

QUALITY EVALUATION TECHNOLOGY OF AGRICULTURAL PRODUCTS

Pictiaw Chen
Department of Biological and Agricultural Engineering
University of California
Davis, California, U.S.A.

ABSTRACT

Quality evaluation of agricultural products has been a subject of interest to many researchers for many years. As a result, several nondestructive techniques for quality evaluation of agricultural products have been developed. These methods are based on the detection of various physical properties that correlate well with certain quality factors of the products. This paper presents an overview of various quality evaluation techniques that are based on one of the following properties: density, firmness, vibration characteristics, X-ray and gamma ray transmission, optical reflectance and transmission, electrical properties, aromatic volatile emission, and nuclear magnetic resonance (NMR). The sophistication of nondestructive methods has evolved rapidly with modern technologies. The use of various modern image acquisition techniques, such as solid state TV camera, line-scan camera, X-ray scanning, ultrasonic scanning, and NMR imaging, in conjunction with image-processing techniques has provided new opportunities for researchers to develop many new and improved techniques for nondestructive quality evaluation of agricultural products.

Keywords: Quality, quality evaluation, nondestructive, sorting, grading

INTRODUCTION

Quality of agricultural products is an important factor to both the producers and consumers. However, there is no clear definition of quality for agricultural products; different researchers define quality differently. Nevertheless, certain basic factors are commonly used to characterize quality: size, shape, color, flavor, firmness, texture, taste, and freedom from defects and foreign materials. Since many quality factors of agricultural products are related to physical properties of the products, it is often possible to develop nondestructive methods for evaluating quality based on physical properties. In the past 30 years researchers have developed such methods for a number of agricultural products, and numerous techniques for evaluating external quality factors, such as size, shape, color, and some external defects, are now available commercially. Internal quality factors, such as maturity, sugar content, oil content, firmness, internal defects, tissue breakdown, and presence of unwanted objects, are more difficult to evaluate. The rapid development of modern technologies has provided new opportunities for researchers to develop many new and improved techniques for evaluating various quality factors of agricultural products. This paper presents an overview of these methods.

REVIEW OF TECHNIQUES

Density

The relationship between density and the quality of agricultural products has been recognized for more than a century. The density of many fruits and vegetables increases with maturity. On the other hand, certain types of damage and defects, such as frost damage in citrus, insect damage in fruits and grains, puffiness in tomatoes, bloaters in cucumbers, and hollow heart in potatoes, tend to reduce the density of the product. Zaltzman et al. (1987) presented a comprehensive literature review of previous studies related to quality evaluation of agricultural products based on density differences. The following are some of the common methods used: removing fruits that float in water or in solutions of known density, dropping fruits into a moving stream of water in which low-density fruits will rise faster than high-density ones, and releasing fruits from the bottom of a flowing stream of water and skimming off fruits of different density ranges from the top of the water channel at different horizontal distances from the point of release (Gutterman, 1976; Wardowski and Grierson, 1972; Perry and Perkins, 1968; and Gould, 1975). A method that utilizes a fluidized bed medium for separating potatoes from clods and stones was studied extensively by Zaltzman and his co-workers (Zaltzman et al., 1983 and 1985). They developed a pilot plant unit that can separate potatoes from clods and stones at a rate of 5 t/h with better than 99% potato recovery and 100% clod and stone removal.

Firmness

Firmness is a physical property that is often used for evaluating the quality of fruits and vegetables. In many agricultural products firmness is related to maturity. In general firmness of fruits decreases gradually as they become more mature and decreases rapidly as they ripen. Overripe and damaged fruits become relatively soft. Thus firmness can be used as a criterion for sorting agricultural products into different maturity groups or for separating overripe and damaged fruits from good ones. Several methods for measuring fruit firmness have been developed.

Force-deformation

Perry (1977) developed a nondestructive firmness-testing unit that applied low-pressure air simultaneously to small areas on opposite sides of peaches to generate a non-bruising maturity-indicating deformation. Mehlschau et al. (1981) developed a "deformeter" for nondestructive maturity detection for pears based on the measurement of deformation resulting from pressing two steel balls against the opposite sides of the fruit with a fixed force. Mizrach et al. (1992) used a 3-mm diameter pin as a mechanical thumb to sense firmness of oranges and tomatoes. Takao (1994) developed a force-deformation type firmness tester that can measure firmness of fruit nondestructively. The tester was named HIT counter, because it was intended for assessing hardness, immaturity, and texture. Bellon et al. (1994) built a micro-deformater that was able to classify peaches into three texture classes with a 92% accuracy. Armstrong et al. (1995) developed an automatic instrument to nondestructively determine the firmness of small fruits, such as blue berries or cherries. The instrument utilizes the force-deflection measurement of a whole fruit between two parallel plates. It incorporates automatic data collection and analysis and can measure the firmness of a batch of 25 fruits within one minute.

Impact

The force response of an elastic sphere impacting a rigid surface is governed by the impacting velocity, mass, radius of curvature, elastic modulus, and Poisson's ratio of the sphere. Researchers have found that the impact of a fruit on a rigid surface can be closely modeled by the impact of an elastic sphere and that the firmness of a fruit has a direct effect on the impact force response. Nahir et al. (1986) reported that when tomatoes are dropped from a 70 mm height onto a rigid surface, the impact force response is highly correlated with fruit weight and fruit firmness. They subsequently developed an experimental tomato grading machine which, by measuring and analyzing the impact force response of the fruit, can separate tomatoes on the basis of weight and color. Delwiche et al. (1987) analyzed impact forces of peaches striking a rigid surface and found that certain impact force characteristics were highly correlated with the fruit's elastic modulus and penetrometer measurements of flesh firmness. A single lane firmness sorting system was developed which used the index F/t^2 (where F and t are the peak impact force and the time required to reach peak force, respectively) to sort peaches and pears into hard, firm, and soft categories (Delwiche et al., 1989). Other sensors using similar techniques of dropping the fruit on a sensor were developed by Younce and Davis (1995) and McGlone and Schaare (1996). A problem inherent to the technique of dropping the fruit on a force sensor is that the impact force is also a function of the mass and radius of curvature of the fruit. Therefore, a large variation in these two parameters will affect the accuracy in firmness measurement.

A different approach is to impact the fruit with a small spherical impactor of known mass and radius of curvature and measuring the acceleration of the impactor. The advantage of this method is that the impact-force response is independent of the fruit mass and is less sensitive to the variation of the radius of curvature of the fruit. This technique was first described by Chen et al. (1985) and was used by researchers in Spain for sensing fruit firmness (Jarén et al., 1992; Correa et al., 1992). Ruiz-Altisent et al. (1993) developed a system which used the impact parameters to classify fruits (apples, pears, and avocados) into different firmness groups. Results of a study by Chen et al. (1996) indicated that using a low-mass impactor can result in the following additional desirable features: It increases the strength of the measured acceleration signal, increases both the magnitude of the calculated firmness index and the rate of change of firmness index with respect to fruit firmness (the firmness index is highly sensitive to the change in fruit firmness), minimizes the error due to movement of the fruit during the impact, minimizes fruit damage caused by the impact, and facilitates high speed sensing. Based on these findings, a low-mass high-speed impact sensor was designed and tested (Chen and Ruiz-Altisent, 1996) with good results on kiwifruits and peaches. Lush, 1996, displayed a hand-held fruit-firmness tester, called Kiwifirm, at a postharvest conference in New Zealand. The design of the tester was also based on the low-mass impact technique. To measure the firmness of a fruit, the operator presses the tip of the probe against the fruit and pushes a button to activate a small impactor to impact the fruit and then read the firmness reading on a digital display.

Sonic vibration

The vibration characteristics of fruits and vegetables are governed by their elastic modulus (firmness), mass, and geometry. Therefore, it is possible to evaluate firmness of fruits and vegetables on the basis of their vibration

characteristics.

The sonic vibration characteristics of fruits were studied by several researchers during the late 1960's and early 1970's. An extensive study of vibration characteristics of apples was conducted by Abbott et al. (1968). They found that apples subjected to vibrational excitation display a series of resonant frequencies and that the second resonant frequency is associated with flexural vibrations and is strongly influenced by fruit size and firmness. They showed that fruit firmness is highly correlated with a stiffness coefficient, f^2m , where f and m are the second resonant frequency and mass of the fruit, respectively. This stiffness coefficient was later corrected by Cooke (1972) who showed that $f^2m^{2/3}$, rather than f^2m , should be the mass-independent indicator of fruit firmness. Further studies were made by Finney (1970, 1971, and 1972), who developed nondestructive techniques for evaluating firmness of intact apples and peaches. Finney and Abbott (1978) presented a comprehensive review of techniques for measuring mechanical resonance, vibration transmissibility, pulse propagation velocity, and the resilience characteristics of solid food commodities.

In early 1980's Yamamoto et al. (1980 and 1981) developed a nondestructive technique for measuring textural quality of apples and watermelons based on the acoustic response of the fruit. They obtained the resonant frequencies of the intact fruit by first recording the sound that was produced by hitting the fruit with a wooden ball pendulum, and then performing Fourier transformation on the sound signal. They found that the resonant frequencies of both apples and watermelons decreased with storage time. They also showed that the resonant frequencies and firmness indices, expressed as functions of the resonant frequency, mass, and density of the fruit, are significantly correlated with fruit firmness and sensory measurements.

The availability of high-speed data acquisition and processing technology in recent years has renewed researchers' interests in the development of sonic vibration and acoustic response techniques. Several teams are currently conducting research in this area. They include researchers in the U.S. in Michigan (Armstrong et al., 1990; Armstrong and Brown, 1993), Maryland (Abbott et al., 1992; Abbott and Massie, 1993), and California (Chen, P. et al., 1992; Huarng et al., 1992); in Belgium (Chen, H. et al., 1992; Chen and De Baerdemaeker, 1992); in Israel (Kimmel et al., 1992; Shmulevich et al., 1996); and in Japan (Sugiyama et al., 1994).

In general, the researchers detected a series of resonant frequencies. However, in the cases where the fruit was excited by a vibrator and the vibration was detected by an accelerometer, the lower resonant frequencies may not be those of the free vibration of the fruit, but may be resonant frequencies that were caused by the interaction between the fruit mass (or the accelerometer mass) and the force developed by local deformation of the fruit.

Theoretically, for the free vibration of an elastic sphere, the elastic modulus of the sphere is related to other physical properties as follows: $E \propto (1+\mu) f^2 m^{2/3} \rho^{1/3}$ where E is elastic modulus; μ is Poisson's ratio; f is resonant frequency of free vibration; m is mass, and ρ is density. Since μ and ρ are relatively constant, researchers have found that the value of $f^2 m^{2/3}$ is a good criterion for predicting the firmness of the fruit. However, one should not be confused between firmness as measured by the ratio of stress/strain (or force/deformation of similar specimens) and flesh-firmness as measured by the Magness-Taylor method, which is a measure

of flesh strength. Another caution is that, since each fruit has more than one resonant frequency, it is important that the same order of resonant frequency be used when comparing firmness of different fruits.

Using the acoustic measurement technique, Armstrong and Brown (1993) developed a prototype packing-line apple firmness tester in order to examine practical considerations for implementing the design into a commercial operation. They developed computer software to determine the first resonant frequency from the acoustic signal. Their work shows that in firmness detection where the first resonant frequency is measured, it is desirable to suppress the higher-order resonant frequencies. Chen, P. et al. (1992) found that higher-order resonance could be suppressed by lengthening the impulse time (contact time between the striker and the fruit). In addition, the result of a study on vibration mode shapes of apples showed that, by knowing the mode shapes at different resonant frequencies, one can strategically place the detector to either accentuate or suppress the signal associated with a given resonant frequency (Huang et al., 1992).

Ultrasonic methods

Ultrasonic techniques have been used quite successfully for evaluating subcutaneous fat, total fat, lean, and other internal properties of live animals (Wallace et al., 1977; Alliston, 1982; and Davis et al., 1964). However, researchers have not been so successful in using ultrasonic measurements to evaluate internal quality of fruits and vegetables. Sarkar and Wolfe (1983) conducted an investigation to assess the potential of ultrasonic techniques for quality evaluation of fresh and processed foods. They found that ultrasonic transmission could be used to evaluate the stability of reconstituted orange juice, reflectance measurements could be used to characterize orange skin texture, and a back-scatter technique could be used to detect cracks in tomatoes. However, they also found that the attenuation coefficient measurements of potato, cantaloupe, and apple tissues showed extremely high values within the frequency range of 0.5 to 1.0 MHz. Similar results were found by Upchurch et al. (1987), who tried unsuccessfully to use 1 MHz ultrasound to distinguish between damaged and undamaged apple tissue. They concluded that, because of the porous nature of fruit tissues, high-frequency ultrasound cannot penetrate deeply into the fruit. For this reason it was difficult to use high-frequency ultrasound to evaluate internal quality of fruits and vegetables. A similar problem was found by Gunasekaran and Paulsen (1986), who reported that ultrasonic methods are not suitable for detecting stress cracks in corn kernels because intercellular airspaces in the kernels block the ultrasonic wave transmission. However, Hoki and Tomita (1975) reported that they successfully propagated lower frequency ultrasonic waves of 200 kHz through soybeans. They found good correlation between propagation velocity and moisture content in the beans. Mizrach et al. (1989) also reported some success in using low frequency (50 kHz) ultrasonic excitation to determine some basic acoustic properties (wave propagation velocity, attenuation coefficient, and reflection loss) of certain fruits and vegetables. They later reported encouraging findings on potential use of ultrasonic techniques for internal quality evaluation of whole avocado fruit and other fresh products (Galili et al., 1993; Mizrach et al., 1994). Haugh (1994) used a dry-coupling broad-band transducer with a frequency of 250 kHz to detect hollow heart in potatoes and found that the wave-form of transmitted ultrasonic signals through a hollow heart potato differed from that of a normal potato, and that the

defective potatoes could be separated on the basis of power spectral moment of the transmitted ultrasonic signals.

Electrical properties

The study of electrical properties of agricultural products has interested many researchers in the past two decades. Numerous studies have been made to determine electrical and dielectric properties of a large variety of agricultural materials, ranging from grains and seeds (Nelson, 1965 and 1987, and Nelson and Lawrence, 1994) to fruits and vegetables (Nelson, 1983; Nelson et al., 1994; Nelson et al., 1995; and Zachariah, 1976). A comprehensive review of the electrical properties of agricultural products was published by Nelson (1973). The electrical properties of many agricultural products, especially hygroscopic materials, are highly dependent on moisture content. This relationship between moisture content and electrical properties was used as a basis for developing commercial instruments for measuring moisture content in grains and seeds. Two commonly used electrical moisture meters for grains and seeds are the conductance-type meters, which measure the conductivity of the product, and the capacitance-type meters, which measure the dielectric constant. Zeleny (1954) described the general principles and discussed the advantages and disadvantages of these two types of moisture meters. Conductance-type moisture meters are relatively easy to operate and to keep in proper adjustment. However, their accuracy can be easily affected by uneven moisture distribution within or among the kernels of the grain and is highly dependent upon the surface moisture of the kernels. Capacitance-type moisture meters are not so sensitive to uneven moisture distribution, but the accuracy and repeatability of results are sensitive to variations in the packing of seeds within the test cell. Matthews (1963) discussed various factors that influence the design of capacitance-type moisture meters and described the design of a prototype moisture meter with improved features. Nelson and Lawrence developed a rapid and nondestructive technique, based on capacitance measurements at 1 and 5 MHz, for estimating moisture content in individual soybeans (1994), dates (1994a), and pecans (1995). They reported that this technique had potential for application in the automatic sorting of dates.

The sensitivity of electrical measurements to moisture content tends to mask changes in electrical properties associated with other variables. Zachariah (1976) reported that a number of researchers have investigated the electrical properties of fruits and vegetables, and, although the results indicated some relationships between electrical properties and certain quality factors of the products, the results were not conclusive enough to permit development of a practical method for quality sorting of fruits and vegetables.

Optical properties

One of the most practical and successful techniques for nondestructive quality evaluation and sorting of agricultural products is the electro-optical technique, based on the optical properties of the product.

When a light beam falls on an agricultural product, such as a fruit, only about 4% of the incident radiation is reflected off the surface as regular reflectance. The remaining radiation transmits through the surface, encounters small interfaces in the cellular structure, and scatters in all directions. A large portion of the radiation will be scattered back to the surface and leave the fruit in the vicinity of the point of

incidence. Birth (1976) suggested the term "body reflectance" for this type of reflection. The remaining scattered light diffuses deeper into the fruit and may eventually reach the fruit surface some distance away from the point of incidence. As the light travels through the fruit, a certain amount is absorbed by various constituents of the fruit. The absorption varies with the constituents, and with the wavelength and path length of the light. The absorbed energy is transformed into other forms of energy. With some materials part of the absorbed radiation may be transformed into other forms of radiation, such as fluorescence and delayed-light emission. Thus, the radiation that leaves the surface of the fruit may consist of one or more of the following components: regular reflectance, body reflectance, transmittance, and emissions (fluorescence, phosphorescence, and delayed-light emission). The characteristics of the radiation that leaves the surface of the product depend on the properties of the product and the incident radiation. Thus, determining such optical characteristics of an agricultural product can provide information related to quality factors of the product.

In the past three decades, researchers have studied the optical properties of various agricultural products and have established correlations between optical characteristics and other quality-related properties of the products. Transmittance and absorption characteristics have been used to evaluate the internal quality of food products. Examples of applications include detection of blood spots in eggs (Norris and Rowan, 1962), water core in apples (Birth and Olsen, 1964), evaluation of fruit maturity (Birth et al., 1983), internal color of tomatoes, maturity of tomatoes (Worthington et al., 1976 and Nattuvetty and Chen, 1980), dry matter in onions (Birth et al., 1985), and many others.

Near-infrared analysis

Norris and his co-workers started to use near-infrared (NIR) radiation to detect the difference in moisture content in grain in the 1960's (Norris and Hart, 1965, and Massie and Norris, 1965). They subsequently studied NIR reflectance and transmittance characteristics of many agricultural products and have found that radiation in the near-infrared region of the spectrum can provide information related to many quality factors of agricultural products. A very important contribution made by Norris and his co-workers was the development of data treatment techniques which make it possible to extract information from spectrophotometric data (curves). They found that diffuse reflectance, R , and diffuse transmittance, T , do not vary linearly with the concentration of an absorbing component in the material. Therefore, if a linear correlation between NIR measurements and the concentration of an absorber is desired, certain mathematical treatments of the reflectance or transmittance data are required.

Norris (1983) summarized: "Diffuse reflectance and transmittance spectra of agricultural products contain information about the chemical composition of the product because each of the components has specific absorption properties. The diffuse spectrum of a sample contains a summation of all of the overlapping absorption bands for each of the components within the sample, plus the contribution from all the scattering interfaces. Chemical composition can be predicted from high-precision, low-noise, diffuse reflectance and transmittance spectra by a number of data treatments. Conversion of data to $\log(1/R)$ or $\log(1/T)$ gives adequate linearity between concentration of constituent and the measured optical parameter. Much of the overlapping of absorption bands can be resolved by

computing the derivative from the spectral curves, and the use of a derivative at one wavelength divided by the derivative at another wavelength can cancel out path-length or light-scattering effects. Combining the derivative treatment with a single-term, linear-regression program to select the wavelengths provides for optimum calibration coefficients to predict the chemical composition." He gave several examples using derivative data treatments to predict the fat, moisture, and protein contents of meat from transmittance data; the oil and moisture content of individual intact sunflower and soybean seeds from transmittance data; and the composition of ground samples of wheat from reflectance data.

Most of the analyses of NIR spectra were made in the wavelength domain. McClure and co-workers (McClure et al., 1984, and Giesbrecht et al., 1981) have shown that Fourier analysis of NIR spectra can be used with several advantages. They found that an NIR spectrum can be transformed into a Fourier series, and the analysis can be made solely on the Fourier coefficients (Fourier domain). They have shown that only the first 50 Fourier coefficients are needed to represent essentially all of the information in many NIR spectra (each of which often contains more than 1000 data points), and only the first 11 coefficients are needed to estimate the contents of certain chemical constituents in the materials.

The research in NIR techniques has led to the development of various commercial NIR analyzers for multiple constituent analysis of grains, oil seeds, meats, dairy products, feed, forages, etc. A very comprehensive book on basic fundamentals of near-infrared technology and NIR applications in the agricultural and food industries was compiled by Williams and Norris (1987).

A number of researchers have conducted research to determine internal compositions of different types of fruits and vegetables. Dull and co-worker used NIR to determine the soluble solids in cantaloupe and honeydew melons (Dull and Birth, 1989; Dull et al., 1992). Kawano et al. (1992) used the NIR technique with fiber optics in interactance mode to analyze sugar content of intact peaches and found good correlation ($r = 0.97$) between NIR measurements and Brix value. Similarly, Slaughter (1995) successfully used the absorption characteristics of near infrared light in peaches and nectarines to predict their soluble solids content ($r = 0.92$). Bellon and Sevila (1993) developed an NIR system, which combined a CCD spectrophotometric camera and bifurcated fiber optics, for determining soluble solids in apples.

X-rays and gamma rays

Short wave radiations such as X-rays and gamma rays can penetrate through most agricultural products. The level of transmission of these rays depends mainly on the mass density and mass absorption coefficient of the material. Thus, X-rays and gamma rays are suitable for nondestructive evaluation of quality factors that are associated with mass density variation. Both X-rays and gamma rays have been used for evaluating maturity of head lettuce, which becomes denser as it matures. Lenker and Adrian (1971) developed a lettuce harvester that uses X-rays for selecting mature lettuce heads. Garrett and Talley (1970) also developed a lettuce maturity evaluating unit for use with a mechanical harvester, but the maturity selection of lettuce heads was based on gamma ray transmission. Researchers have found that X-ray techniques can be used to detect bruises in apples (Diener et al., 1970), hollow heart in potatoes (Nylund and Lutz, 1950; Finney and Norris, 1973), split pit in peaches (Bowers et al., 1988), and granulation in oranges

(Johnson, 1985). Johnson described an electromechanical grader, developed by Sunkist Growers Inc., which used a low-level X-ray scanner to detect frost injury, granulation, and presence of Alternaria in oranges, based on the detection of variations in density within the fruit. X-rays have been used also to sort stones and clods from mechanically harvested potatoes. Palmer et al. (1973) developed an X-ray separator and demonstrated the feasibility of using such a separator on a commercial potato harvester to separate stones and dirt clods from harvested potatoes. Morita et al. (1996) investigated the use of soft X-ray for detection of non-metallic foreign materials in food.

A number of high-speed X-ray sensors capable of detecting hollow heart in potatoes, pits in cherries or olives, and foreign objects have been developed recently for commercial applications. Tollner et al. (1994) gave a comprehensive overview of ongoing research and commercial development of X-ray sensors for nondestructive detection of interior voids and foreign inclusions in fruits and vegetables.

Nuclear magnetic resonance

Nuclear magnetic resonance (NMR) is a technique that detects the concentration of hydrogen nuclei (protons) and is sensitive to variations in the concentration and the mobility of water and oil in the material. Therefore, the NMR method can be used for evaluation of the moisture and oil content of grains and seeds (Brusewitz and Stone, 1987; Miller et al., 1980; Rollwitz, 1985; Tollner and Rollwitz, 1988; and Simpson, 1968). Brusewitz and Stone found that pulsed NMR techniques are more sensitive to moisture in wheat than are currently used dielectric techniques. The FID (free induction decay) ratio was linearly correlated with wheat moisture over the 8% to 15% moisture content range with a 0.98 coefficient of determination. Although NMR imaging (MRI) has been used commercially in the medical field to detect tumors and other abnormalities in humans, its potential for detecting defects and other quality factors in fruits and vegetables has not been fully explored. Hinshaw et al. (1979) have shown that MRI can produce high-resolution images of biological objects. Wang et al. (1988) used MRI methods to obtain images of watercore and its distribution in Red Delicious apples. Chen et al. (1989) used MRI to evaluate various quality factors of fruits and vegetables. They found that MRI can provide high-resolution images of internal structures of intact fruits and vegetables and can be used for nondestructive evaluation of various internal quality factors, such as bruises, dry regions, worm damage, internal breakdown, stage of maturity, and presence of voids, seeds, and pits. They also found that variation of experimental parameters, such as echo delay, resolution, and thickness of the scanning slice, can have profound effects on image enhancement of specific features of the specimen. Rollwitz et al. (1983) suggest different types of portable NMR sensors for agricultural applications. There has been an increased interest in developing NMR sensors for internal quality evaluation of fruits and vegetables. The following is a summary of recent studies in this area.

Fruits and vegetables undergo various changes during maturation. As the fruit becomes more mature, the amounts of water, oil, and/or sugar gradually change. The mobility of hydrogen nuclei of water, oil, and sugar may also change. In addition, the concentration and mobility of water, oil, and sugar in fruits and vegetables are often associated with many other quality factors, such as mechanical damage, tissue breakdown, over-ripe condition, decay, worm damage, and frost

damage. Since NMR can detect variations in the concentration and mobility of water, oil, and sugar, NMR has potential for detecting various quality factors in fruits and vegetables.

On the basis of the above hypothesis, researchers have developed various techniques for evaluating a number of internal quality factors of selected fruits and vegetables.

Results of a U.S.-Israel cooperative research study conducted by researchers at University of California, Davis, and at A.R.O., the Volcani Center, Bet Dagan, show that it is possible to use high-speed NMR techniques to evaluate maturity of avocados (Chen et al., 1993), sugar content of prunes (Zion et al., 1994), presence of pits in cherries (Zion et al., 1994a), and tissue breakdown in melons. The oil content of avocados and sugar content of prunes can be determined from a single-pulse NMR spectrum using a surface coil sensor. The FID (free induction decay) spectrum of an intact avocado acquired with a 2-cm diameter surface coil clearly shows the water and oil resonant peaks. The peak-ratio of the oil/water resonance intensities correlates very well ($r^2 = 0.95$) with the dry weight (maturity index) of the fruit. Similarly, the FID spectrum of an intact prune has resonant peaks of water and sugar, and the peak-ratio of the sugar/water resonance intensities has good correlation ($r^2 = 0.82$) with the soluble solids of the prunes.

The technique of using a surface coil to acquire single-pulse FID spectra not only facilitates rapid testing of whole fruits, but also reduces the effects of other factors such as the size of the fruit and the presence of the seed. Chen et al. (1995) demonstrated the feasibility of using this technique for on-line sensing of fruit quality. Using a specially designed conveyor belt, they successfully acquired FID spectra of avocados while they were moving at speeds up to 250 mm/s. The oil/water resonance peak ratio, obtained from the spectrum, correlates very well ($r^2 = 0.98$) with the dry weight of the fruit.

For NMR imaging of fruits, variation of TR (interpulse delay) and TE (echo delay) can result in a profound effect on image enhancement of specific features of the specimen, such as high-contrast outlines of seeds, bruise areas, over-ripe regions, and stage of maturity. The T_1 -weighted NMR image of the cross-section of four avocado sections, acquired with a TR (interpulse delay) of 50 ms and a TE (echo delay) of 15 ms, shows a clear relationship between the intensity and oil content of the fruit. On the other hand, when TR and TE are increased to 1000 ms and 40 ms, respectively, the T_2 -weighted image shows a strong relationship between intensity and water content. With other fruits, T_2 -weighted images clearly show the presence of seeds in pomelos, internal darkening in mangos, bruised regions in apples, and soft-tissue regions in melons.

Research is needed to optimize techniques for high-speed imaging of thick scanning slices and high-speed image processing to extract desired feature information from the images. Several rapid MRI scanning techniques are available in medical imaging. The transfer of this technology requires research on the relationship between measured NMR parameters and fruit quality factors. Given the relationship between NMR parameters and fruit quality factors, existing pulse sequences can be modified to detect specific defects, and image processing algorithms can be designed for on-line sensing systems.

The use of NMR imaging has enabled researchers to examine various quality factors of fruits in greater detail. Such techniques are not only very useful for investigating relationships between NMR parameters and quality factors, but are

also helpful for developing high-speed NMR techniques. For example, the study of two-dimensional (2-D) images led to the discovery that certain quality factors, such as tissue breakdown in melons and the presence of pits in cherries, can be determined from the one-dimensional (1-D) profile of the 2-D image. The use of 1-D image profiles is conceptually simple, since it requires a very short data acquisition time (about 10 ms) and simple data analysis (minimum software). For example, an algorithm written for detection of pits in cherries based on such 1-D image profile data requires only 13 ms of processing time.

Researchers at Purdue University have used both high-resolution and low-resolution NMR spectrometers to determine internal quality of fruits. The results of their early work (Cho, 1989; Cho et al., 1991) using high-resolution (200 MHz) spectrometers indicated that the sugar content of small specimens of fruits (apple, cantaloupe, and banana) could be determined from the amplitude of the sugar peak of the NMR spectrum. They designed and built a low-resolution (5.35 MHz) proton magnetic resonance sensor capable of accommodating samples with diameters up to 30 mm (Cho et al., 1990). Various tests were conducted using this device to measure sugar content of small fruits (with diameter less than 30 mm) and specimens of larger fruits. Ray et al. (1993) used this device, after implementation of design improvements, to measure sugar content of Bing cherries and reported good correlation between the spin echo ratio (SER) and total soluble solids of the fruit ($r^2 = 0.91$).

Continuing research in NMR for quality evaluation of agricultural products should lead to the development of viable NMR sensors for agricultural applications.

Machine vision

Interest is increasing in the development of machine vision systems to replace human visual inspection. One of the major requirements in developing machine vision systems for sorting fruits and vegetables is the ability to analyze an image accurately and quickly. Although various methods (use of a solid state TV camera, line-scan camera, X-ray scanning, ultrasonic scanning, NMR imaging, etc.) can be used to obtain images of fruits and vegetables which show either external or internal features of certain quality factors, such as color, shape, disease, injury, and defects, it has been difficult in the past to process such images to extract the desired feature information at an acceptable speed. Recently, the declining cost and increasing speeds and capabilities of specialized computer hardware for image processing have made computer vision systems more attractive for use in automatic inspection and sorting of agricultural and food products. Many researchers have devoted considerable effort towards the development of machine vision systems for different aspects of quality evaluation and sorting of agricultural products. As a result, new algorithms and hardware architectures have been developed for high-speed extraction of features that are related to specific quality factors of fruits and vegetables. Thomason (1986) and Godinez (1987) described a commercially available machine-vision system that can differentiate between irregular and erratic image features and predictable, normal image features. Some of the applications related to food products include detection of blemishes, grading of dates based on the amount of wrinkle, and removal of trash from vegetables. Marchant et al. (1988) developed a computer vision system for sorting potatoes into size and shape categories. The system, which uses a multiprocessor architecture and a hardware data reduction unit, can sort at a speed of up to 40 potatoes per second. Delwiche

and his co-workers have developed a line-scan imaging system for detecting defects on dried prunes (Delwiche et al., 1988) and a color vision system for color grading of fresh market peaches (Miller and Delwiche, 1988). Bowers et al. (1988) combined X-ray imaging and computer-vision image analysis to detect split pits in intact peaches. A number of sorting systems that use machine-vision techniques for evaluating external quality factors are commercially available. It is anticipated that high-speed image analysis techniques will play a key role in expanding the capability of X-ray and NMR techniques for internal quality evaluation of agricultural products.

The machine-vision technique has been further refined to include multispectral imaging, where each point (pixel) of the image contains spectral information at several wavelengths. Alchanatis and Searcy (1995) described three techniques for obtaining multispectral images. Such imaging techniques enable researchers to extract additional useful information for quality evaluation. Park and Chen (1996) used a multispectral imaging system to develop techniques for discriminating abnormal from normal poultry carcasses. McClure (1991) predicted that just as NIR spectroscopy being the rapid nondestructive analytical technique of the 20th century, NIR imaging spectroscopy will be the analytical tool of the 21th century.

Aroma

Aroma is an important quality attribute for many agricultural products. At present, the human nose is still the best detector for detecting the smell or aroma of food and agricultural products. Numerous researchers have tried for many years to develop electronic sniffers or electronic noses with limited success. A brief history of the development of electronic noses was reported by Gardner and Bartlett (1994). Most of the electronic noses use an array of sensors, each of which is sensitive to the concentration of one or more components of the gas. The outputs of the sensors are then analyzed using a pattern-recognition procedure, e.g., principal-component analysis, discriminant function analysis, or neural network. Some of the commonly used sensors are sintered metal-oxides, conducting polymers, and quartz-resonators. Various types of sensor arrays and data processing techniques can be found in a book entitled "Sensors and sensory systems for an electronic nose" edited by Garner and Bartlett (1992). Gardner and Bartlett (1994) reported that electronic noses have been used to classify the smell (or flavor) of various beverages or foodstuffs, such as coffee beans, whiskeys, beers, fish, and meat.

There has been an increased interest in the development of aromatic volatiles sensors for determining fruit quality. Benady et al. (1995) developed a sniffer for determining fruit ripeness nondestructively. The sniffer used a semiconductor gas sensor located within a small cup to collect and sense gases emitted by the ripening fruit. They reported that the sensor performed successfully on three muskmelon cultivars under field and laboratory conditions over two growing seasons.

A commercial aroma sensor for determining fruit maturity was seen on the market in Japan in 1990. The company brochure indicated that the portable tester (about 700 g), called "Sakata Fruits Tester", can detect decayed, over-ripe, and unripe fruits with 99% accuracy.

Other sources of information

The above are highlights of only a few selected applications of nondestructive techniques for quality evaluation and sorting of agricultural products. Numerous other applications are not covered in this article. Readers who are interested in other applications are referred to works by Bellon (1994), Chen (1978), Chen and Sun (1991), Dull (1986), Finney (1973, 1978), Finney and Abbott (1978), Gaffney (1976), Gunasekaran et al. (1985), Mohsenin (1984), Nelson (1973), Williams and Norris (1987), Zaltzman et al (1987), and reports by Kawano and Iwamoto (1994) and various other authors in the Proceedings of the International Workshop on Nondestructive Technologies for Quality Evaluation of Fruits and Vegetables, ASAE Publication 05-94.

CONCLUSIONS

Several methods for nondestructive quality evaluation of agricultural products have been reviewed. Some methods are at a more advanced stage of development than others. Because each method is based on measurement of a given physical property, the effectiveness of the method depends on the correlation between the measured physical property and the quality factor of interest. Although researchers have developed relationships between physical properties and quality factors for a number of agricultural products, the inherent natural variability in structure, composition, and other variables within the same batch of agricultural products often makes it difficult to find good correlations between physical properties and quality factors. However, through use of computers and data processing techniques, researchers have been able to minimize the effects of extraneous factors and improve the correlations between some measured properties and quality factors of interest.

The most successful and most widely utilized methods are the optical methods, which incorporate high-speed optical sensing and data processing techniques to facilitate high-speed quality evaluation and sorting of many agricultural products with a high degree of accuracy.

The sophistication of nondestructive methods has evolved rapidly with modern technologies. The availability of high-speed data acquisition and processing technology has renewed researchers' interests in the development of impact and sonic response techniques. Some of these techniques will soon be available for commercial applications. The rapid development of small gas sensor arrays and high-speed pattern recognition techniques will no doubt speed up the development of high-speed electronic aroma detectors. The use of various modern image acquisition techniques, such as solid state TV camera, line-scan camera, X-ray scanning, ultrasonic scanning, and NMR imaging, has enabled researchers to examine various quality factors of agricultural products in greater detail. The availability of many new sensors and the combination of new imaging acquisition and high-speed image processing techniques have provided new tools with which researchers will surely develop many new and improved techniques for nondestructive quality evaluation of agricultural products.

REFERENCES

- Abbott, J. A., H. A. Affeldt, and L. A. Liljedahl. 1992. Firmness measurement of stored 'Delicious' apples by sensory methods, Magness-Taylor, and sonic transmission. *J Amer. Soc. Hort. Sci.* 117:590-595.
- Abbott, J. A., G. S. Bachman, N. F. Childers, J. V. Fitzgerald, and F. J. Matuski. 1968. Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetables. *Food Technology* 22(5):101-112.
- Abbott, J. A. and D. R. Massie. 1993. Nondestructive firmness measurement of apples. ASAE Paper No. 93-6025. St. Joseph, MI.
- Alchanatis, V. and S.W. Searcy. 1995. A selectable wavelength imaging sensor for multispectral inspection of agricultural products. ASAE Paper No. 95-3210. St. Joseph, MI.
- Alliston, J. C. 1982. The use of a Danscanner ultrasonic machine to predict the body composition of Hereford bulls. *Anim. Prod.* 35:361-365.
- Armstrong, P. R. and G. K. Brown. 1993. Non-destructive firmness measurement of apples. ASAE Paper No. 93-6023. St. Joseph, MI.
- Armstrong, P. R., G. K. Brown, and E. J. Timm. 1995. Non-destructive firmness measurement of soft fruit for comparative studies and quality control. ASAS Paper No. 95-6172. St. Joseph, MI.
- Armstrong, P., H. R. Zapp, and G. K. Brown. 1990. Impulsive excitation of acoustic vibrations in apples for firmness determination. *Transactions of the ASAE* 33(4):1353-1359.
- Bellon, V. 1994. Tools for fruit and vegetables quality control: a review of current trends and perspectives. *Proc. IV Int. Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering*. March 22-26, 1993. Valencia-Zaragoza, Spain. vol. 2. pp. 1-12.
- Bellon, V., J.L. Vigneau, and M. Crochon. 1994. Nondestructive sensing of peach firmness. *Proc. IV Int. Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering*. March 22-26, 1993. Valencia-Zaragoza, Spain. vol. 2. pp. 291-297.
- Bellon, B. and F. Sevilla. 1993. Optimization of a non-destructive system for on-line infra-red measurement of fruit internal quality. *Proc. 4th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering*. March 22-26, Valencia - Zaragoza, Spain. pp. 317-325.
- Benady, M., J.E. Simon, D.J. Charles, and G.E. Miles. 1995. Fruit ripeness determination by electronic sensing of aromatic volatiles. *Transactions of the ASAE* 38(1):251-257.
- Birth, G. S. 1976. How light interacts with foods. In: *Quality Detection in Foods*, ASAE Publication 1-76, pp. 6-11, St. Joseph, Michigan.
- Birth, G. S., G. G. Dull, J. B. Magee, H. T. Chan, and C. B. Covaletto. 1983. An optical method for estimating papaya maturity. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 109(1):62-66.
- Birth, G. S., G. G. Dull, W. T. Renfroe, and S. J. Kays. 1985. Nondestructive spectro- photometric determination of dry matter in onions. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 110(2): 297-303.
- Birth, G. S. and K. L. Olsen. 1964. Nondestructive detection of watercore in Delicious apples. *Proc. Amer Soc. Hort Sci.* 85:74-84.
- Bowers, S. V. , R. B. Dodd, and Y. J. Han. 1988. Nondestructive testing to

- determine internal quality of fruit. ASAE Paper No. 88-6569.
- Brusewitz, G. H. and M. L. Stone. 1987. Wheat moisture by NMR. Transactions of the ASAE 30(3): 858-862.
- Chen, H. and J. De Baerdemaeker. 1992. Effect of the apple shape on the reliability of the non-destructive firmness sensing. AGENG 92, Paper No. 9211-115.
- Chen, H., J. De Baerdemaeker, and F. Vervaeke. 1992. Acoustic impulse response of apples for monitoring texture change after harvest. Proc. Int. Conf. Agric. Engineering. Beijing, China.
- Chen, P., M. J. McCarthy, and R. Kauten. 1989. NMR for internal quality evaluation of fruits and vegetables. Transactions of the ASAE 32(5):1747-1753.
- Chen, P., M. J. McCarthy, R. Kauten, Y. Sarig, and S. Han. 1993. Maturity evaluation of avocados by NMR methods. J. of Ag. Engng. Res. 55(3):177-187.
- Chen, P., M. J. McCarthy, S.-M. Kim, and B. Zion. 1995. Development of a high-speed NMR technique for sensing fruit quality. ASAE Paper No. 953613. Presented at ASAE 1995 Annual International Meeting, June 18-23, 1995, Chicago, Illinois.
- Chen, P., M. Ruiz-Altisent. 1996. A low-mass impact sensor for high-speed firmness sensing of fruits. Paper No. 96F-003. AgEng96. Int. Conference on Agricultural Engineering. Madrid, Spain. September 23-26.
- Chen, P., M. Ruiz-Altisent, and P. Barreiro. 1996. Effects of impacting mass on firmness sensing of fruits. Transactions of the ASAE 39(3):1019-1023.
- Chen, P. and Z. Sun. 1991. A review of non-destructive methods for quality evaluation and sorting of agricultural products. J. Agric. Engng Res. 49(2):85-98.
- Chen, P., Z. Sun, and L. Huarng. 1992. Factors affecting acoustic responses of apples. Transactions of the ASAE 35(6):1915-1920.
- Chen, P., S. Tang, and S. Chen. 1985. Instrument for testing the response of fruits to impact. American Society of Agricultural Engineers Paper Number 75-3537.
- Cho, S. I. 1989. Development of a nuclear magnetic resonance based sensor to detect ripeness of fruit. Ph.D. Thesis. Agricultural Engineering Department, Purdue University, Indiana.
- Cho, S. I., V. Bellon, T. M. Eads, R. L. Stroshine, and G. W. Krutz. 1991. Sugar content measurement in fruit tissue using water peak suppression in high resolution ^1H magnetic resonance. J. Food Sci. 56(4):1091-1094.
- Cho, S. I., G. W. Krutz, H. G. Gibson, and K. Haghighi. 1990. Magnet console design of an NMR-based sensor to detect ripeness of fruit. Transactions of the ASAE 33(4):1043-1050.
- Cooke, J. R. 1972. An interpretation of the resonant behavior of intact fruits and vegetables. Transactions of the ASAE 15(6):1075-1080.
- Correa, P., M. Ruiz-Altisent, and J. L. de la Plaza. 1992. Physical parameters in relation to physiological changes of avocado during ripening (20°C) and cold storage (6°C) in different conditions. AGENG 92, Paper No. 9211-16.
- Davis, J. K., R. A. Long, R. L. Saffle, E. P. Warren, and J. L. Carmon. 1964. Use of ultrasonics and visual appraisal to estimate total muscling in beef cattle. J. Animal Sci. 23:638-644.
- Delwiche, M. J., T. McDonald, and S. V. Bowers. 1987. Determination of peach

- firmness by analysis of impact forces. *Transactions of the ASAE* 30(1):249-254.
- Delwiche, M. J., S. Tang, and J. J. Mehlschau. 1989. An impact force response fruit firmness sorter. *Transactions of the ASAE* 32(1):321-326.
- Delwiche, M. J., S. Tang, and J. F. Thompson. 1988. Prune defect detection by line-scan imaging. *ASAE Paper No. 88-3024*.
- Diener, R. G., J. P. Mitchell, and M. L. Rhoten. 1970. Using an X-ray image scan to sort bruised apples. *Agricultural Engineering* 51:356-361.
- Dull, G. G. and G. S. Birth. 1989. Nondestructive evaluation of fruit quality: use of near infrared spectrophotometry to measure soluble solids in intact honeydew melons. *Hortscience* 24(5):754
- Dull, G. G., R. G. Leffler, G. S. Birth, and D. A. Smittle. 1992. Instrument for nondestructive measurement of soluble solids in honeydew melons. *Transactions of the ASAE* 35(2):735-737.
- Finney, E. E. 1970. Mechanical resonance within Red Delicious apples and its relation to fruit texture. *Transactions of the ASAE* 13(2):177-180.
- Finney, E. E. 1971. Random vibration techniques for nondestructive evaluation of peach firmness. *J. agric. Engng Res.* 16(1):81-87.
- Finney, E. E. 1972. Vibration techniques for testing fruit firmness. *J. Texture Studies* 3:263-283.
- Finney, E. E. and J. A. Abbott. 1978. Methods for testing the dynamic mechanical response of solid foods. *J. Food Quality* 2:55-74.
- Finney, E. E. and K. H. Norris. 1973. X-ray images of hollow heart potatoes in water. *Amer. Potato J.* 50:1-8.
- Galili, N., G. Rosenhouse, and A. Mizrach. 1993. Ultrasonic technique for fruit and vegetable quality evaluation. *Proc. 4th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering*. March 22-26, Valencia - Zaragoza, Spain. pp. 281-289.
- Gardner, J. W. and P. N. Bartlett (Editors). 1992. *Sensors and Sensory systems for an electronic nose*. NATO ASI Series. Series E: Applied Sciences, vol. 212. Kluwer Academic Publishers. London.
- Gardner, J. W. and P. N. Bartlett. 1994. A brief history of electronic noses. *Sensors and Actuators B*, 18-19, pp. 211-220.
- Garrett, R. E. and W. K. Talley. 1970. Use of gamma ray transmission in selecting lettuce for harvest. *Transactions of the ASAE* 13(6):820-823.
- Giesbrecht, F. G., W. F. McClure, and A. Hamid. 1981. The use of trigonometric polynomials to approximate visible and near infrared spectra of agricultural products. *Appl. Spectrosc.* 35(2):210-214.
- Godinez, P. A. 1987. Inspection of surface flows and textures. *Sensors*: 27-32. June.
- Gould, W. A. 1975. Mass sorting of mechanically harvested tomatoes. *Research Circular 209*, Ohio Agriculture Research and Development Center, Wooster, Ohio.
- Gunasekaran, S. and M. R. Paulsen. 1986. Automatic, nondestructive detection of corn kernel defects. *Int. Advances in Nondestructive Testing* 12:95-115.
- Gutterman, R. P. 1976. Mass flow density sorter for fruits and vegetables. pp. 211-213. In: *Quality detection in foods*. ASAE Publication 1-76. Amer. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, Michigan.
- Haugh, C. G. 1994. Detecting hollow hearts in potatoes using non-invasive

- acoustic techniques. *Int. Agrophysics* 8(3):509-518.
- Hinshaw, W. S., P. A. Bottomley, and G. N. Holland. 1979. A demonstration of the resolution of NMR imaging in biological systems. *Experientia* 35:1268-1269.
- Hoki, M. and K. Tomita. 1975. Mechanical properties of soybeans by means of ultrasonic measurements. *Bulletin of Agriculture, Mie University*, No. 49. pp. 295-300.
- Huang, L., P. Chen, and S. K. Upadhyaya. 1992. Determination of acoustic vibration modes in apples. *Transactions of the ASAE* 36(5):1421-1429.
- Jarén, C., M. Ruiz-Altisent, R. Pérez de Rueda. 1992. Sensing physical stage of fruits by their response to non-destructive impacts. *AGENG 92*, Paper No. 9211-113.
- Johnson, M. 1985. Automation in citrus sorting and packing. *Proc. Agri-Mation 1 Conf. and Expo.* February 25-28, Palmer House Hotel, Chicago, Illinois. pp. 63-68.
- Kimmel, E., K. Peleg, and S. Hing. 1992. Vibration modes of spheroidal fruits. *Journal of Agricultural Engineering Research* 52:201-213.
- Kawano, S. and M. Iwamoto. 1994. Novel applications of nondestructive techniques for quality evaluation of fruits and vegetables in Japan. *Proc. Int. Workshop on Nondestructive Technologies for Quality Evaluation of Fruits and Vegetables*, Spokane, Washington, June 15-19, 1993. *ASAE Publication* 05-94. pp. 1-8.
- Kawano, S., H. Watanabe, and M. Iwamoto. 1992. Determination of sugar content in intact peaches by near infrared spectroscopy with fiber optics in intertactance mode. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 61(2):445-451.
- Lenker, D. H., and P. A. Adrian. 1971. Use of X-ray for selecting mature lettuce heads. *Transactions of the ASAE* 14(5):894-898.
- Lush, A. 1996. Personal communication. *Industrial Research Limited*, 24 Balfour Road, Parnell, P.O. Box 2225, Auckland, New Zealand.
- Marchant, J. A., C. M. Onyango, and M. J. Street. 1988. High speed sorting of potatoes using computer vision. *ASAE Paper No.* 88-3540.
- Massie, D. R. and K. H. Norris. 1965. Spectral reflectance and transmittance properties of grain in the visible and near infrared. *Transactions of the ASAE* 8(4):598-600.
- Matthews, J. 1963. The design of an electrical capacitance-type moisture meter for agricultural use. *Journal of Agricultural Engineering Research* 8(1):17-30.
- McClure, W.F. 1991. NIR imaging spectroscopy: a fascinating frontier. *NIR news* 2(2):8,10.
- McClure, W. F., A. Hamid, F. G. Giesbrecht, and W. W. Weeks. 1984. Fourier analysis enhances NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Appl. Spectrosc.* 38(3):322-329.
- McGlone, V.A. and P.N. Schaare. 1996. The SoftSort fruit firmness grader. Abstract book. *PH'96 Int. Postharvest Science Conference*, Taupo, New Zealand, August 4-9, 1996. p. 46.
- Miller, B. K. and M. J. Delwiche. 1988. A color vision system for peach grading. *ASAE Paper No.* 88-6025.
- Miller, B. S., M. S. Lee, J. W. Hughes, and Y. Pomeranz. 1980. Measuring high moisture content of cereal grains by pulsed nuclear magnetic resonance. *Cereal Chemistry* 57(2):126-129.

- Mizrach, A., N. Galili, and G. Rosenhouse. 1989. Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. *Transactions of the ASAE* 32(6):2053-2058.
- Mizrach, A., N. Galili, and G. Rosenhouse. 1994. Determining quality of fresh products by ultrasonic excitation. *Food Technology* 48(12):68-71.
- Mizrach, A., D. Nahir, and B. Ronen. 1992. Mechanical thumb sensor for fruit and vegetable sorting. *Transactions of the ASAE* 35(1):247-250.
- Morita, K., S. Tanaka, Y. Ogawa, and C. N. Thai. 1996. Detection of non-metallic foreign materials in food by soft X-ray system with CdTe sensor. ASAE Paper No. 966059. ASAE, 2950 Niles Rd. St. Joseph, MI 49085.
- Nahir, D., Z. Schmilovitch, and B. Ronen. 1986. Tomato grading by impact force response. ASAE Paper No. 86-3028.
- Nattuvetty, V. R. and P. Chen. 1980. Maturity sorting of green tomatoes based on light transmittance through regions of the fruit. *Transactions of the ASAE* 23(2):515-518.
- Nelson, S. O. 1965. Dielectric properties of grain and seed in the 1 to 50 mc range. *Transactions of the ASAE* 8(1):38-47.
- Nelson, S. O. 1973. Electrical properties of agricultural products--a critical review. *Transactions of the ASAE* 16(2):384-400.
- Nelson, S. O. 1983. Dielectric properties of some fresh fruits and vegetables at frequencies of 2.45 to 22 GHz. *Transactions of the ASAE* 26(2):613-616.
- Nelson, S. O. 1987. Frequency, moisture, and density dependence of the dielectric properties of small grains and soybeans. *Transactions of the ASAE* 30(5):1538-1541.
- Nelson, S. O., W. R. Forbus, and K. C. Lawrence. 1994. Microwave permittivities of fresh fruits and vegetables from 0.2 to 20 GHz. *Transactions of the ASAE* 37(1):183-189.
- Nelson, S. O., W. R. Forbus, and K. C. Lawrence. 1995. Assessment of microwave permittivity for sensing peach maturity. *Transactions of the ASAE* 38(2):579-585.
- Nelson, S. O. and K. C. Lawrence. 1994. RF impedance and DC conductance determination of moisture in individual soybeans. *Transactions of the ASAE* 37(1):179-182.
- Nelson, S. O. and K. C. Lawrence. 1994a. RF impedance sensing of moisture content in individual dates. *Transactions of the ASAE* 37(3):887-891.
- Nelson, S. O. and K. C. Lawrence. 1995. Nondestructive moisture determination in individual pecans by RF impedance measurements. *Transactions of the ASAE* 38(4):1147-1151.
- Norris K. H. 1983. Extracting information from spectrophotometric curves. Predicting chemical composition from visible and near-infrared spectra. 1982. In. *Proc. IUFOST Symp. on Food Research and Data Analysis*, Oslo, Norway, Applied Science Pub., Ltd., London, England, pp. 95-113.
- Norris, K. H. and J. R. Hart. 1965. Direct spectrophotometric determination of moisture content of grain and seeds. *Proc. 1963 Int. Symp. on Humidity and Moisture*, Vol. 4, Reinhold, New York, NY, pp. 19-25.
- Norris, K. H. and J. D. Rowan. 1962. Automatic detection of blood in eggs. *Agric. Engng* 43(3):154-159.
- Nylund, R. E. and J. M. Lutz. 1950. Separation of hollow heart potato tubers by means of size grading, specific gravity, and X-ray examination. *Amer. Potato J.*

27:214-222.

- Palmer, J., A. W. Kitchenman, J. B. Milner, A. B. Moore, and G. M. Owen. 1973. Development of a field separator of potatoes from stones and clods by means of X-ray. *J. agric. Engng Res.* 18:293-300.
- Park, B. and Y.R. Chen. 1996. Multispectral image co-occurrence matrix analysis for poultry carcasses inspection. *Transactions of the ASAE* 39(4):1485-1491.
- Perry, R. L. and R. M. Perkins. 1968. Separators for frost damaged oranges. *California Citrograph* 53(8):304-5, 307-8, 310, 312.
- Ray, J. A., R. L. Stroshine, G. W. Krutz, and W. K. Wai. 1993. Quality sorting of sweet cherries using magnetic resonance. ASAE Paper No. 93-6071. St. Joseph, MI.
- Rollwitz, W. L. 1985. Using radio frequency spectroscopy in agricultural applications. *Agricultural Engineering* 66(5):12-14.
- Rollwitz, W. L., J. D. King, G. A. Matzkanin, and R. F. Paetzhold. 1983. Magnetic resonance: a versatile sensor for agriculture applications. *Agricultural Electronics--1983 and Beyond*. ASAE Pub. 9-84. Vol. II, pp.766-772.
- Ruiz-Altisent, M., C. Jarén, and P. Correa. 1993. Fruit quality sensing: post-harvest ripeness. Paper No. 935-25, Proc. 4th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering. March 22-26, Valencia - Zaragoza, Spain. pp. 211-222.
- Sarkar, N. and R. R. Wolfe. 1983. Potential of ultrasonic measurements in food quality evaluation. *Transactions of the ASAE* 26(2):624-629.
- Shmulevich, I., N. Galili, and D. Rosenfeld. 1996. Detection of fruit firmness by frequency analysis. *Transactions of the ASAE* 39(3):1047-1055.
- Simpson, R. J. 1968. A survey of applications of low-resolution NMR. *SIRA Abstracts and Reviews* 23(3):75-79.
- Slaughter, D. C. 1995. Nondestructive determination of internal quality in peaches and nectarines. *Transactions of the ASAE* 38(2):617-623.
- Sugiyama, J., K. Otake, S. Hayashi, and S. Usui. 1994. Firmness measurement of muskmelons by acoustic impulse transmission. *Transactions of the ASAE* 37(4):1235-1241.
- Takao, H. and S. Ohmori. 1994. Development of device for nondestructive evaluation of fruit firmness. *JARQ (Japan Agricultural Research Quarterly)* 28 (1):36-43.
- Thomason, R. L. 1986. High speed machine vision inspection for surface flaws, textures and contours. Proc. Vision '86 Conf., Detroit, Michigan. June 3-5. pp. 5.51-5.61.
- Tollner, H.A. Affeldt, G.K. Brown, P. Chen, N. Galili, C.G. Haugh, A. Notea, Y. Sarig, T. Schatzki, I. Shmulevich, and B. Zion. 1994. Nondestructive Detection of Interior Voids, Foreign Inclusions and Pests. Proc. Int. Workshop on Nondestructive Technologies for Quality Evaluation of Fruits and Vegetables, Spokane, Washington, June 15-19, 1993. ASAE Publication 05-94. pp. 86-96.
- Tollner, E. W. and W. L. Rollwitz. 1988. Nuclear magnetic resonance for moisture analysis of meals and soils. *Transactions of the ASAE* 31(5):1608-1615.
- Upchurch, B. L., G. E. Miles, R. L. Stroshine, E. S. Furgason, and F. H. Emerson. 1987. Ultrasonic measurement for detecting apple bruises. *Transactions of the ASAE* 30(3):803-809.

- Wallace, M. A., J. R. Stouffer, and R. G. Westervelt. 1977. Relationships of ultrasonic and carcass measurements with retail yield in beef cattle. *Livestock Production Sci.* 4:153-164.
- Wang, S. Y., P. C. Wang, and M. Faust. 1988. Non-destructive detection of watercore in apples with nuclear magnetic resonance imaging. *Scientia Horticulturae* 35:227-234.
- Wardowski, W. F. and W. Grierson. 1972. Separation and grading of freeze damaged citrus fruits. Circular 372, Florida Cooperative Extension Service, IFAS, University of Florida, Gainesville.
- Williams, P. C. and K. H. Norris (Editors). 1987. Near-infrared Technology in the Agricultural and Food Industries. American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, Minnesota. 330 pp.
- Worthington, J. T., D. R. Massie, and K. H. Norris. 1976. Light transmission technique for predicting ripening time for intact green tomatoes. pp. 46-49. In: *Quality detection in foods*. ASAE Publication 1-76. Amer. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, Michigan.
- 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. Texture Studies* 11:117-136.
- Yamamoto, H., M. Iwamoto, and S. Haginuma. 1981. Nondestructive acoustic impulse response method for measuring internal quality of apples and watermelons. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 50(2):247-261.
- Younce, F.L., D.C. Davis. 1995. A dynamic sensor for cherry firmness. *Transactions of the ASAE* 38(5):1467-1476.
- Zachariah, G. 1976. Electrical properties of fruits and vegetables for quality evaluation. In: *Quality detection in foods*. ASAE Publication 1-76. Amer. Soc. Agric. Engng., St. Joseph, Michigan. pp. 98-101.
- Zaltzman, A., R. Feller, A. Mizrach, and Z. Schmilovitch. 1983. Separating potatoes from clods and stones in a fluidized bed medium. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 26(4):987-990, 995.
- Zaltzman, A. and Z. Schmilovitch. 1985. An evolution of the potato fluidized bed medium separator. *The American Society of Agricultural Engineers*. Paper No. 85-6016, St. Joseph, Michigan.
- Zaltzman, A., B. P. Verma, and Z. Schmilovitch. 1987. Potential of quality sorting of fruits and vegetables using fluidized bed medium. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 30(3):823-831.
- Zeleny, L. 1954. Methods for grain moisture measurement. *Agricultural Engineering* 35(4):252-256.
- Zion, B., P. Chen, and M. J. McCarthy. 1994. Non-destructive quality evaluation of fresh prunes by NMR spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. (in press)
- Zion, B., M. J. McCarthy, and P. Chen. 1994a. Real-time detection of pits in processed cherries by magnetic resonance projections. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie (Food Science and Technology)* 27(5):457-462.

농산물의 품질 평가 기술

픽티오 첸

교수, 생물 및 농공학과

미국 캘리포니아(데이비스) 대학교

적 요

농산물의 품질평가는 오랫동안 많은 연구자들의 관심 분야이었다. 그 결과 농산물의 품질평가를 위한 몇 가지 비파괴 기술이 개발되었다. 이러한 방법들은 농산물의 특정한 품질인자와 상관이 큰 다양한 물성을 검출하는 것을 바탕으로 한다. 이 논문은 밀도, 경도, 진동 특성, X선 및 감마선 투과, 광의 반사와 투과, 전기적 물성, 방향성 휘발 성분의 방출 및 핵자기 공명(NMR)에 기초한 다양한 품질평가 기술에 대하여 살펴본 것이다. 과학 기술의 발전에 따라 비파괴적 방법들도 매우 복잡하게 되었다. 솔리드 스테이트 TV 카메라, 라인 스캔 카메라, X-선 주사, 초음파 주사, NMR 영상 등의 영상획득 기술은 영상처리 기술과 결합되어 연구자들에게 농산물의 품질평가에 대한 보다 새롭고 진보된 기술을 개발할 수 있는 새로운 기회를 제공하고 있다.

주요용어: 품질, 품질 평가, 비파괴, 선별, 등급화

서 론

농산물의 품질은 생산자와 소비자 모두에게 매우 중요한 요소이다. 그러나 농산물에 있어서는 품질에 대한 명확한 정의가 없어서 연구자에 따라서 품질을 다르게 정의한다. 그럼에도 불구하고 크기, 모양, 색, 향기, 경도, 질감, 맛 및 결점과 이물질 혼합과 같은 몇 가지 기본적 요소는 품질 특성을 기술하는데 공통적으로 사용된다. 농산물에 있어서 많은 품질 인자들은 물성과 연관되기 때문에 물성을 기초로 하여 품질을 평가하는 비파괴적 방법들을 개발하는 것이 가능하다. 지난 30년 동안 연구자들은 많은 농산물에 대하여 이러한 방법들을 개발하였으며, 크기, 모양, 색 및 외부 손상과 같은 외부적인 품질인자를 평가하는 많은 기술들이 상업화되었다. 속도, 당도, 유지 함량, 경도, 내부 손상, 조직의 파괴 및 이물질의 존재와 같은 내부적인 품질인자를 평가하는 것은 보다 어렵다. 최신 기술의 급속한 발전은 농산물의 다양한 품질인자를 평가하는 여러 가지 새롭고 개선된 기술을 개발할 수 있는 기회를 제공하여 왔다. 이 논문에서는 이러한 방법들을 개괄적으로 살펴보려고 한다.

기술의 개설

밀도(Density)

밀도와 농산물의 품질 사이의 관계가 인정된 지는 백년이 넘는다. 많은 과실과 야채에 있어서 밀도는 성숙도에 따라 증가한다. 그러나 감귤류의 서리 피해, 과실과 곡물에 있어서의 충해, 토마토의 팽대(puffiness), 오이의 비대(bloater), 감자의 증공(hollow heart)과 같은 손상 및 결함은 농산물의 밀도를 감소시키는 경향이 있다. Zaltzman 등(1987)은 밀도 차에 의한 농산물의 품질 평가에 관한 이전의 문헌들을 상세히 정리하였다. 일반적으로 사용되는 방법들 중 몇 가지를 예시하면 다음과 같다. 물이나 밀도가 알려진 용액에 부유하는 과실을 제거하는 방법, 흐르는 물에 과실을 낙하시키면 밀도가 작은 과실은 밀도가 큰 것에 비하여 더 빨리 떠오르는 현상을 이용하는 방법, 흐르는 수로의 바닥에서 과실을 방출한 후 방출 위치로부터 수평거리를 달리한 수면에서 서로 다른 밀도 범위의 과실을 건져내는 방법 (Gutterman, 1976; Wardowski와 Grierson, 1972; Perry와 Perkins, 1968; Gould, 1975) 등이다. Zaltzman 등(1983, 1985)은 유동상(fluidized bed) 매질을 이용하여 감자를 흙덩이와 돌로부터 분리하는 방법에 관하여 심도 있게 연구하였다. 이들은 시간당 5톤의 감자를 흙덩이와 돌로부터 분리하는 파일럿 플랜트를 개발하였는데, 감자의 회수율은 99% 이상이었고 흙덩이와 돌은 100% 제거되었다.

경도(Firmness)

경도는 종종 과실과 야채의 품질 평가에 이용되는 물성이다. 많은 농산물에 있어서 경도는 속도와 관련이 있다. 일반적으로 과실의 속도가 증가함에 따라 경도는 점진적으로 감소하며 완숙 단계에 이르면 급격히 감소한다. 과숙하거나 손상된 과실은 비교적 무르다. 따라서 경도는 농산물을 서로 다른 속도 단계로 구분하거나 또는 과숙하거나 손상된 과실을 품질이 좋은 것으로부터 분리하는 기준으로 이용될 수 있다. 과실의 경도를 측정하는 몇 가지 방법들이 개발되어 있다.

힘-변형(Force-deformation)

Perry(1977)는 배의 서로 반대편의 좁은 면적에 저압의 공기를 동시에 작용하여 손상 없이 속도를 지시하는 변형을 발생시키는 비파괴 경도시험 장치를 개발하였다. Mehlschau 등(1981)은 강철 공을 과실의 양편에 대어 정해진 힘으로 누를 때의 변형을 측정하여 비파괴적으로 배의 속도를 검출하는 변형계(deformeter)를 개발하였다.

Mizrach 등(1992)은 오렌지와 토마토의 경도를 감지하기 위한 직경 3mm의 핀을 mechanical thumb으로 사용하였다. Takao(1994)는 비파괴적으로 과실의 경도를 측정할 수 있는 힘-변형 형태의 경도 시험기를 개발하였다. 이 시험기는 HIT 계수기라고 명명

되었는데, 이는 경도(hardness), 미숙도(immaturity), 및 질감(texture)을 측정하기 위한 것이기 때문이다. Bellon 등(1994)은 92%의 정확도로 배를 질감에 따라 3등급으로 분류하는 'micro-deformator'를 제작하였다. Armstrong 등(1995)은 블루베리나 체리 같이 작은 과실의 경도를 비파괴적으로 결정할 수 있는 자동 기기를 개발하였다. 이 장치는 두 개의 평판 사이에 위치한 하나의 과실 전체의 힘-편향(force-deflection) 측정을 이용한 것이다. 이 장치는 자동화된 데이터 수집 및 분석 장치를 갖추고 있으며, 분당 25개 과실의 경도를 측정할 수 있다.

충격(Impact)

단단한 표면에 충돌하는 탄성 구의 반력은 충돌 속도, 질량, 곡률 반경, 탄성 계수 및 구의 Poisson비에 의하여 지배된다. 연구자들은 단단한 표면에 대한 과실의 충돌이 탄성 구의 충돌에 의하여 매우 근사하게 모형화될 수 있음과 과실의 경도가 충격력 반응에 직접적인 영향을 미친다는 것을 발견하였다. Nahir 등(1986)은 70 mm 높이에서 토마토를 단단한 표면에 낙하시킬 때 충격력 반응은 과실의 중량과 경도에 높은 상관이 있다고 보고하였다. 이들은 이어서 실험용 토마토 선별기를 개발하였는데, 과실의 충격력 반응을 측정 분석하여 토마토를 중량과 색을 기준으로 분류하였다. Delwiche 등(1987)은 단단한 표면에 충돌하는 배의 충격력을 분석하여 특정한 충격력 특성들은 과실의 탄성계수와 침입도계에 의한 과육의 경도 측정치에 상관이 큰 것을 발견하였다. 지수 F/t^2 (여기서 F 와 t 는 각각 충격력의 피크와 이에 도달하는데 소요되는 시간이다)을 이용하여 배와 복숭아를 경도에 따라 3단계로 분류하는 외줄 선별기가 개발되었다(Delwiche 등, 1989). 이와 유사하게 센서 위에 과실을 떨어뜨리는 방법을 이용한 기술이 Younce와 Davis(1995) 및 McGlone과 Schaare(1996)에 의하여 개발되었다. 센서 위에 과실을 낙하하는 방법이 내포하고 있는 문제점은 충격력은 또한 질량과 과실의 곡률 반경의 함수라는 것이다. 따라서 이들 두 매개변수의 변이가 크면 경도 측정의 정확도에 영향을 미칠 것이다.

다른 접근 방법은 과실을 소형의 질량과 곡률 반경을 알고 있는 구형 충격기로 타격하여 충격기의 가속도를 측정하는 방법이다. 이 방법의 장점은 충돌력 반응이 과실의 질량에 독립적이며, 과실의 곡률 반경의 변이에 덜 민감하다는 점이다. 이 방법은 Chen 등(1985)에 의하여 최초로 기술되었으며, 스페인의 연구자들에 의하여 과실의 경도를 감지하는데 이용되었다(Jarén 등, 1992; Correa 등, 1992). Ruiz-Altisent 등(1993)은 충돌 매개변수를 이용하여 과실(사과, 배, 아보카도)을 서로 다른 경도 그룹으로 분류하는 시스템을 개발하였다. Chen 등(1996)의 연구 결과는 질량이 작은 충격기가 다음과 같은 추가적인 장점을 가지고 있다는 것을 보였다. 예측된 가속도 신호의 크기를 증가시키고, 과실 경도 지수의 계산치와 과실의 경도에 따른 경도 지수의 변화율을 증가시키며(즉, 과실 경도지수가 과실의 경도 변화에 매우 민감함), 충돌과정에서 과실의 운동에 의한 오차를 최소화하며, 충격에 의한 과실의 손상을 최소화하고, 고속 측정을 가능하게 한다. 이러한 결과를 바탕으로 소질량 고속 충격 센서를 설계하여 키위와 배에 대하여 우수한 시험 결과를 얻었다(Chen과 Ruiz-Altisent, 1996). 1996년에 Rush는

뉴질랜드에서 개최된 수확후 기술 학술회의에서 Kiwifirm이라고 부르는 휴대용 과실 경도시험기를 전시하였다. 이 정도 시험기도 역시 소질량 충격 기술에 근거한 것이다. 과실의 정도를 측정하기 위하여 기계 사용자는 프로브의 끝을 과실에 대하여 압착시킨 후 버튼을 눌러 소형 충격기가 과실에 충격을 가하게 한 후 숫자로 표시된 정도값을 읽게 된다.

음파 진동(Sonic vibration)

과실과 야채의 진동 특성은 탄성계수(경도), 질량 및 기하학적 형태에 의해서 지배된다. 따라서 진동 특성을 기초로 하여 과실과 야채의 정도를 평가하는 것이 가능하다.

1960년대 말과 1970년대 초에 소수의 연구자에 의해서 과실의 음파진동 특성이 연구되었다. 사과와 감의 진동 특성에 관한 심도 있는 연구가 Abbott 등(1968)에 의해서 수행되었다. 이들은 진동이 가해진 사과는 일련의 공진 주파수를 나타내며 2차 공진 주파수가 flexural 진동과 관련되어 있으며, 과실의 크기와 경도에 큰 영향을 받는다는 것을 발견하였다. 이들은 과실의 정도가 stiffness 계수, f^2m ,에 높은 상관성이 있음을 보였는데, 여기서 f 와 m 은 각각 2차 공진 주파수와 과실의 질량이다. 이 stiffness 계수는 나중에 Cooke(1972)에 의해서 수정되었는데, 그는 f^2m 보다는 $f^2m^{2/3}$ 이 질량에 무관한 과실 정도의 지표가 되어야 함을 보였다. 추가적인 연구가 Finney(1970, 1971, 1972)에 의해서 수행되어 사과와 배 개체의 정도를 평가하는 비파괴 기술을 개발하였다. Finney와 Abbott(1978)는 고체 식품류의 기계적 공진, 진동의 전달성, 펄스 전파 속도 및 복원(resilience) 특성의 측정 기술에 대한 상세한 문헌조사 결과를 제시하였다.

1980년대 초에 Yamamoto 등(1980, 1981)은 과실의 음향 반응에 기초하여 사과와 수박의 조직 특성을 측정하는 비파괴 기술을 개발하였다. 이들은 과실을 나무로 된 구형 추로 타격할 때 발생하는 소리를 기록한 후 이 소리 신호를 푸리에(Fourier) 변환하여 공진 주파수를 구하였다. 이들은 사과와 수박에 있어서 공진 주파수는 저장 기간이 경과함에 따라 감소한다는 것을 발견하였다. 이들은 또한 공진 주파수와 공진 주파수, 질량, 과실의 밀도의 함수로 표시된 정도 지수가 과실의 정도와 사람의 감각에 의한 측정치에 유의 상관성이 있음을 발견하였다.

최근에 고속 데이터 수집 및 처리 기술이 가능해짐에 따라서 음파 진동과 음향 반응 기술의 개발에 대한 연구자들의 관심이 새로워지고 있다. 여러 연구팀들이 이 분야에 대한 연구를 수행하고 있다. 이들은 미국 미시간(Armstrong 등, 1990; Armstrong과 Brown, 1993), 매릴랜드(Abbott 등, 1992; Abbott과 Massie, 1993), 캘리포니아(Chen, P. 등, 1992; Huang 등, 1992), 벨기에(Chen, H. 등, 1992; Chen과 De Baerdemaeker, 1992), 이스라엘(Kimmel 등, 1992; Shmulevich 등, 1996) 및 일본(Sugiyama 등, 1994)에 소개하고 있다.

일반적으로 연구자들은 일련의 공진 주파수를 검출하였다. 그러나 과실이 진동기에 의해서 여진되고 가속도계에 의해서 측정되는 경우에는 낮은 공진 주파수는 과실의 자유 진동에 의한 것이 아니고 과실의 질량(또는 가속도계의 질량)과 과실의 국부적 변형에 의해서 발생된 힘과의 상호작용에 기인한 공진 주파수일 수도 있다.

이론적으로 탄성 구의 자유 진동에 있어서 구의 탄성계수는 다음과 같이 다른 물성과 관련되어 있다: $E \propto (1 + \mu) f^2 m^{2/3} \rho^{1/3}$, 여기서 E 는 탄성계수, μ 는 Poisson 비, f 는 자유 진동의 공진 주파수, m 은 질량이며, ρ 는 밀도이다. μ 와 ρ 는 비교적 일정하기 때문에 연구자들은 $f^2 m^{2/3}$ 값이 과실의 경도를 예측할 수 있는 척도라는 것을 발견하였다. 그러나 응력/변형율의 비(또는 유사한 시료에 대한 힘/변형의 비)로 측정된 경도와 과육의 강도를 측정하는 Magness-Taylor 방법에 의해 측정된 과육의 경도를 혼동하지 말아야 한다. 또 다른 유의점은 개개의 과실은 하나 이상의 공진 주파수를 갖기 때문에 서로 다른 과실의 경도를 비교할 때는 동일한 차(order)의 공진 주파수를 사용하는 것이 중요하다.

음향 측정 기술을 이용하여 Armstrong과 Brown(1993)은 사과 경도 시험기의 설계를 상업적 이용에 적용함에 있어서 실질적인 고려사항들을 검토하기 위하여 포장 라인용 시작기를 개발하였다. 이들은 음향 신호로부터 1차 공진 주파수를 결정하는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 이들의 시험 결과는 1차 공진 주파수를 측정하여 경도를 검출함에 있어서 고차 공진 주파수를 억제하는 것이 바람직하다는 것을 보여 주었다. Chen, P 등(1992)은 고차 공진 주파수는 충격 시간(충격기와 과실이 접촉하는 시간)을 연장함으로써 억제할 수 있다는 것을 발견하였다. 또한 사과의 진동 모드 형태에 관한 연구 결과는 서로 다른 공진 주파수에서의 모드 형태를 알면 주어진 공진 주파수에 관련된 신호를 강조하거나 또는 억제하도록 검출기를 설치할 수 있다는 것을 보여 주었다(Huarnng 등, 1992).

초음파 측정법(Ultrasonic methods)

초음파 기술은 피하 지방, 총 지방, 살코기 및 기타 살아 있는 동물의 내부 물성을 평가하는데 매우 성공적으로 이용되고 있다(Wallace 등, 1977; Alliston, 1982; Davis 등, 1964). 그러나 연구자들은 초음파 측정법을 과실이나 야채의 내부 품질 평가에 이용함에 있어서는 그다지 성공을 거두지 못하였다. Sarkar와 Wolfe(1983)는 신선식품과 가공식품의 품질평가에 초음파 기술을 이용하는 가능성에 대하여 연구하였다. 이들은 초음파의 투과(transmission)는 분말을 물에 녹인 오렌지 주스의 안정도를 평가하는데, 반사율(reflectance) 측정은 오렌지 표피 조직의 특성을 기술하는데, 후방 산란(back scatter) 기술은 토마토의 금(crack)을 검출하는데 이용할 수 있음을 발견하였다. 이들은 또한 감자, 칸탈루프 멜론 및 사과의 조직에 대한 초음파 감쇄계수 측정치가 0.5 - 1.0 MHz의 주파수 범위에서 극히 큰 값을 나타낸다는 것을 발견하였다. 손상과 비손상 사과 조직을 구

분하기 위하여 1 MHz의 초음파를 사용하였으나 성공하지 못한 Upchurch 등(1987)도 유사한 결과를 얻었다. 이들은 과실 조직이 다공성이기 때문에 고주파 초음파 신호는 과실 내부 깊이 침투하지 못한다고 결론을 내렸다. 이러한 이유에 의해서 고주파 초음파 신호를 과실과 야채의 내부 품질 평가에 이용하는 것은 상당히 어렵다. 유사한 문제점이 Gunasekaran과 Paulsen(1986)에 의해서 발견되었는데, 이들은 옥수수 알갱이 세포 사이의 공간이 초음파의 전달을 차단하기 때문에 초음파 측정법은 옥수수 알갱이의 스트레스 크랙을 검출하는데 있어서는 적합하지 않다고 보고하였다. 한편 Hoki와 Tomita(1975)는 200 kHz의 저주파 초음파를 콩에 전달시키는데 성공하였다고 보고하였다. 이들은 콩에 있어서 전파속도와 함수율간에 양호한 상관관계를 발견하였다. Mizrach 등(1989)은 일부 과실과 야채에 대한 몇 가지 기본적인 음향 특성(전파 속도, 감쇄계수, 반사 손실)을 결정함에 있어서 저주파(50 kHz) 신호의 이용이 가능하다는 것을 보고하였다. 이들은 후에 아보카도 과실과 기타 신선 농산물의 내부 품질평가에 초음파 기술을 이용할 수 있는 고무적인 연구결과를 발표하였다(Galili 등, 1993; Mazrach 등, 1994). Haugh(1994)는 주파수 250 kHz의 건조 결합 광대역 트랜스듀서를 이용하여 감자의 중공을 검출하였는데, 중공을 통과한 초음파 신호와 정상적인 감자를 통과한 신호의 파형이 다르다는 것을 발견하였으며, 투과된 초음파 신호의 power spectral moment를 이용하여 손상된 감자를 분리할 수 있음을 발견하였다.

전기적 성질(Electrical properties)

과거 약 20년 동안 농산물의 전기적 성질에 대한 연구는 많은 연구자들의 관심의 대상이었다. 곡물과 종자(Nelson, 1965, 1987; Nelson과 Lawrence, 1994)로부터 과실과 야채(Nelson, 1983; Nelson 등, 1994, 1995; Zachariah, 1976)에 이르는 많은 종류의 농산물의 전기(electric) 및 유전(dielectric) 특성을 결정하기 위하여 많은 연구가 수행되었다. 농산물의 전기적 성질에 관한 상세한 문헌조사가 Nelson(1973)에 의하여 보고되었다. 다양한 농산물(특히 흡습성 농산물)의 전기적 성질은 함수율에 크게 의존한다. 이러한 함수율과 전기적 성질 사이의 관계가 상업용 곡물 및 종자 함수율 측정장치를 개발하는 기본 원리가 되었다. 일반적으로 사용되는 곡물 및 종자용 전기적 함수율 측정기는 재료의 전도성을 측정하는 컨덕턴스형과 유전상수를 측정하는 커패시턴스형으로 구분할 수 있다. Zeleny(1954)는 이들 두 종류에 적용되는 일반적인 법칙과 각각의 장단점을 기술하였다. 컨덕턴스형 함수율계는 조작과 조정이 간편한 반면, 곡물 알갱이 내의 또는 알갱이간의 함수율 차가 정확도에 영향을 미치며, 또한 표면 함수율에 크게 의존한다. 커패시턴스형 함수율계는 함수율의 불균일 분포에는 크게 영향을 받지 않으나 결과의 정확도와 반복도가 시료 상자에 충전할 때의 변이에 매우 민감하다. Matthews (1963)는 커패시턴스형 함수율계의 설계에 영향을 미치는 다양한 인자에 대하여 기술하였으며, 개선된 형태의 시작기 설계를 제시하였다. Nelson과 Lawrence는 1 MHz와 5 MHz에서 측정된 커패시턴스를 이용하여 신속하고 비파괴적으로 옥수수(1994), 대추야자(1994a), 피칸(1995)의 함수율을 추정하는 방법을 개발하였다. 이들은 이 기술을 대추야자의 자동 선별에 이용할 수 있다고 보고하였다.

함수율에 대한 전기적 측정치의 감도는 다른 변수와 연관된 전기적 성질의 변화를 가리키는 경향이 있다. Zachariah(1976)는 많은 연구자들이 과실과 야채의 전기적 성질에 관하여 연구하였으며 그 결과들은 전기적 성질과 농산물의 어떤 품질 인자들 사이에 약간의 관계를 나타내기는 하였으나, 과실과 야채의 품질 선별에 이용할 수 있는 실용적인 방법을 개발할 수 있을 정도에는 이르지 못하는 못한다고 보고하였다.

광학적 성질(Optical properties)

농산물의 비파괴적 품질 평가와 선별에 있어서 가장 실용적이고 성공적인 기술 중의 하나는 재료의 광학적 성질을 이용한 전기-광학 기술이다.

빛이 과실과 같은 농산물의 표면에 도달하면 입사된 방사 에너지의 단지 4% 정도만이 표면에서 정규(regular) 반사된다. 나머지 방사 에너지는 표면을 통하여 내부로 전달되며, 세포 구조 내부의 미세한 경계면을 만나면 모든 방향으로 산란된다. 방사 에너지의 많은 부분은 표면으로 다시 산란되어 입사점 부근에서 과실을 빠져나가게 된다. Birth(1976)는 이러한 형태의 반사에 "body reflectance"라는 용어를 사용하였다. 남은 산란광은 과실의 내부로 더 깊이 확산되어 종국에는 입사점으로부터 떨어진 위치에서 표면에 도달할 수 있다. 빛이 과실의 내부를 통과하는 과정에서 일부는 과실의 구성 물질에 의해서 흡수된다. 흡광도는 구성물질과 파장 및 빛의 경로 길이에 의해서 달라진다. 흡수된 에너지는 다른 형태의 에너지로 변환된다. 물질에 따라서는 흡수된 방사 에너지의 일부가 다른 형태의 방사 에너지 즉 형광(fluorescence)이나 지연광(delayed-light emission)으로 바뀔 수도 있다. 따라서 과실의 표면으로부터 나오는 방사 에너지는 다음과 같은 요소 중의 하나 또는 그 이상으로 구성될 수 있다: 정규 반사, body 반사, 투과 및 방사(형광, 인광, 지연광). 표면으로부터 나오는 방사 에너지의 특성은 물질의 성질과 입사광에 의존한다. 따라서 농산물의 광학적 특성을 측정하여 품질 인자에 대한 정보를 얻을 수 있다.

과거 30년 동안 연구자들은 다양한 농산물의 광학적 성질에 대하여 연구하였으며, 광학적 특성과 농산물의 품질관련 물성 사이의 상관관계를 설정하였다. 식품의 내부품질을 평가하기 위해서는 투과율과 흡수율을 사용하고 있다. 적용례를 살펴보면 계란에서 혈흔의 검출(Norris와 Rowan, 1962), 사과와 water core(Birth와 Olsen, 1964), 과실 속도의 평가(Birth 등, 1983), 토마토의 내부 색상, 토마토의 속도(Worthington 등, 1976; Nattuvetty와 Chen, 1980), 양파의 건물중(Birth 등, 1985) 등이다.

근적외선 분석(Near-infrared analysis)

Norris 등은 1960년대에 곡물의 함수율 차를 검출하기 위하여 근적외선(NIR)을 이용하기 시작하였다(Norris와 Hart, 1965; Massie와 Norris, 1965). 이들은 계속해서 많은 농산물에 대한 NIR 반사와 투과 특성을 조사하여 근적외선 파장대의 방사 에너지가 농산

물의 여러 품질 인자에 관련된 정보를 제공할 수 있다는 것을 발견하였다. Norris와 그의 공동 연구자들에 의한 커다란 공헌은 분광광도(spectrophotometric) 데이터(곡선)로부터 유용한 정보를 추출할 수 있는 데이터 처리 기술을 개발한 것이다. 이들은 산란 반사(diffuse reflectance, R)와 산란 투과(diffuse transmittance, T)는 물질 내부의 흡수 요소의 농도에 따라 직선적으로 변하지 않는다는 것을 발견하였다. 따라서 NIR 측정치와 흡수체의 농도 사이에 선형 상관을 구하기 위해서는 반사율이나 투과율 데이터에 대한 수학적 처리가 필요하다.

Norris(1983)의 요약에 의하면, “물질의 화학적 성분들은 각각 특정한 흡수 특성을 갖기 때문에 농산물의 산란 반사나 투과 스펙트럼에는 물질의 화학적 조성에 관한 정보가 포함되어 있다. 시료의 산란 스펙트럼에는 시료를 구성하는 요소 각각의 흡수 파장대가 모두 중첩되어 있으며, 여기에 산란이 일어나는 부분에 의한 영향이 부가되어 있다. 수차례의 데이터 처리 과정을 거치면 고정밀도 저잡음 산란 반사 및 투과 스펙트럼으로부터 물질의 화학적 조성을 예측할 수 있다. 데이터를 $\log(1/R)$ 또는 $\log(1/T)$ 로 변환하면 성분의 농도와 측정된 광학적 변수 사이에 적절한 직선성을 얻을 수 있다. 중첩되는 흡수 영역들의 많은 부분은 스펙트럼 곡선을 미분하여 분리할 수 있으며, 한 파장에서의 미분치를 다른 파장에서의 미분치로 나누면 빛의 통과 거리와 산란에 의한 영향을 상쇄시킬 수 있다. 미분 처리와 파장을 선택하기 위한 단일 항 직선회귀 프로그램을 결합하면 화학적 조성을 예측할 수 있는 교정 계수의 최적값을 구할 수 있다.” Norris는 데이터의 미분처리를 이용하여 투과 데이터로부터 고기의 지방, 수분 및 단백질 함량을 예측하는 방법, 투과 데이터로부터 해바리기와 콩 종자의 유지와 수분 함량을 예측하는 방법 및 반사 데이터로부터 밀가루 시료의 조성을 예측하는 방법에 대한 예를 제시하였다.

NIR 스펙트럼 분석은 대부분 파장 대역에 대하여 수행된다. McClure와 공동연구자들(McClure 등, 1984; Giesbrecht 등, 1981)은 NIR 데이터의 푸리에 분석 방법이 몇 가지 장점을 가지고 있음을 보였다. 이들은 NIR 스펙트럼은 푸리에 급수로 변환될 수 있으며, 단지 푸리에 계수만을 이용하여 분석(푸리에 영역에서)할 수 있음을 발견하였다. 이들은 많은 NIR 스펙트럼(데이터의 수가 1,000개 이상이 되는 경우도 있음)에 포함된 정보 중 모든 중요한 정보를 표시하기 위해서는 처음 50개의 푸리에 계수만으로도 가능하며, 물질을 구성하는 특정한 화학적 구성요소의 함량을 알기 위해서는 단지 처음 11개의 계수만이 필요하다는 것을 보였다.

NIR 기술에 대한 연구는 곡류, 유지 종자, 고기, 낙농 제품, 사료 등의 성분 분석을 위한 다양한 상업용 NIR 분석기의 개발을 가능케 하였다. NIR의 기본 원리와 농산물 및 식품 산업에의 응용에 관한 상세한 책자가 Williams와 Norris(1987)에 의해서 편집되었다.

많은 연구자들이 서로 다른 과실 및 야채의 내부 성분을 결정하기 위한 연구를 수행하였다. Dull 등은 칸탈루페와 하니듀 멜론의 가용성 고형물을 결정하기 위하여 NIR을

이용하였다(Dull과 Birth, 1989; Dull 등, 1992). Kawano 등(1992)은 NIR 기술과 상호 작용 모드(interactance mode)의 광섬유를 이용하여 배의 당도를 분석하였는데, NIR 측정값과 Brix 값 사이에 양호한 상관 ($r = 0.97$)을 얻었다. 이와 유사하게 Slaughter(1995)는 근적외선의 흡광 특성을 이용하여 배와 넥타린의 가용성 고형물을 예측하였다. Bellon과 Sevilla(1993)는 CCD 분광광도 카메라와 두 갈래로 분기된(bifurcated) 광섬유를 결합한 NIR 시스템을 개발하여 사과의 가용성 고형물을 결정하였다.

X-선과 감마선(X-rays and gamma rays)

X-선 및 감마선과 같이 파장이 짧은 방사 에너지는 대부분의 농산물을 투과할 수 있다. 이 광선의 투과 수준은 주로 대상 물질의 질량 밀도와 흡수 계수에 따라 다르다. 따라서, X-선과 감마선은 질량밀도의 변화와 상관관계를 갖는 품질 인자를 비파괴적으로 평가하는데 적합하다. X-선과 감마선은 모두 성숙함에 따라 질량밀도가 커지는 특성을 갖는 양상치의 속도를 평가하는데 이용되어 왔다. Lenker와 Adrian(1971)은 X-선을 이용하여 숙성된 양상치를 선택하는 양상치 수확기를 개발하였다. Garrett와 Talley(1970)도 역시 수확기에 사용하기 위하여 양상치의 속도를 판정하는 장치를 개발하였는데, 속도 판정은 감마선의 투과율을 이용하였다. 연구자들은 X-선 기술이 사과의 손상(Diener 등, 1970), 감자의 중공(Nylund와 Lutz, 1950; Finney와 Norris, 1973), 배의 씨(Bowers 등, 1988), 그리고 오렌지의 과립화(Johnson, 1985)를 검출하는데 이용될 수 있음을 밝혔다. Johnson은 Sunkist Growers사가 개발한 전기-기계식 선별기에 대하여 설명하였는데, 이 선별기는 과실 내부의 밀도 변이를 탐지하여 오렌지의 서리에 의한 손상, 과립화 및 *Alternaria*의 존재를 검출하기 위하여 저수준 X-선 스캐너를 이용하였다. X-선은 또한 기계 수확한 감자로부터 돌과 흙덩이를 골라내는데도 이용되고 있다. Palmer 등(1973)은 X-선 분리기를 개발하였으며, 수확한 감자에서 돌과 흙덩이를 분리하는 상업용 감자수확기에 적용 가능성을 입증하였다. Morita 등(1996)은 식품 속의 비금속성 이물질을 발견하기 위하여 소프트 X-선을 사용하는 방법에 대하여 연구하였다.

최근에는 감자 내부의 중공, 체리와 올리브의 씨, 그리고 이물질을 검출할 수 있는 많은 고속 X-선 센서가 상업용으로 개발되었다. Tollner 등(1994)은 과실과 야채에서 내부의 공극과 이물질의 혼입을 비파괴적으로 검출하기 위한 X-선 센서에 대한 연구 동향과 상업적 개발에 대한 개요를 제시하였다.

핵자기 공명(Nuclear magnetic resonance)

핵자기 공명(NMR)은 수소핵(양자)의 농도를 탐지하는 기술로서 물질 내에 있는 수분과 유지의 농도 및 운동성에 민감하게 반응한다. 그러므로 NMR 방법은 곡물과 종자 내의 함수율과 유지 함량을 평가하는데 이용될 수 있다(Brusewitz와 Stone, 1987; Miller 등, 1980; Rollwitz, 1985; Tollner와 Rollwitz, 1988; Simpson, 1968). Brusewitz 와 Stone

은 펄스 NMR 기술이 현재 이용되고 있는 유전율 기술보다 밀의 함수율에 더 민감함을 밝혔다. FID(free induction decay)율이 밀의 함수율 8% - 15%의 범위에서 함수율과 선형의 관계를 나타냈다(결정계수 0.98). NMR 영상(MRI)은 의학 분야에서 인체 내의 종양 또는 이상 증상을 발견하기 위하여 상업적으로 이용되고 있지만, 과실과 야채의 결함부와 기타 품질 인자를 검출하는데 있어서의 적용 가능성은 아직 충분히 연구되지 않았다. Hinshaw 등(1979)은 MRI가 생물체에 대하여 고분해능의 영상을 제공할 수 있음을 밝혔다. Wang 등(1988)은 MRI 방법을 이용하여 Red Delicious 품종 사과 내부의 watercore와 그 분포를 확인하였다. Chen 등(1989)은 MRI를 이용하여 과실과 야채의 다양한 품질 인자를 평가하였다. 그들은 MRI가 과실과 야채의 손상, 건조부, 충해, 내부 파손, 숙도, 그리고 공극 및 씨의 존재 등과 같은 내부 품질 인자의 비파괴적 평가에 이용될 수 있음을 밝혔다. 그들은 또한 공명 지연(echo delay), 분해능 및 주사 슬라이스(scanning slice)의 두께와 같은 실험변수의 변화가 시료의 특정 형질에 대한 영상의 개선에 상당한 효과를 주고 있음을 밝혔다. Rollwitz 등(1983)은 농업에 적용하기 위한 여러 형태의 휴대용 NMR 센서를 제안하였다. 과실과 야채의 내부 품질을 평가하기 위한 NMR 센서의 개발에 관심이 증대되어 왔다. 다음은 이 분야의 최근의 연구를 요약한 것이다.

과실과 채소는 성숙과정 중에 다양한 변화가 일어난다. 과실이 익어감에 따라 수분, 유지 및 당분의 양이 변한다. 또한 수분, 유지 및 당분 중의 수소핵의 이동성도 변할 수 있다. 더욱이 과실과 채소에서 수분, 기름 및 당분의 농도와 이동성이 종종 물리적 손상, 조직의 파괴, 과숙 조건, 부패, 충해 및 서리에 의한 손상 등과 같은 품질 인자와 상호관련성을 가지고 있다. NMR은 수분, 유지 및 당분의 농도와 이동성의 변이를 검출할 수 있기 때문에, 과실과 야채의 다양한 내부 품질 인자를 검출할 수 있는 가능성을 지니고 있다.

위와 같은 가정 아래 연구자들은 각자 선택한 과실과 야채에 대하여 많은 내부품질 인자를 평가하기 위한 다양한 기술을 개발하였다.

캘리포니아 대학과 이스라엘 A.R.O., Volcani Center, Bet Dagan의 연구자들에 의하여 수행된 미국-이스라엘 협동연구 결과 아보카도의 숙도(Chen 등, 1993), prune의 당도(Zion 등, 1994), 체리 씨의 존재(Zion 등, 1994a), 그리고 멜론의 조직 파괴를 평가하는데 고속 NMR 기술을 사용할 수 있음을 밝혔다. 아보카도의 유지 함량과 prune의 당도는 표면 코일 센서를 이용하여 단일 펄스 NMR 스펙트럼으로부터 결정할 수 있다. 2 cm 직경의 표면 코일로부터 얻어진 온전한 아보카도의 FID 스펙트럼은 수분과 유지에 대한 공명 피크를 분명하게 나타낸다. 유지/수분 공명강도의 피크 비율은 과실의 건물중(숙도 지수)과 상관관계가 매우 높다($r^2 = 0.95$). 온전한 prune의 FID 스펙트럼은 수분과 당에 해당하는 공명 피크를 가지고 있으며, 당도/수분 공명강도의 피크 비율은 prune의 수용성 고형물과 우수한 상관관계($r^2 = 0.82$)를 가지고 있다.

단일 펄스 FID 스펙트럼을 얻기 위하여 표면 코일을 사용하는 기술은 과실 전체를 신속하게 검사할 수 있게 할 뿐만 아니라 과실의 크기 및 씨의 존재와 같은 다른 인자의 영향을 감소시킨다. Chen 등(1995)은 과실 품질의 온 라인 검출에 이 기술을 이용하는 것의 타당성을 입증하였다. 특별히 설계된 컨베이어 벨트를 이용하여 최대 250 mm/s의 속도로 이동하는 아보카도의 FID 스펙트럼을 성공적으로 얻었다. 스펙트럼으로부터 얻어진 유지/수분 공명 피크 비율은 과실의 건물중과 매우 높은 상관관계($r^2 = 0.98$)를 가졌다.

과실의 NMR 영상의 경우에, TR(interpulse delay)과 TE(echo delay)는 종자 윤곽의 심한 대비, 손상 부위, 과숙 영역, 그리고 속도 등과 같은 대상물의 특정 형질에 대한 영상의 개선에 상당한 효과를 줄 수 있다. 50 ms의 TR과 15 ms의 TE로 얻어진 네 개 아보카도 단면의 T_1 -가중 NMR 영상은 강도와 유지 함량 사이에 뚜렷한 상관을 보였다. 한편, TR과 TE를 각각 1000 ms와 40 ms로 증가시켰을 때 T_2 -가중 영상은 강도와 수분 함량 사이에 강한 상관관계를 가졌다. 다른 과실에서 T_2 -가중 영상은 pomelo 내부에 씨의 존재, 망고의 내부 흑변, 사과와 손상부, 그리고 멜론의 조직연화부분을 명백히 나타내었다.

두터운 scanning slice를 고속으로 영상화하는 기술과 영상으로부터 원하는 특징에 대한 정보를 추출하기 위한 고속 영상처리기술을 적정화하는 연구가 필요하다. 몇 가지의 신속한 MRI 스캐닝 기술이 의학분야에서 이용되고 있다. 이러한 기술의 이전을 위해서는 측정된 NMR 변수와 과실의 품질 인자의 상관에 대한 연구가 요구된다. NMR 변수와 과실의 품질 인자에 대한 상관이 주어지면, 특정 결함을 발견하기 위하여 기존의 펄스 시퀀스를 수정하고 온 라인 검출 시스템을 위한 영상처리 알고리즘을 개발할 수 있다.

NMR 영상을 이용하여 연구자들은 과실의 다양한 품질 인자를 훨씬 정밀하게 조사할 수 있게 되었다. 이러한 기술은 NMR 변수와 품질 인자 사이의 관계를 연구하는데 유용할 뿐만 아니라, 고속 NMR 기술을 개발하는 데에도 도움이 된다. 예를 들면 2차원 영상에 대한 연구를 통하여 멜론의 조직 파괴와 체리 씨의 존재와 같은 특정한 품질 인자는 2차원 영상의 1차원 윤곽(profile)으로부터 결정될 수 있음을 알 수 있게 되었다. 1차원 영상 윤곽의 이용은 데이터의 획득시간이 매우 짧고(약 10 ms) 데이터의 분석이 간단하기 때문에(최소의 소프트웨어) 개념적으로도 단순하다. 예를 들면 1차원 영상윤곽 데이터로부터 체리의 씨를 검출하기 위해 작성된 알고리즘은 단지 13 ms의 처리시간이 소요된다.

퍼듀 대학의 연구자들은 과실의 내부 품질을 결정하기 위하여 고분해능과 저분해능의 NMR 분광계를 사용하였다. 고분해능(200 MHz) 분광계를 이용한 그들의 초기 연구 결과(Cho, 1989; Cho 등, 1991)는 작은 과실 시료(사과, cantaloupe, 바나나)의 당도는 NMR 스펙트럼의 당 피크의 진폭으로부터 결정될 수 있음을 나타내었다. 그들은 최대 30 mm

의 직경을 가진 샘플을 수용할 수 있는 저분해능(5.35 MHz) 양자 자기공명 센서를 설계 제작하였다(Cho 등, 1990). 이 장치를 이용하여 작은 과실(직경 30mm 이하)과 큰 과실 시료의 당도를 측정하기 위한 다양한 시험이 수행되었다. Ray 등(1993)은 이 장치의 설계를 개선하여 Bing 체리의 당도를 측정하였으며 SER(spin echo ratio)와 과실의 총 가용성 고형물 사이에 좋은 상관관계가 있음을 보고하였다($r^2 = 0.91$).

농산물 품질평가를 위한 앞으로의 NMR에 관한 연구는 농업 분야에 적용할 수 있는 NMR 센서의 개발을 이룩하여야 할 것이다.

기계 시각(Machine vision)

사람의 시각 검사를 대신하기 위하여 기계 시각 시스템의 개발에 대한 관심이 증대되고 있다. 과실과 야채의 선별을 위한 기계 시각 시스템을 개발하는데 있어서 주요 요구사항의 하나는 영상을 정확하고 신속하게 분석하는 능력이다. 다양한 방법(TV 카메라, 라인 스캔 카메라, X-선 스캔, 초음파 스캔, NMR 영상 등)이 과실과 야채의 영상을 얻기 위하여 이용될 수 있는데, 이러한 영상은 색상, 형상, 병해, 손상 및 결함 등과 같은 외부적 및 내부적 품질 인자의 특징을 나타내고 있으나, 만족할만한 속도로 영상을 처리하여 원하는 특징의 정보를 추출하는 것이 어려웠다. 근래에는 영상처리를 위한 컴퓨터 하드웨어의 가격이 저하된 반면 처리속도와 능률이 향상되어 농산물과 식품의 자동 검사와 선별에 컴퓨터 비전 시스템을 이용하는 것이 많은 관심을 끌게 되었다. 많은 연구자들이 농산물 품질 평가의 다양한 측면과 농산물의 선별을 위한 기계 시각 시스템의 개발에 상당한 노력을 쏟아왔다. 그 결과 과실과 야채의 특정한 품질 인자와 관련된 영상 특징을 고속으로 추출하기 위한 새로운 알고리즘과 하드웨어 장치가 개발되었다. Thomason (1986)과 Godinez(1987)은 불규칙하고 오류적인 영상특징과 예측 가능하고 정상적인 영상 특징을 구분할 수 있는 구입 가능한 기계 시각 시스템에 대하여 기술하였다. 식품 생산과 관련된 몇 가지 적용례를 들면 흠집의 검출, 주름의 양에 따른 대추야자의 선별, 그리고 야채로부터 잡티의 제거 등과 같다. Marchant 등(1988)은 크기와 형상별로 감자를 선별하기 위한 컴퓨터 비전 시스템을 개발하였다. 다중 프로세서와 하드웨어적인 데이터 단순화 장치를 갖춘 이 시스템은 초당 40개 이상의 속도로 감자를 선별할 수 있다. Delwiche와 공동 연구자들은 건조한 prune의 결함을 검출하기 위한 라인 스캔 영상 시스템, 신선한 배의 색상 선별을 위한 컬러 비전 시스템을 개발하였다. Bowers 등(1988)은 X-선 영상과 컴퓨터 시각 분석장치를 결합하여 온전한 배의 씨를 검출하였다. 외적 품질 인자의 평가를 위한 기계 시각을 이용한 선별 시스템은 이미 상업화되어 있다. 농산물의 내적 품질을 평가하는데 X-선과 NMR 기술이 확대 적용되기 위해서는 고속 영상분석 기술이 중요한 역할을 담당할 것으로 기대된다.

기계 시각 기술의 발달은 영상의 각 점(pixel)이 여러 개의 파장에 대한 정보를 포함하는 multispectral imaging을 포함한다. Alchanatis와 Searcy(1995)는 멀티스펙트럼 영상을 얻기 위한 세 가지 기술에 관하여 설명하였다. 이러한 영상처리 기술을 통하여 연구

자들은 품질 평가를 위하여 추가적으로 유용한 정보를 추출할 수 있게 되었다. Park과 Chen(1996)은 정상적인 도축된 닭과 비정상적인 것을 구별하기 위하여 멀티스펙트럼 영상 시스템을 이용하였다. McClure(1991)는 NIR 분광이 20세기의 비파괴 분석기술인 것처럼, NIR 영상 분석이 21세기의 분석 도구가 될 것으로 예견하였다.

향기(Aroma)

향기는 많은 농산물에 있어서 중요한 품질 요소이다. 현재로서는 사람의 코가 식품과 농산물의 냄새 또는 향기를 감지하는 최고의 검출장치이다. 많은 연구자들이 전자 코를 개발하기 위하여 수년동안 노력하여 왔으나 매우 제한적인 성공을 거두었을 뿐이다. 전자 코의 개발에 대한 간략한 역사가 Gardner와 Bartlett(1994)에 의하여 보고되었다. 대부분의 전자 코는 센서의 배열을 사용하는데 각 센서는 한 가지 이상의 가스 성분의 농도에 민감하게 반응한다. 센서의 출력은 패턴인식 방법 즉, 주성분 분석, 식별함수 분석, 또는 신경회로망을 이용하여 분석된다. 흔히 사용되는 센서에는 sintered metal-oxides, conducting polymers와 quartz resonator가 있다. 다양한 형태의 센서와 데이터 처리기술은 Garner와 Bartlett(1992)가 편집한 “Sensors and sensory systems for an electronic nose”에서 찾을 수 있다. Gardner와 Bartlett(1994)는 커피 콩, 위스키, 맥주, 생선, 고기와 같은 음료 및 식품의 맛을 분류하기 위하여 전자 코가 이용되고 있다고 보고하였다.

과실의 품질을 결정하기 위하여 방향성 휘발성분 센서의 개발에 관심이 증가되어 왔다. Benady 등(1995)은 과실의 숙도를 비파괴적으로 측정하기 위한 냄새 탐지기를 개발하였다. 이 냄새 탐지기는 작은 컵 속에 위치한 반도체 센서를 이용하여 성장 중인 과실로부터 발산되는 가스를 포집하여 검출한다. 그들은 이 센서가 2회의 재배기간에 걸쳐서 실험실과 포장 조건에서 세 품종의 머스크멜론에 대하여 성공적으로 작동하였다고 보고하였다.

과실의 숙도를 결정하기 위한 상업적 향기 센서는 1990년 일본에서 선보였다. 제작회사의 안내문은 “Sakada 과실시험기”라고 불리는 이 휴대용 시험기(약 700 g)가 부패되거나, 과숙하거나, 덜 익은 과실을 99%의 정확도로 검출할 수 있다고 표시하고 있다.

기타 정보(Other sources of information)

앞에서 언급한 것은 농산물의 품질 평가와 선별을 위한 비파괴 기술 중 단지 몇 가지만을 선택한 것에 불과하다. 많은 다른 적용례는 본 논문에 포함되어 있지 않다. 다른 적용례에 관심이 있는 독자는 Bellon(1994), Chen(1978), Chen과 Sun(1991), Dull(1986), Finney(1973, 1978), Finney와 Abbott(1978), Gaffney(1976), Genasekaran 등(1985), Mohsenin(1984), Nelson(1973), Williams와 Norris(1987), Zaltzman 등(1987),의 논문, Kawano와 Iwamoto(1994)의 보고서 및 ASAE Publication 05-94인 Proceedings of the International Workshop on Nondestructive Technologies for Quality Evaluation of

Fruits and Vegetables를 참고하기 바란다.

결 론

농산물의 비파괴적 품질 평가에 대한 몇 가지의 방법을 검토하였다. 어떤 방법은 다른 것에 비하여 개발이 더 진전되어 있다. 각 방법은 특정한 물리적 특성의 측정에 기초를 두고 있기 때문에 각 방법의 효과는 측정된 물성과 관심의 대상이 되는 품질 인자의 상관관계에 따라 다르다. 연구자들이 많은 농산물의 물성과 품질 인자 사이의 관계를 개발하였지만, 동일한 농산물에서도 구조, 조성 성분 및 기타 변수들의 자연적인 변이 때문에 물성과 품질 인자 사이의 좋은 상관관계를 찾는 것이 어렵다. 그러나 컴퓨터나 자료처리 기술의 이용을 통하여 연구자들은 부수적인 요인의 영향을 최소화하여 측정 특성과 품질 인자 사이의 상관관계를 보다 향상시킬 수 있게 되었다.

가장 성공적이며 널리 이용되고 있는 방법은 광학적 방법인데, 이는 고속 광학 감지 기술과 자료처리 기술이 결합되어 많은 농산물의 고속 고정밀도 품질 평가와 선별을 가능케 하였다.

현대의 산업 기술과 더불어 비파괴적 측정방법도 급속하게 발전되었다. 고속 자료수집 및 처리기술의 유용성은 연구자들이 충격과 음향반응 기술에 새로운 관심을 갖도록 유도하였다. 이 기술 중 몇 가지는 곧 상업적으로 적용될 것이다. 소형 가스 센서 배열과 고속 패턴인식 기술의 급속한 발전은 분명히 고속 전자식 향기 감지기의 개발을 가속화할 것이다. Solid state TV 카메라, 라인 스캔 카메라, X-선 스캐닝, 초음파 스캐닝, 그리고 NMR 영상과 같은 현대적인 영상획득 기술의 이용은 연구자들에게 농산물의 다양한 품질 인자를 보다 정밀하게 검사할 수 있도록 하였다. 많은 새로운 센서들의 출현, 그리고 새로운 영상획득 기술과 고속 영상처리 기술의 결합은 연구자들이 농산물의 비파괴적 품질 평가를 위하여 진보된 신 기술을 개발하는데 이용할 수 있는 새로운 도구를 제공하고 있다.