

기왕자료를 이용한 수위상승거동곡선에 관한 연구

곽재원*·김길호**

Kwak, Jaewon*, Kim, Gilho**

A Study on Water-level Rise Behavior Curve using Historical Record

ABSTRACT

The comprehension of water-level behavior in rivers is essential for effective flood and river environmental management. The objective of this study is to propose a methodology that can be used by field engineers engaged in actual practice, to readily identify the characteristics of water-level behavior during flood events. To this end, a total of 45 historical water-level records from 2010 to 2022 year, which provide flood information for the flood vulnerable districts of the Han River, were obtained. A Water-level Rise Behavior Curve (WRBC) was developed and suggested to quantify the amount of water-level rise per unit time during flood. As a result, the water-level rises by more than 80% of the total rise within the first 6.2 hours, followed by a gradual rise. The time required to achieve a particular equilibrium varied depending on the area and runoff characteristics of the upstream. Furthermore, the study revealed that the WRBC provides a statistical representation of the water-level rise trend during floods, and can be effectively utilized for flood mitigation measures in waterfront spaces and irrigation facilities.

Keywords : Water level characteristics, Water-level rising behavior curve, Water-level rising during flood

초 록

하천의 수위변화 특성에 대한 이해는 여러 수방활동 및 하천환경의 관리를 위하여 필수적이다. 본 연구는 각종 수방활동에서 종사하는 현장 엔지니어가 특정 지점의 홍수시 수위상승 특성을 간편하게 확인하고 활용할 수 있는 방법론을 제시하는 데 목적이 있다. 이를 위하여 한강수계의 홍수취약지구에 홍수정보를 제공하고 있는 45개 관측소의 2010년부터 2022년까지의 10분 단위 수위자료를 이용하여 홍수 사상에서 발생하는 시간적인 상승량을 단위시간을 통하여 정량화하고 분위화한 수위상승거동곡선(WRBC) 개념을 제시하였으며, 그 적용성을 검토하였다. 분석결과, 홍수시의 수위상승 거동은 평균적으로 초반 6.2시간 이내에 전체 수위상승량의 80% 이상이 상승하며 그 이후에는 점진적으로 상승하는 것으로 분석되었으며, 수위상승 이후에 일정한 평형상태에 도달하는 시간은 상류유역의 면적과 유출 특성에 따라 다른 것으로 나타났다. 이러한 WRBC는 홍수유출로 인하여 발생하는 수위상승의 평균적인 경향에 대해 통계적이고 직관적인 검토에 장점이 있으며, 하천변에 위치한 친수공간, 수리시설 등의 수방활동에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

검색어 : 하천수위특성, 수위상승거동곡선, 홍수시 수위상승

* 종신회원 · 환경부 한강홍수통제소 시설연구사, 공학박사(Han River Flood Control Office · firstsword@naver.com)

** 종신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 수석연구원, 공학박사

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · kgh0518@kict.re.kr)

Received March 16, 2023/ revised April 12, 2023/ accepted April 24, 2023

1. 서론

하천 수위는 상류 유역의 유출에 따라서 실시간으로 변화하며 홍수 시에 급격하게 상승하여 침수피해를 야기한다. 일반적으로 하천 수위는 여러 통계해석적 방법을 통하여 모의-예측되어 왔으며, 특히 홍수유출의 경우에는 강수의 시공간적 패턴에 따라서 유동적으로 변하기 때문에 이를 고려할 수 있는 수리수문모형을 통해서 주로 모의되었다(Singh, 1995). 그러나, 최근 기후변화의 영향으로 기존에는 발생하지 않았던 극한홍수가 빈발하게 되면서(Söderholm et al., 2018), 홍수예보 과정에서 하천 수위상승의 해석에 대한 필요성이 다시금 대두되고 있다.

한국의 수위상승에 따른 예보도 대하천에서 3시간 이전에 수위상승을 예측하여 주의보와 경보 등의 홍수특보를 발령하는 방식으로 이루어져 왔으나, 기후변화의 영향으로 하천규모에 관계없이 홍수피해가 발생하고 있어 어려움을 겪고 있으며(Hwang et al., 2020), 강수량 기반의 산지 돌발홍수 예보시스템, 서울시 내수침수 예측시스템, 지자체 단위 홍수관리시스템 등 다양한 대안이 제안되어 왔다(Hwang et al., 2020). 중소하천에서 홍수피해가 급증하는 경향을 고려하여 현재수위를 기준으로 정보를 제공하는 홍수정보도 제공하고 있으나, 사전에 설정해둔 기준수위를 도달했음을 알려주는 것이므로 향후 수위상승은 고려하지 못한다(Oh et al., 2017). 하천의 수위변화 자체에 집중하여 수위 거동을 해석하기도 하였으며, 대표적으로 해안지역의 강우유출과 고조위가 동시에 발생하였을 경우의 각 수위성분을 해석하고 홍수위를 모의하거나(Lian et al., 2017), 삼림소유역을 대상으로 유출 성분을 구분하고 그에 따른 수위변화를 고찰하기도 하였다(Lee and Lee, 2014). 또한, 울산에 위치한 태화강 하류에 대하여 하천 수위 변화를 조위, 파고, 홍수유출 등의 성분으로 분리하여 수위 거동을 분석하거나(Lee et al., 2021), 수위와 유출량 사이의 정량적인 관계를 규명하기 위하여 수위-유량 관계곡선식의 정규성을 분석하고 불확실성의 정량화가 필요함을 제시하였다(Le Coz et al., 2014). 하천의 수위를 일종의 신호로 간주하고 각각의 성분 자체를 분리하기도 하였으며(Sović et al., 2012), 이에 50년 이상의 장기간 일단위 수위자료를 이용하여 수위의 주기성을 분석하기도 하였다(Lei et al., 2020).

본 연구에서 제시하는 방법과 유사하게 관측된 자료를 이용하여 유량 특성을 도출하는 단위도법 관련 연구도 활발하게 이루어졌다. 단위도는 Sherman(1932)이 최초로 제안한 이후로 여러 실무에서 사용되고 있으며, 우리나라에서도 하천기본계획 등과 같은 실무 분야에 적용되고 있다. 이러한 단위도법은 (a) Synder(Snyder, 1938), SCS 방법(SCS, 1957)과 같은 경험적인 방법, (b) Clark 및 Nash 단위도(Agirre et al., 2005; Nourani et al., 2009)와 같은 개념적인 접근방법, (c) GIUH(Rodríguez-Iturbe et al., 1979)

와 같이 지형학적인 정보를 이용하는 방법, 이변량 단위도법(Nadarajah, 2007)과 같은 확률론적 접근방법의 4가지 방법으로 구분되며(Singh et al., 2014), 관측된 자료를 이용하는 지형학적이나 확률론적 접근방법이 좋은 결과를 나타내는 것으로 제시되고 있다(Singh et al., 2014; Guo, 2022). 특히, Gray 이변량감마모형(Gray, 1961), Croley 이변량감마모형(Croley II, 1980), Nakagami-m 모형(Sakar and Rai, 2011) 등의 확률론적 단위도는 근사치를 추정하는 방법이나 경험적 관계도 통합되어 있다는 점에서 활용성이 높은 것으로 제시되어 왔다. 그러나, 다양한 연구에도 불구하고 특정한 지점에서 홍수 시의 수위상승 특성 자체에 집중한 연구는 거의 진행되지 않았으며, 일반적으로 해당 유역의 특성에 익숙한 전문가의 경험에 주로 의존하여 왔다.

이에 본 연구의 목적은 각종 수방활동에서 중시하는 현장종사자가 특정 지점의 홍수시 수위상승 특성을 간편하게 이해하고 확인할 수 있는 방법론을 제시하는 것이다. 이를 위하여 한강수계의 홍수취약지구에 홍수정보를 제공하는 45개 수위관측소의 2010년부터 2022년까지의 10분 단위 수위자료를 수집하였으며, 수위자료를 이용하여 홍수 사상에서 발생하는 시간적인 상승량을 단위시간 Δt 를 통하여 수위 상승값을 정량화·분위화한 수위상승거동곡선(Water-level Rising Behavior Curve; WRBC) 개념을 제시하였다. 해당 WRBC를 45개 수위관측소에 적용하였으며, 적용 결과를 이용하여 수위관측소 상류유역의 면적과 유출 특성에 따른 차이를 고찰하였다. 또한, 하천변에 위치한 친수공간, 수방시설물 등에 대해 사용자 대피나 수문폐쇄 계획 등을 수립하는데 사용하기 위한 기초자료로서 활용이 가능한지 여부를 검토하고 활용방안을 제안하였다.

2. 수위상승곡선 정의

일반적으로 하천에서의 수위거동은 상류 유역이나 하도의 특성과 같은 수리수문학적 조건에 의하여 결정되게 된다. 예를 들어서 상류유역의 제방비가 매우 커서 도달시간이 매우 짧다면 수위상승이 급격하게 이루어질 것이며, 하폭이 어느 지점에서 급격하게 넓어질 경우에는 수위상승이 특정 수위부터 느리게 상승할 것으로 예측할 수 있다. 이때, 어떠한 수위관측지점에서 관측된 시계열에 대해서 특정한 시작시점 t_j 에서 특정시점 t_k 까지의 시간간격에 대한 수위변화를 $\Delta W.L.$ 라고 할 경우 다음의 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta W.L. &= \text{Water Level}(t_k) - \text{Water Level}(t_j) \\ &= \text{Water Level}(t_j + i\Delta t) - \text{Water Level}(t_j) \end{aligned} \quad (1)$$

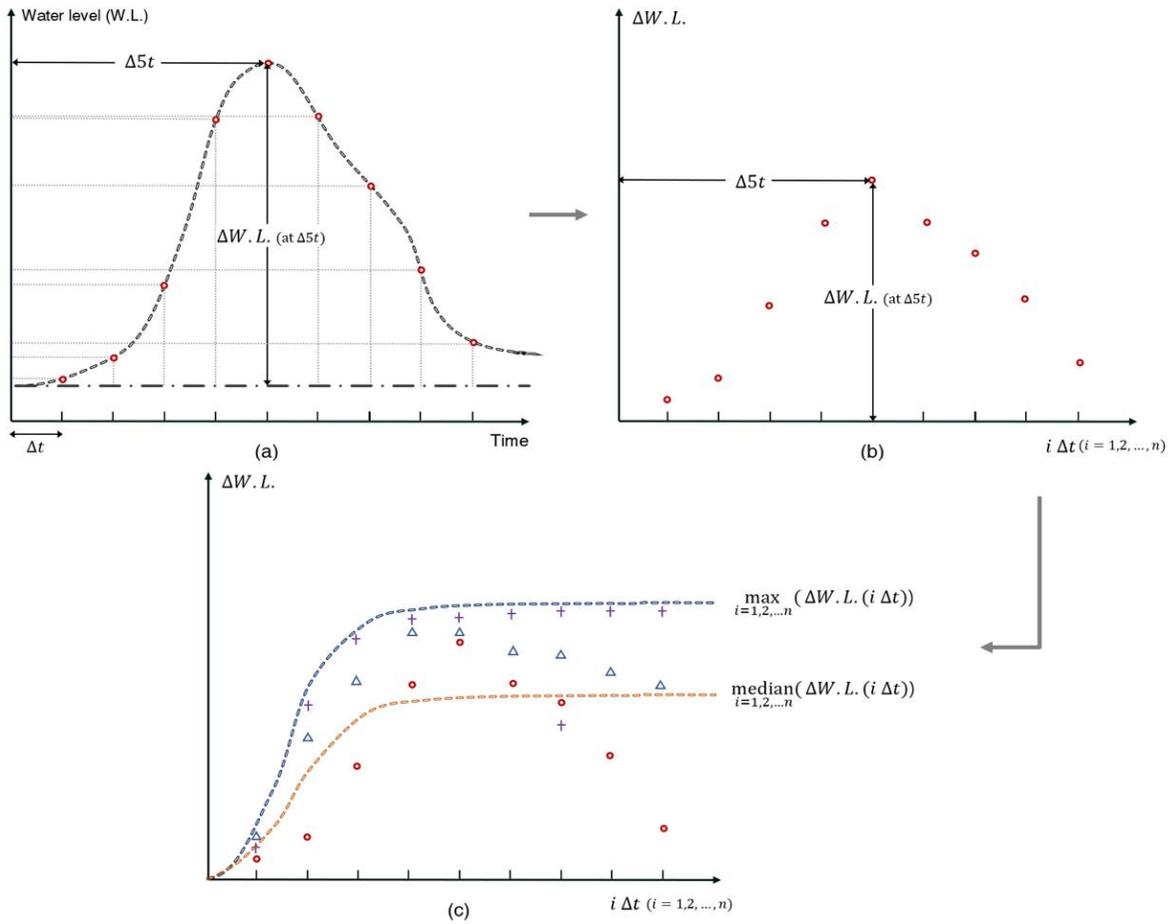


Fig. 1. Concept of Water Level Rise Behavior Curve (WRBC): (a) Unit Water Level Rise with Δt , (b) Scatter Plot of Water Level Rise, (c) Quantile Regression Curve for Each Percentile

이때, Δt 는 단위시간, t_j 는 시작시점, t_k 는 특정시점이며 이때의 시간간격은 단위시간 Δt 의 i 번째 곱을 이용하여 $t_j + i \Delta t$ 로 나타낼 수 있다(Fig. 1(a)). 이때 대상이 되는 수위 시계열에 대하여 $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 까지의 시간간격에 대한 수위변화 $\Delta W.L.$ 을 연속적으로 산정할 수 있으며, 특정한 시간간격의 크기인 $i \Delta t$ 에 대응하는 수위변화량의 집합 ($\Pi_{i \Delta t}$)으로 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pi_{i \Delta t} = \{WaterLevel(t_j + i \Delta t) - WaterLevel(t_j)\} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

$\Pi_{i \Delta t}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)는 각각의 시간간격($i \Delta t$)에 대한 시계열 내에서의 수위변화량의 집합이므로, $\Pi_{i \Delta t}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)를 Fig. 1(b)와 같이 각각의 시간간격($i \Delta t$)에 대응하는 산포도로 나타낼 수 있다. 일반적으로 수위

시계열은 관측대상유역·지점의 수리수문학적 특성에 따라서 특정한 경향과 범위 내에서 증감되므로, 수위시계열이 장기간의 자료라서 충분한 자료 갯수를 가지고 있을 경우 $\Pi_{i \Delta t}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)에 대한 산포도는 특정한 범위와 경향성으로 표현될 수 있을 것이다. 이 경우 수위변화량의 집합 $\Pi_{i \Delta t}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)에 대한 산포도도 특정한 분위(percentile)로 구분될 수 있으며, 각각의 시간간격($i \Delta t$)의 동일한 분위기를 연결한 Fig. 1(c)와 같은 분위곡선(quantile curve)으로 나타낼 수 있게 된다.

해당 분위곡선은 각각의 시간간격($i \Delta t$)에 대해서 동일한 빈도(frequency)를 가지는 수위상승 정도를 나타낸다. 결론적으로 유도된 곡선은 개개의 홍수 사상에서 발생하는 시간적인 상승량을 단위시간 Δt 를 통하여 수위 상승값의 군집으로 표현된 결과를 분위화(percentilization)한 곡선으로 설명될 수 있다. 충분히 장기간의 수위시계열을 대상으로 분위곡선을 유도할 경우 수위가 상승하는 사상(event)의 분위에 대응하

는 수위상승값을 정량적으로 산정할 수 있게 된다. 따라서, 본 연구에서는 상기에 서술한 개념을 특정한 홍수에 대한 수위상승 정도를 대조하면 홍수의 빈도나 분위 정도를 알 수 있는 홍수시 수위상승 거동곡선(Water-level Rise Behavior Curve; WRBC)으로 정의하고자 한다.

3. 적용 및 결과

3.1 대상자료

본 연구의 대상은 한강수계와 수계 내에 위치한 총 45개 수위관측소이다(Fig. 2). 한강수계의 유역면적은 총 41,331.3 km²로서 북한 지역 9,816.8 km²를 제외한 31,514.5 km²가 실질적으로 남한에 의하여 관리되고 있다. 한강수계의 총 하천길이는 8,580.8 km, 총 하천개소는 국가하천 25개를 포함하여 916개 하천이 위치하고 있으며, 총 165개의 수위관측소가 한강수계의 주요 국가 및 지류하천에 위치하여 홍수예보와 정보제공에 활용되고 있다. 한국의 국가 및 지방하천 하천정비율은 2021년 기준으로 79.4%에 달하여 대부분의 하천제방 및 관련정비가 완료된 상태이나(Ministry of Environment, 2021) 지방하천 합류부의 제방과 부족이나, 교량 저부의 계획홍수위 대비 높이 부족 등으로 인한 홍수취약지구가 존재하고 있다. 환경부에서 지정한 홍수취약지구는 전국에 총 433 개소이며, 한강수계의 경우 133개 홍수취약지구가 존재하고 있다(Ministry of Environment, 2022).

기존의 홍수관리는 분류 및 지류의 22개 주요관측소를 통하여 홍수주의보와 홍수경보 등의 특보를 발령하고 이에 따른 대응을 수행하는 방법으로 이루어져 왔으며, 주요 분류 및 지류의 수위관측 위주로 집중적인 관리가 진행되어 왔다. 그러나, 지류와 소하천에서 발생하는 홍수피해에 대해서도 국민적인 요구가 대두됨에 따라서

모든 수위관측소가 수위정보를 제공하고 홍수피해 예방활동을 지원하게 되었다. 이 경우, 각각의 수위관측지점의 수위 변동 특성을 파악하는 것이 홍수피해 저감과 예방활동을 위하여 중요한 관건이 된다. 따라서, 한강수계에 위치한 165개 중에서 홍수취약지구에 홍수정보를 제공하는 45개 수위관측소를 연구의 대상으로 선정하였다. 2010년도부터 10분 단위의 수위관측이 보편화 되었으므로 45개 수위관측소의 2010년부터, 일부 관측소의 경우 10분 단위 관측이 2011~2012년부터 시작되었으므로 해당 연도부터 2022년 도까지의 10분 단위 수위자료를 수집하였다(Ministry of Environment, 2023). 수집된 모든 자료는 시계열 형상 및 유향 등을 고려하고, 수문조사연보를 참고하여 이상치를 제거하였으며, 수위자료의 일관성 등에 대해서도 검증 후 사용하였다(Ministry of Environment, 2023).

3.2 홍수시 수위상승거동곡선 유도

한강수계의 분류 및 지류 주요 수위관측소 45개 지점에 대하여 WRBC를 유도하였다. 유도를 위한 대상자료는 10분 단위의 수위 관측이 시작된 2010년부터 2022년까지의 수위 관측기록을 이용하였으며(MOLTI, 2022), $\Delta t = 10$ 분으로 하여 $\Delta W.L. (i \Delta t)$ 을 $i = 1, 2, 3, \dots, 1000$ 까지(10분에서 약 7일에 해당) 계산하였다(Fig. 3).

그러나, 이렇게 산정된 $\Delta W.L.$ 은 전체 수위 계열에 대한 변화량을 나타낸 것이므로 홍수 시의 변화량이라고 할 수 없으며, 홍수시의 수위 변화만을 분리할 필요가 있다. Yoon and Moon(2014)에 따르면 한국 주요지역의 유의미한 수위변화가 발생하는 일 강우량 30 mm를 초과하는 호우일수를 연간 7.8일에서 11.3일로 제시한 바 있다. 연간 12일을 홍수기간으로 간주할 경우 97% 이상의 분위 또는 연간 초과확률

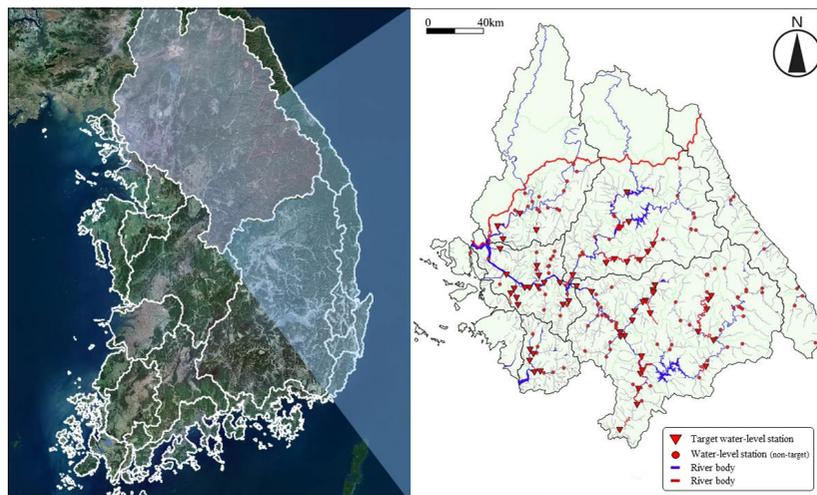


Fig. 2. Study Area and Target Water-Level Station

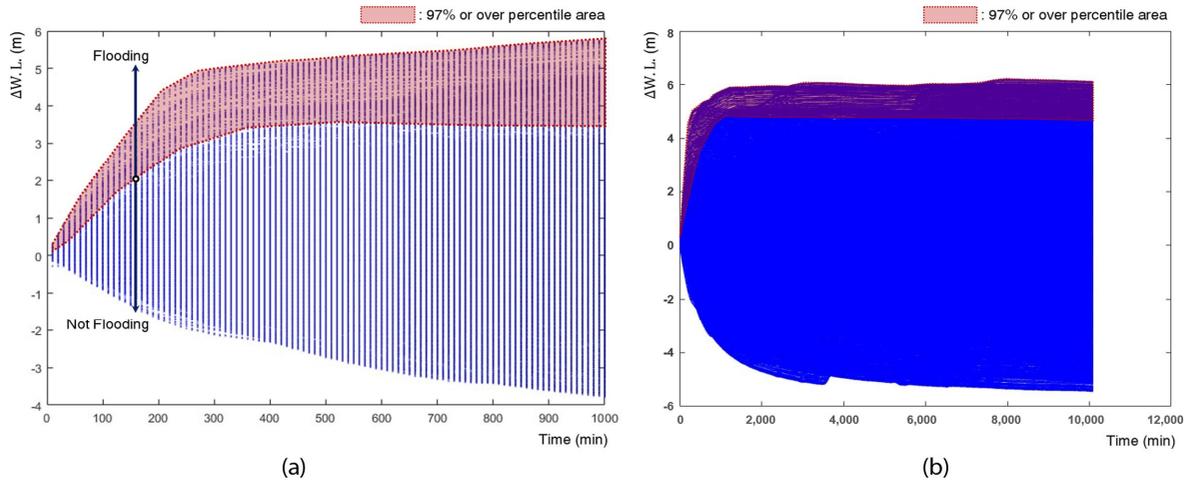


Fig. 3. Scatter Plot of $\Delta W.L.$ ($\Delta t = 10 \text{ min}$, $i = 1, 2, 3, \dots, 1000$)

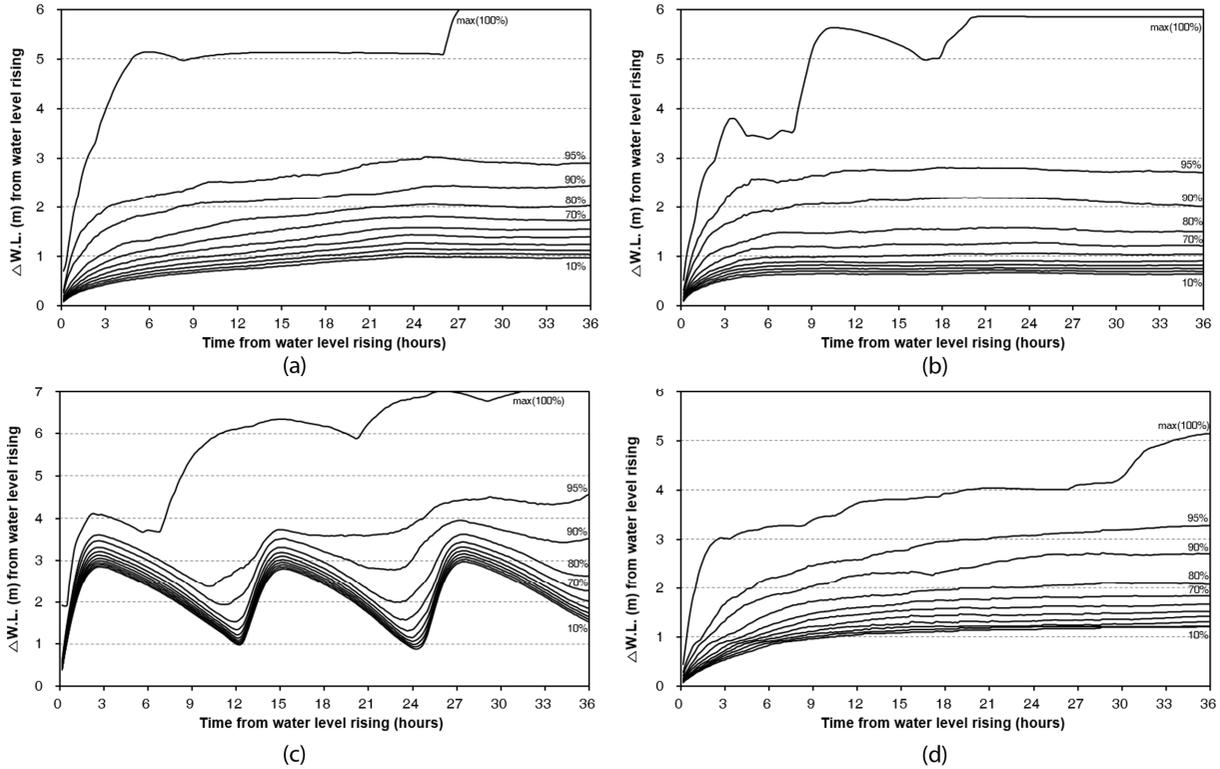


Fig. 4. WRBC Curve for (a) Pocheonsi(Yeongpyeongyo), (b) Gwangjusi(Gyeongangyo), (c) Pajusi(Tongildaegyo), (d) Hongcheongun (Hongcheongyo); Each Gray-Line Indicate Each Percentile of the Water-Level Rising Behavior

$p = 0.03$ 에 해당한다. 따라서, 본 연구에서는 산정된 $\Delta W.L.$ 중에서 상위 97% 이상의 수위상승 자료를 홍수 시의 자료로 간주하여 사용하였다. 45개 수위관측소의 WRBC곡선을 10개의 분위(10, 20, 30, ..., 100%)와 95% 분위로 총 11개의 곡선으로 유도하였으며, 대표적인 4개 지점을 Fig. 4에 도시하였다.

산정된 WRBC는 홍수유출로 인하여 발생하는 수위상승의 평균적인 경향을 통계적으로 나타내게 된다. Fig. 4는 45개 수위관측소의 WRBC 중에서 포천시(영평교), 광주시(경안교), 파주시(통일대교), 홍천군(홍천교)의 특징적인 4개 지점을 도시한 것이며, 각각의 분위에 따른 곡선을 도시하여 수위상승 거동을 보여준다. 우선 Fig. 4(a)는 포천시(영평교) 지점의 수위거동이며, 95%

분위를 기준으로 대부분의 수위상승이 초반 5시간 이내에 최대 2 m 정도로 발생하고 그 이후로는 24시간까지 1.0 m 이내에서 완만하게 증가하는 것으로 나타났다. 두 번째로 Fig 4(b)의 광주시(경안교)는 포천시(영평교) 지점과 비슷한 거동을 보이고 있으며, 조금 더 짧은 초반 3시간 이내에 전체적인 수위 상승이 발생하고 이후에는 완만하게 상승하는 경향을 보이고 있다. Fig 4(d)의 홍천군(홍천교) 지점의 경우에는 초기 9시간에 수위 상승의 상당량이 상승하나, 그 이후에도 지속적으로 수위 상승이 이루어지고 있는 특성을 보이고 있다. 45개 수위관측소 중 한강 분류를 제외한 지점은 홍수 시의 수위상승량의 80% 정도가 초반 62시간 이내에 상승하고 그 이후로는 상승하지 않거나 완만하게 상승하는 것으로 나타났다. 다만 대부분의 수위상승이 발생하고 이후로 평형상태에 도달하는 시간은 유역 별로 큰 차이가 있다. 예를 들어서 WRBC 95% 분위를 기준으로 Fig 4(a)의 포천시(영평교)는 8.5시간, Fig 4(b)의 광주시(경안교)는 3.0시간, Fig 4(d)의 홍천군(홍천교)는 7.2시간 정도면 수위상승량의 80%가 상승한다.

연속적인 강우로 인하여 지속적인 홍수유출이 발생하였을 때, 충분한 시간이 지나면 특정 하천지점에서의 홍수유출의 하류 유하량과 상류 유입량이 평형을 이루는 지점이 생겨날 것이다. 따라서, 도달시간이 상대적으로 짧은 광주시(경안교) 지점은 상대적으로 일정한 호우가 지속되어 수위상승이 발생하고 30시간이 경과하면 홍수위 상승거동이 완만하게 변화하는 상태에 도달하는 것으로 간주 할 수 있으며, 같은 맥락으로 포천시(영평교) 지점은 홍수위 상승후 8.5시간, 홍천군(홍천교) 지점은 홍수위 상승후 7.2시간 이후에 완만하게 변화하는 상태에 도달한다고 볼 수 있다. 이렇듯 전체적인 수위 상승거동은 비슷하나 수위상승 거동이 일정한 평형 상태에 도달하는 시간이 다른 것은 해당 유역의 면적과 유출 특성에 따른 차이로 판단된다. 포천시(영평교)의 상류 유역면적은 466.0 km²로 유역 전체가 낮은 구릉지 지형이며, 유역면적의 69.8%가 임야, 18.6%가 농경지로 이루어져 있으며 약 6시간 정도의 도달시간을 보인다(Gyeonggi-do Provincial Government, 1998). 광주시(경안교) 지점의 상류 유역면적은 261.8 km²이며, 유역의 60%가 EL100~300 m인 산지로 이루어져 있어 도달시간이 3.5시간 정도에 불과하다(MOLIT, 2011). 이와는 반대로 홍천군(홍천교)는 상류유역면적 880.3 km²이며, 그 중의 83.8%를 삼림 지역이 차지하고 유역의 도달시간은 9시간 정도이다(Gyeonggi-do Provincial Government, 2020). 따라서, 이러한 도달시간의 차이가 평형상태 도달시간의 차이로 나타난 것으로 보인다.

이에 반하여 Fig 4(c)의 파주시(통일대교) 지점은 매우 상이한 거동을 나타낸다. 해당 지점은 한강 하구에 인접한 지점으로서 상류에서 유하하는 홍수유출과 더불어 서해의 조위의 영향도 동시에 받는 지점이다. 그에 따라서, 높은 홍수유출이 아닐 경우에는

상대적으로 조위의 영향으로 인하여 12시간 간격으로 홍수위의 상승하강을 반복하는 것을 알 수 있다. 따라서, 일반적인 유역의 경우에는 도달시간과 같은 유역특성에 따라서 홍수위가 초기에 급격하게 상승하다가 완만하게 상승하는 상태에 도달하며, 조위 영향을 받는 하구지역은 조위에 따른 홍수위의 상승하강 특성을 보인다. 결과적으로, WRBC곡선은 각 유역별로 상이한 결과를 나타낼 수 있으므로 지점별 통합적인 적용은 어려울 것으로 보인다.

3.3 홍수시 수위상승거동곡선 활용성 검토 및 고찰

이전 절에서 제시하고 적용한 WRBC는 홍수유출로 인하여 발생하는 수위상승의 평균적인 경향을 통계적으로 나타낸다는 데 의미가 있다. 예를 들어서 Fig 4(a)의 포천시(영평교) 지점의 WRBC를 보면, 90% 분위를 기준으로 수위상승량의 60%인 1.5 m는 상승지점 3시간 이내에 상승하게 되며, 20%에 해당하는 0.5 m가 이후 6시간 동안 상승하고 나머지 20%가 22시간에 도달할 때까지 상승하게 된다. 또한, 이러한 경향성은 전 분위에서 유사한 거동을 나타낸다. 따라서, 90% 분위를 기준으로 하였을 때 초기 수위상승 지점에서 3시간 이내에 1.5 m 정도가 상승한다고 간주할 수 있으므로 하천변에 위치한 친수공간, 수방시설물 등에 대해서도 최대 3시간 이내에 1.5 m가 상승하는 것을 기준으로 친수공간 사용객의 대피나 수문폐쇄 계획 등을 수립할 수 있을 것이다.

Fig 4(d)의 홍천군(홍천교)의 경우에는 90% 분위를 기준으로 초기 6시간 동안에 1.8 m 정도 상승하고 있다. 홍천교 하천 인근에는 친수공간과 도로가 넓게 펼쳐져 있으므로 해당 공간에 대해서 6시간 동안 1.8 m 수위상승을 기초로 각종 수방대책을 수립할 수 있을 것이다. 이와 같이 WRBC가 수위상승의 평균적인 경향성을 정량적인 통계값으로 제시한다는 점을 고려하면 수방활동을 위한 기초자료로서 활용이 가능할 것으로 판단된다. WRBC의 유도는 연간 초과확률 $p = 0.03$ 에 해당하는 개개의 홍수 사상에서 발생하는 시간적인 상승량을 단위시간 Δt 를 통하여 표현한 결과를 분위화한 것임을 고려하면, WRBC상에서 상위 90% 분위에 해당하는 수위상승이 발생하였을 경우 이론적으로는 10년에 한번 정도 발생할 수 있는 수위상승으로 간주하여도 무방하다. 따라서, 홍수시의 수위상승을 각 시점별로 판단할 수 있으며, 수위상승의 정도를 판단하기에도 상대적으로 용이하다는 장점이 있다. 이를 검토하기 위하여 유도된 WRBC에 대하여 실제 홍수시의 사상을 통하여 검토하였으며, 이를 위한 대표적인 홍수사상을 선정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5(a, b, d)의 포천시(영평교), 광주시(경안교), 홍천군(홍천교)의 경우에는 최근 발생한 가장 큰 홍수인 2022년 홍수기의 사상을 선정하였다. 다만, 파주시(통일대교)의 경우에는 2022년에

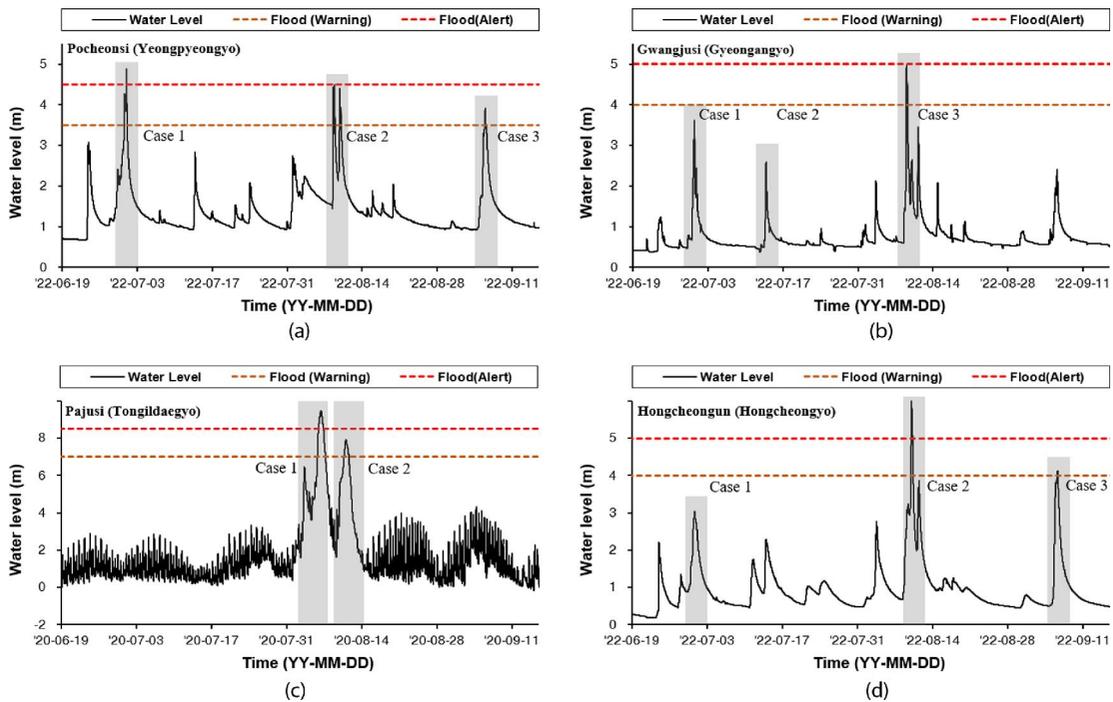


Fig. 5. Runoff Time Series of Each Water-Level Station for (a) Pocheonsi(Yeongpyeongyo), (b) Gwangjusi(Gyeongangyo), (c) Pajusi (Tongildaegyo), (d) Hongcheongun(Hongcheongyo); Red-Square Indicate that Each Selected Flood Event

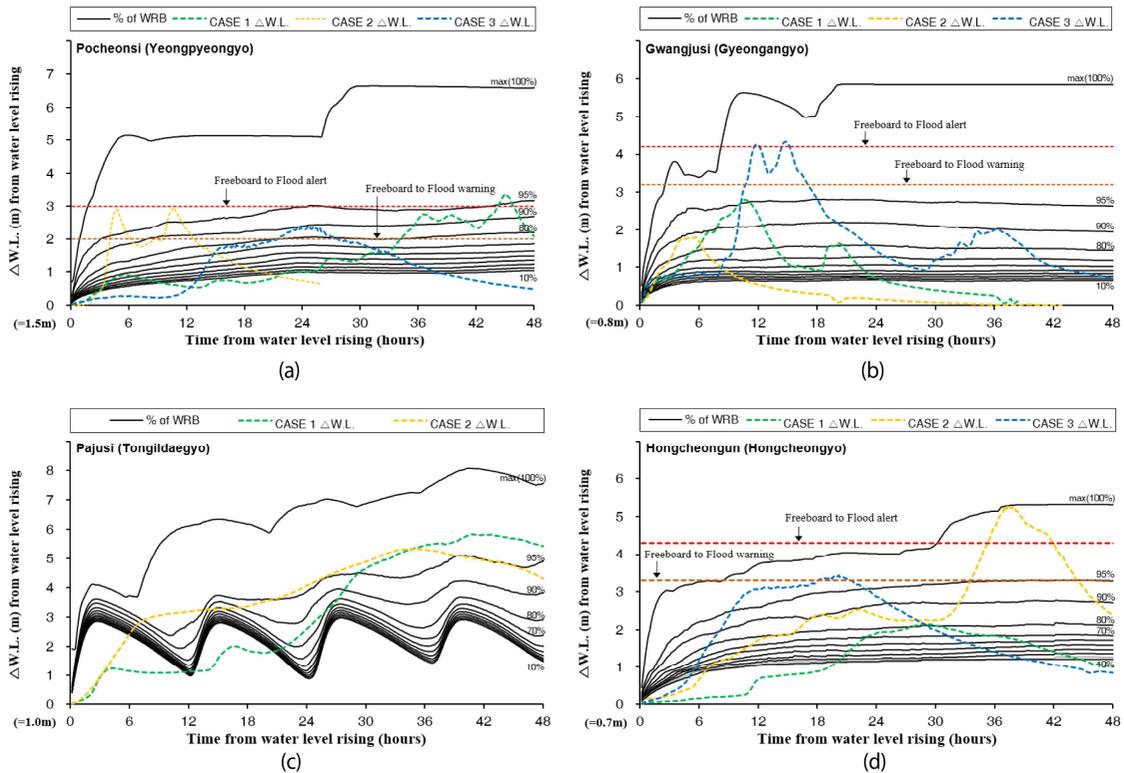


Fig. 6. WRBC and Flood Event for Each Water-Level Station for (a) Pocheonsi(Yeongpyeongyo), (b) Gwangjusi(Gyeongangyo), (c) Pajusi (Tongildaegyo), (d) Hongcheongun(Hongcheongyo); Red-Dot Line Indicate Freeboard to Flood Alert from Each Starting Water-Level and Brown-Dot Line Indicate Freeboard to Flood Warning from Each Starting Water-Level
 별다른 홍수사상이 나타나지 않아서 최근 10년 동안에 가장 큰 홍수가 발생한 2020년의 홍수기 사상을 이용하였다. WRBC의

유도에는 수위상승 시점의 수위와는 상관이 없으나, 비교를 위하여 유사한 시작지점을 가지는 사상을 선정하여 사용하였다. 그에 따라서, 포천시(영평교)는 1.5 m, 광주시(경안교)는 0.8 m, 과천시(통일대교)는 1.0 m, 홍천군(홍천교)는 0.7 m 인근에서 수위상승이 시작되는 사상을 선정하였다. 선정된 사상을 WRBC상에 도시한 결과는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6의 WRBC와 동시에 도시한 홍수사상은 각각의 홍수에서 수위상승에 대한 정도를 정량적으로 판단할 수 있는 방법론으로 활용할 수 있을 것이다. 물론 향후 수위상승 정도를 예측할 수는 없으나, 현재까지의 수위상승 정도에 따른 홍수위의 빈도나 추이를 확인하기 위한 기초자료로서 기능할 수 있다. 예를 들어서 Fig. 6(d)의 홍천군(홍천교)의 Case 3 사상을 보면 점진적으로 수위상승이 진행되다가 최대 80% 분위 정도에서 유지되는 것을 알 수 있다. 이 경우, 최종적으로 홍수 시의 수위상승 정도는 5년에 한번 정도 발생할 수 있는 수준의 수위상승이 일어난 것으로 간주할 수 있으며, 홍수시에 실시간으로 수위상승 정도를 판단하기 위한 기초자료로 활용할 수 있다. 물론 이러한 수위상승 정도는 단순히 수위 시계열의 상승정도를 보고 판단할 수도 있으나, 현재 상승하는 수위의 변화가 어느 수준인지는 단순 수위자료를 보고 판단하기는 어려워져 숙련된 전문가에 의존하고 있으므로, 이러한 상황에서 WRBC를 활용할 수 있을 것으로 보인다. 예를 들어서 Fig. 6(a)의 포천시(영평교)를 보면 Case 1, 3의 경우에는 점진적으로 수위가 상승하면서 홍수주의보 및 홍수경보 수준까지 상승하였다. 그러나 Case 2의 경우에는 2시간까지는 수위상승이 미미하게 발생하다가 3~4시간 이내에 WRBC 분위 5%에서 70%까지 급격하게 상승하는 것을 볼 수 있으며, 4~5시간 구간에서 홍수주의보 및 홍수경보까지 지속 상승하였다. 따라서, 이 경우 현장 엔지니어가 급격하게 상승하는 수위를 보면서 수위 상승의 정도를 파악하거나 현재의 상승경향이 지속될 경우 어느 정도까지 상승할 지의 여부를 판단하는데 활용할 수 있다.

본 연구에서 제시한 WRBC는 수문모의나 기타 모형을 이용하지 않고 개개의 홍수 사상에서 발생하는 시간적인 상승을 단위시간 Δt 를 통하여 표현된 수위 상승값의 군집의 분위곡선일 뿐이다. 그러나, 홍수시의 수위상승에 대해서 의사결정이나 각종 계획 수립을 위한 통계적인 기준치가 없는 현장에서 활용하기 위한 기초자료로는 의미가 있을 것으로 판단되며, 수위 상승을 정량적으로 판단하기 위한 보조자료로서 기능할 수 있을 것이다.

WRBC곡선의 수위상승이나 평형상태에 도달하는 등의 특징은 유역면적과 같은 유역특성에 따르는 것으로 보인다. 이전 절에서 Fig. 4(a)의 포천시(영평교)는 8.5시간, Fig. 4(b)의 광주시(경안교)는 3.0시간, Fig. 4(d)의 홍천군(홍천교)는 7.2시간 정도면 수위상승

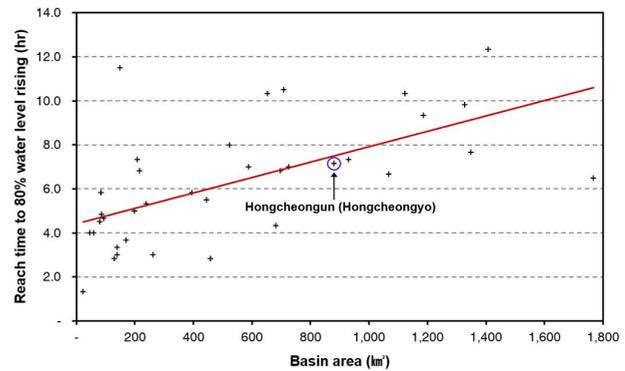


Fig. 7. Scatter Plot of the Basin Area versus Reaching Time to 80% of Water Level Rising in WRBC 95% Percentile Curve; Blue Circle Indicate that the Hongcheongun(Hongcheongyo)

량의 80%가 상승하는 것으로 제시한 바 있으며, 그 이유에 대해서도 고찰하였다. WRBC 95% 분위를 기준으로 이러한 수위상승량의 80%에 도달하는 시간과 유역면적을 도시하면 Fig 7과 같다. 홍천군(홍천교) 지점은 20년에 한번 정도는 24시간 동안에 2.7미터 정도의 수위상승이 발생한다(WRBC 95% 분위에 해당). 이때 Fig 7에 따라서, 홍천군(홍천교) 지점의 상류유역면적이 880 km² 이므로, 수위상승량의 80%에 해당하는 2.2미터가 7.2시간 내에 상승할 것으로 간주할 수 있다. 그러나, Fig 7와 같이 불확실성이 상대적으로 높아서 유역면적만을 가지고 이를 정량화하기에는 어려울 것으로 보이며, 이전 절에서 고찰한 바와 같이 도달시간, 유로연장, 유역의 토지이용과 피복 등과 관계가 있을 것으로 예상된다. 따라서, 향후 다양한 유역특성과 WRBC 곡선과의 상관관계 분석을 통하여 일반적인 방법론으로서의 개선이 필요할 것으로 판단된다. 또한, Fig 4(c)와 같이 조위의 영향을 받는 지점은 조위의 영향이 더 지배적인 것으로 판단되어 향후 보완이 필요할 것으로 보인다.

본 연구의 한계는 기존의 수위자료를 이용하여 수위 상승값의 군집을 분위화 하였다는데 있다. 하천공사나 대규모 지역개발 등으로 인하여 유역이나 하천의 수위거동이 기존과 달라질 경우 유도한 WRBC를 통한 분석은 사용할 수 없게 된다. 유역면적이 상대적으로 작은 지류하천이나 소하천의 경우에는 단순 부지개발이나 지구단위 사업을 통해서도 수위의 거동이 바뀔 가능성이 있기 때문에 WRBC를 적용할 경우 반드시 해당 수위관측소의 수위자료를 대상으로 하여 일관성이 유지되는지를 먼저 검토하여야 하며, 이 과정에서 수위거동의 변화가 있을 경우 적용이 어려울 것으로 보인다. 그러나, 수위자료를 간단한 과정을 통하여 정량화된 통계결과를 제공한다는 점에서는 활용성이 있을 것으로 보인다. 또한, 수위자료만 존재하는 소규모 지류하천이나 소하천의 경우에는 유량측정이 이루어지지 않는다는 점을 고려하여 강우사상과

연계하여 일종의 노모그래프 유도를 위한 자료로서 활용이 가능할 것으로 보이며, 기뮴관리를 비롯한 다양한 상황에서의 활용성과 사용목적에 적절한 분위 선택에 대한 연구도 필요하다.

4. 결론

본 연구는 기존에 축적된 수위자료를 이용하여 홍수시의 수위상승 거동을 통계적으로 나타내는 간단한 방법을 제시하고 그 활용방안을 제시하는 데 목적이 있다. 이를 위하여 홍수 사상에서 발생하는 시간적인 상승량을 단위시간 Δt 를 통하여 수위 상승값의 군집으로 표현하고 분위화한 수위상승거동곡선(WRBC) 개념을 제시하였다. 한강수계의 홍수취약지구에 홍수정보를 제공하는 45개 수위관측소의 2011년부터 2021년까지의 10분 단위 수위자료를 수집하였으며, 제시한 방법론을 적용하고 그 결과를 분석하였다.

WRBC 적용결과에 따라 조위에 영향을 받는 지점이 아닐 경우, 홍수 시의 수위상승량의 80% 정도가 초반 6시간 이내에 상승하며 그 이후에는 완만하게 상승하는 것으로 분석되었다. 다만 전체적인 수위 상승거동은 비슷하나 수위상승 거동이 일정시간이 지난 후에 일정한 평형상태에 도달하는 시간이 다른 것으로 분석되었으며, 이는 해당 지점 상류유역의 면적과 유출 특성에 따른 차이가 원인인 것으로 제시하였다. 조위의 영향을 받는 지점은 높은 홍수유출이 아닐 경우에는 상대적으로 조위의 영향이 지배적이어서 조위영향을 제거하거나 분리하는 과정이 필요할 것이다. 조위영향을 받지 않는 일반적인 유역의 경우 초기에 수위 상승이 높게 나타나며, 이후 완만하게 상승하는 특성을 보이며 각각의 유역특성에 따라서 초기상승량과 시간이 다르게 나타나서 각 지점별로 WRBC 곡선을 산정하여 적용하여야 할 것으로 보인다.

WRBC는 홍수유출로 인하여 발생하는 수위상승의 평균적인 경향을 통계적으로 나타낸다는 데 의미가 있음을 보이고, 그에 따른 활용방안을 고찰하였다. 실무적으로 수문곡선을 WRBC와 동시에 도시하여 현장 엔지니어가 급격하게 상승하는 수위를 보면 수위 상승의 정도를 파악하거나 현재의 상승경향이 지속될 경우 어느 정도까지 상승할 지를 간편하게 판단하는 데 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 대표적으로 검토한 포천시(영평교) 지점의 경우에는 WRBC 분석결과에 따라 전체 수위상승량의 60%인 1.5m가 3시간 이내에 상승하는 것으로 나타났으므로 하천 변에 위치한 친수공간, 수방시설물 등에 대해서도 3시간 이내에 1.5m가 상승하는 것을 기준으로 친수공간의 사용자 대피나 수문폐쇄 계획 등의 활용성이 있음을 고찰하였다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물관리 연구사업(1615012820)과 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 주요사업(20230263-001)의 지원을 받아 연구되었습니다. 아울러 소중한 시간을 할애하여 논문을 심사해주시고 귀한 의견을 주신 익명의 심사위원님들께도 감사드립니다.

References

- Agirre, U., Goñi, M., López, J. J. and Gimena, F. N. (2005). "Application of a unit hydrograph based on subwatershed division and comparison with Nash's instantaneous unit hydrograph." *Catena*, Elsevier, Vol. 64, Nos. 2-3, pp. 321-332, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.013>.
- Croley II, T. E. (1980). "Gamma synthetic hydrographs." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 47, Nos. 1-2, pp. 41-52, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(80\)90046-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(80)90046-3).
- Gray, D. M. (1961). "Synthetic unit hydrographs for small watersheds." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 87, No. 4, pp. 33-54, <https://doi.org/10.1061/jyceaj.0000631>.
- Guo, J. (2022). "General and analytic unit hydrograph and its applications." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 27, No. 2, 04021046, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)he.1943-5584.0002149](https://doi.org/10.1061/(ASCE)he.1943-5584.0002149).
- Gyeonggi-do Provincial Government (1998). *River basic plan for the Yeongpyeong basin*, Gyeonggi-do Provincial Government (in Korean).
- Gyeonggi-do Provincial Government (2020). *River basic plan for the Hongcheon river and river facility management ledger* (in Korean).
- Hwang, S., Yoon, J., Kang, N., Lee, D. and Nog, H. (2020). "Status of flood forecasting and warning technology in Korea." *KSCE Magazine*, KSCE, Vol. 68, No. 9, pp. 74-83 (in Korean).
- Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F. and Le Boursicaud, R. (2014). "Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 509, pp. 573-587, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.016>.
- Lee, I. S. and Lee, H. H. (2014). "Analysis of secular changes in the hydrological characteristics of a small forested watershed using a baseflow recession curve." *Journal of Korean Forest Society*, KFS, Vol. 103, No. 3, pp. 383-391, <https://doi.org/10.14578/jkfs.2014.103.3.383> (in Korean).
- Lee, M., Yoo, Y., Joo, H., Kim, K. T., Kim, H. S. and Kim, S. (2021). "Construction of rating curve at high water level considering rainfall effect in a tidal river." *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Elsevier, Vol. 37, 100907, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100907>.
- Lei, W., Ding, B., Kong, W. and Huang, P. (2020). "Study on the characteristics of water level during the flood season in the Poyang Lake, China." *Proceedings of IOP Conference Series*:

- Earth and Environmental Science*, Vol. 510, No. 3, 032012, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/510/3/032012>.
- Lian, J., Xu, H., Xu, K. and Ma, C. (2017). "Optimal management of the flooding risk caused by the joint occurrence of extreme rainfall and high tide level in a coastal city." *Natural Hazards*, Springer, Vol. 89, No. 1, pp. 183-200, <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2958-4>.
- Ministry of Environment (2021). *Korea River List*, Statute and policy of Ministry of Environment, Available at: <https://www.me.go.kr/home/web/index.do?menuId=10259> (Accessed: March 2, 2023) (in Korean).
- Ministry of Environment (2022). *The Ministry of Environment is moving forward with eternal measures to resolve 433 flood vulnerable zones*, Press release of Ministry of Environment, Available at: <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=1537320&menuId=10525> (Accessed: March 2, 2023) (in Korean).
- Ministry of Environment (2023). *Han Flood Control Office website*, Han Flood Control Office, Available at: <http://www.hrcco.go.kr> (Accessed: March 2, 2023).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MOLTI) (2011). *River basic plan for the Gyeongancheon and river facility management ledger*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Wonju Regional Construction and Management Administration, Wonju, Korea, pp. 172-192 (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MOLTI) (2022). *Annual Hydrological Report in Korea* (in Korean).
- Nadarajah, S. (2007). "Probability models for unit hydrograph derivation." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 344, Nos. 3-4, pp. 185-189, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.07.004>.
- Nourani, V., Singh, V. P. and Delafrouz, H. (2009). "Three geomorphological rainfall-runoff models based on the linear reservoir concept." *Catena*, Elsevier, Vol. 76, No. 3, pp. 206-214, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.11.008>.
- Oh, C. Y., Lee, J. and Choi, K. (2017). "Study on development of flood information service system in waterfront." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference 2017*, Korea Water Resources Association, Changwon, Korea, pp. 212-212 (in Korean).
- Rodríguez-Iturbe, I., Devoto, G. and Valdés, J. B. (1979). "Discharge response analysis and hydrologic similarity: the interrelation between the geomorphologic IUH and the storm characteristics." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 15, No. 6, pp. 1435-1444, <https://doi.org/10.1029/WR015i006p01435>.
- Sarkar, S. and Rai, R. K. (2011). "Flood inundation modeling using Nakagami-m distribution based GIUH for a partially gauged catchment." *Water Resources Management*, Springer, Vol. 25, No. 14, pp. 3805-3835, <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9890-2>.
- SCS (1957). *Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application: V. Mockus*, U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D.C.
- Sherman, L. K. (1932). "Streamflow from rainfall by the unit hydrograph method." *Engineering News-Record*, Vol. 108, pp. 501-505.
- Singh, V. P. (1995). *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, Chelsea, Michigan, USA.
- Singh, P. K., Mishra, S. K. and Jain, M. K. (2014). "A review of the synthetic unit hydrograph: from the empirical UH to advanced geomorphological methods." *Hydrological Sciences Journal*, Taylor & Francis, Vol. 59, No. 2, pp. 239-261, <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.870664>.
- Snyder, F. F. (1938). "Synthetic unit hydrographs." *Transactions of the American Geophysical Union*, Vol. 19, pp. 447-454.
- Söderholm, K., Pihlajamäki, M., Dubrovin, T., Veijalainen, N., Vehviläinen, B. and Marttunen, M. (2018). "Collaborative planning in adaptive flood risk management under climate change." *Water Resources Management*, Springer, Vol. 32, No. 4, pp. 1383-1397, <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1875-3>.
- Sović, A., Potočki, K., Seršić, D. and Kuspilić, N. (2012). "Wavelet analysis of hydrological signals on an example of the River Sava." *Proceedings of the 35th International Convention MIPRO*, IEEE, Opatija, Croatia, pp. 1042-1047.
- Yoon, S. K. and Moon, Y. I. (2014). "The recent increasing trends of exceedance rainfall thresholds over the Korean major cities." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, KSCE, Vol. 34, No. 1, pp. 117-133, <https://doi.org/10.12652/ksce.2014.34.1.0117> (in Korean).