

하수 재이용에 따른 수질, 토양 및 지표생물 영향 분석

Assessment of Wastewater Irrigation Impacts on Water Quality, Soil, and Bio-indicator

장태일*, 박승우**, 정명표***
Tae Il Jang, Sung Woo Park, Myung Pyo Jung

요 지

본 연구에서는 하수재이용에 따른 영향을 분석하기 위하여 수질, 토양 및 지표생물 모니터링을 실시하였으며 이를 분석하였다. 본 시험을 위하여 경기도 수원시 하수처리장 인근의 재이용시험지구와 경기도 화성시 팔탄면 소재의 기천 시험 포장을 대비지구로 선정하였다. 본 연구에서는 환경부에서 제시한 하수처리 재이용 수질 권고기준에 제시된 수질기준과 본 시험에 사용된 재처리수를 비교하였으며, 대비지구의 경우 농업용수 수질기준과 비교하였다. 관개용수에 따른 토양에서의 영향을 분석하였으며, 재이용 관개지구가 대비지구에 비하여 TN, TP의 영양염류와 EC의 값이 높게 나타났다. 그리고 종금속의 토양집적은 나타나지 않았다. 농업용수 재이용에 따른 생태 환경 영향을 분석하기 위하여 대상지구에 지표생물 계측망을 구성하여 영농기간 중 생물다양성의 서식처 유형과 분포, 우점 구조, 그리고 육상지표생물의 발생 정도에 대하여 조사분석하였다. 분석결과, 실험구와 대조구 두 지역의 곤충 및 거미류 종구성, 기능구별 유사도 등은 유사도가 높게 나타났으며, 우점종 구조에서도 차이가 없었다. 다만, 농업재용수의 높은 유기물 함량에 의해 실험구 지역에서 깔파구의 발생량이 많았다.

Key words: Wastewater reuse, Water quality, soil, Bio-indicator

1. 서 론

하수처리장 방류수는 수자원의 지속적 확보 측면에서 많은 국가나 지역에서 하수재이용에 대한 관심과 연구의 대상이 되고 있다. 하수재이용은 부족한 수자원의 보충, 용수이용효율의 제고 등의 효과 이외에도 농경지에 비료성분의 공급, 처리수의 이용에 따른 비용 문제, 보건위생상의 위협, 주민들의 정서적 저항과 반대 등 환경, 경제 및 문화적 측면에서 수행되어야 할 과제가 많은 것이 사실이다(김상민, 2003).

본 연구에서는 그중 하수재이용에 따른 수질, 토양 및 생태환경에 미치는 영향을 분석하기 위하여 대상 지구를 선정하여 모니터링 시스템을 구축하고 수질과 토양 그리고 지표 생물에의 상호 연관관계 및 그 영향을 분석하는데 그 목적이 있다.

* 정회원 · 서울대학교 지역시스템공학부 · E-mail : uriduri7@snu.ac.kr

** 정회원 · 서울대학교 지역시스템공학부 교수 · E-mail : swpark@snu.ac.kr

*** 서울대학교 응용생물화학부 · E-mail : jung7504@hanmail.net

2. 연구 방법

2.1 대상 지구

2.1.1 병점 지구

하수처리수 재이용에 따른 환경 영향 분석을 위한 실험지구는 수원시환경사업소 인근인 경기도 화성시 병점에 시험포장을 Fig. 1.에서와 같이 선정하였다. 시험포장의 공시품종은 수원 지방에서 널리 재배되고 있는 심추청으로 하였으며, 2002년부터 재이용에 따른 작물생육과 수문, 수질 모니터링을 수행하고 있다. 시비량은 기비로 질소질 44kg/ha, 인산질 35kg/ha를 시비하였다.

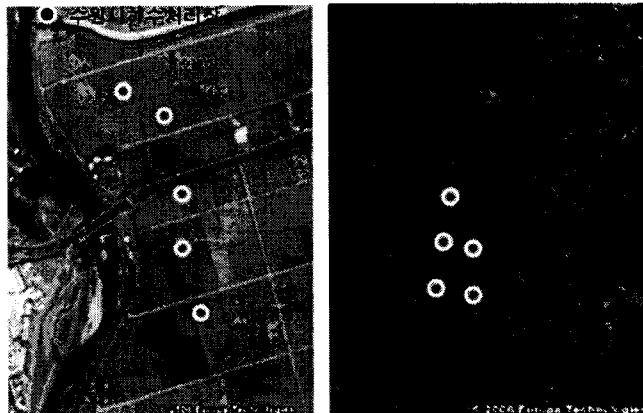


Fig. 1. 실험지구(병점지구) 및 대조지구(기천지구)

2.2.2 기천 지구

대조지구는 Fig. 1.에서와 같이 경기도 화성시 기천저수지 하류에 위치한 시험포장으로 농업용 수질기준을 만족하는 기천저수지로부터 용수를 공급받고 있다. 기천지구의 시험포장을 대상으로 관개기간동안 기비, 분열비, 수비 등 세 번에 걸쳐 비료를 살포하였으며, 기비는 복합비료를 이양전 써레질과 함께 시비하고, 분열비는 요소비료를 표층 시비하였으며, 수비는 수비전용 비료를 표층 시비하였다. 총 질소질 비료의 시비량은 235kg/ha으로 벼 표준시비량인 110kg/ha와 우리나라 평균 시비량인 212.8kg/ha 보다 많은 양이 시비되었으며, 인산의 경우 63kg/ha를 시비하여 표준시비량 70kg/ha와 비슷한 양을 보였다.

2.2 분석 방법

2.2.1 수질 및 토양 분석 방법

하수재이용에 따른 환경과 보건위생 등에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 시험포장에 대하여 월별로 수질, 토양 등을 샘플링하여 분석하였다(농업과학기술원, 2000; 환경부, 2000).

2.2.2 지표생물 분석 방법

곤충 및 거미류 조사는 2006년 벼 생육단계 (유묘기, 분蘖 증기, 수ing기, 출수기, 유숙기)별로 5차례 수행되었다. 각 포장에서 벼 10주씩 흡충기를 이용하여 곤충 및 거미류를 채집하였으며, 수ing기 후부터는 흡충기와 더불어 포충망을 이용하여 포장당 10회씩 스위핑 (Sweeping)하여 곤충 및 거미류를 채집하였다. 분석대상으로 논포장에서 발생하는 절지동물을 해충군, 천적군, 비해충군 세 기능군으로 구분하였다. 논에서 발생하는 주요종은 종 수준 (species level)까지 동정하였으며, 나머지 종에 대해서는 과 수준 (family level)까지 동정하였다.

실험구와 대조구 생물 군집 유사성은 Bray-Curtis 유사도 (S_{jk})를 이용하였다. Bray-Curtis 유사도는 0부터 100까지 값을 가지며 100에 가까울수록 비교한 두 지역의 유사도가 높음을 의미한다. 조사지역간 생물다양성을 비교하기 위해서 Shannon 다양도 지수 (H')와 Pielou 균등도 지수 (J)를

이용하였다. Shannon 다양도 지수는 양수 값을 가지며 지수 값이 높을수록 다양도가 높음을 의미하여, Pielou 균등도 지수는 0부터 1 사이의 값을 가지며 지수 값이 1에 가까울수록 종 균등도가 높음을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수질 분석 결과

각각의 대상지구에 대하여 2002년부터 현재까지의 유입관개수와 논 담수수질을 비교하였다. 총질소와 총인은 예비하여 하수처리수를 관개수로하는 실험지구에서 관개유입수는 TN이 2배, TP가 9배로 나타났으며, 담수농도 또한 상대적으로 큰 값을 보였다. 또한, 전체적으로 유입관개수의 총질소와 총인의 농도에 비하여 담수 평균 농도가 평균 각각 60%와 30% 작게 나타났는데, 이는 작물, 토양 등에 의한 질소순환에서 비롯된 논에서의 수질개선 효과로 보인다.

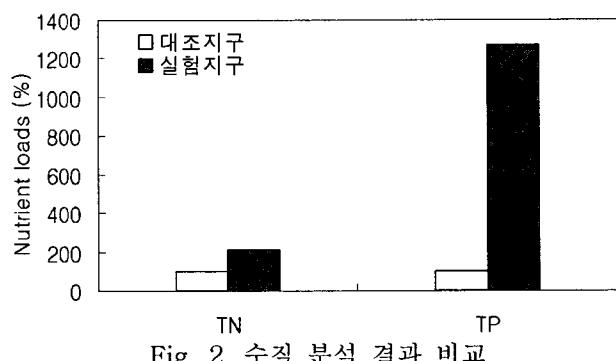


Fig. 2. 수질 분석 결과 비교

3.2 토양 분석 결과

하수처리수 재이용에 따른 토양 특성을 분석하기 위하여, 2005년에서 2006년 동안 이양 전, 후로 토양을 샘플링하여 pH, EC, 영양염류, 중금속, 그리고 양이온 등을 분석하였다. Table 1은 논 재배 전후의 토양의 화학적 성분 분석 결과를 나타내고 있다. 논 재배 전후 토양의 EC 변화는 실험지구에서는 증가한 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 처리되지 않은 하수처리수를 장기간 사용 시에 토양의 영양염류 집적이 우려된다고 할 수 있다. 이후 토양이 안정화되는 경향을 보였다. 이는 실험지구의 다년간의 토양자료를 보면, 유입수의 수질보다는 그 해 강우량의 영향에 의한 것으로 보이며, 지속적인 모니터링을 통하여 토양에서의 영양염류 집적 문제를 살펴보아야 할 것으로 판단된다.

Table 1. 영농기간 전후의 토양의 화학적 성분 분석 결과

항목	단위	실험지구		대조지구	
		관개 전	관개 후	관개 전	관개 후
pH	-	4.87	5.94	4.44	4.71
EC	µS/cm	318.5	420.8	263.4	198.0
TN		1073	1021	1310	1039
TP	mg/kg	600.1	498.1	724.0	890.0
Avail-P		167.1	97.2	127.9	121.1
Organicmatter	%	2.1	2.4	3.18	2.49
Cu		5.41	6.1	4.9	4.8
Zn		108.4	86.2	55.1	76.6
Pb		5.7	5.9	5.8	5.5
Ca	mg/kg	853.8	815.0	555.9	445.6
Mg		64.6	49.1	47.5	49.2
Na		34.2	123.1	12.8	55.2
K		44.5	99.8	54.6	67.0

총질소는 실험지구 및 대조지구에서 논 재배 이전보다 수확 후의 값이 점차적으로 감소하는 것으로 나타났고, 두 시험지구에서 하수재지용에 따른 차이는 살펴 볼 수가 없었다. 유기물의 경우 실험지구에서는 관개 후 증가하는 경향을, 대조지구에서는 감소하는 경향을 보였다. 중금속과 양이온 등에서는 뚜렷한 경향을 보이지는 않았으며, 우리나라 토양환경보전법에 제시된 '토양오염 우려기준'에는 미치지 않는 것으로 나타났다. 다만, Na의 경우는 재배 후 증가하나 실험지구에서 더 높은 값을 보였다. 이는 EC와 같은 경향을 보였다.

3.3 지표생물 분석 결과

실험구와 대조구 두 조사지역에서 연구기간 동안 총 41종 2,586개체의 곤충 및 거미가 채집되었다. 두 지역 전체 종의 Bray-Curtis 유사도 값은 84.92로 그 군집 구조의 유사성이 매우 높았다. 해충군간의 유사도 값은 92.22, 천적군간 유사도 값은 83.30, 비해충군간 유사도 값은 80.19로 실험구와 대조구간 곤충 및 거미류 종 구성은 매우 유사하였다. 위 결과로 인해 농업용수 재이용이 논생태계에서 발생하는 곤충 및 거미류의 출현종 및 발생량에 그다지 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

실험구와 대조구 두 지역 모두 소수의 우점종들과 다수의 희소종으로 군집이 구성되어 있었다. 각 기능군별로 종구성을 비교해 보면 실험구와 대조구 두 지역 모두 해충군에서는 진딧물과 애멸구, 흰동멸구가 많이 발생하였으며, 천적군에서는 황산적거미, 애접시거미, 맴시벌이 많이 발생하였다. 비해충군에서는 깔파구와 특토기가 우점을 차지하였다. 농업용수의 재이용이 전체 곤충 및 거미류 군집 구조뿐만 아니라 우점종의 구조에도 영향을 미치지는 않았다. 곤충과 거미 발생량 순위에 따른 개체수 비교 곡선은 실험구와 대조구 두 지역 모두 10종 이하의 종이 군집의 특성을 결정하고 있으며, 두 지역의 종 개체수 분포 모델 (species abundance distribution model)은 로그 정규 분포에 적용되었다 (실험구: $x^2=3.01$, df=6, p=0.08; 대조구: $x^2=9.48$ df=6 p=0.14). 이는 실험구와 대조구 두 지역 모두 군집이 어느 정도 안정화 되어 있으며, 종 개체수 분포 역시 두 지역간에 차이가 없음을 나타내고 있다.

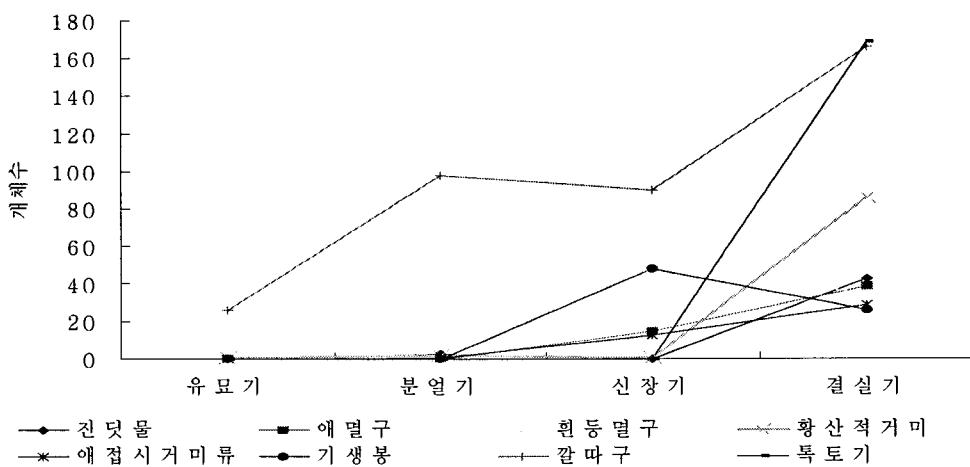


Fig. 3. 실험구 지역 주요종의 연간 발생 변화

주요종의 연간 발생량은 실험구와 대조구에서 거의 유사하였다. 해충군의 주요종인 진딧물과 애벌구, 흰동멸구 모두 벼 생육 후반기까지 증가하다가 벼 생육 말기에 감소하는 경향을 보였으며, 천적군의 황산적거미와 애접시거미는 벼 생육 초기부터 계속적으로 개체수가 증가하였다. 그리고 기생봉은 벼 생육 말기 피식자 (특히 진딧물과 애벌구, 흰동멸구) 밀도가 감소함에 따라 같이 밀도가 감소하는 모습을 보였다. 비해충군의 깔따구는 대조구에서는 벼 생육 말기에 밀도가 급속히 감소하는 경향을 보였으나, 실험구에서는 Fig. 3.에서와 같이 벼 생육 말기에 높은 밀도를 보였다. 이와 같은 특징은 물속에서 생활하는 깔따구 유충이 유기물을 섭취하는 특성과 관련된 것으로 보이며, 유기물이 많이 함유된 실험구의 농업용수가 깔따구의 9월 이후 발생에 영향을 미친 것으로 생각된다. 톡토기는 벼 생육 초기부터 밀도가 말기까지 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 톡토기 역시 유기물을 섭취하지만 농업용수에 직접적으로 영향을 받지 않기 때문에 실험구와 대조구 간 발생 패턴에 차이는 보이지 않았다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 하수재이용에 따른 영향을 분석하기 위하여 수질, 토양 및 지표생물 모니터링을 실시하였고 이를 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 대상지구의 유입관개수와 논 담수수질을 비교한 결과, 총질소와 총인은 대조지구에 비하여 실험지구에서 관개유입수는 TN이 2배, TP가 9배로 나타났으며, 담수농도 또한 상대적으로 큰 값을 보였다. 또한, 전체적으로 유입관개수의 총질소와 총인의 농도에 비하여 담수 평균 농도가 평균 각각 60%와 30% 작게 나타났다.

2) 논 재배 전후 토양의 EC 및 Na의 변화는 실험지구에서는 증가한 것으로 나타났으며, 총질소는 실험지구 및 대조지구에서 논 재배 이전보다 수확 후의 값이 점차적으로 감소하는 것으로 나타났고, 두 시험지구에서 하수재지용에 따른 차이는 살펴 볼 수가 없었다. 유기물의 경우 실험지구에서는 관개 후 증가하는 경향을, 대조지구에서는 감소하는 경향을 보였다. 중금속과 양이온 등에서는 뚜렷한 경향을 보이지는 않았다.

3) 실험구와 대조구 두 지역의 곤충 및 거미류 종구성은 매우 유사하였으며, 해충군, 천적군, 비해충군으로 나뉜 기능구별 유사도 또한 높았다. 실험구와 대조구 두 지역의 우점종 구조는 차이가 없었으며 10종 이하의 소수종이 군집 구조를 결정하였으며, 농업재이용수의 높은 유기물 함량에 의해 실험구 지역에서 깔따구의 발생량이 많았다. 전체적인 생물다양성은 실험구가 대조구에 비해 높았다. 하지만 기능군별로 해충군의 생물다양성은 실험구가 높았으나, 천적군과 비해충군의 생물다양성은 대조구가 높았다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원 (과제번호: 4-5-2)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 과기부, 2006. 하수처리수의 농업용수 재이용 시스템 적용 결과 보고서.
2. 김상민, 2004. 비점오염 모형을 이용한 하수처리수 재이용에 따른 유역 오염총량 분석. 박사학위논문, 서울대학교.
3. 농업과학기술원, 2000. 토양 및 식물체분석법.
4. 환경부, 2000. 수질오염공정시험방법.