

하천제방의 침투해석을 위한 무차원 설계홍수파형에 관한 연구

Study of Design Flood Hydrograph for Seepage Analyses through Levees

전세진*, 권경준**, 안원식***

Se Jin Jeon, Kyung jun Kwon, Won Sik Ahn

요 지

제방을 설계하거나 기존제방의 안정성검토를 위해서는 제방의 침투해석이 필요하며, 외국에서와 같이 대규모하천이 대부분인 곳에서는 댐에서와 같이 정상침투해석을 하고 있으나 우리나라와 일본하천의 경우는 홍수지속시간이 짧아 설계홍수파형을 정상상태로 해석할 경우에는 과대한 외력을 주게되므로 시간에 따른 수위변화를 고려한 비정상 침투해석을 하여야한다. 이 경우 하천수위에 대한 홍수파형이 필요하나 국내에서는 명확한 기준이 없어 설계시 어려움이 많았다.

본 연구에서는 부정류 침투해석에 사용되는 설계홍수파형을 유도하기 위하여 수위자료가 양호한 낙동강 수계 진동 등 5개 수위관측지점의 과거 주요홍수에 대해 지속시간별 홍수위를 조사하여 무차원화시킨 후 통계적·확률적 처리를 통하여 설계홍수파형을 작성하였다. 작성된 홍수파형의 적정성은 과거 발생한 원홍수사상과 금회 유도한 설계홍수파형을 이용하여 침투해석을 시행하고 적정성을 분석하였다. 동수경사법과 한계유속법에서 오차는 각각 진동 0~1.0%, 0.9~1.1%, 현풍 1.6~4.0%, 1.7~4.1%, 왜관 0.6~3.6%, 0.6~3.7%, 낙동 2.0~8.1%, 2.0~8.1%, 정암 1.2~9.8, 1.3~9.9%로 나타났다. 상관성(R^2)은 동수경사 0.983~0.999, 한계유속 0.983~0.999 정도로 매우 상관성이 높게 나타나 실무에 적용이 가능한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 동수경사, 설계홍수파형, 침투해석, 한계유속

1. 서론

최근 우리나라에서 하천제방 침투해석은 2차원에 의한 부정류 침투해석이 이루어지고 있다. 이 경우 외력조건으로 외수위에 대한 하천의 홍수파형이 필요하나 국내에서는 하천홍수에 대한 홍수위, 지속시간 등 수위분포에 대한 명확한 기준이 없어 설계시 어려움이 많았다.

일본 “하천제방설계지침(2000)”등에서는 비정상침투에 의한 부정류 해석을 위한 설계홍수파형작성방법을 제시하고 있으나, 국내에서는 인근 주요수위표 지점의 과거 발생한 최대규모의 홍수사상을 해석하고자 하는 지점의 계획홍수위와 홍수지속시간에 맞추어 적절히 재현하여 적용하고 있다. 윤광석, 여규동(2004)은 계획홍수량에 대한 여러 개의 계획홍수 수문곡선에다 과거홍수사상을 추가하여 합성홍수파형 결정 방법을 제시하였고, 하천제방설계기술(침투)(2004, 김규호)에 이용된바 있다.

* 정회원 · 수원대학교 토목공학과 박사수료 · E-mail : jsj324@dohwa.co.kr
** 정회원 · 수원대학교 토목공학과 박사수료 · E-mail : kkj3311@hanmail.net
*** 정회원 · 수원대학교 토목공학과 교수 · E-mail : wsan@suwon.ac.kr

본 연구에서는 하천제방 침투해석시 사용되는 설계홍수과형을 주요수위관측소 지점에 대한 설계홍수량과 과거홍수사상의 수위곡선을 분석하고 국내외적으로 연구되어온 설계강우의 시간분포방법의 하나인 무차원분포 해석방법을 이용하여 무차원설계홍수과형을 유도하였고, 과거 발생한 원홍수사상과 금회 유도한 설계홍수과형에 대해 2차원침투해석 프로그램인 Seep/w를 이용하여 상관성 분석을 실시하고 적정성을 검토하였다.

2. 제방침투해석의 이론적 배경

과거 국내 실무에서 제체 침투해석은 Mononobe(物部)식을 이용하여 제체 침윤선이 제체 하부에 위치하도록 하는 방법을 많이 사용하였으며, 지반누수는 한계동수경사, 한계유속, 크리프비 등에 의한 판정에 의해 안정성을 검토하여 왔다.

최근에는 흙 속을 흐르는 물의 흐름(침투)은 속도와 동수경사가 흙을 통과하는 동안 변하는 특성을 가지며, 이와 같은 흐름에 관한 문제는 2차원 흐름인 경우 일반적으로 유선망을 사용하는 도해법으로 구하거나 수치해석법(유한 요소법 등)을 도입하여 편미분 방정식의 해를 구하고 있다.

2차원 흐름에 대한 기본원리는 지중의 한 요소에 유입되는 유량 (q_{in}) 과 유출되는 유량 (q_{out})을 산정하여 연속성의 법칙에 의해서 양이 같다는 개념에서 시작되며 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 있게 된다.

3. 설계홍수과형 유도

홍수과형의 형태 중 하천제방 침투해석에서 영향을 주는 조건은 시간별 홍수위 높이, 최고수위, 홍수지속시간의 길이, 홍수과형의 면적(기준수위로부터 정점수위까지의 수위와 지속시간과의 면적), 홍수초기의 상승부곡선경사, 홍수말기의 감수부 곡선경사 등이며, 수위가 시간적으로 어떤 모형을 갖고 있는지가 필요하다.

3.1 수위 자료 추출

설계홍수과형을 개발하기 위하여 주요홍수에 대해 과거 신뢰성 있는 자료를 많이 보유하고 있는 낙동강 유역의 진동, 현풍, 왜관, 낙동, 정암 등 5개소의 수위관측소 지점을 선정하였다. 1984년 ~2007년 발생한 주위보수위 이상 발생한 수위사상을 시간대별로 모두 추출하였다. 주위보수위는 유량조사보고서(2008)에서 산정한 수치를 사용하였다.

자료 추출 기간내 발생한 주의보수위 이상에 해당하는 수위는 진동, 현풍, 왜관, 낙동, 정암이 각각 21개, 13개, 22개, 14개, 15개로서 전체적으로 총 1,032개 홍수사상의 8.2%인 85개를 선정하였다. 하나의 홍수사상에서 홍수시점과 종점은 평수위를 기준으로 하였다.

하나의 수위사상에서 평수위 보다 높은 수위가 평수위를 약간 상회한 상태에서 오래 동안 지속되거나 다시 상승하여 여러 개의 홍수파형으로 나타나는 경우에는 감수곡선의 경사가 급격이 변화하는 곳에서 동일경사로 연장 보정하였다.

한 홍수사상에서 2개 이상의 첨두를 갖는 홍수사상이 진동 33.33%, 낙동 42.86%, 정암 60%로 나타났다. 다봉형 첨두홍수위는 단일형에 비해 복잡한 침투양상을 나타내고 홍수지속시간을 연장하는 등 제방침투에 악영향을 미친다. 첨두홍수가 발생하는 위치는 1/4구간 76.5%, 2/4구간 21.2%, 3/4구간 2.3%, 4/4구간에서는 발생되지 않았다.

일본의 경우 홍수말기 하강부경사가 최대인 것을 찾아서 하강부 경사로 설정하고 홍수위-지속시간으로 작성된 사다리꼴 면적이 되도록 상승부 곡선경사 및 지속시간을 결정하고 있어 대부분 첨두가 중앙부나 후방에 위치하나 낙동강 유역의 홍수파형은 상승부 홍수지속시간이 하강부보다 짧은 전방형이고, 첨두가 1/4구간에 가장 많이 발생하였고, 지속시간은 평균 236시간~400시간으로 나타났다.

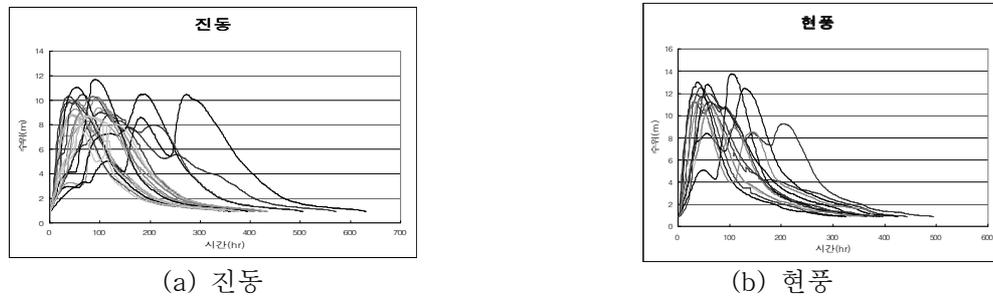


그림 1. 원홍수파형

3.2 홍수파형 작성

본 연구에서는 홍수위의 누가곡선을 이용하여, 홍수위를 시간적으로 무차원화시키기 위하여 개개 홍수위의 누가지속기간과 이에 따른 누가홍수위를 각각 백분율로 표시하였다. 산정한 무차원시간분포방법은 실제 홍수사상과 근접된 첨두홍수위가 나타날 수 있도록 다음과 같은 연구를 수행하였다.

구축된 각 홍수사상을 이용하여 무차원 누가곡선을 그린다. 이때 확률별 누가분포곡선은 Weibull도시공식을 이용하여 10%~90%곡선을 10%간격으로 도시하고, 도시된 분포곡선 중 50%곡선을 채택하였다. 수위관측소별 홍수지속시간은 관측소 전체 홍수사상의 평균지속시간을 적용하였다.

표 1. 관측소별 6차원 회귀계수

관측소명	6차원 회귀계수						
	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
진동	0.018468610	-0.495690073	0.212320266	-0.006220571	0.000078546	-0.000000469	0.000000001
현풍	0.022445127	-0.840737590	0.278274915	-0.009455840	0.000143118	-0.000001040	0.000000003
왜관	-0.054912479	0.111468482	0.158600714	-0.004903006	0.000066284	-0.000000436	0.000000001
낙동	-0.323899895	0.328290811	0.234802245	-0.009499524	0.000161982	-0.000001292	0.000000004
정암	-0.122414717	-0.211660424	0.006270743	-0.003688002	0.000060519	-0.000000503	0.000000002

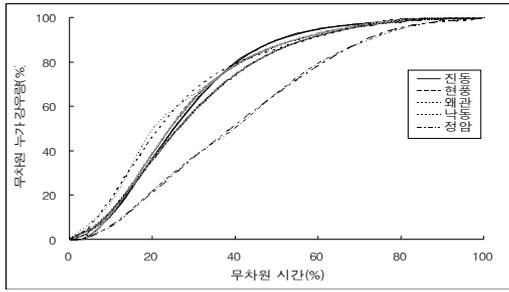


그림 2. 무차원시간 대 누가홍수위곡선

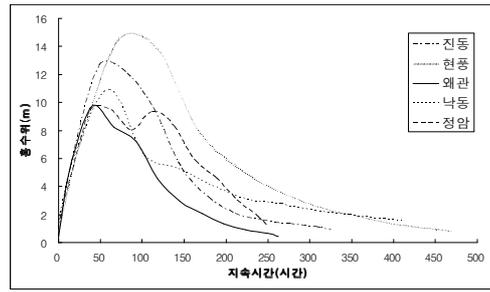


그림 3. 유도홍수파형

3.3 유도한 설계홍수파형의 검증

각 수위표 지점의 기왕홍수파형과 금회 유도한 설계홍수파형의 침투홍수위를 같게 하고, 홍수지속시간은 기왕홍수파형의 평균값을 취하고, Seep/W 프로그램을 이용한 2차원 침투해석을 실시한 후 동수경사 및 한계유속 결과에 대해 오차와 상관성분석을 비교 검토하였다.

침투해석을 위한 표준단면적은 독마루폭 7m, 비탈경사 제내외측 공히 1:3, 제방높이 낙동강 본류는 10m, 정암 9.2m, 여유고 2m로 가정하였다. 고수부지 폭과 높이는 각 20m, 1.81m~5.55m, 투수계수는 체체 $k_1 = 5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$, 기초지반 $k_2 = 5 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 로 가정하고, 이때 경계조건으로 홍수파의 시간간격은 1시간, 격자간격은 제방 높이의 1/10보다 작게 작성하였다.

상기 방법으로 침투해석을 시행하여 원홍수파형과 유도홍수파형에 대한 오차를 비교하였다. 동수경사법과 한계유속법은 각각 진동 0~1.0%, 0.9~1.1%, 현풍 1.6~4.0%, 1.7~4.1%, 왜관 0.6~3.6%, 0.6~3.7%, 낙동 2.0~8.1%, 2.0~8.1%, 정암 1.2~9.8, 1.3~9.9%로 나타났다. 낙동과 정암에서 비교적 오차가 큰 것은 홍수지속시간을 기왕홍수의 산술평균값을 사용하므로서 발생한 것으로 판단된다.

상관성(R^2)은 동수경사법에서는 0.983~0.999이고, 한계유속법에서는 0.983~0.999로 나타났으며, 자연하도에서 발생한 홍수사상에 대해 분석한 값인 점을 감안하면 상관성이 매우 높은 것으로 판단된다.

표 2. 침투해석 결과

하천명	관측 소명	동수경사				한계유속($1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$)			
		원홍수파형	유도홍수파형	차(%)	상관성 (R^2)	원홍수파형	유도홍수파형	차 (%)	상관성 (R^2)
낙동강	진동	2.555~4.648	2.552 ~4.680	0~1	0.999	1.278 ~2.340	1.276 ~2.340	0.9~1.1	0.999
낙동강	현풍	2.916 ~4.876	3.035 ~4.990	1.6~4.0	0.998	1.458 ~2.438	1.518 ~2.495	1.7~4.1	0.992
낙동강	왜관	2.943 ~5.119	2.986 ~5.164	0.6~3.6	0.998	1.471 ~2.560	1.493 ~2.582	0.6~3.7	0.998
낙동강	낙동	2.399 ~3.839	2.542 ~3.958	2.0~8.1	0.985	1.200 ~1.920	1.271 ~1.964	2.0~8.1	0.986
남 강	정암	2.549 ~4.215	2.800 ~4.408	1.2~9.8	0.983	1.274 ~2.107	1.400 ~2.204	1.3~9.9	0.983

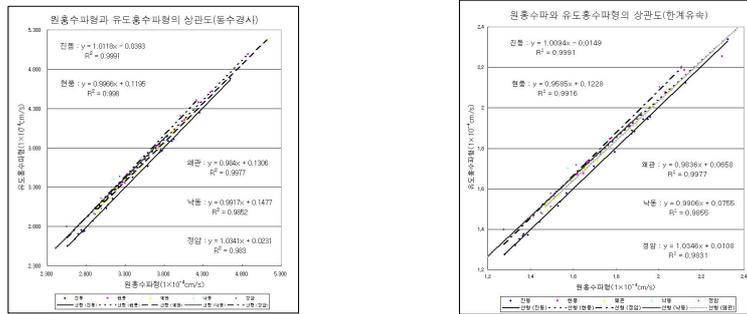


그림 4. 원홍수파형과 유도홍수파형의 상관도

4. 결론

진동 등 5개 수위관측지점의 과거 발생한 주요 홍수사상을 이용하여 홍수위와 지속시간별 홍수위 자료를 이용하여 설계홍수파형을 유도하였다. 적정성 검증은 과거 발생한 원홍수사상과 유도한 설계홍수파형을 이용하여 침투해석을 시행하고 오차를 비교하였다. 동수경사 및 한계유속법의 오차는 0~9.8%, 0.9~9.91%이고, 상관성(R^2)은 0.969~0.998, 0.969~0.998, 정도로 매우 상관성이 높게 나타났다.

본 연구에서 유도한 설계홍수파형 결정 방법은 앞으로 하천제방 설계 및 기존제방 안전성 검토시 많이 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(2004). 하천제방관련선진기술개발 최종보고서.
2. 국토해양부(2008). 2007년도 낙동강유량측정보고서(VI 낙동강유량측정).
3. 김규호(2004), 하천제방설계기술(침투)
4. 서동수, 전세진, 홍창선, 안원식(2006). 계획홍수량 산정을 위한 설계강우의 시간분포에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp1600 ~ 1603.
5. 윤광석, 여규동(2004), 하천제방의 침투해석을 위한 설계홍수파형 결정, 한국수자원학회정기학술대회 논문집, pp5011 ~ 5016.
6. 建設省(2000), 河川堤防設計指針.
7. 國土技術研究センター, 平成14年, 河川堤防の構造検討の手引き
8. Floyd A. Huff, 1967, Time Distribution of rainfall in heavy storms
9. Floyd A. Huff, 1990, Time Distribution of heavy rainstorms in Illinois
10. GEO-SLOPE international Ltd. Calgary, Alberta, Canada. User's Guide SEEP/W Version 5.1