

금강 유역의 댐과 물이용에 의한 유황의 변동특성 분석

Effects of Dams and Water Use on Flow Regime Alteration of the Geum River Basin

강 성 규* / 이 동 루** / 문 장 원*** / 최 시 중****

Kang, Seong Kyu / Lee, Dong-Ryul / Moon, Jang Won / Choi, Si Jung

Abstract

This study presents the alteration of flow regime by effects of dams and water use in the Geum River Basin. The surface water use rate and the Impounded Runoff (IR) index were examined to assess the pressure indicators of the flow alteration. We applied the flow duration curve, flow regime coefficient, flood and low-flow frequency analysis as well as Range of Variability Approach (RVA) to investigate the quantitative changes in natural flow regimes. The results indicate that the high flow decreased and low flow increased respectively compared to the natural flow regimes at eight gauging stations. The Geum river is regulated by 139 dams and reservoirs storing 24% of the annual mean discharge and has high surface water use rate of 36%. These indicators are main pressure factors to alter flow regimes.

Keywords : water use, dams, impounded runoff index, flow regime, reservoir effects, RVA

요 지

본 연구에서는 금강유역의 물이용과 댐의 영향에 의한 하천유황의 변화를 평가하였다. 유황변화의 압력지표로서 하천 수 이용률과 담수지수를 분석하였다. 유황의 정량적인 변화 분석을 위하여 유황곡선, 유황계수, 홍수 및 갈수 빈도분석과 유량변동분석법을 적용하였다. 8개 분석 대상지점의 결과는 댐 건설전의 유황과 비교할 때 댐과 물이용의 영향으로 고유량 범위에서는 감소하고, 저유량 범위에서는 증가하고 있음을 구체적인 수치로 확인하였다. 금강유역은 연평균유출량의 24%를 저류할 수 있는 139개의 댐과 저수지에 의해 유황이 조절되고 지표수의 이용률이 36%로서 이들의 지표가 유황변화의 압력요인이 되고 있다.

핵심용어 : 물이용, 댐, 담수지수, 유황, 저수지영향, 유량변동분석법

1. 서 론

인구의 증가와 경제가 발전하면서 필요한 물 공급을 위한 댐의 저류와 방류, 하천수의 취수, 광역도수, 지하수

개발 등은 하천에 흐르는 자연유황을 변화시켜왔다. 지난 세기부터 수자원 개발로 인한 하천수량의 변화와 영향에 관한 연구가 많이 수행되었다. Dynesius and Nilsson (1994)은 미국, 캐나다, 유럽 및 구소련에 있는 가장 큰

* 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원
Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Water resources research division, 2311 Daehwa-dong, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea (e-mail: skkang@kict.re.kr)
** 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실 책임연구원 (e-mail: dryi@kict.re.kr)
*** 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원 (e-mail: jwmoon@kict.re.kr)
**** 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원 (e-mail: sjchoi@kict.re.kr)

하천의 총유량에서 77%가 댐, 저수지, 도수 및 관개에 의해 영향 받는다고 언급하였다. 미국 하천의 85%이상, 유럽 하천의 60~65%를 포함하여 전 세계 하천의 60%에서 수문학적 변화가 초래되었다고 추정되고 있다. 더 나아가서 접근 가능한 지구상의 담수유출량의 약 50%가 인간에 의해 점유되고 있고, 2025년까지는 70%의 점유가 전망된다 (Moore, 2004). 자연유량의 변화는 하천의 물리, 화학 및 생태적 측면에 지대한 영향을 주기 때문에 하천의 보존과 복원을 위한 새로운 패러다임으로서 자연유량의 복원이 강조되고 있다 (Poff et al., 1997). 물이용이 고도화된 하천에서 자연유량은 필연적으로 변동되어 하천이 고갈되는 경우도 발생할 뿐만 아니라 갈수기에는 자연상태보다 더 많은 유량이 흐르고 홍수기에는 적은 유량이 흐르는 유량의 정량적 변화가 발생한다. 또한, 이들이 발생하는 시기와 빈도에서 변화가 클 수 있다. 물의 안정적 공급과 홍수관리 입장에서 자연유량의 조절은 순기능을 가지나 생태계 입장에서는 오히려 역기능으로 서로 상충되는 기능을 가지고 있다. 그러나 Poff et al. (1997)과 Petts (1996)의 연구에서 알 수 있듯이 자연유량의 복원이 생태계 보전의 기본적인 요소로 정착되고 있다.

우리나라의 모든 대하천의 경우도 대규모 다목적 댐에 건설되어 있고 중소하천에서도 약 18,000여개소의 농업용 저수지가 건설되어 대부분 하천의 유량이 변동되어 왔으나 이에 대한 연구는 미미한 실정이다. 국내에서 유량변동에 대한 연구는 댐건설 전·후의 유량변동을 분석한 이진원 등 (1993)과 김태균 등 (2002)의 연구가 있으며 고익환 등 (2009)은 생태·수문학적 변화를 평가하기 위한 유량변화분석을 수행하였다. 국내에서는 1990년대 들어 변화된 하천 및 생태계의 복원사업이 활발히 진행되고 있다. 이들 하천복원사업의 주요 관심과 목적은 변화된 수로의 복원, 오염하천의 정화, 생태서식처 조성, 자연 구조물 재료를 이용한 친수공간 확보 등으로 과거 유황에 대한 평가와 이를 복원하기 위한 노력은 상대적으로 부족한 실정이다. 그러나 Petts (1996)와 Poff et al. (1997)에 의하면 이수사업에 의해 훼손된 하천의 자연유량 복원이 생태계의 다양성 확보에 가장 중요한 요소임을 제시하고 있다. 본 연구의 목적은 금강유역의 유황특성 변동을 분석하여 자연유황복원의 지표를 제공하는 것이다. 본 연구에서는 먼저 금강유역의 유황변동의 압력 (pressure) 요인으로서 댐 건설과 물이용 현황을 분석하였다. 또한 자연유황과 조절된 하천유량의 유황곡선, 홍수량과 갈수량의 변화 양상 및 Richter et al. (1997)이 제시한 유량변동분석법 (RVA, Range of Variability Approach)을 이용하여 유황의 변동특성을 분석하였다.

2. 유황특성 분석방법

하천유량이란 특정 시간에 하천의 특정 지점을 흐르는 물의 양이며 시간에 따른 지속적인 유량의 상황을 유황이라 한다. 유황은 유황곡선 (flow duration curve)을 통해 그 특성을 확인 할 수 있으며, 일반적으로 연중 일정기간 이상 지속되는 유황은 풍수량 (95일 유량), 평수량 (180일 유량), 저수량 (275일 유량) 및 갈수량 (355일 유량)으로 구분하여 그 규모와 변동성의 평가가 가능하다. 자연유황이란 인위적인 취수, 하천구조물에 의한 유황의 조절 등이 없는 하천 개발 전 상태의 유황을 말하는 것으로 유사이송 등의 물리적 과정, 생태 서식처의 변동 및 수질 등 화학적인 과정 등에 의한 하천환경을 조절한다. 하천은 유역의 기후, 지형, 및 토지이용 등에 따라 고유한 유황특성을 가지고 있고 이들 유황특성은 하천환경의 건전성을 유지시킨다. 그러나 댐과 물이용과 같은 인위적인 환경은 자연유황을 변화시켜 각 하천이 가지고 있는 고유한 기능을 훼손시키게 된다. 유황의 변동 여부의 파악은 전술한 유황곡선을 해석하는 방법, 연최대치 계열을 빈도해석하여 특정 재현기간의 홍수량의 변화를 살펴보거나, 이수관리를 위한 갈수량의 변화를 확인할 수 있는 갈수량의 빈도해석 방법 등을 통해 분석할 수 있다. 한편, Poff et al. (1997)과 Richter (2007)는 유황의 특성을 유황의 크기 (magnitude), 발생빈도 (frequency), 지속기간 (duration), 특정유황의 발생시기 (timing), 유황의 변화율 (rate of change)로 구분하였다. 또한 Richter et al. (1997)은 생태계복원을 위하여 수생태계와 수문학적 자연유황의 관계에 기초를 둔 하천생태관리 목표유량 설정을 위한 새로운 방법을 제안하였다. 이를 위해 Table 1에 제시된 22개 유황 특성을 평가하는 것으로 유량변동 분석법 (Range of Variability Approach)이라 하며, 이는 기존의 유황곡선 분석방법을 보완하여 더욱 세분화된 하천의 물의 흐름 상태를 파악할 수 있는 장점이 있다.

3. 금강유역 유황변동의 압력요인

금강유역의 면적은 9,915 km²이며 본류 하천길이는 398 km에 이른다. 금강유역은 1981년과 2001년에 각각 완공된 대청댐 및 용담댐의 유황조절효과를 크게 받고 있는 지역이다. 수자원장기종합계획 (건설교통부, 2006)에서는 금강유역의 연평균 강수량이 1,226.6 mm이며, 자연상태에서 연간 7,008 백만 m³의 유출량을 보이는 것으로 분석하고 있다. Fig. 1은 금강유역의 월별 강수량 및 유출량을 나타내고 있다. 최대 강수량과 유출량은 7월에 발생하고 있으며, 강수량 최소값은 1월에, 유출량의 최소값은 2월에 발생하

Table 1. Hydrologic Parameters and Ecosystem Influences (Richter B. D., 2007)

Group	Regime Characteristics	Streamflow Parameters	Examples of Ecosystem Influences
Monthly Discharge Conditions (Group #1)	Magnitude Timing	Mean Discharge	<ul style="list-style-type: none"> - Habitat availability for aquatic organisms - Soil moisture availability for plants - Availability of water for terrestrial animals - Availability of food/cover for furbearing mammals - Reliability of water supplies for terrestrial animals - Access by predators to nesting sites - Influences water temp. oxygen levels, photosynthesis in water column
Annual Extreme Discharge Conditions (Group #2)	Magnitude Duration	max. 1-day means min. 1-day means max. 3-day means min. 3-day means max. 7-day means min. 7-day means max. 30-day means min. 30-day means max. 90-day means min. 90-day means Number of zero-flow days 7-day min. flow divided by mean flow for year (baseflow)	<ul style="list-style-type: none"> - Balance of competitive, ruderal, and stress-tolerant organisms - Creation of sites for plant colonization - Structuring of aquatic ecosystems by abiotic vs. biotic factors - Structuring of river channel morphology and physical habitat conditions - Soil moisture stress in plants - Dehydration in animals - Anaerobic stress in plants - Volume of nutrient exchanges between rivers and floodplains - Duration of stressful conditions such as low oxygen and concentrated chemical in aquatic environments - Distribution of plant communities in lakes, ponds, floodplains - Duration of high flows for waste disposal, aeration of spawning beds in channel sediments
	Timing	Julian date of each annual one-day max. discharge Julian date of each annual one-day min. discharge	<ul style="list-style-type: none"> - Compatibility with life cycles of organisms - Predictability/avoidability of stress for organisms - Access to special habitats during reproduction to avoid predation - Evolution of life history strategies, behavioral mechanisms
High/low Pulses (Group #3)	Magnitude Frequency Duration	No. of high pulses each year No. of low pulses each year Mean duration of high pulses within each year Mean duration of low pulses within each year	<ul style="list-style-type: none"> - Frequency and magnitude of soil moisture stress for plants - Frequency and duration of anaerobic stress for plants - Availability of floodplain habitats for aquatic organisms - Nutrient and organic matter exchanges between river and floodplain - Soil mineral availability - Access for waterbirds to feeding, resting, reproduction sites - Influences bedload transport channel sediment textures, and duration of substrate disturbance (high pulse)
Hydrograph Changes (Group #4)	Frequency Rate of Change	Means of all positive differences between consecutive daily values Means of all negative differences between consecutive daily values No. of flow reversals	<ul style="list-style-type: none"> - Drought stress on plans (falling levels) - Entrapment of organisms on islands, floodplains (rising levels) - Desiccation tress on low-mobility streamedge (varial zone) organisms

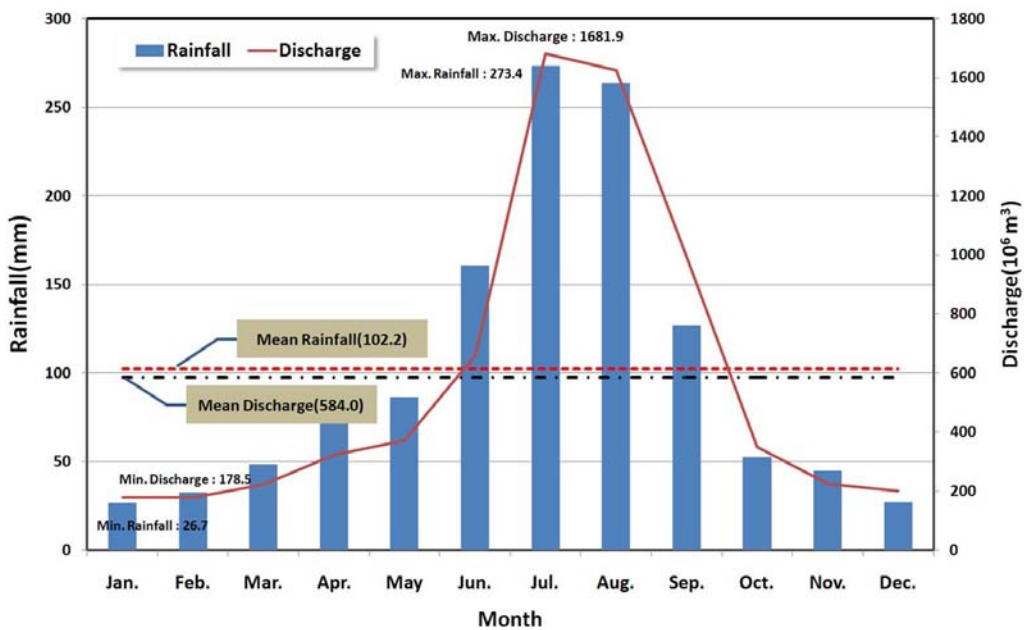


Fig. 1. Monthly Rainfall and Discharge in the Geum River Basin

는 것으로 나타난다. 강수량 대비 유출량으로 계산할 경우, 금강유역에서는 강수량의 57.6%가 하천수로 유출되고 있다.

3.1 물 이용량과 이동

금강유역에서 생·공용수 및 농업용수의 총 이용량은 2006년 기준 약 2,648 백만 m^3 에 달하고 있다(건설교통부, 2006). 총 이용량에서 하천 및 저수지에서 취수하는 양은 2,522 백만 m^3 이고 지하수의 이용량은 126 백만 m^3 이다. 연 평균유출량 대비 하천 및 저수지로부터의 취수량은 약 36%

로서 10~20% 범위의 일본, 미국, 영국 등에 비하여 매우 높은 수준이다. UN Economic and Social Council (1997)에서는 20~40%의 하천이용율의 환경에서는 지역간 용수목적별 물이용에 경쟁이 심화되고 자연유황 등이 변동되어 수생태계가 훼손된다고 하였다. 한편 금강유역에서는 생·공용수 공급을 위하여 Table 2와 Fig. 2에 나타낸 대규모 취수원과 광역상수도를 이용하고 있으며, 연 7.8억 m^3 의 물이동이 이루어지고 있다. 이상과 같은 물이용량과 광역 물 이동은 자연상태 하천의 유황을 계속하여 변화시키고 있다.

Table 2. Multi-regional Water Supply in the Geum River Basin (2006)

Source	Service Area	Amount (10 ⁶ m ³ /y)	Source	Service Area	Amount (10 ⁶ m ³ /y)
Yongdam Dam	Seocheon	12.8	Daechung dam	Cheongju	119.0
	Jeonju	97.3		Cheongwon	64.6
	Gunsan	66.5		Gongju	21.7
	Iksan	38.4		Nonsan	25.9
	Gimje	3.1		Buyeo	9.9
	Wanju	29.2		Seocheon	27.4
Daechung Dam	Asan	81.4	Geum river (Buyeo)	Jeonju	7.3
	Cheonan	78.5	Gunsan	27.4	
	Dangjin	16.8	Estuary dam	Gunsan	45.8
	Yeongi	9.1	Total amount		781.9

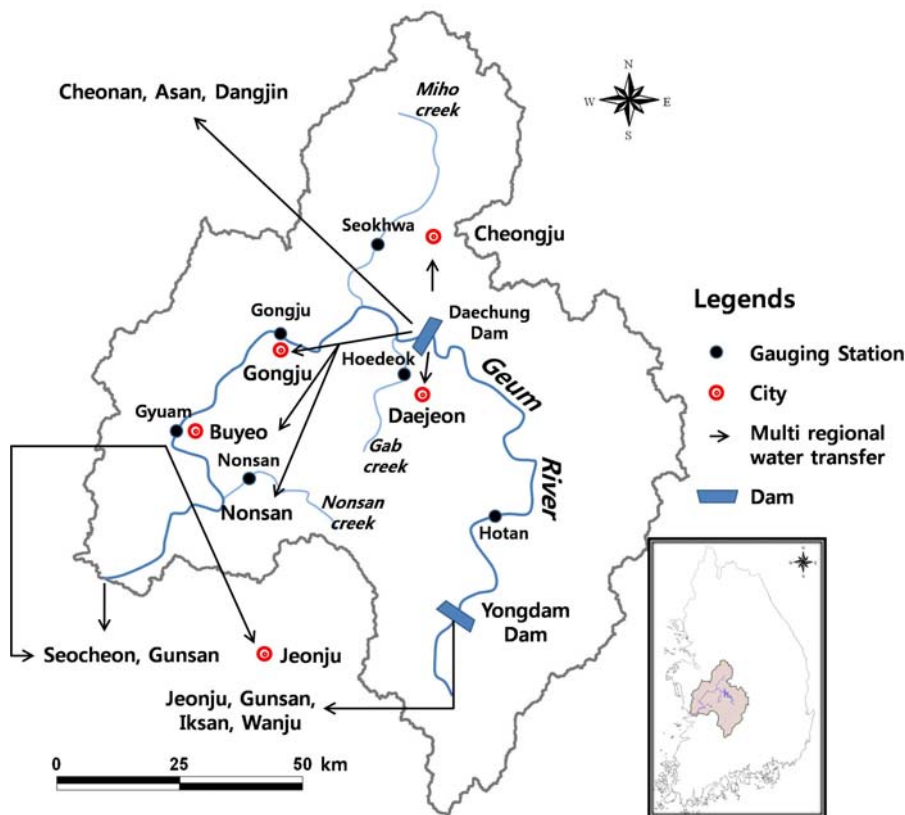


Fig. 2. Multi-regional Water Supply Systems of the Geum River Basin in Korea

3.2 댐과 저수지의 건설

물이용량과 광역 물이동과 함께 하천유역에서 댐과 저수지 등의 건설은 가장 주된 자연유황을 변화시키는 압력 요인이다. 댐과 저수지에서 유입, 유출의 조절은 홍수관리에서 홍수기 유량을 저감시키고 이수관리에서 갈수기 유량을 증가시키는 순기능을 하지만 유황을 변화시키는 역기능이 수반된다. 본 연구에서는 연도별로 농업용 저수지 및 댐의 건설현황 및 유효 저수용량을 조사·분석하였다. 농업용 저수지는 1945년부터 2003년까지 건설된 현황을 조사하였고, 다목적댐은 금강유역에 건설된 대청댐과 용담댐을 조사 대상으로 하였다. 금강유역에는 1,200개가 넘는 저수지가 있으나, 본 연구에서는 분석 대상을 국제 대댐회가 규정하고 있는 높이 15m 이상의 대댐 분류기준을 충족하는 Table 3의 137개 농업용 저수지로 한정하였다. 금강유역에는 1960년 이전과 1980년대에 큰 저류능력을 가진 농업용 저수지가 집중적으로 건설되었으며, 1990년

대 이후에는 그 건설 추세가 크게 둔화된 것으로 나타난다.

댐과 저수지의 저류 정도를 알기 쉽게 나타내는 방법으로 Batalla et al. (2004)이 제안한 담수(湛水)지수 (Impounded Runoff index, IR index)가 있다. 담수지수는 해당 지점에서 저수용량을 자연상태의 연평균유출량으로 나누어 산정한다. Batalla et al. (2004)은 담수지수를 이용하여 댐 등에 의해 변동된 유황특성 인자들의 변화 정도를 설명하고자 하였다. 본 연구에서는 저류량이 시기별로 어떻게 변화하였는지를 평가하기 위해 해당기간까지의 누가유효저수용량을 금강유역 연평균유출량으로 나누어 Fig. 3에 나타내었다. 금강유역의 연평균유출량은 앞에서 제시한 7,008 백만 m^3 을 이용하였다.

담수지수의 분석결과는 금강유역에서 전체 유출량의 약 1/4 정도를 저류하여 이용하고 있음을 보여주며, 대청댐과 용담댐이 건설된 시기에 이 저류 능력은 크게 증가하여 1980년대 이후 유황의 변동에 큰 영향을 주었음을 알 수 있다.

Table 3. Storage Capacity and Number of Reservoir Construction in Geum River Basin

Construction Times	Effective Storage Amount			Number of Construction	
	Agricultural Reservoir ($10^6 m^3$)	Multi-purpose Dam ($10^6 m^3$)	Sum	Agricultural Reservoir	Multi-purpose Dam
1945~1960	71.4	-	71.4	33	-
1961~1970	19.5	-	19.5	19	-
1971~1980	22.1	-	22.1	22	-
1981~1990	98.9	790.0	888.9	39	1
1991~2000	13.2	-	13.2	24	-
2001~2003	-	672.0	672.0	-	1
Total	225.2	1462.0	1687.2	137	2

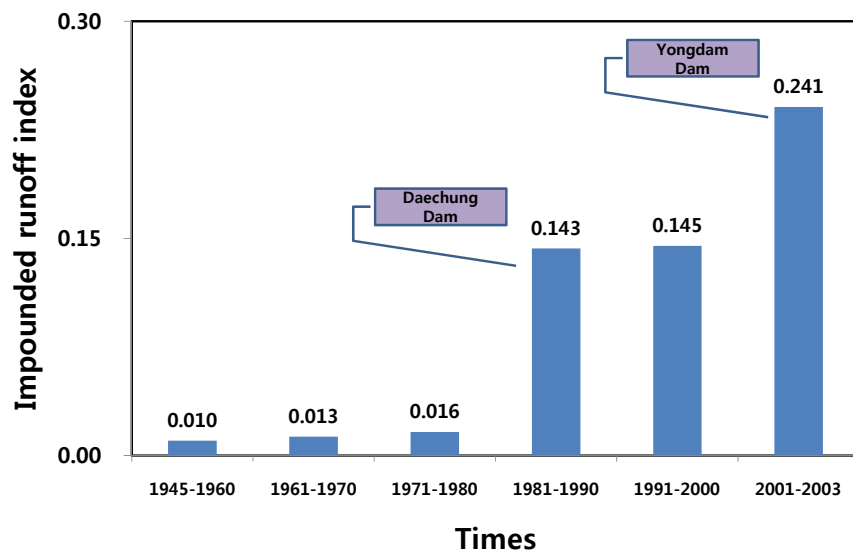


Fig. 3. Impounded Runoff Index of the Geum River Basin

4. 유황분석 자료의 구축

금강유역에서 2절에 제시한 유황 변동 특성을 분석하기 위한 대상 지점은 금강 본류의 상류부터 용담댐, 호탄, 대청댐, 공주, 규암 지점과 주요 지류인 갑천의 회덕, 미호천의 석화 및 논산천의 논산으로 하였다. 유황의 비교는 댐 건설 전과 댐, 저수지 등 치수와 이수를 위한 인위적인 요인에 의해 변화된 상태를 대상으로 한다. 이들 중 댐 지점인 용담댐과 대청댐의 유황의 비교는 유입량과 방류량 자료에 대해 수행하였다. 공주와 규암의 경우 과거부터 수위-유량관계식에 의한 자료가 비교적 풍부한 지점이며, 호탄지점의 경우 용담댐이 비교적 최근에 건설된 이유로 분석기간은 짧으나, 자료의 확보는 용이하였다. 그 외의 지점 중 회덕, 석화와 논산은 과거의 자료가 풍부하지 못한 것으로 평가되었다.

유황분석은 댐의 영향이 큰 본류와 농업용저수지 및 물이용에 의해 주로 영향을 받는 지류지점들로 구분하여 수행하였다. 본류의 대청댐 하류의 경우, 공주와 규암의 관측자료 중 대청댐과 금강하구둑이 건설되기 전의 기간(1967~1980년)과 그 이후의 자료를 비교하였다. 대청댐과 용담댐 지점은 댐의 조절효과를 분석하기 위하여 대청댐(1983~2000년), 용담댐(2002~2005년)의 유입량과

유출량의 비교를 시도하였다. 금강 본류가 아닌 지류의 회덕, 석화, 논산의 경우는 대청댐의 유황조절효과가 직접 미치지 않는으나, 광역 물공급에 의한 회귀수의 영향을 받게 되는 지점이다. 이들 지점은 과거 관측자료의 한계로 인해 댐 건설 전 자연상태의 관측유량자료를 분석에 활용하는 것은 불가하다. 또한 수위 및 수위-유량관계식 검토 결과 신뢰할 수 있는 관측유량 자료의 구축이 1994년 이후에 가능한 것으로 나타났다. 따라서 1994년 이후의 관측유량자료와 수자원장기종합계획(2006)에서 이용된 같은 기간의 모의 자연유량자료를 비교하여 분석하였다. Table 4에 본 연구에 이용한 일 유량자료를 정리하여 나타내었다.

5. 유황변동 분석

유량의 변동은 주요지점의 홍수량과 갈수량 계열을 추출한 후, 빈도해석하여 재현기간별 유량의 변화를 알아보는 방법, 유황곡선을 이용하는 방법 및 유황변동 분석법으로 구분하여 수행하였다. 한편 결측이 연중 10일 이상이면 갈수량 산정이 불가하므로, 빈도해석과 유황곡선을 이용하는 분석에는 사용치 않았다.

Table 4. Year of Flow Data for Pre- and Post-Impact Analysis

Site	Year of Flow Data	Number of Years for Analysis	Remarks
Yongdam Dam	02, 03, 04, 05, 06	5	Inflow/Outflow
Hotan	96, 97, 98, 99, 00	5	Pre-Dam
	01, 02, 03, 04, 05	5	Post-Dam
Daechung Dam	83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 00, 01, 02, 03, 04, 05, 06	24	Inflow/Outflow
Gongju	56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80	25	Pre-Impact Observed
	81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 93, 94, 95, 96, 97, 00, 01, 02, 03, 04, 05	22	Post-Impact Observed
Gyuam	56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80	25	Pre-Impact Observed
	81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 93, 94, 95, 96, 97, 00, 01, 02, 03, 04, 05	22	Post-Impact Observed
Hoedeok	94, 95, 96, 97, 98, 99, 00, 01, 02, 03, 04, 05	12	Simulated/Observed
Seokhwa	94, 95, 96, 97, 98, 99, 00, 01, 02, 03, 04, 05	12	Simulated/Observed
Nonsan	94, 95, 96, 97, 98, 99, 01, 02, 03, 04, 05	11	Simulated/Observed

5.1 유황곡선 분석

Table 5에 대청댐과 용담댐의 건설 전·후의 유황곡선을 분석하여 나타내었다. Table 5의 마지막 열은 일반적인 하상계수가 아닌 유황계수(이진원 등, 1993)이다. 하상계수는 연중 최대치를 최저치로 나눈 값을 나타내는 것으로 갈수기 유황측정의 역사가 짧은 우리나라의 경우 최저치 유량이 왜곡되어 하상계수로 표현하는데 무리가 있다. 따라서 유황곡선에서 지속기간 10일에 해당하는 유량을 지속기간 355일에 해당하는 유량으로 나눈 값을 이용하여 고유량과 저유량의 변동성을 비교 하였다. 그 결과 논산의 경우를 제외하고는 모든 지점에서 고유량과 저유량의 차이가 적어져 월별, 계절별 유량의 차이가 줄어들고 있음을 알 수 있다. 특히, 용담댐의 유입량과 방류량을

비교하면 갈수량의 경우 약 6배에 가까운 변화를 보이고 있다. 한편 논산지점은 관측자료의 갈수기 유량이 더 작은 것으로 평가되어 다른 지점의 일반적 특성과 다르게 분석되었다. 이는 1994년과 1995년의 자료 중 논산지점 상류의 탐정호에서 농업용수를 공급하지 않는 기간인 11월 중순부터 12월까지 매우 작은 유량이 기록되었으며, 논산지점의 분석기간이 상대적으로 짧아 특정 관측값에 의한 영향이 크게 나타나기 때문이다.

Fig. 4에 공주지점과 규암지점의 유황곡선을 나타내었다. 공주지점의 경우 연중 42일 이상 지속되는 유량에서, 규암은 연중 88일 이상 지속되는 유량에서 변화전의 유량이 더 작아지는 것으로 분석되었다. Fig. 5는 금강 본류에서 풍수량과 갈수량의 변화 양상을 나타낸 그림으로 상하류 구간별로 댐 건설 후 유량이 증가된 결과를 보여주고 있다.

Table 5. Alteration of Flow Duration and Coefficient of Flow Regime Characteristics

Site	Remarks	Q ₁₀	Q ₉₅	Q ₁₈₅	Q ₂₇₅	Q ₃₅₅	Coefficient of Flow Regime
Yongdam Dam	Inflow	214.84	18.34	8.86	4.93	1.84	116.76
	Outflow	112.24	25.37	22.39	18.79	11.00	10.20
Hotan	Pre-impact	263.80	32.40	16.50	8.31	4.83	54.67
	Post-impact	217.87	29.37	19.54	14.53	8.01	27.20
Daechung Dam	Inflow	629.37	59.26	28.67	16.19	7.17	87.73
	Outflow	342.78	93.44	44.38	24.61	15.29	22.42
Gongju	Pre-impact	1,017.97	109.22	50.97	32.84	16.30	62.44
	Post-impact	765.43	150.06	79.21	48.62	26.12	29.31
Gyuam	Pre-impact	1,834.68	189.40	77.52	45.61	23.75	77.25
	Post-impact	1,131.85	202.81	127.15	89.12	51.68	21.90
Hoedeok	Simulated	132.63	9.92	4.60	2.71	2.33	57.04
	Observed	103.97	13.47	7.88	4.72	3.35	31.04
Seokhwa	Simulated	228.09	24.00	10.32	6.50	4.82	47.31
	Observed	285.33	40.14	22.48	14.35	10.14	28.13
Nonsan	Simulated	85.48	7.73	3.66	2.13	1.75	48.79
	Observed	72.62	7.78	3.74	2.13	1.07	68.17

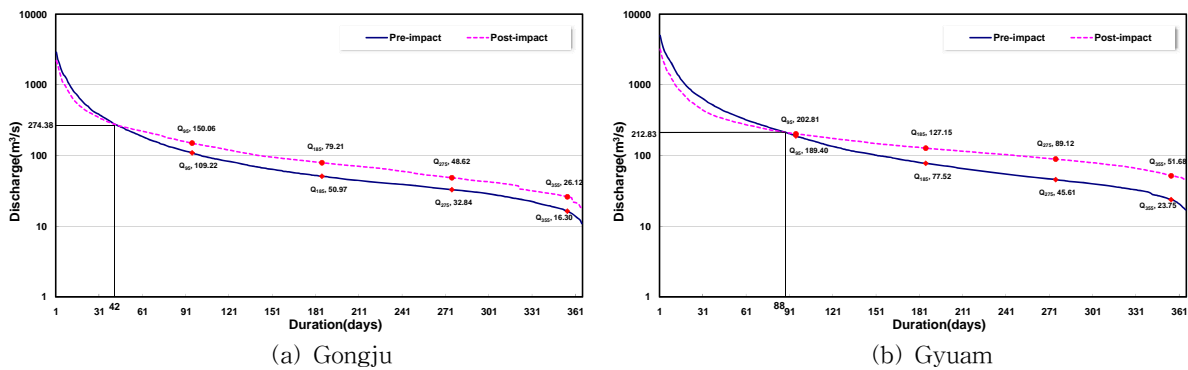


Fig. 4. Flow Duration Curve

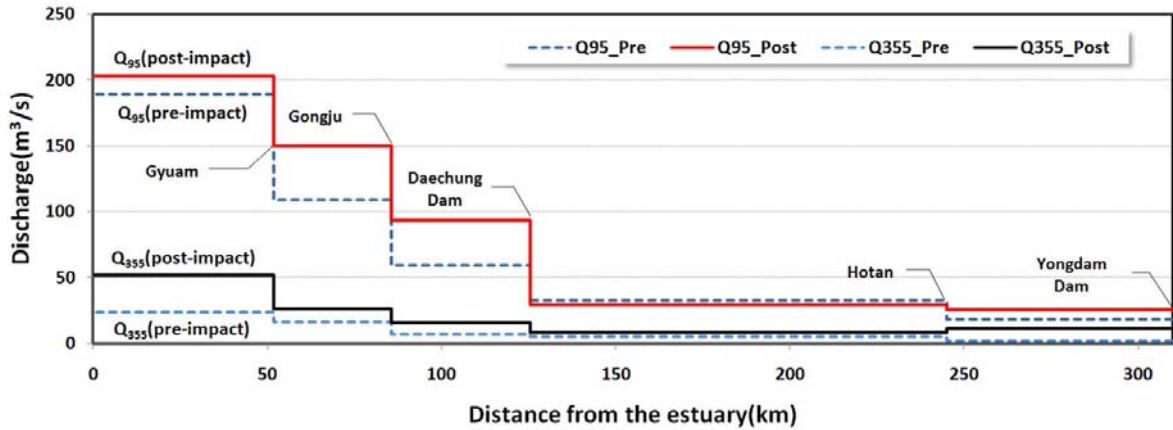


Fig. 5. Trend of Q_{95} and Q_{355} from Upstream to Downstream in the Geum River

5.2 홍수량과 갈수량의 빈도해석

홍수량과 갈수량의 빈도해석은 재현기간별 유량의 크기 변동을 살펴보기 위하여 수행하였다. 홍수량 빈도해석은 연일최대치 계열을 이용하여 수행하였으며, 갈수량은 연중 355일 이상 지속되는 갈수량 계열을 작성한 후, 빈도 해석 하였다. 갈수량의 빈도해석은 주로 하천의 취수 안정성을 보장하는 유량의 크기를 분석하기 위하여 수행되며, 10년 빈도에 해당하는 기준갈수량은 우리나라에서 하천수 취수의 허가 기준 유량으로 이용되고 있다. 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해서는 보통 30년 이상의 자료를 이용하는 것이 바람직하지만 용담댐이 2001년에 완공되어 변화 전·후 장기간의 유량자료 구축이 불가능 대형댐 상류의 지점과 관측 자료기간이 짧은 지류의 지점은 빈도 해석 대상에서는 제외하였다. 따라서 빈도해석을 통한 재현기간별 유량의 변동 현황은 대형댐, 공주 및 규암 지점을 대상으로 분석하였다.

빈도해석에서 확률분포형의 매개변수를 추정하는 방법은 확률가중모멘트법을 이용하였고, 분포형의 적합도는 χ^2

(Chi-Square)검정 및 K-S (Kolmogorov-Smirnov)검정을 통해 평가하였다. 확률 분포형은 2변수 대수정규분포, 2변수 감마분포, Type-1 극치분포 (Gumbel)와 일반화된 극치분포 (GEV)를 대상으로 하였으며, 적합도 검정 결과 2변수 감마분포와 일반화된 극치분포의 결과가 적절한 것으로 나타났다. 이들 분포형 중 감마분포는 수문학분야에서 가장 널리 사용되는 분포형의 하나이다 (윤용남, 2007). 따라서 본 연구에서는 감마분포의 결과를 선택하여 제시하였다.

댐과 물이용에 따른 지속기간별 홍수량 및 갈수량의 변화는 Table 6과 같이 홍수량이 많게는 60% 수준까지 감소되고 갈수량은 공주지점에서 3배 가까이 증가하고 있다. 이는 홍수 피해 저감과 하천에서의 취수 안정성의 확보에 댐이 기여하고 있음을 의미하나 유황의 인위적인 변화는 생태계의 다양성과 고유의 성질을 변화시킴을 반증하기도 한다. Figs. 6 and 7에 재현기간별 홍수량과 갈수량의 변화를 나타내었다. 규암지점은 공주지점보다 하류에 위치하여 대형댐에 의한 영향을 덜 받게 되나, 금강하구둑의 영향을 직접 받기 때문에 이 두 시설물의 영향이 복합적으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

Table 6. Flood and Low-flow Frequency Analysis for the Geum River

Discharge (m^3/s)		Daechung Dam	Gongju	Gyuam
Flood Magnitude (return period 100 year)	Pre-impact	6,601.2	6,977.0	14,125.9
	Post-impact	4,581.2	6,639.5	8,275.9
	Ratio	0.69	0.95	0.59
Low-flow Magnitude (return period 10 year)	Pre-impact	2.2	2.3	10.7
	Post-impact	3.6	6.5	12.4
	Ratio	1.64	2.83	1.16

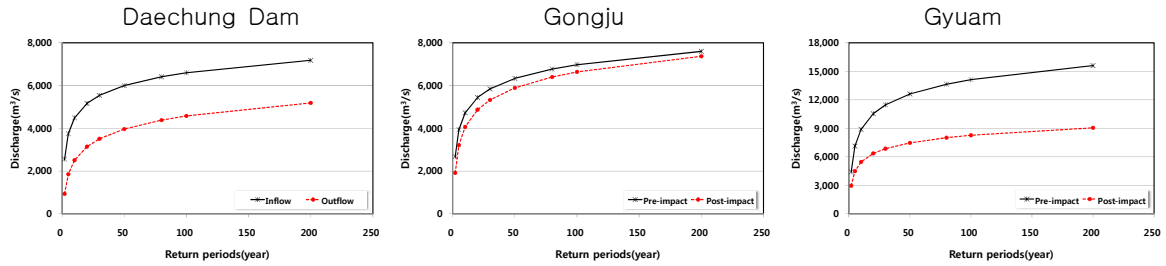


Fig. 6. Change of Flood Magnitude for Each Return Periods

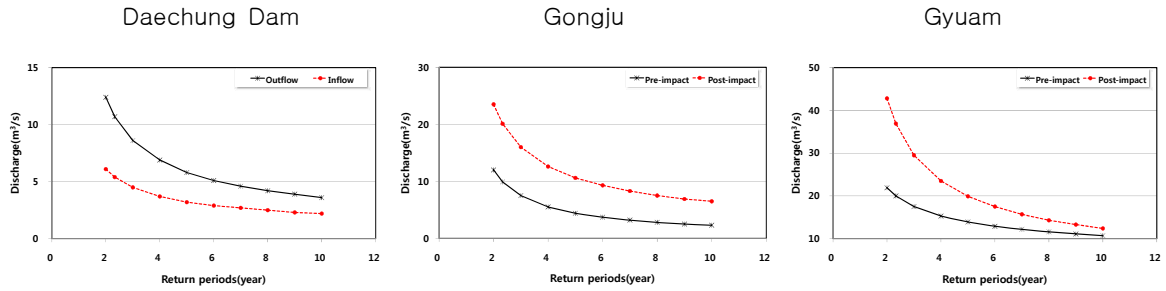


Fig. 7. Change of Low-flow Magnitude for Each Return Periods

5.3 유량변동 분석

유량변동 분석은 Table 1에 소개한 22개의 항목의 변화도를 분석하는 것으로 IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) (Ritcher et al., 1997)를 이용하였다. Ritcher et al. (2007)에 따르면 수문변화율 (HA, Hydrologic Alteration)의 항목은 Eq. (1)과 같이 정의된다.

$$HA = \frac{\text{관측빈도} - \text{기대빈도}}{\text{기대빈도}} \quad (1)$$

여기서 관측 빈도는 유황의 변화가 생긴 이후 (댐건설 후)의 유량(방류량)이 댐건설 전 “평균 ± 1표준편차”의 구간에 속해있는 횟수를 말하며, 기대 빈도는 유황의 변화가 발생하기 전 (댐건설 전)의 유량이 댐건설 전 “평균 ± 1표준편차” 구간에 속해있는 횟수를 가리킨다. 수문변화율이 양의 값이면 수문량의 변화는 있지만, 과거의 수문량의 범위를 벗어날 가능성이 적은 것이며, 음(-)의 값은 유량이 그 크기와는 상관없이 유량변동 이후의 자료가 과거의 자료와는 다른 범위에 분포함을 나타낸다. -1의 값을 가진다면 댐 건설 및 물이용으로 인한 수문량의 변화는 과거 수문량의 범위에 한 번도 포함되지 않음을 의미한다. 유량변동 분석결과는 실제 변화된 값보다는 수문변화율을 Table 7에 나타내어 쉽게 변화여부를 알 수 있도록 하였다.

용담댐의 유입량과 방류량의 유량 변동은 월별 평균의 경우, 7월, 10월, 11월 및 12월의 특성이 가장 크게 변동되

었으며, 각 지속기간별 최대값보다는 최소값의 평균값 변동이 심화된 것으로 평가되었다. 호탄 관측지점은 5월~7월 평균유량의 특성변화가 있었으며, 지속기간 90일 최소값의 평균의 변화가 두드러졌다. 대청댐은 11월에서 다음해 1월까지 유황의 조절효과가 가장 큰 것으로 나타났으며, 매년 90일 최대값의 평균치를 제외하고는 각 지속기간별 최소, 최대 평균값은 유입량에 비해 방류량의 특성이 변화되었다.

월별 평균값의 변화로 알아보면, 공주는 7월부터 이듬해 1월까지, 규암은 11월부터 이듬해 2월까지의 월 평균값의 변동이 있었다. 다른 지점과 마찬가지로 각 년도의 지속기간별 최대값의 평균치보다는 최소값의 평균치에 변화가 더 큰 것으로 분석되었다. 지류의 경우, 홍수기보다는 11월부터 이듬해 4월까지의 갈수기의 변동이 심화된 것으로 나타난다. Table 5의 유황곡선을 이용한 분석에서는 논산, 회덕지점의 유황은 크게 변동된 것으로 나타나지 않았으나, 유량변동 분석결과 이들 두 지점의 유황 특성치에도 큰 변화가 있었음을 알 수 있다. 이러한 변화는 수문량의 변화뿐 아니라 환경·생태학적으로도 영향을 주어 갈수기의 수생물의 서식공간의 감소, 홍수터의 수위 상승과 토양수분의 증가로 인한 수면식물의 다양성 유지 저감, 적절한 수온과 DO의 유지 등에 변화를 초래할 수 있고, 갈수빈도의 감소는 하구연의 생태계에 많은 영향을 줄 수 있다.

Table 7에서 Group 3의 high pulse는 특정값 (평균유량 + 표준편차)보다 유량이 큰 경우를 지칭하며, low pulse는

평균유량에서 표준편차를 뺀 값보다 유량이 작은 경우를 의미한다. Group 4의 rise, fall rate는 일 유량의 증가 혹은 감소하는 비율을 구분하여 표기한 것이며, number of reversal은 감소 혹은 증가하다가 증가 혹은 감소하는 횟수를 표기한 것이다. 분석의 예로 Fig. 8에 공주지점의 3일 유량의 최소값과 7월 평균유량의 변화를 연도별로 도

시하였다. 대청댐 건설 전 연속된 3일 평균유량의 최소값의 평균은 12.06 m³/s이며, 대청댐 건설 후 25.46 m³/s로 증가하였다. 7월 평균유량은 714.1 (m³/s)에서 600.5 (m³/s)로 감소하고 있다. 점선은 각 평균에 표준편차를 가감한 값을 나타내는 것으로 향후 변동 이전의 상태로 유황을 복원한다면 그 목표 범위가 될 수 있다.

Table 7. Hydrologic Alteration in the Geum River Basin

Indices	Hydrologic Alteration							
	Yongdam Dam	Hotan	Daechung Dam	Gongju	Gyuam	Hoedeok	Seokhwa	Nonsan
Parameter Ggroup #1								
Jan.	-0.667	0.000	-0.118	-0.337	-0.514	-0.429	-0.286	-0.143
Feb.	-0.500	0.333	0.125	0.094	-0.081	-0.800	-0.625	-0.333
Mar.	-0.667	0.000	0.067	0.091	0.458	-0.222	-0.667	0.286
Apr.	0.667	0.333	0.143	0.146	0.191	-0.286	-0.143	-0.286
May	0.667	-0.333	0.063	0.339	0.172	0.143	0.000	0.000
Jun.	0.667	-0.667	0.200	0.181	0.597	0.286	0.100	0.429
Jul.	-1.000	-0.333	0.133	-0.132	0.215	0.111	0.333	-0.333
Aug.	0.000	0.333	0.000	-0.219	0.042	0.000	-0.300	0.167
Sep.	0.000	0.667	0.118	0.116	0.237	0.143	0.000	0.286
Oct.	-1.000	0.667	0.000	-0.023	0.042	0.286	0.429	0.143
Nov.	-1.000	0.667	-0.250	-0.074	-0.287	-0.625	-0.500	-0.571
December	-1.000	0.667	-0.474	-0.479	-0.355	-0.375	-0.444	0.143
Parameter Group #2								
1-day Minimum	-1.000	-0.333	-0.813	-0.609	-0.561	-1.000	-0.750	-1.000
3-day Minimum	-1.000	-0.333	-0.313	-0.405	-0.635	-1.000	-0.750	-0.875
7-day Minimum	-1.000	-0.667	-0.267	-0.449	-0.595	-0.714	-0.625	-0.875
30-day Minimum	-1.000	-0.667	-0.467	-0.107	-0.387	-0.750	-1.000	-0.571
90-day Minimum	-1.000	-1.000	-0.529	-0.219	-0.284	-0.667	-1.000	-0.400
1-day Minimum	-0.667	-0.333	-0.467	-0.248	-0.023	-0.667	0.000	-0.889
3-day Minimum	0.000	0.333	-0.500	-0.306	0.250	-0.500	0.000	-0.600
7-day Minimum	-0.667	0.333	-0.444	-0.142	0.103	-0.444	0.000	-0.625
30-day Minimum	-1.000	-0.333	-0.250	0.111	0.302	-0.125	0.000	-0.444
90-day Minimum	-1.000	0.000	0.000	-0.089	0.432	0.286	0.000	0.000
Number of Zero Days	0.667	0.000	-0.348	-0.083	0.000	0.000	0.000	-0.083
Base flow	-1.000	-1.000	-0.500	-0.449	-0.571	0.143	-0.286	-0.286
Date of Minimum	0.000	0.000	1.000	-0.702	-0.755	2.000	0.200	0.333
Date of Minimum	-0.333	2.000	0.250	-0.132	-0.219	0.250	0.250	0.333
Parameter Group #3								
Low Pulse Count	-1.000	-1.000	-0.895	-0.510	-0.449	-0.889	-1.000	-0.875
Low Pulse Duration	-1.000	-0.643	-0.439	-0.653	-0.556	-0.625	-0.889	-0.714
High Pulse Count	-0.667	-0.667	-0.842	-0.287	-0.265	0.111	-0.250	-0.111
High Pulse Duration	-0.333	-0.333	-0.500	0.042	0.215	-0.125	0.125	-0.143
Parameter Group #4								
Rise Rate	-0.667	-0.667	-0.375	-0.421	-0.023	-0.625	0.250	-0.429
Fall Rate	-0.667	-0.333	-0.438	-0.154	0.302	-0.625	-0.889	-0.857
Number of Reversals	-1.000	-0.667	-0.533	-0.942	-0.942	-1.000	-1.000	-1.000

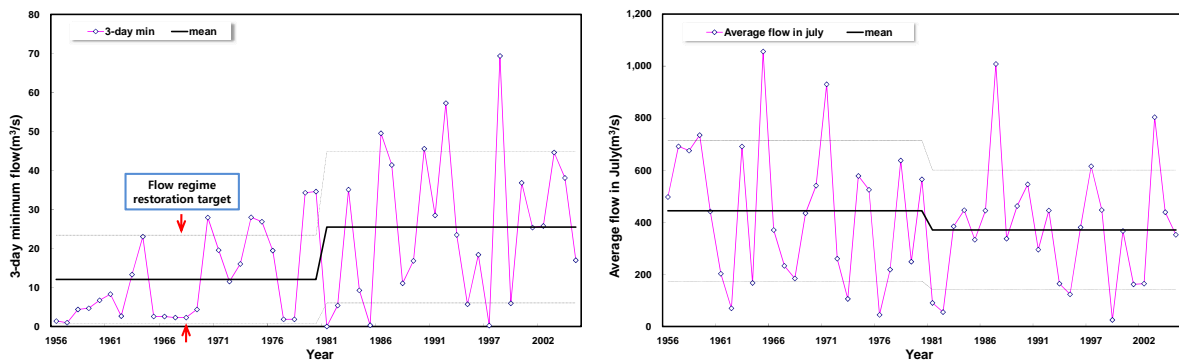


Fig. 8. Alteration of 3-day Minimum Flow and Average Flow in July at Gongju

5.4 유황변동 원인 평가

유황변동의 가장 큰 원인은 용담댐과 대청댐의 조절 효과이다. 특히 본류의 경우는 이들 두 댐의 방류량에 큰 영향을 받으며, 다른 이유로는 이수목적의 취수와 물의 유역변경에서 찾을 수 있다. 대청댐의 경우, 대전광역시의 필요수량을 공급하고 있으며 이들 수량의 회귀수가 감전을 통해 금강으로 이동하므로, 회터지점에 영향을 준 것으로 판단된다. 또한 건설교통부(2004)에 따르면, 2000년 이후 신설된 광역 상수도인 대청댐 계통의 공급지역은 청주, 천안, 청원, 연기, 아산이다. 이 중 청주와 청원에 공급되는 물은 미호전을 통해 금강으로, 연기지역에 공급되는 물은 공주 상류의 금강으로 회귀되어 각각 석화와 공주지점에 영향을 주게 된다. 논산천의 논산지점 역시 광역 물 공급과 물이용에 따른 회귀 등으로 인하여 유황이 변화되었음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 금강유역에서 댐 건설과 물이용에 의한 영향으로 나타난 유황의 변동특성을 분석하였다. 이를 위하여 먼저 유황변화의 압력요인으로서 연평균유출량에서 이용하고 있는 하천수 이용률과 댐과 저수지에서 담수할 수 있는 담수지수를 분석하였다. 유황의 정략적 변화분석은 유황곡선분석, 유황계수, 홍수와 갈수량 빈도분석 및 유황변동분석법을 적용하여 평가하였다. 본류의 경우는 용담댐과 대청댐의 영향을 평가하였으며 지류의 경우는 이들 댐의 광역도수 등 물공급과 물이동 경로의 변화에 따른 유황의 변동양상을 분석하였다. 최근 “유황조사사업단”이 운영되면서 주요지점에 대한 평·갈수기 유황측정도 지속적으로 행해지고 있으며, 향후 이들 자료를 바탕으로 더욱 신뢰할 수 있는 결과를 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에 의한 결과는 다음과 같다.

- 1) 금강유역은 하천수의 이용률이 36%로서 높은 수준이며, 담수지수는 0.24로서 연평균유출량의 24%를 저류할 수 있는 139개의 댐과 저수지에 의해 조절되어 이들의 지표가 유황변화의 압력요인이 되고 있다. 향후 이들 지표는 유역의 유황변화분석의 인과관계를 평가할 수 있는 지표로 활용될 수 있을 것이다.
- 2) 유황곡선과 유황계수를 통해 분석한 결과는 호단지점을 제외하고는 풍수량을 기록하기 이전 즉, 연중 95일 이하의 지속일수에서 유황의 반전이 발생하고 있다. 유황계수의 경우, 최대 1/10 수준까지 작아져 최대 유량과 최소유량의 폭이 줄어들고 있음을 알 수 있었다. 댐의 영향을 직접 받고 있는 본류 구간에

서 그 변동폭은 더욱 커서 유황계수는 1/4에서 1/10까지 감소하고 있으며, 지류구간은 거의 변화가 없거나 혹은 논산지점의 경우 유황계수가 더 커진 것으로 나타나고 있다. 이는 농업용 저수지 보다는 대규모 다목적 댐인 대청댐과 용담댐의 영향이 상대적으로 크음을 의미한다.

- 3) 홍수량과 갈수량의 빈도해석 결과에서 100년 빈도 홍수량은 5%에서 40%까지 감소하고 있으며, 갈수량은 16%에서 최대 183%가 증가한 것으로 나타났다.
- 4) 유황변동 분석법을 적용해본 결과 월평균 유량, 특정 지속기간별 최대, 최소유량 및 연 최대, 최소 유량 발생일 등 거의 모든 특성이 변화되고 있었다. 월평균 유량은 지류보다는 댐의 영향을 직접 받고 있는 본류 구간에서 변동이 심화되어 있으며, 특히 10월부터 이듬해 2월까지 평균유량이 변형 전에 비해 증가하고 있다. 지속기간별 최대, 최소 유량은 논산과 석화 지점을 제외한 모든 지점에서 최소유량이 증가하고 최대 유량은 감소하고 있다. 최소 유량 발생일은 변형전의 경우 농업용수의 사용이 증가하고, 갈수량이 적은 4월, 5월에 주로 발생하고 있으나, 댐과 저수지에서의 방류로 인해 늦가을부터 겨울로 그 시기가 이동하고 있다. 이들 변동의 공통적인 특성은 홍수량 및 풍수기 유량의 감소와 갈수량 및 평, 갈수기 유량의 증가로 나타나고 있다.

참 고 문 헌

- 건설교통부(2004). 광역상수도 및 공업용수도 수도정비기본계획, pp. 86-90.
- 건설교통부(2006). 수자원장기종합계획, pp. 441-456.
- 고익환, 김정근, 박상영(2009). “댐운영을 고려한 금강의 생태·수문학적 변화 평가: I. 유황변화분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제1호, pp. 1-8.
- 김태균, 윤용남, 안재현(2002). “댐 건설에 따른 하류 유황의 변화 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제6호, pp. 807-816.
- 윤용남(2007). **수문학**. 청문각, pp. 848-849.
- 이진원, 김형섭, 우효섭(1993). “댐건설로 인한 5대수계 본류의 유황변화 분석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제13권, 제3호, pp. 79-91.
- Dynesius, M., and Nilsson, C. (1994), "Fragmentation and Flow Regulation of River Systems in the Northern Third of the World.", *Science*, Vol. 266. No. 5186, pp. 753-762.
- Moore, M. (2004). *Perception and interpretations of environmental flows and implications for future water*

- resource management - A survey study*, Master thesis, Linköping University, Sweden
- Petts, G.E. (1996). "Water allocation to protect river ecosystems." *Regulated Rivers: Research & Management*, Vol. 12, pp. 353-365.
- Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E., and Stromberg, J.C. (1997). "The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration." *BioScience*, Vol. 47, No. 11, pp. 767-764.
- Batalla, R.J., Gomez, C.M., and Kondolf, G.M. (2004). "Reservoir-induced hydrological changes in Ebro River basin(NE Spain).", *Journal of Hydrology*, Vol. 290, Issues 1-2, pp. 117-136.
- Richter, B.D. (2007). *Protecting instream flows: How much water does a river need?* The nature conservancy's fresh water initiative.
- Richter, B.D., Baumgater, J.V., Wigington, R., and Braun, D.P.(1997). "How much water does a river need?", *Freshwater Biology*, No. 37, pp. 231-249.
- UN Economic and Social Council(1997). "Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world.", *Commission on sustainable development*, Fifth session 7-25, April, United Nations.

논문번호: 09-095	접수: 2009.08.21
수정일자: 2010.01.21/02.22	심사완료: 2010.02.22