

발 간 등 록 번 호
11-1480523-000996-01

NIER-RP2012-010

팔당유역 축산계 오염원 변동에 따른 수질관리 방안

국립환경과학원 한강물환경연구소

이형진, 류덕희, 박지형, 진영헌, 방규철, 윤효정,
황문영, 김권래, 양희정, 김혜성, 김세훈

Water-quality and management according to the fluctuation
of livestock pollution source in Paldang basin

Hyungjin Lee, Doughee Rhew, Jihyung Park, Younghun Jin, Kyuchul Bang,
Hyojung Yoon, Moonyoung Hwang, Kwonrae Kim, Heejeong Yang,
Hyesung Kim, Sehun Kim

Han-River Environment Research Center
National Institute of Environment Research

2011

목 차

목 차	i
표목차	ii
그림목차	iii
Abstract	iv
I. 서 론	1
II. 연구내용 및 방법	3
1. 현황자료 분석	3
2. 현장조사	3
3. 축산계 오염원변화에 따른 수질 예측	6
III. 연구결과 및 고찰	9
1. 기상(강수량)	9
2. 수질측정망 자료의 분석	10
3. 조사대상 지역의 가축 사육두수 및 배출부하량 변화	13
4. 현장조사 결과	16
5. 수질예측 결과	20
6. 축산계 오염원의 관리방안	25
IV. 결 론	28
참고문헌	29

표 목 차

<표 1> 조사지점 세부현황	4
<표 2> 이천기상대 월별 강수량 및 비율	10
<표 3> 국가수질측정망(청미천1, 복하천1) 지점의 오염원 및 부하량 변화	11
<표 4> 국가수질측정망(청미천1, 복하천1)의 연평균 BOD, T-N, T-P 비교	12
<표 5> 조사대상지역의 가축사육두수 변화	14
<표 6> 조사대상지역의 배출부하량 변화	15
<표 7> 조사구간 내 단위면적당 가축사육두수 및 배출부하량	20
<표 8> 수질모의결과 및 현장조사결과	24
<표 9> 유기질 비료와 퇴비의 생산량 및 판매량	25

그 립 목 차

<그림 1> 청미천 구간 수질오염도 변화	1
<그림 2> 남한강하류 중권역 축산계 오염원 현황과 구제역으로 인한 살처분 및 매몰 현황	2
<그림 3> 조사지점 위치도	4
<그림 4> 세부조사지점도(오천천지류, 매곡천)	5
<그림 5> 세부조사지점도(화곡천, 양화천)	6
<그림 6> 화곡천 및 양화천 수질모델링 모식도	8
<그림 7> 이천기상대 강수량 변화	9
<그림 8> 국가수질측정망(청미천1, 복하천1) 월별 BOD, T-N, T-P 변화 ...	13
<그림 9> 축산계 오염원 상·하류 수질 비교(BOD)	16
<그림 10> 축산계 오염원 상·하류 수질 비교(T-N)	17
<그림 11> 축산계 오염원 상·하류 수질 비교(T-P)	18
<그림 12> 축산계 오염원 상·하류 수질오염도비 변화	19
<그림 13> 화곡천 수질예측 보정결과	20
<그림 14> 화곡천 수질예측 검증결과	21
<그림 15> 양화천 수질예측 보정결과	21
<그림 16> 양화천 수질예측 검증결과	22
<그림 17> 구제역 발생 및 미발생 시 수질모의 및 실측결과의 월별 변화	23
<그림 18> 축산농가 관리체계도	26

Abstract

This study was carried out to investigate change in water quality in association with decrease of livestock pollution source caused by food ant mouth disease(FMD) in Paldang basin.

Whagok stream and Yangwha stream were selected for a case study and the water quality was surveyed in small basin scale. In Whagok stream study site, 20,759 head of pigs (69.5%) and 97 head of cattle (8.4%) were buried as an act of FMD sanitation. The decline of livestock head in this area resulted in decreases of discharge load of BOD, T-N, and T-P by 84.9%, 77.4%, and 85.2%, respectively. In Yangwha stream study site, 9,172 head of pigs (83.0%) and 219 head of cattle (39.5%) were buried resulting in decreases of discharge load of BOD, T-N, and T-P by 63.0%, 64.1%, and 67.4%, respectively.

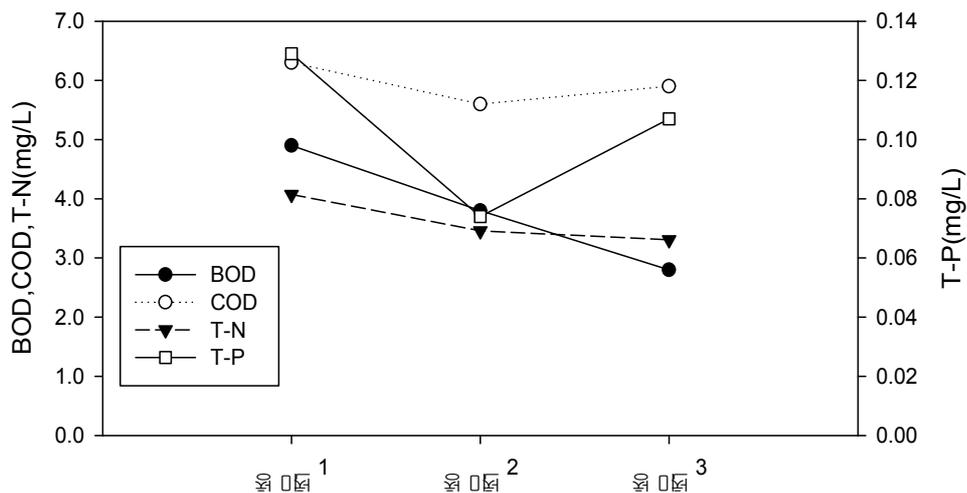
To evaluate the effect of changes in the discharge load of livestock pollution source by FMD on water quality, SWAT model and QUALKO2 model were introduced and the concentration of BOD, T-N, and T-P in each stream were calculated. The model simulation showed decreases in BOD, T-N, and T-P by 2.1 mg/L, 5.214 mg/L, and 0.061 mg/L in Whagok stream and 0.8 mg/L, 2.234 mg/L, 0.105 mg/L in Yangwha stream, respectively.

For the proper management of livestock pollution source, establishment of database regarding the amount of livestock feces and urine is recommended. Also, it would be required to control manure utilization and to strengthen the standard of water quality discharged from livestock farm. In last, it is necessary to educate farm owners to make them aware of the Environmental importance of livestock farming for the management of the stream water quality.

I. 서 론

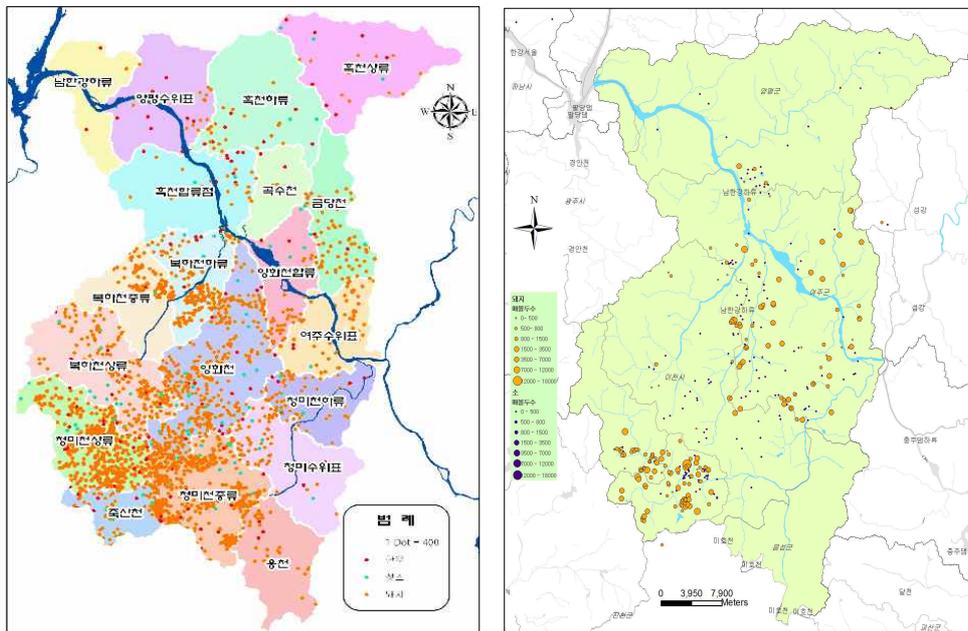
팔당호에 유입되는 남한강, 북한강, 경안천의 세 하천중 경안천은 오염도가 가장 높지만 유량이 상대적으로 매우 적기 때문에 수질에 대한 영향도가 남한강 및 북한강에 비해 크지 않다. 북한강은 남한강에 비해 수질이 상대적으로 양호한 반면, 남한강은 유량이 많은 반면 수질이 다소 불량하여 유입하천 중 오염 부하량이 가장 많기 때문에 팔당호의 수질에 대한 영향도가 상대적으로 매우 크다(이형진 등, 2007).

남한강의 주요 지천인 청미천, 양화천, 복하천은 축산계 오염원에 의한 수질 영향이 매우 큰 곳으로, 2009년도 기준으로 오염발생부하량의 74.7%, 오염배출 부하량의 53.6%를 차지하고 있다. '남한강하류 중권역 물환경관리 연동계획'에 따르면 복하천 상·하류 지역과 청미천 상류지역, 양화천 중상류 지역의 돼지 사육밀도가 높은 것으로 나타나며(한강유역환경청, 2011), 이들 지역의 주요 오염 인자는 축산계 및 토지계로 조사된 바 있다(이형진 등, 2010). 특히 축산농가가 밀집된 청미천 상류지역(국가수질측정망 청미천1 지점)의 수질오염도는 중·하류(국가수질측정망 청미천 2, 3지점)보다 높게 나타나기도 한다(그림 1).



<그림 1> 청미천 구간 수질오염도 변화(2008-2010, 연평균)

지난 2010년말부터 2011년 초반까지 발생한 구제역으로 인해 전국적으로 약 348만여 마리의 가축이 살처분 되어 가축사육두수가 급격히 감소하게 되었다 (그림2). 경기도에서는 돼지와 소 약 170만여 마리가 살처분 되었으며, 2009년 말 사육두수를 기준으로 이천시는 돼지의 99%, 안성시는 돼지의 65%가 살처분 되어 가축사육두수가 매우 짧은 기간 동안 급격하게 감소되었다.



<그림 2> 남한강하류 중권역 축산계 오염원 현황(좌: 2009년 기준)과 구제역으로 인한 살처분 및 매몰 현황(우: 2011.2.기준, 농림수산식품부 (구제역.kr) 자료 변환)

이런 대규모의 살처분은 국내에서 유사한 사례를 찾아보기 어려울 정도이며, 일부 외국 연구에서 대규모 초지에서 가축방목을 중단했을 때 수질변화에 대해 일부 연구된 바가 있지만 국내처럼 살처분의 형태가 아닌 초지에서 방목을 중단하는 형태로 국내와는 다소 차이가 있다.

본 연구는 대규모 구제역 발생으로 인해 팔당유역 지류의 상류에서 축산계 오염원변동에 따른 수질의 영향을 분석하고 향후 관리방안을 모색하고자 한다.

II. 연구내용 및 방법

1. 현황자료 분석

가. 기상(강수량) 자료

하천의 수질을 영향을 미치는 요인 중에는 생활계, 축산계, 토지계, 산업계 등의 오염원 이외에 기상조건(강수량)이 중요한 요인 중 하나이다. 강수량자료를 분석하기 위해 조사지역 인근에 위치한 이천기상대의 측정자료를 활용하였다.

나. 오염원현황 및 구제역으로 인한 사육두수 변동 분석

본 연구를 위한 오염원 현황자료는 전국오염원조사자료(국립환경과학원, 2011) 및 각 지자체의 통계연보(이천시, 2010; 안성시, 2010)를 활용하였으며, 가축사육 두수 및 구제역으로 인한 변동 내역은 각 지자체 및 농림수산식품부의 자료를 사용하였다.

다. 과거 수질자료와의 비교

과거 수질과 2011년 수질을 비교하기 위해 국가수질측정망 지점 중 청미천1과 복하천1지점의 측정자료를 활용하였다.

2. 현장조사

가. 조사항목 및 조사기간

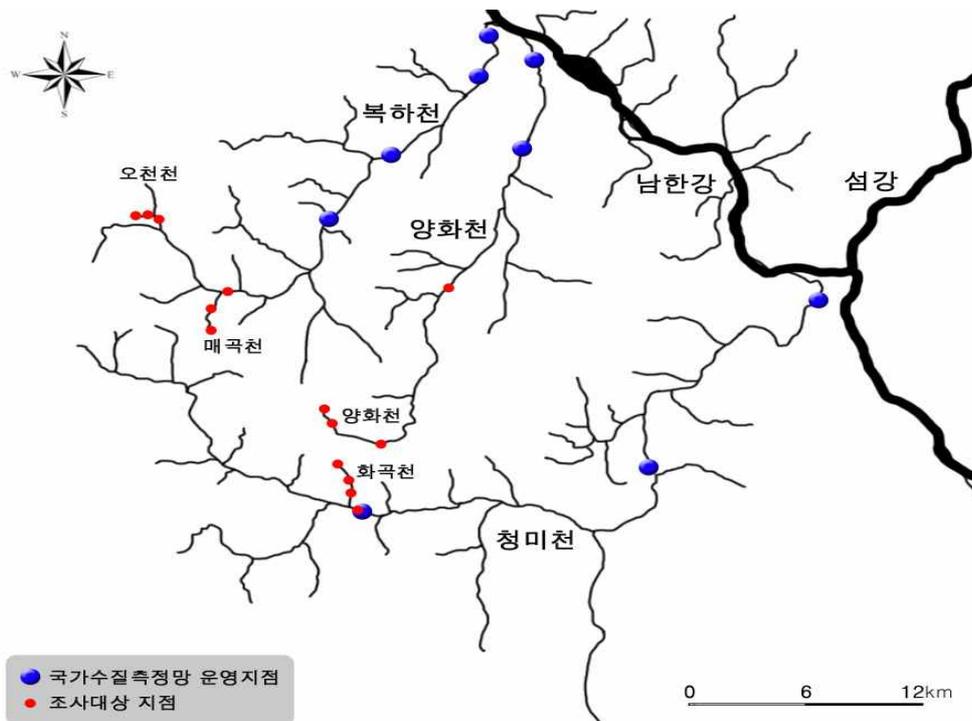
BOD, COD, T-N, T-P, SS, NH₃-N, NO₃-N, TOC, 수온, pH, DO, EC 등 12개 수질항목을 조사하였고, 조사기간은 2011년 5월 26일부터 10월 26일까지 1~2주 간격으로 실시하였다. 유량조사는 2011년 8월 25일과 9월 30일 2회에 걸쳐 실시하였다.

나. 조사지점의 선정

남한강하류 중권역 물환경관리계획(2008~2012) 및 1:50,000 지도를 활용하여 축산계 오염원이 밀집된 소하천을 선정하였으며, 현장조사를 통해 전기전도도가 높게 나타나는 소하천을 우선적으로 고려하였다. 조사대상 소하천은 축산계 오염원이 밀집된 소하천 중 구제역으로 인해 살처분이 실시된 2개 소하천(양화천, 화곡천)과 구제역이 발생하지 않아 살처분이 없었던 2개 소하천(오천천 지류, 매곡천)을 선정하였다. 조사지점의 세부현황은 <표 1> 및 <그림 3>과 같다.

<표 1> 조사지점 세부현황

하천명	채수지점		GPS 좌표	비고	
	지점명	지점코드			
북하천	오천천 지류	축산오염원 상류 계곡수	B1	N37.15.50.34 / E127.20.42.25	
		축산오염원 하류 계곡수	B2	N37.16.02.64 / E127.21.10.68	
	오천천	오천천 본류(오미교)	B3	N37.15.54.19 / E127.21.16.31	
	매곡천	축산오염원 상류(매곡1교)	M1	N37°11'31.63" / E127°23'20.87"	
		축산오염원 하류(매곡교)	M2	N37°11'54.40" / E127°23'05.46"	
북하천	북하천 합류 후(매곡교II)	M3	N37°13'09.53" / E127°23'49.60"		
양화천	양화천 상류	축산오염원 상류 계곡수	Y0	N37°08'19.7" / E127°27'38.0"	구제역 발생
		축산오염원 상류 계곡수	Y1	N37°08'27.07" / E127°27'33.83"	
		축산오염원 하류(대죽2교)	Y2	N37°08'10.35" / E127°29'09.60"	
	양화천 중류	마장교	Y3	N37°13'07.29" / E127°31'02.37"	
청미천	화곡천	축산오염원 상류 계곡수	W1	N37°07'30.78" / E127°27'18.56"	구제역 발생
		축산오염원 내(농장 앞)	W2	N37°06'50.46" / E127°27'57.86"	
		축산오염원 하류(우곡교)	W3	N37°06'28.41" / E127°27'53.66"	
	청미천	청미천 합류 후(시가지청미교)	W4	N37°05'45.45" / E127°28'47.19"	



<그림 3> 조사지점 위치도

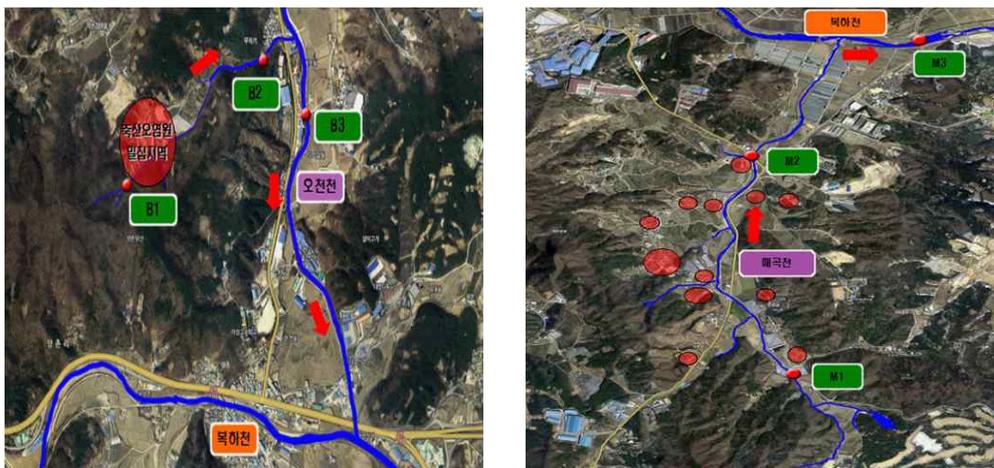
다. 조사지점 현황

(1) 오천천 지류

오천천은 북하천의 상류에 위치한 지천으로 이천시 마장면 관리에 위치하고 있으며, 조사대상 소하천은 오천천으로 유입되는 소규모의 지천이다. 상류에는 특별한 오염원이 없으며, 중류에 축산계 오염원이 밀집하고 있고 하류에는 마을이 있다. 축산계 오염원 상류 조사지점(B1)과 하류(마을상류) 조사지점(B2)으로 구분하여 조사하였으며, 오천천 본류구간(B3)도 조사하였다(그림4). 구제역 발생이 없었던 지역이다.

(2) 매곡천

북하천의 상류에 위치한 지류로 이천시 호법면 매곡리에 위치하고 있다. 매곡천 상류에는 골프장과 수련원이 조성되어 있으며 중·하류에 축산계 오염원이 위치하고 있다. 축산계 오염원 상류 조사지점(M1)과 하류 조사지점(M2)으로 구분하여 조사하였으며, 북하천 본류구간(M3)도 병행하여 조사하였다(그림 4). 구제역 발생이 없었던 지역이다.



<그림 4> 세부조사지점도(좌: 오천천지류, 우: 매곡천)

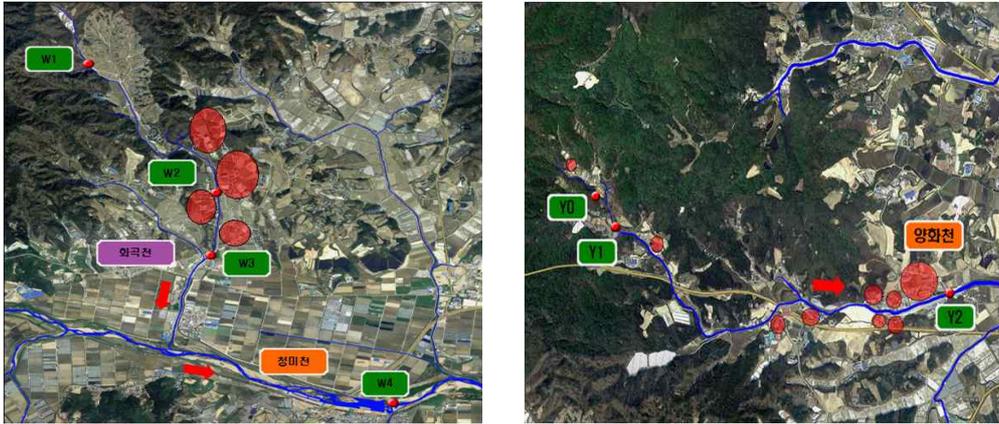
(3) 화곡천

청미천의 중·상류에 위치한 지천으로 안성시 일죽면 화곡리에 위치하고

있다. 상류에는 대규모 공원묘원이 조성되어 있으며 중·하류에 축산계 오염원이 밀집되어 있다. 축산계 오염원 상류 조사지점(W1)과 축산밀집지역 내 지점(W2), 하류 조사지점(W3)으로 구분하여 조사하였으며, 청미천 본류 구간(W4)도 병행하여 조사하였다(그림 5). 구제역이 발생한 지역이다.

(4) 양화천

양화천의 최상류 지천으로 이천시 설성면 대죽리에 위치하고 있다. 축산계 오염원 상류 조사지점(Y0, Y1)과 하류 조사지점(Y2)으로 구분하여 조사하였으며, 양화천 중류 구간(Y3)도 병행하여 조사하였다(그림 5). 구제역이 발생한 지역이다.



<그림 5> 세부조사지점도(좌: 화곡천, 우: 양화천)

3. 축산계 오염원변화에 따른 수질 예측

가. SWAT 모형

축산계 오염원 변화가 발생한 화곡천과 양화천의 기존 유량조사자료가 없어 SWAT모형을 이용하여 유량을 산출하였다. SWAT모형의 경우 전체 유역을 작은 소유역으로 구분할 수 있고, 수문순환 현상에 대한 재현성이 우수하며, 강우시와 비강우시 유역내의 오염물질거동에 대한 일별 유출모의가 가능하다. 또한 QUAL2E 모형의 알고리즘이 반영되어 있어 하천의 자정작용을 반영할 수 있는 등 본 연구의 내용과 부합하여 선정하였다.

(1) 입력자료의 구축

DEM(Digital Elevation Map)은 경사도, 토양, 토지피복 등과 같은 공간속성정보의 기본이 되는 자료로, 1:25,000 수치지도를 이용하여 등고 자료를 추출하였다.

토지피복도는 환경부의 Landsat TM(Thematic Mapper) 위성영상사진을 기반으로 작성된 중분류 토지피복분류도(1:250,000)를 기초로 분석하였다. 토지피복분류도는 시가화/건조지역, 농업지역, 산림지역, 나지, 초지, 습지, 수역 등 14가지의 토지피복특성으로 구성되어 있다.

토양도는 토양의 물리화학적 성질을 결정해주는 입력자료로 농업과학기술원에서 제작된 1:50,000 개략토양도를 사용하여 분석하였다.

모델을 위한 유역구분은 조사지점을 기준으로 나누었으며, 크게 축산계 오염원의 영향을 받지 않는 상류지점과 축산계 오염원의 영향을 받는 하류지점으로 구분하였다.

SWAT모형에서는 강우, 풍속, 기온, 태양복사량, 상대습도 등의 기상자료를 입력하여 유출 및 증발산 등의 수문성분을 계산하게 된다. 본 연구에서는 이천기상대의 일별 기상자료를 사용하였다.

연구 대상지역에는 별도의 취수장이 없었다. 매곡천 일부 구간에서 농업용수를 위해 취수가 이루어지고 있었으나 그 영향이 제한적으로 나타나고 있어 본 연구에서는 고려하지 않았다.

(2) SWAT 모형의 보정

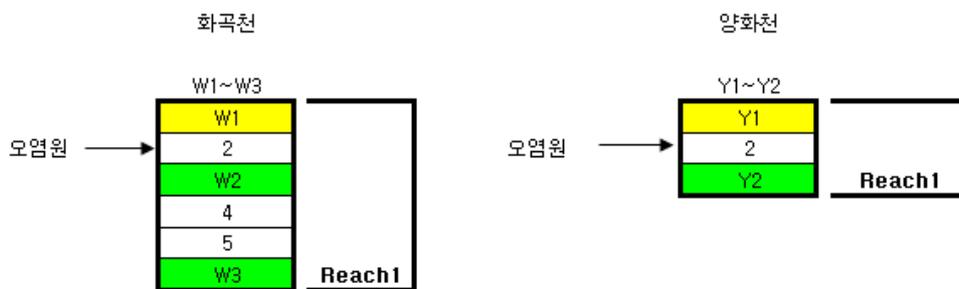
SWAT 모형의 보정은 모형으로부터 계산된 값과 실측치가 가장 잘 일치하도록 모형의 초기조건 및 반응계수를 유역의 조건에 맞도록 일치시키는 과정이며, 조사대상지점에서 조사된 자료를 이용하여 모형의 반응계수 보정을 실시하였다. 모델 타당성 검토를 위해 모의기간동안 실측된 자료를 이용하여 모델 예측값과 비교하였다.

나. QUALKO2 모형

수질예측을 위해서 하천수질예측을 위해 널리 사용되고 있는 QUALKO2를 사용하였다. QUALKO2는 BOD₅, 유기성 질소 또는 유기성 인을 그대로 입력하여 계산되는 모형으로 QUAL2E를 일부 보완한 모형으로 조류 생산 및 사멸에 의한 내부 생산 유기물 증가를 고려하고, Bottle BOD의 개념을 도입했다. 국내에서 측정되는 BOD₅는 5일간 Bottle내에서 일어나는 산소소모량의 총량으로, 이는 Bottle에 포함되어 있는 비생물성 CBOD 뿐만 아니라 조류의 내생호흡에 의한 산소소모량과 질산화에 의한 산소소모량이 포함되게 된다.

QUAL2E는 질소와 조류의 농도가 무시할 수 있는 수준으로 낮아 유기물과 용존산소가 외부에서 유입되는 비생물성 CBOD에 의하여 좌우되는 수체에 한하여 적용이 가능하고, 본 연구에서는 축산계 오염원 등으로 인해 부영양화가 심한 국내 하천을 대상으로 하기 때문에 QUALKO2를 사용하였다.

구간(reach)은 본 연구의 대상지역이 매우 짧은 구간임을 감안하여 단일 구간으로 설정하였으며, 모형의 기초단위인 소구간 요소(element)의 크기는 0.5km로 구성하였다(그림 6).



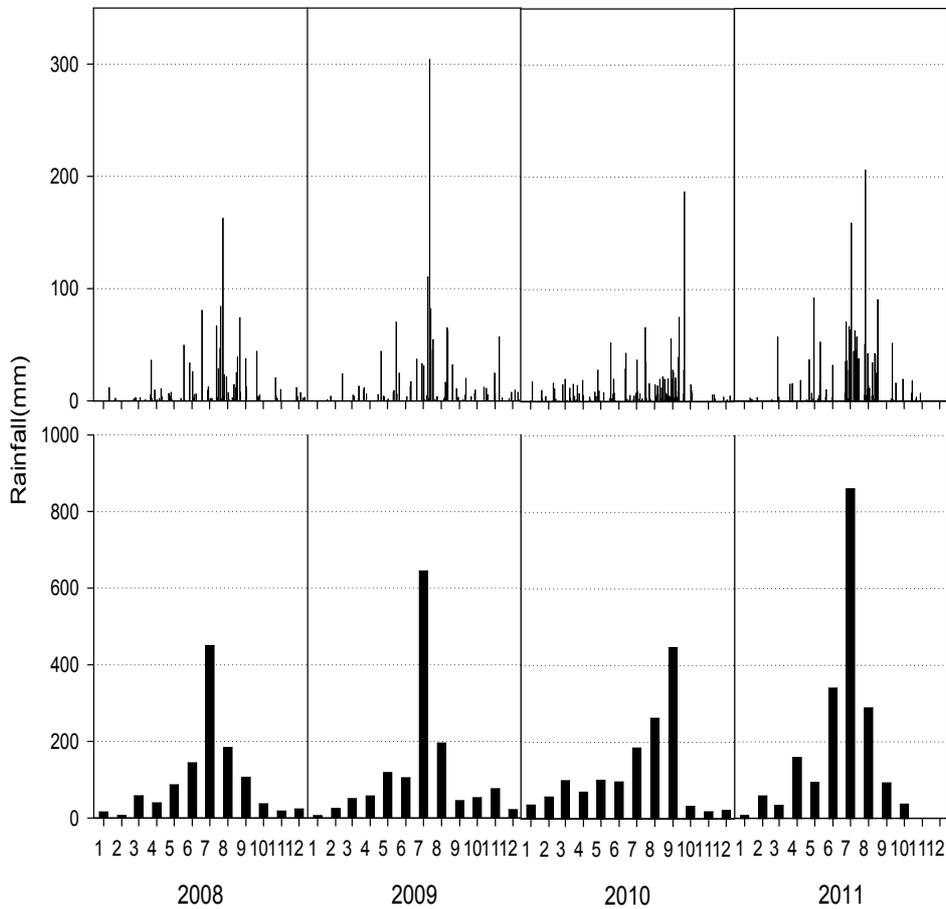
<그림 6> 화곡천 및 양화천 수질모델링 모식도

2011년 5~10월의 실측수질과, 실측수질이 없는 기간은 청미천과 양화천 국가수질측정망 자료를 계절지수 등 통계적 기법을 활용하여 산출하였다. 강수량 자료를 바탕으로 SWAT모형을 통해 산정된 유량자료를 QUALKO2 모형의 입력자료로 사용하였으며, 실측수질 중 5월과 6월 자료를 보정 및 검증자료로 사용하였다.

Ⅲ. 연구결과 및 고찰

1. 기상(강수량)

2008년, 2009년, 2011년은 7월에 강우가 집중되는 등 비교적 유사한 월별 강수분포를 나타내었으나 2010년은 9월에 강수가 집중되었다(그림 7). 연강수량은 2011년이 2,045mm로 예년에 비해 높게 나타났다. 연강수일수는 2010년이 165일로 예년에 비해 높게 나타났으나 연강수량은 1,430으로 2009년과 비슷하게 나타났다(표 2).



<그림 7> 이천기상대 강수량 변화(기상청, 2008~2011년, 위:일 강수량, 아래: 월 강수량)

<표 2> 이천기상대 월별 강수량 및 비율(기상청, 2008~2011년, 단위:mm)

연도 월	2008		2009		2010		2011	
	강수량	비율	강수량	비율	강수량	비율	강수량	비율
1월	15.8	1.4%	6.5	0.5%	36.3	3.4%	7.8	0.4%
2월	6.6	0.6%	25.1	1.7%	57.2	5.4%	58.8	2.9%
3월	58.1	5.0%	50.8	3.5%	99.9	9.4%	34.3	1.7%
4월	39.4	3.4%	57.7	4.0%	70	6.6%	158.8	7.8%
5월	86.8	7.5%	118.9	8.3%	101	9.5%	94.7	4.6%
6월	144.0	12.4%	105	7.3%	96.5	9.0%	340.7	16.7%
7월	450.4	38.7%	644.9	44.9%	185.1	17.3%	861	42.1%
8월	184.4	15.9%	195.7	13.6%	263.2	24.6%	288.9	14.1%
9월	106.4	9.1%	45.5	3.2%	447.3	41.9%	92.9	4.5%
10월	37.0	3.2%	53	3.7%	32.5	3.0%	37.4	1.8%
11월	18.2	1.6%	76.3	5.3%	18.8	1.8%	58.5	2.9%
12월	23.6	2.0%	22.1	1.5%	21.8	2.0%	11.2	0.5%
연강수량	1,171		1,402		1,430		2,045	
연강수 일수(일)	112		118		165		119	
50mm 이상 강수 일수(일)	5		8		5		13	
40mm 이상 강수 일수(일)	8		10		6		19	
강수별 평균강수량	10.5		11.9		8.7		17.2	

2. 수질측정망 자료의 분석

조사대상지역의 전년도 수질측정자료가 없기 때문에 인근의 수질측정망 지점인 청미천1, 복하천1(복하천 중류)의 자료를 활용하였고, 2009년도를 기준으로 오염원과 배출부하량을 산출하였다. 오염원 자료는 남한강하류 중권역 물환경관리계획에서 유사한 소권역의 자료를 활용하였으며, 소권역의 유역면적에서 일부 차이가 발생하는 부분은 유역면적비로 적용하여 계산하였다. 양화천은 수질측정망 지점이 하류쪽에 위치해 있어 제외하였다.

구제역 살처분에 의한 축산계 배출부하량의 감소량은 2009년 소·돼지의 사육두수에서 살처분에 따라 감소한 사육두수의 비를 이용하여 산출하였다. 대부분의 살처분이 소보다 부하량이 낮은 돼지를 대상으로 이루어졌기 때문에 살처분량에 비해 배출부하량의 감소는 크지 않았다(표 3).

<표 3> 국가수질측정망(청미천1, 복하천1) 지점의 오염원 및 부하량 변화

		청미천1		복하천1		
		2009	살처분 후	2009	살처분 후	
오염원	인구(명)	26,785	-	24,502	-	
	소(두) (젓소, 한우)	27,351	25,925 (-1,426)	14,658	14,402 (-456)	
	돼지(두)	239,168	37,354 (-201,814)	69,979	12,075 (-57,904)	
	산업폐수 발생량(톤/일)	10,918	-	10,516	-	
배출 부하량 (kg/일)	BOD	생활	698.3	-	832.5	-
		축산	5,103.0	4,029.0	2356.6	1,908.0
		산업	23.1	-	38.8	-
		토지	1,647.6	-	2044.1	-
		기타	22.9	-	0.7	-
		계	7,494.8	6,420.8 (14.3% ↓)	5272.6	4,824.0 (8.5% ↓)
	T-N	생활	622.5	-	750.1	-
		축산	4643.3	3,66.0	1392.9	1,127.7
		산업	23.7	-	37.0	-
		토지	1365.3	-	812.4	-
		기타	5.6	-	5.1	-
		계	6660.3	5,683.1 (14.7% ↓)	2997.5	2,732.3 (8.8% ↓)
	T-P	생활	71.0	-	77.9	-
		축산	374.9	296.0	157.1	127.2
		산업	2.5	-	3.3	-
		토지	75.8	-	78.3	-
		기타	1.3	-	0.1	-
		계	525.5	446.6 (15.0% ↓)	316.7	286.8 (9.4% ↓)
연평균수질	BOD	5.3	-	2.2	-	
	T-N	3.758	-	2.809	-	
	T-P	0.102	-	0.067	-	

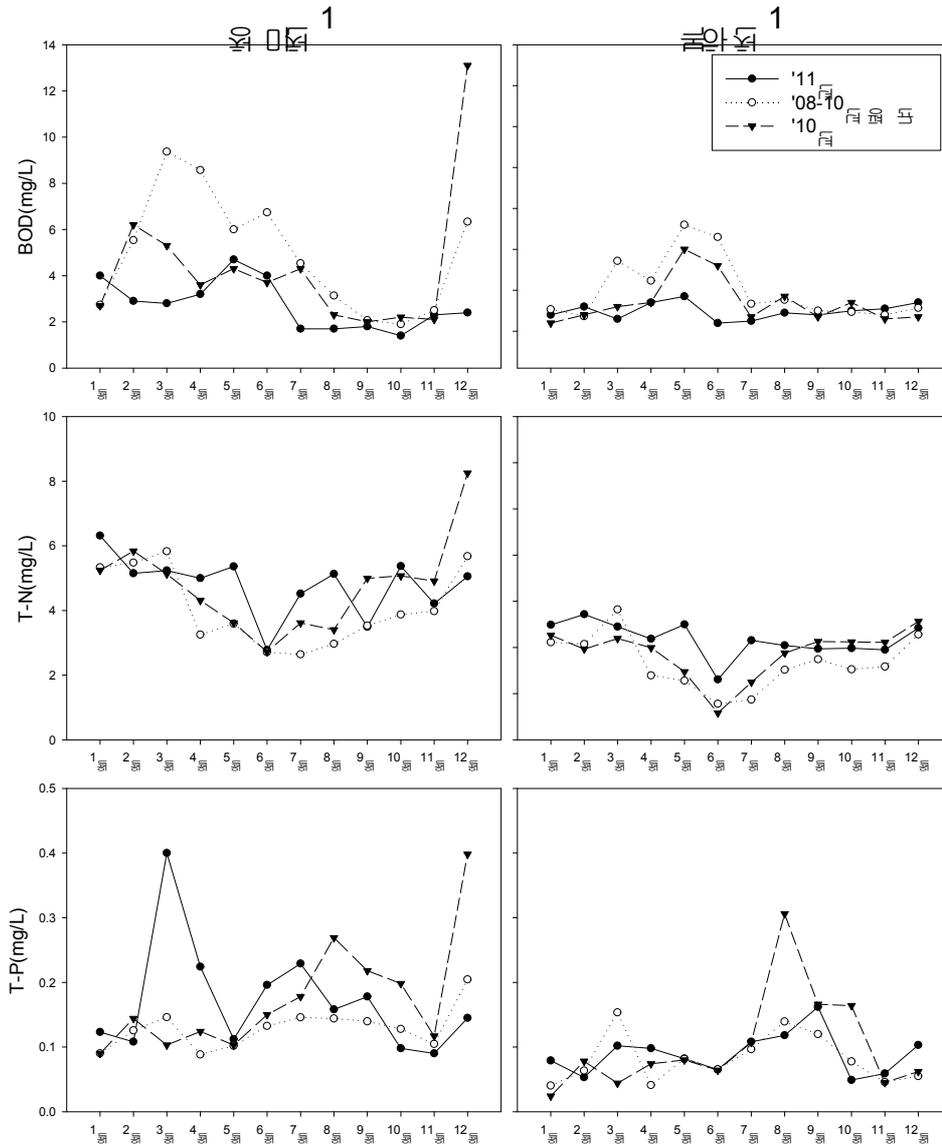
청미천1의 연평균 BOD, T-N, T-P는 2010년과 2011년이 동일하거나 큰 차이가 없었다. 복하천1의 연평균 BOD와 T-P는 2010년보다 2011년이 감소하였으나, 연평균 T-N은 증가한 것으로 나타났다(표 4). 이것은 유역에 따라 강우강도에 따른 오염물질의 배출특성이 다르고(김 등, 2003; 김 등, 2002; 박과 박, 2004), 2011년의 연강수량이 예년에 비해 매우 높게 나타난 것이 원인으로 보인다.

2011년 월별 수질오염도 변화 양상은 2010년과 대체로 비슷하게 나타났으나, BOD의 경우 청미천1은 2월, 3월, 7월에, 복하천1은 5월과 6월에 다소 큰 차이를 보였는데, 이것은 2008~2010년 평균 오염도와도 차이를 보였다. T-N의 경우 청미천1과 복하천1 모두 1~6월까지의 감소하다가 7월 이후 증가하는 경향을 보이는 양상은 대체로 유사하였으나 월별로는 다소 차이를 나타내었다. 특히 복하천1의 경우는 1~8월까지의 2010년보다 2011년에 전반적으로 오염도가 높게 나타났고 9월 이후에는 낮게 나타났다. T-P의 경우 청미천1은 3월과 4월에 2010년보다 오염도가 비교적 높게 나타났고 이후에는 2010년과 비슷한 변화양상을 나타내었다. 청미천1과 복하천1 모두 8월~10월에는 2010년보다 낮은 오염도를 나타내었다(그림 8).

청미천1과 복하천1은 비교적 유역면적이 크고 유역에 다양한 오염원이 산재해 있으며, 축산계 오염원의 변화, 연강수량 및 강우강도의 변화 등 다양한 요인에 의해 수질에 대한 영향이 복합적으로 나타난다. 따라서 같은 해에도 매월 수질변화의 폭이 크고, 연도별로 변화양상이 다르게 나타나고 있어 축산계 오염원의 변화에 의한 영향을 파악하기에는 다소 어려움이 있다.

<표 4> 국가수질측정망(청미천1, 복하천1)의 연평균 BOD, T-N, T-P 비교

	청미천1			복하천1		
	'08~'10 평균	'10년	'11년	'08~'10 평균	'10년	'11년
BOD	4.9	4.3	4.3	2.0	1.4	1.0
T-N	4.071	4.756	4.801	3.327	3.750	4.380
T-P	0.129	0.174	0.172	0.081	0.101	0.090



<그림 8> 국가수질측정망(청미천1, 복하천1) 월별 BOD, T-N, T-P 변화

3. 조사대상 지역의 가축 사육두수 및 배출부하량 변화

각 하천의 조사구간 중 오천천 지류(이천시 마장면 관리)와 매곡천(이천시 호법면 매곡리)은 구제역에 의한 가축의 살처분이 없는 지역이며, 화곡천과 양화천은 구제역이 발생하여 대규모 살처분이 있었던 지역이다. 화곡

천은 2만여두의 돼지(69.5%)와 90여두의 소(8.4%)가 살처분 되었으며, 양화천은 9천여두의 돼지(83.0%)와 2백여두의 소(39.5%)가 살처분 되었다(표 5).

<표 5> 조사대상지역의 가축사육두수 변화

			오천천 지류	매곡천	화곡천	양화천
하천일람 하천연장(km)			28(오천천)	43	20	181.7
하천일람 유역면적(km ²)			13.1(오천천)	9.0	4.5	29.8
조사구간 하천연장(km)			1.0	2.8	3.0	3.5
조사구간 유역면적(km ²)			0.4	5.3	1.6	3.0
축산계 오염원	2010년	한우(두)	0	585	131	237
		젓소(두)	0	852	1,019	317
		돼지(두)	1,400	0	29,879	11,050
		개(마리)	100	4	0	0
	살처분 후	한우(두)	0	585	129(-2)	170(-67)
		젓소(두)	0	852	924(-95)	165(-152)
		돼지(두)	1,400	0	9,120(-20,759)	1,878(-9,172)
		개(마리)	100	4	0	0
	재입식 후	한우(두)	0	585	129	170
		젓소(두)	0	852	930(+6)	174(+9)
		돼지(두)	1,400	0	11,820(+2,700)	2,472(+594)
		개(마리)	100	4	0	0

화곡천의 BOD, T-N, T-P의 배출부하량은 각각 84.9%, 77.4%, 85.2%가 감소하였고, 양화천(상류)은 각각 63.0%, 64.1%, 67.4%가 감소하였다(표 6).

<표 6> 조사대상지역의 배출부하량 변화

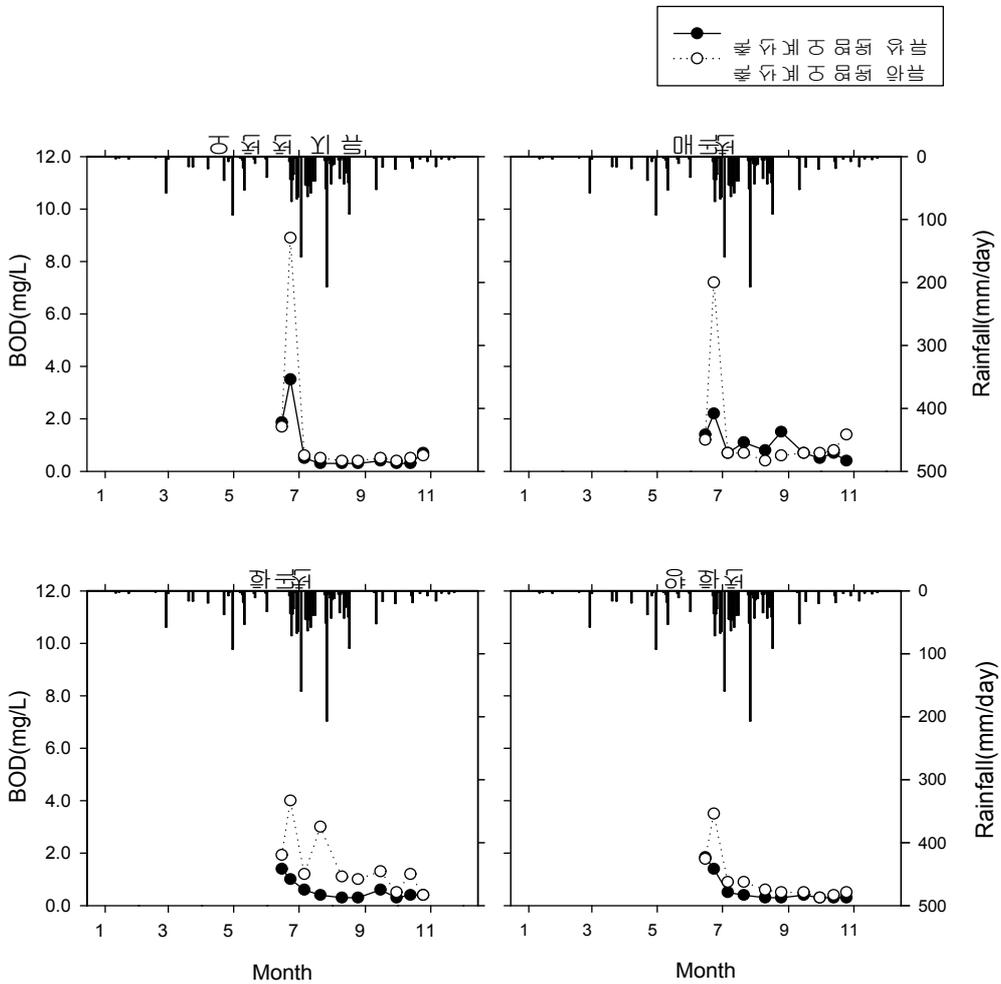
				오천천 지류	매곡천	화곡천	양화천
배출 부하량 (g/일)	2010년	BOD	생활	167	22,956	4,207	9,474
			축산	14,496	91,147	963,090	198,962
			토지	2,777	79,336	8,341	14,858
			계	17,440	193,439	975,638	223,294
		T-N	생활	131	19,185	2,408	2,149
			축산	10,005	57,140	456,012	115,591
			토지	1,750	26,117	6,705	12,365
			계	11,886	102,441	465,124	130,106
		T-P	생활	14	1,898	251	310
			축산	1,332	6,853	87,460	17,389
			토지	139	2,740	542	901
			계	1,485	11,491	88,253	18,600
	살처분 후	BOD	생활	167	22,956	4,207	9,474
			축산	14,496	91,147	135,036	58,353
			토지	2,777	79,336	8,341	14,858
			계	17,440	193,439	147,584	82,685
		T-N	생활	131	19,185	2,408	2,149
			축산	10,005	57,140	95,797	32,184
			토지	1,750	26,117	6,705	12,365
			계	11,886	102,441	104,909	46,699
		T-P	생활	14	1,898	251	310
			축산	1,332	6,853	12,286	4,855
			토지	139	2,740	542	901
			계	1,485	11,491	13,079	6,066
재입식후	BOD	생활	167	22,956	4,207	9,474	
		축산	14,496	91,147	244,743	62,897	
		토지	2,777	79,336	8,341	14,858	
		계	17,440	193,439	257,291	87,229	
	T-N	생활	131	19,185	2,408	2,149	
		축산	10,005	57,140	143,298	35,678	
		토지	1,750	26,117	6,705	12,365	
		계	11,886	102,441	152,411	50,192	
	T-P	생활	14	1,898	251	310	
		축산	1,332	6,853	22,225	5,401	
		토지	139	2,740	542	901	
		계	1,485	11,491	23,018	6,612	

4. 현장조사 결과

가. 상·하류간 수질 변화

(1) BOD

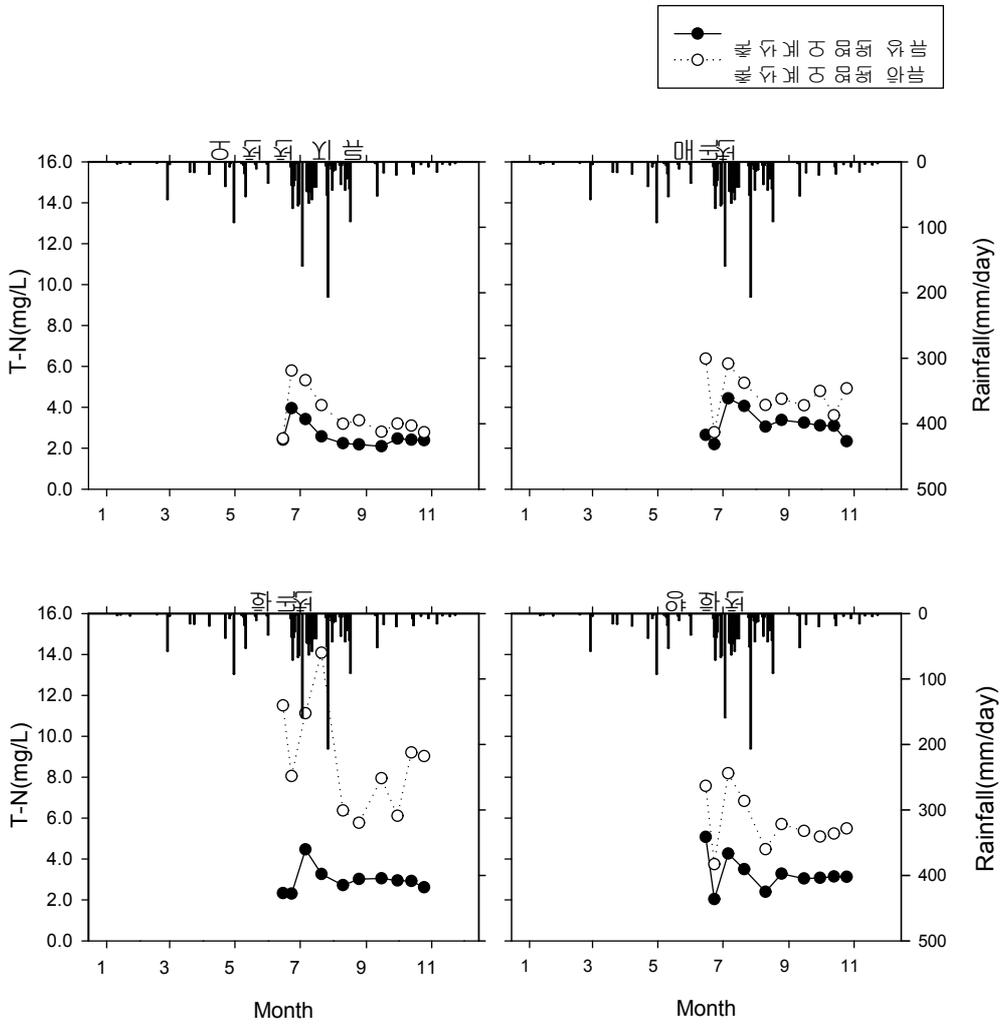
BOD는 살처분이 없었던 오천천 지류와 매곡천에서는 6월 23일 강우 시 축산오염원 하류지역(B2, M2)의 오염도가 급격히 증가하였으나 화곡천(W3)과 양화천(Y2)은 증가폭이 상대적으로 작았다. 모든 조사대상 하천의 상·하류 지점에서 6월 이후 오염도가 낮아지는 경향을 나타내었다(그림 9).



<그림 9> 축산계 오염원 상·하류 수질 비교(BOD)

(2) T-N

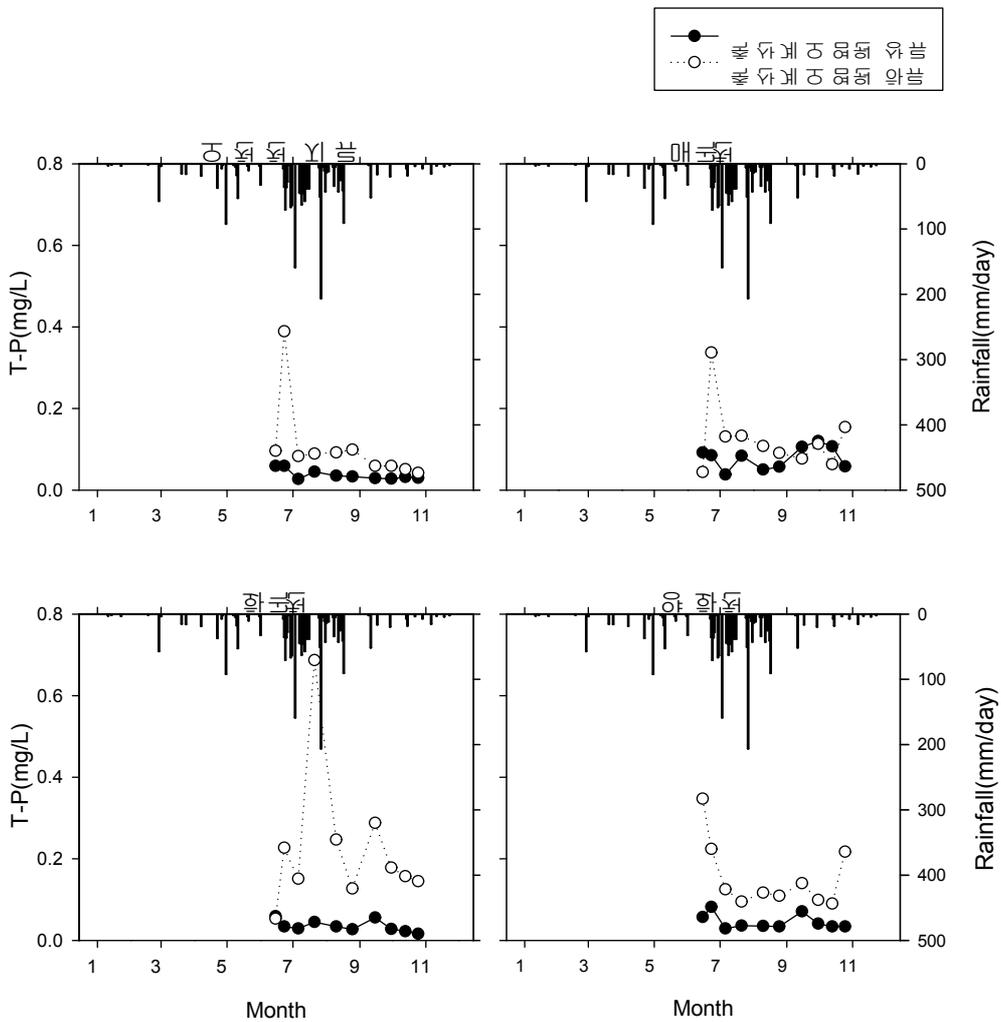
T-N은 4개 지류 모두 축산오염원 상류지역에서 유사한 오염도와 시기별 변화양상을 나타내었으나, 오천천 지류와 매곡천은 축산오염원 상·하류간 변화가 어느 정도 일정하게 유지되면서 유사한 변화 양상을 나타낸 반면, 화곡천과 양화천은 하류간의 오염도 변화폭이 크게 나타났다(그림 10).



<그림 10> 축산계 오염원 상·하류 수질 비교(T-N)

(3) T-P

T-P는 오천천 지류와 매곡천의 강우 시 조사결과를 제외하면 상·하류 모두 비교적 큰 변화가 없는 것으로 나타났으나, 화곡천과 양화천은 강우가 없을 경우에도 급격히 상승하기도 했다. 화곡천은 하류의 오염도변화가 큰 반면, 양화천은 6월 이후 점차 오염도가 감소하여 비교적 안정적인 수질을 나타내었다.



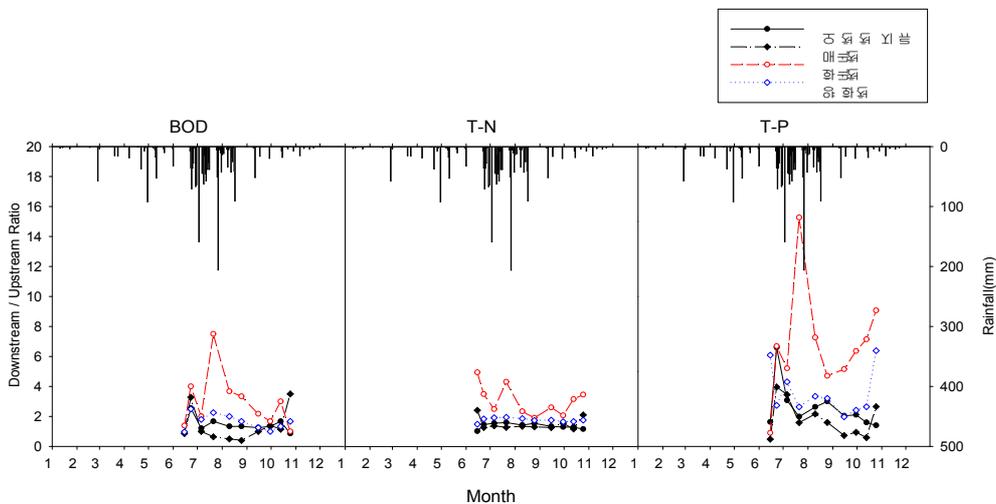
<그림 11> 축산계 오염원 상·하류 수질 비교(T-P)

나. 축산오염원 상·하류 오염도비 변화

단순히 축산오염원 하류지점의 수질오염도 변화를 분석하는 것 보다는 축산오염원 상류지점의 오염도 변화를 반영하기 위해 하류의 수질오염도를 상류의 수질오염도로 나눈 축산오염원 상·하류 오염도비를 산출하였다.

$$\text{축산오염원 상·하류 수질오염도비} = \frac{\text{축산오염원 하류의 수질오염도}}{\text{축산오염원 상류의 수질오염도}}$$

오천천 지류, 매곡천, 양화천은 BOD, T-N, T-P 모두 유사한 변화양상을 나타내었으나 화곡천은 강우가 소강상태를 보인 7월 중순(21일)에 가장 높은 비율을 나타내었다(그림 12).



<그림 12> 축산계 오염원 상·하류 수질오염도비 변화

화곡천이 다른 3개 지류와 차이를 보이는 이유로는 화곡천의 높은 가축 사육밀도와 관계가 있는 것으로 보인다. 화곡천은 하천연장은 매곡천, 양화천과 비슷하지만 유역면적은 3개 하천 중 가장 적으며, 가축 개체수는 다른 지류보다 월등하게 많았다(표 5). 이를 단위유역면적당 사육두수와 배출부하량으로 나타내었을 때, BOD와 T-P는 다른 3개 하천보다 최소 8배 이상, T-N은 6배 이상 나타났다(표 7).

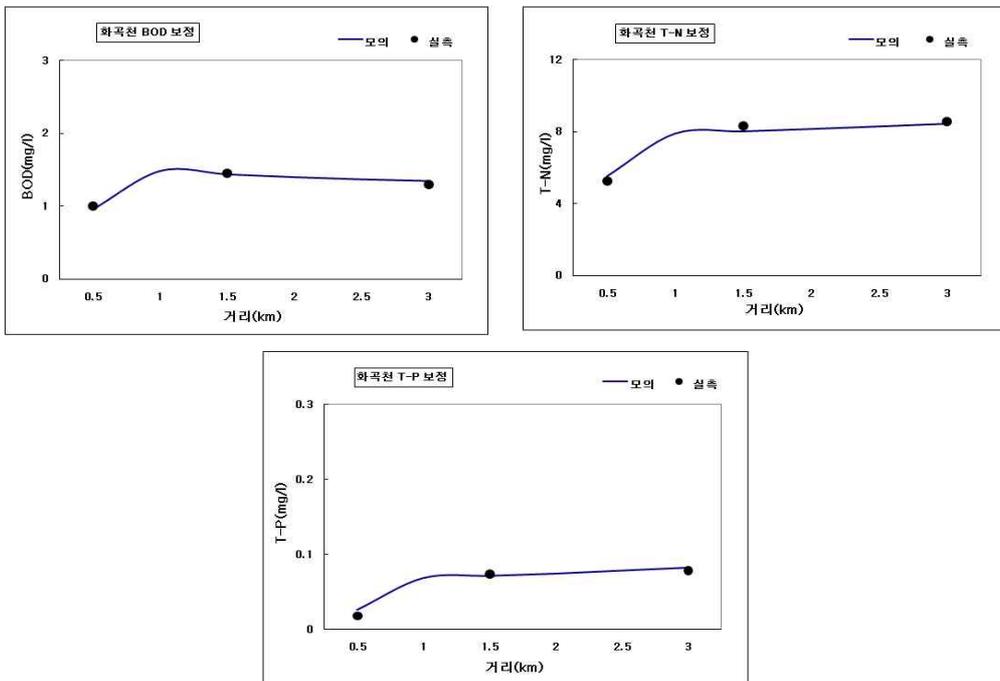
<표 7> 조사구간 내 단위면적당 가축사육두수 및 배출부하량

		오천천 지류	매곡천	화곡천	양화천
조사구간 유역면적(km ²)		0.4	5.3	1.6	3.0
단위면적당 사육두수 (두 · 마리/km ²)	한우	0	110	82	79
	젓소	0	161	637	106
	돼지	3,500	0	18,674	3,683
	개	250	1	0	0
단위면적당 배출부하량 (g/(day · km ²))	BOD	43,600	36,498	609,774	74,431
	T-N	29,715	19,328	290,703	43,369
	T-P	3,713	2,168	55,158	6,200

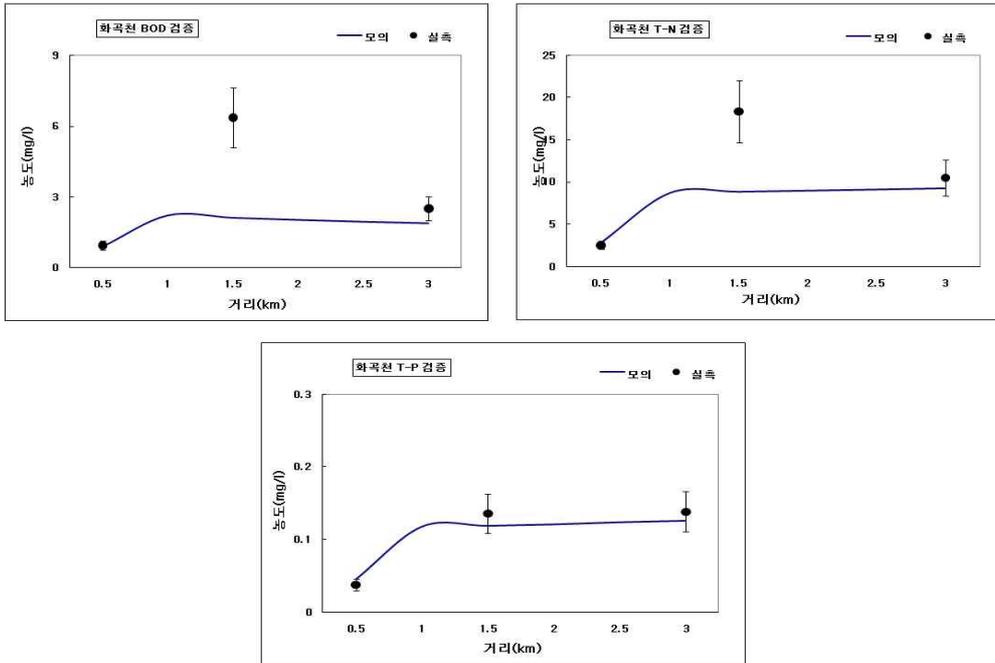
5. 수질예측 결과

가. 수질모형의 보정 및 검증

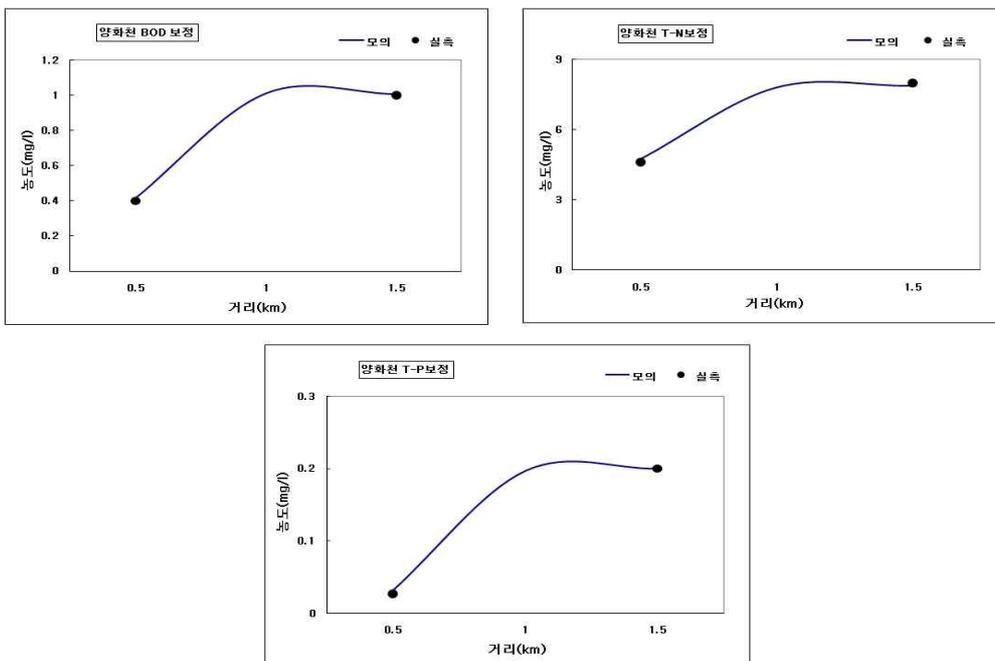
수질모형은 2011년 5월 측정된 현장조사결과로 보정하였고, 6월 자료로 검증하였다(그림13~16).



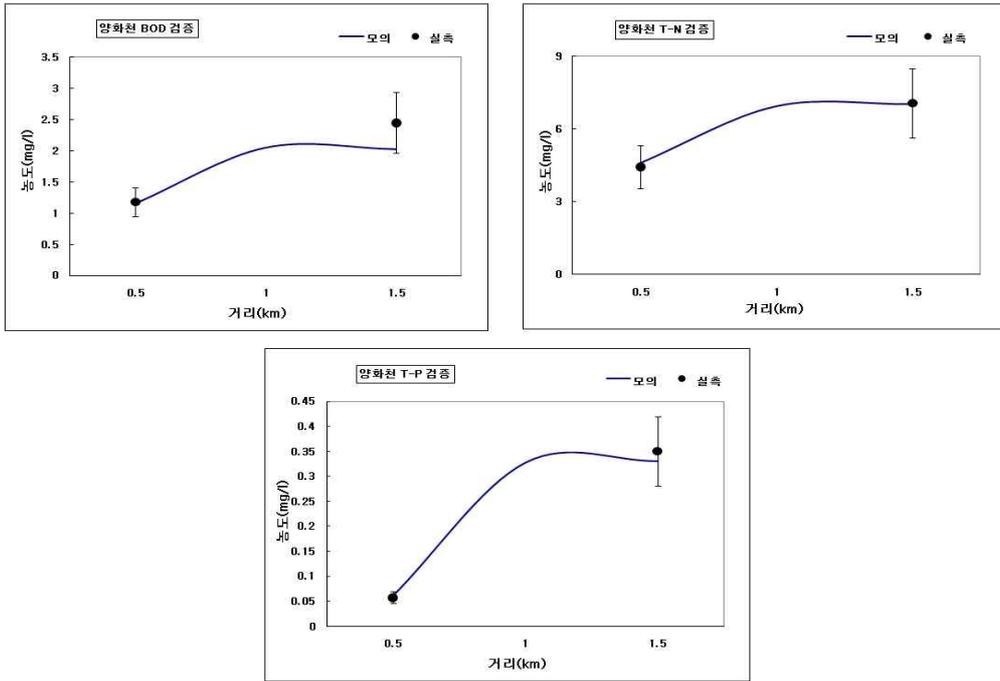
<그림 13> 화곡천 수질예측 보정결과



<그림 14> 화곡천 수질예측 검증결과



<그림 15> 양화천 수질예측 보정결과



<그림 16> 양화천 수질예측 검증결과

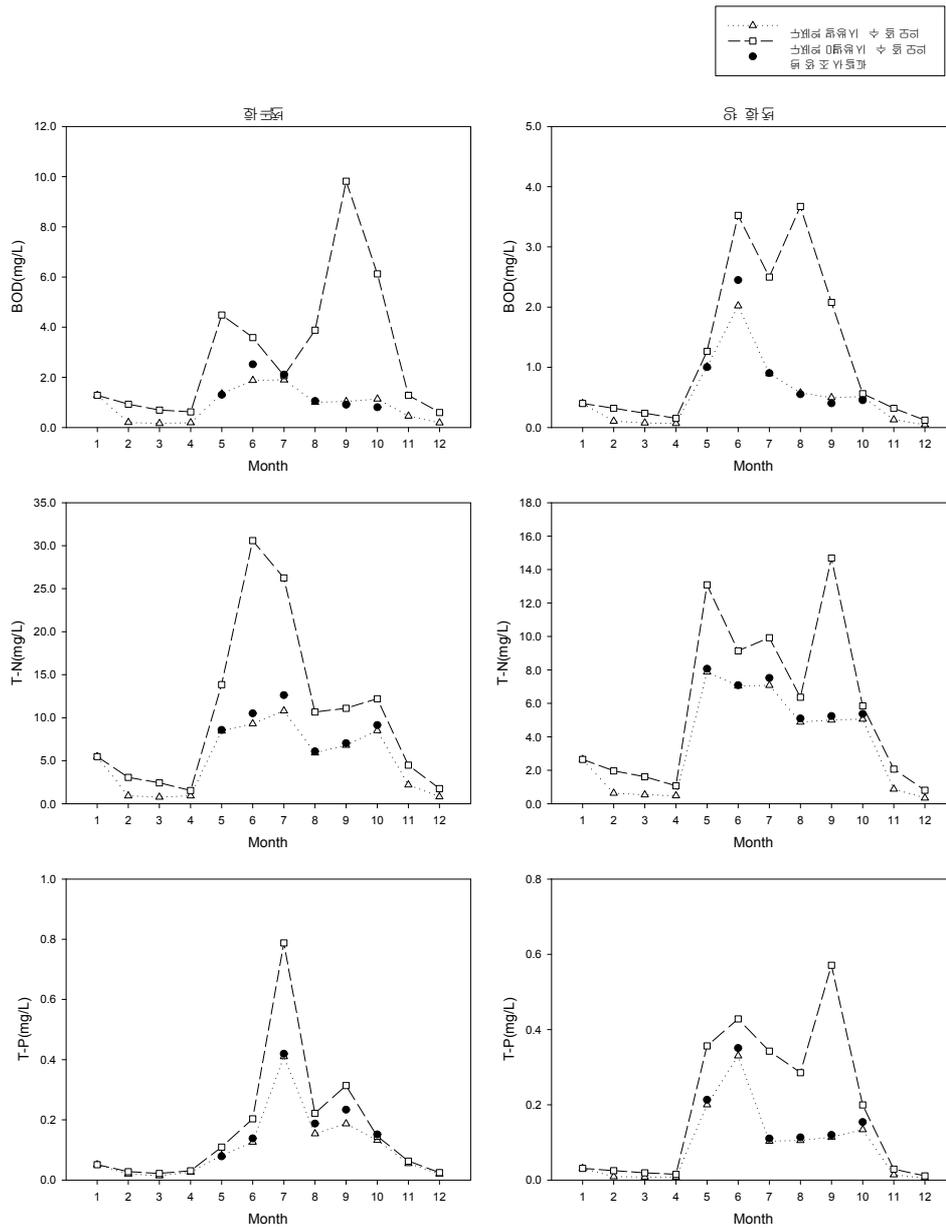
나. 수질모의 결과

2011년 강수량을 바탕으로 SWAT모형을 통해 산출된 유량자료를 사용하였고, 지자체의 구제역 관련 가축사육두수변화 등 축산계 오염원자료, 축산계 이외의 오염원 현황과약을 위한 2009년 전국오염원조사 자료 등을 이용하여 배출부하량을 산출하였다.

구제역으로 인해 가축의 살처분이 실시된 화곡천과 양화천을 대상으로 살처분 및 재입식에 의한 가축사육두수 변화와 살처분이 없었을 경우를 비교하였다. 살처분이 없었을 경우의 사육두수는 2010년말 가축사육두수를 기준으로 월별 변동이 없는 것으로 가정하였다. 각 조건에 따라 월별로 산출된 배출부하량과 유량을 바탕으로 수질을 모의하였고 월별 현장조사결과와 비교하였다. 현장조사결과는 화곡천은 W3지점, 양화천은 Y2지점을 기준으로 하였다

구제역 살처분(2월)으로 인한 사육두수 변화를 반영한 수질모의결과와 현

장조사결과가 매우 비슷하게 나타나 수질 모형이 매우 적절하게 구축된 것으로 나타났다(그림 17).



<그림 17> 구체역 발생 및 미발생 시 수질모의 및 실측결과의 월별 변화

화곡천에서 구제역으로 인한 살처분이 없었을 경우 '11년 연평균 BOD 3.0 mg/L, T-N 10.281 mg/L, T-P 0.167 mg/L로 예상되었으며, 살처분으로 인한 사육두수 변화를 반영했을 경우에는 BOD 0.9 mg/L, T-N 5.067 mg/L, T-P 0.106 mg/L로 예상되어 살처분으로 인해 BOD 2.1 mg/L, T-N 5.214 mg/L, T-P 0.061 mg/L가 감소되는 것으로 예상되었다.

양화천의 경우 구제역으로 인한 살처분이 없었을 경우 '11년 연평균 BOD 1.3 mg/L, T-N 5.769 mg/L, T-P 0.193 mg/L로 예상되었으며, 살처분으로 인한 사육두수 변화를 반영했을 경우에는 BOD 0.5 mg/L, T-N 3.535 mg/L, T-P 0.088 mg/L로 예상되어 살처분으로 인해 BOD 0.8 mg/L, T-N 2.234 mg/L, T-P 0.105 mg/L가 감소되는 것으로 예상되었다(표 8).

<표 8> 수질모의결과(살처분 발생 및 미발생시) 및 현장조사결과

대상하천		구제역 미발생 모의			구제역 발생 모의			현장조사결과		
		BOD	TN	TP	BOD	TN	TP	BOD	TN	TP
화곡천	1월	1.3	5.468	0.051	1.3	5.468	0.051	-	-	-
	2월	0.9	3.063	0.028	0.2	0.918	0.020	-	-	-
	3월	0.7	2.422	0.022	0.2	0.768	0.014	-	-	-
	4월	0.6	1.535	0.031	0.2	0.904	0.026	-	-	-
	5월	4.5	13.842	0.110	1.3	8.451	0.082	1.3	8.557	0.078
	6월	3.6	30.596	0.204	1.9	9.294	0.126	2.5	10.487	0.138
	7월	2.1	26.251	0.788	1.9	10.793	0.410	2.1	12.599	0.419
	8월	3.9	10.664	0.222	1.0	5.902	0.154	1.1	6.065	0.187
	9월	9.8	11.088	0.314	1.0	6.798	0.187	0.9	7.023	0.233
	10월	6.1	12.204	0.146	1.1	8.501	0.132	0.8	9.116	0.151
	11월	1.3	4.482	0.063	0.5	2.193	0.055	-	-	-
	12월	0.6	1.754	0.025	0.2	0.810	0.020	-	-	-
	평균	3.0	10.281	0.167	0.9	5.067	0.106	-	-	-
양화천	1월	0.4	2.648	0.031	0.4	2.648	0.031	-	-	-
	2월	0.3	1.963	0.025	0.1	0.631	0.009	-	-	-
	3월	0.2	1.614	0.019	0.1	0.532	0.008	-	-	-
	4월	0.2	1.074	0.015	0.1	0.475	0.008	-	-	-
	5월	1.3	13.085	0.357	1.0	7.875	0.200	1.0	8.059	0.213
	6월	3.5	9.145	0.428	2.0	7.034	0.330	2.4	7.079	0.350
	7월	2.5	9.925	0.343	0.9	7.076	0.103	0.9	7.507	0.110
	8월	3.7	6.368	0.285	0.6	4.879	0.105	0.6	5.090	0.113
	9월	2.1	14.692	0.571	0.5	5.005	0.114	0.4	5.229	0.120
	10월	0.6	5.846	0.200	0.5	5.057	0.134	0.5	5.364	0.154
	11월	0.3	2.066	0.029	0.1	0.869	0.014	-	-	-
	12월	0.1	0.807	0.011	0.0	0.341	0.005	-	-	-
	평균	1.3	5.769	0.193	0.5	3.535	0.088	-	-	-

6. 축산계 오염원의 관리방안

가. 관리현황

축산계 오염원은 대부분이 퇴비 혹은 액비의 형태로 농경지에 살포되어 강우시 오염물질이 유출되는 비점오염형태로 하천에 영향을 미치고 있으며, 퇴비의 사용량이 점차 증가하고 있어 이로 인한 수질오염에 대한 관리가 필요한 실정이다(표 9). 또한 축사 시설물의 경우에도 일부 축사의 경우 비가림 시설 등의 미비로 오염물질이 유출되기도 한다.

<표 9> 유기질 비료와 퇴비의 생산량 및 판매량(농림수산식품부, 2010)

(단위 : 천톤)

년도	합 계		유기질 비료		퇴비	
	생 산	판 매	생 산	판 매	생 산	판 매
'01	1,687	1,334	117	104	1,570	1,230
'05	3,249	2,641	389	341	2,859	2,300
'06	3,832	3,094	445	364	3,387	2,730
'07	3,960	3,087	553	465	3,407	2,622
'08	4,103	3,042	529	463	3,574	2,579
'09	3,707	3,462	364	360	3,343	3,102

청미천과 양화천의 중·상류지역은 축산계 오염원이 밀집된 지역으로 특히 남한강하류 중권역의 소권역 중 청미천 중·상류지역에 해당하는 청미천상류, 죽산천, 청미천중류 소권역은 BOD, T-N, T-P의 발생부하량과 배출부하량 중 축산계 부하량이 절반이상을 차지하는 것으로 나타나고 있다(한강유역환경청, 2011). 조사대상 유역내 축산시설에서 발생하는 오염물질은 대부분이 자원화의 형태로 처리되고 있으며, 일정 부분만 위탁처리를 하고 있었다. 또한 규제대상 미만 규모의 축사에서는 오염물질이 처리되지 않은 채 하천으로 유입되고 있었다.

나. 관리방안

(1) 가축분뇨 자원화 관련 통계자료의 구축 및 퇴비 사용량 적정화 유도

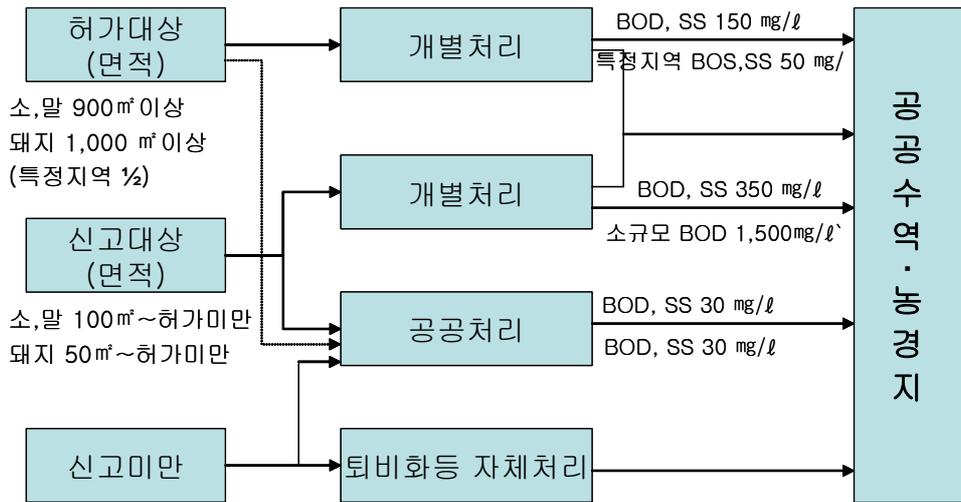
축산을 통해 발생한 가축분뇨를 자원화하여 농경지의 양분으로 활용하는 것은 유용한 방법이지만, 대부분의 농경지에서 사용되는 퇴비의 양이 표준

시비량보다 많이 사용할 경우 문제가 될 수 있다. 적절한 양의 퇴비 사용을 유도하기 위해서는 현재 어느 정도 사용하고 있는지 정확한 통계자료가 구축이 필요하다. 자원화된 축산폐기물이 어떤 경로를 거쳐 어느 경작지에 얼마만큼 사용되는지 현황 파악이 되어야 그 사용량을 관리할 수 있고 자원화를 통해 수질오염을 감소하려는 당초의 목적을 달성할 수 있을 것이다.

대부분의 농민들은 농업생산성 향상을 위해 필요 이상으로 퇴비를 사용하는 경향이 있는데, 관련 통계가 구축되면 그에 따라 퇴비 사용량을 줄이도록 유도하고 퇴비로 인한 환경오염의 홍보 및 교육을 통해 이를 개선해 나가야 할 것이다.

(2) 가축분뇨 처리시설의 방류수 수질기준 강화

『가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률 시행규칙』에 따르면 가축분뇨 처리시설(정화시설)의 방류수 수질기준이 공공처리시설의 경우 'BOD 30 mg/L 이하'이나 그 외의 정화시설의 경우에는 허가대상시설이 'BOD 50 mg/L 이하'(특정지역), 신고대상시설이 'BOD 150 mg/L 이하'(특정지역)으로 기준이 설정되어 있다(그림 18).



<그림 18> 축산농가 관리체계도

※자료출처 : 청미천유역 수질개선대책수립을 위한 연구용역(한강수계관리위원회)

현재 축산시설들의 대부분이 주거밀집지역을 피해 하천 상류의 계곡에 위치해 있는데 이곳의 상류수질(배경농도)이 대부분 BOD 1~2 mg/L 미만인 것을 고려하면 최대 약 100배에 가까운 방류수가 하천으로 유입될 수 있다는 것을 의미한다. 즉 축산시설 인근의 하천의 경우 상시적으로 수질오염의 위험성에 노출되어 있는 상태이므로 정화시설의 방류수 수질기준 강화가 시급하다.

(3) 신고미만 시설에 대한 관리 강화

『가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률 시행규칙』에 따르면 돼지 사육 시설은 면적 50㎡ 미만, 소·젓소·말 사육시설의 경우 100㎡ 미만의 시설에 대해서는 가축분뇨의 처리시설의 설치 의무가 없어 이에 대한 관리가 필요하다.

관련 연구용역에 따르면 청미천 배수구역 내 신고미만 축산농가의 사육 두수가 한우 및 젓소의 경우 38%(15,053두), 돼지의 경우 24%(118,280두)로 나타나고 있고, 신고미만 축산농가의 대부분은 톱밥발효, 퇴비화 등 축산폐수처리시설을 운영하고 있다고 보고되고 있으나, 부속되지 않은 퇴비의 처분, 적정시설에서의 보관미비 등으로 인해 하천 오염을 가중시키는 것으로 보고 되었다(한강수계관리위원회, 2006).

이들 시설에 대해서는 가축분뇨 자원화시설에 대한 설치 지원 및 교육을 실시하고, 처리시설을 운영 중일 경우 운영방법 교육 및 기술습득 지원, 처리시설을 운영하지 않을 경우 각 지자체에서 가축분뇨를 수거하여 공공처리시설로 연계하여 처리하는 것이 필요하다.

(4) 축산업자에 대한 환경교육

가축분뇨에 의한 환경오염을 방지하기 위해 가장 중요한 부분은 축산농가의 수질오염에 대한 관심과 인식이다. 각 지자체의 담당자만으로는 축산농가를 관리하는 것은 한계가 있으므로 축산농가의 관리인들 스스로 가축분뇨에 의한 수질오염의 중요성을 인식하고 바뀌어나가는 것이 우선 되어야 할 것이다. 제도적으로는 이미 '환경친화축산농장 지정제도'가 실시 중이므로, 이 제도를 활용하여 많은 축산농가가 참여할 수 있도록 제도의 혜택을 알리고 확대해 나가야 할 것이다.

IV. 결 론

본 연구는 2010년말에서 2011년 초에 발생했던 대규모 구제역에 의해 살처분으로 가축의 사육두수가 급격히 변화함에 따른 하천의 수질에 미치는 영향을 소유역을 대상으로 살펴보고 적절한 관리방안을 연구하고자 하였다.

조사대상지역에서 구제역 살처분으로 인한 가축사육두수 변화는 화곡천에서 돼지 2만여두(69.5%), 소 90여두(8.4%)가 살처분 되었으며, 양화천(상류지역)에서는 돼지 9천여두(83.0%), 소 2백여두(39.5%)가 살처분되었다. 이에 따라 화곡천의 배출부하량은 BOD 84.9%, T-N, 77.4%, T-P 85.2%가 감소하였고, 양화천은 BOD 63.0%, T-N 64.1%, T-P 67.4%가 감소하였다.

살처분에 의한 사육두수 및 배출부하량 감소에 따른 수질영향을 모의하기 위해 SWAT모형 및 QUALKO2모형을 사용하였다. 수질모의 결과, 화곡천은 살처분 미발생시 BOD 3.0 mg/L, T-N 10.281 mg/L, T-P 0.167 mg/L였으나 살처분시 BOD 0.9 mg/L, T-N 5.067 mg/L, T-P 0.106 mg/L로 나타나 BOD 2.1 mg/L, T-N 5.214 mg/L, T-P 0.061 mg/L가 감소한 것으로 예상되었다. 양화천은 살처분 미발생시 BOD 1.3 mg/L, T-N 5.769 mg/L, T-P 0.193 mg/L였으나, 살처분시 BOD 0.5 mg/L, T-N 3.535 mg/L, T-P 0.088 mg/L로 나타나 BOD 0.8 mg/L, T-N 2.234 mg/L, T-P 0.105 mg/L가 감소하는 것으로 예상되었다.

축산계 오염원의 관리방안으로는 가축분뇨 자원화 관련 통계자료 구축 및 퇴비 사용량 적정화 유도, 가축분뇨 처리시설의 방류수 수질기준 강화, 신고미만 시설에 대한 관리 강화, 축산업자에 대한 환경교육 실시 등이 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

- 국립환경과학원. 2011. 2009년 전국오염원조사 보고서. 국립환경과학원
 기상청 홈페이지(<http://kma.go.kr>)
- 김건하, 김영철, 이동률, 정하영, 여중현. 2003. 우리나라 농지-임야유역으로부터
 터의 강우유출수 EMC 부하 분석 및 추정. 대한환경공학회지. 25(6). pp.
 760-770.
- 김성수, 김종석, 방기연, 권은미, 정옥진. 2002. 경안천 유역의 강우사상별 비
 점오염원 유출특성 및 원단위 조사. 대한환경공학회지. 24(11). pp.
 2019-2027
- 농림수산식품부 홈페이지(<http://구제역.kr>)
- 농림수산식품부. 2010. 퇴비를 품질등급 표시판매 및 등급별 차등지원(보도자
 료). 농림수산식품부
- 박연희, 박석순. 2004. 강우강도에 따른 토지이용별 비점오염원 부하량 산정
 함수 연구. 대한환경공학회지. 26(10). pp. 1070-1078.
- 안성시. 2010. 제12회 안성통계연보. 안성시
- 이천시. 2010. 제50회 이천통계연보(2009년기준). 이천시
- 이형진, 공동수, 김상훈, 신기식, 박지형, 김병익, 김성미, 장승현, 천세억.
 2007. 남한강수계 저수기 수질변동 특성에 관한 연구, 한국물환경학회
 지. 23(6). pp. 889-896
- 한강수계관리위원회. 청미천 유역 수질개선대책수립을 위한 연구용역 보고
 서. 2006. 한강수계관리위원회.
- 한강유역환경청. 남한강하류 중권역 물환경관리 연동계획(2008-2012). 2011.
 한강유역환경청