

농산물의 비파괴 품질 평가 기술 개발 연구 동향

노상하
서울대학교 생물자원공학부

Nondestructive Quality Evaluation Technologies for Agricultural Products

Sang Ha Noh

Division of Biological Resources and Materials Engineering,
Seoul National University, Suwon 441-744

1. 서 언

농산물의 품질은 상품가치의 척도로서 외관, 조직감, 향기, 영양적 가치, 안전성 등 여러 가지 측면에서 종합적으로 평가되고 있으며, 농산물의 종류마다 평가 항목이나 평가방법이 다르고, 국가 또는 지역마다 평가 기준이 다르게 적용되고 있다.

품질평가 방법은 크게 구분하면 대상물의 형태나 특성을 변화시켜 측정하는 파괴적인 방법과 형태나 특성을 변화시키지 않고 측정하는 비파괴적인 방법이 있다. 또한 비파괴적인 방법은 품질측정 센서를 대상물의 표면에 접촉시켜 측정하는 접촉식과, 대상물의 표면에 접촉하지 않고 측정하는 비접촉식으로 구분할 수 있다. (대상체를 파괴하더라도 용매나 용액을 사용하지 않고, 즉, 대상시료의 화학적 성분변화를 유발시키지 않고, 분말 또는 액체상태로 성분을 측정하는 것을 비파괴적인 방법으로 간주하기도 함). 비파괴적인 방법은 파괴적인 방법을 대신하기 위한 기술로서, 일반적으로 파괴적인 방법에 비해 정확도나 정밀도가 떨어지지만, 품질평가에 소요되는 시간과 노력을 절감하기 위해 개

발되고 있다.

농산물의 품질은 소비자의 기호나 식미, 농산물의 이용목적에 따라 다르고, 주관적인 요소를 내포하고 있기 때문에 정의하기조차 어려운 경우가 많다. 그러나 농산물의 상품화를 위해서는 보편적이고, 공통적으로 적용가능한 품질평가 항목의 선정 및 각 항목별 평가 기준의 정량화, 즉, 품질평가의 객관화와 규격화가 수반되어야 한다. 수확된 농산물은 생명체이기 때문에 같은 품종이라도 개체마다 무게, 모양, 색깔, 구성성분 등이 다른 특성을 지니고 있다. 따라서 농산물의 품질은 원칙적으로 개체 하나하나를 대상으로 평가해야 하므로, 이를 위해 많은 시간과 노력이 투입되고 있다. 특히, 수확된 농산물의 상품화를 위한 품질평가는 상대적으로 정밀도가 떨어지더라도 노력절감을 위해 신속성을 향상시키는 것이 중요하므로 비파괴적인 측정법이 적용되고 있다.

여기서는 수확된 농산물의 품질평가를 위해 개발 또는 적용되고 있는 비파괴 품질평가기술의 종류와 특징, 이들 기술을 이용한 주요 연구결과 및 연구동향, 기술의 한계성 및 앞으로의 전망 등에 대해 기술하고자 한다.

2. 농산물의 특성 및 품질 인자

2.1. 농산물의 특성

인간의 생존을 위해 필요한 먹거리는 농산물, 축산물, 임산물, 수산물 등으로 구분되며, 농산물은 또한 식량작물(벼, 보리, 밀, 감자, 고구마, 옥수수 등), 채소류(마늘, 양파, 고추, 오이, 무, 배추 등), 과일류(사과, 배, 복숭아, 감귤, 감 등), 특용작물(참깨, 땅콩, 인삼 등) 등으로 구분된다. 농산물은 종류가 매우 다양할 뿐만 아니라 같은 품종이라도 재배지역, 생육환경에 따라 모양, 크기, 색깔, 구성성분이 각각 다르며, 같은 재배지역내에서도 개체마다 차이가 있다. 따라서 모든 농산물은 수확 후에 상품가치 향상을 위해 각 개체를 대상으로 주어진 기준에 따라 등급별로 구분하는 선별, 포장과정을 거친다.

또한 농산물은 수확 후에도 살아있는 생명체로서 호흡을 계속하며, 내부적으로 생화학적 변화가 연속적으로 일어나는 특성을 지니고 있기 때문에 품질변화가 연속적으로 일어난다. 농산물의 품질을 유지하고 품질을 평가하는 기술을 개발하기 위해서는 생화학적 측면에서 품질변화 메카니즘의 구명도 대단히 중요하다.

2.2. 농산물의 품질 인자

수확된 농산물의 품질을 평가하기 위해 제시되고 있는 주요 품질 인자는 외관(appearance), 조직감(texture), 풍미(flavor), 영양가(nutritional value), 안전성(safety) 등으로 구분하고 있으며, 이들 인자를 평가하기 위한 구체적인 항목은 농산물의 종류 즉, 곡류, 과일류, 채소류, 화훼류, 육류 등에 따라 다르다. 예로써 과채류에 적용되는 구체적인 평가항목은 Table 1과 같다.

Table 1 Quality components of fruits and vegetables

Major Items	Components
Appearance	Size(length, dia. width, height, weight, volume etc.), Shape(curvature, sphericity, roundness), Color(uniformity, intensity), Gloss, Defects
Texture	Firmness(hardness, softness), Crispness, Meakiness, Toughness
Flavor(taste and smell)	Sweetness, Sourness(acidity), Bitterness, Aroma(volatiles compounds) Off-flavor
Nutrition	Carbohydrate, Protein, Lipids, Vitamins, Minerals
Safety	Toxicants, Contaminants

Table 1에 열거된 appearance를 외부품질, texture, flavor 및 nutrition을 내부품질로 구분하기도 한다.

3. 농산물의 비파괴 품질평가 기술

이들 농산물의 품질인자를 비파괴적으로 측정하는 방법은 광학적 방법, 전자기적 방법, 역학적 방법 등으로 구분할 수 있으며, 이들을 보다 구체적으로 세분하면 다음과 같다(괄호내는 측정가능한 대표적인 품질인자).

① 광학적 방법

- 영상계측 : 가시영상(크기, 모양, 색깔, 손상), 근적외 영상(표면 결함)
- 흡수 분광법 : 자외선 분광(성분분석), 가시선 분광(색채, 색소, 외부 결함), 근적외선(NIR)(성분 분석, 표면 결함)
- 레이저 계측 : 산란이용(표면 결함)

② 전자기적 방법

- 전기적 성질 : 직류저항(함수율), 고주파 임피던스 및 마이크로 웨이브(함수율, 밀도, 내부 공동)
- 자기적 성질 : 핵자기공명(NMR)(당도, 오일, 함수율), 자기공명 영상(내부 결함, 내부조직)

③ 역학적 방법

- 동적방법 : 진동 여기법(경도, 점탄성, 속도), 타음해석(경도, 내부공동, 점탄성), 초음파 해석(내부 공동, 경도, 육질, 내부조직)
- 방사선 : X선(내부 공동, 내부구조)

괄호 내에 표시된 품질인자는 해당 요소기술을 이용하여 현재 실용화를 위해 연구되고 있거나 이미 실용화되어 있는 것들이다. 현재, 비파괴적으로 측정가능한 인자는 외관 품질을 제외하고는 극히 제한되어 있는 실정이다.

4. 비파괴 품질 평가 기술 개발 연구 동향

위에서 제시한 바와 같이 농산물의 품질을 비파괴적으로 평가하기 위한 기술은 다양하지만 여기서는 현재 주로 온라인(on-line)화를 목적으로 적용되고 있는 요소기술을 중심으로 연구 동향을 소개하고자 한다.

농산물의 선별 또는 품질평가를 위한 시스템은 일반적으로 원료 공급부, 등급판정부, 등급별 배출부 및 포장부로 구성된다. 이들 시스템을 구성하는 기계적인 장치는 대상 농산물의 물리적 특성을 고려하여 설계되어야 한다. 특히 원료공급부는 각 개체별 등급판정을 위

해 원료의 정렬화(alignment) 및 개체화(singularization)가 가능해야 하며, 등급판정부는 비접촉 온라인 상태에서 원하는 품질인자의 등급이 거의 실시간에 가깝게 빠른 속도로 판정되도록 설계되어야 한다.

4.1. 기계 시각(Machine Vision)

기계시각은 인간의 눈을 대신할 수 있는 기술로서 농산물의 크기, 색깔, 모양, 표면 흠집 등 외관품질 판정에 유용하게 이용될 수 있다. 그러나 문제는 기계시각의 경우 3차원 대상물이 2차원 영상으로 입력되기 때문에 대상체의 전체 표면색, 흠집의 유무, 기형의 유무 등을 판정하는 시스템을 개발하기 위해서는 판별알고리즘 뿐만 아니라 전체표면을 검색할 수 있는 기계적인 장치가 동시에 개발되어야 한다.

기계시각은 영상형성(image formation), 영상입력(image acquisition), 전처리(pre-processing), 영상분석(image analysis), 영상해석(image interpretation) 등 일련의 과정을 거쳐 목적하는 품질을 판정한다. 농산물은 공산품처럼 정형화되어 있지 않을 뿐만 아니라 색을 포함하기 때문에 처리해야 할 데이터의 양이 상대적으로 많은 특징을 지니고 있다. 영상형성 과정에서 영상프레임을 구성하는 각각의 광학소자(Fig. 1)가 감지하는 quantum power(Q_i)는 다음식에 의해 결정된다.

$$Q_i(x, y) = \int_{\lambda} I(\lambda; x, y) O(\lambda; x, y) L(\lambda; x, y) F_i(\lambda) C(\lambda) d\lambda$$

여기서 *i*는 색좌표계에서 R, G 또는 B값, λ는 파장(nm), x와 y는 영상에서 화소의 좌표, I(λ; x, y)는 물체의 표면에 입사하는 입사광의 분광광도, O(λ; x, y)는 물체의 분광반사도, L(λ; x, y)은 물체로부터 반사되는 반사광이 렌즈와 컬러필터를 통과할 때 일어나는 spectral attenuation, F_i(λ)는 컬러필터의 분광투과도, C(λ)는 광학소자의 분광감도이다. 흑백영상에서는 F_i(λ)를 생략하고, 특정 파장대역만의 영상을 획득하기 위해 특정필터를 카메라 렌즈앞에 부착하여 사용하기도 한다.

농산물의 색상, 표면흠집 등을 판정할 경우 전처리와 영상분석에 소요되는 시간을 단축시키기 위해 영상형성에 필요한 조명장치의 구성, 광원의 선택, 물체의 분광반사도를 근거로한 특정 필터의 선택(흑백영상에서 필요한 경우), 공간해상도 및 gray scale 해상도의 적정화 등이 매우 중요하다.

- 1) 과실류의 크기, 색상 및 형상: 사과와 색깔, 형상

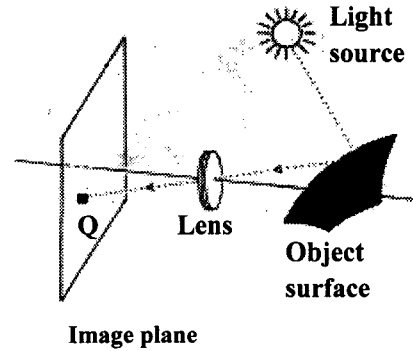


Fig. 1 영상형성

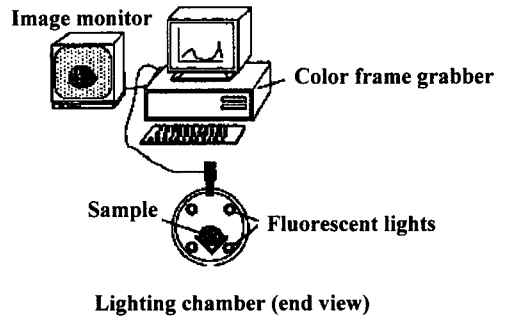


Fig. 2 과실류의 외관품질판정을 위한 기계각장치의 구성(Varghese, 1991)

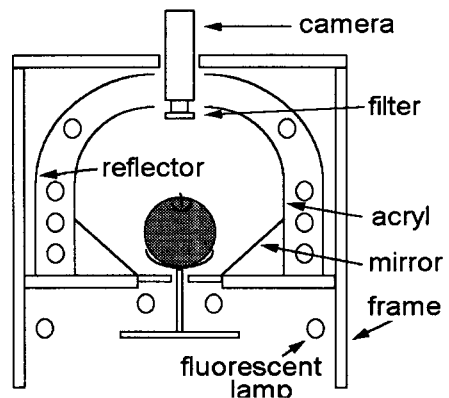


Fig. 3 후지사과의 크기 및 색상 판정을위한 기계 시각 장치(노 등, 1995)

및 크기를 판정하기 위해 Varghese 등(1991)은 CCD 컬러 카메라(768×493), frame grabber(512×512×8

bit RGB) 및 조명장치(형광등 사용)로 구성되는 기계 시각장치(Fig. 2)를 구성하여 정지된 상태의 golden delicious를 대상으로 색깔 판별, 과실의 투영면적과 무게와의 상관관계, 기형 판정을 위한 알고리즘을 개발하였다. Golden delicious의 색상변화는 green에서 light green, yellow로 변화되는데 RGB를 HSI 색좌표계로 변환한 후 Hue 값에 따른 화소의 빈도분포도를 사용할 경우 거의 100% 색상판정이 가능하며, 사과와 투영단면적을 이용하여 무게 추정이 가능한 것으로 보고하였다. 그러나 기형의 유무를 판정하기 위해서는 시료가 놓이는 자세에 따라서는 최대 5방향에서의 영상을 획득하여 lopsidedness를 측정함으로써 판별이 가능하다고 하였다.

노 등(1992 및 1995)은 후지 사과의 크기와 색상을 온라인으로 판정할 목적으로 흑백 카메라, 두 개의 반사경, 조명장치 등으로 실험장치(Fig. 3)를 구성하고, 후지 사과의 색상이 초록에서 붉은색으로 변화하는 점에 착안하여 색깔 판정을 위해 550nm의 밴드패스필터를 카메라에 장착하였다. 이 시스템의 특징은 시료의 윗면 뿐만 아니라 시료의 양쪽에 설치한 거울에 의해 시료의 양쪽면을 동시에 볼 수 있도록 하였으며, 흑백 카메라에 특정필터를 장착하여 색상을 판정함으로써 컬러 카메라에 비해 분석대상 데이터를 약 1/3로 감소시킨 점이다. 이와같은 장치를 이용하여 색깔과 크기를 동시에 판정할 수 있는 고속 등급판정 알고리즘(gratitude method)을 개발하고 후지 사과의 크기를 8등급으로 선별한 결과 선별 정확도는 73~84%, 색깔을 3등급으로 판정한 결과 정확도는 85~95%였다. 선별 정확도는 이송절시에 놓여지는 사과의 자세와 이송속도에 따른 잔상의 영향을 받으며, 크기와 색깔을 동시에 고려할 경우 최대 선별능률은 초당 3개로 보고하였다.

토마토(fresh tomato)는 성숙 정도에 따라 6단계의 색깔(green, breakers, turning, pink, light red, red)로 구분된다. Choi 등(1995)은 토마토의 성숙도를 판정하기 위해 두 개의 확대경을 장착한 컬러 CCD 카메라와 원통형 조명장치(내부에 백열등 내장)로 실험장치를 구성하고, 시료 표면의 직반사에 의한 색상정보의 왜곡을 감소시키기 위해 polarizing filter를 카메라에 장착하였다. 입력된 영상에서 일정한 값이하의 Hue값을 갖는 화소의 면적비를 계산하고, 이를 이용하여 각 성숙단계별로 maturity index를 설정하고, 이에 따라 성숙도 선별을 수행한 결과 선별정도는 사람의 육안판정과 비교할 때 77%정도 일치하였다.

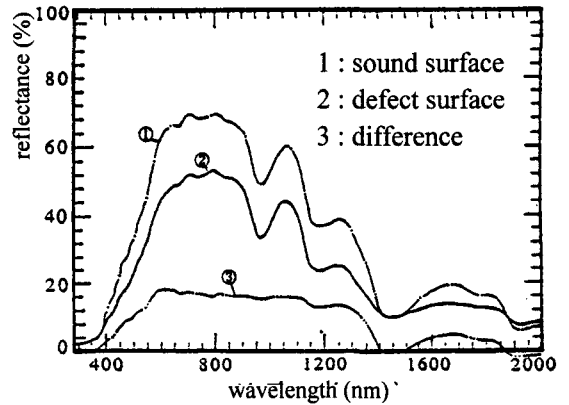


Fig. 4 복숭아의 건전부와 결함부의 분광반사도

사과의 경우 내부에 밀병(watercore)이 존재하면 저장 중에 부패가 되기 쉽다. Throop 등(1989)은 사과의 밀병 및 내부장해(internal disorder)를 판정하기 위해 고감도 비디오 카메라, 75W DC 텅스텐 할로겐 램프 등으로 실험장치를 구성하고, 사과(red delicious)의 투과영상의 평균화소치가 밀병의 유무와 상관관계가 높음을 발견하였다.

2) 과실류의 표면 결함 : 과실표면의 멍, 병반점, 상처 등 표면 결함은 사람의 눈으로는 쉽게 구분이 되지 않지만 기계시각을 이용할 경우 조명의 불균일, 결함 주변의 색상, 결함의 위치 및 크기 등에 따라 검출이 용이하지 않으며 전체표면을 검색해야 하는 어려움이 있다. 특히 멍이든 경우 표면색상은 시간이 지남에 따라 변하기 때문에 초기에는 색상에 의한 검출은 불가능하다. 일반적으로 결함의 검출은 색상의 차이보다는 근적외선 영역에서 흡광도의 차이를 이용하는 경우가 많다. Rehkugler와 Throop(1986)는 사과(red delicious apple)의 멍든 부분을 검색하기 위해 꼭지 및 화점(stem-calyx axis)의 방향이 수직이 되도록 하고, 사과를 360° 회전시키면서 line scan camera(64 elements)로 사과표면 영상을 획득하였다. 이 영상에 image filtering, differencing, binary image thresholding 등의 다단계 처리를 하여 멍든 부분을 인식하고, 면적을 계산한 다음 등급판정을 실시한 결과 사람의 육안판정 결과와 비슷하였다. Singh 등(1993)은 복숭아(major peach)의 결함(cut, scar, bruise 및 wormhole)을 판정하기 위해 특정과장대역에서 각종 결함부위와 건전부위의 분광흡수 특성의 차이(Fig. 4)가 있음을 이용하여 중심파장이 740nm이고 유효폭이 40nm인 밴드패스

필터를 카메라 렌즈에 장착하고, 근적외 영상을 획득하여 결함유무를 판정하는 연구를 수행하였다. 그 결과 판정 속도는 초당 5~10개, 판정오차는 28.6%로 나타났다. 이후 Li 등(1994)이 조명을 보다 균일화하고, 중심파장이 848nm, 밴드폭이 15.4nm인 필터를 사용함으로써 판정오류를 10%로 감소시켰다.

Delwiche 등(1993)은 카메라의 광학소자가 750nm에서 파크 감응도를 갖는 3개의 라인 스캔 카메라를 사용하여 건조된 프룬(dried prune)을 선별하기 위한 연구를 수행한 결과 선별오류가 건전한 시료의 경우 5.6%, 불건전한 시료의 경우 10.8%로 나타났으며, mold, scab 및 crack의 경우 분류 오류가 각각 3.7%, 9.1% 및 16.5%로 나타났다.

3) 화훼류의 등급판정 : 과실류의 등급판정에 대한 연구는 많이 수행되었으나, 화훼류 선별을 위한 연구는 상대적으로 미미한 실정이다. Steinmetz 등(1993)은 기계시각 시스템을 구성하여 장미 줄기의 길이, 직경 및 굽은 정도, 꽃봉오리의 단면적, 개화정도, 색깔 등 장미의 품위를 판별하는 알고리즘을 개발하였다. 줄기의 길이 및 직경 측정오차는 각각 2.2% 및 16%로 나타났고, 줄기의 굽은 정도 및 꽃봉오리의 성숙도 판정오차는 각각 15%, 및 15~17%로 나타났다.

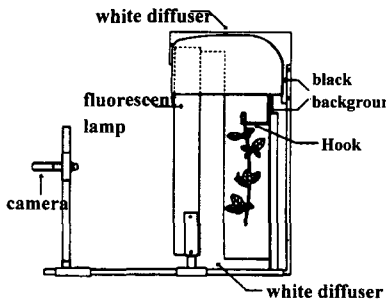


Fig. 5 기계시각에 의한 장미 선별 실험장치 (Steinmetz et al, 1993)

4) 곡류의 품위 판정 : 벼, 옥수수 등 곡류의 품질은 화학적 구성성분과 외관에 의해 좌우된다. 벼의 경우 현미상태에서 건전미, 동할미, 착색립, 활청미, 사청미, 북백립, 쇠미 등의 구성비에 따라 품위를 결정한다. Hwang 등(1996)은 현미의 품위판정을 위해 확대경, 컬러영상처리장치, 광섬유를 이용한 사광 조명 등으로 기계시각 장치를 구성하고 각종 현미 낱알의 기하학적인

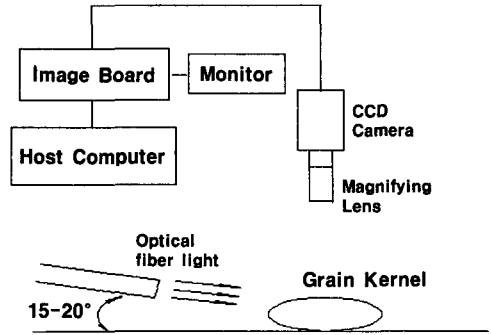


Fig. 6 기계시각에 의한 현미의 품위판정 실험장치 (황 등, 1996)

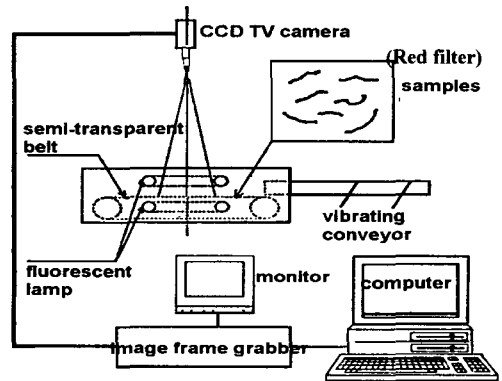


Fig. 7 영상처리를 이용한 녹차의 품질판정 장치 (Yoshitomi, 1990)

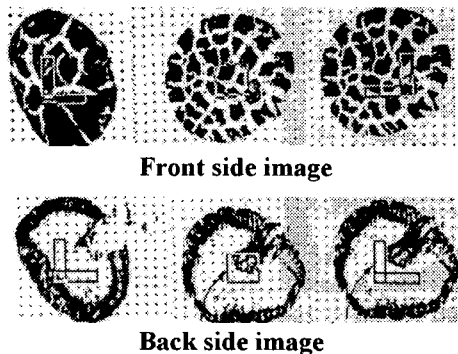


Fig. 8 표고의 영상(황 등 1994)

특징 및 광학적 특성에 대한 분석을 수행하였다. 또한, 곡립에 20° 이하의 사광을 가하고, 영상을 입력한 다음 곡립의 길이 방향으로 G값의 분포를 분석함으로써 현

미의 동할 판정이 가능하다고 보고하였다. 이때, 사광의 방향과 곡립의 장축이 이루는 각도, 사광에 대한 배아의 상대적인 위치가 동할 판정에 영향을 미친다고 보고하였다.

5) 기타 농산물의 등급판정 : 녹차(green tea)의 품질은 건조된 잎 조각(crushed leave)의 종류 및 모양별 구성비와 관련된다. Yoshitomi(1990)는 녹차의 품질을 판정하기 위해 CCD-TV 카메라, 환형 형광등 등으로 실험장치를 구성하고(Fig. 7), 건조된 각 잎 조각의 종류를 쉽게 분리시키기 위해 카메라 렌즈에 red filter(YA3)를 장착하여 품질을 판정하고 sensory test와 비교한 결과 성공적이었다고 보고하였다.

Hwang 및 Lee(1994)는 표고(oak mushroom)의 특징 추출 및 등급판정을 위한 연구를 수행한 결과 표고의 선별기준이 되는 갖의 크기, 모양, 표피의 색상, 균열 정도, 후면 끝단의 말린 두께, 후면 내피의 색상 및 정렬상태를 정량적으로 측정할 수 있는 외관 검색 소프트웨어 및 시각장치를 개발하였다. 또한 신경회로망을 이용하여 실시간 등급판정이 가능한 알고리즘을 개발하였다.

4.2. 근적외선(NIR)

1960년대초 미국 농무성의 Karl Norris는 밀이나 콩의 함수율 측정을 위해 근적외선 분광법(NIR spectroscopy)을 처음으로 적용하였고, 그 후에 응용범위가 확대되어 농업, 식품 및 사료분야 뿐만 아니라 현재에는 화학, 생화학, 화장품, 의학, 석유화학, 제약, 고분자, 제지 및 섬유분야까지 널리 보급되어 있다. 근적외선은 일반적으로 800nm~2500nm의 파장 대역으로서 어떤 분자 결합에 근적외선이 조사되면 그 분자 결합이 가지고 있는 고유한 진동 에너지에 해당하는 복사선이 흡수된다. 근적외선은 2500nm이상의 중적외선 영역에서 흡수되는 O-H, C-H, N-H, 그리고 C=O 등과 같은 작용기가 갖는 기본 진동수의 배음(overtone)과 결합음(combination)의 진동이 나타나는 대역으로 흡광도는 ① 중적외선에 비해 약 1/10~1/1000에 불과하며, ② 유사한 분자결합을 갖는 유기화합물의 흡수스펙트럼 대역이 겹쳐서 나타나는 단점이 있다. 그러나 근적외선은 중적외선에 비해 ① 상대적으로 흡수율이 작고 반사율이 크며, ② 침투깊이가 수 mm로 깊고(중적외선은 수 μm), ③ 저비용으로 광학시스템을 구축할 수 있기 때문에 비파괴 성분계측용으로 이용되고 있다.

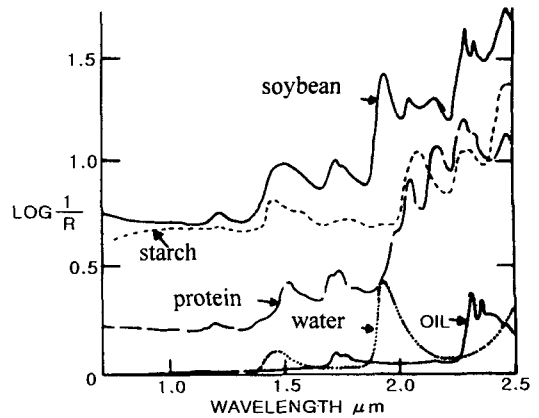


Fig. 9 콩과 콩을 구성하는 주요 성분의 흡수스펙트럼

근적외선은 유기 화합물의 흡수 스펙트럼에서 흡수 피크의 중첩으로 인해 시료의 주요 성분을 정확하게 측정하는 데는 한계가 있지만, 농산물이나 식품의 품질 판정의 경우 어느 정도의 오차가 허용되므로 유용하게 활용되고 있다. Fig. 9는 콩과 콩을 구성하는 전분, 단백질, 오일 및 물 등 주요 성분을 대상으로 근적외선 분광광도계를 이용하여 측정된 흡수 스펙트럼의 일례이다. 만약 콩을 대상으로 측정된 흡수 스펙트럼을 이용하여 콩에 포함되어 있는 단백질의 함량을 추정하고자 할 경우 단백질의 흡수 봉우리 파장(여러개가 나타나고 있음)을 먼저 결정한 다음, 이들 파장에서 콩 스펙트럼의 흡광도를 이용하여 단백질의 함량을 추정할 수 있다. 단백질에 의한 흡수파장들은 단백질 흡수 스펙트럼을 2차 미분한 후에 (-)피크를 나타내는 파장으로서 쉽게 구할 수 있다. 콩에 함유되어 있는 단백질 함량이 높을수록 단백질 흡수파장에서 콩 스펙트럼의 흡광도가 높게 나타난다. 그런데 많은 경우 특정성분의 흡수 파장이 다른 성분의 흡수파장과 중첩되기 때문에 중첩되는 성분의 영향을 배제하고, 보다 정밀한 계측을 위해 다중회귀 분석법, 주성분 분석법, 최소자승법, 신경회로망 기법 등 여러가지 스펙트럼 분석기법이 개발되어 왔다. 다음 식은 특정 성분예측을 위한 대표적인 다중회귀 모델이다.

$$C_{est} = a_0 + a_1S_1 + a_2S_2 + \dots + a_nS_n$$

여기서, C_{est} 는 특정성분의 함량, S_1, S_2, \dots, S_n 는 n개의 서로 다른 파장에서의 흡광도, 흡광도의 1차 또는 2차 미분 값(이들 값을 스펙트럼 정보라 함)이며, $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ 는 모델의 회귀계수이다.

한편, 근적외선을 이용한 비파괴 성분측정을 위해 1990년대 중반까지는 스펙트럼 측정시간이 수십초 이상 소요되는 정밀급 NIR 분광광도계로 측정된 스펙트럼을 분석하여 주요 성분을 비파괴적으로 계측하거나, 대상 성분의 주 흡수파장을 구명한 다음 그 결과를 이용하여 수초 이내에 성분을 계측하는 장치개발을 위한 연구가 주로 수행되어 왔다. 그러나 최근에는 실시간으로 스펙트럼 측정이 가능한 실시간 분광광도계의 개발과 더불어 현장의 공정라인에서 대상 성분을 실시간으로 계측하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 1960년대 근적외선 분광분석법이 개발된 이후 농산물을 대상으로 주요 성분을 비파괴적으로 측정하기 위한 몇몇 연구 사례는 다음과 같다.

1) 과실 및 과채류의 당도: 사과, 배 등 과실류와 수박, 토마토, 오이 등 과채류의 경우 수분이 80%~90% 정도이고, 그외는 당분, 섬유질 등 가용성 고형분이 포함되어 있다. 이들 농산물의 경우 당분의 함량은 맛을 결정하는 중요한 인자이기 때문에 당함량을 선별라인에서 비파괴적으로 실시간으로 측정하는 기술을 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. Kawano 등(1992)은 광섬유를 이용한 근적외선 분광분석장치를 이용하여 복숭아의 비파괴 당도측정 가능성에 대해서 검토하였다. 복숭아의 흡수 스펙트럼을 2차미분한 결과 당분중에서 복숭아에 가장 많이 함유되어 있는 자당(sucrose)의 흡수파장인 906nm에서 당도에 따라 2차 미분값에 큰 차이가 있음을 발견하고 906nm를 비롯한 878, 870 및 889nm에서 구한 흡수스펙트럼의 2차미분값을 독립변수로 하여 당도에측 회귀식을 개발하였다. 吉川 등(1990)은 미니토마토에 대해 600~2500nm의 흡수 스펙트럼을 측정하고, 1차 및 2차 미분 스펙트럼 정보를 이용하여 당함량 및 산함량과 상관관계가 높은 파장을 통계적인 방법을 적용하여 구하였다.

노 등(1996)은 후지 사과를 대상으로 온라인 비접촉 당도 판정장치를 개발할 목적으로 일차적으로 정밀급 분광광도계를 이용하여 650nm~1050nm 범위에서 측정된 후지 사과의 흡수 스펙트럼 정보와 당도와의 상관관계를 분석하였다. 그 결과 당도판정이 가능함을 발견하고 이 파장 범위에서 실시간 스펙트럼 측정이 가능한 spectrometer(OceanOptics PCD1000)를 이용하여 비접촉 당도판정 장치를 구성한 다음 사과의 당도에 따른 흡수 스펙트럼의 2차 미분 정보를 이용하여 당도를 예측하는 회귀식을 개발하고 검정을 수행하였다. 그 결과 표준검정오차(SEP)가 1.59 Brix%로서 비교적

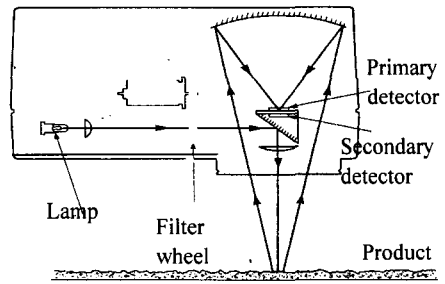


Fig. 10 NIR을 이용한 곡물의 온라인 함수율 측정 장치의 센서부(Infrared Engineering Ltd)

크게 나타났으며, 실시간 spectrometer의 S/N비의 개선이 필요한 것으로 보고하였다. 최근 일본에서는 근적외선 분광분석법을 이용하여 5대과일(사과, 배, 복숭아, 단감, 감귤)의 당·산도를 선별라인에서 실시간으로 측정할 수 있는 장치가 개발되어 시판되고 있으나 노하우가 알려져 있지 않으며, 고가로 판매되고 있다.

2) 곡류의 함수율 및 주요 성분: 곡류원료 또는 분쇄된 곡물의 함수율, 지방, 단백질, 아미노산 등 주요 성분의 비파괴 측정기술은 원료의 품질판정과 건조 또는 가공 공정제어를 위해 대단히 중요하다.

Norris 등(1965)이 근적외선 분광분석법을 이용하여 콩과 밀의 함수율을 측정하기 위한 연구를 처음으로 수행한 이후 함수율 측정에 관한 연구가 다수 수행되었다. 함수율과 유의성이 높은 파장은 1800nm, 1940nm, 2080nm이고, 이들 파장에서 흡광도는 함수율 뿐만 아니라 대상시료의 온도, 입도 및 시료층의 두께에 영향을 받는다고 보고하였다. Fig. 10은 현재 제품화된 분쇄된 곡류의 온라인 함수율 측정장치이다. 이 장치는 분쇄된 곡물의 입도와 시료층의 두께 등의 영향을 배제하기 위해 수분의 흡수파장인 1940nm와 제2의 파장에서 흡광도의 비를 이용한 것으로 회전필터를 이용하여 이들 두 파장에서의 흡광도를 측정하고 있다. Williams 등(1984)은 밀과 보리에서의 아미노산을 측정하기 위해 근적외선을 이용하였다. 이들은 밀에 대해서는 흡광스펙트럼의 2차 미분, 보리에 대해서는 1차 미분값을 이용할 경우 좋은 결과가 나타난다고 보고하였다. Delwiche(1993)는 밀의 경도를 측정하기 위해 근적외선 스펙트럼을 이용하여 다중선형회귀(MLR) 모형과, PLS회귀 모형을 개발하였으며, 또한 그는 쌀의 아밀로오스 성분 함량 측정을 위한 연구를 수행하였다(1995).

3) 우유 및 유제품의 주요 성분 : Rodriguez 등(1995)은 치즈에 함유된 지방, 단백질 및 전체 고형분 함량을 근적외선 분광분석법에 의해 예측하였는데 상관계수 0.98의 매우 좋은 결과를 얻었다. Diaz Carrillio 등(1993)은 근적외선을 이용해 염소젖을 치즈로 변환시키는데 중요한 casein의 함량을 측정하였고, Pedretti 등(1992)은 근적외선을 이용하여 우유의 이물질이나 첨가제의 검출이 가능하다고 보고하였다. 실제 낙농 산업에서 근적외선을 이용한 대표적인 온라인 측정장치는 Asimopoulos와 Pope(1994)가 우유, 분유, 버터 및 치즈에 함유된 지방, 단백질, 수분 및 염분의 함량을 측정하기 위해 개발한 장치(LT Industries, Rockville, Maryland USA)이다.

4.3. RF 및 마이크로 웨이브

수분을 함유한 유전체(dielectrics)가 고주파 전기장에 놓이면 물분자와 같이 쌍극자 모멘트(dipole moment)를 가진 분자들은 전기장의 방향으로 배열하려는 힘 때문에 회전과 진동을 유발하고, 쌍극자의 방향이 전기장의 변화를 따라가지 못하기 때문에 이를 극복하기 위한 에너지가 손실된다. 또한 유전체내에 전자와 전공 등과 같은 자유전하 carrier가 존재할 경우 저항성 손실도 발생된다.

교번전계내에서 유전체의 이와같은 전기적 특성은 Fig. 11과 같이 손실이 전혀 발생하지 않는 커패시터와 그와 병렬로 연결되는 저항으로 표시되는 등가회로로 표시할 수 있으며, 유전특성은 복소유전율(complex permittivity)로 표시된다.

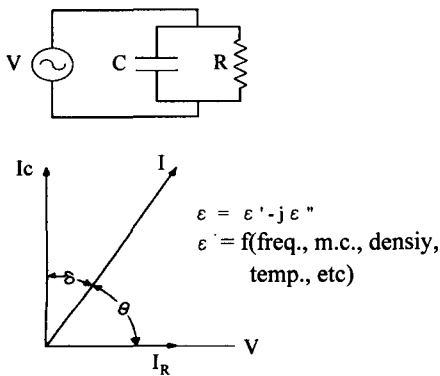


Fig. 11 커패시터에 채워진 유전체의 유전특성을 나타내기위한 등가회로 및 페이스 선도

농산물은 수분을 내포하는 유전체로서 수분은 RF 및 마이크로 웨이브 영역에서 다른 유기화합물에 비해 상대적으로 큰 유전상수값을 가지고 있으므로 이러한 유전상수의 변화를 이용하여 농산물의 함수율을 측정할 수 있다. 일반적으로 모든 농산물은 수확당시의 함수율이 곡류의 경우 25~35%(w.b.), 과실류의 경우 85%이상으로 농산물의 종류에 따라 차이가 있으며, 가공 및 저장 과정에 품질관리를 위해 함수율을 신속 정확하게 측정하는 기술이 요구된다.

Nelson 등(1953, 1965)은 Q-meter를 이용하여 1~50 MHz에서 보리, 밀, 옥수수 등의 함수율에 따른 샘플홀더의 리액턴스 변화를 이용하여 유전상수, 유전손실, 교류전도도 등을 측정하였으며, Jorgenson 등(1970)은 Boonton type RX meter와 샘플홀더를 브릿지 회로로 구성하여 고주파 영역인 50~200 MHz에서의 곡류와 씨앗의 함수율에 따른 복소유전율을 측정하였다.

Stetson 등(1970)은 200~500 MHz 범위에서 곡류와 씨앗이 채워진 샘플홀더의 어드미턴스를 이용하여 유전특성을 측정하는 장치를 개발하였으며, Corcoran 등(1970)은 가청주파수 영역에서 임피던스 브릿지 회로를 구성하여 밀, 알과파, 옥수수 등의 복소유전율을 측정하였다. Noh 와 Nelson(1986)은 5 MHz-12 GHz 범위에서 벼의 유전특성을 측정하고, 측정 주파수, 시료의 함수율 및 산물밀도를 독립변수로 하는 유전상수 예측모델을 개발하였다.

기초연구 결과 곡물류의 유전상수는 함수율 뿐만 아니라 샘플홀더내의 곡물의 산물밀도와 온도, 측정 주파수 및 곡류의 종류에 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 유전특성을 이용한 함수율 측정장치를 개발하기 위해서는 무엇보다도 샘플홀더내의 시료의 산물밀도를 일정하게 유지시키거나, 산물밀도 변화에 무관한 측정법을 개발하는 것이 과제다. Kandala 등(1986, 1987, 1989, 1990, 1991)은 옥수수 단립의 수분을 측정하기 위해 작은 평행판 커패시터를 제작하고, 평판사이에 놓여진 단립의 두께, 투영면적 및 무게와 1MHz와 4.5MHz에서 정전 용량 변화와의 상관관계를 구명함으로써 함수율을 측정하는 장치를 개발하였다. Nelson, Kraszewski 등(1992)은 RF 및 마이크로 웨이브대역에서 soybeans, field corn, popcorn, peanuts, pecans을 대상으로 단립의 크기와 형상에 무관한 함수율 측정법을 개발하였다. Kim과 Noh(1997)는 평행판 샘플홀더, 발전장치, 샘플홀더의 무게측정장치, 시료의 온도측정장치를 이용하여 곡류용 정전용량식 온라인 함수율 측

정장치를 개발하였다. 시료의 함수율에 따른 전극판의 고주파 정전용량의 변화는 발전장치의 주파수 변화를 통해 감지하고, 샘플홀더 내의 시료의 산물밀도의 영향은 시료의 무게를 측정함으로써 배제하였다.

4.4. 핵자기공명(NMR) 및 자기공명 영상(MRI)

원자핵들은 하나의 축을 중심으로 회전하고 있으며, 그 결과 회전 및 자기 모멘트를 갖는다. 회전모멘트를 가지는 원자핵이 축회전수와 같은 주파수로 변하는 자기장 내에 위치하면 공명을 일으키면서 에너지를 흡수하는 자기공명현상이 1946년 미국 Harvard 대학에서 처음으로 발견되었다. 모든 원자핵이 이러한 핵자기공명을 일으킬 수 있는 자기성 즉 자기모멘트를 갖는 것은 아니며, 양자와 중성자 수의 합이 홀수인 원자핵만이 이러한 성질을 갖는다. 대표적인 예를 들면, ^1H , ^{13}C , ^{19}F , ^{31}P 등을 들 수 있다.

어떤 물질이 다량의 수분을 포함하고 있을 때, 물 분자를 이루는 수소 원자핵의 99.98%는 ^1H 상태로 존재하며 자기모멘트를 가진 하나의 조그만 자석으로 생각할 수 있다. 각각의 수소 핵들은 임의로 배열되어 있으므로 전체적으로 볼 때 자성을 띠지 않는다. 만약 그 물질을 수천 gauss의 강한 자기장 (B_0) 속에 두면, 각 수소 핵의 회전 자기모멘트는 강한 외부의 자장의 방향으로 정렬하게 된다. 동시에 각 수소 핵들은 자장의 방향을 기준으로 하여 세차 (precession) 운동을 하게 된다. 세차 운동의 각속도는 원자핵의 종류에 따라 고유한 값을 가지며, 외부 자장의 세기에 비례하여 변한다. 즉, 수소원자는 1000 gauss 자장 속에서 4.26MHz의 속도로 세차운동을 한다.

강한 자장 B_0 에 수직인 방향으로(X축) 또 하나의 비교적 약한 수십 gauss 정도의 무선주파수(radio-frequency) 범위의 진동자기장 (oscillating magnetic field) B_1 을 수소원자핵의 세차운동 각속도와 같은 주파수로 걸어주면 공명현상을 일으켜 에너지를 흡수하고, B_1 자장을 소멸시키면 외부로 에너지를 방출하여 공명신호(resonance signal)를 발생시킨다. 흡수된 에너지가 이완될 때 나타나는 이완시간은 T_1 (spin-lattice relaxation time)과 T_2 (spin-spin relaxation time)로 표시한다. T_1 은 원자핵의 이완이 핵주위의 환경과의 사이에서 일어날 때의 이완시간이고, T_2 는 원자핵 사이에서 일어나는 이완시간이다.

T_1 과 T_2 는 물질의 상 또는 종류에 따라 다른 값을 가지며, T_2 값은 고체상일수록 짧고, 액체상일수록 길다. 또한 물과 기름의 시간정수들은 상이한 값을 갖는다. 이러한 특성들은 검사물질의 화학적 성분 분석 및 의학적 진단에 널리 사용되고 있다.

핵자기공명(NMR)은 수소원자핵의 농도를 감지하는 기술로서, 특히 물질내에 있는 물과 오일의 농도 및 운동성에 민감한 반응을 나타내며, 곡류와 씨앗류의 수분이나 오일 함량의 측정을 위한 연구가 수행된 바 있다. Brusewitz와 Stone은 NMR 기술을 이용하여 밀의 함수율을 측정된 결과, 유전율에 의한 함수율 측정보다 정밀도가 높다고 하였다. FID(free induction decay)는 밀의 경우, 함수율 8%~15%의 범위에서 0.98의 결정계수를 갖는 선형적인 상관관계를 나타냈다.

과실류와 채소류는 성숙과정에서 수분, 오일, 당함량의 변화가 일어나며, 이들 내에 존재하는 수소원자의 농도와 이동성(mobility)에도 변화가 일어난다. 또한 이들의 변화는 과실의 기계적 손상, 조직파괴, 과숙, 고온장애, 동해(frost damage)에도 나타난다. 따라서 핵자기공명은 과실내에서 일어나는 여러 가지 품질변화를 측정할 수 있는 가능성을 가지고 있다.

이와 같은 이유로 NMR을 이용한 내부품질판정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Chen 등(1993)은 아보카도의 성숙도, Zion 등(1994)은 prune의 당함량, cherry 내의 pit의 유무, 메론의 조직파괴 등을 NMR기술을 이용하여 신속하게 평가할 수 있다고 하였다. 그들은 아보카도의 오일함량과 prune의 당도를 측정하기 위해 직경이 2cm인 원형의 표

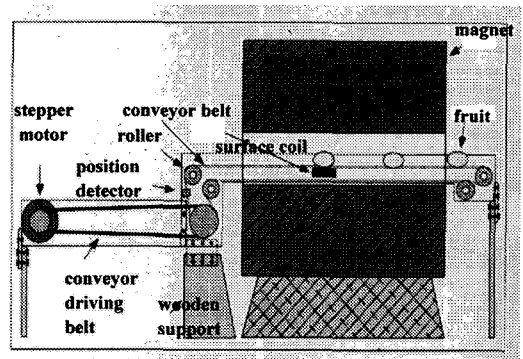


Fig. 12 NMR을 이용한 아보카도의 온라인 오일 판정장치의 단면도(Chen 등, 1995)

면 코일(surface coil)을 사용하였다. 이와 같은 코일을 사용함으로써 과실의 크기나 과실내에 포함되어 있는 씨앗 등의 영향을 감소시킬 수 있다고 보고하였다. 또한, Chen 등(1995)은 자기장에 영향을 주지 않는 특수한 이송벨트를 제작(Fig. 12)하여 과실을 이송시키면서 온라인 상태에서 과실의 내부 품질을 측정할 수 있는 장치를 개발하고, 아보카도를 대상으로 오일과 수분의 공명 피크 비와 건물중량과의 상관관계를 구명한 결과, 이송속도 250mm/s에서 결정계수가 0.98로 매우 높게 나타났다고 보고하였다.

Purdue 대학의 연구자들은 높은 분해능과 낮은 분해능을 갖는 NMR spectrometer를 사용하여 과실류의 내부 품질을 판정하였다. 분해능이 200MHz인 spectrometer를 사용하여 과실류의 시편(사과, 칸타로프, 바나나)을 대상으로 당함량을 측정된 결과, 당함량은 NMR 스펙트럼의 당 피크점의 진폭으로부터 얻을 수 있다고 보고하였다(Cho, 1989; Cho 등, 1991). 또한 Cho 등(1990)은 시료의 지름이 30mm까지 수용가능한 낮은 분해능(5.35 MHz)의 양자 자기공명 센서를 고안·제작하였으며, 이 장치를 이용하여 크기가 작은 과실류와 크기가 큰 과실류의 시편을 대상으로 당함량을 측정하는 실험을 수행하였다. Ray 등(1993)은 이 센서의 설계를 개선, 제작한 후에 이 장치를 이용하여 Bing 체리의 당함량을 측정하였다. 그 결과 spin echo 비(SER)와 과실류의 당함량 사이에 높은 상관관계가 있음을 보고하였다 ($r^2 = 0.91$).

조 등(1994)은 과실의 내부품질 판정을 위해 영구자석 상자, RF/감지코일, R-C-L 직렬동조회로, RF 신호 발생장치, RF 펄스 프로그래머 및 증폭장치 등으로 구성되는 NMR 장치를 설계/제작하였으며, NMR 펄스발생 및 공명신호를 수집·분석하기 위한

전체 운용프로그램을 개발하였다. 제작된 NMR장치를 이용하여 사과와 배의 시편과 키위 및 금귤을 대상으로 NMR신호와 당도를 신경회로망으로 학습하여 당도예측 모델을 개발하고 검증한 결과, 사과, 배, 키위 및 금귤에 대한 SEP는 각각 0.565, 0.394, 0.415 및 1.461 Brix%로 나타났다. 이 결과 사과와 배는 3등급, 키위와 금귤은 2등급까지 당도선별이 가능한 것으로 보고하였다. 또한, NMR 신호의 강도와 키위 중량과의 상관관계는 결정계수가 0.902로서 과실의 당도 및 중량을 동시에 판정할 수 있다고 하였다. 또한 조와 정은(1996) 이 장치를 이용하여 배의 함수율을 측정하는 알고리즘을 개발하고, 함수율 예측 모델을 개발한 결과, 이 모델의 결정계수와 SEC는 각각 0.983 및 0.467%, 였으며, 검증 결과 결정계수와 SEP는 각각 0.985 및 0.513%로 나타났다고 보고 하였다.

NMR에 근거하는 MRI는 상업적으로 의학분야에서 종양이나 다른 비정상적인 것들을 검출하기 위해 사용되어 왔다. 최근 과실류나 채소류에서 내부결합이나 내부 품질 인자들을 검출할 수 있는 가능성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. UC Davis의 Chen(1989)등은 MRI장치(General Electric, CSI-2)를 이용하여, 과실류와 뿌리 채소류를 대상으로 이들의 여러 가지 내부품질을 판정하기 위한 연구를 수행하였다. 그 결과 MRI를 이용할 경우 해상도가 높은 영상획득이 가능하다는 것을 밝혔으며, 과실류의 명, 별레에 의한 손상, 내부갈변, 성숙도, 내부 공동, 씨앗의 유무 등 내부 결함을 비파괴적으로 검출할 수 있다고 보고하였다. 또한 공명지연(echo delay), 해상도, 스캔닝 두께(scanning slices) 등이 자기공명 영상획득과 관련되는 주요한 인자임을 발견하였다.

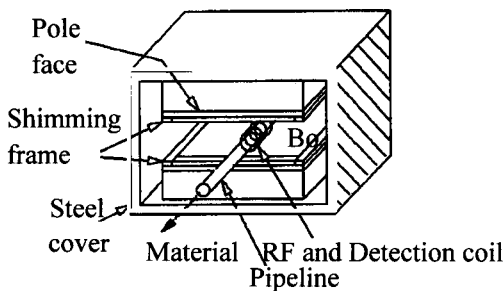


Fig. 13 영구자석을 이용한 저분해능 자석상자의 개략도(조 등, 1994)

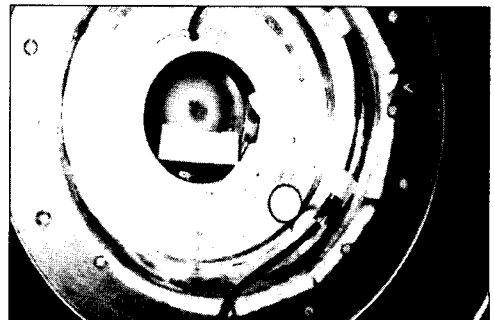


Fig. 14 자기공명 영상을 얻기위한 Magnetic console 내의 사과시료

4.5. 음파 및 초음파

초음파가 어떤 매질을 통과할 때 매질의 특성(탄성계수, 포아송비, 밀도, 다공성 등)에 따라 속도와 진폭이 변화하며, 반사와 산란이 일어나는 특성을 이용하여 각종 농축산물 및 식품의 품질을 비파괴적으로 측정하기 위한 연구가 약 40년전부터 수행되어 왔다.

초기에는 주로 매질의 특성에 따른 1~10MHz 초음파의 속도변화를 이용하여 육류 또는 살아있는 가축을 대상으로 피하지방, 총 지방, lean 등을 판정하기 위한 연구(Temple, 1956, Stouffer et al, 1961, Johnson et al, 1964)와 액상식품(쥬스, 포도주, 우유 등)을 대상으로 쥬스 즙(fruit flesh), 알콜, 지방, 고형분 함량(soluble solid) 등을 측정하는 연구(Zacharias et al, 1972, Winder et al, 1970, Fitzgerald et al 1961)를 수행하였으며, 그 이후 많은 연구를 통하여 살아있는 가축의 피하지방층의 두께를 측정하는 실용화 장치를 개발하는 데 성공하였다(Wallace et al., 1977; Alliston, 1982).

그러나 과실류나 채소류의 내부품질을 평가하는데 초음파를 이용하는 방법은 그다지 성공적이지 못했다. 그 이유는 이들 농산물은 다공성(porous) 물질로서 1~10MHz의 초음파의 경우 산란에 의한 감쇄가 극심하게 일어나기 때문이다. Sarker와 Wolf (1983)는 농산물 및 가공식품의 품질평가를 위한 초음파 기술의 이용 가능성에 대하여 연구한 결과, 토마토, 멜론, 사과 조직의 감쇠계수는 0.5~1.0MHz에서 매우 높은 값을 나타내며, 토마토 내부의 crack을 감지하기 위해서는 후면산란(back scattering)을, 오렌지의 표면조직상태를 구명하기 위해서는 반사도를 이용하는 것이 바람직하다고 보고하였다. Upchurch 등(1987)은 손상된 사과 조직과 손상되지 않은 사과 조직을 구별하는데 1MHz 초음파를 사용하였지만 좋은 결과를 얻지 못하였으며, 과실류 조직의 다공성 때문에 주파수가 높은 초음파는 과실류를 깊숙히 관통하지 못한다고 결론을 내렸다. 그러나 Hoki와 Tomita(1975)는 200KHz 정도의 낮은 주파수의 초음파는 공을 성공적으로 관통하며, 관통 속도와 공의 함수율 사이에는 높은 상관성이 있음을 밝혔다. Mizrach 등(1989)은 과실류나 채소류의 기초적인 음파특성을 구명하기 위해 낮은 주파수(50KHz)의 초음파를 사용하였으며, 또한 아보카도나 다른 신선한

농산물의 내부 품질 판정에 대한 초음파 기술의 사용 가능성에 대해 고무적인 결과를 발표하였다(Galli et al., 1993; Mizrach et al., 1994). Haugh(1994)는 감자 내부의 공동을 감지하기 위하여 250KHz의 dry-coupling broad-band transducer를 사용하였다. 공동을 가진 감자를 투과하여 전달된 초음파 신호는 정상적인 감자의 신호와는 다르다고 보고하였으며, 흠이 있는 감자로 전달된 초음파 신호의 power spectral moment를 기초로 선별할 수 있는 것으로 보고하였다.

5. 결 언

농산물의 비파괴 품질측정을 위해 적용가능한 여러가지 요소 기술 중에서 기계시각, 근적외선, RF 및 마이크로웨이브, NMR 및 MRI와 초음파 기술분야의 연구 및 기술개발 동향에 대해 문헌을 중심으로 살펴보았다.

기계시각은 인간의 시각을 대신하는 기술로 농산물의 외관 품질과 관련된 인자의 측정을 위해 많은 연구가 수행되어 왔다. 각종 과실류의 크기와 색깔판정 시스템은 이미 현장에 보급되고 있으나, 표면 결점의 검출 및 모양판정을 위한 장치 개발은 미흡한 실정이다. 또한 지금까지는 대부분 2차원 영상을 대상으로 정보를 분석하고 있으나, 농산물은 3차원 형상임을 감안할 때 보다 정밀한 분석을 위해 3차원 영상분석 기술이 개발되어야 할 것으로 판단된다.

근적외선을 이용하는 비파괴 측정기술은 과채류의 당도, 곡류의 함수율, 경도 및 아밀로오스 함량, 우유 및 유제품의 지방, 단백질 및 고형분 함량 등 주로 내부품질인자의 측정을 위해 많은 연구가 수행되어 왔다. 근적외선의 경우 실시간 스펙트럼센서의 개발과 함께 측정속도가 실시간으로 단축될 것으로 예상된다. 앞으로 NIR imaging 및 멀티 스펙트럼 영상분석 카메라의 응용에 대한 연구가 확대 될 것으로 전망된다.

RF 및 마이크로웨이브는 주로 곡류의 함수율 측정에 이용되고 있으며, 일부 과채류(수박, 멜론 등)의 속도 및 내부 공동판정을 위한 연구가 수행된 바 있다. 함수율 측정장치의 경우 시료의 산물밀도 보정법에 대한 연구가 진행되고 있다.

핵자기공명 및 자기공명 영상 기술은 비교적 최근에 관심을 불러 일으키는 기술로서 과채류의 당

도, 오일 및 내부결합, 곡류의 함수율 측정장치 개발을 위해 많은 연구가 수행되고 있다. 현재까지는 측정장치가 고가이기 때문에 실용화에는 문제가 있는 것으로 판단되며, 실용화를 앞당기기 위해 저분해능 NMR장치의 개발에 관한 연구가 예상된다.

초음파 기술은 주로 육류의 육질 및 살아있는 가축의 육질판정에 적용하기 위해 많은 연구가 수행되었다. 현재 가축의 육질 판정용 실용화장치가 개발되어 사용되고 있으나, 정밀도 면에서 개선의 여지가 있는 것으로 보고되고 있다. 과채류 등의 속도, 내부공동 및 내부결합등의 판정장치 장치 개발을 위해 다수의 연구가 수행되고 있으나, 다공성이 높은 농산물의 경우에는 500kHz이하의 저주파를 이용하는 것이 효과적인 것으로 보고되고 있다.

참고 문헌

- 1) J. C. Alliston, A. J. Kempster, M. G. Owen, and M. Ellis, "An evaluation of three ultrasonic machines for predicting the body composition of live pigs of the same breed, sex and live weight", *Anim Prod* 35, pp. 165-169, (1982)
- 2) G. Asimopoulos, J. M. Pope. "On-line monitoring of dairy products with the use of NIR technology", *Proc. of Food Processing Automation Conference III, Orland, Florida (USA) 9-12 February 1994* pp. 266-270, (1994)
- 3) T. W. Athey, M. A. Stuchly and S. S. Stuchly, "Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: Part I" *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-30, No. 1 pp. 82-86, (1982)
- 4) G. S. Birth, G. G. Dull, W. R. Renfro and S. J. Kays, "Nondestructive spectrophotometric determination of dry matter in onions", *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 110(2) pp. 297-303, (1985)
- 5) G. H. Brusewitz and M. L. Stone, "Wheat moisture by NMR", *Trans. of ASAE* 30(3) pp. 858-862, (1987)
- 6) P. Chen, M. J. MacCarthy, R. Kautenm, "NMR for internal quality evaluation of fruits and vegetables", *Trans. of ASAE* 32(5) pp. 1747-1735, (1989)
- 7) P. Chen, M. J. MacCarthy, R. Kauten, Y. Sarig and S. Han, "Maturity evaluation of avocados by NMR methods", *J. of Ag. Engng Res.* 55(3) pp. 177-187, (1993)
- 8) P. Chen, M. J. MacCarthy, S. M. Kim and B. Zion, "Development of a high-speed NMR technique for sensing fruit quality", *ASAE Paper No. 953613. Presented at ASAE 1995 Annual Int'l Meeting, June 18-23, 1995, Chicago Illinois, (1995)*
- 9) Cho, H. K. and Y. Kwon, "Detection of surface defects in eggs using computer vision", *Journal of KSAM* Vol. 20(4), pp. 368-375, (1995)
- 10) Choi, K., G. Lee, Y. J. Han, and J. M. Bunn, "Tomato maturity evaluation using color image analysis", *Trans. of ASAE* 38(1) pp. 171-176, (1995)
- 11) Cho, S. I, "Development of a nuclear magnetic resonance based sensor to detect ripeness of fruit", *Ph.D. Thesis. Agricultural Engineering Department, Purdue Univ. Indiana, (1989)*
- 12) P. T. Corcoran, S. O. Nelson, L. E. Stetson and C. W. Schlaphoff, "A Determining dielectric properties of grain and seed in audiofrequency range", *Trans. of ASAE. Vol. 13(3)* pp. 348-351, (1970)
- 13) Dekker, E. and P. D. Visser, "A Machine vision system for rice grading", *Agricultural Engineering Dept. LSU, (1988)*
- 14) Delwiche, S. R., "Measurement of single kernel wheat hardness sing near-infrared transmittance", *Trans. of ASAE Vol. 36(5)* pp. 1431-1437, (1993)
- 15) S. R. Delwiche, M. M. Bean, R. E. Mille, and P. C. Williams, "Apparent amylose content of milled rice by near-infrared reflectance spectrophotometry", *Cereal Chemistry*, 72(2) pp. 182-187, (1995)
- 16) E. Diaz-Carrillio, A. Munoz-Serrano, A.

- Moraga and J. M. Serradilla-Manrique, "Near-infrared calibrations for goat's milk components: proteins, total casein, alpha-, beta- and kapa-caseins, fat and lactose", *Journal of Infrared Spectroscopy*, 1:3 pp. 141-146, (1993)
- 17) G. G. Dull, G. S. Birth, D. A. Smittle and R. G. Leffler, "Near infrared analysis of soluble solids in intact cantaloupe", *J. Food Sci.* 54(2), pp. 393-395, (1989)
- 18) G. G. Dull, G. S. Birth and R. G. Leffler, "Use of near infrared analysis for the nondestructive measurement of soluble solids in honeydew melons", *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.* 35(2), pp. 735-737, (1989)
- 19) J. W. Fitzgerald and W. C. Winder, "An ultrasonic method for measurement of solids-not-fat and milk fat in fluid milk", *J. Dairy Sci.* 44 pp. 1165, (1961)
- 20) N. Galili, G. Rosenhouse, and A. Mizrach, "Ultrasonic technique for fruit and vegetable quality evaluation", *Proc. 4th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetables Production Engineering*, March 22-26, Valencia-Zaragona, Spain, pp. 281-289, (1993)
- 21) S. Gunasekaran, T. M. Cooper, and A. G. Berlage, "Evaluating Quality Factors of Corn and Soybeans Using a Computer Vision System", *Transactions of ASAE* 31(4), pp. 1264-1271, (1988)
- 22) S. Gunasekaran, and M. R. Paulsen, "Automatic, nondestructive detection of corn kernel defects", *Int. Advances in Nondestructive Testing*, 12 pp. 95-115, (1986)
- 23) M. Hoki, and K. Tomita, "Mechanical properties of soybeans by means of ultrasonic measurements", *Bulletin of Agriculture, Mie University*, No. 49 pp. 295-300, (1975)
- 24) C. S. Hwang, S. H. Noh and J. W. Lee, "Algorithm for discrimination of brown rice kernels using machine vision", *Proc. of KSAM '96 conference* pp. 53-57, (1996)
- 25) H. Hwang, and C. H. Lee, "Automatic recognition of the front/back sides and stalk states for mushrooms", *Journal of KSAM*, Vol. 19(2), pp. 124-137, (1994)
- 26) T. Isaksson, G. Tøgersen, A. Iversen and K. I. Hildrum, "Non destructive determination of fat, moisture and protein in salmon fillets by use of near-infrared diffuse spectroscopy", *J. of the Science of Food and Agriculture*, 69(1) pp. 95-100, (1995)
- 27) E. K. Johnson, R. L. Hiner, R. H. Alsmayer, L. E. Campbell, W. T. Platt, and J. C. Webb, "Ultrasonic pulse-echo measurement of livestock physical composition", *Trans. of ASAE* 7(3), pp. 246-249, (1964)
- 28) F. L. Jorgenson, A. R. Edison, S. O. Nelson and L. E. Stetson, "A bridge method for dielectric measurements of grain and seed in the 50- to 250-MHz range", *Trans. of ASAE*, pp. 18-24, (1970)
- 29) Kandala. V. K. Chari, R. G. Leffler., S. O. Nelson and K. C. Lawrence, "Capacitive sensors for measuring single-kernel moisture content in corn", *ASAE Paper No. 86-3004*, (1986)
- 30) S. Kawano, H. Watanabe and M. Iwamoto, "Determination of sugar content in intact peaches by near infrared spectroscopy with fiber optics in interactance mode", *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 61(2), pp. 445-451, (1992)
- 31) C. S. Kim, J. F. Reid, and M. R. Paulsen, "Algorithms for automatic detection of corn stress cracks", *ASAE Paper No. 89-7508* (1989)
- 32) X. Li, T. Iwao, T. Fujiura, S. Shibusawa, K. Takeyama and K. Mohri, "Damaged fruits inspecting system by machine vision(part2)", *Journal of JSAM* 56(1), pp. 37-44, (1994)
- 33) J. A. Marchart, C. M. Onyango, and M. J. street, "High speed sorting of potatoes using computer vision", *ASAE Paper 883540*, (1988)
- 34) T. Matsuhisa, and A. Hosokawa, "Quantitative measurement of the texture and cracks of hulled nonglutinous rice grains using image

- data processing system", JSAM 45(3), pp. 357-368, (1983)
- 35) B. K. Miller, and M. J. Delwiche, "Spectral analysis of peach surface defects", Trans. Amer. Soc. Agr. Eng. 34(6) pp. 2509-2515, (1991)
 - 36) B. K. Miller, and M. J. Delwiche, "Peach Defect Detection with Machine vision", Trans. of ASAE 34(6), pp. 2588-2597, (1991)
 - 37) A. Mizrach, N. Galili, and G. Rosenhouse, "Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation", Trans. of ASAE 32(6), pp. 2053-2058, (1989)
 - 38) A. Mizrach, N. Galili, and G. Rosenhouse, "Determining quality of fresh products by ultrasonic excitation", Food Technology, 48(12) pp. 68-71, (1994)
 - 39) S. O. Nelson, "Dielectric properties of grain and seed in the 1 to 50-MC", Trans. of ASAE, Vol. 8(1), pp. 38-48, (1965)
 - 40) S. O. Nelson, and K. C. Lawrence, "RF Impedance sensing of moisture content in individual dates", ASAE. Paper No. 926507, (1992)
 - 41) S. H. Noh, J. W. Lee, and S. H. Lee, "Development of a Fruit Grader using Black/White Image Processing System", Journal of KSAM, Vol. 17(4), pp. 354-369, (1992)
 - 42) S. H. Noh, K. H., Ryu, and S. M. Kim, "Classification of apple coloration using image processing system", Journal of KSAM, Vol. 16(3) pp. 272-280, (1991)
 - 43) K. H. Norris, and J. R. Hart, "Direct spectrophotometric determination of moisture content of grain and seeds", Pages 19-25: Principles and Methods of Measuring Moisture in Liquids and Solids. Vol. 4. A. Wexler, ed. Reinhold, New York., (1965)
 - 44) N. Pedretti, D. Bertrand, M. F. Devaux and A. Sire, "Identification of chemical constituents by multivariate near-infrared spectral Imaging", Anal. Chem. 64 pp. 664-670, (1992)
 - 45) J. A. Ray, R. L. Strohshine, G. W. Krutz, and W. K. Wai, "Quality sorting of sweet cherries using magnetic resonance", ASAE Paper No. 93-6071. St. Joseph, MI., (1993)
 - 46) G. E. Rehkugler, and J. A. Throop, "Image processing algorithm for apple defect detection", Trans. of the ASAE. 32(1), pp. 267-272, (1986)
 - 47) J. L. Rodriguez-Otero, M. Hermida and A. Cepedadsa, "Determination of fat, protein and total solids in cheese by near infrared reflectance spectroscopy", Journal of AOAC International, 78(3), pp. 802-806, (1995)
 - 48) N. Sarker, and R. R. Wolfe, "Potential of ultrasonics measurements in food quality evaluation", Trans. of ASAE 26(2), pp. 624-629, (1983)
 - 49) N. Sarker, and R. R. Wolfe, "Computer vision based system for quality separation of fresh market tomatoes", Trans. of ASAE, 28, pp. 1714-1718, (1985)
 - 50) N. Sarker, and R. R. Wolfe, "Feature extraction technique for sorting tomatoes by computer vision", Trans. of ASAE. Vol. 28(3), pp. 970-979, (1985)
 - 51) N. Singh, M. J. Delwiche and R. S. Johnson, "Machine vision algorithms for defect grading of stonefruit", Trans. of ASAE, 93-3005, (1993)
 - 52) V. Steinmetz, M. J. Delwiche, D. K. Giles, and R. Evans, "Grading roses with machine vision", Trans of ASAE. 93-6070, (1993)
 - 53) L. E. Stetson and S. O. Nelson, "A method for determining dielectric properties of grain and seed in the 200- to 500-MHz range", Trans. fo ASAE pp. 491-495, (1970)
 - 54) J. R. Stouffer, M. V. Wallentine, G. H. Wellington, and A. Diekmann, "Development and application of ultrasonic methods for measuring fat thickness and rib-eye area in cattle and hogs", J. Anim. Sci. 20(4), pp. 759-767, (1961)
 - 55) S. Y. Suh, et. al, "Apple color discrimination with color computer vision and human

- vision", *Journal of KSAM*, Vol. 17(2) pp. 123-131, (1992)
- 56) Tao et. al, "Machine vision for color inspection of potatoes and apples", *Trans. of ASAE*. Vol. 38(5), pp. 1555-1561, (1995)
- 57) Temple Robert, S, "Estimation of fat thickness in cattle MS Thesis", Colorado State Univ., Fort Collins, (1956)
- 58) B. L. Upchurch, G. E. Miles, R. L. Stroshine, E. S. Furgason, and F. H. Emerson, "Ultrasonic measurement for detecting apple bruises", *Trans. of ASAE* Vol. 30(3), pp. 803-809, (1987)
- 59) Z. Varghese, and C. T. Morrow, "Automated inspection of golden delicious apples using color computer vision", International summer meeting ASAE, (1991)
- 60) M. A. Wallace, J. R. Stouffer, and R. G. Westervelt, Relationships of ultrasonic and carcass measurements with retail yield in beef cattle", *Livestock Production Sci.* 4: pp. 153-164, (1977)
- 61) P. C. Williams, K. R. Rreston, K. H. Norris and P. M. Starkey, "Determination of Amino Acids in Wheat and Barley by near-infrared reflectance spectroscopy", *Journal of Food Science*, Vol. 48, (1984)
- 62) W. C. Winder, D. J. Aulik, and A. C. Rice, "An ultrasonic method for direct and simultaneous determination of alcohol and extract content of wines", *Am. J. Enol. Vitic* 21 pp. 1-11, (1970)
- 63) E. M. Zacharias Jr, and R. A. Parnell Jr, "Measuring the solids content of foods by sound velocimetry", *Food Technol* 26 pp. 160-166, (1972)
- 64) B. Zion, P. Chen, and M. J. McCarthy, "Non-destructive quality evaluation of fresh prunes by NMR spectroscopy", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, (1994)