

논의 관개용수 수질에 따른 토양심도별 영양물질 분석

Concentration Profile of Nitrogen and Phosphorus in Paddy Soils with Irrigation Water Quality

이은정*·성충현**·박승우***

Eun Jeong Lee·Chung Hyun Seong·Seung Woo Park

요 약

하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 영향을 평가하기 위해 논의 관개용수 수질에 따른 토양심도별 영양물질 분석을 시행하였다. 시험지구는 경기도 수원시 병점에 위치하며, 실험에 사용한 관개용수는 1) 지하수(TP#1), 2) 하수처리수(TP#2), 3) 재이용수(TP#3; 하수처리수+여과+UV소독)로 분류하여 관개하였다. 토양은 표토를 포함하여 20 cm 간격으로 60 cm까지 토양 심도별로 샘플링하였으며, 총질소(TN)와 총인(TP) 항목을 분석하였다. 분석결과 표토에서는 관개용수 수질의 차이에 의해 하수처리수 및 재이용수를 관개한 처리구 토양에서 영양물질의 함량이 높게 나타났다. 그러나 심도가 증가할수록 관개용수 수질에 의한 영향이 줄어들어 하수처리수의 농업용수 재이용으로 인해 관개용수 내 영양물질의 함량이 높아져도 심토까지는 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

핵심용어: 관개용수, 영양물질, 토양심도

I. 서 론

우리나라의 용수수요량은 2003년 기준 총 337억 m³이며, 이 중 농업용수로 사용되는 양이 160억 m³으로 총 용수수요량의 약 50%에 달한다(건설교통부, 2006). 그러나 우리나라는 강우 특성상 6월~8월에 대부분의 강수가 집중되어 있고, 이양 등으로 인해 농업적으로 용수가 가장 많이 필요로 하는 5월에는 봄가뭄으로 용수가 부족하여 농업용수 공급에 어려움이 많다.

2006년말 현재 연간 66억톤의 하수처리수 중 약 6.8%인 4.5억톤이 재이용되고 있으며, 재이용율은 2000년 2.99%, 2003년 5.4%, 그리고 2006년 6.8%로 점차 증가하는 추세이기는 하지만 아직도 많은 양의 하수처리수가 하천으로 바로 방류되고 있다. 하수처리수는 하수처리장에서 고도처리를 거친 후 방류됨에 따라 수질이 양호하고(2006년 평균 BOD 6.9 mg/l), 작물생장에 유용한 고농도 유기물 성분(총질소, 총인)을 함유하고 있으며 수량 또한 연중 일정하여 농업용수 물부족 현상을 해결하기 위한 대체수자원으로 이용될 수 있다(환경부 2007). 따라서 하수처리수를 농업용수로 재이용할 경우 안정적인 용수 공급을 기대할 수 있으며, 하수처리수에 포함되어 있는 영양물질을 이용하여 궁극적으로 비료사용량을 줄일 수 있다.

그러나 논벼의 재배특성 상 관개수를 장기간 담수함에 따라 관개수에 포함되어 있는 영양 물질이 토양에 집적되는 등의 문제가 발생할 수 있다. 토양에 영양물질이 집적되어 강우에 의해 궁극적으로

* 정회원·서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 박사과정-E-mail: tweety45@snu.ac.kr

** 정회원·서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 박사과정-E-mail: munymuny@naver.com

*** 정회원·서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 교수, 농업생명과학연구원 겸임연구원-E-mail: swpark@snu.ac.kr

지하수가 오염되면 질산성 질소 등의 물질에 의해 청색증(blue baby syndrome)과 같은 질병을 유발할 수도 있다.

따라서 본 연구에서는 하수처리수를 농업용수로 관개할 경우 관개수의 처리수준에 따른 농토양의 심도별 영양물질을 분석하여 하수처리수가 심토에 미치는 영향을 살펴보았다.

II. 재료 및 방법

대상지구는 경기도 수원시 병점에 위치하며, 실험에 사용한 관개용수는 1) 지하수(TP#1), 2) 하수처리수(TP#2), 3) 재이용수(TP#3; 하수처리수+ 여과+ UV소독)로 분류하여 관개하였다. 각 시험구의 크기는 5m×5m로 설계하였으며, 3처리 4반복으로 난수배치법을 적용하여 시험구를 구성하고, 벼품종은 수원 지방에서 널리 재배되고 있는 심추청을 선정하여 벼를 재배하였다. Fig. 1은 시험포장 전경을 보여주고 있다.



Fig. 1 Study area for wastewater reuse experiment

농 토양에서 토양 환경에 영향을 미치는 주요한 인자는 관개수의 수질이다. 따라서 본 연구에서는 시험포장의 유입수 및 담수, 그리고 관개수가 토양을 침투한 후의 수질을 알아보기 위해 침출수의 수질도 분석하였다.

분석을 위하여 시험포장의 유입수 및 담수 수질을 1주 1회, 침출수는 월 1회 주기로 샘플링하였으며, 침출수는 하단부가 반투과성 재질로 구성된 길이 1m(φ 20mm)의 진공관을 통하여 유입되도록 하여 샘플링하였다. 그리고 하수처리수 재이용에 따른 처리구별 토양심도에 따른 토양특성을 분석하기 위하여 2007년도 수확 후 처리구별로 표토를 포함하여 20 cm 간격으로 60 cm까지 총 4점씩 12점의 토양을 샘플링하여 영양물질 분석을 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 유입수 및 담수의 수질특성

Table 1은 실험기간인 6년 동안의 유입수 및 담수의 평균 수질을 나타낸 것이다. 유입관개수별 pH는 6.68~7.11로 대부분 중성에 가까운 것으로 처리구별 유사한 값을 보였다. 영양물질인 총질소(TN)와 총인(TP)은 지하수 처리구(TP#1)에서 각각 2.26 mg/l, 0.13 mg/l로 현저히 작게 나타났고, 하수처리수(TP#2) 처리구는 각각 13.76 mg/l, 0.63 mg/l, 재이용수(TP#3) 처리구에서는 각각 13.56 mg/l, 0.63 mg/l로 TP#2와 유사한 농도를 나타냈다. 영양물질의 거동에 영향을 미치는 담수의 입자성 부유물질(SS)의 농도는 지하수를 제외한 TP#2 및 TP#3에서 높은 값을 보였다.

처리구별 농 담수 수질은 처리구별 유입관개수 수질의 영향을 반영하는 것으로 나타났으며, 그 경향은 유입관개수질의 변화와 유사하게 나타났다. 그러나 상대적으로 수질이 양호한 TP#1을 제외한 다른 처리구는 논외 수질 정화 능력으로 인하여 유입수에 비해 담수의 수질이 개선된 것으로 나타났다. TP#2의 경우 TN은 5.83 mg/l로 약 58%, TP는 0.48 mg/l로 약 24% 정도 유입수에 비해 수질이 향상되었으며, TP#3의 경우 TN은 6.32 mg/l로 약 53%, TP는 0.45 mg/l로 약 29% 정도 수질이 개선되었음을 확인할 수 있다. 그러나 TP#1을 제외하고는 처리구별로 뚜렷한 경향은 보이지 않았다.

Table 1 Chemical characteristics of the effluent and ponded water, and the reuse criteria for wastewater as an irrigation source (2002 ~ 2007)

| Treatment | pH | EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | TN | TP | SS | |
|----------------|----------|-----------------------------------|--------|-------|------|--------|
| | | | (mg/l) | | | |
| TP#1 | Effluent | 6.68 | 333.1 | 2.26 | 0.13 | 49.73 |
| | Ponding | 6.93 | 295.7 | 2.20 | 0.25 | 178.21 |
| TP#2 | Effluent | 7.02 | 531.3 | 13.76 | 0.63 | 44.25 |
| | Ponding | 6.79 | 416.7 | 5.83 | 0.48 | 246.13 |
| TP#3 | Effluent | 7.11 | 533.1 | 13.56 | 0.63 | 25.58 |
| | Ponding | 6.95 | 341.1 | 6.32 | 0.45 | 341.08 |
| Reuse Criteria | | 6.5 ~ 8.5 | < 7000 | < 30 | NA* | NA |

* NA: not applicable

3.2 침출수 수질 특성

침출수의 pH는 Table 2에서와 같이 대부분 약산성으로 중성에 가까운 것으로 처리구별 유사한 값을 보였다. 침출수의 전기전도도는 담수에 비해 크게 나타나 염류가 집적되고 있음을 보여주고 있다. TN은 처리구별로 2.19 ~ 2.73 mg/l의 농도로 TP#1과 비슷한 농도를 보였으며, TP#1을 제외한 처리구의 경우 담수에 비해 약 60% 감소하였다. TP 역시 0.15 ~ 0.17 mg/l 농도의 값을 보였으며, TP#1을 제외한 나머지 처리구의 경우 TP 농도가 0.3배 정도로 크게 감소한 것으로 분석되었다.

Table 2 Chemical characteristics of the leachate from paddy fields (2006 ~ 2007)

| Treatment | pH | EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | TN | TP |
|-----------|------|-----------------------------------|--------|------|
| | | | (mg/l) | |
| TP#1 | 6.90 | 426.69 | 2.19 | 0.17 |
| TP#2 | 6.94 | 519.37 | 2.37 | 0.15 |
| TP#3 | 6.94 | 466.45 | 2.73 | 0.16 |

3.3 심도별 토양 특성

Fig. 2와 Table 3은 토양심도별 TN과 TP의 분포를 보여주고 있다. 모든 처리구에 대해 TN과 TP 농도가 토양심도가 증가함에 따라 감소되는 경향을 보였으며, 이는 기존의 선행연구들과 같은 경향을 보이고 있다. TP#2와 TP#3 관개수에는 지하수에 비해 영양물질이 많이 함유되어 있어 이것에 의한 영향으로 TP#1에 비해 TP#2, TP#3의 표토에서 TN, TP의 농도가 높았다. 그러나 심도가 증가함에 따라 각 처리구간의 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았는데 이는 침출수의 수질 특성에서 살펴본 바와 같이 TN, TP가 토양 속 깊이 침출되지 않기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 심도가 증가할수록 관개용수 수질에 의한 영향이 줄어들어 하수처리수의 농업용수 재이용으로 인해 관개용수 내 영양물질의 함량이 높아져도 심토까지는 영향을 미치지 못하는 것을 의미한다.

하수처리수 처리구(TP#2)와 재이용수 처리구(TP#3)의 토양 심도별 TN과 TP의 농도를 비교해보면 뚜렷한 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 TP#3은 TP#2에 비해 여과와 UV살균과정이 추가가 되는데, 이 처리과정 자체가 하수처리수를 농업용수로 사용할 경우 발생할 수 있는 미생물에 의한 인체 위해성을 저감시키기 위한 것으로, TN이나 TP 등의 영양물질을 제거하는 매커니즘이 아니므로 영양물질의 함유 농도 측면에서는 TP#2와 TP#3 관개수가 차이가 없음을 의미한다.

Table 3 Content of total N and total P with depth

| Treatment | depth(cm) | T-N(mg/kg) | T-P(mg/kg) |
|-----------|-----------|------------|------------|
| TP#1 | 0 | 910 | 504.73 |
| | 20 | 777 | 339.61 |
| | 40 | 455 | 239.96 |
| | 60 | 188 | 141.90 |
| TP#2 | 0 | 1,164 | 533.87 |
| | 20 | 678 | 373.55 |
| | 40 | 396 | 217.54 |
| | 60 | 165 | 141.04 |
| TP#3 | 0 | 1,100 | 551.55 |
| | 20 | 833 | 409.54 |
| | 40 | 469 | 237.82 |
| | 60 | 224 | 180.22 |

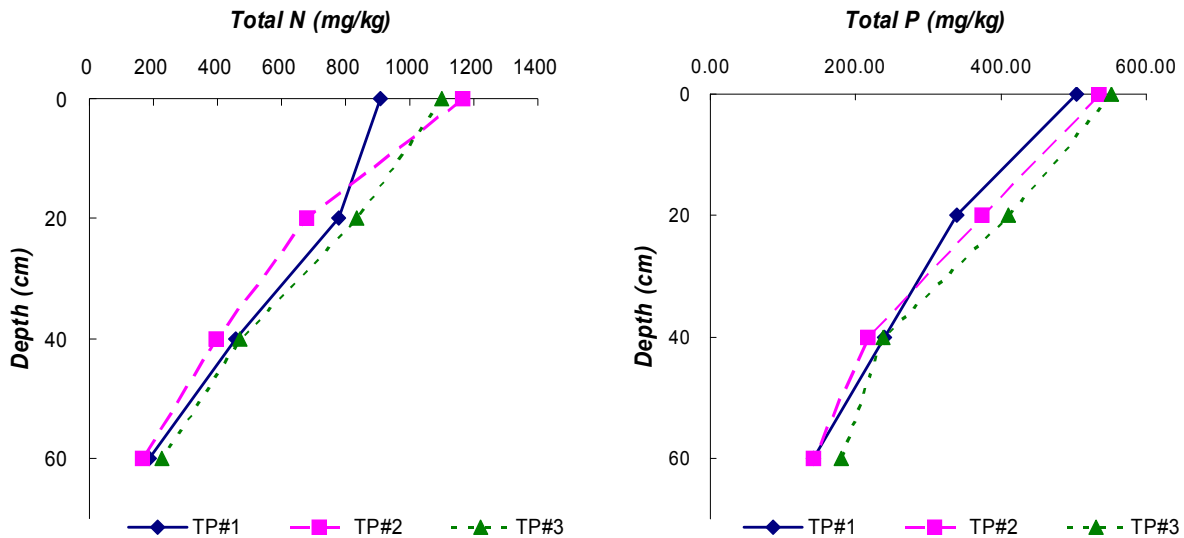


Fig. 3 Comparison of total N and total P content with depth

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 생활하수를 농업용수로 관개할 경우 관개수의 처리수준에 따른 토양심도별 영양물질 변화를 분석하였다. 또한, 토양 환경에 영향을 미치는 시험포장의 유입수 및 담수의 수질을 분석하였으며, 관개수가 토양을 침투한 후의 수질을 알아보기 위해 침출수의 수질도 분석하였다. 모니터링 대상지구는 경기도 화성시 병점에 위치한 시험포장으로, 2002년부터 수문 및 수질 모니터링을 실시하고 있다. 실험에 사용한 관개용수는 1) 지하수(TP#1), 2) 하수처리수(TP#2), 3) 재이용수(TP#3: 하수처리수+여과+UV소독)로 분류하여 실험에 사용하였다.

유입수의 pH는 6.68 ~ 7.11로 대부분 중성에 가까운 것으로 처리구별 유사한 값을 보였다. 영양물질인 TN과 TP는 TP#1에서 각각 2.26 mg/l, 0.13 mg/l로 현저히 작게 나타났고, TP#2는 각각 13.76 mg/l, 0.63mg/l, TP#3에서는 각각 13.56 mg/l, 0.63mg/l로 TP#2와 유사한 농도를 나타냈다.

처리구별 논 담수 수질은 상대적으로 수질이 양호한 TP#1을 제외한 다른 처리구는 논 수질 정화 능력으로 인하여 유입수에 비해 담수의 수질이 개선된 것으로 나타났다. TP#2의 경우 TN은 5.83 mg/l로 약 58%, TP는 0.48 mg/l로 약 24% 정도 유입수에 비해 수질이 향상되었으며, TP#3의 경우

TN은 6.32 mg/l로 약 53%, TP는 0.45 mg/l로 약 29% 정도 수질이 개선되었음을 확인할 수 있다. 그러나 TP#1을 제외하고는 처리구별로 뚜렷한 경향은 보이지 않았다.

침출수의 수질 분석결과 TN, TP는 TP#1과 비슷한 농도를 보였으며, TP#1을 제외한 처리구의 경우 담수에 비해 농도가 각각 약 0.4배, 0.3배로 크게 감소하였다.

처리구별 토양심도에 따른 토양특성을 분석 결과, 영양물질의 경우 모든 처리구에 대해 TN과 TP 농도가 토양심도가 증가함에 따라 감소되는 경향을 보였으며, 관개수의 특성에 따라 TP#1의 농도가 가장 작았다. TP#2와 TP#3의 경우 고농도의 영양물질을 함유하고 있어 표토에서의 TN, TP 농도가 높게 나타났다. 그러나 관개수의 특성이 심토까지 영향을 미치지 않아 심도 60 cm 부근에서는 TP#1과 비슷한 농도를 나타내었다. 이는 TN, TP가 토양 속 깊이 침출되지 않기 때문인 것으로 판단된다.

이상의 연구 결과는 향후 지속적인 심도별 토양 및 침출수의 모니터링을 통하여 하수재이용에 따른 토양에서의 영양물질 집적 현상을 조사하고 모의하는데 기초 자료로 활용될 것으로 보이며, 이를 통하여 재이용의 안전성 평가에도 활용될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 사업단의 연구비지원 (과제번호 4-5-3)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 과학기술부(2007). 하수처리수의 농업용수재이용 시스템 적용(4-5-2) 최종 보고서.
2. 건설교통부(2006). 수자원장기종합계획.
3. 김상민(2004). 비점오염 모형을 이용한 하수처리수 재이용에 따른 유역 오염총량 분석, 서울대학교 박사 학위논문.
4. 농업과학기술원(2000). 토양 및 식물체분석법.
5. 환경부(2005). 하수처리수 재이용 수질권고기준.
6. 환경부(2007). 하수도통계.