

모형 재이용관을 이용한 하수재이용수의 부식 및 수질영향 연구 Characteristics of Corrosion and Water Quality in Simulated Reclaimed Water Distribution Pipelines

강성원* · 이재영** · 이현동*·***,† · 김지은*** · 곽필재*

Sung-Won Kang* · Jai-Young Lee** · Hyun-Dong Lee*·***,† · Gi-Eun Kim*** · Pill-Jae Kwak*

*한국건설기술연구원 · **서울시립대학교 환경공학과 · ***과학기술연구대학원

*Korea Institute of Construction Technology · **School of Environmental Engineering, University of Seoul

***University of Science and Technology

(2012년 6월 12일 접수, 2012년 7월 27일 채택)

Abstract : Water reuse has been highlighted as a representative alternative to solve the lacking water resource. This study carried out a study on the pipe corrosion and water quality change which can occur through the supply of reclaimed water, using a simulated reclaimed water distribution pipeline. Galvanized steel pipe (GSP), cast iron pipe (CIP), stainless steel pipe (STSP) and PVC pipe (PVCP) were used for the pipe materials. Reclaimed water(RW) and tap water(TW) were respectively supplied into simulated reclaimed water distribution pipelines. As a result of performing a loop test to supply reclaimed water to simulated reclaimed water distribution pipelines, the weight reduction of pipe coupons showed the sequence of CIP > GSP > STSP ≈ PVCP. In addition, reclaimed water showed a high corrosion rate comparing to that of tap water. In case of CIP, the initial corrosion rate showed 3.511 mdd(milligrams per square decimeter per day) for reclaimed water and 2.064 mdd for tap water and the corrosion rate for 90 days showed 0.833 mdd for reclaimed water and 0.294 mdd for tap water. Also in case of GSP, the initial corrosion rate showed 2.703 mdd for reclaimed water and 2.499 mdd for tap water and the corrosion rate for 90 days showed 0.349 mdd for reclaimed water and 0.248 mdd for tap water, which was a tendency similar to that appeared in CIP with a tendency to reduce the corrosion rate. As a result of water quality changes of reclaimed water at pipe materials to carry out the loop test, there was higher conversion ratio of ammonia into nitrate in CIP and GSP with higher corrosion rate than that in STSP and PVCP where no corrosion has occurred. The highest denitrification rate of nitrate could be observed from CIP with the most particles generated from corrosion. In CIP, it could be confirmed that there was MIC (Microbiologically Induced Corrosion) as a result of EDS (Energy Dispersive X-ray spectrometer System) analysis results.

Key Words : Reclaimed Water, Pipe corrosion, Pipe Materials, Loop Test

요약 : 하수재이용은 부족한 수자원 문제를 해결할 수 있는 대표적인 대안으로 주목을 받고 있다. 본 연구에서는 하수재이용수의 공급시 관망내에서 일어날 수 있는 관의 부식과 수질변화에 대한 연구를 모형관망을 이용하여 수행하였다. 관 재질은 아연도강관(GSP), 주철관(CIP), 스테인레스강관(STSP), PVC관(PVCP)을 이용하였고, 하수재이용수와 수돗물을 각각 공급하여 비교 및 평가하였다. 하수재이용수를 모형관망에 공급하는 루프테스트를 수행한 결과, 관 재질별 시편의 무게 감소량은 CIP > GSP > STSP ≈ PVCP의 순으로 나타났다. 또한, 하수재이용수는 수돗물과 비교하여 부식속도가 높게 나타났는데, CIP의 경우, 하수재이용수의 초기 부식속도가 3.511 mdd, 수돗물은 2.064 mdd를 나타내었고, 90일간의 부식속도는 하수재이용수 0.833 mdd, 수돗물 0.294 mdd를 나타내었다. 또한, GSP도 하수재이용수의 초기 부식속도가 2.703 mdd, 수돗물은 2.499 mdd를 나타내었고, 90일간의 부식속도는 하수재이용수 0.349, 수돗물 0.248 mdd로 CIP에서 나타난 경향과 유사하였으며, 시간이 지남에 따라 부식속도가 감소하는 경향을 나타내었다. 루프테스트를 수행하는 과정에서 관 재질별로 하수재이용수의 수질변화를 관찰한 결과, 암모니아성 질소의 경우, 부식이 크게 발생한 CIP 및 GSP에서 부식이 발생하지 않은 STSP 및 PVCP와 비교하여 질산염으로 전환되는 비율이 월등히 높았고, 부식생성물이 가장 많은 CIP에서 질산성 질소의 탈질이 가장 높게 일어나는 현상을 관찰할 수 있었다. 또한, CIP에서는 SRB (Sulfur Reducing Bacteria)에 의한 황산이온의 소모가 나타났으며, EDS (Energy Dispersive X-ray spectrometer System) 분석 결과 MIC (Microbiologically Induced Corrosion)가 있었음을 확인할 수 있었다.

주제어 : 하수재이용수, 관 부식, 관 재질, 루프테스트

1. 서론

지역별 수자원 분포의 차이로 인한 물 부족현상과 기후 변화로 인한 가뭄의 영향이 겹쳐지면서 지역별 물 부족현상이 더욱 가중되고 있다. 이러한 물 부족현상을 해결하기 위해 빗물, 지하수, 하수처리수, 해수담수화 등과 같은 능동형 수자원의 활용을 증가시켜 기존의 수자원에 의한 용수공급 의존도를 줄이고자 노력하고 있다. 이 중 하수처리수를 재이

용하는 방안은 수량의 변동이 적어 안정적으로 수자원을 공급할 수 방안이다.¹⁾

하수재이용이란 하수처리장에 유입되는 하수를 여러 가지 공법을 사용하여 처리한 후 사용 용도에 맞게 재이용하는 것을 말하며, 하수재이용수의 용도는 도시재이용수, 조경용수, 친수용수, 하천 유지용수, 농업용수, 습지용수, 지하수충진, 공업용수로 구분하고 있다.²⁾ 우리나라는 2010년도 하수처리수의 재이용률이 전국 평균 10.9%이고 하수처리장 외부에

† Corresponding author E-mail: hdlee@kict.re.kr Tel: 031-910-0092 Fax: 031-910-0291

서 이용하는 장외용수 비율이 5.1%이다. 장외용수의 비율은 2000년 0.9%, 2004년 2.4%, 2008년 4.4%로서 매년 꾸준히 증가하여 기존 수자원에 의한 용수공급 의존도를 줄이는데 기여하고 있다.

하수처리수를 재이용하기 위한 처리 공정에 대한 연구들이 다수 수행되었다. 하수재이용을 위한 효율적인 막여과 공정 운영을 위한 연구가 수행되었고^{3,4)} 입상활성탄 공정을 이용하는 방안 및 용존오존부상 공정을 이용하는 방안에 대한 연구도 진행되었다.^{5,6)} 하수처리수를 막여과하기 위한 전처리 방법으로 오존처리와 응집처리에 대한 비교 연구가 수행되었다.⁷⁾ 또한, 공동주택 단지 내에서 발생하는 잡배수를 생물학적 처리를 거치지 않고 멤브레인과 고도산화처리를 통하여 처리한 후 재이용하는 시스템에 대한 연구가 수행되었고, 접촉산화법으로 운영 중인 오수정화시설의 후단에 응집 공정을 결합하여 오수를 중수로 사용하려는 연구도 수행되었다.^{8,9)} 그리고 하수재이용수를 농업분야에 적용하기 위한 농작물의 재배 및 토양에 미치는 영향에 대한 연구가 조사되었다.¹⁰⁾ 그러나 국내에서는 하수처리수를 재이용하기 위한 공급과정에서 발생하는 물리, 화학 및 생물학적 영향에 대한 조사는 아직 이뤄지지 않았다.

용도에 맞게 처리된 용수를 관망(pipeline)으로 공급시 용수와 관벽 간의 물리, 화학 및 생물학적 반응에 의해 부식 및 스케일 발생, 미생물 재성장이 발생하게 된다. 이는 용수의 수질, 관 재질, 유속 등에 따라 영향을 받게 되는데 지금까지의 대부분의 연구는 수돗물을 대상으로 연구가 진행되었고¹¹⁻¹³⁾ 하수처리수와 같은 재이용수를 대상으로 한 연구는 거의 진행되지 않았다.

본 연구에서는 모형 관망에 하수재이용수 및 수돗물을 공급하는 loop 테스트를 수행하여 관 재질별로 수체와 관벽의 반응에 의한 수질특성 변화를 관찰하였고 관 재질별로 제작한 시편의 무게변화를 통하여 관의 부식특성을 조사하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험장치

본 실험은 시험수가 연속적으로 순환할 수 있는 loop형으로 제작하였다. 실험 장치는 국내 용수 공급관로로 많이 쓰이는 주철관(Cast Iron Pipe, CIP), 스테인리스강관(Stainless Steel Pipe, STSP), PVC관(Polyvinyl Chloride Pipe, PVCP)을 포함한 세 개의 관과 아연도 강관(Galvanized Steel Pipe, GSP)을 선정하였다. 하수재이용수 및 수돗물을 대상으로 총 8개의 loop을 설치하였고, 각 loop에 수증펌프를 1개씩 설치하여 수돗물과 재이용수를 공급하였다. 모의관망은 직경 15 mm인 관을 사용하여 총길이를 2.5 m로 하였고, loop 내부의 유속이 1.5 m/sec가 되게 하였다. 실험 장치의 세부내용은 Table 1과 같다. 관재질별 부식특성을 관찰하기 위해 loop 중간에 아크릴 챔버를 설치하여 각 챔버 당 20 mm (W) × 15 mm (H) × 3 mm (D) 크기의 시편을 20개씩 설치하였다. 시편은 아크릴 챔버 내 받침대에 꽂아 물의 흐름 방향에 수직

Table 1. Status of simulated distribution loop system

Parameters	Value
Type of Experiment	Loop test
Types of Coupon	GSP (Galvanized steel pipe), STSP (Stainless steel 304), PVCP (Polyvinyl chloride), CIP (Cast iron pipe)
Coupon Size (mm)	20 (W) × 15 (H) × 3 (D)
Flow Rate	1.5 m/sec
Sources of Water	RW (Reclaimed Water), TW (Tap Water)
Volume of Water	4 L
Running Time	24 hr
Measurement Parameters	pH, Temperature, DO, Conductivity, Alkalinity, TOC, Cl ⁻ , Turbidity, Chlorine residual, Hardness, SO ₄ ²⁻ , Zn ²⁺ , Fe ²⁺ , NO ₃ ⁻ -N, NO ₂ ⁻ -N, NH ₄ ⁺ -N

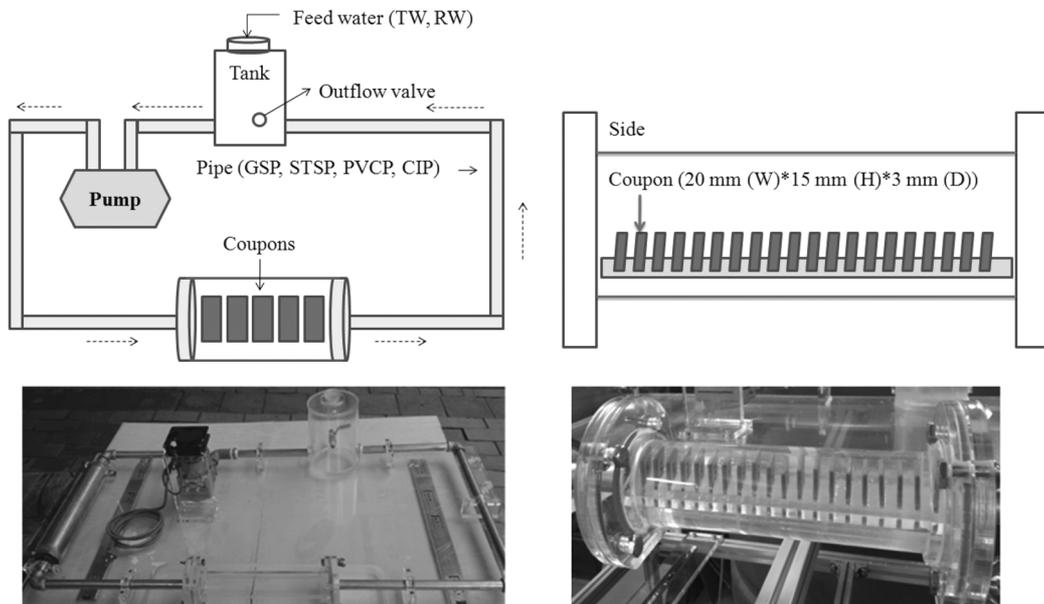


Fig. 1. Schematic of simulated distribution loop system and coupon tester used in experiment.

으로 설치하였다. 시편은 장착하기 전, 멸균기에서 121℃로 15분간 멸균 처리시킨 다음, 105℃ 건조기에서 24시간 방치하고, 수중에 잠기도록 설치하였다. Fig. 1에 모의관망 시험 장치와 챔버의 개략도 및 사진을 나타내었다.

본 실험에서는 I시의 하수처리수 재이용시설에서 처리되는 방류수(Reclaimed Water, RW)와 한국건설기술연구원으로 공급되는 수도물(Tap Water, TW)을 사용하였다. I시에서 방류되는 하수재이용수는 생물학적 처리 후 방류되는 하수처리수를 모래여과, 활성탄여과, 차아염소산나트륨(NaOCl) 소독처리를 거쳐 도시복합생활용수로 사용되고 있다.

2.2. 실험 방법

하수재이용수와 수도물을 대상으로 관망내 수질변화를 관찰하기 위해 Table 1의 수질항목에 대하여 유입수와 loop 테스트 중 7일, 14일, 21일, 28일, 50일, 70일, 90일에 각 loop로부터 시료를 채취하여 수질을 측정하였다. Loop 테스트 중 7일, 21일, 28일, 50일, 70일, 90일에 시편을 채취하여 무게감소량에 따른 부식속도를 분석하였다. 부식속도를 구하기 위해서 실험장치의 관 재질별 시편을 반응기로부터 회수하여 시편을 KS D ISO 8407:2003에 의거하여 처리한 다음 무게감소량을 측정하여 mdd (milligrams per square decimeter per day)로 표현해서 나타내었다. 부식전후의 관 표면의 성분 분석을 위해 EDS (Energy Dispersive X-ray spectrometer System) (Hitachi, Field Emission E-4200)를 이용하였다.

3. 결과

3.1. 유입수 수질 특성

Table 2에 loop 테스트에 사용한 하수재이용수와 수도물의 수질특성을 나타내었다. 두 시료에서 큰 차이를 나타내는 수질 항목은 전기전도도와 염소이온 농도이다. 하수재이용수의 전기전도도 및 염소이온 농도가 수도물에 비하여 21배, 100배 높았는데 이러한 이유는 본 연구에서 사용된 하수재이용수가 해안을 매립하여 만든 지역적인 특성상 하수관거로 해수가 여러 가지 원인에 의하여 유입되었기 때문인 것으로 판단된다. 하수재이용수 생산 과정에 호기성 생물학적 처리공정이 포함되어 있기 때문에 황산이온의 경우 하수재이

용수가 수도물에 비하여 16배 높았고, 생물학적 질산화 및 탈질 공정의 영향으로 질소계열(암모니아성 질소, 아질산성 질소, 질산성 질소) 성분의 농도는 하수재이용수가 4~8배 높은 것으로 나타났다.

3.2. 하수재이용수와 수도물의 부식속도 비교

관 재질별로 하수재이용수와 수도물의 부식속도를 알아보기 위한 시편의 무게감소량 실험을 수행하였다. Fig. 2(a)에 나타난 것과 같이 하수재이용수의 경우, CIP에서 무게감소량이 90일 동안 0.6507 mg으로 가장 크게 나타났으며, GSP

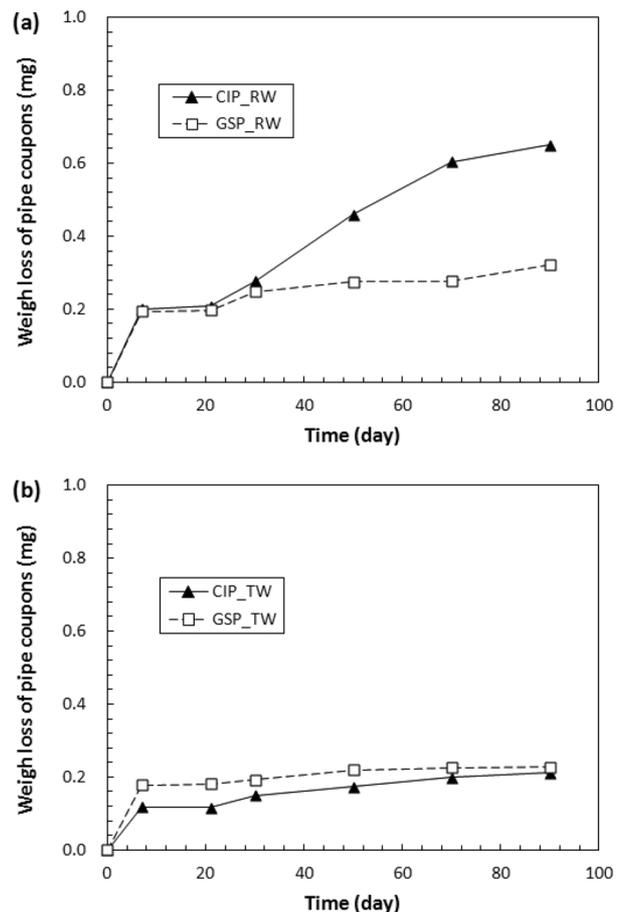


Fig. 2. Weight loss of coupons in (a) reclaimed water and (b) tap water.

Table 2. Characteristics properties of adjusted RW and TW

Parameter	Unit	Reclaimed water	Tap water	Parameter	Unit	Reclaimed water	Tap water
pH		7.42	7.86	Total chlorine	mg/L	0.25	0.20
Temperature	℃	26.1	25.9	SO ₄ ²⁻	mg/L	191.5	12.0
DO	mg/L	4.94	4.86	Calcium Hardness	mg/L as CaCO ₃	568	69
Conductivity	us/cm	3,700	178	Total Hardness	mg/L as CaCO ₃	743	82
Alkalinity	mg/L as CaCO ₃	96	34	Zn ²⁺	mg/L	0.010	0.068
TOC	mg/L	2.86	1.29	Fe ²⁺	mg/L	0.006	0.010
Cl ⁻	mg/L	704.75	7.04	NH ₄ ⁺ -N	mg/L	0.578	0.072
Turbidity	NTU	0.791	0.088	NO ₂ ⁻ -N	mg/L	0.0365	0.0093
Free chlorine	mg/L	0.07	0.12	NO ₃ ⁻ -N	mg/L	4.9	1.1

의 무게감소량은 0.3212 mg, STSP는 0.0009 mg, PVCPC는 0.0008 mg의 감소량을 보였다. 수돗물에서는 Fig. 2(b)와 같이 하수재이용수에서와 달리 GSP와 CIP의 무게감소량이 90일 동안 각각 0.2279 mg 및 0.2117 mg으로 유사하게 나타났고, STSP와 PVCPC는 무게감소량이 각각 0.0005 mg, 0.0004 mg를 나타냈다. 관 재질별로 하수재이용수와 수돗물에 의한 시편의 무게감소량은 모든 재질에서 하수재이용수에서 무게감소량이 크게 나타났다. 특히, CIP는 하수재이용수를 공급한 시편에서의 무게감소량이 수돗물을 공급한 것과 비교하여 큰 차이를 나타내었는데, 7일 이후 수돗물에서 CIP의 무게감소량은 0.11821~0.2117 mg로 큰 변화가 없었지만, 재이용수의 경우 21일 이후, 0.2077~0.6507 mg으로 수돗물에 비해 크게 무게가 감소하는 것을 볼 수 있었다. 반면, GSP는 수돗물과 하수재이용수에서 모두 7일까지 무게손실량이 급격하게 증가했다가 이후 완만한 증가를 나타내었고 두 시험수에서 비교적 큰 차이를 나타내지 않았다. STSP 및 PVCPC의 무게감소량은 두 시험수에서 모두 매우 작게 나타났는데, STSP는 부식성을 극도로 억제시킨 합금으로 부식이 거의 발생하지 않았고, PVCPC도 부식현상의 주원인이 전기화학적 현상임을 고려하면 부식현상으로 인한 무게감소가 거의 없다고 판단된다.

시편의 무게감소량이 거의 측정되지 않은 STSP 및 PVCPC를 제외하고, 하수재이용수 및 수돗물에 대한 CIP 및 GSP의 부식속도를 Fig. 3에 나타내었다. 부식속도는 무게감소량을 mdd단위로 계산하여 나타내었다.

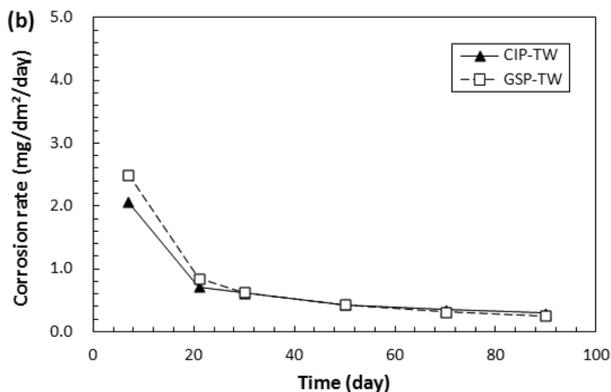
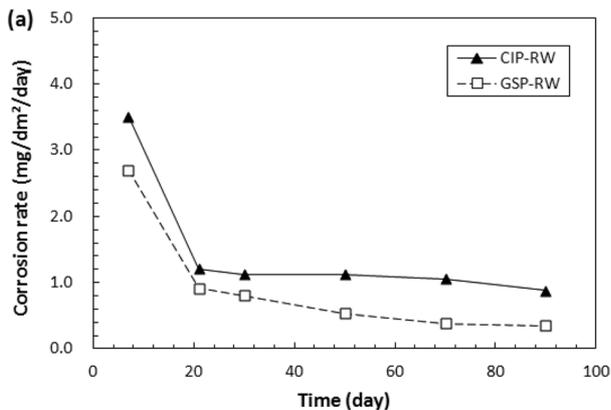


Fig. 3. Corrosion rate of pipes in (a) reclaimed water and (b) tap water.

CIP에서는 하수재이용수의 초기 부식속도가 3.511 mdd, 수돗물의 부식속도는 2.064 mdd를 나타내었고, 90일간의 부식속도는 하수재이용수 0.833 mdd, 수돗물 0.294 mdd로 시간이 지남에 따라 부식속도는 감소하는 경향을 나타내었다. 특히, 21일 이후에는 부식속도가 매우 미비하게 감소하거나 일정하게 유지되었다. GSP에서는 하수재이용수의 초기 부식속도가 2.703 mdd, 수돗물에서 2.499 mdd를 나타내었고, 90일간의 부식속도는 하수재이용수 0.349, 수돗물 0.248 mdd로 CIP에서 나타난 경향과 유사하게 시간이 지남에 따라 부식속도가 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 부식속도는 수질별로 차이를 보였는데 모든 관 재질에 대해서 재이용수를 공급한 시편의 초기부식속도가 수돗물 보다 0.204~1.447 mdd 크게 나타났다. 이를 통해 부식성이 큰 수계에 대해서 관 재질 및 공급수의 수질특성이 부식에 미치는 영향이 매우 중요함을 확인할 수 있었다.

유입수가 관의 부식에 미치는 영향을 살펴보기 위해 유입수별 부식성 지수를 산정하였다. LSI (Langelier Saturation Index)는 가장 일반적으로 물의 부식성을 나타내는 지수로서 LSI가 0보다 작으면 부식성이고, 0 이상이면 비부식성으로 구분한다. 본 연구의 대상인 하수재이용수와 수돗물을 대상으로 LSI를 산정하면, 하수재이용수는 0.17, 수돗물은 -0.63을 나타낸다. 즉, 시편을 이용한 부식 실험결과와는 상반대 결과가 도출되게 된다. 이와 같은 이유로 하수재이용수의 경우 LSI와 같은 기존의 부식성 지수를 사용하는 것은 적절치 못하다. 하수재이용수의 경우는 부식 억제인자보다 부식촉진 인자의 영향을 더 크게 받으므로 이를 반영할 수 있는 지수에 대한 재검토가 이뤄져야 한다.¹⁴⁾

3.3. 관 재질별 하수재이용수의 수질 변화

하수재이용수의 공급시 관 재질별로 시간에 따른 pH의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 초기 공급된 하수재이용수의 pH는 7.42였으나 모든 관종에서 시간에 따라 pH가 증가하였다. 모든 관종에서 pH가 증가한 원인은 모형관의 feed water tank가 외부에 노출되어 있어 모형관의 운전기간 동안 조류가 성장해 pH를 증가시킨 것으로 판단된다. 90일 후, CIP와

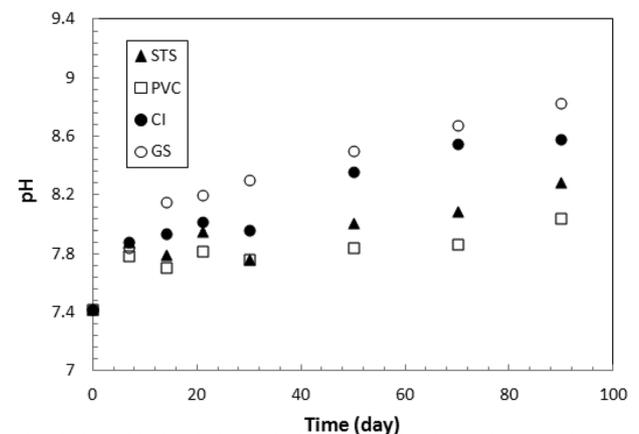
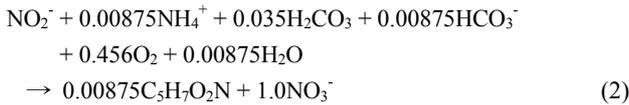
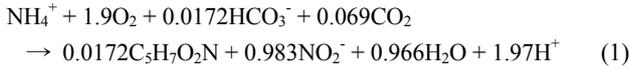


Fig. 4. Variation of pH at pipe materials.

GSP에서 pH를 측정한 결과 9.01, 8.68까지 증가한 것에 비해서 STSP와 PVC의 pH는 각각 8.29, 8.04로 다소 낮게 나타났다. 이러한 경향은 관 재질별로 하수재이용수의 질소성분 변화를 관찰하여 설명할 수 있다.

수중의 암모니아는 식 (1)과 (2)의 반응에 의하여 아질산화 및 질산화가 진행되는데 이 때 수소이온이 발생하게 되어 pH를 저하시킨다.¹⁵⁾ 여기서 C₅H₇O₂N는 자가영양미생물인 질산화 미생물을 의미한다.



하수재이용수를 공급한 관로에서 관 재질별로 질산화 정도를 확인하기 위해 암모니아성 질소의 농도변화를 Fig. 5(a)에 나타내었다. STSP와 PVC에서 암모니아성 질소의 농도는 거의 유사한 거동을 나타내었다. 7일 이후로는 모형관내 자가영양미생물의 성장으로 암모니아성 질소의 질산화에 의한 영향이 관찰되었고, 특히 50일 이후에는 암모니아성 질소

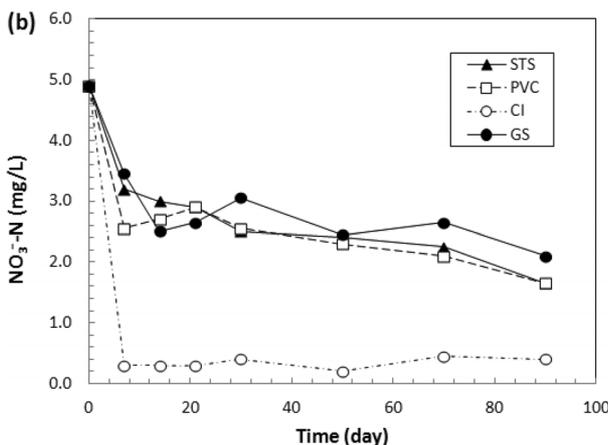
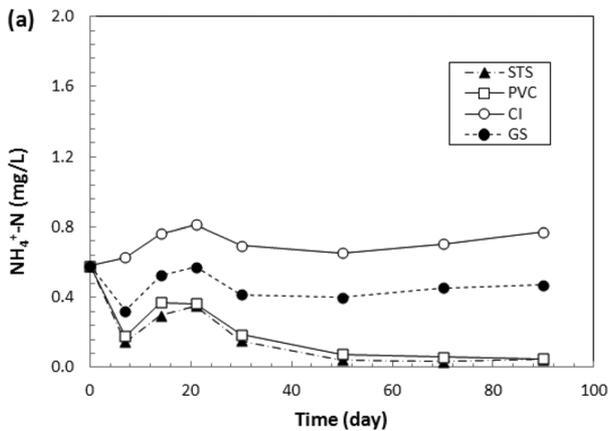


Fig. 5. Variation of (a) ammonia-N, (b) nitrate-N at pipe materials.

가 0.1 mg/L 이하로 나타났다. 질산화가 진행되는 과정에서 생성된 H⁺의 영향으로 pH를 낮추는 효과가 있었으며, CIP와 GSP에 비해 상대적으로 pH가 낮게 나타난 것이다. 반면, CIP에서는 암모니아성 질소가 오히려 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 원인은 유기질소의 분해에 의한 암모니아성 질소의 증가가 있었으나, CIP 부식생성물이 질산화균에 독성을 나타내어 질산화가 저해되어 나타난 현상으로 판단된다.

다음 Fig. 5(b)에 재이용수를 공급한 관로에서 질산성 질소의 농도변화를 나타내었다. 탈질화 과정은 수중내 다양한 유기성 혹은 무기성 전자공여체의 산화에 의하여 질산염 혹은 아질산염이 전자수용체로 사용되는 과정에서 일어나며, 질산염의 농도가 감소하면서 탈질화가 일어났다. 특히, 부식생성물이 많았던 CIP에서는 다른 관들과 비교하여 관벽에서 무산소 조건이 잘 형성되어 질산성 질소가 탈질되었고, 이 과정에서 생성된 OH⁻의 영향으로 인하여 CIP의 pH가 증가했을 것으로 예상된다.

하수재이용수의 모형관 공급에 따른 질소성분 변화를 수돗물과 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 부식이 가장 크게 일어난 CIP와 부식이 발생하지 않은 STSP를 대상으로 하수재이용수와 수돗물의 공급에 따른 탈질률을 비교한 결과, 하수재이용수를 공급할 때 수돗물 공급시 보다 질산성 질소의 탈질률이 월등히 높음을 알 수 있다. CIP는 부식생성물이 많아 관벽에서 무산소 조건이 잘 형성되어 수돗물에서도 질산성 질소의 37.8%가 탈질이 되었다. 반면, STSP는 수돗물의 경우, 질산성 질소가 유입농도 1.10 mg/L에서 관망 공급 후 1.42~1.60 mg/L로 오히려 증가하는 경향을 나타내었다. 이와 같이 관 재질별로 공급된 용수의 질소 성분이 변화되는 경향이 다름을 관찰할 수 있었다.

황산이온 및 염소이온은 용액 중에서 금속과 반응하여 금속을 용해시킴으로서 금속보호산화막의 형성을 막아 금속관의 공식을 일으킨다. 또한 높은 황산이온은 미생물의 활동과 부식에 직접적인 영향을 끼치며 관내 무산소 조건이 형성되면 황산이온을 전자공여체로 사용하는 황환원박테리아(SRB; Sulfur Reducing Bacteria)가 번성하여 이 과정에서

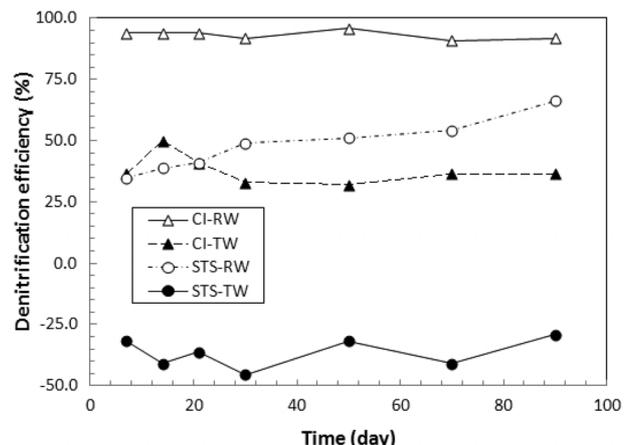


Fig. 6. Comparison on denitrification efficiencies in reclaimed water and tap water.

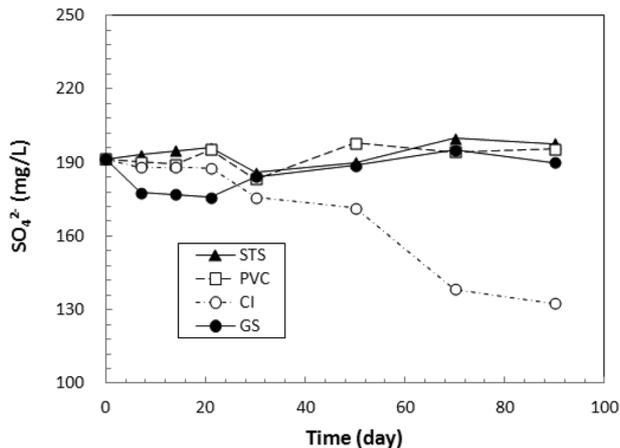


Fig. 7 Variation of sulfate at pipe materials.

부식을 일으키는 것으로 조사되었다.¹⁶⁾ Fig. 7에 관 재질별로 하수재이용수 공급시 황산이온의 변화를 나타내었다. GSP, STSP 및 PVC의 경우에는 황산이온의 변화가 크게 관찰되지 않았으나, CIP에서는 질산성 질소의 탈질률이 높았던 것과 유사하게 황산이온이 저감되는 현상을 관찰되었고, 특히 30일 이후에는 황산이온의 감소가 뚜렷하게 나타났다. 수돗물의 경우에도 CIP에서 황산이온의 감소가 가장 크게 나타났다.

황산이온의 감소는 SRB의 왕성한 활동을 의미하며 이는 MIC (Microbiologically Induced Corrosion)가 발생할 수 있음을 동시에 의미한다. 탄소강이나 스테인리스강에서 SBR에 의한 MIC가 관련되었을 경우 부식 생성물과 재질 표면에서 높은 인산이온 및 황산이온이 존재한다고 알려져 있으며

원소분석시 P, S가 검출되게 된다.¹⁶⁾ CIP에서도 초기 표면에서는 측정되지 않았던 S 및 Mn이 운전시간 후 50일이 경과한 시편에서 0.48%, 0.87%가 검출되었다. 이는 미생물에 의한 부식이 진행되고 있음을 의미하는 결과이다. 반면, 수돗물을 공급한 CIP에서는 50일이 경과된 시편의 표면에서 S 및 Mn이 검출되지 않았다. 즉, 수돗물보다 하수재이용수에서 미생물에 의한 부식이 일어날 가능성이 더 클 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 하수재이용수를 관망을 통하여 공급시 일어날 수 있는 부식과 수질변화에 대한 연구를 수행하였다. 사용된 하수재이용수는 생물학적 하수처리(침전지 포함) 후 모래여과와 GAC 공정을 거쳐 생산된 용수이고, 모형 관망은 아연도강관(GSP), 주철관(CIP), 스테인레스강관(STSP), PVC관(PVCP)을 이용하여 각각 구성하였다. 모형 관망을 이용하여 90일간의 루프테스트를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 하수재이용수를 모형관망에 공급한 루프테스트 결과, 관 재질별 시편의 무게 감소량은 CIP > GSP > STSP ≈ PVC의 순으로 나타났다. 반면 수돗물을 공급한 경우는 GSP가 CIP보다 무게 감소량이 7.1% 많게 나타나 관 재질별로 하수재이용수 및 수돗물에 대한 부식특성이 다를 수 있었다.

2) CIP는 하수재이용수의 초기 부식속도가 3.511 mdd, 수돗물은 2.064 mdd를 나타내었고, 90일간의 부식속도는 하수재이용수 0.833 mdd, 수돗물 0.294 mdd로 시간이 지남에 따라 부식속도는 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, GSP도 하수재이용수의 초기 부식속도가 2.703 mdd, 수돗물은 2.499 mdd를 나타내었고, 90일간의 부식속도는 하수재이용수 0.349, 수돗물 0.248 mdd로 CIP에서 나타난 경향과 유사하게 시간이 지남에 따라 부식속도가 감소하는 경향을 나타내었다.

3) 루프테스트를 수행하는 과정에서 수질변화를 관찰한 결과, 관 재질별로 미생물 성장 및 부식 정도가 다르기 때문에, 관 재질별로 하수재이용수의 수질 변화가 일어났다. 암모니아성 질소의 경우, 부식이 발생하지 않은 STSP 및 PVC에서는 부식이 큰 CIP 및 GSP와 비교하여 질산염으로 전환되는 비율이 월등히 높았다. 그러나, 질산성 질소의 경우, 부식 생성물이 가장 많은 CIP에서 탈질이 가장 높게 일어나는 현상을 관찰할 수 있었다. 또한, CIP에서는 SRB에 의한 황산이온의 소모가 나타났으며, EDS를 통한 원소분석 결과 MIC가 있었음을 확인할 수 있었다. 이러한 이유로 하수재이용수의 공급시 추가 염소투입 또는 고도처리공정의 도입이 필요할 것으로 판단된다.

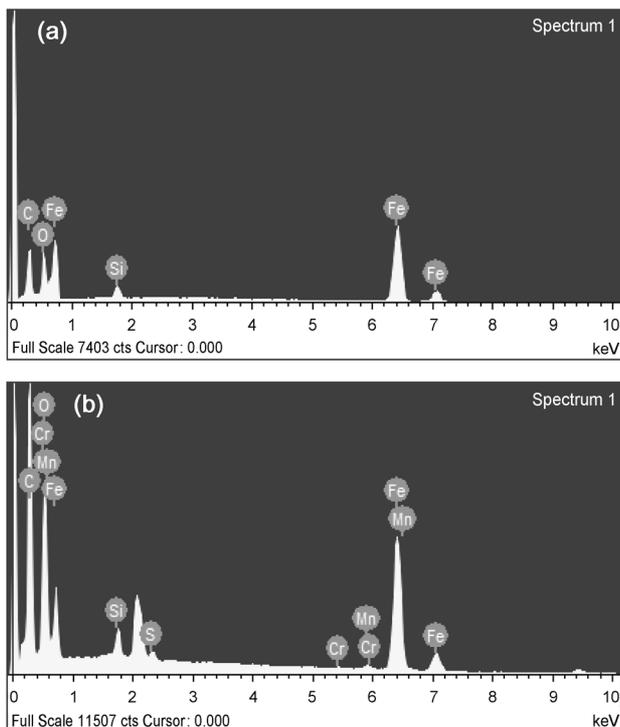


Fig. 8. EDX in CIP coupon; (a) initial, (b) after 50 days.

사 사

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(마이크로그리드 용수공급 기술 개발, 2012-0018-1-1)의 연구비 지원에 의해 수행되었고 이에 감사드립니다.

KSEE

참고문헌

1. 김인수, 오병수, “물부족 해결을 위한 해수담수화와 물 재이용 기술,” 대한환경공학회지, **30**(12), 1197~1202(2008).
2. 환경부, “하수처리수 재이용 가이드북,” (2009).
3. 김영훈, 이창하, 전민정, 이용수, 이의종, 남종우, 김형수, “약품역세를 적용한 하수재이용 막여과 시스템의 운전성능 평가,” 상하수도학회지, **25**(3), 335~342(2011).
4. 이창하, 김영훈, 전민정, 이용수, 이의종, 남종우, 김형수, “하수재이용 막여과 공정에서 약품 역세에서의 물리세정 영향 비교 평가,” 상하수도학회지, **25**(6), 981~987(2011).
5. 서석환, 김지연, 현길수, 최정우, “입상활성탄 공정을 이용한 하수방류수의 재이용 연구,” 한국수처리학회지, **18**(4), 71~77(2010).
6. 정병길, 이기형, 정진희, 장성호, 조도현, 성낙창, “초미세 기포-용존오존부상 공정을 이용한 염색폐수 처리수의 재이용,” 한국환경과학회지, **20**(3), 291~299(2011).
7. 국영룡, 주재영, 배운선, 이혜인, 정인호, 박철휘, “정밀여과에 의한 하수고도처리수의 재이용을 위한 전처리법에 관한 연구,” 상하수도학회지, **24**(5), 595~601(2010).
8. 김준규, 송인상, 오해석, 종지선, 정연규, “공동주택 단지 내에서 MF-멤브레인과 고도산화처리를 이용한 잡배수 재이용 시스템,” 서울시연구지, **9**(1), 131~140(2008).
9. 최창규, 이광호, “도시 다지 내 하수 및 우수의 재이용 기술 적용,” 건설기술연구소 논문집, **30**(2), 45~49(2011).
10. 최봉수, 임정은, 신용건, 양재익, 이상수, 옥용식, “폐양액과 하수처리수 재이용이 배추생육 및 토양에 미치는 영향,” 한국토양비료학회지, **44**(2), 394~399(2011).
11. Batté, M., Koudjonou, B., Laurent, P., Mathieu, L., Coallier, J. and Prévost, M., “Biofilm responses to ageing and to a high phosphate load in a bench-scale drinking water system,” *Water Res.*, **37**(6), 1351~1361(2003).
12. Manuel, C. M., Nunes, O. C. and Melo, L. F., “Dynamics of drinking water biofilm in flow/non-flow conditions,” *Water Res.*, **41**(3), 551~562(2007).
13. Lehtola, M. J., “The effects of changing water flow velocity on the formation of biofilms and water quality in pilot distribution system consisting of copper or polyethylene pipes,” *Water Res.*, **40**(11), 2151~2160(2006).
14. 이현동, 김지은, 광필재, 박재현, 공명식, “재이용수의 부식성 지수 평가 및 KRWI 개발,” 한국수처리학회지, **20**(2), 17~25(2012).
15. Water research foundation, “Effect of Nitrification on corrosion in the distribution system,” ISBN 978-1-60573-047-9 (2010).
16. Li jin, Xu Zhao-Yi, Li Jiu-Yi and Jiao Di, “Characteristics of the Microbiologically Influenced Corrosion of 304 Stainless Steel in Reclaimed Water Environment,” *Acta Phys. Chim. Sin.*, **26**(10), 2638~2646(2010).