

습지여상시설을 이용한 하천 수질정화

정용준[†] · 임기성

환경관리공단 유역관리처

Purification of Stream Water Quality by Subsurface-flow Wetland Facility

Yong-Jun Jung[†] · Ki-Sung Lim

Watershed Management Department, Environmental Management Corporation

(Received 22 September 2005, Accepted 3 February 2006)

Abstract

The facility of constructed wet land combined with filter media was examined in order to improve the water quality of a polluted stream, which has been performed as a part of national projects. Throughout 2 years of operation for a stream, it can provide the design and operating parameters for the purpose of future construction. The influent flow rate was about 50% against the design capacity. The removal efficiencies of BOD, COD_{Mn}, SS, T-N and T-P were 62.9%, 47.1%, 74.8%, 22.4% and 33.5%, respectively. In order to keep this facility stable, the removal of surface filter media and supplement should be periodically conducted. In addition, the proper selection of sites is recommended not to be flooded.

keywords : Constructed wet land, Filter media, Polluted stream, Water quality

1. 서론

정부에서는 대전, 충남·북, 전북지역 450만 주민들의 식수원이자 용수원인 금강 및 만경강·동진강 수계를 대상으로 93년부터 수질개선대책을 추진해 왔으나, 도시화·산업화 및 호소의 부영양화로 인하여 수질이 개선되지 않고, 목표수질 달성이 어려운 상황에 이르러 이에 따라 해당 수계의 물 문제에 대하여 근본적인 해결을 위한 범정부적 차원의 종합대책을 마련하였다(정부합동, 2000).

금강수계물관리종합대책의 일환으로 대청호 유입하천 중 수질 오염이 진행중인 하천을 선정한 뒤, 환경친화적 수질개선 사업을 수행하기 위하여 하천자연정화공법을 활용한 하천수질개선사업이 진행되었다. 국내의 하천 실정에 적합한 수질정화기술은 1995년에 개발되었고, 1997년과 1998년도에는 자갈접촉산화법, 인공습지, 수초재배섬 및 접촉산화조와 같은 수질개선 시범사업이 전국적으로 확산되었으며, 2000년 이후에는 4대강 물관리종합대책이 본격 추진됨에 따라 4대강 수계에 걸쳐 다양한 공법이 도입되었다.

생물학적 접촉 산화공정은 자연친화적이면서 유기물의 제거 효율이 높아 국내·외(임 등, 1992; 조, 2004; 岡田宏道 et al., 1981; 小島貞男, 1981)적으로 알려진 하천수질정화공법이다. 또한 동식물 부양체제와 환경의 기능을 유지하는 습지(Adamus et al., 1983)시설에 수질정화는 물론이

며, 비오톱조성 및 자연학습 공간까지 제공(Kadlec et al., 1996)가능한 인공습지에 대한 연구도 최근 활발히 진행되고 있다(박 등, 2004a; 박 등, 2004b; 최 등, 2005).

다양한 수질정화기술 가운데, 인공습지법과 자갈접촉법의 장점을 최대한 활용한 습지여상 공법은 안정된 수질을 얻을 수 있고, 부하변동에 대응하기 쉬운 뿐만 아니라, 유지관리가 용이하며, 습지상부의 갈대에 의해 호소의 부영양화를 유발하는 영양염류의 제거가 가능한 것으로 알려져 있어 점오염원과 비점오염원의 처리에 폭넓게 적용되고 있다(양, 2003; Vrhovsek et al., 1996; Green, 1997).

습지여상 공정은 모래와 자갈등을 이용하여 형성한 습지 필터층에 인공습지를 조성한 후, 갈대나 고랭이와 같은 정수식물을 재배하여 영양 물질을 제거함과 동시에, 완속여과와 자갈접촉 산화법에 부착된 미생물의 활동으로 부가적인 수처리 효과를 기대하는 수질정화법이다(Green, 1997; Luederitz et al., 2001).

환경관리공단에서는 환경부에서 추진중인 대청호등 금강수계상수원수질관리특별종합대책의 일환으로 2000년 후반 기부터 하천자연정화시설을 활용한 하천수질개선 시범사업을 수행하였다. 본 연구에서는 대청호 유입하천 중, 수질오염이 진행중인 금강수계의 S하천을 대상으로 시설의 유지관리가 용이하고, 시설비가 저렴한 하천자연정화공법 가운데 습지여상 시설을 설치하여 안정된 기간동안 2년간 운전하여 도출한 결과를 분석하였다. 이는 향후 유사한 사업을 추진할 경우, 보다 효율적으로 사업을 수행하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
yjjung@emc.or.kr

2. 연구내용 및 방법

2.1. 대상 하천

대청호 유역 하천자연정화시설 설치사업을 수행하기 위하여 하천지형, 수리·수문 특성, 주변 토지 이용, 오염원 현황, 경제성 및 측량·지질조사 등을 실시한 기초 자료(환경관리공단, 2000b)를 바탕으로, Fig. 1과 같은 위치에 목적에 적합한 부지를 선정하였다.

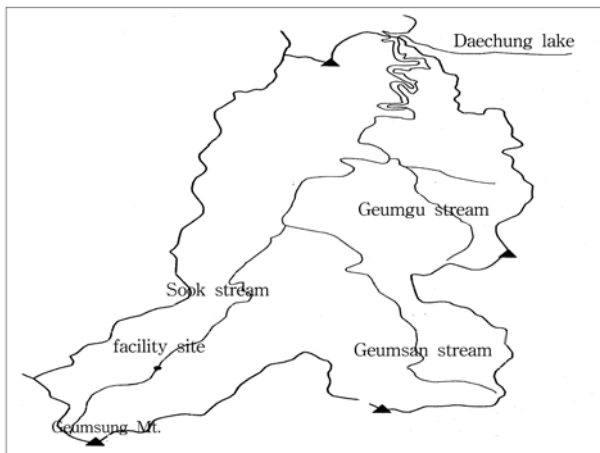


Fig. 1. Location of facility station.

S하천은 금강 수계의 제 1지류로 유역면적 176.5 km², 유로 연장 29.0 km이고, 유역 형상은 수지상의 장방형을 이루는 국가 및 지방 2급 하천이며, 행정구역상 충청북도의 2군 5개 읍면을 포함하고 있다. Fig. 1에 표시한 바와 같이 충청북도 금산군 금성면 금성산에서 발원한 S하천은 계곡류를 이루며 북류하다가 유로를 형성한 뒤, 지류들인 금산천과 금구천 및 추풍천과 합류한 후 대청호에 유입하고, 개수율은 55.1%로 조사되었다.

대상 정화시설은 충남 금산군 추부면 마전리 일원의 주거 밀집지역과 산재된 일부 공장 하수가 미처리되어 유입되는 중·상류지점에 위치하는데, 하폭은 20~30 m, 수심은 0.5 m이하이고, 하천 주변은 농경지로 되어있으며, 하천 우안에 제방도르가 설치되어 있다.

2.2. 시설 개요

유입 하천의 유황을 분석한 결과 평균 갈수량과 저수량은 690 m³/일과 6,050 m³/일로 나타났고, 평수량과 풍수량은 각각 16,850 m³/일과 34,300 m³/일의 유량으로 조사되어 이를 바탕으로 설계 유량을 Table 1과 같이 계획하였다. 대상 수계내에는 광역수질 측정망이 설치되어 있지 않기 때문에 하천정비 기본계획서와 정화시설 사전 위치 조사시 지점별로 수질 조사한 결과를 바탕으로 설계 수질을 정하였다(환경관리공단, 2000a).

수리·수문 및 유입 수질의 차이등을 고려하여 설계한 대상 하천들의 정화시설 현황은 Table 1과 같다.

Table 1. Summary of design parameters of subsurface-flow wetland facility

	S stream
Flow rate (m ³ /d)	8,000 (6,000~10,000)
Water quality (mg/L)	BOD : 10.0, SS : 10.0
Site area (m ²)	1,500
HRT (hr)	2.3
Construction completion	2001. 12.

본 연구에 적용된 습지 여상시설은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 크게 유입부, 정화시설 및 유출시설로 구성하였다.

유입시설은 하천수를 취수하여 수질정화조내로 유입시키는 역할을 한다. 조목과 세목스크린을 통과한 뒤, 펌핑을 통한 동력을 이용하여 침사지에 저류된 유입수를 습지여상조내로 유입시키는 시설들로 구성되어 있다. 또한 인근의 외곽수로와 제방수로도 수중 펌프를 이용하여 유입분배조에 저류시켰다.

유입분배조를 거친 하천수는 제 1습지 유입용 수문을 통하여 제 1습지 상부로 유입된다. 습지로 유입된 하천수는 Fig. 3에 나타난 바와 같은 구조를 형성하는 필터층을 수직으로 통과하면서 여과, 미생물 분해 등에 의해 처리된 후 습지 중앙부의 집수정으로 유입된다. 습지내의 용존산소는 집수정 내부에 설치된 DO meter에 의해 감지되며, DO 값에 따라 송풍기의 가동대수를 조절할 수 있도록 되어있다. 송풍기 형식은 roots blower(2.8 m³/min, 5.3 kw)로 하였고, 소음을 적게 하기 위하여 헬리컬형으로 선정하였다.

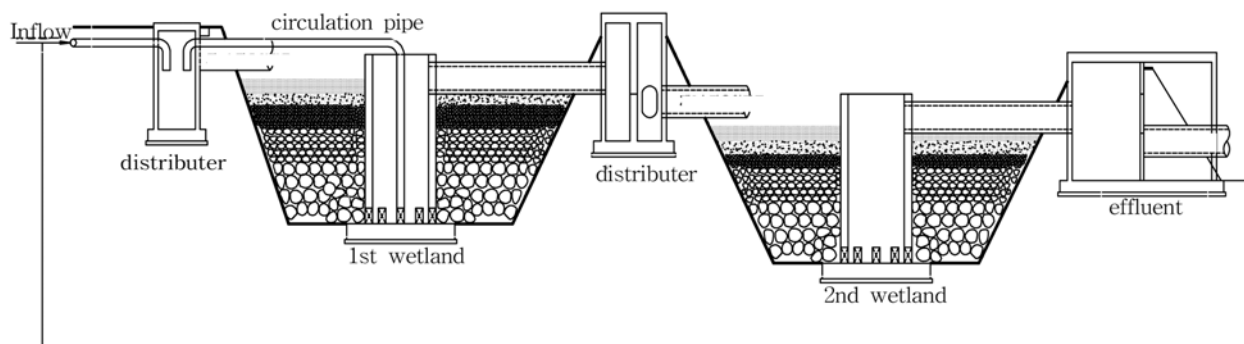


Fig. 2. Schematic diagram of subsurface-flow wetland facility.

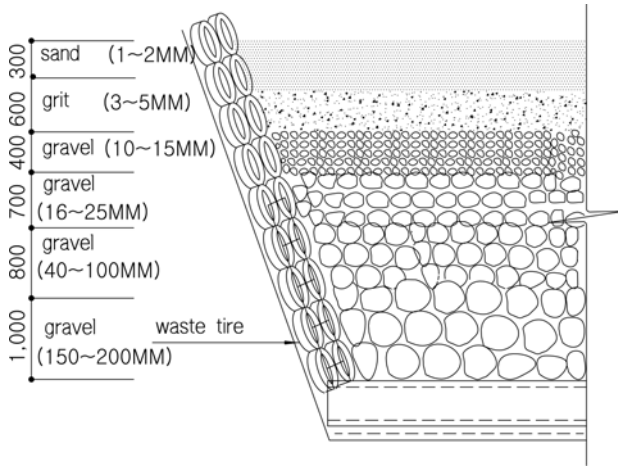


Fig. 3. Cross section of filter layers.

습지의 수위는 수위계로 감지되며, 일정 수위 이상이면 제 1·2펌프실의 펌프 가동을 중지하여 하천수의 유입을 차단한다. 또한 집수정에는 순환펌프가 설치되고, 연결관으로 유입분배조에 연결되면서 처리수를 순환시킨다.

제 1습지에서 처리된 하천수는 자연유하로 중간분배조를 거쳐 제 2습지로 유입된다. 습지내부에 충전된 필터층을 수직으로 통과하여 필터층 여과, 미생물 분해 등에 의해 처리되어 습지내부의 집수정으로 집수된 후 최종방류조로 이송된다.

유출시설은 중간 방류조와 최종 방류조로 구성되었다. 중간 방류조는 제 1습지의 보수 및 청소를 위하여 제 2습지로 하천수를 유입하거나, 제 2습지로 하천수 유입차단시 연속적처리를 위하여 중간 방류조로 이송하기 위한 시설이다. 최종 방류조는 제 2습지에서 처리된 처리수의 방류를 위한 시설로 설치되어 있다. Fig. 4에는 설치된 시설물의 전경을 표시하였다.



Fig. 4. Photographs of subsurface-flow wetland facility.

2.3. 수질 분석

처리 시설의 효율성과 안정성을 평가하기 위하여 2001년 12월 준공된 이후로 2002년부터 2003년까지 2년간 운전하였다. 유입수와 유출수의 유량 및 수질을 정기적으로 측정하였는데, 모든 시료는 수질오염공정시험법(환경부, 1998)과 standard method(APHA et al., 1998)에 준하되, 1일 혼합시료로 채수한 후 수질분석을 실시하였다. 단, 2002년 6월부터 10월까지의 대상 수계내의 오염하천 정비사업으로

인하여 하천수의 유입과 차단이 반복되었기 때문에 지속적인 운전이 불가능한 시기였고, 2003년에는 온도계 센서 고장으로 온도 측정이 불가능하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 운전 특성

운전 기간동안 측정된 습지여상 시설내의 온도 변화는 Fig. 5에 표시한 바와 같다. 하절기 수온 상승은 예상되었지만, 현장 여건상 측정이 불가능하였으므로 이에 대한 운영 결과를 평가할 수 없었다. 최저 수온은 1°C로 측정되어 동절기 운전상의 문제점으로 예상되는 습지여상 시설내의 결빙현상은 없는 것으로 관찰됨에 따라, 본 시설물의 옥외 설치에 대한 문제점도 없을 것으로 사료된다.

습지 여상시설내의 DO농도 변화는 Fig. 6에 표시한 바와 같이, 0.7~12.7 mg/L 및 평균 5.2 mg/L로 나타났다. DO농도가 낮게 유지된 운전 기간동안 습지여상 시설의 일부지역에서 혐기화가 관찰되었지만, 전체적으로 수처리의 성능저하는 나타나지 않았다. 본 시설은 DO값에 따라 송풍기의 가동대수를 조절할 수 있도록 설치되었으나, DO농도가 수처리 효율, 특히 생물학적 질소제거에 필요한 질산화와 탈질과정에 미치는 영향을 단계적으로 검토할 수 없었다.

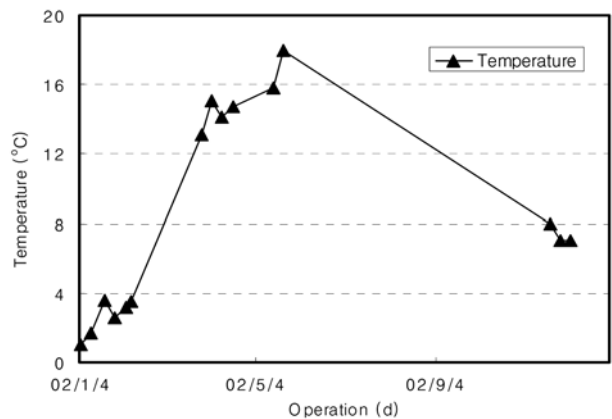


Fig. 5. Temperature profile for 1 year operation.

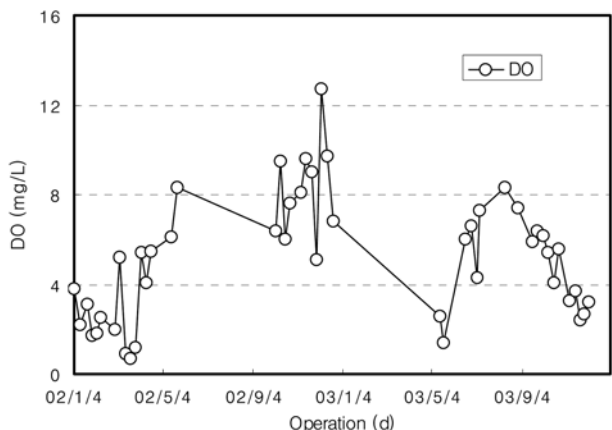


Fig. 6. Monitoring of DO concentration.

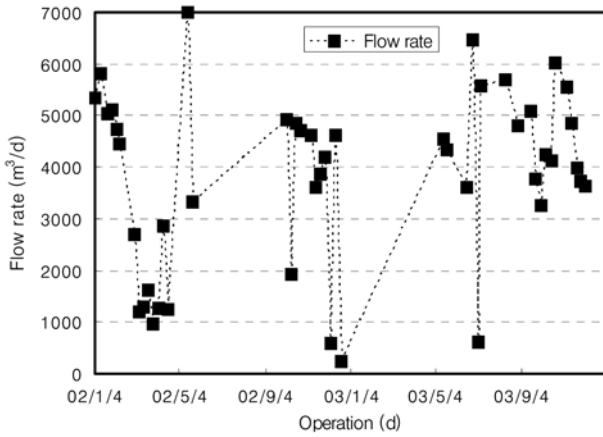


Fig. 7. Profile of flow rate.

향후 운전에는 송풍기 가동 대수 변경에 따른 습지여상 시설내의 DO농도 변화와 처리 효율에 대한 운영 및 검토가 필요하며, 이에 따라서 송풍기 가동을 유동적으로 수행할 필요가 있을 것으로 사료된다.

운전 기간동안 측정된 정화시설의 처리 유량 변화는 Fig. 7과 같다. 8,000 m³/d의 설계 유량에도 불구하고, 측정된 기간 동안의 유량은 240~7,008 m³/d로 변화폭이 컸으며, 평균은 3,822 m³/d로 나타나, 설계 유량 대비 처리 유량은 약 50% 이하였다.

습지여상 시설의 특성상 BOD와 SS와 같은 유기물의 처리효율은 좋았으나, 운전 경과일에 따라 모래여재 상부의 폐색현상이 발생하여 실제 처리수량은 당초 계획수량보다 낮은 것으로 나타났다.

장기간에 걸친 본 시설의 운영 중 가장 어려웠던 부분은 습지여상 조내에서 발생하는 사상성 조류와 유입 SS에 의한 여재표면의 폐색현상 이었다. 운영기간 중 이러한 현상 방지를 위하여 주기적으로 여재 표면을 제거하여 주었으나, 효과는 오랜 시간동안 지속되지 않아 2004년도에는 표면의 모래를 전량 제거하였으며, 그 후의 처리는 폐색현상 없이 지속적으로 안정되게 운전할 수 있었다. 여층 최상부에 모래를 포설함으로써 수처리 효율의 향상은 기대할 수 있었으나, 처리수량의 감소와 같은 유지관리상의 문제점이 발생하여 오히려 시설운영에 더 많은 어려움이 있었다.

3.2. 시설 효율 분석

습지여상 시설의 유기물, 즉 BOD, COD_{Mn} 및 SS의 유입, 유출 농도 및 제거 효율을 Fig. 8에 표시하였다.

S하천의 유입 BOD, COD_{Mn} 및 SS의 농도는 2.4~17.3 mg/L, 4.1~15.8 mg/L 및 3.0~61.0 mg/L범위로 나타났고, 이때의 제거 효율은 각각 24.2~88.7%, 0~72.2% 및 40.0~96.7%범위였다. BOD, COD_{Mn} 및 SS의 평균 제거효율은 62.9%, 47.1%, 74.8%로 나타났다.

2002년도와 비교하여 전반적으로 2003년도에 유입수의 농도가 증가하였으며, 제거효율도 상승한 것으로 관찰되었다. BOD와 SS의 제거 효율에 비하여 COD_{Mn}의 제거 효율이 다소 낮게 나타났는데, 이는 운전 경과일에 따른 여

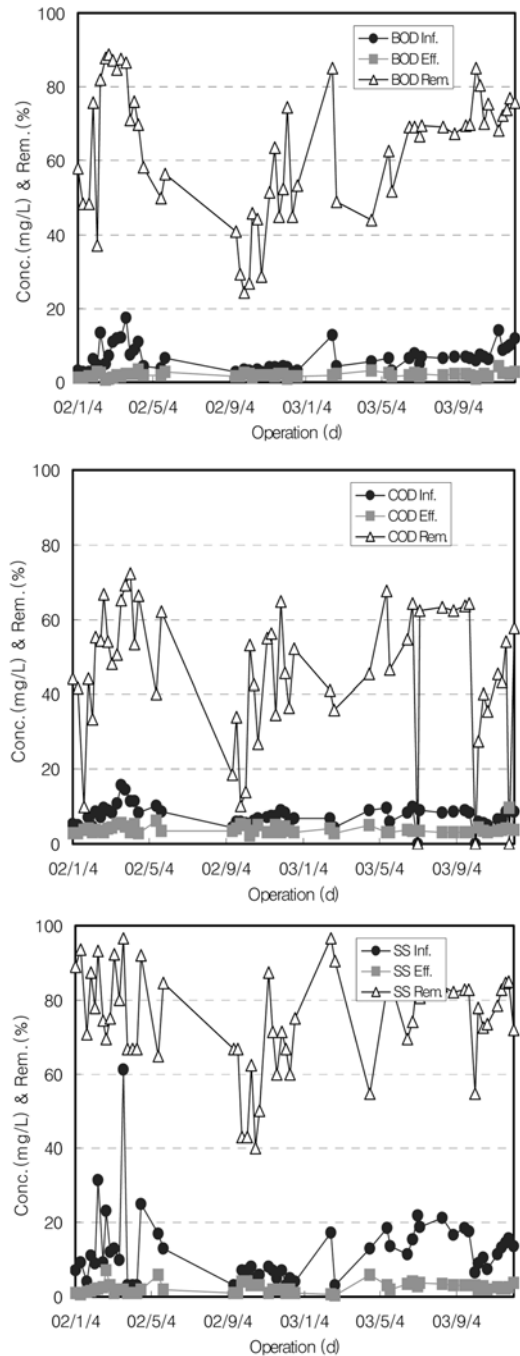


Fig. 8. Monitoring of influent, effluent concentration and removal efficiency for BOD, COD_{Mn} and SS.

상의 잦은 폐색과 교체 및 정수식물들에 대한 부적절한 관리 등과 같은 원인으로 인하여 생물학적 분해 미생물의 활동 약화와 정수식물들의 기능 저하등이 복합적으로 작용했기 때문으로 사료된다.

본 처리시설은 2개의 습지여상을 직렬로 운전하므로, 제 1습지의 수리학적 부하율은 17 m³/m²·d가 되고, BOD부하도 0.09 kgBOD/m³·d가 된다. 이는 살수여상의 설계요소(Metcalf et al., 1995)와 비교할 때 수리학적 부하는 고속 살수여상, BOD부하는 저속살수여상에 근접하게 되므로, 이들의 BOD제거율인 65~90%범위는 효율적 운전 및 유지관

리 여부에 따라 달성할 수 있을 것으로 사료된다.

2002년도의 장마철 기간에는 운전한 자료가 없어서 2003년도 장마철 기간에 운영한 결과를 평가해 볼 때, 본 처리 시설은 장마철 기간에도 유입수 농도 증가와 이에 따른 처리수질 악화 등의 현상은 관찰되지 않았으며, 특이한 문제점 발생없이 안정된 운전이 가능한 것으로 나타났다.

모니터링 기간동안의 T-N과 T-P의 유입, 유출 농도 및 제거 효율을 Fig. 9에 표시하였다. 유입수의 T-N 농도는 2.3~9.9 mg/L, 유출수는 1.7~7.7 mg/L 범위였고, 이때의 제거효율은 0~82.1%, 평균 제거효율은 22.4%였다. 여과습지의 수질정화 초기처리(양, 2001)에서 T-N의 월평균 처리효율은 35~65%를 도출했던 연구 결과와 비교할 때 본 시설의 처리 효율은 낮은 것으로 나타났다. 이는 유입수의 T-N 농도가 10 mg/L이하로 낮았으며, 생물학적 질소제거 기작에 필요한 질산화-탈질공정에서 습지여상조내의 DO농도 조절이 불완전하였던 원인으로 해석된다. 따라서 향상된 질소, 인제거 효율을 확보하기 위해서는 습지여상조내의 DO농도 조절이 가능한 설계와 시공이 고려되어야 할 것으로 사료된다. 또한 습지식물에 의한 영양소의 흡수제거가 활발하지 못할 만큼 인공습지조성이 불완전했던 원인도 지적할 수 있다.

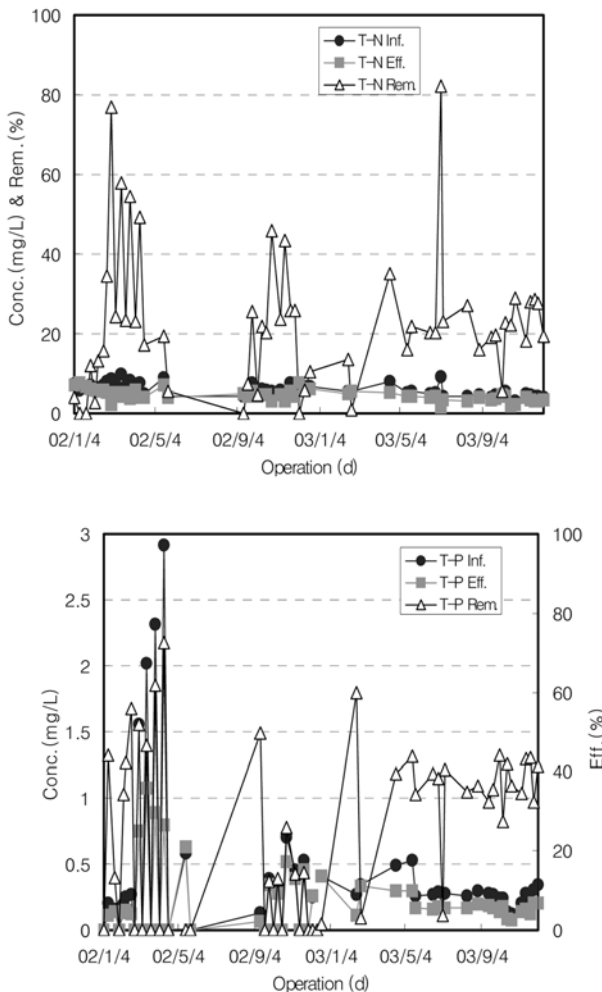


Fig. 9. Profiles of nutrients and removal efficiency.

수중에서의 인 화합물은 입자성과 용해성으로 구분할 수 있다. 습지여상 시설에서의 입자성 인은 매질과 경수식물의 뿌리 사이의 공극에 침전되거나, 여재와 뿌리 표면에 형성된 미생물막에 흡착 제거되며, 용해성 인은 침강 제거된다고 볼 수 있다. 본 시설물을 대상으로 2년 동안 모니터링한 결과 유입수와 유출수의 T-P농도는 0.1~2.9 mg/L 및 0.1~1.1 mg/L로 나타났으며, 이때의 제거 효율은 0~72.6%였다. 실제 운영되고 있는 처리시설들(양, 2003)의 제거 효율이 22~85%범위를 나타낸 것과 비교할 때, 적절한 범위로 운전되었다고 간주할 수 있으나, 인공습지의 조성과 관리만 원활히 이루어졌다면 더 높은 제거 효율을 기대할 수 있을 것으로 사료된다. 습지여상내에서 미생물에 의한 인 흡수는 약 1시간 내에 이뤄지며, 약 6시간 정도면 흡수된 인의 90% 이상이 재유출된다는 연구결과(Richardson et al., 1986)를 참고할 때, 향후의 설계 및 시설 운전에서는 전체 체류시간을 조절할 필요가 있을 것으로 사료된다.

3.3. 설계 및 운전시 고려사항

자연형 하천정비나 오염하천 정화사업을 추진할 때, 습지를 조성하여 하천으로 유입되는 미처리 점오염원과 비점오염원 및 오염된 하천수를 정화하면서 훼손된 습지를 복원하고, 비오톱을 조성하는 방안이 관심이 높아지고 있다(양, 2001).

본 시설물의 공사완료 후 2년 동안 운전한 결과, 홍수범람과 같은 자연 재해가 예상될 경우에는 유입관로를 차단하였기 때문에 운전이 불가능하게 된 시기는 없었으나, 하천 자연정화시설을 설치할 때는 해당 하천의 특성을 고려한 부지선정이 우선적으로 고려되어야 한다. 국내 대부분의 하천은 제외지에 여유가 있기 때문에 이를 활용함으로써 시설 설치에 필요한 토지매수 비용이나, 법적 규제를 해결할 수 있다. 제외지에서는 홍수범람과 같은 자연현상에 대응할 수 있는 구조물 설계와 대비가 필요하므로 체내지에 설치하는 것이 가장 안전한 방법이다.

또한 하천자연정화시설을 설치하기 위해서는 건설비와 유지관리비가 적게 소요되는 공정을 선정해야 하며, 하천의 경관을 해치지 않으면서 용지의 다목적 이용까지도 종합적으로 고려해야 한다.

4. 결론

대청호 등 금강수계 상수원수질관리특별종합대책의 일환으로 소하천을 선정하여 습지여상정화시설을 장기간 운전한 결과는 다음과 같다.

- 1) 시설물의 설계 유량 대비 처리 유량은 약 50%정도로 나타나 안정적인 수처리 효율 확보를 위해서는 일정한 유량 유입이 필요한 것으로 나타났다.
- 2) 처리시설의 안정적인 운전을 위해서는 습지여상조내에서 발생하는 사상성 조류와 유입 SS에 의한 폐색 현상을 예방하여야 하므로 여재 표면의 주기적인 삭취나, 보사작업이 필요할 것으로 사료된다.

- 3) 처리 시설의 평균 유기물 제거율, 즉 BOD, COD_{Mn} 및 SS는 62.9%, 47.1% 및 74.8%로 나타났으며, 처리 효율에 미치는 동절기의 기온 저하와 같은 계절적인 영향은 미미하였다.
- 4) T-N과 T-P제거율은 각각 22.4%와 33.5%로 나타났지만, 인공습지가 원활히 조성될 경우 더 향상된 제거 효율을 기대할 수 있다.
- 5) 본 시설이나 유사 시설의 설계 시 주위 환경의 경관을 고려함과 동시에 자연재해에 의한 피해가 발생되지 않도록 적절한 부지 선정도 고려되어야 할 요소로 판단된다.

참고문헌

- 박재홍, 최의소, 조일형, 인공습지를 이용한 축산폐수의 처리, *한국물환경학회지*, **20**(2), pp. 157-162 (2004a).
- 박현건, 이춘식, 이홍재, 서동철, 허종수, 모래와 굴폐각을 이용한 인공습지 오수처리장치 개발, *한국물환경학회지*, **20**(5), pp. 437-446 (2004b).
- 양홍모, 고수부지를 이용한 여과습지의 수질정화 초기 처리, *한국환경복원녹화기술학회지*, **4**(4), pp. 56-63 (2001).
- 양홍모, 고수부지에 조성한 수질정화 여과습지의 초기 운영 단계 총인 제거, *한국환경복원녹화기술학회지*, **6**(6), pp. 49-55 (2003).
- 양홍모, 하천고수부지 수질 정화 여과습지의 초기 운영단계 질소제거, *한국환경농학회지*, **22**(4), pp. 278-283 (2003).
- 임연택, 윤조희, 서정범, 유원주, 유덕희, 홍정선, 서윤수, 자갈층 접촉산화법을 이용한 오염하천수의 정화, *한국물환경학회지*, **8**(3), pp. 173-180 (1992).
- 정부합동, *대청호등 금강수계물관리종합대책* (2000).
- 조항문, *하천수질정화공법의 평가 및 적용방안*, 서울시정개발연구원, pp. 9-107 (2004).
- 최종규, 김세경, 강호정, 조경덕, Marsh와 Pond형태의 Micro-cosm습지 시스템을 이용한 TNT(2,4,6-trinitrotoluene)의 분해 연구, *대한환경공학회지*, **27**(2), pp. 197-205 (2005).
- 환경관리공단, *소옥천 하천자연정화시설 수리·수문 조사 보고서* (2000a).
- 환경관리공단, *하천자연정화시설 설치 관련 수리·수문 조사 보고서* (2000b).
- 환경부, *수질오염공정시험법, 동화기술*, 서울 (1998).
- 환경부, *2003 자연형 하천정화를 위한 인공습지 조성 및 운영 요령* (2003).
- 岡田宏道, 大谷光伸, 廣瀬道郎, 網狀接觸材の性質と應用, *用水と廢水*, **23**(4), pp. 400-406 (1981).
- 小島貞男, チューブ狀接觸材の性質と應用, *用水と廢水*, **23**(4), pp. 388-395 (1981).
- Adamus, P. R. and Stockwell, L. T., A Method for Wetland Functional Assessment: VII.1.Critical Review and Evaluation Concepts, US Dept. Transportation, Federal Highway Administration, Report FHWA 1P, pp. 82-83 (1983).
- American Public Health Association, AWWA, WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th edition, Washington DC. USA (1998).
- Green, M. B., Experience with Establishment and Operation of Reed Bed Treatment for Small Communities in the UK, *Wetland Ecology and Management*, **4**, pp. 147-158 (1997).
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L., *Treatment Wetlands*. Boca Raton: CRC Press. Inc. (1996).
- Luederitz, V., Eckert, E., Martina, L. W., Lange, A. and Gersberg, R. M., Nutrient Removal Efficiency and Resource Economics of Vertical Flow and Horizontal Flow Constructed Wetlands, *Ecological engineering*, **18**, pp. 157-171 (2001).
- Metcalf & Eddy, *Wastewater engineering treatment and reuse*, 4th Edition, McGraw-Hill (1995).
- Richardson, C. J. and Marshall, P. E., Processes Controlling Movement, Storage and Export of Phosphorus in a Fen Peatland, *Eco.Monogr.*, **56**(4), pp. 279-302 (1986).
- Vrhovsek, D., Kukanja, V. and Bulc, T., Constructed Wet-land (CW) for Industrial Wastewater Treatment, *Wat. Res.*, **30**(10), pp. 2287-2292 (1996).