

기술노트

수질오염총량관리제 시행에 따른 영산강·섬진강수계 단위유역의 수질 현황

박재홍[†] · 류덕희* · 정동일**

영산강유역환경청

*국립환경과학원 한강물환경연구소

**국립환경과학원 물환경연구부

Water Quality Status of the Unit Watersheds in the Yeongsang / Seomjin River Basin since the Management of Total Maximum Daily Loads

Jae Hong Park[†] · Doug Hee Rhew* · Dong Il Jung**

Measure and Analysis Division, Yeongsan River Basin Environmental Office

*Han River Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research

**Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research

(Received 4 September 2011, Revised 6 September 2011, Accepted 6 September 2011)

Abstract

The results of investigation on the water quality of the unit watersheds in the Yeongsang/Seomjin River indicate that BOD₅, SS, T-P decrease in most of the unit watersheds. However, COD_{Mn} and T-N increase since the Total Maximum Daily Loads (TMDLs). It is thought that COD_{Mn}, which is included non-biodegradable matters, is difficult to decrease only using by conventional biological treatment facilities and T-N is affected by non-point source, etc. The results of assessment on 3 years BOD₅ indicate that most of the unit watersheds were being improved except Yeongbon A, Seombon C and Yocheon B. In addition, it was found that T-P were also being improved except Yocheon B and Hwangryeong A. Consequently, water qualities of the unit watersheds have been improved in many cases since the TMDLs.

keywords : BOD₅, Target water quality, T-P, Water quality assessment

1. 서론

수질오염총량제는 토지이용 제한과 농도규제 방식에서 하천의 환경용량을 고려하여 단위유역별 배출부하량을 목표수질의 달성이 가능한 허용총량 이하로 관리하는 유역관리 제도이다(박재홍 등, 2009). 그동안 각종 토지이용 규제와 환경기초시설의 확충으로 공공수역의 수질이 점차 개선되어 왔으나 만족할 만한 성과를 이루지 못했다(국립환경과학원, 2008). 이에 정부는 1998년 이후 4대강 물관리종합대책을 수립하면서 배출허용기준으로 개별 배출원을 제어하는 종래의 농도규제방식에 더하여 유역의 배출량을 총량적으로 관리하는 총량관리제가 도입하게 되었다. 1999년 한강수계법을 비롯하여 2002년 낙동강 등 3대강수계 물관리 및 주민지원 등에 관한 법률이 제정되면서 수질오염총량관리제 시행근거가 마련되었다.

오염총량관리 시행초기 수질오염총량관리계획 수립에 있어 필요한 단위유역별 유량 및 수질자료 부족으로 할당량 산정의 불확실성이 증가하는 등의 문제가 제기되었다. 이를 계기로 2004년 8월부터 목표수질을 설정해야 하는 수계 구

간 및 그 영향을 받는 유역의 하류지점 목표수질지점으로 선정하여 특정 요일 및 시기가 중복되지 않도록 8일 간격으로 수질변동을 측정하고 단위유역의 목표수질 초과 여부를 확인하도록 규정하게 되었다(국립환경과학원, 2008).

1단계 수질오염총량관리제는 2010년 완료되었는데 그동안 단위유역의 할당부하량을 만족하기 위하여 다양한 계획들이 추진되었고(박재홍, 2008) 이에 대한 검증이 진행되고 있다. 할당부하량을 초과할 경우 지자체의 개발사업 추진이 제한을 받기 때문에 단위유역별 할당부하량은 모두 만족하였다.

그동안 제도운영상에 나타난 보완점을 개선하고 보다 발전된 수질오염총량제의 시행을 위해서 다양한 연구들이 수행되어 왔다(김영일과 이상진, 2006; 박준대 등, 2008, 2011; 박준대와 오승영, 2010; 조용진 등, 2003). 한편, 계획기간이 종료되는 시점에 단위유역별 평가수질이 설정된 목표수질을 만족할 수 있을 것인지가 또 하나의 관심대상일 것이다. 왜냐하면 수질오염총량제는 단위유역의 목표수질을 달성·유지할 수 있도록 단위유역의 배출부하량을 할당부하량 이내로 관리하는 제도이나 궁극적으로는 수질의 개선 목적도 있기 때문이다. 그럼에도 불구하고 단위유역의 목표수질 달성여부에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

[†] To whom correspondence should be addressed. jhong@korea.ac.kr

따라서 본 연구는 1단계 수질오염총량관리제가 완료된 현재 영산강·섬진강수계 23개 단위유역 중 시행계획 수립 대상 단위유역의 수질현황을 살펴보고, 1, 2단계 관리대상 물질인 BOD₅, T-P의 수질 현황을 살펴보고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 시행계획수립대상 단위유역

Fig. 1의 영산강·섬진강수계 총 23개 단위유역(국립환경과학원, 2009) 중 1단계 계획수립 기간의 시행계획 수립대상 지역은 2005년 시행계획을 수립하여야 하는 광주광역시, 나주시, 순천시, 광양시, 남원시, 정읍시로 영본A, 영본B, 영본C, 영본D, 황룡A, 섬본D, 섬본E, 오수A, 섬본C, 요천B의 10개 단위유역이 해당된다. 2006년 시행계획을 수립하여야 하는 군 지역은 담양군, 화순군으로 영본A, 영본B, 영본C, 황룡A 4개 단위유역이 해당된다. 2008년 시행계획을 수립하여야 하는 기타 군 지역은 장성군, 함평군, 영암군, 무안군, 곡성군, 구례군, 하동군, 순창군, 임실군, 장수군으로 황룡A, 영본B, 영본C, 영본D, 섬본D, 섬본E, 오수A, 섬본C 8개 단위유역이 해당되는데 모든 단위유역이

2005년 시행되는 단위유역에 해당되며 2006년과 2008년 시행지역 중 새롭게 추가되는 단위유역은 없다. 따라서 시행계획수립대상 10개 단위유역을 대상으로 각 단위유역의 말단에서 8일 간격으로 측정된 연간 30회 이상 수질자료를 산술평균하여 BOD₅, SS, COD_{Mn}, T-N, T-P 항목에 대한 연도별 수질 변화추이를 살펴보았다.

2.2. 관리대상 오염물질의 수질 평가

수질오염총량관리제에서 단위유역의 수질평가는 단위유역말단의 목표수질지점별로 기본방침(환경부, 2002a, 2002b, 2002c) 및 수질환경보전법 제7조 규정에 의한 수질오염공정시험방법에 의하여 측정된 연간 30회 이상 측정된 자료를 낙동강수계 물관리 및 주민지원 등에 관한 법률 시행규칙 별표3 제4호, 금강수계 물관리 및 주민지원 등에 관한 법률 시행규칙 별표2 제4호, 영산강·섬진강수계 물관리 및 주민지원 등에 관한 법률 시행규칙 별표2 제4호 규정에 따라 식 (1)~(3)에 의해 평가하여 수질변동을 파악하였다(환경부, 2002d, 2002e, 2002f).

$$\text{평균수질} = e(\text{변환평균수질} + \text{변환분산}/2) \tag{1}$$

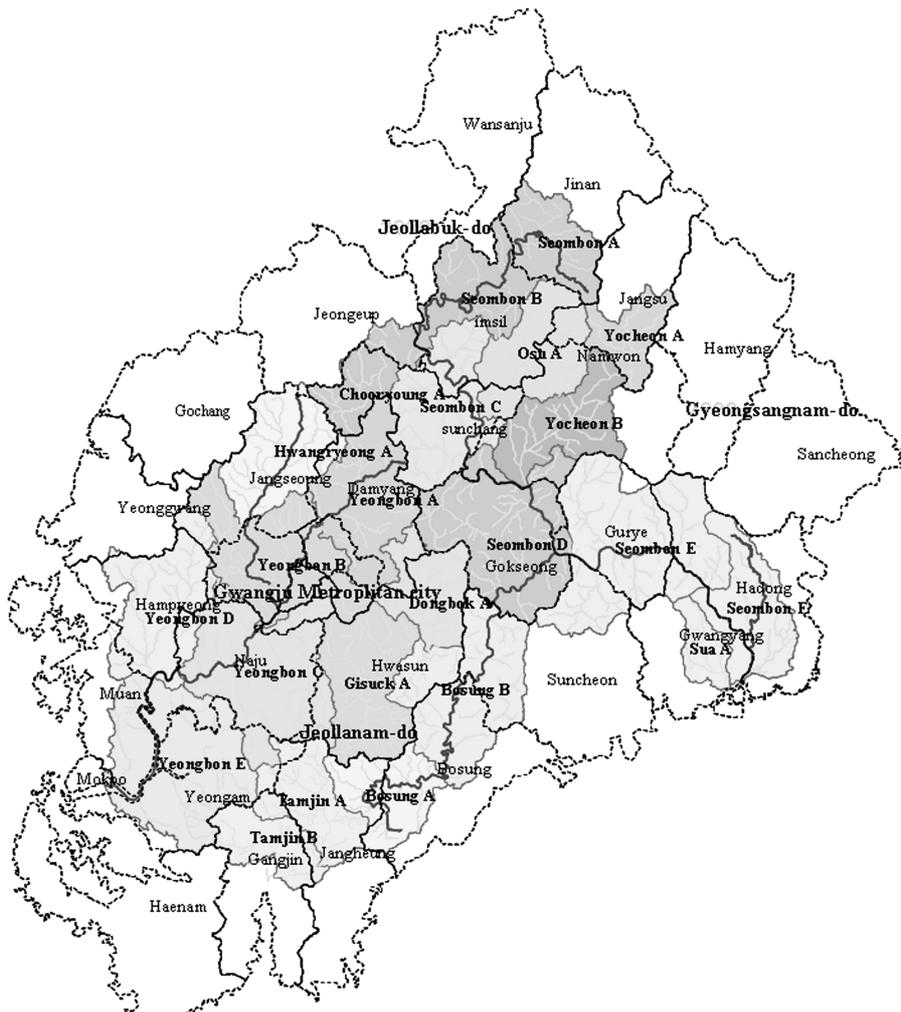


Fig. 1. The Yeongsang/seomjin River watersheds and target water quality stations.

$$\text{변환평균수질} = \{\ln(\text{측정수질}) + \ln(\text{측정수질}) + \dots\} / \text{측정회수} \quad (2)$$

$$\text{변환분산} = \{\ln(\text{측정수질}) - \text{변환평균수질}\}^2 + \dots / (\text{측정회수} - 1) \quad (3)$$

식 (1)~(3)의 수질평가 방법으로 평가된 3년간의 2회 수질을 분석하여 단위유역의 평가수질이 2회 연속 목표수질보다 나은 경우 시행계획수립대상 단위유역에서 제외시켰다. 즉 시행계획수립대상 단위유역에서 제외되었다는 것은 수질이 개선되었거나 목표수질 이내로 수질이 안정적으로 유지되고 있다는 것을 의미한다. 따라서 수질오염총량관리제에서 적용되는 수질평가방법을 이용하여 1, 2단계 대상 물질인 BOD₅와 T-P의 수질개선 추이를 살펴보았다. 또한, 수질오염총량관리제에서 단위유역의 목표수질은 하천의 유량조건(저수기, 평수기)과 무관하게 달성하여야 하는 수질이다. 즉 어떠한 환경여건(강우 등)에서도 점·비점오염원 저감시설 등을 통해서 반드시 목표수질을 달성해야 함으로 단위유역의 수질개선현황을 논할 때 수문자료와의 상관성은 배제된다. 따라서 본 연구에서도 수질변화 추이 및 수질개선현황 평가시 유량과의 상관성은 배제하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 시행계획수립대상 단위유역의 연도별 수질

3.1.1. BOD₅ 수질추이

불확실성을 포함하고 있는 수질 측정자료를 정량화하기 위하여 통계학적 기법이 사용된다. 자료가 정규확률 분포를 이루고 있다는 가정 하에 일반적으로 널리 사용되고 있는 통계인자는 Mean, Median, Mode, 특정 농도의 초과 또는 비초과 확률, 표준편차, % 변동계수(coefficient of variation: Cov) 등이다(김영철 등, 2003).

1단계 수질오염총량관리제의 시행계획수립 대상 단위유역별 BOD₅의 수질측정값, Mean 농도, 표준편차 값을 Table 1에 제시하였는데 영산강·섬진강수계의 경우 최초 시행계획수립이 2005년 중반인 관계로 이 시점을 기준으로 수질오염총량제 수립 전·후의 수질추이를 살펴보았다.

시행계획 추진 전·후의 단위유역별 BOD₅ 수질추이를 살펴보면 수질오염총량제의 추진 이후 영본B, 영본C, 영본D 단위유역의 수질개선 추이가 뚜렷하게 나타나고 있으며 이중 영본B 단위유역은 2005년 평균 8.5 mg/L에서 2010년 평균 5.0 mg/L로 약 41%의 수질개선이 이루어졌다. 영본B

Table 1. Summarized statistics for the annual BOD₅ of unit watersheds

Unit watershed	Statistics	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Mean
Yeongbon A	Avg.	3.4	2.9	2.7	3.1	2.6	3.6	3.1	3.1
	SD	2.2	1.6	1.6	2.0	1.3	2.2	1.2	0.3
	n	44	40	40	45	50	50	49	45
Yeongbon B	Avg.	8.7	8.5	7.7	8.7	5.9	6.0	5.0	7.2
	SD	4.3	3	2.7	3.6	3.0	2.8	1.4	1.4
	n	44	40	40	45	50	50	49	45
Yeongbon C	Avg.	7.5	6.9	5.4	7.7	5.7	5.5	4.5	6.2
	SD	3.7	2.7	2.3	4.6	3.1	2.4	1.3	1.1
	n	43	42	38	44	43	39	45	42
Yeongbon D	Avg.	5.6	5.9	4.4	5.6	3.6	4.4	4.2	4.8
	SD	2.4	2.2	1.1	2.0	1.5	1.8	1.3	0.8
	n	43	42	37	44	43	39	44	42
Hwangryeong A	Avg.	3.6	2.1	2.3	2.2	2.5	2.3	2.3	2.5
	SD	2.2	2.5	1.3	1.1	1.5	1.2	0.7	0.5
	n	44	39	40	45	47	43	44	43
Seombon C	Avg.	1.9	1.3	1.4	1.5	1.6	1.9	2.1	1.7
	SD	1.2	0.8	0.6	0.8	1.0	1.5	0.9	0.3
	n	43	43	40	43	44	39	44	42
Seombon D	Avg.	1.7	1.5	1.5	1.3	1.4	1.7	1.6	1.5
	SD	1.1	0.8	0.7	0.5	0.7	0.8	1.2	0.1
	n	44	39	38	43	44	41	42	42
Seombon E	Avg.	1.6	1.4	1.3	1.3	1.5	1.5	1.4	1.4
	SD	1.1	0.9	0.6	0.6	0.9	0.7	0.5	0.0
	n	44	40	38	43	44	41	42	42
Yocheon B	Avg.	1.7	1.2	1.5	1.7	1.6	2.3	1.8	1.7
	SD	1	0.8	0.8	1.1	0.9	1.5	0.7	0.1
	n	43	43	39	43	44	39	44	44
Osu A	Avg.	2.0	1.3	1.5	1.5	1.7	1.5	1.6	1.6
	SD	1.2	0.9	1.2	1.1	1.1	1.2	0.7	0.1
	n	43	43	41	43	44	39	44	42

단위유역의 수질은 광주광역시에 위치한 광주하수처리장의 방류수질에 영향을 많이 받는 단위유역으로 2008년 고도처리시설 도입과 광주하수처리장의 지속적인 수질개선 노력 등으로 수질개선이 이루어진 것으로 판단된다. 영본C, 영본D 단위유역은 상류의 영본B 단위유역 수질이 개선됨에 따라 직접적인 영향을 받는 것으로 판단된다. 한편 요천B, 섬본C 단위유역은 BOD₅가 다소 증가하는 경향을 나타내고 있으며 그 밖의 단위유역은 시행계획 추진 전·후의 수질변동이 거의 없는 것으로 나타났다. 섬본C, 요천B의 수질이 개선되지 않는 이유는 박재홍 등(2009)의 연구에서 제시된 바와 같이 개발과 삭감계획의 이행실적을 살펴보면 계획기간의 초반기에 삭감계획이 수립되지 않았거나(주로 후반기에 집중), 삭감량에 비해 개발량이 다소 많은 이유에 기인하는 것으로 판단된다.

한편, 외국의 연구결과에 따르면 하천의 수질자료 값은 로그-정규 확률분포를 이루는 것으로 보고되고 있다(농업기반공사, 2002). Fig. 2는 시행계획수립 대상 단위유역 중 영본B의 2005~2010년 동안 측정된 BOD₅를 누적 확률지에 도시하였다. Fig. 2에 나타난 것처럼 로그 확률지에 수질자료를 나타낸 결과 대부분의 자료가 직선 형태를 나타

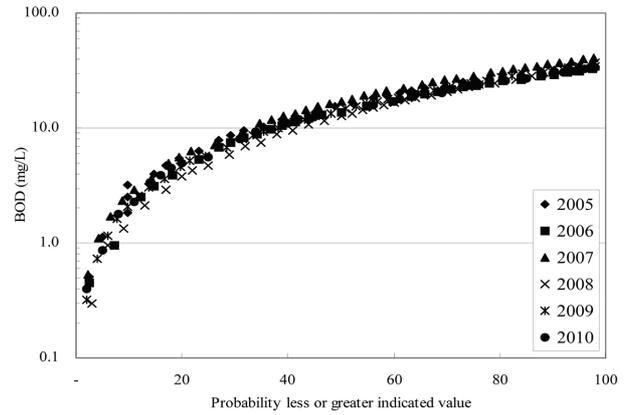


Fig. 2. Cumulative probability distribution of BOD₅ in Yeongbon B (2005 ~ 2010).

내고 있다. 영본B 이외의 단위유역의 경우도 동일한 수질분포 양상을 나타내었다.

3.1.2. SS 수질추이

시행계획수립 대상 단위유역별 SS의 수질 특성은 Table 2에 제시된 바와 같이 대부분의 단위유역에서 연도별로 증

Table 2. Summarized statistics for the annual SS of unit watersheds

Unit watershed	Statistics	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Mean
Yeongbon A	Avg.	21.9	15.1	14.0	10.8	11.6	9.4	11.0	13.4
	SD	34.0	20.7	23.1	7.6	7.5	5.4	6.9	1.5
	n	44	40	40	45	50	50	49	45
Yeongbon B	Avg.	33.9	22.5	26.5	22.2	24.1	14.9	24.6	24.1
	SD	27.7	24.2	45.2	16.5	18.8	7.2	12.8	5.2
	n	44	40	40	45	50	50	49	45
Yeongbon C	Avg.	30.3	20.3	20.8	26.6	22.0	22.9	44.7	26.8
	SD	23	21	13	22.2	12.5	12.4	31.6	8.0
	n	43	42	38	44	43	38	44	42
Yeongbon D	Avg.	62.9	42.6	32.6	21.5	19.6	19.3	31.5	32.9
	SD	40.4	30.6	31.1	12.8	17.1	7.6	18.2	14.6
	n	43	42	37	44	43	38	43	41
Hwangryeong A	Avg.	12.4	9.7	9.9	7.6	9.5	6.6	6.1	8.8
	SD	8.7	9.6	8.3	4.4	6.4	5.8	4.0	2.0
	n	44	39	40	45	47	42	43	43
Seombon C	Avg.	8	8.9	16.6	9.0	7.2	12.6	11.7	10.6
	SD	8.5	7.8	25.1	8.9	6.8	24.4	14.3	3.0
	n	43	43	40	43	44	38	43	42
Seombon D	Avg.	11.1	9.6	9.7	5.8	8.7	6.8	6.8	8.4
	SD	17.9	15.4	23.3	4.6	11.6	6.4	7.6	1.8
	n	44	39	38	43	44	40	41	41
Seombon E	Avg.	10	7.1	10.4	5.4	5.5	5.7	6.9	7.3
	SD	14.2	7.9	17.7	3.8	4.0	7.1	7.3	1.9
	n	44	40	38	43	44	40	41	41
Yocheon B	Avg.	5.8	5.3	11.1	8.1	7.8	12.6	8.9	8.5
	SD	5.8	3.7	21.5	10.4	7.2	21.1	9.7	2.4
	n	43	43	39	43	44	38	43	41
Osu A	Avg.	7.1	10.8	23.8	11.4	13.6	17.1	9.6	13.3
	SD	9.1	13.9	35.3	13.6	29.1	47.3	12.4	5.2
	n	43	43	41	43	44	38	43	42

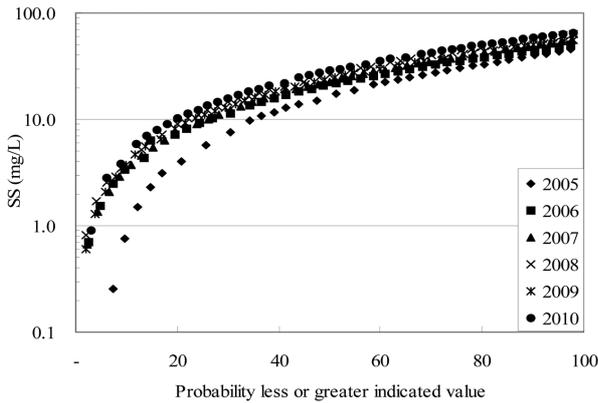


Fig. 3. Cumulative probability distribution of SS in Yeongbon B (2005 ~ 2010).

가와 감소가 반복적으로 나타나고 있으며 SS가 뚜렷하게 개선되거나 악화된 단위유역은 없는 것으로 판단된다. 영본 A, 영본D, 황룡A, 섬본D, 섬본E 단위유역은 SS가 다소 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 영본B, 섬본C, 오수A 단위유역은 연도별로 증감되는 경향은 있으나 2005년과 2010년의 수질변화는 거의 없는 것으로 판단된다. 한편, 요천B

단위유역은 다소 증가하는 추이를 나타내고 있고 영본C 단위유역은 2009년까지 증감을 반복하다 2010년에 연평균 44.7 mg/L로 증가되었는데 이는 4월 및 8~9월의 측정자료 중 일부가 81.2~153.9 mg/L 범위로 다소 높게 분석되어 전체적으로 연평균 SS 농도가 높게 평가된 것으로 판단된다.

Fig. 3은 시행계획수립 대상 단위유역 중 영본B의 SS를 누적 확률지에 도시하였다. Fig. 3에 나타난 것처럼 로그 확률지에 수질자료를 나타낸 결과 대부분의 자료가 직선 형태를 나타내고 있어 수질자료를 Log Normal 분포로 나타내는데 무리가 없을 것으로 판단된다. 영본B 이외의 단위유역의 경우도 동일한 수질 분포 양상을 나타내었다.

3.1.3. COD_{Mn} 수질추이

단위유역별 COD_{Mn}의 수질측정값을 Table 3에 제시하였는데 수질오염총량제 추진 이후에 COD_{Mn}의 수질 개선을 나타내는 단위유역은 없는 것으로 판단된다. 연도별로 수질 증감은 나타나고 있으나 2005년과 2010년 COD_{Mn}의 수질 변화가 발생하지 않은 영본D, 황룡A, 섬본E를 제외한 단위유역은 COD_{Mn}이 증가폭은 작지만 지속적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Table 3. Summarized statistics for the annual COD_{Mn} of unit watersheds

Unit watershed	Statistics	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Mean
Yeongbon A	Avg.	6.5	5.8	5.9	7.1	7.2	6.9	6.4	6.5
	SD	2.8	1.8	2.6	2.7	2.8	4.0	1.9	0.5
	n	41	40	40	45	50	50	49	45
Yeongbon B	Avg.	8.6	8.1	7.8	9.7	9.3	8.5	8.4	8.6
	SD	2.4	1.4	2.8	3.4	3.6	2.6	1.9	0.6
	n	41	40	40	45	50	50	49	45
Yeongbon C	Avg.	8.6	7.9	7.4	10.7	9.8	8.8	8.3	8.8
	SD	2.7	1.7	3	4.4	4.3	2.8	1.8	1.0
	n	41	41	38	44	43	38	44	42
Yeongbon D	Avg.	8.2	8.3	7.0	9.4	8.6	8.3	7.9	8.2
	SD	2.3	1.7	2.4	2.6	2.7	2.5	1.6	0.7
	n	41	41	37	44	43	38	43	41
Hwangryeong A	Avg.	5.5	4.8	4.9	5.4	5.4	5.3	4.9	5.2
	SD	2.1	2.3	2	1.7	1.5	1.4	1.1	0.3
	n	41	39	40	45	47	42	43	42
Seombon C	Avg.	4.2	3.6	4.4	4.8	4.3	4.7	4.8	4.4
	SD	1.4	1.3	1.9	1.8	1.4	1.8	1.4	0.4
	n	41	41	40	43	44	38	43	41
Seombon D	Avg.	4.0	3.9	3.9	4.4	4.2	4.3	4.3	4.1
	SD	1.5	1.6	1.9	1.6	1.3	1.3	1.0	0.2
	n	41	39	38	43	44	40	41	41
Seombon E	Avg.	3.6	3.5	3.2	3.8	3.8	3.5	3.7	3.6
	SD	1.4	1.3	1.3	1.4	1.2	1.0	0.9	0.2
	n	41	40	38	43	44	40	41	42
Yocheon B	Avg.	4.2	3.6	4.3	5.0	4.8	5.4	5.4	4.7
	SD	1.6	1.3	1.6	1.6	1.4	1.7	1.3	0.6
	n	41	41	39	43	44	38	43	41
Osu A	Avg.	4.3	3.7	4.4	4.7	4.4	4.4	4.6	4.4
	SD	1.4	1.6	2.5	1.7	1.8	1.8	1.6	0.3
	n	41	41	41	43	44	38	43	42

COD_{Mn}의 수질개선이 나타나지 않는 이유는 수처리시설의 대부분이 생물학적 처리공정에 기반을 두고 있기 때문에 유기물 중 BOD는 개선되더라도 난분해성 성분을 반영하는 COD_{Mn}은 기존처리시설 만으로는 수질개선에 한계를 나타내고 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 수질오염총량제에서 삭감시설을 확충하더라도 난분해성 유기물 처리시설을 갖추지 않는 한 COD_{Mn}의 수질개선은 기대하기 어려울 것으로 판단된다.

하수처리율의 증가, 고도처리공법의 도입 등으로 분해 가능한 유기물의 처리가 용이해진 반면 난분해성 유기물이 상대적으로 증가하여 수생태계에서 BOD는 감소하고 COD는 증가하는 경향을 나타내고 있는 실정이다. 따라서 향후 유기물의 관리항목으로 COD의 도입이 필요시 되며 수질오염총량관리제에서도 관리대상항목으로 COD를 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 단위유역별 COD_{Mn}과 BOD₅의 수질변화추이를

비교하여 제시하였는데 BOD₅의 수질추이와는 무관하게 대부분 COD_{Mn}의 수질은 증가하고 있다.

Fig. 5는 시행계획수립 대상 단위유역 중 영본B의 COD_{Mn}을 누적 확률지에 도시하였다. Fig. 5에 나타난 것처럼 로그 확률지에 수질자료를 나타낸 결과 대부분의 자료가 직선 형태를 나타내고 있다. 영본B 이외의 단위유역의 경우도 동일한 수질 분포 양상을 나타내었다.

3.1.4. T-N 수질추이

단위유역별 T-N 수질추이를 살펴보면 수질오염총량제의 추진 이후 영본B, 영본C, 섬본E, 영본D, 섬본D, 영본A의 순으로 40.0~10.4%의 수질개선 경향을 나타내었으며 황룡A 단위유역은 약 8%의 수질개선이 이루어져 2005년과 2010년의 수질에 큰 변화는 없는 것으로 나타났다. 한편, 요천B, 오수A, 섬본C 단위유역은 T-N이 증가하는 추이를 보이고 있으며 이중 요천B 단위유역은 가장 큰 T-N 증가 추이

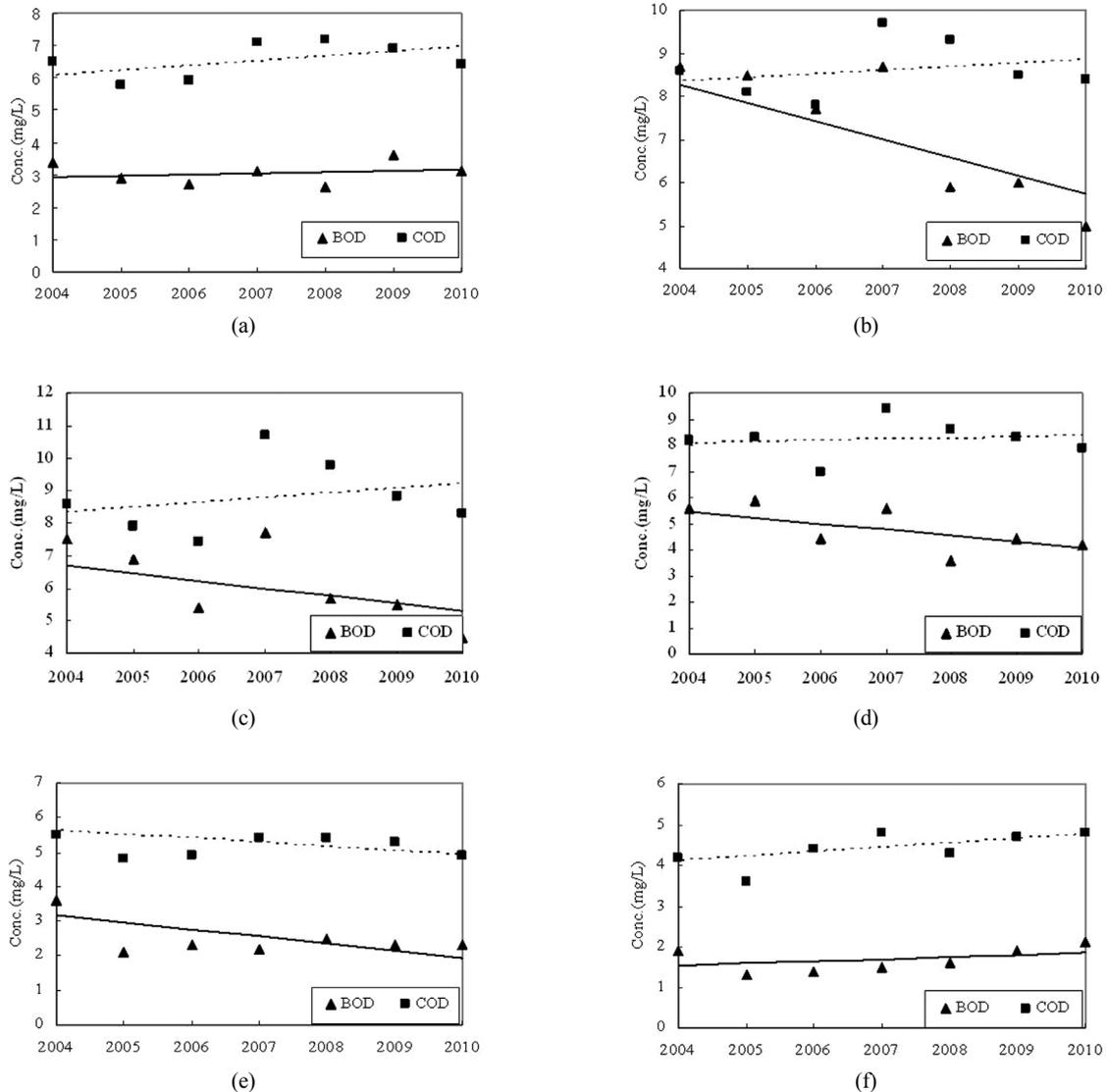


Fig. 4. Relationships between BOD₅ and COD_{Mn} of each Unit Watersheds at (a) Yeongbon A, (b) Yeongbon B, (c) Yeongbon C, (d) Yeongbon D, (e) Hwangryeong A, (f) Seombon C, (g) Seombon D, (h) Seombon E, (i) Yocheon B, (j) Osu A.

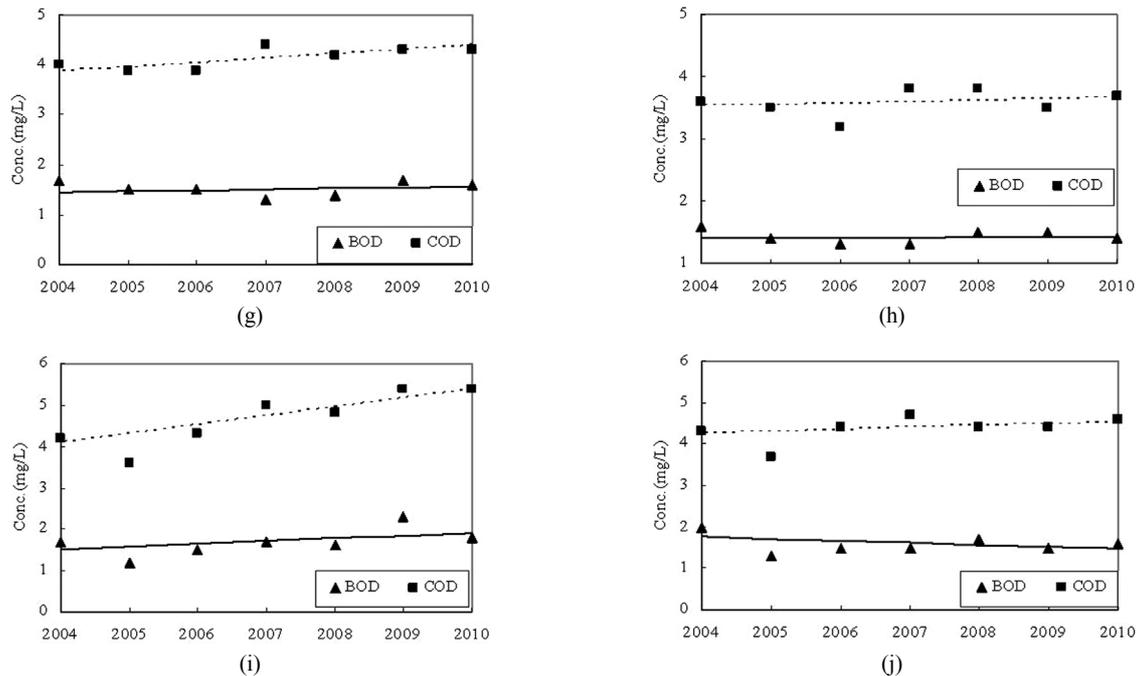


Fig. 4. Relationships between BOD₅ and COD_{Mn} of each Unit Watersheds at (a) Yeongbon A, (b) Yeongbon B, (c) Yeongbon C, (d) Yeongbon D, (e) Hwangryeong A, (f) Seombon C, (g) Seombon D, (h) Seombon E, (i) Yocheon B, (j) Osu A. (continued)

Table 4. Summarized statistics for the annual T-N of unit watersheds

Unit watershed	Statistics	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Mean
Yeongbon A	Avg.	2.373	2.769	2.268	2.241	2.460	2.135	2.482	2.390
	SD	0.9	1.2	0.7	0.8	1.0	0.6	0.6	0.2
	n	44	40	40	45	50	50	49	45
Yeongbon B	Avg.	8.363	9.285	8.359	7.900	9.871	7.235	5.570	8.083
	SD	4.5	3.5	4.4	3.0	3.3	2.5	2.2	1.3
	n	44	40	40	45	49	50	49	45
Yeongbon C	Avg.	6.525	7.312	5.956	6.570	9.128	5.505	4.584	6.511
	SD	2.9	2.8	3.2	2.5	5.2	2.3	1.5	1.3
	n	43	42	38	44	43	38	44	42
Yeongbon D	Avg.	6.148	6.406	5.63	6.185	8.215	4.988	4.380	5.993
	SD	3.0	2.9	2.6	2.6	3.6	1.9	1.5	1.1
	n	43	42	37	44	43	38	43	41
Hwangryeong A	Avg.	1.917	2.217	1.886	2.146	2.423	1.932	2.036	2.080
	SD	0.6	1.2	0.7	0.8	1.0	0.7	0.5	0.2
	n	44	39	40	45	47	42	43	42
Seombon C	Avg.	1.976	1.538	1.863	1.850	2.156	1.579	1.985	1.850
	SD	0.8	0.5	0.8	0.5	1.1	0.7	0.5	0.2
	n	43	43	40	43	44	38	43	41
Seombon D	Avg.	1.711	2.408	1.85	1.800	2.219	1.509	1.777	1.896
	SD	0.7	1.3	0.8	0.7	1.1	0.5	0.5	0.3
	n	44	39	38	43	44	40	41	41
Seombon E	Avg.	1.784	2.448	1.683	1.722	2.045	1.540	1.655	1.840
	SD	0.5	1.4	0.7	0.6	1.0	0.5	0.3	0.3
	n	44	40	38	43	44	40	41	42
Yocheon B	Avg.	2.498	2.035	2.548	2.754	3.969	2.562	3.496	2.837
	SD	1.1	0.8	1.2	1.1	1.8	1.0	0.7	0.6
	n	43	43	39	43	44	38	43	41
Osu A	Avg.	2.489	1.464	2.081	1.977	2.397	1.485	1.925	1.974
	SD	1.3	0.5	0.8	0.8	1.2	0.7	0.4	0.4
	n	43	43	41	43	44	38	43	42

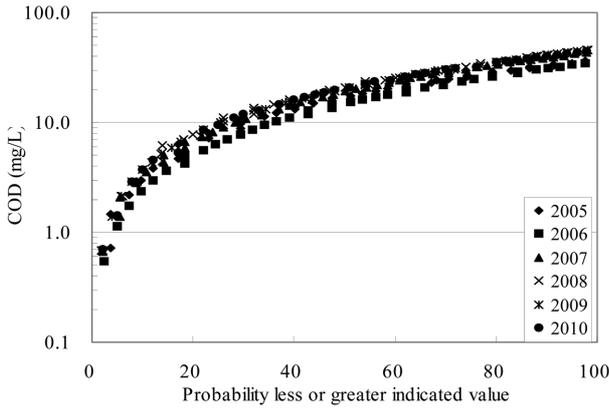


Fig. 5. Cumulative probability distribution of COD_{Mn} in Yeongbon B (2005~2010).

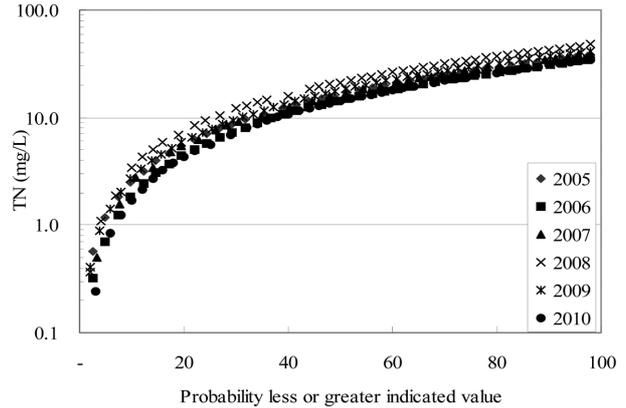


Fig. 6. Cumulative probability distribution of T-N in Yeongbon B (2005~2010).

(71.7%)를 나타내었다. 요천B, 오수A, 섬본C 단위유역은 T-N 항목 이외의 BOD, COD, SS, T-P 항목에서도 대부분 수질이 개선되지 않는 것으로 조사되었다. 이들 단위유역의 수질이 개선되지 않은 이유는 가축사육량 증가, 자원화 처리방식에 따른 토지계 부하량 증가 등 비점오염원에 의한 영향, 비점 처리시설의 부족, 삭감시설의 비 고도처리화, 개

발과 삭감계획의 불균형에 따른 영향으로 판단된다.

Fig. 6은 시행계획수립 대상 단위유역 중 영본B의 T-N을 누적 확률지에 도시하였다. Fig. 6에 나타난 것처럼 로그 확률지에 수질자료를 나타낸 결과 대부분의 자료가 직선 형태를 나타내고 있다. 영본B 이외의 단위유역의 경우도 동일한 수질 분포 양상을 나타내었다.

Table 5. Summarized statistics for the annual T-P of unit watersheds

Unit watershed	Statistics	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Mean
Yeongbon A	Avg.	0.195	0.142	0.112	0.117	0.117	0.096	0.089	0.109
	SD	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	n	44	40	40	45	50	50	49	45
Yeongbon B	Avg.	0.775	0.685	0.644	0.681	0.655	0.536	0.326	0.615
	SD	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1
	n	44	40	40	45	50	50	49	45
Yeongbon C	Avg.	0.551	0.442	0.414	0.454	0.463	0.368	0.246	0.420
	SD	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
	n	43	42	38	44	43	38	44	42
Yeongbon D	Avg.	0.507	0.420	0.348	0.381	0.351	0.270	0.198	0.354
	SD	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
	n	43	42	37	44	43	38	43	41
Hwangryeong A	Avg.	0.112	0.103	0.08	0.092	0.105	0.103	0.084	0.097
	SD	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	n	44	39	40	45	47	42	43	42
Seombon C	Avg.	0.061	0.043	0.067	0.044	0.042	0.066	0.059	0.055
	SD	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
	n	43	43	40	43	44	38	43	41
Seombon D	Avg.	0.099	0.165	0.057	0.054	0.056	0.059	0.047	0.077
	SD	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	n	44	39	38	43	44	40	41	41
Seombon E	Avg.	0.082	0.082	0.038	0.033	0.038	0.035	0.033	0.049
	SD	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	n	44	40	38	43	44	40	41	42
Yocheon B	Avg.	0.121	0.109	0.125	0.115	0.137	0.199	0.120	0.132
	SD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
	n	43	43	39	43	44	38	43	41
Osu A	Avg.	0.062	0.06	0.077	0.052	0.051	0.075	0.049	0.061
	SD	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
	n	43	43	41	43	44	38	43	42

3.1.5. T-P 수질추이

시행계획수립 대상 단위유역별 T-P의 연도별 수질측정값을 Table 5에 제시하였는데 시행계획 추진 전·후의 단위유역별 T-P 수질추이를 살펴보면 수질오염총량제의 추진이후 섬본C와 요천B를 제외한 모든 단위유역에서 T-P 수질이 개선되고 있는 것으로 나타났다. 영본B, 영본D, 섬본D, 섬본E 단위유역은 시행계획 추진시점인 2005년 대비 1단계 종료시점인 2010년의 T-P 수질이 52.4~71.5%로 현저히 개선되었고, 영본A, 영본C, 오수A, 황룡A 단위유역의 경우도 18.3~44.3%의 수질개선이 이루어진 것으로 나타났다. T-P 수질의 개선은 박재홍(2008)의 연구결과에서 나타난 바와 같이 하수처리시설의 고도 처리화, 가축분뇨 처리시설의 신·증설, 하수처리시설로의 직접이송, 하수관거정비 등을 통해 T-P 처리를 증가 및 고도처리에 따른 영향으로 판단된다. T-P의 경우도 1단계 대상물질인 BOD₅의 삭감과정에서 T-P도 저감되어 수질개선효과로 나타나고 있는 것으로 판단된다. 즉 황룡A를 제외하고는 BOD₅의 수질이 개선된 영본A, 영본B, 영본C, 영본D, 섬본D, 섬본E 단위유역의 T-P수질이 모두 개선되었다. 반면, 섬본C, 요천B 단위유역의 경우 T-P가 다소 증가되는 경향을 나타내었다. 요천B 단위유역은 가축 사육량이 많고 대부분 자원화 처리방식을 적용하고 있어 농지나 토양으로 환원된 축산폐수에 의한 영향인 것으로 판단된다. 또한, 요천B 단위유역의 수질에 영향을 미치는 남원하수처리장이 비 고도처리방식으로 운영되다 2009년 11월에 고도처리방식을 적용하게 된 점도 요천B 단위유역의 T-P 수질이 개선되지 않은 한 요인으로 판단된다.

Fig. 7은 시행계획수립 대상 단위유역 중 영본B의 T-P를 누적 확률지에 도시하였다. Fig. 7에 나타난 것처럼 로그 확률지에 수질자료를 나타낸 결과 대부분의 자료가 직선 형태를 나타내고 있어 로그 확률분포를 가짐을 알 수 있다. 영본B 이외의 단위유역의 경우도 동일한 수질 분포 양상을 나타내었다.

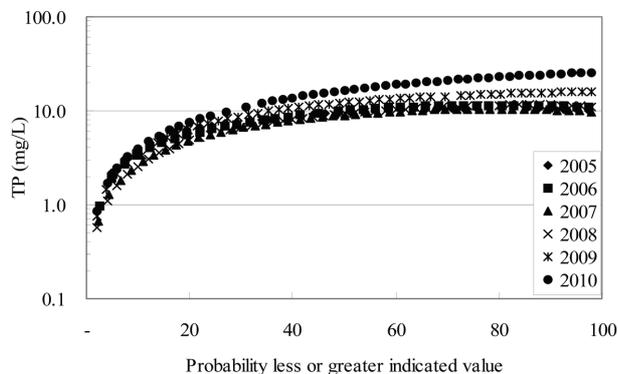


Fig. 7. Cumulative probability distribution of T-P in Yeongbon B (2005 ~ 2010).

3.2. 시행계획수립대상 단위유역의 1, 2단계 관리 대상물질의 수질평가

수질오염총량관리제의 1단계 관리대상물질인 BOD₅와 2

Table 6. Water quality assessment by mean BOD₅ value during each period

Unit watershed	BOD ₅ assessment					BOD ₅ target water quality
	'04~'06	'05~'07	'06~'08	'07~'09	'08~'10	
Yeongbon A	3.0	2.9	2.8	3.1	3.1	2.1
Yeongbon B	8.2	8.1	7.3	6.9	5.6	5.6
Yeongbon C	6.7	6.7	6.3	6.4	5.2	5.2
Yeongbon D	5.5	5.4	4.6	4.6	4.1	5.2
Hwangryeong A	3.0	2.5	2.3	2.3	2.4	2.2
Seombon C	1.6	1.5	1.5	1.7	1.9	1.5
Seombon D	1.6	1.4	1.4	1.5	1.6	1.3
Seombon E	1.5	1.4	1.4	1.4	1.5	1.3
Yocheon B	1.5	1.5	1.6	1.9	1.9	1.5
Osu A	1.6	1.5	1.6	1.5	1.6	1.7

Table 7. Water quality assessment by mean T-P value during each period

Unit watershed	T-P assessment				
	'04~'06	'05~'07	'06~'08	'07~'09	'08~'10
Yeongbon A	0.140	0.122	0.116	0.110	0.101
Yeongbon B	0.741	0.695	0.669	0.626	0.508
Yeongbon C	0.485	0.447	0.447	0.431	0.357
Yeongbon D	0.441	0.391	0.361	0.336	0.273
Hwangryeong A	0.099	0.094	0.093	0.100	0.098
Seombon C	0.057	0.050	0.050	0.048	0.053
Seombon D	0.086	0.070	0.056	0.056	0.054
Seombon E	0.064	0.047	0.037	0.036	0.035
Yocheon B	0.122	0.116	0.126	0.146	0.148
Osu A	0.066	0.062	0.059	0.054	0.053

단계 관리대상물질로 추가 선정된 T-P의 3년 단위 평가수질을 Table 6, 7에 각각 나타내었다.

식 (1)~(3)에 의해 평가된 BOD₅의 3년 단위 평가수질을 살펴보면 영본D, 오수A는 2007~2009년과 2008~2010년 2회 연속 목표수질보다 나은 수질을 나타내어 시행계획 수립 대상 단위유역에서 제외되나 그 외 단위유역의 경우는 2회 연속 목표수질보다 같거나 높은 수질을 나타내어 2011년에도 시행계획을 수립하여야 한다.

영본B, 영본C, 황룡A 단위유역의 경우 비록 2회 연속 목표수질을 달성하지 못하였지만 매회 평가수질이 지속적으로 감소되고 있으며 영본B의 경우 '08~'10년 평가 수질이 목표수질인 5.6 mg/L와 동일한 수질을 나타내었다. 이는 수질이 지속적으로 개선되어 목표수질에 근접하고 있다는 것을 나타낸다.

섬본D, 섬본E 단위유역의 경우 평가수질이 감소되는 추이를 나타내다 다시 초기의 평가수질과 동일한 상태를 유지하고 있는 것으로 나타났으며, 영본A, 섬본C 단위유역은 평가수질이 감소되다 '07~'09년 이후 평가수질이 증가하는 추이를 나타내었다. 섬본D, 섬본E, 영본A, 섬본C 단위유역의 3년 평가수질이 '04~'06년 이후 감소하다 '07~'09년 이후 다시 증가추이를 나타내는 이유는 2007년 이전

에는 개발계획이 전혀 없거나 개발량이 소규모인 반면 삭감계획은 2007년 이후에 집중되어 있기 때문에 연차별 개발계획과 삭감계획이 계획대로 추진되지 못해 나타난 결과일 가능성이 있다. 이는 향후 이행평가가 완료되면 평가수질의 증가 원인이 파악될 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 요천B 단위유역의 평가수질은 지속적으로 증가하고 있는데 전술한 BOD₅의 수질추이에서 언급한 바와 같이 삭감계획이 후반기에 집중되어 있으며 개발량과 삭감량의 불균형에 따른 영향인 것으로 판단된다. 따라서 요천B 단위유역의 수질개선을 위해서는 개발계획과 삭감계획을 적절히 조정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

T-P의 경우 1단계 관리대상 오염물질은 아니지만 2단계 관리대상 오염물질로 추가되었으며, 부영양화의 주요원인물질로 작용하는 등 수질관리의 주된 관심대상물질인 관계로 1단계 수질오염총량관리제를 시행하는 동안 T-P 수질의 개선여부를 파악하고자 하였다.

T-P의 3년 단위 평가수질은 Table 7에서 보는 바와 같이 황룡A, 요천B 단위유역을 제외하고는 지속적으로 수질이 개선되고 있는 것으로 나타났다. 대부분의 단위유역 T-P수질이 개선되고 있는 것으로 미루어 볼 때 지속적인 오염원 관리와 삭감시설의 설치가 수질개선에 긍정적인 효과를 나타내고 있는 것으로 판단되며 개발계획도 삭감계획과 적절히 균형을 이룰 수 있도록 관리되고 있기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 황룡A 단위유역은 수질이 감소와 증가를 교차하고 있으며 '08~'10수질은 '04~'06년의 초반기 평가 수질값과 거의 유사한 수질을 나타내었다. 이는 특정연도에 수립된 삭감계획과 개발계획의 상대적인 부하량 차이, 또는 예산의 집행차질이나 공사기간의 연장에 따른 삭감계획의 미이행에 의한 결과인 것으로 판단된다.

요천B 단위유역의 경우도 평가수질이 기간에 따라 증가와 감소를 반복하고 있으나 전체적으로 증가하는 추세를 나타내고 있는데 전술한 T-P의 수질추이에서 언급된 바와 같이 축산계 부하량의 증가, 자원화 처리방식에 따른 토지계 부하량 증가, 요천B 단위유역의 수질에 직접적인 영향을 미치고 있는 남원하수처리장이 2009년 11월 이전까지 비 고도처리방식으로 운영된 점이 복합적으로 나타난 결과인 것으로 판단된다.

4. 결론

영산강·섬진강수계 단위유역의 수질추이를 살펴본 결과 BOD₅, SS, T-P의 경우 대부분의 단위유역에서 수질이 개선되는 경향을 나타내었다. 반면 COD_{Mn}, T-N의 경우 수질오염총량관리제의 시행에도 불구하고 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 COD_{Mn}의 경우 난분해성 유기물에 기인하여 기존의 생물학적 처리시설만으로는 처리의 한계가 있는 것으로 판단된다. 또한 T-N은 경작지로부터의 유입 등 비점오염원에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다. 1단계 관리대상물질인 BOD의 3년 수질평가 결과 영본A, 섬본C, 요

천B 단위유역을 제외한 지역은 모두 수질이 개선되었으며, 2단계 관리대상물질로 추가된 T-P의 경우도 요천B, 황룡A 등 일부 단위유역을 제외한 대부분의 지역에서 수질개선 추이를 나타내고 있다. 따라서 수질오염총량관리제 시행 이후 영산강·섬진강수계 단위유역의 수질이 상당부분 개선되는 추이를 나타내고 있는 것으로 판단된다.

현재 시행계획 수립대상 단위유역의 이행평가가 진행중인 관계로 수질오염총량관리 1단계의 평가를 위한 다양한 자료들의 검증이 완료되어 가용한 자료가 확보될 경우 보다 명확한 단위유역의 수질개선 효과를 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구의 수질측정자료는 영산강·섬진강수계 기금사업(오염총량관리조사연구-유량측정망운영)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 국립환경과학원(2008). 4대강수계 총량관리 목표수질·유량 측정 성과·평가 보고서.
- 국립환경과학원 수질오염총량관리제도(2009). <http://tmdl.nier.go.kr/>.
- 김영일, 이상진(2006). 수질오염총량관리 계획수립의 개선방안에 관한 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, 22(6), pp. 977-981.
- 김영철, 박재홍, 이동률(2003). 농업용 저수지 소하천의 통계학적 수질변화 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, 18(5), pp. 685-697.
- 농업기반공사(2002). 저수지와 담수호의 수질개선 방안(최종).
- 박재홍(2008). 수질오염총량관리 시행계획에서 수립된 삭감계획의 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, 24(3), pp. 297-305.
- 박재홍, 박준대, 류덕희, 정동일(2009). 수질오염총량관리제의 성과평가: 개발/삭감계획의 이행실적 및 단위유역의 수질현황. *수질보전 한국물환경학회지*, 25(4), pp. 481-493.
- 박준대, 박주현, 류덕희, 정동일(2008). 수질오염총량관리를 위한 비점배출계수 산정-특정 기준유량 시기의 강우배출비. *수질보전 한국물환경학회지*, 24(4), pp. 452-457.
- 박준대, 오승영(2010). 수질오염총량관리 배출부하량에 대한 강우영향분석. *수질보전 한국물환경학회지*, 26(4), pp. 648-653.
- 박준대, 오승영, 최옥연(2011). 수질오염총량관리 관거월류 부하 변화에 따른 배출부하량 산정방법. *수질보전 한국물환경학회지*, 27(3), pp. 293-299.
- 조용진, 이원호, 한양수, 연인성(2003). 오염총량관리를 위한 삭감부하량 결정 및 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, 19(2), pp. 193-203.
- 환경부(2002a). 금강수계 오염총량관리 기본방침.
- 환경부(2002b). 낙동강수계 오염총량관리 기본방침.
- 환경부(2002c). 영산강·섬진강수계 오염총량관리 기본방침.
- 환경부(2002d). 금강수계 물관리 및 주민지원등에 관한 법률.
- 환경부(2002e). 낙동강수계 물관리 및 주민지원등에 관한 법률.
- 환경부(2002f). 영산강·섬진강수계 물관리 및 주민지원등에 관한 법률.