

총 유기탄소의 수문학적 플럭스와 총 일차생산량 사이의 관계분석

박 윤 경* / 조 선 주** / 최 대 규*** / 김 상 단****+

Relationship between Hydrologic Flux of Total Organic Carbon and Gross Primary Production

Yoonkyung Park* / Seonju Cho** / Daegy Choi*** / Sangdan Kim****+

요지 : 지면에서 탄소수지를 모의하는 모형들은 주로 수직적인 탄소 플럭스에 주된 관심을 두어왔다. 반면에 수평적인 탄소 플럭스에 관한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 수평적인 탄소 플럭스의 흐름에 대해 연구하고자 유역 내 식생에 의해 생산되는 총 일차생산량(Gross primary production, GPP)과 유역에서 배출되는 총 유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)의 교차상관분석을 실시하였다. 분석결과, GPP와 유역에서 배출되는 TOC의 유량가중 평균 농도는 서로 지체시간이 없을 경우에 가장 큰 상관관계를 보여주고 있음을 확인하였다. 또한 주기성이 고려된 상관구조를 살펴본 결과, 여름철의 TOC와 GPP 사이의 상관관계가 주기성이 고려되지 않았을 경우의 상관관계와 유사하게 나타났다. 이로부터 GPP와 TOC의 상관관계는 여름철에 맺어지는 GPP와 TOC 상관관계에 의해서 대부분이 규정되고 있음을 살펴볼 수 있었다. 이에 따라 식생에 의해 생산된 탄소와 유역에서 배출되는 유기탄소의 관계가 계절적으로도 긴밀한 관계가 있을 것이라 추측된다. 따라서 향후 연구는 계절에 따른 식생 변수와 GPP와 TOC의 관계를 분석함으로써 조금 더 정량적으로 수평적인 탄소 플럭스 흐름에 대해 이해할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 탄소 플럭스, 총 일차생산량, 총 유기탄소, 교차상관분석

Abstract : Models estimating carbon budget at land surface are mainly interested in vertical flux of carbon. On the other hand, studies on horizontal flux are obviously lacked to confirm that relationship between the hydrological flux of organic carbon discharged from catchment and terrestrial carbon production, a relation between Total Organic Carbon(TOC) and Gross Primary Production(GPP) tried analysis through cross correlation. The best correlation structure is correlation between GPP and TOC of flow-weighted mean concentration from watershed without delay. Furthermore, cross correlation analysis was performed by consider periodicity. The correlation between TOC and GPP in summer was similar to correlation without periodicity. Therefore, correlation between GPP and TOC was most regulated by the correlation between GPP and TOC at summer. As a result, the vegetation carbon and organic carbon from watershed is recognized a close relationship on the seasonal. Therefore, future research is correlation analyzing between vegetation variables according season, GPP and TOC, we are expected to use quantitative understanding that horizontal flux flow of carbon from the surface.

keywords : Carbon flux, Gross primary production, Total organic carbon, Cross correlation analysis

+ Corresponding author : skim@pknu.ac.kr
* 정희원 · 부경대학교 환경공학과 석사과정 · E-mail: myminey@hanmail.net
** 비희원 · 부경대학교 환경공학과 석사과정 · E-mail: true0815@nate.com
*** 비희원 · 부경대학교 환경연구소 선임연구원 · E-mail: aidhim@pknu.ac.kr
**** 정희원 · 부경대학교 환경공학과 부교수 · E-mail: skim@pknu.ac.kr

1. 서 론

현재까지 지면에서 탄소수지를 모의하는 모형들은 주로 대기-식생-토양 시스템에서의 수직적인 탄소 플럭스에 주된 관심을 두어왔으며 (Goldewijk et al. 1994, Lloyd 1999, Roxburgh et al. 2006), 유기탄소의 수문학적 플럭스, 즉 수평적인 탄소 플럭스에 관한 연구는 상대적으로 많은 관심을 받지 못하여 왔다(Aumont et al. 2001, Lu et al. 2011). 일반적으로 식생량과 토양탄소가 지면에서 유일한 탄소 저장소인 것으로 간주되어 왔으나, 최근의 연구결과들을 살펴보면 지면에서 생산되는 유기탄소의 일정한 양이 수중에 용존 상태 또는 입자 상태로 존재하고 있으며 수중에 존재하는 유기탄소는 유역 단위에서 수문학적 플럭스를 통하여 수평적인 이동이 이루어진다는 것을 확인하였다(Aumont et al. 2001, Robertson et al. 1996).

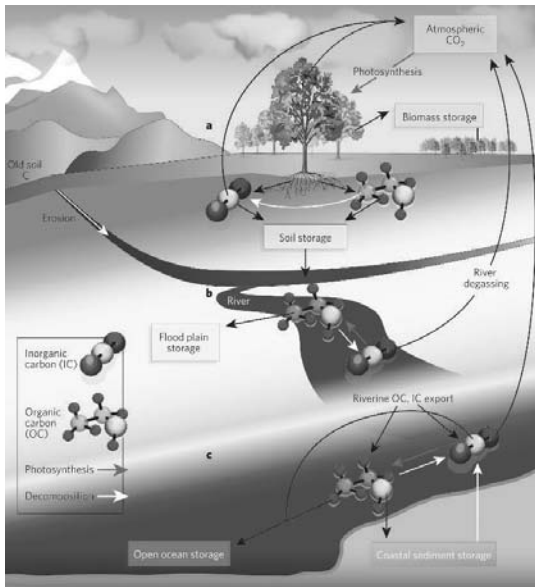


Fig. 1 Rivers and the carbon cycle (Raymond 2005).

이러한 연구결과는 탄소 순환고리(Fig. 1)를 통해서도 확인 할 수 있다(Raymond 2005). 지구

내 탄소는 광합성을 통해서 대기의 탄소를 지상의 식생에 포착되며(a) 유기탄소 형태로 하천으로 배출되며 하천을 따라 대기 중의 탄소가 포착되거나 대기로 배출된다(b). 하천을 통해 배출된 탄소는 해양에서도 동일한 프로세스를 통해 탄소의 이동이 이루어진다(c). Field and Raupach(2004)에 따르면 광합성을 통해 지상에 포착된 탄소의 일부분이 해양으로 배출되고 있다. 이러한 탄소의 이동은 광합성, 생물호흡, 화석연료의 사용 등을 통한 수직적인 이동에 비해 정량적인 해석이 부족하다.

따라서 본 연구에서는 하천 시스템을 통하여 배출되는 총 유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)와 식생의 광합성을 통하여 생산되는 총 일차생산량(Gross primary production, GPP) 사이의 관계를 정량적으로 살펴보고자 하였다. 이를 위하여 낙동강 상류의 산림 유역을 연구 유역으로 선택하였으며, 분석에 필요한 TOC의 관측 자료가 완벽하게 구비되어 있지 않기 때문에 단계별로 적절한 모형화 기법을 적용하였다. 낙동강 상류 유역의 하천 유량은 수정TANK모형을 이용하여 모의하였다. 대상 유역들의 유량과 TOC 동시 관측 자료를 이용하여 최소분산비편향추정법과 연계한 7-변수 대수 선형 모형이 구축되며, 이로부터 모의된 하천 유량자료와의 연계를 통하여 유역 출구에서의 총 유기탄소 부하량이 모의하였다. 해당 유역에서의 GPP는 MODIS로부터 획득하였다.

관측자료 및 일련의 수문학적 모형화 기법을 이용하여 계산되는 TOC 부하량과 MODIS로부터 획득한 GPP 자료를 이용하여 하천을 통하여 배출된 TOC 총량과 식생에 의해 생산된 탄소량 사이의 관계를 교차상관분석을 통하여 살펴보고자 한다. 이러한 비교 결과로부터 하천으로 배출되는 TOC와 식생에 의해 생산된 탄소량이 서로 어느 정도의 상관성을 가지고 있는지를 살펴볼 수 있을 것이며 더 나아가 수평적인 탄소 플럭스의 정량적 확인이 가능해질 것으로 판단된다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상지역

본 연구에서는 하천 시스템을 통하여 배출되는 유기탄소와 식생의 광합성을 통하여 생산된 탄소 사이의 관계를 살펴보고자 하였다. 국립환경과학원에서는 수질오염총량관리를 위하여 낙동강 유역의 경우 41개의 단위유역으로 구분하여 유역의 수질 및 유량관리를 실시하고 있다. 41개 단위유역으로 구분되어진 낙동강 유역을 외부의 다른 자극을 최소화하여 식생의 광합성을 통해서 발생된 탄소와 하천시스템을 통하여 배출되는 유기탄소의 관계를 보다 정확하게 살펴보기 위해 인간 활동에 의한 교란이 적으며, 상류 유입량에 의한 자료 왜곡이 최소화되는 지역을 선정하여 연구대상지역으로 활용하기로 하였다. 따라서 수질오염총량관리를 위해 구분되어진 낙동강 41개 단위유역 중 최상류하천이 속하며 다른 유역에 비해서 산림비율이 높은 17개 단위유역을 선정하여 본 연구에 적용하였다.

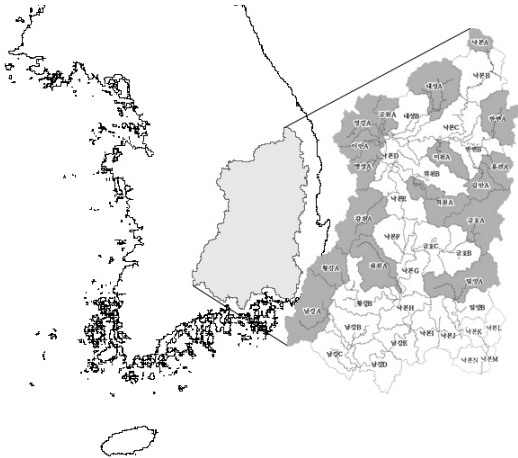


Fig. 2 Study area

2.2. 기초자료

국립환경과학원에서는 2004년부터 수질오염총

량관리제 단위유역 말단부에서 평균 8일 간격으로 유량과 수질을 동시에 측정하고 있다. 또한 2007년부터는 TOC를 측정대상에 포함하여 관측을 실시하고 있다. 여기서 제공되고 있는 수질과 유량 자료의 경우 대략 8일 간격으로 측정하나, 일정하게 관측되지 않으므로 일단위 유량 및 수질 자료를 모의할 필요가 있다. 유량은 TANK 모형을, 수질 자료의 경우 부하량을 모의할 수 있는 7-변수 대수 선형 모형을 이용하였다. 일 유량은 TANK 모형을 이용하여 8일 간격 자료를 일 단위 자료로 확장할 수 있다. 이 때, 각 단위유역에서 발생하는 취수량과 환경기초시설 방류량은 유역출구에서 일괄 합하거나 감하는 방식을 취하여 모형의 구조에 포함하였다. 농업용수 취수에 의한 영향은 4월에서 10월까지 적용하게 된다. 보다 상세한 내용은 김상단 등(2007), 한수희 등(2007a), 김재철 등(2007), 김문성 등(2009), 이아연 등(2010)을 참조할 수 있다. 일 TOC 부하량은 미국 USGS에서 개발한 7-변수 대수 선형 모형을 이용하여 8일 간격 자료를 일 단위 자료로 확장할 수 있다. 7-변수 대수 선정 모형의 매개변수들은 최소 분산 비편향 추정기법(Minimum Variance Unbiased Estimator, MVUE)을 적용하여 추정하게 된다. 보다 상세한 내용은 한수희 등(2007b)과 이아연 등(2010)을 참조할 수 있다.

유역에서 발생하는 GPP는 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)에서 제공되는 GPP 자료를 이용하였다. MODIS는 미항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)의 지구관측시스템위성(Earth Observation System, EOS)으로써 1999년에 발사된 Terra 위성과 2002년 발사된 Aqua 위성에 탑재된 36개의 채널로 구성된 센서이다. MODIS 영상은 생물권의 광범위한 변화를 모니터링하기 위한 목적으로 운영 중이며 사용상의 제약 없이 누구나 무료로 활용할 수 있는 장점이 있다. 또한 위성을 통해서 관측된 자료는 36개의 분광밴드와 250, 500, 1000m의 공간해상도를 가지며 이는 모두 미국지질조사(United States

Geological Survey, USGS)내에 LP DAAC(Land Processes Distributed Active Archive Center; <http://lpdaac.usgs.gov>)에서 이용가능하다. 본 연구에 사용되는 MOIDS GPP의 원자료 이름은 MODIS/Terra Gross Primary Productivity

8-day L4 Global 1km SIN Grid V004로서 2000년 2월 18일부터 1km × 1km 격자로 자료가 제공되고 있다. Fig. 3는 2008년 7월 11일에 관측된 GPP자료로서 Arc GIS를 통해서 확인가능하다.



Fig. 3 Gross primary productivity in 2008.7.11

원격탐사자료를 통해 획득된 자료는 아직까지 그 기술적 한계로 인하여 많은 불확실성을 내포하고 있으며(Falge et al. 2001, Vargas et al. 2007) 또한 촬영시점에서의 구름 등의 기상현상으로 인해 자료가 공백으로 처리되거나 이상치로 관측되어 신뢰성이 떨어지게 된다. 그렇기 때문에 MODIS에서 제공하는 GPP 위성자료를 그대로 사용하기 보다는 보정과정을 거친 후 이용하여야 한다. 본 연구에서는 최치현 등(2012)이 수행한 위성자료 검증을 위한 방법을 이용하여 MODIS GPP 자료를 보정하게 된다. 보정방법은 다음과 같다. 1) 보정 대상 일의 자료와 이 자료의 선행 2개 시계열과 후행 2개 시계열의 자료를 평균한 값의 차이가 절반 미만 또는 2배 초과가 될 경우 이를 이상치로 간주하여 원자료에서 제거하게 된다. 2) 자료의 비정상적 잡음을 줄이기 위하여 $2n+1$ 의

이동평균(즉, 해당 일 기준으로 앞의 2개 자료, 뒤의 2개 자료, 해당 일 자료 등 5개의 자료의 평균)을 계산하여 이를 해당 일의 값으로 간주한다. 이 때 이동평균을 위해 필요한 선행 및 후행 자료들 중 1개라도 존재하지 않으면 해당 일의 GPP는 관측되지 않은 것으로 간주한다. 3) 이러한 과정을 거쳐 생성된 수정된 8일 간격 GPP 자료를 이용하여 특정 월에 해당되는 자료 중에서 최고값을 취하여 해당 월을 대표하는 GPP 값으로 간주한다. 이때 해당 월에 8일 간격 GPP 자료가 하나라도 존재하지 않는다면 월 GPP 자료는 결측으로 처리한다. 4) 월 GPP의 결측값이 존재하는 경우에 식 (1)과 같은 코사인 함수를 이용하여 결측된 자료를 내삽 보완한다. 참고로 식 (1)이 매개변수 α 와 β 는 수정된 GPP 월 자료를 이용하여 평균제곱근오차(Root Mean Square Error,

RSME)를 최소화 하는 방향으로 추정하게 된다.

$$GPP_{edited,m} = \overline{GPP} + \alpha \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{12} \cdot t_m + \beta\right) \quad (1)$$

여기서 $GPP_{edited,m}$ 은 최종적으로 보정된 월 GPP값을 나타내며 \overline{GPP} 는 수정된 GPP 월 자료의 평균, α 는 GPP 평균값으로부터 최대 및 최소 편차, β 는 GPP가 최대가 되는 월을 의미하며, t_m 은 월이다. 참고로 적용된 GPP의 단위는 $g/m^2/month$ 이다.

2.3. 총 유기탄소와 총 일차 생산량 사이의 관계 분석

유역 내 하천 시스템을 통하여 배출되는 유기탄소와 식생의 광합성을 통하여 생산된 탄소 사이의 관계를 살펴보고자 GPP와 TOC의 관계가 분석된다. 두 자료 사이의 상호의존관계를 나타내는 상관계수(correlation coefficient)는 -1과 1 사이의 값을 취하게 된다. 이 값이 크면 클수록 두 자료의 상관성이 크다는 것을 의미한다. 만약 자료들 간의 관계가 시차를 두고 나타나는 경우에는 상관계수를 이용하기 보다는 교차상관계수(cross correlation coefficient)를 이용하는 것이 유용하다. 교차상관계수와 관련된 내용 및 식은 Salas et al.(1980)에서 확인할 수 있다. Karim(2005)은 오스트레일리아의 Cotter River 중 5개의 관측지점 내에서 GPP와 유기탄소의 관계를 분석하기 위하여 교차상관계수를 이용하였다. 따라서 본 연구에서도 상관계수를 이용하기보다는 식 (2)와 같이 교차상관계수를 이용하여 GPP와 TOC의 관계를 분석하기로 하였다. GPP와 TOC의 교차상관 분석결과와 비교하기 위하여 GPP의 경우 추가로 식 (3)과 같이 자기상관분석을 실시하였다.

$$r_k^{OC,GPP} = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (O.C_t - \overline{O.C_t})(GPP_{t+k} - \overline{GPP_{t+k}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{N-k} (O.C_t - \overline{O.C_t})^2 \cdot \sum_{t=1}^{N-k} (GPP_{t+k} - \overline{GPP_{t+k}})^2}} \quad (2)$$

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (GPP_t - \overline{GPP_t})(GPP_{t+k} - \overline{GPP_{t+k}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{N-k} (GPP_t - \overline{GPP_t})^2 \cdot \sum_{t=1}^{N-k} (GPP_{t+k} - \overline{GPP_{t+k}})^2}} \quad (3)$$

식(2)는 GPP와 TOC의 교차상관계수를 구하기 위해서 이용되었다. 해당 식에서 $r_k^{OC,GPP}$ 는 지체시간 k 가 고려된 GPP와 TOC의 교차상관계수이다. N 은 자료의 총 개수이며 k 는 지체시간(month)이다. $O.C_t$ 는 TOC의 원자료, $\overline{O.C_t}$ 는 TOC 원자료의 평균이다. GPP_{t+k} 는 지체시간 k 가 고려된 GPP자료이며 $\overline{GPP_{t+k}}$ 는 지체시간이 고려된 GPP 자료의 평균을 의미한다. 식 (3)은 GPP의 자기상관계수를 구하기 위한 식으로서 r_k 는 지체시간 k 에 관한 GPP의 자기상관계수이다. N 은 자료의 총 개수, k 는 지체시간(month), GPP_t 는 GPP 원자료, $\overline{GPP_t}$ 는 GPP 원자료의 평균, GPP_{t+k} 는 지체시간 k 가 고려된 GPP 자료(kg/month), $\overline{GPP_{t+k}}$ 는 지체시간 k 가 고려된 GPP의 평균이다.

이 때, TOC와 GPP를 비교를 위하여 관측된 TOC 농도를 사용하는 것이 가장 좋으나 앞서도 언급했듯이 관측된 자료가 완벽하지 못하기 때문에 1일 간격으로 모의된 TOC 농도와 부하량을 추가적으로 GPP와 비교하였다. 실제 관측된 월별 TOC 유량 가중 평균농도(mg/L), 모의된 월별 TOC 유량 가중 평균농도(mg/L), 모의된 월별 TOC 부하량(kg/month) 등 총 세 종류의 TOC의 수문학적 플럭스와 보정이 완료된 월 GPP(kg/month) 자료를 비교하였다.

또한 월별로 GPP와 TOC 간의 관계가 어떠한 관계가 있는지, 계절별로는 어떻게 변화하는지를 확인하고자 주기성이 고려되어지는 식 (4)를 이용하여 두 자료 사이의 주기성이 고려된 교차상관분석을 실시하였다. 이에 덧붙여서 식 (5)와 같이 GPP의 주기성이 고려된 자기상관분석을 실시하여 GPP와 TOC의 주기성이 고려된 교차상관분석

결과와 비교하였다. 이 때 GPP와 TOC의 자료는 전체 연구기간의 자료를 월별로 구분하여 분석에 적용하였다.

$$r_{k,\tau}^{OC,GPP} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{\nu=1}^N (O.C_{V,\tau} - \overline{O.C}_{\tau})(GPP_{V,\tau-k} - \overline{GPP}_{\tau-k})}{s(O.C)_{\tau} \cdot s(GPP)_{\tau-k}} \quad (4)$$

$$r_{k,\tau} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{\nu=1}^N (GPP_{V,\tau} - \overline{GPP}_{\tau})(GPP_{V,\tau-k} - \overline{GPP}_{\tau-k})}{s(GPP)_{\tau} \cdot s(GPP)_{\tau-k}} \quad (5)$$

식 (4)는 GPP와 TOC의 주기성이 고려된 교차상관계수를 구하는데 이용된다. 여기서 k 는 지체시간이며 τ 는 관계성을 알아보하고자하는 월, N 는 자료 개수, $O.C_{V,\tau}$ 는 τ 월의 TOC 자료, $\overline{O.C}_{\tau}$ 는 τ 월에 해당하는 GPP 자료의 평균이다. $GPP_{V,\tau-k}$ 는 지체시간 k 가 고려된 GPP의 자료이며 $\overline{GPP}_{\tau-k}$ 는 지체시간이 고려된 GPP의 평균이다. $s(O.C)_{\tau}$ 는 τ 월의 TOC의 표준편차이며 $s(GPP)_{\tau-k}$ 는 지체시간이 고려되어진 월의 GPP 표준편차이다. 식 (5)는 주기성이 고려된 GPP 자기상관계수($r_{k,\tau}$)를 구하

고자 할 때 사용되며 k 는 지체시간, τ 는 GPP와 TOC의 관계성을 알고자하는 월, N 은 τ 월에 해당하는 자료의 개수, $GPP_{V,\tau}$ 는 τ 월의 GPP 자료, \overline{GPP}_{τ} 는 τ 월의 GPP 평균, $GPP_{V,\tau-k}$ 는 지체시간 k 가 고려된 GPP자료이며 $\overline{GPP}_{\tau-k}$ 는 지체시간이 고려된 GPP자료의 평균이다. $s(GPP)_{\tau}$ 는 τ 월 GPP자료의 표준편차, $s(GPP)_{\tau-k}$ 는 지체시간이 고려된 월의 GPP 표준편차이다.

3. 연구결과

3.1. 기본자료 생성 결과

낙동강 최상류 유역 17개 유역을 대상은 TANK 모형에 의해 모의된 유량의 검·보정 결과 유역별로 편차는 있으나 평균적으로 결정계수가 0.7728, 모형효율계수가 0.7197 정도로 관측유량 자료를 우수하게 재현하고 있음을 살펴볼 수 있었다. Fig. 4에 낙동강 최상류 유역(A유역) 17개를 대상으로 TANK 모형의 매개변수를 추정된 결과 중 병성 A와 남강 A를 도시하였다. 모든 그래프의 가로축은 2004년 1월 1일을 시작으로 하는 Julian day를 의미한다. 첫 번째 행에 위치한 그

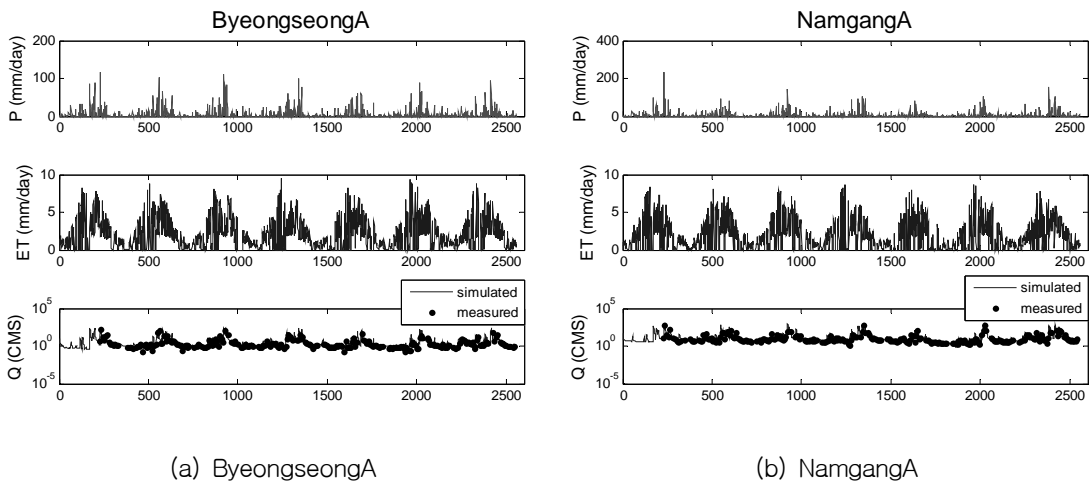


Fig. 4 Results for river flow simulation

림에서 점선은 일강수량이며, 두 번째 행의 실선은 일 실제증발산량이다. 마지막 세 번째 행의 그림은 일 하천 유량을 나타낸 것으로서 실선은 TANK 모형에 의해 모의된 유량이며 점은 관측 유량을 의미한다.

TANK 모형에서 모의된 일 유량자료와 수질·유량 측정망 등 DB 및 웹시스템에서 제공하는 TOC 자료를 7-변수 대수 선형 모형에 적용하여 하천의 TOC 일 부하량을 모의하였다. 이 역시 낙동강 최상류 유역(A유역)

17개에 적용하였으며 최소 분산 비편향 추정 기법을 이용한 TOC 부하량 추정 시의 회귀분석 정확도를 나타내는 결정계수는 17개 유역 전체 평균 0.9643으로 관측 자료를 매우 우수하게 재현하고 있음을 살펴볼 수 있었다. Fig. 5에 병성 A와 남강 A에 해당하는 7-변수 대수 선형 모형 결과를 도시하였다. 그림에서 가로축은 관측 부하량이며 세로축은 모의 부하량을 나타낸다.

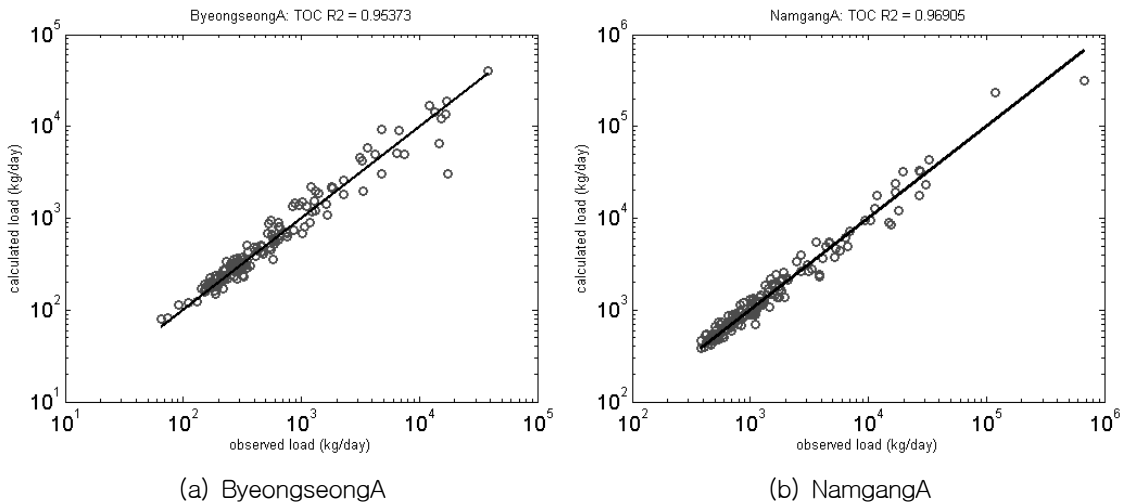


Fig. 5 Results for river water quality loads (TOC) simulation

자료보정을 통하여 수정된 GPP자료를 2003년부터 2010년까지 월별로 평균을 내어 연구에 적용한 17개의 A유역에 대해서 1월, 4월, 7월, 10월의 관측된 GPP를 Fig. 6에 도시하였다. 그림에서의 GPP 단위는 $g/m^2/month$ 이며 계절에 따라 GPP의 변화량이 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 유역에 표시된 색상이 붉은색에서 초록색으로 갈수록 유역에서 식생에 의해 생산되

는 탄소량이 증가함을 뜻한다. 따라서 식생이 가장 활발하게 성장하는 여름에 다른 계절에 비해서 유역의 GPP가 초록색을 띄고 있으며 이는 식생에 의해 생산된 탄소량이 다른 계절에 비해 상당히 많다는 것을 의미한다. 겨울의 GPP의 경우에는 다른 계절에 비해 생산되는 탄소량이 현저히 낮음을 Fig. 6 (a)를 통해서 알 수 있다.

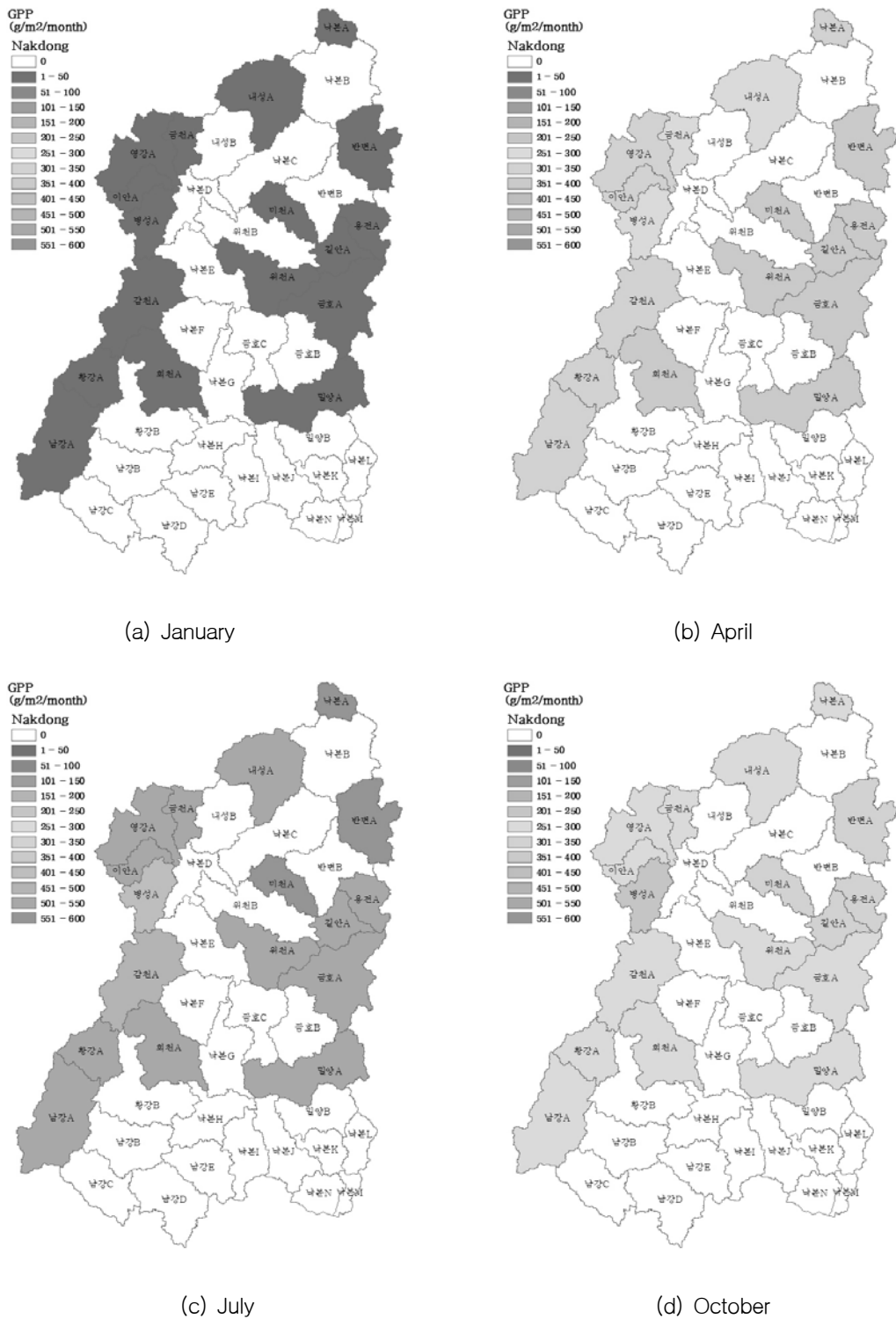


Fig. 6 Seasonal GPP Variation

3.2. 주기성이 고려되지 않은 상관관계

유역 내 하천 시스템을 통하여 배출되는 유기탄소와 식생의 광합성을 통하여 생산된 탄소 사이의 관계를 살펴보고자 TOC를 3가지 경우로 구분하여 경우별로 GPP와 교차상관분석을 실시하였다. TOC를 3가지로 구분한 내용은 다음과 같다. CASE-1은 관측된 월별 TOC 유량 가중 평균 농도(mg/L), CASE-2는 모의된 월별 TOC 유량 가중 평균 농도(mg/L), CASE-3은 모의된 월별 TOC 부하량(kg/month)이다.

TOC에 대한 GPP의 지체시간을 0 ~6 까지 고려하여 교차상관 분석을 실시하였다. 여기서 지체시간이 1이라는 것은 분석하고자하는 특정 월에 대해서 TOC는 해당 특정 월, GPP의 경우에는 1개월 앞선 자료를 의미하는 것이다. 주기성이 고려되지 않은 교차상관분석을 위한 연구기간은 관측된 TOC자료가 시작되는 2007년부터 2010년까지 4년간 실시하였다.

우선적으로 CASE별로 지체시간이 변화에 따라 유역별 교차상관계수를 통계적으로 살펴보고자 Fig. 7에 box plot 형태로 나타내었다.

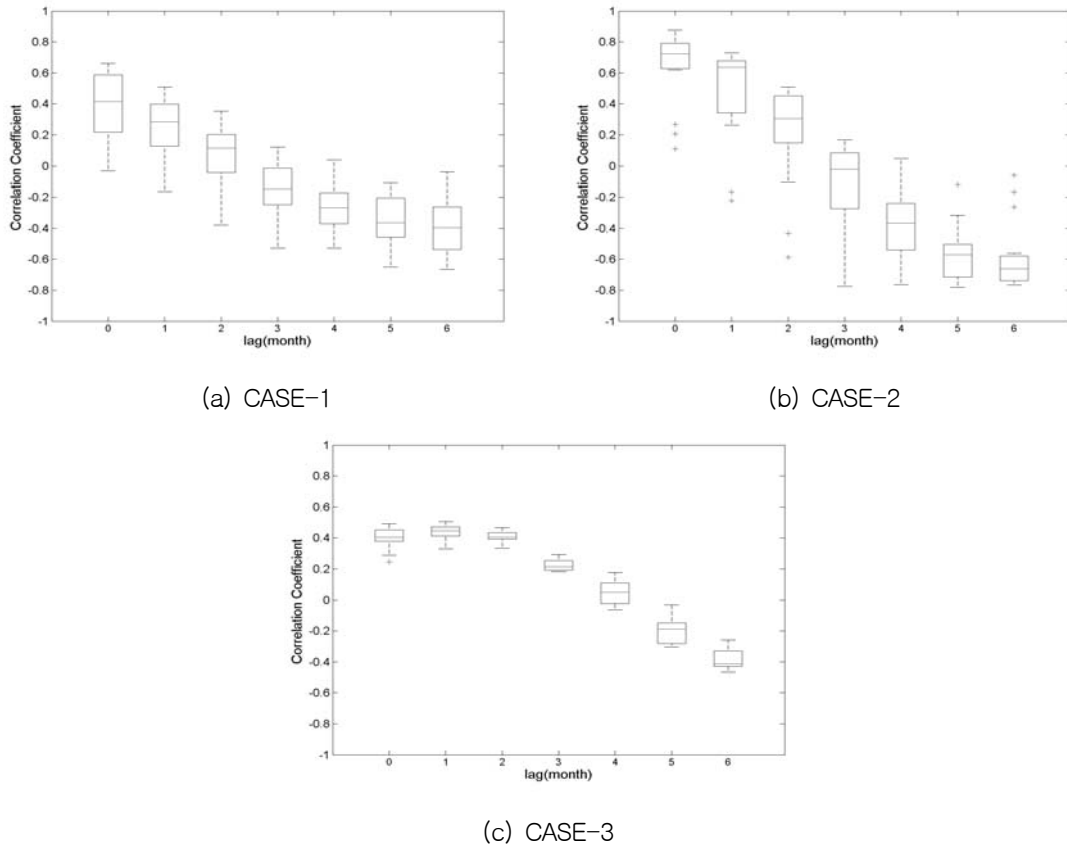


Fig. 7 Box plot of the cross correlation coefficient in 17 watershed of Nakdong river

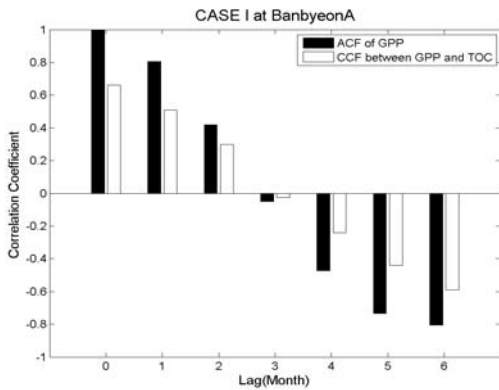
모든 CASE에서 지체시간이 길어질수록 교차상관계수가 작아지는 패턴의 그림을 나타내고 있음을 살펴볼 수 있다. CASE-3의 경우 대상 17개 유역의 산정된 교차상관계수가 평균값에서 조밀하

게 위치해 있으나 TOC와 GPP의 교차상관강도가 CASE-2에 비해서는 떨어지고 있다. CASE-2는 지체시간이 0일 때 교차상관계수가 0.6에서 0.8 사이에 존재하고 있으며 CASE-2의 다른 지체시

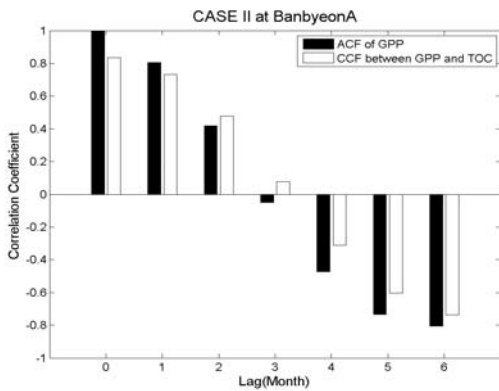
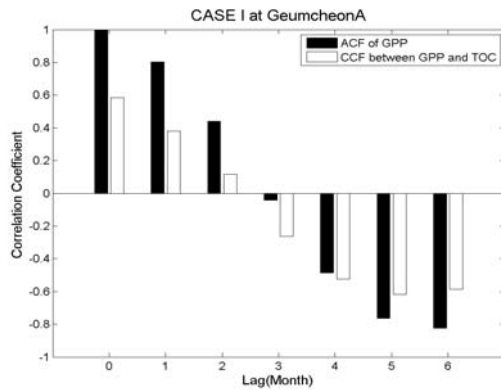
간에 비해서 유역별 교차상관계수가 평균값에 보다 조밀하게 모여 있음을 확인 할 수 있다. TOC 부하량은 단순히 TOC 농도와 유량의 곱으로 나타낼 수 있다. CASE-2, CASE-3의 교차상관계수가 큰 차이를 보이고 있는데, 이는 부하량과 GPP의 상관분석 시 유량에 대한 영향으로 확인되었다. 연구대상지역의 유량과 GPP의 상관계수를 을 확인해 본 결과, 평균적으로 0.42정도로 나타났다. 따라서 TOC와 GPP의 관계를 분석하기 위해서는 모의된 TOC 월별 유량 가중 평균 농도를 이용하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 8에는 Fig. 7에서 확인하지 못한 특정 한 유역에 대한 TOC와 GPP의 교차상관분석을 확인하고자 반변A와 금천A에 대한 경우별 TOC와 GPP의 교차상관분석 결과를 나타내었다. TOC와

GPP의 교차상관분석을 비교하기 위하여 추가적으로 GPP의 자기상관계수도 추가적으로 Fig. 8에 함께 도시하였다. Fig. 8의 (a)는 CASE-1로서 관측된 월별 TOC 유량 가중 평균 농도와 월별 GPP의 교차상관분석결과이며 (b)는 모의된 월별 TOC 유량 가중 평균 농도와 월별 GPP의 교차상관분석결과이다. 마지막으로 (c)는 CASE-3으로 모의된 월별 TOC 부하량과 월별 GPP간의 교차상관분석결과이다. 3가지 경우 모두 비슷한 패턴을 가지고 있으나, 경우별로 차이점을 발견할 수 있다. CASE-1과 CASE-2의 경우에는 지체시간이 0일 때 상관성이 가장 높게 나타났으며 지체시간이 커질수록 TOC와 GPP의 상관성이 작아지는 경향을 보였다. 3개월 이상으로 지체시간이 길어지게 될 경우에는 역 상관으로 전환되었다.



(a) Result for CASE-1(Observed TOC concentration vs GPP)



(b) Result for CASE-2(Simulated TOC concentration vs GPP)

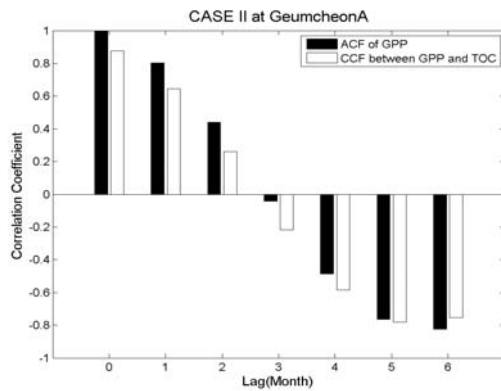
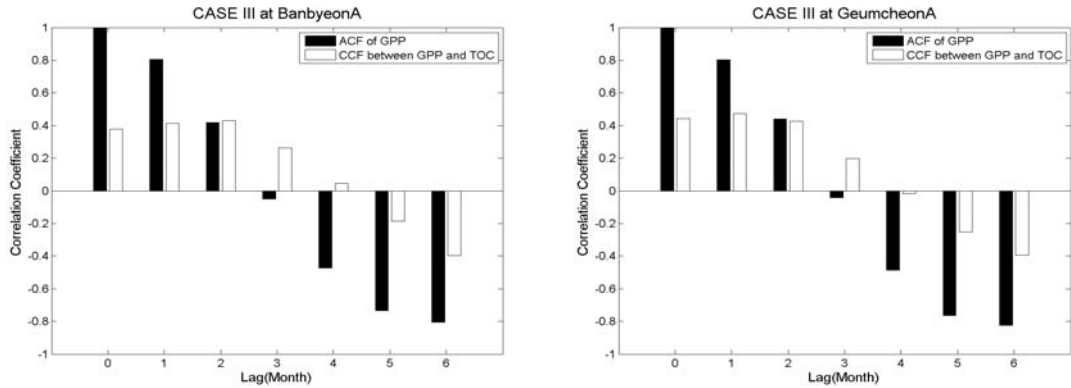


Fig. 8 Result of the cross correlation analysis at Banbyeon A and Geumcheon A



(c) Result of CASE-3(Simulated TOC load vs GPP)

Fig. 8 Result of the cross correlation analysis at Banbyeon A and Geumcheon A (continued)

CASE-3에서는 지체시간이 1일 때 상관성이 가장 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있는데 이는 모의된 TOC 부하량이 GPP와 약간의 시간간격을 두고 상관성을 가지는 것을 의미한다. CASE-2, 즉 모의된 월별 TOC 유량 가중 평균 농도와 월

별 GPP의 관계가 다른 두 가지 경우보다 높은 상관성을 보이고 있다. 이러한 결과는 연구 대상 유역에 대해서 경우별로 상관계수가 최대값을 가지는 지체시간에 대해서 정리한 Table 1을 통해서도 확인 할 수 있다.

Table 1 Maximum the cross correlation coefficient by cases

Watershed \ Item	Maximum Cross Correlation Coefficient		
	CASE-1 (lag : 0)	CASE-2 (lag : 0)	CASE-3 (lag : 1)
Nakbon A	0.0190	0.1101	0.4779
Banbyeon A	0.6616	0.8340	0.4140
Yongjeon A	0.4465	0.7234	0.3575
Kilan A	0.3791	0.6853	0.4351
Micheon A	0.5953	0.7642	0.4707
Naeseong A	0.4162	0.6402	0.4558
Geumcheon A	0.5850	0.8771	0.4715
Yeonggang A	0.1231	0.2041	0.5068
Ian A	0.3788	0.8152	0.4963
Byeongseong A	0.1301	0.6317	0.4474
Wecheon A	0.2474	0.6189	0.3725
Kamcheon A	-0.0312	0.2675	0.3292
Geumho A	0.3519	0.7061	0.4102
Hoicheon A	0.6397	0.8723	0.4410
Hwanggang A	0.4145	0.7403	0.4503
Namgang A	0.6325	0.7595	0.4484
Milyang A	0.5151	0.7840	0.4469

3.3. 주기성이 고려된 상관관계

주기성이 고려되지 않은 TOC와 GPP의 전반적인 상관구조는 앞선 3.2절에서 확인하였다. 이러한 TOC와 GPP의 연관성을 좀 더 세부적으로 분석하여 계절적으로 TOC와 GPP의 관계는 어떻게 변화하는지를 확인하고자 주기성이 고려된 교차상관분석을 실시하였다. 연구기간을 관측 TOC 유량 가중 평균 농도가 존재하는 2007년부터 2010년까지 4년간의 자료를 이용하고자 하였으나, 주기성이 고려된 상관분석을 하기에는 자료수가 많이 부족하여 수정된 GPP자료가 존재하는 2003년부터 2010년까지의 자료를 이용하였다. 따라서 CASE-2, CASE-3로 자료 수를 늘려 이에 대한

주기성이 고려된 교차상관분석을 실시하였다. 또한 주기성이 고려된 교차상관분석 결과와 비교하기 위하여 GPP 역시 주기성이 고려된 자기상관분석을 실시하였다.

Fig. 9에 반면 A에 대해 유역의 주기성이 고려된 교차 상관 분석 결과를 나타내었다. 세로축은 교차상관계수이며 가로축은 TOC와 GPP사이의 지체시간을 의미한다. (a)의 경우 1행부터 차례대로 3월, 4월, 5월에 해당하는 교차상관분석 결과를 나타낸 것이며 (b)는 차례대로 6월, 7월, 8월의 분석결과를 나타낸다. (c)는 9월, 10월, 11월을, (d) 역시 12월, 1월, 2월 순으로 교차상관분석 결과를 나타내었다.

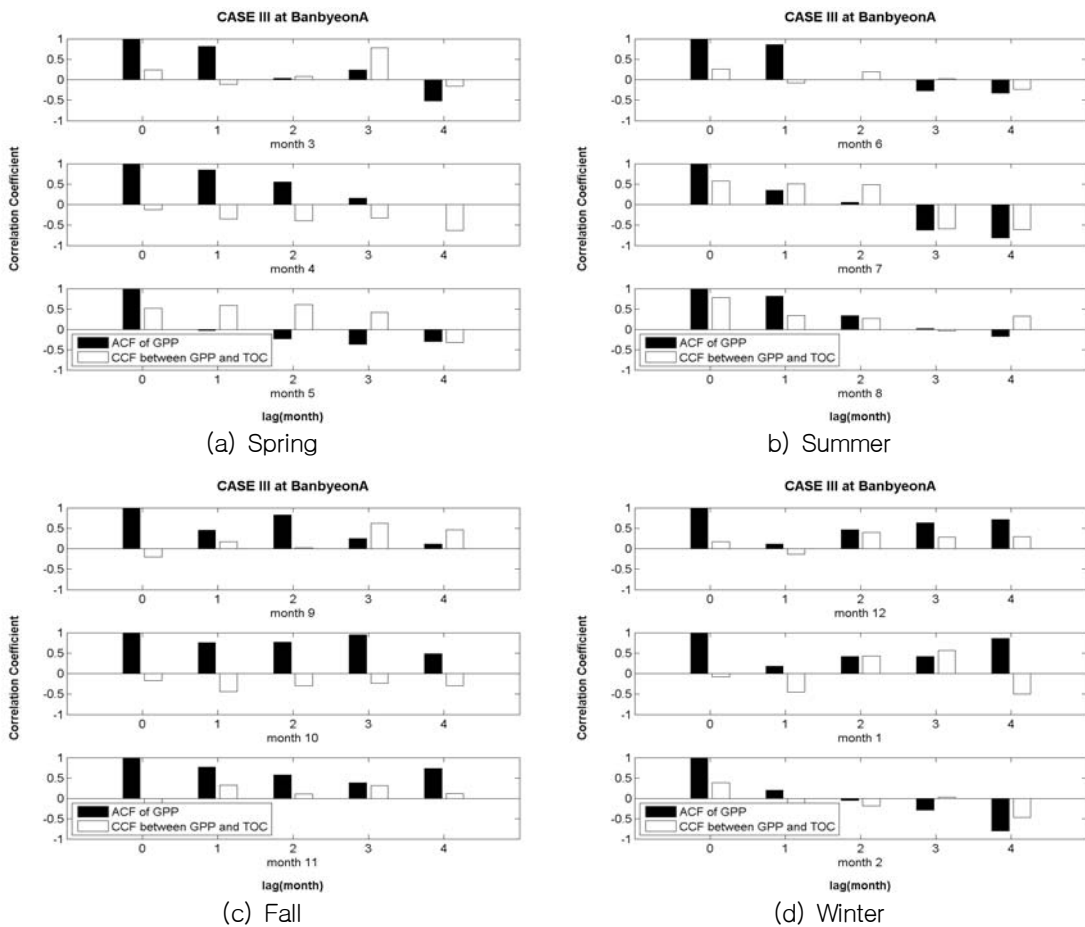


Fig. 9 Result of considering the cross correlation analysis of the periodicity

주기성을 고려한 교차상관분석을 실시하여 계절별 관계성을 확인해 본 결과 주기성을 고려하지 않은 교차상관분석과 같이 TOC와 GPP간의 뚜렷한 상관구조를 찾기는 어려웠다. 그러나 그 중에서도 여름(6~8월)은 다른 계절에 비해서 GPP 자기상관계수와 TOC와 GPP 사이의 교차상관계수가 주기성이 고려되지 않은 교차상관분석과 유사한 패턴을 보이는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 8 (b)에서도 확인 할 수 있듯이 주기성이 고려되지 않은 교차상관계수보다 계수 값은 작지만 주기성이 고려된 GPP가 자기상관계수의 경우 지체시간이 커질수록 계수가 작아졌으며, 주기성이 고려된 TOC와 GPP의 교차상관계수 역시 지체시간이 커질수록 계수가 작아져 주기성이 고려되지 않은 교

차상관계수의 변화 패턴과 유사한 패턴을 그리고 있는 것을 확인 할 수 있었다.

3.4. 유역에서 배출되는 TOC에 대한 GPP의 기여도 평가

유역에서 발생하는 GPP가 유역에서 배출되는 TOC에 얼마나 기여하는 지를 확인하기 위하여 2003년부터 2010년까지의 자료의 월별 TOC 부하량에 GPP를 나누어 백분율로 나타내었다. 주기성을 고려하지 않은 교차상관분석결과 TOC와 GPP의 지체시간이 0 ~ 1일 때 가장 높은 상관관계를 보이고 있어 TOC(t)/GPP(t)와 TOC(t)/GPP(t-1) 두 가지 경우로 구분하여 기여도를 평가하였다(Fig. 10).

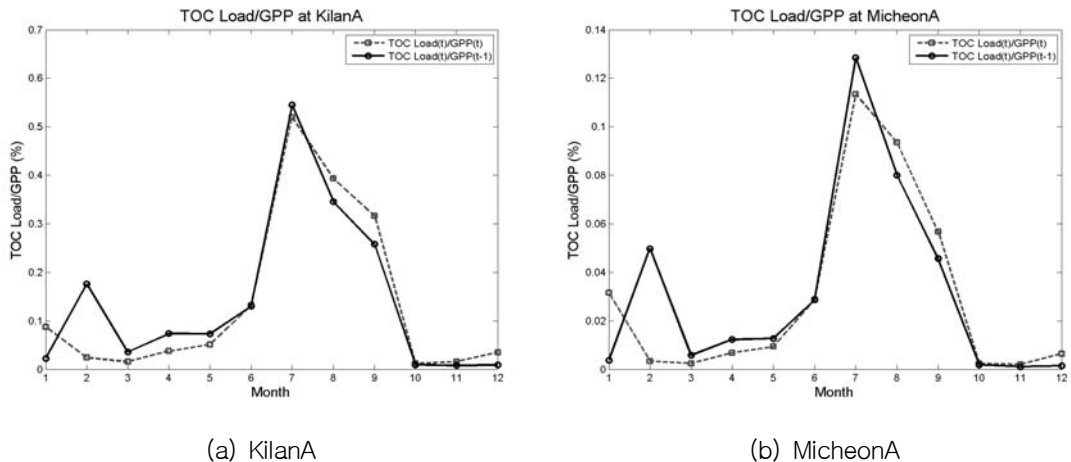


Fig. 10 Result of comprson TOC load and GPP

Fig. 10의 가로축은 월, 세로축은 유역에서 배출되는 TOC에 대해 유역에서 발생한 GPP의 기여도(%)를 의미한다. 모든 유역에서 Fig. 10에 도시한 길안 A와 미천 A의 결과와 비슷한 결과를 보였다. 7월에 GPP가 TOC 부하량에 기여하는 정도가 가장 컸으며 1개월의 지체시간이 고려되었을 때가 그렇지 않았을 때 보다 미세한 차이이지만 하지만 조금 더 높게 기여도가 산정되었다. 17개의 연구 대상 유역에서 GPP가 1월인 경우에 GPP가 TOC에 기여하는 정도가 같은 12월, 2월

에 비해서 높게 산정되었다. 이는 GPP와 TOC의 월별 시계열을 이용하여 비교해 본 결과, 1월의 GPP가 같은 계절인 12월과 2월의 GPP보다 작게 관측되었고 TOC 부하량의 경우 12월, 1월, 2월에서의 부하량 값이 큰 변화가 없이 비슷한 값을 가졌다. 이로 인하여 상대적으로 GPP가 작은 1월에 기여도가 비교적 높게 산정되었다. 이는 인공위성을 통해 획득한 자료가 가지는 한계점인 관측기구의 오작동, 관측 시 미세한 기상적 요인의 가정으로 인한 신뢰도가 떨어지는 자료 및 관측이

적합하지 않은 날의 자료에 의해 유발될 수 있으며(Falge et al. 2001, Vargas et al. 2007) 겨울의 식생 생장이 다른 계절에 비해 현저히 낮게 나타나기 때문에(Fig. 6(a)) 다음과 같은 결과가 유발되는 것으로 예상된다.

또한 식생의 생장이 활발한 여름에 발생된 GPP가 유역에서 배출되는 TOC 부하량에 기여하는 정도가 가장 큼을 알 수 있었다. Karim(2005)은 Cotter River 유역의 경우 연 TOC 부하량에 대한 연 GPP의 기여도도가 0.01% ~ 0.45%임을 밝혀낸 바 있다. 이러한 결과 값은 본 연구에서는 7월에 산정된 기여도와 유사한 결과임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 하천 시스템을 통하여 배출되는 유기탄소와 식생의 광합성을 통하여 생산된 탄소 사이의 관계를 살펴보고자 낙동강 상류의 산림 유역을 연구 유역으로 선택하였다. 식생의 광합성을 통하여 생산된 탄소는 NASA에서 제공하는 위성자료 중 하나인 MODIS GPP를 이용하였다. MODIS GPP를 연구에 사용하기에 앞서 위성자료가 가지는 문제점을 해결하기 위해 보정과정을 통하여 수정된 MODIS GPP를 본 연구에 적용하였다. 하천 시스템을 통하여 배출되는 유기탄소의 경우 수질오염총량관리제에서 제공하는 관측 TOC 농도를 사용하였다. 제공되고 있는 관측 TOC 농도는 평균 8일 간격자료로서 완벽한 자료가 아니기 때문에 관측 TOC농도와 더불어 추가적으로 TANK모형과 7-변수 대수 선형 모형을 이용하여 연구 대상 유역별 1일 간격으로 TOC 농도와 부하량을 모의하여 본 연구에 사용하였다. 관측 TOC 농도와 모의된 TOC 농도는 월별 유량 가중 평균농도로, 부하량의 경우 TOC 월 부하량으로 자료를 재구성하였으며 각각을 CASE-1, CASE-2, CASE-3로 구분하여 TOC와 GPP 사이의 주기성이 고려되지 않은 교차상관분석을 실시하였고, 그 결과 3가지 모두 GPP의 선

행지체시간이 길어질수록 TOC와 GPP간의 교차상관계수가 점점 작아지는 패턴을 보였다. 특히 CASE-2인 월별 TOC 유량 가중 평균농도와 월 GPP 간의 지체시간이 0일 때 가장 큰 연관성을 가지는 것을 확인하였다. 또한 계절적으로 TOC와 GPP의 상관구조의 변화를 확인하기 위하여 CASE-2, 3에 대해서 주기성이 고려된 교차상관분석을 실시하였다. 주기성이 고려되지 않은 교차상관분석처럼 특징적인 변화패턴은 없었으나 여름(6~8월)에 GPP와 TOC의 상관구조가 주기성이 고려되지 않은 상관구조와 유사한 결과를 나타냄을 확인하였다.

이때 유량 및 TOC 자료를 TANK모형 및 7-변수 대수 선형 모형을 이용하여 자료계열을 일자료로 확장한 바와 같이 온도 및 일사량 등을 이용하여 GPP 역시 일자료로 확장하여 향후 연구에 적용하게 된다면 양질의 연구 성과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

유역에서 발생한 GPP가 유역에서 배출되는 TOC에 얼마나 기여하는 지를 확인하기 위하여 유역의 TOC 부하량을 GPP로 나누어 정리한 결과 0.01~0.7(%)미만으로 기여도가 산정되었으며 특히 7월의 TOC 부하량은 6월 GPP에 대해 기여도가 상대적으로 다른 달에 비해서 높게 나타났다. 식생이 활발한 여름에 유역으로 유입되는 탄소량이 증가함에 따라 일정 시간이 흐른 후 다시 유역 밖으로 극히 일부분이 배출되는 것을 연구를 통해서 확인 할 수 있었다.

본 연구를 통하여 수평적인 탄소 플럭스의 흐름은 식생에 의해 포착된 탄소의 일부분이 유역에서 배출되는 총 유기탄소와 관계성을 가지고 일정량 기여하고 있다는 것을 확인하였다. 추가적으로 주기성이 고려된 교차상관분석과 TOC에 대한 GPP의 기여도가 여름에 주목할 만한 결과를 냄으로써 식생에 의해 생산된 탄소와 유역에서 배출되는 유기탄소의 관계가 계절적으로도 긴밀한 관계가 있을 것이라 추측된다. 따라서 향후 연구에서는 계절에 따른 식생변수와 GPP와 TOC의 관계를 분석함으로써 조금 더 정량적으로 수평적인 탄

소 플럭스 흐름에 대해 이해 할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2009-0071549).

참고 문헌

김문성, 신현석, 박주현, 김상단. 2009. 낙동강 오염총량관리 단위유역 유달을 경험공식. 수질보전 한국물환경학회지 25: 581-589.

김상단, 강두기, 김문수, 신현석. 2007. 유역모형 구축을 위한 8일간격 유량측정자료의 일유량 확장 가능성. 수질보전 한국물환경학회지 23: 64-71.

김재철, 김상단. 2007. 오염총량관리 유량측정자료를 이용한 낙동강 유역 유황분석. 수질보전 한국물환경학회지 23: 332-338.

이아연, 박무종, 조덕준, 김상단. 2010. 낙동강 유역 BOD, COD 및 TOC의 수문학적 플럭스 추정. 대한환경공학회논문집 32: 830-839.

최치현, 최대규, 최현일, 김경현, 김상단. 2012. 평균기온과 식생의 영향을 고려한 격자기반 일 지표토양온도 예측 모형 개발. 수질보전 한국물환경학회지 28: 137-147.

한수희, 강두기, 신현석, 유재정, 김상단. 2007a. 비편향 회귀분석모형을 이용한 낙동강 본류 부유사량 산정방법의 신뢰도 향상. 수질보전 한국물환경학회지 23: 251-259.

한수희, 신현석, 김상단. 2007b. 낙동강 유역관리를 위한 부하량 유황곡선의 적용 가능성. 수질보전 한국물환경학회지 23: 620-627.

Aumont O, Orr JC, Monfary P, Ludwig W, Amiotte-Suchet P and Probst J-L. 2001. Riverine-driven interhemispheric transport

of carbon. *Global Biogeochemical Cycles* 15(2): 393-405.

Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burda G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grunwald T, Hollinger D, Jensen N, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K and Wofsy S. 2001. Gap filling strategies for long term energy flux data sets. *Agricultural and Forest Meteorology* 107(1): 71-77.

Field CB and Raupach MR. 2004. *Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate and the Natural World*. Island Press, Washington, DC

Goldewijk KK, van Minnen JG, Kreileman GJJ, Vloedberg M and Leemans R. 1994. Simulating the carbon flux between the terrestrial environment and the atmosphere. *Water, Air, and Soil Pollution* 76: 199-230.

Karim Sabetraftar. 2005. The hydrological flux of organic carbon at the catchment scale: a case study in the cotter river catchment, Australia. Ph.D. dissertation, The Australian national university, Canberra, ACT 0200, Australia

Lloyd J. 1999. Current perspectives on the terrestrial carbon cycle. *Tellus* 51(B): 336-342.

Lu XX, Li S, He M, Zhou Y, Li L and Ziegler D. 2011. Organic carbon fluxes from the upper Yangtze basin: an example of the Longchuanjiang river, China. *Hydrological Processes*. DOI: 10. 1002/hyp.8267

Raymond PA. 2005. CARBON CYCLE, The age of the Amazon's breath, *Nature*, 436: 497-500.

Robertson AI, Boon PI, Bunn SE, Ganf GG, Herzceg AL, Hillman TJ and Walker KF. 1996. A scoping study into the role, importance, source, transportation and cycling of carbon in the riverine environment. Report to the Murray-Darling basin commission. Project R6067. MDBC, Canberra.

Roxburgh SH, Wood SW, Machev BG, Woldendorp G and Gibbons P. 2006. Assessing the carbon sequestration potential of managed forests: a case study from temperate Australia. *Journal of Applied Ecology* 43: 1149-1159.

Salas JD, Delleur JW, Yevjevich V and Lane

WL. 1980. *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. Water Resources Publication, USA

Vargas R, Cook R, Agarwal D, Boden T, Papale D, Van Ingen C, Yang B and Baldocchi D. 2007. The future of the world-wide flux tower database. FLUXNET Workshop, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA

- 논문접수일 : 2012년 05월 30일
- 심사의뢰일 : 2012년 06월 05일
- 심사완료일 : 2012년 10월 23일