

## 계란의 음향진동 특성

# The Acoustic Vibration Properties for Chicken Eggs

최완규                      조한근  
정희원                      정희원  
W. K. Choi                H. K. Cho

### ABSTRACT

Surface crack detection is an important aspect in the quality control process of egg markets. The acoustic vibration of an egg could be used as a critical factor in evaluating the eggshell quality. The mode shape indicates the egg vibration behavior at different locations with respect to the input impulse and provides important information for the optimum sensor location to obtain the desired acoustic measurements. Theoretical analysis and experimental measurements were conducted to determine the acoustic vibration modes in eggs. The resonant frequencies of the first and second resonance mode of intact eggs were found to be distributed between 2kHz and 7kHz range. The measured mode shapes of an egg were similar to theoretical shapes of homogeneous, elastic spheres. An elliptical deformation at the equator ring of the egg was observed. The frequency peak of this mode was dominantly present in the frequency spectrum of an intact egg impacted at its sharp position. The mode shapes related to the first resonant frequency of an egg showed that the optimum location for the measuring sensor was the 180 degrees position. A optimum location for the egg support was found to be the 90 degrees position having the smallest vibration magnitude.

**Keywords** : Egg, Acoustic vibration, Mode shapes, Resonant frequency

### 1. 서      론

농산물의 비파괴 품질평가 방법 중 음향진동 반응은 사과, 수박, 토마토, 멜론 및 계란 등과 같은 농산물의 경도, 속도 및 표면 결함 등을 예측하는데 많이 사용되어 왔다. 국내에서도 음향반응을 이용한 계란과 수박의 품질검사에 대한 연구가 보고된바 있다(Cho 등, 2000; Kim 등, 1998).

음향 진동반응에 의한 품질평가는 대상체에 충격을 가함으로써 발생하는 음향 진동신호를 분석하여 대상체의 내부 또는 외부결함을 추정하는 것이다. 탄성이 있는 모든 물체는 고유의 음향진동

특성을 가지고 있으며, 결함이 있는 물체는 정상적인 물체와 음향진동 특성이 다르다. 계란의 경우 탄성이 있는 구형체에 가깝기 때문에 음향진동 반응을 측정하여 공진 주파수 등을 분석하면 내적, 외적 특성을 파악할 수 있다. 음향진동 반응을 이용하여 농산물의 품질을 평가할 때 고려해야 할 사항은 충격방법, 충격위치, 반응센서의 위치 및 농산물을 고정시키는 방법 등이다. 이들 요인들은 측정된 음향진동 신호에 많은 영향을 미치기 때문에 적절한 충격장치와 반응센서의 선정과 함께 이들의 위치 선정 또한 중요하다(Coucke 등, 1997; Langenakens 등, 1997).

The article was submitted for publication in April 2002, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in June 2002. The authors are W. K. Choi Research Specialist, Chungbuk National University, and H. K. Cho Professor, Chungbuk National University. The corresponding author is W. K. Choi, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763 Korea. E-mail: <wkchoi@ame.chungbuk.ac.kr>

모드분석(modal analysis)은 구조물의 동적 변화를 파악하기 위해 진동해석에 적용되는 실험적이고 분석적인 절차로서(Langenakens 등, 1997), 음향 진동 반응을 이용한 농산물의 품질평가 장치 개발에 선행되어야 할 과제이다. 모드분석을 통해 효과적인 충격 반응을 얻기 위한 모드모양, 충격기법, 측정위치 등과 같은 중요한 정보를 구할 수 있으며, 농산물의 내/외부 품질평가에 필요한 고유의 진동특성 자료를 구할 수 있다. 이러한 이유로 선진국에서는 오래 전부터 모드분석을 통하여 농산물에 대한 동적 특성을 확립해 가고 있지만 국내에서는 이에 대한 연구가 미비한 실정이다.

본 연구는 계란의 전체적인 음향 진동반응을 측정하여 주파수 반응과 음향 진동모드를 분석하고, 모드 분석 결과를 기초로 음향 진동반응을 이용한 계란 크랙 검사장치 설계를 위한 충격위치 및 센서의 위치를 결정하기 위하여 수행되었다.

## 2. 이론적 고찰

표면에 크랙이 없는 정상 계란의 진동모드를 구하기 위하여 탄성 구형체의 이론적인 진동모드를 사용하였다. 계란의 구형률은 약 0.75로서 완전한 구형체는 아니지만 구형체로 가정해도 계란의 진동모드를 통한 효과적인 충격위치와 반응의 측정위치 정보를 얻는데는 큰 문제가 없다.

자유진동 상태에서 탄성 구형체의 미세한 변위를 표현하는 Navier 방정식은 다음과 같다(Armstrong 등, 1990; Chen 등, 1993; Cooke and Rand, 1973; Huarng 등, 1993).

$$\mu \nabla^2 \bar{u} + (\lambda + \mu) \nabla [\nabla \cdot \bar{u}] = \rho \ddot{\bar{u}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $\lambda$  : Lamé 상수(Lamé's constant)  
 $\mu$  : 전단탄성계수(Shear modulus)  
 $\bar{u}$  : 위치벡터(Displacement vector)  
 $\rho$  : 밀도(Density)  
 $\nabla^2$ : 라플라스 연산자(Laplacian operator)  
 $\nabla$  : 증감 연산자(Gradient operator)  
 식 (1)에서  $\lambda$ 와  $\mu$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 E : 탄성계수(Young's modulus)

$\nu$  : 포아송비(Poisson's ratio)

식(1)의 해를 구하면 식(3)과 같이 된다.

$$\psi_n = j_n \left( \frac{\omega r}{V_c} \right) P_n(\cos \theta) e^{-i\omega t} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 r은 구형체의 반지름, Vc는 압축위상속도이며, 구형체의 표면 변형은 표 1의 Legendre 다항식  $P_n(\cos \theta)$ 에 의하여 지배를 받는다.

Table 1 Legendre polynomials

$P_0(\cos \theta) = 1$
$P_1(\cos \theta) = \cos \theta$
$P_2(\cos \theta) = (1/4)(3 \cos 2\theta + 1)$
$P_3(\cos \theta) = (1/8)(5 \cos 3\theta + 3 \cos \theta)$
$P_4(\cos \theta) = (1/64)(35 \cos 4\theta + 20 \cos 2\theta + 9)$

구형 진동모드에서 법선 방향의 충격에 의해서 발생하는 탄성 구형체의 첫 번째 공진 주파수의 진동모드는 편원-편장(oblate-prolate)모드로서, 반지름 R의 기본원을 그리고 기본원의 둘레를 일정한 각도( $\theta$ )로 나눈 다음  $\theta$ 에 대응하는  $R+P_2(\cos \theta)$ 를 도시함으로써 그릴 수 있다. 이때  $P_2 \cos \theta$ 는 표 1에 의하여 구한다. 두 번째 공진 주파수의 진동모드도 같은 방법으로 그릴 수 있다.

## 3. 재료 및 방법

### 가. 공시재료

실험에 사용된 계란은 하이라인 품종으로서 표면에 크랙이 없는 정상란 60개를 크기별로 선정하고, 계란의 장경, 단경, 구형율, 질량, 밀도, 탄성계수 및 포아송비를 조사하였다. 이때 구형율은 기하학적 평균직경을 장경으로 나눈값을 사용하였다(So 등, 1999). 기하학적 평균직경은 (장경×단경×폭)<sup>1/3</sup>로 계산하였으며 단경과 폭은 동일한 것으로 가정하였다. 탄성계수와 포아송비는 문헌을 참고하였다. 표 2는 조사된 계란의 물리적 특성을 나타낸다.

진동모드 분석을 위해서 60개의 계란 중 10개의 계란을 크기별로 선택하여 사용하였다.

Table 2 Physical properties of eggs

Description	Magnitude (average)	Units	Reference
Minor axis	45.1	mm	
Major axis	69.8	mm	
Sphericity	0.75		
Density(eggshell)	2,300	kg/m <sup>3</sup>	
Density(egg content)	1.058	kg/m <sup>3</sup>	
Mass	0.059	kg	
Young's modulus	20	GN/m <sup>2</sup>	Lin et al., 1996
Poisson's ratio	0.35		Lin et al., 1996

나. 실험장치

계란에 충격을 가함으로써 발생하는 음향진동반응과 진동모드를 분석하기 위하여 그림 1과 같은 실험장치를 구성하였으며, 표 3에 실험장치의 사양을 나타내었다. 충격기는 소형 충격해머(086D80, PCB, USA)를 사용하였으며, 반응의 측정은 가속도계(352A10, PCB, USA)를 사용하였다. 충격은 난각에 대하여 법선 방향으로 가하였으며, 가속도계는 왁스를 사용하여 난각에 법선방향으로 부착하고 난각 표면에 수직인 가속도를 측정하였다. 가속도계의 신호는 신호조절기(442B04, PCB, USA)를 거쳐 디지털오실로스코프(TDS220, Tektronix, USA)에 기록하였다. 이때 5 ms의 샘플링 시간 동안에 2,500개의 데이터가 저장되며, 저장된 데이터는 RS-232 직렬 인터페이스를 통하여 PC로 보내

져 파형을 분석하였다. 파형의 분석은 소프트웨어 MATLAB(MathWorks, USA)을 이용하였다.

다. 계란의 음향 진동모드 분석

계란의 충격위치와 반응측정 위치에 따른 음향진동반응을 분석하여 진동모드 분석에 적용하기 위하여 예비 실험을 실시하였다. 먼저 계란의 첨부에 충격을 가하고 충격지점에서 90도, 180도 위치에서 반응을 측정하였고, 다음으로 계란의 둔부에 충격을 가하고 90도, 180도 위치에서 반응을 측정하였다. 마지막으로 계란의 중앙부위에 충격을 가하고 첨부와 둔부 그리고 180도 위치에서 반응을 측정하였다.

계란 전체의 음향 진동반응을 분석하기 위하여 크기별로 선정한 정상란 10개에서 얻은 데이터의

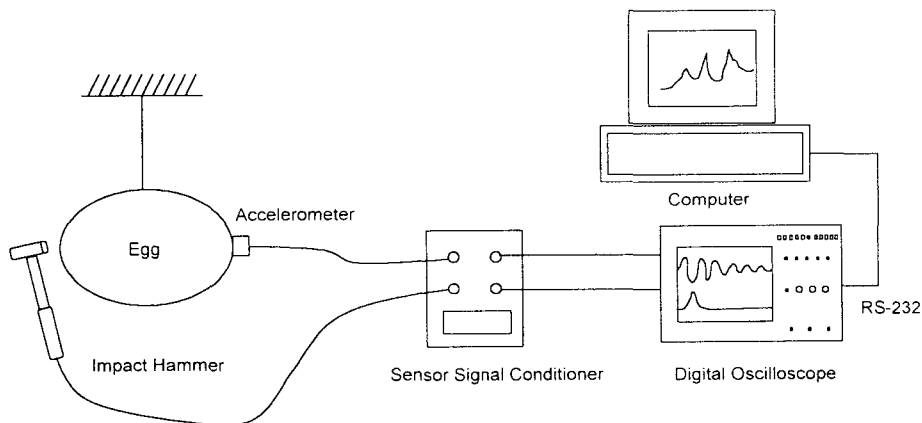


Fig. 1 Schematic diagram for modal analysis of eggs.

Table 3. Specifications of test equipment

Item	Type	Specification
IBM-PC	Celeron 433 MHz	RAM 64 Mb
Digital Oscilloscope	Tektronix TDS220	Sampling Rate 1 Gs/sec, 2 channel Bandwidth 100MHz
Accelerometer	PCB 352A10	Sensitivity 10 mV/g, 0.7g Frequency range 2~10kHz
Impact Hammer	PCB 086D80	Sensitivity 0.2 mV/g, 2.23g Frequency range 0~15kHz, 4 channel
Sensor Signal Conditioner	PCB 442B04	Gain x1, x10, x100

평균값을 이용하였다. 진동을 최대한 자유롭게 하기 위하여 중앙부를 줄로 부착하여 매달았으며, 그림 2에서 처럼 각 계란의 측정점을 32개의 측정점으로 나누고 적도부의 한 점인 첨부에 수직방향으로 충격을 가하고 가속도계를 이동하며 다른 지점에서 반응을 측정하였다. 이때 가속도계의 이동은 계란의 음향 진동특성에 크게 영향을 미치지 않는다.

신호 분석 전 충격(입력)신호에는 충격창(force window) 함수를 적용하여 특정 구간의 신호만을 취함으로써 잡음의 영향을 최소화하였으며, 반응(출력)신호에는 지수창(exponential window) 함수를 적용하여 스펙트럼 누설을 방지하였다. 또한 32개 측정점 각각의 입력과 출력의 관계에서 계란의 진동특성을 나타내는 주파수반응 함수(frequency response function)를 구하였으며, 주파수반응 함수의 평가기준이 되는 기여도(coherence) 함수를 구하여 실제로 측정된 신호에 잡음이 얼마나 포함되어 있는가를 조사하였다.(Coucke 등, 1997; Langenakens 등, 1997; Ramsey, 1975).

탄성 구형체의 적도원에 대한 이론적인 진동모드와 계란의 적도원에 대한 실제 진동모드를 비교하기 위하여 10개의 계란 각각에 대하여 그림 2의 첨부와 둔부를 잇는 둘레를 적도원으로 가정하고 그림 3과 같이 적도원 둘레를 30도 간격으로 12개 지점을 선택하였다. 이때 기준 위치를 180도 위치로 하고, 기준 위치에 대한 다른 위치에서의 상대적인 측정값을 얻었다.

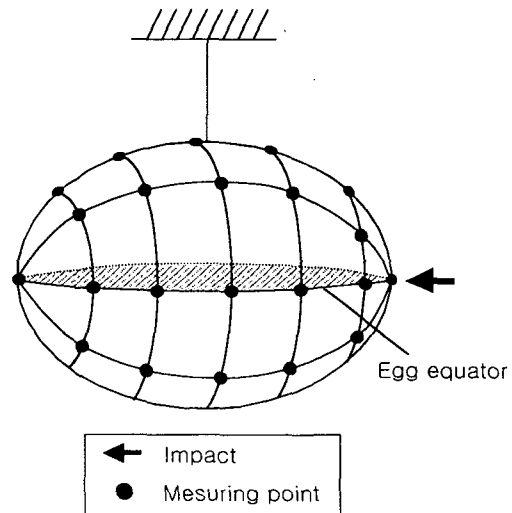


Fig. 2 Measuring points on egg surface.

음향 진동모드 분석은 10개 계란에서 얻은 측정값의 평균값을 주파수 분석함으로써 수행되었다. 시간영역의 충격 반응신호에 대한 고속 푸리에 변환(FFT)을 수행하여 1,250쌍의  $a_j + b_j(j=1, 2, \dots, 1250)$  형태의 푸리에 계수들을 얻었다. 두 개의 인접한 푸리에 계수 사이의 주파수 분해능은 200 Hz이고, 주파수와 진폭은 다음과 같이 구하였다.

$$\text{주파수} : f = 200 \times j \text{ [Hz]} \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{진폭} : A_j = (a_j^2 + b_j^2)^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

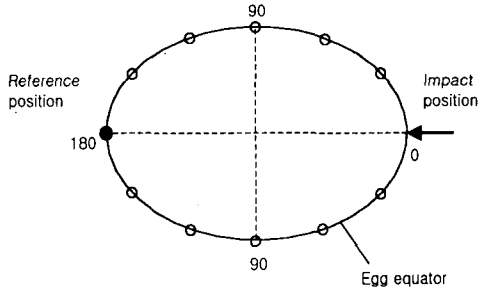


Fig. 3 Impact and measuring positions along the equator of the egg.

측정점에서의 진폭을 기준점의 진폭으로 나누어 각 측정점에서의 상대진폭을 구하였다. 계란 적도부의 실제 진동모드는 구형체의 기본원에 상대진폭을 더하여 도시하였다. 탄성 구형체의 이론적인 진동모드와 실험에 의해 구해진 계란의 실제 진동모드를 비교하여 계란의 적도원을 따라 전파되는 음향진동 모드를 분석하였다.

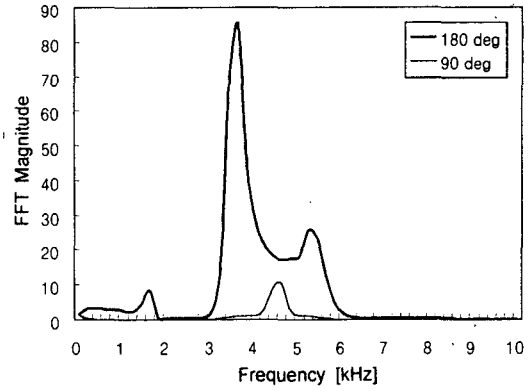
#### 4. 결과 및 고찰

##### 가. 계란의 위치별 음향 진동반응

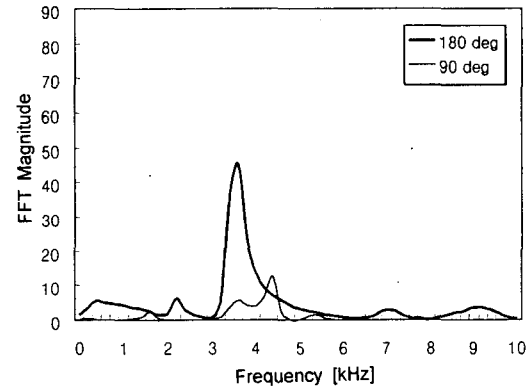
계란의 충격위치와 반응측정 위치에 따른 음향 진동반응을 비교하기 위하여 그림 4와 같이 반응 신호에 대한 파워 스펙트럼을 구하였다. 그림 4(a)는 계란의 첨부에 충격을 가하고 충격지점으로부터 90도, 180도 지점에서 반응을 측정했을 경우의 파워 스펙트럼을 나타낸다. 그림에서 보듯이 90도 지점에서 측정할 경우의 파워 스펙트럼의 진폭은 180도 지점에서 측정할 경우의 진폭보다 매우 작게 나타나 신호가 미약함을 알 수 있었다.

또한 그림 4(b)는 계란의 둔부에 충격을 가할 경우의 파워 스펙트럼을 나타낸다. 그림에서 보듯이 90도 지점에서는 신호가 미약하며 180도에서 신호가 크게 감지되지만 첨부 충격의 경우보다는 신호가 작은 것을 알 수 있었다.

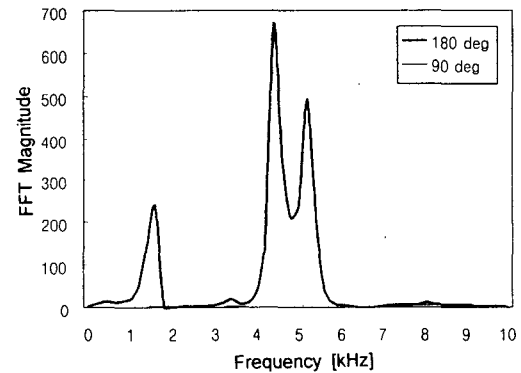
그림 4(c)는 계란의 중앙부에 충격을 가한 경우의 파워 스펙트럼으로서 180도 지점에서는 첨부와 둔부 충격시 보다 큰 신호를 얻을 수 있지만, 비슷한 크기의 공진 주파수가 여러 개 검출되며, 90도 지점인 첨부와 둔부의 신호가 상대적으로 너무



(a) Impact on small end

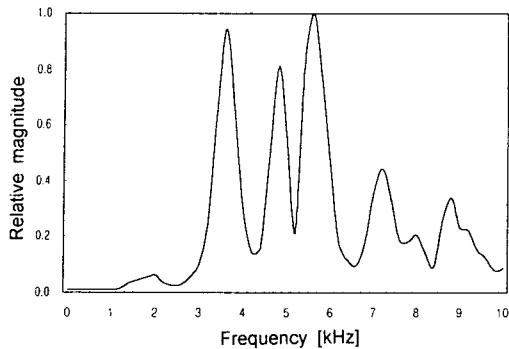


(b) Impact on large end

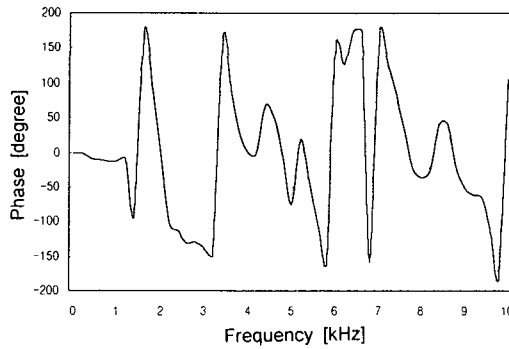


(c) Impact on center

Fig. 4 Effects of impact and sensor positions on the magnitude of the power spectrum.



(a) magnitude



(b) phase

Fig. 5 The FRF magnitude and phase of 32 measurements.

미약하기 때문에 첩부와 둔부에 있는 크랙의 검사에 어려움이 있을 것으로 판단되었다.

위의 결과에서 첩부에 충격을 가하고 충격지점으로부터 180도 지점에서 반응을 측정하는 경우가 가장 좋은 음향 진동반응을 얻을 수 있는 것으로 확인되었으며, 이때의 주된 공진주파수는 첫 번째 공진주파수인 3.6 kHz로서 계란의 진동모드 분석시 기준으로 사용하였다.

#### 나. 계란의 주파수 반응

그림 5는 계란 전체의 주파수반응 함수에 대한 크기와 위상을 나타낸다. 주파수반응 함수를 통해서 계란의 공진 주파수와 공진 주파수에 해당하는 공진모드를 구하였다. 계란의 주된 공진 주파수는

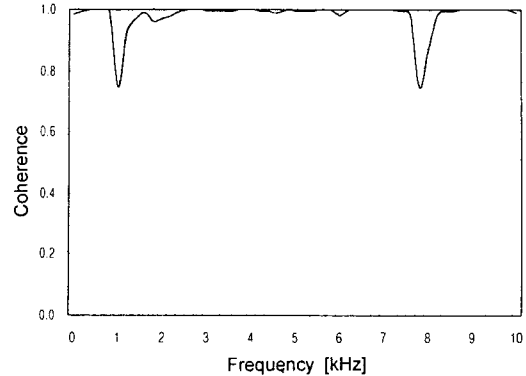


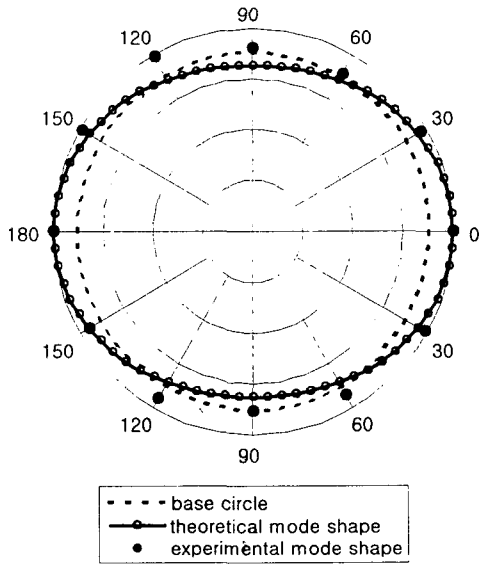
Fig. 6 Coherence of frequency response function.

2~7 kHz의 범위에 분포하기 때문에 이 범위의 값에 대해서만 고려하였다. 그림 5에서 보듯이 7 kHz 이하에서 3개의 주된 공진 첨두치(peak)가 관찰되었으며, 첫 번째 공진 주파수는 3.6 kHz, 두 번째 공진주파수는 4.8 kHz, 그리고 세 번째 공진 주파수는 5.6 kHz였다. 이때 공진점에서의 위상은 약 90°를 나타내었다. 그림 6의 기여도 함수에서는 공진 주파수가 분포하는 2~7 kHz 범위에서는 95% 이상의 기여도 값을 나타내어 추정된 주파수 반응 함수가 잡음의 영향을 거의 받지 않았음을 알 수 있었다.

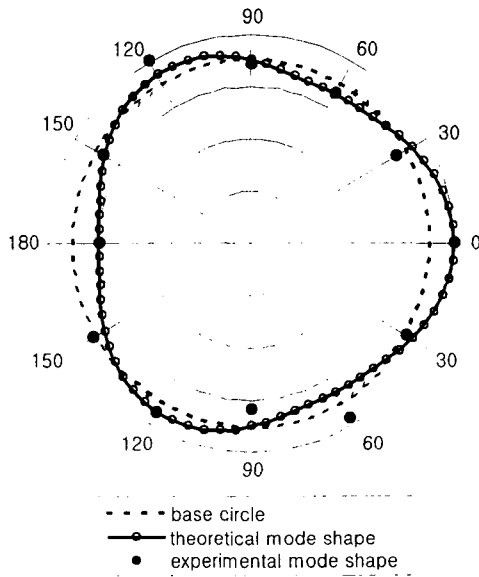
#### 다. 계란의 음향진동모드

탄성 구형체의 이론적인 진동모드와 계란의 적도원에 대한 실제 진동모드를 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a)는 정상 계란의 첩부에 충격을 가했을 때 첫 번째 공진 주파수(3.6 kHz)에 대한 실제 진동모드를 탄성 구형체의 이론적인 진동모드와 비교한 것이다.

탄성 구형체의 첫 번째 공진 주파수에 대한 이론적인 진동모드는 편원-편장(oblate-prolate) 모드로서, 충격입력 지점인 0도 부근과 반대 지점인 180도 부근에서 진동이 크고 90도 부근에서 진동이 작게 나타났다. 또한 진동이 기본원과 만나는 부분에서는 진동이 없거나 아주 작게 나타났다. 계란의 첫 번째 공진 주파수에 대한 실제 진동모드는 그림 7(a)에서 점으로 표시된 부분으로서 탄



(a) first resonance mode(RF:3.6 kHz)



(b) second resonance mode(RF:4.8 kHz)

Fig. 7 Comparison between the resonance mode of egg and theoretical mode shape.

성 구형체의 이론적인 진동 모드와 유사한 형태의 모드 모양을 나타내었다. 이때 음향 진동반응은

충격점과 가까울수록 진폭은 크지만 첨두치의 수가 많이 나타났고, 180도 부근에서 하나의 주된 첨두치를 나타내어 파형 분석을 위해 적당하였다.

그림 7(b)는 두 번째 공진 주파수(4.8 kHz)에 대한 이론적인 진동모드와 계란의 실제 진동모드를 비교한 것으로서 이론적인 진동모드와 실제 진동모드가 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

계란의 진동 모드는 계란이 충격입력 지점에 대하여 다른 위치에서 어떻게 진동하는 가에 대한 정보를 제공하므로 원하는 측정값을 얻기 위한 센서의 위치 선정에 필요하다. 계란의 적도원을 따라 전파되는 파형은 그림 4의 첨부와 둔부 충격에서 보듯이 첫 번째 공진 주파수와 관계가 있었다. 계란의 실제 진동 모드에서 첫 번째 공진 주파수는 서로 다른 크기의 충격에 대하여 대부분 변함이 없으며, 반응신호는 충격지점으로부터 180도 부근에서 가장 크게 나타났다.

따라서 계란의 충격지점을 첨부로 했을 경우 반응의 측정은 180도 반대 지점인 둔부에서 측정하는 것이 가장 좋고, 둔부에 충격을 가할 경우에는 첨부에서 반응을 측정하는 것이 가장 좋은 신호를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

또한 계란의 음향 진동 측정시 계란 받침대와 계란 사이의 접촉면은 계란의 진동이 최소인 90도 부근에 위치시키면 계란의 전체적인 진동에 대한 계란 받침대의 영향을 최소화 할 수 있을 것으로 판단되었다.

## 5. 결 론

계란을 탄성 구형체로 가정하여 탄성 구형체의 이론적인 진동모드를 분석하고, 실제로 계란에 충격을 가함으로써 발생하는 음향진동 반응율 측정하여 이론치와 실측치를 비교 분석하였으며, 이를 통하여 계란 크랙검사기 설계를 위한 충격위치 및 센서의 위치 등을 제시하였다.

그 결과 탄성 구형체의 이론적인 진동 모드와 계란의 적도원 둘레에서 실제로 측정된 진동모드는 유사한 형태를 나타내었고, 계란의 적도원을 따라 전파되는 진동 모드를 통하여 충격입력 지점에 대하여 다른 위치에서 어떻게 진동하는지를 알 수 있었다. 즉, 계란의 진동모드에서 첫 번째 공진 주파수에 대한 신호는 충격지점을 첨부나 둔부로

할 경우 반응은 180도 반대 지점에서 측정할 때 가장 큰 신호를 얻을 수 있으며, 계란 받침대와 계란과의 접촉면은 진동이 작은 90도 부근이 적당하였다.

### 참 고 문 헌

1. Kim, M. S., D. S. Choi, Y. H. Lee and Y. K. Cho. 1998. Study on acoustic characteristics of the watermelon. J. of the Korean Society for Agricultural Machinery 23(1):57-66.
2. Armstrong, P., H. R. Zapp and G. K. Brown. 1990. Impulsive excitation of acoustic vibrations in apples for firmness determination. Trans. of the ASAE 33(4):1353-1359.
3. Chen, H. and J. D. Baerdemaeker. 1993. Effect of apple shape on acoustic measurements of firmness. J. agric. Engng Res. 56:253-266.
4. Cho, H. K., W. K. Choi and J. H. Paek. 2000. Detection of surface cracks in shell eggs by acoustic impulse method. Trans. of the ASAE 43(6):1921-1926.
5. Cooke, J. R. and R. H. Rand. 1973. A mathematical study of resonance in intact fruits and vegetables using a 3-media elastic sphere model. J. agric. Engng. Res. 18:141-157.
6. Coucke, P., B. De Ketelaere and J. De Baerdemaeker. 1997. Detection of eggshell cracks by means of acoustic frequency analysis. Proc. of the 3rd IFAC workshop, Hannover, Germany, 28 September-2 October : 163-168.
7. Huarng, L., P. Chen and S. Upadhyaya. 1993. Determination of acoustic vibration modes in apples. Trans. of the ASAE 36(5):1423-1429.
8. Langenakens, J. J., X. Vandewalle and J. De Baerdemaeker. 1997. Influence of global shape and internal structure of tomatoes on the resonant frequency. J. agric. Engng Res. Vol. 66:41-49.
9. Lin, J., V. M. Puri and R. C. Anantheswaran. 1996. Strains in eggshell during cooling of eggs- Measurement and prediction using the finite element method. Trans. of the ASAE 39(3):1005-1012.
10. Ramsey, K. A. 1975. Effective Measurement for Structural Dynamic Testing. Part I. Sound & Vibration, November : 24-35.
11. So, J. D., Y. K. Huh and S. W. Lee. 1999. Physical characteristics of stem and fruit of *lycium chinense* mill. J. of the Korean Society for Agricultural Machinery 24(4):365-372.