

## 섬진강의 유량변화 통계 검정

### Statistical Tests for the Flow Change in Sumjin River

이 광 만\* / 윤 라 영\*\* / 이 승 윤\*\*\*

Lee, Gwang Man / Yun, La Young / Lee, Seung Yoon

#### Abstract

An understanding of temporal trends of stream flows can help in the river management and the water resources planning for natural circumstances and human communities. Changes in temperature, precipitation, flow, and land use (agriculture, flood prevention activities, reservoir operation, interbasin diversion, etc.) are all eventually reflected in the flow pattern of the river. An assumption that the stationarity of the hydrologic series implying time-invariant characteristics of the time series accepted in water structure designs can no longer be valid if the flow changes as a result of the climate change or the stream flow use. Therefore, the identification and description of the characteristics of changes in hydrologic time series is a very important task in the river basin management. In this study, the statistical tests on the flow change forced by excess water diversions in the Sumjin River basin were performed by ways of single variable and time series variable comparisons. The tests showed that currently the Sumjin River basin statistically keeps its homogeneity in annual streamflow series, but the changed situation has been appeared in dry season streamflow series.

**keywords** : statistical test, time series, flow change, water diversion

#### 요 지

하천유량의 시간적 추세에 대한 이해는 자연환경이나 인간사회를 위한 하천관리 및 수자원계획에 도움을 줄 수 있다. 일반적으로 기온, 강수, 유량 그리고 농업, 홍수방지활동, 저수지 및 유역간의 물이동 등과 같은 하천의 이용은 결과적으로 하천의 흐름에 반영되게 된다. 수자원 시설물 설계에서 받아들여지는 시계열 상에서 수문기상학적 특성이 불변하다는 가정은 기후변화나 하천교란에 의해 더 이상 타당하지 않을 수 있다. 그러므로 수문시계열에서 변화 특성을 검증하고 기술하는 것은 하천관리에 있어 매우 중요한 과제이다. 본 연구에서는 섬진강에서 인위적 유량교란에 의한 유량 변동성 검정을 통계해석에 기반을 둔 단일변수와 집단변수, 그리고 시계열 분석방법으로 구분하여 수행하였다. 검정 결과, 현재 섬진강 수계의 연 유량계열은 동질성을 유지하고 있으나 갈수기 유량계열에서는 변동성이 나타났다.

**핵심용어** : 통계검정, 시계열, 유량변화, 유역변경

\* 한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원

Team Director, KIWE, Kwater, 462-1 Jeonmin-dong, Yuseung-gu, Daejeon, 305-730, Korea  
(e-mail: lkm@kwater.or.kr)

\*\* 교신저자, 한국수자원공사 수자원연구원 연구원

Researcher, KIWE, Kwater, 462-1 Jeonmin-dong, Yuseung-gu, Daejeon, 305-730, Korea  
(e-mail: lyun@kwater.or.kr)

\*\*\* 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원

Researcher, KIWE, Kwater, 462-1 Jeonmin-dong, Yuseung-gu, Daejeon, 305-730, Korea  
(e-mail: behappy777kr@hotmail.com)

## 1. 서 론

일반적으로 관측된 과거 수문기상자료는 수자원 사업을 계획하고 설계할 때 매우 중요한 역할을 한다. 대부분의 수자원 사업에서는 수문기상특성을 시계열 상에서 변동성이 없는 변수로 가정하여 설계한다. 그러나 이와 같은 가정은 더 이상 타당하지 않을 수도 있다. 이의 원인으로는 자연적인 것과 인위적인 것이 있는데 최근에 많이 강조되고 있는 지구온난화에 의한 수문기상의 변화나 유역의 도수에 의한 하천수의 감소 등이다. 어느 경우나 우려할 점이 있으며 경우에 따라서는 매우 심각한 문제로 나타날 수도 있다. 오랫동안 수문학자들에 의해 불변적이며 독립적이고 무작위적 현상으로 간주되었던 홍수사상에 대해서도 추세변화의 증거가 제시되고 있다(Lins and Slack, 1999; Jain and Lall, 2000).

하천유량의 변동성에 대해서는 지구온난화나 엘니뇨 등 특수 기상에 대한 검정이 다양하게 연구되었는데 주로 기상변화를 가정한 수문기상특성의 변화를 밝히는 것이었다. 예를 들면 Zhu and Day(2005)는 Mann-Kendall 검증을 통하여 펜실베이니아를 흐르는 47개 하천의 유량 변동성을 조사하였다. 또한 유량변동에 대한 비매개변수 검정 방법으로는 Kahya and Kalayci(2004)가 터키의 26개 유역을 대상으로 Sen's T, Spearman's Rho, Mann-Kendall 그리고 Seasonal Kendall 검증을 시도하였다. 유사한 방법으로 Novotny and Stefan(2006)은 미네소타에 있는 5개의 대하천을 대상으로 기초통계분석과 비매개변수법을 이용하여 기상변화에 대한 지표를 연구한바 있다.

우리나라에서는 아직까지 수문기상학적 변화에 대한 명확한 증거가 제시되지 않고 있으나 집중호우나 강수일수의 감소, 짧은 봄과 가을은 지구온난화의 영향에 의한 것이라는 추측이 일부 있는 것도 사실이다. 국내의 수문 변동성에 대한 연구는 기상변화와 수리시설물에 의한 영향을 분석한 것이 주류를 이룬다. 김태균 등(2002)은 금강유역을 대상으로 대청댐 건설에 따른 유량의 변화를 분석하고 연 초과치 계열에 대한 빈도분석을 통하여 댐의 이수와 치수효과를 분석하였다. 김태웅 등(2004)은 기후변화의 영향이 유역의 물 순환에 미치는 영향을 대청댐 유역을 대상으로 분석하였으며, 안재현 등(2001)도 대청댐 유역을 대상으로 지구온난화에 의한 수문환경변화에 대한 연구를 수행하였다.

그러나 우리나라와 같이 하천수의 이용률이 높은 곳에서는 자연변화에 의한 변동성보다 인위적 변화가 더욱 심할 수 있는데 이에 대한 평가 사례는 극히 적은 편이다. 특히 하천에 대규모 수자원 시설물이 들어설

경우 유량의 변화에 영향을 미칠 수 있으며 시설 전후의 상황을 크게 변화시킬 수도 있다. 대체로 수문통계학적 입장에서는 장기간의 수문계열은 큰 변화를 보이지 않으나 유역의 도수와 같이 짧은 시간 내에 대규모 인위적 행위는 보다 큰 변화를 보여줄 수 있는데 수리권이나 물이용과 관련된 분쟁의 원인이 되기도 한다. 하천유량의 급격한 증가나 감소는 어류생태환경을 변화시키고 이로 인해 직·간접적으로 자연생태 뿐만 아니라 이를 토대로 살아가는 지역사회에도 영향을 미칠 수 있다. 실제 Letcher *et al.*(2001)은 토지이용과 농업용댐 개발로 인한 하천유량의 변화에 따른 사회·경제적 영향을 분석한바 있다.

따라서 유량변동에 대한 정확한 판단은 하천수의 이용이나 하천생태환경보전 및 하천관리에 매우 중요한 자료로 활용될 수 있다. 근래 섬진강 하류부에서 나타나고 있는 하상저하 및 염수침입은 골재채취나 광양만 준설 등 하천에 직접적으로 가해진 원인과 유역의 도수로 인한 유량감소에 기인한다는 주장이 제기되고 있다. 광양3단계 환경영향평가 보고서(한국수자원공사, 2005)에 따르면 실제 섬진강 수계의 경우 보성강댐이나 섬진강댐에서 대량의 유역외 도수가 오래전부터 있어왔고 90년대 초반에는 주암댐이 건설되어 유량변화의 원인으로 지목되고 있다. 본 연구에서는 섬진강 하류에서 나타나고 있는 염분농도의 증가와 하상저하의 원인중 하나로 제기되고 있는 유량감소에 대한 판단을 위해 통계적 방법을 이용한 유량 변동에 대한 검정을 통하여 변화의 유·무를 검정하고자 하였다. 분석방법은 단일변수, 집단변수 그리고 시계열 비교법을 이용하고 매개변수 검정(parametric test)과 비매개변수 검정(nonparametric test)을 실시하였다. 비교시점은 유량감소의 원인을 제공했다는 주암댐 건설시점을 기준으로 전과 후로 나누어 대비하였다.

## 2. 유량 변동성 검정 방법

관측된 수문자료는 물리적 법칙으로 적절히 설명할 수 없는 영향을 받고 있는데, 수문변수를 설명하거나 예측하는데 있어 어려움은 대개 다음과 같은 이유에 기인한다. 우선 강우와 같은 주도적인 변수의 내재적 무작위성과 지형, 지하수나 토양의 상태 등 수문시스템의 무작위성이고, 다음은 측정자료의 오류로서 여기에는 유량 등 관측 자체에서 발생하는 오류와 강우 등과 같이 표본의 한계에 따른 오류 등이 있다. 또 다른 하나는 현상에 대한 그릇된 이해에 따른 오류로써 표본조사에 의한 오류가 없다 할지라도 시스템 해석에서 입력과 결

과에서 발생하는 인위적 오류 등이 언제든지 개입될 수 있다는 것이다.

섬진강 유역과 같이 유량이 감소하여 하류부에서 하상저하와 염분농도가 증가하였다는 주장에 대해 이를 기술적으로 판단하기 위해서는 여러 가지 조사와 검증이 요구되나 수문통계학적 관점에서 유량변화가 발생하였는지에 대한 검토 역시 위와 같은 이유로 불확실성이 내재될 수밖에 없다. 그러나 수문순환과정을 정의하는데 있어 발생할 수 있는 오류는 덮어두고 현재까지 조사된 자료에 타당성을 부여하고 문제에 대한 답을 찾는 것이 보다 현실적인 대안이 될 수 있을 것이다. 왜냐하면 아무리 좋은 해법을 동원한다 해도 수문변수가 가지고 있는 내재적 특성을 완전히 해석한다는 것은 현재로서는 불가능하기 때문이다.

이와 같은 정보의 한계성을 무시하고 섬진강 수계에서 수자원 시설물에 의한 유역외 도수 등으로 발생한 유량감소가 기존 수문자료 계열에서 완전히 새로운 계열로 바뀌었는지, 그 변동성이 얼마나 큰지, 변동성으로 인해 발생하는 영향의 정도는 얼마나 보는 것이 타당한지 등에 대한 답을 정량적으로 해석하는 것 또한 불가능할 것이다. 그러나 이와 같이 현실적인 어려움이 있다 하더라도 수문변수의 변동성에 대해서는 이론적으로 타당성 있는 통계가설로 증명해 볼 수 있다(Maidment, 1993).

수문변수의 변동성에 대한 검정은 단일변수(single variable)와 집단변수(group)로 구분되며, 집단변수는 쌍(pair)과 다중집단(multi group)으로 구분할 수 있다. 단일변수에 대한 검증은 주로 통계치, 도식해 및 변량도표 등과 매개변수와 비매개변수를 이용하는 가설검정이 있다. 집단변수에 대한 비교방법 중 여러 개의 독립된 자료계열이나 독립적으로 구분이 가능할 경우 Rank-Sum Test나 Two-sample t Test 등을 이용할

수 있다. 또한 수문시계열 상에서 단일변수의 추세를 평가하는 방법으로는 평균의 이동(mean shift)을 검정하는 t-Test나 Mann-Whitney Test가 있다.

본 연구에서는 섬진강 하류의 유량 변동성을 보다 정확하고 종합적인 판단이 가능하도록 Table 1과 같이 다양한 분석방법을 적용하였다. 변동성 평가를 위한 시계열 상에서의 유량변동 구분은 섬진강에서의 유량감소 문제를 고려하여 주암댐이 건설되어 있는 보성강의 유량에 영향을 받는 송정수위표 지점을 기준으로 평가하였다.

### 3. 유역현황

#### 3.1 유역특성

섬진강 유역은 우리나라 5대강 유역의 하나로서 우리나라 남부지역중 중서부에 위치하고 있으며 북에서 남으로 흐르는 하천으로서 유역면적은 4,896.5km<sup>2</sup>, 유로연장이 212.3km에 달한다. 행정구역으로는 전라남도, 전라북도, 경상남도를 포함하고 있으며, 전체 유역면적 중 전라북도가 44%, 전라남도가 47%, 경상남도가 9%를 차지하고, 해당 행정구역은 3도 4시 11군 9읍 93면을 포함하고 있다. 상류부의 하천연안과 계곡에 소규모의 농지가 산재해 있고, 중류부의 남원, 구례 및 곡성 일대에 평야가 약간 발달되어 있을 뿐 타 유역에 비해 평지의 발달이 적은 유역이다. 또한 섬진강댐, 주암댐, 보성강댐 및 동복댐 등이 위치하여 홍수를 조절하고 각종 용수를 유역외로 공급하고 있다(Fig. 1)(건설교통부/한국수자원공사, 2006).

유역의 기후는 섬진강이 남해안 중앙부에 위치한 이유로 춘하추동이 현저하게 구분되며, 여름인 7월부터 9월까지의 습한 해안성기후로 고온다습하며 겨울에는 대륙성 기후의 영향을 받아 한랭건조하고 하류는 남해안

Table 1. Applied Methods for Testing the Flow Change in Sumjin River

Testing Objectives	Testing Methods	Contents of Analysis
1) Flow Duration Curve	Duration Curve	Daily Flow Probabilistic Analysis
2) Annual Flow Change	Moving Average	Trend Analysis of Annual Flow
3) Flow Homogeneity between After-Juam and Before-Juam	Two-Sample t Test	Homogeneity and Consistency Analysis of Hydrologic Time Series
	Rank-Sum Test	
4) Mean Shift(Jump) between After-Juam and Before-Juam	Mean Shift t-test	Mean Moving test of Separated Hydrologic Time Series by Using Means and Standard Deviations
	Mann-Whitney Test for Shift	Mean Moving of Two Hydrologic Time Series by Rank of Flow Magnitude

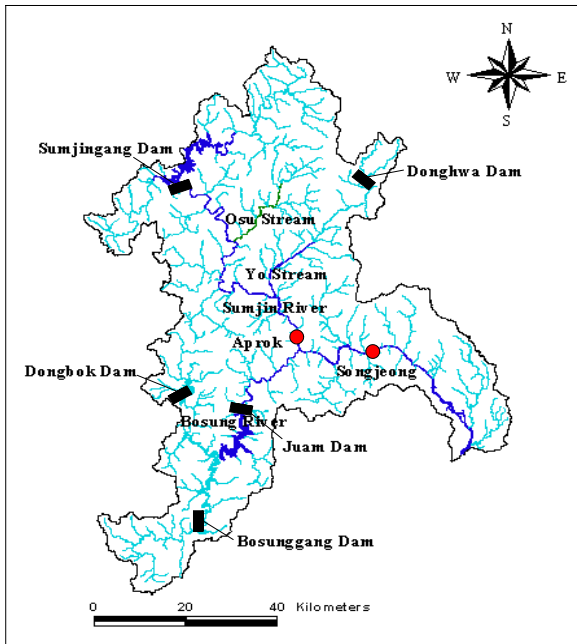


Fig. 1. Map of the Sumjin River Basin

에 접하고 있으므로 상류부보다 기온이 높다. 연평균 강수량은 1,385.2mm로서 우리나라의 연평균 강수량인 1,274mm보다 111.2mm가 많은 편이며, 섬진강 하구 지역은 우리나라 최다우지 중 하나이다. 강우의 계절적 분포는 6월에서 9월 사이에 연간 강우량 60~70%가 발생한다. 최고기온은 순천 관측소에서 기록한 1994년 7월 24일에 기록된 39.4°C이며, 최저기온은 장수 관측소에서 기록한 1991년 2월 23일의 -25.7°C이다. 년 평균기온은 10.4°C~12.5°C로 지역간 큰 기온차는 없다.

### 3.2 유출 특성

섬진강의 유출자료는 적성, 압록 및 송정수위표 지점의 자료가 이용 가능하다. 본 연구에서는 유역 전체를 대상으로 한 유량변화에 대한 판단이 목적이므로 주암댐이 위치하고 있는 보성강을 기준으로 통계분석 대상

수위표를 선정하였다. 분석 대상지점은 압록과 송정수위표 지점인데 압록수위표 지점은 보성강과 섬진강 본류가 만나는 지점의 직상류에 위치하고 있어 주암댐의 영향을 받지 않는 곳이며, 송정수위표 지점은 보성강과 합류지점에서 하류로 40.3km 지점에 위치해 주암댐의 영향을 받고 있으므로 본 연구의 유량변화에 대한 비교·분석에 가장 부합하는 수문정보를 제공할 수 있는 지점이라 할 수 있다.

우선 이들 두 지점의 수문통계분석에 앞서 전반적인 유황을 판단하기 위해서 Figs. 2 and 3에 압록 및 송정수위표 지점의 월 유량을 도시하였다. 현재 검증된 두 지점에서 이용 가능한 유량자료는 1966년부터 2001년까지이며, 이 기간 동안 외견상으로는 유량변화의 추세를 발견하기 어려웠다. 또한 두 지점의 월 유량에 대한 기초 통계치는 Table 2와 같고 정규분포에 비하여 우측으로 편향된 분포를 보이며 이는 우리나라 하천의 유출특성과 비슷한 경향을 나타낸다.

섬진강 수계에서 대표적 유량변동 원인이라 할 수 있는 물이용 현황은 Table 3과 같다. 섬진강에서는 일찍이 1937년부터 보성강댐이 건설되어 연간 1.8억m<sup>3</sup>이 유역외로 수력발전을 위해 도수되고 있으며, 1966년부터는 섬진강댐에서 동진강 유역으로 연간 4.6억m<sup>3</sup> 이상의 물이 수력발전과 농업용수공급을 위해 유역 변경되고 있다. 또한 1971년부터는 보성강 수계에 동북댐이 건설되어 광주권으로 용수공급되고 있으며, 1991년부터는 주암댐이 운영에 들어가 광주, 순천 및 여수 등에 생활용수와 공업용수를 공급하기 위해 유역외 도수가 이루어지고 있다. 하류 다압지점에서는 적은 양이기는 하나 포항제철에 용수공급을 위한 취수가 이루어지고 있다. 섬진강 수계의 전체적인 용수공급 상황은 11억m<sup>3</sup>를 넘고 있어 전체 유출의 20%정도가 유역외로 도수되고 있는 실정이다.

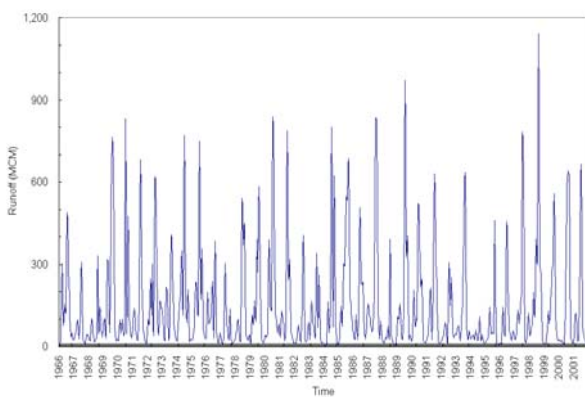


Fig. 2. Monthly Flow Series at Aprok

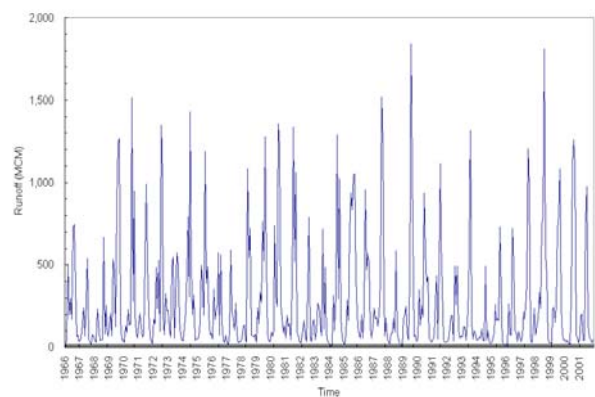


Fig. 3. Monthly Flow Series at Songjeong

Table 2. Statistical Characteristics of Monthly Flows at Aproj and Songjeong

Class	Aproj Gauging Station(106m <sup>3</sup> )					Songjeong Gauging Station(106m <sup>3</sup> )				
	Max.	Min.	Mean	S.D.	Skw.	Max.	Min.	Mean	S.D.	Skw.
Jan.	134.8	3.1	40.7	32.6	1.708	216.9	5.4	63.7	52.9	1.758
Feb.	200.1	4.7	61.9	47.7	1.145	354.9	7.9	100.2	83.7	1.344
Mar.	277.6	8.4	84.1	55.2	1.681	480.6	14.1	149.5	100.4	1.666
Apr.	370.2	13.9	109.0	85.8	1.304	717.1	24.7	216.1	167.1	1.133
May	319.8	10.8	93.8	83.3	1.473	763.5	20.4	199.6	173.4	1.660
Jun.	536.8	15.6	168.7	144.4	1.094	1085.6	33.6	339.8	289.7	1.088
Jul.	921.3	9.8	423.8	266.5	0.057	1792.3	21.4	789.5	482.7	0.255
Aug.	1127.2	35.5	341.9	246.8	1.081	1795.9	57.7	662.0	409.2	0.589
Sep.	690.1	17.1	230.1	198.6	0.946	1264.1	34.4	419.4	360.9	0.882
Oct.	277.0	11.5	74.1	64.2	1.599	451.2	21.0	120.9	103.3	1.817
Nov.	163.6	8.7	46.5	31.6	2.162	322.2	16.9	78.4	56.8	2.605
Dec.	136.1	4.1	40.0	27.7	1.710	214.9	9.7	64.7	46.5	1.950
Year	2986.9	311.5	1714.6	686.7	-0.037	5784.7	961.9	3204.0	1247.1	0.120

Table 3. Interbasin Water Diversions from Sumjin River Basin

Class	Period(year)				
	1937	1965	1971	1976	1991
Bosunggang Dam	178 million m <sup>3</sup> /year				
Sumjingang Dam	460 million m <sup>3</sup> /year				
Dongbok Dam	92 million m <sup>3</sup> /year				
Daap Intake Station	21 million m <sup>3</sup> /year				
Juam Dam	381 million m <sup>3</sup> /year				

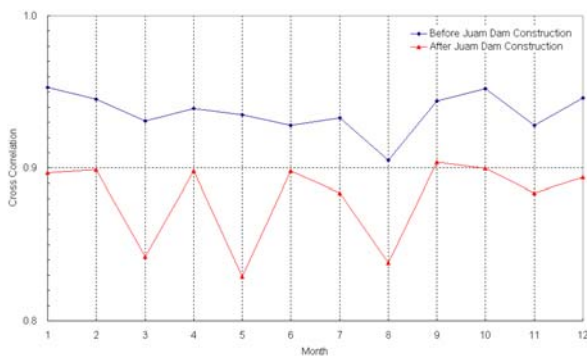


Fig. 4. Cross Correlation between Aproj and Songjeong

한편 압록과 송정수위표 두 지점간 월 유량의 상호 상관계수는 높게 나타나고 있는데 주암댐 건설전은 거의 95% 수준이다. 이는 분석자료가 1966년부터 이용 가능하여 이미 삼진강댐 및 보성강댐의 유역의 도수가 반영되었고 주암댐 건설전이라 높은 상관성을 보이는 것으로 판단된다. 그러나 주암댐 건설이후는 83~90%

수준으로 건설 전보다는 다소 낮은 값을 보여주고 있어 주암댐의 영향이 반영된 것으로 판단된다.

### 3.3 유량변동 시점 유추

삼진강 수계에서 유량변동시점을 유추하기 위하여 편차누적곡선을 이용하였다. 편차누적곡선은 이상기후나 인위적 교란에 의한 수문자료의 변동시점을 구분할 수 있는데 수문학적인 불균일성을 특정짓기 위하여 주어진 시계열 기간 동안 평균편차비를 누적시킴으로서 장기간의 수문변수 변동추세를 도식을 통하여 분석할 수 있다.

$$\phi = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{\bar{Q}} \quad (1)$$

$$\phi' = \frac{\sum_{i=1}^{12} Q_i - \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})}{\sum_{i=1}^{12} Q_i} \quad (2)$$

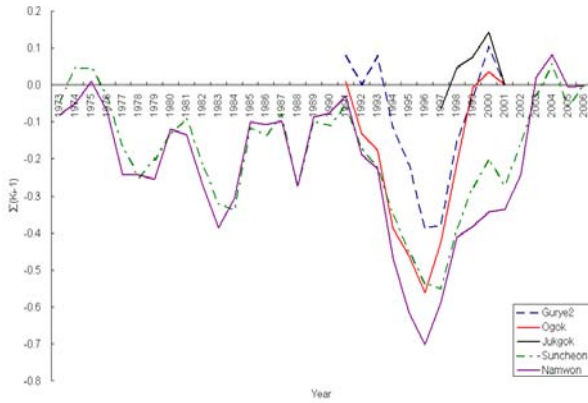


Fig. 5. Nonuniform Parameter of Rainfall

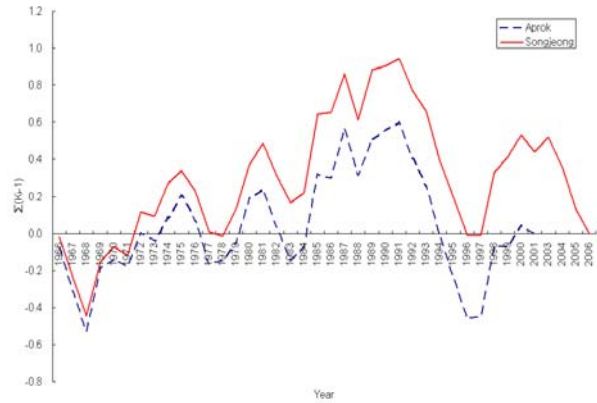


Fig. 6. Nonuniform Parameter of Runoff

여기서,  $\phi$ 는 연유출의 불균일계수,  $\phi'$ 는 연기본유출계수,  $Q_{max}$  연중최대유량,  $Q_{min}$  연중최소유량,  $\bar{Q}$ 는 연평균유량,  $Q_i$ 는 월평균유량 그리고  $n$ 는  $Q_i < \bar{Q}$ 인 개월수이다. 따라서 유량의 연불균일계수는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$1 - \phi' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{12} Q_i - \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})}{\sum_{i=1}^{12} Q_i} \quad (3)$$

$$\sum \left( \frac{\phi_i}{\phi} - 1 \right) = \sum (K_i - 1) = f(t) \quad (4)$$

$$\sum \left( \frac{\phi'_i}{\phi} - 1 \right) = \sum (K'_i - 1) = f(t) \quad (5)$$

위의 식을 이용하여 유량변동 시작시점을 유추하기 위하여 불균일계수를 송정과 압록수위표 지점을 중심으로 강우와 유량자료에 대하여 적용하여 정성적으로 평가하였다. 우선 강수량 및 유량의 상관성 및 변동성을

파악하기 위해 삼진강수계내 인근 관측소의 강수량을 이용한 변동경향은 Fig. 5에 도시하였으며, Fig. 6에는 유량의 불균일계수를 도시하였다. 결과는 1991년을 기준으로 강우는 1996년까지 감소하다 이후 회복되는 추세를 보이나 유량은 1996년까지 급속히 감소하고 이후에도 회복정도가 강우에 비해 낮은 것으로 나타났다. 따라서 우연의 일치인지는 모르나 삼진강 수계에서 유량변동 기준시점을 주암댐이 완성된 1991년으로 정하고 이후 유량자료계열 구분에 적용하였다.

## 4. 유량의 변동성 평가

### 4.1 단일변수 통계 검정

단일변수에 대한 유량의 변동성 분석은 주로 도식적 방법이 많이 이용된다. 이미 삼진강 지역의 유출특성은 앞 장에서 분석한 바와 같으며 압록과 송정수위표 지점의 유황분석 결과는 Figs. 7 and 8과 같다. 주암댐 건설 전과 후를 비교분석해 보면 댐 건설 전에 비해 후가 풍수량, 평수량, 저수량 및 갈수량 모두 적게 나타났으며 약 10~15% 정도의 감소가 감지되었다. 압록과 송정의

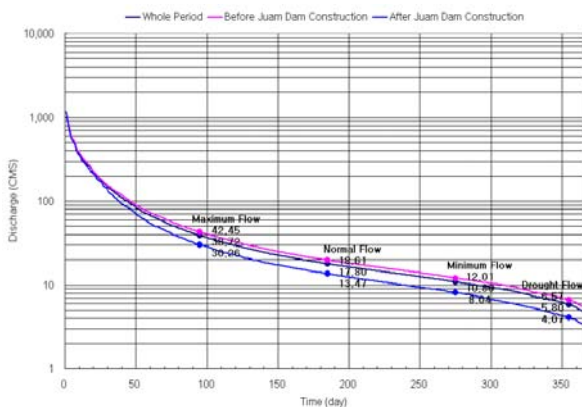


Fig. 7. Flow Duration Curve at Apok

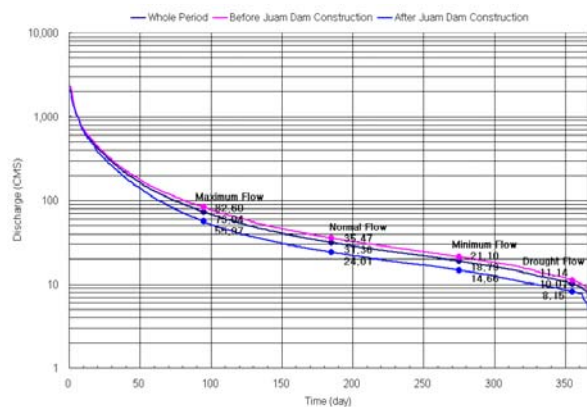


Fig. 8. Flow Duration Curve at Songjeong

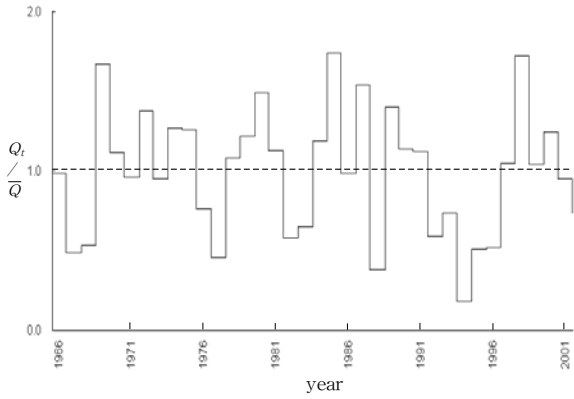


Fig. 9.  $Q_t/\bar{Q}$  Series at Aproz

유황곡선은 거의 같은 분포를 보여주고 있는데 주암댐 건설 후 1990년대 초중반의 장기 가뭄으로 인한 유황저하와 일부 유역의 도수로 인한 영향으로 판단된다. 즉, 동북댐과 주암댐에서 유입량의 많은 양이 유역변경으로 인하여 하류 저수량의 감소에 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

한편 연 유량의 변동성에 대한 시각적 판단을 위하여 연 유량자료계열에 대한  $Q_t/\bar{Q}$ (t년의 유량/연평균유량)을 살펴보면 Figs. 9 and 10과 같다.

두 지점 모두 주암댐 건설 전과 후의  $Q_t/\bar{Q}$ 의 변화는 거의 같은 추세를 보이고 있다. 이는 평균유량을 기준으로 다운년과 가뭄년의 분포를 비교한 것으로 값이 1보다 큰 경우와 작은 경우가 거의 같은 수로 나타나고 있어 두 지점간의 유황특성이 같음을 알 수 있다.

#### 4.2 집단(독립)변수 통계 검정

집단(독립)변수 해석방법에는 유황계열의 동질성 분석이 매우 유용하게 이용된다. 이 방법은 집단(독립)변수 계열에서 중간에 인위적 영향이 작용했을 경우, 전과 후의 계열로 나누어 동질성의 훼손을 평가하는 것이다. 일반적으로 여러 가지 매개변수와 비매개변수 검정 방법은 평균과 분산을 이용하여 시계열자료의 통계적 특성 내에서 자료계열의 변화를 평가하고 결정할 수 있다. 이 방법 역시 비교가 가능하도록 압록과 송정수위표 지점에 대하여 1991년 전·후로 구분하여 월별 유황계열에 대한 Two-Sample t Test를 실시하였으며 계산 방법은, 두 집단의 자료의 표본평균과 표준편차(표본 크기가  $n$ 인 첫 번째 집단의  $\bar{x}$ ,  $s_x$ 와  $y$ 는 표본의 크기가  $m$ 인 두 번째 집단의  $\bar{y}$ ,  $s_y$ )를 각각 계산하고, 자유도를 계산한 후(만약 귀무가설  $s_x = s_y$ 이 기각되지 않으면  $df = n + m - 2$ 이고 표준편차가 큰 차이를 나타내면 다음의 공식을 이용해 자유도를 구한다.), 검정통계

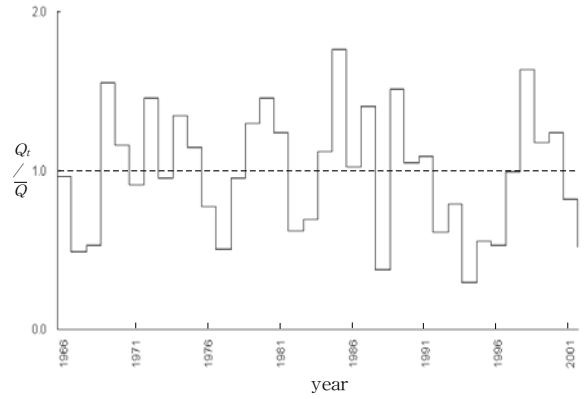


Fig. 10.  $Q_t/\bar{Q}$  Series at Songjeon

량  $t$ 를 계산하여,  $|t| > t_{1-\alpha/2, df}$ 이면  $H_0$ 은 기각된다.

$$df = \frac{\left( \frac{s_x^2}{n} + \frac{s_y^2}{m} \right)^2}{\frac{(s_x^2/n)^2}{n-1} + \frac{(s_y^2/m)^2}{m-1}} \quad (6)$$

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s_x^2}{n} + \frac{s_y^2}{m}}} \quad (7)$$

Two-Sample t Test의 결과는 Table 4와 같다. 분석 결과를 살펴보면 1991년 이전과 후의 계열은 두 지점 모두에서 일부 갈수기의 경우에 95%신뢰구간에서 귀무가설이 기각되었다. 이는 상대적으로 유출량이 적은 갈수기에 주암댐 건설로 인한 유량의 변동성이 크게 나타난 결과로 판단되어 계절적으로는 유황계열의 동질성이 유지되지 못하고 있는 것을 알 수 있다.

또한, 두 독립된 집단의 비교 검정은 하나의 집단이 다른 하나의 집단보다 더 큰 값을 포함하는지를 알아보기 위해 수행된다. 이 방법으로는 Rank-Sum Test가 있다. Rank-Sum Test의 귀무가설  $H_0$ 은 두 집단이 동일한 분포이다. 대립가설  $H_1$ 은 하나의 집단이 다른 집단보다 더 큰 관측치를 나타내는 경향이 있다. Rank-Sum Test의 계산 과정은, 우선 모든 자료를 1(최소)부터  $N$ (최대)까지의 순위로 정렬시킨다. 여기서  $N = n + m$ 이다( $n$ 은 두 표본 중에서 작은 표본의 수이고  $m$ 은 큰 표본의 수; 자료의 수가 같을 때에는 그 값에 해당하는 순위의 평균). 그런 다음 작은 집단의 관측수  $n$ 의 순위의 합인 검정통계량  $W$ 를 계산하고, 표본 크기에 대해서 가설  $H_0$ 하의  $W$ 의 이론 평균과 표준편차를 다음과 같이 계산하며, 검정통계량  $Z_{rs}$ 의 표준형을 계산한다. 이때  $|Z_{rs}| > Z_{1-\alpha/2}$ 이면  $H_0$ 은 기각된다.

Table 4. Results of Two-Sample t Test for Aproj and Songjeong

Month	Aproj Gauging Station(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )									Songjeong Gauging Station(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )								
	Before-Juam			After-Juam			df	t	Remark	Before-Juam			After-Juam			df	t	Remark
	Mean	S.D.	Var.	Mean	S.D.	Var.				Mean	S.D.	Var.	Mean	S.D.	Var.			
Jan.	46.9	36.7	1345.2	26.5	13.2	174.3	33	2.4415	Reject	77.6	61.5	3789.3	42	18.9	359.6	31	2.6771	Reject
Feb.	71.5	50.9	2595	40	31.2	975	30	2.2643	Reject	124.3	91.4	8357.7	63.7	48.6	2369.8	37	2.7035	Reject
Mar.	90.7	60.5	3656.2	68.9	39.1	1530.9	29	1.2921	Pass	166.3	109.9	12082.4	127.7	76.3	5829.3	35	1.2873	Pass
Apr.	122.5	90.9	8261.3	78.3	66.7	4447.7	26	1.6312	Pass	260.2	177.3	31465.1	150.8	120.8	14597.5	35	2.2792	Reject
May	112.1	92.7	8586.5	52.3	31.1	966.5	33	2.8832	Reject	247.7	199.1	39641.7	123.9	69.9	4888.9	33	2.8138	Reject
Jun.	163.8	150.7	22708.7	179.9	135.1	18254.8	21	0.3162	Pass	364.7	317.5	100810.9	308.1	246.8	60922.6	33	0.6190	Pass
Jul.	457.7	276.7	76536.1	346.8	235.5	55463.2	22	1.2318	Pass	816.6	496.7	246718.4	771.1	477.7	228201.5	28	0.2812	Pass
Aug.	327.1	217.6	47349.3	375.6	312.7	97797.5	14	0.4670	Pass	648.9	383	146736.2	674.5	478.7	229168.4	22	0.1715	Pass
Sep.	240.4	200.1	40054.5	206.7	202.6	41035	19	0.4616	Pass	448.6	370.3	137131.9	364.3	364.1	132581.9	27	0.6894	Pass
Oct.	77.8	57.1	3266.1	65.8	80.4	6462.2	15	0.4467	Pass	133.4	98.4	9687.4	102.2	115	13229	24	0.8542	Pass
Nov.	52.1	35.4	1256	33.8	15	223.6	34	2.1764	Reject	92	66.3	4395.6	55.6	24.6	608.4	34	2.4537	Reject
Dec.	44.0	28.5	812.3	30.9	24.5	601.4	22	1.3959	Pass	71.7	46.2	2138.9	53.3	47.6	2268.9	26	1.1707	Pass

Table 5. Results of Rank-Sum Test for Aproj and Songjeong

Month	Aproj Gauging Station			Songjeong Gauging Station		
	W	Z <sub>rs</sub>	Remark	W	Z <sub>rs</sub>	Remark
Jan.	159	1.511	Pass	227	2.235	Reject
Feb.	150	1.820	Pass	222	2.375	Reject
Mar.	174	0.996	Pass	258	1.369	Pass
Apr.	156	1.614	Pass	219	2.458	Reject
May	151	1.786	Pass	229	2.179	Reject
Jun.	218	0.481	Pass	290	0.475	Pass
Jul.	166	1.271	Pass	288	0.531	Pass
Aug.	215	0.378	Pass	310	0.056	Pass
Sep.	180	0.790	Pass	282	0.698	Pass
Oct.	162	1.408	Pass	246	1.704	Pass
Nov.	162	1.408	Pass	232	2.095	Reject
Dec.	151	1.786	Pass	233	2.067	Reject

$$\mu = \frac{n(N+1)}{2} \tag{8}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{nm(N+1)}{12}} \tag{9}$$

$$Z_{rs} = \begin{cases} \frac{W-1/2-\mu}{\sigma} & \text{만약 } W > \mu \text{ 이면} \\ 0 & \text{만약 } W = \mu \text{ 이면} \\ \frac{W+1/2-\mu}{\sigma} & \text{만약 } W < \mu \text{ 이면} \end{cases} \tag{10}$$

여기서 Z<sub>1-α/2</sub>는 표준정규확률분포의 1-α/2지점에 해당한다. 압록 및 송정수위표의 검정결과는 Table 5와 같다.

검정통계량 |Z<sub>rs</sub>|은 송정의 경우 일부 갈수기에 신뢰

구간 95%(Z<sub>0.05</sub>=1.96)에서 귀무가설이 기각되었다. 이는 주암댐의 영향이 반영되어 건설전과 후의 유량계열 분포가 동일하지 않음을 나타낸다.

### 4.3 시계열 평균의 이동 검정

평균의 이동 변화에 대한 분석은 Mean Shift t-Test 와 Mann-Whitney Test가 있다. 이 중 Mean Shift t-Test는 Fig. 11과 같이 수문변수 y<sub>t</sub>, t=1, ..., N 이 비상관관계이고 평균 μ와 표준편차 σ이 정규분포인 표본 크기 N의 연속적인 수문계열이라고 할 때 계열을 N<sub>1</sub>+N<sub>2</sub>=N 인 크기 N<sub>1</sub> 과 N<sub>2</sub>의 두 하위계열로 나누고(본 연구에서는 주암댐 건설전과 후), 첫 번째 하위계열 y<sub>t</sub>, t=1, 2, ..., N<sub>1</sub>은 평균 μ<sub>1</sub>과 표준편차 σ을 가지고 두 번째 하위계열 y<sub>t</sub>, t=N<sub>1</sub>+1, N<sub>1</sub>+2, ..., N은 평균 μ<sub>2</sub>



와 표준편차  $\sigma$ 를 가진다고 가정한다. 이때 두 자료계열이 같은 평균을 가진다는 가설  $\mu_1 = \mu_2$ 의 기각은 원 자료계열에서 평균의 변동이 있음을 나타내고 다음과 같이 계산한다.

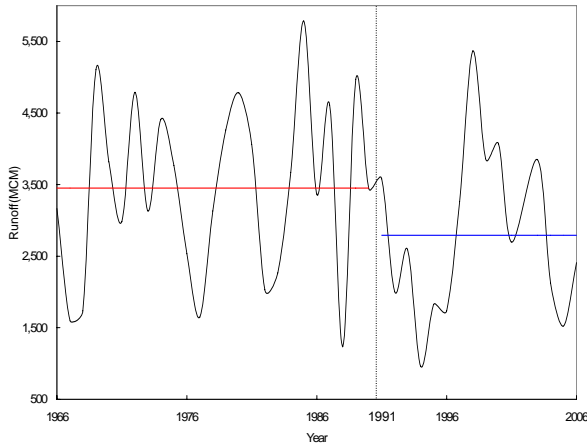


Fig. 11. Conception of Mean Shift(jump) Test

$$T_c = \frac{|\bar{y}_2 - \bar{y}_1|}{S \sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}} \quad (11)$$

$$S = \sqrt{\frac{(N_1 - 1)s_1^2 + (N_2 - 1)s_2^2}{N - 2}} \quad (12)$$

여기서  $\bar{y}_1$  과  $\bar{y}_2$ ,  $s_1^2$  과  $s_2^2$ 는 각각 첫 번째와 두 번째 하위계열의 추정된 평균과 분산이다. 가설은  $T_c > T_{1-\alpha/2, \nu}$  일 때 기각된다. 평균이동에 대한 검정 결

과는 Table 6과 같으며 가설을 만족하므로 주암댐의 건설 전과 후의 유량계열에는 평균의 이동이 없는 것으로 판단할 수 있다.

한편 평균의 변화에 대한 분석 방법 중 하나인 Mann-Whitney Test 역시 Fig. 11과 같이 자료계열  $y_t, t=1, \dots, N$ 은  $N_1 + N_2 = N$ 인 각각  $N_1$ 과  $N_2$  크기의 두 하위계열  $y_1, \dots, y_{N_1}$ 과  $y_{N_1+1}, \dots, y_N$ 으로 나뉜 연속 수문계열이라고 가정하고, 새로운 계열  $z_t, t=1, \dots, N$ 은 원자료  $y_t$ 가 오름차순으로 재배열된 것을 나타낸다. 이는 통계치를 이용함으로써 첫 번째 하위계열의 평균이 두 번째 하위계열의 평균과 같다는 가설로서 검증할 수 있는데 다음과 같이 계산한다.

$$u_c = \frac{\sum_{t=1}^{N_1} R(y_t) - N_1(N_1 + N_2 + 1)/2}{[N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)/12]^{1/2}} \quad (13)$$

여기서  $R(y_t)$ 는 실측  $y_t$ 가 계열  $z_t$ 로 정렬된 순위이다. 두 하위계열의 평균이 동일하다는 가정은  $|u_c| > u_{1-\alpha/2}$  일 경우 기각된다. 검정 결과는 Table 7과 같으며 Mann-Whitney Test 역시 주암댐 건설 전과 후의 자료계열에서 평균의 이동이 없음을 보여주었다.

#### 4.4 검정의 종합 평가

본 연구는 섬진강 수계에서 물이용에 따른 하천의 유량 변화 추세와 변동성을 판단하기 위해 통계분석에 근거한 검정을 시도하였다. 섬진강은 비교적 유역의 도수가 일찍이 이루어져 왔고 그 양도 많은 편에 속한다.

Table 6. Results of Mean Shift t Test for Apruk and Songjeong

Case		Annual Average Flow( $10^6$ m <sup>3</sup> )	S.D	Var.	df	$T_c$	$T_{0.05}$
Apruk	Before-Juam	1806.608	660.323	436026	34	0.0018	1.697
	After-Juam	1505.539	731.374	534909			
Songjeong	Before-Juam	3452.452	1240.537	1538931	38	0.0014	1.684
	After-Juam	2789.892	1183.333	1400276			

Table 7. Results of Mann-Whitney Test for Apruk and Songjeong

Case		Annual Average Flow	S.D.	Var.	df	$ u_c $	$u_{0.05}$
Apruk	Before-Juam	1806.608	660.323	436026	34	1.2535	1.96
	After-Juam	1505.539	731.374	534909			
Songjeong	Before-Juam	3452.452	1240.537	1538931	38	1.4667	1.96
	After-Juam	2789.892	1183.333	1400276			

Table 8. Comprehensive Evaluation on Tests of the Flow Change in Sumjin River

Testing Methods	Interpretations of Results
1) Duration Curve	Recession of Duration Curve after Juam Dam
2) Moving Average	No Significant Variation in Annual Flow Moving Average
3) Two-Sample t Test	Seasonally Non-homogeneity and Non-consistency
4) Rank-Sum Test	Seasonally Non-homogeneity and Non-consistency
5) Mean Shift t-test	No Jump of Mean
6) Mann-Whitney Test for Shift	No Jump of Mean

따라서 하류에서의 유량감소는 예견되는 문제이며 이와 같은 상황이 장기적으로 수문변수의 변동성을 야기하였는지 아니면 자료계열의 동질성과 일관성이 유지되고 있는지에 대한 검증은 향후 하천관리나 수자원 이용의 기준이 될 수 있을 것이다. 이런 측면에서 섬진강 수계의 유량 변동성에 대한 종합판단은 Table 8에 요약되어 있으며 다음과 같다.

유황분석에서는 주암댐 건설 후에 유량이 감소하는 추세를 나타내었고 Two Sample t Test와 Rank-Sum Test에서도 일부 갈수기의 경우 유량계열 분포의 차이를 보였다. 그러나 평균의 이동 검정(Mean Shift t-test와 Mann-Whitney Test for Shift)에서는 평균의 이동이 없는 것으로 나타나 계열의 일관성이 유지되고 있는 것으로 나타났다. 따라서 현재 섬진강 수계에서의 유량계열은 주암댐이 운영되기 시작한 1991년부터 유량 감소가 나타났으며, 특히 갈수기에는 그 변동성이 상대적으로 커 수문계열의 일관성과 동질성이 유지되고 있다고 볼 수 없는 상황이다. 결과적으로 섬진강 수계의 유량변동성은 계절별로는 나타나고 있으나 연계열로는 동질성이 유지되고 있다고 판단할 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 섬진강 수계내에서 주암댐 건설로 인한 하류지역의 유량변화 상황을 판단하기 위하여 유량 자료를 대상으로 시계열 및 통계적 분석을 수행하였다. 분석결과 유량변동시점은 1991년으로 나타났으며 이는 주암댐의 운영시작시점과 일치한다. 유량변동성 분석은 1990년대 초반부터 다년간 강수량이 평년보다 적었으며 이의 영향이 유량에 미쳐 유량감소의 한 요인으로 판단되나 회복도 측면에서는 강우보다 낮은 것으로 나타나 주암댐의 도수로 인한 영향이 일부 작용한 것으로 분석되었다. 통계검정 결과는 계절적으로는 갈수기 유량의 변동이 상대적으로 크게 나타나 1991년을 기준으로 전과 후의 변동성이 존재하는 것으로 평가되었으나 장기 유량계열의 평균 이동은 나타나지 않은 것으로 분석되

었다. 따라서 섬진강 수계에서는 갈수기 유량감소 해소 방안에 대한 대책이 요구되며 장기 유량계열에 대한 지속적인 분석을 통하여 유역의 도수 등 수자원 이용의 합리화를 도모할 필요가 있는 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

건설교통부/한국수자원공사 (2006). 섬진강·영산강 유역조사보고서.

김광천, 배덕효, 최병규, 신희범 (2006). “수자원 계획을 위한 수문요소 변동성 분석.” **한국수자원학회 학술 발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1231-1235.

김병식, 김형수, 서병하, 김남원 (2005). “기후변화에 따른 유역의 수문요소 및 수자원 영향평가.” **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 143-148.

김태균, 윤용남, 안재현 (2002). “댐 건설에 따른 하류 유황의 변화 분석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제6호, pp. 807-816.

김태웅, 이동률, 유철상 (2004). “기후변화에 따른 대청댐 유역의 유출 영향 분석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp. 305-314.

안재현, 유철상, 윤용남 (2001). “GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, pp. 335-345.

최성욱, 윤병만, 우효섭, 조강현 (2004). “댐 건설에 의한 유황 변화에 따른 하류 하도에서 하천지형학적 변화 및 식생피복의 변화 : 황강 합천댐 사례.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제1호, pp. 55-66.

한국수자원공사 (2005). 광양3단계 환경영향평가 보고서.

Jain, S. and Lall, U. (2000). “Magnitude and timing of annual maximum floods : trends and large-scale climatic associations for the Blacksmith Fork

- River, Utah." *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 12, pp. 3641-3651.
- Kahya, E. and Kalayci, S. (2004). "Trend analysis of streamflow in Turkey." *Journal of Hydrology*, Vol. 289, pp. 128-144.
- Lettenmaier, D.P. (1976). "Detection of Trends in Water Quality Data from Records with Dependent Observations." *Water Resources Research*, Vol. 12, pp. 1037-1046.
- Lins, H.F. and Slack, J.R. (1999). "Streamflow trends in the United States." *Geophysical Research Letters*, Vol. 26, No. 2, pp. 227-230.
- Letcher, R.A., Yu, Schreider, S., Jakeman, A.J., Neal, B.P. and Nathan, R.J. (2001). "Methods for the analysis of trends in streamflow response due to changes in catchment condition." *Environmetrics*, Vol. 12, No. 7, pp. 613-630.
- Maidment, D.R. (1993). *Handbook of Hydrology*. pp. 17.11.
- Novotny, E.V. and Stefan, H.G. (2006). "Stream flow in Minnesota : Indicator of climate change." *Journal of Hydrology*, Vol. 334, No. 3-4, pp. 319-333.
- Snedecor, G.W., and Cochran, W.G. (1980). *Statistical Methods*. The Iowa State University Press, Ames, Iowa.
- Zhu, Y. and Day, R.L. (2005). "Analysis of Streamflow Trends and The effects of Climate in Pennsylvania, 1971 to 2001." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 41, No. 4, pp. 1393-1405.

(논문번호:08-51/접수:2008.04.11/심사완료:2008.09.22)