

소양강 탁수 현황과 저감에 대한 수리학적 분석

이진용*

강원대학교 지질학과

A Hydrological Analysis of Current Status of Turbid Water in Soyang River and Its Mitigation

Jin-Yong Lee*

Department of Geology, Kangwon National University

ABSTRACT

Water in Soyang River is an essential source for citizens of Chuncheon and Seoul areas. In 2006, turbid water in Soyang River aggravated by the typhoon Ewiniar, sustained for over 280 days unlike conventional years, then which interrupted water supply of Chuncheon and Seoul areas. Soil erosion derived from high cool lands constituting about 55% of Soyang River area is considered one of main causes for the turbid water, including imprudent development of mountainous area, road expansion, and road construction for forestry. According to analysis of turbidity, precipitation and reservoir level in Soyang River region for June 2006~August 2008, the turbidity showed a peak correlation ($r = 0.28$) at a lag time of 49 days and especially did an excellent correlation ($r = 0.60$) with the reservoir level at a lag of 4 days. In the meantime, a critical turbidity of 31 NTU at Soyanggang Dam was estimated, over which would cause turbid water at Paldang Dam. In addition, a master recession curve was suggested, from which sustaining time of turbid water can be predicted.

Key words : Turbid water, Soyang River, Mitigation, High-cool lands agriculture, Recession curve, Chuncheon

요약문

소양강물은 춘천과 서울지역 시민의 중요한 수원이다. 2006년 태풍 에위니아로 악화된 탁수현상은 예년과 달리 280일 이상 지속되었으며 이로 인하여 춘천 및 서울지역 물 공급에 차질을 빚었다. 한편 소양강 유역의 약 55%에 해당하는 고랭지밭의 토사유출이 탁수현상의 주요원인으로 꼽히며 이와 함께 무분별한 산지개간, 도로의 확포장, 임도 개설 등도 탁수를 가중시키는 것으로 알려진다. 본 연구에서 2006년 6월~2008년 8월간의 소양강 유역의 탁도, 강수량, 댐수위 등을 분석한 결과 탁도는 일 강우와 49일의 지연시간을 두고 최대의 상관성($r = 0.28$)을 보였으며 특히 댐수위와는 4일의 지연시간에 대해 탁월한 상관성($r = 0.60$)을 나타냈다. 그리고 2006년과 2007년 두 차례 발생한 탁수의 지속기간과 거리별 탁도 자료를 이용하여 분석한 결과 취수원인 팔당댐에 탁수(10 NTU)가 도달하기 위한 소양강댐의 기준 탁도는 약 31 NTU로 추정되었다. 또 분석을 통해 향후 탁수발생 시 지속기간을 예측할 수 있는 지배감쇠곡선(master recession curve)을 제시하였다.

주제어 : 탁수, 소양강, 저감, 고랭지농업, 감쇠곡선, 춘천

1. 서론

소양강댐은 1967년 착공 6년만인 1973년에 준공되었으

며 저수량 269억톤으로 강원 및 서울지역의 주요 수원(water source)이다. 소양강댐의 물은 유하하여 의암댐(15 km), 청평댐(60 km) 및 팔당댐(88 km)에 이른다. 이

*Corresponding author : hydrolee@kangwon.ac.kr

원고접수일 : 2008. 9. 24 심사일 : 2008. 10. 2 게재승인일 : 2008. 12. 5
질의 및 토의 : 2009. 2. 28 까지

런 소양강댐에서 발생하는 탁수(통상적으로 10 NTU 이상을 말함)는 수처리 비용의 상승과 관계지역의 물 공급에 막대한 차질을 초래한다(김범철, 2007; 정대교·정희만, 2006). 2002년(총강수량 = 1,178 mm, 7~9월 강수량 = 683 mm) 70일이었던 소양강댐의 탁수기간은, 2003년(총강수량 = 1,863 mm, 7~9월 강수량 = 1,287 mm) 64일, 2004년(총강수량 = 1,405 mm, 7~9월 강수량 = 942 mm) 45일로 줄었고 2005년(총강수량 = 1,335 mm, 7~9월 강수량 = 873 mm)에는 탁수일이 없었다(한국수자원공사, 2007). 그런데 2006년(총강수량 = 1,659 mm, 7~9월 강수량 = 1,065 mm)에는 탁수일이 285일로 급증하였다(2007년 탁수종료일까지 합산, 2006년만은 167일).

2006년 7월에 소양강댐의 상류지역에 단기간(7.11~20)에 집중호우가 발생하였는데(태풍 에위니아 영향) 이 기간에 총 600 mm(1961~1990년 춘천지역 연평균총강수량 1,296 mm의 약 1/2), 시간당 최대 88 mm/hr를 기록하였다. 이로 인해 125개소에서 산사태가 발생하였고 121개소에서 하천이 유실되었다. 그 결과 다량의 토사가 유출되었고 이것이 소양강 탁수의 주요 원인이 되었다. 그런데 앞서 언급한 바와 같이 2006년에는 다른 해와 달리 매우 장기간에 걸쳐 탁수가 발생하였는데 이는 당해에 집중호우가 유년히 심했다는 점도 작용을 하였지만 단순히 강수량만으로 보았을 때 2003년과 비교하면 특이한 현상으로

볼 수 있다(김복혜 등, 2007).

2007년 3월 중앙정부 및 강원도 등은 소양강 유역의 탁수저감을 위해 2007~2013년간 3,859억을 투자하여 고랭지밭 매입 및 정비사업, 탁수 자동측정 장치 설치 등을 단계적으로 실시하도록 하였다. 한편 소양호 유역의 밭 면적은 73.12 km²이며 약 55%인 40.03 km²는 고랭지 밭이다. 토사 유출은 고랭지 밭이 많이 분포하고 있는 만대천, 자운천, 내린천, 가아천에서 매우 심각하다(류찬희, 2007; 한국수자원공사, 2007). 특히 고랭지 밭이 몰려 있는 양구군 해안면은 야산을 개간해 농사를 지으며 개간한 밭은 경사가 심하고 척박해 반복적인 객토를 하고 있다(류찬희, 2007). 경사지밭 객토는 적은 비에도 그대로 흘러가 해안면을 흐르는 만대천과 성황천을 따라 인북천을 거쳐 소양호로 유입된다(Fig. 1).

2007년 소양강댐의 탁수현상이 종료된(2007년 4월 28일) 후에도 잦은 양구군 해안면 지역(6월 26일)은 여전히 탁수가 지속되고 있었으며 고랭지 채소밭은 객토한 토양들이 특별한 완충지역 없이 방치되어 있었다(Fig. 2). 또한 태풍으로 발생한 고지대의 산사태는 눈에 확연히 드러났다. 특히 해안면에서 유하한 탁수가 만대천을 따라 흘러 기령천 물과 합류하여 인북천으로 흐르는데, 만대천 물은 붉은 황토 빛을 보이는 탁수인데 반해 상류지역에 고랭지 밭이 없는 기령천의 경우 매우 맑은 물빛을 보였다

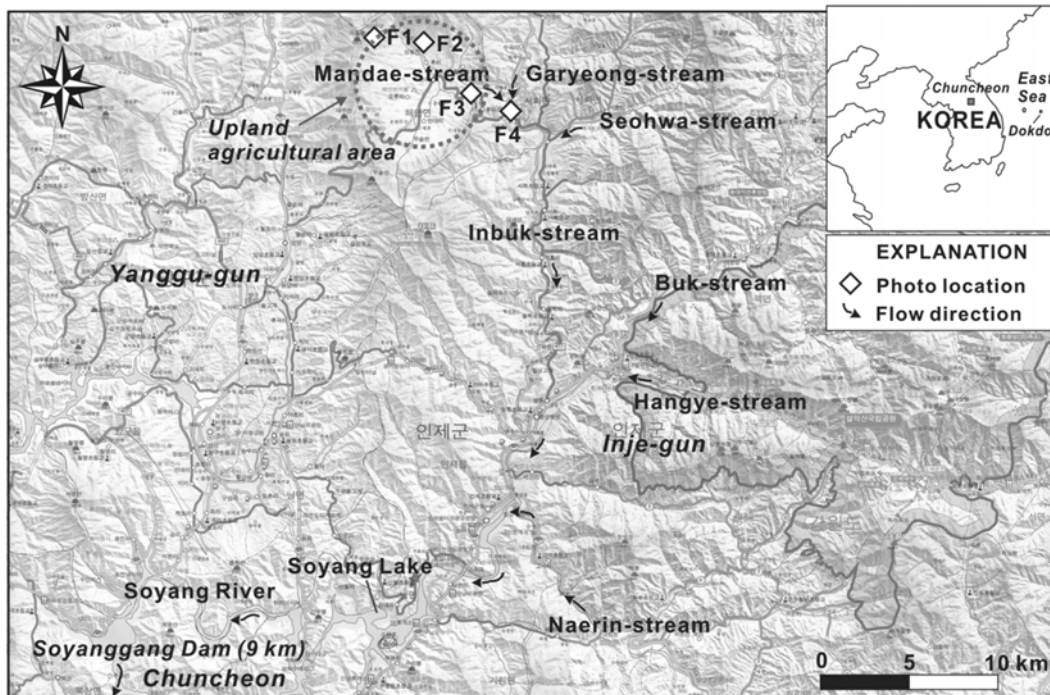


Fig. 1. Location of the study area showing relevant streams and their flow directions.

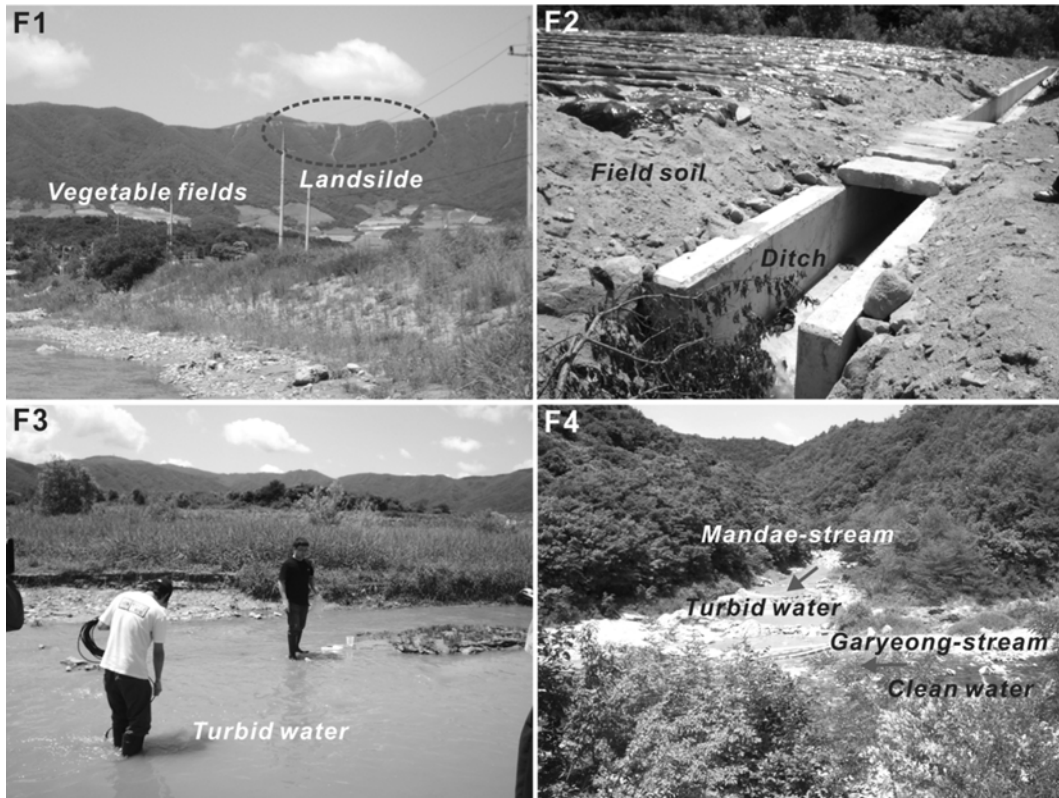


Fig. 2. Photos of upland agricultural area and turbid water taken on 26 June, 2007. Modified from Kim et al. (2007).

(김복혜 등, 2007). 이런 이유로 고랭지 밭이 소양강 유역 탁수의 주원인으로 꼽히며 정부와 강원도는 고랭지 밭에 대한 대책을 주요 현안으로 잡고 있다.

본 연구에서는 소양강 유역에서 발생하는 탁수현상과 저감에 대한 수리학적 분석을 위하여 한국수자원공사(소양강댐관리단)가 2006년 6월 22일부터 2008년 8월 4일까지 관측한 소양강 유역의 강수량(precipitation), 소양강 댐 물의 탁도(turbidity), 댐 수위(reservoir level), 댐 유입수량(total inflow) 등의 수문자료를 분석하였고 이를 통해 탁수의 지속기간을 예측하는 지배감쇠곡선(master recession curve)을 추정하였다.

2. 연구자료 및 방법

2.1. 수문자료

한국수자원공사 소양강댐 관리단에서는 소양강댐 물의 탁도 등을 포함한 수질, 댐 수위 및 댐 유입수량 등을 정기적으로 관측하고 있으며 이를 일반인들에게 공개하고 있다(한국수자원공사, 2007). 본 연구에서는 공개된 2006년 6월 22일~2008년 8월 4일의 일일자료(각각 775개 자료)를 이용하였는데 탁도의 경우에는 총 69개의 결측

(8.9%)이 있다. 2008년 이전의 결측(총 결측의 5.8%)은 결측 기간이 최장 연속 3일 이내여서 선형보간(linear interpolation)을 사용하였다. 그리고 대부분(94.2%)의 결측은 2008년 4월 2일에서 5월 29일 사이에 발생하였는데 이때는 탁도가 매우 낮은 수준이었으며(~1 NTU), 이 기간 전후에 모두 1 NTU의 탁도를 보인 것을 고려하여 결측을 모두 1 NTU로 설정하였다(Fig. 3).

한편 강수량의 경우 기상청 춘천기상대(Chuncheon Weather Station, 춘천시 우두동)에서 관측한 자료와 수자원공사 소양강댐 관리단에서 측정된 자료가 있다(Fig. 4). 두 관측 지점은 약 7 km 이격되어 있고 두 측정 강수량은 강한 선형성($r^2 = 0.84$)을 보이나 전체적으로 소양강댐에서 측정된 강수량이 조금 크게 나타나는 경향이 있다. 본 연구에서는 탁도 자료가 소양강댐에서 측정된 것이므로 이에 준하여 소양강댐에서 측정된 강수량 자료를 기본으로 삼았다.

2.2. 자료해석

수문자료의 특성을 이해하기 위해서 본 연구에서는 주로 시계열적 해석방법(time series analysis)을 사용하였다. 해석에 사용한 함수는 자기상관(auto-correlation), 스펙트

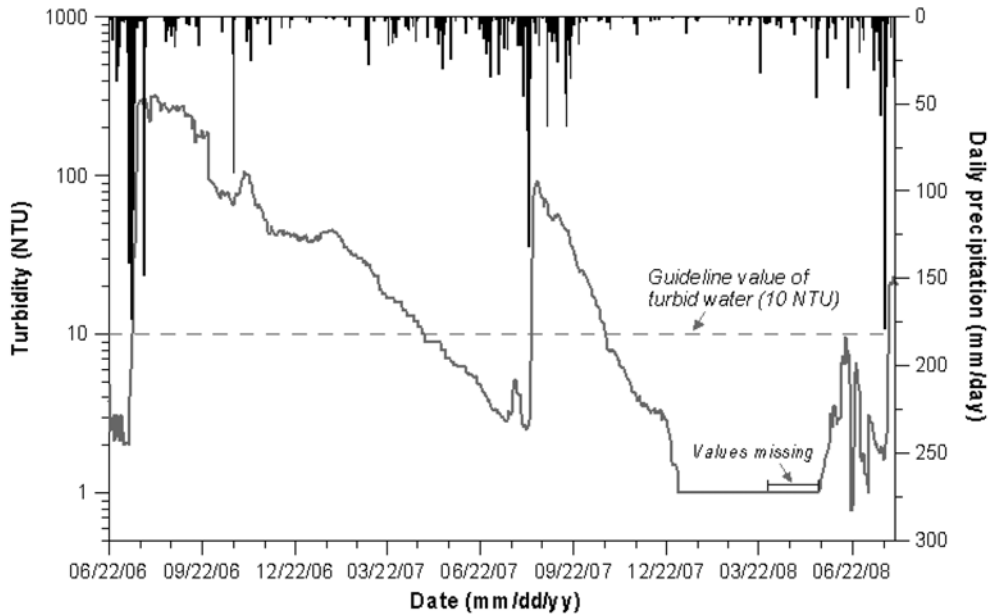


Fig. 3. Variation of turbidity and daily site precipitation at Soyanggang Dam area during June 2006~August 2008. Data are from K-WATER.

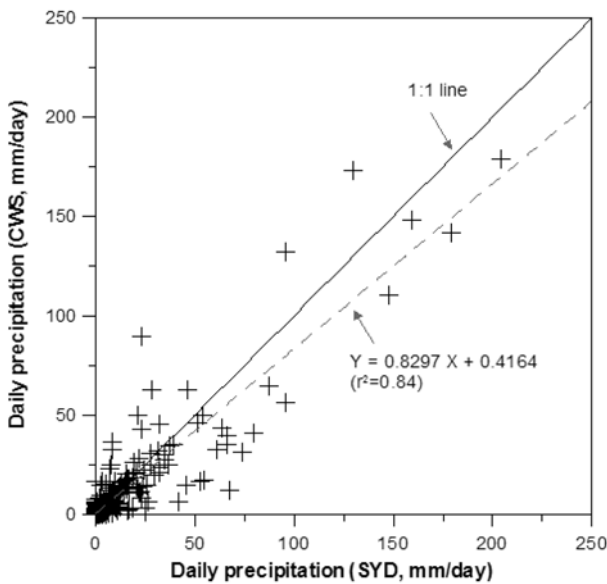


Fig. 4. Comparison of precipitations measured at Soyanggang Dam station (SYD, K-water) and Chuncheon Weather Station (CWS, Korea Meteorological Administration).

럼밀도(spectral density) 및 교차상관(cross-correlation) 함수이다. 자기상관 함수는 일정 시간에 대하여 연속적 자료의 선형적 의존성 및 기억효과(memory effect)를 정량화한다(Angelini, 1997; Larocque et al., 1998). 일 강수(daily precipitation)와 같이 일반적으로 상호 자기연관성이 적은 함수는 자기상관 함수가 빠르게 감소하며 자기상관성이 큰 대기압과 같은 자료는 긴 지연시간(time lag)에

대해 높은 자기상관성을 보인다(Lee and Lee, 2000). 스펙트럼밀도 함수는 시계열 자료의 주기성을 보여주는 것으로 조절시간(regulation time)을 통해 해당 시스템(지하수 혹은 지표수 시스템)의 외부 충격(예를 들어 강우)에 대한 반응의 영향기간을 알 수 있다(Larocque et al., 1998).

교차상관 함수는 두 시계열간의 상호의존성(interdependency)을 나타낸다. 일반적인 상관성(correlation)은 일의적으로 계산되나 시계열의 교차상관 함수는 시간(lag time)에 따라 상관성의 변화를 보여준다. 특히 시간 0과 최고 상관성을 보이는 시간간의 시차를 나타내는 지연시간(the delay)은 시스템의 충격 전파속도를 지시한다(Lee and Lee, 2000). 본 연구에서는 소양강 물의 탁도, 강수량, 댐 수위 및 댐 유입량에 대하여 상기의 시계열 함수 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 토론

3.1. 강수, 댐 수위, 댐 유입수량과 탁도의 상관관계

앞서 기술한 비와 같이 2006년은 예년과 달리 매우 장기간의 탁수기간(10 NTU 이상인 기간)을 보여 주었다(Fig. 3). 태풍 에위니아가 지나간(2006.7.11~20) 후인 8월 7일에 328 NTU의 최고 탁도를 보인 후 서서히 감소하였다. 이후 우기인 2007년 8월 13일에 다시 탁수가 발생하였고 이때에는 탁수기간이 73일로 전년에 비해 매우 짧았다. 한편 2008년에 다시 장마가 오면서 7월 28일에

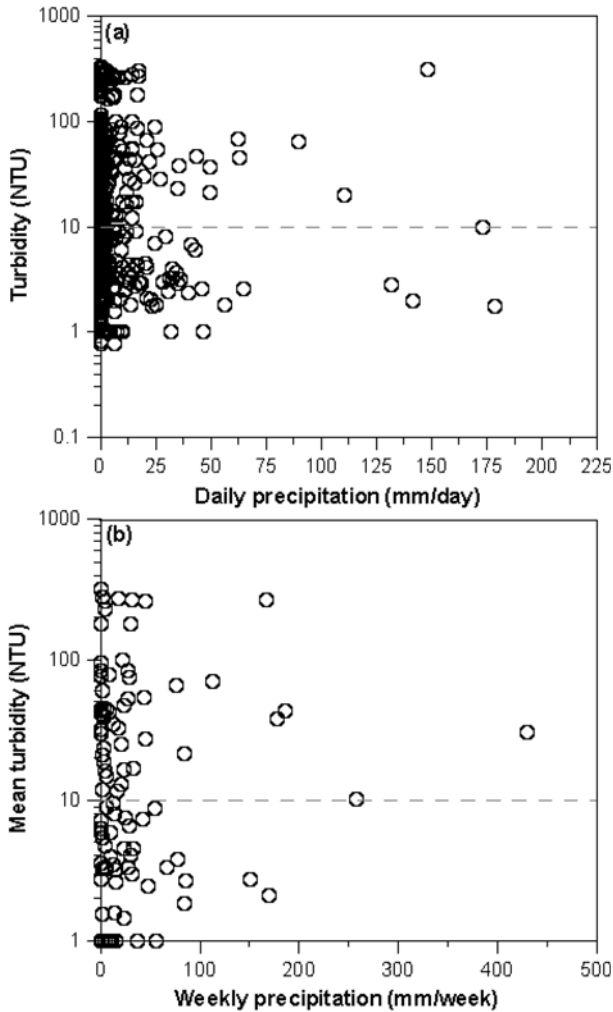


Fig. 5. Relationships between water turbidity and (a) daily precipitation and (b) weekly precipitation.

탁수가 시작되어 8월 4일 현재 진행 중이다. 일반적으로 소양강의 탁수는 많은 비에 의해 유발되며 Fig. 3에서 보는 바와 같이 일일 강수량(daily precipitation)과 표면적으로 연관성을 보인다. 그러나 시간적 지연에 대한 고려없이 일일 강수량 및 1주 누적강수량(weekly cumulative precipitation)과 탁도는 큰 연관성을 보이지 않는다(Fig. 5).

한편 소양강 댐의 수위와 탁도는 지연시간(time lag = 0) 없이 유의할 만한 수준($r^2 = 0.44$)의 선형적(실제로는 로그 선형성) 연관성을 보인다(Fig. 6a). 연도별로 보면 선형성은 더욱 명확해지며 댐 수위의 신술적 증가에 대하여 탁도는 지수적(exponentially)으로 증가한다. 그러나 2006년도와 2007년도의 탁수자료를 비교해 보면 동일 댐 수위에 대해서 2006년도에는 탁도가 상대적으로 높았다. 2006년에는 폭우로 인한 댐 수위 조절을 위해 여수로 방

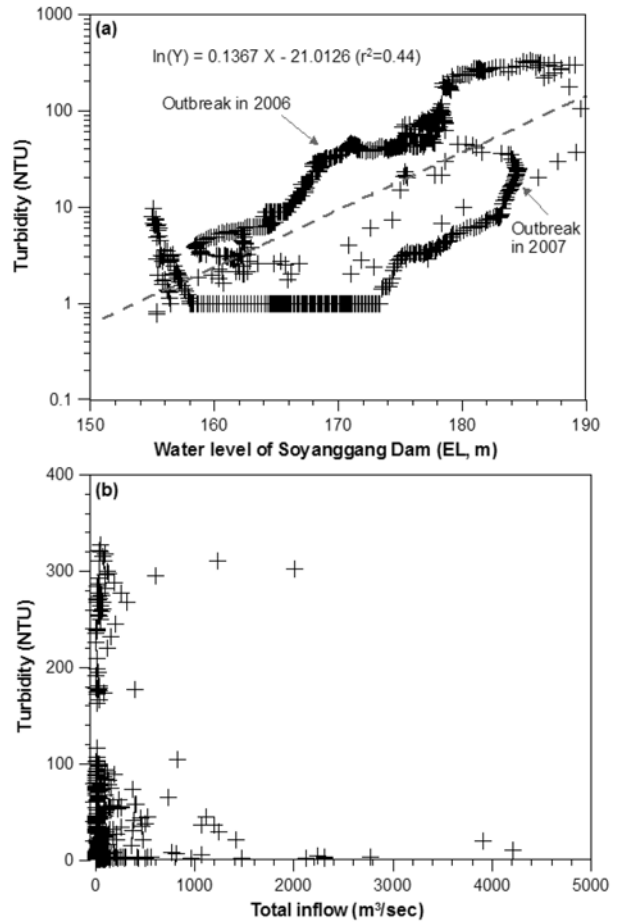


Fig. 6. Relationships between (a) reservoir level and (b) total inflow into the Soyanggang dam.

류를 하였다. 점을 고려해 보면, 즉 일부는 인위적으로 댐 수위가 조절되었다는 점을 고려하면, 2007년도와의 수치 차이에도 불구하고 전체적으로 댐 수위와 탁도의 선형적 연관성은 매우 높다고 사료된다. 한편 지연시간이 없을 경우 댐 총 유입수량(댐 유역에서 유입되는 유량)과 탁도는 유의할만한 상관성을 보이지 않았다(Fig. 6b).

3.2. 시계열 분석

개별 시계열 자료의 특성을 살펴보기 위하여 자기상관성을 계산하였다(Fig. 7a). 기대한 바와 같이 일강수량은 자기상관성이 매우 빠르게 감소하여 임의함수(random function)의 성격을 보였다(Lee and Lee, 2000). 또 조절 시간도 0.43 일로 매우 짧았다(Table 1). 이와 같은 양상은 댐 유입량도 비슷하게 나타났다. 그러나 댐 저수위와 탁도는 매우 강한 자기상관성을 보이며 긴 지연시간에도 높은 자기상관 계수를 보였고 조절시간도 각각 40.56일과 70.34일로 나타나 선행 값들이 후행 값들에 장기간 영향

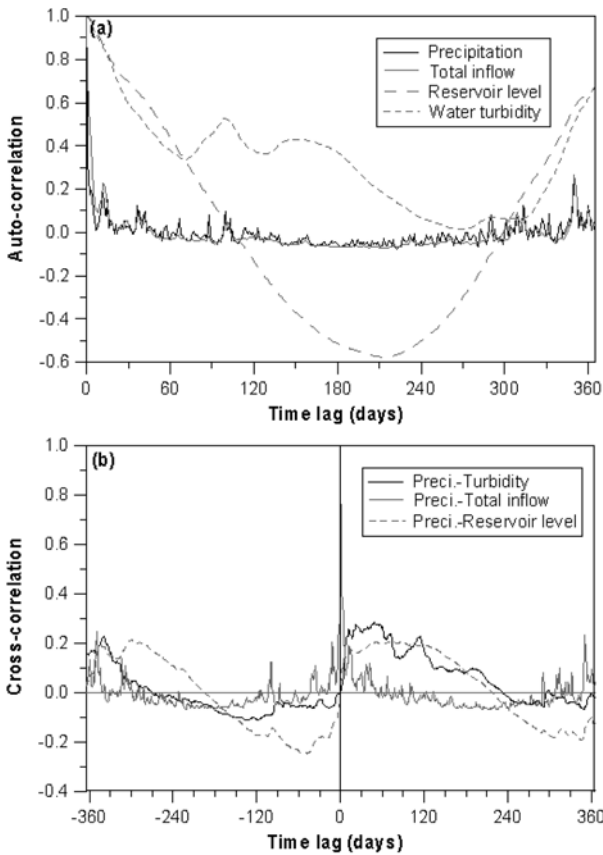


Fig. 7. (a) Auto-correlations of precipitation, total inflow, reservoir level and water turbidity and (b) cross-correlations of precipitation with turbidity, total inflow and reservoir level (truncation = 365 days).

Table 1. Results of auto-correlation analysis for precipitation, total inflow, reservoir level and water turbidity

Parameter	Time lag (auto-correlation = 0)	Regulation time
Precipitation	20 days	0.43 days
Total inflow	47 days	1.14 days
Reservoir level	106 days	40.56 days
Water turbidity	NA (>> 300 days)	70.34 days

을 미치는 것을 알 수 있다. 그러므로 나타난 시계열적 특성상 일강수량과 유입량을 한 그룹으로 그리고 댐 저수위 및 탁도를 또 다른 그룹으로 대별할 수 있다.

Fig. 7b는 일강수량과 탁도, 유입량 및 저수위와의 시계열적 상관관계를 보여준다. 지연시간이 없을 경우에 무관해 보이던 일강수량과 탁도의 관계는 지연시간 49일에 대해 최고 0.284($p < 0.0001$)의 유의할만한 상관성을 보였다 (Table 2). 최고 상관관계는 49일에 보였지만 상관계수는 강우 후 점차적으로 상승하여 10일 이후부터는 0.20 이상

Table 2. Results of cross-correlation analyses for precipitation, total inflow, reservoir level and water turbidity

Parameters	Time delay (cross-correlation = 0)	Maximum cross-correlation
Precipitation-turbidity	49 days	0.284
Precipitation-total inflow	1 day	0.758
Precipitation-reservoir level	50 days	0.203
Total inflow-turbidity	22 days	0.365
Total inflow-reservoir level	13 days	0.263
Reservoir level-turbidity	4 days	0.598

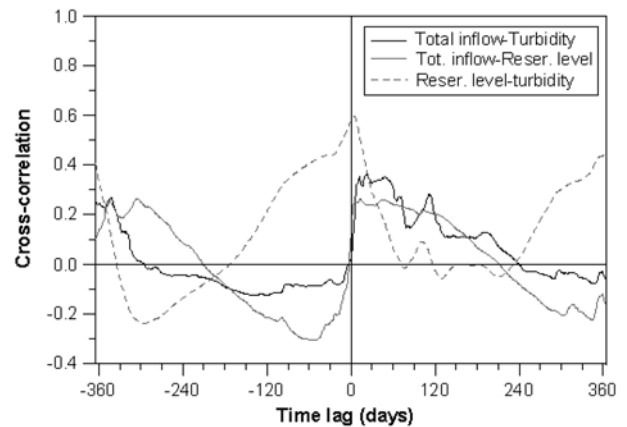


Fig. 8. Cross-correlations among total inflow, turbidity and reservoir level (truncation = 365 days).

의 비교적 큰 상관성을 보였다. 또 일강수량은 댐 유입량과는 1일의 지연시간에 대해 가장 높은 0.758의 상관성을 보여 강수가 직접적으로 빠르게 댐 유입수량에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 즉 물은 강수와 연동하여 빠른 시간 내에 유하하여 댐의 유입수량에 영향을 미치지만 탁수는 고형물질이 이동하는 것이므로 물보다는 지연시간이 길다는 것을 알 수 있다. 한편 일강수량과 댐 수위도 비교적 의미있는 상관성을 보였다. 지연시간 50일에 대하여 0.203의 상관계수를 보였으며 상당기간 동안 유의미한 상관계수를 유지함으로써 강수가 지속적으로 댐 수위에 영향을 줄 수 있다.

Fig. 8은 댐 유입수량, 탁도 및 댐 저수위의 시계열적 상관관계를 보여준다. 댐 유입수량은 탁도와 22일의 지연시간에 대하여 0.365의 비교적 높은 상관성을 보였다. 유입수량과 댐 수위는 지연시간 13일에 대하여 최고 0.263의 상관관계를 보였다. 동일 유입수량 인자에 대하여 탁도와 댐 수위의 최고 상관계수를 보이는 지연시간의 차이는 물의 유동속도와 물속을 이동하는 고형물질의 속도 차이로 이해할 수 있다. 한편 댐 저수위와 탁도는 4일의 짧은 지연시간에 대하여 최고 0.598의 높은 상관관계를 보

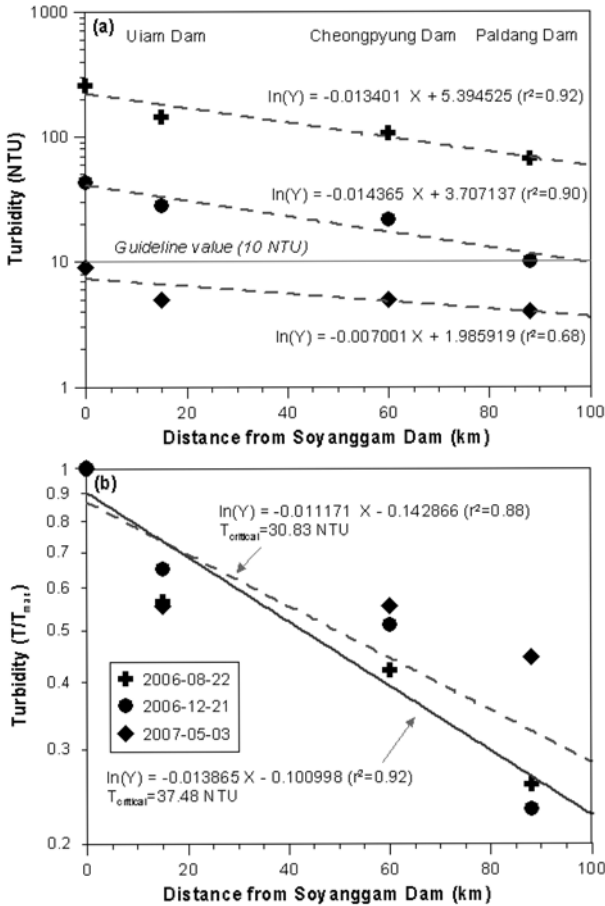


Fig. 9. Change in water turbidity versus distance from the Soyanggang Dam. Turbidity data are from K-Water.

였다. 댐 저수위는 강수가 하천을 따라 이동한 결과로 상승하므로 이는 곧 고형물질(혹은 부유물질)의 도달을 의미하여 깊은 상관관계를 보인 것으로 사료된다.

3.3. 탁도저감 분석

상기한 비와 같이 소양강댐의 탁수는 하류 청평댐과 취수원이 있는 팔당댐에 영향을 준다. 2006년과 2007년 탁수현상 발생 시 측정된 소양강댐(0 km), 청평댐(60 km), 팔당댐(88 km)의 탁도 자료(2006년 8월, 2006년 12월, 2007년 5월)를 이용하여 탁도의 유하거리에 따른 저감을 분석하였다(Fig. 9a). 산술적 유하거리에 따라 탁도는 지수적으로 감소하는 것으로 나타났다. 특히 탁수현상이 진행 중인 두 경우(2006년 8월과 2006년 12월)의 지수적 감소 현상은 탁월하다(각각 0.92 및 0.90의 결정계수). 세 가지 경우에 대하여 최고 탁도로 나누어 표준화(standardized)한 탁도(T/T_{max})를 거리에 대하여 도시하여 하나의 대표 탁도감소 곡선을 작성하였다(Fig. 9b). 이 결과 취수원인 팔

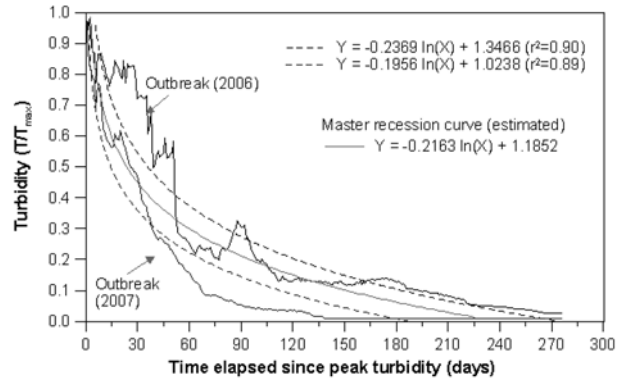


Fig. 10. Estimation of a master recession curve for water turbidity using two outbreaks in 2006 and 2007.

당댐에 탁수가 도달하지 않기 위해서는 소양강댐에서 최대 31 NTU 이하를 유지하여야 하는 것으로 추정되었다. 또 탁수현상이 발생하지 않은 2007년 5월의 자료를 제외한다면 소양강댐에서 최대 38 NTU 이하로 유지하여야만 팔당댐에 탁수가 도달하지 않을 것으로 사료된다.

한편 2006년에는 탁수지속기간이 285일이었고 2007년에는 73일 이었다. 두 번의 탁수현상 발생(outbreak)에 대하여 최고 탁도로부터 탁도 지속기간의 감쇠곡선을 도시하였다(Fig. 10). 이를 위해 최고농도로 관측 탁도를 나누어 표준화하였다. 표준화 탁도(standardized turbidity)는 경과시간에 대하여 대수적으로(logarithmically) 감소하는 것으로 나타났다. 또 두 번의 탁수기간을 통합하는 대표 감쇠곡선을 제시하였다($Y=-0.2163 \ln(X)+1.1852$, Y: 표준화 탁도, X는 경과시간(일)). 이를 통해 향후 최고농도를 알 경우 일정 오차 범위 내에서 탁수가 얼마나 지속될 것인지를 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 소양강 유역에서 발생하는 탁수현상을 이해하기 위하여 2008년 6월~2008년 8월에 관측한 소양강 댐물의 탁도, 댐 저수위, 댐 유입수량 및 일 강수량을 분석하였다. 자기상관 분석결과 댐 유입수량과 일 강수량은 임의의 함수의 성격을 보였고 댐 저수위와 탁도는 자기상관성이 매우 큰 것으로 나타났다. 한편 탁도는 강수와 일정지연 시간을 두고 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났으며 또 댐 수위와는 매우 큰 상관관계를 보였다. 거리에 따른 탁도의 분석 결과에 의하면 팔당댐에 탁수가 도달하지 않기 위해서는 소양강댐에서 최대 31~38 NTU 이하로 유지시켜야 하는 것으로 추정되었다. 또 2006년과 2007년 두 번의 탁수지속기간 자료를 분석한 결과 탁도는

시간에 대하여 대수적으로 감소하는 것으로 나타났으며 최고 탁도를 알 경우 탁수지속기간을 예측하는 대표 감쇠 곡선을 제시하였다.

사 사

본 연구에 사용한 수문자료는 한국수자원공사 소양강댐 관리단이 관측한 자료이며 이에 감사드립니다. 본 논문을 심사하고 좋은 수정의견을 주신 익명의 심사위원님과 강원대 박유철 교수님께 감사드립니다. 이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-313-C00772).

참 고 문 헌

김범철, 2007, 소양강 탁수발생 실태와 환경생태학적 영향, 워터저널, 파트 1.

김복혜, 이나경, 정대교, 노진환, 이진용, 최현영, 목종구, 2007, 소양강 탁수의 퇴적물 및 부유물질에 관한 광물 및 퇴적학적 연구, 2007 춘천물포럼, 강원대학교, p. 725-736.

류찬희, 2007, 맑은 물 밝은 세상 (3) 비점오염원을 막아라. 서울신문 2007년 4월 16일자.

정대교, 정희만, 2006, 소양강댐 건설 이후 소양호 저층퇴적물의 퇴적상 변화와 이의 환경퇴적학적 영향, 지질학회지, **42**, 199-234.

한국수자원공사, 2007, 탁수 현황 및 대책, 소양강댐관리단 홈페이지(soyang.kwater.or.kr), Accessed at 25 August, 2007.

Angelini, P., 1997, Correlation and spectral analysis of two hydrogeological systems in Central Italy. *Hydrol. Sci. J.*, **42**(3), 425-439.

Larocque, M., Mangin, A., Razack, M., and Banton, O., 1998, Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a karst aquifer (Charente, France). *J. Hydrol.*, **205**, 217-231.

Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2000, Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system. *J. Hydrol.*, **229**, 190-201.