

내수배제계획 수립을 위한 IDQ(강우강도-지속시간-홍수량)곡선의 활용



강 부 식 |
단국대학교 토목환경공학과 부교수
bskang@dankook.ac.kr



김 진 겹 |
단국대학교 토목환경공학과 박사과정
jg_kim@dankook.ac.kr



김 영 도 |
인제대학교 환경공학과 조교수
ydkim@inje.ac.kr

1. 서론

최근 기후변화나 이상기후로 인해 수문사상의 불확실성이 증가하고 극치홍수량의 빈도와 규모 등이 증가함에 따라 내수배제계획에 있어서도 미래에 발생 가능한 홍수량에 대비할 수 있는 다양한 대안들이 필요한 실정이며, 기후변화로 인해 증가하는 내수 홍수 및 침수 위험도는 크게 증가하고 있으나 관련 연구는 매우 부족하기 때문에 다양한 위험도를 종합적으로 고려한 내수배제계

획 수립 기법이 요구되는 바이다.

기후변화와 이상기후에 따라 미래의 홍수량이 증가할 경우, 이에 대비할 수 있는 여러 대안들이 존재 할 수 있다. 설계기준 측면에서는 설계 빈도를 향상시키거나 설계수문량을 일정량 혹은 일정비율로 상향시키는 방법이 있을 수 있고, 치수대책으로서 하천 제방의 증고나 우수지 및 펌프장을 추가로 설치하여 침투홍수량 증가에 대비할 수 있다. 하지만 이러한 방안들은 아직까지 규모의 적정성을 판단하거나 결정하는데 뚜렷한 기준이 마련되어 있지 않다.

미래의 불확실성 및 기후변화에 따른 내배수 시설의 설계 및 내수배제계획에 대한 기준을 설정한다 하더라도 이미 건설된 구조물이나 내수배제계획에 곧바로 반영하기가 불가능하거나 가능하다 해도 막대한 자원과 예산이 소요된다. 따라서 기존의 내수배제 시설물은 그 능력을 유지하며 새롭게 건설되는 시설물이 기존의 시설물과 조화롭게 연계되어 내수홍수 및 침수 방어 능력을 극대화 할 수 있는 내수배제계획이 필요하다.

최근 수문학에서의 가장 중요한 이슈중 하나는 복잡한 강우-유출과정의 단순화과정에서 야기되는 불확실성, 수학적 모델링과정의 복잡성으로 말미암아 발생하는 단계간 오차전파, 기후변화로 인한 자연발생적 불확실성 등 다양한 원인의 불확실성들을 정량화하고 이를 적절히 설계에

반영하는 것이다. 주로 강우분석 및 확률강우량 산정, 강우-유출모형의 매개변수 산정, IDF (Intensity-Duration-Frequency) 해석등의 분야에서 관련된 연구가 진행되어 왔다. 강우분석 측면에서 Kavetski et al.(2006)은 Bayesian 이론을 통한 강우량의 불확실성 분석과 관측 강우량의 신뢰구간을 제시하였고, Lee et al.(2009)은 Bayesian 이론을 적용한 강우자료의 이상불 모의를 통해 유출량의 범위를 제시한 바 있다. 강우 확률분포형 적용성 분석 측면에서 Kim et al.(2008)은 극치강우사상의 불확실성을 고려하기 위해 FORGEX (FOCused Rainfall Growth curve EXtension)기법을 이용해 지역적 확률강우량을 산정하였고, Shin et al.(2008)은 Generalized Logistic 분포형을 이용한 강우 지역빈도 해석을 통해 지역적 확률강우량의 신뢰구간을 산정한 바 있다. 또한, 강우확률분포형의 매개변수에 산정기법을 개선하기 위해 Kim et al.(2010)과 Seo et al.(2011,a)은 Bayesian 이론을 통한 확률 분포형 매개변수의 범위를 제시하였고, Seo et al.(2011,b)은 Bootstrap 기법을 이용하여 확률 분포형 매개변수의 범위를 제시하였다.

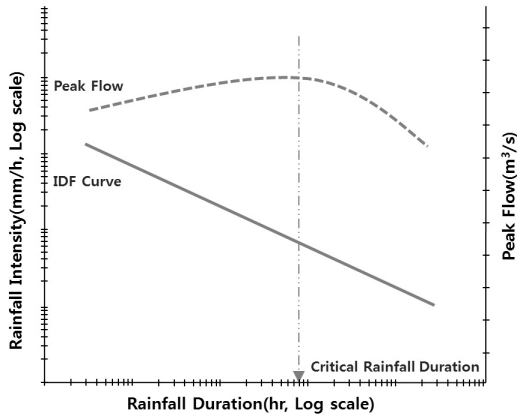
강우 빈도해석과정의 개선뿐만 아니라 강우-유출 모형의 매개변수에 산정기법의 개선을 위해 Ajami et al.(2006)과 Kwon et al.(2012)은 Bayesian 이론을 통한 단위유량도 매개변수의 신뢰구간 및 이에 따른 수문곡선의 범위를 제시하였다. 또한, IDF곡선식의 개선을 위해 Chen(1983)은 특정빈도의 확률강우량을 이용하여 IDF 곡선을 유도하는 경험식을 제시하였고 Koutsoyiannis et. al.(1998)은 지역적 IDF 공식의 일반식을 제시하였다. Sivapalan et. al.(2002)과 Madsen et. al.(2002)은 지점강우 빈도해석 결과로부터 지역적 IDF 곡선을 얻을 수 있는 기법을 개발하였다.

최근 연구동향을 살펴본 결과, 내수배제계획

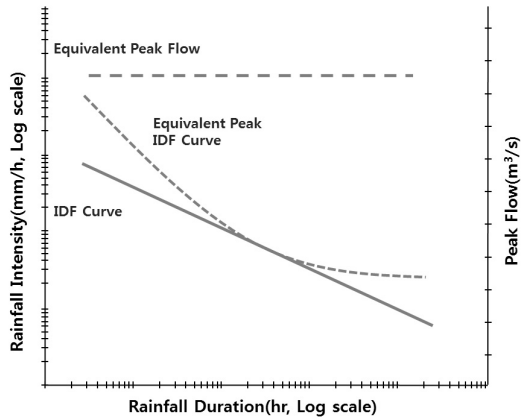
수립을 위한 설계홍수량 산정에 영향을 주는 각 요소별로 정량적인 분석기법과 매개변수의 신뢰구간을 제시하려는 노력이 계속되어 왔으며 설계 수문곡선 산정에 미치는 영향을 설계요소별로 분석하려는 경향을 확인할 수 있었다. 하지만, 실무적 관점에서 보았을 때 모든 불확실성을 정량적으로 분석하여 설계홍수량을 산정하고 내수배제 계획을 수립하기에는 여전히 어려움이 존재한다.

2. IDQ 해석

일반적인 IDF곡선은 강우 빈도해석의 결과로서 특정빈도 (Frequency)에 대하여 다양한 지속시간 (Duration)을 갖는 강우강도 (Intensity)를 연결한 곡선이다. 특정빈도의 곡선상에서 지속시간과 강우강도간의 다양한 조합을 이용하여 홍수해석을 수행하게 되면 최대홍수량을 발생시키는 점을 찾을 수 있는데 이때의 지속시간을 임계지속시간이라 한다. 임계지속시간에서의 강우사상을 설계강우로 사용하여 홍수해석을 수행하고, 이렇게 결정된 홍수위가 설계홍수위가 된다 (그림 1). 하지만 한편으로는 설계홍수위를 발생시킬 수 있는 강우강도와 지속시간의 조합은 임계지속시간에서의 설계강우 주변으로 무수히 존재할 수 있다. 만일 하천의 본류에서 발생하는 설계홍수수문곡선의 홍수량 및 홍수위에 따라 펌프장 운영에 대한 계획을 수립해야 한다면, 동일한 홍수위라도 다양한 설계강우가 발생시키는 다양한 홍수수문곡선에서 펌프장의 규모와 내수배제 효과가 달라지게 되고, 임계강우사상만이 아닌 다양한 강우사상에 대한 홍수량해석이 필요하게 된다. 본 연구에서는 홍수량 산정절차를 통해 발생가능한 홍수위에 상응하는 첨두홍수량을 산정한 뒤 IDQ해석을 통해 동일한 첨두홍수량을 갖는 임의지속시간에서의 홍수수문곡선을 유도하는 기법을 소개하고자 한다.



〈그림 1〉 IDF 곡선과 첨두홍수량간의 상관관계



〈그림 2〉 IDF 곡선과 IDQ 곡선과의 상관관계

〈그림 2〉에서의 점선으로 나타낸 곡선을 IDQ 곡선이라 하며, 설계자가 구조물의 형태나 계획 등을 고려하여 산정할 수 있는 홍수수문곡선의 빈도를 결정하게 되면 빈도에 대한 IDQ해석을 수행한 후 설계홍수수문곡선을 산정할 수 있다. 특정 설계빈도에서 임계지속시간에 해당하는 첨두홍수량은 IDQ해석을 위한 기준홍수량으로 결정할 수 있으며, 동일한 크기의 기준홍수량이 나타날 수 있는 강우를 수치적으로 역산할 수 있는데 이렇게 구한 강우에 해당하는 수문곡선을 등첨두수문곡선이라 할 수 있으며, 강우강도로 변환한 뒤 기존 IDF 곡선과 함께 그래프를 그린 결과는 〈그림 2〉와 같다. 임계지속시간에서 IDF곡선과 IDQ곡선은 서로 접하게 된다. 또한, 같은 요령으로 수위-유량 관계곡선식을 활용하여 등첨두수위를 기준으로 IDH곡선을 산정할 수 있다.

3. 대상유역의 선정 및 분석

본 연구에서 제시한 IDQ해석을 적용하기 위해 도시지역인 원주시가 존재하고 인근에 내수배제를 할 수 있는 하천이 위치한 원주천 유역을 대상으로 하였다. 선정된 유역은 홍수추적 절차

가 필요하지 않은 소규모 유역이며 관측강우량이 충분히(30년 이상) 존재하는 강우관측소가 인근에 있기 때문에 설계홍수량 산정 절차를 적용하기에 적절한 유역이라 판단되었다. 원주천은 지방하천인 흥양천, 화천 등을 포함하고 있으며 국가하천 섬강으로 유입된다. 구체적인 유역도는 〈그림 3〉과 같다.



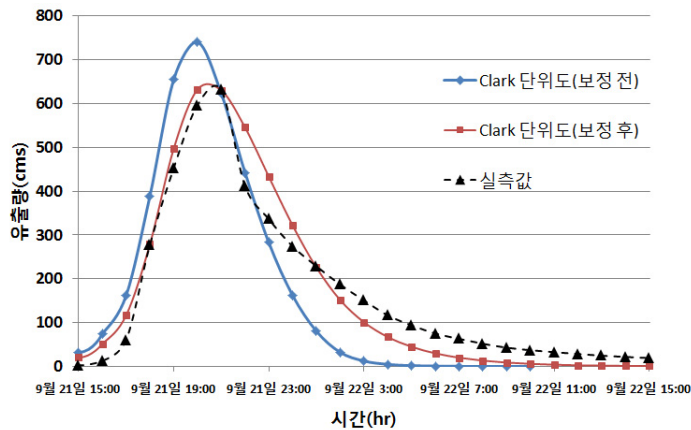
〈그림 3〉 원주천 유역도

홍수량 산정에 필요한 기법은 설계홍수량 산정요령(국토교통부, 2012)에 따라 적용하였으며, 강우분석에 관한 사항은 한국 확률강우량도 개선 및 보완연구 (국토교통부, 2011)에서 제시한 방법을 사용하였다.

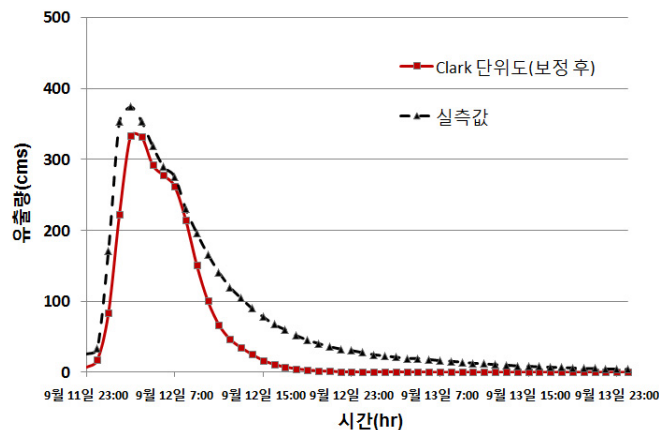
또한, 홍수수문곡선을 합성하기위해 Clark 단위도(Clark, 1945)를 사용하였다. Clark 단위도는 관측자료가 없는 유역에 경험식을 통해 매개변수를 산정할 수 있는 합성단위도 기법이지만, 본 연구에서 적용하는 유역은 원주 수위관측소를 출구로 하는 유역이기 때문에 관측자료를 이용하여 매개변수를 산정하고 홍수량을 산정하였다.

매개변수 보정을 위한 강우-유출사상을 채택하였으며 채택한 사상은 2010년 9월 21일 15시부터 22일 01시까지 강우와 이에 따른 수위 관측 자료이다. 관측된 수위는 수위-유량 관계곡선식을 이용해 유량으로 환산하였으며 수평직선분리법에 의해 직접유출량을 구분하였다. 매개변수 보정결과 도달시간(t)은 1.1시간, 저류상수(K)는 2.5로 산정되었으며, 보정 전후 수문곡선의 R^2 는 0.88에서 0.97로, RMSE는 48.8m³/s에서 25.6m³/s으로 개선되었다.

또한, 결정된 매개변수를 토대로 선행함수상태가 충분한 AMC(III)조건의 2010년 9월 11일



〈그림 4〉 Clark 단위도의 매개변수 보정



〈그림 5〉 Clark 단위도 검증결과(매개변수 보정 후)

23시부터 12일 08시까지의 강우사상과 이에 따른 유출량에 대해 검증절차를 수행하였다. 검증 수문곡선의 R2는 0.94이며 RMSE는 28.4m³/s로 양호한 검증결과를 나타내었다.

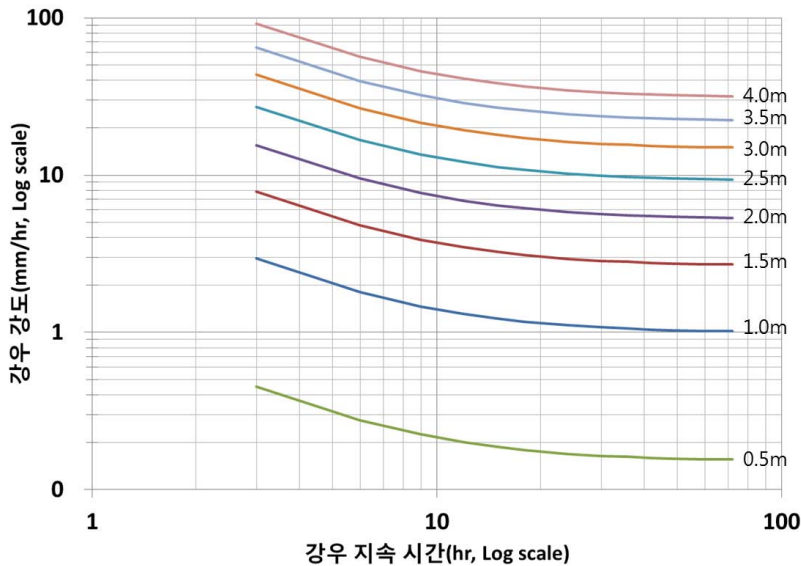
상에 따른 첨두홍수량을 첨두홍수위로 환산하여 내수배제를 실시할 지역의 IDQ 곡선을 작성해야 한다. 해당 지점의 수위-유량 관계곡선식을 이용하여 특정 수위에 해당하는 유출량을 목표 홍수량으로 설정하여 해당 유출량을 도출할 수 있는 여러 시나리오의 강우량을 역추정하는 방법으로 IDQ 곡선을 산정하고, 동일 수위에 해당하는 강우강도를 연결시킨 IDH 곡선으로 환산하였다.

4. 내수배제계획 수립을 위한 IDQ 곡선

내수배제계획 수립을 위해서는 다양한 강우사

〈표 1〉 원주 수위관측소 수위유량관계곡선식


지점	적용 범위	수위유량관계곡선식 ($Q: m^3/s, H(h): m$)	수위(m)	유량(m^3/s)
원주 ($H = h + 1$)	$0.49 \leq H \leq 0.93$	$Q = 0.298 \times (H - 0.490)^{3.320}$	0.5	7.9
	$0.93 < H \leq 1.17$	$Q = 97.410 \times (H - 0.870)^{3.050}$	1.0	51.0
	$1.17 < H \leq 1.50$	$Q = 15.500 \times (H - 0.830)^{1.700}$	1.5	135.4
	$1.50 < H \leq 2.80$	$Q = 71.891 \times (H - 1.150)^{2.110}$	2.0 2.5	268.4 471.0
	$2.80 < H \leq 6.30$	$Q = 27.671 \times (H - 0.750)^{2.802}$	3.0 3.5 4.0	752.2 1123.2 1595.0



〈그림 6〉 원주천의 IDH 곡선

5. 결론

본 연구에서는 내수배제계획 수립을 위한 원주천의 IDQ 해석을 실시하였다. 여기서 얻은 IDQ곡선 및 IDH곡선은 해당 지역의 홍수에경보 발령 시 신속한 의사결정 지원도구로서 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 내외수 연계 배수계획 수립을 위한 시나리오 설정 지원도구로 활용 가능하다. 또한, 본 곡선을 통해 동일 강우 지속시간에서의 강우강도 변화, 동일 강우강도에서의 지속시간 변화 등을 분석하여 해당 지역의 강우-유출 특성을 고려한 홍수량 산정이 가능하다. 최

근에는 IDQ 분석을 신속히 수행하기 위해 등첨 두 수문곡선 산정이 가능한 ‘HyGen’ 프로그램이 개발되었고 다양한 유역과 사상에 검증과정이 진행되고 있다. 

감사의 글

본고는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(13AWMP-B066744-01)에 의한 내외수홍수연구단의 연구비 지원에 의해 작성되었습니다.

참고문헌

- Ajami, N.K., Duan, Q., and Sorooshian, S. (2006) “An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction”, *Water Resource Research*, 43(W01403): 1–19.
- Chen, C.L. (1983) “Rainfall Intensity–Duration–Frequency Formulas”, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, pp. 1603–1621
- Clark, C.O. (1945) Storage and the unit hydrograph. *transaction of ASCE*, 110: 1419–1446
- Huff, F.A. (1967) “Time distribution of rainfall in heavy storm”, *Water Resource Research*, 3(4): 1007–1019
- Kavetski, D., Kuczera, G., and Franks, S. (2006). Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 1. Theory. *Water Resources Research*, 42(W03407).
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D, Manetas, A., (1998) “A Mathematical Framework for Studying Rainfall Intensity–Duration–Frequency Relationships”, *Journal of Hydrology*, Vol 206, pp. 118–135
- Madsen, H., Mikkelsen, P. S., Rosbjerg, D., Harremoes, P. (2002) “Regional Estimation of Rainfall Intensity–Duration–Frequency Curves using Generalized Least Squares Regression of Partial Duration Series Statistics”, *Water Resources Research*, Vol. 38, No. 11 pp. 21–1 ? 21–11
- Sivapalan, M., Blöschl, G. (1998) “Transformation of Point Rainfall to Areal Rainfall Intensity–Duration–Frequency Curves”, *Journal of Hydrology*, Vol 204, pp. 150–167
- 권현한, 이장경, 이종석, 나봉길 (2012) “Bayesian 모형을 이용한 단일사상 강우-유출 모형의 불확실성 분석”, *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, Vol. 45, No. 5 pp. 505–516

- 김상욱, 이길성, 박영진 (2010) “극치강우사상을 포함한 강우빈도분석의 불확실성 분석”, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, Vol. 43, No. 4, pp. 337-351
- 김정원, 남우성, 신주영, 허준행 (2008) “FORGEX기법을 이용한 한국 강우자료의 지역빈도해석에 관한 연구”, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, Vol. 41, No. 4 pp. 405-412
- 김진겸, 강부식, 윤병만 (2014) “홍수저류지 설계를 위한 강우강도-지속시간-홍수량(IDQ) 곡선 해석”, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, Vol. 47, No. 1, pp. 83-93
- 서영민, 박기범 (2011a) “Bayesian MCMC 및 Metropolis Hastings 알고리즘을 이용한 강우빈도분석에서 확률분포의 매개변수에 대한 불확실성 해석”, 한국환경과학회지, 한국환경과학회, Vol. 20, No. 3, pp. 329-340
- 서영민, 박기범 (2011b) “강우빈도해석에서 Bootstrap을 이용한 확률분포의 매개변수 추정에 대한 불확실성 해석”, 한국환경과학회지, 한국환경과학회, Vol. 20, No. 3, pp. 321-327
- 신홍준, 남우성, 정영훈, 허준행 (2008) “Generalized Logistic 분포형을 이용한 지역빈도해석의 불확실성 추정”, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, Vol. 28, No. 6b pp. 723-729
- 이효상, 전민우, Balin, D., Rode, M. (2009) “강우자료의 불확실성을 고려한 강우 유출 모형의 적용”, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, Vol. 42, No. 10, pp. 773-783