

## 초음파를 이용한 바이오시스템 계측

김기복 · 김만수\*

한국표준과학연구원 환경·안전계측센터, \*충남대학교 생물산업기계공학과

### Measurement of Biosystems Using Ultrasound

Ki-Bok Kim and Man-Soo Kim\*

Center for Environment and Safety Measurement, Korea Research Institute of Standards and Science

\*Dept. of Bioindustrial Machinery Engineering, Chungnam National University

#### Abstract

Ultrasonic nondestructive testing is a versatile and successful technique that can be applied to a wide variety of material analysis applications. The state-of-art technology of sensors, microprocessors, and methods for signal analysis has been promising new possibilities for the application of ultrasonic techniques to non-destructive and non-hazardous testings. Ultrasonic material analysis is based on a simple principle of physics. That is, the motion of a wave is affected by the medium through which it travels. Thus, changes in one or more of four measurable parameters associated with the passage of an elastic wave through a material - time of flight, attenuation, scattering, and frequency content - would be correlated with changes in physical properties such as hardness, elastic modulus, density, homogeneity or particle size and structure. Ultrasonic techniques can be applied to various biosystems such as food, agricultural products and biological materials, owing to their nondestructive nature. In this paper, the principle of ultrasonic technique was briefly described and its applications to biosystems were reviewed.

**Key words:** ultrasonic testing, nondestructive, biosystem, transducer, quality

#### 서 론

초음파는 사람의 귀로는 들을 수 없는 높은 주파수(20 kHz)이상의 음파를 말한다. 초음파는 보통 음파보다 파장이 짧고 지향성이 강하며 특히 물속에서 파의 전파와 반사특성이 매우 양호하다. 이러한 성질을 이용한 대표적인 기기가 어군탐지기이다. 초음파는 본질적으로 매질을 따라 전파하는 탄성파로서 초음파가 진행하는 식품의 내부 물성 등에 따라 초음파의 특성(속도, 감쇠, 흡수, 산란 등)이 변하기 때문에 이러한 초음파 특성을 측정함으로써 식품의 물성을 알 수 있게 된다. 또한 초음파가 진행하는 매질은 초음파의 음압과 주파수에 따라 진동하게

되므로 이러한 특성을 이용하여 식품의 절단, 발열 작용, 응집작용, 유화작용 등을 유발할 수도 있다. 초음파 기술은 초기에는 1921년 프랑스의 Langevin의 의해 측심기(測深機)가 개발된 이후 주로 수중에서의 음파 탐지에 의한 군함이나 잠수함의 위치 식별과 이동속도 측정 등과 같은 군사적인 목적으로 연구되었다. 그 후 비파괴검사, 박막의 두께 측정, 세척기, 금속용접, 에칭, 유속 및 수위 측정 등과 같은 산업적 응용 뿐만 아니라 인체 질병의 진단이나 치료를 위한 의료용으로도 많이 이용된다. 최근 식품, 농산물, 수산물, 축산물 등과 관련한 생물공학 분야에 응용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 식품 원료 및 용기의 세척, 단백질이나 지방의 추출, 숙성 등에 활용되고 있으며, 식품 공정계측, 육류의 조직검사, 농산물의 비파괴 품질 평가 등에 응용하기 위한 연구가 수행되고 있다.

식품공정에서 초음파의 이용은 공정의 흐름 및 품질에 관여하는 검사 및 제어를 위한 초음파의 정

Corresponding author: Ki-Bok Kim, Senior Researcher, Center for Environment and Safety Measurement, Korea Research Institute of Standards and Science 305-600, Republic of Korea.  
Phone: 042-868-5278, Fax: 042-868-5027  
E-mail: kimkibok@kiss.re.kr

보적 응용과 초음파 에너지를 직접적으로 이용하기 위한 동력적 응용(세척, 가공, 가열 등)의 두 가지 영역으로 크게 나눌 수 있다. 공정검사 및 제어로는 주로 저에너지의 초음파를 이용하여 식품의 내부 품질검사, 공정제어 등을 수행하며 동력적 응용으로는 고에너지의 초음파를 이용한다. 최근에는 분해반응의 가속화, 복합재료의 분해 등 초음파가 화학적 반응에 관여하는 특성을 연구하고 응용기술을 개발하는 음파화학(sonochemistry)이라는 새로운 분야가 대두되고 있다(Joyce *et al.*, 2003; Tezcanli-Guyer *et al.*, 2003). 음파의 기계적, 물리적 영향을 이용한 응용분야로는 표면세척(surface cleaning), 탈수화 촉진, 건조 및 여과 증진, 미생물 및 효소의 활동억제, 세포분열, 액상물질로부터의 가스제거, 열 전달 촉진, 추출공정의 가속화 등을 들 수 있다.

한편 비교적 낮은 에너지의 초음파는 인체 및 생물체에 무해하며 비파괴적으로 대상체의 내부 상태를 측정할 수 있기 때문에 초음파를 이용하여 식품의 다양한 품질 요소를 평가하려는 연구가 수행되고 있으며 앞으로 식품을 포함한 바이오시스템 분야에서 그 응용분야가 매우 다양해질 것으로 생각된다.

### 초음파의 기초이론

탄성체에 응력이 가해지면 이 응력은 탄성체 내에서 파동의 형태로 전파해 나가는데 이를 탄성파라 한다. 탄성파는 그 진동 모드에 따라서 여러 가지 종류가 있으며 각 모드에 따라 전파속도가 달라진다. 또한, 탄성파가 매질 내를 전파하는 동안 매질의 형상이나 매질의 특성에 따라서 탄성파의 진폭이나 파형이 달라지며, 경계면을 만나게 되면 반사와 굴절을 일으키게 된다. 매질이 이방성(anisotropic property)일 경우에는 탄성파의 거동은 매우 복잡해지게 된다.

### 파동 방정식

이상적인 유체는 전단 변형이 없기 때문에 그 안에서는 종파(longitudinal wave) 모드의 탄성파만 존재하지만, 고체의 경우에는 전단 변형으로 인하여 종파 및 횡파(transverse wave) 모드의 탄성파가 존재한다. 이상적인 무한한 탄성 등방성 고체에서의 파동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + G) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} - G \nabla \times \nabla \times \mathbf{u} \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ 는 매질의 밀도,  $\mathbf{u}$ 는 매질 내 입자의 변위,  $\lambda$ 는 Lamé 상수이고  $G$ 는 전단계수(shear modulus)이다.

식 (1)에서 매질이 전단 변형이 없고 체적변화만 있을  $\Delta \times \mathbf{u} = 0$  경우 이 되므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 \mathbf{u} = \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (2)$$

여기서,  $c_p$ 는 종파속도로서 다음과 같이 표시된다.

$$c_p^2 = \frac{\lambda + 2G}{\rho} = \frac{E}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad (3)$$

여기서,  $E$ 는 매질의 탄성계수 (Young's modulus),  $\mu$ 는 프와송(Poisson) 비이다.

한편, 체적의 변화가 없고 전단 변형만 있을 경우  $\nabla \times \mathbf{u} = 0$  이 되므로 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 \mathbf{u} = \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (4)$$

여기서  $c_s$ 는 횡파속도로서 다음과 같이 표시된다.

$$c_s^2 = \frac{G}{\rho} \quad (5)$$

한편,  $E$ 와  $G$  사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$E = 2(1 + \mu)G \quad (6)$$

따라서, 재료의 밀도  $\rho$ , 종파속도  $c_p$ , 횡파속도  $c_s$ 를 측정하면 식 (3), (5), (6)을 이용하여 재료의 기계적 특성인 탄성계수, 전단탄성계수, 프와송 비를 알 수 있다.

종파의 경우는 매질 내 입자의 운동방향과 파의 진행방향이 동일하며 횡파의 경우는 입자의 운동방향이 파의 진행방향에 수직이다. 횡파는 편향성(polarization)을 지니는데 횡파의 편향성은 매질의 경계면을 기준으로 이에 수평인 수평횡파(horizontal shear wave) 성분과 파의 진행방향과 수평횡파에 수직인 수직횡파(vertical shear wave) 성분을 지니게 된다.

매질 내 음파의 속도는 생체지방(fat)의 경우 1,450 m/sec, 부드러운 생체조직에서는 대략 1,540 m/sec,

생체근육의 경우는 1,585 m/sec, 그리고 인체의 뼈에서는 3,500 m/sec 정도이다. 따라서 식품이나 생체 시스템 내에서 서로 다른 조직간의 초음파 속도 차이를 검출하여 조직의 두께측정이 가능하다. 한편 식(3) 및 (5)에서 종파 및 횡파 속도는 초음파의 주파수와 무관함을 알 수 있는데 즉, 파장과 무관하다. 따라서 동일한 매질 내에서 저주파 초음파와 고주파 초음파의 속도는 동일하다. 반면 초음파 속도는 온도에 따라 변하는 성질을 가지고 있으나 생물체를 대상으로 내부의 조직 검사를 하는 경우에는 온도에 따른 초음파 속도변화는 거의 무시된다.

생물체 경계면에서의 탄성파의 거동

음향적 특성이 다른 두 매질의 경계에 탄성파가 도달하면, 탄성파는 반사, 굴절, 산란을 일으키는데, 이러한 현상을 이용하여 생물체 내의 조직이나 이상상태를 검사할 수 있다. 매질의 경계면에서 발생하는 반사각 또는 굴절각은 Snell의 법칙에 의해 비교적 간단히 구할 수 있다. 초음파의 반사 및 투과 현상은 음향 임피던스를 이용하면 쉽게 기술 할 수 있으며 매질의 음향 임피던스,  $Z$ 는 다음 식 (8)과 같이 매질 내의 입자( $v$ )의 속도에 대한 음압( $P$ )의 비로 정의된다(Kino, 1987).

$$Z = \frac{P}{v} \tag{7}$$

음향임피던스는 음장의 형태, 주파수 및 매질 내의 위치에 따라서 달라지며 평면파에 대해서는 다음 식 (8)과 같이 응력이 가해지기 전의 매질의 밀도( $\rho_0$ )와 초음파 속도의 곱으로 표시된다.

$$Z = \rho_0 c \tag{8}$$

식 (7)에 의해 정의되는 음향 임피던스는 음장 및 매질의 특성을 함께 내포하고 있으므로 비(specific) 음향 임피던스라 하고, 식 (8)로 정의 되는 음향 임피던스는 매질의 물성을 나타내므로 특성(characteristic) 음향 임피던스라 한다. 이후부터는 음향 임피던스는 특성 음향 임피던스를 의미한다.

Fig. 1에서  $x=0$ 에 음향 임피던스가  $Z_1, Z_2$ 인 두 매질의 계면이 존재하고 이 계면에 수직으로 평면파가 입사할 경우를 고려하면 매질 I에서의 초음파의 투과계수  $T_1$  및 반사계수  $R_1$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$T_1 = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \tag{9}$$

$$R_1 = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \tag{10}$$

한편, 두 매질 사이에 일정한 두께  $L$ 인 매질이 존재하면, 경계조건으로부터 투과계수  $T_1$ 는 다음과 같이 표현된다(Kino, 1987).

$$T_1 = \frac{4}{2 + \left(\frac{Z_3 + Z_1}{Z_1 + Z_3}\right) \cos^2 k_2 L + \left(\frac{Z_2^2}{Z_1 Z_3} + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2^2}\right) \sin^2 k_2 L} \tag{11}$$

여기서,  $k_2$ 는 매질 II에서의 파수이다. 따라서 식 (11)에서 매질 I에서 매질 III로의 초음파의 완전투과 조건은  $T_1 = 1$ 인 경우이므로 매질 II의 음향임피던스는 다음과 같이 결정된다.

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3} \tag{12}$$

이때, 매질의 두께( $L$ )은 초음파 파장의 1/4배가 되어야 한다.

Fig. 1에서와 같이 서로 다른 음향 임피던스를 갖는 조직의 경계면에서 초음파의 반사가 일어난다. 따라서 대부분의 초음파를 이용한 비파괴 검사에서는 초음파가 접촉하는 매질의 경계면에 음향 임피던스의 차이로 인한 반사파를 감소시키기 위하여 진공 grease, 물, 오일 등과 같은 음향 임피던스 정

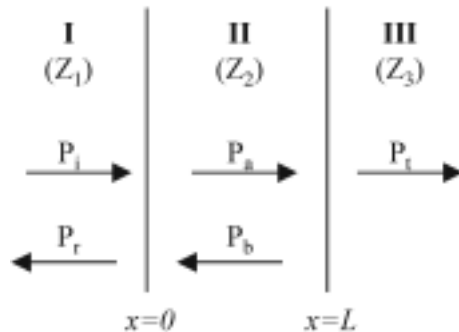


Fig. 1. Reflection and transmission of normally incident plane wave.

합을 위한 couplant를 도포하여 검사를 수행한다. 측정 매질 내 불연속부에서의 반사파의 크기는 경계면을 구성하는 두 조직의 음향 임피던스 차에 의존하기 때문에 이러한 반사파를 이용하여 매질 내부의 물성 파악이 가능하다. 예를 들어 지방과 근육의 경계면에서는 음압 반사율이 0.1 정도이지만 근육과 뼈의 경계면에서는 0.64정도이며 이 정도의 반사는 매우 큰 반사로서 뼈로 전달되는 에너지의 비율이 매우 작음을 뜻한다. 따라서 이러한 현상 때문에 뼈의 뒤쪽에 있는 조직의 검사가 어렵게 된다.

초음파 검사에 있어 효율적인 초음파 트랜스듀서를 설계하기 위해서는 투과에너지를 최대한 크게 해주어야 한다. 따라서 초음파를 발생시키는 압전 재료와 대상물의 음향임피던스를 적절하게 일치시키는 것이 필요하다. 따라서 식 (11)은 초음파 주파수가 특정한 조건으로 제한되지만 탄성파의 에너지를 손실 없이 전달할 수 있다는 점에서 매우 중요한 의미를 지닌다.

한편, 굴절은 파동의 전파속도가 서로 다른 두 매질의 경계면에 파동이 사각으로 입사할 때 다른 매질로 전파하는 과정에서 파동의 진행방향이 바뀌는 현상을 말한다. 인체의 경우 연조직과 뼈처럼 초음파 전파속도 차이가 큰 두 매질의 경계면에서는 굴절각이 약  $19^{\circ}18'$  정도의 큰 굴절이 발생한다. 이러한 굴절과가 긴 거리를 전파할 경우에는 벗어난 정도가 누적되어 초음파 영상진단장치의 정확도에 큰 영향을 주게 된다.

#### 초음파의 감쇠 및 분산

초음파 변환기로부터 발생된 초음파나 반사파가 조직 내를 진행할 때 조직 내에서 에너지를 잃고 진폭이 줄어들거나 주파수에 따라서 속도가 달라지면 그 파형이 변하게 되는데 전자는 감쇠, 후자는 분산이라고 한다.

감쇠의 주요 원인은 흡수와 산란이다. 초음파의 흡수는 매질 내의 주기적 진동 에너지가 내부 분자 에너지(internal molecular energy) 또는 열과 같은 비주기적 분자운동 등과 같이 다른 형태로 전환되는 것을 의미한다. 보통 생체조직 내에서 이러한 초음파 흡수가 강하게 일어나지만 이와 관련된 구체적인 기작은 잘 알려져 있지 않다. 매질 내에서의 초음파 흡수는 주파수가 증가할수록 커지게 되며 이러한 초음파 흡수는 전파 매질의 특성에도 관련이 깊으므로 조직의 상태에 대한 정보를 제공해 줄

수 있기 때문에 앞으로 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다. 초음파의 산란은 전자파의 산란과 같은 원리로서, 반사체의 크기가 파장과 비슷하거나 작을 때 많은 방향으로 반사되어 나가는 파동현상이다. 산란된 초음파의 분포는 산란체와 파장의 상대적 크기에 따라 달라진다. 즉, 초음파 파장  $\lambda$ 와 산란입자의 평균크기  $D$ 의 비에 따라서 세 가지 경우로 나누어진다.

$\lambda_B = 2\pi D$ 는 레일리 산란과 중간단계 산란의 경계조건으로 이에 해당하는 경계주파수를  $f_B$ 라 정의한다. 레일리 영역은  $f_R = 0.1f_B$ 로서 이 영역에서의 산란계수는 입자의 크기와 무관하게  $\alpha_R \propto f^4$ 와 같이 주어지는데 산란체의 크기가 파장에 비해 매우 작기 때문에 산란파는 모든 방향으로 진행한다. 레일리 산란에서 산란파의 세기는 산란체와 주위 매질 사이의 음향임피던스 차이, 산란체의 크기 및 파장에 따라 달라지며 산란파의 세기는 주파수가 증가할수록 커진다. 한편 중간단계 영역은  $f_I = 10f_B$ 로서 이 영역에서의 산란계수는  $\alpha_I \propto Df^2$ 로 주어진다.  $\lambda \ll D_{\min}$ 을 만족하는 높은 주파수 영역에서는 입자들 사이의 경계면에서 난반사에 의한 산란으로 취급되고 이때의 산란계수는  $\alpha_M \propto 1/D$ 와 같이 주파수에는 무관하고 입자의 크기에 반비례한다.

산란된 초음파를 이용하여 생체 조직의 영상이나 혈액의 흐름 속도 등을 측정할 수 있으며 이로부터 진단을 위한 많은 정보를 알 수 있다. 실험에 의하면 인체의 경우 서로 다른 조직에서 산란된 산란파는 서로 다른 공간 분포를 갖기 때문에 이러한 특성을 이용하면 임상적으로 생체 조직의 특성을 좀 더 충분히 활용할 수 있을 것이다.

한편, 분산은 매질 내에서 평면파의 위상속도가 초음파의 주파수에 따라 달라지는 현상으로 펄스 형태의 초기파형이 매질 내를 전파해감에 따라 그 파형을 계속 유지할 수 없게 되어 최종적으로 시간이 지남에 따라 임의의 파열(wave train)형태로 바뀌는 특성을 가진다. 이러한 분산의 원인으로서는 1) 전파매질에서의 경계의 존재(기하학적 분산) 2) 주파수 의존성을 지니는 물질상수(물성 분산) 3) 매질 내의 매우 많은 작은 산란입자에 의한 산란(산란 분산) 4) 비가역적인 과정에 의해 파의 에너지 흡수(소모 분산) 5) 진폭에 따른 파의 속도 변화(비선형 분산) 등을 들 수 있다.

## 초음파 송수신 시스템

### 초음파 센서

초음파 센서는 초음파 전파에 수반하여 음압이나 매질의 변형을 검출하는 것이다. 초음파 센서는 초음파 신호와 전기신호 사이의 변환을 하는 점에서 초음파 트랜스듀서라고도 하고, 물질 내부를 탐색하는데 사용되므로 초음파 탐촉자라고도 한다. 또 초음파 진동의 발생 및 검출을 하는 점에서 초음파 진동자라고도 한다. 초음파 발생 기작은 압전 효과, 전왜 효과, 자왜 효과, 광탄성 효과 등의 변형과 다른 물리량과의 상호작용을 이용하는 방법 등 여러 가지가 있지만 주로 압전재료가 많이 사용된다. 압전 재료는 수정 등과 같은 단결정과 압전 세라믹 등이 사용되며 PZT(lead zirconate titanate)가 대표적이다. 얇은 원판형의 압전 세라믹이 일반적으로 비파괴검사 및 생물체의 조직특성 규명에 보통 많이 사용된다. 원판에 걸리는 전압의 극성에 따라 판이 수축 또는 이완과 같은 기계적 변형을 하게 되어 원판 바깥쪽으로 초음파를 발생시키게 된다. 반대로 외부로부터 기계적 자극 즉, 초음파가 수신되면 서로 반대되는 표면에 상반되는 전극을 갖는 내부 전기장을 형성하게 되는데 이러한 내부 전기장의 변화를 검출하여 초음파를 측정할 수 있다. 의료용 초음파 센서의 경우 주파수 대역별로 많은 여러 가지 다양한 형태의 센서가 개발되어 있으나 과실에 적합한 초음파 센서는 거의 개발되어 있지 않다. Fig. 2는 본 연구진에 의해 개발된 압전형 초음파 센서(100kHz)로서 과실과 접촉하는 부분을 곡면으로 설

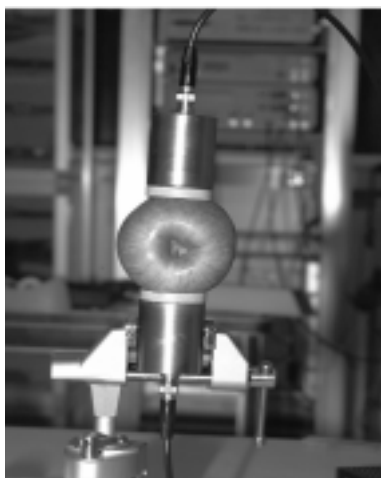


Fig. 2. Ultrasonic transducer for fruit with acoustical focusing wear plate.

계하였으며 초음파의 송수신 효율을 증가시키기 위하여 과실과 압전재료 사이에 식 (12)를 만족하는 적절한 음향 임피던스 정합층을 개발하였다(Kim *et al.*, 2003a).

### 초음파 시험 방법 및 장치

초음파 시험장치에서 측정되는 변수는 송신용 초음파 트랜스듀서에서 발생된 초음파가 수신용 트랜스듀서에 수신된 신호의 진폭, 도달시간 및 위상이다. 이들 변수를 처리하는 방법에 따라 시험방법과 장치가 달라지며 크게 초음파 투과법과 반사법으로 구분할 수 있다. 투과법은 초음파가 매질을 통과한 후에 수신되는 초음파의 감쇠, 전파시간(time of flight), 위상변화 등을 측정하여 매질 내의 정보를 파악할 수 있다. 반사법은 펄스-에코법이라고도 하며 가장 일반적으로 사용되는 방법으로서 발사된 초음파가 물체에 부딪혀 되돌아오는 탄성파의 도달 시간과 그 크기를 이용하는 방법으로서 제 1차 세계대전 당시 수중 물체 포착에 처음 이용되었다. 이 방법은 하나의 초음파 트랜스듀서로 탄성파의 송수신이 가능하다. 보통 초음파 영상진단 장치와 같은 의료용 초음파 탐상에는 펄스-에코법이 주로 이용된다. 반사법의 경우 매질을 통과하여 입사된 초음파가 매질의 반대쪽 경계면에서 반사하여 되돌아오기 때문에 매질의 초음파 속도를 알면 되돌아오는 시간으로부터 매질의 두께를 계산할 수 있다. 또한 매질 내 임의 점에서 결함이나 공동 등이 있으며 초음파 에너지의 일부가 결함에서 반사되기 때문에 이러한 결함이나 공동의 유무와 크기 등을 쉽게 알 수 있다. 한편, 과실의 경우 초음파 감쇠가 매우 크기 때문에 초음파의 반사가 거의 일어나지 않기 때문에 투과법이 주로 이용된다. Fig. 2에서 보는 바와 같은 과실용 초음파 센서를 이용하여 Fig. 3과 같은 초음파 투과시험 장치를 구성할 수 있다. Fig. 3에서 송신용 초음파를 구동하기 위한 pulser와 수신되는 초음파 신호를 증폭하기 위한 receiver 파형을 분석하기 위한 오실로스코프 등으로 구성된다(Kim *et al.*, 2002).

### 초음파 신호처리

초음파 신호를 처리하는 방법에는 크게 A-스캔, B-스캔, C-스캔이 있다. A-스캔은 초음파 시험기의 CRT 상에 수평축은 초음파가 매질 내를 전파하는 시간을, 수직축은 신호의 진폭을 나타내는 방법이다. B-스캔은 초음파 측정기의 시간축을 CRT의 수

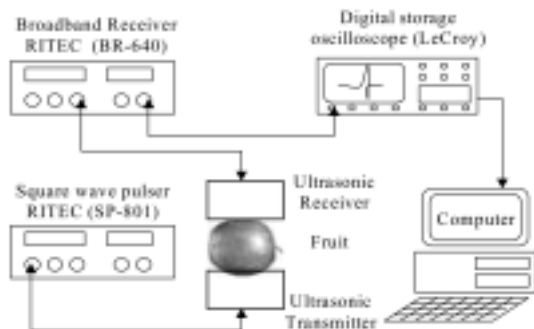


Fig. 3. Ultrasonic measurement system.

직축, 트랜스듀서의 위치를 수평축으로 하고 초음파 음의 세기에 따른 밝기를 CRT에 표시한다. C-스캔은 radiographic tomogram과 유사한 이차원 평면 영상을 만들어 주는 방법으로서 최근에는 B-스캔과 조합하여 3차원 영상을 얻기 위한 기술이 개발되고 있다.

#### 초음파 기술을 이용한 바이오시스템 계측

초음파를 이용한 비파괴검사기술은 일반 금속재료 및 기계분야 그리고 의료분야 등에 활발하게 적용되어 왔다. 저에너지의 초음파는 인체 및 생물체에 무해하며 비파괴적으로 대상체의 내부 상태를 측정할 수 있는 장점이 있다. 초음파를 이용한 바이오시스템 계측분야에서는 최근 많이 연구되고 있는 과실의 품질측정과 관련한 연구내용들을 중심으로 고찰한 다음 식품 및 축산물 분야의 응용에 대하여 간략하게 고찰하기로 한다.

#### 과실의 기계적 특성측정 연구

과실의 품질에는 무게, 색택, 형상, 표면상태 등과 같은 외부 품질인자와 당도, 육질, 영양가, 보존성, 가공성, 내부 공동 및 결함 등의 내부 품질인자가 있다. 지금까지 청과물에 대한 품질판정은 주로 외부 품질인자를 중심으로 행해지고 있으며, 내부 품질인자의 경우 전체 중 일부를 표본 추출하여 당도, 산도, 경도, 결함(공동, 갈변현상)등을 파괴적인 방법으로 측정하고 있는 실정이다. 선진국에서는 외관 판정뿐만 아니라 내부 품질의 판정을 위해 근적외선, 핵자기공명, 영상처리, 초음파, X 선 등을 이용하여 속도, 부패 정도 및 내부의 결함 정도를 판정할 수 있는 기술을 개발 중에 있거나 일부는 실용화에 접근하고 있다. 이러한 기술들은 계측, 센서, 전자

기술의 눈부신 발달로 가능해졌으며 최근에는 초음파를 이용한 방법들이 많은 관심을 끌고 있다. 그러나 지금까지의 초음파 기술은 대부분 의료진단이나 산업설비 등에 대한 비파괴 검사용으로 주로 사용되고 있으며 농산물의 내부 품질평가에 적용하기 위한 연구는 매우 부족한 실정이다.

과실에 대한 초음파 기술 적용에 관한 연구들을 살펴보면 Sarkar와 Wolfe (1983)은 오렌지 표면의 texture, 토마토의 표면 crack, husked sweet corn의 내부결함을 측정하기 위하여 초음파 송신용으로는 0.5 MHz의 협대역 초음파 트랜스듀서, 수신용으로는 1 MHz의 광대역 초음파 트랜스듀서를 사용하여 시료를 투과하여 나오는 초음파 신호의 감쇠를 측정하여 분석하였다. Mizrach 등(1989)은 50 kHz의 초음파 주파수에서 투과법을 이용하여 몇 가지 과실과 채소를 균일하게 절단한 다음 두께에 따른 초음파 속도와 감쇠를 측정하였다. 사과의 초음파 전파속도가 감자보다 낮게 나타났는데 그 이유는 사과 조직 내에 공극이 상대적으로 크기 때문이며 감자 조직은 섬유질이 거의 없고 세포 공간 내부의 공극도 2% 정도에 불과하기 때문이라고 하였다. 과실의 경도와 조직 내부의 생리학적 인자들을 고찰한 결과 이들 특성들과 초음파 특성 사이에 상관관계가 있음을 보고하였다. 특히, 아보카도의 경우 상대적으로 덜 익은 것이 초음파 전파속도가 낮게 측정되었으며 따라서 초음파 전파속도를 측정함으로써 아보카도의 수확시기를 판단할 수 있을 것으로 보고하였다 (Mizrach 등, 1991, 1996). 또한 Mizrach 등(1997)은 망고의 과피 부분에 초음파 센서를 직접 접촉하여 망고의 초음파 감쇠를 측정하였다. 초음파 시험 뿐만 아니라 경도 계측을 위한 파괴적인 압축실험과 당도 및 산도와 관계를 고찰하기 위한 생리학적 실험을 병행하여 초음파 감쇠, 압축실험을 통한 기계적 특성(탄성계수, 경도), 생리학적 지수들간의 상관성을 나타내는 통계모형을 개발하였다. 개발된 통계모형을 이용하여 초음파 감쇠를 측정함으로써 망고의 당도, 산도의 예측이 가능하며 저장 중에 있는 망고의 연화과정을 모니터링 가능하다고 하였다. 한편 국내에서는 Kim *et al.*(2002)은 사과, 배, 복숭아에 대하여 일정한 크기의 시편을 만든 다음 500 kHz의 공진주파수를 가지는 초음파 센서와 고풍력 초음파 시험장치를 이용하여 투과법을 적용한 결과 사과에서의 초음파 속도는 약 232.4 m/sec, 배의 경우 255.2 m/sec, 복

숭아의 경우 195.4 m/sec로 각각 나타났으며 감쇠계수는 사과와 배의 경우 1.61 dB/mm, 배의 경우 1.16 dB/mm, 복숭아의 경우 0.58 dB/mm로 각각 측정되었다. 과실 과육을 투과하여 수신되는 초음파 신호의 주파수 특성을 분석한 결과 대체적으로 20 kHz 전후의 주파수 특성을 나타낸다고 보고하였다. 또한 Kim *et al.*(2003b)은 과실의 저장기간에 따른 초음파 전파속도, 감쇠, 주파수 등을 분석한 결과 사과 과육의 경우 저장기간이 증가함에 따라 초음파 전파속도는 감소하며 감쇠계수는 증가함을 보고하였다. 특히 주파수 분석결과 저장기간이 증가할수록 즉, 속도가 진행됨에 따라 초음파 투과신호의 제 1 피크 주파수는 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 초음파 파라미터를 이용할 경우 사과의 저장기간이나 수확 후 속도 변화의 예측이 가능한 것으로 보고하였다. 지금까지 과실의 기계적 특성 등을 측정하기 위한 연구에서는 과실에 적합한 초음파 센서가 아닌 일반 공업용 초음파 센서를 이용한 연구가 대부분이었다. 따라서 최근 Kim *et al.*(2003a)은 과실의 절단하지 않고 초음파를 송수신 할 수 있는 센서를 개발하였으며 앞으로 관련 연구에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

### 식품 제조공정 및 축산분야 응용

식품 예멀전과 현탁액 생산 공정, 특히 유제품 생산 공정에서의 품질제어 및 공정 제어에 초음파 기술이 아주 효율적으로 응용될 수 있다. 우유와 크림에서의 초음파 특성을 이용하여 유지와 탈지의 농도를 예측할 수 있으며 이에 따라 유제품의 품질을 제어하는데 활용될 수 있다(Miles *et al.*, 1990). 또한 치즈 제조공정에서 renneted milk의 응고시간을 예측하는데 초음파의 펄스-반사법이 적용될 수 있다. 이러한 응고시간은 enzymatic phase에서 physicochemical phase로 전이되는 지표이며 온라인 공정상에서 지속적으로 초음파의 속도와 감쇠를 측정함으로써 응고시간을 예측할 수 있다. 따라서 이러한 응고시간을 지속적으로 모니터링 함으로써 최종 생산제품의 품질을 제어할 수 있다(Bakkali *et al.*, 2001; Benedito *et al.*, 2002). 그 외 치즈의 탄성계수와 같은 기계적 특성을 측정하기 위한 연구로서 air-coupled 초음파 트랜스듀서를 이용하여 비접촉식 초음파 탐상기법을 적용하기 위한 연구도 수행되었다(Cho *et al.*, 2001). Nassar *et al.*(2001)은 50-100 kHz의 저주파 초음파(Nassar *et al.*,

2001)의 전파속도와 gel 형성과정에서의 구조적인 변화와의 상관관계를 고찰함으로써 우유의 gelation 과정을 모니터링 하기 위한 연구를 수행하였다.

한편, 축산 분야의 응용으로서는 Park *et al.*(1994a)은 소고기 근육내의 지방을 측정하기 위하여 초음파 A-스캔 방법을 적용하였다. 초음파 속도는 지방의 농도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 초음파 속도와 지방 농도사이의 상관계수는 강한 상관관계가 있음을 보였다. 초음파 속도를 독립변수로 한 비선형 회귀모델을 개발하고 평가한 결과 지방 농도가 8%이상일 경우는 정확도가 90% 정도이며 지방 농도가 8%이하인 경우에는 정확도가 76.4%정도로 나타났다. 또한 Park *et al.*(1994b)은 초음파 신호의 주파수 특성을 이용하여 소고기 근육내의 지방함량을 측정하기 위한 연구를 수행하였다. 주파수 스펙트럼으로부터 얻어진 특성을 이용하여 다중선형회귀 모델을 개발하고 평가한 결과 지방 함량 예측의 평균 정확도는 약 79%로 나타났다.

초음파는 식중독의 원인이 되는 살모넬라(salmonella) 등의 박테리아 및 세균의 살균에 적용 될 수 있다. 예를 들어 닭의 표면에 감염되어 있는 박테리아의 경우 약 47 kHz의 초음파로 처리한 세척용 냉각수를 이용하여 제거할 수 있다. 그 밖에 우유 및 달걀로부터 추출되는 단백질의 분해, 치즈 및 가루 반죽의 물성측정, 초음파를 이용한 우유의 살균, 고추파를 이용한 세포파괴 등에 초음파 기술이 이용될 수 있다.

## 결 론

초음파 기술이 응용되기 시작한 것은 약 100여년 정도로서 비교적 짧지만 인류의 삶에 없어서는 안 될 정도로 중요한 위치를 차지하고 있다. 본 논문에서는 초음파의 원리와 바이오시스템에 대한 응용 예를 살펴보았다. 초음파 기술은 비파괴적인 방법으로서 의학 분야뿐만 아니라 식품 및 농산물의 내부 품질측정, 식품 공정 제어 등에 다양하게 응용될 수 있다. 특히, 초음파는 초음파 외 다른 적용 기술에서는 효과적으로 제공할 수 없는 경도 및 공동 등과 같은 내부 결함의 판정에 매우 효과적인 기술로 알려져 있다. 최근 관련 반도체 공정기술과 전자기술의 발전에 따라 초음파 관련 장비와 센서도 소형화되고 있는 추세이다. 현재 초음파 센서의

경우 MEMS 기술을 적용하여 수십  $\mu\text{m}$  크기의 초소형 초음파 센서를 개발할 수 있는 단계에 와 있다. 이에 따라 식품 및 농산물의 물성측정, 육류의 품질관정, 식품의 공정제어 뿐만 아니라 최근의 NT 및 BT 관련 분야에서 그 활용이 매우 기대된다.

### 참고문헌

- Bakkali, F., A. Moudden, B. Faiz, A. Amghar, G. Maze, F. Montero de Espinosa and M. Akhnk. 2001. Ultrasonic measurement of milk coagulation time. *Measurement Science Technology* **12**: 2154-2159
- Benedito, J., J.A. Carcel, R. Gonzales and A. Mulet. 2002. Application of low intensity ultrasonics to cheese manufacturing processes. *Ultrasonics* **40**: 19-23
- Cho, B., J. Irudayaraj and M.C. Bhardwaj. 2001. Rapid measurement of physical properties of cheddar cheese using a non-contact ultrasound technique. *Trans. ASAE* **44**(6): 1759-1762
- Galili, N., A. Mizrach and G. Rosenhouse. 1993. Ultrasonic testing of whole fruit for nondestructive quality evaluation. ASAE Paper No. 93-6026. St. Joseph, MI, USA
- Joyce, E., T.J., Mason, S.S. Phull and J. P. Lorimer. 2003. The development and evaluation of electrolysis in conjunction with power ultrasound for the disinfection of bacterial suspensions. *Ultrasonic Sonochemistry* **10**: 231-234
- Kim, K.B., M.S. Kim, H.M. Jung and B. Ahn. 2002. Mechanical property of fruit by ultrasonic parameters. Proceedings of International Symposium on Automation and mechatronics of Agricultural and Bioproduction system, Chiayi, Taiwan, Vol. **1**, pp. 119-129.
- Kim, K.B., S.D. Lee and M.S. Kim. 2003a. Ultrasonic probe design and fabrication for contact measurement of fruit. Asia-Pacific Conference on Non-destructive Testing, Korea. Paper No. 233.
- Kim, K.B., M.S. Kim, H.M. Chung and S.D. Lee. 2003b. Mechanical properties and ultrasonic parameters of the apple flesh while in storage. *J. of KSAM* **28**(3): 239-244
- Kino, G.S. 1987. *Acoustic waves-Devices, imaging & analog signal processing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA
- Louis, A.L. and A.A. Judith. 1994. Changes in sonic resonance of 'Delicious' and 'Golden Delicious' apples undergoing accelerated ripening. *Trans. of the ASAE* **37**(3): 907-912
- Miles, C.A., D. Shore and K.R. Langley. 1990. Attenuation of ultrasound in milks and creams. *Ultrasonics* **28**: 394-400
- Mizrach, A., N. Galili and G. Rosenhouse. 1989. Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. *Trans. of the ASAE* **32**(6): 2053-2058.
- Mizrach, A., N. Galili, G. Rowenhouse and D.C. Teitel. 1991. Acoustical, mechanical and quality parameters of winter grown melon tissue. *Trans. of the ASAE* **34**(5): 2135-2138
- Mizrach, A., N. Galili, S. Gan-mor, U. Flitsanov and I. Prigozin. 1996. Models of ultrasonic parameters to assess avocado properties and shelf life. *J. Agric. Eng. Res.* **65** (4): 261-267
- Mizrach, A., U. Flitsanov and Y. Fuchs. 1997. An ultrasonic nondestructive method for measuring maturity of mango fruit. *Trans. of the ASAE* **40**(4): 1107-1111
- Nassar, G., B. Nongaillard and Y. Noel. 2001. Monitoring of milk gelation using a low-frequency ultrasonic technique. *J. of Food Engineering* **48**: 351-359
- Park, B., A.D. Whittaker, R.K. Miller and D.S. Hale. 1994a. Predicting intramuscular fat in beef longissimus muscle from speed of sound. *J. Anim. Sci.* **72**: 109-116
- Park, B., A.D. Whittaker, R.K. Miller and D.S. Hale. 1994b. Predicting intramuscular fat in beef with ultrasonic frequency analysis. *J. Anim. Sci.* **72**: 117-125
- Sarkar, N. and R.R. Wolfe. 1983. Potential of ultrasonic measurements in food quality evaluation. *Trans. of the ASAE* **26**(2): 624-629
- Tezcanli-Guyer, G. and N.H. Ince. 2003. Degradation and toxicity reduction of textile dyestuff by ultrasound. *Ultrasonic Sonochemistry* **10**: 235-240