



저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이 학 석 사 학 위 논 문

한반도에서 발생한
홍수 위험의 정량화 분석



2014 년 2 월

부 경 대 학 교 대 학 원

환 경 대 기 과 학 과

김 유 진

이 학 석 사 학 위 논 문

한반도에서 발생한 홍수 위험의 정량화 분석

지도교수 변희룡

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함.

2014 년 2 월

부 경 대 학 교 대 학 원

환 경 대 기 과 학 과

김 유 진

김유진의 이학석사 학위논문을 인준함.

2014 년 2 월 21 일

주 심 이학박사 권 병 혁 (인)

위 원 이학박사 김 재 진 (인)

위 원 이학박사 변 희 룡 (인)

CONTENTS

Contents	i
List of Figures	ii
List of Tables	v
Abstract	vi
1. 서론	1
2. 자료 및 방법	4
2.1 일 강수량 자료	4
2.2 홍수 위험 지수	5
3. 지점별 특성	7
3.1 연 최대 홍수 위험도의 변화	7
3.2 홍수 위험일의 발생과 지속	13
3.3 홍수 위험일의 공간 분포	17
4. 군집별 특성	22
4.1 홍수 위험 지역 구분	22
4.2 연 최대 홍수 위험도의 변화	27
4.3 홍수 위험일의 시공간 분포	31
5. 요약 및 토의	34
References	37

List of Figures

Fig. 1. Distribution of 57 weather stations with WMO number (47 is omitted in the head of each number). Shaded contours denote topography (m).	4
Fig. 2. Time-series of the yearly maximum FI among 57 stations from 1974 to 2012.	9
Fig. 3. The spatial distribution of the linear trends (decade^{-1}) of yearly maximum FI. The points indicate station locations.	10
Fig. 4. Time-series of the yearly maximum FI in (a) Seoul, and (b) Miryang from 1974 to 2012.	11
Fig. 5. Scatter plot of (a) flood risk dates ($\text{FI} > 1$) against FI and (b) flood risk onset dates against duration from 1974 to 2012 in 57 stations. Flood risk date was defined as the day of FI greater than 1. Each radial axis denotes the first day of the month.	15
Fig. 6. Histogram of the flood risk duration that is the successive days of flood risk days.	16

Fig. 7. Same as figure 3, but for the mean (a) onset date, and (b) end date of the flood risk duration. The points indicate station locations. The values denote Julian day.	20
Fig. 8. Same as figure 7, but for the (a) onset date, and (b) end date of the flood risk duration.	20
Fig. 9. Same as figure 8, but for the yearly mean frequency of the flood risk days.	21
Fig. 10. Same as figure 9, but for the maximum of the flood risk duration.	21
Fig. 11. Variation of Pearson correlation coefficient between merged clusters. The number of cluster is from 56 to 1.	24
Fig. 12. Spatial distribution of 6 clusters grouped along monthly maximum FI.	24
Fig. 13. The variation of 15-day running mean (line) of the averaged precipitation per date from 1974 to 2012 along the group of (a) G1, (b) G2, (c) G3, (d) G4, (e) G5, and (f) G6. The bars denote monthly mean of the daily precipitation.	25

Fig. 14. Same as figure 4, but for (a) G1, (b) G2, (c) G3, (d) G4, (e) G5, and (f) G6. 29

Fig. 15. Histogram of mean flood risk frequency of the flood risk days per station averaged from 1974 to 2012 in each group. 32

Fig. 16. Time-series of the FI of 6 groups (G1, G2, G3, G4, G5, and G6) and total (T) averaged per date on 57 stations from 1984 to 2012. 33



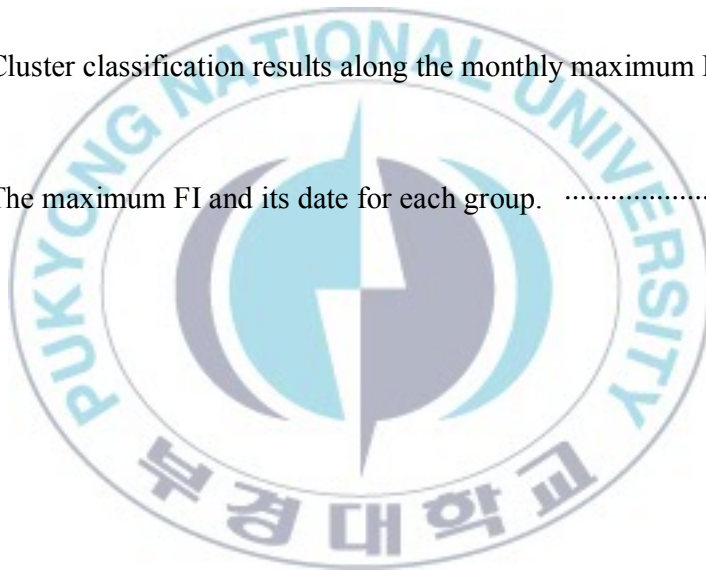
List of Tables

Table 1. The classification of the FI. 6

Table 2. The ranking of 5 maximum FI cases (1st row) and other station dates of the year. 12

Table 3. Cluster classification results along the monthly maximum FI. 26

Table 4. The maximum FI and its date for each group. 30



Quantitative Analysis of Flood Risk using Flood Index over Korea

Yu-Jin Kim

Department of Environmental Atmospheric Sciences, Graduate School,

Pukyong National University

Abstract

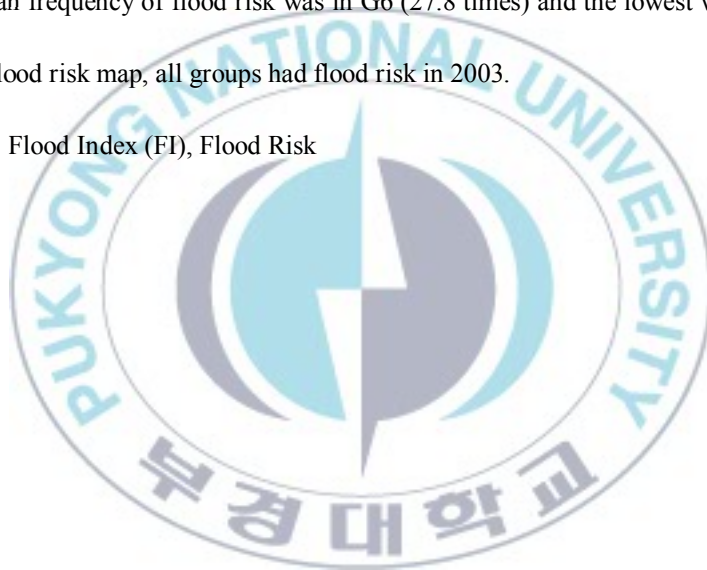
This study investigated the characteristics of flash flood risk of 57 stations and 6 groups in Korea, using Flood Index (FI; Byun and Lee, 2002) which was calculated from the daily precipitation data from 1973 to 2012. The days of FI greater than 1 mean flood risk days.

In 57 stations, Gangneung (31th Aug., 4.88), Pohang (30th Sep., 4.39), Sokcho (2nd Sep., 3.97), Icheon (11th Sep., 3.71), and Busan (23th Aug., 3.56) had the biggest flood risk in each of the top five years (2002, 1998, 1984, 1990, 1991) at the ranking of flood risk in the top five years. All the trends of the yearly maximum FI in 57 stations were positive. The trend of yearly maximum FI was the highest in Seoul at the rate of 0.48 decade^{-1} , and the lowest trend was in Miryang at 0.04 decade^{-1} . Also, the flood risk days in the 57 stations appeared in 24th July~29th Oct., and the mean duration of flood risk was 5.75 days. The earliest mean onset date of flood risk among each of 57 stations was 5th Aug. at Busan, and

the latest was in 7th Sep. at Gangneung. The earliest mean end date was 21th Aug. at Suwon, and the latest was 23th Sep. at Buan.

In groups of flood risk, Korea was divided into six clusters along monthly maximum FI. The trend of the yearly maximum FI in each of 6 groups was positive. The trends of groups in the west of Korea were higher than those of the groups in east of Korea. The maximum flood risk among each of 6 groups was the highest in 31th Aug. 2002 (3.36) at G1. The highest mean frequency of flood risk was in G6 (27.8 times) and the lowest was in G5 (1.1 times). In flood risk map, all groups had flood risk in 2003.

Key words: Flood Index (FI), Flood Risk



1. 서론

한국은 집중호우의 강도가 계속해서 증가함에 따라 홍수 등으로 인한 수재해가 인명 및 재산 피해의 대부분을 차지하고 있다 (김근영, 2005). 이러한 홍수로 인한 하천 주변의 피해를 방지하기 위해 인근에 여러 시설물을 설치하고 있지만, 수재해는 계속해서 발생하고 있다 (이근상 등, 2013). 이에 따라 집중호우 시 홍수 피해 및 이를 예측할 수 있는 홍수 위험에 관한 연구가 계속 진행되어 왔다. 홍수 피해에 관한 연구로는 강우 특성과 홍수 피해액의 상관관계 분석, 홍수 피해의 원인과 문제점 개선방안에 관한 연구, 홍수 피해에 따른 지역적 취약성 변화의 분석 (김양수, 2002; 박두호 등, 2011; 홍지혜와 황진환 등, 2006) 등이 있다. 홍수 위험에 관한 연구로는 지리정보 시스템 (GIS)를 이용한 입력자료 생성, GIS와 강우 유출 모형 연계 분석을 통한 산악 돌발 홍수 예측 (김상호 등, 2006; 이연길 등, 2003; 최현과 남광우, 2005) 및 홍수 유출 시 분포형 모형의 적용 가능성 검증에 관한 연구 (김병식 등, 2008; 박진혁 등, 2007; 박진혁과 허영택, 2009) 등이 활발하게 이루어지고 있다. 침수의 개념으로서 홍수를 면 단위로 살펴보기 위해 홍수 위험 지도를 사용하여 하천 주변뿐만 아니라 넓은 영역 단위의 홍수 위험에 대한 취약성도 분석되었다. 이에 관한 연구로는 홍수 지도 제작을 위한 수치 지형도의 오차 평가 (이근상 등, 2004), 홍수 위험 지도 활용을 위한 홍수

취약도에 대한 정량적 평가 (김태형 등, 2011), 3차원 가상 현실을 이용한 홍수위험지도의 제작과 활용성 평가 (송영선 등, 2012) 등이 있다. 또한 지수를 사용함으로써 홍수의 위험을 수치로 정량화 하려는 노력이 있었다 (변희룡과 정준석, 1998; 장대원, 2010).

홍수 위험에 관한 연구로는 이처럼 많은 연구가 있으나, 대부분의 홍수 위험은 유출량 산정을 통해 예측되고 있다. 앞서 언급한 관련된 선행 연구에서 사용되는 변수로는 대부분 하천의 수위, 댐 수위, 유출량 등이 있었다. 그러나 이러한 변수들은 위기 시 급변하기 때문에 이에 대한 의존도를 줄이고, 강수량만을 이용한 홍수 위험 분석의 필요성이 제기된 바 있다 (변희룡과 정준석, 1998). 이와 같이 강수량만을 사용하여 홍수 위험시의 호우를 분석한 연구가 드물게 발견된다 (정성원 등, 2002). 이들은 지속기간을 고려한 최대 강수량과 확률 빈도를 비교함으로써 홍수의 근본적인 원인을 오랜 기간 동안 꾸준한 양의 강우 때문이라고 설명하였다. 따라서, 강수량을 사용하여 홍수의 위험을 분석하더라도 강수의 누적 효과를 고려해야 한다. 또한 과거에 주로 있었던 하천 유역 중심의 홍수 치수 계획이 먼 개념의 유역 단위 치수계획으로 확장하여 등장함에 따라 (김경탁 등, 2007), 특정하게 강 유역의 지점뿐만 아니라 한반도 전체 지점에 대한 홍수 위험의 연구 필요성이 부각되고 있다.

따라서 본 연구는 홍수 위험에 관한 분석에 사용되는 복잡한 변수들에 대한 의존도를 줄이고 강수가 지속되어 누적되는 효과를

고려하기 위해 시간 가중 함수를 사용하여 강수가 누적되는 기간에 따라 그에 맞는 양이 축적되는 방식을 사용한 누적 강수량을 이용하여 한반도 전 지점 및 군집별 홍수 위험도의 특성을 분석하고자 한다.



2. 자료 및 방법

2.1 일 강수량 자료

한국 기상청에서 제공하는 57개 지점 (Fig. 1)의 1973년 1월 1일부터 2012년 12월 31일 까지 (40년간)의 일 강수량 자료를 사용하였다. 울릉도 1개 지점과 제주도 3개 지점은 지역 특성상 제외하였다.

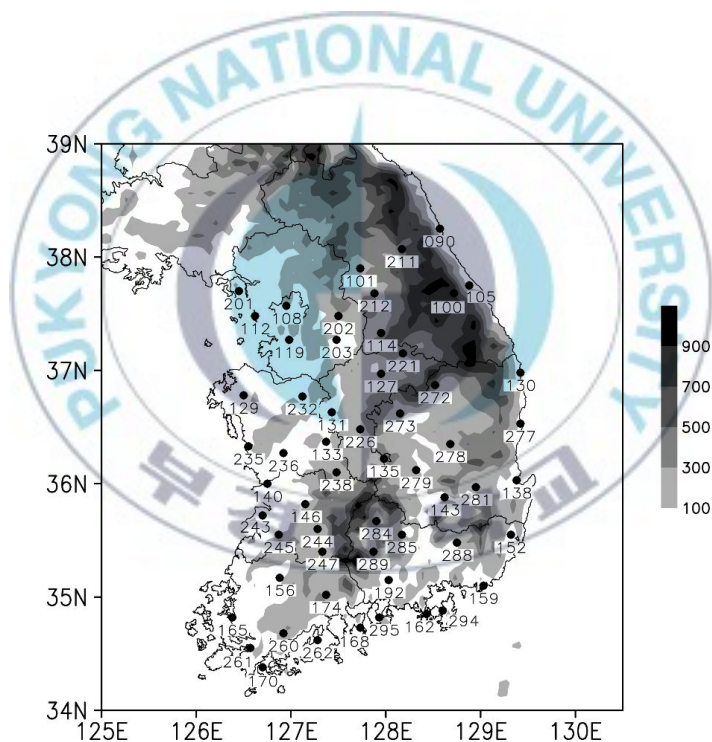


Fig. 1. Distribution of 57 weather stations with WMO number (47 is omitted in the head of each number). Shaded contours denote topography (m).

2.2 홍수 위험 지수

홍수 위험도를 분석하기 위해서 Flood Index (FI; Byun and Lee, 2002)를 사용하였다. FI는 유출, 증발산, 침투 등으로 인한 수자원의 일 감소가 고려된 현재 수자원량에 현재 수자원량의 최댓값을 사용하여 표준화 시킴으로써 한반도 전체의 수자원 분포를 지수로 비교 가능하게 한다. 이는 수자원이 집중된 경우 ‘돌발 홍수’의 위험을 정량적으로 나타낼 수 있는 장점을 가진다. FI 계산 과정은 아래 식과 같다.

$$E = \sum_{N=1}^D (\sum_{m=1}^N P_m / N) \quad \text{Eq. (1)}$$

$$W = E / (\sum_{N=1}^D (1/N)) \quad \text{Eq. (2)}$$

$$FI = (W - A_{\max}(W)) / St(\max(W)) \quad \text{Eq. (3)}$$

Eq. (1)의 E는 D일동안 누적된 유효 수자원량을 의미하고, P_m은 m일 전의 일 강수량, D는 강수량이 누적되는 기간을 의미한다. E에서 m일 전 강수량은 m일 동안 평균된 강수량으로 총 수자원 량에 더해진다. Eq. (2)의 W는 E의 값을 하루 상당량으로 바꾼 유출량이 고려된 현재 수자원량을 뜻한다. Eq. (3)의 FI는 W를 W의 연 최댓값 평균과 연 최댓값의 표준편차를 사용하여 표준화한다. FI는 누적 기간 (D=365)으로 인해 강수 시작일의 1년 이후부터 계산된다.

FI계산과 같은 원리의 방법을 이용한 유효 강수 지수를 사용하여 실제 홍수 사례에 적용 후 결과를 비교한 연구 (변희룡과 정준석,

1998)에서 (유효 강수 지수는 FI 계산에서 최댓값을 사용하지 않은 차이점이 있다.), 유효 강수 지수가 홍수를 유발할 만한 호우가 있었음을 나타낸 바 있었다. 유효 강수 지수에서 개선된 FI는 W의 최댓값을 사용한다. FI의 의미는 Table 1에서 보여준다.

Table 1. The classification of the FI.

Flood Index	Classification
$1 < FI \leq 2$	Moderate flood risk
$2 < FI \leq 3$	Severe flood risk
$3 < FI$	Extreme flood risk

3. 지점별 특성

3.1 연 최대 홍수 위험도의 변화

전 지점 연별 최대 홍수 위험도의 분포를 보기 위해 연별 FI 최댓값 분포를 Fig. 2에 나타냈다. 전 지점 연별 FI 최댓값은 $0.388 \text{ decade}^{-1}$ 로 증가하는 경향을 보인다. 특히 2002년, 1998년, 1984년, 1990년, 1991년은 상위 5순위 해에 속하며 홍수 위험이 극심한 ($FI > 3$) 해에 포함되었다.

전 지점 연별 최대 홍수 위험도의 분포 (Fig. 2)에서 5순위까지 기록한 5개의 각 해에서 홍수 위험이 높았던 5개의 지점과 날짜를 살펴보았다 (Table 2). 전 지점에서 연별 최댓값 상위 5순위는 2002년 8월 31일 강릉 (4.88), 1998년 9월 30일 포항 (4.39), 1984년 9월 2일 속초 (3.92), 1990년 9월 11일 이천 (3.71), 1991년 8월 23일 부산 (3.56) 순으로 나타났다. 각 해의 홍수 위험도를 분석한 결과, 높았던 홍수 위험도가 나타났던 지역과 날짜는 홍수통제소에서 예보되는 강 유역의 지점에 한해서, 『한국의 홍수통제 30년사』 (건설교통부, 2005)에 기록된 과거 홍수 사상에 포함된 것으로 확인되었다. 2002년에는 강릉에서 홍수 위험이 발생했던 때와 같은 날 대관령, 추풍령, 고흥, 합천 순으로 홍수 위험도가 높은 값을 기록하였다. 이는 2002년 태풍 ‘루사’의 영향으로 인한 것이다. 태풍 ‘루사’는 2002년 8월 20일부터 9월 1일까지 관측 사상

최다 일 강수량을 기록 (김경탁 등, 2007)하며 본 지역들에 영향을 주었다. 1998년에는 9월 28일부터 30일까지 이어진 태풍 ‘예니’로 인한 포항 집중호우는 포항의 홍수 위험도를 높게 만들었고, 그 해의 7월 31일부터 8월 18일까지 지속된 서울 경기 충청 지방 게릴라성 집중호우 (지리산 집중호우)로 인해 서울, 보은, 강화, 대전 지역에서도 높은 홍수 위험도를 기록하였다. 1984년에는 8월 31일부터 9월 4일까지 서울 경기 강원 일대가 태풍 ‘준’의 영향을 받았다. 이로 인해 한강에 대홍수가 발생하였고 속초, 인제, 홍천, 의성, 춘천에서 상위 5위의 홍수 위험도를 기록하였다. 1990년에는 9월 9일부터 12일까지 중부지방의 집중호우로 인해 한강 대홍수가 발생하여 이천, 홍천, 수원, 서울, 인천에서 높은 홍수 위험도를 기록하였다. 그리고 1991년에는 태풍 ‘글래디스’의 영향으로 8월 22일부터 26일까지 영남 동해안에 집중호우가 내렸다. 이로 인해 부산, 울산, 포항, 영덕, 울진은 높은 홍수 위험도를 기록하였다.

지점별 연별 FI 최댓값 변화 경향 (Fig. 3)은 전 지역에서 연별 FI 최댓값이 증가하는 추세를 나타냈다. 서울에서 0.48 decade^{-1} 로 가장 크게 증가하고, 밀양에서 0.04 decade^{-1} 로 가장 작게 증가하였다. 전체적으로는 동해 및 남해안 지역에서 작은 증가 추세를 나타내었고 경기도 지역, 경상남북도 내륙, 강원도 내륙, 전라북도 대부분의 지역은 큰 증가 추세를 나타내었다. 연 최대 홍수 위험도의 변화 경향이 가장 크고

작았던 서울과 밀양 지역의 FI 최댓값 변화 경향 (Fig. 4)을 비교하였다. 서울 (Fig. 4a)은 홍수 위험도가 급격히 증가하는 양상을 보였고 밀양 (Fig. 4b)은 홍수 위험도가 매년 비슷한 폭의 변동을 보이며 아주 작게 증가하였다.

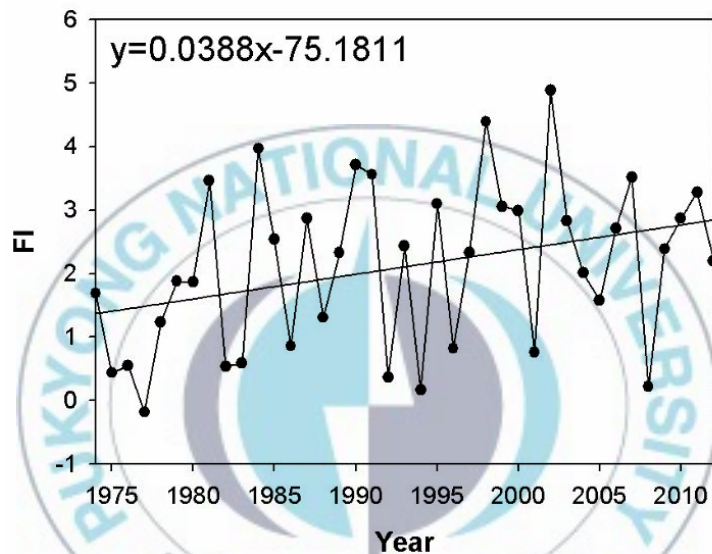


Fig. 2. Time-series of the yearly maximum FI among 57 stations from 1974 to 2012.

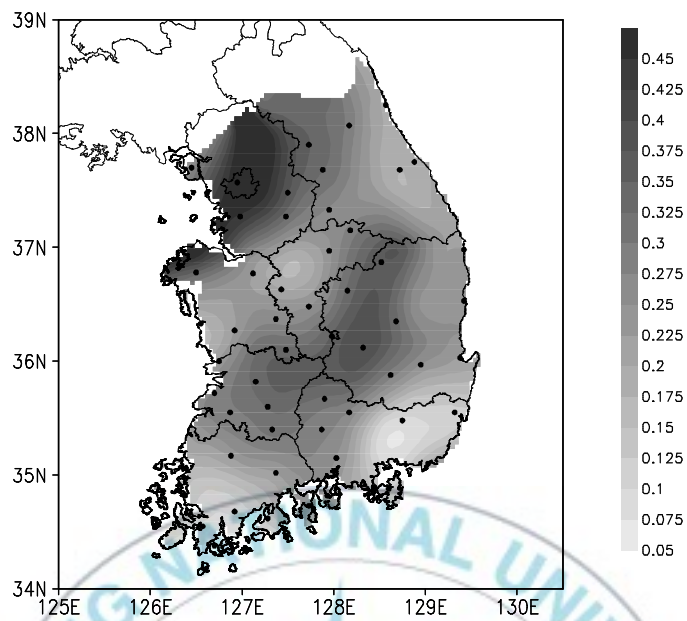


Fig. 3. The spatial distribution of the linear trends (decade⁻¹) of yearly maximum FI. The points indicate station locations.

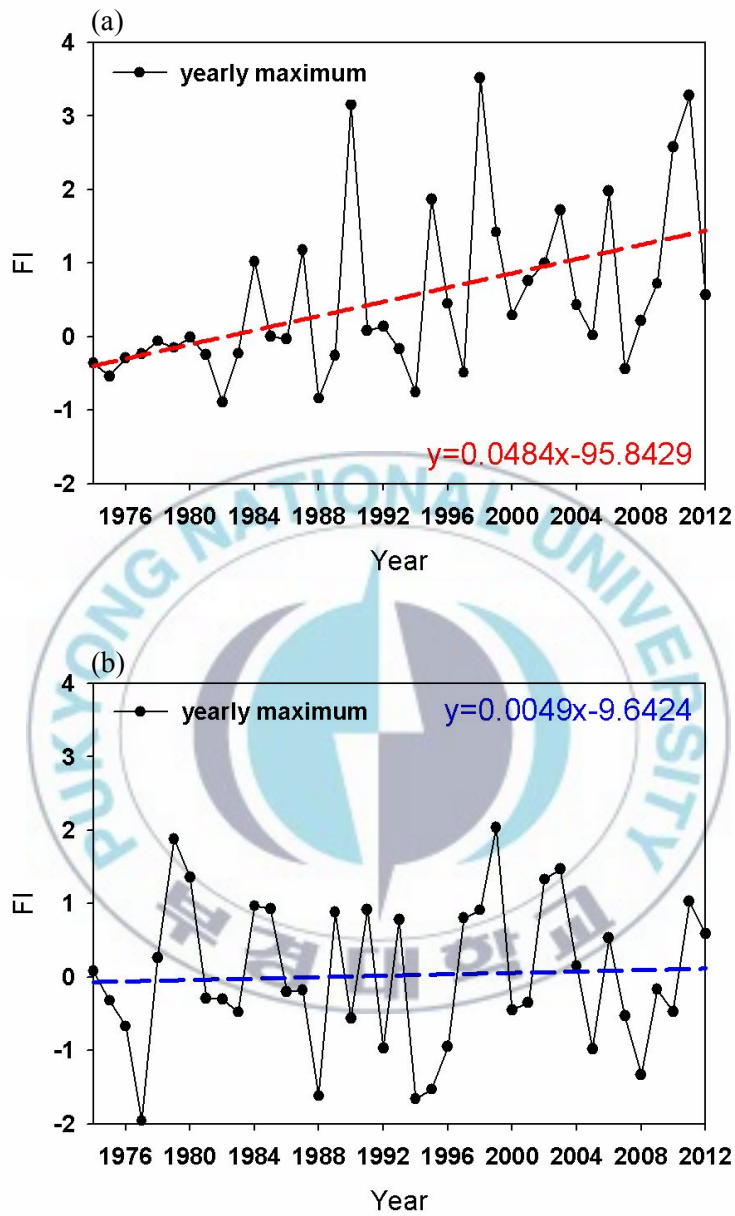


Fig. 4. Time-series of the yearly maximum FI in (a) Seoul, and (b) Miryang from 1974 to 2012.

Table 2. The ranking of 5 maximum FI cases (1st row) and other station dates of the year.

2002			1998			1984			1990			1991		
Station	Date	FI	Station	Date	FI	Station	Date	FI	Station	Date	FI	Station	Date	FI
1 st Gangneung	8/31	4.88	Pohang	9/30	4.39	Sokcho	9/2	3.97	Icheon	9/11	3.71	Busan	8/23	3.56
2 nd Daegwallyeong	8/31	3.22	Seoul	8/8	3.52	Inje	9/2	1.96	Hongcheon	9/11	3.24	Ulsan	8/23	3.45
3 rd Chupungnyeong	8/31	2.21	Boeun	8/12	3.49	Hongcheon	9/2	1.57	Suwon	9/11	3.16	Pohang	8/23	2.47
4 th Goheung	8/31	2	Ganghwa	8/6	2.82	Uiseong	9/3	1.4	Seoul	9/11	3.16	Yeongdeok	8/23	1.93
5 th Hapcheon	8/31	1.95	Daejeon	8/12	2.65	Chuncheon	9/2	1.33	Incheon	9/11	3.11	Ulsan	8/24	1.7

3.2 홍수 위험일의 발생과 지속

Fig. 5는 1974년부터 2012년 (39년)까지 한국 57개 지점에서 홍수 위험 ($FI > 1$ 일 때)시 FI 값과 발생일 그리고 지속 기간 사이의 관계를 scatter plot으로 나타낸 것이다. 방위각 축은 시계방향으로 1월부터 12월까지 각 달의 1일을 의미하고, 반경 축은 각각 FI 값 (Fig. 5a)과 홍수 위험 지속 기간 (Fig. 5b)을 나타낸다. Fig. 5a는 홍수 위험 발생 ($FI > 1$)시 발생일에 대한 FI 값의 분포를 나타낸 것이다. 홍수 위험 발생시 평균 FI 값은 약 1.47이었으며, 39년간 홍수 위험일은 총 3777일이었다. 전체 홍수 위험은 6월 24일~10월 29일의 기간에 발생하며, 평균적으로는 241.40일 (8월 30일)에 발생한다. 이는 여름철로, 돌발홍수의 위험을 나타낸다. 이 중 극심한 홍수 위험 ($FI > 3$)은 총 44일 발생하였다. 그 중 가장 큰 홍수 위험도를 기록한 곳은 강릉 (4.88)으로 2002년 8월 31일에 발생하였다. 이는 태풍 ‘루사’의 영향으로, 같은 날 영향 지역이었던 대관령도 3.22로 높은 홍수 위험도를 기록하였다 (Table 2). 강릉 다음으로 큰 홍수 위험도는 포항 (4.39)에서 1998년 9월 30일에 나타났다. Fig. 5b는 홍수 위험 발생일에 대한 지속 기간의 분포이다. 홍수 위험은 홍수 위험 시작일과 관계없이 대부분 (전체의 90.4%) 15일 이내로 지속된다. 그러나, 시작일이 9월로 갈수록 지속 기간이 길어지는 경향을 나타낸다. 특히 예외적으로 길었던 지속 기간은 63일 (서울, 1998년 8월 5일~10월 6일), 84일 (거제, 1999년 7월 29일~10월 20일), 85일

(통영, 1999년 7월 29일~10월 21일)까지 있었다.

분석기간 동안 발생한 홍수위험의 지속기간별 발생 빈도수 (Fig. 6)를 살펴보면, 홍수 위험은 주로 7일 이하의 지속 기간 (전체의 70.4%)을 가지고 8일 이상의 지속 기간은 별로 발생하지 않는다. 또한 지속 기간에 따른 홍수 위험의 발생 빈도는 1~2일 사이에서 가장 높게 차지하고 있다.



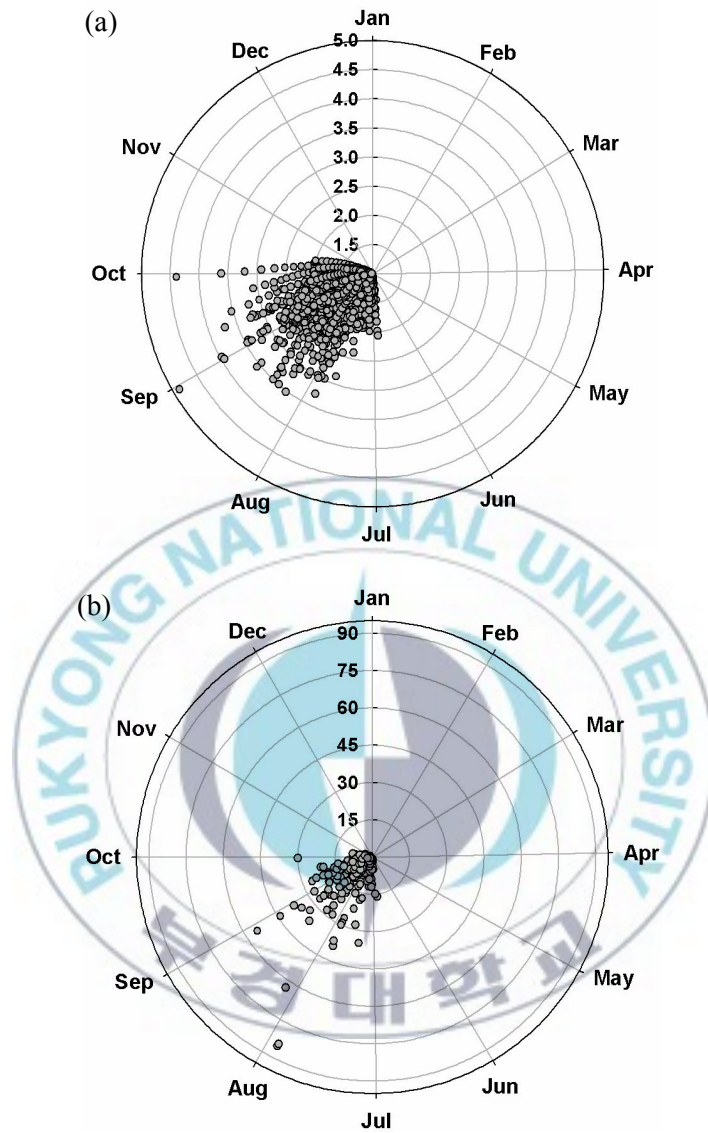


Fig. 5. Scatter plot of (a) flood risk dates ($FI > 1$) against FI and (b) flood risk onset dates against duration from 1974 to 2012 in 57 stations. Flood risk date was defined as the day of FI greater than 1. Each radial axis denotes the first day of the month.

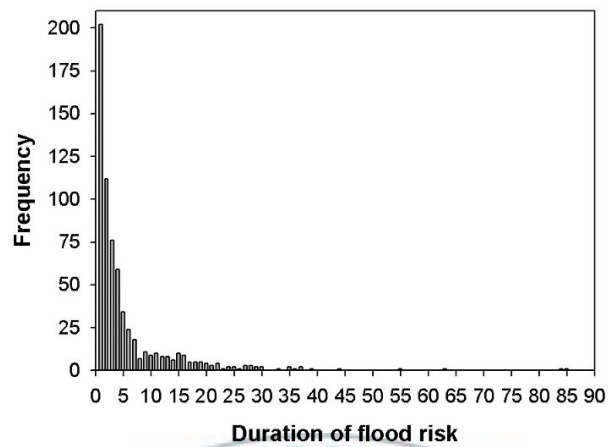
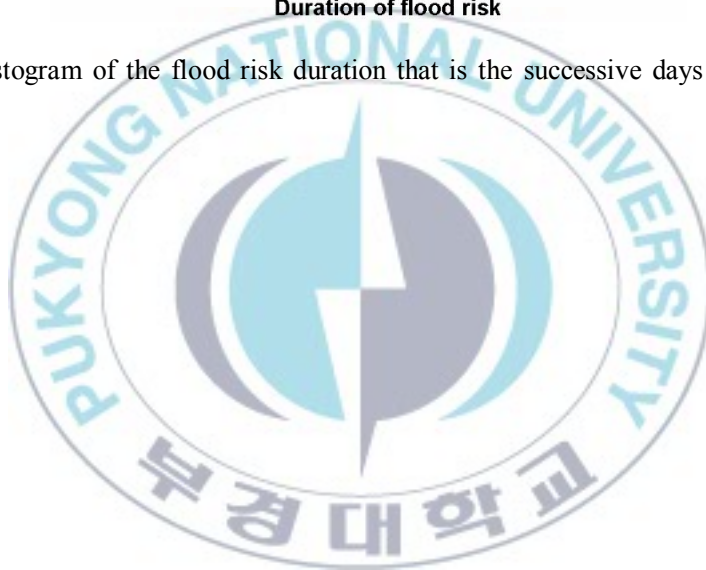


Fig. 6. Histogram of the flood risk duration that is the successive days of flood risk days.



3.3 홍수 위험일의 공간 분포

지역별 홍수 위험일의 평균 시종일을 살펴보기 위해 Fig. 7에 공간분포를 나타냈다. 전체 홍수 위험 시작일 (Fig. 7a)의 평균은 232.45일로, 홍수 위험이 가장 일찍 나타난 지역은 부산으로 평균 216.78일에 나타났고, 홍수 위험이 가장 늦게 나타난 지역은 강릉으로 평균 249.67일에 나타났다. 전라남도 및 경상남북도 내륙 일부 지역과 동해안 해안 지역에서 홍수 위험이 늦게 나타나는 특징을 보였다. 전 지점 평균 종료일은 248.59일로 홍수 위험이 가장 일찍 끝난 지역은 수원으로 평균 233일에 종료되었고, 홍수 위험이 가장 늦게 끝난 지역은 부안으로 평균 265.75일에 종료되었다. 경상남도 해안 지역 및 충청북도를 중심으로 한 내륙지역에서는 홍수 위험이 일찍 끝나는 경향을 보였다.

이번에는 지점별 홍수 위험의 최초 시작일과 최종 종료일을 공간분포로 나타냈다 (Fig. 8). 전 지점 최초 시작일 (Fig. 8a) 평균은 196.91일이다. 전 지점 중 홍수 위험이 가장 일찍 나타난 지역은 통영, 여수, 해남으로 175일에 홍수 위험이 시작되었고, 강릉 지역은 홍수 위험이 가장 늦게 시작된 지역으로 232일에 시작되었다. 강원도 동해안 지역, 경상남북도 내륙 일부 지역, 전라남북도 내륙 일부 지역에서 홍수 위험일이 늦게 나타나는 특징을 보였다. 최종 종료일 (Fig. 8b)은 평균 270.30일이었으며 홍수 위험이 가장 일찍 끝난 지역은 청주로 260일에

홍수 위험이 일찍 종료 되었다. 홍수 위험이 가장 늦게 끝난 지역으로는 강릉, 서울 등 35개의 지점에서 273일로 홍수 위험이 가장 늦게 종료되었다. 경상남도 및 전라남도 남해안 일부 지역, 강원도 북부 지역, 경기 충남 충북 내륙 일부 지역에서 홍수 위험이 일찍 종료되는 경향을 보였다.

지역별 홍수 위험일의 연평균 빈도 (Fig. 9)는 평균 1.7 days year⁻¹이다. 그 중 서울에서는 5.69 days year⁻¹로 연평균 빈도가 가장 높고, 순천에서는 0.44 days year⁻¹로 연평균 빈도가 가장 낮다. 전 지점 중 경상남북도 해안 지역 (부산, 거제, 포항, 통영), 경상북도 내륙 (의성), 전라남북도 (광주, 군산), 충청남도 (부여, 서산), 및 경기도 (강화, 인천) 지역에서는 연평균 빈도가 높은 경향을 보였고, 경상남도 및 전라남도 남쪽 해안지역부터 내륙 일부 지역 (남해, 진주, 합천, 순천 등)은 연평균 빈도가 낮은 경향을 보였다.

지역별 홍수 위험일의 최대 지속 기간을 Fig. 10에 나타냈다. 전 지점 홍수 위험일의 최대 지속 기간 평균은 23.58일이다. 최대 지속 기간이 가장 긴 지역은 통영 (85일)이고 최대 지속 기간이 가장 짧은 지역은 순천 (4일)이다. 최대 지속 기간이 가장 긴 지역과 가장 짧은 지역은 81일의 차이를 보였다. 그 외 거제 (84일), 서울 (63일), 부안 (55일), 서산 (44일) 등에서 최대 지속 기간이 길게 나타났고, 경상남도과 전라남도 지역에서는 홍수 위험의 최대 지속 기간이 짧은 경향을 보였다.

홍수 위험의 연별 평균 빈도수 (Fig. 9)와 최대 지속 기간 (Fig. 10) 분포가 비슷한 형태를 보여, 대체적으로 연별 평균 빈도수와 최대 지속 기간이 높고 긴 지역인 서울과 가장 낮고 짧은 지역인 순천 두 지점을 비교하여 살펴보았다 (그림 미제시). 서울과 순천에서는 분석 기간인 39년 동안 각각 9개, 8개 해에서 홍수 위험이 발생하였다. 하지만 서울은 그 중 7개의 해에서 지속 기간이 10일 이상이었고 순천은 8개의 모든 해에서 지속 기간이 10일 미만이었다. 이로서 연별 빈도수와 최대 지속 기간 분포에서 높은 값을 나타냈던 서울은 매년 홍수 위험이 발생하는 것은 아니지만, 홍수 위험이 한 번 발생하면 길게 지속되는 특징을 가진다는 것을 확인하였다.



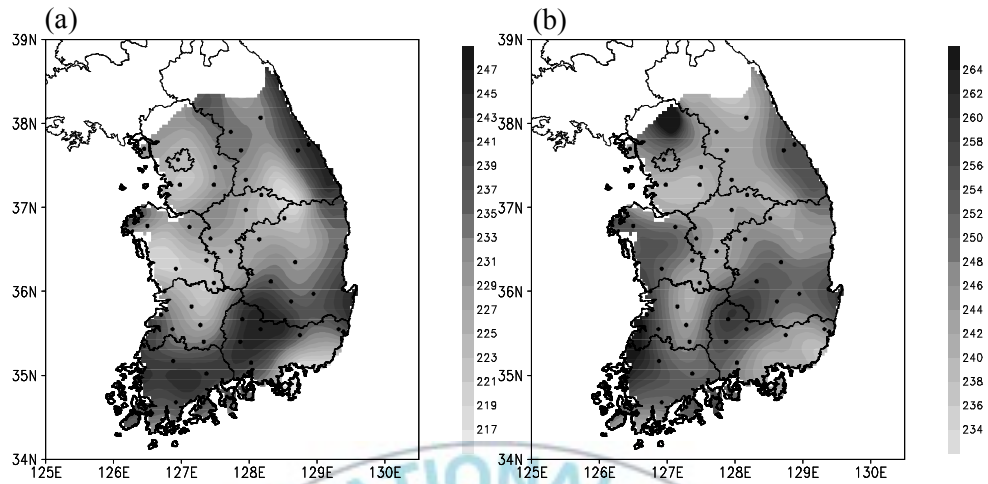


Fig. 7. Same as figure 3, but for the mean (a) onset date, and (b) end date of the flood risk duration. The points indicate station locations. The values denote Julian day.

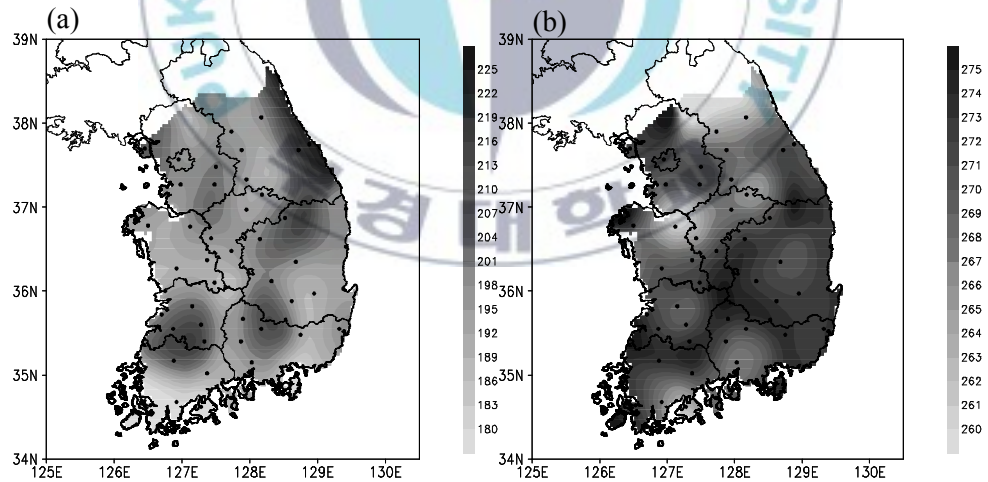


Fig. 8. Same as figure 7, but for the (a) onset date, and (b) end date of the flood risk duration.

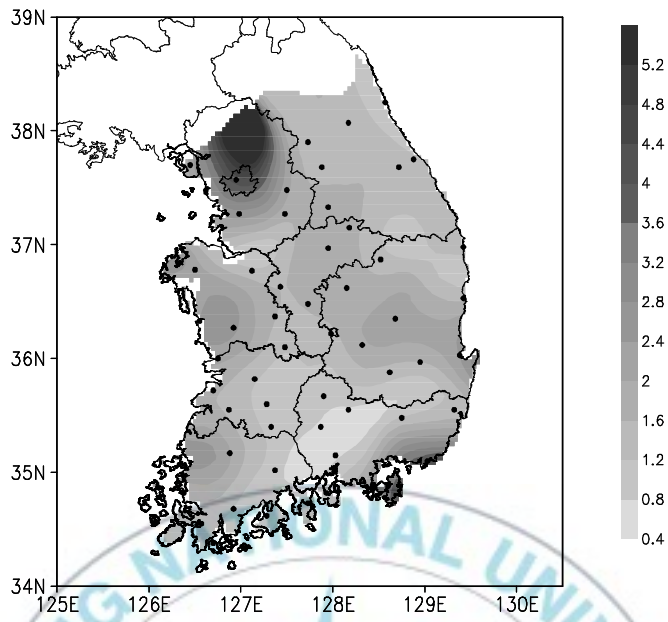


Fig. 9. Same as figure 8, but for the yearly mean frequency of the flood risk days.

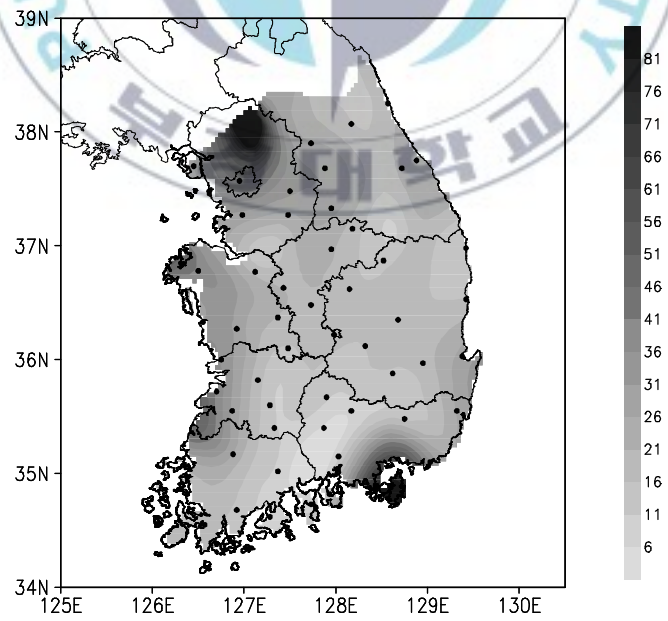


Fig. 10. Same as figure 9, but for the maximum of the flood risk duration.

4. 군집별 특성

4.1 홍수 위험 지역 구분

홍수 위험이 전 지점에서 상이한 특징을 가지므로 비슷한 지역끼리 묶어 홍수 위험 지역을 구분하여 분석하기 위해 SPSS (Statistical Package for Social Science)를 이용한 군집 분석을 시행하였다. 본 연구에서 사용된 군집 분석 방법은 계층적 군집 분석 방법 중 하나인 between-groups linkage method이다. 이는 유사성이 가까운 순서대로 개체들을 묶어 군집화하는 방법으로, 개체의 유사성을 측정하여 가장 유사한 개체끼리 순차적으로 묶어 군집을 나눈다. 이 때, 유사성의 척도는 각 개체간의 Pearson correlation coefficient를 계산함으로써 측정한다. 적절한 군집의 수는 지점들을 군집화 할 때, 군집 수에 따른 pearson correlation coefficient의 변화가 급격하게 감소하기 시작하는 구간으로 선정한다. 분석에서 사용된 자료는 1974년부터 2012년까지 (39년) 57개 지점의 월별 최대 FI 자료이다. 군집 수가 6개에서 5개로 감소할 때 pearson correlation coefficient의 변화가 크므로, 본 연구에서는 6개를 적정 군집수로 선정하였다 (Fig. 11). 한국을 6개의 홍수 위험 지역 군집으로 나누면 Fig.12에서 나타나듯 북동해안 지역 (G1), 북부 지역 (G2), 중부 지역 (G3), 남동해안 지역 (G4), 남부 지역 (G5), 남해안 지역 (G6)으로

구분되었다 (Table 3).

나뉜 군집들의 홍수 위험 분석 이전에, 각 지역들의 강수 특성을 살펴보았다 (Fig. 13). 전체 군집에서는 전형적인 연중 한국의 강수 패턴인 7, 8월에 강수가 집중되는 분포가 확인되었다. 그런데, 지역에 따라 강수의 양이나 피크의 형태 등은 조금씩 다르게 나타났다. 피크의 형태에 따라 살펴보면, G1, G4에서는 7월 보다 8월에 강수가 더 많아서 연중 일 강수 분포가 두 개의 봉으로 나타나며, 8월 봉이 가장 높게 나타났다 (Fig. 13a, d). G3, G5, G6에서는 이와 반대로 8월보다 7월에 강수가 더 집중되어 연중 일 강수 분포가 마찬가지로 두 개의 봉으로 나타나지만 7월 봉이 가장 높게 나타났다 (Fig. 13c, e, f). 예외적으로, G2에서는 7월 강수가 8월 강수보다 눈에 띄게 높아 연중 일 강수 분포가 7월에 가장 높은, 거의 한 개 봉의 형태로 나타났다 (Fig. 13b). 여름철 강수량에서는 전체 군집 중 G4가 다른 지역에 비해 강수량이 적게 나타나는 특징이 확인 되었다 (Fig. 13d).

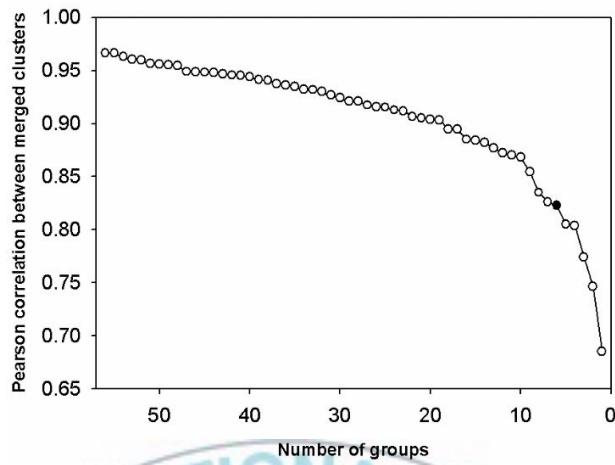


Fig. 11. Variation of Pearson correlation coefficient between merged clusters. The number of cluster is from 56 to 1.

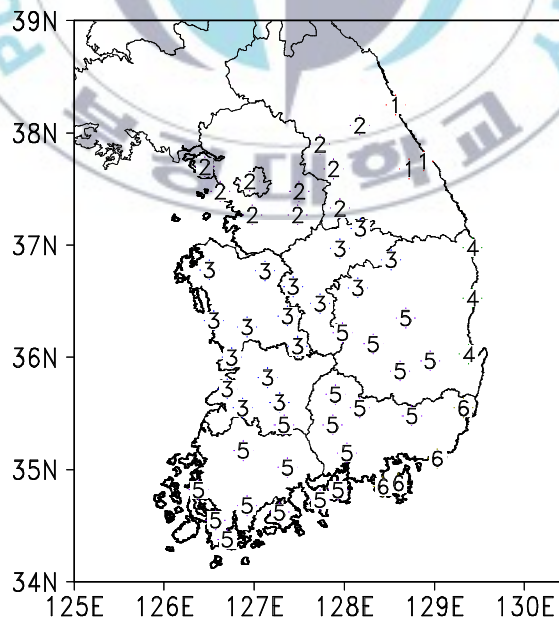


Fig. 12. Spatial distribution of 6 clusters grouped along monthly maximum FI.

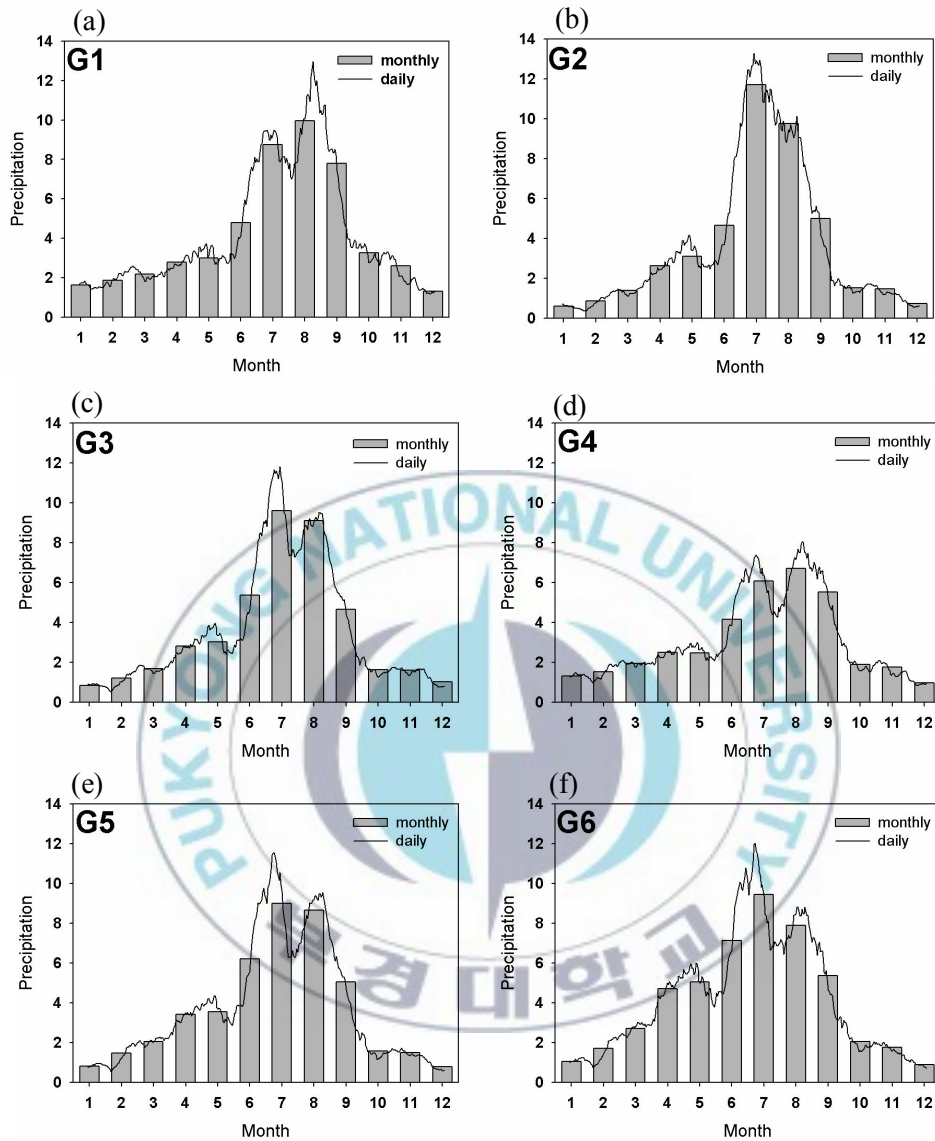


Fig. 13. The variation of 15-day running mean (line) of the averaged precipitation per date from 1974 to 2012 along the group of (a) G1, (b) G2, (c) G3, (d) G4, (e) G5, and (f) G6. The bars denote monthly mean of the daily precipitation.

Table 3. Cluster classification results along the monthly maximum FI.

Group	Location
G1	NE coast
G2	North region
G3	Middle region
G4	SE coast
G5	South region
G6	South coast



4.2 연 최대 홍수 위험도의 변화

홍수 위험도의 변화를 살펴보기 위해 군집별 FI의 연 최대값 변화를 시계열로 나타냈다 (Fig. 14). 연 최대 홍수 위험도는 모든 군집에서 증가 경향을 나타냈다. 특히 G2에서 증가 경향이 0.38 decade^{-1} 로 가장 크고 G6에서 0.15 decade^{-1} 로 증가 경향이 가장 작았다. G2는 서울이 포함된 군집으로서 앞서 서울 지역에서 FI 최대값 증가 경향, 빈도, 최대 지속 기간이 모두 높은 값이 나타났던 것이 확인되었다. 또한 G1은 증가 경향은 작은 편이지만 연별 최대값이 2002년에 가장 큰 값을 기록하였다. 또한 대체적으로 서해안 지역의 (G2, G3, G5)이 동해안 지역 (G1, G4, G6)보다 연 최대 홍수 위험도의 증가 경향이 크게 나타나는 특징을 보였다.

군집별 최대 홍수 위험도를 Table 4에 정리하였다. 가장 큰 홍수 위험도 (3.36)는 G1에서 2002년 8월 31일에 나타났다. 이는 Table 2와 논의된 것과 같이 태풍 ‘루사’로 인한 영향이다. G2에서는 1990년 9월 11일에 홍수 위험도 (3.13)가 가장 높게 나타났으며 이 때는 중부지방 집중호우로 인해 한강 대홍수가 있었던 시기이다. G3 그룹에서는 1987년 7월 31일에 큰 홍수 위험도 (2.09)가 나타났는데, 이는 1987년 7~8월 400 mm 이상의 호우로 인한 영향으로 확인되었다. G4에서는 1998년 9월 30일에 큰 홍수 위험도 (2.49)가 나타났다. 이는 태풍 ‘예니’로 인한 집중호우의 영향이다. G5에서는 2003년 9월 12일에 큰 홍수 위험도

(1.96)를 기록하였는데 이는 2003년 9월 12일에 있었던 태풍 ‘매미’의 영향이다. G6에서는 1991년 8월 23일에 큰 홍수 위험도 (2.70)를 기록하였다. 이는 1991년 8월 22~26일의 태풍 ‘글래디스’의 영향으로 인한 것이다.



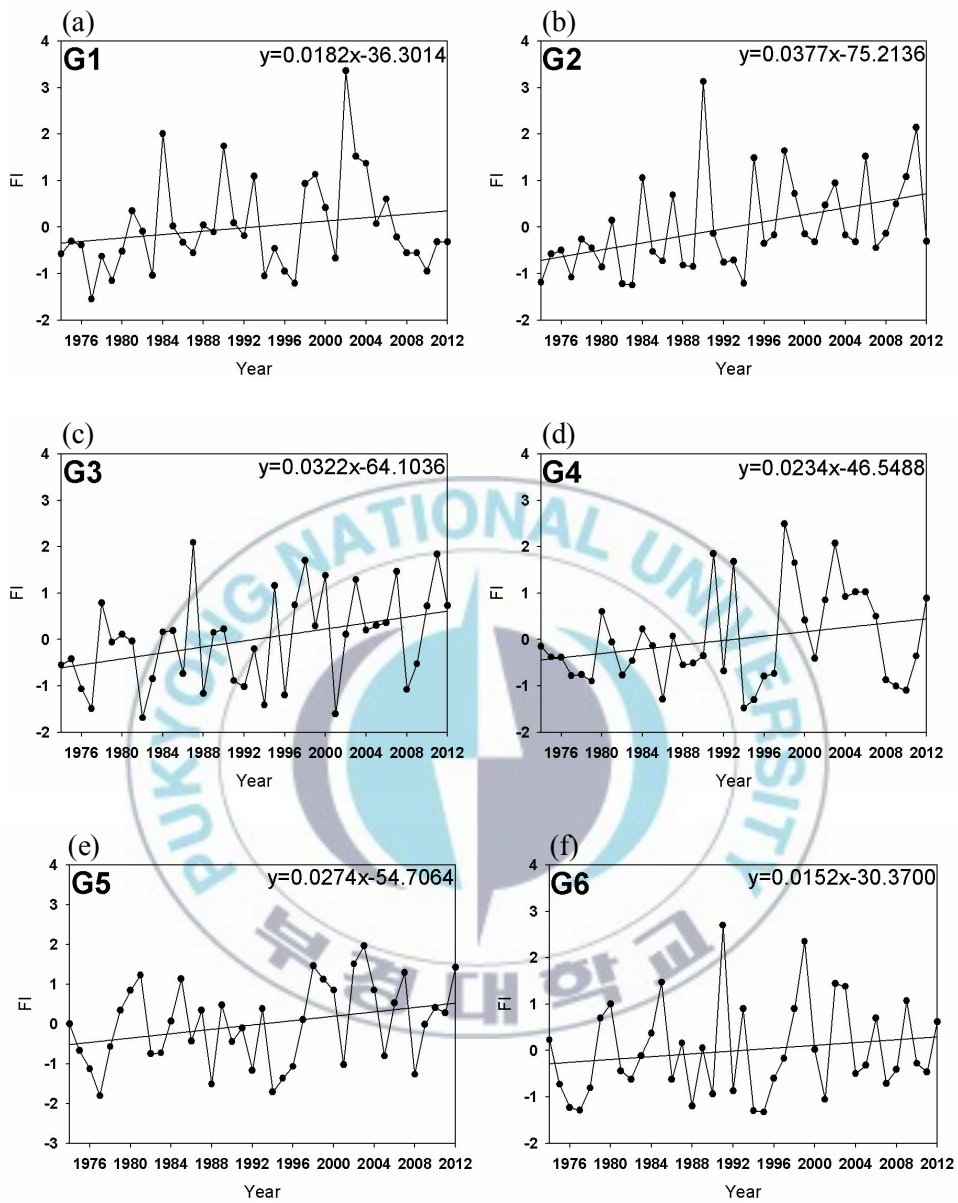


Fig. 14. Same as figure 4, but for (a) G1, (b) G2, (c) G3, (d) G4, (e) G5, and (f) G6.

Table 4. The maximum FI and its date for each group.

G1		G2		G3		G4		G5		G6	
Date	FI	Date	FI	Date	FI	Date	FI	Date	FI	Date	FI
2002/8/31	3.36	1990/9/11	3.13	1987/8/31	2.09	1998/9/30	2.49	2003/9/12	1.96	1991/8/23	2.70



4.3 홍수 위험일의 시공간 분포

전 군집에서는 총 351회 홍수 위험이 발생하였다. 군집별 지점 평균 홍수 위험 빈도 (Fig. 15)는 G6에서 27.8회로 가장 높은 빈도를 보였고, G5에서 1.1회로 가장 낮은 빈도를 보였다.

군집별 6개 그룹의 일별 FI 값과 57개 지점 전체 FI의 일평균 값으로 Kim et al. (2011)의 방법을 사용하여 Fig. 5a의 홍수 위험이 발생한 기간의 홍수 위험도 지도를 완성하였다 (Fig. 16). 1974~1983년은 홍수 위험일이 없었으므로 본 지도는 1984~2012년간 홍수 위험 기간 (Fig. 5a)인 6월 24일~10월 29일의 홍수 위험일 분포를 나타냈다. 1987년에는 G3에서, 1990년에는 G2에서 홍수 위험이 두드러지게 나타났다. 1991년에는 G4와 G6에서 홍수 위험도가 높게 나왔는데 이는 태풍 ‘글래디스’의 영향으로 추정된다. 1999년에는 G6에서 홍수 위험도가 높고 오래 지속되었다. 2011년에는 중부지방 집중호우의 영향으로 인해 북부와 중부 지역인 G2, G3에서 홍수 위험도가 높게 지속되었다. 또한 2003년에는 전 지점 평균 홍수 위험도가 가장 높게 오래 지속되었으며 대부분 그룹에서 홍수 위험도가 높게 나타났다. G6에서 높은 홍수 위험 빈도 (Fig. 15)는 홍수 위험 지도에서 1999년에 홍수 위험이 길게 지속된 영향이 컸던 것을 알 수 있다. G5에서 낮은 홍수 위험 빈도 (Fig. 15)를 나타낸 것 또한 홍수 위험 지도에서 G5의 빈도가 매우 적은 것을 통해서 알 수 있다. 이와 같이 홍수 위험도 지도를 이용하면 홍수위험이

언제, 어디에서 발생했으며 얼마만큼 지속되었는지에 대한 정보를 알 수 있다.

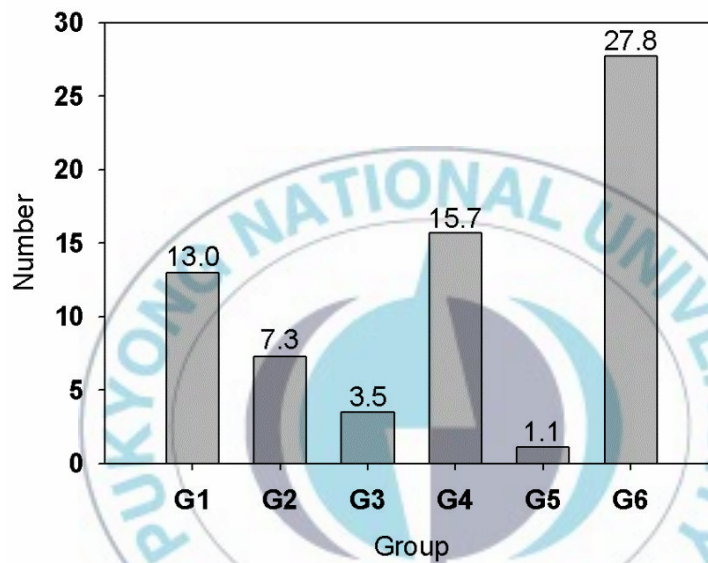


Fig. 15. Histogram of mean flood risk frequency of the flood risk days per station averaged from 1974 to 2012 in each group.

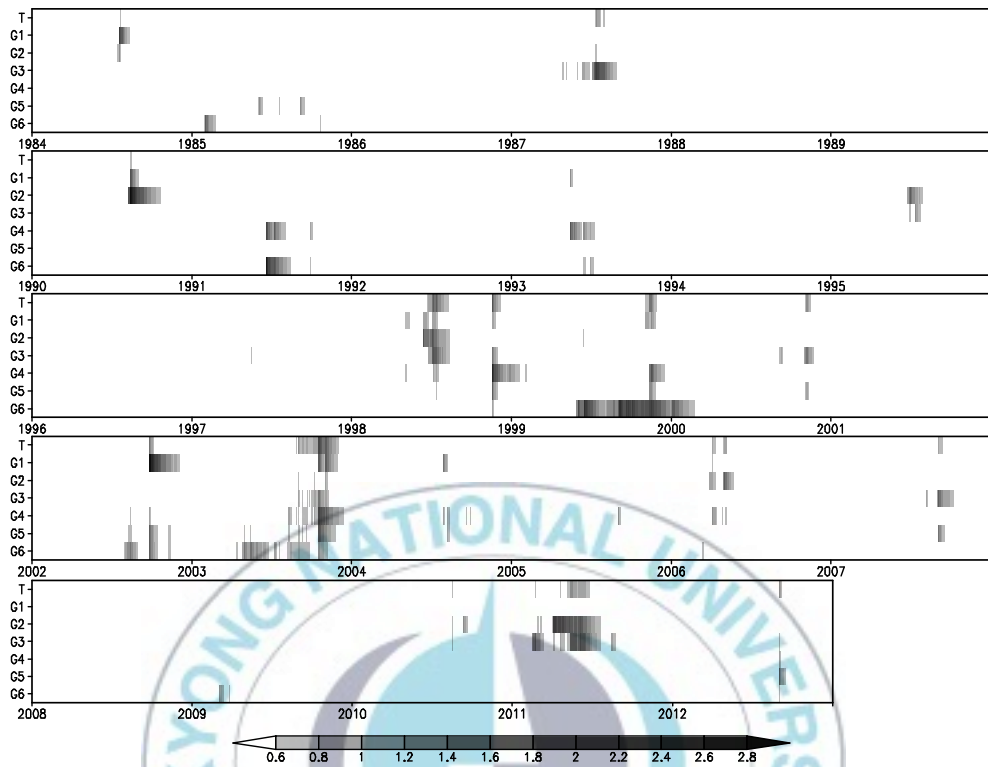


Fig. 16. Time-series of the FI of 6 groups (G1, G2, G3, G4, G5, and G6) and total (T) averaged per date on 57 stations from 1984 to 2012.

5. 요약 및 토의

전 지점 홍수 위험도 특징 분석에서 연 최대 홍수 위험도의 변화는 증가하는 경향을 보였고 상위 5개 해의 지점별 홍수 위험도 순위에서는 2002년 강릉이 가장 높았다. 각 해 별 홍수 위험도가 높았던 원인은 태풍 및 집중호우였으며, 이 때의 홍수 사상은 홍수 통제소의 기록에서 확인되었다. 홍수 위험도 최댓값 변화 경향은 전 지역이 증가 추세이고, 증가 경향은 서울이 가장 컸고 밀양이 가장 작았다. 홍수 위험은 6월 24일~10월 29일에 발생하였다. 또한 홍수 위험은 시작일과 관계없이 대부분 15일 이내로 지속되며 1~2일의 지속 기간에서 가장 높은 발생 빈도수를 보였다. 홍수 위험의 공간분포에서 평균 시종일은 부산에서 가장 빨리 시작되고 강릉에서 가장 늦게 시작되며, 수원에서 가장 빨리 종료되고 부안에서 가장 늦게 종료되었다. 홍수 위험의 최초 시작일과 최종 종료일은 통영, 여수, 해남에서 가장 일찍 시작되었고 강릉에서 가장 늦게 시작되었으며, 청주에서 가장 일찍 끝나고 대관령, 서울 등 35개의 지역에서 동일한 날짜에 가장 늦게 끝났다. 홍수 위험일 연평균 빈도와 최대 지속 기간은 비슷한 분포를 보였으며, 대체적으로 서울, 통영에서 높고 순천에서 낮은 분포를 나타냈다.

홍수 위험 지역은 6개의 군집으로 분류되었고, 군집별 강수량은

G4에서 상대적으로 여름철 강수량이 적고, G2에서 7월 강수량이 눈에 띄게 높았다. 연 최대 홍수 위험도의 변화는 전체 군집에서 모두 증가하였다. 그 중, G2에서 가장 높고, G6에서 가장 낮은 증가 경향을 보였다. 대체적으로 서해안에 위치한 군집이 동해안에 위치한 군집보다 높은 증가 경향을 나타냈다. 군집별 최대 홍수 위험도 역시 태풍이나 집중호우의 영향을 받았던 시기에, 영향 지역의 군집에서 값이 높게 나왔다. 군집별 홍수 위험의 시공간 분포 중, 군집별 홍수 위험 발생 지점 평균 빈도가 G6에서 가장 높고, G5에서 가장 낮게 나타났다. 홍수 위험 지도에서는 1991년에는 G4, G6에서 홍수 위험이 발생하였고, 1999년에는 G6에서 홍수 위험일이 가장 길게 지속되었으며, 2003년에는 전 지역에 홍수 위험이 골고루 분포하는 등 어디 지역에서 언제 홍수 위험이 있었는지 확인할 수 있었다.

이처럼 강수량을 이용하여 FI를 산출한다면 강 유역뿐만 아니라 홍수 통제소에서 예보할 수 없는 지역인 강 유역 밖의 기상 관측 지점에서도 홍수의 위험도를 어느 정도 알 수 있다. 그러나 FI는 강수량이 급격히 많아지는 날 값이 급작스럽게 증가하여 홍수 위험시 높은 수치를 나타내지만, 그 이후 오래 지속된다는 단점이 있다. 또한 FI를 이용한 홍수 위험도는 순간적으로 내리는 시간단위의 강수가 아닌 일 단위로 누적되어 계산되기 때문에, 같은 방법으로 급격히 비가 내리는 시기에 시간단위의 누적 강수량 (변희룡 등, 2013)으로 홍수

위험도를 구할 수 있는 방법이 개발된다면 보다 더 정확하고 빠른 홍수
위험 정보 생성에 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.



References

- Byun, H. R. and D. K. Lee, 2002: Defining three rainy seasons and the hydrological summer monsoon in Korea using available water resources index. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **80** (1), 33-44.
- Byun, H. R. and J. S. Chung, 1998: Quantified diagnosis of flood possibility by using effective precipitation index. *Journal of Korea Water Resources Association*, **31**(6), 657-665.
- Byun, H. R., Y. J. Kim, and S. B. Oh, 2013: Calculation of the hourly summed available water resources indexes that assess the concentration of precipitation hourly. *Korea Intellectual Property Office*, 10-2013-0134922.
- Choi, H. and K. W. Nam, 2005: Real-time flash flood evaluation by GIS module at mountainous area. *Korean Journal of Remote Sensing*, **21**(4), 317-327.
- Hong, J. H. and J. H. Hwang, 2006: Analysis on the change of regional vulnerability to flood. *Korea Environment Institute*, **5**(4), 1-18.
- Jang, D. W., 2010: Development and application of risk management index for flood prevention alternatives. Unpublished Ph. D. Dissertation, Inha University, Incheon.

- Jung, S. W., J. W. Moon, M. S. Han, and D. H. Kim, 2002: The storm characteristics analysis of the Nakdong-river flood of the August 2002. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 1384-1387.
- Kim, B. S., Y. H. Bae, J. S. Park, and K. T. Kim, 2008: Flood runoff simulation using radar rainfall and distributed hydrologic model in un-gauged basin ; Imjin river basin. *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies*, **11(3)**, 52-67.
- Kim, D. W., H. R. Byun, K. S. Choi, and S. B. Oh, 2011: A spatiotemporal analysis of historical droughts in Korea, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50(9)**, 1895-1912.
DOI:10.1175/2011JAMC2664.1.
- Kim, G. Y., 2005: Interactive strategies between disaster management and urban planning for the damage mitigation of urban floods. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, **53(9)**, 13-20.
- Kim, K. T., J. H. Kim, J. S. Park, and I. K. Byun, 2007: Analysis of flood inundation using WMS and RADARSAT SAR image. *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies*, **10(3)**, 1-12.
- Kim, S. H., M. J. Park, S. M. Kang, and S. J. Kim, 2006: Modeling rainfall - runoff simulation system of JinWie watershed using GIS based HEC-HMS model.

Journal of Korean Association of Geographic Information Studies, **9(4)**, 119-128.

Kim, T. H., K. Y. Han, and W. H. Cho, 2011: Vulnerability analysis in the Nakdong river basin for the utilization of flood risk mapping. *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies*, **14(3)**, 203-222.

Kim, Y. S, 2002: The causes and measures of flood damage in 2002. *Magazine of Korea Water Resources Association*, **35(6)**, 11-19.

Lee, G. S., D. K. Koh, and W. G. Kim, 2004: Efficient construction method of topographic data for flood mapping using digital map. *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies*, **7(1)**, 52-61.

Lee, G. S., Y. W. Jang, and Y. W. Choi, 2013: The analysis of flood propagation characteristics using recursive call algorithm. *Journal of Korean Spatial Information Society*, **21(5)**, 63-72.

Lee, Y. K., S. C. Park, and K. S. Lee, 2003: Flood runoff analysis of small river basin using geographic information system. *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies*, **6(1)**, 24-36.

Ministry of Construction and Transportation, Han River Flood Control Office,
Nakdong River Flood Control Office, Geum River Flood Control Office,

Youngsan River Flood Control Office, 2005: 30-years progress of the Korean flood control. *Ministry of Construction and Transportation*, 667pp.

Park, D. H., J. H. Ahn, and Y. J. Choi, 2011: Correlation between storm characteristics and flood damage, *Journal of Korean Wetlands Society*, **13(2)**, 219-229.

Park, J. H., B. S. Kang, G. S. Lee, and E. R. Lee, 2007: Flood runoff analysis using radar rainfall and Vflo model for Namgang dam watershed. *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies*, **10(3)**, 13-21.

Park, J. H. and Y. T. Hur, 2009: Flood runoff simulation using physical based distributed model for Imjin-river basin. *Journal of Korea Water Resources Association*, **42(1)**, 51-60.

Song, Y. S., P. S. Lee, and Y. Yeon, G. H. Kim, 2012: Flood risk mapping using 3D virtual reality based on geo-spatial information. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, **20(4)**, 97-104.