

중금속에 노출된 *Rhizophora mangle*의 폴리페놀, 항산화 활성 및 지방산 함량 변화

황진익¹, 이건섭¹, 박미례¹, 김소정², 정영재³, 이택건^{1*}

¹한국해양과학기술원 남해특성연구부, ²경북해양바이오산업연구원, ³신경대학교 생명공학과

Changes of Phenolics, Antioxidant Activities and Fatty Acid Contents of *Rhizophora mangle* Exposed to Heavy Metals

Jinik Hwang¹, Gunsup Lee¹, Mirye Park¹, So Jung Kim², Youngjae Chung³
and Taek-Kyun Lee^{1*}

¹South Sea Environment Research Department, Korea Institute of Ocean Science & Technology

²Kyeongbuk Institute for Marine Bio-Industry

³Department of Life Science and Biotechnology, Shin Gyeong University

요 약 Cu, Ni 및 Cd에 노출된 망그로브 식물의 페놀성 화합물, 항산화 활성 및 지방산 함량의 변화를 분석하였다. *Rhizophora mangle*의 태생종자를 Cu(0.01 및 1 ppm), Ni(0.1 및 10 ppm) 및 Cd(0.1 및 10 ppm) 스트레스 하에서 12주간 배양하였다. 대조구와 비교하여 볼 때, 12주 동안 망그로브 뿌리의 형태학적 변화는 관찰되지 않았다. 12주간 배양된 태생종자에서 페놀성 화합물의 함량은 통계학적으로 유의하게 변화하지 않았으나, 항산화 활성은 크게 증가하였다. 지방산, C14:1, C15:1 및 C18:2n-6, 함량은 시험된 모든 태생종자에서 변화하였다. 이러한 결과는 DPPH 라디칼 소거능 assay와 지방산 함량분석이 중금속 하에서의 망그로브 식물의 반응을 진단할 수 있는 유용한 바이오마커가 될 수 있음을 보여준다.

Abstract Changes of phenolics, antioxidant activities and fatty acid contents were determined in the mangrove plant exposed to Cu, Ni and Cd. Propagules of *Rhizophora mangle* were cultured for 12 weeks under the Cu (0.01 and 1 ppm), Ni (0.1 and 10 ppm) and Cd (0.1 and 10 ppm) stresses. In comparison with control, morphological changes of mangrove root were not observed in 12 weeks. Significant changes of phenolics were not detected and antioxidant activities were dramatically increased in the metal-treated mangroves. Fatty acid, C14:1, C15:1 and C18:3n-6, contents were changed in the all of tested propagules. These results shows that DPPH radical scavenging assay and determination of fatty acid contents could be useful biomarkers for diagnosing responses of mangrove plant under heavy metal stress.

Key Words : Antioxidant activity, Fatty acid, Heavy metals, Phenolics, *Rhizophora mangle*

1. 서론

중금속은 무게가 5 g/cm³ 이상인 elements의 그룹으로 정의된다. 중금속 중 Co, Fe, Mn, Ni, Zn, Cu 등은 필수 미소영양성분이며, 식물의 정상적인 성장에 필요하고, 산화환원반응, 전자전달 및 다른 중요한 물질대사 과정에

참여한다[1]. 한편 Pb, Cd, Cr 및 Hg 등은 필수영양성분이 아니며, 생물학적 기능을 가지지 않고, 잠재적으로 식물에 독성영향을 미친다[2-4]. 고농도의 중금속은 식물의 성장을 저해하며, 생물량을 감소시키고 궁극적으로는 사멸에 이르게 한다[5]. 중금속은 호흡, 광합성, 세포증식, 식물-물 연관관계, 질소대사 및 미네랄 섭취 등과 같은

본 논문은 한국해양과학기술원 연구과제(PE99161)로 수행되었음.

*Corresponding Author : Taek-Kyun Lee(Korea Institute Ocean Science & Technology)

Tel: +82-55-639-8630 email: tklee@kiost.ac

Received April 12, 2013

Revised June 10, 2013

Accepted July 11, 2013

생리과정을 저해한다[6].

카드뮴은 SH 그룹과 결합하여 민감한 효소를 불활성화시키며[12], 카드뮴과 구리는 단백질합성을 저해한다[13]. 니켈과 구리는 활성산소를 생성하여 단백질과 핵산에 산화적 손상을 일으킨다[14-16]. 특히 구리는 hydroquinone과 benzoquinone의 산화를 가속화시켜 DNA 손상을 유도한다[17]. 일반적으로 중금속 독성은 조절되지 않는 과량의 활성산소(reactive oxygen species, ROS)의 생성이며, 생성된 ROS는 지질을 peroxidation시키고, 효소를 비활성화시키며, DNA 및 세포의 다른 구성성분의 손상을 유발한다[7]. 중금속에 의한 ROS 생성에 대한 반응으로, 식물은 catalase, peroxidase, superoxide dismutase 등 다양한 항산화 효소 뿐만 아니라 glutathione, 페놀성 화합물, 카로티노이드, ascorbate 및 불포화지방산 등 이중결합을 포함하는 다양한 항산화 물질을 생산하여 중금속 독성에 저항하게 된다[8-11].

망그로브 식물은 유입된 중금속의 sink로 작용하며, 고농도의 중금속에도 견딜 수 있는 기능을 갖는 것으로 알려져 있다[18]. 망그로브 식물과 관련된 중금속 연구는 염분 스트레스와 침수, 중금속의 분포와 축적 및 광합성에 대한 영향이 대부분을 차지하고 있으며[19-21], 아직까지 중금속에 노출된 망그로브 식물의 생리 및 생화학적 기작에 관한 연구는 많지 않다. 본 연구에서는 red mangrove로 알려진 *R. mangle*의 태생종자(propagules)를 실험실에서 배양하면서 Cu, Ni 및 Cd 노출에 대한 생화학 및 생리학적 반응을 분석하였다. 12주간 배양 후 페놀성 화합물, 항산화 활성 및 지방산 함량의 변화를 분석하여, Cu, Ni 및 Cd 오염의 지시자(indicators)로서의 활용가능성을 분석하였다. 얻어진 결과를 통하여 중금속 스트레스 조건하에서의 망그로브 식물의 생리 및 생화학적 이해를 증진시킬 수 있을 것이다.

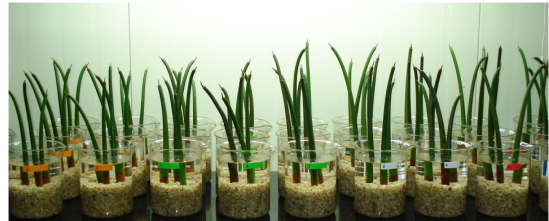
2. 재료 및 방법

2.1 태생종자 배양

R. Mangle 태생종자는 망그로브 마켓에서 구입하였으며, 각각 3개체를 해수가 들어 있는 비이커에 담아 항온 실험실(25°C)에서 배양하였다[Fig. 1]. Day/night cycle과 광도는 각각 14/10 hr, 480 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{c}^{-1}$ 로 조정하였다. 태생종자 배양기에 Cu(0.01 및 1 ppm), Ni(0.1 및 10 ppm) 및 Cd(0.1 및 10 ppm)을 각각 12주간 처리한 후 시료를 채취하여 페놀성 화합물, 항산화 활성 및 지방산 분석에 사용하였다.

2.2 페놀성 화합물 함량 분석

망그로브 추출물의 페놀성 화합물 함량은 Capannesi and Palchetti 방법[22]을 따라 Folin-Ciocalteu reagent로 측정하였다. 0.5 mL의 망그로브 추출물을 0.5 mL의 Folin-Ciocalteu reagent와 섞고 1 mL의 7.5% Na_2CO_3 를 첨가하였다. 8 mL의 증류수를 첨가하여 희석시킨 후 65°C에서 20분간 방치하였다. 푸른색의 반응물을 UV 분광광도계로 765 nm에서 측정하였고, 표준시약으로는 gallic acid를 사용하였다. 망그로브 추출물의 분석은 3번 반복하여 실시하였으며, 페놀성 화합물 함량은 GAE(gallic acid equivalent)로 표시하였으며, 결과는 평균값 \pm SD로 표시하였다.



[Fig. 1] Culture of *R. mangle* propagules.

2.3 항산화 활성 분석

항산화 활성은 DPPH 자유 라디칼 소거능을 기반으로 분석하였다. 실험방법은 Lu와 Foo의 방법[23]을 일부 수정하여 측정하였다. DPPH 용액은 100 mM의 DPPH를 80% 메탄올에 녹여 제조하였다. 0.1 mL의 망그로브 추출물을 2.9 mL의 DPPH 용액에 첨가한 후 잘 섞었다. 25°C, 암처에서 10 분간 방치한 후 517 nm에서 흡광도를 측정하였다. 저해율(%)은 시료를 첨가하지 않은 대조군과 비교하여 아래의 공식을 이용하여 계산하였다.

DPPH 라디칼 소거능(%) = $[(A_0 - A_1)/A_0] \times 100$ (A_0 =대조군 흡광도 A_1 =실험군 흡광도)

실험은 3번 반복 수행하였으며, 결과는 평균값 \pm SD로 표시하였다.

2.4 지방산 분석

12주간 중금속 처리한 *R. mangle* 태생종자를 동결건조하여 분말화한 후 지질 추출 및 지방산 분석에 사용하였다. 지질 및 지방산 추출은 Folch 등의 방법[24]에 따라 실시하였으며, 0.5 mg의 망그로브 분말에 chloroform:methanol(2:1) 5 mL을 첨가하여 20 분 동안 sonicate시킨 후, 0.58% NaCl 5 mL을 다시 첨가하여 10분간 다시 sonicate시켰다. 2000 rpm에서 5분 동안 원심분리시켜 상층부를 제거하고, 아래층을 pasteur pipet을 이용하여 다

른 튜브에 옮겨 N₂ 하에서 건조시켰다. 건조된 sample에 0.5 mL toluene과 2 mL 0.5 N NaOH을 넣고 5분간 중탕 시킨 후 식혔다. BF₃MeOH 첨가 후 다시 3분간 중탕한 후 식혔다. 15 mL petroleum ether과 20 mL H₂O을 넣어 5분간 sonicate시킨 다음 정치시키고 상등액을 뽑아 N₂을 이용하여 건조시켰다. 건조된 시료를 100 µL의 hexane에 녹이고, 1 µL를 gas chromatography(GC)에 주입하였다. 사용한 GC 기종은 Varian CP - 3800을 이용하였으며, detector는 FID을 이용하였고, column은 HP INNOWAX을 이용하여 분석하였다[Table 1]. 실험은 3번 반복 수행하였으며, 결과는 평균±SD로 표시하였다.

[Table 1] Operating condition of gas chromatography for fatty acid analysis

Gas Chromatography	Varian CP - 3800
	Length 30 m
Column (HP-Innowax)	ID 0.25 mm
	Film Thickness 0.25 µm
Oven temp.	50 °C (2 min) → 5 °C/min → 220 °C (30 min)
Detector/Injector	250 °C
Carrier gas	He ₂ (25 ml/min)
H ₂ gas/O ₂ gas	30/300 ml/min

2.5 통계분석

통계분석은 SPSS 통계 소프트웨어를 사용하여 수행하였다. 데이터의 normality와 homogeneity는 ANOVA로 확인하였고, 실험구 간의 차이는 one-way ANOVA와 Duncan's multiple range test로 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 *R. mangle* 태생종자 배양

R. mangle 태생종자를 해수에서 배양하였다. 배양 후 2주에 태생종자로부터 뿌리가 자라기 시작하였고[Fig. 2A], 4주에는 뿌리가 길어지고, 붉은색이 짙어졌다[Fig. 2B]. 배양 8주에는 뿌리가 더욱 길어지면서 흰색의 잔뿌리가 형성되기 시작하였다[Fig. 2C]. 태생종자 배양 12주에는 뿌리가 굵어지면서 더 많은 잔뿌리가 생성되었다[Fig. 2D].

일반적으로 망그로브 식물은 aerial 부위로의 중금속 이동을 제한하는 기작을 가지고 있기 때문에 대부분의 중금속은 뿌리에 축적되는 특성을 가지고 있다[19,20,25]. 뿌리에 중금속이 모이는 것은 중금속에 더 민감한 aerial

부위를 보호하기 위한 기작이며, 따라서 망그로브 식물의 성장은 중금속에 크게 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다[26,27]. 본 연구에서도 중금속이 처리된 태생종자와 처리되지 않은 태생종자를 배양하였을 때 뿌리의 성장 변화 [Fig. 2] 뿐만 아니라 길이 및 무게의 차이를 관찰할 수 없었다(data not shown).



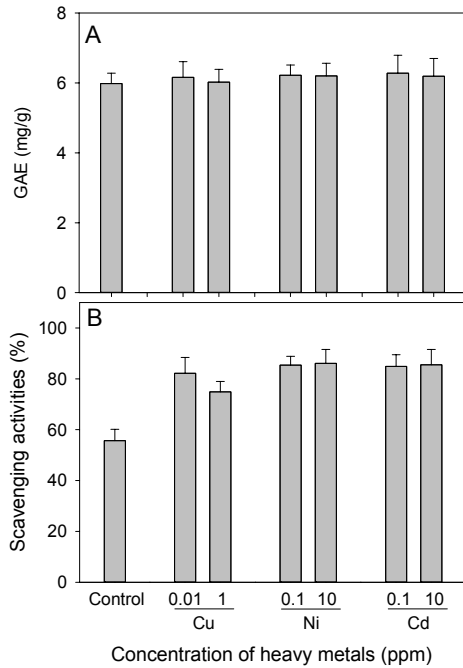
[Fig. 2] Morphological changes of root grown from *R. mangle* propagules during 12 weeks. A, roots after 2 weeks; B, roots after 4 weeks; C, roots after 8 weeks; D, roots after 12 weeks.

3.2 페놀성 화합물 함량 및 항산화 활성 변화

12주간 Cu, Ni 및 Cd에 노출된 *R. mangle* 태생종자를 노출시키고, 페놀성 화합물의 함량 및 항산화 활성의 변화를 분석하였다. 연구결과 대조구에 비해 함량의 변화는 거의 나타나지 않았다[Fig. 3A]. 그러나 항산화활성은 중금속에 노출되지 않은 대조구(55.64%)에 비해 Cu, Ni 및 Cd에 노출된 태생종자(74.84-86.09%)에서 크게 증가하였다[Fig. 3B].

페놀성 화합물은 electron-donating agents이며, 항산화 물질로 작용하기 때문에[1], 중금속 노출의 바이오마커로 작용될 수 있는 것으로 보고되어 있으나[28], 연구 결과 Cu, Ni 및 Cd 노출된 *R. mangle* 태생종자에서 페놀성 화합물의 함량이 변화하지 않았다. 중금속 노출에 대하여 페놀성 화합물의 함량이 변화하지 않은 것은 페놀성 화합물의 항산화 반응에 의해 발생할 수 있는 phenoxyl radicals이 prooxidants로 작용할 수 있기 때문에[29], 고농도의 중금속에 노출된 식물은 페놀성 화합물의 합성이나 분비를 억제하여 phenoxyl radicals의 생성에 의해 발생할 수 있는 악영향을 줄이고자 한다[30]. 중금속 노출에 대하여 페놀성 화합물의 함량이 증가하지 않은 다른 가설은 다른 항산화 물질의 생산을 들 수 있다. 카드뮴에 노출된 *Spartina densiflora*는 항산화 물질로 페놀성 화합물

을 생산하지 않고, ascorbic acid나 glutathione 등 다른 항산화 물질을 생산함으로써 중금속에 반응한다[31]. 본 연구의 결과, 페놀성 화합물의 함량 변화를 *R. mangle* 태생종자의 중금속 오염에 대한 바이오마커로서 활용될 수 없는 것으로 판단된다.

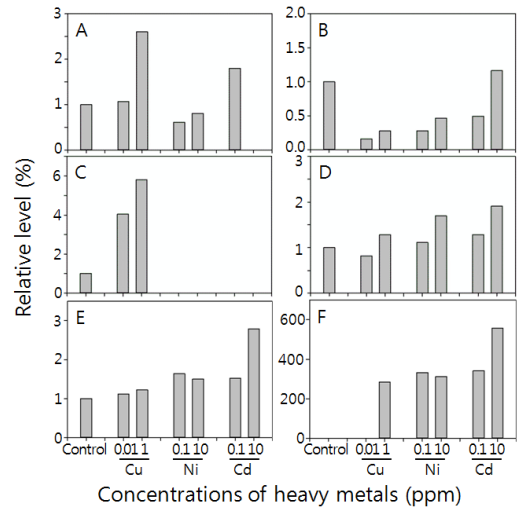


[Fig. 3] Total phenolic contents (A) and DPPH radical scavenging activities (B) of *R. mangle* propagules exposed to heavy metals.

3.2 지방산 함량 변화

Cu, Ni 및 Cd에 노출된 *R. mangle* 태생종자로부터 지방산을 추출하고, 조성을 비교하였다. 얻어진 결과는 중금속에 노출되지 않은 대조구에 대한 증감의 정도를 상대적으로 표시하였다. 중금속 처리에 대하여 크게 변화한 지방산은 C13:0, C14:1, C15:1, C16:0, C18:0 및 C18:3n-6으로 나타났다. C13:0은 1 ppm의 Cu를 처리하였을 때 약 2.5배 증가하였고, Ni에 노출되었을 때는 감소하였다. C14:1은 중금속을 처리하였을 때 대조구에 비해 감소하는 경향을 나타냈으며, C15:1은 Cu 처리군에서만 증가하였고, Ni과 Cd 처리군에서는 미량이 검출되었다. C16:0은 중금속 처리에 따라 크게 변화하지 않았으나, 중금속 농도가 증가함에 따라 C16:0의 농도가 증가하는 경향을 보였다. C18:0은 Cd 처리군에서만 함량이 증가하였고, 특히 10 ppm의 Cd 농도에서 대조구에 비해 약 3배의 함량 증가를 보였다. C18:3n-6은 대조군에서는 미량이 검출

되었으나, 중금속을 처리하였을 때 약 200-600배 함량이 증가되는 것이 관찰되었다. 종합해 보면, Cu가 처리된 망그로브에서는 C13:0, C14:1, C15:1 및 C18:3n-6의 함량이 변화하였고, Ni 처리군에서는 C14:1, C15:1, C16:0 및 C18:3n-6의 함량이 변화되었다. Cd이 처리된 망그로브에서는 조사된 모든 지방산의 함량이 변화하였다. 따라서 Cu, Ni 및 Cd 모두에 반응하는 C14:1, C15:1 및 C18:2n-6은 중금속에 대한 *R. mangle*의 반응을 검출할 수 있는 바이오마커로서의 가능성이 있는 것으로 판단된다.



[Fig. 4] Changes of fatty acid contents in mangrove exposed to heavy metals. A, C13:0; B, C14:1; C, C15:1; D, C16:0; E, C18:0; F, C18:3n-6.

4. 결론

중금속(Cu, Ni 및 Cd)에 12주간 노출된 *R. mangle* 태생종자의 페놀성 화합물, 항산화 활성 및 지방산 함량변화를 분석하였다. 12주간 중금속에 노출된 태생종자에서 페놀성 화합물의 함량은 변화되지 않았고, 항산화 활성은 크게 증가하였다. 이러한 결과는 중금속 노출에 대하여 *R. mangle*은 중금속 유발 ROS에 대한 반응으로 페놀성 화합물 대신 다른 항산화물질을 생산한다는 것을 의미한다. 중금속에 노출된 태생종자에서 지방산 C13:0, C14:1, C15:1, C16:0, C18:0 및 C18:3n-6의 함량이 증감하였는데, 3가지 중금속에 공통적으로 반응하는 지방산은 C14:1, C15:1 및 C18:2n-6으로 나타났다. 따라서 DPPH assay와 지방산 함량분석은 *R. mangle*의 중금속 반응을 진단할 수 있는 바이오마커로서 활용가능한 것으로 판단된다.

References

- [1] A. Michalak, "Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress". Polish J. Environ. Stud. vol. 15, no. 4, pp. 523-530, 2006.
- [2] L. Sebastiani, L. Bastiani, F. Scebba, R. Tongetti, "Heavy metal accumulation and growth responses in poplar clones Eridano (*Populus deltoides* × *maximowiczii*) and I-214 (*P. × euramericana*) exposed to industrial waste". Env. Exp. Bot. vol. 52, pp. 79-88, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.01.003>
- [3] S. Rama Devi, M. N. V. Prasad, "Copper toxicity in *Ceratophyllum demersum* L. (Coontail), a free floating macrophyte: Response of antioxidant enzymes and antioxidants". Plant Sci. vol. 138, pp. 157-165, 1998.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9452\(98\)00161-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00161-7)
- [4] V. Rai, P. Vaypayee, S. N. Singh, S. Mehrotra, "Effect of chromium accumulation on photosynthetic pigments, oxidative stress defence system, nitrate reduction, proline level and eugenol content of *Ocimum tenuiflorum* L". Plant Sci. vol. 167, pp. 1159-1169, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.06.016>
- [5] M. H. Zenk, "Heavy metal detoxification in higher plants-a review". Gene, vol. 179, no. 1, pp. 21-30, 1996.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1119\(96\)00422-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1119(96)00422-2)
- [6] P. Zornoza, S. Vazquez, E. Esteban, M. Fernandez-Pascual, R. Carpena, "Cadmium-stress in nodulated white lupin: strategies to avoid toxicity". Plant Physiol. Biochem. vol. 40, pp. 1003-1009, 2002.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0981-9428\(02\)01464-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0981-9428(02)01464-X)
- [7] K. Stobrawa, G. Lorenc-Plucinska, "Thresholds of heavy-metal toxicity in cuttings of European black poplar (*Populus nigra* L.) determined according to antioxidant status of fine roots and morphometrical disorders". Sci. Total Environ. vol. 390, pp. 86-96, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.09.024>
- [8] J. Vangronsveld, H. Clijsters, "Toxic effects of metals". In: Farago, M.E. (Ed.), Plants and The Chemical Elements-Biochemistry, Uptake, Tolerance and Toxicity. VCH, Weinheim, pp. 149-177, 1994.
- [9] C. Xiang, D. J. Oliver, "Glutathione metabolic genes coordinately respond to heavy metals and jasmonic acid in *Arabidopsis*". Plant Cell. vol. 10, pp. 1539-1550, 1998.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1105/tpc.10.9.1539>
- [10] S. Srivastava, R. D. Tripathi, U. N. Dwivedi, "Synthesis of phytochelatins and modulation of antioxidants in response to cadmium stress in *Cuscuta reflexa*-an angiospermic parasite". J. Plant. Physiol. vol. 161, pp. 665-674, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1078/0176-1617-01274>
- [11] F-Q. Zhang, Y-S. Wang, Z-P. Lou, J-D. Dong, "Effect of heavy metal stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedling (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorrhiza*). Chemosphere. vol. 67, pp. 44-50, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.10.007>
- [12] M. R. Bruins, S. Kapil, F. W. Oehme, "Microbial resistance to metals in the environment". Ecotoxicol. Environ. Saf. vol. 45, pp. 198-207, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/eesa.1999.1860>
- [13] A. Hassen, N. Saidi, M. Cherif, A. Boudabous, "Effects of heavy metals on *Pseudomonas aeruginosa* and *Bacillus thuringiensis*". Bioresour. Technol. vol. 65, pp. 73-82, 1998.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(98\)00011-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(98)00011-X)
- [14] K. Doreswamy, B. Shrilatha, T. Rajeshkumar, H. R. Muralidhara, "Nickel induced oxidative stress in testis of Mice: Evidence of DNA damage and Genotoxic effects". J. Androl. vol. 25, pp. 996-1003, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/j.1939-4640.2004.tb03173.x>
- [15] Y. Li, M. A. Trush, "Oxidation of hydroquinone by copper: Chemical mechanism and biological effects". Arch. Biochem. Biophys. vol. 300, no. 1, pp. 346-355, 1993.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/abbi.1993.1047>
- [16] I. Rocchetta, M. Mazza, V. Conforti, L. Ruiz, V. Balzaretto, M. Molina, "Effect of chromium on fatty acid composition of two strains of *Euglena gracilis*". Environ. Pollut. vol. 141, pp. 353-358, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2005.08.035>
- [17] Y. Li, M. A. Trush, "DNA damage resulting from the oxidation of hydroquinone by copper: Role for a Cu[II]/Cu[I] redox cycle and reactive oxygen generation". Carcinogenesis vol. 7, pp. 1303-1311, 1993.
- [18] E. C. Peters, N. J. Gassman, J. C. Firman, R. H. Richmond, E. A. Power, "Ecotoxicology of tropical marine ecosystems". Environ. Toxicol. Chem. vol. 16, pp. 12-20, 1997.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/etc.5620160103>
- [19] G. R. MacFarlane, M. D. Burchett, "Photosynthetic pigments and peroxidase activity as indicators of heavy

- metal stress in the grey mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh". *Mar. Pollut. Bull.* vol. 42, pp. 233-240, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0025-326X\(00\)00147-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00147-8)
- [20] M. W. Yim, N. F. Y. Tam, "Effects of wastewater-borne heavy metals on mangrove plants and soil microbial activities". *Mar. Pollut. Bull.* vol. 39, pp. 179-186, 1999.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00067-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00067-3)
- [21] Y. Ye, N. F. Y. Tam, Y. S. Wong, C. Y. Lu, "Growth and physiological responses of two mangrove species (*Bruguiera gymnorrhiza* and *Kandelia candel*) to waterlogging". *Environ. Exp. Bot.* vol. 49, pp. 209-221, 2003.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0098-8472\(02\)00071-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0098-8472(02)00071-0)
- [22] C. Capannesi, I. Palchetti, M. Mascini, A. Parenti. "Electrochemical sensor and biosensor for polyphenols detection in olive oils". *Food Chem.* vol. 71, pp. 535-562, 2000.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00211-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00211-9)
- [23] Y. Lu, L. Y. Foo, "Antioxidant and radical scavenging activities of polyphenols from apple pomace". *Food Chem.* vol. 68, pp. 81-85, 2000.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00167-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00167-3)
- [24] J. Folch, M. Lees, S. H. G. Stanley, "A simple method for the isolation and purification of total lipid from animal tissue". *J. Biol. Chem.*, vol. 226, pp. 497-509, 1957.
- [25] N. F. Y. Tam, Y. S. Wong, "Accumulation and distribution of heavy metals in a simulated mangrove system treated with sewage". *Hydrobiologia* vol. 352, pp. 67-75, 1997.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1003057407878>
- [26] G. Y. Huang, Y. S. Wang, "Physiological and biochemical responses in the leaves of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorrhiza*) exposed to multiple heavy metals". *J. Hazardous Materials.* vol. 182, pp. 848-854, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.121>
- [27] G. Z. Chen, S. Y. Mao, N. F. Y. Tam, Y. S. Wong, S. H. Li, C. Y. Lan, "Effect of synthetic wastewater on young *Kandelia candel* plants growing under greenhouse conditions". *Hydrobiologia* vol. 295, pp. 263-273, 1995.
DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-0289-6_30
- [28] D. Białońska, A. M. Zobel, M. Kuras, T. Tykarska, K. Sawicka-Kapusta, "Phenolic compounds and cell structure in bilberry leaves affected by emissions from a Zn-Pb smelter," *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 181, no. 1, pp. 123 - 33, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-006-9284-x>
- [29] Y. Sakihama, M. F. Cohen, S. C. Grace, H. Yamasaki, "Plant phenolic antioxidant and prooxidant activities: phenolics-induced oxidative damage mediated by metals in plants". *Toxicology*, vol. 177, no. 1, pp. 67 - 80, 2002.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0300-483X\(02\)00196-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0300-483X(02)00196-8)
- [30] B. Marquez-Garcia, M. A. Fernandez-Recamals, F. Cordoba, "Effects of cadmium on phenolic composition and antioxidant activities of *Erica andevalensis*". *J. Bot.* vol. 2012, pp. 1-6, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/doi:10.1155/2012/936950>
- [31] D. M. Dominguez, F. C. Garcia, A. C. Raya, R. T. Santiago, "Cadmium-induced oxidative stress and the response of the antioxidative defense system in *Spartina densiflora*". *Physiologia Plantarum*, vol. 139, no. 3, pp. 289 - 302, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1399-3054.2010.01368.x>

황진익(Jinik Hwang)

[정회원]



- 2002년 3월 ~ 2008년 2월 : 신라대학교 학사 졸업
- 2008년 3월 ~ 2010년 2월 : 한국해양연구원 연구원
- 2011년 3월 ~ 현재 : 한국과학기술연합대학원 대학교 석·박사 통합과정 재학

<관심분야>

환경독성학, 분자생물학

이건섭(Gunsup Lee)

[정회원]



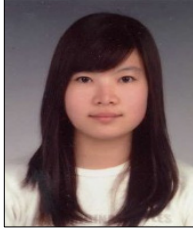
- 2003년 2월 : 성균관대학교 생명공학과 (이학석사)
- 2010년 2월 : 성균관대학교 생명공학과 (이학박사)
- 2011년 1월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연수연구원

<관심분야>

분자생물학, 해양 독성학

박 미 례(Mirye Park)

[정회원]



- 2010년 2월 : 동아대학교 생명과학전공 (이학학사)
- 2011년 10월 ~ 2012년 8월 : 한국해양연구원 인턴연구원
- 2012년 9월 ~ 현재 : 한국과학기술연합대학원 대학교 석·박사 통합과정 재학

<관심분야>

해양환경독성학, 해양분자생물학

이 택 건(Taek-Kyun Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 성균관대학교 생물학 (이학석사)
- 1998년 2월 : 성균관대학교 식물분자생리학 (이학박사)
- 1998년 9월 ~ 2000년 8월 : 한국해양연구원 연수연구원
- 2000년 9월 ~ 현재 : 해양과학기술원 남해특성연구부 책임연구원

<관심분야>

환경분자생리학, 해양환경독성학

김 소 정(So-Jung Kim)

[정회원]



- 1998년 2월 : 인제대학교(환경독성학 석사)
- 2006년 9월 : 해양연구원 남해연구소 연구원
- 2006년 10월 ~ 2007년 4월 : 대한적십자 연구원
- 2007년 5월 ~ 현재 : 경북해양바이오산업연구원 연구원

<관심분야>

생물소재 생화학

정 영 재(Youngjae Chung)

[정회원]



- 1988년 2월 : 성균관대학교 대학원 생물학과 (이학석사)
- 1993년 2월 : 성균관대학교 대학원 생물학과 (이학박사)
- 1997년 3월 ~ 2007년 2월 : 서남대학교 생명과학과 교수
- 2007년 3월 ~ 현재 : 신경대학교 생명공학과 교수

<관심분야>

식물형태 및 계통분류학, 식물유전자원학