

## 영산강 하구의 방류와 강우의 규모 및 빈도 상관성 분석

류호상\* · 이관홍  
인하대학교 해양과학과

### Relationships on Magnitude and Frequency of Freshwater Discharge and Rainfall in the Altered Yeongsan Estuary

HOSAHNG RHEW\* AND GUAN-HONG LEE

Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

하구둑으로 인해 담수의 공급이 간헐적으로 발생하는 영산강 하구에서는 담수의 방류가 하구의 유동패턴, 염분농도의 변이, 영양염 공급 등 하구환경과 생태계 반응을 주도하는 요인이다. 담수의 방류는 유역의 강우조건에 영향을 받으므로 담수의 방류시기 및 규모를 파악하기 위해서는 담수방류를 유발하는 강우조건과 강우-방류간 상관관계에 대한 이해가 필요하다. 또한 담수방류가 하구에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 방류의 규모와 더불어 빈도에 대한 고려가 필수적이다. 이 연구는 영산강 하구역의 담수방류를 예측하고 평가하는 도구로서 영산강 하구둑의 담수방류자료를 대상으로 강우에 보다 직접적으로 반응하는 극치방류의 확률분포함수를 파악하고 극치방류를 유발하는 강우조건을 판별하여 극치방류를 유발하는 강우와 극치방류 간의 빈도-규모 관계식을 도출하는 데 목적을 두었다. 13.7년(1997.1.1-2010.8.31)간의 일방류량 자료에 대하여 일연속방류를 분석의 기본단위인 방류이벤트로 정의하되 4일 이상의 일연속방류의 경우는 방류패턴에 토대를 둔 이벤트 분리 알고리즘을 적용하여 개별 이벤트를 식별하였다. 총 529건의 방류 이벤트에 대하여 14년간의 연 최고치 중 최솟값에 해당하는 133,656,000 m<sup>3</sup>을 기준으로 극치방류이벤트를 선별하고 부분시계열 빈도분석법을 적용하여 극치방류의 확률분포함수가 Weibull(k=1.4)함수를 따름을 확인하였다. 극치방류를 기준으로 대비되는 강우 1일전 3일합 강우량이며 최솟값은 50.98 mm인 것으로 나타났다. 이 기준에 따라 추출된 방류유발가능 강우군은 총 102건으로 극치방류이벤트의 수보다 많았다. 정준판별분석을 통해 3일합 강우량 이외에 관리수위대비(-1.35 m EL.) 하구호 수위가 방류유발 강우를 규정하는 중요한 요소라는 점과 방류유발가능 강우군을 선별하는 임계값을 104 mm로 제조정할 경우 3일합 강우량만으로 방류유발 강우를 규정할 수 있음을 확인하였다. 극치방류 유발 강우만을 대상으로 강우-방류 관계식을 수립한 결과 3일합-강우량( $\overline{r_{3day}}$ ), 3일합-강우량 재현주기( $T_{r3}$ ), 방류량(Discharge, D), 방류량 재현주기( $T_d$ )의 관계는  $D = 1.111 \times 10^8 + 1.677 \times 10^6 \overline{r_{3day}}$ , ( $\overline{r_{3day}} \geq 104$ ),  $T_d = 1.326 T_{r3}^{0.683}$ ,  $T_d = 0.117 \exp[0.0155 \overline{r_{3day}}]$ 로 나타났다. 100년 주기 3일합 강우(357 mm)에 의해 유발되는 방류량은 영산강 하구둑 방류량의 재현주기는 30.8년 정도이며 그 양은  $7.0979 \times 10^8$  m<sup>3</sup>이다. 담수방류의 재현주기 및 재현주기에 기초한 강우-방류 관계식은 영산강 하구역을 비롯하여 인위적으로 담수의 방류가 조절되는 하구역에서 담수의 영향을 평가하고 예측하는 데 기여할 수 있을 것이다.

The intermittent freshwater discharge has an critical influence upon the biophysical environments and the ecosystems of the Yeongsan Estuary where the estuary dam altered the continuous mixing of saltwater and freshwater. Though freshwater discharge is controlled by human, the extreme events are mainly driven by the heavy rainfall in the river basin, and provide various impacts, depending on its magnitude and frequency. This research aims to evaluate the magnitude and frequency of extreme freshwater discharges, and to establish the magnitude-frequency relationships between basin-wide rainfall and freshwater inflow. Daily discharge and daily basin-averaged rainfall from Jan 1, 1997 to Aug 31, 2010 were used to determine the relations between discharge and rainfall. Consecutive daily discharges were grouped into independent events using well-defined event-separation algorithm. Partial duration series were extracted to obtain the proper probability distribution function for extreme discharges and corresponding rainfall events. Extreme discharge events over the threshold 133,656,000 m<sup>3</sup> count up to 46 for 13.7y years, following the Weibull distribution with k=1.4. The 3-day accumulated rainfalls which occurred one day before peak discharges (1day-before-3day -sum rainfall), are determined as a control variable for discharge, because their magnitude is best correlated with that of the extreme discharge events. The minimum value of the corresponding 1day-before-3day-sum rainfall, 50.98mm is initially set to a threshold

\*Corresponding author: rhew0503@hanmail.net

for the selection of discharge-inducing rainfall cases. The number of 1day-before-3day-sum rainfall groups after selection, however, exceeds that of the extreme discharge events. The canonical discriminant analysis indicates that water level over target level (-1.35 m EL.) can be useful to divide the 1day-before-3day-sum rainfall groups into discharge-induced and non-discharge ones. It also shows that the newly-set threshold, 104mm, can just separate these two cases without errors. The magnitude-frequency relationships between rainfall and discharge are established with the newly-selected 1day-before-3day-sum rainfalls:  $D = 1.111 \times 10^8 + 1.677 \times 10^6 \overline{r_{3day}} (r_{3day} \geq 104, R^2 = 0.459)$ ,  $T_d = 1.326 T_{r3}^{0.683}$ ,  $T_d = 0.117 \exp[0.0155 \overline{r_{3day}}]$ , where  $D$  is the quantity of discharge,  $\overline{r_{3day}}$  the 1day-before-3day-sum rainfall,  $T_{r3}$  and  $T_d$  are respectively return periods of 1day-before-3day-sum rainfall and freshwater discharge. These relations provide the framework to evaluate the effect of freshwater discharge on estuarine flow structure, water quality, responses of ecosystems from the perspective of magnitude and frequency.

**Keywords:** Extreme statistics, Partial duration series, Return period, Estuary dam, Discriminant analysis

## 서 론

하구는 담수와 염수가 만나 기수역을 형성하는 지역이다. 하천에서 하구로 유입되는 담수와 조석, 파랑 작용에 의해 유동하는 염수의 상대적인 강도에 따라 성층이 나타나거나 부분혼합 혹은 완전혼합이 이루어진다(Dyer, 1998). 담수와 염수의 상대적인 강도는 하천 유량의 변동과 조석주기, 바람에 의한 취송류 발달 정도 등에 따라 장기 혹은 단기 시공간 스케일에서 다양하게 표출되며, 동일 하구의 담수-염수 혼합 패턴도 시공간적인 변이를 보인다(van Maren and Hoekstra, 2004; de Castro *et al.*, 2004; Garel *et al.*, 2009). 담수-염수 혼합의 평균 패턴과 시공간 변이는 하구 내 퇴적물 분포와 이동, 플럭(floc)의 발생과 침강에 영향을 미치며(Bird, 2000; Masselink and Hughes, 2003; Webster and Ford, 2010), 생지화학적 순환 및 하구 생태계 구조와 반응을 결정하는 핵심인자이다(Goñi *et al.*, 2009; Byun *et al.*, 2005; Miller *et al.*, 2008).

우리나라의 경우 주요하천과 지류하천의 하구 대부분이 하구둑으로 차단되어 있어 담수와 염수의 혼합 시기와 규모는 인위적인 수문개폐를 통한 담수의 방류에 의해 결정된다. 인공구조물에 의한 하구의 형태변화는 하구 내 조류속의 감소로 이어지는 경우가 대부분이어서(Kang, 1999; Byun *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2006), 하구둑으로 차단된 하구의 해수유동은 담수의 방류에 의해 주도되는 경우가 일반적이다. 일례로 낙동강 하구에서는 조석이 주도적인 역할을 담당하던 하구둑 건설 이전과 달리 하구둑 건설 이후 인위적인 수문개폐를 통해 간헐적으로 방류되는 하천 담수가 하구둑 외측의 해수유동을 주도되는 형태로 변모하였다(장과 김, 2006). 간헐적인 담수의 방류는 하구둑의 건설 이후 기수역의 감소로 인해 저염도 조건에 대한 완충 능력이 저하된 하구의 부유/저서 생태계에 '충격'으로 작용할 수 있으며(Miller *et al.*, 2008), 영양염 공급원으로서 식물플랑크톤의 대증식을 유도하는 작용을 하기도 한다(Byun *et al.*, 2005). 이는 모두 방류 규모에 따른 담수의 공간적 범위와 유동패턴, 담수-염수 혼합으로 인한 염도의 회복기간에 따라 결정된다. 하구둑으로 차단된 우리나라의 하구에서 방류 시기와 규모는 하구 환경을 이해하는 중요한 열쇠이다.

담수 방류에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 강우이다. 자연하구의 경우 담수 유량의 증가는 강우에 따라 시차를 두고 연속적으로 이루어져 최종적으로 하구를 통해 바다로 유입된다. 하구둑으로

로 차단되어 있는 하구의 경우 강우에 따른 하천 유량의 증가가 바로 담수 방류로 이어지지 않는다. 하구호의 저수용량에 여유가 있을 경우 일정 규모 이하의 강수는 방류를 유발하지 못한다. 하구호의 수위 유지 및 홍수 예방을 위한 사전 배제 등의 이유로 강우와는 무관하게 배수갑문의 개방이 이루어질 수도 있다. 그러나 홍수기와 같이 일정 규모 이상의 강우가 집중적으로 발생하는 시기에는 인위적인 조절이 개입될 수 있는 여지가 줄어들어 강우의 규모가 보다 직접적으로 배수갑문 개방을 촉발시키는 요인으로 작용한다. 매년 이례적으로 진행되는 대규모 방류(이하 극치방류)의 시기와 규모는 인위적인 조절보다는 유역 내 강우의 시기와 규모에 직접적인 영향을 받아 발생한다. 그러므로 극치방류의 경우 극치방류 유발 강우의 편별, 강우량과 극치방류량의 규모-빈도 상관관계의 수립이 가능하다. 극치방류에 초점을 맞출 경우 방류 규모에 따른 재현주기를 계산할 수 있으며, 강우의 재현주기와 방류 규모의 재현주기를 연계시킬 수 있다. 재현주기로 표현된 방류량이나 강우량은 일종의 표준화된 지표로서 그 활용도가 높다. 강우와 연계된 방류의 성격을 논의하기에 적합하며 방류의 영향을 정량화하기에 유리하다(Eyre and Ferguson, 2006).

국내에서 하천의 유량 혹은 유역의 유출량과 강우의 관련성을 다룬 연구들에 비해 하구둑 방류량 자료와 강우의 상관성을 분석한 연구는 많지 않다. 박 등(2008)이 윤 등(2003)이 제시한 Tank model을 이용하여 낙동강의 하천유량을 추정하고 이를 방류량과 비교하는 연구를 수행한 것이 거의 유일하다. 박 등(2008)의 연구에서 강우량은 하천유량을 추정하는 Tank model의 여러 입력변수 중 하나로 사용될 뿐이어서 이 연구를 강우량과 방류량 간의 직접적인 상관성을 분석한 연구라고 보기는 어렵다. 오히려 비교할 만한 연구는 방조제의 담수유출과 염분변동 간의 관계를 분석하고자 한 조 등(2008)의 연구이다. 조 등(2008)은 연구의 일환으로 방조제별 유역 월평균 강우량과 월평균 방류량 간의 상관성을 분석하여 0.8 이상의 높은 결정계수를 얻을 수 있음을 보였다. 그러나 강우와 하구둑 수문개방에 의해 발생하는 담수방류의 규모 간 직접적인 상관관계를 파악하여 강우자료로부터 담수 방류의 규모와 시기를 예측하는 관계식을 도출하는 작업은 아직 시도된 바 없다.

이 연구는 영산강 하구역의 담수방류를 예측하고 평가하는 도구로서 영산강 하구둑의 담수방류자료를 대상으로 강우에 보다 직접적으로 반응하는 극치방류의 확률분포함수를 파악하고 극치방

류를 유발하는 강우조건을 판별하여 극치방류를 유발하는 강우와 극치방류 간의 빈도-규모 관계식을 도출하는 데 목적을 두었다. 이를 위해 먼저 영산강 하구둑의 극치방류이벤트를 선별하고 극치방류이벤트의 확률분포를 찾아 극치방류의 규모에 대응되는 재현주기 산정식을 확립하였다. 그 다음 강우량을 비롯하여 극치방류이벤트를 유발하는 강우를 특성화하는 조건을 바탕으로 극치방류 유발 강우를 선별하는 판별식을 수립하고자 하였다. 마지막으로 극치방류이벤트와 방류유발 강우의 상관성을 조사하여 극치방류이벤트의 발생과 그 특성을 예측하는 예측식을 확립하고 방류유발 강우의 재현주기와 극치방류이벤트의 재현주기 간의 관계를 파악하였다.

**연구지역**

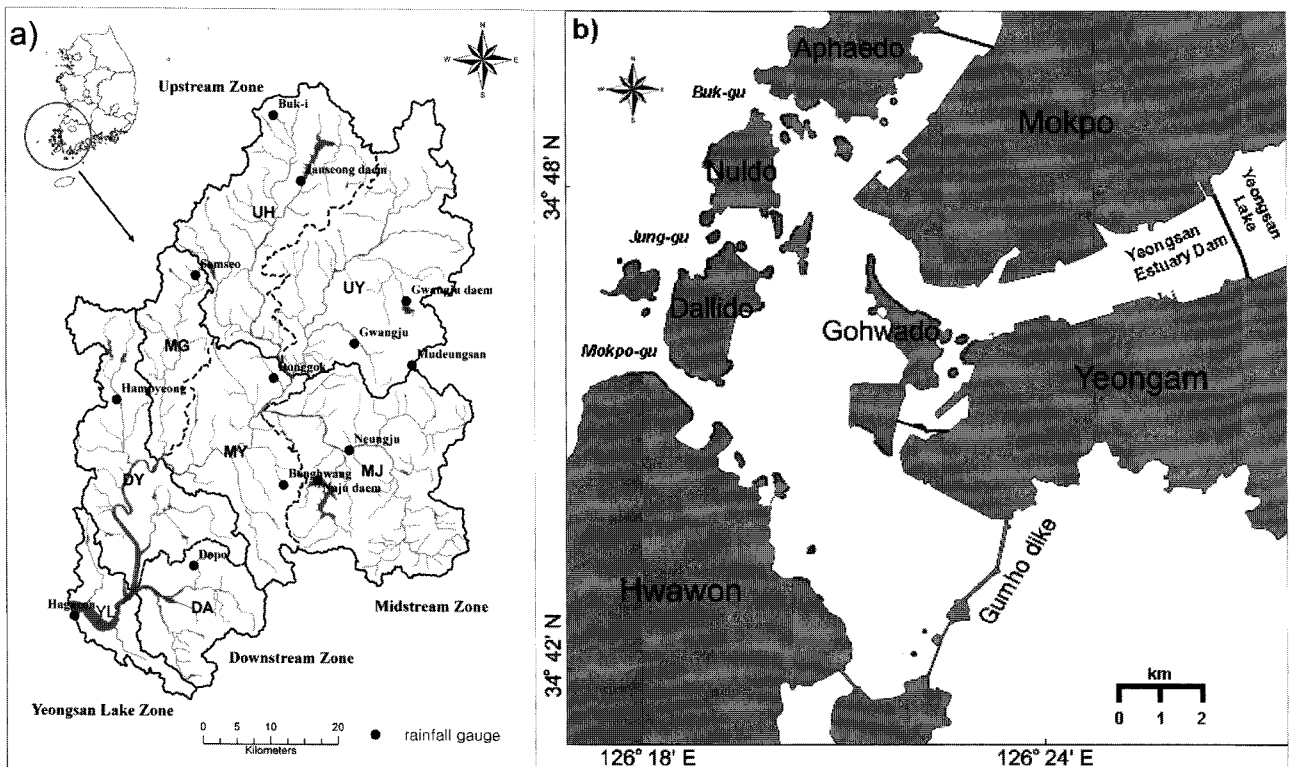
영산강은 전남 담양군 용면 용연리 용추봉에서 발원하여 황룡강, 지석천, 고막원천 등의 지류와 합류한 뒤 하구둑을 거쳐 서해로 흘러 들어간다(Fig. 1a). 영산강은 총 유역면적은 3,469.58 km<sup>2</sup>, 유로연장은 135.36 km이다. 영산강은 4대강의 하나로 분류되지만 유역규모는 한강(23,292.83 km<sup>2</sup>), 낙동강(23,702.02 km<sup>2</sup>), 금강(9,914.01 km<sup>2</sup>)에 비해 15~30%에 불과한 수준이다. 영산강이 4대강의 지위를 얻은 것은 유역 내에 넓게 펼쳐져 있는 충적지와 구릉지를 중심으로 농업이 발달하여 조선시대 이래 국가경제의 근간을 이루어왔기 때문이다.

영산강은 상류로부터 상류구간, 중류구간, 하류구간, 하구호 등 4개 구간으로 구분된다. 영산강 상류 구간은 광주를 포함하는 영

산강 본류의 상류 유역, 장성을 포함하는 황룡강 유역이 포함된다(Table 1). 중류 구간은 만봉천, 봉황천, 영산천, 문평천 등이 합류하는 영산강 본류의 중류 유역과 화순을 포함하는 지석천 유역, 삼서, 나산 등을 포함하는 고막원천 유역으로 구성된다. 하류 구간은 함평천과 삼포천을 포함하여 함평, 무안 등이 위치한 영산강 본류의 하류 유역과 영암, 도포 등이 위치한 영암천 유역으로 구성된다. 영산강 하구호 구간은 영산강 하류 유역과 영산강 하구둑 사이에 위치한 유역으로 1981년 영산강 하구둑이 완공되기 이전에는 영산강이 아닌 남해만으로 불리던 내만 지역이다(범, 2002).

광주 기상청의 지난 30년 자료에 따르면 영산강 유역 내 연평균 강수량은 1368 mm로 전국 평균보다 높으며, 연강수량이 65%가 6-9월에 집중되어 있다. 이로 인해 영산강의 하상계수(연간 최대유량과 최소유량의 비)는 큰 편이다. 나주댐, 장성댐, 담양댐, 광주댐 등이 축조되기 이전인 1976년 이전에는 1:320에 이르다가 댐 축조 이후 1:130으로 개선되었다(이 등, 1993). 상대적으로 유황이 안정된 현재에도 홍수시를 제외하면 하천의 유량은 대체로 댐에서 방류하는 하천유지용수에 의해 조절되고 있으며 평수시의 유량이 하천의 생태계가 겨우 유지될 수 있을 정도로 작다.

영산강은 1981년 하구둑이 건설되기 이전까지 밀물 시 목포로부터 영산강을 따라 73 km 상류에 위치한 영산포(나주) 지역까지 조수의 영향을 받던 감소하천이었다. 1981년 12월 무안군 삼향면 옥암리와 영암군 삼호읍 산호리를 잇는 총길이 4.35 km의 하구둑이 준공되면서 담수와 염수의 지속적인 조우와 혼합은 제한되고 담수의 유입은 간헐적인 형태로 변모하였다. 하구둑은 현재 총 8



**Fig. 1.** The location of 13 rainfall gauges within the Yeongsan Drainage Basin(a). See Table 1 with regard to the symbols of sub basins. The map of the Yeongsan Estuary(b). The estuary is connected to the offshore sea through three navigation channels, Mokpo-gu, Jung-gu, and Buk-gu.

**Table 1.** Drainage area of sub-basins in the Yeongsan River Drainage Basin (source: Water Management Information System-<http://www.wamis.go.kr>)

zone	Representative steams	drainage area (km <sup>2</sup> )	relative area	cities/towns included	Symbol
Upstream	Yeongsan River	714.80	0.21	Gwangju	UY
	Hwangryong River	565.04	0.16	Janseong	UH
Midstream	Yeongsan River	421.18	0.12	Naju	MY
	Jiseokcheon	663.98	0.19	Hwasoon	MJ
	Gomakwoncheon	218.95	0.06	Samseo	MG
Downstream	Yeongsan River	470.58	0.14	Hampyeong	DY
	Yeongamcheon	264.34	0.08	Yeongam	DA
Yeongsan Lake	-	150.71	0.04	Mokpo	YL
Total	-	3469.58	1.00	-	-

개의 배수갑문을 갖추고 있으나 하구호의 퇴적량 증가로 배수능력이 저하되고 계획홍수량이 증가하여 현재 4대강 사업과 연계하여 배수문 증설공사가 진행 중이다(4대강 살리기 추진본부, 2009). 영산강 하구둑의 배수갑문 개방은 관리를 담당하고 있는 농어촌공사의 관리규정에 따라 담수호 수위가 관리수위(EL. -1.35 m)를 초과하거나 초과할 우려가 있을 때, 홍수기간 중 수위조절과 예비방류의 차원에서 필요하다고 판단될 때, 배수갑문의 점검 및 정비가 필요할 경우, 수질개선이나 제염이 필요할 때, 기타 방류가 필요한 사유가 발생할 때 이루어진다(농어촌공사, 1999). 배수갑문의 개폐는 해수 유입을 방지하기 위해 담수호 수위가 외조위에 비해 0.20 m 이상이 되는 경우로 제한되므로 담수방류 시점과 지속기간은 조위의 영향을 받는다(농어촌공사, 1999).

## 재료 및 방법

### 분석자료

방류량 분석은 농어촌공사 영산강 사업단에서 제공한 1997년부터 1월부터 2010년 8월까지의 영산강 하구둑 일방류량 자료를 사용하였다. 일강우량 자료는 영산강 유역에서 국토해양부 관할 하에 운영되는 22개 측정소 자료 중 1997년부터 2010년 8월(총 4991일)까지 결측일수가 10일 이하인 13개소의 자료를 이용하였다(Table 2). 선정된 자료에서 결측일수는 총관측일의 0.2%에 불과하므로 분석결과에는 큰 영향을 미치지 않는다고 간주하고 결측치를 단순히 0으로 처리하였다. 선정된 13개 지점은 광주, 광주댐, 무등산(영산강상류 유역) 북이, 장성댐(황룡강 유역), 봉황, 동곡(영산

**Table 2.** List of rainfall gauges within the Yeongsan River Drainage, run by Ministry of Land, Transport, Maritime Affairs (source: Water Management Information System - <http://www.wamis.go.kr>). The latitudes and longitudes of rain gauges are all transformed into WGS84 coordinates from raw data

Station	Location		elevation (m)	period	sub basin	data for analysis
	latitude(DMS)	longitude(DMS)				
Gwangju	35-08-38	126-54-17	60	1993-2010	UY	○
Gwangju daem	35-12-00	126-59-23	80	1993-2010	UY	○
Mudeungsan	35-06-56	126-59-55	520	1993-2010	UY	○
Damyang daem	35-22-35	127-00-42	100	1993-2010	UY	×
Samji	35-16-14	126-56-08	34	2003-2010	UY	×
Buk-i	35-26-37	126-46-23	240	1965-2010	UH	○
Jangseong daem	35-21-27	126-49-04	240	1993-2010	UH	○
Jangseong	35-19-13	126-48-21	-	1965-1998	UH	×
Bonghwang	34-57-26	126-47-22	50	1993-2010	MY	○
Donggok	35-05-52	126-46-23	20	1993-2010	MY	○
Doam	34-59-15	126-43-49	-	1965-1998	MY	×
Neungju	35-00-14	126-53-50	30	1965-2010	MJ	○
Naju daem	34-57-49	126-50-42	50	1993-2010	MJ	○
Dongmyeon	35-01-52	127-02-29	100	2005-2010	MJ	×
Cheongpoong	34-52-31	126-58-17	106	2005-2010	MJ	×
Yeong San Po	34-59-49	126-47-47	-	1965-1998	MJ	×
Ijang	35-05-10	126-51-59	54	2002-2010	MJ	×
Samseo	35-13-55	126-38-47	20	1965-2010	MG	○
Nasan	35-06-42	126-36-43	20	2004-2010	MG	×
Hampyeong	35-04-04	126-31-04	10	1965-2010	DY	○
Dopo	34-50-57	126-38-37	20	1993-2010	DA	○
Hagueon	34-46-55	126-27-02	10	2005-2010	YL	○

강중류 유역), 능주, 나주댐(지석천 유역), 삼서(고막원천 유역), 함평(영산강하류 유역), 도포(영암천 유역), 하구언(하구호 유역) 등으로 영산강 유역을 구성하는 하위 유역별로 비교적 고르게 분포하고 있다(Fig. 1a). 방류에 영향을 미치는 강우 이외의 요인은 1997년 1월부터 2010년 8월까지 관측된 하구호 내측수위와 하구호 외측의 일최저조위를 고려하였다. 하구호 내측수위는 ‘국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)’에서 제공하는 일수위자료를, 하구호 외측 조위는 국립해양조사원에서 제공하는 동일기간의 목포검조소 1시간 조위자료를 수준원점 기준표고(EL.)로 환산한 후 일최저조위를 선별하여 사용하였다. 전자의 경우 총 4991일분의 관측값에 대해 수위가 EL. 5 m 이상으로 나타나는 총 410일의 자료를 이상값으로 간주하여 분석에서 제외하였다. 이는 농어촌공사의 시설규정에서 언급된(최대)수위 EL. 4.62 m을 고려한 것이다(농어촌공사, 1999). 후자의 경우 2008년 7월, 9월, 2009년 1월, 7월 자료는 결측으로 인해 분석에서 제외하였다.

**유역평균 일강우량 산정**

유역평균 일강우량 산정에는 티센다각형을 이용한 면적평균법을 이용하는 것이 일반적이지만 이 연구에서는 계산의 간편성을 위해 산술평균법을 이용하여 하위유역별 대표일강우량을 산정하고(Dingman, 2002), 유역평균 강우량은 전체유역에 대해 하위유역이 차지하는 면적비(상대면적)를 가중치로 한 하위유역별 대표일강우량의 가중치 평균으로 계산하였다(Table 1). 유역평균 강우량( $\bar{r}_i$ )은 식 (1)과 같다. 단,  $UY_i$ 는 영산강 상류 유역,  $UH_i$ 는 황룡강 유역,  $MY_i$ 는 영산강 중류 유역,  $MJ_i$ 는 지석천 유역,  $MG_i$ 는 고막원천 유역,  $DY_i$ 는 영산강 하류 유역,  $DA_i$ 는 영암천 유역,  $YL_i$ 는 하구호의 강우를 나타낸다.

$$\bar{r}_i = 0.21UY_i + 0.16UH_i + 0.12MY_i + 0.19MJ_i + 0.06MG_i + 0.14DY_i + 0.08DA_i + 0.04YL_i \quad (1)$$

$$UY_i = \frac{(gwangju)_i + (gwangju\ daem)_i + (mudeungsan)_i}{3}$$

$$UH_i = \frac{(Buk-i)_i + (Jangseong\ daem)_i}{2}$$

$$MY_i = \frac{(Bonghwang)_i + (Donggok)_i}{2}$$

$$MJ_i = \frac{(Neungju)_i + (Naju\ daem)_i}{2}$$

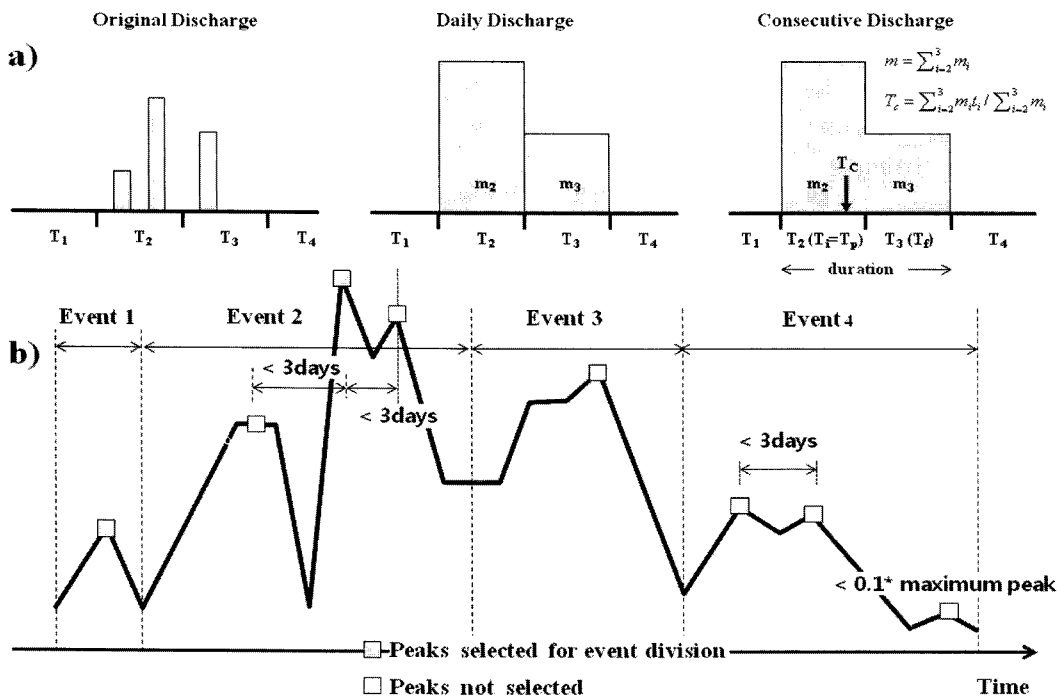
$$MG_i = (samseo)_i, \quad DY_i = (Hampyeong)_i, \quad DA_i = (Dopo)$$

$$YL_i = (Hagueon)_i$$

**방류이벤트의 정의**

배수갑문 운영원칙에 따라 수문의 개방은 해수의 역류를 방지하기 위해 담수호 수위와 외조위의 차이가 0.20 m 이상 확보되는 경우로 제한된다(농어촌공사, 1999). 따라서 특별한 예외상황이 아니면 하구둑의 수문개방은 간조 시 수심 분에서 수 시간에 걸쳐 이루어진다. 만일 배제해야 할 유량이 많을 경우 하루 두 차례 혹은 2-3일에 걸쳐 수문개방이 이루어지기도 한다. 그러므로 분석대상이 되는 방류이벤트는 크게 세 가지 시간스케일에 따라 정의될 수 있다(Fig. 2a).

첫째, 개별 방류를 분석의 기본단위인 ‘이벤트’로 정의하는 것이다. 이 때 두 가지 문제가 발생한다. 개별 방류는 배수갑문 운영원칙에 따라 내부수위가 관리수위를 초과하는지와 내/외측의 수위차가 0.20 m 이상이 되는지의 여부에 좌우된다. 이로 인해 일조



**Fig. 2.** Definitions of discharge events. Three different events can be defined: original discharge, daily discharge, and consecutive discharge (a). In this research, consecutive discharges are defined as discharge events for satisfying an independency condition. The event division algorithm can be applied to consecutive discharges over 4 days that have multiple peaks (b). See the text on the event division algorithm.

부동의 조위패턴을 보이는 영산강 하구역의 경우 강우의 영향력 못지않게 조위의 영향력이 커진다. 배제할 유량이 많아 하루 두 차례 수문개방이 이루어질 경우 외부조위가 보다 낮아지는 시기에 방류 규모도 커진다. 방류자료와 대비하는 강우자료가 일단위로 집계된 자료(일강우량)이므로 두 자료 간의 시간단위가 부합하지 않는 문제도 발생한다. 일강우량을 토대로 강우와 방류의 상관성을 분석하고자 할 때 개별 방류를 분석의 기본단위인 '이벤트'로 정의하는 것은 부적당하다.

둘째, 일단위로 집계한 방류현상(이하 일방류)을 분석의 기본단위인 '이벤트'로 정의하는 것이다. 하루 2회에 걸쳐 이루어진 방류는 하나의 이벤트로 통합된다. 일강우량과 자료집계 단위가 동일하므로 시간 단위의 불부합 문제는 해소되며, 일조부등으로 인한 개별 방류 간의 변이는 집계 과정에서 완화된다. 다만 증가한 유량을 배제하기 위해 2-3일 혹은 그 이상의 기간동안 방류가 연속적으로 일어나게 되는 경우 개별 일방류의 독립성을 가정하기 어렵다는 문제가 발생한다. 방류 이벤트의 독립성은 방류의 규모와 빈도, 강우와 방류의 상관성 분석에서 만족되어야 하는 필수요건이므로 무시할 수 없는 문제이다.

셋째, 수일에 걸쳐 연속적으로 일어나는 방류(이하 일연속방류)를 분석의 기본단위인 '이벤트'로 정의하는 것이다. 이 경우 이벤트의 규모는 일연속방류의 총합으로, 지속기간은 일연속방류의 지속일로 정의될 수 있으며 이벤트를 대표하는 시간은 방류시작시간( $T_s$ )과 종료시간( $T_e$ ), 일방류량이 가장 크게 나타나는 침투시간( $T_p$ ), 개별 방류량의 규모를 고려한 가중치 평균으로서의 중심시간( $T_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i t_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$ ,  $m_i$ 는 일방류량,  $t_i$ 는 일수) 등으로 특성화될 수 있다(Fig. 2a). 일연속방류를 하나의 이벤트로 정의하는 것은 일방류를 이벤트로 정의하는 것에 비하여 이벤트의 독립성을 확보하기 용이하다는 점에서 강우와 방류의 상관성을 분석하는 데 보다 적합한 단위가 될 수 있다. 다만 이 경우 두 가지 문제가 제기될 수 있다. 첫째는 다수의 침투값을 보이는 일연속방류자료를 처리하는 방식이다. 다수의 침투값을 보이는 일연속방류를, 단순히 방류가 수일에 걸쳐 연속적으로 일어났다고 해서 단일한 이벤트로 간주하는 것은 무리가 있다. 연구자의 주관에 최소화하면서 일관된 기준에 따라 이벤트를 분리하는 방식이 정의되어야 한다. 둘째는 일연속방류와 대비하는 강우사상의 반응시차를 규정하는 방식이다. 일방류자료와는 달리 다양한 지속기간을 보이는 일연속방류의 경우 이벤트를 대표하는 시간을 시작시간과 종료시간, 침투시간과 중심시간 등 다양하게 설정할 수 있다. 강우량과 일연속방류를 대비하고자 할 때 양자 간의 반응시차를 정의하는 기준이 정의되어야 한다.

이 연구에서는 일연속방류를 분석의 기본단위로 삼는다. 위에 언급한 문제는 다음과 같은 방법으로 처리하였다. 먼저 이벤트 분리 알고리즘을 정의하고 이를 전체 자료에 대하여 일관되게 적용하여 연구자의 주관에 개입되는 여지를 제한하였다. 이벤트 분리 알고리즘은 다음과 같다(Fig. 2b). 우선 지속기간이 3일 이하인 일연속방류의 경우 방류패턴과 무관하게 단일한 이벤트로 간주한다. 이벤트 분리 알고리즘은 4일 이상 지속되는 일연속방류 중 다수의 침투값을 보이는 경우에 대해 적용한다. 다수의 침투값 중 이벤트를 대표하는 침투값의 선별을 위해 1) 일연속방류 내 최대 침투값의 10%보다 크고 2) 전후 3일의 시간간격 내에 자신보다 큰

일방류량이 존재하지 않아야 한다는 2가지 기준을 적용하였다. 여기서 10%와 3일은 자료 분석 과정에서 시행착오를 거쳐 경험적으로 얻은 값이다. 이벤트의 경계는 침투값 사이의 최솟값으로 정의되 동일한 크기의 최솟값이 여러 개 존재할 경우 보다 작은 침투값에 가까이 위치한 최솟값을 경계로 설정한다. 경계에 위치한 일방류는 시간적으로 앞선 이벤트에 속하는 것으로 간주한다.

강우와 방류이벤트의 반응시차는 방류이벤트의 규모와 가장 높은 상관성을 보이는, 해당 강우와 침투시간( $T_p$ )의 시간차이로 정의한다. 강우사상과 대비되는 방류량은 해당 이벤트의 규모, 즉 해당 일연속방류의 총합으로 간주한다. 다시 말해 이 연구에서는 수일에 걸쳐 일어난 일연속방류의 총량이 침투시간에 집중되어 있는 것으로 가정, 반응시차를 도출하고 강우와 방류의 상관관계를 분석한다.

### 극치방류이벤트의 재현주기 산정

극치분석에는 매년 발생한 최고치로 구성되는 연 최고치계열(annual maximum series)을 분석대상으로 삼는 연 최고치 분석법(annual maximum frequency analysis)과 임의 임계값 이상의 값으로 구성되는 부분시계열자료(partial duration series)를 분석대상으로 삼는 부분시계열 빈도분석법이 널리 활용된다. 부분시계열 빈도분석법은 임계 초과치 빈도분석법(peaks-over-threshold frequency analysis)으로 불리기도 한다. 통계적 유의성 확보를 위해서는 자료의 수가 최소 20개 이상이 되어야 하므로 전자는 보통 20년 이상 축적된 자료가 존재할 때, 후자는 그렇지 못한 경우에 주로 이용된다(Goda, 2000). 자료의 누적연수에 상관없이 부분시계열 빈도분석법이 극치빈도를 파악하는 데 보다 효과적이라는 주장도 있다(Stedinger *et al.*, 1993). 부분시계열을 추출하기 위한 임계값은 분석기간의 연 최고치 중 최솟값으로 두는 것이 널리 사용되는 방안이지만(Dunne and Leopold, 1978), 연구목적에 따라 연구자가 임의로 임계값을 설정하는 것도 문제가 되는 것은 아니다(Stedinger *et al.*, 1993; Goda, 2000). 부분시계열의 추출에서 유의해야 할 점은 추출된 값이 서로 독립적인 사상으로 취급될 수 있어야 한다는 점이다. 이를 위해 단순히 임계값 이상의 값을 기계적으로 추출하는 것이 아니라 임계값 이상의 값 중 독립적인 '이벤트'의 극댓값을 추출하는 방식을 적용한다(Stedinger *et al.*, 1993). 이 논문에서는 Dunne and Leopold(1978)가 제안한 방식을 따라 분석기간의 연 최고치 중 최솟값을 임계값으로 두고 전체 자료에서 부분시계열을 추출하였다. 일연속방류의 경우는 서로 독립적인 이벤트를 대상으로 분석을 수행하기 때문에 추출된 이벤트의 독립성에 대한 추가적인 고려를 할 필요는 없다.

극치방류이벤트 규모를 재현주기로 표현하기 위해서는 극치방류이벤트의 연평균출현율( $\lambda$ ), 측정 검열변수( $v$ ), 주어진 극치방류이벤트자료를 가장 잘 설명하는 확률분포함수 등을 구해야 한다. 연평균출현율( $\lambda$ )은 극치방류이벤트의 총수( $N_T$ )를 자료의 총기간( $K$ )으로 나눈 값이다. 측정의 검열변수( $v$ , censoring parameter)는 측정에서 누락된 이벤트가 전체 이벤트에 대해 차지하는 비중을 나타내는 매개변수로서 측정에서 누락된 이벤트가 없을 경우 1의 값을 가진다. 확률분포함수로는 Gumbel 분포, GEV(General Extreme Value) 분포, Weibull 분포, 로그정규분포 등이 널리 활용되지만, 이 연구에서는 Gumbel 분포와 Weibull 분포만을 고려하였다. GEV

**Table 3.** Estimates of parameters for unbiased plotting position formulas

Probability Distribution Function	$\alpha$	$\beta$
Gumbel	0.44	0.12
GEV	$0.44 + 0.52/k$	$0.12 - 0.11/k$
Weibull	$0.20 + 0.27/\sqrt{k}$	$0.20 + 0.23/\sqrt{k}$

분포와 Weibull 분포는 각각 매개변수 조정을 통해 Gumbel 분포와 로그정규분포 등과 유사한 형태로 조정할 수 있기 때문이다 (Goda, 2000).

극치방류이벤트를 규모에 따른 내림차순으로 정리한 값을  $x_{(m)}$ 이라 하면, Goda(2000)의 도시위치 불편추정공식(unbiased plotting position formula)에 따라  $x_{(m)}$ 에 대응하는 도시위치의 불편추정값  $\hat{F}_{(m)}$ 이 결정된다.

$$\hat{F}_{(m)} = 1 - \frac{m - \alpha}{N_T + \beta}, m = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 순위,  $\hat{F}_{(m)}$ 는 해당 순위에 대응하는 누적확률의 추정치,  $N_T$ 는 전체자료의 수,  $N$ 는 표본의 수,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 확률분포함수의 종류에 따라 결정되는 상수로 몬테카를로 모의를 통해 얻어진 값이다. 이 연구에서는  $N_T = N$ 을 가정한다( $v=1$ ). 확률분포함수별  $\alpha$ ,  $\beta$ 의 값은 <Table 3>과 같다(Goda, 2000). 후보 확률분포함수의 역함수로부터  $\hat{F}_{(m)}$ 로부터 대응되는 분위수  $y_{(m)}$ 를 얻을 수 있다(Table 4). 선형회귀기법을 이용하면  $x_{(m)}$ 과  $y_{(m)}$ 값으로부터  $x_{(m)} = \hat{B} + \hat{A}y_{(m)}$ 를 만족시키는  $A$ ,  $B$ 의  $R^2$  값과 결정계수를 계산할 수 있다. 결정계수가 1에 가장 가까운 함수가 극치방류 이벤트 분포에 가장 잘 부합하는 함수이므로 이를 극치방류 확률분포함수로 간주한다.

확률분포함수가 결정되면 극치방류이벤트 규모  $x$ 에 대응되는 재현주기(return period,  $T$ ) 혹은 주어진 재현주기를 가진 극치방류 이벤트 규모  $x$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = \frac{1}{\lambda[1 - F(x)]}, x = F^{-1}\left(1 - \frac{1}{\lambda T}\right) \quad (3)$$

**극치방류이벤트 유발 강우조건**

강우와 극치방류 간의 상관관계를 파악하기 위해서는 극치방류 이벤트에 대응되는 강우사상을 식별해야 한다. 이를 위해서는 우선 극치방류를 유발하는 적정 강우 및 강우와 극치방류 간 반응시차를 파악해야 한다. 하구둑의 수문개방을 통해 이루어지는 담

수 방류는 강우에 따른 하천의 유량 및 하구호 수위의 증가에 대한 반응이므로 유역 내 강우가 발생한 시점과 시차(time lag)를 보인다. 시차(time lag)는 하계망의 형태나 규모, 지표피복 등과 같은 유역의 속성에 따라 결정된다(Dingman, 2002). 또한 극치방류와 같이 이례적 규모의 방류량에 대해서는 일강우량보다는 일정한 기간(이하 ‘적정누적일’)동안의 누적강우량을 대응되는 강우량으로 보는 것이 자연스럽다. 강우와 방류 간의 반응시차 및 적정누적일은 선형적으로 파악되는 값이 아니라 주어진 자료로부터 결정되어야 한다.

적정누적일 및 반응시차의 결정을 위해 일강우량자료로부터 해당 일을 포함하여 해당 일 이전  $n$ 일간의 누적강우량을 의미하는 ‘ $n$ 일합 강우량’( $r_{t,(n)}$ )을 다음과 같이 정의한다.

$$r_{t,(n)} = r_t + r_{t-1} + \dots + r_{t-n+1} = \sum_{i=0}^{n-1} r_{t-i} \quad (4)$$

위의 정의에 따라 생성된  $n$ 일합 강우량 시계열 중 극치방류이벤트의 침두시간보다  $m$ 일 앞선 지점의 자료를 극치방류이벤트와 비교하면  $n$ 일의 누적일수와  $m$ 일의 반응시차를 적용할 때 강우량자료와 극치방류이벤트 간의 상관계수를 파악할 수 있다. 다양한  $n$ ,  $m$ 값 중 가장 높은 상관도를 보이는 경우를 적정누적일과 반응시차로 간주한다.

반응시차와 적정누적일수가 결정되면 방류 이벤트와 대응되는 해당  $n$ 일합 강우량을 토대로 극치방류를 유발하는 최소강우량(이하 ‘방류유발 임계  $n$ 일합 강우량’)을 도출한다. ‘방류유발 임계  $n$ 일합 강우량’보다 큰 강우사상을 방류를 유발할 가능성이 있는 ‘잠재 방류유발 강우량’으로 간주할 수 있다. 방류유발 임계  $n$ 일합 강우량은 방류가 일어난 경우와 연관되는  $n$ 일합 강우량만을 추출하여 얻은 값이다. 전체 강우량 자료에 대해 이 값을 적용하여 얻은 ‘잠재 방류유발 강우량’이 모두 방류를 유발하는 것은 아니다. 방류는 강우조건에 의해서만 결정되는 것은 아니기 때문이다. ‘잠재 방류유발 강우량’ 중 실제 방류를 유발하는 경우와 그렇지 않은 경우를 구분해주는 요인을 판별하는 작업이 필요하다.

강우 이외에 방류에 영향을 미칠 수 있는 유력한 요소로는 ‘관리수위(EL. -1.35 m) 대비 하구호 수위’와 ‘일찌저조위’를 들 수 있다. ‘관리수위대비 하구호수위’는 하구호 수위에서 하구호의 관리수위(EL. -1.35 m)를 제한 값이다. 하구호 수위가 관리수위보다 높은 경우는 양의 값을, 하구호 수위가 관리수위보다 낮은 경우는

**Table 4.** Candidate probability distribution functions for extreme events

Probability Distribution function	Cumulative Distribution Functional form, $F(x)$
Gumbel	$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-B}{A}\right)\right], (-\infty < x < \infty)$
	Inverse functional form: $y = -\ln[-\ln F(x)], y = \frac{x-B}{A}$
GEV (General Extreme Value)	$F(x) = \exp\left[-\left(1 + \frac{x-B}{A}\right)^k\right], (B - kA \leq x < \infty)$
	Inverse functional form: $y = k[(-\ln F(x))^{-1/k} - 1], y = \frac{x-B}{A}$
Weibull	$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right], (B \leq x < \infty)$
	Inverse functional form: $y = [-\ln(1 - F(x))]^{1/k}, y = \frac{x-B}{A}$

음의 값을 지닌다. 관리수위 대비 하구호 수위가 양의 값을 가지는 경우 상대적으로 적은 강우량에도 방류를 유발할 가능성이 높아진다. 하구호의 수위는 강우량에 의존한 양이지만 이 연구와 같이 극치방류이벤트에 초점을 맞추고 여기에 대응되는 강우사상만을 고려하는 경우 군소방류이벤트에 의한 수위변화는 고려되기 어렵다. 그러므로 ‘관리수위 대비 하구호 수위’는 이런 부분을 보완하는 추가변수로서의 효용을 지닌다. ‘일최저수위’는 해당일의 최저조위를 수준원점 기준표고로 환산한 값이다. 일최저조위가 낮을수록 담수호 내외수위차가 커질 가능성이 높으므로, 강우량과는 별개로 방류에 영향을 미칠 수 있다. 이 연구에서는 위의 두 가지를 함께 방류유발 강우량의 특성화 인자로 도입하여 판별분석(discriminant analysis)을 통해 방류사건을 예측하는 데 일합 강우량, 관리수위 대비 하구호 수위, 일최저수위의 상대적 기여도를 판단하고 방류유발 강우의 판별조건을 수립한다.

**강우-방류 규모빈도 상관성 규명**

방류유발 강우의 판별조건이 수립되면, 이에 따라 선별된 *n*일합 강우량과 대응되는 극치방류이벤트를 이용하여 최종적인 강우-방류 상관관계식을 얻는다. *n*일합 강우량에 대해 방류유발 최소강우량을 기준으로 하는 부분시계열을 추출, 빈도분석법을 적용하여 강우량에 대한 재현주기를 구한 후 상관 관계식을 바탕으로 강우의 재현주기와 극치방류의 재현주기의 상관성을 규명한다. 부분시계열로 추출되는 *n*일합 강우량의 독립성을 확보하기 위해 추출 과정에서 임계값 이상의 *n*일합 강우량에서 나타나는 군집패턴을 고려, 개개 군집의 최댓값만을 선별하는 방식을 사용한다.

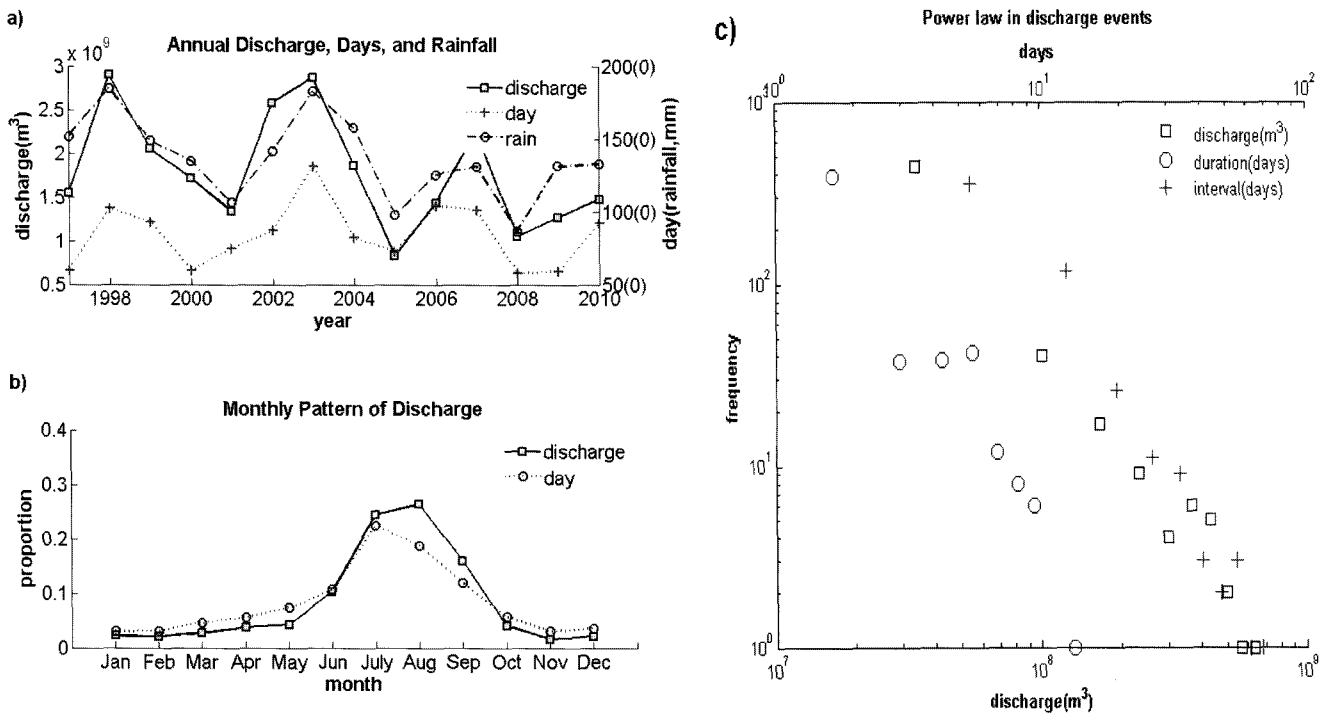
**결 과**

**방류 이벤트 특성**

일단위로 집계된 방류자료를 분석한 결과 1997년 1월 1일부터 2010년 8월 31일 동안 담수 방류가 발생한 일수는 총 1177일이다. 이는 총 기간(4991일)의 23.6%에 해당된다. 배수갑문의 개방시간은 총 7,187,040분(4991일) 중 207,899분으로 총 기간의 단지 2.89%에 해당된다. 하구둑의 건설로 하구역의 담수-염수 혼합이 극히 짧은 기간으로 제한되어 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

연 방류량은 평균  $1.7975 \times 10^9 \text{m}^3$ 이지만 최솟값이 2005년의 83,154,500  $\text{m}^3$ , 최댓값이 1998년의 289,704,900  $\text{m}^3$ (1998)으로 연간변이가 적지 않다. 연 방류량은 연강수량과 양의 상관관계를 보여 연 방류량의 변이는 연강수량의 변이를 반영한다고 할 수 있다. 연 방류일 역시 평균 84일이지만 최솟값이 2008년의 58일, 최댓값이 2003년의 131일로 연간변이가 적지 않은 편이다(Fig. 3a). 기간 내 전체 방류량의 77%, 전체 방류일의 65%가 6월부터 9월 사이에 집중되어 있어 동아시아 몬순의 영향으로 여름철에 강우가 집중되는 우리나라 기후특성을 잘 반영하고 있다(Fig. 3b).

일단위로 집계된 방류자료에 대하여 이벤트의 정의(일연속방류) 및 이벤트 분리 알고리즘을 적용하면 총 529건의 방류 이벤트가 식별된다. 방류 이벤트 규모의 평균은  $4.75700 \times 10^7 \text{m}^3$ 이지만 중앙값이  $1.84890 \times 10^7 \text{m}^3$ 로 이벤트 규모의 대부분이 평균보다 작은 영역에 몰려 있으며, 최소  $3.37000 \times 10^5 \text{m}^3$ , 최대  $6.68618 \times 10^8 \text{m}^3$ 로 자료의 산포가 매우 크다. 방류 이벤트의 지속기간의 경우 최소 1일에서 최대 14일의 산포를 보이지만, 평균은 2.23일, 중앙값은 1일로 대부분의 이벤트가 1일의 지속기간을 가지고 있음을 보여준



**Fig. 3.** The general description of discharge data. (a) The annual variations of total discharge and days of discharge are well correlated with the annual variations of total rainfall within the Yeongsan River Basin. (b) Over 65% discharge events occur during Jun to September, indicating the dominant summer monsoon. (c) The discharge events can be defined as the aggregation of consecutive daily discharges by an event-separation algorithm. (d) The distribution of discharge magnitude, duration and interval follows a power law.



다. 방류 이벤트의 발생간격 역시 평균 9.42일, 중앙값 7일이지만 자료의 범위가 최소 2일에서 최대 72일로 산포가 매우 크다. 방류 이벤트의 규모, 지속기간, 발생간격의 분포를 로그스케일로 표현하면 모두 직선에 가깝게 나타나는데 이는 방류 이벤트의 규모, 지속기간, 발생간격이 모두 멱함수 분포를 따르고 있음을 시사하는 것이다(Fig. 3c).

**극치방류이벤트의 선별과 재현주기 계산**

연 최고 방류이벤트 중 최소이벤트는 2005년 6월 30일에서 7월 6일에 발생한 규모 133,656,000m<sup>3</sup>의 방류이벤트이다(Table 5). 극치방류이벤트 선별 임계값은 연 최고 방류이벤트 중 최솟값인 2005년 연 최고 방류이벤트의 규모(133,656,000m<sup>3</sup>)로 두었다(Table 5). 총 529건의 방류이벤트 중 극치방류이벤트로 분류된 것은 46건이다. 침두시간을 기준으로 극치방류이벤트의 월분포를 살펴보면 4월이 1건, 6월이 6건, 7월이 15건, 8월이 15건, 9월이 9건으로 나타나 6-9월에 집중된 패턴을 보인다(Table 5). 연 방류량에 대해 극치방류이벤트가 차지하는 비율은 평균 47.5%이지만 최소 16.1%(2005년)에서 최대 75.8%(2004년)의 범위에서 연간 변이를 보인다(Fig. 4a). 연평균출현율( $\lambda$ )은 이벤트 총수( $N_T$ )가 46건, 관측기간( $K$ )이  $K=13+8/12=41/3$ (년)이므로  $46/(41/3)=3.37$ (회/년)이다.

극치방류이벤트의 확률분포함수로는 Gumbel 함수보다는  $k=1.4$ 인 Weibull 함수가 보다 적합한 것으로 나타났다(Fig. 4b). 극치방류이벤트와 Weibull( $k=1.4$ ) 함수의 적합 패턴이 계단형태를 보이는 것은 이벤트 분리 알고리즘의 분리기준에 따른 결과로 보인다. 이와 같은 패턴은 극치방류이벤트의 확률분포함수를 결정하는 데 영향을 미쳐 극치방류이벤트의 규모와 빈도를 파악하는 데 오류를 유발할 수 있으나 이 연구에서는 그 정도가 크지 않을 것으로 판단하였다. 최소사승법을 이용하여 얻어진 Weibull( $k=1.4$ ) 함수의 매개변수  $A, B$ 의 추정치는  $\hat{A}=2.0558 \times 10^8, \hat{B}=9.1058 \times 10^7$ 이며 이 때 Weibull( $k=1.4$ ) 함수의 적용범위는  $9.1058 \times 10^7 \leq x < \infty$ 이다

( $x$ 는 극치방류이벤트의 규모, 즉 방류량). 이 함수를 이용하여 1997년 1월에서 2010년 8월까지 기록된 값 중 최대 이벤트에 해당하는 2002년 8월 12-21일(침두시간은 8월 15일) 이벤트( $6.88618 \times 10^8 m^3$ )의 재현주기를 계산하면 25.5년을 얻으며, 100년 주기 방류이벤트의 규모는  $8.1432 \times 10^8 m^3$ 으로 계산된다.

극치방류이벤트간의 시간간격은 72일 이하의 경우와 200일 이상의 경우가 구분된다(Fig. 4c). 전자는 동일한 연도에 발생하는 이벤트 간의 시간간격을 의미하며, 후자는 직전 연도의 마지막 극치방류이벤트와 다음 연도의 첫 극치방류이벤트 간의 시간간격을 의미한다. 동일연도에 나타나는 극치방류이벤트 간의 발생간격은 최소 4일, 평균 19.5일, 중앙값은 15일, 최대 72일로 나타난다. 반면 연도별 간격은 최소 237일, 평균 319.6일, 중앙값은 308일, 최대 389일로 나타난다, 즉, 동일연도 내에서 극치방류이벤트는 대체로 15-20일 간격으로 발생하며 직전 연도의 마지막 극치방류이벤트와 다음 연도의 첫 번째 극치방류이벤트 간에는 대략 10개월이 소요된다.

**극치방류이벤트 유발 강우조건인 시차와 적정누적일수**

극치방류이벤트와 대응되는 적절한 강우사상을 식별하기 위해 유역평균 일강우량에 대하여 누적일수를 1일에서 5일까지, 반응시차를 0일부터 4일까지 변화시키면서 극치방류이벤트와 대응되는 강우자료를 추출한 뒤 두 자료 간의 상관관계를 분석하였다(Fig. 5a). 결정계수가 가장 높은 것은 4일합 강우량에 대해 0일 시차를 적용하는 경우로  $R^2=0.59$ 이다. 두 번째로 높은 경우는 3일합 강우량에 대해 1일 시차를 적용하는 경우로  $R^2=0.55$ 이다. 전자에 비해 후자의 결정계수가 낮게 나타난 이유는 후자의 경우 2002년 8월 12일에서 21일까지 진행된 이벤트가 방류 이벤트 규모에 비해 낮은 3일합 강우량과 대응되고 있기 때문이다(Fig. 5b).

2002년 8월 12-21일의 극치방류이벤트(침두시간은 8월 15일)를 해당 시기의 강우자료와 함께 살펴보면 적정누적일수 3일을 채택

**Table 5.** list of extreme discharge events during 1997.1 to 2010.8

year	annual maximum discharge( $\times 10^3 m^3$ )	date	# of events over threshold ( $> 133,656,000 m^3$ )	month of occurrence				
				<Jun.	Jun	July.	Aug.	Sep.
1997	342,351	08.04 - 08.09	2			1	1	
1998	534,831	09.30 - 10.04	5		1		3	1
1999	467,407	09.22 - 09.25	2				1	1
2000	461,240	08.25 - 08.29	4		1	1	1	1
2001	329,395	06.23 - 06.27	2		1	1		
2002	668,618	08.12 - 08.21	4			1	2	1
2003	433,861	07.09 - 07.17	7	1*		3	2	1
2004	544,747	08.18 - 08.22	6		1	2	2	1
2005	133,656	06.30 - 07.06	1			1		
2006	236,473	07.09 - 07.14	2			2		
2007	477,161	09.15 - 09.22	4				1	3
2008	247,958	06.17 - 06.25	2		2			
2009	425,376	07.15 - 07.20	2			2		
2010	242,691	07.01 - 07.14	3			1	2	
total			46	1*	6	15	15	9

\*This case occurred in April 25-29.

**Note.** The year shaded (2005) indicates the minimum of annual maximum discharge events. The month of occurrence is determined by the day of peak discharge (peak time,  $T_p$ ).

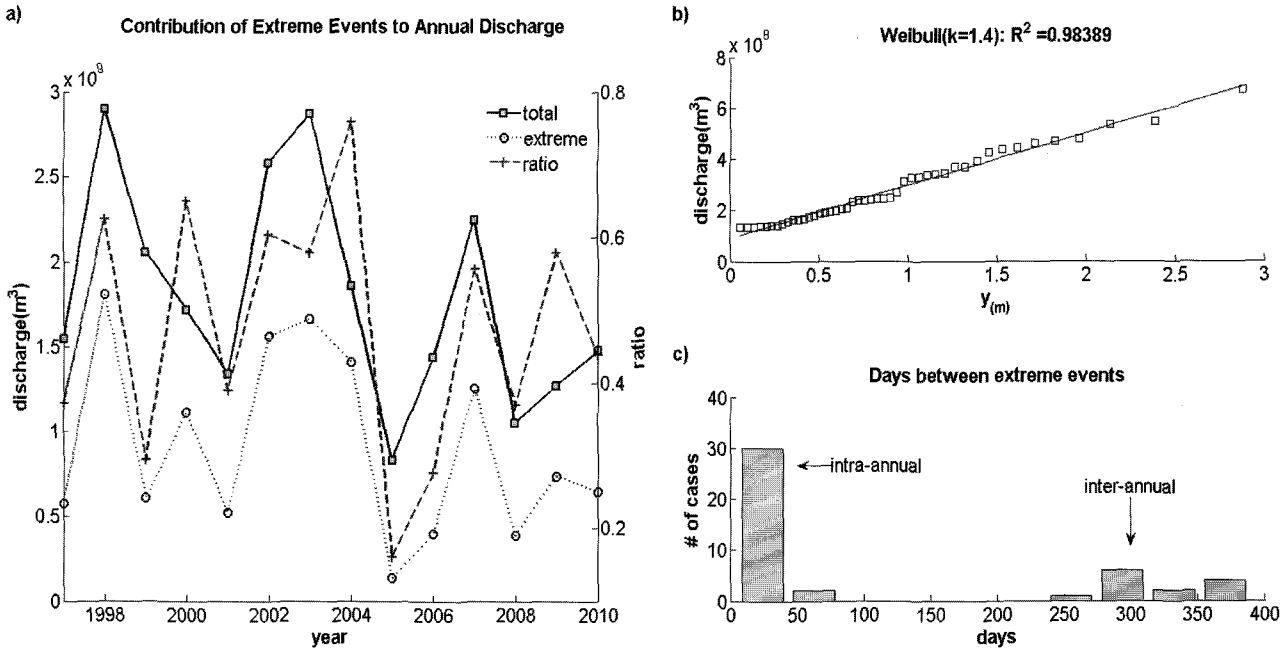


Fig. 4. Main characteristics of extreme events. (a) Extreme events account for 47.5 % of annual discharge on average, though annual variations range from 16.1% to 75.8%. (b) The distribution of extreme events is best fitted to Weibull function with  $k=1.4$ . (c) The extreme discharge events occurs at a bimodally-clustered interval distribution.

할 경우 왜 해당 이벤트가 다소 이례적인 결과를 보이는지 짐작할 수 있다. 2002년 8월 12-21일의 극치방류이벤트는 10일, 11일, 12일, 14일에 발생한 강우이벤트에 대한 반응일 가능성이 높다 (Fig. 5c). 앞서 7일에 발생한 강우에 비해 8일 날 발생한 방류이벤트의 규모도 상대적으로 작았으므로, 7일의 강우로 인해 공급된 유량 중 미처 배제되지 못한 부분도 2002년 8월 12-21일 극치방류이벤트의 발생에 영향을 미쳤을 수 있다. 당시의 일평균 하구호 수위와 외부조위의 패턴을 살펴볼 때, 배제가 용이했을 것으로 판단되는 11일까지 이전의 방류를 통해 관리수위까지 배제하는 데 성공하였으나 7일 강우의 후속적인 영향과 10일 이후의 강우의 누적 영향으로 하구호의 수위 상승이 발생, 8월 15일의 침두방류를 유발한 것으로 보인다.

적정누적일수를 3일로 둘 경우 방류량과 대비되는 강우량에서 7일의 강우는 물론 10일과 11일의 강우량이 누락되므로 방류이벤트는 상대적으로 작은 강우량과 대응된다. 7일 강우로 인한 부분은 7일-11일까지의 방류이벤트로 어느 정도 배제되었다고 간주할 수 있으므로 이는 제외하더라도 10일과 11일의 강우량을 방류량과 대응되는 누적합 강우량에 포함시킨 후 상관분석을 실시하면 결정계수가  $R^2 = 0.6154$ 로 나타난다. 이는 초기의 결정계수  $R^2 = 0.55$ 보다 높은 값이며 적정누적일수 4일과 0일의 시차를 적용한 경우 ( $R^2 = 0.59$ )보다도 높은 값이다. 2002년 8월 12-21일의 이벤트를 분석에서 제외하여도 적정누적일수 4일과 반응시차 0일을 적용한 경우 ( $R^2 = 0.6641$ )보다 적정일수 3일과 반응시차 1일을 적용한 경우 ( $R^2 = 0.6710$ )가 보다 높은 결정계수를 보인다. 이와 같은 결과는 적정누적일수를 4일로 하고 시차를 0일로 하는 경우가 적정누적일수를 3일로 하고 시차를 1일로 하는 경우에 비해 더 나은 결정계수를 보이기는 하지만 극치방류이벤트와 강수의 상관관계를 파악하는 유일한 접근법으로 인정하기는 어렵다는 것을 보

여준다.

이 연구에서는 2002년 8월 12일에서 21일까지 진행된 이벤트를 분석방법의 한계에서 발생한 다소 이례적인 사례로 간주하고, 영산강 하구역에서 극치방류이벤트와 강우의 상관관계를 파악하는 적정누적일수와 반응시차는 각각 3일과 1일이라고 두었다. 이는 무엇보다도 예측의 효용을 고려한 것이다. 시차가 0일인 경우 보다는 1일인 경우를 선택하면 최종 수립되는 관계식을 이용하여 오늘날까지 확보된 3일합 강우량으로부터 그 다음 날의 침두방류 여부 및 침두방류로 대표되는 극치방류이벤트의 규모를 예측하는 것이 가능하기 때문이다.

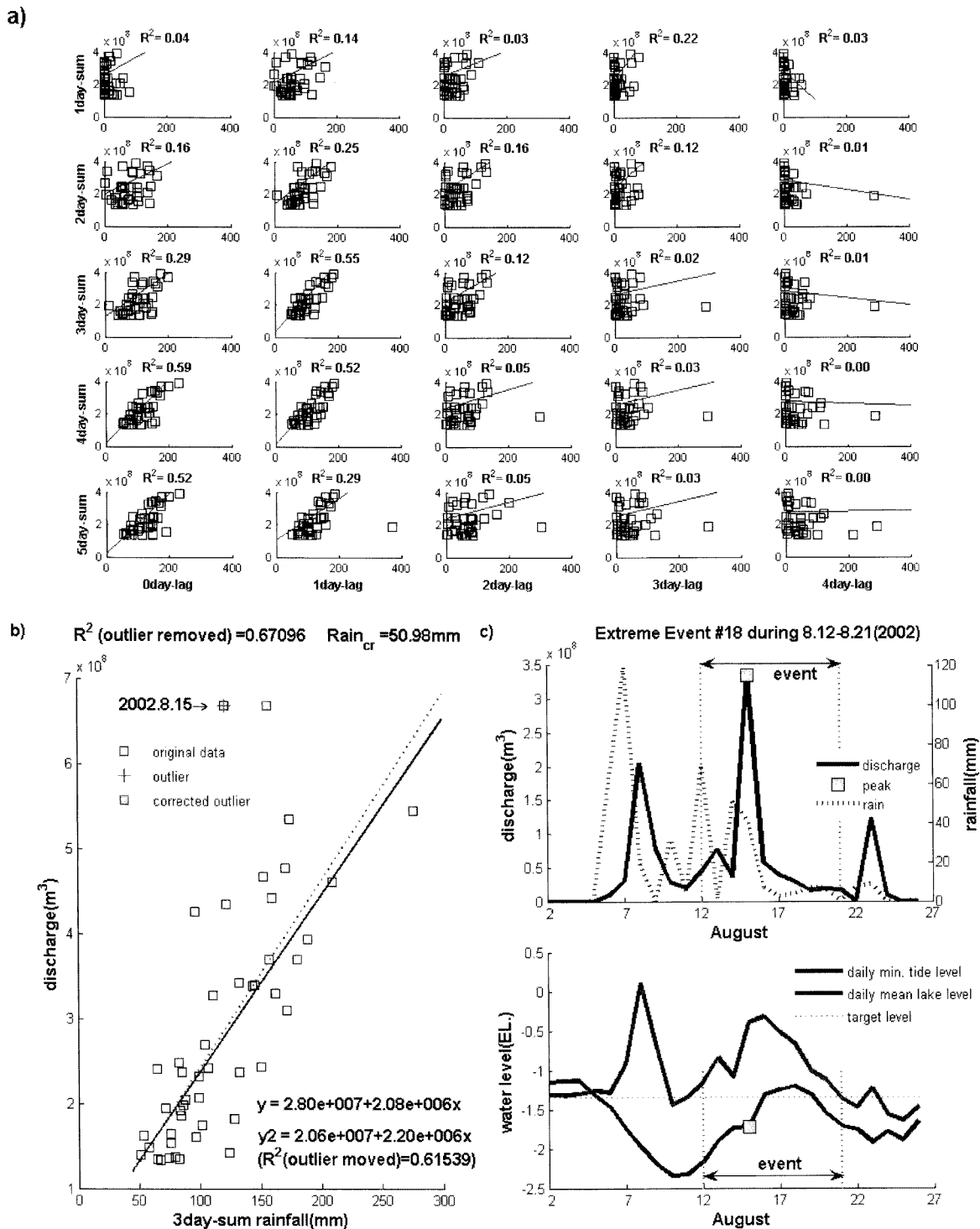
적정누적일수 3일과 반응시차 1일을 적용하여 얻은 3일합 강우량과 극치방류를 대비하면 '방류유발 임계 3일합 강우량'은 50.98 mm이다. 8월 12-21일의 이벤트를 제외하고 1일 시차를 두고 대비되는 3일합 강우량과 극치방류이벤트 간의 회귀식은  $x = 2.08 \times 10^6 \overline{r_{3day}} + 2.80 \times 10^7$  ( $R^2 = 0.6710$ )이다. 여기서  $x$ 는 극치방류이벤트의 규모이며,  $\overline{r_{3day}}$ 은 3일합 강우량이다. 극치방류이벤트의 확률분포함수인 Weibull( $k=1.4$ ) 분포의 적용범위 ( $9.1058 \times 10^7 \leq x < \infty$ )를 고려하여  $\overline{r_{3day}}$ 의 허용범위를 계산해 보면 아래와 같다.

$$\overline{r_{2day}} \geq 30.32(\text{mm}) \left( \frac{9.1058 \times 10^7 - 2.80 \times 10^7}{2.08 \times 10^6} \right) \quad (5)$$

방류유발 임계 3일합 강우량인 50.98 mm는 식 (5)로 제시되는 허용범위 내의 값이므로 50.98 mm를 3일합 강우량 중 극치방류 이벤트를 유발할 수 있는 잠재적 후보군을 구분하는 기준으로 삼았다.

**극치방류이벤트를 유발하는 강우요인의 특성화**

50.98(mm)을 임계값으로 선별된 3일합 강우량을 총 316건이다.



**Fig. 5.** (a) The determination of relevant accumulated rainfall and time lag between rainfall and discharge (b) Though the case of 4 day-sum rainfall with 0 day time lag shows the highest coefficient of determination ( $R^2$ ), the 3day-sum rainfall with 1 day time lag was chosen as the more relevant rainfall, considering the characteristics of outlier and the usability of prediction. (c) The exploration of outlier. See the text on the details.

그러나 이것을 모두 독립적인 사건으로 볼 수는 없다. 3일합 강우량은 특정한 날을 기준으로 그 날을 포함, 그 이전 3일간의 강우량을 누적한 것이므로 일연속적인 값들은 서로 누적일이 중복되어 있는, 상호의존적인 양이다. 따라서 임계값을 넘는 경우 중 일

연속으로 나타나는 경우는 별개의 사건이 아니라 하나의 사건으로 간주해야 한다. 또한 일연속 기간이 긴 경우에는 3일합 강우량의 변이패턴을 고려하여 몇 개의 사건으로 분리하는 것도 고려해야 한다. 편의상 이 연구에서는 일연속적으로 나타나는, 서로 관

련되어 있는 임계값 이상의 3일합 강우량을 ‘극치방류유발 잠재 3일합 강우군(群)’이라 지칭한다. 극치방류유발 잠재 3일합 강우군의 식별은 방류이벤트의 식별과 동일한 알고리즘을 적용하여 분리할 수 있다. 다만 극치방류유발 잠재 3일합 강우군의 경우 전체의 총합은 의미가 없고 동일 강우군에 속하는 3일합 강우량이 하나의 사건으로 다루어져야 한다는 것만을 지시한다는 것이 큰 차이점이다.

316건의 임계값 이상의 3일합 강우량에 대해 일연속 패턴을 기준으로 방류이벤트 분리 알고리즘을 그대로 적용하면 총 102건의 극치방류유발 잠재 강우군이 식별된다. 각각의 잠재 강우군은 극치방류이벤트를 유발할 만한 3일합 강우량 조건을 만족시키는 일련의 강우사상을 대표한다. 102건의 사례를 살펴보면, 1997년 5월 29일-31일의 강우군과 1998년 4월 2일의 강우군을 제외하면 대체로 방류이벤트와 0일 혹은 1일 시차를 보이는 3일합 강우량이 존재한다. 1997년 5월 29일-31일의 강우군에 대해서는 6월 3일에 방류가 발생하여 최소 3일, 최대 5일의 시차를 보였다. 1997년 5월 29일 영산강 유역에 200 mm가 넘는 호우가 왔음에도 불구하고 관리수위의 변화는 미미하여 5일이 지난 6월 3일에야 방류가 이루어졌다. 1998년 4월 2일의 강우군의 경우 3일합 강우량이 임계값을 넘기 이전에 방류가 발생하였다. 그러나 0-1일 시차로 방류가 일어난 100건 중 54건에 대해 방류의 규모가 극치방류이벤트의 기준을 만족시키지 못하였다. 다시 말해 극치방류가능 강우이벤트 중 실제 극치방류이벤트를 발생시키는 강우 이벤트의 비율은 45.1%이다. 이는 극치방류이벤트의 유발에 관계하는, 3일합 강우량 이외의 특성변수가 존재한다는 것을 시사한다.

3일합 강우량 외에 방류에 영향을 미치는 특성변수로서 ‘관리수위 대비 하구호수위’와 ‘일최저조위’를 도입하였다. 판별분석에 활용할 3일합 강우량은 방류이벤트의 침투시간에 대해 1일 이전의 값으로 두었고 관리수위 대비 하구호수위와 일최저조위는 예측의 측면을 고려하여 3일합 강우량과 동일시점을 자료를 추출하였다. 방류유발 임계 3일합 강우량 50.98 mm를 초과하는 경우에 대해서는 극치방류이벤트의 규모만 만족시키지 못했을 뿐 모두 방류가 일어났으므로 위와 같은 기준으로 3일합 강우량을 선정하는 것은 문제가 되지 않는다. 다만 1997년 5월 29-31일의 경우와 1998

년 4월 2일의 경우는 방류이벤트와의 시차가 5일에 이르러 위의 기준을 적용할 수 없었으므로 강우그룹 내 최댓값을 보이는 1997년 5월 31일의 값과 1998년 4월 2일의 값으로 대신하였다. 극치방류유발 잠재 3일합 강우군 중 ‘관리수위 대비 하구호수위’의 이상치가 나타나는 시점과 일치하는 자료가 총 10건(1999년 6월 23일, 1999년 7월 1일, 2005년 8월 19일, 2006년 5월 5일, 2006년 5월 19일, 2006년 6월 14일, 2006년 7월 11일, 2006년 7월 20일, 2006년 7월 26일, 2006년 8월 26일), ‘일최저조위’의 결측치 구간과 일치하는 자료가 총 5건(2008년 7월 2일, 2009년 7월 7일, 11일, 15일, 21일)으로 나타나 관련 자료는 분석에서 제외하였다. 따라서 총 87건의 사례에 대하여 정준판별분석을 실시하여 3일합 강우량, 관리수위 대비 하구호수위, 일최저조위의 상대적인 중요도를 평가하였다(Table 6).

판별함수의 고유치는 0.450로 나타나 판별분석을 통해 얻어진 판별함수의 기여도는 무시할 수 없는 수준이다. 정준상관계수는 0.557로서 판별함수는 자료 내 분산의 31% 정도를 설명하는 것으로 나타났다. 방류의 발생에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 1일 시차의 3일합 강우량이지만, 관리수위 대비 하구호수위도 3일합 강우량의 65.5% 정도의 영향력을 지닌다. 반면 일최저조위는 상대적으로 그 영향력의 비중이 낮았다. 주어진 3일합 강우량과 관리수위 대비 하구호수위, 일최저조위 자료를 판별함수에 대입하여 방류 여부에 대한 예측을 시도하는 경우 극치방류가 일어나지 않는다는 예측은 74.6%의 적중률을 보이는 데 반해 극치방류가 일어난다는 예측은 81.3%의 적중률을 보인다. 극치방류의 발생 유무에 대한 적중률을 종합하여 77.0% 수준인 것으로 나타났다.

일최저조위의 기여도가 상대적으로 낮으므로 3일합 강우량과 관리수위 대비 하구호수위만으로 판별함수를 구성할 수도 있다. 이 경우 전체자료에 대한 예측율을 다소 떨어지지만, 일최저조위를 고려한 경우와 비교하여 큰 차이를 보이지 않는다(Table 6). 설명력이 증가하지 않는다면 가급적 단순한 판별함수를 구하는 것이 적절하다고 판단하여 이 연구에서는 극치방류 유발강우를 특성화하는 판별함수는 3일합 강우량과 관리수위대비 하구호수위만을 고려하여 수립하였다.

Table 6. Results of Canonical Determinant Analysis

variables	x1 3day-sum, 1day before rainfall over threshold (=50.98 mm)	x2 lake level over target level(= -1.35m EL.)	x3 daily minimum tide level off the estuary dam
	Scheme 1 (x1, x2, and x3 used)		Scheme 2 (x1 and x2 used)
Eigenvalue	0.450		0.448
Canonical correlation <sup>1</sup>	0.557 (0.31)		0.556(0.31)
Wilks' λ <sup>2</sup>	0.690 (0.00)		0.691 (0.00)
Degree of importance	x1(0.935) > x2(0.612) > x3(0.210)		x1(0.936) > x2(0.613)
Discriminant function <sup>3</sup>	y = 0.020x <sub>1</sub> +0.711x <sub>2</sub> +0.147x <sub>3</sub> -1.732		y = 0.020x <sub>1</sub> +0.762x <sub>2</sub> -2.008 (x <sub>2</sub> =-0.0262x <sub>1</sub> +2.6352)
Prediction power <sup>4</sup>	T	75.9 (66/87)	74.7 (65/87)
	NED	73.2 (41/56)	71.9 (41/57)
	D	80.7 (25/31)	80.0 (24/30)

<sup>1</sup>Values within the parenthesis are variations of data explained by discriminant function.

<sup>2</sup>Values within the parenthesis are p-value for significance of discriminant functions.

<sup>3</sup>A function within the parenthesis for Scheme 2 is an equation of divide between groups.

<sup>4</sup>T=total data, NED=no extreme discharge, ED=extreme discharge.

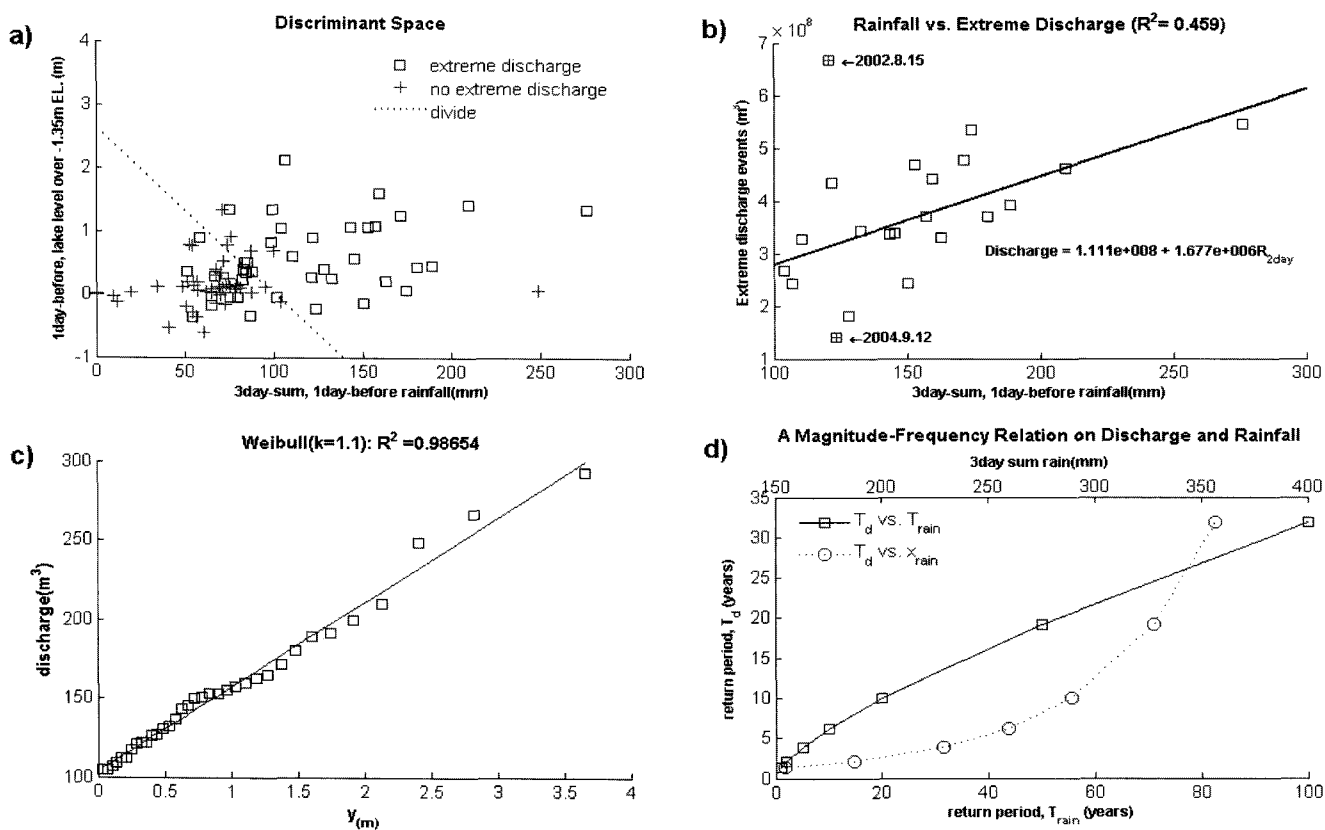


Fig. 6. Establishment of magnitude-frequency relations of rainfall and extreme discharges. (a) Resetting the threshold value to select the rainfall data. (b) Regression analysis between newly-selected discharge dataset. (c) Probability density function for partial duration series of 1day-before-3day-sum rainfall data with the threshold value, 104 mm. (d) Magnitude-Frequency Relations on Discharge and Rainfall.

강우-방류 규모/빈도 상관성

3일합 강우량과 관리수위대비 하구호 수위만을 고려하여 얻은 정준판별함수를 이용하여 극치방류 유발 여부를 구별하는 요인을 살펴보면 관리수위 대비 하구호 수위가 높을수록 보다 낮은 3일합 강우량에 대해서도 극치방류가 발생하였음을 확인할 수 있다 (Fig. 6a). 또한 3일합 강우량이 104 mm 이상인 구역에서는 1건의 예외(1997.5.29-31의 강우군)를 제외하고는 모두 극치방류를 유발하였다. 그러므로 극치방류유발 임계강우량을 50.98 mm가 아닌 104 mm로 재설정하면 극치방류유발을 예측하는데 3일합 강우량만을 고려하는 것이 가능해진다. 따라서 최종적인 강우-방류 상관식은 3일합 강우량이 104 mm 이상인 경우와 이에 대응하는 극치방류량을 이용하여 수립하였다(Fig. 6b). 간차가 크게 나타나는 2002년 8월 12-21일의 방류이벤트(강우에 비해 방류량이 과다)와 2004년 9월 11-14일의 방류이벤트(강우에 비해 방류량이 과소)는 이례적인 것으로 보고 나머지 자료에 대해 회귀분석을 통해 관계식을 구하면 다음과 같다. 이 때 이 식에서 얻어지는 최소극치방류량은 극치방류이벤트의 확률분포함수인 Weibull(k=1.4) 함수의 적용범위 안에 있게 된다.

$$\text{Discharge} = 1.111 \times 10^8 + 1.677 \times 10^6 \overline{r_{3\text{day}}}(r_{3\text{day}} \geq 104) \quad (6)$$

강우와 방류 간의 규모/빈도 상관성을 파악하기 위해서는 3일합 강우량 자료의 극치분석이 필요하다. 극치방류 유발 임계 강우량을 104 mm로 설정한 것을 고려하여 임계값을 동일하게 두

고 부분시계열을 선별하면 총 35건의 사례가 추출된다. 따라서 연평균출현율( $\lambda_{rain}$ )은  $\lambda_{rain} = 35 / (13 + 2/3) = 2.561$ 이다. 이 때 3일합 강우량의 극치값은 Weibull(k=1.1) 분포를 따른다(Fig. 6c). 매개 변수 A, B의 추정치는  $\hat{A}_{rain} = 53.33$ ,  $\hat{B}_{rain} = 103.78$ 이며 적용범위는  $103.78 \leq \overline{r_{3\text{day}}} < \infty$ 이다. 따라서 식 (6)을 적용할 수 있는 3일합 강우량에 대해 Weibull(k=1.1) 함수를 적용하는 데에는 문제가 없다.

3일합 강우량과 극치방류이벤트의 확률분포함수가 얻어졌으므로 두 양의 재현주기 간의 관계식은 이론적으로 유도가 가능하다. 그러나 이 연구에서는 단순화된 식을 얻기 위해 다음과 같은 방법으로 추정하는 방법을 택하였다. 우선 3일합 강우량의 극치확률 분포함수로부터 1년, 2년, 5년, 10년, 20년, 50년, 100년 주기 3일합 강우량을 구하고 식 (6)을 이용하여 대응되는 극치방류이벤트의 규모를 파악하였다. 그 다음 극치방류이벤트의 확률분포함수를 이용하여 해당 방류이벤트의 규모에 대응되는 재현주기를 구한 후 강우의 재현주기와 방류의 재현주기 간의 관계식을 도출하였다. 그 결과는 식 (7)과 같다(Fig. 8d). 여기서  $T_d$ ,  $T_r$ 는 각각 방류와 3일합-강우량의 재현주기,  $\overline{r_{3\text{day}}}$ 는 유역평균 3일합 강우량이다. 이 식에 따르면, 100년 주기 3일합 강우(357mm)에 대해 영산강 하구둑방류량의 재현주기는 30.8년 정도이며 그 양은  $7.0979 \times 10^8 \text{m}^3$ 이다.

$$T_d = 0.117 \exp[0.0155 \overline{r_{3\text{day}}}], \quad T_d = 1.326 T_r^{0.683} \quad (7)$$

## 토론 및 결론

하구둑의 수문 개방에 따라 간헐적으로 담수가 유입되는 영산강 하구에서는 방류되는 담수의 양이 하구환경을 지배하는 중요한 요소 중 하나이다. 담수방류의 영향을 평가하고자 하는 연구의 경우 담수방류의 규모를 발생빈도에 따라 구분하여 접근하는 것이 유용하다. 담수의 영향을 평가하는 자료는 일반적으로 단기적인 관측으로 획득되는 데 반해 하구의 환경은 개개의 방류이벤트의 누적적인 효과를 통해 형성되는 것이기 때문이다. 이 연구는 우선 극치방류이벤트의 규모를 빈도의 관점에서 분류하는 방법론을 제시하고 있어 담수방류의 영향을 평가하고자 하는 연구에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 예를 들어 담수방류 재현주기 정보는 Miller et al.(2008)과 같이 플랑크톤 군집에 미치는 하천수의 영향을 평가하는 미소생태계 실험을 기획하거나 하구역에서 담수의 영향으로 발생하는 다양한 현상들을 규모/빈도 관점으로 해석할 수 있도록 도와준다.

이 연구에서 제시한 강우-방류의 관계식은 강우와 방류의 연계를 재현주기로 표현한다. 이는 유역간의 특성을 비교-평가하고자 할 때 유리하다. 강우량이나 방류량은 유역마다 유출특성에 차이를 보이기 때문에 유역 간 편차가 크다. 강우나 방류의 영향을 받는 하구 생태계는 해당 환경에 적응된 상태이기 때문에 강우나 방류의 절대적 규모보다는 출현빈도에 따른 규모에 보다 의존적이다. 그러므로 유역 간에 강우나 방류의 영향을 비교하려면 절대 수치보다는 출현빈도와 규모라는 관점에서 접근하는 것이 적절하다. 이 연구에서 제시하는 최종 결과는 강우-방류 상관관계를 재현주기로 표현하고 있어 향후 유사한 연구가 다른 유역-하구에서 수행되었을 때 강우-방류의 영향을 상호 비교할 수 있는 틀을 제시할 수 있으리라 본다.

한 가지 유의할 점은 강우-방류 관계식을 여름철이 아닌 다른 계절에 적용하는 경우이다. 1997년 5월 29-31일의 방류유발 잠재 강우군이 보여주는 바와 같이 강우량의 규모가 매우 크더라도 당시 유역의 상태에 따라 방류로 이어지지 않을 수 있다. 여름철은 잦은 강우로 인해 유역 내 토양층의 수분흡수 능력은 그다지 크지 않으므로 강우가 발생할 경우 수위 상승으로 이어지는 시간이 상대적으로 짧다. 그러나 강우량이 적고 건조한 봄의 경우는 유역에 내린 강우가 하천의 수위 상승으로 이어지기까지 다소 긴 지연이 일어날 수 있다. 이런 점을 고려한다면 유역 내의 증발산 정도 역시 극치방류 유발 가능 3일합 강우량을 특성화하는 데 중요한 요소로 작용할 수 있으리라 판단된다. 이 부분에 대한 분석은 추후 연구의 몫으로 돌린다. 실용적인 견지에서 판단할 때 이 연구를 통해 파악된 방류유발 임계 강우량이나 강우-방류 관계식 및 빈도-규모 관계식은 구성이 간단하고 적용이 간편하다는 점에서 그 가치가 인정될 수 있다고 생각된다.

이 연구를 통해 확인한 내용을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 지난 14년간 발생한 영산강 하구둑의 극치방류이벤트를 토대로 극치방류량의 재현주기를 계산하였다. 이를 위해 1997년 1월부터 2010년 8월까지 실시된 방류 기록에서 일연속방류를 이벤트로 규정하고 부분시계열 빈도분석법의 방식에 따라 2005년 연 최고인 133,656,000 m<sup>3</sup>을 임계값으로 적용하여 46건의 극치방류이벤트를 추출하였다. 극치방류이벤트의 확률분포는 Weibull

(k=1.4) 함수로 가장 잘 설명되었다. 2002년 8월 12-21일(첨두시간은 8월 15일) 이벤트(6.88618×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>)의 재현주기를 계산하면 25.5년을 얻으며, 100년 주기 방류이벤트의 규모는 8.1432×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>이다.

둘째, 극치방류이벤트를 유발하는 강우조건을 판별하였다. 극치방류이벤트와 대응되는 강우자료를 추출하기 위해 강우와 방류 간의 반응시차와 방류량과 비교할 수 있는 적정누적일수를 분석하여 각각 1일과 3일의 값을 얻었다. 극치방류 1일 전, 3일합-강우량과 극치방류이벤트의 상관관계를 조사하여 방류유발 가능 임계 3일합 강우량으로 50.98 mm을 선정하였다. 이 값을 초과하는 3일합-강우량 자료는 총 102건의 강우군으로 분류되었다. 이 중 추가변수로 도입한 관리수위대비 하구호수위 및 일최저조위와 대비될 수 있는 87건의 자료를 선별하여 정준판별분석을 실시하였다. 극치방류의 유발에 미치는 영향은 3일합 강우량, 관리수위대비 하구호수위, 일최저조위의 순으로 나타났다. 단순성과 설명력을 고려하여 3일합 강우량과 관리수위대비 하구호수위만을 이용하여 최종적인 판별함수를 결정하고, 이를 이용하여 강우-방류 관계식의 수립을 위한 자료를 추출하였다.

셋째, 판별분석을 통해 관리수위대비 하구호수위가 극치방류유발강우의 특성화에 기여함을 확인하였으나, 동시에 극치방류유발 가능 3일합 강우량을 선별하는 임계값을 50.98 mm에서 104 mm로 재설정하면 항상 극치방류를 유발하는 3일합 강우량 자료를 얻을 수 있음을 알았다. 이에 따라 3일합 강우량이 104 mm 이상인 강우군을 추출하고 회귀분석을 이용하여 강우-극치방류의 상관관계를 분석하여 아래와 같은 식을 얻었다.

$$\text{Discharge} = 1.111 \times 108 + 1.677 \times 10^6 \overline{r_{3\text{day}}} (\overline{r_{3\text{day}}} \geq 104)$$

부분시계열 빈도분석법을 적용하면 3일합-강우량의 극치자료의 경우 Weibull(k=1.1)분포를 따른다. 이를 이용하여 3일합 강우량의 규모( $\overline{r_{3\text{day}}}$ ), 3일합-강우량의 재현주기( $T_{r3}$ ), 방류량의 재현주기( $T_d$ )의 관계를 도출하면 아래와 같다.

$$T_d = 0.117 \exp[0.0155 \overline{r_{3\text{day}}}], T_d = 1.3267 \overline{r_{r3}}^{0.683}$$

담수방류의 재현주기 및 재현주기에 기초한 강우-방류 관계식은 담수의 영향을 평가하고 예측하는 데 활용될 수 있으므로 유역-하구를 통합하여 관리하는 과학적 기반으로 자리매김할 수 있는 한편 하구통합관리시스템의 설계와 개발 과정에서 기여할 수 있을 것이다.

## 사 사

방류 이벤트의 정의 및 통계적인 독립성에 대한 날카로운 지적으로 인해 본 논문의 완성도를 높일 수 있게 도움을 주신 조홍연 박사님과 익명의 심사위원께 감사를 드립니다. 본 연구는 국토해양부의 해양환경기술개발사업의 일환인 “하구역종합관리시스템개발연구”(No-41873-01)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

농어촌공사 영산강사업단, 1999, 하구둑시설물 관리규정, 11pp.

- 박 순, 윤한삼, 이인철, 김헌태, 2008. 낙동강 하구역 해양물리환경에 미치는 영향인자 비교분석(1): 하구둑 방류량과 기상인자. 해양환경안전학회지, **14**(2): 111-117.
- 법선규, 2002. 영산강유역의 지형과 주민생활. 한국지역지리학회지, **8**(4): 451-467.
- 4대강 살리기 추진본부, 2009. 4대강 살리기 마스터플랜. 국토해양부, 400pp.
- 윤한삼, 이인철, 류청로, 2003. 영일만 유입오염부하량과 수질의 시공간적 변동특성(1): 하천유량과 유입부하량의 계절변동. 한국해양공학회지, **17**(4): 23-30.
- 이진원, 김형섭, 우효섭, 1993. 댐건설로 인한 5대수계 본류의 유황변화 분석. 대한토목학회논문집, **13**(3): 79-91.
- 장성태, 김기철, 2006. 낙동강 하구에서의 해양 환경 변화. 한국해양학회지, **11**(1): 11-20.
- 조홍연, 조범준, 김상준, 2008. 계절별 염분 자료를 이용한 아산만 연안의 담수영향범위 추정, 한국해양해양공학회논문집, **20**(2): 219-231.
- Bird, E., 2000. Coastal Geomorphology: An Introduction., John Wiley & Sons, 322pp.
- Byun, D.S., X.H. Wang and P.E. Holloway, 2004. Tidal characteristic adjustment due to dyke and seawall construction in the Mokpo Coastal Zone, Korea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **59**: 185-196.
- Byun, D.S., X.H. Wang, D.E. Hart and Y.K. Cho, 2005. Modeling the effect of freshwater inflows on the development of spring blooms in an estuarine embayment. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **65**: 351-360.
- de Castro, M., M. Gomez-Gesteira, R. Prego and I. Alvarez, 2004. Ria-ocean exchange driven by tides in the Ria of Ferrol (NW Spain), *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **61**: 15-24.
- Dingman, S.L., 2002. Physical Hydrology (2nd ed.). Prentice Hall, 646pp.
- Dunne, T. and L.B. Leopold, 1978. Water in Environmental Planning. W.H.Freeman, 818pp.
- Dyer, K., 1998. Estuaries: A Physical Introduction (2nd ed.). Wiley, 210pp.
- Eyre, B.D. and A.J.P. Ferguson, 2006. Impact of a flood event on benthic and pelagic coupling in a sub-tropical east Australian estuary (Brunswick). *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **66**: 111-122.
- Garel, E., L. Pinto, A. Santos and O. Ferreira, 2009. Tidal and river discharge forcing upon water and sediment circulation at a rock-bound estuary (Guadiana estuary, Portugal). *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **84**: 269-281.
- Goda, Y., 2000. Random Seas and Design of Maritime Structures (2nd ed.). World Scientific, 444pp.
- Goñi, M.A., G. Voulgaris and Y.H. Kim, 2009. Composition and fluxes of particulate organic matter in a temperate estuary (Winyah Bay, South Carolina, USA) under contrasting physical forcings. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **85**: 273-291.
- Kang, J.W., 1999. Changes in Tidal Characteristics as a result of construction of sea-dyke/sea-walls in the Mokpo Coastal Zone in Korea, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **48**: 429-438.
- Kim, T. I., B. H. Choi and S. W. Lee, 2006. Hydrodynamics and sedimentation induced by large-scale coastal development in the Keum River Estuary, Korea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **68**: 515-528.
- Masselink, G. and M.G. Hughes, 2003. Introduction to Coastal Processes and Gemorphology. Arnold, 354pp.
- Miller, C.J., D.L. Roelke, S.E. Davis, H.-P. Li and G. Gable, 2008. The role of inflow magnitude and frequency on plankton communities from the Guadalupe Estuary, Texas, USA: Findings from microcosm experiments, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **80**: 67-73.
- Stedinger, J.R., R.M. Vogel, and E. Foufoula-Georgiou, 1993. Frequency Analysis of Extreme Events. In: Handbook of Hydrology, edited by Maidment, D.R., McGraw-Hill, pp.18.1-66.
- van Maren, D.S. and P. Hoekstra, 2004. Seasonal variation of hydrodynamics and sediment dynamics in a shallow subtropical estuary: the Ba Lat River, Vietnam. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **60**: 529-540.
- Webster, I.T. and P.W. Ford, 2010. Delivery, deposition and redistribution of fine sediments within macrotidal Fitzroy Estuary/Kepel Bay: Southern Great Barrier Reef, Australia. *Cont. Shelf Res.*, **30**: 793-805.

2011년 6월 10일 원고접수

2011년 10월 10일 수정본 채택

담당편집위원: 오영민