

하천유역의 관속식물을 이용한 토양내의 중금속 오염원 제거에 관한 연구

강경홍 · 김인성*

전주대학교 이공대학 생명과학부
*전주대학교 대학원 생물학과

Study on the Elimination of Heavy Metal Pollutants in the Soil by Vascular Plant in the River Area

Kang, Kyung-Hong · Kim, In-Sung*

School of Life Science, Collage of Science and Technology, Jeonju Univ.
*Dept. of Biology, Graduate School, Jeonju Univ.

ABSTRACT

The biological magnification of Pb, Cu, Zn and Fe in vascular plant ; *Persicaria thunbergii*, *Trapa japonica* and *Nymphoides peltata* naturally grown at the river and riverside and relationship between the concentration of heavy metals in these vascular plants and in the soil were investigated in the Chonju river, Chonju city. The biological magnification values of these metals in *P. thunbergii* were founded as follows ; Pb, Cu, Zn and Fe were 80.4~254.6 μ g/g, 284.6~688.4 μ g/g, 635.5~1979.4 μ g/g and 1160.0~3590.9 μ g/g respectively. In the case of *T. japonica*, Pb, Cu, Zn and Fe were 107.8~306.0 μ g/g, 282.7~963.0 μ g/g, 1328.3~3546.9 μ g/g and 656.8~9944.0 μ g/g and in *N. peltata*, 140.1~193.9 μ g/g, 187.7~327.3 μ g/g, 1126.6~1723.6 μ g/g and 611.7~1914.6 μ g/g respectively. The amount of the biological magnification of heavy metals in the leaf, stem and root of these plants was generally increased in the sequence of leaf<stem<root. When *P. thunbergii* was treated with the heavy metals (alone or combinations of Pb, Cu and Zn) of 10ppm and 30ppm concentrations to comparing with the pattern of biological magnification in habitat, metal uptakes were in root higher than in stem and leaf. And, *P. thunbergii* treated with 30ppm concentration of each heavy metal alone higher than treated with

10ppm concentration as follows ; Pb 2.8, Cu 2.0 and Zn 2.1 times. The biological magnification of heavy metals in *P. thunbergii* treated with the 10ppm and 30ppm concentrations of heavy metals was generally increased in the sequence of Zn<Pb<Cu and the amount of the biological magnification of Pb and Zn in leaf, stem and root of *P. thunbergii* was increased in the sequence of stem<leaf<root but, Cu was leaf<stem<root. In the culture medium applied with heavy metals mixed, Cu induced the Zn deficiency in the plant. When comparing the heavy metal concentration in these plants with the heavy metal content in the habitat soil, the magnification value of heavy metals in *P. thunbergii* were Pb 13.2, Cu 73.4, Zn 58.7 and Fe 13.1 times to compare with the content of heavy metals in the habitat soil. In the case of *T. japonica*, Pb 25.3, Cu 98.5, Zn 145.0 and Fe 42.0 times and in *N. peltata*, Pb 11.2, Cu 47.5, Zn 87.7 and Fe 28.8 times. Statistical analysis suggested that the significant portion of heavy metal in samples was derived from habitat soil.

Keywords : Pollutant, Heavy metal, Vascular plant, Biological magnification

요약문

하천 주변에 서식하는 관속식물의 중금속 농축량과 서식지 토양 내의 중금속 함량과의 상관관계를 조사하기 위해 전주시에 위치한 전주천에 서식하는 고마리, 마름 그리고 노랑어리연꽃을 이용하여 Pb, Cu, Zn 및 Fe의 생물학적 농축량을 조사하였고, 재료식물의 서식지 토양 내의 중금속 함량을 분석하여 그 상관관계를 비교·분석 하였다. 그 결과 고마리에서 중금속 농축량은 Pb의 경우 80.4~254.6 $\mu\text{g/g}$, Cu는 284.6~688.4 $\mu\text{g/g}$, Zn는 635.5~1979.4 $\mu\text{g/g}$ 그리고 Fe는 1160.0~3590.9 $\mu\text{g/g}$ 으로 나타났다. 마름에서는 Pb, Cu, Zn 그리고 Fe에서 각각 107.8~306.0 $\mu\text{g/g}$, 282.7~963.0 $\mu\text{g/g}$, 1328.3~3546.9 $\mu\text{g/g}$ 그리고 656.8~9944.0 $\mu\text{g/g}$ 으로 나타났고, 노랑어리연꽃에서는 140.1~193.9 $\mu\text{g/g}$, 187.7~327.3 $\mu\text{g/g}$, 1126.6~1723.6 $\mu\text{g/g}$ 그리고 611.7~1914.6 $\mu\text{g/g}$ 으로 나타났다. 재료식물 각 부위별 중금속 농축량은 일반적으로 잎<줄기<뿌리의 순서로 그 농축량이 증가하였다. 서식지에 서식한 재료식물에서의 중금속 농축 양상을 검증하기 위해서 재료식물중 고마리를 선정하여 Pb, Cu 그리고 Zn의 농도를 10ppm과 30ppm으로 나누어 단독 또는 복합 처리하여 고마리 내의 중금속 농축량을 분석한 결과 재료식물의 뿌리에서 가장 높은 농축량을 나타냈고, 처리 농도에 따른 중금속 농축량을 비교하면 10ppm 처리구에 비해 30ppm 처리구에서 Pb는 2.8배, Cu는 2.0배 그리고 Zn는 2.1배 높았으며 중금속 농축량은 Zn하였다. 재료식물 부위별 농축량은 Pb와 Zn의 경우 줄기<잎<뿌리의 순서로 농축량이 증가하였고, Cu는 잎<줄기<뿌리의 순서로 농축량이 증가하였다. 그리고 중금속을 조합처리한 재료 식물에서 Cu는 Zn의 흡수를 억제하는 결과를 나타냈다. 서식지 토양의 중금속 함량과 식물내의 중금속 농축량을 비교하면 고마리에서는 토양에 비해 Pb는 13.2배, Cu는 73.4배, Zn는 58.7배 그리고 Fe는 13.1배로 높은 농축량을 보였으며, 마름에서는 Pb, Cu, Zn 그리고 Fe 각각 25.3배, 98.5배, 145.0배 그리고 42.0배로 나타났고, 노랑어리연꽃에서는 11.2배, 47.5배, 87.7배 그리고 28.8배로 농축량이 증가하였다. 서식지 토양의 중금속 함량과 재료식물 내의 중금속 농축량 사이에는 정 상관관계가 있었다.

주제어 : 오염원, 중금속, 관속식물, 생물학적 농축

1. 서론

지구상의 생태환경 중 가장 복잡한 구성요소로 형성된 것으로 토양 환경을 들 수 있다. 특히, 토양 환경과 식물과는 서로 밀접한 관계로 식물은 토양 환경으로부터 각종 영양염류 및 이온물질을 흡수하여 생장하고, 토양은 식물로부터 대부분의 분해성 물질을 공급받아 토양내의 구성요소를 형성하게 된다. 토양오염이란 토양내에 난분해성물질이나 지구상의 생물체에 유해한 물질이 침적되는 것을 말하는데, 이러한 토양의 오염원으로는 산업폐수에서 유발되는 중금속 물질과 강산 및 강알카리성 물질, 농약과 비료에서 유발되는 난분해성 물질 그리고 생활하수에서 기인하는 질산 및 인산염물질 등을 들 수 있다. 또한, 대기로부터 방출된 대기 오염원인 황 및 질소 산화물등이 강우로 인하여 토양에 침적되어 오염원으로 작용하기도 한다. 토양 오염은 지표면의 토양에만 국한되는 것이 아니고 수질오염에 의해 하천이나 저수지 그리고 해양 기저부의 토양이 이러한 오염원의 수계유입으로 인하여 오염된다. 이러한 오염원 중에서 토양 내에서 분해되지 않고 영구히 침적되는 물질인 중금속류 오염원은 현대 사회의 공업화가 가중됨에 따라 대두된 심각한 환경문제가 되었다.

오염된 토양을 복구하는 방법에는 크게 두가지 방법이 있는데, 첫째는 현장에서 오염물질을 제거하는 방법이고, 둘째는 오염된 토양을 오염 지역에서 제거하여 일정한 오염제거 시설에서 오염원을 제거 한 후 다시 본래 지역으로 복구시키는 방법으로 나눌 수 있다. 이 중 현장에서 오염원을 제거하는 방법은 주로 생물학적인 방법이 동원되는데 여기에 적용되는 오염원으로는 토양내에서 분해가 쉬운 물질인 유기오염원이 주종을 이루게 되고 이러한 유기오염원을 분해하는데는 주로 미생물을 이용한다.

본 연구는 토양 오염원 중 난분해성 물질인 중

금속류 물질을 토양으로부터 분리·제거하는데 식물의 이용성을 밝혀보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구의 조사지역은 전주시와 공업단지를 지나는 전주천 및 그 유입하천 지역을 중심으로 7개 지점 (어두교;AD, 월암교;WA, 삼천취수장;SC, 양화교;YH, 삼천물보;SM, 이성보;LS 및 삼선철교;SS)을 선정하여 토양층의 중금속 함량과 7개 지점에 분산되어 하천가와 하천내에 군생하는 습생식물인 고마리(*Persicaria thunbergii*)와 수중 기저부에 뿌리를 내리고 서식하는 수생식물인 마름 (*Trapa japonica*) 및 노랑어리연꽃 (*Nymphoides peltata*) 내에서 중금속 농축량을 분석하였다. 재료의 채집은 매주 1회씩 1994년 7월부터 10월 까지 4개월간 총 16회 실시하였고, Pb, Cu, Zn 및 Fe를 분석대상 중금속으로 선정하여 각각의 시료에서 분석하였다. 그리고 재료 식물중 고마리를 선정하여 실험실 조건에서 각 중금속의 농도별로 배양구를 설치하여 중금속 흡수량을 조사하여 서식지에서의 중금속 흡수량과 상호 비교·분석하였다.

토양내의 중금속 추출은 토양시료를 70℃ 건조기에서 완전히 건조시킨 뒤 600 μ m 체를 이용하여 분리한 후 건조량 10g을 분취하여 20ml 질산과 과산화수소수 그리고 소량의 염산과 황산을 첨가하여 25~30℃ 교반항온기에서 12시간 이상 반응시켜 산분해 하였고, 재료식물에서 중금속 추출은 각 재료식물의 잎, 줄기 및 뿌리를 생체량 20g씩 분취하여 120℃ 건조기에서 건조한 후 분쇄하여 각각의 건조량 2g을 취하여 20ml 질산과 과산화수소수를 가하여 재료식물이 완전히 녹아 맑은 담황색 용액이 될 때 까지 산분해 시켰다¹⁾.

중금속 분석은 Anodic stripping voltametric method를 이용한 Trace element analyser (TEA

3000, Camtronics Ltd., Australia) 와 Flame atomization method를 이용한 Atomic absorption spectrophotometer (AAS, Hitachi Ltd., Japan) 을 이용하여 병행 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 토양에서 Pb, Cu, Zn 및 Fe의 함량 분석

전체 7개 채집지에서 채토한 토양의 분석 결과 각각 중금속의 함량은 토양의 Cu함량을 기준으로 할 때 Pb는 1.8배, Zn는 3.0배 그리고 Fe는 32.2배로 토양내의 중금속 함량이 Cu<Pb<Zn<Fe의 순서로 증가하였다 (Table 1).

본 조사의 측정치를 환경청(1989)에서 조사한 농경지, 공업지역, 하천유역, 생활하수 배출지역, 공업폐기물 처리지역, 광산지역 및 도로변 토양 등의 구분에 따른 중금속 조사자료와 비교하면 Pb와 Zn의 토양 내 함량이 광산지역이나 공업폐기물 처리지역의 토양을 제외한 다른 지역의 측정치에 비해 높음을 알 수 있었고, Cu의 토양내 함량은 환경청의 조사 지역에서 나타난 측정 자

Table 1. The Contents of Pb, Cu, Zn and Fe in Soil collected at the different Sampling Sites (contents are expressed as Mean Values, Unit : $\mu\text{g/g}$ in Dry Weight)

Sampling Site Heavy Metal	Sampling Site						
	AD	WA	SC	YH	SM	LS	SS
Pb	18.0	16.6	5.3	7.8	12.6	9.9	7.9
Cu	6.5	5.0	3.9	5.2	6.5	8.7	7.0
Zn	21.1	26.3	14.5	14.9	15.3	19.6	16.6
Fe	342.5	308.0	102.1	159.1	182.3	152.7	130.1

- AD : Adugyo
- WA: Wualamgyo
- SC : Samchonchisu
- YH : Yanghwagyo
- SM : Samchonmulbo
- LS : Leesungbo
- SS : Samsuncheolgyo

료와 유사한 결과였다. 특히, 환경청조사자료중 하천유역의 중금속 분석치와 비교할 때 본 연구에서 조사된 Pb, Cu 및 Zn의 측정치는 환경청에서 조사한 하천유역의 Pb, Cu 및 Zn의 측정치에 비해 Pb는 0.8 배에서 3.9 배, Cu는 0.9 배에서 1.9 배 그리고 Zn는 1.3 배에서 2.3 배로 높은 값이었다.

또한, 조사지역의 상류보다 하류의 하천 토양에서 중금속 함량의 변동량이 크게 나타난 것으로 조사되었는데, 이것은 하천의 하류에서 발생되는 도심지 하수 및 공단 폐수의 유입과 하천가에 서식하는 식물 군락의 계절적 성장 변화에 의해 식물체 내에 농축되는 중금속의 양이 식물 군락의 밀도 및 성장 상태와 밀접히 연계되어 나타나는 현상²⁾³⁾⁴⁾으로 사료 된다.

3.2 재료식물에서 중금속 농축량 분석

대상 하천의 7개 채집지에서 자생한 고마리, 마름 및 노랑어리연꽃 내의 중금속 농축량을 식물체 각 부위별로 조사하였다(Table 2).

Table 2. The Mean Value of the Amount of the Biological Magnification of Pb, Cu, Zn and Fe in the Leaf, Stem and Root of in *P. thunbergii*, *T. japonica* and *N. peltata* grown naturally at different Sampling Site (Unit : $\mu\text{g/g}$ in Dry Weight)

Plant	Part	Pb	Cu	Zn	Fe
<i>P. thunbergii</i>	Leaf	15.5	28.4	239.6	93.8
	Stem	11.0	41.8	165.6	156.5
	Root	123.4	376.6	818.3	2289.1
<i>T. japonica</i>	Leaf	27.3	66.7	281.5	141.4
	Stem	61.3	261.5	425.1	262.3
	Root	125.2	289.9	1604.1	5674.7
<i>N. peltata</i>	Leaf	30.8	70.2	470.0	63.4
	Stem	31.8	59.8	395.4	103.2
	Root	92.8	125.6	866.1	1044.7

고마리에서 Pb, Cu, Zn 및 Fe의 월별 평균 농축량은 전체 채집지에서 각각 80.4~254.6 $\mu\text{g/g}$, 284.6~688.5 $\mu\text{g/g}$, 635.5~1979.4 $\mu\text{g/g}$ 및 1160.0~3590.9 $\mu\text{g/g}$ 으로 중금속은 각각 Pb<Cu<Zn<Fe의 순서로 증가양상을 보였고, 마름에서는 전체 채집지에서 Pb는 107.8~306.0 $\mu\text{g/g}$, Cu는 282.7~963.0 $\mu\text{g/g}$, Zn은 1328.3~3546.9 $\mu\text{g/g}$ 그리고 Fe는 656.8~9944.0 $\mu\text{g/g}$ 으로 월별 평균 농축량을 나타내 고마리의 중금속 농축양상과 같은 양상을 보여주었다. 반면에, 노랑어리연꽃에서의 월평균 중금속 농축량을 보면 Pb의 경우 140.1~193.9 $\mu\text{g/g}$, Cu는 187.7~327.3 $\mu\text{g/g}$, Zn은 1126.6~1723.6 $\mu\text{g/g}$ 그리고 Fe는 611.7~1914.6 $\mu\text{g/g}$ 로 노랑어리연꽃 내에 농축된 각각의 중금속은 고마리와 마름에서의 중금속 농축량 증가와는 다른 양상으로 Pb<Cu<Fe \leq Zn로 증가하였다.

각각의 재료식물 내에 농축된 중금속 전체 농축량을 중금속별 비율로 나타내면, 고마리의 경우 Pb, Cu, Zn 및 Fe는 각각 3.9%, 11.8%, 29.7% 그리고 54.1%로 나타났고 마름에서는 2.1%, 5.8%, 22.9% 그리고 69.2%로 나타났다. 또한, 노랑어리연꽃의 중금속별 농축량의 비는 5.2%, 8.5% 45.9% 그리고 40.4%로 나타났다(Fig. 1)

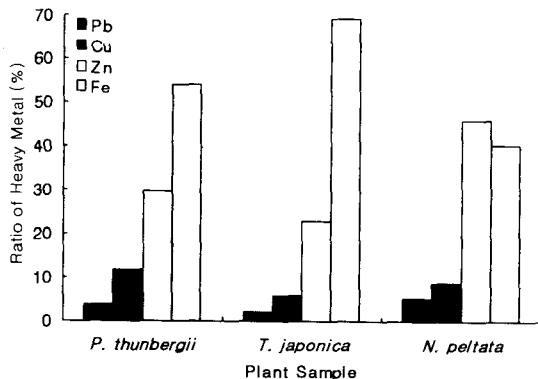


Fig. 1. The ratio of heavy metal in *P. thunbergii*, *T. japonica* and *N. peltata*.

식물에서의 중금속 흡수량에 대해 Boyd⁵⁾는 생체량에 비례하여 일정 면적에서 Fe, Zn 및 Cu의

흡수량이 부레옥잠, 비름과식물인 *Alternanthera phibxeroides* 및 쥐꼬리망초과 식물인 *Justicia americana*등에서 Cu<Zn<Fe의 순서로 증가한다고 보고 하였고, Park et al.⁶⁾은 마름에서 중금속의 농축량이 Pb<Cu<Zn<Fe의 순서로 증가한다는 보고의 유사한 결과이다. 토양에 함유된 Pb, Cu, Zn 및 Fe의 함량과 고마리내의 중금속 농축량을 비교하면 Pb의 평균 농축량은 토양의 중금속 평균 함량에 비해 13.2 배, Cu는 73.4 배, Zn은 58.7 배 그리고 Fe는 13.1 배로 나타나 토양의 중금속 평균 함유량에 비해 고마리에서 Cu의 농축배수가 가장 큰 것으로 나타났다. 이것은 고마리의 뿌리내 평균 농축량과 토양의 중금속 평균 함량과를 비교하여 볼 때 Pb는 11.0 배, Cu는 61.7 배, Zn은 38.8 배 그리고 Fe는 11.6 배로 고마리의 뿌리에서 Cu의 농축 배수가 가장 크게 나타난 것과 비슷한 결과임을 알 수 있었다. 마름에서는 농축된 중금속 평균 농축량과 토양의 중금속 평균 함량과 비교할 때 Pb는 토양에 비해 25.3 배, Cu는 98.5 배, Zn은 145.0 배 그리고 Fe는 42.0 배의 중금속 농축량을 나타냈고, 마름의 뿌리내 평균 농축량과 토양 내의 중금속 평균 함량과 비교할 때 Pb의 평균 농축량은 토양의 평균 함량에 비해 11.2 배, Cu는 47.5 배, Zn은 87.7 배 그리고 Fe는 28.8 배로 나타났다. 노랑어리연꽃에서 Pb는 15.5 배, Cu는 37.9 배, Zn은 87.4 배 그리고 Fe는 6.2 배 정도의 농축량을 나타냈고, 노랑어리연꽃 뿌리의 평균 농축량은 토양의 평균 함량에 비해 Pb는 8.3 배, Cu는 20.6 배, Zn은 47.3 배 그리고 Fe는 5.3 배로 나타나 마름과 노랑어리연꽃에서 Zn의 농축배수가 분석한 다른 중금속에 비해 가장 큰 것으로 나타났다(Fig. 2).

이처럼 각각의 재료식물에서 중금속 농축량과 중금속 흡수력간의 차이가 나타나는 것은 식물체가 서식하는 환경의 영양요인과 각각의 식물의 중금속에 대한 흡수력의 차이 등에 의해서 나

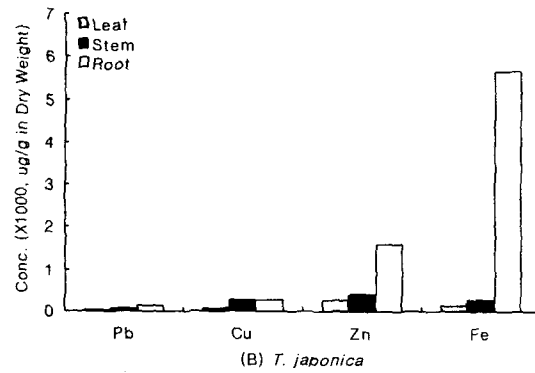
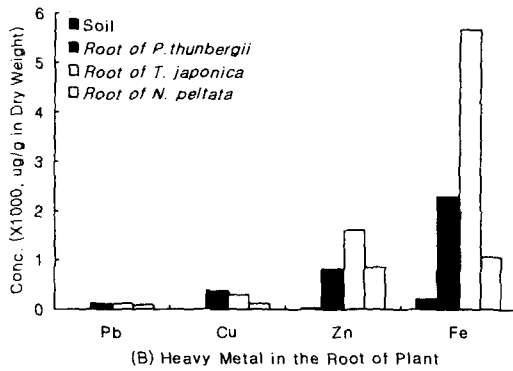
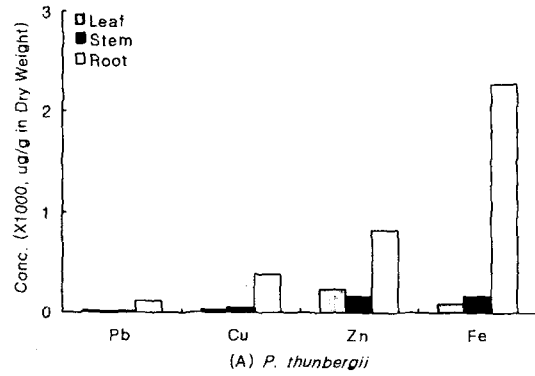
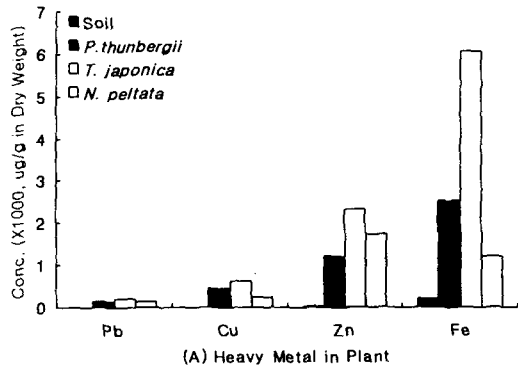


Fig. 2. The comparison of heavy metal content in the soil of habitat and the biological magnification of heavy metal in plant or in the root of plant.

타난 결과로 사료된다. 그리고 세 종류의 재료식물에서 공통적으로 나타난 현상은 토양에 직접 접한 식물체의 뿌리부분에서의 중금속 농축량이 식물체의 다른 부분에서의 농축량보다 월등히 높은 중금속 농축량을 나타냈음을 알 수 있었는데(Fig 3) 이것은 쥐꼬리망초과 식물인 *J. americana*, 비름과 식물인 *A. philoxeroides* 및 큰부들에서 나타난 결과⁵⁾ 및 마름의 결과⁶⁾와는 유사하나, 물개구리밥과 식물인 *Azolla pinata*와 개구리밥과 식물인 *Lemna minor*의 결과⁷⁾와는 다른 양상을 보였다.

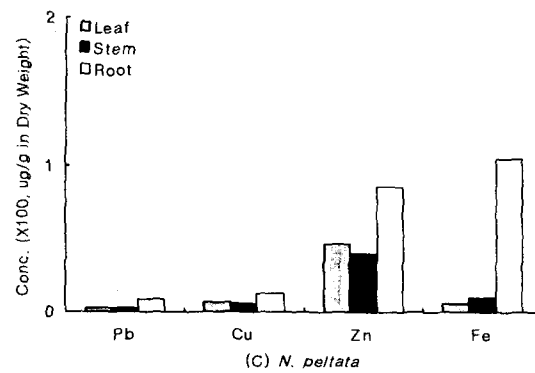


Fig. 3. The pattern of the biological magnification of heavy metal in the leaf, stem and root of *P. thunbergii*, *T. japonica* and *N. peltata*.

각각의 재료식물에서 중금속의 농축량은 노랑

어리연꽃, 고마리 그리고 마름의 순서로 농축량이 증가하였으나 Zn의 경우 노랑어리연꽃 내에서 농축량이 고마리의 농축량보다 높게 나타났다(Fig. 4).

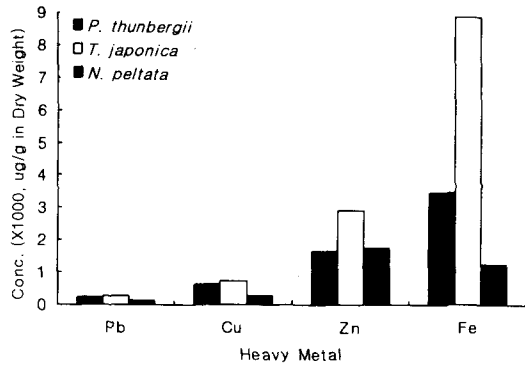


Fig. 4. The pattern of the biological magnification of heavy metal in *P. thunbergii*, *T. japonica* and *N. peltata*.

이러한 결과는 물개구리밥과 식물인 *A. pinata*와 *Pleurotus sajor-caju*에서 Mn, Ni, Pb, Cu, Zn, Fe, Co 및 Cd 등의 흡수량에 관한 Jain et al.⁸⁾의 연구 결과와 습지와 호수 주변에 자생하는 관속식물인 통발과 식물인 *Utricularia vulgaris*, 개미탑과 식물인 *Meriophyllum exalbescens*, 수련과 식물인 *Nymphaea variegatum* 및 산부채 등에서 Zn, Cu, Cd, Pb, Mn 및 Fe 등의 흡수량에 관한 Franzin과 McFarlane⁹⁾의 연구 결과, 그리고 수 중의 수생 관속식물에서 Pb와 Cu의 흡수 양상에 관한 Welsh와 Denny¹⁰⁾의 연구 결과등과 유사한 중금속 농축경향을 알 수 있다.

세 가지 재료식물의 뿌리에서 평균 중금속 농축량과 토양의 평균 중금속 함량과의 상관관계(r)를 조사한 결과, 고마리의 경우 Pb는 0.823_(112, 0.01), Cu는 0.766_(112, 0.01), Zn는 0.789_(112, 0.01) 및 Fe는 0.950_(112, 0.01)등으로 나타났고, 마름의 경우 Pb는 0.894_(112, 0.01), Cu는 0.956_(112, 0.01), Zn는 0.649_(112, 0.05) 및 Fe는 0.957_(112, 0.01)등으로 나타났다.

그리고 노랑어리연꽃의 경우 Cu는 0.875_(112, 0.01), Zn은 0.807_(112, 0.01) 그리고 Fe는 0.941_(112, 0.01)로 정 상관관계를 나타내 식물의 뿌리에 농축된 중금속의 농축량은 식물체가 서식하는 서식지 토양의 중금속 함량에 영향을 받는다는 연구^{9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16)}와 유사한 결과를 나타내었다.

3.3 고마리내에서 중금속 흡수량 실험

채집지에서 자생한 고마리 내의 중금속 농축량과 고마리에 중금속을 처리 할 경우 고마리의 농축 경향성을 조사하기 위해 중금속을 단독 또는 혼합하여 10과 30ppm의 농도로 처리한 결과 고마리에 Pb, Cu 및 Zn을 단독으로 처리하였을 때 그 농축량은 Zn<Pb<Cu의 순서로 증가하고, 중금속 10ppm 처리구에 비해 30ppm 처리구에서 Zn는 2.1배, Pb는 2.8배 그리고 Cu는 2.0배 가량 많은 농축량을 보였다. 두 가지 중금속을 동시에 처리한 처리구에서 고마리에 농축된 중금속의 농축량은 Pb와 Cu를 동시에 처리한 처리구에서 Pb의 농축량이 10ppm의 단독 처리구에 비해 0.1배 가량 감소 하고, Cu의 농축량은 Cu 단독 처리구의 농축량과 비슷한 수준의 농축량을 보였다. Pb와 Zn을 동시에 처리한 경우 Pb의 농축량이 10ppm의 단독 처리구에 비해 0.2배 감소한 반면, 30ppm 처리구에서는 0.1배 가량 증가하고 Zn의 농축량은 Zn의 단독처리구에 비해 10ppm 처리구와 30ppm 처리구에서 모두 0.2배 가량 증가하였다. Cu와 Zn를 동시에 처리한 경우 Cu의 농축량은 Cu 단독 처리구에 비해 10ppm 처리구에서 0.2배 감소하고 30ppm 처리구에서 0.2배 가량 증가하였다. 반면에, Zn은 Cu와 혼합 처리하였을때 전혀 검출되지 않았다. 3가지 중금속을 동시에 처리한 경우 중금속 각각의 단독 처리구에 비해 Pb는 10ppm 처리구에서 0.3배, 30ppm 처리구에서 0.6배 감소하고, Cu는 30ppm 처리구에서 0.3배 감소하였으나 10ppm처리구에서는 Cu단독 처리구에서의 농축

Table 3. The Concentration of Heavy Metal in *P. thunbergii* treated with the different Concentrations of Pb, Cu and Zn Alone or the Mixtures of Pb, Cu and Zn for 12 Days (Concentrations as represses as Mean, Unit : $\mu\text{g/g}$ in Dry Weight)

Analysed Heavy Metal	Combination Treatment (Unit : ppm)	Times of Treatment (Day)							
		2	4	6	8	10	12		
Pb	Pb	10	429.6	344.0	591.0	747.4	778.4	1064.0	
		30	464.8	1638.4	1687.0	2642.2	2166.8	2331.6	
	Pb+Cu	10	500.2	210.0	394.2	487.0	367.4	1756.6	
		30	709.0	344.2	1083.4	1497.4	1252.4	1867.6	
	Pb+Zn	10	789.0	346.2	499.2	730.6	692.4	1251.0	
		30	987.8	1642.0	1606.0	2078.2	1301.8	1941.8	
	Pb+Cu+Zn	10	154.8	138.0	202.4	958.8	468.0	692.0	
		30	158.8	517.8	651.8	1191.0	1054.8	979.2	
	Control		0.7	2.3	3.4	4.2	8.6	10.2	
	Cu	Cu	10	536.2	1523.4	1269.2	2032.0	1170.0	1473.6
			30	1666.6	2396.8	3320.6	4501.6	1417.4	2748.2
		Cu+Pb	10	464.2	442.0	918.6	2121.4	1053.8	1231.2
30			2163.6	2656.4	3105.2	3947.2	2775.8	2632.2	
Cu+Zn		10	552.6	1205.0	1112.0	1384.4	1237.0	1097.2	
		30	903.8	1685.4	2834.8	4618.6	4005.4	4543.4	
Cu+Pb+Zn		10	539.8	330.4	1010.8	1987.2	968.8	3465.2	
		30	701.6	1035.6	1802.0	3140.6	1627.6	2776.8	
Control		0.3	1.2	0.9	1.2	8.3	11.3		
Zn		Zn	10	194.8	279.2	816.5	848.0	748.2	724.2
			30	372.0	779.4	2444.8	3277.8	1057.2	1231.6
		Zn+Pb	10	246.4	310.6	1138.0	1276.6	724.2	535.8
	30		561.8	998.8	1834.6	2692.6	1056.4	1751.0	
	Zn+Cu	10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
		30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Zn+Cu+Pb	10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
		30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Control		4.5	5.6	6.5	6.4	6.9	7.3	

량과 비슷한 수준으로 나타났다(Table 3).

반면에, Zn은 Cu와 동시에 처리하였을 경우와 같이 Pb, Cu 그리고 Zn을 동시에 처리한 10ppm 처리구와 30ppm 처리구에서 모두 검출되지 않았다(Fig. 5). 이러한 결과는 부레옥잠에 의

한 Pb, Cd 및 Hg 등의 흡수량이 저농도의 처리구 보다 고농도의 처리구에서 그리고 혼합 처리구보다 단독 처리구에서 높게 검출 된다는 Muramoto와 Oki¹⁷⁾의 실험결과 및 수생식물인 *Eldoea nuttallii*의 잎과 뿌리에서 Zn와 Cu의 흡수량이 농도에 따라 증가한다는 Werff와 Ernst¹⁸⁾의 실험결과와 일치하였다. 그리고 중금속을 혼합 처리한 처리구 중 Cu와 Zn 그리고 Pb, Cu 및 Zn 20ppm의 처리구에서 배양한 고마리에서는 Zn가 전혀 검출되지 않았는데, 이는 Wallace와 Berry¹⁹⁾에 의해 보고된 식물 내에 여러 종류의 중금속이 동시에 농축되었을 때 각각의 중금속 상호간에 작용하는 길항효과(Synergic effect)의 결과와 유사한 결과로 사료된다.

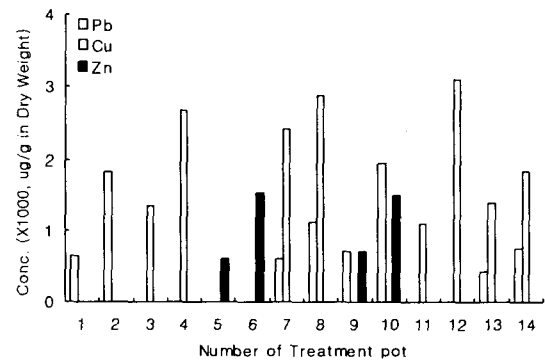


Fig. 5. The patterns of the mean values of the concentrations of heavy metal in *P. thunbergii* treated with the different concentration heavy metal alone or the mixtures of heavy metal for 12 days ; 1. Pb 10ppm, 2. Pb 30ppm, 3. Cu 10ppm, 4. Cu 30ppm, 5. Zn 10ppm, 6. Zn 30ppm, 7. Pb+Cu 10ppm, 8. Pb+Cu 30ppm, 9. Pb+Zn 10ppm, 10. Pb+Zn 30ppm, 11. Cu+Zn 10ppm, 12. Cu+Zn 30ppm, 13. Pb+Cu+Zn 10ppm, 14. Pb+Cu+Zn 30ppm.

또한, 이처럼 혼합 처리에서 Cu가 Zn의 흡수를 강하게 저해하는 현상에 대해 벼과 식물을 이용해 실험한 결과 Cu와 Zn은 식물체 내의 중금속 결합물질에 동일한 결합부위를 가지며, Cu가 Zn보다 강한 결합력을 가짐으로 식물체에서

Cu가 Zn의 흡수를 강하게 억제 한다는 결과와 유사한 결과^{20) 21)}로, 식물체 내에서 중금속 흡수 및 농축작용에 대한 기구를 밝히는 것은 중금속의 농축생리현상을 밝히는 중요한 과제로서 이에 대한 보다 깊은 연구가 요구된다. 고마리에서 중금속의 부위별 농축량을 조사하기 위해 Pb, Cu 및 Zn을 각각 20ppm의 농도로 처리한 재료식물을 12시간 후 잎, 줄기 및 뿌리에서의 중금속 농축량을 조사한 결과 재료식물의 각 부위별 Pb, Cu 및 Zn의 농축량은 7개 채집지에서 자생한 고마리에서 조사된 부위별 중금속 농축량의 결과와 유사한 결과로 Pb와 Zn의 경우 줄기<잎<뿌리의 순서로 중금속의 농축량이 증가하였고, Cu의 경우 잎<줄기<뿌리의 순서로 중금속 함유량이 증가하여 뿌리에서 가장 많은 양의 중금속을 농축할 수 있음을 알 수 있었다(Table 4).

Table 4. The Concentrations of Heavy Metal in the Leaf, Stem and Root of *P. thunbergii* treated with 20ppm of Pb, Cu and Zn Alone for 12 hours (Unit : $\mu\text{g/g}$ in Dry Weight)

Part of Plant Species	Pb	Cu	Zn
Leaf	17.16	12.20	38.00
Stem	16.45	14.62	25.64
Root	159.35	1156.57	135.98

또한 고마리에 농축된 각각의 중금속의 부위별 농축량은 잎과 줄기에서 Cu<Pb<Zn의 순서로 나타났고 뿌리에서는 Zn<Pb<Cu의 순서로 증가하였다. 그리고 각 개체당 중금속의 농축량은 Pb<Zn<Cu 순서로 증가하였는데 이러한 결과는 7개 채집지에서 자생한 고마리에 농축된 중금속의 농축량과 유사한 경향성이 있음을 알 수 있었고 서식지 토양에서 고마리의 Cu 흡수량이 조사된 다른 중금속에 비해 크다는 사실을 나타내는 결과였다.

이처럼 3종류의 관속식물 중 정수성 수생관속식물인 마름 및 노랑어리연꽃과 하천가에 군락

을 형성하는 고마리 등에서 중금속의 농축량을 비교하면, 마름과 고마리에서 중금속의 농축량은 비슷한 수준으로 농축된다는 것을 알 수 있었고 노랑어리연꽃에서 농축량은 다른 재료식물에 비해 비교적 적은양을 농축하는 것으로 나타나 관속식물에서 중금속 농축량의 차이는 식물종의 차이, 식물체가 서식하는 서식지 환경 특히, 식물의 형태와 해부학적인 차이^{9) 22)} 등에 의해서 중금속 농축량이 달라짐을 알 수 있었다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 하천 유역에 유입되는 중금속의 제거에 하천가에 군락을 형성하는 습생식물이나 정수성 수생관속식물을 이용할 경우 부유성 수생관속식물을 이용할 때 나타나는 현상 즉, 수면을 점유하여 식물체의 잎 면적이 증가함에 따라 수중으로의 태양광을 차단하여 수온이 낮아지는 현상, 수중 저니부의 토양에 뿌리를 내리지 않아 수중 토양에 함유된 중금속의 제거를 불리하게하는 점, 그리고 수중에 뿌리가 직접 노출되어 수중 산소의 소비로 인한 수중생태계에 다른 영향을 미치게 되는 여러 작용^{8) 23) 24) 25) 26)} 등을 피할수 있어 유리하다고 생각된다. 본 연구 실험재료 중 하천 유역에 군락을 형성하는 고마리는 토양에 뿌리를 내리고 하천의 가장자리에 군락을 형성하므로 수중에 뿌리가 직접 노출될 때 뿌리에 영향을 미치는 여러 환경요인 즉, 수온의 변화, 태양의 조사시간 및 태양의 조사량 등과 같은 계절적인 변화에 의한 뿌리의 성장 저해 현상이 적으며, 토양에 뿌리를 내리고 성장할 경우 뿌리 주위의 환경 변화가 수중의 환경보다 변화 정도가 적으므로 뿌리의 성장에 유리하다^{27) 28)}. 또한, 식물체의 뿌리에서 영양물질을 흡수하는 효과가 주근보다는 뿌리털에서 더 왕성히 일어나고 이러한 뿌리털의 생장은 토양내의 혐기적인 환경상태는 수중 환경 보다 유리하기 때문²⁸⁾에 마름과 노랑어리연꽃에 비해 하천가에 군락을 형성하는 고마리가 하천 토양으로부터 직접 많은 양의 중금속 물질을 제거할 수 있는

유리한 점을 갖추고 있는 식물로 생각된다. 또한 본 실험의 결과에서 나타난 것과 같이 하천가에 자생한 고마리의 건조량에 따른 중금속의 평균 농축량이 전체 채집지에서 Pb는 80.4~254.6 $\mu\text{g}/\text{g}$, Cu는 284.6~688.5 $\mu\text{g}/\text{g}$, Zn는 635.5~1979.4 $\mu\text{g}/\text{g}$ 및 Fe는 1160.0~3590.9 $\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 측정되었고, 고마리 한 개체당 평균 생체량이 38.45 \pm 4.76g(n=56)일 때 이에 따른 건조량이 생체량의 약 21.3%인 8.19 \pm 1.02g(n=56)이므로, 고마리 한 개체당 농축할 수 있는 Pb, Cu, Zn 및 Fe 등의 농축량이 각각 0.66~2.09mg, 2.33~5.64mg, 5.20~16.21mg 그리고 9.50~29.41mg등으로 생각할 수 있다. 이는 1m²내에 서식하는 고마리(약 850~1,100개체)에 의해서 제거할 수 있는 중금속의 양을 Pb는 0.64~2.04g, Cu는 2.27~5.50g, Zn는 5.07~15.80g 그리고 Fe는 9.26~28.67g으로 계산된다. 따라서, 하천유역에 군락을 형성하는 고마리의 경우 정수성 관속식물이나 부유성 관속식물을 이용하는 방법과는 달리, 중금속 물질이 하천에 유입되기 전에 하천가에 형성된 고마리 군락에서 중금속 물질을 제거할 수 있는 중금속 제거 식물(Elimination plant)로 활용할 수 있어, 수질 및 토양의 정화식물로 활용이 기대되며 서식지의 파괴를 보호해야 할 중요한 자생식물임을 확인 하였다.

4. 결론

본 연구는 하천유역 토양 내의 중금속을 제거하는데 식물을 활용하기 위해 전라북도에 위치한 전주천과 그 주변하천에서 7개 지점을 선정하여 토양의 Pb, Cu, Zn 및 Fe 등의 함량을 조사하고, 그 주변에 자생하는 고마리, 마름 및 노랑어리연꽃의 중금속 농축량과 부위별 중금속 농축량을 조사하였다. 그리고 재료식물내의 중금속 농축량과 서식지 토양의 중금속 함량과의 관계를 밝히기 위해 재료식물내의 중금속 함량과 토양의 중금속 함

량간의 상관계수를 조사하였다. 재료식물의 중금속 흡수경향을 조사하기위해 재료식물 중 고마리를 선정하여 실험실 내에서 Pb, Cu 및 Zn 등을 여러 농도로 처리한 용액에 고마리의 뿌리부분을 침수시켜 배양한 후 그 농축량을 측정하였고, 그 결과를 7개 채집지에서 자생한 고마리의 중금속 농축량의 측정치와 비교 분석 하였다. 7개 채집지에서 자생한 고마리의 부위별 중금속 농축량은 Pb와 Zn의 경우 줄기<잎<뿌리의 순서로 증가하고, Cu와 Fe는 잎<줄기<뿌리의 순서로 증가하여, 중금속 별 농축량은 Pb<Cu<Zn<Fe의 순서로 증가하였다. 마름의 경우 부위별 중금속 농축량은 Pb, Cu, Zn 및 Fe에서 모두 잎<줄기<뿌리의 순서로 농축량이 증가하고, 중금속별 농축량은 고마리에서와 같이 Pb<Cu<Zn<Fe의 순서로 증가하였다. 노랑머리 연꽃의 경우 Cu와 Zn는 농축량이 줄기<잎<뿌리의 순서로 증가하고, Pb와 Fe는 잎<줄기<뿌리의 순서로 농축량이 증가하였다. 그리고 노랑어리연꽃내 중금속 농축량은 고마리와 마름에서와는 달리 Pb<Cu<Fe \leq Zn의 순서로 증가하였다. 고마리의 배양 실험 결과, 서식지에서 조사된 결과인 잎과 줄기에서 Pb흡수력은 그의 농축량과는 달리 Cu의 흡수력이 가장 크다는 것을 실내 배양실험의 중금속 흡수량 실험의 결과와 고마리의 중금속 농축량 및 서식지 토양의 중금속 함량과 비교함으로써 알 수 있었다. 서식지 토양의 중금속 함량의 변화 양상과 고마리, 마름 및 노랑어리연꽃 뿌리에서 그 농축량의 변화양상을 비교 분석한 결과, 그 경향은 정일성을 나타냈는데, 이것은 토양의 중금속 함량의 변화로 인하여 재료식물의 뿌리에 농축된 중금속 농축량이 변화한다는 것을 시사하는 것이다.

5. 사 사

본 연구는 1996년 전주대학교 학술연구조성비의 지원에 의해 연구되었음.

참고 문헌

1. Franson, M. A. H. "Standard Method (for the Examination of Water and Waste Water)" *American Public Health Association*, 17th Ed. pp.3~1~3~11 (1989).
2. Barrett, P. R. F., Murphy, K. J., and Wade, P. M. "The Management of Aquatic Weeds", in *Hance, R. J. and K. Holly. Weed Control Handbook : Principles. Blackwell Scientific Publications LTD*, pp.473~490 (1990).
3. Jackson, P. J., Unkefer, P. J., Delhaize, E., and Robinson N. J. "Mechanisms of Trace Metal Tolerance in Plant", in *Katterman, F. 1990. Environmental Injury to Plants. Academic Press*, pp.231~255 (1990).
4. Smilde, K. W. "Heavy Metal Accumulation in Crops Grown on Sewage Sludge Amended with Metal Salts", *Plant and Soil*, 62, pp.3~14 (1981).
5. Boyd, C. E. "Vascular Aquatic Plants for Mineral Nutrient Removal from Polluted Water", *Economic Botany*, 24, pp.95~103 (1970).
6. Park, K. N., Kang, K. H., and Kim, I. S. "Studies on the Removal of Heavy Metals and the Assay of Heavy Metal Pollution Levels in the Area of Rivers by Vascular Plants. I. Biological Magnification of Pb, Cu, Zn and Fe in Water Chestnut, *Trapa japonica* and Relationship to Metal Contents in Adjacent Soil or Waters", *J. NSRI, Jeonju Univ.*, 8(1), pp.25~31 (1995).
7. Jain, S. K., Vasudevan, P. and Jha N. K. "Azolla pinata R. Br and Lemna minor L. for Removal of Lead and Zinc from Polluted Water", *Wat. Res.*, 24(2), pp.177~183 (1990).
8. Jain, S. K., Vasudevan, P., and Jha, N. K. "Removal of Some Heavy Metals from Polluted Water by Aquatic Plants ; Studies on Duckweed and Watervelvet", *Biological Waters*, 28, pp.115~126 (1989).
9. Franzin, W. G., and McFarlane G. A. "An Analysis of the Aquatic Macrophyte, *Myriophyllum exalbescens*, as an Indicator of Metal Contamination of Aquatic Ecosystems near a Base Metal Smelter", *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 24, pp.597~605 (1980).
10. Welsh, P., and Denny P. "The Uptake of Lead and Copper by Submerged Aquatic Macrophytes in Two English Lakes", *J. Ecology*, 68, pp.443~455 (1980).
11. Aulio, K. "Accumulation of Copper in Fluvial Sediments and Yellow Water Lilies (*Nuphar lutes*) of Varing Distance From a Metal Processing Plant", *Bill. Environ. Contam. Toxicol.*, 25, pp.713~717 (1980).
12. Dietz, F. "The Enrichment of Heavy Metals in Submerged Plants", pp.53~62 (1973).
13. Harding, J. P. C., and Whitton B. A. "Zinc, Cadmium and Lead in Water, Sediments and Submerged Plants of the Derwent Reservoir, Northern England", *Water Res.*, 12, pp.307~319 (1978).
14. Hutchinson, G. E. "The Chemical Ecology of Freshwater Macrophytes", *In A Treatise on Limnology. Vol. III. Limnology Botany. John Wiley & Sons. New York*, pp.264~407 (1975).
15. Kinkade, M. L., and Erdman H. E. "The Influence of Hardness Components (Ca^{2+} and Mg^{2+}) in Water on the Uptake and Concentration of Cadmium in a Simulated Freshwater Ecosystem" *Environ. Res.*, 10, pp.308~313 (1975).

16. Mudroch, A., and Capobianco J. "Study of Selected Metals in Marshes on Lake St. Clair, Ontario", *Arch. Hydrobiologia*, 84, pp.87~108 (1978).
17. Muramoto, S., and Oki Y. "Removal of Some Heavy Metal from Polluted Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*)", *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 30, pp.170~177 (1983).
18. Werff, M. M., and Ernst W. H. O. "Kinetics of Copper and Zinc Uptake by Leaves and Roots of an Aquatic Plant, *Elodea nuttallii*", *Z. Pflanzenphysiol. B.*, 92(S1-10), pp.1~9 (1979).
19. Wallace, A., and Berry W. L. "Shift in Threshold Toxicity Levels in Plants when more than Trace Metal Contaminates Simultaneously", *The Science of the Total Environment*, 28, p.257~263 (1983).
20. Girdano, P. M., Noggle, J. C., and Mortvedt, J. J. "Zinc Uptake by Rice as Affected by Metabolic Inhibitor and Competing Cations", *Plant and soil*, 41, pp.673~646 (1974).
21. Gupta, B. D., and Mukherji S. "Effects of Toxic Concentrations of Copper on Growth and Metabolism of Rice Seedlings", *Z. Pflanzenphysiol. Bd.*, 82, pp.95~106 (1977).
22. Peter, R., Welsh, H., and Denny P. "The Translocation of Lead and Copper in Two Submerged Aquatic Angiosperm Species", *Jour. of Environ. Botany.*, 30(115), pp.339~345 (1979).
23. Gottlibe, L. D. "Eutrophoretic Evidence and Plants Populations", *Prog. Phytochem.*, 7, pp. 1~45 (1981).
24. McIntyre, G., Rodriguez, J. J., Thackston, E. D., and Wilson D. J. "Copper Removal by an Adsorbing Colloid from Flotation Pilot Plant", *Separation Science and Technology*, 17(2), pp. 359~367 (1982).
25. O'Brien, W. J. "Use of Aquatic Macrophytes for Waste Water Treatment", *J. Environ. Eng. Div.*, 107(4), pp.681~698 (1982).
26. Yount, J. L., and Crassen R. A. "Eutrophication Control by Plant Harvesting", *J. of WPCF*, 42(4), pp.173~183 (1970).
27. Baker, A. J. M., Brooks, R. R., Pease, A. J., and Malaisse, F. "Studies on Copper and Cobalt Tolerance in Three Closely Related Texa within the Genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaire", *Plant and Soil*, 73, pp.377~385 (1983).
28. Waisel, Y., and Agami M. "Ecophysiology of Roots of Submerged Aquatic Plants", In Waise, Y., Eshel, A. and U. Kafkafi. "Plant Roots" *Marced Dekker. Inc.*, pp.887~905 (1991).