

고분자 압전 박막 센서를 이용한 사과와 충격 음파 특성 분석

Analysis of Impact Acoustic Property of Apple Using Piezo-Polymer Film Sensor

김만수*, 이상대**, 박정학**, 김기복**†

Man Soo Kim*, Sangdae Lee**, Jeong-Hak Park** and Ki-Bok Kim**†

초 록 본 연구는 PVDF(polyvinylidene flouride) 압전센서를 이용하여 사과와 내부 품질을 평가할 수 있는지를 고찰하기 위하여 수행되었다. 사과 표면에 기계적 충격을 가한 후 반대편에 부착된 PVDF 압전센서를 이용하여 사과를 투과한 음파신호를 수신하였다. 투과 음파신호를 분석하기 위한 음향 파라미터들로서 시간 영역에서는 신호의 rise time(RT), ring down count(RC), energy(EN), event duration(ED), peak amplitude(PA)를 이용하였으며 주파수영역에서는 spectral density(SD)를 각각 이용하였다. 사과와 저장 기간이 증가함에 따라 응답신호의 크기는 감소하였으며 중심 주파수도 저주파수로 변화하였다. 분석에 사용된 음향 파라미터들은 사과와 저장 기간과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다. 음향 파라미터들과 저장기간에 대하여 다중회귀분석을 수행한 결과 결정계수가 0.97로 매우 높게 나타났다. 따라서 PVDF 압전센서와 음향 파라미터를 이용하여 사과와 저장기간에 따른 내부 품질 평가가 가능할 것으로 기대된다.

주요용어: 고분자 압전필름센서, PVDF, 충격응답신호, 사과, 저장기간

Abstract In this study, the PVDF (polyvinylidene fluoride) piezo-film sensor was applied to measure the internal quality of apple. The developed sensor detected the response signal through apple after mechanical impact on the surface of apple. The acoustical parameters at time domain such as rise time (RT), ring down count (RC), energy (EN), event duration (ED) and peak amplitude (PA) and acoustical parameter at frequency domain such as spectral density (SE) were analyzed. The size of waveform decreased as storage time of apple increased. The frequency at maximum magnitude was shifted to lower frequency band according to the storage time. The acoustical parameters showed strong relationship with storage time. The multiple linear regression equation was developed to estimate storage time of apple using the acoustical parameters at time domain and its coefficient of determination was 0.97. The internal quality of apple according to storage time is predictable using developed PVDF sensor and acoustical parameters defined in this study.

Keywords: Piezo-Polymer Film Sensor, PVDF, Impact Acoustic Response, Apple, Storage Time

1. 서론

과실의 품질은 외관, 조직감, 향기, 영양성, 안전성 등 여러 가지 측면에서 종합적으로 평가되고 있으며 과실 종류마다 평가항목이나 평가방법이 다르

다. 과실의 품질은 무게, 선택, 형상, 표면 상태 등과 같은 외부품질 인자와 당도, 육질, 영양가, 보존성, 내부 공동 및 내부 결함 등의 내부 품질인자가 있다. 지금까지 청과물의 품질 관정은 주로 외부 품질 인자를 중심으로 행해지고 있으며, 내부 품질

인자는 당도, 산도, 경도 등을 파괴적인 방법으로 측정하고 있다. 내부 품질인자를 이용한 판정은 파괴적 방법을 사용하므로 과실의 상품성이 사라지게 되고, 또한 모든 개체에 대해서도 측정 할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 비파괴적으로 과실 내부의 품질을 판정하기 위하여 근적외선, 핵자기공명, 영상처리, 초음파, X-선 등과 같은 여러 가지 비파괴 검사방법 및 장치가 연구되고 있다. 이 중에서 음파를 이용한 비파괴 측정법이 측정원리가 비교적 간단하고 장치의 구현이 용이하기 때문에 오래 전부터 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다[1-6]. 이 방법은 과실의 형상, 경도, 밀도 등과 같은 기계적 특성에 따라 특정 공명주파수가 나타나며 음파신호에 대한 스펙트럼 분석을 통해 진동형태를 특성화하여 검사하는 방법이다. 지금까지의 음파특성을 이용한 연구에서는 음파를 수신하기 위한 센서로서 콘텐서 마이크로폰을 이용한 경우가 대부분이었다. 최근 필름 형태의 음파센서로서 과실과 같이 굴곡이 있는 매질에 쉽게 접촉이 가능하며 가볍고 유연한 고분자 압전박막 재료인 PVDF(polyvinylidene flouride) 센서가 연구되고 있다[7-8].

본 연구는 앞으로 많은 활용이 예상되는 PVDF 압전센서를 이용하여 과실 내부품질의 평가 가능성을 검토하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 기계적 충격으로 과실에 적당한 타격을 가한 후 발생하는 음파신호를 감지하기 위하여 PVDF 압전센서를 제작하였으며 과실의 저장기간에 따른 음파특성을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. PVDF 필름센서 제작

PVDF는 1969년 Kawai[9]에 의해 압전성과 초전성이 발견된 이후 센서로 적용하기 위한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. PVDF는 (-CH₂-CF₂-)를 반복단위로 하는 선상고분자로서 기계적·화학적 성질이 우수하고 분자쇄 내에 존재하는 강한 C-F 쌍극자기에 의해 고분자 재료 중 가장 큰 유전율을 나타내어 콘텐서 재료로 실용화되고 있다. 또한 가공성이 좋고 충격 등으로 잘 파손되지 않으며 유전율이 크고 가벼울 뿐만 아니라 절연성, 내전압성이 커서 고전압의 입력에 잘 견딜 수 있다. 또한 PVDF는 그 재질이 매우 유연하며, 가볍고, 질긴

재료로서 기존 세라믹 계열의 압전 재료에 비해 음향 임피던스가 상대적으로 낮기 때문에 액체나 생체 조직 등과 같은 물질에 적용하는데 있어 더 유리한 장점이 있다. 특히 과실과 같이 음향 임피던스가 낮은 매질에 적용할 때 압전체와 매질사이의 음향 임피던스를 보다 효과적으로 맞추어 줄 수 있기 때문에 센서와 매질사이의 임피던스 불일치에 따른 음파 검출 손실을 줄일 수 있는 장점이 있으며 에너지 손실을 나타내는 mechanical Q값이 낮기 때문에 짧은 펄스의 송수신이 가능하여 광대역 주파수 특성을 얻을 수 있다. 또한 재료의 특성상 세라믹 계열의 압전재료에 비해 유연하므로 사용 용도에 따라 여러 가지 변형된 형상의 센서를 제작할 수 있다.

Fig. 1은 박막형 탄성과 검출센서 연구에 사용된 PVDF 압전센서인 110 μm 두께의 PVDF 필름으로서 직경은 각각 3, 6, 12 mm로 제작하였다. 센서에서 감지하는 신호를 검출하기 위한 전극연결은 먼저 센서의 전극 부에 직경 1.5 mm의 구멍을 뚫은 다음 리벳과 신호 선을 결선하였다. 그 구조는 Fig. 2에서 보는바와 같다. 리벳에 연결된 황동 전극에 전기적 노이즈를 방지하기 위하여 이중으로 절연된 동축케이블을 납땜하여 BNC 커넥터와 연결하였다.

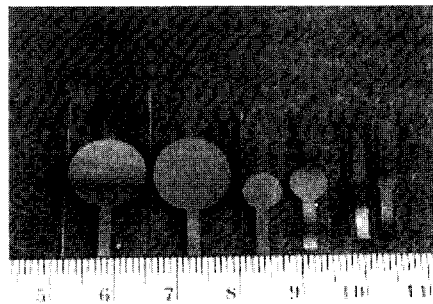


Fig. 1 Photo of PVDF (thickness: 110 μm, diameter: 3, 6, and 12 mm)

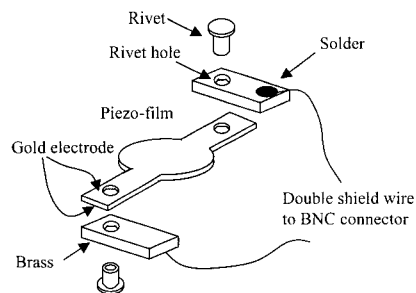


Fig. 2 Construction of a piezo-polymer sensor's wire harness

2.2. 실험장치 및 음향 파라미터

실험에 사용된 사과를 부사로 온도 20℃, 상대습도 75% 조건의 실험실에서 보관하였으며 3개의 사과를 이용하여 3일 간격으로 실시하였다. 사과에 기계적 충격을 주기 위해 Fig. 3과 같은 실험 장치를 제작하였으며 시료에 적당한 음향 충격을 줌과 동시에 사과 타격부분의 손상을 최소화하기 위하여 지름 8 mm의 아크릴 봉을 이용하였다. 이때 항상 동일한 기계적 충격을 가하기 위해 아크릴 봉을 90°각도에서 타격을 가하도록 하였으며 사과 표면의 타격 부위에서 반발되어 다시 타격하는 현상이 발생하지 않도록 반발되는 타격 봉을 손으로 잡아 1회만 타격이 되도록 하였다. 타격 봉에 의한 기계적 충격으로 발생된 신호를 수신하기 위하여 본 연구에서 제작된 PVDF 압전센서를 부착하였으며 수신된 신호는 1 GHz의 sampling rate를 가지는 오실로스코프와 컴퓨터를 이용하여 분석하도록 하였다.

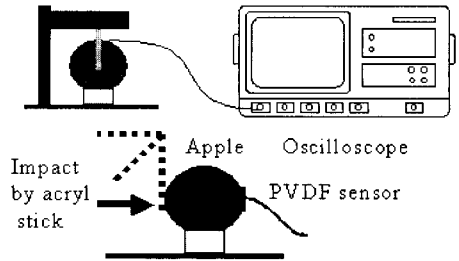


Fig. 3 Mechanical impulse device

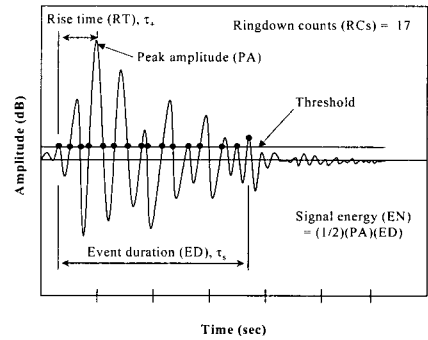


Fig. 4 Acoustic parameters of impulse response signal

사과의 기계적 충격응답 신호를 분석하기 위하여 Fig. 4에서 보는 바와 같은 음향 파라미터를 이용하였다. Fig. 4는 일반적인 음향 응답파형을 나타내는 것으로서 문턱값(0.02 V) 이상으로 파형이 지속되는 시간(τ_s)을 ED(event duration), 이 시간 내에서 문턱값을 가로지르는 회수를 RC(ring-down count), 파형의 최대값을 PA(peak amplitude), 처음 문턱값을 넘는 순간부터 PA까지 걸리는 시간을 RT(rise time, τ_r), PA와 파형의 시작과 끝점을 연결한 삼각형의 면적을 신호파형의 에너지(EN)이라고 정의하였다. 또한 센서에 의해 획득된 응답파형

에 대한 주파수 분석을 실시하여 spectral density (SD)를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 저장기간에 따른 센서 응답파형 분석

Fig. 5~7은 실험에 사용된 3개 사과의 저장기간에 따른 센서 응답파형의 변화를 나타낸 것으로서

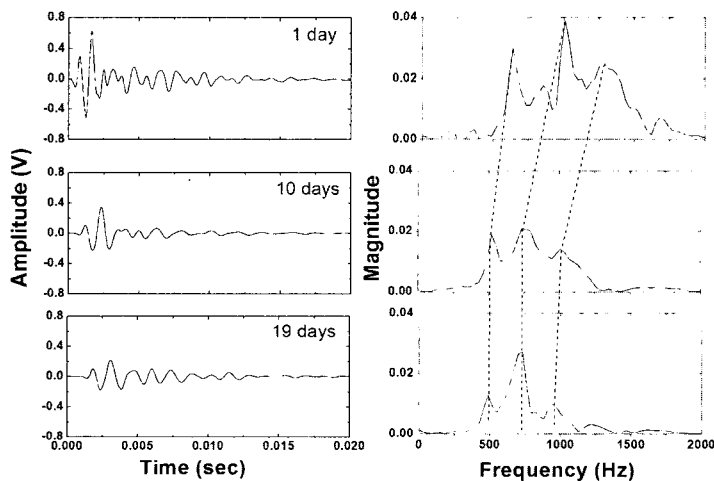


Fig. 5 Acoustic response signal and its frequency spectrum of sample No. 1 with the storage time

직경 6 mm의 PVDF 압전센서를 사용한 경우이다. 저장 기간에 따라 응답 신호의 감쇠가 크게 나타나고 있으며 최대 진폭값도 감소하는 것으로 나타났다. 응답신호를 주파수 분석한 결과 저장 초기에 최대 매그니튜드를 가지는 피크 주파수(f_{m1})가 대략 1 kHz 부근에서 나타났으나 저장기간이 증가함에 따라 매그니튜드가 감소할 뿐만 아니라 피크 주파수가 상대적으로 저주파수 쪽으로 천이하는 것으로 나타났다. 마찬가지로 2번째 매그니튜드를 가지는 피크 주파수(f_{m2})와 3번째 매그니튜드를 가지는 피크 주파수(f_{m3})도 유사한 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 저장기간에 따른 사과과육의 초음파 파

라미터의 변화에 대한 연구결과[10]와 매우 비슷한 결과를 나타낸다.

3.2. 저장기간에 따른 음향 파라미터 분석

사과의 저장기간에 따른 음향 파라미터를 분석한 결과는 Fig. 8에서 보는바와 같다. 응답신호의 최대 피크까지의 상승시간을 나타내는 RT 파라미터의 경우 사과 개체별로 차이가 있지만 대체적으로 저장기간이 증가함에 따라 RT도 증가하는 것으로 나타났다. 반면 RC, EN, ED, PA, SD는 저장기간에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 또한 본 연구에서

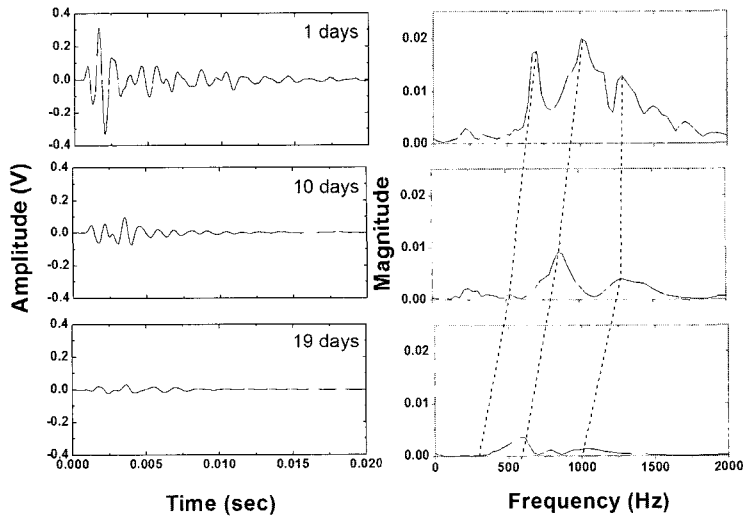


Fig. 6 Acoustic response signal and its frequency spectrum of sample No. 2 with the storage time

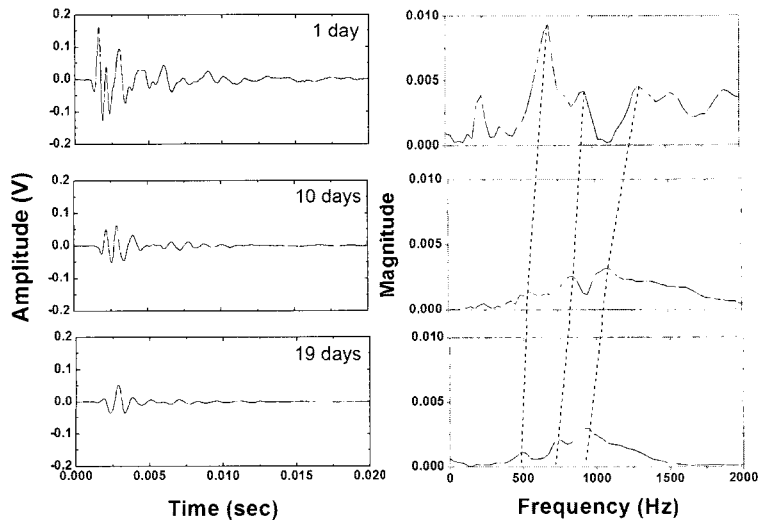


Fig. 7 Acoustic response signal and its frequency spectrum of sample No. 3 with the storage time

의 음향 파라미터는 대체적으로 저장기간에 따라 매우 강한 상관관계를 나타내는 것으로 분석되었다. 반면 사과 개체별로 저장기간에 따른 음향 파라미터는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 따라서 개별 시료를 고려할 경우 기계적 가진에 따른 음향 반응을 검출하여 경도와 같은 저장기간에 따른 사과의 물성변화를 측정하는 것이 가능할 할 것으로 판단된다.

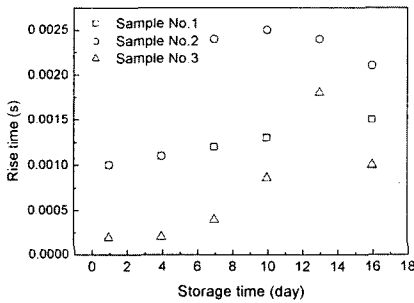
최종적으로 본 연구에서 분석된 음향 파라미터를 독립변수로 이용하여 사과의 저장기간을 예측할 수 있는 모델을 개발하기 위하여 다음 식 (1)과 같은 예측모델을 가정한 다음 중회귀 분석을

실시하였다.

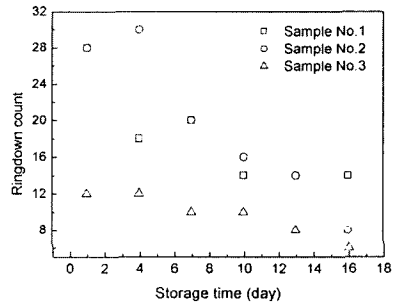
$$ST = a_0RT + a_1RC + a_2EN + a_3ED + a_4PA + a_5 \tag{1}$$

여기서, ST 는 저장기간(day), $a_0 \sim a_5$ 는 회귀모델의 계수를 각각 나타낸다.

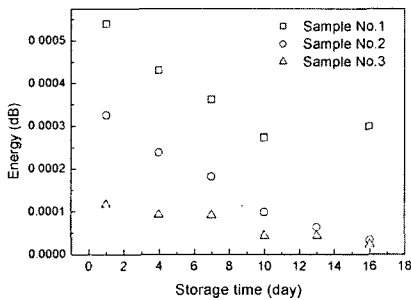
모델 식 (1)에 포함되는 독립변수는 응답파형의 시간 파라미터만을 고려하였는데 이것은 추후 개발된 PVDF 센서를 이용하여 실제 측정장치를 개발할 때 주파수 파라미터를 포함할 경우 신호처리 회로가 추가되어 측정장치가 복잡해질 가능성이 있으므로 포함되는 음향 파라미터의 개수를 작게 하는



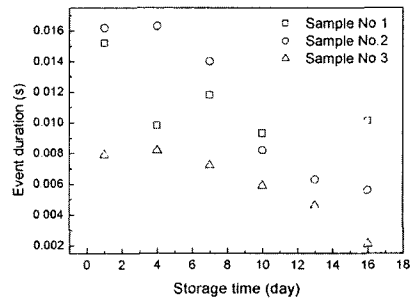
(a) RT



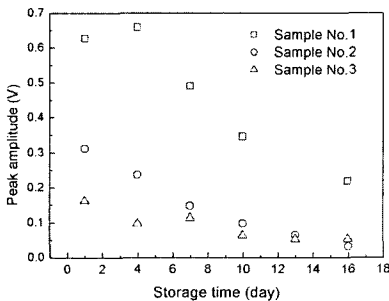
(b) RC



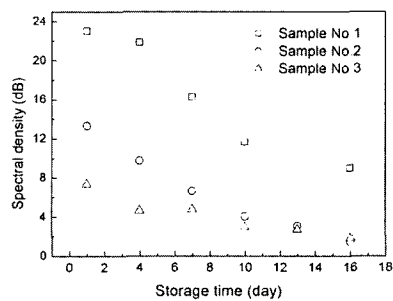
(c) EN



(d) ED



(e) PA



(f) SD

Fig. 8 Acoustical parameters v.s. storage time (a) rise time(RT), (b) ringdown count(RC), (c) energy(EN), (d) event duration(ED), (e) peak amplitude(PA), and (f) spectral density(SD)

Table 1 Multiple regression analysis for storage time of apple using acoustical parameters

Sample No.	Model	Regression coefficients						R ²
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	
1	Eqn. (1)	4145.648	4628.339	295.516	-3.973	-0.269	8.475	0.995
2		601.32	-87615.578	572.72	78.308	-0.537	5.122	0.972
3		-136.731	-71534.44	1239.208	16.466	-1.244	11.648	0.985

것이 유리하기 때문이다. Table 1의 결과에서 보는 바와 같이 실험에 사용된 개별 사과 시료에 대하여 기계적 충격에 따른 응답파형의 음향 파라미터를 이용할 경우 사과의 저장기간이 예측 가능한 것으로 분석되었으며 아울러 사과의 경도변화도 측정이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 전체 사과를 대상으로 할 경우에는 그 정확도가 매우 낮을 것으로 판단되는데 앞으로 이러한 부분에 대한 보완 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 PVDF 압전센서를 이용하여 과실의 내부품질을 비파괴적으로 측정하기 위한 연구로서 과실의 표면형상에 적합하도록 센서를 제작하였다. 기계적 충격으로 과실에 적당한 타격을 가한 후 발생하는 음파 신호를 제작된 PVDF 압전센서로 검출하였으며 신호의 RT, RC, EN, ED, PA와 같은 시간 축에서 얻을 수 있는 음향 파라미터와 주파수 분석으로부터 얻어지는 SD를 이용하여 사과의 저장기간에 따른 센서의 응답파형을 분석하였다. 센서 응답신호는 저장기간에 따라 감쇠가 많이 발생되어 전반적으로 파형이 줄어드는 현상이 나타났으며 주파수 분석한 결과 최대 매그니튜드를 가지는 주파수 성분들이 저장기간이 증가함에 따라 저주파수 쪽으로 천이하는 경향을 나타내었다. 또한 정의된 음향 파라미터를 분석한 결과 RT는 저장기간에 따라 증가하는 경향을 나타내었으나 나머지 파라미터인 RC, EN, ED, PA, SD는 저장기간에 따라 매우 강한 상관관계로 감소하는 경향을 나타내었다. 이들 시간 파라미터들을 독립변수로 하여 사과의 저장기간을 예측할 수 있는 중회귀 모델을 개발하고 평가한 결과 실험에 사용된 사과 시료 모두에서 결정계수가 0.97이상을 나타내어 물성변화의 평가가 가능할 것으로 판단된다. 따라서 과일의 품질을 평가하기 위한 PVDF 압전센서의 많은 응용이 가

능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] J. A. Abbot, G. S. Bachman, N. F. Childers, J. V. Fitzgerald and F. J. Matuski, "Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetables," Food Technology, Vol. 22, No. 5, pp. 101-112, (1968)
- [2] E. E. Finney, "Vibration techniques for testing fruit firmness," Journal of Texture Studies, Vol. 3, pp. 262-283, (1972)
- [3] H. M. Yamamoto, M. Iwamoto and S. Haginuma, "Acoustic impulse response method for measuring natural frequency of intact fruits and preliminary applications to internal quality evaluation of apples and watermelons," Journal of Texture Studies, Vol. 11, pp. 117-136, (1980)
- [4] G. H. Brusewitz and J. A. Bartsch, "Impact parameters related to post harvest bruising of apples," Transactions of the ASAE, Vol. 32, No. 3, pp. 962-965, (1989)
- [5] P. R. Armstrong, G. K. Brown and G. K. Brown, "Impulsive excitation of acoustic vibrations in apples for firmness determination," Transactions of the ASAE, Vol. 33, No. 4, pp. 1353-1359, (1990)
- [6] L. A. Liljedahl and J. A. Abbott, "Changes in sonic resonance of 'Delicious' and 'Golden Delicious' apples undergoing accelerated ripening," Transactions of the ASAE, Vol. 37, No. 3, pp. 907-912, (1994)
- [7] L. Shmulevich, N. Galili and D. Rosenfeld, "Detection of fruit firmness by frequency analysis," Transactions of the ASAE, Vol.

- 39, No. 3, pp. 1047-1055, (1996)
- [8] K. B. Kim, D. J. Yoon, J. H. Kueon and Y. S. Lee, "A study on detection of elastic wave using patch type piezo-polymer sensor," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 24, No. 3, pp. 268-274, (2004)
- [9] K. Kawai, "The piezoelectricity of poly (vinylidene fluoride), Journal of Applied Physics," Vol. 8, pp. 975-976, (1969)
- [10] K. B. Kim, M. S. Kim, H. M. Jung and S. D. Lee, "Mechanical properties and ultrasonic parameters of the apple flesh while in storage," Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery, Vol. 28, No. 3, pp. 239-244, (2003)