하천제방의 비정상 침투해석을 위한 설계홍수파형 산정

Estimation of Design Flood-Hydrograph for Unsteady Seepage Analysis Through River Levees

서 린* · 윤광석**

Seo, Lynn · Yoon, Kwang Seok

Abstract

Our objective is to compose design flood-hydrograph for analysis of unsteady seepage through river levees. Flood data in the study area, whose observations period are sufficiently long, were collected. Design water surface level and design flood of the study area were analyzed. The method that was introduced in design criteria guideline for river levee in Japan was modified and applied in this study for decision of design flood-hydrograph. For examination of applicability of composed flood-hydrograph, the relation of slope of falling limb and duration of flood-hydrograph was analyzed. It was estimated that flood duration in composed flood-hydrograph was longer than one of design flood-hydrograph, that represents duration of design flood-hydrograph can not take duration of real flood into account. Slope of falling limb of composed flood-hydrograph was more gradual than one of design flood-hydrograph in most study area. Although the results showed that the larger area of a basin accompanies the gentler slope, the pronounced correlation, which can be seen between basin area and flood duration, did not exist. The present study suggests that employing duration of composed flood-hydrograph and slope of falling limb of design flood-hydrograph is safer design when analyzing unsteady seepage through river levees. This study proposed a practical approach to estimate design flood-hydrograph using past flood data. This study applied the methodology to the study area in five river basins and identified the validation.

Key words : Levee, Unsteady seepage analysis, Design flood-hydrograph, Water surface level

요 지

본 연구는 제방에 대한 비정상 침투해석에 사용되는 설계홍수파형을 결정하기 위하여 수위자료가 충분히 구축된 우리나라 5대강 수계의 수위관측소 홍수자료를 수집하고 대상 지점의 유역면적, 제방고, 계획홍수량 및 계획홍수위를 조사하였다. 합성홍수파형 결정방법은 일본의 하천제방설계지침에서 제시하고 있는 방법을 보완하여 사용하였다. 합성된 홍수파형의 적용성을 검토하기 위해 합성홍수파형의 감수부 경사와 지속시간을 계획수문곡선과 비교하였고 유역면적에 따른 홍수파형의 감수부 경사와 지속시간의 관계도 분석하였다. 홍수지속시간은 합성홍수파의 홍수지속시간이 계획홍수파의 지속시간보다 크게 산정되었으며, 계획홍수파의 지속시간이 실제 홍수사상의 지속시간을 충분히 대변할 수 없는 것으로 나타났다. 감수부 경사는 대부분의 지점에서 합성홍수파형이 계획홍수파의 감수부 경사보다 완만한 것으로 나타났으며, 유역면적이 넓어질수록 완만해지는 경향을 보였으나, 지속시간과 같이 뚜렷한 상관관계는 보이지 않았다. 하천제방의 비정상 침투해석 시 지속시간은 합성홍수파의 지속시간을 사용하고 감수부 경사는 계획홍수파의 감수부 경사를 사용하는 것이 안전측 설계가 될 것으로 판단된다. 본 연구는 설계홍수수문곡선과 과거대표홍수사상을 이용하여 합성홍수파형을 작성하는 방법을 제안하였으며 5대강 수계 대상지점에 대해 적용하여 그 방법론의 타당성을 확인하였다.

핵심용어 : 하천제방, 비정상 침투해석, 설계홍수파, 수위

1. 서 론

홍수시 제방 붕괴 원인은 크게 월류, 침식, 제체 불안정 및 하천 구조물에 의한 붕괴 등으로 구분할 수 있다. 1987년~2003년까지의 제방붕괴 사례의 원인을 분석한 결과, 전체

제방붕괴 사례 758건중 월류가 300건으로 가장 많은 비율을 차지하고 있으며, 침식 295건, 제체 불안정에 의한 붕괴 87건, 구조물에 의한 붕괴 76건으로 나타났다. 또한 전체 제방 붕괴 사례 758건 중 지방2급 하천에서 626건(82.6%)이 발생하였고, 그 다음으로 지방2급 하천에서 89건(11.7%), 그리

*정회원. 한국건설기술연구원 하천해안연구실, 석사후 연구원(E-mail: seolynn@hanyang.ac.kr)
Member. Graduate Research, Korea Institute of Construction Technology

**교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 하천해안연구실, 연구위원(Tel: +82-910-0270, Fax: +82-31-910-0251, E-mail: ksyoon@kict.re.kr)
Corresponding Author. Member. Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology.

고 국가하천에서 가장 적은 43건(5.7%)이 발생하였다. 1970~1980년대에 집중적으로 건설된 하천제방이 노후되어 관공현상으로 붕괴되는 현상이 많이 나타나고 있다(Ministry of Construction and Transportation, 2004).

국내에서는 2002년 태풍 루사 이후 제방의 안정성평가 및 설계기법에 대해 많은 연구가 수행되었다. Lee 등(2002)은 제방안정도 평가방법 비교를 통하여 국내 설계기준에서 제시하고 있는 제방의 안전성확보 외에 제방에 요구되는 기능마다 외력과 내력을 비교하여 공학적인 안전성 조사방법 도입이 필요하다고 제시하였고, Yoon 등(2002)은 홍수피해 저감을 위한 제방관련 설계기술 개선방안 검토를 통해 우리나라, 일본, 미국 등의 설계기준을 비교 분석하고 국내 제방설계기준 개선방향을 제시하였다. Kim 등(2006)은 제방침투에 대해 문제점 분석을 분석하고 수리적 특성, 토질적 특성에 따른 해석방법과 보강방법에 대해 연구를 수행하였다. Yoon과 Yeo(2004)는 침투해석을 위한 기본홍수파형 작성방법을 이용하여 낙동강유역 수위관측소 9개 지점에 적용하여 합성홍수파형을 작성하였다. Kim 등(2006)은 수치해석을 이용하여 하천제방 배수통문의 안정성에 대해 평가하였고, Im 등(2006)은 제방침투 수치해석 모형의 적합성 분석을 통해 침투수치 모형의 적합성을 검증하였다.

국외에서는 Jain 등(2000)은 지형학적 순간 단위도법(geomorphological instantaneous unit hydrograph)을 이용하여 다양한 홍수패턴에 대해 설계홍수파형을 산정하였으며, 모형의 적용성을 평가하였다. Fredlund 등(2011)은 빠른 수위하강 조건에서의 제방에 대한 침투류의 영향과 사면안정을 분석하였다. 또한 포화상태와 불포화상태를 구분하여 모의를 하여 제체내부의 유효응력을 계산하여 제방 붕괴의 기작을 분석하였다. Shahrokhbabadi와 Toufigh(2012)는 유전자 알고리즘과 자연요소법을 사용하여 제체내의 침윤면의 위치를 정의하기 위한 연구를 수행하였다.

대규모 하천이 많은 미국과 유럽 등은 정상 침투해석을 실시하여 제방을 설계하지만, 우리나라의 경우 상류 지역은 하천경사가 급하여 홍수지속시간이 짧고, 하류 지역은 하천경사가 완만하여 홍수지속시간이 길어서 비정상 침투해석을 통해 제방을 설계해야 한다. 설계 홍수파형을 정상상태로 해석하면 대상지점의 홍수파형이 갖는 홍수지속시간과 감수부 경사가 고려되지 않아, 상류 지역은 과대한 외력이 설정될 수 있으며, 하류 지역은 과소한 외력조건으로 과소 설계될 우려가 있어 시간에 따른 수위 변화를 고려할 수 있는 비정상 침투해석이 필요하다.

비정상 침투해석을 위해서는 제방에 대한 외력조건으로 적용될 하천의 홍수파형이 필요하지만 국내에서는 홍수위와 지속시간 등 홍수파형의 시간분포에 대한 명확한 기준이 없어서 실무에서는 설계하고자 하는 대상지점의 계획홍수량에 사용된 홍수파형의 계획홍수위와 홍수지속시간을 이용하여 설계홍수파형을 결정하여 사용하고 있다.

본 연구에서는 제방에 대한 비정상 침투해석시 외력으로 설정되는 설계홍수파형을 결정하기 위하여 우리나라 5대강 수계의 수위관측소에 대한 설계홍수량을 조사하고, 과거 홍수사

상의 수문곡선을 분석하였다. 각 지점별로 과거 홍수사상의 홍수지속시간과 설계홍수량 산정시 사용되었던 설계수문곡선을 비교하여 본 연구에서 합성한 설계홍수파형의 적용성을 살펴보았다.

2. 제방침투해석 방법 검토

제방은 흙과 돌로 구성되어 침투거동이 제방의 구조적 안정성에 큰 영향을 미친다. 제방의 누수는 외수위가 상승하여 제체 또는 지반을 통해 제내지층으로 침투수가 유출되는 현상을 말하고 제체를 침투해오는 제체누수와 지반을 침투해오는 지반누수가 있다. 홍수시 하천과 제내지층 수두차에 의해 제내지층 비탈면을 통하여 누수가 발생하거나, 기초지반을 통해 제내지층으로 파이핑이 발생하는 경우 제방이 붕괴될 수 있다. 침투류는 제체 및 기초지반의 누수 및 파이핑 등을 발생시키는 원인으로서 제방의 안전에 중요한 요소이다. 침투거동은 제방 구성재료의 입도분포, 다짐정도, 균질성, 수면의 위치, 수위의 시간적 변화, 강우 등에 영향을 받는다.

2.1 미국

미국에서 침투류에 대한 제방 안전성 검토는 미공병단의 제방설계 지침을 따르도록 하고 있다. 원칙적으로 정상상태를 가정한 정상 침윤면을 Design Water Surface Elevation(DWSE), Hydraulic top of levee(HTOL) 및 Minimum top of levee(MTOL) 등을 기준으로 설정하여 제방의 안전성을 해석한다. 제방 비탈면의 슬라이딩 파괴에 대한 안전성 평가법에서는 수위에 따라 6개의 경우로 나누어 안전율을 제시하고 있다. 미국의 설계 기준은 침투에 대한 제방의 안전성은 증가되나 소규모 하천인 경우 홍수지속시간이 길어져 과대 설계의 가능성이 있다(USACE, 2009; USACE, 2010; Department of water resources, 2012).

2.2 일본

일본의 경우, 침투에 대한 안전성 평가는 침투에 의한 제체 비탈면 활동 파괴 안전성 검토와 기초지반 파이핑 파괴 안전성 검토로 구분하여 안전성을 평가한다. 파이핑에 대한 안전성 검토에서 침투류는 비정상 침투류 계산식에 의해 계산을 하고 침투류 계산 결과를 이용하여 동수경사의 최대치를 구해서 이 최대치가 0.5보다 작을 경우 안전성이 확보된 것으로 판단한다. 홍수특성을 분석하여 분석된 홍수파형은 침투류 계산을 위한 외력으로 설정된다(Ministry of Construction, 2000).

계획홍수량을 산정할 때 사용한 홍수파형을 사용하여 홍수파형 각각에 대해 평수위를 기준으로 지속시간을 구하고 지속시간에 대한 수위파형 중에서 홍수말기 감수부 경사가 최대인 것을 찾아서 그 경사를 감수부 경사로 결정하고 평수위와 홍수파형들의 포락선으로 둘러싸인 면적과 같은 면적이 되도록 증수부 경사와 지속시간을 결정하여 사다리꼴의 수위파형을 결정하고 있다. 이렇게 구한 홍수파형을 '기본홍수파형'이라고 한다. 이 방법의 경우, 계획홍수량을 산정할 때 사

용한 홍수파형만을 사용하므로 기본홍수파형의 지속시간이 하천에서 발생한 실제 홍수사상의 지속시간을 반영하지 못하는 단점이 있다.

2.3 한국

국내 실무에서 제체 침투해석은 Mononobe식을 이용하여 제체 침윤선이 제체 하부에 위치하도록 하는 방법을 많이 사용하였으며, 지반누수는 한계동수경사, 한계유속 크리프비 등에 의한 판정에 의해 안정성을 검토하여 왔다. 침투류 해석에서 제체 및 지반의 토질정수와 더불어 중요한 요소가 홍수 지속시간인데 국내에서는 주로 정상상태의 경우에 대해서 침투해석을 수행하고 있으며 홍수지속시간은 계획홍수파형의 지속시간을 사용하거나 경험적으로 결정되고 있다.

최근에는 침투류를 2차원으로 해석하여 결정짓기도 한다. 흙 속을 흐르는 물의 흐름은 속도와 동수경사가 흙을 통과하는 동안 변하는 특성을 가지며, 이와 같은 흐름에 관한 문제는 2차원 흐름인 경우 일반적으로 유선망을 사용하는 도해법

으로 구하거나 수치해석법을 도입하여 편미분 방정식의 해를 구할 수 있다. 2차원 흐름에 대한 기본원리는 흙 속의 한 요소에 유입되는 유량과 유출되는 유량을 산정하여 Darcy의 법칙($v_x = K_x i_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$, $v_z = -K_z i_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$)을 적용하여 2차 편미분 방정식을 유도할 수 있다.

3. 대상지점 및 과거 대표홍수사상

국내 여건에 맞는 설계홍수파형을 개발하기 위하여 과거 홍수자료를 얻을 수 있는 수위관측소 지점을 분석대상지점으로 선정하였고, 그 지점에 해당하는 계획홍수 수문곡선은 하천기본계획에서 계획홍수량 산정시 사용하였던 홍수수문곡선을 이용하였다.

3.1 대상지점

설계홍수파형 결정을 위해 5대강의 본류에 위치하고, 충분한 과거 홍수자료를 구할 수 있는 수위관측소 지점을 대상지

Table 1. Stations analyzed in the study

권역명	하천명	지점명	기본계획 측점 (No.)	계획 홍수량 (m³/s)	계획 홍수위 (EL.m)	계획빈도 (년)	유역면적 (km²)	여유고 (m)	제방고	
									좌안	우안
한강	섬강	간현	8+150	4,560	64.88	80	1,181.81	1.2이상	67.59	67.59
	경안천	경안	62	2,080	39.92	100	263.35	1.2이상	44.28	42.51
	한강	광장	125+479	37,000	18.91	200	24,058.90	2.0이상	19.00	25.70
	평창강	방림교	223	2,166	365.28	80	488.30	1.2이상	366.76	-
	남한강	여주	34	13,203	44.40	100	11,104.40	2.0이상	47.48	47.50
	청미천	청미	30	1,820	58.41	50	557.00	1.0이상	-	61.10
	한강	행주대교	58+057	37,000	11.48	200	26,091.90	2.0이상	15.50	15.50
낙동강	한강	한강대교	92+429	37,000	15.33	200	24,753.20	2.0이상	18.00	18.50
	금호강	동촌	57	5,590	34.65	200	1,544.0	1.5이상	37.14	37.28
	남강	정암	53+240	3,630	17.02	100	3,283.0	1.2이상	18.54	18.40
	내성천	월포	52	2,930	82.33	100	1,134.5	1.2이상	84.31	83.77
	낙동강	낙동	505	12,580	44.16	200	9,369.0	2.0이상	46.71	46.77
	낙동강	지보	596+370	6,460	63.19	200	4,516.9	1.5이상	64.19	94.09
	낙동강	사벌	561	10,740	55.50	200	7247.9	2.0이상	57.51	51.92
	낙동강	왜관	411+130	13,420	28.71	200	11,074.4	2.0이상	30.80	30.82
	낙동강	삼랑진	108+20	16,840	11.69	100	22,891.9	2.0이상	11.56	15.52
금강	낙동강	구포	30+20	19,370	6.57	200	23,273.6	2.0이상	9.04	8.52
	금강	마어구	93+510	11,530	22.47	100	7,135.07	2.0이상	28.15	26.01
	금강	규암	52+100	12,930	12.34	100	8,327.58	2.0이상	16.43	16.46
	금강	진두	71+100	12,450	16.76	100	7,811.81	2.0이상	19.16	19.16
	금강	부강	112+350	7,940	25.97	100	5,004.60	1.5이상	27.47	27.47
섬진강	금강	매포	120+700	7,940	29.00	100	4,939.57	1.5이상	38.72	38.81
	섬진강	송정	81	12,137	25.52	100	4,278.60	2.0이상	25.77	20.96
	섬진강	압록	126	7,372	40.83	100	2,482.70	1.5이상	39.05	47.86
	섬진강	구례	110	11,656	33.04	100	3,805.40	2.0이상	29.44	36.78
영산강	섬진강	하동	31	11,894	10.33	100	4,604.70	2.0이상	7.45	5.44
	황룡강	선암	0	1,970	15.14	200	563.30	1.0이상	18.63	18.63
	지석천	남평	17+15	3,120	17.15	200	567.20	1.2이상	20.03	20.06
	영산강	나주	130+350	7,190	11.31	200	2,054.70	1.5이상	15.61	15.61
영산강	영산강	마륵	160+440	2,710	14.10	200	682.20	1.2이상	18.36	18.42

점으로 선정하였고, 대상지점의 계획홍수위 수문곡선은 하천 기본계획에서 계획홍수량 산정시 사용하였던 홍수수문곡선을 이용하였다. 여유고는 계획홍수량을 안전하게 소통시키기 위해서 하천에서 발생할 수 있는 여러 가지 불확실한 요소들에 대한 안전값으로 주어지는 여분의 제방높이를 말하고, 계획홍수량별 여유고는 「하천설계기준·해설(Ministry of Construction and Transportation, 2009)」에서 규정하고 있으며 실제 여유고는 하천과 제방의 중요도, 제내지 상황, 주변접속도로, 사회 및 경제적 여건 등을 고려하여 결정하도록 하고 있다. Table 1에 대상지점의 현황, 계획홍수량, 시설제방고 및 여유고를 나타내었다.

3.2 과거 대표 홍수사상 추출

앞서 밝힌 바와 같이 본 연구는 과거 홍수자료가 비교적 잘 구축되어 있는 5대강 권역에 위치한 수위관측소를 대상지점으로 하고 있으며 이 지점의 수위수문자료를 사용하여, 과거 대표 홍수사상을 추출하였다. 본 연구는 대상지점의 1976년부터 2011년까지의 수위시계열에서 「수문조사연보(Ministry of Construction and Transportation)」에 홍수사상으로 기록된 홍수사상을 우선 추출하고, 홍수사상의 개수가 부족한 지점의 경우에는 고수위를 기록한 수문사상을 추가로 추출하였다. 하나의 홍수사상에서 평수위를 기준으로 홍수시점과 종점을 결정하였다. 한강 수계 53개, 낙동강 수계 127개, 금강

수계 43개, 섬진강 수계 39개, 영산강 수계 40개 홍수사상을 추출하였다. Table 2~Table 6에 본 연구에서 사용한 각 권역별 홍수사상을 나타내었다.

Table 3. Flood events in Nakdong river

연도	기간	홍수원인	해당지점
1987	7.13 - 7.18	태풍 SELMA	왜관, 삼랑진, 구포, 동촌, 정암, 지보, 사벌
	8.28 - 8.31	태풍 DINA	왜관, 삼랑진, 구포, 동촌, 정암, 월포, 지보, 사벌
1988	7.08 - 7.19	집중호우	왜관, 구포, 월포, 지보, 사벌
1989	7.25 - 8.03	집중호우, 태풍 JUDY	왜관, 삼랑진, 구포, 동촌, 월포, 지보, 사벌
1995	7.23 - 7.25	태풍 FAYE	구포, 정암
	8.19 - 9.05	태풍 JANIS, 집중호우	낙동, 왜관, 삼랑진, 동촌, 월포, 지보, 사벌
1998	7.31 - 8.21	집중호우	낙동, 왜관, 삼랑진, 구포, 동촌, 정암, 월포, 지보
2002	8.30 - 9.10	태풍 LUSA	낙동, 왜관, 삼랑진, 동촌, 정암, 월포, 지보, 사벌
2003	9.12 - 7.17	태풍 MEMI	낙동, 왜관, 삼랑진, 동촌, 정암, 월포, 지보, 사벌
2004	6.21 - 6.22	집중호우	낙동, 정암, 월포, 사벌
	8.19 - 8.20	태풍 MEGI	낙동, 동촌, 정암, 지보
2005	8.07 - 8.13	집중호우	정암, 지보
2006	7.10 - 7.22	태풍 EWINIAR	왜관, 삼랑진, 정암, 월포, 낙동, 지보, 사벌, 구포
2007	9.14 - 9.20	태풍 NARI	삼랑진, 동촌, 정암, 지보, 구포
2008	8.14 - 8.19	집중호우	동촌, 정암, 월포
2009	7.14 - 7.19	집중호우	동촌, 정암, 지보
2010	8.20 - 8.20	집중호우	동촌, 정암
2011	6.29 - 7.15	집중호우	동촌, 정암, 월포, 지보, 구포

Table 2. Flood events in Han river

연도	기간	홍수원인	해당지점
1976	8.13 - 8.18	태풍 DOT	한강대교
1980	7.21 - 7.27	집중호우	광장
1981	7.02 - 7.08	집중호우	광장
1984	8.31 - 9.07	집중호우	간현, 광장, 한강대교
1987	7.21 - 8.06	집중호우	간현, 경안, 방림교
1988	7.08 - 7.12	집중호우	경안
1989	7.25 - 8.05	집중호우	청미
1990	9.06 - 9.17	집중호우	경안, 여주, 청미, 한강대교
1995	8.23 - 9.03	태풍 JANIS	행주대교, 한강대교
1996	7.25 - 8.01	집중호우	행주대교
1998	8.03 - 8.20	집중호우	행주대교
2002	8.30 - 9.05	태풍 RUSA	경안, 여주
2003	9.12 - 9.14	태풍 MAEMI	여주
2004	7.02 - 7.23	태풍 MAEGI	간현, 여주, 청미
2005	6.25 - 7.20	집중호우	간현, 청미
2006	7.16 - 7.19	태풍 EWINIAR	간현, 여주, 청미, 한강대교
2007	8.03 - 8.15	태풍 NARI	간현, 여주, 청미, 방림교
2008	7.22 - 7.31	집중호우	간현, 방림교, 청미
2009	7.08 - 7.23	집중호우	간현, 경안, 방림교, 여주, 청미
2010	9.19 - 9.23	집중호우	간현, 경안, 청미
2011	6.23 - 7.06	집중호우	간현, 경안, 광장, 청미

Table 4. Flood events in Geum river

연도	기간	홍수원인	해당지점
1976	8.05 - 8.18	집중호우	마어구
1978	8.17 - 8.24	태풍 CARMEN	부강
1979	8.05 - 8.11	태풍 IRVING	부강
	9.17 - 9.24	집중호우	마어구
1980	7.19 - 8.01	태풍 IDA	마어구, 부강
1985	9.14 - 9.24	집중호우	마어구
1987	7.22 - 7.29	집중호우	마어구, 부강
	8.29 - 9.07	태풍 DINA	마어구, 부강
1997	6.25 - 6.30	태풍 PETER	진두
	7.01 - 7.12	집중호우	규암, 매포, 진두
	8.03 - 8.10	태풍 TINA	규암, 매포, 진두
2000	8.24 - 9.01	태풍 PRAPIROON	규암, 매포
2002	8.31 - 9.07	태풍 LUSA	규암, 매포, 진두
2003	9.11 - 9.15	태풍 MEMI	마어구, 규암, 매포, 진두

Table 5. Flood events in Seomjin river

연도	기간	홍수원인	해당지점
1984	7.06 - 7.13	태풍 ALEX	압록
	9.02 - 9.06	태풍 JUNE	압록
1985	8.10 - 8.13	태풍 KIT	압록
	8.14 - 8.20	태풍 LEE	압록
	9.02 - 9.22	집중호우	압록
1986	6.24 - 6.28	태풍 NANCY	압록
1987	7.23 - 7.28	집중호우	압록
	8.05 - 8.10	집중호우	압록
	8.16 - 8.20	집중호우	압록
	8.21 - 8.25	집중호우	압록
	8.28 - 9.03	태풍 디나	압록
1991	7.09 - 7.19	집중호우	송정, 압록, 하동
1993	7.30 - 8.05	태풍 CAITLIN	하동, 송정
	7.12 - 7.15	집중호우	송정
1997	8.23 - 8.30	집중호우	송정
	7.06 - 7.10	집중호우	송정
	7.16 - 7.20	집중호우	구례
1998	8.04 - 8.08	태풍 TINA	구례
	8.13 - 8.22	집중호우	구례
2000	9.30 - 10.03	태풍 YANNI	구례
	7.10 - 7.13	태풍 KAI-TAK	송정
	7.14 - 7.19	집중호우	송정, 구례
	8.04 - 8.09	집중호우	송정
	8.24 - 8.30	집중호우	송정, 구례
2001	9.13 - 9.18	태풍 SAOMAI	구례
	6.24 - 6.30	태풍 CHEBI	송정
2002	7.12 - 7.18	집중호우	송정
2003	8.30 - 9.03	태풍 루사	하동, 구례
2004	9.12 - 11.14	태풍 매미	구례, 하동
2005	8.18 - 8.19	태풍 MEGI	구례
2007	9.15 - 9.16	태풍 NARI	송정
2010	8.11 - 8.19	집중호우	구례, 송정

Table 6. Flood events in Yeongsan river

연도	기간	홍수원인	해당지점
1985	9.18 - 9.22	집중호우	마륵
1986	6.24 - 6.27	태풍 NANCY	마륵
1987	7.11 - 7.17	태풍 SELMA	마륵
1996	7.01 - 7.07	집중호우	나주
1997	5.29 - 6.01	집중호우	마륵
1999	6.03 - 6.04	집중호우	마륵
	8.02 - 8.07	태풍 OLGA	나주
	9.22 - 9.28	태풍 BART	나주, 마륵
2000	7.14 - 7.19	집중호우	나주
	8.24 - 8.29	집중호우	마륵
2004	8.18 - 8.19	태풍 MEGI	나주, 마륵
2009	7.07 - 7.17	집중호우	나주
2010	7.09 - 7.14	집중호우	마륵
	8.11 - 8.19	집중호우	마륵

4. 합성홍수파형 작성

제방의 비정상 침투해석을 위한 설계홍수파형은 홍수지속 시간과 감수부 경사로 결정할 수 있다. 하천설계기준 등에서는 하천제방 침투류 계산시 비정상 포화해석을 하여야 한다고 제시하고 있으나(Ministry of Construction and Transportation, 2009), 비정상 침투해석의 외력으로 적용될 하천수위 파형의 결정 방법에 대해서는 그 기준을 제시하고 있지 않다. 본 연구에서는 계획홍수량 산정시 사용된 수문곡선을 기본으로 과거 홍수자료를 추가하여 설계홍수파형을 작성하였다. 일본 하천제방설계지침(Ministry of Construction, 2000)에서 제시하고 있는 침투류 해석을 위한 홍수파형 결정방법은 계획홍수량 산정시 이용했던 계획홍수파형만을 사용하는 것으로 되어 있다. 이 경우, 과거 홍수사상에 의한 홍수지속시간이 반영되지 않아 안정성 측면에서 계획홍수파형과 과거 홍수를 모두 고려한 본 연구의 방법이 더 타당할 것으로 판단된다.

본 연구에서 합성홍수파형을 작성한 과정을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 특정 하천에서 발생한 과거 홍수파형들을 나타낸 것이다. 이 과거 홍수사상들로부터 평수위를 기준으로 각각의 홍수파형마다 지속시간을 구할 수 있다. 이 지속시간과 홍수파형들의 침두수위를 이용하여 Fig. 1(b)와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 1(c)와 같이 평수위와 지속시간에 따른 포락선을 그린 후 포락선으로 둘러싸인 면적을 구한다. 여기에서 제방고 높이가 되지 않을 경우 침두수위의 지속시간이 1시간이 되도록 포락선을 설정한다. 포락선이 제방고 높이에 도달하지 않는 경우는 과거 홍수사상의 침두수위가 계획홍수위보다 낮기 때문에 발생하며, 침투해석을 위해서는 계획홍수위에 해당하는 포락선이 필요하므로 계획홍수위에 도달하도록 포락선을 연장해 주어야 한다. 계획홍수위에서 지속시간이 1시간이 되도록 설정하는 하는 이유는 수문곡선에서 침두수위에 인접한 상승 및 하강 경사가 더 급하게 나타나는 현상을 반영하기 위해 최소한의 침두지속시간을 설정해줌으로써 안정적인 설계가 되도록 하는 효과가 있다. Fig. 1(b)의 홍수파형 중에서 홍수 말기의 감수부 경사(수위저하 속도)가 가장 가파른 것을 찾아서 그 경사를 구하고 Fig. 1(d)에 나타낸 것처럼 Fig. 1(c)와 같은 면적이 되도록 증수부 경사 및 지속시간을 결정하여 합성홍수파형을 결정한다.

5. 결과 분석

홍수파형 합성 절차에 따라 5대강 권역, 30개 지점에 대해서 합성홍수파를 작성하고, 홍수지속시간과 홍수파의 감수부 경사를 산정하였다. Fig. 2는 본 연구의 대상지점 30개 중 한강대교 지점의 합성홍수파형 작성 과정을 나타낸 것이다. 본 연구에서 합성한 대상지점의 합성홍수파형 홍수지속시간, 홍수파의 감수부 경사 및 합성홍수파형 면적 등을 Table 7에 나타내었다.

홍수파의 지속시간과 감수부 경사는 설계홍수파형을 결정하는데 있어서 가장 중요한 인자이며, 본 연구에서 작성한

(a) design flood-hydrograph and flood events (b) duration in accordance with water level

(c) area of composed flood-hydrograph (d) estimation of falling limb's slope

Fig. 1. The procedure to compose the flood-hydrograph

Fig. 2. The procedures to compose the flood-hydrograph of Hangangdaegyo station

Table 7. Composed flood-hydrographs

권역명	하천명	지점	평수위 (EL.m)	침두수위 (EL.m)	침두지속시간 (hr)	감수부 경사	홍수지속시간 (hr)	합성홍수파 면적 (시간×수위)
한강	섬강	간현	61.0	67.6	1	-0.0806	349.73	1152.35
	경안천	경안	35.0	42.5	1	-0.1600	103.52	388.71
	한강	광장	6.5	19.0	13	-0.0936	182.81	1142.55
	평창강	방림교	361.0	366.8	1	-0.1361	72.38	208.47
	남한강	여주	35.0	47.5	2	-0.0892	282.89	1765.24
	청미천	청미	52.0	61.1	1	-0.0954	85.00	386.75
	한강	행주대교	3.0	15.5	9	-0.0771	574.40	3589.97
	한강	한강대교	4.0	18.0	1	-0.1032	185.93	1301.50
낙동강	금호강	동촌	26.0	37.1	1	-0.1875	786.00	4378.02
	남강	정암	8.0	18.4	12	-0.0871	259.78	1350.86
	내성천	월포	80.0	83.8	1	-0.0818	148.31	279.57
	낙동강	낙동	35.5	46.7	1	-0.0942	325.46	1824.19
	낙동강	지보	56.0	64.2	1	-0.0825	617.20	2527.45
	낙동강	사벌	46.0	51.9	147	-0.0794	756.53	4311.33
	낙동강	왜관	20.0	30.8	1	-0.0659	757.12	7868.43
	낙동강	삼랑진	1.0	11.6	1	-0.1050	433.60	2289.40
	낙동강	구포	0.5	8.5	1	-0.0730	146.02	585.56
금강	금강	마어구	12.0	26.0	1	-0.0689	334.67	2346.04
	금강	규암	4.0	16.4	1	-0.1245	283.42	1761.44
	금강	진두	5.5	19.2	1	-0.1631	571.91	3906.16
	금강	부강	19.0	27.5	1	-0.1306	378.46	1602.77
	금강	매포	21.5	36.8	1	-0.1347	817.57	6258.53
섬진강	섬진강	송정	11.0	25.8	1	-0.2486	602.66	8881.63
	섬진강	압록	30.0	47.9	1	-0.1774	164.64	1470.26
	섬진강	구례	24.0	36.8	1	-0.2091	380.50	2431.38
	섬진강	하동	3.0	7.3	17	-0.1684	42.00	90.72
영산강	황룡강	선암	14.5	18.6	1	-0.0779	195.7	404.12
	지석천	남평	13.5	20.0	1	-0.1131	58.38	190.60
	영산강	니주	2.5	15.6	1	-0.1183	266.20	1744.97
	영산강	마륵	11.5	18.4	1	-0.1062	120.47	413.21

합성홍수파의 지속시간과 감수부 경사를 계획홍수량 산정에 사용된 계획홍수수문곡선과 비교한 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3에 보인 바와 같이 5개 권역의 대부분 지점에서 계획홍수파의 지속시간보다 합성홍수파의 지속시간이 긴 것으로 나타났다. 실무에서 계획홍수량을 결정하는데 사용하는 강우-유출모형은 특정 지속시간의 강우량만을 홍수량으로 산정하지만, 실제 강우는 여러 강우사상이 중첩되어 나타나거나, 그 시간분포가 매우 불규칙적이므로 실제 홍수사상을 반영한 합성홍수파의 지속시간이 더 길게 산정된 것으로 판단된다.

Fig. 4는 계획홍수파와 합성홍수파의 감수부 경사를 비교한 것이다. 대부분의 지점에서 합성홍수파와 계획홍수파의 감수부 경사가 일치하는 것으로 나타났다. 하지만, 한강 권역의 경우, 대상지점 중 한강 상류에 위치한 섬강의 간현, 평창강의 방림교, 청미천의 청미지점은 계획홍수파에 비해 합성홍수파의 감수부가 더 급경사를 이루는 것으로 나타났다. 이는

하도 경사가 비교적 가파른 상류지역에서 계획홍수파형이 실제 홍수사상의 감수부 경사를 충분히 반영하지 못한 결과로 판단된다. 낙동강 권역의 동촌, 지보지점은 계획홍수파의 감수부 경사가 더 급하게 나타났다. 본 연구에서 사용한 합성홍수파 작성법은 과거 홍수사상의 감수부 경사와 계획홍수파의 감수부 경사 중 더 급한 것을 채택하여 작성하므로, 한강 상류 지역은 합성홍수파의 감수부 경사를 사용하고 낙동강 권역의 동촌, 지보지점은 계획홍수파형의 감수부 경사를 사용하는 것이 안전측 설계로 판단된다.

Fig. 5는 합성홍수파와 계획홍수파의 지속시간과 유역면적의 관계를 도시한 것이다. 대부분의 대상지점에서 유역면적이 넓어짐에 따라 홍수파의 지속시간이 길어지는 것으로 나타났으나, 계획홍수파는 합성홍수파에 비해 유역면적과 홍수지속시간의 상관관계가 낮은 것으로 나타났다. 이는 유역면적이 넓어질수록 홍수지속시간이 길어지는 실제 홍수사상의 특성이 합성홍수파의 작성과정에서 반영되었기 때문이다.

(a) Han river

(b) Nakdong river

(c) Geum river

(d) Seomjin river

(e) Yeongsan river

Fig. 3. Comparison between durations of design flood-hydrograph and composed flood-hydrograph

(a) Han river

(b) Nakdong river

Fig. 4. Comparison between falling limb's slopes of design flood-hydrograph and composed flood-hydrograph

(c) Geum river

(d) Seomjin river

(e) Yeongsan river

Fig. 4. Continued

(a) Han river

(b) Nakdong river

(c) Geum river

(d) Seomjin river

Fig. 5. Relation between flood duration and basin area

(e) Yeongsan river

Fig. 5. Continued

(a) Han river

(b) Nakdong river

(c) Geum river

(d) Seomjin river

(e) Yeongsan river

Fig. 6. Relation between falling limb's slope and basin area

Fig. 6은 합성홍수파와 계획홍수파의 감수부 경사와 유역면적의 관계를 나타낸 것이다. 유역면적이 커질수록 감수부 경사가 완만해지는 것을 알 수 있으며, 영산강은 Table 1에 나타난 바와 같이 다른 권역에 비해 유역면적이 다소 작은 편에 속해 감수부 경사와의 상관관계가 약하게 나타난 것으로 판단된다. 또한 계획홍수파의 감수부 경사가 합성홍수파의 감수부 경사보다는 다소 급한 것으로 나타났다.

6. 결론 및 고찰

본 연구는 일본 하천제방설계지침(Ministry of Construction, 2000)에서 제시하고 있는 침투해석을 위한 기본홍수파 산정 방법을 보완하여, 우리나라 한강 권역, 낙동강 권역, 금강 권역, 섬진강 권역, 영산강 권역의 30개 지점에 적용하였다. 대상지점의 1976년 이후 수위 시계열에서 「수문조사연보(Ministry of Construction and Transportation)」에 홍수사상으로 기록된 홍수사상과 이와 비슷한 수위를 기록한 홍수사상을 추가로 추출하였으며, 총 302개 홍수사상을 사용하였다. 계획홍수 수문곡선은 계획홍수량 산정시 사용된 홍수 수문곡선을 이용하여 합성홍수파를 작성하였다.

제방의 비정상 침투해석을 위한 설계홍수파형은 홍수지속 시간과 홍수말기의 감수부 경사로 결정할 수 있다. 본 연구에서 작성한 합성홍수파의 홍수지속시간이 계획홍수파의 홍수지속시간보다 크게 산정되었으며, 이는 설계시 계획홍수파의 지속시간에 안전율을 적용하여 침투해석을 수행해야 함을 의미한다. 감수부 경사는 유역면적이 넓어질수록 완만해지는 경향을 보이긴 하였지만, 지속시간처럼 뚜렷한 상관관계는 보이지 않았다. 실제홍수사상을 반영한 합성홍수파에 비해 계획홍수파의 감수부 경사가 가파르게 나타나는 것을 확인하였으며, 계획홍수량을 산정할 때 사용된 계획수문곡선을 침투해석에 사용하는 것이 안전측 설계가 될 것으로 판단된다. 본 연구에서는 합성홍수파의 침투값이 제방고에 미치지 못하면 평수위와 포락선의 넓이는 그대로 유지하고 침투값만 제방고까지 연장하는 방법을 사용했으므로 이 경우 홍수지속시간이 다소 짧아지게 된다.

본 연구는 5대강 권역의 대상지점에 대해 비정상 침투해석을 위한 설계홍수파를 산정하여 유역면적과 홍수파의 지속 시간, 감수부 경사의 비교를 통해 그 방법론의 타당성을 확인하였다. 본 연구에서 작성한 합성홍수파형은 향후 대상지점의 위치를 유역의 상류·하류로 구분하여 이에 따른 홍수 지속시간 및 감수부 경사의 적용성에 관한 연구가 필요하며 실제 하천제방에 대한 침투류 해석을 통해 본 연구에서 제안한 방법론의 적용성에 대한 연구 역시 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(하천시설물 설계 기법 및 수치모형 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Department of Water Resources, State of California (2012) Urban levee design criteria.
- Fredlund, M., Lu, H. and Fend, T. (2011) Combined seepage and slope stability analysis of rapid drawdown scenarios for levee design, *Geo-Frontiers* 2011, ASCE 2011.
- Im, D., Yeo, H., Kim, K.H. and Kang, J. (2006) Suitability Analysis of Numerical Models Related to Seepage through a Levee, *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 39, No. 3, pp. 241-252.
- Jain, S.K. Singh, R.D. and Seth, S.M. (2000) Design flood estimation using GIS supported GIUH approach, *Water Resources Management*, Kluwer academic publishers, Vol 14, pp. 369-376.
- Kim, J.M., Choi, B.H., Oh, S.Y. and Kim, K.M. (2006) Numerical Studies for the Safety Estimation of Box-Culvert in Levee, *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 39, No. 6, pp. 479-486.
- Kim, K.H. (2006) Analysis of reinforcement techniques for levee seepage, *Urban Flood Disaster Management Research Center*.
- Lee, S.J., Yoon, K.S. and Kim, K.H. (2002) Comparison of Safety Evaluation Techniques for Levees, *The Korean Society of Civil Engineering Conference 2002*, *Korean Society of Civil Engineering*, pp. 612-615.
- Ministry of Construction (2000) Design guidelines for river levees, Ministry of Construction.
- Ministry of Construction and Transportation (1986) Pyeongchang river general plan report, Ministry of Construction and Transportation.
- Ministry of Construction and Transportation (1988) Geum river general plan report, Ministry of Construction and Transportation.
- Ministry of Construction and Transportation (1989) Seomjin river general plan, Ministry of Construction and Transportation.
- Ministry of Construction and Transportation (1992) Nam river general plan report, Ministry of Construction and Transportation.
- Ministry of Construction and Transportation (1993) Nakdong river general plan report, Ministry of Construction and Transportation.
- Ministry of Construction and Transportation (1994) Cheongmi river general plan report, Ministry of Construction and Transportation.
- Ministry of Construction and Transportation (1997) Geumho river general plan report, Ministry of Construction and Transportation.
- Ministry of Construction and Transportation (1998) Gyeongan river general plan report, Ministry of Construction and Transportation.
- Ministry of Construction and Transportation (1998) Yeongsan river general plan report, Ministry of Construction and Transportation.
- Ministry of Construction and Transportation (2001) Naeseong river general plan report, Ministry of Construction and Transportation.
- Ministry of Construction and Transportation (2002) Bukhan river general plan report, Ministry of Construction and Transportation.
- Ministry of Construction and Transportation (2002) Han river general plan report, Ministry of Construction and Transportation.
- Ministry of Construction and Transportation (2004) Development of advanced technologies for levees, Ministry of Construction and Transportation.
- Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (2009) Han

- river general plan report, Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs.
- Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (2009) River design criteria, Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs.
- Shahrokhbadi, S.h. and Toufigh, M.M. (2012) The solution of unconfined seepage problem using natural element method (NEM) coupled with genetic algorithm (GA), Applied mathematical modeling, published online.
- USACE (2009) Guidelines for landscape planting and vegetation management at levees, floodwalls, embankment dams, and appurtenant structures, USACE.
- USACE (2010) USACE process for the national flood insurance program (NFIP) levee system evaluation, USACE.
- Yoon, K.S. and Yeo, K.D. (2004) Design Flood Wave for Seepage Analyses through Levees, *The Korea Water Resources Association Conference 2004*, Korea Water Resources Association, pp. 5011-5016.
- Yoon, K.S., Lee, S.J. and Kim, K.H. (2002) Improvement in Levee Design Technologies for Reduction of Flood Damage, *The Korean Society of Civil Engineering Conference 2002*, Korean Society of Civil Engineering, pp. 616-619.

◎ 논문접수일 : 2012년 10월 04일

◎ 심사의뢰일 : 2012년 10월 10일

◎ 심사완료일 : 2012년 10월 29일