 구함으로써 신호에 포함된 불규칙한 잡음을 제거하였으며, 자기상관에 대한 FFT(Fast Fourier Transform)로부터 파워스펙트럼과 공진주파수들을 구하였다. 이때 파워스펙트럼의 크기를 정규화 시킴으로써 분석 시 타격강도에 의한 영향을 최소화하였다. 정규화 된 파워스펙트럼들을 분석함으로써 파각란 판별에 필요한 판별 인자들을 구하였고, 이들을 이용한 판별 알고리즘을 개발하여 파각란 검사 시스템의 성능을 평가하였다.

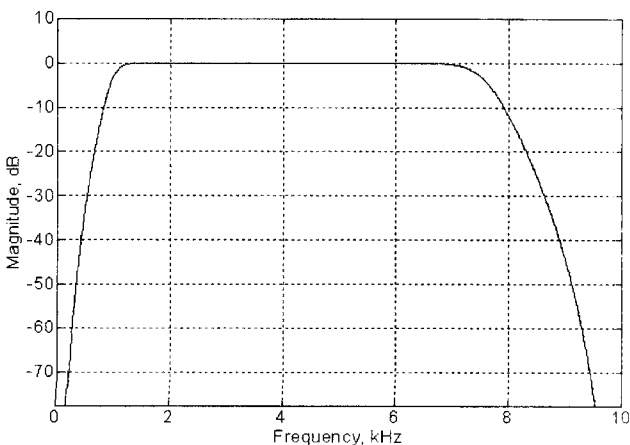
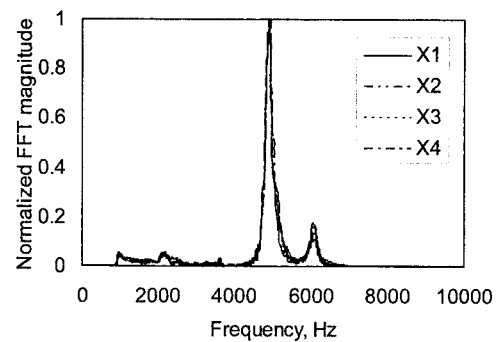


Fig. 6 Band pass filter used.

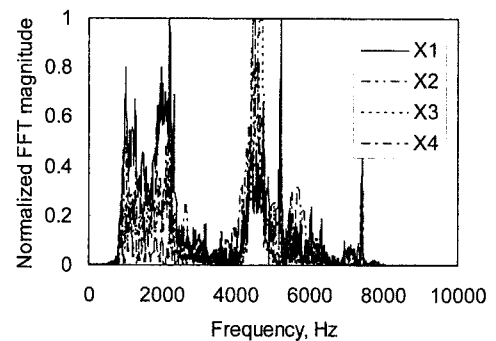
3. 결과 및 고찰

가. 계란의 음파특성

4회에 걸쳐 타격 후 획득된 정상란과 파각란의 정규화된 파워스펙트럼의 한 예를 그림 7에 나타내었다. 정상란의 경우 그림 7(a)에 나타낸 것처럼 4회 타격 간 파워스펙트럼이 거의 일정하고 최대 공진주파수의 변화 또한 거의 없는 반면, 파각란의 경우 타격 간 파워스펙트럼의 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있었다(Fig. 7(b)).



(a) Intact egg

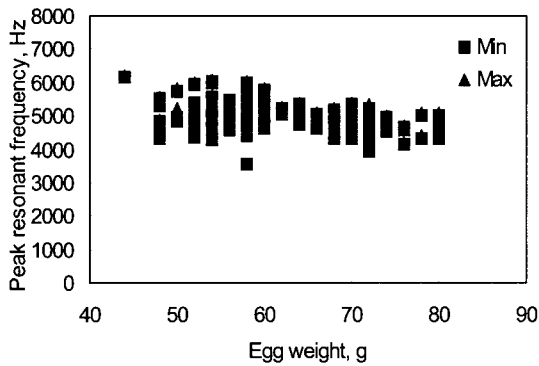


(b) Cracked egg

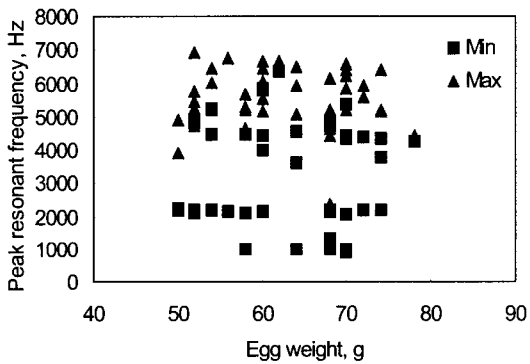
Fig. 7 Normalized power spectra of four impacts (X1: first impact, X2: second impact, X3: third impact, X4: fourth impact).

파각란 판별 알고리즘을 개발하기 위해서 시험재료의 최대 공진주파수와 표준편차, 그리고 파워스펙트럼의 타격 간 상관계수와 같은 음파특성들을 조사한 결과 정상란의 최대 공진주파수는 4,000~6,200 Hz 범위에 분포한 반면, 파각란의 경우는 900~7,000 Hz 사이에 광범위하게 분포함을 알 수 있었다(Fig. 8). 파각란의 경우 최대 공진 주파수 범위가 넓은 것은 파각이 있는 부위와 없는 부위의 공진 주파수 차이가 크기 때문에 생긴다고 판단되었다. 최대 공진주파수들의 표준편차는 정상란의 경우 대부분 0~100 사이에 분포하였고, 파

각란의 경우는 0~2,500사이로 광범위하게 분포하였다(Fig. 9). 정규화된 파워스펙트럼의 타격 간 상관계수 분포는 정상란의 경우 0.4~1.0, 파각란의 경우는 0.0~1.0까지 광범위하게 분포하였다(Fig. 10). 이와 같은 특징들은 정상란과 파각란을 분류할 수 있는 판별인자로 활용 가능할 것으로 판단되었다.



(a) Intact egg



(b) Cracked egg

Fig. 8 The distribution of peak resonant frequencies with egg weight (Min: minimum value of peak resonant frequencies, Max: maximum value of peak resonant frequencies).

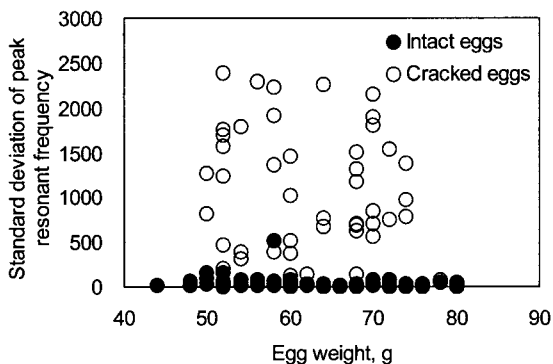
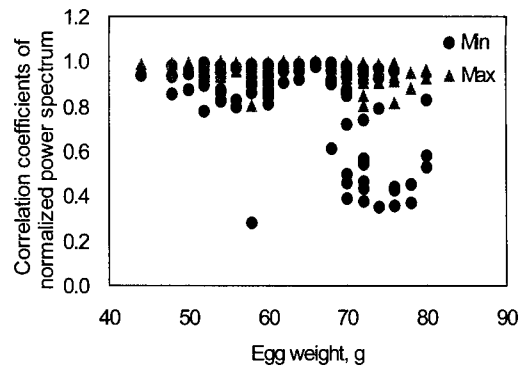
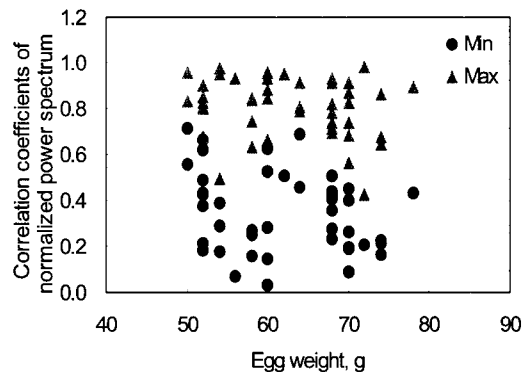


Fig. 9 The distribution of standard deviations of peak resonant frequency.



(a) Intact egg



(b) Cracked egg

Fig. 10 The distribution of correlation coefficients of normalized power spectrum (Min: minimum value of correlation coefficients, Max: maximum value of correlation coefficients).

나. 판별인자 분석

정상란과 파각란의 4회 타격 간 파워스펙트럼의 신호 간 상관관계를 분석한 결과를 표 1에 나타내었고, 최대 공진주파수와 그들의 표준편차를 분석한 결과를 표 2에 나타내었다. 표 1에서 정상란의 경우 서로 다른 타격 간 신호의 상관이 0.98이상으로 높게 나타났는데, 이것은 4회 타격한 신호들이 거의 일정하며, 난각의 상태가 균일 하고 특정 부위에 파각과 같은 결함이 없다는 것을 의미한다. 반면 파각란의 경우 첫 번째와 두 번째 타격의 상관이 0.355로 매우 낮게 나타났다. 이것은 첫 번째와 두 번째 타격 신호가 불규칙적이라는 것을 의미하며, 이들 부위가 다른 부위에 비해 이상이 있거나 파각이 있다는 것을 의미한다.

표 2에서도 알 수 있듯이 정상란의 경우는 최대 공진주파수가 대부분 4,880 Hz 부근에 분포하며, 그 표준 편차도 18.7로 낮게 나타났다. 반면 파각란의 경우는 최대 공진주파수의 분포가 넓으며, 파각이 있는 부위를 타격했을 경우 다른 부위와 다르게 저주파 경향이 나타나는 경우가 있었다. 따라서 4

Table 1 The correlation coefficients of four power spectra

		X1	X2	X3	X4
Intact eggs	X1	1.000			
	X2	0.983	1.000		
	X3	0.988	0.995	1.000	
	X4	0.989	0.992	0.995	1.000
Cracked eggs	X1	1.000			
	X2	0.355	1.000		
	X3	0.593	0.635	1.000	
	X4	0.666	0.714	0.778	1.000

Table 2 The peak resonant frequencies and standard deviation of four power spectra

	X1 (Hz)	X2 (Hz)	X3 (Hz)	X4 (Hz)	Standard Deviation (Hz)
Intact eggs	4,888	4,907	4,868	4,868	18.7
Cracked eggs	2,190	4,457	4,653	4,477	1172.8

회 타격에 대한 최대 공진주파수와 표준편차, 타격 간 상관계수를 파각란 판별을 위한 판별인자로 사용하기로 하였다.

다. 파각란 판별 알고리즘

이상의 여러 판별인자를 이용하여 파각란을 판별하기 위한 알고리즘을 그림 11에 나타낸 바와 같이 개발하였다.

1단계에서 최대 공진주파수와 그들의 표준편차를 이용하여 확실한 파각란을 먼저 선별하고, 2단계에서는 파워스펙트럼 간의 상관과 최대 공진주파수의 표준편차를 이용하여 미세 파각란을 선별하는 구조로 하였다. 즉, 4회 타격에 대한 최대 공진주파수가 모두 경계값(th1) 이하이거나 그 중에 하나가 경계값(th2) 이상, 또는 그들의 표준편차가 경계값(th3) 이상이라는 각각의 조건을 만족하면 무조건 파각란으로 판별하였다. 만약 조건을 만족하지 않으면 다음 단계로 넘어가서 4회 타격 간 파워스펙트럼의 서로의 상관들 중에서 하나가 경계값(th4) 이하이고, 최대 공진주파수들의 표준편차가 경계값(th5) 이상이라는 두 가지 조건을 다시 비교해서 모두 만족하면 파각란으로 판별하고, 그렇지 않으면 정상란으로 판별하도록 하였다.

라. 성능평가

정상란 242개와 파각란 88개, 총 330개의 미지 시료에 대하여 파각란 판별알고리즘의 성능을 평가하여 표 3에 나타내었다.

그 결과 정상을 파각으로 잘못 판정한 오차는 242개 중 2개(0.8%), 파각을 정상으로 잘못 판정한 오차는 88개 중 6개(6.8%)로서 정상란과 파각란의 평균 판별성능은 97.6%로 나타나 우수한 것으로 평가되었다. 여기서 오차는 대부분 난각 상태의 불균일이나 침부나 둔부에 아주 작은 미세 파각이 있을 경우 발생하였다. 개발된 장치는 1조로 진행 시 시간당 1,800개의 계란을 처리할 수 있어 등급판정 현장에 투입 가능하리라고 판단된다.

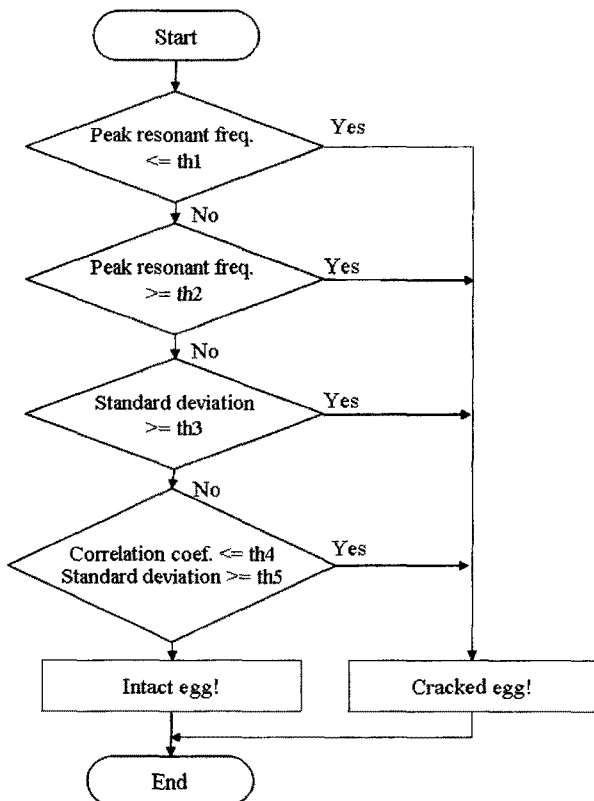


Fig. 11 The flow chart of cracked egg discrimination.

Table 3 The inspection result using unknown samples

Class	No. of eggs	Correct Classification (%)	Error ratio (%)	
			Type I*	Type II**
Intact eggs	242	99.2	0.8	6.8
Cracked eggs	88	93.2		
Total	330	97.6	2.4	

*Type I: the error ratio in estimating intact egg as cracked

**Type II: the error ratio in estimating cracked egg as intact

4. 요약 및 결론

본 연구는 축산물등급판정소에서 계란에 등급을 부여하기 위한 과정 중 인력에 의해 행해지고 있는 파각란 판별 과정을 자동화하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 다음을 이용한 자동 검사 장치를 구축하였고 그 성능을 평가하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 난각에 있는 미세 파각을 자동으로 검사하기 위하여 회전형 솔레노이드와 플라스틱 햄머를 사용하여 계란의 적도부 상부를 4회 타격하고 타격지점의 상부에서 마이크로폰으로 음파 신호를 검출하여 처리할 수 있는 시스템을 구축하였다.
- (2) 파각란 판별을 위한 판별인자로 4회 타격으로부터 획득한 각 음파 신호의 정규화된 파워스펙트럼간의 상관계수, 각 신호의 최대 공진주파수와 그들의 표준편차를 이용하였다. 정상란의 경우 4회 타격 간 파워스펙트럼의 상관이 높고 최대 공진주파수의 분포가 4,000~6,200 Hz 범위에 한정된 반면, 파각란의 경우는 타격 간 상관이 낮고 최대 공진주파수의 분포도 2,000 Hz대의 저주파 경향을 나타내거나 파각의 정도에 따라 900~7,000 Hz 범위로 광범위하게 주파수 특성이 나타났다.
- (3) 정규화된 파워스펙트럼간의 상관계수, 최대 공진주파수와 그들의 표준편차에 대한 정상란과 파각란의 경계값들을 조합하여 파각란 판별 알고리즘을 개발하였다.
- (4) 개발된 파각란 검사 장치의 판별성능은 97.6%로서 기존 계란 등급판정 과정에 투입하여 파각란 검사의 자동화를 실현할 수 있으며, 양계장이나 계란 집하장의 이송라인에 설치하여 파각란의 조기 발견에도 기여할 수 있으리라 판단된다.

참고 문헌

1. Cho, H. K., W. K. Choi and J. H. Paek. 2000. Detection of surface cracks in shell eggs by acoustic impulse method. Transactions of the ASAE 43(6):1921-1926.
2. Elster, R. T. and J. W. Goodrum. 1991. Detection of cracks in eggs using machine vision. Transactions of the ASAE 34(1):307-312.
3. Jindal, V. K. and Eakasit Sritham. 2003. Detecting eggshell cracks by acoustic impulse response and artificial neural networks. 2003 ASAE Annual International Meeting. Paper Number:036170.
4. Ketelaere, B. De, P. Coucke and J. De Baerdemaeker. 2000. Eggshell crack detection based on acoustic resonance frequency analysis. J. of Agricultural Engineering Research 76:157-163.
5. Lawrence, K. C., S. C. Yoon, G. W. Heitschmidt, D. R. Jones and B. Park. 2008. Imaging system with modified-pressure chamber for crack detection in shell eggs. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety 2(2). (in press)
6. 이수환, 조한근, 최완규. 2000. 기계시각과 인공 신경망을 이용한 파란의 판별. 한국농업기계학회지 25(5):409-414.
7. 조한근, 권양. 1995. 컴퓨터 시각을 이용한 계란 표면의 결함 검출. 한국농업기계학회지 20(4):368-375.
8. 최완규, 조한근. 2002. 계란의 음향진동 특성. 한국농업기계학회지 27(4):293-300.
9. 축산물 등급판정소. 2007. 축산물 등급판정 세부기준.