KJEE 48(1): 12-25 (2015)
http://dx.doi.org/10.11614/KSL.2015.48.1.012
ISSN: 2288-1115 (Print), 2288-1123 (Online)

Original article

대청호 유입지천의 수질 특성

심무준* · 윤재용 · 이수형

국립환경과학원 금강물환경연구소

Water Quality Properties of Tributaries of Daechung Lake, Korea. ***Shim, Moo Joon*, Jae Yong Yoon and Soo Hyung Lee (Geum River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Okcheon 373-804, Korea)***

Abstract The tributaries of Daechung Lake play an important role in controlling eutrophication in the lake, which is used for agricultural purposes and as potable water. However, water quality properties were not extensively studied in the tributaries of Daechung Lake. The objectives of this study are to investigate spatial and temporal properties of water quality and to characterize streams which could threaten water quality of Daechung Lake. For this study, water samples were weekly or monthly collected from February 2014 to October 2014 in 9 streams. Water quality parameters analyzed in this study include biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total organic carbon (TOC), total nitrogen and phosphorus (TN and TP), suspended solids (SS), and chlorophyll *a*. Based on temporal distribution and principal component analysis, BOD, COD, TOC, SS, and TP were controlled by not only river discharge that increased during summer due to heavy rain fall, but also due to anthropogenic input (e.g., bridge construction and/or agricultural activity). Dilution is also one of the factors explaining TN and conductivity, both of which decreased with increased discharge. Generally, concentrations of contaminants (BOD, COD, TOC, TN and TP) in the tributaries were higher than those of Daechung Lake. However, pollution load indicated that only the main channel of Geum River and Sook Stream may largely influence lake waters, attributed mostly to their large volumes. This implies that the main channel and Sook Stream are the major influences on the water quality of Daechung Lake.

Key words: Daechung Lake, tributaries, water quality, discharge, Sook Stream

서 론

대청댐은 높이 72 m, 길이 495 m, 체적 123만 4천 m^3의 댐으로 금강상류에 위치하고 있다(Lee *et al*., 2008). 대청댐이 완공됨으로 생긴 대청호는 저수면적 72.8 km^2, 호수길이 80 km, 저수량 15억톤으로서 대전, 청주와 천안을 비롯한 충청지역과 전북 일부 지역에 생·공용수를 공급하며, 금강하류와 미호천 유역에는 농업용수를 제공하는 데 이용되고 있다(Lee *et al*., 2008; Kim *et al*., 2012). 또한 홍수조절을 통하여 금강 하류지역의 홍수피해를 경감시키고 수력발전을 통하여 전력을 생산하는 역할을 해오고 있다(Lee *et al*., 2008).

그러나 국내외 여느 인공호수와 마찬가지로 댐의 건

Manuscript received 8 December 2014, revised 5 March 2015,
revision accepted 17 March 2015
* Corresponding author: Tel: +82-43-730-5623, Fax: +82-43-733-9408,
E-mail: moojoonshim@gmail.com

ⓒ The Korean Society of Limnology. All rights reserved.
This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

설로 인해 물의 흐름이 느려지고 수 체류시간이 증가하므로 영양염류가 증가하여 부영양화 현상이 발생되어왔다 (Kim and Kim, 1996; Lee and Kim, 1996; Han *et al*., 1998; Lee *et al*., 2008). 이러한 대청호 녹조현상의 원인을 파악하여 수질개선을 위한 노력이 다각도로 진행되어왔다 (Lee *et al*., 2002; Oh and Koh, 2003; Shin *et al*., 2003; An and Yang, 2007; Kim and An, 2010). 그러나 이런 종류의 연구는 주로 대청호 내 호수 지점에 국한된 수질조사가 집중되어왔으므로 유입하천에 관한 연구가 필요하다는 주장이 제기되어왔다 (Kim and Lee, 2011; Kim *et al*., 2012).

외국에서는 이미 호수에 유입되는 지천의 수질이 호수에 미치는 영향에 관해 많은 연구가 진행되고 있다 (Kelly *et al*., 1991; Hurley *et al*., 1998; Winter *et al*., 2007; Makarewicz *et al*., 2012). Winter *et al*. (2007)은 Lake Simcoe에 용존산소 고갈현상이 발생하는 것은 지류에 의해 유입되는 인의 영향으로 보고하였다. Makarewicz *et al*. (2012)는 Lake Ontario보다 수질 항목의 농도가 유입하천에서 더 높았다는 것을 발견했고 규모가 작은 하천이라도 유입되는 인의 부하량은 클 수 있다는 것을 밝혀냈다. 본 연구에서 분석한 항목은 아니지만 수은도 지류에서 겨울에 눈이 녹을때와 여름에 강우량이 증가했을 때 Lake Michigan으로 유입되는 부하량이 증가한 것이 관찰되었다 (Hurley *et al*., 1998).

이와 같이 호수로 유입되는 지천에 의해 호수의 수질이 변할 수 있으며 대청호의 수질도 유입지천에 의해 영향을 받을 수 있으므로 대청호로 유입되는 수질의 특성을 먼저 파악할 필요가 있다. 실제로 부영양화로 인하여 대청호에서 발생하는 녹조현상은 유입하천에 의한 영향이 가장 큰 것으로 알려져 있으며 (Kim, 1996) 소옥천이 유입되는 추소 수역에서 상대적으로 심하게 나타나는 걸로 보고되었다 (Cheon *et al*., 2006). Kim *et al*. (2012)은 10년간 수질 자료를 분석하여 대청호 유입지천들이 대청호 수질에 끼칠 수 있는 가능성을 보고하였다. 그 연구에서는 오염도가 가장 심한 옥천천의 수질 개선이 대청호 수질 개선에 큰 도움을 줄 것이며 여름철 총인과 부유물의 유입을 최소화시켜야 한다고 적시하였다. 그러나 여전히 유입하천의 수질을 개선하는 노력은 크게 이루어지지지 않고 있으며 유입지천에 대한 지속적인 모니터링이나 수질 특성에 관한 연구도 미미한 형편이다. 따라서 본 연구의 목적으로는 (1) 대청호로 유입되는 지천의 시·공간적 수질 특성을 파악하고 (2) 유입지천의 수질을 조절하는 요인을 찾고자 하였으며 (3) 대청호 수질에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 지천을 선정하는 것에 있다. 본 연구의 결과는 대청호 수질 개선 계획을 수립하는 데 기초적인 자료로 이용될 수 있을 것이다.

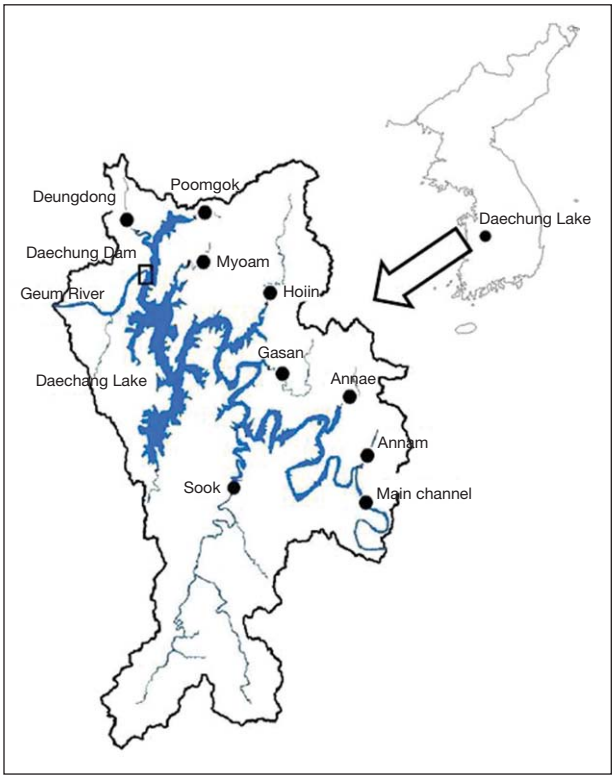

Fig. 1. Location map showing sampling sites.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 채수방법

대청호로 직접 유입되는 지천 소옥천, 안남천, 안내천, 가산천, 회인천, 묘암천, 품곡천과 등동천을 선택하였고 추가적으로 대청호로 유입되기 전 금강본류에서도 채수하여 총 9개의 하천에서 채수하였다 (Fig. 1). 이중 2014년 2월부터 2014년 10월까지 본류, 소옥천, 회인천, 안내천, 등동천에서는 일주일에 한번 채수하였으며 나머지 지천들 (안남천, 가산천, 묘암천, 품곡천)에서는 한 달에 한번 채수하였다. 채수한 시료는 아이스박스에 보관하여 최대한 단시간내로 실험실로 운반하였다. 실험실로 운반한 뒤 즉시 분석하였으며 즉시 분석이 불가능했던 항목은 냉장보관하여 수일내로 분석을 완료하였다.

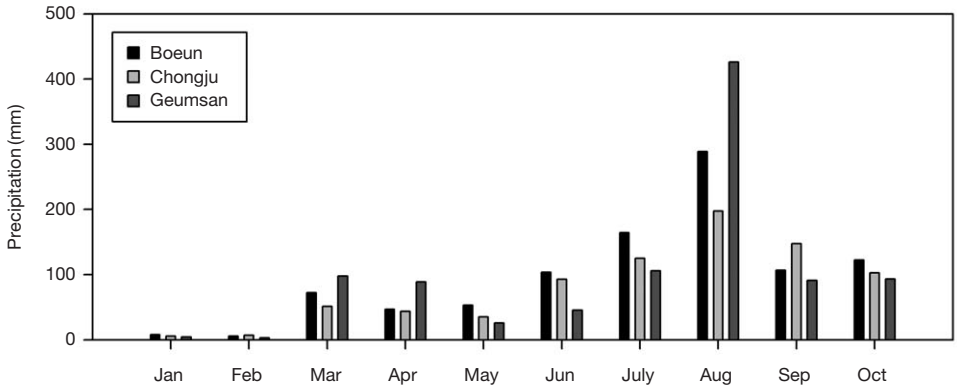

Fig. 2. Precipitation of the towns around the tributaries of Daechung Lake.

Table 1. Monthly average discharge of the tributaries (m^3 s^{-1}).

	Main St.	Sook	Annae	Hoiin	Deungdong	Annam	Myoam	Poomgok	Gasan
Feb	13.7	0.951	0.126	0.178	0.100	0.041	0.029	0.063	0.073
Mar	36.5	1.358	0.120	0.275	0.067	0.036	0.025	0.038	0.051
Apr	22.7	0.907	0.106	0.211	0.047	0.045	0.105	0.040	0.083
May	29.9	1.554	0.131	0.387	0.031	0.052	0.130	0.040	0.120
Jun	38.9	1.437	0.854	0.249	0.062	0.167	0.029	0.041	0.016
Jul	23.3	0.997	0.199	0.207	0.026	0.080	0.016	0.047	0.073
Aug	226	10.8	1.618	2.251	0.669	1.789	1.765	0.256	1.292
Sep	37.5		0.243	0.922	0.273	0.047	0.027	0.050	0.074
Oct	20.2		0.113	0.237	0.085				

2. 분석방법

유량 (stream discharge)은 유속-면적법 (velocity-area method)을 이용하였다. 유속을 현장에서 유속계로 (Valeport, Valeport BFM 001 & 002 Open Channel Flow Meters) 측정한 뒤 소프트웨어 (Calpad 2003-2004)를 이용해 유량을 계산하였다. 수온, 전기전도도 (electrical conductivity), 용존산소 (dissolved oxygen) 및 pH는 YSI meter (YSI 650MDS)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 생화학적산소요구량 (biochemical oxygen demand, BOD), 화학적산소요구량 (chemical oxygen demand, COD), 부유물질 (suspended solids, SS), 총인 (total phosphorus, TP), 총질소 (total nitrogen, TN)와 엽록소 *a* (chlorophyll *a*)는 수질오염공정시험법 (Ministry of Environment, 2011)에 의거하여 분석하였다. 총유기탄소 (total organic carbon, TOC)는 시료 적당량을 고온의 연소기에 주입한 후 연소를 통해서 수중의 유기탄소를 이산화탄소로 산화시켜 TOC 분석기 (Sievers 5310C, Sievers)로 정량하였다. 본 연구에서 분석된 수질항목들의 조절 요인 (factor)을 찾기 위한 주성분분석 (principal component analysis)은 SPSS (version 18)를 이용해 varimax 회전방법으로 요인을 추출하였다.

결과 및 고찰

1. 일반 수질 특성

각 지천에서 측정된 유량의 월 평균값은 Table 1에 나타냈다. 금강본류 유량이 지천에 비해 현저히 높았으며 지천에서는 소옥천에서 제일 높았다. 그 다음으로는 안내천과 회인천이며 나머지 지류 간에는 큰 차이는 나지 않았다. 본 연구에서 선택된 대청호 유입지천 유역에 위치한 도시들의 강수량 (precipitation)은 여름에 증가하는 전형적인 한국 강수 현상을 보여주고 있다 (Fig. 2). 모든 하천에서 유량은 대체적으로 봄 (5월)과/혹은 초여름 (6월)에 유량이 증가하였고 특히 2014년 8월에는 전국적으로 집중호우가 내려 8월 중순 모든 지천에서 유량이 현저하게 증가하였다 (Table 1).

8월 집중강우로 유량이 현저하게 증가된 이후 모든

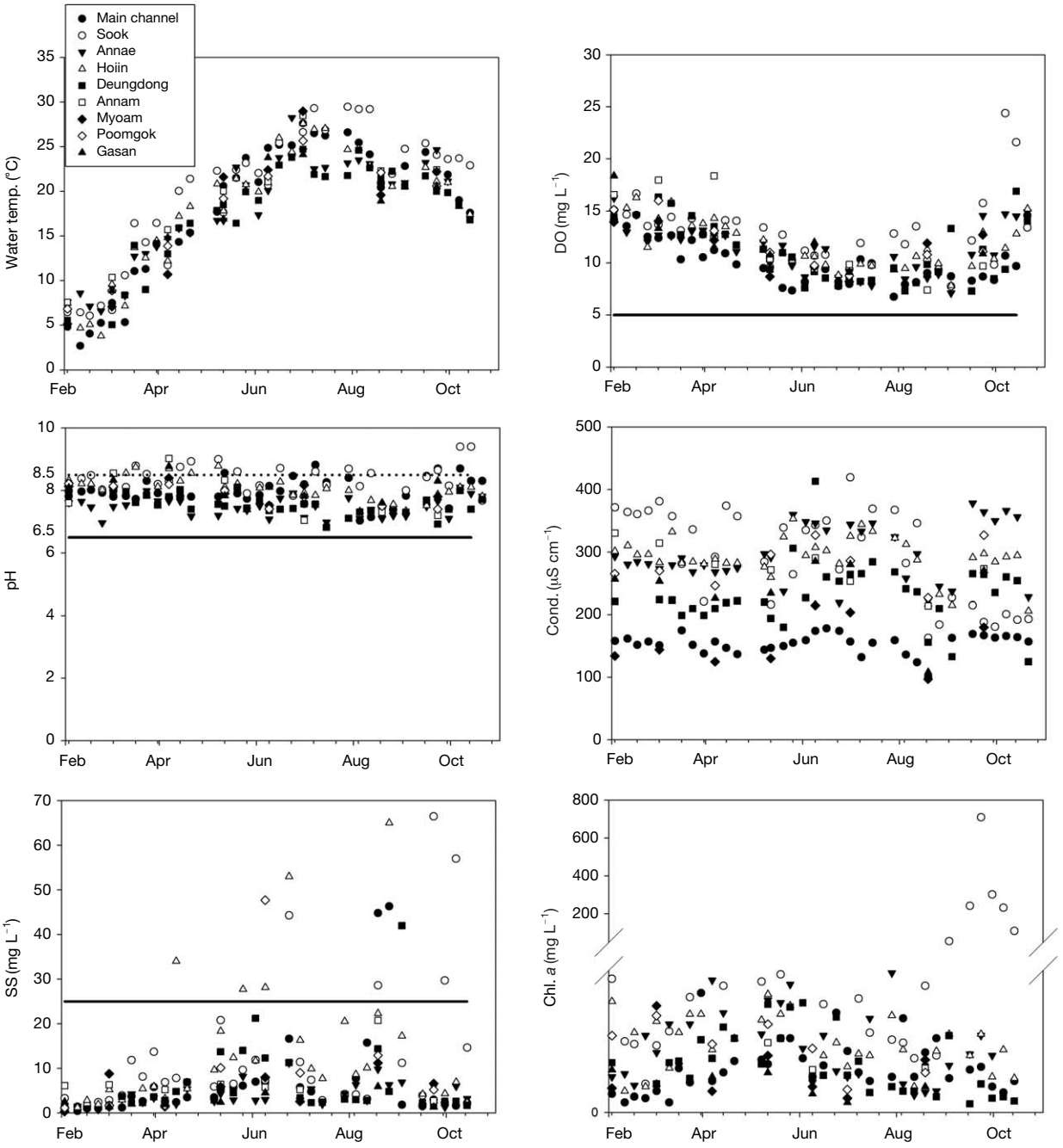

Fig. 3. Temporal variation of water temperature, dissolved oxygen, pH, conductivity, SS, and chlorophyll *a* in the tributaries. Solid bar represents third grade of Korean standards for stream water quality.

하천에서 유량이 감소하였으나 소옥천에서는 유량이 감소하지 않고 정체구간이 형성되었다. 이는 집중강우의 영향으로 대청호 수위가 올라갔지만 방류를 하지 않음에 따라 소옥천에서 대청호로 물이 더 이상 유입되지 않은 것에 기인하는 것으로 판단된다.

수온은 겨울에서 여름으로 갈수록 증가하다가 가을이 되면서 감소했으나 용존산소는 수온이 증가할 때 감소하다가 가을이 되어 다시 증가하였다(Fig. 3). 이는 온도가 올라갈수록 기체의 용해도가 감소하고 온도가 낮아질수록 용해도가 높아지기 때문이다. 채수 기간 동안 지천간 용존산소는 큰 차이가 나지 않았으나 소옥천에서 10월에 20 mg L^{-1} 넘는 높은 값을 나타냈다(Fig. 3). 이

는 8월 중순 이후 정체수역이 형성되면서 과도한 조류 번식으로 용존산소 함량이 증가했기 때문으로 판단된다. 실제로 소옥천에서 정체수역이 형성된 후 높은 엽록소 *a* 값을 나타냈으며 육안으로도 녹조현상이 관찰되었다.

pH는 모든 지천에서 계절에 따른 큰 차이를 보이지 않다가 유량이 최대인 이후 소옥천에서 변화가 관찰되었다(Fig. 3). 대체적으로 하천수질 환경기준 1등급에서 3등급 기준 6.5~8.5를 넘지 않지만 주로 소옥천에서 8.5를 넘는 경우가 관찰되었다. 소옥천에서 pH가 높았을 때 엽록소 *a*와 용존산소도 지천 중 최대값을 보였다(Fig. 3). 즉 소옥천에서 광합성 작용이 가장 활발하며 그로 인해 엽록소 *a*와 용존산소의 농도, 그리고 pH가 높아진 것으로 판단된다. 같은 이유로 소옥천에서 정체수역이 형성된 이후 과도한 조류 번식으로 인해 pH가 9 이상으로 올라간 것으로 판단된다.

전기전도도는 하천의 유량이 증가할 때 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 3). 8월에 유량 최대치를 보였을 때 전기전도도가 감소하는 경향이 뚜렷했으며 6월에 유량이 증가했을 때에도 전기전도도가 감소했다. 이는 유량이 증가함에 따라 용존성 고형물질이 희석되기 때문으로 사료된다. 지천 간 전기전도도 차이가 현저하게 나타났다. 즉 본류가 대체적으로 제일 낮고 소옥천이 높게 나타났다. 전기전도도는 수용액이 전류를 통과시키는 능력을 수치로 나타낸 값으로 용존고형물(dissolved solids)의 농도를 나타낸다. 용존고형물은 주로 이온으로 이루어져 있으며 보통 오염의 정도가 높을수록 용존이온의 농도가 높기 때문에 높은 전기전도도가 나타난다. 즉 전기전도도의 차이를 결정하는 것은 용존고형물질의 농도인데 소옥천에서 다른 지천에 비해 높은 이유는 오염물의 함량이 타 지천에 비해 높다는 것을 의미할 수 있다. 또한 상대적으로 금강 본류에서는 유량이 많아서 희석효과가 상대적으로 크기 때문에 전기전도도가 낮을 수 있다.

부유물질 역시 강수량이 증가할 때 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 3). 6월 유량이 증가했을 때 회인천에서 부유물질 함량이 최고로 높았으며 품곡천과 소옥천에서도 현저히 증가하여 3등급 수질기준(25 mg L^{-1})을 초과하였다. 회인천은 상류에 발생하고 있는 공사로 인해 4월 이후 6월 말까지 탁수가 유입되었으며 7월부터는 탁

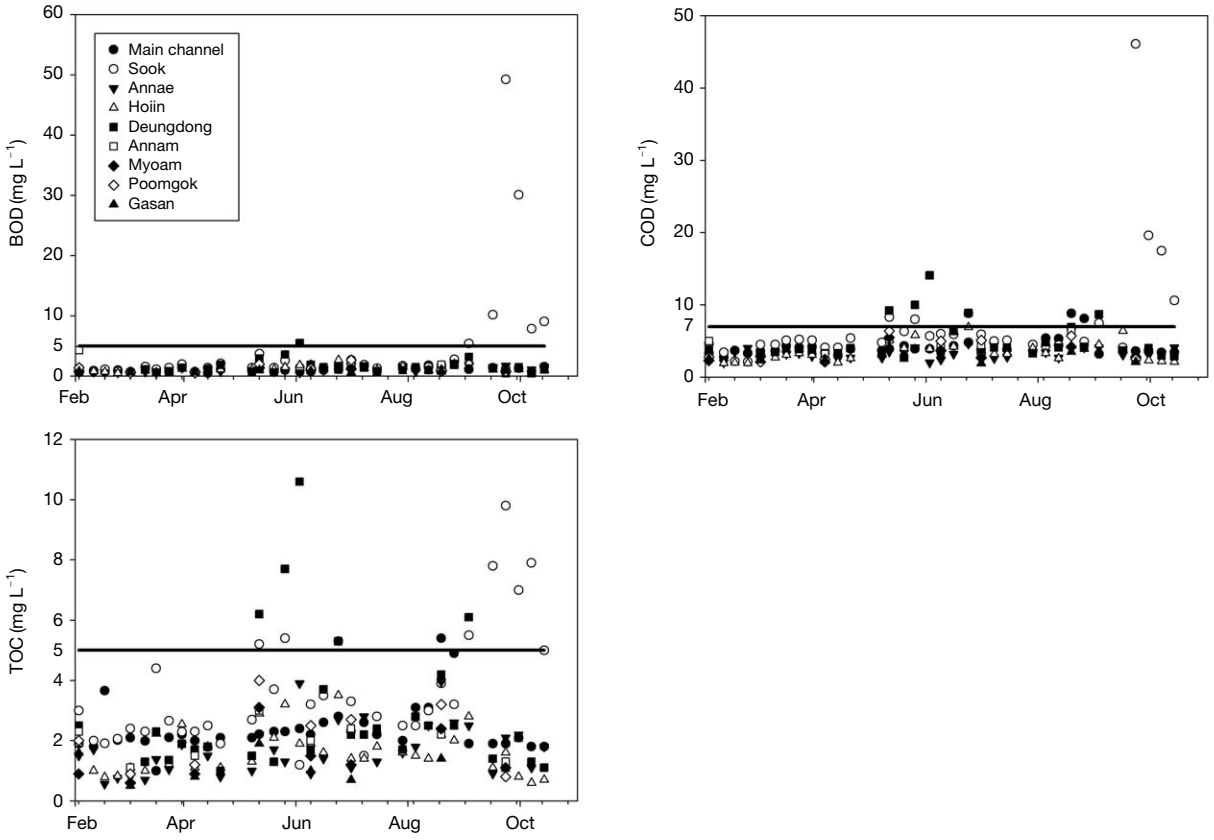

Fig. 4. Temporal variation of BOD, COD, and TOC in the tributaries. Solid bar represents third grade of Korean standards for stream water quality.

수가 관찰되지 않았다. 따라서 회인천에서는 유량과 상관없이 상류쪽 교량공사로 인해 4월에는 3등급을 초과한 것으로 판단된다. 품곡천에서도 유량이 높지 않았을 때인 6월에도 높은 부유물질의 농도가 관찰되었다. 따라서 품곡천에서 부유물질은 유량에 의해서만 통제된다고 보기에는 어려우며 높은 부유물질 함량을 유발하는 요인에 대해서 조사가 필요하다.

8월 집중강우 후 유량이 최대가 되었을 때에도 회인천에서 부유물질이 최고치를 보였으며 본류, 등동천, 소옥천에서도 3등급을 초과하였다. 소옥천에서 정체수역이 형성된 이후 엽록소 *a*와 마찬가지로 9월 하순에 최고치를 보였다가 점차적으로 감소하였다. 이는 소옥천에서 정체수역이 형성된 이후 증가한 조류가 부유물질 증가의 주원인임을 암시한다. 부유물질의 계절에 따른 변화로 미루어보면 대청호 유입지천에서 부유물질은 주로 유량에 의해 조절되지만 유량과 상관없는 교량공사와 같은 인위적인 활동에 의해서도 조절된다.

2. 유기물 농도와 유기물 지표 간 관계

유기물 농도를 지시하는 BOD, COD와 TOC 모두 대체적으로 봄에서 여름으로 갈수록 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 4). 이는 대체적으로 여름으로 갈수록 강수량이 증가함에 따라 유기물을 함유하는 물질이 빗물에 쓸려서 하천으로 유입되기 때문으로 판단된다(Kim *et al.*, 2014). 하천수질 환경기준 3등급(보통)을 초과하는 경우도 겨울과 봄에는 나타나지 않았고 6월과 8월에 각각 등동천과 소옥천에서 나타났다. 등동천 채수지점 상류에는 품곡하수처리장이 있어서 방류수의 영향을 받을 수 있다. 소옥천에서는 8월 최대 유량 이후 정체수역이 형성되어 BOD, COD, TOC 값이 다른 지천들에 비해 압도적으로 높게 증가하였으며(Fig. 4) 6등급(매우 나쁨) 기준을 훨씬 넘어섰다. 앞서 언급하였듯이 소옥천 정체수역에서 많은 조류의 번식이 유기물 농도 증가의 주원인으로 판단된다. 9월말 최대치를 보인 이후 점차적으로 감소했으며 엽록소 *a*와 비슷한 경향을 보였다(Fig. 4).

BOD는 생물학적으로 분해가 가능한 유기물을 지시하는 지시자이며(Waziri and Ogugbuaja, 2010) TOC는 수질오염공정시험기준에 의하면 수층에서 유기적으로 결합된 탄소의 합을 말한다. 따라서 BOD/TOC비(ratio)는 수중에 생분해성(biodegradable) 유기물 비중을 나타낼 수 있다. 즉 BOD/TOC비가 높으면 수중에 생분해성 유기물 함량이 상대적으로 높은 것을 의미한다. 집중호우 이후 정체된 소옥천에서 BOD의 증가로 BOD/TOC비가 현저히 증가한 것을 제외하고는 계절에 따른 큰 차이와 지천 간 차이는 없었다(Fig. 5). 또한 모든 지천에서 대체적으로 0.5 이상으로 생분해성 유기물의 비중이 높은 것으로 나타났다. 8월 집중강우 후 소옥천에서 BOD/TOC비가 현저히 증가한 이유는 집중강우 후 소옥천에서 정체수역이 형성된 이후 조류가 과도하게 번식하였고 그로 인해 생분해성 유기물이 증가하였기 때문으로 판단된다.

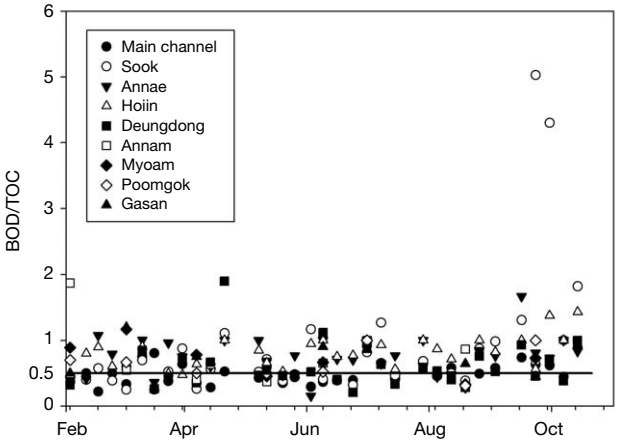

Fig. 5. Temporal variation of BOD/TOC ratios in the tributaries.

3. 총인과 총질소 시·공간분포

총인은 전 채수시기에서 대체적으로 등동천에서 높게 나타났으며 5월과 6월 유량이 증가했을 때 등동천, 소옥천, 안남천에서 3등급($0.2\ mg\ L^{-1}$)을 초과하는 수질을 나타냈다(Fig. 6). 등동천에서 높은 이유는 하수처리장 방류수의 영향으로 추정은 되지만 좀 더 세밀한 조사가 필요하다. 회인천에서는 3등급을 초과하지는 않았지만 6월 하순에 유량이 증가했을 때 총인의 농도가 다른 지천에서보다 높았다. 6월 회인천에서는 공사가 있었기 때문에 유량 증가로 인한 많은 양의 토사가 유입되었다. 인은 질소에 비해 흡착성이 높아서 토양 입자에 흡착되어 입자상으로 존재할 수 있다. 따라서 강수량이 증가하여 많은 양의 토사가 유입이 되었을 때 흡착되어있던 인으로 인해서 농도가 증가하는 것으로 생각된다. 또한 축산폐수가 회인천 유역의 전체 오염부하량(BOD, 총인과 총질소)의 가장 주요한 오염원으로 알려져 있으므로(K Water, 2013) 축산폐수의 유입으로 증가했을 가능성도 배제할 수 없다.

8월 집중강우 후 각 지천에서 소폭의 상승은 있었으

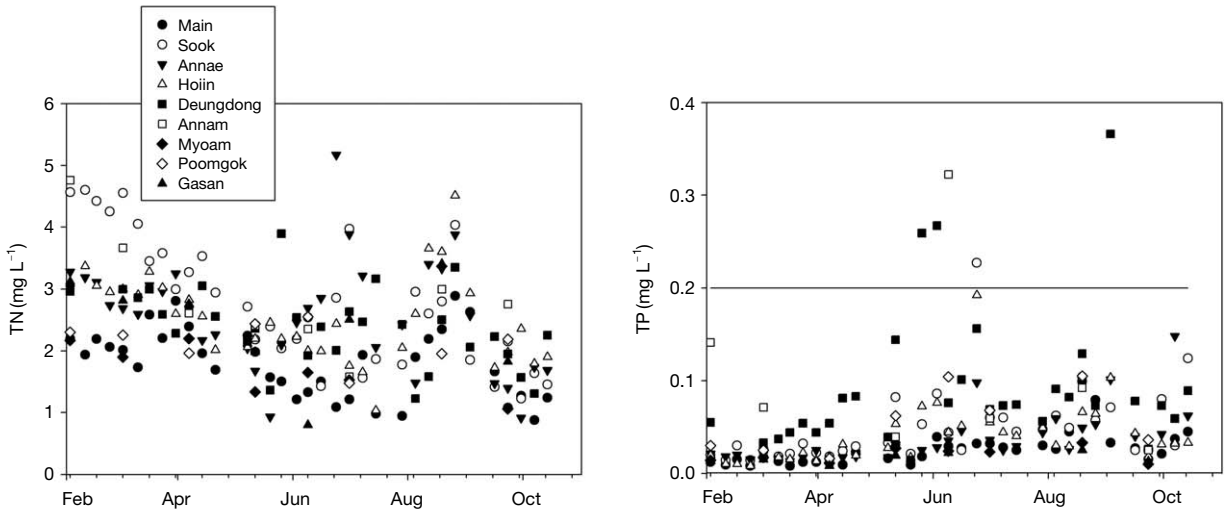

Fig. 6. Seasonal variation of TN and TP in the tributaries. Solid bar represents third grade of Korean standards for stream water quality.

나 유량에 비례하여 크게 증가하지는 않았다(Fig. 6). 하지만 등동천에서는 9월 초 현저하게 증가된 총인의 농도가 발견되었다. 등동천의 유량 변화를 보면 9월 초에도 유량이 정상적으로 돌아가지 않고 여전히 높은 상태였다(Fig. 6). 따라서 등동천에서 총인의 최고값이 최대유량 직후에 나온 것은 유량이 최대였을 때 일시적 희석효과로 인한 것으로 사료된다. 소옥천에서 정체수역이 형성된 후 총인의 농도는 BOD, COD, TOC와는 달리 증가하지 않았다. 오히려 9월 초 이후에는 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 물이 흐르지 않아서 조류번식이 왕성해짐에 따라 총인이 영양염으로 소비되기 때문으로 사료된다.

총질소는 겨울에서 여름으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내다가 6월 강수량 증가시에 증가했다가 8월 집중강우 후 재증가하였다(Fig. 6). 총질소는 겨울과 초봄에는 소옥천에서 높은 경향을 나타냈으나 5월과 6월에는 등동천과 안내천에서 높은 농도가 일시적으로 나타났다. 즉 안내천에서 유량이 최대치이었을 때(6월 하순) 총질소 농도가 다른 지천보다도 더 높았다. 반면 등동천에서 높은 총질소 농도를 보였을 때는(5월 하순) 상류지역에 존재하는 논으로부터 탁수 유입이 관찰되었으며 유량은 증가하지 않았다. 따라서 등동천에서 5월 하순 관찰되었던 높은 총질소 농도는 유량과는 큰 상관성이 없으며 상류지역에 존재하는 논에서 비료성분이 많이 함유된 탁수가 유입된 것에 기인하는 것으로 사료된다. 질소 역시 총인과 마찬가지로 8월 집중강우 후 재증가하였으나 모든 지천에서 유량이 감소하면서 점차적으로

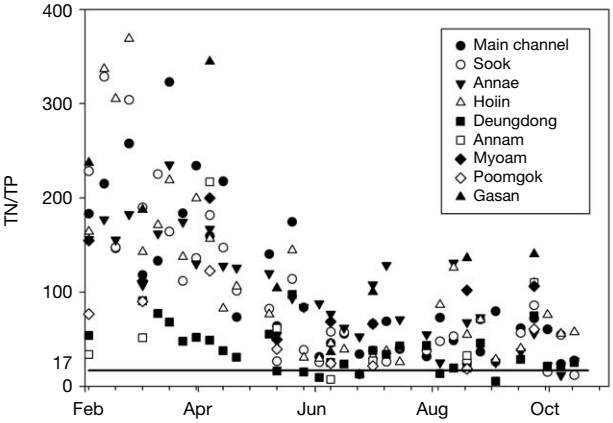

Fig. 7. Seasonal variation of TN/TP ratios in the tributaries.

감소하는 경향을 보였다(Fig. 6). 특히 소옥천에서는 총인과 마찬가지로 정체수역이 형성된 다음 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 이는 총인과 더불어 조류번식에 이용이 되었기 때문에 감소하는 것으로 판단된다.

총질소/총인 비(TN/TP ratio)는 호수와 하천의 영양염 제한 인자(limiting factor)를 나타내는 지시자로 활용되어 왔다(Forsberg and Ryding, 1980; Havens *et al*., 2003; Bergström, 2010; Zan *et al*., 2011; Varol, 2012). 총질소/총인 비가 17 이상이면 인이 제한 인자이며 10보다 작으면 질소가 제한 인자인 것으로 간주되어왔다(Varol, 2012). 본 연구에서는 모든 지천에서 일부 시기를 제외하고는 17 이상으로 인이 제한인자로 작용하는 것으로 판단된다(Fig. 7). 이는 Kim *et al*. (2012) 보고한 대청호

Table 2. Correlation coefficients between TN/TP ratios and the other parameters.

	Water T	pH	DO	Cond.	Discharge	BOD	COD	TOC	SS	TN	TP	Chl. *a*
Main st.	−0.719	−0.176	0.555	0.065	−0.262	−0.453	−0.307	−0.396	−0.344	0.540	−0.647	−0.122
Sook	−0.840	−0.029	0.256	0.455	−0.238	−0.201	−0.240	−0.376	−0.351	0.780	−0.588	−0.176
Annae	−0.693	0.029	0.349	−0.291	−0.250	−0.594	−0.343	−0.326	−0.422	0.384	−0.680	−0.210
Hoiin	−0.847	0.384	0.651	0.057	−0.214	−0.586	−0.567	−0.367	−0.450	0.481	−0.591	−0.223
Deungdong	−0.610	0.356	0.520	−0.158	−0.232	−0.560	−0.602	−0.569	−0.504	0.164	−0.671	−0.163
Annam	0.065	−0.265	−0.053	−0.029	−0.176	−0.358	−0.669	−0.838	−0.302	0.069	−0.676	−0.199
Myoam	−0.930	0.301	0.930	−0.649	0.042	−0.758	−0.433	−0.279	−0.397	0.260	−0.454	0.057
Poomgok	−0.837	0.537	0.846	0.156	−0.391	−0.332	−0.953	−0.740	−0.537	0.390	−0.898	0.639
Gasan	−0.913	0.058	0.653	−0.192	0.080	−0.046	−0.085	0.580	−0.356	0.724	−0.629	0.716

내와 유입지천에서 총질소/총인 비가 17 이상으로 인이 제한 요인이라는 결과와 유사하다. 또한 이들은 대청호 내에는 총질소/총인 비가 높아서 (88 이상) 질소가 과잉 공급 상태인 것으로 보고하였으며 회귀분석과 부영양화 지수의 경험적 모델 (empirical model)을 통하여 대청호 내로 유입되는 지천의 총인이 대청호 조류성장에 직접적인 영향을 주는 것으로 밝혔다.

총질소/총인 비는 여름으로 갈수록 감소하는 모습을 보였으며 유량이 증가했던 시기에도 큰 변화를 보이지 않았다 (Fig. 7). 따라서 대청호 유입지천에서 총질소/총인 비의 변화는 유량과 상관이 없는 것으로 보인다. 이는 총질소/총인 비와 다른 항목 간 상관성에 의해 뒷받침 될 수 있다. 소옥천을 제외하고 총질소/총인 비는 수온 및 총인과 음의 상관성이 높은 것으로 나타났다 (Table 2). 이는 여름으로 갈수록 총질소의 농도가 감소했기 때문이며 총인이 총질소/총인 비를 조절하는데 총질소보다 더 중요한 역할을 하는 것을 의미한다. 금강 본류로 직접 유입되는 유구천에서도 총인이 총질소/총인 비의 조절인자로 더 중요한 역할을 하는 것으로 보고되었다 (An and Shin, 2005). 소옥천에서는 총질소와 총질소/총인 비와 유의한 양의 상관성이 나타났다 (Table 2). 소옥천에서는 총인 대신 총질소가 총질소/총인 비를 조절하는 데 더 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

4. 유입지천의 수질 조절 인자

조사된 9개의 지천에서 수질 항목을 조절하는 인자들을 분석하기 위하여 주성분분석을 하였다. 각각의 지천을 대상으로 개별적인 주성분분석 결과 대체적으로 3개 혹은 4개의 요인 (factor)에 의해 유입지천들의 수질이 설명될 수 있는 것으로 나타났다 (Table 3). 주로 같은 요인에 대하여 높은 가중치를 보이는 항목들이 발견되었다. 예를 들어, BOD, COD, TOC, 부유물질, 총인은 예외도 있지만 대체적으로 같은 요인에 대하여 높은 가중치를 보였다. 또한 본류를 제외하고 모든 지천에서 전기전도도와 유량도 같은 요인에 대하여 높은 상관성을 나타냈다 (Table 3). 모든 지천에서 분석된 자료를 대상으로 주성분분석을 한 결과 역시 개별적인 하천에서와 유사한 결과를 나타냈다 (Table 4).

주성분분석 결과 고유치 (eigenvalue)가 1 이상인 요인은 3개이며 이 요인들이 전체의 수질을 66.042%까지 설명할 수 있는 것으로 나타났다 (Table 4). 요인 1은 BOD, COD, TOC, 부유물질, 총인과 유량이 높은 가중치를 보였다. 따라서 이 항목들은 강수량에 의해 유량이 증가함에 따라 증가하는 것으로 판단된다. 이미 여러 지천에서 강수량이 증가했을 때 이 항목들이 증가했던 것을 언급한 바 있다. 요인 2는 온도, 전기전도도, 총질소와 유량의 가중치가 높은 것으로 나타났다. 유량은 요인 2에 대해서도 요인 1에 대한 유사한 가중치를 보였다. 앞서 언급하였듯이 전기전도도는 유량이 증가하면서 대체적으로 거의 모든 지천에서 감소하는 경향을 나타냈으며 총질소 역시 집중강우가 발생하기 전까지는 대체적으로 감소하는 것을 살펴본 적 있다. 따라서 요인 2는 강수량과 관련이 있지만 강수량이 증가하면서 발생하는 희석효과인 것으로 사료된다. 요인 3은 pH, DO와 엽록소 *a*를 설명하고 있다. 따라서 광합성과 같은 물질대사가 영향을 미치는 것으로 판단되며 유사한 결과가 낙동강 하구에서도 보고되었다 (Shin *et al*., 1998). 앞서 언급하였듯이, 광합성이 발생하면 용존산소가 증가하고 pH가 증가하기 때문에 이 세 항목이 요인 3에 의해 해석되어지는 것으로 판단된다.

5. 대청호 수질에 대한 유입지천의 영향

대청호에 유입되는 지천들이 호수 수질에 끼칠 수 있는 영향을 알아보기 위하여 대청호 수질 (BOD, COD, TOC, TN, TP)의 2014년 월평균 자료 (http://water.nier.go.kr)와 본 연구에서 분석된 지천의 월평균 수질을 Fig.

Table 3. Results of principal component analysis on individual tributaries.

	Variance	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Main St.	Water temp.	.210	.868	−.329	.024
	pH	−.146	−.096	−.751	−.224
	DO	−.151	−.931	.118	−.060
	Cond.	−.162	.265	−.221	−.828
	Discharge	.916	.141	.277	.118
	BOD	.352	.387	−.062	.697
	COD	.901	.203	.211	.162
	TOC	.885	.022	.115	.132
	SS	.937	.174	.134	.095
	TN	.133	−.380	.770	−.056
	TP	.865	.204	−.238	.179
	Chl. *a*	.206	.727	.396	−.149
Sook	Water temp.	.168	.952	.039	−.015
	pH	−.719	.306	.039	−.241
	DO	−.778	−.448	−.239	−.087
	Cond.	−.209	−.122	−.440	−.812
	Discharge	.300	.022	−.084	.874
	BOD	.257	.326	.776	−.083
	COD	.686	.346	.539	.137
	TOC	.657	.056	.469	.109
	SS	.738	.138	.268	.430
	TN	−.088	−.885	−.244	−.149
	TP	.812	.332	.012	.206
	Chl. *a*	.059	.007	.906	.220
Annae	Water temp.	.843	−.255	−.233	
	pH	.004	.062	.786	
	DO	−.624	−.078	.621	
	Cond.	.030	−.835	.072	
	Discharge	.612	.685	−.128	
	BOD	.796	−.045	.020	
	COD	.552	.378	.251	
	TOC	.606	.231	−.301	
	SS	.799	.366	.110	
	TN	.053	.769	−.090	
	TP	.694	.022	.456	
	Chl. *a*	.066	−.385	.779	
Hoiin	Water temp.	.299	.793	−.245	
	pH	−.183	−.740	−.242	
	DO	−.306	−.865	.060	
	Cond.	−.174	−.004	−.814	
	Discharge	.108	.356	.839	
	BOD	.801	.420	.026	
	COD	.659	.503	.036	
	TOC	.811	.197	.169	
	SS	.730	.278	.326	
	TN	−.021	−.317	.847	
	TP	.731	.478	.141	
	Chl *a*	.640	−.416	−.226	
Deung D.	Water temp.	.200	.859	.011	−.343
	pH	−.012	−.842	−.138	−.188
	DO	−.233	−.724	.198	.430
	Cond.	−.129	.478	−.739	.154
	Discharge	.129	.237	.888	.096
	BOD	.895	.185	−.035	.087

Table 3. Continued.

	Variance	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Deung D.	COD	.953	.135	.079	.017
	TOC	.951	.140	.067	.049
	SS	.786	.095	.429	−.042
	TN	.174	−.123	−.028	.921
	TP	.879	.181	.268	.058
	Chl. *a*	.810	−.340	−.104	.030
Annam	Water temp.	−.972	.132	.051	.100
	pH	.419	−.159	−.207	−.770
	DO	.771	−.346	−.221	−.415
	Cond.	.715	−.670	−.083	.131
	Discharge	−.114	.981	.086	.117
	BOD	.379	.016	.694	.448
	COD	−.061	.575	.786	.141
	TOC	−.272	.044	.939	.004
	SS	.010	.977	.186	.036
	TN	.933	.093	.061	.158
	TP	.089	−.041	.049	.799
	Chl. *a*	.723	.600	−.118	−.289
Myoam	Water temp.	.550	.325	−.600	−.343
	pH	−.227	−.895	.090	.122
	DO	−.792	−.004	.473	.303
	Cond.	−.062	.030	−.977	−.072
	Discharge	.122	.634	.615	−.399
	BOD	.918	−.118	−.348	−.012
	COD	.846	.442	.143	.206
	TOC	.885	.319	.246	−.067
	SS	.104	.942	.096	.259
	TN	−.171	.324	.782	−.444
	TP	.670	.569	.207	−.246
	Chl. *a*	−.101	.063	−.044	.960
Poomgok	Water temp.	.742	.428	−.457	.070
	pH	−.977	.008	.092	.058
	DO	−.717	−.511	.404	−.156
	Cond.	.502	−.011	.205	.810
	Discharge	.281	.128	−.144	−.925
	BOD	.002	.812	−.385	.355
	COD	.367	.905	−.009	−.165
	TOC	.134	.958	.072	−.208
	SS	.752	.291	.410	.130
	TN	.103	−.055	.957	.152
	TP	.731	.568	.075	−.315
	Chl. *a*	−.569	−.075	.752	.267
Gasan	Water temp.	.879	−.361	.069	
	pH	−.546	−.360	−.493	
	DO	−.805	−.051	.042	
	Cond.	−.209	−.900	−.223	
	Discharge	.431	.844	.230	
	BOD	.169	−.052	.966	
	COD	.118	.299	.799	
	TOC	−.181	−.047	.858	
	SS	.663	.488	.306	
	TN	−.310	.856	−.280	
	TP	.844	.178	.197	
	Chl. *a*	−.884	−.230	.139	

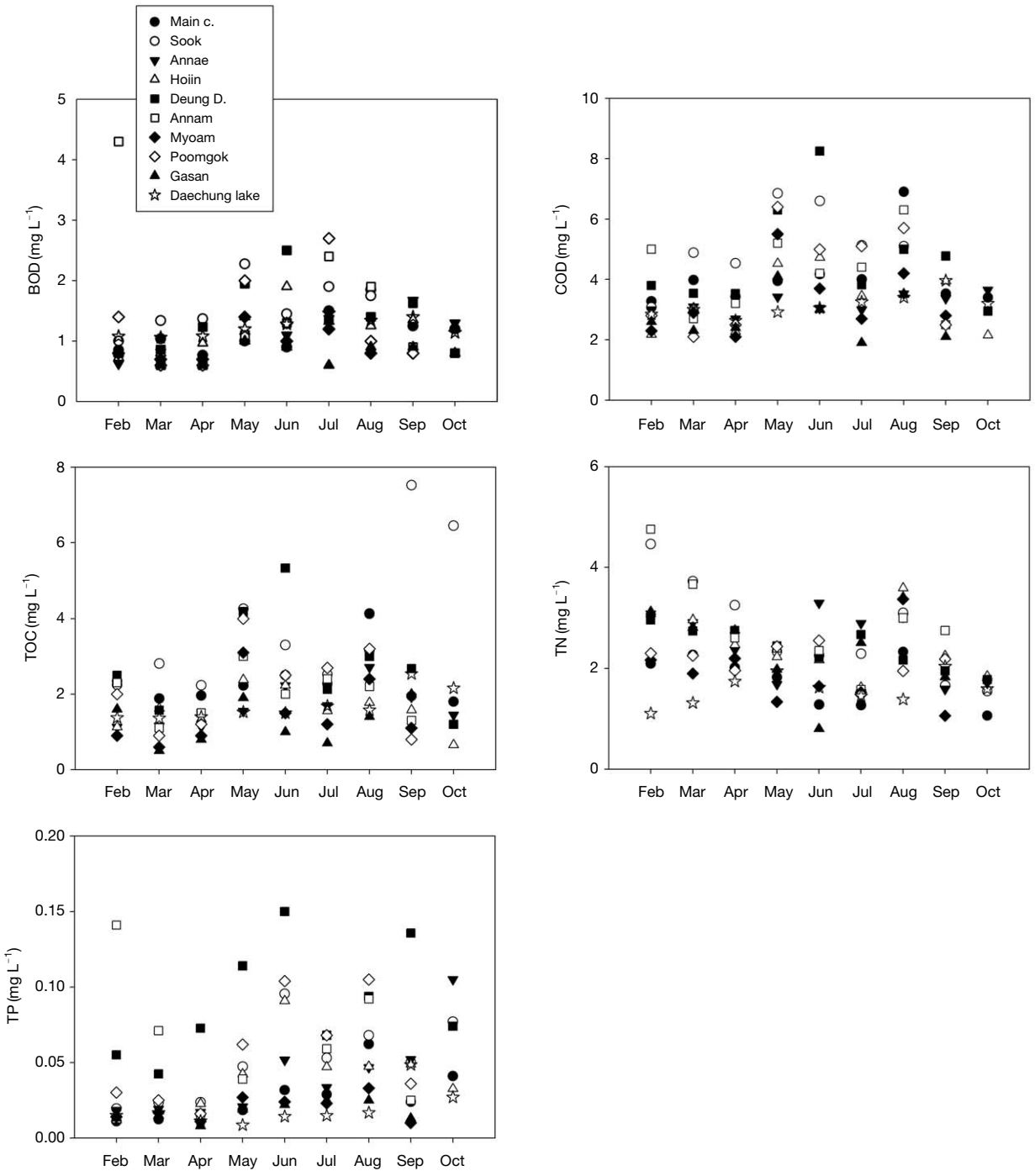

Fig. 8. Comparison of water qualities between the tributaries and Daechung Lake.

8에 도시하였다. 또한 본 연구에서 분석된 월평균으로 유입부하량을 계산하였다(Table 5). 8월과 9월의 소옥천 BOD와 COD는 타 지천보다 현저히 높아서 제외하였다. BOD의 경우 봄과 가을엔 유입지천과 대청호 간 비슷한 농도를 보이지만 여름에는 일부 지천 즉 등동천, 소옥천, 회인천, 품곡천에서 현저히 높은 농도를 나타냈다(Fig. 8). COD와 총유기탄소는 전 채수 시기에 대체적으로 조사된 모든 유입지천의 농도가 높은 편으로 나타났으며 BOD와 마찬가지로 여름에 유입지천과 대청호 간의 농도 차이가 크게 나타났다. 총질소와 총인 역시 대체적

Table 4. Results of principal component analysis on the all tributaries selected in this study.

Variance	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Water Temp.	.475	−.616	−.457
pH	−.207	−.067	.696
DO	−.466	.459	.594
Conductivity	−.223	−.614	.181
Discharge	.486	.517	−.476
BOD	.781	−.133	.000
COD	.848	.084	−.056
TOC	.792	.104	−.065
SS	.816	.205	−.143
TN	−.001	.759	.039
TP	.795	−.020	−.149
Chl. *a*	.421	−.083	.684
Eigenvalue	4.538	1.923	1.464
Variance	37.817	16.022	12.203
Cumulative variance	37.817	53.839	66.042

Table 5. Average of pollution load (Kg day^{-1}) of pollutants in tributaries during study period.

	BOD	COD	TOC	SS	TN	TP
Main st.	7,001	26,135	15,342	95,920	9,688	222
Sook	435	1,284	763	2,981	715	16
Annae	50.3	133	90.0	253	120	2.01
Hoiin	65.5	192	99.2	1,100	152	2.86
Deungdong	22.8	76.8	47.9	175	32	1.82
Annam	44.6	142	52.7	427	71	2.54
Myoam	19.2	94.1	52.5	231	71	0.70
Poomgok	7.5	28.5	15.7	71	13	0.45
Gasan	16.7	63.3	26.6	94	60	0.43

으로 유입지천에서 전 시기에 대청호보다 농도가 높게 나타났다 (Fig. 8). 대청호 유입지천에서 채수 시기별로 총인과 총질소의 농도가 높은 하천은 주로 안남천, 등동천, 소옥천, 회인천이다. 특히 총인의 경우 여름에 등동천에서의 농도가 뚜렷이 높았으며 이는 유역의 비점오염으로부터 강우에 의해 총인이 유입되었거나 여름에 조류의 성장으로 높게 나타난 것일 수 있다.

그러나 금강본류와 소옥천을 제외하고는 대청호에 유입되는 부하량은 크지 않았다 (Table 5). 즉 앞서 언급하였듯이 금강본류와 소옥천의 유량이 높기 때문에 금강본류와 소옥천의 유입부하량이 타 지천들에 비해 현저하게 높은 것으로 판단된다. 따라서 대부분의 오염물들은 본류와 소옥천을 통해 대청호에 유입되는 것으로 판단된다. 앞서 밝혔듯이 등동천이나 품곡천 등과 같이 여름에 대청호보다 높은 오염물의 농도를 보이는 지천들이 존재하였다. 그러나 이러한 지천들은 상대적으로 유

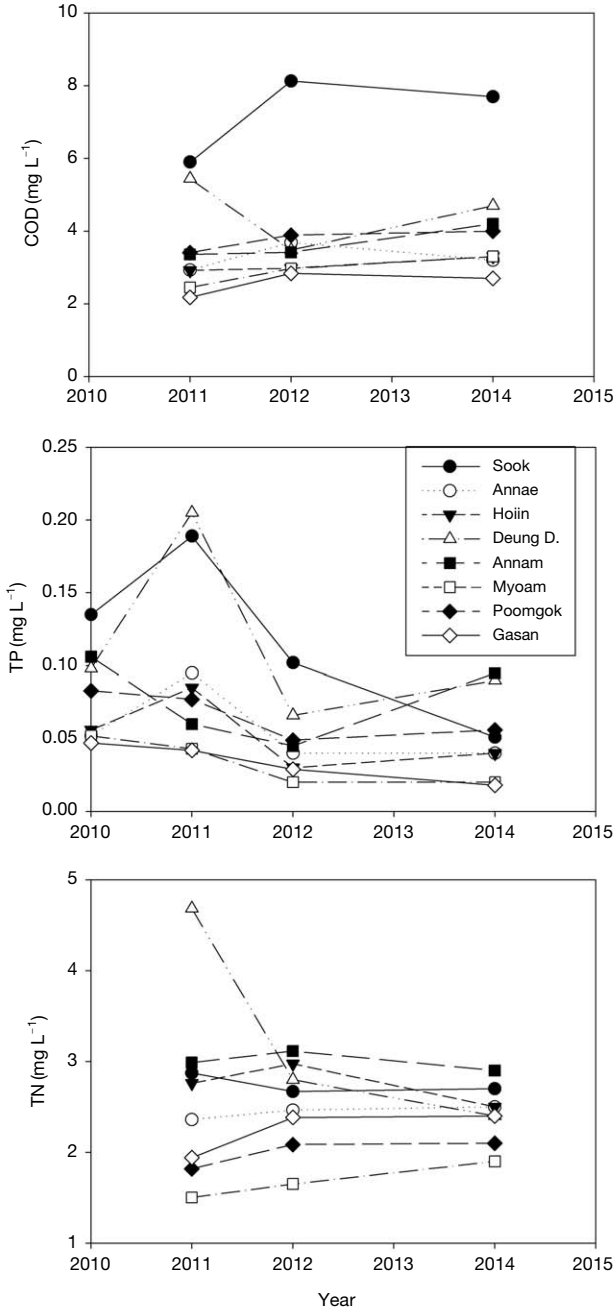

Fig. 9. Variation of water quality for the past 3 years in the tributaries.

량이 적어서 유입되는 오염물질의 양은 상대적으로 적은 것으로 판단된다.

본 연구에서 본류를 포함한 모든 지천에서 유입되는 계산된 평균 총인 부하량의 합계는 248 kg day^{-1}이며 K water (2013)에서 밝힌 외부에서 유입되는 인의 부하량은 268 kg day^{-1}이다. K water (2013)에 의하면 대청호

내부 퇴적물에서 인이 용출되는 양은 약 14 kg day^{-1}이다. 즉 대청호 내부에서 용출되는 인의 양은 외부에서 유입되는 양의 약 5%에 지나지 않는다. 따라서 외부에서 유입되는 인의 양이 95% 이상을 차지하고 있어서 대청호 수질개선을 위해서는 대청호로 유입되는 지천에서의 인의 부하량을 줄이는 노력이 필요하다.

6. 지천 수질 변화

유입지천의 수질 변화를 추적하기 위해 COD, TN, TP의 최근 3년간 평균값을 이미 출간된 보고서(NIER, 2012)에서 발췌하여 본 연구의 평균값과 비교하였다(Fig. 9). COD는 2011년부터 2014년까지 소옥천에서 높은 농도를 나타냈다. 소옥천에서는 2012년도에 COD 농도가 증가하였으나 다른 지천에서는 연간 큰 변화는 보이지 않았다. 총인의 경우에도 소옥천과 등동천에서 뚜렷한 변화가 관찰되었다. 등동천에서의 총인 농도 변화에 대한 이유를 추정하기 어려웠다. 소옥천에서는 2012년도에 총인의 농도가 급격히 줄어들었으며 본 연구에서도 예전 평균값보다 낮은 농도를 나타냈다. 이는 2011년 생태습지가 옥천하수종말처리장 하류에 조성됨으로서 총인이 제거되는 효과로 추정되며 이와 유사한 결과가 보고되었다(NIER, 2012). 반면 총질소는 등동천을 제외하고는 모든 지천에서 연간 변화가 크게 일어나지 않았다. 따라서 소옥천에 조성된 생태습지는 총질소를 제거하는 것에는 큰 효과가 없는 것으로 판단된다. 그러나 소옥천에 조성된 생태습지가 소옥천 총인과 총질소 뿐 아니라 다른 수질에 끼치는 영향에 대하여 심도있는 연구가 필요할 것이다.

결 론

대청호로 유입되는 지천들의 수질은(BOD, COD, TOC, 총인, 부유물질) 강수량 증가로 인한 여름에 유량 증가로 악화되거나 총질소와 전기전도도 따른 희석에 의해 조절이 된다. 또한 일부 지천(예, 회인천)에서는 교량공사와 같은 인위적인 활동으로 인한 탁수 유입도 영향을 미친다. 대청호 수질과 비교해볼 때 모든 지천에서 대체적으로 오염물의 농도가 높았다. 하지만 유입부하량을 고려했을 때 소옥천과 본류가 대청호 수질에 가장 크게 영향을 미칠 것으로 나타났으며 나머지 하천들은 유량이 작기 때문에 그 영향은 미미할 것으로 판단된다.

REFERENCES

An, K.-G. and W.-M. Yang. 2007. Water quality characteristics in Keum River watershed. *Korean Journal of Limnology* **40**(1): 110-120.

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.

Bergström, A.-K. 2010. The use of TN : TP and DIN : TP ratios as indicators for phytoplankton nutrient limitation in oligotrophic lakes affected by N deposition. *Aquatic Sciences* **72**: 277-281.

Cheon, S.U., J.A. Lee, J.J. Lee, Y.B. Yoo, K.C. Bang and Y.J. Lee. 2006. Relationship among inflow volume, water quality and algal growth in the Daechung Lake. *Korean Journal on Water Quality* **22**: 342-349.

Forsberg, C. and V.H. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indics in 30 Wsedish waste-receiving lakes. *Archives of Hydrobiology* **89**: 189-207.

Han, E.J., T.G. Kim, D.H. Joung, S.Y. Cheon, S.J. Kim, S.J. Yu, J.Y. Hwang, T.S. Kim and M.H. Kim. 1998. Assessment of trophic state for Daechung Reservoir using Landsat TM imagery data. *Journal of Environmental Impact Assessment* **7**: 81-91.

Havens, K.E., R.T. James, T.L. East and V.H. Smith. 2003. N : P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution. *Environmental Pollution* **122**: 379-390.

Hurley, J.P., S.E. Cowell, M.M. Shafer and P.E. Hughes. 1998. Tributary loading of mercury to Lake Michigan: Importance of seasonal events and phase partitioning. *Science of Total Environment* **213**: 129-137.

K water. 2013. Report on management of water qaulity of Daechung Lake.

Kelly, T.J., J.M. Czuczwa, P.R. Sticksel, G.M. Sverdrup, P.J. Koval and R.F. Hodanbosi. 1991. Atmospheric and tributary inputs of toxic substances to Lake Erie. *Journal of Great Lakes Research* **17**: 504-516.

Kim, G.-H., J.H. Lee and K.-G. An. 2012. Spatio-temporal fluctuations with influence of inflowing tributary streams on water quality in Daechung Reservoir. *Korean Journal of Limnology* **45**(2): 158-173.

Kim, H.G. and T.G. Kim. 1996. The water quality management of Daechung reservoir using remote sensing. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **18**: 1383-1396.

Kim, J.Y. 1996. A study on variation characteristics and correlationships of water quality in Daechung Lake basin. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society* **5**: 763-770.

Kim, M.-S., Y.-J. Lee, K.-G. An, B.-H. Kim, S.-J. Hwang and K.-H. Shin. 2014. Allochthonous organic matter contribution to foodweb in Shingu Agricultural Reservoir after rainfall period. *Korean Journal of Ecology and Limnology*

47(1): 53-61.

Kim, O.-J. and O.-M. Lee. 2011. Phytoplankton community and the evaluation of water quality status in So-Ok Stream. *Korean Journal of Limnology* **44**(2): 113-128.

Kim, Y.P. and K.G. An. 2010. Charactersitics of water quality in Hyeongsan River watershed. *Korean Journal of Limnology* **43**(1): 150-160.

Lee, S.-C., J.-H. Han and K.-G. An. 2008. Functional modifications of Daechung Reservoir eutrophication by upper dam construction. *Korean Journal of Limnology* **41**(3): 348-359.

Lee, J.H. and Y.J. Kim. 1996. Epilithic diatoms and trophic states of dam lakes in the Naktong River systems. *Korean Journal of Environmental Biology* **14**: 18-28.

Lee, J.H., J.G. Park and E.J. Kim. 2002. Trophic states and phytoplankton compositions of Dam Lakes in Korea. *Algae* **17**: 275-281.

Makarewicz, J.C., W.G. Booty and G.S. Bowen. 2012. Tributary phosphorus loading to Lake Ontario. *Journal of Great Lakes Research* **38**: 14-20.

Ministry of Environment, 2011. Standard methods for water quality analysis.

National Institute of Environmental Research (NIER). 2012. A study on control measures of algal bloom for management of water quality in the Daechung and Boryeong Reservoirs (III).

Oh, K.H. and Y.K. Koh. 2003. Water quality and pollutions of river waters in Gwangju city. *Journal of Environmental Sciences* **12**(3): 287-297.

Shin, J.K., S.J. Hwang and K.J. Cho. 2003. Assessment of water quality in Pyeongtaek Reservoir and its main tributaries. *Korean Journal of Limnology* **36**(1): 38-47.

Shin, S.-K., C.-K. Park and K.-O. Song. 1998. Evaluation of water quality using principal component analysis in the Nakdong River estuary. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society* **7**: 171-176.

Varol, M. 2012. Tmeporal and spatial dynamics of nitrogen and phosphorus in surface water and sediments of a transboundary river located in the semi-arid region of Turkey. *Catena* **100**: 1-9.

Waziri, M. and V.O. Ogugbuaja. 2010. Interrelationship between physicochemical water pollution indicators: A case study of River Yobe-Nigeria. *American Journal of Scientific and Industrial Research* **1**: 76-80.

Winter, J.G., M.C. Eimers, P.J. Dillon, L.D. Scott, W.A. Scheider and C.C. Willox. 2007. Phosphorus inputs to Lake Simcoe from 1990 to 2003: Declines in tributary loads and observations on Lake water quality.

Zan, F., S. Huo, B. Xi, Q. Li, H. Liao and J. Zhang. 2011. Phosphorus distribution in the sediments of a shallow eutrophic lake, Lake Chaohu, China. *Environmental Earth Science* **62**: 1643-1653.