

부레옥잠 바이오매스의 특성분석과 제지적용성 평가

김동성 · 허윤성 · 성용주[†] · 한승원¹ · 서철모²

접수일(2014년 10월 13일), 수정일(2014년 10월 22일), 채택일(2014년 10월 24일)

Characterization of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) Biomass and Evaluation of Applicability as an Organic Filler to Papermaking

Dong Sung Kim, Yoon Sung Heo, Yong Joo Sung[†], Seung-Won Han¹ and Cheol Mo Seo²

Received October 13, 2014; Received in revised form October 22, 2014; Accepted October 24, 2014

ABSTRACT

The enrichment with nutrients in rivers and lakes becomes serious problems in Korea. As the environmental friendly solution, the phytoremediation are getting more attention and the water hyacinth could be a strong candidate plant for this. Water hyacinth is a free floating freshwater plant proven to be a effective plant used for a purification of a polluted lakes, sewage wastewater, and livestock wastewater. The biggest obstacles for application of water hyacinth in Korea could be the disposal of the water hyacinth before winter, because there is no feasible use for the water hyacinth until now. In this study, the characteristics of water hyacinth were deeply investigated for providing background data to develop appropriate application of the water hyacinth. The water hyacinth was fractioned three parts, leaf, air bladder, root of which morphological properties were evaluated with microscope and field emission scanning electron microscope (FE-SEM). The water contents of each parts of the water hyacinth were 87% for leaf, 96.5% for air bladder, 94.6% for root. The chemical compositions of each parts were also measured and showed around 29% of hot water extract in leaf and air bladder, 42% holocellulose for leaf, 47% holocellulose for air bladder. The application of water hyacinth biomass without root parts to papermaking provided bulkier structure, but the tensile strength was decreased.

• 충남대학교 농업생명과학대학 환경소재공학과 (Dept. of Biobased Materials, College of Agriculture and Life Science, Chungnam Natl. Univ., Daejeon, Republic of Korea)

1 농촌진흥청 국립원예특작과학원 도시농업연구팀 (Rural Development Administration, Dept. of Horticultural Crop Research, Suwon Si, Gyeonggi-do, 441-440, Korea)

2 에코시프트(주) (EcoShift Inc. 1013ho, 1305-30, Joongangro, Dong-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea)

† 교신저자 (Corresponding Author): E-mail: yosung17@cnu.ac.kr

Keywords: *Water hyancith, water content, morphological properties, papermaking*

1. 서론

산업발전과 도시화 및 지속적인 지역개발 등의 영향으로 다양한 환경문제가 발생하여 많은 관심의 대상이 되고 있다. 이러한 환경문제를 적절히 관리하여 국가 전체의 환경을 개선하고 보전하는 것은 국민의 행복한 삶을 위해 필수적인 사안이라 할 수 있는데, 특히 도시 및 농지 등으로부터 유입되는 비점오염수 및 축산농가 등으로부터 발생하는 유기성 오염수들은 주요 하천이나 저수지 등으로 흘러들어오고 생활폐수 및 질소, 인 등과 같은 무기영양염류의 집적 및 부영양화를 초래하여 녹조발생 및 수중생태계 파괴와 같은 문제들을 유발하고 있다.¹⁾ 이러한 대표적인 수질오염에 대응하고 하천수의 부영양화를 최소화하기 위한 여러 가지 설비 및 방법들에 대한 연구개발이 이루어지고 있으나 비점오염원으로부터 유입되기 때문에 광범위한 범위를 대상으로 추가적인 설비가 필요하거나, 이를 위한 상당한 수준의 에너지 및 관리비용의 추가적 집행 등으로 현실적인 대응에 많은 어려움이 있는 실정이다. 따라서 현재 친환경적이고 저비용의 수질정화 방법에 대한 관심이 높아지고 있는데, 대표적인 친환경 수질정화 방법으로 대형수생식물을 사용한 수질정화 방법을 들 수 있다. 부레옥잠, 부들, 물창포, 연꽃 등이 이러한 목적으로 활용될 수 있는데 이중 부레옥잠은 백합아강 백합목 물옥잠과 에이크호르니아속에 속하는 담수 수생식물로서²⁾ 수질정화 기능이 상대적으로 우수한 것으로 알려져 있다. 실제 부레옥잠은 COD, NH₄-N, PO₄-P 등 담수의 부영양화를 일으키는 물질을 효과적으로 흡수하여 성장하는데,³⁾ 특히 질소와 인을 비롯한 합성세제의 제거에 효과적이며, 영양염류 제거 효율을 실험한 결과, 질소는 70-80%, 인은 40-50% 정도의 제거율을 나타내는 것으로 보고된 바 있다.⁴⁾ 이러한 부레옥잠의 수질정화 효과를 활용하여 축산폐수의 정화를 위한 실험^{5,6)}이 실시된 바 있고, 생활오수,⁷⁾ 하수처리 공정영향⁸⁾ 및 수중영양염류 제거⁹⁾ 등에 적용가능성이 평가된 바 있다.

상대적으로 높은 수질정화능력을 가지고 있는 부

레옥잠은 실제 열대 또는 아열대 기후에서 서식하는 수종으로서 대부분 하천, 강 유역에 서식하며, 번식력이 매우 뛰어나기 때문에 아프리카와 아마존 지역 등의 열대 및 아열대 지역에서는 과밀하게 성장된 부레옥잠으로 인한 다양한 문제들이 발생되고 있다. 특히, 많은 양의 부레옥잠이 수표면을 덮어 빛을 차단시켜, 식물성 플랑크톤과 침수식물의 번식을 방해하고, 과도한 생장으로 수질을 더욱 악화시키는 것으로 보고되고 있다.¹⁰⁾ 하지만 국내의 경우에는 여름철 번식이 된 부레옥잠이 겨울철의 저온기온에서 동사되기 때문에 한해살이에 속하며 과밀한 번식에 의한 문제는 발생되지 않는다. 그러나 동사된 부레옥잠을 방치할 경우 추가적인 수질오염의 원인이 되기 때문에 부레옥잠이 동사하기 전에 회수할 필요가 있고, 이렇게 회수된 부레옥잠의 경우 특별한 용도가 없기 때문에 부레옥잠의 활용기술의 개발이 시급히 요구되는 실정이다. 현재 이러한 폐 부레옥잠을 배지로 활용한 연구¹¹⁾나, 사료로의 활용 가능성이 제시된 바 있으나 종합적 활용을 위한 다양한 가능성에 대하여 깊이 있는 연구개발이 진행되지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 폐기되고 있는 부레옥잠의 고도활용을 위한 기초자료를 확보하고자 부레옥잠의 형태적, 화학적 특성을 자세히 알아보았다. 특히 부레옥잠을 각각 잎, 부레, 뿌리부분으로 나누어 형태적 분석을 실시하였고, 생체의 물질량과 함유수분량 등을 알아보았다. 섬유자원으로서의 활용성을 알아보기 위하여 화학적 성분분석 및 제지용 충전제 등으로 적용성을 평가하였는데, 이러한 결과들을 바탕으로 부레옥잠의 통합적 활용방안을 모색해보았다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

본 연구에서 사용한 부레옥잠은 국내 M사에서 구입하여 적용하였다. 특성분석을 위하여 생부레옥잠을 세척하여 불순물을 제거하고 잎, 부레, 뿌리부분으로 나

누어 시료를 준비하였으며 성분분석 등을 위해서 상온에서 기건시켰다.

2.2 부레옥잠의 수분함유량 평가

2.2.1 부레옥잠의 고형분 함량 평가

부레옥잠의 총 무게비율을 평가하기 위하여 고형분 함량 평가를 실시하였다. 부레옥잠을 잎, 부레, 뿌리부분으로 분획·건조시켜 전체 부레옥잠에서 각 부분이 차지하는 무게비율을 평가하였다.

2.2.2 수분함유량 평가

부레옥잠의 수분함유량 특성을 평가하기 위하여 생체 부레옥잠을 잎, 부레, 뿌리부분으로 나누어 분석을 실시하였다. 수분함유량 특성을 파악하기 위하여 고압프레스를 이용하여 2000 kg/cm^2 , 70 mm/s 의 조건으로 압착을 실시하여 생체에서 압착되어 나오는 압착수의 양을 평가하였다. 시료에서 압착수가 용출되지 않을 정도로 압착을 실시한 후 남은 잔재는 건조하여 물리적으로 추출되지 않고 잔류하는 수분량을 평가하였다.

2.3 전자주사현미경을 이용한 부레옥잠의 형태적 특성 평가

부레옥잠의 잎, 부레, 뿌리의 표면과 단면을 관찰하기 위하여 전자주사현미경(field emission scanning electron microscope, FE SEM, Philips XL30 ESEM TMP)을 이용하여 평가하였다. 부레옥잠 부위별로 각각 동결시킨 후 횡단면을 절삭, 에탄올을 이용하여 단계별로(50%, 70%, 80%, 90%, 95%, 100% I, 100% II) 약 2시간씩 탈수시켰다. 탈수된 시료를 초임계 건조기(critical point dryer, CDP 030)로 임계점 건조 후 내부미세 구조를 비교평가 하였다.

2.4 부레옥잠의 화학적 조성 및 특성평가

2.4.1 부레옥잠의 화학적 성분분석

부레옥잠의 화학적 성분조성을 파악하고자, 잎·부레·뿌리로 각각 분리하여 분쇄하고 분쇄분을 40-60 mesh로 분급하여 TAPPI 표준분석법에 의거 화학적 조성 분석을 실시하였다. 우선 온수추출(TAPPI Standard Method T207 cm-99) 및 유기용매추출(TAPPI Standard Method T204 cm-97)을 실시하고, 이어서 셀룰로오스

함량분석(TAPPI Standard Method T203 cm-99)과 리그닌의 함량을 Klason-lignin법(TAPPI Standard Method T222 om-02)을 이용하여 평가하였다. 시료 내의 ash 함량(TAPPI Standard Method T211 om-93)은 525°C ± 25 에서 4시간 동안 연소시킨 후 측정하였다.

2.4.2 원소분석

부레옥잠을 잎, 부레, 뿌리로 나누어 각각의 부위별로 질소 및 탄소의 함량을 분석하기 위하여 각각의 시료를 분말화 한 후 자동원소분석기(automatic elemental analyzer)를 이용하여 C와 N의 함량비를 분석하였다.

2.5 부레옥잠의 부위별 화학성분의 관능기 평가

부레옥잠의 부위별 조성분의 관능기를 비교평가하기 위하여 적외선분광분석장치(fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)를 사용하여 성분분석을 실시하였다. 부레옥잠은 각 부위별로 분리, 건조 및 분쇄한 후 분석을 실시하였으며, 전반사측정(attenuated total reflectance, ATR) 분석 시 발생하는 peak point를 파악한 후 특성을 파악하였다.

2.6 부레옥잠 바이오매스를 혼합한 수초지 제조

부레옥잠 바이오매스의 제지용 원료 적용가능성을 알아보기로 미표백침엽수 펄프(unbleached softwood kraft pulp, UKP) 지료에 뿌리를 제외한 부레옥잠 바이오매스 건조 후 분쇄분을 첨가하여 수초지를 제조하였다. 실험실용 고해기(Valley beater)를 이용하여 UKP를 해리 후 평량 80 g/m^2 로 수초지를 제조하였다. 여기에 뿌리부분을 제거한 부레옥잠 바이오매스 건조 후 분쇄분을 40-100 mesh로 분급한 후 10, 20% 첨가하고 균일하게 혼합하여 수초지를 제조하였다. 그 후 고압프레스를 이용하여 압력은 1000 kg/cm^2 , 70 mm/s 의 조건으로 압착탈수를 실시한 후 건조하여 그 특성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 부레옥잠의 부위별 수분함유량 평가

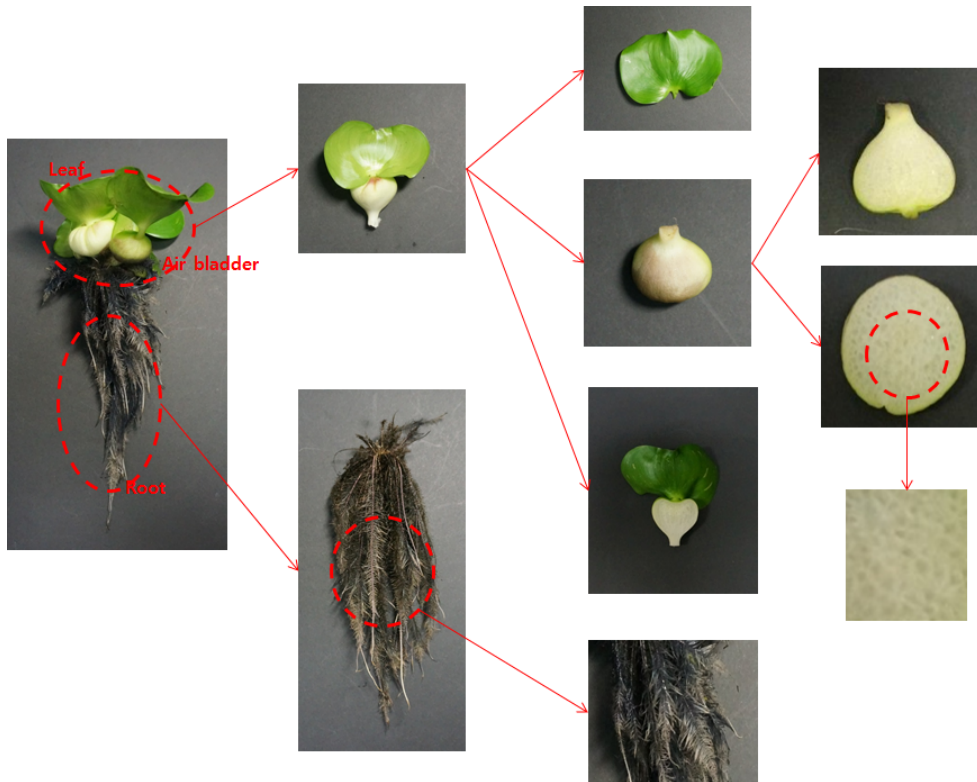


Fig. 1. Morphology of each parts of the water hyacinth plants.

3.1.1 고품분 함량 평가

부레옥잠은 물 위에 존재하는 상층부와 물 아래에 존재하는 하층부로 나눌 수 있는데, Fig. 1에서 보는 바와 같이 상층부의 경우 잎과 부레로 이루어져 있으며, 하층부는 새의 깃털 모양의 뿌리로 이루어져 있다. 각 부위별로 고품분 무게를 비교하였을 때 Fig. 2에서와 같이 전체 부레옥잠 고품분에서 잎맥 부위 중 잎이 약

12%, 부레가 약 60%, 뿌리부분이 약 27%를 차지하는 것으로 나타났다. 기존 연구에서도 이와 유사하게 잎과 부레가 약 74%, 뿌리 부분이 약 26%로 전체 부레옥잠 바이오매스를 구성하고 있는 것으로 보고된 바 있다.¹²⁾

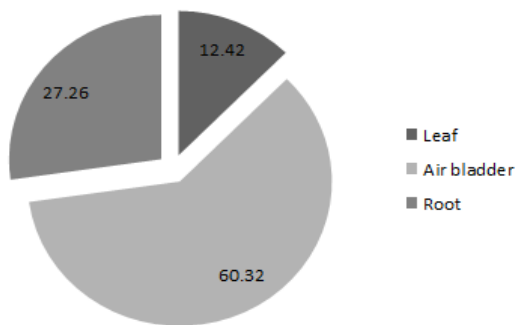


Fig. 2. Weight composition of water hyacinth.

3.1.2 부레옥잠의 수분함유량

생재 부레옥잠을 잎, 부레, 뿌리로 분획하여 프레스로 압착을 실시하여 물리적으로 수분을 제거하고 이때 압착되어 나오는 수분량을 측정하여 프레스 압착수 (press extract)로 명명하였다. 프레스 압착 후 잔사를 건조하여 물리적 압착 후 잔류하는 수분량을 평가하였다. 분획한 잎, 부레, 뿌리의 압착수는 전체 생재 무게 중 각각 28.8%, 75.0%, 74.2%를 차지하는 것으로 나타났고 부레와 뿌리에서 매우 많은 양의 압착수가 발생되는 것을 확인할 수 있었다. 압착 후 잔사에서 수분을 측정한 결과 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 뿌리와 부레 잔사에서는 약 20% 수준의 수분이 잔류하고 있었으나 잎 잔

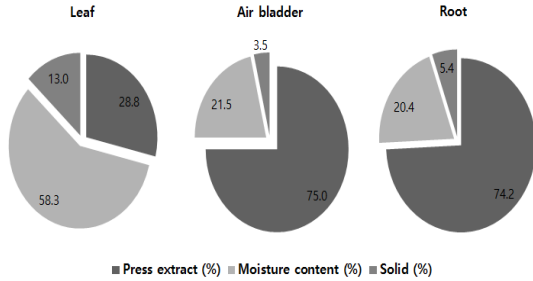
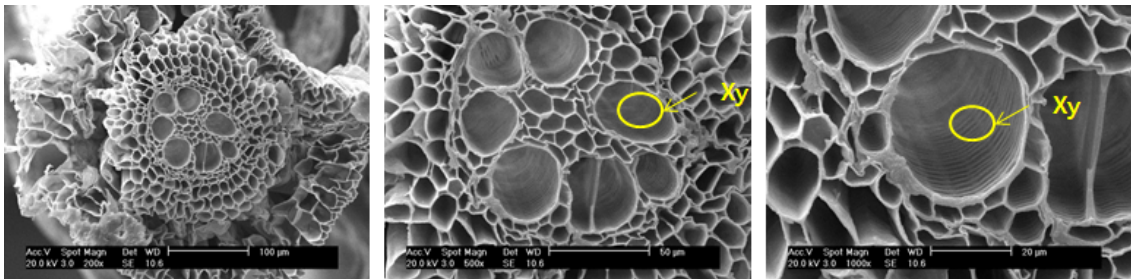


Fig. 3. Water and solid composition of water hyacinth.

사에는 58.3% 수분이 남아있는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 보아 생재 부레옥잠이 가지고 있는 총 수분 함량은 잎, 부레, 뿌리에서 각각 약 87.0%, 96.5%, 94.6%로서 잎 부분이 가장 높은 고형분 함량을 가지는 것으로 나타났다. 전체적으로 부레옥잠의 함수율은 90% 이상을 나타내는 것으로 측정되었는데 기존에 보고된 총 함수율 92.8-95.0%,¹³⁾ 90%^{14,15)}와 유사한 결과가 도출된 것으로 확인되었다.

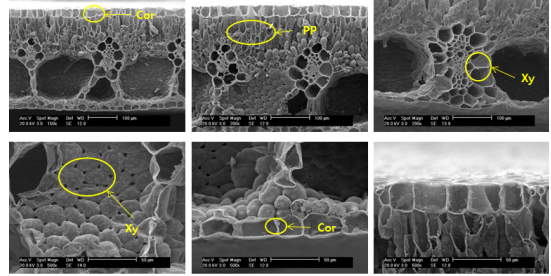
3.2 부레옥잠의 구조적 특성 평가

부레옥잠의 구조적 특성을 파악하기 위해 잎, 부레, 뿌리로 각각 분획하고 탈수 및 건조를 시켜 시료를 준비한 후 전자주사현미경을 이용하여 각각의 미세세포 구조 등을 비교 분석하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 잎¹⁶⁾에서는 표피가 겉을 감싸고 있으며, 그 안으로 책상조직이 구성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 부레의 경우 Fig. 5과 같이 주로 물관부와 기공으로 이루어져 있는 것이 관찰되었다. Fig. 6에서 나타낸 뿌리의 경우¹⁷⁾에서는 물관부가 다수 분포하는 것을 확인할 수 있었다.



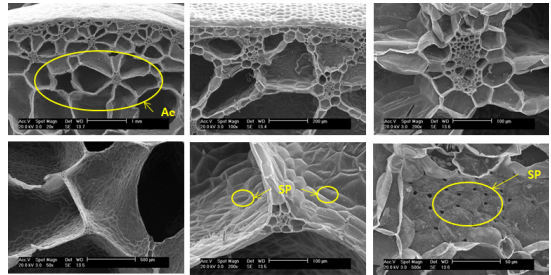
Xy : Xylem

Fig. 6. Scanning electron microscopy image of cross section of water hyacinth root.



• Cor : Cortex • Xy : Xylem • PP : Palisade parenchyma • SP : Spongy parenchyma

Fig. 4. Scanning electron microscopy image of cross section of water hyacinth leaf.



• SP : Spongy parenchyma • Ae : Aerenchyma

Fig. 5. Scanning electron microscopy image of cross section of water hyacinth air bladder.

3.3 부레옥잠의 화학적 특성 평가

3.3.1 부레옥잠의 부위별 화학적 구성 성분 평가

화학적 성분 조성을 평가하기 위하여 부레옥잠을 잎, 부레, 뿌리부분으로 나누어 분급 후 각각 부위별로 성분분석을 실시한 결과는 Table 1과 같다. 일반적인 목재 섬유에 비하여 온수 추출물이 잎, 부레, 뿌리 부분에서 각각 29.4%, 28.7%, 20.2%로 매우 높게 추출되었으며, 무기물의 함량 또한 약 12.0%, 11.8%, 8.4%로 높

Table 1. Chemical compositions of water hyacinth

Component	Water hyacinth		
	Leaf	Air bladder	Root
Hot water extract (%)	29.4	28.7	20.2
Alcohol-benzene extract (%)	2.1	2.6	1.6
Ash (%)	12.0	11.8	8.4
Klason lignin (%)	22.5	20.0	16.3
Holocellulose (%)	42.3	46.9	51.1
α -cellulose (%)	23.5	34.1	26.1
β, γ -cellulose (%)	18.8	12.8	25.0

게 나타난 것으로 판단하였다. 알파셀룰로오스의 함량은 잎, 부레, 뿌리부분에서 각각 23.5%, 34.1%, 26.1% 정도의 수준인 것으로 판단하였다. 리그닌 함량의 경우 각각 약 22.5%, 20.0%, 16.3%로 잎에 상대적으로 많은 양의 리그닌이 존재하는 것으로 판단하였다. 기존 연구에서는 부레옥잠의 셀룰로오스 함량은 약 17.8%-31.0%,¹⁸⁻²⁰⁾ 리그닌 함량은 약 7%-26%로 보고된 바 있다.^{21,22)} 각 연구별로 화학적 조성에서 다소 차이가 나타나는데, 이는 부레옥잠의 생육환경 차이 등에 기인한 것으로 판단하였다.

3.3.2 부레옥잠의 부위별 질소함량평가

토양개량제 및 사료 등으로의 적용성을 평가하기 위하여 부레옥잠 부위별 탄소와 질소함량을 원소분석기를 통해 측정하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 탄소와 질소의 비율로 결과를 정리하였을 때 잎 부분이 20.2의 탄질율(C/N ratio)를 나타내었다. 상대적으로 많은 양의 질소가 잎부분에 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 기존 연구에서는 총 부레옥잠의 C/N ratio가 15.8-25.1

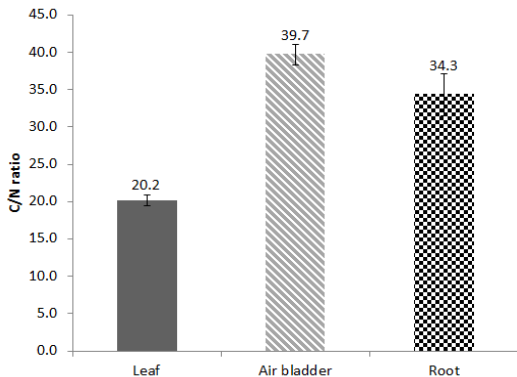


Fig. 7. C/N ratio of water hyacinth.

로 보고,²³⁾ 녹비작물 활용 시 탄질율이 상대적으로 높은 작물(30:1-60:1)은 토양에 탄소를 공급하게 됨으로써 유기탄소가 증가하며,²⁴⁾ 탄질율이 낮은 작물(8:1-15:1)은 질소함량이 증가됨이 보고된 바²⁵⁾있고, 적절한 탄질율(25 이하)를 가질 경우 토양 중의 미생물 바이오매스가 증가하는 것으로 보고된 바 있다.²⁶⁾ 이렇게 부위별로 탄질율의 차이가 나타남에 따라 효율적인 활용을 위해서는 최종 목적에 맞게 부위별로 각각 적용하는 방법도 필요할 것으로 판단되었다.

3.4 FT-IR을 활용한 부레옥잠의 관능기 평가

부레옥잠의 섬유 표면의 화학적 특성을 FT-IR로 분석한 결과를 Fig. 8에서 나타냈으며, 특정 관능기를 나타내는 파장의 경우에는 스펙트럼 내 피크 위치에 숫자를 넣어 기입하였다. FT-IR은 특정 파장에서의 화학적 관능기의 존재여부를 확인할 수 있으며, 스펙트럼에서 1, 2(669 cm⁻¹, 780 cm⁻¹)는 방향족 및 알켄의 C-H

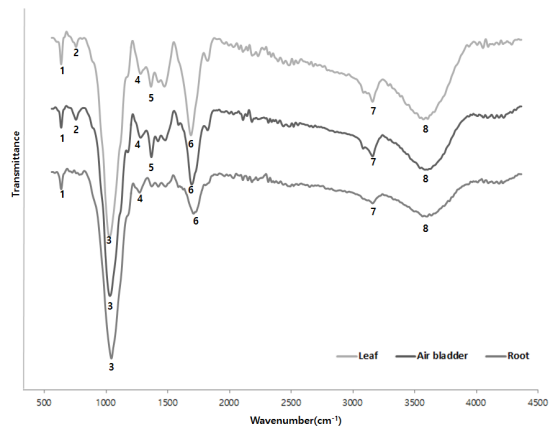


Fig. 8. FT-IR spectrum of water hyacinth depending on the fractions.

bending, 피크 3, 4(1027 cm^{-1} , 1241 cm^{-1})는 리그닌 성분의 Guaiacyl 성분,^{24,25} 5(1322 cm^{-1})에서의 피크는 리그닌 성분인 Syringyl 성분,²⁶ 6(1608 cm^{-1})은 $1600\text{-}1720\text{ cm}^{-1}$ 로 에스테르, 아마이드, 알데하이드의 C=O stretch,²⁷ 7(2924 cm^{-1})은 지방족 화합물의 C-H stretching,²⁸ 8(3318 cm^{-1})은 $3100\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$ 로 수소 결합의 O-H stretch²⁹를 존재를 나타내는 것을 알 수 있었다. 전체적으로 각 잎, 부레, 뿌리 부분에서 스펙트럼은 모두 유사하게 나타났으나, 상대적으로 리그닌 양이 적은 뿌리의 스펙트럼에서는 5(1322 cm^{-1})번 위치의 피크가 약하게 나타나는 것을 볼 수 있었다.

3.5 부레옥잠의 제지용 충전제 활용 가능성 평가

제지용 충전제로의 활용가능성을 평가하기 위하여 부레옥잠의 뿌리부분을 제거한 잎, 부레 부분의 분쇄분을 40-100 mesh로 분급하여 충전제로 적용하여 수초지를 제조하고 그 물성변화를 비교평가 하였다. 부

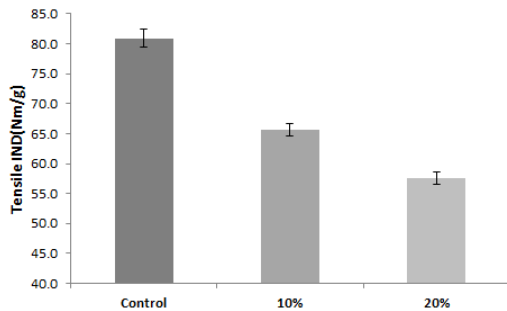


Fig. 9. Changes in tensile index depending on the addition of water hyacinth biomass.

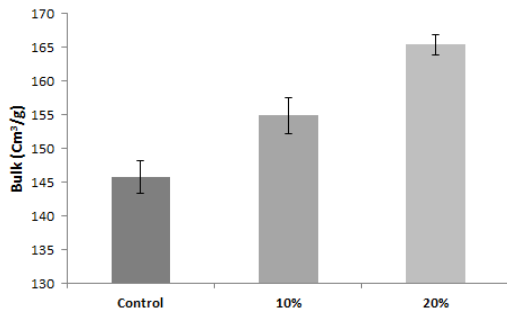


Fig. 10. Changes in bulk depending on the addition of water hyacinth biomass.

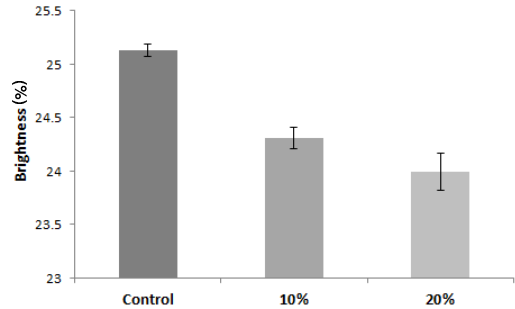


Fig. 11. Change in brightness depending on the addition of water hyacinth biomass.

레옥잠 바이오매스의 첨가량에 따른 물성의 변화들은 Figs. 9-11에서 나타났다. 부레옥잠 바이오매스의 첨가에 따라 벌크는 증가하는 경향을 나타내었지만 강도와 백색도는 감소하는 경향을 나타내었다. 실제 부레옥잠 바이오매스에 의해 강도 등의 감소는 나타났지만 지류제품의 기능성을 부여하기 위한 방안으로 10% 미만의 첨가는 가능할 수 있을 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구에서는 뛰어난 수질정화 능력을 가지고 있는 부레옥잠의 활용도를 높이기 위한 방안을 모색하여 보았다. 실제 식재 후 겨울이전에 제거해야만 하는 부레옥잠의 수거 후 활용은 이러한 부레옥잠의 수질정화용 적용을 가속화 할 수 있는 중요한 이슈라 할 수 있다. 부레옥잠의 물리적, 형태적, 화학적 특성 등을 분석하고 그 적용 가능성을 알아보았는데 그 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 부레옥잠 바이오매스는 부위별로 잎, 부레, 뿌리가 각각 12.4%, 60.3%, 27.3%를 차지하고 있고 부레의 바이오매스량이 가장 많은 것을 알 수 있었다. 부레옥잠은 매우 많은 양의 수분을 가지고 있고 총 수분량은 잎, 부레, 뿌리 부위별로 각각 87.0%, 96.5%, 94.6%를 갖는 것으로 확인하였으며, 부레의 경우 가장 많은 고형분을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 해부학적 특성을 평가하기 위하여 전자주사현미경으로 관찰한 결과 일반적인 식물에서 가지고 있는 책상조직, 해면조직, 물관부, 수층부를 확

인하였다.

- (2) 화학적 조성 결과 온수추출량이 많고 회분의 함량도 10% 이상의 높은 수준인 것을 알 수 있었다. C/N ratio 측정 결과 상대적으로 앞에서 질소함량이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. FT-IR을 통한 부레옥잠 구성물질의 관능기를 평가한 결과 대체로 유사한 스펙트럼이 나타났지만 뿌리부분에서는 상대적으로 리그닌의 함량이 적은 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 부레옥잠 바이오매스의 제지 충전제 활용 가능성 평가를 위하여 뿌리를 분리하고 잎맥부분을 수초지의 충전제로 적용한 결과 부레옥잠 바이오매스의 첨가량이 증가할수록 벌크특성이 우수해지나, 강도가 하락 및 백색도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 위의 연구결과를 바탕으로 부레옥잠의 활용을 위한 추가적인 다양한 연구개발이 진행된다면, 폐기성 유기자원인 부레옥잠의 고도활용이 가능하고 이러한 것을 통해 친환경적이고 효율적인 수질정화 시스템의 운영이 더욱 용이해질 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 2014년 농촌진흥청 국립원예특작과학원 농촌진흥사업에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

1. Kim, M. S., Park, S. H., Kim, M. S., Kim, H. J., Lee, M. K., Lee, M. G., Kim, S. H., Yang, J. H., and Kim, T. S., Contamination characteristics of agricultural groundwater around livestock burial areas in Korea, *The Journal of Engineering Geology* 24(2):237-246 (2014).
2. Lee, J. S., Ability of water quality remediation by using the ornamental water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) of water floating plant, *Flower Res. J.* 14(2):104-110 (2006).
3. Kim, B. Y., Lee, J. S., and Kim, J. H., Survey on nutrient removal potential and growth state of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) at Seo-Ho, *Korean Journal of Environmental Agriculture* 17(2):145-149 (1998).
4. Jun, M. S. and Kim, B. C., Nutrient removal potential of water hyacinth cultured in nutrient-enriched water and swinery wastewater, *Korean Journal of Environmental Biology* 17(1):117-124 (1999).
5. Moon, B. H., Utilization of water hyacinth for live-stock wastewater purification, *Korea Swine Journal* 11(122):100-103 (1989).
6. Kim, B. Y., Kim, K. S., and Park, Y. D., Studies on the nutrient removal potential of selected aquatic plants in the pig waste water, *Korean Journal of Environmental Agriculture* 7(2):111-116 (1988).
7. Kim, C. S., Ko, J. Y., Lee, J. S., Park, S. T., Ku, Y. C., and Kang, H. W., Selection of aquatic plants having high uptake ability of pollutants in raw sewage treatment, *Korean Journal of Environmental Agriculture* 26(1):25-35 (2007).
8. Chung, J. R., Ryu, H. I., and Ryu, J. K., Effects of heavy metals on the beware treatment process by water hyacinth, *The Korean Journal of Sanitation* 9(2):110-119 (1994).
9. Jun, M. S. and Kim, B. C., Nutrient removal potential of water hyacinth cultured in nutrient-enriched water and swinery wastewater, *Korean Journal of Environmental Biology* 17(1):117-127 (1999).
10. Kim, J. S., Choi, J. H., and Song, S. D., A study on advanced treatment of effluent in sewage wastewater treatment plant by *Eichhornia crassipes*, *J. Korean Ind. Eng. Chem.* 13(4):361-365 (2002).
11. Chang, H. Y., Lee, S. I., and Roh, M. K., Mycelial growth of oyster mushroom by substrates of water-hyacinth and banana leaf and stalk, *Journal of Mushroom Science and Production* 7(2):45-48 (2009).
12. Mishima, D., Tateda, M., Ike, D., and Fujita, M., Comparative study on chemical pretreatments to accelerate enzymatic hydrolysis of aquatic macrophyte biomass used in water purification processes, *Bioresource Technology* 97:2166-2172 (2006).
13. Nigam, J. N., Bioconversion of water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*) hemicellulose acid hydrolysate to motro fuel ethanol by xylose-fermenting yeast, *Journal of Biotechnology* 97:107-116 (2002).

14. Abdelhamid, A. M. and Gabr, A. A., Evaluation of water hyacinth as feed for ruminants, *Archives of Animal Nutrition* 41:745-756 (1991).
15. Gunnarsson, C. C. and Petersen, C. M., Water hyacinths as a resource in agriculture and energy production: A literature review, *Waste Management* 27:117-129 (2007).
16. Lopes, A., Osamn, S. M. R., and Piedade, M. T. F., Effects of crude oil on survival, morphology, and anatomy of two aquatic macrophytes from the Amazon floodplains, *Hydrobiologia* (636):295-305 (2009).
17. Vitoria, A. P., Pinto, F. L., Silva, L. B. C., Cunha, M., Oliveira, J. G., Rezende, C. E., Souza, C. M. M., and Azevedo, R. A., Structural and ecophysiology alterations of the water hyacinth [*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms] due to anthropogenic stress in Brazilian rivers, *Braz. Arch. Biol. Technol* (54)5:1059-1068 (2011).
18. Abdelhamid, A. M. and Gabr, A. A., Evaluation of water hyacinth as feed for ruminants, *Archives of Animal Nutrition (Archiv fuer Tierernahrung)* 41:745-756 (1991).
19. Bolenz, S., Omran, H., and Gierschner, K., Treatments of water hyacinth tissue to obtain useful products, *Biological Wastes* 33(4):263-274 (1990).
20. Chanakya, H. N., Borgaonkar, S., Meena, G., and Jagadish, K. S., Solid phase biogas production with garbage or water hyacinth, *Bioresource Technology* 46:227-231 (1993).
21. Patel, V. B., Patel, A. R., Patel, M. C., and Madamwar, D. B., Effect of metals on anaerobic digestion of water hyacinth-cattle dung, *Applied Biochemistry and Biotechnology* 43:45-50 (1993).
22. Poddar, K., Mandal, L., and Banerjee, G. C., Studies on water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) - Chemical composition of the plant and water from different habitats, *Indian Veterinary Journal* 68:833-837 (1991).
23. Gunnarsson, C. and Mattsson, C., Water hyacinth - Trying to turn an environmental problem into an agricultural resource, MFS-Report No. 25, Swedish University of Agriculture, Uppsala (1997).
24. Abral, H., Kadriadi, D., Rodianus, A., Mastariyanto, P., Ilhamdi, Arief, S., Sapuan, S. M., and Ishak, M. R., Mechanical properties of water hyacinth fibers - polyester composites before and after immersion in water, *Materials and Design* 58:125-129 (2014).
25. Fiol, N., Escudero, C., and Villaescusa, I., Chromium sorption and Cr(VI) reduction to Cr(III) by grape stalks and yohimbe bark, *Bioresource Technology* 99:5030-5036 (2008).
26. Zheng, J. C., Feng, H. M., Lam, M. H. W., Lam, P. K. S., Ding, Y. W., and Yu, H. Q., Removal of Cu(II) in aqueous media by biosorption using water hyacinth roots as a biosorbent material, *Journal of Hazardous Materials* 171:780-785 (2009).
27. Gupta, R. and Grag, V. K., Vermiremediation and nutrient recovery of non-recyclable paper waste employing *Eisenia fetida*, *Journal of hazardous materials* 162:430-439 (2009).
28. Toupin, M. and Belanger, D., Spontaneous functionalization of carbon black by reaction with 4-nitrophenyldiazonium cations, *Langmuir* 24(5):1910-1917 (2008).
29. Lim, S. F., Zheng, Y. M., Zou, S. W., and Chen, J. P., Characterization of copper adsorption onto an alginate encapsulated magnetic sorbent by a combined FT-IR, XPS and mathematical modeling study, *Environmental Science and Technology* 42(7):2551-2556 (2008).