

하절기의 집중강우가 남한강 상류수계 수질에 미치는 영향

박 성 민 · 신 윤 근*

(상지대학교 환경공학과)

The Impact of Monsoon Rainfall on the Water Quality in the Upstream Watershed of Southern Han River. Park, Sung-Min and Yoon Keun Shin* (Department of Environmental Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea)

The objective of this was to determine how the seasonal intensive rainfall influenced the water quality, and to analyze the long-term temporal trend of water chemistry and spatial heterogeneity in the upstream watershed of Southern Han River using water quality dataset from 1997 to 2007. The largest seasonal variability in most parameters occurred during the two month July and August and there were closely associated with a large spate of summer monsoon rain. Total phosphorus (TP), chemical oxygen demand (COD), and suspended solids (SS) were greater during summer than any other seasons, and had a direct correlation with precipitation ($r > 0.4$, $p < 0.01$, $n = 120$). In addition, dissolved oxygen (DO) had an inverse function with precipitation ($r = -0.542$, $p < 0.01$). Overall, the data of total phosphorus (TP) and suspended solids (SS) showed that water quality was worst in Site I1, compared to the others. This was due to continuous effluents from the highlands' fields and cattle farms within the upstream area of Doam lake (Song stream). Based on the overall dataset, an efficient water quality management is required in the highlands and farms areas for better water quality with precipitation ($r = 0.4$, $p < 0.01$, $n = 120$).

Key words : monsoon rainfall, suspended solid, water quality, nonpoint source, Doam lake, Southern Han River

서 론

우리나라의 하천생태계는 하계에 편중된 강우(장마, 집중호우, 태풍 등)에 의해 매년 주기적으로 교란을 받는다. 몬순과 연 3~5차례 직접적인 영향을 미치는 태풍으로 인해 연 강우량의 50% 이상이 하계에 발생한다. 반면에 겨울부터 이듬해 봄까지는 강우가 적어 하천생태계의 하계 동태는 다른 계절과 뚜렷이 구분된다. 하계에 편중된 강우로 인한 홍수는 하천 및 호소생태계의 물리 화학적 특성에 직, 간접적인 영향을 미치는 요인으로 평가되고 있다(Park *et al.*, 2002). 특히, 하절기 동안 비점오염원으로부터 인과 질소 같은 영양염류의 유입이 보고되었으나, 이런 연구들은 주로 호소들에 국한되었고, 하천에 대

한 연구는 점원 및 비점원 오염원의 영향이 큰 지역에서만 이루어져 우리나라의 산림지역에 위치한 하천에서의 계절적 강우 특성변화에 따른 다각적 수질변동에 대한 평가는 거의 없는 실정이다(An and Shin, 2005). 또한 폭우가 내리는 시기에는 토사의 유출과 탁수가 발생하는 데, 근래 국내 여러 지역에서 토양침식의 증가로 인해 탁수가 발생하고 댐에 저류되어 장기화함으로써 호수의 수질과 생태계 피해 및 방류 이후 하류 하천의 피해 사례가 증가하고 있고, 몬순강우에 의한 탁수 관련 연구들도 많은 수계에서 다양하게 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2004; An and Shin, 2005; Park *et al.*, 2005; Shin *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2007).

본 연구 대상인 도암댐 하부에 위치한 동강 유역은 강

* Corresponding author: Tel: 033)730-0441, Fax: 033) 730-0444, E-mail: ykshin@sangji.ac.kr

원도 정선군, 영월군, 평창군의 산림지대를 흐르는 계류성 하천이다. 특히 유역 주변의 하천수변 지형이 수려하고 주변의 산세가 험하기 때문에 강은 양측이 높은 절벽으로 이루어진 지대를 따라 흘러 유속이 빠른 전형적인 상류역 하천의 모습을 지니고 있다. 또한 본류인 송천 조양강, 동강으로 구분되며, 골지천 및 오대천을 포함하여 9개의 주요 지류를 포함하고 있다. 특히 송천의 경우 도암댐이 위치하고 상류지역에서 70여 개의 소규모 목장, 스키장, 골프장 및 콘도 등 관광콘텐츠가 발달되어 있어 많은 오염원들이 유입되고 있는 실정이다 (Lee *et al.*, 2006).

1990년대 이후 계속 증가한 고랭지 밭에서 강우시 유출되는 토사로 인한 탁수가 지속적으로 유입되어 도암호 내에 많은 양의 탁수를 저류하고 장기간 탁수를 방류하게 되어 하류 하천수계의 수질악화를 초래하여 수처리 시설 도입이 거론되고 더 나아가 도암댐 해체 등의 논란으로 크게 이슈화 되었다. 특히 상류수계는 토양과 숲과 아주 밀접한 관련이 있고 (Fisher *et al.*, 2004), 수계 서식지가 독특하며, 얇은 수로로부터 상당한 양의 물을 받아들이는 경향이 있어 환경지표로서 아주 독특한 가치를 가지고 있다 (Lawrence *et al.*, 2011).

연구 대상지역의 선행 연구로는 도암호의 부영양화 실태 (Kim *et al.*, 1995), 송천상류수계의 수질 및 오염 부하량 분포에 관한 연구 (Huh *et al.*, 1995), 도암호의 수질과 어류군집 특성 연구 (Lee *et al.*, 2006), 도암댐 유역의 산림 파편화 분석 (Heo *et al.*, 2007) 등이 있다. 하지만 대부분의 연구가 도암호와 상류 유입수계에 국한되어 이루어졌고 도암댐 하류역에 관한 연구는 단편적으로 이루어졌거나 매우 미비한 실정이며 탁수 관련 연구는 보고된 바 없다.

본 연구는 환경지표성으로 가치를 지닌 남한강 상류수계의 송천, 조양강, 동강 등 본류와 골지천 및 오대천 등 주요 지류를 중심으로 분기별 수질 특성과 몬순강우를 고려 장마기와 갈수기로 대별하여 주요 수질 변수에 대한 조사를 실시하여 상·하류간의 수질에 대한 공간적 특성을 파악하고 나아가 과거 10년 동안의 수질 데이터를 이용하여 장기적 이화학적 수질 변화 특성을 분석함으로써 향후 수자원 및 수질관리에 유용한 기초자료를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개요 및 조사지점

남한강은 강원도 태백시의 금대봉 검용소에서 발원해

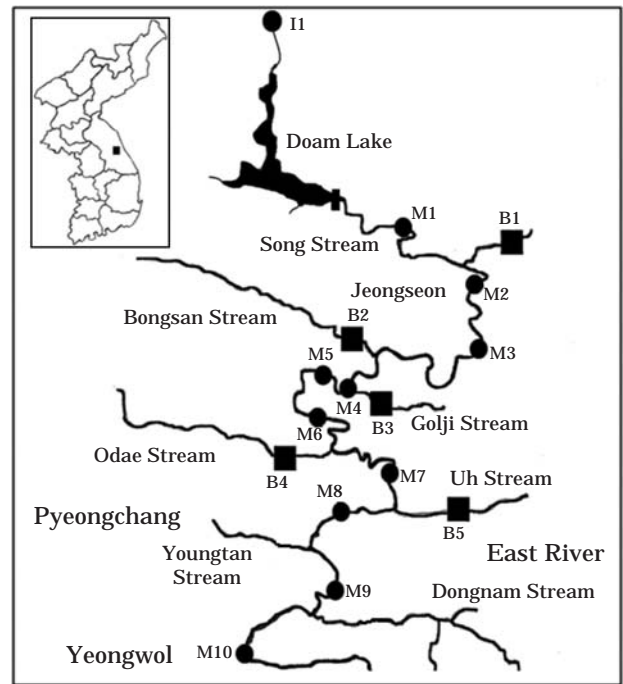


Fig. 1. Map showing the shape of the upstream watershed of Southern Han River and sampling sites.

유역면적 12,514 km², 유로연장 375 km이며 남서류, 영월읍에서 평창강을 합치고 충북의 단양군을 지나 서쪽으로 흐름을 바꾸어 제천시의 광대한 충주호에 27억 5000만 톤의 물을 채우고, 시설용량 40만 kW의 발전소를 움직인 다음, 북서로 유로를 바꾸어 달천을 합쳐 충주시를 지나서 경기도 들어간다. 이후 섬강, 청미천, 양화천, 북하천, 흑천 등과 합류하며 최종적으로 북한강과의 합류점인 양서면 양수리에 이르는 우리나라의 대표적인 강이다. 본 연구는 그 중에서도 상류지역으로 도암호가 위치한 수하리 용산교부터 도암댐을 지나 가수리까지 본류의 수질특성에 영향을 줄 수 있는 지류와 합류부를 고려하여 선정하였고, 과거자료 비교를 위해 환경부 모니터링 지점을 포함하여 총 16개 지점 (I1 용산교, M1 도암댐 하류, M2 배나드리교하류, M3 한터교, M4 유천2교, M5 아우라지교, M6 장열교, M7 남평교, M8 정선교, M9 광하교, M10 가수리, B1 대기천, B2 봉산천, B3 골지천, B4 오대천, B5 어천)을 조사하였다 (Fig. 1).

2. 조사기간 및 방법

조사시기는 2008년 5월, 8월 10일, 2009년 4월의 총 4회 실시하였고 수질분석항목은 수온, 용존산소량, 전기전도도, 수온, 총질소, 총인, 생물학적 산소요구량, 화학적 산

소요구량, 총부유물이었다. 남한강 상류수계의 강우량은 기상청의 자료를 이용하였고, 주요 지점의 과거 수질 결과는 환경부의 년별 및 월별자료를 이용하였다. 수온, 용존산소, 전기전도도는 YSI 556MPS를 사용하여 현장에서 직접 측정하였고, 총질소는 자외선 흡광광도법, 총인은 아스코르빈산 환원법, 생물학적 산소요구량은 수질오염 공정시험법, 화학적 산소요구량(COD_{Mn})은 산성 망간법, 총부유물질은 유리섬유여과법에 의거하였고, QA/QC 분석보장을 위해 미국 환경보호청의 규정(U.S. EPA, 1979)에 따라 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 남한강 수계의 강우 특성

남한강 상류수계의 11년간(1998~2008)의 강우 패턴 분석에 의하면, 연평균 강우량은 1,314 mm로 2003년과 2006년에 1,500 mm 이상으로 다른 해에 비해 많은 강우가 내린 반면 2001년과 2008년에는 1,000 mm 이하의 가뭄의 해로 나타났다(Fig. 2a). 이는 국내 30년간 국내 연평균 강수량 1,200 mm보다는 다소 높았다. 강우가 가장 많았던 2003년과 가장 가물었던 2001년의 월별 강우량 변동을 11년간 월평균 자료와 비교 분석한 결과 1~3월, 10~12월에는 다른 해와 아주 작은 차이를 보였으나 4월과 7~9월에는 상당한 차이를 보인다. 강우기인 7~9월 동안 평균 842 mm의 강우량을 보여 이 시기의 강우량이 연평균 강우량의 64.1%를 차지하여 7~9월의 강우량이 전체 강우량을 좌우하는 것으로 나타났다(Fig. 2b). 몬순시기에 강우량이 전체의 강우량을 좌우하는 결과는 다른 수계의 연구들(Park *et al.*, 2002; An and Shin, 2005; Kang and An, 2006; An and Yang, 2007; Bae *et al.*, 2007; Han *et al.*, 2010)과 동일하였다. 본 연구 기간인 2008년에는 309 mm의 최대 강우량을 보인 7월을 제외한 나머지는 평균 강우량보다 낮았다. 월 평균 강우량은 86 mm, 강우기인 7~8월의 강우가 전체 강우량의 51%를 차지하였다(Fig. 2b).

2. 수질의 계절별 변이

연구기간 동안 조사된 수질변수의 평균값, 최대·최소값 분석결과는 Table 1과 같다.

전기전도도는 평균 0.174 mS cm⁻¹로 4월(2009) B5(어천)에서 최대값 0.334 mS cm⁻¹, 8월(2008) B2(봉산천)에서 최소값 0.064 mS cm⁻¹을 나타냈고, 공간적 분포 양상

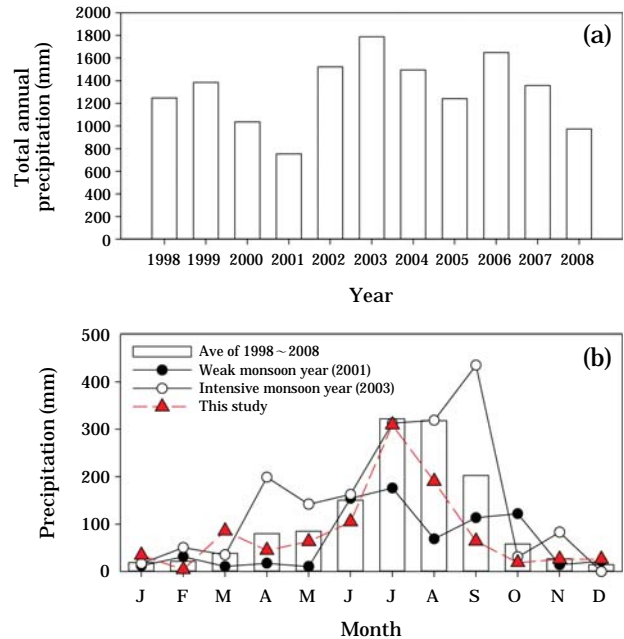


Fig. 2. Variations of the total annual precipitation (a) and monthly precipitation (b) in the study area.

Table 1. Mean, minimum, maximum, and standard deviation of the physical, and biological parameters in the upstream watershed of Southern Han River during 2008 (May, August, October) and 2009 (April).

Parameters	N	Mean	Min	Max	SD
Conductivity (mS cm ⁻¹)	60	0.174	0.064	0.334	0.065
Temperature (°C)	60	14.4	1.8	24.5	5
TN (mg L ⁻¹)	60	4.20	1.94	19.48	2.55
TP (mg L ⁻¹)	60	0.020	0.004	0.067	0.015
BOD (mg L ⁻¹)	60	1.57	0.05	3.69	0.92
COD (mg L ⁻¹)	60	2.12	0.6	3.8	0.73
DO (mg L ⁻¹)	60	10.56	4.71	13.59	1.55
SS (mg L ⁻¹)	60	2.78	0.2	17.6	2.75

은 상류에서 하류로 내려갈수록 증가하는 경향성을 보였다(Fig. 3a). Park *et al.* (2011)의 결과를 보면 춘천에서 조사된 전기전도도와 비슷한 수준이고 광주보다는 다소 낮았는데 두 곳 모두 건기에 높고 우기에 낮은 경향을 보이고 있어 본 연구 결과와 같은 양상을 나타냈다. Collins and Jenkins (1996)은 네팔 히말라야 하천 수질에 가장 강력한 영향을 주는 것으로 농업이 활발하게 이루어지고 있는 몬순시기에 일어난다고 하였다. 몬순시기에는 이온의 농도가 건기에 비해 낮아지고 있는데 그 이유는 풍화되어 유입되는 것보다 집중강우로 인해 희석되는 비율이

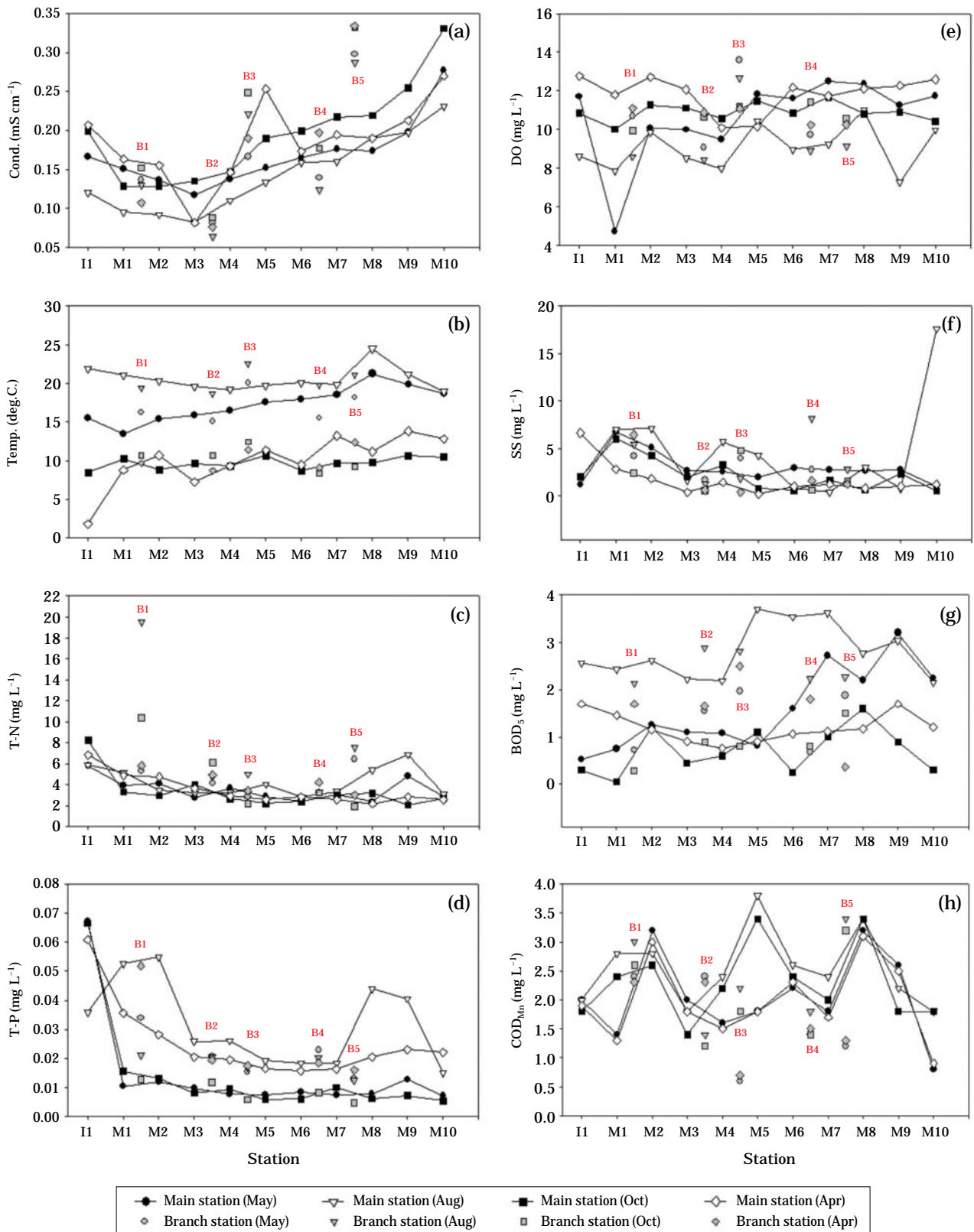


Fig. 3. Spatial variations of physio-chemical, and biological parameters in the upstream watershed of Southern Han River during May, August, October, 2008, and April, 2009.

크기 때문이라고 하였는데 이 역시 본 연구 결과와 동일한 것으로 판단된다. 수온은 평균 14.4°C, 최대 24.5°C, 최소 1.8°C로 나타났고 여름철에는 높고 봄 가을에는 낮은 경향을 보이는데 하천 수심이 낮고 수량이 적어 쉽게 대기온도에 영향을 받기 때문으로 판단된다. 공간적인 분포는 여름철을 제외하고 전반적으로 하류로 갈수록 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 3b). 이런 특성은 치악산 수계에서도 나타나 치악산 계류의 수온이 하류에 존재하는 주천강 수계에 비해 낮았다 (Shin and Kim, 2002). 하천의 수온을 좌우하는 요인으로는 하천 좌우에 나무 그늘의 존재와 수온이 낮은 지하수의 유입, 수중보 등으로 인한 수체의 정체성 등에 의해 영향을 받는 것으로 보여지며 나무들이 많이 존재하는 계류에 비해 나무 그늘이 존재하지 않아 햇빛의 영향을 직접적으로 받고 있는 본류 하천에서 수온이 높아지는 것으로 보인다. 동일 수계 내에서 수온의 차이가 나타나는 것은 이런 특성과 관련이 있는 것으로 판단된다.

총질소(TN)는 평균 4.2 mg L⁻¹로 8월 B1 (대기천)에서 19.48 mg L⁻¹의 최대치를 나타냈고 하류로 갈수록 감소하는 경향성을 보이나 여름철에 정선 도심의 광하고 정점에서 다소 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 3c). 산간 계류성 하천의 수질을 변동을 조사 연구한 An and Shin (2005)의 결과와 비교할 때 총질소의 경우는 약 3배 높았으며, 질소가 높은 농도를 나타내는 것은 지질학적 특성이나 혹은 대기침전 이외에도 본 연구의 경우 고랭지 채소밭 등의 비점오염원의 영향이 큰 것으로 판단된다. 총인(TP)은 평균 0.02 mg L⁻¹로 나타났는데 An and Shin (2005)의 결과와 유사하였다. 5월, 11월, 4월 (2009)의 경우는 도암호 유입지점인 I1에서 최고치를 보이고 방류되어 하류로 내려가며 지점별 유사한 패턴을 보인 반면 여름철인 8월의 경우 오히려 유입수 (I1)는 낮았지만 방류수역인 M1, M2 지점에서 높아지고 그 이후 다른 달과 같은 양상을 보이다가 정선 도심 지역인 M8, M9 지점을 지나면서 다시 높아지는 경향을 보였다 (Fig. 3d). 소양호에서 연구된 바에 의하면 강우 시 상류하천에서 유입되는 유기물이 소양호 전체 유기물의 70~90%를 차지하며 소양호 수질을 좌우하고 있는 것으로 보고하고 있다 (Heo et al., 1998; Kim and Kim, 2004). 도암호 상류지점에서 높은 총인농도를 보이고 하계에는 도암호 방류수역 인근에서 높게 나타나는 것은 채소밭에서 유출된 인이 도암호에 영향을 주고 홍수기 높은 인농도의 도암호 방류수가 유입되며 하천수질에 영향을 주고 있기 때문으로 사료된다.

유기물 오염의 지표로 사용되고 있는 생물학적 산소요

구량 (BOD)과 화학적 산소요구량 (COD)의 평균농도는 각각 1.57 mg L⁻¹ 및 2.12 mg L⁻¹로 생물학적 산소요구량은 우리나라 현행 하천 수질 기준에 의하면 2등급으로 평가되었다. 생물학적 산소요구량은 계절별로 뚜렷한 차이를 보이며 8월 M5~M7에서 3 mg L⁻¹ 이상을 보이며 다른 지역보다 높게 측정되었고 어천 (B5)과 합류 후 다른 지역과 비슷한 농도로 감소하였으며 특히 M5 지역은 화학적 산소요구량도 같은 양상으로 증가 하였다 (Fig. 3e). 화학적 산소요구량은 지점별 농도 변화 폭이 컸다. 그 중 M2, M5, M8의 경우 8월, 11월에 다른 지점보다 2배 이상 높게 측정되었는데 M5, M8 유역에 위치한 도심을 경유하여 생활하수 혹은 기타 오염원에 의해 유입되었을 것으로 사료되며, M2의 경우는 지류인 B1과 주변 지역에서 유기물이 유입되는 것과 관련이 있는 것으로 사료된다 (Fig. 3f). 용존산소량 (DO)은 평균 10.56 mg L⁻¹로 5월 B3에서 최대 13.59 mg L⁻¹, 5월 M1에서 최소 4.71 mg L⁻¹이었고, 공간적으로는 매 시기 다른 경향성을 나타냈다 (Fig. 3g). 총부유물 (SS)의 평균 농도는 2.78 mg L⁻¹로 8월 M10에서 최대 17.6 mg L⁻¹, 4월 (2009) M6에서 최소 0.2 mg L⁻¹로 나타났으며, 하류로 갈수록 감소하는 경향을 보이나 8월에 경우는 다른 양상을 나타냈다 (Fig. 3h).

수질의 월평균치를 비교해 보면 전기전도도와 용존산소량은 강우량과는 역상관관계를 나타냈으나 총부유물질과 총인은 강우량과 유사한 경향을 보였다 (Fig. 4). 집중강우는 탁수를 발생시키는데 점토입자에 흡착된 인의 유출을 수반하므로 호수나 하천에서 부영양화를 일으키는 원인이 된다 (Heo et al., 1998, 1999; Bae et al., 2007). 이런 특성이 총부유물질과 총인이 강우량과 유사한 경향을 보이게 하는 이유로 여겨진다. 전기전도도는 강우량과 역상관관계를 나타내는 것 (Fig. 4a)은 Park et al. (2002)과 An (2011)의 연구결과에서도 동일하데 특히 장마 초기에 큰 폭으로 감소한다고 한 것으로 미루어 볼 때 급격한 유량의 변화를 유발함으로써 나타나는 현상으로 판단된다. An and Shin (2005)의 결과는 본 연구와 달리 강우량과 전기전도도사이의 정상관관계를 보인 것으로 보고하였는데 이는 강우에 따른 시간지연현상으로 나타나는 것으로 실질적으로는 강우가 짧게는 4~5일 후 길게는 1~2주 후에 전기전도도가 급격히 감소된다고 보고하여 이 역시 문순에 의해 이온 농도가 희석되는 효과로 인해 전기전도도가 낮아지는 것으로 해석하고 있다. 총부유물과 총인의 경우는 강우량과 정상관관계를 나타냈는데 (Fig. 4b, c) 이런 경향은 An and Shin (2005)의 결과와 같았다. 강우량이 많을수록 총부유물이 증가하는데 집중강우시기의

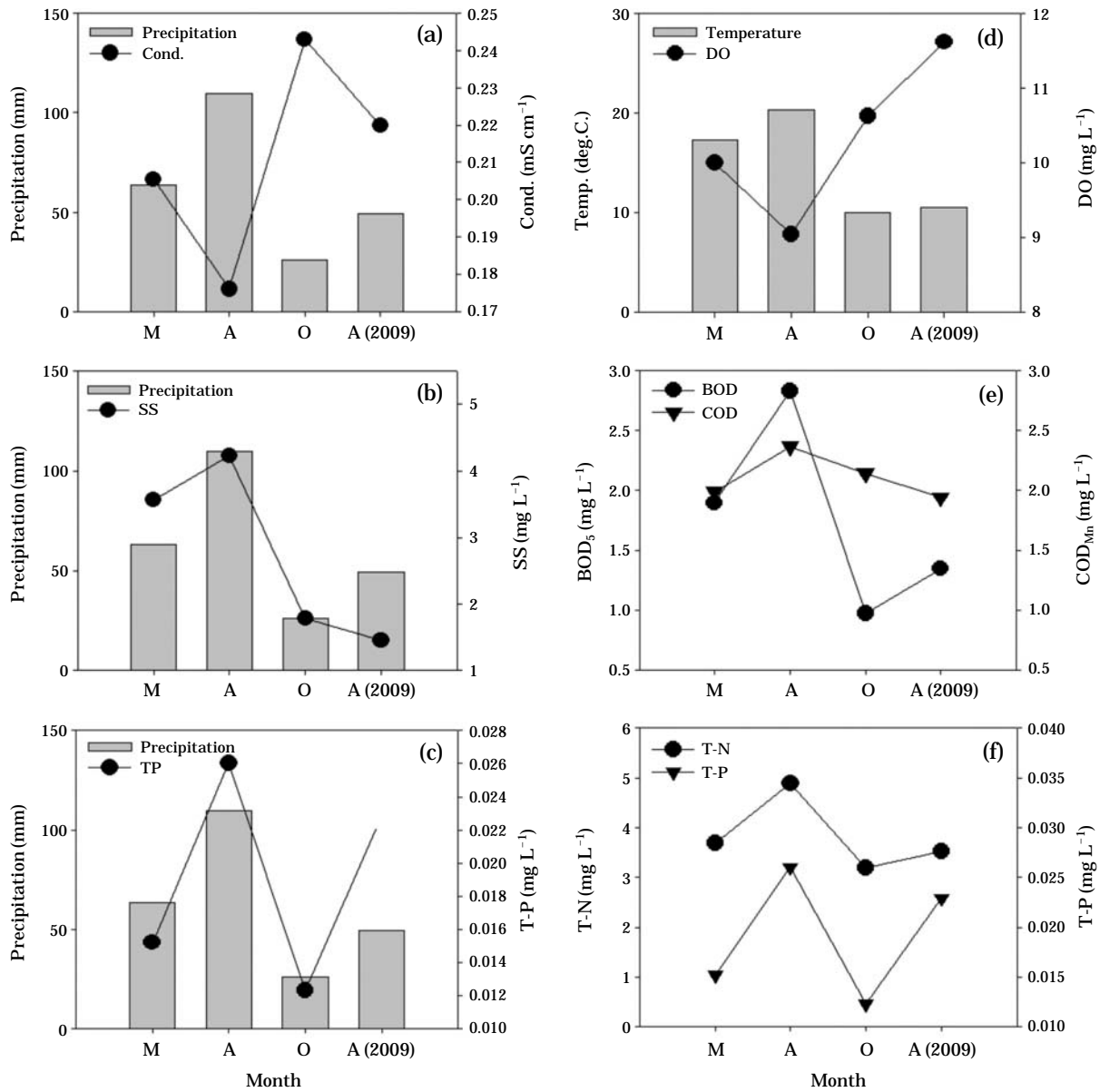


Fig. 4. Seasonal fluctuations of precipitation and physio-chemical parameters. Each data point indicates monthly averages during 2008~2009.

총부유물의 대부분은 유기성 부유물이라기보다 비휘발성 무기물의 증가로 인한 것으로 보여진다 (Perkins and Jones, 1994; An and Shin, 2005). 이와 같이 급격한 총부유물질의 증가는 하천 생태계에 부정적인 영향을 미칠 수 있다 (Ford, 1990; Dodds *et al.*, 1998; Yoon *et al.*, 2011).

생물학적 산소요구량과 화학적 산소요구량 모두 장마기인 8월에 각각 2.83 mg L⁻¹ 및 2.37 mg L⁻¹로 최대치를 보였으며 생물학적 산소요구량은 월별 변동 폭이 큰 반면 화학적 산소요구량은 적은 것으로 나타났다 (Fig. 4e,

f). 총질소와 총인은 강우기인 8월에 최대치를 보이며 계절별 같은 패턴을 보였다. 이 결과는 하절기에 BOD, COD, 총질소, 총인의 농도가 다른 계절에 비해 증가하였다는 An and Shin (2005)의 결과와 동일하다. 하지만 TP의 경우 강우량과의 비교 분석에서 강우량이 적은 4월 (2009)년에 3.52 mg L⁻¹로 높게 나타났는데 이는 갈수기 하천의 유지수량이 적은 상태에서 생활하수 및 농업용수 등의 오염원에 의한 영양염류가 유입되어 높은 농도가 된 것으로 판단된다 (Fig. 4g). 금강 수계의 토지이용도와

Table 2. Mean, minimum, maximum, and standard deviation of the physio-chemical, and biological parameters on the annual averages during 1998 to 2007.

Parameters	N	Mean	Min	Max	SD
Conductivity (mS cm ⁻¹)	10	0.151	0.116	0.171	0.019
Temperature (°C)	10	12.9	11.8	13.8	0.6
TN (mg L ⁻¹)	10	3.42	2.99	4.34	0.45
TP (mg L ⁻¹)	10	0.050	0.042	0.078	0.010
BOD (mg L ⁻¹)	10	0.92	0.65	1.18	0.16
COD (mg L ⁻¹)	10	2.31	1.77	2.88	0.37
DO (mg L ⁻¹)	10	10.82	10.05	11.27	0.40
SS (mg L ⁻¹)	10	11.71	4.62	33.00	8.36

Table 3. Mean, minimum, maximum, and standard deviation of the physio-chemical, and biological parameters on the monthly averages during 1998 to 2007.

Parameter	N	Mean	Min	Max	SD
Conductivity (mS cm ⁻¹)	703	0.151	0.04	0.55	0.054
Temperature (°C)	703	12.8	0	31	7.9
TN (mg L ⁻¹)	703	3.41	0.08	16.61	1.59
TP (mg L ⁻¹)	701	0.05	0.001	0.902	0.071
BOD (mg L ⁻¹)	703	0.91	0.2	3.2	0.43
COD (mg L ⁻¹)	703	2.29	0.7	15.8	0.99
DO (mg L ⁻¹)	703	10.82	6	20.5	2.16
SS (mg L ⁻¹)	702	11.75	0.1	441	26.29

Table 4. Pearson's correlation coefficients (*r*) and probability (*p*) values, based on the significance using a 2-tailed test, in the water quality parameters (n=total number observations).

		Precipitation	Temp.	DO	BOD	COD	SS	TN	TP	Cond.
Precipitation	r	1								
	p									
	n	120								
Temp.	r	.589(**)	1							
	p	.000								
	n	120	120							
DO	r	-.542(**)	-.874(**)	1						
	p	.000	.000							
	n	120	120	120						
BOD	r	.128	.213(*)	-.096	1					
	p	.162	.019	.299						
	n	120	120	120	120					
COD	r	.424(**)	.465(**)	-.444(**)	.419(**)	1				
	p	.000	.000	.000	.000					
	n	120	120	120	120	120				
SS	r	.313(**)	.351(**)	-.399(**)	.044	.534(**)	1			
	p	.000	.000	.000	.633	.000				
	n	120	120	120	120	120	120			
TN	r	-.137	-.237(**)	.298(**)	.096	-.086	-.255(**)	1		
	p	.137	.009	.001	.295	.352	.005			
	n	120	120	120	120	120	120	120		
TP	r	.422(**)	.397(**)	-.396(**)	.126	.532(**)	.748(**)	-.263(**)	1	
	p	.000	.000	.000	.170	.000	.000	.004		
	n	120	120	120	120	120	120	120	120	
Cond.	r	-.122	-.133	.225(*)	.037	-.132	-.263(**)	.115	-.223(*)	1
	p	.186	.149	.013	.687	.152	.004	.213	.015	
	n	120	120	120	120	120	120	120	120	120

수질특성을 조사 연구한 Han *et al.* (2010)이 건기에는 영양염의 농도가 높게 유지되다가 여름철에 총인 등 영양염류가 하천 유량의 증가로 인해 희석되는 효과를 보였다는 보고와 유사한 것으로 사료된다.

3. 과거 10년간 수질변수들의 상관관계

남한강 상류수계에서의 10년간 년 평균 수질변수의 평

균값, 최대·최소값 분석결과는 Table 2, 지점별 월 평균 수질변수의 평균값, 최대·최소값 분석결과는 Table 3과 같이 요약된다.

남한강 상류수계에서의 수질변수에 대한 10년 동안의 계절별 Pearson상관지수 분석결과는 Table 4와 같다. Pearson상관지수 분석에 따르면 강우와 총인, COD, 총부유물에 대하여 상관지수 값이 0.40 이상 ($p < 0.01$, $n =$

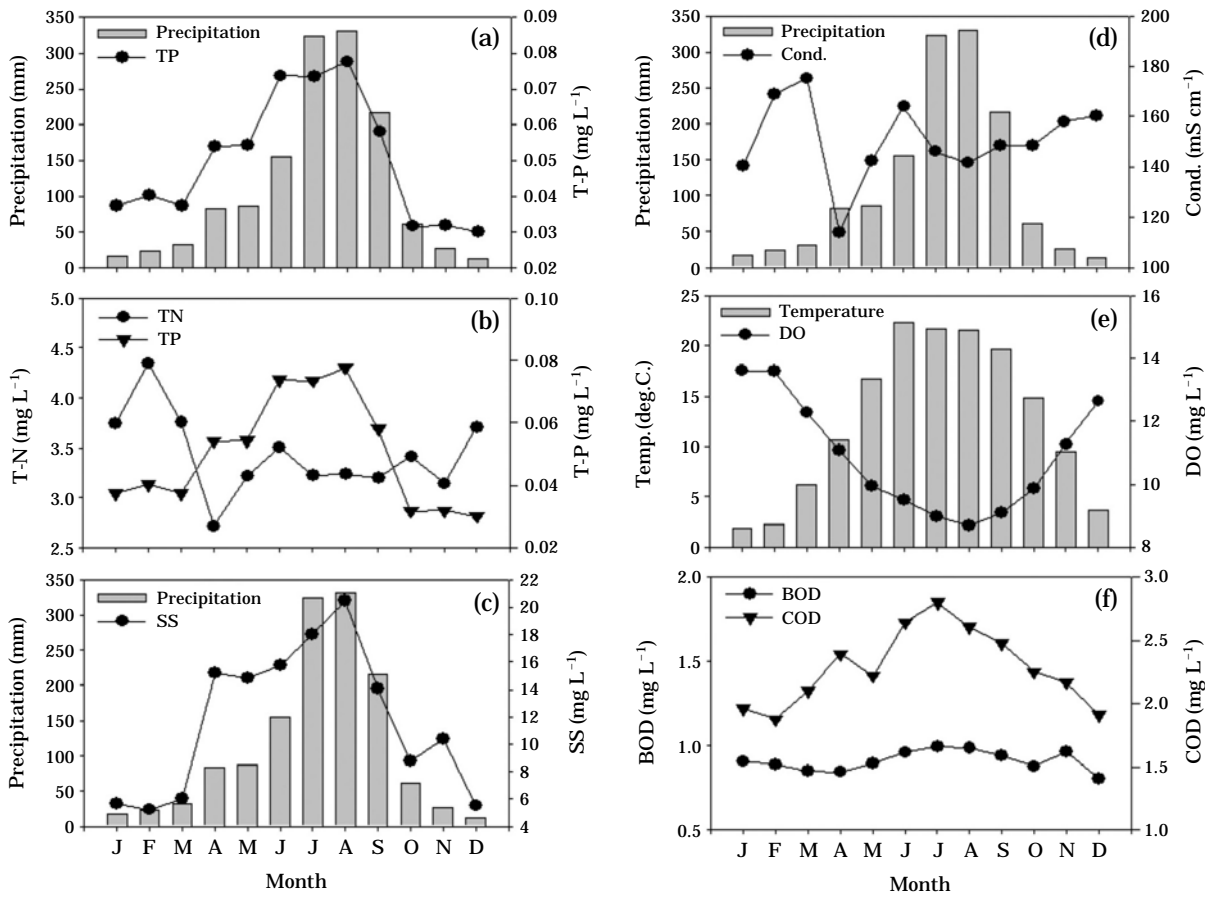


Fig. 5. Seasonal fluctuations of precipitation and physio-chemical parameters. Each data point indicates monthly averages during 1998~2007.

120)의 상관성을 보였으며, 용존산소는 역의 상관성 ($r = -0.542, p < 0.01$)을 보여 강우가 수질 변화에 중요한 요 소인 것으로 나타났다 (Table 4).

용존산소 (DO)의 농도분포는 수온변화와 뚜렷한 역의 상관관계 ($r = -0.874, p < 0.01$)를 보였는데 (Fig. 5e, Table 4), 이로 인해 BOD 및 COD는 DO와의 상관관계에서 상 대적으로 수온과의 관계보다 낮은 상관성을 나타낸 것으 로 보인다. 따라서 용존산소는 BOD와 COD의 영향보다는 수온의 영향을 더 많이 받는 것으로 판단된다 (Table 4).

총부유물의 10년간 계절별 평균 농도를 보면 강우기인 8월에 최대값 20.47 mg L^{-1} , 갈수기인 2월에 최소값 5.22 mg L^{-1} 로 약 3.9배의 차이를 보이고 (Fig. 5c), 강우와의 상관관계 분석에서도 유의한 양의 상관성 ($r = 0.313, p < 0.01$)을 보였다 (Table 4). 이는 장마기 집중강우에 의해 무기성 부유물의 증가 때문으로 여겨지며 이로 인해 탁 도의 증가, 일부 구간의 COD 증가, 1차생산자에 광 제한 효과 등을 초래할 것으로 사료된다 (Perkins and Jones,

1994; Dodds *et al.*, 1998; An and Shin, 2005). 한편 4~6 월 총부유물의 증가 (Fig. 5c)는 상류역인 도암호 유입 지 점의 단독 증가로 나타났으며 이는 상류에 산재한 농경 지, 골프장 및 레저시설 등 비점오염원에서 유입되는 탁 수의 영향으로 사료된다 (Kim *et al.*, 1995).

BOD와 COD의 연평균은 각각 0.92 mg L^{-1} , 2.31 mg L^{-1} 로 장마기간인 7월에 각각 0.99 mg L^{-1} , 2.8 mg L^{-1} 로 최고치를 나타냈으며 5월에 상승하기 시작하여 장마기간 에 최고치를 보이는데 (Fig. 5f), 이는 강우에 의해 농경지 와 같은 비점오염원에서 유기물이 유입하였기 때문으로 사료된다. 또한 BOD와 COD 농도가 계절별로 매우 유사 ($r = 0.419, p < 0.01$)한 패턴을 보였다 (Table 4). COD의 경 우 3~4월에 증가하는 것으로 나타났는데 (Fig. 5f) 이는 갈수기 동안 뚜렷한 큰 강우가 없었고 외부로부터의 영 향이 미미했을 것으로 판단되며 유량감소 및 수온상승의 동시 효과로 하천 자체의 유기물오염도 증가로 사료된다.

총인 (TP)은 연평균 0.05 mg L^{-1} 로 나타났으며 장마기

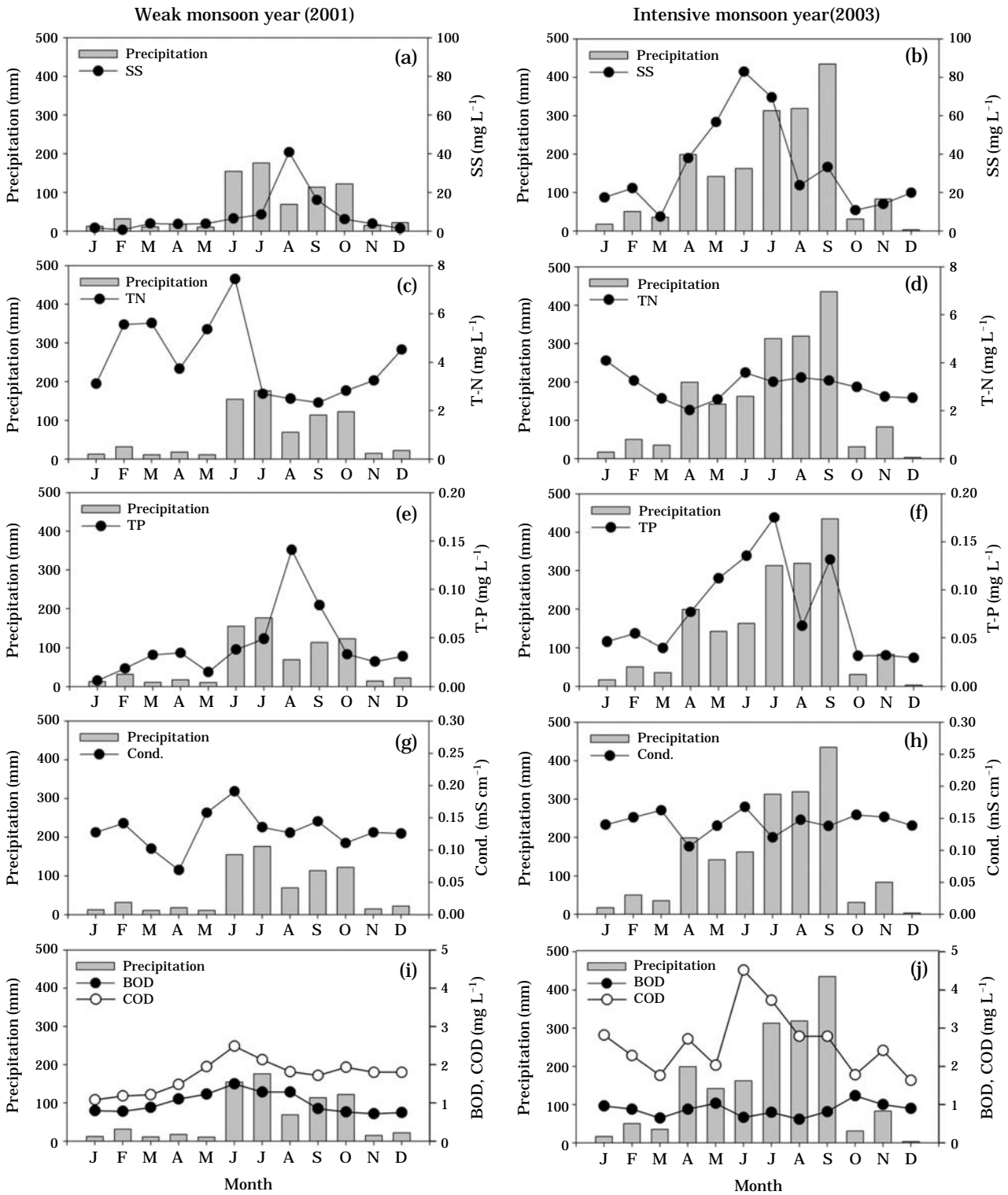


Fig. 6. Seasonal comparisons of physio-chemical parameters between the weak monsoon and intensive monsoon.

인 8월에 0.078 mg L^{-1} 로 평균보다 약 1.5배 높았다(Fig. 5a, Table 4). 6월에 급격하게 증가하여 8월에 최대값을

보였으며 다시 강우의 감소에 따라 총인 농도는 감소하는 경향을 보였다(Fig. 5a). 강우와의 상관관계 분석에서

도 상관지수 값이 0.40 이상 ($p < 0.01$, $n=120$)의 상관성을 보였다 (Table 4). 화학적 산소요구량 (COD), 총부유물 (SS)과도 높은 상관성 ($r=0.532$, $p < 0.01$; $r=748$, $p < 0.01$)을 보여 강우기 증가는 집중강우에 의한 총부유물 증가 때문인 것으로 사료된다 (Fig. 5c, Table 4). 반면 총질소(TN)의 경우 평균 3.42 mg L^{-1} 로 나타났으며 갈수기인 2월에 4.34 mg L^{-1} 로 평균보다 약 1.2배 높았다 (Fig. 5b). 또한 2.71 mg L^{-1} 로 4월에 최소치를 보였으며 강우기인 7~9월에는 평균 3.22 mg L^{-1} 로 갈수기보다 낮게 나타났다. 질소는 물에 잘 용해되는 경향을 가지고 있어 강우량보다는 용해도에 영향을 받는 것으로 보인다. 따라서 4월 이후 강우량이 증가하여 일시적으로 TN 농도도 증가하지만 6월 이후 계속되는 강우로 유량이 증가하여 희석되므로 오히려 강우량은 증가함에도 불구하고 그 농도가 감소하는 것으로 판단된다. 그 후 강우가 줄어들면서 차차 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 5b). 이런 경향은 영산강 수계에서 조사 연구한 Kang and An (2006)의 결과와 같았다. 영양염의 변화 양상이 강우초기에 집중 강우로 인해 비점오염원으로부터 하천으로 영양염의 농도를 증가시키는 경향성은 여러 보고들 (Carpenter *et al.*, 1998; Correll, 1998; Zhang *et al.*, 2004)과 유사하였다.

약한 몬순기후를 보인 2001년과 강한 몬순기인 2003년을 비교한 Fig. 6에서와 같이 강우량에 따라서 수질 변수들의 변화양상이 매우 다르게 나타났다. 총부유물의 양은 강한 몬순시기에 컸고 몬순 세력이 약화된 시기에는 적은 것으로 나타났다 (Fig. 6a, b). 총질소의 경우는 강한 몬순 시기에 약한 몬순 시기에 비해 농도가 낮고 변화의 폭이 크지 않았다 (Fig. 6c, d). 이는 질소성분이 물에 잘 용해되어 적은 강우에도 높은 농도를 나타내는데 강한 강우가 지속될 때에는 오히려 희석되어 농도가 낮아지는 것으로 보인다. 총인의 경우는 총부유물과 유사한 경향을 보이는데 (Fig. 6e, f), 집중강우가 탁수를 발생시킬 때 점토입자에 흡착된 인이 함께 유출되면서 일어난 현상이라고 보여진다 (Heo *et al.*, 1998, 1999). 전기전도도는 강우의 강도 차이에 의한 변화가 다른 요인들에 비해 크지 않은 것으로 나타났다 (Fig. 6g, h). BOD는 강우강도에 큰 차이를 보이지 않는데 비해 COD는 강한 몬순시기에 약한 시기에 비해 변화의 폭이 컸다 (Fig. 6i, j).

Kim *et al.* (1995)은 도암호의 부영양화 원인이 도암호 상류에 산재하고 있는 목장과 스키장 등이 주요한 인 배출원이라고 보고하였다. 또한 최근 연구들은 북동 아시아에서 경사가 큰 고랭지에서 몬순강우에 의해 토양이 유실되는 것이 수질을 악화시키는 것으로 보고하고 있다 (Tao, 1998; Kim *et al.*, 2000; Ogawa *et al.*, 2006; Park *et*

Table 5. Spatial variations of turbidity and suspended solids. During 2009 (April, July*).

	Dry season (2009. 04)		Monsoon season (2009. 07) ^a	
	Turbidity (NTU)	SS (mg L^{-1})	Turbidity (NTU)	SS (mg L^{-1})
I1	13.40	6.63	46.7	56.7
M1	1.03	2.80	254	184.0
M2	3.26	1.81	182	112.0
M3	0.80	0.40	224	530.0
M4	0.36	1.42	-	-
M5	0.82	0.20	-	-
M6	0.443	0.99	-	-
M7	0.61	1.22	-	-
M8	0.93	0.80	106	149.3
M9	1.06	1.00	-	-
M10	0.81	1.21	-	-
B1	3.77	6.43	29.7	31.3
B2	0.71	0.61	75.2	89.3

Sources: Park, S.M. (2010) Thesis of Master. Sangji University.

al., 2007; Park *et al.*, 2010). 지구온난화의 영향으로 하계 집중호우의 정도가 심화되고 있어 집중 강우로 인한 수질의 영향력은 커질 것으로 예상된다 (Milly *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2007). 10년간의 하계 집중강우자료와 환경 요인들을 분석한 결과 본 연구에서도 하계 집중 강우가 오염물질의 농도를 높이는 것으로 나타났다. 따라서 집중 호우로 인한 수질의 변화를 줄이기 위해서 탁수의 원인 물질로 지목되고 있는 도암호 상류지역에 위치한 고랭지밭 및 축산농가 등에서 유실되는 토양, 비료, 농약성분 등의 오염물질을 줄이기 위한 시설을 설치하고 경사가 큰 곳에서 경작을 금지하며, 비료 시비 시기를 집중 강우시기를 피하여 실시하는 등의 노력이 필요하다. 사람들이 많이 살고 있는 도심지역이나 대규모 위탁시설이 위치한 관광단지로부터 배출되는 생활하수 등에서 총인 등 영양염류와 유기물 등이 인근 하천으로의 유입되는 것을 최소화하기 위하여 하수처리시설을 설치하거나 정화조 등의 시설을 통해 하천으로 직접 유입되는 오염 부하량을 낮추는 노력도 요구된다. 아울러 상류지역에 존재하고 있는 가축사육 농가로부터 배출되는 축산 폐기물을 별도로 관리하여 고농도의 폐수가 하천으로 유입되지 않도록 하는 등 효율적이고 다양한 방법으로 상류 하천의 수질관리를 위한 노력이 요구되고 있다.

적 요

하절기 집중 강우가 남한강 상류수계 수질에 미치는

영향을 파악하기 위해 2008~2009년 4차례 현장조사를 시행하였고 1998~2007년까지 10년간 측정된 환경부 수질자료를 분석하였다. 남한강 상류수계 내에서의 전기전도도는 하절기 강우에 의해 희석되는 효과로 집중 강우 시기에 농도가 급격히 감소하고, 질소도 집중 강우기에 감소하는 경향을 보였으며, 총인, 생물학적 산소요구량과 화학적 산소요구량 등은 8월에 최대가 되는 등 대부분의 이화학적 특성이 7~8월에 집중되는 하절기 문순강우에 의해 조절되는 것으로 사료된다. 강우와 총인, 화학적 산소요구량, 총부유물의 상관지수는 0.40 이상 ($p < 0.01$, $n = 120$)의 상관성을 보였으며, 용존산소는 역의 상관성 ($r = -0.542$, $p < 0.01$)을 보여 강우가 수질의 이화학적 변이에 중요한 요소임을 확인하였다. 본 연구 지역의 하절기 집중 강우는 비점오염원으로부터 총인 및 총부유물 농도를 증가시키는 것으로 판단되며 상류지역에 위치한 고랭지밭 및 축산농가 등에서 배출되는 수질 오염물질과 도심 지역의 오염부하 등에 의한 하천으로의 유입을 최소화하고 오염부하 저감을 통한 효율적인 수질관리가 요구된다.

사 사

본 연구는 2008년도 상지대학교 교내연구비와 연구년 지원을 받아 수행되었습니다. 본 논문의 부족한 부분을 친절하게 조언해주신 두 분의 심사위원에게 감사드립니다.

인 용 문 헌

- An, K.G. 2011. Long-term seasonal and interannual variability of epilimnetic nutrients (N, P), chlorophyll-*a*, and suspended solids at the dam site of Yongdam reservoir and empirical models. *Korean Journal of Limnology* **44**: 214-225.
- An, K.G. and I.C. Shin. 2005. Influence of the asian monsoon on seasonal fluctuations of water quality in a mountainous stream. *Korean Journal of Limnology* **38**(1): 54-62.
- An, K.G. and W.M. Yang. 2007. Water quality characteristics in Keum river. *Korean Journal of Limnology* **40**: 110-120.
- Bae, D.Y., E.C. Yang, S.H. Jung, J.H. Lee and K.G. An. 2007. Nutrients and chlorophyll dynamics along the longitudinal gradients of Daechung reservoir. *Korean Journal of Limnology* **40**: 285-293.
- Carpenter, S., N.F. Caraco, D.L. Correll, R.W. Howarth, A.N. Sharpley and V.H. Smith. 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications* **8**: 559-568.
- Correll, D.L. 1998. The roll of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: a review. *Journal of Environmental Quality* **27**: 261-266.
- Dodds, W.K., J.R. Jones and E.B. Welch. 1998. Suggested classification for stream trophic state: Distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen and phosphorus. *Water Reaserch* **32**: 1455-1462.
- Fisher, S.G., R.A. Sponseller and J.B. Heffernan. 2004. Horizons in stream biogeochemistry: flowpaths to progress. *Ecology* **85**: 2369-2379.
- Ford, D.E. 1990. Reservoir transport process, p. 15-41. *In: Reservoir limnology-Ecological perspectives* (Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne, eds.). John Wiley and Sons, Inc.
- Han, J.H., Y.J. Bae and K.G. An. 2010. Spartial and temporal variability of water quality in Geum-river watershed and their influences by landuse pattern. *Korean Journal of Limnology* **43**: 385-399.
- Heo, S.G., K.S. Kim, J.H. Ahn, J.S. Yoon, K.J. Lim, J.D. Choi, Y.C. Shin and C.W. Lyou. 2007. Landscape analysis of the forest fragmentations at Doam-dam watershed using the FRAGSTATS model. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* **10**: 10-21.
- Heo, W.M., B.C. Kim and Y.N. Kim. 1999. The variations of phosphorus concentration and phosphorus loading to storm runoff from watershed of lake Dalbang. *Korean Journal of Limnology* **32**: 43-48.
- Heo, W.M., B.C. Kim, Y.N. Kim and K.S. Choi. 1998. Storm runoff of phosphorus from nonpoint sources into lake Soyang and transportation of turbid watermass within the lake. *Korean Journal of Limnology* **31**: 1-8.
- Huh, I.R., S.G. Park, K.Y. Choi and U.H. Jeong. 1995. A study on the upstream water quality and distribution of pollution loading for Song stream. *Journal of Korean Society on Water Quality* **11**: 175-181.
- Kang, S.A. and K.G. An. 2006. Spatio-temporal variation analysis of physico-chemical water quality in the Yeongsan-river watershed. *Korean Journal of Limnology* **39**: 73-84.
- Kim, B.C., K.S. Choi, C.G. Kim, U. Lee and Y.H. Kim. 2000. Effects of the summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir, lake Soyang, Korea. *Water Research* **34**: 3495-3504.
- Kim, B.C. and S.M. Jung. 2007. Turbid storm runoffs in lake Soyang and their environmanetal effect. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers Special Fea-*

- ture p. 1185-1190.
- Kim, B.C., W.M. Heo, G.S. Hwang. 1995. The eutrophication of Lake Doam. *Korean Journal of Limnology* **28**: 233-240.
- Kim, B.C. and Y.H. Kim. 2004. Phosphorus cycle in a deep reservoir in asian monsoon area (Lake Soyang, Korea) and modeling with a 2-D hydrodynamic water quality model [CE-QUAL-W2]. *Korean Journal of Limnology* **37**: 205-212.
- Kim, J.H., J.W. Seo, Y.E. Na and K.G. An. 2007. Ecological health assessments on turbidwater in the downstream after a construction of Yongdam dam. *Korean Journal of Limnology* **40**: 130-142.
- Kim, J.J., Y.S. Jung, J.G. Kim, S.W. Lee and Y.H. Kim. 2007. Studies on variations of turbidity with strength of rainfall and mineralogy of turbidity-causing materials in Imha and Andong-dam. *Journal of Mineralogical Society of Korea* **20**: 213-222.
- Kim, J.K., and B.C. Kim, S.M. Jung, C.W. Jang, M.S. Shin and Y.K. Lee. 2007. The distribution of DOM and POM and the composition of stable carbon isotopes in streams of agricultural and forest watershed located in the Han river system, Korea. *Journal of Limnology* **40**: 93-102.
- Lawrence, G.B., H.A. Simonin, B.P. Baldigo, K.M. Roy and S.B. Capone. 2011. Changes in the chemistry of acidified Adirondack streams from the early 1980s to 2008. *Environmental pollution* **159**: 2750-2758.
- Lee, S.H., J.S. Choi, K.Y. Lee, Y.S. Jang, I.S. Lim, W.M. Heo, J.K. Kim and B.C. Kim. 2006. A study of water quality and fish community in lake Doam. *Korean Journal of Limnology* **39**: 167-177.
- Milly, P.C.D., K.A. Dunne and A.V. Vecchia. 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature* **438**: 347-350.
- Ogawa, A., H. Shibata, K. Suzuki, M.J. Mitchell and Y. Ikegami. 2006. Relationship of topography to surface water chemistry with particular focus on nitrogen and organic carbon solutes within a forested watershed in Hokkaido, Japan. *Hydrological Processes* **20**: 251-265.
- Park, J.C., J.W. Park, J.K. Shin and H.M. Lee. 2005. Dynamics of high turbid water caused by heavy rain of monsoon and typhoon in a large Korean reservoir (Andong reservoir). *Korean Journal of Limnology* **38**: 105-117.
- Park, J.H., J.H. Lee, S.Y. Kang and S.Y. Kim. 2007. Hydroclimatic controls on dissolved organic matter characteristics and implications for trace metal transport in Hwangryong river watershed, Korea during a summermonsoon period. *Hydrological Processes* **21**: 3025-3034.
- Park, S.B., S.K. Lee, K.H. Chang, K.S. Jeong and G.J. Joo. 2002. The impact of monsoon rainfall (changma) on the changes of water quality in the lower Nakdong river (Mulgeum). *Korean Journal of Limnology* **35**(3): 160-171.
- Perkins, B.D. and J.R. Jones. 1994. Temporal variability in a midwestern stream during spring. *Verhandlungen des International Verein Limnologie* **25**: 1471-1476.
- Shin, J.K., C.K. Kang and S.J. Hwang. 2003. Daily variations of water turbidity and particle distribution of high turbid-water in Paltang reservoir, Korea. *Korean Journal of Limnology* **36**: 257-268.
- Shin, J.K., J. Hur, H.S. Lee, J.C. Park and S.J. Hwang. 2006. Spartial interpretation of monsoon turbid-water environment in a reservoir (Yongdam) discharging surface water, Korea. *Journal of Korean Society on Water Quality* **22**: 933-942.
- Shin, Y.K. and H.S. Kim. 2002. Ecological studies on the phytoplankton community in the Mt. Chiak stream, Korea. I. Environmental characteristics. *Journal of Environmental Science* **8**: 1-14.
- Tao, S. 1998. Spatial and temporal variation in DOC in the Yichun river, China. *Water Research* **32**: 2205-2210.
- U.S. EPA. 1979. Handbook for analytical quality control in water and wastewater laboratories. EPA 600/4-79-019.
- Yoon, S.A., K. You, J.H. Park, B.H. Kim and S.J. Hwang. 2011. Effect of highly concentrated turbid water quality and periphytic diatom community in artificial channel. *Korean Journal of Limnology* **44**: 75-84.
- Yoon, S.W., Y.R. Chung, R. Ye, Y.K. Kim and S.W. Chung. 2006. The characteristics of turbidity flow occurrence in Daechung dam watershed. *Fall Academic conference proceeding of Korean Society of Water and Wastewater* p. 797-803.
- Zhang, M., Z. Hea, D.V. Calvert and P.J. Stoffella. 2004. Spatial and temporal of water quality in drainage ditches within vegetable farms and citrus groves. *Agricultural Water Management* **65**: 39-57.
- Zhang, X., F.W. Zwiars, G.C. Hegerl, F.H. Lambert, N.P. Gillet, S. Solomon, P.A. Stott and T. Nozawa. 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature* **448**: 461-465.

(Manuscript received 11 August 2011,
Revised 23 September 2011
Revision accepted 15 December 2011)