

## 도시유역의 FwI-D-F 곡선 산정 및 활용에 관한 연구

최현일<sup>1</sup>, 김응석<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>영남대학교 건설시스템공학과, <sup>2</sup>선문대학교 토목공학과

### Study on Estimation and Application of the FwI-D-F curves for Urban Basins

Hyun Il Choi<sup>1</sup> and Eung Seok Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Yeungnam University

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Sunmoon University

**요약** 과거 홍수량 분석을 위해 다양한 연구가 진행되었으며 특히, 홍수량-지속시간-빈도곡선(flood-duration-frequency curves)의 연구가 국외에서 진행되었다. 그러나 국내의 수문자료는 하천의 특정지점에서 홍수량 자료 보다는 수위자료를 쉽게 수집 가능하기 때문에 본 연구에서는 도시유역의 홍수에 따른 홍수위험도를 정량적으로 분석하기 위하여 기존의 강우강도-지속시간-빈도곡선(Intensity-duration-frequency curves)을 응용한 홍수위-지속시간-빈도곡선(flood water level-duration-frequency curves: FwI-D-F)방법을 제시하였다. 연구의 대상지역은 한강수계 중량천의 중량교 지점으로 18년간의 수위 자료를 이용하여 FwI-D-F곡선을 산정하였다. 홍수위에 대한 지속시간별 빈도곡선인 FwI-D-F 곡선은 특정한 홍수위에 따른 값을 빈도개념으로 적용이 가능하므로, 내수침수를 포함한 홍수예보에 많은 도움이 될 수 있리라 판단된다. 또한, 특정 호우사상에 대한 강우량이 예측되면 작성된 강우강도-지속시간-빈도곡선(I-D-F곡선)과 FwI-D-F곡선을 연계하여 임의 관측지점의 수위를 예측하는 것이 가능하다고 사료된다.

**Abstract** There have been performed many researched for flood magnitude analysis, for example, the Flood-Duration-Frequency relations in the west. Because flood water stage data are more available rather than flood amount data at flood gauge stations of Korea, this study developed Flood water level-Duration-Frequency (FwI-D-F) curves using rainfall Intensity-Duration-Frequency(I-D-F) curves for the quantitative flood risk assessment in urban watersheds. FwI-D-F curve is made from water level data for 18 years at Joonggrayng bridge station of Joonggrayng River basin in Han River drainage area. FwI-D-F curve can estimate the occurrence frequency for a certain flood elevation, which can be used for urban flood forecasting. It is expected that the flood elevation can be estimated from the forecasted rainfall data using both FwI-D-F and I-D-F curves.

**Key Words** : Flood water level, I-D-F curve, FwI-D-F curve, Flood forecasting

### 1. 서론

우리나라의 자연재해는 장마와 태풍시기에 집중호우로 인한 홍수가 대부분으로 그 피해규모가 대형화 추세에 있다[1]. 도시유역 홍수피해를 감소시키기 위한 수공

구조물의 설계에 있어 홍수자료의 확률적 변화특성에 대한 올바른 이해는 필수적이라 하겠다. 댐이나 제방, 암거 등 수공구조물의 축조 시 수리·수문학적 최적설계를 위해서는 보다 명확하고 합리적인 홍수량의 추정이 요구되고 있고 보다 명확한 홍수의 크기를 결정하기 위해서 홍

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

\*교신저자 : 김응석 (hydrokes@sunmoon.ac.kr)

접수일 10년 05월 04일

수정일 10년 06월 17일

게재확정일 10년 07월 06일

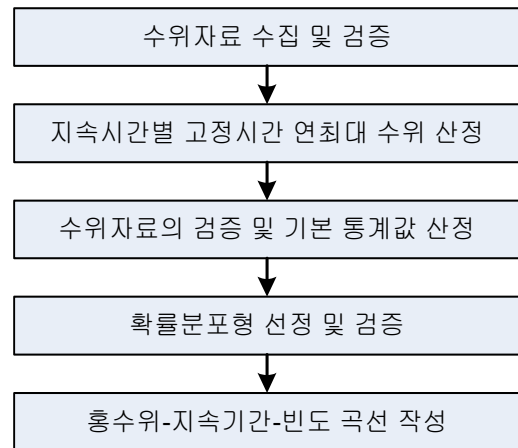
수빈도분석이 필요하다[7,8]. 따라서, 지난 수십 년간 홍수빈도해석에 대한 많은 연구가 수행되어져 왔다. 특히, 하천유출량의 빈도해석을 위한 기본 원리와 계산과정에 대한 연구 및 첨두홍수량과 홍수체적 분석에 관한 연구가 활발히 수행되었다[11]. 또한 홍수 산정량의 정도분석에 관한 연구를 통하여 수많은 연구자들이 홍수빈도해석에 대한 연구결과를 제시하였고, 최근에는 국외에서 소개된 강우 지속기간과 홍수량의 적합한 scaling을 이용한 홍수량-지속시간-빈도(Q-D-F; Flood-Duration-Frequency) 곡선에 관한 연구를 국내 한강인도교 지점의 홍수량 자료에 대해 적용하여 Q-D-F분석을 수행하였다[2, 9, 10].

현재 우리나라는 홍수량의 결정을 위해 필요한 실측자료가 상당히 부족한 실정이다. 특히, 현재 사용되고 있는 강우-유출 모형에 의한 홍수에·경보 시스템은 강우의 실시간 관측치를 모형의 입력 자료로 요구하기 때문에 홍수 도달이 짧은 소유역에서 최근 빈번히 발생하는 돌발홍수를 예보하는 것에는 실효성을 거두지 못하고 있다[3,5-7]. 따라서 이러한 홍수예보의 문제점과 최근의 기후변화 현상에 따른 자연적, 환경적 여건의 변화 및 각종 개발사업 등으로 인한 극한홍수의 발생빈도가 높아가고 있어 기존 수방시설물의 홍수배제능력 부족 등 구조적 대책의 한계성 때문에 돌발홍수를 비롯한 이상홍수를 대비하기 위한 비구조적 대책의 일환인 돌발홍수 예·경보 시스템의 구축이 어느 때 보다 중요하게 되었다[12].

방재목표 홍수량 산정을 위해서 비교적 장기간의 강우 자료를 대상으로 강우빈도를 분석한 결과와 강우-유출관계를 통하여 설계홍수량을 결정하는 간접적인 방법을 이용해 왔다[4]. 위와 같은 방법은 대개 미세측유역에서 신뢰할 수 있는 홍수유출자료를 얻을 수 없을 때 활용할 수 있는 방법이며 추정오차가 홍수빈도분석의 상대결과 보다 크다. 또한 계획홍수량 산정을 위해서는 첨두홍수량뿐만 아니라, 홍수량 체적에 대한 분석과 홍수-지속시간-빈도(Q-D-F) 분석을 이용한 홍수정보제공이 필요한 실정이다. Q-D-F 분석체계의 신뢰성을 확보하기 위해서는 신뢰할 만한 장기유출관측 자료가 필요하나 우리나라에서는 이러한 자료의 확보에 한계를 가진다[2]. 따라서, 본 연구에서는 대상유역의 홍수위험도 분석을 위해 우리나라의 실정에서 손쉽게 획득 가능한 수위자료를 이용하여 홍수위-지속시간-빈도곡선(flood water level-duraiton-frequency curve: FwI-D-F)을 분석하고, 이를 이용하여 홍수 위험도를 정량화 할 수 있는 방법을 제시하였다. 연구에 사용되는 자료는 한강의 지류인 중랑천상의 중랑교 수위표 지점의 18년간 수위자료를 수집하여 홍수위-지속시간-빈도곡선(FwI-D-F)을 산정하였다.

## 2. 자료 수집 및 FwI-D-F 곡선 작성 방법

본 연구에서 적용한 대상지역의 자료는 중랑교 수위자료로 한강홍수통제소에서 1991년부터 2008년까지 총 18년간 관측한 자료를 수집하였으며, 이중 1991년~2002년 사이의 자료는 1시간 단위 수위자료이고, 2003년~2006년 사이의 자료는 30분 단위 수위자료이며, 2007~2008년 사이의 자료는 10분 단위 수위자료로 구성되어 있다. 따라서, 1시간 단위의 수위 자료를 제외한 나머지 수위 자료는 모두 1시간 단위로 합산하여 모든 자료의 수위 자료를 1시간 단위로 통일하여 적용하였다. FwI-D-F곡선의 작성은 기존의 I-D-F곡선 추정 방법과 유사한 방법으로 분석체계를 구성하여 작성하였다. 아래 그림 1은 FwI-D-F곡선을 작성하는 방법을 간략하게 나타내었다.



[그림 1] FwI-D-F곡선 작성 흐름도

강우의 분석과 다르게 FwI-D-F에서는 임의시간이 아닌 고정시간 60분, 1440분 등의 고정시간 수위자료를 분석하여 다음 표 1과 같이, 중랑교 지점의 1981~2008년까지의 수위자료를 나타내었다. 전체자료에서 18년간의 최저수위의 평균은 0.39m 이며, 최고 수위의 평균은 5.90m 이다.

수집된 자료의 시간간격을 모두 1시간 단위로 재구성하여 이를 적용하였다. 따라서 지속시간 1시간~24시간까지 1시간 간격의 지속시간별 시 수위자료의 시계열분석을 통하여 지속시간별 고정시간 연 최대 수위값을 계산하여 표 2에 나타내었다.

[표 1] 중량교 수위자료

년도	기간(월.일.시)	자료유무		시간 단위	비고	최저 및 최고 수위	
		수위 (m)	유량 (CMS)			최저 (m)	최고 (m)
1991	05.02.17~10.31.23	○	×	1hr	6.18~25, 6.1, 5.30, 5.29 : 90이상 수위 제외	0.01	9.86
1992	04.02.10~10.31.23	○	×	1hr	8.25~27, 4.18~4.3 : 90이상 수위 제외	0.01	11.61
1993	04.01.00~10.28.11	○	×	1hr	-	0.87	2.83
1994	03.31.10~12.21.10	○	×	1hr	-	0.87	3.05
1995	03.31.10~12.31.15	○	×	1hr	12.31, 14, 13 : 90이상 수위 제외	0.84	4.69
1996	01.01.00~12.31.23	○	○	1hr	5.14~1.1 :(-)값 제외	0.48	5.47
1997	01.01.00~12.31.23	○	×	1hr	-	0.48	11.52
1998	01.05.11~12.31.23	○	×	1hr	-	0.59	8.7
1999	01.01.00~12.31.23	○	○	1hr	-	0.53	7.48
2000	01.01.00~12.31.23	○	○	1hr	-	0.04	9.63
2001	01.01.00~12.31.23	○	○	1hr	-	0.30	6.66
2002	01.01.00~12.31.23	○	○	1hr	-	0.39	3.92
2003	01.01.00~12.31.23	○	○	30min	-	0.41	4.16
2004	01.01.00~12.31.19	○	○	30min	-	0.22	2.63
2005	01.03.11~12.31.23	○	○	30min	-	0.24	2.5
2006	01.01.00~12.31.23	○	○	30min	-	0.03	5.26
2007	01.01.00~12.31.23	○	○	10min	-	0.39	2.46
2008	01.01.00~12.31.23	○	○	10min	-	0.39	3.7

[표 2] 주요 지속기간별 고정시간 연최대 수위

연도	고정시간 연최대 수위(m)								
	1시간	2시간	3시간	4시간	5시간	6시간	12시간	18시간	24시간
1991	9.9	19.7	19.7	19.8	19.9	19.9	34.4	49.0	61.2
1992	1.2	2.3	3.5	4.6	5.7	6.8	13.1	18.7	23.8
1993	0.3	0.6	0.8	1.1	1.3	1.6	2.9	4.1	5.4
1994	0.3	0.6	0.9	1.1	1.4	1.6	2.7	3.7	4.6
1995	0.5	0.9	1.4	1.9	2.3	2.8	5.3	7.6	9.7
1996	0.5	1.1	1.4	1.8	2.1	2.5	4.6	6.7	8.7
1997	1.2	2.3	3.3	4.3	5.3	6.2	10.7	13.4	14.4
1998	0.9	1.3	1.9	2.6	3.2	3.6	5.6	7.9	9.9
1999	0.7	1.1	1.6	2.1	2.6	3.1	5.2	7.0	8.7
2000	1.0	1.0	1.1	1.4	1.7	2.0	3.8	5.3	6.5
2001	0.7	1.3	1.9	2.4	2.8	3.2	4.8	5.9	6.8
2002	8.6	8.7	8.7	8.8	8.8	8.8	9.1	9.3	9.6
2003	7.1	7.2	7.2	7.3	7.3	7.4	7.6	7.9	8.2
2004	4.5	4.6	4.6	4.6	4.7	4.7	5.0	5.3	5.5
2005	0.2	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	2.5	3.4	4.4
2006	0.5	1.0	1.5	2.0	2.4	2.9	5.6	8.0	10.0
2007	0.2	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	2.4	3.3	4.0
2008	0.4	0.7	1.1	1.4	1.7	1.9	3.4	4.9	6.0
평 균	2.2	3.1	3.4	3.8	4.2	4.5	7.2	9.5	11.5
최 저	0.2	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	2.4	3.3	4.0
최 고	9.9	19.7	19.7	19.8	19.9	19.9	34.4	49.0	61.2

### 3. 자료 및 HDF 분석 결과

#### 3.1 수위자료의 검정 및 기본 통계값 산정

강우자료는 이상치에 대한 이상치 검정과 강우량자료 계열내 자료들이 서로 상관성이 없는 무작위성(randomness)을 가져야 한다는 무작위성 검정, 평균이나 분산 등의 크기가 증가하거나 감소하는 등의 경향성(trend)을 가지지 않아야 한다는 경향성 검정 등을 실시하여 빈도해석에 사용할 수 있는지 여부를 사전에 검토하여야 한다. 이상치 검정은 Grubbs & Beck 검정, 무작위성 검정은 Run 검정, Turning Point 검정, Anderson Exact 검정 등 3가지, 경향성 검정은 Kendall 검정, Hotelling-Pabst 검정, Wald-Wolfowitz 검정 등 3가지를 각각 적용하였다.

지속기간별 연최대 수위 자료계열은 확연한 이상치가 없고, 무작위성 검정과 경향성 검정을 대체적으로 만족하는 것으로 나타났으므로 빈도해석을 위한 자료 계열로 적합한 것으로 나타났다. 한편, 이와 같이 적합도 판정이 완료되면 평균, 분산, 왜곡도계수, 첨예도계수 등과 같은 기본 통계값을 산정하여 자료 계열의 일반적인 특성을 파악할 수 있도록 하여야 하며, 주요 지속기간별 수위자료 계열의 기본 통계값 산정 결과는 다음 표 3과 같다.

#### 3.2 확률분포형 선정 및 검증

##### 3.2.1 확률분포함수의 매개변수 추정방법

확률분포형의 특성을 나타내는 매개변수를 추정하는 방법에는 모멘트법(MOM), 최우도법(ML), 확률가중모멘트법(PWM) 등이 있다. 우리나라는 관측년수가 짧아 자료수가 충분하지 못하므로 모멘트법의 경우 이상치에 지나치게 민감한 문제를 지니며, 최우도법은 수렴 문제와 자료수가 불충분할 경우에는 효율성이 낮으므로, 자료수나 이상치에 따라서 왜곡특성이 크게 나타나지 않는 확률가중모멘트법을 사용하는 것이 여러 가지 측면에서 타

당하다. 따라서, 본 연구에서는 가장 합리적인 방법으로 판단되는 확률가중모멘트법에 의한 빈도해석 방법을 채택하였다.

##### 3.2.2 확률분포형의 종류 및 매개변수 추정치의 적합성 조건 검토

확률강우량 산정을 위한 강우자료 빈도해석에 주로 사용되고 있는 확률분포형인 Log-Normal 분포(LN2P, LN3P), Gamma 분포(GAM2P, GAM3P), Log-Pearson Type-III 분포(LP3P), Gumbel 분포(GUM), Generalized Extreme Value 분포(GEV) 등을 사용하였다.

매개변수 추정 방법별 및 확률분포형별로 추정된 매개변수값이 매개변수의 범위인 적합성 조건을 만족시키지 못하는 경우가 가끔 발생한다. 이와 같은 경우가 발생하면 확률수문량을 산정하는 프로그램이 수행되는 도중에 중단되거나 적절하지 못한 결과를 나타낼 수 있으므로 프로그램 내부에서 매개변수 추정치의 적합성 조건(validity condition)을 검토하였다.

##### 3.2.3 적합도 검정을 통한 최적 확률분포형 선정

관측 수문자료가 가정한 이론 확률분포형과 적합하다는 가설을 검정하기 위하여 확률분포형의 적합도 검정(goodness of fit test)을 실시하고, 이를 토대로 최적 확률분포형을 선정하게 된다.

적합도 검정에는 기존 Chi-Square( $\chi^2$ ) 검정, Kolmogorov-Smirnov(K-S) 검정과 아울러 Probability Plot Correlation Coefficient(PPCC) 검정, Robustness 검정 등을 추가로 적용하였다. 적합도 검정 결과를 살펴보면 주요 지속기간별로 적정 확률분포형이 다소 다르게 나타나고 있으나, 대체적으로 GEV 분포(generalized extreme value)가 주요 지속기간의 적정 확률분포형으로 판단되어 최적 GEV분포를 전 지속기간에 대한 최적 확률분포형으로 채택하였다.

[표 3] 주요 지속기간별 수위자료 계열의 기본 통계값 산정

지속기간	평균	분산	왜곡도계수	첨예도계수	비고
60분	2.2	1.455	1.754	5.037	-
120분	0.5	1.551	2.868	11.933	-
180분	3.4	1.349	2.871	12.108	-
360분	4.5	0.981	2.682	11.491	-
720분	7.2	1.035	3.264	14.708	-
1080분	9.5	1.108	3.445	15.642	-
1440분	11.5	1.148	3.503	15.909	-

### 3.3 빈도해석에 의한 확률 수위값 산정

매개변수 추정 방법은 확률가중모멘트법, 최적 확률분포형은 GEV분포를 채택하여 산정된 주요 지속기간별 확률 수위 값은 표 4와 같다.

### 3.4 FwI-D-F 작성

표 4의 결과를 바탕으로 FwI-D-F곡선을 작성하여 아래의 그림에 나타내었다. 또한 아래의 그림 2에서 결과를 살펴보면 기존의 I-D-F곡선과 다르게 지속기간별 곡선의 형태가 일정한 기울기로 그려지지 않고 360분 지속시간에서 변곡이 발생하여 2차원 곡선에 가까운 그래프 형태로 그려지는 것을 볼 수 있다.

## 4. 결론

Q-D-F 곡선은 홍수량에 대한 지속기간별 빈도곡선으로 특정한 홍수량에 대한 값을 빈도개념으로 적용이 가

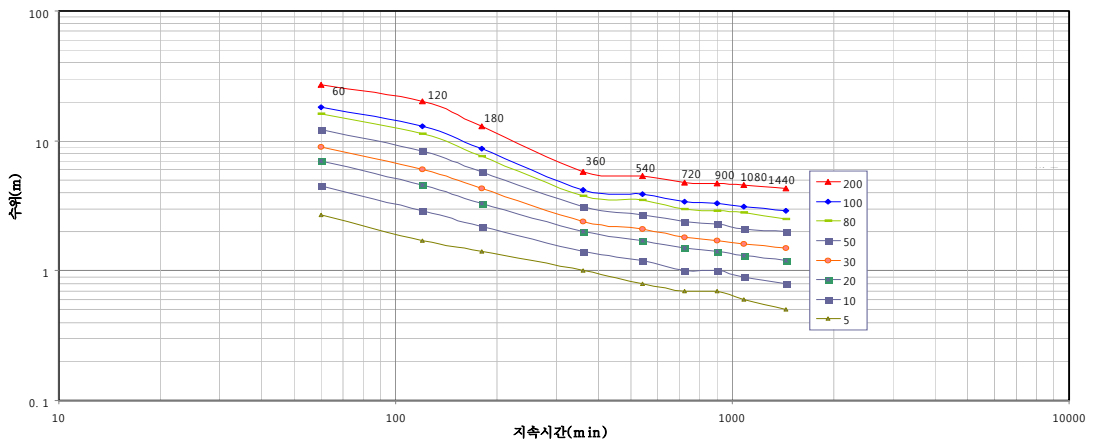
능하나, 이번 연구는 도시지역의 내수침수를 포함한 홍수예보가 목적임으로 침수예측에서 가장 중요한 수위를 고려할 수 있는 FwI-D-F 작성이 보다 더 연구의 활용에 적합한 것으로 판단되었다. 특히, 국내의 경우 주요 유역의 수문자료가 대부분 수위자료로 관측되고 있는 점을 고려하면 Q-D-F 곡선 보다는 FwI-D-F 곡선의 산정이 도시지역에서 홍수예보에 보다 더 적합한 것으로 판단되었다.

따라서 특정 호우사상에 대한 강우량이 예측되면 소규모 도시지역에서 이를 바탕으로, 기 작성된 I-D-F곡선과 금회 산정된 FwI-D-F곡선을 연계하여 임의 관측지점의 강우량에 대한 수위를 예측할 수 있으므로, 이를 홍수예보 측면에서 활용이 가능하다고 판단된다.

연구 결과를 검증 및 보완 수정하기 위해서 특정년도의 호우사상에 대해 강우의 확률빈도를 계산하고, 그 호우사상에 의한 수위의 확률빈도를 금회 산정된 FwI-D-F 곡선에서 확인할 필요가 있다. 또한 다양한 확률강우량에 대하여 FwI-D-F를 산정한 지점에서의 강우-유출 해석 및 수위 분석을 실시하여 강우의 빈도와 그 강우로 인하여 발생한 홍수량에 대한 수위의 빈도를 검증해야 하겠다.

[표 4] 주요 지속기간별 확률수위 값 산정 (단위 : m)

재현기간	주요 수위 지속기간 (분)								
	60	120	180	360	540	720	900	1080	1440
5년	2.7	1.7	1.4	1.0	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5
10년	4.5	2.9	2.2	1.4	1.2	1.0	1.0	0.9	0.8
20년	7.0	4.6	3.3	2.0	1.7	1.5	1.4	1.3	1.2
30년	9.0	6.0	4.3	2.4	2.1	1.8	1.7	1.6	1.5
50년	12.2	8.4	5.8	3.1	2.7	2.4	2.3	2.1	2.0
80년	16.1	11.3	7.6	3.8	3.5	3.0	2.9	2.8	2.5
100년	18.2	13.0	8.7	4.2	3.9	3.4	3.3	3.1	2.9
200년	27.0	20.1	12.9	5.8	5.4	4.8	4.7	4.6	4.3



[그림 2] FwI-D-F 곡선

## 참고문헌

- [1] 국립방재연구소, **지리산 일원 호우피해조사 및 분석**. 현장보고서. NIDP-98-01, 1998.
- [2] 김광섭, 한건연, 최규현, “한강 인도교 지점에서의 홍수량-지속기간-빈도 분석” 대한토목학회 2007 정기학술대회 논문집 pp.1986~1989, 2007.
- [3] 김운태, 배덕효, 조천호, “돌발홍수예보를 위한 미소유역의 한계유출량 산정” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제35권, 제5호, pp. 553-561, 2002.
- [4] 김응석, 최현일, 이동의, 강동진, “돌발홍수지수를 이용한 돌발홍수심도 산정” 한국방재학회논문집, 한국방재학회, 제9권, 제6호, pp. 125-132, 2009.
- [5] 김진훈, 배덕효, “한강유역 한계유출량 산정” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제39권, 제2호, pp. 151-160, 2006.
- [6] 배덕효, 김진훈, “한국형 돌발홍수 예정보시스템 개발”, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제27권, 제3B호, pp. 237-243, 2007.
- [7] 신현석, 김홍태, 박무종, “GIS와 GcIUH를 이용한 돌발홍수기준우량 산정의 타당성 검토연구”, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제37권, 제5호, pp. 407-424, 2004.
- [8] Javlle, P. Ouarda T.B.M.J., Lng, M., Bobee, B. Galea, G. and Gresillon, J.M., "Development of regional flood-duration-frequency curves based on the index-flood method. J. of Hydrology, Vol. 258, pp. 249-259, 2002.
- [9] Javlle, P. Gresillon, J.M. and Galea, G. " Discharge-duration-frequency curve modeling for floods and scale invariance. Comptes Rendus de l' Academie des Science, Science de la terre et des planetes, Vol 329, pp. 39-44, 1999.
- [10] Galea, G. Prudhomme, C. "Notions de base et concepts utiles pour la comprehension de la modelisation synthetique des regimes de cure des assins versants au sens des models Qdf. Revue des Sciences del l' Eau 1, pp. 83-101, 1997.
- [11] Singh, V. P., Aminian, H. "An empirical relation between volume and peak of direct runoff", J. of water Res. Bull. Vol. 22, No. 5, pp. 725-730, 1986.
- [12] Sweeney, T.L. (1992) Modernized Areal Flash Flood Guidance. NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO44.

### 최 현 일(Hyun Il Choi)

[정회원]



- 1995년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (수공학석사)
- 2006년 10월 : 미국 일리노이대학교 토목환경공학과 (수공학박사)
- 2007년 11월 ~ 2008년 5월 : 한국환경정책평가연구원 책임연구원
- 2008년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 건설시스템공학과 조교수

<관심분야>  
수문학, 수문기상학

### 김 응 석(Eung Seok Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 : 고려대학교 토목환경공학 (수공학석사)
- 2002년 2월 : 고려대학교 토목환경공학 (수공학박사)
- 2002년 3월 ~ 2004년 2월 : 고려대학교 부설 방재과학연구원 선임연구원
- 2004년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 부교수

<관심분야>  
수자원시스템, 상하수도 관망시스템