

인의 흡착능 평가를 통한 인공습지 하수처리 시스템의 여재 선발

이홍재 · 서동철 · 조주식¹⁾ · 허종수*

경상대학교 응용생명과학부, ¹⁾순천대학교 환경농업과학부
(2003년 2월 18일 접수, 2003년 5월 23일 수리)

Screening of the Optimum Filter Media in the Constructed Wetland Systems through Phosphorus Adsorption Capacities

Hong-Jae Lee, Dong-Cheol Seo, Ju-Sik Cho¹⁾ and Jong-Soo Heo* (Division of Applied Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea, ¹⁾School of Environment and Agricultural Science, Sunchon National University, Suncheon 540-742, Korea)

ABSTRACT : The phosphorus(P) adsorption capacities of various filter media were investigated in relation to the size and types of filter media to screen the optimum condition. The objective of this study was to evaluate the constructed wetland longevity by improving P adsorption capacity. The maximum P adsorption capacities of filter media A(4~10 mm), B(2~4 mm) and C(0.1~2 mm) were 8, 10 and 22 mg/kg, respectively, showing those increased as the filter media size decreased. Among the experimental media, the optimum filter media size was 0.1~2 mm. When the filter medium was supplemented with organic materials which were piled up and decayed in the constructed wetland, the P adsorption capacity was significantly enhanced. Under the conditions of optimum filter media size, the respective maximum P adsorption capacities of filter media C when supplemented with Ca, Mg, Al and Fe were higher than that of filter media C. However the addition of Ca, Mg, Al and Fe to constructed wetland were not recommended because of the possibility of their secondary pollution. The maximum P adsorption capacity of filter media C was 22 mg/kg, but this was increased to 36 mg/kg when filter media C was supplemented with 2% oyster shell.

Key words: constructed wetland, phosphorus adsorption capacity, filter media, organic materials, oyster shell, Langmuir adsorption isotherm.

서 론

농어촌에서 발생하는 하수는 과거에는 오염부하가 적어 자정작용만으로도 충분히 정화될 수 있었으나 근래에는 생활수준의 향상으로 생활하수량이 증가하면서 하수의 오염물농도 및 부하량이 자연정화능력을 상회할 정도로 증가하여 이들을 적절히 처리하지 않으면 농어촌지역에 위치한 하천의 수질뿐만 아니라 주변의 농경지에도 악영향을 미치게 된다¹⁾.

농어촌 지역의 하수를 현행 도시 하수처럼 활성슬러지법 등의 기계식 공법으로 처리할 경우 농어촌의 부하변동에 대한 적응력 부족으로 하수처리효율이 감소하며 운영과 유지관리비의 경제적인 면에서도 부적합하다. 따라서 기계식 공법의 문제점을 보완하고 농어촌 지역의 특성에 맞는 하수처리 공법으로 자연정화공법이 대두되었으며, 토양처리방법, 산화지

처리법, 식물을 이용한 처리법 및 습지처리법 등이 그 대표적인 방법이다^{2,3)}. 그러나 현행 자연정화공법은 하수처리에 있어서 과도한 부지면적이 소요되며, 겨울철 처리효율이 급격히 낮아지고, 악취발생 및 공극폐쇄로 인한 투수속도의 저하 등으로 하수처리장의 안정적이며 장기간의 운영에 어려운 문제점이 발생한다^{4,5)}. 이러한 자연정화공법 중에서 수초, 모래, 자갈을 이용한 인공습지는 현행 자연정화공법의 단점을 보완하면서 하수처리장으로서의 장기적인 운영을 가능한 것으로 평가되고 있다.

하수처리장의 장기적인 운영에는 여러 가지 제한 인자들이 작용하며, 대표적으로 오염원에 의한 공극폐쇄현상과 인의 포화를 들 수 있다. 오염원에 의한 공극폐쇄현상은 공법의 변경과 개선에 따라서 극복될 수 있으나 인의 포화는 오염원을 처리하면서 당면하는 한계이다. 특히 인은 기체 상태의 제거 기작이 없어 식물의 흡수, 미생물의 분해, 침전, 여과 및 흡착에 의해 처리되므로 하수처리장에 계속 축적될 수밖에 없고 결국에는 인의 부하량이 처리조의 용량을 초과하여 누적되

*연락처:

Tel: +82-55-751-5470 Fax: +82-55-757-0178
E-mail: jsheo@nongae.gsnu.ac.kr

Table 1. Chemical characteristics of the filter media used.

| | pH | EC | OM | T-N | T-P | Ca | Mg | Al | Fe | Diameter |
|-------------------|-------|-------------|--------|---------|-------|---------|-------|-------|-------|----------|
| | (1.5) | (1.5; dS/m) | (g/kg) | (mg/kg) | | | | | | (mm) |
| Filter medium A | 7.8 | 0.04 | 12.8 | 7.64 | 3.26 | 690 | 1,458 | 1.19 | 1,197 | 4~10 |
| Filter medium B | 7.9 | 0.05 | 7.9 | 8.52 | 2.06 | 790 | 215 | 1.94 | 765 | 2~4 |
| Filter medium C | 6.5 | 0.03 | 7.0 | 18.67 | 1.66 | 13.0 | 186 | 0.69 | 1,321 | 0.1~2 |
| Organic materials | 6.8 | 2.13 | 501.6 | 12,030 | 10.20 | 27.6 | 1,616 | 199.8 | 3,382 | 0.1~2 |
| Oyster shell | 7.3 | 0.04 | 1.4 | 621 | 314 | 378,000 | 2,200 | 0.23 | 610 | 0.1~2 |

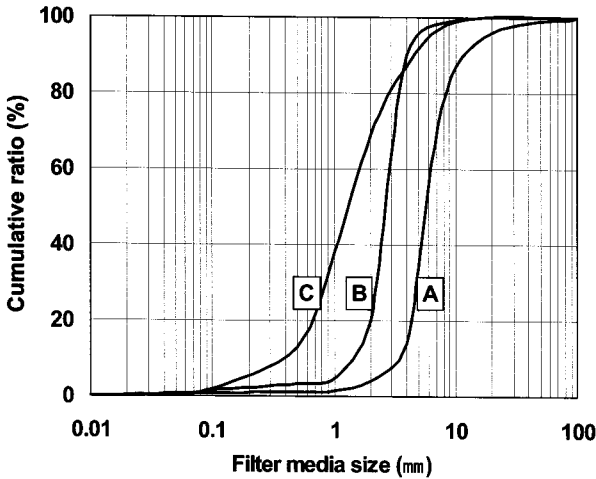


Fig. 1. Particle size distributions of the filter media used. Filter medium A, 4~10 mm; Filter medium B, 2~4 mm; Filter medium C, 0.1~2 mm.

있던 인 성분이 세척이나 용출되며 결국에는 하수처리장의 처리능력을 상실하게 된다⁹⁾. 따라서 인공습지 하수처리장의 수명과 가장 밀접하게 관련된 요인은 다른 제한요인 보다는 인의 포화가 가장 크다고 할 수 있다¹⁰⁾.

본 연구는 하수처리장에 축적되어 하수처리장 수명의 제한 인자로 작용하는 인의 포화치를 조사하기 위해 우선 여재 입경별 최대 인 흡착능을 조사하여 최적의 여재를 선정하였다. 또한 자연정화공법을 이용한 하수처리장에서 제한 인자로 작용하는 인의 흡착능력을 향상시켜 하수처리장의 수명을 연장하기 위한 방안을 검토하기 위해 굴폐각과 하수처리장에 쌓여 부식된 식물체 유기물을 흡착제로서의 사용가능 여부를 조사하기 위해 최대 인 흡착능을 조사하였다.

재료 및 방법

공시재료

하수처리장 수명을 간접적으로 파악하고 인공습지 하수처리장의 장기간 사용을 위한 방안을 검토하기 위해 인 흡착능에 대한 실험을 수행하였다.

공시여재는 골재채취장에서 채취한 여재를 사용하였으며, 유기물은 하수처리장에 쌓여 부식된 유기물을 사용하였고, 굴폐각은 경남 남해의 해안에서 직접채취한 것을 사용하였으며 여재와 흡착제인 유기물과 굴폐각의 이화학적 특성은 Table 1

에서 보는 바와 같다.

여재와 흡착제에 대한 입도 분포도는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 여재 대(A)는 입경 4~10 mm가 약 72%이상, 여재 중(B)은 입경 2~4 mm가 약 70%이상 및 여재 소(C)는 0.1~2 mm가 약 70%이었으며, 유기물과 굴폐각의 입경은 0.1~2 mm로 조제하였다.

인 흡착능 실험

여재의 입경별 및 흡착제 종류에 따른 인 흡착능 조사는 여재 대(A), 여재 중(B), 여재 소(C), 유기물 및 굴폐각에 인 (KH₂PO₄) 표준용액을 농도별로 0, 2.5, 5, 10, 20, 40, 80, 100 및 120 mg/L 주입하여 Langmuir 등온흡착식에 적용하여 최대 인 흡착량을 3반복으로 조사하였다¹¹⁻¹³⁾.

여재 입경별 유기물 첨가에 따른 인 흡착능 조사는 여재 대(A), 여재 중(B) 및 여재 소(C)에 입경이 0.1~2 mm로 조제한 유기물을 0, 0.5, 1 및 5% 첨가한 후 인(KH₂PO₄) 표준용액을 농도별로 0, 2.5, 5, 10, 20, 40, 80, 100 및 120 mg/L 주입하여 Langmuir 등온흡착식에 적용하여 최대 인 흡착능을 조사하였다.

Ca, Mg, Al, Fe 및 굴폐각 첨가에 따른 인 흡착능 조사는 여재 소(C)에 Ca를 0.01, 0.05, 0.1%, Mg, Al 및 Fe를 0.25, 0.5, 1%, 그리고 굴폐각을 0.5, 1, 2%를 첨가한 후 인(KH₂PO₄) 표준용액을 농도별로 0, 2.5, 5, 10, 20, 40, 80, 100 및 120 mg/L 주입하여 Langmuir 등온흡착식에 적용하여 최대 인 흡착능을 조사하였다.

실험에 사용한 Langmuir 등온흡착식은 단분자층 흡착으로도 불리며, 일반식은 식(1)과 같다¹⁴⁾.

$$(1) \frac{x}{m} = \frac{abCe}{1 + bCe}$$

$\frac{x}{m}$: 흡착제 단위 질량당 흡착된 용질의 양(mg/g)

C_e : 평형상태에서 남은 액상농도(mg/L)

a : 최대흡착량에 관한 상수 혹은 최대흡착능력(mg/g)

b : 흡착에너지에 관한 상수

ab : empirical constant

식(1)을 다시 정리하면 아래 식(2)와 같이 되고 이를 통해 최대 흡착량(a)을 산출하였다.

$$(2) \frac{Ce}{(x/m)} = \frac{1}{a} \cdot Ce + \frac{1}{ab}$$

분석방법

수질분석은 수질오염공정시험법과 APHA의 Standard method에 준하여 다음과 같이 하였다^{15,16}. 인의 분석은 아스코르빈산 환원법으로 분석하였다. 여재의 분석은 토양화학분석법에 준하여 다음과 같이 하였다^{16,17}. 여재의 pH는 초자전극법, EC는 EC meter (Orion, Model 160, Germany), 유기물은 Tyurin법으로 분석하였고, 여재를 습식분해하여 그 여액을 필요에 따라 희석하여 총 질소는 Kjeldahl법, 총 인은 Vanado molybdate법으로 분석하였다. 그리고 Ca, Mg, Al 및 Fe의 분석은 Atomic absorption spectrophotometer (Shimadzu AA-680, Japan)로 분석하였다.

결과 및 고찰

여재, 유기물 및 굴패각의 인 최대 흡착능

여재, 유기물 및 굴패각의 최대 인 흡착능을 조사하기 위해 Langmuir 등온흡착식을 적용한 결과는 Fig. 2, 3, 4에서 보는 바와 같이 여재 입경별, 유기물 및 굴패각 모두에서 Langmuir 직선식이 서로 고도의 유의성이 있는 정(+)의 상관관계를 보였다.

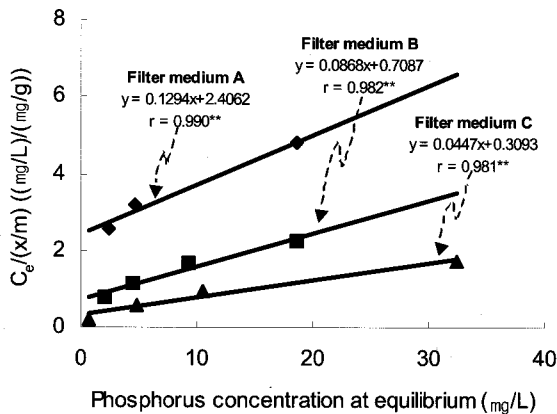


Fig. 2. Langmuir isotherm for phosphorus adsorption by the filter media A, B and C.

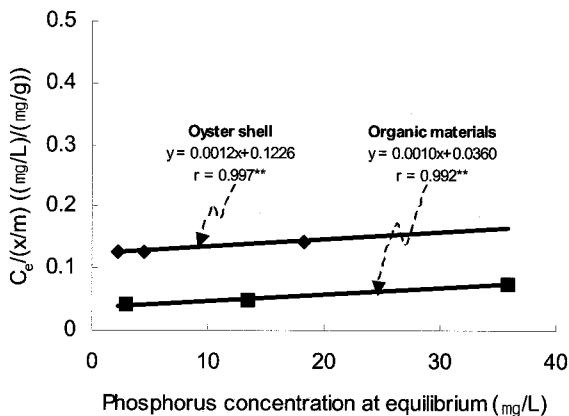


Fig. 3. Langmuir isotherm for phosphorus adsorption by oyster shell and organic materials.

여재 입경에 따른 인 최대 흡착능은 여재 대(A)는 8 mg/kg, 여재 중(B)은 12 mg/kg 및 여재 소(C)는 22 mg/kg으로 여재 입경이 작아질수록 인 최대 흡착능은 증가하였다. 이는 여재의 입경이 작아질수록 인을 흡착할 수 있는 표면적이 넓어지기 때문이라 사료되었다.

또한 흡착제로서의 사용가능 여부를 알아보기 위한 굴패각 및 유기물의 인 최대 흡착능은 굴패각이 833 mg/kg 및 유기물이 1,000 mg/kg으로 나타나 매우 뛰어난 인 흡착능을 나타내었고, 이들을 여재에 첨가하는 흡착제로 사용하면 인 흡착능을 향상시킬 수 있을 것으로 사료되었다.

여재 입경별 유기물 첨가에 따른 인 최대 흡착능

인공습지 하수처리장에서 하수처리 경과시기에 따라 유입되는 하수와 이식된 다년생 수초에 의해 유기물들이 축적되게 된다. 하수에 포함되어 있는 유기물은 대부분 용해성 유기물로 미생물이 에너지원으로 사용할 수 있으나 수초 등이 고사되어 하수처리장에 쌓이는 유기물들은 완전히 부식되는 데 많은 시간이 소요된다. 따라서 인공습지 하수처리장에 쌓이는 유기물 중 수초에 의한 유기물이 인의 흡착에 어떠한 관계가 있는지 알아보기 위해 하수처리장에 쌓여 부식된 다년생 수초인 갈대, 달뿌리풀, 샷갓사초 및 노랑꽃창포를 골고루 섞어 유기물로 조제하고 여재에 유기물을 0, 3 및 5% 첨가하여 인 흡착능을 조사하였다.

여재 입경별 유기물 첨가에 따른 인 최대 흡착능을 Langmuir 등온흡착식에 적용하여 조사한 결과는 Fig. 5에서 보는 바와 같다. 여재 입경별 유기물을 0, 3 및 5% 첨가하였을 경우 모든 여재에서 인 최대 흡착능이 점점 증가하였으며, 특히 여재 소(C)에서 유기물 첨가량이 5%일 경우가 유기물을 첨가하지 않은 것에 비해 인 흡착능이 급격히 증가하여 76 mg/kg로 인 흡착능이 54 mg/kg 증가하였다. 이와 같이 유기물을 첨가함으로써 최대 인 흡착능이 증가하는 것은 앞서 실험한 여재 입경별, 유기물 및 굴패각의 최대 인 흡착능 조사

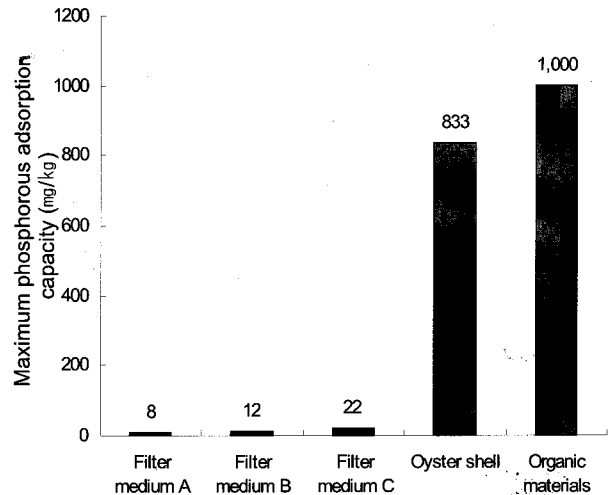


Fig. 4. Maximum phosphorus adsorption capacities of filter media, oyster shell and organic materials.

에서 유기물만으로도 매우 높은 인 흡착능을 가지고 있기 때문으로 사료되었다. 그러나 유기물의 특성상 인 함량이 상당히 높아서 어느 한계이상 주입시 오히려 인이 방출되는 결과를 초래할 수 있을 것으로 판단되어 하수처리장에서 자연적으로 수초에 의해 쌓이는 양 외에는 주입해서는 안될 것으로 판단되었다. 따라서 인공습지 하수처리장에 수초에 의해 쌓여 부식된 유기물은 인의 흡착능을 증가시켜 인 처리능력을 향상시킬 수 있을 것이라 사료되었다.

Ca, Mg, Al, Fe 및 굴패각 첨가에 따른 인 최대 흡착능

여재 중에서 인 흡착능이 가장 높은 여재 소(C)에 하수와 함께 유입될 가능성이 있는 Ca, Mg, Al 및 Fe가 인 흡착능에 어떠한 영향을 미치며, Ca의 함량이 많고 폐기물인 굴패각¹⁸⁻²³⁾을 재활용하기 위해 첨가하였을 경우에는 인의 흡착에 어떠한 영향을 미치는지 조사해보았다.

여재 소(C)에 Ca, Mg, Al, Fe 및 굴패각의 첨가시 pH는 인 흡착과 침전에 큰 영향을 미치므로 일반 생활하수의 pH와 동일한 조건인 pH 7에서 인 흡착능 실험을 실시한 결과는 Fig. 6에서 보는 바와 같다.

여재 소(C)에 Ca, Mg, Al 및 Fe를 첨가하였을 경우 각각의 첨가량이 증가할수록 여재 소(C)의 인 최대 흡착능도 전반적으로 증가하였으며 특히 Ca 첨가는 다른 첨가물에 비해 적은 양인 Ca 0.1%첨가만으로도 인 흡착능이 885 mg/kg으로 급격히 증가함을 알 수 있었다. 그러나 Ca, Mg, Al 및 Fe는 하수처리장에 첨가시 인흡착에 대해 유의성 있는 상승효과가 없었으며, 특히 이들에 의한 2차 오염을 유발할 수 있으므로 실제로 하수처리장에 주입할 수 없는 것으로 판단된다. 따라서 인을 흡착한 후에 용해도가 낮아 2차 오염을 유발하지도 않고, Ca의 함량이 높아서 낮은 함량으로도 인 흡착능을 급격히 증가시킬 수 있는 굴패각¹⁸⁻²³⁾을 첨가하여 인 흡착능을 조사해 보았다. 그 결과 굴패각을 0.5, 1 및 2% 첨가시 인 흡착능이 27, 29 및 36 mg/kg으로 최대 인 흡착능이 지속적으로

증가하여 굴패각 2% 첨가한 것이 첨가하지 않은 것에 비해 인 흡착능이 14 mg/kg 증가하였다. 그러므로 인공습지 하수처리장 시공시 모래와 굴패각을 섞어 여재로 사용하면 2차 오염을 유발하지 않으면서 인의 축적능력을 향상시켜 하수처리장 수명을 연장할 수 있을 것으로 사료되었다.

요 약

인공습지 하수처리장에 축적되어 하수처리장 수명의 제한인자로 작용하는 인의 포화치를 조사하기 위해 여재 입경별 최대 인 흡착능을 조사하여 최적의 여재를 선정하였고, 또한 유기물과 굴패각의 인 흡착제로서 사용가능 여부를 조사하기 위해 최대 인 흡착능을 조사하였다. 그리고 인공습지 하수처리장에서 하수처리장의 수명을 연장하기 위한 방안을 검토하기 위해 여재별로 흡착제인 유기물 양을 달리하여 최대 인 흡착능을 조사하였고, 최종으로 선정된 여재에 Ca, Mg, Al, Fe 및 굴패각 첨가에 따른 최대 인 흡착능을 조사하였다.

여재 입경별 최대 인 흡착능을 조사한 결과 여재 입경이 작아질수록 최대 인 흡착능이 증가하는 경향으로 여재 대(4~10 mm), 중(2~4 mm) 및 소(0.1~2 mm)의 최대 인 흡착능은 각각 8, 10 및 22 mg/kg로서 여재 입경이 0.1~2 mm인 여재 소(C)가 최적의 여재이었고, 유기물과 굴패각의 최대 인 흡착능을 조사한 결과 유기물이 1,000 mg/kg 및 굴패각이 833 mg/kg이었다.

입경별 여재에 유기물을 첨가하였을 경우 모든 여재에서 유기물 첨가량이 증가할수록 최대 인 흡착능이 점점 증가하였다. 따라서 인공습지 하수처리장에서 수초에 의해 쌓여 부식된 유기물은 인의 흡착능을 증가시켜 인 처리능력을 향상시킬 수 있을 것이라 사료되었다.

최적 여재인 여재 소(C)에 Ca, Mg, Al 및 Fe를 첨가하였

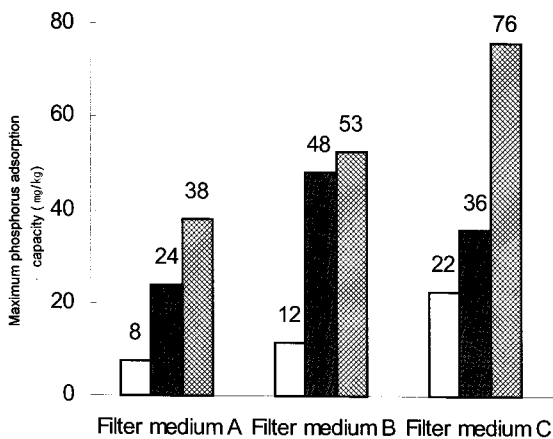


Fig. 5. Maximum phosphorus adsorption capacity of filter media when supplemented with different level of organic materials. □ Filter medium+O.M 0%; ■ Filter medium+O.M 3%; ▨ Filter medium+O.M 5%.

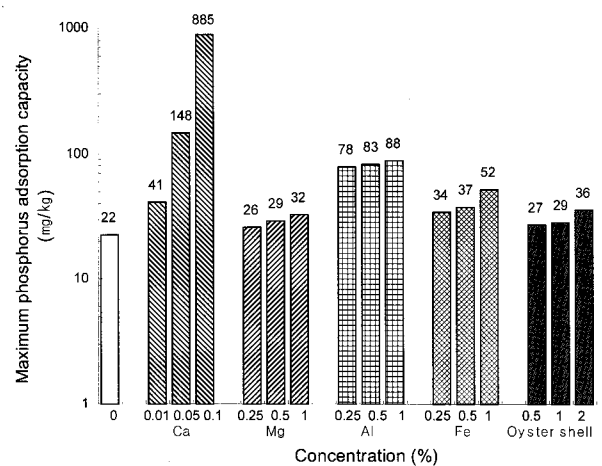


Fig. 6. Maximum phosphorus adsorption capacity of filter media C when supplemented with Ca, Mg, Al, Fe and oyster shell. □ Filter medium C; ▨ Filter medium C+Ca; ▩ Filter medium C+Mg; ▪ Filter medium C+Al; ▫ Filter medium C+Fe; ■ Filter medium C+oyster shell.

을 경우 모든 조건에서 첨가량이 증가할수록 최대 인 흡착능도 점점 증가하였으며, 특히 Ca 0.1% 첨가시 인 흡착능이 885 mg/kg으로 급격히 증가하였다. 굴폐각을 여재에 첨가하여 흡착능을 조사한 결과 굴폐각을 2% 첨가시 인 흡착능이 약 22 mg/kg에서 약 36 mg/kg으로 약 14 mg/kg이 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 농림부의 농림기술개발사업과제 "수초 모래 자갈을 이용한 환경친화형 농촌 하수처리 시스템 개발"의 연구결과중 일부임.

참고 문헌

- 윤춘경, 권순국, 김형중 (1997) 인공습지에 의한 농촌오수 처리에 관한 연구, 한국농공학회지, 39(4), 55-63.
- Park, B. H., Nam, G. S. and Lee, K. S. (2001) Characteristics of water quality improvement in constructed wetlands under high hydraulic loadings, *J. KSWQ* 17(4), 477-484.
- Tanner, C. C., Adams, D. D. and Downes, M. T. (1997) Methane emissions from constructed wetlands treating agricultural wastewaters, *J. Environ. Qual.* 26, 1056-1062.
- 양홍모 (1999) 수자원보전을 위한 점원 및 비점원 오염물의 자연생태적 친환경적 처리-인공습지 및 연못·습지 시스템, 한국수자원학회지, 32(5), 111-123.
- 김혜주 (1999) 자연형 하천 조성을 통한 하천의 자정능력 향상-식물의 수질정화작용을 중심으로, 한국수자원학회지, 32(5), 148-152.
- Chung, D. Y. (1999) Development of an environmentally friendly sewage disposal model for agricultural and fishing village areas, *Journal of the Korean Society for Environmental Restoration and Revegetation Technology* 2(1), 10-19.
- 이도원, 송동하, 임경수, 박은진, 강호정 (1999) 식생을 이용한 수질 관리-생태구, 경관, 유역 규모에서 생태학적 접근, 한국수자원학회지, 32(5), 134-147.
- Yun, S. M. (1998) The analysis of self-cleansing power through the sewage disposal model of water plants and aggregate, Master Thesis, Korea National University of Education Chung-Buk, Korea.
- Yang, L., Chang, H. T. and Huang, M. L. (2001) Nutrient removal in gravel- and Soil-based wetland microcosmos with and without vegetation, *Ecological Engineering* 18, 91-105.
- Aleksandra, D., Yves, C., Christiane, F. and Robert, P. C. (2002) Phosphorus saturation potential: A parameter for estimating the longevity of constructed wetland systems, *Environ. Sci. Technol.* 36, 4642-4648.
- Sakandevan, K. and Bavor, H. J. (1998) Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems, *Wat. Res.* 32(2), 393-399.
- Pant, H. K., Reddy, K. R. and Lemon, E. (2001) Phosphorus retention capacity of root bed media of sub-surface flow constructed wetlands, *Ecological Engineering* 17, 345-355.
- Arias, C. A., Del, B. M. and Brix, H. (2001) Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds, *Wat. Res.* 35(5), 1159-1168.
- Park, K. J. (1998) Effect of pH and distribution of natural soil on pollutants adsorption, Doctor Thesis, University of Ulsan, Ulsan, Korea.
- APHW, AWWA, WPCF (1995) Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed., American Public Health Association, DC.
- 정우용 외 (1998) 수질오염, 폐기물, 토양오염 공정시험방법, (주)동화기술.
- 농촌진흥청 농업기술연구소 (1998) 토양화학분석법-토양, 식물체, 토양미생물, 농촌진흥청 농업기술연구소
- Choi, K. J. and Wang, C. K. (1999) Development of process for phosphorus removal from water using clamshell, *Res. Rep. Env. Sci. Tech., Chungnam Nat'l Univ., Korea*, 17, 37-49.
- Choi, K. J. (1997) Removal of phosphorus in water using clamshell, Master Thesis, Chungnam Nat'l Univ., Korea.
- 첨단환경기술 (1996) 정석법에 의한 하·폐수중의 인제거, 첨단환경기술.
- Kim, M. P. and Han, J. D. (1997) Adsorption properties of oyster shell powder as landfill cover, *J. of KSEE* 19(1), 97-110.
- Momberg, G. A. and Oellermann, R. A. (1992) The removal of phosphate by hydroxyapatite and struvite crystallization in south africa, *Wat. Sci. Tech.* 26(5-6), 987-996.
- Ferguson, J. F. and King, T. (1977) A model for aluminum phosphate precipitation, *J. WPCF.* 49(4), 646-658.