

비점오염원의 우수지 유입 방지를 위한 슬래그 활용 방안

박 정 환* / 김 진 한**+ / 정 종 태*** / 전 세 진**** / 박 한 봉*****

The Application Plans of Slag to Prevent Non-point Source Pollutants Flowing into the Retention Pond

Jung Hwan Park* / Jin Han Kim** / Jongtai Jung*** /

Se Jin Jun**** / Han Bong Park*****

요약 : 본 연구는 오염이 심한 우수지를 지속적으로 양호한 수질로 유지하기 위한 효율적 방안을 모색하고자 수행되었다. 우수지 수질을 양호하게 유지하려면 외부로부터 유입되는 비점오염원의 유입 차단이 필요하다. 본 연구에서는 이의 방안으로 다공성 슬래그의 활용을 제안하였다. 다공성 슬래그 넷트를 우수지에 설치하는 경우의 수질 변화를 알아보기 위하여 오염물질의 제거 정도를 실험하였다. 그 결과 접촉 시간과 인 제거 효율 간에는 높은 상관관계($r^2=0.9765$)를 나타내어 접촉시간이 처리효율에 미치는 중요한 인자임을 알 수 있었으며, 인과 부유물질은 조제 시료, 생물학적 처리수, 하수 모두 다공성 슬래그 충전상을 통과하면서 높은 효율로 제거됨을 확인할 수 있었다. 이로부터 비점오염원의 유입 방지를 위하여 우수지 수중 내부와 외부 호안에 다공성 슬래그 충전상의 설치방안을 제안하였다.

핵심용어 : 우수지, 비점오염원, 슬래그

Abstract : This study was performed to figure out what would be effective to maintain good water quality in the retention pond which was badly polluted before. In order to keep the good water quality of the retention pond it is necessary to prevent outer non-point source pollutants from flowing into the pond. In this study, we proposed to use porous slag as a blockage of the inflow into the pond from external non-point sources. We experimented with porous slag nets to see how the water is effected. With the results of the experiments, we found out there is a close correlation($r^2=0.9765$) between contact time and the removal rate of phosphorus, therefore we can conclude that contact time affects removal rate greatly. Synthetic wastewater, activated sludge effluent, and sewage were passed through a porous slag packed bed, both phosphorus and the suspended solid in water were removed highly. With the results of these tests, we proposed to set up a porous slag packed bed inside of the retention pond and revetment to prevent external non-point source pollutants flowing into the retention pond.

Keywords : Retention pond, Non-point source, Slag

1. 서 론

우리나라 연안에는 홍수방지와 만조시 유출수의 원활한 방류를 목적으로 많은 우수지가 설치

되어 있다. 그러나 이들 우수지는 유역으로부터 유입된 오염물질의 축적으로 대부분의 우수지 수질이 악화되는 등 이에 의한 민원도 증가하고 있는 실정이다. 특히 이와 같이 해안에 위치한 유

+ Corresponding author : jinhan@incheon.ac.kr

* 정회원 · 인하공업전문대학 화공환경과 교수

** 정회원 · 인천대학교 도시환경공학부 교수

*** 비회원 · 인천대학교 도시환경공학부 교수

**** 비회원 · 가람환경기술(주)

***** 비회원 · 가람환경기술(주)

수지의 경우 오염된 물이 해안으로 방류되면서 인근 연안의 해양수질에도 악영향을 미칠 수 있다. 본 연구는 인천광역시에 위치한 A 유수지의 수질 및 저니질 개선을 수행한 후에도 지속적으로 깨끗한 유수지 수질을 유지하기 위한 방안을 모색하기 위하여 수행되었다. 송도 경제자유구역과 인접한 실험 대상 유수지는 하천의 최하단에 위치해 있다. 본 유수지는 조성 초기, 홍수 예방을 위해 조성되었으나 시간이 경과함에 따라 유수지 주변 공단의 폐수 및 하수의 유입, 원인 미상의 비점오염원 유입과 이들 오염 유입수의 긴 체류시간으로 인해 여름철 대량으로 조류가 발생하는 등 문제가 발생되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 오염 정도가 호소수질등급 VI 등급(매우 나쁨)의 유수지를 대상으로 여러 가지 물리·화학적 방법을 이용하여 호소수질등급 III 등급(보통)의 수질로 개선한 후 이 수질을 지속적으로 유지하기 위한 방안을 모색하고자 수행되었다. 유수지 정화사업이 선행된 후에도 양호한 수질을 지속적으로 유지하기 위해서는 유수지 외부로부터 유입되는 비점오염원의 유입을 차단하여야 하는데 이를 위한 방안으로 본 연구에서는 슬래그를 이용하는 방안을 제안하고자 하였다. 제철 공정에서 발생하는 슬래그는 현재 도로용 골재와 같이 슬래그의 특성을 살리지 못한 주로 저급한 용도로 활용되고 있다. 이들 슬래그 중에는 환경분야에서 재활용이 가능한 정도의 충분한 칼슘(CaO 40% 이상)이 함유되어 있으며, 마그네슘, 알루미늄, 실리카 등 환경분야의 오염물질 처리에 많이 이용되는 물질(Jun과 Yim, 1999)로 구성되어 있다. 이 중 칼슘은 수중의 정인산과 불용성 착물을 형성하는 이른바 hydroxyapatite로 대표되는 난용성 인산칼슘 결정으로 종정(種晶) 표면에 석출, 제거된다. 이러한 정석탈인법(Zoltek, 1974 : Nancollas, 1968 : 中川四 등, 1983)은 비교적 고농도의 인(10 mg/L 정도)을 포함하는 시료부터 1 mg/L 정도의 비교적 낮은 농도의 인 함유 시료의 처리에 적용할 수 있는 방법으로 알려져 있다. 이와 함께 슬래그는 다공성의 특성과 넓은 비

표면적으로 인하여 부유물질의 제거는 물론 오염물질의 흡착 기능을 가지고 있다. 본 연구에서는 이들 슬래그를 별도로 가공함이 없이 피상 형태 그대로 그물망 또는 철망 형태로 비점오염원 차단 시설을 만들어 설치할 때 부유물질 및 인의 제거 효율을 조사하고 이로부터 슬래그를 이용한 환경친화적인 비점오염원 유입방지 시설물의 설치 방안을 제안하고자 하였다. 본 연구에서 제안하는 외부 비점오염원의 유입차단 시설은 유수지 뿐만 아니라 체류시간이 긴 호소 등의 부영양화 방지(Nichols 등, 1979 : Gerber 등, 1986 : Ekama, 1983)에도 적용할 수 있으며, 특별한 가공 없이 오염방지 시설을 설치할 수 있어 경제적이며 또한 폐자원을 유용하게 재활용할 수 있다는 장점이 있다. 특히 비점오염원 유입 차단 시설을 환경친화적으로 설치할 경우 친수공간 조성에도 도움이 되어 유수지나 호소 주변 시민들의 삶의 질 향상에 도 기여할 것으로 기대된다.

2. 유수지 위치도 및 실험

2.1 유수지 위치도 및 시료 채취 지점

본 연구의 실험 대상으로 선정한 유수지의 위치도와 수질 분석을 위한 시료 채취 지점을 Fig. 1에 나타내었다. 실험 대상 유수지는 서쪽으로는 서해 바다와 인접해 있으며 해안도로가 위치해 있

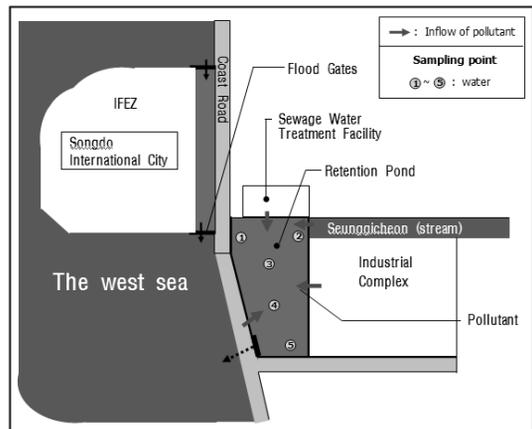


Fig. 1. Location and sampling points

어 도로변으로부터 비점오염원이 유입될 수 있다. 북쪽으로는 하수 처리장이 위치해 있어 하수처리장 유출수가 유입되고 있다. 동쪽으로는 하천과 공단이 위치해 있어 공단의 우수와 함께 처리되지 않은 공단폐수를 무단방류할 경우 본 연구 대상 유수지로 유입될 가능성이 있다. 그러므로 외부로부터 유입되는 이들 비점오염원의 유입을 차단할 수 있는 방안이 필요한 실정이다.

2.2 실험 및 재료

본 연구에서 사용한 반응기는 아크릴 재질로, 형태는 직사각으로 일종의 압출유형(PFR)의 반응기이며 용량은 5리터이다. 아크릴 내부에는 철망 형태의 박스를 제작하고 여기에 다공성 슬래그를 충전한 후 아크릴 반응기에 넣어 실험하였다. Fig. 2는 아크릴 수조에 넣어 사용한 철망 구조의 슬래그 충전 반응기 구조와 아크릴 반응조 상부의 원수 유입부 장치를 나타낸 개략도이다. 먼저 펌프에 의해 처리 대상 시료가 반응조로 유입되면 아크릴 수조 상부의 원수 유입부에 설치된 역삼각형의 노치(notch)를 넘쳐흐르도록 하여 유량이 가능한 고르게 슬래그 반응조로 유입되도록 하였다. 이후 유입부를 통과한 시료는 슬래그 반응조를 따라 흐르면서 처리된다.

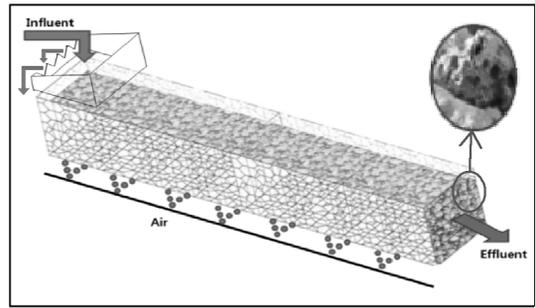


Fig. 2. Schematic diagram of slag reactor

실험 장치 하부에는 공기를 불어 교반과 함께 유입수 중에 함유되어 있는 부유물질이 반응기 바닥에 가능한 퇴적되지 않도록 하였다. 아크릴 조 바닥에는 배수 밸브(drain valve)를 설치하여 실험 기간 경과에 따라 반응조 하부에 부유물질이 쌓이게 되면 배출시킬 수 있도록 하였다. 또 반응기 외부에는 가온장치(heating element)를 설치하여 20℃로 항온을 유지하였다. 실험은 슬래그와 접촉시간에 따른 처리효율 변화를 조사하고자 수리학적 체류시간 변화에 따른 효율을 분석하였다. 실험에 사용한 슬래그는 제철 공장에서 발생하는 고로슬래그이며 별도로 가공하지 않은 직경 10mm 크기의 것을 선별하여 사용하였다. 본 연구에서 사용한 분석 방법 및 사용기기는 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Analytical methods

Items	Methods and instruments
BOD ₅	수질오염공정시험방법
TN	수질오염공정시험방법
TP	수질오염공정시험방법
SS	수질오염공정시험방법
Turbidity	Standard methods(DRLANGE, Nephla)
COD _{Cr}	Closed Reflux, Colorimetric Method (HACH, DR-2700)
COD _{Mn}	수질오염공정시험방법
Cd	Inductively Coupled Plasma(Seiko, SPS 1200-A)
Cu	Inductively Coupled Plasma(Seiko, SPS 1200-A)
Mn	Inductively Coupled Plasma(Seiko, SPS 1200-A)
Zn	Inductively Coupled Plasma(Seiko, SPS 1200-A)
Cr ⁶⁺	Inductively Coupled Plasma(Seiko, SPS 1200-A)
Fe	Atomic Absorption Spectrophotometer(Shimadzu)
Salinity	Standard methods(Argentometric Method)
E. Coli	Standard methods

3. 결과 및 고찰

3.1 유수지 수질 분석 결과

유수지 수질 분석 결과를 Table 2에 나타내었다. 유수지의 수질 등급을 나타내는 특별한 기준은 없으나 분석 결과를 우리나라 호소수질기준(환경부, 2008)과 비교해 볼 때, COD_{Mn}, TN, TP 모두 호소수질기준 VI 등급 이하(매우 나쁨)의 수질임을 알 수 있다. 분석 결과 중 영양염류인 TN은 호소수질기준 VI 등급의 약 8.2배, TP는 약 8.7배로 높게 나타났다. 이들 영양염류는 호소의 부영양화 원인물질로 여름철 조류 대량 번식의 원인 물질이기도 하다. 따라서 본 연구에서는 슬래그를 이용, 부유물질 제거와 함께 조류의 주요 성장제한요소(limiting nutrient)인 TP 제거 정도를 실험하고 조류 발생 방지를 위한 유수지 수질 개선방안의 하나로 활용 가능한 지 평가하고자 하였다.

3.2 슬래그 충전상에 의한 인 제거 효과

3.2.1 조제 시료의 인 제거 효과

우리나라 하수(환경부, 2008) 중의 인 농도는 평균 4mg/L 정도이나, 어떤 하수처리장 유입 원수의 경우 6~8 mg/L를, 적은 수이나 일부 하수처리장의 유입 원수는 10mg/L를 상회하는 경우도 있다. 본 절의 조제시료 실험에서는 비점오염원으로 하수가 유입될 때를 고려하여 시료의 인 농도를 약 10mg/L로 만들어 비교적 높은 농도를 대상으로 실험하였다.

Fig. 2의 다공성 슬래그를 충전한 장치에 10~11 mg/L의 총인 농도로 조제한 시료를 통과시켜 인 제거 효과를 실험한 결과가 Fig. 3~Fig. 5이다. 유량은 시간 당 각각 830mL, 420mL, 210mL로 하였으며 이 때 슬래그와의 접촉시간은 약 6시간, 12시간, 24시간이었다. 실험 결과 시료와 슬래그의 접촉시간이 길어지면서 인 제거 효율은 증가하는 경향을 보였다. Fig. 6은 접촉시간과 효율간의 상관관계를 나타낸 것이다. 접촉 시간과 인 제거 효율 간에는 높은 상관관계($r^2=0.9765$)를 보임을 알 수 있어 처리 효율에 미치는 여러 인자 중 슬래그와 시료의 접촉시간이 매우 중요한 인자임을 알 수 있었다.

Table 2. Water quality for the A retention pond

Items ¹⁾	Sampling points				
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
BOD ₅	4.51	18.9	17.0	19.0	33.0
COD _{Mn}	16.9	33.5	30.9	30.7	34.7
SS	16.25	27.67	14.0	14.0	114.6
T-N	4.99	12.33	7.21	5.96	7.34
T-P	0.66	1.31	1.05	1.0	0.86
Cd	N.D. ²⁾	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cu	0.007	0.020	0.045	0.047	0.132
Mn	0.405	0.168	0.159	0.153	0.168
Zn	N.D.	0.054	0.210	0.202	1.352
Fe	N.D.	N.D.	0.024	N.D.	N.D.
Cr ⁶⁺	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Salinity	17.83	5.29	4.82	4.86	2.84
E. coli	N.D.	2200	3000	3500	5000

¹⁾ All units are mg/L except salinity(‰) and E. coli(colony/100mL).

²⁾ N.D. : Not detectable

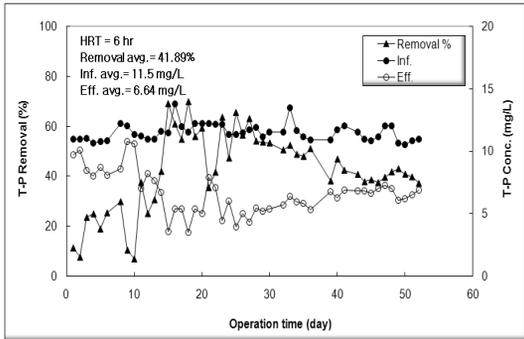


Fig. 3. Removal rate of TP (HRT=6hr)

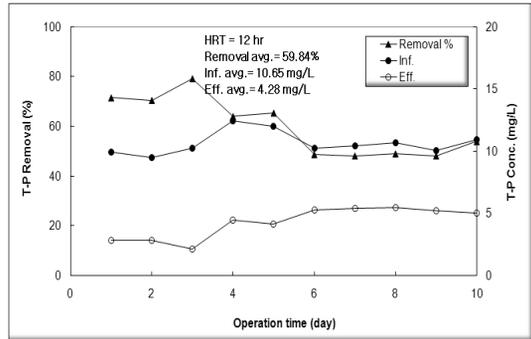


Fig. 4. Removal rate of TP (HRT=12hr)

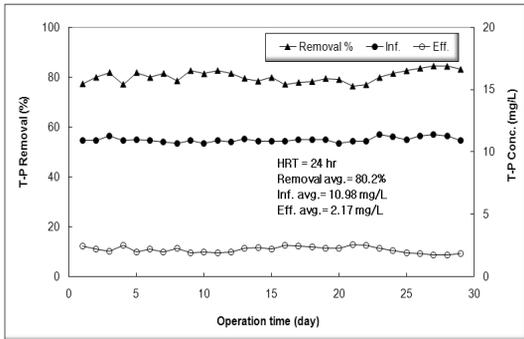


Fig. 5. Removal rate of TP (HRT=24hr)

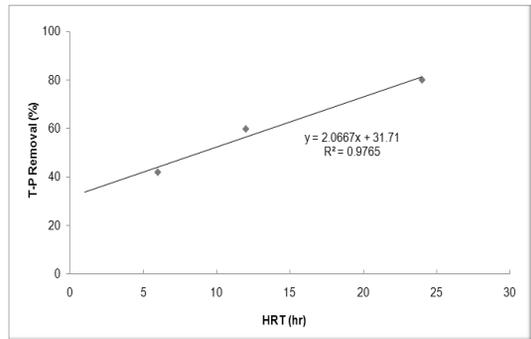


Fig. 6. Correlation between TP removal rate and HRT

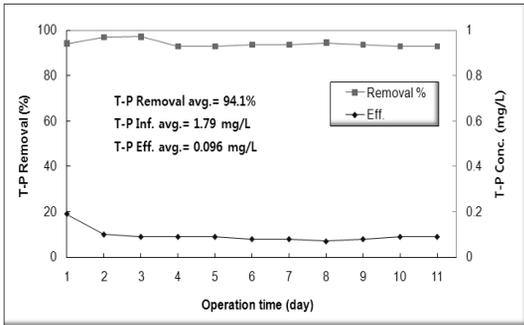


Fig. 7. Removal rate of TP for activated sludge effluent

3.2.2 활성슬러지 방류수의 인 제거 효과

조제 시료 대신 실제 하수처리장의 생물학적 처리수를 대상으로 인 처리 실험을 수행하고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 접촉시간을 12시간으로 실험한 결과 인 제거 효율은 약 94%를 나타내어 조제 시료의 경우보다 조금 더 높은 제거효율

을 나타내었다. 이는 조제 시료의 경우 총인이 모두 용해성 형태인 것에 비해 현장 시료의 경우 용해성 인과 함께 부유물질에 함유된 인이 시료 중에 존재하여 다공성의 슬래그에 부착, 제거되므로 조금 더 높은 효율을 보인 것으로 판단된다.

3.2.3 하수의 인 제거 효과

현장 시료로 마을에서 발생하는 하수를 사용하여 슬래그 충전상을 통과시킬 때의 인 제거효과를 실험하고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 슬래그와 오수의 접촉 시간은 12시간으로 실험하였다. 실험 결과 총인 제거율은 97.6%를 나타내었으며 처리수의 부유물질은 검출되지 않아 대부분 제거되었다. 하수를 대상으로 실험한 경우에도 인과 부유물질 모두 전술한 조제 시료 및 생물학적 처리수의 실험 결과와 유사하게 높은 제거율을 나타내었다.

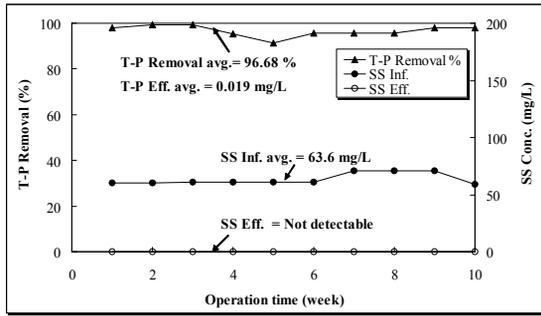


Fig. 8. Removal rate of TP and SS for sewage

3. 3 슬래그를 이용한 외부 비점 오염원의 우수지 유입 방지 방안

전술한 실험에서 수중의 인과 부유물질이 슬래그 충전상을 통과하면서 고효율로 제거됨을 확인한 바 있다. 이 결과로부터 본 연구 대상 우수지로 유입되는 외부 비점오염원의 유입 차단을 위하여 다공성 슬래그를 충전한 비점오염원 차단 시설의 설치를 제안할 수 있었다.

Fig. 9는 게비온(gabion) 형태의 철망에 다공성 슬래그를 채운 구조물의 개략도이다. Fig. 10은 본 연구 대상 우수지에 비점오염원의 유입을 차단하기 위한 다공성 슬래그 충전상의 설치 위치를 제안한 개략도이다. 그림 10과 같이 우수지 외부 비점오염원의 유입을 차단하기 위하여 다공성 슬래그 충전상을 비점오염원이 유입되는 수중 내부와 우수지 호안에 설치한다. 이 때 우수지 수중 내부에는 나일론 또는 섬유 재질의 유동성 그물망 구조물에 다공성 슬래그를 충전시킨 후 우수지로 유입되는 하천의 유입 지점과 공단으로부터 유입되는 비점오염원 유입부의 수중에 설치한다. 비점오염원이 유입되면 슬래그 충전상을 통과하면서 부유물질과 인이 제거되어 이들 오염물질의 우수지 유입을 차단할 수 있게 된다. 또 이들 다공성 슬래그 충전상은 우수지 외곽으로부터 우수지로 유입되는 토사가 우수지의 중앙 내부로 유입되지 않도록 차단벽의 역할도 하게 된다. 그러므로 장기적으로 우수지 중앙부에는 오염 퇴적토가 쌓이지 않게 되므로 정화를 위한 우수지 전체 퇴적토

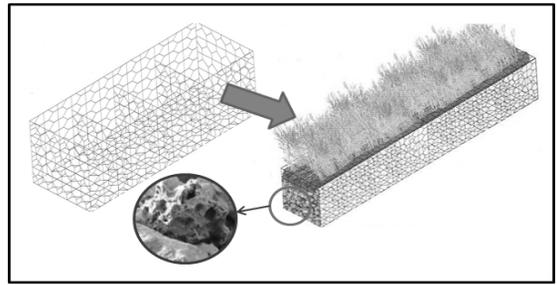


Fig. 9. Schematic diagram of porous slag packed bed

의 준설은 필요 없게 된다. 단지 슬래그 충전상이 설치된 부분에 퇴적된 토사 등을 정기적으로 제거함으로써 우수지 전체 수질 및 저니질의 관리가 가능할 것으로 기대된다.

Fig. 10 하단의 서쪽 해안도로 호안에는 Fig. 9에 나타난 게비온 형태의 철망 구조물에 다공성 슬래그를 충전하여 설치한다. 이 경우 해안도로 쪽에서 유입되는 비점오염원의 유입을 차단할 수 있게 된다. 이러한 시설을 설치함에 따라 비점오염원 중 부유물질과 함께 특히 인을 고효율로 제거할 수 있어 우수지의 양호한 수질 유지는 물론, 여름철 우수지에서 대량 발생할 수 있는 조류의 발생 억제 가능할 것으로 기대된다. 이와같이 슬래그를 활용한 방법은 비용 면에서 경제적이고 우수지 관리 측면에서도 관리가 용이하다는 장점이 있다. 서쪽 해안도로 호안에 설치한 슬래그 충전상의 상부에는 풀이나 꽃 등을 자라게 하여 심미적 효과가 있는 시설로 설치할 수 있고 폐자원 재활용이라는 측면에서도 환경 친화적인 방법이다.

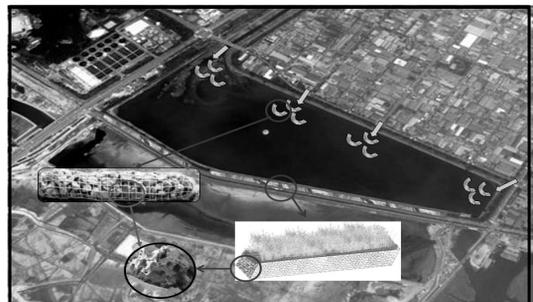


Fig. 10. Locations of porous slag packed bed as a blockage

4. 결 론

해안에 인접한 A 유수지에 대하여 비점오염원의 유입 방지를 위한 슬래그 활용 방안을 모색한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 슬래그를 충전한 실험장치를 사용하여 인 제거 효과를 조사한 결과 접촉 시간과 인 제거 효율간에는 높은 상관관계($r^2=0.9765$)를 나타내어 접촉시간이 처리효율에 미치는 중요한 인자임을 알 수 있었다.
- 2) 인과 부유물질은 조제 시료, 생물학적 처리수, 하수 모두 다공성 슬래그 충전상을 통과하면서 높은 효율로 제거됨을 확인할 수 있었다.
- 3) 유수지 수중 내부와 외부 호안에 다공성 슬래그 충전상의 설치방안을 제안함으로써 환경 친화적인 유수지 외부 비점오염원의 유입 방지 방안을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 인천지역환경기술개발센터의 2010년도 연구개발사업비 지원(과제번호 10-2-70-72)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Jun, S. J, and Yim, S. S., "A Study on the Coagulation of Wastewater Containing Fine Silica Particles With the Waste Slurry from

Soda Ash Manufacturing Industries", *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, Vol. 27, No. 7, pp. 1073-1078, 1999.

John Zoltek, Jr., "Phosphorus removal by orthophosphate nucleation", *J. of WPCF*, Vol. 46, No. 11, pp. 2498-2520, 1974.

George H. Nancollas, "Kinetics of crystal growth from solution", *J. of Crystal Growth*, Vol. 3, No. 4, pp. 335-339, 1968.

中川四, 鈴木秀男., "骨炭나 用いた 2次處理水の晶析脱リン法に關する研究(I)", *日本下水道協會誌*, Vol. 20, No. 231, pp. 19-27, 1983.

Nichols, H. A., and Osborn D. W., "Bacterial Stress: Prerequisite for Biological Removal of Phosphorus", *JWPCF*, Vol. 51, No. 3, pp. 557-569, 1979.

Gerber, A., Mostert, E. S., Winter, C. T., and de Villiers, R. H., "Interactions between phosphate, nitrate and organic substrate in biological nutrient removal processes", *Wat., Sci. Tech.*, 19, pp. 183-197, 1986.

Ekama, G. A., "Consideration in the process design of nutrient removal activated sludge process", *Wat. Sci. Tech.*, 15, pp. 282-318, 1983.

환경부, 수질환경공정시험기준, 환경부고시 제 2008-99호, 2008.

환경부, 하수종말처리시설 운영·관리 현황, 2008.

○논문접수일 : 10년 03월 29일

○심사의뢰일 : 10년 04월 01일

○심사완료일 : 10년 05월 24일