

## 계절에 따른 비강우시 팔당호의 유기물 유입부하량

길경익<sup>†</sup> · 신지웅<sup>\*</sup> · 허진<sup>\*\*</sup>

서울과학기술대학교 건설공학부

<sup>\*</sup>서울과학기술대학교 토목공학과

<sup>\*\*</sup>세종대학교 환경에너지융합학과

## Loading of Organic Matter according to Seasonal Changes into Lake Paldang during Non-storm Period

Kyungik Gil<sup>†</sup> · Jiwoong Shin<sup>\*</sup> · Jin Hur<sup>\*\*</sup>

*School of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology*

*\*Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology*

*\*\*Department of Environment and Energy, Sejong University*

*(Received 28 September 2010, Revised 25 January 2011, Accepted 7 February 2011)*

### Abstract

The study is conducted to evaluate loading of organic matter as seasonal changes during non-storm period into Lake Paldang which is used to a major drinking water source. Samples were taken in Lake Paldang intake during non-storm period and were analyzed loading of organic matter. From the results of the survey, improving of the water quality showed remarkable tendency depending on the changing periods from summer to fall and from fall to winter. Dilution effect from the increase of base run-off caused by the concentrated rainfall in rainy season, the characteristics of Korea's climate seems to have to be the reason. On the other hand, deteriorating of the water quality showed tendency depending on the changing periods from winter to spring and from spring to summer. Increase of Cyanobacteria etc. is explained by seasonal effects which are a small amount of the rainfall in winter and spring and gradational increase of water temperature.

**keywords** : Lake Paldang, Loading of organic matter, Non-storm period, Seasonal changes

### 1. 서론

남한강, 북한강, 경안천이 합류되는 지점에 형성된 팔당호는 수도권 2,300만 국민의 식수원으로 사용되고 있는 주요 취수원으로써 그 수질관리에 관심이 고조되고 있다. 하지만 남한강, 북한강, 경안천의 각 수계마다 서로 다른 수질특성을 가지고 있어 팔당호 수질관리에 어려움을 겪고 있다(신재기 등, 2000).

하천 및 호소의 수질오염 원인으로는 크게 점오염원에 의한 오염과 비점오염원에 의한 오염으로 구분할 수 있는데 점오염원의 경우, 급속한 경제발전으로 생물학적 공정에 기반을 둔 하·폐수처리 시설을 통하여 대부분 제거된 후 방류함으로써 그 수질관리를 하여왔으나 비점오염원의 경우, 처리시설이 미흡하고 관리가 점오염원에 비해 어려워 오염원 관리를 소홀히 해왔다(Wetzel, 1990). 특히 인공호의 특징을 갖는 팔당호는 강우의 영향을 직접 받으며, 기존 연구에 따르면 비점오염원으로부터 약 44.5%가 유입되는 것으로 조사되었고 2020년에는 약 54.3%까지 증가할

것이라고 예측되고 있다(김이형과 이선하, 2005; 이병수와 길경익, 2008; 환경부, 2004). 1996년 미국 EPA 발표에 따르면, 오염원 조사에서 전체 조사 구역의 약 40%가 오염원인 중 비점오염원의 영향이 가장 크다고 조사되어 비점오염원 관리를 위해 연간 많은 예산을 수질관리에 사용하고 있다(EPA, 1996). 이에 환경부도 오염총량관리제(Total Maximum Daily Load: TMDL)를 도입하여 2004년 4대강 물관리종합대책 강화 및 물관리 목표 달성에 노력을 하고 있다(이소영 등, 2006; 정용준과 임기성, 2006; 환경부, 2005). 이러한 노력에도 불구하고 현재 팔당호는 생분해성 유기물 지표가 되는 BOD는 감소하는 반면 난분해성 유기물을 반영하는 COD는 지속적으로 증가하고 있는 추세이며 팔당호 유역내의 생활하수, 가축분뇨, 농경폐수 등의 증가로 점차 부영양화 현상을 보이고 있는 실정이다(국립환경과학원, 2005; 김범철 등, 1989; 조덕희 등, 2009). 또한 이미 많은 연구 조사를 통해 유속이 빠른 하천은 외부기원 유기물이 대부분 차지하고, 정체수역인 호수 및 하천 하류는 내부생성 유기물이 대부분으로 구성된다고 알려져 있는데 하천형 호수인 팔당호는 계절에 따라 체류시간의 변화의 차이가 있겠지만 평균 약 5~6일로 짧아 대부분 외부기원 유기물로 그 변동이 심하다(이종남 등, 1988; Thornton,

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

kgil@seoultech.ac.kr

1990; Wetzel and Saunders, 1983). 이러한 비강우시에 함께 유출되는 외부기원 유기물은 토지이용도, 계절적 영향, 생태적 영향 등 다양한 요인에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있으며 그 원인 분석과 관리방법에 많은 어려움이 있어 조사의 필요성이 있다.

본 연구에서는 팔당호의 유입 유기물질이 계절이 바뀌면서 어떻게 변화하는지를 확인하여 팔당호 수질개선에 도움이 되는 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 연구방법

본 연구에서는 팔당호의 계절에 따른 비강우시 유기물 유입 부하량을 알기 위해 2008년 6월부터 2009년 11월까지 조사를 실시하였다. Fig. 1은 연구 지역인 남한강, 북한강, 경안천이 합류하는 팔당호를 나타낸 것이며 시료채취는 팔당호 취수구에서 채수를 실시하였다. 본 논문에서는 2008년 6월부터 2009년 11월까지 비강우시의 유기물 유입 부하량을 산정하였다. 유기물 유입 부하량 산정방법은 식 (1)과 같으며, 오염농도  $C(t)$ 는 시간  $t$ 에서 유역으로부터 유출되는 유기물질의 농도로 월별 2주마다 건기시료를 채취하여 유기물질의 농도를 산술평균 하였고, 유량  $Q(t)$ 는 한강홍수통제소의 수문자료를 이용하여 유량을 산정하였다. 수질 분석은 BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, DOC, POC, TOC 항목에 대해 실시하였으며 BOD<sub>5</sub>와 COD<sub>Mn</sub> 항목은 수질오염 공정시험법(환경부, 2008)에 의하여 분석하였다. DOC 항목은 채수한 시료를 500°C에서 2시간 태운 GF/F 섬유여지(Whatman, PA)에 여과시켜 총 유기탄소 분석기(Shimadzu V-series, TOC-CPH)로 측정하였다. POC 항목은 채수한 시료를 0.7 μm 유리 GF/F 섬유여지(Whatman, PA)에 여과시키는 과정에서 걸러진 입자성 물질을 105°C에서 10분 동안 건조시킨 후 원소분석기(Flash EA1112)로 유기탄소(%) 측정을 하였다. TOC 항목은 DOC와 POC를 합하여 산정하였다. 계절의 구분은 한반도를 중심으로 한 기압배치형의 출현빈도

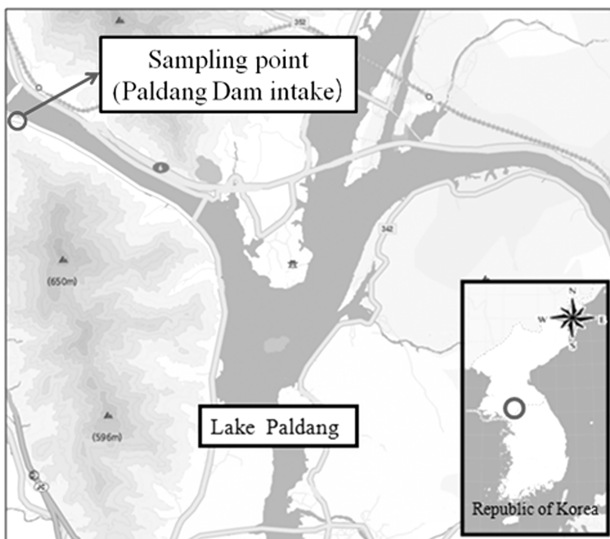


Fig. 1. Location map of study area.

를 사용하여 봄(3월, 4월, 5월), 여름(6월, 7월, 8월), 가을(9월, 10월, 11월), 겨울(12월, 1월, 2월)로 크게 4가지로 구분하였다(문승의와 임향희, 1980).

$$\text{Organic matter mass loading (ton)} = \sum_{t=1}^n C(t) \times Q(t) \quad (1)$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 유기물 유입 부하량 산정

비강우시 팔당호 내의 유기물질 변동을 조사하기 위해 2008년 6월부터 2009년 11월까지 모니터링을 실시한 결과를 이용하여 월 평균 유기물 유입 부하량을 산정하였다. Table 1은 월별 산정한 오염부하량을 도표로 나타낸 것이다. 여름철에 유기물질이 높아지다가 가을과 겨울로 접어들면서 낮아지는 경향을 확인할 수 있는데 이는 우리나라의 계절적 특성인 여름철 집중강우를 갖는 장마 기간 동안 강우와 함께 유기물질이 유출되어 기저유량뿐 아니라 유기물질 부하량도 함께 상승시키고 이 후 넓은 배수유역에 내렸던 강우유출수들이 점차 배출되는 과정에서 유기물질들이 낮아진 것으로 판단된다. 또한 2009년 여름철이 2008년 여름철보다 유기물질 상승 폭이 높은 것은 2008년 7월의 강우량이 595 mm인 것에 비해 2009년 7월은 822 mm로 약 220 mm 이상의 차이를 보였고 전체적으로도 2008년 여름철보다 2009년 여름철에 내린 강우량이 많았다. 이는 비강우시 팔당호의 유기물질 변동은 강우로 인한 기저유량 변화가 가장 영향을 많이 미친다고 판단된다.

월별 유기물 유입 부하량을 통계 처리한 결과, Fig. 2 및 Table 2로 나타내었다. BOD<sub>5</sub>의 경우, 최소 249.61 ton에서 최대 13,912.53 ton까지 큰 범위로 조사되었으며 표준편차도 3,101.43로 나타나 데이터의 수치적 차이가 큰 것으로 나타났다. 다른 유기물질 항목도 대부분 유사하게 나타났는데 이는 유기물 유입 부하량이 계절에 따라 변동이 크다는 것을 보여주는 결과이다.

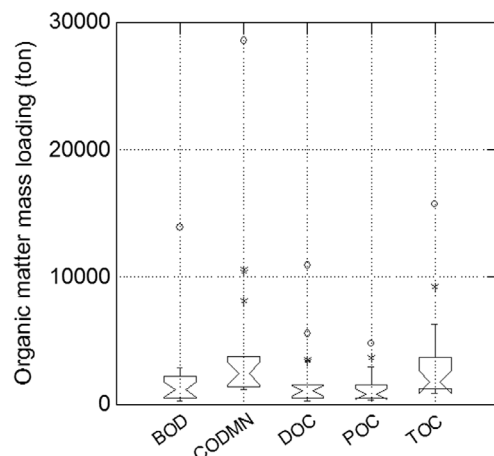


Fig. 2. Statistical analysis of organic matter mass loading.

### 3.2. 계절의 따른 팔당호 내 유기물질 변동

팔당호의 유기물 유입 부하량은 계절의 따라 변화를 보이며 2008년 6월부터 2009년 11월까지 유기물질 변동은 Fig. 3에 도식화하였다. 또한 수평직선분리법에 의해 분리된 팔당호의 기저유량과 강우량을 Fig. 4에 도식화 하였다. 호내 수질이 개선되는 구간은 여름에서 가을, 가을에서 겨울로 변화하는 구간이다. Fig. 4와 같이 우리나라 배수유역의 특성상 여름철 장마 기간 동안 집중강우로 많은 강우가 내리는데 이에 따라 이미 많은 강우가 내렸기 때문에 직접적인 강우가 아닌 비강우시의 호내 유기물질의 경우에도 팔당호 상류의 많은 댐호에 의해 홍수조절로 인한 댐 방류와 더불어 기저유출의 증가로 희석효과를 일으켜 수질이 개선된 것으로 판단된다. 호내 수질이 악화되는 구간은 겨울에서 봄, 봄에서 여름으로 변화하는 구간이다. 이는 점차적인 수온 상승과 강우가 적은 계절로 남조류 등이 증식할 수 있는 조건이 형성되어 팔당호 내에서 클로로필-a의 계절에 따른 농도변화를 나타낸 Fig. 5과 같이 수체 내 조류 증식에 의해 수질이 악화되었을 것이라고 판단된다(국립환경과학원, 2008). 또한 강우가 거의 없는 겨울과 봄철동안

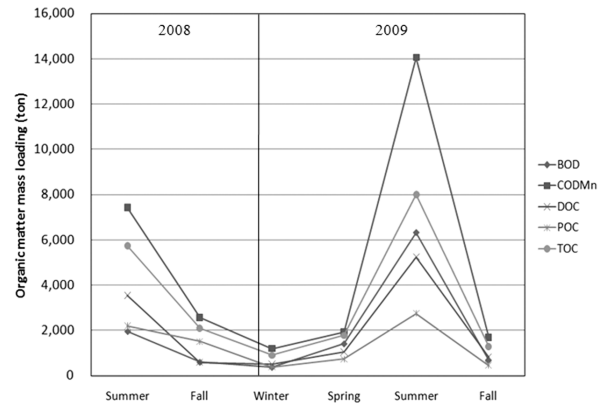


Fig. 3. Organic matter mass loading according to seasonal changes.

축적되어있던 유기물질들이 여름철 집중강우에 의해 함께 유출되어 호내 유기물질이 증가된 것으로 판단된다.

### 3.3. 계절별 생분해성 및 난분해성 유기물질 분포

COD<sub>Mn</sub> 부하량과 BOD<sub>5</sub> 부하량이 각각 유기물의 총량과

Table 1. Organic matter mass loading during the dry periods

Site	Date (year-month)	BOD <sub>5</sub> (ton/month)	COD <sub>Mn</sub> (ton/month)	DOC (ton/month)	POC (ton/month)	TOC (ton/month)
Paldang	2008-06	1,569.50	3,757.57	1,578.73	1,570.25	3,148.98
	2008-07	1,927.49	8,118.20	3,491.90	1,358.90	4,850.85
	2008-08	2,380.00	10,412.23	5,562.71	3,674.60	9,237.32
	2008-09	953.57	2,860.72	1,112.83	2,580.17	3,693.00
	2008-10	439.41	2,329.14	351.66	933.84	1,285.50
	2008-11	411.77	2,530.00	314.97	1,013.16	1,328.12
	2008-12	341.03	1,135.29	563.68	322.18	885.88
	2009-01	249.61	1,166.30	530.36	322.72	852.96
	2009-02	535.08	1,313.53	462.81	516.63	978.82
	2009-03	1,317.22	1,453.92	1,062.36	853.52	1,915.88
	2009-04	1,042.19	1,418.72	953.28	544.20	1,497.42
	2009-05	1,879.45	2,944.45	1,133.99	802.50	1,936.46
	2009-06	2,200.96	3,013.68	1,414.13	552.80	1,966.90
	2009-07	13,912.53	28,562.20	10,929.91	4,791.00	15,720.91
	2009-08	2,861.90	10,596.15	3,410.52	2,927.80	6,338.27
	2009-09	567.52	2,344.41	1,090.69	510.80	1,601.46
	2009-10	647.03	1,349.06	519.47	474.05	993.52
2009-11	812.50	1,402.52	880.55	389.73	1,270.28	

Table 2. Statistical analysis of organic matter mass loading

Statistics	BOD <sub>5</sub> (ton)	COD <sub>Mn</sub> (ton)	DOC (ton)	POC (ton)	TOC (ton)
Minimum	249.61	1,135.29	314.97	322.18	852.96
Maximum	13,912.53	28,562.20	10,929.91	4,791.00	15,720.91
Range	13,662.92	27,426.91	10,614.94	4,468.82	14,867.95
Median	997.88	2,437.21	1,076.53	828.01	1,758.67
Mean	1,891.60	4,817.12	1,964.70	1,341.05	3,305.70
95% CI upper	3,433.90	8,129.79	3,269.72	1,986.19	5,203.61
95% CI lower	349.29	1,504.44	659.68	695.90	1,407.78
Standard Dev.	3,101.43	6,661.48	2,624.27	1,297.32	3,816.53

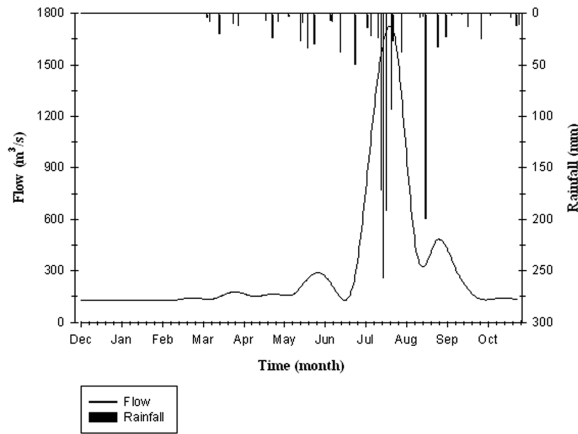


Fig. 4. Base runoff according to seasonal changes in Lake Paldang.

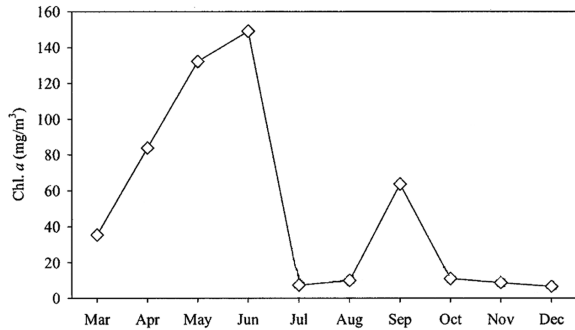


Fig. 5. Chlorophyll-a according to seasonal changes in Lake Paldang - The value was calculated from the results obtained by National Institute of Environmental Research (2008).

생분해성 유기물을 대표할 수 없지만 COD<sub>Mn</sub> 부하량과 BOD<sub>5</sub> 부하량 구성비율의 차이를 통해 난분해성 유기물질이 어떠한 경향으로 변화하는지 확인하기 위해 Fig. 6과 같이 나타내었다.

계절에 따라 생분해성 유기물과 난분해성 유기물의 구성 분포의 차이를 보이며, 팔당호로 유입되는 총 유기물질은 다른 계절에 비해 수질이 개선되는 현상을 보이지만 Table 3과 같이 유기물질 중의 난분해성 유기물질 부하량은 여름철의 경우가 다른 계절에 비해 많이 유입된다는 것을 확인할 수 있다. 이는 여름철 집중강우가 있는 장마 기간 동안

Table 3. Rates of organic matter mass loading during the dry periods

Season	(COD-BOD)/COD (%)	BOD/COD (%)	COD-BOD (ton)
2008 Summer	70.54	29.46	5,470.34
2008 Fall	77.18	22.82	1,971.70
2008 Winter	69.27	30.73	829.80
2009 Spring	24.04	75.96	526.08
2009 Summer	50.42	49.58	7,732.21
2009 Fall	56.63	43.37	1,022.98

넓은 배수유역에 내렸던 강우유출수가 점차 유출되면서 기저유량 증가와 더불어 유기물질도 증가 시키는데 이 중 난분해성 유기물이 유기물질의 구성 중에 많은 비중을 차지했을 것이라고 판단된다. 실제로 2008년 가을철이 2009년 가을철보다 난분해성 유기물이 약 2배정도 높게 나타났는데 이는 2009년 9월의 총 강우량이 41 mm인 것에 비해 2008년 9월에는 107 mm의 강우를 보여 직접적인 강우가 아니더라도 난분해성 유기물질 구성에 강우인자가 영향을 미친다고 추정할 수 있다.

### 3.4. 연간 유기물질 부하량에 대한 월별 기여도

연간 팔당호로 유입되는 유기물질의 월별 기여도를 알아보기 위해 2008년 12월부터 2009년 11월까지 총 연간 유기물질 부하량을 100%기준으로 월별 유기물질 부하량 살펴본 결과, 여름철인 6월, 7월, 8월이 2009년간 총 유기물질의 약 74%를 차지하며 각각 약 5%, 50%, 19%의 기여도를 보였다. 이는 비강우시 유기물질 부하량이지만 우리나라 배수유역 특성상 여름철 집중강우로 인한 기저유량 증가로 7월, 8월이 연간 유기물 유입 부하량에 많은 기여도를 보이는 것으로 추정된다.

## 4. 결론

팔당호의 유기물질 부하량은 계절에 따라 변화를 보이며, 여름에서 가을이 되면서 호내 수질이 개선되는 것은 여름철에 이미 많이 내린 강우로 인한 유출의 증가로 희석효과에 의해 개선된 것으로 판단된다. 하지만 희석효과 등으로 개선된 팔당호 유기물질 중 난분해성 유기물질 부하량은

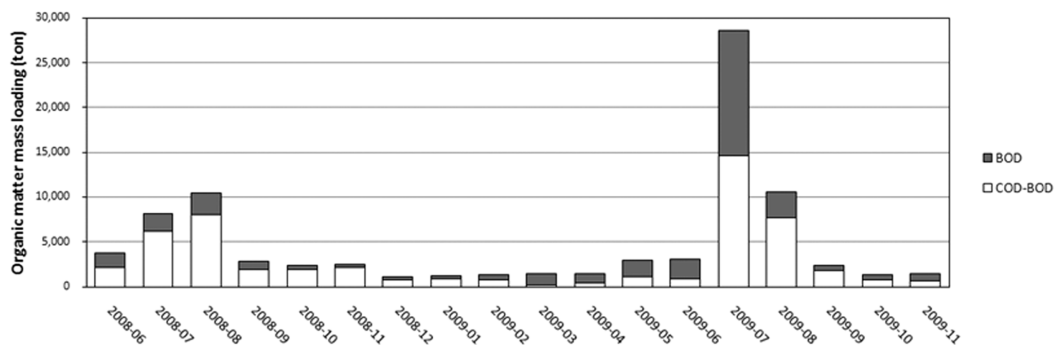


Fig. 6. Rates of organic matter mass loading during the dry periods.

여름철의 경우가 다른 계절에 비해 많이 유입된다는 것을 확인할 수 있는데 이는 강우에 의한 직접적인 영향은 아니지만, 여름철 집중강우가 있는 장마 기간 동안 넓은 배수 유역에 내렸던 강우유출수가 점차 유출되면서 기저유량과 유기물질을 증가시켜 이 중 난분해성 유기물이 유기물질의 구성 중에 많은 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 겨울에서 봄으로 되면서 수질이 악화되는 것은 계절 변화에 따라 수온이 상승하면서 조류 증식에 의한 것으로 생각된다.

연간 유기물질의 월별 기여도를 조사한 결과, 비강우시 유기물질 부하량은 여름철인 7월, 8월이 2009년간 총 유기물질의 약 69%를 차지하는데 이는 비강우시 유기물질 부하량이지만 배수유역 특성상 계절에 따른 기저유량 증가로 7월, 8월이 많은 기여도를 보이는 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- 국립환경과학원(2005). *한강수계 오염총량관리 대상물질 연구사업*. 한강수계관리위원회.
- 국립환경과학원(2008). *수계별 호소환경 및 생태조사*. 한강수계관리위원회.
- 김범철, 김동섭, 권오길(1989). 팔당호의 부영양화 실태. *수질보전학회지*, **5**(2), pp. 39-46.
- 김이형, 이선하(2005). 주차장 및 교량지역의 강우유출수내 비점오염물질의 특성 비교 및 동적 EMCs. *수질보전 한국물환경학회지*, **21**(3), pp. 248-255.
- 문승의, 엄향희(1980). 한국의 계절구분. *한국기상학회지*, **16**(1), pp. 45-54.
- 신제기, 조주래, 황순진, 조경제(2000). 경안천~팔당호의 부영양화와 수질오염 특성. *Korean J. Limnol.*, **33**(4), pp. 387-394.
- 이병수, 길경익(2008). 식생피도가 식생여과대의 질소 및 인 처리효율에 미치는 영향. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(4), pp. 499-503.
- 이소영, 이은주, 김준명, 이병식, 김이형(2006). 주차장 축적 입자의 입도분석, 침강성 및 입자별 중금속 부착량 산정. *공동춘계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, pp. 1034-1040.
- 이종남, 고병욱, 강용태(1988). 팔당 상수원 보호종합대책에 관한 연구, Part 8, 수리수문. *국립과학연구원 보고서*, pp. 351-470.
- 정용준, 임기성(2006). 한강 수계 비점오염원관리 시범시설 모니터링 및 유지관리방안 I. *공동춘계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, pp. 409-412.
- 조덕희, 김종수, 정연훈(2009). 팔당상수원 부영양화 제어를 위한 수질관리 정책방향. *상하수도학회지*, **23**(6), pp. 693-699.
- 환경부(2004). *관계부처합동 물관리 종합대책의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책*.
- 환경부(2005). *비점오염원관리 업무편람*.
- 환경부(2008). *수질오염공정시험법*.
- EPA (1996). *Nonpoint Pointers*. EPA-841-F-96-004, U. S. Environmental Agency, Office of Water, A. Washington D.C..
- Thornton, K. W. (1990). *Reservoir Limnology: Ecological Perspectives*, Wiley interscience, New York, pp. 245.
- Wetzel, R. G. and Saunders, W. B. (1983). *Limnology*, Philadelphia, pp. 743.
- Wetzel, R. G. (1990). Reservoir ecosystems: conclusions and speculations. In : *Reservoir Limnology : Ecological perspectives* K. W. Thornton, B. L. Kimmel, and F. E. Payne (eds.), Wiley interscience, New York.