

남한강 수계에서 장기 이화학적 수질특성에 대한 토지이용도 및 계절성 강우의 영향

이지은 · 최지웅 · 안광국*

충남대학교 생명시스템과학대학 생물과학과
(2012년 5월 8일 접수; 2012년 8월 1일 수정; 2012년 8월 24일 채택)

Influence of Landuse Pattern and Seasonal Precipitation on the Long-term Physico-chemical Water Quality in Namhan River Watershed

Ji-Eun Lee, Ji-Woong Choi, Kwang-Guk An*

Department of Biological Sciences, Chungnam National University, Daejeon 365-764, Korea
(Manuscript received 8 May, 2012; revised 1 August, 2012; accepted 24 August, 2012)

Abstract

The objective of this study was to analyze long-term annual and seasonal trends of water chemistry on landuse patterns and seasonal precipitation using 72 sampling sites within Namhan River watershed during 2001-2010. Water quality, based on multi-parameters of water temperature(WT), dissolved oxygen(DO), biochemical oxygen demand(BOD), chemical oxygen demand(COD), suspended solids(SS), total nitrogen(TN), total phosphorus(TP), and electric conductivity(EC) varied largely depending on monsoon rain and landuse patterns such as forest, cropland, and residence. Concentrations of BOD and COD as an indicator for organic matter pollution, increased during summer monsoon season at the cropland and residential streams. Values of TN and TP were higher in residential streams than in the forest and cropland streams. In the meantime, DO values had weak relations to the landuse patterns of forest and cropland cover. Water quality was worst in cropland and residential streams, and also most degraded in 4th order streams. Overall, our results suggest that efficient water quality management is required in the cropland and residential landuse streams.

Key Words : Water quality, Landuse pattern, Seasonal precipitation, Namhan River

1. 서론

남한강 수계는 총 유로연장 375 km, 유역 면적 12,577 km² 인 한강의 2대 지류중 하나로서 강원도 삼척시의 대덕산에서 발원하여 평창강과 합류하고 단양

을 지나면서 충주호에 유입된 후, 달천과 합류하여 팔당호로 유입되는 수도권 시민의 주요 상수원이다. 또한, 남한강 수계는 팔당호로 유입되는 유입량의 54%를 차지하고 있으며, 국내에서 두 번째로 큰 인공호인 충주호가 위치하고 있어 홍수 및 갈수기에 수문조절을 통하여 남한강 하류부의 유량 및 이화학적 수질 변화에 직접적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다(한과안, 2008). 남한강 수계는 유량이 풍부한 반면 북한강 수계에 비해 점오염원 및 비점오염원의 영향이 커서 수질특성에 악영향을 주고 있다(박 등, 2008; 정 등,

*Corresponding author : Kwang-Guk An, Department of Biological Sciences, Chungnam National University, Daejeon 365-764, Korea
Phone: +82-42-821-6408
E-mail: kgan@cnu.ac.kr

2012). 특히, 최근 남한강 수계내의 도시화에 따른 인구집중화 및 소규모 산업시설의 확장으로 하천의 이화학적 수질 및 생태 건강도가 악화되어 음용수 수질 기준을 위협하고 있다(박과 신, 2011). 특히, 인근 수계에서 배출되는 생활하수 및 축산폐수 등의 각종 영양염류 및 유해 화합물이 하상에 퇴적되면서 이화학적 수질오염을 야기하고 있으며, 농업활동으로 인한 인(P) 과 질소(N)의 농도는 수체의 부영양화 현상에 크게 기여하고 있다(오 등, 2009).

최근 남한강 수계의 이화학적 수질특성에 대한 보고들에 따르면(김 등, 2011; 박과 신, 2011; 이 등, 2007; 홍과 나, 1978), 하천의 이화학적 수질 역동성은 계절별, 연별 강우 경향에 의해 변화되며, 강우에 따른 유량변화는 하천생태계의 물리적 교란뿐만 아니라 이화학적 수질변화의 주요 변수로 작용한다(박 등, 2005; 안 등, 2001). 특히 우리나라의 수체는 강우량의 50% 이상이 하계에 편중하여 매년 주기적 유량변동에 의해 이화학적 수질 측정값에 직접적인 영향을 준다는 결과가 폭넓게 보고되고 있다(An과 Jones, 2000). 이런 하절기 강우는 수체에 인(P) 농도의 증가(An, 2000), 질소농도의 감소, 무기성 부유물 증가(안 등, 2001)를 가져오고, 이온 희석현상(Ionic dilution)에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(안, 2001). 한편, 부영양화 현상에 핵심 역할을 하는 조류(Phytoplankton) 생장은 하절기에 가장 왕성하게 증가함에도 불구하고, 유입되는 인(P)은 하절기의 클로로필 증가에 크게 기여하지 않으나(An, 2000; An과 Park, 2002), 장마 종료 후인 9-10월 기간에 용존성 인은 수체내의 수화현상에 큰 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Jones와 Bachmann, 1976). 즉, 장마기간에 조류생산량이 낮은 원인은 주변 유역으로 부터 높은 농도의 오염부하가 유입되지만 총부유물 대부분이 조류생산력을 제한하는 무기성 현탁물(Inorganic solids)이기 때문이다(김, 2002; An과 Park, 2002). 장마기 무기현탁물에 의한 광저해 현상(Light limitation)과 유량증가에 의한 체류시간 단축 효과는 수체내 식물성 플랑크톤의 세척현상(Washout)을 가져와 강우초기 식물성 플랑크톤 농도를 감소시키고 부영양화 현상을 저감시키는데 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다.(An과 Park, 2002).

수체의 수질은 하절기 강우 및 유량과 같은 수리수문학적 요인뿐만 아니라 주변의 토지 이용도(Landuse pattern)에 의해 크게 영향 받는 것으로 보고되고 있으나, 남한강 수계에서 이에 대한 연구는 극히 미미한 실정이다. 하천 수질은 임야나 초지, 농경지 및 도시나 공업지역 등 다양한 유역 토지 이용도에 따라 두드러진 차이를 보이며, 각 토지 이용도에 따라 해당 수계의 수질이 결정된다(Haith, 1976). 임야나 초지와 같이 인간의 인위적 영향이 적은 산림 지역에 위치한 하천은 산림과 토양에 의해 일부 자정되는 특징을 보여 비교적 인(P)과 질소(N)의 농도가 낮고, 유기물 오염도가 낮은 반면, 집약적 농경지와 같이 농지 활용도가 높은 지역의 수계에서는 비점오염원의 영향으로 인(P)과 질소(N)의 농도가 산림 지역에 비해 높은 것으로 보고되고 있다(안과 신, 2005; 조 등, 2010). 한편, 도시나 산업지역과 같이 인구밀집 지역에서는 각종 생활하수와 공장폐수 등이 다량 발생하며, 강우 시 도로와 건물 등에서 다양한 비점오염 물질이 하천으로 유입됨으로서 하천의 수질을 악화시키는 것으로 보고되고 있다(박 등, 1994; Collins와 Jenkins, 1996). 따라서 유역내의 토지이용도에 따른 수질변화특성에 대한 연구는 오염원 관리 및 수생태계 유지에 반드시 필요하다.

최근 남한강 유역에서는 이·화학적 수질 오염이 가속화되고 있고, 각종 공사활동으로 하천의 인위적인 교란이 보고되고 있다. 특히, 하천 주변 농지나 공사장에서 유입되는 오염원에 의하여 부유물질(Suspended Solids, SS)의 수치가 높게 나타났고, 지속적인 유입과 퇴적을 반복하면서 점점 더 악화가 되고 있다(조 등, 2010). 생분해성 유기물의 지표가 되는 생물학적 산소요구량(Biological Oxygen Demand, BOD)과 난분해성 유기물을 반영하는 화학적 산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD)은 지속적으로 증가하는 것으로 나타나 수계 내 난분해성 유기물질의 지속적인 유입이 있는 것으로 나타났고, 이러한 원인은 점오염원의 유입보다는 상대적으로 비점오염원에 의한 유기물질의 지속적인 유입에 의한 것으로 보고되고 있다(김 등, 2010; 정 등, 2009). 본 연구에서는 남한강 수계의 장기간 연별 수질특성을 분석하고, 몬순강우에 의한 계절별 수질특성을 평가하였다. 또

한, 토지 이용도에 따른 계절별, 연별 수질특성을 파악하고 아울러 하천차수에 따른 수질특성을 비교·평가하여 남한강의 수질개선 방안 마련을 위한 기초 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상구역과 수질자료

남한강 수계의 수질특성을 분석하기 위하여 2001년부터 2010년까지 물환경정보시스템의 수질측정망 자료를 이용하였고, 토지이용도 및 강우 분포특성과 연계하여 자료를 분석하였다. 자료 분석을 위하여 선정된 수계는 72 지점으로, 남한강 상류역 수계(15 지점), 평창강 수계(5 지점), 충주댐 수계(12 지점), 달천수계(14 지점), 섬강수계(13 지점) 및 남한강 하류역 수계(13 지점)로 대별되었고(Fig. 1), 각각 지류의 수질을 대표하는 지점으로 선정되었다. 본 분석에 이용된 72개 하천지점 및 지점명은 아래와 같다.

- 남한강 상류수계(N_u)
: S01(송천1), S02(송천2), S03(조양강), S04(오대천 2), S05(정선 1), S06(정선 2), S07(광하), S08(동강), S09(영월 1), S10(골지천 1), S11(변천), S12(골지천 2), S13(어천), S14(석향천), S15(영월 2)
- 평창강 수계(P_y)
: S16(평창강 1), S17(평창강 2), S18(주천강 1), S19(주천강 2), S20(평창강 3)
- 충주댐 수계(C_d)
: S21(가곡), S22(덕천), S23(충주댐), S24(충주), S25(중원), S26(덕은리), S27(원주), S28(옥동천 2), S29(가대천), S30(매포천), S31(죽령천), S32(영덕천)
- 달천 수계(D_a)
: S33(달천 1), S34(달천 2), S35(달천 3), S36(달천 4), S37(달천 5), S38(화양천), S39(행목동천), S40(쌍천), S41(동진천 1), S42(동진천 2), S43(음성천), S44(석문동천), S45(석문천), S46(요도천)
- 섬강수계(S_u)
: S47(유동천 2), S48(계천 2), S49(섬강 1), S50(섬강 2), S51(섬강 3), S52(섬강 4) S53(유동천), S54(대관대천), S55(금계천), S56(전천), S57(원주천 1), S58(원주천 2), S59(서곡천)

- 남한강 하류수계(N_d)
: S60(강천), S61(여주 1), S62(여주 2), S63(이포), S64(강상), S65(청미천 2), S66(청미천 3), S67(양화천), S68(북하천1), S69(북하천2), S70(북하천 3), S71(흑천 1), S72(흑천2)

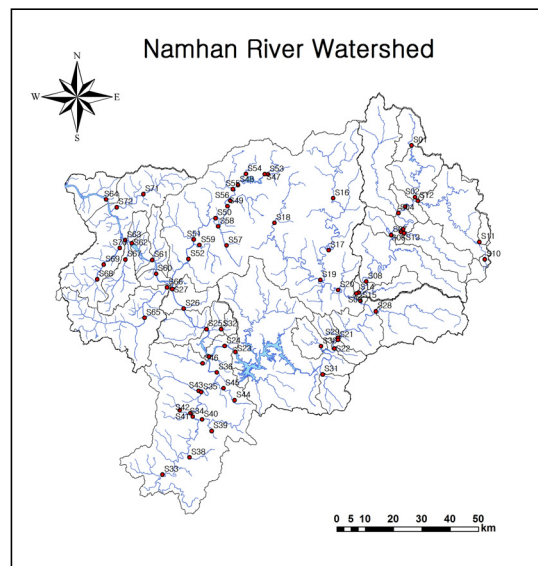


Fig. 1. The sampling sites in Namhan River watershed.

본 연구를 위해 이용된 수질변수는 8개 항목으로 수온(Water temperature, WT), 용존산소량(Dissolved oxygen, DO), 생물화학적 산소요구량(Biochemical oxygen demand, BOD), 화학적 산소요구량(Chemical oxygen demand, COD), 부유물(Suspended solids, SS), 전기전도도(Electrical conductivity, EC), 총질소(Total nitrogen, TN) 및 총인(Total phosphorus, TP)이다.

2.2. 강우자료

강우자료 분석을 위해 2001년 1월부터 2010년 12월까지 10년간의 기상청 데이터를 이용하였고, 수계 내의 강우량은 양평, 충주, 원주, 영월 등 4개 관측소의 평균 강우량으로 산정하였다. 기상대 관측환경은

양평(위도: 37° 29' 01" N, 경도: 127° 59' 12" E, 해발고도: 47m), 원주(위도: 37° 20' 15" N, 경도: 127° 56' 47" E, 해발고도: 149.8m), 충주(위도: 36° 58' 15" N, 경도: 127° 57' 49" E, 해발고도: 113.6m), 영월(위도: 37° 10' 52" N, 경도: 128° 27' 26" E, 해발고도: 239.7m)이다. 또한 강우량의 계절적 특성을 감안하여 5-6월의 장마전기(Premonsoon), 7-8월의 장마기(Monsoon), 9-10월의 장마후기(Postmonsoon)로 대별하여 분석하였다.

2.3. 토지이용도(Landuse pattern) 분석

각 조사 지점을 대상으로 토지이용도(Land coverage)를 파악하기 위하여 환경부에서 제작된 토지피복도와 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 하천도, 유역도, DEM자료 등을 ArcGIS 10.0 (ESRI, 2010)을 활용하여 분석하였다. 또한, WAMIS에서 제공하는 DEM자료를 기반으로 ArcSWAT 2009를 활용하여 각 조사지점에 해당하는 유역을 새롭게 제작하였고, 이를 기반으로 각 조사지점의 토지피복도와 중첩분석을 실시하여 각 지목별 상대피복도를 분석하였다. 분석된 자료를 토대로 토지이용도가 40% 이상인 곳을 각각 산림형(Forest type), 농지형(Cropland type), 주거형(Residential type)으로 분류하였다(Choi *et al.*, 2011).

3. 결과 및 고찰

3.1. 하천 유역별 토지이용도 분포특성

남한강 유역의 72개 지점의 토지이용도를 조사한 결과에 따르면, 산림형 하천은 62지점으로서 전 지점 중 86.1%, 농지형 하천은 8지점으로서 전 지점 중 11.1%, 주거형 토지이용도 하천은 2지점으로서 2.8%로 나타나, 전체 지점 중 약 86%가 산림형 하천인 것으로 분류되었다(Fig. 2). 산림형 하천은 남한강 상류수계(N_u) 15지점, 평창강 수계(P_y) 5지점, 충주댐 수계(C_d) 12지점, 달천 수계(D_a) 13지점, 섬강수계(S_u) 12지점, 남한강 하류수계(N_d) 5지점으로 다른 유형과 비교하여 뚜렷하게 우세하였고, 남한강 수계 전반에 걸쳐 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 2a). 농지형 하천은 달천 수계(D_a) 1지점, 남한강 하류수계(N_d) 7지점으로 대부분

남한강 하류부에 위치하는 것으로 나타났다(Fig. 2b). 주거형 하천은 섬강 수계(S_u) 1지점, 남한강 하류수계(N_d) 1지점으로 우리나라의 특별시 혹은 광역시와 같은 인구 밀집지의 도심형 하천이 아닌 소규모 농촌의 주거지 및 중규모의 시가지에 인접한 하천으로 분석되었다. 특히, 섬강 수계(S_u)의 원주천(S58)과 남한강 하류수계(N_d)의 복하천(S69)은 도심 생활하수

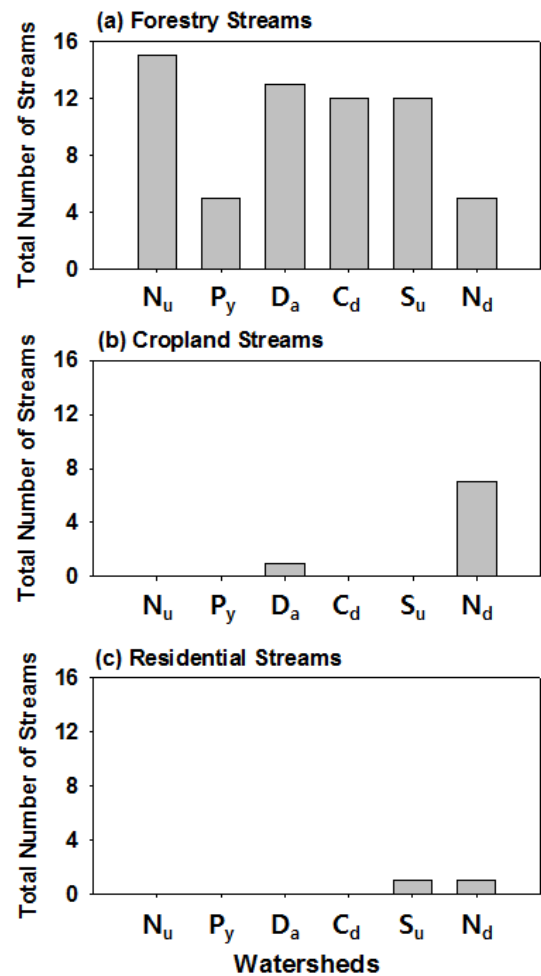


Fig. 2. Differences of stream type distributions such as forestry, cropland, and residential landuse within sub-regions of Namhan River watershed(N_u =Namhan River upstream watershed, P_y =Pyeongchang River watershed, D_a =Dal Stream watershed, C_d =Chungju Dam watershed, S_u =Seom River watershed, N_d =Namhan River downstream watershed).

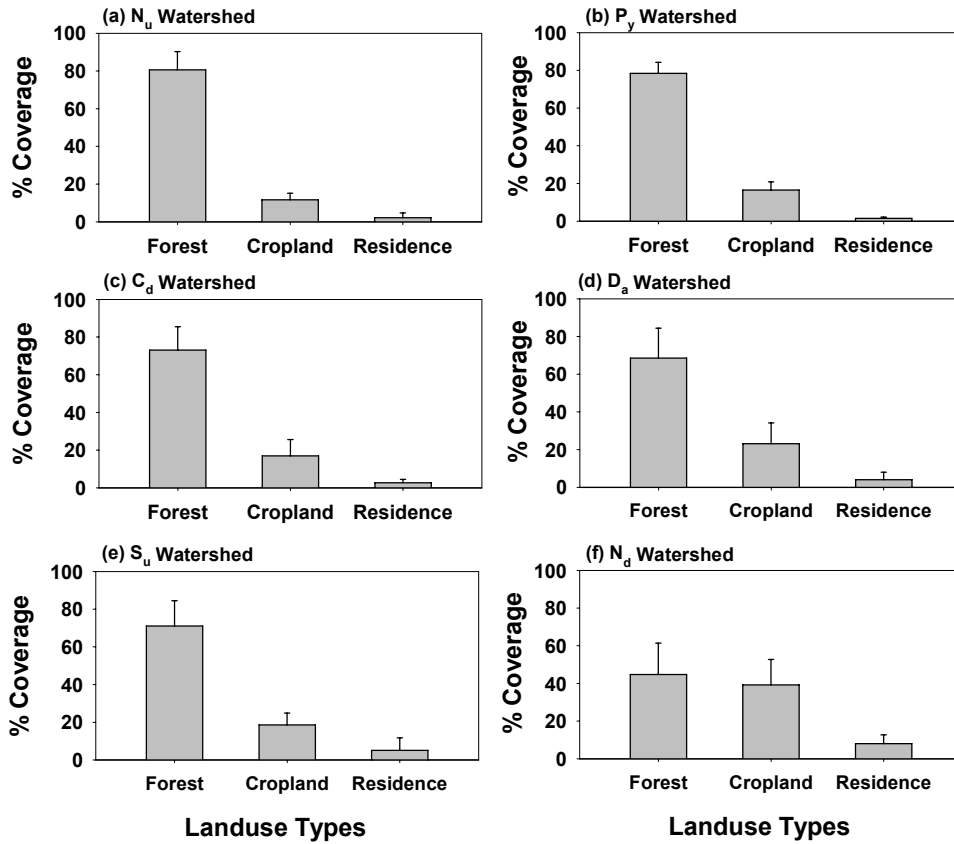


Fig. 3. Landuse patterns, expressed as a forest, cropland, and residential cover for each sub-regional watershed.

및 공단폐수, 축산농가의 영향을 많이 받는 지역으로 연, 월별 이화학적 수질 변화가 큰 것으로 분석되었다 (김 등, 2007; 김 등, 2009; 정, 2005).

수계별 하천의 분포 유형에 따르면, 남한강 상류수계(N_u)의 경우 산림형 토지이용도가 80.6%로 높게 나타났고, 농지형 및 주거형 토지이용도는 각각 11.7%, 2.1%로서 산림형 토지이용도에 비해 낮게 나타났다 (Fig. 3a). 평창강 수계(P_y)에서는 5지점 모두 산림형 토지이용이 70% 이상(범위: 71-83%)으로 나타나 농지형 및 주거형 하천과 비교하여 하천으로 유입되는 유기물 및 영양염류(N, P)의 양이 적은 것으로 나타났다(조 등, 2010). 충주댐 수계(C_d)에서는 산림형 토지이용도가 평균 73.4%를 보였으나, 충주시를 관통하면서 주거형의 토지이용도가 증가한 것으로 나타났다 (Fig. 3c). 달천 수계(D_a)는 논과 밭의 이용이 평균

23.1%(범위: 1.3-38.5%)로 다른 수계에 비하여 하천 주변의 농업활동이 활발한 것으로 나타났으며, 이로 인한 유기물 및 영양염류의 유입이 많은 것으로 나타났다(윤 등, 2007). 섬강수계(S_u)는 평균적으로 산림형 토지이용도가 71.1%, 농지형 18.6%, 주거형 5.1%로 나타나 충주댐 수계(C_d)와 유사한 경향을 보였다. 반면, 남한강 하류수계(N_d)의 경우, 13지점 중 7지점이 농지형 하천으로 다른 수계에 비하여 농지형 토지이용도(평균: 39.2%, 범위: 15.3-61.0%)가 높은 것으로 나타났다(Fig. 3f). 이러한 남한강 하류수계(N_d)의 집약적 농지이용은 유기물 유입량 증가 및 영양염류(N, P)의 부하 증가에 의해 부영양화 현상을 가속화 시키고 있고(박 등, 2006; 박 등, 2011), 최근에는 어류의 생태건강도 다변수 평가모델(IBM 모델)을 이용한 생태 건강성 평가에서 그 등급이 감소하는 것으

로 나타나(환경부, 2009; 환경부, 2010) 향후 이에 대한 관리 대책 마련이 시급한 것으로 사료되었다.

3.2. 토지 이용도 및 강우 특성에 따른 계절별 수질특성

남한강 수계에서 72지점의 10년간 용존산소(DO), 생물학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD), 부유물 농도(SS), 전기전도도(EC) 및 영양염류(TN, TP)의 수질 변수들에 대한 토지이용도 영향은 변수별 뚜렷한 변화를 보였다(Fig. 4). 용존산소(DO)

는 수온이 가장 낮은 1월에 가장 높은 값, 수온이 가장 높은 8월에 가장 낮은 값을 보였으며, 일반적으로 8-14 mgL⁻¹ 농도를 유지하는 것으로 나타나 수온에 따른 용존산소 농도의 증감이 잘 반영되었다. 계절별 용존산소 농도가 온도 상승과 함께 감소하는 계절적 변화를 보였는데, 이러한 결과는 다른 하천의 연구결과와도 일치하였다(안 등, 2005). 그러나 계절별 토지 이용도에 따른 차이는 미미한 것으로 나타났다(Fig. 4a). 하천에서 유기물 오염지표인 BOD의 경우, 72지

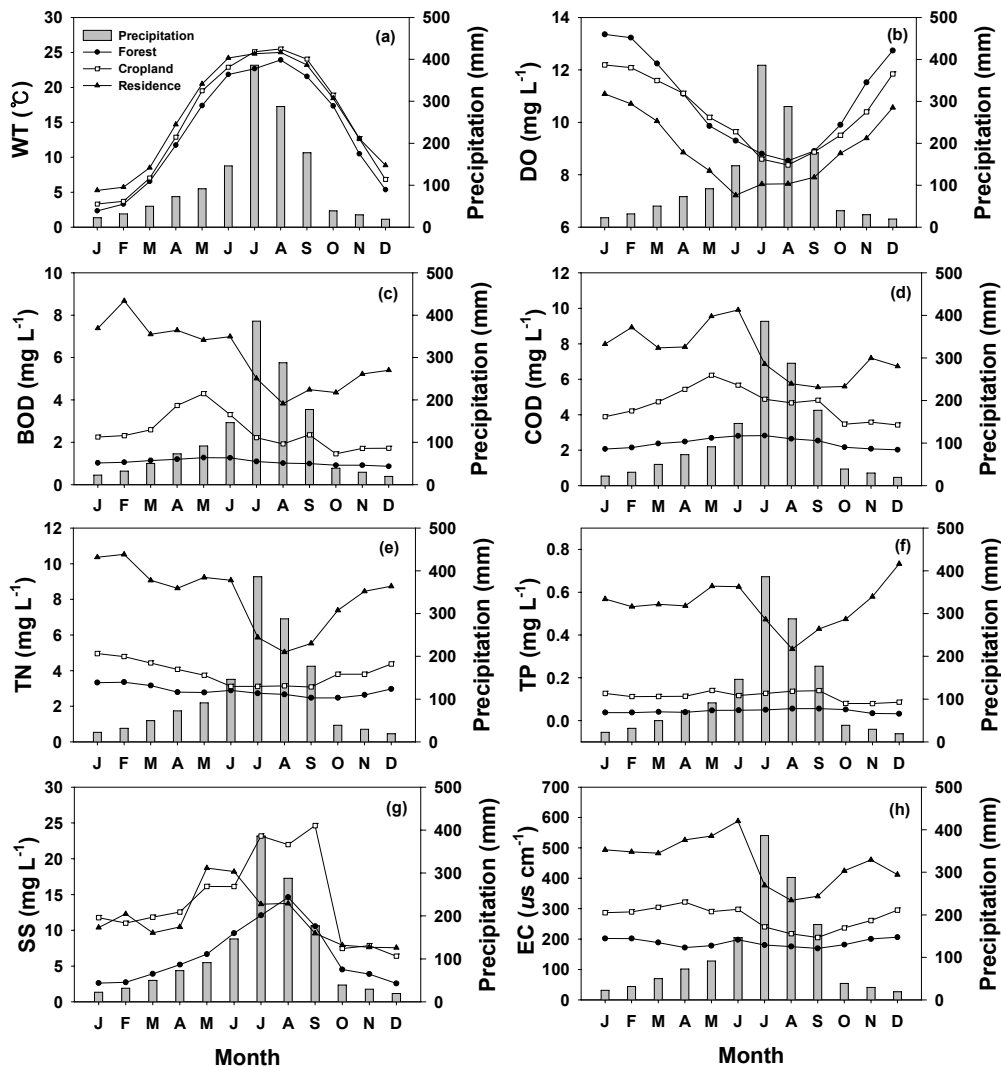


Fig. 4. Seasonal fluctuations of water quality in relation to monthly precipitation.

점의 월별평균을 산출한 결과에 따르면, 10월에 2.23 mgL⁻¹(범위: 0.91-4.35 mgL⁻¹)로 최소값을 보였고, 5월에 최대값(4.13 mgL⁻¹)을 보였다(Fig. 4c). 한편, COD 농도는 10월, 5월에 각각 최소(평균 3.73 mgL⁻¹), 최대(평균 6.15 mgL⁻¹)의 농도를 보였다. 즉, BOD 및 COD는 1월부터 상승하기 시작하여 갈수기인 5월에 최고치를 보였고 이후 급격히 감소하다가 10월부터 거의 유사한 값을 유지하는 것으로 나타나 두 변수간의 유사한 경향을 보였다. 따라서, 갈수기에는 유기물 배출 부하량 대비 유량감소에 의한 하천 내 유기물질 농도가 높아지는 경향을 보이며, 우기에는 유량의 증가로 유기물질 농도가 낮아지는 경향을 보였다.

토지이용도별 특성 분석에 따르면, 주거형 하천의 BOD 및 COD 농도는 산림형 및 농지형 하천에 비해 높아, 통계학적으로 유의한 차이($p < 0.001$)를 보였고, 이런 차이는 장마전인 4-6월에 뚜렷한 농도차이를 보였다. 즉, 주거형 하천에서는 산림형 및 농지형 하천에 비해 유기물 오염도가 높은 것으로 나타났다.

총질소(TN)는 토지이용 유형별 농도차가 가장 큰 것으로 분석되었다. 주거형 하천에서 산림형 및 농지형보다 뚜렷하게 높은 농도를 보였으며, 계절적 편차도 큰 것으로 분석되었다(Fig. 4e). 주거형 하천은 연중 높은 총질소(TN) 농도를 유지하였으나 9월에 5.0 mgL⁻¹의 최소 농도를 보여 장마에 의한 희석현상이 뚜렷하게 나타났고, 농지형 및 산림형 하천은 연중 평균 5.0 mgL⁻¹ 이하의 농도를 유지하며 계절적 변동이 거의 없는 것으로 나타났다. 총인(TP)은 연중 0.03-0.73 mgL⁻¹의 큰 변동 폭으로 토지 이용도에 따라 뚜렷하게 구분되는 변화를 보였다. 주거형 하천의 경우, 평균 0.53 mgL⁻¹로 산림형, 농지형 하천과 비교하여 뚜렷하게 높은 값을 보였고, 8월에 0.33 mgL⁻¹로 장마에 의한 희석현상을 보였다. 이는 주거형 하천이 소규모 농촌의 주거지 및 중규모의 시가지 인근에 위치하기 때문에 축산농가와 도심지역의 영향을 많이 받은 것으로 사료된다(방 등, 2002). 또한, 농경지에서 인(P)을 포함한 비료사용 등으로 농지형 하천에서 평균 0.11 mgL⁻¹의 높은 값을 보이며, 산림형 하천에서 평균 0.04 mgL⁻¹로 가장 낮은 값을 보였다(Fig. 4f).

총 부유물(SS)의 농도는 계절강우 분포와 높은 상관성($r = 0.865, p < 0.001$)을 보였고, 강우 분포가 집

중되는 7-9월에 높게 나타났고, 산업 및 경제활동이 적고 강우량이 작은 동절기에 낮은 값을 보였다(Fig. 4g). 토양노출이 가장 심한 농지형 하천은 산림형 및 주거형 하천보다 통계학적으로($p < 0.001$) 뚜렷하게 높은 부유물 농도를 보여 농지형 하천의 경우 부유물 농도 증가에 의한 하상퇴적 증가 및 그에 따른 저서생물의 영향이 타 토지이용도에 비해 클 것으로 사료되었다(정 등, 1999). 전기전도도(EC)는 주거형 하천에서 평균 455.1 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 으로 높은 값을 보였고, 농지형 하천이 평균 270.8 $\mu\text{S cm}^{-1}$, 산림형 하천이 188.0 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 산림형 하천에서 가장 낮은 값을 보였다. 또한, 계절별 EC수치는 3가지 유형의 토지 이용도에서 모두 6월 이후에 낮아지는 경향을 보여 장마에 의한 이온희석현상(Ionic dilution)이 뚜렷하게 나타났다(Fig. 4h). 이러한 이온 희석 현상은 An과 Jones(2000), 안(2001), 안 등(2001)의 연구들에 의하여 뒷받침된다.

수질항목별 토지이용도에 따른 계절적 수질경향을 종합해보면, 유기물질 오염지표인 BOD와 COD는 주거형 하천에서 전반적으로 높은 값을 보였으며, 총부유물 농도(SS) 및 전기전도도(EC)는 강우량과 높은 연관성을 보였다. 총질소(TN)와 총인(TP)은 토지이용도에 따라 농도차가 큰 것으로 분석되었는데, 총질소(TN)와 총인(TP) 모두 주거형 하천에서 뚜렷하게 높게 나타났고, 산림형 하천은 유기물 및 영양염류의 유입이 적어 다른 유형의 하천들에 비하여 낮은 수치를 보였다.

3.3. 연별 수질특성

토지이용도에 따른 연별 수질 변화 분석에 따르면, 농지형 하천과 산림형 하천에서 용존산소(DO)는 2001년부터 지속적으로 증가하는 경향을 보였고, 주거형 하천의 용존산소(DO)는 다른 유형의 하천들에 비하여 낮게 나타났다(Fig. 5b). 생물학적 산소요구량(BOD)의 경우, 농지형 및 산림형 하천에서 연별로 일정한 수치를 유지하는 것으로 나타났으나 주거형 하천에서는 큰 변화를 보였다(Fig. 5c). 또한, 화학적 산소요구량(COD)은 연별로 BOD와 유사한 경향을 보이지만, BOD보다 높은 수치를 보여 미생물에 의해 분해가 가능한 유기물 뿐 아니라 분해가 불가능한 유기물도 다량 유입되고 있는 것으로 나타나 농지 및 산림

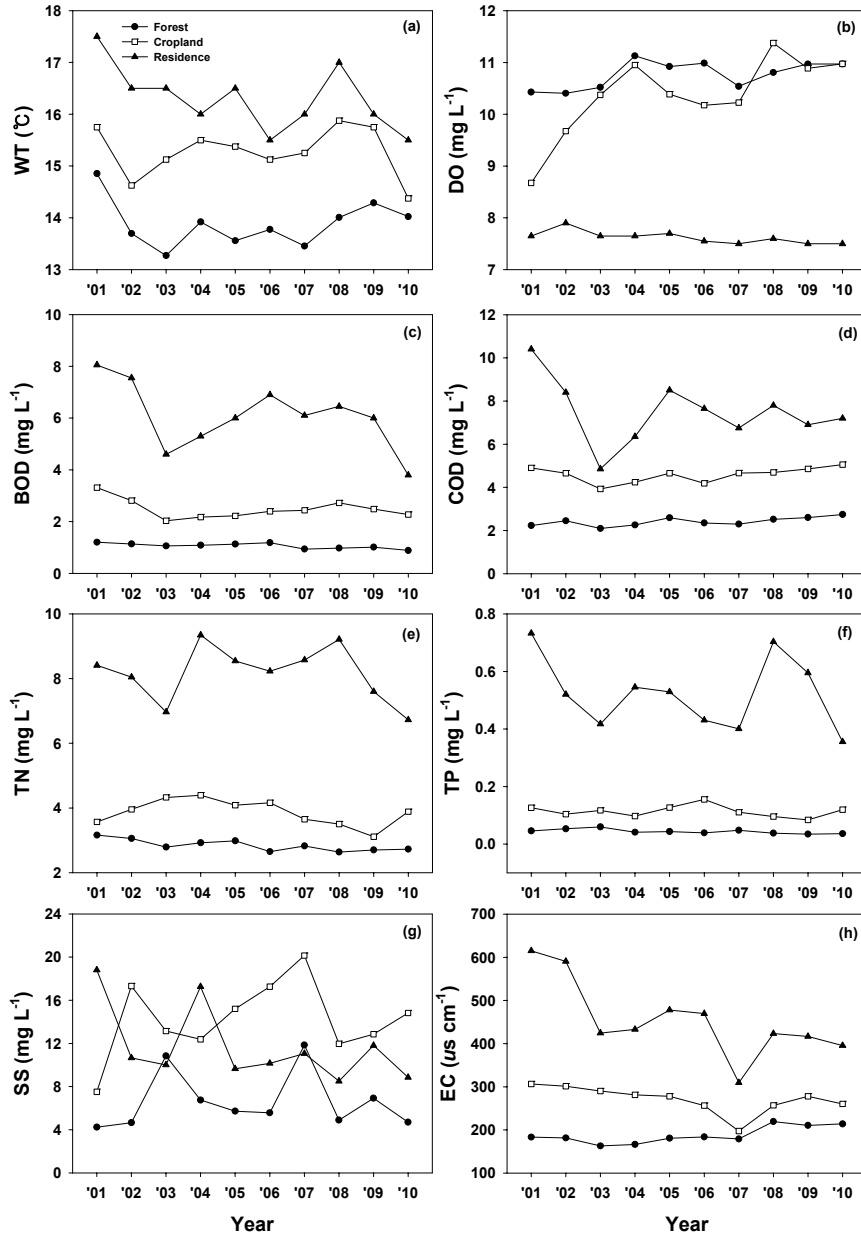


Fig. 5. Long-term annual fluctuations of water quality during 2001-2010 in Namhan River watershed.

에서 유래하는 자연적인 유기물 뿐 아니라 인위적인 유기물도 다량 유입되고 있는 것으로 사료되었다(Fig. 5d). 총부유물(SS) 농도는 농지형 하천에서 대체적으로 높게 나타났으며, 연별로 큰 변화를 보였으며, 2007년에 가장 높은 값을 보였다(Fig. 5g). 총질소

(TN)와 총인(TP)의 경우, 산림형 하천과 농지형 하천은 연별로 큰 변화를 보이지 않았으나 주거형 하천에서는 연별로 뚜렷한 차이를 보였다(Fig. 5e, 5f). 주거형 하천이 산림형과 농지형 하천에 비하여 높은 농도를 보인 것은 하천 주변에서 유입되는 생활하수와 공

단폐수가 가장 큰 요인인 것으로 사료되었다(김 등, 2007; 정, 2005). 전기전도도(EC) 역시 주거형 하천에서 가장 높은 농도를 보였고, 2007년에 3가지 유형 모두에서 낮게 나타났는데, 이는 2007년에 발생한 높은 강우분포에 의한 것으로 사료되었다

3.4. 토지 이용도별 수질특성

토지 이용의 상대적 인 피도별 수질변화 특성 평가는 Fig. 6, 7과 같다. x-축을 산림의 상대적인 빈도로 표기했을 때 유기물 오염 지표인 생물학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD), 부유물질(SS), 전기전도도(EC) 그리고 영양염류인 총질소(TN)는 산림의 상대비율이 높을수록 낮은 농도를 보였고, 통계적으로도 높은 역상관관계를 보였다(Table 1). TN의 경우, 산림의 비율이 20% 이하일 때, 6.0 mgL⁻¹의 높은 농도를 보이다가 산림의 비율이 90% 이상일 때는 1.2 mgL⁻¹ 이하로 나타나 수질이 개선되는 것으로 분석되었다. 이는 안과 신(2005)이 제시한 바와 같이 70%이상의 산림 지형에서도 1.0 mgL⁻¹ 이상의 높은 질소 농도가 관측된다는 기존의 연구결과와 일치하는 결과를 보였다. 반면, 복미 및 유럽의 경우 하천마다 양상은 다르지만, 일반적으로 오염원이 적은 산림형 하천에서 총질소의 농도는 0.2-0.6 mgL⁻¹ 이하의 농도가 검출된다는 점에서 분명한 차별성을 보였다(Dodds 등, 1998; Howden 등, 2009). BOD 및 COD 또한 산림의 비율이 30%일 때, 각각 4.2 mgL⁻¹, 5.8 mgL⁻¹의 높은 농도를 보이다가 산림의 비율이 90% 이상 되면 두변수 모두 2.0 mgL⁻¹ 이하로 감소하였다. 총질소

(TN), 총인(TP), 부유물 농도(SS), 전기전도도(EC)는 산림형 비율이 증가함에 따라 최대치 농도가 뚜렷이 감소하는 것으로 나타나 산림지대가 강우시 부유물 및 영양염류(N, P)의 유입부하를 저감시켜 주는 완충 작용(Buffering action)을 하는 것으로 나타났다(조 등, 2010).

농지형 토지이용도 비율에 따른 수질변수의 변화는 Fig. 7에서 보여주는 바와 같이, 산림형 토지이용 비율의 증가에 따른 특성과 반대되는 경향을 보였다. BOD 및 COD 농도는 농작물을 짓는 농지의 면적 비율이 높을수록 두 변수 모두 높은 수치를 보였다(Fig. 7c, 7d). BOD의 경우, 대부분의 지점에서 3.0 mgL⁻¹ 이하로 환경부의 이화학적 하천 수질기준에 의거할 때 “약간좋음”의 수질등급을 보였으나, 농지의 비율이 50%이상인 곳에서는 최대 5.0 mgL⁻¹로서 환경부의 수질등급 “악화상태”로 되는 경향을 보였다. COD 또한 농지 비율이 60% 이상의 점유율을 보이는 지점에서 최대 6.0 mgL⁻¹의 악화된 수질을 보였다. 영양물질의 농도를 나타내는 총질소(TN)와 총인(TP)은 농지의 비율이 증가함에 따라 높아지는 경향을 보였다(Fig. 7e, 7f). 한편, 전기전도도(EC)는 농지의 비율이 50% 이상인 구간에서 평균 350 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 으로 전체 평균 250 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 보다 1.4배 이상 높은 수치를 보였다. 또한, 농지형 토지이용 비율의 증가에 따라 DO와 TP를 제외한 대부분의 변수에서 높은 농도를 보였고, 통계적으로 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다(Table 1).

Table 1. Correlation analysis with landuse patterns against physiochemical parameters

Parameters	n	% Forest		% Cropland		% Residence	
		r	p	r	p	r	p
WT	72	-0.561**	< 0.001	0.522**	< 0.001	0.563**	< 0.001
DO	72	0.404**	< 0.001	-0.268*	0.023	-0.461**	< 0.001
BOD	72	-0.610**	< 0.001	0.513**	< 0.001	0.797**	< 0.001
COD	72	-0.762**	< 0.001	0.667**	< 0.001	0.803**	< 0.001
SS	72	-0.475**	< 0.001	0.436**	< 0.001	0.286*	0.015
TN	72	-0.424**	< 0.001	0.307*	0.009	0.655**	< 0.001
TP	72	-0.030	0.799	-0.018	0.879	0.191	0.108
EC	72	-0.486**	< 0.001	0.426**	< 0.001	0.598**	< 0.001

* p < 0.05, ** p < 0.001

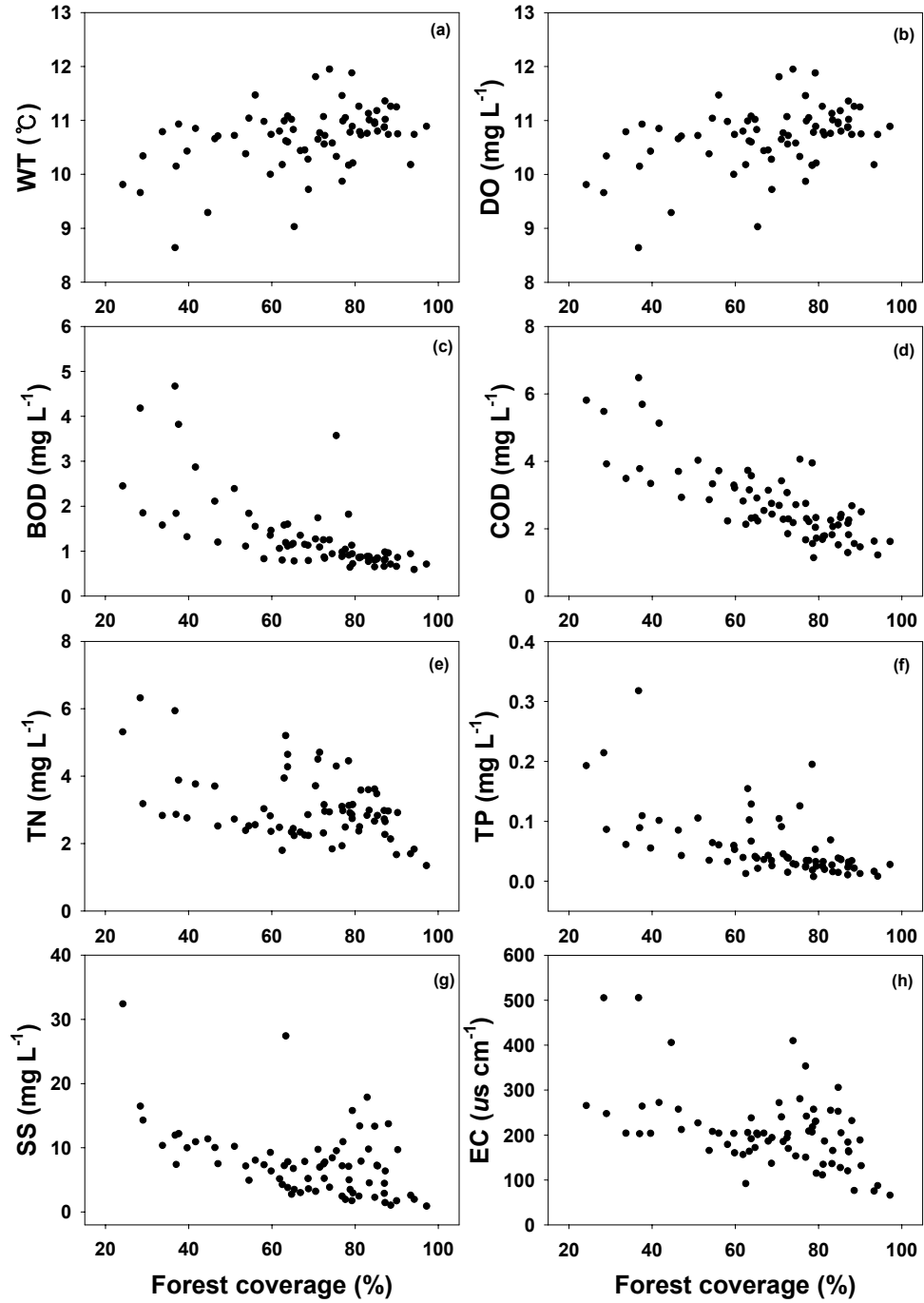


Fig. 6. Water quality variations on the forest coverage.

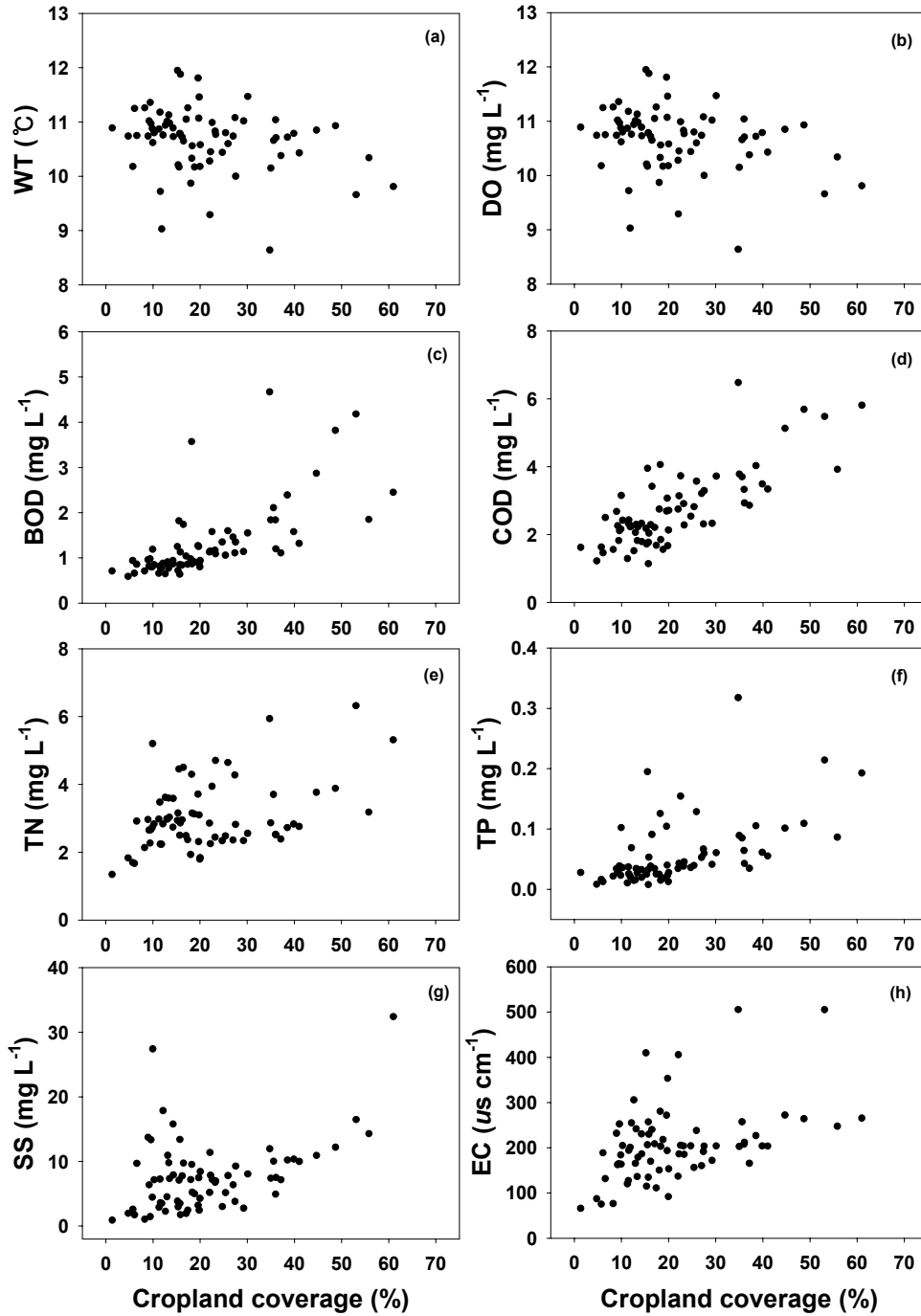


Fig. 7. Water quality variations on the cropland coverage.

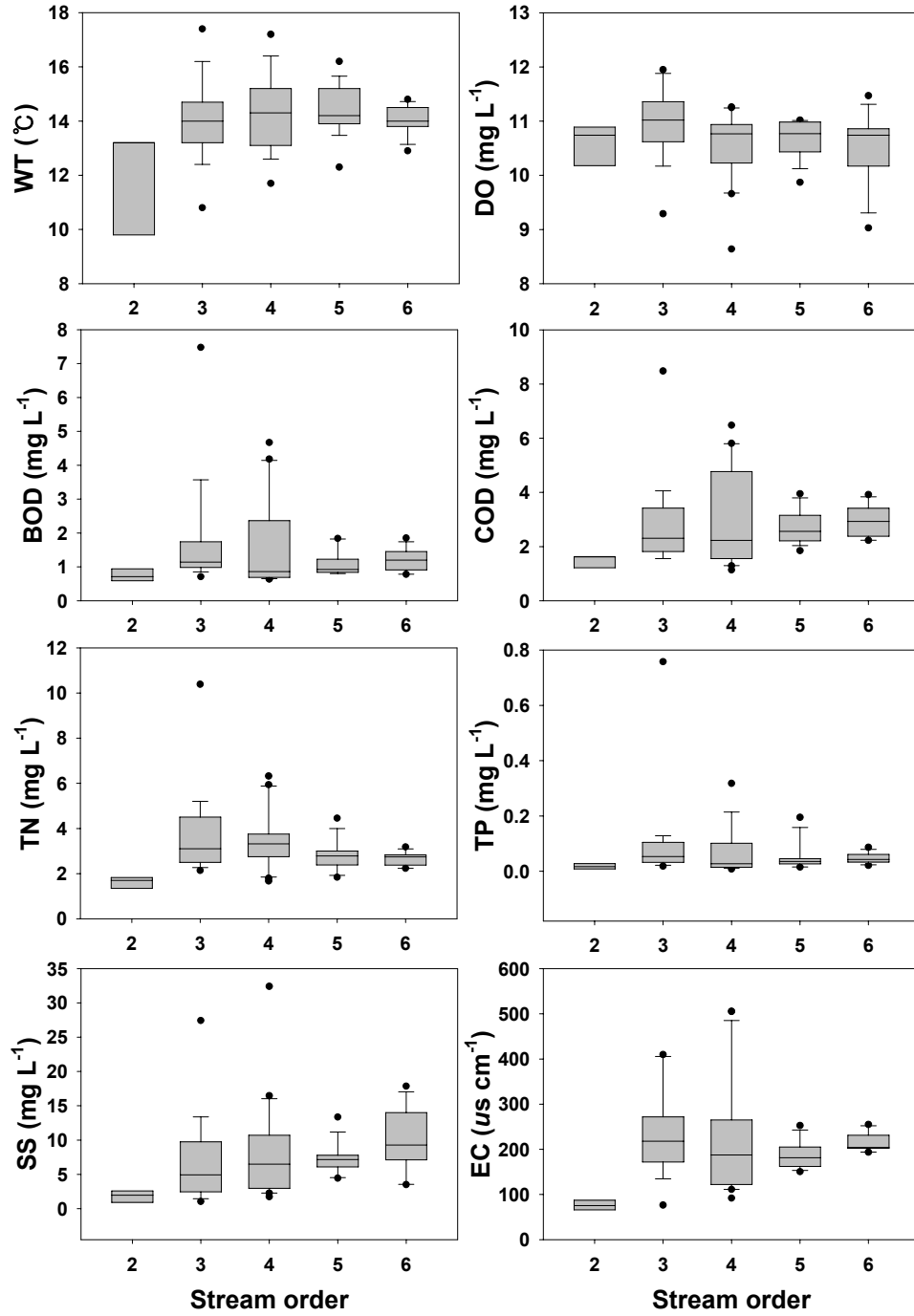


Fig. 8. Physico-chemical variations of water quality on the gradients of stream order.

3.5. 하천차수별 수질변화 특성

하천차수에 따른 수질변화 특성을 분석한 결과에 따르면(Fig. 8), 용존산소(DO), 생물학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD), 총질소(TN), 총인(TP), 총부유물(SS) 및 전기전도도(EC)는 공통적으로 4차 하천에서 최대치를 보였고, 나머지 2-3차 하천 및 5-6차 하천에서의 최대치는 낮게 나타났다. 이는 남한강의 종류인 4차 하천에서 농지와 주거지가 발달하여 오염물질이 다량으로 유입되어 수질이 악화되었다가 하류로 갈수록 유량증가에 의한 희석과 물리·화학적 자정작용 등에 의해 수질이 개선되는 것으로 판단된다. DO는 3차 하천에서 평균 11 mgL^{-1} 로 최고치를 보이다가 하천차수가 증가함에 따라 서서히 감소하는 양상을 보였다. 이는 하천차수가 높아짐에 따라 수온이 증가하여 용존산소 용해율이 낮아지는 이유 때문으로 분석되었다. 생물학적 자정작용에 의한 산소 소모도 고려될 수 있으나 충분한 재폭기가 이루어지는 하천 수질특성을 고려할 경우 그 영향은 미미하다고 할 수 있다. TN 및 TP는 유사한 패턴을 보였는데, 4차 하천에서 수질이 양호한 지점과 악화된 지점이 고루 분포하다가 5차 하천에서 수질이 개선된 결과를 보여 충주댐 방류수의 영향을 많이 받는 남한강 종류의 특성 때문으로 사료되었다. 즉, 충주호는 유입부하가 적고 체류시간이 길어 댐에 유입된 인(P)의 상당량이 호수 수체 내에 침강되어 방출수의 인(P) 농도가 매우 낮아 남한강 종류의 수질특성에 영향을 미친 것으로 사료되었다(An과 Kim, 2003). EC 및 SS도 유사한 경향을 보이는데 SS의 경우, 4차 하천에서 최대치가 33 mgL^{-1} 이고, 2-3차, 5-6차 하천에서는 최대치가 15 mgL^{-1} 로서 최대치에 있어서 2배 이상의 큰 변화 폭을 보였다. 또한, 하천 주변 유역에서 무기성 및 유기성 부유물이 충주댐에 유입되면 대부분은 침강되어 방출수의 부유물 농도는 낮아져 충주댐 하류부(5차 하천)에서는 수질이 개선되는 효과를 보였다. EC는 4차 하천에서 $500 \mu\text{S cm}^{-1}$ 의 최대치를 보여 다른 하천보다 2배 이상의 변화 폭을 보였다. 다른 하천에 비해 4차 하천에서의 수질은 특히 악화되어 있는 것을 감안할 때 4차 하천 인근에서 유입되는 오염물 및 인(P)과 질소(N)와 같은 영양염을 차단하는 것이 중요한 것으로 나타났다.

4. 결론

남한강 수계에서의 이화학적 수질은 토지 이용도 및 계절별 강우 분포에 의해 크게 영향 받는 것으로 나타났다. 전체 72개 하천에서 산림형 토지 이용도가 가장 높게 나타났으며, 농지형 및 주거형 토지이용도 특성은 낮게 나타났다. 또한, 수계별 하천의 분포 유형에 따르면, 남한강 상류수계(N_u)의 경우 산림형 토지이용도가 80.6%를 보여 우세현상을 보였고, 농지형 및 주거형 토지이용도는 각각 11.7%, 2.1% 이하로 산림형 토지이용도에 비해 낮게 나타났다. 반면, 평장강 수계(P_y)에서는 5지점 모두 산림형 토지이용이 70% 이상(범위: 71-83%)으로 나타나 농지형 및 주거형 하천과 비교하여 하천으로 유입되는 유기물 및 영양염류(N, P)의 양이 적은 것으로 나타났다. 계절별 수질특성은 용존산소(DO) 및 수온에서 역순관 관계를 보였으며, 총부유물(SS) 농도 및 전기전도도(EC)는 몬순강우의 영향을 크게 받아 전자는 7-8월에 급격히 증가하였고, 후자는 급격히 감소하는 특성을 보였다. 이러한 결과는 몬순강우에 의하여 발생하는 현상으로 강우에 따른 수체 내·외적인 변화와 변화요인에 대한 체계적인 분석이 필요할 것으로 사료된다. 한편, 일반적으로 유기물 오염의 지표인 BOD, COD농도는 산림형 토지이용도 하천에서 그 피도비율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였고, 반대로 농지형 하천에서는 증가하는 경향을 보여 토지 이용도에 따른 수질 영향은 분명하게 나타났다. 특히, 토지 이용률에서 농지의 면적이 증가함에 따라 인(P)과 질소(N) 오염 부하량이 크게 증가했으며, 특히 4차 하천들에서 가장 높게 나타나 향후 남한강 수계의 효율적 수질관리를 위해 농지형 하천에 대한 수질개선을 적극 검토하여야 할 것으로 사료된다. 또한, 남한강 수계의 수질악화에 영향을 미치는 오염된 지천들에 대한 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 사료되며, 이와 더불어 각 수계별 오염원의 제어에 관한 연구가 지속적으로 병행되어야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- 김기동, 서정범, 서용찬, 2007, 섬강, 원추천, 매지천 그리고 주요 유입지천의 수질조사, 한국환경분석학회지,

- 10(4), 191-196.
- 김용진, 신경애, 이옥민, 2009, 남한강 지류인 북하천과 달천의 부착구조를 이용한 생물학적 수질평가, 한국환경생물학회지, 27(4), 414-424.
- 김종철, 원운재, 박충기, 신용진, 은주영, 이석중, 최금중, 최지용, 김영진, 2011, 도내 주요 하천수의 수질특성 및 오염부하량 산정: 남한강, 북한강, 섬강, 홍천강, 한탄강 수계, 서울특별시 보건환경연구원보, 22, 80-88.
- 김태원, 허진, 정명숙, 길경익, 2010, 팔당호 지류 중 남한강 유역의 강우 시 난분해성 유기물질 유출 특성, 한국물환경학회 공동 추계학술발표회 논문집, 한국물환경학회, 267-268.
- 김형을, 2002, 남한강의 조류생산잠재력과 제한영양염에 관한 연구, 석사학위논문, 경희대학교.
- 박석순, 박배경, 이상호, 1994, 한강유역의 토지이용도에 따른 지천 수질 비교, 한국수질보전학회지, 10(1), 10-16.
- 박성민, 신윤근, 2011, 하절기의 집중강우가 남한강 상류수계 수질에 미치는 영향, 한국하천호수학회지, 44(4), 373-384.
- 박정원, 신재기, 이희무, 박재충, 2005, 인공호에서 몬순과 태풍 강우에 의한 고탁수층의 이동과 소멸특성, 한국하천호수학회지, 38(1), 105-117.
- 박지형, 공동수, 민경석, 2008, 팔당호 상류유역의 점·비점오염원 유달부하 특성: 남한강·경안천 수계를 대상으로, 한국물환경학회지, 24(6), 750-757.
- 박지형, 손수민, 류덕희, 2011, 경험식과 요인분석을 통한 오염물질 유출 특성 연구 - 남한강 상·하류 수계 주요 하천을 중심으로, 한국물환경학회지, 27(6), 905-913.
- 박혜경, 유경아, 이현주, 변명섭, 최명제, 김용진, 강필구, 신유나, 2006, 남한강 중·하류 수계의 수질 및 동·식물플랑크톤 분포 양상, 한국물환경학회 공동 추계학술발표회 논문집, 한국물환경학회, 696-705.
- 방천희, 박재로, 이용수, 2002, 북하천 유역의 수질평가를 위한 종합수질지표의 적용성 검토, 한국물환경학회 공동 추계학술발표회 논문집, 한국물환경학회, 39-42.
- 안광국, 서진원, 박석순, 2001, 대청호의 취수탑 주변의 이화학적·생물학적 상태에 대한 계절강우의 영향, 한국하천호수학회지, 34(4), 327-336.
- 안광국, 신일철, 2005, 산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 몬순 강우의 영향, 한국하천호수학회지, 38(1), 54-62.
- 안광국, 2001, 대형 인공호에서 양이온, 음이온 및 전기전도도의 연변화에 대한 수리수문학적 중요성, 한국하천호수학회지, 34(1), 1-8.
- 오세진, 우성호, 허진, 정명숙, 신현상, 2009, 집중 강우시 남한강 내 용존 유기물의 성상 변화, 한국물환경학회지, 25(5), 697-703.
- 윤충경, 이새봄, 정광욱, 한정운, 2007, 농업용 저수지 유역의 토지이용과 수질항목 간의 상관관계 분석, 한국하천호수학회지, 40(1), 31-39.
- 이형진, 공동수, 김상훈, 신기식, 박지형, 김병익, 김성미, 장승현, 천세역, 2007, 남한강수계 저수지 수질변동 특성에 관한 연구, 한국물환경학회지, 23(6), 889-896.
- 정상혁, 2005, 원주천 수질개선 및 수량증대에 관한 연구, 석사학위논문, 연세대학교.
- 정성민, 엄재성, 장창원, 최영순, 김범철, 2012, 강우시 한강유역에서의 비점오염원 유출 특성과 토지이용도와의 관계, 한국물환경학회지, 28(2), 255-268.
- 정성민, 장창원, 김재구, 김범철, 2009, 한강상류 고령지 농업지역에서의 강우시 비점오염 유출 특성, 한국물환경학회지, 25(1), 102-111.
- 정평민, 어성준, 정영현, 김재진, 김기선, 1999, 북한강 지류에서의 하상 조성에 따른 저서성 대형무척추동물의 군집 분포, 한국환경생물학회지, 17(4), 389-400.
- 조경원, 이현주, 박지형, 2010, 토지이용이 다변화된 산림 유역의 수질에 미치는 몬순 강우의 영향, 한국농림기상학회지, 12(3), 197-206.
- 한정호, 안광국, 2008, 인공담과 그 영향을 받는 하류하천의 수질변동 역동성: 사례 연구, 한국하천호수학회지, 41(3), 382-394.
- 홍사육, 나규환, 1978, 남한강의 수질, 한국하천호수학회지, 11(1), 1-6.
- 환경부, 2009, 수생태계 건강성 조사 및 평가(II), 환경부 국립환경과학원.
- 환경부, 2010, 수생태계 건강성 조사 및 평가(III), 환경부 국립환경과학원.
- An, K.-G., 2000, Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorus, Korean Journal of Limnology, 33(3), 222-229.
- An, K.-G., Kim, D. S., 2003, Response of lake water quality to nutrient inputs from various streams and in-lake fishfarms, Water Air Soil Pollut, 149(1-4), 27-49.
- An, K.-G., Jones, J. R., 2000, Temporal and spatial patterns in salinity and suspended solids in a reservoir influenced by the Asian monsoon,

- Hydrobiologia, 436(1-3), 179-189.
- An, K.-G., Park, S. S., 2002, Indirect influence of the summer monsoon on chlorophyll, total phosphorus models in reservoirs: a case study, *Ecol. Model.*, 152(2-3), 191-203.
- Choi, J. W., Kumar, H. K., Han, J. H., An, K.-G., 2011, The development of a regional multimetric fish model based on biological integrity in lotic ecosystems and some factors influencing the stream health, *Water Air Soil Pollut.*, 217(1-4), 3-24.
- Collins, R., Jenkins, A., 1996, The impact of agricultural land use on stream chemistry in the middle Hills of the himalayas, *J. Hydrol.*, 185(1-4), 71-86.
- Dodds, W. K., Jones, J. R., Welch, E. B., 1998, Suggested classification of stream trophic state: distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen, and phosphorus, *Water Res.*, 32(5), 1455-1462.
- ESRI, 2010, ArcGIS(version 10,0), Environmental Systems Research Institute Inc., Redlands, CA.
- Haith, D. A., 1976, Land use and water quality in New York Rivers, *J. Environ. Eng-ASCE.*, 102(1), 1-15.
- Howden, N. J. K., Bowes, M. J., Clark, A. D. J., Humphries, N., Neal, C., 2009, Water quality, nutrients and the European union's Water Framework Directive in a lowland agricultural region: Suffolk, south-east England, *Sci. Total Environ.*, 407(8), 2966-2976.
- Jones, J. R., Bachmann, R. W., 1976, Prediction of phosphorus and chlorophyll levels in lakes, *J. Water Pollut. Con. F.*, 48(9), 2176-2182.