

# 홍수저류지 설계를 위한 강우강도-지속시간-홍수량(IDQ) 곡선 해석

## Analysis of Intensity-Duration-Quantity (IDQ) Curve for Designing Flood Retention Basin

김진겸\* / 강부식\*\* / 윤병만\*\*\*

Kim, Jin Gyeom / Kang, Boosik / Yoon, Byungman

### Abstract

This research was carried out for suggesting design criteria and procedure for maximizing flood control capacity by building flood control facilities like flood retention basin built in connection with existing facilities in order to cope with increased uncertainty due to factors such as urbanization and climate change. We suggested the procedure for the analysis under the various scenarios applicable for the cases of determining retention basin capacity as provision for the flood water level increase in main river channel or estimating flood water level reduction effect when retention basin capacity is given. Procedure for estimating design flood hydrograph at any duration using Intensity-Duration-Quantity (IDQ) originated from the existing IDF, and its application example were provided. Based on rainfall estimated by the IDQ analysis, it is possible to calculate an equivalent peak hydrographs under various scenarios, e.g. lower frequency hydrograph under same rainfall duration with water level higher than existing hydrograph, hydrograph with same peak and higher volume due to increased rainfall duration, hydrograph with higher peak and volume than existing hydrograph, etc.

**Keywords** : flood retention basin, IDF, IDQ, design flood, uncertainty analysis

### 요 지

기후변화 및 도시화 등의 요인으로 인하여 증가하는 불확실성에 대처하기 위하여 건설되는 홍수저류지 형태의 치수시설 물이 기존의 치수시설물과 연계되어 치수능력을 극대화 할 수 있는 설계기준과 절차의 제시를 위하여 본 연구가 수행되었다. 본류의 홍수위 증가량에 대비할 수 있는 저류지용량결정, 저류지용량이 주어질 경우의 본류의 홍수위 저감효과산정 등에 적용할 수 있는 다양한 시나리오 하에서의 분석을 위한 절차를 제시하였다. 기존 설계홍수량 산정절차에 근거한 IDQ (Intensity-Duration-Quantity) 분석을 이용하여 임의지속시간에서의 설계홍수수문곡선 산정기법을 제시하였고 그 활용사례를 제시하였다. IDQ 분석을 통해 산정한 강우량을 기반으로 등가첨두 수문곡선을 산정할 수 있으며, 기존 수문곡선과 동일한 지속시간 하에서 하천의 수위가 높아질 수 있는 저빈도 수문곡선과, 기존 수문곡선과 동일한 첨두홍수량을 지니지만 강우지속시간의 증가로 인해 유출체적이 증가하는 수문곡선, 기존 수문곡선에 비해 하천의 수위 및 수문곡선의 부피 모두 증가하는 수문곡선 등 다양한 형태의 수문곡선에 대한 시나리오해석을 가능하게 한다.

\* 단국대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정 (e-mail: jg\_kim@dankook.ac.kr)

Ph.D. Course, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook Univ., Yongin 448-701, Korea

\*\* 교신저자, 단국대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수 (e-mail: bskang@dankook.ac.kr, Tel: 031-8005-3471)

Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook Univ., Yongin 448-701, Korea

\*\*\* 명지대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: bmyoon@mju.ac.kr)

Professor, Department of Civil Engineering, Myongji Univ., Yongin 449-728, Korea

## 1. 서론

최근에 기후변화에 따라 수문사상의 불확실성이 증가하고 극치홍수량의 빈도와 규모 역시 증가함에 따라 치수 계획에 있어서도 증가된 홍수량에 대비할 수 있는 다양한 대안들이 모색되고 있다. 제방위주의 1차원적인 치수패러다임이 유역에서 홍수량을 제어하는 2차원적 치수패러다임으로 확장됨에 따라 설계기준도 이를 적절히 반영할 수 있는 재검토가 요구되고 있다. 기후변화의 영향을 설계기준에 반영하기 위해서 구조물별 설계빈도 기준을 일부 상향 조정하는 방식을 적용하여 왔으나 이와 같은 방법만으로는 한계가 있으므로 근본적인 개선이 필요하다는 지적이 있다(MLIT, 2012).

미래 기후변화에 따른 홍수량의 증가가 예상될 때 이에 대비할 수 있는 여러 대안이 있을 수 있다. 설계기준의 측면에서 보면 설계빈도를 상향시키는 방법, 설계수문량을 일정량 혹은 일정비율로 상향시키는 방법이 있고, 치수대안별로 보면 제방을 증고하여 침투홍수위의 증가에 대비하는 방안, 저류지나 댐을 설치하여 홍수량을 저류시키는 방안 등이 대표적이지만, 모든 경우에 있어서 어느 정도의 규모가 적절한지에 대해서는 뚜렷한 기준이 마련되어 있지 못한 실정이다. 기후변화에 따른 새로운 설계기준을 설정한다해도 기존의 설계기준에 따라 이미 건설된 치수구조물은 새로운 설계기준에 맞춰 치수능력을 증가시키기가 불가능하거나 가능하더라도 막대한 자원과 예산이 소요되기 마련이다. 따라서 기존에 건설된 치수구조물은 그 자체의 치수능력을 유지한 채, 새로이 건설되는 치수시설물이 기존의 치수시설물과 조화롭게 연계되어 치수능력을 극대화 할 수 있는 설계기준의 제시를 위하여 본 연구가 수행되었다. 또한 기존의 설계홍수량 산정이 설계홍수위를 결정하는 부분에 지나치게 집중되었다는 점을 지적하며, 제방과 저류지가 복합적으로 운영되는 조건에서 적용할 수 있는 방법론을 제시하고자 한다.

최근 수문학에서의 가장 중요한 이슈 중 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) 해석 등의 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 앙상블 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. (2011a)은 Bayesian 이론을 통한 확률 분포형 매개변수의 범위를 제시하였고, Seo et al. (2011b)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, IDF 곡선식의 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. (1998)과 Madsen et al. (2002)은 지점강우 빈도해석 결과로부터 지역적 IDF 곡선을 얻을 수 있는 기법을 개발하였다.

최근 연구동향을 살펴본 결과, 설계홍수량 산정에 영향을 주는 각 요소별로 정량적인 분석기법과 매개변수의 신뢰구간을 제시하려는 노력이 계속되어 왔으며 설계수문곡선 산정에 미치는 영향을 설계요소별로 분석하려는 경향을 확인할 수 있었다. 하지만, 실무적 관점에서 보았을 때 모든 불확실성을 정량적으로 분석하여 설계홍수량을 산정하기에는 어려움이 존재한다. 본 연구에서는 설계홍수량의 증감을 초래할 수 있는 여러 다양한 불확실성 요소가 존재한다는 것을 지적하며, 최근 기후변화 및 여러 불확실성요소들로 인하여 증가된 홍수량을 설계에 반영하기 위하여 IDF 곡선을 응용한 강우강도-지속시간-홍수

량(IDQ; Intensity-Duration-Quantity) 곡선(이하 'IDQ 곡선')을 제시하고 이의 해석과 활용방안을 제시하고자 한다.

## 2. 연구방법 및 이론

### 2.1 IDQ 해석

일반적인 IDF 곡선은 강우 빈도해석의 결과로서 특정 빈도(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(Fig. 1). 하지만 한편으로는 설계홍수위를 발생시킬 수 있는 강우강도와 지속시간의 조합은 임계지속시간에서의 설계강우 주변으로 무수히 존재할 수 있다. 만일 하천의 분류에서 발생하는 설계홍수수문곡선의 홍수량을 분담하기 위한 홍수저류시설을 계획하는 경우 동일한 설계홍수위라도 다양한 설계강우가 발생시키는 다양한 홍수수문곡선에서 홍수저류지의 규모와 효과가 달라지게 되고, 임계강우사상만이 아닌 다양한 강우사상에 대한 홍수량해석이 필요하게 된다. 본 연구에서는 홍수량 산정절차를 통해 해당 유역의 설계빈도에 상당하는 첨두홍수량을 산정한 뒤 IDQ 해석을 통해 동일한 첨두홍수량을 갖는 임의지속시간에서의 홍수수문곡선을 유도하는 기법을 소개하고자 한다. 본 연구에서 제시하는 IDQ 해석은 동일한 첨두홍수량을 발생시키는 강우사상,

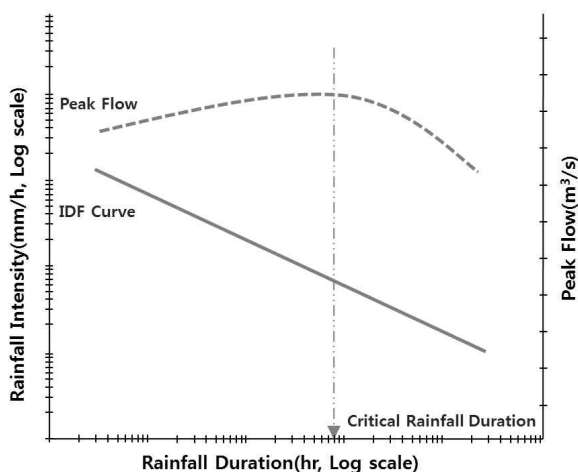


Fig. 1. Relation of IDF Curve and Peak Flow

즉 등첨두홍수수문곡선을 이용하여 강변저류시설 혹은 홍수저류시설 등의 설계에 활용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

Fig. 2에서의 점선으로 나타낸 곡선을 IDQ 곡선이라 하며, 설계자가 수공구조물의 형태나 수자원계획 등을 고려하여 산정할 수 있는 홍수수문곡선의 빈도를 결정하게 되면 빈도에 대한 IDQ 해석을 수행한 후 설계홍수수문곡선을 산정할 수 있다. 특정 설계빈도에서 임계지속시간에 해당하는 첨두홍수량은 IDQ 해석을 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 Fig. 2와 같다. 임계지속시간에서 IDF 곡선과 IDQ 곡선은 서로 접하게 된다.

### 2.2 설계시나리오별 IDQ 곡선의 활용

#### 2.2.1 설계홍수위의 초과 홍수량에 대한 저류지 설계

하천의 제방은 설계홍수량에 해당하는 홍수위를 기준으로 설계하게 된다. 먼저 불확실성의 증가로 인하여 제방의 치수능력을 초과하는 홍수에 대비하여 홍수저류지를 설계해야하는 경우를 생각할 수 있다. 만일 설계홍수위로부터  $\Delta H$ 만큼의 홍수위증가에 대비할 수 있는 저류지를 설계하고자 한다면 저류지의 용량은 최소한  $\Delta H$ 의 월류수위에 대응하는 월류량에 해당하는 값 이상의 규모를 가져야 한다. Fig. 3에서의 A, B, C 세 가지 수문곡선 중 A곡선을 설계수문곡선이라하면 동일한 첨두홍수량을 받

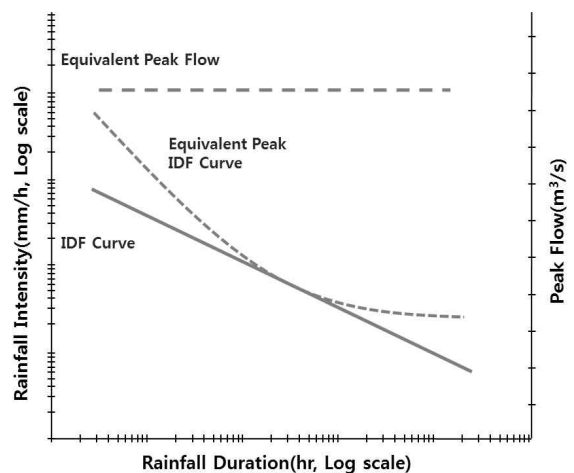


Fig. 2. Relation of IDF Curve and IDQ Curve

생시킬 수 있는 수문곡선 중 B나 C의 수문곡선을 생각할 수 있는데, 각 수문곡선에서의  $\Delta H$ 의 월류수위에 대응하는 월류홍수량은 B수문곡선에서 가장 큰 값( $\Delta Q_B$ )을 갖게 된다. 만일 B수문곡선이 유역에서 충분히 발생가능한 수문곡선이라면 홍수저류지는  $\Delta Q_B$  이상의 용량을 가져야 한다.

Fig. 3의 A, B, C곡선과 A', B', C'곡선에 해당하는 강우사상이 Fig. 4에 표기되어 있다. 기존 IDF 곡선과 IDQ 곡선이 만나는 점 A는 기존 홍수량 산정절차에 따라 산정된 임계지속시간에 해당하는 강우강도이며, 점 A'은 지속시간은 동일하되, 재현기간이 높은 강우에 해당한다. 점 B는 기존 설계강우보다 긴 지속시간에서 동일한 첨두홍수량을 발생시키는 강우사상에 해당한다. 강우지속시간이 길어 총홍수량의 체적이 크게 나타나게 되는 강우사상이다. 점 B'는 점 B와 동일한 지속시간을 가지며, 높은 재현기간의 강우가 발생하는 경우의 강우사상이다. 점 C

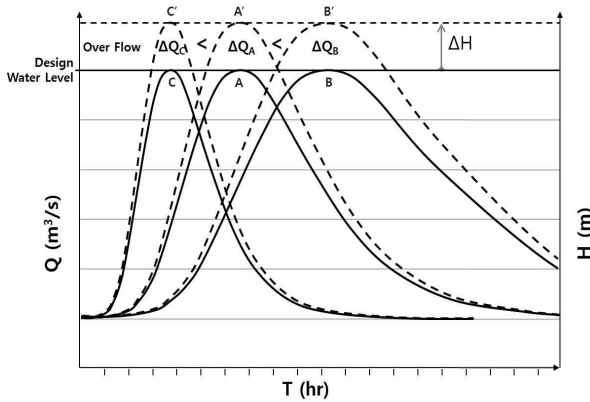


Fig. 3. Equivalent Peak Hydrograph for Water Level Increase

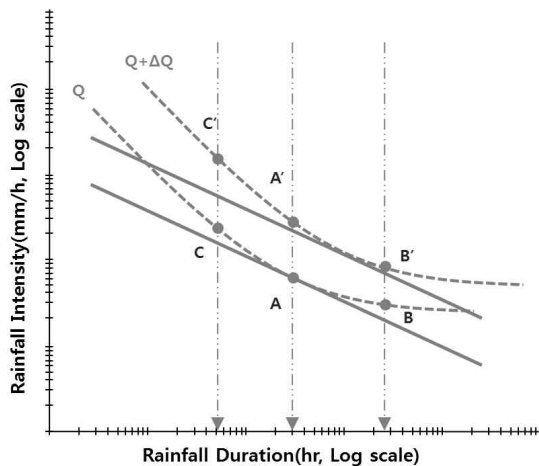


Fig. 4. Schematic Analysis of Design Rainfall Intensity using IDQ Curve

와 C'은 지속시간이 짧고 강우강도가 큰 사상이므로 강우량은 적지만 짧은 시간에 높은 강도의 강우가 발생하는 경우에 해당한다. IDQ 곡선도 IDF 곡선과 마찬가지로 강우강도식의 형태로 표현할 수 있다.

## 2.2.2 설계홍수위로부터 일정수위만큼 홍수위를 저감하기 위한 저류지 설계

불확실성의 증가에 대비하여 홍수저류지를 설치함으로써  $\Delta H$ 만큼 홍수위를 저감하고자 하는 경우를 생각할 수 있다. 목표저감량  $\Delta H$ 를 달성하기 위하여 필요한 홍수저류지의 규모는 설계홍수위에 대한 수문곡선과 설계홍수위로부터  $\Delta H$ 만큼 저하된 홍수위사이의 수문곡선의 체적이 된다. Fig. 5에서도 Fig. 3과 마찬가지로 A, B, C 세 가지 수문곡선을 보여주고 있는데 B수문곡선에서 요구되는 저류지 용량이 가장 큰 값( $\Delta Q_B$ )을 갖게 되고, C 곡선에서 가장 작은 용량( $\Delta Q_C$ )을 갖게 된다. 즉  $\Delta Q_B$  이상의 저류지는  $\Delta H$  이상의 홍수위저감효과를 보일 수 있다.

## 2.2.3 일정 규모의 저류지에 대한 홍수위저감 효과

강변저류지와 같은 저류구조물의 규모는 지형조건이나 사회경제적 제약조건으로 인하여 저류용량이 미리 결정되는 경우가 있다. 이런 경우 예상되는 수위저감효과는 홍수수문곡선의 형태에 따라 달라질 수 있다. 기존의 설계홍수 수문곡선 외에 동일 첨두조건에서 발생하는 여러 수문곡선을 검토하여 최소 수위저감 효과를 계산하여 강변저류지의 치수능력평가를 수행할 수 있다. Fig. 6에서 앞선 경우와 마찬가지로의 A, B, C 수문곡선에 대하여 C곡선은 가장 큰 수위저감효과를 B곡선은 가장 작은 수위저감효과를 보여준다.

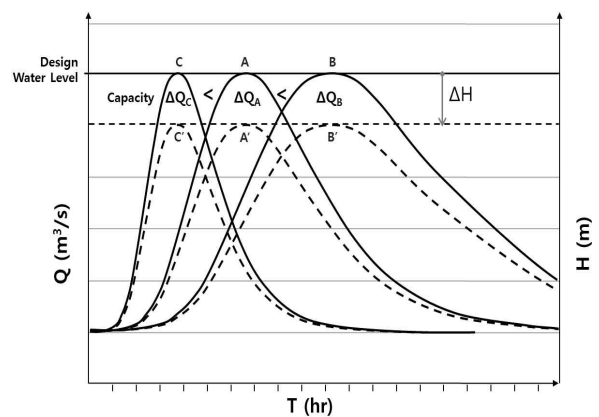


Fig. 5. Equivalent Peak Hydrograph for Water Level Decrease

### 3. 대상유역의 선정 및 분석

#### 3.1 대상유역선정

본 연구에서 제시한 설계홍수량 산정기법을 적용하기 위한 유역은 강원도 원주시에 위치한 원주천 유역으로서 원주 수위관측소를 출구로 하는 유역을 대상으로 하였다. 선정된 유역은 홍수추적 절차가 필요하지 않은 소규모 유역이며 관측강우량이 충분히(30년 이상) 존재하는 강우관측소가 인근에 있기 때문에 설계홍수량 산정 절차를 적용하기에 적절한 유역이라 판단되었다. 원주천은 지방하천

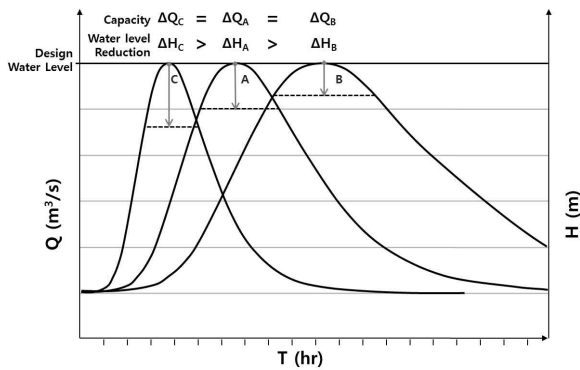


Fig. 6. Equivalent Peak Hydrograph for Flood Control Capacity

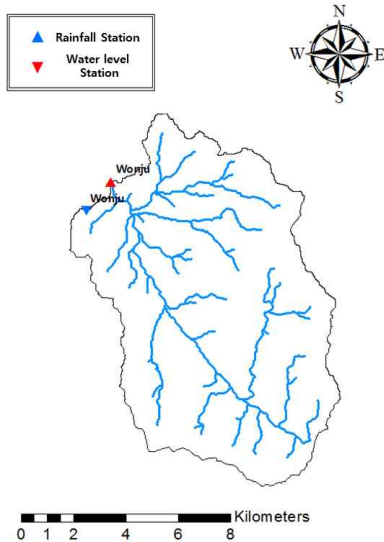


Fig. 7. Wonju River Basin

인 홍양천, 화천 등을 포함하고 있으며 국가하천 섬강으로 유입된다. 구체적인 유역도는 Fig. 7과 같다. 수위관측소는 화천합류부 하류에 위치한 봉학교지점이다.

기본적인 유역특성분석은 ESRI의 ArcGIS 9.3 프로그램과 Extension 기능인 ArcHydro를 이용하여 산정하였고 원주천 유역의 특성인자는 Table 1에 나타나 있다.

Table 1. Basin Characteristics

Area (km <sup>2</sup> )	River Length (km)	Flow Length (km)
94.43	13.34	18.15
River Slope (m/m)	Basin Slope (m/m)	Basin Perimeter (km)
0.0169	0.363	62.65

#### 3.2 강우 분석

강우분석의 기초가 되는 강우관측소는 유역내 존재하는 기상청 관할의 원주관측소를 대상으로 하였고, 제원은 Table 2와 같다.

선정된 원주관측소의 관측개시연도는 1971년이지만 강우 빈도해석에 필요한 시우량자료를 보유하고 있는 기간은 39개년 이상(1973~현재)이며, 이는 우리나라 강우 빈도해석 시 최소 관측년수의 기준으로 제시되고 있는 30개년 이상이므로 기본적인 신뢰도를 갖추고 있음을 알 수 있다.

지점 확률강우량을 산정하기 위해서 1973년 1월부터 2010년 12월까지의 시우량자료를 수집하였으며, 지속시간은 1, 2, 3, 5, 6, 9, 12, 18, 24, 48, 72시간으로 나누어 연최대강우량을 산정하였고 선정된 지속시간별 연최대강우량을 토대로 지점 확률강우량을 산정하였다. 설계홍수량 산정요령(MLIT, 2012)에 따라 지점 확률강우량 산정시 확률분포함수는 Gumbel 분포를 채택하였으며, 매개변수 추정방법은 확률가중모멘트법을 채택하였다. 확률강우량은 국립방재연구소의 FARD (Frequency Analysis of Rainfall Data) 2006을 사용하여 산정하였다.

지점확률강우량을 면적확률강우량으로 환산하기 위해 면적우량환산계수(ARF)를 적용하였다. 면적우량환산계수는 MLIT (2011)의 연구에서 제시한 ARF 공식을 따르

Table 2. Specification of Rainfall Station

Name	Type	Location	Longitude	Latitude	Altitude	Observation Start	Organization
Wonju	TM	Wonju-si MyeongRyun-dong	127° 56'	37° 20'	152.2 m	1971. 9(D) 1973. 1(H)	KMA

며, 원주천 유역은 한강유역에 속하기 때문에 한강유역의 매개변수를 적용하였다. 단, 주요 지속시간에 해당하지 않는 지속시간에 한해서 평균값을 사용하였으며 강우지속시간이 48시간을 초과하는 경우에는 강우의 면적감소율이 미미하기 때문에(2% 미만) 일괄적으로 1로 처리하였다. 산정한 빈도별, 지속시간별 ARF결과는 Table 3과 같고, 최종적으로 결정된 면적확률 강우량은 Table 4와 같다.

설계강우의 시간분포는 Huff 방법을 사용하며, 설계홍수량 산정요령(MLIT, 2012)에 따라 초과확률 50%의 3분위 강우시간분포를 사용하였다. 한국확률강우량도 보완

및 개선연구(MLIT, 2011)에서 산정한 원주관측소의 분위별 무차원 누가곡선 분포와 6차 회귀식은 다음 Tables 5 and 6과 같다.

### 3.3 설계홍수량 산정

#### 3.3.1 유효우량 산정

유효우량은 NRCS 방법을 사용하며, 원주천 유역의 개략토지이용도 및 개략토양도를 중첩한 후 유역평균 유출곡선 지수를 산정하는 방법을 사용하였다. Figs. 8 and 9

Table 3. Area Reduction Factor by Return Period and Duration

Duration	Return Period						
	2 yr	10 yr	30 yr	50 yr	80 yr	100 yr	200 yr
3 hr	0.9601	0.9613	0.9638	0.9653	0.9676	0.9666	0.9680
6 hr	0.9753	0.9858	0.9849	0.9856	0.9835	0.9803	0.9851
9 hr	0.9803	0.9715	0.9669	0.9664	0.9636	0.9666	0.9638
12 hr	0.9820	0.9712	0.9716	0.9728	0.9718	0.9698	0.9701
18 hr	0.9822	0.9659	0.9676	0.9654	0.9677	0.9661	0.9674
24 hr	0.9846	0.9770	0.9764	0.9756	0.9766	0.9737	0.9741
36 hr	0.9876	0.9820	0.9807	0.9799	0.9797	0.9793	0.9781
48 hr	0.9907	0.9871	0.9849	0.9842	0.9828	0.9850	0.9820

Table 4. Probable Rainfall of Wonju Basin

Duration	Return Period						
	2 yr	10 yr	30 yr	50 yr	80 yr	100 yr	200 yr
3 hr	63.0	97.8	119.1	129.1	138.4	142.3	155.3
6 hr	89.0	141.9	172.7	187.0	199.6	205.0	225.1
9 hr	106.7	167.9	204.2	220.6	235.6	243.5	265.7
12 hr	119.4	189.1	231.8	251.0	268.7	276.3	302.7
18 hr	137.7	219.5	270.7	292.4	314.6	323.7	355.3
24 hr	151.4	245.9	303.6	328.8	353.6	363.6	398.9
36 hr	185.3	309.4	385.2	419.3	451.6	466.0	511.1

Table 5. Dimensionless Cumulative Distribution Curve (Exceedance Prob. 50%)

Type	Quartile	Duration(%)										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Cumulative Rainfall (%)	1 st	0	17	40.2	55	63.3	72.1	79.4	85	73.1	97.5	100
	2 nd	0	4.7	13.3	30.2	52.2	70.7	82	89	94.5	97.9	100
	3 rd	0	3.1	8.5	15.8	25.4	40.9	57.6	79.5	91.5	97.4	100
	4 th	0	2.4	6.8	14.2	20.5	27.7	39.9	50.1	70.9	90.9	100

Table 6. Dimensionless Regression Equation of 3rd Quartile Huff Distribution

Quartile	Regression Equation
3rd	$Y = 0.051419171 - 0.212547993667X + 0.078317818513X^2 - 0.003676588864X^3 + 0.000085810961X^4 - 0.000000862858X^5 + 0.000000003063X^6$

여기서, Y는 무차원 누가강우량(%), X는 무차원 강우지속기간(%)

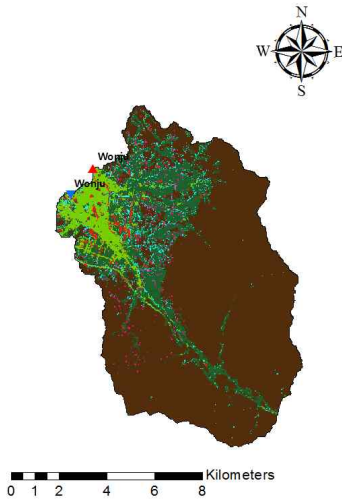


Fig. 8. Landuse Map of Wonju Basin

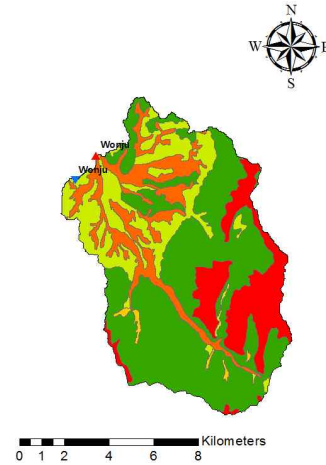


Fig. 9. Soil map of Wonju Basin

Table 7. Estimation of Curve Number (CN) in Wonju Basin

Landuse	Soil Type								Total	CN
	A		B		C		D			
	Area	CN	Area	CN	Area	CN	Area	CN		
Farm	0.82	63	0.15	74	0.06	82	0.03	85	1.05	CN II=68.3 CN III=83.2
Paddy	11.90	79	3.25	79	0.80	79	0.72	79	16.67	
Forest	38.78	56	26.96	75	0.59	86	0.40	91	66.74	
Pasture	1.56	30	0.31	58	0.07	71	0.08	78	2.01	
Bare land	0.87	77	0.23	86	0.03	91	0.03	94	1.15	
Urbanization	5.79	89	0.54	92	0.20	94	0.27	95	6.79	
Water	0.01	100	0.00	100	0.01	100	0.00	100	0.02	
Total	59.72		31.43		1.75		1.53		94.43	

는 유출곡선 지수 산정 시 사용한 원주천 유역의 개략토지 이용도와 개략토양도이다. 또한, Table 7은 GIS 상에서 계산한 유역평균 유출곡선 지수를 정리한 결과이다.

### 3.3.2 단위도의 매개변수 산정

본 연구에서는 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 관측자료이다. 관측된 수위는 수위-유량 관계곡선식을 이용해 유량으로 환산하였으며 수평직선분리법에 의해 직접유출량을 구분하였다. 매개변

수 보정결과 도달시간( $t_c$ )은 1.1시간, 저류상수(K)는 2.5로 산정되었으며, 보정 전후 수문곡선의  $R^2$ 는 0.88에서 0.97로, RMSE는  $48.8\text{ m}^3/\text{s}$ 에서  $25.6\text{ m}^3/\text{s}$ 로 개선되었다.

또한, 결정된 매개변수를 토대로 선행함수상태가 충분한 AMC (III) 조건의 2010년 9월 11일 23시부터 12일 08시까지의 강우사상과 이에 따른 유출량에 대해 검증절차를 수행하였다. 검증 수문곡선의  $R^2$ 는 0.94이며 RMSE는  $28.4\text{ m}^3/\text{s}$ 로 양호한 검증결과를 나타내었다.

앞서 산정한 설계강우량, CN값, 단위도를 토대로 빈도별, 지속시간별 확률홍수량을 산정하여 Table 9에 나타내었다. 진하게 표시된 항목은 임계지속시간에 해당하는 설계홍수량이다.

#### 4. IDQ 해석을 이용한 설계홍수수문곡선 산정

원주천은 지방하천으로서 1999년에 수립된 원주천 하천정비기본계획(MILT, 1999)에 의하면 하천설계빈도가 80년으로 설정되어 있어 80년 빈도를 기준으로 IDQ 해석을 수행하고자 한다. Table 9의 계산결과에 따르면 임계지속시간은 9시간, 재현기간 80년에 대한 설계홍수량은  $684.7\text{ m}^3/\text{sec}$ 가 된다. 본 연구에서는 80년 빈도의 홍수량  $Q_{80}$ 에 대한 IDF 곡선과 IDQ 곡선을 중첩한 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

이와 같은 IDQ 해석을 통해 기존 설계 홍수수문곡선 산정기법에서 사용하는 강우량인 점 A( $D=D_c$ ,  $D_c$ 는 임계지

Table 8. Rating Curve of Wonju Water Level Station

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

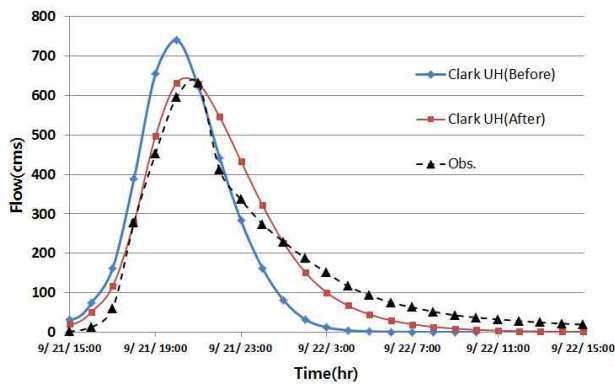


Fig. 10. Calibration of Clark UH Parameters

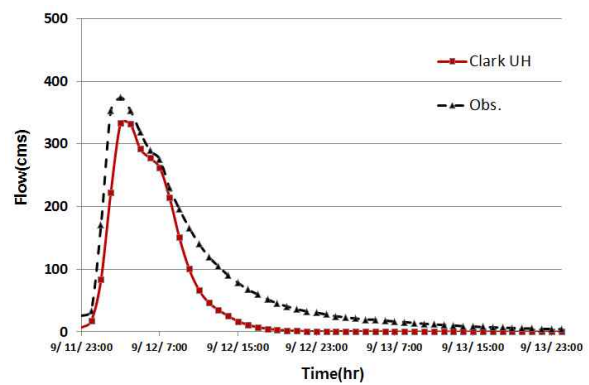


Fig. 11. Validation of Clark UH Parameters

Table 9. Design Flood using Clark UH

Return Period	Duration							
	3 hr	6 hr	9 hr	12 hr	18 hr	24 hr	36 hr	48 hr
30 yr	400.6	556.4	572.1	567.5	514.4	468.8	398.2	334.5
50 yr	449.5	617.3	631.1	626.1	564.4	515.1	428.3	368.6
80 yr	495.0	671.4	684.7	680.3	615.7	561.0	465.9	400.5
100 yr	514.9	694.6	713.2	703.6	636.8	579.3	482.6	416.1
200 yr	580.1	781.5	793.5	784.9	710.2	644.5	535.4	460.5



## 5. 결 론

본 연구에서는 홍수량의 불확실성에 대비하기 위하여 홍수저류지의 설치를 통하여 치수능력을 증가시키고자 하는 경우, 새로이 건설되는 치수시설물이 기존의 치수시설물과 연계되어 치수능력을 극대화 할 수 있는 설계기준의 제시를 목적으로 수행되었다. 본류의 홍수위 증가량에 대비할 수 있는 저류지용량결정, 저류지용량이 주어질 경우의 본류의 홍수위 저감효과산정 등에 적용할 수 있는 다양한 시나리오 하에서의 분석을 위한 기준을 제시하였다. 기존 설계홍수량 산정절차에 근거한 IDQ 해석을 추가하여 임의지속시간에서의 설계홍수수문곡선 산정기법을 제시하였고 그 활용사례를 제시하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) IDQ해석은 기존 IDF(강우강도-지속시간-재현빈도) 분석 방법과 유사하게 기존 재현빈도의 설계홍수량의 첨두량과 동일한 첨두량을 나타낼 수 있는 등첨두수문곡선을 찾아 IDF 곡선의 형태로 나타내며, 해당 유역에서 분석된 IDF 곡선과 중첩하여 그래프 형태로 분석하는 방법이다.
- 2) 재 산정된 설계홍수수문곡선은 IDQ 해석을 통해 산정한 강우량을 기반으로 새롭게 산정되는 수문곡선으로서, 기존 수문곡선과 동일한 지속시간 하에서 하천의 수위가 높아질 수 있는 저빈도 수문곡선과, 기존 수문곡선과 동일한 첨두홍수량을 지니지만, 강우발생빈도 및 강우총량의 차이로 인해 수문곡선의 부피가 증가하는 수문곡선, 기존 수문곡선에 비해 하천의 수위 및 수문곡선의 부피 모두 증가하는 수문곡선 등 다양한 형태의 수문곡선에 대한 시나리오 해석을 가능하게 한다.
- 3) 본 연구에서 제시한 설계홍수수문곡선은 단순 저빈도 강우에 의한 홍수량 증가뿐만 아니라 첨두홍수량에는 변화가 없고 부피가 증가하는 형태, 첨두홍수량과 부피가 모두 증가하는 형태를 고려할 수 있기 때문에 설계 및 계획 단계에서 활용 목적에 따라 다양하게 활용될 수 있을 것이라 기대한다.
- 4) 설계자의 판단에 따라 단순 저빈도 강우에 의한 홍수량 증가에 따라 해당 하천의 수위 증가가 예상될 경우 수위와 관련이 있는 준설량 산정, 제방 및 보의 설계 및 평가에 사용될 수 있으며, 첨두홍수량에는 변화가 없고 부피가 증가하는 형태의 수문곡선을 고려해야 할 경우 하천의 총유출체적과 관련이 있는 댐이나 저수지, 강변저류지 등 저류구조물 설계 및

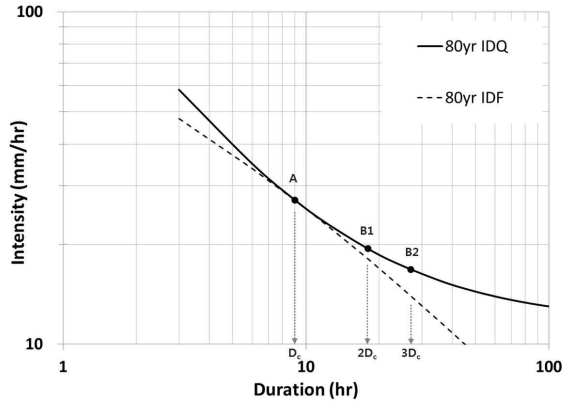


Fig. 12. IDQ Analysis of Wonju Basin

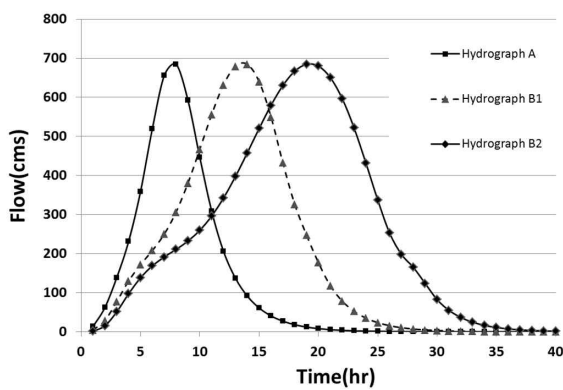


Fig. 13. Comparison of Hydrograph

속시간)외에 홍수량은 동일하나 홍수체적의 증가에 대응하는 점 B1( $D=2D_c$ )과 점 B2( $D=3D_c$ )를 찾을 수 있다. 지속시간이 임계지속시간에 비해 짧은 점도 찾을 수 있으나 IDQ 해석에 있어서 관심있는 부분은 임계지속시간 이상의 지속시간에 대한 강우이므로 설계에서 큰 의미가 없다.

점 B1과 B2는 중첩된 곡선 중 80년의 재현기간에 해당하는 IDF 곡선과 IDQ<sub>80</sub> 곡선이 임계지속시간보다 긴 지속시간에서 만나는 점으로서 첨두홍수량은 원설계 홍수량과 동일하지만 재현기간이 길고, 강우지속시간도 길어 홍수수문곡선의 부피가 크게 나타날 수 있는 강우강도에 해당한다. 물론 이것이 80+a년의 재현기간에서의 임계지속시간에 대한 설계를 의미하는 것은 아니기 때문에 a년의 재현기간이 완전히 확보되는 것은 아니다. 여기서 a는 홍수저류지 설치로 인하여 추가적으로 확보할 수 있는 재현기간 또는 안전도라고 이해할 수 있을 것이다.

기존의 방법으로 산정한 설계홍수수문곡선과 본 연구에서 제시한 IDQ 해석을 추가하여 산정한 설계홍수수문곡선을 비교하여 Fig. 13에 나타내었다.

평가 시에 용이하게 사용될 수 있을 것이다.

향후, 해당 지역에서의 적절한 초과확률을 갖는 최대 지속시간 결정에 관한 연구를 수행한다면 임계지속시간 외에 수문 설계에 활용할 수 있는 강우지속시간의 범위를 제시하여 정량적인 IDQ 분석 결과를 도출할 수 있을 것이라 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(13AWMP-B066744-01)에 의한 내외수홍수 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- 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*, Vol. 43(W01403), pp. 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*, Vol. 110, pp. 1419-1446.
- Huff, F.A. (1967). "Time distribution of rainfall in heavy storm." *Water Resource Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1019.
- Kavetski, D., Kuczera, G., and Franks, S. (2006). "Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 1. Theory." *Water Resources Research*, Vol. 42, No. 3, W03407.
- Kim, J.W., Nam, W.S., Shin, J.Y., and Heo, J.H. (2008). "Regional frequency analysis of South Korean rainfall data using FORGEX method." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 4 pp. 405-412(in Korean).
- Kim, S.U., Lee, K.S., and Park, Y.J. (2010). "Analysis of uncertainty of rainfall frequency analysis including extreme rainfall events." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 4, pp. 337-351(in Korean).
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D., and Manetas, A. (1998). "A mathematical framework for studying rainfall Intensity-Duration-Frequency relationships." *Journal of Hydrology*, Vol. 206, No. 1-2, pp. 118-135.
- Kwon, H.H., Kim, J.G., Lee, J.S., and Na, B.K. (2012). "Uncertainty assessment of single event rainfall-runoff model using bayesian model." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 5, pp. 505-516 (in Korean)
- Lee, H.S., Jeon, M.W., Balin, D., and Rode, M. (2009). "Application of rainfall runoff model with rainfall uncertainty." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 10, pp. 773-783(in Korean).
- Ludwig, R., May, I., Turcotte, R., Vescovi, L., Braun, M., Cyr, J.-F., Fortin, L.-G., Chaumont, D., Biner, S., Chartier, I., Caya, D., and Mauser, W. (2009). "The role of hydrological model complexity and uncertainty in climate change impact assessment." *Advances in Geosciences*, Vol. 21, No. 21, pp. 63-71.
- Madsen, H., Mikkelsen, P.S., Rosbjerg, D., and 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.
- Mansell, M.G. (1997). "The effect of climate change on rainfall trend and flooding risk in the west of Scotland." *Nordic Hydrology*, Vol. 28, No. 1, pp. 37-50.
- MLIT. (1999). *Wonju river maintenance basic plan*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 78-81(in Korean).
- MLIT. (2011). *Study on Improvement and Supplement of Probability Rainfall in South Korea*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 8.8-8.11(in Korean).
- MLIT. (2012). *Guideline of Design Flood Estimation*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 1-3(in Korean).
- Seo, Y.M., and Park, K.B. (2011a). "Uncertainty analysis for parameters of probability distribution in rainfall frequency analysis by bayesian MCMC and metropolis Hastings Algorithm." *Journal of the Environmental*

- Sciences*, KENSS, Vol. 20, No. 3, pp. 329-340 (in Korean).
- Seo, Y.M., and Park, K.B. (2011b). "Uncertainty analysis for parameter estimation of probability distribution in rainfall frequency analysis using bootstrap." *Journal of the Environmental Sciences*, KENSS, Vol. 20, No. 3, pp. 321-327(in Korean).
- Shin, H.J., Nam, W.S., Jung, Y.H., and Heo, J.H. (2008). "Uncertainty assessment of regional frequency analysis for generalized logistic distribution." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 28, No. 6b, pp. 723-729(in Korean).
- Sivapalan, M., and Blöschl, G. (1998). "Transformation of point rainfall to areal rainfall Intensity-Duration-Frequency Curves." *Journal of Hydrology*, Vol. 204, pp. 150-167.
- USDA-SCS. (1985). *National Engineering Handbook, Section 4-Hydrology*. Washington D.C., US.

논문번호: 13-083	접수: 2013.10.10
수정일자: 2013.12.18/12.27	심사완료: 2013.12.27