

만족시키지 못하고 있고, 속도 평가는 이 보다 더 정확성이 떨어지기 때문에 종래와 같이 사람의 손에 의한 확인작업이 병행되고 있는 실정에 있다.

수박을 두드려서 품질을 판별하는 전통적인 방법에는, 두드릴 때 발생하는 가청주파수 대역의 소리를 이용하는 이외에 또 다른 하나의 인자가 존재한다고 할 수 있는데 그것은 두드릴 때 발생된 진동(또는 탄성파)의 감촉(세기과 진동수)이다. 수박에서 초음파의 전파 특성을 알아보는 것은 바로 이 탄성파의 전달 특성을 보다 정밀하게 분석하는 것이다. 즉, 충격 가진을 초음파 가진으로 하고 진동의 전달을 초음파 탐촉자로 수신하여 분석하는 것이다. 이 방법은 초음파 송수신기를 수박에 접촉시켜 송신하고 전파된 초음파를 다시 수신하는 것으로 청과물에 손상을 줄 염려하는 전무하다.

그러나 청과물과 같은 농산물에서의 초음파의 거동에 대하여는 거의 알려져 있지 않으며, 고유진동수가 비교적 저주파이고 대부분의 경우 고주파의 초음파가 투과되지 않는다는 사실이 알려져 있는 정도이다. 따라서 본 연구에서는 우선 수박을 대상으로 초음파의 투과성을 확보하기 위한 적절한 주파수와 신호형태를 파악하고 수박의 공동(空洞) 유무 판별에의 적용 가능성을 기초적으로 검토해 보는 것을 목적으로 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

공시재료는 11월경 시중에서 구입한 두 종류의 수박(하우스 재배)으로 하였는데, 하나는 외피가 매우 얇고 최대 직경이 11cm 정도로 작은 타원형 수박(샘플 1: 외피두께 1mm 내외의 복수박)이고, 다른 하나는 외피가 두꺼운 일반 수박(샘플 2: 외피두께 20mm 내외의 달고나수박)으로 최대직경이 약 19cm, 최소직경이 17.8cm 이었다.

나. 실험장치

그림 1에는 실험장치의 개략도를 나타내었으며 표 1에는 그 제원을 표시하였다. 실험장치는 신호발

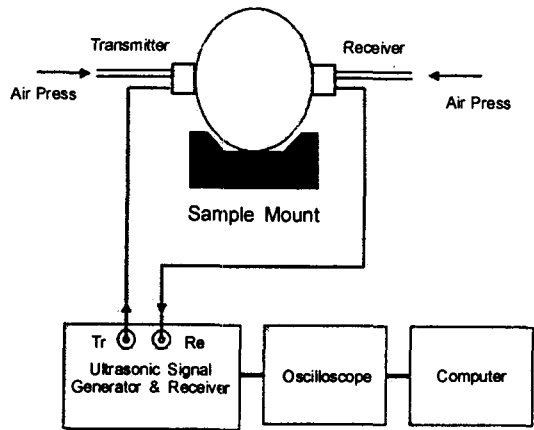


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system.

Table 1 Specification of experimental system

| Item | Specification | Remark |
|--|---|------------------|
| Ultrasonic signal generator & receiver | 1kHz~100kHz Pulse Generator 0~40dB Receiver Gain | Handmade (Japan) |
| Transmitter and receiver | SH 2kHz Probe Diameter : 20mm | Handmade (Japan) |
| Oscilloscope | 500MHz, 2Ch. | LeCroy |

생 및 수신장치, 송수신 탐촉자, 샘플 지지대, 디지털 오실로스코프 및 컴퓨터로 구성하였다. 샘플 지지대는 공기압에 의해 탐촉자를 수박에 일정 압력(2.25kg/cm²)으로 밀착시키도록 제작되었다. 여기서 적용한 초음파는 수평횡파(Shear Horizontal wave, SH wave)로 의료용 초음파 영상진단장치에서 적용하는 수 MHz의 종파 초음파와는 달리 투과되는 물체의 입자에 의한 산란효과가 적고 탐촉자도 저주파용으로 하여도 크기를 작게 할 수 있는 이점이 있다. 따라서 본 연구에서는 SH 모드 초음파 탐촉자를 이용한 측정 시스템을 구성하였다. 단, 탐촉자는 접촉면이 평면으로 수박과 접촉시 공압 가압에 의해 1/3~1/2 정도만이 접촉하게 된다.

다. 실험방법

계측원리로는 펄스투과법을 적용하였는데, 신호

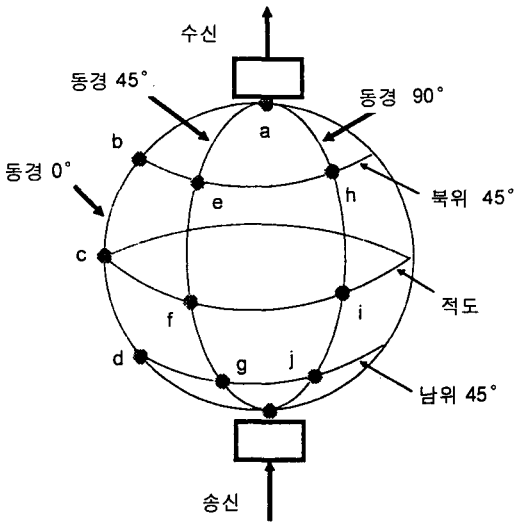


Fig. 2 Measuring Positions around the surface of watermelon.

발생 장치에서 발생시킨 전기신호를 수신 탐촉자가 감지하여 전기신호로 변환시킨다. 수신된 초음파 신호는 증폭된 뒤, 디지털 오실로스코프에서 기록되며 컴퓨터에서 파형 분석을 수행하였다.

실험에서는 우선 수박에서 초음파의 투과성을 확보할 수 있는 적절한 주파수 대역을 검토하기 위하여 수 kHz에서 수십 kHz의 범위에서 주파수를 바꾸어 가며 투과성을 평가하였다.

다음으로 수박에서의 초음파의 전파 특성을 알아보기 위하여 그림 2에 보이는 바와 같이 수박의 표면을 따라 수신점을 옮겨 가면서 파형을 획득하여 수신한 신호를 비교하였다.

수신점 a는 송신점의 정반대편이며 나머지 수신점은 편의상 수박을 경도와 위도로 구분하였을 때 경도 0, 45, 90도, 위도 +45(북위), 0(적도), -45(남위)의 교차점에 해당한다.

단, 이 때 송수신 트랜스듀서는 공기압기구를 이용하여 가압할 수 없으므로, 수작업으로 가능한 일정하게 밀착시키도록 노력하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 종파와 횡파 및 주파수에 따른 투과성의 비교

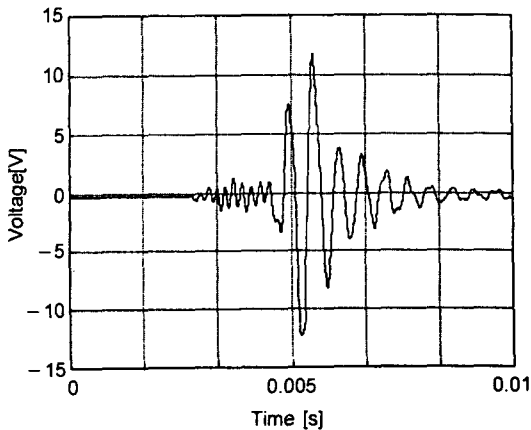
종파의 초음파는 50kHz 이상의 주파수 대역에서 시험한 결과 전혀 투과 신호를 얻을 수 없었다. 단, 샘플을 슬라이스로 만들어 투과할 수 있는 두께를 확인한 결과 5cm 이내인 것으로 나타났다. 이는 종파에 대한 감쇠가 매우 크다는 것을 의미한다. 한편 50kHz 이하의 주파수 대역에서는 실험을 할 수 없었는데, 이는 50kHz 이하의 공진 주파수를 갖는 종파 트랜스듀서의 크기가 직경 50mm 이상으로 커지기 때문에 수박에 접촉시켜 시험하기에는 적합치 않았기 때문이다. 결과적으로 종파는 수박에 적용하기에 곤란한 것으로 판단되었다.

이에 반하여 SH 모드 횡파는 비교적 잘 투과하는 것으로 나타났는데, 단 과실의 종류에 따라 조직의 형태가 다르므로 이에 따른 최적의 주파수 대역이 존재할 것으로 사료되어 여러 가지 주파수에 대한 실험을 수행하였다. 그림 3은 샘플 1에서 얻은 대표적인 파형의 예를 나타낸 것으로 (a)는 2kHz, (b)는 20kHz의 송수신 트랜스듀서를 이용하여 얻은 투과 파형이다. 단, (b)의 앞부분에 나타난 예리한 피크군은 트리거 신호로부터 잠입한 전기적 잡음으로 무의미하다. 두 신호의 크기를 비교해 보면 (a)의 경우가 (b)에 비하여 27dB (약 500배) 정도 큰 것을 알 수 있다. 5kHz, 10kHz의 주파수에 대해서도 실험해 보았으나 수신 진폭은 역시 2kHz의 경우에 비해 매우 작았다. 따라서 수박의 경우에는 2kHz 대역의 주파수가 적절한 것으로 판단되며 이후의 실험은 모두 2kHz의 주파수로 수행되었다.

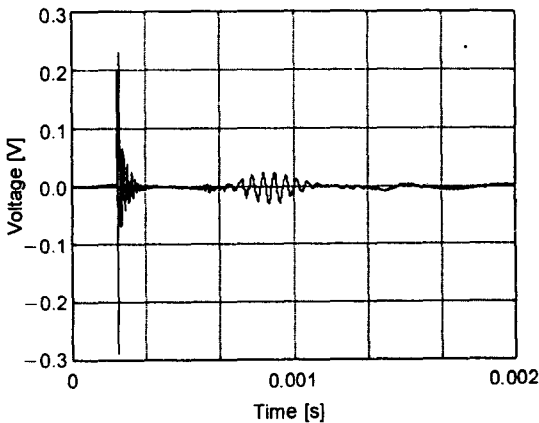
나. 수박에서의 초음파 전파의 특징

이미 앞에서 보인 그림 3(a)는 샘플1 수박에서의 초음파 투과 파형을 나타내었으며, 다음에 보이는 그림 4는 샘플2 수박에서의 투과 파형을 나타내었다. 모두 정상적인 수박에서의 투과 파형인데 서로 차이가 있음을 알 수 있다.

즉, 그림 3 (a)에서는 2kHz의 주파수 성분이 잘 나타나고 있는데 반해 그림 4에서는 여러 가지 주파수 성분이 복합되어 있음을 알 수 있다. 특히 그림 4는 앞과 뒤의 두 가지 피크군으로 이루어져 있음을 볼 수 있는데, 이와 같은 차이는 실험한 샘플 수박의 차이에서 비롯된다고 할 수 있다. 그림 3 (a)의 경우 샘플



[a] Received waveform for 2kHz transmitting signal



[b] Received waveform for 20kHz transmitting signal

Fig. 3 Comparison of transmitted signals in sample 1 at different frequency.

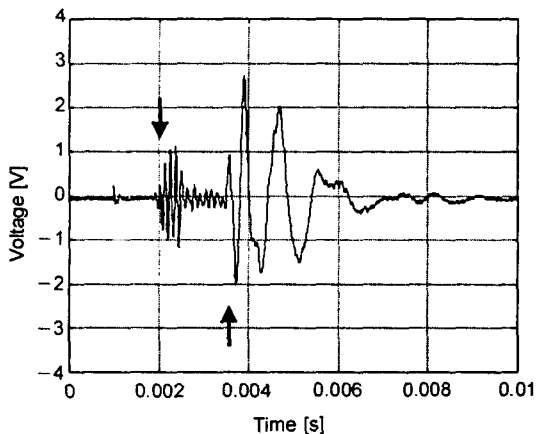


Fig. 4 Transmitted signal in the sample 2.

플은 겹질이 매우 얇은 작은 수박이었기 때문에 외파에 의한 영향이 거의 없었으며 또한 투과 거리가 짧아 파형에 변형이 별로 나타나지 않은 반면, 그림 4의 경우 샘플은 겹질이 두꺼운 수박이기 때문에 우선 송신 펄스 충격에 의한 반발력이 종파의 형태로 유입되어 횡파보다 빠르게 그림의 앞부분(↓표시)에 도착되고 있다. 일반적으로 종파는 횡파에 비해 약 2배 정도 전파속도가 빠르므로 이러한 해석은 타당하다고 할 수 있다. 한편 횡파의 투과파는 그림의 뒷부분(↑표시)에 나타나는데, 전파거리가 길어 산란, 분산 등에 의한 파형의 변질이 심하게 나타나 일부는 2kHz 이하의 주파수 성분으로 왜곡되어 있다. 그러나 이외에도 입사파가 두꺼운 겹질을 투과할 때 모드 변화가 발생되어 일부는 표면파로 전파할 것으로 생각되는데, 그림 4의 투과파에 표면 전달파가 포함되어 나타났는지는 이 파형만으로는 알 수 없다.

그림 5는 이러한 표면전달파의 특성을 알아보기 위한 실험결과로 그림 2의 b에서 j까지의 9개 수신점에서 얻은 파형을 보여준다. 그림의 배열상 가로 방향은 동일 경도를 나타내고 세로 방향은 동일 위도를 나타낸다. 먼저 경도 0도상의 수신점 b, c, d를 비교해 보면 수신점이 송신점에 가까워질수록 수신 파형의 도착 시점이 빨라지고 진폭이 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 그림 4에서와 같은 종파 성분은 나타나지 않는다.

즉, 종파는 직접 투과 성분으로서만 나타남을 확인할 수 있다. 이 경향은 경도 45도, 90도상의 경우에서도 마찬가지이다. 또한 동일 위도상의 점, 즉 북위 45도상의 점 (b, e, h), 적도상의 점 (c, f, i), 남위 45도상의 점 (d, g, j)를 비교해 보면 서로가 유사한 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 진폭은 약간 차이가 있지만 이는 앞에서 밝힌 바와 같이 트랜스듀서를 손으로 파지했기 때문에 트랜스듀서의 접촉력에 약간의 차이가 있기 때문인 것으로 생각된다. 이로부터 송신점으로부터 출발한 표면파는 겹질의 구면을 따라 전방향으로 전파하고 있음을 알 수 있다.

한편 북위 45에서 a점 사이에서는 수신 신호가 거의 포착되지 않았다. 이것은 다음과 같은 이유로 생각할 수 있다. 즉, 구면을 따라 전파한 표면파는 다시 a점으로 모이게 되는데, 이 때 수박의 표면이 정확한 구면이라면 어느 방향으로 전파해 온 표면파도

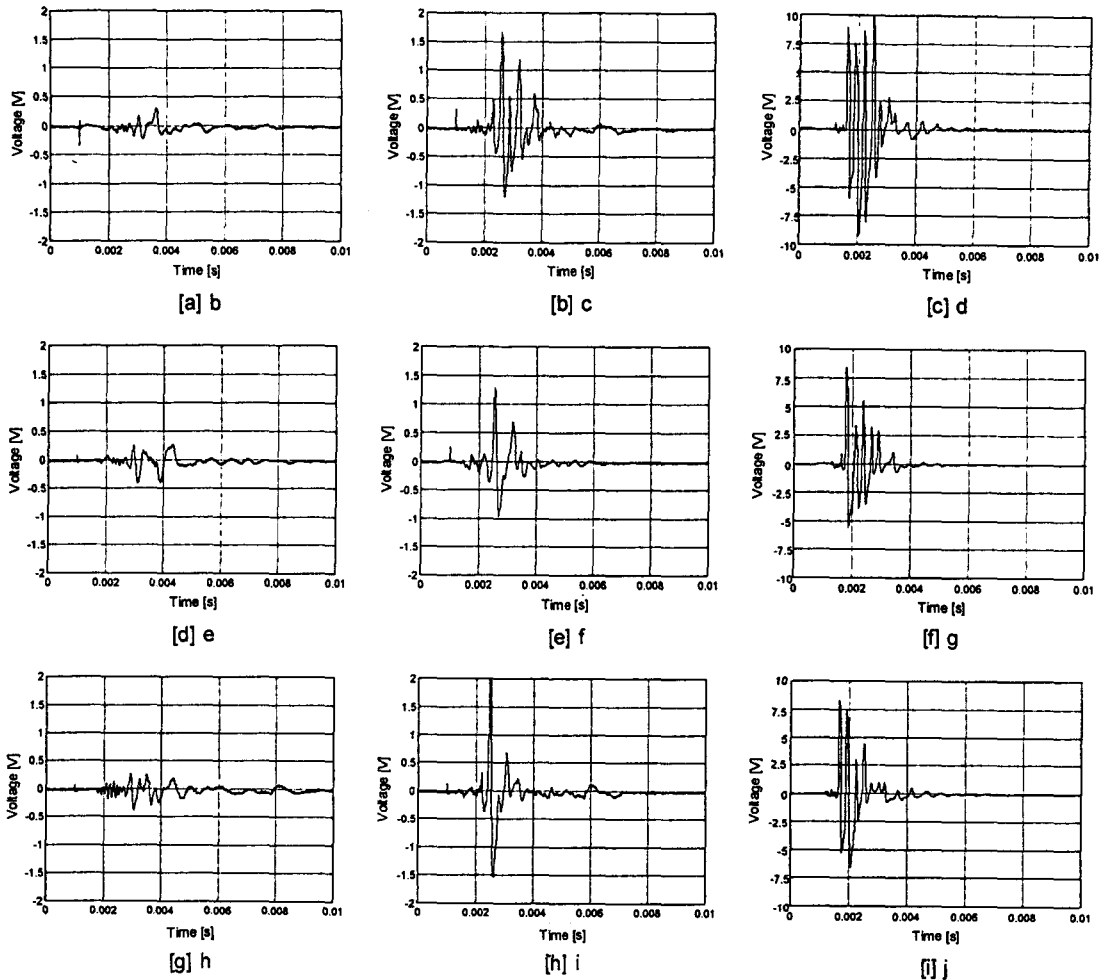


Fig. 5 Waveforms detected at measuring positions on the surface of watermelon.

전파거리가 동일하므로 위상이 일치하여 큰 파형이 나타나겠지만, 실제 수박의 표면은 정확한 구형이 아니므로 표면파는 전파경로에 따라서 약간의 거리차를 갖게 되고 이들이 모이면 결국 불규칙한 위상을 갖는 많은 파동이 상쇄간섭을 일으켜 소멸되는 효과를 가져오게 된다. 따라서 a점 주변에서 수신 신호가 포착되지 않고 a점에서는 직접 투과파만이 수신된다고 할 수 있다. 결과적으로 그림 4의 신호는 직접 투과파만의 신호이며 껍질을 타고오는 표면파는 여기에 거의 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

다. 공동 검출 모의 실험

앞에서 확인한 초음파의 투과성을 이용하면 수박

의 공동 유무 검출이 가능할 것이다. 이를 확인하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 모의 실험을 실시하였다. 즉, 큰 수박 (샘플 2)에 그림 6에 보이는 바와 같은 5mm 직경의 드릴 홀을 뚫어 임의적인 공동을 만든 후 투과 신호의 변화를 살펴 보았다. 그 결과를 그림 7에 나타낸다.

드릴 홀이 있는 경우는 없는 경우 (그림 4와 비교)에 비하여 투과 신호의 크기가 10분의 1 이상 현저히 감소함을 알 수 있으며, 이로부터 초음파를 이용한 수박 내부 공동의 유무 판별 가능성을 예상할 수 있었다.

한편, 공동이 있는 경우에도 표면파는 그림 5에서와 유사하게 존재하는 것으로 나타났으며 공동은 표면파에는 별다른 영향을 미치지 않음을 알 수 있었

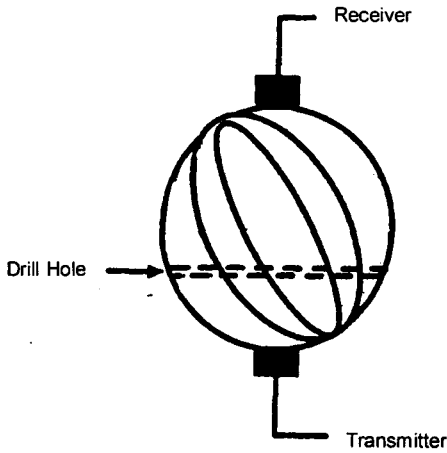


Fig. 6 Sample with drill hole.

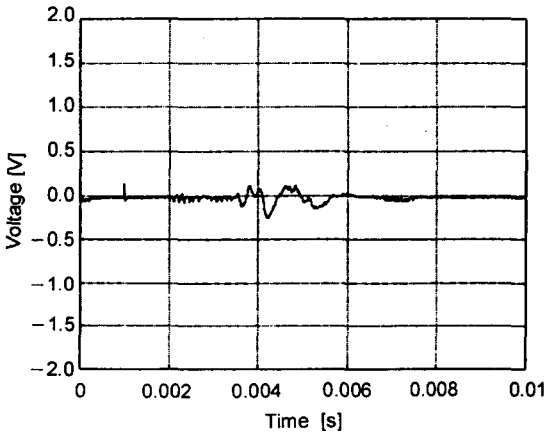


Fig. 7 Transmitted signal in the sample 2 with drill hole.

다. 따라서 공동 유무 검사에는 직접 투과파 성분의 크기 비교가 유효할 것으로 사료되며, 단 이 때 송·수신기는 일직선상에 마주보는 방향으로 배치되어야 할 것으로 판단되었다.

4. 결 론

수박의 내부 품질에 대한 초음파 비파괴 평가의 기초 연구로서 수행한 수박에서의 초음파의 전파 특성에 대해 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 2kHz 대역의 SH 모드 횡파 초음파가 가장 잘

투과하는 것으로 나타났다.

2) 껍질이 두꺼운 수박에서는 표면을 따라 전파하는 표면파가 존재한다. 그러나 송신점과 정반대편의 수신점에서는 표면파 상호간의 불규칙 위상차에 의한 상쇄효과에 의해 표면파의 영향은 나타나지 않았으며 직접 투과파만 검출할 수 있었다.

3) 수박의 내부에 고의적인 공동(空洞)을 만들어 실험한 결과 직접 투과파 신호의 크기가 급격히 감소함을 볼 수 있었으며 이로부터 직접 투과파의 진폭은 공동 유무의 판별에 효과적인 파라미터가 될 수 있음을 알 수 있었다.

이상과 같은 결과는 수박의 내부 공동의 유무 판별에 직접적으로 적용될 수 있으며, 향후 투과파의 스펙트럼 분석, 반사파의 산란특성 등의 분석에 의한 내부품질의 종합판별과 타 청과물에서의 적용을 위한 필수적인 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Kawano, S., H. Watanabe and M. Iwamoto. 1989. Determination of Sugar Contents in Intact Peach by Near Infra-red (NIR) Spectroscopy. 日本園藝學會誌 58(2):604-605.
2. Tsuruoka, H. and M. Takatsuji. 1987. Application of Impedance Tomography to the Measurement of Quality of Fruit. 計測自動制御學會論文集 22(9): 994-999.
3. Chen, P., M. J., McCarthy and R. Kauten. 1989. NMR for Internal Quality Evaluation of Fruits and Vegetables. American Society of Agricultural Engineers 32(5):1747-1753.
4. Park, B. 1996. Ultrasonic Technology for Nondestructive Food Quality Evaluation. Proc. Int. Symp. on Quality Evaluation of Agricultural Products and Foods Using Nondestructive Techniques, pp. 112-134, Nov. 16, Seoul, Korea.
5. Abbott, J. A. and D. R. Massie. 1993. Nondestructive Firmness Measurement of Apples, ASAE paper No. 936025.
6. Armstrong, P. and G. K. Brown. 1991. Apple Firmness Sorting Using a Nondestructive Acoustic Technique. ASAE Paper No. 916044.
7. Hayashi, S., J. Sugiyama, K. Otobe, Y. Kikuchi and S. Usui. 1992. Nondestructive Measurement for Maturity of Muskmelons by Analysis of Acoustic Signals. 日本食品工業學會誌 39(6):465-470.