

# 수박의 음향특성에 관한 기초연구

## Fundamental study on Acoustic Characteristics of the Watermelon

김만수\*      최동수\*      이영희\*\*      조영길\*\*

성회원      정회원      정회원      성회원

M. S. Kim    D. S. Choi    Y. H. Lee    Y. K. Cho,

### 1. 서론

농산물의 품질을 판정하는 요인은 크게 외부적인 요인과 내부적인 요인으로 나눌 수 있다. 농산물의 품질판정은 크기, 형태, 색택 및 흠의 유무 등 외부적인 요인에 따라 행해지고 있는 실정이다. 그러나 비파괴적인 내부품질판정은 농산물의 적기수확, 저장기간예측, 객관적인 내부품질평가 등으로 인해 그 중요성이 높아지고 있으며, 국제 경쟁력에서도 우위를 차지할 수 있는 요소가 될 수 있다. 따라서 농산물의 비파괴 내부품질판정 기술개발이 시급히 요구되고 있는 실정이다.

수박의 생산량은 국내 과채류 총생산량의 약 70%에 해당이 된다. 또한 매년 생산량이 증가하고 있는 중요한 작물이다. 수박의 속도는 품종, 착과 위치, 토지, 재배시기, 기상조건 등에 따라 차이가 생긴다. 수박의 성숙은 두드러져 나는 소리의 느낌, 과일의 꼭지부분의 짜임새, 과피의 색깔과 광택, 접지부(밑부분)의 황변정도, 손에 닿는 감촉 등으로 판정하는 것이 보통이다. 과일의 속도를 어느 정도 정확하게 판정할 수 있으려면 오랜 경험이 필요로 한다. 오랜 경험이 있다하더라도 이와 같은 속도판정은 주관적인 요소가 포함되어 있으며, 내부 과육의 품질을 객관적으로 평가하지 못하는 실정이다. 수박의 경우 착과 후 약 40일에서 45일 전후로 해서 수확을 하지만 같은 날 착과가 이루어진다고 하더라도 개체별 내부상태가 다르다.

본 연구에서는 음향실험을 할 수 있는 계측 및 분석 시스템을 구축하고, 수박의 음향학적 특성을 구명함으로써 내부품질을 비파괴적 평가하는데 적용할 수 있도록 하기 위한 기초연구를 하고자 하였다.

### 2. 재료 및 방법

#### 가. 공시재료

본 연구에 사용된 공시재료는 품종이 금천인 수박으로 대단위 생산지인 부여에서 적숙과 미숙, 크기별로 선별하여 구입을 하였다. 미숙과의 경우 착과후 25일된 것을 선정하였으며, 적숙과는 착과후 45일되어 수확된 것을 선정하였다. 실험에 사용된 공시재료의 기본적인 물성들을 표 1에 나타내었다.

Table 1. Physical properties of watermelon used in experiment

Grade	Date of		diameter(m)	weight(kg <sub>f</sub> )	density (×10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	volume (×10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	sugar content (Brix %)	elastic modulus (MPa)
	full bloom	harvest						
ripe	97.4.20	97.6.5	0.193~0.258	3.91~8.12	0.909~1.076	3.70~8.93	7.8~11.1	0.442~0.812
unripe	97.5.22	97.6.5	0.147~0.194	1.64~3.88	1.102~1.491	1.10~3.52	4.5~7.3	0.575~0.737

Note : volume : water displacement method by Archimedes theory.

\* 충남대학교 농과대학 농업기계공학과

\*\* 농업기계화연구소 가공기계과

나. 실험장치

본 연구에서는 수박의 타격음에 대한 반응 신호를 계측하기 위하여 구성된 시스템의 개략도는 그림 1 과 같으며, 시스템을 구성하고 있는 계측기와 제원을 표 2에 나타내었다.

Table 2. Specifications of measuring system for acoustic impulse responses

Items	Specifications	Remarks
Microphone set	microphone . frequency response( $\pm 2$ dB) : 5Hz to 40kHz . dynamic range(3% THD) : 20 to 145dB . Sensitivity(dB re:1V/pa) : -36dB microphone power supply microphone preamplifier	HEWLETT PACKARD Model : HPAC0J-7012XX HP ACOP-9200XX HP ACOP4012XX
Microphone calibrator	reference tone : 94dB SPL and 104dB SPL( $\pm 0.5$ dB) output frequency : 1 kHz( $\pm 2\%$ )	HEWLETT PACKARD Model : HP ACOP-511EXX
DSP board	DSP chip : TMS320C30, 40MHz	SONITECH International, Inc. Model : SPIRIT-30
Stereo Audio Interface Box (SAIB)	. channel : 2 channel A/D and 2 channel D/A . signal coding : 16-bit linear . sample rate : 5.5, 6.6, 8, 9.6, 11, 16, 22.05, 32, 44.1, 48kHz(software selectable) . full scale input : Line 2.8Vpp, Mic .29Vpp	SONITECH International, Inc. Model : SAIB-48
Computer	. IBM 586 - 100MHz . Hard disk : 1.2Gb . Memory : 16Mb	
Arbitrary waveform generator	. 10 standard waveform . built-in 12-bit 40MSa/s arbitrary waveform capability	HEWLETT PACKARD Model : HP33120A
Digital oscilloscope	. sample rate max. : 2GSa . Sensitivity : 1mV/div to 5V/div	HEWLETT PACKARD Model : HP54542A
Digital balance	weighing range : 5 kg to 25kg	CAS Engineering, Model : SC-25P
Universal Testing Machine	500kg <sub>r</sub> capacity, 0.05mm/min loading rate accuracy	Deayoung

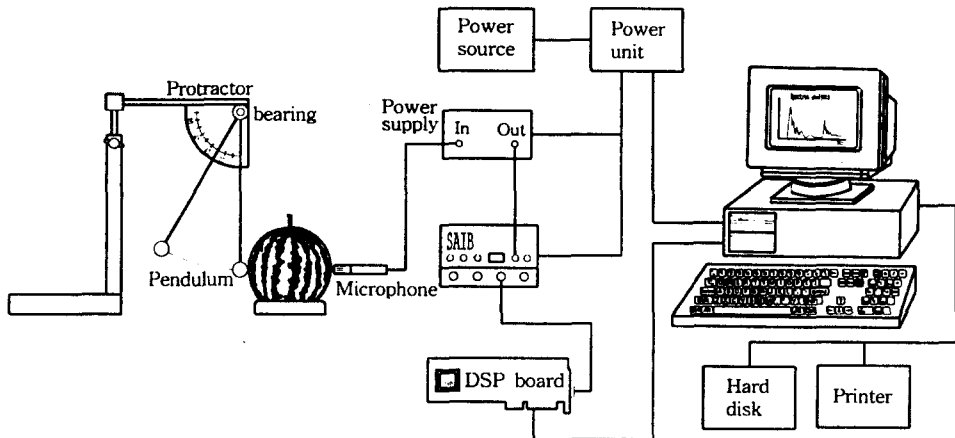


Fig. 1 Schematic diagram of measuring system for acoustic impulse responses.

그림 1은 공시재료에 외부 힘을 가하여 자유진동을 일으켜 재료의 음향 임펄스(impulse) 반응을 계측하여 내부품질을 분석하는 시스템으로서, 외부 힘을 가하는 장치는 진자를 이용한 타격방식을 사용하였다. 타격부는 아크릴 구를 사용하였으며, 진자의 원활한 진동을 위하여 베어링을 사용하였다. 이때 타격구의 무게는 17.18g이며, 진자의 길이는 35cm이었다. 진자의 낙하각도를 임의

로 선택할 수 있도록 배어링이 설치된 부분에 각도기를 설치하였다.

음향신호 검출부는 마이크로폰(microphone), 마이크로폰 프리앰프(microphone preamplifier), 그리고 마이크로폰 전원공급장치이며, 신호분석부로는 음향신호를 A/D변환시키는 기능을 하는 SAIB(Stereo Audio Interface Box), 고속으로 신호처리를 하는 DSP(Digital Signal Processing) board와 신호분석을 하는 컴퓨터로 구성하였다.

#### 다. 실험방법

##### 1) 밀도, 탄성계수, 당도 측정

본 연구에서는 수박이 균일한 재질로 구성되어있다는 가정 하에 수박의 체적을 물의 체적으로 치환하여 측정된 수박의 질량과 체적의 비를 수박의 밀도로 보았다.

본 연구에서는 내부품질에 큰 영향을 미치는 탄성계수를 UTM(Universal Testing Machine)을 사용하여 측정하였다. 하중재하속도는 20mm/min로 크로스헤드가 일정한 속도로 시편을 압축하도록 하였다. 압축실험에 사용된 시편은 음향실험을 한 직후에 수박을 쪼개어 껍질에 가까운 부분과 중심부분 그리고 중심과 껍질의 중간부분 모두 3곳을 시편채취기(cork borer)를 이용하여 채취한 다음, 직경 17.6mm, 길이 20mm의 원통형 시편을 만들어 사용하였다.

당도 측정은 압축실험에서 시편을 채취한 부분에서 시편을 채취하여 Brix 당도계를 사용하여 측정하였다.

##### 2) 신호처리

###### ① 필터설계

FFT(Fast Fourier Transform)연산은 Fourier변환을 근사화한 소위 DFT(Discrete Fourier Transform)을 계산하는데 매우 효과적인 방법이다. Fourier변환식이 연속함수의 무한 적분인 반면 FFT연산식은 유한급수이다. DFT의 유한성과 불연속성에 의해 에일리어싱(Aliasing)현상이 일어날 수 있다. 에일리어싱현상은 시간신호를 샘플링하기 때문에 생기는 것으로, 샘플링 후 고주파가 마치 저주파처럼 생기는 현상이다. 이 문제는 샘플링 주파수의 1/2이상 주파수는 포함되지 않도록 신호를 로패스 필터링(lowpass filtering)함으로써 해결된다.

본 실험은 음향실험으로서 무향실과 같은 실험 환경이 아니기 때문에 Noise에 노출되어 있다. 수박을 매질로 하여 전달되는 유효한 음향신호는 거의 1kHz범위 내에 존재하기 때문에 주파수 분석을 위한 FFT신호처리시 에일리어싱현상이 일어나지 않도록 하기 위하여 필터를 설계하여 적용하였다. 필터설계시 필터스펙과 설계된 필터 특성은 그림 2와 같다.

###### ② 데이터수집

진자를 이용하여 공시재료에 일정한 각도로 타격을 하였다. 진자가 재료에 타격을 한 후 다시 타격이 되지 않도록 하기 위하여 순간적으로 진자를 손으로 잡았다.

공시재료에 전달된 임펄스를 마이크로폰(microphone)을 통하여 검출해서 프리앰프(preamplifier)에서 증폭한 후 SAIB(Stereo Audio Interface Box)에서 A/D 변환을 거쳐 DSP(Digital Signal Processing) board을 통해 data을 수집하였다. A/D변환시 샘플링 주파수는 5.5125kHz이었으며, Framesize는 2048이 되도록하여 데이터를 하드에 저장하였다.

###### ③ 신호처리

음향신호를 분석하는 과정을 그림 3에 나타내었으며, 이와 같은 분석은 DSP board와 디지털 신호처리 프로그램(Hypersignal RIDE 4.0)을 이용하였다.

그림 3에서 보는 바와 같이 아날로그 신호를 A/D변환한 후 설계한 필터를 사용하여 원래신호를 필터링한 후 FFT처리를 하였다. FFT처리시 데이터 점수를 2048로하였다. 다음으로 매그니튜드(magnitude)를 구한 후 스펙트럼으로 표시하였다. 스펙트럼 주파수의 범위는 0 에서 2755Hz로

주파수 분해능은 2.69Hz이었다. 주파수 영역에서 피크주파수를 찾아내어 그 주파수와 dB값으로 표시하였다.

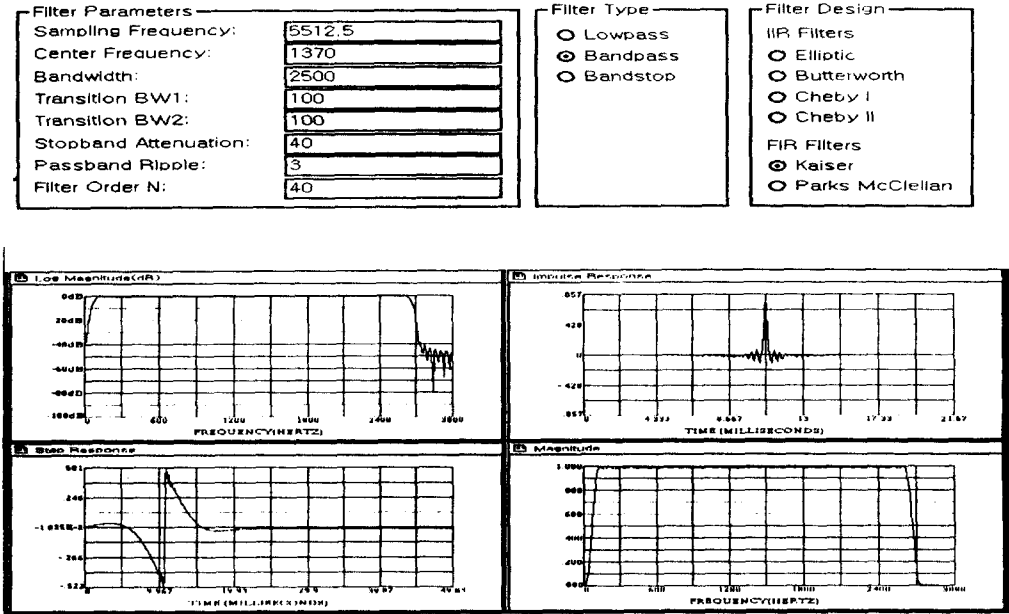


Fig. 2. Filter characteristics.

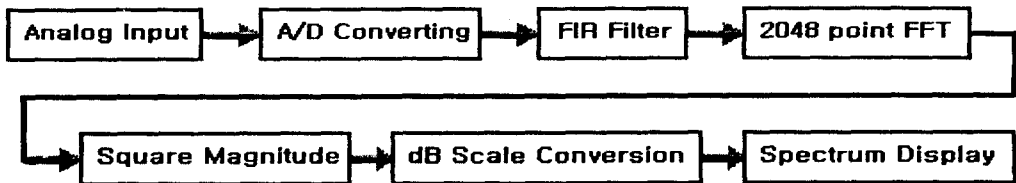


Fig. 3. Blockdiagram for digital signal processing of acoustic impulse response.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 수박의 음향반응

그림 4와 그림 5는 각각 적속과 미속과의 시간영역에서의 음향신호(좌측)와 주파수영역에서 음향신호 대한 주파수 성분(우측)을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 적속과는 시간영역에서 파형이 미속과에 비하여 복잡한 형상을 하고 있다. 시간영역을 주파수영역으로 변환 할 때 파형이 복잡할수록 피크 주파수성분이 많아진다. 내부품질을 결정하는 여러 가지 요인의 영향 때문에 미속에서 적속으로 진행될수록 시간영역의 파형이 복잡해지고, 여러 주파수 성분을 갖는 것으로 사료된다.

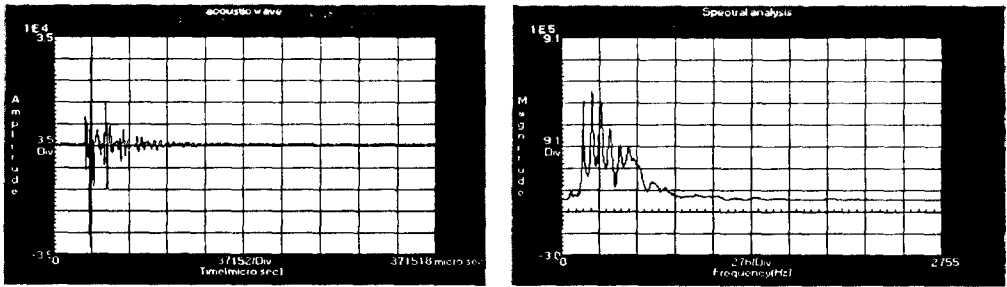


Fig. 4. The digitized acoustic impulse response of the ripen watermelon and its frequency spectrum obtained with an FFT.

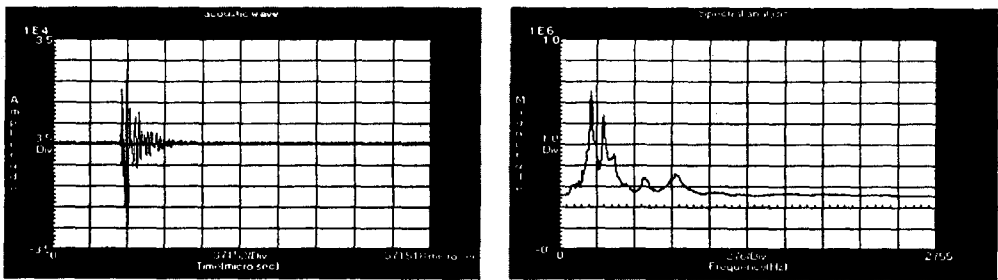


Fig. 5. The digitized acoustic impulse response of the unripen watermelon and its frequency spectrum obtained with an FFT.

그림 6은 무게와 처음 세 피크주파수와의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 무게가 증가함에 따라 제1피크 주파수, 제2피크주파수, 제3피크주파수는 저주파 쪽으로 진행됨을 알 수 있었다.

탄성계수와 제2피크주파수와의 관계를 그림 7에 나타내었다. 탄성계수는 각 피크주파수와의 상관관계가 높지 않은 것으로 분석되었다.

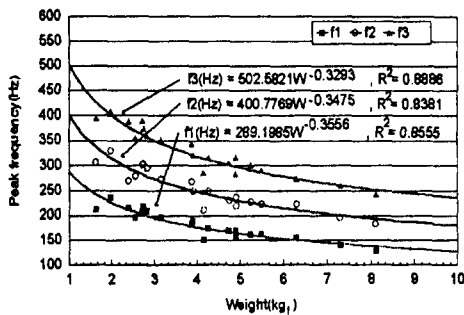


Fig. 6. Relationship between first three frequencies and mass of the watermelons.

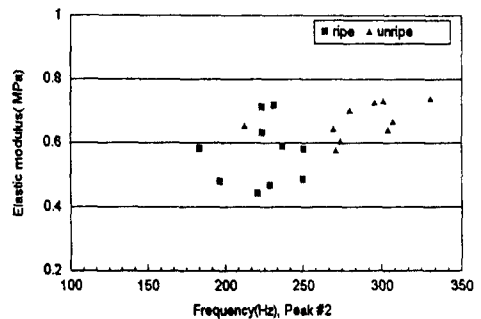


Fig. 7. Relationship between peak frequency(#2) and elastic modulus.

표 3에는 수박의 품질을 결정하기 위하여 고려되었던 인자들간의 상관계수를 분석한 결과를 나타내었다. 무게와 밀도 그리고 당도를 각 피크주파수들과 높은 상관관계가 있었고, 탄성계수는 다른 인자들과 상관계수가 낮음을 알 수 있었다.

Table 3. Correlation coefficients between quality parameters of watermelons

	$\rho$	$f_1$	$mf_1^2$	$m^{2.3}p^{1.3}f_1^2$	$f_2$	$mf_2^2$	$m^{2.3}p^{1.3}f_2^2$	$f_3$	$mf_3^2$	$m^{2.3}p^{1.3}f_3^2$	volume	sugar content	elastic modulus
m	<b>-0.8603</b>	<b>-0.9249</b>	0.6759	-0.5010	<b>-0.9155</b>	0.5611	-0.4336	<b>-0.9427</b>	<b>0.8161</b>	-0.4065	0.9969	0.8149	-0.4162
$\rho$		<b>0.8244</b>	<b>-0.7648</b>	0.3053	<b>0.8264</b>	-0.6169	0.2675	<b>0.8723</b>	<b>-0.8342</b>	0.2669	<b>-0.8580</b>	<b>-0.8033</b>	0.3186
$f_1$			-0.4627	<b>0.7313</b>	<b>0.9760</b>	-0.4369	0.6284	<b>0.9787</b>	-0.6746	<b>0.5829</b>	<b>-0.9168</b>	<b>-0.8383</b>	0.3516
$mf_1^2$				0.2619	-0.4881	<b>0.7404</b>	0.2288	-0.5559	<b>0.9064</b>	0.2360	0.6527	0.6087	-0.3963
$m^{2.3}p^{1.3}f_1^2$					0.6823	0.0942	<b>0.8563</b>	0.6397	-0.0359	<b>0.8258</b>	-0.5137	-0.4314	0.0769
$f_2$						-0.3671	0.6961	<b>0.9681</b>	-0.6725	<b>0.5667</b>	<b>-0.9076</b>	<b>-0.8499</b>	0.4022
$mf_2^2$							0.2904	-0.4943	<b>0.7107</b>	<b>0.1138</b>	0.5368	0.4148	-0.2102
$m^{2.3}p^{1.3}f_2^2$								0.5713	<b>0.0099</b>	<b>0.7791</b>	-0.4477	-0.4186	0.1810
$f_3$									-0.6888	0.5997	<b>-0.9345</b>	<b>-0.8568</b>	0.3778
$mf_3^2$										0.1596	<b>0.7959</b>	<b>0.7159</b>	-0.4105
$m^{2.3}p^{1.3}f_3^2$											-0.4247	-0.3546	0.0569
volume												<b>0.7879</b>	0.4016
sugar content													-0.2978

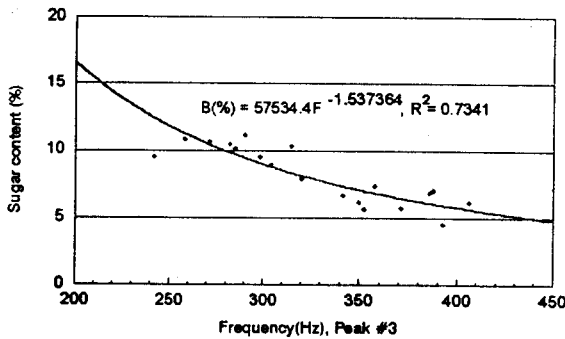


Fig 8. Relation between peak frequency(#2) and sugar content for watermelon

따라서 피크주파수를 알면 당도, 체적, 무게, 밀도를 어느 정도 예측할 수 있으리라 사료된다.

그림 8에는 당도와 피크주파수 중 가장 상관관계가 높은 제3피크주파수의 관계를 나타내었다.

#### 4. 결론

수박의 내부품질을 판정에 기준이 될 수 있는 중요한 인자들, 즉, 당도, 밀도, 속도 등의 영향이 어떠한 음향반응으로 나타나는지 음향신호를 분석하기 위하여 음향신호 분석시스템을 구성하여 수박의 음향학적 특성을 구명하였던 결과는 다음과 같다.

가. 수박의 음향학적 특성을 구명하기 위하여 음향 계측 분석 시스템을 구축하였다. 음향 계측 분석 시스템은 크게 공시재료 타격부, 음향신호 검출부, 신호분석부로 구성하였다. 파실에 전파되는 유효한 음향신호가 1kHz범위안에 있기 때문에 음향신호 샘플링 주파수는 선택 가능한 최소 주파수인 5512.5Hz으로 설정하였으며, framesize 2048점수로 하였다.

나. FFT처리시 발생할 수 있는 에얼리이싱 현상을 제거하기 위하여 lowpass filter를 적용하면 된다. 본 연구에서는 음향신호에 0 ~ 20Hz부근의 주파수 성분인 Noise가 포함되어 있어 샘플링 주파수의 1/2이상의 주파수 성분이 포함되지 않도록 밴드패스필터를 설계하여 적용하였다. FFT처리시 데이터 점수를 2048로 하였으며, 스펙트럼 주파수의 범위는 0 에서 2755Hz로 주파수 분해능은 2.69Hz이었다.

다. 수박의 등숙정도가 미숙에서 적숙으로 진행될수록 시간영역의 파형이 복잡해지고, 여러 주파수 성분을 갖는 것으로 나타났다. 또한 무게가 증가함에 따라 제1피크 주파수, 제2피크주파수, 제3피크주파수는 저주파쪽으로 진행됨을 알 수 있었다. 당도의 경우도 마찬가지로 당도가 증가함에 따라 피크주파수는 저주파쪽으로 이동하는 것으로 나타났다. 당도는 세 번째 피크주파수와 가장 밀접한 관계가 있었으며,  $R^2$ 의 값이 0.7341이었다.

라. 수박의 내부품질인자들의 상관관계를 분석했던 결과, 무게와 밀도 그리고 당도는 각 피크 주파수들과 높은 상관관계가 있었으며, 상관계수들은 각각 -0.9155 ~ -0.9427, 0.8244 ~ 0.8723, -0.8383 ~ -0.8568이었다. 체적의 경우는 세 번째 피크주파수와 높은 상관관계가 있었으며 상관계수는 -0.9345이었다. 따라서 타격에 의한 음향신호의 주파수성분을 알면 어느 정도 무게, 밀도, 체적 그리고 당도를 예측할 수 있으리라 사료되었다.

## 5. 참고문헌

1. Abbott, J. A., D. R. Massie, B. L. Upchurch and W. R. Hruschka. 1995. Nondestructive Sonic Firmness Measurement of Apples. Trans. of the ASAE Vol. 38(5) : 1461 - 1466.
2. Amos Mizrach, Naftali Galili, Daniel C. Teitel and Giora Resenhouse. 1989. Acoustical, Mechanical and Quality Parameters of Melon Tissue. A1 ASAE/CSAE MEETING PRESENTATION Paper No. : 893951.
3. Armstrong, P., H. R. Zapp and G. K. Brown. 1990. Impulsive Excitation of Acoustic Vibrations in Apples for Firmness Determination. Trans. of the ASAE Vol. 33(4) : 1353 - 1359.
4. Chen, P., Z. Sun and L. Huanng. 1992. Factors Affecting Acoustic Responses of Apples. Trans. of the ASAE Vol. 35(6) : 1915 - 1920
5. Sasao, A. 1985. Impact response properties of watermelons in growth process. J. of the JSAM, 47(3) : 335 - 358
6. Setsuo HAYASHI, Jun-ichi SUGIYAMA, Kazunori OTOBE. 1995. Nondestructive quality evaluation of fruits and vegetables by acoustic transmission waves. Proceedings of ARBIP95, Kobe, Japan 1995. 227 - 234
7. 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 Texture Studies, 11 : 117 - 136.
8. Yamamoto, H., M. Iwamoto, s. Haginuma. 1981. Nondestructive acoustic impulse response method for measuring internal quality of apples and watermelons. J. of Japanese Society of Horticultural Science, 50(2) : 247 - 261.
9. 박선호. 1995. 디지털 신호처리의 기초와 DSP응용실무. 국제테크노정보연구소.
10. 박종민. 1993. 과실의 점탄성 특성과 그 응용. 충남대학교 박사학위논문
11. 이채욱. 1996. 디지털 신호처리. 청문각.