

Research Article

Open Access

## 전남 지역 농업분야 양분 지표를 이용한 수질 공간 변이 해석

전병준,<sup>1</sup> 임상선,<sup>1</sup> 이광승,<sup>1</sup> 이세인,<sup>1</sup> 함종현,<sup>1</sup> 류순호,<sup>2</sup> 윤광식,<sup>1</sup> 최우정<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>전남대학교 지역·바이오시스템공학과, <sup>2</sup>서울대학교 농생명공학부

### Understanding Spatial Variations of Water Quality Using Agricultural Nutrient Indices in Chonnam Province

Byeong-Jun Jeon,<sup>1</sup> Sang-Sun Lim,<sup>1</sup> Kwang-Seung Lee,<sup>1</sup> Se-In Lee,<sup>1</sup> Jong-Hyun Ham,<sup>1</sup> Sun-Ho Yoo,<sup>2</sup> Kwang-Sik Yoon<sup>1</sup> and Woo-Jung Choi<sup>1\*</sup> (<sup>1</sup>Department of Rural & Biosystems Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea, <sup>2</sup>Department of Agricultural Biotechnology, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea)

Received: 6 September 2013 / Revised: 16 January 2014 / Accepted: 24 February 2014

Copyright © 2014 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

#### Abstract

**BACKGROUND:** Water quality of rural areas are susceptible to agricultural nutrient input and supply such as chemical fertilizer and livestock manure. This study was conducted to evaluate the usefulness of nutrient (N and P) indices in understanding spatial variations of water quality across Chonnam province which is a typical agricultural region in Korea.

**METHODS AND RESULTS:** The nutrient indices including chemical fertilizer supply, livestock manure production, and nutrient balance were correlated with water quality data (T-N, T-P, BOD, and COD) for the twenty-two districts of the province. Concentration of T-N were positively correlated with chemical fertilizer supply, livestock manure N production, and nutrient balance ( $P<0.05$  or  $P<0.01$ ). Meanwhile, T-P concentration was not correlated with these nutrient indices; however, there was a tendency that T-P concentration increases with livestock manure P production ( $P=0.06$ ) and with nutrient balance ( $P=0.09$ ). These results suggest that T-N concentration is susceptible

to both chemical fertilizer and livestock manure; whereas T-P is likely to be affected by livestock manure rather than chemical fertilizer. The concentrations of BOD and COD were also positively ( $P<0.05$  or  $P<0.01$ ) correlated with livestock manure production.

**CONCLUSION:** This study shows the usefulness of nutrient indices in understanding spatial variations of water quality and suggests that livestock manure rather than chemical fertilizer can be a more critical water pollution source and thus highlights the need for more attention to livestock manure treatments for rural water quality management.

**Key words:** Chemical fertilizer, Livestock manure, Non-point source pollution, Nutrient balance, Water quality

#### 서론

농촌지역은 농경지, 축산, 산림, 생활하수 등 다양한 비점 오염원이 산재해 있어 오염원과 오염물질 유출 경로가 복잡하여 수질 관리가 어렵다(Ongley *et al.*, 2010; Sun *et al.*, 2012). 1980년대까지는 다양한 비점오염원 중 집약농업에 따른 화학비료 과다 사용이 농촌지역 비점원 오염의 주요 원인으로 작용해 왔다(Sun *et al.*, 2012; Withers and Lord,

\*교신저자(Corresponding author): Woo-Jung Choi  
Phone: +82-62-530-2153; Fax: +82-62-530-2159;  
E-mail: wjchoi@jnu.ac.kr

2002). 1980년 이후 선진국을 중심으로 고투입 집약농업에서 저투입 지속가능농업으로의 전환을 위해 양분종합관리(integrated nutrient management, INM)를 도입하여 화학비료 사용을 감축하고 있다(Parris, 2011). 이와 같은 노력의 결과로 1990~2002년 사이에 OECD 국가에서 화학비료에 의한 잉여 양분이 약 17% 개선되었지만, 지표수의 질산염( $\text{NO}_3^-$ )과 인(P) 오염에 대한 농업분야의 기여도는 각각 30~80%와 20~70%로 여전히 높은 수준으로 평가되고 있다(Parris, 2011). 이와 같이 화학비료 사용 감축에도 불구하고 수질오염에 대한 농업비점오염원의 영향이 여전히 높은 것은 일차적으로 점오염원 처리 시설 확충에 기인한 것일 수도 있지만(Skinner *et al.*, 1997), 다른 측면에서는 화학비료이외의 비점오염원(예를 들면 가축분뇨)에 의한 것일 수도 있다(OECD, 2008).

우리나라에서도 1997년에 친환경농업육성법이 제정된 이후 화학비료에 대한 정부보조금을 삭감하고 가축분퇴비와 유기질비료에 대한 지원을 확대한 결과 경지면적당 화학비료( $\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}$ ) 사용량은 2000년 381.9 kg/ha에서 2010년 232.7 kg/ha로 감소하였다(농림수산식품부 통계연보, 2000~2010). 반면, 가축분 퇴비를 포함한 유기성 비료 생산량은 2001년과 2010년 사이에 1,990천 Mg에서 3,908천 Mg으로 증가하였고, 이를 단위 경지 면적으로 환산하면 2001년 0.95 Mg/ha와 2010년 2.2 Mg/ha에 해당한다(농협, 2011, 2012). 하지만, 친환경농업 육성 정책이 본격적으로 실행된 2000년대 우리나라 4대강(한강, 금강, 낙동강, 영산강)의 수질 지표 중 생화학적 산소 요구량(Biochemical oxygen demand, BOD), 화학적 산소 요구량(Chemical oxygen demand, COD), 총질소(Total-nitrogen, T-N), 총인(Total-phosphorus, T-P)농도는 각각 2.3~3.4 mg/L, 3.8~5.7 mg/L, 2.8~3.6 mg/L, 0.09~0.19 mg/L의 범위였고 BOD를 제외하고는 뚜렷한 시계열적 감소 경향이 없었다(<http://stat.me.go.kr>, <http://water.nier.go.kr>). 이와 같은 BOD 감소는 일차적으로 BOD를 90%이상 제거할 수 있는 하수처리시설 용량이 2001년 19,230천 Mg에서 2010년 25,118천 Mg으로 증가하여 비점오염원의 오염기여도가 감소하였기 때문으로 판단된다(환경부, 2011). 최근 Yoo *et al.* (2012)이 1980년대 이후 우리나라 4대강 수질의 시계열적 변동 원인을 조사한 결과에 의하면 T-N과 T-P 농도(1989년부터 수질자료 존재)는 화학비료 사용량과 상관관계가 없었던 반면 양분수지(양분발생량과 작물양분요구량의 차이)와 정의 상관관계(T-N:  $r^2=0.61$ ,  $P<0.001$ ,  $n=22$ , T-P:  $r^2=0.37$ ,  $P<0.001$ ,  $n=22$ )가 있었다. 또한, COD (1981년부터 수질자료 존재)는 가축분뇨 발생량과 정의 상관관계( $r^2=0.53$ ,  $P<0.001$ ,  $n=30$ )를 보였다. 이와 같은 결과는 친환경농업이 확대된 2000년대 이후 농촌지역 비점원오염에서 화학비료의 기여도가 감소하였음을 의미하며, 더 나아가 비점원오염 관리를 위해서는 화학비료와 가축분뇨를 포괄하는 종합적인 접근이 필요함을 제시한다(Yoo *et al.*, 2012).

Yoo *et al.* (2012)은 우리나라 국가적 수준에서 양분수지

와 수질오염의 시계열적 통계자료를 이용한 수질오염변동 원인 해석 기법을 마련하였지만, 아직까지 이와 같은 해석 기법이 지역 수준에서 하천 수질의 공간 변이 해석에 적용된 사례는 없다. 수질오염은 지형, 강우유형, 토지이용방식, 영농활동 등 다양한 요인에 의해 영향을 받기 때문에 수질 변동 해석이 용이하지 않지만, Yoo *et al.* (2012)이 제시한 양분수지 방법은 비교적 수월하게 수질 변동 해석에 활용될 수 있다. 따라서, 본 연구는 우리나라의 대표적 농업지역인 전남지역 시·군을 대상으로 수질지표와 양분지표의 상관관계를 구명하여 수질오염의 공간적 변이 해석에서 양분수지 개념 활용 가능성을 평가하기 위해 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 농업 통계 및 수질 측정 자료 수집

전남지역 22개시·군별 주요 작물군(미곡, 맥류, 잡곡, 두류, 서류, 채소, 특용작물, 과수)의 재배면적, 화학비료 공급량과 축종별(한우, 젓소, 돼지, 닭) 사육두수 자료는 2011년 기준 각 시·군 통계연보(<http://www.jeonnam.go.kr>) 정보를 활용하였다.

2011년 평균 수질 지표(T-N, T-P, BOD, COD) 농도 자료는 환경부의 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr>)에 공개된 정보를 활용하였다. 수질 관측지점은 모두 96개 소였으며 각 시·군별 지점 수는 상이하였고 목포시와 해남군에는 관측지점이 없었다.

### 가축분뇨발생량

시·군별 작물 재배 면적당 가축 분뇨 발생량은 시·군 통계연보상의 축종별 두수와 환경부(2008)에서 발표한 축종별 분뇨발생 원단위(한우, 젓소, 돼지, 닭에 대해서 각각 5000.5, 13760.5, 1861.5, 36.5 kg/두/년)를 곱한 값을 작물 재배 면적으로 나누어서 계산하였다. 축종별 분뇨 발생 원단위는 해당 축종의 성장단계(연령)에 따라 상이하지만, 시·군별 통계연보에는 이에 대한 구분이 없기 때문에 본 연구에서도 단일 원단위를 사용하였다. 2011년 기준 전남 지역의 전체 가축사육 규모는 한우 517,151 두, 젓소 32,377 두, 돼지 967,686 두, 닭 29,722,062 수로 단위 경지면적당 가축사육 두수는 101.6 두/ha로 전국 107.1 두/ha 보다 낮은 편이었다. 시·군의 축종별 사육규모를 비교하면 한우는 장흥군(54,238 두), 젓소는 나주시(8,322 두), 돼지는 나주시(172,555 두)와 무안군(176,175 두), 닭은 나주시(5,552,220 수), 무안군(4,757,704 수), 함평군(4,531,800 수)에서 대규모로 사육되고 있었다(<http://www.jeonnam.go.kr>).

### 양분수지 분석

농경지의 양분수지는 양분의 투입량(input)과 제거량(output)의 차이로 계산되며, 주변 수계에 배출될 수 있는 잠재적 양분량 평가에 활용된다(Parris, 1998). 양분수지 분석은 양분 투입과 제거의 공간적 범위에 따라 Farm gate

balance, Soil surface balance (SSB), System balance의 세 가지로 구분되며, OECD에서는 일반적으로 SSB를 활용한다(Parris, 1998). SSB 방법에서 양분수지는 화학비료(무기질, 유기질), 종자, 가축 분뇨, 대기강하물 등(질소의 경우 생물학적 질소 고정량도 포함)에 의한 양분 투입량과 작물과 사료 수확에 의한 제거량의 차이로 계산된다(Parris, 1998). 가능한 다수의 양분 투입과 제거 항목을 고려하면 양분수지 분석의 정확도를 제고할 수 있는 반면 자료 취득의 어려움에 의해 활용도가 낮아질 수도 있다. 본 연구에서는 Yoo *et al.* (2012)과 동일하게 농업통계가 구축되어 자료 취득이 용이한 화학비료 공급량과 가축분뇨에 의한 양분 발생량을 양분 투입량으로 고려하였고, 주요 작물군(미곡, 맥류, 잡곡, 두류, 서류, 채소, 특용작물, 과수)별 표준시비량의 재배면적가중평균을 양분 제거량으로 사용하였다.

화학비료 공급량은 각 시·군 통계연보 자료를 이용하였으며(<http://www.jeonnam.go.kr>), 가축분뇨 양분 발생량은 각 시·군 통계연보 상의 축종별 사육두수와 농촌진흥청(2006)의 양분발생단위(한우, 젖소, 돼지, 닭에 대해서 각각 질소 40.9, 88.0, 13.5, 0.4 kg/두 (수)/년, 인산 11.7, 30.7, 7.7, 0.3 kg/두 (수)/년)의 곱으로 계산하였다. 작물의 양분 요구량은 주요 작물군(미곡, 맥류, 잡곡, 두류, 서류, 채소, 특용작물, 과수)의 평균 표준시비량과 해당 작물군의 재배면적의 곱의 합으로 산출하였다. 미곡(벼), 맥류(보리, 맥주보리), 잡곡(옥수수), 두류(콩), 서류(감자, 고구마), 채소(고추 외 41종), 특용작물(땅콩 외 19종), 과수(사과 외 8종)의 표준 질소 및 인산시비량의 평균값은 각각 95.5, 78.0, 157.8, 46.0, 95.5, 168.4, 116.6, 127.4 kg N/ha와 44.7, 70.6, 32.5, 56.5, 68.5, 58.3, 110.3, 84.9 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha였다(농촌진흥청, 2007). 보성의 경우 녹차 재배면적이 넓어 녹차도 양분수지 분석에 포함시켰는데, 질소 및 인산시비량이 각각 600 kg N/ha과 200 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha였다(농촌진흥청, 2011).

각 시·군의 작물 재배 면적당 양분(질소와 인산) 수지(N 또는 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kg/ha)는 양분 투입량과 작물의 양분 요구량의 차이로 계산하였으며(Yoo *et al.*, 2012), 양분 투입량=양분 요구량일 경우 양분 수지는 0, 양분 투입량>양분 요구량의 경우 양분 과잉, 그 반대의 경우는 양분 부족을 의미한다.

### 상관관계 분석

SPSS 18.0 (SPSS Inc. Chicago, Illinois, USA)으로 가축분뇨 발생량과 양분수지의 상관관계, 하천수의 T-N, T-P 농도와 양분 지표(화학비료 공급량, 가축분뇨 양분 발생량, 양분 수지)의 상관관계, 하천수의 BOD, COD와 가축분뇨 발생량의 상관관계를 95% 유의수준에서 분석하였다. 가축분뇨 지표(분뇨 및 양분 발생량)의 경우 단위면적당 가축 사육두수가 극히 적은 신안군과 진도군은 상관관계 분석에서 제외하였다.

## 결과 및 고찰

### 가축분뇨 발생량

2011년 기준 전남 지역에서 발생한 가축분뇨는 5,918천 Mg 이었으며, 이를 작물재배 면적(269천 ha)으로 나눈 단위 재배면적당 분뇨 발생량은 22.0 Mg/ha로 2010년 전국 단위 재배면적당 분뇨 발생량인 24.4 Mg/ha (Yoo *et al.*, 2012)보다 적었다. 함평군이 45.9 Mg/ha로 가장 많았으며, 나주시(42.1 Mg/ha)>무안군(37.8 Mg/ha)>담양군(26.0 Mg/ha)>순천시(34.5 Mg/ha)의 순서였으며, 타 시·군보다 가축사육 규모가 작은 목포시, 신안군, 진도군의 분뇨 발생량은 10 Mg/ha이하였다(Table 1).

### 양분수지 구성요소

전남지역의 전체 화학비료 공급량은 질소 44,664 Mg, 인산 11,422 Mg이며 이는 작물재배 면적 기준으로 각각 166 kg N/ha과 42 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha에 해당한다. Yoo *et al.* (2012)이 보고한 2010년 전국 평균 단위 작물재배면적당 질소와 인산 화학비료 공급량(129 kg N/ha와 47 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha)과 비교하면 전남지역의 인산 공급량은 전국 평균과 유사하지만 질소 공급량은 35 kg N/ha 많았다. 시·군별 질소 화학비료 공급량은 여수시가 384 kg N/ha로 가장 많았으며, 영광군(235 kg N/ha), 순천시(222 kg N/ha)의 순서였고, 단위 재배면적당 인산 화학비료 공급량은 여수시(210 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha), 순천시(70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha), 완도군(66 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha)의 순서였다(Table 2).

전남지역의 가축분뇨 양분 발생량은 질소 50,076 Mg, 인산 23,129 Mg으로 작물재배 면적 기준으로는 각각 186 kg N/ha과 86 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha에 해당한다. 이는 Yoo *et al.* (2012)이 보고한 전국 평균(질소 196 kg N/ha, 인산 92 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha)과 유사하다. 시·군별로는 함평군의 질소와 인산 발생량이 각각 411 kg N/ha과 209 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha로 가장 많았다. 한편, 타 지역에 비해 가축두수가 적은 목포시(45 kg N/ha, 18 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha)와 신안군(49 kg N/ha, 19 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha), 진도군(24 kg N/ha, 9 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha)은 가축분뇨 양분 발생량이 적었다(Table 2). 전남지역의 화학비료와 가축분뇨에 의한 단위재배면적당 총 양분 공급량은 질소 352 kg N/ha과 인산 128 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha이며, 시·군별로는 함평, 여수, 무안, 영광, 나주, 순천의 양분 공급량이 많았다(Table 2).

전남지역 주요 작물군(미곡, 맥류, 잡곡, 두류, 서류, 채소, 특용작물, 과수)의 재배면적당 양분요구량은 질소 109 kg N/ha과 인산 53 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha로 2010년 기준 전국 평균(115 kg N/ha, 67 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha)보다 적었는데, 이는 전체 재배면적 중 양분요구량이 상대적으로 적은 작물(미곡, 맥류, 두류, 서류) 재배면적의 비율(75.7%)이 전국 평균(59.7%)보다 넓기 때문에 판단된다(Yoo *et al.*, 2012). 시·군별 질소 요구량은 표준시비량이 많은 녹차가 대규모로 재배되고 있는 보성이 135 kg N/ha로 가장 많았으며 타 시·군은 97~120

**Table 1. Livestock number and manure production of the administrative districts of Chonnam province**

Districts	Manure production (Mg)	Cultivated land area (ha)	Manure production per unit cultivated area (Mg/ha)
Boseong	200,819	15,983	12.6
Damyang	259,093	8,408	30.8
Goheung	244,782	20,470	12.0
Gangjin	226,338	13,323	17.0
Gurye	109,320	3,754	29.1
Gokseong	212,036	6,988	30.3
Gwangyang	48,885	4,311	11.3
Haenam	368,605	36,641	10.1
Hampyeong	535,756	11,677	45.9
Hwasun	199,242	7,626	26.1
Jindo	29,340	10,132	2.9
Jangheung	340,112	11,845	28.7
Jangseong	175,485	8,468	20.7
Muan	711,564	18,839	37.8
Mokpo	4,001	693	5.8
Naju	853,174	20,245	42.1
Shinan	120,925	19,389	6.2
Suncheon	277,437	8,041	34.5
Wando	67,571	4,313	15.7
Yeongam	417,587	20,148	20.7
Yeonggwang	415,735	13,783	30.2
Yeosu	99,932	4,180	23.9
Total	5,917,740	269,257	22.0

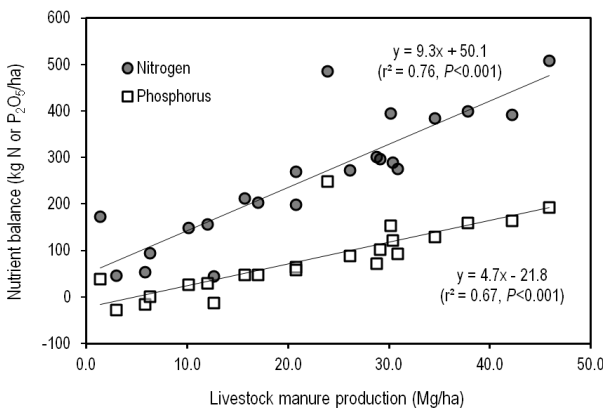
**Table 2. Nutrient supply, demand, and balance of the administrative districts of Chonnam province**

Districts	Nitrogen (kg N/ha)					Phosphorus (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)				
	Supply			Demand	Balance	Supply			Demand	Balance
	Fertilizer	manure	Total			Fertilizer	manure	Total		
Boseong	79	100	179	135	44	13	39	52	64	-13
Damyang	121	260	381	106	276	34	110	143	50	93
Goheung	169	94	262	106	156	50	31	81	51	30
Gangjin	153	148	301	97	204	38	61	98	51	47
Gurye	160	239	398	101	297	52	105	157	55	102
Gokseong	108	283	391	102	289	27	147	174	51	122
Gwangyang	200	90	289	117	173	68	38	106	68	38
Haenam	177	85	261	112	149	43	37	80	53	27
Hampyeong	200	411	611	103	508	34	209	244	51	193
Hwasun	163	212	375	102	273	43	99	142	53	89
Jindo	142	24	165	120	46	15	9	24	52	-28
Jangheung	159	242	401	100	301	37	87	124	53	72
Jangseong	210	166	376	106	270	50	69	119	55	64
Muan	186	327	513	113	400	41	171	213	53	159
Mokpo	120	45	165	110	54	29	18	47	63	-16
Naju	139	358	497	105	392	35	183	218	54	164
Shinan	161	49	210	114	95	36	19	56	55	1
Suncheon	222	266	488	102	385	70	116	186	56	130
Wando	191	127	319	106	213	66	38	104	56	48
Yeongam	125	176	301	102	199	30	79	109	51	58
Yeonggwang	235	263	498	103	395	64	139	202	49	153
Yeosu	384	208	592	107	485	210	92	302	53	249
Average	166	186	352	109	243	42	86	128	53	75

kg N/ha였다. 한편, 인산 요구량은 49~68 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha의 범위였다(Table 2).

**양분수지**

전남지역 전체 평균 양분수지는 질소 243 kg N/ha, 인산 75 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha로 양분 과잉 상태였다(Table 2). 이는 Yoo et al. (2012)이 보고한 2010년 기준 우리나라 평균 양분수지(질소 269 kg N/ha, 인산 110 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha)와 OECD가 조사한 2002~2004 동안의 우리나라 양분수지(질소 240 kg N/ha, 인산 110 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha)보다 낮은 반면 OECD 가입국의 평균 양분수지(74 kg N/ha, 23 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha)에 비해 양분 과잉 정도가 질소와 인산 모두 3배 이상에 해당한다(OECD, 2008). 질소는 모든 시·군에서 과잉 상태인 반면 인산은 보성, 진도, 목포가 각각 -13 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha, -28 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha, -16 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha로 양분 결핍 상태였으며, 신안은 인산 양분수지가 1 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha로 균형에 가까웠다(Table 2). 전체 시·군 중 함평, 무안, 여수의 질소와 인산 수지가 각각 508, 400, 485 kg N/ha과 193, 159, 249 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha로 상대적으로 높았다. 각 시·군의 양분수지는 화학비료 공급량이 극단적으로 많은 여수를 제외하고는 가축분뇨 발생량과 정의 상관관계가 있었는데(Fig. 1), 이는 화학비료 보다는 가축분뇨가 농촌지역의 양분수지 결정인자임을 의미한다. 한편, 도시로 분류되는 순천과 여수의 질소와 인산 수지가 각각 385 kg N/ha, 485 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha와 130 kg N/ha, 249 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha으로 전남 평균(각각 243 kg N/ha, 75 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha)로 높았는데(Table 2), 순천의 경우 돼지 사육두수가 58,286두로 전체 22개 시·군 중 다섯 번째로 높아서 가축분뇨에 의한 양분발생량이 많았고 상대적으로 양분요구도가 높은 과수 재배 면적이 1,548 ha로 전체 시·군 중 세 번째로 높기 때문에 화학비료 사용량이 많았기 때문으로 판단된다. 하지만, 여수의 경우 본 연구에서 합리적인 해석이 어려웠다.



**Fig. 1. Relationship between livestock manure production and nutrient balance in the administrative districts of Chonnam province (n=21). One district (Yeosu) of which chemical fertilizer supply rate was extremely high was not included in the analysis.**

**하천수 수질 현황 및 양분 지표와의 상관관계**

2011년 전남지역 시·군 하천수의 평균 수질 지표는 T-N 2.4 mg/L, T-P 0.10 mg/L, BOD 2.18 mg/L, COD 4.9 mg/L였다(Table 3). 시·군별로 비교하면 T-N과 T-P 농도는 완도군이 각각 0.7 mg/L와 0.02 mg/L로 가장 낮았으며, 영광군이 각각 5.4 mg/L와 0.47 mg/L로 가장 높았다. 이와 같은 차이는 완도(질소 213 kg N/ha, 인산 48 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha)와 영광(질소 395 kg N/ha, 인산 153 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha)의 양분수지 경향과 일치한다(Table 2). BOD와 COD는 고흥군이 각각 0.50 mg/L와 1.7 mg/L로 가장 낮았고, 영광군이 각각 7.4 mg/L와 10.6 mg/L로 가장 높았는데(Table 3), 이는 영광군의 분뇨 발생량이 30.2 Mg/ha로 고흥군(12.0 Mg/ha)보다 높은 점과 동일한 경향이다(Table 1).

하천수의 T-N 농도는 단위 재배면적당 화학비료 공급량

**Table 3. Mean values of water quality indicators of streams in the administrative districts of Chonnam province monitored by the Ministry of Environment in 2011**

Districts	Water quality indicators (mg/L) <sup>a</sup>			
	BOD	COD	T-N	T-P
Boseong	1.2	3.0	1.1	0.03
Damyang	1.9	3.9	3.3	0.08
Goheung	0.5	1.7	1.6	0.10
Gangjin	1.2	3.7	1.2	0.04
Gurye	1.6	4.2	1.9	0.05
Gokseong	1.3	3.8	1.6	0.04
Gwangyang	1.10	2.7	1.4	0.03
Haenam	NA	NA	NA	NA
Hampyeong	2.1	5.9	2.7	0.07
Hwasun	1.5	3.5	1.6	0.05
Jindo	3.5	7.8	2.2	0.06
Jangheung	1.1	3.1	1.1	0.04
Jangseong	1.5	4.2	2.0	0.08
Muan	4.2	7.6	5.0	0.22
Mokpo	NA	NA	NA	NA
Naju	3.9	6.9	3.7	0.20
Shinan	4.7	12.0	2.7	0.09
Suncheon	1.6	3.5	2.4	0.18
Wando	0.6	2.1	0.7	0.02
Yeongam	1.5	5.3	2.1	0.08
Yeonggwang	7.4	10.6	5.4	0.47
Yeosu	1.3	3.4	5.0	0.06
Average	2.2	4.9	2.4	0.10

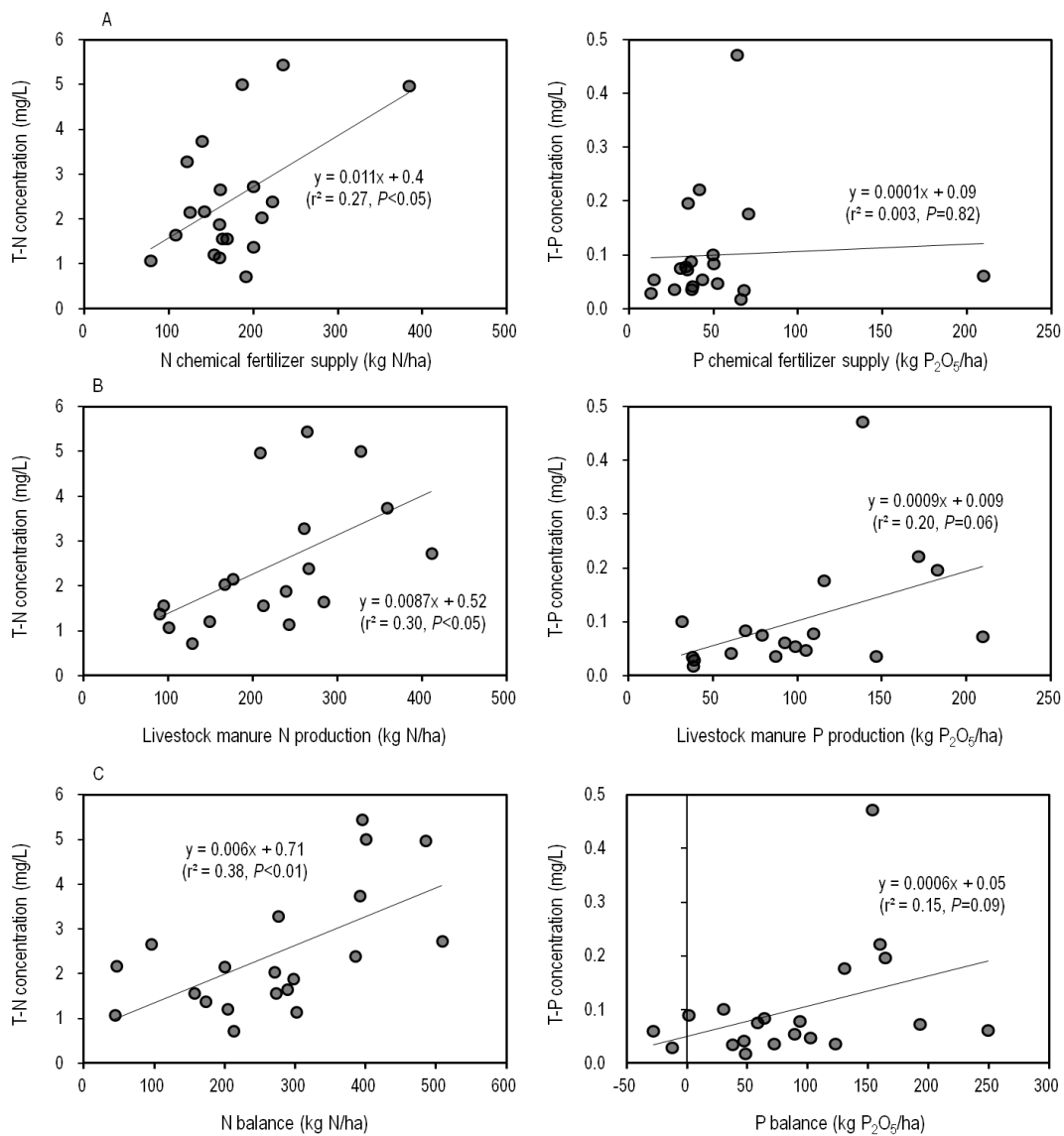
NA, Not available.

<sup>a</sup>BOD, Biochemical oxygen demand; COD, Chemical oxygen demand; T-N, Total nitrogen; T-P, Total phosphorus.

(Source: <http://water.nier.go.kr>)

( $r^2=0.27, P<0.05$ )은 물론 단위면적당 가축분뇨 질소 발생량 ( $r^2=0.30, P<0.05$ )과도 정의 상관관계가 있었는데, 이는 질소 화학비료 사용은 물론 축사의 폐수 방류와 가축분뇨를 원료로 제조되는 퇴비의 토양 사용에 의한 하천수의 질소 농도 증가 가능성을 의미한다(Fig. 2A, B). 반면, 하천수의 T-P 농도는 화학비료 공급량( $r^2=0.03, P=0.82$ )과는 상관관계가 없었지만, 가축분뇨 인 발생량( $r^2=0.20, P=0.06$ )이 높은 시·군에서 T-P 농도가 증가하는 경향이 있었다(Fig. 2A, B). 토양에서 무기태 인은 토양 교질에 쉽게 흡착되거나 불용성 염으로 침전되기 때문에 화학비료로 사용된 인산이 직접 수계로 유출될 가능성은 낮다(Haynes and Mokolobate, 2001; Mead, 1981; Yoo et al., 2006). 반면, 가축분뇨나 퇴비는 흡착이나

침전 등에 의한 불용화 정도가 낮은 유기태 인이 상대적으로 풍부하기 때문에 축사나 퇴비 사용 농경지로부터의 인 유출 가능성이 상대적으로 크다(Sharpley and Moyer, 2000). Kim et al. (2011)이 실내 칼럼 실험에서 7 종의 가축분 퇴비를 토양에 혼합하여 19주 동안 무기태인과 유기태인의 용탈량을 조사한 결과에 의하면 우리나라의 주요 토양인 Inceptisol에서 유기태인이 전체 인 용탈량의 90% 이상이었다. 따라서, 본 연구 결과와 선행연구 결과는 화학비료 보다는 가축분뇨 또는 퇴비가 하천수의 주요 인 오염원으로 작용할 수 있음을 제시한다. 하천수의 T-N 농도와 단위면적당 질소수지 상관관계의 결정계수( $r^2$ )는 0.38 ( $P<0.05$ )로 화학비료 또는 가축분뇨 질소 발생량보다 높았으며, T-P 농도도



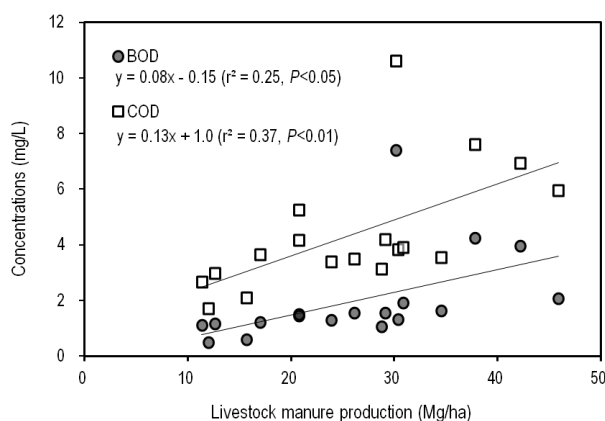
**Fig. 2.** Relationship between nutrient indices and the concentrations of total nitrogen (T-N) and total phosphorus (T-P) in stream water in the administrative districts of Chonnam province monitored by the Ministry of Environment (n=20): (A) chemical fertilizer supply, (B) livestock manure nutrient production, and (C) nutrient balance. Two districts (Mokpo and Haenam) were not included in the analysis because water quality data were not available.

인산 수지와  $P=0.09$  수준에서 상관관계가 있었다(Fig. 3C). 이 결과는 Yoo *et al.* (2012)이 보고한 1980년대 이후 우리나라 4대강의 T-N과 T-P 농도와 양분수지의 상관관계와 일치한다. 따라서, 양분수지는 하천수 T-N과 T-P 농도의 시계열적 변화는 물론 공간적 변이 해석에도 유용한 것으로 판단된다.

한편, 전남 시·군 하천의 BOD와 COD는 Yoo *et al.* (2011)이 보고한 바와 같이 모두 단위 재배면적당 가축분뇨 발생량과 정의 상관관계가 있었는데(Fig. 3). 이와 같은 상관관계는 부적절한 가축분뇨 관리와 퇴비의 과잉 사용에 의한 하천수의 생물분해성 및 난분해성 유기물질 오염 가능성이 있음을 보여준다. 특히, 가축분뇨 퇴비화 과정 중 난분해성인 부식물질이 생성되기 때문에(Larney *et al.*, 2006) 강우 사상 시 지표유거에 의해 퇴비 과잉 사용 농경지로부터 유기물이 수계로 유출되어 BOD와 COD를 증가시킬 수 있다(Lee *et al.*, 2012).

## 요약

하천수질의 공간적 변이 해석에 양분 지표의 활용 가능성을 탐색하기 위해 전남 시·군의 수질 자료(T-N, T-P, BOD, COD)와 양분 지표(화학비료 공급량, 가축분뇨 발생량, 가축분뇨 양분 발생량, 양분수지)의 상관관계를 조사하였다. 수질 T-N은 화학비료 공급량, 가축분뇨 질소 발생량, 양분수지와 모두 정의 상관관계( $P<0.05$  또는  $P<0.01$ )가 있었고, T-P와 이들 양분 지표와의 상관관계는 95% 수준에서 유의성이 없었지만 가축분뇨 인 발생량( $P=0.06$ )과 양분수지( $P=0.09$ )와는 유의미한 관계가 있었다. 따라서, 전남 지역 하천의 T-N 농도는 농경지 사용 화학비료는 물론 가축분뇨에 의해 영향을



**Fig. 3. Relationship between livestock manure production and biochemical oxygen demand (BOD) and chemical oxygen demand (COD) of stream water in the administrative districts of Chonnam province monitored by the Ministry of Environment (n=18). Two districts (Mokpo and Haenam) from which water quality data were not available and another two districts (Jindo and Shinan) in which livestock manure production was extremely low (see Table 1 for details) were not included in the analysis.**

받는 반면 T-P 농도는 화학비료 보다는 부적절한 가축분뇨 처리 및 퇴비 과잉 사용에 의해 증가될 수 있음을 의미한다. 가축분뇨와 이를 원료로 제조되는 퇴비는 토양교질 및 금속이온과의 반응성이 낮아 무기태 인에 비해 상대적으로 이동성이 큰 유기태 인을 함유하고 있기 때문에 하천 T-P 농도 증가에 기여할 수 있는 것으로 해석되었다. 한편, BOD와 COD는 모두 유기물질 함량이 높은 가축분뇨 발생량과 정의 상관관계( $P<0.05$  또는  $P<0.01$ )가 있었는데, 이 또한 T-P의 경우와 동일하게 하천 수질에 대한 가축분뇨의 영향을 반영한다. 하지만, 본 연구에서 기상, 지형, 강우유형, 영농활동, 토지이용방식이 상이한 시·군을 대상으로 취득이 용이한 통계자료에 의존하여 양분수지를 분석하여 수질 변동을 해석한 점은 한계로 인정된다. 이와 같은 한계에도 불구하고 본 연구 결과는 수질 변동 이해의 측면에서 양분 지표를 이용한 수질의 공간 변이 해석 가능성과 수질 관리의 측면에서 가축분뇨 관리(폐수 처리 및 적정 퇴비 사용)의 중요성을 통계적으로 제시한다는 측면에서 의미가 있다.

## Acknowledgment

This research was financially supported by the Yeongsan and Sumjin River Watershed Management Committee, Ministry of Environment and by the Ag-BMPs Development Project for Water Quality Improvement in Saemangeum Estuarine Reservoir funded by the Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Republic of Korea.

## References

- Haynes, R.J., Mokolobate, M.S., 2001. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: A critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 59, 47-63.
- Kim, H.Y., Lim, S.S., Kwak, J.H., Lee, S.I., Lee, D.S., Hao, X., Yoon, K.S., Choi, W.J., 2011. Soil and compost type affect phosphorus leaching from Inceptisol, Ultisol, and Andisol in a column experiment. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 42, 2188-2199.
- Larney, F.J., Sullivan, D.M., Buckley, K.E., Eghball, B., 2006. The role of composting in recycling manure nutrients. *Can. J. Soil Sci.* 86, 597-611.
- Lee, J., Kim, J., Lee, J.K., Kang, L., Kim, S., 2012. Current status of refractory dissolved organic carbon in the Nakdong river basin. *J. Korean Soc. Water Environ.* 28, 538-550.
- Mead, J.A., 1981. A comparison of the Langmuir, Freundlich, and Temkin equations to describe phosphate adsorption properties of soils. *Aust. J. Soil Res.* 19, 333-342.

- Ongley, E.D., Xiaolan, Z., Tao, Y., 2010. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China. *Environ. Pollut.* 158, 1159-1168.
- Parris, K., 1998. Agricultural nutrient balances as agri-environmental indicators : an OECD perspective. *Environ. Pollut.* 102, 219-225.
- Parris, K., 2011. Impact of agriculture on water pollution in OECD countries: recent trends and future prospects. *Int. J. Water Resour. Dev.* 27, 33-52.
- Sharpley, A., Moyer, B., 2000. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall. *J. Environ. Qual.* 29, 1462-1469.
- Sun, B., Zhang, L., Yang, L., Zhang, F., Norse, D., Zhu, Z., 2012. Agricultural non-point source pollution in China: causes and mitigation measures. *AMBIO* 41, 370-379.
- Withers, P.J.A., Lord, E.I., 2002. Agricultural nutrient inputs to rivers and groundwaters in the UK: policy, environmental management and research needs. *Sci Total Environ.* 282, 9-24.
- Yoo, J.H., Ro, H.M., Choi, W.J., Yoo, S.H., Han, K.H., 2006. Phosphorus adsorption and removal by sediments of a constructed marsh in Korea. *Ecol. Eng.* 27, 109-117.
- Yoo, S.H., Ro, H.M., Choi, W.J., 2012. Soil and water qualities affected by six decades of agricultural paradigm shifts in Korea. *Proc. Nat. Acad. Sci. Korea (Natural Science Part)*. 51, 127-157.