

수문변화 지표법에 의한 다목적댐의 유량변화 분석

Hydrologic Regime Alteration Analysis of the Multi-Purpose Dam by Indicators of Hydrologic Alterations

박 봉 진* / 강 기 호** / 정 관 수***

Park, Bong Jin / Kang, Ki Ho/ Jung, Kwan Sue

Abstract

In this study, Hydrologic regime alterations(magnitude, magnitude and duration of annual extreme, frequency and duration of high and low pulse, rate and frequency of water condition changes, Range of Variability Approach) were analyzed by using Indicators of Hydrologic Alterations at the 11 major multi-purpose dam. The analysis result of the magnitude of monthly water conditions during drought season, inflow was 6.38 m³/sec ~ 39.84 m³/sec and outflow was 20.36 m³/sec ~ 49.43 m³/sec, was increased 1.84 % ~ 200.98 %. The analysis result of the magnitude of monthly water conditions during flood season, inflow was from 79.06 m³/sec to 137.12 m³/sec and outflow was from 65.32 m³/sec to 80.16 m³/sec, was decreased from 18.19 % to 40.39 %. The analysis result of the magnitude and duration of annual extreme, 1-day minimum was increased 82.86 % ~ 2,950 %, but 1-day maximum was decreased 34.78 % ~ 83.96 %. The analysis result of the frequency and duration of high and low pulse, low pulse count was decreased 29.67 % ~ 99.07 % and high pulse count was also decreased 4.60 % ~ 92.35 % after dam operation. Hydrograph rise rate was decreased 15.84 % ~ 79.31 % and fall rate was 1.97 % ~ 107.10 %. RVA of 1-day minimum was increased 0.60 ~ 2.67, also RVA of 1-day maximum was decreased 0.50 ~ 1.00.

keywords : Indicators of Hydrologic Alteration, Multi-purpose dam, Magnitude, Magnitude and Duration of Annual Extreme Conditions, Timing of Annual Extreme conditions, Frequency and Duration of High and Low Pulse, Rate and Frequency of Water Condition Changes, Range of Variability Approach

요 지

본 연구에서는 수문변화 지표법을 적용하여 11개 주요 다목적댐의 월 유량 크기, 연 최소·최대유량 크기와 지속 기간, 고·저맥과 빈도와 주기, 수문곡선 변화 비율과 빈도를 분석하였다. 월 유량변화 분석 결과, 갈수기에 해당하는 1월부터 6월과 10월부터 12월까지의 유입량이 6.38 m³/sec ~ 39.84 m³/sec이었으나, 방류량은 20.36 m³/sec ~ 49.43 m³/sec로 1.84 % ~ 200.98 %가 증가하였다. 우기철인 7월부터 9월까지의 유입량이 79.06 m³/sec ~ 137.12 m³/sec

* 한국수자원공사 댐·유역관리처 하천유역팀장

Korea Water Resources Corporation San 6-2 Yeonchuk-dong Daeduk-Gu, Daejeon, 306-711, Korea
(e-mail: bongjinpark@kwater.or.kr)

** 한국수자원공사 수자원관리처 하천유역팀

Korea Water Resources Corporation San 6-2 Yeonchuk-dong Daeduk-Gu, Daejeon, 306-711, Korea
(e-mail: kangkiho@kwater.or.kr)

*** 충남대학교 공과대학 토목공학과 부교수, 교신저자

Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, ChungNam National University, Daejeon, 305-764
(e-mail: ksjung@cnu.ac.kr)

이었으나, 방류량은 65.32 m³/sec ~ 80.16 m³/sec로 18.19 % ~ 40.39 %가 감소하였다. 연 최소·최대 유량변화 분석 결과는 1일 최소유량이 82.86 % ~ 2,950 %가 증가하였으며, 연 최소 및 최대 유량변화는 1일 최소유량은 82.86 % ~ 2,950 %가 증가하였으나, 1일 최대유량은 34.78 % ~ 83.96 %가 감소하였다. 고·저맥과의 빈도와 주기의 분석 결과, 저맥과의 발생 횟수는 댐 조절후 29.67 % ~ 99.07 %가 감소하였으며, 고맥과의 발생횟수도 4.6 % ~ 92.35 %가 감소하였다. 수문곡선 변화 비율과 빈도의 분석 결과 상승률은 15.84 % ~ 79.31 %가 감소하였으며, 하강율은 1.97 % ~ 107.10 %가 감소하였다. 유량변화정도 분석 결과는 1일 최소유량은 0.60 ~ 2.67 증가하였으며, 1일 최대 유량은 0.50 ~ 1.00으로 감소하였다.

핵심용어 : 수문변화 지표법, 다목적댐, 월 유량의 크기, 연최소·최대유량 크기와 지속기간, 연최소·최대유량의 발생시기, 고·저맥파 빈도와 주기, 수문곡선 변화 비율과 빈도, 유량변화정도 분석

1. 서 론

다목적댐은 홍수기에 유량을 저장하여 수력발전이나 각종 용수공급 등에 이용함으로써 수자원의 가치를 높이는 유용한 역할을 하고 있다. 그러나 댐 하류하천에는 침투 홍수량 감소와 갈수시 저유량 증가 등의 급격한 유량변화가 발생한다. 댐이 하류하천의 생태계에 미치는 영향에 가장 핵심이 되는 사항은 유량변화(Graf, 2006)이며, 유량변화는 하천생태계의 생물학적 구조와 기능에 중요한 역할을 한다(Poff *et al.*, 1997; Junk *et al.*, 1989).

국내에는 댐 하류하천의 유황변화에 관하여 윤용남과 박무중(1993), 김태균 등(2002), 이진원 등(1993)의 연구가 있다. 외국에는 Magilligan *et al.*(2003), Olden and Poff(2003), Poff *et al.*(2006, 2007)이 댐 하류하천의 유황변화에 관하여 연구하였다. 특히 미국의 Nature Conservancy(2007)에서 개발한 수문변화 지표법(Indicators of Hydrologic Alteration)은 유량변화에 관한 다양한 연구를 위하여 수문학적인 변화과정을 정량적인 지표로 산정하고 분석하는 모델로서, Richter *et al.*(1996, 1997, 1998), Shiau and Wu(2004), Magilligan and Nislow(2005), Graf(2006), Lajoie *et al.*(2007)이 본 모형을 적용하여 연구를 시행한 바 있다. 우리나라에서는 박봉진 등(2008)이 수문변화 지표법을 적용하여 영천댐이 하류하천에 미치는 유량변화를 분석한 바 있다.

하천의 유량은 크기(Magnitude), 발생시기(Timing), 발생빈도(Frequency), 기간(Duration), 변화율(Rate of change)의 5가지의 주요한 특성을 고려하여 분석하게 된다(Richter *et al.*, 1996; Poff *et al.*, 1997). 국내에서는 댐으로 인한 유량변화를 분석하는 방법으로, 대부분 10년 이상의 일 유량자료를 활용하여 갈수량, 저수량, 평수량, 풍수량을 산정하고, 이들을 유량변화의 지표로 활용하고 있다(이진원 등, 1993; 김태균 등, 2002). 그러

나 이렇게 단순한 4가지 지표로 댐이 하류하천에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고 제시하는 것은 한계가 있었다. 따라서, 본 연구에서는 수문변화 지표법을 적용하여 우리나라의 소양강댐 등 11개 주요 다목적댐에서의 일단위 유입량과 방류량을 분석하여 월 유량 크기, 연 최소·최대유량 크기와 지속기간, 고·저맥파 빈도와 주기, 수문곡선 변화 비율과 빈도 등 댐이 하류하천에 미치는 영향을 분석·제시 하고자 하였다.

2. 수문변화지표 모형

2.1 모형의 개요

수문변화지표 모형은 자연유량 특성과 유량(Hydrologic Regimes)의 변화를 정량적으로 계산할 수 있도록 Richter *et al.*(1996)에 의해 개발되었으며, 일 유량자료를 분석하여 Table 1에 표기된 유량변화의 32개 지표를 계산할 수 있다.

수문변화지표 모형에 의해서 산정된 32개의 지표는 다음과 같이 다섯 가지의 주요 통계적 지표를 제공한다(Nature Conservancy, 2007). 첫째 월유량 변화의 크기, 둘째 연최소·최대유량 크기와 지속기간, 셋째 연최소·최대유량의 발생시기, 넷째 고·저맥파의 빈도와 주기, 다섯째 수문곡선 변화 비율과 빈도이다.

32개의 수문변화지표는 하천생태계의 개체군 동태론, 먹이사슬 관계, 종간의 경쟁 등 생태적 기능과 연계한 모형으로 개발되었다(Richter *et al.*, 1996). 일 유량자료를 분석하여 최소 및 최대유량의 크기와 변화를 평가하고, 1일, 3일, 7일, 30일, 90일 등 다양한 기간의 분석결과와 연최대·최소유량의 Julian date를 제공한다.

일단위의 수문자료는 홍수사상과 같이 시간단위의 특성을 가지지는 않지만, 일평균 유량의 비교·분석 방법은 년간의 수문변화 특성을 제공하기 때문에 홍수사상 보다 더 역동적인 수문응답 요소가 반영된다

Table 1. Summary of Hydrologic Parameters used in the IHA and Their Characteristics

IHA statistics group	Regime characteristics	Hydrologic parameters
Group 1: Magnitude of monthly water conditions	Magnitude Timing	Mean value for each calendar month
Group 2: Magnitude and duration of annual extreme water conditions	Magnitude Duration	Annual minima(/maxima) 1-day means Annual minima(/maxima) 3-day means Annual minima(/maxima) 7-day means Annual minima(/maxima) 30-day means Annual minima(/maxima) 90-day means
Group 3: Timing of annual extreme water conditions	Timing	Julian date of each annual 1 day maximum(/minimum)
Group 4: Frequency and duration of high and low pulses	Magnitude Frequency Duration	No. of high(/low) pulses each year Mean duration of high(/low) pulses within each year
Group 5: Rate and frequency of water condition changes	Frequency Rate of change	Means of all positive(/negative) differences between consecutive daily means No. of rises(/falls)

(Magilligan *et al.*, 2005). 이와 같은 이유로 수문변화지표 모형은 일간 상승률(해석학적으로 댐 건설후의 유량 변화율)과 하강율을 분석하여 년평균 상승률, 하강율과 그 횟수를 계산하여 제공한다. 만일 일평균유량의 증감 방향이 다르면(상승 또는 하강), 이것을 한번의 변환(reversal)으로 산정하여 일년 동안의 횟수를 계산하게 된다.

최고와 최저 유량의 주기와 기간을 생태계에 매우 중요한 영향을 미치게 된다(Magilligan *et al.*, 2005). 따라서 수문변화지표 모형은 수문곡선의 맥파(pulse) 특성을 제공한다. 맥파는 댐 건설전의 일정기간동의 수문곡선이 75%를 초과하거나, 25% 이하로 떨어지는 기간을 말하며, 댐 건설전의 수문곡선에 75%와 25%에 해당하는 꼬리부분이다. 최대, 최소유량의 맥파는 발생횟수와 기간은 연 단위로 산정한다.

2.2 유량변화정도 분석 개념

Richter *et al.*(1997, 1998)은 하천의 유량특성을 근거로 유량변화정도 분석법(Range of Variability Approach, RVA)을 Eq. (1)과 같이 제안 하였다. 유량 변화정도 분석 개념은 하천에서의 댐 건설과 같은 인위적인 영향으로 인하여 자연하천의 유량특성이 변화하고 이로 인하여 생태계에 미치는 영향을 완화하는 하천 유량관리와 복원방안을 제시하는 도구로 사용되고 있다.

$$D = \frac{N_o - N_e}{N_e} \times 100 \quad (1)$$

여기서 D 는 유량변화정도, N_o 는 관측된 유량자료 중에서 RVA의 목표값 범위에 포함되는 유량이 관측된 횟수, N_e 는 기대되는 유량자료 중에서 RVA의 목표값 범위에 포함되는 유량이 발생할 것으로 예상되는 횟수이다.

RVA의 목표값 범위는 관측된 유량값들 중에서 27% ~ 75% 범위에 해당하는 유량값으로 정한다. 일반적으로 N_o 는 댐 건설과 같은 인위적인 요인에 의해 유량변화가 발생한 이후의 유량자료를 적용하고(유량 변화후), N_e 는 댐 건설과 같은 인위적인 요인에 의해 유량변화가 발생하기 이전의 유량자료를 적용(유량 변화전)한다(Richter *et al.*, 1997, 1998).

$D = 0$ 은 유량 변화가 거의 없는 경우, $D > 0$ 은 유량 변화후의 유량이 유량 변화전 보다 증가한 경우, $D < 0$ 은 유량 변화후의 유량이 유량 변화전 보다 감소한 경우에 해당한다.

3. 분석 대상댐 및 수문자료

본 연구는 홍수조절과 발전, 용수공급 등의 역할을 하는 다목적댐을 대상으로 하여 Fig. 1 및 Table 2(한국수자원공사, 2007)와 같이 소양강댐을 포함하여 우리나라의 주요 다목적댐 11 개소를 선정하였다. 본 연구가 장기간의 댐 유입량과 방류량의 변화를 비교·분석하여 하류에 미치는 영향을 검토하는 것을 목적으로 하기 때문에 수문자료가 있더라도 현재 건설중 이거나 댐 운영후 3년 이내는 분석대상에서 제외하였다. 남강댐과 같이 홍수량의 대부분을 다른 유역인 가화천으로 방류

Table 2. Site Used for Analysis and Their Associated Characteristics

Dam	River	Drainage area (km ²)	Basin occupation rate (%)	Gross reservoir capacity (10 ⁶ m ³)	Active capacity (10 ⁶ m ³)	Flood control capacity (10 ⁶ m ³)
So Yang	North Han	2,703	10.4	2,900	1,900	500
Chung Ju	South Han	6,648	25.6	2,750	1,789	616
Hoing Sung	Gye Cheon	209	0.8	86.9	73.4	9.5
Dae Chung	Geum	3,204	32.7	1,490	790	250
Bo Ryoung	Ung Cheon	163.6	69.7	116.9	108.7	10
An Dong	Nak Dong	1,584	6.7	1,248	1,000	110
Im Ha	Ban Byeon Cheon	1,361	5.8	595	424	80
Hap Cheon	Hang	925	4.0	790	560	80
Mil Yang	Dong Chang Cheon	95.4	0.4	73.6	69.8	6
Sum Jin	Sum Jin	763	15.6	466	370	32
Ju Am	Bo Seong	1,010	20.6	457	352	60

하고 있어 분석에서 제외하였다. 주암댐의 경우에는 본 댐으로 유입하는 유량의 일부를 조절지댐으로 공급하고 있으나 주암 본댐에서 용수공급 및 홍수조절을 하고 있어 분석 대상에 포함하였다. 대청댐의 경우 용담댐의 건설로 인하여 유입량의 인위적인 변화가 예상되므로 분석기간을 용담댐 운영전까지로 하였으나, 용담댐은 운영기간이 짧아 분석 대상에서 제외하였다.

본 연구에서는 국가수문정보시스템에서 제공하는 수문자료를 활용하였으며, 댐별 분석기간은 Table 3과 같다. 댐 지점에서의 유입량은 댐 상류지역으로 취수 또는 도수하는 모든 유량을 포함하여 댐으로 유입하는 전체 유량자료를 적용하였으며, 댐 하류측의 방류량을 댐 운영후의 댐 상류지역으로 취수 또는 방류하는 유량은 제외하고, 순수히 댐 하류하천으로 방류한 자료를 사용하였다. 조정지댐이 있는 충주댐, 안동댐, 합천댐, 임하댐, 주암댐은 댐 하류측의 방류량을 조정지댐의 방류량 자료를 사용하였다.

댐 운영으로 하류하천의 유량변화에 미치는 영향분석은 댐 하류지점의 수위관측소에서 관측된 수문자료를 적용하여야 한다. 그러나 댐 직하류 구간의 수문자료를 구할 수 있는 수위관측소가 없는 경우가 대부분이다. 또한 댐 건설전·후의 일관성 있는 관측자료의 확보가 어려울 뿐만 아니라 수위관측소 위치에 따라 지류가 유입하는 경우 지류의 영향을 별도로 고려하여야 하며, 배수위와 같은 댐의 영향과 기후변화에 대한 영향요인도 함께 고려하여야 하기 때문에 일반적으로 댐 지점에서의 유입량을 댐 운영전 입력자료, 댐 하류측으로 방류량을 댐 운영후의 입력 자료로 설정하여 비교·분석하고 있다(Willams and Wolman, 1984).

4. 수문변화 지표 분석

4.1 월 유량의 변화 크기

월 유량의 변화는 월 단위로 댐 운영계획을 수립하는 우리나라의 경우 댐 운영과 가장 직결된 지표가 된다. 소양강댐 등 11개 다목적댐의 월 유량변화의 산정 결과는 Fig. 2와 Table 4 및 Table 5와 같다. 갈수기에

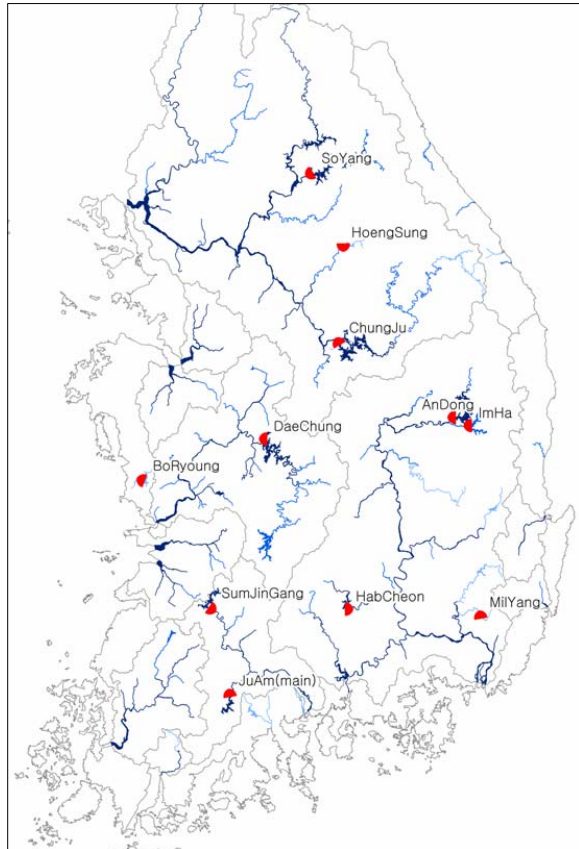


Fig. 1. Location Map of the Study Dams

Table 3. Information of the Dam Close and Analysis Years

Dam	Dam closed	Analysis years	Duration (years)	Analysis site
So Yang	1973. 12	1974 ~ 2006	33	dam
Chung Ju	1986. 10	1986 ~ 2006	21	regulation dam
Hoing Sung	2002. 11	2001 ~ 2006	6	dam
Dae Chung	1981. 6	1981 ~ 2006	26	regulation dam
Bo Ryoung	2000. 6	1999 ~ 2006	8	dam
An Dong	1977. 5	1977 ~ 2006	30	regulation dam
Im Ha	1993. 12	1993 ~ 2006	14	regulation dam
Hap Cheon	1989. 12	1990 ~ 2006	17	regulation dam
Mil Yang	2002. 12	2002 ~ 2006	5	dam
Sum Jin	1965. 12	1975 ~ 2006	32	dam
Ju Am	1992. 12	1991 ~ 2006	16	dam

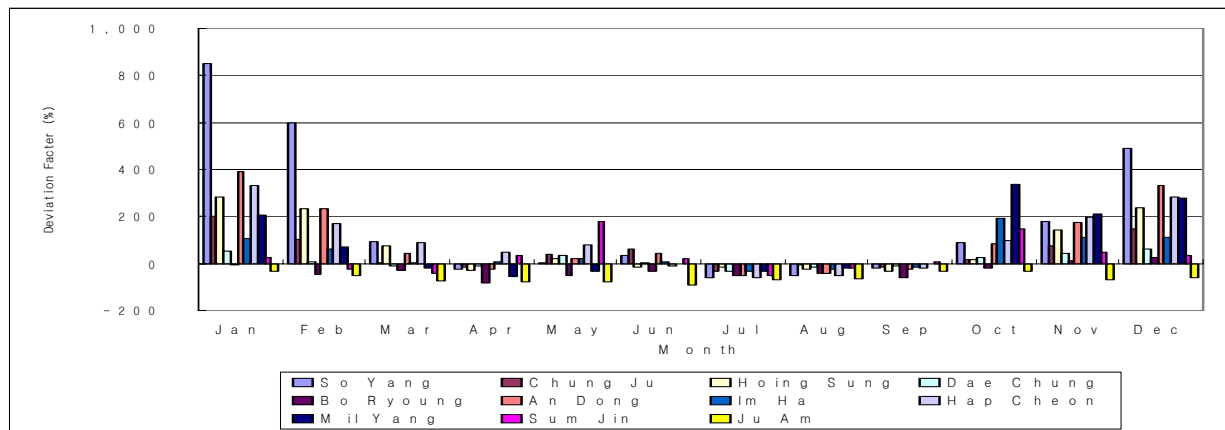


Fig. 2. Percent Difference between Inflow & Outflow for Monthly Flow

Table 4. Difference between Inflow & Outflow for Monthly Flow (m³/sec)

Dam	Rem.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
So Yang	inflow	6.51	9.11	28.37	66.05	60.40	56.57	208.80	207.90	130.00	30.89	21.76	11.34
	outflow	61.85	63.66	55.23	49.49	62.79	75.02	78.76	101.50	103.40	57.97	60.74	66.89
Chung Ju	inflow	22.39	33.78	70.68	124.60	116.60	146.00	597.50	462.60	330.00	85.97	47.25	32.16
	outflow	67.86	68.31	71.50	107.60	163.50	237.30	395.60	435.00	278.10	100.20	83.32	79.88
Hoing Sung	inflow	0.58	0.68	1.28	3.43	3.30	4.81	32.84	14.79	9.17	2.99	0.87	0.59
	outflow	2.24	2.24	2.23	2.52	4.06	4.10	28.20	11.03	6.25	3.46	2.11	1.99
Dae Chung	inflow	19.59	28.16	42.83	53.40	50.96	91.06	289.40	224.60	160.90	40.85	26.20	23.30
	outflow	29.73	30.66	38.34	48.73	69.04	91.98	195.80	192.20	141.00	50.39	37.58	37.89
Bo Ryoung	inflow	0.60	1.02	0.79	2.86	3.02	5.20	15.70	13.63	9.17	2.02	0.47	0.46
	outflow	0.55	0.55	0.55	0.52	1.43	3.37	7.78	7.70	3.58	1.60	0.53	0.57
An Dong	inflow	5.42	8.05	15.27	29.05	26.86	33.65	96.53	84.27	63.40	15.01	9.36	6.80
	outflow	26.69	26.87	22.01	21.71	31.96	48.27	45.24	48.09	47.02	27.67	25.70	29.40
Im Ha	inflow	3.76	4.72	8.77	18.25	21.27	27.46	76.09	76.48	48.73	7.75	4.21	3.95
	outflow	7.83	7.72	8.97	19.64	25.44	29.95	51.16	58.09	41.41	22.66	8.96	8.44
Hap Cheon	inflow	4.44	6.29	8.40	11.70	11.75	24.32	62.24	66.03	41.63	10.79	6.49	5.66
	outflow	19.24	16.86	15.83	17.21	20.95	21.57	23.85	30.91	33.27	21.32	19.31	21.59
Mil Yang	inflow	0.43	0.79	1.43	3.71	4.93	3.09	13.41	11.83	6.10	0.42	0.45	0.40
	outflow	1.30	1.34	1.15	1.57	3.28	3.00	9.18	9.28	6.13	1.84	1.40	1.51
Sum Jin	inflow	4.08	7.59	10.07	13.58	9.99	22.06	56.03	44.97	26.58	4.47	3.74	4.23
	outflow	5.09	5.71	5.62	18.49	27.85	27.18	27.63	36.93	28.20	11.06	5.59	5.67
Ju Am	inflow	2.38	2.95	5.03	8.17	12.32	23.99	59.73	78.37	44.00	7.89	4.23	3.16
	outflow	1.55	1.44	1.42	1.69	2.74	1.99	18.57	29.09	30.19	5.24	1.35	1.24
Average	inflow	6.38	9.38	17.54	30.44	29.22	39.84	137.12	116.86	79.06	19.00	11.37	8.37
	outflow	20.36	20.49	20.26	26.29	37.55	49.43	80.16	87.26	65.32	27.58	22.42	23.19

Table 5. Percent Difference between Inflow & Outflow for Monthly Flow (%)

Dam	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
So Yang	850.30	598.60	94.72	-25.07	3.96	32.60	-62.28	-51.19	-20.44	87.70	179.10	490.00
Chung Ju	203.10	102.30	1.15	-13.67	40.19	62.55	-33.79	-5.96	-15.74	16.50	76.34	148.40
Hoing Sung	284.60	231.40	75.06	-26.49	23.25	-14.63	-14.13	-25.47	-31.82	16.01	142.50	238.80
Dae Chung	51.74	8.87	-10.49	-8.75	35.48	1.01	-32.35	-14.45	-12.42	23.36	43.45	62.65
Bo Ryoung	-7.91	-45.99	-30.25	-81.92	-52.82	-35.19	-50.44	-43.52	-61.00	-21.18	12.40	23.83
An Dong	392.20	233.90	44.12	-25.28	18.99	43.42	-53.13	-42.94	-25.83	84.36	174.50	332.70
Im Ha	108.20	63.70	2.27	7.61	19.56	9.09	-32.76	-24.04	-15.04	192.50	113.10	113.50
Hap Cheon	333.70	168.10	88.46	47.08	78.26	-11.31	-61.68	-53.19	-20.08	97.50	197.70	281.30
Mil Yang	204.80	69.04	-19.53	-57.78	-33.43	-3.04	-31.55	-21.53	0.42	337.90	210.00	279.80
Sum Jin	24.81	-24.87	-44.25	36.18	178.8	23.24	-50.68	-17.88	6.101	147.4	49.48	33.97
Ju Am	-34.81	-51.14	-71.84	-79.34	-77.76	-91.71	-68.91	-62.88	-31.39	-33.57	-68.20	-60.82
Average	200.98	112.99	11.04	-18.62	19.96	1.84	-40.39	-29.59	-18.19	79.87	95.11	163.01

해당하는 1월부터 6월과 10월부터 12월까지 8개월간은 유입량이 6.38 m³/sec ~ 39.84 m³/sec이었으나, 방류량은 20.36 m³/sec ~ 49.43 m³/sec로 1.84 % ~ 200.98 %가 증가하였다. 우기철인 7월부터 9월까지 3개월간은 유입량이 79.06 m³/sec ~ 137.12 m³/sec이었으나, 방류량은 65.32 m³/sec ~ 87.26 m³/sec로 18.19 % ~ 40.39 %가 감소하였다.

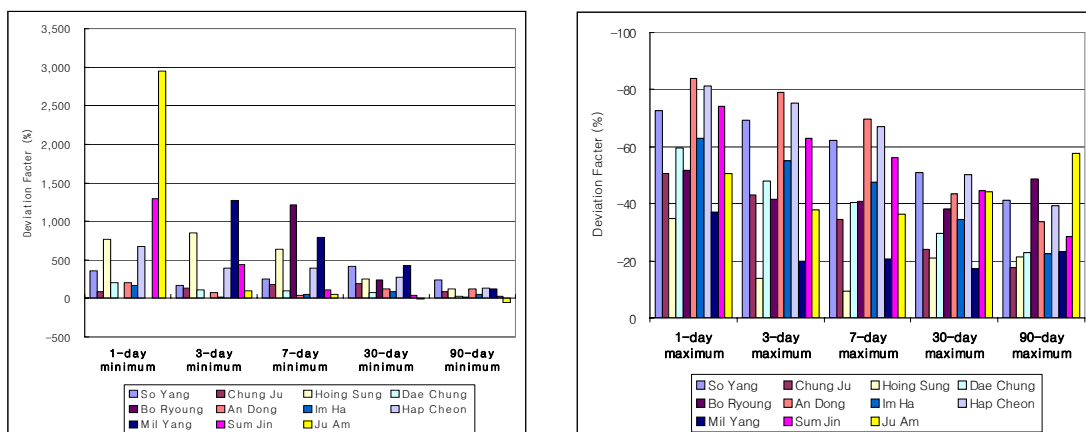
4.2 연 최소·최대유량 크기와 지속기간

댐으로 인한 가장 큰 변화는 최소와 최대유량의 변화이다. 일반적으로 다목적댐의 경우 최소유량은 증가하고, 최대유량은 감소하는 경향이 있다(Richter *et al.*, 1998; Magilligan *et al.*, 2005).

소양강댐 등 11개 다목적댐의 연 최소유량 변화의 산정 결과는 Fig. 3과 Table 6 및 Table 7과 같다. 1일 최소유량은 갈수기 동안 댐의 용수공급, 발전 등 댐 운영과 관련된 지표이다. 댐 운영으로 인한 하류하천으로 방류하는 1일 최소유량은 충주댐이 7.59 m³/sec에서 13.87 m³/sec로 82.86 %가 증가하였으며, 주암댐이 0.03

m³/sec에서 0.81 m³/sec로 2,950 %가 증가하였다. 월단위의 댐 운영계획에 중요한 30일 최소유량은 주암댐이 1.22 m³/sec에서 1.16 m³/sec로 4.57 %가 감소하였으나 밀양댐이 0.14 m³/sec에서 0.76 m³/sec로 430.70 %가 증가하였다. 계절적인 요인을 반영하는 90일 최소유량은 주암댐이 2.93 m³/sec에서 1.23 m³/sec로 58.05 %가 감소하였으나 소양강댐은 11.47 m³/sec에서 39.41 m³/sec로 243.40%가 증가하였다.

소양강댐 등 11개 다목적댐의 연 최대유량 변화의 산정 결과는 Table 8 및 Table 9와 같다. 기간별 최대유량은 댐의 홍수조절과 관련된 지표이다. 1일 및 3일 최대유량은 홍수사상의 침투유량 변화를 분석하여 제공한다. 댐 운영으로 인한 1일 최대유량은 횡성댐이 329.20 m³/sec에서 214.70m³/sec로 34.78 %가 감소하였으며, 안동댐이 1,090 m³/sec에서 174.80 m³/sec로 83.96 %가 감소하였다. 3일 최대유량은 횡성댐이 186.60 m³/sec에서 160.90 m³/sec로 13.74 %가 감소하였으며, 안동댐이 652.0 m³/sec에서 137.9 m³/sec로 78.85 %가 감소하였다.



(a) minimum flow

(b) maximum flow

Fig. 3. Percent Difference between Inflow & Outflow for Min. & Max. Flow

Table 6. Difference between Inflow & Outflow for Minimum Flow (m³/sec)

Dam	Rem.	1-day minimum	3-day minimum	7-day minimum	30-day minimum	90-day minimum
So Yang	inflow	0.48	1.60	2.59	4.31	11.47
	outflow	2.20	4.23	8.95	21.96	39.41
Chung Ju	inflow	7.59	10.43	12.36	16.60	32.48
	outflow	13.87	24.39	33.95	48.66	59.11
Hoing Sung	inflow	0.05	0.07	0.12	0.36	0.76
	outflow	0.43	0.69	0.91	1.28	1.72
Dae Chung	inflow	3.28	5.91	7.24	10.30	20.05
	outflow	9.79	12.22	14.30	17.74	25.07
Bo Ryoung	inflow	0.00	0.00	0.03	0.14	0.45
	outflow	0.21	0.32	0.35	0.47	0.52
An Dong	inflow	0.59	1.55	2.62	3.85	6.96
	outflow	1.78	2.80	3.80	8.44	15.76
Im Ha	inflow	0.17	0.58	0.90	1.41	3.51
	outflow	0.46	0.70	1.41	2.65	5.39
Hap Cheon	inflow	0.54	1.23	1.64	2.65	5.06
	outflow	4.16	6.00	7.96	9.97	11.65
Mil Yang	inflow	0.00	0.05	0.08	0.14	0.42
	outflow	0.44	0.64	0.68	0.76	0.92
Sum Jin	inflow	0.03	0.09	0.28	0.93	2.93
	outflow	0.43	0.46	0.57	1.28	3.64
Ju Am	inflow	0.03	0.51	0.73	1.22	2.93
	outflow	0.81	1.04	1.08	1.16	1.23

Table 7. Percent Difference between Inflow & Outflow for Minimum Flow (%)

Dam	1-day minimum	3-day minimum	7-day minimum	30-day minimum	90-day minimum
So Yang	358.90	165.40	245.40	409.80	243.40
Chung Ju	82.86	133.90	174.70	193.10	81.99
Hoing Sung	766.70	853.80	638.50	250.70	125.70
Dae Chung	198.40	106.70	97.46	72.24	25.05
Bo Ryoung	-	-	1,213.00	234.40	14.72
An Dong	203.40	80.53	44.88	119.00	126.40
Im Ha	166.70	21.90	55.88	88.43	53.59
Hap Cheon	676.90	387.10	386.30	276.40	130.40
Mil Yang	-	1,271.00	785.20	430.70	119.90
Sum Jin	1,290.00	433.70	105.00	37.24	24.12
Ju Am	2,950.00	102.60	48.49	- 4.57	- 58.05

4.3 고·저맥파의 빈도와 주기

수문곡선의 맥파(pulse)는 하천생태계에 결정적인 역할을 한다(Richter *et al.*, 1998). 수문곡선이 25 % 이하로 떨어지는 기간을 저맥파, 75 %를 초과하는 기간을 고맥파로 분류한다. 고·저맥파의 빈도와 주기 변화의

산정 결과는 Table 10 및 Fig. 4과 같다. 댐 운영이후 저맥파의 발생 횟수는 29.67 % ~ 99.07 %가 감소하였으며, 저맥파의 기간은 -73.338 % ~ 681.10 %까지 분포하였다. 고맥파의 발생 횟수는 댐 조절방류 이후 4.60 % ~ 92.35 %가 감소하였으며, 고맥파의 기간은 2.00 % ~ 137.50 %가 증가하였다.

Table 8. Difference between Inflow & Outflow for Maximum Flow (m³/sec)

Dam	Rem.	1-day maximum	3-day maximum	7-day maximum	30-day maximum	90-day maximum
So Yang	inflow	2,232.00	1,538.00	913.60	381.30	202.00
	outflow	612.20	474.20	344.60	187.70	118.70
Chung Ju	inflow	6,037.00	3,903.00	2,368.00	977.30	504.70
	outflow	2,974.00	2,219.00	1,551.00	744.30	414.90
Hoing Sung	inflow	329.20	186.60	122.20	44.74	20.40
	outflow	214.70	160.90	110.80	35.30	16.04
Dae Chung	inflow	2,721.00	1,682.00	1,044.00	451.90	248.60
	outflow	1,101.00	875.90	620.80	317.80	192.30
Bo Ryoung	inflow	215.70	111.00	63.68	28.17	14.58
	outflow	104.00	64.70	37.72	17.37	7.46
An Dong	inflow	1,090.00	652.00	392.90	159.50	89.26
	outflow	174.80	137.90	118.60	90.30	59.33
Im Ha	inflow	1,141.00	665.60	375.00	156.00	74.94
	outflow	424.30	299.70	196.70	102.50	58.14
Hap Cheon	inflow	648.20	384.80	243.20	113.60	62.47
	outflow	121.90	95.15	80.52	56.71	37.90
Mil Yang	inflow	182.70	89.27	49.73	22.13	11.50
	outflow	115.00	71.56	39.52	18.35	8.82
Sum Jin	inflow	616.10	344.20	202.60	90.54	48.85
	outflow	159.80	128.00	88.46	50.25	34.88
Ju Am	inflow	718.50	431.30	268.10	123.40	66.71
	outflow	355.60	268.00	171.10	68.88	28.12

Table 9. Percent Difference between Inflow & Outflow for Maximum Flow (%)

Dam	1-day maximum	3-day maximum	7-day maximum	30-day maximum	90-day maximum
So Yang	- 72.58	- 69.17	- 62.28	- 50.76	- 41.24
Chung Ju	- 50.74	- 43.14	- 34.50	- 23.84	- 17.79
Hoing Sung	- 34.78	- 13.74	- 9.28	- 21.09	- 21.40
Dae Chung	- 59.55	- 47.92	- 40.53	- 29.68	- 22.66
Bo Ryoung	- 51.79	- 41.70	- 40.77	- 38.34	- 48.82
An Dong	- 83.96	- 78.85	- 69.82	- 43.38	- 33.53
Im Ha	- 62.81	- 54.97	- 47.56	- 34.31	- 22.42
Hap Cheon	- 81.20	- 75.28	- 66.90	- 50.08	- 39.33
Mil Yang	- 37.07	- 19.84	-20.54	- 17.06	- 23.32
Sum Jin	- 74.06	- 62.81	- 56.33	- 44.49	- 28.60
Ju Am	- 50.51	- 37.86	- 36.16	- 44.18	- 57.85

Table 10. Percent Difference between Inflow & Outflow for the Low Pulse Count and Duration, High Pulse Count and Duration

Dam	Low pulse count	Low pulse duration	High pulse count	High pulse duration
So Yang	- 53.26	- 46.88	- 92.35	92.00
Chung Ju	- 64.53	- 73.16	- 77.00	60.94
Hoing Sung	- 98.06	- 27.18	- 63.33	64.87
Dae Chung	- 71.57	281.30	- 79.08	47.71
Bo Ryoung	- 95.71	34.69	- 68.85	98.55
An Dong	- 71.61	127.40	- 74.58	92.11
Im Ha	- 84.58	681.10	- 85.87	104.50
Hap Cheon	- 94.09	28.15	- 73.33	137.50
Mil Yang	- 99.07	- 73.33	- 52.63	39.42
Sum Jin	- 78.10	416.00	- 87.88	8.28
Ju Am	- 29.67	153.40	- 4.60	2.00

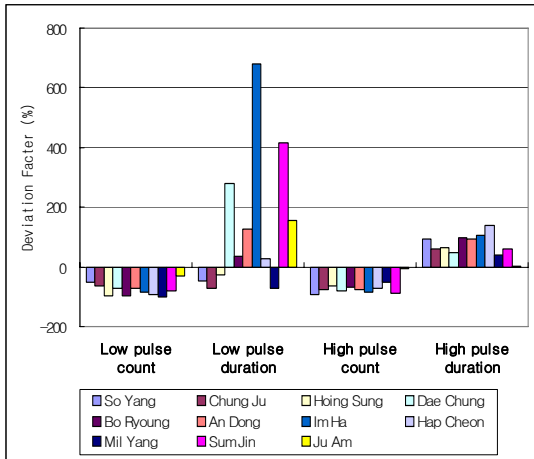


Fig. 4. Low & High Pulse Count and Duration

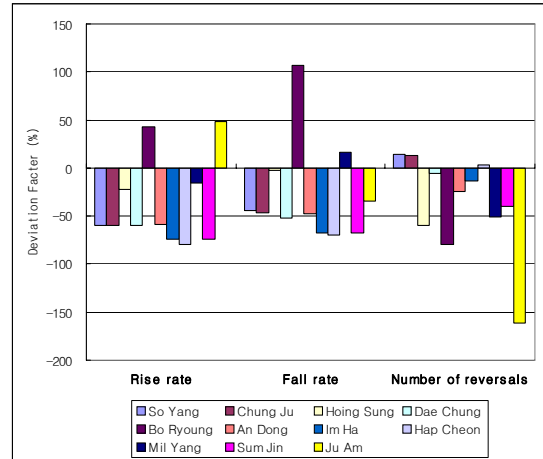


Fig. 5. Rise & Fall Rate, Number of Reversal

Table 11. Percent Difference between Inflow & Outflow for Number of Hydrograph Reversal, Rise Rate, Fall Rate

Dam	Rise rate	Fall rate	Number of reversals
So Yang	- 59.79	- 44.80	14.45
Chung Ju	- 59.38	- 46.24	12.79
Hoing Sung	- 21.71	- 1.97	- 60.04
Dae Chung	- 59.78	- 52.12	- 5.71
Bo Ryoung	42.66	107.10	- 79.52
An Dong	- 58.97	- 47.87	- 24.23
Im Ha	- 74.13	- 67.32	- 13.16
Hap Cheon	- 79.31	- 69.90	3.15
Mil Yang	- 15.84	15.92	- 50.47
Sum Jin	- 74.51	- 67.01	- 39.61
Ju Am	48.67	- 34.57	- 161.40

4.4 수문곡선 변화 비율과 빈도

IHA모형에서 제공하는 상승율과 하강율, 상승에서 하강 또는 하강에서 상승의 횟수는 수문곡선 형상변화를 대표한 지표이다. 상승율과 하강율, 상승에서 하강 또는 하강에서 상승의 횟수는 유량변화의 역동성을 분석하여 정보를 제공한다. 수문곡선 변화 비율과 빈도의 산정 결과는 Table 11 및 Fig. 5와 같다. 상승률은 15.84 % ~ 79.31 %가 감소하였으며, 하강율은 -69.90 % ~ 107.10 %까지 분포하였다. 상승에서 하강 또는 하강에서 상승의 횟수는 14.45 % ~ -161.40 %로 분석되었다.

5. 유량변화정도 분석

수문변화 지표법에서는 RVA Category를 3개의 범위로 구분하는데 Lowest Category 33 % 이하, Middle Category는 34 % ~ 66 %, Highest RVA Category는 67 % 이상에 해당하는 유량을 기준으로 설정하게 된다 (Nature Conservancy, 2007). 본 연구에서는 유량변화

정도 분석의 목표범위를 Richter *et al.*(1997, 1998)이 제안한 방법과 같이 댐으로 유입하는 유입량의 25 %와 75 %에 해당하는 값을 기준으로 설정하였으며, 분석기준은 Highest RVA Category로 하였다.

Highest RVA Category는 댐으로 유입하는 유입량의 75 %에 해당하는 값을 기준유량으로 정하고, 이 기준유량을 초과하는 유입량이 유입하는 횟수와 댐 조절 후 방류량이 이 기준유량을 초과하는 횟수를 산정하고, Eq. (1)을 적용하여 유량변화정도를 분석하게 된다. 유량변화정도가 음인 것은 댐 조절 후 방류량이 기준유량을 초과하는 발생횟수가 감소 한 것이며, 양의 값은 기준유량을 초과하는 발생횟수가 증가 한 것을 의미한다. 0은 기준유량을 초과하는 유량의 발생횟수와 댐 조절 후의 방류량의 발생횟수와 동일한 것을 의미한다.

Highest RVA Category에 대한 유량변화정도를 분석한 결과는 Fig. 6과 Table 12와 같다. 1일 최소유량에 대한 유량변화정도는 0.60에서 2.67 증가하였으며, 3일, 7일, 30일, 90일 최소유량에 대한 유량변화정도 역시 증가하였다. 이것은 댐으로 유입하는 유량을 댐에서 조절

방류 함으로써 최소 방류량이 증가한 것으로 분석될 수 있다. 주암댐의 경우 유역변경으로 주암 조절댐에 용수를 공급함에 따라 하류하천의 7일, 30일 90일 최소유량은 감소한 것으로 판단된다.

1일 최대유량에 대한 유량변화정도는 0.50에서 1.00으로 감소하였으며, 3일, 7일, 30일, 90일 최대유량에 대한 유량변화정도 역시 감소하였다. 이것은 댐으로 유입하는 홍수량을 댐에서 조절함에 따라 하류로 유하 하는 홍수량이 감소한 것으로 분석될 수 있다. 횡성댐, 보령댐, 밀양댐의 경우에는 3일, 7일 30일 최대유량의 유량변화정도가 0으로 댐으로 유입하는 유량과 조절후 유량

의 발생횟수가 같은 것으로 분석되었다.

Table 13과 Fig. 7은 소양강댐의 Highest RVA Category를 기준으로 유입량과 댐 조절후 하류로 방류한 방류량의 발생횟수와 유량변화정도를 분석한 결과이다. 최소유량의 발생횟수는 댐 조절이후 증가하였으나, 최대유량의 발생횟수는 댐 조절이후 감소한 것으로 분석되었다. 이에 따라, 최소유량의 유량변화정도 역시 1.50에서 7.00으로 증가하였으며, 댐 조절이후 유량이 상당히 개선된 것으로 판단된다. 최대유량의 유량변화정도는 0.80에서 1.00으로 감소하여 댐 조절 이후 하류로 방류되는 홍수량이 상당히 감소한 것으로 판단된다.

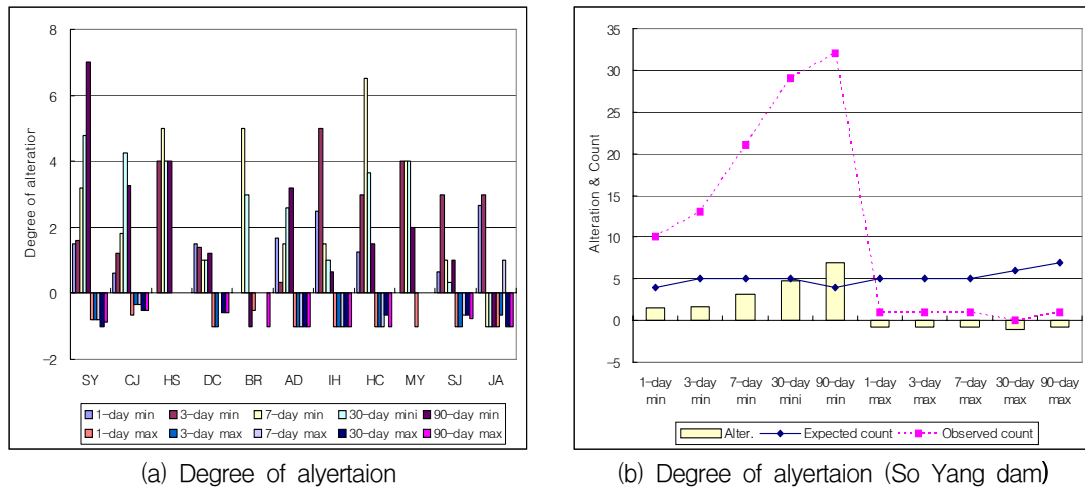


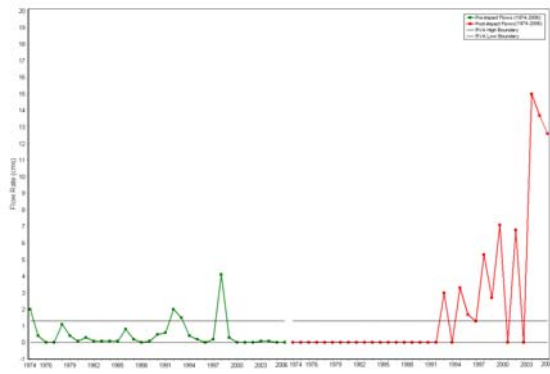
Fig. 6. Analysis Result of the RVA (Highest RVA Category)

Table 12. Measures of Hydrologic Alteration (Highest RVA Category)

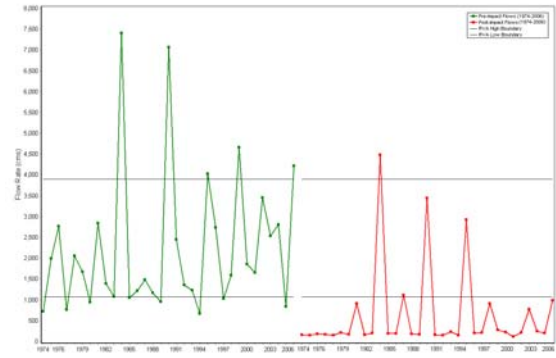
Dam	1-day minimum	3-day minimum	7-day minimum	30-day minimum	90-day minimum	1-day maximum	3-day maximum	7-day maximum	30-day maximum	90-day maximum
So Yang	1.50	1.60	3.20	4.80	7.00	-0.80	-0.80	-0.80	-1.00	-0.86
Chung Ju	0.60	1.20	1.83	4.25	3.25	-0.67	-0.33	-0.33	-0.50	-0.50
Hoing Sung	0.00	4.00	5.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Dae Chung	1.50	1.40	1.00	1.00	1.20	-1.00	-1.00	0.00	-0.60	-0.60
Bo Ryoung	0.00	0.00	5.00	3.00	-1.00	-0.50	0.00	0.00	0.00	-1.00
An Dong	1.67	0.33	1.50	2.60	3.20	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
Im Ha	2.50	5.00	1.50	1.00	0.67	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
Hap Cheon	1.25	3.00	6.50	3.67	1.50	-1.00	-1.00	-1.00	-0.67	-1.00
Mil Yang	0.00	4.00	4.00	4.00	2.00	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum Jin	0.67	3.00	1.00	0.33	1.00	-1.00	-1.00	-0.67	-0.67	-0.75
Ju Am	2.67	3.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-0.67	1.00	-1.00	-1.00
Average	1.12	2.41	2.68	2.51	1.98	-0.82	-0.62	-0.35	-0.58	-0.70

Table 13. RVA Analysis Result of So Yang Dam (Highest RVA Category)

Items	1-day minimum	3-day minimum	7-day minimum	30-day minimum	90-day minimum	1-day maximum	3-day maximum	7-day maximum	30-day maximum	90-day maximum
Expected count	4	5	5	5	4	5	5	5	6	7
Observed count	10	13	21	29	32	1	1	1	0	1
Alter.	1.50	1.60	3.20	4.80	7.00	-0.80	-0.80	-0.80	-1.00	-0.86



(a) 1-day minimum flow



(b) 1-day maximum flow

Fig. 7. RVA of So Yang Dam

6. 결과 고찰 및 결론

하천은 살아있는 유기체로 끊임없이 변화는 특성을 가지고 있다. 자연적인 유량변화인 주기적인 홍수와 가뭄은 하천을 삶의 터전으로 살아가는 생물들의 건전성을 유지하는 핵심적인 요소이다(Junk *et al.*, 1989). 그러나 댐 건설로 인한 유량변화는 하천생태계의 생물학적 구조와 기능에 중요한 영향을 미치게 된다(Poff *et al.*, 1997; Junk *et al.*, 1989).

미국의 경우에도, Graf(2006)는 1.2 km² 이상의 32개 대댐의 72개 구간에서 댐으로 인한 수문변화를 분석한 결과, 년 최대유량은 67%가 감소하였으며 반면 30일 기준 최소유량은 52%가 증가한 것으로 제시하였다. Richard 등(2005)은 미국 Wyoming주 Snake River의 Jackson Lake Dam 건설로 인하여 홍수(peak flows) 주기와 크기의 감소로 하천지형의 변화와 홍수터 고유 식생의 파괴에 결정적인 역할을 하였으며, 하천의 안정성과 홍수터 식생의 역동성에 큰 영향을 미치고 있다고 제시하였다. Gordon and Meentemeyer(2006)는 California 유역 Russian River의 Warm Springs 댐 건설 이후 Bankfull area가 94% 축소되고, Stream length는 64%가 변화되었으며, Riparian vegetation은 72%가 증가 하였다고 제시한 바 있다.

우리나라의 소양강댐 등 11개 주요 다목적댐의 가장 중요한 변화를 분석한 결과, 갈수기에 해당하는 1월부터 6월과 10월부터 12월까지 방류량은 20.36 m³/sec ~ 49.43 m³/sec로 유입량과 비교하여 1.84 % ~ 200.98 %가 증가하였다. 우기철인 7월부터 9월까지 방류량은 65.32 m³/sec ~ 87.26 m³/sec로 유입량과 비교하여 18.19 % ~ 40.39 %가 감소하였다. 연최소 및 최대 유량의 변화는 1일 최소유량은 82.86 % ~ 2,950 %가 증가하였으나, 1일 최대유량은 34.78 % ~ 83.96 %가 감소하였다. 이와 같은 유량변화는 댐이 홍수기 동안은

일시적으로 유입하는 홍수량을 저류하여 하류하천의 홍수를 조절하고, 갈수시에 발전 및 용수 안정적으로 공급하는 것을 목적으로 하고 있기 때문에 필연적이다.

합천댐의 1일 최소유입량이 0.54 m³/sec이었으나 방류량은 4.16 m³/sec로 676.90 %가 증가하였으며, 1일 최대유입량이 648.20 m³/sec이었으나 방류량은 121.90 m³/sec로 81.20 %가 감소하였으며(Table 6 ~ Table 9), 이에 따라 조정지댐에서 낙동강 합류점까지 사주면적은 58 %가 감소하고 식생사주 면적은 1,750 %가 증가한 것으로 조사된바 있다(최성욱 등, 2004).

Jorde(2006)는 댐 건설로 유량과 수질, 유사공급 변화가 1차적으로 발생하며, 이에 따라 홍수터(Floodplain)와 하도(Channel)에서의 지형, 수심·유속·유향 등 수리특성, 소류력, 유사의 크기와 입도구성 등 유사특성의 변화과정이 발생하고, 생물학적 영향 또는 생태학적 응답으로써 홍수터와 수변식생의 변화, 저서생물·어류·조류·포유류 등의 생물학적 변화 하는 것으로 제시한 바 있다.

금번 연구에서는 수문변화지표 모형을 적용하여 우리나라의 소양강댐 등 11개 주요 다목적댐을 대상으로 댐의 유입량과 방류량에 의한 유량의 크기, 연최소·최대유량 크기와 지속기간, 고·저택과 빈도와 주기, 수문곡선 변화 비율과 빈도, 유량변화정도를 분석하였으며, 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 월 유량변화는 갈수기에 해당하는 1월부터 6월과 10월부터 12월까지 8개월간은 유입량이 6.38 m³/sec ~ 39.84 m³/sec이었으나, 방류량은 20.36 m³/sec ~ 49.43 m³/sec로 1.84 % ~ 200.98 %가 증가하였다. 우기철인 7월부터 9월까지 3개월간은 유입량이 79.06 m³/sec에서 137.12 m³/sec이었으나, 방류량은 65.32 m³/sec ~ 87.26 m³/sec로 18.19 %에서 40.39 %가 감소하였다.

- 2) 고·저맥과의 빈도와 주기 변화결과, 저맥과가 발생한 횡수는 댐의 조절방류 이 29.67 % ~ 99.07 %가 감소하였으며, 고맥과가 발생한 횡수는 댐의 조절방류 이후 4.60 % ~ 92.35 %가 감소하였다. 수문곡선의 상승률은 15.84 % ~ 79.31 %가 감소하였으며, 하강율은 -69.90 % ~ 107.10 %가 감소하였다. 상승에서 하강 또는 하강에서 상승의 횡수는 3.15 % ~ 161.40 %로 변화폭이 큰 것으로 분석되었다. 유량변화의 역동성을 반영하는 상승에서 하강, 하강에서 상승으로의 변환 횡수는 14.45 % ~ -161.40 %로 변화폭이 상당히 크지만 전체적으로 크게 감소하였다.
- 3) 연 최소·최대 유량변화는 1일 최소유량이 충주댐은 7.59 m³/sec에서 13.87 m³/sec로 82.86 %가 증가하였으며, 주암댐은 0.03 m³/sec에서 0.81 m³/sec로 2,950 %가 증가하였다. 1일 최대유량은 횡성댐이 329.20 m³/sec에서 214.70m³/sec로 34.78 %가 감소하였으며, 안동댐이 1,090m³/sec에서 174.8 m³/sec로 83.96 %가 감소하였다.

수자원 이용의 극대화를 위하여 댐 건설이 피할 수 없는 상황이라면, 댐도 하천의 일부로써 인식하고 댐과 하천이 함께 공유할 수 있는 방안이 모색되어야 한다. 미국, 일본 등에서는 댐 건설로 인한 하류하천의 생태계 변화를 회복하기 위한 댐 운영방식 변화를 시도하고 있다. 따라서 본 연구는 댐 건설로 인한 하류하천에 미치는 영향을 분석하고 평가하여 댐 운영의 새로운 개념들이 전향적으로 도입되어야 할 시기에 필요한 연구라고 판단된다.

참 고 문 헌

김태균, 윤용남, 안재현 (2002). “댐 건설에 따른 하류 유황의 변화 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제6호, pp. 807-916.

박봉진, 김준태, 장창래, 정관수 (2008). “수문변화 지표법에 의한 영천댐이 하류하천에 미치는 유황변화 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제2호, pp. 163-172.

윤용남, 박무종 (1993). “댐 건설로 인한 5대수계 본류의 유황변화 분석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제13권, 제3호, pp. 79-91.

이진원, 김형섭, 우효섭 (1993). “댐 건설로 인한 5대수계 본류의 유황변화 분석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제13권, 제3호, PP. 79-91.

한국수자원공사 (2007). **댐운영실무편람**.

최성욱, 윤병만, 유효섭, 조강현 (2004). “댐건설에 의한 유황변화에 따른 하류 하도에서 하천지형학적 변화 및 식생피복의 변화 : 황강 합천댐 사례.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제1호, pp. 55-66.

Gordon, E., Meentemeyer, R.K. (2006). “Effects of Dam Operation and Land Use on Stream Channel Morphology and Riparian Vegetation.” *Geomorphology*, Vol. 82, pp. 412-429.

Graf, W. L. (2006) “Downstream Hydrologic and Geomorphic Effects of Large Dams on American Rivers.” *Geomorphology*, Vol. 79, pp. 336-360.

Jorde, P. E. (2006). “Reservoir Operation and Ecosystem Losses.” KICT, *The 2nd international Workshop on River Environment*, pp. 41-66.

Junk, W. J., Baylay, P. B., and Sparks, R. E. (1989). “The Flood Pulse Concept in River Floodplain Systems.” *Procedure International Large River Symposium*, Canada, Special Publication, *Fish Aquatic Science*, Vol. 106, pp. 110-127.

Lajoie, F., Assani, A. A., Roy, A. G., Mesfioui, M. (2007). “Impacts of Dams on Monthly flow Characteristics—the Influence of Watershed Size and Seasons.” *Journal of hydrology*, Vol. 334, pp. 423-439.

Magilligan F. J., Nislow K. H. (2005). “Change in Hydrologic Regime by Dams.” *Geomorphology*, Vol. 71, pp. 61-78.

Magilligan, F. J., Nislow, K. H, Graber, B. E. (2003). “Scale-Independent Assessment of Discharge Reduction and Riparian Disconnectivity Following Flow Regulation by Dam.” *Geological Society of America*, Vol. 31, No. 7, pp. 569-572.

Nature Conservancy (2007). *Indicators of Hydrologic Alteration Version 7 User's Manual*.

Olden, J. D., Poff, N. L. (2003). “Redundancy and the Choice of Hydrologic Indices for Characterizing Streamflow Regimes.” *River Research and Applications*, Vol. 19, pp. 101-121.

Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., Stromverg, J. C. (1997). “The Natural Flow Regime : A Paradigm for River Conservation and Restoration.” *Bioscience*, Vol. 47, No. 11, pp. 769-784.

- Poff, N. L., Olden, J. D., Merritt, D. M., Pepin, D. M. (2007). "Homogenization of Regional River Dynamics by Dams and Global Biodiversity Implications." *PNAS*, Vol. 104, No. 14,
- Poff, N. L., Olden, J. D., Pepin D. M., Bledsoe, B. P. (2006). "Placing Global Stream Flow Variability in Geographic and Geomorphic Contexts." *River Research and Applications*, Vol. 22, pp. 149-166.
- Richard, A. M., Mills, J. D., Wrazien, D. R., Bassett, B., Splinter, D. K. (2005). "Effects of Jackson Lake Dam on the Snake River and its floodplain Grand Teton National Park, Wyoming, USA." *Geomorphology*, No. 71, pp. 79-98.
- Richter, B. D., Baumgartner, Braun D. P., Powell J. (1998). "A Spatial Assessment of Hydrologic Alteration within a River Network." *Regulated Rivers: Research & Management*, No. 14, pp. 329-340.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. F., Powell, J., Braun, D. P. (1996). "A Method for Assessing Hydrologic Alterations within Ecosystems." *Conservation Biology*, Vol. 10, No. 4, pp. 1163-1174.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Wigington, B., Braun, D. P. (1997). "How Much Water Does a river Need ?" *Freshwater Biology*, Special Applied Issues Section, No. 37, pp. 231-249.
- Shiau, J. T., Wu, F. C. (2004). "Feasible Diversion and Instream Flow Release Using Range of Variability Approach." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 130, No. 5, pp. 395-404.
- Williams, G. P., Wolman, M. G. (1984). "Downstream Effects of Dams on Alluvial Rivers." *U.S. Geology Survey Professional Paper 1286*, pp. 1-83.

(논문번호:08-21/접수:2008.02.19/심사완료:2008.05.20)