

# 양수장지구 광역논 영양염류 유출부하 특성

윤광식\* · 조진구\* · ○한국현\*\* · 최진규\*\*\* · 조재영\*\*\*\*

## I. 서론

우리 나라 농경지 1,899천ha중 61%인 1,153천ha가 논이고, 그 중 76%인 879천ha가 수리답이다. 수리답은 저수지, 양수장, 보, 집수암거, 관정 등 농업수리시설물을 통해 안정적으로 농업용수를 공급받고 있고, 약 17%인 150천ha가 양수장(배수장겸용 포함)을 수원공으로 농업용수를 공급하고 있다. 한편, 논으로부터 수도 이양기와 분얼기에 발생하는 강우-유출과정을 통하여 다량의 영양물질이 하천으로 유입되어 비료의 경제적인 손실뿐만 아니라 하천이나 담수호의 부영양화 유발물질로서 크게 작용하기도 한다. 농업유역의 경우 논에서 영양물질의 이동과 물질 수지는 벼에 대한 양분 수급을 결정하고 주변 수계 환경에 영향을 미칠 수 있으므로 호소나 저수지 수질관리를 위해서는 논에서 농업 비점오염물질의 유출 메카니즘에 대한 정량적인 평가가 선행되어야 할 것으로 생각된다. 지금까지 논에서의 오염부하 연구는 일부 이루어졌지만 다양한 기상조건과 수원공 종류, 물관리 관행에서의 오염부하 평가는 미흡한 편이다. 또한, 장기 모니터링 자료가 충분치 않아 영양염류부하에 관한 예측 및 평가가 어려운 실정이다.

본 연구는 1999년 5월부터 2000년 9월 30일까지 양수장 관개지구인 전라북도 남원시 금지면 금풍지구 수도작 농업지대를 대상으로 관개량이 풍부한 양수장 지구에서의 관행 물관리하에서 논으로부터의 영양물질 수지와 손실량을 조사하였다.

## II. 재료 및 방법

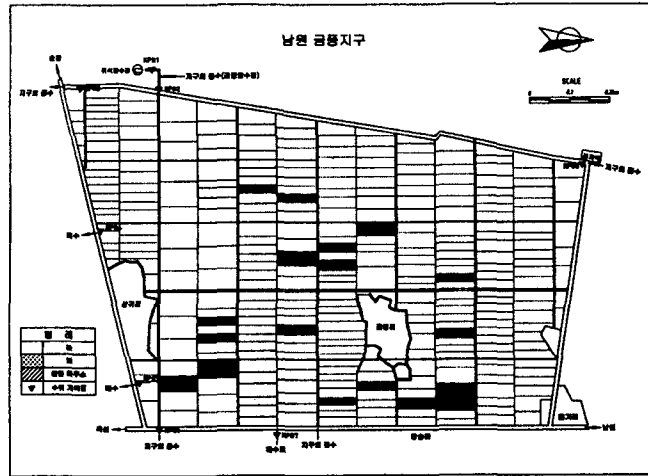
### 1. 시험지구 개황

본 연구에 사용된 시험지구는 전라북도 남원시 금지면 금풍지구이며 표고가 55.2~58.2m의 평탄한 저지대로서 귀석양수장에서 관개수가 공급되고 있다. 본 시험지구인 금풍지구는 1998년 가을 경리정리에 착수하여 1999년 5월말에 준공된 대구회화 재경지정리지구로서 수리상태는 비교적 양호하다. 시험지구 상·하류를 관통하는 장축의 길이는 약 1.25km, 평균 폭은 약 0.87 km로서 주요 유출구는 지구 장축의 동쪽 중간지점에 위치하고 있다. 시험지구의 장축을 중심으로 서측은 경사가 급한 산지로 되어 있고, 동측은 낮고 평탄한 수도작 농업지대이다. 시험지구인 유역의 남측과 동측의 논지대를 둘러싼 제방은 섬진강 본류 및 요천 하구부와 접하여 경계를 이룬다. 요천은 남쪽을 향하여 흐르다가 시험지구의 남동쪽 2km 지점에서 동쪽방향으로 흐르는 섬진강 본류와 합류하여 남쪽으로 방향을 바꾸게 된다. <그림 1>은 남원 금풍지구 개황도이다.

시험지구의 총 지구면적은 114.84ha이고, 그 중 논 면적이 95.0ha, 주거지역 면적이 7.27ha, 기타 면적이 12.57ha이며, 일부 시설원예를 위한 하우스가 관개기간 중에도 유지되는 곳이 있으나 대부분 논에서 벼를 재배하고 있다.

---

\* 전남대학교 생물산업공학과 교수  
\*\* 전남대학교 농공학과 박사과정 수료  
\*\*\* 전북대학교 생물자원시스템공학부 교수  
\*\*\*\* 전북대학교 농화학과 박사



<그림 1> 남원 금풍지구 개황도

## 2. 기상 개황

시험지구의 연평균기온은 12.0℃이고 여름철 평균 기온은 21.1 ~ 25.3 ℃, 겨울철은 -1.9 ~ 0.5℃로서 기온의 연교차가 심하다. 최근 5개년 동안의 평균 강수량은 1,220.5mm이며, 6 ~ 9월의 여름철 강수량은 806.1mm로서 연강수량의 66.0%에 해당한다. 본 시험포장의 토양은 지산미사질 양토(Jisan Silt loam, SiL ; fine loamy, mixed mesic family of Fluventic Haplaguepts)이다.

## 3. 측정시설

시험포장에 설치된 측정시설로는 관개량, 지구의 공급량과 논으로부터 유출되는 배수량을 측정하기 위한 압력변환형 자기수위계 WL-14 Water Level Logger(Global Water Co., USA)와 수위표 각각 8조와 논 수위표 1조, 그리고 간이 침투량계와 증발량계를 각각 1조씩 설치하였으며, 모든 측정 기기는 1999년 5월 1일부터 2000년 9월 30일까지 운영하였다. 한편, 강우자료는 남원관측소의 기상자료를 사용하였으며, 시험지구로 취수되는 관개량과 유출수량은 각 용수로와 배수로에 설치된 수위계로부터 측정된 수위를 수위~유량관계의 유량공식을 이용하여 유량으로 변환하였다.



<그림 2> 금풍지구 수위계 설치전경



<그림 3> 금풍지구 침투-증발 측정기기

#### 4. 영농현황

본 시험지구는 광역논으로서 여러 농가에 의해 영농활동이 이루어지고 있으며, 화학비료의 시비와 논물관리 등 제반 영농사항은 경작자에 의하여 운영되었다. 1차년도인 1999년 5월 22일부터 5월 27일 사이에 논갈이를 하고 담수를 시킨 후, 5월 25일부터 6월 5일 사이에 재식거리 15 × 30 cm, 1주당 3본씩 기계이앙을 실시하였다. 시험포장의 재배품종은 거의 대부분이 동진벼이며, 9월 25일부터 10월 2일 사이에 수확이 완료되었다. 비관개기간 동안에는 거의 대부분의 농가에서 수확 후 벼짚을 분쇄하여 전랑 논 토양에 살포하고 비경운 상태로 유지하였다. 2차년도에는, 2000년 3월 20일부터 3월 30일 사이에 1차 논갈이가 진행되었으며, 5월 20일부터 5월 30일 사이에 2차 논갈이를 실시하였다. 모내기에는 5월 25일부터 6월 5일 사이에 기계이앙을 실시하였으며, 10월 5일부터 10월 10일 사이에 대부분의 농가에서 벼 수확을 완료하였다.

1차년도에는 5월 20일부터 5월 30일 사이에 모내기 기비로 84kg N ha<sup>-1</sup>, 29kg P ha<sup>-1</sup> 그리고 29 kg K ha<sup>-1</sup> 를 전층시비 하였으며, 6월 15일부터 6월 18일에 분얼비로 32kg N ha<sup>-1</sup>, 7월 30일부터 8월 5일 사이에 수비로 18kg N ha<sup>-1</sup>을 시비하였다. 2차년도에도 유사한 시비가 이루어졌다. 위에서 언급한 영농현황과 화학비료의 시비량은 실제 농가를 방문하여 설문조사를 실시한 결과이다. 본 시험포장에 시비된 화학비료의 양을 농촌진흥청의 추천 시비량 (N : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : K<sub>2</sub>O = 110 : 80 : 70 kg ha<sup>-1</sup>)과 비교하면 질소의 경우 약 110 - 130%, 그리고 인의 경우 약 40% 수준으로 시비되고 있었다.

#### 5. 시료채취 및 분석방법

강우 시료는 2 mm 이상의 강우사상이 발생할 때마다, 관개수 시료는 매 관개시마다 관개수 유입구에서 채수하였다. 유출수는 유출이 발생할 때마다 유출전, 유출중, 유출후에 중앙배수로의 웨어유출구에서 폴리에틸렌 용기(2 L)에 채수하였으며, 모든 수질시료는 4°C 이하의 온도로 보관하면서 분석시료로 사용하였다.

시료분석은 USDI의 FWPCA manual에 기준하였다. 부유물질(suspended solids)은 시료 1000 mL를 취하여 유리섬유여지법으로, 전질소, 암모니아태질소는 수질시료 500mL를 취하여 각각 환원증류-킬달법과 중화적정법으로 분석하였다. 총인은 수질시료 500mL를 취하여 50mL로 농축한 다음 ascorbic acid reduction법에 기준하여 분석하였다. 질산태질소는 0.45 $\mu$ m의 유리섬유여지를 사용하여 여과한 다음 이온크로마토그래피(Sykam 4260, Germany)를 이용하여 분석하였다. 토양분석은 Jackson(1967)의 방법에 기준하였다. 토성은 micropipette 법으로 측정하였으며, 토양 pH는 1:5 H<sub>2</sub>O 현탁액 중에서 유리전극으로 측정하였고, 유기탄소 함량은 Walkley-Black법으로, 양이온 치환용량은 1-N ammonium acetate를 이용하여 토양을 암모니아태질소로 포화시킨 후 킬달증류법을 이용하여 측정하였으며, 치환성 양이온은 1N-ammonium acetate로 침출하여 유도결합플라즈마(Liberty Series II, Varian, Australia)로 분석하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 강우현황

1999년 5월 1일부터 2000년 9월 30일까지 시험기간 동안 조사 대상지역에 내린 강우량과 강우 특성을 조사한 결과는 다음과 같다. 장마는 6월 20일에 시작하여 7월 20일에 종료되었는데, 약 30 일로서 예년의 29일과 비슷한 경향이었다. 수도작 영농시기로 논에서 물의 유·출입이 많은 6, 7,

8월에 내린 강우량은 1999년의 경우 677mm, 2000년의 경우 1,062mm로 나타났다. 본 조사기간 동안의 강우특성은 9월에 약 200 - 260mm의 강우량이 기록되었다는 점이다. 9월 중 강우량은 1990년부터 1996년까지의 예년 강우량의 약 200%를 나타내었다. 1999년과 2000년 영농기간 동안의 강우량은 각각 1,065mm, 1,296mm를 나타내었다.

## 2. 물수지

조사기간 동안 유·출입된 물의 양을 대입하여 물수지를 계산한 결과, 1999년의 경우 강우량 1,065mm, 관개수량 1,340mm, 유출수량 1,453mm, 증발산량 444mm, 침투수량 459mm로 나타나 미측정된 유입수량이 49 mm로 나타났다. 2000년의 경우 강우량 1,296mm, 관개수량 1,185mm, 유출수량 1,421mm, 증발산량 448mm, 침투수량 580mm로 나타나 미측정된 유입수량이 32mm로 나타났다.

권과 유(1989)가 경기도 화성군 정남면 케량리 인근 논에서 물수지를 계산한 결과, 강우량은 808.6mm, 관개수량은 715.4mm, 침투수량은 318.0mm, 유출수량은 1,060mm 그리고 증발산량은 668mm로 계산되지 않은 유입수량이 552.0mm 였다고 보고한 바 있으며, 이와 허(1995)가 벼 재배기간 동안 물수지를 조사한 결과, 강우량은 1,513mm, 관개수량은 500mm, 침투수량은 552mm, 증발산량은 598mm, 유출수량은 500mm로 나타났으며, 계산되지 않은 물의 양이 약 350mm 였다고 보고하였다. 이와 같이 각 연구자별로 연구결과가 서로 상이하게 나타나고 있는데 이는 기상조건, 토양투수조건, 작물재배방식 및 용수원 등이 지역별로 다르기 때문에 나타나는 결과로 생각된다. 조사지구인 금풍지구의 경우 양수장으로부터의 공급량이 충분하여 유출수량이 타 지역보다 많았던 것으로 판단된다.

<표 1> 물수지 비교

(단위 : mm)

	1999년	2000년	권과 유(1989)	이와 허(1995)
강우량	1,065.0	1,296.0	808.6	1,513.0
관개수량	1,340.0	1,185.0	715.4	500.0
침투수량	1,453.0	1,421.0	318.0	552.0
유출수량	444.0	448.0	1060.0	598.0
증발산량	459.0	580.0	668	500.0
계산되지 않은 유입수량	49.0	32.0	552.0	350.0

## 3. 논에서 질소와 인의 물질수지

논에서 화학성분의 물질순환은 크게 유입계, 내부계, 유출계로 분류할 수 있다. 화학비료, 볏짚, 관개수와 관개토사, 강우와 같은 인자가 유입계에 포함되며, 생물학적 질소고정과 일부 영양물질의 토양내 고정이 내부계에 포함되며, 암모니아 휘산과 탈질을 통한 질소손실, 침투손실, 논두렁에서의 삼투손실, 수확된 현미의 인출 그리고 유출수와 유출토사와 같은 인자가 유출계에 해당된다.

이와 같이 논토양 내에서 화학성분의 물질수지는 여러 가지 인자가 개입되어 있고, 지역적인

특성이나 영농형태에 의해 물질수지 결과가 다양하게 나타날 수 있다. 본 조사시간 동안 95ha의 광역논으로 유출·입 된 영양물질의 수지와 유출부하량은 <표 2>와 같다.

<표 2> 영농기간 금풍지구 광역논의 질소와 인의 물질수지

(단위 : kg/ha)

	Total-N		Total-P	
	1999	2000	1999	2000
Input				
강수	32.2	24.0	0.38	0.35
관개수	21.8	20.8	0.13	0.22
비료	134	140	12.64	13.52
소계	188	184.8	13.15	14.09
Output				
지표유출	57.8	54.7	2.33	1.96
침투	14.6	12.8	0.07	0.07
소계	72.4	67.5	2.40	2.03

수계 환경에 영향을 미칠 수 있는 영양물질 가운데 질소와 인을 대상으로 물질수지를 조사한 결과, 영농기간동안 영양물질의 유입량은 화학비료에 의해 전질소 134~140kg/ha, 총인 12.6~13.5 kg/ha, 강수에 의해 전질소 24~32.2kg/ha, 총인 0.35~0.38kg/ha, 관개수에 의해 전질소 20.8~21.8 kg/ha, 총인 0.13~0.22kg/ha가 유입된 것으로 나타났다.

영농기간 동안 유출수에 의한 영양물질의 유출량은 전질소의 경우 54.7 ~ 57.8kg/ha, 총인은 영농기간 1.96 ~ 2.33kg/ha로 나타났다. 시기별로 6월에 유출량이 가장 높았는데 이는 시비효과로 6월에 유출수중 화학성분의 농도가 높았기 때문인 것으로 생각된다. 유출량을 시비된 화학비료량을 기준으로 유실률을 계산한 결과, 질소의 경우 시비량의 약 39~43%, 인은 6.3~8.0%가 유출 과정을 통하여 유실된 것으로 나타났다.

영농기간 동안 유출수에 의한 영양물질의 유출량은 전질소의 경우 54.7~57.8kg/ha, 총인은 1.96~2.33kg/ha로 나타났다. 시기별로 6월에 유출량이 가장 높았는데 이는 시비효과로 6월에 유출수중 화학성분의 농도가 높았기 때문인 것으로 생각된다. 유출량을 시비된 화학비료량을 기준으로 유실률을 계산한 결과, 질소의 경우 시비량의 약 39~43%, 인은 14.5~17%가 유출과정을 통하여 유실된 것으로 나타났다. 본 조사결과와 지금까지 연구된 국내·외 결과를 비교해 보면, 본 조사에서 질소와 인의 유출부하량이 높게 나타났다. 이는 영농지역에 따른 비료 시용량, 시비방법, 시비시기, 관개용수 및 강우의 양과 성분의 차이 등 지역특성으로 인하여 영양물질의 유출량에 차이가 발생한 것으로 생각된다.

영양물질의 침투손실량은 전질소의 경우 12.8~14.6kg/ha로 월별로는 6월에 가장 높게 나타났다. 이는 5월말 영농을 위한 기비 시비후 논물중 전질소 함량이 크게 증가하였기 때문인 것으로 생각된다. 총인의 침투손실량은 0.07kg/ha로 나타났으며, 월별로는 5월과 6월에 가장 높게 나타났다. 침투과정을 통한 영양물질의 손실량을 시비된 화학비료량을 기준으로 유실률을 계산한 결과,

질소의 경우 시비량의 약 9.1~10.8%, 인은 0.50%가 손실된 것으로 나타났다. Kunimatsu(1986)이 일본 농림통계의 자료를 인용하여 논에서 침투손실량을 조사한 결과, 전질소는 11.34kg/ha 그리고 총인은 0.194kg/ha로 나타났다. 본 조사결과와 Kunimatsu(1986)의 결과를 비교시 전질소 침투손실량은 유사한 경향이었으나, 총인은 본 조사에서 더 작게 나타났는데 이는 시비량이 작은 것에 기인하는 것으로 판단되었다.

#### IV. 요약 및 결론

양수장 지구의 광역논으로부터 영농기 오염부하량을 산정하기 위하여 전북 남원시 금풍지구 115ha(논면적 95ha)를 대상으로 물수지 조사와 수질 모니터링을 실시하였다. 관개기간 동안 유·출입된 물의 양을 대입하여 물수지를 계산한 결과, 1999년의 경우 강우량 1,065mm, 관개수량 1,340mm, 유출수량 1,453mm, 증발산량 444mm, 침투수량 459mm로 나타나 미측정된 유입수량이 49mm로 나타났다. 2000년의 경우 강우량 1,296mm, 관개수량 1,185mm, 유출수량 1,421mm, 증발산량 448mm, 침투수량 580mm로 나타나 미측정된 유입수량이 32mm로 나타났다.

질소와 인을 대상으로 물질수지를 조사한 결과, 영농기간동안 영양물질의 유입량은 화학비료에 의해 전질소 134~140kg/ha, 총인 12.6~13.5kg/ha, 강우에 의해 전질소 24~32.2kg/ha, 총인 0.35~0.38kg/ha, 관개수에 의해 전질소 20.8~21.8kg/ha, 총인 0.13~0.22kg/ha가 유입된 것으로 나타났다.

영농기간 동안 유출수에 의한 영양물질의 유출량은 전질소의 경우 54.7~57.8kg/ha, 총인은 1.96~2.33kg/ha로 나타났다. 유출량을 시비된 화학비료량을 기준으로 유실률을 계산한 결과, 질소의 경우 시비량의 약 39~43%, 인은 12.8~14.6%가 유출과정을 통하여 유실된 것으로 나타났다. 영양물질의 침투손실량은 전질소의 경우 12.8~14.6kg/ha로 총인의 침투손실량은 0.07kg/ha로 나타났으며, 침투과정을 통한 영양물질의 손실량을 시비된 화학비료량을 기준으로 유실률을 계산한 결과, 질소의 경우 시비량의 약 9.1~10.8%, 인은 0.50%가 손실된 것으로 나타났다. 이는 본 조사 지구의 경우 양수장지구로서 관개량이 풍부하여 상대적으로 배수량이 많고 이에 따른 부하량이 큰 것으로 판단되며 영양염류 부하 저감을 위해서는 적절한 물관리가 필요하다고 볼 수 있겠다.

#### 참 고 문 헌

1. 권순국, 유명진, 1989, 담수호의 환경오염 및 부영양화 방지대책 수립(II), 농어촌진흥공사.
2. 오승영, 김진수, 김규성, 2000. 관개기 광역논에서의 오염물질의 수지, 2000년 한국농공학회 학술발표회 논문집 pp. 617-622.
3. Kim, B. Y. and J. K. Cho., 1995, Nutrient effluence by the outflowing water from the paddy field during rice growing season, Korean Comm. Irrig. and Drain., 2, pp.150~156.
4. Kunimatsu T., Rong, L., Sudo, M. and Takeda, I., 1994, Runoff loadings of materials causing water pollution from a paddy field during a non-planting period, The Japanese Soc. Irrig. Drain. and Reclam. Eng., 170, pp.45~54.
5. Takeda I., T. Kunimatsu, S. Kobayshi, and T. Maruyama, 1991, Contaminant balance of a paddy field area and its loading in the water system-studies on pollution loadings from a paddy field area, The Japanese Soc. Irrig. Drain. Reclam. Eng., 153, pp.63~72.