



## Appropriateness analysis of design rainfall factors using the rainfall data of an inundated flood events

Yu, Byeong-Wook<sup>a</sup> · Kim, Seon-Ho<sup>b</sup> · Bae, Deg-Hyo<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>Ph. D. Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Ph. D. Candidate, Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

<sup>c</sup>Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

Paper number: 20-006

Received: 29 January 2020; Revised: 11 March 2020; Accepted: 11 March 2020

### Abstract

The purpose of this study is to analyze whether design rainfall and hyetograph, which are the main elements of design rainfall, can properly reflect the those of observed rainfalls through inundated rainfall events. The target areas were selected at seven large cities with high damages regarding to the flooding. Comparative analysis between probability and observed rainfall shows that 57% of the cases, in which rainfall amount through the IDF curve is estimated lower than the observed rainfall, do not properly reflect the observed rainfalls. In particular, this trend is exacerbated by the cases in low return period and the rain type of typhoon or frontal rain. The comparative results of rainfall intensity formula showed that the Talbot and Japanese formula were stable in the short- and long-term return periods, respectively. The comparison of hyetograph results also showed that the Mononobe method properly reflects the maximum rainfall intensity and the Huff method properly reflects the shape of rainfall pattern.

**Keywords:** Design rainfall, Rainfall intensity formula, Time distribution method, Urban inundation

## 침수 홍수사상의 강우자료를 활용한 설계강우 요소의 적정성 분석

유병욱<sup>a</sup> · 김선호<sup>b</sup> · 배덕효<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>세종대학교 건설환경공학과 박사과정, <sup>b</sup>세종대학교 건설환경공학과 박사수료, <sup>c</sup>세종대학교 건설환경공학과 교수

### 요 지

본 연구의 목적은 실제 침수 강우자료를 활용하여 설계강우 주요 요소인 강우량 및 우량주상도가 실측 침수사상을 적절히 반영하는지 분석하는 것이다. 대상지역은 홍수발생 시 피해액이 높은 대도시 7곳을 선정하였다. 확률 강우량과 실측 강우량 비교분석 결과 IDF 곡선을 통한 강우량은 실측 강우사상의 총 강우량보다 낮게 산정되는 경우가 57%로 실측 강우의 강우량을 적절히 반영하고 있지 못하다고 판단되었다. 이러한 경향은 재현 빈도가 저 빈도이며 호우 유형이 태풍 또는 전선성 호우일 경우 심해지는 것으로 나타났다. 강우강도 식별 강우량 비교결과 단기기간에서는 Talbot 식, 장기기간에는 Japanese 식이 안정적인 것으로 나타났다. 우량주상도 비교 결과 최대강우강도는 Mononobe 방법이 형태는 Huff 방법이 가장 적절히 반영하는 것으로 나타났다.

**핵심용어:** 도시침수, 설계강우, 시간분포 방법, 강우강도 식

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-3408-3814  
E-mail: dhbae@sejong.ac.kr (D.-H. Bae)

## 1. 서론

우리나라에서 발생하는 자연재해 가운데 홍수로 인한 피해는 전체 자연재해 피해액의 90%를 차지할 정도로 크다 (MOPAS, 2018). 특히 도시지역은 인구밀도가 높고 산업시설이 밀집되어 있어 홍수 발생 시 막대한 인명 및 재산피해가 발생한다. 따라서 도시지역에서 홍수피해를 방지하고 원활한 우수배제를 위해서는 수공구조물의 역할이 매우 중요하다. 이에 각 도시에서는 홍수방어를 위해 하수도정비기본계획에 따라 수공구조물을 설계 및 운영하고 있다. 그러나 도시에서는 최근 설계기준으로 활용되는 재현빈도보다도 높은 빈도로 홍수가 발생하고 있으며 이러한 침수피해의 주요 원인은 저지대 지역 우수 집중, 시설물의 배수능력 및 용량 부족, 설계방법의 문제 등이 있다. 특히 설계방법은 모든 도시에서 구조물 설계에 활용되는 기준으로 문제가 발생할 경우 홍수 피해 및 예방에 직접적인 영향을 미칠 수 있다.

홍수예방을 위한 수공시설물 설계방법은 크게 설계강우와 설계홍수량 산정부분으로 나눌 수 있다. 설계강우 산정부분은 일반적으로 강우량, 최대강우강도, 우량주상도를 산정하는 방법으로 구성되며 각 요소는 과거 강우자료를 이용한 통계적 방법에 의해서 산정된다. 다만 통계적 방법에 따라 산정한 설계강우는 과거 강우특성을 일반화하여 산정하기 때문에 실제강우와는 차이가 발생할 수밖에 없다. 따라서 산정된 설계강우가 적절한지 평가하고, 필요시 설계강우 산정방법을 개선하는 것은 중요한 일이다.

객관적이고 정확한 설계강우 산정을 위해 각 요소의 적정성을 분석한 연구가 다수 진행되어 왔다. 강우량 산정에 관한 연구동향을 살펴보면 Hong *et al.* (2001)은 확률 강우량 산정방법을 개선하기 위해 확률분포형과 매개변수 추정방법에 신뢰도 분석 기법을 적용하여 발생 가능한 불확실성을 판단하고 적정성을 분석하였다. Oh *et al.* (2009)와 Jo and Jeon (2012)은 호우사상을 활용하여 빈도별 확률 강우량을 초과하는 강우사상의 특성을 분석하고 기존 설계강우량의 적정성을 평가하였다. 또한 Jung *et al.* (2007)은 관측된 이상강우를 활용하여 정상성 빈도해석방법에 따라 산정된 확률 강우량의 적정성을 평가하였고 Jung *et al.* (2019)은 정상성, 비정상성 빈도해석방법에 따른 확률 강우량을 비교하여 비정상성 방법이 기존 정상성 방법에 비해 확률 강우량, 극치강우사상을 더욱 잘 반영하는 것을 보였다. Mugita *et al.* (2017)은 일본 지역의 실측 홍수사상을 기반으로 설계강우량 산정방법을 평가한 바 있다.

우량주상도 작성을 위한 시간분포 방법에 관한 연구동향

을 살펴보면 수공구조물 설계 시 우량주상도 작성방법으로 권고하는 Huff방법의 적정성을 분석하는 방향으로 진행되어 왔다. Jang *et al.* (2006)은 국내 유역을 대상으로 Huff방법을 적용하고 실제강우와 비교하여 Huff방법은 호우선정, 지속기간별 동일 분포 가정 등 여러 가지 문제가 있어 극치호우사상을 적절히 모의하지 못한다는 한계점을 지적하였다. Choi *et al.* (2014)는 Huff방법의 호우사상 선정에 따른 침투홍수량의 과다평준화 문제를 개선하기 위해 호우사상 선정 기각 기준을 제시하여 시간분포 하는 방법을 제안하였다. Park *et al.* (2019)은 도시의 우수관망 설계강우를 대상으로 Huff방법과 교호블록 방법에 대해 실제 강우 재현성, 침투 홍수량 정확성, 우수 흐름 연속성을 평가하였으며, 교호블록 방법이 우수함을 보였다.

선행 연구는 실측 강우를 활용하여 실제강우 요소에 대해 적정성 분석 및 산정방법 개선 연구를 수행하였으나 아직까지 국내에서 실제 침수사상을 활용하여 설계강우의 한계점을 평가한 사례는 없었다. 따라서 본 연구에서는 실제 과거 침수가 발생한 강우자료를 수집하여 설계강우의 요소들이 실측 침수사상을 적절히 반영하고 있는지 분석하고, 각 요소 산정 시 사용하는 여러 가지 산정방법을 비교분석 하고자 한다.

## 2. 연구방법

내수침수는 시설물의 설계 문제, 유지관리 문제로 인해 발생할 수 있으며, 설계 방법에 대한 적정성 분석 시 유지관리의 영향이 고려될 필요가 있다. 다만 시설물의 유지관리에 대한 자료는 체계적으로 구축된 바 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 내수침수가 시설물의 설계 문제로 인해 발생한다고 가정하고 연구방법론을 구성하였다. 설계강우의 적정성 분석을 위해 설계 주요 요소인 강우량과 우량주상도를 실측 강우사상과 비교하였으며 Fig. 1은 연구방법 모식도를 그린 것이다. 연구 방법은 크게 실측 강우 재현빈도 산정, 실측 강우 재현빈도의 확률 강우량 산정 및 우량주상도 작성, 설계강우 요소의 적정성 분석으로 구성된다. 본 연구에서는 설계강우 요소의 적정성 분석을 위해 실측 강우와 동일한 재현빈도, 강우지속기간을 갖는 확률 강우량을 산정하고 우량주상도를 작성하였다.

실측 강우의 재현빈도는 실측 강우의 1시간 최대강우강도와 IDF 곡선의 1시간 확률 강우량을 비교하여 재현빈도를 결정하였다. 이때 IDF 곡선은 각 도시별로 연 최대 강우자료를 빈도 해석하여 확률 강우량을 산정하고 이를 확률강우강도로 변환하여 재현빈도별로 작성하였다.

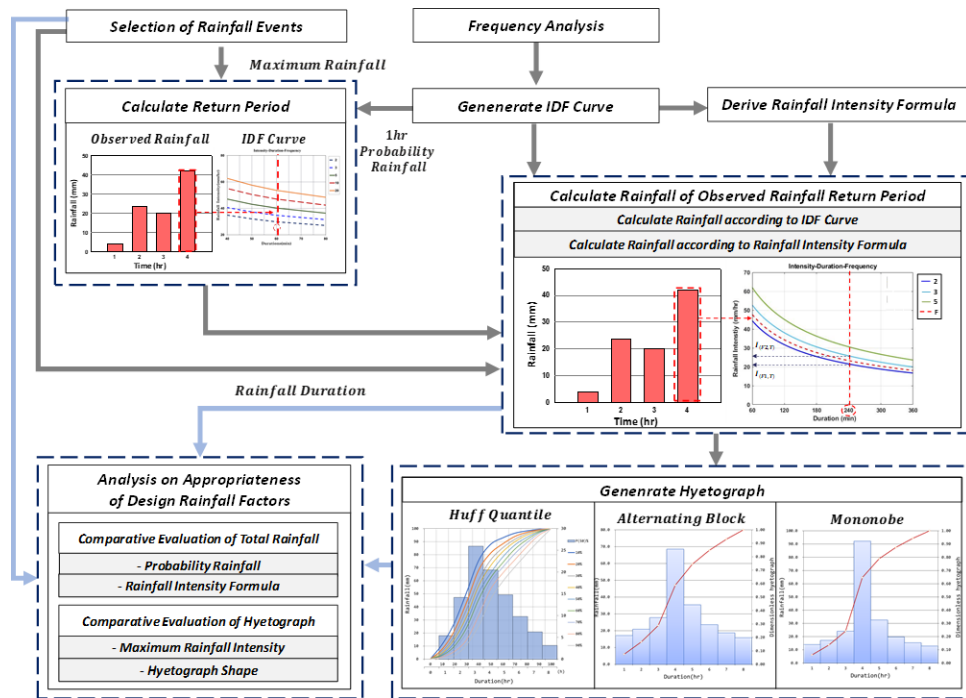


Fig. 1. Schematic view of analysis on design rainfall factors

강우량에 대한 적정성 분석은 IDF 곡선을 선형보간하여 산정한 강우량과 강우강도 식을 통해 산정한 확률 강우량을 실측 강우량과 비교하여 수행하였다. 강우강도 식은 하수도 시설기준에서 제시하는 4가지 강우강도 식(Talbot, Sherman, Japanese, Cleveland)과 비교적 활용성이 높다고 알려진 전대수다항식을 회귀분석방법을 통해 유도하였다. 비교분석은 모든 강우사상을 강우 지속기간, 재현빈도, 지역, 호우유형별로 나눠 수행하였다.

우량주상도에 대한 적정성 분석은 우량주상도의 최대강우강도와 형태에 대해 실측 우량주상도와 비교하여 수행하였으며 작성 시 시간분포 방법으로는 Huff방법, 교호블록 방법, Mononobe 방법을 활용하였다. 최대강우강도는 시간분포 방법별 우량주상도와 실측 우량주상도의 지속기간별 최대강우강도를 추출하여 차이를 비교하였다. 우량주상도 형태는 실측 우량주상도와 각 시간분포 방법별 우량주상도의 시·구간별 상대오차를 산정하여 비교분석하였다.

### 2.1 실측 강우의 재현빈도 산정

실측 강우의 재현빈도는 IDF 곡선을 활용하여 산정하였으며 산정방법은 Fig. 2와 같다. 먼저 실측 강우사상의 1시간 최대강우강도가 IDF 곡선 상에서 몇 년 빈도 구간에 속하는지 확인한 후 빈도구간의 1시간 확률강우강도를 이용하여 가중치를 산정하여 최종적인 실측 강우 재현빈도를 산정하였다.

가중치는 선형보간법을 활용하여 산정하였으며 가중치 산정식은 Eq. (1)과 같고 최종적인 재현빈도 산정 식은 Eq. (2)와 같다. 본 연구에서 실측 강우의 재현빈도를 1시간 최대강우강도를 통해 산정한 이유는 도시구역의 도달시간은 대부분 1시간 이하이며 도시 수공구조물은 첨두 강우강도에 받는 영향이 크기 때문이다.

$$Weight = \frac{Z - I_{F1}}{I_{F2} - I_{F1}} \quad (1)$$

$$F = F1 + (F2 - F1) \times Weight \quad (2)$$

여기서  $F1$ 은 첫 번째 재현빈도,  $F2$ 는 두 번째 재현빈도  $I_{F1}$ 와  $I_{F2}$ 는 첫 번째와 두 번째 재현빈도의 1시간 확률강우강도,  $Z$ 는 실측 강우의 최대강우강도를 뜻한다. 단 재현빈도 구간을 확인할 때 실측 강우의 최대강우강도가 2년 빈도 이하로 확인되면 재현빈도는 2년 빈도로 가정하였다.

### 2.2 실측 강우 재현빈도의 확률 강우량 산정

실측 강우 재현빈도를 갖는 강우량은 IDF 곡선과 강우강도 식을 이용하여 산정하였으며 산정방법은 Fig. 2와 같다. 강우량의 재현빈도와 강우량은 선형적으로 비례한다고 가정하고 앞서 구한 재현빈도 구간의 실측 강우 지속기간을 갖는 확률

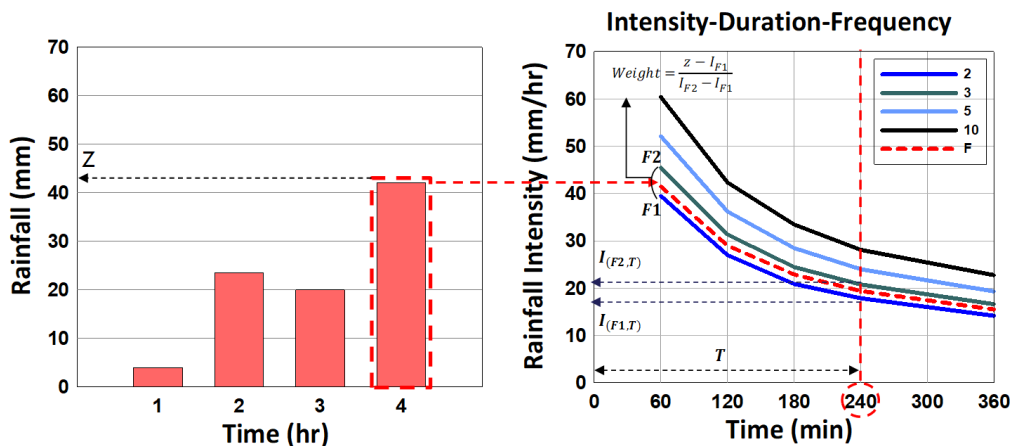


Fig. 2. Estimation method of observed rainfall return period

강우강도를 IDF 곡선과 강우강도 식을 통해 산정하였다. 또한 이에 실측 강우지속기간을 곱하여 Eqs. (3) and (4)와 같이 재현빈도 구간별 확률 강우량을 산정하였다. 최종적으로 Eq. (5)를 통해 구간별 확률 강우량에 가중치를 적용하여 실측 강우 빈도의 강우량을 산정하였다.

$$R_{(F1,T)} = I_{(F1,T)} \times T \tag{3}$$

$$R_{(F2,T)} = I_{(F2,T)} \times T \tag{4}$$

$$R_{(F,T)} = R_{(F1,T)} + (R_{(F2,T)} - R_{(F1,T)}) \times Weight \tag{5}$$

여기서,  $T$ 는 실측 강우 지속기간이며,  $I_{(F,T)}$ 는  $F$  빈도  $T$  지속기간에 해당하는 확률강우강도,  $R_{(F,T)}$ 는  $F$  빈도,  $T$  지속기간에 해당하는 확률 강우량이다.

### 3. 대상지역 및 자료수집

본 연구에서는 인구밀도가 높고 주거, 영업시설 등이 밀집되어 홍수 발생 시 피해액이 높은 대도시를 기준으로 Fig. 3과 같이 국내 대표도시 7곳(서울, 인천, 부산, 대전, 대구, 광주, 울산)을 대상지역으로 선정하였다. 또한 우리나라 도시별 침수피해 특성을 분석해보면 외수침수보다 내수침수로 인한 피해가 전체 피해에 73%로 매우 높기 때문에 실측 강우사상은 내수침수를 유발한 강우자료를 수집하여 선정하였다. 내수침수피해 사례는 뉴스기사를 통해 각 도시지역에 과거 20년간(1998~2017년) 발생한 침수사례를 수집하였다(Sim and

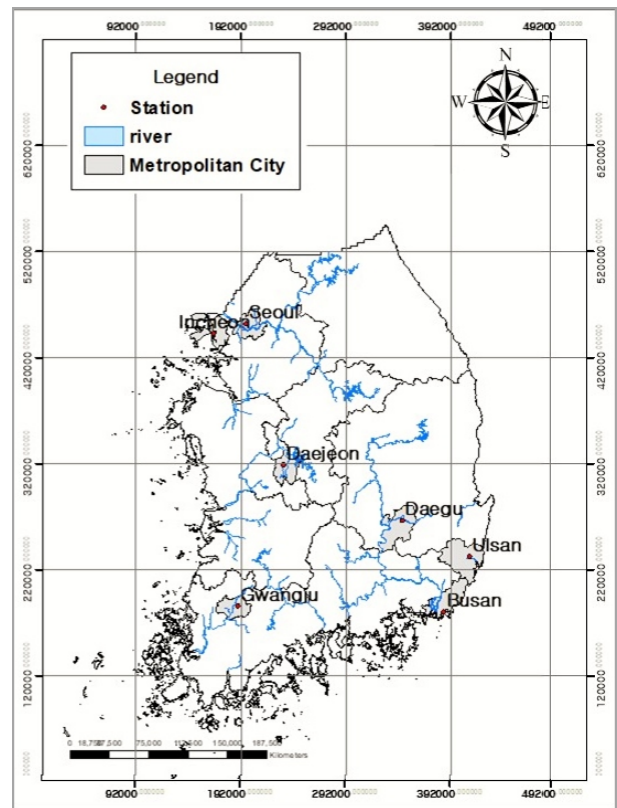


Fig. 3. Study area

Kim, 2006). 해당기간의 수문자료는 기상청 관할 종합기상관측소시스템(Automated Synoptic Observing System 이하 ASOS)의 시 단위 강우자료를 수집하였다. 또한 동일 ASOS 지점 자료를 활용하여 강우지속시간 1시간부터 48시간까지의 연 최대 강우자료를 수집하였다. 실측 강우사상 선정 기준은 Huff 방법에서 호우사상 구분 시 적용하고 있는 무강우 지

속기간 6시간 이상 기준을 동일하게 적용하여 선정하였다. 또한 호우 유형에 따라서 설계강우 요소에 미치는 영향을 분석하기 위해 선정된 강우사상을 대류성 호우, 전선성 호우, 태풍 3가지로 분류하였으며 기준은 행정안전부 재해연보(MOPAS, 1998~2018)와 기상청 보도 자료를 활용하였다.

#### 4. 결과 및 분석

##### 4.1 실측 강우의 재현빈도 산정

각 도시별 IDF 곡선 작성을 위해 앞서 구축한 ASOS 지점 강우자료를 빈도 해석하여 확률 강우량을 산정하였다. 확률 강우량 산정 시 침수발생 지역의 설계강우 조건을 최대한 반영하기 위해 실측 강우사상을 두 그룹으로 나누고 확률 강우량을 각각 산정하여 활용하였다. 실측 강우사상은 1998~2007년, 2008~2017년으로 나누었으며 확률 강우량은 1961~1997년, 1961~2007년 기간에 대해 연 최대 강우자료를 빈도 해석하여 산정하였다. 확률 강우량 산정 시 확률분포형은 Gumbel 분포형을 활용하였으며 매개변수 추정방법은 확률가중모멘트법을 활용하였다. 적합도 검정은  $\chi^2$  검정, Kolmogorov-Smirnov 검정, PPCC 검정, Cramer-von Mises 검정방법을 모

Table 1. Comparison of rainfall events in accordance with return period

Return period (yr)	All events	Proportion (%)
2	103	60
2 ~ 3	24	14
3 ~ 5	20	12
5 ~ 10	15	9
10 ~	9	5

두 활용하여 수행하였다.

실측 강우의 재현빈도는 IDF 곡선의 1시간 확률 강우량과 실측 강우사상의 1시간 최대강우강도를 비교하고 가중치를 산정하여 최종적인 재현빈도를 산정하였다. 재현빈도별 강우사상 수 비교결과는 Table 1과 같으며 분석결과 대부분 재현빈도는 5년 빈도 이하로 산정되어 도시 침수는 낮은 빈도의 강우사상에서 발생하는 것을 알 수 있었다.

##### 4.2 강우량 적정성 분석

Fig. 4는 모든 강우사상에 대하여 실측 강우량과 확률 강우량의 총 강우량 차이 정도를 나타낸 그래프이며 점선을 기준으로 오른쪽은 실측 강우량이 확률 강우량보다 높은 사상들의 총 강우량 차이 정도를 나타낸다. 비교결과 실측 강우량이 확률 강우량보다 높은 사상은 모든 강우사상 중 57%로 나타났으며, 실측 강우량이 확률 강우량보다 높은 사상들은 총 강우량 차이 정도가 더욱 심하게 나타나는 것을 알 수 있었다. Tables 2 and 3은 강우지속기간별, 재현빈도별 확률 강우량을 초과하는 강우사상 수를 비교한 표로 확률 강우량을 초과하는 강우사상이 강우지속기간과 재현빈도에 관련성이 있는지 분석하고자 하였다. 분석결과 강우지속기간이 길어질수록 확률 강우량을 초과하는 강우사상이 증가하는 경향성이 있었으며 특히, 18~24시간 구간에서는 확률 강우량을 초과하는 강우사상 비율이 86%, 24시간 이상 구간에서는 100%로 나타났다. 재현빈도별 분석결과로는 모든 빈도 구간에서 확률 강우량을 초과하는 사상 수가 많았지만 특히 5년 빈도 이하의 저 빈도 강우사상에서 확률 강우량을 초과하는 경우가 많았다.

Fig. 5는 실측 강우의 재현빈도가 5년 빈도 이하이면서 확률 강우량을 초과하는 대표적인 강우사상에 대해 지속기간별 최대강우강도를 추출하고 이를 IDF 곡선과 비교한 그림이다. 비교분석 결과 인천지역 강우사상 경우에는 1시간 최대강우

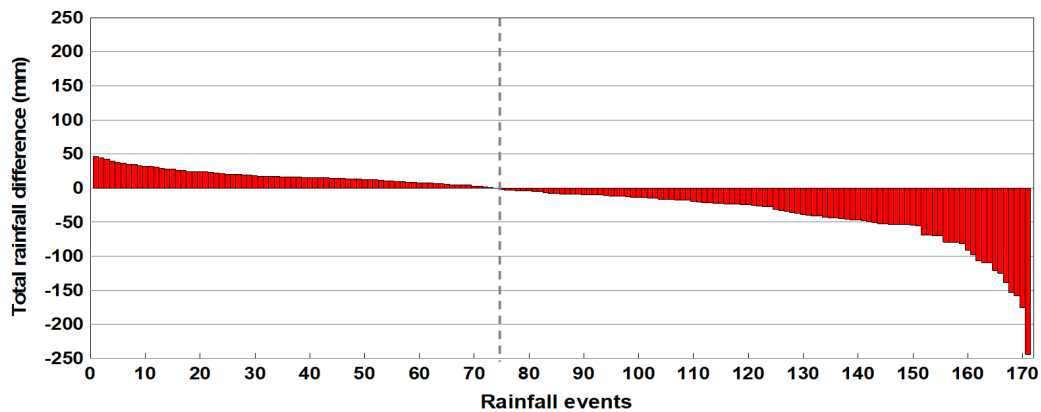


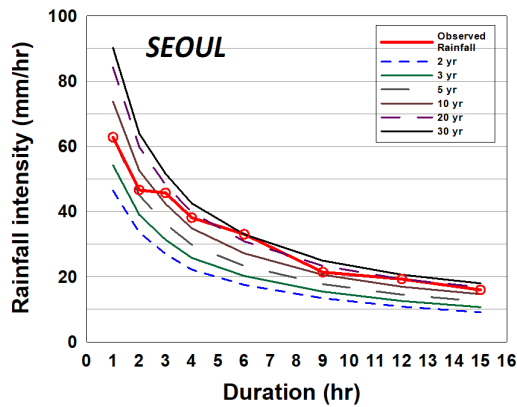
Fig. 4. Comparison of observed rainfall and probability rainfall

**Table 2.** Comparison of rainfall events above probability rainfall in accordance with rainfall duration

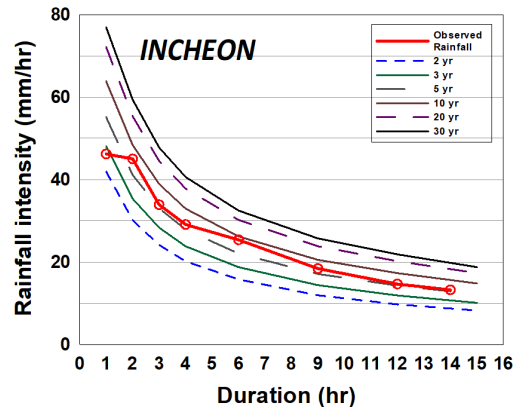
Rainfall duration (hr)	All events	Rainfall events above probability rainfall	Proportion (%)
0 ~ 6	38	14	37
6 ~ 12	73	39	53
12 ~ 18	39	26	67
18 ~ 24	14	12	86
24 ~	7	7	100

**Table 3.** Comparison of rainfall events above probability rainfall in accordance with return period

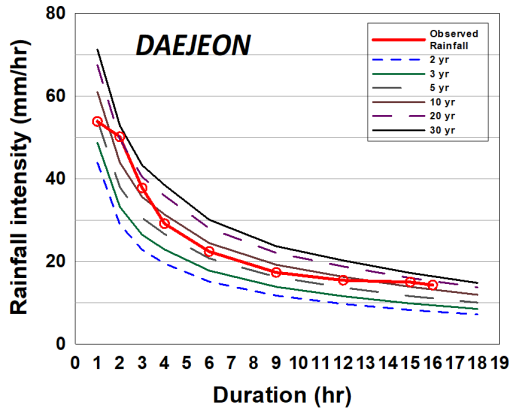
Return period (yr)	All events	Rainfall events above probability rainfall	Proportion (%)
2	103	59	57
2 ~ 3	24	14	58
3 ~ 5	20	14	70
5 ~ 10	15	8	53
10 ~	9	3	33



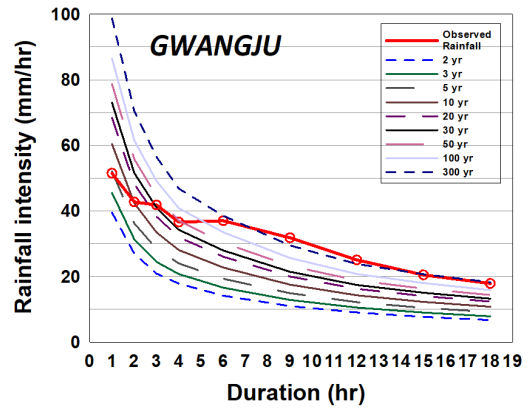
(a) Seoul Area



(b) Incheon Area



(c) Daejeon Area



(d) Gwangju Area

**Fig. 5.** Comparison of maximum rainfall intensity and IDF curve

강도 기준 재현빈도가 2~3년 빈도였지만 총 강우량의 재현 빈도가 약 5년 빈도까지 높아졌으며 서울지역과 대전지역의 강우사상은 총 강우량의 재현빈도가 10~20년까지 높아지는 것을 알 수 있었다. 특히, 울산지역의 강우사상은 최대강우 강도 재현빈도 대비 총 강우량의 재현빈도가 상승하는 정도가 매우 높았으며 300년 빈도까지 높아지는 것을 확인하였다. Table 4는 모든 강우사상에 대해 강우지속기간별 최대강우 강도 재현빈도 대비 총 강우량 재현빈도의 차이를 비교한 표로

대략적인 평균빈도를 비교하였다. 비교분석 결과 6~12시간의 강우사상을 제외하고는 모든 강우사상에서 최대강우 강도 재현빈도 대비 총 강우량의 재현빈도가 높아지는 것을 알 수 있었으며 특히 강우지속기간이 길어질수록 높아지는 정도가 큰 것을 알 수 있었다. 따라서 실제 도시침수는 침투강우 강도 보다 총 강우량에 받는 영향이 클 것으로 추정되었다.

Table 5는 호우 유형별 확률 강우량을 초과하는 실측 강우 사상 수와 평균초과강우량을 비교한 표이며, 이때 활용한 확



**Table 4.** Comparison of maximum rainfall intensity return period and total rainfall return period

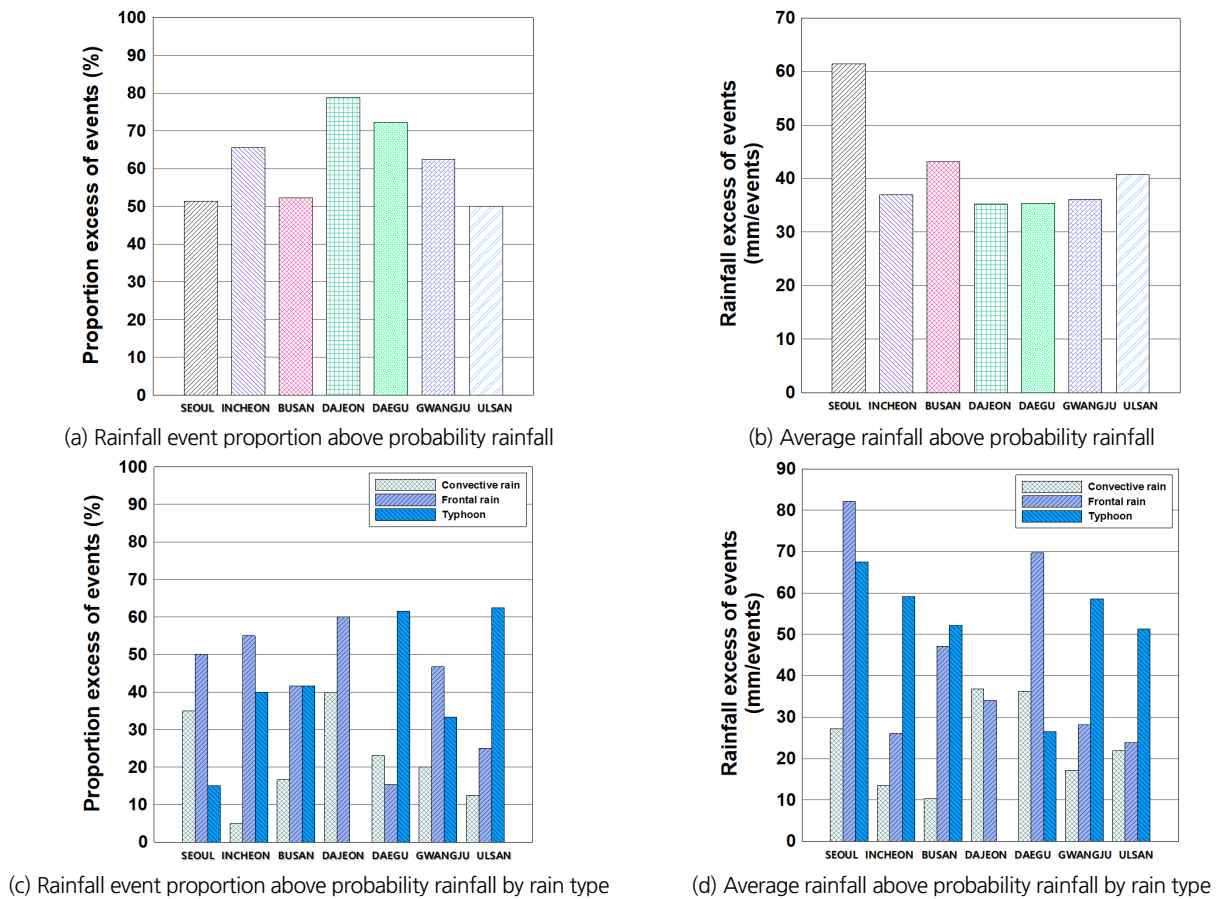
Rainfall duration (hr)	All events	Average return period of maximum rainfall (yr)	Average return period of total rainfall (yr)
0 ~ 6	38	3.8	4.5
6 ~ 12	73	9.1	8.3
12 ~ 18	39	4.3	8.1
18 ~ 24	14	2.3	33.5
24 ~	7	2.4	14.9

**Table 5.** Comparison of rainfall events above probability rainfall in accordance with rain type

Rain type	All events	Rainfall events above probability rainfall	Proportion (%)	Rainfall excess of events (mm/events)
Convective	46	22	48	27.02
Frontal	83	43	52	45.05
Typhoon	42	33	79	49.68

를강우량은 앞서 4.1에서 산정한 값을 활용하였다. 모든 호우 유형에서 실측 강우량이 확률 강우량을 초과하는 비율은 50% 이상으로 많은 것으로 분석되었다. 특히, 태풍의 경우는 확률 강우량을 초과하는 강우사상 비율이 약 79%로 대부분 실측 강우량을 적절히 반영하지 못하는 것을 알 수 있었다. 호우 유형별로 확률 강우량을 초과하는 강우사상의 평균초과강우량을 비교한 결과 전선성 호우와 태풍의 경우에는 평균초과강우량이 약 40~50 mm/events로 높은 것을 알 수 있었다.

Fig. 6(a)는 지역별 확률 강우량을 초과하는 강우사상 비율을 비교한 결과로 모든 지역에서 확률 강우량을 초과하는 강우사상은 많았으며 특히 대전과 대구지역은 확률 강우량을 초과하는 강우사상 발생 비율이 높은 것으로 확인되었다. 지역별로 확률 강우량을 초과하는 강우량의 크기를 비교해본 결과 Fig. 6(b)와 같이 서울지역에서는 다른 지역에 비해 평균 초과강우량이 제일 크게 나타났으며 이외의 지역에서는 비슷한 크기를 나타내었다. 지역별 확률 강우량을 초과하는 강우사상이 호우 유형에 따라 받는 영향을 비교한 결과 Fig. 6(c)와 같이 대구와 울산지역에서는 태풍의 경우에서 확률 강우량을



**Fig. 6.** Comparison of rainfall events above probability rainfall in accordance with area

Table 6. Relative error in accordance with Rainfall intensity formula

Area	Talbot (%)		Sherman (%)		Japanese (%)		Cleveland (%)		Polynomial (%)	
	short	long	short	long	short	long	short	long	short	long
Seoul	2.19▲	-2.23	-2.31	0.29	-3.70	2.61▲	0.09	-0.37	0.23	-0.31
Incheon	0.99▲	-2.85	-0.70	-0.50	-1.38	1.55▲	0.10	-1.02	0.06	-0.43
Busan	1.95▲	-1.41	-4.16	2.17	-4.61	4.73▲	0.05	-0.27	0.34	-0.07
Daejeon	1.49▲	-5.54	-1.05	1.39	-1.60	4.89▲	0.08	-0.68	-0.05	-1.58
Daegu	0.22	-3.85	0.46▲	-1.28	0.18	-0.22	0.29	-1.41	0.18	0.25▲
Gwangju	2.22▲	-2.72	-1.78	0.50	-2.69	2.27▲	-0.52	0.02	0.08	0.33
Ulsan	2.55▲	-1.43	-4.06	-0.99	-4.06	0.19	-0.52	-0.85	0.35	1.17▲

초과하는 강우사상이 많았으며 부산지역에서는 태풍과 전선성 강우에 모두 확률 강우량을 초과하는 강우사상이 많았다. 이외의 지역에서는 모두 전선성 강우에서 확률 강우량을 초과하는 강우사상이 대부분을 차지하였다. 평균초과강우량을 비교해본 결과로는 모든 지역에서 전반적으로 전선성 호우와 태풍의 경우에는 크기의 정도가 컸다. 특히, 서울과 대구지역에서는 전선성 호우에 취약한 정도가 크며, 인천, 광주, 울산 지역에서는 태풍에 강우량이 취약한 정도가 컸다. 전반적으로 지역별 호우 유형에 따른 강우량의 영향을 분석해보면 서울과 대전지역은 전선성 호우에 받는 영향이 크다고 판단되었고 이외의 지역은 태풍에 받는 영향이 크다고 판단되었다.

본 연구결과 강우량은 호우 유형에 따라 받는 영향이 크다고 나타났으며, 지역별로 호우 유형에 따라 받는 차이는 선행 연구들과 일관성을 보여 신뢰도 있는 결과라고 판단되었다 (Park *et al.*, 2008). 그러나 우리나라의 설계강우 산정기준에서는 지역별 호우특성을 고려하고 있지 않다. 따라서 각 도시별로 호우 유형별 민감도를 분석하고 취약한 유형에 대해서는 해당 유형의 특성을 반영한 설계강우를 산정기준에 제시할 필요가 있다고 판단되었다.

본 연구에서는 먼저 두 기간에 나눠 산정한 확률 강우량을 기반으로 강우강도 식을 각각 유도하였다. 그리고 모든 강우사상에 대하여 강우강도 식 기반의 확률 강우량을 각각 산정하고 이를 실측 강우량과 비교하여 비교적 안정적인 값을 나타내는 식에 대해 비교분석하고자 하였다. 일반적으로 수공구조물 설계 시 강우강도식 결정은 식 기반의 확률 강우량을 확률 강우량과 비교하여 편차가 가장 적은 식으로 결정하고 있다. 그러나 앞선 실측 강우량과 확률 강우량 비교결과 실측 강우량이 확률 강우량보다 높은 사상들의 총 강우량 차이 정도는 크게 나타났고 강우강도식을 유도하면서 오차도 존재하기 때문에 본 연구에서는 비교적 안정적으로 나타내는 식을 선정하고자 하였다.

비교 결과 실측 강우량이 식 기반의 확률 강우량을 초과하

는 강우사상 수의 차이는 식별로 크지 않아 본 연구에서는 강우강도식 기반의 확률 강우량과 실측 강우량의 총 강우량 차이 정도를 비율로 비교하여 비교적 안정적인 값을 나타내는 식에 대해 지역별로 비교분석하였다. 비교분석 결과 강우지속시간 10시간을 기준으로 보수적인 값을 나타내는 식에 차이를 보였다. Table 6은 식별 평균상대오차를 지역별로 나타낸 표이다. 강우지속시간이 비교적 단기간의 경우에 대해 분석해 보았을 때에는 전반적으로 대부분 지역에서 Talbot 식을 통한 강우량이 보수적인 값을 나타내었다. 장기간의 경우에 대해 분석해 보았을 때에는 전대수 다항식과 Japanese 식을 통해 산정한 강우량이 가장 보수적인 값을 나타내었지만 전반적으로 분석해 보았을 때에는 Japanese 식을 이용하였을 때 보수적으로 나타나는 경우가 많았다. 따라서 설계 강우강도식 결정 시 보수적인 값을 나타내는 Talbot과 Japanese 식을 우선적으로 검토하는 것이 비교적 안전한 설계가 될 수 있다고 판단되었다.

#### 4.3 우량주상도 적정성 분석

본 연구에서는 시간분포 방법별 우량주상도와 실측 우량주상도를 비교분석하여 실측 우량주상도의 최대강우강도와 형태를 적절하게 반영하는 시간분포 방법을 선정하고자 하였다. Huff 방법과 Mononobe 방법 적용 시 무차원 시간분포곡선과 지점별 n값은 국토교통부 보고서를 활용하였다. Huff 우량주상도 작성 시 초과발생확률은 50%, 분위는 3분위를 채택하였고 Mononobe 우량주상도 작성 시 배치는 일반적으로 많이 사용되는 중앙집중형을 이용하였다(MLTM, 2011). 교호블록 우량주상도 작성 시에는 IDF 곡선과 오차가 제일 적은 전대수 다항식을 활용하였다.

Fig. 7은 각 시간분포 방법에 따른 우량주상도와 실측 우량주상도의 최대강우강도를 비교한 그림이다. 최대강우강도는 강우지속시간 내의 첨두강우강도부터 지속시간 3시간까지의 최대강우강도를 비교하였다. 비교결과 지속시간 첨두강우



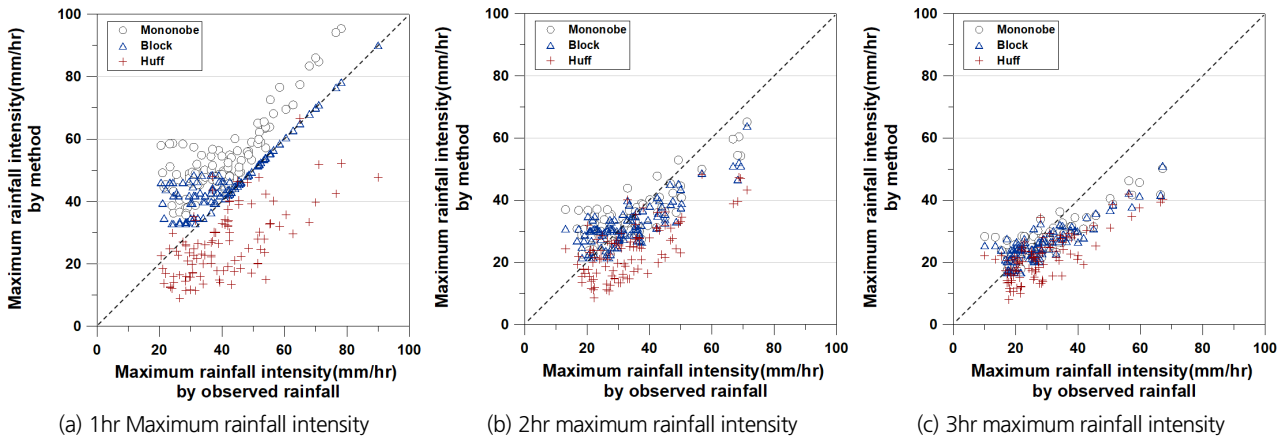


Fig. 7. Comparison of maximum rainfall intensity between actual hyetograph and hyetograph by time distribution method

Table 7. Relative error by time interval in accordance with rainfall duration (%)

Rainfall duration (hr)	Huff (%)	Mononobe (%)	Block (%)
0 ~ 6	31.2▼	50.5	35.7
6 ~ 12	55.5▼	69.9	56.9
12 ~ 18	87.8▼	92.4	97.3
18 ~ 24	211.8	172.5▼	230.2
24 ~	208.4	178.7▼	305.0
All	76.8▼	85.8	93.7

Table 8. Relative error by time interval in accordance with area (%)

Area	Huff (%)	Mononobe (%)	Block (%)
Seoul	67.7▼	69.1	82.6
Incheon	98.4	83.8▼	107.3
Busan	58.7▼	74.4	71.5
Daejeon	90.6▼	97.0	113.9
Daegu	83.7▼	127.7	93.0
Gwangju	75.3	88.6	71.8▼
Ulsan	56.9	58.2	50.2▼

강도는 Mononobe 방법을 이용하였을 때 실측 강우보다 높은 경우가 많았으며 Huff 방법의 경우에는 첨두강우강도가 낮게 산정됨을 확인하였다. 이러한 경향성은 지속시간 2~3시간 최대강우강도 비교에서도 동일하게 나타났으며 Mononobe 방법뿐만 아니라 교호블록 방법을 이용하였을 경우에도 최대강우강도가 실측 강우 보다 높은 경우가 다수 있는 것을 확인하였다.

Tables 7 and 8는 실측 우량주상도와 시간분포 방법별 우량주상도의 시 구간별 상대오차를 강우지속기간과 지역별로 나

눠 비교한 표이다. Table 7에서 알 수 있듯이 강우지속기간이 18시간 이하인 경우에서 Huff 방법의 상대오차가 가장 적었으며 이후의 강우지속기간에서는 Mononobe 방법의 상대오차가 적은 것을 알 수 있었다. 이는 전반적으로 Mononobe 방법과 교호블록 방법은 강우지속기간 내에서 첨두부에서 멀어질수록 과소 산정되는 경향으로 인해 Huff 방법의 상대오차가 적게 나타났다고 판단되었다. 또한 장기간에서는 상대오차가 100% 이상이기 때문에 모든 시간분포 방법이 실측 우량주상도의 형태를 반영하는 데에는 한계가 있는 것으로 판단되며, 비교적 Mononobe 방법의 상대오차가 적은 이유는 상대적으로 첨두강우량이 안전하게 설계되었기 때문이라고 판단된다.

지역별로 시 구간별 상대오차를 비교하였을 때에는 전반적으로 Huff 방법의 경우 상대오차가 가장 낮았으며 인천의 경우에는 Mononobe 방법, 광주와 울산 지역에서는 교호블록 방법의 상대오차가 가장 낮았다. 이는 앞선 최대강우강도 비교결과 Mononobe 방법과 교호블록 방법의 최대강우강도가 높게 산정된다는 점으로 보아 인천, 광주, 울산 지역에서 발생한 호우는 최대강우량이 높게 발생되어 상대오차가 적은 것이라 판단되었다.

본 우량주상도 적정성 분석결과 최대강우강도는 Mononobe 방법이 가장 크게 실측 우량주상도를 반영하고 Huff 방법이 가장 작게 반영하는 것을 확인하였다. 또한 형태는 Huff 방법이 실측 우량주상도를 안정적으로 반영하는 것으로 나타났으나 상대오차의 차이는 이외의 시간분포 방법과 미미하며 강우지속기간이 장기간일 때에는 매우 컸기 때문에 모든 시간분포 방법이 형태에 대해서는 불확실성이 존재한다고 판단되었다. 따라서 수공구조물 용량 설계 시 큰 영향을 미치는 첨두강우강도를 고려하여 설계 시 Mononobe 방법을 우선적으로 검토하는 것이 안정적인 설계방법이라 판단되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 설계강우 요소의 적정성 분석을 위해 설계 강우 산정절차에 따라 강우량 및 우량주상도를 산정하고 이를 실측 강우사상과 비교분석하였다. 또한 설계강우 산정절차 적용 시 다양한 강우강도식과 시간분포 방법을 적용하여 비교 분석하였다. 실측 강우사상은 각 도시별 과거 20년간 발생한 침수사례를 수집하여 선정하였다. 강우량에 대한 적정성 분석은 IDF 곡선과 강우강도 식을 통해 산정한 강우량을 실측 강우량과 비교하여 수행하였고 우량주상도에 대한 적정성 분석은 시간분포 방법별 우량주상도의 최대강우강도와 우량주상도 형태를 실측 우량주상도와 비교하여 수행하였다. 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 동일 재현빈도의 강우량에 대한 적정성 분석 결과 실측 강우량이 확률 강우량보다 높은 경우는 57%로 높았으며, 재현빈도가 낮은 경우에도 다수 발생하였다. 따라서 IDF 곡선을 통해 산정한 강우량은 실측 강우량을 반영하는데 한계가 있으며, 저 빈도의 강우사상에 대해 분석했을 때 침투 강우강도 대비 총 강우량의 재현빈도가 상대적으로 높아 도시침수는 침투강우강도 보다 총 강우량에 받는 영향이 클 것으로 추정되었다.
- 2) 호우 유형 및 지역별 강우량에 대한 적정성 분석 결과 호우 유형별로는 태풍과 전선성 호우에 의한 경우에 취약한 것으로 나타났으며, 지역별로는 서울과 대전지역이 전선성 호우에 취약하고 이외의 지역에서는 태풍에 취약한 것으로 나타났다. 따라서 도시별 설계강우 산정 기준 수립 시 도시별로 영향을 많이 받는 호우 유형의 특성을 반영할 필요가 있는 것으로 판단된다.
- 3) 수공구조물 설계 시 주로 이용되는 5가지 강우강도 식을 활용하여 실측 강우의 재현빈도와 강우지속기간을 갖는 식 기반의 확률 강우량을 산정하고 이를 실측 강우량과 비교분석하였다. 비교분석 결과 확률 강우량과 실측 강우량 비교결과와 동일한 결과를 나타냈으며 비교적 안정적인 식에 대해 분석해 보았을 때에는 모든 지역에서 강우지속기간이 단기간일 때에는 Talbot 식, 장기간일 때에는 Japanese 식이 안정적으로 산정되는 경향을 보였다.
- 4) 각 시간분포 방법별 우량주상도와 실측 우량주상도의 최대 강우강도와 형태를 비교한 결과 최대강우강도는 Mononobe 방법, 형태는 Huff 방법이 가장 실측 강우를 적절히 반영하는 것으로 나타났다. 그러나 수공구조물 용량 결정 시 침투 강우강도가 미치는 영향이 크기 때문에 설계 시 설계강우

를 안정적으로 산정하기 위해서는 우선적으로 Mononobe 방법을 고려해야 할 필요가 있다고 판단된다.

본 연구에서는 실제 침수를 유발한 강우사례를 활용하여 설계강우 요소들의 적정성 분석 및 산정방법의 한계점을 제시하여 향후 국내 설계기준 보완을 위한 기초자료로써 활용될 수 있다는 점에서 가치가 있다고 판단된다. 추후의 연구에서는 도시별 설계기준 수립 시 호우 유형에 따른 영향을 반영하는 방법에 관한 연구가 필요하며, 도시지역 이외에도 유역을 대상 지역으로 세분화하고 해당 유역의 수공구조물 설계강우 산정 기준을 반영하여 설계강우 요소의 적정성을 분석해 볼 필요성이 있다고 사료된다.

## 감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물 관리연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(130747).

## References

- Choi, S., Joo, K., Shin, H., and Heo, J.H. (2014). "Improvement of Huff's method considering severe rainstorm events." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 11, pp. 985-996.
- Hong, C.S., Wone, S.Y., Ahn, J.H., and Ahn, W.S. (2001). "Reliability analysis for the estimation of frequency-based rainfall." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 1, No. 3, pp. 111-122.
- Jang, S.H., Yoon, J.Y., and Yoon, Y.N. (2006). "A study on the improvement of Huff's method in Korea: I. Review of applicability of Huff's method in Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 9, pp. 767-777.
- Jo, D.J., and Jeon, B.H. (2012). "Analysis on the characteristics of exceeding probability rainfall events." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 309-313.
- Jung, T.H., Kim, H.B., Kim, H.S., and Heo, J.H. (2019). "Selection of climate indices for nonstationary frequency analysis and estimation of rainfall quantile." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 39, No. 1, pp. 165-174.
- Jung, S.I., Yoo, C.S., and Yoon, Y.N. (2007). "On the stationarity of rainfall quantiles: 1. Application and evaluation of conventional methodologies." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 7, No. 5, pp. 79-88.
- Mugita, A., Yokota, T., Matsuura, T., and Nakamura, Y. (2017). "Analysis of the design rainfall for stormwater management of

- sewerage.” *Proceeding of 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage*, Prague, Czech Republic, pp. 1963.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2011). *Improvement and complementary research for probable rainfall*.
- Ministry of Public Administration and Security (MOPAS) (1998~2018). *Disaster Annual Report*.
- Oh, T.S., Kim, E.C., Moon, Y.I., and Ahn, J.H. (2009). “Characteristics analyses of timely rainfall events above probability precipitation on each frequency.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. b6, pp. 513-526.
- Park, C.Y., Moon, J.Y., Cha, E.J., Yun, W.T., and Choi, Y.E. (2008). “Recent changes in summer precipitation characteristics over South Korea.” *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 43, No. 3, pp. 324-336.
- Park, J.K., Jung, W.S., and Choi, H.J. (2008). “An analysis of the Korean peninsula damages vulnerabilities for a natural disaster mitigation : Focus on public facilities damages.” *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 17, No. 4, pp. 413-422.
- Park, J.P., Kang, T.U., and Lee, S.H. (2019). “A temporal distribution method of probable rainfall for planning a storm sewer Network in an urban area.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 1, pp. 85-94.
- Sim, J.H., and Kim, Y.B. (2006). “The status and countermeasures of the national inveterate flooded district.” *Journal of National Institute for Disaster Prevention*, Vol. 8, No. 1, pp. 79-94.