

635.615

GOVP 12009299

L 293人

최 종  
연구보고서

**신경회로망을 이용한 수박의 타음식 비파괴  
평가기술 개발**

Nondestructive acoustic impulse response  
method for measuring internal quality of  
watermelon using neural network

연구기관  
동신대학교

농림부



# 제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “신경회로망을 이용한 수박의 타음식 비파괴 선별기술 개발에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

1999 . 10 . 13 .

주관연구기관명	:	동신대학교
총괄연구책임자	:	소 철 호
연구원	:	서 범 석
연구원	:	남 택 송
연구원	:	양 동 운
연구원	:	이 윤 호
연구원	:	배 태 주
연구원	:	조 정 혜
연구원	:	고 선 필
위탁연구기관명	:	대한검사기술(주)부설연구소
위탁연구책임자	:	김 영 환

# 요 약 문

## I. 제 목

신경회로망을 이용한 수박의 타음식 비파괴 평가기술 개발

## II. 연구개발의 목적 및 중요성

현재 우리나라에서는 과일의 무게, 크기, 형태 등의 외관만을 고려하여 선과하고 있으며 과일의 실제 내용물 검사는 단지 몇 개의 샘플에 대한 파괴적인 방법에 의존하고 있다. 수박의 속도에 대한 판별방법도 과형, 꼭지 부분의 줄기 형태,果皮색, 타격에 의한 둔탁한 타음, 외피의 탄력성 정도 등에 의한 방법을 사용하며 그마저도 생산농민의 경험을 바탕으로 하는 자가적인 방법에 의존한다. 생산품 전량을 객관적인 비파괴적 장치로써 검사할 수 있는 적합한 기술이 확립되지 못했다. 구매자들마저도 과일의 속도 판정에 대한 전문적인 지식이 없으므로 순전히 외관상 특징들을 가지고 선택할 수밖에 없다. 따라서 품질면에 대한 신뢰성이 떨어지는 것은 물론 판별하는데 많은 노력과 시간이 소요된다. 일본의 경우 수박의 비파괴적인 검사를 위해 타음식기술, 전자밀도식기술, 근적외선기술, X선이나 NMR 영상기술 등이 개발 활용되고 있으나 기기들이 고가의 장비이다.

본 연구는 수박의 비파괴 품질 평가법의 하나로서 타음에 의한 방법을 시도하였다. 수박의 내부 상태 검사를 위해 수박의 타격음을 분석하고 속도판정에 관여하는 인자와의 상관관계를 파악한다. 나아가 수박의 개체차이, 품종차이 등에 의해

판정지표와 속도 사이의 상관성이 낮아지는 점을 보완하고자 신경망기법을 도입한다. 이를 바탕으로 유효한 특징변수(Feature)를 추출하여 확률신경회로망(Probabilistic Neural Network)에 적용함으로써 수박의 타음식 비파괴 평가 분류기를 개발하고자 하였다.

### Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

타음신호를 해석하여 이를 확률신경회로망기법에 활용하여 수박의 내부품질인 속도를 비파괴적으로 평가하고자 하는 연구목표를 달성하고자 하였다.

상품으로서의 수박의 품질을 판정하는데 1차적으로 중요하다 할 수 있는 과육의 붉은색을 기준으로 당도와의 관계를 참고하여 평가하였다. 타격기를 손으로 들고 수박의 적도표면을 타격하여 타격점의 반대편인 지점에서 마이크로폰을 통해 타음의 파형을 컴퓨터로 읽어 들었다. 파형해석을 위해 진동해석, 공명주파수를 분석 및 전파경로에 관한 연구를 수행하였다. 수박 과육과 과피에서의 음파속도를 측정된 결과 속도에 따라 속도가 120~250m/sec까지 변화함을 발견하였고 음파의 감쇄 또한 크게 변화함을 발견하였다. 수박에서의 피크파형의 전달속도를 이해하기 위해 군속도와 위상속도의 개념을 구분하여 논의하였다. 이러한 결과들을 바탕으로 타음신호로부터 8개의 특징변수를 추출하여 이들 변수들이 갖는 의미를 논의하였다. 또 다른 연구자들에 의해 제기되어온  $f_0$ ,  $f_m^2$ ,  $f_m^{2/3} \rho^{1/3}$  등의 음향학적인지(acoustic indices)와 속도와의 관계도 비교 검토하여 보았다. 부가적인 기술로 타격장치, 집음장치, 밀도측정 등에 대한 기술을 확보하였다. 수박의 개체차이, 품종차이 등에 의해 판정지표와 속도 사이의 상관성이 낮아지는 점을 보완하고자 신경망기법을 도입하였다. 이를 바탕으로 유효한 특징변수(Feature)를 추출하고 확률신경회로망(Probabilistic Neural Network)에 적용하는 분류기 프로그램을 개발하였다.

#### IV. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

다음과형으로부터 특징변수들을 추출하는 프로그램 작업을 완성하여 안정적으로 특징변수들이 추출되었음을 확인하였다. 다음분석으로부터 얻은 특징변수들을 이용하여 개발된 분류기에 입력하여 미숙과, 적숙과로 분류평가하였다.

학습조건과 학습갯수에 따라 대표적 과형으로 분류기를 학습시켰다. 시험판 분류기(Ver.1.0)는 학습표본 개수를 7, 17, 58개로 하였을 때 각각 60.3%, 82.7%, 87.9%의 분류성능을 보였으며, 보완된 완성판 분류기(Ver.2.0)는 단지 17개의 과형학습에 의해서 87.9%의 분류성능을 확보할 수 있었고 학습표본 개수를 58개로 하는 경우 89.6%로 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다.

생산자들의 분류 정확도가 60~70%인 점에 비추어 보아 분류기의 성능이 실용화 단계의 기술을 확보하였다고 판단된다. 따라서 추후 분류기의 제품화 및 상품화 단계의 연구개발이 필요하다고 사료된다.

## SUMMARY

### I. TITLE

Nondestructive acoustic impulse response method for measuring internal quality of watermelon using neural network

### II. Goal and Significance of the Study

So far Quality evaluation of fruits has been processed by the means of weight and size etc in our country and the test to evaluate actual internal quality by the destructive method for some samples. Nondestructive technique for examining the whole fruit products has been established on the bases of self-examination method of farmer's experience only. Moreover, consumers since they do not have knowledge on evaluation of fruit maturity, select fruit by only external characteristics. Therefore confidence in the quality of fruits does not exist among consumers.

In Japan, they have applied the various methods of impact pulse technique, electric density measurement technique, NIR and NMR in nondestructive examination of watermelon.

In this study, we conducted and adapted acoustic impulse response method as one of various nondestructive evaluation methods. When we

buy a watermelon, we determine after thumping watermelon to check for ripeness. Acoustic impact response method is nondestructive measurement method that performs and substitutes these experimental maturity evaluation method for mechanical measurement.

We analyzed acoustic impact pulse which generated from watermelon to examine internal quality of watermelon and investigated the correlation between internal quality parameter of watermelon and its acoustic characteristics.

It has not been a high relationship between acoustic indices and maturity owing to individual difference and breed difference in the agricultural products. The PNN adoptable several acoustic indices was introduced in order to supplement this defect. We will suggest new feature parameters extracted from acoustic impact pulse to input PNN program routine and ultimately we wished to develop watermelon classification software by acoustic impact response method.

### **III. The Substance of our study**

We intended to evaluate nondestructively the internal quality of watermelon by acoustic impulse response method.

We regarded red-color degree(as the flesh matured, so the red color increased) as the index of watermelon maturity.

The equatorial side of watermelon was impacted by hand-operated the impact hammer made with tepron. The generated acoustic sound signal was picked up by a microphone and recorded by a computer. The



microphone was set on the opposite side(180° ) of impact point. By the analysis of vibration and resonant frequency of acoustic impulse signal, we discussed on the propagation path. We make clear distinction concept between group velocity and phase velocity so that we understand transmission velocity of pulse signal in the watermelon. From the result of velocity measurement of flesh and fruit shell, we found that sound velocity have ranged from 120 to 250m/sec according to watermelon maturity. It was found that the attenuation of acoustic impact pulse was highly varied according to watermelon maturity. On the base of these results, we extracted eight features from impact pulse signals and discussed on the meaning of each parameter.

We investigated and compared relationship between ripeness and acoustic indices( $f_0$ ,  $f^2_m$ ,  $f^2_m \rho^{1/3}$ ) which were studied by other researchers. As additional techniques, we established technical basis for impact apparatus and the digital method of density measurement.

It has been a low relationship between evaluation indices and maturity owing to individual difference and breed difference in the agricultural products. PNN was introduced in order to supplement this defect. We will suggest new feature parameters extracted from acoustic impact pulse to input PNN program routine and ultimately we wished to develop watermelon classification software by acoustic impact response method.

#### **IV. Result of our study and Suggestion**

We developed the program which extracts features from impact pulse signals. The extracted features were stable. We input the value of

feature into Probabilistic Neural Networks(PNN) and classified watermelon into ripe watermelon and pre-ripe ones according to maturity.

We trained the watermelon classifier program under the different training condition and number of training data.

We found that the classifier program of the version(Ver.1.0) had classification ability as follows: 60.3% in case of 7 training data, 82.7% in case of 17 training data, 87.9% in case of 58 training data. the classifier program of advanced version (Ver.2.0) had classification ability as follows: 87.9% in case of only 17 training data, 89.6% in case of 58 training data. Considering from the fact that the classification accuracy of farmers was 60~70%, We think the practical technique for watermelon classifier was established. Therefore we think that study and development to commercialize a classification device must be performed in the near future.

# Contents

Chapter. 1. Introduction .....	11
Section. 1. The purpose and scope of the study .....	11
Chapter. 2. The background of nondestructive quality evaluation .....	12
Chapter. 3. Interpretation of impact response signal .....	17
Section 1. Quality evaluation of watermelon .....	17
Section 2. Measurement of impact signal and Acoustic Indices .....	20
Section 3. Interpretation of impact signal and elastic wave velocity, measurement judgement .....	25
Section 4. Feature parameter of impact signal related with ripeness judgement .....	49
Chapter. 4. Study subject .....	54
Chapter. 5. Apparatus for density measurement and impact apparatus .....	57
Section 1. Apparatus for density measurement .....	57
Section 2. Impact apparatus .....	61
Section 3. Interface board .....	64
Section 4. X-ray testing .....	67
Chapter. 6. Development of watermelon classifier .....	70
Section 1. Principle of PNN .....	70
Section 2. Classifier software .....	78
Section 3. Result of training and evaluation .....	83
Chapter. 7. Conclusion .....	88
References .....	90

# 목 차

1장 서론 .....	11
1절 연구개발의 목적과 범위 .....	11
2장 비파괴 품질평가 기술개발 연구동향 .....	12
3장 타음신호의 해석 .....	17
1절 수박의 품질평가 .....	17
2절 타음의 측정과 타음 평가지수 .....	20
3절 타음의 해석과 탄성과 속도측정 .....	25
4절 속도와 관련된 타음 신호의 특징 변수 .....	49
4장 공시재료 .....	54
5장 밀도측정장치 및 타격장치 .....	57
1절 밀도측정장치 .....	57
2절 타격장치 .....	61
3절 interface 장치 .....	64
4절 X-ray 투과시험 .....	67
6장 분류기 개발 .....	70
1절 PNN 이론 .....	70
2절 분류기 소프트웨어 .....	78
3절 학습 및 검증 .....	83
제7장 결론 .....	88
참고문헌 .....	90

# 1장 서론

## 1절 연구개발의 목적과 범위

현재 우리나라 선과기술은 과일의 무게, 크기 등 만을 고려하여 처리를 하고 있는데 실제 과일 내용물 검사는 단지 몇 개의 샘플에 대한 파괴적인 방법에 의존하고 있는 실정이다. 수박의 속도에 대한 판별방법은 과형, 꼭지 부분의 줄기 형태, 과피색, 타격에 의한 둔탁한 탁음, 외피의 탄력성 정도 등에 의한 방법이 있는데 현재까지는 생산농민의 경험을 바탕으로 하는 자가적인 방법 이외에 생산품 전량을 비파괴적으로 검사할 수 있는 적합한 기술이 확립되지 못했다. 게다가 구매자들마저도 과일의 속도 판정에 대한 전문적인 지식이 없으므로 순전히 외관상 특징들을 가지고 선택할 수밖에 없다. 따라서 품질면에 대한 신뢰성이 떨어지는 것은 물론 판별하는데 많은 노력과 시간이 소요된다. 일본의 경우 수박의 비파괴적인 검사를 위해 타음식기술, 전자밀도식기술, 근적외선기술, X선이나 NMR 영상 기술 등이 개발 활용되고 있다.

본 연구는 비파괴 품질 평가법의 하나로서 타음에 의한 방법을 시도하였다. 이것은 수박을 사면서 손으로 두드려보고 고르는 경험적인 속도 판단 방법을 기기측정으로 대체하여 수행하는 것이다. 따라서 수박의 내부 상태 검사를 위해 수박의 타격음을 분석하고 속도판정에 관여하는 인자와의 상관관계를 파악하였다. 나아가 농산물의 개체차이, 품종차이 등에 의해 판정지표와 속도 사이의 상관성이 낮아지는 점을 보완하고자 신경망기법을 도입하여, 이를 바탕으로 유효한 특징변수(Feature)를 추출하여 확률신경회로망(Probabilistic Neural Network)에 적용함으로써 수박의 타음식 비파괴 평가 분류기를 제작하고자 하였다.

## 2장 비파괴 품질평가 기술개발 연구동향

농산물의 품질은 상품가치의 척도로, 외관, 조직감, 향기, 영양적 가치, 안전성 등 여러 가지 측면에서 종합적으로 평가되고 있으며, 농산물의 종류마다 평가항목이나 평가방법이 다르다.

품질평가 방법을 크게 구분하면, 대상물의 형태나 특성을 변화시켜 측정하는 파괴적인 방법과 형태나 특성을 변화시키지 않고 측정하는 비파괴적인 방법이 있다. 농산물의 품질은 과실의 크기(또는 무게)와 외관품질 및 내부품질로 대별된다. 외관품질에는 과형(등근 정도, 뿔 정도), 과색, 외부손상(과피의 상처, 병충해) 등이 있으며, 내부품질에는 과육 성분(fructose, glucose, sucrose, amino acids), 숙도(경도, 당도, 색), 내부손상(공동, 내부부패)등이 포함된다. 위와 같은 다양한 측정항목에 관한 여러 가지 비파괴 검사방법 및 장치가 개발되고 있다.

### [외관품질평가]

크기나 굵기, 색깔, 형상, 상처나 기형의 유무 등 외관품질을 평가하는 방법이 1991년 이래로 연구 보고되고 있다. Varghese 등(1991)은 사과 색깔, 형상 및 크기를 검사하기 위해 CCD칼라 카메라 및 조명장치로 구성되는 실험장치를 제작하여 색깔 판별, 과실의 투영면적과 무게와의 상관관계, 기형판정을 위한 알고리즘이 개발하였고, Suh 등(1992)은 사과 “후지”의 전체표면을 대상으로 색깔과 크기를 동시에 판정할 수 있는 고속 등급판정 알고리즘을 개발하였다. CCD카메라 등을 이용한 영상분석으로 외관품질과 관련되는 인자를 측정하는 방법은 복숭아의 흠집 판정, 색깔에 의한 토마토의 성숙도 선별, 사과 색깔과 크기 등을 선별하는데 폭 넓게 이용되고 있다. 각종 과실류의 크기와 색깔판정 시스템은 이미 현장에 보급되고 있으나, 표면 결점의 검출 및 모양판정을 위한 장치 개발은 미흡한 실정이다.

### **[근적외선(NIR)]**

근적외선(NIR)법을 청과물의 성분측정에 이용한 것은 1985년 이후부터 이고, 양파의 말린 정도를 측정하는 것이 최초이다. 그 후 복숭아 과실의 당도, 온주감의 당도측정, 후지사과의 당도 판정장치 개발에 응용되고 있다. 현재에는 복숭아 과실의 당도, 온주밀감의 당도와 산도, 멜론의 당도를 측정하는 선별기가 개발되었다.

### **[가시광 투과]**

강력한 광원 고감도의 센서 및 암흑상자로 구성되어 강력한 백색광을 받은 과실의 투과광 및 투과상이 고감도의 광전자 상대관 및 고감도의 CCD카메라로 얻어진 화상을 관찰하여 속도를 판정하는 가시광의 투과법을 이용하여 파인에플 속도 측정 장치가 개발되었다.

### **[핵자기공명(NMR) 및 자기공명 영상(MRI)]**

핵자기공명(NMR)은 수소원자핵의 농도를 감지하는 기술로서 특히, 물질내에 있는 물과 오일의 농도 및 운동성에 민감한 반응을 나타내므로 곡류 씨앗의 수분이나 오일 함량의 측정을 위한 연구가 수행된 바 있다. H- 및 C-NMR은 과실 및 과즙의 당, 식품중의 텍스트린, 유기산, 지방산, 기호물질 등 가용성 성분의 분석에 유효하다. MRI로는 최근 과실류나 채소류에서 내부결합이나 내부 품질 인자들을 검출할 수 있는 가능성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Chen(1989) 등은 MRI장치를 이용하여 과실류와 뿌리 채소류를 대상으로 이들의 여러 가지 내부품질을 판정하기 위한 연구를 수행한 결과 MRI를 이용할 경우 해상도가 높은 영상획득이 가능하다는 것을 밝혀냈다.

### **[초음파]**

과실류나 채소류의 내부품질을 평가하는데 초음파를 이용하는 방법은 그다지

성공적이지 못했다. Shaker와 Wolf(1983)는 식품의 품질평가를 위한 초음파 기술의 이용 가능성에 대해 연구한 결과, 초음파 투과도는 오렌지 주스의 안정성 평가를 위해, 반사도는 오렌지 표면 조직을 규명하는데 이용될 수 있음을 발견하였다. 후방산란(back scatter) 기술은 토마토 내부의 crack을 감지하는데 사용될 수 있으나, 토마토, 멜론, 사과 등은 조직의 다공성 때문에 주파수가 높은 초음파는 과실류를 깊숙히 관통하지 못한다고 Upchurch(1987)등이 확인하였다.

### **[음파]**

음파에 의한 과일과 채소류 조직의 비파괴 측정법은 오랫동안 연구되어 왔다. 농산물은 모양과 특성에 따라 특정 공명주파수가 존재하며, 이를 스펙트럼 분석을 통해 진동형태를 특성화하여 검사하는 방법이다.

Abbott(1968) 등은 사과에 음파진동을 적용하여 공명 피크가 굴절 진동과 관련이 있고 이는 사과 질량과 Firmness(경도)에 크게 영향을 받는다는 사실을 발견하였다. 이러한 연구를 바탕으로 과실의 Firmness와 깊은 상관성을 갖는 Stiffness 상수( $f^2m$ ,  $f$ =resonant frequency,  $m$ =mass)를 추론하였다. Finney(1970, 1971)는 사과와 복숭아의 Firmness를 평가하는데 있어서 음파진동법에 대한 연구를 더욱 심화하였다. Cooke(1970)은 과실조직의 shear modulus가  $f^2m^{2/3}$ 에 비례함을 표현하기 위해 진동 탄성체의 이론적인 분석을 이용하였다. 그 후  $f^2m$ 과  $f^2m^{2/3}$  이 두 인자가 과실과 채소류의 Firmness 측정에 넓게 이용되어지고 있다. 수박의 속도를 측정하는데 음향충격기술(Acoustic impulse Techniques)를 적용하는데는 정보가 그리 많지는 않다. Clark(1975)은 음파가 멜론의 과실을 통해 전파되면서 감쇠되는 시간을 측정하였다. 과육(속)이 익어감에 따라 (빨간 색 증가) 감쇠시간은 증가하게 되었다. 그 결과 멜론 과육의 색과 밀접한 관계가 있음을 발견하였다. Yamamoto(1980) 등은 사과와 수박의 음향특성을 측정함으로써 Firmness 인자( $f^2m$ ,  $f^2m^{2/3} \rho^{1/3}$ )가 사과에 있어서 MT(Magness Taylor)Firmness와 깊은 상관관계가 있지만, 수박의 flesh



Firmness와는 약한 상관관계가 있음을 발견하였다. Yamamoto(1981) 등은 나무 타격기를 이용한 음향충격법으로 내부품질중 조직에 대한 비파괴 검사를 수행하였다. 이 연구에서 음향인자들 즉 표면 Young's modulus, 충격강도와 sensory firmness사이에서 아주 중요한 상관관계가 있음을 발견하였다. Sasao(1985)는 수확현장에서 성장과정에 있는 수박의 음향충격에 대한 특성을 연구하여 파형과 공진주파수를 분석한 결과 같은 품종에서도 서로 다른 음향 공진 특성이 보임을 발견하였고, 공진주파수 분석으로 수확적기를 판별할 수 있음을 보고하였다. Peleg(1989) 등은 아보카도를 대상으로 과일외의 기계적인 커플링으로 인해 나타나는 음파의 진동에너지를 측정하였다. 이 실험으로 Firmness 인자는 과실의 속도 변화에 민감하게 반응한다는 사실을 발견하였다. Armstrong(1989) 등은 사과에 공명을 활성화시키기 위해 음파를 이용하였다. 공명주파수 mode로 사과 조직의 탄성을 추론하기 위해 탄성구 모델을 이용하였다. 그 결과 공명주파수에 의해 예측된 사과의 탄성계수와 사과의 중심부가 포함된 사과의 탄성계수 사이에 상관관계가 있음을 발견하였다. Abbott.(1992) 등은 음파공명 함수가 탄성계수, 과육의 정도, 바탕색과 중요하게 연관되어 있으며, 저장된 사과의 MT(Magness Taylor) Firmness와도 깊은 연관성이 있음을 추론하였다. 음파 측정으로 모든 과실의 Firmness를 예측할 수 있다고 하였다. Farabee and Stone(1991)은 수박의 속도를 판별하는 "Acoustical impulse response system"을 개발하였다. Hayashi(1992) 등은 멜론에서 상관관계를 분석하고자 마이크론을 2개 사용하여 전달속도(37~50m/sec)를 측정하였고 과일경도와 전달속도간에 높은 상관관계가 있음을 발견하였다. Vervaeke(1993) 등은 음향충격기술(Acoustic impulse techniques)을 적용하여 다른 저장조건하에 있는 사과의 적당한 저장기간을 결정하는데 Stiffness factor ( $f^2m^{2/3}$ )를 개발하였다. K.Otobe(1993) 등은 점탄성 관계식으로부터 동적 탄성률과 공진주파수의 분석으로 토마토와 딸기의 속도 평가에 관한 연구를 수행하였다. J.Sugiyama(1995) 등은 멜론에서 타음신호의 시간, 공간, 음향의 3차원적 그래프에 의한 분석으로 후숙기간동안 전파속도가 약 20% 늦

어짐을 발견하였다. M.L.Stone(1996) 등은 수박을 이용하여 충격법에 의한 속도 측정 연구를 수행하였다. 수박의 속도와 공동과의 유무를 측정하는데 있어서 수박 속도는 MT(Magness Taylor) Firmness와 8개의 주파수변수로 분석하였으며, 주로 주파수와 대역폭을 주된 변수로 사용하여 속도와 의 관계를 살펴본 결과 상관 계수 0.63을 얻을 수 있었다. 특히 85~160Hz의 주파수 영역에서 높은 상관관계를 보였다. T. Torii (1997)는 초음파에 의한 식물과 농산물의 계측방법을 연구하여 음속이 색채로 표현된 속도와 일정한 상관관계를 보이며 과일의 숙성도에 따라서 뚜렷한 변화가 있음을 언급하였다. 토마토에서 속도에 따라 미숙과인 경우 속도 200~400m/sec이고, 적숙과인 경우 600~800m/sec임을 발견하였다.

국내에서 수행된 연구내용 중 김만수 등(1998)은 수박의 내부품질의 비파괴적 평가를 위해 음향특성에 관한 연구를 수행하였다. 타음장치를 사용하여 밀도와 탄성계수, 당도를 측정하였고 그 결과 적숙과는 시간영역에서 미숙과에 비해 복잡한 양상을 보이며, 당도와 3정점 주파수( $f_3$ )와의 관계 실험에서 상관계수 0.73을 얻었다. 장정영(1998) 등은 수박에서 초음파 전파특성에 관한 연구를 수행하였다. 수박의 초음파 투과성을 연구하므로써 적절한 주파수의 신호형태를 파악하고자 하였고 약 2KHz~20KHz 횡파모드를 사용하여 수박의 공동 유무를 판별할 수 있는 가능성에 대해 기초적인 검토 결과를 보고하였다.

최근(1999) 미국 Delaware대학에서 수박을 타격하여 속도를 판별하는 "UD machine"이라는 탐지기를 개발하였다. 실험결과 최적의 수박 당수치(8~12%)와 고유주파수(100~250Hz)는 밀접한 관계가 있다고 발표하였다.

음파기술은 현재 과채류 등의 내부결함 판정장치 개발을 위해 다수의 연구가 수행되고 있다.

## 3장 타음신호의 해석

### 1절 수박의 품질평가

농산물의 품질평가에 있어서 그 지표로 삼는 것에는 인간의 감각에 의한 외관(크기와 형태), 색깔, 향, 맛 등을 포함한 감각적 평가지표와 기기에 의해 객관적으로 측정하는 파괴적인 평가지표와 비파괴적인 평가지표가 있다.

수박에 있어서도 다른 농산물과 마찬가지로 그 품질을 평가하는데 감각적 지표인 과육의 색과 맛(Sensory Firmness) 등과 파괴적인 평가지표인 MT-Firmness, Brix 당도, 종탄성계수(Young's modulus) 등을 그 지표로 사용하여 왔다. 그러나 수요자들의 주관적 특성 차이와 이들 기기적인 각각의 측정량들이 상호 복합적으로 연계되어 있다는 사실 때문에, 이러한 지표들 중 어느 하나로써 수박의 숙도 또는 품질 상태를 완전히 평가하기에는 상당한 어려움이 있다.

기존의 연구자들은 많은 평가지표 중에서 감각적 평가지표로써는 과육의 색과 조직의 육질(Sensory Firmness)을, 파괴적 측정지표로써는 MT-Firmness, Brix 당도, Young's modulus, 파괴장도(Breaking stress) 등을 주로 사용하여 왔다. 또 이러한 지표들을 기준으로 삼아 새롭게 제안하는 비파괴적 평가지수들과의 상관관계 분석을 통하여 그들의 비파괴적 평가지수의 유용성을 주장하곤 하였다.

다른 연구자에 의하면 사용하는 평가지표들 사이의 상관 계수가 0.5 내지 0.8 정도의 범위에 분포하는 경우 상관성이 높은 것으로 여기고 있다. M.L. Stone의 연구에서 수박의 당도와 색은 상관도 0.89를, 당도와 질량은 상관도 0.49였다. H. Yamamoto의 경우 Sensory Firmness와 겉보기 탄성계수는 0.63의 상관도를, Sensory Firmness와 M-T값은 0.85의 상관도를 보였다. 또 타음신호로부터 얻은 음향학적 지표(Acoustic Indices : AI)와 다른 숙도 평가지수 사이의 상관

관계도 비슷한 형편이다.

### 1. 과육색에 의한 속도 평가

미숙과로서 과육의 색깔이 완전히 하얗고 씨앗도 잘 구별되지 않는 상태를 0-10%로, 반쯤 붉은 부분과 흰 부분이 섞인 경우 50%로 볼 때, 붉은 부분이 과육 전체에 고루 퍼져 있지 않고 어느 한편으로 편재되는 경우가 흔히 있었는데, 이런 경우도 구분하지 않고 절단면적중 차지하는 비율만으로 속도를 결정하였다. 95% 이상으로 표현된 것은 검붉은 빛이 돌기 시작하는 정도이다. 이와 같이 0%에서 100%까지를 육안으로 흰색과 붉은 색의 비율로부터 과육의 속도 판정기준을 결정하였다. 이러한 방법으로 우리가 사용한 58개의 수박에서 색으로 판별한 속도와 Brix당도의 관계를 그림 1에 나타내었다. 이를 보면 과육의 색에 의해 판별한 속도와 당도가 일정한 상관성 0.86을 보이고 있음을 알 수 있다. 또 색이라는 요인은 수요자들이 직접 상품성을 판단하는 1차적인 요인으로 생각한다. 따라서 우리는 색으로 판단한 속도를 평가지표로 하여 연구를 진행하였다.

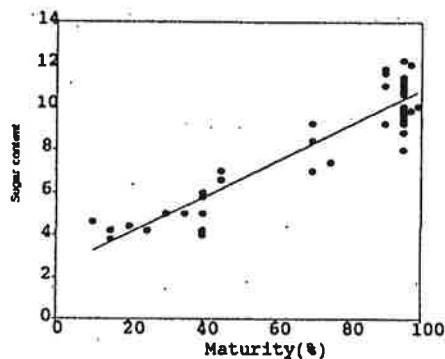


그림 1 색으로 평가한 속도와 당도의 상관성

## 2. 타음에 의한 수박 내부 품질 비파괴평가

우리는 주위에서 수박을 손으로 두드려서 발생하는 소리를 귀로 듣고 수박이 잘 익었는지 판단하려 하는 것을 흔히 본다. 이런 방법은 경험이 많은 사람에게는 가능하지만 일반인에게는 그렇지 못하다. 수박의 타음식 비파괴 평가기술은 이러한 방법과 기본적으로 같다고 할 수 있다. 이 방법에서는 고무볼, 진자형 추, 나무 망치 또는 솔레노이드형, 압전물질형 타격기 등의 적당한 장치로 수박을 타격하고, 타격에 의해 발생하는 수십Hz 내지 수KHz 영역의 음향을 측정하여 그 신호를 분석함으로써 수박 내부의 품질에 대한 정보를 얻는다. 이는 기존의 타음방식과는 다르지만 음향학적 지수를 해석하므로 품질정보를 얻어내기도 한다. 사과나 토마토, 딸기 등 크기가 작은 과일에 많이 적용하는 방법으로 타격장치 대신 주파수를 가변할 수 있는 진동기에 의해 수십Hz 내지 수KHz의 진동을 인가해서 주파수를 소인(sweep)하여 주파수 스펙트럼을 얻어 품질정보를 얻기도 한다. 이는 타음에 의한 방법과는 차이가 있지만 진동해석을 통하여 음향학적 지수를 얻는다는 점에서는 같은 방법이라고 할 수 있다. 또 수박의 과육을 가로질러 투과하는 음향신호를 이용하여 파형의 변형, 감쇠 등을 해석하여 내부품질정보를 얻고자 하는 시도도 있었다. 특히 이런 경우에 2KHz의 횡파모드 음파가 유리하다고 보고하고 있다. 이런 연구에서 저주파로의 파형 변형 등을 지적하고 있다. 이런 연구를 더 발전시키기 위해서는 음파의 전달경로와 파형 형성에 대한 분석이 더 필요하며, 그러한 연구들은 타음방식의 신호해석과 상호 연관되어 있기 때문에 같은 방식의 평가법이라 할 수 있다.

## 2절 다음의 측정과 다음 평가지수

### 1. 측정방법

우리는 그림 2와 같이 전체적인 장치를 구성하였다. 즉 타격기, 마이크로폰, 기록계(디지털오실로스코프, A/D신호획득 보드를 내장한 컴퓨터)이다. 수박에서 타음 신호를 야기시키기 위한 몇 종류의 타격기를 제작하였다. 타격기는 8g~42g 정도의 질량을 갖고, 재질은 테프론 수치, 나무, 실리콘 고무 등으로 만든 구 또는 반구모양이며, 진자에 매달아 사용하거나 직접 손으로 잡고 타격할 수 있도록 제작하였다. 마이크로폰은 가청주파수 영역 내에서 평탄한 특성을 가지며, 수박표면에 1~3mm 근접시켜 사용하였다. 기록계로는 Digital Oscilloscope(LeCroy 9350A, 500MHz Oscilloscope)를 보통 Sampling rate 500Ks/s, 시간파형은 10msec/div, 감도는 10mV/div인 실험조건으로 설정하여 사용하였다. 실제 현장 적용시 편리성을 고려하여 A/D신호획득보드를 내장한 노트북컴퓨터를 제작하였다.

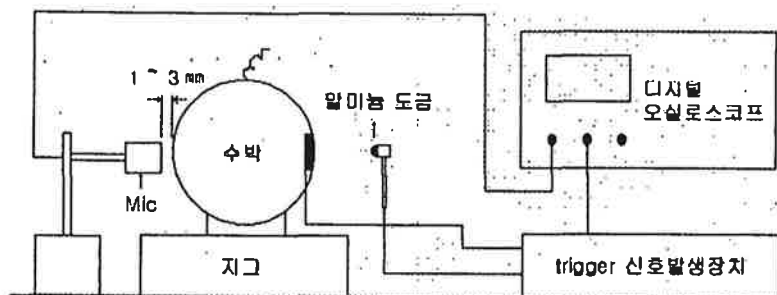


그림 2 수박신호측정장치

타격방법은 진자의 위치에너지를 이용하여 타음신호를 얻거나, 현장적용의 편리성을 위해서 직접 손으로 잡고 타격하는 방법을 택했다. 단진자의 위치에너지를 이용하는 방법과 손으로 타격기를 잡고 직접 타격하는 방법으로 얻은 신호와 비교했을 때, 둘 사이에 큰 차이는 보이지 않았다. 손으로 타격기를 잡고 직접 타격해서 얻은 신호로부터 재현성을 확인했으며, 타음신호의 진폭만 변화할 뿐 우리가 중요시하는 신호의 전체적인 모습은 변하지 않았다. 타격지점은 수박의 적도면의 한 지점을 택하였고, 타음신호의 측정위치는 타격점의 대척점으로 하였다.

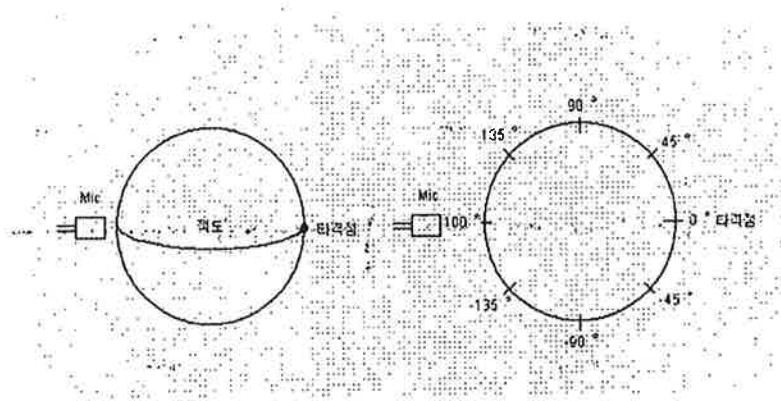


그림 3: 타격점과 타음신호의 측정위치

## 2. 수박에서 대표적인 타음파형

타음신호 측정위치를 위 그림 3과 같이 적도면에서 타격점과 측정위치의 각도를 45°, 90°, 135°, 180°하여 파형을 측정하였다.

그림 4는 크기(높이×직경)21×20(cm)인 수박에서 위의 방법으로 측정한 파형이다. 이 파형들을 후리에 변환하여 주파수 공간에서 보면 집음위치 180에서는 규칙적인 공명피크를 볼 수 있다. 다른 측정위치에서는 이 공명피크들이 불규칙해짐을 알 수 있는데, 이러한 사실들은 다른 연구자들이 수박에서 얻은 전형적인 타음 파형과도 같고, 그 특징도 같음을 알 수 있다. 그래서 본 실험에서는 측정의

용이성, 공명피크의 특징, 음향평가지수의 분석 등의 유용성을 고려하여 다른 연구자들이 행했던 바와 같이 180°에서 측정된 파형을 이용해서 신호를 해석하고자 한다.

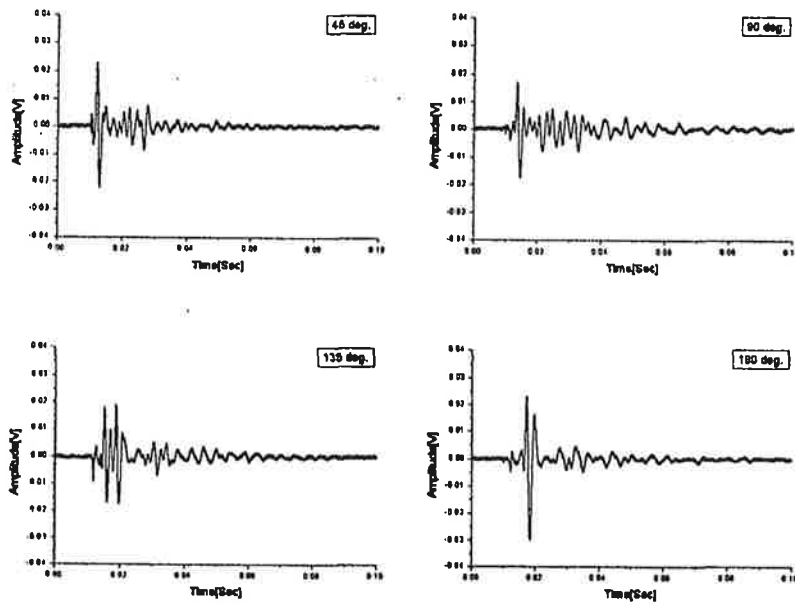
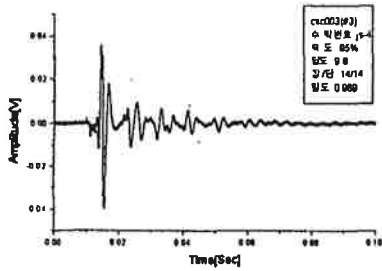


그림 4 타격점으로 부터 45°, 90°, 135°, 180° 에서 측정된 파형

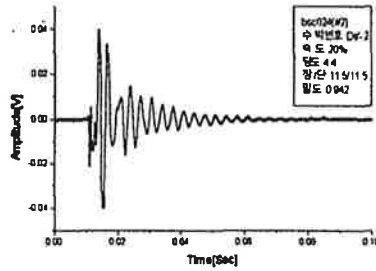
수박의 속도별, 크기별에 따라 다음 파형을 측정하고 주파수 스펙트럼을 분석한 결과 차이가 있음을 발견하였다. 이를테면 미숙과인 경우 파형이 Ring down 형태의 단순한 파형이 얻어지고 주파수 스펙트럼의 강도가 상대적으로 유난히 큰 피크가 존재하였고, 속도가 증가한 경우 파형이 복잡해지고 주파수 스펙트럼 피크들도 복잡해지는 경향을 보였다. 이러한 사실들은 다른 연구자들의 분석과 일치한다.

그림 5는 작은 크기의 적숙과, 작은 크기의 미숙과, 중간 크기의 미숙과, 큰 적숙과의 타격지점의 반대쪽 180°에서 측정되는 전형적인 파형이다.

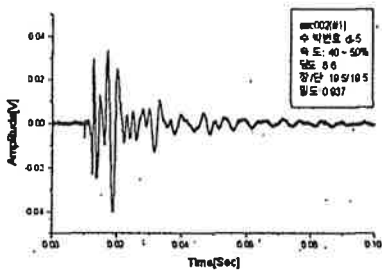




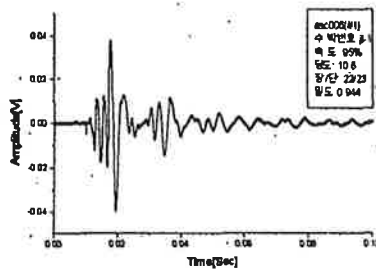
a) 작은 적속과



b) 작은 미속과



c) 중간 크기의 미속과



d) 큰 적속과

그림 5 속도와 크기가 다른 수박에서 측정되는 전형적인 타옴파형

위 그림 5의 파형은 전형적인 파형을 나타낸 것으로 Sasao(1985) 등이 지적한 바와 같이 적속과이나 작은 크기의 수박의 경우 일부는 마치 미속과의 전형적인 파형처럼 보이는 사례도 존재하며, 미속과인데도 적속과의 전형적인 파형과 유사한 사례도 있다. 또 많은 경우 중간속도나 중간크기의 수박에 대한 타옴파형은 위와 같은 전형적인 형태의 파형의 중간형태의 혼합으로 미묘한 차이가 있으나 일견하여 판단하기에는 곤란한 형태를 보인다. 따라서 이처럼 판단하기 곤란한 형태의 타옴을 발생시키는 수박의 속도를 평가하기 위해서는 세밀한 분석이 필요하였다.

### 3. 속도판정에 유용한 음향 평가지수

다음신호로부터 속도판정에 유효한 특징을 발견하기 위한 연구들이 진행되어 왔다. 과일의 속도를 나타내는 여러가지 지표들과의 상관관계를 분석하여 유용하게 사용되어온 대표적인 음향지수들로서 다음과 같은 것들이 있다.

Abbott(1968) 등은 진동법에 의해 측정된 주파수 분석을 통해서 기본 공명진동수( $f_1$ )와  $mf_1^2$ ,  $f_1^2 m^{2/3}$  등이 속도판정에 유용한 음향지수임을 제시하였고 이 지수는 그 이후로 많은 연구자들에 의해서 유용성이 확인되고 사용되어 왔다. 또 탄성론적인 의미해석을 통해서  $m^{2/3} \rho^{1/3} f_1^2$ 으로 수정 발전되었고, 이 음향지수값들은 각각 자유도 1인 진동계의 용수철 상수, 탄성계수 등과 관련되어 있음이 알려져 있다. H.Yamamoto(1981) 등은 수박 각 개체의 비균질성, 모양의 찌그러짐 등에 의해서 음향지수의 계수값이  $m^{6.5} \rho^{4.0} f_1^2$ 으로 보완하는 것이 더 유용하다는 보고도 있었다. M.L.Stone(1996) 등이 제시한 B-M(Band width Magnitude) 정수는 적절한 주파수 영역을 다수 설정해서 각각의 영역 내에서의 Frequency Spectrum Intensity를 고려한 것이다. 예를들어 그들의 BM40-90정수는 수박의 당도와 0.636의 상관계수를 보였으며, BM80-130정수는 당도와 0.167의 상관관계를 갖는다고 하였다. 이런 방식으로 속도와 관계있는 특정한 주파수영역을 탐색하였다. S. Hataishi(1992) 등은 멜론에서의 타음파형으로부터 타음의 전달속도(Transmission Velocity)와 과육경도(Fruit Hardness)간에 상관계수가 0.832임을 발견하였고 적숙한 멜론에서의 측정된 전달속도(Transmission Velocity)는 37~50m/sec였다. 이로써 2-마이크로폰 방식으로 측정된 전달속도가 유용한 음향지수로 사용될 수 있음을 보였다. J. Sugiyama(1995) 등은 후숙과정에 있는 과일의 전달속도를 측정하였는데 5일동안 후숙할 경우 전달속도가 20%정도 느려진다고 한다. 또 타음신호를 시,공간,음향의 영상패턴이 과육의 속도상태와 관련이 있음을 시사하였다. 장경영, 김만수(1998) 등은 수박의 속도가 증가할수록 타음파형이 복잡해진다고 지적하였고 공명진동수( $f_1$ )와  $mf_1^2$ ,  $f_1^2 m^{2/3}$  등이 속도와 밀접한

상관성이 있음을 다시 확인하였다. 수박에서의 2KHz의 횡파모드의 투과 음향의 전파경로와 특성에 대하여 보고하였고, 상이한 주파수(2KHz, 20KHz)의 종파와 횡파 모드 음향펄스의 투과성과 감쇄 특성의 차이를 보고하였다.

### 3절 다음의 해석과 탄성파 속도측정

#### 1. 과육과 과피 시편에서 속도측정

수박의 과육과 과피의 속도측정을 위해 그림 6과 같이 50KHz에서 속도와 감쇄를 측정할 수 있는 Pulse generator receiver(PUNDIT), Digital Oscilloscope(LeCroy 9350A, 500MHz Oscilloscope)로 측정장치를 구성하였다.

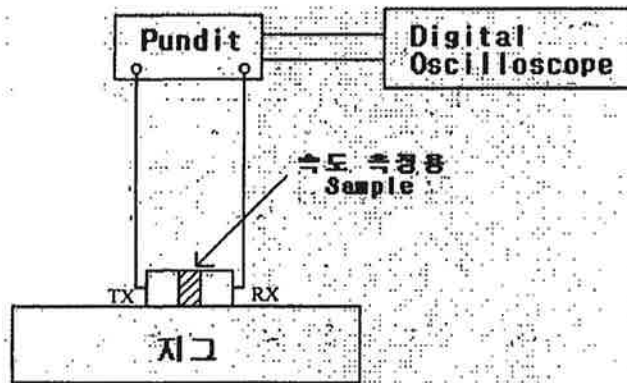


그림 6 수박의 과육과 과피 속도측정장치 구성도

수박의 과육과 과피의 속도측정에 앞서 측정값에 대한 신뢰도를 확보하기 위해 속도를 알 수 있는 몇 가지 종류의 재질로 교정시편을 제작하여 예비 실험을 실시하였다. 교정 시편의 재질은 Steel, Brass, 아크릴로 이루어져 있으며, Steel

교정 불럭의 크기는 30mm( $\varnothing$  30mm), 100mm( $\varnothing$  50mm), Brass와 아크릴은 10mm( $\varnothing$  50mm), 30mm( $\varnothing$  30mm)로 제작하였고, 각 시편의 길이는 속도 측정의 중요한 인자이므로 1/100mm로 가공하였다. 수박의 과육과 과피의 속도를 측정하기 위해서는 교정시편과 같이 정확한 길이의 수박 시편이 요구된다. 이런 조건으로 수박 시편을 가공하기 위해서 수박을 절단 할 수 있는 장비(그림 7)를 제작하여 3mm( $\varnothing$  30mm), 5mm( $\varnothing$  30mm), 7mm( $\varnothing$  30mm)인 수박시편을 준비하였다.

교정시편의 속도측정은 콘크리트와 같은 물질의 속도측정을 위해서 사용되어온 50KHz pundit의 수박, steel, brass, 아크릴과 같은 물질에 적용 가능성을 검토하고 속도측정값의 정확도와 측정된 속도값과 문헌에 보고되어 있는 값과의 타당성 검토를 위해서 수박의 과육과 과피에서의 속도측정에 앞서 수행하였다.

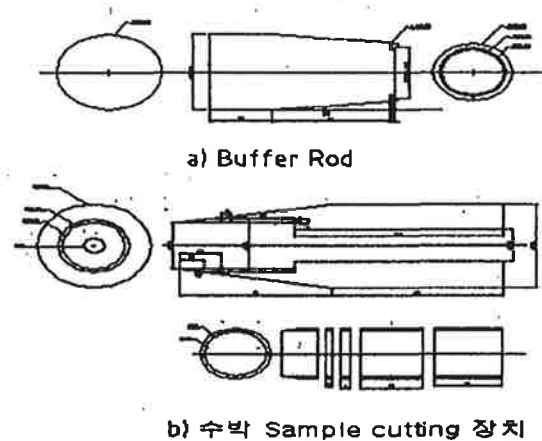
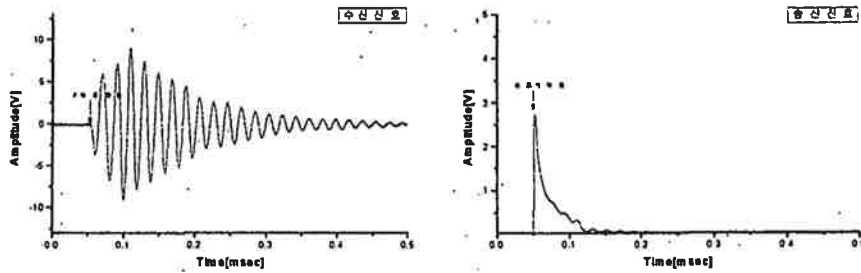


그림 7 수박시편 절단장치 구성도

교정시편의 속도측정은 그림 6처럼 송신탐촉자와 수신탐촉자 사이에 교정 시편을 끼워 넣고 pundit에 표현되는 전파시간 뿐만 아니라 디지털 오실로스코프를 이용해서 송신신호와 수신 측정 시편마다 비교하면서 신호를 측정했다. 교정시편의 속도를 측정하기 전에 속도측정장치의 자체 지연시간을 그림 8과 같이 측정하고 지연시간을 고려하여 속도를 계산하였다.



a) 수신신호

b) 송신용 임펄스

그림 8 속도측정장비에서 관찰되는 무과신호 파형

그림 9는 두께가 9.75mm인 아크릴 평판에서의 파형이며, 그림 10은 두께가 30mm( $\phi$  30mm)인 아크릴시편에서 파형이다. 두 파형에서 전파시간은 송신신호의 시작 시간부터 수신신호가 시작되는 점까지의 전파시간을 측정하고, 측정된 전파시간에서 측정장비의 자체지연시간( $3.63 \mu\text{sec}$ )를 빼주어 교정시편의 전파시간을 측정하였다. 표 1은  $\phi$  50mm,  $\phi$  30mm인 Steel, Brass, 아크릴에서의 전파시간을 측정하여 속도를 계산한 값이다. 이러한 방법으로 측정된 속도가 문헌에서 나타난 값들과 일치함을 확인하였고 그리하여 우리의 속도 측정법에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었다.

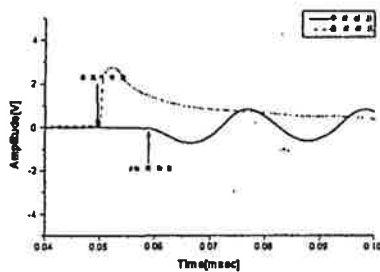


그림 9 두께 9.75mm인 아크릴 시편에서 파형

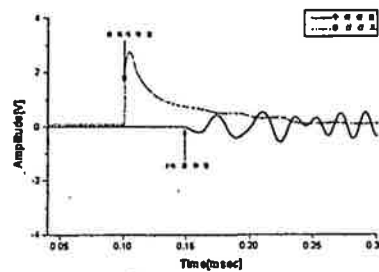


그림 10 두께 30mm인 아크릴 시편에서 파형

표 1  $\phi$  50mm인 Steel, Brass, 아크릴, 전파시간과 속도

직경( $\phi$ =50mm)	속도(m/sec)	문헌에서 속도*(m/sec)
Brass(10mm)	3548	3455
아크릴(10mm)	2433	2177
steel(100mm)	5476	5189

\* Ultrasonics , A.P.Cracknell, Wykeham Publ., London, ISBN 0-85109-770-7

수박의 과육과 과피 속도측정은 다른 물질에 비해 속도를 측정할 수 있는 방법이 구체적으로 알려져 있지 않고 있다. 수박의 재질은 크게 과육과 과피로 이루어져 있으며 과육과 과피는 다른 금속에 비해 재질이 너무 약하고, 또한 감쇄가 심하다고 알려져 있다. 수박재질의 연합과 감쇄, 임피던스 등은 속도를 측정하는데 어려움을 야기시킨다. 이런 문제점을 해결하기 위해서 수박시편절단장치를 이용해서 수박의 과육과 과피를 3mm( $\phi$  30mm), 5mm( $\phi$  30mm), 7mm( $\phi$  30mm)인 수박시편을 가공하여 각각의 속도를 측정했다.

과육의 속도측정은 힘을 약하게 가했을 때와 과육이 부서지기 시작하는 시점에서 속도를 측정하였다. 그림 11은 수박의 과육과 과피 시편에서 측정된 전형적인 파형이다.

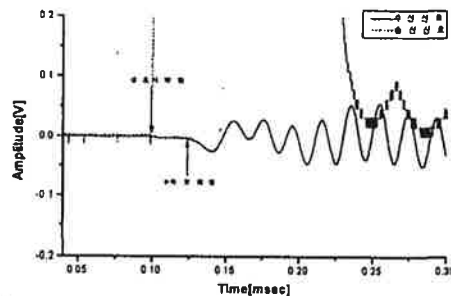
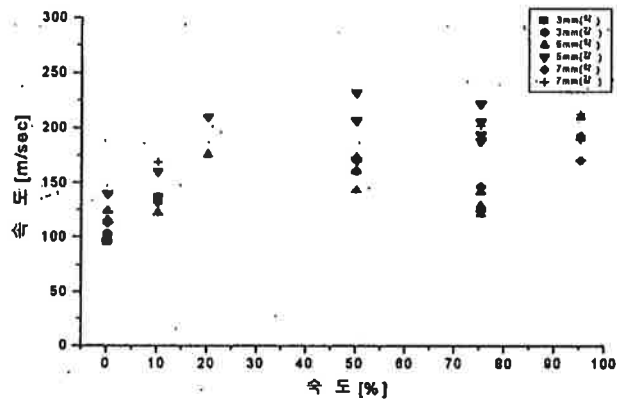
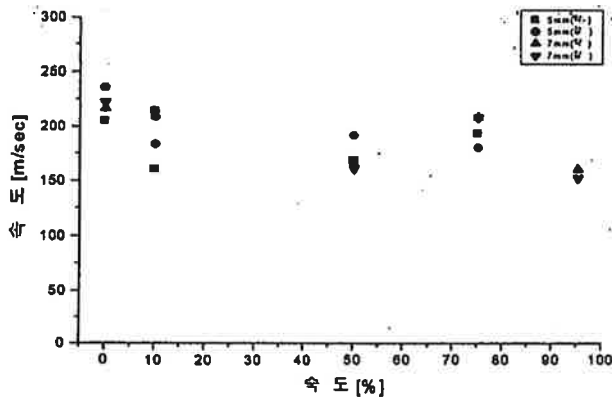


그림 11 과육시편에서 속도 측정파형

그림 12(a)는 과육에서의 음파속도를 속도와 관련지어 표현한 그림이며, 전체적인 속도는 100m/sec~250m/sec사이에 있고 속도가 증가할수록 과육의 음파전파 속도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 그림 12(b)는 과피에서의 음파속도와 속도 관계를 표현한 그림이며, 전체적인 속도 변화폭은 240m/sec~150m/sec사이에 있으며, 과육과는 반대로 속도가 증가할수록 속도는 감소하는 형태를 보이고 있다.



(a) 과육 시편

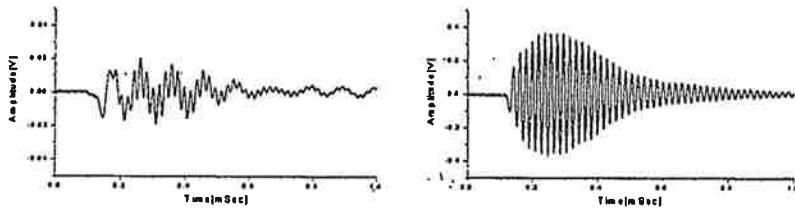


(b) 과피 시편

그림 12 수박의 속도에 따른 음파 속도의 측정값

한편, 이 때 측정된 신호로부터 전파시간 뿐만 아니라 진폭의 정보도 얻을 수 있다. 측정된 신호의 진폭으로 감쇄계수를 계산 할 수 있으나 몇가지 문제점을 가지고 있다. 본 실험에서 사용된 송수신탐촉자의 주파수 대역이 50KHz로 수박시편을 얇게 가공해야만 신호가 투과 할 수 있다는 점이다.

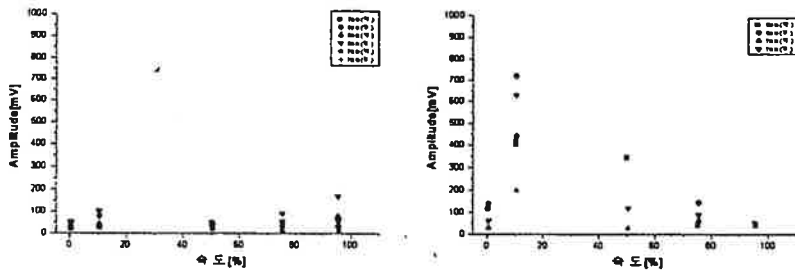
이런 문제로 인해 수박시편이 파장 정도로 가공되어 투과법에 의한 감쇄측정 인데도 불구하고 진동자와 수박시편의 큰 임피던스 차로 인해 수박시편 내에서 다중반사로 인한 간섭문제가 발생한다. 따라서 이런 시편에 대한 측정값으로부터 감쇄계수를 구한다는 것은 의미가 없다. 그렇지만 두께가 같은 수박의 과육과 과피의 진폭  $V(rms)$ 의 크기는 어느 정도 감쇄의 정보를 포함하고 있다고 생각되어 그림 13과 같은 과육과 과피의 신호에서 측정된 진폭으로 그림 14와 같이 표현해 보았다



a)과육에서 측정된 파형

b)과피에서 측정된 파형

그림 13 과육과 과피에서 측정된 파형



a)속도에 따른 과육에서  
투과음파의 진폭

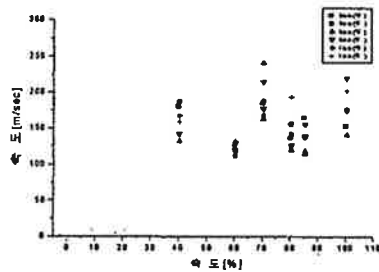
b)속도에 따른 과피에서  
투과음파의 진폭

그림 14 속도가 다른 수박의 과육과 과피에서의 투과음파 진폭 측정값

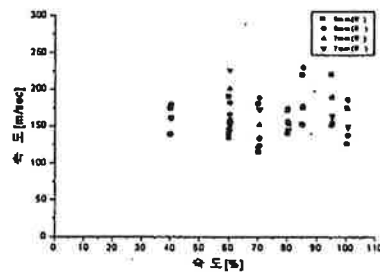


측정 결과를 보면 과육보다는 과피의 진폭이 모두 크게 측정되었다. 측정결과로부터 과육에서 감쇄가 크다고 생각된다.

수박 품종에 따른 차이점을 확인해 보기 위해 위와 같은 방법으로 무등산수박에서 과육과 과피의 속도, 감쇄를 측정하였다. 그 측정값을 그림 15는 무등산수박의 과피와 과육의 속도이다. 일반수박과 비슷한 범위의 속도를 가짐을 알 수 있다.



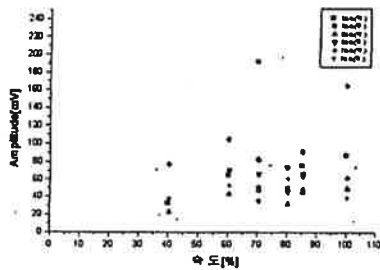
(a) 속도가 다른 과육에서  
음파전달속도



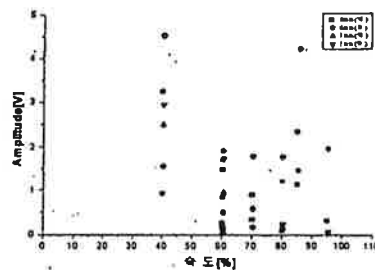
(b) 속도가 다른 과피에서  
음파전달속도

그림 15 속도가 다른 무등산수박의 과육과 과피에서 음파전달속도 측정값

그림 16은 무등산 수박의 과육과 과피에서 측정된 투과음파의 진폭이다. 여기서도 일반수박과 같은 결과를 얻었다.



a) 속도에 따른 과육에서  
투과음파의 진폭



b) 속도에 따른 과피에서  
투과음파의 진폭

그림 16 무등산 수박의 속도에 대한 과육과 과피에서 투과음파의 진폭

## 2. 타음파형 이해를 위한 몇 가지 실험

타격기에 의해 발생한 타음이 수박 몸체를 지나서 타음파형을 만들어 낼 때 어느 경로를 지나서 측정점까지 도착하게 되는지를 알기 위해서 다음과 같은 몇 가지 실험을 수행하였다.

하나의 완전한 수박을 그림 17처럼 1/4, 1/2, 3/4 정도씩 절단해내고, 과피쪽 (MIC 1)과 과육의 중심부(MIC 2)에서 타음 신호를 측정했다. 각각 측정된 타음 신호로부터 도달시간을 측정하고 속도를 계산함으로써 타음신호의 전파경로를 추정하고자 한다.

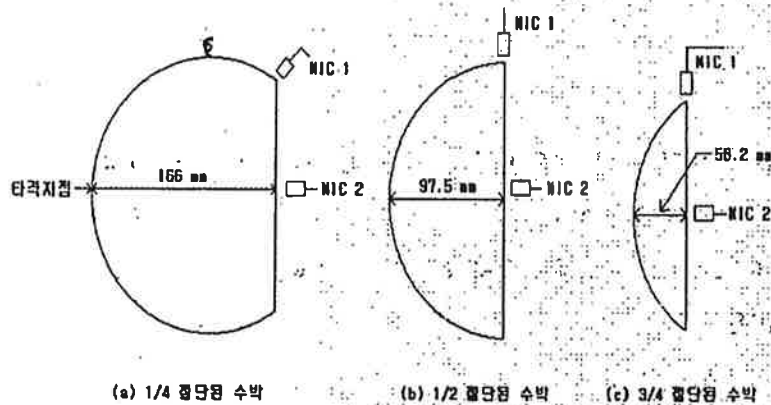
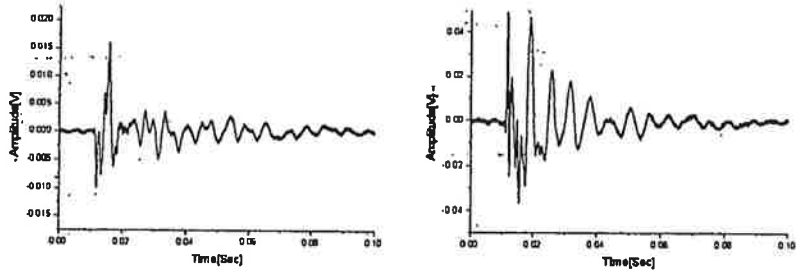


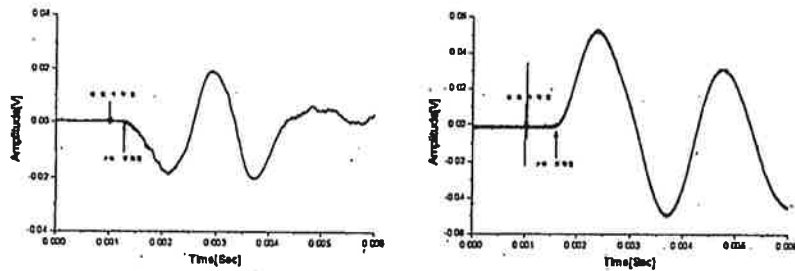
그림 17 몸체 일부를 잘라낸 수박에서 타음의 측정

그림 18은 1/4절단된 수박시편(그림 17(a))에서 측정된 파형이다. 타음신호는 두 측정점 위치에서 모두 비슷한 진폭의 신호를 측정 할 수 있었다. 두 위치에서 비슷한 진폭의 신호를 검출 할 수 있다는 것은 과피쪽과 과육쪽 경로에 비슷한 정도로 신호가 전파한다고 볼 수 있다.



a)과피쪽에서 측정된 파형      b)과육 중심에서 측정된 파형  
 그림 18 몸체의 1/4절단된 수박에서 측정된 타음의 전체 파형

또, 그림 19는 3/4절단된 수박시편(그림 17(c))에서 측정된 타음의 초기파형이다



a)과피쪽에서 측정된 파형      b)과육 중심에서 측정된 파형  
 그림 19 몸체의 3/4절단된 수박에서 측정된 타음의 초기파형

타격순간에 전기적 트리거 신호를 기준 시작점으로 하여 각각의 측정위치에 처음으로 도달하는 음파(p파)가 도달하는 시간을 측정할 수 있고, 이런 방법으로 각각의 경우에 음파의 전파속도를 계산할 수 있다. 각 경우에 예상경로의 측정거리와 p파 도달시간을 다음의 표 2에 나타냈다. 표 2의 결과로 도달시간과 도달 예상경로로부터 계산하면 타격지점으로부터 과육 중앙부분(MIC 2)쪽으로는 직선경로 방향 속도는 271m/sec이다

표 2 절단된 수박에서 초기펄스 도달시간과 예상경로의 거리  
(실험에 사용한 수박은 직경(D)=19.5cm, 속도:95%이다)

수 박	과육중심에서 측정		과피 끝위치에서 측정		
	도달시간( $\mu$ s)	경로거리(cm)	도달시간	직선경로거리 (cm)	원호경로거리 (cm)
1/4절단수박(a)	1072 $\mu$ s	16.6cm	780 $\mu$ s	17.99cm	22.96cm
1/2절단수박(b)	807 $\mu$ s	9.75cm	694 $\mu$ s	13.78cm	15.30cm
3/4절단수박(c)	678 $\mu$ s	5.82cm	372 $\mu$ s	10.65cm	11.26cm

또 타격지점으로부터 과피 끝부분(MIC 1)쪽으로의 직선경로 방향의 속도는 157m/sec., 표면을 따라오는 원호방향의 속도는 248m/sec이다. 과피와 과육에서의 음파속도를 비교하여 볼 때 타당한 경로는 원호방향이라고 생각된다. 위의 결과로부터 다음초기신호는 과피와 과육으로 모두 다음신호가 전달되고 있음을 알 수 있다. 다음 진앙점으로부터 각각 두 지점으로 전파해온 다음 초기신호의 속도가 앞의 실험에서 측정된 속도와 비교하여 타당한 범위내에 존재하고 있다.

미숙상태와 적숙상태인 수박의 껍질을 깎아가면서 파형을 측정하여 보았다. 과피를 제거하면서 다음파형과 주파수 스펙트럼의 변화를 보기 위해서 과피를 제거한 실험을 수행했다. 수박의 반지름이 10cm인 미숙과와 적숙과를 180°에서 파형을 측정하고, 수박의 경도면을 따라 그림 20처럼 2cm, 15cm, 18cm정도의 홈을 가공하고 그림 21, 그림 22와 같이 파형이 측정되었다.



그림 20 수박의 경도면을 따라 2cm, 15cm, 18cm정도의 홈 가공

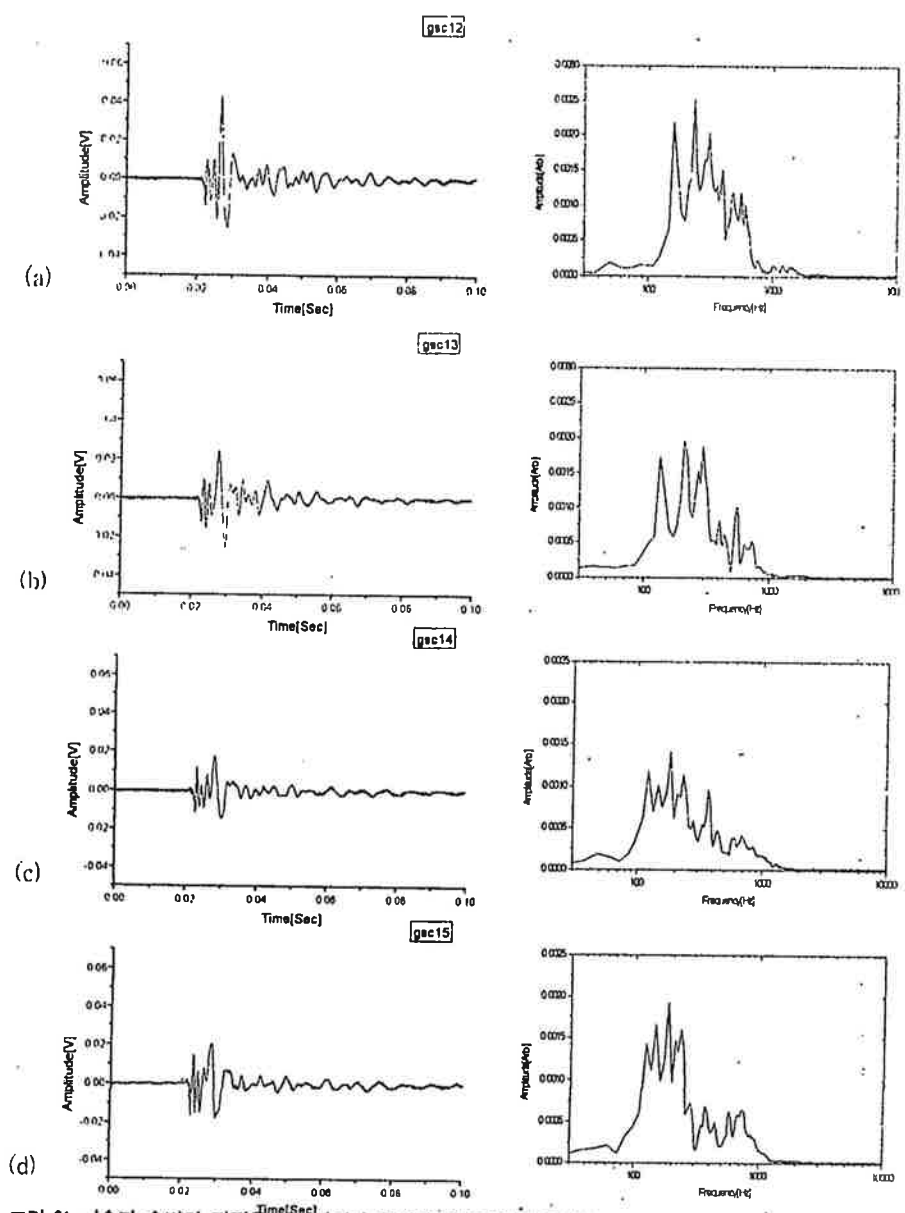


그림 21 미숙과 수박의 껍질을 제거하면서 측정된 타음파형과 주파수 스펙트럼 (사용한 수박 속도는 30%, 크기는 22×20cm 껍질두께는 2cm 였다)  
 (a) 수박의 껍질을 제거하기 전 정상상태에서 측정된 파형  
 (b) 수박의 껍질을 경도선을 따라 폭 2cm 제거하고 측정된 파형  
 (c) 수박의 껍질을 경도선을 따라 폭 18cm 제거하고 측정된 파형  
 (d) 타격위치의 과피만 직경 8cm남기고 껍질은 모두 제거한 후 측정된 파형

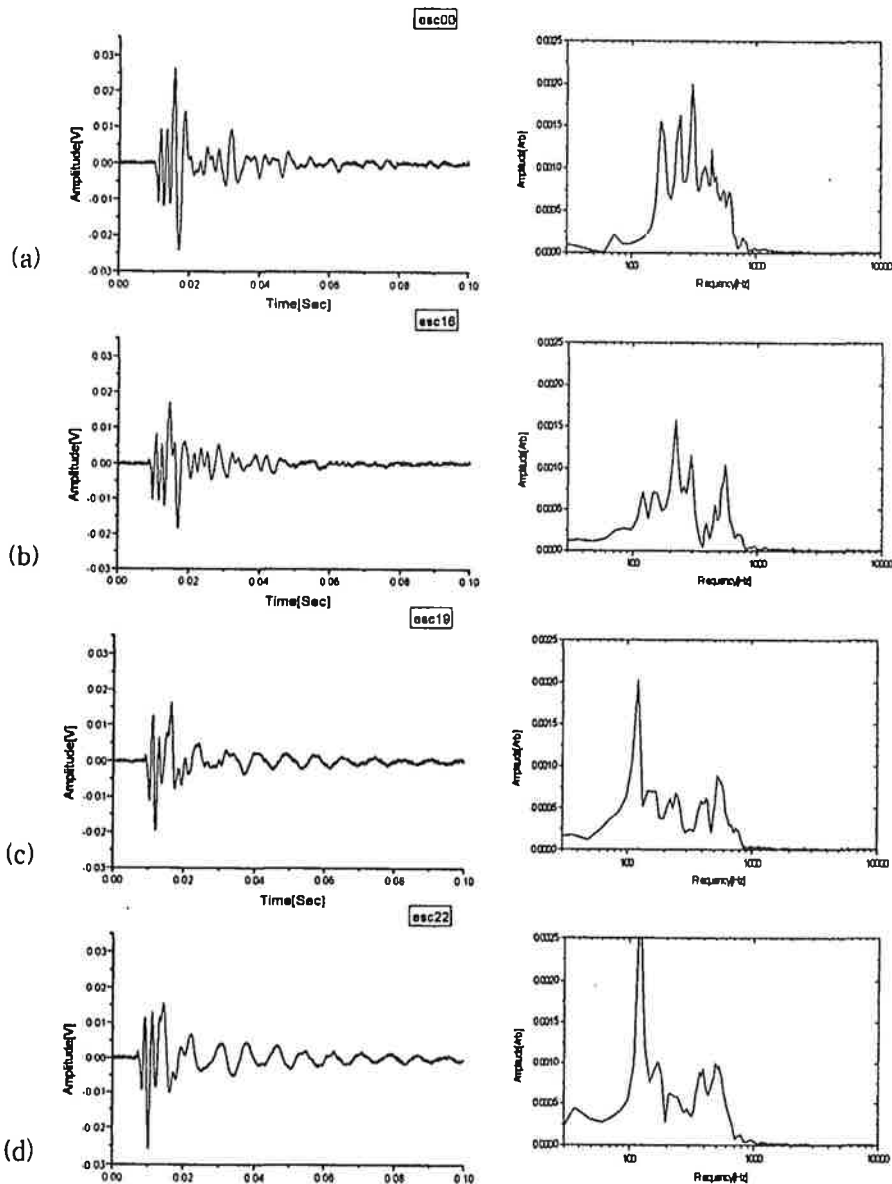


그림 22 적속과의 검질을 제거하면서 측정된 타음파형과 주파수 스펙트럼  
 (사용한 수박의 속도는 90%, 크기는 20×21cm, 검질두께는 2cm 였다)  
 (a) 수박의 검질을 제거하기 전 정상상태에서 측정된 파형  
 (b) 수박의 검질을 경도선을 따라 폭 2cm 제거하고 측정된 파형  
 (c) 수박의 검질을 경도선을 따라 폭 15cm 제거하고 측정된 파형  
 (d) 수박의 검질을 경도선을 따라 폭 18cm 제거하고 측정된 파형

다음파형으로부터 주파수 스펙트럼을 얻고 각 공명 피크에 대한 주파수를 측정했다. 그것을 과피 제거정도에 대해서 그림 23과 같이 나타냈다.

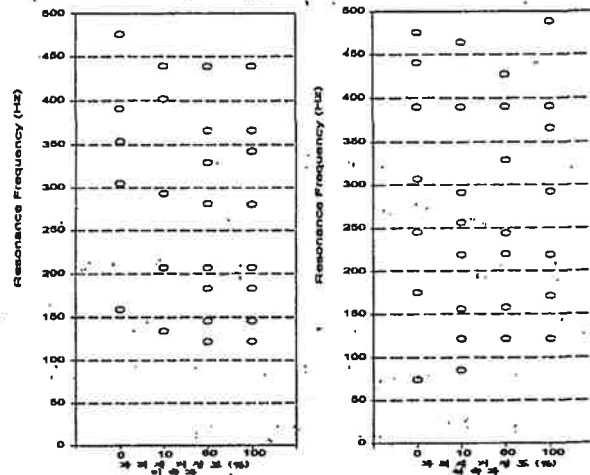


그림 23 과피의 제거 정도에 따른 공명주파수의 변화

과피를 제거하면 미숙과에서는 진동모드에 따라 다르지만 공명주파수가 감소하는 경향이 있다. 그에 반해 적숙과의 공명주파수는 크게 변하지 않는 것 같다. 이런 현상은 앞에서 측정한 속도를 보면 미숙과에서 과피와 과육의 속도차가 크다. 미숙과에서 속도가 빠른 과피층이 제거가 되므로 공명주파수가 감소하고 있다. 반면에 속도가 높은 수탁에서는 과피와 과육의 속도가 비슷하거나 오히려 과육에서 속도가 빠르다. 그러므로 과피가 제거되므로 구의 반지름이 10%정도 감소하고 또, 표면에 과육이 드러나 표면층의 속도가 빨라져서 주파수 상승효과가 예상되므로 공명주파수가 오히려 증가할 수가 있다는 사실과 부합한다. 그러나 수탁이 완전한 구형이 아니고 내부의 상태도 균질하지 않으며 많은 공진모드가 복잡하여 신호들을 구분하는 것이 쉽지 않다. 다만 저주파쪽의 공진모드의 공진주파수 변화 의미를 짐작할 수 있는 단서를 준다 하겠다.

수박의 내부에 존재할 수 있는 공동에 의해 타음파형이 어떻게 변화할 것인지를 알기 위해서 인위적인 공동을 형성하여 타음파형을 측정하였다. 미숙상태와 적숙상태인 수박을 시험재료로 하여 직경 3cm 정도의 원통형 공동을 극점을 통과하는 축을 따라 형성시켰다. 또, 내부의 과육부분은 완전 제거하고 나서 과피만 남겨 한 상태의 파형도 측정하였다. 그림 24와 그림 25에 그 파형과 주파수 스펙트럼을 보였다.

그림 24(b)는 미숙과 수박내부의  $\phi 3\text{cm}$ 인 관통구멍을 가공해서 측정된 파형이다. 정상상태의 파형 그림 24(a)와 비교해서 저주파 모드가 2개가 여기되어 있음을 알 수 있다. 그림 24(a)의 주파수 스펙트럼에서 첫 번째 공진 주파수가 252Hz인데 비해 공동을 형성한 그림 24(b)의 주파수 스펙트럼에서 그 보다 낮은 194Hz와 80Hz에서 피크가 여기되어있다. 완전히 수박 내부의 과육을 제거한 후 과피만을 남겼을 때도 그런 저주파 모드가 생성되었다. 고주파 모드는 복잡해서 각 모드를 구분하기가 힘들다. 그림 25(b)파형에서도 정상과의 기본진동수 160Hz에 비해서도 2개의 130Hz와 69Hz의 저주파 모드가 여기되었다. 미숙과 정상과 구별 없이 인위적인 내부공동에서는 정상과의 가장 낮은 공명진동수 보다 더 낮은 쪽에 새로운 모드가 여기될 수 있음을 알 수 있었다.



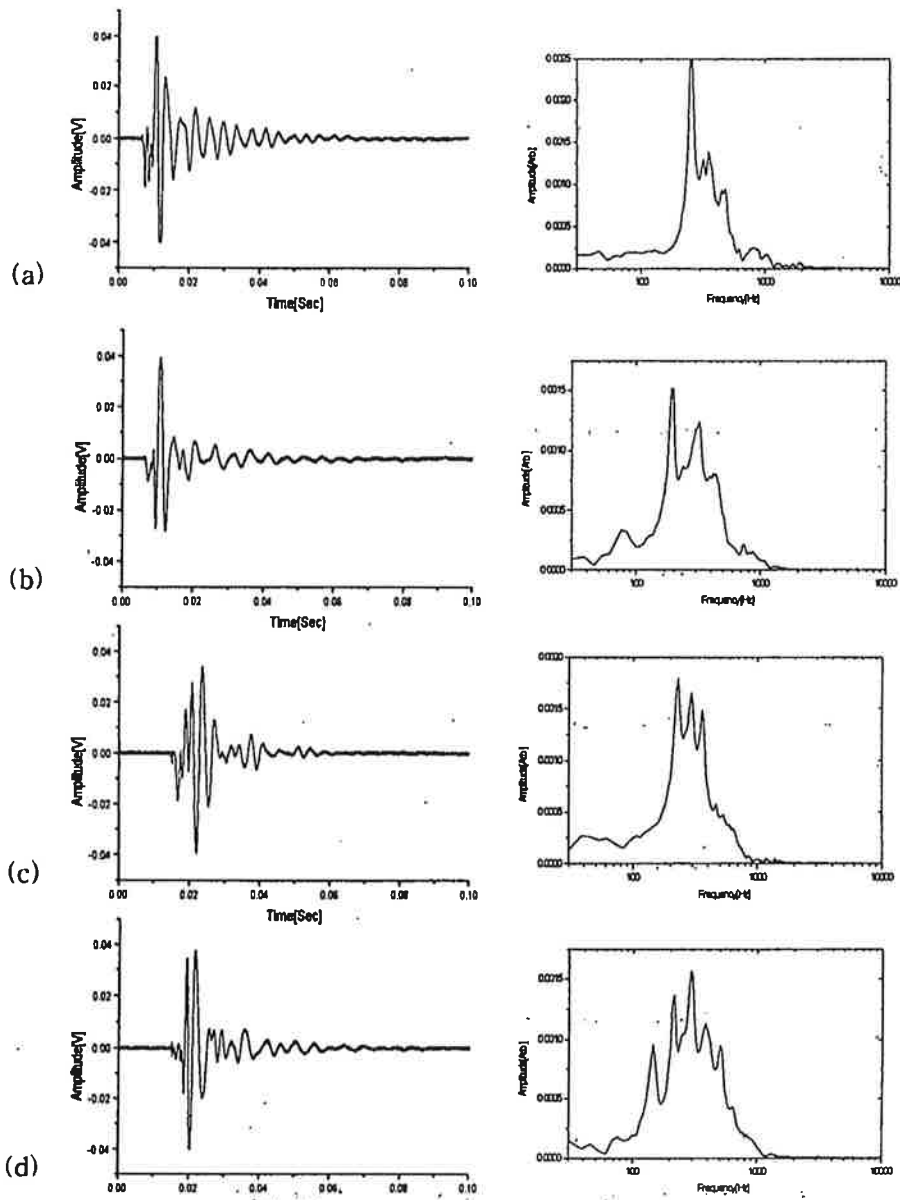


그림 24 미숙과 수박 내부에 인위적인 공동이 존재할 때 타음파형과 주파수 스펙트럼  
 (사용한 수박은 속도 40%, 크기 13\*12.5, 무게 1.36, 밀도 0.944, 당도 4.0 였다)  
 (a) 공동을 만들지 않은 정상상태에서 측정한 파형  
 (b) 직경 3cm인 원통모양으로 공동으로 만들고 측정한 파형  
 (c) 수박의 속을 완전히 파내고 측정한 파형  
 (d) 수박속을 완전히 파내고 물을 채운후 파형측정

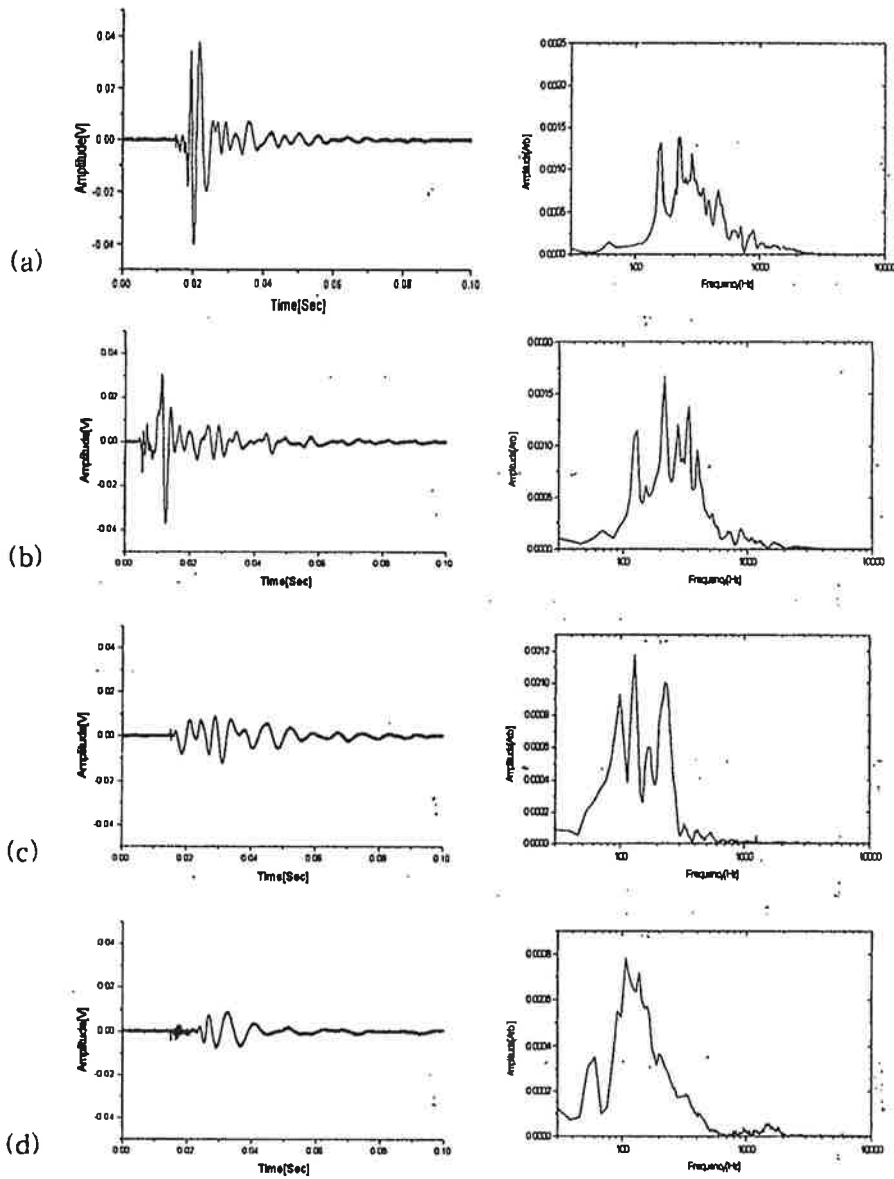


그림 25 잡익은 수박 내부에 인위적 공동이 존재할 때 타음파형과 주파수 스펙트럼  
 (사용한 수박은 속도:30%, 크기:22\*24, 무게:5.82, 밀도:0.984, 당도:9.6 였다)  
 (a) 공동을 만들지 않은 정상상태에서 측정된 파형  
 (b) 직경 3cm인 원통모양으로 공동으로 만들고 측정된 파형  
 (c) 수박의 속을 완전히 파내고 측정된 파형  
 (d) 수박속을 완전히 파내고 물을 채운후 파형측정

다음 방법에 의한 과육의 속도측정을 위해서 그림 26과 같은  $\phi 170\text{mm}$ 의 원형 디스크 모양의 수박 시편을 준비하였다. 준비된 시편의 두께는 36mm, 57.5mm로 준비하여 타격순간 trigger가 되도록 장치한 다음 신호를 측정하고, 그림 27처럼 측정된 신호로부터 trigger점으로부터 P파가 도달되는 점의 시간을 측정하였다. 과육이 약하여 타격에 따라 요동이 있는 타음신호가 측정되었으며, 초기 파형의 중심주파수는 2KHz에서 6KHz에 걸쳐 있었다. 측정된 시간과 과육 두께로부터 계산된 속도는 약 140m/sec으로서 우리가 앞에서 측정한 과육에서의 음파 속도와 비교했을 때 타당한 범위에 든다 하겠다.

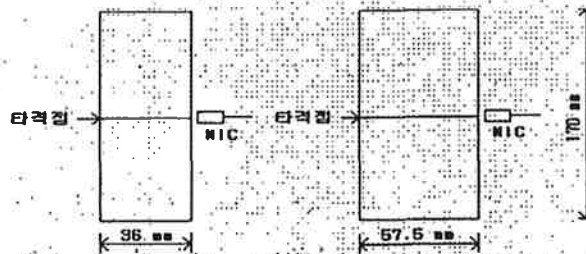
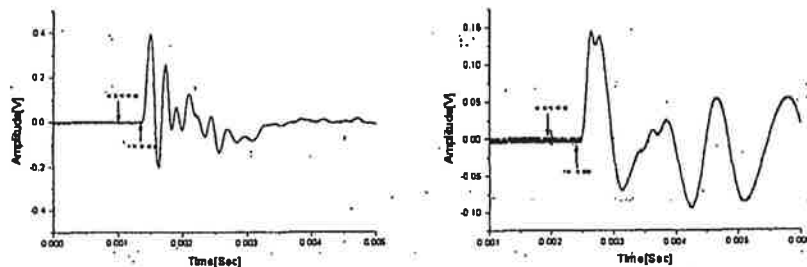


그림 26 타음식에 의한 과육 속도측정용 시편



a) 두께 36mm에서 측정된 신호      b) 두께 57.5mm에서 측정된 신호

그림 27 과육 두께 36mm, 57.5mm에서 측정된 타음신호

### 3. 타음신호에서 얻을 수 있는 속도

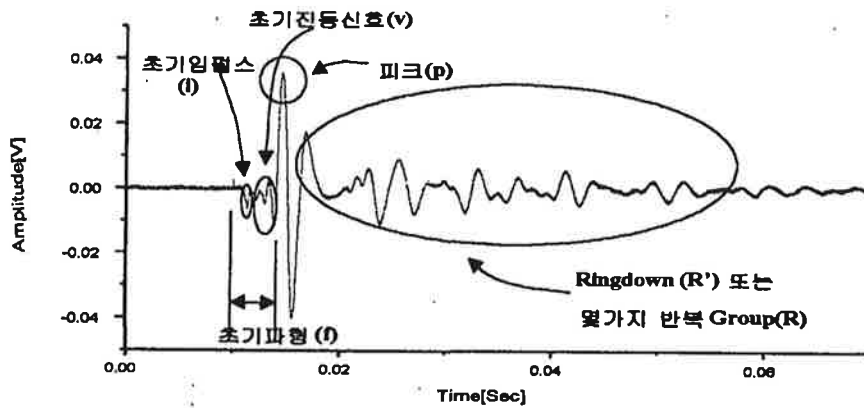


그림 28 타음신호에서의 파형구분

전형적인 타음신호에서 파형의 특징들을 구분하여 그림 28에 나타냈다. 속도면에서 볼 때 적속과에서는 초기파형(f), 피크파형(p)과 몇 가지 Group 파형(R)이 반복된다. 그리고 초기파형(f)을 자세히 보면 초기입펄스(i)와 몇 Group의 초기진동(v)이 있다. 미속과의 파형은 초기파형(f), 피크파형(p)과 Ringdown(R')으로 구분지어 볼 수 있다. 타음신호파형은 크기에 따라서도 달라진다. 따라서 파형이 수박의 크기에 따르는 영향에 크게 의존함을 알 수 있다. 파형들을 주파수분석 해보면 초기파형(f)은 상대적으로 고주파 성분이 분포하고, 피크파형(p)은 300~500Hz, Ringdown(R')이나 반복 Group(R)은 저주파쪽에 분포함을 알 수 있다.

초기파형(f) 고주파부분을 살펴보면 다음과 같다. 수박을 구(sphere)로 근사하여 생각해 볼 때 앞에서 살펴본 것처럼 초기부분의 고주파성분들은 과피쪽 원호방향으로나 수박을 관통해서 오기도 한다. 그런데 미속과, 적속과에서는 과피와 과육의 속도에 차이가 있다. 수박에서 과육과 과피의 속도차를 고려하여 다음과 같은

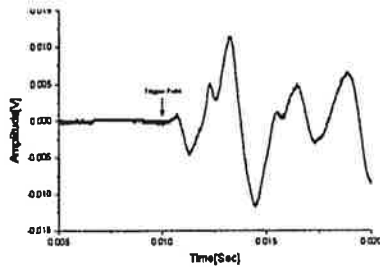
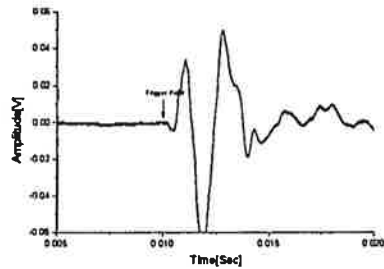
생각을 유도해 볼 수 있다. 미숙과에서는 과피에서 음파속도가 빠르고 과육에서는 늦으며 과피를 따라서 오는 경우는 반원둘레  $\pi R$ 만큼의 경로를, 과육을 따라 오는 경우는 직경  $2R$ 만큼의 경로를 따라 오게 된다. 따라서 두 경우의 도달시간을 계산해보면 과육쪽을 통과해서 직접오는 신호가 먼저 도달하게 된다. 이 두 경로에서의 도달시간의 차이는 수박의 반지름에 따라 다르지만 반지름 10cm인 수박에서 약 0.2msec 정도가 된다. 마찬가지로 적숙과에서 같은 논의를 해보면 과피를 따라서 오는 신호가 먼저 도달하게 되고 이 두 경로에서의 도달시간의 차이는 수박의 반지름에 따라 다르지만 반지름 10cm인 수박에서 약 1msec 정도의 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 이 정도의 시간차는 초기파형부분(f)의 맨 앞 임펄스부분(i)이내에서 나타날 정도로 매우 짧은 시간인 것이다. 즉 이 신호는 결국 약 500Hz 이상의 주파수 성분의 파형에만 영향을 미치고 보통 수박 품질판정에 사용되는 공명주파수(500Hz 이하 신호)에는 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. 또 더구나 이런 초기임펄스 신호(i)들은 그 진폭이 매우 작아서 잡음신호의 영향을 크게 받아 다음신호로부터 정확한 도달점을 찾는 데 오차가 크게 발생한다. 따라서 다음식 평가방법에서 이 초기임펄스 신호(i)로부터 정보를 얻기가 쉽지 않다. 아마도 이런 주파수 영역에서의 연구는 다른 연구자들처럼 다음식이 아닌 투과음 방식으로의 연구가 적합할 것으로 생각된다.

초기파형중 초기진동신호(v)의 주파수 성분은 약 500Hz 근처의 성분을 포함하는데 이런 주파수의 음파는 수박의 속도를 150m/sec로 볼 때 약 30cm 정도의 파장을 갖게 된다. 1cm 정도의 수박껍질은 파장에 비해서 매우 얇은 것이다. 따라서 수박껍질에 의해서 초기진동이 발생하는 것은 아니라고 사료된다. 오히려 이 주파수의 파장은 수박의 전체직경과 비슷하게 되거나 수박직경보다 더 커지게 된다. 결국 초기임펄스 이외의 신호들(500Hz 이하의 주파수 성분)은 모두 심각한 기하학적 분산을 받게 되며, 이것을 이해하기 위해서는 진동모드 해석이 중요하게 된다.

피크파형(p)부분의 신호에 대한 견해는 다음과 같다. 이들의 주파수는 보통

수박의 크기에 따라 다르긴 하지만 300~500Hz 범위에 있다. 이 피크파형(p)부분의 신호는 타격지점으로부터 시계방향, 반시계방향으로 전파해온 음파들이 상호보강적으로 간섭한 결과로 생각할 수 있으며 측정점의 마이크 위치를 바꾸어서 측정해보면 이 피크파형(p)들이 크게 달라짐을 볼 수 있다. S. Hayashi 등은 멜론의 속도를 측정하기 위해 이 피크파형(p)의 전달속도를 측정하였으며, 멜론의 경우 속도에 따라 37~50m/sec의 범위로 변한다고 보고한 바 있다. 우리는 수박에서 이 피크파형(p)의 도달시간을 측정하였으며, 그 전달속도는 20~50m/sec의 범위에 도달하게 된다. 이것을 초기임펄스의 속도 보통 150~240m/sec, 과육이나 과피에서 50KHz 음파로 측정한 속도 120~240m/sec와는 다르다. 이런 현상은 이 피크의 중심주파수가 300~500Hz정도이며, 이 때 분산이 매우 큰 상황이며 이 주파수에서의 균속도로써 이해해야 한다.

다음신호의 신호 전파해석을 위해서 우리는 타격위치로부터 2-마이크방법을 이용해서 다음신호를 측정했다. 측정위치는 MIC 1은 45°, MIC 2는 90°, MIC 1은 90°, MIC 2는 135°, MIC 1은 135°, MIC 2는 180°에 위치시키고, 타격시 트리거 신호를 기준으로 모든 신호가 트리거 되도록 하였으며, 45°~90° 사이에서 파형측정시 문제가 되는 air bone noise도 고려되었다. 그림 29와 같이 측정된 파형으로부터 우리는 45°- 90°, 90°- 135°, 135°- 180°의 꺾짐을 따라 전파하는 P파의 전파시간을 측정할 수 있으며, 각각의 전파시간은 256 μsec, 233 μsec, 272 μsec으로 측정되었다. 측정된 시간으로부터 2R=16cm 수박으로부터 전파경로의 길이는  $\pi \cdot R$ 이므로 전파시간과 전파경로의 길이로 계산된 속도는 245m/sec, 233m/sec, 274m/sec로 계산되었으며, 우리가 pundit로 측정한 속도와 잘 일치하고 있다.



a) 45° 에서 측정된파형

b) 90° 에서 측정된파형

그림 29 45° - 90° 에서 측정된 타음의 초기파형

#### 4. 주파수 분석 및 진동이론

앞 절에서 수박껍질을 제거한 후의 공진주파수의 변화, 수박 내부에 인위적 공동을 만들고 공진주파수의 변화에 대한 FFT분석을 하였다. 다음 그림 30에 크기와 속도가 다른 수박에서 대표적인 파형을 FFT하여 주파수 스펙트럼을 보였다.

주파수 분석을 통하여 몇 개의 공진주파수 피크로 구성되었음을 알았다. 이 공진주파수 중에는 수박의 속도에 따라 크게 변화하는 것도 있고, 그러지 않은 경우도 있었다. 주파수 공간에서만 보면 이런 형상은 이상할지 모르지만 이것이 3차원적인 구조체의 진동으로부터 오는 신호라는 점을 고려하면 특정한 진동모드에 대한 진동의 공간배향 특성에 따라 속도에 대한 의존성이 달라지는 것은 당연하다. 한 진동모드에 대한 공진주파수는 기하학적 구조와 크기 및 물성 등의 여러 요인에 따라 달라진다. 즉 수박의 경우 속도에 따른 물성 변화이외에도 크기, 형태에 따라서도 공진주파수가 변화한다는 것이다.

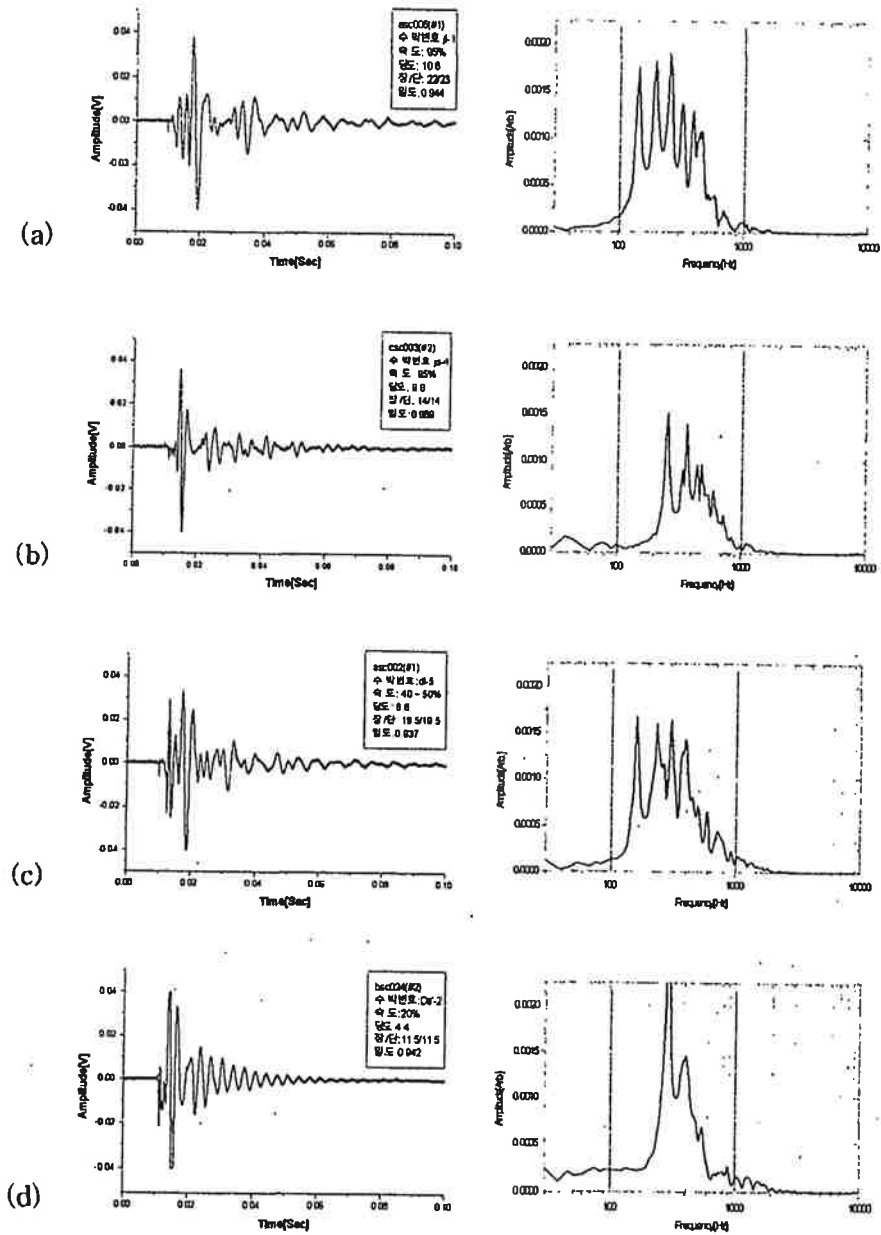


그림 30 속도와 크기가 다른 수박의 대표적인 파형과 주파수 스펙트럼  
 (a) 큰 적숙과, (b)작은 적숙과, (c) 큰 미숙과, (d) 작은 미숙과



그림 31에 타격점으로부터 측정점의 각도를 변화시키면서 측정한 다음의 주파수 스펙트럼을 보였다.

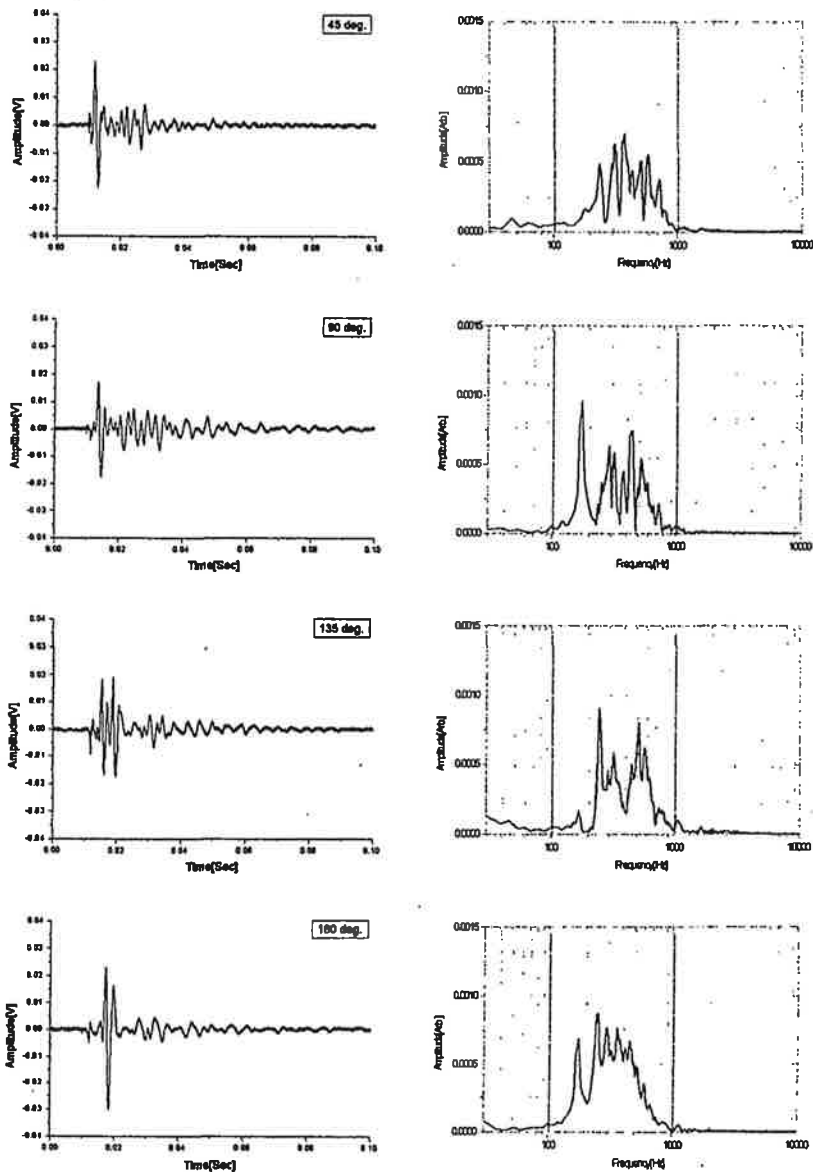


그림 31 타격점으로부터 적도면을 따라 45°, 90°, 135°, 180° 위치에서 측정된 타음파형과 주파수 스펙트럼

각도에 따라 많은 차이를 보인다. 그러나 정해진 주파수의 여기 강도만 각도, 즉 공간배향에 따라 달라졌음을 알 수 있다. 각 모드별로 공간배향에 대한 분포까지 파악한다면 좀 더 모드에 대한 신원 확인이 가능할 것이나, 180° 타음만으로는 공명주파수인  $f_i$ 로부터 단지 추정할 수 있는 정도일 것이다.

얇은 껍질제거 실험에서의 그림 23 처럼 180° 파형만으로 모드를 추정해 보는 것이 혼란스럽고 불확실한 일일지도 모르지만, 많은 직관을 제공하고 해석의 방향을 시사하는 도움이 있다. 이를 위해서 우리는 얇은 구각의 공진모드를 살펴봄으로써 수박의 진동모드에 관한 개념적 이해를 엿볼 수 있다.

공진주파수는 다음과 같이 주어진다.[ref. 37]

$$f_i = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \Omega_n = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot g_i(\mu)$$

단  $i = 0, 1, 2, 3 \dots$  이며,  $E$ 는 modulus,  $\rho$ 는 밀도이며,  $a$ 는 shell의 반지름이며  $g_i(\mu)$ 는 poisson비로 주어지는 함수이다.

따라서  $f_i \cdot a = \text{상수} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot g_i(\mu) \cdot g_i(\mu)$  이며

$\left(\frac{f_i}{f_j}\right) = \frac{g_j(\mu)}{g_i(\mu)}$ 로 주어진다. 즉 주파수의 비는 기하학적 인자가 상쇄되

고 속도와 관련된 물성으로 주어진다는 것을 시사한다. 수박에서는 껍질만 존재하지 않고 3층의 구체로 취급하는 것이 정확하고, 더구나 완전한 구형도 아니며 물성의 균질성도 보장되지 않으므로 완전한 해석적 접근은 어렵다. 따라서 위의 다만 개념적인 접근만을 위한 것이다.  $i$ 값이 0, 1, 2로 변함에 따라 Breathing mode, rigid body motion mode 등으로 불리며 그 진동양상은 다음 그림 32와 같이 표현된다.

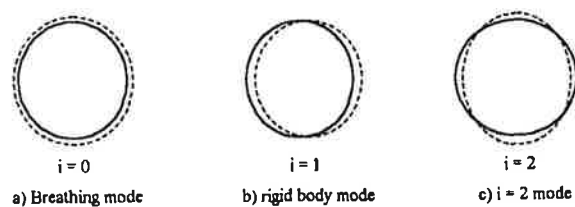


그림 32 구각의 기본 진동모드의 모식도

## 4절 속도와 관련된 타음 신호의 특징 변수

우리는 앞 절에서 다른 연구자들이 수박의 속도 판별을 위해 사용한 음향학적 지수들을 논하였고, 또 그들의 의미를 다음과 관련하여 세밀히 연결하고자 하였다. 수박에서의 속도측정과 감쇄, 음향 전달경로 파악 및 각 공진주파수와 모드를 논하였다. 또 이들 신호 파형의 구성부분과 연관지어 속도와 관련된 정보를 얻으려 하였다. 그러나 우리가 고려해야 할 점은 이 많은 변수나 그에 포함된 정보들로부터 유용하고 편리한 특징정수들을 얻기 위해서 다음 사항을 고려해야 한다. 먼저 수박의 속도와 큰 상관관계를 갖는 정수를 선택해야 하며, 속도이외의 인자 예를들어 수박의 크기, 모양 등에 대한 의존성이 작은 정수이어야 한다는 것이다. 이를테면 다른 연구자들이 이용해오던 변수로서  $f_0$ 보다는  $mf^2$ , 더 나아가  $m^{2/3} \rho^{1/3} f^2$  등이 더욱 속도와 상관성이 높다는 것이 이런 상황을 의미한다 하겠다. 또 한가지는 다음파형으로부터 특징변수를 추출하는 과정이 간단하고, 재현성이 있어야 한다는 것이다. 특히 잡음이나 약간의 신호변동 등에 안정적(noise immunity)이어야 한다. 경험적 변수보다는 그 특징정수가 수박의 속도와 어떤 관련을 갖는지 물리적 의미가 명확하면 더욱 좋다. 이런 생각을 바탕으로 다음과 같은 특징변수들을 고려하였다.

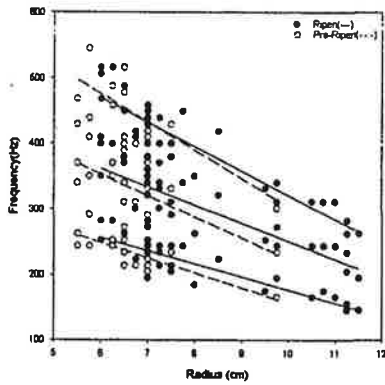
먼저 앞장에서 논의한바 있는 다른 연구자들에 의해 사용되어온 변수들을 들 수 있다.

- ①  $f_i$  : 각 공명 주파수 ( $i = 1, 2, 3 \dots$ )
- ②  $mf_i^2$  : 수박을 1차원 진동자로 고려할 때의 탄성계수(Stiffness coefficient)에 해당한다.
- ③  $m^{2/3} \rho^{1/3} f_i^2$  : 횡탄성계수(shear modulus)로 해석된다.

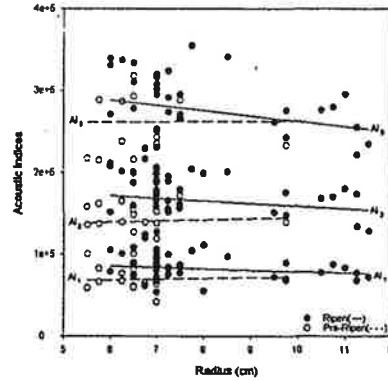
Yamamoto(1981)에 의하면 이들 정수가 속도와 일정한 상관도를 보이며 특히  $i$ 의 값에 따라서, 즉 어떤 공명피크 인가에 따라 속도와 상관계수가 변화한다고 알려져 있다. 다시 말해서 공명모드가 선택적으로 관계됨을 말하고 있다. 그러나 앞 절에서 논의한 바와 같이 단순히 가장 낮은 주파수부터 첫 번째 피크, 두 번째 피

크로 파악하는 것은 혼란이 있는 소지가 있다. 특히 공동과의 경우는  $f_1$ 보다 낮은 쪽에서 1~2개의 공진피크가 쉽게 발생하곤 함을 앞에서 보았다.

그림 33(a)는 ①의 정수 즉  $f_1, f_2, f_3$ 를 속도와 수박의 반지름에 대해 나타낸 그림이다. 수박의 반지름에 크게 의존하며 속도에 대한 의존성이 혼돈되어 보인다. 그림 33(b)는 ②의 정수 즉  $m^{2/3} \rho^{1/3} f_i^2$  을  $i = 1, 2, 3$  에 의하여 나타낸 것이며 여기서는 수박의 반지름의 의존성이 거의 없어졌고, 미숙과의 값보다 적숙과의 정수값이 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉 ①정수보다 ②정수가 속도 판단의 좋은 특정정수가 될 수 있으며, 이  $m^{2/3} \rho^{1/3} f_i^2$  값이 속도와 상관도가 높으며, 특히  $i = 2$  일 때 그 변화가 크게 나타나는 사실 등은 많은 연구자들이 공히 보고하는 내용과 일치한다.



(a) 공명주파수



(b) 보상된 공명주파수

그림 33 속도와 크기가 다른 수박의 타음신호 공명주파수와 보상된 공명주파수

④  $f_i/f_j$  : 공진주파수의 비 값이며, 구형 shell에서 포아송비 만의 함수로 표시될 수 있다.

구형 shell의 진동모드 논의에서 언급한 바와 같이 공진 주파수간의 비율  $f_i/f_j$  기하학적 인자가 서로 상쇄되고 shell 구조물의 포아송비  $\mu$  만의 함수였다. 이 개념을 고려하여 수박의 공진주파수에 적용해 볼 가치가 있다. 수박에서 공명진동수들의 모드구분이 명확하지는 않지만  $i = 1, 2, 3$  정도의 피크에 대하여 적용해 보도록 한다. 그림 34에 수박의 크기와 속도에 대하여 공진주파수의 비율을 나타내어 그렸다.

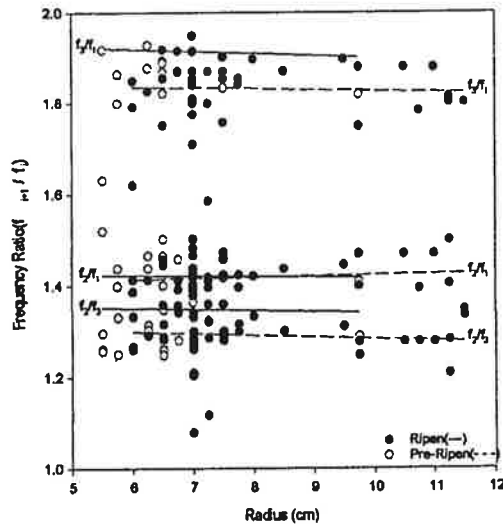


그림 34 속도와 크기가 다른 수박의 타음신호 공진주파수의 비

그림에서 보는대로, ④정수( $f_i/f_j$ )는 수박 크기에 거의 독립적이며 속도에 따른 변화가 나타나 있다. 특이한 바는 어떤 모드는 속도에 따른 정수값 변화가 매우 작으며( $f_2/f_1$ ), 어떤 모드는 속도에 따라 큰 변화를 보이는 이른바 모드 선택성이 존재함을 알 수 있다.

수박의 속도가 증가할수록 다음 파형이 복잡해지고, 즉 공명피크의 수가 많아지는 것이 보이므로 이것도 ⑤정수 공명피크 수(number of Peak)로 택할 수 있다. 또 수박의 속도가 증가할 때 과육에서의 음파감쇄가 크게 변할 수 있음을 감안하여 다음파형의 에너지를 제⑥의 특징정수로, 공명피크의 세기 비율을 제⑦의 정수로 택할 수 있을 것이다. 이들 ⑤, ⑥, ⑦ 특징정수들을 58개 수박의 다음파형에서 얻어 속도와 비교하여 그림 35에 나타내었다.

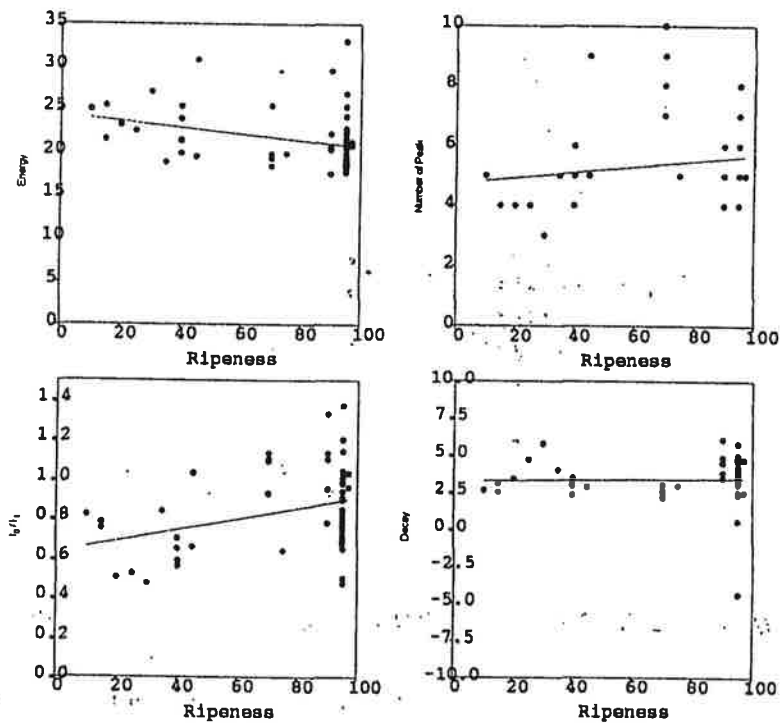


그림 35 속도가 다른 수박에서 다음신호의 여러 가지 특징정수와 속도 그래프

(f)정수를 수박 크기로 보상하기 위해 경험적 fitting 값인  $(f_r^{0.84})$  정수로 환산하여 제⑧의 특징정수로 보았으며 이를 그림 36에 나타내었다. 또 타옴파형의 최대 피크파형의 도달시간도 특징변수로 고려하여 보았다. 이러한 특징변수들의 개개의 속도에 대한 상관성은 0.2~0.75정도로 나타나게 되는데 이들을 신경회로망에 입력하여 종합적인 판단을 하게 함으로써 전체 분류확률을 높일 것으로 기대하는 것이다.

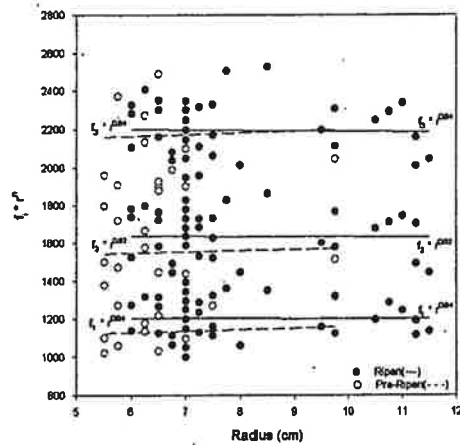


그림 36 속도와 크기가 다른 수박의 타옴신호 특징정수  $f_r^{0.84}$ 의 그래프

## 4장 공시재료

본 연구에 사용된 시료는 광주광역시 광산구 유림마을에 위치한 수박농가에서 하우스수박 2품종(금천, 금배), 광주광역시 광산구 평동에 위치한 수박농가에서 노지수박 1품종(대고)을 선정하고 구입하였다. 시료의 숙도에 있어서 미숙과(D), 적숙과(J), 과숙과(정상과를 실온에서 숙성시켰다, P)으로 3종류로 대별하였는데 전문가로부터 외관을 기준으로 숙도를 분류하였다가 실험한 후 쪼개서 과육색에 의해 숙도를 다시 구분하였다. 크기는 직경이 13cm~17cm, 18cm~19.5cm, 20cm 이상인 수박을 L(Large), M(Middle), S(Small)로 각각 편의상 구분하여 실온에서 보관 실험하였다. 공시재료 58개 수박의 제원은 표 3과 같다.

우리는 수박에서 타격음의 신호를 측정하기 위한 시스템으로 그림 2에서와 같이 전체적인 장치를 구성하였다. 즉 타격기, 마이크로폰, 기록계(디지털오실로스코프, A/D신호획득 보드를 내장한 컴퓨터)이다. 타격기는 테프론으로 제작된 타격구(무게:13g, 직경:16mm, 길이:30mm)를 사람이 직접 손으로 잡고 샘플의 적도면 중앙을 가볍게 타격하였다. 마이크로폰은 가청주파수 영역 내에서 평탄한 특성을 가지며, 수박표면에 1~3mm 근접시켜 사용하였다. 기록계로는 Digital Oscilloscope (LeCroy 9350A, 500MHz Oscilloscope)를 보통 Sampling rate 500Ks/s, 시간파형은 10msec/div, 감도는 10mV/div인 실험조건으로 설정하여 사용하였다. 이런 장치로 180° 타격음을 얻어 컴퓨터에 파일로 기록하였으며 학습과 검증에 활용하였다.



표 3 공시재료 총괄표와 제원

수박번호	크기(cm) (높이×직경)	무게(Kg)	말도(g/cm <sup>3</sup> )	당도 (° Brix)	숙도(%)	품종
1(DM-3)	19.5×19.5	4.24	0.937	6.6	45	금배
2(DS-7)	15×15	2.00	0.962	5.0	35	대고
3(DS-8)	14×14	1.68	0.949	5.8	40	대고
4(DS-9)	15×14	1.70	0.955	5.0	40	대고
5(DS-10)	13×13	1.34	0.944	7.0	45	대고
6(DS-11)	14×13	1.62	0.942	4.0	40	대고
7(DS-12)	13.5×13	1.50	0.938	6.0	40	대고
8(DS-13)	13.5×13	1.55	0.945	4.0	40	대고
9(DS-14)	13×12.5	1.36	0.944	4.0	40	대고
10(DS-15)	13.5×13	1.58	0.963	3.8	15	대고
11(DS-16)	14×13.5	1.78	0.937	4.0	40	대고
12(DS-17)	14.5×14	2.04	0.944	4.2	40	대고
13(DS-18)	13×12.5	1.26	0.926	4.2	15	대고
14(DS-19)	12.5×11	1.02	0.944	4.2	25	대고
15(DS-20)	12.5×11.5	1.22	0.938	4.6	10	대고
16(DS-21)	11.5×11.5	0.98	0.942	4.4	20	대고
17(DS-22)	10.5×11	0.84	0.913	5.0	30	대고
18(JL-28)	21×22.5	5.82	0.957	8.4	70	대고
19(JL-29)	20×21	4.92	0.946	8.4	70	대고
20(JL-31)	22×23	6.44	0.944	10.6	95	대고
21(JL-32)	23×22.5	5.92	0.943	10.6	95	대고
22(JL-33)	22×22	5.38	0.971	9.2	70	대고
23(JL-34)	21×21.5	5.00	0.951	11.8	90	대고
24(JM-11)	20×19.5	4.06	0.951	7.0	70	대고
25(JM-12)	20×19.5	3.74	0.954	8.0	95	대고
26(JM-13)	20×19	3.74	0.961	9.2	95	대고
27(JS-7)	15×14	1.76	0.941	11.2	95	금배
28(JS-8)	14×13.5	1.64	0.953	9.2	90	금배
29(JS-9)	13×14	1.64	0.970	9.6	95	금배
30(JS-10)	13.5×14	1.76	0.967	9.4	95	금배
31(JS-11)	13×14.5	1.68	0.933	12.2	95	금배
32(JS-12)	16×16	2.14	0.932	11.0	95	금배
33(JS-13)	14×13.5	1.44	0.906	11.6	90	금배
34(JS-14)	15×14	2.14	0.972	9.2	90	금배
35(JS-15)	14×15	1.86	0.920	10.6	95	금배
36(JS-16)	14.5×14.5	1.74	0.945	11.0	90	금배

표 3 공시재료 총괄표와 제원(계속)

수박번호	크기(cm) (높이×직경)	무게(Kg)	밀도(g/cm <sup>3</sup> )	당도 (° Brix)	숙도(%)	품종
37(JS-17)	15·15.5	2.38	0.967	7.4	75	대고
38(JS-18)	14·14	1.92	0.970	9.8	95	금배
39(JS-19)	14·13	1.64	0.976	9.8	95	금배
40(JS-20)	14·14	1.92	0.970	10.0	95	금배
41(JS-21)	14·14	1.86	0.969	9.8	95	금배
42(JS-22)	14.5·14	2.00	0.976	9.8	97	금배
43(JS-23)	14.5·14.5	2.22	0.969	10.0	95	금배
44(JS-24)	16·15	2.54	0.977	10.8	95	금배
45(JS-25)	16.5·15	2.56	0.948	11.4	95	금배
46(JS-26)	15·14	2.10	0.929	12.0	97	금배
47(JS-27)	16·14.5	2.50	0.969	11.4	95	금배
48(JS-28)	12.5·13	1.52	0.962	9.8	95	금배
49(JS-29)	13.5·13	1.78	0.989	10.6	95	금배
50(JS-30)	13·12.5	1.44	0.973	10.8	95	금배
51(JS-31)	13·12	1.40	0.972	11.2	95	금배
52(JS-32)	13·12	1.54	0.975	9.6	95	금배
53(JS-33)	12.5·12	1.40	0.966	10.6	95	금배
54(JS-34)	15.5·14	2.30	0.970	8.8	95	금배
55(JS-35)	15·14	2.08	0.954	10.6	95	금배
56(JS-36)	16·17	2.75	0.977	10.0	95	금배
57(PS-4)	15·15	2.40	0.952	11.4	95	금배
58(PS-5)	16·15.5	3.06	0.965	10.0	99	금배

## 5장 밀도측정장치 및 타격장치

### 1절 밀도측정장치

#### 1. 수침식

아르키메데스 원리를 이용하여 다음과 같은 방법으로 밀도를 측정하였다.

- 100Kg까지 측정가능한 전자저울을 준비한다.
- 물을 채울 수조(물통)를 준비한다. 이때 수조(물통)의 크기는 수박의 크기를 고려하여야 한다. 준비된 수조(물통)에 물은 수박이 바닥에 닿지 않은 상태에서 잠길 수 있을 정도로 채운다.
- 물이 담긴 수조(물통)를 전자저울위에 올려 놓은 후 영점조정을 하여 저울의 수치가 0 인 상태가 되도록 한다. 영점조정이 되지 않은 저울을 사용할 경우는 부피 측정시 “수조(물통)+물”의 값을 빼주어야 한다.
- 수박에 추를 매단다. 추의 무게는 수박에 매달았을 때 수박이 물에 잠길 수 있어야 하므로 1.5-4Kg정도의 추를 사용한다.
- 추를 매단 수박의 무게(질량)을 저울위에 올려 측정한다.
- 추를 매단 수박을 수조(물통)속 물의 중간부분에 위치하게 한다. 이 때 수박과 추가 물위에 떠있지 않도록 하며 수조(물통)의 바닥이나 옆면, 어느 부분에도 닿지 않도록 해야하고 수박은 물속에 잠기도록 해야한다. 수박이 수조(물통)속 물의 중간에 위치했을 때 저울의 수치를 읽는다. 이 수치(값)가 부피이다.
- 위의 과정을 통해 수박의 질량과 부피를 구하여 밀도를 알 수 있었다.

## 2. 전자식

가로×세로가 0.5×0.5cm인 모눈종이 위에 수박을 올려 놓고 일정한 높이에 디지털카메라를 고정시킨 후 위와 옆면(그림 37)에서 사진을 찍는다.

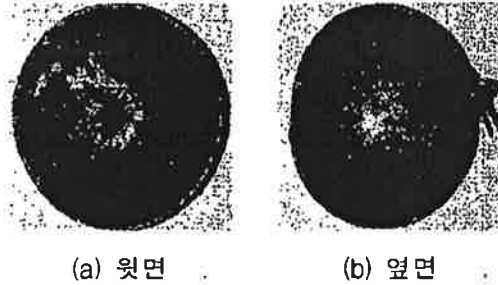


그림 37 모눈종이위에 수박을 올려놓은 후 디지털카메라로 찍은  
윗면과 옆면

이는 등가적 타원체로 근사해서 측정하려 한 것이다. 사진상에서 모눈종이에 수박이 차지하는 눈금의 개수를 세어 장반경과 단반경을 구한다.

위에서 수박을 찍었을 때 이는 원으로 가정하고 옆면에서 찍었을 때는 타원으로 가정한다. 위에서 찍은 수박에서 얻어진 면적을 이용하여 반경(a)을 얻어낼 수 있다.

$$A(\text{면적}) = \pi a^2$$

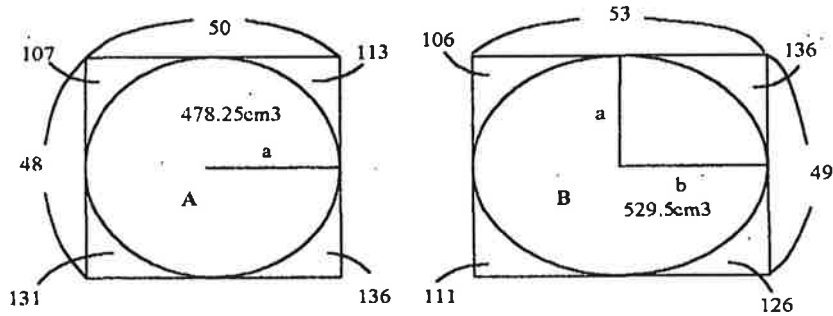
옆면에서 찍은 수박에서 얻어진 면적으로 반경(b)을 얻어낼 수 있다.

$$B(\text{면적}) = \pi ab$$

구해진 반경(a, b)으로 부피를 계산해 낼 수 있다.

$$V(\text{부피}) = 4\pi a^2b/3$$

다음은 수박의 장반경과 단반경 측정으로 얻은 부피 측정예이다.



모눈종이 한칸 = 0.5cm

$$A \text{의 면적} = (50 \times 48) \times 0.5 - (107 + 113 + 131 + 136) \times 0.5 = 478.25 \text{cm}^2 = \pi a^2$$

$$\therefore a = 12.341 \text{cm}$$

$$B \text{의 면적} = (53 \times 49) \times 0.5 - (106 + 136 + 111 + 126) \times 0.5 = 529.5 \text{cm}^2 = \pi ab$$

$$\therefore b = 13.664 \text{cm}$$

$$\therefore V = \frac{4}{3} \pi a^2 b = \frac{4}{3} \pi (12.341)^2 (13.664) = 8.713$$

이 때 윗면과 옆면 두방향 그림 38과 같이 디지털카메라와 수박까지의 거리를 보정하고 디지털카메라로 찍었을 때 정사형의 각도를 보정하여 다음과 같이 계산한다

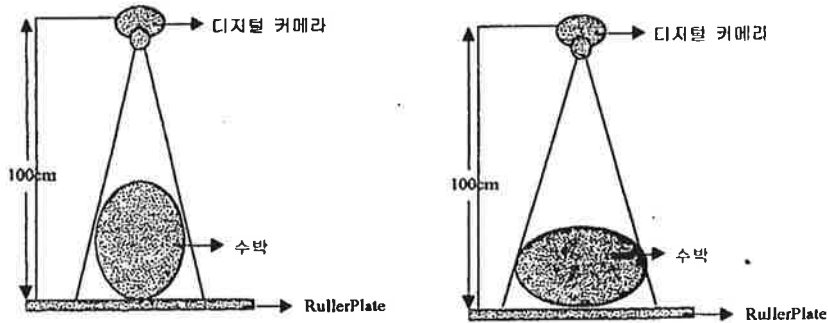


그림 38 장반경과 단반경 측정을 위한 수박 촬영 도식화

사진기에서 바닥까지의 거리 : 100cm

바닥에서 수박반경까지의 거리 : 측정값 a=12.3cm, 측정값 b=13.7cm

$$100 : 12.341 = (100-12.3) : a' \quad \therefore a' = 10.823$$

$$100 : 13.664 = (100-13.7) : b' \quad \therefore b' = 11.792$$

$$\therefore V = \frac{4}{3} \pi a^2 b = \frac{4}{3} \pi (10.823)^2 (11.792) = 5.785 \text{ (단위보정값)}$$

실제부피 : 5.94      보정전 : 8.713      보정후 : 5.785

전자식 밀도 측정법의 정확도를 알아보기 위해 수침식에서 얻은 밀도값을 기준으로 하여 거리보정을 한 전자식 밀도측정법으로 얻은 최종값을 비교하여 다음 표 4와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

표 4 수침식과 전자식 밀도 측정값 비교

수침식			전자식			오차값 비교	수박~카메라 거리(cm)
질량	부피	밀도	질량	부피	밀도		
5.32	6.04	0.881	5.32	6.379	0.834	5.3%	61.5
6.80	7.26	0.936	6.80	6.924	0.98	4.7%	100
6.18	6.82	0.906	6.18	6.647	0.93	2.6%	100
5.46	5.94	0.919	5.46	5.785	0.943	2.6%	100
5.10	5.40	0.944	5.10	5.315	0.960	1.7%	100
2.92	3.04	0.961	2.92	3.088	0.946	1.6%	100

밀도측정결과 수박과 카메라사이의 거리는 100cm일 때 오차가 적었으며, 타원 모양의 수박인 경우 오차는 3%~5%였으나 원형에 가까운 수박의 경우 오차는 2%이하였다. 이러한 방법으로 밀도측정기술을 확보하였고 이를 토대로 하여 그림 39처럼 컴퓨터와 연결된 CCD카메라와 Ruller Plate로 전자식 밀도측정장치를 설

계할 수 있다. 가로×세로 0.5(cm)× 0.5(cm)인 눈금을 그린 Ruller Plate위에 수박을 올려 놓는다. CCD 칼라 카메라를 100cm이상 거리에 고정시키고 컴퓨터와 연결하도록 한다. CCD 칼라 카메라로 확보해 놓은 밀도측정기술을 이용하여 수박의 정지영상에서 장반경과 단반경을 각각 구하여 그 수치를 보정하는 알고리즘을 통해 부피를 구할 수 있을 것이다. 동시에 수박의 중량을 구해 밀도를 구할 수 있을 것으로 보인다.

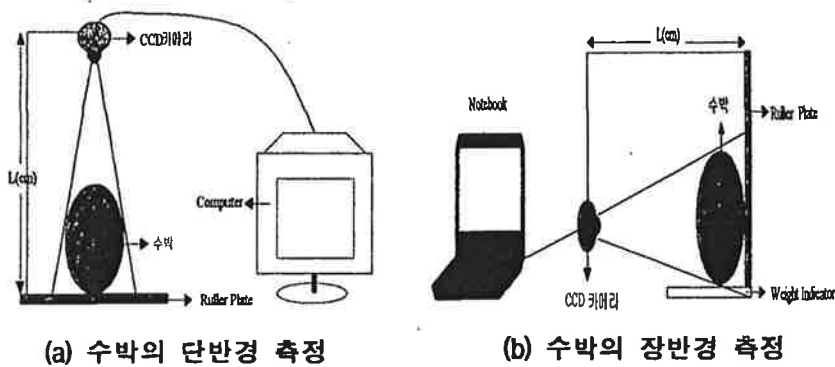


그림 39 전자식 밀도측정장치 설계도

## 2절 타격장치

타격장치와 짐승장치의 안정성을 확보하기 위한 실험을 실시하였다.

수박에서 신호를 측정하기 위해서 여러종류의 타격구를 고안하여 수박에서 신호를 측정했다. 타격구의 재질은 테프론, 나무, 실리콘으로 구성되어 있으며, 테프론은 4종류로 이루어져있다. 4종류의 타격기는 각각의 고유주파수를 방출 할 수 있도록 설계되어 있으며, M0는 8g으로 테프론 타격기중 가장 고주파를 발생하도록 되어있고, M1 13g 으로 고주파와 저주파의 중간주파수를 만들 수 있도록 제

작되었다. M2는 29g, M3 42g으로 주로 저주파를 만들도록 설계되어 있다. ST는 13g으로 수박에 상처를 주지 않고 타격할 수 있도록 타격기 앞면에 약2mm정도 두께의 스펀지를 부착하여 제작하였다. 실리콘은 19g으로 M3, 손으로 타격 했을 때와 비슷한 저주파수를 만들 수 있고, 아무리 강한 타격을 해도 수박에 상처를 주지 않고 우리가 원하는 주파수를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 나무로 만든 타격기 17g으로 우리가 제작한 타격기중 가장 고주파를 만들 수 있도록 제작되어 있다. 그림 40은 수박에서 측정한 각 타격기별 신호이며 위에서 언급한 타격구별 발생주파수 영역의 결과와 잘 일치하고있다. 그래서 우리는 우리가 원하는 주파수 대역을 가지고 있는 테프론 M1을 표준으로 선택하여 수박에서 신호를 얻었다.

집음장치는 타격기로 타격하였을 때 수박에서 발생하는 타격음을 전기적인 신호로 바꾸어주는 부분으로 소형이고 광대역 특성을 나타내는 콘덴서형 마이크론을 사용하였다. 소음이 많은 환경에서는 주위의 잡음 신호를 분리시키고 집음 효율을 높이기 위해 깔대기형 음향집속장치를 마이크론에 부착하여 사용하였으나 다음 측정신호를 왜곡하는 문제점을 안고있다. 그러나 이러한 깔대기형 음향집속부를 사용할 때 깔대기의 길이를 변화시키면서 수박의 파형을 측정하여 보고, 마이크론에 스펀지를 부착하여 실험하여 본 결과 깔대기모양의 음향집속부 내부에서 공진주파수가 발생되어 측정되는 파형에 심각하게 영향을 끼친다는 결론을 얻었다. 따라서 불가피하게 집음장치를 사용할 때에는, 신호처리과정에서 적절한 fc의 저주파필터를 채택해야 한다.



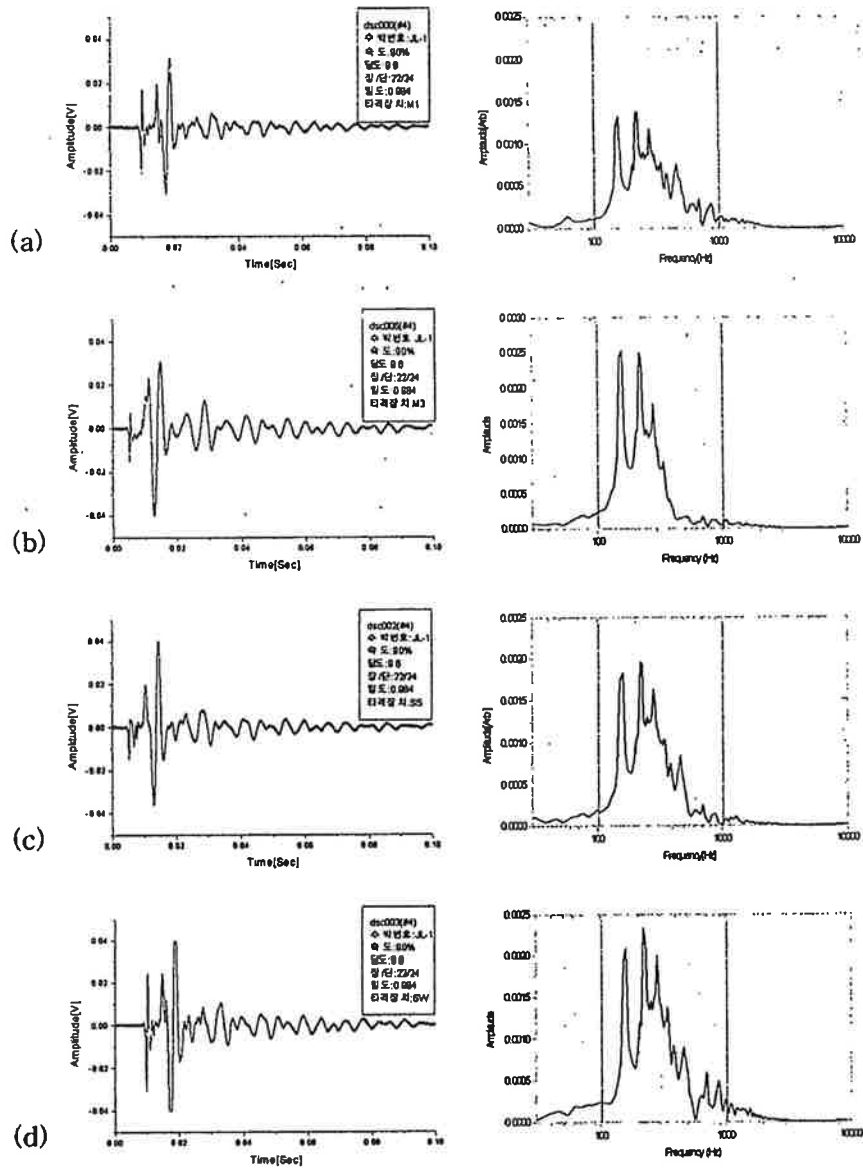


그림 40 타격기 종류에 따른 타음파형과 주파수 스펙트럼  
(a) M1, (b)M3, (c)SS, (d)SW

### 3절 interface 장치

신호획득보드는 짐승장치에서 수신된 타격음의 전기적 신호를 디지털로 바꾸어 컴퓨터에 입력시키는 장치이다. 이 보드의 구성도를 그림 41에 나타내었다. 이 보드에서 사용되는 A/D 변환기는 최대 초당 106개의 샘플이 가능하도록 하였다. 내장된 1 MHz 발진기에서 나오는 클럭신호를 인텔 8254를 사용하여 A/D 변환기의 샘플 클럭으로 사용하였다. 그 결과로 변환 속도는 1  $\mu$ s에서 65 ms의 범위에서 자유로 설정할 수 있다. 이 보드의 입력신호의 범위는  $\pm 2.5$  V로 설정하였다. 트리거는 입력신호가 레벨이 트리거 전압에 다다르면 트리거가 일어나도록 하였고, 트리거 전압은 가변저항으로  $\pm 2.5$  V 범위에서 설정할 수 있도록 하였다. 현재는 0.5 V로 설정하여 놓았다. 트리거에 프리 트리거 기능을 부여함으로써 타격음에 대한 트리거 신호가 도달하기 이전의 파형 부분을 관측할 수 있도록 하였다.

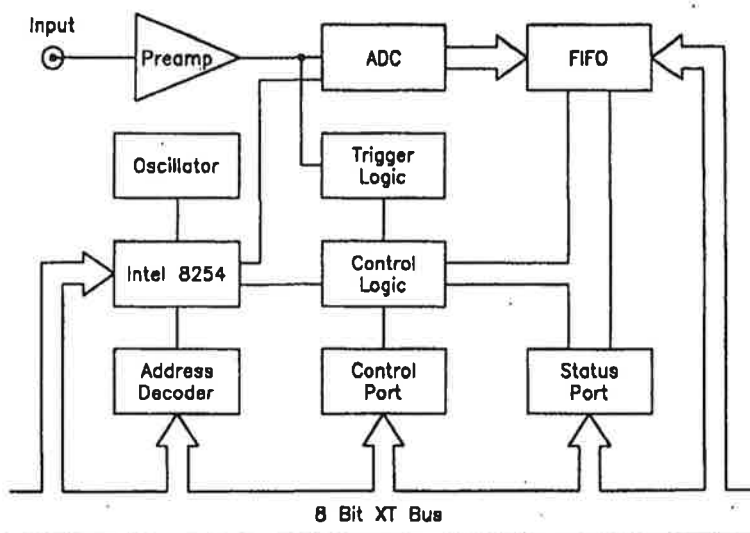


그림 41 신호획득 보드의 구성도

디지털로 변환된 파형데이터는 보드에 있는 FIFO(First In First Out) 메모리에 저장하도록 하였다. FIFO에는 8 bit 분해능으로 최대 4096개의 데이터를 저장할 수 있다. 제작된 보드는 PC/XT 8bit ISA 슬롯에 장착이 가능하고 그 크기가 13 cm × 10 cm로 노트북 PC 내부에 장착이 가능하다. 타격음에는 필요 이상의 고주파수 잡음 신호가 수신되는데, 이를 제거하기 위해서 2 kHz의 저역통과 필터를 부착하였다. UAF42를 사용하여 1-pole Butterworth 형의 저역통과 필터와 RC를 이용한 AC coupling 회로 및 전단 증폭기를 부착하여서 수신된 타격음 신호를 신호획득 보드의 입력에 맞추도록 하였다. 그림 42에 노트북 PC와 제작된 신호획득 보드, 프리앰프와 필터 모듈을 나타내었고, 그림 43에 이 신호획득 보드를 노트북 PC에 장착한 모습을 나타내었다.

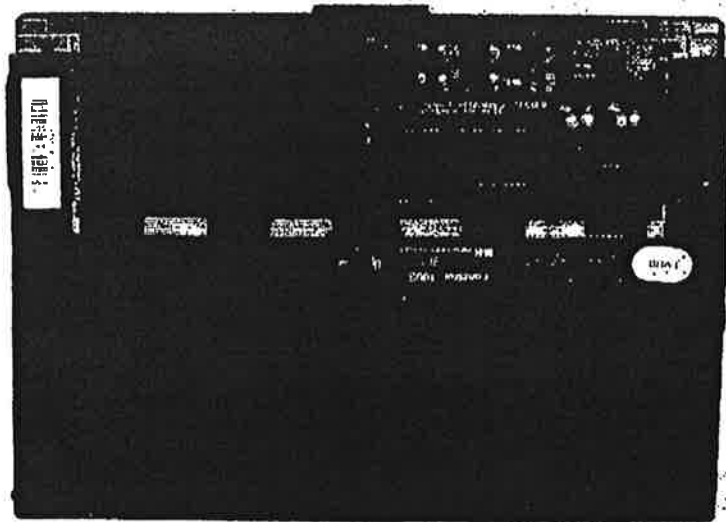


그림 43 신호획득 보드를 노트북 PC 내부에 장착한 모습

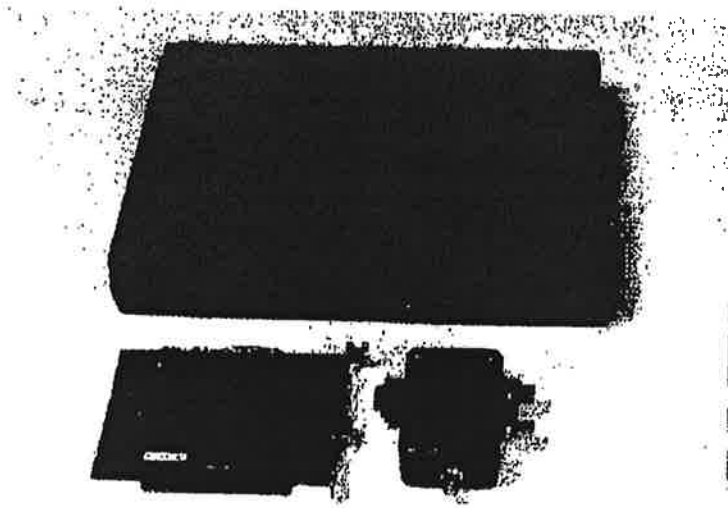


그림 42 신호획득장치. 노트북 PC, 제작된 신호획득 보드,  
필터와 프리앰프 부

## 4절 X-ray 투과시험

수박의 내부 품질을 평가하는데 있어서 X-ray의 활용가능성을 알아보고자 하였다. 실험에 사용한 X-ray 장비는 TVX-3600 Desk-top fluoro scope(그림 44)이다.

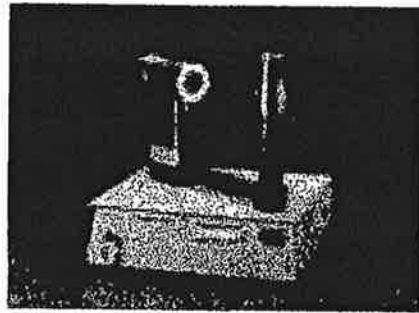


그림 44 TVX-3600 Desk-top X-ray fluoro scope

잘익은 수박의 과육과 미숙한 수박의 과육에 X선의 강도(표 5)를 달리하여 투과하고 선명한 X선 영상을 얻을 수 있는 최적조건을 알아보고자 다음과 같은 실험을 하였다. 수박의 적숙과육과 미숙과육 각각의 시료를 그림 45처럼 계단모양으로 준비하여 속도와 깊이에 따른 투과영상을 얻고자 하였다.

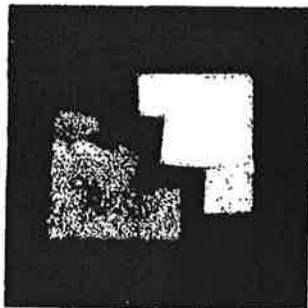


그림 45 계단모양으로 자른 적숙과육과 미숙과육

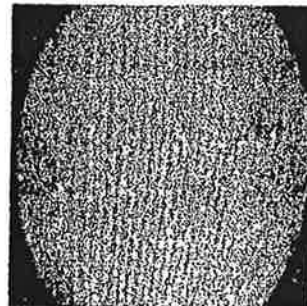


그림 46 최적조건(조건3)에서 얻은 영상

표 5 X선 투과시 전압과 전류강도

조건	1	2	3	4
전압(KVp)	19	25	30	42
전류(mA)	0.35	0.35	0.35	0.35

4가지 조건으로 X선을 투과하여 그림 46처럼 얻은 영상에서 조건1의 경우 1cm정도만 구별이 가능하였고 최적조건으로는 전압 30KV 전류 0.35mA인 조건3이었으나 선명하게 수박의 과육 상태를 알 수 있는 조건은 없었다.

잘익은 수박과육과 미숙한 수박과육의 X선 영상에서의 차이를 보기 위해 다음과 같은 실험을 시행하였다. 미숙과와 적숙과를 가로×세로×높이 (2×2×4cm)로 잘라서 그림 47과 같이 교대로 배치해 놓고 X선 영상에서 수박의 적숙과육과 미숙과육을 구분하기 위해서 적숙과육 위에 납을 올려놓아 표시하였다.

전류와 전압을 달리 하여 표 6과 같이 X선 강도를 변화시키면서 적숙과육과 미숙과육의 구별정도를 측정하였다.



그림 47 적숙과육과 미숙과육을 교대로 배치



그림 48 최적조건(조건5)에서 얻은 영상

표 6 X선 투과시 전류와 전압강도

조 건	1	2	3	4	5	6
전압(KVp)	13	19	25	30	36	42
전류(mA)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35

전류와 전압의 조건을 달리하여 그림 48과 같이 X선 투과 영상으로부터 수박의 적숙과육과 미숙과육을 선명하게 구별하기 어려웠다. 위의 실험조건에서 가장 최적조건으로 보이는 경우는 조건5이나 이 경우 또한 아래 그림과 같이 과육의 상태를 구별하기는 어렵다.

위 실험결과 선명하게 수박의 적숙과육과 미숙과육을 구분할 수 있는 조건을 얻을 수 없었으며, X-ray를 투과하여 얻은 X선 영상으로 수박의 속도를 구분하기는 어렵다고 할 수 있다.

## 6장 분류기 개발

### 1절 PNN 이론

#### 1. 형상인식 기법

여기에서는 본 연구에서 개발한 수박 판별을 위한 소프트웨어에 적용한 형상 인식 기법에 대해 간략히 소개하였다.

##### 가. 형상인식

인간은 어떤 물체에 대해 그것의 특징을 파악하고 그를 기초로 하여 그 물체가 어떠한 종류인지 인식하는 것을 매우 자연스럽게 행한다. 이러한 과정을 기계에 적용하여 어떤 물체의 특징을 추출하고 그것의 종류·특징을 파악하는 작업을 형상인식(pattern recognition)이라 한다. 이러한 형상인식은 문자, 음성, 전기적 파형 또는 신호의 인식 등과 같은 분야뿐만 아니라, 생산 현장의 품질 검사나 자동제어 등에서도 널리 활용되고 있다.

형상인식은 감독형 형상인식(supervised pattern recognition)과 무감독형 형상인식(unsupervised pattern recognition)으로 나눌 수 있는데, 만약 분류하고자 하는 패턴이 어느 범주에 속하는지 이미 알고 있다면 이는 감독형 형상인식의 문제이고, 분류하고자 하는 모든 패턴이 어느 범주에 속하는지 알지 못한다면 이러한 문제는 무감독형 형상인식의 문제이다. 감독형 형상인식 기법은 추출된 패턴을 학습표본(training samples)과 시험표본(test samples)으로 분류하여, 학습표본은 분류 알고리즘을 만드는데 이용하고, 나머지 시험표본은 만들어낸 분류 알고리즘에 적용하여 그 분류기의 성능을 평가하는데 사용한다. 이에 반해 무감독형 형상인식은 패턴들의 범주가 어떤 종류의 것인지 알 수 없지만 유사한 특징을 갖는 패턴의 범주를 설정하고자 할 때 사용한다.



본 연구에서는 지금까지 실제적인 문제 해결을 위해 널리 사용되고 있는 감독형 형상인식 기법을 사용하였는데, 이 기법의 기본적인 적용 절차를 그림 49에 나타내었다.

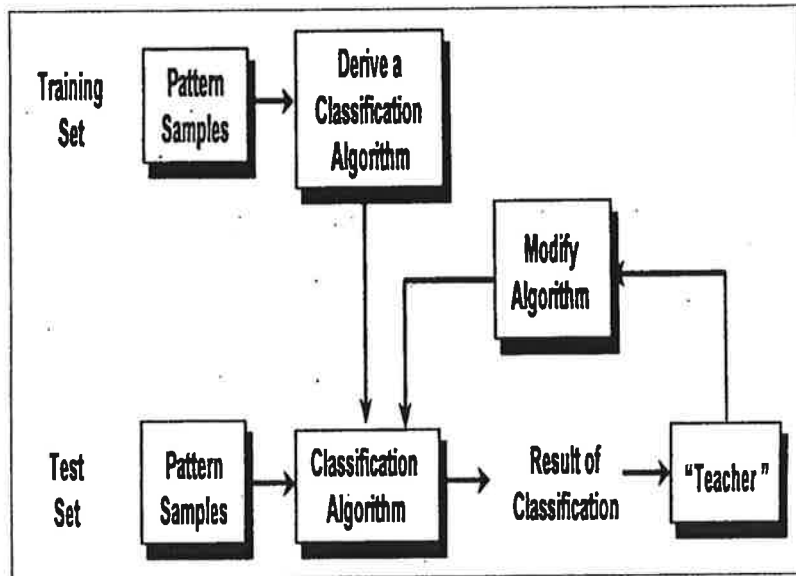


그림 49 감독형 형상인식기법 과정

형상인식 기법을 수박 분류에 적용하기 위해서는 마이크로부터 얻은 수박 신호로부터 특징을 추출하고, 추출된 특징으로부터 수박분류에 적합한 특징을 선택하고, 이렇게 선택된 특징을 이용하여 수박분류를 실시하는 알고리즘을 개발하는 과정으로 거쳐야 한다. 이 기법에 대하여 각 과정을 간략히 설명하겠다.

1) 특징추출

형상인식 기법에서 특징(Feature)이란 일반적으로 같은 범주에 속하는 표본들이 지니고 있는 특성으로서 다른 범주와 구별 할 수 있는 측정 함수를 의미한다. 특징추출 단계는 마이크로부터 얻어지는 수박신호로부터 유용한 형태의 특징을 도

출해내는 과정으로서 분석대상이 되는 패턴의 복잡성을 줄여서, 분류 알고리즘을 간단히 하고 동시에 분류 정확도를 향상시키는데 그 목적이 있다. 만약 패턴 분류에 전혀 소용이 없는 특징만이 추출된다면 아무리 훌륭한 분류기를 사용해도 좋은 분류성능을 얻기 어렵다. 따라서 특징들 중에서 패턴 분류에 유용한 특징만을 추출하는 것이 매우 중요한 문제이면서도, 이러한 특징을 도출할 방법에 대한 일반적인 원칙은 없다. 왜냐하면 유용한 특징이란 활용용도에 따르는 것이기 때문에, 어떤 문제를 풀려고 하느냐에 따라 달라지기 때문이다. 유용한 특징을 찾기 위한 노력으로 지금까지 다양한 종류의 특징들이 정의되어 사용되었다. 1차원 파형에서 특징들을 추출할 수 있으며, 2차원 image에서 사용 가능한 특징들이 있다. 이런 특징들은 먼저 파형(Waveform 또는 Image)을 Digital 정보로 변환하고, 이 Digitized Data로부터 흔히 Digital Signal(또는 Image) Processing 이라고 부르는 신호 처리 기법을 사용하여 추출한다. 그러나 이렇게 추출한 특징을 모두 사용한다는 것은 바람직하지 못하므로, 이러한 특징들 중에서 유용한 특징을 선택해야 한다. 이러한 과정을 특징선택이라 한다.

## 2) 특징선택

앞 절에서 언급한 바와 같이 특징추출 단계에서 도출된 특징이 모두 수박분류에 유용한 것이 아니므로, 그 중에서 수박분류에 유용한 특징인 “민감한 특징”만을 선택하는 과정을 특징선택 단계라 한다. 보통 민감한 특징이 지녀야 할 특성으로는 첫째, 결합분석을 위해 충분한 정보를 가지고 있으며, 둘째는 물리적 시스템이 지니고 있는 종류간 이질성을 특징 공간에서도 일관성 있게 유지해야 하고, 셋째로는 사용코자하는 특징이 모든 표본(Sample)에 대해서 일관성 있게 도출 가능해야 한다는 것 등이다. 그러나 이러한 정성적인 기준들은 실제 특징선택 과정에서의 적용기준으로는 분명하지 않기 때문에 보다 정량적인 특징 평가기준이 필요하게 된다. 정량적인 평가기준을 설정할 때 보통 고려되는 조건으로는 결합종류 구분능력과 특징간의 독립성의 두 가지이다. 결합종류 분류능력은 특징의 결합분

류에의 효용성을 의미하며, 결합 분류시 발생하게 되는 오류 확률로 정량화시킬 수 있으며, 특징간의 독립성은 특징의 중복성을 피하면서 특징의 숫자를 줄이는 것과 관계가 있는데, 상관계수로 정량화 시킬 수 있다.

만약 d-차원을 갖는 특징집합  $x = \{ \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_d \}$  를 생각할 때, 오류 확률 e는 식(1)로 표시된다.

$$e = \int [1 - \max P(w_i | \xi)] p(\xi) d\xi \quad (1)$$

여기에서  $\xi$ 는 d개의  $\zeta_i$ 특징에 의해 구성되는 특징벡터이고, 즉

$$\xi = [\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_d]^T \quad (2)$$

$P(w_i | \xi)$ 는 i번째 범주에 대한 사후확률이며,  $p(\xi)$ 는 식(3)으로 정의되는 혼합밀도함수이다.

$$p(\xi) = \sum_{i=1}^m p(\xi | w_i) P(w_i) \quad (3)$$

여기에서  $P(w_i)$ 는 i번째 범주의 사전확률이다.  $P(w_i | \xi)$ 는 i번째 범주의 조건부 확률밀도함수  $p(\xi | w_i)$ 와 식(4)의 관계를 가지고 있다.

$$P(w_i | \xi) = \frac{p(\xi | w_i) P(w_i)}{p(\xi)} \quad (4)$$

민감한 특징은 (1)식으로 정의된 오류확률 e를 작게 하는 특징으로서 e값이 낮을수록 결합구분 능력이 우수하다. 두 변수간의 상호 의존성을 측정하는 통계량 중에서 가장 대표적인 척도가 Pearson의 상관계수인데, 이는 식 (5)에 의해 정의된다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2]^{1/2}} \quad (5)$$

여기에서, n은 표본 수를  $X_i, Y_i$ 는 두 가지 서로 다른 특징  $X, Y$ 의  $i$  번째 값을,  $\bar{X}, \bar{Y}$ 는 각각 두 특징  $X, Y$ 의 평균값을 나타낸다. 이 상관계수  $r$ 은 두 변수간의 관계가 선형관계인지를 측정하는 척도로서  $r$ 의 절대값이 1에 가까우면 두 변수사이의 상호의존성이 매우 높음을 의미한다. 따라서 민감한 특징이란 전술한 오류확률  $e$ 값이 낮으면서 동시에 다른 특징과의  $r$ 의 절대값이 작은 특징을 의미하기 때문에, 특징선택이란  $e$ 값과  $r$ 값을 바탕으로 가장 적절한 특징들을 선별해 나가는 과정이라 할 수 있다.

### 3) 분류

특징 추출과 특징선택 과정을 통하여 민감한 특징이 결정되면 이 특징을 이용하여 각 표본을 가장 적합하다고 판단되는 범주로 분류하게 되는데 이러한 과정을 수행하는 것을 분류기라 한다. 분류기는 적절한 분류 알고리즘을 사용한다. 지금까지 개발된 분류기들은 크게 통계적 분류기(statistical classifier), 범칙근거 분류기(rule-based classifier), 학습근거 분류기(learning-based classifier) 등이 있다.

#### 가) Statistical Classifier

Statistical Classifier는 각 범주별 특징값들의 통계적인 접근을 통하여 분류하는 기법으로써 Linear Discriminant 방법을 이용한 Fisher's Linear Discriminant Function, Minimum Distance Classifier, K-Nearest Neighbor(KNN) Classifier, Bayesian Classifier 등이 있다.

#### 나) Rule-Based Classifier

Rule-Based Classifier는 Pattern Matching Approach로서, 훈련표본에 대한 특정 벡터(Feature Vector)의 분포도를 살펴보고 어떤 특정 범주를 가장 잘 표현할 수 있는 값(이를 Descriptor Entry라 함)을 설정하고, 이를 IF ~ THEN Rule에 적용하여 분류하는 방법으로써, Classification Table Classifier, Fuzzy Classifier 등이 있다.

#### 다) Learning-Based Classifier

Learning-Based Classifier는 대표적으로 Neural Network Classifier를 생각할 수 있다. Neural Network은 인간의 뇌의 구조와 작동원리를 Modeling 할 수 있다는 점과 함께, 훈련 표본을 통해 필요한 지식을 학습 할 수 있으며, 또한 훈련 표본에서 특별하게 경험하지 못한 표본에 대해서도 배운 지식을 일반화하여 필요한 결론을 자동적으로 내려 준다는 독특한 장점 때문에 1980년 후반부터 그 활용이 급속히 증가하고 있다.

20여가지의 Neural Network 종류 중에서 가장 널리 사용되는 것은 Back Propagation Neural Network (BPNN)이다. BPNN은 상기 Neural Network의 특성을 잘 나타내고 있으며, 패턴 분류, 자동제어, Regression Analysis 등에서 널리 사용되고 있다. 그러나 BPNN은 입력(Input)과 출력(Output) 사이의 상관관계가 사용자에게 대해서 불투명하고, training 시간이 어떤 경우에는 너무 길기 때문에, 모든 문제에 대해 보편성 있는 Classifier로 사용되기에는 아직도 문제점이 많은 상태이다.

1988년 Specht에 의해 개발된 Probabilistic Neural Networks(PNN)은 Neural Network이 가지고 있는 Parallel Processing등 여러 가지 장점을 가지고 있으면서도, Statistical Classification 알고리즘 중 Bayesian 방법을 적용시킬 수 있는 Neural Network으로 특히 Pattern Classification 분야에서 널리 사용되고 있다.

## 2. 확률신경회로망 (Probabilistic Neural Networks)

PNN은 병렬처리 능력 등 신경회로망이 가지고 있는 여러 가지 장점과 함께, 패턴 분류시 Bayesian 기법을 적용시킨다는 독특한 장점때문에 형상 분류 문제에 광범위하게 적용되고 있다. 이 절에서는 PNN에 대해서 간략히 서술하겠다.

그림 50에 PNN의 기본적인 구조를 나타내었다.

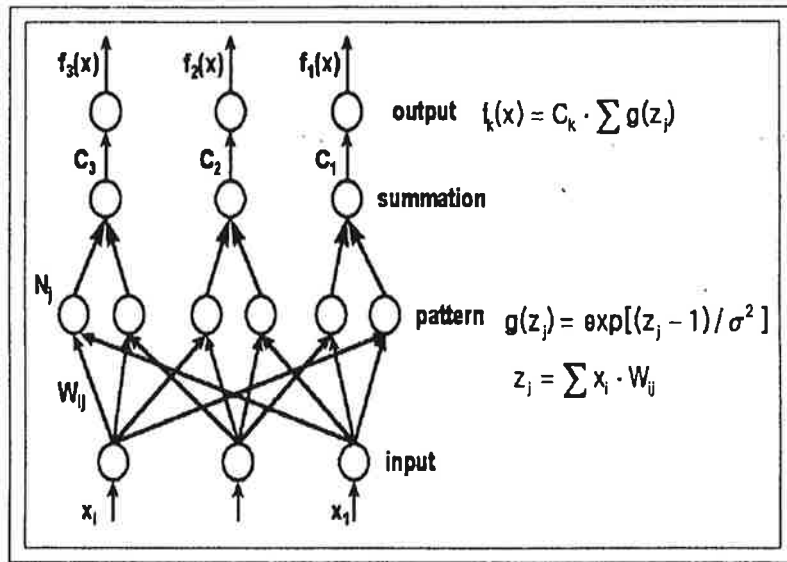


그림 50 확률신경회로망 구조

그림 50에 나타낸 바와 같이 PNN은 4개의 층(layer)으로 구성되어 있다. 첫째 층은 입력층으로서 여기를 통해 각 표본의 특징 벡터( $X_i$ )가 PNN에 공급된다. 두번째 층은 패턴층으로서 입력층에 공급된 표본의 특징값  $X_i$ 에 가중치  $W_{ij}$ 를 곱한 결과들의 합을 받아들여, 그 값에 지수함수를 적용한 값을 출력시킨다. 세번째 층은 합산층으로서, 합산층의 각 노드(node)들은 패턴층의 노드들 중 자신과 같은 범주에 속한 노드들에만 연결되어있는데, 연결된 패턴층 노드들의 출력의 합을 입력으로 받아들인 후 여기에 사용자가 정의한 파라미터인  $C_i$ 를 곱하여 그 결과를

출력시킨다. 마지막으로 네번째 층은 출력층으로서 최종적인 출력이 수박 분류 과정에 사용된다. 다른 종류의 신경회로망과는 달리, PNN의 구조는 주어진 문제가 가지고 있는 수박 종류의 수와 학습과정에서 사용된 학습표본의 수에 의해 결정된다. 즉 출력층과 합산층의 노드의 수는 수박종류(즉 범주)의 수와 같고, 패턴층의 노드수는 학습표본의 수와 일치하며, 입력층의 노드수는 특징벡터의 특징수와 동일하다.

PNN의 학습과정은 매우 간단한 다음의 3과정으로 이루어져 있다. (1) 학습표본이 주어지면 패턴층에 이에 해당하는 j번째 노드  $N_j$ 를 설정한다. (2) 만약에  $X_{ij}(i=1,2,3 \dots \dots, M, j=1,2, \dots \dots, N)$ 를 주어진 j번째 학습표본의 i번째 특징이라고 하면, 패턴층의 j번째 node와 입력층의 I번째 노드를 잇는 연결선의 가중치  $W_{ij}$ 를  $X_{ij}$ 와 같게 한다. (3) 그리고 마지막으로 패턴층의 j번째 노드를 주어진 학습 표본이 속해있는 범주에 해당하는 합산층과 연결한다. 학습과정에서 특징적인 것은 가중치  $W_{ij}$ 가 반복과정이 없이 단번에 결정된다는 것이며, 따라서 학습도 "순간적"으로 완료된다는 점이다. 또한 이 학습과정에서 PNN은 학습 표본으로부터 Parzen window 방법을 통해 각 범주별 확률밀도함수를 계산한다는 점이다. 일단 회로망의 훈련이 끝나면 사용자 정의 파라미터인  $C_i (i=1,2,3)$ 와 평활화 계수  $\sigma$ 를 선택해야한다.  $C_i$ 는

$$C_i = \frac{h_i l_i}{n_i}$$

로 정의된다. 여기에서  $h_i$ 는 i번째 범주의 사전확률,  $l_i$ 는 손실계수,  $n_i$ 는 i번째 범주내의 학습표본의 수이다. 따라서 사용자가 과속과 같은 어떤 특정 범주에 더 큰 비중을 두고 싶을 때에는 손실계수  $l_i$ 에 큰 값을 지정할 수 있다. 평활화 계수  $\sigma$ 는 패턴층내에 있는 각 패턴들의 개별적인 중요도를 조절하는 계수로서  $\sigma$  값을 작게하면 개개의 패턴에 대한 중요성을 강조하게되고,  $\sigma$  값을 크게 하면 많은 패턴들의 평균적인 거동을 강조하게 된다. 그리고 이 값은 어떤 이론적 근거로부터

결정된다기보다는 다분히 실용적 관점에서 비교적 “양호한” 분류 성능을 얻을 수 있는  $\sigma$  값을 찾아 사용하고 있다.

PNN의 학습과 회로망 파라미터에 대한 선택이 끝나면, 이 PNN을 이용하여 시험표본에 대한 수박분류를 수행할 수 있다. PNN의 수박분석 알고리즘은 “주어진 시험표본에 대한 출력층의 노드중 최대값(이 값은 곧 최대 예상손실을 의미함)을 갖는 범주를 그 시험표본의 범주로 결정한다”라고 할 수 있다. 이것은 곧 PNN이 Bayes법칙에 따라 수박분류를 수행함을 말한다.

## 2절 분류기 소프트웨어

앞의 3장 4절에서 논의한 타음신호의 특징변수들을 활용하여 수박이라는 상품을 미숙과와 적숙과로 분류하기 위해 개인용 컴퓨터수준에서 동작하는 프로그램을 작성하였다. 프로그램의 주요부분은, A/D 신호획득보드를 제어하여 마이크로폰으로부터 타음신호를 읽어 들이거나 이미 얻어진 타음신호 파일을 제어할 수 있는 프로그램루틴, 타음파형을 신호처리하여 특징변수를 추출하는 프로그램루틴, 추출된 특징 변수로부터 학습을 수행하거나 그 학습된 DB를 이용하여 분류결과를 판정하는 루틴으로 되어 있다. 먼저, 수박분류기의 충분한 성능을 확보하기 위해서는 타음파형으로부터 특징변수들을 안정적으로 재현성 있게 추출하는 것이 선행되어야 한다. 특히 타음파형에 혼입될수 있는 잡음신호와 작업자가 타격시험을 수행할 때 타격점의 변동등에 의해 발생될수 있는 신호파형의 작은 변화등에 의하여 추출된 특징 변수가 갑작스런 큰 요동을 일으키지 않아야하는 문제가 있다. 신호처리 도중 범위나 임계값을 설정할 때는 이런 점을 충분히 고려해야 안정적인 특징변수 추출이 이루어진다.

분류기에 입력으로 사용하는 타음파형은  $100\mu\text{sec}$  sample rate로 1024 point의 데이터를 갖도록 통일시켜 사용하였다. 이 파형은 rms를 취하여 최대진폭값으



로 나눔으로써 타격강도의 변동을 규격화 하였다. 또, rms파형을 전체 파형시간 동안 적분하여 에너지 특징변수를 얻었다. 또 다음파형을 FFT하여 주파수 스펙트럼 데이터를 얻고 저주파쪽에서 고주파쪽으로 스캔하면서 공진주파수열 {fi}를 얻는다. 이때 스펙트럼세기의 값이 한 정점에서 세기의 15% 이내의 작은 변화는 무시하였고 15%이상의 변화가 있을 때 공명피크로 간주하여 처리하고 그 주파수를 읽었다. 또 주파수의 피크가 근접하여 한 피크의 중심주파수의 ±20%이내에서 다른 피크가 발견되는 경우도 잡음으로 간주하여 무시하였다. 여기서 15%, ±20% 등의 값은 수박의 많은 타음 데이터를 보면서 결정한 경험적 값이다. 이와 같이하여 {Ii}와 {fi} 공진피크의 수 등을 얻었다. 또, 이 값들로부터 공진피크들의 세기값 {Ii}열과 주파수 열 {fi}에 대한 기울기 값(Decay constant)의 변화를  $I_i = I_0 \exp[-\alpha f_i]$  형태로 curve fitting하여  $\alpha$  값을 얻었다.

표 7에 이 루틴의 소스 프로그램을 나타내었다.

```
dspc
#include "wmelon.h"
void wave_norm(float *int);
void fourl(float *, int, int);
void wave_rms(float *, float *, int, int);
void wave_norm(array, num)
float array[]; int      num;
      int      i;
      float    temp=0.0, wmax=-1.0;
      /* offset */
      for(i=0;i<NCPFSET;i++)    temp+=array[i];
      temp=temp/NCPFSET;
      for(i=0;i<num;i++){
          array[i]=array[i]-temp;
          if( fabs(array[i]) > wmax ) wmax=fabs(array[i]);
      }
      for(i=0;i<num;i++)    array[i]=array[i]/wmax;
void wave_rms (wave,rms,wnum,rms)
float wave[],rms[];
int wnum,rms;
{
    int      i,j;
    float temp=0.0;
    for(i=rms;i<wnum-rms;i++){
        rms[i]=wave[i]*wave[i];
        for(j=0;j<rms;j++)    rms[i]+=wave[i-j]*wave[i-j]+wave[i+j]*wave[i+j];
        if ( rms[i]>temp )    temp=rms[i];
    }
    for (i=0;i<rms;i++) {
        rms[i]=rms[rms];
        rms[wnum-i-1]=rms[wnum-rms-1];
    }
    for (i=0;i<wnum;i++)    rms[i]=rms[i]/temp;
}
```

```

#define SWAP(a,b) tempr=(a);(a)=(b);(b)=tempr
void fourl(data,n,jsign)
float data[];
int n,jsign; {
    int n,mmax,m,j,istep;
    double wtemp,wr,wpr,wpi,wi,theta;
    float tempr,tempi;
    n=n << 1;
    j=1;
    for (i=1;i<n;i+=2) {
        if (j > i) {
            SWAP(data[j],data[i]);
            SWAP(data[j+1],data[i+1]); }
        n=n >> 1;
        while (m >= 2 && j > m) {
            j -= m;
            m >>= 1; }
        j += m;
    }
    mmax=2;
    while (n > mmax) {
        istep=2*mmax;
        theta=6.28318530717959/(jsign*mmax);
        wtemp=sin(0.5*theta);
        wpr = -2.0*wtemp*wtemp;
        wpi=sin(theta);
        wr=1.0;    wi=0.0;
        for (m=1;m<mmax;m+=2) {
            for (i=m;i<n;i+=istep) (j=i+mmax;
                tempr=wr*data[j]-wi*data[j+1];
                tempi=wr*data[j+1]+wi*data[j];
                data[j]=data[j]-tempr;
                data[j+1]=data[j+1]-tempi;
                data[i] += tempr;
                data[i+1] += tempi;
                wr=(wtemp+wr)*wpr-wi*wpi+wr;
                wi=wi*wpr+wtemp*wpi+wi; )
            mmax=istep; } #undef SWAP
}

feature.c
#include "wrmelon.h"
#include "key.h"
#include "hario.h"
#define FMAX 400
void feature(int);
extern float w_rms[], f_data[];
extern float wm_feature[];
extern int point[];
extern float wm_mass, time_intv, freq_intv;
void feature(int wnum){
    float rms_f[3][20], freq_f[2][40];
    int feature_num[2];
    int nth=0, low=1, up, i, j, count, peak_pos, peak_count=0;
    int f_peak[40];
    float vth1=0.2, vth2=0.2, gap=0.05, tol=0.2, peak;
    float energy=0.0;
    char *h_rms;
    float xi, yi, a11=0.0, a12=0.0, a22=0.0, b1=0.0, b2=0.0;
    float det, slop;
    FILE *fp;
    /* get energy of waveform */
    for (i=0;i<wnum;i++) energy+=w_rms[i]*w_rms[i]/wnum;
}

```

```

/* features in FFT data - search peaks in frequency spectrum */
i=(int) 50/freq_intv; /* start frequency = 50 Hz */
while (f_data[i]<vth2) i++;
nth=0; up=1; count=i; peak=f_data[i]; peak_pos=i;
for (i=count;i<FMAX;i++){
    if ( up>0 ) {
        if (f_data[i]>peak){
            peak_pos=i; peak=f_data[i];
            if (f_data[i]<peak-gap){
                f_peak[peak_count++] = peak_pos;
                up=up;
                peak=f_data[peak_pos];
                i=peak_pos;
            }
        }
        if (up<0){
            if (f_data[i]<peak){
                peak_pos=i;
                if (f_data[i]>peak+gap){
                    peak=f_data[peak_pos];
                    up=-up;
                    i=peak_pos;
                }
            }
        }
    }
}
/* check peak frequencies - remove closer peaks */
for (i=1;i<peak_count;i++){
    if (f_peak[i]-f_peak[i-1]<tol*f_peak[0]){
        if ((f_data[f_peak[i]]>f_data[f_peak[i-1]]) {
            for (j=i;j<peak_count;j++){
                f_peak[j-1]=f_peak[j];
                peak_count--;
            }
        }
        else {
            for (j=i+1;j<peak_count;j++){
                f_peak[j-1]=f_peak[j];
                peak_count--;
            }
        }
    }
}
/* least square fitting */
for (i=1;i<peak_count;i++){
    xi=f_peak[i]*freq_intv;
    yi=log(f_data[f_peak[i]]);
    a11+=1.0; a12+=xi; a22+=xi*xi; b1+=yi; b2+=xi*yi;
}
det=a11*a22-a12*a12;
slop=(a11*b2-a12*b1)/det;
wm_feature[0]=energy*1000;
wm_feature[1]=peak_count;
wm_feature[2]=f_peak[0]*freq_intv;
wm_feature[3]=f_data[f_peak[1]]/f_data[f_peak[0]];
wm_feature[4]=-slop*1000;
wm_feature[5]=f_peak[2]/(1.0+f_peak[1]);
wm_feature[6]=f_peak[2]/(1.0+f_peak[0]);
wm_feature[7]=f_peak[3]/(1.0+f_peak[0]);
wm_feature[8]=wm_mass;
/* display feature values */
h_jmsi = '^0';
gcvf(wm_feature[0], 4, h_jmsi);
Wstring(point[52]+15, point[25]+13, h_jmsi, WHITE, 1);
gcvf(wm_feature[1], 4, h_jmsi);
Wstring(point[56]+15, point[25]+13, h_jmsi, WHITE, 1);
gcvf(wm_feature[3], 4, h_jmsi);
Wstring(point[56]+15, point[33]+13, h_jmsi, WHITE, 1);
gcvf(wm_feature[4], 4, h_jmsi);
Wstring(point[56]+15, point[37]+13, h_jmsi, WHITE, 1);
gcvf(wm_feature[5], 4, h_jmsi);
Wstring(point[52]+15, point[37]+13, h_jmsi, WHITE, 1);
gcvf(wm_feature[6], 4, h_jmsi);
Wstring(point[52]+15, point[41]+13, h_jmsi, WHITE, 1);
gcvf(wm_feature[7], 4, h_jmsi);
Wstring(point[52]+15, point[45]+13, h_jmsi, WHITE, 1);
gcvf(wm_feature[8], 4, h_jmsi);
Wstring(point[56]+15, point[41]+13, h_jmsi, WHITE, 1);

```

```

/* save data for PNN */
fp=fopen("msl.pnn","w");
fprintf(fp,"%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f\n", wm_feature[0], wm_feature[1],
        wm_feature[3], wm_feature[4], wm_feature[5], wm_feature[6], wm_feature[7], wm_feature[8]);
fclose(fp);

```

표 7 분류기 소스 프로그램중 · 신호처리와 특징변수 추출루틴

또 필요한 경우 다음과형으로부터 직접신호처리하여 얻는 특징변수이외에 질량, 밀도, AI, 및 기타 값을 키보드나 다른 입력장치로부터 받을수 있도록 하였다.

신경회로망 루틴은 학습을 수행하여 학습 DB를 형성할수 있는 판 (Version)과 학습수행은 불가하며 기존재하는 DB를 써서 분류시험만을 할수 있는 판으로 구분하였는데, 이것은 사용자의 조작 실수로 학습DB를 손상시켜서 분류 성능을 저하시키는 경우를 대비한 것이다. 수박의 품종차이에 따라 달라지는 특징은 그에 적합한 학습DB를 어렵지 않게 생성할수 있으며, 그런 과정을 통하여 좀더 나은 분류정확성을 얻을 수 있는 것으로 기대된다. 그러나 품종에 따른 다음과형의 특징변화는 앞에서 다음과형해석에서 논의한 일반적 유형으로부터 크게 벗어나기 보다는 미세한 변화들로 사료되며, 그 차이들은 품종에 따라 얻어지는 학습DB에 스스로 특징이 분류하게 하는 방식인 것이다.

출력은 수박상품을 두 단계로 나누어 미숙과(숙도 70%이하)와 적숙과로(숙도 71% 이상) 구분하게 하였으며 필요한 경우는 3단계로 분류할 수도 있도록 하였다. 수박의 분류시 출력되는 수치는 각각 피시험 수박이 미숙과일 확률 또는 적숙과 확률로 나타내도록 프로그램하였다.

### 3절 학습 및 검증

수집된 총 58개의 공시재료용 수박에서 얻은 측정값과 다음파형으로부터 개발된 분류기의 성능을 평가하고자 한다. 각 특징변수의 영향, 학습 갯수의 영향등을 확인하고자 하였으며, 적합한 조건을 얻고자 하였다. 표8에서 58개의 다음파형으로부터 얻은 특징변수와 제원을 나타내었다. 이것은 다음파형을 신호처리 및 특징변수 추출 프로그램루틴에서 분석한 결과로써 우리가 원하는 특징변수들을 안정적으로 추출해내고 있음을 알 수 있었다. 또 표의 AI는 다른 연구자들이 사용해 왔던  $m^{2/3} \rho^{1/2} f^2$  지수로서 비교 참고하기 위하여 각 수박에 계산하여 얻은 값이다.  $V_s$ ,  $V_f$ 는 다음 파형을 타격시험시 디지털 오실로스코프로부터 실험자가 직접 측정하여 얻은 균속도와 P파의 속도이다.

표 8 학습 및 검증에 사용한 58개 수박의 타음파형해석에 관련된 특징변수값.

수박 번호	V <sub>f</sub>	V <sub>s</sub>	f <sub>0</sub>	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	AI(f <sub>0</sub> )	AI(f <sub>1</sub> )	AI(f <sub>2</sub> )	Energy	Number of Peak	I <sub>0</sub> /I <sub>1</sub>	Decay constant
1	32	134	165	234	312	7553	14033	23935	3034	9	1.033	3.223
2	272	119	234	332	423	8804	17274	28323	1823	5	0.843	3.551
3	21	107	234	332	419	6332	15005	24312	1932	4	0.854	3.333
4	240	113	214	232	410	6223	13310	23535	2140	4	0.957	2.940
5	257	129	273	410	517	8332	20423	31334	1931	5	0.855	2.855
6	235	122	214	273	400	6133	10774	21336	215	4	0.547	1.25
7	323	114	253	341	473	8204	14054	23373	253	5	0.923	2.954
8	237	120	214	312	300	6710	12340	19305	2135	4	0.933	2.54
9	241	113	253	371	493	7006	13741	23532	2024	4	0.743	3.334
10	139	119	234	341	633	7334	15771	24333	2543	4	0.753	2.433
11	223	102	214	312	400	6339	13305	23335	2113	5	0.833	2.03
12	215	93	215	232	371	4237	8337	13333	2334	6	0.733	3.435
13	217	114	244	351	453	6335	14037	23334	2154	4	0.733	3.047
14	233	115	244	371	453	5373	13316	21772	2255	4	0.933	4.634
15	235	95	244	351	433	6540	13335	21535	2507	5	0.834	2.646
16	323	109	233	410	546	8330	13330	23337	2329	4	0.935	3.332
17	213	124	233	341	423	5373	10427	19333	2707	3	0.473	5.732
18	230	125	155	234	233	7335	17433	23533	2540	7	1.133	2.53
19	231	123	165	244	312	7331	13334	27633	1933	10	1.13	2.133
20	333	124	145	155	233	7230	12317	23433	2533	8	1.133	3.033
21	277	119	145	215	233	6435	13332	23471	3301	6	1.147	2.333
22	237	117	165	244	312	8330	13332	23332	1342	9	1.204	3.077
23	225	113	175	244	312	8330	17133	27333	2073	6	1.034	3.433
24	333	143	165	244	312	8334	14301	24333	1334	8	1.132	2.635
25	233	112	155	273	341	9131	17575	27307	1327	7	0.937	3.533
26	235	113	175	253	332	73316	13133	23373	2235	6	1.373	3.51
27	314	130	155	273	330	5337	13432	23371	2423	4	0.733	3.377
28	243	133	214	312	410	6334	12337	23033	2222	5	0.735	4.43
29	276	124	253	273	330	8317	10333	19333	1322	6	0.833	2.333
30	237	109	224	332	419	7233	13333	23372	1934	5	0.735	4.511
31	271	119	234	332	371	7513	15233	19370	2173	4	0.931	4.437
32	317	113	165	233	351	5336	12133	19335	223	4	0.933	3.332
33	243	113	224	312	419	6132	12013	21335	2322	4	0.833	6.033
34	177	109	244	341	433	9335	19233	31705	1757	5	1.133	3.33
35	237	129	244	332	423	8555	13135	27073	1922	6	1.043	3.333
36	24	121	244	332	433	8139	15477	27333	2033	4	0.733	4.37
37	237	113	244	341	443	10347	20335	35374	1937	5	0.934	2.933
38	23	121	244	351	443	9101	13335	33333	205	5	0.737	3.33
39	233	115	234	341	443	7534	14033	27132	2022	5	0.835	3.035
40	223	117	253	351	453	9733	19334	33335	1737	4	0.942	4.115
41	245	125	253	371	443	9733	23333	37723	1374	6	0.933	3.157
42	254	117	234	332	400	8273	17333	25135	2023	5	1.033	2.433
43	139	110	244	341	433	10333	19377	33433	1333	7	0.743	3.715
44	245	143	214	312	400	8435	17336	23335	213	6	0.802	3.27
45	231	134	215	232	330	7723	13745	23433	2173	5	0.843	4.945
46	234	113	215	233	330	6734	12351	23035	2125	5	0.951	4.15
47	222	109	214	312	400	8435	13234	23135	1344	6	1.016	3.37
48	247	113	233	330	433	8337	13445	31335	1313	5	0.907	3.433
49	211	113	273	371	473	10331	20445	33430	1737	4	0.835	3.535
50	259	123	233	400	517	10301	22177	37733	1937	5	0.735	5.747
51	242	120	253	410	517	7330	23333	33151	203	5	0.843	2.43
52	171	110	233	400	507	10303	21157	33370	1932	6	0.835	4.937
53	135	94	253	351	453	73135	13444	27033	2534	5	0.476	4.737
54	240	113	224	322	419	8334	17335	33330	1333	6	0.943	3.333
55	233	115	224	322	423	8435	13377	23235	2037	5	0.973	3.713
56	234	122	224	322	419	9777	20944	31333	1935	6	0.833	3.035
57	139	117	215	312	330	74107	13333	23234	2046	6	0.831	3.34
58	273	143	215	232	330	8533	17333	31032	133	6	0.737	0.933

특징정수로 Energy, Number of peak  $f_1$ ,  $f_2/f_1$ ,  $f_3/f_1$ ,  $f_4/f_1$ ,  $I_1/I_0$ , Decay constant를 사용한 분류기(Ver. 1.0)의 성능평가결과를 하려 한다. 분류성능은 사용되는 특징변수 입력뿐 아니라, 학습시키는 대표적인 학습입력갯수에 의해서도 성능이 달라진다. 우리는 준비된 파일로부터 전형적인 파형을 선정하여 학습시키는 방법들을 시험하고 분류기의 성능을 확인하였다. 다음의 표. 9에 그 결과를 나타내었다.

표 9. 분류기(Ver. 1.0)성능 평가표.

사용되는 특징정수 학습표본수	8개의 특징정수 사용한 경우 (Energy, Number of peak, $f_1$ , $f_2/f_1$ , $f_3/f_1$ , $f_4/f_1$ , $I_1/I_0$ , Decay constant( $I_1/I_0$ ))
8개	67.2%
17개	75.8%
58개	84.4%

8개를 학습시킨 경우와, 학습표본갯수를 17개로늘린 경우, 또 전체 파형58개의 수탁파형을 학습시켜 자체 검증한 분류정확도를 표시하였다. 학습표본갯수를 증가시키면 정확도가 67.2%에서 84.4%로 증가함을 알수 있었다. 그러나, 아직 분류성능이 다소 미흡한 바 비교적 적은 학습표본수에 의해서 충분한 분류정확도에 도달해야 하는 pnn의 특징을 감안하여 보면, 이 특징정수를 사용하여 학습표본갯수를 늘려가는 쪽보다는, 특징변수를 새롭게 보완하는 것이 분류기의 성능을 높이는 데 유리할 것이 분명하다.

우리는 앞 절에서  $\{f_i\}$  등이 수박의 속도뿐만 아니라 수박의 크기에 의존함을 알고 있다. 즉  $\{f_i\}$  값은 속도판정에 유리하기만 작용하지는 않는다 크기와 다른 수박에 대해서는 분류성능을 악화시킬수 있다. 이런점을 고려하여 분류 판전에 사용되는 특징정수를 바꾸어 분류기(Ver. 2.0)을 제작하였다. 앞에서와 같은 방법으로 분류성능을 시험하여 다음 표 10에 분류기(Ver 2.0)프로그램의 성능평가성적을 나타내었다

표 10. 분류기(Ver. 2.0) 성능평가표.

사용한 특징정수 학습표본수	7개의 특징정수만 사용한 경우 (Energy, Number of peak, $f_2/f_1$ , $f_3/f_1$ , $f_4/f_1$ , $I_1/I_0$ , Decay constant( $I_1/I_0$ ))	7개 이외에 특징변수를 추가 입력한 경우				
		$f_1^{0.84}$	$f_2^{0.82}$	$m^{2/3} \rho^{1/3} f_1^2$	$m^{2/3} \rho^{1/3} f_2^2$	$m^{2/3} \rho^{1/3} f_3^2$
17개	87.9%	84.4%	86.2%	88.6%	87.9%	87.9%
58개	89.6%	×	×	×	×	×

이 표에서 알 수 있듯이 다음으로부터 직접 얻을 수 있는 7개의 특징변수 (Energy, Number of peak,  $f_2/f_1$ ,  $f_3/f_1$ ,  $f_4/f_1$ ,  $I_1/I_0$ , Decay constant( $I_1/I_0$ )) 들을 사용하여 17개의 대표적인 학습파형을 학습하여 전체 58개를 시험한 경우 87.9%의 분류 정확도를 확보할 수 있었다.

또한 다음파형만으로부터 프로그램 스스로 얻을 수 있는 7개의 특징변수 이외 다른 특징변수  $f_1^{0.84}$ ,  $f_2^{0.82}$ ,  $m^{2/3} \rho^{1/3} f_1^2$ ,  $m^{2/3} \rho^{1/3} f_2^2$ ,  $m^{2/3} \rho^{1/3} f_3^2$  추가입력하는 경우 분류 정확도는 84.4%에서 최대 87.6%까지로 나타났다.

이 때 표에서 보는바대로 Ver. 2.0 분류기에서는 다음만으로 얻은 7개의 특징변수와 학습표본 개수 단지 17개만으로 87.9%의 분류 성능을 얻고 있으며 학습표본 개수를 58로 늘리는 경우 89.5%로 향상됨을 알 수 있다. 다음 표11에 7개의 특징정수를 채택한 분류기(Ver.2.0)에 17개의 학습표본을 사용하여, 58개의 공시 재료 파형을 분류했던 결과의 출력을 모두 예시하였다.



표 11 분류기(Ver. 2.0)의 평가결과에서 7개 특징변수사용하여 17개(음영 표시)를 학습하여 검증한 판정표

수박 번호	과육색깔에 의한 속도	출 력 값			품종	수박 번호	과육색깔에 의한 속도	출 력 값			품종
		미숙 확율	적숙 확율	판정				미숙 확율	적숙 확율	판정	
1	45	66	34	○	금배	30	95	36	64	○	금배
2	35	37	63	×	대교	31	95	0	100	○	"
3	40	85	15	○	"	32	95	39	61	○	"
4	40	74	26	○	"	33	90	28	72	○	"
5	45	64	36	○	"	34	90	25	75	○	"
6	40	89	11	○	"	35	95	29	71	○	"
7	40	72	28	○	"	36	90	33	67	○	"
8	40	68	32	○	"	37	75	54	46	×	대교
9	40	66	34	○	"	38	95	44	56	○	금배
10	15	93	7	○	"	39	95	55	45	×	"
11	40	49	54	×	"	40	95	34	66	○	"
12	40	47	53	×	"	41	95	29	71	○	"
13	15	77	23	○	"	42	97	34	66	○	"
14	25	53	47	○	"	43	95	34	66	○	"
15	10	63	37	○	"	44	95	43	57	○	"
16	20	78	22	○	"	45	95	32	68	○	"
17	30	99	1	○	"	46	97	27	73	○	"
18	70	38	62	○	"	47	95	28	72	○	"
19	70	21	79	○	"	48	95	37	63	○	"
20	95	34	66	○	"	49	95	48	52	×	"
21	95	44	56	○	"	50	95	27	73	○	"
22	70	16	84	○	"	51	95	51	49	○	"
23	90	25	75	○	"	52	95	31	69	○	"
24	70	33	77	○	"	53	95	48	52	○	"
25	95	25	75	○	"	54	95	31	69	○	"
26	95	18	82	○	"	55	95	47	66	○	"
27	95	60	40	×	금배	56	95	46	53	○	"
28	90	38	62	○	"	57	95	46	54	○	"
29	95	25	75	○	"	58	99	37	63	○	"

## 제7장 결론

다음에 의한 수박의 내부품질을 비파괴적으로 평가하는 신경망형의 수박분류기를 개발하고자 하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

수박의 품질 기준으로 색을 기준으로 하여, 이것이 공시재료에서 측정된 Brix 당도와 높은 상관성을 가짐을 확인하였다.

수박의 과육과 과피에서 음파속도가 수박이 익어갈수록 120m/sec로부터 220m/sec이내에서 변화하며 음파의 투과시 감쇄특성도 변화함을 발견하였다.

수박의 타격지점으로부터 측정점에서의 음파의 전파 양태가 음파의 주파수에 따라 크게 달랐다. 음파의 파장이 수박의 단반경보다 작은 주파수영역(약 500Hz 이상)에서는 과피를 따르는 경로와 과육을 가로지르는 경로 모두로 전파하며, 타음파형의 초기임펄스에만 영향을 준다.

다음의 대부분의 신호는 약 500Hz이하의 저주파 성분으로 구성되어 있다. 음파의 파장이 수박의 단반경보다 큰 이영역에서는 강한 기하학적 분산이 존재한다. 이때 타음신호의 최대피크진폭부분의 파형은 주파수가 200~400Hz 성분이며, 이 신호의 전파속도는 20 ~50 m/sec정도였다.

수박의 품질추정에 저주파 공명피크들이 중요하다. 음향학적 방법으로 수박 품질을 평가할 때 다른 연구자들에 의해 사용되어 온 음향학적 판정지표  $mf^2$ ,  $m^{2/3}$ ,  $\rho^{1/3}f^2$  의 의미를 논의하였다. 탄성구각의 진동모드와 타음파형의 주파수분석을 통해서 새로 도입한 공진주파수의 비, 에너지 등의 새로운 음향평가 지수가 유용함을 알았다.

파형획득장치와 수박 분류프로그램이 개인용 컴퓨터 수준으로 구현되도록 개발되었고, 실험에 의한 타격장치의 주파수여기특성과 적정조건, 전자식밀도측정기술 등이 확보되었다. 개발된 부가기술들과 새로운 음향평가지수들은 추후 더욱 정확도가 높은 분류장치 등의 연구개발에 활용될 수 있을 것이다.

PNN방식의 신경회로망을 채택한 분류기프로그램을 개발완성하였다. 분류기를 58개의 무작위 표본에 대한 분류평가 결과, 최대 87%~89.7%까지의 분류정확도로 미숙과, 적숙과를 구분하였음을 확인하였다. 수박의 개체특성차이가 커서 일부 수박을 구분하지 못하는 경우가 있지만, 이런 것은 개발된 분류기에 학습표본의 수를 늘리거나, 품종별로 학습DB를 갖추는 등의 간단한 보완에 의해 따라서 더욱 향상된 성능을 갖게 할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- 1) 노상하. 1997. 농산물의 비파괴 품질평가 기술개발 연구동향. 97년 한국비파괴검사학회 춘계학술발표논문집. 한국비파괴학회. pp.3-15
- 2) Proceedings of '98 international symposium seoul Korea. 1998. KSAM
- 3) 藤宏郎. 1996. 농산물의 비파괴 내부 계측과 품질평가 ; 성분, 구조, 온도. 制御情報 Vol. 40(2):63-68
- 4) 加藤宏郎. 1994. 밀도에 의한 비파괴당도선별. 식품유통기술 Vol.23(12):61-64
- 5) 鳥居 徹 . 1997. 초음파를 이용한 계측 (2); 초음파에 의한 식물, 농산물의 계측법. 농기학지 Vol.59(2):105-108
- 6) 岩元睦夫. 1993. 비파괴평가 기술의 이용도 과제 . 식품의 개발 Vol.28(1):13-16
- 7) 田中 俊一郎. 1995. 특집 생물과 초음파; 횡파 초음파를 이용한 농산물의 비파괴 내부 품질 평가. 초음파 TECHNOL Vol.7(7): 41-46
- 8) 乙部和紀 . 1993. 과일 청구물의 진동에 의한 상품관리.
- 9) 中元陽一. 1994. 타음·진동에 의한 속도판정장치의 개발. 제53회농업기술학회연차대회강연요지. pp 223 - 224
- 10) 河野澄夫. 1996. 농산물 비파괴 품질평가의 최신동향 ; 품질평가는 맛의 시대. 식품의 용기 Vol.37(5):262-268
- 11) 杉山純一. 1995. 타음회절에 의한 과실의 속도 계측법의 개발.제11회 비파괴계측강연요지집. 일본식품과학공학회. pp 102-105
- 12) 손주용, 반성철, 신정섭, 홍성희. 1996. 수박과 멜론의 부위별 유리당 함량 분포에 관한 연구. 한국농화학회지 vol.39(3):200-205
- 13) Duane N., Chisholm, David H. Picha. 1986. Distribution of sugars

and organic acids within ripe watermelon fruit. Hortscience vol.21(3):501-503

- 14) 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 vol.22(5): 101-112
- 15) Yamamoto, H., M. Iwamoto, S. Haginuma. 1980. Acoustic impulse response method for measuring natural frequency of intact fruits and preliminary applications to internal quality evaluation of apples and watermelon. J. of the Texture Studies vol.11:117-136
- 16) Yamamoto, H., M. Iwamoto, S. Haginuma. 1981. Nondestructive acoustic impulse response method for measuring internal quality of apples and watermelons. J. of the Japanese Society of Horticultural Science vol.50(2):247-261
- 17) Sasao, A. 1985. Impact response properties of watermelons in growth process. J. of the JSAM vol.47(3):335-358
- 18) Armstrong, P. G.K.Brown. 1991. Apple Firmness Sorting Using a Nondestructive Acoustic Technique. ASAE Paper No.916044
- 19) Hayashi, S., J.Sugiyama, K.Otobe, Y.Kikuchi, S.Utsui. 1992. Nondestructive Measurement for Maturity of Muskmelons by Analysis of Acoustic Signals. 일본식품공업학회지 vol.39(6):465-470
- 20) Abbott, J.A. , D.R. Massie. 1993. Nondestructive Firmness Measurement of Apples. ASAE Paper No.936025
- 21) M.L. Stone, P.R. Armstrong, X. Zhang, G.H. Brusewitz, D.D.Chen. 1996. Watermelon maturity determination in the field using acoustic impulse impedance techniques. TRANS ASAE Vol.39(6):2325-2330

- 22) Cooke, J.R. 1972. An Interpretation of the resonant behavior of intact fruits and vegetables. Transactions of the ASAE 15 :1075-1080
- 23) Finney, E.E. 1972. Vibration techniques for testing fruit firmness. J. Texture Studies 3:262-283
- 24) 加藤宏郎. 1993. Nondestructive measurement fo fruits quality by electrical impedance. 농업기계학회지 vol.55(1):75-83
- 25) Kqzunori Otohe, Junichi Sugiyama, Yuji Kikuchi. 1993. Firmness measuring system of fruits and vegetables with a Light-contact vibrating probe. Nippon Shokuhin Kohyo Gakkaishi vol.40(11):792-800
- 26) Tom Torri. 1997. Method of studing physical acoustic of plant and agricultural products. 농업기계학회지 vol.59(2):105-108
- 27) T. Sugiyama. 1995. Firmness measurement of fruits by acoustic impulse transmission. Tohoku national agricultural experiment station at fukushima. 일본식품과학공학회. pp.102-105
- 28) 장경영, 김만수, 조한근. 1998. 수박에서의 초음파 전파특성에 관한 실험적 연구. 한국농업기계학회지 vol.22(6):615-620
- 29) 김만수, 최동수, 이영희, 조영길. 1998. 수박의 음향특성에 관한 연구. 한국 농업기계학회지 vol.23(1):57-66
- 30) D. E. Lippmann. 1987. An introduction to computing with neural nets. IEEE ASSP Magazine. pp. 4-22.
- 31) D. F. Specht. 1988. Probabilistic neural networks for classification, mapping, or associative memory. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks Vol.1:525-532.
- 32) C. W. Therrien. 1989. Decision Estimation and Classification. John

Wiley. New York

- 33) R. O. Duda and P. E. Hart. 1973. Pattern Classification and Scene Analysis. New York. John Wiley & Sons
- 34) 김학준. 1997. 형상인식기법을 이용한 지능형 결함 분류기에 관한 연구. 석사학위 논문. 조선대학교
- 35) 소철호, 서범석, 김영환. 1997. 수박 비파괴 선별기술 개발 연구보고서. 광주광역시 북구청
- 36) 이윤호. 1996. 간섭계를 이용한 탄성구 낙하 충격력의 해석. 동신대학교 석사학위논문
- 37) Werner soedel. 1981. Vibrations of shells and plates 2nd Ed. Marcel Dekker. Inc. Chap.6
- 38) UD watermelon sensor <http://www.udel.edu/pr/expert/watermel.html>
- 39) 한규평, 김성채, 최성규, 박태동, 이돈길, 이창환. 1986. 무등산수박 고유품질 탐색과 재배에 관한 연구. 전남농촌진흥원.
- 40) 중앙일보기사. 1999.7.5. 32면
- 41) SBS 호기심천국. 1999.6.6. 제65회

※ 수박 분류기 프로그램이 필요하신 분들은 아래 연락처로 문의 바랍니다.

E-Mail : [chso@dongshinu.ac.kr](mailto:chso@dongshinu.ac.kr)

[kiecord@thrunet.com](mailto:kiecord@thrunet.com)