

## 식물의 환경 변화에 따른 음향방출의 신호특성

### Characteristics of AE Signals from Plant according to the Environmental Variation

남기우

Kiwoo Nam

초 록 본 연구에서는 식물에 나타나는 다양한 환경변화를 고려하여, 식물의 상태를 비파괴적인 방법으로 검토하여 식물생장을 제어하기 위한 기초적인 실험을 실시하였다. 건조토양에서 겉씨식물과 속씨식물은 물관부에서 발생하는 캐비테이션 신호만 검출되었다. 증류수를 공급한 직후는 물관부의 강한 신호와 원형질 연락사 및 세포막의 약한 신호가 동시에 검출되었다. 그러나 강산성수를 공급한 경우는 증류수를 공급한 경우와 상반되는 신호가 검출되었다. 바람의 세기, 잎의 수, 음악, 기온 및 습도는 음향 신호 발생 수에는 영향을 끼쳤으나, 검출된 신호의 주파수 범위는 같았다.

**주요용어:** 환경변화, 속씨식물, 겉씨식물, 음향방출, 신호특성, 캐비테이션

**Abstract** A basic experiment was performed to control the plant growth using acoustic emission technique considering the environmental conditions for plant. At a dry soil condition, the signals due to the cavitation from xylem of angiosperm and gymnosperm were mainly detected. The strong signal from xylem and the weak signal from plasmodesmata and casparian strip were detected at the same time after distilled water was provided. Two signals after providing the acid and distilled water were contrary to each other. The wind, number of leaf, music, temperature and humidity affected the acoustic emission count from plants but the frequency ranges of the detected signals were the same.

**Keywords:** variation of environment, angiosperm, gymnosperm, acoustic emission, signal characteristics, cavitation

#### 1. 서 론

산업사회가 발전함에 따라서 열악한 환경으로 식물의 성장환경도 열악해가고 있다. 특히 산성비가 내리는 빈도가 점점더 많아져감에 따라서, 산성비가 내리는 경우 식물이 어떤 반응을 보이는가 하는 것은 식물의 관리에 있어서 대단히 중요한 요인이라고 판단된다. 토양에 산성이 침입하면 토양입자에 결합

되어 있는 알루미늄을 방출하여 알루미늄의 독성이 증가하는데, 생물에 대한 직접 피해는 생체 유기화합물을 분해하여 생체조직을 파괴하고, 식물 상피조직의 옥스 조직 내 지방산 에스테르류를 산화 또는 가수분해시킨다. 그리고, 식물 잎의 반점과 광합성 저해, 꽃잎의 색이 탈색되는 등 직접적인 피해를 준다. 알루미늄이 용탈되어 식물 뿌리에 영향을 주는데 수목이 뿌리를 통해 흡수하게 되면 잎이나 열매

에 함유되어, 인간에게 해롭게된다. 산성물질이 오존 등과 결합하면 나무들은 추위, 질병, 해충, 가뭄, 곰팡이 등의 스트레스에 더 민감하게 되어, 나무의 성장 저하와 동시에 고사하게 된다.

식물이 성장하는데 있어서 가장 중요한 것은 물이며, Milburn은 아주까리의 물관부에서 발생하는 캐비테이션에 의한 소리를 마이크로폰을 사용하여 검출하였다[1-3]. Tyree 등은 서양측백의 줄기로부터 음향 신호 발생을 조사하였다[4]. Sandford와 grace는 사과나무와 미국편백의 줄기에서 발생하는 캐비테이션을 가지고 음향 신호 특성을 조사하였다[5]. Tyree 등은 야생상태의 옥수수의 물관부에서 발생하는 캐비테이션에 의한 음향 신호를 측정하였다[6]. Sato 등은 산성비와 물 스트레스를 고려하여 2년생 스키묘목에서 음향 신호 특성을 논의하였다[7]. 이외에도 물 스트레스에 의한 식물의 음향 신호 측정에 관한 연구를 활발하게 실시하고 있다[8-13]. 그러나, 이들 연구는 식물에서 발생하는 음향 신호에 대하여 보고하였으나, 식물의 환경변화에 의한 음향 신호의 주파수를 분석한 연구는 전혀 찾아 볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 여러 가지 환경변화가 나타났을 때, 식물에서 발생하는 음향 신호의 주파수 특성을 분석하여 식물생장관리에 기초적인 데이터를 제공하고자 하였다.

2. 실험 재료 및 방법

본 연구에서 사용한 식물은 밤나무(*chestnut*)와 소나무(*pine*)를 대상으로 실내에서 실험을 실시하였다. 실험에 사용한 식물은 종자식물(*spermatophyta*)이다. 밤나무는 속씨식물(*angiosperm*) 중 쌍떡잎 식물(*dicotyledoneae*)이며, 소나무는 겉씨식물(*gymnosperm*)이다. 식물의 생장에 필요한 수분의 수송은 밤나무에서는 물관(*vessel*)을, 소나무에서는 헛물관(*tracheid*)을 주로 이용하고 있다.

본 연구는 식물의 환경변화에서 발생하는 식물의 음향 방출 신호를 실내에서 검출·분석하였다. 실내는 3월 2일부터 5월 30일까지 실시하였으며, 이때의 평균 기온과 습도를 Fig. 1에 나타낸다. 건조도양에 의한 식물의 음향방출을 평가하기 위하여 밤나무와 소나무에 pH 6.7의 물 2L 공급 2주 후에 측정하였다. pH에 의한 영향은 밤나무와 소나무에 pH 6.7의 물 2L 공급 2주 후에 pH 6.7, pH 5.7 및 pH 3.96의 물 공급 직후에 측정하였다. 바람, 잎, 음악, 온도

및 습도에 의한 영향은 밤나무에 pH 6.7의 물 2L를 공급 직후에 측정하였다.

식물에서 발생하는 음향방출 신호를 검출하기 위한 센서는 접촉매질을 사용하여, 토양으로부터 20 mm 위치인 나무의 줄기에 테이프를 압착하였다[14]. 본 연구에 사용한 음향 방출 신호의 검출 개략도를 Fig. 2에 나타낸다. 사용한 센서는 식물의 다양한 신호를 검출하기 위하여 0.1~1 MHz 광대역 센서를 사용하였고, 검출되는 음향 신호는 노이즈를 최대한 제거하기 위해 0.1~1 MHz 아날로그 필터를 사용하였다. 식물에서 발생하는 음향신호는 센서를 거쳐 PAC사의 1200A model(1 channel)을 사용하여 검출하였다. 검출된 신호는 컴퓨터와 연결된 Gage사의 CS215고속 A/D보드를 이용하여 A/D변환 한 후, 시간-주파수 해석법을 사용하여 실시간적으로 관찰하고 분석하였다.

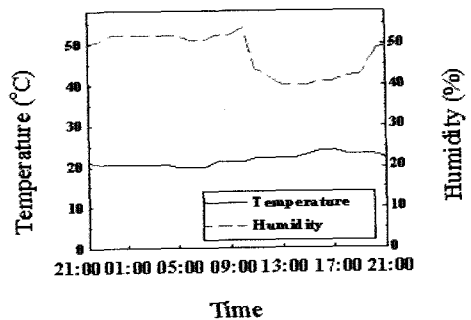


Fig. 1 Distribution of mean temperature and humidity at indoor (2000. 3. 2 ~ 2000. 5. 30)

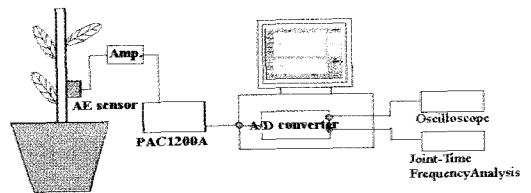


Fig. 2 Schmatic diagram for detection and analysis of acoustic emission

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 건조도양

환경 스트레스는 생체내의 퍼텐셜과 외부 퍼텐셜 사이의 차이로 인하여 생체 내외의 에너지 또는 물

질 이동을 일으키는 추진력에 의해 생물학적 변형을 일으킨다고 한다[15]. 체외의 낮은 수분 퍼텐셜은 생물이 수분을 잃게 하는 원인이 된다고 한다. 따라서 건조토양에 의한 식물의 음향방출을 평가하기 위하여 밤나무와 소나무에 pH 6.7의 물 2L 공급 2주 후 물 스트레스를 받는 식물에서 24시간 동안 발생하는 음향 신호를 검출하여 시간-주파수 해석법으로 분석하여 Fig. 3에 나타내었다. 이 그림에서 강하게 나타나는 주파수(f) 범위는 속씨식물인 밤나무는 0.45~0.55 MHz이고, 겉씨식물인 소나무는 0.2~0.3 MHz이다. 이것은 2주간 공급수를 중단함으로써 뿌리에서 흡수할 수 있는 수분이 없으므로 목질부인 물관부에서 나타나는 캐비테이션 신호라고 판단된다. 이와 같이 주파수 범위가 다른 것은 밤나무는 주로 물관으로, 소나무는 헛물관만으로 이루어져 있기 때문이라고 판단된다.

### 3.2. pH에 의한 영향

일반적으로 대부분의 식물은 pH 5~7의 토양에서 가장 양호한 상태라고 한다. 그러나 pH 4.7이하인 산성 토양에는 가용성 Al의 농도가 높아져서 식물의 생장을 억제할 뿐만 아니라 가용성 인산에 해를 미치고 철의 흡수를 방해하며, 식물대사에 직접적으로 독작용을 한다[16]. 이와 같은 pH의 영향을 관찰하기 위하여 밤나무와 소나무에 pH 6.7의 물 2L 공급 2주 후, pH 6.7, pH 5.7 및 pH 3.96의 물 2L 공급 직후 식물 대사의 독작용 영향으로 나타나는 음향 신호를 24시간 동안 검출하여 주파수 분석을 한 것을 각각 Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6에 나타낸다.

밤나무에 pH 6.7과 pH 5.7의 물을 공급한 Fig. 4에서는 음향 신호의 주파수 범위가 같음을 알 수 있다. 따라서 이 정도의 pH에 의한 영향은 없는 것으로 나타났다.

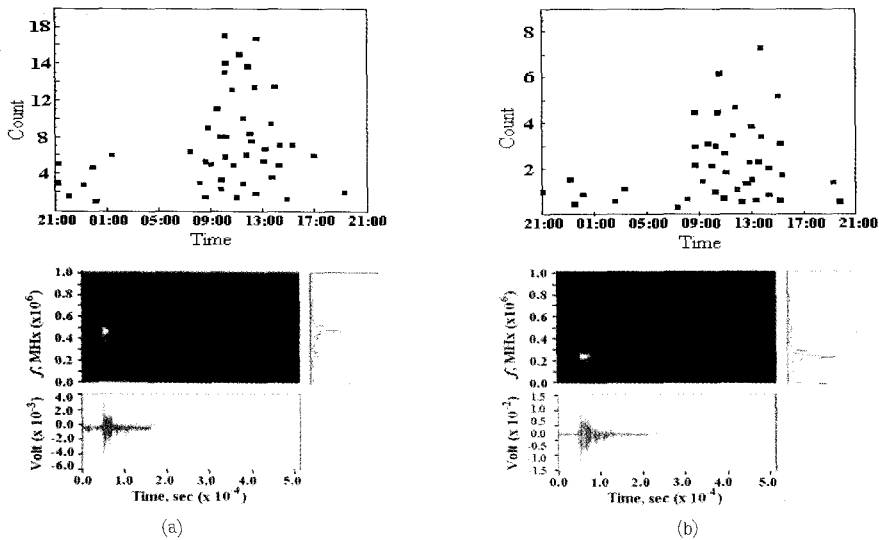


Fig. 3 AE waveforms, frequency analysis, and AE counts from dry soil (a) chestnut, (b) pine

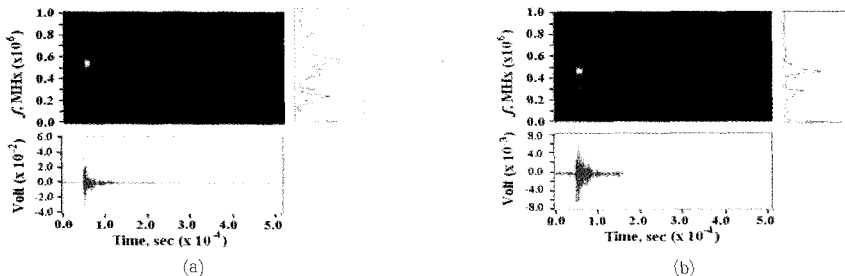


Fig. 4 Acoustic signals by affect of pH in chestnut (a) pH 5.7, (b) pH 6.7

pH 6.7의 중성수를 공급한 밤나무와 소나무에서 음향 신호를 검출하여 시간-주파수 분석한 것을 Fig. 5에 나타낸다. 이 그림에서 밤나무와 소나무의 음향 신호 주파수 범위는 0.2~0.3 MHz와 0.45~0.55 MHz로 동일하게 나타났다. 여기서 강하게 나타나는 주파수 범위인 밤나무의 0.45~0.55 MHz와 소나무의 0.2~0.3 MHz는 Fig. 3에서 설명하였듯이

물관과 헛물관에서 발생하는 캐비테이션 신호이다. 그러나 물을 공급함으로써 나타나는 약한 주파수 범위인 밤나무의 0.2~0.3 MHz와 소나무의 0.4~0.5 MHz는 원형질 연락사와 세포막에서 발생하는 음향 신호라고 판단된다.

pH 3.96의 강산성수를 공급한 결과를 Fig. 6에 나타낸다. 이 그림에서도 pH 6.7의 중성수를 공급

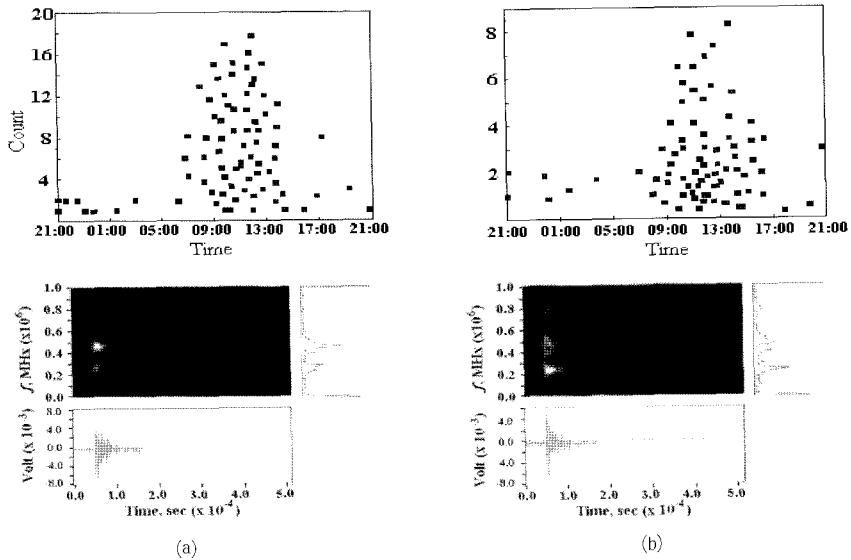


Fig. 5 Acoustic signals by water of pH 6.7  
(a) chestnut, (b) pine

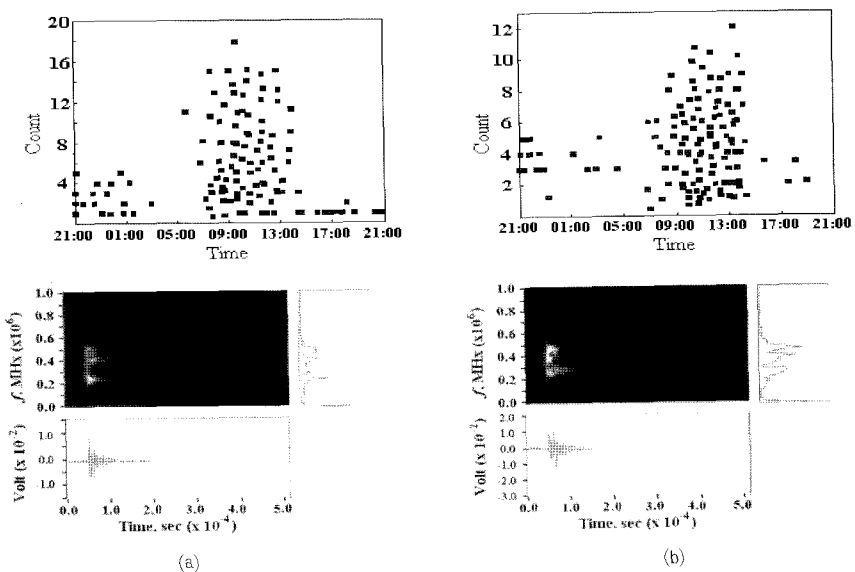


Fig. 6 Acoustic signal by water of pH 3.96  
(a) chestnut, (b) pine

한 Fig. 5와 같은 주파수 범위가 나타났다. 그러나 중성수를 공급한 경우와는 정반대로 강산성수를 공급함으로써 속씨식물인 밤나무의 음향 신호 주파수 범위는 0.2~0.3 MHz에서, 겉씨식물인 소나무는 0.4~0.5 MHz에서 강하게 나타났다. 이것은 원형질 연락사나 세포막이 강산성수에 자극을 받아 수축함으로써 나타나는 캐비테이션 신호가 물관과 헛물관의

캐비테이션 신호보다 크게 나타나는 것이 원인이라고 판단된다.

3.3. 잎의 수 및 음악의 영향

식물의 잎의 수와 음악은 증산작용에 영향을 미치므로, 각각의 영향에 대하여 검토한 결과를 Fig.

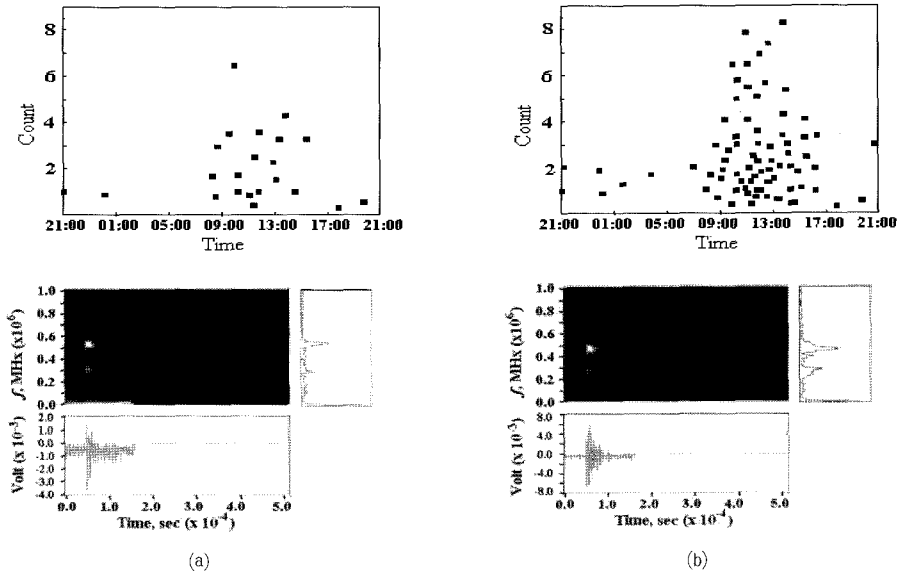


Fig. 7 Acoustic signal by a number of leaf (a) few leaves, (b) many leaves

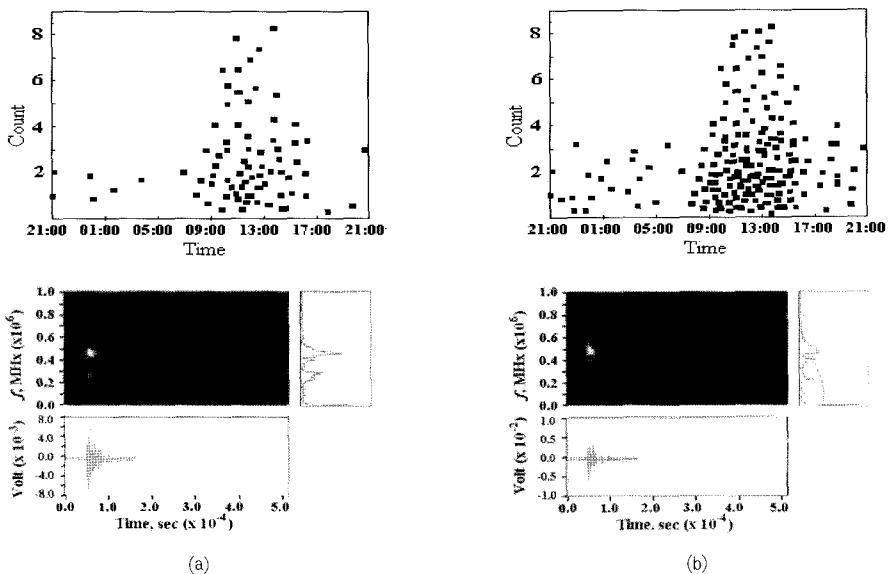


Fig. 8 Acoustic signal by the affect of music (a) without music (b) with music

7과 8에 나타난다. pH 6.7의 물을 공급한 밤나무에서 잎이 적을 때(Fig. 7(a))는 신호의 발생이 적었고, 잎이 많을 때(Fig. 7(b))는 신호가 많이 발생하였다. 그러나 잎의 수에 의한 주파수 범위는 변화가 없었다. 그리고 클래식 음악을 24시간 동안 들려준 경우의 결과(Fig. 8)에서도 음악은 신호의 발생 수에는 영향을 끼쳤으나 주파수 범위는 변화가 없었다.

### 3.4. 바람의 영향

일반적으로 바람이 강하게 불면 증산작용이 왕성하게 일어난다고 한다. 따라서 바람이 강하게 불 경우, 식물이 보이는 반응을 알아보기 위하여 pH 6.7의 물 2 L를 공급한 밤나무에서 얻어진 결과를 Fig. 9에 나타낸다. 이것은 실내에서 맑은 날 24시간 동안 선풍기를 사용하여 강한 바람을 일으키면서 신호를 검출하였다. 이 그림에서도 Fig. 5와 같은 0.2~0.3 MHz와 0.45~0.55 MHz의 주파수 범위가 나타났다. 이와 같이 바람은 증산작용을 왕성하게 하므로 음향 신호 발생 수에는 영향을 끼쳤으나, 신호의 주파수 범위는 변화가 없었다.

### 3.5. 기온과 습도의 영향

음향 신호의 수는 기온이 낮을 때는 적었으며, 기온이 높을 때는 많이 발생하였다. 그리고 습도가

높을 때는 적었으며, 습도가 낮을 때는 많았다. 이러한 경우 음향 신호의 수만 다를 뿐, 식물의 토양 상태에 따라서 검출된 신호 주파수 영역은 동일하였다.

## 4. 결 론

환경변화에 따른 식물의 생리작용에서 발생하는 음향 신호를 검출하여 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 토양이 건조한 상태에서 검출되는 음향 신호들의 주파수 범위는, 속씨식물(밤나무)은 0.45~0.55 MHz로 나타났고, 겉씨식물(소나무)는 0.2~0.3 MHz로 나타났다. 따라서 이 주파수 범위가 물관부에서 물이 통과할 때 나타나는 캐비테이션에 의한 신호라고 판단된다.
- (2) 증류수를 공급한 후에 검출되는 음향 신호들의 주파수 범위는 캐비테이션 신호 이외에 속씨식물(밤나무)은 0.2~0.3 MHz, 겉씨식물(소나무)는 0.4~0.5 MHz가 나타났다. 이것은 원형질 연락사 및 세포막에서 발생하는 캐비테이션 신호라고 판단된다.
- (3) 산성수를 공급에서 검출되는 음향 신호들의 주파수 범위는, 증류수를 공급한 경우와 동일한 주파수 영역에서 나타났다. 그러나, 속씨식물(밤나무)은 저영역인 0.2~0.3 MHz에서, 겉씨식물

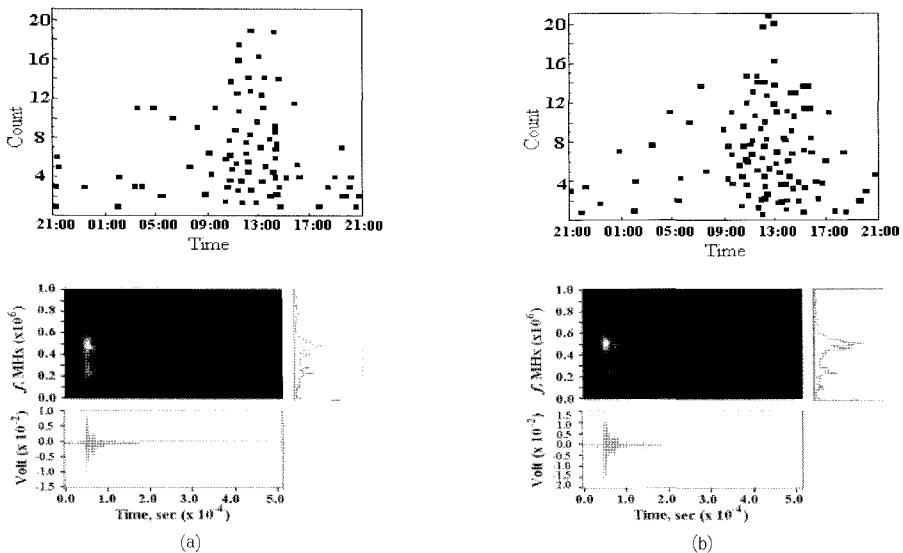


Fig. 9 Acoustic signals by the affect of wind  
(a) without wind, (b) with wind

(소나무)는 고영역인 0.4~0.5 MHz에서 강하게 나타났다. 이것은 산성수에 의하여 세포막의 수축으로 강한 캐비테이션이 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

- (4) 바람의 세기, 잎의 수, 음악, 기온 및 습도는 음향 신호 발생 수에는 영향을 끼쳤으나, 검출된 신호의 주파수 영역은 같았다.
- (5) 식물에서 발생하는 음향 신호를 이용하여 식물의 상태를 미리 파악 할 수 있다고 판단되며, 산림 자원 보호, 식물 재배 관리 및 환경 제어에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.
- 참고문헌**
- [1] J. A. Milburn and R. P. C. Johnson, "The Conduction of Sap. II. Detection of Vibrations Produced by Sap Cavitation in Ricinus Xylem", *Planta*, Vol. 66, pp. 43-52, (1966)
- [2] J. A. Milburn, "Cavitation in Ricinus by Acoustic Detection : Induction in Excised Leaves by Various Factors", *Planta(Berl.)* Vol. 110, pp. 253-265, (1973)
- [3] J. A. Milburn, "Cavitation Studies on Whole Ricinus Plants by Acoustic Detection", *Planta(Berl.)* Vol. 112, pp. 333-342, (1973)
- [4] M. T. Tyree, M. A. Dixon and R. G. Thompson, "Ultrasonic Acoustic Emissions from the Sapwood of Thuja occidentalis Measured inside a Pressure Bomb", *Plant Physiol*, Vol. 74, pp. 1046-1049, (1984)
- [5] A. P. Sandford and J. Grace, "The Measurement and Interpretation of Ultrasound from Woody System", *J. of Experimental Botany*, Vol. 36, pp. 298-311, (1985)
- [6] M. T. Tyree, E. L. Fiscus, S. D. Wullschlegler and M. A. Dixon, "Detection of Xylem Cavitation in Corn under Field Conditions", *Plant Physiol*, Vol. 82, pp. 597-599, (1986)
- [7] K. Sato, A. Uchiyama, T. Izuta, M. Miwa, N. Watanabe, T. Kubo and M. Fushitani, "Effect of Soil Acidity on Acoustic Emission Properties of Sugi Seeding", *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 13, pp. 42-46, (1994)
- [8] 奥島里美 他, "メロンくき部におけるアコーステック・エミッションの計測", *農業施設學會大會講演要旨集*, pp. 21-22, (1993)
- [9] L. Okushima, S. Sase, T. Ohtani, M. Shimojo and Y. Higo, "Plant Measurement by Acoustic Emission Sensor", *Acta Hort. (ISHS)* Vol. 421, pp. 241-248, (1998)
- [10] L. Okushima, T. Ohtani, M. Shimojo, S. Sase and Y. Higo, "Measuring of Root Growth in the Soil by an Acoustic Emission Technique", *Proceeding from the sensors for non-destructive testing international conference and tour holiday inn international drive resort, Orland, Florida, February 18-21*, pp. 263-274, (1997)
- [11] 奥島里美, "植物栽培におけるアコーステック・エミッションの應用", *フレッシュユフ-ドシステム*, 第29卷 第1号. pp. 44-47, (2000)
- [12] 邱國玉 他, "アコーステック・エミッションによるトマトの水ストレスの檢出", *農業工學關係研究成果情報*, pp. 37-38, (1999)
- [13] C. D. Durairaj, L. Okushima, and S. Sase. "A simulated investigation to measure acoustic emission caused by root growth", *Transactions of the ASAE* Vol. 43, No. 6, pp. 1905-1910, (2000)
- [14] 남기우, "물 스트레스를 받는 식물에서 검출된 음향방출의 신호특성", *비파괴검사학회 2002 추계학술대회 논문집*, pp. 162-167, (2002)
- [15] 권영명 외 12명 공저, *식물생리학*, 아카데미서적, p. 97, (1997)
- [16] 심상칠 역, *생명의 물리학 - 생물물리학입문*, 전파과학사, p. 60, (1986)