

## X-ray 영상기법을 이용한 비소 흡수가 고사리 내부 수액 거동에 미치는 영향 연구

이진평\* · 이상준†

### X-ray Micro-imaging of Arsenic Absorption of Sap Flow in Xylem Vessels of Pteris

Jin-Pyoung Lee and Sang-Joon Lee

**Abstract.** The global environment is deteriorating at an alarming rate, despite of enhanced international environmental regulation. Many studies have been performed to reduce toxic pollutants. Recently, plant-based phytoremediation technology for moving toxic contaminants from soil and water has been receiving large attention. Arsenic-contaminated soil is one of the major pollutant sources for drinking water. Pteris cretica has been known as a hyper-accumulator of arsenic from soils. In this study, we investigated the effect of arsenic absorption on sap flow inside xylem vessels of Pteris. The synchrotron X-ray micro-imaging technique was employed to monitor the refilling process of water containing arsenic inside the xylem vessels of Pteris's leaves and stems non-invasively. The captured phase-contrast X-ray images show both anatomy of internal structure and transport of water inside Pteris. The exposure of Pteris to arsenic solution was found to increase largely the water raise speed in xylem vessels. The present results would provide important information needed for understanding the mechanisms of accumulation and transportation of toxic materials in plants.

**Key Words:** Phytoremediation(식물정화기술), X-ray micro-imaging technique (X-ray 미세영상기법), Pteris cretica(고사리)

## 1. 서 론

날로 심각해지고 있는 환경오염은 야생동물의 생존을 위협할 뿐만 아니라, 토양과 수질, 대기를 오염시켜 우리의 주변 생활환경을 날로 악화시키고 있다. 이처럼 생활환경이 점점 나빠져감에 따라, 환경 오염물질들의 처리와 정화에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 환경정화기술에는 크게 물리적, 화학적 및 생물학적 방법으로 나눌 수 있다<sup>1,2)</sup>. 생물학적 환경 정화기법 중 하나인 식물정화기술(phytoremediation)은 식물을 이용하여 오염된 환경을 정화하고 복원하는 기술로 오염지역의 처리에 대한 환경친화성이 큰 녹색기술(green

technology)로 새롭게 부각되고 있다<sup>3,4)</sup>. 식물정화기술은 일반적인 처리기술과 비교하여 비용절감효과와 극대화 및 일반인들에게 거부감이 없는 심미적 효과가 높아 최근 많은 관심을 받고 있다<sup>2)</sup>.

토양이나 수질 속에 들어있는 중금속에 대한 식물학적 정화기법 중에서 중금속 고축적 식물(hyper-accumulator)을 이용하여 뿌리 조직에서 중금속을 흡수하고 지상부로 수송하여 축적시킨 후 수확하여 정화시키는 식물추출방법(phytoextraction)이 대표적이다. 최근 이러한 식물들 중에서 비소에 대한 고축적 식물인 고사리(Pteris cretica)에 대한 연구가 관심을 끌고 있다<sup>5,6)</sup>.

비소(As)는 지구상에 20번째로 많은 원소이며, 토양과 수질을 오염시키는 주된 원인 중 하나이다. 비소는 인체에 흡수될 경우 그 자체의 독성만으로 죽음에 이를 수 있으며, 비록 작은 양이라도 암 발병의 원인이 되기도 한다. 제초제와 같은 농약에 많이 쓰이는 비소는

†포항공과대학교 교수  
E-mail: sjlee@postech.ac.kr

\*포항공과대학교 환경공학부

농경지의 토양과 수질을 오염시켜 그 농지에서 자란 식물에 의해 사람들이 직접적으로 피해를 입을 수 있다<sup>7)</sup>. 고사리 과의 식물 중 일부는 비소에 대한 고축적 식물종으로 토양 속의 비소를 흡수하여 잎과 줄기 등의 조직 내부에 축적시켜 토양의 비소 농도를 떨어뜨리며, 비소로 오염된 토양에서 40% 이상 더 잘 자라는 것으로 알려져 있다. 현재 여러 종류의 Pteris 종들이 이러한 고축적 식물종으로 알려져 있으며 이와 관련된 연구들이 진행 중에 있다<sup>5,6)</sup>.

이러한 식물의 환경정화 능력에 대한 연구에 있어서 가장 힘든 부분 중 하나가 불투명한 식물의 내부 물질의 이동을 기존의 방법으로는 가시화 할 수 없다는 것이다. 이러한 문제를 해결하고자 본 연구에서는 X-ray 미세영상기법(X-ray micro-imaging technique)을 이용하여, 비소를 흡수하는 고사리의 줄기에서 내부의 수액 유동을 가시화하였다. X-ray 미세영상기법은 살아있는 샘플을 자르거나 고정시키는 처리를 거치지 않고 내부 모습을 그대로 실시간으로 볼 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 X-ray 미세영상기법의 장점을 이용하여 곤충 내부의 모습<sup>9)</sup>, 미세채널 내부 불투명한 혈류의 속도장 측정<sup>10)</sup>, 미세기포의 크기 및 속도 동시 측정<sup>11)</sup>, 대나무 물관 내부의 수액 거동 측정<sup>12)</sup> 등 불투명한 물체 내부의 유체유동을 정량적으로 가시화하는 연구가 이루어 졌다.

식물의 내부구조를 관찰 할 수 있는 다른 기법으로는 confocal laser microscopy(CLSM), magnetic resonance imaging(MRI) 등이 있지만, 이러한 방법들은 측정할 샘플의 두께에 한계가 있거나 하나의 영상을 얻는데 걸리는 시간이 많이 걸리는 단점이 있어 살아있는 식물의 내부 구조를 실시간으로 측정하기는 어렵다.

본 연구에서는 X-ray 미세 영상기법을 이용하여, 고사리 줄기에 있는 물관 내부의 수액 거동을 가시화하여 유속 변화를 측정하고, 이를 통하여 비소에 의한 고사리의 물 흡수 능력변화를 알아보고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험 방법

### 2.1 실험장치

식물의 내부구조와 물관에서의 수액 이동을 가시화하기 위하여 X-ray 미세영상기법을 이용하였다. X-ray 미세영상기법은 방사광 가속기에서 제공되는 X-ray의

높은 결맞음(coherence)특성을 이용하여 X-ray빔이 물체를 통과하면서 생기는 빛의 위상차(phase difference)를 이용하여 물체 내부 형태를 투과방식(transmission method)으로 가시화하는 위상대비(phase contrast) 영상기법을 사용하였다. 높은 결맞음을 가지는 가속기 X-ray 빔은 샘플을 통과하면서 프레넬 가장자리 회절(Frenel edge diffraction)을 야기시킨다. 이는 빛이 물체를 통과하면서 생기는 두 가지 다른 위상차에 의한 간섭효과로 생기는 회절 패턴을 만들게 되고, 이 패턴을 이용하여 물체 가장자리의 영상을 구성할 수 있다. 이러한 방식은 빛의 기본 성질인 굴절(refraction)과 회절(diffraction)을 이용하는 것으로 방사광 가속기에서 나오는 X-ray로 물체의 경계면에서 생기는 위상차 변화를 가시화 하는 기법이다<sup>8)</sup>.

Fig. 1은 본 연구에 사용되어진 X-ray 미세영상 시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 실험은 포항가속기 연구소(PAL)의 7B2라인에서 실시하였다. 가속기 저장링(storage ring)에서 나오는 X-ray는 측정하고자 하는 샘플을 투과하게 되며, 이 때 샘플의 내부 구조에 따라 위상차가 발생하게 된다. 이러한 위상차 정보가 포함된 X-ray 빔은 신틸레이터(scintillator, CdWO<sub>4</sub>)에 도달하게 된다. 신틸레이터는 눈에 보이지 않는 X-ray 영상을 우리 눈으로 볼 수 있는 가시영역의 빛으로 바꾸어 주는 결정체(crystal)로 여기에 맞힌 X-ray 영상은 금으로 코팅된 거울(gold-coated mirror)을 통해 반사되고, 이를 10배 대물렌즈가 장착된 CCD 카메라로 기록한다.

가속기에서 나오는 강력한 에너지의 X-ray빔은 연속적으로 공급되기 때문에, 식물과 같은 바이오 샘플에 손상을 주게 된다. 또한 고사리처럼 약한 식물에 고에너지의 X-ray 빔을 지속적으로 조사하게 되면 식물 내

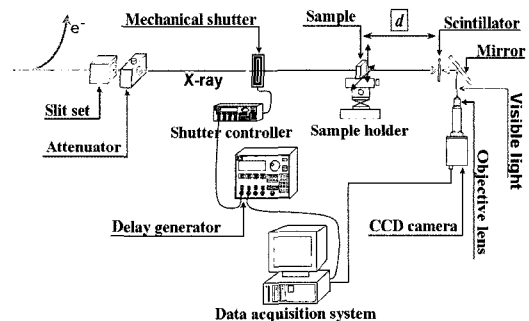


Fig. 1. Schematics of X-ray micro imaging system.

부 수분이 에너지를 흡수하여 기포를 형성하고, 이 기포들이 점점 커지게 된다. 이러한 손상을 줄이기 위해 기계식 셔터를 사용하여 영상 취득 시에만 샘플에 X선이 노출되도록 하였다. 즉, CCD 카메라와 기계식 셔터를 동기시켜 촬영하는 순간에만 셔터가 열려 X선 영상을 CCD 카메라로 취득하고, 촬영하지 않는 동안에는 셔터가 닫혀 빔이 조사되지 못하도록 하여 고사리가 X선에 의해 받는 손상을 최소한으로 줄여주었다.

실험에 사용된 카메라는 16bit CCD 카메라로 2048 X 2048 pixels의 공간분해능을 가지며, 10배 대물 렌즈를 사용하여  $710 \mu\text{m} \times 710 \mu\text{m}$ 의 관찰 영역(field of view)을 가진다. 샘플에 X선이 조사되는 시간은 100 ms이며, 0.5초의 간격으로 영상을 취득하였다.

Fig. 2는 이러한 X-ray 미세영상기법을 사용하여 취득한 고사리 줄기의 내부구조를 보여주는 영상이다. 이 X선 영상은 고사리 줄기의 내부 조직과 함께 물관부위에서 수액의 충전과정 (그림의 타원부분)을 보여주고 있다. 타원부분을 확대하여 보면 아래의 진한 색 부분과 위의 연한 부분으로 나뉘는데, 아래의 진한 부분이 물이 충전된 부분이고, 위의 연한부분이 물관이 비어있는 공기층을 나타낸다.

## 2.2 실험방법

본 연구에서는 고사리(Pteris)종 중에서 *Pteris cretica*를 샘플로 선택하였다. *Pteris cretica*는 비소에 대한 고축적 식물 중 하나이고<sup>5,6)</sup> 우리나라에서 자생하는 종으로 쉽게 구할 수 있는 식물이다.

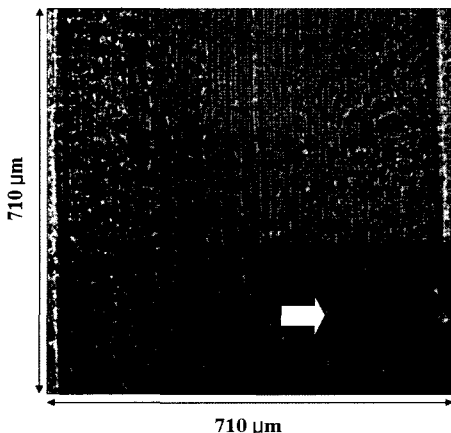


Fig. 2. A typical X-ray image showing xylem vessels inside *Pteris* stem.

화분에서 자라고 있는 고사리를 실험 직전 비슷한 크기의 7개의 잎이 달린 줄기부분을 잘라 이송장치에 고정하였다. 줄기를 자른 이후 먼저 줄기의 물관에서 물이 빠져나가 물관이 비어있는 것을 X-ray 영상으로 관찰하였다. 그리고, 줄기에 각 실험의 목적에 알맞은 물을 공급한 후, 시간경과에 따라 비어 있는 물관에 물이 다시 충전되어 흐르는 과정을 X-ray 영상으로 연속적으로 취득하였다.

Fig. 3은 *Pteris* 줄기 내부의 물관에서 물이 충전되어 가는 과정을 보여주는 X-ray 영상이다. 이를 통해 시간경과에 따라 물관 내부를 이동하는 물의 meniscus 변화를 볼 수 있다. 그림에서 화살표로 표시한 부분이 물관 속 물의 meniscus 위치로 시간이 지남에 따라 물관을 따라 상승하는 물의 모습을 관찰할 수 있다. 이러한 물의 meniscus 변화를 이용하여 물의 상승 속도를 구하였으며, 각각의 실험조건에 대해 5장의 X선 영상을 취득하여 이들의 평균값으로 상승속도를 구하였다. 이러한 실험방식을 이용하여 본 연구에서는 4 가지의 실험을 수행하였다.

식물의 경우 세포나 조직을 때어낸 이후에도 일정 기간 동안 그 능력을 유지하며 정상적인 기능을 수행하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 식물

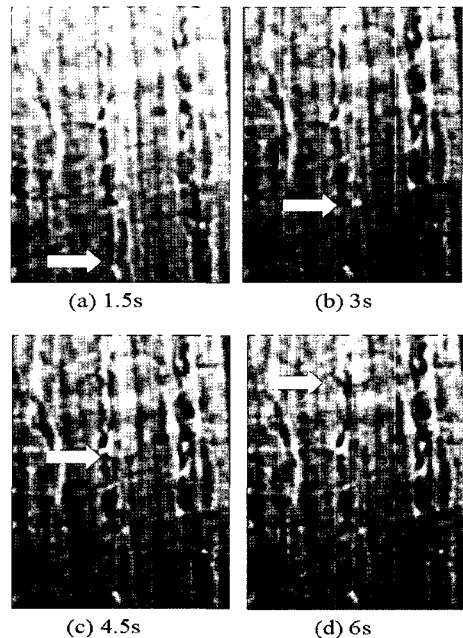


Fig. 3. Water rise in *Pteris* stem.

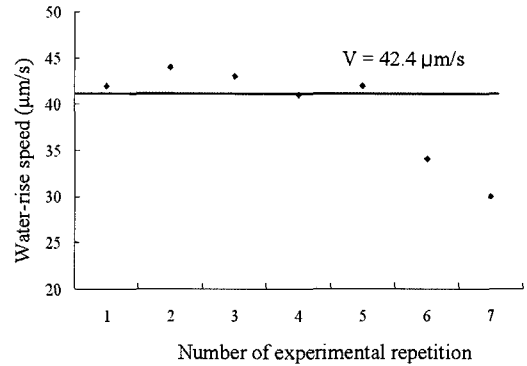
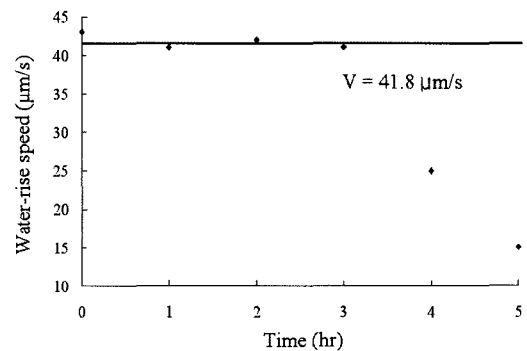
**Table 1.** The concentration of arsenic tested in the study.

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3
Case 1	DI water	0 mol As	DI water
Case 2	DI water	0.17 mol As	DI water
Case 3	DI water	0.2 mol As	DI water
Case 4	DI water	0.25 mol As	DI water
Case 5	DI water	0.33 mol As	DI water
Case 6	DI water	0.5 mol As	DI water
Case 7	DI water	1 mol As	DI water

조직의 기능이 얼마나 오랫동안 유지될 수 있는 지를 알아보는 실험을 먼저 수행하였다. 이 실험에서는 하나의 잎으로 똑 같은 실험을 몇 번 반복할 수 있는지와, 잎을 떼어낸 후 물을 비우고 다시 충전하는 재충진 과정을 몇 시간 동안 지속적으로 수행할 수 있는지를 알아보았다. 이어서 재충진하는 물의 종류를 변화시키면서 고사리 줄기에서 이들 물의 이동속도에 미치는 영향을 알아 보았다.

그리고 비소의 농도를 변화시키면서 물관 내부를 이동하는 물의 상승속도 변화를 측정하였다. 이 때 물과 비소의 혼합비율을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 실험에 사용되어진 비소는 기존의 비소 실험에 많이 이용되고 있는 1000 mg/l 표준용액을 사용하였다<sup>5,6)</sup>. 하나의 잎에 대하여 처음에는 증류수만 사용하여 물을 충전시키고, 약 20분 후 물과 비소가 섞인 용액을 사용하여 충진을 시킨다. 그리고 약 2시간 뒤 다시 증류수만을 사용하여 충전되는 과정을 관찰하였다. 본 연구에서 실험한 7가지 경우의 비소 농도를 Table 1에 정리하였다. 마지막으로 비소를 사용하여 2주 동안 기른 고사리와 물만 주어진 기른 고사리를 대상으로 비슷한 크기의 잎이 달린 줄기를 잘라 같은 방법으로 실험을 수행하여 수액의 충전 속도를 비교하였다. 즉, 처음 2가지 실험을 통해 물의 상승속도 측정에 영향을 주는 주요 요인들에 대해 알아보고, 마지막 2가지 실험에서는 비소가 함유된 물이 고사리에 미치는 영향을 알아보았다.

모든 실험은 기존의 연구에서 알려진 *Pteris*가 비소를 가장 잘 흡수하는 조건인 온도 25°C와 물의 pH 6~8의 환경을 유지하도록 하였다. 그리고, 다른 이온들에 기인한 영향을 최소화하기 위해 물은 증류수를 사용하였다. 각각의 경우에 대해 5번의 반복실험을 하였으며, 그 평균값을 구하여 실험 결과로 사용하였다.

**Fig. 4.** Effect of repetition number on water-rise speed.**Fig. 5.** Effect of experimental duration time on water-rise speed.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 실험 횟수와 시간경과에 따른 영향

먼저 하나의 고사리 잎으로 몇 번의 실험을 반복할 수 있는지를 알아보기 위해 줄기에서 잎을 자르고, 그 잎을 이용하여 20분 간격으로 물의 상승속도를 측정하고, 그 결과를 Fig. 4에 나타 내었다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 처음 물을 빨아올리고 난 뒤 5번 반복할 때까지는 평균값에서 5% 범위 이내로 상승 속도에 큰 변화가 나타나지 않았다. 그러나, 6번째 실험부터는 상승 속도가 20% 이상 크게 감소하였다.

다음으로 줄기에서 잎을 자른 시간으로부터 얼마의 시간 동안 실험을 지속할 수 있는지 알아보기 위해, 줄기에서 잎을 떼어내고 1시간 간격으로 물의 재충진 과정을 반복하였다. 그 결과 Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 잎을 떼어내고 실험을 시작한 후 3시간까지는 재충진 속도의 변화가 3% 이내로 크지 않았으나, 4시간째부터는

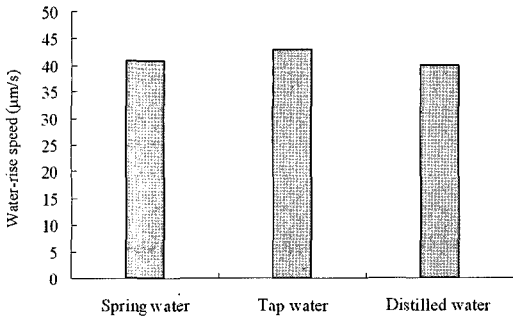


Fig. 6. Variation of water-rise speed of various waters in a xylem vessel of *Pteris*.

상승속도가 40% 이상 크게 줄어 드는 것으로 나타났다.

이상의 실험을 통해, 고사리 줄기에서 잎을 자른 후, 재충진 과정을 5번 이내로 하고, 3시간 이내에 실험을 마친다면, 재충진 횟수와 실험 지속시간에 따른 영향은 크지 않을 것임을 확인할 수 있다. 이러한 실험 결과에 기초하여 이후의 실험들은 모두 이 조건을 만족시키는 범위 내에서 수행되었다.

3.2 물의 종류에 따른 속도변화

실험에 사용된 물의 종류에 따라 물의 충전 속도가 어떻게 달라지는지를 알아보기 위해, 하나의 잎을 사용하여 시판중인 마시는 생수(spring water)와 수도물, 그리고 3차 증류수를 이용하여 충전속도 변화를 측정하고 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 상승속도의 차이는 5% 이내로 물의 종류에 따른 영향이 크지 않다고 할 수 있다.

식물이 토양 속의 물을 흡수할 때, 뿌리를 통해 이온을 선택적으로 흡수하거나 또는 토양의 농도나 pH에 의해 수분의 흡수 능력이 바뀌게 된다. 그러나, 본 연구에서 다루고 있는 실험 샘플에는 뿌리가 없으므로 잎의 증산작용에 의해서만 물을 끌어 올리기 때문에 이온변화에 기인한 영향이 나타나지 않는 것으로 보인다. 이와 같은 결과에 기초하여 비소를 이용한 실험에서는 3차 증류수를 사용하였다.

3.3 비소에 의한 영향

비소와 증류수의 혼합비를 달리하여 비소 농도를 조절한 물을 사용하여 고사리 물관에서 상승속도 변화를 측정하여 비소 농도의 영향을 살펴보았다.

Fig. 7을 보면 처음 증류수만 사용하여 실험한 후 비소가 섞인 물을 사용한 2번째 경우에 있어서 상승속도의 차이는 5% 정도로 크지 않은 것으로 나타났다. 비소가 함유되지 않은 증류수로 실험한 경우에는 3% 정도 감소하였다. 그러나, 다시 증류수를 공급하여 실험한 3번째 실험에서는 비소가 함유된 모든 경우에 있어서 상승속도가 약 15% 정도 증가한 것으로 나타났다. 이것은 고사리가 흡수한 비소에 의해 생체 내부에 화학반응이 일어나 고사리 물관에서 물을 끌어 올리는 능력이 다소 상승한 것으로 생각되어 진다. 비소에 대한 고축적 식물종인 고사리는 물속에 녹아 있는 5가 이온의 비소 As(V)를 흡수하여 3가 이온인 As(III)의 형태로 축적한다고 알려져 있다<sup>5,6)</sup>. 고사리의 경우 비소로 오염된 지역에서 주변 토양에 함유되어 있는 비소 농도에 비해 200배 이상의 농도로 비소를 잎에 축적하며, 40% 정도 더 크게 자라는 것으로 알려져 있다<sup>7)</sup>. 이것은 고사리의 성장에 비소성분이 영향을 미치고 비소를 생체 내에 축적함으로써 성장 속도가 빨라져 본 연구 결과에 나타난 것처럼 물관에서의 상승속도가 증가한 것으로 보인다. 식물의 성장속도가 증가하게 되면 대사량이 많아지고 이로 인한 호흡과 물질 대사가 많아져 뿌리로부터의 물 공급 역시 늘어나게 된다. 이러한 물 공급량의 증가는 바로 물의 상승 속도증가로 나타나게 되는 것이다.

Fig. 8은 첫 번째 증류수 실험에 비해 3번째 실험에서 상승속도가 얼마 만큼 증가하였는 지를 나타내고 있다. 이 실험 결과를 보면 비소의 물농도가 낮은 경우 상승속도가 높고 농도가 높아질수록 상승속도가 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 즉, 비소의 농도가 높을수록 물을 끌어 올리는 능력이 약해짐을 나타낸다. 이것

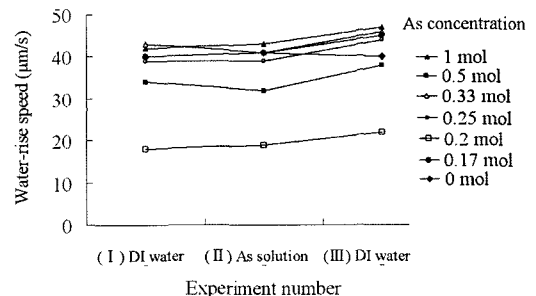


Fig. 7. Effect of arsenic concentration on water-rise speed.

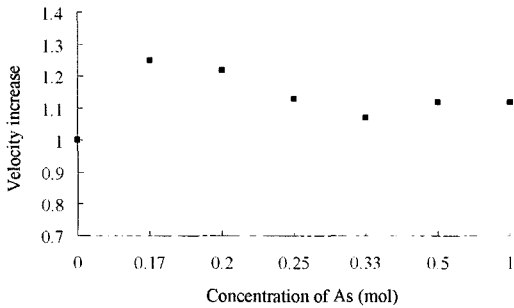


Fig. 8. Effect of arsenic concentration in As solutions.

은 높은 농도로 오염된 지역에서는 고사리의 정화기능이 기대치만큼 능력을 보여주지 못한다는 이전의 연구결과와 일치하는 결과라 볼 수 있다<sup>1,2,3</sup>).

Fig. 9는 비소 표준용액을 사용하여 재배한 고사리와 단순히 물만으로 재배한 고사리의 상승속도를 비교한 실험 결과이다. 10번 반복 실험한 결과, 비소를 사용하여 기른 고사리의 경우 물만 사용하여 기른 경우보다 물관에서의 물의 상승속도가 빠른 것으로 나타났다. 평균속도를 비교하여 보면 비소를 사용한 경우는 53.4  $\mu\text{m/s}$ , 비소를 사용하지 않은 경우는 상승 속도가 41  $\mu\text{m/s}$ 로 나타났다. 이것으로부터 앞에서 설명한 바와 같이 고사리가 비소를 흡수함에 따라 물을 끌어올리는 능력이 향상되며 평균적으로 상승속도는 약 23%정도 증가한 것으로 나타났다.

이것은 상승속도가 15% 증가한 Fig. 7의 결과와 다소 차이가 있다. 이와 같은 상승속도의 차이는 고사리가 비소에 노출된 시간의 차이에 기인한 것으로 생각되어진다. Fig. 7의 경우 고사리가 비소에 노출된 시간은 2시간 정도에 지나지 않는다. 반면에 Fig. 9의 경우, 2주 동안 고사리가 비소가 함유된 물을 빨아들여 조직내부에 상당히 많은 양의 비소를 축적하게 되어 상승속도가 보다 빨라진 것으로 생각되어진다. 상승속도 차이를 가져온 또 다른 요인으로는 뿌리에 의한 흡수 방법의 차이를 생각할 수 있다. Fig. 9에 나타난 결과는 비소를 포함하고 있는 물로 살아 있는 고사리를 재배하여, 뿌리로부터 비소를 흡수하여 앞으로 보내진 경우에 해당한다. 잘려진 잎을 사용하여 실험한 Fig. 7의 경우에는 단순히 잎에서 일어나는 증산작용만물의 상승속도에 영향을 미치는데 비해, Fig. 9의 경우에는 고사리 체내에 비소를 흡수할 때 뿌리부분에서 발생하는 여과와 흡수과정이 추가되어 비소의 흡수율이 보다 높

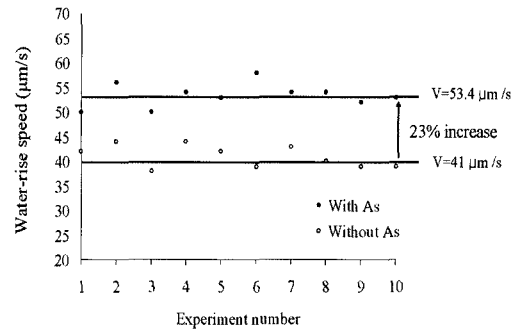


Fig. 9. Effect of arsenic on the growth of Pteris.

아져 물의 상승속도가 증가한 것으로 생각되어진다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 비소에 대한 고축적 식물종인 고사리의 줄기 내부 물관의 유동가시화를 통해 비소가 고사리의 물 흡수능력에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 고사리 줄기에서 잎을 자른 후 재충진 과정을 5번 반복하거나, 3시간 이내에 마칠 경우 물의 상승속도에 큰 변화가 나타나지 않았다. 그리고, 생수, 수돗물, 증류수를 사용하여 실험한 결과 상승속도 차이는 5% 이내로 물의 종류에 따른 영향은 크지 않았다. 또한 비소가 함유된 물에 절지된 고사리를 2시간 놓아둔 경우와 2주간 기른 경우 고사리 줄기 내부 물관에서의 수액의 상승속도가 증류수에 노출시킨 경우에 비해 각각 15%와 23% 증가하였다. 이것은 고사리의 물 흡수능력이 체내에 비소가 축적됨에 따라 향상됨을 나타낸다. 그리고 고사리와 같은 환경정화식물의 정화능력을 정량적으로 평가하는 새로운 방법으로 X-ray 미세영상기법이 사용될 수 있음을 보여 주었다. X-ray 미세영상기법을 사용한 식물 내부흐름의 유동가시화는 환경오염물질을 흡수하는 식물 내부에서 일어나는 독성 물질의 축적과 이동과정을 이해하는데 크게 도움이 될 것이다.

#### 후 기

본 연구는 포항 방사광 가속기연구소의 7B2 빔라인에서 수행되었으며, 포항 방사광 가속기에서의 실험은 과학기술처와 포항공대의 지원을 받았습니다. 본 연구는 과기부(과학재단)에서 지원한 특정기초연구(R01-

2004-000-10500-0)와 시스템바이오다이나믹스 국가핵심연구센터(R15-2004-033-06002-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

### 참고문헌

- 1) Salt, D. E., Blayock, M., Kumar, P., Dushenkov, S., Ensley, B. D., Chet, I. and Raskin, I., 1995, "Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants," *Bio/Tech.*, Vol. 13, pp. 468-474.
- 2) US EPA, 2000, Introduction to Phytoremediation, EPA/600/R-99/107.
- 3) Tsao, T., 2003, *Phytoremediation*, Springer, Berlin.
- 4) Kruger, E. L., Anderson, T. A. and Coats, J. R., 1997, *Phytoremediation of soil and water contaminants*, Amer. Chem. Soc., Washington, DC.
- 5) Srivastava, M., Ma, L. Q. and Santos, J., 2006, "Three new arsenic hyper-accumulating ferns," *The Sci. of The Total Environ.*, Vol. 364, pp. 24-31.
- 6) Zhang, W., Cai, Y., Tu, C. and Ma, L. Q., 2002, "Arsenic speciation and distribution in an arsenic hyper-accumulating plant," *The Sci. of The Total Environ.*, Vol. 300, pp. 167-177.
- 7) Cullen, W. R. and Reimer, K. J., 1989, "Arsenic speciation in the environment," *Chem. Rev.*, Vol. 89, pp. 713-764.
- 8) Raven, C., Snigirev, A., Snigireva, I., Spanne, P., Souvorov, A. and Kohn, V., 1996, "Phase-contrast microtomography with coherent high-energy synchrotron X rays," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 70, pp. 1826-1828.
- 9) Westneat, M. W., Betz, O., Blob, R. W., Fezzaa, K., Cooper, W. J. and Lee, W. K., 2003, "Tracheal respiration in insects visualized with synchrotron X-ray imaging", *Science*, Vol. 299, pp. 558-560.
- 10) Lee, S. J. and Kim, G. B., 2005, "Synchrotron micro-imaging technique for measuring the velocity fields of real blood flows," *J. of Appl. Phys.*, Vol. 97, 064701.
- 11) Lee, S. J. and Kim, S., 2005, "Simultaneous micro-imaging of Size and velocity of micro-bubbles moving in an opaque tube," *Exp. in Fluids*, Vol. 39, pp. 492-497.
- 12) Kim, Y. and Lee, S. J., 2003, "In vivo visualization of flow in xylem vessels of a bamboo plant using synchrotron X-ray micro imaging technique," *KSME J.*, Vol. 27, pp. 563-581.