



서울지점의 기존 Huff 모형의 문제점 분석 및 개선 방안에 대한 제안

Analysis of a Conventional Huff Model at Seoul Station and Proposal of an Improvisation Method

유철상* · 나우영**

Yoo, Chulsang*, and Na, Wooyoung**

Abstract

The conventional Huff model has a serious limitation with respect to over-smoothing of the rainfall peak because it is derived based on the mean temporal distribution of observed rainfall events. To overcome this limitation of the conventional Huff model, this study proposes a modified Huff model that considers the characteristics of the temporal distribution of observed annual maximum rainfall events. After normalizing and rearranging rainfall events around the storm center, the modified Huff model is formulated to consider their mean characteristics. Compared to the conventional Huff model, the modified Huff model has a unique characteristic of being a centered-type, which is also formulated using the rearranged rainfall events around the storm center. When we evaluated the suitability of the conventional Huff model, we found that the model is not representative of the temporal rainfall distribution of observed storm events. Though the modified Huff model is formulated as a centered-type that is found to perform better than the conventional Huff model formulated for a given quartile, the modified Huff model still has a limitation that the model is derived by considering the mean characteristics of the observed rainfall temporal distribution.

Key words : Rainfall Temporal Distribution Model, Huff Model, Evaluation of Temporal Distribution Model, Modified Huff Model

요 지

현재 사용되고 있는 Huff 모형은 관측 호우사상의 평균적인 시간분포 특성을 반영하기 때문에 집중호우사상의 첨두치를 잘 나타내지 못하는 한계를 가진다. 본 연구에서는 기존 Huff 모형의 한계를 극복하기 위해 연최대치 호우사상의 시간분포 특성을 반영한 수정 Huff 모형을 제안하였다. 수정 Huff 모형은 연최대치 호우사상을 중앙집중형으로 재배열한 후 이를 정규화하여 평균적인 특성을 갖도록 유도되었다. 기존 Huff 모형과의 가장 큰 차이점은 모형 유도과정에서 중앙집중형으로 재배열된 관측 호우사상이 이용되어 수정 Huff 모형의 형태가 중앙에 집중된다는 점이다. 기존 Huff 모형에 대한 적합성을 평가한 결과, Huff 모형은 실제 관측 호우사상의 시간적 강우분포에 대해 대표성을 갖기는 어려운 것으로 판단되었다. 반면 수정 Huff 모형은 분위별이 아닌 오직 중앙집중형 하나의 형태로 유도되었음에도 불구하고 분위별로 유도된 기존의 Huff 모형보다 더 나은 성능을 보이는 것으로 확인되었다. 그러나 여전히 관측된 시간분포의 평균적인 특성을 반영하는 한계는 극복하지 못하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 강우의 시간분포 모형, Huff 모형, 시간분포 모형 평가, 수정 Huff 모형

1. 서 론

설계강우의 시간적 분포는 강우-유출해석 결과에 큰 영향

을 미친다(Nouh, 1985). 주어진 재현기간, 주어진 지속시간에 대한 설계강우량이 결정되면 이를 시간 분포시킨 설계우량추상도가 유도되어야 하고, 이것을 입력으로 하여 강우-유

*정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수(E-mail: envchul@korea.ac.kr)

Member, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

**교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정(Tel: +82-2-3290-3912, Fax: +82-2-3290-3912, E-mail: uo092@hanmail.net)

Corresponding Author, Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

출해석을 수행하면 설계홍수량이 계산된다. 이 과정에서 대상 지점 또는 유역을 대표할 수 있는 강우의 시간분포가 필요하다. 원칙적으로는 관측 강우자료에 대한 분석을 통해 최적의 시간분포를 유도하여 사용해야 하나, 자료의 부족 등 여러 한계로 인해 시간분포 모형을 이용하는 것이 보다 일반적이다(Jeong and Yoon, 2007).

시간분포 모형은 유도 방법에 따라 크게 세 가지로 분류된다. 첫 번째는 실제 관측된 호우자료를 분석하여 시간분포를 유도하는 형태이다. 전 세계적으로 널리 쓰이고 있는 Huff 모형(Huff, 1967)을 비롯하여 미국 National Resources Conservation Service (NRCS)에서 개발한 SCS 모형(Kent, 1973), 호우의 모멘트를 이용하는 Yen and Chow 모형(Yen and Chow, 1980), Mononobe 모형(Jeong and Yoon, 2007), Pilgrim and Cordery 모형(Pilgrim and Cordery, 1975) 등이 이에 해당한다. 두 번째는 I-D-F (rainfall intensity-duration-frequency) 관계를 기반으로 개발된 모형이다. 지속시간에 해당하는 강우강도 정보를 이용하여 강우분포 형태가 유도되며, Alternating Block 모형(Chow et al., 1988), Kiefer and Chu 모형(Kiefer and Chu, 1957), Lee and Ho 모형(Lee and Ho, 2008) 등이 이에 해당한다. 마지막으로, 추계학 및 통계학적인 접근 기반의 시간분포 유도 방법이 있다(Garcia-Guzman and Aranda-Oliver, 1993; Cheng et al., 2001; Lin et al., 2005; Wu et al., 2006).

이러한 모형들 중에서 실제 수공설계에 어떤 것이 사용되느냐는 일종의 선택의 문제이다. 예를 들어 미국의 경우는 Huff 모형에 근간을 둔 무차원 시간분포를 이용하고 있으며(NOAA, 2013), 이는 중국, 싱가포르, 한국의 경우도 마찬가지이다(MOCT, 2000; Chan et al., 2012; Yin et al., 2016). 뉴질랜드와 이탈리아 등 일부 국가에서는 I-D-F 관계를 이용하는 모형인 Chicago 시간분포 모형을 사용하고 있다(NCC, 2013; Palla and Gnecco, 2016). 필리핀에서는 Alternating Block 모형을 사용하고 있으며(JICA, 2010), 홍콩에서도 이와 유사하게 주어진 지속시간에 해당하는 강우강도를 이용하여 시간분포 모형을 유도하고 있다(DSD, 2018).

국내에서는 Seo (1965)에 의해 강우의 시간분포 개념이 처음 고찰되었다. Park et al. (1981)은 서울지점에 대해 Huff 모형을 적용한 바 있으며, 그 이후에 Seo and Kim (1989)은 전국의 우량관측소에서 측정된 강우자료를 이용하여 전국적인 설계우량의 시간분포 특성치를 제시하여 설계에 적용하기 위한 기초를 마련하였다. Seo et al. (1995)은 위천유역의 독립호우사상 3,550개를 선별하여 Yen and Chow 모형, Huff 모형, Pilgrim-Cordery 모형, Mononobe 모형에 의한 지속시간별 설계강우의 시간분포 특성치를 제시하였다. Lee et al. (2004)은 대전지역의 기상학적, 지형학적 특성에 맞는 적절한 강우분포형을 제시하고 기존에 유도된 Huff 시간분포와 비교하였다. 이외에도 다양한 시간분포에 대한 여러 연구들이 지속적으로 수행되었으며, 근래에는 극치강우사상 자

료를 이용하는 연구들이 주를 이룬다(Lee and Chu, 2006; Yoon et al., 2012; Cho and Kim, 2015).

현재 국내에서 가장 많이 사용되는 Huff 모형은 국토교통부의 체계적인 연구를 통해 그 적용이 보편화되었다. 예를 들어, MOCT (2000)는 6월부터 9월 사이에 발생한 호우사상의 시강우자료를 이용하여 Huff (1967)의 방법론에 근거한 시간분포를 유도하였다. 기상청 관측소별 관측자료를 이용하였으며, 이때 무강우기간은 6시간으로 설정하였다. Huff 모형 유도 결과, 분위는 경호우의 경우 1분위가 가장 많았고, 중호우는 2, 3분위에 집중되어 나타났다. 그 후, MLTM (2011)에서는 기존 연구의 한계를 극복하고자 국내의 실정을 고려한 ‘확률강우량도 개선 및 보완연구’를 수행하였다. 해당 연구에서는 기상청 산하 관측소 69개 지점의 시강우자료를 이용하여 지점별 Huff 모형을 유도하였다. 연중 전기간의 시강우자료를 이용하였으며, 총강우량 25.4 mm (1 inch) 이상의 사상만을 이용하였다. 분석 결과, 2, 3분위가 최빈분위로 나타났고, 2000년의 연구에 비해 최빈분위에 집중되는 경향이 더욱 커졌다. 이외에도 MOCT (2004)에서는 하천정비기본계획 수립 및 하천대장작성 지침을 통해 강우의 시간분포 결정시 임계지속시간을 산정하고, 임계지속시간 동안의 강우시간분포는 시강우자료를 이용한 Huff의 강우시간분포방법을 사용하도록 권장한 바 있다.

그러나 Huff 모형은 크게 다음 세 가지 문제점을 가진다. 첫째로 호우사상의 지속시간 혹은 발생 원인별로 다르게 나타나는 강우의 시간분포를 하나의 대표 분포로 포괄할 수 있는가에 대한 문제가 있다(Jun and Yoo, 2012). 두 번째는 최빈분위가 결정되더라도 무차원 누가곡선이 과도하게 평활화되어 나타나기 때문에 첨두강우량을 과소 산정하게 되는 문제이다. 이는 극치강우사상의 시간분포에 대한 첨두유출을 과소 추정하게 되는 문제로 이어지며, 이러한 문제는 강우의 지속시간이 짧을수록 더 심각하다(Jeong and Yoon, 2007). 임계지속시간 개념을 도입함으로써 다소 보완이 가능하지만, 근본적인 해결책은 아니다. 마지막 문제는 최빈분위의 선택이 전혀 물리적이지 않다는 점이다. 1분위나 2분위의 경우 초기손실의 영향으로 첨두홍수량이 과소 산정되며, 4분위로 갈수록 첨두홍수량이 증가하는 경향이 있다는 연구(Yoon et al., 2004)는 수문학적으로 당연한 개념이며, 다만 이것이 3분위 선택의 이유일 수는 없다. 한편 MLTM (2011)에서는 홍수량 산정결과를 고려하여 Huff 3분위, 확률 50% 무차원 누가곡선을 실무적 안전측으로 제시한 바 있다.

Huff 분포의 문제점 중 가장 심각한 것인 첨두홍수량의 과소 산정 문제는 다양한 연구들에서 제기된 바 있다. Knapp and Terstriep (1981)은 저수지 홍수량 추정을 위해 20개 소유역에 대해 여러 시간분포를 적용한 결과, 가능최대강수량과 100년 빈도 강우에서 각 분포간 상당한 차이가 발생하였으며, 특히 Huff 분포의 경우 재현기간 100년 빈도 강우량

에 대한 침투유출량이 SCS 분포에 비해 20~25% 정도 작게 산정됨을 확인하였다. Ward et al. (1980)은 다양한 수문학적 조건 하에서 Kentucky 유역에 시간분포 모형을 적용한 결과, Huff 모형의 침투유출량 값이 최대 30% 정도 작게 산정됨을 확인하였다. Yoon et al. (2004)은 무한천 유역에 대해 100년 빈도 설계강우량을 Mononobe 모형과 Huff 모형으로 시간분포시켜 이로 인해 발생한 침투홍수량의 차이를 비교하였다. 그 결과, Huff 모형에 대한 침투홍수량이 Mononobe 모형에 대한 침투홍수량에 비해 약 25% 더 작게 산정되었다. 이외에도 Jeong and Yoon (2007)은 Huff 모형이 근본적으로 과거 누가우량곡선의 평균값을 반영하기 때문에 소규모유역 혹은 도시유역의 경우 다른 모형들에 비해 홍수유출량의 규모가 작게 산정됨을 지적하였다.

본 연구에서는 서울지점에서 관측된 호우의 시간적 분포 특성을 바탕으로 기존의 Huff 모형을 검토하고, 더 나아가 서울지점의 연최대치 호우사상의 특성을 고려한 수정 Huff 모형을 제안하고자 한다. 먼저, 이변량 빈도해석을 통해 1961년부터 2016년까지의 기간에 서울지점에서 발생한 연최대치 호우사상을 선정하였다. 선정된 호우사상은 현재 설계기준으로 제시된 Huff 모형과 비교되었으며, 이를 통해 Huff 모형이 실제 호우사상과 얼마나 다른지를 평가하였다. 마지막으로 현재의 Huff 분포가 가지는 문제점을 상당 부분 극복할 수 있는 수정 Huff 모형을 제안하고, 이를 다시 관측 호우사상과 비교하여 그 적용성을 판단하고자 한다.

2. Huff 모형과 모형의 결정

2.1 Huff 모형

Huff (1967)는 미국 Illinois 주의 East-central Illinois 유역에서 관측된 자료를 통계적으로 분석하여 Huff 모형을 개발하였다. 1955년부터 1966년까지 총 12년 동안 49개 관측소에서 관측된 강우자료를 사용하였다. 호우사상의 선정 기준은 무강우기간 6시간 이상, 유역평균 강우량 0.5 inch (12.7 mm) 이상이었다. 선정된 호우사상은 총 261개이며, 강우지속시간은 3시간에서 48시간 사이에 분포하였다. 선정된 호우사상의 최대강우가 발생한 지점을 기준으로 4개의 분위로 호우사상을 분류하였다. 분류 결과, 1분위와 2분위 호우가 각각 30%, 36%로 가장 빈번한 분위로 나타났으며, 4분위 호우사상의 수가 가장 적었다.

각 분위에 해당하는 호우사상의 시간분포 특성을 대표하는 Huff 시간분포는 시간적 무차원화에 근간을 두고 있다. 각 분위에 속하는 개개 호우의 시간별 누가우량기록을 호우별 총 지속시간과 총 우량을 사용하여 무차원화 한다(Eqs. (1) and (2)).

$$PT(i) = \frac{T(i)}{T_o} \times 100\% \quad (1)$$

$$PR(i) = \frac{R(i)}{R_o} \times 100\% \quad (2)$$

이때 $PT(i)$ 는 총 강우지속시간 T_o 에 대한 임의시간 $T(i)$ 에서의 강우지속시간 백분율(%)이며, $PR(i)$ 는 총 지속시간 T_o 동안의 총 우량 R_o 에 대한 임의시간 $T(i)$ 까지의 누가우량 백분율(%)이다. 통상 i 의 개수를 10으로 설정하여 10%의 단위 시간 간격마다 누가우량 백분율을 산정한다.

한편, Huff 모형의 분위가 유출에 지대한 영향을 미침에도 적정 분위에 대한 선정 기준은 명확히 제시되지 않았다. Huff (1967)에서 총 261개 호우사상에 대해 Huff 시간분포를 유도한 결과, 2분위에 침투우량이 위치하는 호우사상 수가 가장 많았다. 그 다음은 1분위였다. 국내의 연구인 MOCT (2000)과 MLTM (2011)에서는 국내에서 발생한 호우에 대해 유사한 분석을 수행하였다. 각 우량관측소 지점마다 Huff 모형을 유도하고, 최빈분위를 결정하였다. 그 결과, 1분위와 4분위가 최빈분위인 지점은 없었으며, 2분위와 3분위가 최빈분위인 경우가 대부분이었다. 결국 우리나라에서는 호우의 지속시간에서 중앙부에 호우가 집중되는 경향이 있으며, 이를 고려하여 Huff 모형을 유도해야 한다는 결론을 내릴 수 있다. 또한, 초기손실로 인한 침투홍수량 과소 산정 문제를 고려할 때, 1, 2분위보다는 3분위 혹은 4분위가 적정 분위로 설정됨이 적절하다고 판단된다. MLTM (2011)에서는 홍수량 산정결과를 고려하여 Huff 3분위, 확률 50% 무차원 누가곡선을 실무적 안전측으로 제시한 바 있다.

2.2 Huff 모형의 개선에 대한 연구들

앞서 언급한 바 있듯이 Huff 모형의 적용에는 여러 문제점들이 존재한다. 이를 해결하고자 국내에서는 Huff 모형을 개선하려는 여러 연구들이 수행된 바 있다. 먼저, Lee et al. (2004)은 대전지역을 대상으로 기상학적, 지형학적 특성에 맞는 적절한 강우분포형을 제시하고, 기존에 유도된 Huff 시간분포와 비교하였다. 지속시간별 강우량을 누적하고 지속시간과 강우량을 무차원화하여 새로운 강우분포형을 유도한 결과, 기존 Huff 시간분포의 형태와 상이한 결과가 도출되었다. 그 이유는 Huff 모형의 경우 각각의 호우 사상의 분위기를 결정하고 각각의 분위에 해당하는 호우사상들만으로 분포시키는 반면, 새로운 분포형은 모든 호우사상을 고려하였기 때문이다.

Jang et al. (2006)은 Huff (1967)의 연구배경과 지형 및 강우특성을 국내유역과 비교하고 Huff 모형을 국내에 적용한 MOCT (2000) 연구의 한계점을 파악하였으며, 국내 호우사상이 가지는 지속시간별 시간분포 특성을 검토함으로써 국내유역에 적합하게 Huff 모형을 개선하고자 하였다. Lee et al. (2006)은 강우의 수문학적 특성을 고려한 단시간 강우의 시간분포 형태를 제시하였다. 6시간 이하의 단시간 강우자료가 충분히 확보되어있는 국내 도시지역인 서울, 부산,

대구, 대전 지점을 대상으로 Huff의 무차원 누가곡선을 새롭게 유도하였으며, 강우의 수문학적 특성은 지속기간, 강우의 발생 유형, 구간변화 등으로 분류하여 고려하였다. 그 결과, 국내 도시지역에 대한 단시간 강우의 최대강우는 전방위 구간에서 발생할 확률이 가장 높게 나타났다.

반면 Lee and Chu (2006)는 1961년부터 2004년까지 서울 지역에 대한 강우 관측자료 중 지속기간별 연최대치 강우자료를 이용하여 강우의 시간분포 특성을 분석하고 기존 Huff의 4분위법 결과와 비교하였다. 그 결과, 연최대치 강우의 지속기간이 짧을수록 무차원 누가곡선이 Huff의 4분위법 분포에 비해 비교적 완만하게 나타났으며, 지속기간이 점점 증가할수록 Huff 분포와 유사하게 나타났다.

2.3 모형의 검증

시간분포 모형에 대한 검증은 주로 관측자료와의 비교를 통해 이루어진다(Guo and Hargadin, 2009; Nguyen et al., 2010; Kimoto et al., 2011). Guo and Hargadin (2009)은 NRCS에서 권장하며, 미국의 많은 대도시구역에 적용된 바 있는 SCS 시간분포 모형과 실제 호우사상의 시간분포의 유사성에 대한 검증을 위해 57년간 관측된 강우분포 자료를 분석하고 비교하였다. Nguyen et al. (2010)은 캐나다 Quebec 지역에 가장 적합한 시간분포 패턴을 제시하고자 8개의 시간분포 모형을 적용하고 평가하고, 과거에 발생한 주요 호우사상의 침투유량과 총 유출량을 가장 유사하게 모의한 2개의 모형을 선정하였다. Kimoto et al. (2011)은 Southern Arizona 지역에서 관측된 실제 호우분포와 SCS 방법으로 유도한 설계 시간분포를 비교한 바 있다. 그러나 I-D-F에 근거한 모형을 사용하는 경우처럼 관측자료와의 비교 자체가 큰 의미를 갖지 않는 경우가 있을 수 있다. 즉, 단순히 설계기준으로 적용한다고 판단하는 것이다.

그러나 한국에서는 과연 적용하고 있는 시간 분포가 관측 호우사상의 특성을 반영하고 있는지에 대한 논쟁이 꾸준히 계속되고 있다(Jeong and Yoon, 2007; KWRA, 2009; Choi et al., 2014; Cho and Kim, 2015). Jeong and Yoon (2007)은 기존의 시간분포 모형들 중 국내에서 주로 사용되는 Huff 모형, Mononobe 모형, 교호블록 모형 등이 모두 크고 작은 문제점을 가진다는 것을 지적하고, 설계홍수량의 차이가 서로 크다고 밝혔다. 또한, 설계강우를 시간적으로 분포시킬 시, 원칙적으로는 해당 지역의 과거 강우자료로부터 통계학적인 분석을 거쳐 해당 지역에 적합한 시간분포 모형을 유도하여 사용해야 함을 강조하였다.

KWRA (2009)에서도 설계강우량에 대한 시간분포는 설계지역의 과거 강우자료로부터 강우 지속시간 동안 총 강우량이 어떠한 형태로 분포하는지를 통계적인 방법을 통해 분석하고 이를 바탕으로 분포시키도록 하였다. 아울러 기존의 시간분포 모형을 적용하고자 한다면, 모형 강우에 대한 유출 특성이 실제 유출 거동에 어느 정도 적합한지 확인할

것을 권장하였다.

Choi et al. (2014)은 Huff 모형이 모든 지역에 대해 일괄적으로 적용될 수 없다는 문제를 제기하며, 대상지역에서 관측된 집중호우사상의 특성을 고려할 수 있게 적절히 개선된 모형을 유도해야 함을 밝혔다. 관측된 극치호우사상 기반의 시간분포 개발을 제안한 Cho and Kim (2015)의 연구에서도 도시홍수 적용에 있어 침투홍수량을 Huff 방법은 과소하게, I-D-F 기반의 교호블록방법은 과다하게 산정하는 경향이 있으며, Mononobe 모형 또한 중·소규모 유역에서 과다하게 산정한다는 문제를 제기한 바 있다.

3. 자료 및 Huff 모형 유도

3.1 자료

본 연구에서는 서울지점에서 관측된 연최대치 독립호우사상의 시간우량 자료를 사용하였다. Park and Yoo (2012)의 연구에서는 이변량 빈도해석을 수행하여 1961년부터 2010년까지의 연최대 호우사상을 추출한 바 있다. Park and Yoo (2012)는 독립호우사상을 구분하기 위해 InterEvent Time Definition (IETD)으로는 12시간을, 절단값(threshold)으로는 1 mm를 적용하였다. 구분된 독립호우사상들의 총강우량과 평균 강우강도를 대상 변량으로 하는 Freund 이변량 지수분포를 적용하여 연최대치 독립호우사상을 추출하였다. 동일한 절차를 거쳐 1961년부터 2016년까지 총 56개의 연최대 호우사상 자료를 확보하였으며, 해당 호우사상들의 지속기간, 총강우량, 강우강도는 Table 1에 정리하였다.

연최대치 호우사상의 지속시간은 짧게는 1시간에서부터 길게는 104시간까지 매우 다양하다. 추출된 연최대치 호우사상의 지속기간, 총 강우량, 강우강도의 평균은 각각 24.0시간, 154.7 mm, 11.4 mm/hr로 나타났다. 강우에 대한 시간분포는 말 그대로 총 강우량을 시간의 흐름에 따라 분포시키는 것이기 때문에 본 연구에서는 6시간 미만의 과도하게 짧은 지속시간을 가지는 호우사상들을 제외하고 분석을 진행하였다. 결국 분석에는 40개의 연최대치 호우사상에 대한 시간우량 자료가 이용되었다.

3.2 주어진 호우사상에 대한 Huff 분포 결정

MLTM에서는 전국의 주요 우량관측소의 관측자료군을 이용하여 유도한 Huff 모형을 제공하고 있다(MLTM, 2011). 주어진 정보는 무차원 시간 10% 간격의 무차원 누가강우량 수치이다. 따라서 어떤 호우사상의 강우 총량과 지속시간 정보가 주어지면 그에 맞는 Huff 분포를 간단히 결정할 수 있다. 본 연구에서는 서울지점에 대해 제시된 Huff 모형 중 각 분위별로 평균적인 거동을 보이는 초과확률 50%에 해당하는 수치를 이용하였다. Fig. 1은 1968년과 1990년 연최대 호우사상에 대해 결정된 Huff 모형을 나타낸 것이다.

Table 1. Information of the Annual Maximum Storm Events

Year	Duration (hr)	Rainfall (mm)	Rainfall Intensity (mm/hr)	Year	Duration (hr)	Rainfall (mm)	Rainfall Intensity (mm/hr)
1961	3	55.9	18.6	1989	12	82.7	6.9
1962	18	62	3.4	1990	35	352.2	10.1
1963	2	45.8	22.9	1991	35	138.1	3.9
1964	6	127.4	21.2	1992	9	129.5	14.4
1965	27	87	3.2	1993	3	75.0	25.0
1966	65	361.7	5.6	1994	4	68.4	17.1
1967	4	43.1	10.8	1995	93	331.8	3.6
1968	17	156.7	9.2	1996	16	116.5	7.3
1969	4	83.7	20.9	1997	13	126.3	9.7
1970	20	191.8	9.6	1998	25	359.7	14.4
1971	8	132.8	16.6	1999	75	500.3	6.7
1972	25	394.5	15.8	2000	2	42.9	21.5
1973	18	59.5	3.3	2001	22	180.3	8.2
1974	18	87	4.8	2002	54	227.9	4.2
1975	17	112.1	6.6	2003	41	159.5	3.9
1976	53	226.3	4.3	2004	1	38.9	38.9
1977	52	168.2	3.2	2005	18	52.8	2.9
1978	44	244.3	5.6	2006	80	281.3	3.5
1979	4	88	22.0	2007	2	30.0	15.0
1980	18	116.0	6.4	2008	44	192.2	4.4
1981	58	156.2	2.7	2009	10	129.8	13.0
1982	22	80.2	3.6	2010	10	83.5	8.4
1983	1	31.4	31.4	2011	104	630.0	6.1
1984	39	317.5	8.1	2012	4	76.5	19.1
1985	3	66.0	22.0	2013	2	45.0	22.5
1986	8	106.2	13.3	2014	4	42.5	10.6
1987	29	323.8	11.2	2015	29	119.5	4.1
1988	14	67.8	4.8	2016	3	58.0	19.3

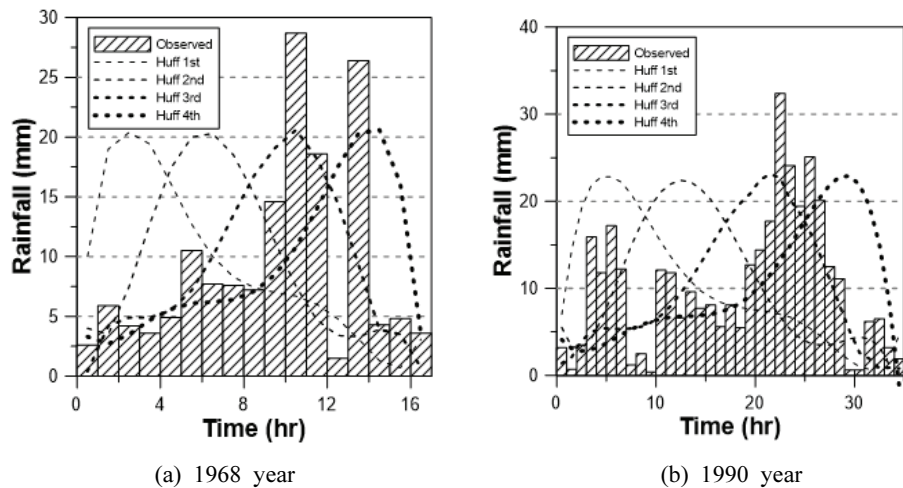


Fig. 1. Derivation of the Conventional Huff Model for the Case of 1968 and 1990 Years

서울지점의 40개 연최대치 호우사상에 대해 유도된 Huff 모형을 간단히 검토한 결과, 현재 제시된 Huff 모형은 연최대치 호우사상의 특성을 반영할 수 없는 것으로 판단되었다. 먼저, 시간우량의 최대치를 비교하였을 때, 관측치에 비해 모형의 값이 너무 과소하게 나타났다. 또한, 전체적인 분포의 형태도 분위별로 유도된 그 어떤 Huff 모형과도 상당한 차이를 보임을 확인하였다. 이는 실제 발생하는 호우사상이 무작위적인 시간적 분포특성을 보일뿐더러 Huff 모형 자체가 호우사상의 지속시간과 재현기간에 대한 상대적인 규모를 고려하지 못하기 때문이다. 즉, 현재 제시된 Huff 모형으로는 연최대치 호우사상의 시간적 분포특성을 적절히 고려하지 못하며, 이는 곧 수공구조물의 설계 시 큰 한계로 작용할 수 있다.

3.3 결정된 Huff 모형의 정량적 평가

본 연구에서는 호우사상별로 결정된 Huff 모형들의 적합성을 검토하기 위해 다음과 같은 비교·평가를 수행하였다.

시간분포 모형의 비교 방법은 총 세 가지로 분류된다. 첫 번째는 총 강우량을 해당 연최대치 호우사상의 지속시간에 대해 분포시켜 비교하는 방법이다(Case 1). Case 1에 대해 유도된 Huff 모형은 3.2절의 Fig. 1과 같다. 이는 곧 유도된 시간분포 모형과 실측 호우사상의 시간분포를 비교하는 것이다. 두 번째 방법은 실제 호우사상의 침투시간과 유도된 모형에서 나타나는 침투시간을 일치시킨 후 비교하는 방법이다(Case 2). 이는 Case 1의 유도 결과를 평행 이동시킨 형태이다. 마지막은 시간분포 모형의 형태로 실제 호우의 분포를 재배열하여 비교하는 것이다(Case 3). 재배열하는 방법은 Mononobe 모형의 중앙집중형 분포를 만드는 방법이나 교호블록 모형을 만드는 방법과 유사하다. 즉, 중앙에 최대 시간우량이 배치되고 그보다 작은 시간우량이 순차적으로 좌우 교차하며 배치된다. 이때 네 분위에 대해 유도된 Huff 모형 또한 침투우량이 중앙에 배치되도록 평행이동시킨 후 비교하였다. 1968년과 1990년 호우사상에 대한 Case 2와 3의 비교 방법은 각각 Figs. 2 and 3과 같다.

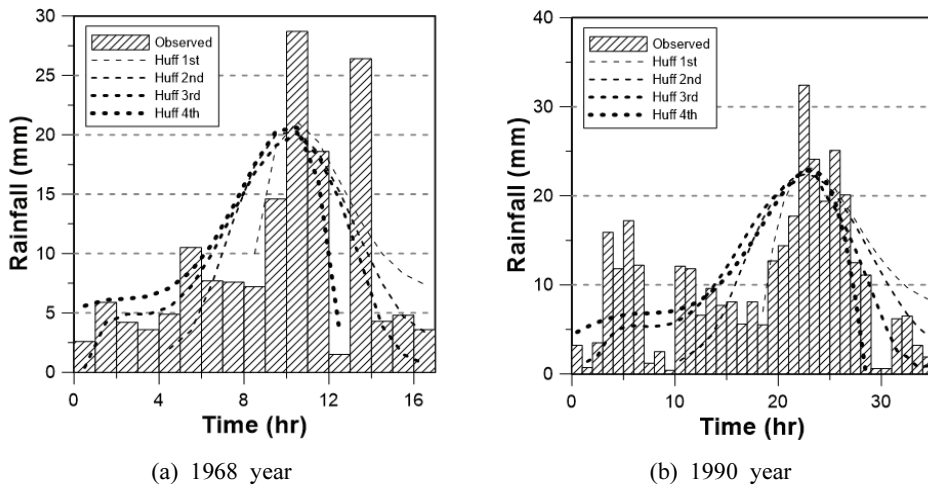


Fig. 2. Case 2 of Evaluating the Conventional Huff Model

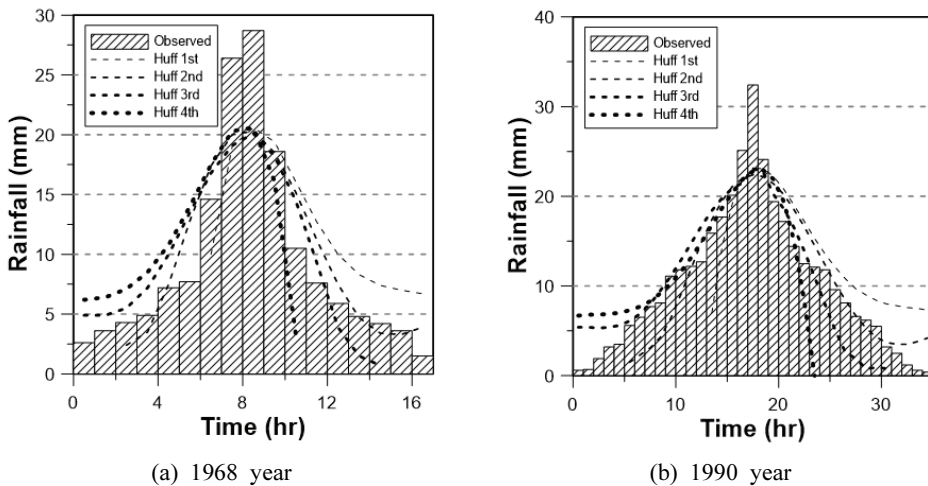


Fig. 3. Case 3 of Evaluating the Conventional Huff Model

참고로, 관측 시강우자료의 재배치는 호우사상의 자기상관성을 왜곡시키는 문제의 여지가 있다. 예를 들어, 본 연구에서 사용하는 관측 호우사상의 자기상관계수는 평균적으로 0.361로 나타났으며, 재배열된 Case 3의 평균적인 자기상관계수는 0.773으로 증가하였다. 그러나 Huff 모형의 평균적인 자기상관계수(0.899)는 이보다 더 크기에 Case 3과 같은 비교·평가 과정은 큰 문제를 야기하지는 않을 것으로 판단하였다.

앞서 언급한 세 가지 방법에 대해 모형과 관측 호우사상은 다음과 같은 평가척도를 고려하여 그 유사성을 평가하였다. 첫 번째 평가척도는 첨두강우량 값의 차이인 DR_{peak} 이다. 수공구조물 설계시 첨두유출량의 크기에 영향을 줄 수 있는 첨두강우량의 차이는 모형에 대한 검토에 가장 중요하게 고려되어야 할 요소이다. 따라서 가장 첫 번째 평가척도로써 첨두강우량의 차이를 살펴보았다. DR_{peak} 는 아래 식과 같이 실제 호우사상의 최대 강우량과 결정된 Huff 모형의 최대 강우량의 차이로 결정된다.

$$DR_{peak} = S_i - O_i \quad (3)$$

여기서 S_i 는 모형을 통해 결정된 Huff 모형의 최대 강우량을 의미하며, O_i 는 실제 호우사상의 최대 강우량이다.

두 번째 평가척도는 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, $RMSE$)이다. $RMSE$ 는 강우 시간분포 차이를 정량화한 것으로 볼 수 있다. 즉, 모형으로부터 유도된 강우량 분포가 실제 관측된 호우사상의 강우량 분포와 어느 정도의 차이를 보이는지를 일종의 표준편차 형식으로 나타낸 것이다. $RMSE$ 는 아래의 Eq. (4)를 통해 산정된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \quad (4)$$

Eq. (3)에서와 동일하게 S_i 는 모형을 통해 결정된 시강우량을, O_i 는 실제 발생한 호우사상의 시강우자료를 의미한다. 본 연구에서는 시강우량자료를 이용하였으므로 n 은 강우의 지속시간에 해당한다.

마지막 세 번째 척도는 상관계수 R 로써, 모형의 강우분포와 관측 호우의 시간분포 사이의 유사성을 정량화한 것이다. 패턴상관계수의 개념과 유사하며, R 값이 1 혹은 -1에 가까워질수록 분포형태가 유사하다는 것을 의미한다. R 은 Eq. (5)를 통해 산정된다.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (5)$$

여기서도 S_i 는 모형의 시강우량을, O_i 는 관측 호우사상의 시강우자료를 나타낸다. 그리고 \bar{S} 와 \bar{O} 는 각각 모형으로 유도된 시강우량의 평균, 실제 발생한 시강우량의 평균을 의미한다.

세 가지 평가척도를 이용하여 1968년과 1990년 연최대치 호우사상에 대해 결정된 Huff 모형을 평가하였다(Table 2). 첫 번째 평가척도인 DR_{peak} 는 Case에 관계없이 모두 동일한 값으로 산정되었다. DR_{peak} 산정에 있어 Case의 차이는 단순히 시간분포를 평행이동한 것이기 때문에 영향이 전혀 없다. 또한 DR_{peak} 는 Huff 모형의 분위와 무관하게 모두 음의 값으로 산정되었다. 즉, 모의된 시강우량의 최대치가 관측된 최대치보다 작다는 것을 의미한다. Huff 모형의 가장 큰 문제점 중 하나가 시간분포의 과도한 평활화임을 고려할 때 이는 당연한 결과로 여겨진다.

다음으로 $RMSE$ 값을 비교해보면, 전체적으로 Huff 3분위 모형이 가장 작게 산정되었다. 특히 1968년 호우사상에 대해 유도한 Huff 3분위 모형은 모든 Cases에서 가장 작은 값을 보였으며, Case 1에서는 Huff 4분위 모형이, Case 2와 3에서는 Huff 2분위 모형이 차순위로 작은 $RMSE$ 가 산정되었다. 1990년 호우사상에 대해서는 Case 1의 경우, Huff 3분위 모형이 가장 작았지만 Case 2는 4분위, Case 3은 2분위가 가장 작은 $RMSE$ 값을 보였다.

마지막으로 R 산정 결과는 관측 호우의 시간적 분포형태에 따라 크기가 결정되었다. 즉, 1968년과 1990년 호우사상은 첨두강우량이 지속시간의 3분위에서 발생하였고 크고 작은 시강우가 비교적 완만하게 분포되어있다. 따라서 Case 1의 경우에 Huff 3분위 모형의 R 값이 제일 크게 산정되었다. 관측된 시강우량을 순차적으로 재배열한 Case 3의 경우는 두 호우사상 모두 Huff 3분위 모형이 각각 0.913과 0.893으로 가장 큰 R 값을 보이기는 하였으나, 분위별 차이는 상대적으로 크지 않았다.

이러한 비교에서 더욱 중요한 것은 사실 Case에 따라 평가 결과가 크게 다르게 나타난다는 점이다. 공통적으로 Case 1보다는 Case 2에서, Case 2보다는 Case 3에서 실측 호우의 시간분포와 모형의 시간분포가 더 유사하다는 결과가 도출되었다. 이 차이는 물론 비교기준을 다르게 설정하는 것에서 비롯된다. Case 2에서는 첨두강우 발생시각을 일치시켰으며, Case 3은 무작위적으로 발생하는 실제 강우의 시간적 분포를 시간분포 모형과 같이 연속적인 곡선의 형태로 재배열하여 비교하였다. 앞서 자기상관분석을 통해서도 확인하였듯이 실제 관측된 호우사상의 시간적 분포와 모형의 시간분포의 자기상관성은 다소 차이를 보인다. 모형의 자기상관성이 재배열된 분포의 자기상관성보다 여전히 더 크지만, Case 3에서는 실제 분포와 모형 분포의 자기상관성을 최대한 유사하게 만든 후 모형에 대해 평가하였다. 또한 평가척도 산정 결과를 보면 알 수 있듯이 Case 1과 2에 비해 Case 3의 결과가 상대적으로 $RMSE$ 가 작고 R 이 크다.

Table 2. Results of Estimating Evaluation Measures

Type of Measures	Year	Case	Huff 1st	Huff 2nd	Huff 3rd	Huff 4th
DR_{peak}	1968	-	-8.500	-8.600	-8.300	-8.300
	1990	-	-9.500	-9.700	-9.400	-9.500
$RMSE$	1968	1	11.319	10.576	6.505	8.049
		2	7.150	6.782	6.505	7.843
		3	5.104	3.526	2.753	4.915
	1990	1	10.563	11.391	6.397	8.686
		2	7.783	7.123	5.926	5.844
		3	6.073	2.993	3.236	5.019
R	1968	1	0.271	0.044	0.605	0.355
		2	0.634	0.529	0.605	0.604
		3	0.902	0.905	0.913	0.853
	1990	1	0.040	0.141	0.634	0.279
		2	0.681	0.693	0.678	0.635
		3	0.881	0.882	0.893	0.842

모형의 평가가 실제 관측 호우사상의 분포와의 유사성을 기반으로 이루어진다는 측면에서 Case 3가 가장 적절한 평가 방법이 될 수 있다.

3.4 전체 호우사상에 대한 평가

본 연구에서는 앞서와 동일한 방법으로 모든 40개 호우사상에 대해 유도된 Huff 모형을 평가하였다. 40개 호우사상은 각기 다른 지속시간과 침투강우량, 총강우량을 가진다. 이러한 다른 특성을 가지는 호우사상에 대한 객관적인 비교를 위해 첫 번째 척도인 DR_{peak} 와 두 번째 척도인 $RMSE$ 를 표준화하였다. 먼저, DR_{peak} 를 표준화하기 위해 관측 호우사상의 침투강우량 값(O_{peak})으로 나누어 SDR_{peak} 를 산정하였다(Eq. (6)). $RMSE$ 는 관측 호우사상의 평균 강우강도(I)로 나누어 $SRMSE$ 를 산정하였다(Eq. (7)). 상관관계수 R 은 그 자체로 0부터 1의 값을 나타내기 때문에 별도의 표준화 과정을 거치지 않았다.

$$SDR_{peak} = \frac{DR_{peak}}{O_{peak}} \quad (6)$$

$$SRMSE = \frac{RMSE}{I} \quad (7)$$

40개 호우사상에 대한 SDR_{peak} , $SRMSE$, R 산정치를 평균한 결과와 표준편차는 Table 3과 같다. 먼저, SDR_{peak} 은 DR_{peak} 와 마찬가지로 Case에 대한 영향이 없었다. 반면, $SRMSE$ 와 R 은 Case별로 산정되는 값이 상당한 차이를 보였다. SDR_{peak} 산정 결과, Huff 모형은 침투강우량을 과소 추정하는 경향을 보이며, (-) 부호가 이를 나타낸다. 이는 침투치의 분위에 관계없이 동일한 경향을 보였지만, 그중에서도 3분위와 4분위 모형의 SDR_{peak} 가 가장 작은 차이를 보였다. $SRMSE$ 산정 결과는 Case별 차이가 확연하게 나타났다. Case 1보다는 Case 2가, Case 2보다는 Case 3가 모의치와 관측치 사이의 차이가 좀 더 작았다. 분위별로 비교해보면 Case 1에서는 2분위가, Case 2와 3에서는 3분위가 가장 작은 $SRMSE$ 결과를 보였다. R 은 Case 1보다는 Case 3의 값이 더 크게 산정되었다. 즉, Huff 모형은 실제 호우사상의 시간적 강우분포와의 유사성이 작으며, 순차적으로 재배열된 Case 3의 경우에서야 큰 유사성을 보인다. 분위별로 비교하면 3분위 모형에

Table 3. Results of Estimating the Standardized Evaluation Measures (Averages and Standard Deviations of All Storm Events)

Type of Measures	Case	Huff 1st	Huff 2nd	Huff 3rd	Huff 4th
SDR_{peak}	-	-0.518(0.228)	-0.522(0.225)	-0.511(0.223)	-0.513(0.224)
$SRMSE$	1	1.538(0.529)	1.520(0.533)	1.544(0.530)	1.589(0.491)
	2	1.369(0.435)	1.342(0.451)	1.295(0.476)	1.283(0.497)
	3	1.040(0.450)	0.931(0.438)	0.924(0.451)	0.992(0.483)
R	1	0.234(0.314)	0.266(0.325)	0.265(0.317)	0.253(0.291)
	2	0.436(0.245)	0.420(0.217)	0.478(0.224)	0.452(0.281)
	3	0.801(0.076)	0.811(0.106)	0.823(0.098)	0.808(0.085)

대해 가장 큰 R 이 산정되었다.

세 가지의 표준화된 평가척도를 활용하여 Huff 모형의 적합성을 평가한 결과, Huff 모형은 실제 관측 호우사상의 시간적 강우분포에 대해 대표성을 갖기는 어려운 것으로 판단되었다. 먼저, SDR_{year} 는 -0.5 이하의 값으로 모두 산정되었다. 이는 Huff 모형의 침투강우량이 실제 관측 호우사상의 침투강우량에 비해 절반 이상 작다는 것을 의미한다. 이렇게 과도하게 평활한 형태로 유도되는 시간분포는 침투유출량의 과소 산정을 초래하게 된다. $SRMSE$ 는 Huff 모형의 분위별 차이는 보이지 않았지만 Case 1보다는 Case 2가, Case 2보다는 Case 3이 더 작은 값으로 나타났다. 그 중 Case 3에서는 3분위에 대한 $SRMSE$ 가 가장 작게 산정되었지만 다른 분위에 비해 우월한 결과로 판단되지는 않는다. R 또한 Case 3에 대한 결과가 가장 큰 상관성을 보이기는 하였으나 분위별 차이는 미미한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 결국 분위기를 굳이 구분할 필요가 없다는 결론을 의미하는 것이기도 하다. 특히 관측 호우사상들 중 2분위와 3분위에 속하는 호우사상의 수가 유사한 점을 고려하면 호우의 분포특성을 전체적으로 반영하는 중앙집중형이 더 나은 선택이 될 수 있다. 실제로 대부분의 시간분포 모형들은 중앙집중형을 택하고 있다 (Keifer and Chu, 1957; Veneziano and Villani, 1999; Jeong and Yoon, 2007).

4. 서울지점 연최대 호우사상의 특성을 고려한 수정 Huff 모형의 제안

본 장에서는 연최대치 호우사상의 시간분포 특성을 고려한 수정 Huff 모형을 제안하고자 한다. 기존 Huff 모형과의 가장 큰 차이점은 주어진 호우사상을 앞의 Case 3의 방법처럼 중앙을 중심으로 재배열하고 누가한 후, 이를 정규화하여 평균적인 분포를 유도한다는 점이다. 이 과정을 자세히 설명하면 다음과 같다.

먼저, 40개의 연최대치 호우사상의 우량주상도를 Case 3와 같은 방식으로 배열하였다. 즉, 중앙에 가장 큰 강우가 위치하고 그 다음 크기의 강우를 순차적으로 좌우에 번갈아 배치하는 형태이다. 중앙에 집중이 되는 형태로 실제 강우의 분포를 재배열한 이유는 국내에서는 Huff 모형의 적정 분위기를 2분위 혹은 3분위로 제시하고 있기 때문이다. 즉, 2분위 또는 3분위가 유사하게 발생하는 상황에서 어느 한쪽을 선택할 필요가 없이 중앙집중형을 선택한 것이다.

이렇게 재배열된 40개 호우사상을 가지고 기존 Huff 모형의 유도 절차를 동일하게 적용하였다. 즉, 재배열된 40개의 호우사상에 대해 누가우량곡선을 유도하고, 각 호우사상에 대해 시간과 누가우량을 이용하여 무차원으로 정규화하였다. 무차원 시간-누가우량곡선의 시간축을 10% 마다 구분하고, 각 시간구간에 해당하는 무차원 누가우량계열을 생성하였다. 마지막으로 무차원 누가우량계열에 대해 초과확률이

50%에 해당하는 누가우량곡선을 유도하였다. 이 과정에는 10% 시간구간별 누가우량을 오름차순으로 정리하는 부분이 포함된다. 유도된 50% 누가우량곡선을 무차원 시간구간별 우량으로 도시한 결과는 Fig. 4이다. Fig. 4를 보면, 우량이 중앙에 집중되는 형태를 띠고 있으나 침투강우 발생 이후에 급격하게 강우가 감소하는 특성을 보인다.

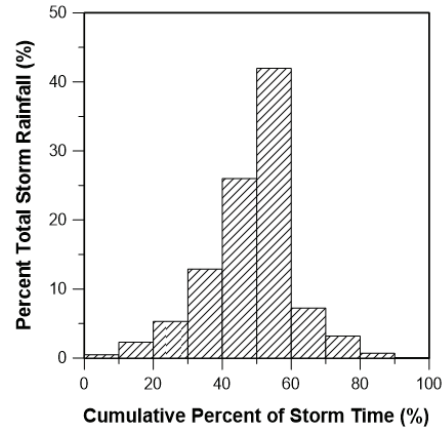


Fig. 4. Derivation of the Modified Huff Model

수정 Huff 모형과 기존 Huff 모형을 비교해보면 서로 다른 분포특성을 확인할 수 있다. Fig. 5는 기존 4개 분위에 대한 Huff 모형을 비교한 것이다. 먼저, 수정 Huff 모형은 50%에 해당하는 무차원 시간대에 더 많은 강우가 밀집되어 있는 형태로 기존의 Huff 모형보다 강우의 분포가 더욱 중앙에 집중되어 나타난다. 또한 수정 Huff 모형의 무차원 누가우량곡선 중앙부 기울기가 확연히 크다. 이는 곧 수정 Huff 모형이 기존 Huff 모형에 비해 강우 침투치가 더 크다는 것을 의미한다. 마지막으로 수정 Huff 모형의 무차원 누가우량곡선이 처음에는 서서히 증가하다가 급격하게 기울기가 커지고, 후반부에도 급격하게 기울기가 급격하게 줄어드는

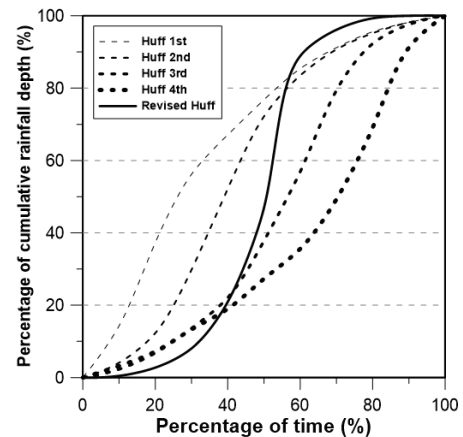


Fig. 5. Comparison Between the Conventional Huff Model and the Modified Huff Model

것을 확인할 수 있다. 즉, 변곡의 정도가 기존 Huff에 비해 크며, 결국 이는 상대적으로 강우 발생 초기와 말미에는 강우량이 적게 발생하고, 중앙부에 많은 양이 집중되어 나타나는 형태라고 해석될 수 있다.

앞서 유도한 무차원 누가우량곡선을 이용하여 40개의 연최대치 호우사상에 대해 각각 수정 Huff 분포를 결정하였다. 결정된 수정 Huff 모형과 관측 호우사상을 비교하여 각 평가척도(SDR_{peak} , $SRMSE$, R)를 산정하였다. 이 세 가지 평가척도에 대한 산정 값을 박스도표로 도시하면 각각 Figs. 6, 7 and 8과 같다.

먼저, Fig. 6은 SDR_{peak} 산정 결과를 보여준다. 수정 Huff 모형에 대한 SDR_{peak} 가 기존의 Huff 모형의 SDR_{peak} 값보다 더 크게 산정되었다. 기존의 Huff 모형에 대한 평균적인 SDR_{peak} 은 -0.516 이고, 수정 Huff 모형에 대한 SDR_{peak} 은 -0.432 이다. 여전히 음의 값을 가지긴 하나 실제 관측 침투강우량과 모의치와의 차이가 감소한 것은 분명하다. 그 차이가 대폭 감소했다고 보긴 어려우나 기존의 Huff 모형에 비해 침투유출량이 과소하게 추정될 여지가 줄어들었다고 판단할 수 있다.

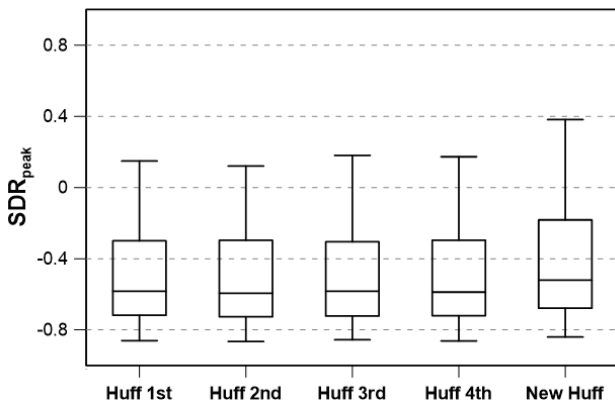


Fig. 6. Results of SDR_{peak}

다음으로, $SRMSE$ 를 비교해보았다(Fig. 7). 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 Case 1과 2에서는 수정 Huff 모형의 $SRMSE$ 와 기존 Huff 모형의 $SRMSE$ 의 차이는 크지 않은

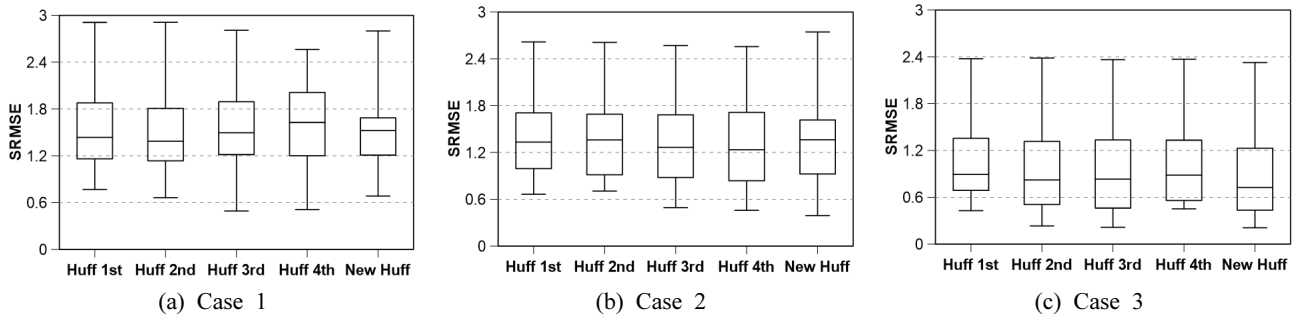


Fig. 7. Results of $SRMSE$

것으로 나타난다. 다만, 40개 $SRMSE$ 의 1사분위 값과 3사분위 값의 차이가 상대적으로 작게 나타났다. 이는 수정 Huff 모형의 $SRMSE$ 의 분산이 기존 Huff 모형의 $SRMSE$ 의 분산에 비해 작음을 의미한다. 그러나 Case 3에 대해서는 수정 Huff 모형의 $SRMSE$ 값 자체가 기존 Huff 모형의 $SRMSE$ 에 비해 더 작게 나타났다. 기존의 Huff 모형은 평균 0.972 정도인 반면, 수정 Huff 모형에 대한 $SRMSE$ 는 0.858 로 확연히 감소하였다.

마지막으로 R 을 비교한 결과이다(Fig. 8). 수정 Huff 모형이 기존의 Huff 모형보다 실제 발생한 호우의 강우분포의 형태를 더 잘 모의하는 것으로 나타났다. 특히 Case 1과 3에서 수정 Huff 모형의 R 이 기존의 Huff 모형보다 크게 산정되었다. 기존의 Huff 모형은 Case 1에서 평균 0.255 , Case 3에서는 0.811 정도로 나타났다. 반면 수정 Huff 모형의 R 값은 Case 1에서 0.270 , Case 3에서 0.831 으로 산정되어 기존의 네 개 분위에 대한 Huff 모형의 R 값보다 더 크게 나타났다. 한편 Case 2에서는 기존 Huff 모형의 R 이 평균 0.446 , 수정 Huff 모형의 R 이 0.448 로, 거의 유사하게 산정되었다.

이상과 같은 평가 결과는 수정 Huff 모형이 기존의 Huff 모형보다 더 뛰어나다는 것을 증명한다. 관측 호우사상과 Huff 모형 사이의 침투강우량 차이(즉, SDR_{peak})가 감소하였다. 또한, Case 3에 대한 결과에서는 $SRMSE$ 값이 기존의 Huff 모형에 비해 작게, 그리고 R 값은 크게 산정되었다. 그러나 여전히 그 차이가 눈에 띠 정도로 확연하지는 않는 문제점이 있다. 즉, 연최대치 호우사상의 평균적인 특성을 고려했음에도 실제로 발생한 호우사상의 시간적 분포 특성을 모의하는 데에는 여전히 한계를 보이는 것이다. 이러한 문제는 사실 평균적인 특성을 반영하는 Huff 모형 자체의 한계이기도 하다. 수정 Huff 모형 또한 재배열한 강우분포를 이용하여 유도되었지만 연최대치 호우사상들의 평균적인 특성을 반영하는 모형이다. 특히 연최대치 호우사상의 발생빈도를 차별적으로 반영하지 못하기 때문에 I-D-F 관계식에 근거한 방법에 비해 약점을 보인다고 판단할 수 있다.

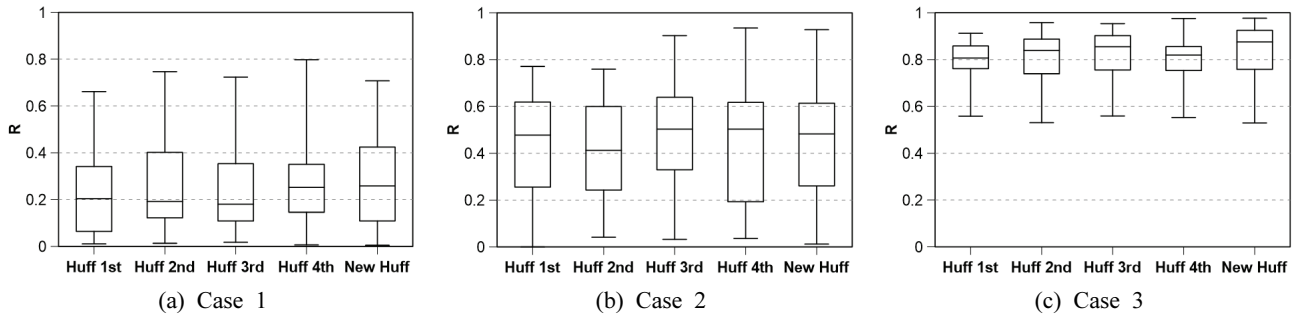


Fig. 8. Results of R

5. 결론

본 연구에서는 서울지점에서 관측된 연최대치 호우사상을 이용하여 기존의 Huff 모형을 검토하고, 더 나아가 호우사상의 시간분포 특성을 반영하는 수정 Huff 모형을 제안하였다. 이를 위해, 먼저, 이변량 빈도해석을 통해 1961년부터 2016년까지의 기간에 서울지점에서 발생한 연최대치 호우사상을 선정하였다. 선정된 호우사상을 현재 설계기준으로 제시된 Huff 모형과 비교하였고, 이를 통해 Huff 모형이 실제 호우사상과 얼마나 다른지 평가하였다. 마지막으로 현재의 Huff 모형이 가지는 문제점을 상당 부분 극복할 수 있는 수정 Huff 모형을 제안하고, 이를 다시 관측 호우사상과 비교하여 그 적용성을 판단하였다.

기존의 서울지점에 대한 Huff 모형을 평가하기 위해 본 연구에서는 세 가지 평가척도를 이용하였다. 첫 번째 척도인 DR_{peak} 는 모형의 첨두치와 실제 호우사상의 첨두치의 차이를 의미한다. 두 번째 척도인 $RMSE$ 는 모형과 실제 호우의 지속시간 동안 시간별 강우량의 차이를 정량화한 수치이다. 마지막으로 패턴상관계수 R 은 호우의 시간적 분포 형태가 얼마나 유사한지를 나타내는 척도이다. 세 척도의 산정에는 지속시간이 6시간 미만인 호우사상을 제외한 총 40개의 연최대치 호우사상이 이용되었다. 또한 40개 호우사상의 상대적 강우특성을 제거하기 위해 평가척도를 표준화하여 비교하였다.

세 가지의 평가척도를 활용하여 기존 Huff 모형의 적합성을 평가한 결과, Huff 모형은 실제 관측 호우사상의 시간적 강우분포에 대해 대표성을 갖기는 어려운 것으로 판단되었다. 특히 SDR_{peak} 을 이용한 평가 결과는 Huff 모형이 과도하게 평활한 형태로 유도되어 첨두유출량의 과소 산정을 초래할 가능성을 보여주었다. 추가로 $SRMSE$ 와 R 산정 결과는 Huff 모형의 분위별 차이가 미미하여 굳이 분위기를 구분할 필요가 없다는 점을 확인시켜 주었다.

본 연구에서는 이러한 기존 Huff 모형의 한계를 극복하고자 수정 Huff 모형을 제안하였다. 수정 Huff 모형은 관측된 연최대치 호우사상을 중앙집중형으로 재배열하고 정규화한 후 그 평균적인 특성이 반영되도록 유도된다. 기존 Huff

모형과의 가장 큰 차이점은 수정 Huff 모형이 중앙집중형이라는 점이며, 유도과정에 중앙집중형으로 재배열된 호우사상이 사용된다는 점이다. 이렇게 유도된 수정 Huff 모형은 기존의 Huff 모형보다 더 나은 것으로 확인되었다. 즉, 관측 호우사상과 수정 Huff 모형 사이의 첨두강우량 차이가 감소하였고, $SRMSE$ 값이 기존의 Huff 모형에 비해 작게, 또한 R 값은 크게 산정되었다. 이러한 차이는 수정 Huff 모형과 각 분위별로 유도된 기존 Huff 모형의 유도방법의 차이로부터 발생하였으므로 의미있는 결과로 판단할 수 있다.

그러나 여전히 수정 Huff 모형은 관측 호우사상의 평균적인 특성을 고려하여 유도된다는 한계를 크게 극복하지는 못하고 있는 것으로 나타났다. 특히 관측 호우사상의 첨두를 설명하는데 큰 한계를 가진다. 이는 물론 관측된 시간분포의 평균적인 특성을 반영하는 모형 유도과정의 근본적 한계이기도 하다. 특히, 호우사상의 발생빈도를 차별적으로 반영하지 못하므로 I-D-F 관계식에 근거한 시간분포 모형의 장점을 뛰어넘기는 어려운 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고, 수정 Huff 모형은 기존 Huff 모형이 가지는 2분위나 3분위나 논쟁을 해소할 수 있으며, 또한 수정 Huff 모형의 유도과정에서 관측 시간분포를 재배열함으로써 첨두의 크기가 좀 더 현실적으로 상향되었다는 장점을 가진다. 아울러 본 연구는 이변량 빈도해석을 통해 연최대치 호우사상을 추출함으로써 분석 대상 Sample 수가 적다는 한계를 가진다. 지속시간별 연최대치 호우사상을 추출하거나 Peak Over Threshold (POT) 계열을 우선 추출하는 방법 등을 적용하면 이러한 한계를 극복할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 분 단위 강우자료를 이용하여 동일한 분석을 수행한다면 보다 실효성 있는 연구 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(19CTAP-C143641-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Chan, E.S., Balmforth, D., Kan, Y., Koike, T., Lampe, L., Lim, K.K., et al. (2012). *Report on key conclusions and recommendations of the expert panel on drainage design and flood protection measures*. Singapore's National Water Agency, Singapore.
- Cheng K.S., Hueter I., Hsu E.C., and Yeh, H.C. (2001). A scale-invariant Gauss-Markov model for design storm hyetographs. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, Vol. 37, No. 3, pp. 723-735.
- Cho, H., and Kim, G. (2015). Development of a rainfall time distribution considering characteristics of temporal variability of extreme rainfall events. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 4, pp. 23-29.
- Choi, S., Joo, K., Shin, H., and Heo, J.H. (2014). Improvement of Huff's method considering severe rainstorm events. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 47, No. 11, pp. 985-996.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Drainage Services Department (DSD). (2018). *Stormwater drainage manual: Planning, design and management* (5th ed.). Government of the Hong Kong Special Administrative Region, HongKong.
- Garcia-Guzman, A., and Aranda-Oliver, E. (1993). A stochastic model of dimensionless hyetograph. *Water Resour. Res.*, Vol. 29, No. 7, pp. 2363-2370.
- Guo, J.C., and Hargadin, K. (2009). Conservative design rainfall distribution. *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 14, No. 5, pp. 528-530.
- Huff, F.A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resour. Res.*, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1019.
- Jang, S., Yoon, J., and Yoon, Y. (2006). A study on the improvement of Huff's method in Korea: I. Review of applicability of Huff method in Korea. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 39, No. 9, pp. 767-777.
- Japan International Cooperation Agency (JICA). (2010). *Technical standards and guidelines for planning of flood control structures*. Tokyo, Japan.
- Jeong, J., and Yoon, Y. (2007). *Design practices for water resources* (2nd ed.). Seoul: Goomi Press.
- Jun, C., and Yoo, C. (2012). Application of the beta distribution for the temporal quantification of storm events. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 45, No. 6, pp. 531-544.
- Keifer, C.J., and Chu, H.H. (1957). Synthetic storm pattern for drainage design. *J. Hydr. Eng. Div.*, Vol. 83, No. 4, pp. 1-25.
- Kimoto, A., Canfield, H.E., and Stewart, D. (2011). Comparison of synthetic design storms with observed storms in southern Arizona. *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 16, No. 11, pp. 935-941.
- Knapp, H.V., and Terstriep, M.L. (1981). *Effects of basin rainfall estimates on dam safety design in Illinois*. Contract Report 253, Illinois State Water Survey, IL, USA.
- Korea Water Resources Association (KWRA). (2009). *Commentary of rivers design standard*. Seoul: KWRA.
- Lee, J., and Chu, H. (2006). Time distribution characteristics of an annual maximum rainfall according to rainfall durations using Huff's method. *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, Vol. 26, No. 5B, pp. 519-528.
- Lee, J., Kim, H., and Kang, I. (2004). A case study for the determination of time distribution of frequency based rainfall. *J. Wet. Res.*, Vol. 6, No. 3, pp. 71-81.
- Lee, J., Shin, C., and Chang, J. (2006). An analysis of the temporal pattern according to hydrologic characteristics of short-duration rainfall. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 6, No. 3, pp. 57-68.
- Lee, K.T., and Ho, J.Y. (2008). Design hyetograph for typhoon rainstorms in Taiwan. *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 13, No. 7, pp. 647-651.
- Lin, G.F., Chen, L.H., and Kao, S.C. (2005). Development of regional design hyetographs. *Hydrol. Process.*, Vol. 19, No. 4, pp. 937-946.
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT). (2000). *1999 Report on the development of water resources management techniques: Design rainfall temporal distribution*. Seoul, Korea.
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT). (2004). *Establishment of basic plan for river maintenance and guidelines for writing the river documents*. Seoul, Korea.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2011). *Research on the improvement of probability rainfall*. Seoul, Korea.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2013). *Precipitation-frequency atlas of the United States*. NOAA Atlas 14, National Weather Service, Silver Spring, ML.
- Nelson City Council (NCC). (2013). *Maitai River flood hazard*

- mapping modelling report*. Nelson, New Zealand.
- Nguyen, V.T.V., Desramaut, N., and Nguyen, T.D. (2010). Optimal rainfall temporal patterns for urban drainage design in the context of climate change. *Water Sci. Technol.*, Vol. 62, No. 5, pp. 1170-1176.
- Nouh, M. (1985). Effects of rainfall runoff model assumptions on optimal storm sewer system design. *Arab. J. Sci. Eng.*, Vol. 12, No. 1, 19-35.
- Palla, A., and Gnecco, I. (2016). Assessing the urban catchment hydrologic response under different environmental scenarios. *Proceedings of the NOVATECH 2016—9th International Conference on Planning and Technologies for Sustainable Urban Water Management*, Lyon, France.
- Park, C., Seo, B.H., Yoon, Y.N., and Kang, G.W. (1981). A study on rainfall-pattern analysis for determination of design flow in small watershed. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 14, No. 4, pp. 13-18.
- Park, C., and Yoo, C. (2012). Review of parameter estimation procedure of Freud bivariate exponential distribution. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 45, No. 2, pp. 191-201.
- Pilgrim, D.H., and Cordery, I. (1975). Rainfall temporal patterns for design flood. *J. Hydr. Div.*, Vol. 101, No. 1, pp. 81-95.
- Seo, S. (1965). A study on temporal pattern of storms. *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, Vol. 7, No. 3, pp. 972-977.
- Seo, B., and Kim, N. (1989). *Analysis of temporal variations for determining the local design storms*. KICT 89-WR-111, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Gyeong-gi, Korea.
- Seo, J., Lee, S., Cho, H., and Min, B. (1995). A study on the application of time distribution model for design storms. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 28, No. 5, pp. 205-217.
- Kent, K.M. (1973). *A method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds*. SCS-TP-149, Soil Conservation Service, US Government Printing Office, Washington, DC, USA.
- Veneziano, D., and Villani, P. (1999). Best linear unbiased design hyetograph. *Water Resour. Res.*, Vol. 35, No. 9, pp. 2725-2738.
- Ward, A., Wilson, B., Bridges, T., and Barfield, B. (1980). An evaluation of hydrologic modeling techniques for determining a design storm hydrograph. *Proceedings of International Symposium on Urban Storm Runoff*, University of Kentucky, Lexington, KY, USA.
- Wu, S.J., Yang, J.C., and Tung, Y.K. (2006). Identification and stochastic generation of representative rainfall temporal patterns in Hong Kong territory. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, Vol. 20, No. 3, pp. 171-183.
- Yen, B.C., and Chow, V.T. (1980). Design hyetographs for small drainage structures. *J. Hydr. Div.*, Vol. 106, No. HY6, pp. 1055-1076.
- Yin, S., Xie, Y., Nearing, M.A., Guo, W., and Zhu, Z. (2016). Intra-storm temporal patterns of rainfall in China using Huff curves. *Trans. ASABE*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, Vol. 59, No. 6, pp. 1619-1632.
- Yoon, S., Kim, J., and Moon, Y. (2012). A study on optimal time distribution of extreme rainfall using minutely rainfall data: A case study of Seoul. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 45, No. 3, pp. 275-290.
- Yoon, Y., Jang, S., Kang, S., and Park, M. (2004). Development of rainfall distributions for design floods. *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, 313-317.

Received	December 18, 2018
Revised	December 20, 2018
Accepted	February 26, 2019