미계측유역에서의 돌발홍수지수 산정

김응석*, 최현일**
*선문대학교 토목공학과
**영남대학교 건설시스템공학과
e-mail:hydrokes@summon.ac.kr

Estimation of the Flash Flood Index for Ungauged Catchments

Eung Seok Kim*, Hyun Il Choi**
*Dept of Civil Engineering, Sunmoon University
**Dept of Civil Engineering, Yeungnam University

요 약

본 연구의 목적은 Bhaskar 등(2000)의 연구를 우리나라 유역에 적용하여, 기왕홍수사상에 따른 유출수문곡선의 특성을 이용한 돌발홍수지수(Flash Flood, Index, FFI)를 산정함으로써 유역에서 발생하는 돌발홍수의 심각성 정도를 정량화하고자 하였다. 또한, Bhaskar 등(2000)의 연구내용을 보다 확장하여 미계측유역에서 적용할 수 있는 새로운 돌발홍수지수를 개발하고, 돌발홍수지수와 강우특성과의 상관관계를 정량적으로 분석하였다.

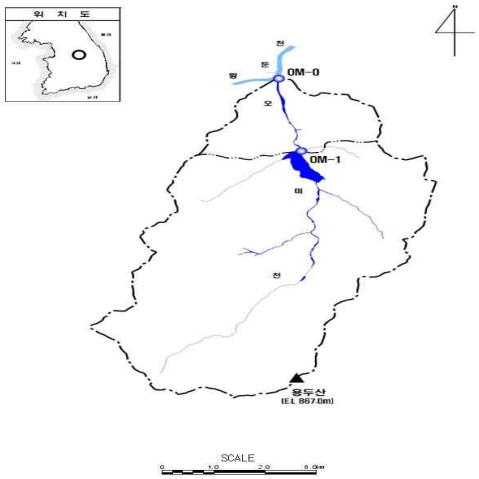
1. 서론

강우와 유출사이의 물의 순환에 대한 모든 정보를 포함하고 있는 유출수문곡선으로 표현되는 돌발홍수의 유출특성을 이용하여 돌발홍수의 심도를 정량적으로 평가하기 위한 돌발홍수지수(Flash Flood Index, FFI) 산정에 관한 기존 연구 결과들은 Kyiamah(1996)와 Bhaskar et al.(2000)의 연구 내용에 바탕을 두고 있다. 그들의 연구에서는 홍수 시 유출수문곡선으로부터 상승부 경사, 홍수량 비, 홍수반응시간 등 돌발홍수의 유출특성을 표현하는 3가지 특성인자를 정의하여, 이들을 이용하여 Eastern Kentucky 지역의 홍수 사상에 대하여 돌발홍수지수를 산정하였으며, 국내에서는 정재철(2000)이 보청천을 대상으로 단 몇 개의 사상만을 대상으로 Bhaskar *et al.*(2000)이 제시한 방법에 따라 돌발홍수지수를 산정 한 바가 있다. 그러나, 이들 연구에서는 소수의 수문사상만을 이용하였기 때문에 상대심도를 산정하는데 있어 문제가 있으며 상대심도를 산정하는데 있어 도수분포를 이용하였기 때문에 매우 주관적이라고 할 수 있다. 또한, 기존의 연구는 돌발홍수심도 산정시에 필요한 유출수문곡선을 실측된 자료를 이용하여 산정하였으나 국내의 소유역의 경우 실측된 유출수문곡선 자료가 그다지 많지 않은 관계로 인해 돌발홍수심도를 산정하는데 많은 어려움을 내포하고 있다. 특히, 돌발홍수로 인해 과거 많은 피해를 입고 있는 소유역 하천의 경우는 대부분이 실측 유출수문곡선이 없는 관계로 인해 돌발홍수로 인해 발생되는 돌발홍수심도를 정량적으로 분석하는데 많은 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 강우자료를 이용해 유출수문곡선을 해석할 수 있는 HEC-HMS(Hydrologic Modeling System)모형을 이용하여 유출수문곡선을 모의하고 이를 통한 돌발홍수의 심각성 정도를 정량화 하고자 하였다. 또한 본 연구에서는 홍수유출 특성의 종합적인 반영과 기존 돌발홍수의 단점을 보완하는 홍수지수의 산정에 초점을 맞추어, 본 연구에서 개발된 홍수지수와 기존의 돌발홍수지수와의 비교 분석을 통해 새로 개발된 홍수지수의 특성 및 유용성을 확인하고, 돌발홍수지수와 강우 특성간의 상관관계를 분석하고자 한다.

2. 대상유역 선정

본 연구에서는 미계측 소유역 홍수의 심도를 객관적으로 정량화하기 위하여 지형학적 조건에 근거하여 산지하천인 강원도 원주시 오미천 유역을 선정하였다. 오미천은 지방 2급 하천으로 80년 빈도로 하천 정비 계획이 수립되어있다. 오미천 유역은 임야가 전체 면적의 86.32%인 14.45km²을 차지하는 산지 자연하천 유역으로 집중호우로 인한 홍수피해

는 미미하지만 산지하천에서의 집중호우 발생 시 돌발홍수심도의 특성을 연구하기 위하여 선택하였다.



[그림 1] 오미천 유역도

3. 강우-유출모형 적용

본 연구의 대상 유역인 오미천 유역은 미계측 소유역이기 때문에 유출수문곡선을 산정하기 위하여 HEC-HMS모형을 적용하였다. HEC-HMS는 유출량, 직접유출량, 기저유출량, 하도구간 흐름 모의 등 유출과정의 각 성분을 모의하는 모형을 가지고 있다. HEC-HMS 모형의 Basin Model에 필요한 매개변수를 다음 [표 1]과 같이 산정하여 정리하였다.

[표 1] 매곡천 유역의 HEC-HMS 매개변수

Loss Rate Parameter	Clark's Parameter	
SCS Curve Number	Time of Concentration (hr)	Storage Coefficient (hr)
87.92	0.94	2.02

오미천유역 인근 제천관측소의 1973년부터 2008년까지의 연최대 1일 강우를 조사한 결과 1990년 9월 11일 228.5mm로 최대 강우가 관측되었고, 1973년 6월 29일 40.5mm로 최저 강우가 관측되었다. 오미천 유역의 연최대 실측강우자료에 대한 유출수문곡선을 HEC-HMS모형을 통하여 산정한 결과, 첨두홍수량의 경우 2007년 8월 5일 183.3m^3/s로 최대가 산정되었고, 1974년 8월 23일 14.5m^3/s의 최소값이 산정되었다.

4. 돌발홍수지수

4.1 기존 돌발홍수지수

4.1.1 홍수수문곡선의 상승부 경사

홍수수문곡선의 상승곡선은 다음의 식 (1)과 같은 형태의 일반적인 지수식으로 나타내며, 상승부 경사 K값은 식 (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: 초기유량, Q_t: 홍수반응시간 T_p에 가까운 시간 t에서의 유량, K : 상승곡선 기울기 (/day), t : 시간(hr)

본 연구에서는 특정 홍수사상에 대한 K_i의 상대심도 RK를 정량화하기 위하여 36개년 연최대치계열의 최대 K_{max}와 최소 K_{min}를 이용하여 식 (3)과 같이 지수화 하였다.

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

4.1.2 홍수량 비

홍수량 비 M은 홍수수문곡선에 대한 첨두홍수량과 평균유량의 비이며, 평균유량과 비교하여 얼마나 큰 홍수량이 발생하였는지를 파악 할 수 있는 인자로서 식 (4)와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$M = Q_{max}/Q_a \tag{4}$$

여기서, Q_{max} : 첨두홍수량, Q_a : 평균 유량

본 연구에서는 특정 홍수사상에 대한 M_i의 상대심도 RM을 정량화하기 위하여 36개년 연최대치계열의 최대 M_{max} 및 최소 M_{min}을 이용하여 식 (5)와 같이 지수화 하였다.

$$RM = \frac{M_i - M_{min}}{M_{max} - M_{min}} \tag{5}$$

4.1.3 홍수반응시간

홍수반응시간 T_p는 유출수문곡선으로부터 직접 산정할 수 있으며, 홍수사상의 시작과 첨두홍수량이 발생한 시간으로 정의된다. 본 연구에서는 특정 홍수사상에 대한 T_{p_i}의 상대심도 RT_p를 정량화하기 위하여 36개년 연최대치계열의 최대 $T_{p_{max}}$와 최소 $T_{p_{min}}$을 이용하여 식 (6)과 같이 지수화 하였다.

$$RT_p = \frac{T_{P_{max}} - T_{P_i}}{T_{P_{max}} - T_{P_{min}}} \tag{6}$$

4.1.4 돌발홍수지수 산정

상승경사(K), 홍수량 비(M), 홍수반응시간(T_p) 인자들에 대한 상대심도지수를 산술평균함으로써 다음 식 (7)과 같이 돌발홍수지수를 산정하였다.

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

4.2 새로운 돌발홍수지수

4.2.1 홍수수문곡선의 상승부 평균경사(K)

본 연구의 적용과 같은 강우-유출모형에 의한 유출수문곡선의 경우 초기유량 Q_0은 대부분 0으로 산정되어 식 (2)를 정의할 수 없으므로 상승부 평균경사 K값을 식 (8)을 이용하여 정의하기로 한다.

$$K = \frac{(Q_p/A)}{T_p} \quad (8)$$

여기서, A: 유역면적

특정 홍수사상에 대한 K_i의 상대심도 RK를 정량화하기 위하여 36개년 연최대치계열의 최대 K_{max}와 최소 K_{min}를 이용하여 식 (3)과 같이 지수화 하였다.

4.2.2 첨두 비홍수량

미계측 유역에서 장기유출을 모의하고 평균유량을 산정하는 것은 더 큰 불확실성을 포함하게 되므로, 기존에 사용한 홍수량 비 대신에 첨두홍수량을 유역면적으로 나눈 첨두 비홍수량을 사용한다.

$$M = Q_p/A \quad (9)$$

같은 방법으로, 특정 홍수사상에 대한 M_i의 상대심도 RM을 정량화하기 위하여 36개년 연최대치계열의 최대 M_{max} 및 최소 M_{min}을 이용하여 식 (5)와 같이 지수화 하였다.

4.2.3 첨두시간까지 평균유출량

새로운 방법에서는 홍수반응시간 대신에 첨두시간까지의 평균유출량을 산정하여 홍수발생시의 유출체적을 고려할 수 있도록 식 (10)과 같이 나타낸다.

$$Q = \frac{(V_p/A)}{T_p} \quad (10)$$

여기서, Q: 첨두시간까지의 평균유출량, V_p: 첨두까지의 유출용적

본 연구에서는 특정 홍수사상에 대한 Q_i의 상대심도 RQ를 정량화하기 위하여 36개년 연최대치계열의 최대 Q_{max}와 최소 Q_{min}을 이용하여 식 (11)과 같이 지수화 하였다.

$$RQ = \frac{Q_i - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} \quad (11)$$

4.2.4 돌발홍수지수

이상 선정한 홍수유출수문곡선의 상승부 평균경사(K), 첨두 비홍수량(M), 그리고 첨두시간까지의 평균유출량(Q)의 세가지 홍수심도 계수를 산술평균하여 다음 식(12)와 같이 돌발홍수지수를 산정하였다.

$$FFI = \frac{(RK + RM + RQ)}{3} \times 100(\%) \quad (12)$$

5. 결과분석

5.1 기존 돌발홍수지수의 상관분석

오미천 유역에서 상승경사(K), 홍수량 비(M), 홍수반응시간(T_p)의 돌발홍수심도계수 및 돌발홍수지수의 산정 결과, 36개 호우사상 중 가장 큰 돌발홍수지수는 2007년 8월 5일에 발생한 호우로 81.79의 값으로 산정되었으며, 가장 작은 돌발홍수지수는 2004년 8월 18일 발생한 호우로 8.42의 값을 나타내었다. 또한, 36개 호우사상의 전체 평균 돌발홍수지수는 34.55로 나타났다.

[표 2]와 같이 기존 돌발홍수지수와 3개 홍수심도 계수와의 상관성을 살펴보면, 오미천 유역의 경우 김병식 등(2008) 및 Bhaskar 등(2000)의 연구결과와 비슷한 양상의 상관관계를 나타내었다. 유출수문곡선에서 유사한 특성을 나타내는 상승부 경사(K) 및 홍수반응시간(T_p)와의 상관성이 비교적 높게 나타났으며, 이와 같이 2개 홍수심도 계수의 중복적인 적용으로 인하여 상대적으로 홍수량 비(M)와의 상관성은 작게 나타났다.

[표 2] 홍수심도 계수와 기존 돌발홍수지수와의 관계

홍수심도 계수	회귀식	상관계수(R^2)
K	FFI = 34.95ln(K) - 36.94	0.950
M	FFI = 0.09M + 22.90	0.146
T_p	FFI = -31.65ln(T_p) + 112.19	0.799

[표 3]과 같이 분석한 돌발홍수지수와 강우특성요소들과의 상관관계 분석에서, 전체적으로 기존 돌발홍수지수 산정방법에서는 돌발홍수지수와 강우특성과의 상관성은 크지 않은 것으로 분석되었다. 돌

발홍수지수의 산정에 직접적으로 포함되지 않았지만 강우특성자료중 2시간 최대 강우량(R_{2h})과의 상관계수가 0.279로 상대적으로 가장 높게 나타났다. 그러나 총강우량과 돌발홍수지수와의 상관성은 매우 낮은 것으로 분석되었다.

[표 3] 강우특성별 기존 돌발홍수지수와의 관계

강우특성	회귀식	상관계수(R^2)
I_a	$FFI = 3.46I_a + 9.80$	0.247
R_{1h}	$FFI = 0.82R_{1h} + 13.11$	0.260
R_{2h}	$FFI = 0.53R_{2h} + 13.01$	0.279
R_{3h}	$FFI = 0.43R_{3h} + 13.02$	0.271
R_{4h}	$FFI = 0.39R_{4h} + 11.28$	0.245
R_{5h}	$FFI = 0.36R_{5h} + 10.43$	0.233
R_{6h}	$FFI = 0.32R_{6h} + 10.94$	0.203
R_t	$FFI = -1.86\ln(R_t) + 45.36$	0.001
D	$FFI = -29.28\ln(D) + 118.16$	0.379

5.2 새로운 돌발홍수지수와의 상관분석

홍수수문곡선의 상승부 평균경사(K), 첨두 비홍수량(M), 첨두시간까지 평균유출량(Q) 등의 3가지 홍수심도 계수로 구성되는 새로운 돌발홍수지수 산정방법에 의한 오미천 유역 36개년 연최대치 계열에 대한 종합홍수심도계수 및 종합홍수지수의 산정 결과, 36개 호우사상 중 가장 큰 종합홍수지수는 2007년 8월 5일에 발생한 호우로 89.11의 값으로 산정되었으며, 가장 작은 종합홍수지수는 1973년 6월 29일 발생한 호우로 2.96의 값을 나타내었다.

[표 4]와 같이 새호운 돌발홍수지수와 3개 홍수심도 계수와의 상관성을 살펴보면, 기존 돌발홍수지수 산정방법에서 상승부 경사(K) 및 홍수반응시간(T_p)와의 상관성이 비교적 높게 나타나고 홍수량 비(M)와의 상관성은 작게 나타난 것과는 달리, 3개의 홍수심도 계수인 상승부 평균경사(K), 첨두 비홍수량(M) 및 첨두시간까지의 평균유출량(Q)과의 상관계수가 모두 비슷하게 높게 나타났다. 이는 3개의 홍수심도 계수가 종합적으로 작용하여 새로운 돌발홍수지수가 결정됨을 나타낸다.

[표 4] 홍수심도 계수와 새로운 돌발홍수지수와의 관계

홍수심도 계수	회귀식	상관계수(R^2)
K	$FFI = 13.79K + 7.42$	0.739
M	$FFI = 2.34M - 3.99$	0.790
Q	$FFI = 8.59Q - 2.35$	0.750

[표 5]와 같이 분석한 새로운 돌발홍수지수와 강우특성요소들과의 상관관계 분석에서, 기존의 방법으로 산정된 돌발홍수지수보다 새로운 방법에 의한 돌발홍수지수가 강우지속시간을 제외한 강우특성들과 높은 상관관계를 보였으며, 2시간 최대 강우량(R_{2h})에서 최대 상관성을 보인 돌발홍수지수의 결과와는 달리, 4시간 최대 강우량(R_{4h})과의 상관계수가 0.795로 가장 높게 나타났다. 강우특성과 새로운 돌발홍수지수와의 관계를 살펴볼 때, 산지하천 소유역에서 짧은 시간에 집중된 많은 강우량이 오미천 유역에서 일어나는 홍수의 원인이 되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 강우-돌발홍수지수의 관계곡선식을 이용하면 강우자료를 통하여 신속하게 발생홍수의 심도를 예측할 수 있으므로 미계측 소유역의 홍수예경보를 위한 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

[표 5] 강우특성별 새로운 돌발홍수지수와의 관계

강우특성	회귀식	상관계수(R^2)
I_a	$FFI = 4.50I_a - 8.61$	0.743
R_{1h}	$FFI = 1.14R_{1h} - 6.23$	0.552
R_{2h}	$FFI = 0.81R_{2h} - 9.72$	0.719
R_{3h}	$FFI = 0.68R_{3h} - 11.28$	0.761
R_{4h}	$FFI = 0.66R_{4h} - 16.70$	0.795
R_{5h}	$FFI = 0.62R_{5h} - 19.29$	0.784
R_{6h}	$FFI = 0.60R_{6h} - 21.45$	0.781
R_t	$FFI = 0.26R_t - 6.23$	0.429
D	$FFI = -10.10\ln(D) + 54.57$	0.051

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 김병식, 김형수, "유출수문곡선과 돌발홍수지수를 이용한 돌발홍수심도 산정", 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제41권, 제2호, pp.185-196, 2008.

[2] 정재철, 돌발홍수지수 산정에 관한 연구-보청천을 중심으로-. 석사학위논문, 수원대학교, 2000.

[3] Kyiamah, G.K., "Monitoring and Characterization of Flash Floods", MS thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Louisville, 1996

[4] Bhaskar, N.R., French, M.N., Kyiamah, G.K., "Characterization of Flash Floods in Eastern Kentucky." Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, Vol. 5, No. 3, pp. 327-331, 2000.