

물 스트레스를 받는 속씨식물과 겉씨식물에서 검출된 음향방출의 신호특성

Signal Characteristics of Acoustic Emission from Angiosperm and Gymnosperm by the Water Stress

남기우

Kiwoo Nam

초 록 식물의 환경제어 향상을 위하여, 비파괴적인 방법을 사용하여 식물의 신호 특성이 연구되고 있다. 본 연구에서는 속씨식물과 겉씨식물에서 검출되는 음향방출 신호에 미치는 물 스트레스의 영향에 대하여 검토하였다. 낮시간의 음향방출 신호는 밤시간 보다 훨씬 많았으며, 낮시간의 신호는 식물의 물 스트레스에 의해서 발생한 것으로 판단된다. 속씨식물과 겉씨식물은 음향 신호의 강한 주파수 대역이 다르게 나타났으며, 실외에서 검출한 식물의 음향 신호 주파수는 동일한 식물을 사용하여 실내에서 검출한 신호의 주파수 범위와 일치하였다.

주요용어: 물 스트레스, 속씨식물, 겉씨식물, 음향방출, 신호특성

Abstract To improve environmental control in various plants, signal characteristics of plants have been studied by a nondestructive technique. In this paper, the acoustic emission (AE) from plants was analyzed for water stress dependency. AE signals were taken from gymnosperm and angiosperm. AE sensor detected AE signals from the plant stem underneath the plant surface below the sensor. AE hit-event counts in daytime were more than those in night time, and it was found that the daily hit counts pattern was strongly affected by the water stress in the plant. Frequency bands of AE signals from the angiosperm was different from those from the gymnosperm. Frequency bands of AE in outdoor condition were in accord with those in indoor having similar conditions

Keywords: water stress, angiosperm, gymnosperm, acoustic emission, signal characteristics

1. 서 론

전세계적으로 산업의 발달은 우리의 생활을 편리하고 윤택하게 만들었지만, 식물의 자연 생태계에 매우 나쁜 영향을 미치고 있다. 이러한 식물의 상태변화 현상을 단순하게 생물학적 원리를 기초하여 생체 안에 있어서 그것을 구성하는 원자 또는 분자

의 특성만으로 설명한다는 것은 고전적인 것이며, 정확한 생명현상을 설명하는 데는 한계가 있다고 생각한다. 최근에는 생명현상을 물리학의 입장에서 이해하려는 생물물리학이 주류를 이루고 있다. 그러나 이러한 생물물리학에 대한 연구는 주로 생체 내의 고분자를 선택하여 그 구조에 대한 물리적 특징 조사, 근육의 운동이나 신경생리, 시각과 관련

된 연구, 광합성에 관한 연구, 진화의 수리통계적 가능성에 대한 연구, 생리학, 전기의료학 및 방사선의학 등으로 주로 동물에 관한 연구로서, 식물에 대한 물리적 현상에 관한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다.

식물이 성장하는데 있어서 가장 중요한 것은 물이며, 물을 흡수할 때 물관부에서 발생하는 케비테이션이 음향방출 신호의 원인이라는 것은 많은 연구자들에 의하여 연구되었다. Milburn은 아주까리의 물관부에서 발생하는 케비테이션에 의한 소리를 마이크로폰을 사용하여 검출하였다[1-3]. Tyree 등은 서양측백(*Thuja occidentalis*)의 줄기로부터 음향 신호 발생을 조사하였다[4]. Sandford와 Grace는 사과나무(*Malus sylvestris*)와 미국편백(*Chamaecyparis lawsoniana*)의 줄기에서 발생하는 케비테이션을 가지고 음향 신호 특성을 조사하였다[5]. Tyree 등은 야생상태의 옥수수(*Zea mays*)의 물관부에서 발생하는 케비테이션에 의한 음향 신호를 측정하였다[6]. Sato 등은 산성비와 물 스트레스를 고려하여 2년생 스키묘목에서 음향 신호 특성을 논의하였다[7]. 이외에도 물 스트레스에 의한 식물의 음향방출 신호 측정에 관한 연구를 활발하게 실시하고 있다[8-12]. 이와같이 많은 연구자들은 식물의 목질부에서 발생하는 음향방출 신호에 대하여 보고하였다. 저자는 겉씨식물과 속씨식물이 산성비 등 환경 변화에 따른 음향방출 신호의 주파수를 분석하였으나[13], 물 스트레스에 의한 음향방출 신호의 주파수를 분석한 연구는 전혀 찾아 볼 수 없다.

따라서, 본 연구에서는 물 스트레스에 의하여 식물에서 발생하는 음향방출 신호를 시간-주파수 해석법으로 주파수를 분석하여, 물 스트레스에 의한 식물의 생체 정보 특성을 이용하여 식물의 생장관리에 도움이 되는 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 식물의 음향방출 신호 발생 기구(Mechanism)

수중생활에서 육상생활로 진화해 온 식물에게는 물은 곧 생명이다. 식물은 토양으로부터 수분 흡수를 위해 발달된 뿌리구조, 수분을 수송하는 헛물관과 물관의 발달, 증발을 막을 수 있는 잎표면의 큐티클층 및 수분 스트레스에 대한 기공의 민감한 반응 등은 수분결핍에 대한 적응의 결과로 보여진다.

식물이 뿌리에서 흡수한 수분의 운반에 직접 관여하는 것은 수직으로 배열된 물관(*vessel*)과 헛물관

(*tracheid*)이다. 물관과 헛물관은 세포가 죽은 상태로 기능을 발휘하는데, 이들은 연속적으로 상호연결적으로 구성되어 있다. 일반적으로 겉씨식물(*gymnosperm*)은 헛물관만으로 구성되어 있으며, 대부분의 속씨식물(*angiosperms*)은 헛물관과 물관을 모두 가지고 있다. 헛물관의 직경은 10-25 μm 이며 물관은 40-80 μm 에서 500 μm 되는 것도 있다. 관을 흐르는 액체의 유속은 액체와 모세관 벽 사이의 부착력으로 인한 마찰에 의하여 감소되는데 이때 벽과 접촉하고 있는 액체 분자는 정지되어 있고 관의 중심부에 있는 분자는 가장 빨리 이동한다.

Hagen과 Poiseuille에 의하면 유속은 관 직경의 4제곱에 비례하므로 굵은 물관이 가는 헛물관보다 유속이 훨씬 빠르다. 증산이 시작되는 아침이 되면 증산작용 때문에 높은 곳에서부터 유속이 빨라지기 시작하는데 한 낮에 최고 유속은 가는 물관에서는 1-6 m/h, 굵은 물관에서는 16-45 m/h, 헛물관을 가진 침엽수에서 속도가 가장 느린 것으로 조사되었다. 그러나 물관의 유속이 빠르게 되면 Briggs의 실험결과에서처럼 헛물관보다 케비테이션(공동 현상)이 생길 가능성이 훨씬 많다. 그것은 큰 관은 표면적이 넓고 부피가 크기 때문에 공동이 생길 부위가 많고 유속도 빠르기 때문이다. 이와 같이 식물에서는 물관, 헛물관, 뿌리, 세포막 등에서 수분의 흐름에 의하여 케비테이션이 발생한다.

Fig. 1은 식물체의 뿌리와 물관부에서 물의 흡수 및 이동에 의하여 발생하는 음향방출 신호의 검출 과정을 나타낸 모식도로서, 식물체 내에서는 증산 작용 또는 물 스트레스(water stress)에 의한 케비테이션(*cavitation*)으로 발생된 신호를 센서로 검출할 수 있다.

3. 실험 재료 및 방법

3.1. 재료

실험에 사용한 식물의 종류와 실험 조건을 Table 1에 나타낸다. 실내는 5종류, 실외는 6종류를 실시하였다. 실내는 밤나무(*chestnut*), 소나무(*pine*), 관음죽(*rhapsis*), 단풍나무(*maple*) 및 향나무(*juniperus chinensis*), 실외는 밤나무, 소나무, 대나무(*bamboo*), 단풍나무, 향나무 및 은행나무(*ginkgo biloba*)에서 실시하였다. 이와 같이 실험에 사용한 식물의 종류를 식물 분류 기준에 의하여 분류한 결과를 Table 2에

나타낸다. 종자식물(*spermatophyta*)은 속씨식물(*angiosperms*)과 겉씨식물(*gymnosperm*)로 나누고, 속씨식물은 쌍떡잎식물(*dicotyledoneae*)과 외떡잎식물(*monocotyledoneae*)로 나눈다. 그리고 분류한 식물들은 생존에 필요한 물의 수송을 속씨식물은 물관을, 겉씨식물은 헛물관을 주로 이용하고 있다.

3.2. 실험방법

본 연구는 실내에서 물 스트레스에 의하여 발생하는 식물의 음향 방출 신호를 검출하여 분석하였으며, 실외의 음향방출 신호와 비교하였다. 실내는 3월 2일부터 5월 30일까지 실시하였으며, 물 스트레스에 의한 식물의 음향방출 특성을 평가하기 위하여 물을 공급한 후 고사할때까지 측정하였다. 또 비교하기 위하여 고사직전에 물을 공급함으로써 회생시의 음향방출신호를 검출하였다. 이때의 평균 기온과 습도를 Fig. 2에 나타낸다. 실외는 4월 30일 오전 11시부터 오후 3시까지 실시하였으며, 이때의 최고 기온은 12.9 °C, 최대 습도는 84 %였다. 본 연구에 사용한 음향 방출 신호의 검출 개략도를 Fig. 3에 나타내며, 식물에 부착한 센서는 접촉매질을 사용하여 각 나무의 줄기 위 20 mm위치에 테이프로 압착하였다. 사용한 센서는 식물의 다양한 신호를 검출하기 위하여 100~1000 kHz 광대역 센서(PAC社, WD)를 사용하였고, 검출되는 음향 신호는 노이즈를 최대한 제거하기 위해 100~1000 kHz 아날로그 필터를 사용하였다. 식물체에서 발생하는 음향방출 신호는 센서를 거쳐 음향방출 측정장치(PAC社의 model 1200A)를 사용하여 검출하였다.

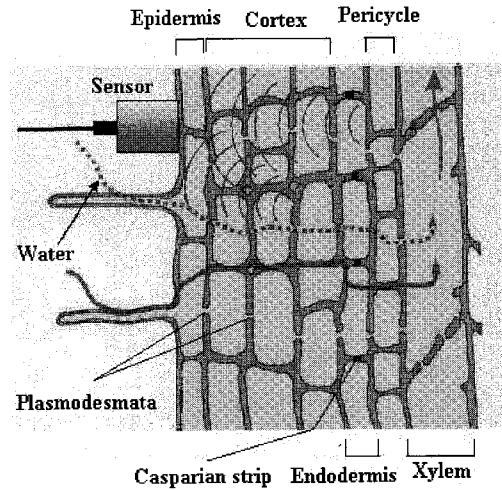


Fig. 1 Schematic diagram of elastic wave detection

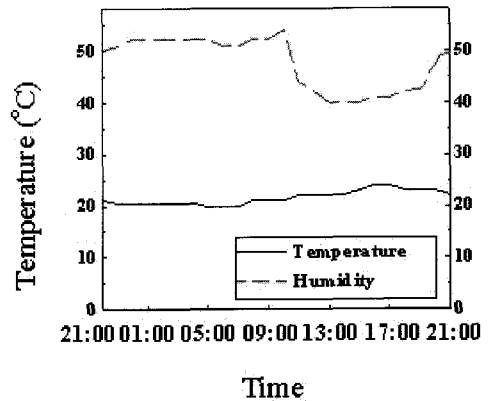


Fig. 2 Distribution of mean indoor temperature and humidity(2000. 3. 2 ~ 2000. 5. 30)

Table 1 Indoor and outdoor test condition

Condition	Plants for signal detection	Test period	Temp. and Humidity
Indoor	Chestnut, Pine, Rhapsis, Maple, Juniperus chinensis	March 2 ~ May 30	See Fig. 2
Outdoor	Chestnut, Pine, Bamboo, Maple, Juniperus chinensis, Ginkgo biloba	April 30 11:00 ~ 15:00	12.9 °C, 84 %

Table 2 Classification of tested plant

Spermatophyta	Angiosperm	Dicotyledoneae : Chestnut, Maple	water path : vessel
		Monocotyledoneae : Rhapsis, Bamboo	
	Gymnosperm	Pine, Juniperus chinensis, Ginkgo biloba	water path : tracheid

검출된 신호는 컴퓨터와 연결된 Gage(社)의 CS215 고속 A/D변환기를 통하여 디지털화 시킨 후, 시간-주파수 해석법을 사용하여 실 시간적으로 관찰하고 분석하였다. 음향방출 신호검출을 위한 문턱값은 40 dB로 하였다.

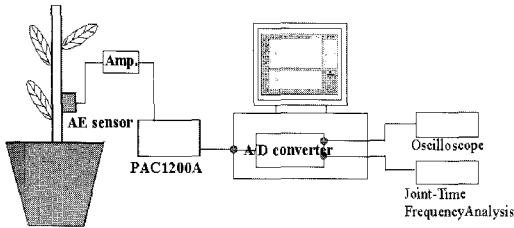


Fig. 3 Schematic diagram for detection and analysis of acoustic emission

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 시간에 따른 일사량과 음향방출 신호 발생 수와의 관계

Fig. 4는 pH 6.7의 물을 공급한 관음죽(*rhapis*; 속씨식물)에서 24시간 검출된 음향방출 신호 발생수를 나타낸 것이다. 음향방출 신호는 전시간에 걸쳐서 발생하며 일출 후 오전 9시경부터 오후 2시까지

일사량이 최고값을 나타낼과 동시에 음향방출 신호가 집중적으로 발생하는 현상을 보였다[9]. 이것은 잎의 증산작용이 왕성하여 물관부, 원형질 연락사 및 세포막을 통과하는 수분에 의하여 공동현상(캐비테이션; cavitation)이 발생한 것이 원인이라고 판단된다.

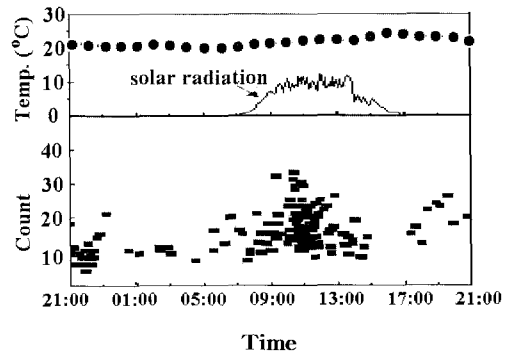


Fig. 4 Indoor temperature and AE count as a function of time

4.2. 실내에서 얻어진 음향방출 신호

4.2.1. pH 6.7의 물 공급에 따른 음향방출 신호

일반적으로 대부분의 식물은 pH 5~7의 토양에서 가장 양호한 상태라고 한다. 따라서 밤나무(*chestnut*;

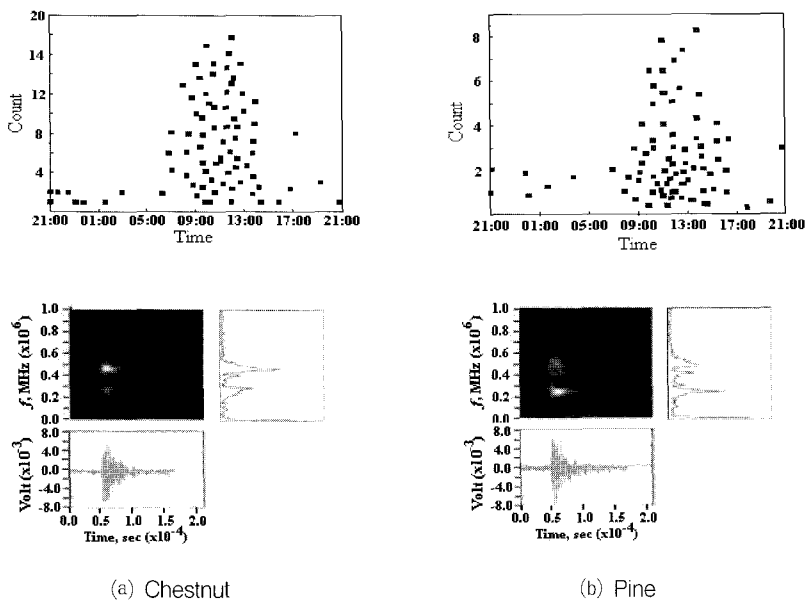


Fig. 5 Acoustic signal detected during water supply with pH 6.7

속씨식물)와 소나무(pine; 겉씨식물)에 pH 6.7의 물을 공급한 직후, 식물에서 발생하는 음향방출 신호를 시간-주파수 해석법을 이용하여 분석한 것을 Fig. 5에 나타낸다. 이 그림에서 밤나무와 소나무의 음향방출 신호 주파수 범위는 200~300 kHz와 450~550 kHz영역으로 동일하게 나타났다. 여기서 밤나무의 450~550 kHz영역과 소나무의 200~300 kHz영역은 위에서 설명하였듯이 물관과 헛물관에서 발생하는 캐비테이션 신호이다. 그러나 미약하게 나타나는 밤나무의 200~300 kHz영역과 소나무의 400~500 kHz영역은 원형질 연락사와 세포막에서 발생하는 음향방출 신호라고 판단된다. 음향방출 사상수 또한 잎의 증산작용이 활발한 08시경부터 14시경까지 집중적으로 발생함을 알 수 있다.

4.2.2. 물 스트레스에 따른 식물의 음향방출 신호

Fig. 6은 식물에서 발생하는 음향방출 신호를 Table 2의 분류에 따라서 속씨식물과 겉씨식물, 즉 물관과 헛물관의 시간 및 주파수 특성을 나타내었다. 속씨식물은 밤나무, 겉씨식물은 소나무를 대표적으로 나타내었다. 이것은 pH 6.7의 물을 공급한 후 시간이 경과함에 따라 토양이 건조하게 되면서 물 스트레스에 의한 식물의 음향방출 신호를 나타낸 것이다.

이 그림에서 속씨식물과 겉씨식물에서 발생한 음향방출 신호는 시간이 경과함에 따라서 미약하게 되는 것을 알 수 있다. 이것은 뿌리에서 흡수되는 물이 줄어 들게 됨에 따라 물관부, 원형질 연락사

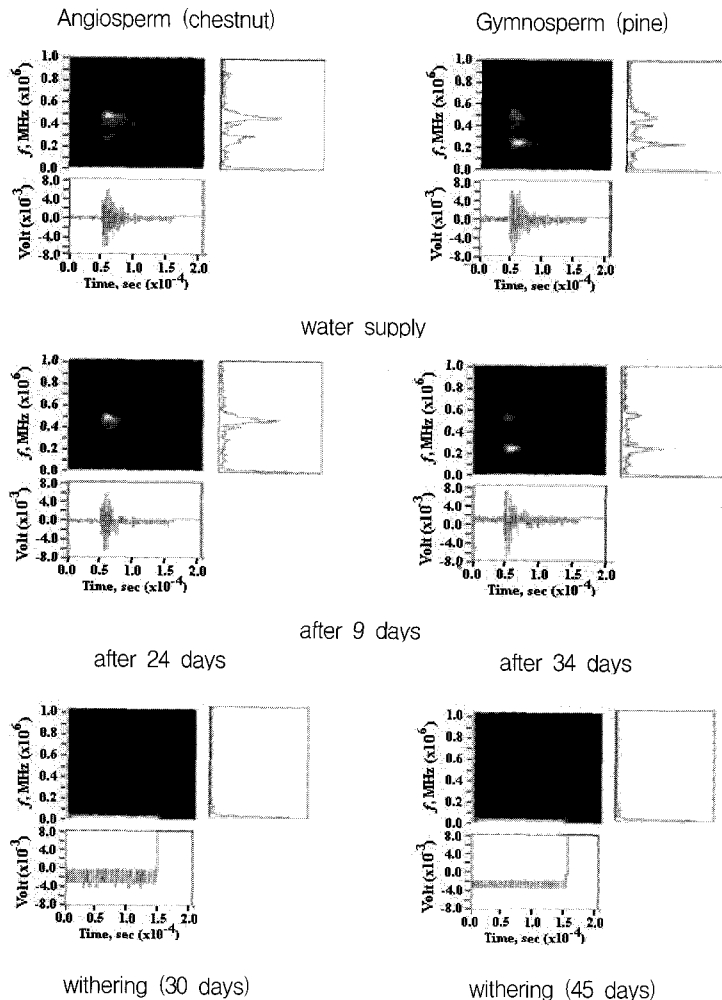


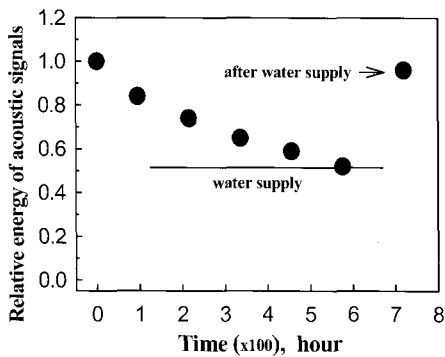
Fig. 6 Change of acoustic emission signals of plants due to water stress as a function of elapsing days

및 세포막을 통과하는 물에 의한 케비테이션이 줄어드는 것이 원인이라고 판단된다. 그리고, 이들 2종류 식물의 음향방출 신호에서 주파수 대역이 강하게 나타나는 것은 물관 또는 헛물관에서 발생하는 케비테이션 신호이고, 약하게 나타나는 것은 원형질 연락사 또는 세포막에서 발생하는 케비테이션 신호라고 판단된다. 이러한 것은 14일째 이후에서 얻어진 신호를 보면 약한 주파수 대역은 사라지고 강한 주파수 대역만 존재하는 사실에서 알 수 있다. 14일째의 그림에서 활엽수인 밤나무는 주파수 범위가 450~550 kHz이고, 침엽수인 소나무는 200~300 kHz영역이다. 이것은 2주간 공급수를 중단함으로써 뿌리에서 흡수할 수 있는 수분이 없으므로 목질부인 물관부에서 나타나는 케비테이션 신호라고 판단된다. 이와 같이 주파수 범위가 다른 것은 밤나무는 주로 물관으로, 소나무는 헛물관으로 물의 수송이 이루어지기 때문이라고 판단된다. 당연한 것이지만 죽은 식물에서는 아무런 신호가 검출되지 않았다.

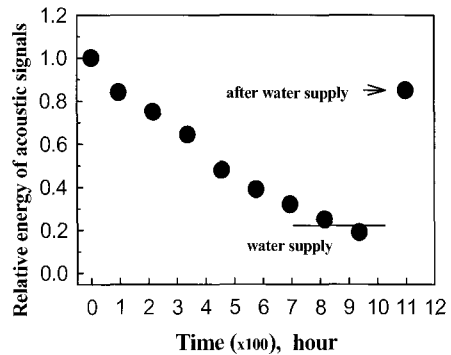
pH 6.7의 물을 공급한 후 시간의 경과에 따라 얻

어진 음향방출 신호를 분석한 Fig. 6의 주파수 분석창에서 얻어진 주파수의 에너지 값과 시간의 상관관계를 Fig. 7에 나타낸다. 이 그림에서 종축은 상대적 음향방출 신호 에너지(물을 공급한 후 시간의 경과에 따라서 얻어진 음향방출 신호의 주파수 에너지/물을 공급한 직후 얻어진 음향방출 신호의 주파수 에너지)를 나타내고, 횡축은 pH 6.7의 물을 공급한 후 경과한 시간을 나타낸다. 이들 그림에서 밤나무와 소나무의 주파수의 에너지 값은 시간의 경과에 따라서 음의 지수함수적으로 감소함을 알 수 있었다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 밤나무의 경우는 상대적 음향방출 신호 에너지 값이 약 0.5근처(24일째)에서, 소나무의 경우는 약 0.2근처(34일째)에서 물을 공급한 결과 죽어가던 나무가 회생하였다.

이와 같이 회생하는 나무에서 얻어진 음향 신호를 Fig. 8(a), (b)에 나타낸다. 이것은 pH 6.7의 물을 공급한 직후에 얻어진 음향방출 신호와 유사하였다. 이 그림에서 얻어진 주파수의 에너지 값을 Fig. 7에 나타내었다.

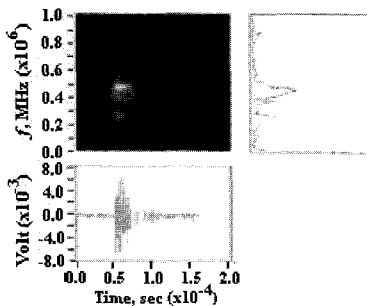


(a) Chestnut

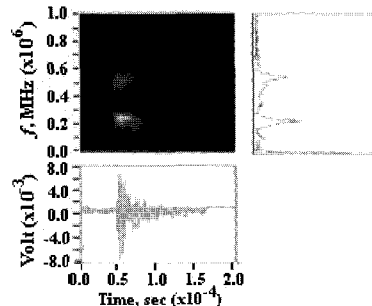


(b) Pine

Fig. 7 Variation of relative energy of acoustic emission signals as a function of time



(a) Chestnut



(b) Pine

Fig. 8 Acoustic emission signals after water supply to plants being withered away

4.2.3. 실외에서 얻어진 음향방출 신호

상기와 같은 결과를 실외의 식물에서 얻어진 음향방출 신호와 비교하기 위하여 밤나무와 소나무를 이용하여 음향방출 신호를 검출하였다. Fig. 9(a)는 밤나무에서 얻어진 음향방출 신호로서 200~300 kHz와 450~550 kHz, Fig. 9(b)는 소나무의 경우로 200~300 kHz와 400~500 kHz의 주파수 범위로 실내에서 얻어진 것과 동일하였다. 이와같이 실내·외의 식물에서 얻어진 결과가 유사하므로, 식물 음향방출 신호를 검출함으로써 식물의 상태 변화를 예측할 수 있으리라고 판단된다.

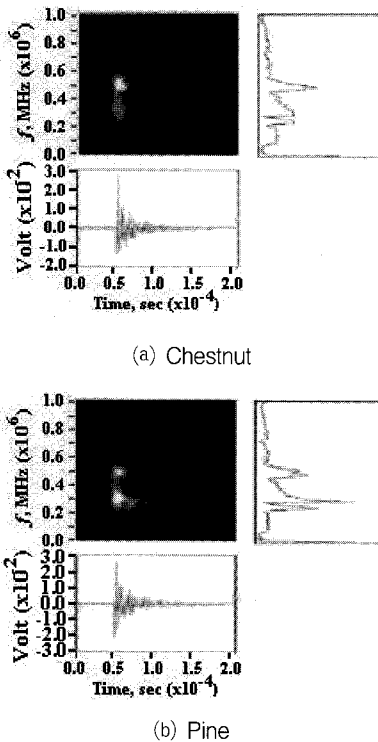


Fig. 9 Acoustic emission signals from plants under outdoor condition

5. 결론

식물의 상태 변화에 따라 발생하는 음향방출 신호를 검출하여 시간-주파수 해석법을 통하여 주파수를 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 일출 후 오전 10시경부터 오후 2시까지 일사량이 최고값을 나타낼때 음향방출 신호가 집중적으로 많이 발생하였다.

- 2) 속씨식물과 겉씨식물은 음향방출 신호의 강한 주파수 대역이 다르게 나타났다.
- 3) 실외에서 검출한 식물의 음향방출 신호 주파수는 조건이 비슷한 실내에서 검출한 신호의 주파수 범위와 일치하였다.
- 4) 식물에서 발생하는 음향방출 신호를 이용한 본 시스템을 산림 관련 부서에서 활용하면 식물의 상태를 미리 파악 할 수 있으며, 산림 자원 보호, 식물 재배 관리 및 환경 제어에 큰 도움이 될 것으로 생각한다. 그리고, 식물의 생리학적 연구에 음향방출법을 적용한다면, 식물의 생리현상을 물리학적으로 해석하는데 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

참고문헌

- [1] Milburn, J. A. and Johnson, R. P. C., "The Conduction of Sap. II. Detection of Vibrations Produced by Sap Cavitation in Ricinus Xylem," *Planta*, Vol. 66, pp. 43~52, (1966)
- [2] Milburn, J. A., "Cavitation in *Ricinus* by Acoustic Detection : Induction in Excised Leaves by Various Factors," *Planta(Berl.)* Vol. 110, pp. 253~265, (1973)
- [3] Milburn, J. A., "Cavitation Studies on Whole *Ricinus* Plants by Acoustic Detection," *Planta(Berl.)* Vol. 112, pp. 333~342, (1973)
- [4] Tyree, M. T., Dixon, M. A. and Thompson, R. G., "Ultrasonic Acoustic Emissions from the Sapwood of *Thuja occidentalis* Measured inside a Pressure Bomb," *Plant Physiol*, Vol. 74, pp. 1046~1049, (1984)
- [5] Sandford, A. P. and Grace, J., "The Measurement and Interpretation of Ultrasound from Woody System," *J. of Experimental Botany*, Vol. 36, pp. 298~311, (1985)
- [6] Tyree, M. T., Fiscus, E. L., Wullschlegel, S. D. and Dixon, M. A., "Detection of Xylem Cavitation in Corn under Field Conditions," *Plant Physiol*, Vol. 82, pp. 597~599, (1986)
- [7] Sato, K., Uchiyama, A., Izuta, T., Miwa, M., Watanabe, N., Kubo, T. and Fushitani, M., "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, "메론くき部 におけるアコステック・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] Okushima, L., Sase, S., Ohtani, T., Shimojo, M. and Higo, Y., "Plant Measurement by Acoustic Emission Sensor," *Acta Hort. (ISHS)* Vol. 421, pp. 241~248, (1998)
- [10] Okushima, L., Ohtani, T., Shimojo, M., Sase, S. and Higo, Y., "Measuring of Root Growth in the Soil by an Acoustic Emission Technique," *Proceeding from the sensors for nondestructive 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ステック・エミッションの應用," *フレッツシユフ-ドシステム*, 第29卷 第1号, pp. 44~47, (2000)
- [12] 邱國玉 他, "アコステック・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] 남기우, "식물의 환경 변화에 따른 음향방출의 신호특성," *비파괴검사학회지*, 제23권 제3호, pp. 198~204, (2003)