

교량 강우유출수내 비점오염물질의 유출특성 및 상관성

위승경 · 김이형* · 정용준** · 길경익†

서울산업대학교 토목공학과

*공주대학교 건설환경공학부 방재연구센터

**부산가톨릭대학교 환경공학과

Washoff Characteristics and Correlation of Nonpoint pollutants in a Bridge Storm Runoff

Wee, Seung-Kyung · Kim, Lee-Hyung* · Jung, Yong-Jun** · Gil, Kyung-Ik†

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Technology

*Department of Civil & Environment Engineering, Kongju National University

**Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan

(Received 5 September 2007, Accepted 21 May 2008)

Abstract

During the dry periods, many types of pollutants are being accumulated on the paved surface by vehicle activities and the accumulated various pollutants are inflowing into the near watershed areas for the rainfall periods. Particularly, bridges are the centralized region to be the surface runoff of the stormwater due to the high ratio of the impermeable area. Also, the metals, toxic chemicals and sediments originated from bridges could be strongly influenced to the watershed areas during the runoff. Therefore, the present study is achieved to provide washoff characteristics and correlation from the bridge during rainfall periods. The result shows that the EMC ranges for 95% confidence intervals in a bridge land use are 10.12~128.09 mg/L for TSS, 6.07~21.15 mg/L for BOD, 2.10~6.70 mg/L for TN and 0.06~0.85 mg/L for TP.

keywords : Bridge, Event mean concentration (EMC), First flush, Nonpoint sources, Stormwater

1. 서론

환경부는 유역으로부터 유입되는 오염물질의 총량을 규제하는 오염총량관리제(Total Pollution Load Management System, TPLMS)를 도입하였다. 이 제도는 기존의 방류수 수질기준 중심의 수계관리에서 하천에서의 유량을 고려한 오염물질 총량 개념으로 수계를 관리하겠다는 내용이다(이은주 등, 2006a). 이러한 오염총량관리제는 도시하수나 산업폐수 및 축산폐수 등의 점오염원 뿐만 아니라 넓은 지역에 걸쳐서 분포하는 비점오염원 관리의 중요성을 부각시켰다(이은주 등, 2006b). 현재 국내 4대강에서의 수계별 오염총량 목표수질은 BOD 기준으로 1~6 mg/L 범위로 산정되어 있으며, 4대강의 비점오염원에 의한 오염 부하량 기여율은 개략적으로 22~37% 정도 범위를 차지하고 있다(김이형 등, 2006a, 2006b; 환경부, 2005). 특히 수도권 지역의 주요 상수원인 팔당호 상수원은 44.5%가 비점오염원에서 배출되고 있는 것으로 조사되었으며, 2020년에는 54.3%까지 증가할 것으로 예측하고 있다(김이형과 이선하, 2005; 환경부, 2004). 따라서, 환경부는 2002년도에 “비점오염원 관리대책

수립계획”을 마련하였으며, 2004년 6월에 관계기관 합동으로 ‘물관리 종합대책의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원 관리 종합대책’을 발표하였다(환경부, 2004).

비점오염원 관리는 오염총량관리제의 성공적인 시행을 위하여 필수적으로 연구 및 관리해야 할 사항이다. 그러나 현재 우리나라는 기초 자료 및 모니터링 결과의 부족으로 관리에 어려움이 크다(김이형과 이선하, 2005). 그 중에서 포장률이 높아 오염물질의 축적 및 유출이 심한 도로 및 교량 지역은 강우에 대한 유출 및 유량과 수질농도의 변화가 매우 빠르게 나타난다. 강우시 유출유량은 급격히 상승하고 강우가 종료되면 바로 감소하여 비강우시의 상황으로 빠르게 회복되는 등 포장된 지역에서의 수문현상은 강우에 매우 민감하다(신창민 등, 2004). 특히 오염물질이 강우 초기에 일시에 배출되는 초기강우 현상(first flush effect)이 두드러져, 우수 피크유출에 앞서 최대 오염유출이 발생하여 하천에 큰 영향을 미친다(이현동과 배철호, 2002).

따라서, 본 연구는 도시 내 포장된 지역 중에서 교량으로부터 유출되는 강우유출수내 비점오염물질의 유출 특성을 파악하고자 수행되었다. 본 연구에서 산정된 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)는 향후 교량지역의 비점오염원 연구에 있어서 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

† To whom correspondence should be addressed.
kgil@snut.ac.kr

2. 연구방법

2.1. 모니터링 지점 및 방법

강우 및 유역특성에 의하여 오염물질 유출이 발생하는 비점오염원 연구에 있어서 모니터링은 중요한 부분이다. 모니터링 수행 전 효율적인 유량측정 및 수질시료의 채취를 위하여 웨어를 설치하였으며, 강우 시작 전 현장에 대기하면서 모니터링 준비를 완료하였다. 강우 시작 후 유량측정은 용기 포집에 의한 직접 측정법을 사용하여 집수용기(20 L)에 일정 시간동안 집수된 유출량을 10분 단위로 측정하였다. 또한 수질분석을 위한 수질 시료 채취는 강우 유출수의 초기 강우현상을 파악하기 위하여 강우 시작 후 유출이 발생하는 즉시 첫 번째 시료로 하여 초기에는 5분 간격으로, 15분 이후부터는 15분 간격으로, 30분 이후에는 30분 간격으로, 1시간 후에는 유출이 끝날 때까지 1시간 간격으로 하여 모니터링을 수행하였다. 채취된 수질 시료는 강우 사상이 끝난 후 곧바로 실험실로 운반되어 입자상 물질, 유기물질, 비용존성 잔존유류(Oil, Grease), 영양물질 및 중금속 등의 항목으로 분류하여 실험이 수행되었으며, 각 항목별 측정 방법은 수질오염 공정시험법(환경부, 1995)과 Standard method (APHA et al., 1998)에 준하여 분석하였다.

모니터링 지점은 Fig. 1에 나타나 있으며, 배수유역은 용인시 운학동 G교량 상부지점의 아스팔트로 포장된 지역으로 면적은 1,922 m²이다.

2.2. 강우 유출수의 EMC 산정

강우에 의해서 유출되는 오염물질의 부하량 산정시 이용되는 오염물질의 농도는 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)로 불리며 식 (1)과 같이 모니터링 결과를 이용하여 산정된다. EMC는 전체 강우 지속시간 T시간 동안 유출된 전체 누적 오염물질의 양을 전체 유출량으로 나누어 계산할 수 있으며, 비점오염원에서의 평균 농도 산

정시 중요하게 이용되고 있다. 여기서, $C(t)$ 와 $Q_{TRu}(t)$ 는 강우 지속시간 t 에 대한 오염물질의 농도와 유출율을 의미한다.

$$EMC = \frac{\text{Discharged mass during an event}}{\text{Discharged volume}} \quad (1)$$

$$= \frac{\int_0^t C(t) \cdot Q_{TRu}(t) dt}{\int_0^t Q_{TRu}(t) dt}$$

2.3. 통계분석

식 (1)을 이용하여 각 강우사상에 대한 EMC를 산정한 후, 산정된 EMC에 대한 통계적 대표성을 찾기 위하여 SYSTAT 버전 9.0을 이용하여 통계분석을 행하였다(SYSTAT version 9.0). 여기에는 최소, 최대, 중간값, 평균값, 분산, 이상점(outliers), 95% 신뢰구간(Confidence interval) 및 각 % 별 사분위간 범위(interquartile range)를 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 강우사상에 대한 모니터링 결과

2006년 6월부터 2007년 5월까지 총 8회의 모니터링에 대한 강우사상이 Table 1에 정리되어있다. 강우 전 건조일수(antecedent dry days, ADD)는 1~45일, 전체 강우량(total rainfall)은 6.0~60.5 mm, 강우 지속시간(runoff duration)은 3.0~11.4시간, 평균 강우강도(average rainfall intensity)는 1.2~12.1 mm/hr의 범위로 나타났다.

3.2. 유출 오염물질의 농도 특성

일반적으로 포장된 지역은 대부분 좁은 유역면적에 비해 높은 불투수율로 인하여 강우 시 다른 토지이용에 비해서

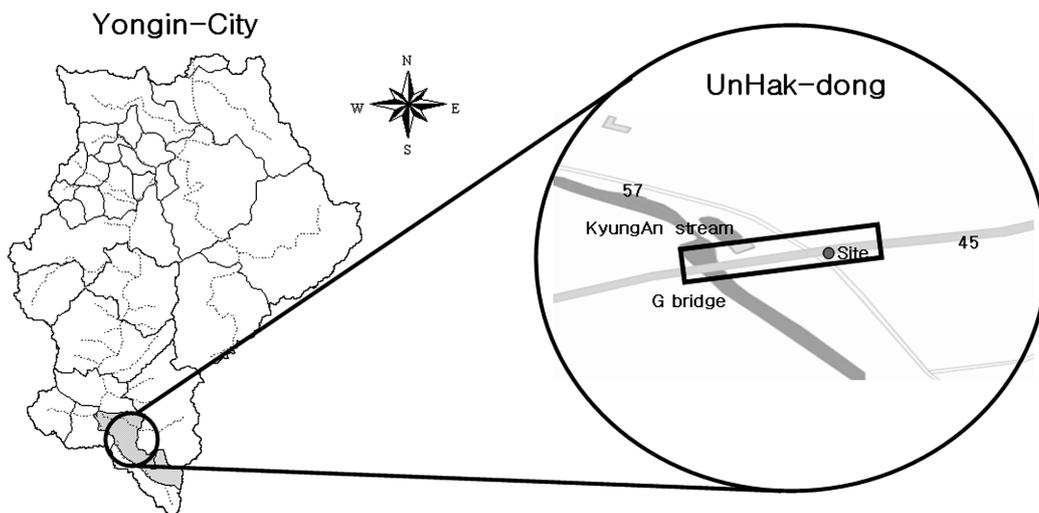


Fig. 1. Map showing the monitoring location and area.

Table 1. Event table for monitored event

Event No.	Event date (yy/mm/dd)	ADD (days)	Total rainfall (mm)	Runoff duration (hr)	Avg. rainfall intensity (mm/hr)
E-1	06/06/22	5	7.5	5.6	1.3
E-2	06/06/29	2	13.5	6.2	2.2
E-3	06/08/17	18	6.5	3.0	2.2
E-4	06/09/05	8	11.0	4.2	2.6
E-5	06/10/22	45	6.0	5.0	1.2
E-6	07/03/04	1	33.5	11.4	2.9
E-7	07/04/30	9	16.5	3.9	4.2
E-8	07/05/17	4	60.5	5.0	12.1

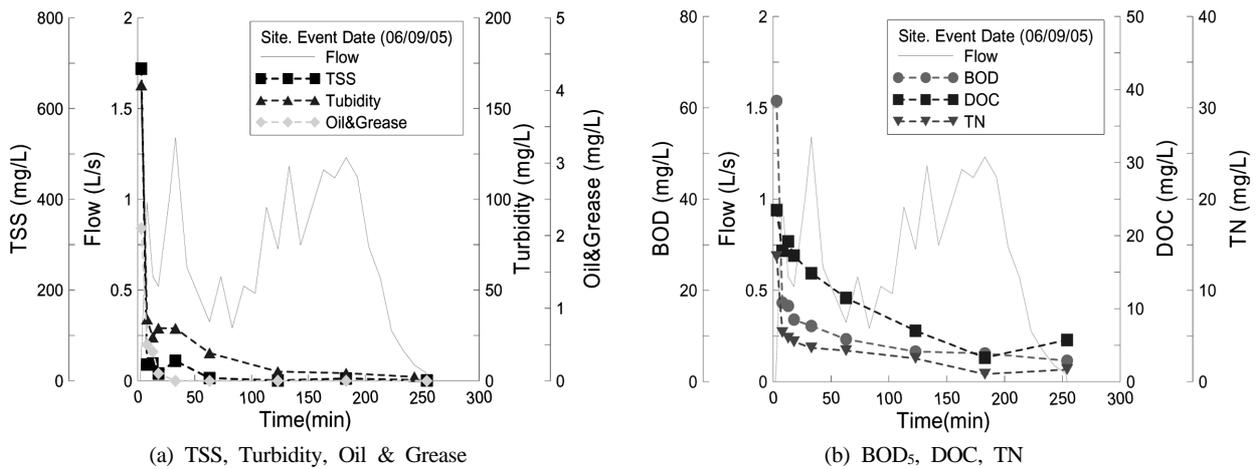


Fig. 2. Hydro-and polluto-graphs of monitoring sample (E-4).

강우 유출량이 많고 지속적인 차량의 운행으로 인한 오염물질의 축적이 다른 토지이용에 비해 심각하다. Fig. 2는 모니터링을 통해 채취된 강우 유출수내 오염물질의 농도변화와 유출량의 관계를 수리수문 및 농도곡선으로 나타내었다. 강우 초기에 고농도로 유출되는 초기강우 현상을 보이다가 강우가 지속되면서 저농도로 유출되는 특성을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

3.3. 유출시간에 따른 오염물질의 평균 농도 변화

강우 초기 1시간 이내에 다량의 비점오염물질이 교량지역으로부터 유출되는 것을 수리수문 및 농도곡선을 통해 확인할 수 있었다. 따라서 강우 초기 1시간 이내의 비점오염물질 유출특성을 면밀히 검토하기 위하여 전체 사상(event)의 농도 자료를 활용하여 통계분석을 수행하였으며, 그 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. TSS의 경우 평균농도가 강우 유출 직후 432.0 mg/L의 값을 나타내었으나, 강우 지속시간이 60분으로 경과한 후 41.5 mg/L로 감소하였음을 알 수 있다. BOD의 경우 평균농도가 강우 유출 직후 71.0 mg/L에서 강우지속 시간이 60분 후 15.9 mg/L로 줄어드는 경향을 나타내고 있다. TN의 경우 평균농도가 강우 유출 직후 11.3 mg/L에서 강우 지속 시간이 60분 경과 후 5.9 mg/L로 감소함을 볼 수 있다. 그리고 Zn의 경우 평균농도가 강우 유출 직후 0.98 mg/L에서 강우 지속 시간이 60분 경과 후 0.41 mg/L로 감소한 것을 확인할 수 있다. 전체적

으로 살펴보면, 강우 초기부터 60분 이내에 오염물질이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이렇듯 시간에 따른 평균농도의 감소는 강우 초기에 비해 말기에서는 초기강우 현상의 영향, 희석 및 청소효과로 인하여 2~10배 정도 줄어듦을 알 수 있다.

3.4. EMC 통계분석

교량지역에서 강우에 의해 유출되는 오염물질의 강우당 평균 농도, 즉 EMC가 어느 정도인지 파악이 중요하다. 이러한 값의 산정을 위해서 본 연구에서는 식 (1)을 이용하여 각 강우사상에 대한 EMC를 산정한 후, 산정된 EMC에 대한 통계적 대표성을 찾기 위하여 통계분석을 행하였다. Table 2는 이러한 과정을 통해 취득된 각 오염물질의 EMC를 산정한 결과이다.

TSS EMC의 경우 11.59~230.82 mg/L 범위, BOD EMC의 경우 4.58~31.85 mg/L 범위, TN EMC의 경우 1.86~9.21 mg/L, TP의 경우 0.14~1.55 mg/L의 범위로 나타났다. 그리고 Oil & Grease의 경우 0.00~1.84 mg/L 범위, 중금속의 경우 Pb와 Zn의 EMC는 각각 0.00~0.15 mg/L와 0.11~0.96 mg/L의 범위로 나타났다. Cd의 경우는 8회의 모니터링결과 미검출되었다.

미국 캘리포니아주 로스앤젤레스 지역 포장지역에서의 강우유출수내 EMC 결과를 살펴보면 TSS EMC의 경우 5.21~874 mg/L 범위, TOC EMC의 경우 7.36~59.3 mg/L

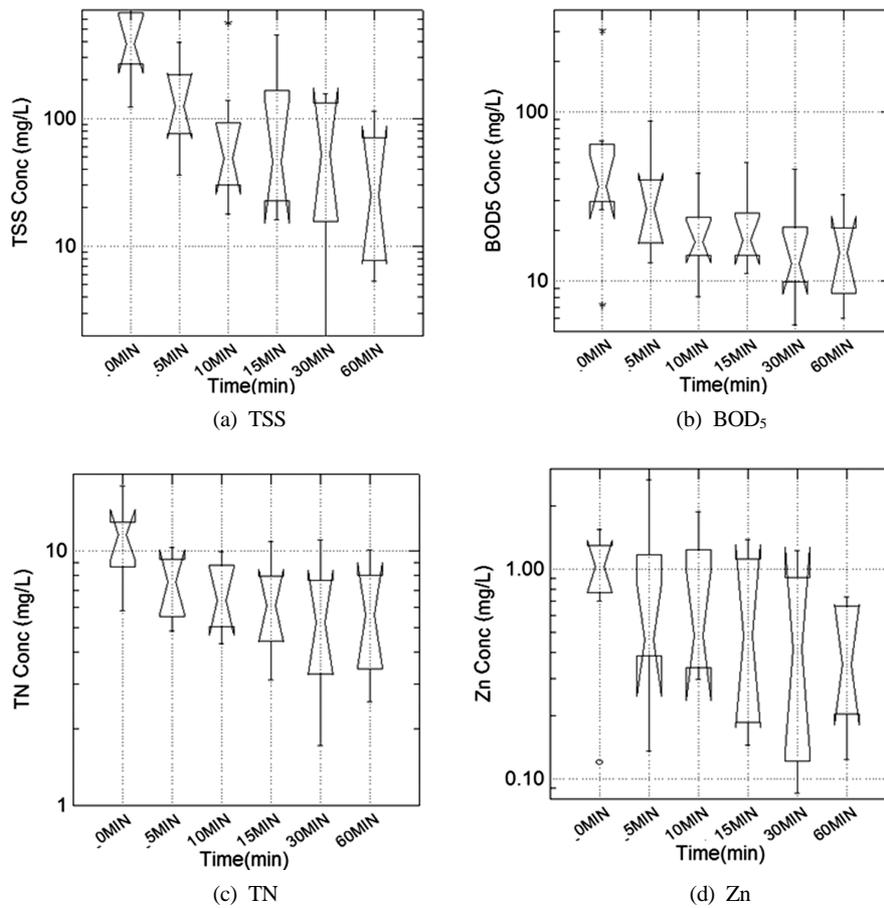


Fig. 3. Descriptive statistics concentration changes during initial 1-hr.

Table 2. Statistical summaries of EMC

Parameters (mg/L)	Basic statistics				Confidence interval		
	Min.	Max.	Median	Mean	St. Dev.	95% Upper	95% Lower
TSS	11.59	230.84	49.02	69.11	70.56	128.09	10.12
BOD ₅	4.58	31.85	10.92	13.61	9.02	21.15	6.07
DOC	2.89	55.84	11.12	20.91	20.94	38.41	3.40
TN	1.86	9.21	3.21	4.39	2.75	6.70	2.10
TP	0.14	1.55	0.28	0.45	0.47	0.85	0.06
Oil&Grease	0.00	1.84	0.02	0.40	0.74	1.02	-0.21
Pb	0.00	0.15	0.05	0.05	0.05	0.09	0.01
Zn	0.11	0.96	0.36	0.41	0.27	0.64	0.19
Cd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

의 범위로 나타났다. 그리고 TP의 경우 0.11~1.54 mg/L 범위, Oil & Grease의 경우 0.52~34.6 mg/L의 범위로 나타났다(이은주 등, 2006b). 여기에서 서로 비교해 보았을 때 TP의 경우 비슷한 값을 나타낸 반면 TSS와 Oil & Grease의 경우 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 교량이 신설교량으로 차량의 소통이 많지 않아 검출이 되지 않은 것으로 판단된다.

이 결과를 살펴보면, 넓은 범위의 EMC를 보여주고 있는데 이는 한 종류의 토지이용에서조차 EMC를 예측한다는 것이 쉽지 않음을 나타내고 있으며, 김이형과 강주현(2004)의 선행연구 결과에서도 잘 나타나 있다.

유출되는 비점오염물질의 EMC에 대한 95% 신뢰구간을 살펴보면, TSS의 범위는 10.12~128.09 mg/L, BOD₅는 6.07~21.15 mg/L의 범위로 나타났고, TN과 TP의 경우 각각 2.10~6.70 mg/L와 0.06~0.85 mg/L의 범위로 나타났다.

그리고 강우유출수에 의해 교량상부의 비점오염물질의 유출에 영향을 끼치는 인자를 파악하기 위하여 강우특성과 유출된 오염물질과의 상관성을 분석하였다. 강우특성과 오염물질별 EMC간의 상관성을 분석한 결과 TSS와 BOD₅, DOC, 그리고 TN을 제외한 오염물질 EMC는 강우특성과 깊은 상관성을 보이지 않았다. 그리고 유기물질과 영양물질은 높은 상관관계를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구는 포장된 지역 중 교량에서 강우 시 유출되는 비점오염물질의 유출 경향 및 유출 시간에 따른 농도분포 분석을 수행한 결과를 정리하였으며, 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 수리수문 및 농도곡선에서 알 수 있듯이 포장된 지역은 높은 불투수율로 인하여 강우 초기에 고농도로 유출되는 초기강우 현상(frist flush effect)을 보이다가 강우가 지속되면서 저농도로 유출되는 특성을 보인다.
- 2) 유출시간에 따른 오염물질의 평균 농도 변화를 살펴보면, 대부분의 오염물질이 0~10분 이내에 2~10배의 많은 감소를 보이며, 초기농도에 비해 급격히 저감된 것으로 나타났다.
- 3) 유출오염물질의 통계분석 결과, TSS EMC의 경우 11.59~230.82 mg/L 범위, BOD EMC의 경우 4.58~31.85 mg/L 범위, TN EMC의 경우 1.86~9.21 mg/L, TP의 경우 0.14~1.55 mg/L의 범위로 나타났다. 그리고 중금속의 경우 Pb와 Zn의 EMC는 각각 0.00~0.15 mg/L와 0.11~0.96 mg/L의 범위로 나타났다. Cd의 경우는 검출이 되지 않았다.
- 4) 각 오염물질별 95% 신뢰구간을 살펴보면, TSS의 범위는 10.12~128.09 mg/L, BOD는 6.07~21.15 mg/L, TN과 TP의 경우 2.10~6.70 mg/L와 0.06~0.85 mg/L의 범위로 나타났다. 그리고 강우특성과 오염물질별 EMC 간의 상관성을 분석한 결과 TSS와 BOD, DOC, 그리고 TN을 제외한 오염물질 EMC는 강우특성과 깊은 상관성을 보이지 않았다. 그리고 유기물질과 영양물질은 높은 상관관계를 나타내었다.

참고문헌

- 김이형, 강주현(2004). 고속도로 강우 유출수내 오염물질의 EMC 및 부하량 원단위 산정. *한국물환경학회지*, **20**(6), pp. 631-640.
- 김이형, 고석오, 이병식, 김성길(2006a). 국내 고속도로 강우 유출수의 EMCs 및 유출 부하량 산정. *대한토목학회 논문집*, **26**(2B), pp. 255-231.
- 김이형, 이선하(2005). 주차장 및 교량지역의 강우유출수내 비점오염물질의 특성 비교 및 동적 EMCs. *한국물환경학회지*, **21**(3), pp. 248-255.
- 김이형, 이은주, 고석오, 강희만(2006b). 아스팔트 포장 고속도로의 강우 지속시간별 유출 경향. *한국도로학회 논문집*, **8**(1), pp. 99-106.
- 신창민, 최지용, 박철휘(2004). 도시지역에서의 토지이용별 비점오염물질 유출특성. *대한환경공학학회지*, **26**(7), pp. 729-735.
- 이은주, 고석오, 강희만, 이주광, 이병식, 임경호, 김이형(2006a). 고속도로 노면유출수의 중금속 유출 특성 및 상관성. *한국물환경학회지*, **22**(1), pp. 128-133.
- 이은주, 고석오, 강희만, 이주광, 이병식, 임경호, 김이형(2006b). 포장지역에서의 강우사상별 EMC 산정 및 단순 샘플농도와의 비교. *한국물환경학회지*, **22**(1), pp. 104-109.
- 이현동, 배철호(2002). 비점오염원 유출특성과 저감을 위한 최적관리방안. *한국물환경학회지*, **18**(6), pp. 569-576.
- 환경부(2004). *관계부처합동 물관리 종합대책의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책*.
- 환경부(2005). *비점오염원 업무편람*.
- 환경부(1995). *수질오염공정시험법*.
- APHA, AWWA and WEF (1998). *Standard Method for Examination of Water and Wastewater*, 20th edition, Washington D.C., U.S.A.