韓國水資源學會論文集
第46卷 第1號·2013年 1月
pp. 47~58

JKWRA Vol. 46, No. 1, 47-58
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2013.46.1.47
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

국지홍수 심도예측을 위한 새로운 홍수지수의 개발

Development of a New Flood Index for Local Flood Severity Predictions

조 덕 준* / 손 인 욱** / 최 현 일***

Jo, Deok Jun / Son, In Ook / Choi, Hyun Il

Abstract

Recently, an increase in the occurrence of sudden local flooding of great volume and short duration due to global climate changes has occasioned the significant danger and loss of life and property in Korea as well as most parts of the world. Such a local flood that usually occurs as the result of intense rainfall over small regions rises quite quickly with little or no advance warning time to prevent flood damage. To prevent the local flood damage, it is important to quickly predict the flood severity for flood events exceeding a threshold discharge that may cause the flood damage for inland areas. The aim of this study is to develop the NFI (New Flood Index) measuring the severity of floods in small ungauged catchments for use in local flood predictions by the regression analysis between the NFI and rainfall patterns. Flood runoff hydrographs are generated from a rainfall-runoff model using the annual maximum rainfall series of long-term observations for the two study catchments. The flood events above a threshold assumed as the 2-year return period discharge are targeted to estimate the NFI obtained by the geometric mean of the three relative severity factors, such as the flood magnitude ratio, the rising curve gradient, and the flooding duration time. The regression results show that the 3-hour maximum rainfall depths have the highest relationships with the NFI. It is expected that the best-fit regression equation between the NFI and rainfall characteristics can provide the basic database of the preliminary information for predicting the local flood severity in small ungauged catchments.

Keywords : flood index, flood severity, threshold discharge, regression analysis, ungauged catchment

요 지

최근 들어 전 세계적인 기후변화 양상에 따라 짧은 시간에 큰 유출양상을 보이는 국지적 돌발성 홍수의 발생이 증가하는 추세이며 이로 인한 인명 및 재산의 피해가 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 발생하고 있다. 이와 같이 소규모 지역의 집중된 강우로 발생하는 국지적 돌발성 홍수는 빠른 수문반응으로 인하여 홍수피해를 예방하기 위한 예·경보 시간이 부족한 것이 특징이다. 국지 홍수로 인한 피해를 막기 위해서는 한계유량을 초과하여 제내지의 피해발생 가능성이 있는 홍수사상에 대한 심도예측이 중요하다. 본 논문의 목적은 소규모 유역에서 발생하는 홍수사상의 심각성 정도를 정량화할 수 있는 새로운 홍수지수(New Flood Index)를 개발하고 새로운 홍수지수와 강우특성과의 회귀분석을 통하여 국지 돌발홍수 예측에 적용하고자 하였다. 2개의 시범유역들에 대한 홍수유출수문곡선은 장기간 관측된 연최대치계열 실측 강우자료를 이용하여 강우-유출 모형을 통하여 산정하였다. 새로운 홍수지수 NFI는 2년 빈도 홍수량으로 가정된 한계유량을 초과하는 홍수사상에 대하여, 첨두홍수량비, 상승부경사, 초과홍수지속시간 등 홍수 유출수문곡선의 특성을 이용한 3가지 상대심도계

* 동서대학교 건축토목공학부 조교수 (e-mail: water21c@gdsu.dongseo.ac.kr)
Assistant Professor, Department of Architecture & Civil Engineering, Dongseo University
** 영남대학교 건설시스템공학과 석사과정 (e-mail: ook0520@hanmail.net)
Master Course, Department of Civil Engineering, Yeungnam University
*** 교신저자, 영남대학교 건설시스템공학과 부교수 (e-mail: hichoi@ynu.ac.kr, Tel: 053-810-2413)
Corresponding Author, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yeungnam University

수의 기하학적 평균값으로 산정하였다. 분석결과 3시간 최대강우가 새로운 홍수지수 NFI와 가장 높은 상관관계가 있음을 확인하였다. 새로운 홍수지수와 강우특성과의 회귀분석을 통해 얻어진 최적 관계식은 소규모 미계측 유역에서의 국지적 홍수 심도예측을 위한 예비정보의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 홍수지수, 홍수심도, 한계유량, 회귀분석, 미계측유역

1. 서 론

최근 전 세계적으로 기후변화의 영향으로 강우의 집중화 현상에 따라 발생하는 국지적 홍수에 의한 피해가 증가하고 있는 추세이다. 돌발성 국지홍수를 발생시키는 중요 요소인 강우의 집중화 현상은 더 이상 기상이변이 아닌 기상특성으로 자리를 잡아가고 있다. 국지홍수 피해의 예로 1998년 지리산 일원에서 발생한 국지적인 집중호우로 인해 사망 68명, 실종 27명의 피해가 발생하였고(NDMI, 1998), 2005년 7월 11일부터 20일까지 강원도 지역에서 발생한 집중호우시의 하천범람 및 제방붕괴로 인해 하천변 주택, 농경지, 도로 유실 등의 많은 피해를 남겼으며(NEMA, 2007), 2010년 7월 16일부터 18일 사이에 경남 합천군의 집중호우로 하천범람은 물론 인접 농경지 유실·매몰 등의 피해와 122세대 280명의 이재민을 발생시켰다(NEMA, 2010). 이와 같이 소유역에서 집중호우에 의한 국지홍수는 이제 우리나라의 빈번한 재해 중의 하나가 되었으며 현재 대유역의 홍수피해를 예방하기 위하여 구조적 및 비구조적 예방대책이 세워지고 있지만 소유역의 국지성 홍수에 관한 연구는 아직 초보단계에 머물고 있는 실정이다(Kim et al., 2007; Kim and Kim, 2008). 기 구축된 홍수통제소에 의한 홍수예·경보 시스템이 적용되는 본류구간에서의 피해는 최근 감소하는 추세를 보이나 중·소하천에서의 피해는 증가하고 있으므로, 최근 생활수준의 향상 및 인간 활동영역의 확대로 인한 소하천 및 산악지역에서의 홍수대응책이 필요한 시점이다.

국지홍수 연구에 있어 시공간적 특성을 지닌 강우를 이용한 기상학적 관점에서의 연구들이 선행되어져 왔으며 최근에는 레이더 강우를 활용한 돌발홍수 예·경보에 관한 연구들도 이뤄지고 있다. 또한 수문학적 관점에서 과거 홍수사상의 유출량자료 등을 이용하여 지역별 홍수특성을 이해하고자 하는 연구들이 수행되어 왔다. 유럽연합(EU)에서는 돌발홍수의 수문기상학적 발생과정을 이해하기 위해 HYDRATE (Hydrometeorological Data Resources and Technology for Effective Flash Flood Forecasting Project)를 설립하여 돌발홍수의 예측능력을 향상시키고 있으며, 미국에서는 1970년대 중반부터 돌발홍수능(Flash Flood Guidance; FFG)을 기반으로 한 국립기상청(National Weather Service)의 돌발홍수 예·경보가 이뤄지고 있다. 이와 관련하여 Sweeney (1992)는 돌발홍수능의 표준적인 산정기준을 제시하였고, Fread (1992)는 돌발홍수능 산정에 필요한 한계유출량(threshold runoff) 계산기법에 대한 연구를 수행하였다. Carpenter and Georgakakos (1993)는 GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) 기반의 소유역 한계유출량 산정을 위한 알고리즘을 개발하였고, Carpenter et al. (1999)은 돌발홍수능 산정시에 중요한 한계유출량 산정방안의 4가지 방법에 대한 특성을 분석하였다. 국내에서는 Kim et al. (2000)이 평창강 유역을 중심으로 한계유출량을 4가지 방법으로 각각 산정하고 실제 홍수시의 관측유량과 비교하여 평가하였고, Kim et al. (2002)은 미국 국립기상청(NWS)에서 운영하고 있는 돌발홍수 예·경보시스템의 국내 평창강 유역에 대한 적용성을 검토하였다. Choi and Lee (2006)는 지형기후학적 단위유량도로부터 미계측 소유역의 한계유출량을 산정하였다. Bae and Kim (2007)은 미국의 돌발홍수예경보 시스템을 바탕으로 한국형 돌발홍수예경보 시스템을 개발하기 위한 이론적 배경을 제시하였다.

수문학적 관점에서의 또 다른 연구로는 과거의 홍수사상에 대한 유출수문곡선의 특성을 분석하여 돌발홍수의 심도를 평가하고자, Bhaskar et al. (2000)은 미국 켄터키 동부지방에서 발생하였던 30개의 돌발홍수사상에 대하여 유출수문곡선의 상승부경사, 홍수량비, 홍수반응시간을 이용하여 돌발홍수지수를 산정하였다. Bhaskar et al. (2000)이 제시한 방법을 적용하여 Jung (2000)은 보청천 유역의 홍수사상에 대해 돌발홍수지수를 산정한 바 있으며, Kim and Kim (2008)는 한강유역의 과거 101개의 홍수사상에 대한 돌발홍수지수를 산정하였다. Wi et al. (2008)은 한강 및 설마천 유역의 실측자료를 이용하여 기존의 돌발홍수지수를 보완한 종합홍수지수를 통해 홍수의 심도를 유역별로 상대평가하고자 하였다. 돌발홍수지수의 미계측 소유역 적용에 대한 연구로는, 유역의 실측강우에 대한 유출곡선 및 돌발홍수지수를 산정하여 강우와 유출특성

과의 관계를 분석하였고(Kim et al., 2009), 과거 강우자료를 이용하여 각 빈도별 지속시간별 확률강우량에 대한 유출수문곡선을 바탕으로 돌발홍수지수를 산정하고 돌발홍수지수-지속시간-빈도 관계곡선을 제시하였으며(Kim et al., 2010), 모의된 유출수문곡선의 홍수반응시간을 제외한 상승부경사와 홍수량비를 이용하여 산정한 돌발홍수지수를 기존 3개의 상대심도로 산정한 돌발홍수지수와 비교하였다(Kim et al., 2012).

돌발홍수능 시스템은 유역의 토양수분 상태를 고려하며 지점별, 소유역별 한계유출량을 산정할 수 있고 최근의 지역적 상황을 고려할 수 있는 장점이 있다. 하지만 우리나라의 경우 대부분의 소유역은 실측된 유출량자료가 없는 미계측 지역이므로 단위첨두유량 산정에 어려움이 있고, 유역의 토양수분상태를 모의하기에는 자료가 부족하며, 과정이 번거롭고 동일 대상유역에 대한 한계유출량도 계산하는 각각의 방법에 따라 큰 오차를 보인다. 따라서 본 논문에서는 돌발홍수능 산정 시스템에 비해 소규모 유역의 국지적 돌발성 홍수의 심각성을 정량화하기에 적합하며 산정과정이 비교적 간편한 유출수문곡선을 이용한 돌발홍수지수 산정방법을 바탕으로 새로운 홍수지수를 산정하고자 하였다. 이를 위하여 장기간 시강우 측정자료를 보유한 강우관측소가 주변에 위치한 2개의 미계측 소유역인 옥곡천과 칠성천 유역을 시범유역으로 선정하고, 과거 37개년(1973~2009)의 실측 강우량을 바탕으로 유출수문곡선을 산정한 후, 홍수량의 빈도해석을 통해 산정한 한계유량(threshold discharge)을 초과하여 제내지의 피해발생 가능성이 있는 국지적 홍수사상들의 심도를 정량적으로 분석하고자 하였다. 따라서 한계유량을 초과하는 연최대치계열 유출수문곡선에 대하여 산정한 새로운 홍수지수와 강우특성과의 회귀분석을 통해 유역별 최적 강우-홍수지수 회귀관계식을 제시하여, 짧은 지속시간과 집중적인 강우에 의해 발생하는 빠른 수문반응으로 인해 홍수피해를 대비할 수 있는 시간이 부족한 소유역에서 예측된 강우로부터 쉽고 신속하게 국지성 홍수를 예측할 수 있는 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 대상유역의 선정 및 수문분석

대하천 유역의 경우는 하천의 주요지점에 수위계를 설치하여 수위-유량관계로부터 유출수문곡선을 계산하고 있으며 돌발홍수에 관한 연구도 선행된 바 있다(Kim and Kim, 2008). 그러나 미계측 소유역에서 발생하는 국지적 홍수특성에 대한 연구는 미흡한 실정이기에 본 논문에서는 미계측 소유역을 대상으로 발생하는 국지홍수의 심도를 정량화할 수 있는 새로운 홍수지수를 개발하고자 하였다. 미계측 소유역의 경우 홍수지수를 산정하기 위해 필요한 실측된 유출수문곡선이 존재하지 않기 때문에 장기간 실측 강우자료를 바탕으로 강우-유출모형을 사용하여 유출수문곡선을 모의하여야 하므로, 유역과 근접한 곳에 자료의 결측기간이 비교적 적으며 최소 30개년 이상의 실측 강우자료를 보유하고 있는 강우관측소가 위치한 유역을 시범유역으로 선정하였다. 본 연구에서는 위와 같은 기준을 바탕으로 옥곡천과 칠성천 유역을 시범유역으로 선정하였으며, 각 대상유역들에 대한 개황은 다음과 같다.

2.1 유역의 개황

낙동강 수계에 속한 옥곡천은 지방하천인 미천의 제1지류로서, 유역은 동경 128° 44′~128° 47′, 북위 36° 20′~36° 25′ 사이에 위치하고 있다. 옥곡천은 의성군 점곡면 황룡리 구사골 인근에서 발원하여 북쪽으로 유하하다 미천의 좌안에 합류된다. 유역의 평균고도 및 평균경사는 각각 EL. 248.50 m, 18.62%로 유역의 대부분이 산지로 형성되어 있다. 전체적인 유역의 형상은 하천이 유역의 중앙부를 관통하여 전체적으로 가늘고 긴 직사각형의 수지상이며, 유역면적은 23.48 km^2이고, 유로연장은 11.29 km이다(Gyeonsangbuk Province, 2009).

칠성천은 형산강 국가하천 구간의 제1지류인 지방2급 하천으로, 유역은 동경 129°18′~129°23′, 북위 35°55′~35°59′ 사이에 위치하고 있으며, 운제산(EL.481.4m)에서 발원하여 북측으로 유하하다가 국가하천인 형산강에 합류된다. 대부분 임야와 농경지로 이루어져 있는 칠성천 유역의 평균고도는 EL.106.57 m, 평균경사는 17.33%, 유역면적은 28.60 km^2, 유로연장은 9.06km로, 유로연장에 비해 유역평균 폭이 비교적 넓은 부채형의 형태를 나타낸다(Gyeonsangbuk Province, 2004).

두 유역의 위치 및 형상은 강우관측소 위치와 함께 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 강우자료의 수집

시범유역에 대한 강우-유출수문특성을 분석하고, 연최대치계열의 유출특성을 파악하기 위해서는 장기간의 강우관측기록이 필요하다. 이를 위하여 수문분석에 통계적 유의성을 확보할 수 있는 비교적 장기간(30개년 이상)의 관측자료를 보유하고 있고, 자료의 신뢰성이 확보되는 것으로 판단되는 관측소를 선정하여 37개년(1973~2009)간의 시강우 자료를 수집하였다. 옥곡천은 유역의 인근에

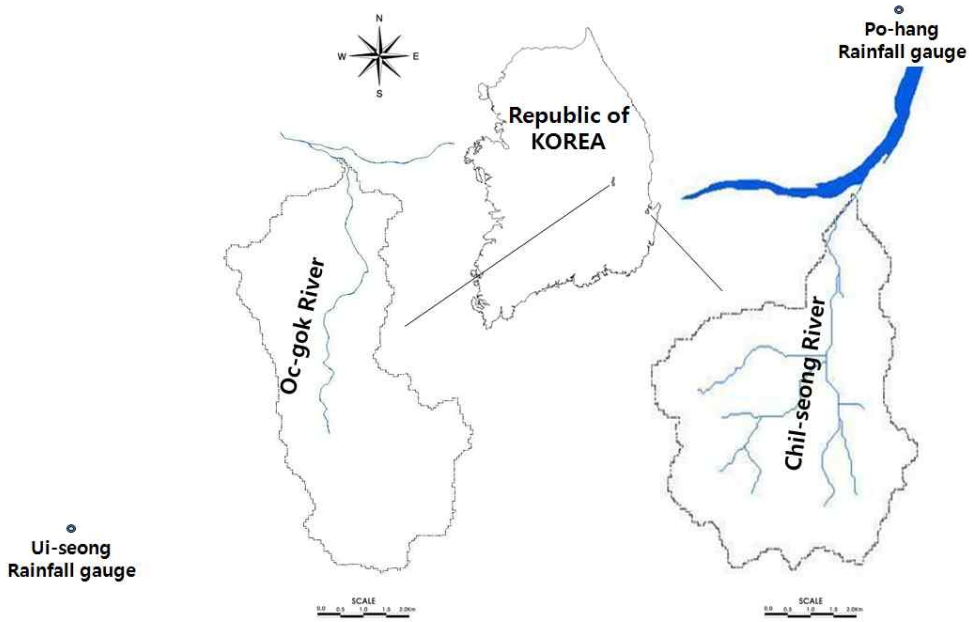

Fig 1. Basin Maps and Rainfall Gauge Station Locations for the Two Study Catchments

Table 1. Information of Rainfall Gauge Stations for the Two Study Catchments

유역명	관측소명	위 치			관측 개시일	관할청
		소재지	동경	북위		
옥곡천	의성관측소	경북 의성군 의성읍 원당리 6-4	128°41′	36°41′	1973.01.	기상청
칠성천	포항관측소	경상북도 포항시 송도동 311-8	127°23′	36°02′	1943.01.	기상청

위치한 의성관측소를 선택하였으며, 칠성천은 포항관측소의 강우자료를 이용하였다. 두 유역의 해당관측소 제원은 다음 Table 1과 같다.

2.3 연최대치계열 홍수수문곡선 산정

본 논문에서 선정한 시범유역들은 미계측 소유역으로써 실측된 유량이 없기 때문에 실측된 37개년의 시강우자료와 HEC-HMS모형(USACE, 2000)를 이용하여 연최대치계열의 홍수사상 유출수문곡선을 산정하였다. 모형에서 유효우량은 NRCS(Natural Resources Conservation Service) 곡선지수(Curve Number; CN)법을, 단위도는 Clark의 유역추적법을 사용하였다. AMC (Antecedent Moisture Condition)-III 조건하에서 NRCS CN의 평균값으로 옥곡천 유역은 86.5, 그리고 칠성천 유역의 경우 90.7로 산정되었다. 도달시간의 경우, 두 유역 모두 Kirpich, Rziha, Kerby, Kraven-I, Kraven-II 공식들에 의해 산정된 결과들 중 Kraven-II의 결과를 적용하여 옥곡천은 1.14 hr, 그리고 칠성천은 0.89 hr로 산정되었다. Clark 단위도의 저류상수의 경우, 두 유역에서 Clark, Linsley, Russel, Sabol 공식들에 의해 산정된 결과들 중 Sabol 공식에 의해 각각 옥곡천 유역은 1.15 hr, 그리고 칠성천 유역은 0.73 hr로 산정되었다. 이상의 HEC-HMS모형 매개변수들은 옥곡천(Gyeonsangbuk Province, 2009) 및 칠성천(Gyeonsangbuk Province, 2004) 하천기본계획보고서의 결과를 이용하였다. 2개 시범유역의 연최대치계열 실측강우자료에 의한 유출수문곡선 산정결과, 첨두홍수량은 옥곡천 유역에서는 2006년 7월 26일의 171.2 m^3/s, 그리고 칠성천 유역에서는 1998년 9월 30일의 577.6 m^3/s로 각각 최대가 산정되었다. 1973년부터 2009년까지 37개년 연최대치계열 강우량에 대한 첨두홍수량 및 첨두발생시간은 옥곡천 유역은 Table 2에, 그리고 칠성천 유역의 결과는 Table 3에 정리되어 있다.

2.4 한계유량 결정

본 논문에서는 집중호우 발생시 제내지의 피해발생 가능성이 있는 홍수사상의 선별을 위해 한계유량(threshold

Table 2. Summary of Runoff and Indexing Characteristics along with Rainfall Data for Annual Maximum Flood Events during 1973-2009 in the Oc-gok River Basin

No.	Flood Runoff Characteristics					Indexing Parameters							Rainfall Characteristics					
	Flood Event Date (mm/dd/yy) (1)	Flood Peak Discharge $Q_p(m^3/s)$ (2)	Time to Flooding Start T_s(hr) (3)	Time to Flooding Peak T_p(hr) (4)	Time to Flooding End T_e(hr) (5)	Flood Magnitude Ratio M (6)	Rising Curve Gradient K(mm/hr^2) (7)	Flood Duration Time D(hr) (8)	Relative Severity Factor RM (9)	Relative Severity Factor RK (10)	Relative Severity Factor RD (11)	New Flood Index NFI (12)	Max. 1-hour Rainfall R_{1h}(mm) (13)	Max. 2-hour Rainfall R_{2h}(mm) (14)	Max. 3-hour Rainfall R_{3h}(mm) (15)	Max. 4-hour Rainfall R_{4h}(mm) (16)	Max. 5-hour Rainfall R_{5h}(mm) (17)	Max. 6-hour Rainfall R_{6h}(mm) (17)
1	07/30/73	88.4	3.73	4.0	4.18	1.04	1.95	0.44	0.04	0.24	0.10	0.10	33.0	48.0	52.0	63.5	67.5	67.5
2	08/23/74	79.9	-	4.0	-	0.94	-	-	-	-	-	-	22.0	36.5	45.5	60.0	69.5	73.0
3	08/06/75	50.9	-	3.0	-	0.60	-	-	-	-	-	-	31.0	37.0	39.0	39.6	40.1	40.1
4	08/06/76	79.0	-	2.0	-	0.93	-	-	-	-	-	-	47.5	52.5	54.0	55.0	75.5	87.0
5	08/07/77	99.8	11.98	13.0	13.34	1.17	2.23	1.36	0.17	0.27	0.32	0.25	33.0	43.0	51.0	55.5	60.0	65.5
6	08/26/78	76.5	-	3.0	-	0.90	-	-	-	-	-	-	31.5	32.1	32.1	32.1	32.1	32.1
7	06/25/79	34.0	-	3.0	-	0.40	-	-	-	-	-	-	16.5	29.0	32.5	36.0	38.0	40.5
8	05/25/80	53.0	-	5.0	-	0.62	-	-	-	-	-	-	21.8	29.5	38.3	45.2	47.8	49.2
9	08/30/81	60.1	-	2.0	-	0.71	-	-	-	-	-	-	33.0	45.1	48.1	49.3	49.3	49.3
10	08/14/82	99.5	6.49	7.0	7.59	1.17	4.34	1.10	0.17	0.53	0.26	0.28	26.0	45.0	60.5	66.0	72.0	77.0
11	07/22/83	102.3	10.32	11.0	11.60	1.20	3.91	1.28	0.20	0.48	0.30	0.31	34.5	48.1	55.1	57.6	68.1	76.1
12	09/02/84	144.6	5.68	8.0	9.97	1.70	3.93	4.30	0.69	0.48	1.00	0.69	33.0	52.0	83.0	103.0	115.0	125.0
13	08/17/85	65.5	-	5.0	-	0.77	-	-	-	-	-	-	17.0	31.5	37.5	52.0	65.7	70.7
14	06/25/86	86.1	16.88	17.0	17.04	1.01	1.44	0.15	0.01	0.18	0.04	0.04	24.0	33.3	49.3	57.3	60.3	66.8
15	06/07/87	101.5	3.59	4.0	4.98	1.19	6.24	1.38	0.19	0.77	0.32	0.36	27.0	46.0	63.5	74.0	80.2	85.2
16	07/15/88	51.1	-	3.0	-	0.60	-	-	-	-	-	-	19.1	34.1	43.6	45.1	51.6	53.6
17	08/29/89	107.8	3.51	4.0	5.03	1.27	7.11	1.52	0.26	0.87	0.35	0.43	35.0	56.0	67.0	74.0	77.3	78.3
18	09/11/90	80.7	-	5.0	-	0.95	-	-	-	-	-	-	30.0	51.4	55.6	59.0	60.0	61.2
19	09/27/91	55.0	-	4.0	-	0.65	-	-	-	-	-	-	22.0	34.0	42.0	47.0	51.0	59.0
20	07/15/92	110.9	1.40	2.0	2.54	1.30	6.62	1.14	0.30	0.81	0.26	0.40	58.0	66.0	68.0	69.0	69.0	69.0
21	08/13/93	77.4	-	9.0	-	0.91	-	-	-	-	-	-	29.0	42.0	47.0	49.0	52.0	53.0
22	08/29/94	72.4	-	3.0	-	0.85	-	-	-	-	-	-	26.5	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0
23	08/25/95	70.1	-	3.0	-	0.82	-	-	-	-	-	-	35.5	42.0	48.0	50.5	51.0	51.0
24	06/16/96	34.8	-	4.0	-	0.41	-	-	-	-	-	-	13.0	24.0	32.0	35.5	40.5	42.5
25	07/16/97	71.4	-	3.0	-	0.84	-	-	-	-	-	-	23.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
26	08/15/98	138.7	6.06	8.0	9.59	1.63	4.24	3.53	0.62	0.52	0.82	0.64	31.0	51.0	79.5	93.0	99.5	102.5
27	06/16/99	56.6	-	6.0	-	0.67	-	-	-	-	-	-	13.0	24.0	34.5	47.0	57.0	64.0
28	08/24/00	112.2	6.89	8.0	8.92	1.32	3.75	2.03	0.32	0.46	0.47	0.41	24.5	47.0	67.5	77.0	80.0	84.0
29	09/09/01	64.7	-	9.0	-	0.76	-	-	-	-	-	-	23.5	31.0	35.5	38.5	43.5	49.0
30	09/06/02	119.8	0.81	2.0	3.47	1.41	4.47	2.66	0.40	0.55	0.62	0.52	40.5	67.0	67.0	67.0	67.0	67.0
31	08/21/03	73.7	-	5.0	-	0.87	-	-	-	-	-	-	25.0	46.0	48.5	54.0	57.5	60.0
32	08/18/04	103.1	3.66	4.0	5.35	1.21	8.16	1.69	0.21	1.00	0.39	0.44	29.0	56.5	65.0	71.5	82.0	90.5
33	08/02/05	115.9	9.36	11.0	11.70	1.36	2.89	2.34	0.36	0.35	0.54	0.41	29.5	58.0	65.0	79.5	87.0	94.5
34	07/26/06	171.2	3.28	5.0	6.74	2.01	7.67	3.47	1.00	0.94	0.81	0.91	38.5	70.5	94.5	116.5	126.5	127.5
35	09/14/07	70.9	-	4.0	-	0.83	-	-	-	-	-	-	26.5	52.0	55.0	58.0	64.0	65.5
36	08/12/08	73.0	-	2.0	-	0.86	-	-	-	-	-	-	39.5	46.7	50.7	50.7	50.7	50.7
37	07/21/09	73.6	-	2.0	-	0.87	-	-	-	-	-	-	28.0	50.5	56.5	60.5	62.5	63.0
Average		84.5	6.24	5.3	8.14	0.99	4.60	1.89	0.33	0.56	0.44	0.41	28.9	43.5	51.8	57.8	62.8	66.0
Maximum		171.2	16.88	17.0	17.04	2.01	8.16	4.30	1.00	1.00	1.00	0.91	58.0	70.5	94.5	116.5	126.5	127.5
Minimum		34.0	0.81	2.0	2.54	0.40	1.44	0.15	0.01	0.18	0.04	0.04	13.0	24.0	25.0	25.0	25.0	25.0

Table 3. Summary of Runoff and Indexing Characteristics along with Rainfall Data for Annual Maximum Flood Events during 1973-2009 in the Chil-seong River Basin

No.	Flood Runoff Characteristics					Indexing Parameters							Rainfall Characteristics					
	Flood Event Date (mm/dd/yy) (1)	Flood Peak Discharge $Q_p(m^3/s)$ (2)	Time to Flooding Start T_s(hr) (3)	Time to Flooding Peak T_p(hr) (4)	Time to Flooding End T_e(hr) (5)	Flood Magnitude Ratio M (6)	Rising Curve Gradient K(mm/hr^2) (7)	Flood Duration Time D(hr) (8)	Relative Severity Factor RM (9)	Relative Severity Factor RK (10)	Relative Severity Factor RD (11)	New Flood Index NFI (12)	Max. 1-hour Rainfall R_{1h}(mm) (13)	Max. 2-hour Rainfall R_{2h}(mm) (14)	Max. 3-hour Rainfall R_{3h}(mm) (15)	Max. 4-hour Rainfall R_{4h}(mm) (16)	Max. 5-hour Rainfall R_{5h}(mm) (17)	Max. 6-hour Rainfall R_{6h}(mm) (17)
1	07/30/73	119.8	-	3.0	-	1.00	-	-	-	-	-	-	38.8	50.7	51.8	52.4	52.4	52.4
2	07/07/74	125.4	17.96	19.0	19.12	1.05	0.79	1.17	0.01	0.04	0.14	0.04	20.6	33.9	45.9	55.5	65.6	76.3
3	07/06/75	73.1	-	20.0	-	0.61	-	-	-	-	-	-	14	22.9	27.2	34.2	41.7	45.9
4	08/03/76	141.7	7.49	8.0	8.33	1.18	6.49	0.85	0.05	0.33	0.10	0.11	34.3	47.6	57	60.9	61.1	61.1
5	09/12/77	100.5	-	8.0	-	0.84	-	-	-	-	-	-	24	34.3	46.5	49.5	50.2	51.9
6	08/02/78	54.3	-	3.0	-	0.45	-	-	-	-	-	-	19.3	26.2	28.5	31	31.2	31.2
7	08/16/79	101.8	-	4.0	-	0.85	-	-	-	-	-	-	33.1	41	60.4	68.3	71.4	71.7
8	09/11/80	155.5	10.84	12.0	12.91	1.30	4.67	2.08	0.08	0.24	0.24	0.16	25.6	42	53.8	65.2	75.5	84.4
9	08/30/81	144.7	8.63	9.0	10.05	1.21	10.30	1.42	0.05	0.52	0.16	0.17	30.1	44	54.4	60.4	70.7	83.7
10	06/03/82	92.2	-	3.0	-	0.77	-	-	-	-	-	-	35.2	36.8	38.8	40.4	40.4	40.4
11	08/29/83	122.2	4.98	5.0	5.26	1.02	14.58	0.28	0.00	0.73	0.03	0.05	34.3	52	53.7	53.8	53.8	53.8
12	09/19/84	73.9	-	4.0	-	0.62	-	-	-	-	-	-	16.4	26	33	37	41.5	42
13	08/16/85	107.1	-	3.0	-	0.89	-	-	-	-	-	-	24	43.1	49.4	52.3	54.1	54.9
14	06/25/86	126.6	20.63	21.0	21.13	1.06	2.76	0.49	0.01	0.14	0.06	0.05	22.5	35.5	47.3	50.8	59.7	62.5
15	08/31/87	303.5	10.02	13.0	14.48	2.53	9.45	4.46	0.40	0.48	0.52	0.46	42.5	82	117.5	142.8	153.3	160.5
16	09/28/88	97.1	-	8.0	-	0.81	-	-	-	-	-	-	18.2	32.7	43.5	45.8	47.5	48.3
17	08/30/89	179.2	4.93	6.0	6.57	1.49	8.52	1.64	0.13	0.43	0.19	0.22	43.4	57.5	64.3	64.9	67.9	69.4
18	07/16/90	99.4	-	2.0	-	0.83	-	-	-	-	-	-	26.8	41.5	47.9	48	48	48
19	08/23/91	178.7	25.20	27.0	28.48	1.49	5.00	3.28	0.13	0.25	0.38	0.23	24.6	47.4	59.9	76.8	89	99.6
20	08/25/92	66.3	-	7.0	-	0.55	-	-	-	-	-	-	13.1	21.6	27.8	33.5	43.8	50
21	08/10/93	178.3	9.41	13.0	14.33	1.49	2.49	4.92	0.13	0.13	0.57	0.21	24.5	46.5	67	87.8	106.2	120
22	05/25/94	69.5	-	10.0	-	0.58	-	-	-	-	-	-	15.7	22.2	29.6	34.9	40.2	43.6
23	08/30/95	123.8	14.51	15.0	15.48	1.03	1.20	0.97	0.01	0.06	0.11	0.04	22.9	35.5	54.6	65.8	70.6	73.3
24	06/17/96	66.0	-	4.0	-	0.55	-	-	-	-	-	-	19.1	28.4	39.6	42.5	45.3	47.5
25	06/26/97	108.6	-	11.0	-	0.91	-	-	-	-	-	-	18.4	30.7	43.3	48.1	56.6	59.9
26	09/30/98	577.6	23.27	29.0	31.92	4.81	12.25	8.64	1.00	0.62	1.00	0.85	75.5	147.9	222.6	258.5	289.9	317
27	07/23/99	111.4	-	16.0	-	0.93	-	-	-	-	-	-	20.3	35.5	40.5	45.2	46.5	46.6
28	09/16/00	140.0	23.39	24.0	24.43	1.17	5.06	1.04	0.04	0.25	0.12	0.11	21	40	52	58.5	66.3	69.3
29	09/09/01	223.9	21.74	23.0	24.41	1.87	12.61	2.68	0.23	0.63	0.31	0.35	38.1	64.6	81.1	86.9	90.7	92.8
30	08/31/02	117.0	-	23.0	-	0.98	-	-	-	-	-	-	19.5	32.5	48	63	78.5	88.5
31	06/19/03	210.1	9.83	12.0	13.40	1.75	6.36	3.57	0.20	0.32	0.41	0.30	28.5	56.5	80.5	94	106.5	118
32	08/14/04	214.1	1.52	3.0	3.75	1.78	9.73	2.24	0.21	0.49	0.26	0.30	50.5	76.4	87.9	92.4	92.9	93
33	08/25/05	342.3	8.28	10.0	11.18	2.85	19.86	2.89	0.49	1.00	0.33	0.55	89	93	109.5	113	123	133.5
34	07/10/06	123.9	8.89	9.0	9.12	1.03	5.35	0.23	0.01	0.27	0.03	0.04	22.5	35.5	48	57.5	72	80.5
35	09/16/07	195.4	7.68	9.0	9.54	1.63	8.74	1.87	0.16	0.44	0.22	0.25	50.5	56.5	62	63	72.5	81
36	08/08/08	89.4	-	2.0	-	0.75	-	-	-	-	-	-	34.5	38.5	39.5	39.5	39.5	39.5
37	07/15/09	86.3	-	2.0	-	0.72	-	-	-	-	-	-	28	40.5	42	43.5	45.5	47.5
Average		147.0	12.59	10.8	14.94	1.23	7.70	2.35	0.18	0.39	0.27	0.24	30.3	45.9	58.3	65.3	71.9	76.7
Maximum		577.6	25.20	29.0	31.92	4.81	19.86	8.64	1.00	1.00	1.00	0.85	89.0	147.9	222.6	258.5	289.9	317.0
Minimum		54.3	1.52	2.0	3.75	0.45	0.79	0.23	0.00	0.04	0.03	0.04	13.1	21.6	27.2	31.0	31.2	31.2

discharge)을 Henderson (1961)이 제시한 초기 홍수를 유발하는 조건인 강턱유량(bankfull discharge)의 개념을 이용하고자 하였다. 강턱유량보다 큰 홍수량은 제내지보다 높은 홍수위를 형성하여 제내지에 침수피해를 유발할 수 있다. 강턱유량은 자연하천에서 실제 홍수터 표고까지의 강턱을 월류하지 않고 흐르는 유량을 말한다(Williams, 1978). 이러한 강턱유량은 현장자료를 이용하여 결정할 수 있으나, 현장에서 강턱유량이나 수심의 구별이 어려운 관계로 특정 재현기간별 유량으로 산정하는 연구들이 많이 수행되어 왔다(Dury, 1961; Williams, 1978; Leopold, 1994). 이에 따라 Hey (1994)와 Riley (1998)는 2년 빈도의 유량을 강턱유량으로 제시하였으며, 국내에서도 Lee and Lee (2003)는 섬강의 문막 수위관측소 자료를 분석하여 1.8년 빈도 유량을 강턱유량으로, Im et al. (2006)이 2년 빈도의 유량을 강턱유량으로 제시하였다. 따라서 본 논문에서는 2년 빈도 홍수유량을 강턱유량으로 가정하고 이를 제내지의 피해발생 가능성이 있는 한계유량으로 결정하였다. 각 시범유역별 37개년(1973~2009)의 실측 강우사상으로부터 모의된 연최대치계열 홍수량의 빈도분석을 통하여 2년 빈도 홍수량을 산정한 결과, 옥곡천은 85 m^3/sec, 칠성천은 120 m^3/sec이 각각 한계유량으로 결정되었다.

3. 새로운 홍수지수 산정

본 논문에서는 Bhaskar et al. (2000)의 돌발홍수지수 산정방법을 참고하여, 2.4절에서 정의한 한계유량을 초과하여 발생하는 홍수사상에 대한 새로운 홍수지수(New Flood Index; NFI)를 산정함으로써 제내지의 침수피해를 유발할 가능성이 있는 홍수사상에 대한 심도를 정량화하고자 하였다. Bhaskar et al. (2000)은 상승부경사 K, 홍수량비 M, 그리고 홍수반응시간 T 등 실측 홍수유출수문곡선의 특성을 정량화한 3가지 상대심도계수를 바탕으로 돌발홍수지수를 제시한 반면, 본 논문에서는 새로운 홍수지수(NFI)의 산정을 위해 한계유량을 초과하여 발생하는 홍수유출수문곡선을 대상으로, 한계유량에 대한 첨두홍수량비 M, 한계유량 발생시점부터 첨두홍수량 발생시간까지의 수문곡선 상승부경사 K, 한계유량을 초과하여 발생하는 홍수지속시간 D 등의 3가지 심도계수를 고려하였다. 새로운 홍수지수 산정방법의 자세한 사항은 다음과 같다.

3.1 첨두홍수량비

기존의 돌발홍수지수 산정법에 사용했던 홍수량비는 장기간의 평균유출량에 대한 각 홍수사상 첨두홍수량의 비를 의미한다. 그러나 미계측 소유역에서는 장기유출량 실측값이 없으며, 또한 국내 여건상 소유역이 아니라 할지라도 실제 장기유출량을 실측하고 있는 유역은 많지 않은 실정으로, 장기유출모형을 사용하여 모의되는 결과는 적용되는 매개변수에 따라 다르게 산정되므로 결과의 불확실성을 불러올 수 있다. 따라서 본 논문에서는 Eq. (1)과 같이, 한계유량 Q_b에 대한 첨두유량 Q_p의 비를 이용한 홍수심도 M을 산정하였다.

$$M = \frac{Q_p}{Q_b} \tag{1}$$

첨두홍수량비 M값은 유역의 침수위험 가능성이 있는 한계유량에 대한 발생한 홍수의 상대비를 의미한다. 즉, 첨두홍수량비 M값이 증가하면 제내지의 침수를 유발할 가능성이 있는 큰 규모의 홍수량을 의미하며, 이로 인한 홍수피해가 증가될 가능성을 나타낸다. 따라서 한계유량보다 큰 홍수가 발생할 경우에 해당 유역의 홍수피해를 유발할 수 있는 잠재위험성이 있는 것으로 보아, 첨두홍수량비 M값이 1보다 큰 홍수사상을 새로운 홍수지수 산정대상 홍수로 선별하였다. 37개년의 분석기간동안 첨두홍수량비 M값의 산정결과를 살펴보면, 옥곡천 유역에서는 15개의 연최대치계열 홍수량이 선별되어 Table 2의(6)칸에 나타난 바와 같이 1.01에서 2.01의 범위를 보이며, 칠성천의 경우 19개의 홍수사상에 대해 Table 3의(6)칸에 표시한 바와 같이 1.02에서 4.81의 범위를 나타내었다.

3.2 상승부경사

많은 양의 홍수가 급격히 발생하는 국지홍수의 특성을 반영하기 위하여, Bhaskar et al. (2000)은 홍수수문곡선의 상승부를 지수함수로 가정하여 다음 Eq. (2)와 같이 상승부경사 K를 산정하였다.

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

여기서, Q_0는 상승부 곡선의 초기유량값이고, Q_t는 첨두홍수 발생시간 t근처에서의 홍수량값이다. 모의된 수문곡선에서는 초기유량 Q_0가 0의 값을 갖게 되므로, 지수함수를 수문곡선 상승부에 적용하기에는 어려움이 있다. 또한 하나의 강우사상에서 여러 개의 첨두유량이 연속하여 발생하는 경우, 상승부 곡선의 초기값 결정 시 임의성과 불확실성이 따른다. 따라서 본 논문에서는 한계유량 Q_b 이상으로 홍수가 발생할 때의 시간 T_s을 상승부 기울기의

계산 시작시점으로 결정하여 첨두홍수량 Q_p 발생시점 T_p까지의 평균기울기를 K(mm/hr^2)값으로 산정하였다.

$$K = \frac{(Q_p - Q_b)/A}{T_p - T_s} \quad (3)$$

유역의 배수면적 A를 고려한 비유량에 대해 계산된 K 값은 옥곡천 유역의 경우 Table 2의(7)칸에서와 같이 1.44 에서 8.16 mm/hr^{2}의 범위를 나타내며, 칠성천 유역에서는 Table 3의(7)칸에 나타난 바와 같이 0.79 에서 19.86 mm/hr^{2}까지의 값으로 분석되었다. 침수피해를 유발할 가능성이 있는 홍수발생시, 빠른 시간내 급격히 홍수량이 증가하는 국지홍수의 대표적인 특성을 나타내는 상승부경사 K값이 증가하면 제내지 침수를 유발하는 홍수량이 빠른 속도로 증가하게 되어 홍수피해가 발생할 가능성이 커지게 된다.

3.3 초과홍수지속시간

Bhaskar et al. (2000)이 제시한 돌발홍수지수 산정과정에서는 홍수사상의 시작에서부터 첨두홍수량이 발생하는 시점까지의 홍수반응시간 T를 사용하였다. 그러나 홍수유출수문곡선의 짧은 홍수반응시간이 유출속도가 빠른 홍수와 관련이 있으므로, 상승부 경사 K와 홍수반응시간 T는 유사한 특성을 중복적으로 나타낼 수 있다(Kim et al., 2012). 따라서 본 논문에서는 홍수반응시간 T를 대신하여 한계유량을 초과하는 홍수의 지속시간인 초과홍수지속시간 D를 제시하여 새로운 심도계수로 선정하고자 하였다. Eq. (4)에 의해 한계유량이상의 홍수발생 시작시간 T_s로부터 종료시간 T_e까지의 시간으로 산정된 초과홍수지속시간 D가 길어지면 제내지의 침수를 유발할 수 있는 한계유량을 초과하는 홍수가 오랜시간 지속됨을 의미하며, 이로 인해 홍수피해가 증가될 가능성이 커지게 된다.

$$D = T_e - T_s \quad (4)$$

37개년 분석 기간동안 각 시범유역에서의 초과홍수지속시간 D는 옥곡천의 경우 0.15~4.30 hr (Table 2의(8)칸 참조), 칠성천은 0.23~8.64 hr (Table 3의(8)칸 참조) 범위의 값을 나타내었다.

3.4 새로운 홍수지수

이상에서 선정한 첨두홍수량비 M, 상승부경사 K, 초과홍수지속시간 D 등 3개의 심도계수는 각각 다른 단위와 범위의 값으로 산정되기 때문에, 다음 Eq. (5)와 같이 최소-최대 표준화기법을 사용하여 0~1 범위의 상대심도 계수값으로 변환하였다.

$$RS_i = \frac{S_i - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \quad (5)$$

여기서 S_i는 i번째 홍수사상에서의 심도계수 M, K, D를 나타내며, $S_{\max}$는 각 심도계수의 37개년 분석기간의 기왕최대값이고, $S_{\min}$는 한계유량에서의 최소값으로 각각 $M_{\min}$=1, $K_{\min}$ = 0 mm/hr^2, $T_{\min}$ = 0 hr이다. RS_i는 0~1 범위로 표준화된 상대심도계수 RM, RK, RD이며, 옥곡천 및 칠성천 유역의 3개 상대심도 산정결과는 각각 Tables 2 ans 3의 (9), (10), (11)칸에 나타내었다.

이와 같이 표준화된 3개의 상대심도계수 RM, RK, RD는 종합적인 홍수심도를 나타내기 위하여 하나의 지수로 나타낼 필요가 있다. 본 논문에서는 3개 상대심도계수의 기하학적 평균을 취하여 다음 Eq. (6)과 같이 새로운 홍수지수 NFI를 산정하였다.

$$NFI = RM^{\alpha} \times RK^{\beta} \times RD^{\gamma} \quad (6)$$

여기서 α, β, γ는 3개 상대심도계수에 대한 가중계수로서, 본 논문에서는 동일한 가중치로 가정하여 1/3로 적용하였다. 이와 같이 산정된 NFI가 의미하는 것은 홍수수문곡선의 특성 중, 첨두홍수량은 물론 침수피해 유발 가능성이 있는 홍수사상의 상승속도 및 지속시간을 종합적으로 고려하여 발생하는 국지홍수의 상대적인 홍수심도를 정량화한 것이다. NFI는 한계유량 발생시의 최소값 0으로부터 기왕최대 홍수시 발생가능한 심도인 최대값 1의 범위로 산정된다. NFI값은 기왕최대 홍수에 대한 상대적인 홍수심도를 나타내는 것으로 값이 클수록 심각한 잠재적 홍수피해를 유발할 수 있는 국지홍수를 예상할 수 있다. 옥곡천 및 칠성천 유역의 NFI값 산정결과는 각각 Tables 2 and 3의(12)칸에 나타내었다.

4. 강우특성-홍수지수 상관관계 분석

홍수유출수문곡선은 강우에 대한 유역의 반응결과로서, 강우특성에 대한 유역의 지형적인 특성을 반영한다. 또한, 특정한 유역에서의 서로 다른 강우특성은 다른 유출결과를 초래하므로, 한 유역의 다양한 유출결과를 강우특성으로부터 분석할 수 있다. 따라서 강우와 유출의 관계분석은 소유역에서 짧은 시간에 발생하는 국지적인 홍수를 예측하고 돌발성 홍수의 특성을 이해하는데 중요하다. 본 논문에서는 한계유량을 초과하여 발생했던 과거의

홍수사상에 대하여 산정된 새로운 홍수지수 *NFI*와 1~6시간동안 각각의 지속시간별 최대 강우량과의 상관분석을 통하여 각 시범유역별 강우특성과 홍수특성간의 관계를 분석하고자 하였으며, 각 시범유역을 대표할 수 있는 홍수지수-강우 회귀관계식을 제시하고자 하였다. Tables 2 and 3에는 각각 옥곡천과 칠성천 유역에 대하여 산정된 새로운 홍수지수 *NFI*를 포함하여 강우특성 및 홍수유출 특성이 정리되어 있다. Figs. 2 and 3에는 각각 옥곡천과 칠성천 유역에서의 새로운 홍수지수 *NFI*와 각각 1시간, 2시간, 3시간, 4시간, 5시간, 6시간 최대 강우량(R_{1h}, R_{2h}, R_{3h}, R_{4h}, R_{5h}, R_{6h})과의 관계를 나타내는 그래프가 도시되어 있으며, Table 4에는 옥곡천 및 칠성천 유역에서의 새로운 홍수지수 *NFI*와 각 강우특성과의 상관관계식을 정리하였다. 옥곡천 유역에서의 새로운 홍수지수 *NFI*와 강우특성과의 상관관계를 살펴보면 0.110에서 0.936 범위의 상관도를 보이며, 3시간 최대강우량 R_{3h}과의 상관성이

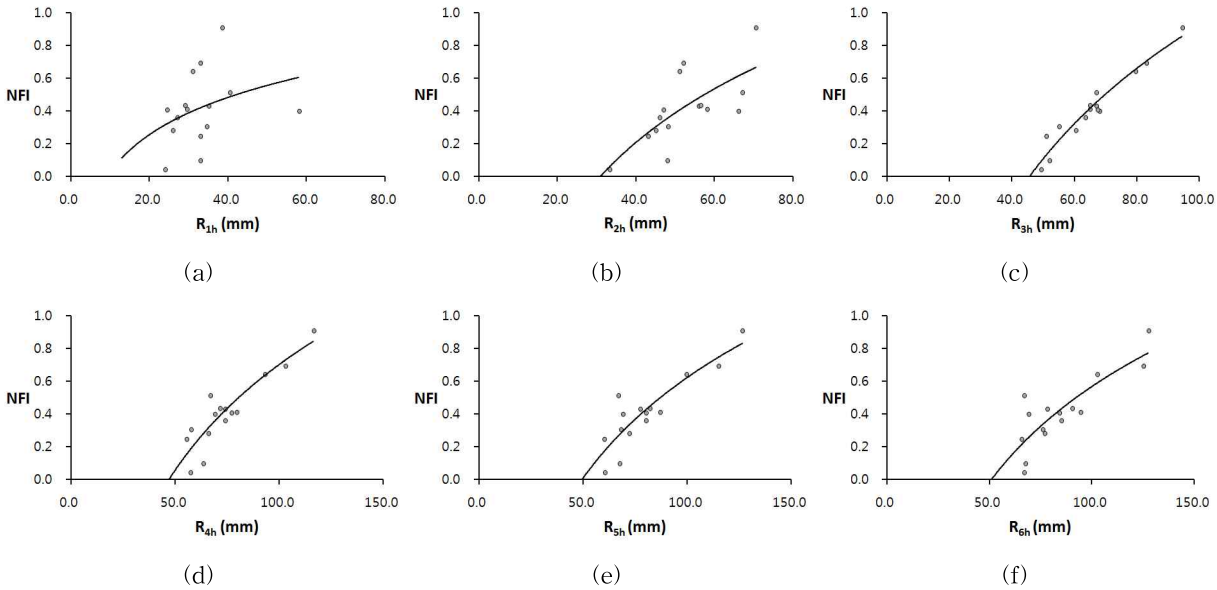

Fig. 2. The Comparison of Trends between *NFI* and a) R_{1h}, b) R_{2h}, c) R_{3h}, d) R_{4h}, e) R_{5h}, and f) R_{6h} in the Oc-gok River Basin

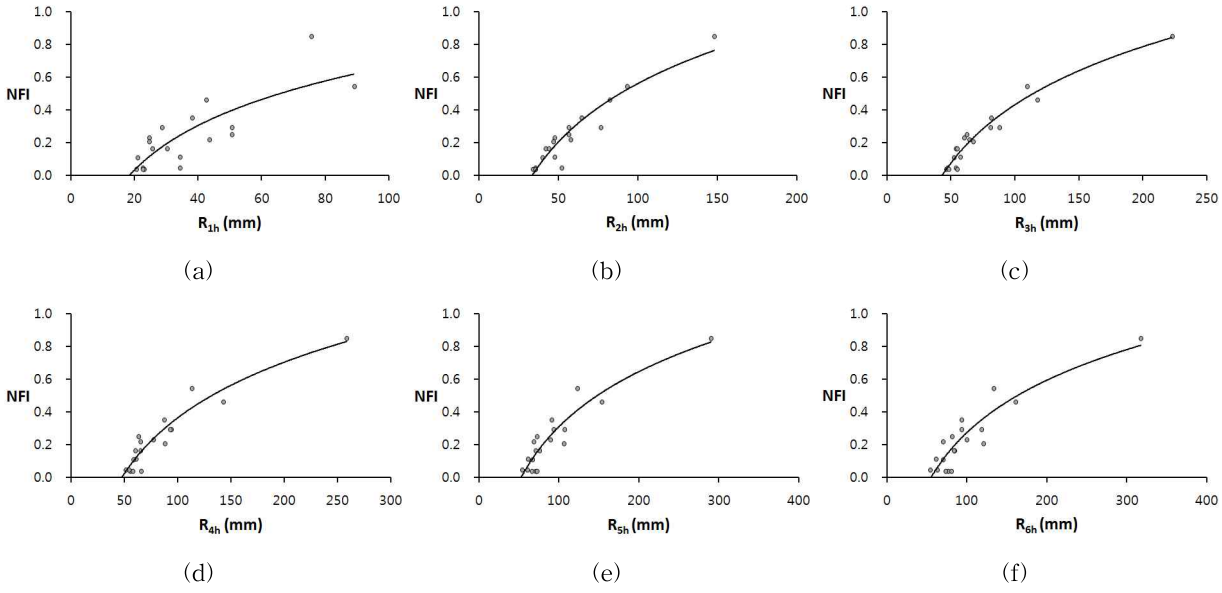

Fig. 3. The Comparison of Trends between *NFI* and a) R_{1h}, b) R_{2h}, c) R_{3h}, d) R_{4h}, e) R_{5h}, and f) R_{6h} in the Chil-seong River Basin

Table 4 Regression Equations for Relations between NFI and Rainfall Characteristics

Rainfall	The Oc-gok River basin		The Chil-seong River basin	
	Regression equations	R^2	Regression equations	R^2
R_{1h}	$NFI=0.328\ln(R_{1h})-0.728$	0.110	$NFI=0.392\ln(R_{1h})-1.142$	0.658
R_{2h}	$NFI=0.808\ln(R_{2h})-2.775$	0.506	$NFI=0.515\ln(R_{2h})-1.812$	0.904
R_{3h}	$NFI=1.177\ln(R_{3h})-4.497$	0.936	$NFI=0.512\ln(R_{3h})-1.927$	0.950
R_{4h}	$NFI=0.933\ln(R_{4h})-3.593$	0.807	$NFI=0.491\ln(R_{4h})-1.897$	0.904
R_{5h}	$NFI=0.887\ln(R_{5h})-3.461$	0.776	$NFI=0.486\ln(R_{5h})-1.925$	0.870
R_{6h}	$NFI=0.844\ln(R_{6h})-3.318$	0.689	$NFI=0.461\ln(R_{6h})-1.851$	0.829

가장 높게 나타났다. 칠성천 유역에서의 새로운 홍수지수 *NFI* 또한 3시간 최대강우량 R_{3h}와의 상관성이 가장 높은 결과를 보이며, 강우특성별로 0.658에서 0.950 범위의 상관계수를 나타내었다. 이와 같은 두 시범유역의 결과는 소유역에서 발생하는 국지적 홍수가 주로 짧은 시간에 집중하는 강우에 의해 발생하는 것을 증명하며, 예측된 3시간 최대 강우량 R_{3h}을 통하여 두 유역에서 발생할 장래 홍수의 심도예측이 가능함을 의미한다.

5. 결 론

국내 대부분의 소유역들은 실측 유량자료가 확보되어 있지 않은 경우가 많아 홍수의 예측 및 대비에 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 Bhaskar et al. (2000)의 돌발홍수지수 산정방법을 개선하여, 실측된 유량 대신 장기실측 강우사상으로 모의된 홍수유출수문곡선의 특성을 정량화하여 미계측 소유역에서 발생홍수의 심도를 예측하는 새로운 홍수지수 *NFI*를 산정방안을 제시하였다.

새로 개발된 홍수지수 산정방안은 제내지에 잠재적 침수위험성이 예상되는 한계유량조건을 2년 빈도 홍수량으로 가정하고, 과거 37개년 연최대치계열 홍수사상 중 한계유량을 초과하는 홍수유출수문곡선에 대하여 첨두홍수량비, 상승부경사, 초과홍수지속시간 등 3개 심도계수를 한계유량조건값 및 기왕최대값을 사용한 최소-최대 표준화 기법으로 무차원화한 상대심도계수를 바탕으로 결정하였다. 본 논문에서 제시한 새로운 홍수지수 *NFI*는 Bhaskar et al. (2000)의 돌발홍수지수의 심도계수중 중복적인 성격이 있는 홍수반응시간 대신 초과홍수지속시간을 고려하였으며, 첨두홍수량비 및 상승부경사 심도계수 산정방식을 개선하여 미계측 유역에 적용가능하고 분석자에 따른 산정결과의 임의성을 최소화 하도록 하였다. 이러한 새로운 홍수지수 산정방법은 2개의 시범유역인 옥곡천 및 칠성천 유역에 적용되었으며, 새로운 홍수지수 *NFI*와 강우특성간의 상관성을 분석한 결과, 두 유역에서 모두 비교적 짧은 지속시간에 집중하는 호우인 3시간 최대강우 R_{3h}와의 상관계수가 가장 높게 도출되었다. 두 시범유역의 결과는 소유역에서 발생하는 국지적 홍수가 주로 짧은 시간에 집중하는 강우에 의해 발생되며, 예측된 강우자료를 통하여 소유역에서의 발생홍수 심도예측이 가능함을 의미한다. 그러나 이와 같은 홍수지수-강우특성 분석결과는 유역특성이 유사한 2개의 시범유역에 대한 결과로서, 본 연구결과의 일반화 및 실용화를 위해서는 장기간 관측된 강우자료를 구축하고 있고 유역의 강우특성을 대표할 수 있는 관측소를 보유한 보다 많은 다양한 지형학적 특성의 소유역을 대상으로 한 새로운 홍수지수 *NFI* 적용결과의 검증이 필요하다. 또한, 새로운 홍수지수 *NFI*가 홍수수문곡선의 특성을 정량화하여 산정되므로, 미계측 유역의 홍수수문곡선 모의를 위한 강우-유출모형 매개변수 산정의 정확도 향상도 필요하다.

본 연구에서의 시범유역 적용결과는 새로운 홍수지수 *NFI*가 특정 강우조건과 높은 상관관계를 나타내었으나, 미계측 소유역을 대상으로 적용되었기에 실제 홍수사상과 일치하는지 여부는 확인할 수 없는 상황이다. 향후 실측 자료가 확보된다면 제내지에 잠재적인 침수영향을 초래할 수 있는 실제 한계홍수량의 산정과 재해기록을 반영한 홍수지수 및 강우조건을 제시할 수 있을 것으로 기대한다. 또한 레이더 강우자료 및 위성영상 자료의 정확한 해석을 통한 강우예측의 정확도가 향상된다면 예측강우와 기분석된 홍수지수-강우특성 상관관계를 이용하여 지역별 국지성 홍수예측의 실효성을 향상시킬 수 있을 것이며, 홍수지수를 강우특성과 더불어 유역의 지형학적 요인들을 추가로 고려하여 분석한다면 보다 유역특성에 적합한 상관관계식을 유도할 수 있을 것으로 사료된다. 본 논문에서 산정한 홍수지수는 향후 실측자료를 사용한 검증

을 통하여, 빠른 시간에 소유역에서 발생하는 국지성 홍수를 예측함으로써 보다 안전하고 효율적인 홍수대비를 가능하게 하여 홍수피해를 저감할 수 있으며, 지역별 재해대응체계의 구축 및 의사결정 지원도구로써 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(10기술혁신E04)에 의한 복합지하공간 수해 방지를 위한 지하저류공동 건설기술개발의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

Bae, D.H., and Kim, J.H. (2007). "Development of Korea flash flood guidance system: (II) Component development and system analysis." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 27, No. 3B, pp. 245-254.

Bhaskar, N.R., French, B.M., and Kyiamah, G.K. (2000). "Characterization of flash floods in Eastern Kentucky." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 5, No. 3, pp. 327-331.

Carpenter, T.M., Sperfslage, J.A., Georgakakos, K.P., Sweeney, T.L., and Fread, D.L. (1999). "National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems." *Journal of Hydrology*, Vol. 224, pp. 21-44.

Carpenter, T.M., and Georgakakos, K.P. (1993). "GIS-based procedures in support of flash flood guidance." *Iowa Institute of Hydraulic Research Report*, No. 366, Iowa City, IA, USA.

Choi, H., and Lee, S.J. (2006). "Verification about threshold discharge computation using GIUH on ungauged small basin." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 14, No. 1, pp. 15-27.

Dury, G.H. (1961). "Bankfull discharge: an example of its statistical relationships." *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, Vol. 6, No. 3, pp. 48-55.

Gyeonsangbuk Province. (2004). "The basic plan report for the Chil-seong River maintenance works."

Gyeonsangbuk Province. (2009). "The basic plan report for the Oc-gok River maintenance works."

Henderson, F.M. (1961). "Stability of alluvial channels." *Journal of Hydraulics Division-ASCE*, Vol. 87, pp. 109-138.

Hey, R.D. (1994). "Restoration of gravel-bed rivers: Principles and practice." Natural Channel Design: Perspectives and Practice, Canadian Water Resources Association, Cambridge, Ont., pp. 157-173.

Im, C.S., Lee, J.H., Kim, T.H., Lee, J.C., and Yoon, S.E. (2006). "A dominant discharge estimate for channel characteristics quantity survey." *Proceedings 2006 Annual Conference*, KWRA, pp. 66-71.

Jung, J.C. (2000). "The study on estimation of the flash flood index for the Bo-chunRiverbasin." MS. Thesis, Suwon University, Korea.

Kim, B.S., and Kim, H.S., (2008). "Estimation of the Flash Flood Severity using Runoff Hydrograph and Flash Flood Index." *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 185-196.

Kim, B.S., Hong, J.B., Kim, H.S., and Yoon, S.Y. (2007). "Development of flash flood model using digital terrain analysis model and rainfall RADAR: Ⅰ. Methodology and model development." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 27, No. 2B, pp. 151-159.

Kim, E.S., Choi, H.I., and Jee, H.K. (2010). "Estimation of the flash flood index by the probable rainfall data for ungauged catchments." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 4, pp. 81-88.

Kim, E.S., Choi, H.I., Lee, D.E., and Kang, D.J. (2009). "Estimation of the flash flood severity using flash flood index." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 6, pp. 125-131.

Kim, E.S., Jang, H.Y., Kim, S.D., Park, M.S., and Choi, H.I. (2012). "Analysis of rainfall-flood severity relations in small ungauged catchments." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 199-208.

Kim, W.T., Bae, D.H., and Cho, C.H. (2002). "Threshold runoff computation for flash flood forecast on small catchment scale." *Journal of the Korean Water*

Resources Association, Vol. 35, No. 5, pp. 553-561.

Kim, W.T., Kim, J.H., and Bae, D.H. (2000). "Assesment on hydrologic threshold runoff." Proceedings 2000 Annual Conference, KWRA, pp. 739-742.

Lee, H.C., and Lee, E.T. (2003). "A study on the channel forming discharge estimation and the hydraulic geometry characteristics of the alluvial stream." *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 36, No. 5, pp. 823-838.

Leopold, L.B. (1994). *A view of the river*. Harvard University Press, Cambridge, MA, USA.

NDMI (National Disaster Management Institute). (1998). "Investigation on damage from heavy rains around Jiri Mountain." NDIP-98-01.

NEMA (National Emergency Management Agency). (2007). Annual report on disasters.

NEMA (National Emergency Management Agency). (2010). Annual report on disasters.

Riley, A.L. (1998). *Restoring streams in cities : a guide for planners, policy makers and citizens*. Island press, Wachington, D.C., USA.

Sweeney, T.L. (1992). *Modernized Areal Flash Flood Guidance*. National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Report, National Weather Service, HYDRO 44. USA.

USACE (2000). *Hydrograph Modeling System*. Technical Reference Manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, USA.

Wi, S.W., Chung, G.H., and Kim, T.W. (2008). "Development of a comprehensive flood index through standardizing distributions of runoff characteristics." *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 41, No. 6, pp. 605-617.

Williams, G.P. (1978). "Bankfull discharge of rivers." *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 6, pp. 1141-1154.

논문번호: 12-090	접수: 2012.08.08
수정일자: 2012.09.11/09.25	심사완료: 2012.09.25