

## 제강 슬래그를 여재로 사용한 자연정화 하수처리장의 인(P)제거 효과

정 동 양<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 한국교원대학교 기술교육과

### Removal of Phosphorus by Blast Furnace Slag as a Filter Medium in a Self-Purifying Swage Treatment System

Chung Dong Yang<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Technology Education, Korea National University of Education.

#### ABSTRACT

A blast furnace slag(BFS) has been used as a filter medium for the treatment of domestic waste waters during the period of 9-month. More than 90% of phosphorus was removed while the hardness of the treated water increased by 5 times and the pH was significantly raised from 6.8 to 10.8. The high hardness and pH of the treated water indicated dissolution of BFS by the sewage. The experimental results suggest that BFS could be utilized for the removal of phosphorus in the waste water treatment plant using aquatic plants and gravels.

Key Words : *Blast furnace slag, Phosphorus removal, aquatic plant, Gravels, Waste water treatment.*

#### I. 서 론

중앙유럽 국가들의 생활하수에 인(P) 함유량은 보통 11mg/L이며, 자연정화 하수처리장의 방류수질은 6~7mg/L로 보고되고 있다(Mertach, 1988). 우리나라의 하수종말 처리장에 유입되는 생활하수의 인 농도는 3~4mg/L로서 비교적 낮은 편이다. 현재 우리나라에 널리 보급되고 있는 합병정화조나, 기계식의 개인 혹은 마을 하수처리장의 경우 인(P) 제거는 거의 되지 않는다(환경부, 2002a). 1998~2001년까지 환경부의 G7-환경기술개발사업 연구과제 끝에 제시된 마을 하수처리를 위한 수초·골재 하수처리장의

유입수와 방류수의 인 농도는 각각 4~13mg/L와 0.5~1.0mg/L로서 처리율이 90% 수준이며, 단순한 자연정화 습지 구조에서의 인 처리율은 45% 수준이고(Ham·Yoon·Jeon·Hwang, 2003) 처리장 구조와 사용여재에 따라 인 처리율은 큰 차이를 보이고 있다. 하수처리장에 포설하는 자연산 골재는 지역마다 그 특성이 다르며, 특히 MnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Fe, SiO<sub>2</sub>, MnO 등을 많이 함유한 골재는 인(P)의 흡착효과가 매우 높은 것으로 알려져 있다(Börner, 1992). 수초·골재 하수처리장에서 인 제거는 90%가 포설된 골재에 의해 흡착되고 있다. 나머지 인은 미생물(Bio-P)과 처리장에 자라는 수초(건중량 0.3%)에 의해

제거되고 있다(Fehr, 2000). 초겨울에 처리장의 수초를 베어내면 인 총량의 5~10%를 제거할 수 있으나, 베어내지 않으므로써 수초의 인 처리는 무시하고 있다. 수초·골재 하수처리장에 하수가 공급되면 골재표면에 미생물막이 형성되어 공극의 폐쇄 현상이 발생하는데 갈대뿌리의 활착으로 표층의 폐쇄를 막고, 갈대줄기의 흔들리면서 투수성을 높이며 그것으로 인하여 골재층의 미생물 활성에 기여한다. 갈대는 하수에 적응력이 높고 여러 가지 장점 때문에 처리장에 식재 하여야 한다(Wissing, 1995).

탈인의 효과를 극대화하기 위하여 자연/인공 골재에 제강 입상 슬래그(이하 슬래그)를 첨가하게 되면 자연산 골재의 소요량도 줄이고 폐기물인 슬래그의 재활용 의미와 함께 탈인 효과도 높일게 될 것이다. 슬래그를 마을 혹은 개인용 수초·골재하수처리 시설에 사용하였을 때 나타나는 반응과 처리효율을 예측하고 이것을 수초·골재 하수처리장에 포설하는 자연/인공 골재에 섞어서 사용할 수 있는지를 확인하는 것이 본 연구의 목적이다.

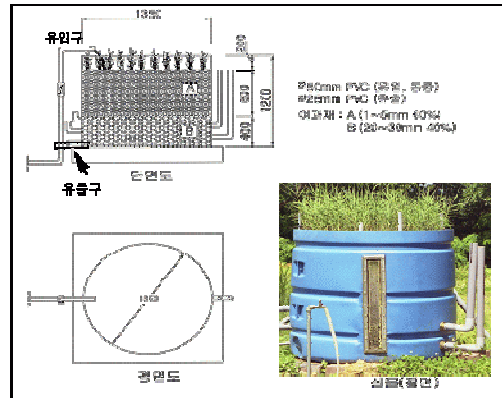
## II. 연구범위 및 방법

### 1. 연구범위

본 연구는 슬래그가 포설된 갈대 침상의 단위 면적에 유입하는 하수 부하량이 하루에 150L로서 유럽의 자연정화 처리장의(ATV H262) 기준을 적용하였다. 모델 처리장에 유입하는 하수와 처리되어 유출하는 방류수의 BOD, CODcr, TN, TP, SS, pH 및 경도를 측정하며, 하수와 슬래그의 용탈과정에서의 상호관계를 규명하고 하수 처리과정에서 뿌리공간(골재와 뿌리 주변)이 높은 알카성을 가질 때 갈대초장의 성장상태를 관찰한다.

### 2. 연구 방법

연구를 수행하기 위하여 원통형 처리장을(그림 1) 옥외에 설치하고 한국교원대학교의 생활하수를 모터 제어 장치를 사용하여 1일 150L를 12회에 분산하여 유입시켰다. 슬래그와 하수가



<그림 1> 제강 입상 슬래그를 이용한 가정용 생활하수 처리 실험시설.

반응하는 침상에 2002년 9월 27일 청주지역의 농장에서 발아시킨 후 1년 동안 포트에서 자란 갈대(*Phragmites australis Trin.*)를 식재 하였다. 장시간의 갈대 생장관찰에서 경우에 따라 갈대의 손상이 발생하므로 5분을 표시해놓고 3분의 초장을 평균 9일 간격으로 측정하여 평균값을 취하였다.

#### 1) 실험용 모델 처리장

유입된 하수의 처리상태를 분석하기 위하여 지름 135cm, 높이 120cm인 원통(FRP)의 하단부에 40cm는 입경이 20~30mm의 슬래그를 채우고, 그 위 60cm는 입경이 1~5mm의 슬래그를 채웠으며, 표면에는 갈대를 40포기 식재 하였다. 하수가 유입하게 되면 수직으로 여과 되도록 하였으며, 원통 하단부 양 측면에는 지름 50mm PVC관을 두 개씩 연결하여 슬래그층에 산소공급이 원활하도록 하였다(그림 1).

#### 2) 포설된 슬래그 특성

본 모의실험에 사용된 슬래그는 분쇄된 것으로서 외형에 모가 나있으며, 표 1에 제시된 슬래그는 인의 흡착능을 높이는 CaO, T-Fe, SiO<sub>2</sub>, MgO, MnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등의 양이온을 자연산 모래(표 2)보다 많이 함유하고 있기 때문에 하수에 포함된 음이온자인 인의 흡착능이 매우 좋을 것으로 예측된다. 충북금강 지류인 백천천의 하상 모래는 Fe, Mg, Ca 등의 순으로 양이온

인자를 함유하고 있는 반면에 슬래그는 석회(CaO), 철분(T-Fe), 실리카(SiO<sub>2</sub>) 등의 인을 흡착하는데 필요한 기본 요소가 높은 편이다(환경부, 2002 a).

<표 1> 슬래그의 화학성분[%], 입상 슬래그 생산회사 제공).

	T-Fe	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	TiO <sub>2</sub>
SI	18.196	41.664	12.439	11.998	4.543	1.707	1.804	0.054	0.916

<표 2> 충북 금강 지류인 백천천의 하상 모래의 이학적 특성[mg/kg](환경부, 2002a).

K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
2600	23.0	120	250	850	11.0	0.4	0.8

3) 수질분석 기기 및 방법

수질분석은 수질오염공정시험법(2003)과 APHA의 Standard methods(1995)에 준하여 다음과 같이 하였다(정우용, 2003; APHW, AWWA, WPCF, 1995).

생물학적 산소요구량(BOD)은 잉클러 아지드화나트륨 변법, 화학적 산소요구량(COD<sub>Cr</sub>)은 중크롬산칼륨법(K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>법), 부유물질(SS)은 유리섬유여지법, 경도(Hardness)는 EDTA Titrimetric 법으로 분석하였고, 총 질소(T-N)는 자외선 흡광도법, 총 인(T-P)은 아스코르빈산 환원법으로 발색하여 spectrophotometer (CADAS-100, Germany)로 분석하였다.

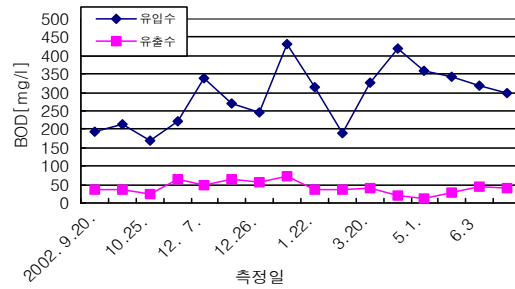
4) 실험 기간 및 조건

2002년 9월~2003년 6월까지 내부를 관찰할 수 있는 모델처리장에 400여 포기의 갈대를 식재하고 하루에 150L 하수를 2시간마다 분산하여 유입시켰다. 처리장에 미칠 외부요인을 실험 결과에 미리 반영하기 위하여 실험시설은 노천에 설치하였다. 실험에 사용된 하수의 인 함유량은 4~8mg/L으로서 일반 도시의 가정하수보다 배 이상 높으며, 슬래그 층에 하수가 흐를 때 인의 제거율을 분석하기에 매우 적합하였다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 생물학적 산소요구량(BOD)

2002년 9월부터 2003년 6월 현재까지의 유입수의 농도는 177~430mg/L까지 분포하며 평균 농도는 264mg/L이다(그림 2).

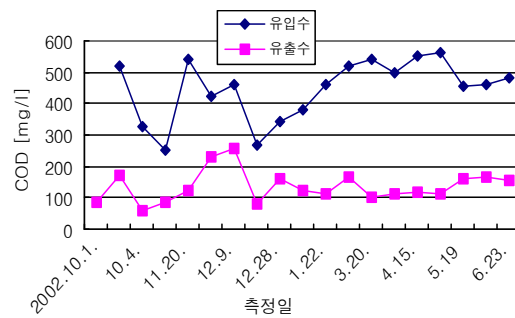


<그림 2> 유입 및 유출수의 BOD 분포.

유출수의 농도는 39~59mg/L 정도이며 평균 유출 농도는 45mg/L로 처리율은 81.8% 수준이다. 일반 가정의 생활하수의 BOD 농도가 100~200mg/L 정도이며(환경부, 2002 b, 건교부, 1988) 이러한 하수를 위 실험처리장에 유입시키게 되면 방류수질이 10~15mg/L 이하로 기대 할 수 있을 것이다.

2. 화학적 산소요구량(COD<sub>Cr</sub>)

실험기간 중에 조사한 유입하수의 농도는 266~543mg/L의 범위 내에 분포하였으며, 평균 425 mg/L로서 변동의 폭이 심하였다(그림 3).

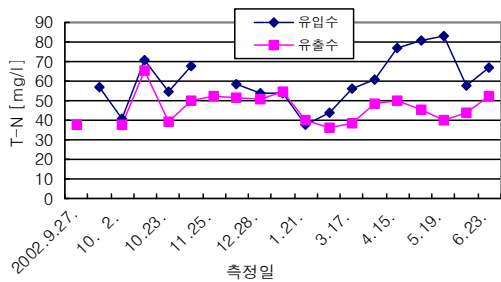


<그림 3> 유입수와 유출수의 COD<sub>Cr</sub> 분포.

유출수의 평균 농도는 138mg/L 이었으며, 평균 처리율은 68%이다. 모델을 제작하여 관찰하는 초기 3개월은 유입수질과 유출수질의 추이가 같은 경향을 보였으나 그 후부터는 유입수의 CODcr 농도변화에 따르지 않고 일정한 값을 유지하며 처리율이 높아지는 경향을 보이고 있다.

3. 총질소(T-N)

유입수의 평균 T-N은 38~67mg/L 로서 일반적인 생활하수보다 높게 나타났다. 유출수의 T-N 농도는 37~65mg/L 정도이며, 처리율은 대개 16~20% 내외로 분포하고 있다(그림 4).



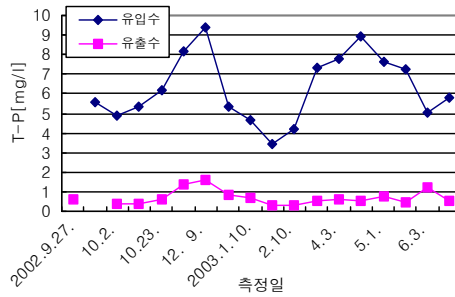
<그림 4> 유입 및 유출수의 T-N농도 분포.

준 혐기성 인공 습지가 조성된 정상적인 수초·골재 하수처리장(정동양, 1999; 환경부, 2002a)의 경우 T-N 처리율은 C/N비에 따라 45~52% 수준이며, 둔치에 조성한 하천수질정화를 위해 조성한 인공 습지(양홍모, 2003a)의 탈질율은 39%인데 이 연구에 사용한 모델 처리장의 처리율은 그 절반 수준이므로 탈질 효과는 낮은 편이다. 처리율이 낮은 것은 이 처리시설에 혐기성 조건을 가진 구조가 없기 때문에 탈질 효율이 낮게 나타난다고 판단되나 다른 처리장에 사용한 여재와 구조가 다르므로 직접적인 처리율 비교에는 무리가 따른다.

4. 총인(T-P)

유입수의 인 농도는 3.4~8.18mg/L 범위에 분포하며 평균 6.02mg/L로 가정 하수에 비하여 매우 높은 값을 가진 것은 교내의 하수가 대부분 화장실의 오수이기 때문이다(그림 5).

유출수의 농도는 0.35~1.62mg/L의 범위 내에 분포하며 평균 농도는 0.59mg/L수준이다. 그림

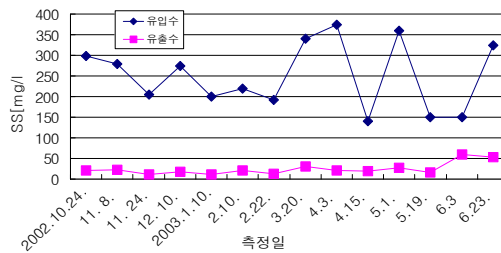


<그림 5> 유입 및 유출수의 T-P농도 분포.

5에는 초기 3개월의 유입수 인 농도와 처리된 유출수의 인 농도 분포가 같은 추세를 보이고 있다. 예측하였던 바와 같이 제강 슬래그의 높은 양이온 성분 때문에 매우 높은 인(P)의 침전능(Precipitation)을 보유하고 있으며, 그 처리효율은 90% 수준이다. 일반적인 인공습지 자유수면 하수처리장(양홍모, 2003b)의 인 처리율 비교를 살펴보면 미국의 처리장은 28~85%, 영국의 처리장에서는 37~47%, 덴마크는 22~72%인데 비하여 이 연구모델이 가장 높은 인 처리율을 보여주고 있다. 상수원 보호구역의 방류기준이 2mg/L인 점을 감안할 때 유출수의 낮은 인 농도는 슬래그를 마을 혹은 가정용 수초·골재 하수처리장의 첨가 여제로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

5. 부유물질(SS)

유입수와 유출수의 평균 수질은 각각 251mg/L과 25mg/L이었으며, 부유물질은 계절의 기온변화에 영향을 받지 않고 항상 90% 이상 제거되었다. 고형물질은 침상 표면에 형성된 슬러지 층에서 물리적으로 잘 제거되었고, 대부



<그림 6> 유입수와 유출수의 SS 분포도.

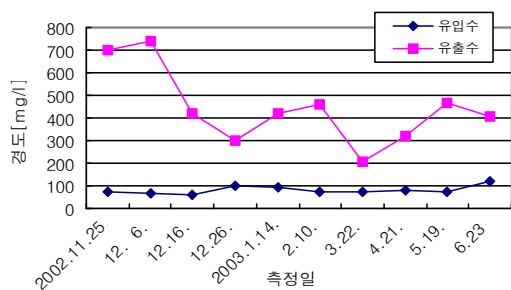
분의 잔여 부유물질은 60cm의 여과층을 통과하면서 산화되어 제거되고 있다(그림 6).

## 6. 경도( $\text{CaCO}_3$ )

물의 세기 정도를 나타내는 단위로서 수중의 2가 양이온 함량을 여기에 대응하는  $\text{mg-CaO} + \text{CO}_3/\text{L}$ 로 환산 표시한 것으로, 우리나라 음용수 기준으로는  $300\text{mg/L}$  이하로 되어 있으나, 실제로는  $100\text{mg/L}$  이하가 일반적이다(김남천, 1989). 교원대학교 수돗물의 경도는  $42\text{mg/L}$  정도이다.

이러한 수질 상태에서는 관의 부식도가 높은 것으로 알려지고 있다. 금강 지류의 미호천 하류의 하천수 경도는  $75\text{mg/L}$ 이었다. 유입되는 생활하수의 경도는 평균  $78\text{mg/L}$  정도였으며(그림 7), 미호천의 주변 하천수질 범주에 속한다. 유출수의 실험 초기에 가장 높은 경도는  $745\text{mg/L}$ 로 나타났으며, 가동 후 3개월이 지난 뒤 경도는  $200\sim 300\text{mg/L}$ 까지 낮아졌다가 다시  $450\text{mg/L}$ 로 상승하는 것을 반복하는 특성을 나타내고 있다.

9개월 동안 측정된 유출수의 경도는 평균  $465\text{mg/L}$  정도이다. 이러한 결과를 보면 하수에 슬래그가 용탈되고 있음을 알 수 있다.

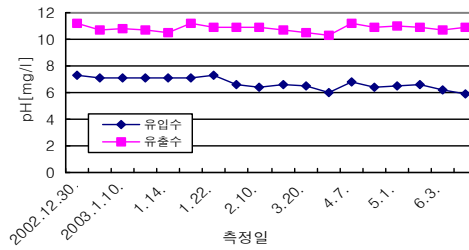


<그림 7> 제강 슬래그 침상의 경도 변화.

## 7. pH 농도

일반적으로 가정오수의 경우 pH-값이 7정도 인데, 교원대학교에서 발생하는 하수는 평균 6.9이었으며, 모델 처리장을 통과한 방류수의 pH-값은 평균 10.8로서 매우 높은 편이다(그림 8).

유입수와 유출수의 pH-값 분포 추이는 비슷하며 다만 방류수의 pH-값이 높은 것은 슬래그



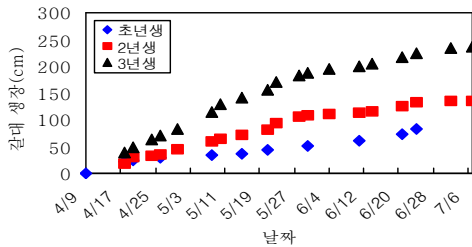
<그림 8> 유입 및 유출수의 pH-값 분포.

가 하수에 용탈되고 있음을 뜻한다. 정상적인 수초·골재 하수처리장의 경우는 유입수 pH-값보다 유출수의 pH-값이 약간 떨어지고 있다(환경부, 2002a). 이것은 미생물이 유기물질을 분해하는 과정에서 발생하는 현상(질산화 과정)이다. 그러나 순전히 제강 슬래그만 사용하는 이번 실험의 경우는 하수가 산화되면서 산성으로 변화는 양보다 슬래그의 용해도가 높기 때문에 방류수의 pH-값이 높게 나타나고 있다. 이러한 pH-값 상승은 인의 흡착을 용이하게 하며(옥진수, 1995; 류기상, 1995; 황한국, 1994), 수초·골재 하수처리장에 제강슬래그를 일부 첨가하게 되면 탈인 효과를 높이고, 처리수의 산성화를 지연하고 자연산 골재를 절약할 수 있음을 알 수 있다. 슬래그를 전적으로 수초·골재하수처리장의 여재로 사용하는 것은 방류수의 pH-값 상승 때문에 고려해야 하지만 일반 골재와 섞어서 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 적합한 배합률 규명은 앞으로 연구를 통하여 밝혀야 할 부분이라고 생각된다.

## 8. 갈대 성장 상태

갈대는 상온( $6\sim 9^\circ\text{C}$ )에서 싹이 트기 시작하는데 수초·골재 하수처리장에서는 골재층에서 하수가 처리되면서 미열이 발생하므로 2월 말에서 3월초에 표층을 뚫고 갈대의 새싹이 나오기 시작하였다. 모델처리장의 갈대 성장은 2003년 4월 9일부터 6월 23일까지 평균 9일의 간격으로 막대 자를 이용하여 갈대 초장을 측정하였고, 발아 후 1년생 갈대를 수초·골재 하수처리장에 이식한 후 2년과 3년 동안 활착된 갈대 성장을 평균 3일 간격으로 측정할 전

년도 측정치(김성애, 2002)와 서로 비교하였다 (그림 9).



<그림 9> 갈대 성장 결과.

싹이 돋아나기 시작한지 20일이 경과 할 때까지의 갈대 성장속도는 슬러지 위에서 자라는 초년생 갈대나 수초·골재하수처리장에서 2년째와 3년째 자라고 있는 갈대와 비슷하다. 그러나 시간이 경과될수록 갈대의 성장속도는 이식 년도에 비례하여 성장하였다. 싹이 난지 1개월이 지나면 초년생은 36cm, 2년생은 59cm, 3년생은 115cm 정도 자라며, 85일 경과하면 각각 85cm, 130cm, 225cm의 순으로 자랐다. 처리장의 표면에 많은 영양소가 퇴적되고 아울러 갈대 뿌리의 활착이 해를 거듭 할수록 왕성해지기 때문에 갈대 초장은 이식 나이에 비례하여 자라는 것을 알 수 있다. 강원도 산골 군부대(보병 78부대, 1999)에서 자유수면의 인공 습지를 조성하여 1, 2, 3의 습지로 분리하여 하수를 처리하면서 관찰된 갈대의 성장은 하수의 직접 영향을 받는 1번의 습지에서 6개월 자란 초장은 50cm 내외였으며, 갈대의 잎 마름 증상이 나타났다. 1, 2의 습지를 거친 하수는 어느정도 정화 되어 3번째 습지에 유입된다. 3번째 습지의 갈대 초장은 150cm로 성장하는 것이 관찰 된 것을 볼 때 생 하수가 포화된 1의 습지환경에서는 갈대의 활착이 원만하지 않으나, 이 실험연구에 사용한 모델은 골재층이 포화되지 않으며 지표면과 골재층에 자연 통풍이 되므로 갈대성장에 문제점이 관찰되지 않았다. 지금까지 공급된 마을 하수처리용 수초·골재 하수처리장의 갈대는 과다한 영양공급과 골재층에 충분한 산소공급으로 인하여 갈대의 성장은 매우 양호한 상태이며, 초가을까지 갈대의 싹이 수시로 나오고 있

음이 관찰되었다.

#### IV. 결 론

갈대·슬래그 침상에 하수가 유입되면 슬래그에 함유된 석회성분이 용해된다. 유출수의 경도는 유입수보다 평균 5배 가까이 높게 나타난다. pH-값 또한 유입수보다 50% 이상 높아지고 있다. 인은 약 90%가 제거된다. BOD는 약 82%, COD는 68%, SS는 90% 이상 처리가 되고 있다. 하수와 슬래그가 접촉할 때 용탈 현상으로 방류수의 pH-값이 과다하게 높아지므로 자연정화처리장에 제강 슬래그만을 여재로 사용하는 것은 또 다른 환경문제가 발생될 것으로 판단되며, 따라서 현재 보급되고 있는 수초·골재 하수처리장에 포설하는 일반 골재에 일부의 슬래그를 섞어 사용하게 되면 자연산 골재 공급의 어려운 점도 다소 해소하며, 폐기물 재활용 효과와 인의 흡착 제거율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

#### 인 용 문 헌

건설교통부. 1988. 하수도 정책방향.  
 김남천. 1989. 환경공학실험(수질편), 동화기술.  
 김성애. 2002. 영향인자에 따른 수초·골재하수처리장의 투수속도, 한국 교원대학교, 기술교육과, 석사학위 논문.  
 류기상. 1995. 분말 전로슬래그를 이용한 고농도 인폐수의 처리에 관한 연구, 홍익대학교 토목공학과 석사학위 논문.  
 보병 78연대. 1999. 갈대습지 오수처리장(연구자에게 제공된 미공개 자료).  
 양홍모. 2003a. 고수부지에 조성한 수질정화 자유수면습지의 초기운영단계 질소제거, 환경복원녹화기술학회, Vol. 6, No.6. 25. Dec. 2003.  
 양홍모. 2003b. 고수부지에 조성한 수질정화 여과습지의 초기운영단계 총인제거, 환경복원녹화기술학회, Vol. 6, No.6. 25. Dec. 2003.  
 옥진수. 1995. 입상 전로슬래그를 매디아로 이용

- 한 여과와 탈인의 동시처리에 관한 연구, 홍익대학교 토목공학과 석사학위 논문.
- 정동양. 1999. 자연친화형 농어촌 하수처리장 모델 개발, 환경기술녹화기술학회지, 제2권 제1호.
- 정우용. 2003. 수질오염, 폐기물, 토양오염 공정 시험방법, (주)동화기술.
- 환경부. 2002a. 자연친화형 농어촌 수초·골재 하수처리장 모델 개발.
- 환경부. 2002b. 하수도 통계.
- 황한국. 1994. 전로슬래그를 이용한 정석 탈인법의 영향인자에 관한 연구, 홍익대학교 토목공학과 석사학위 논문.
- APHW, AWWA, WPCF. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed., American Public Health Association, DC.
- ATV H262. Behandlung von häuslichen Abwasser in Pflanzenbeeten, 1989.
- Börner, T. 1992. Einflußfaktoren für die Leistungsfähigkeit von Pflanzenkläranlagen. Schriftreihe AR 58, Verein zur Förderung des Institut für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung der TH Darmsdat (Hrsg).
- Fehr, G. 2000. Forschungsansätze und Ergebnisse des Verbundprojektes Bewachsene Bodenfilter, Celle, FRG.
- Ham, J. H., C. G. Yoon., J. H. Jeon and H. S. Hwang. 2003. Sewage Treatment Using Natural Systems and Effluent Reuse for Crop Irrigation in Small Communities, J. of the Korean Society of Agr. Eng.
- Mertach, V. 1988. Pilotprojekt "Wurzelraumanlage Buende" Landesamt fuer Wasser und Abfall Nordrhein Westfalen.
- Wissing, F. 1995. Wasserreinigung mit Pflanzen, Eugen Ulmer GmbH & Co. Stuttgart.

接受 2004年 2月 28日