

선행함수지수를 고려한 강우강도-지속시간-홍수량(IDQ) 곡선기반의 홍수에경보기법

김진겸* · 강부식**

Kim, Jin-Gyeom* · Kang, Boosik**

Flood Alert and Warning Scheme Based on Intensity-Duration-Quantity (IDQ) Curve considering Antecedent Moisture Condition

ABSTRACT

The methodology of utilizing Intensity-Duration-flood Quantity (IDQ) curve for flood alert and warning was introduced and its performance was evaluated. For this purpose the lumped parameter model was calibrated and validated for gauged basin data set and the index precipitation equivalent to alert and warning flood was estimated. The index precipitation and IDQ curves associated by three different Antecedent Moisture Conditions (AMCs) are made provision for various possible flood scenarios. The test basin is Wonju-cheon basin (94.4km²) located in Gangwon province, Korea. The IDQ curves corresponding to alert (50% of design flood level) and warning (70% of design flood level) level was estimated using the Clark unit hydrograph based lumped parameter model. The performance evaluation showed 0.704 of POD (Probability of Detection), 0.136 of FAR (False Alarm Ratio), and 0.633 of CSI (Critical Success Index), which is improved from the result of IDQ with single fixed AMC.

Key words : Flood alert and warning, Clark unit hydrograph, Intensity-duration-quantity curve, Antecedent moisture condition, Flash flood guidance

초 록

수문모형 기반의 강우강도-지속시간-홍수량(IDQ) 곡선을 이용하여 홍수에보에 활용하는 기법을 소개하고 그 성능을 평가하였다. 이를 위하여 계측된 유역의 자료를 이용하여 집중형 모형의 검보정을 실시하고 하천의 특보 홍수량에 준하는 등가강우량을 산정하였다. 특보홍수량과 선행함수상태별 IDQ 곡선을 산정되면 발생 가능한 여러 시나리오에 대비할 수 있다. 시범대상유역은 강원도에 위치한 원주천 유역(94.4km²)이며 주의보 수위(계획홍수량의 50%)와 경보 수위(계획홍수량의 70%)에 해당하는 IDQ 곡선이 산정되었다. 과거 10년간의 자료로부터 선행함수 조건별 IDQ곡선의 홍수에보능력을 평가한 결과, 탐지확률은 0.704, 경보실패율은 0.136, 임계성공지수는 0.633으로 나타났으며, 단일 조건의 IDQ 곡선을 적용한 홍수에보능력에 비해 더 나은 평가지수를 얻을 수 있었다.

검색어 : 홍수에경보, Clark단위도, Intensity-duration-quantity 곡선, 선행함수지수, Flash flood guidance

* 정희원 · 단국대학교 토목환경공학과 박사수료 (Dankook University · jg_kim@dankook.ac.kr)

** 종신희원 · 교신저자 · 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Corresponding Author · bskang@dankook.ac.kr)

Received June 25, 2015/ revised September 8, 2015/ accepted November 10, 2015

1. 서론

홍수예경보시스템의 구축에 있어서 가장 중요한 요소는 강우와 홍수량의 정확한 산정 및 예측에 있고, 동시에 자료입력, 모델구동 및 최종의사결정에 이르는 과정의 신속성이라 할 수 있다. 최근 고해상도 레이더강수관측과 분포형 홍수유출모형의 활용이 점차로 현업에까지 확산되고 있지만 대응량의 입력자료와 상세격자기반의 분포형유출모형의 적용은 계산부하를 증가시켜 신속한 의사결정에 불리하게 작용하는 측면도 동시에 존재한다.

홍수예경보의 일반적인 절차는 강우관측 데이터를 바탕으로 유역의 유출량을 계산한 후 댐이나 저류지의 저수량을 고려하여 주요 지점의 수위와 홍수의 규모를 판단한 뒤 수문조절에 의한 홍수조절을 실시하는 것이다. 홍수예경보지점의 수위가 주위보 수위(계획홍수량의 50%) 또는 경보수위(계획홍수량의 70%)에 도달하거나 도달이 임박한 것으로 예상될 때 홍수예보를 발령하게 된다. 이러한 방식은 홍수도달시간이 짧은 경우, 모형의 구동부터 홍수예보 발령까지의 절차를 수행하는 동안 발생하는 피해에 대비하기 어렵고 강우의 지속시간이 길어질 경우, 강우예측의 정확도에 따라 홍수예경보의 정확도가 결정된다. 다양한 시나리오의 강우를 강우-유출모형에 미리 적용하여 돌발홍수 등이 발생했을 때 도표화된 결과를 바탕으로 즉각적인 예경보를 실시하는 방법이 신속하고 효율적인 홍수예경보가 될 수 있다.

홍수방어를 위한 비구조적인 대책인 홍수예경보 기법을 개발하기 위해 Sweeney (1992)는 미국 NWS (National Weather Service) 에서 사용하는 돌발홍수예경보의 표준기법을 제시하였고, Carpenter et al. (1999)은 한계유출량을 산정하는 기준유량을 제방일류량과 2년 빈도 홍수량으로 나누어 Snyder 단위도법, 지형학적 단위도법에 적용하여 비교 분석하였다. 또한 Reed et al. (2007)은 미계측 유역의 빈도별 한계유출량을 산정하기 위해 분포형 모형을 적용하는 방안을 제시하였다. 최근에는 Gourley et al. (2011)에 의하여 미국내 국립기상청(National Weather Service)의 현업 돌발홍수예경보시스템인 FFG (Flash Flood Guidance)의 예보성능을 새로이 개발된 GFFG (Gridded Flash Flood Guidance) 시스템과 비교 검토한바 있다. 결과적으로 GFFG가 공간적 변동성을 구현하는데는 개선된 모습을 보였지만 예측정확도 측면에서는 기존시스템으로부터 크게 나아지지는 못하였다는 한계점을 진단하였다.

국내에서는 Kim et al. (2002)이 미소유역 규모의 한계유출량을 산정하는 GIS기반의 시스템을 개발하였으며, Park et al. (2013)은 HEC-GeoHMS를 사용하여 3단계 위험수심에 따른 한계강우량을 산정하였다. 돌발홍수예경보의 개선을 위하여 Shin et al. (2004)은 산지유역의 돌발홍수 경보발령 기준우량을 GIS와 지형학적 순간단위도를 사용하여 산정하였고, Bae et al. (2012)은 도시유역에서의

실시간 홍수예보를 위한 Flow nomograph를 제시한 바 있다. 마찬가지로 목적을 위해 해외에서는 Ntelekos et al. (2005)이 돌발홍수 예경보에 사용되는 기법별 불확실성을 분석하고 확률론적 돌발홍수 예경보기법을 제시하기 위해 지형학적 순간단위도에 사용되는 GIS변수, 홍수량과 관련된 지역적 특성, 초기토양수분량, 수문모형 매개변수를 불확실성이 존재하는 변수로 지정하고 실시간으로 관측되는 레이더 강우를 기초로 확률론적인 예경보 기법을 제시하였다. Norbiato et al. (2008)은 미계측 유역의 돌발홍수 예경보를 위해 계측유역의 모형 매개변수 및 토양수분 상태를 미계측 유역으로 전이시켜 미계측 유역의 예경보 능력을 평가한바 있다.

본 연구는 홍수예경보과정의 신속성을 확보하기 위한 목적으로 강우강도(Intensity) - 지속시간(Duration) - 홍수량(flood Quantity) 곡선(이하 IDQ곡선)을 제시하고, 이 곡선을 이용하여 홍수예측에 활용하는 기법을 소개하였다. 본 방법은 다양한 강우 지속시간에서 존재하는 홍수량 시나리오를 고려하며 강우예측에서 제공하는 강우량과 지속시간을 통해 Nomograph상에서 손쉽게 홍수 유무를 판별할 수 있다.

2. 대상 유역

연구 대상유역은 대한민국 최대규모 하천인 한강의 제2지류인 원주천 유역으로서, 단위도 이론을 적용할 수 있는 유역면적 94.4km², 유로연장 18.2km인 소규모 유역이다(Table 1). 유역 출구는 단위도 매개변수의 검토정을 위해 수위관측소가 존재하는

Table 1. Wonju-Cheon Basin Characteristics

Area (km ²)	94.4	River Slope (m/m)	0.0169
River Length (km)	13.3	Basin Slope (m/m)	0.363
Flow Length (km)	18.2	Basin Perimeter (km)	62.7

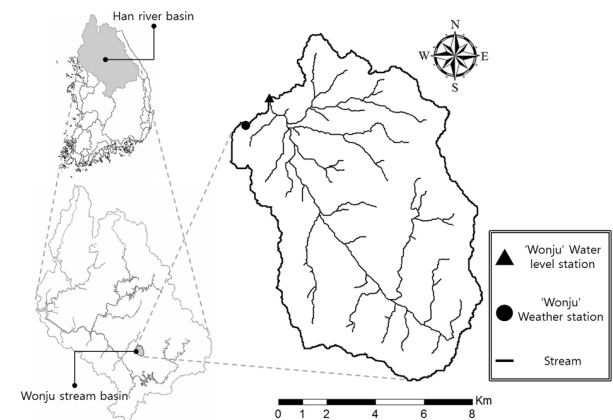


Fig.1. Study Basin and This Location in South Korea

Table 2. Observation Station Information

Station name	Location			Observation starts on	Operated by
	Longitude	Latitude	Altitude (EL.m)		
‘Wonju’ Weather station	127.947	37.338	152.2	1973/01/01	KMA ^a
‘Wonju Br.’ Water level station	127.956	37.348	120.2	1976/08/13	MLIT ^b

^aKMA: Korea Meteorological Administration

^bMLIT: Ministry of Land, Infrastructure and Transport

Table 3. Rating Curve of Wonju Water Level Station (MLTM, 2009)

Station	Range	Equation ($Q: m^3/s, H(h): m$)
Wonju ($H = h + 1$)	$0.49 \leq H \leq 0.93$	$Q = 0.298 \times (H - 0.490)^{3.320}$
	$0.93 < H \leq 1.17$	$Q = 97.410 \times (H - 0.870)^{3.050}$
	$1.17 < H \leq 1.50$	$Q = 15.500 \times (H - 0.830)^{1.700}$
	$1.50 < H \leq 2.80$	$Q = 71.891 \times (H - 1.150)^{2.110}$
	$2.80 < H \leq 6.30$	$Q = 27.671 \times (H - 0.750)^{2.802}$

지점으로 설정하였으며(Fig. 1), 강우-유출 사상은 원주교 수위관측소의 수위-유량 관계곡선식(MLTM, 2009)과 원주 기상관측소의 강우자료를 활용하였다(Tables 2 and 3).

본 연구에서는 홍수수문곡선산정을 위해 Clark 단위도를 채택하였다. 단위도의 매개변수 보정을 위해 2004년 8월 18~19일의

강우-유출 사상을 포함한 4개의 사상을 선택하고 매개변수를 산정한 결과, 도달시간(T_0)은 2.0시간, 저류상수(K)는 4.27로 산정되었으며 결정된 매개변수를 2010년 9월 12~13일, 2013년 7월 22~23일의 강우-유출사상에 대해 검증절차를 수행하였다(Table 4 and Fig. 2).

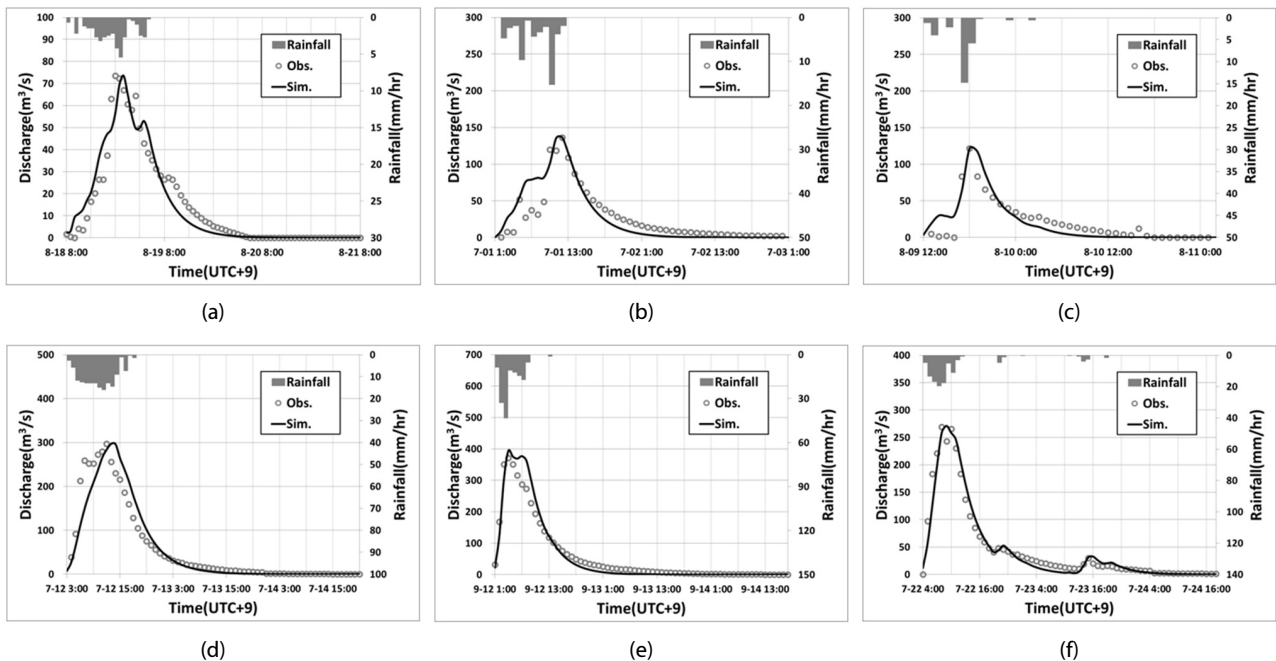


Fig. 2. Result of Calibration (a~d) and Validation (e~f) for Clark UH Parameters

Table 4. Summary of Model Calibration and Validation

	Period		T _c	K	Total Rainfall (mm)	R ²	RMSE (m ³ /s)	NSE
	a	b						
Calibration	a	2004/8/18 08:00 ~ 2004/8/20 06:00	1.5	5.14	81.0	0.81	9.98	0.80
	b	2005/7/01 01:00 ~ 2005/7/02 24:00	2.6	3.78	104.5	0.84	15.88	0.80
	c	2007/8/09 12:00 ~ 2007/8/11 02:00	2.2	3.1	48.0	0.83	12.76	0.79
	d	2009/7/12 03:00 ~ 2009/7/14 21:00	1.7	5.08	191.0	0.90	28.46	0.91
Validation	e	2010/9/12 01:00 ~ 2010/9/14 16:00	2.0	4.27	107.0	0.97	24.67	0.95
	f	2013/7/22 04:00 ~ 2013/7/24 18:00			248.5	0.97	13.35	0.97

3. IDQ 곡선

일반적인 IDF 곡선은 강우 빈도해석의 결과로서 특정빈도 (Frequency)에 대하여 다양한 강우 지속시간(Duration)을 갖는 강우 강도(Intensity)를 연결한 곡선이다. 하지만 본 연구에서는 특정 홍수량(Quantity)에 상응하는 강우 지속시간과 강우강도를 연결한 IDQ 곡선을 이용하여 홍수예보에 활용하고자 한다.

IDQ 곡선을 산정함에 있어서 먼저 목표홍수량을 설정하고 특정 강우지속시간에 대하여 목표홍수량이 산정되는 강우사상을 찾아낸다. 이후 강우지속시간을 변경해가며 계속해서 해당되는 강우사상을 찾는다. 그러다음 목표홍수량을 증가 혹은 감소시켜가며 동일한 계산을 반복하면 IDQ 곡선군을 얻을 수 있다(Fig. 3). IDQ곡선을 산정하기 위해서는 유역의 유출모형이 구축되어 있어야 한다. 목표 홍수량과 지속시간의 변경을 통한 반복계산이 필요하므로 계산부하가 적은 단위도기반의 집중형모형도 충분히 좋은 대안이 될 수 있다. 연산속도와 계산부하가 크게 문제되지 않는 경우라면 분포형 유출모형을 사용할 수도 있다. 특정 빈도의 홍수량에 대해 IDQ곡선을 산정하고 IDF 곡선과 비교하면 임계지속시간에서 서로

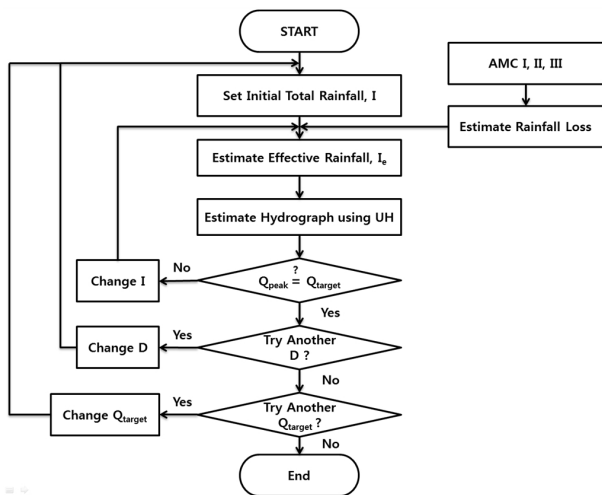


Fig. 3. Flowchart of The IDQ Curve Derivation

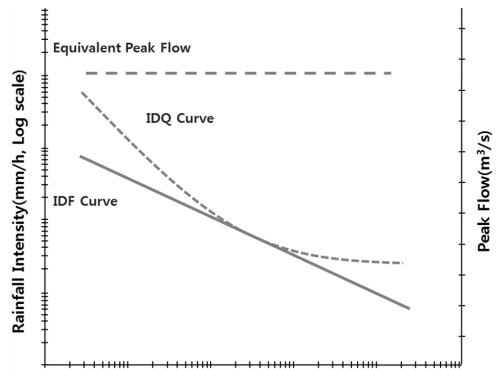


Fig. 4. Relationship of IDF and IDQ Curve

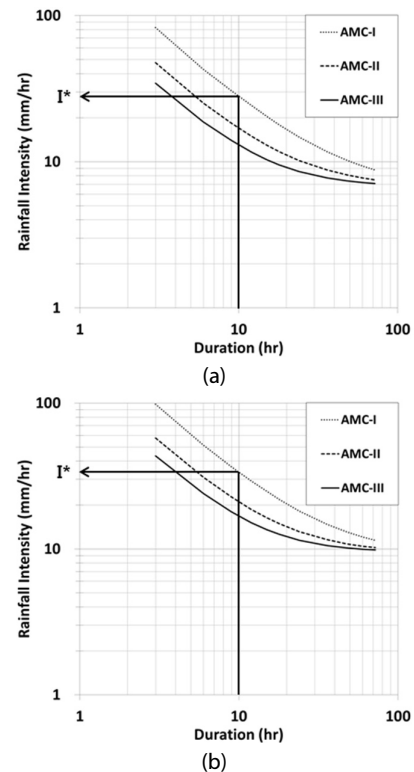


Fig. 5. The IDQ Curve for Flood Alert (a) and Warning (b) with Various Antecedent Moisture Conditions

접하게 되는 특징이 있다(Kim et al., 2014). 이러한 특성은 임계지속시간을 찾는 데 있어서 중요한 단서로 활용될 수도 있다(Fig. 4).

IDQ곡선을 산정하기 위한 주의보 및 경보유량은 우리나라에서 수행하고 있는 홍수예보의 기준과 동일하게 각각 해당 하천 설계홍수량의 50%와 70%로 설정하였다. 원주교 수위관측소 지점의 주의보 및 경보 유량은 각각 342.4m³/s, 479.3m³/s로 산정되었다. 강우 주상도를 만들기 위한 Huff 분포는 기 수행된 원주 강우관측소의 연구결과를 활용하였다(MLTM, 2011). 또한, 유효강우를 총 강우로 변환하기 위해 NRCS 방법을 적용하였고 선행함수 조건에 따른 유출곡선지수는 각각 47.5(AMC-I), 68.3(AMC-II), 83.2(AMC-III)로 산정되었다. 이러한 자료를 바탕으로 선행 함수 조건에 따른 IDQ곡선을 주의보 및 경보 유량에 대해 각각 산정하였다(Fig. 5).

4. IDQ곡선을 이용한 홍수예보 사례분석

실제 홍수특보 발령시에는 IDQ곡선을 통하여 산정한 특보등가 강수량(I^*)과 예보강우량(I_f)의 비교를 통하여 의사결정이 이루어진다. 먼저 특보(주의보, 경보) 기준수위에 대응하는 홍수량을 산정한다. I^* 는 특보유량에 해당하는 IDQ곡선상에서 특정지속시간(D)에 해당되는 인덱스 강수량값으로 결정된다. 예측 강우량(혹은 강도) I_f 는 주로 기상청에서 제공하는 예보강수량이 사용될 수 있다. 기상청에서는 특보발령시 6시간과 12시간을 기준시간으로 사용하고 있다. 예보강수량을 활용하게 되면 상대적으로 긴 예측선행시간을 확보할 수 있다는 유리한 점이 있지만 예보강수량의 신뢰도에 불확실성이 큰 경우 관측강수량을 특보발령의 의사결정에 활용할 수 있다. 이 경우 예측선행시간은 짧아지지만 예측의 안정성은 높아진다. 시나리오예측을 보조적 수단으로 활용한다면

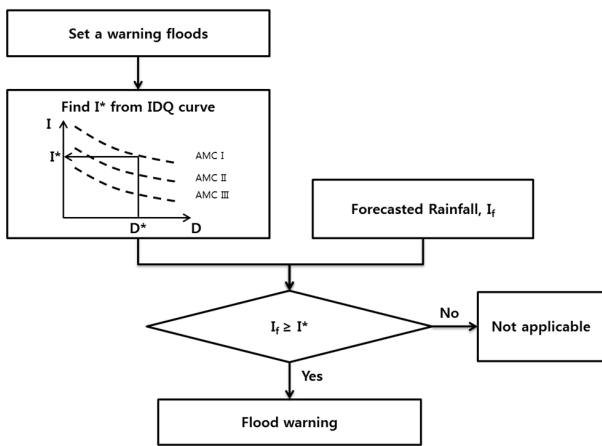


Fig. 6. Decision Making Process for Flood Warning Using The IDQ Curve

완벽한 예측은 아니더라도 최악의 사상(worst event)에 대비할 수 있다. IDQ곡선을 이용한 홍수특보발령의 의사결정과정은 Fig. 6과 같다.

IDQ곡선을 이용한 홍수예보기법을 평가하기 위해 2004-2013년 기간 동안 홍수량 기준으로 100m³/s의 목표홍수량을 넘어서거나 또는, 강우량 기준으로 AMC 조건별 100m³/s의 IDQ곡선상에서 등가강우량 이상의 강우강도가 발생했던 46개 홍수사상을 수집하였다. 수집된 홍수사상은 선행강우의 정도에 따라 AMC I~III 조건으로 구분하였고 강우지속시간, 총강우량, 평균강우강도, 최고강우강도, 첨두홍수량을 조사하여 AMC 조건에 부합하는 IDQ곡선상에서의 홍수예보 유무와 수위관측소에서 관측된 수위를 기준으로 실제 홍수 발생량이 목표홍수량 이하인 16개 사상을 제외한 30개 홍수사상을 선정하였다(Table 5 and Fig. 7). 단, 원주천 유역에서 과거에 발생한 실제 홍수사상의 대부분이 해당지역의 특보기준유량에 비하여 작았기 때문에 홍수판단기준도 실제 특보기준보다는 작은 100m³/s 이상으로 설정하여 IDQ곡선을 이용한 홍수예보 모의평가에 적용하였다.

홍수예보 성능평가지수를 산정하기 위해 홍수예보는 관측된 평균강우강도가 IDQ 등가강우강도 이상이면 Yes로, 이하이면 No로 구분하였다. 실제 홍수 발생은 관측된 유량이 100m³/s 이상이면 Yes, 이하이면 No로 구분하였다. 이때, AMC 조건별 IDQ곡선의 홍수예보 성능을 비교하기 위해 단일 AMC조건인 IDQ곡선만을 이용한 홍수예보 결과를 추가로 산정하였다(Table 6). 이러한 정보를 바탕으로 탐지확률(POD, Probability Of Detection), 경보실패율(FAR, False-Alarm Ratio), 임계성공지수(CSI, Critical Success Index)를 계산하였다(Schaefer, 1990; Wilks, 1995).

POD는 예보된 사건의 발생 수(hits)를 실제사건 발생 수(hits+misses)로 나눈 값으로서, 사건이 발생했을 때의 예보성공율을 의미하는 조건부확률이다. FAR은 예보된 사건이 발생하지 않은 경우의 수(false alarms)를 예보 발령의 수(hits+false alarms)로

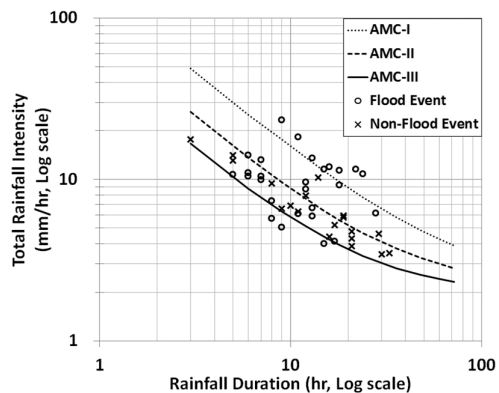


Fig. 7. IDQ Curve and Flood Events with Various Antecedent Moisture Conditions

Table 5. Flood Warning Evaluation of The IDQ Curve Method in Actual AMC

Date	AMC	Rainfall Duration (hr)	Total Rainfall (mm)	Rainfall Intensity (mm/hr)	Maximum Intensity (mm/hr)	Peak Flood (m ³ /s)	Flood Forecast	Actual Flood
2004.6.20	III	15	60.00	4.00	8.00	120.23	No	Yes
2004.7.15	III	13	86.45	6.65	32.50	160.57	Yes	Yes
2004.7.16	III	8	59.04	7.38	17.50	114.00	Yes	Yes
2004.8.18	III	21	81.06	3.86	11.00	83.00	Yes	No
2005.7.1	III	12	104.52	8.71	31.50	138.10	Yes	Yes
2005.8.10	III	6	62.52	10.42	29.00	118.66	Yes	Yes
2005.8.11	III	7	73.01	10.43	25.50	167.77	Yes	Yes
2006.7.12	III	17	70.04	4.12	15.00	131.50	No	Yes
2006.7.15	III	22	253.44	11.52	27.50	370.96	Yes	Yes
2006.7.27	I	28	173.04	6.18	20.50	200.28	No	Yes
2006.8.25	I	5	53.50	10.70	50.00	121.65	No	Yes
2007.8.4	I	7	69.51	9.93	21.00	150.66	No	Yes
2007.8.5	III	9	45.54	5.06	25.50	159.76	No	Yes
2007.8.9	III	8	46.00	5.75	24.00	141.85	No	Yes
2008.7.24	III	15	173.85	11.59	39.00	230.22	Yes	Yes
2009.7.9	III	9	59.49	6.61	24.50	76.52	Yes	No
2009.7.12	III	16	191.04	11.94	20.50	299.62	Yes	Yes
2009.7.14	III	12	115.56	9.63	31.00	389.63	Yes	Yes
2009.7.17	III	6	66.00	11.00	27.50	109.37	Yes	Yes
2009.7.18	III	6	84.60	14.10	53.10	121.03	Yes	Yes
2010.9.11	III	11	67.54	6.14	26.00	209.64	Yes	Yes
2010.9.12	III	7	92.75	13.25	31.50	377.02	Yes	Yes
2010.9.21	I	11	201.52	18.32	49.50	635.36	Yes	Yes
2011.7.3	III	18	203.94	11.33	44.00	233.26	Yes	Yes
2011.7.7	III	12	95.52	7.96	29.00	65.96	Yes	No
2011.7.8	III	13	76.96	5.92	13.00	121.03	Yes	Yes
2011.7.27	I	13	176.02	13.54	53.00	137.54	Yes	Yes
2011.8.16	I	18	165.96	9.22	37.00	265.10	No	Yes
2012.7.5	I	24	258.96	10.79	40.50	198.95	Yes	Yes
2013.7.22	I	9	210.51	23.39	44.50	271.79	Yes	Yes

Table 6. Contingency Table Between Flood Forecast and Events

		Flood Forecast							
		Yes				No			
		Fixed AMC I	Fixed AMC II	Fixed AMC III	Actual AMC	Fixed AMC I	Fixed AMC II	Fixed AMC III	Actual AMC
Actual Flood	Yes	9	14	23	19	19	13	4	8
	X, hit				Y, miss				
	No	0	5	19	3	18	14	0	16
Z, false alarm					Not Applicable				

나는 값으로서, 예보를 발령했을 때의 예보실패율을 의미하는 조건 부확률이다. CSI는 사건의 발생률이 무발생률에 비해 상대적으로 적을 때 사용하는 측정방법으로서 사건 발생을 정확히 예보한 경우의 수(hits)를 사건이 예보된 경우의 수(hits+false alarms)와 사건 발생을 예보하지는 못했지만 사건이 발생한 경우의 수(misses)의 합으로 나눈 값이다. CSI는 사건의 무발생을 예보한 경우를 제외한 예보정확도로서 평소엔 발생하지 않는 홍수사상을 발생하지 않는다고 예보하는 것은 의미가 없기 때문에 예보정확도를 평가하기에 적절한 지수이다.

$$POD = \frac{hits}{hits + misses} = \frac{X}{X + Y} \quad (1)$$

$$FAR = \frac{false\ alarms}{hits + false\ alarms} = \frac{Z}{X + Z} \quad (2)$$

$$CSI = \frac{hits}{hits + misses + false\ alarms} = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (3)$$

AMC-I 조건에서의 단일 IDQ 곡선을 이용했을 때의 POD는 0.321, FAR은 0.000, CSI는 0.321로 산정되었으며, AMC-II 조건에서의 단일 IDQ 곡선을 이용했을 때의 POD는 0.519, FAR은 0.263, CSI는 0.438로 산정되었다. 특히, AMC-III 조건에서의 단일 IDQ곡선을 이용했을 때의 POD는 0.852, FAR은 0.452, CSI는 0.500으로 산정되어 세 가지 단일조건 중 모든 값이 가장 크게 나타났다. AMC-III 조건은 동일한 강우에도 많은 유효강우를 산정하여 잦은 홍수예보가 발령되게 되고, 평가지수인 POD와 CSI가 높은 장점이 있는 동시에 FAR도 높아져 전체적인 홍수예보의 정확도는 떨어지게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 강우 발생당시의 AMC 조건별 IDQ곡선을 이용했을 때의 POD는 0.704, FAR은 0.136, CSI는 0.633으로 산정되었다. AMC 조건별 IDQ곡선을 이용한 홍수예보를 발령했을 때 홍수가 실제 일어나는 상황에서 홍수예보를 정확히 할 확률이 70.4%(=POD)이고, 홍수예보를 발령했을 때 실제 홍수가 발생할 확률이 86.4%(=1-FAR)로서 단일 IDQ곡선을 사용했을 때에 비해 정확성도 확보하고 있기

Table 7. Overall Performance Statistics for Flood Warning Based on The IDQ Curve

IDQ curve (AMC #)	POD	FAR	CSI
I Only	0.321	0.000	0.321
II Only	0.519	0.263	0.438
III Only	0.852	0.452	0.500
Actual	0.704	0.136	0.633

때문에 충분한 적용성을 가지고 있다고 판단된다. 특히, 중간 수준의 평가결과를 보이는 AMC-II 조건에 비해 POD는 높고, FAR은 낮은 장점을 가지면서 종합적인 판단지표인 CSI가 모든 조건 중 가장 높게 나타났다(Table 7).

5. 결론

본 연구에서는 IDQ곡선을 산정하고 홍수예보에 활용하는 기법을 소개하였다. IDQ곡선은 다양한 강우지속시간에서 존재할 수 있는 홍수 시나리오를 고려하여 강우예보 시점에서 간편하게 홍수예보를 수행할 수 있는 도표이다. IDQ곡선의 산정 및 홍수예보 평가에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) IDQ곡선을 산정하고 홍수예보 평가를 수행한 대상구역은 한강의 제2지류인 원주천 유역이다. Clark 단위도의 매개변수 검토정 절차를 거쳐 해당 유역에 알맞은 단위도 모형을 구축하였다.
- (2) IDQ곡선은 목표 홍수량을 만족시키는 다양한 강우를 역산하는 절차를 통해 산정되며, 이를 위해 유역의 강우-유출 모형은 Clark 단위도, 강우 주상도는 Huff 4분위법, 유효강우 분리는 NRCS방법을 이용하였다. 또한, 홍수발생 당시의 선행강우와 토양수분 상태를 반영하기 위해 AMC 조건에 따른 IDQ곡선을 각각 산정하였다.
- (3) 과거 10년 동안 발생한 강우-유출사상에 AMC 조건별 IDQ곡선을 이용한 홍수예보를 수행하여 그 성능을 평가한 결과, 탐지확률(POD)은 0.704, 경보실패율(FAR)은 0.136, 임계성공지수(CSI)는 0.633으로 나타났으며, 단일 AMC 조건의 IDQ곡선만을 이용했을 때에 비해 높은 탐지확률(POD)과 임계성공지수(CSI)를 가지면서, 낮은 경보실패율(FAR)을 나타내었다.

IDQ곡선을 이용한 홍수예보는 도표를 이용한 간편한 예보로서 복잡한 수문모형을 이용해 홍수예보를 발령하기 이전에 빠른 대처와 판단을 가능하게 할 수 있고, 지자체 공무원 등 수문학적 지식이 높지 않더라도 강우 예보결과를 이용해 도표 상에서 홍수유무를 판단할 수 있는 장점이 있다. 하지만 본 방법은 강우예보에 매우 의존적이고 수문모형과 실제 유역에서 발생하는 자연현상 사이에 존재하는 여러 가지 불확실성으로 인한 예보능력의 저하와 댐, 저수지 등 수공구조물의 치수능력을 반영하지 않은 자연 유출상태만을 고려한다는 단점이 존재한다.

향후, 유역에서 발생하는 다양한 불확실성을 고려한 확률론적 홍수예보기법과 단위도 기반의 강우-유출모형을 발전시켜 수공구조물의 치수능력을 고려한 분포형 혹은 준분포형 수문모형을 활용한다면, 더욱 발전된 홍수예보를 할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(15AWMP-B079625-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Bae, D. H., Shim, J. B. and Yoon, S. S. (2012). "Development and assesment of flow nomograph for the real-time flood forecsting in Cheonggye stream." *J. of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 11, pp. 1107-1119 (in Korean).
- Carpenter, T. M., Sperflage, J. A., Georgakakos, K. P., Sweeney, T. and Fread, D. L. (1999). "National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning system." *J. of Hydrology*, Vol. 224, pp. 21-44.
- Gourley, J. J., Erlingis, J. M., Hong, Y. and Wells, E. B. (2011). "Evaluation of tools used for monitoring and forecasting flash floods in the united states." *Weather and forecasting*, Vol. 27, pp. 158-173.
- Kim, J. G., Kang, B. S. and Yoon, B. M. (2014). "Analysis of intensity-duration-quantity (IDQ) curve for designing flood retention basin." *J. of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 47, No. 1, pp. 83-93 (in Korean).
- Kim, W. T., Bae, D. H., Cho, C. H. (2002). "Threshold runoff computation for flash flood forecast on small catchment scale." *J. of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 35, No. 5, pp. 553-561 (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime affairs (MLTM) (2009). *Hydrological annual report in Korea* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime affairs (MLTM) (2011). *Study on improvement and supplement of probability rainfall* (in Korean).
- Norbiato, D., Borga, M., Esposti, S. D. and Gaume, E. (2008). "Flash flood warning base on rainfall thresholds and soil moisture conditions : An assessment for gauged and ungauged basins.", *J. of hydrology*, Vol. 362, pp. 274-290.
- Ntelekos, A. A., Georgakakos, K. P. and Krajewski, W. F. (2005). "On the uncertainties of flash flood guidance:Toward probabilistic forecasting of flash floods." *J. of Hydrometeorology*, Vol. 7, pp. 896-915.
- Park, J. B., Shin, D. S., Park, M. J., Kang, B. G. and Shin, H. S. (2013). "Rainfall thresholds estimation to develop flood forecasting and warning system for Nakdong small river basins." *J. of Korea Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 13, No. 2, pp. 311-317 (in Korean).
- Reed, S., Schaake, J. and Zhang, Z. (2007). "Distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations." *J. of hydrology*, Vol. 337, pp. 402-420.
- Schaefer, J. T. (1990). "The critical success index as an indicator of warning skill." *Weather and Forecasting*, Vol. 5, pp. 570-575.
- Shin, H. S., Kim, H. T. and Park, M. J. (2004). "An application of making the flash flood warning trigger rainfall in real basin using GIS and GCUH. -At the Namcheon basin of the Sobaek mountain-" *J. of Korea Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 24, No. 4B, pp. 311-319 (in Korean).
- Sweeney, T. L. (1992). *Modernized areal flash flood guidance*, NOAA Tech. Rep. NWS HYDRO 44, Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA, Springfield, VA.
- Wilks, D. S. (1995). *Statistical methods in the atmospheric sciences*, Academic Press, Burlington, MA.