

최 종
연구보고서

농업수리시스템과 유힬농지를 이용한
수질관리기술 개발

The Development of Water Quality Management
Technology using Irrigation-Drainage System
and Fallow Paddy

연구기관
한국농촌공사

농 립 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “농업수리시스템과 유휴농지를 이용한 수질관리기술 개발에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2006년 7월 일

주관연구기관명 : 한국농촌공사

총괄연구책임자 : 김 형 중

세부연구책임자 : 김 형 중

연 구 원 : 장 정 렬

연 구 원 : 김 희 수

연 구 원 : 배 요 섭

연 구 원 : 강 의 태

협동연구기관명 : 건국대학교

협동연구책임자 : 김 선 주

연 구 원 : 김 필 식

연 구 원 : 지 용 근

연 구 원 : 이 주 용

연구보조원 : 박 기 춘

연구보조원 : 이 상 윤

요 약 문

I. 제 목

농업수리시스템과 유희농지를 이용한 수질관리기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

농업수리시스템과 유희농지를 이용한 수질관리기술 개발의 연구목적은 크게 기술적 측면, 경제·사회적 측면, 사회·문화적 측면의 3가지로 나눌 수 있는데, 각 연구개발의 목적 및 필요성은 다음과 같다.

1. 기술적 측면

논 지대에서는 대부분 관개용수가 농업수리시스템을 유하하면서 반복 이용되는 광역용수라는 특징을 갖고 있으므로 농촌지역의 수질관리를 위해서는 이러한 물 흐름 특성을 이해하고, 그 흐름 속에서 수질관리방안을 수립하기 위한 기술을 개발할 필요가 있다.

농촌지역 물 흐름의 중추를 이루고 있는 농업수리시스템은 지금까지 수량관리 위주로 개발되었으나, 농촌지역의 수질이 악화됨에 따라 수질관리를 고려한 농업수리시스템 및 구축기술을 개발할 필요가 있다.

농업수리시스템 및 이 시스템 내에서 물을 이용하는 농지의 친환경적 이용기술을 개발하여 농업의 친환경성을 증대시켜 농업보조금을 환경보조금 등으로 대체함으로써 농업보조금 지급에 따른 통상마찰을 피하고 농민의 안정적 수익기반을 구축할 필요가 있다.

선진 외국에 비해 친환경적 농업농촌정비 기술개발이 미진하므로 우리나라의 농업농촌을 풍요롭게 지키기 위해서는 친환경적 농업농촌정비 기술을 확립해 나가야 한다.

최근 주곡인 쌀 수급의 불안정, 농어촌지역의 고령화 등으로 휴경지가 증가되고 있으나, 이를 적절히 관리하지 않으면 농경지가 황폐화되어 농경지로 재이용시

많은 어려움이 있으므로 이들 유휴농지를 다면적 공간으로 활용하기 위한 기술을 개발할 필요가 있다.

따라서 농업수리시스템 및 농지를 친환경적으로 이용하고, 또한 수질개선시설로서 뿐만 아니라 생태계보전공간(biotope)의 기능도 발휘할 수 있도록 정비할 필요가 있다.

2. 경제·산업적 측면

○ 농업용수 수질개선 시급 : 농업용수의 수질이 악화되어 이를 개선하기 위한 투자가 증대되고 있으므로 농업수리시스템 내에서의 적절한 수질관리를 통해 농업용수 수질개선 비용을 줄일 수 있는 기술을 개발할 필요가 있다.

○ 휴경지가 증가되고 있으므로 이들 농지의 유효이용방안 수립 필요

- 쌀 과잉생산이 사회적 문제로 대두어 쌀생산조정 및 논농업직불제 사업 등 쌀생산 수급을 조절하기 위한 정책의 도입 등으로 휴경지가 증가되고 있으므로 이들 휴경지의 유효이용방안을 수립할 필요가 있다.

- 따라서 휴경지와 같은 유휴농지를 수질정화시설 등 다면적으로 이용하기 위한 기술을 개발할 필요가 있고, 논농업직불제 사업 대상 농지는 콩 등 발작물 재배가 허용되므로 고부가가치 작물 재배 등 농지의 이용율을 높이기 위한 기술을 개발할 필요가 있다.

다. 사회·문화적 측면

환경보전형 시설에 대해서는 보조금지급에 따른 통상마찰을 해소할 수 있으므로 친환경적 농업수리시설 및 농지이용방안을 개발하여 농촌의 소득 및 환경을 보전해 나갈 필요가 있다.

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

본 연구에서는 증가되고 있는 휴경지를 활용하여 수질개선을 도모하는 동시에 휴경기간 중 식생 번식으로 인한 농경지의 황폐화를 방지하기 위한 관리기술 및 농업수리시스템의 수질개선기능을 평가하고자 하며, 그 구체적인 연구의 세부 내용 및 범위는 다음과 같다.

1. 농업수리시스템의 수질정화기능 평가 및 강화방안 도출

쌀생산 조정제 농지 등의 유�휴(휴경)농지를 조사 분석하고, 이들 휴경지를 포함하는 농업수리시스템 중 유역폐쇄가 가능한 연구 대상지구를 선정하였다. 대상지구의 특성을 조사 분석하고, 저류지, 낙차공 등의 수질정화기능을 평가하며, 수질정화기능을 강화하기 위한 방안을 도출하고자 한다.

2. 유�휴(휴경)농지의 수질정화기능 평가

농업수리시스템 내에 있는 연구대상 휴경농지를 선정하고, 이 휴경지의 물수지 조사, 기상, 토양의 물리·화학성을 조사하였다. 또한 연구 대상농지에서 유입수 및 유출수의 수질을 조사하여 유�휴농지의 수질정화기능을 분석하였다.

3. 유�휴(휴경)농지의 황폐화를 방지하기 위한 물관리기술 개발

휴경이 진행됨에 따라 뿌리가 발달한 수생식물 및 관목류가 번식하면 농경지가 황폐화되어 휴경지를 재이용할 때 많은 어려움이 있으므로 적절한 물관리를 통하여 식생의 번성을 방지하는 동시에 수질정화를 유도하기 위한 물관리기술을 개발하고자 한다.

4. 유�휴(휴경)농지의 수질정화기능 강화방안 제시

휴경지의 수질정화기능을 강화하기 위해 웅덩이 및 여울을 조성하여 휴경지 표면에 다양한 변화를 갖도록 하여 수질정화기능을 평가하였다. 또한 소규모 흙수로를 조성하여 수질정화기능을 평가함으로써 휴경지에서의 수질정화기능을 강화하기 위한 기술을 개발하고자 한다.

또한 농지에 암거배수를 도입하여 범용화를 통한 농지이용율 제고와 수질정화기능을 강화할 수 있는 가능성을 분석하고자 한다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구결과

본 연구에서는 증가되고 있는 휴경지에서의 일반적인 수질개선효과를 살펴보고, 휴경지에서의 수질정화효율을 향상시킬 수 있는 방안을 도출하고자 시험포장을 조성하여 연구를 수행하였다. 또한 농업수리시스템 중 저류지와 낙차공에서의 수질개선효과에 대하여 연구하였는데 그 결론을 요약하면 다음과 같다.

가. 휴경지의 수질변화 특성

최소한의 관리도 이루어지지 않고 방치된 휴경지에서는 휴경 초기에는 식물에 의한 여과 및 흡수에 의해 수질정화효과가 있었으나 휴경이 진행됨에 따라 식물체의 고사와 재용출로 수질정화효과를 거의 기대할 수 없었고 오히려 오염원으로 작용하는 경우가 있었다.

휴경지의 수심을 평균 10~20 cm로 담수관리하는 경우에는 유기물의 제거효과는 없었으나 농업용수원 부영양화의 주원인인 질소와 인의 제거효과는 있는 것으로 나타났다. 이 경우 담수관리를 하기 때문에 잡풀의 발생이 억제되어 농지의 황폐화를 방지하고 식물의 고사와 재용출에 따른 수질악화현상을 일으키지 않았다.

나. 휴경지의 담수관리에 따른 수질개선

휴경지의 수심을 20~30 cm로 관리하는 경우 SS의 제거효과는 없었으나 BOD는 19.9%의 제거율을, COD는 6.9%의 제거율을 보여 유기물이 제거되었다. 또한 TN의 경우 65.5%의 높은 제거율을 보였고, TP의 경우도 62.7%의 제거율을 보임으로서 영양염류도 제거되는 것으로 나타났다. 따라서 휴경지를 방치하지 않고 담수관리하는 경우 유기물과 영양염류의 제거효과가 있을 뿐만 아니라 식물의 생장에 따른 농지의 황폐화를 방지할 수 있었다.

다. 여울 및 웅덩이 조성을 통한 수질개선

휴경지에서의 수질정화기능을 강화하기 위하여 다양한 수심을 갖도록 여울과 웅덩이를 조성하여 수질정화시험을 한 결과 SS는 63.0%의 제거율을 보였고, BOD는 40.0%의 제거율을 보였으나 COD는 유입수와 유출수 사이에 큰 차이가

없었다. TN의 경우 63.0%의 제거율을 보였고, TP의 경우도 42.5%의 제거율을 보였다. 이와 같이 여울과 웅덩이를 조성한 시험포에서는 SS, 유기물, 영양염류의 제거효과가 있었고, 일정 정도 담수를 하기 때문에 식물의 발생이 억제되어 25~30%의 낮은 피도를 나타냄으로서 식물생장에 따른 농지의 황폐화도 방지할 수 있었다.

라. 흙수로 조성을 통한 수질개선

휴경지에 흙수를 조성한 시험포의 경우 SS는 61.0%의 제거율을 보였다. BOD는 29.5%의 제거율을 보였으나 COD는 유입수와 유출수가 비슷한 값을 나타냈다. TN은 39.7%의 제거율을, TP의 경우는 15.9%의 제거율을 보였다. 따라서 흙수로에서도 SS, 유기물, 영양염류의 제거효과가 있었으므로 휴경지를 경운하여 수로를 만들고 물을 흘려보내면 수질정화효과는 물론 식물생장도 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

마. 암거배수에 의한 수질정화

암거배수 유출수의 경우 SS, Chl-a는 유입수에 비해 유출수의 농도가 낮았다. 그러나 BOD, COD, TN, TP는 유입수와 유출수 사이에 큰 차이가 없어 정화효과가 거의 없었다. 따라서 암거배수에서의 정화효율을 높이기 위해서는 정화효율이 높은 소수재를 개발하여 적용할 필요가 있는 것으로 판단된다.

바. 저류지에서의 수질변화

농업수리시스템의 하나인 저류지의 경우 SS는 36.2%가 제거되었다. BOD는 33.2%의 제거율을, COD는 25.6%의 제거율을 나타냈다. TN은 22.8%의 제거율을, TP는 33.7%의 제거율을 보였다. 따라서 농업수리시스템에 있는 저류지들은 수질개선에 긍정적으로 작용할 것으로 판단된다.

사. 낙차공의 수질정화기능

DO농도가 높은 경우에는 별 차이가 없지만 DO농도가 낮은 경우에는 낙차공을 통과하면서 DO농도가 높아지는 경향을 보였다. 따라서 낙차공을 설치하면 일정 정도의 DO농도를 유지할 수 있으므로 미생물에 의한 오염물질 제거효과를 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구결과의 활용 방안

가. 기대효과

1) 기술적 측면

- 농업수리시스템에 의한 광역수질관리기술 수립
- 농업수리시스템 내에서의 수질개선기능 강화기술 도출
- 쌀생산조정 정책에 따라 발생하는 유휴농지를 이용한 수질개선기술 수립
- 농업보조금의 환경보전보조금으로의 전환에 의한 통상마찰 해소 및 고부가가치 농업생산기반 정비기법 제시
- 수질정화형 암거배수조직 설계기법 제시

2) 경제·산업적 측면

- 친환경적 농업수리시스템 구축기술의 도입으로 농업기반정비에 대한 보조금 지급 당위성 제시로 안정적인 영농기반 구축
- 자연정화기능을 이용한 농촌용수 수질개선을 통한 농촌생활환경 개선
- 휴경에 따른 환경보조금 도입이 가능하므로 농촌소득 보전에 기여
- 농업통상마찰을 해소하면서 영농을 지속할 수 있는 바탕마련

나. 활용방안

- 휴경농지의 황폐화를 방지하기 위한 관리에 활용
- 휴경지를 이용한 수질정화에 활용
- 농촌지역 광역 수질관리에 활용
- 농업농촌의 친환경정비에 활용
- 무역협상시 농경지의 친환경성 자료로 활용

SUMMARY

I . Subject

The Development of Water Quality Management Technology using Irrigation-Drainage System and Fallow Paddy

II. Objectives and Significance of the Study

The objectives of this research can be divided into three parts : technical aspects, economic aspects, and social and cultural aspects. Each of them is as follows.

1. Technical aspects

Most of irrigation water in paddy field have a characteristic as the water which is recycled and reused in irrigation-drainage system. To manage the water quality, we could understand the characteristic of water flow and develop the technology for the water quality management.

Irrigation-drainage system has been mainly developed for the water quantity management until now. However, agricultural area need the irrigation-drainage system and management technology for preventing the water quality pollution.

Technology development and increasement of environmental-friendly use of farm land in irrigation-drainage system are important for the transferring agricultural subsidy to the environmental subsidy. When it is complete, safety income of farmers would secure and trade war would decrease.

Technology for a environmental-friendly agricultural infrastructure improvement and rural development in Korea compared with foreign country unsatisfied. The technology establishment are required for the conservation of agricultural area. Fallow paddy has been increased following the import of

cheap agricultural product, and the unbalance between farming cost and price of agricultural products since 1990. The increasing fallow paddy needs to be protected and used for the re-cultivation. Therefore, irrigation-drainage system and farm land have to be used environmental-friendly. It is not only facility for improvement of water quality but important for ecosystem conservation

2. Economic aspects

- Development of the management technology in irrigation-drainage system is necessary for the reduction of cost because of increasing investment for the improvement of water quality in agricultural water.
- The fallow paddy has been increased because the government executed the policy such as the control system of rice production and the debit system of paddy farming. It is necessary to research effective application plans for the increasing fallow paddy.
- Technology development to use fallow paddy as purification facility of water quality is necessary. Fallow paddy is need to develop technology for increasing of utility efficiency because it is available to cultivate upland crops.

3. Social and cultural aspects

The facility for environmental conservation is available to be subsidized from the government. An income of agriculture and environmental conservation is necessary through the development of the environmental-friendly facility and utility plan in farm land.

III. Contents and Scopes of the Study

The objectives of this research are to improve a water quality using the increasing fallow paddies and assess a management technology and improving function of water quality in the irrigation-drainage system. The detailed

contents and scopes of the research are as follows.

1. Application plan for water quality improvement in the irrigation-drainage system.

This study analyzed the fallow paddy for rice production control and selected effective study area in the irrigation-drainage system including this paddy. Characteristics of study area were analyzed and improvement function of water quality was assessed in agricultural pool and drop structures. This study are intend to suggest the technology for an effective management of water quality.

2. Assessment of water quality improvement in the fallow paddy

Fallow paddy was selected as study area in irrigation-drainage system. Water balance, weather and soil properties were investigated in this field. Also, improvement function of water quality were analyzed through a comparison of water quality in the inlet and outlet.

3. Technology development of water management to prevent devastation

Fallow paddies are need to prevent devastation by spread of weed such as a hydrophyte and bush because it is difficult to re-cultivate the fields. This study intend to develop a technology of water management for improvement of water quality and prevention of increasing weed.

4. Suggestion for the water quality improvement

Shallow pool & shallows and earthen waterway were installed with a variation of fields surface to increase for water quality improvement in the fallow paddies. This study intend to develop technology to increase the water quality improvement using these facilities. Also, pipe drainage system was installed to analyze possibility of utility raise and water quality improvement in farm land.

IV. Results and Recommendations

1. Results

This study was investigated an effective of water quality improvement in the increasing fallow paddy. It was made an experimental field to find out a improvement plan of water quality. Also, it was study water quality improvement on agricultural pool and drop structures installed in irrigation-drainage system. The results of the research are as follows.

1) Characteristics of the change of water quality in the fallow paddy

Water quality was improved with a filtration and uptake by plants in initial fallow, but it was not occurred owing to the drying and decaying of plants in the fallow paddy.

When a water depth of fallow paddy was managed with from 10 cm to 20 cm, although a organic matter was not reduced, TP and TN, which are the mainly cause of eutrophication in agricultural water, were reduced. Managed fallow paddy with water depth prevented the weed growing and water quality pollution by the drying and decaying of plants.

2) Water quality improvement using the management of water depth

When water depth in fallow paddy was managed with from 20 cm to 30 cm, although SS was not removed, removal ratio of BOD and COD were 19.9 % and 6.9 %, respectively. TP and TN were highly removed with 65.5 % and 62.7 %, respectively. Therefore, management of water depth in the fallow paddy not only removed organic matter and nutrient salts but also prevented the field from devastating according to growth of plants.

3) Water quality improvement using the shallow pool and shallows

Water quality were experimented in the fallow paddies installed with shallow pool and shallows for enhancement of the water quality improvement. Removal ratio of SS and BOD were 63.0 % and 40.0 %, respectively. TN and TP were removed with 63.0 % and 42.5 %, respectively. SS, organic matter

and nutrient salts were removed in the fallow paddies installed with shallow pool and shallows. The fallow paddies have a low cover-degree with from 25 % to 30 % owing to control of plants growth according to maintenance of water depth constantly.

4) Water quality improvement using the earthen waterway

SS and BOD were removed with 61.0 % and 29.5 % in the experimental field installed the earthen waterway, respectively. TN and TP were removed with 39.7 % and 15.9 %, respectively. Therefore, it was found that SS, organic matter and nutrient salts were removed in the earthen waterway.

5) Water quality improvement using the pipe drainage system

Effluent concentrations of SS and Chl-*a* were low than that of influent in the pipe drainage system. Concentration of BOD, COD, TN and TP were not difference between influent and effluent. It was found that new improver was developed to improve water quality in the pipe drainage system.

6) Improvement of water quality in the agricultural pool

SS, BOD and COD were removed with 36.2 %, 33.2 % and 25.6 % in the agricultural pool such one among the irrigation-drainage system, respectively. TN and TP were removed 22.8 % and 33.7 %, respectively. It was found that the agricultural pool have an good effect on the water quality improvement.

7) Improvement of water quality in the drop structures

When the concentration of DO was low, the reaeration efficiency was high than that of the high concentration in the drop structures. It was found that the drop structures aerated into water and removed pollutants by microorganism because DO could be constantly maintained.

2. Application

1) Expected effect

- Establishment of water quality management technology in the irrigation -drainage system
- Technology suggestion for improvement of water quality in the irrigation -drainage system
- Technology device using the increasing fallow paddy
- Technology suggestion for environmental-friendly agricultural infrastructure improvement project and decrease of trade war through the transferring agricultural subsidy to the environmental subsidy
- Suggestion of design techniques of the pipe drainage system for water quality management
- Improvement of agricultural environment through management of water quality

2) Recommendation

- Management techniques to prevent the fallow paddy from devastating
- Application to water quality improvement using the fallow paddy
- Application to water quality improvement using the irrigation-drainage system
- Application to environmental-friendly maintenance in agricultural area
- Application to environmental-friendly data of farm land at the trade negotiation

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	19
Section 1. Research needs	19
Section 2. Scopes	23
Section 3. Methodology	27
Chapter 2. Current status of research and development ...	33
Chapter 3. Results and discussion	39
Section 1. Water quality changes in fallow paddy	39
Section 2. Water quality improvement using fallow paddy	70
1. Study area	70
2. Materials and methods	74
3. Characteristics of soil	75
4. Water quality improvement by maintaining water depth	76
5. Water quality improvement by the shallows and shallow pools	96
6. Water quality improvement by the earthen waterway	110
7. Water quality improvement by the pipe drainage	122
Section 3. Water quality management using irrigation and drainage system	132
1. Water quality changes in agricultural pool	132
2. Water quality changes in drop structure	140
Section 4. Conclusions	144

Chapter 4. Achievement and contributions	147
Section 1. Achievement and contributions	147
Section 2. Evaluation points of the study	150
Chapter 5. Strategy for further application	151
Section 1. Strategy for further application	151
Section 2. Recommendation for future studies	152
Chapter 6. Information collected during the study	153
Chapter 7. References	156

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	19
제 1 절 연구개발의 필요성	19
1. 서론	19
2. 국내·내외 관련기술의 현황과 문제점	21
3. 앞으로 전망	22
제 2 절 연구 범위	23
1. 연구개발 내용 및 범위	23
2. 연차별 연구개발 내용 및 범위	24
제 3 절 연구 방법	27
1. 농업수리시스템의 수질정화기능 평가	27
2. 유희(휴경)농지의 수질정화기능 평가	27
제 2 장 국내의 기술개발 현황	33
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	39
제 1 절 휴경지의 수질정화 특성	39
1. 서론	39
2. 이론적 배경	40
3. 어소리 및 토진리 지구 개요	43
4. 어소리 및 토진리 지구 토양현황	46
5. 휴경지의 수질변화 특성	48
제 2 절 휴경지를 이용한 수질개선기능 강화	70
1. 연구대상지구 현황	70

2. 재료 및 방법	74
3. 석문지구의 토양특성	75
4. 휴경지의 담수관리에 따른 수질개선	76
5. 여울 및 웅덩이 조성을 통한 수질개선	96
6. 흙수로 조성을 통한 수질개선	110
7. 암거배수에 의한 수질정화	122
제 3 절 농업수리시스템을 이용한 수질관리	132
1. 저류지에서의 수질변화	132
2. 낙차공의 수질정화기능	140
제 4 절 결론	144
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	147
제 1 절 연구개발목표 달성도 및 관련분야 기여도	147
제 2 절 평가 착안점	150
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	151
제 1 절 연구결과의 활용계획	151
1. 기술적 측면	151
2. 경제·산업적 측면	151
제 2 절 추가연구의 필요성	152
제 6 장 연구개발과정에서 수립한 해외과학기술정보	153
제 7 장 참고문헌	156

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 필요성

1. 서론

1990년대부터 외국으로부터 값싼 농산물의 수입과, 농촌 인건비, 제반 영농비와 농산물 가격의 불균형으로 인하여, 영농여건이 불리한 지역에서 경작을 포기하는 경지가 많아지고 있다(Jung et al., 1998). 최근 몇 년간 휴경지 변화추이를 살펴보면 논에 비하여 타 용도로 전환하기 쉬운 밭의 경우, 전체 밭 면적의 4.8%까지 휴경율이 증가한 적도 있으며, 2002년에는 논 휴경율은 0.5%, 밭은 이보다 4배가 많은 2.0%에 이르렀다. 특히, 2003년도에는 논 휴경율이 2.3%, 밭 휴경율은 2.8%로서 전년도에 비하여 논은 4.6배가 증가하였고, 밭은 1.4배 증가하였다.

농지이용에 대한 규제를 완화하려는 사회적 분위기와 더불어 경제적 이익을 목적으로 농지를 타 산업 용도로 전환하고자 하는 농지 소유자들의 욕구에 의해 휴경면적은 앞으로도 증가될 것으로 예상된다. 또한 농업부문의 환경 및 생태계 보전차원에서 농지의 과다 이용에 대한 제한이 제기되므로 계속적으로 문제될 것이 예상된다. 그러나 이러한 사회적 변화에도 불구하고 세계적으로 부족한 식량위기에 대처하기 위해서는 농지를 지속가능한 형태로 보전하기 위한 노력이 필요하겠다(Kwon, 2001).

김 등(2004)은 휴경지를 관리하지 않고 방치할 경우 잡풀뿐만 아니라 관목류가 식생하게 되어 농경지가 황폐화되며, 휴경논의 재경작을 위한 비용으로 10ha당 793,000원(2000년 불변가격 기준)이 든다고 보고하였으며, 이에 따라 휴경논의 관리가 필요하다고 하였다. 권 등(2003)은 휴경전과 후의 잡초발생양상을 연구하기 위해 휴경논을 재경작할 경우와 일반 경작논을 비교하였을 때, 일년생 잡초의 발생이 두드러지며 이에 대한 방제법을 찾아야 한다고 보고하였다. 따라서 국가적인 식량수급 및 경작지 관리차원에서 현재 혹은 향후에 발생하게 될 휴경지를 적절히 관리할 필요가 있다.

다른 한편으로 휴경지는 습지로서의 역할을 하고 있다. 비료와 농약을 사용하지 않으므로 소생태계가 형성되어 생태계 보전이라는 긍정적인 역할도 갖고 있다.

또한 습지는 생태계 보전뿐만 아니라 수질정화기능도 갖고 있으므로 휴경지를 수질정화의 공간으로 활용한다면 국토공간의 이용율을 높일 수 있다. 따라서 휴경지에 식생이 번성하여 농경지가 황폐화되는 것을 방지하면서 수질정화기능도 갖도록 관리하기 위한 기술을 개발할 필요가 있다.

한편 농업수리시스템은 지금까지 용수의 원활한 공급과 배수를 주목적으로 건설되고 관리되었다. 그러나 농업용수의 수질오염이 심화됨에 따라 수량관리 뿐만 아니라 수질관리의 중요성이 부각되고 있다. 농업수리시스템이 고유의 기능인 원활한 용수 공급과 배수를 유지하면서 가능하면 수질정화기능도 겸할 수 있도록 할 필요가 있다.

농업수리시스템과 유희농지를 유용하게 활용하기 위한 연구개발의 필요성을 기술적, 경제·산업적, 사회·문화적인 측면에서 기술하면 다음과 같다.

가. 기술적 측면

논 지대에서는 대부분 관개용수가 농업수리시스템을 유하하면서 반복 이용되는 광역용수라는 특징을 갖고 있으므로 농촌지역의 수질관리를 위해서는 이러한 물 흐름 특성을 이해하고, 그 흐름 속에서 수질관리방안을 수립하기 위한 기술을 개발할 필요가 있다.

농촌지역 물 흐름의 중추를 이루고 있는 농업수리시스템은 지금까지 수량관리 위주로 개발되었으나, 농촌지역의 수질이 악화됨에 따라 수질관리를 고려한 농업수리시스템 및 구축기술을 개발할 필요가 있다.

농업수리시스템 및 이 시스템 내에서 물을 이용하는 농지의 친환경적 이용기술을 개발하여 농업의 친환경성을 증대시킴으로써 농업보조금을 환경보조금 등으로 대체함으로써 농업보조금 지급에 따른 통상마찰을 피하고 농민의 안정적 수익기반을 구축할 필요가 있다.

선진 외국에 비해 친환경적 농업농촌정비 기술개발이 미진하므로 우리나라의 농업농촌을 풍요롭게 지키기 위해서는 친환경적 농업농촌정비 기술을 확립해 나가야 한다.

최근 주곡 수급의 불안정, 농어촌지역의 고령화 등으로 휴경지가 증가되고 있으나, 이를 적절히 관리하지 않으면 농경지가 황폐화되어 농경지로 재이용시 많은 어려움이 있으므로 이들 유희농지를 다면적 공간으로 활용하기 위한 기술을 개발할 필요가 있다.

따라서 농업수리시스템 및 휴경농지를 친환경적으로 이용하고, 또한 수질개선시설로서 뿐만 아니라 생태계보전공간(biotope)의 기능도 발휘할 수 있도록 정비할 필요가 있다.

나. 경제·산업적 측면

농업용수의 수질이 악화되어 이를 개선하기 위한 투자의 필요성이 높아지고 있으므로 농업수리시스템 내에서의 적절한 수질관리를 통해 농업용수 수질개선 비용을 줄일 수 있는 기술을 개발할 필요가 있다.

또한 쌀 과잉생산이 사회적 문제로 대두어 쌀생산조정 및 논농업직불제 사업 등 쌀 생산 수급을 조절하기 위한 정책의 도입 등으로 휴경지가 증가되고 있으므로 이들 휴경지의 유효이용방안을 수립할 필요가 있다.

따라서 휴경지와 같은 유휴농지를 수질정화시설 등 다면적으로 이용하기 위한 기술을 개발할 필요가 있다.

다. 사회·문화적 측면

환경보전형 시설에 대해서는 보조금지급에 따른 통상마찰을 해소할 수 있으므로 친환경적 농업수리시설 및 휴경농지 이용방안을 개발하여 농촌의 소득 및 환경을 보전해 나갈 필요가 있다.

2. 국내·내외 관련기술의 현황과 문제점

외국에서는 농업생산활동이 이루어짐으로서 발생하는 국토 환경보전 등 다면적 기능의 적절한 평가나 기능의 충분한 발휘를 위한 연구가 이루어지고 있다. 이 중 수질보전기능은 종래부터 田渊(1991, 1996) 등이 논의 탈질기능 연구나 지형연쇄에 의한 질산성질소 등의 제거기능에 관하여 연구하였다.

中村(1998)은 관개용수의 환류에 의한 하천수질의 희석효과에 관하여 연구하였고, 谷山(1989)이나 大久保(1993) 등은 수로의 자정작용에 관하여 연구하였다.

端憲二(1996)는 휴경지를 이용한 수질개선에 관한 연구에서 휴경지의 생태계 및 수질보전기능에 대하여 평가하는 등 수로, 휴경지, 논 등 농업수리시스템 내의 단위 시설에서의 수질보전기능에 대하여 연구하였고, 高橋(1999, 2000, 2001) 등은 농업수리시스템을 이용한 수질환경보전에 관한 연구에서 농업수리시스템과 수질환경의 여러 가지 관련성에 대하여 평가하였다. 齋藤(2000) 등은 농업용 용

배수로와 하천이 유기적으로 결합되어 반복이용을 되풀이하면서 유역의 수질환경을 보전하는 기능을 한다고 평가하는 등 농지 및 농업수리시스템이 수질보전에 미치는 역할에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다.

우리나라의 경우 오 등(2002)은 관개기 대구획 광역논에서의 오염부하 원단위 연구를 통하여 관개기 동안의 오염물질(질소, 인 및 COD)의 물질수지 특성을 파악하고 오염부하 원단위를 산정한 바 있으나, 휴경논에서의 수질관리에 관한 연구개발은 미흡하다. 지금까지 휴경지에 관한 연구는 대체로 잡초 생태적 특성과 토양의 물리성 및 미생물 변화에 관한 것으로 주로 잡초생태에 대한 연구가 이루어 졌다(Kwon et al., 2003). 자연재해 등으로 인하여 쌀 재고량이 부족할 경우 휴경지를 다시 농경지로 이용해야 하나 이를 대비하여 휴경지를 적절히 관리하고, 또한 수질정화공간으로 활용하기 위한 기술개발에 대한 연구는 미흡한 실정이라고 보고하였다(Kim et al., 2004).

또한 농업수리시스템은 지금까지는 수량위주로 농업용수를 관리해왔기 때문에 이들을 다면적으로 이용하기 위한 기술개발이 미진한 실정이다.

농업용수 수질개선사업은 저수지 내 또는 하천 내에서의 수질정화 위주로 개발되어 시설의 규모가 커지고, 유지관리가 어려운 문제점이 있으므로 유희농지를 이용하여 농업수리시스템과 같은 유역의 전체적인 물흐름 속에서의 소규모 분산적 수질개선기술의 개발이 시급한 실정이다.

3. 앞으로 전망

고령화의 가속화, 통상압력의 강화 등 국내외적인 영농여건의 악화로 농업경영이 어렵게 됨에 따라 휴경지는 계속 증가될 것으로 예상되므로 휴경지를 유효하게 이용하기 위한 기술개발 특히 친환경적 이용에 대한 필요성이 증대되기 때문에 수질정화에 이용하기 위한 기술개발의 필요성도 증대될 것으로 판단된다.

또한 농업용수의 수질이 악화되고 있어 이를 개선하기 위한 투자가 증대될 것으로 판단되므로 광역단위의 수질관리체제 구축에 대한 필요성도 높아질 것으로 판단된다. 그린투어리즘과 연계하여 농업수리시설을 친환경적으로 정비하기 위한 사업이 확대될 것이므로 이에 대한 연구개발의 필요성은 증대될 것으로 판단된다.

제 2 절 연구 범위

1. 연구개발 내용 및 범위

가. 농업수리시스템의 수질정화기능 평가 및 강화방안 도출

- 쌀생산 조정제 농지 등의 유희(휴경)농지 조사 분석
- 유역폐쇄가 가능한 연구대상지구 선정
- 풍리구역의 특성 및 용배수계통 조사
- 저류지, 낙차공 등의 수질정화기능 평가 및 강화방안 도출

나. 유희(휴경)농지의 수질정화기능 평가

- 농업수리시스템 내 연구대상 농지 선정
- 연구대상 농지의 물수지 조사분석
- 기상조사, 토양의 물리·화학성 조사
- 연구 대상농지에서 유입수 및 유출수의 오염농도 비교 조사 및 분석

다. 유희(휴경)농지의 수질정화기능 강화방안 제시

- 유희농지 표면의 다양한 변화에 의한 수질정화기능 강화
 - 웅덩이, 여울 조성에 의한 강화
 - 소규모 흠수로 조성에 의한 강화
- 토양흡착에 의한 강화 및 농지이용율 증대 방안
 - 수질정화형 암거배수도입으로 수질정화기능 강화
 - 고소득 발작물 재배 등 농지의 이용율 증대방안 검토
 - 정화효율 향상 및 시설의 적정관리를 위한 유지관리방안 모색

2. 연차별 연구개발 내용 및 범위

구 분	연구개발 내용 및 범위
1차 년도 (2003 - 2004)	<p>연구대상지구선정 및 기초조사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 대상지구선정을 위한 자료수집, 현장답사 - 유역폐쇄가 가능한 연구대상지구 선정 - 물리구역 특성, 용배수계통, 토지이용현황 조사 <p>농업수리시스템의 수질보전기능 평가</p> <ul style="list-style-type: none"> - 단위 농업수리시스템 선정 - 취수용수의 유입부하량 조사 - 단위 농업수리시스템 말단에서의 수질변동 조사 - 저류지, 낙차공의 수질변화 특성 조사 <p>유희농지의 물수지 조사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 농업수리시스템내 조사연구용 단위 필지의 (유희)농지 선정 - 증발량, 침투량, 유입 및 유출수량 측정장치 설치 및 측정 - 기상 조사, 토양특성조사 - 물수지분석 - 옹덩이 및 여울 조성

구 분	연구개발 내용 및 범위
2차 년도 (2004 - 2005)	<p>저류지를 이용한 수질개선기능 강화</p> <ul style="list-style-type: none"> - 저류지의 부유물질 침전기능 평가 - 유입수 및 유출수의 수량 및 수질조사 <p>낙차공을 이용한 수질개선 기능 강화 (모형실험)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 낙차공의 재폭기효과 분석 - 유입부 및 유출부의 DO농도 조사 <p>농업수리시스템에서의 수질변화 특성 조사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 유입하천에서 차지하는 농업용수의 비율 및 하천수질 - 취수용수의 유입부하량, 단위 농업수리시스템 말단에서의 수질 변동 조사 <p>소규모 흙수로 굴착에 의한 강화</p> <ul style="list-style-type: none"> - 소규모 흙수로 조성에 의한 체류시간 연장 - 유입·유출 수량 및 수질조사 - 침전물 조사 <p>웅덩이 및 여울 조성에 의한 강화</p> <ul style="list-style-type: none"> - 웅덩이나 여울을 반복하여 조성함으로서 생물의 생식환경을 복잡하게 하여 수질정화기능 평가 - 여울부분에서 일어나는 재폭기에 의한 산소 공급효과 유도 - 웅덩이에서 유속 저하에 의한 부유물 침전기능 유도 - 유입·유출 수량 및 수질조사 <p>암거배수에 의한 수질개선기능 강화</p> <ul style="list-style-type: none"> - 대상농지 토양의 물리적 특성 및 화학적 특성 조사 - 기존 자료 및 현장조사 결과에 기초한 암거배수시설 설계 및 시공

구 분	연구개발 내용 및 범위
3차 년도 (2005 - 2006)	<p>암거배수의 수질정화효과 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> - 증발량, 침투량 측정 - 유입·유출수의 수량 및 수질 측정 - 토양특성조사 <p>소규모 흙수로 조성 휴경지에서의 수질정화기능 평가</p> <ul style="list-style-type: none"> - 흙수로 유입·유출 수량 및 수질조사 - 침전물 조사 <p>웅덩이 및 여울 조성 휴경지에서의 수질정화기능 평가</p> <ul style="list-style-type: none"> - 유입·유출 수량 및 수질조사 - 침전물 조사 <p>농업수리시스템에서의 수질변화 특성 조사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 단위 농업수리시스템 말단에서의 수질변동 조사 - 저류지, 낙차공의 수질변화 특성 조사 <p>농업수리시스템 내에서의 광역수질관리 방안 수립</p>

제 3 절 연구 방법

1. 농업수리시스템의 수질정화기능 평가

가. 연구대상지구 선정

- 경지정리가 완료되어 단위 농업수리시스템의 구분이 명확한 곳
- 연구의 정확성을 위하여 유역폐쇄가 가능한 유역 선정
- 단위 농업수리시스템 내에 낙차공, 저류지 등 농업수리 시설이 다양한 곳
- 지속적인 조사 및 관리가 용이한 곳
- 가능한 한 연구기관으로부터 가까운 곳

나. 현지답사 및 청취 : 지역의 사회·문화적 특성, 수리관행, 영농기간, 주요작물 등 조사

다. 물리구역의 특성 조사 분석 : 연구대상 물리지구의 농지이용현황, 논농업직불제 대상농지, 쌀생산조정제 농지, 휴경지 등 파악

라. 지형도를 이용하여 구획의 크기 및 용배수계통 조사 → 수질 및 수량측정 장소 선정

마. 토양도를 이용하여 토양, 토성 등 조사

바. 유입하천, 취수구, 농업수리시스템 말단에서의 수질 및 수량 조사

사. 기타 농업수리시설(낙차공, 저류지 등)에서의 수질변화특성 조사

아. 유량조사는 수질조사와 병행하여 실시하고, 영농기간의 수량변화상황을 파악하기 위하여 자동수위측정기를 설치하여 상시측정도 병행

2. 유희(휴경)농지의 수질정화기능 평가

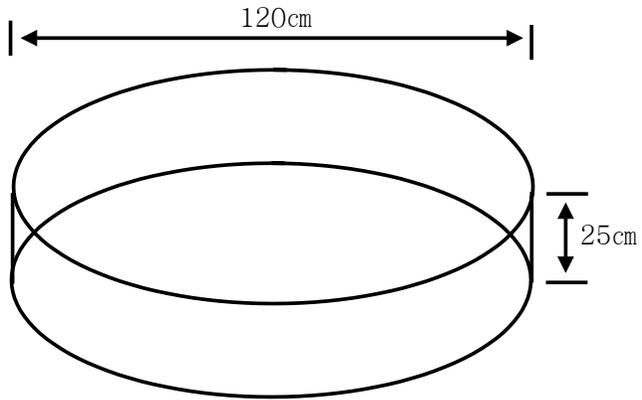
가. 농업수리시스템 내 연구대상 농지 선정

- 선정조건 : - 연구대상 단위 농업수리시스템 내에 있는 농지
- 벼를 주로 경작하고 있는 논지대에 위치한 농지

나. 기상조사 및 물수지 조사분석(증산량, 침투량 등)

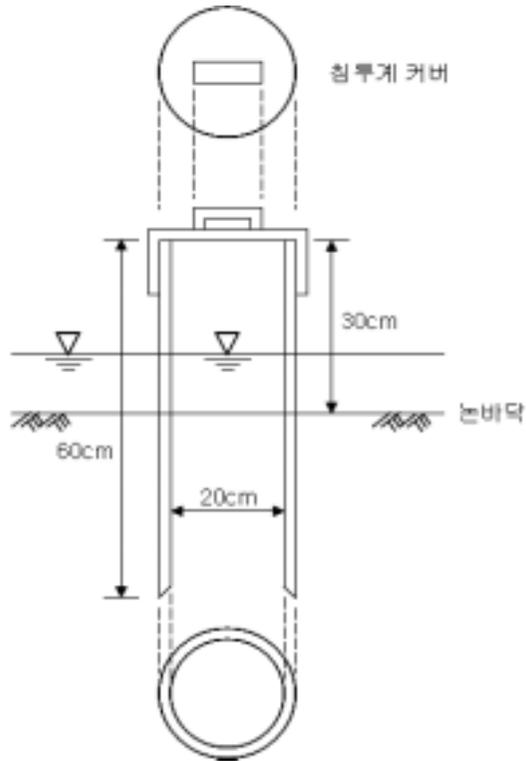
- 기상조사 : 강우량, 일사량, 상대습도 등의 자료를 지배관측소에서 수집

- 대형 증발계를 이용하여 증발량 측정



대형 증발계

- 침투량 측정장치를 이용하여 침투량 측정



- 토양의 물리·화학적 조사 : 영농시작 전과 추수 후에 각 1회 측정
- 연구 대상농지에서 유입수 및 유출수의 수량 및 오염농도 비교 조사 및 분석
- 유입수 및 유출수량 측정 : 유입구 및 유출구에 웨어 및 수위계를 설치하여 조사

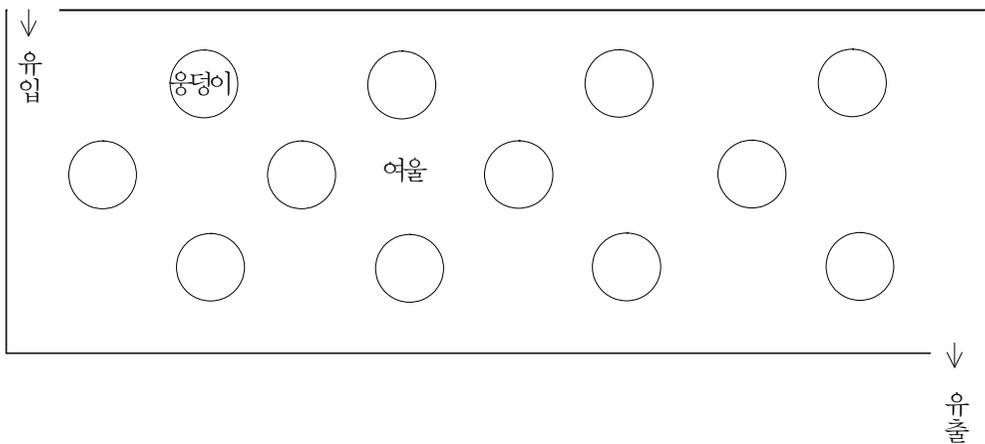
다. 농업수리시스템의 수질정화기능 강화(모형실험)

- 낙차공의 월류부 형상에 따른 재폭기효과 비교
- 낙차고 변화에 따른 재폭기효과 비교
- 낙차공 물방석에서의 재폭기효과 분석

라. 유희(휴경)농지의 수질정화기능 강화

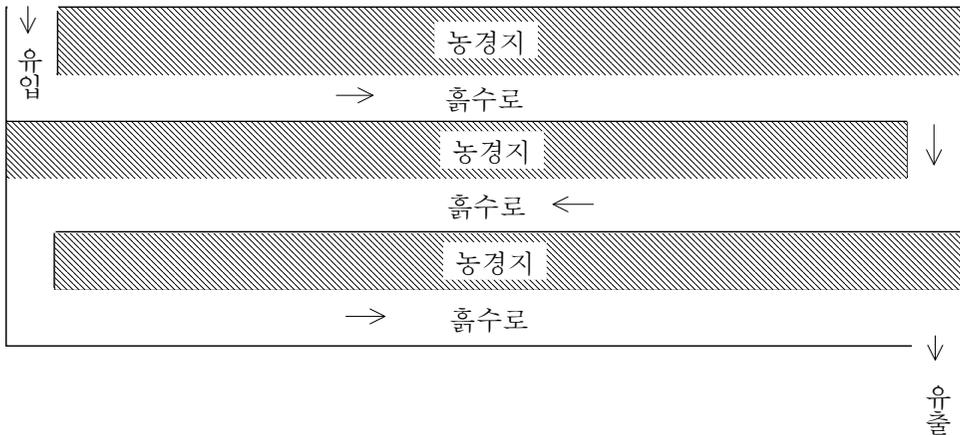
■ 웅덩이, 여울 조성에 의한 강화

- 0.5m×0.5m의 웅덩이 조성
- 웅덩이 간격 : 3m
- 웅덩이 수는 포장조건에 따라 조정
- 여울부분에는 표면에 굴곡 조성
- 유입수 및 유출수의 수량 및 농도 측정
- 웅덩이의 퇴적물 조사 : pH, EC, CEC, 총인, 총질소, 유기물함량, 유효인산, 산화환원전위



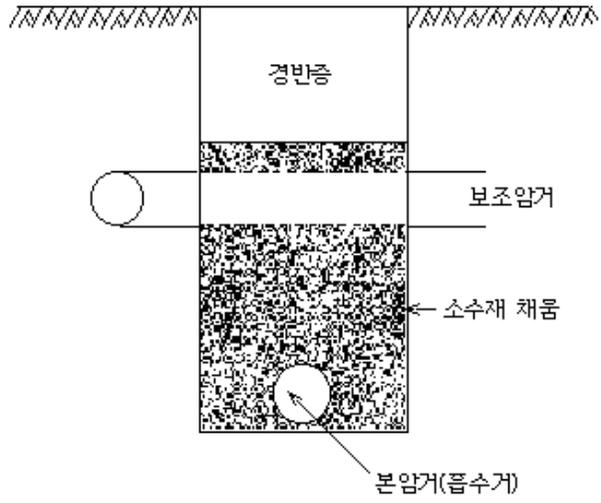
■ 소규모 흠수로 굴착에 의한 강화

- 흠수로의 규격 : 폭 - 0.5m, 깊이 - 0.5m
- 수로사이의 간격 : 2 ~ 3m
- 흠수로의 길이 : 20 ~ 80m (포장조건에 따라 조절)
- 흠수로 유입·유출 수량 및 수질 조사



■ 쌀생산조정제 대상 유희농지의 토양흡착에 의한 수질개선기능 강화 및 농지이용율 증대 방안

- 기존의 참고자료 및 설계기준을 바탕으로 암거배수 도입
- 시험포장의 선정 : 가능한 한 쌀생산조정제 대상농지 등의 유희농지 선정
 - 암거배수 설계
 - 작토층의 두께와 현장투수계수 측정
 - 암거간격의 결정
- 수질정화형 암거배수조직의 시공
 - 준비-가설-거선설정-자재배치-굴착-암거포설-소수재투입-뒤채움
 - 잔토처리-자갈제거 순으로 시공
- 암거배수 유입수 및 유출수의 수질 및 수량 조사



<암거 단면>

제 2 장 국내외 기술개발 현황

옛날부터 습지는 수질정화, 홍수조절, 생물다양성 보존의 장소로 그 기능이 평가되면서, 최근에는 특히 습지복원, 유효이용이 주목을 모으고 있다. 수질 정화 면에서는 하천, 호소, 수로 등의 수질정화에 휴경논, 습지를 이용하는 사례가 늘고 있다. 오수를 직접 정화용 습지에 유입시켜 완전하게 처리하는 것이 이상적인데, 일본에서는 위생상(병원균)으로나 주변환경(악취 등)에 미치는 영향 등 때문에 일정 기준을 만족시킨 후에 고도처리하는 경우에만 적용이 가능하다. 그러나 일정한 수준으로 처리하여 방류되지만 방류구역의 유량이 충분하지 않은 지역에서는 질소·인 등 부영양화 요인이 해소되지 않는다.

하수 고도처리법으로 식생습지를 이용하는 경우 저농도 하수를 처리하면 고도처리비용 절감효과가 기대되며, 오수처리시설과 자연생태계 사이의 완충지대로 이용하면 생태계 보전에도 도움이 될 것으로 생각된다. 적용 장소로는 도시부 하수도 방류구역의 하천부지나 수로에서의 이용 또는 농촌과 산간지역의 생활 잡배수처리와 농업배수 재이용을 위한 휴경논 등에서의 이용을 생각해 볼 수 있다.

휴경지가 증가되고 있음에도 불구하고 아직까지 우리나라의 경우 수질정화를 목적으로 휴경논을 활용하고 있는 사례는 극히 찾아보기가 힘들다. 우리와 인접한 일본의 경우는 농업인의 감소, 고령화 등 우리의 농촌과 비슷한 현실을 가지고 있으며 휴경지가 증가하고 있는 상황에서 수질정화나 생태계 보전의 수단으로서 일찍부터 휴경논을 활용하고 있다.

이러한 배경에서 일본의 연구를 중심으로 휴경논을 이용한 수질정화방법에 관련된 기술개발 현황을 살펴보면 다음과 같다.

野田(1991)은 ‘휴경논과 잡초’라는 연구를 통하여 휴경논 방치에 따른 잡초의 성장과 이에 따른 인접논의 영향에 대해서 분석하였다. 휴경지의 방치에 따른 문제점으로서 잡초종자의 공급원, 경지의 황폐화, 토양의 물리적 구조 변화, 유해동물의 번식지 등을 제시하고 있으며, 이에 대한 방지책으로서는 제초제 살포, 담수, Cover Crops, Soft weeds의 적극적인 도입, 비오톱 조성, 수질정화공간으로서의 활용 등을 제시하고 있다. 북해도 농정국에서는 에코 빌리지 창출 시험 습지 비오톱의 다면적 기능의 평가와 정비 기법의 개발을 목적으로 4년 동안(2000~

2004년) ‘휴경논 등을 활용한 습지 바이오톱의 생물 서식 공간 및 수질 정화 기능의 평가(2004)’라는 연구를 수행하였다. 이 연구는 생물 서식 공간에 대한 사회적 관심이 커지고 있는 일본의 사회적 요구에 부응하기 위하여 수생생물의 서식 및 수질 정화 장소로서의 특징을 가지고 있는 습지를 개발하기 위한 방법의 하나로써 농촌 지역에 존재하는 휴경논 등을 적극적으로 활용하는 방법을 연구하였다. 휴경지를 대상으로 모델 시험지를 선정하여 시험지를 주요 휴경발형 관리구, 논형 관리구, 갈대 방치구, 자연 방치구로 분리한 후, 생물 서식 공간으로서의 평가(1999~2003년)를 위하여 ① 모델 시험지 전체의 식물 및 수생동물 조사, ② 잠자리류의 우화껍질 조사, ③ 수중 및 퇴적층 중의 수생동물의 정량 조사, ④ 주변 논 전체의 식물 및 수생동물의 정성 조사를 실시하였다. 그리고 수질 정화 기능의 평가(2000~2002년)를 위해서 봄~가을에 표면 유입수와 표면 유출수의 수질 및 유량을 측정하여 병렬구로 비교했다. 주된 수질 분석 항목으로서 T-N, NO₃-N, T-P, SS, COD 등을 조사하였다. 마지막으로 주변 논에 대한 영향 조사(2000~2003년)를 위하여 시험지내 및 주변 논에 대하여 해충의 발생 밀도를 조사했다. 이상의 연구를 통하여 시험지 전체에서 확인된 생물의 종수는 314종으로 비교 논보다 다양한 생물이 서식하는 것을 발견하였으며, 이러한 식물은 수생동물의 상호 관계는 물론 식물군락의 입체적인 구조나 식물 연쇄가 크게 관여하고 있는 것으로 보고하였다. 수질의 경우는 봄부터 가을에 걸쳐 T-N, NO₃-N, T-P, SS, COD에 대한 수질 정화 기능이 확인되었다. 종합적인 수질정화 효율을 향상시키기 위해서는 개방 수면과 식물체 및 적당량의 식물 사체의 존재 또는 그 배치가 중요하다고 결론짓고 있다.

山本(2003)은 ‘논바이오톱의 연속성에 근거한 농촌 환경 특성의 유형화’라는 연구에서 국토수치정보의 토지이용데이터로부터 논바이오톱의 연속성을 나타내는 논 JOIN수를 계산하여 농촌 환경 특성을 분석했다. 1976년과 1991년 논에 대한 연속성이나 논과 주변 토지 이용의 위치관계가 유사한 곳을 대상으로 6개의 유형으로 구분하여 변화 요인을 규명했다. 이러한 연구의 목적은 논은 얇은 지수역(논), 폭이 좁은 유수역(수로), 초원, 임지 등 여러 가지 형태로 농촌 생물에게 다양한 생식 공간(바이오톱)을 제공하고 있다. 그러나 생물상에 있어 불가결한 논은 여러 가지 여건에 의해 면적 감소뿐만 아니라, 평양지대의 대규모화, 산간의 불규칙한 논 모양 등 논 바이오톱의 연속성이 저하되고 있다. 따라서 기존의 지리 정보에 의해 국토 규모로 논바이오톱의 연속성을 유형화하여, 그 변화 실태를 규명하였다. 竹内

(2004)는 휴경논 등을 활용한 습지 비오톱은 환경 교육의 장소로서 자유로운 활동이 가능하며, 생물다양성이나 생물서식의 지속성을 확보하기 쉽다. 따라서 환경교육에 좋은 장소이며 잠재적 요구도 커서 농촌지역 활성화에 활용성이 높다는 점에 착안하여 ‘휴경논 등을 이용한 습지비오톱의 환경 교육의 장소로서의 역할’이라는 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 말하고 있다. ① 많은 아동들이 농촌지역에 대해 관심이 높으며, 농촌지역의 다양한 형태의 환경에서 생물을 대상으로 한 자유로운 활동을 기대하고 있다. 또한 도시지역의 교원과 환경교육단체 직원은 농촌지역에 흥미를 가지고 있어 아동보다 습지에 대한 관심이 높고, 생물을 대상으로 관찰이나 연구 활동을 기대하고 있다. 또한 환경 교육의 장소로서 자유로운 활동이 가능한 생물이 서식 할 수 있는 습지 비오톱은 잠재성이 높은 장소로 판단된다. ② 습지 비오톱을 ‘자연 환경형’, ‘중간형’, ‘신규 창출형’으로 분류했다. 현재 많은 습지 비오톱은 자유로운 출입이 제한되어 있다. ‘신규 창출형’에 있어서 출입을 금지하는 이유는 생물서식의 지속성 저하를 방지하기 위해서이다. ③ 지표생물의 생식 환경으로부터 보면, 농촌지역은 도시지역보다 서식공간 끼리의 연결(비오톱의 네트워크)를 확보하기 쉽다. 또한 연구대상지역의 경우 많은 지표생물이 발견되어 도시지역의 습지비오톱보다 생물의 다양성과 생물서식이 지속적으로 유지될 수 있는 것으로 나타났다. ④ 연구대상지는 「생물개체의 발견이나 포획의 용이함」, 「생물다양성 확인의 용이함」, 「강 또는 주변의 임야나 농지와 생태계적 및 활동적 연속성」을 가지고 있으므로 이곳을 대상으로 환경학습을 한 어린이들의 수준이 상당히 향상되었다. 그리고 최종적으로 휴경논 등을 활용한 습지 비오톱은 자유로운 활동이 가능한 생물의 다양성이나 생물 서식의 지속성을 확보하기 쉬우므로, 시대적 요구에 알맞은 환경교육의 장소로서의 역할을 가지고 있다고 밝히고 있다. 또한 須田(2003)은 비오톱에 대한 사회적 관심이 커지고 있으며, 특히 습지 비오톱은 수생생물의 서식 및 수질 정화 기능이나 사람과 수환경을 연결시켜주는 장소로서의 특징을 가진다. 농촌 지역의 휴경논 등의 적극적 활용의 하나로서, 습지 비오톱을 조성한 사례를 대상으로 다면적 기능 중 생물 다양성 보전 기능 및 수질 정화 기능에 대해 검토하기 위해서 ‘휴경논을 활용한 습지 비오톱의 생물 다양성 보전 기능·수질 정화 기능’이라는 연구를 통하여 다음과 같은 4가지 결론을 밝히고 있다. ① 각 처리구에서는 환경적인 차이에 따라 각각의 환경을 좋아하는 생물이 서식 하고 있다. ② 연구대상지는 유하형의 습지이며, 봄부터 가을에 걸쳐 수질 정화 기능이 있는 것으

로 확인된다. 처리 구간을 비교한 결과, $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 정화율은 자연 방치구가 제일 크고, 수온 상승을 위한 개방 수면과 토양 표층의 식물 사체의 존재가 중요하다. 논형 관리구 및 자연 방치구에서는 생물 활동에 의한 토양 교란의 영향으로 SS의 정화율이 저하되는 예도 발견되기 때문에 갈대 방치구가 위험이 적다고 판단된다. ③ 연차가 진행되면서 식물 사체로부터의 용출 등으로 T-P 및 COD의 정화율이 저하된다. 따라서 이러한 정화를 위해서는 식물 사체의 제거가 중요하다. 이상의 결과로부터 종합적인 수질정화효율 향상을 위해서는 개방 수면과 식물체 및 적당량의 식물 사체의 존재, 혹은 그 배치가 중요하다. ④ 연구대상지와 그 주변 논에서의 해충 조사 결과에 의하면, 연구대상지에서는 해충의 밀도는 높았지만, 주변의 논에서 관행 방제가 이루어지기 때문에 피해를 미칠 정도의 밀도에는 이르지지는 않았다. 이러한 결과는 연구대상지가 주변의 논에 대해서 해충을 다량 발생시키는 원인이 아니라고 판단된다. 그리고 최종결론에서 농촌 지역의 휴경논 등을 활용할 경우, 수생생물의 생식 공간이나 수질 정화 기능을 양립하는 경우에는 봄부터 가을까지의 관개, 식생과 식물 사체의 존재를 다양화하는 식생의 관리가 중요하다고 고찰하였다. 谷元(2003)은 휴경논의 담수관리는 토양 구조의 보전과 함께 생물 서식 공간 제공, 지하수 함양, 수질 정화 등의 다면적 효과도 기대된다. 그러나 담수관리를 계속하면, 식생이 1년생 식물로부터 다년생 식물로 천이되어 다년생 식물의 군락이 우점하는 시점에서 논으로의 복원이 곤란하게 된다. 따라서 경작의 빈도와 담수관리를 달리한 휴경논에 있어서 식생 천이의 차이를 규명한다는 목적으로 ‘담수관리휴경논의 식생 천이와 관리 기술’이라는 연구를 수행하였다. 연구방법은 담수관리구와 통상 관리구를 마련해 담수 관리구는 2000년부터 4년간 상시담수, 통상 관리구는 2001년부터 4월에 관개, 9월에 낙수하는 관리로 했다. 평균 수심은 약 10 cm이다. 경운 작업은 양쪽 모두 5월에 로터리경을 실시하였다. 이에 따른 연구결과로서는 ① 항공사진을 통하여 담수 관리구의 식물종 면적을 조사했다. 논으로의 복원에 곤란한 요인이 되는 대형 추수 식물은 담수 3년째부터 급속히 증식 해 포장 전체의 17.4%를, 담수 4년째(2003년)에는 41.9%를 차지하였다. ② 소형 추수 식물의 바이오매스(biomass)량은 통상 관리구보다 담수 관리구에 많지만, 경작하면 그 바이오매스(biomass)량은 1/2이하로 억제된다. 경운과 겨울철 낙수 처리를 실시 한 통상 관리구에서는 다년생 식물의 발생이 억제되어 1년생 식물이 많아진다. ③ 담수관리 휴경논은 대형 추수 식물이 증가하기 시작하는 3년째에 식물제거와 경운이 필요하며,

번식력이 강한 소형 추수 식물의 억제는 경운 혹은 낙수 처리가 유효하다. ④ 2003년에 통상 관리구의 일부를 논으로 복원하여 벼를 재배한 결과, 생육 기간 중 식물종 발생은 통상적인 제초제사용으로 관리할 수 있었다. 등을 제시하고 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 휴경논을 이용한 수질정화는 수질정화 효과는 물론 생태계 보전, 부근 논외 피해감소, 토지보전 등 다양한 효과를 볼 수 있다. 그러나 이러한 연구들은 시험대상지역의 지형적 특성, 토질, 환경 등에 많은 영향을 받고 있으므로 국내에 적용하기 위해서는 우리나라의 휴경논을 대상으로 한 연구가 필요하다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 휴경지의 수질정화 특성

1. 서론

휴경지, 특히 휴경논에 있어서 수질개선은 부착, 여과, 침전 등의 물리적 작용, 식물 및 재폭기에 의한 산소공급, 유기물분해, 질산·인의 제거 등 생물학적 작용에 의해 이루어진다. 구체적인 방법으로서 수심을 얇게 유지하는 지표흐름형 습지형태, 흙수로를 조성하고 여기에 오염된 물을 흘려보내 정화하는 방법, 여울과 웅덩이 등을 조성해 다양한 수심을 갖도록 하여 수질개선을 도모하는 방법 등이 있다.

지표흐름형 습지형태는 휴경논을 그대로 사용하는 방법으로서 농지배수나 밭 등의 유출수를 휴경지에 통과시켜 정화시키는 방법이다. 이 방법은 휴경지를 변형시키지 않고 사용하기 때문에 경제적인 부담이 적다. 그러나 휴경지에서 증식된 조류가 혼입되거나 고사한 식물체의 잔재물이 분해되면 오히려 처리수의 수질을 악화시킬 수 있다.

흙수로를 조성하는 방법은 휴경지 내에 수로를 굴착하여 어느 정도의 수심을 갖고, 수 시간 정도의 비교적 짧은 체류 시간을 갖도록 하여 수질을 정화하는 방법이다. 정화를 위한 반응 시간이 비교적 짧기 때문에 필요에 따라 접촉재를 충진하여 정화효율을 향상시킬 수 있다.

다양한 수심을 갖도록 여울과 웅덩이를 조정하여 수심이 얇은 여울에서는 재폭기에 의해 많은 산소가 유입되어 다양한 미생물이 서식하게 되고, 이 다양한 생물이 수중의 오탁 물질을 포식·흡착하여 수질을 정화한다. 또한 웅덩이 부분에서는 유속이 느리기 때문에 생물에게 포식·흡착되지 않는 대형 물질이나 여울에서 생물막에 의해 박리된 것이 침전됨으로서 수질이 정화된다.

휴경지는 농지로 환원 이용하는 것이 전제가 되어야 하기 때문에 휴경기간 중 잡초가 번성하여 농지가 황폐화되는 것을 방지해야 한다. 이에 더하여 수질개선 효과를 향상시킬 수 있다면 농지를 유효하게 이용하는 것이 될 것이다. 본 연구에서는 휴경지에서의 일반적인 수질개선효과를 살펴보고 잡초의 번성을 방지하

면서 수질개선효과를 달성할 수 있는 기술을 개발하고자 몇 개의 휴경지를 선정하여 수질을 조사하였고, 수질정화효율을 향상시킬 수 있는 방안을 도출하고자 시험포장을 조성하여 조사를 수행하였다.

2. 이론적 배경

휴경지에서의 오염물질 제거기작은 침전, 흡착 등의 물리화학적 작용 또는 생태계에 관계되는 생물화학적 작용 등이 복잡하게 얽혀 있지만, 기본적으로는 ① 입자성 영양물질의 침전·흡착 및 인의 불활성화작용, ② 바닥 퇴적물 중에 서식하는 탈질균에 의한 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$), 아질산성 질소($\text{NO}_2\text{-N}$)의 탈질작용, ③ 유수, 바닥표면, 수생식물의 표면 등에 서식하는 종속영양미생물에 의한 유기물의 분해작용 등으로 요약할 수 있다. 즉, 오염된 물이 습지에 유입되면 오염성분 중 물보다 비중이 큰 부유물질은 중력에 의해 침전되고, 다른 성분은 토양입자에 흡착되기도 하며, 처리시설 내에서 생육하는 식물에 의해 직접 흡수되기도 하고, 또는 토양이나 수중의 미생물에 의해 분해되면서 정화된다.

휴경지에 번성하는 수생식물은 오탁물질을 흡수하거나 분해하는 것만이 아니라, ① 바람을 감쇄시켜 퇴적물의 부상을 억제하고, ② 일조를 막아 플랑크톤의 발생을 억제하며, ③ 물의 흐름을 일정하게 하는 작용을 할 뿐만 아니라, ④ 부착성 미생물의 서식장소를 제공하는 등 다양한 유익한 기능을 갖는다. 또한 뿌리를 통해서 산소를 공급함으로써 미생물에게 서식처를 제공하는 역할을 하여 많은 미생물들이 뿌리 주위에 서식하여 이들로 하여금 오염물질을 신속하고 효과적으로 처리하게 한다.

오염물질의 분해에 이용되는 산소는 식물 뿌리나 대기에 의한 재폭기에 의해서 주로 공급된다. 이 산소의 일부는 뿌리와 지하경의 표면에 수송되고, 여기에 호기성 미생물의 생육환경을 조성해 질산화와 같은 호기적인 반응이 이루어진다.

휴경지에서 식물의 생장에 필요한 영양염류는 토양으로부터 얻는다. 부들, 갈대, 부레옥잠은 여러 종류의 토양은 물론 상당히 미세한 모래자갈에서도 성장한다. 휴경지에서 물은 토양표면을 흘러가기 때문에 가장 활발한 미생물 활동은 유기 퇴적물층의 표면과 식물의 수면 아래 부분에서 이루어진다. 점토질을 함유한 토양은 인의 제거에 대단히 효과적이다.

박테리아, 원생동물로부터 보다 고등한 동물에 이르기 까지 수질정화에 여러 가지 유익한 활동을 하는 미생물이 휴경지에 존재한다.

휴경지에서는 침강성 유기물질의 제거가 대단히 빠르다. 이 침전된 유기물은 그 지점의 산소상태에 따라 호기성 혹은 혐기성 분해된다. 나머지 콜로이드 및 용해성 유기물은 오수가 시스템내의 부착미생물과 접촉함에 따라서 제거되어 간다.

휴경초기에는 유기물의 제거효율이 높으나 시간이 지남에 따라 정화효율이 저하될 수 있는데 이는 고사된 식물 잔재물이나 습지에 잔존하는 자연 유기물의 분해에 의해 유기물이 생성될 수 있기 때문이다.

오수에 들어있는 오염물질 중 부영양화를 일으키는 주요 성분인 질소와 인은 생물이 자라는데 필요한 성분이므로 오수중의 질소와 인은 식물이나 미생물의 영양분으로 흡수되어 제거된다. 그러나 이들 성분들이 과다하게 유입되면 조류가 과잉 번성한다. 이 조류 중에는 사람, 물고기, 다른 조류에 대하여 유독한 물질(독소)을 생산하는 종류도 있으며, 부영양화나 적조현상과 같은 심각한 수질문제를 일으키기도 한다.

오수중의 유기성 질소성분은 미생물에 의해 무기성 질소인 암모니아성 질소($\text{NH}_4\text{-N}$)로 분해된다. 분해된 $\text{NH}_4\text{-N}$ 는 아질산성 질소($\text{NO}_2\text{-N}$), 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)로 산화·분해(질산화작용, nitrification)되는 과정에서 수생식물이나 식물성 플랑크톤에 의해 흡수되어 수질이 정화된다. 또한 습지 토양은 부분적으로 산소결핍 현상이 나타나기 때문에 산소가 없는 환원층이 형성되어 질산성 질소가 혐기성균에 의해 탈질화작용(denitrification)이 일어나 안정된 질소가스(N_2)로 되어 자연계로 되돌아가기도 한다.

암모늄 이온(NH_4)은 이온 교환에 의해 (-)로 하전된 토양입자에 흡착, 부동화(immobilization)되어 잘 움직이지 않고, 점토광물이나 유기물에 강하게 흡착되기도 한다. 일부는 지표수로 이동되기도 하고, 침전물이나 부유물에 부착되기도 하며, 용해되기도 한다. 또한 식물의 뿌리나 혐기성 미생물에 의해서 흡수될 수 있고, 다시 유기물로 변환될 수 있다. 암모늄은 일정한 온도와 용존산소 상태에서 물고기나 수생식물에 수질문제를 일으킬 수 있다. 암모늄 이온은 일정한 토양온도(약 9°C 이상)가 되면 식물의 호기성 근권에서 질산화 작용을 통해 쉽게 질산염(NO_3^-)으로 변화된다. 음이온인 질산염은 (-)하전을 띤 토양입자에 부동화되지 않으므로 훨씬 더 유동성이 크며 수질 문제와 관련된 가장 일반적인 질소 형태이다. 식물이나 미생물에 잘 흡수되지 않고, 다른 방법으로는 잘 이동하지 않는 질산성 질소는 침투수와 함께 잘 이동하여 토양을 통과해 지하수에 도달될 수 있다. 지하수의 질산성 질소는 우물, 침윤, 얇은 흐름을 통하여 지표수를 오염시

킬 수 있고, 더 깊은 대수층으로 이동할 수도 있다. 휴경지와 같은 습지에서 자라는 식물은 먼저 $\text{NH}_4\text{-N}$ 을 흡수하고, $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 흡수가 거의 완료된 다음 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ 을 흡수하기 시작한다. 이와 같이 식물체에 흡수된 질소는 식물체와 함께 휴경지로부터 제거되기도 하고, 작물 잔류물이나 뿌리체로서 토양 중에 남을 수도 있다.

습지에 유입하는 유기태질소는 보통 오수 중의 유기태 고형물이나 조류와 같은 입자체로 되어 있다. SS의 초기 제거는 보통 대단히 빨리 이루어진다. 이 유기태 질소의 대부분은 그 후 분해되거나 무기화되어 수중에 암모니아를 방출한다. 식물의 유기퇴적물과 기타 자연으로부터 발생하는 휴경지내 유기물도 또한 유기태 질소원이 되어 계절적으로 분해가 이루어지면 암모니아를 방출한다.

질산화는 호기조건 하에서 적당한 온도와 충분한 알카리도가 있고, 또한 질산화균이 종속영양생물과 이용 가능한 산소를 둘러싸고 경쟁할 수 있을 정도로 유기물이 거의 제거된 후에 발생한다. 질산화균도 또한 토양표면에 부착하고 있는 경우가 많은 것으로 판단되며, US EPA(1993)는 경험상 습지에서 질산화의 제약조건은 산소를 이용할 수 있는지 여부에 달려 있다고 보고하였다. 이론적인 관계에서는 1 g의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 을 산화하는데 4.6 g의 산소가 필요하다.

습지에서 생물학적인 탈질에 의한 질산이온의 제거에는 무산소상태, 충분한 탄소원, 온도가 허용범위에 있어야 한다. 무산소상태를 확보하기 위해서는 수심이 깊어 산소가 원활히 공급되지 못하는 웅덩이 부분을 조성하여 확보할 수 있다. 수온은 지역의 기후와 계절에 좌우되기 때문에 이용 가능한 충분한 탄소원의 존재가 반응과정을 지배하는 인자가 되는 경향이 있다. 습지에서 주요한 탄소원은 식물 litter와 저층에 존재하는 자연 유기물이다.

질소와 함께 부영양화를 일으키는 주요 성분인 인의 발생량이 증가하면서 수질 문제가 우려되고 있다. 특히 인은 식물의 중요한 영양물질로서 작물의 생산량을 증가시키기 위해서 반드시 필요하기 때문에 농작물을 다량 생산하는 농촌지역에서는 지금까지의 과다시비로 지역적으로는 인성분의 비료를 사용하지 않아도 작물 생산수준을 유지할 수 있을 정도로 토양에 누적되어 있다.

이러한 인성분은 강우나 관개수 유출시 토사와 함께 이동하여 소하천이나 저수지에 유입되어 바닥에 퇴적되고 오랫동안 수중에 용해되며 수질악화를 초래한다. 최근 들어 인의 발생량이 증가한 또 다른 주요 원인들로서는 수세식화장실의 보급으로 농촌지역에서 인성분을 함유한 오수발생량의 증가, 인 성분을 함유한

합성세제를 사용하는 세탁기의 보급, 축산영농의 대규모화와 농작물 찌꺼기의 부식, 소규모 축산농가에서 흘러나오는 폐수 등이 있다. 이렇게 발생된 인은 식물체에 흡수되어 수확시 제거되기도 하지만, 질소성분과는 달리 인산염(PO_4^{3-})은 물에 잘 용해되지 않고 토양에 잘 부착되기 때문에 대부분 토양입자와 함께 이동하여 하천이나 저수지에 유입된다.

이처럼 토양에 쉽게 흡착되고 식물에 직접 흡수되는 인의 성질은 토양과 식물이 있는 휴경지에서 잘 제거될 수 있다. 휴경지에서 인의 제거는 흡착이나 침전의 결과로 이루어진다. 휴경 초기에는 토양입자와의 접촉면에서의 흡착과 초기의 활발한 식물생장과 식물피복의 확대 때문에 인 제거는 효율이 좋다. 그러나 이와 같은 시스템이 평형상태에 달할 때 인 제거는 감소되는 것으로 생각된다. 식물에 의한 흡수는 계속 이루어지지만 그 후의 분해에 의해 인성분 중 일부가 물속으로 다시 유출될 수 있다.

3. 어소리 및 토진리 지구 개요

가. 대상지구선정

연구대상지구는 경기도 평택시, 안성시, 오산시의 일반 휴경지 및 쌀생산조정제 휴경농지 1,095개 필지 중 진흥지역에 위치하며 경지정리가 완료되고 접근이 용이할 뿐만 아니라 유역폐쇄가 가능한 예정지를 일차 선정하였다. 이를 토대로 현장답사를 실시하여 경기도 평택시 어소리와 토진리 지구를 연구대상지로 최종 선정하였다.

어소리 지구는 쌀생산조정제 휴경지가 포함되어 있으며, 용·배수로 및 낙차공 등의 농업수리시설이 정비되어 있는 지역이다.

토진리 지구는 물관리가 이루어지고 있는 쌀생산조정제 휴경지와 물관리가 이루어지지 않는 일반 휴경지 및 수도를 재배하는 농경지가 이웃하고 있어 비교연구에 적합하여 연구대상지로 선정하였다.

나. 연구대상지구 현황

어소리 지구와 토진리 지구는 경기도 평택시 청북면에 위치하고 있다. 평택시의 총면적은 452.31 km^2 이며, 행정적으로는 2읍 7면 13동으로 구성되어 있다. 이 중 청북면은 평택시의 서북쪽에 위치하고 있으며 면적은 51.52 km^2 이다.

어소리 지구는 단위 블록의 논지대를 포함한 농업수리시스템 내에서 수질변화

상태를 살펴보기 위하여 선정하였다.

1) 어소리 지구

○ 위치 : 경기도 평택시 청북면 어소리 답533번지 및 유역

○ 면적 : 쌀생산조정제 휴경지 3,841m²

○ 용배수계통 : 어소리 지구는 평택담수호의 길음양수장에서 양수된 용수가 숙성간선을 통하여 공급되고, 어소리 지구의 농지를 통과한 용수는 배수로를 통하여 진성천으로 유출된다.



그림 3-1 어소리 및 토진리 지구의 위치

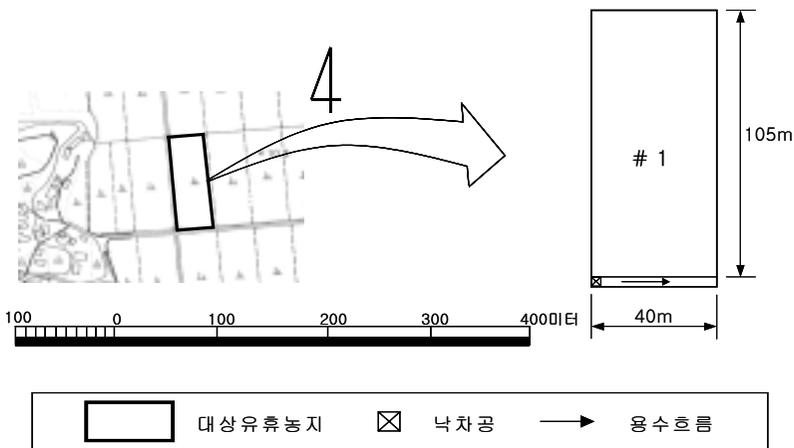


그림 3-2 어소리 지구 조사대상 휴경지 위치도



그림 3-3 어소리 지구 조사대상 휴경지 전경

2) 토진리 지구

토진리 지구는 쌀생산조정제 휴경지와 일반휴경지에서의 수질변화특성을 살펴보기 위하여 선정하였다.

- 위치 : 경기도 평택시 청북면 토진리 답172, 170-9번지 및 유역
- 면적 : 쌀생산조정제 휴경지 2,807m², 일반 휴경지 2,401m²
- 용배수계통 : 토진리 지구는 평택담수호의 길음양수장에서 양수된 용수가 청북간선을 통하여 공급되고, 토진리 지구의 농지를 통과한 용수는 배수로를 통하여 하류의 농지로 유입된다.

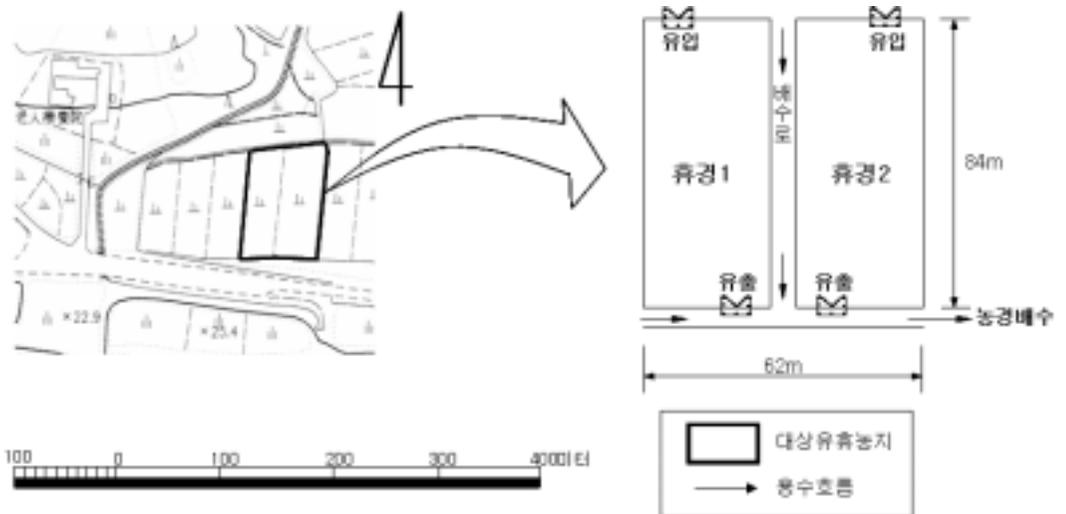


그림 3-4 토진리 지구 조사대상 휴경지 위치도



<쌀생산 조정제 휴경지>



<일반 휴경지>

그림 3-5 토진리 지구 조사대상 휴경지 전경

4. 어소리 및 토진리 지구 토양현황

가. 토양분석 방법

각 시험포 당 3지점에서 시료를 채취하였으며, 토성, pH(1:5), 전기전도도 (1:5), 양이온치환용량, 총질소(Kjeldahl 법), 총인(HClO₄ 분해법), 유효인산 함량 (Bray NO.1법), 유기물 함량(Walkley & Black법)을 측정하였다.

나. 토양특성

토성은 어소리 시험포의 경우 모래(Sand)가 평균 24.7% (20.0~27.0%), 실트(Silt)가 평균 65.0% (63.0~68.0%), 그리고 점토(Clay)가 평균 10.3% (9.0~12.0%)로서 대부분 실트와 모래를 많이 함유한 미사질양토(Silty Loam)로 나타났다. 토진리 시험포의 경우도 Sand가 평균 22.3% (20.0~26.0%), Silt가 평균 59.0% (58.0~60.0%), 그리고 Clay가 평균 18.7% (14.0~22.0%)로서 어소리와 마찬가지로 미사질양토로 나타났다.

pH는 어소리 시험포가 평균 5.2 (5.1~5.6)로서 산성을 나타냈고, 토진리 시험포도 평균 5.3 (5.0~5.6)으로서 산성을 나타냈다. 이 두 포장은 우리나라 논토양 비옥도 조사결과 (1995)인 5.6에 비하여 다소 낮고, 또한 논토양의 적정 pH기준치인 6.5 (농업기술원)에 미달되는 산성토양인 것으로 나타났다. 김세근 (1997)은 휴경년수가 경과할수록 산도가 높아진다고 보고하고 있다. 또한 일반적인 경우에 이전에 배수되었던 토양이 침수되면 대체로 알카리성 토양은 pH가 감소하고 산성토양은 pH가 증가하여, pH가 중성 부근으로 수렴하게 된다고 하였다. 이는 전

자의 경우는 CO₂가 축적되어 탄산으로 되기 때문에 pH가 알카리성 토양에서 감소하고 후자의 경우는 수산화철의 산화에 의해 pH가 산성토양에서 증가한다고 하였다. 따라서 휴경논을 재경작하는 경우를 대비하여 어느 정도 담수상태를 유지하는 등 산성화를 방지할 수 있도록 물관리를 하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

표 3-1 어소리 및 토진리 시험포별 토양분석결과

구 분		어소리 1	어소리 2	어소리 3	평균	토진리 1	토진리 2	토진리 3	평균
입도분석	Sand(%)	20.0	27.0	27.0	24.7	21.0	26.0	20.0	22.3
	Silt(%)	68.0	64.0	63.0	65.0	59.0	60.0	58.0	59.0
	Clay(%)	12.0	9.0	10.0	10.3	20.0	14.0	22.0	18.7
	토 성	SiL	SiL	SiL		SiL	SiL	SiL	
산도 pH (1:5)		4.9	5.6	5.1	5.2	5.4	5.0	5.6	5.3
유기물 (%)		5.13	5.53	6.06	5.60	1.87	2.95	2.33	2.40
유효인산 (ppm)		39.72	22.41	19.20	27.1	4.90	12.27	8.07	8.40
총질소 (mg/kg)		2,394.0	2,967.1	3,539.9	2,967.0	2,192.2	1,373.2	1,113.8	1,559.7
총인산 (mg/kg)		1,019.1	954.2	950.9	974.7	831.4	632.1	536.3	666.6
양이온치환용량 (cmol/kg)		18.85	19.40	19.70	19.30	15.75	15.85	15.50	15.70
전기전도도 (dS/m)(1:5)		0.72	0.95	0.56	0.70	0.39	0.36	0.32	0.40

전기전도도 (EC)는 어소리 시험포의 경우 평균 0.70 (0.56~0.95) dS/m, 토진리 시험포는 평균 0.40 (0.32~0.39) dS/m이었으며, 이 범위 내에서는 습지식물이 번성할 수 있다.

양이온치환용량 (CEC)은 어소리 시험포는 평균 19.30 (18.85~19.70) meq/100g, 토진리는 평균 15.70 (15.50~15.85) meq/100g으로 나타났다. 이는 우리나라 논토양의 평균 CEC인 14.6 meq/100g보다 높게 나타나 비료를 흡수하는 힘인 보비력이 좋은 것으로 나타났다.

총질소 (TN) 함량은 어소리 시험포는 평균 2,967.0 (2,394.0~3,539.9) mg/kg, 토진리 시험포는 평균 1,559.7 (1,113.8~2,192.2) mg/kg으로 나타났다.

총인 (TP) 함량은 어소리 시험포는 평균 974.7 (950.9~1,019.1) mg/kg, 토진리 시험포는 평균 666.6 (536.3~831.4) mg/kg으로 나타났다.

유효인산(Av.P₂O₅) 함량의 경우 어소리 시험포는 평균 27.10 (19.20~39.72) mg/kg, 토진리 시험포는 평균 8.4 (4.90~12.27) mg/kg으로 나타났다. 이들 시험포는 우리나라 전국 논토양 비옥도 조사결과 (1995)인 128 mg/kg이나 적정기준치인 100 mg/kg에 비해 매우 낮은 값을 나타냈다.

유기물 함량의 경우 어소리 시험포는 평균 5.6 (5.13~6.06)%로서 우리나라 전국 논토양 비옥도 조사결과 (1995)인 2.5%이나 적정기준치인 3.0%보다 높은 값을 나타냈다. 토진리 시험포는 평균 2.4 (1.9~3.0)%로서 다소 낮게 나타났다.

5. 휴경지의 수질변화 특성

수질조사는 현장에서 유입수 및 유출수를 채취하여 수온, pH, EC, DO를 측정하였다. 실내분석을 위하여 채취한 시료를 전처리 한 후 신속히 실험실로 운반하여 수질오염공정시험법에 의거하여 수질 항목을 분석하였다.

가. 어소리 지구

어소리 지구 휴경지는 쌀생산조정제 농지로서 2003년부터 휴경을 하고 있으며, 아무런 관리가 이루어지지 않고 방치된 상태의 휴경지이다. 이러한 휴경지에서 수질변화특성을 분석하기 위하여 2003~2004년도에 수질을 조사하였는데, 그 결과는 다음과 같다.

수온은 유입수의 경우 16.6~25.1 °C, 평균 21.4 °C였고, 휴경지 유출수는 16.9~27.1 °C, 평균 22.5 °C였다.

pH는 유입수가 7.0~7.7, 평균 7.5로서 중성을 나타냈으며, 휴경지 유출수는 7.1~7.3, 평균 7.2로서 중성을 나타내 유입수와 휴경지 유출수 사이에 큰 차이가 없었다. 유입수와 휴경지 유출수 모두 농업용수 수질기준인 6.0~8.5를 만족하였기 때문에 휴경지 유출수를 농업용수로 이용하여도 문제는 없다.

EC는 유입수가 336~604 μ S/cm, 평균 510 μ S/cm였고, 휴경지 유출수는 428~625 μ S/cm, 평균 535 μ S/cm를 나타내 유입수와 휴경지 유출수 사이에 큰 차이가 없었다. EC의 경우 농업용수 수질기준은 없지만 미국 캘리포니아 대학교 대외

협력국(UCCES)이 개발한 농업용수 수질기준지침에는 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하에서는 문제가 없는 것으로, 700~3,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서는 오염우려, 3,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상에서는 작물생육에 큰 영향을 미치는 것으로 분류하고 있다. 유입수와 휴경지 유출수 모두 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하를 나타내고 있으므로 휴경지 유출수를 농업용수로 이용해도 작물 특히 수도에 악영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

표 3-2 어소리 휴경지 유입수 및 유출수의 수질

구 분	수온 ($^{\circ}\text{C}$)	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	SS (mg/L)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	$\text{NO}_2\text{-N}$ (mg/L)	$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L)	$\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/L)	TP (mg/L)	$\text{PO}_4\text{-P}$ (mg/L)	Chl- <i>a</i> (mg/m^3)	
어소리 유입수	최소값	16.6	7.0	336	8.8	2.8	0.1	9.2	3.94	0.06	0.72	0.15	0.12	0.01	7.40
	최대값	25.1	7.7	604	42.0	5.1	20.3	13.8	10.04	1.22	3.69	9.37	0.39	0.23	37.30
	표준편차	3.6	0.2	100	10.1	0.8	9.0	1.8	2.00	0.50	1.27	3.22	0.10	0.08	12.07
	평균	21.4	7.5	510	25.9	4.0	8.3	11.3	6.23	0.54	2.34	3.24	0.19	0.07	20.96
어소리 유출수	최소값	16.9	7.1	428	16.0	1.5	3.0	11.5	2.28	0.09	1.05	0.03	0.10	0.00	3.00
	최대값	27.1	7.3	625	95.8	3.8	21.3	17.4	8.37	0.44	4.38	5.42	0.41	0.26	14.20
	표준편차	4.2	0.1	87	30.5	1.0	8.6	2.4	2.52	0.11	1.34	2.38	0.13	0.10	4.41
	평균	22.5	7.2	535	42.8	2.7	11.2	14.7	5.05	0.25	2.14	2.14	0.25	0.10	8.01

DO는 유입수가 2.8~5.1 mg/L , 평균 4.0 mg/L 였고, 휴경지 유출수는 1.5~3.8 mg/L , 평균 2.7 mg/L 로서 유입수에 비해 다소 낮아졌다. 그림 3-6과 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수의 농도가 낮은 것으로 나타났다(그림에서 점선은 유입수와 유출수의 농도가 같은 것을 의미하고, 이 점선 아래에 있으면 유입수보다 유출수의 농도가 낮은 것을, 이 점선보다 위에 있으면 유입수에 비해 유출수의 농도가 높은 것을 의미한다). 이와 같이 휴경지 유출수의 DO가 낮아진 것은 휴경지를 흘려가면서 수질이 정화되는 과정에서 용존산소가 소모되었기 때문이다. 미생물이 유기물 및 영양염류를 분해하기 위해서는 용존산소가 필요하기 때문이다. 그러나 유입수와 휴경지 유출수 모두 농업용수 수질기준인 2 mg/L 이상을 만족하고 있으므로 휴경지 유출수가 농업용수로 재이용되거나 농업용수원으로 유입되어도 큰 문제는 없다.

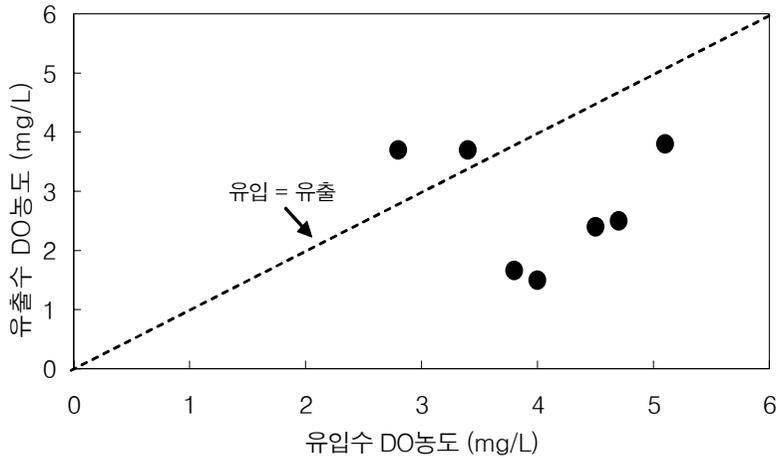


그림 3-6 어소리 지구 휴경지 유입수와 유출수의 DO농도 비교

SS는 유입수가 8.8~42.0 mg/L, 평균 25.9 mg/L였는데, 휴경지 유출수는 16.0~95.8 mg/L, 평균 42.8 mg/L를 나타내 유입수에 비해 유출수의 농도가 오히려 높아졌다. 그림 3-7과 같이 휴경지 유출수에서 SS농도가 높아지는 경우가 많았다. 유입수와 휴경지 유출수 모두 하천의 농업용수 수질기준인 100 mg/L 이하는 만족하지만, 호소의 농업용수 수질기준인 15 mg/L보다는 높았다. 또한 유입수의 표준편차가 10.1인데 반하여 유출수의 표준편차는 30.5로서 유출수가 안정되지 못한 경향을 보였다. 휴경지 유출수의 SS농도가 높아진 것은 어소리 휴경지의 경우 봄부터 여름철 사이에 잡초가 무성하게 자라고 겨울에는 이들 잡초가 고사하여 휴경지 내에서 잔류하면서 부식되고, 부식된 식물 잔해가 물과 함께 유출되기 때문이다. 이와 같이 휴경지를 방치하여 잡초가 자라고 이것이 부식되어 유출되면 오염원이 되기 때문에 잡초가 자라지 못하도록 적절히 관리하는 것이 바람직하다. 잡초가 자라지 못하게 하면서 수질을 정화하는 2가지 목적을 동시에 달성하기 위해서는 적절한 수위관리가 필요한 것으로 판단된다. 또한 뿌리가 발달되는 식물이 번성하고, 기타 관목류 등이 번성하면 휴경지를 농경지로 재이용할 때 이들을 뽑아 내주어야 하기 때문에 재이용에 많은 어려움이 있으므로 이러한 측면에서도 다른 식물이 자라지 못하도록 적절히 수위를 관리하여 잡초의 성장을 억제하는 것이 바람직하다.

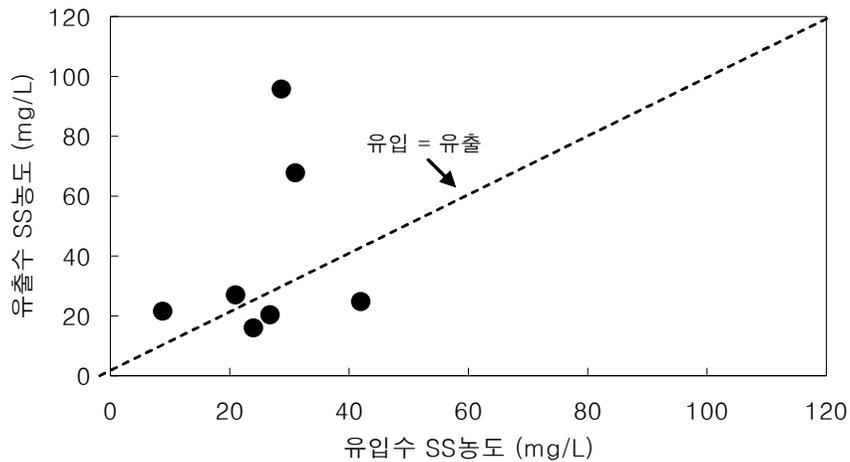


그림 3-7 어소리 지구 휴경지 유입수와 유출수의 SS농도 비교

BOD의 경우 표 3-2와 같이 유입수는 0.1~20.3 mg/L, 평균 8.3 mg/L였는데, 유출수는 3.0~21.3 mg/L, 평균 11.2 mg/L로 높아졌다.

COD의 경우도 유입수는 9.2~13.8 mg/L, 평균 11.3 mg/L였는데, 휴경지 유출수는 11.5~17.4 mg/L, 평균 14.7 mg/L를 나타내 유입수에 비해 휴경지 유출수가 농도가 높게 나타났다. 그림 3-8과 같이 조사기간 동안 모든 시점에서 유입수보다 휴경지 유출수의 농도가 높게 나타났다. 그리고 유입수와 휴경지 유출수 모두 호소의 농업용수 수질기준인 8 mg/L보다 높았다. 또한 유입수의 표준편차는 1.8인데 비하여 유출수는 2.4를 나타내 안정되지 못한 경향을 나타냈다.

이와 같이 휴경지에서 유기물 지표인 BOD와 COD의 농도가 높아져 유기물을 정화하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 SS에서 언급한 바와 같이 식물이 무성하고 이들 식물이 겨울철에 고사되어 분해되면서 유기물이 용출되었기 때문이다. 따라서 적절히 관리되지 못하는 휴경지는 식물의 성장 및 분해로 인하여 새로운 오염원이 될 가능성이 높은 것을 알 수 있다.

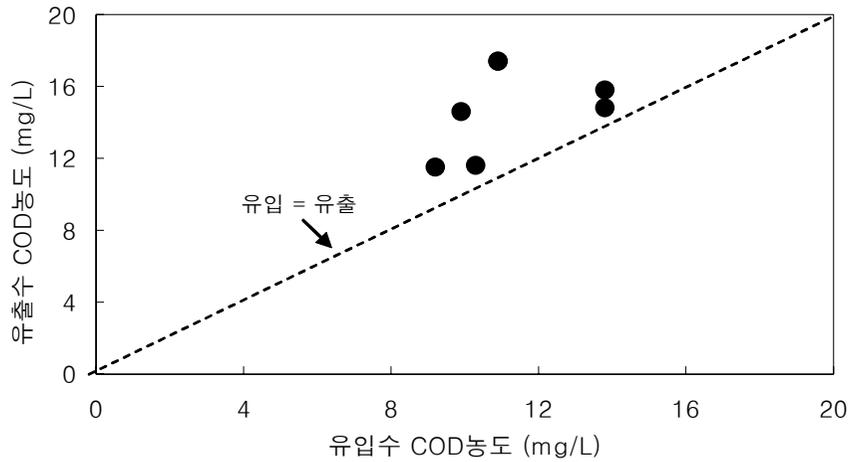


그림 3-8 어소리 지구 휴경지 유입수와 유출수의 COD농도 비교

TN은 유입수의 경우 3.94~10.04 mg/L, 평균 6.23 mg/L였고, 휴경지 유출수는 2.28~8.37 mg/L, 평균 5.05 mg/L로서 휴경지 유출수에서 감소되는 경향을 보였다. 또한 그림 3-9와 같이 대부분의 시점에서 유입수에 비해 휴경지 유출수의 농도가 감소되어 평균 18.9%의 TN제거율을 보였다. 비록 TN제거율은 낮지만 휴경지를 잘 활용하면 수질정화의 장으로서 활용할 수 있는 가능성을 보여주는 결과라 하겠다. 그러나 유입수의 표준편차가 2.00인데 반하여 유출수의 표준편차는 2.52를 나타내 안정되지 못한 경향을 보였다. TN의 경우는 유입수와 휴경지 유출수 모두 농업용수 수질기준인 1 mg/L보다 높았다.

질소의 태별 농도를 살펴보면 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 경우는 유입수가 0.15~9.37 mg/L, 평균 3.24 mg/L였고, 휴경지 유출수는 0.03~5.42 mg/L, 평균 2.14 mg/L로 낮아졌다. 그림 3-10과 같이 대부분의 시점에서 휴경지 유출수의 농도가 유입수에 비해 낮아져 평균 34.2%의 감소율을 보였다. 이와 같이 $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 호기성조건이 되면 $\text{NO}_2\text{-N} \rightarrow \text{NO}_3\text{-N}$ 으로 변화되는 질산화과정을 거쳐 감소될 뿐만 아니라 식물에 의해서도 흡수 제거된다. 휴경지는 수심이 얇고 넓은 면적에서 대기와 접하고 있기 때문에 대기로부터의 재폭기에 의해 꾸준히 산소가 공급된다. 따라서 전 수심에 걸쳐 호기성상태가 유지될 수 있으므로 질산화가 일어나기 쉬운 조건이기 때문에 $\text{NH}_4\text{-N}$ 이 감소되었다.

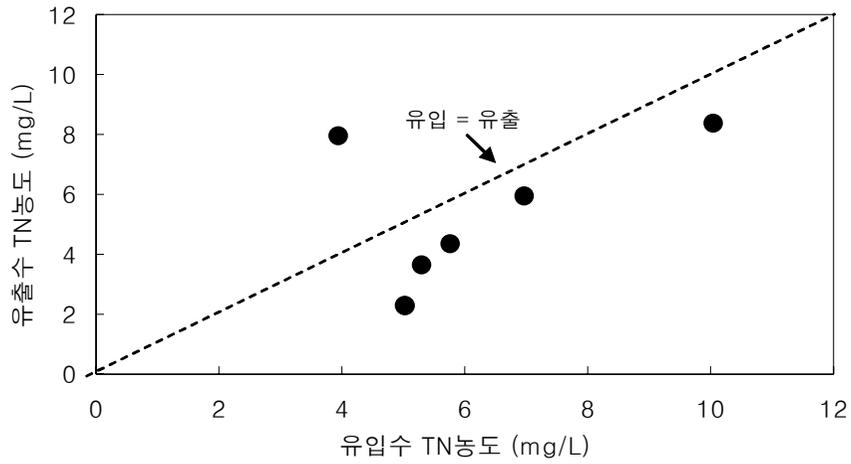


그림 3-9 어소리 지구 휴경지 유입수와 유출수의 TN농도 비교

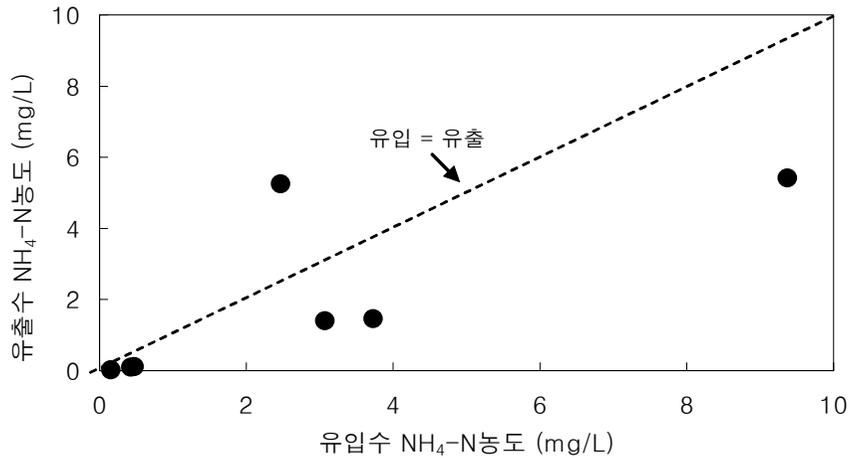


그림 3-10 어소리 지구 휴경지 유입수와 유출수의 NH₄-N농도 비교

NO₂-N의 경우 유입수는 0.06~1.22 mg/L, 평균 0.54 mg/L였는데, 휴경지 유출수는 0.09~0.44 mg/L, 평균 0.25 mg/L로 낮아져 평균 54.6%의 감소율을 보였다. 그림 3-11과 같이 유입수의 농도가 0.2 mg/L 이하에서는 휴경지 유출수의 농도가 다소 높아지기도 하였으나, 0.2 mg/L 이상에서는 모두 휴경지 유출수의 농도가

낮아졌다. $\text{NO}_2\text{-N}$ 의 경우는 질산화의 중간단계로서 $\text{NH}_4\text{-N}$ 에서 $\text{NO}_2\text{-N}$ 으로 변화되는 것보다 $\text{NO}_2\text{-N}$ 에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 으로 변화되는 것이 빠르기 때문에 제거율이 비교적 높게 나타났다.

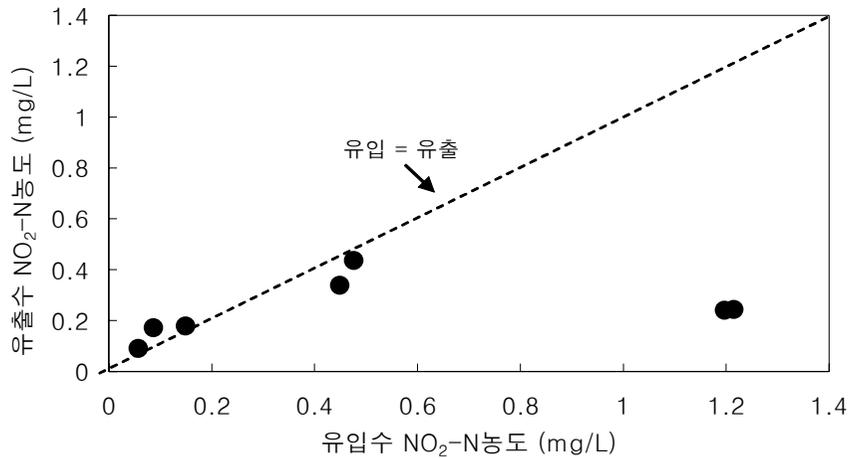


그림 3-11 어소리 지구 휴경지 유입수와 유출수의 $\text{NO}_2\text{-N}$ 농도 비교

$\text{NO}_3\text{-N}$ 의 경우 유입수는 0.72~3.69 mg/L, 평균 2.34 mg/L였는데, 휴경지 유출수는 1.05~4.38 mg/L, 평균 2.14 mg/L로서 8.6%의 감소율을 나타냈다. 이와 같이 $\text{NO}_3\text{-N}$ 감소율이 낮은 것은 유입수가 호기성 상태에서 꾸준히 질산화가 이루어져 유입수 중의 유기질소 및 $\text{NH}_4\text{-N}$ 이 $\text{NO}_2\text{-N}$ 을 거쳐 $\text{NO}_3\text{-N}$ 으로 변화되는 반면 휴경지는 수심이 낮아 항상 호기성상태를 유지하기 때문에 $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 탈질에 의해 제거되지 않았기 때문이다. 그러나 그림 3-12와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 휴경지 유출수의 농도가 낮게 나타났다. 이는 휴경지내의 식물들이 물속의 질산성질소를 영양분으로 적으나마 $\text{NO}_3\text{-N}$ 를 흡수하기 때문에 $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 제거된 것이다.

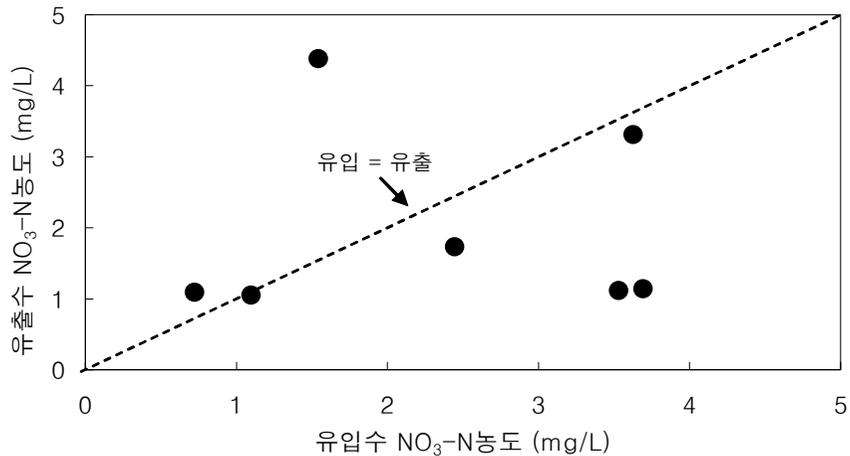


그림 3-12 어소리 지구 휴경지 유입수와 유출수의 NO₃-N농도 비교

TP는 유입수가 0.12~0.39 mg/L, 평균 0.19 mg/L였는데, 휴경지 유출수는 0.10~0.41 mg/L, 평균 0.25 mg/L로서 유입수에 비해 휴경지 유출수에서 높은 농도를 나타냈을 뿐만 아니라 유입수와 휴경지 유출수 모두 농업용수 수질기준을 초과하였다. 또한 그림 3-13과 같이 유입수에 비해 휴경지 유출수의 농도가 높은 시기가 많은 것으로 나타났다. 휴경지를 통과하면서 TP의 농도가 높아진 것은 고사된 식물체에서 인성분이 용출되었기 때문이다. 또한 부유물질에 잘 부착되는 성질이 있는 인성분이 증가된 SS성분과 함께 유출된 것도 하나의 원인이다. 이와 같이 휴경지는 인을 배출하는 오염원으로 작용할 수 있으므로 수질보전을 위해서는 휴경지를 적절히 관리해야할 필요성이 있다.

PO₄-P의 경우 유입수는 0.01~0.23 mg/L, 평균 0.07 mg/L였는데, 휴경지 유출수는 0.00~0.26 mg/L, 평균 0.10 mg/L로 높아졌다. 그림 3-14와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 휴경지 유출수에서 농도가 높아졌다. 이와 같이 PO₄-P농도가 높아진 것은 TP에서 언급한 바와 같이 식물 고사체에서 인성분이 재용출되거나 SS와 함께 유출되었기 때문이다.

이상과 같이 적절히 관리되지 않은 휴경지는 유기물과 영양염류가 잘 제거되지 않고 오히려 식물고사체에 의해 유기물과 영양염류를 발생시키는 오염원으로 작용할 우려가 있으므로 식물체가 자라지 못하도록 적절히 관리할 필요가 있다.

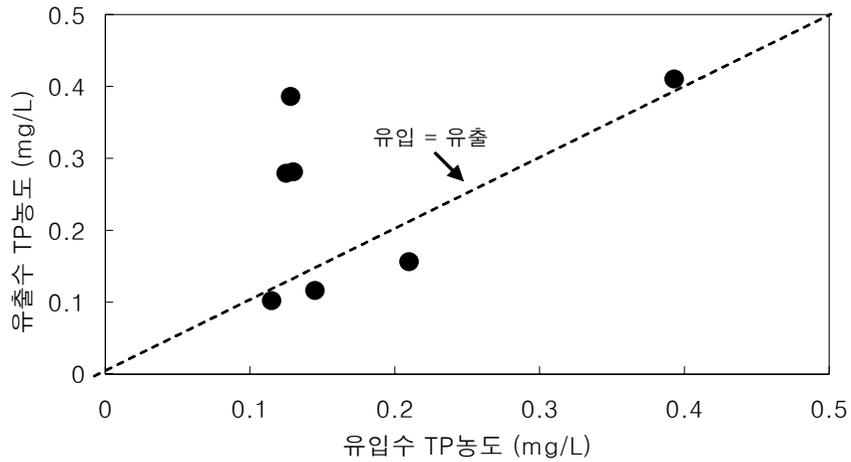


그림 3-13 어소리 지구 휴경지 유입수와 유출수의 TP농도 비교

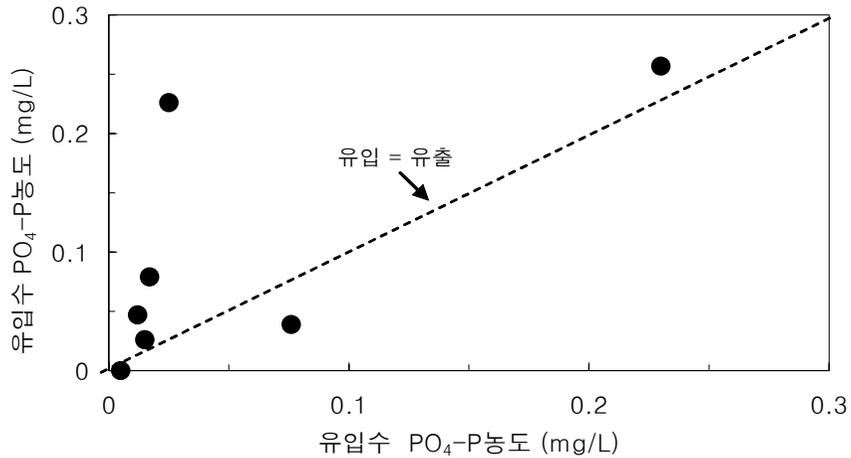


그림 3-14 어소리 지구 휴경지 유입수와 유출수의 PO₄-P농도 비교

Chl-*a*의 경우 유입수의 농도가 7.40~37.30 mg/m³, 평균 20.96 mg/m³이었는데, 휴경지 유출수에서는 3.00~14.20 mg/m³, 평균 8.01 mg/m³으로 낮아져 61.8%의 제거율을 보였다. 또한 그림 3-15와 같이 모든 시기에 유입수에 비해 휴경지 유출수의 농도가 낮은 것으로 나타났다. 이와 같이 휴경지를 통과하면서 Chl-*a*농도가

낮아진 것은 휴경지는 식물이 많이 자라고 있어 식물체에 의해 햇빛이 차단되어 휴경지 내부에서는 새롭게 녹조가 발생하기 않고, 반면에 식물체에 의한 여과효과가 있었기 때문이다. Chl-a가 제거된 것은 조류가 휴경지에 잔류하는 것을 의미하므로 잔류된 조류가 고사되어 휴경지의 정화능력을 초과하는 오염물질을 방출하면 오염원으로 작용할 가능성을 내포하는 것이기도 하다.

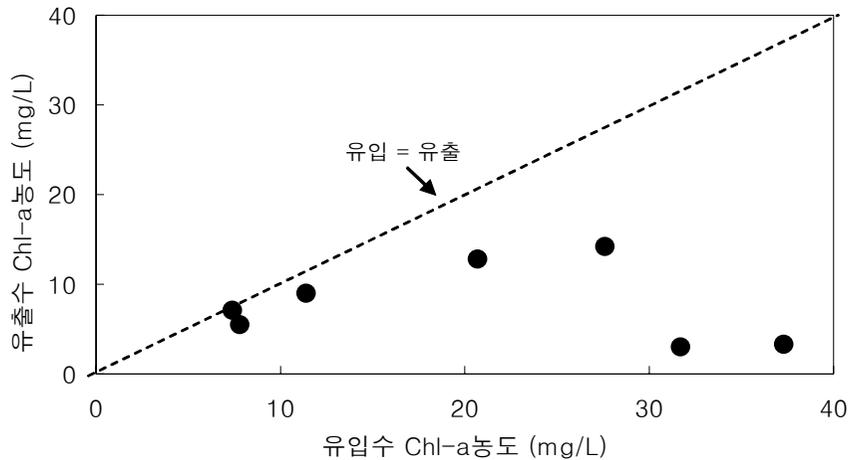


그림 3-15 어소리 지구 휴경지 유입수와 유출수의 Chl-a농도 비교

이상과 같이 최소한의 관리가 이루어지지 않고 방치된 휴경지에서는 수질정화를 거의 기대할 수 없을 뿐만 아니라 식물체의 고사와 재용출에 의해 오히려 수질오염원으로 작용할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 번무하는 잡풀 및 관목류는 뿌리가 발달하여 휴경지를 농경지로 재이용할 경우 장애가 될 수 있다. 실제로 그림 3-16 및 표 3-3과 같이 어소리 휴경지에서는 12과 21종의 식물이 성장하고 있는 것으로 조사되었다. 이와 같은 다양한 식물들 특히 아카시아나 버드나무 등의 관목류의 발달한 뿌리는 휴경지를 농경지로 재이용할 경우 장애요인이 된다. 뿐만 아니라 이들이 고사하여 분해되면 수질오염원이 되므로 식물이 자라지 못하도록 봄부터 담수하여 일정 정도 수위를 유지할 필요가 있다. 이상과 같이 수질오염과 농경지의 기능 유지면에서 볼 때 수위관리를 통해 식물의 성장을 방지하기 위한 최소한의 관리가 필요할 것으로 판단된다.



그림 3-16 어소리 지구 휴경지 전경 (2006년 6월)

표 3-3 어소리 지구의 식물상

과 명	한 국 명	학 명
국화과	개망초	<i>Erigeron annuus(L.)Pers.</i>
	미국가막사리	<i>Bidens frondosa L.</i>
	쭈	<i>Artemisia princeps var</i>
화분과	갈대	<i>Phragmites communis Trinius</i>
	달뿌리풀	<i>Phragmites japonica</i>
	독새풀	<i>Alopecurus aequalis</i>
	줄	<i>Zizania latifolia</i>
석죽과	벼룩이자리	<i>Arenaria serpyllifolia L.</i>
	점나도나물	<i>Cerastium holosteoides var. hallaisanense</i>
	쇠별꽃	<i>Stellaria aquatica Scop.</i>
십자화과	꽃다지	<i>Draba nemorosa var.</i>
	냉이	<i>Capsella bursa-pastoris</i>
	속속이풀	<i>Rorippa islandica Borbas</i>
마디풀과	고마리	<i>Persicaria thunbergii</i>
바늘꽃과	달맞이꽃	<i>Oenothera stricta L.</i>
삼과	환삼덩굴	<i>Humulus japonicus S.</i>
속새과	쇠뜨기	<i>Equisetum palustre L.</i>
양귀비과	애기똥풀	<i>Chelidonium majus L.var</i>
지치과	꽃마리	<i>Trigonotis peduncularis</i>
콩과	아카시아	<i>Decurrens var. dealbata</i>
현삼과	주름잎	<i>Mazus japonicus</i>

나. 토진리 지구

토진리 지구는 농경지 사이에 휴경지가 위치하고 있는데, 휴경 1은 쌀생산조정제 휴경지로서 2003~2004년도에는 10~20 cm 정도로 담수관리를 하였으나, 2005년도에는 거의 관리되지 않았다. 휴경 2는 쌀생산조정제 휴경지가 아닌 일반 휴경지로서 담수관리를 하지 않고 방치된 농지이다. 본 연구에서는 휴경지에서의 수질변화특성을 조사하기 위하여 2003년 말에서 2004년 사이에 조사를 실시하였다. 토진리 유입수의 경우는 비관개기에도 인근 마을로부터의 유출수가 배수로를 통해 흘러가고, 이것이 휴경 1에 유입되기 때문에 비관개기에도 수질조사가 가능하였고, 농경배수의 경우도 배수로 하류에서 수질조사를 실시할 수 있었다. 그러나 휴경 2의 경우는 비관개기에는 유입이 차단되어 관개기에만 수질조사를 실시하였는데, 그 결과는 다음과 같다.

조사기간 동안 수온은 유입수가 2.9~30.1 ℃, 평균 17.9 ℃였고, 휴경 1은 2.4~30.3 ℃, 평균 19.5 ℃이었으며, 농경배수는 3.0~29.6 ℃, 평균 19.0 ℃이었다. 휴경 2의 경우는 관개기에만 수질을 조사하였기 때문에 유입수, 휴경 1 및 농경배수보다 높은 17.4~30.5 ℃, 평균 23.2 ℃를 나타냈다.

표 3-4 토진리 지구 수질변화

구 분	수온 (℃)	pH	EC (μs/cm)	SS (mg/L)	DO (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	TP (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	Chl- <i>a</i> (mg/m ³)	
토진리 유입수	최소값	2.9	7.2	225.0	3.0	2.3	5.2	3.42	0.07	1.05	0.43	0.07	0.00	4.20
	최대값	30.1	10.0	768.0	70.0	13.6	14.8	9.35	1.14	6.14	7.48	0.33	0.19	49.30
	표준편차	7.7	1.0	150.2	18.8	3.7	2.9	1.52	0.39	1.36	1.93	0.07	0.05	19.61
	평균	17.9	8.1	448.7	25.0	5.8	9.4	5.58	0.41	3.08	2.10	0.15	0.08	25.59
토진리 휴경 1	최소값	2.4	6.9	117.0	7.6	1.9	6.4	0.42	0.00	0.00	0.06	0.03	0.00	2.20
	최대값	30.3	8.4	604.0	202.8	12.6	25.0	8.99	1.08	3.64	11.32	0.76	0.76	15.40
	표준편차	8.3	0.4	156.5	48.2	2.8	4.9	2.21	0.30	1.05	2.78	0.18	0.19	5.03
	평균	19.5	7.4	377.8	45.7	4.5	11.4	3.08	0.19	0.78	1.82	0.14	0.06	7.93
토진리 휴경 2	최소값	17.4	6.5	263.0	9.0	1.3	7.2	0.42	0.00	0.00	0.07	0.03	0.00	2.20
	최대값	30.5	8.1	535.0	29.2	5.1	18.6	2.05	1.02	3.77	2.79	0.10	0.10	14.90
	표준편차	4.2	0.5	93.8	6.7	1.5	3.6	0.52	0.35	1.27	0.93	0.02	0.03	4.14
	평균	23.2	7.0	436.5	14.1	3.2	11.7	1.14	0.15	0.63	0.59	0.06	0.01	8.96
토진리 농경배수	최소값	3.0	6.9	66.0	4.4	2.5	4.2	0.70	0.00	0.00	0.09	0.03	0.00	4.80
	최대값	29.6	7.9	603.0	209.0	14.2	20.0	8.13	0.46	9.75	3.02	0.41	0.21	11.90
	표준편차	8.1	0.3	154.0	50.2	3.5	4.4	2.15	0.17	2.37	1.05	0.11	0.05	2.91
	평균	19.0	7.3	394.3	35.7	5.3	9.4	4.25	0.19	2.81	1.02	0.13	0.03	7.70

pH는 유입수가 7.2~10.0, 평균 8.1이었는데, 휴경1 유출수는 6.9~8.4, 평균 7.4, 휴경 2 유출수는 6.5~8.1, 평균 7.0, 농경배수는 6.9~7.9, 평균 7.3으로 유입수에 비해 다소 낮아져 중성을 나타냈다. 모든 지점에서 농업용수 수질기준인 6.0~8.5를 만족하고 있다.

EC의 경우는 유입수가 225.0~768.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 평균 448.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이었는데, 휴경 1 유출수는 117.0~604.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 평균 377.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 휴경 2 유출수는 263.0~535.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 평균 436.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 농경배수가 66.0~603.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 평균 394.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 유입수에 비해 낮은 경향을 보였다. EC가 모두 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하를 나타내고 있어 농업용수로서는 큰 문제가 없는 것으로 나타났다.

DO의 경우 유입수가 2.3~13.6 mg/L, 평균 5.8 mg/L였는데, 휴경 1 유출수는 1.9~12.6 mg/L, 평균 4.5 mg/L, 휴경 2 유출수는 1.3~5.1 mg/L, 평균 3.2 mg/L, 농경배수는 2.5~14.2 mg/L, 평균 5.3 mg/L를 나타내 유입수에 비해 DO농도가 낮아졌다. 그림 3-17에서도 알 수 있는 바와 같이 대부분 유입수에 비해 휴경 1 유출수, 휴경 2 유출수, 농경배수에서 유입수에 비해 DO농도가 낮아졌다. 이와 같이 DO농도가 낮아진 것은 미생물이 유기물 및 영양염류를 분해하는데 용존산소가 소모되었기 때문이다. 수질정화에 용존산소가 소모된 반면 수면을 통한 재폭기에 의해 산소가 공급되었기 때문에 농업용수 수질기준인 2 mg/L 이상을 유지하고 있었다.

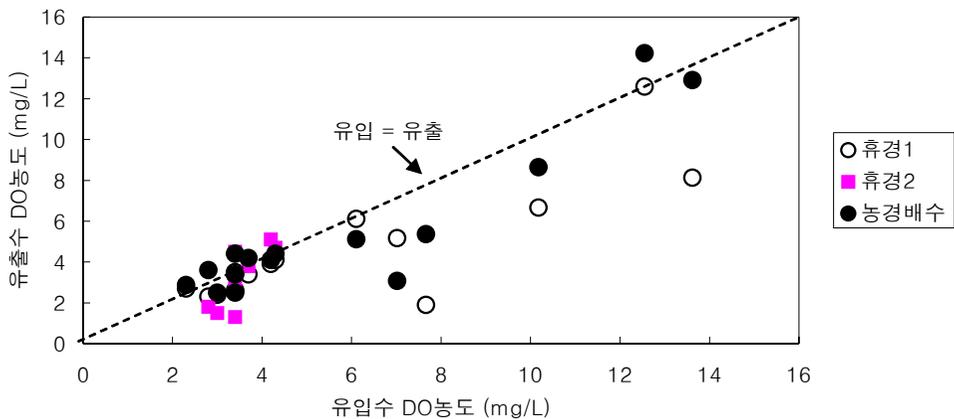


그림 3-17 토진리 지구 유입수와 유출수의 DO농도 비교

입수와 비슷한 농도를 나타냈다. 그림 3-19에서도 알 수 있는 바와 같이 유입수에 비해 휴경 1 유출수, 휴경 2 유출수에서 COD농도가 증가되는 시기가 다소 많은 경향을 보였다. COD의 경우 모두 농업용수 수질기준인 8 mg/L보다 높은 경향을 보였다. 휴경 1 유출수의 경우 SS와 마찬가지로 바람에 의해 식물 잔해물 및 미세한 유기질 토양이 부유하여 유출되었기 때문에 COD농도가 증가된 것으로 판단된다. 휴경 2의 경우 식물체의 여과작용으로 SS성 유기물의 유출은 거의 없었던 반면 고사한 식물체에서 용출된 용존성 유기물이 유출되었기 때문에 COD농도가 증가된 것으로 판단된다. 농경배수는 유입수에 비해 유출수의 농도가 높은 경우도 있고 낮은 경우도 있어 일정한 경향을 보이지는 않았지만 농경배수의 평균 COD가 유입수의 평균 COD와 비슷한 값을 나타내 농경배수가 반드시 오염원으로 작용하지는 않는다는 것을 알 수 있다.

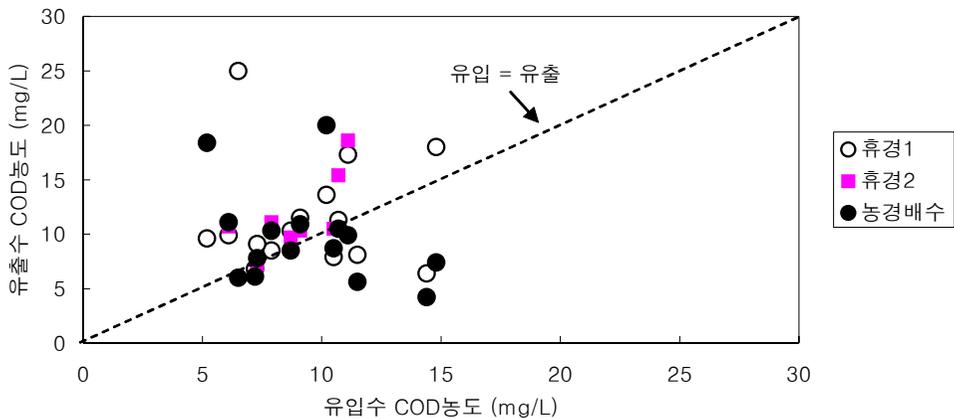


그림 3-19 토진리 지구 유입수와 유출수의 COD농도 비교

TN의 경우 유입수는 3.42~9.35 mg/L, 평균 5.58 mg/L였는데, 휴경 1 유출수는 0.42~8.99 mg/L, 평균 3.08 mg/L로 낮아져 44.8%의 제거율을 나타냈다. 휴경 2 유출수의 경우는 0.42~2.05 mg/L, 평균 1.14 mg/L로 낮아져 79.5%의 높은 제거율을 보였다. 농경배수의 경우도 0.70~8.13 mg/L, 평균 4.25 mg/L로 낮아져 23.9%의 제거율을 보였다. 그림 3-20에서도 알 수 있는 바와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수에서 TN농도가 낮아지는 경향을 보였다. 휴경 1의 경우 수심이 낮은 곳에서는 공기중으로부터의 재폭기에 의해 산소가 공급되기 때문에 호

기성상태가 유지되어 질산화가 이루어지고 수심이 깊은 곳에서는 혐기성 부분이 존재하여 탈질이 일어나기 때문에 질소가 제거된다. 휴경 1의 경우 담수상태를 유지하기 때문에 식물의 생장이 제한을 받아 식물에 의한 흡수는 크지 않을 것으로 판단된다. 휴경 2의 경우는 수심이 대단히 얕아 수중이 항상 호기성 상태를 유지하기 때문에 질산화는 잘 이루어지나 탈질은 잘 이루어지지 않는 반면 식물이 번성하기 때문에 식물에 의해 질소성분이 흡수제거되었기 때문에 질소제거율이 높게 나타났다. 그러나 휴경 2의 경우는 휴경 첫해이기 때문에 식물잔재물이 많지 않아 식물로부터의 재용출이 없어 질소제거율이 높게 나타났으나, 어소리 휴경지에서와 같이 휴경연수가 길어짐에 따라 식물잔해물이 쌓이면 오히려 오염원으로 작용할 우려가 있으므로 물관리를 통하여 식물의 생장을 억제하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 농경배수의 경우도 대부분의 시기에 유입수에 비해 낮은 경향을 보임으로서 농경배수가 반드시 오염원으로 작용하지 않는다는 것을 알 수 있다. 유입수, 휴경 1 유출수, 휴경 2 유출수, 농경배수 모두 농업용수 수질기준인 1 mg/L보다 높았지만 질소를 제거하는 기능을 갖고 있는 것을 알 수 있다.

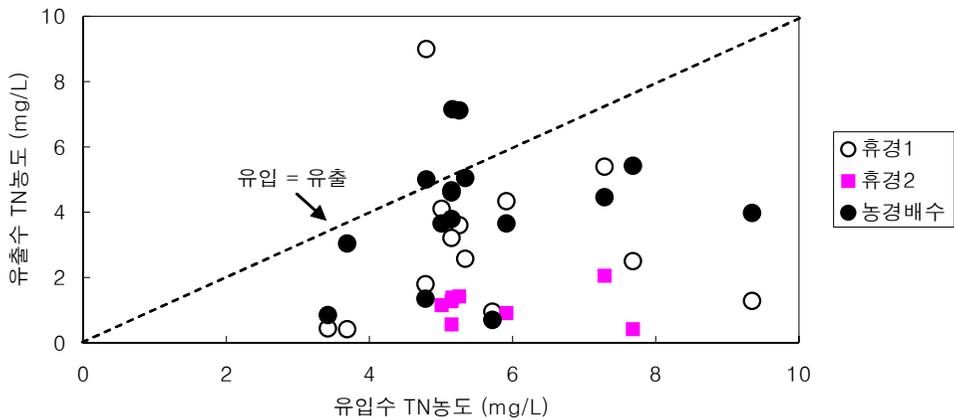


그림 3-20 토진리 지구 유입수와 유출수의 TN농도 비교

$\text{NH}_4\text{-N}$ 의 경우 유입수가 0.43~7.48 mg/L, 평균 2.10 mg/L였는데, 휴경 1 유출수는 0.06~11.32 mg/L, 평균 1.82 mg/L으로 낮아져 13.3%가 감소되었다. 휴경 2 유출수는 0.07~2.79 mg/, 평균 0.59 mg/L로서 71.8%가 감소되었다. 농경배수는 0.09

~3.02 mg/L, 평균 1.02 mg/L로 낮아져 51.7%가 감소되었다. 그림 3-21과 같이 많은 시기에 유입수에 비해 유출수의 NH₄-N농도가 낮게 나타났는데, 이는 휴경 1과 2 및 농경지가 호기성상태가 유지되어 질산화가 활발하게 이루어져 NH₄-N이 NO₂-N, NO₃-N으로 바뀌었기 때문이다.

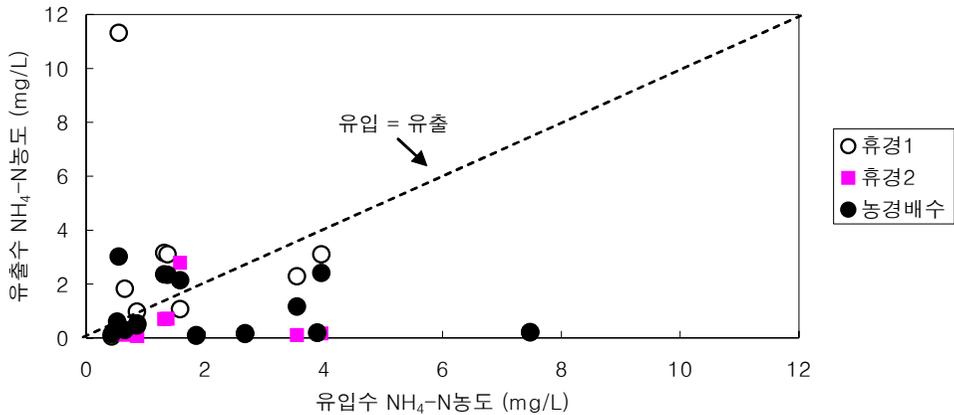


그림 3-21 토진리 지구 유입수와 유출수의 NH₄-N농도 비교

NO₂-N의 경우 유입수가 0.07~1.14 mg/L, 평균 0.41 mg/L였는데, 휴경 1 유출수는 0.00~1.08 mg/L, 평균 0.19 mg/L로 낮아져 54.3%가 감소되었다. 휴경 2 유출수는 0.00~1.02 mg/L, 평균 0.15 mg/L로 낮아져 64.2%가 감소되었다. 이와 같이 질산화에 의해 NH₄-N이 NO₂-N로 변화되어 NO₂-N이 꾸준히 생성됨에도 불구하고 휴경지 유출수에서 NO₂-N이 감소되는 것은 호기성 상태가 유지되어 빠른 속도로 NO₂-N이 NO₃-N으로 바뀌기 때문이다. 농경배수의 경우도 농경지가 수심이 얇아 호기성 상태를 유지하기 때문에 NO₂-N이 유입수에 비해 낮아졌다. 이 때문에 그림 3-22와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수에서 NO₂-N이 낮은 경향을 보였다.

NO₃-N의 경우 유입수가 1.05~6.14 mg/L, 평균 3.08 mg/L였는데, 휴경 1 유출수는 0.00~3.64 mg/L, 평균 0.78 mg/L로 낮아져 74.6%의 감소율을 보였다. 휴경 2 유출수는 0.00~3.77 mg/L, 평균 0.63 mg/L로 낮아져 79.5%의 감소율을 보였다. 또한 그림 3-23과 같이 휴경 1과 휴경 2는 모든 시기에 유입수에 비해 유출수의 NO₃-N농도가 낮은 것으로 나타났다. 휴경 1은 수심이 얇은 곳에서는 질산화가

일어나고, 수심이 깊은 곳에서는 탈질이 일어나기 때문에 질산화에 의해 $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 꾸준히 생성됨에도 불구하고 유출수의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도가 낮아졌다. 휴경 2의 경우는 대부분 수심이 얇아 탈질이 일어날 수 없음에도 불구하고 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도가 낮아진 것은 탈질 보다는 식물에 흡수된 양이 많기 때문인 것으로 판단된다. 농경배수의 경우도 $0.00\sim 9.75\text{ mg/L}$, 평균 2.81 mg/L 로 낮아져 8.9%의 제거율을 보였다.

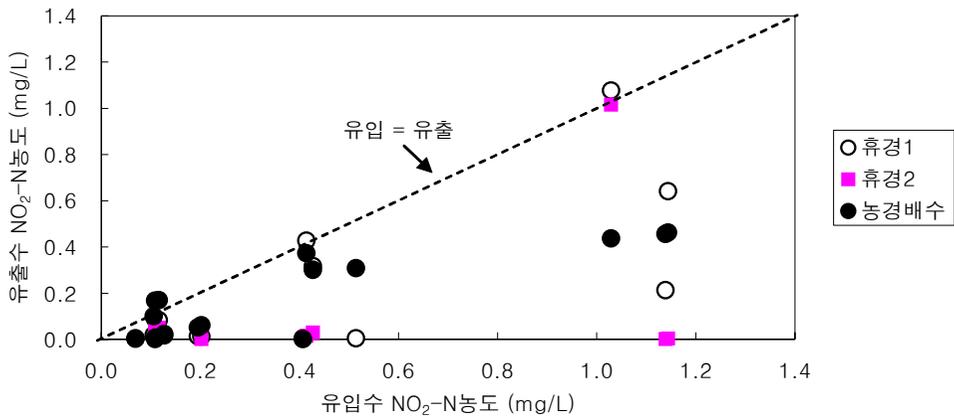


그림 3-22 토진리 지구 유입수와 유출수의 $\text{NO}_2\text{-N}$ 농도 비교

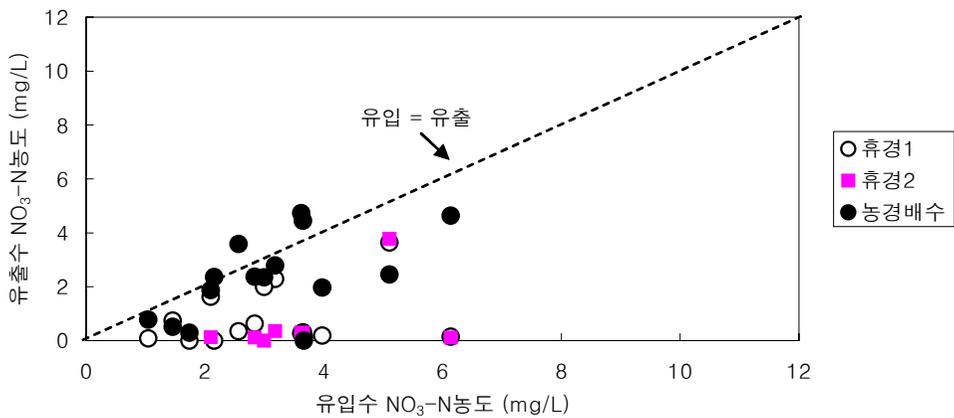


그림 3-23 토진리 지구 유입수와 유출수의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도 비교

TP는 유입수가 $0.07\sim 0.33\text{ mg/L}$, 평균 0.15 mg/L 였는데, 휴경 1 유출수는 $0.03\sim$

0.76 mg/L, 평균 0.14 mg/L를 나타내 유입수와 비슷한 값을 나타냈다. 휴경 2 유출수는 0.03~0.10 mg/L, 평균 0.06 mg/L로 낮아져 63.7%의 높은 제거율을 보였다. 농경배수는 0.03~0.41 mg/L, 평균 0.13 mg/L로서 유입수와 비슷한 값을 나타냈다. 그러나 그림 3-24와 같이 모든 지점에서 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수에서 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 휴경 1에 비해 휴경 2에서 TP제거율이 높은 것은 번무한 식생이 무기인을 흡수했기 때문으로 판단된다. 이의 영향으로 휴경 2 유출수의 경우는 농업용수 수질기준인 0.1 mg/L 이하를 만족하였다. 농경배수의 경우도 유입수에 비해 유출수의 농도가 낮아 농경지가 항상 오염원으로 작용하지는 않는다는 것을 알 수 있다.

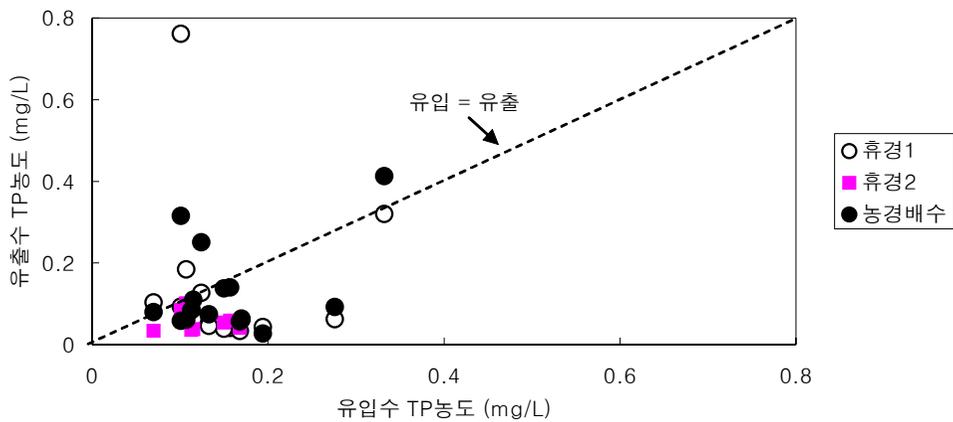


그림 3-24 토진리 지구 유입수와 유출수의 TP농도 비교

PO₄-P의 경우 유입수의 농도가 0.00~0.19 mg/L, 평균 0.08 mg/L이었는데, TP와 마찬가지로 휴경 2 유출수가 0.00~0.01 mg/L, 평균 0.01 mg/L로 낮아져 84.1%의 가장 높은 제거율을 보였다. 휴경 1 유출수의 경우도 0.00~0.76 mg/L, 평균 0.06 mg/L로 낮아져 28.6%의 제거율을 보였다. 농경배수의 경우는 0.00~0.21 mg/L, 평균 0.03 mg/L로 낮아졌다. PO₄-P는 그림 3-25와 같이 모든 지점에서 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수에서 농도가 낮아지는 경향을 보였다.

Chl-a의 경우 유입수가 4.20~49.30 mg/m³, 평균 25.59 mg/m³였는데, 휴경 1 유출수는 2.20~15.40 mg/m³, 평균 7.93 mg/m³로 낮아져 69.0%의 제거율을 보였다. 휴경 2 유출수의 경우도 2.20~14.90 mg/m³, 평균 8.96 mg/m³으로 낮아져 65.0%의 제

거울을 보였다. 농경배수의 경우도 $4.80 \sim 11.90 \text{ mg/m}^3$, 평균 7.70 mg/m^3 으로 낮아졌다. 이상과 같이 휴경지나 농경지를 거치면서 Chl-a가 제거되는 것으로 나타났다. 또한 그림 3-26과 같이 모든 지점에서 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수의 Chl-a농도가 낮아지는 경향을 보였다.

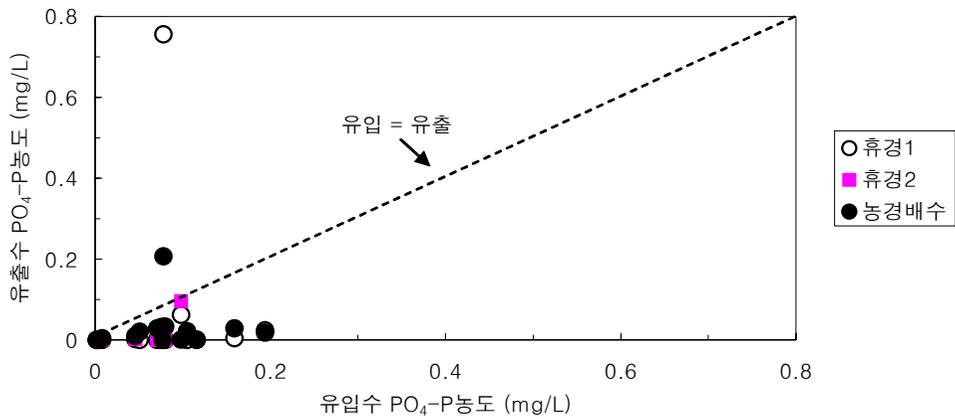


그림 3-25 토진리 지구 유입수와 유출수의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도 비교

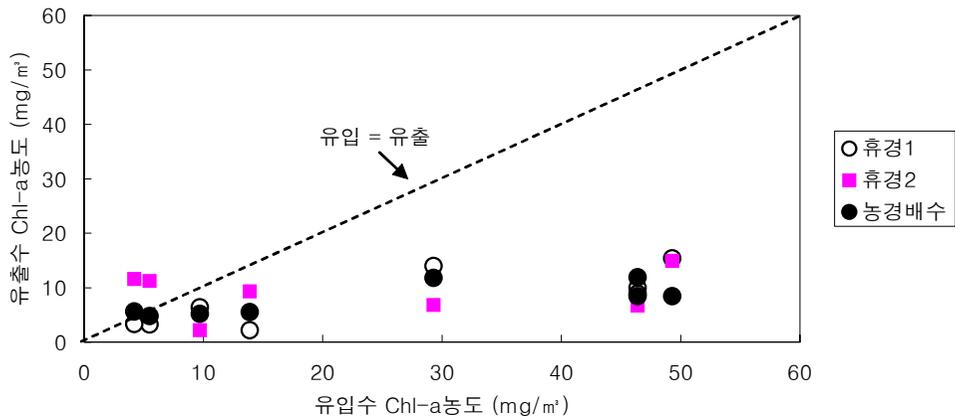


그림 3-26 토진리 지구 유입수와 유출수의 Chl-a농도 비교

이상과 같이 토진리 휴경지의 경우 수심을 평균 10 cm로 담수관리하는 휴경 1에 비해 담수를 하지 않는 휴경 2의 경우가 대체적으로 수질정화효과가 높은 것

으로 나타났다. 이는 휴경 1의 경우 담수상태를 유지하기 때문에 식물이 거의 자라지 못해 식물체에 의한 흡수나 여과작용이 발휘되지 못하기 때문이다. 그러나 농업용수원 부영양화의 주원인인 질소와 인의 제거효과는 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 휴경지를 적절히 관리하여 수생식물의 번무를 방지하면서 수질정화를 도모하기 위한 기술을 개발하고자 한다.

반면 휴경 2의 경우 식물이 많이 자라기 때문에 식물체에 의한 흡수 및 여과작용에 의해 수질정화효과가 높다. 그러나 휴경 2의 경우는 표 3-5와 같이 9과 16종의 다양한 식물이 성장하기 때문이 어소리 휴경지에서와 같이 이들이 겨울철에 고사하면 분해되면서 오염물질이 식물체로부터 재용출되어 오염원으로 작용할 우려가 있다. 뿐만 아니라 대형식물이나 관목류가 유입되어 뿌리를 뺏으면 휴경지를 농경지로 재이용할 때 장애가 된다. 그림 3-27과 같이 수위관리를 하지 않은 2006년도에는 수위관리를 한 2004년도(그림 3-5)에 비해 식물이 번무하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 재이용을 전제로 하는 휴경지의 경우는 일정 정도 물관리를 하여 식물이 번성하는 것을 방지하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

농경지를 통과하여 배출되는 농경배수의 경우도 유입수에 비해 평균 유기물 및 TP농도 비슷한 반면 TN은 낮은 것으로 보아 농경배수가 반드시 오염원으로 작용하지는 않는 것으로 나타났다.



그림 3-27 토진리 지구 휴경지 전경(2006.6)

표 3-5 토진리 지구의 식물상

과 명	한 국 명	학 명
국화과	개망초	<i>Erigeron annuus(L.) Pers.</i>
	뽕리뽕이	<i>Youngia japonica(L.)</i>
	쑥	<i>Artemisia princeps var</i>
화본과	갈대	<i>Phragmites communis Trinius</i>
	달뿌리풀	<i>Phragmites japonica</i>
	독새풀	<i>Alopecurus aequalis</i>
마디풀과	고마리	<i>Persicaria thunbergii</i>
십자화과	꽃다지	<i>Draba nemorosa var.</i>
	냉이	<i>Capsella bursa-pastoris</i>
	속속이풀	<i>Rorippa islandica Borbas</i>
석죽과	벼룩이자리	<i>Arenaria serpyllifolia L.</i>
	점나도나물	<i>Cerastium holosteoides var. hallaisanense</i>
속새과	쇠뜨기	<i>Equisetum palustre L.</i>
양귀비과	애기똥풀	<i>Chelidonium majus L.var</i>
현삼과	주름잎	<i>Mazus japonicus</i>
지치과	꽃마리	<i>Trigonotis peduncularis</i>

제 2 절 휴경지를 이용한 수질개선기능 강화

어소리 지구와 토진리 지구에서 살펴본 바와 같이 휴경지는 수질을 정화하는 기능을 갖고 있다. 담수를 하지 않고 방치하는 휴경지의 경우 식물체에 의한 흡수와 여과작용 등에 의한 수질정화효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 담수하지 않는 휴경지는 많은 식물이 자라고 이들이 겨울철에 고사하여 새로운 오염원으로 작용할 가능성이 있다. 또한 휴경년수가 경과함에 따라 여러 가지 식물이 유입되고 특히 관목류 등이 유입됨으로서 뿌리가 발달하면 휴경지를 농경지로 재이용할 때 많은 장애가 되기 때문에 바람직하지 않다. 반면 담수관리를 하는 휴경지는 식물의 생장이 억제되어 식물의 고사에 의한 채용출의 염려는 없는 반면 식생에 의한 수질정화효과가 발휘되지 않기 때문에 정화효율이 낮다. 따라서 본 연구에서는 담수관리를 하여 식물의 생장을 억제하는 동시에 수질정화효율을 높일 수 있는 기술을 개발하기 위하여 충남 당진군 석문지구에 시험포를 조성하여 수질정화효과를 조사하였다. 시험포는 수위를 20~30 cm로 관리하는 휴경은 I 과 수심을 10 cm 이하로 관리하는 휴경은 II를 조성하였다. 또한 질산화와 탈질을 유도하기 위하여 다양한 수심을 갖는 여울-웅덩이 시험포와 흙수로 시험포를 조성하여 2004~2005년도에 수질정화시험을 실시하였다.

충남 당진군에 위치하고 있는 석문지구는 주위 농경지와 완전 분리되어 용·배수로가 정비되고, 독립된 양수장이 구비되어 있기 때문에 인접지역으로부터의 유입이 거의 없어 유역폐쇄가 가능한 지역이다. 또한 한국농촌공사 농어촌연구원이 관리하기 때문에 농지의 변형이 가능하고 유지관리가 용이하여 연구대상지구로 선정하였다. 석문지구에서는 휴경지를 이용한 수질개선기능 강화방안을 도출하기 위하여 물관리에 따른 휴경지의 수질변화특성을 조사하였다. 여울-웅덩이 시험포 및 흙수로 시험포, 암거배수 시험포를 조성하여 수질정화특성을 조사·분석하였다.

1. 연구대상지구 현황

석문지구는 휴경지의 물관리에 따른 식생 및 수질변화특성을 조사하고, 여울 및 웅덩이, 흙수로, 암거배수 조성에 따른 휴경지의 수질정화기능 강화방안 도출을 위하여 선정하였다.

- 위치 : 충남 당진군 고대면 슬항리
- 면적 : 18.47ha (시험포 면적 : 1.73ha)
- 용배수계통 : 용수는 석문담수호 유입부의 물을 양수하여 공급하고, 농지배수는 반대편 석문담수호 유입부로 방류한다. 본 지구는 석문지구 간척사업에 의해 조성되어 2004년도에 내부개답을 완료하고 영농을 개시한 지구이다.

본 연구를 위한 시험포는 2구획으로 구성하였는데, 1시험포는 여울과 웅덩이 시험포, 흙수로 시험포, 암거배수 시험포를 조성하였다. 2시험포는 2개 블록으로 분할하여 수위관리에 따른 수질정화효과 및 식생특성 등을 조사하였다.

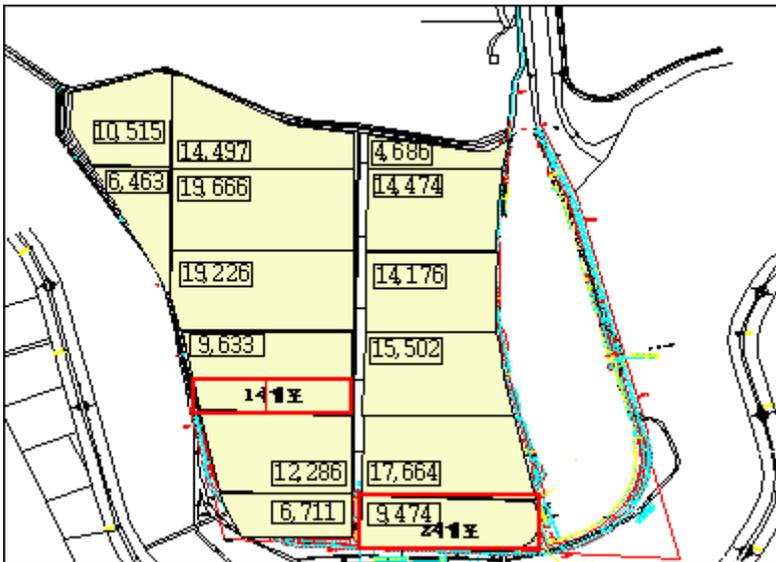


그림 3-28 석문지구 시험포 위치도

- 1시험포 (면적 : 7,859 m²)
 - 유휴농지 표면의 다양한 변화에 의한 수질정화기능 강화 시험용 포장 (그림 3-29)
 - 웅덩이 및 여울조성에 의한 수질정화기능 강화 (그림 3-30)
 - 흙수로 조성에 의한 수질정화기능 강화 (그림 3-31)
 - 암거배수 조성에 의한 수질정화기능 강화 (그림 3-32)

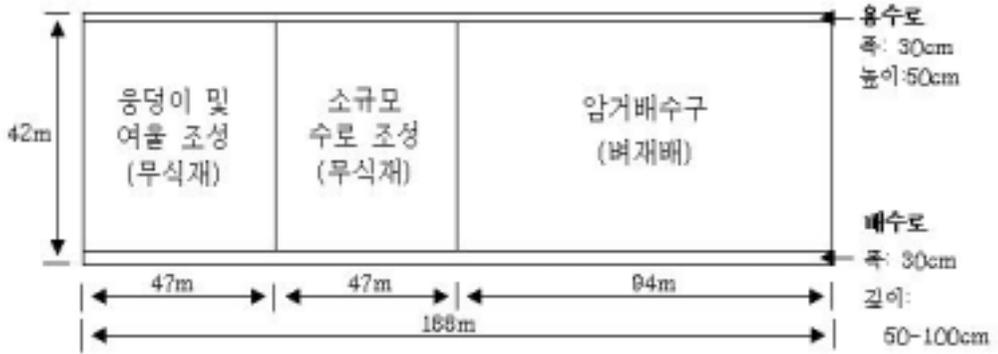


그림 3-29 1시험포 이용도

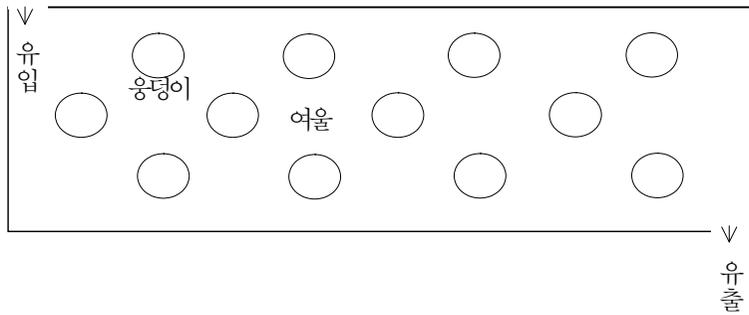


그림 3-30 여울과 응덩이 조성 개념도

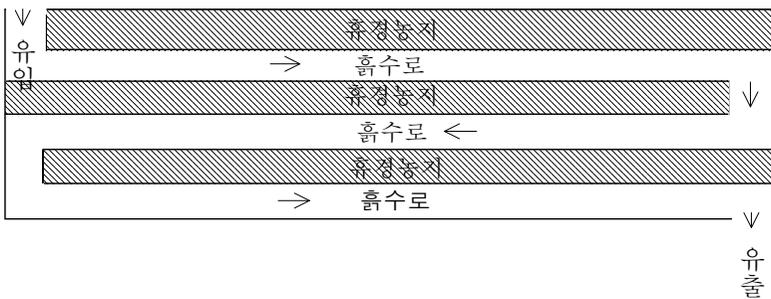


그림 3-31 흙수로 조성 개념도

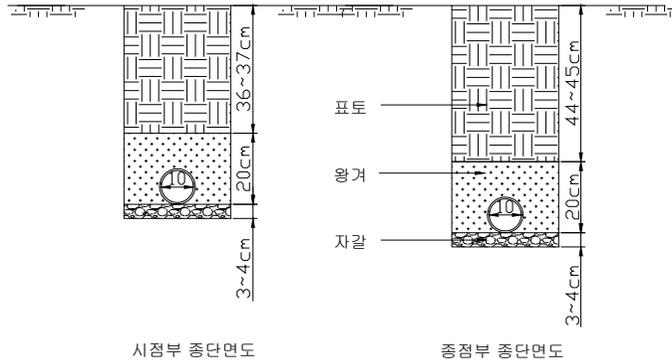


그림 3-32 암거배수 조성 단면도

○ 2시험포 : 9,474m²

- 휴경논 I : 쌀생산조정제 휴경지 시험용 포장
수심을 평균 20~30 cm로 유지하면서 수질정화효과 및 식물천이 특성 조사
- 휴경논 II : 쌀생산조정제 휴경지 시험용 포장
수심을 10 cm로 이하로 유지하면서 수질정화효과 및 식물천이 특성 조사
- 무관리구

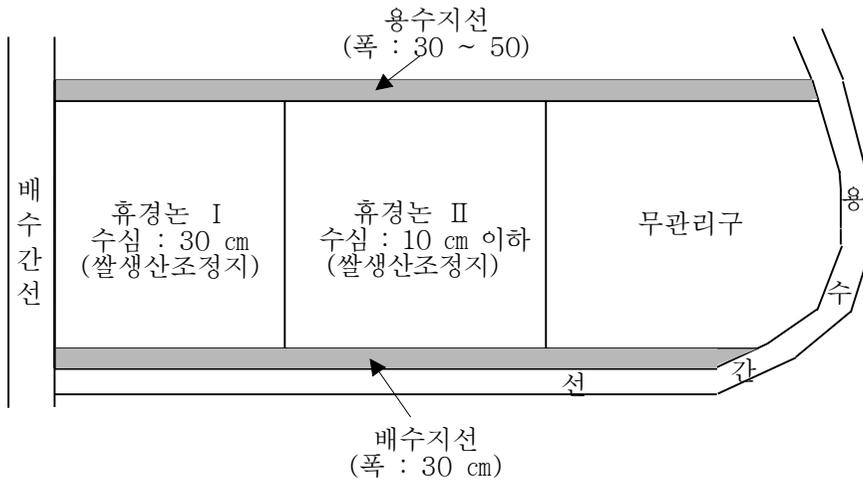


그림 3-33 2시험포 세부 이용도



<휴경논 I>



< 휴경논 II>



<무관리구 전경>

그림 3-34 2시험포 전경

2. 재료 및 방법

시험시설은 상시 유지관리가 가능한 석문지구에 설치하였다. 농경지에서 물질 수지를 분석하기 위해서 먼저 물수지 분석을 해야 하므로, 유입부와 유출부에 웨어 및 부표식 자동측정 수위계를 설치하였다. 침투량을 측정하기 위해 침투량계를 두 곳에 설치하였다. 그리고 증발량 측정을 위하여 대형증발계 1기를 설치하였으며, 침투량계와 대형증발계에는 부표식 수위계를 이용하여 실시간 측정하였다. 또한 강우량 측정을 위하여 데이터로거가 장착된 우량계를 설치하였다.



그림 3-35 웨어 및 수위계



그림 3-36 침투량계



그림 3-37 대형증발계



그림 3-38 우량계

3. 석문지구의 토양특성

석문지구의 토성은 Sand가 평균 32.3% (27.0~41.0%), Silt가 평균 61.7% (54.0~66.0%), 그리고 Clay가 평균 6.0% (5.0~8.0%)로서 미사질양토(Silty Loam)로 나타났다.

pH는 평균 6.7(6.0~7.4)로서 우리나라 논토양 비옥도 조사결과 (1995)인 5.6보다 높고, 논토양의 적정 pH기준치인 6.5 (농업기술원)보다 다소 높게 나타났다.

전기전도도 (EC)는 평균 0.40 (0.06~0.97) dS/m로서 간척토양특성 (ECe > 4 dS/m) 보다 낮게 나타났다. 이 범위 내에서는 습지식물이 번성할 수 있다.

양이온치환용량 (CEC)은 평균 6.70 (6.25~7.10) meq/100g으로서 우리나라 논토양의 평균 CEC인 14.6 meq/100g보다 낮은 값을 나타냈다.

총질소 (TN) 함량은 평균 677.8 (635.7~758.4) mg/kg이고, 총인 (TP) 함량은 평균 399.2 (382.9~413.4) mg/kg으로서 다소 낮게 나타났다.

유효인산(Av.P₂O₅) 함량의 경우 평균 23.40 (19.98~27.08) mg/kg으로서 우리나라 전국 논토양 비옥도 조사결과 (1995)인 128 mg/kg이나 적정기준치인 100 mg/kg에 비해 매우 낮은 값을 나타냈다.

유기물 함량의 경우 평균 0.40 (0.36~0.46)%로서 다소 낮게 나타났다.

표 3-6 시험포별 토양분석결과

구 분		석문 1	석문 2	석문 3	평균
입도분석	Sand(%)	27.0	41.0	29.0	32.3
	Silt(%)	65.0	54.0	66.0	61.7
	Clay(%)	8.0	5.0	5.0	6.0
	토 성	SiL	SiL	SiL	
산도 pH (1:5)		6.0	7.4	6.6	6.7
유기물 (%)		0.36	0.36	0.46	0.40
유효인산 (ppm)		19.98	27.08	23.14	23.40
총질소 (mg/kg)		758.4	635.7	639.4	677.8
총인산 (mg/kg)		413.4	382.9	401.4	399.2
양이온치환용량 (cmol/kg)		7.10	6.25	6.70	6.70
전기전도도 (dS/m)(1:5)		0.06	0.97	0.09	0.40

4. 휴경지의 담수관리에 따른 수질개선

휴경논에서 수위관리 방법에 따른 수질변화특성을 분석하기 위하여 휴경논 I 은 수심을 평균 20~30 cm로 유지하여 인위적인 용수 공급을 실시하였고, 휴경논 II는 평균 10 cm 이하의 수심이 유지되도록 관리하여 수질정화효과 및 식물천이 특성을 조사하였다.

물관리가 이루어지는 시험포의 물질수지를 분석하기 위해 휴경논 I에서 물수지 분석을 실시하였다. 유입부와 유출부에 웨어 및 부표식 자동측정 수위계를 설치하였으며, 침투량 측정을 위해 침투량계를 두 곳에 설치하였다. 그리고 증발량 측정을 위하여 대형증발계 1기를 설치하였으며, 침투량계와 대형증발계에서 부표식 수위계를 이용하여 증발량과 침투량을 실시간 측정하였다. 또한 강우량 측정을 위하여 자동 Data 관측기가 장착된 우량계를 설치하였다. 물수지 분석을 위해 휴경논 I 유입구와 유출부의 웨어를 통과하는 유량과 침투량, 증발량을 시간별로 분석하였다.

대상지구의 식물상을 조사하기 위해 휴경논 I에는 6개의 방형구 (1m × 1m), 휴경논 II에는 8개의 방형구를 설치하여 피도를 조사하였다. 식물체의 영양물질 흡수량을 조사하기 위해 식물체의 화학성분을 분석한 후 이 결과에 건물중을 곱하여 각 지점의 식물별 영양물질 함유량을 산정하였다.

가. 수질정화효과

수온은 유입수가 9.2~29.7 °C, 평균 23.9 °C였는데, 휴경논 I 유출수는 10.3~34.8 °C, 평균 25.2 °C로 높아졌고, 휴경논 II 유출수는 11.5~32.9 °C, 평균 25.1 °C로 높아졌다. 이와 같이 휴경논에서 수온이 높아진 것은 넓은 면적에서 골고루 햇빛을 받기 때문이다.

pH는 유입수가 7.0~9.1, 평균 7.8로 중성을 나타냈으며, 휴경논 I 유출수는 7.1~9.1, 평균 8.2, 휴경논 II 유출수는 7.1~9.7, 평균 8.1로 유입수에 비해 다소 높아졌으나 농업용수 수질기준인 6.0~8.5를 만족하였다.

EC는 유입수의 경우 220.0~939.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 평균 551.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 나타냈고, 휴경논 I 유출수는 260.0~981.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 평균 504.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 휴경논 II 유출수는 273.0~1,073.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 평균 526.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 나타냈다. 이와 같이 EC는 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하를 나타내는 경우가 많았고, 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상인 경우도 거의 대부분이 1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하를 나타냈기 때문에 휴경지 유출수를 농업용수로 이용해도 큰 문제는 없다.

표 3-7 석문지구 휴경지 유입수 및 유출수 농도

구 분	수온 (°C)	pH	EC (µs/cm)	SS (mg/L)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	TP (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	Chl -a (mg/m)	
유입수	최소값	9.2	7.0	220.0	0.4	3.2	1.4	4.5	0.58	0.00	0.18	0.03	0.07	0.02	1.8
	최대값	29.7	9.1	939.0	59.5	13.4	7.6	16.6	5.69	0.36	6.79	1.90	0.41	0.33	45.7
	표준편차	5.1	0.5	228.3	16.8	2.9	2.0	3.9	1.40	0.11	1.58	0.45	0.08	0.08	13.3
	평균	23.9	7.8	551.7	25.9	6.3	4.5	9.2	3.46	0.15	2.39	0.45	0.26	0.16	12.4
휴경논 I 유출수	최소값	10.3	7.1	260.0	2.4	2.4	1.4	5.9	0.29	0.00	0.03	0.03	0.04	0.00	1.8
	최대값	34.8	9.1	981.0	84.5	11.3	6.7	16.0	4.16	0.32	2.59	0.77	0.24	0.16	22.8
	표준편차	5.8	0.5	238.4	27.1	3.0	2.1	2.9	1.03	0.10	0.74	0.18	0.06	0.04	7.0
	평균	25.2	8.2	504.5	31.8	7.1	3.6	8.6	1.20	0.06	0.64	0.18	0.10	0.03	10.6
휴경논 II 유출수	최소값	11.5	7.1	273.0	0.0	1.4	2.1	4.4	0.27	0.00	0.06	0.03	0.03	0.00	3.4
	최대값	32.9	9.7	1,073.0	94.5	13.6	6.7	18.8	3.15	0.24	2.77	0.41	0.19	0.08	21.8
	표준편차	5.5	0.8	253.2	30.9	4.1	1.5	3.9	0.82	0.07	0.76	0.09	0.04	0.02	5.9
	평균	25.1	8.1	526.5	28.2	7.3	3.3	9.9	1.18	0.06	0.68	0.14	0.10	0.04	9.8

DO의 경우 유입수가 3.2~13.4 mg/L, 평균 6.3 mg/L였는데, 휴경논 I 유출수는 2.4~11.3 mg/L, 평균 7.1 mg/L를 나타냈고, 휴경논 II 유출수는 1.4~13.6 mg/L, 평균 7.3 mg/L를 나타내 유입수에 비해 높은 농도를 나타냈다. 그림 3-39와 같이 많은 시기에 유입수에 비해 유출수의 DO농도가 높게 나타났다. 이와 같이 유출수의 DO농도가 높게 나타난 것은 수면에서 대기 중으로부터의 재폭기가 원활히 이루어지고 있기 때문이다. 유입수와 휴경논 유출수 모두 농업용수 수질기준인 2 mg/L를 크게 상회하였다.

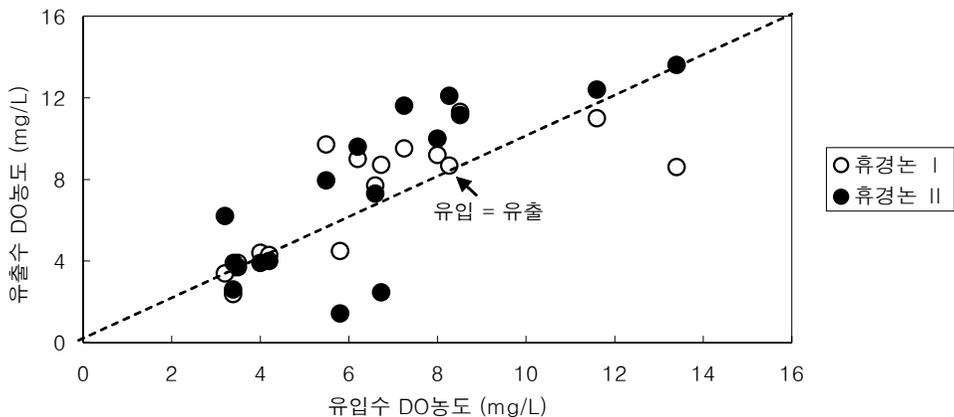


그림 3-39 석문 지구 휴경지 유입수와 유출수의 DO농도 비교

SS농도는 유입수 0.4~59.5 mg/L, 평균 25.9 mg/L에 비하여 휴경논 I 유출수는 2.4~84.5 mg/L, 평균 31.8 mg/L로, 휴경논 II 유출수는 0.0~94.5 mg/L, 평균 28.2 mg/L로 농도가 높아졌다. 이와 같이 유출수의 SS농도가 높아진 것은 증발산, 침투 등에 의해 유출수량이 줄어들어 반대로 유출수의 농도는 높아진 것으로 판단된다. 또한 석문지구의 토양이 세립질의 미사질 양토이고, 간척지에 조성된 벌판으로서 강한 바람 등에 의한 전도현상으로 바닥의 세립질이 부유하여 유출된 것도 하나의 원인인 것으로 판단된다. 시기적으로 볼 때는 그림 3-40과 같이 유입수에 비해 유출수의 SS농도가 높아지는 경우도 있고 낮아지는 경우도 있어 일정한 경향을 보이지 않았다.

휴경논 I에 비해 휴경논 II 유출수에서 SS농도가 낮은 경향을 보였는데, 이는 휴경논 II의 경우는 식물이 번성하여 바람 등의 영향을 적게 받기 때문이다. 유입수와 휴경지 유출수 모두 농업용수 수질기준인 15 mg/L보다 높은 값을 나타냈다.

이와 같은 현상은 식물이 자라지 못하도록 10~20 cm로 담수관리를 하는 토진리 휴경 1에서도 확인되었다. 따라서 식물을 식재하지 않고 담수하는 경우 바람 등에 의해 수체가 전도되어 부유물질이 부상하여 유출되는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

휴경논 II의 경우도 수위관리를 하지 않는 어소리 지구 휴경지와 마찬가지로 번성한 식물의 잔해가 유출되어 유출수의 SS농도가 증가되는 경향을 보인 것으로 판단된다.

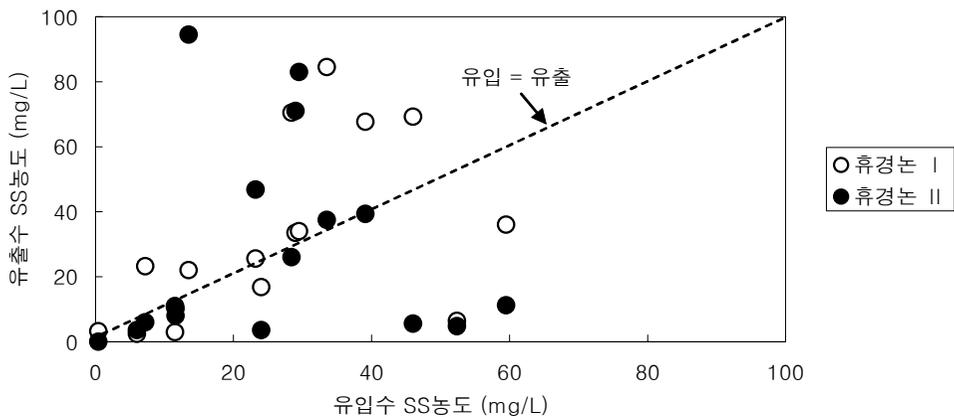


그림 3-40 석문 지구 휴경지 유입수와 유출수의 SS농도 비교

BOD는 유입수가 1.4~7.6 mg/L, 평균 4.5 mg/L였는데, 휴경논 I 유출수는 1.4~6.7 mg/L, 평균 3.6 mg/L로 낮아져 19.9%의 제거율을 보였다. 휴경논 II의 경우는 2.1~6.7 mg/L, 평균 3.3 mg/L로 낮아져 27.6%의 제거율을 보였다. 그림 3-41과 같이 유입수에 비해 유출수의 농도가 높은 경우도 있고 낮은 경우도 있어 일정한 경향을 보이지는 않았지만 유출수의 농도가 높아진 경우에도 모두 하천수의 농업용수 수질기준인 8 mg/L 이하를 나타냈다. 유입수의 BOD농도의 표준편차는 2.0이었는데 휴경논 I 유출수의 표준편차는 2.1로서 비슷하였으나, 휴경논 II 유출수의 표준편차는 1.5로서 휴경논 I에 비해 안정된 수질정화효과를 보이고 있다.

10~20 cm로 담수하는 토진리 휴경 1은 BOD가 감소되지 않고 오히려 증가한 반면 20~30 cm로 담수하는 휴경논 I의 경우 19.9%가 제거된 것으로 보아 일정 정도로 담수관리하는 경우 수질개선에 유리한 것으로 판단된다. 또한 휴경논 I, II 모두 담수관리를 하지 않는 토진리 휴경 2보다 BOD제거 효율이 높은 것으로 나타났다.

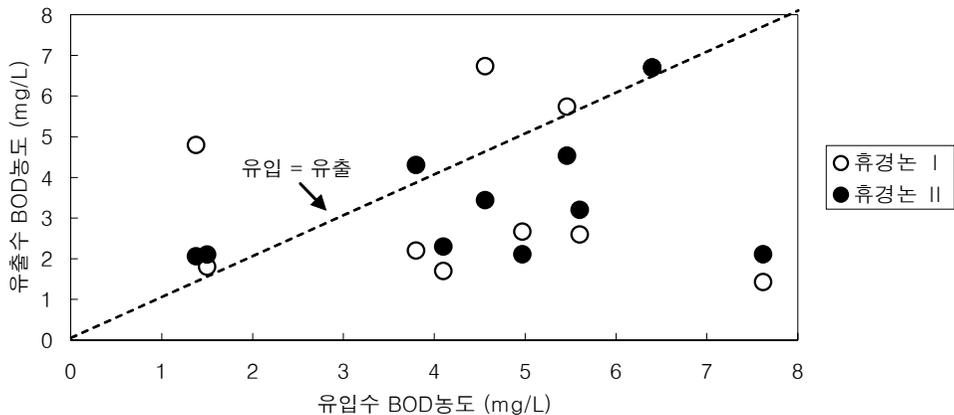


그림 3-41 석문 지구 휴경지 유입수와 유출수의 BOD농도 비교

COD의 경우 유입수는 4.5~16.6 mg/L, 평균 9.2 mg/L였는데, 휴경논 I 유출수는 5.9~16.0 mg/L, 평균 8.6 mg/L로 낮아져 6.9%의 제거율을 보였다. 반면 휴경논 II 유출수는 4.4~18.8 mg/L, 평균 9.9 mg/L를 나타내 유입수에 비해 조금 증가되었다. 그림 3-42에서와 같이 휴경논 I은 유입수에 비해 유출수의 COD농도

가 낮은 경우가 많고, 휴경논 II 유출수는 유입수에 비해 유출수의 COD농도가 높은 경우가 많았다. 또한 휴경논 I 유출수의 표준편차는 2.9로서 유입수의 표준편차 3.9에 비해 낮아 안정된 정화효과를 보여주고 있었다. 그러나 모두 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 상회하고 있었다.

10~20 cm로 담수관리하는 토진리 휴경 1의 경우도 유입수에 비해 유출수의 COD농도가 높은 반면 20~30 cm로 담수관리하는 석문지구의 휴경논 I은 적으나 COD가 감소된 것으로 나타났다. 휴경논 II의 경우는 어소리 휴경지, 토진리 휴경 2와 마찬가지로 유출수의 COD농도가 증가되었는데 이는 고사한 식물체로부터 난분해성의 유기물이 생성되었기 때문인 것으로 판단된다(須田, 2003).

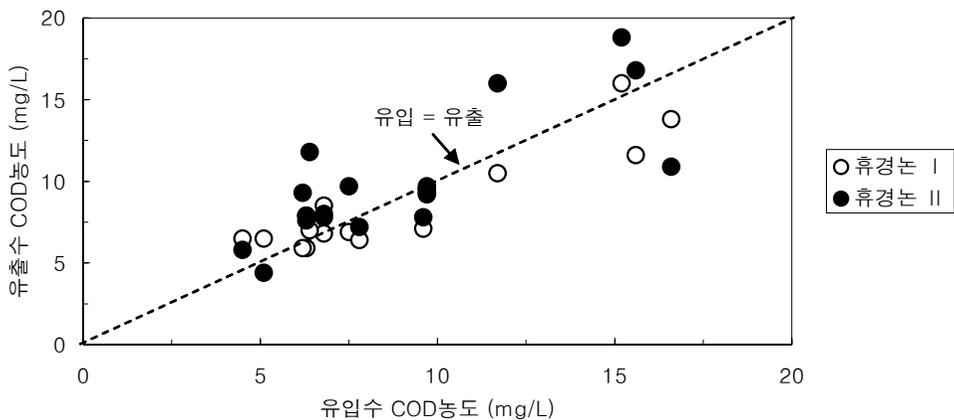


그림 3-42 석문 지구 휴경지 유입수와 유출수의 COD농도 비교

이상과 같이 유기물의 경우 수위를 20~30 cm로 관리하는 석문지구의 휴경지 I에서는 제거율이 높지는 않지만 평균적으로 BOD와 COD 모두 정화되는 경향을 보였다. 이는 수면에서 대기 중으로부터 꾸준히 재폭기가 이루어지고 또한 20~30 cm 정도의 수심은 바람에 의해 쉽게 전도될 수 있으므로 전 수심에 걸쳐 호기성 상태가 유지되기 때문에 호기성 미생물에 의해 유기물이 활발히 분해되기 때문이다. 휴경지 I의 경우는 대체적으로 토진리 휴경지나 어소리 휴경지에 비해서 유기물제거 효과가 높은 것으로 나타났다.

휴경지 II의 경우는 BOD는 제거된 반면 COD는 제거되지 않고 오히려 증가되었다. 이는 휴경지 II의 경우 토진리 휴경 2와 마찬가지로 수심이 얕기 때문에

호기성상태가 유지되어 분해가 용이한 유기물은 미생물에 의해 활발히 분해되어 BOD는 감소된 반면 고사한 식물체에서 난분해성 유기물이 용출되었기 때문에 COD는 오히려 증가된 것으로 판단된다. 따라서 수질정화측면에서 볼 때 휴경지를 그대로 방치하기 보다는 일정 정도 수심을 유지하여 식물의 성장을 억제하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

TN의 경우 유입수는 0.58~5.69 mg/L, 평균 3.46 mg/L였는데, 휴경논 I 유출수는 0.29~4.16 mg/L, 평균 1.20 mg/L로 낮아져 65.5%의 높은 제거율을 보였다. 휴경논 II의 경우도 0.27~3.15 mg/L, 평균 1.18 mg/L로 낮아져 66.0%의 제거율을 보였다. 그림 3-43과 같이 거의 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수의 농도가 낮은 경향을 보였다. 휴경지에서 질소제거의 주요 기작은 유기질소의 침전, 암모니아성 질소로의 분해, 암모니아의 휘발, 식물과 조류(algae)를 포함한 미생물에 의한 용존성 질소의 흡수, 질산화 및 탈질이다(Kadlec and Knight, 1996). 휴경논 I의 경우 바람이 많이 부는 낮에는 대기 중으로부터의 재폭기와 바람에 의한 전도현상으로 수중이 호기성 상태가 유지되어 $\text{NH}_4\text{-N}$ 이 $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 으로 변화되는 질산화가 진행되고, 바람이 잔잔한 밤에는 전도현상이 없어 수심이 깊은 곳에서는 혐기성 상태가 되어 질산화된 $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 탈질되어 질소가 제거되는 것이 질소제거의 주요 기작인 것으로 판단된다. 휴경논 II의 경우는 수심이 얇아 항상 호기성 상태가 유지되기 때문에 질산화가 활발히 이루어지고, 질산화에 의해 변화된 무기질소를 식물이 활발히 흡수제거하는 것이 주요기작인 것으로 판단된다. 유입수의 TN농도 표준편차는 1.40이었는데, 휴경논 I, II 유출수의 표준편차는 각각 1.03, 0.82로서 안정된 정화효과를 보였다.

TN의 경우 수심을 10~20 cm로 담수하는 토진리 휴경 1에 비해 수심을 20~30 cm로 관리하는 석문지구 휴경논 I이 TN정화효율이 높은 것으로 나타났다. 석문지구 휴경논 I은 담수관리를 하지 않는 어소리 휴경지보다는 TN제거 효율이 높은 반면 토진리 휴경 2나 석문 휴경논 II에 비해서는 TN제거 효율이 낮은 것으로 나타났다. 이는 어소리의 경우 2003년도부터 휴경을 시작하였기 때문에 식물의 고사체가 많은 반면 토진리와 석문지구는 2004년도부터 휴경이 시작되었기 때문에 상대적으로 식물의 고사체가 적기 때문인 것으로 판단된다. 이상의 결과를 고려할 때 TN제거 면에서 휴경지를 방치하기 보다는 가능하면 일정 정도로 수심을 관리하는 것이 유리한 것으로 판단된다. 또한 식물생장에 의한 농경지의 황폐화를 방지할 수 있다.

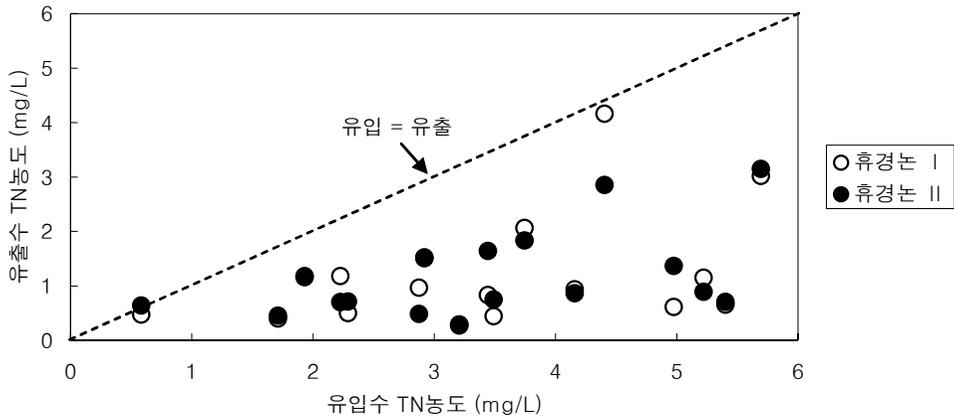


그림 3-43 석문 지구 휴경지 유입수와 유출수의 TN농도 비교

$\text{NH}_4\text{-N}$ 의 경우 유입수가 0.03~1.90 mg/L, 평균 0.45 mg/L였는데, 휴경논 I 유출수는 0.03~0.77 mg/L, 평균 0.18 mg/L로 낮아져 60.6%의 감소율을 보였다. 휴경논 II 유출수는 0.03~0.41 mg/L, 평균 0.14 mg/L로 낮아져 68.8%의 감소율을 보였다. 그림 3-44와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수에서 낮은 농도를 나타내고 있다. 이와 같이 휴경논 유출수의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 이 낮아진 것은 휴경논에서 호기성이 유지되어 질산화가 잘 이루어지고 있다는 것을 보여주는 결과이다.

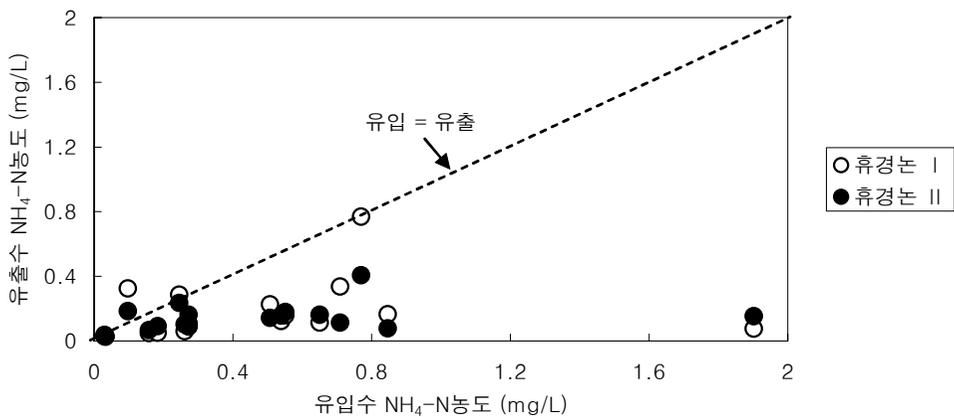


그림 3-44 석문 지구 휴경지 유입수와 유출수의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도 비교

NO₂-N의 경우 유입수가 0.00~0.36 mg/L, 평균 0.15 mg/L였는데, 휴경논 I 유출수는 0.00~0.32 mg/L, 평균 0.06 mg/L를 나타내 58.9%의 감소율을 보였다. 휴경논 II의 경우는 0.00~0.24 mg/L, 평균 0.06 mg/L로서 휴경논 I 과 같은 감소율을 보였다. 그림 3-45에서 보는 바와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수의 NO₂-N의 농도가 낮아지고 있다. 이와 같이 NO₂-N이 감소되는 것은 질산화에 의해 NO₂-N가 NO₃-N으로 변화되기 때문이다.

NO₃-N의 경우 유입수가 0.18~6.79 mg/L, 평균 2.39 mg/L였는데, 휴경논 I 유출수는 0.03~2.59 mg/L, 평균 0.64 mg/L로 낮아져 73.3%의 감소율을 보였다. 휴경논 II 유출수는 0.06~2.77 mg/L, 평균 0.68 mg/L로 낮아져 71.3%의 제거율을 보였다. 그림 3-46에서와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 휴경논 유출수의 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 이와 같이 NO₃-N의 제거율이 높은 것을 볼 때 휴경논 I 에서 질산화와 탈질이 잘 이루어지며, 휴경논 II에서는 질산화가 잘 이루어지고, 번성한 식물이 활발히 질산성 질소를 흡수 제거하는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 수심을 20~30 cm로 담수관리하는 석문지구 휴경논 I 이 수심을 10~20 cm로 관리하는 토진리 휴경 1에 비해 질소제거율이 높은 것으로 나타났다. 또한 담수관리를 하지 않는 어소리 휴경지에 비해서도 질소제거율이 높은 것으로 나타났다. 따라서 휴경지를 일정 정도로 담수관리하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

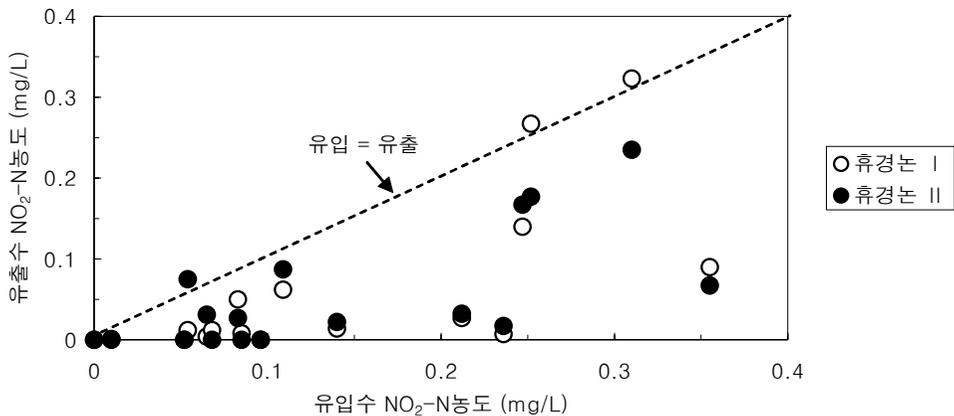


그림 3-45 석문 지구 휴경지 유입수와 유출수의 NO₂-N농도 비교

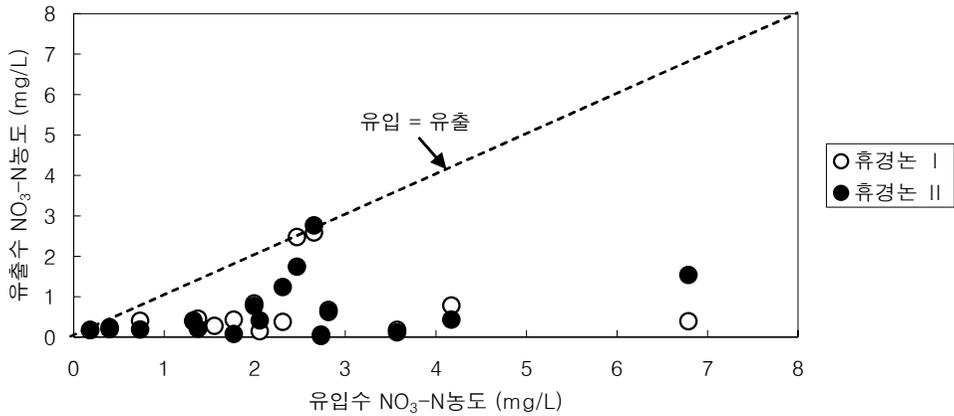


그림 3-46 석문 지구 휴경지 유입수와 유출수의 NO₃-N농도 비교

TP의 경우 유입수가 0.07~0.41 mg/L, 평균 0.26 mg/L를 나타냈는데, 휴경논 I 유출수는 0.04~0.24 mg/L, 평균 0.10 mg/L를 나타내 62.7%의 제거율을 보였다. 휴경논 II의 경우는 0.03~0.19 mg/L, 평균 0.10 mg/L를 나타내 61.4%의 제거율을 보였다. 그림 3-47과 같이 휴경지 유출수는 모든 시기에 유입수에 비해 유출수의 TP농도가 낮게 나타났으며, 유출수가 대부분 농업용수 수질기준인 0.1 mg/L 이하를 만족하였다. 인의 주요 제거기작은 흡착, 침전, 조류(algae) 및 식물에 의한 흡수 등으로 입자성인은 주로 침전하고, 용존성인은 식물 및 조류에 의해서 흡수되어 제거되었다고 판단된다. 휴경논 II의 TP제거율이 높은 것은 휴경논 I의 TP 제거 주요 기작인 침전, 토양 흡착 등의 물리적 작용에 더하여 식물에 의해 흡수 제거는 기작이 더해졌기 때문이다.

PO₄-P의 경우도 유입수가 0.02~0.33 mg/L, 평균 0.16 mg/L였는데, 휴경논 I 유출수는 0.00~0.16 mg/L, 평균 0.03 mg/L를 나타내 80.4%의 높은 제거율을 보였다. 휴경논 II 유출수의 경우도 0.00~0.08 mg/L, 평균 0.04 mg/L를 나타내 76.6%의 높은 제거율을 보였다. 그림 3-48과 같이 모든 시기에 유입수에 비해 휴경지 유출수의 농도가 낮아지는 경향을 보였다.

이상과 같이 인의 경우도 석문지구 휴경논 I, II가 토진리나 어소리 휴경지에 비해 대체적으로 제거율이 높은 것으로 나타났다. 따라서 휴경지를 담수관리하는 것이 인의 제거면에서도 좋은 것으로 판단된다. 휴경논 I에 비해 휴경논 II의

인 제거율이 높은 것은 식물에 의한 흡수제거 기작이 더해지기 때문이지만 어소리 휴경논에서와 같이 휴경이 진행됨에 따라 식물고사체가 쌓이면 오히려 오염원으로 작용할 가능성이 있으므로 식물이 자라지 못하도록 휴경지를 담수관리하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

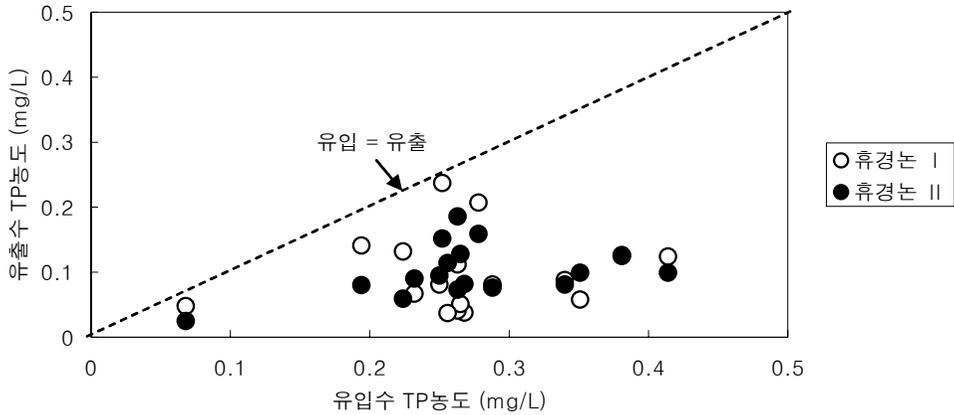


그림 3-47 석문 지구 휴경지 유입수와 유출수의 TP농도 비교

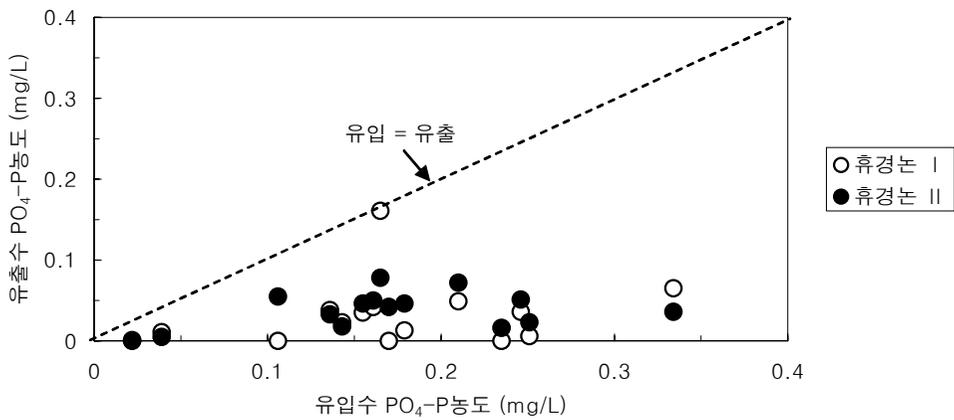
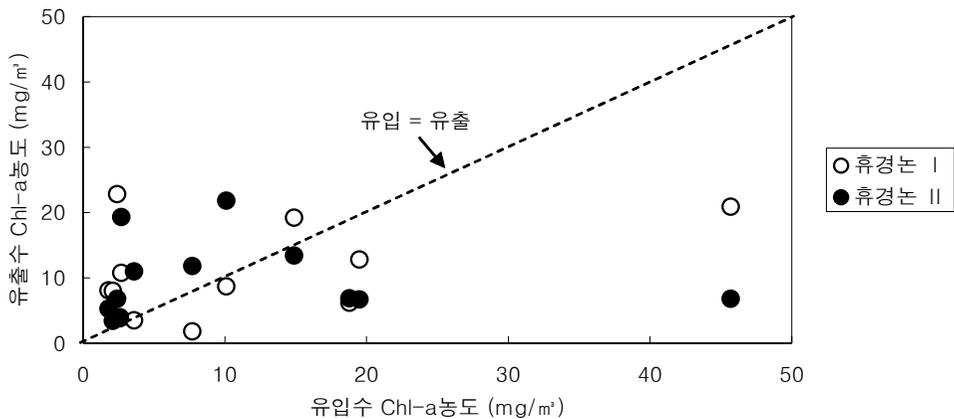


그림 3-48 석문 지구 휴경지 유입수와 유출수의 PO₄-P농도 비교

이상과 같이 휴경지는 TN, TP와 같은 영양염류가 유입수에 비하여 유출수에서 지속적으로 낮은 것으로 나타나 영양염류 제거효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 농지배수 등을 휴경논을 이용하여 수질을 정화한다면 질소와 인이 제거되어 주요 농업용수원인 저수지의 부영양화에 의한 조류발생을 방지하는데 큰 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다. 휴경논 I의 경우는 담수상태를 유지하여 식물의 성장을 억제하기 때문에 식물의 고사에 의한 재용출의 염려가 없다. 그러나 휴경지 II의 경우는 번성한 식물의 고사에 의해 영양염류가 재용출될 우려가 있고, 발달한 식물의 뿌리 때문에 휴경지를 농경지로 재이용할 때 많은 장애가 있으므로 가능하면 휴경지의 담수관리를 통해 농경지가 황폐화되는 것을 방지하는 동시에 수질정화기능을 갖도록 관리하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

Chl-a의 경우는 유입수가 1.8~45.7 mg/m³, 평균 12.4 mg/m³였는데, 휴경논 I 유출수는 1.8~22.8 mg/m³, 평균 10.6 mg/m³를 나타내 15.2%의 제거율을 보였다. 휴경논 II 유출수는 3.4~21.8 mg/m³, 평균 9.8 mg/m³로 낮아져 21.5%의 제거율을 보였다. 그림 3-49와 같이 시기별로 유입수에 비해 유출수에서 Chl-a농도가 높은 경우도 있고 낮은 경우도 있어 일정한 경향을 보이지는 않았지만 휴경지는 Chl-a를 제거하는 기능도 있는 것으로 나타났다.



나. 물수지 및 물질수지 분석

논에서 물은 관개용수와 강우의 형태로 유입하며 물은 배수로의 지표유출수, 대기로의 증발산, 지하로의 침투수의 형태로 유출한다. 증발산량은 수면 증발과 비의 잎으로부터의 증산으로 구성된다. 본 연구에서 강우량은 서산관측소의 강우량 자료를 이용하였으며 유입량 즉, 관개용수와 유출량, 침투량은 계측기를 이용하여 실측하였다. 본 연구에서는 식생이 거의 없는 휴경논 I에 대하여 물수지를 분석하였기 때문에 수면증발량만 측정하고 증산은 고려하지 않았다.

논은 담수 상태로 유지되므로 이에 대한 물수지는 담수심의 변화량으로 표현할 수 있다. 논에서의 물수지는 유입량과 강우량으로부터 증발산량, 침투량, 배수량을 제함으로서 담수심을 계산하여 얻을 수 있으며, 이를 그림으로 나타내면 그림 3-50과 같으며 포장의 담수심은 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.

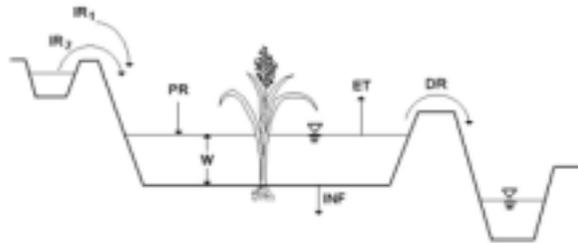


그림 3-50 논에서의 물수지

$$W_j = W_{j-1} + IR_{1j} + IR_{2j} + PR_j - (DR_j + ET_j + INF_j) \quad (1)$$

여기서, IR_1 = 지하수 관개량(mm), IR_2 = 빗눈 유입량(mm) PR = 일강우량 (mm), DR = 유출량(mm), ET = 증발산량(mm), INF = 침투량(mm), W = 담수심(mm) (첨자 j는 j일을 나타낸다.)

석문지구 휴경논의 용수 유입량과 유출량을 측정하기 위하여 유입부와 유출부에 웨어를 설치하여 실측하였으며 침투량계와 증발계를 설치하여 휴경논에서의 침투와 증발에 의해 발생하는 손실량을 실측하였다. 계측된 데이터를 이용하여 2004년 7월 1일부터 2005년 11월 30일까지 휴경논의 물수지를 분석하였다. 2004년에는 7월 1일부터 11월까지 153일간 측정하였으나, 2005년의 경우는 계측기기 고장으로 인하여 8월부터 11월까지 122일간 물수지를 분석하였다.

1) 강우량

2004년도 강우량은 7, 8, 9, 10, 11월이 각각 321.9 mm, 131.2 mm, 282.6 mm, 1.8 mm, 70.5 mm로서 조사기간 동안 총 808 mm가 내렸고, 7월과 9월에 많이 내렸다. 2005년도에는 8, 9, 10, 11월이 각각 270.5 mm, 228.7 mm, 30.9 mm, 19.6 mm로서 총 549.7 mm가 내렸으며, 8월과 9월에 많이 내렸다.

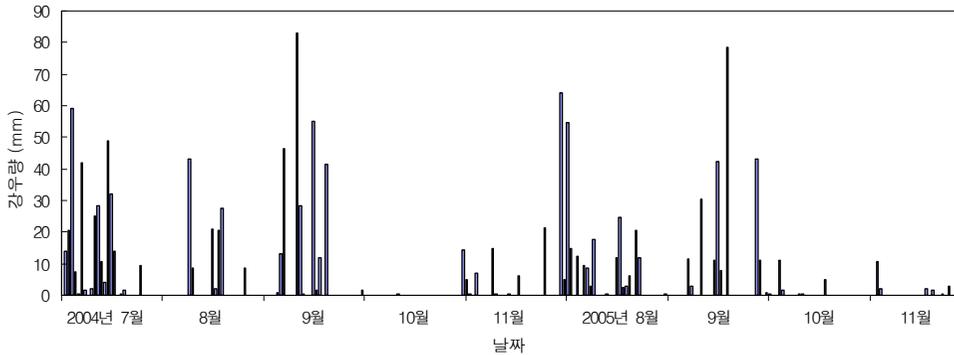


그림 3-51 조사기간 강우량

2) 증발량

물수지의 손실량을 분석하기 위해 증발량과 침투량을 시간별로 실측하였다. 휴경논 I 은 20~30 cm로 항상 담수하였기 때문에 식물이 자라지 못하여 식물에 의한 증산량은 없는 것으로 하고 수면에서의 증발량만을 측정하였다. 증발량은 지름 120 cm, 높이 25 cm의 대형 증발계에 부표식 수위계를 장착하여 실시간 측정하였다. 증발량을 측정한 결과 2004년도의 총 증발량은 32.1 cm이며, 평균 0.21 cm/d로 나타났다. 동 기간의 서산관측소 일평균 증발량 0.26 cm/d와 비교하였을 때 유사하게 분석되었다. 2005년도 조사기간 동안의 총 증발량은 29.3 cm이며, 일평균 증발량은 0.24 cm/d로 나타났다.

3) 침투량

침투량 측정을 위해 휴경논 I 의 유입부와 유출부 부근에 침투계를 설치하였다. 침투계는 지름 20 cm, 높이 60 cm의 관에 수위계를 장착하여 실시간 측정이 가능하도록 하였다. 침투계 자료의 분석결과 2004년도에는 유입부와 유출부의 침투량

은 큰 차이 없이 조사기간 동안 총 30.6 cm로서 일평균 2.0 mm/d를 나타냈다. 2005년도에는 총 침투량이 39.1 cm로서 일평균 3.21 mm/d로 나타났다. 국내 논지역의 일평균 침투량이 3.0~7.0 mm라고 했을 때 비교적 낮은 침투량을 나타내었다.

4) 물수지

유희농지의 물수지 분석을 위해 유입부와 유출부에 웨어를 설치하고 유·출입량을 실시간 측정하기 위해 웨어에 부표식 수위계를 설치하였다. 본 연구의 유희농지는 담수심을 약 20~30 cm로 유지하기 위해 유출입이 자유롭게 하였으며, 유입부로 일정한 수량이 유입되도록 하였다.

웨어 유출입수의 실시간 수위자료를 이용하여 식(2)로 유량을 계산하였다.

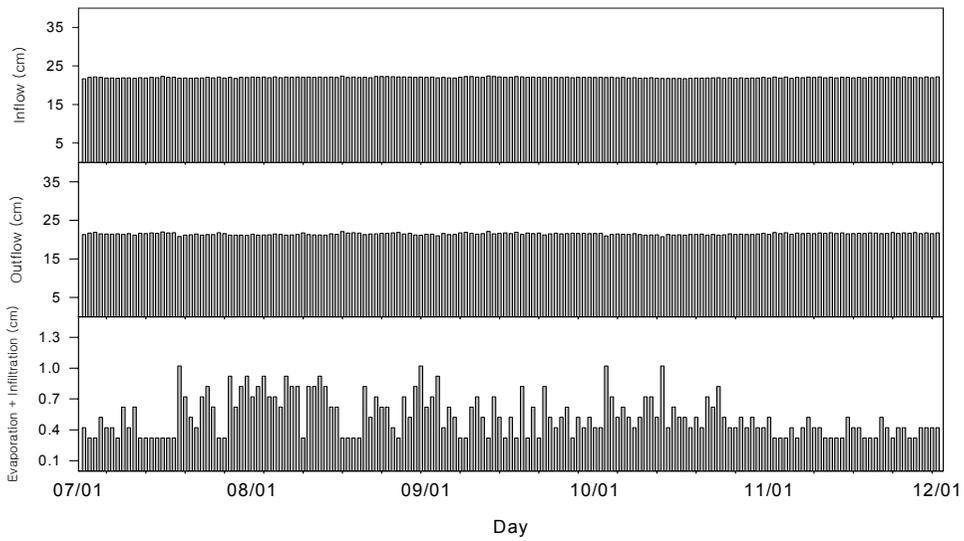
$$Q = \frac{8}{15} C \sqrt{2gh}^{\frac{5}{2}} \quad (2)$$

여기서, Q : 유량(m^3/s), C : 웨어계수, g : 중력가속도, h : 수위(m)

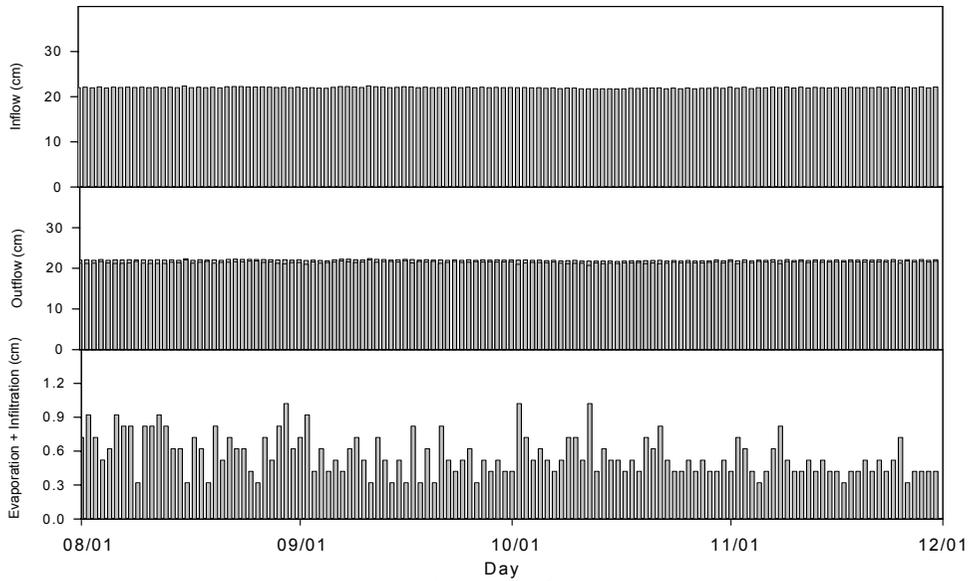
조사기간 동안 유입량은 평균 67.27 m^3/d 로 거의 일정한 양을 유지하였고, 이에 따라 유출량도 평균 56.42 m^3/d 로 일정한 값을 나타냈다. 연구기간동안의 체류시간은 휴경논의 총담수유량과 총유입량 관계에서 13.8일로 나타났다.

총유입량은 18,499 m^3 에 대해 총유출량은 15,516 m^3 으로 감소되었는데, 이는 증발량과 침투량에 의한 손실로 판단된다.

유입량 중 웨어를 통한 유출량이 83.9%로 가장 높았고, 증발량과 침투량은 각 9.7%와 9.2%를 나타냈다. 유입량에 비하여 유출량 및 소비수량(증발량 + 침투량)이 상대적으로 다소 높게 산정된 이유는 지속적인 용수공급이 이루어지므로 휴경논의 증발량이 실측된 대형 증발계보다 적은 양이 증발되었고, 조사기간 동안의 총강우량 1,358 mm 중 일부가 유효우량으로 사용되었기 때문이다. 또한 기타 손실은 휴경논두렁을 비닐로 덮어 침투손실을 최소화하였다.



(a) 2004년



(b) 2005년

그림 3-52 석문지구 휴경논 I 물수지 분석 결과

5) 물질수지

조사기간의 총 물질수지 분석결과 SS는 표 3-8과 같이 479.1 kg이 유입되고, 493.4 kg이 유출되었다. 따라서 SS는 유입량에 비해 유출량이 많았기 때문에 SS의 정화효과는 없었던 것으로 나타났다. 이와 같이 SS가 제거되지 않고 증가된 것은 증발산, 침투 등에 의해 유출수량이 줄어들어 반대로 유출수의 농도는 높아진 것으로 판단된다. 또한 석문지구의 토양이 세립질의 미사질 양토이고, 간척지에 조성된 벌판으로서 강한 바람 등에 의한 전도현상으로 바닥의 세립질이 부유하여 유출된 것도 하나의 원인인 것으로 판단된다.

BOD는 유입량과 유출량이 각각 83.2 kg과 55.9 kg으로 제거율은 32.8 %이었다. COD는 유입량과 유출량이 각각 170.2, 133.4 kg으로서 21.6 %가 제거되었다. 영양염류의 경우 TN은 67.3 kg이 유입되고 18.6 kg이 유출되어 72.4 %가 제거되었다. TP는 4.8 kg이 유입되고 1.6 kg이 유출되어 66.7 %가 제거되었다. 휴경논 I에서는 유기물에 비해 영양염류의 제거율이 높은 것으로 나타났다.

이와 같이 휴경지는 유기물과 영양염류를 정화하는 기능이 있으므로 수질개선공간으로 활용할 가치가 있다.

표 3-8 휴경논 I의 물질수지

구 분	유입수			유출수		
	평균농도 (mg/L)	총유입량 (m ³)	총부하량 (kg)	평균농도 (mg/L)	총유입량 (m ³)	총부하량 (kg)
SS	25.9	18,499	479.1	31.8	15,516	493.4
BOD	4.5		83.2	3.6		55.9
COD	9.2		170.2	8.6		133.4
TN	3.64		67.3	1.20		18.6
TP	0.26		4.8	0.10		1.6

다. 식물상 및 식물체 조사

1) 식물상 조사

휴경논 I은 6개의 방형구 (1m×1m)를 대상으로 조사를 실시하였으며, 20~30%의 낮은 피도를 나타내고 있다. 이는 봄부터 수심 20~30 cm로 담수상태를 유지하여 식물의 성장이 억제되었기 때문으로 판단된다. 대상지에서 발견된 식생종은 갈대, 물피, 부들 3종으로 종다양성이 낮았으며, 갈대가 우점하고 있는 비율은 51

%인 것으로 조사되었다. 담수가 오랫동안 진행된 상태이기 때문에 갈대와 같은 호수성 식생종 이외의 식생은 미미한 것으로 조사되었다.

휴경논 II는 방형구 8곳에 대하여 식물상 조사를 실시하였다. 담수심을 10 cm 이하로 유지한 상태에서 식생의 피도는 50~55 %를 나타내고 있으며, 부들, 갈대, 개구리밥, 세모고랭이, 돌피, 미국개기장, 차풀, 미국가막살이, 고마리여뀌, 나자스말, 물달개비 등 총 11종이 발견되어 휴경논 I 보다는 많은 종이 발견되었다. 우점하고 있는 식물은 부들, 갈대, 세모고랭이, 돌피 4종이며, 개구리밥은 전 지역에 대해 발견되었으나 그 밀도는 낮은 것으로 조사되었다. 무관리 휴경논은 휴경논 I 과 II의 식물종에 강아지풀, 새콩, 사초가 추가되어 14종이 발견되었으며, 식생의 피도는 75~87 %를 나타냈다.

이상과 같이 무관리 휴경논의 경우 잡초 및 식물의 생장이 무성하여 75~87 %의 피도를 나타낸 것과 비교하여 휴경논 I 과 II의 피도는 각 20~30 %, 50~55 % 정도를 나타내고 있다. 따라서 전혀 물관리를 하지 않는 휴경논은 식물이 번성하여 황폐화될 우려가 높은 것을 알 수 있다. 휴경논 I 과 II 사이에 수질정화 효율에는 큰 차이가 없고, 수위관리를 하는 휴경논 I 이 식물의 피도가 낮은 것으로 나타나 식물의 번식에 의한 논의 황폐화를 막기 위해서는 휴경논 I 과 같이 일정수위 이상 담수를 유지하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

표 3-9 휴경논 I, II의 식물상 및 식물체 분석

시험포		우 점 식물종	분포면적 (m ²)	식물체내 P함유량 (mg/g)	최대 생물량 (g DM/m ²)	P 흡수량 (g/m ²)	지상부 생산 (kg DM/yr)	지상부에 의한 연간 P 흡수량 (kg P/yr)
휴경논 I	2004년	갈대	363	0.42	161.1	0.068	58.40	0.023
	2005년	갈대	426	0.47	487.0	0.229	176.78	0.083
휴경논 II	2004년	갈대	188	0.43	147.9	0.062	27.81	0.012
		돌피	258	0.31	155.3	0.048	40.07	0.012
	2005년	갈대	204	0.38	565.2	0.214	106.26	0.040
		돌피	258	0.42	320.9	0.134	82.79	0.034

2) 식물체의 영양물질 분석

식물체의 인성분을 분석한 후 이 결과에 건물중을 곱하여 각 지점의 식물별 인 함유량을 산정하였다. 인성분의 분석은 건물량을 측정된 식물체를 잎, 줄기,

뿌리로 나눈 후 식물체 분쇄기를 통하여 1 mm 이하의 분말로 만들었다. 분말 시료 0.5 g에 1 mL의 conc. H_2SO_4 와 50% $HClO_4$ 용액을 10 mL가한 후 약한 열로 초기 반응이 일어날 때까지 처리한 다음, 고온에서 약 2시간 동안 용액이 투명하게 될 때까지 분해하였다. 분해된 용액을 냉각시켜 증류수로 희석한 다음, 총인은 Vanadate법에 따라 발색시켜 비색정량하였다.

지상부 생산과 지상부에 의한 연간 P흡수량은 건물중 최대생물량을 이용하여 계산하였다. 지상부 생산은 단위면적당 건물중 최대생물량을 식물 분포면적에 곱하여 산출하였고, 인 흡수량(kg/yr)은 단위면적당 인 함량에 식물 분포면적을 곱하여 산출하였다(Na et al., 1996).

식물체 내 P함유량은 휴경논 I이 2004년도와 2005년도에 각각 0.42, 0.47 mg/g으로 비슷하게 나타났다. 휴경논 II의 경우는 2004년도는 갈대와 돌피가 각각 0.43, 0.31 mg/g이고, 2005년도는 각각 0.38, 0.42 mg/g이었다.

최대 생물량은 휴경논 I이 2004년도와 2005년도에 각각 161.1, 487.0 g DM/m²로 2004년도에 비해 2005년도에 높아졌다. 이는 2005년도에는 식물이 발아하는 시기인 봄에 담수를 제대로 하지 못하였기 때문이다. 휴경논 II의 경우는 주 우점종인 갈대와 돌피를 합한 최대 생물량이 2004년도와 2005년도가 각각 303.2, 886.1 g DM/m²로 휴경지 I에 비해 매우 높은 것으로 나타났다.

P흡수량은 휴경논 I이 2004년도에는 0.068 g/m²이고 2005년도에는 0.229 g/m²으로서 2005년도가 높게 나타났다. 휴경논 II의 경우는 갈대와 돌피를 합한 P흡수량이 2004년도에는 0.110 g/m²이고, 2005년도가 0.348 g/m²으로서 휴경논 II의 경우도 2005년도에 증가된 것으로 나타났다. 이와 같이 2005년도에 증가된 것은 봄에 담수를 제대로 하지 못하여 식물이 성장했기 때문이다. 휴경논 I과 II사이에는 담수상태를 유지하여 식물의 생장이 제어된 휴경논 I이 적게 나타났다.

지상부 생산량은 휴경논 I이 2004년도에 58.40 kg DM/yr이고, 2005년도가 176.78 kg DM/yr로서 식물의 피도가 높아진 2005년도에 증가되었다. 휴경논 II의 경우는 2004년도에 갈대가 27.81 kg DM/yr, 돌피가 40.07 kg DM/yr이었고, 2005년도에는 갈대가 106.26 kg DM/yr, 돌피가 82.79 kg DM/yr로 2005년도에 높게 나타났다. 지상부에 의한 연간 P흡수량은 휴경논 I이 2004년도에 0.023 kg P/yr이고, 2005년도가 0.083 kg P/yr으로 2005년도에 증가되었다. 휴경논 II의 경우는 2004년도에 갈대와 돌피를 합한 P흡수량이 0.024 kg P/yr, 2005년도가 0.074 kg P/yr로서 2005년도에 증가되었다. 휴경논 I에 비해 휴경논 II가 연간 P흡수량이 낮은 것은 식물

의 피도가 높아 서로간의 경쟁 때문에 P의 흡수에 어려움이 있었기 때문이다. 즉, 유입수의 P는 같은 반면 휴경논 I에는 식물이 적어 P를 충분히 흡수할 수 있었던 반면, 휴경논 II는 식물의 개체수가 많아 각 개체가 P를 흡수하는데 제약이 있었기 때문이다.

라. 토양변화특성

휴경논 I의 토성은 휴경논 조성 전에는 모래가 32.3%, 실트가 61.7%, 점토가 6.0%였는데, 2005년 4월에는 모래, 실트, 점토가 각각 32.0%, 62.0%, 6.0%로서 휴경논 조성전과 큰 차이가 없었다. 2005년 11월에는 모래, 실트, 점토가 각각 25.0%, 71.0%, 4.0%를 나타내 모래 및 점토의 비율은 줄어들고 대신에 실트의 비율이 높아졌다. 모래는 무거운 입자이기 때문에 관개과정에서 침전되므로 유입수 중에는 모래에 비해 실트의 비율이 높기 때문에 휴경논에 침전되는 모래의 비율이 적으므로 퇴적물 중의 모래비율이 상대적으로 감소된 것이다. 점토의 함유율이 감소된 것은 유입수와 함께 유입된 점토성분이 바람 때문에 침전되지 않고, 침전된 경우에도 미립질 점토성분이 바람 등에 의해 부유되어 유출수와 함께 유출되었기 때문이다. 이는 휴경논 I에서 SS성분이 유입수에 비해 유출수에서 높아진 것을 통해서도 확인 할 수 있다. 휴경논 I에서 실트가 증가된 것은 유입수 중의 실트성분이 침전되고, 점토 성분에 비해 무겁기 때문에 바람에 의해 침전된 것이 잘 부유되지 않기 때문이다.

휴경논 II의 경우는 2005년 4월에 모래, 실트, 점토의 함유율이 각각 40.0%, 55.0%, 5.0%이고, 2005년 11월에는 모래, 실트, 점토가 각각 37.0%, 59.0%, 4.0%로서 모래의 함유율은 증가된 반면, 실트와 점토의 함유율은 감소되었다. 휴경논 II의 경우 모래의 함유율이 증가되고, 실트와 점토의 함유율은 감소되었다. 휴경논 II의 경우는 수심이 얇고 유속이 빠르기 때문에 실트와 점토는 잘 침전되지 않아 유출수와 함께 유출된 반면 모래는 이들에 비해 무겁기 때문에 잘 침전되므로 휴경논 II 토양에는 상대적으로 모래의 함유율이 높아 졌다.

표 3-10 석문지구 휴경논 I, II의 토성변화특성

분 류		토성			
		Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	토성
조성전		32.3	61.7	6.0	SiL
휴경논 I	2005. 4	32.0	62.0	6.0	SiL
	2005. 11	25.0	71.0	4.0	SiL
휴경논 II	2005. 4	40.0	55.0	5.0	SiL
	2005. 11	37.0	59.0	4.0	SiL

석문지구 휴경논 I, II 토양의 pH는 시간이 경과함에 따라 낮아져 산성을 나타내는 경향을 보였다. 그 외 유기물, 유효인산, TN, TP, EC, CEC의 경우는 시간이 경과함에 따라 높아지기도 하고 낮아지기도 하여 일정한 경향을 보이지 않았다.

표 3-11 석문지구 휴경논 I, II 토양의 화학성 변화 특성

분 류		pH(1:5)	유기물 (%)	유효인산 (ppm)	TN (mg/kg)	TP (ppm)	EC (dS/m(1:5))	CEC (me/100g)
조성전		6.7	0.40	23.40	677.80	399.20	0.40	6.70
휴경논 I	2005. 4	4.8	0.57	32.28	809.54	389.90	0.16	8.70
	2005.11	4.6	0.47	30.32	435.93	333.01	0.27	6.20
휴경논 II	2005. 4	4.9	0.94	42.61	627.06	349.59	0.22	7.55
	2005.11	4.6	1.38	31.10	910.69	419.90	0.38	9.35

5. 여울 및 웅덩이 조성을 통한 수질개선

여울과 웅덩이의 반복상태가 이어지면 여울에서는 많은 산소가 유입되어 다양한 생물이 성장하고, 이러한 생물이 수중의 오탁 물질을 포식·흡착함으로써 물을 정화한다. 웅덩이에서는 생물에게 포식·흡착되지 않는 대형 물질이나, 여울에서 형성된 생물막에서 박리된 것이 침전된다.



그림 3-53 여울, 웅덩이의 수질정화 기구

그러나 자정 작용의 범위를 넘으면 수로는 포화상태가 되어 황화수소, 메탄 등의 가스가 발생하여 수로 환경은 악화된다. 물의 색깔은 가장 오탁한 경우 검은색 내지 흑갈색을 띠며, 상태가 좋아질수록 흑갈색에서 다갈색, 녹색 내지 노란색으로 변화된다.

산소를 흡수하는 다종다양한 생물이 수중의 오염물질을 흡수·흡착할 수 있는 여울과 식물에 흡수·흡착되지 않는 대형물질이나 여울에서 박리된 미생물막이 침전되어 정화되도록 웅덩이를 시험포 내에 조성하여 휴경지에서의 수질정화특성을 분석할 수 있도록 하였다.

조성된 여울과 웅덩이는 그림 3-54와 같이 폭 42 m × 길이 47 m의 휴경지에 직경 0.5~1 m, 깊이 0.5 m의 웅덩이를 조성하였으며 식물은 별도로 식재하지 않고 자연도래에 의해 수생식물이 생육하도록 하였다. 시험용수는 석문담수호 유입부에 펌프를 설치하여 공급하였고 공급된 용수는 일정하게 수위가 유지되는 유량조정수로에 유입되게 하였다. 유량조정수로에 유입된 용수는 유입공을 통하여 시험포장으로 유입되도록 하였다. 유량조정수로는 수심이 일정하게 유지되기 때문에 시험포장으로 유입되는 유량은 일정한 것으로 가정하였으며, 이때의 유량은 80.6 m³/d였다.

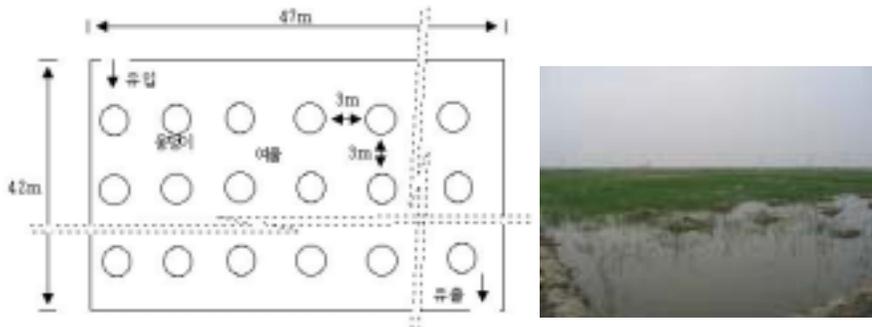


그림 3-54 여울과 용덩이 조성도 및 전경

수질은 수질오염공정시험법에 의거하여 분석하였다. 대상지구의 식물상을 조사하기 위해 방형구 (1m × 1m) 6개를 설치하였고, 식물체의 영양물질 흡수량을 조사하기 위해 식물체내의 인함유량, 최대 생물량, 인 흡수량 등의 화학성분을 분석하였다. 유입수량과 유출수량 조사 설비는 2004년 6월부터 2005년 10월까지 주로 관개기에 2004년도에 153일, 2005년도에도 153일 운영하였다.

1) 수질변화특성

조사기간 중 유입수의 수온은 9.2~29.7 °C로서 평균 23.9 °C를 나타냈고, 유출수는 14.6~31.3 °C, 평균 24.5 °C를 나타내 큰 차이를 보이지 않았다. 수온은 미생물의 활동에 많은 영향을 미치게 되며 BOD와 TN의 제거율에 영향을 미치게 된다. 수온이 0°C에서 30°C로 상승하면서 BOD 제거효율은 전체 53%에서 62%로 다소 증가하게 된다 (Bruce et al., 1999). 조사된 연구대상 시험포의 수온에서는 미생물이 활발하게 분해활동을 할 수 있고 수생식물도 활발하게 성장하기 때문에 수질개선효과가 있을 것으로 판단된다.

유입수의 pH는 7.0~9.1로서 알카리성을 보이는 경우도 있었으나 평균 7.8로서 대부분 중성을 나타냈다. 유출수도 유입수와 큰 차이가 없이 7.1~8.5, 평균 7.6으로 중성을 나타냈으며, 모두 농업용수 수질기준인 6.0~8.5를 만족하고 있었다.

EC는 유입수가 220.0~939.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 평균 551.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 나타냈고, 유출수는 186.0~888.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 평균 495.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 나타내 유입수에 비해 유출수가 낮은 전기전도도를 나타냈다. 이와 같이 유출수와 유입수에 관계없이 모두 3,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 보다 크게 낮을 뿐만 아니라 대부분 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하이기 때문에 농업용수로 재이용할 경우 장애가 발생하지 않을 것으로 판단된다.

표 3-12 여울-옹덩이 유입수 및 유출수 농도

구 분	수온 (°C)	pH	EC (μ S/cm)	SS (mg/L)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	TP (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	Chl- <i>a</i> (mg/m ³)	
유입수	최소값	9.2	7.0	220.0	0.4	3.2	1.4	4.5	0.58	0.00	0.18	0.03	0.07	0.02	1.8
	최대값	29.7	9.1	939.0	59.5	13.4	7.6	16.6	5.69	0.36	6.79	1.90	0.41	0.33	45.7
	표준편차	5.1	0.5	228.3	16.8	2.9	2.0	3.9	1.40	0.11	1.58	0.45	0.08	0.08	13.3
	평균	23.9	7.8	551.7	25.9	6.3	4.5	9.2	3.46	0.15	2.39	0.45	0.26	0.16	12.4
여울- 옹덩이 유출수	최소값	14.6	7.1	186.0	0.4	1.8	0.6	4.4	0.24	0.00	0.00	0.02	0.06	0.00	0.3
	최대값	31.3	8.5	888.0	24.4	7.5	6.0	18.6	4.22	0.30	5.72	0.22	0.31	0.13	17.9
	표준편차	4.8	0.4	230.8	7.0	2.0	1.6	4.7	1.19	0.09	1.75	0.06	0.08	0.05	5.2
	평균	24.5	7.6	495.5	9.6	4.9	2.7	9.6	1.28	0.03	0.98	0.10	0.15	0.07	5.1

DO는 유입수가 3.2~13.4 mg/L, 평균 6.3 mg/L로서 농업용수 수질기준인 2 mg/L 이상을 만족하였고, 유출수도 1.8~7.5 mg/L, 평균 4.9 mg/L로서 농업용수 수질기준을 만족하였다. 그림 3-55와 같이 대부분 유입수에 비해 유출수의 농도가 낮아졌는데, 이는 미생물이 오염물질을 분해하는데 산소를 소비했기 때문으로 판단된다.

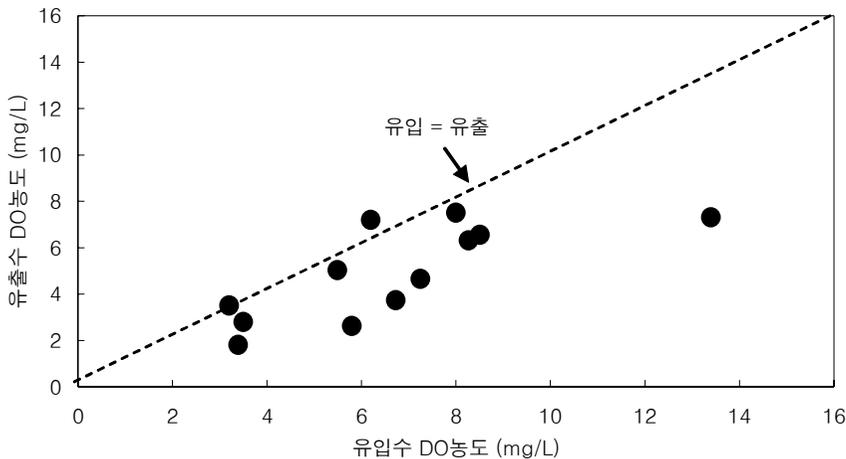


그림 3-55 여울-옹덩이 시험포 유입수와 유출수의 DO농도 비교

유입수의 SS농도는 0.4~59.5 mg/L, 평균 25.9 mg/L로서 호소의 농업용수 수질기준인 15.0 mg/L를 초과하는 경우도 있었다. 유출수는 0.4~24.4 mg/L, 평균 9.6 mg/L로 크게 낮아져 평균 63.0%의 제거율을 보였다. 그림 3-56과 같이 대부분 유

입수에 비해 유출수의 SS농도가 낮았으며 15.0 mg/L 이하를 나타내 농업용수 수질기준을 만족하였다. SS제거량을 살펴보면 유입수량이 80.6 m³/d이므로 2004년과 2005년에 각각 153일간 유입되었기 때문에 각각 325.6 kg-SS가 되므로 유입총량은 651.2 kg-SS이다. 유출된 양은 2004년도와 2005년도에 각각 118.4 kg-SS이므로 총 236.8 kg-SS이다. 따라서 시험기간에 제거된 SS총량은 414.4 kg-SS이다. 이와 같이 일정한 수심을 갖는 휴경논 I 과 II에 비해 다양한 수심을 갖는 휴경지를 통과하면서 중력에 의한 침전, 수생식물과의 접촉침전 등에 의하여 높은 SS제거율을 보였다. 따라서 휴경지에 웅덩이, 여울 등을 조성하여 다양한 수심을 갖도록 하고 물을 흘려보낸다면 수질개선효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 유입수의 SS농도에 대한 표준편차는 16.8이었는데 유출수는 7.0으로 나타나 유출수는 안정된 경향을 보였다.

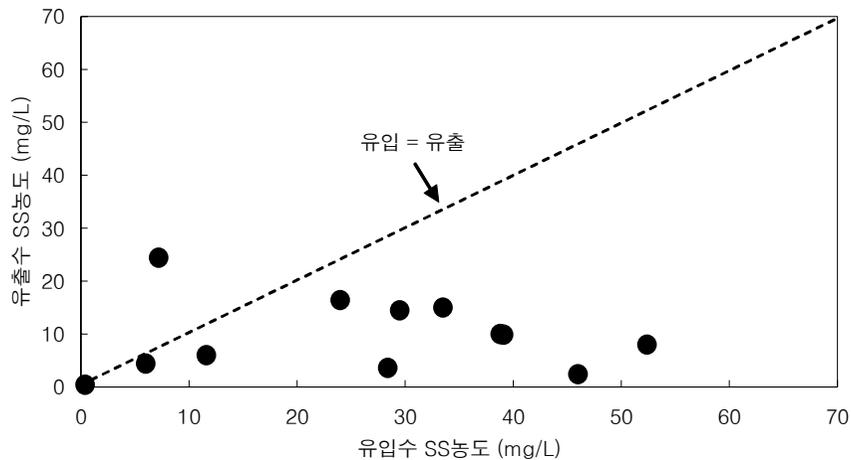


그림 3-56 여울-웅덩이 시험포 유입수와 유출수의 SS농도 비교

유입수의 BOD는 1.4~7.6 mg/L, 평균 4.5 mg/L였는데, 유출수는 0.6~6.0 mg/L, 평균 2.7 mg/L로 낮아져 40.0%의 BOD제거효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 유출수와 유입수 모두 농업용수 수질기준인 8.0 mg/L 이하를 만족하였다. 조사기간 중 BOD는 총 111.0 kg-BOD가 유입되고, 총 66.6 kg-BOD가 유출되었으므로 40.0%인 44.4 kg-BOD가 제거되었다. 그림 3-57과 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수의 BOD농도가 낮은 경향을 보였다. 이는 유기물이 SS성분과 함

계 침전되고 미생물에 의해서 분해되었기 때문이다. 수중식물 줄기나 잎, 침전물에 호기성 미생물이 부착되어 형성된 얇은 미생물막(microbial film)과 유기물이 반응하여 BOD가 제거된다 (Brix, 1993). 2004년 10월과 2005년 7월의 BOD 제거율이 다소 떨어진 것은 강우발생으로 인하여 형성된 미생물막이 교란되어 미생물막의 작용이 원활하게 이루어지지 않았기 때문이라 사료된다. BOD의 경우 유입수의 표준편차는 2.0이었는데 유출수의 표준편차는 1.6으로 다소 안정된 경향을 보였다.

여울-웅덩이 시험포에서의 BOD제거율은 휴경논 I 과 II에 비해 높게 나타났다. 따라서 휴경지에 여울과 웅덩이를 조성하면 수질정화효과를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

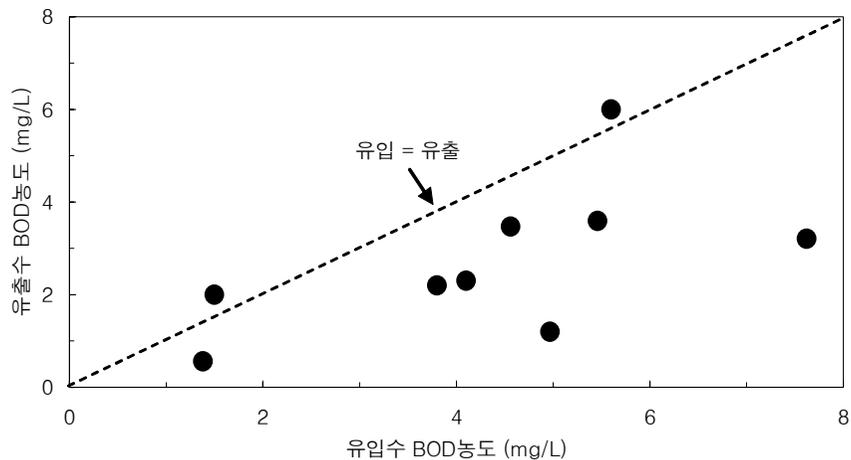


그림 3-57 여울-웅덩이 시험포 유입수와 유출수의 BOD농도 비교

유입수의 COD는 4.5~16.6 mg/L, 평균 9.2 mg/L였는데, 유출수는 4.4~18.6 mg/L, 평균 9.6 mg/L로 나타나 수치적으로는 제거가 되지 않는 것으로 분석되었다. 그림 3-58에서도 알 수 있는 바와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수의 COD가 높은 것으로 나타났다. 이는 고사한 식물체에서 난분해성 유기물질이 용출되었기 때문인 것으로 판단된다(須田, 2003).

여울-웅덩이 시험포에서 COD가 제거되지 않은 것은 식물이 자라는 휴경논 II에서도 확인할 수 있었는데 이는 식물에서 난분해성 물질이 용출되기 때문인 것

으로 판단된다. 반면 식물이 거의 자라지 못하는 휴경은 I에서는 COD가 제거된 것으로 나타났다.

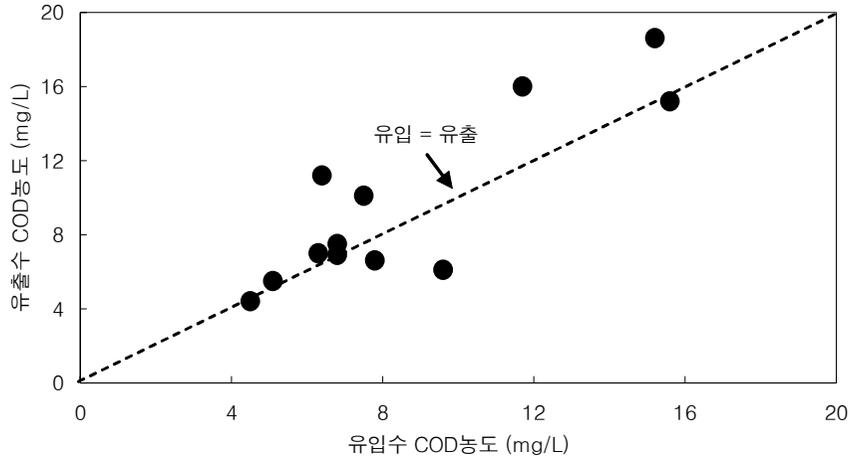


그림 3-58 여울-웅덩이 시험포 유입수와 유출수의 COD농도 비교

TN의 경우 유입수는 0.58~5.69 mg/L, 평균 3.46 mg/L였는데, 유출수는 0.24~4.22 mg/L, 평균 1.28 mg/L로서 63.0%의 제거율을 보였다. 그림 3-59에서도 알 수 있는 바와 같이 모든 시기에 유입수에 비해 유출수의 TN농도가 낮아지는 것으로 나타났다. 유입수와 유출수가 대부분 농업용수 수질기준인 1.0 mg/L를 상회하지만 여울-웅덩이 휴경지를 통과하면서 TN이 제거되는 것으로 나타났다. 조사기간 동안 유입된 TN양은 85.4 kg-TN이고, 유출된 양은 31.6 kg-TN으로서 총 제거된 양은 63.0%인 53.8 kg-TN이었다. TN제거율은 휴경은 I, II, 여울-웅덩이 시험포간에 큰 차이를 보이지 않았다.

이와 같이 TN이 제거된 것은 수심이 얇은 여울부분을 흐를 때는 대기중으로부터의 재폭기에 의해 호기성상태가 되어 질산화가 이루어지고, 수심이 깊은 웅덩이 부분을 지날 때에는 혐기성이 형성되어 탈질이 일어나기 때문이다. TN의 제거는 식물에 의한 흡수보다 질산화와 탈질화가 중요한 역할을 한다. 온도가 낮아 미생물의 활동이 저하되면 질산화와 탈질화의 정도가 낮아진다. 유입수 중의 유기태 질소(organic N)가 무기성 질소인 암모니아성 질소 (NH₄-N)로 변화되고, 호기성 미생물에 의한 질산화 (nitrification)작용으로 질산태 질소(NO₃-N)로 전환되며, 질산태 질소는 혐기상태인 습지의 토양으로 확산되어 혐기성 미생물에

의하여 탈질화(denitrification)가 일어나면서 질소(N_2)와 아산화질소(N_2O)로 전환되어 이들이 대기중으로 이동하여 질소가 제거된다 (Yang et al, 2001). 여울부분은 수심이 얇기 때문에 DO에서 살펴본 바와 같이 재폭기에 의해 호기성상태를 유지하여 질산화되고, 웅덩이 부분의 바닥은 혐기성 상태가 유지되어 탈질이 이루어짐으로서 TN이 제거된 것이다. 또한 호기성 및 혐기성에 의해 유기질소가 무기태의 형태로 전환되어 수생식물이 이를 영양분으로 흡수·제거한 것도 질소 제거에 기여한 것으로 판단된다. 수생식물이 무기태 형태인 NH_4-N , NO_2-N , NO_3-N 을 흡수·제거하고 있다는 것은 무기태 성분이 유입수에 비해 유출수에서 낮아진 것으로부터 확인할 수 있다.

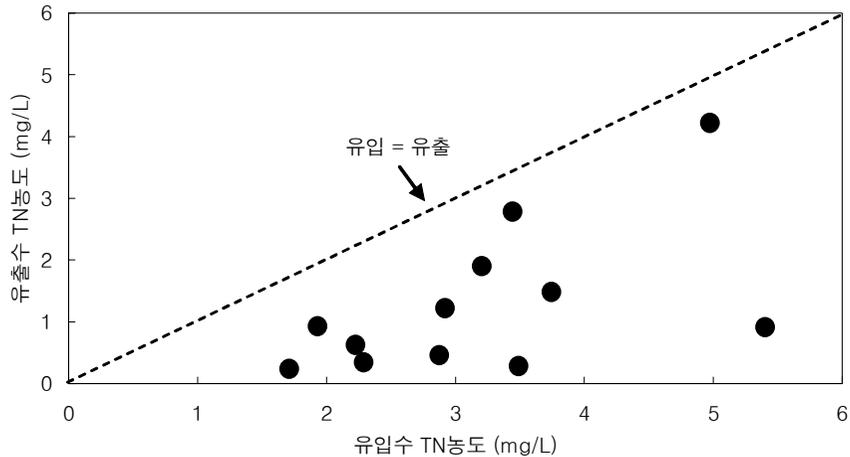


그림 3-59 여울-웅덩이 시험포 유입수와 유출수의 TN농도 비교

NH_4-N 의 경우 유입수가 0.03~1.90 mg/L, 평균 0.45 mg/L였는데, 유출수는 0.02~0.22 mg/L, 평균 0.10 mg/L를 나타내 78.2%가 감소되었다. 그림 3-60에서도 알 수 있는 바와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수의 NH_4-N 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 여울-웅덩이 시험포는 여울 부분이 수심이 얇기 때문에 호기성상태가 유지되어 질산화가 활발히 이루어지기 때문에 NH_4-N 농도가 감소된다.

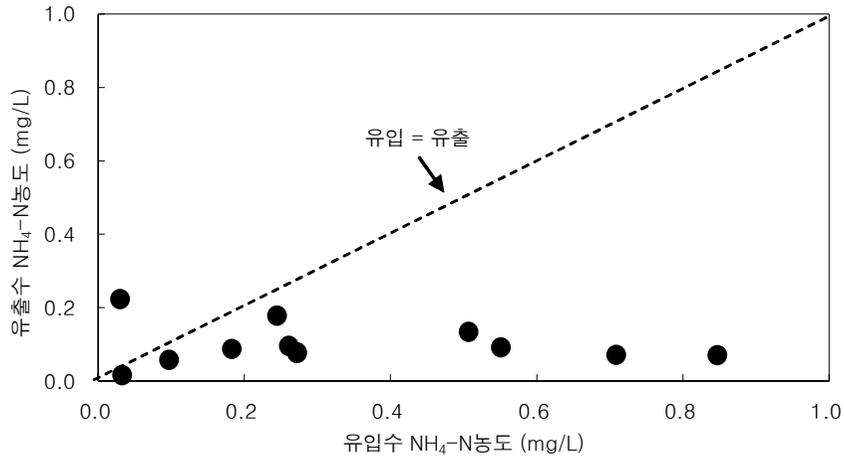


그림 3-60 여울-웅덩이 시험포 유입수와 유출수의 NH₄-N농도 비교

NO₂-N의 경우 유입수가 0.00~0.36 mg/L, 평균 0.15 mg/L였는데, 유출수는 0.00~0.30 mg/L, 평균 0.03 mg/L를 나타내 79.8%가 감소되었다. 그림 3-61에서도 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수에서 NO₂-N농도가 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이는 NH₄-N에서와 마찬가지로 질산화에 의해 NO₂-N이 NO₃-N으로 변화되기 때문이다.

NO₃-N의 경우 유입수가 0.18~6.79 mg/L, 평균 2.39 mg/L였는데, 유출수는 0.00~5.72 mg/L, 평균 0.98 mg/L로 감소되어 59.1%가 제거되었다. 그림 3-62에서도 모든 시기에 유입수에 비해 유출수의 NO₃-N농도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 유기질소 및 NH₄-N이 NO₂-N을 거쳐 NO₃-N으로 변화됨에도 불구하고 유출수의 NO₃-N이 감소된 것은 식물에 의한 흡수와 수심이 깊어 혐기성 부분이 존재하는 웅덩이에서 탈질이 이루어지기 때문이다.

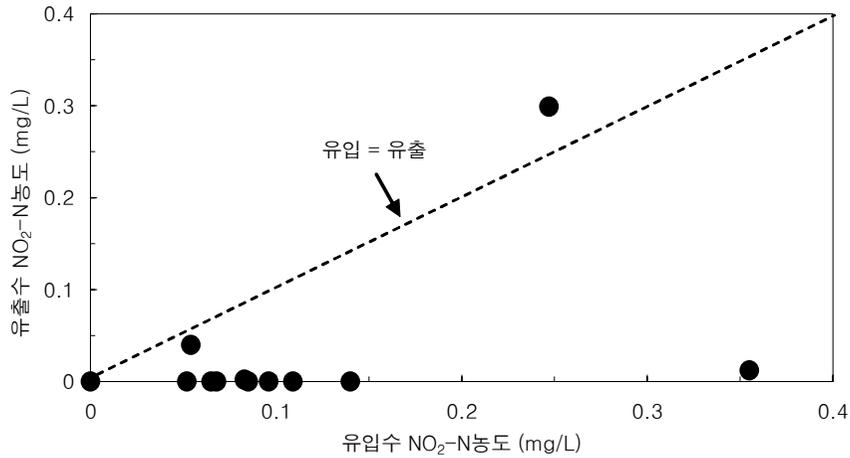


그림 3-61 여울-웅덩이 시험포 유입수와 유출수의 NO₂-N농도 비교

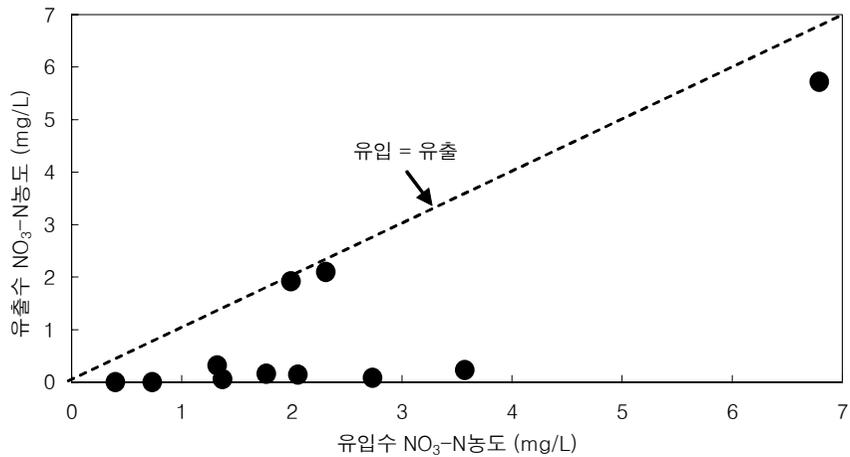


그림 3-62 여울-웅덩이 시험포 유입수와 유출수의 NO₃-N농도 비교

TP의 경우 유입수가 0.07~0.41 mg/L, 평균 0.26 mg/L였는데, 유출수는 0.06~0.31 mg/L, 평균 0.15 mg/L로 감소되어 평균 42.5%의 제거율을 보였다. 그림 3-63에서와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수의 TP농도가 감소되는 경향을 보였다. 조사기간 중 TP는 총 6.4 kg-TP가 유입되고 3.6 kg-TP가 유출되어 총 2.8 kg-TP가 제거되었다. 습지 내에서 인은 이온과 결합한 인산염(Ca-phosphate,

Fe-phosphate, Al-phosphate)의 상태로 침전되며, 습지식물에 의해 일부는 흡수된다 (Pant et al, 2001). 또한 유기물의 침전과 고사된 식물의 잔재물이 침전되어 형성된 습지바닥의 침전 잔재물 층(sediment-litter layer)에 흡착되어 95%이상 존재한다 (Faulker et al, 1989). 이와 같이 TP가 제거된 것은 부유물질에 잘 부착되는 무기태 인이 SS 성분과 함께 침전되었을 뿐만 아니라 무기태의 형태로 수생식물에 흡수되었기 때문이다. TP의 경우 휴경논 I, II에 비해 여울-웅덩이 시험포에서 제거율이 다소 낮은 값을 나타냈다.

PO₄-P는 유입수가 0.02~0.33 mg/L, 평균 0.16 mg/L였는데, 유출수는 0.00~0.13 mg/L, 평균 0.07 mg/L로 낮아져 60.0%의 제거율을 보였다. 그림 3-64에서와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수의 PO₄-P가 낮아지는 경향을 보였다. PO₄-P의 경우 SS성분과 함께 침전되거나 식물에 의해 흡수제거된다.

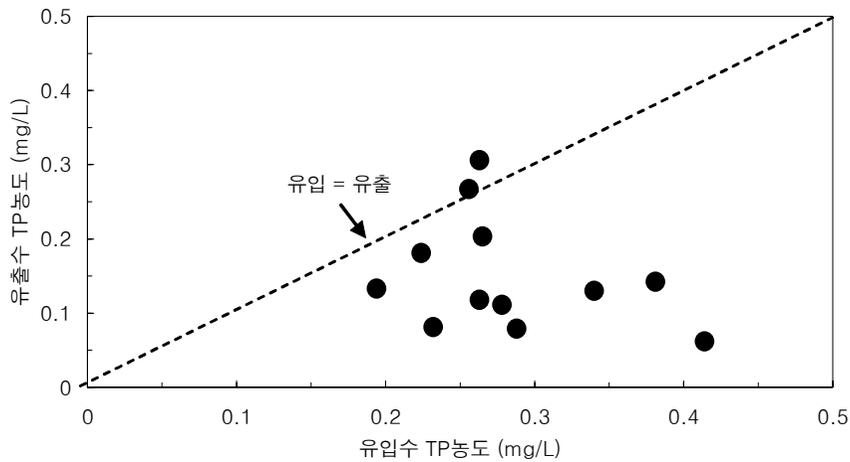


그림 3-63 여울-웅덩이 시험포 유입수와 유출수의 TP농도 비교

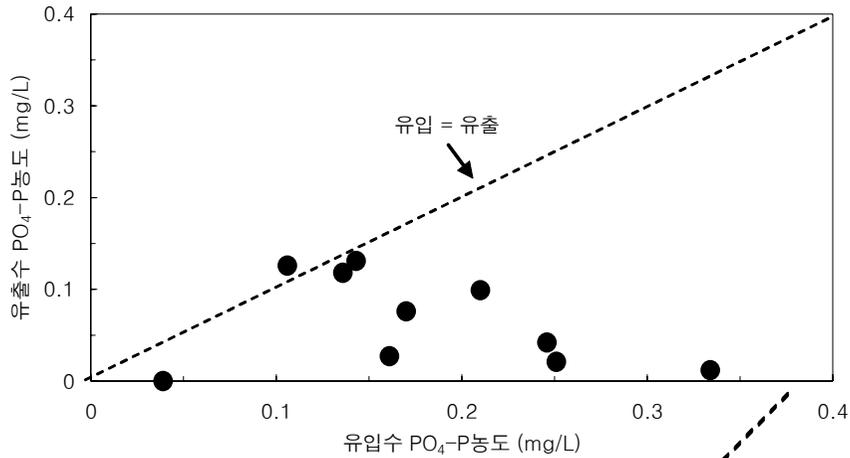


그림 3-64 여울-웅덩이 시험포 유입수와 유출수의 PO₄-P농도 비교

Chl-*a*의 경우 유입수가 1.8~45.7 mg/m³, 평균 12.4 mg/m³였는데, 유출수는 0.3 ~ 17.9 mg/m³, 평균 5.1 mg/m³으로 낮아져 59.4%의 제거율을 보였다. 그림 3-65에서와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해서 유출수에서 농도가 낮아졌다. 본 연구에 이용된 휴경지는 수심이 얇고 유속이 늦어 Chl-*a*가 높아질 수 있는 조건임에도 불구하고 낮아진 것은 고사된 조류가 침전·제거될 뿐만 아니라 수생식물에 의해 햇빛이 차단되어 광합성에 의한 조류생산이 제한되었기 때문이라 판단된다.

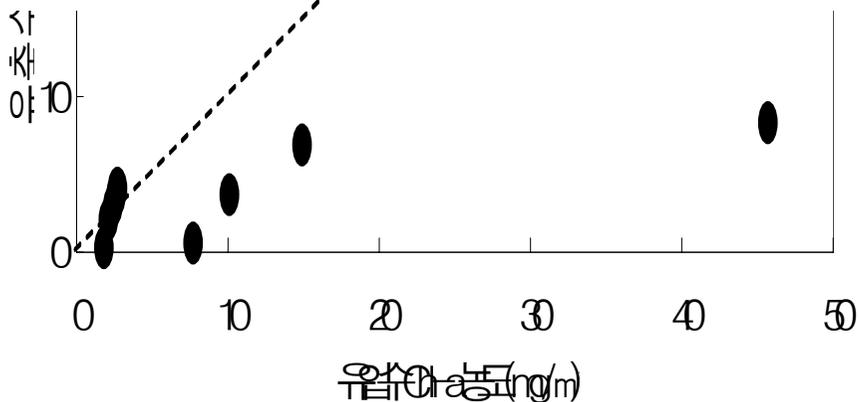


그림 3-65 여울-웅덩이 시험포 유입수와 유출수의 Chl-*a*농도 비교

2) 토양변화특성

여울과 웅덩이에서의 토양특성을 살펴보기 위하여 토양시료를 채취하여 물리·화학적 분석하였다. 시험포를 조성하기 전의 토성은 모래, 실트, 점토 함량비가 각각 32.3%, 61.7%, 6.0%로서 미사질양토로 분류되었다. 웅덩이와 여울이 조성되어 운영된 후인 2005년 11월의 토성은 모래, 실트, 점토 함량이 웅덩이에서 15.0%, 79.0%, 6.0%로 나타났고 여울에서는 16.0%, 78.0%, 6.0%로 분석되어 실트가 대부분인 미사질양토를 나타내 큰 변화가 없었다(표 3-13). 시험포 조성 전에 비해 시험포 조성 후에 웅덩이와 여울의 실트 성분비율이 높아졌는데 이는 유입수 중의 부유물이 많이 침전되어 상대적으로 함유율이 증가된 것으로 판단된다.

표 3-13 여울, 웅덩이 포장의 토양의 토성

분 류		토 성			
		Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	토 성
조성전		32.3	61.7	6.0	SiL
조성후	웅덩이	15.0	79.0	6.0	SiL
	여울	16.0	78.0	6.0	SiL

토양의 화학성은 pH의 경우 시험포 조성 전에는 6.7이었고, 시험포 조성 후에는 웅덩이에서 4.9, 여울에서는 5.4로서 큰 변화는 아니지만 시간이 지남에 따라 산성화되는 경향을 보였다. 유기물의 경우 시험포 조성 전에는 0.40%였는데, 조성 후에는 0.77%와 0.60%로 높아졌는데, 이는 용수 중의 유기물이 SS성분과 함께 침전되었기 때문이다. 유효인산의 경우 시험포 조성 전에 23.40 ppm이었는데, 시험포 조성 후에는 웅덩이와 여울이 각각 46.0 ppm과 27.48 ppm으로 낮아졌다. 또한 TN과 TP도 각각 677.80 mg/kg과 399.20 ppm에서 웅덩이의 경우는 523.39 mg/kg과 383.92 ppm으로 낮아졌고, 여울의 경우도 235.89 mg/kg과 332.65 ppm으로 낮아졌다. 양이온치환용량(CEC)의 경우는 조성 전 6.70 me/100g에서 조성 후 웅덩이와 여울에서 각각 8.80 me/100g와 9.15 me/100g로 높아졌으나 EC의 경우는 0.40 dS/m에서 0.23 dS/m와 0.10 dS/m로 낮아졌다(표 3-14). 이와 같이 토양

중의 영양염류가 감소된 원인은 비료의 공급이 없는 상태에서 수생식물에 의해 흡수·제거되었기 때문인 것으로 판단된다.

표 3-14 여울-웅덩이 포장 토양의 화학적 특성

분류	pH(1:5)	유기물 (%)	유효인산 (ppm)	TN (mg/kg)	TP (ppm)	EC (dS/m(1:5))	CEC (me/100g)	
조성전	6.7	0.40	23.40	677.80	399.20	0.40	6.70	
조성후	웅덩이	4.9	0.77	46.00	523.39	383.92	0.23	8.80
	여울	5.4	0.60	27.48	235.89	332.65	0.10	9.15

3) 식물상 및 식물체 특성

여울과 웅덩이가 조성된 휴경논 1,973 m²를 대상으로 6개의 방형구 (1 m×1 m)를 설치하여 조사를 실시하였는데 25~30%의 낮은 피도를 나타냈으며 그 중 갈대와 부들이 차지하는 비율은 각각 25.3%와 15.4%로써 분포된 면적은 150 m²와 91 m²로 나타났다. 이는 봄부터 담수상태를 유지하여 식물의 성장이 억제되었기 때문으로 판단된다. 대상지에서 발견된 식생종은 갈대, 물피, 부들 등 3종으로 종다양성이 낮았으며, 갈대와 물피가 우점하고 있는 것으로 조사되었다. 담수가 오랫동안 진행된 상태이기 때문에 갈대나 물피 등의 호수성 식생종 이외의 식생은 미미한 것으로 조사되었다. 식물체내의 P함유량은 갈대가 0.41 mg/g, 부들이 0.53 mg/g으로 갈대가 다소 높은 것으로 나타났다. 최대 생물량은 갈대가 179.0 g DM/m²이고, 부들이 171.3 g DM/m²이었다. 단위면적당 P흡수량은 갈대가 0.245 g/m²이고 부들이 0.286 g/m²으로 부들이 다소 높게 나타났다. 지상부에 의한 연간 P흡수량은 표 3-15와 같이 갈대가 0.471kg P/yr으로서 부들에 의한 인 흡수량 0.334kg P/yr에 비해 다소 높게 나타났다.

표 3-15 여울-웅덩이 시험포의 식물상 및 식물체 분석

시험포	우 점 식물종	분포면적 (m ²)	식물체내 P함유량 (mg/g)	최대 생물량 (g DM/m ²)	P 흡수량 (g /m ²)	지상부 생산 (kg DM/yr)	지상부에 의한 연간 P 흡수량 (kg P/yr)
휴경논 I	갈대	150	0.41	179.0	0.245	343.6	0.471
	부들	91	0.53	171.3	0.286	200.3	0.334

쌀생산조정제 농지와 같은 휴경지를 일정기간 지난 후에 농지로 다시 이용하기 위해서는 식물의 생장을 억제하여야 할 필요가 있으므로 수위관리를 통하여 논이 황폐화되는 것을 방지하는 것이 바람직하다. 또한 여울, 옹덩이 조성을 통해 다양한 수심을 가진 휴경논의 경우는 식물의 생장 억제뿐만 아니라 수질정화효과도 있는 것으로 나타났다.

6. 흙수로 조성을 통한 수질개선

수로는 단지 물을 송수하는 기능뿐만이 아니라, 자정 작용이나 물을 저장하는 기능, 다양한 동식물의 서식 기능, 이것들에 의한 수질 정화를 시작으로 환경보전기능이나 친수 기능 등 다양한 역할이 있다.

수질정화 흙수로는 길이가 60 m정도이면 되고, 폭과 깊이는 0.5 m × 0.5 m 정도가 수로에 퇴적하는 퇴적물 제거 작업 및 위험 방지를 고려할 때 적당하다고 할 수 있다. 수로의 수는 유지관리를 고려하여야 하며 기본적으로 3열 이상으로 하고, 수로의 간격은 3 m 이상으로 한다. 수로에 유입되는 유량은 100 m³/일 정도로 수로연장 60 m에 3시간 체류되도록 한다. 수로의 입구와 출구는 U형으로 하며 높이는 40 cm 정도로 설계한다. 수로에 유입되는 토사를 침전시키기 위하여 입구로부터 20 m의 지점에 저류조를 설치하는 것이 좋다. 일반적으로 수로에 유입되는 토사는 입구로부터 20 m지점까지 사이에서 70 %가 퇴적되기 때문이다. DO가 감소하면 혐기성상태가 되어 정화 효과가 감소하거나 악취가 발생우려가 있으므로 DO가 4 mg/ L이하일 때는 DO를 공급하는 시설을 갖추는 것이 좋다 (농촌환경정비센터, 1995).

흙수로에서의 수질정화작용을 분석하기 위하여 그림 3-66과 같이 폭 42 m × 길이 47 m의 휴경지에 폭 0.5 m, 깊이 0.5 m, 총연장 약 170 m의 흙수로를 조성하였다. 흙수로 내와 주위부는 식재를 하지는 않았지만 자연도래에 의해 수생식물이 생육하도록 하였다. 시험용수는 석문담수호 유입부에 펌프를 설치하여 공급하였다. 공급된 용수는 일정하게 수위가 유지되는 유량조정수로에 유입되게 하였다. 유량조정수로에 유입된 용수는 유입공을 통하여 흙수로로 유입되도록 하였다. 유량조정수로는 수심이 일정하게 유지되기 때문에 흙수로로 유입되는 유량은 일정한 것으로 가정하였으며, 이때 유량은 199.76 m³/d였다.

수질조사는 현장에서 유입수 및 유출수를 채취하여 수온, pH, EC, DO를 측정하고, 실내분석은 수질오염공정시험법에 의거하여 실시하였다.

조사는 2004년 6월부터 2005년 10월까지 주로 관개기에 실시하였으며, 비관개기에는 용수공급의 제약으로 조사를 실시하지 못하였다.

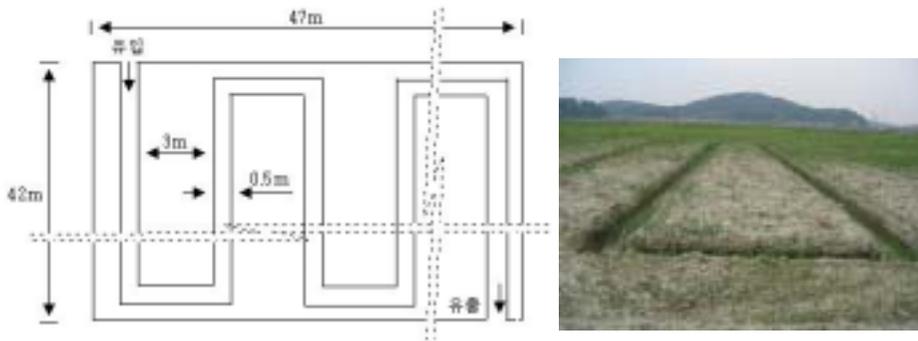


그림 3-66 흡수로 조성 개념도 및 전경

가. 수질변화특성

조사기간 중 유입수의 수온은 9.2~29.7 °C로서 평균 23.9 °C를 나타냈고, 유출수는 14.5~30.1 °C, 평균 24.2 °C를 나타내 큰 차이를 보이지 않았다. 유입수와 유출수의 수온에 큰 차이가 없는 것은 흡수로 내부 및 주위에 식생이 번성하여 햇빛을 차단하였기 때문이다.

유입수의 pH는 7.0~9.1, 평균 7.8로서 알카리성을 보이는 경우도 있었으나 대부분 중성을 나타냈고, 유출수도 유입수와 큰 차이가 없이 7.1~8.6, 평균 7.7로 중성을 나타내 유입수와 유출수 대부분 농업용수 수질기준인 6.0~8.5를 만족하고 있었다.

표 3-16 흡수로에서의 수질변화

구 분	수온 (°C)	pH	EC (μs/cm)	SS (mg/L)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	TP (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	Chl-a (mg/m)	
유입수	최소값	9.2	7.0	220.0	0.4	3.2	1.4	4.5	0.58	0.00	0.18	0.03	0.07	0.02	1.8
	최대값	29.7	9.1	939.0	59.5	13.4	7.6	16.6	5.69	0.36	6.79	1.90	0.41	0.33	45.7
	표준편차	5.1	0.5	228.3	16.8	2.9	2.0	3.9	1.40	0.11	1.58	0.45	0.08	0.08	13.3
	평균	23.9	7.8	551.7	25.9	6.3	4.5	9.2	3.46	0.15	2.39	0.45	0.26	0.16	12.4
흡수로 유출수	최소값	14.5	7.1	202.0	1.6	2.9	0.2	4.4	0.48	0.00	0.12	0.00	0.15	0.02	0.4
	최대값	30.1	8.6	1,014.0	33.0	11.0	9.4	14.2	4.41	0.32	5.89	0.44	0.27	0.22	36.7
	표준편차	4.4	0.4	257.7	8.9	2.7	2.7	3.1	1.24	0.10	1.79	0.15	0.04	0.07	11.2
	평균	24.2	7.7	514.4	10.1	6.7	3.2	9.0	2.09	0.08	1.34	0.15	0.22	0.13	10.3

조사기간 중 EC는 유입수가 220.0~939.0 μS/cm, 평균 551.7 μS/cm를 나타냈고, 유출수는 202.0~1,014 μS/cm, 평균 514.4 μS/cm를 나타내 유입수와 유출수 간에

큰 차이를 보이지 않았다. 이와 같이 유출수와 유입수에 관계없이 모두 $3,000 \mu\text{S/cm}$ 보다 크게 낮을 뿐만 아니라 대부분 $700 \mu\text{S/cm}$ 이하이기 때문에 농업용수로 사용하여도 문제가 없을 것으로 판단된다.

DO는 유입수가 $3.2\sim 13.4 \text{ mg/L}$, 평균 6.3 mg/L 로서 농업용수 수질기준인 2 mg/L 이상을 만족하였고, 유출수도 $2.9\sim 11.0 \text{ mg/L}$, 평균 6.7 mg/L 로서 농업용수 수질기준을 만족하였다. 이는 미생물이 오염물질을 분해하는데 산소를 소비했음에도 불구하고 수표면에서의 재폭기에 의해 산소가 원활히 공급되었기 때문이다. 그림 3-67과 같이 유입수에 비해 유출수의 농도가 높아진 경우도 있고 낮아진 경우도 있는 등 일정한 경향을 보이지 않았다.

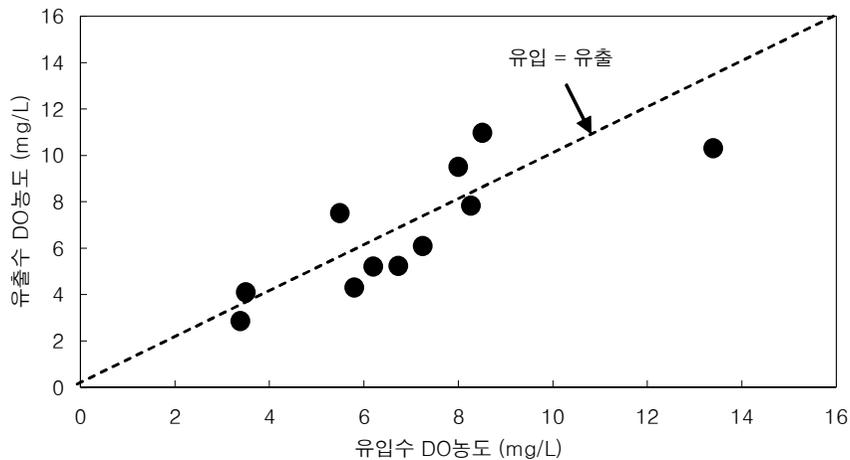


그림 3-67 흙수로 유입수와 유출수의 DO농도 비교

유입수의 SS농도는 $0.4\sim 59.5 \text{ mg/L}$, 평균 25.9 mg/L 로서 하천의 농업용수 수질기준인 100 mg/L 보다는 낮지만, 11회 중 6회는 호소의 농업용수 수질기준인 15 mg/L 를 초과하였다. 그러나 유출수는 $1.6\sim 33.0 \text{ mg/L}$, 평균 10.1 mg/L 로서 대부분 15 mg/L 이하를 나타내 농업용수 수질기준을 만족하였다. 그림 3-68과 같이 대부분 유입수에 비해 유출수의 SS농도가 낮은 것으로 나타났다. 조사기간 중 2004년 6월부터 153일간, 2005년 6월부터 153일간의 SS제거량을 살펴보면 유입수량이 $199.76 \text{ m}^3/\text{d}$ 이므로 $1,583.2 \text{ kg-SS}$ 가 유입되었고, 유출량은 총 617.4 kg-SS 이므로 총 제거량은 61.0% 인 965.8 kg-SS 이다. 이와 같이 유입수가 흙수를 통과하면서 중력에 의한 침전, 수생식물과의 접촉침전 등에 의하여 SS성분이 제거되었다.

따라서 휴경지를 일정한 간격으로 갈고 물을 흘려보내기만 하여도 수질개선효과를 기대할 수 있고, 잡초가 자라는 것도 방지하는 효과도 있다.

흙수로 유입수의 SS의 표준편차는 16.8이었는데, 유출수는 8.9로서 안정된 값을 나타냈다. 또한 흙수로 유출수는 휴경논 I, II에 비해 SS의 제거효율이 높은 것으로 나타났다.

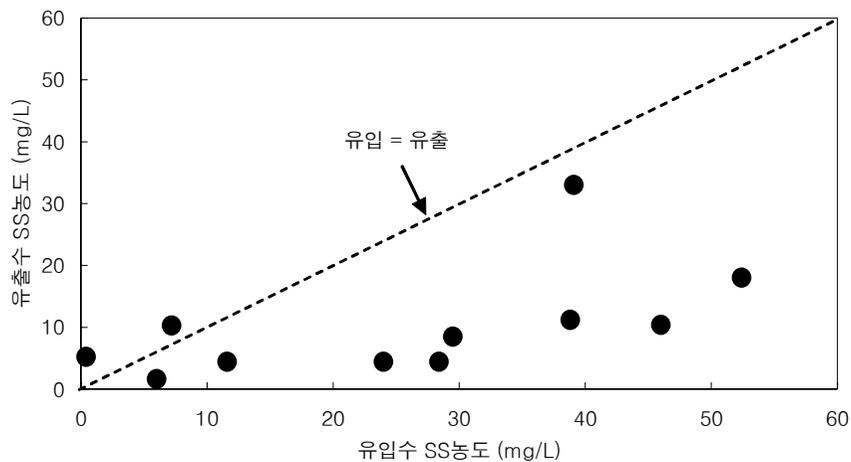


그림 3-68 흙수로 유입수와 유출수의 SS농도 비교

유입수의 BOD는 1.4~7.6 mg/L, 평균 4.5 mg/L였는데, 유출수는 0.2~9.4 mg/L, 평균 3.2 mg/L를 나타내 유출수가 농업용수 수질기준인 8.0 mg/L를 초과하는 경우도 있었으나 그림 3-69와 같이 대부분 유출수의 농도가 낮아져 BOD제거효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 조사기간 중 유입된 BOD 총량은 275.1 kg-BOD이고, 유출된 총량은 195.6 kg-BOD로서 총제거량은 28.9%인 79.5 kg-BOD였다. 이는 유기물이 SS성분과 함께 침전되고 미생물에 의해서 분해되었기 때문이다. 흙수로에서의 BOD제거율은 휴경논 I, II에 비해 높고, 여울-웅덩이 시험포에 비해 낮은 것으로 나타났다.

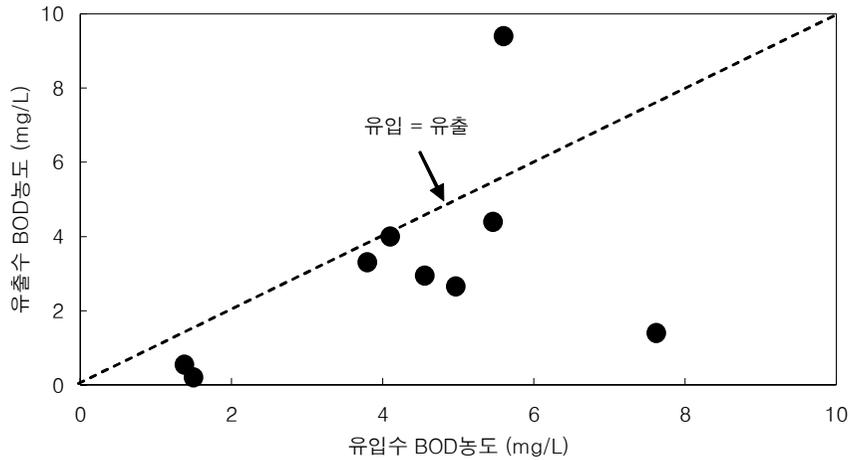


그림 3-69 흡수로 유입수와 유출수의 BOD농도 비교

COD는 유입수가 4.5~16.6 mg/L, 평균 9.2 mg/L였는데, 유출수는 4.4~14.2 mg/L, 평균 9.0 mg/L로서 1.9%의 제거율을 보였다. 그러나 시기적으로 볼 때 그림 3-70과 같이 유입수보다 유출수의 COD가 증가되고, 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 상회하는 경우가 많아 흡수로에서 COD는 효과적으로 제거되지는 않았다. 휴경논 I, II, 여울-웅덩이 시험포 및 흡수로 시험포에서 COD제거율은 대체적으로 낮으며, 서로간에 별 차이가 없었다.

조사기간 중 유입수의 TN농도는 0.58~5.69 mg/L, 평균 3.46 mg/L였는데, 유출수는 0.48~4.41 mg/L, 평균 2.09 mg/L로 낮아져 39.7%의 제거율을 보였다. 유입수와 유출수가 대부분 농업용수 수질기준인 1.0 mg/L를 상회하지만 그림 3-71과 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수에서 TN농도가 낮아짐으로서 흡수로를 통과하면서 TN이 제거되는 것으로 나타났다. 시험기간 중 유입된 TN은 211.5 kg-TN이고, 유출된 TN은 127.8 kg-TN이므로 TN의 총제거량은 83.7 kg-TN이었다. 흡수로는 수심이 얇기 때문에 DO에서 살펴본 바와 같이 재폭기에 의해 6.0 mg/L 이상의 호기성상태를 유지하므로 유기질소가 무기태의 형태로 전환되어 수생식물이 이를 영양분으로 흡수하기 때문에 TN이 제거된 것이다. 흡수로 시험포의 TN제거율은 휴경논 I, II 및 여울-웅덩이 시험포에 비해 낮은 값을 보였다.

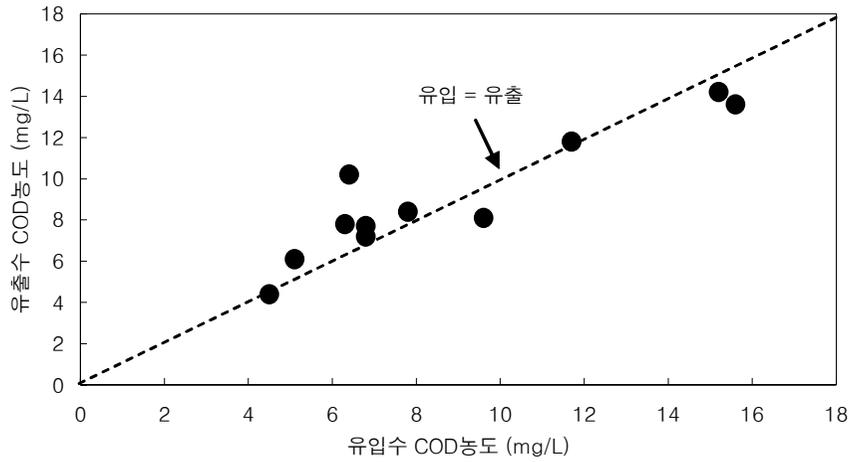


그림 3-70 흡수로 유입수와 유출수의 COD농도 비교

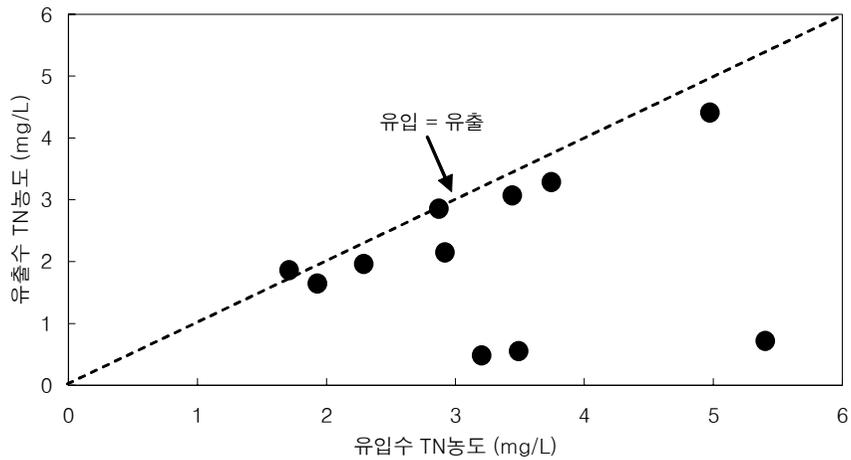


그림 3-71 흡수로 유입수와 유출수의 TN농도 비교

$\text{NH}_4\text{-N}$ 은 유입수가 0.03~1.90 mg/L, 평균 0.45 mg/L였는데, 유출수는 0.00~0.44 mg/L, 평균 0.15 mg/L를 나타내 66.2%가 줄어들었다. 또한 그림 3-72와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도가 낮게 나타났다. 이와 같이 $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도가 낮아진 것은 유입수 자체의 DO농도가 6.3 mg/L로 호기성이므로

질산화가 잘 이루어지기 때문이다. 그리고 질산화나 유기물의 분해에 용존산소가 소비됨에도 불구하고 유출수의 DO농도가 평균 6.7 mg/L로 감소되지 않은 것으로 보아 수면에서 대기중으로부터 재폭기가 활발히 이루어지고 있다는 것을 짐작할 수 있다.

NO₂-N의 경우 유입수는 0.00~0.36 mg/L, 평균 0.15 mg/L였는데, 유출수는 0.00~0.32 mg/L, 평균 0.08 mg/L로 낮아져 42.0%가 감소되었다. 또한 그림 3-73과 같이 대부분의 시기에 유입수보다 유출수에서 NO₂-N이 감소되고 있다. 이것으로 부터도 호기성 상태에서의 질산화가 활발히 이루어지고 있다는 것을 알 수 있다.

NO₃-N의 경우 유입수는 평균 0.18~6.79 mg/L, 평균 2.39 mg/L였는데, 유출수는 0.12~5.89 mg/L, 평균 1.34 mg/L를 나타내 43.8%가 감소되었다. 그림 3-74에서와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수의 농도가 낮게 나타났다. 이와 같이 NO₃-N이 감소된 것은 부분적으로 형성된 혐기성구간에서의 탈질과, 수로에 부분적으로 성장하고 있는 식물에 의해 흡수 제거된 것으로 판단된다.

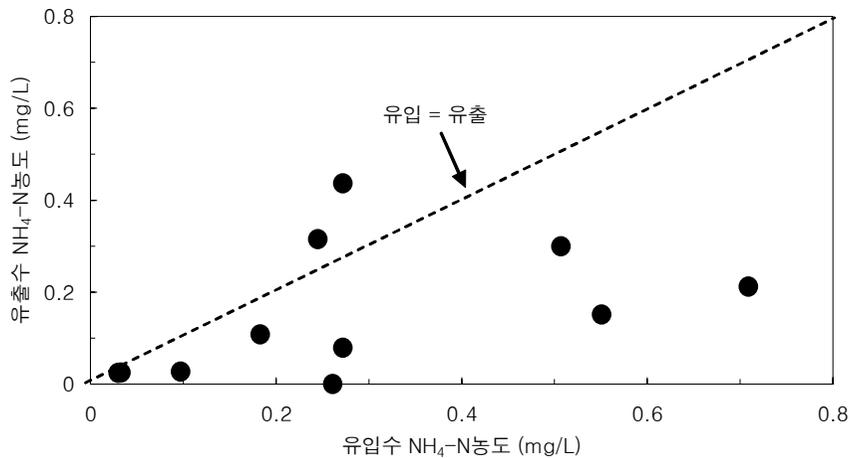


그림 3-72 흡수로 유입수와 유출수의 NH₄-N농도 비교

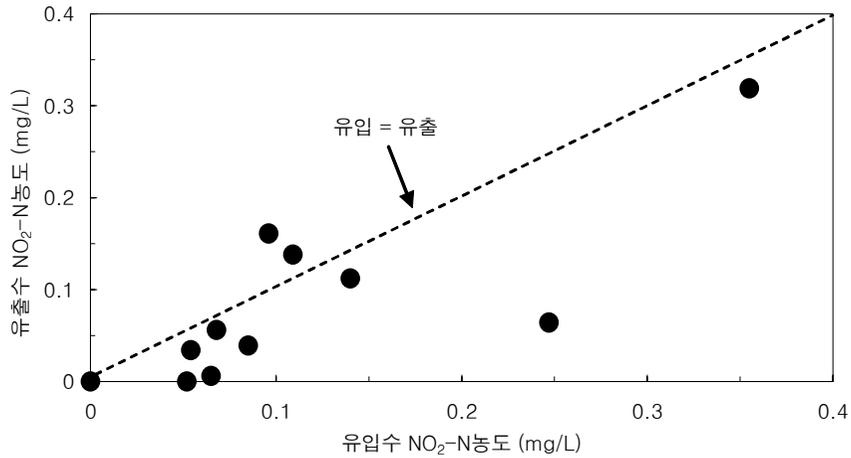


그림 3-73 흙수로 유입수와 유출수의 NO₂-N농도 비교

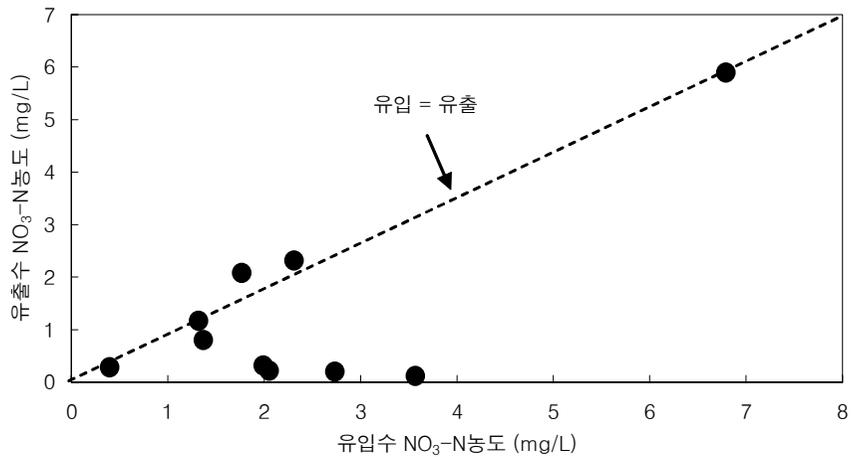


그림 3-74 흙수로 유입수와 유출수의 NO₃-N농도 비교

유입수의 TP농도는 0.07~0.41 mg/L, 평균 0.26 mg/L였는데, 유출수는 대부분 이보다 낮아져 0.15~0.27 mg/L, 평균 0.22 mg/L를 나타내 15.9%가 제거되었다. 그림 3-75와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수의 TP가 감소되었다. 조사기간 동안 유입된 TP는 15.9 kg-TP이고, 이 기간 동안 유출량은 13.4 kg-TP 이므로 TP 총제거량은 2.5 kg-TP이다. 또한 PO₄-P의 경우 유입수가 0.02~0.33

mg/L, 평균 0.16 mg/L였는데, 유출수는 0.02~0.22 mg/L, 평균 0.13 mg/L로서 19.0%가 제거되었다. 그림 3-76과 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수에서 $PO_4\text{-P}$ 농도가 낮아졌다. 이와 같이 TP가 제거된 것은 부유물질에 잘 부착되는 무기태 인이 SS성분과 함께 침전되었을 뿐만 아니라 무기태인인 $PO_4\text{-P}$ 의 형태로 수생식물에 흡수되었기 때문이다.

이상과 같이 흙수로에서 공공수역의 부영양화를 일으키는 원인물질인 질소와 인이 제거됨으로서 농업용수의 부영양화에 의한 녹조현상을 방지하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 휴경지에서 SS성분과 함께 침전된 무기태 영양물질은 휴경지를 재경작할 경우 비료성분으로 작용하게 되므로 휴경지를 수질개선을 위한 공간으로 적극 활용한다면 수질개선뿐만 아니라 토양의 비옥도도 높일 수 있을 것으로 기대된다.

Chl-*a*의 경우 유입수는 1.8~45.7 mg/m³, 평균 12.4 mg/m³였는데, 유출수는 0.4~36.7 mg/m³, 평균 10.3 mg/m³로 낮아져 17.2%의 낮은 제거율을 보였다. 이와 같이 Chl-*a* 제거율이 낮은 것은 유입수 자체의 Chl-*a*농도가 낮기 때문이다. 그림 3-77과 같이 유입수에 비해서 유출수에서 Chl-*a*농도가 높아지는 경우도 있고 낮아지는 경우도 있어 일정한 경향을 보이지는 않았다. 다만 흙수로의 경우 수심이 낮고 유속이 늦어 Chl-*a*가 높아질 수 있는 조건이지만 유입수와 유출수의 평균 농도가 각각 10.97, 10.31 mg/m³으로 큰 차이가 없는 것은 수생식물에 의해 햇빛이 차단되어 광합성이 제한되었기 때문이다.

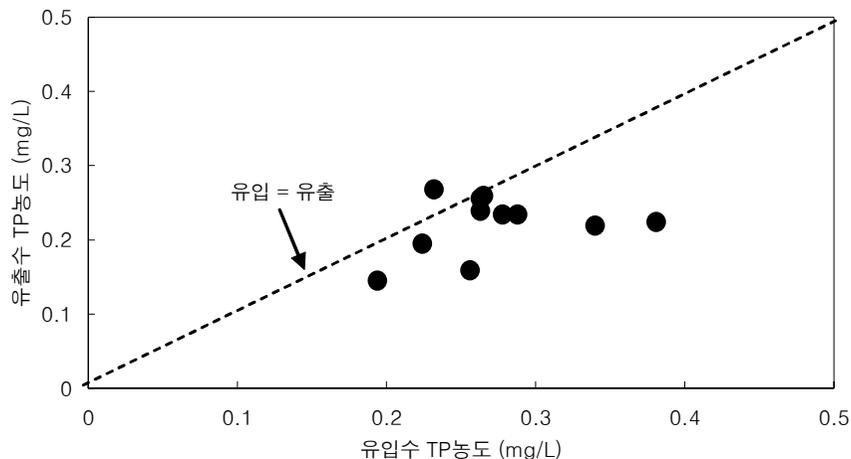


그림 3-75 흙수로 유입수와 유출수의 TP농도 비교

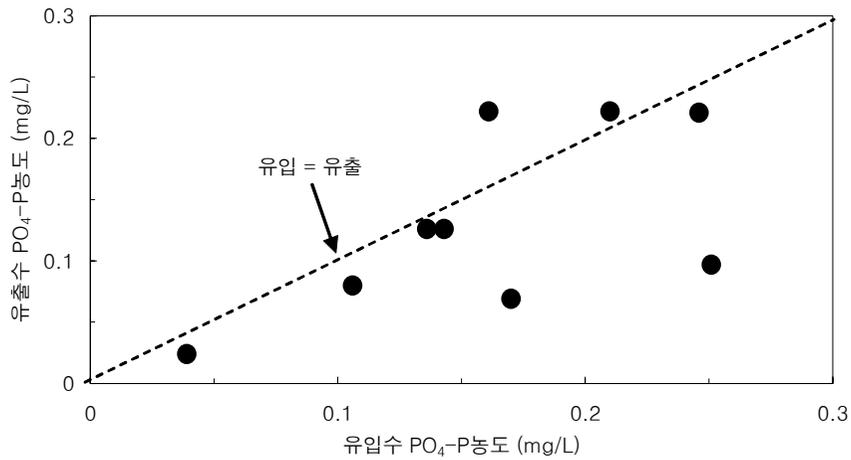


그림 3-76 흙수로 유입수와 유출수의 PO₄-P농도 비교

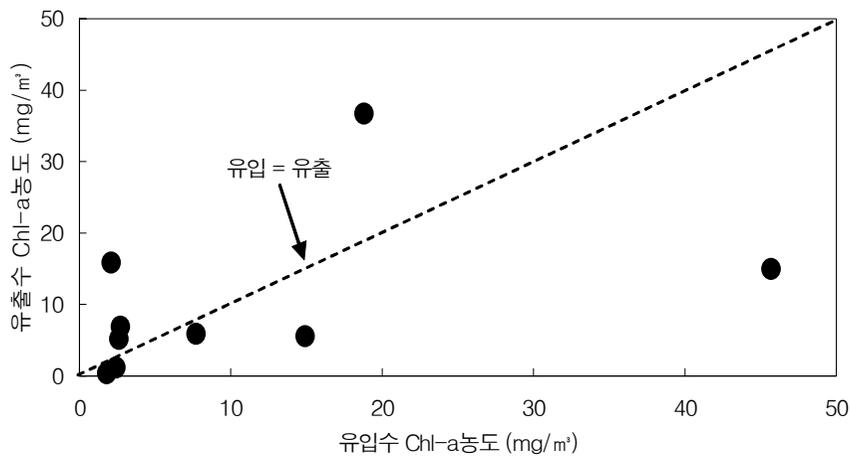


그림 3-77 흙수로 유입수와 유출수의 Chl-a농도 비교

나. 토양특성변화

흙수로의 토양특성변화를 살펴보기 위하여 흙수로 조성 전과 후에 토양시료를 채취하여 물리·화학적 분석하였다. 토성은 조성 전에는 모래, 실트, 점토 함량이 각각 32.3%, 61.7%, 6.0%였는데, 2005년 4월에는 모래, 실트, 점토가 각각 18.0%, 76.0%, 6.0%를 나타냈고, 11월에는 각각 17.0%, 78%, 5.0%를 나타냈다.

모래의 함유율은 감소된 반면 실트의 함유율은 증가되었고, 점토는 비슷한 값을 나타냈다. 이와 같이 실트의 함유율이 증가된 것은 유입수 중의 실트가 침전되어 상대적으로 실트의 함유율이 증가되었기 때문이다.

표 3-17 흡수로 시험포 토양의 토성

분 류		토성			
		Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	토성
조성전		32.3	61.7	6.0	SiL
조성후	2005. 4	18.0	76.0	6.0	SiL
	2005. 11	17.0	78.0	5.0	SiL

토양의 화학성은 pH의 경우 조성 전에는 6.7이었는데, 2005년 4월에는 5.6이었고, 11월에는 4.9로서 낮아져 산성을 나타내 시간이 지남에 따라 산성화되는 경향을 보였다. 유기물의 경우 조성 전에는 0.40%였는데, 2005년 4월에는 0.43%고, 11월에는 0.66%로 높아졌는데, 이는 용수 중의 유기물이 SS성분과 함께 침전되었기 때문이다. 유효인산은 조성 전에는 23.40 ppm이었는데, 2005년 4월에 36.14 ppm이고, 11월에는 18.56 ppm으로 낮아졌다.

표 3-18 흡수로 시험포 토양의 화학적 특성

분 류	pH(1:5)	유기물 (%)	유효인산 (ppm)	TN (mg/kg)	TP (ppm)	EC (dS/m(1:5))	CEC (me/100g)	
조성전	6.7	0.40	23.40	677.80	399.20	0.40	6.70	
조성후	2005. 4	5.6	0.43	36.14	353.21	364.85	0.08	9.40
	2005.11	4.9	0.66	18.56	334.49	330.29	0.20	7.95

또한 TN은 조성 전에는 677.80 mg/kg이었는데, 2005년 4월에는 353.21 mg/kg이고, 11월에는 334.49 mg/kg으로 감소되었다. TP도 조성 전에는 399.20 ppm이었는데, 2005년 4월에는 364.85 ppm, 11월에는 330.29 ppm으로 낮아지는 경향을 보였

다. 양이용치환용량(CEC)도 조성 전에는 6.70 me/100g였는데, 2005년 4월에는 9.40 me/100g로 높아졌다가, 11월에는 7.95 me/100g으로 다시 낮아졌다. EC의 경우는 조성 전에 0.40 dS/m였는데, 2005년 4월에는 0.08 dS/m으로 낮아졌다가 11월에는 0.20 dS/m로 다시 높아졌다.

7. 암거배수에 의한 수질정화

주급인 쌀 수급의 불균형으로 쌀생산량을 줄이기 위한 노력이 이루어지고 있다. 따라서 기존의 논을 쌀생산만을 위한 경지가 아니라 기타 밭작물을 재배할 수 있는 공간으로 정비할 필요가 있다. 이를 위해서는 배수가 잘 되도록 암거배수를 시공할 필요가 있다. 암거배수를 시공함으로써 평상시에는 습해에 약한 밭작물을 재배하고, 필요시에는 주급인 쌀을 생산할 수 있다. 암거배수시설은 물이 토양과 소수재를 통과하여 지하로 침투하여 유공관에 집수되므로 수질개선효과가 있을 것으로 판단되어 암거배수의 수질정화효과를 살펴보고자 한다. 이를 위하여 충남 당진군의 석문 시험포에 암거배수를 시공하였다.

암거배수조직은 배수구역의 지표 잔류수나 토양 중의 중력수를 직접 흡수하여 흘려보내는 흡수관과 토층으로부터의 과잉수를 쉽게 또 연속적으로 흡수거에 유입시키기 위한 소수재 또는 피복재로 이루어져있다.

가. 토양특성

암거배수시설을 설치한 농지의 토양층위는 조사지점에서 흡수거 매설깊이인 0.7 m까지는 뚜렷한 층위의 구분없이 하나의 실트질 층위로 구성되었다. 부분적으로 점토질이 분포하고 있으나 일정한 경향을 보이지는 않았다.

토성은 모래가 26 %, 실트가 68 %, 점토가 6 %인 미사질양토를 나타냈다. pH는 8.4로서 다소 높은 경향을 보였으며, 전기전도도는 0.54 dS/m를 나타냈다. 유기물은 0.28 %, 총질소 함량은 110.9 mg/kg, 총인은 400.6 mg/kg을 나타냈으며, 강열감량은 2.1 %를 나타냈다.

나. 암거배수설치

(1) 흡수거의 깊이

흡수거의 깊이, 간격, 암거의 기울기, 관 지름의 순으로 설계 기준값들을 결정하였다(토양 속에 균열이 현저하게 발달해 있어 신뢰성 있는 투수 계수값을 구하기가 어렵기 때문에 암거의 깊이와 간격은 이론식보다 경험값을 기초로 해서 결정).

$$H = h + \alpha \quad (3)$$

H : 흡수거의 매설 깊이(m)

h : 계획 지하수위(m)

α : 포장 지하수위의 강하속도, 배수개량에 따른 지반의 수축침하, 영농기계의 주행하중, 동결심도 등을 고려한 여유고; 0.2~0.4(m)
 (난투수성 토양, 연약지반 : 0.2, 사질토양·사력 등 : 0.4, 상기 이외의 토양 : 0.3)

H는 포장 중앙부에서의 매설 깊이이며 흡수거의 상하류단은 관내 유속을 고려해서 $H \pm 0.10$ m의 깊이로 한다. 일반적으로 상류단에서는 0.6~0.8 m, 하류단에서는 0.8~1.0 m로 매설하는 예가 많다. 본 연구에서는 상류단은 0.6 m, 하류단은 0.7 m로 하였다.

(2) 흡수거의 간격

흡수거의 간격은 흡수거 사이의 중앙부에서 강우 후 1~2일 이내에 계획 지하수위까지 지하수위를 강하시키는 데 필요한 흡수거 사이의 거리이다.

토지이용상황과 토성에 의해 결정하는 방법, 이론적 해법으로서 토성 특히 투수성을 고려하여 결정하는 방법 두 가지가 있다.

본 연구에서는 이상의 이론과 국내의 '농경지 이용률 제고를 위한 최적설계기법 연구(1992)'의 내용을 토대로 그림 3-78과 같이 암거 간격 7 m, 경사 1/420로 설계하였고, 채움재는 왕겨를 사용하였으며, 경운 깊이를 고려하여 표토는 30 cm 이상을 유지하는 것으로 설계하였고, 암거배수는 6열로 설치하였다.

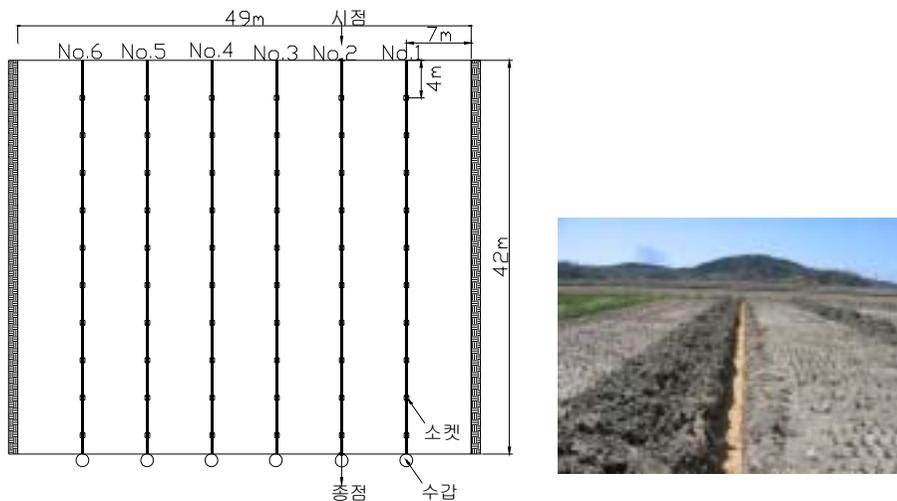


그림 3-78 암거배수 조직도 및 전경

다. 암거배수의 수질정화 특성

암거배수시설 유입수의 수온은 14.4~28.8 °C, 평균 23.8 °C였는데, 유출수는 13.2~22.1 °C, 평균 19.4 °C로서 유출수의 수온이 낮았다. 이는 암거배수는 지하에 매설되었기 때문에 수온이 낮아졌기 때문이다.

표 3-19 암거배수 유입수 및 유출수 평균 농도

구 분	수온 (°C)	pH	EC (µs/cm)	SS (mg/L)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	TP (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	Chl- <i>a</i> (mg/m)	
유입수	최소값	14.4	6.8	248.0	2.0	2.8	1.3	4.5	0.61	0.00	0.42	0.02	0.10	0.00	1.0
	최대값	28.8	8.3	851.0	32.4	13.4	5.6	15.8	5.40	0.09	4.22	0.49	0.31	0.27	45.7
	표준편차	4.3	0.5	207.3	9.5	3.0	1.5	3.5	1.51	0.03	1.34	0.15	0.06	0.08	14.8
	평균	23.8	7.5	472.1	16.5	6.6	3.2	7.9	2.90	0.04	2.01	0.17	0.23	0.14	10.2
암 거 유출수	최소값	13.2	6.6	182.0	0.5	1.9	1.8	4.3	0.72	0.00	0.40	0.04	0.06	0.02	0.0
	최대값	22.1	8.0	1,043.0	15.2	7.4	4.6	23.6	5.62	0.05	3.97	0.35	0.55	0.19	9.8
	표준편차	2.6	0.5	258.4	4.9	1.8	0.9	5.9	1.55	0.02	1.31	0.10	0.15	0.06	3.9
	평균	19.4	7.4	427.7	8.3	4.8	3.1	9.0	3.00	0.01	1.95	0.18	0.20	0.10	3.0

암거배수시설 유입수의 pH는 6.8~8.3, 평균 7.5였는데, 유출수는 6.6~8.0, 평균 7.4로서 유입수와 비슷한 값을 나타냈다. 유입수와 유출수 모두 농업용수 수질기준인 6.0~8.5를 만족하였다.

EC는 유입수가 248.0~851.0 µS/cm, 평균 472.1 µS/cm였는데, 유출수는 182.0~1,043.0 µS/cm, 평균 427.7 µS/cm로서 비슷한 값을 나타냈으며, 대부분 700 µS/cm 이하였다.

DO농도는 유입수가 2.8~13.4 mg/L, 평균 6.6 mg/L였는데, 유출수는 1.9~7.4 mg/L, 평균 4.8 mg/L로서 유출수의 DO농도가 낮았다. 또한 그림 3-79와 같이 모든 시기에 유입수에 비해 유출수의 DO농도가 낮게 나타났는데, 이는 암거배수시설은 지하 0.6~0.7 m에 매설되어 있기 때문에 산소가 공급되지 않는 반면 유입수 중의 DO는 오염물질 분해에 이용되었기 때문이다. 그러나 유입수와 유출수 모두 농업용수 수질기준인 2.0 mg/L 이상을 만족하였다.

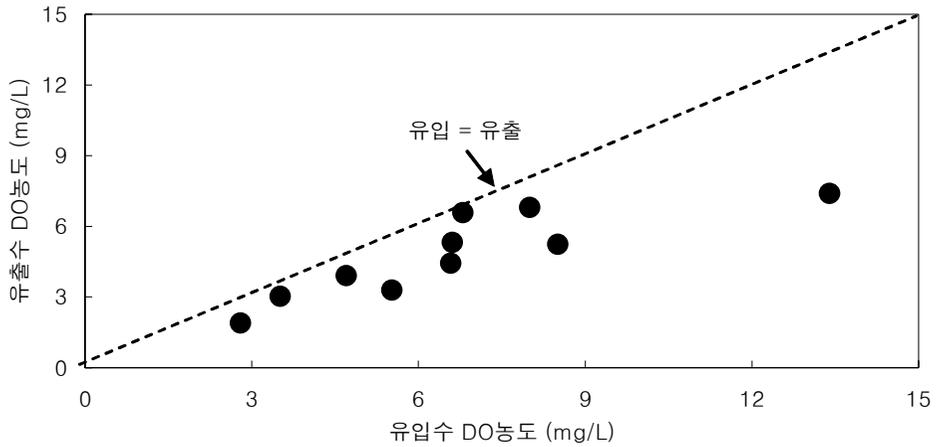


그림 3-79 암거배수 유입수와 유출수의 DO농도 비교

SS의 경우 유입수는 2.0~32.4 mg/L, 평균 16.5 mg/L였는데, 유출수는 0.5~15.2 mg/L, 평균 8.3 mg/L로서 유입수에 비해 유출수의 농도가 낮았다. 그림 3-80과 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수의 SS농도가 낮게 나타났는데, 이는 토양과 소수재를 통과하면서 SS성분이 여과되었기 때문이다. 유출수는 대부분 농업용수 수질기준인 15 mg/L 이하를 만족하고 있다.

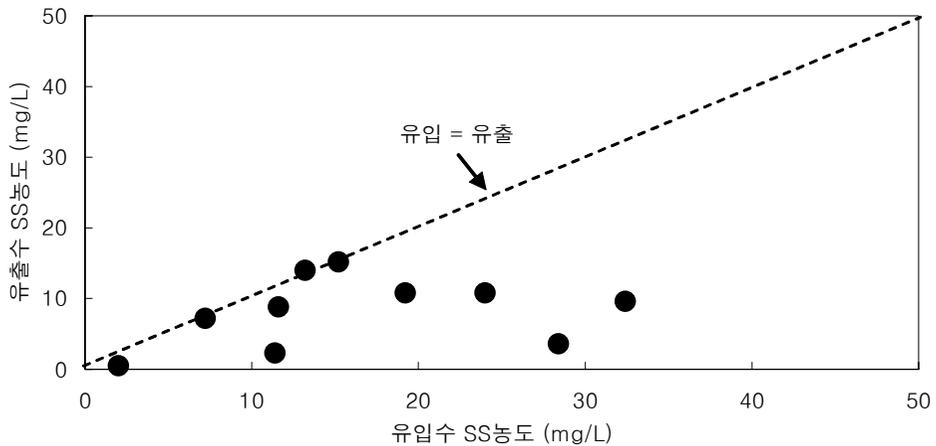


그림 3-80 암거배수 유입수와 유출수의 SS농도 비교

BOD의 경우 유입수가 1.3~5.6 mg/L, 평균 3.2 mg/L였는데, 유출수는 1.8~4.6 mg/L, 평균 3.1 mg/L로서 큰 차이가 없었다. 그림 3-81과 같이 시기별로 유입수가 높은 경우도 있고, 유출수가 높은 경우도 있어 일정한 경향을 보이지 않았으나 유입수의 농도가 4 mg/L 이상에서는 어느 정도 BOD가 제거되는 것으로 나타났다. BOD의 경우 모두 하천의 농업용수 수질기준인 8 mg/L 이하를 만족하였다.

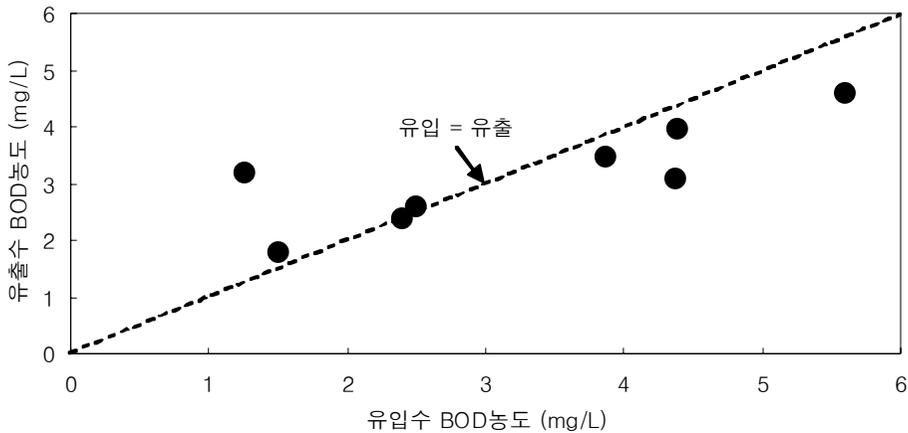


그림 3-81 암거배수 유입수와 유출수의 BOD농도 비교

COD의 경우 유입수가 4.5~15.8 mg/L, 평균 7.9 mg/L였는데, 유출수는 4.3~23.6 mg/L, 평균 9.0 mg/L로서 유입수에 비해 유출수의 농도가 다소 증가되었다. 그림 3-82에서와 같이 시기별로는 유입수에 비해 유출수의 농도가 높은 경우도 있고, 낮은 경우도 있어 일정한 경향을 보이지 않았다. 또한 유출수는 농업용수 수질기준인 8 mg/L 보다 높은 경우도 있었다.

이상과 같이 암거배수는 유기물을 효과적으로 제거해 주지 못하는 것으로 나타났다.

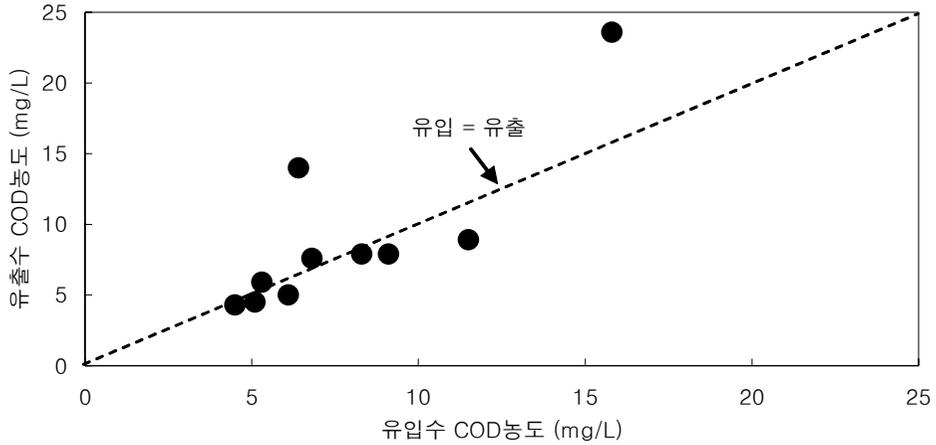


그림 3-82 암거배수 유입수와 유출수의 COD농도 비교

TN의 경우 유입수는 0.61~5.40 mg/L, 평균 2.90 mg/L였는데, 유출수는 0.72~5.62 mg/L, 평균 3.00 mg/L로서 유입수와 비슷한 농도를 나타냈다. 그림 3-83과 같이 유입수와 유출수는 거의 같은 농도를 나타내고 있어 암거배수가 TN를 제거해 주지 못하는 것을 알 수 있다. 이는 유입수와 유출수의 DO농도가 각각 평균 6.6, 4.8 mg/L로서 호기성을 나타내 질산화는 이루어지는 반면 탈질이 이루어지지 않기 때문이다.

NH₄-N의 경우 유입수가 0.02~0.49 mg/L, 평균 0.17 mg/L였는데, 유출수는 0.04~0.35 mg/L, 평균 0.18 mg/L로서 거의 비슷한 값을 나타냈다. 그림 3-84와 같이 유입수에 비해 유출수의 NH₄-N 농도가 높은 경우도 있고 낮은 경우도 있어 일정한 경향을 보이지 않았다. 그러나 유입수의 NH₄-N 농도가 0.18 mg/L 이상에서는 유출수의 농도가 낮게 나타났다.

NO₂-N의 경우는 유입수가 0.00~0.09 mg/L, 평균 0.04 mg/L였는데, 유출수는 0.00~0.05 mg/L, 평균 0.01 mg/L로 유출수의 농도가 낮았다. 그림 3-85와 같이 유입수에 비해 유출수의 농도가 낮은 경우가 많았는데, 이는 질산화에 의해 NO₂-N이 NO₃-N으로 변화되었기 때문이다.

NO₃-N의 경우 유입수는 0.42~4.22 mg/L, 평균 2.01 mg/L였는데, 유출수는 0.40~3.97 mg/L, 평균 1.95 mg/L로서 큰 차이가 없었다. 그림 3-86에서도 유입수와 유출수의 농도가 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 이는 암거배수의 DO농도가

평균 4.8 mg/L인 것에서 알 수 있는 바와 같이 암거배수가 호기성을 나타내고 있기 때문에 혐기성에 의한 탈질이 원활히 이루어지지 않았기 때문이다.

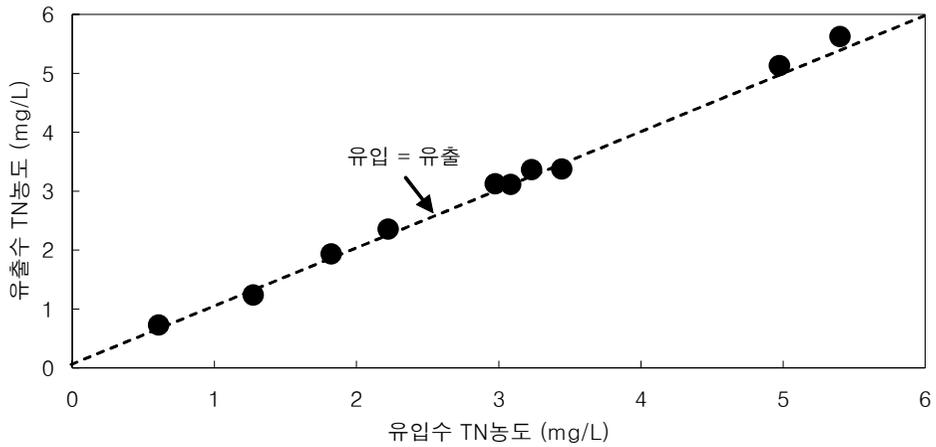


그림 3-83 암거배수 유입수와 유출수의 TN농도 비교

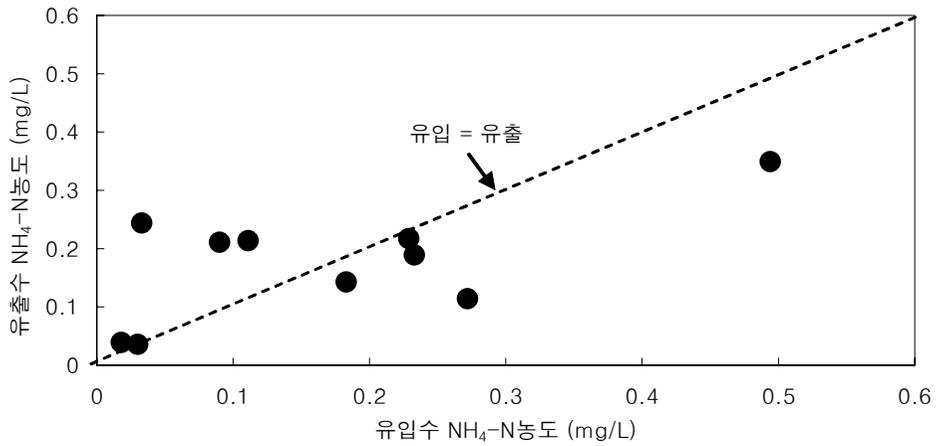


그림 3-84 암거배수 유입수와 유출수의 NH₄-N농도 비교

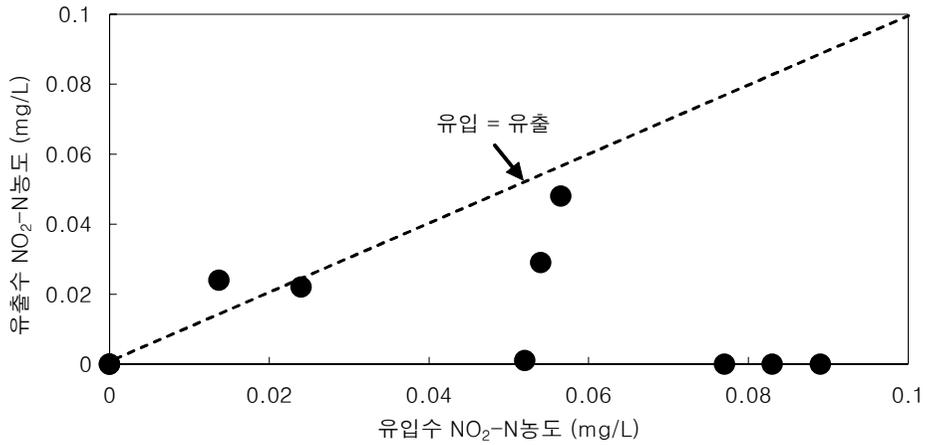


그림 3-85 암거배수 유입수와 유출수의 NO₂-N농도 비교

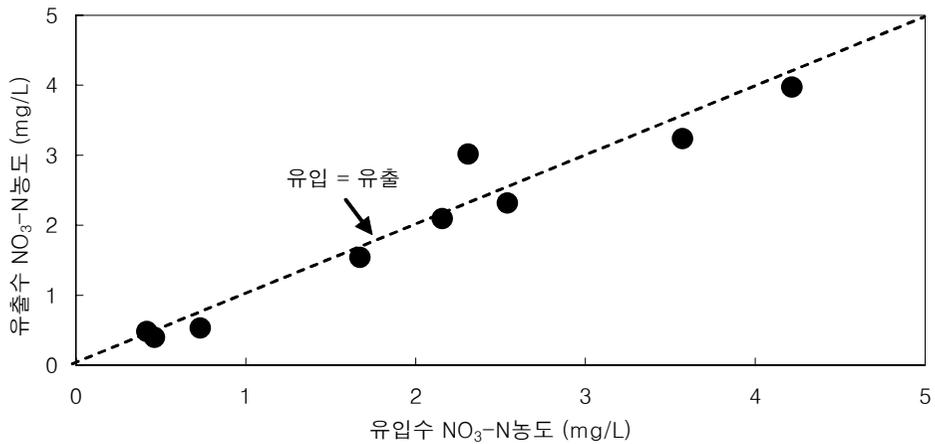


그림 3-86 암거배수 유입수와 유출수의 NO₃-N농도 비교

TP의 경우 유입수가 0.10~0.31 mg/L, 평균 0.23 mg/L였는데, 유출수는 0.06~0.55 mg/L, 평균 0.20 mg/L로서 큰 차이가 없었다. 반면 그림 3-87과 같이 유입수에 비해 유출수의 TP농도가 낮은 경우가 많았다. 이와 같이 TP농도가 낮아지는 것은 SS에 부착되어 있던 인성분이 SS와 함께 토양과 소수재에 의해 여과되었

기 때문이다. 이는 그림 3-88에서 $\text{PO}_4\text{-P}$ 가 유입수에 비해 유출수에서 낮은 경우에서 확인 할 수 있다.

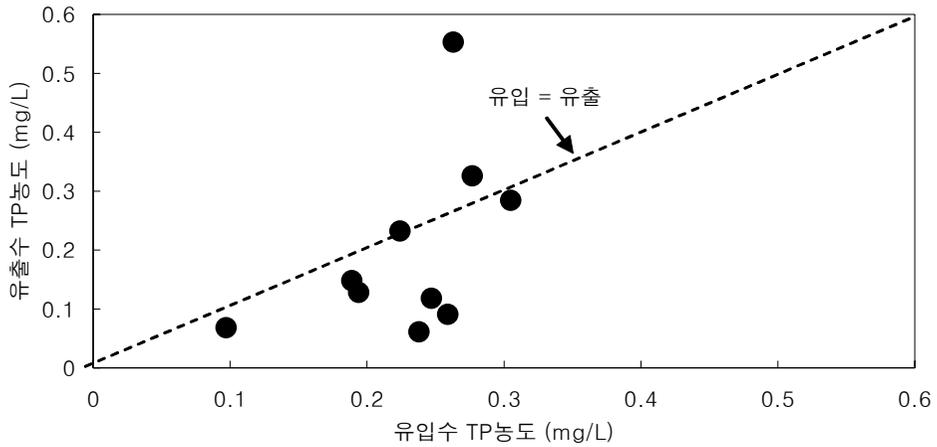


그림 3-87 암거배수 유입수와 유출수의 TP농도 비교

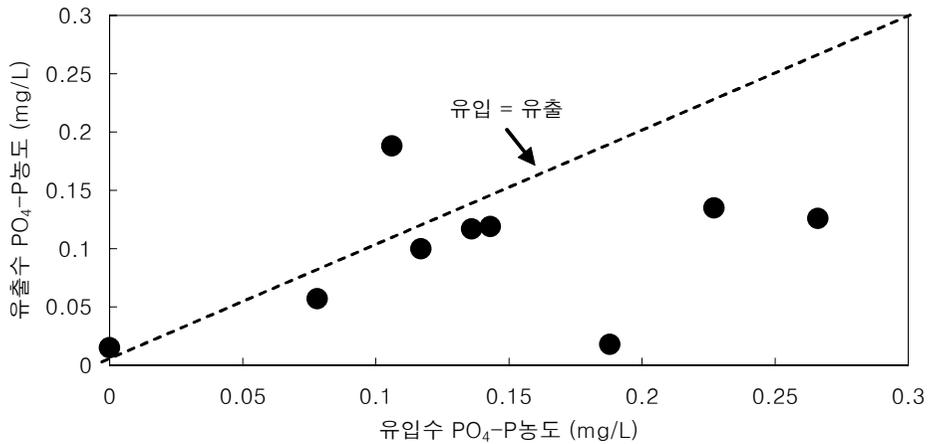


그림 3-88 암거배수 유입수와 유출수의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도 비교

$\text{Chl-}a$ 의 경우 유입수가 $1.0\sim 45.7 \text{ mg/m}^3$, 평균 10.2 mg/m^3 이었는데, 유출수는 0.

0~9.8 mg/m³, 평균 3.0 mg/m³로 유입수에 비해 낮아졌다. 그림 3-89에서 알 수 있는 바와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수의 Chl-*a*농도가 낮아 졌는데, 이는 토양과 소수재의 여과작용 때문인 것으로 판단된다.

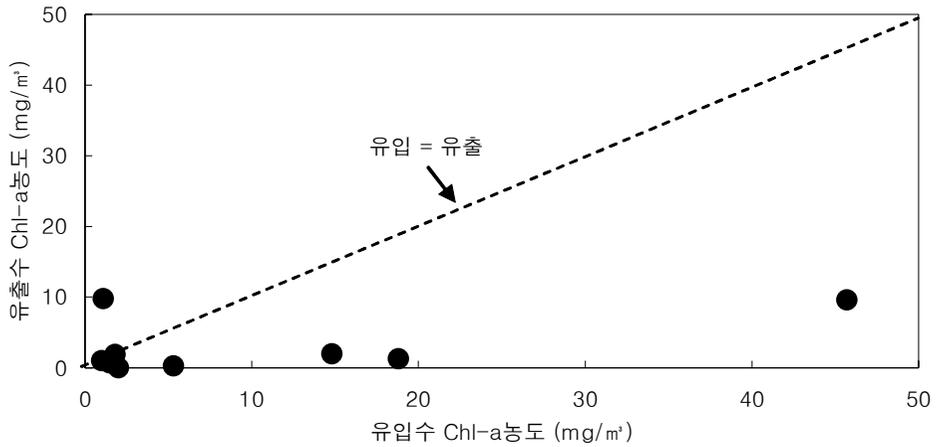


그림 3-89 암거배수 유입수와 유출수의 Chl-*a*농도 비교

이상과 같이 암거배수 시설은 토양 및 소수재의 여과작용에 의해 SS 및 Chl-*a*는 제거되지만 유기물이나 영양염류의 제거효율은 매우 낮은 것으로 나타났다. 따라서 암거배수에서의 정화효율을 높이기 위해서는 정화효율이 높은 소수재 및 시공기법을 개발하여 적용할 필요가 있는 것으로 판단된다.

제 3 절 농업수리시스템을 이용한 수질관리

1. 저류지에서의 수질변화

저류지는 석문지구에 면적 213 m², 수심 1.0 m로 조성된 것을 이용하여 유입수 및 유출수의 수질, 퇴적물 조사를 실시하였다.

저류지의 유입수량은 249~574 m³/d이었으며, 이때의 체류시간은 0.4~0.9일이다.

가. 수질정화효과

저류지에 공급되는 용수는 석문담수호 유입부에서 양수하고, 처리시설을 통과한 배수는 다시 석문담수호 유입부로 유입된다.

수질분석은 수온, EC, pH, DO 등 일반항목은 현장에서 측정하였고 BOD, COD, SS, T-N, T-P 등은 실험실로 운반하여 수질오염공정시험방법에 준하여 분석하였다.

조사기간 동안 수온은 유입수가 13.6~27.4 °C, 평균 20.1 °C였고, 유출수는 10.0~32.1 °C, 평균 21.3 °C로서 유입수와 유출수간에 큰 차이를 보이지 않았다.

pH는 유입수가 6.7~10.0, 평균 8.0이었고, 유출수가 6.9~9.0, 평균 7.9로서 대부분 호소의 농업용수 수질기준인 6.0~8.5를 만족하였다.

표 3-20 저류지 유입수 및 유출수의 수질변화

구 분	수온 (°C)	pH	EC (μ S/cm)	SS (mg/L)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	TP (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	Chl- <i>a</i> (mg/m)	
유입수	최소값	13.6	6.7	197.0	3.2	6.5	1.0	4.5	0.80	0.01	0.05	0.06	0.10	0.08	0.2
	최대값	27.4	10.0	1,011.0	60.5	11.7	33.4	34.5	19.15	0.27	3.19	16.86	1.43	1.17	30.0
	표준편차	4.8	0.9	311.9	16.5	1.8	9.1	8.2	4.72	0.07	1.19	4.77	0.34	0.29	7.7
	평균	20.1	8.0	618.0	21.0	8.1	7.2	8.8	4.42	0.08	1.79	1.79	0.43	0.34	7.3
유출수	최소값	10.0	6.9	297.0	2.4	6.3	0.8	4.1	0.45	0.00	0.36	0.06	0.12	0.07	1.4
	최대값	32.1	9.0	986.0	55.5	12.5	10.6	10.0	8.08	0.42	2.97	3.44	0.66	0.52	28.5
	표준편차	7.0	0.7	227.6	13.8	1.9	3.2	1.9	2.15	0.11	0.82	1.14	0.15	0.13	8.6
	평균	21.3	7.9	582.1	13.4	8.0	4.8	6.5	3.14	0.09	2.05	0.76	0.28	0.21	10.0

EC는 유입수가 197.0~1,011.0 μ S/cm, 평균 618.0 μ S/cm이었고, 유출수가 297.0~986.0 μ S/cm, 평균 582.1 μ S/cm으로서 다소 낮아지는 경향을 보였으며, 수질기준

에 EC항목은 없으나 미국에서는 $700 \mu\text{S}/\text{cm}$ 이하에서는 해가 없는 것으로 구분하고 있으므로 저류지 유출수를 농업용수로 이용하여도 문제는 없는 것으로 판단된다.

DO는 유입수가 $6.5\sim 11.7 \text{ mg/L}$, 평균 8.1 mg/L 로 높았으며, 유출수도 $6.3\sim 12.5 \text{ mg/L}$, 평균 8.0 mg/L 로 유입수와 비슷한 값을 보였다. 그림 3-90과 같이 유입수에 비해 유출수의 DO농도가 높은 경우도 있고 낮은 경우도 있어 일정한 경향을 보이지 않았으나 모두 수질기준인 2.0 mg/L 이상을 만족하였다. 유기물 및 영양염류를 분해하는데 용존산소가 소비됨에도 불구하고 DO농도가 낮아지지 않은 것은 그만큼 수면에서 대기로부터의 재폭기에 의해 산소가 공급되기 때문이다.

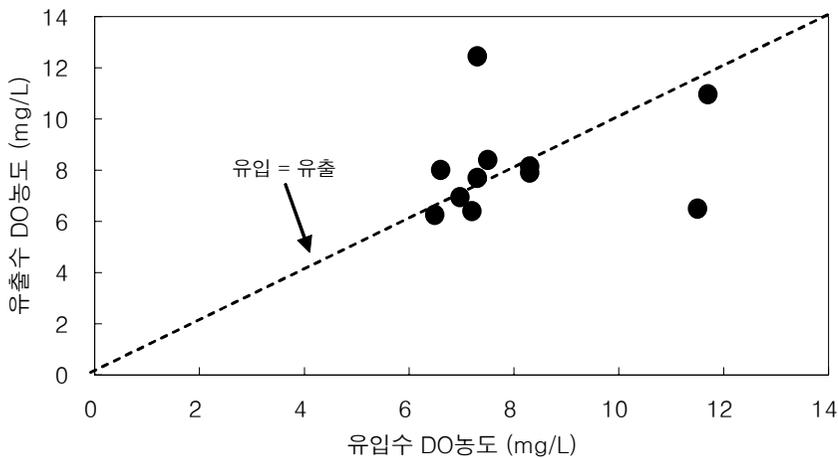


그림 3-90 저류지 유입수와 수출수의 DO농도 비교

SS는 유입수가 $3.2\sim 60.5 \text{ mg/L}$, 평균 21.0 mg/L 로서 수질기준인 15 mg/L 를 상회하는 경우가 많았지만 유출수는 $2.4\sim 55.5 \text{ mg/L}$, 평균 13.4 mg/L 로서 수질기준을 만족하는 경우가 많았다. 또한 그림 3-91과 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해 유출수의 SS농도가 낮아졌다. 이 때 SS제거율은 평균 36.2%인데, 이는 저류지가 부유물질 침전에 의한 수질정화효과가 있다는 것을 보여주는 결과이다. 유출수의 표준편차는 13.4로서 유입수에 비해 안정된 값을 나타냈다.

BOD는 유입수가 $1.0\sim 33.4 \text{ mg/L}$, 평균 7.2 mg/L 였는데, 유출수는 $0.8\sim 10.6 \text{ mg/L}$, 평균 4.8 mg/L 로서 33.2%의 제거율을 보였다. 그림 3-92와 같이 유입수에 비해 유출수의 BOD농도가 높은 경우도 있고, 낮은 경우도 있어 일정한 경향을 보이지는 않았다. 전체적으로 BOD가 감소된 것은 용존성 유기물은 미생물에 의해

수중에서 분해되고, 입자성 유기물은 SS성분과 함께 침전되었기 때문이다.

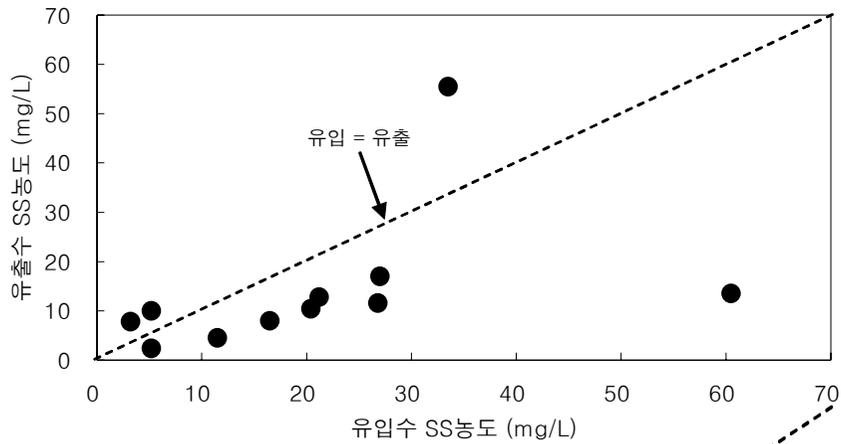


그림 3-91 저류지 유입수와 수출수의 SS농도 비교

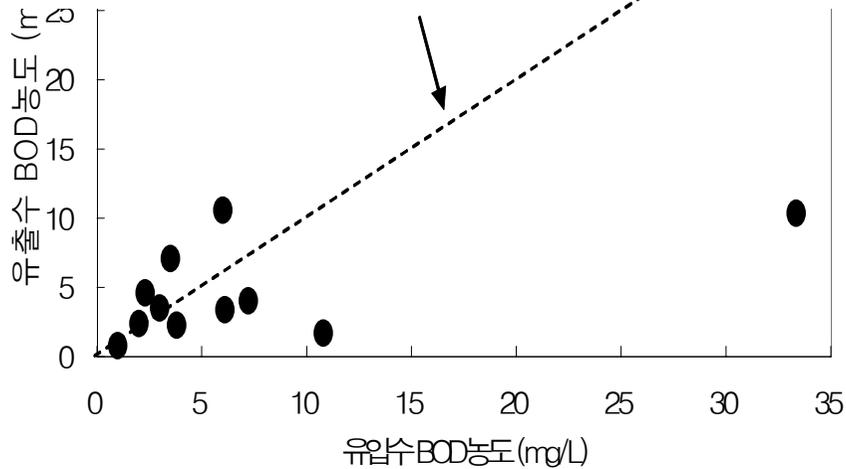


그림 3-92 저류지 유입수와 수출수의 BOD농도 비교

COD는 유입수가 4.5~34.5 mg/L, 평균 8.8 mg/L로서 수질기준인 8.0 mg/L를 상회하였으나, 유출수는 4.1~10.0 mg/L, 평균 6.5 mg/L로 감소되어 25.6%의 낮은 정화효율을 나타냈으며, 그림 3-93과 같이 유입수에 비해 유출수의 COD농도가 높은 경우도 있고 낮은 경우도 있었다. COD도 BOD와 마찬가지로 미생물에 의한 분해와 침전에 의해서 제거된다.

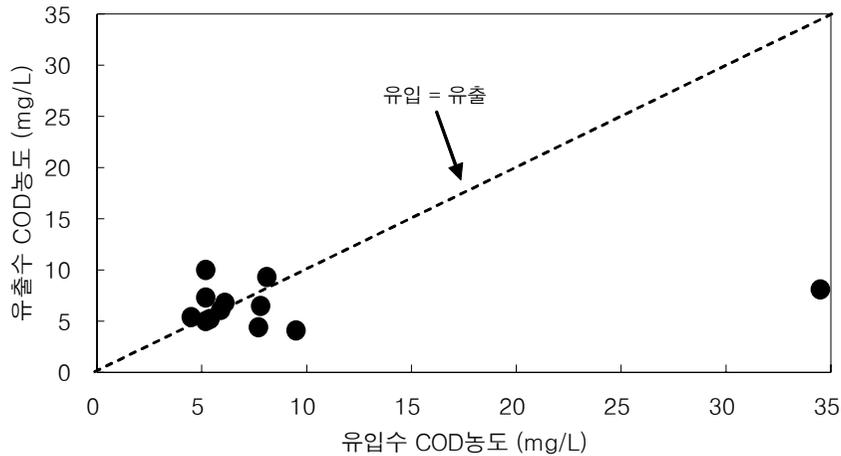


그림 3-93 저류지 유입수와 수출수의 COD농도 비교

TN은 유입수가 0.80~19.15 mg/L, 평균 4.42 mg/L였는데, 유출수는 0.45~8.08 mg/L, 평균 3.14 mg/L로 낮아져 22.8%의 제거율을 보였다. 그림 3-94와 같이 대부분의 시기에 유입수에 비해서 유출수의 농도가 낮게 나타났다.

NH₄-N은 유입수가 0.06~16.86 mg/L, 평균 1.79 mg/L였는데, 유출수는 0.06~3.44 mg/L, 평균 0.76 mg/L를 나타내 평균 57.7%가 감소되었다. 이와 같이 NH₄-N이 감소된 경우는 호기성상태에서 질산화가 진행되고 있기 때문이다. 그러나 그림 3-95와 같이 시기적으로 유입수에 비해 유출수의 농도가 높은 경우도 있고 낮은 경우도 있어 일정한 경향을 보이지 않았다.

NO₂-N은 유입수가 0.01~0.27 mg/L, 평균 0.08 mg/L이었는데, 유출수는 0.00~0.42 mg/L, 평균 0.09 mg/L로 오히려 증가되었다. 또한 그림 3-96과 같이 유입수에 비해 유출수에서 NO₂-N농도가 증가되는 경우도 있고 감소되는 경우도 있는 등 일정한 경향을 보이지 않았다.

NO₃-N의 경우도 유입수가 0.05~3.19 mg/L, 평균 1.79 mg/L였는데, 유출수는 0.36~2.97 mg/L, 평균 2.05 mg/L를 나타내 오히려 증가되었고, 그림 3-97과 같이 유입수에 비해 유출수가 증가되는 경우도 있고 감소되는 경우도 있는 등 일정한 경향을 보이지 않았다. 이와 같이 NO₂-N, NO₃-N이 감소되지 않은 것은 유입수와 유출수의 DO농도가 각각 8.1, 8.0 mg/L를 나타내고 있는 바와 같이 저류지가 호기성조건은 어느 정도 유지되어 질산화에 의해 NO₂-N, NO₃-N이 생산되는 속

도에 비해 혐기성으로 인해 탈질되는 속도가 느리기 때문이다. 따라서 저류지에서 질소제거율을 높이기 위해서는 저류지에 부분적으로 혐기성 부분을 확보하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

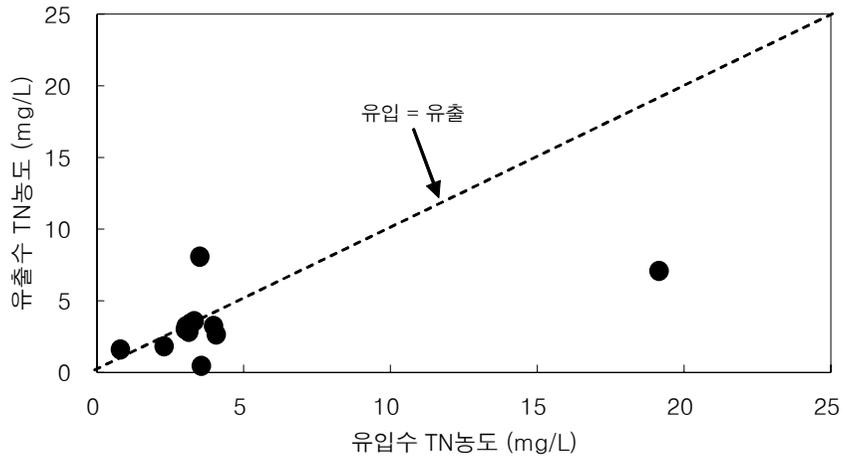


그림 3-94 저류지 유입수와 수출수의 TN농도 비교

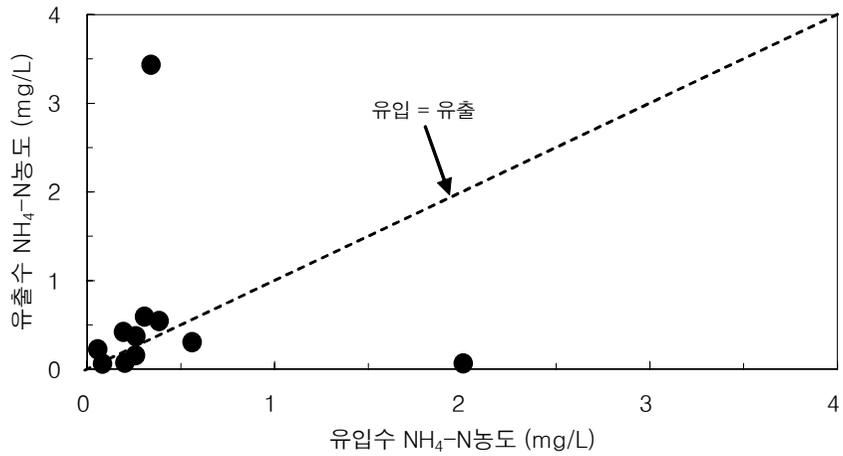


그림 3-95 저류지 유입수와 수출수의 NH₄-N농도 비교

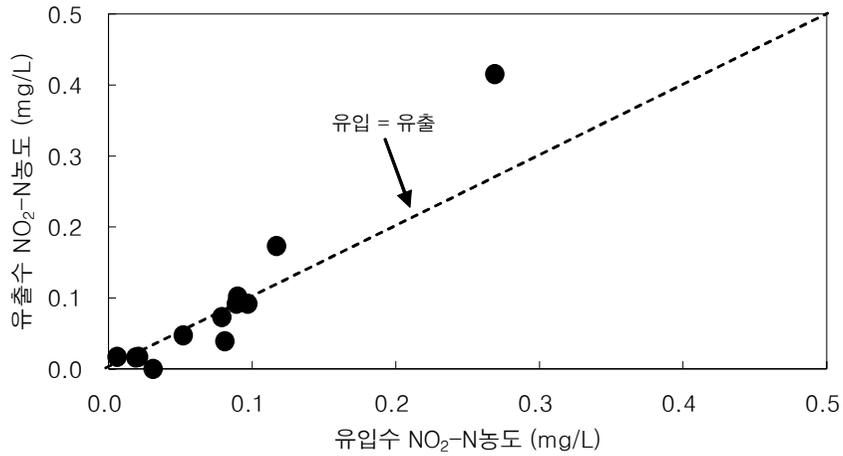


그림 3-96 저류지 유입수와 수출수의 NO₂-N농도 비교

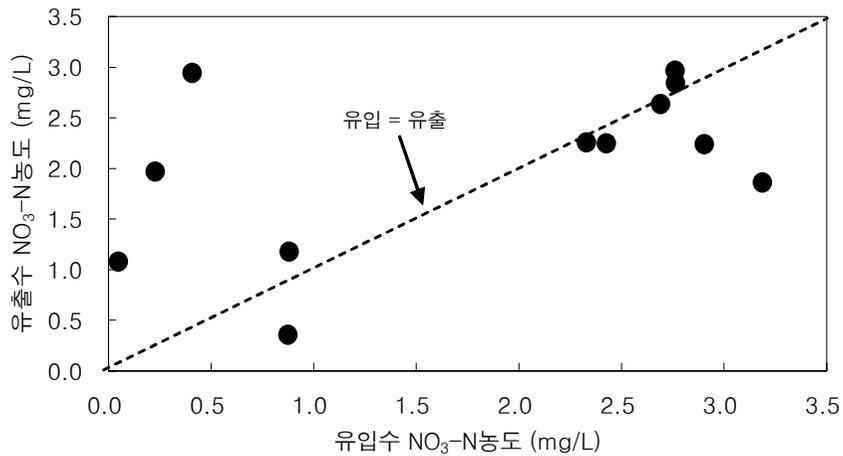


그림 3-97 저류지 유입수와 수출수의 NO₃-N농도 비교

TP의 경우 유입수가 0.10~1.43 mg/L, 평균 0.43 mg/L를 나타냈으나, 유출수는 0.12~0.66 mg/L, 평균 0.28 mg/L로서 평균 33.7%가 제거되었다. 인성분은 토양입자에 잘 부착되는 성질을 갖고 있으므로 SS성분에 붙어 있던 것이 SS성분과 함께 침전되어 유출수의 인 농도가 낮아진 것으로 판단된다. 그러나 그림 3-98과

같이 유입수에 비해 유출수가 높은 경우도 있고 낮은 경우도 있어 일정한 경향을 보이지 않았다.

PO₄-P의 경우 유입수는 0.08~1.17 mg/L, 평균 0.34 mg/L를 나타냈는데, 유출수는 0.07~0.52 mg/L, 평균 0.21 mg/L를 나타내 37.5%의 제거율을 보였다. 그림 3-99와 같이 유입수에 비해 유출수에서 PO₄-P농도가 감소되는 경우가 많았다.

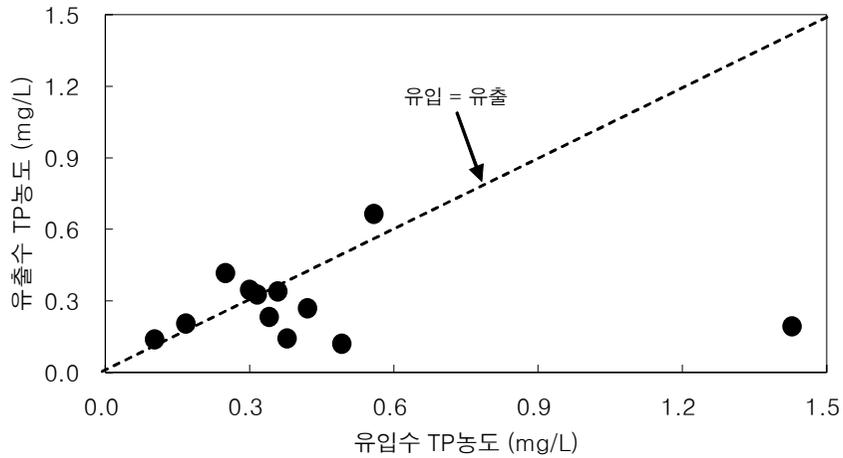


그림 3-98 저류지 유입수와 수출수의 TP농도 비교

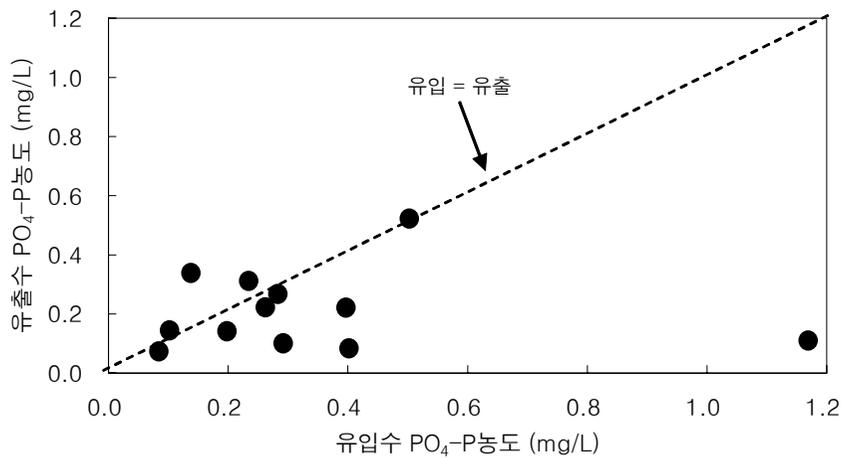


그림 3-99 저류지 유입수와 수출수의 PO₄-P농도 비교

Chl-*a*는 유입수가 0.2~30.0 mg/m³, 평균 7.3 mg/m³이었는데, 유출수는 1.4~28.5 mg/m³, 평균 10.0 mg/m³로 오히려 높아지는 경향을 보였고, 그림 3-100과 같이 유입수에 비해 유출수의 농도가 높은 경우가 많았다. 그러나 대부분 OECD가 제시한 부영양화 기준인 25 mg/m³ 이하였다.

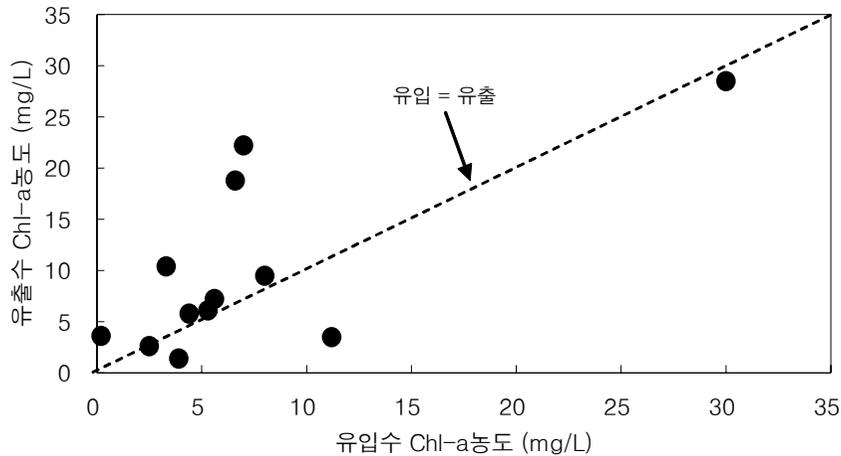


그림 3-100 저류지 유입수와 수출수의 Chl-*a*농도 비교

이상과 같이 저류지는 수질정화효과는 크지 않지만 수질정화효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 농업수리시스템에 있는 저류지들은 수질개선에 긍정적으로 작용할 것으로 판단된다. 다만 수질정화효율을 높이기 위해서는 부분적으로 수심 1 m 이상의 깊은 혐기성 부분을 조성하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 시험용의 조그만 저류지에서 실험한 결과이므로 실제 저류지에서의 수질정화효과를 규명할 필요가 있을 것으로 판단된다.

나. 퇴적물특성

저류지 퇴적물의 토성은 2004년 초에는 모래가 42.0 %, 실트가 55.0 %, 점토가 3.0 %였는데, 2004년 말에는 각각 31.0 %, 65.0 %, 5.0 %였고, 2005년 말에는 각각 31.0 %, 64.0 %, 5.0 %로서 모래의 함유율은 감소된 반면, 실트와 점토의 함유율은 증가되었다. 이는 유입수 중의 SS성분이 침전되어 실트와 점토의 비율이 높아진 것으로 판단된다.

표 3-21 저류지 퇴적물의 토성

분 류	토성			
	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	토성
2004년 초	42.0	55.0	3.0	SiL
2004년 말	31.0	65.0	5.0	SiL
2005년 말	31.0	64.0	5.0	SiL

저류지 퇴적물의 pH는 2004년 초에 8.2였으나 시간이 경과됨에 따라 낮아져 2005년 말에는 4.7로 낮아져 산성을 나타냈다. EC는 2004년 초에 2.0 dS/m였는데, 시간이 지남에 따라 감소되어 2005년 말에는 0.8 dS/m로 낮아 졌다. 유기물 함량은 2004년 초에 0.2%였는데, 시간이 지남에 따라 증가되어 2005년 말에는 0.8%로 높아졌다. 이는 유입수 중의 유기물이 침전되었기 때문이다. TN도 2004년 초에는 129 mg/kg이었는데 시간이 지남에 따라 증가되어 2005년 말에는 622 mg/kg으로 높아졌다. TP도 2004년 초에는 370 mg/kg이었는데, 시간이 지남에 따라 증가되어 2005년 말에는 450 mg/kg으로 증가되었다.

표 3-22 저류지 퇴적물의 화학성

	pH	EC (dS/m)	유기물함량 (%)	TN (mg/kg)	TP (mg/kg)
2004년 초	8.2	2.0	0.2	129	370
2004년 말	6.8	1.9	0.5	518	456
2005년 말	4.7	0.8	0.8	622	450

2. 낙차공의 수질정화기능

낙차공에서의 재폭기 효과를 분석하기 위하여 모형실험을 실시하였다. 모형은 건국대학교 야외 시험장에 설치하였다(그림 3-101). DO는 미생물들이 오염물질을 분해하는데 꼭 필요하기 때문에 농업수리시스템 중에서 DO를 증가시킬 수 있는 시설이 있다면 수질개선효과에 긍정적으로 작용하게 된다. 농업수리시스템 중 낙차공은 물이 낙하하면서 분쇄되는 과정에서 산소가 유입될 수 있는 시설이다. 본 연구에서는 낙차공의 재폭기 효과를 분석하기 위하여 모형실험을 실시하였다.



그림 3-101 낙차공 수리시험 전경

모형실험은 낙차고를 0.2 m, 0.6 m, 1.0 m로 변화시키면서 실험을 실시하였고, 낙차부 상류에 자갈을 부설하여 낙차부에서의 재폭기 효과를 높이기 위한 실험도 병행하였다. 낙차고가 0.2 m인 경우 표 3-23과 같이 낙차전의 DO농도가 3.69 ~7.46 mg/L, 평균 5.77 mg/L이었는데, 낙하후에는 4.02~7.03 mg/L, 평균 5.80 mg/L로서 낙하전과 비슷한 값을 나타냈다. 그림 3-102에서도 알 수 있는 바와 같이 낙차고 0.2 m에서는 낙하전과 낙하후가 거의 같은 값을 나타내고 있다.

표 3-23 차고에 따른 DO농도의 변화

낙차고 \ 구분	낙하전			낙하후		
	최소값	최대값	평균	최소값	최대값	평균
0.2m	3.69	7.46	5.77	4.02	7.03	5.80
0.6m	4.56	7.86	6.45	5.94	7.89	6.84
1.0m	4.58	7.62	6.19	5.98	7.13	6.65

낙차고를 0.6 m로 증가시킨 경우 낙차전의 DO는 4.56~7.86 mg/L, 평균 6.45 mg/L였는데, 낙하후에는 5.94~7.89 mg/L, 평균 6.84 mg/L를 나타내 6% 정도 높아졌다. 그림 3-103에서와 같이 낙하전 DO농도가 7.0 mg/L 이하에서는 낙하후에 DO농도가 높아지고, 7.0 mg/L 이상에서는 낙하후에 낮아지기도 하고 높아지기도 하여 일정한 경향을 보이지 않았다. DO농도가 높은 경우에는 별 차이가 없지만 DO농도가 낮은 경우에는 낙차공을 통과하면서 자연스럽게 DO농도가 높아지기

때문에 일정 정도의 DO농도를 유지할 수 있으므로 미생물에 의한 오염물질 제거효과를 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

낙차고를 1.0 m로 한 경우는 낙하전 DO농도가 4.58~7.62 mg/L, 평균 6.19 mg/L였는데, 낙하후에는 5.98~7.13 mg/L, 평균 6.65 mg/L를 나타내 다소 증가되는 경향을 보였으나 상승률은 7% 정도로서 낙차고 0.6 m와 거의 차이가 없었다. 이 결과와 일본농업집락배수협회(1992)가 일반적으로 낙차고가 1.2 m 이상이면 2단으로 나누어 낙하시키는 것이 효율이 좋다고 보고한 것을 감안하면 낙차고를 0.6~1.0 m 정도로 하는 것이 재폭기에는 효율적인 것으로 판단된다.

낙차부의 형상에 따른 재폭기 효과를 실험하기 위하여 낙차부 전 수로에 자갈을 포설하고 실험을 실시한 결과 자갈포설 전에는 DO가 평균 9.13 mg/L였는데, 자갈을 포설한 길이 1 m구간을 유하하는 동안 DO가 9.21 mg/L로서 큰 차이를 보이지 않았다.

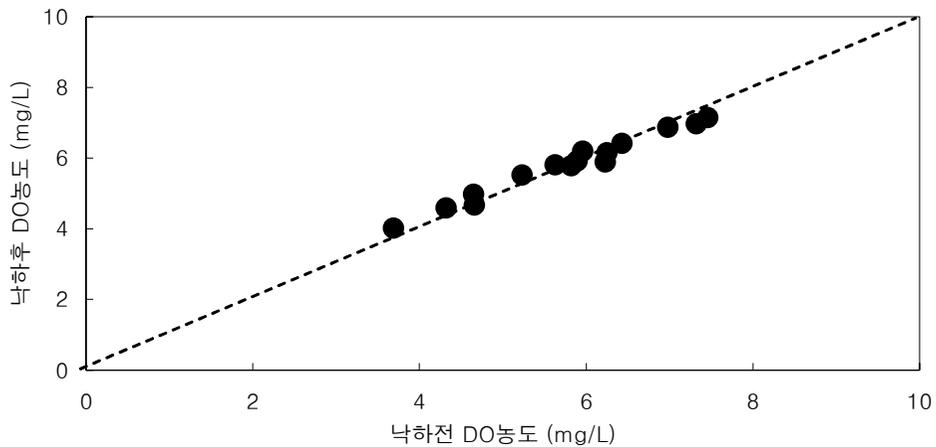


그림 3-102 낙차고 0.2 m일 때 낙하 전후 DO농도 변화

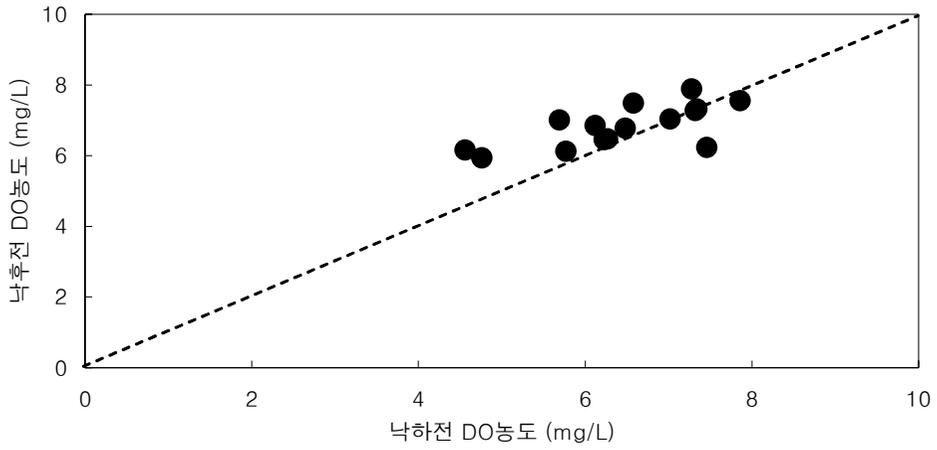


그림 3-103 낙하고 0.6 m일 때 낙하 전후 DO농도 변화

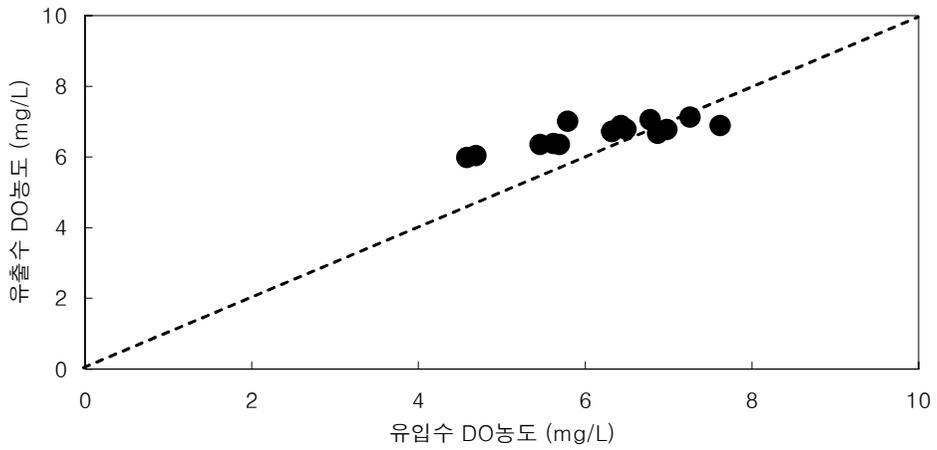


그림 3-104 낙하고 1.0 m일 때 낙하 전후 DO농도 변화

제 4 절 결 론

본 연구에서는 증가되고 있는 휴경지에서의 일반적인 수질개선효과를 살펴보고, 휴경지에서의 수질정화효율을 향상시킬 수 있는 방안을 도출하고자 시험포장을 조성하여 연구를 수행하였다. 또한 농업수리시스템 중 저류지와 낙차공에서의 수질개선효과에 대하여 연구하였는데 그 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 휴경지의 수질변화 특성

휴경지에서의 수질변화특성을 살펴보기 위하여 관리되지 않고 방치된 휴경지와 일정한 수심으로 담수관리를 하고 있는 휴경지에 대하여 조사하였다.

최소한의 관리가 이루어지지 않고 방치된 휴경지에서는 휴경 초기에는 식물에 의한 여과 및 흡수에 의해 수질정화효과가 있었으나 휴경이 진행됨에 따라 식물체의 고사와 재용출로 수질정화를 거의 기대할 수 없었고 오히려 오염원으로 작용하는 경우가 있었다. 또한 번무하는 잡풀 및 관목류는 뿌리가 발달하여 휴경지를 농경지로 재이용할 경우 장애가 될 수 있다.

휴경지의 수심을 평균 10~20 cm로 담수관리하는 경우에는 유기물의 제거효과는 없었으나 농업용수원 부영양화의 주원인인 질소와 인의 제거효과는 있는 것으로 나타났다. 반면 담수관리를 하기 때문에 잡풀의 발생이 억제되어 농지의 황폐화를 방지하고 식물의 고사와 재용출에 따른 수질악화현상을 일으키지 않았다.

따라서 휴경지를 적절히 관리하여 수생식물의 번무를 방지하면서 수질정화를 도모하기 위한 기술을 개발하기 위하여 담수관리 시험포, 여울-웅덩이 조성 시험포, 흡수로 조성 시험포, 암거배수 설치 시험포를 설치하여 수질정화시험을 실시하였다.

2. 휴경지의 담수관리에 따른 수질개선

휴경지의 수심을 20~30 cm로 관리하는 경우 SS의 제거효과는 없었으나 BOD는 유입수가 평균 4.5 mg/L이었는데, 유출수는 평균 3.6 mg/L로 낮아져 19.9%의 제거율을 보였다. COD의 경우 유입수가 평균 9.2 mg/L이었는데, 유출수는 평균 8.6 mg/L로 낮아져 6.9%의 제거율을 보여 유기물이 제거되었다. 또한 TN의 경우 유입수가 평균 3.46 mg/L이었는데, 유출수는 평균 1.20 mg/L로 낮아져 65.5%의 높은 제거율을 보였다. TP의 경우도 유입수가 평균 0.26 mg/L를 나타냈는데, 유출수는 평균 0.10 mg/L를 나타내 62.7%의 제거율을 보임으로서 영양

염류도 제거되는 것으로 나타났다. 따라서 휴경지를 방치하지 않고 20~30 cm로 담수관리하는 경우 유기물과 영양염류의 제거효과가 있을 뿐만 아니라 식물의 생장에 따른 농지의 황폐화를 방지할 수 있었다.

3. 여울 및 웅덩이 조성을 통한 수질개선

휴경지에서의 수질정화기능을 강화하기 위하여 다양한 수심을 갖도록 여울과 웅덩이를 조성하여 수질정화시험을 하였다. 그 결과 SS는 유입수가 평균 25.9 mg/L이었는데 유출수는 평균 9.6 mg/L로 크게 낮아져 평균 63.0 %의 제거율을 보였다. BOD는 평균 4.5 mg/L에서 평균 2.7 mg/L로 낮아져 40.0 %의 제거율을 보였으나 COD는 유입수와 유출수 사이에 큰 차이가 없었다. TN의 경우 유입수는 평균 3.46 mg/L였는데, 유출수는 평균 1.28 mg/L로 낮아져 63.0 %의 제거율을 보였다. TP의 경우도 유입수가 평균 0.26 mg/L였는데, 유출수는 평균 0.15 mg/L로 감소되어 평균 42.5 %의 제거율을 보였다. 이와 같이 여울과 웅덩이를 조성한 시험포에서는 SS, 유기물, 영양염류의 제거효과가 있었고, 일정 정도 담수를 하기 때문에 식물의 발생이 억제되어 25~30%의 낮은 피도를 나타냄으로서 식물생장에 따른 농지의 황폐화도 방지할 수 있었다.

4. 흙수로 조성을 통한 수질개선

휴경지에 흙수를 조성한 시험포의 경우 SS농도는 유입수가 평균 25.9 mg/L이었는데, 유출수는 평균 10.1 mg/L로 낮아져 61.0%의 제거율을 보였다. 유입수의 BOD는 평균 4.5 mg/L였는데, 유출수는 평균 3.2 mg/L로 낮아져 29.5%의 제거율을 보였다. COD는 유입수가 평균 9.2 mg/L이었는데, 유출수는 평균 9.0 mg/L로 비슷한 값을 나타냈다. 유입수의 TN농도는 평균 3.46 mg/L였는데, 유출수는 평균 2.09 mg/L로 낮아져 39.7%의 제거율을 보였다. TP의 경우 유입수는 평균 0.26 mg/L였는데, 유출수는 평균 0.22 mg/L를 나타내 15.9 %가 제거되었다. 따라서 흙수로에서도 SS, 유기물, 영양염류의 제거효과가 있었으므로 휴경지를 경운하여 수로를 만들고 물을 흘려보내면 수질정화효과는 물론 식물생장도 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 암거배수에 의한 수질정화

암거배수시설의 경우 SS는 유입수가 평균 16.5 mg/L였는데, 유출수는 평균

8.3 mg/L로서 유입수에 비해 유출수의 농도가 낮았다. 그러나 BOD, COD, TN, TP는 유입수와 유출수 사이에 큰 차이가 없어 정화효과가 거의 없었다. 암거배수 시설은 토양 및 소수재의 여과작용에 의해 SS 및 Chl-*a*는 제거되지만 유기물이나 영양염류의 제거효율은 매우 낮은 것으로 나타났다. 따라서 암거배수에서의 정화효율을 높이기 위해서는 정화효율이 높은 소수재 및 시공기법을 개발하여 적용할 필요가 있는 것으로 판단된다.

6. 저류지에서의 수질변화

농업수리시스템의 하나인 저류지의 경우 SS는 유입수가 평균 21.0 mg/L이었는데, 유출수는 평균 13.4 mg/L 낮아져 36.2 %가 제거되었다. BOD는 유입수가 평균 7.2 mg/L였는데, 유출수는 평균 4.8 mg/L로서 33.2 %의 제거율을 보였다. COD는 유입수가 평균 8.8 mg/L이었는데, 유출수는 평균 6.5 mg/L로 감소되어 25.6%의 제거율을 나타냈다. TN은 유입수가 평균 4.42 mg/L였는데, 유출수는 평균 3.14 mg/L로 낮아져 22.8 %의 제거율을 보였다. TP의 경우도 유입수가 평균 0.43 mg/L를 나타냈으나, 유출수는 평균 0.28 mg/L로서 평균 33.7%가 제거되었다. 따라서 농업수리시스템에 있는 저류지들은 수질개선에 긍정적으로 작용할 것으로 판단된다. 다만 수질정화효율을 높이기 위해서는 부분적으로 수심 1 m 이상의 깊은 혐기성 부분을 조성하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 시험용의 조그만 저류지에서 실험한 결과이므로 실제 저류지에서의 수질정화효과를 규명할 필요가 있을 것으로 판단된다.

7. 낙차공의 수질정화기능

낙차공 모형을 만들어 낙차에 따른 재폭기 효과를 실험하였는데, 낙차고가 0.2 m인 경우는 재폭기 효과가 거의 없었다. 낙차고를 0.6 m로 증가시킨 경우에도 낙차전과 후의 평균 DO농도에는 거의 차이가 없었으나 낙하전 DO농도가 7.0 mg/L 이하에서는 낙하후에 DO농도가 높아지는 경향을 보였다. DO농도가 높은 경우에는 별 차이가 없지만 DO농도가 낮은 경우에는 낙차공을 통과하면서 자연스럽게 DO농도가 높아지기 때문에 항상 일정 정도의 DO농도를 유지할 수 있으므로 미생물에 의한 오염물질 제거효과를 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 이상의 결과는 모형실험에 의한 결과이므로 실제 크기의 다양한 낙차공에 대하여 재폭기효과를 규명할 필요가 있을 것으로 판단된다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도 및 관련분야 기여도

구 분	연구개발 목표 달성도		관련분야 기여도
	연구개발목표	달성도 (%)	
1차 년도 (2003 - 2004)	연구대상지구선정 및 기초조사 - 대상지구선정을 위한 자료 수집, 현장답사 - 유역폐쇄가 가능한 연구대상지구 선정 - 몽리구역 특성, 용배수계통, 토지이용현황 조사	100	○ 휴경지는 버려진 땅이 아니라 수질정화 및 생태계 보전에 크게 기여한다는 근거를 마련하여 농지에 대한 친환경보조금 지급의 당위성 제시로 농촌의 안정된 수입기반 및 농지보전기반 구축에 크게 기여할 것으로 판단됨
	농업수리시스템의 수질보전기능 평가 - 단위 농업수리시스템 선정 - 취수용수의 유입부하량 조사 - 단위 농업수리시스템 말단에서의 수질변동 조사 - 저류지, 낙차공의 수질변화 특성 조사	100	○ 기존의 농업수리시스템은 농업용수의 원활한 공급과 배수를 목적으로 조성되었으나 본 연구를 통해 이들 시설이 수질에 미치는 영향에 대한 파악을 통한 친수시설 개발 유도에 크게 기여
	유휴농지의 물수지 조사 - 농업수리시스템내 조사연구용 단위 필지의 (유휴)농지 선정 - 증발량, 침투량, 유입 및 유출수량 측정장치 설치 및 측정 - 기상 조사, 토양특성조사 - 물수지분석 - 웅덩이 및 여울 조성	100	○ 휴경지 등의 유휴농지는 농사를 짓지 않고 방치되는 농지로만 여겨 왔으나, 본 연구를 통하여 유휴농지를 다면적으로 활용하여 농지의 이용률을 높이기 위한 연구가 활성화되는 계기를 마련하는데 크게 기여할 것으로 판단됨

구 분	연구개발 내용 및 범위		관련분야 기여도
	연구개발목표	달성도 (%)	
2차 년도 (2004 - 2005)	저류지를 이용한 수질개선기능 강화 - 저류지의 부유물질 침전기능 평가 - 유입수 및 유출수의 수량 및 수질조사	100	○ 저류지를 용수를 일시적으로 저류하는 시설로서만이 아니라 수질정화기능도 고려한 설계에 기여할 것으로 판단됨
	낙차공을 이용한 수질개선 기능 강화 (모형실험) - 낙차공의 재폭기효과 분석 - 유입부 및 유출부의 DO농도 조사	100	○ 낙차공을 수질정화에 필요한 산소공급시설로서 인식하고, 재폭기 효율을 높일 수 있는 구조개발이 활성화되는데 크게 기여할 것으로 판단됨
	농업수리시스템에서의 수질변화 특성 조사 - 유입하천에서 차지하는 농업 용수의 비율 및 하천수질 - 취수용수의 유입부하량, 단위 농업수리시스템 말단에서의 수질변동 조사	100	○ 농지 및 농업수리시스템에서의 수질변화를 측정함으로써 농촌 지역의 광역수질관리에 기여할 수 있을 것으로 판단됨
	소규모 흙수로 굴착에 의한 강화 - 소규모 흙수로 조성에 의한 체류시간 연장 - 유입·유출 수량 및 수질조사 - 침전물 조사	100	○ 휴경지를 이용하여 수질정화 기능을 강화시킬 수 있는 기술 개발을 통해 농지의 유효이용에 크게 기여할 것으로 판단됨
	웅덩이 및 여울 조성에 의한 강화 - 웅덩이 및 여울 조성을 통한 수질정화기능 평가 - 웅덩이에서 유속 저하에 의한 부유물 침전기능 유도 - 유입·유출 수량 및 수질조사	100	○ 휴경지를 수질정화공간만이 아니라 생태계 보전공간으로서 활용할 수 있는 기술개발 활성화에 크게 기여할 것으로 판단됨
	암거배수에 의한 수질개선기능 강화 - 대상농지 토양의 물리적 특성 및 화학적 특성 조사 - 수질정화형 암거배수시설 설계 및 시공	100	○ 단순한 지하배수를 통한 농지의 범용화만이 아니라 수질정화 기능도 겸비한 시설개발에 기여할 것으로 판단됨

구 분	연구개발 내용 및 범위		관련분야 기여도
	연구개발목표	달성도 (%)	
3차 년도 (2005 - 2006)	암거배수의 수질정화효과 분석 - 증발량, 침투량 측정 - 유입 및 유출수의 수량 측정 - 토양특성조사	100	○ 농지의 범용화에 기여하는 암거배수의 친환경적 설계에 기여할 것으로 판단됨
	소규모 흙수로 조성 휴경지에서의 수질정화기능 평가 - 흙수로 유입·유출 수량 및 수질조사 - 침전물 조사	100	○ 휴경지에 흙수를 조성하여 수질을 정화할 수 있는 기술 개발을 통하여 저비용 농업용수 수질개선기술 제공으로 농촌지역의 수질환경개선에 크게 기여할 것으로 판단됨
	웅덩이 및 여울 조성 휴경지에서의 수질정화기능 평가 - 유입·유출 수량 및 수질조사 - 침전물 조사	100	○ 휴경지를 수질정화공간과 생태계 보전 공간으로 활용할 수 있는 기술개발을 통하여 농지이용율 제고에 크게 기여할 것으로 판단됨
	농업수리시스템에서의 수질 변화 특성 조사 - 단위 농업수리시스템 말단에서의 수질변동 조사 - 저류지, 낙차공의 수질변화 특성 조사 농업수리시스템 내에서의 광역수질관리 방안 수립	100	○ 농촌지역 물관리의 중추를 이루고 있는 농업수리시스템과 유흥농지를 활용한 수질관리 기술 개발을 통하여 농업용수의 수질보전에 크게 기여할 것으로 판단됨

제 2 절 평가 착안점

구 분	평가의 착안점 및 척도		평가
	착 안 사 항	척 도 (점수)	
1차년도 (2003- 2004)	○연구대상지구 선정의 타당성	30	30
	○농지에서 물수지 및 물질수지 조사의 타당성	30	30
	○농업수리시스템과 수질환경과의 관계분석의 합리성	40	40
2차년도 (2004- 2005)	○농업수리시스템의 수질개선기능 강화방안의 적정성	35	35
	○흙수로 설계의 적합성	35	35
	○옹덩이 및 여울조성 방법의 적합성	30	30
3차년도 (2005- 2006)	○수질정화형 암거배수 설계의 타당성	30	30
	○조사항목의 타당성	30	30
	○광역수질관리방안 수립의 타당성	40	40
최종평가	○목표달성도	40	40
	○종합 자료분석 및 결과도출과정의 적합성	30	30
	○연구결과 활용방안의 타당성	30	30

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구결과의 활용계획

1. 기술적 측면

- 농업수리시스템에서의 수질정화기능을 규명하고, 농업수리시스템의 수질개선기능 강화기술을 도출하여 농업수리시스템에 의한 광역수질관리기술을 제공함으로써 농업용수의 수질개선에 활용한다.
- 최근 증가되고 있는 휴경농지의 수질개선기능을 평가하고, 휴경지를 이용한 수질정화기능 강화방안을 도출하여 휴경지를 수질정화의 장으로 활용할 뿐만 아니라 휴경농지의 황폐화를 방지하기 위한 관리에 활용한다.
- 특히, 휴경지에 흙수로 굴착, 여울 및 웅덩이 조성, 적정 수심관리를 통한 수질 개선 및 식물생장에 따른 농지의 황폐화 방지기술을 개발하여 농경지의 이용을 제고 및 농업용수의 수질보전에 활용한다.
- 휴경지의 수질정화기능 및 생태계보전 기능에 대한 자료제공으로 농업보조금 지급에 따른 통상마찰을 피하기 위하여 환경보전 보조금 지급의 타당성을 확보하여 통상마찰 해소 및 고부가가치 농업생산기반 정비에 활용한다.
- 휴경지의 다면적 기능 제시로 휴경지를 효과적으로 관리할 수 있는 제도수립을 위한 자료로 활용할 수 있도록 한다.

2. 경제 · 산업적 측면

- 친환경적 농업수리시스템 구축기술의 도입으로 농업기반정비에 대한 친환경 보조금 지급의 당위성 제시로 안정적인 영농기반 구축에 활용하여 농촌소득 보전에 기여한다.
- 자연정화기능을 이용한 농촌용수 수질개선을 통한 농촌생활환경개선에 활용하여 농촌지역의 활성화에 기여한다.
- 휴경지를 활용한 친환경적 농지보전에 활용함으로써 농지정비 등의 관련분야 산업을 활성화하는데 기여한다.
- 증가되고 있는 휴경지의 친환경성을 규명하여 휴경지의 적절한 관리의 필요성을 농민들에게 홍보하기 위한 자료로 활용한다.

제 2 절 추가연구의 필요성

- 흙수로 굴착에 따른 수질정화기술개발은 흙수로를 굴착하고 이의 수질정화 기능을 규명하여 수질정화를 위해서는 흙수로를 도입할 필요성이 있다는 것을 제시하였으나, 흙수로에서의 수질정화기능을 보다 강화하기 위해서는 여러 가지 수질정화제품을 활용하는 방안에 대한 추가연구가 필요한 것으로 판단된다.
- 암거배수에 의한 수질정화는 기존의 암거형태로는 안정적인 수질개선기능 확보에 미비한 점이 있으므로 수질개선기능이 높은 소수재 및 시공기법개발을 위한 추가 연구를 통하여 농지의 범용화 및 수질정화기능을 제고할 필요가 있는 것으로 판단된다.

제 6 장 연구개발과정에서 수립한 해외과학기술정보

우리나라와 같이 논농업위주로 영농을 하고 있는 일본의 경우 쌀과잉생산에 따른 문제점을 해결하기 위하여 부분적으로 휴경을 유도하고 있다. 휴경지를 스스로 관리하는 자기보전관리형은 휴경기간 중 휴경지에 사료작물을 재배하는 등 농지의 황폐화를 방지하기 위하여 스스로 적절히 관리할 것을 권장하고 이에 대한 책임감을 환기시키기 위하여 휴경지에 확인표를 부착하고 있다. 그러나 자기 관리형의 경우 그림 6-1과 같이 방치되어 수목이 자라 황폐화되는 경우도 있었다.



그림 6-1 자기보전관리형 휴경지

이와 같은 휴경지 방치에 따른 농경지의 황폐화를 방지하기 위하여 그림 6-2와 같이 논 전체를 휴경하지 않고 일부만을 휴경하도록 권장함으로써 상시 담수관리가 이루어지도록 유도하고 있다. 담수관리를 통하여 잡초 생장에 따른 농지의 황폐화를 방지할 뿐만 아니라 경우에 따라서는 그림 6-2의 하단과 같이 일정부

분을 분리하여 발작물을 재배하기 위한 노력도 이루어지고 있다. 이 경우에도 각 포장에 확인표를 부착하여 책임감을 환기시키고 있다.



부분휴경



부분휴경 확인표식



부분휴경(휴경및야채재배)



부분휴경 확인표식

그림 6-2 부분휴경을 통한 휴경지의 담수관리

필지 전체를 휴경하는 경우는 그림 6-3과 같이 항상 담수하도록 유도하여 식물의 생장에 따른 농지의 황폐화를 방지하는 동시에 수질정화를 도모하고 있다. 이 경우 잡초 이외의 많은 수생생물들이 서식하여 생태계보전 공간으로서의 역할도 기대할 수 있다.



휴경 (담수관리)



휴경 (담수관리)

그림 6-3 휴경지의 담수관리

식물이 성장하는 경우에도 일정 정도의 담수상태를 유지하면 수생식물 이외이 관목류의 성장을 억제하여 농경지로 재이용시 발생할 수 있는 장애를 최소화하도록 유도하고 있다. 또한 휴경지를 생태계 보전을 위한 연구대상지로 활용하여 휴경에 따른 농지의 생태천이 특성 등을 연구하고 있다.

이상과 같이 휴경지에 관목류 등의 식물 성장에 따른 농지의 황폐화를 방지하고, 또한 휴경지를 수질보전공간, 생태계보전공간으로 활용하기 위한 다양한 기술개발이 이루어지고 있다.



그림 6-4 휴경지의 생태계 변화 연구

제 7 장 참고문헌

1. 국용인, 박태동, 권오도, 2002, 농휴경 경과 연수에 따른 잡초생태특성 변화, 한국잡초학회지 22(2), pp. 137-146
2. 김세근, 1997, 휴경논의 토양 및 식생변화와 재경작시 대책, <http://ns.knrda.go.kr/tech/cgi-bin/BK030401.htm>
3. 김형중, 김선주, 김필식, 안열, 양용석, 2006, 휴경논에서의 수질관리 연구, 한국농공학회 논문집 48(2), pp.69-76
4. 김선주, 김형중, 김필식, 지용근, 양용석, 2006, 휴경지의 웅덩이와 여울에 의한 수질정화특성, 한국농공학회 논문집 48(3), pp.35-45
5. 농림부 홈페이지, 2003, http://www.maf.go.kr/html/mains/rice_control.htm
6. 농림부 홈페이지, 2003, <http://www.maf.go.kr/html/issue/issue10.htm>
농림부, 2002, 농지배수의 친환경적 관리 및 처리 기법개발
7. 농어촌진흥공사, 1992, 농경지 이용율 제고를 위한 최적설계기법 연구, 연구보고서
8. 농어촌진흥공사, 1993, 농경지 이용율 제고를 위한 최적설계기법 연구, 연구보고서
9. 농업과학기술원, 1992~2003, 농경지 비옥도 변동 조사
10. 오승영, 김진수, 김규성, 김선중, 윤춘경, 2002, 관개기 대구획 광역논에서의 오염부하 원단위, 한국농공학회지, 44(2), pp.136-147
11. 유철현, 김종구, 소재돈, 1990, 암거배수가 답전윤환토양의 이화학성에 미치는 영향, 한일농업공동연구사업보고서
12. 稻森悠平, 林紀男, 須藤隆一, 1990, 水路による汚濁河川水直接淨化、用水と廢水, 23(8)
13. 尾崎保夫, 阿部薫, 1993, 植物を活用した資源循環型水質淨化技術の課題と展望, 用水と廢水, 35(91)
14. (社)農村環境整備センター, 1995, 農村に適した水質改善手法
15. (財)日本農業土木總研究所, 1993
16. 谷本岳, 藤林新作, 若杉晃介, 2001, ビオトープ水田における植生遷移について, 農,土 學會關東支部講要, pp. 69-70

17. 谷本岳, 藤林新作, 若杉晃介, 2002, 湛水管理水田における植生と被度の変化, 農土學會講要, pp. 460-461
18. 田淵俊雄, 篠田鎮嗣, 黒田久雄, 1993, 休耕地を活用した窒素除去の試み, 農業土木學會誌, 61(12), pp.27-32
19. 田淵俊雄, 志村もと子, 尾野充彦, 1996, 休耕地における窒素除去試験の結果と実用性の検討, 農業土木學會誌, 64(4), pp.27-32
20. 田淵俊雄, 黒田久男, 稲場昭, 川野宏明, 海老原保孝, 堀角京美, 1991, 面源主體の農業集水域からの流出負荷に関する研究, 農業土木學會論文集 154, pp.45-53
21. 齋藤讓一, 兒島正展, 勝保孝, 2000, 中川流域における農業用水の流域保全機能について, 農業土木學會誌, 68(3), pp.27-30
22. 端憲二, 石川雅也, 鈴木光剛, 1996, 濕地における窒素除去機能～濕地模型を用いた浄化試験, 農業土木學會誌, 64(4), pp.21-26
23. 中村好男, 峰岸正人, 谷内功, 兒島正典, 1998, 移種水源を持つ水田地域での循環灌漑と水環境への影響, 農業土木學會誌, 66(2), pp.9-14
24. 谷山重孝, 竹内悟, 山岡和純, 屈畑正純, 1989, 農村地域の自然浄化機能を組み込んだ水質モデルシミュレーション, 農業土木學會誌, 57(7), pp.25-32
25. 大久保卓也, 村上昭彦, 1993, 重回歸分析による水路・河川における晴天時浄化率の豫測, 用水と廢水, 35, pp.418-424
26. 柴原藤善, 長谷川清善, 小林正幸, 1992, 2段式暗渠利用による水田排水の水質浄化, 滋賀縣農業試験場研究報告 第33號
27. 荻野芳彦, 村島和男, 1985, 暗渠排水計劃の理論的検討-汎用化耕地のための暗渠排水設計(I)-, 農業土木學會論文集 119
28. 高橋順二, 2001, 農業水利システムを活用した水質環境保全, 用水と廢水, 43(4), pp.47-53
29. 高橋順二, 白谷榮作, 吉永育生, 1999, 農業水利システムによる流域の水環境と水質環境, 農業土木學會誌, 67(9), pp.61-67
18. 高橋順二, 白谷榮作, 吉永育生, 2000, 受水域・水源域としての農業水利システムにおける水質管理, 農業土木學會誌, 68(3), pp.19-25
30. Agus, Fahmudin, 2000. Multifunctional Roles of Lowland Rice Fields in Watersheds in Java, Indonesia. In *Proceedings of the International Seminar on Multifunctionality of Agriculture in Japan*. 81-96

31. Garrod, G. and K. G. Willis. 1994. Valuating biodiversity and nature conservation at a local level. Vol. 3 : 555-565
32. APHA, 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (20th ed.). American Public Health Association, Washington
33. Brix, H., 1993. Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance. In: Moshiri, G. A. (Ed.), *Constructed Wetlands of water Quality Improvement* Lewis publishers, Boca Raton, FL : pp.9-22
34. Bruce E. Rittmann and Perry L. McCarty, 1999. *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*, McGraw-Hill
35. Faulker, S. P. and C. J. Richardson, 1989. Physical and Chemical Characteristics of Freshwater Wetland Soils in Hammer, D. A. (ed.). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural*, Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Michigan : pp.41-72
36. Kim, S. J., H. J. Kim and P. S. Kim, 2005, Study on the water management method of fallow paddy fields considering water quality purification, INWEPF 2nd Steering meeting and symposium on the water and environment in paddy fields proceeding, pp.145-157
37. Pant, H. K., K. R. Reddy and E. Lemon, 2001. Phosphorous retention capacity of root bed media of sub-surface flow constructed wetlands, *Ecological Engineering* Vol. 17 : pp.345-355
39. Sherwood, C. R. R. W. Crites and E. J. Middlebrooks, 1995, *Natural systems for waste management and treatment*
40. Yang, L., H. T. Chang and M. L. Huang, 2001. Nutrient removal in gravel- and soil -based wetland microcosms with and without vegetation, *Ecological Engineering* Vol. 18 : pp.91-105

주 의

1. 이 보고서는 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.