

음향반응에 의한 계란의 크랙검출에 관한 연구*

Crack Detection in Eggshell by Acoustic Responses

조 한 근*	최 완 규*	백 진 하*
정회원	정회원	정회원
H. K. Cho	W. K. Choi	J. H. Paek

ABSTRACT

A nondestructive quality inspection technique using acoustic impulse response method was developed for egg-shell inspection. An experimental system was built to generate the impact force, to measure the response signal and to analyze the frequency spectrum. This system includes an impulse generating unit, an egg holding seat, a microphone with preamplifier, and a DSP board installed on Personal Computer. A simple algorithm was developed for crack detection. Using the developed system with algorithm, crack detection ability was evaluated and the error rate to estimate the normal egg as cracked was found to be 4% and the error rate to estimate the cracked egg as normal was also found to be 4%. This system could be adopted in industry with some modification.

주요용어(Key Words): 계란(Egg), 크랙검출(Crack Detection), 음향반응(Acoustic Response), 파워스펙트럼(Power Spectrum), 공진주파수(Resonant Frequency)

1. 서 론

최근 국내에는 선진국의 양계시설 도입으로 급이, 급수, 집란, 이송, 세척, 선별, 포장 등 대부분의 양계 작업이 자동화되어 있으나, 파란이나 오란의 검사는 아직도 인력에 의한 육안 검사에 의존하고 있다. 육안 검란은 작업의 특성상 숙련이 필요하고, 장시간의 작업이 어려우므로 오란의 가능성이 높아 상품성의 저하와 국민건강에 많은 문제를 야기할 가능성이 있다. 국내에는 파란율과 관련된 통계가 없지만 미국 양계장의 경우 파란이나 오란율이 약 5~8%로 추정되고 있다(Lin 등, 1995). 파란에 의한 경제적 손실은 시설의 현대화와 함께 점차 증가할 전망이다.

미세한 크랙이 있는 계란의 경우 유통 중 오염되어 소비자의 건강을 크게 위협할 가능성이 높다 (Bain, 1990).

최근에는 농업관련 작업의 자동화 추세에 맞추어 농산물의 품질평가를 위해 각종 비파괴적 방법에 대한 연구가 많이 시도되고 있다. 음향 반응에 의한 농산물의 품질 평가에 대한 연구는 초기에 진동장치나 낙하 충격에 의한 음파 진동공진법으로 시작해서 최근에는 타격에 의한 음향 충격 전파반응법을 이용한 연구가 많이 수행되고 있다. 음향 충격 전파반응법은 음파 진동공진법에 비해 장비 면에서 간단하다. 음파 진동공진법의 경우 진동을 검출하기 위해 진동 가속도계 같은 감지 장치를 농산물의 표면에 부착해

* 이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

* 충북대학교 농업기계공학과

야 한다. 그러나 음향충격 전파반응법의 경우, 진동 가속도계 대신 마이크로폰과 같은 음향센서에 의해서 비접촉으로 감지를 할 수 있으며 타격장치가 진동 시스템을 대신한다.

파일의 음향특성을 기초로 해서 사과와 수박의 조직특성을 비파괴적으로 측정하기 위한 연구가 Yamamoto 등(1980)에 의해 수행되었다. 그들은 나무로 된 볼로 사과와 수박을 타격하고 타격에 의해 발생한 소리 신호를 푸리에 변환함으로써 사과와 수박의 고유주파수를 얻었다. Armstrong 등(1990)은 사과에 순간적인 충격을 가했을 때 발생하는 음향 공진 주파수 진동으로부터 사과의 탄성계수를 예측하여 사과의 견고함의 정도를 측정하였다. Chen 등(1992)은 4개종에서 추출한 14개의 사과에 대한 소리의 고저 수준을 사람의 청력으로 평가한 다음 실험장치에 의한 사과의 음향 반응 측정과 비교하였다. 그 결과 소리의 고저 수준이 사과의 첫 번째와 두 번째 공진 주파수와 직접적인 상관이 있음을 확인하였다. Sugiyama 등(1994)은 음향 충격전파 반응을 이용하여 머스크멜론의 품질을 평가하는 연구를 수행하였는데, 샘플의 적도 부분을 24등분해서 각각의 점에서 음향신호를 얻은 다음 시간에 따른 소리의 강도를 분석해 본 결과 충격에 의해서 발생한 음파가 샘플의 적도면을 따라 일정속도로 전달되며, 이 전달 속도는 성숙한 멜론일수록 더 느리다는 사실을 알았다. Hayashi 등(1995)은 몇 가지 파일과 채소를 대상으로 음향 반응을 측정하여 음향 특성과 품질과의 관계를 설명하였다.

최근에 음향반응을 이용해서 계란의 표면 결함을 검출하려는 연구가 시도되고 있다. 조와 최(1997)는 음향반응에 의한 파란 검출 가능성을 조사하기 위해, 음향 특성을 이용하여 난각의 음향반응을 측정하고, 난각의 음향반응에 영향을 미치는 인자들을 조사하였다. 계란을 타격하는 볼의 재질을 세라믹, 받침대를 고무, 진자의 타격 각도를 20도, 그리고 계란과 마이크로폰과의 측정거리를 10mm 이내로 할 경우 계란의 결함을 가장 잘 구별할 수 있었다. 또한 계란의 타격부위로는 첨단부, 측정위치는 타격지점과 180도 지점에서 측정할 경우 결함을 잘 구별할

수 있었다.

본 연구의 목적은 음향충격 전파반응법을 이용하여 계란의 크랙을 검출하기 위한 연구로서 다음과 같은 세부목적을 갖는다.

- 1) 계란에 충격을 가하고, 음향신호를 처리, 저장 및 분석하기 위한 실험용 검사 시스템을 구성한다.
- 2) 크랙을 효율적으로 검사할 수 있는 알고리즘을 개발한다.

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

실험에 사용된 계란은 하이라인 품종으로서 양계장에서 수집한 중량 등급별 40개씩 200개의 정상계란을 이용하였다. 이 중 100개의 계란은 알고리즘 개발을 위한 실험에 사용하였고, 남은 100개의 계란은 알고리즘 검증을 위해 사용하였다. 모든 계란은 정상란으로서 무게 및 부피 측정 후 임의의 크랙을 만들어 실험에 사용하였다.

나. 실험장치 구성

실험용 검사 시스템은 계란 타격장치, 음향감지센서, 신호증폭장치, 신호 수집 및 분석장치로 구성된다.

타격장치는 적절한 충격력을 갖는 로타리형 솔레노이드(Shindengen 사)에 짧은 PVC 막대를 연결하고 막대 끝에는 세라믹 볼을 부착하였다. 음향반응 감지 센서로는 저렴한 콘덴서형 마이크로폰을 사용하였고, 타격방향과 180도 되도록 하며 계란(대란기준)과는 10mm 정도의 간격을 유지하도록 위치시켰다. 대란을 기준으로 한 이유는 소란을 기준으로 하는 경우, 대란의 경우 서로 접촉을 하기 때문이다. 신호 증폭을 위해 프리앰프 회로를 제작 사용하였다. 신호 수집과 처리를 위하여 DSP(Digital Signal Processor, Ariel사) 보드를 컴퓨터(IBM-AT 486 DX2 66MHz)와 함께 사용하였다. DSP 보드는 음향신호 용으로서 Anti-aliasing 필터를 내장하여 50 kHz 이상

의 노이즈는 차단되도록 되어 있고, 샘플링 율은 50 kHz로서 전파된 음향신호 수집에 충분하였다. 계란을 받치는 계란 고정장치는 양계장에서 사용되는 시판용 고무받침을 구입하여 사용하였다. 그림 1은 실험장치의 개략도이다.

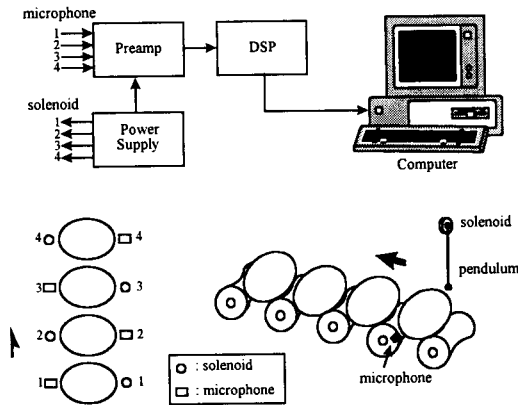


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

다. 실험방법

실험장치의 작동은 계란의 첨단부를 타격 장치쪽으로 하여 받침 위에 올려놓은 후 솔레노이드를 작동하여 볼이 달린 진자로 계란을 타격하였다. 타격에 의해 발생한 음향신호는 5Hz~20kHz의 주파수 반응을 측정할 수 있는 콘덴서형 마이크로폰으로 감지하였다. 마이크로폰에 의해서 감지된 미세한 전기적 신호는 프리앰프에서 증폭된 후 DSP 보드로 보내진다. 프로그램에 의해 시간영역 및 주파수 파형을 컴퓨터 모니터에 표시하도록 하고, 알고리즘 개발에 사용하기 위해 하드디스크에 저장하도록 하였다.

신호측정을 위해서 DSP 보드의 수동 트리거 기능을 사용하여, 프로그램 내에서 트리거 레벨을 조절하도록 하였다. 음향측정시 외부 소음을 최소화하도록 하였고, 프리앰프의 게인과 DSP보드의 트리거 레벨을 조정하여 소음이 신호에 유입되지 않도록 하였다.

라. 판별 알고리즘 개발

판별 알고리즘을 구하기 위하여, 양계장으로부터 하이라인 품종을 구하여 등급별 20개씩을 임의로 추출한 정상란 100개를 시료로 이용하였다.

각 계란을 회전시키고 90도 간격으로 4세트의 신호를 측정하였는데, 침부를 타격하고 둔부에서 측정된 신호 2 세트와 둔부를 타격하고 침부에서 측정된 신호 2 세트를 수집하였다. 따라서 계란 당 모두 4세트의 신호 즉 계란 100개에서 추출한 400세트의 신호를 이용하여 판별 알고리즘을 구하였다.

판별 알고리즘을 구하기 위하여, 정규화된 파워 스펙트럼의 면적, 파워 스펙트럼의 도심, 최대 공진 주파수 및 이들 값들의 신호간 최대 최소값의 편차를 판별 인자로 가정하고 각각의 판별 능력을 비교하였다.

정상란과 이상란의 주파수 특성에서 스펙트럼의 면적, 스펙트럼의 도심 및 최대 공진 주파수들의 4 세트 신호들의 평균값과 최대 최소값의 편차가 크랙 판별의 기준으로 사용될 수 있는지를 평가하였다. 이를 위하여 0~6.25 kHz 주파수 범위 내의 값들을 다음에 설명되는 방법으로 구하였다.

1) 스펙트럼 면적

$$S = \sum_{i=0}^n P_i \dots\dots\dots (1)$$

여기서 P_i : 파워 스펙트럼의 진폭

2) 스펙트럼 도심

$$C_x = \frac{\sum_{i=0}^k P_i \cdot f_i}{\sum_{i=0}^k P_i} \dots\dots\dots (2)$$

$$C_y = \frac{\sum_{i=0}^k P_i \cdot (\frac{P_i}{2})}{\sum_{i=0}^k P_i} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 C_x, C_y : 도심의 좌표

f_i : 주파수

3) 최대 공진 주파수

$$f_{res} = f(P_{i, max}) \dots \dots \dots (4)$$

3. 결과 및 고찰

가. 신호 유형

그림 2와 3은 정상란과 이상란에 대한 시간영역과 주파수 영역에서의 전형적인 응답신호를 보여준다. 시간영역의 경우, 이상란이 정상란에 비해 진동이 다소 빠르게 감쇠됨을 알 수 있다. 이는 난각의 파손으로 난각에 의한 감쇠효과가 정상란 보다 증가됨을 의미한다. 주파수 영역의 경우, 차이는 더욱 두드러져, 스펙트럼의 면적이 이상란의 경우 증가하고, 피크의 수가 증대됨을 알 수 있으며, 최대 공진 주파수의 변화 폭이 크게 나타났다.

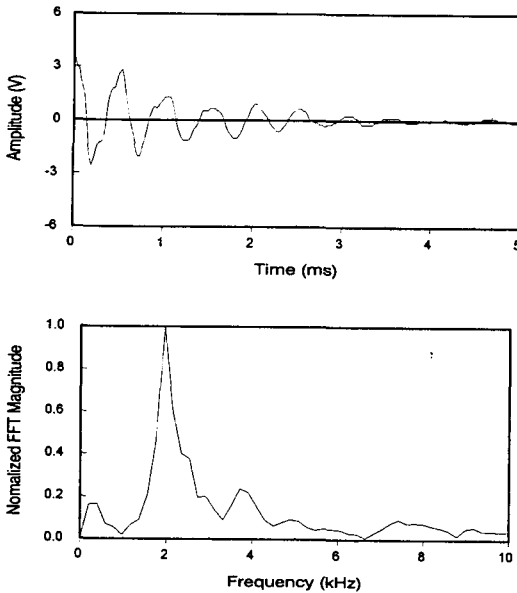


Fig. 2 Sound response (upper) and power spectrum(lower) of normal eggs.

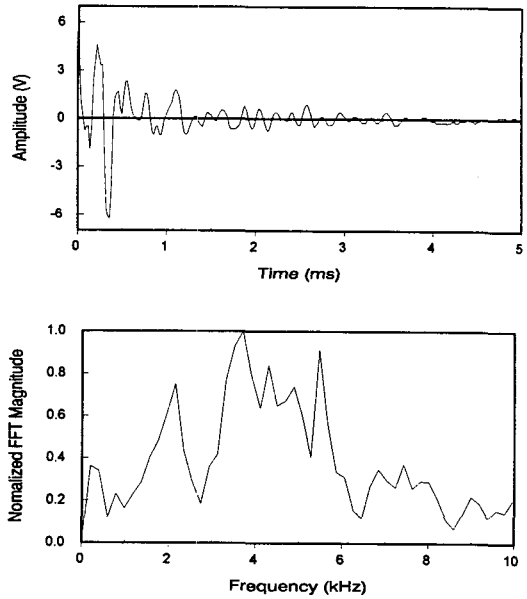


Fig. 3 Sound response (upper) and power spectrum (lower) of damaged eggs.

나. 판별 알고리즘 개발

1) 스펙트럼 면적

그림 4는 각 계란에서 수집한 4개의 반응에 대한 파워 스펙트럼 면적의 평균값들과 최대값과 최소값의 편차들을 보여주고 있다. 그림 4에서 알 수 있듯이, 정상란의 경우 면적의 평균값은 작은 편이며, 면적의 편차도 작게 나타나서 그림 4의 좌측 하단에 모여있음을 알 수 있다. 반대로 이상란의 경우 면적값과 편차가 비교적 크게 나타남을 알 수 있다.

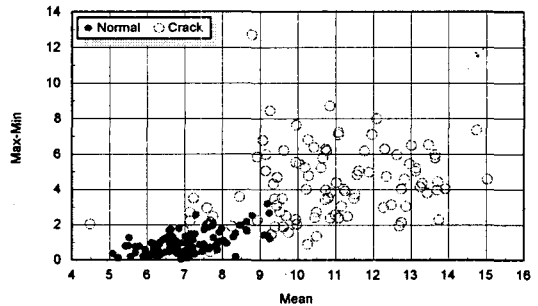


Fig. 4 Average vs. difference between maximum and minimum among four values of area in normalized power spectrum.

그림 5는 정상란과 이상란의 경계가 되는 부분을 확대하여 표시한 그림이다. 그림 5로부터 정상란과 이상란을 구분하는 조건으로 평균값이 9.3 보다 작고, 최대값과 최소값의 편차가 2.8 보다 작은 값을 가진 계란을 정상란으로 판정하고, 다른 값을 가지는 계란을 모두 이상란으로 판정하는 기준을 정할 수 있게 된다. 이 경우 정상란을 이상란으로 판정하는 오차는 0이 되고, 이상란을 정상란으로 판정하는 오차는 100개중 13개가 된다.

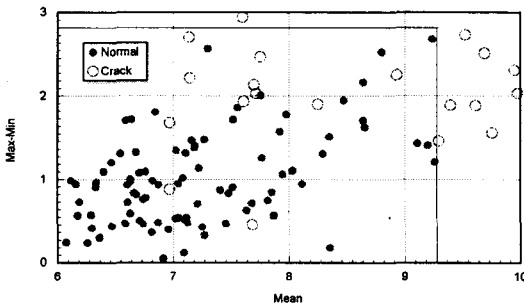


Fig. 5 Close-up view around boundary part in Fig. 4.

2) 스펙트럼 도심

그림 6은 모든 계란의 파워 스펙트럼의 도심의 4 신호간의 평균값을 나타낸다. 그림 6에서 보는 바와 같이 도심 값으로 이상란을 구별하기에는 적절치 못함을 쉽게 알 수 있다. 그림 7은 모든 계란의 파워 스펙트럼의 도심의 4 신호간의 최대값과 최소값의 편차를 표시한다.

그림 7에서 보는 바와 같이 도심 C_y 의 편차 값($C_{y,diff}$)은 이상란을 구별하는 기준으로 사용될 수 있음을 볼 수 있다. 기준 식은 다음과 같다.

$$C_{y,diff} \geq -0.08571 \cdot C_{x,diff} + 0.06 \dots\dots\dots (5)$$

여기에서 $C_{y,diff}$: 도심 C_y 의 편차
 $C_{x,diff}$: 도심 C_x 의 편차

위 식(5)를 사용하였을 때, 정상란을 이상란으로 판정할 오차는 100개중 2개로 나타났고, 이상란을 정상란으로 판정할 오차는 100개중 16개로 나타났습니다.

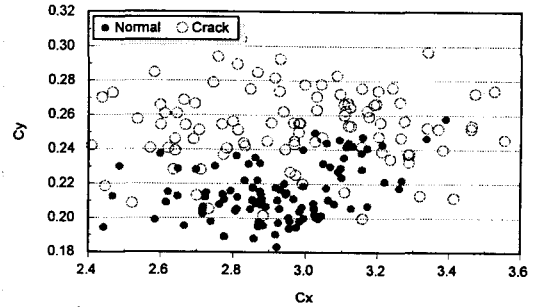


Fig. 6 Average of four values of centroid coordinates in normalized power spectrum density.

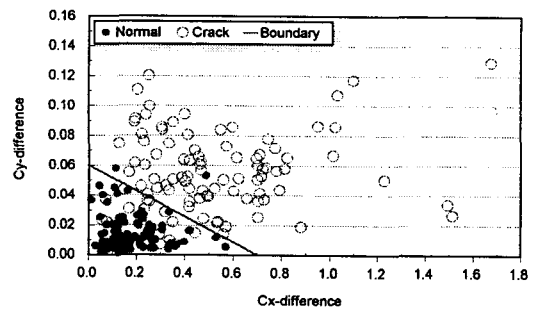


Fig. 7 Difference of four values of centroid coordinates in normalized power spectrum density.

3) 최대 공진 주파수

그림 8은 모든 계란의 최대 공진주파수 신호간의 평균값이 분포할 빈도를 상태값으로 나타내고 있다. 그림 8에서 이상란의 최대공진 주파수는 비교적 넓게 분포하고 있고, 정상란의 최대 공진 주파수는 1.5~3.0 kHz에 분포하는 특징을 보여 주고 있어 정상란과 이상란의 차이를 보여준다. 판별 경계 주파수로서 2~2.5 kHz의 범위를 고려한다면, 정상란을 이상란으로 판정할 오차는 100개중 15개가 되며, 이상란을 정상란으로 판정할 오차는 100개 중 45개가 되어 기준으로 사용하기에는 적합하지 않음을 알 수 있다.

그림 9는 모든 계란의 최대 공진주파수의 신호간 편차가 분포할 빈도를 상태값으로 표시하여 나타내고 있다. 정상란의 경우 편차가 아주 작게 나타나

고, 이상란의 경우는 편차가 크게 나타났다. 기준을 0.3 kHz로 고려한 경우, 정상란을 이상란으로 판정할 오차는 100개 중 6개가 되고, 이상란을 정상란으로 판정할 오차는 100개중 26개가 되어 편차 역시 기준으로 사용하기에는 적합하지 않음을 알 수 있다.

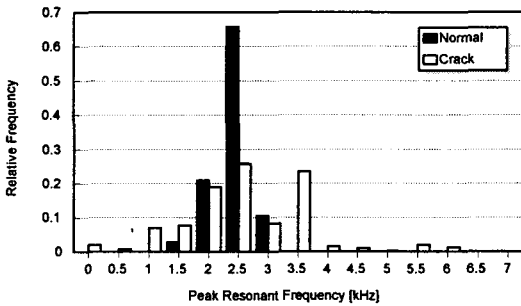


Fig. 8 Distribution of average of four values in peak resonant frequency.

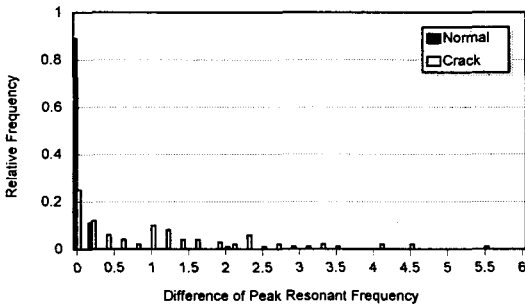


Fig. 9 Distribution of difference between maximum and minimum values in peak resonant frequency.

표 1은 조사된 방법들에 의한 판정결과를 나타내고 있다. 표 1에서와 같이 면적에 의한 기준이 가장 높은 판정율을 보이고 있고, 다음이 도심과 최대 공진주파수 순서로 되어 있다.

이상 여러 판정요인 가운데 가장 오차율이 적은 것은 면적에 의한 판정방법으로 나타났다. 면적에 의해 판별되지 않은 계란들에 대해 다른 방법을 적용한 결과 판정이 가능한 것들이 있는 것으로 확인되어, 이들 방법들을 조합하여 적용하면 판정율을 다소 높일 수 있는 것으로 확인되었다.

Table 1 Results of factors in crack detection

Factor	Criteria	Error (%)	
		Normal	Crack
Area	Avg. < 9.3	0	13
	Diff. < 2.8		
Diff. of Centroid	Eq. (5)	2	16
Peak Resonant Frequency	Avg. > 4.0 and < 5.5	15	45
	Diff. < 0.3	5	26

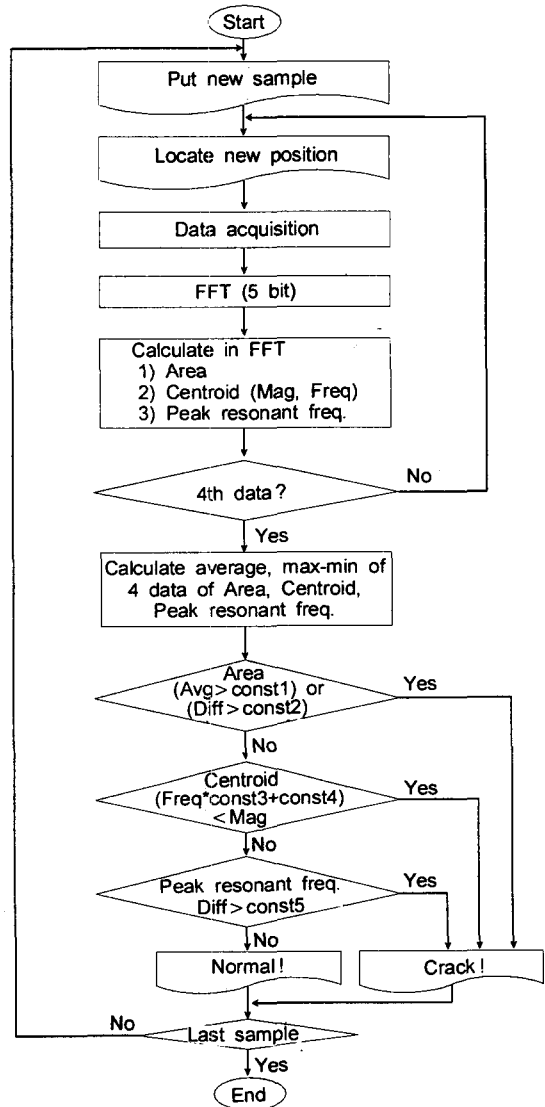


Fig. 10 Flow chart of crack detection algorithm.

그림 10의 흐름도는 최종적으로 개발된 크랙 판별 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 알고리즘은 C 프로그램 언어로 코딩이 되어, DSP 제어 프로그램과 함께 컴파일하여, 하나의 실행 프로그램파일로 구성하였다. 프로그램의 진행순서는 실행과 동시에 계란을 올려 놓으라는 메시지가 출력되며, 계란을 올려 놓고 수동 스위치로 솔레노이드를 동작시켜 계란을 타격하면, 데이터 수집 및 처리가 컴퓨터에 의해 진행된다. 각 계란당 4회의 타격, 수집 및 처리가 반복된 후에 크랙판정 결과가 모니터에 출력된다. 이때 계란의 주파수 특성, 면적, 도심, 최대 공진 주파수 등의 판정요인들이 모두 파일에 기록된다.

다. 판별 알고리즘 검정

본 연구에서 개발된 알고리즘의 성능을 점검하기 위하여 새로운 시료 100개를 구하여, 검정시험을 실시하였다. 시료는 임의로 선정하였고, 이 중 50개는 크랙을 임의로 만들어 실험을 실시하였다. 크랙은 가급적 작게 만들었으며, 라인형의 경우 폭 10 μ m 이하 길이 15~40mm, 방사형의 경우 폭 10 μ m 이하 직경 15~30mm 이하, 홀형의 경우 직경 5~10mm 이하로 만들었고, 크랙은 계란 당 1개씩으로 모든 부위에 고르게 위치하도록 만들었다. 검정실험 결과 표 2와 같은 결과를 얻었다. 정상란을 이상란으로 판정한 오차가 2개, 이상란을 정상란으로 판정한 오차가 2개 총 4개의 오차가 발생하였다. 이러한 오차의 주된 요인으로는 드문 경우이지만 어떤 계란의 경우 난각 상태가 특이한 경우 음향반응의 불균일성에 기인한 것으로 추정된다. 또한 계란의 비중은 음향반응에 영향을 주지 않은 것으로 확인되었다.

Table 2 Results of crack inspection

Status	Number of eggs	
	Normal	Crack
Actual	50	50
Estimated	48	52

크랙이 있는 계란을 전체 생산량의 약 5%라고 가정하여 크랙 판정 성공률을 계산하면 $1 - (0.95 \times 2 / 50 + 0.05 \times 2 / 50) = 0.96$ 이 되어 본 시스템의 크랙 판정율은 약 96%라고 평가할 수 있다.

현재 대부분의 양계장에서 채택되고 있는 자동 집란시설에 적용하기 위하여는, 솔레노이드 작동의 자동화가 필요하며, 이는 이송라인에 설치될 리밋 스위치와 계란 유무를 감지할 광센서로 쉽게 제어할 수 있을 것이다. 실용화를 위해서는 이송용 모터나 벨트 등 다른 장치들에 의한 소음에 대한 대책이 요구되며, 현재의 판정율을 개선하는 방법에 관한 보다 많은 연구가 필요할 것으로 본다.

4. 결 론

음향반응에 의한 검란방법을 개발하기 위한 기초 실험으로 난각의 음향반응 실험장치를 구성하고, 계란의 결함을 판별할 수 있는 방법들을 비교하여 검란 알고리즘을 개발하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 계란의 표면결함을 판별할 수 있는 음향반응장치를 구성하였다.
- 2) 판별 알고리즘으로는 파워 스펙트럼의 각 면적간의 평균값과, 최대값과 최소값의 차이값을 비교할 때 성공률이 높은 것으로 확인되었고, 모든 방법을 조합해서 사용할 때 성공률을 높일 수 있는 것으로 나타났다.
- 3) 본 연구에서 개발된 시스템으로 판정한 결과 정상란을 이상란으로, 이상란을 정상란으로 판정할 비율은 각각 4%, 4%로 나타났다.
- 4) 타격의 자동화, 다른 기기에 대한 소음문제 해결 및 판별 알고리즘의 개선을 통해 실용화가 가능할 것이다.

참 고 문 헌

1. 조한근, 최완규. 1997. 난각의 음향반응에 영향을 주는 인자. 한국농업기계학회지 22(1):41-48.
2. Armstrong, P., H. R. Zapp, G. K. Brown. 1990.

- Impulsive excitation of acoustic vibrations in apples for firmness determination. *Trans. of the ASAE*. 33 (4):1353-1359.
3. Bain, M. M. 1990. Eggshell structure and mechanical strength. In *Proc. of the 8th Australian Poultry and Feed Convention*. Gold Coast, Queensland, Australia, October.
4. Chen P., Z. Sun, L. Huang. 1992. Factors affecting acoustic responses of apples. *Trans. of the ASAE*. 35 (6):1915-1920.
5. Hayashi S., J. Sugiyama, K. Otobe. 1995. Nondestructive quality evaluation of fruits and vegetables by acoustic transmission waves. *Proceedings of ARBIP95 (JSAM) Vol(1):227-234*.
6. Lin, J, V. M. Puri, R. C. Anantheswaran. 1995. Measurement of Eggshell Thermal-Mechanical Properties. *Trans of the ASAE*, 38(6):1769-1776.
7. Sugiyama J., K. Otobe, S. Hayashi, S. Usui. 1994. Firmness measurement of muskmelons by acoustic impulse transmission. *Trans. of the ASAE*. 37(4): 1235-1241.
8. Yamamoto H., M. Iwamoto and S. Haginuma. 1980. Acoustic impulse response method for measuring natural frequency of intact fruits and preliminary applications to internal quality evaluation of apples and watermelons. *J. of Texture Studies*. 11:117-136.