

# 물 순환형·녹색명품 관광도시를 위한 인공습지 조성방안 연구

## Constructed wetlands for water recycling and green tourist city

이 주 영\*· 한 무 영\*\*· 김 형 준\*\*\*

### <목 차>

- |                   |               |
|-------------------|---------------|
| I. 서론             | IV. 실험결과 및 토의 |
| II. 인공습지의 환경학적 가치 | V. 결론         |
| III. 실험방법         | < 참고문헌 >      |

### <국문 초록>

청정지역 제주도는 자연이 살아 숨쉬는 저탄소·녹색명품 관광도시 조성사업을 진행 중에 있으며, 청정지역에 맞는 국제자유도시 조성 및 발전을 위해 많은 투자를 하고 있는 실정이다. 특히 수자원은 저탄소·녹색명품 관광도시 조성사업을 위해 반드시 필요한 요소이다. 그러나 최근 기후변화로 인해 한정된 수자원은 과도한 물 사용으로 인하여 물 부족 및 생태계 유지유량 부족의 문제점을 유발하고 있다. 또한 화산섬인 제주도는 구멍 뚫린 현무암으로 빠져 지하로 흘러가기 때문에 물을 저장했다가 재활용하는 방법이 필요한 실정이다. 특히 도시가 숲이 되는 『Green City』 조성 및 『Sustainable urban water management』 조성을 위해 빗물 및 하수처리 방류수를 인공습지와 같은 자연정화시스템을 통해 정화함으로써 공공수역의 수질 개선 도모에 기여할 수 있을 것이다. 또한 도시 생태계 복원 측면

\* 서울대학교 건설환경공학과 빗물연구센터선임연구원

\*\* 서울대학교 건설환경공학과 교수

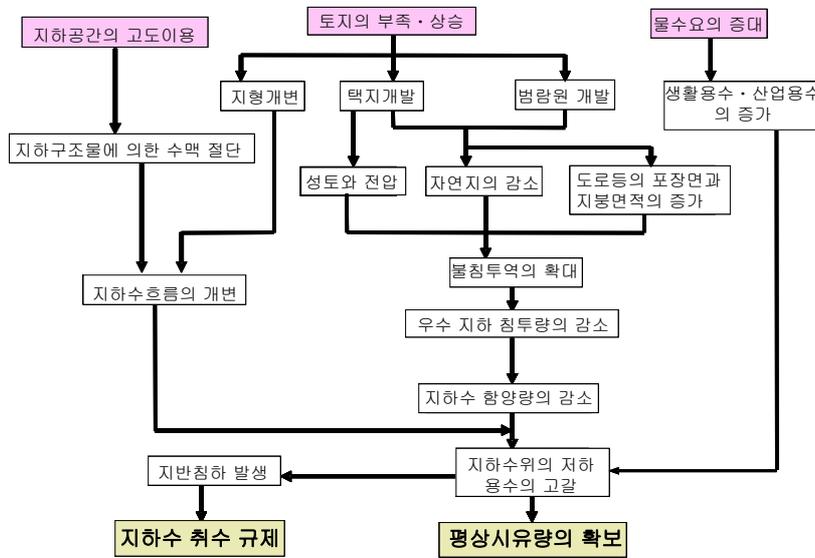
\*\*\*서울대학교 건설환경공학과 연구원

에 상당한 효과를 얻을 수 있을 것이다. 본 연구는 도시에서 유출된 빗물과 빗물 속에 포함된 비점오염원(TSS, COD, TN, TP 그리고 중금속) 등이 인공습지를 통해 평균 60% 이상이 제거됨을 알 수 있었다. 이 결과를 통해 도시 계획에 반영함으로써 자연이 살아 숨쉬는 저탄소·녹색명품 제주도 조성에 이바지 할 수 있을 것이다.

**주 제 어:** 저탄소·녹색명품도시, 기후변화, 인공습지, 비점오염원

## I. 서론

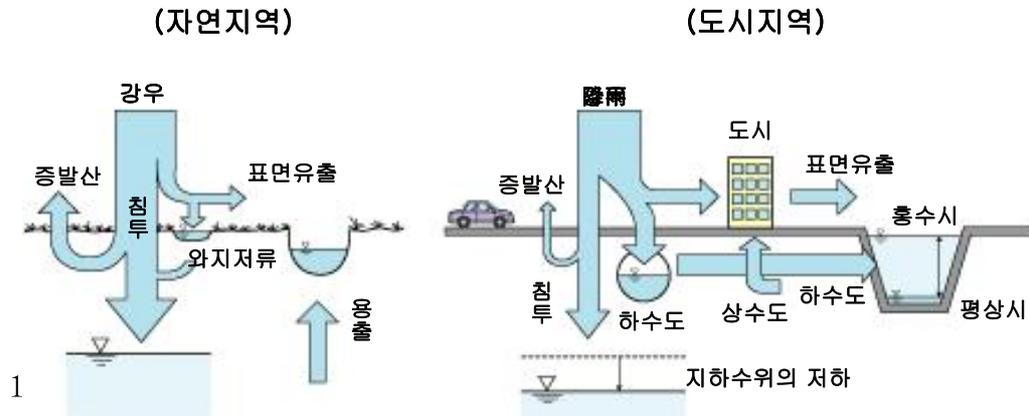
화산섬인 제주도는 현무암질로 되어 있다. 그래서 제주도의 지질학적 특성상 빗물의 저장 및 수자원 확보를 위한 연구가 진행되어야 한다. 그동안 우리나라는 홍수조절과 갈수기 수자원 공급을 위한 양적인 관리는 많은 댐을 건설함으로써 상당한 진전이 있었다. 그러나 수질의 악화는 뚜렷한 진전을 보이지 않고 있는 실정이다. 많은 재원을 투자하여 하수처리장을 건설하고, 각종 수질규제를 운영하고 있음에도 불구하고 하류의 수질은 개선의 기미를 보이지 않고 있다 (김이형, 2007). 또한 도시화에 의한 지하 공간의 고도 이용은, 많은 지하 구조물을 낳아, 지하수의 흐름이 바뀌는 경우가 발생하고 있다 (한영해, 2005). 또 택지 개발에 의한 지형의 개변, 성토나 전압, 도로 등의 포장면이나 지붕 면적의 증가 등은 빗물이 지면에 침투되지 않는 면적의 증가를 불러일으켰으며 이에 관련, 나아가서는 지하수 함양량의 감소를 일으키고 있다(한영해 외, 2006). 게다가 지하수 흐름의 개변, 지하수 함양량의 감소는, 지하수의 저하, 용수의 고갈 등을 가져와, 평상시 하천 유량의 감소로 연결되어 있다 <그림 1>. 인구의 집중, 산업 활동의 확대는, 물수요의 증대를 일으켜, 지하수를 과도하게 사용하게 되고 이에 따라 지하수의 저하와 거기에 따르는 지반침하의 원인으로도 되고 있다. 또 평상시의 하천 유량의 감소에 따라, 사람들의 휴식의 장소로서의 하천 공간은 잃어가고 있다.



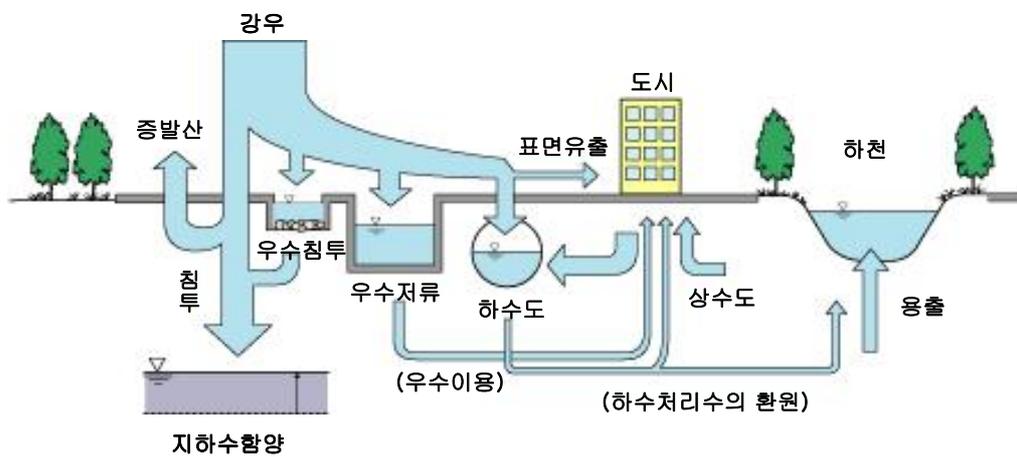
<그림 1> 도시화에 따른 지하수, 하천수의 문제·과제와 인과관계

이러한 수질적 관점에서 보면 도시화에 따른 지하수와 하천수는 오염되고, 동식물이 살 수 없는 황폐한 도시가 된다. 따라서 이러한 도시 물순환 개선을 위하여 옛 자연 상태로 되돌리기 위한 여러 가지 대책을 검토할 필요가 있다<그림 2-a와 그림 2-b>. 또한 강우시 발생하는 빗물이나 하수처리수 재이용 및 유효 이용을 촉진하는 것 등이 좋은 고려대상이다.

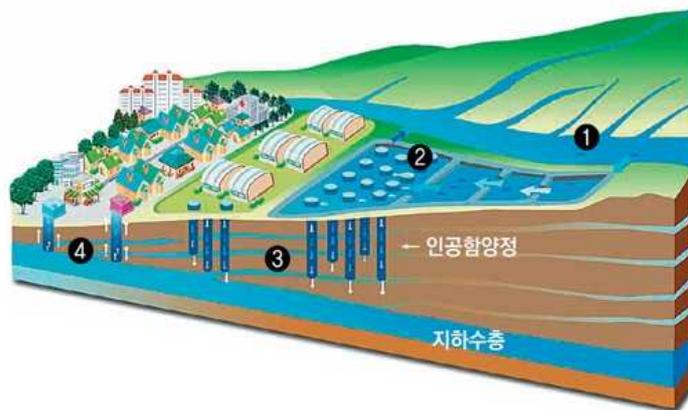
특히 제주도에 적용하고 있는 빗물집수를 위한 기술은 한국지질자원연구소와 대기업을 중심으로 진행 중에 있다. J-ART 프로젝트(제주 친화형 지하수 인공함량기술) 프로젝트는 제주도 하천에 보를 세운 뒤 넘치는 물을 저장했다가 재활용하는 사업이다. 이는 연간 250~300만 톤을 활용할 수 있으며 제주시민 1만 5천명이 1년 정도 사용할 수 있는 양을 확보할 수 있다. <그림 3>은 제주도에 적용가능한 빗물집수 방법을 제시하고 있다. (1)은 하천에 설치된 보에서 넘친 물이 저류지로 흘러들게 되고(2), (3)은 저장된 물은 인공함량정을 통해 지하로 흘러가게 된다. (4)은 지하수층에 저장된 물을 갈수기 때 끌어들려 쓰게 된다.



<그림 2-1> 도시화에 수반하는 물순환계의 변화



<그림 2-2> 물순환계 재생의 이미지



자료: 수자원의 지속적확보기술개발사업단이야기 블로그(2010)

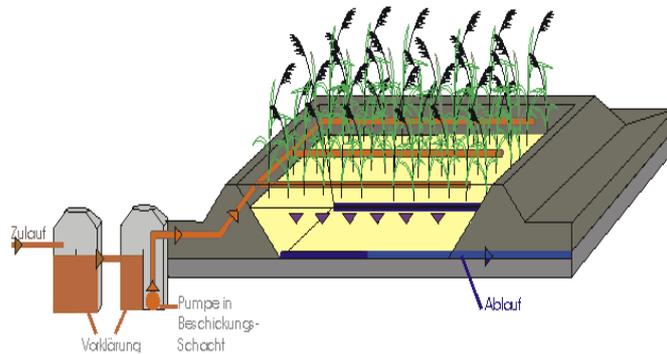
<그림 3> 제주도의 J-ART 사업

그러나 이러한 방법은 수자원확보를 위한 좋은 방법으로 여겨지고 있으나, 저에너지·저탄소 배출 개념적 측면에서 보면 지속적인 수자원 확보기술로써 인공습지만한 기술은 없는 실정이다. 또한 인공습지는 조경학적 요소를 가미함으로써 국제적 관광도시 조성에 크게 이바지하고 있다. 따라서 본 연구는 인공습지 조성을 통해 도시강우유출수의 수질 개선효과, 물순환 기능확대 및 도시 생태계 복원에 중요한 역할을 담당하고 있음을 보여주고 있다.

## II. 인공습지의 환경학적 가치

전만식외(2003)에 의하면 "인공습지는 갈대, 줄, 부들 등의 습지식물과 습지식물을 지지하고 미생물 부착의 매체인 자갈, 토양, 그리고 오염물질 분해 등 수질 정화에 가장 중요한 기능을 수행하는 미생물로 구성된다. 습지에서의 수질정화는 무생물학적 요인(침전과 흡착)과 생물학적 요인(생물에 의한 흡수)으로 구분된다. 침전과 흡착에 의한 물질제거는 입자형태의 물질이 저층으로 가라앉거나 식물체의 표면에 부착하여 제거되는 형태로서 습지에서 가장 중요한 정화기작이며, 이렇게 제거된 물질들은 생물에 의해 식물에 의해 직접 흡수되고 유기물은 토양이나 수중의 미생물 등에 의해 분해되는 정화과정을 거쳐 처리된다. 수생식물에 의한 수질개선은 토양이라는 매질 속에서 식물과 미생물이 상호 공생을 통한 물리·생물·화학적 반응에 의하여 이루어지며, 수생식물 그 자체는 수처리에 있어 큰 기여를 하지 않고 단지 수처리 능력을 향상키기 위한 환경을 제공한다. 식물의 뿌리는 미생물 부착매질로 이용되며, 식물근계의 통기조직을 통한 산소의 전달은 미생물의 분해활동을 촉진하여 질산화(Nitrification)나 탈질화(Denitrification) 작용을 유도하며, 식물은 미생물이 분해하는 유기물질을 영양염류로 흡수하고 식물은 합성된 유기물이나 대사산물을 미생물에게 제공한다. 이러한 메카니즘에 의한 수질정화 효과는 유기물, 부유고형물, 영양염류, 병원성균과 중금속까지도 제거효율을 갖는다. 인공습지는 수중의 부유물질과 인을 침강시켜 하류의 부영양화를 경감하는 효과를 가지고 있으므로 근래 경비가 적게 드는 수질정화법으로 각광받고 있다. 인공습지 또는 저류지는 물의 유속을 저하시켜 부유물질을 침강시키며, 수생식물과 저질표면의 미생물막이 수중의 용존영양염류를 흡수하여 침강을 돕는 기작을 가지고 있다. 저질에 포함되어

있는 Ca, Al, Fe 등의 금속이온은 인산염과 결합하여 불활성의 침전을 형성하기 때문에 인산염을 영구히 퇴적시키는 효과를 가지게 된다” 고 보고하고 있다.<그림 4>는 인공습지 구조를 보여주고 있다.



<그림 4> 인공습지 구조

### Ⅲ. 실험방법

#### 1. 실험장소

실험장소는 강원도 강릉시 7번 국도상에 위치한 인공습지를 대상으로 수행하였다. 인공습지 면적은 2,250m<sup>2</sup> 이며 식생은 물옥잠, 부들, 갈대를 중심으로 식재하였으며 깊이는 1.0-1.5m 정도이다. 인공습지로 유입되는 집수면은 대략 2,000m<sup>2</sup> 이다<그림 5>.



<그림 5> 실험대상 인공습지(위성사진(위), 현장사진(아래))

인공습지 구조는 맨 하층부에 방수를 위한 설비를 하고, 상층부에 40cm 두께로 자갈과 굵은 모래로 채운다. 하부의 완속한 흐름을 위하여 경사 1-2% 를 둔다. 사용된 습지 식물은 부들, 갈대, 부레옥잠 등을 키워서 인공습지의 정화기능을 향상 시키게 된다.

## 2. 조사방법

인공습지로 유입되는 도로유출수는 2009년도에 발생된 12개 강우사상으로부터 채취하였다. 조사항목은 TSS, COD, TN, TP 그리고 중금속 항목으로 측정하였다. 인공습지로 유입되는 유입수의 오염농도는 일반적으로 강우기간동안 상당한 차

이를 보여주고 있기 때문에 일반적으로 강우발생 후 20분내 인공습지로 유입되는 강우유출수를 대상으로 분석하였다. 인공습지 유출수는 강우발생 후 유출구에서 나오는 유출수를 분석하였다. COD, TSS, TN, TP는 수질오염공정시험법에 따라 수행하였다. 중금속은 전처리후 ICP-OES(Varian)를 이용하여 측정하였다. 12개의 강우사상은 다음과 같다.

<표 1> 조사시점에서 12개 강우사상에 관한 자료

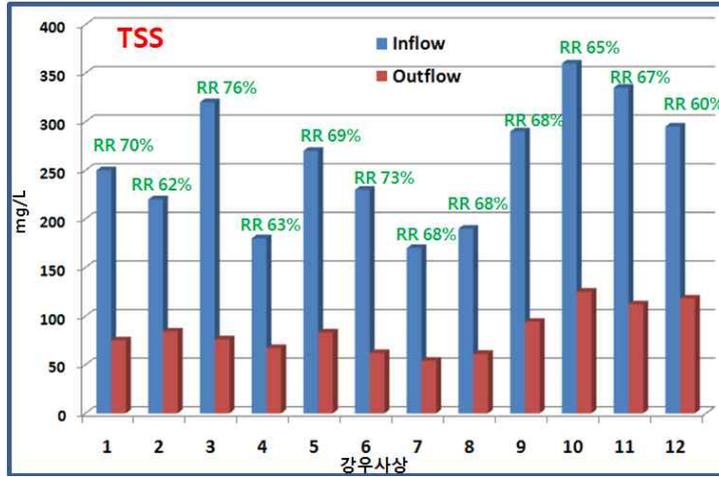
강우사상	강우일짜	강우량 (mm)
1	2009년 3월 13일	16.5
2	2009년 4월 20일	29.0
3	2009년 5월 16일	18.5
4	2009년 5월 21일	13.5
5	2009년 6월 2일	23.0
6	2009년 7월 9일	132.0
7	2009년 7월 14일	29.0
8	2009년 8월 11일	57.5
9	2009년 9월 12일	9.0
10	2009년 10월 14일	8.0
11	2009년 11월 1일	50.0
12	2009년 12월 10일	8.0

자료: 기상청홈페이지(www.kma.or.kr)

## IV. 실험결과 및 토의

### 1. TSS 농도

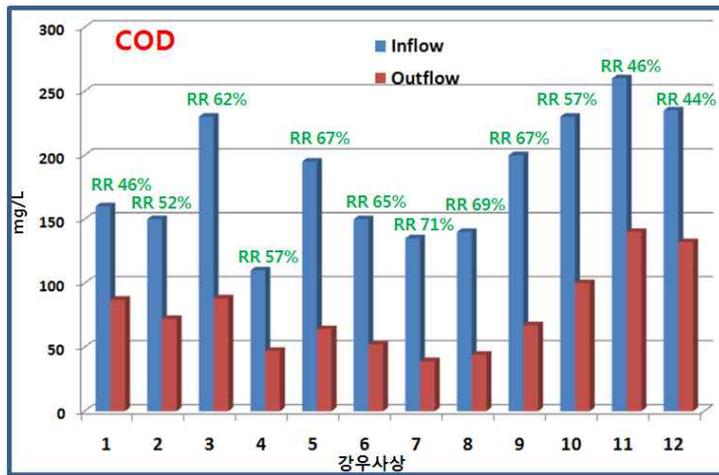
<그림 6>은 인공습지의 TSS 제거효율을 보여주고 있다. 유입되는 TSS 농도는 강우강도, 교통량, 선행무강우일수에 따라 좌우되기 때문에 유입 TSS 농도는 다소 다양한것 처럼 보인다. 그러나 제거효율은 계절과 상관없이 전반적으로 60-70% 제거효율을 보여주고 있다. 이러한 이유는 TSS는 건식침적물질(토양부산물)과 차량에서 발생하는 부산물로 이루어져 있기 유입된 도로유출수는 인공습지에서 중력식 침전에 의해 침전되거나 식물뿌리와 습지내 토양에 의해 제거되는 것으로 판단 된다.



자료: R.R (Removal Rate)

<그림 6> 인공습지의 TSS 제거효율

## 2. COD 농도



자료: R.R (Removal Rate)

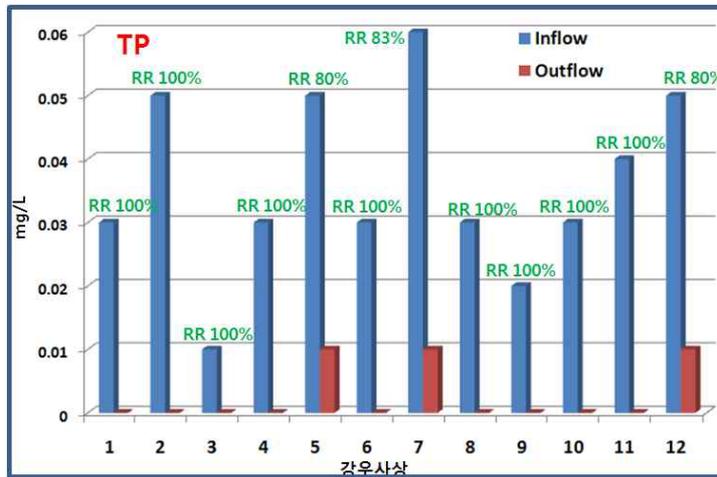
<그림 7> 인공습지의 COD 제거효율

<그림 7>은 인공습지의 COD 제거효율을 보여주고 있다. 유입되는 COD 농도는 그림 6의 TSS 농도 유입농도와 유사하다. TSS 농도가 높을수록 COD 농도도 높은 것을 알 수 있었다. 그러나 TSS 제거율은 계절과 상관이 없는 것으로 판단되었

으나 COD 제거율은 여름철에 비해 겨울철에 상당히 떨어짐을 알 수 있다(강우사상 1번(3월),11번(11월),12번(12월)에서 제거율은 46%, 44%, 46%). 이러한 이유는 COD 제거는 미생물에 의해서 이루어짐을 알 수 있다.

### 3. TP 농도

<그림 8>은 인공습지의 TP 제거효율을 보여주고 있다. 유입되는 TP 농도는 미량의 농도이며, COD와 달리 계절적 영향이 없는 것으로 판단된다. 또한 평균 제거율이 90% 이상임을 알 수 있다. 이러한 이유는 TP는 대부분 인공습지내의 토양과 흡착되어서 제거되며 나머지는 극소수 TP는 수생식물에 의해 제거됨을 알 수 있다.



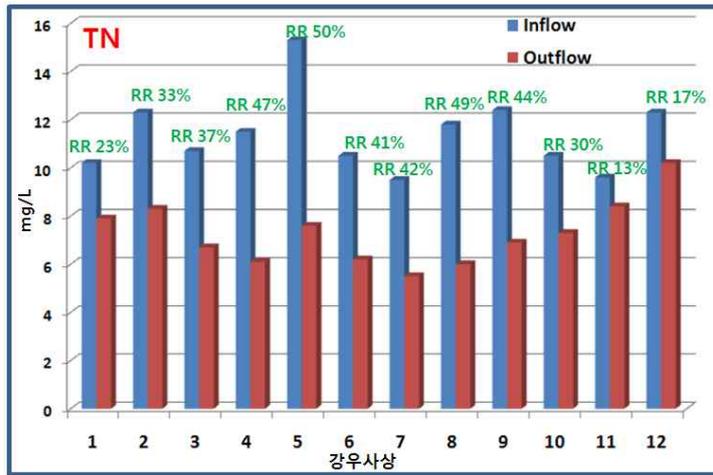
자료: R.R (Removal Rate)

<그림 8> 인공습지의 TP 제거효율

### 4. TN 농도

<그림 9>은 인공습지의 TN 제거효율을 보여주고 있다. 유입되는 TN 농도는 10-16 mg/L 범위이고 제거율은 여름철에 평균 40% 이상이나 겨울철은 10-20% 정도에 불과하다. 이러한 이유는 겨울철 인공습지내의 식물이 생육하고 있지 않기

때문인 것으로 판단된다. 질소의 제거는 미생물과 식물에 의해서만 제거되기 때문에 수생식물의 역할이 상당히 중요함을 알 수 있다.

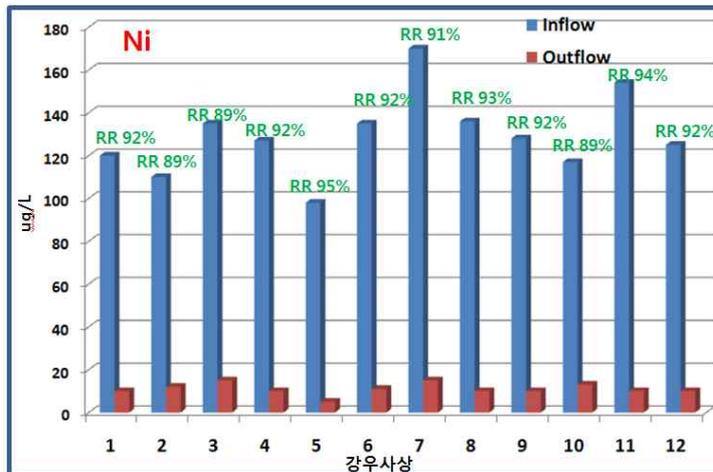


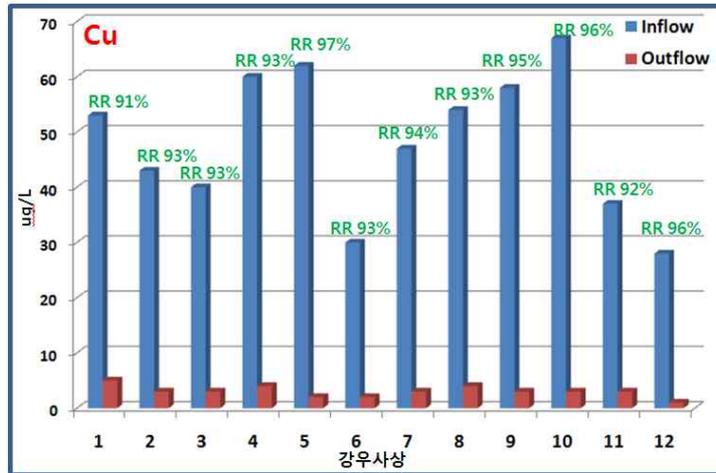
자료: R.R (Removal Rate)

<그림 9> 인공습지의 TN 제거효율

## 5. 중금속 농도

<그림 10>은 인공습지 내에 유입되는 중금속 농도 및 제거율을 보여주고 있다.





자료: R.R (Removal Rate)

<그림 10> 인공습지의 대표 중금속 제거 제거율(Ni(위), Cu(아래))

중금속 제거는 일반적으로 토양과 흡착에 의해 이루어지거나 식물의 흡수에 의해 제거됨 알 수 있다. 그러나 계절별 제거율을 보면 일년동안 평균 90% 이상의 제거율을 보여주고 있는것을 알 수 있다. 대부분은 토양 흡착에 의해 제거됨을 알 수 있다. 이러한 이유는 유입 농도가 ug/L 정도의 아주 작은 농도로 유입되기 때문에 식물에 의해 제거되기보다는 토양과의 화학적 흡착 제거기작에 의해 이루어짐을 알 수 있다.

## V. 결 론

인공습지의 조성은 인간을 포함하는 다양한 생물들을 위하여 생태적·경제적으로 많은 종류의 서비스와 유용한 가치를 제공한다. 특히 물순환형 도시 조성을 위하여 원단위 비점오염원을 친환경적으로 제거하여 하천으로 방류함으로써 하천 생태계 보존에 이바지 할 수 있다. 또한 도시 내의 인공습지조성은 관광자원 또는 자연환경 생태교육장으로 활용할 수도 있다. 국제관광도시를 지향하는 제주특별자치도에서는 인공습지는 지속가능한 수자원 확보를 위한 최적 기술이라고 할 수 있다.

본 연구의 실험 결과를 통해 제주특별자치도는 다음과 같은 점을 고려하여야 할 것이다. 첫째는 기존의 도시계획 현황과 법규를 고려하여 적절한 면적과 충분한 체

류시간을 가질 수 있는 체적을 확보하여야 한다. 두 번째는 인공습지의 건설조건은 오염도가 높은 곳을 우선적으로 처리하여야 한다는 점이다. 따라서 제주도에서 비점 오염원 유출이 가장 많은 곳을 선정하여 인공습지를 조성하여야 한다. 세 번째는 녹색명품관광도시 조성을 위하여 생태복원효과가 크고 도시의 경관생태에 어울리는 인공습지를 조성하여야 한다. 특히 생물서식지의 제공에 의해 도시 생태계 복원의 효과는 극대화 되기 때문에 이점에 관해 중점적인 연구가 필요하다.

## <참고문헌>

- 김이형(2007), 비점오염의 현황 및 적정 처리용량 산정을 위한 초기강우 기준 산정, "한국도로학회", 9(2), 24-33.
- 전만식·김범철(2003), 인공습지 조성을 통한 수질개선 및 생태계복원 효과. 「파로호 생태계 포럼」, 12(1), 1-6.
- 한영해·이태구·황희연(2006), 도시지역의 물순환체계 구축을 위한 화단형 침투·저류시스템 개발, "한국생태환경건축학회", 2(1), 12-19.
- 한영해(2005), 「도시지역에서의 분산식 빗물관리 계획모형 개발」, 박사학위논문, 서울대학교 환경대학원.