

유출특성 분포함수의 표준화를 통한 종합홍수지수의 개발

Development of a Comprehensive Flood Index through Standardizing Distributions of Runoff Characteristics

위 성 옥* / 정 건 희** / 김 태 웅***

Wi, Sungwook / Chung, Gunhui / Kim, Tae-Woong

Abstract

This study developed a flood index which evaluates runoff characteristics. Runoff characteristics expressed in a hydrograph were reflected in the flood index in the form of characteristic factors such as a rising curve gradient, a peak discharge, a flood response time, and a flood discharge volume prior to peak. This study applied the standardization method to estimate the relative severity of the characteristic factors by transforming the distribution of characteristic factors into the standard normal distribution. The flood index developed in this study is a comprehensive flood index (CFI) which makes up for the weak points of a flash flood index (FFI) in determining relative severities. The CFI was applied to Han River basin and Selma River basin, and was compared with the FFI based on the correlation analysis and the regression analysis. The CFI could comprehensively evaluate flood runoff characteristics because the CFI is not dominated by a specific characteristic factor, and the CFI could explain more efficiently the relationship between rainfall and runoff than the FFI.

keywords : Flood Index, Runoff Characteristics, Standardization

요 지

본 연구에서는 우리나라 홍수유출의 특성을 종합적으로 표현할 수 있는 홍수지수를 개발하였다. 홍수유출특성을 종합적으로 지수에 반영하기 위하여 유출곡선으로 표현되는 홍수유출의 특성을 홍수수문곡선의 상승률, 첨두유량, 홍수 응답시간, 첨두발생 전 홍수용적 등 4가지의 특성인자로 표현하였다. 이러한 유출특성인자를 객관적인 상대심도로 표현하기 위하여 본 연구에서는 특성인자의 분포함수를 표준정규분포함수로 변환하여 특성지수를 산정하였다. 본 연구에서 산정한 종합홍수지수(Comprehensive Flood Index, CFI)는 기존의 돌발홍수지수(Flash Flood Index, FFI)의 문제점을 보완한 것으로 홍수의 심도를 유역별로 상대평가할 수 있는 특징이 있다. 본 연구에서는 한강과 설마천 유역에 대하여 CFI를 산정하고, 상관분석과 회귀분석을 통해 FFI와 비교 평가하였다. CFI는 산정과정에서 특정 홍수유출 특성에 지배받지 않아 종합적으로 홍수유출특성을 표현할 수 있고, FFI에 비해 강우-유출관계를 효과

* 한양대학교 토목공학과 석사과정

Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea
(e-mail: eg4u@hanyang.ac.kr)

** 아리조나대학교 초빙연구원

Visiting Research Associate, Dept. of Civil Engineering and Engineering Mechanics, The University of Arizona, Tucson, AZ, 85721, USA

(e-mail: gunhui@email.arizona.edu)

*** 한양대학교 건설환경시스템공학전공 조교수

Corresponding Author, Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do, 426-791, Korea

(e-mail: twkim72@hanyang.ac.kr)

적으로 설명할 수 있었다.

핵심용어 : 홍수지수, 유출특성, 표준화

1. 서 론

홍수는 호우의 강도 및 지속시간, 지역적 특성에 따라 하천홍수, 도시홍수, 해안홍수 및 돌발홍수 등 여러 유형으로 구분할 수 있다. 최근 지구온난화, 엘니뇨 및 라니냐 등 지구환경 변화에 따른 기후변화의 영향으로 인해 짧은 기간 동안 높은 강도를 가지는 호우의 발생이 빈번하고 이에 기인하는 돌발홍수에 대한 관심이 높아지면서, 이를 평가하기 위한 노력으로 돌발홍수지수(Flash Flood Index, FFI)가 개발되었다(Kyiamah, 1996; 정재철, 1999; Bhaskar *et al.*, 2000; 김병식 등, 2007). FFI는 강우와 유출사이의 물의 순환에 대한 모든 정보를 포함하고 있는 유출수문곡선으로 표현되는 돌발홍수의 유출특성을 이용하여 돌발홍수의 심도를 정량적으로 평가한 홍수지수이다.

돌발홍수지수 산정에 관한 기존 연구 결과들은 Kyiamah(1996)와 Bhaskar *et al.*(2000)의 연구 내용에 바탕을 두고 있다. 그들의 연구에서는 홍수 시 유출수문곡선으로부터 상승률, 홍수량 비, 홍수 응답시간 등 돌발홍수의 유출특성을 표현하는 3가지 특성인자를 정의하고, 이것들을 이용하여 Eastern Kentucky 지역의 홍수 사상에 대하여 돌발홍수지수를 산정하였다. 국내에서는 정재철(1999)과 안원식(2000)이 Kyiamah(1996)와 Bhaskar *et al.*(2000)가 제시한 방법을 적용하여 보청천 유역의 홍수 사상에 대해 돌발홍수지수를 산정한 바 있으며, 산정된 돌발홍수지수와 3가지 돌발홍수 유출특성과의 관계를 분석함으로써 우리나라에서 돌발홍수의 발생 가능성이 높다고 평가하였다. 김병식 등(2007)은 한강유역의 홍수사상에 대해 돌발홍수지수의 시공간적 분포를 분석한 바 있다.

돌발홍수지수의 산정을 위해서는 돌발홍수 유출특성별 상대적 크기를 나타내는 상대심도를 결정하게 된다. 상대심도는 보통 임의적인 분류기준에 의해 결정되었는데(Kyiamah, 1996; 정재철, 1999; 안원식, 2000; Bhaskar *et al.*, 2000), 이러한 방법은 연구자에 따라 돌발홍수의 심도가 달라질 가능성이 있기 때문에 지수 산정의 일관성을 유지하기가 어렵다. 따라서 일관성 있는 홍수지수의 산정이 이루어지 위해서는 상대심도를 결정하는 방법에 대한 표준화된 기준이 필요하며, 본 연구에서는 분포의 표준화 기법을 도입하여 새로운 상대심

도 결정 방법을 제시하고자 한다.

본 연구에서 적용하는 표준화 기법은 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)의 산정 기법에 기초를 둔다. McKee *et al.*(1993)은 강수량과 밀접한 관계를 갖는 가뭄을 정의하고 감시하기 위하여 표준강수지수를 개발하였으며, 표준강수지수는 이후 많은 연구에서 가뭄의 특성 분석을 위한 가뭄지수로 이용되어 왔다(Edwards and McKee, 1997; Guttman, 1999; 유철상, 류재희, 2003; Kim *et al.*, 2006; 연제문 등, 2007). SPI의 산정에 이용되는 표준화 기법은 강수량 자료가 아닌 자료를 표준화시키는 목적에도 사용되었다. 그 예로 유원희(2002)는 유출량 자료에 SPI 산정 기법을 적용하여 가뭄지수를 산정한 바 있으며, 추현재 등(2007)은 남방진동지수와의 계절적 관계의 파악을 목적으로 월평균기온과 월유입량을 SPI 산정 기법을 통해 표준화시킨 후 분석한 바 있다.

홍수와 함께 우리 생활에 막대한 피해와 영향을 끼치는 대표적인 기상재해인 가뭄의 경우 여러 가지 정의에 따른 가뭄의 심도를 정량화하기 위하여 다양한 가뭄지수(drought index)가 개발되어 활용되고 있고, 기존의 돌발홍수지수가 돌발홍수 사상의 평가에 제한적임을 감안할 때, 홍수의 경우에도 홍수의 심도를 평가하기 위한 다양한 홍수지수의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 홍수유출 특성의 종합적인 반영과 표준화 기법을 이용하여 FFI의 단점을 보완하는 홍수지수의 산정에 초점을 맞추어 우리나라 대표 하천인 한강과 전형적인 산지 하천인 설마천 유역에 대하여 홍수지수를 산정하고자 한다. 본 연구에서 개발된 홍수지수와 기존의 돌발홍수지수와의 비교 분석을 통해 본 연구에서 개발된 홍수지수의 특성 및 유용성을 확인하고, 또한 본 연구에서 개발한 홍수지수가 홍수발생 원인 및 강우 특성과 갖는 관계를 분석하고자 한다.

2. 연구 대상 유역

본 연구에서는 홍수 지수를 산정하기 위한 대상유역으로 한강 유역과 설마천 유역을 선정하였다. 한강은 서울을 관통하는 우리나라 중부 최대하천으로서 지리적 중요성과 대표성이 인정되며 비교적 긴 기간의 수문관측기록이 존재한다. 설마천 유역의 경우 비록 자료 기간은 길지 않으나 한국건설기술연구원으로부터 신뢰성

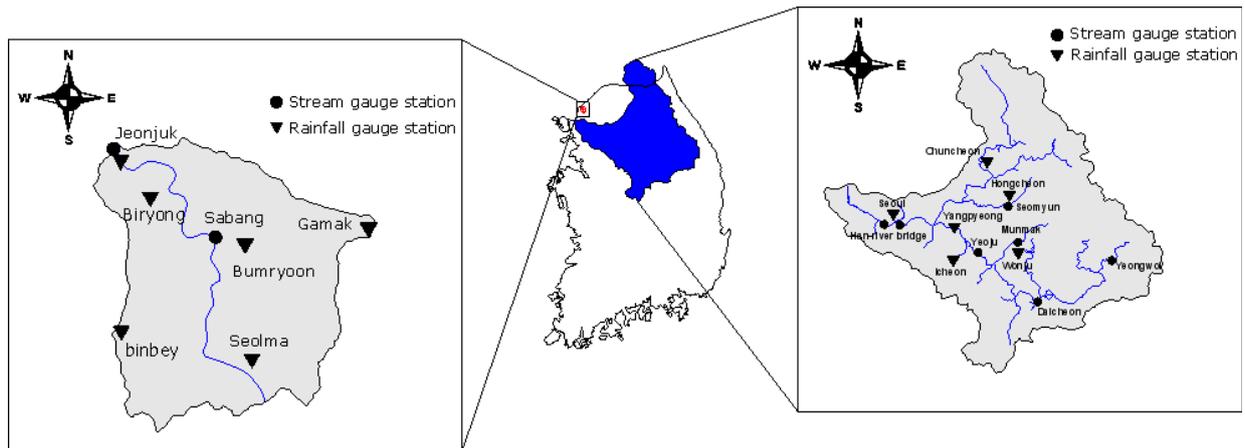


Fig. 1. Han River Basin and Selma River Basin

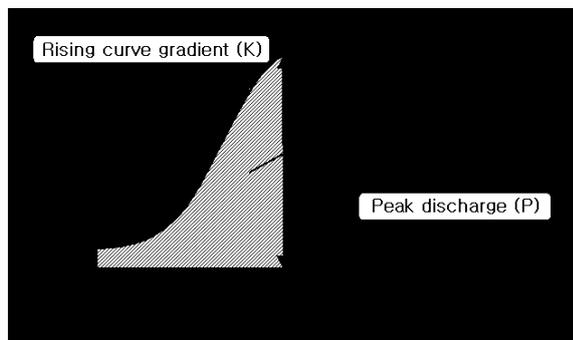


Fig. 2. Flood Runoff Characteristics

있는 수문 자료들이 제공되고 있고 전형적인 산지 소하천으로 돌발홍수의 발생에 유리한 지리적 특성을 지니고 있다.

한강과 설마천의 유역도와 유역 내 수문 관측소 위치는 Fig. 1과 같다. 한강 유역의 홍수유출특성의 분석을 위해 한강대교 수위 관측소의 17개년(1990~2006년) 수위 및 유량 자료와 기상청 관할 6개 우량관측소의 시강우량 자료를 사용하였다. 설마천 유역에서는 유역의 출구인 전적비교에서의 10분 단위의 우량과 유량 자료를 사용하였고, 자료기간은 1998년부터 2005년까지 총 8개년이다.

3. 홍수유출 특성 분석

본 연구에서는 홍수특성을 종합적으로 반영할 수 있는 종합홍수지수를 산정하기 위하여 기존의 돌발홍수유출 특성들에 홍수용적을 홍수지수 산정시에 추가로 반영하였다. 따라서 본 연구에서 홍수지수 산정에 반영된 4가지 홍수유출 특성은 상승률(K), 첨두유량(P), 홍수 응답시간(T), 첨두발생 전 홍수용적(A)이며, Fig. 2에 도식적으로 설명되어져 있다. 각 홍수유출특성별 정의는 다음과 같다.

3.1 상승률(Rising curve gradient, K)

수문곡선의 상승곡선은 Eq. (1)과 같은 지수함수로 일반화할 수 있다. 이 식으로부터 상승률 K는 Eq. (2)를 이용하여 산정할 수 있다.

$$Q_t = Q_0 e^{Kt} \quad (1)$$

$$K = \frac{24 \ln(Q_t / Q_0)}{t} \quad (2)$$

여기서, Q_0 는 유입량의 증가가 시작되는 부분에서의 유량, Q_t 는 첨두유량, K 는 상승곡선의 기울기 (day^{-1}), 그리고, t 는 첨두 발생 시간(hr)이다. K가 클수록 급격한 수문곡선의 상승으로 인해 홍수에 대한 대비가 더욱 어려워지게 되며 심각한 홍수의 피해로 이어지게 된다.

3.2 첨두유량(Peak discharge, P)

첨두유량(P)은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 수문곡선상의 가장 큰 유량의 크기이며, 홍수 발생기간 동안 가장 큰 유량의 영향을 홍수지수 산정 시 반영하고자 선택된 인자이다. 첨두유량이 클수록 더 심각한 홍수사상으로 평가하게 되며, 홍수수문곡선으로부터 직접 산정한다.

3.3 홍수 응답시간(Flood response time, T)

홍수 응답시간(T)은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 홍수사상의 시작 즉 유입량의 증가가 일어나는 시점부터 첨두유량이 발생하는 시점까지의 시간으로 정의되며 홍수수문곡선으로부터 직접 얻게 된다. 짧은 홍수 응답시간은 유입량의 급격한 증가가 발생했음을 의미하며 짧은 짧은수록 심각한 돌발홍수의 발생에 기여하게 된다.

3.4 침투발생 전 홍수용적(Flood discharge amount prior to peak, A)

침투발생 전 홍수용적(A)은 홍수 응답시간(T) 동안 발생한 총 유입량으로 정의된다. 즉 유입량의 상승이 일어나는 시점부터 침투 유량이 발생하는 시점까지의 총 유입량(m^3)을 말하며, Fig. 2에서 빗금으로 처리된 영역으로 표시된 부분이다.

이상의 4가지 홍수유출 특성과 돌발홍수지수 산정에 사용되는 홍수유출특성의 차이점을 살펴보면 Fig. 3과 같다. 가장 큰 차이점은 돌발홍수 지수 산정에서는 고려되지 않은 침투발생 전 홍수용적(A)의 영향을 홍수지수 산정에 반영한 것으로, 이는 일시적인 침투유량의 크기뿐 아니라 침투유량 발생까지의 유출용적의 영향을 홍수지수에 반영하기 위한 것이다. Bhaskar *et al.* (2000)의 연구 결과에 의하면 A는 돌발홍수지수와의 상관성이 작은 것으로 나타났는데, 홍수용적의 추가는 넓은 평가 영역을 갖는 홍수지수의 개발을 가능하게 하

고, 보다 다양한 홍수유출특성을 종합적으로 반영할 수 있게 한다. 또한, 돌발홍수지수에서는 침투유량을 장기 유출 평균으로 나눈 홍수량비로 정의된 홍수유출 특성을 사용하여 침투유량의 영향을 반영한 반면, 본 연구에서는 침투유량 자체의 영향만을 고려하였다.

4. 홍수의 정량적 표현 기법 개발

4.1 표준화 기법

각 홍수유출특성에 대한 상대심도를 결정하기 위하여 Mckee *et al.*(1993)이 강수량과 밀접한 관계를 갖는 가뭄을 정의하고 감시하기 위해 개발한 SPI (Standardized Precipitation Index)의 산정에 적용한 표준화 기법을 도입하였다. Fig. 4는 표준화 과정을 도식적으로 설명한 것이다. 표준화를 위해서는 먼저 적합도 검정을 통해 표준화 시키고자 하는 자료에 대한 적정 확률 분포형을 선정하게 된다. 적정 확률 분포형의 선정이 이루어진 다음, 그 분포에 대한 누적확률분포함수

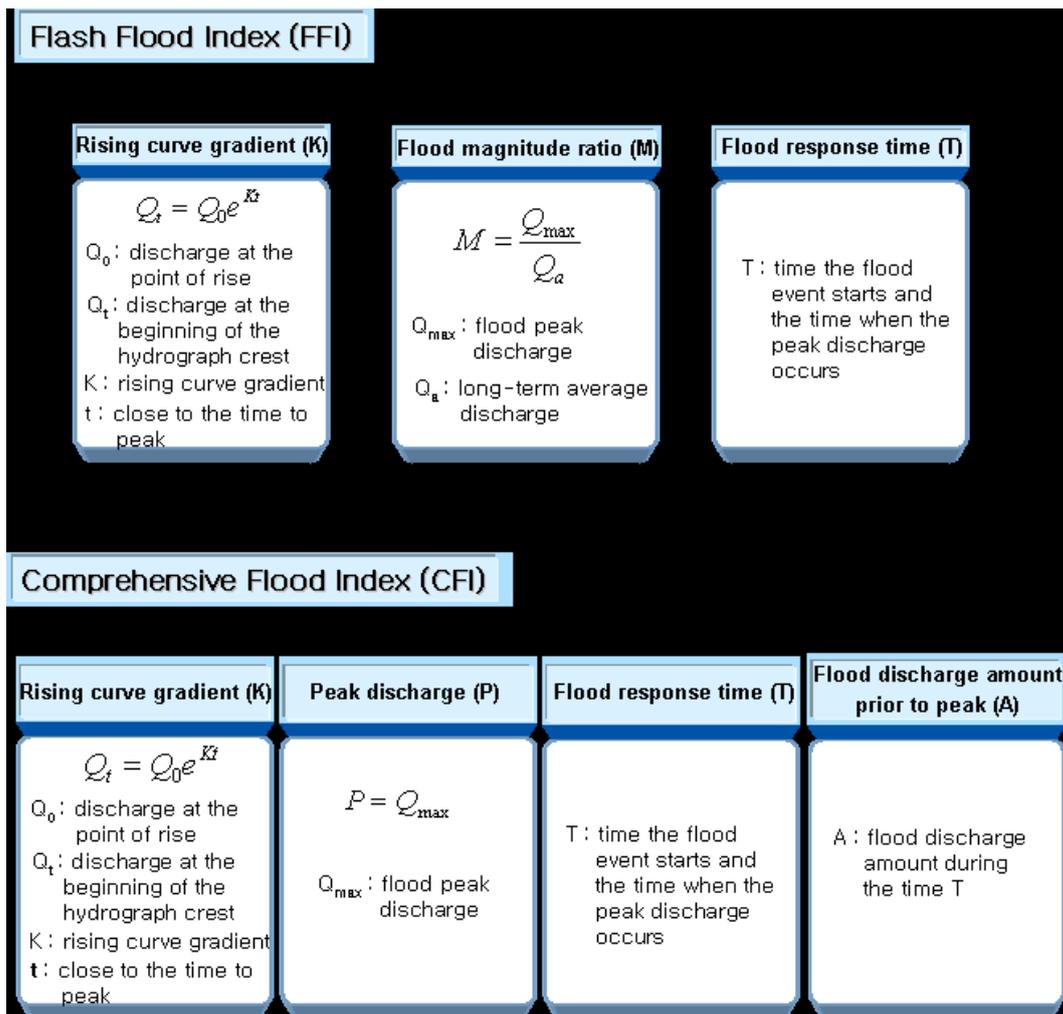


Fig. 3. Flash Flood Index and Comprehensive Flood Index

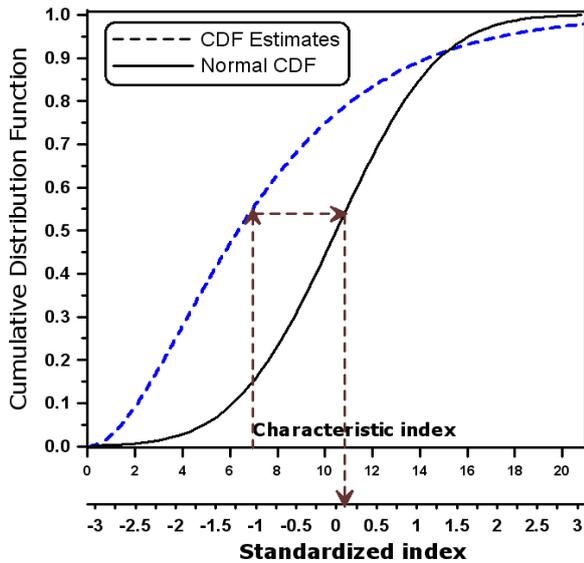


Fig. 4. Standardization of Cumulative Distribution Function (Kim *et al.*, 2006)

(cumulative probability function, CDF)와 평균이 0이고 분산이 1인 표준정규분포의 CDF를 이용하여 특정 자료 값에 대한 표준화된 값을 얻게 된다.

본 연구에서는 표준화 기법을 통해 각각의 홍수유출 특성을 표준화시키고, 이를 상대 심도로 결정함으로써 임의적 기준으로 상대심도를 결정하는 기존의 상대심도 결정 방법을 보완하였다. 일반적으로 유량과 강우량과 같은 수문 자료의 분포는 양의 왜곡도가 존재하게 되는데, 이러한 자료의 특성은 상관관계 분석에서 과대평가 혹은 과소평가의 결과를 불러올 수 있으며, 이런 문제를 해결하기 위한 방법으로 표준화 기법을 적용하게 된다(추현재 등, 2007). 따라서 홍수지수 산정 시 고려한 홍수유출특성들이 양의 왜곡도가 존재하는 분포 특성을 갖게 되면 표준화 기법의 도입으로부터 특정 홍수사상에 대한 홍수 지수가 과대 혹은 과소평가되는 것을 막

는 효과도 얻을 수 있다.

Gamma 분포는 분포의 형태와 잘 알려진 수학적 특성 때문에 수문분야에서 광범위하게 쓰이는 분포로서 양으로 왜곡되어 있는 수문자료특성과 유사성을 가지고 있다(이재수, 2006). 특히 자료의 분포특성이 Gamma 분포를 따를 때 표준화 시킨 자료는 본연의 특성을 잃지 않는다(Edwards and Mckee, 1997). 본 연구에서는 먼저 4가지 홍수유출특성에 대해 Gamma 분포의 적합도 검정을 5% 유의수준에 대해 Kolmogorov-Smirnov 검정(K-S Test)과 Chi-square 검정(χ^2 Test)을 통해 실시하였다. Table 1은 한강과 설마천 유역의 홍수유출 특성별 적정 확률분포에 대한 검정 결과를 보여주고 있으며, 한강유역에서의 침투발생 전 홍수용적을 제외한 모든 홍수유출특성의 분포가 Gamma 분포를 따른다는 것을 알 수 있다. 한강유역의 침투발생 전 홍수용적에 대한 적정 확률분포로는 극치분포(extreme value distribution, GEV)를 선정하였다.

4.2 홍수유출 특성과 상대심도의 결정

Tables 2 and 3은 한강과 설마천 유역에 대해 각각 선정된 58개, 76개 홍수사상별 4가지 홍수유출특성(K, P, T, A)과 각각에 대한 상대심도를 산정한 결과이다. 두 유역의 4가지 홍수유출특성 값들을 서로 비교해 보면 유역의 크기에 상당한 차이가 있는 만큼 한강유역에서의 침투유량(P)과 침투발생 전 홍수용적(A)의 값들이 설마천 유역보다 매우 큰 값을 보임을 알 수 있다. 반면 설마천에서는 지형 특성으로 인하여 한강유역에 비해 큰 값의 상승률(K)과 작은 값의 홍수 응답시간(T)을 보였다. 설마천은 매우 큰 유로 경사를 갖는 산지 소하천에 해당하므로, 홍수 시 급격한 유량의 증가로 인해 한강 유역보다 큰 상승률과 짧은 홍수 응답시간을 나타내게 되는 것이다. 하지만 상대심도로 나타내기 전에 유

Table 1. Goodness-of-fit Test of Runoff Characteristic Distributions

Basin	Distribution	Runoff characteristics	χ^2		K-S test	
			test statistic	critical value	test statistic	critical value
Han River	Gamma	K	3.17	9.49	0.12	0.18
		P	5.28	7.81	0.15	0.18
		T	3.83	9.49	0.16	0.18
	GEV	A	1.79	5.99	0.06	0.18
Selma River	Gamma	K	2.32	9.49	0.12	0.15
		P	8.16	9.49	0.13	0.15
		T	2.32	9.49	0.07	0.15
		A	4.21	9.49	0.09	0.15

Table 2. Relative Severity of Runoff Characteristics in Han River Basin

No	Date	Flood characteristics				Standardized characteristics				Flood Index	
		K (day ⁻¹)	P (m ³ /s)	T (hr)	A (10 ⁶ m ³)	S_K	S_P	S_T	S_A	CFI	FFI
1	1990-06-20	1.62	5185	29	362.33	0.18	-0.88	-0.40	-0.45	-0.76	-0.31
2	1990-06-23	1.41	11033	22	598.47	-0.09	0.52	-0.93	0.33	1.68	1.35
3	1990-06-25	1.11	9921	29	741.80	-0.54	0.30	-0.40	0.61	0.77	0.16
4	1990-07-11	0.73	4932	26	291.93	-1.22	-0.97	-0.61	-0.84	-2.42	-1.58
5	1990-07-18	2.65	12993	13	436.29	1.27	0.87	-1.82	-0.15	3.80	3.95
6	1990-07-22	0.54	6446	32	604.45	-1.69	-0.51	-0.20	0.34	-1.67	-2.01
7	1990-07-25	1.22	10269	29	609.97	-0.35	0.37	-0.40	0.35	0.76	0.41
8	1990-08-22	1.60	7483	27	397.44	0.16	-0.25	-0.54	-0.30	0.15	0.45
9	1990-09-02	1.07	7971	45	563.77	-0.60	-0.13	0.55	0.24	-1.03	-1.27
10	1990-09-09	2.31	5185	14	148.26	0.95	-0.88	-1.70	-2.27	-0.50	1.77
11	1990-09-11	2.12	28800	23	1589.67	0.75	2.92	-0.84	1.46	5.97	4.51
12	1991-07-26	1.53	13493	29	665.45	0.07	0.95	-0.40	0.47	1.89	1.42
13	1992-08-28	3.14	6714	19	309.51	1.68	-0.44	-1.19	-0.73	1.70	2.43
14	1993-07-14	2.47	7442	19	311.50	1.09	-0.26	-1.19	-0.72	1.31	2.03
15	1993-07-18	1.32	5091	32	365.72	-0.21	-0.91	-0.20	-0.44	-1.37	-0.93
16	1994-07-02	0.98	4840	51	377.11	-0.74	-1.00	0.84	-0.39	-2.97	-2.58
17	1994-08-29	2.04	5750	31	247.40	0.67	-0.71	-0.26	-1.16	-0.94	0.22
18	1995-07-10	2.21	7364	33	281.61	0.84	-0.28	-0.13	-0.91	-0.21	0.70
19	1995-08-09	1.96	10649	29	632.04	0.58	0.44	-0.40	0.40	1.82	1.42
20	1995-08-20	2.33	13991	30	814.06	0.96	1.03	-0.33	0.73	3.05	2.32
21	1995-08-25	1.04	27079	56	3341.50	-0.65	2.73	1.07	2.10	3.11	1.01
22	1996-07-22	2.62	4708	27	184.23	1.23	-1.04	-0.54	-1.78	-1.05	0.73
23	1996-07-28	1.54	15913	46	1262.75	0.09	1.33	0.60	1.23	2.05	0.82
24	1997-07-02	2.07	8310	28	450.49	0.70	-0.05	-0.47	0.10	1.21	1.11
25	1997-07-06	0.84	5286	39	434.46	-1.01	-0.85	0.22	-0.15	-2.24	-2.09
26	1997-07-17	1.03	5056	43	415.16	-0.67	-0.93	0.44	-0.23	-2.27	-2.04
27	1997-08-05	2.11	7441	51	600.30	0.74	-0.26	0.84	0.33	-0.03	-0.36
28	1998-06-26	3.18	5074	27	143.13	1.72	-0.92	-0.54	-2.35	-1.01	1.34
29	1998-07-03	0.78	4461	64	562.67	-1.12	-1.13	1.41	0.24	-3.42	-3.66
30	1998-07-11	0.84	6111	76	533.45	-1.01	-0.61	1.88	0.16	-3.34	-3.50
31	1998-08-04	1.69	7280	38	325.53	0.26	-0.30	0.17	-0.64	-0.84	-0.20
32	1998-08-08	0.74	20356	68	2423.93	-1.22	1.95	1.57	1.85	1.00	-0.85
33	1998-08-15	1.10	9153	20	505.68	-0.54	0.14	-1.10	0.08	0.77	0.69
34	1999-08-03	0.91	20707	79	3355.26	-0.88	1.99	1.99	2.12	1.24	-0.88
35	1999-09-21	1.68	10272	53	1130.39	0.25	0.37	0.94	1.12	0.80	-0.32
36	1999-09-25	0.94	5199	26	345.11	-0.83	-0.88	-0.61	-0.54	-1.63	-1.09
37	2000-07-23	2.72	4689	27	226.09	1.33	-1.05	-0.54	-1.34	-0.52	0.82
38	2000-08-28	0.69	8336	80	1538.02	-1.33	-0.04	2.02	1.43	-1.96	-3.39
39	2000-09-16	1.02	7450	64	753.07	-0.68	-0.25	1.41	0.63	-1.72	-2.35
40	2001-07-15	3.85	10441	19	357.38	2.22	0.40	-1.19	-0.48	3.33	3.81
41	2001-07-23	3.41	7713	19	215.93	1.89	-0.19	-1.19	-1.44	1.45	2.89
42	2001-07-31	0.92	6483	68	785.13	-0.86	-0.50	1.57	0.68	-2.26	-2.94
43	2002-08-07	2.16	25723	40	1605.89	0.79	2.59	0.28	1.47	4.56	3.09
44	2002-09-01	2.13	6128	21	223.48	0.76	-0.60	-1.01	-1.37	-0.20	1.17
45	2003-07-23	2.90	10872	23	381.09	1.48	0.48	-0.84	-0.37	2.44	2.81
46	2003-08-25	1.38	9851	42	672.39	-0.13	0.28	0.39	0.48	0.25	-0.23
47	2003-08-28	1.28	8618	28	479.89	-0.27	0.02	-0.47	0.00	0.22	0.22
48	2003-09-08	0.78	4586	32	384.69	-1.12	-1.08	-0.20	-0.35	-2.35	-2.00
49	2003-09-10	0.66	5234	20	295.39	-1.40	-0.87	-1.10	-0.82	-1.99	-1.17
50	2003-09-13	0.47	5779	40	587.45	-1.89	-0.70	0.28	0.30	-2.57	-2.87
51	2003-09-19	2.02	7218	26	287.74	0.64	-0.31	-0.61	-0.87	0.07	0.94
52	2004-06-21	1.07	5285	56	383.76	-0.59	-0.85	1.07	-0.36	-2.88	-2.52
53	2004-07-13	1.35	9107	33	562.88	-0.17	0.13	-0.13	0.24	0.33	0.09
54	2004-07-17	0.86	13331	51	1141.00	-0.98	0.93	0.84	1.12	0.23	-0.89
55	2004-08-20	0.57	5182	99	866.73	-1.61	-0.88	2.65	0.80	-4.35	-5.15
56	2005-07-01	2.12	5157	20	254.53	0.75	-0.89	-1.10	-1.10	-0.14	0.96
57	2005-08-11	2.28	7056	26	394.59	0.91	-0.35	-0.61	-0.31	0.86	1.17
58	2006-07-29	1.04	17220	52	2034.80	-0.65	1.52	0.89	1.70	1.69	-0.01

Table 3. Relative Severity of Runoff Characteristics in Selma River Basin

No	Date	Flood characteristics				Standardized characteristics				Flood Index	
		K (day ⁻¹)	P (m ³ /s)	T (hr)	A (10 ³ m ³)	S_K	S_P	S_T	S_A	CFI	FFI
1	1998-06-30	22.41	7.54	3.5	71.74	0.78	-0.02	-0.73	0.02	1.51	1.49
2	1998-07-02	8.63	37.33	5.0	313.03	-0.31	1.47	-0.30	1.32	2.78	1.45
3	1998-07-09	11.78	8.48	5.2	81.78	0.01	0.07	-0.26	0.12	0.45	0.33
4	1998-07-16	9.34	39.06	7.7	231.27	-0.24	1.52	0.27	1.00	2.01	1.01
5	1998-08-05	4.45	10.14	5.5	132.35	-0.91	0.20	-0.18	0.49	-0.04	-0.52
6	1998-08-08	4.86	4.72	11.5	117.20	-0.83	-0.32	0.90	0.39	-1.67	-2.06
7	1998-08-14	9.77	1.86	8.2	33.21	-0.19	-0.84	0.36	-0.45	-1.84	-1.39
8	1998-09-05	2.20	3.00	16.3	111.34	-1.43	-0.59	1.52	0.35	-3.19	-3.54
9	1998-09-21	14.25	2.33	3.8	9.41	0.22	-0.72	-0.62	-1.06	-0.94	0.12
10	1999-07-22	3.88	17.32	6.8	288.05	-1.02	0.65	0.11	1.23	0.76	-0.47
11	1999-07-24	48.40	1.86	1.7	5.67	1.97	-0.84	-1.48	-1.27	1.35	2.61
12	1999-07-31	8.20	116.52	9.2	1214.36	-0.36	3.24	0.54	3.38	5.71	2.33
13	1999-08-02	76.97	23.40	1.0	37.02	2.88	0.94	-1.93	-0.39	5.37	5.76
14	1999-08-03	62.59	23.59	1.7	91.94	2.45	0.95	-1.48	0.20	5.09	4.89
15	1999-09-19	13.10	45.23	2.8	224.13	0.12	1.71	-0.96	0.97	3.76	2.79
16	1999-10-28	7.49	9.90	9.0	136.57	-0.45	0.18	0.51	0.51	-0.26	-0.77
17	2000-07-22	53.89	7.64	1.5	19.91	2.17	-0.01	-1.58	-0.72	3.02	3.74
18	2000-08-05	6.07	50.73	9.7	603.22	-0.64	1.86	0.62	2.17	2.77	0.60
19	2000-08-25	29.03	3.13	2.8	13.32	1.14	-0.57	-0.96	-0.91	0.63	1.54
20	2000-08-27	10.18	10.82	6.3	93.85	-0.15	0.25	0.00	0.22	0.32	0.10
21	2000-08-31	8.02	7.97	7.8	124.10	-0.38	0.02	0.30	0.43	-0.23	-0.66
22	2000-09-15	3.29	14.20	21.0	468.33	-1.14	0.48	2.02	1.82	-0.87	-2.68
23	2001-06-17	3.74	3.01	5.5	40.58	-1.04	-0.59	-0.18	-0.34	-1.79	-1.45
24	2001-06-29	25.54	3.35	1.7	10.59	0.96	-0.53	-1.48	-1.01	0.90	1.91
25	2001-07-05	21.16	1.06	4.8	5.90	0.70	-1.10	-0.35	-1.25	-1.31	-0.05
26	2001-07-14	12.23	5.02	5.0	17.86	0.05	-0.29	-0.30	-0.77	-0.71	0.06
27	2001-07-21	8.93	32.69	8.7	533.62	-0.28	1.31	0.45	1.99	2.57	0.58
28	2001-07-22	6.01	22.02	6.3	323.20	-0.65	0.88	0.00	1.36	1.59	0.23
29	2001-07-29	30.82	32.62	2.5	129.31	1.23	1.31	-1.09	0.47	4.09	3.63
30	2001-07-30	35.25	2.64	1.5	6.10	1.44	-0.66	-1.58	-1.24	1.12	2.36
31	2001-07-31	7.89	14.64	12.2	187.45	-0.40	0.50	0.99	0.79	-0.10	-0.89
32	2001-08-15	43.90	1.59	2.0	3.16	1.80	-0.91	-1.31	-1.49	0.71	2.20
33	2001-10-09	22.79	6.93	2.5	28.58	0.80	-0.07	-1.09	-0.53	1.28	1.82
34	2002-04-29	6.92	11.43	6.5	117.54	-0.52	0.30	0.04	0.39	0.12	-0.27
35	2002-07-05	11.76	4.83	3.7	18.22	0.00	-0.31	-0.67	-0.76	-0.40	0.37
36	2002-07-19	10.22	110.63	10.5	469.42	-0.14	3.13	0.75	1.82	4.06	2.24
37	2002-07-24	19.96	2.07	1.8	7.59	0.63	-0.78	-1.40	-1.15	0.09	1.24
38	2002-08-05	7.79	8.53	11.2	119.76	-0.41	0.07	0.85	0.40	-0.79	-1.19
39	2002-08-26	6.62	5.65	12.5	72.13	-0.56	-0.21	1.04	0.03	-1.79	-1.81
40	2002-08-27	12.32	5.86	7.3	59.54	0.05	-0.19	0.21	-0.10	-0.44	-0.34
41	2002-08-31	6.84	7.91	10.5	125.12	-0.53	0.02	0.75	0.44	-0.83	-1.27
42	2003-05-07	7.72	1.82	8.7	31.38	-0.42	-0.85	0.45	-0.48	-2.20	-1.72
43	2003-06-15	18.48	1.73	3.2	6.17	0.53	-0.87	-0.84	-1.24	-0.74	0.49
44	2003-06-29	5.98	1.02	5.0	11.91	-0.65	-1.12	-0.30	-0.96	-2.43	-1.47
45	2003-07-09	26.84	1.06	2.5	2.51	1.03	-1.10	-1.09	-1.57	-0.55	1.02
46	2003-07-19	2.26	1.13	5.3	15.88	-1.42	-1.07	-0.22	-0.83	-3.10	-2.27
47	2003-07-22	2.03	1.00	15.0	37.67	-1.49	-1.13	1.36	-0.38	-4.36	-3.98
48	2003-07-27	4.21	31.83	11.7	265.20	-0.95	1.28	0.92	1.14	0.54	-0.60
49	2003-08-06	17.19	8.31	6.0	68.59	0.44	0.05	-0.07	-0.01	0.55	0.56
50	2003-08-20	25.57	22.68	2.7	79.04	0.96	0.91	-1.02	0.09	2.98	2.89
51	2003-08-23	16.19	26.63	4.3	231.81	0.37	1.08	-0.48	1.00	2.92	1.92
52	2003-08-24	20.87	8.10	3.3	19.13	0.68	0.04	-0.78	-0.74	0.76	1.50

53	2003-08-27	11.45	8.32	6.0	100.76	-0.02	0.05	-0.07	0.27	0.37	0.10
54	2003-09-18	5.00	3.68	13.2	80.34	-0.81	-0.47	1.13	0.10	-2.31	-2.41
55	2004-02-21	7.00	1.75	14.2	26.24	-0.51	-0.87	1.26	-0.58	-3.22	-2.64
56	2004-05-28	3.89	1.72	20.7	39.90	-1.01	-0.88	1.98	-0.35	-4.22	-3.87
57	2004-07-12	34.33	1.40	2.3	2.14	1.40	-0.97	-1.16	-1.62	-0.04	1.58
58	2004-07-16	7.02	1.36	11.2	14.60	-0.51	-0.99	0.85	-0.87	-3.22	-2.35
59	2004-08-05	10.12	2.84	7.2	30.66	-0.15	-0.62	0.18	-0.50	-1.44	-0.95
60	2004-09-07	25.36	47.95	3.2	214.00	0.95	1.79	-0.84	0.92	4.49	3.57
61	2004-09-11	2.14	11.04	20.7	301.41	-1.45	0.27	1.98	1.28	-1.89	-3.17
62	2005-04-09	4.04	0.97	14.5	22.86	-0.98	-1.14	1.30	-0.65	-4.07	-3.42
63	2005-05-17	7.58	0.56	8.0	6.40	-0.44	-1.37	0.33	-1.22	-3.36	-2.14
64	2005-06-26	17.96	1.94	6.3	16.99	0.49	-0.82	0.00	-0.80	-1.12	-0.33
65	2005-06-30	2.33	1.51	11.2	42.44	-1.39	-0.94	0.85	-0.31	-3.50	-3.19
66	2005-07-03	1.80	1.21	16.0	47.35	-1.57	-1.04	1.48	-0.24	-4.34	-4.09
67	2005-07-09	3.49	1.00	2.0	29.37	-1.10	-1.13	-1.31	-0.52	-1.43	-0.91
68	2005-07-28	9.39	0.52	6.3	3.27	-0.23	-1.39	0.00	-1.47	-3.10	-1.63
69	2005-08-02	44.33	9.90	1.5	15.13	1.82	0.18	-1.58	-0.85	2.73	3.58
70	2005-08-10	16.74	8.90	5.3	60.24	0.41	0.10	-0.22	-0.09	0.64	0.73
71	2005-08-24	6.74	7.83	11.0	119.62	-0.55	0.01	0.83	0.40	-0.96	-1.36
72	2005-09-13	12.13	13.56	6.7	75.00	0.04	0.44	0.08	0.05	0.45	0.40
73	2005-09-17	31.59	2.08	1.8	8.73	1.27	-0.78	-1.40	-1.09	0.79	1.88
74	2005-09-21	2.73	7.77	19.2	233.09	-1.28	0.00	1.83	1.01	-2.10	-3.11
75	2005-09-30	3.79	2.51	17.3	96.05	-1.03	-0.69	1.63	0.23	-3.12	-3.35
76	2005-11-06	8.71	4.15	8.9	62.73	-0.30	-0.40	0.49	-0.07	-1.26	-1.19

역의 특성으로 인해 큰 차이를 보였던 두 유역의 홍수 유출특성 간의 차이가 상대심도로 표현되면서 제거되었다. 이는 유역별 홍수유출특성에 대한 확률 분포를 이용한 상대심도 결정 방법에 기인한 결과이다. 결국 표준화 기법의 적용을 통해 산정된 홍수유출특성의 상대심도는 유역별 상대적인 홍수 특성을 반영하게 된다.

홍수의 심도를 유역별로 상대평가 할 수 있는 특징은 한강과 설마천 유역과 같이 홍수유출특성에서 극단적인 차이가 존재하는 경우에 대해 유용하다. 두 유역에 대해 기존 돌발홍수지수 산정 방법대로 돌발홍수지수를 산정한 결과, 두 유역 간 매우 큰 차이를 보이면서 설마천 유역의 경우 돌발홍수 발생 가능성이 매우 큰 반면 한강의 경우 돌발홍수의 발생이 거의 없거나 매우 제한적이라는 것을 알 수 있었다. 하지만 한강에서의 홍수 사상에 대해 돌발홍수지수가 낮게 산정 되었다고 해서 홍수의 평가가 절하되어서는 안 될 것이다. 한강에서는 유역 특성상 돌발홍수가 아닌 하천홍수 형태로 인한 피해가 발생할 가능성이 클 것이며, 이러한 홍수에 대한 평가는 실제로 심각한 홍수임에도 불구하고 돌발홍수지수에 의해서 낮게 평가 될 수 있기 때문이다.

5. 홍수지수의 산정 및 분석 결과

한강과 설마천 유역의 홍수 사상에 대해 홍수유출특성을 산정하고 표준화를 통한 상대심도를 결정하여 Eq. (3)으로부터 최종적으로 종합홍수지수(Compre-

hensive Flood Index, CFI)를 산정하였다.

$$CFI = S_K + S_P - S_T + S_A \quad (3)$$

5.1 CFI와 FFI의 비교

Figs. 5 and 6은 각 유역별 CFI와 표준화 기법을 적용한 FFI의 산정 결과를 비교한 것이다. 표준화 기법의 도입으로 인해 첨두유량을 기준유량(장기유출평균)로 나눈 홍수량 비(M)의 확률분포는 첨두유량(P)의 확률분포와 차이가 없다. 따라서 두 홍수지수 간의 차이는 첨두발생 전 홍수용적(A)의 사용여부에 따라 발생한 것이다. Table 4는 상관계수의 산정을 통해 CFI와 FFI의 홍수유출 특성과의 상관관계를 비교한 결과이다. FFI가 상승률(K)와 홍수 응답시간(T)에 의한 영향을 크게 받는 반면, CFI는 돌발홍수의 유출 특성의 영향이 작아지면서 지수 산정과정에서 특정 홍수유출 특성에 지배받지 않았다.

강우특성과의 상관관계 분석을 통해 CFI와 FFI의 차이점을 비교 평가한 결과에서 CFI는 FFI보다 강우량의 특성을 잘 반영하는 것으로 나타났다. Figs. 7 and 8은 유역별로 각 홍수지수가 홍수발생 중 1시간 최대 강우량과 총 강우량과의 관계를 회귀분석을 통해 나타낸 것이다. 두 유역에서 모두에서 CFI가 FFI보다 높은 결정계수(R^2)값을 가지면서 강우와의 관계를 잘 표현하고 있음을 알 수 있다. 또한 1시간 최대 강우량과의 결정

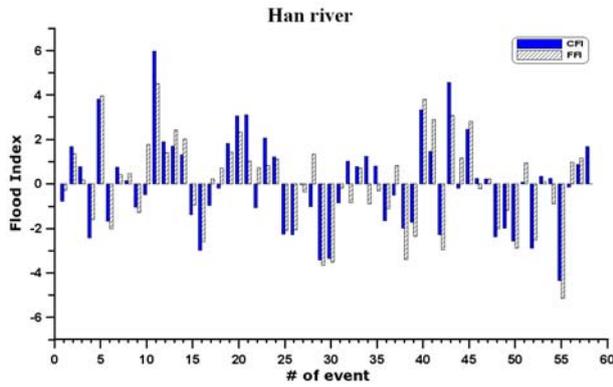


Fig. 5. CFI and FFI in Han River Basin

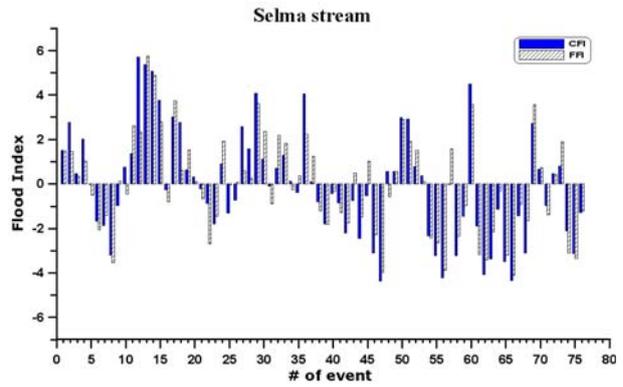


Fig. 6. CFI and FFI in Selma River Basin

Table 4. Comparison of the Flood Index and the Flood Characteristics

Han river				Selma river			
Flood Characteristic	CFI	Flood Characteristic	FFI	Flood Characteristic	CFI	Flood Characteristic	FFI
K	0.54	K	0.81	K	0.59	K	0.81
P	0.76	M	0.43	P	0.67	M	0.40
T	-0.41	T	-0.72	T	-0.57	T	-0.80
A	0.36			A	0.45		

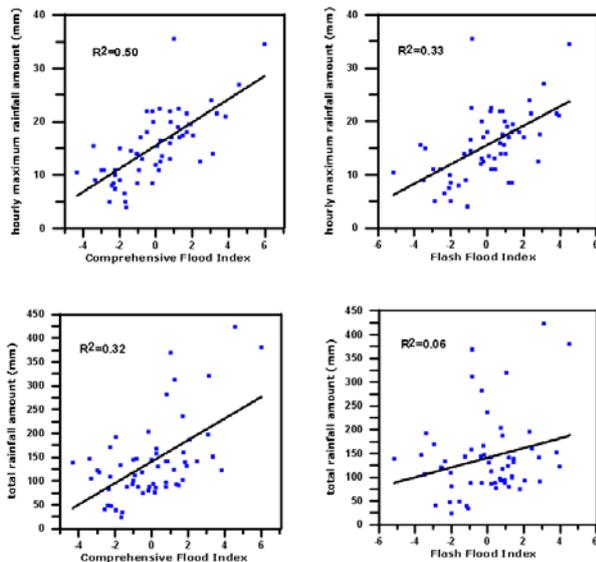


Fig. 7. Regression Analyses between the Flood Index and the Rainfall amount in Han River Basin

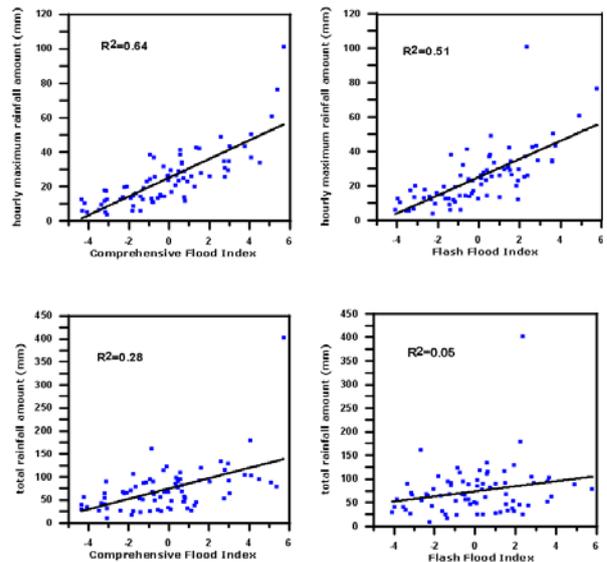


Fig. 8. Regression Analyses between the Flood Index and the Rainfall amount in Selma River Basin

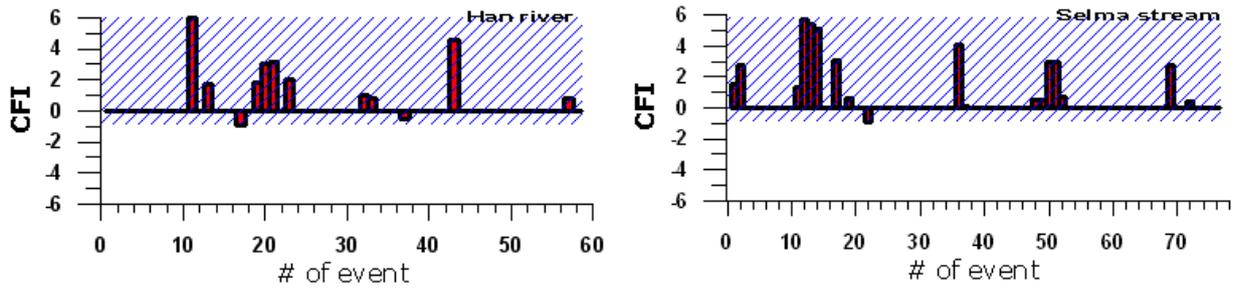
계수가 총강우량과의 결정계수보다 높게 나타나고 있으며, 이는 홍수지수가 강우심도보다는 강우강도에 의한 강우 특성을 보다 잘 반영하는 것이라 판단된다.

5.2 홍수발생 원인별 CFI

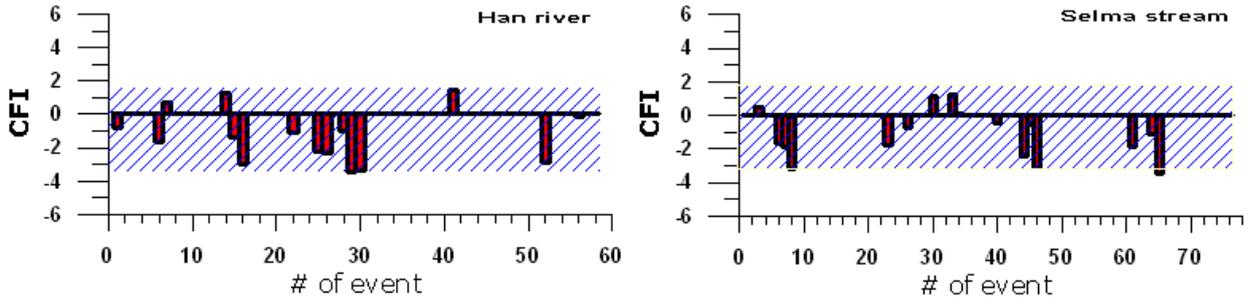
홍수의 발생 원인을 고려하여 총 5가지 경우에 대한 CFI의 특성을 살펴보았다. 우선 집중호우, 태풍, 장마

전선 각각의 영향에 의한 CFI의 특성을 살펴보고, CFI에 대한 각 호우발생 원인별 영향을 명확히 파악하기 위해서 한 가지 원인만 존재하는 홍수 사상에 대해 조사하였다. 그리고 장마 기간 동안의 집중호우, 강수량 표현 중 강한 비(시간당 강수량이 20mm 이상의 비)에 해당하는 호우에 의한 CFI 등 총 5가지 경우에 대한 CFI의 특성을 살펴보았다(Fig. 9). 그 결과 한강과 설마

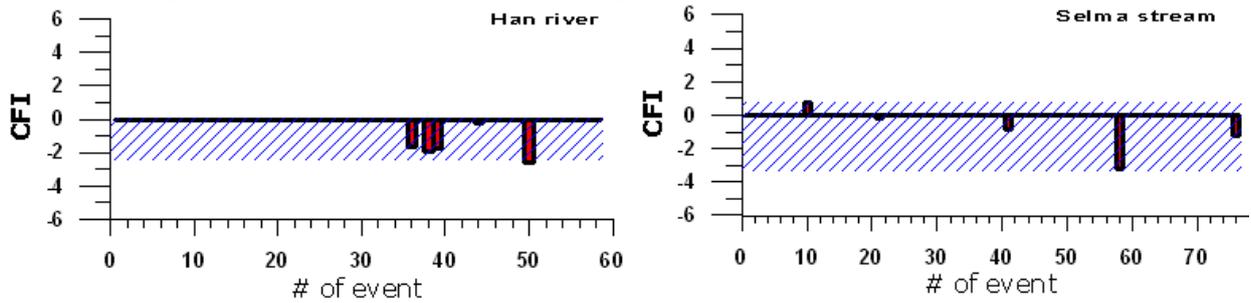
○ Case 1: range of CFI for flood events caused by single influence of a heavy rainfall



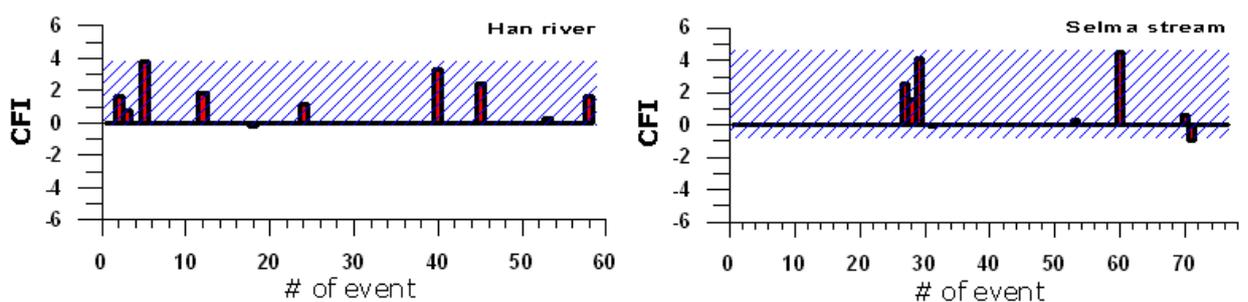
○ Case 2: range of CFI for flood events caused by single influence of a seasonal rain front



○ Case 3: range of CFI for flood events caused by single influence of a typhoon



○ Case 4: range of CFI for flood events caused by influence of a heavy rainfall during a seasonal rain front



○ Case 5: range of CFI for flood events caused by single influence of a strong rainfall

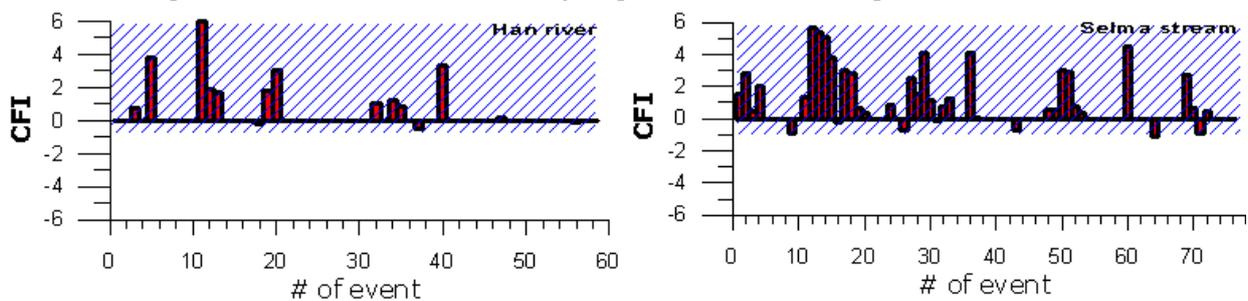


Fig. 9. Range of the CFI by the Reasons for Occurring Flood

Table 5. Regression Equations for CFI in Han River Basin

Equation	adjusted coefficient of determination
$CFI = 0.889529K + 0.000299P - 0.0366T - 2.83177$	0.93
$CFI = 0.876395K + 0.000311P - 0.03498T - 1.2 \times 10^{-7}A - 2.89057$	0.92
$CFI = 1.065174K + 0.000391P - 1.1 \times 10^{-6}A - 4.56072$	0.89
$CFI = 1.38269K + 0.000281P - 4.83349$	0.86
$CFI = 0.000375P - 0.04837T - 6.9 \times 10^{-7}A - 1.17501$	0.85
$CFI = 0.000321P - 0.05941T - 0.66403$	0.85
$CFI = 1.230966K - 0.06636T + 2.58 \times 10^{-6}A - 1.28563$	0.78
$CFI = 0.000516P - 2.4 \times 10^{-6}A - 3.13546$	0.77
$CFI = -0.09683T + 2.56 \times 10^{-6}A + 1.851868$	0.63
$CFI = 1.922268K + 1.85 \times 10^{-6}A - 4.38667$	0.60
$CFI = 0.000284P - 2.6468$	0.57
$CFI = 1.204939K - 0.01591T - 1.33592$	0.28
$CFI = 1.418472K - 2.27932$	0.28
$CFI = -0.04606T + 1.735974$	0.15
$CFI = 1.11 \times 10^{-6}A - 0.78071$	0.11

Table 6. Regression Equations for CFI in Selma River Basin

Equation	adjusted coefficient of determination
$CFI = 0.069241K + 0.04626P - 0.17851T - 4.35 \times 10^{-6}A - 0.90927$	0.87
$CFI = 0.063113K + 0.078274P - 1.14774T - 0.93682$	0.85
$CFI = 0.075809K - 0.21264T + 9.11 \times 10^{-6}A - 0.72811$	0.83
$CFI = 0.101935K + 0.064112P + 1.96 \times 10^{-6}A - 2.67732$	0.79
$CFI = 0.096078K + 0.07852P - 2.53929$	0.79
$CFI = 0.058106P - 0.29126T - 2.71 \times 10^{-6}A - 1.020566$	0.77
$CFI = 0.078057P - 0.265T - 0.892772$	0.76
$CFI = 0.121118K + 8.39 \times 10^{-6}A - 2.91214$	0.72
$CFI = -0.34897T + 8.63 \times 10^{-6}A + 1.489441$	0.71
$CFI = 0.112617P - 4.6 \times 10^{-6}A - 0.97155$	0.47
$CFI = 0.078463P - 1.08914$	0.44
$CFI = 0.062227K - 0.15131T - 0.111478$	0.39
$CFI = 0.095998K - 1.52644$	0.34
$CFI = -0.26692T + 1.912578$	0.31
$CFI = 5.97 \times 10^{-6}A - 0.79503$	0.19

천 유역에 대해 호우발생 원인별 CFI의 범위가 유사한 것을 볼 수 있다.

5.3 CFI와 유출특성과의 관계식

본 연구에서는 다중회귀분석을 통해 각 유역별 CFI

와 홍수유출 특성 간 관계를 표현하는 관계식을 유도하였다. 다중회귀분석을 통해 두 유역의 홍수유출 특성 조합별 총 15개의 관계식을 유도할 수 있다(Tables 5 and 6). 다중 회귀분석에서는 같은 종속변수와 서로 다른 수의 독립변수를 가지는 회귀식의 적합도를 비교하

는 경우 발생하는 문제점을 해결하기 위해 독립변수의 수를 고려한 결정계수인 조정결정계수를 회귀식의 적합도 비교를 위해 사용하여야 한다(박범조, 2007). 높은 조정결정계수를 갖는 다중회귀식을 사용할수록 본 연구에서 제시한 CFI에 근접하는 지수를 얻을 수 있다. 다중회귀분석으로부터 조정결정계수를 통한 회귀식의 적합도와 다양한 홍수유출 특성을 변수로 고려한 CFI의 산정이 용이해졌다.

6. 결 론

본 연구에서는 기존 홍수지수 산정 과정 중 상대심도를 결정하는 과정상의 문제점을 보완하기 위해 표준화기법을 적용하고 홍수지수의 평가 범위를 확장하기 위해서 침투발생 전 홍수용적을 홍수유출 특성에 추가하여 새로운 홍수지수인 Comprehensive Flood Index(CFI)를 제시하였다. 우리나라 대표 하천인 한강과 전형적인 산지 하천인 설마천 유역에 대하여 CFI를 산정하였고 유역별 산정된 CFI를 분석하여 얻은 결과가 다음과 같다.

- 1) 표준화 기법을 적용함으로써 새로운 홍수의 정량적 표현기법을 제시하였다. CFI는 각 홍수유출 특성의 확률 분포와 그것의 표준화된 값을 상대심도로 사용하면서 각 유역별 특성이 반영되는 홍수지수라는 특징을 갖게 되었다.
- 2) 상관분석과 회귀분석을 통해 CFI와 기존의 돌발홍수지수(FFI)를 비교 검토함으로써 침투발생 전 홍수용적이 홍수지수 산정에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 CFI에서는 돌발홍수 유출특성에 대한 영향이 작아졌으며 FFI에서처럼 홍수유출 특성에 대한 영향이 특정 인자에 치우치는 결과는 나타나지 않았다. 두 홍수지수와 강우 특성과의 관계를 비교 분석한 결과에서 CFI는 강우량과의 관계를 잘 표현하였다.
- 3) 홍수발생 원인별 CFI의 특성을 알아보기로 총 5가지 경우(집중호우, 장마전선, 태풍, 장마기간 내 집중호우, 강한 비)에 대해 CFI의 특성을 검토하였고 같은 홍수 발생 원인에 대해 한강과 설마천 유역에서 유사한 범위의 CFI를 갖는 것으로 나타났다.
- 4) CFI와 홍수유출 특성 간 다중회귀분석을 통해 홍수유출 특성 조합별 총 15개의 관계식을 유도하였다. 홍수유출 특성과 결정계수를 통한 회귀식의 적합도를 고려한 CFI의 산정이 용이해졌다.

본 연구에서는 한강과 설마천 유역에 대해서 CFI를 산정하였다. 많은 유역에 대해 CFI를 산정하고 그 결과를 비교했을 때에 본 연구에서 시도한 CFI의 특성 및 CFI가 홍수발생 원인 및 강우 특성과 갖는 관련성이 명확해질 수 있을 것이며 이를 바탕으로 특정 유역에서의 홍수사상에 대한 영향을 평가할 수 있는 지표로 활용가능 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원의 이 상기후대비시설기준강화 연구단에 의해 수행되는 2005 건설기술기반구축사업(05-기반구축-D03-01)에 의해 지원되었습니다.

참 고 문 헌

- 김병식, 김형수, 김보경 (2007). "유출수문곡선의 특성을 이용한 돌발홍수 특성." **2007 건설교통 R&D 성과포럼 논문집**, pp. 74-77.
- 박범조 (2007). EXCEL을 이용한 현대통계학 이론과 활용. 시그마프레스(주), pp. 371-375.
- 안원식 (2000). "돌발홍수지수 산정에 관한 연구." **수원대 산업기술연구소 논문집**, 제15집, pp. 11-19.
- 연제문, 변성호, 이정규, 김태웅 (2007). "이차원 가뭄인도해석을 통한 서울지역의 가뭄 평가." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제4호, pp. 335-343.
- 유원희 (2002). 유출량 계열을 이용한 가뭄 지수 산정. 석사학위논문, 인하대학교.
- 유철상, 류재희 (2003). "서울지점 가뭄의 재현 및 지속 특성 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제4호, pp. 561-573.
- 이재수 (2006). 수문학. 구미서관, pp. 496-534.
- 정재철 (1999). 돌발홍수지수 산정에 관한 연구-보청천을 중심으로-. 석사학위논문, 수원대학교.
- 추현재, 김태웅, 이정규, 이재홍 (2007). 'ENSO와 한국의 수문변량들간의 계절적 관계 분석.' **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제4호, pp. 299-311.
- Bhaskar, N.R., French, M.N., and Kyiamah, G.K. (2000). "Characterization of Flash Floods in Eastern Kentucky." *Journal of Hydrologic*

- Engineering*, ASCE, Vol. 5, No. 3, pp. 327–331.
- Edwards, D.C., and Mckee, T.B. (1997). *Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Scales*. Climatology Report No. 97-2.
- Guttman, N.B. (1999). "Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm." *Journal of the American Water Resources*, Vol. 35, No. 2, pp. 311–322.
- Kim, T.-W., Valdes, J.B., Nijssen, B., and Roncayolo, D. (2006). "Quantification of linkages between large-scale climatic patterns and precipitation in the Colorado River Basin." *Journal of Hydrology*, Vol. 321, pp. 173–186.
- Kyamamah, G.K. (1996). *Monitoring and Characterization of Flash Floods*. MS thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Louisville.
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., and Klest, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration of time scales." *8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Jan 17–23, 1993, Anaheim, CA, pp. 179–184.
- (논문번호:08-07/접수:2008.01.14/심사완료:2008.04.11)