

유출수문곡선과 돌발홍수지수를 이용한 돌발홍수심도 산정

Estimation of the Flash Flood Severity using Runoff hydrograph and Flash flood index

김 병 식* / 김 형 수**

Kim, Byung Sik / Kim, Hung Soo

Abstract

The flash flood has been studied in the climatological aspect which considers temporal and spatial characteristics of rainfall. However, we have not interested in runoff hydrograph for flash flood study. Therefore, our objectives of this study are to apply a work of Bhaskar *et. al* (2000) which studied runoff hydrograph to represent the flash flood to Korea and also to distinguish flash flood event from general flood event. That is, we quantified the severity of flash flood by estimation of flash flood index using runoff hydrograph. This study estimated the flash flood index for investigating the relative severity of flash flood in Han river basin with 101 flood events. Also we quantified the flash flood severity for flood event by heavy rainfall occurred in July of 2006. As a result, Kangwon-do province showed more severe flash flood than other areas in Han river basin and urban area such as Jungrang cheon stream also showed severe flash flood. We analyzed a flash flood of July of 2006 by dividing July into 1st to 3rd terms. From the analysis we knew that the 1st term of July showed the severe flash flood was occurred in Seoul area and the 2nd term showed it was occurred in Kangwon-do province.

keywords : Flash flood index, runoff hydrograph, rising curve gradient, flood magnitude, flood response time

요 지

지금까지 돌발홍수는 주로 강우의 시공간적인 특성들을 고려한 기후학적 측면에서 관심을 가지고 연구가 진행되어 왔을 뿐 유출의 시각에서 돌발홍수를 평가하기 위한 노력은 매우 미흡하였다고 할 수 있다. 본 연구의 목적은 Bhaskar 등(2000)의 연구를 우리나라에 적용하여 유출수문곡선에 의해 돌발홍수를 설명하고, 다른 홍수사상과 돌발홍수 사상을 구별하고자 하는데 있다. 즉, 유출수문곡선의 특성을 이용해 홍수사상에 대한 돌발홍수지수(flash flood index)를 산정함으로써 돌발홍수의 심각성 정도를 정량화하고자 하였다. 이를 위해 본 논문에서는 한강유역의 과거 101개의 홍수사상에 대해 돌발홍수의 상대심도(relative severity)를 파악하기 위하여 돌발홍수지수를 산정하였으며 또한, 2006년 7월의 집중호우에 의해 발생한 홍수사상의 돌발홍수 심도를 시공간적으로 정량화하였다. 분석 결과, 한강유역의 다른 지역에 비해 강원도 지역의 홍수 유출수문곡선들이 돌발홍수 심도를 크게 나타내었으며 중랑천 등과 같은 도시유역에서도 돌발심도가 크게 나타남을 확인 할 수 있었다. 2006년 7월 집중호우에 의한 한강유역의 돌발홍

* 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원
Senior Researcher, Dept. of Water Resources Research, KICT
(e-mail: hydrokbs@kict.re.kr)

** 인하대학교 사회기반시스템공학부 부교수
Associate Prof., Dept. of Civ. Engrg., Inha Univ.,

수지수를 7월 전반기, 중반기 그리고 하반기로 나누어 시공간적 공간분포를 분석한 결과, 7월 전반기의 경우 서울 주변지역의 돌발심도가 크게 나타났으며 7월 중반기의 경우 강원도 지역의 돌발홍수 심도가 크게 나타났다.

핵심용어 : 돌발홍수지수, 유출수문곡선, 상승 곡선 기울기, 홍수량 비, 홍수 반응시간

1. 서론

최근 지구온난화, 엘니뇨 및 라니냐 등 지구환경 변화에 따른 기후변화의 영향으로 짧은 시간에 매우 높은 강도를 가진 이상호우로 많은 인명과 재산피해가 발생하고 있다. 이상호우는 이제 더 이상 현상이 아닌 우리나라의 기상특성으로 자리를 잡아 가고 있다. 2006년도 어김없이 태풍과 집중호우로 홍수피해가 발생하였는데 2006년 7월 14일부터 20일까지 전국적으로 35명의 사망자와 13명의 실종자가 발생하는 등 큰 피해를 입었다. 피해의 규모를 보면, 태풍 루사와 매미에 의한 홍수 피해에 비해 그 심각성이 결코 뒤지지 않는다고 할 수 있다. 이 중 대부분의 피해는 강원도 지역에서 발생하였는데, 인명피해는 사망 29명, 실종 11명으로 전국피해의 약 88%, 재산피해는 약 1조 6천억 원으로 전국피해의 약 94%를 나타내었다. 이러한 원인 중의 하나는 집중호우로 인한 돌발홍수가 원인이라고 볼 수 있다. 돌발홍수는 소유역 규모의 좁은 지역과 급경사지역에서 짧은 지속시간과 집중적인 강우강도에 의해 발생하고, 빠른 유속과 토사를 동반하기 때문에 빠른 수문반응으로 홍수를 대비할 수 있는 시간이 부족한 것이 특징이다. 특히, 강원도 지역은 대부분이 산악지역으로써 돌발홍수가 지속적으로 발생할 수 있는 적합한 환경을 제공하고 있다.

이처럼 1990년대 후반 이후 돌발홍수는 우리나라의 가장 빈번한 자연 재해 중 하나가 되었으며, 정부는 홍수 피해로부터 국민의 재산과 생명을 보호하기 위하여 구조물 및 비구조물적인 예방대책을 세우고 있다. 현재 건설교통부는 일반적으로 작은 지역에서 발생하여 빠른 홍수파의 전달 속도를 갖는 돌발홍수를 예보할 수 있는 돌발홍수 예보 시스템을 개발하고 있는 중이다. 그러나, 우리나라에서는 돌발홍수 사상에 대한 유출 특성을 분석하고자 하는 연구가 거의 없었다. 예를 들면, 돌발홍수 수문곡선이 다른 홍수 수문곡선과 다르게 어떤 특징을 가지고 있는지에 대한 비교 연구 등이 없었다. 그러나 Bhaskar *et al.*(2000)은 유출수문곡선을 이용하여 돌발홍수지수를 산정하고 이 지수에 의해 돌발홍수를 설명하고자 하였으며, 국내에서는 정재철(2000)이 보청천을 대상으로 단 몇 개의 사상만을 대상으로 Bhaskar

et al.(2000)이 제시한 돌발홍수지수를 산정하고자 한 바가 있다. 그러나, 이 연구에서는 소수의 수문사상만을 이용하였기 때문에 상대심도를 산정하는데 있어 문제가 있으며 상대심도를 산정하는데 있어 도수분포를 이용하였기 때문에 매우 주관적이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구의 목적은 Bhaskar *et al.*(2000)의 연구를 우리나라에 적용하여 유출수문곡선에 의해 돌발홍수를 설명하고, 다른 홍수사상과 돌발홍수를 구별하고자 한다. 즉, 유출수문곡선의 특성을 이용해 돌발홍수에 대한 상대홍수지수를 산정함으로써 돌발홍수의 심각성 정도를 정량화하고자 한다.

2. 돌발홍수의 특징과 원인

돌발홍수의 특징은 여러 홍수 중에서 가장 빨리 움직이는 홍수라고 할 수 있다. 가령 산지 계곡의 하천으로 높은 강도의 집중호우가 내릴 경우, 갑작스러운 유출의 증가와 조용히 흐르던 하천의 흐름이 갑자기 사납게 돌진하는 흐름으로 변하게 된다. 이러한 갑작스러운 흐름 변화는 큰 파괴력을 가지고 있으며 매우 위험하다고 할 수 있다. 돌발홍수는 매우 빠른 속도로 움직이며, 이로 인한 힘은 매우 커서 나무가 뽑히고 커다란 바위가 함께 하천으로 흐르게 되어 하천 주변의 건물과 교량 등과 같은 하천 구조물 등을 파괴하게 된다. 이러한 흐름의 앞부분에는 물벽이 형성되는데, 그 높이가 수 미터에 달하고 많은 양의 토사, 자갈, 나무, 바위 등을 동반한 토석류(debris flow)가 발생한다. 돌발홍수 원인은 여러 가지가 있을 수 있으나 대개는 좁은 지역에 갑작스런 집중호우로 인해 발생하게 된다. 만약 호우가 이동하지 않고 몇 시간 동안 정지하여 홍수에 취약한 구조의 하천 유역에 200mm가 넘는 강우를 내린다면, 이 지역은 매우 큰 돌발홍수의 위험을 초래하게 된다. 인위적인 원인으로는 댐 파괴나 제방붕괴 등이 돌발홍수의 원인이 될 수도 있을 것이다. 돌발홍수의 원인을 기상학적 관점과 지형학적 관점에서 설명을 다시 요약하면 다음과 같다.

(1) 기상학적 관점의 돌발홍수

- 짧은 기간에 강한 강우강도를 갖는 대류성 호우에서 발생할 경우

- 집중호우가 상류나 소지류의 도시지역에 발생할 경우
- 호우 구름대가 산악지역에서 이동하지 못하고 정체하여 호우를 내릴 경우

(2) 지형학적 관점의 돌발홍수

- 유역의 형태가 방사형에 가까울 경우
- 유역이 산악지형일 경우
- 유역의 형상계수가 높으며 유역의 형태가 원형에 가까울 경우

3. 돌발홍수지수

계절라성 집중호우로 인한 돌발홍수의 원인을 분석하기 위해서는 우선 강우강도, 지속시간, 강우분포 등에 대한 분석이 선행되어야 하고, 이를 근거로 유출특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 그러나 우리나라의 경우 돌발홍수 예보를 위한 시스템 구축에 대한 연구는 계속되고 있으나 정작 중요한 돌발홍수의 유출특성에 대한 연구는 전무한 상황이다(건설교통부, 2005). 2006년도에 발생한 강원도 지역의 홍수피해 특성은 기존에 발생하였던 대 하천 홍수가 아니고 강원도 산악 지역을 중심으로 발생한 돌발홍수로 보는 견해가 많다. 따라서, 돌발홍수의 유출특성에 대한 연구가 매우 필요한 시점이라고 판단된다. 본 논문에서는 유출수문곡선 형태의 특성을 토대로 유출수문곡선의 상승부 경사, 첨두홍수량, 지체시간을 고려하여 각각의 홍수 사상에 대해 “돌발홍수지수(flash flood index)”를 정의하였다(Bhaskar *et al.*, 2000). 상승곡선의 기울기 (K), 홍수량 비 (M), 지체(응답)시간 (T_p)와 같은 특성치들이 홍수사상들을 요약하기 위하여 사용되었으며, 각각은 Fig. 1과 같다. 이들 중 홍수수문곡선의 상승부경사와 홍수 반응시간은 단위를 가지고 있기 때문에 각각의 값을 다음 절의 Eq. (3), (5) 그리고 (6)을 이용하여 지수화 하였다. 돌발홍수지수(FFI)는 Eq. (7)과 같이 각각 K , M , T_p 의 특성

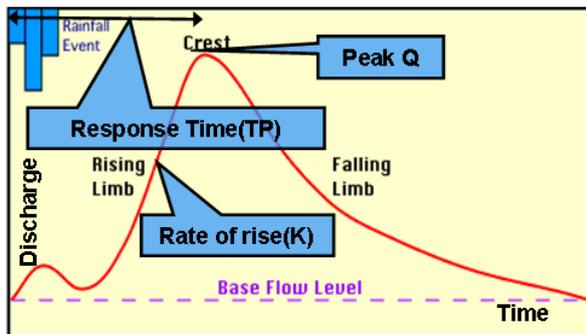


Fig. 1. Structure of Flood Hydrograph

치를 요약한 세 개의 상대 심도 요소들로 산정된다. 본 절에서는 각각의 특성치와 지수화 과정을 Bhaskar *et al.* (2000)의 연구를 근거로 다음에 자세히 설명하였다.

3.1 홍수수문곡선의 상승부 경사

홍수수문곡선의 상승곡선은 다음 Eq. (1)과 같은 형태의 일반적인 지수 식으로 나타낼 수 있으며, 상승부 경사 K 값은 Eq. (2)를 이용하여 산정할 수 있다.

$$Q_t = Q_0 e^{Kt} \tag{1}$$

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

여기서,

Q_0 : 초기 유량

Q_t : 홍수 반응시간 T_p 에 가까운 시간 t 에서의 유량

K : 상승곡선 기울기 (day^{-1})

t : 시간 (hr)

기본적으로 유출곡선의 상승곡선 기울기는 홍수 수문곡선의 상승부 경사도 값이다. 따라서 Eq. (1)에서 K 값이 상승하면 t 시간 후에 엄청난 크기의 홍수량이 발생하게 되며 하도에 큰 영향을 미치게 되어 돌발홍수가 발생할 수 있다는 점을 짐작 할 수 있다. 또한, K 는 그 지역의 지형학적 특성을 내포하고 있다고 할 수 있다. 본 논문에서는 현재 홍수사상 K (K_i)의 상대심도(RK)를 정량화하기 위하여 과거 홍수사상의 최대 K (K_{max})와 최소 K (K_{min})를 이용하여 Eq. (3)과 같이 지수화 하였다.

$$RK = \frac{K_i - K_{min}}{K_{max} - K_{min}} \tag{3}$$

3.2 홍수량 비

홍수량 비(M)는 홍수수문곡선에 대한 첨두 홍수량과 평균유량의 비이며, 평균유량과 비교하여 얼마나 큰 홍수량이 발생하였는지를 파악할 수 있는 인자이다. 우리나라의 경우 하상계수가 다른 나라에 비해 상당히 크기 때문에 매우 큰 값을 가질 것으로 판단된다. 홍수량 비를 Eq. (3)과 같이 나타내기 위하여 한다. 본 논문에서는 현재 홍수사상 M (M_i)의 상대심도(RM)를 정량화하기 위하여 과거 홍수사상의 최대 M (M_{max})와 최소 M (M_{min})를 이용하여 Eq. (5)과 같이 지수화 하였다.

$$M = Q_{\max} / Q_a \quad (4)$$

여기서, Q_{\max} : 첨두 홍수량
 Q_a : 평균 유량

$$RM = \frac{M_i - M_{\min}}{M_{\max} - M_{\min}} \quad (5)$$

3.3 홍수 반응시간

홍수 반응(지체)시간 T_p 는 유출수문곡선으로부터 바로 산정 할 수 있으며, 홍수사상의 시작과 첨두 홍수량이 발생한 시간으로 정의된다. 짧은 홍수 반응시간은 높은 유출 속도를 갖는 일반적인 돌발홍수와 관련이 있으며 이러한 관점에서 작은 값의 홍수 반응시간은 높은 상대 심도를 갖게 된다. T_p 의 단위는 시간(hr)이며 값이 작으면 작을수록 홍수 유출속도가 높은 것을 의미한다. 본 논문에서는 현재 홍수사상 T_p (T_{p_i})의 상대심도 (RT_p)를 정량화하기 위하여 과거 홍수사상의 최대 T_p ($T_{p_{\max}}$)와 최소 T_p ($T_{p_{\min}}$)를 이용하여 Eq. (6)과 같이 지수화 하였다.

$$RT_p = \frac{T_{p_{\max}} - T_{p_i}}{T_{p_{\max}} - T_{p_{\min}}} \quad (6)$$

3.4 돌발홍수지수

유출수문곡선의 상승경사(K)와 홍수량 비(M)는 상대적으로 큰 값을 가지면 돌발홍수에 접근하게 되지만, 응답시간(T_p)의 경우는 값이 작을수록 돌발홍수 현상에 접근하게 되며, 이들 인자들에 대한 상대심도지수를 합

함으로써 다음 Eq. (7)과 같이 돌발홍수지수(flash flood index, FFI)(Bhaskar *et al.*, 2000)를 산정할 수 있다.

$$FFI = \frac{(RK + RM + RT_p)}{3} \times 100 (\%) \quad (7)$$

4. 적용

4.1 대상유역

본 논문에서는 돌발홍수의 심도를 객관적으로 정량화하기 위하여 지형 및 기상학적 조건에 근거하여 돌발홍수 발생 가능성이 큰 한강 유역을 선정하였다. 산악 지형으로 이루어진 한강 유역은 Fig. 2와 같이 한반도의 중심부에 위치하며 본 논문에서 이용한 유역 내 수위관측소는 Table 1과 같다.

4.2 2006년 7월 집중호우 및 수문자료 수집

2006년 7월에 발생한 호우는 7월 9일경에 시작하여 7월 29일까지 약 21일 동안 장기간에 걸쳐 한강유역과 낙동강 유역을 중심으로 전국적으로 발생하였다. 장마전선과 더불어 태풍 “에위니아”의 직접적인 영향과 태풍 에위니아, 빌리스, 개미의 간접 영향에 의해 집중호우가 발생하였다. 특히 강원 영서 지방의 경우 7월 14일 - 7월 21일에 발생한 집중호우로 인하여 극심한 피해를 입었다. 7월 14일에 시작된 호우는 소멸한 태풍 “빌리스”와 “에위니아”의 영향에 의한 것으로 소멸한 태풍 “빌리스”로부터 수증기의 지속적인 유입과 북한지역에 있던 장마전선이 남하하면서 7월 14일부터 7월 16일까지 한강유역인 강원영서 지방과 영동의 일부 지역에서 집중적으로 발생하였다. Fig. 3은 기상청(www.

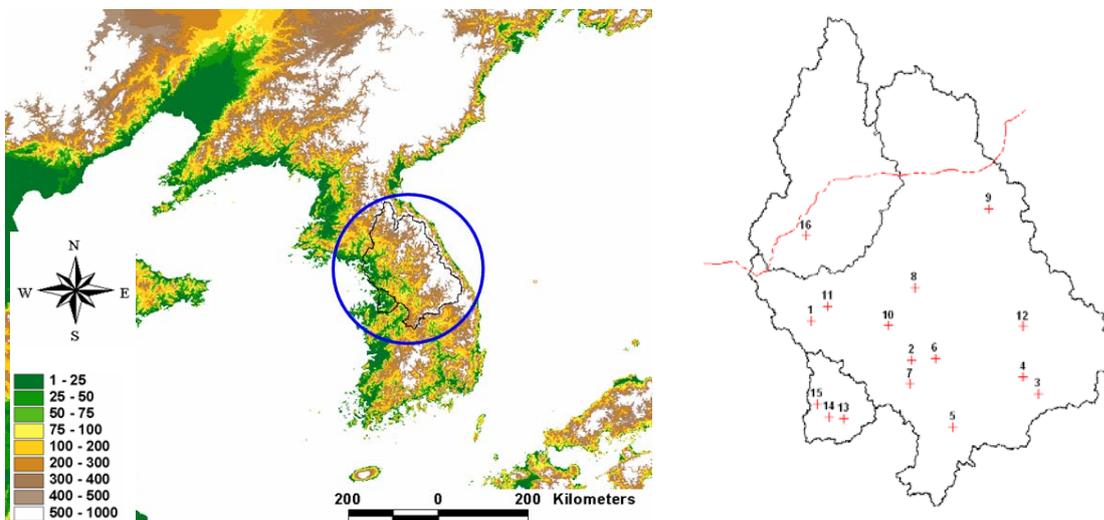


Fig. 2. Location of Stations in Han River Basin

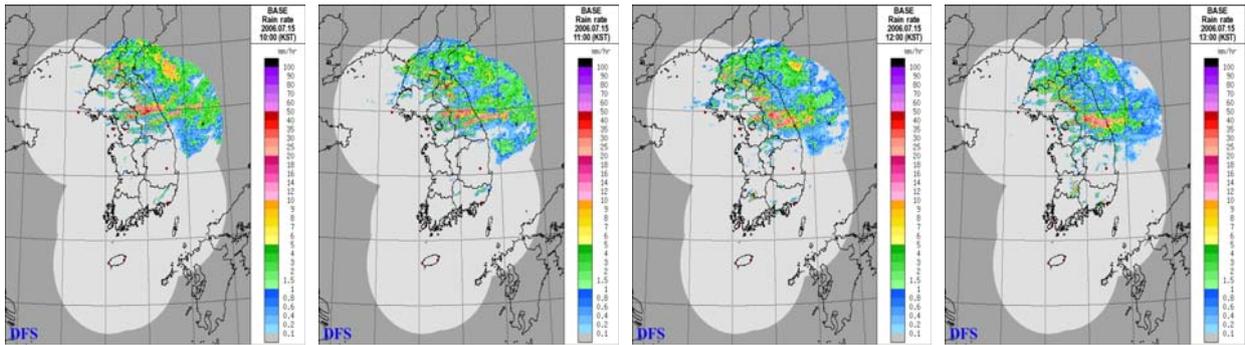


Fig. 3 Radar Images for (07/15 10:00 – 07/15 17:00)(from KMA)

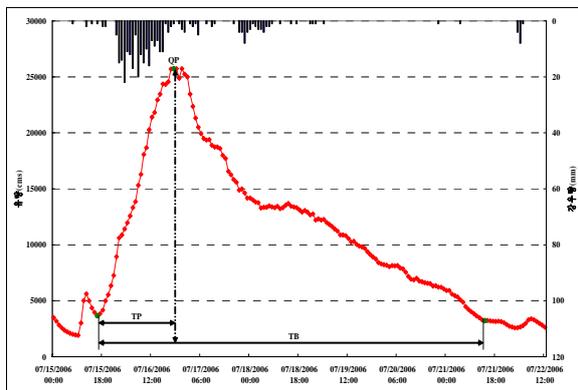
kma.go.kr)에서 제공하는 기상레이더 합성영상을 나타낸 것으로 강원지역의 집중호우 시간과 일치하는 시간대인 7월 15일 10시-7월 15일 13시의 영상이다. 그림을 살펴보면 40mm 이상의 강우량을 나타내는 붉은색의 지대가 강원도지역에 걸쳐 있음을 확인할 수 있다. 이 기간의 집중호우는 과거 잘 드러나지 않은 하천재해 양상을 나타내었다. 다시 말하자면, 소하천에서의 토사재해가 집중적으로 발생하였으며 산지지역의 하천 침식, 도로파괴가 대단히 크게 발생하였다. 이러한 피해 유형은 강우발생 3시간 이내에 피해를 유발하는 전형적인 돌발홍수의 피해 유형이다. 따라서 본 논문에서는 한강유역

을 대상으로 금년 7월의 집중호우에 의해 발생한 홍수사상의 돌발홍수 심도를 정량화하고 시공간적인 발생특성을 파악하기 위하여 돌발홍수지수를 산정하였다.

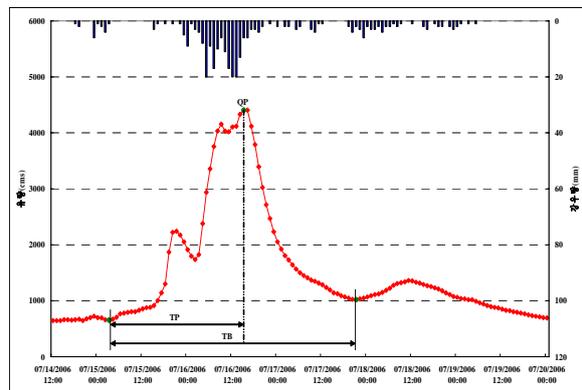
Table 1은 본 연구에서 이용한 수위관측소 현황을 나타낸 것이며 각 수위 관측소별 홍수수문곡선과 특성치를 Fig. 4에 나타내었다. 본 논문에서는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 홍수유출수문곡선으로부터 그 특성치를 추출하고, Eqs. (1) ~ (6)를 이용하여 각각의 상대심도를 산정하였으며 Eq. (7)로 부터 돌발홍수지수를 산정하였다. Table 2는 지점별 돌발홍수지수의 특성치 및 돌발홍수 지수 산정 결과를 수록한 것이다.

Table 1. Names of Stations is used in Study

| No. | Observatory | No. | Observatory | No. | Observatory | No. | Observatory |
|-----|--------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|-------------|
| 1 | Hangangdaeyo | 5 | Dal Cheon | 9 | Weon Tong | 13 | Gongdo |
| 2 | Yeoju | 6 | Munmak | 10 | Yangpyeong | 14 | Pyeongtaek |
| 3 | Yeong Chun | 7 | Cheongmi | 11 | Junranggyo | 15 | Dongyeon |
| 4 | Yeongwol 1 | 8 | Seomyeon | 12 | Sanganmi | 16 | Jeokseong |

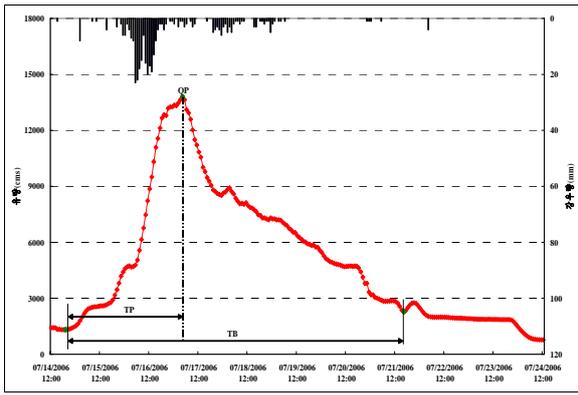


(a) Hangangdaeyo (060715-060722)

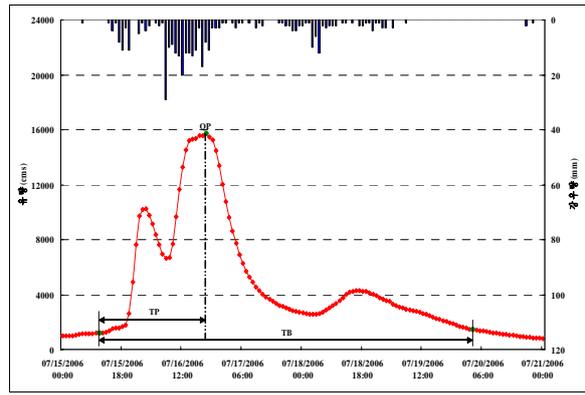


(b) Munmak (060714-060720)

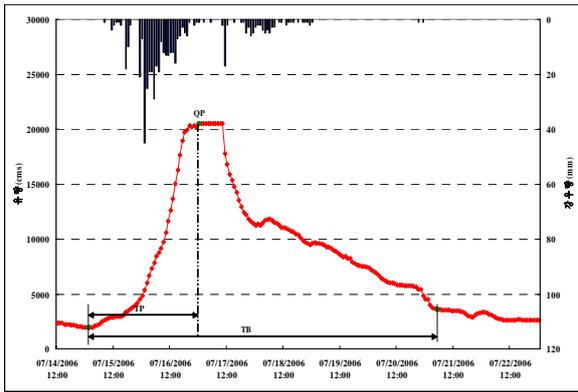
Fig. 4. Flood Hydrograph and Characteristics at Site (Some Parts of Table 1)



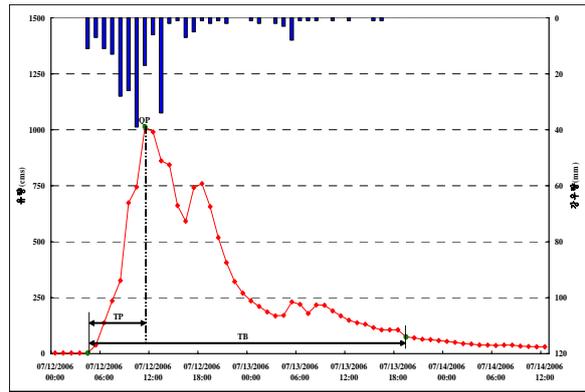
(c) Yeoju (060714-060724)



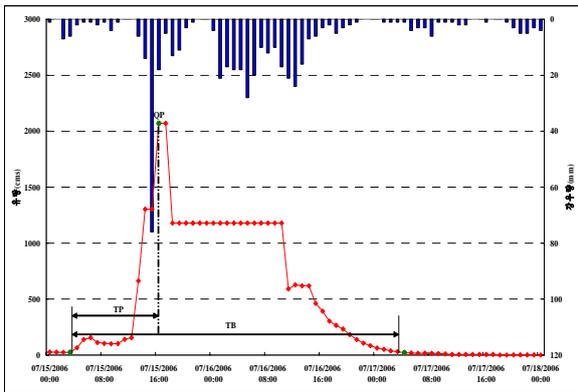
(d) Yeong Chun (060715-060721)



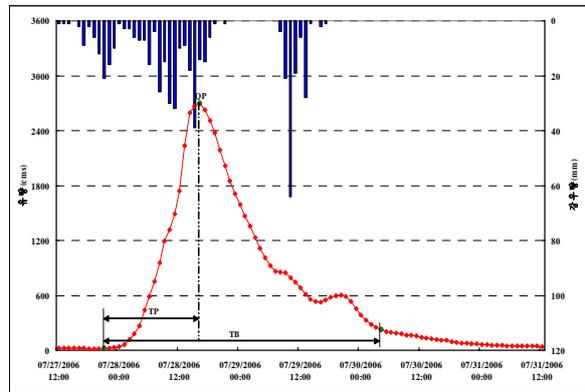
(e) Yangpyeong (060714-060722)



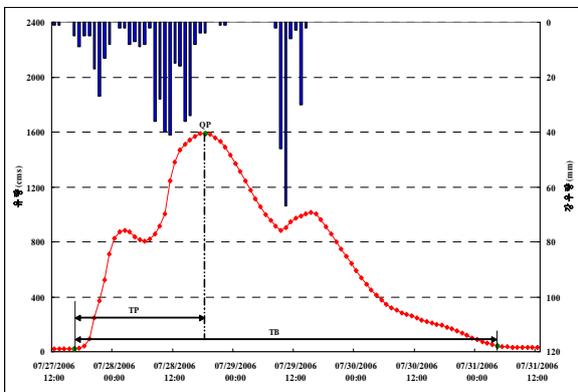
(f) Jungranggyo (060712-060714)



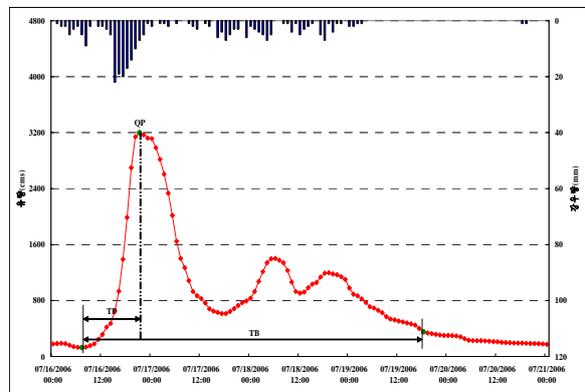
(g) Sangamni (060715-060718)



(h) Pyeongtaek (060727-060731)



(i) Dongyeon (060727-060731)



(j) Dal Cheon (060716-060721)

Fig. 4. Flood Hydrograph and Characteristics at Site (Some Parts of Table 1)

Table 2. Observed Flood Indexing Parameters and Characteristics using Hydrograph (continued)

| No. | Flood Runoff Characteristics | | | | | Flood Indexing Parameters | | | | | | | | |
|-----|------------------------------|------------|---------------------|---------------|---------------------|---|-------------------------|----------------------------|---------------------------|------|------|-----------------------|------|-------|
| | Stream gauge number | Flood data | Flood peak QP (cms) | Mean Qa (cms) | Time to peak TP (h) | Rising curve gradient K(day ⁻¹) | Flood magnitude ratio M | Flood response time TP (h) | Relative Severity Factors | | | Flash flood index FFI | | |
| | | | | | | | | | RK | RM | RT | Sum | Ave | % |
| 1 | 1 | 07/11/2006 | 8844 | 657.2 | 30 | 2.08 | 13.46 | 30 | 0.05 | 0.04 | 0.53 | 0.63 | 0.21 | 20.88 |
| 2 | | 07/15/2006 | 25735 | | 28 | 1.67 | 39.16 | 28 | 0.04 | 0.13 | 0.57 | 0.74 | 0.25 | 24.56 |
| 3 | | 07/26/2006 | 14722 | | 53 | 1.09 | 22.40 | 53 | 0.02 | 0.07 | 0.14 | 0.23 | 0.08 | 7.63 |
| 4 | | 07/11/2004 | 9107 | | 37 | 1.26 | 13.86 | 37 | 0.02 | 0.04 | 0.41 | 0.48 | 0.16 | 16.01 |
| 5 | | 07/15/2004 | 13331 | | 42 | 1.01 | 20.28 | 42 | 0.02 | 0.06 | 0.33 | 0.41 | 0.14 | 13.62 |
| 6 | | 07/21/2003 | 10872 | | 25 | 2.82 | 16.54 | 25 | 0.08 | 0.05 | 0.62 | 0.75 | 0.25 | 24.91 |
| 7 | | 08/23/2003 | 9851 | | 45 | 1.36 | 14.99 | 45 | 0.03 | 0.05 | 0.28 | 0.35 | 0.12 | 11.66 |
| 8 | 2 | 07/12/2006 | 2704 | 304.4 | 25 | 2.15 | 8.88 | 25 | 0.05 | 0.02 | 0.62 | 0.70 | 0.23 | 23.29 |
| 9 | | 07/14/2006 | 13791 | | 57 | 0.99 | 45.31 | 57 | 0.02 | 0.15 | 0.07 | 0.24 | 0.08 | 7.87 |
| 10 | | 07/26/2006 | 6970 | | 50 | 0.86 | 22.90 | 50 | 0.01 | 0.07 | 0.19 | 0.27 | 0.09 | 9.16 |
| 11 | | 07/11/2004 | 2436 | | 44 | 0.64 | 8.00 | 44 | 0.00 | 0.02 | 0.29 | 0.32 | 0.11 | 10.64 |
| 12 | | 07/15/2004 | 6628 | | 35 | 1.17 | 21.77 | 35 | 0.02 | 0.07 | 0.45 | 0.54 | 0.18 | 17.99 |
| 13 | | 07/21/2003 | 4097 | | 18 | 2.25 | 13.46 | 18 | 0.06 | 0.04 | 0.74 | 0.84 | 0.28 | 27.96 |
| 14 | | 08/27/2003 | 5183 | | 15 | 3.63 | 17.03 | 15 | 0.10 | 0.05 | 0.79 | 0.95 | 0.32 | 31.58 |
| 15 | 3 | 07/12/2006 | 5161 | 31.84 | 21 | 2.70 | 44.41 | 21 | 0.07 | 0.15 | 0.69 | 0.91 | 0.30 | 30.30 |
| 16 | | 07/15/2006 | 15719 | | 32 | 1.65 | 135.25 | 32 | 0.04 | 0.46 | 0.50 | 1.00 | 0.33 | 33.38 |
| 17 | | 07/12/2004 | 4050 | | 35 | 2.33 | 34.85 | 35 | 0.06 | 0.11 | 0.45 | 0.62 | 0.21 | 20.75 |
| 18 | | 07/15/2004 | 4060 | | 32 | 1.31 | 34.93 | 32 | 0.03 | 0.12 | 0.50 | 0.64 | 0.21 | 21.38 |
| 19 | | 07/21/2003 | 2622 | | 25 | 2.75 | 22.56 | 25 | 0.07 | 0.07 | 0.62 | 0.77 | 0.26 | 25.52 |
| 20 | | 08/25/2003 | 4304 | | 6 | 14.22 | 37.03 | 6 | 0.44 | 0.12 | 0.95 | 1.51 | 0.50 | 50.48 |
| 21 | 4 | 07/12/2006 | 2428 | 34.98 | 22 | 2.63 | 56.75 | 22 | 0.07 | 0.19 | 0.67 | 0.93 | 0.31 | 31.09 |
| 22 | | 07/15/2006 | 5981 | | 32 | 1.81 | 139.78 | 32 | 0.04 | 0.48 | 0.50 | 1.02 | 0.34 | 34.07 |
| 23 | | 07/27/2006 | 1640 | | 11 | 6.80 | 38.33 | 11 | 0.20 | 0.13 | 0.86 | 1.19 | 0.40 | 39.77 |
| 24 | | 07/12/2004 | 1009 | | 32 | 1.75 | 23.59 | 32 | 0.04 | 0.08 | 0.50 | 0.62 | 0.21 | 20.54 |
| 25 | | 07/15/2004 | 1393 | | 46 | 0.79 | 32.55 | 46 | 0.01 | 0.11 | 0.26 | 0.38 | 0.13 | 12.51 |
| 26 | | 07/21/2003 | 1243 | | 28 | 2.13 | 29.06 | 28 | 0.05 | 0.09 | 0.57 | 0.72 | 0.24 | 23.88 |
| 27 | | 08/25/2003 | 1721 | | 3 | 21.14 | 40.21 | 3 | 0.67 | 0.13 | 1.00 | 1.80 | 0.60 | 60.03 |
| 28 | 5 | 07/16/2006 | 3199 | 42.23 | 14 | 5.52 | 94.57 | 14 | 0.16 | 0.32 | 0.81 | 1.30 | 0.43 | 43.18 |
| 29 | | 07/27/2006 | 2639 | | 13 | 5.01 | 78.01 | 13 | 0.15 | 0.27 | 0.83 | 1.24 | 0.41 | 41.28 |
| 30 | | 07/16/2004 | 2126 | | 6 | 6.38 | 62.85 | 6 | 0.19 | 0.21 | 0.95 | 1.35 | 0.45 | 45.03 |
| 31 | | 07/21/2003 | 920 | | 19 | 3.81 | 27.20 | 19 | 0.11 | 0.09 | 0.72 | 0.92 | 0.31 | 30.66 |
| 32 | | 08/27/2003 | 754 | | 12 | 3.85 | 22.29 | 12 | 0.11 | 0.07 | 0.84 | 1.02 | 0.34 | 34.15 |
| 33 | 6 | 07/12/2006 | 2015 | 31.62 | 24 | 2.94 | 37.46 | 24 | 0.08 | 0.12 | 0.64 | 0.84 | 0.28 | 28.03 |
| 34 | | 07/14/2006 | 4406 | | 36 | 1.27 | 81.92 | 36 | 0.03 | 0.28 | 0.43 | 0.73 | 0.24 | 24.49 |
| 35 | | 07/27/2006 | 1950 | | 7 | 7.27 | 36.26 | 7 | 0.22 | 0.12 | 0.93 | 1.27 | 0.42 | 42.33 |
| 36 | | 07/12/2004 | 1868 | | 33 | 1.72 | 34.73 | 33 | 0.04 | 0.11 | 0.48 | 0.64 | 0.21 | 21.23 |
| 37 | | 07/15/2004 | 2437 | | 34 | 1.01 | 45.31 | 34 | 0.02 | 0.15 | 0.47 | 0.63 | 0.21 | 21.11 |
| 38 | | 07/21/2003 | 1390 | | 29 | 1.89 | 25.84 | 29 | 0.05 | 0.08 | 0.55 | 0.68 | 0.23 | 22.69 |

Table 2. Observed Flood Indexing Parameters and Characteristics using Hydrograph (continued)

| No. | Flood Runoff Characteristics | | | | | Flood Indexing Parameters | | | | | | | | | |
|-----|------------------------------|------------|---------------------|---------------|---------------------|---|-------------------------|----------------------------|---------------------------|------|------|-----------------------|-------|-------|-------|
| | Stream gauge | Flood data | Flood peak QP (cms) | Mean Qa (cms) | Time to peak TP (h) | Rising curve gradient K(day ⁻¹) | Flood magnitude ratio M | Flood response time TP (h) | Relative Severity Factors | | | Flash flood index FFI | | | |
| | | | | | | | | | RK | RM | RT | Sum | Ave | % | |
| 39 | | 08/27/2003 | 1868 | | 11 | 4.65 | 34.73 | 11 | 0.13 | 0.11 | 0.86 | 1.11 | 0.37 | 37.03 | |
| 40 | 7 | 07/15/2006 | 1265 | 41.04 | 20 | 4.13 | 91.66 | 20 | 0.12 | 0.31 | 0.71 | 1.14 | 0.38 | 37.89 | |
| 41 | | 07/27/2006 | 1846 | | 19 | 4.91 | 133.79 | 19 | 0.14 | 0.46 | 0.72 | 1.33 | 0.44 | 44.20 | |
| 42 | | 07/15/2004 | 845 | | 30 | 3.08 | 61.24 | 30 | 0.08 | 0.21 | 0.53 | 0.82 | 0.27 | 27.49 | |
| 43 | | 07/21/2003 | 174 | | 22 | 2.83 | 12.61 | 22 | 0.08 | 0.04 | 0.67 | 0.79 | 0.26 | 26.18 | |
| 44 | | 08/27/2003 | 403 | | 8 | 10.54 | 29.21 | 8 | 0.32 | 0.10 | 0.91 | 1.33 | 0.44 | 44.46 | |
| 45 | 8 | 07/12/2006 | 3115 | | 39.68 | 17 | 7.03 | 70.42 | 17 | 0.21 | 0.24 | 0.76 | 1.21 | 0.40 | 40.28 |
| 46 | | 07/15/2006 | 5317. | 26 | | 2.68 | 120.19 | 26 | 0.07 | 0.41 | 0.60 | 1.09 | 0.36 | 36.19 | |
| 47 | | 07/27/2006 | 4095 | 17 | | 6.77 | 92.56 | 17 | 0.20 | 0.32 | 0.76 | 1.28 | 0.43 | 42.57 | |
| 48 | | 07/12/2004 | 4011 | 33 | | 2.78 | 90.68 | 33 | 0.07 | 0.31 | 0.48 | 0.87 | 0.29 | 28.86 | |
| 49 | | 07/16/2004 | 3062 | 18 | | 2.58 | 69.21 | 18 | 0.07 | 0.23 | 0.74 | 1.04 | 0.35 | 34.77 | |
| 50 | | 07/21/2003 | 1932 | 22 | | 3.64 | 43.67 | 22 | 0.10 | 0.15 | 0.67 | 0.92 | 0.31 | 30.65 | |
| 51 | | 08/27/2003 | 2910 | 19 | 2.97 | 65.78 | 19 | 0.08 | 0.22 | 0.72 | 1.03 | 0.34 | 34.22 | | |
| 52 | 9 | 07/12/2006 | 216 | 36.36 | 12 | 4.86 | 15.88 | 12 | 0.14 | 0.05 | 0.84 | 1.03 | 0.34 | 34.50 | |
| 53 | | 07/14/2006 | 1272 | | 19 | 3.80 | 93.50 | 19 | 0.11 | 0.32 | 0.72 | 1.15 | 0.38 | 38.32 | |
| 54 | | 07/27/2006 | 280 | | 12 | 5.99 | 20.58 | 12 | 0.18 | 0.07 | 0.84 | 1.09 | 0.36 | 36.26 | |
| 55 | | 07/12/2004 | 265 | | 14 | 3.92 | 19.48 | 14 | 0.11 | 0.06 | 0.81 | 0.98 | 0.33 | 32.75 | |
| 56 | | 07/16/2004 | 202 | | 16 | 1.85 | 14.85 | 16 | 0.04 | 0.05 | 0.78 | 0.86 | 0.29 | 28.83 | |
| 57 | | 07/21/2003 | 269 | | 22 | 3.31 | 19.77 | 22 | 0.09 | 0.06 | 0.67 | 0.83 | 0.28 | 27.53 | |
| 58 | | 08/27/2003 | 980 | | 23 | 3.87 | 72.04 | 23 | 0.11 | 0.24 | 0.66 | 1.01 | 0.34 | 33.62 | |
| 59 | 10 | 07/14/2006 | 20522 | | 8.73 | 47 | 1.20 | 9.92 | 47 | 0.02 | 0.03 | 0.24 | 0.29 | 0.10 | 9.75 |
| 60 | | 07/26/2006 | 11723 | 49 | | 0.82 | 5.66 | 49 | 0.01 | 0.01 | 0.21 | 0.23 | 0.08 | 7.70 | |
| 61 | | 07/16/2004 | 8167 | 40 | | 0.72 | 3.95 | 40 | 0.01 | 0.01 | 0.36 | 0.38 | 0.13 | 12.56 | |
| 62 | | 07/21/2003 | 3681 | 33 | | 0.50 | 1.78 | 33 | 0.00 | 0.00 | 0.48 | 0.48 | 0.16 | 16.09 | |
| 63 | | 08/27/2003 | 4712 | 17 | | 1.32 | 2.28 | 17 | 0.03 | 0.00 | 0.76 | 0.79 | 0.26 | 26.23 | |
| 64 | 11 | 07/12/2006 | 1014 | 60.7 | 7 | 20.18 | 204.80 | 7 | 0.64 | 0.71 | 0.93 | 2.27 | 0.76 | 75.78 | |
| 65 | | 07/15/2006 | 944 | | 20 | 3.72 | 190.66 | 20 | 0.10 | 0.66 | 0.71 | 1.47 | 0.49 | 48.93 | |
| 66 | | 07/27/2006 | 622 | | 9 | 12.91 | 125.57 | 9 | 0.40 | 0.43 | 0.90 | 1.73 | 0.58 | 57.61 | |
| 67 | | 07/11/2004 | 169 | | 7 | 12.07 | 34.14 | 7 | 0.37 | 0.11 | 0.93 | 1.42 | 0.47 | 47.26 | |
| 68 | | 07/17/2004 | 262 | | 4 | 10.57 | 52.93 | 4 | 0.33 | 0.18 | 0.98 | 1.49 | 0.50 | 49.54 | |
| 69 | | 08/18/2003 | 702 | | 11 | 12.19 | 141.72 | 11 | 0.38 | 0.49 | 0.86 | 1.73 | 0.58 | 57.55 | |
| 70 | | 09/17/2003 | 738 | | 12 | 10.03 | 149.10 | 12 | 0.31 | 0.51 | 0.84 | 1.67 | 0.56 | 55.51 | |
| 71 | | 07/21/2003 | 591 | | 21 | 5.45 | 119.39 | 21 | 0.16 | 0.41 | 0.69 | 1.26 | 0.42 | 41.96 | |
| 72 | | 08/23/2003 | 791 | | 13 | 4.59 | 159.80 | 13 | 0.13 | 0.55 | 0.83 | 1.51 | 0.50 | 50.31 | |
| 73 | 12 | 07/12/2006 | 1066 | | 57.9 | 20 | 6.03 | 148.95 | 20 | 0.18 | 0.51 | 0.71 | 1.40 | 0.47 | 46.58 |
| 74 | | 07/15/2006 | 2071 | 13 | | 8.23 | 289.38 | 13 | 0.25 | 1.00 | 0.83 | 2.08 | 0.69 | 69.25 | |
| 75 | | 07/12/2004 | 528 | 25 | | 4.96 | 73.78 | 25 | 0.14 | 0.25 | 0.62 | 1.02 | 0.34 | 33.85 | |
| 76 | | 07/16/2004 | 648 | 13 | | 5.19 | 90.54 | 13 | 0.15 | 0.31 | 0.83 | 1.29 | 0.43 | 42.93 | |

Table 2. Observed Flood Indexing Parameters and Characteristics using Hydrograph

| No. | Flood Runoff Characteristics | | | | | Flood Indexing Parameters | | | | | | | | |
|-----|------------------------------|------------|---------------------|---------------|---------------------|---|-------------------------|----------------------------|---------------------------|------|------|-----------------------|------|-------|
| | Stream gauge | Flood data | Flood peak QP (cms) | Mean Qa (cms) | Time to peak TP (h) | Rising curve gradient K(day ⁻¹) | Flood magnitude ratio M | Flood response time TP (h) | Relative Severity Factors | | | Flash flood index FFI | | |
| | | | | | | | | | RK | RM | RT | Sum | Ave | % |
| 77 | | 07/21/2003 | 406 | | 18 | 7.08 | 56.73 | 18 | 0.21 | 0.19 | 0.74 | 1.15 | 0.38 | 38.18 |
| 78 | | 08/24/2003 | 565 | | 4 | 31.43 | 78.95 | 4 | 1.00 | 0.27 | 0.98 | 2.25 | 0.75 | 75.04 |
| 79 | 13 | 07/16/2006 | 832 | | 12 | 8.03 | 115.10 | 12 | 0.24 | 0.39 | 0.84 | 1.48 | 0.49 | 49.42 |
| 80 | | 07/27/2006 | 1591 | | 16 | 6.11 | 220.11 | 16 | 0.18 | 0.76 | 0.78 | 1.72 | 0.57 | 57.22 |
| 81 | | 07/15/2004 | 1170 | 53.3 | 30 | 2.83 | 161.86 | 30 | 0.08 | 0.56 | 0.53 | 1.17 | 0.39 | 38.89 |
| 82 | | 07/21/2003 | 189 | | 32 | 1.81 | 26.15 | 32 | 0.04 | 0.08 | 0.50 | 0.63 | 0.21 | 20.90 |
| 83 | | 08/27/2003 | 631 | | 7 | 11.07 | 87.30 | 7 | 0.34 | 0.30 | 0.93 | 1.57 | 0.52 | 52.34 |
| 84 | 14 | 07/16/2006 | 1252 | | 14 | 7.37 | 14.79 | 14 | 0.22 | 0.05 | 0.81 | 1.08 | 0.36 | 35.93 |
| 85 | | 07/27/2006 | 2700 | | 19 | 6.13 | 31.90 | 19 | 0.18 | 0.10 | 0.72 | 1.01 | 0.34 | 33.70 |
| 86 | | 07/15/2004 | 1425 | 34.82 | 34 | 2.60 | 16.83 | 34 | 0.07 | 0.05 | 0.47 | 0.59 | 0.20 | 19.53 |
| 87 | | 07/21/2003 | 294 | | 29 | 0.92 | 3.47 | 29 | 0.01 | 0.01 | 0.55 | 0.57 | 0.19 | 19.04 |
| 88 | | 08/27/2003 | 760 | | 11 | 4.28 | 8.98 | 11 | 0.12 | 0.03 | 0.86 | 1.01 | 0.34 | 33.64 |
| 89 | 15 | 07/12/2006 | 426 | | 23 | 3.72 | 11.36 | 23 | 0.10 | 0.03 | 0.66 | 0.79 | 0.26 | 26.43 |
| 90 | | 07/15/2006 | 1142 | | 11 | 7.37 | 30.47 | 11 | 0.22 | 0.10 | 0.86 | 1.18 | 0.39 | 39.47 |
| 91 | | 07/27/2006 | 1591 | | 26 | 3.99 | 42.44 | 26 | 0.11 | 0.14 | 0.60 | 0.86 | 0.29 | 28.60 |
| 92 | | 07/15/2004 | 628 | 31.5 | 36 | 2.05 | 16.75 | 36 | 0.05 | 0.05 | 0.43 | 0.53 | 0.18 | 17.78 |
| 93 | | 07/21/2003 | 622 | | 19 | 3.87 | 16.59 | 19 | 0.11 | 0.05 | 0.72 | 0.88 | 0.29 | 29.49 |
| 94 | | 08/27/2003 | 560 | | 8 | 9.10 | 14.94 | 8 | 0.28 | 0.05 | 0.91 | 1.24 | 0.41 | 41.25 |
| 95 | 16 | 07/12/2006 | 4557 | | 12 | 5.48 | 17.01 | 12 | 0.16 | 0.05 | 0.84 | 1.06 | 0.35 | 35.30 |
| 96 | | 07/14/2006 | 11772 | | 30 | 1.62 | 43.95 | 30 | 0.04 | 0.15 | 0.53 | 0.72 | 0.24 | 23.92 |
| 97 | | 07/27/2006 | 2095 | | 18 | 2.73 | 7.82 | 18 | 0.07 | 0.02 | 0.74 | 0.83 | 0.28 | 27.82 |
| 98 | | 07/11/2004 | 2227 | 29.0 | 33 | 1.13 | 8.31 | 33 | 0.02 | 0.02 | 0.48 | 0.53 | 0.18 | 17.54 |
| 99 | | 07/15/2004 | 3632 | | 61 | 0.51 | 14.09 | 61 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 1.44 |
| 100 | | 07/21/2003 | 4422 | | 25 | 2.99 | 16.51 | 25 | 0.08 | 0.05 | 0.62 | 0.75 | 0.25 | 25.09 |
| 101 | | 08/23/2003 | 10257 | | 27 | 2.56 | 38.29 | 27 | 0.07 | 0.13 | 0.59 | 0.78 | 0.26 | 25.99 |

분석 결과 다른 지역에 비해 상안미를 포함한 강원도 지역의 홍수수문곡선들이 돌발홍수 심도를 크게 나타내고 있다. 또한, 중랑천 같은 도시지역에서도 돌발심도가 크게 나타남을 확인 할 수 있었다. 2000년에 발간된 “Significant floods in the United States during the 20th century USGS measures a century of floods” (Perry, 2000) 보고서의 내용을 보면 돌발홍수는 산악지형뿐만 아니라 도시지역에서도 발생 가능성이 높다고 언급되어 있으며 위의 결과는 이러한 내용과 일치한다고 볼 수 있다. Fig. 5-7은 2006년 7월 집중호우에 의한 한강유역의 돌발홍수지수를 7월 전반기(7.11- 7.14), 중

반기(7.15-7.24) 그리고 하반기(7.26-8.2)로 나누어 시공간적으로 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 7월 전반기의 경우 서울 주변지역의 돌발심도가 크게 나타나고 있는데, 이때, 서울과 고양시 일대에 홍수 피해가 발생하였었다. 7월 중반기의 경우 강원도 지역에 돌발홍수 심도가 크게 나타났으며 이 때 큰 홍수피해가 발생하였다. 그러나, 7월 하반기 경우 중부지방의 집중호우에 의해 안성천 유역을 포함한 여러 지역에서 홍수피해를 보였으나, 돌발홍수지수는 낮게 나타나고 있다. 이는 돌발홍수에 의한 피해보다는 일반적인 홍수에 의한 피해임을 보여주는 것으로 판단된다.

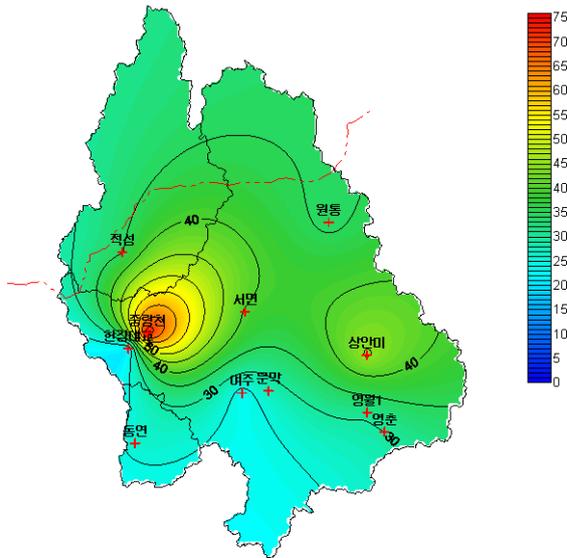


Fig. 5. Spatial Distribution of Flash Flood Index in Han River Basin (2006.7.11–2006.7.14)

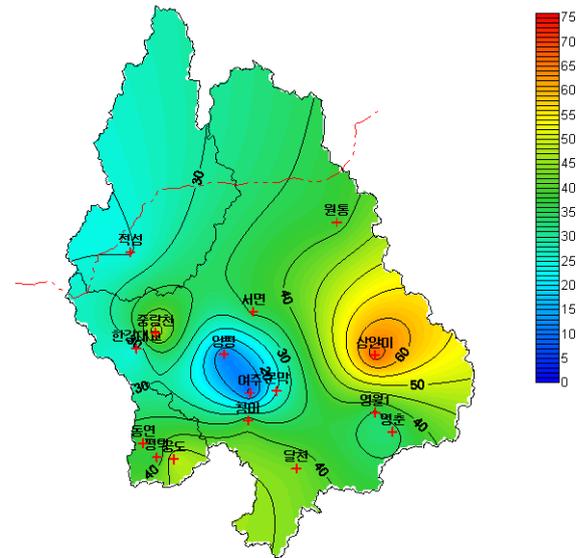


Fig. 6. Spatial Distribution of Flash Flood Index in Han River Basin (2006.7.15–2006.7.24)

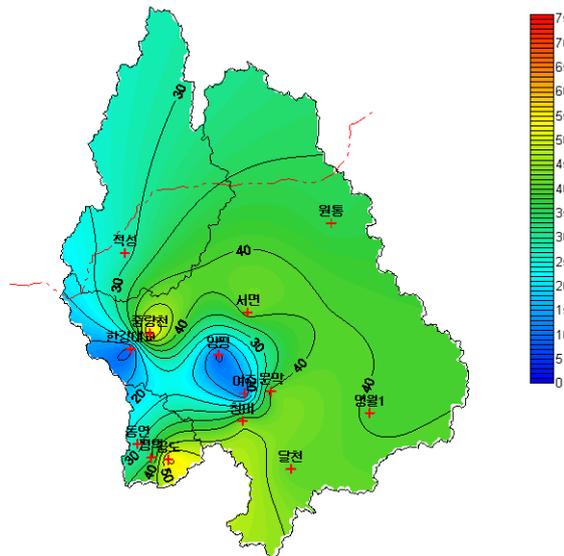


Fig. 7. Spatial Distribution of Flash Flood Index in Han River Basin (2006.7.26–2006.8.2)

4.2 돌발홍수지수와 유출수문곡선 특성인자의 상관분석

본 절에서는 101개의 홍수사상에 대해, 돌발홍수지수(FFI)와 유출특성의 관계를 분석하였으며 이때 산점도 분석과 선형 회귀분석을 실시하였다. Fig. 8은 돌발홍수지수(FFI)와 홍수수문곡선의 상승부 경사(K)의 관계를 나타낸 것이며 FFI에 대한 회귀 식으로 표시하면 Eq. (8)과 같다.

$$FFI = 15.5 \ln(K) + 14.17 \quad (8)$$

Fig. 9는 돌발홍수지수(FFI)와 홍수수문곡선의 홍수량비(M)의 관계를 나타낸 것이며 FFI에 대한 회귀 식으로 표시하면 Eq. (9)과 같다.

$$FFI = 0.184(M) + 22.151 \quad (9)$$

Fig. 10은 돌발홍수지수(FFI)와 홍수량 응답시간(T_p) 관계의 관계를 나타낸 것이며 FFI에 대한 회귀 식으로 표시하면 Eq. (10)과 같다.

$$FFI = -20.05 \ln(T_p) + 92.15 \quad (10)$$

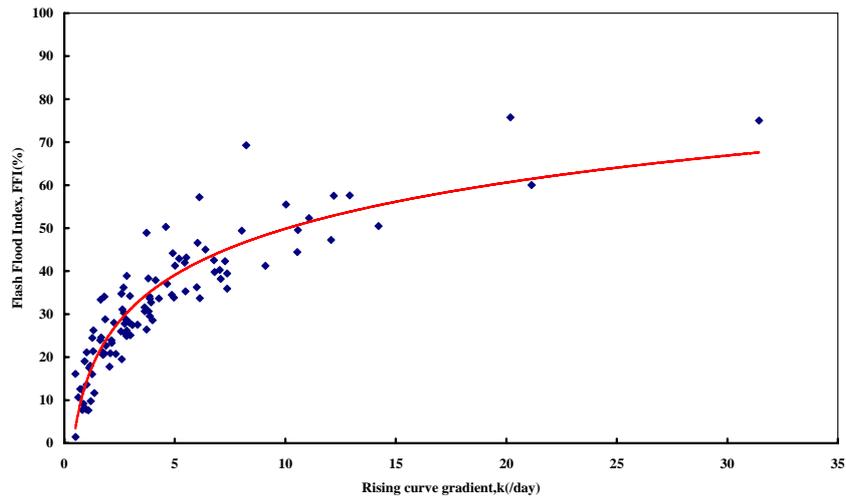


Fig. 8. Relationship Between Flash Flood Index(FFI) and Rising Curve Gradient(K)

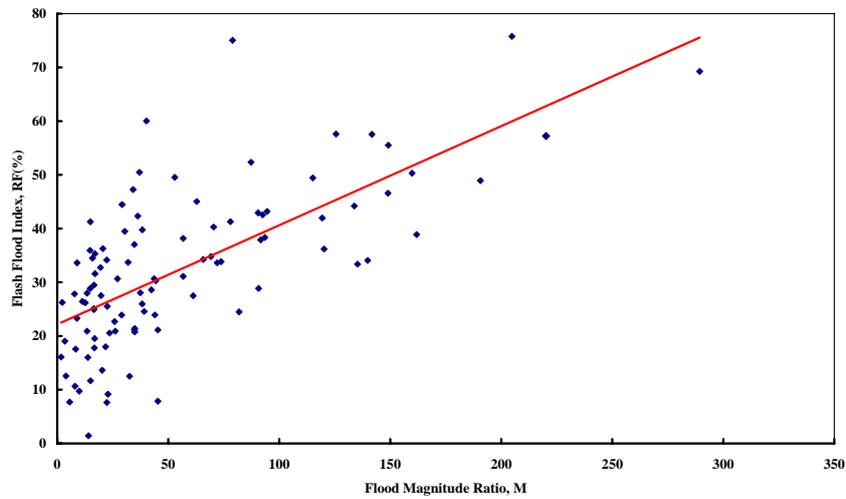


Fig. 9. Relationship Between Flash Flood Index(FFI) and Flood Magnitude(M)

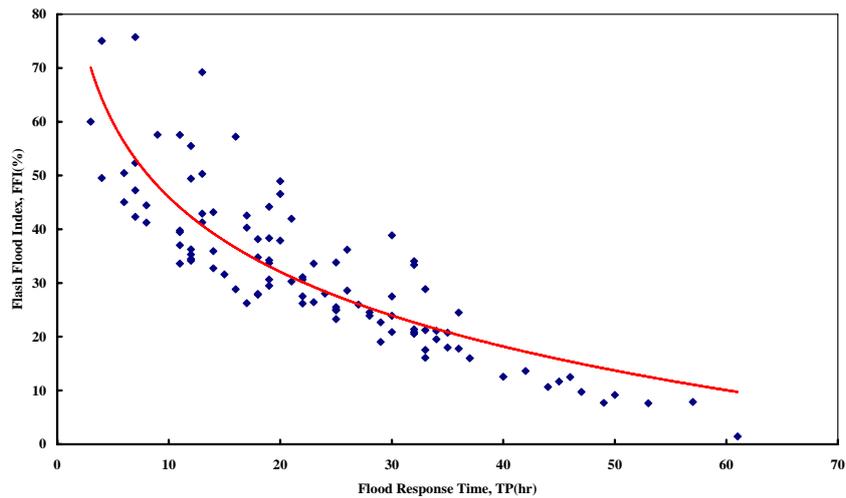


Fig. 10. Relationship Between Flash Flood Index(FFI) and Flood Response Time(T_p)

분석 결과, 우리나라의 경우에도 돌발홍수지수(FFI)는 Bhaskar 등(2000)의 연구결과와 동일하게 K 와 T_p

값에 밀접한 관계가 있음을 확인 할 수 있었다. 그러나 M 의 경우 Fig. 8을 통해 알 수 있듯이 돌발홍수지수와

상관성이 낮은 것으로 분석되었으며, 차후에는 홍수량 비 (M)을 FFI 인자로써 사용하기 보다는 강우강도 등과 같은 강우와 관련된 인자를 사용하는 것이 우리나라에 적합 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 과거 101개의 홍수사상에 대하여 돌발홍수의 상대심도(relative severity)를 파악하기 위하여 유출수문곡선으로부터 돌발홍수지수를 산정하였으며, 이를 이용하여 금년 7월의 집중호우에 대한 한강유역의 돌발홍수 발생특성을 분석하였다. 또한, 지금까지 기상학적 측면에서 연구되어 온 돌발홍수에 대한 연구 대신 유출 측면에서 돌발홍수 수문곡선이 다른 홍수 수문곡선과 어떻게 구분 되는지를 파악하고자 하였으며 돌발의 심각성 정도를 정량화하고자 하였다. 본 연구의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 분석 결과 다른 지역에 비해 강원도 지역의 홍수 수문곡선들이 돌발홍수 심도를 크게 나타내었으며 중랑천 등과 같은 도시유역에서도 돌발심도가 크게 나타남을 확인 할 수 있었다. 이는 돌발홍수는 산악지역뿐만 아니라 도시지역에서도 발생 가능성이 높다고 언급한 2000년 미국에 발간된 "Significant floods in the United States during the 20th century USGS measures a century of floods" (Perry, 2000) 보고서의 내용과 일치하는 것으로 우리나라의 경우 돌발홍수시스템의 설치가 산악지역뿐만 아니라 도시지역에도 필요하다는 것을 의미한다.
- 2) 2006년 7월 집중호우에 의한 한강유역의 돌발홍수 지수를 7월 전반기, 중반기 그리고 하반기로 나누어 시공간적 공간분포를 분석한 결과, 7월 전반기의 경우 서울 주변지역의 돌발심도가 크게 나타났으며 7월 중반기의 경우 강원도 지역의 돌발홍수 심도가 크게 나타내었다.
- 3) 7월 하반기 경우 중부지방의 집중호우에 의해 안성천 유역을 포함한 여러 지역에서 홍수피해를 보였으나, 돌발홍수지수는 낮게 나타났으며 이는 돌발홍수에 의한 피해보다는 일반적인 홍수에 의한 피해임을 보여주는 것으로 판단된다.
- 4) 본 논문에서는 101개의 홍수사상에 대해, 돌발홍수 지수(FFI)와 유출특성의 관계를 분석하였으며 이때 산점도 분석과 선형 회귀분석을 실시하여 FFI와 유출수문곡선 특성치의 관계식을 유도하였다.

- 5) 본 논문은 돌발홍수와 연관된 유출 수문곡선 특성의 정량화에 의해 돌발홍수를 표현하고자 한 첫 시도이다. 이 분야를 위해 향후 연구에서는 더 많은 홍수사상들과 추가적인 지수화 그리고 매개변수들의 포함은 돌발홍수를 다른 홍수 사상들로부터 구분해내기 위한 지수 사용에 관련된 더 명확한 정의와 개발을 위해 필요하다고 생각한다. 비록, 돌발홍수지수(FFI)가 돌발홍수 예측을 위한 어떠한 의미도 제공하진 않지만, 본 연구는 우리나라에서 돌발홍수의 수문학적 거동을 이해하고자 하는 첫 걸음이라고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 한국건설교통기술평가원의 이상기후대비시설기준강화 연구단에 의해 수행되는 2005 건설기술기반구축사업(05-기반구축-D03-01)에 의해 지원되었습니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2005). **강우레이더에 의한 돌발홍수예보 시스템 개발(2차년도)**
 기상청 홈페이지 (www.kma.go.kr).
 김병식, 홍준범, 김형수, 김양수 (2007). "지형분석모형과 강우레이더를 이용한 돌발홍수모형 개발; II.태풍 루사에 의한 양양 남대천 유역의 돌발홍수 모니터링", **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, Vol. 27, No. 2B, pp. 161-169
 김병식, 홍준범, 김형수, 윤석영 (2007). "지형분석모형과 강우레이더를 이용한 돌발홍수모형 개발; I.방법론 및 모형의 개발." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, Vol. 27, No. 2B, pp. 151-159
 정재철 (2000). "돌발홍수지수에 관한 연구(보청천을 중심으로)." 석사학위논문, 수원대학교
 Bhaskar, N.R, French, B.M, Kyiamah, G.K. (2000). "Characterization of flash floods in Eastern Kentucky." *Journal of hydrologic engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 327-331
 Perry, C.A. (2000). "Significant floods in the United States during the 20th century USGS measures a century of floods." USGS, Fact Sheet024-00

(논문번호:08-02/접수:2008.01.04/심사완료:2008.01.18)