

하천제방의 침투해석을 위한 설계홍수파형 결정

Design Flood Wave for Seepage Analyses through Levees

윤광석*, 여규동**

Kwang Seok Yoon, Kyu Dong Yeo

요 지

본 연구에서는 제방에 대한 부정류 침투해석시 사용되는 설계홍수파형을 결정하기 위하여 수위자료가 양호한 낙동강 수계 수위관측소 지점의 홍수자료를 수집하고 그 지점에 해당하는 계획홍수량 및 계획홍수위를 조사하였다. 설계홍수파형 결정 방법은 일본의 하천제방설계지침(2000)에서 제시하고 있는 방법을 참고하였으며, 그 적용성을 검토하기 위해서 낙동강의 9개 수위관측소 지점의 과거 홍수사상과 계획홍수량 산정시 사용되었던 설계수문곡선을 이용하여 합성홍수파형을 시험적으로 결정했다. 비교분석하여 침투해석을 위한 설계홍수파형을 결정 방법에 적용했다. 제방의 비정상 침투해석을 위한 설계홍수파형은 홍수지속시간과 감수부 경사로 결정할 수 있는데, 홍수지속시간은 합성홍수파의 홍수지속시간이 계획홍수파의 지속시간보다 크게 산정되었는데, 이는 설계시 계획홍수파의 지속시간에 어느 정도 안전율을 적용해야 함을 의미한다. 감수부 경사는 분석된 과거 홍수사상중에는 계획홍수파의 감수부 경사보다 급하게 감소하는 것은 거의 없는 것으로 나타났는데, 감수부 경사는 계획홍수량 산정시 사용했던 수문곡선을 사용하는 것이 안전측 설계가 될 것으로 판단된다. 본 연구는 최근 누수에 의한 제방붕괴가 발생한 바 있는 낙동강 유역에 대해서 시험적으로 적용해 보았으며 그 방법론에 대한 타당성을 확인했다.

핵심용어 : 하천제방, 침투해석, 제체누수, 지반누수, 설계홍수파형

1. 서 론

최근 홍수로 인한 제방붕괴 사례가 증가하고 있는데, 제체누수 및 지반누수에 의해서 제방이 붕괴되거나 피해를 입는 사례가 증가하고 있다. 2002년 8월 낙동강 홍수의 경우, 홍수가 14일 동안 지속되어 제방의 파이핑 및 누수에 의해서 제방피해가 발생하였다. 그러나, 실무에서는 제체 및 지반 침투에 대한 해석시 홍수 지속시간에 대한 명확한 기준이 없어 설계에 어려움이 많은 실정이다. 미국의 경우 침투해석시 하천 수위 상황에 따라 안전성을 검토하고 있으며, 일본의 경우에는 침투해석을 설계홍수파형을 결정하여 부정류 해석을 하도록 하고 있는데(河川堤防設計指針, 2000), 여러 개의 계획홍수 수문곡선으로 수위파형을 합성하여 기본수위파형을 결정하는 방법을 사용하고 있다. 국내 하천설계기준(2002)의 경우 한계동수 경사, 한계유속, 크리프비에 의한 판정에 의해 안전성 검토가 이루어지도록 규정하고 있다. 국내의 경우 침윤선 검토에 대한 일정기준이 없어 Mononobe 식이 가장 많이 이용되어 왔으며 최근 부정류 침투해석이 이루어지고 있다. 그러나, 부정류 침투해석을 위한 설계홍수파형의 결정방법이 명확히 제시되지 않아 홍수지속시간에 따라 과대설계나 과소설계 가능성이 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 제방에 대한 부정류 침투해석시 사용되는 설계홍수파형을 결정하기 위하여 우리나라의 수위관측소 지점에 대한 설계홍수량을 조사하고, 과거 홍수사상의 수문곡선을 분석하였다. 각 지점별로 과거 홍수사상의 홍수지속기간을 설계홍수량 산정시 사용되었던 설계수문곡선과 비교하여 침투해석을 위한 설계홍수파형을 결정하고자 한다.

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 · E-mail : ksyoon@kict.re.kr

** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : ykd@kict.re.kr

2. 국내·외 제방침투해석 방법 검토

일반적으로 하천제방은 흙과 돌로 구성되므로 침투거동이 구조물 안정에 큰 영향을 미친다. 제방의 누수는 외수위가 상승하여 제체 또는 지반을 통해 제내지측으로 침투수가 유출되는 현상을 말하고 제체를 침투해오는 제체누수와 지반을 침투해오는 지반누수가 있다. 침투류는 제체 및 기초지반의 누수 및 파이핑 등을 발생시키는 원인으로서 제방의 안정에 중요한 요소이다. 홍수시 하천과 제내지측 수두차에 의해 제내지측 비탈면을 통하여 누수가 발생하거나, 기초지반을 통해 제내지측으로 파이핑이 발생하는 경우 제방이 붕괴될 가능성이 매우 크기 때문이다. 침투거동은 제방 구성재료 자체

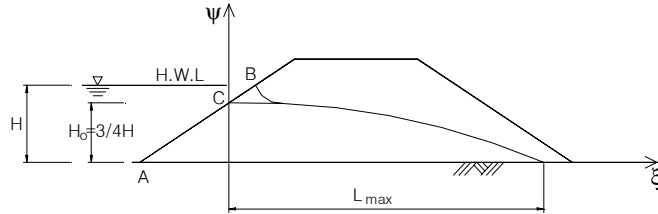


그림 2. Mononobe 방법에서의 홍수지속시간 결정

의 입도분포, 다짐정도, 균질성, 수면의 위치, 수위의 시간적 변화, 강우 등에 영향을 받게 된다. 누수에는 제체누수와 지반누수로 구분할 수 있는데, 하천설계기준(2002)에서는 제체누수에 대해서는 제체 침윤선이 제체 하부에 위치하도록 하고, 지반누수에 대해서는 한계동수 경사, 한계유속, 크리프비에 의한 관정에 의해 안전성 검토를 하도록 하고 있다. 국내 실무에서는 제체에 대해서는 Mononobe 경험식이 주로 사용되고, 파이핑에 대해서는 한계동수경사(i_c)에 의한 판정방법이 사용되고 있다. 침투류 해석에서 제체 및 지반의 토질정수와 더불어 중요한 요소가 홍수지속시간인데, 국내에서는 정상상태의 경우에 대해서 침투해석을 수행하고 있으며, 홍수지속시간(t_0)은 그림 1과 나타낸 바와 같이 홍수위가 제방 비탈점 A점을 도달한 시간으로부터 최고수위 B점을 지나서 C점에 도달할 때까지의 시간으로 정의되며, 경험적으로 결정되는 것으로 보인다.

일본의 침투류 계산 흐름은 그림 2와 같다(하천제방설계지침, 2000, 건설성). 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. 그림에서 홍수특성조사중에 홍수과형조사가 있으며 조사된 홍수과형은 침투류 계산을 위한 외력으로 설정된다. 그림 3은 일본 하천제방설계지침에서 제시하고 있는 침투류 해석을 위한 홍수과형결정 순서를 나타낸 것이다. 그림 3(a)의 복수의 하천수위 과형 각각에 대해서 기준이 되는 수위(원칙적으로 평수위)마다의 지속시간을 구하고 그림 3(b)를 작성한다. 그림 3(b)의 지속시간에 대한 포락선을 그린 후, 그 포락선으로 둘러싸인 면적을 구한다. 여기에서 포락선이 제방고 높이가 되지 않을 경우 해당 수위의 지속시간이 1시간이 되도록 포락선을 설정한다. 그림 3(a)의 수위과형중에서 홍수 말기의 감수부 경사(수위저하 속도)중 최대인 것을 찾아서 그 경

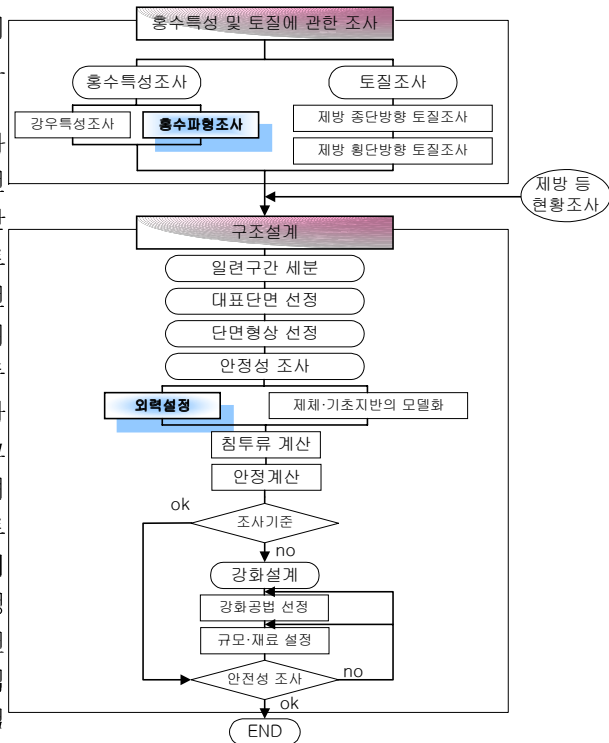


그림 1. 일본의 침투에 대한 안전성 조사 순서

사를 구한 다음, 그림 3(c)에 나타난 것처럼 그림 3(b)와 같은 면적이 되도록 증수부 곡선경사 및 지속시간을 결정하여 기본 수위 파형으로 결정한다.

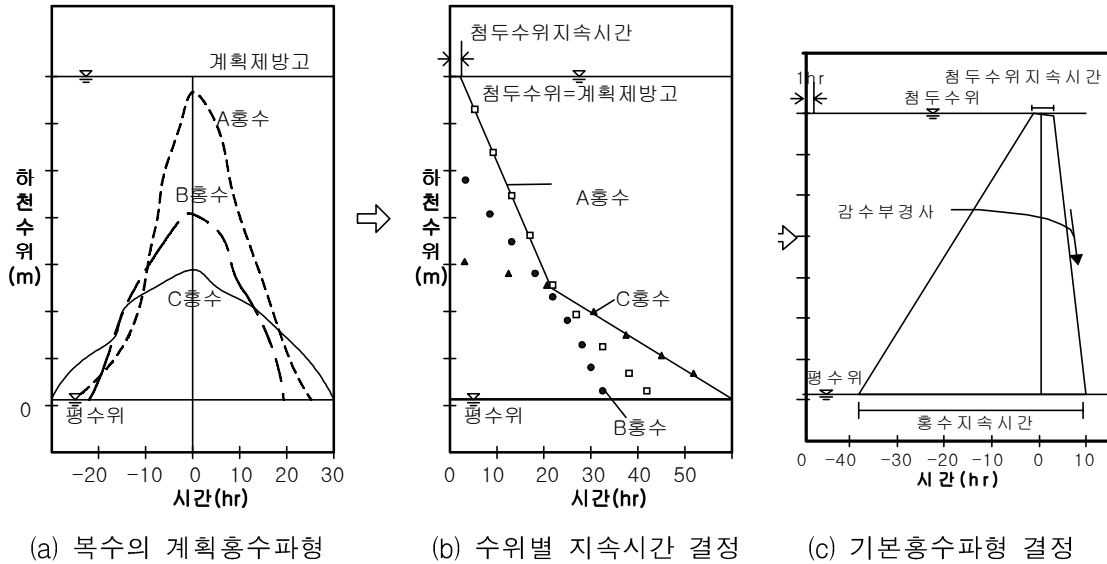


그림 3. 침투해석을 위한 홍수파형 결정 방법

미국은 미공병단의 제방설계 및 시공지침(2002)에서 제시하고 있는 침투에 대한 안전성 검토 방법으로 침윤면 계산은 원칙적으로 정상상태를 가정한 정상 침윤면으로 하는 것으로 되어 있다. 그런데, 제방 비탈면의 슬라이딩 파괴에 대한 안정성 평가법에서는 수위에 따라 6개 경우로 나누어 안전율을 제시하고 있는데, Case I(축제종료시)인 경우 제내·외지의 안전율은 $F_s \geq 1.3$, Case II(급격한 수위 저하시)인 경우 제외지 안전율은 $F_s \geq 1.0$, Case III(한계고수위)인 경우 제외지 안전율은 $F_s \geq 1.4$, Case IV(최고수위시)인 경우 제외지 안전율은 $F_s \geq 1.4$, Case VI(지진시)인 경우 제내·외지 안전율은 $F_s \geq 1.0$ 으로 홍수파에 의한 수위변화를 고려하고 있는 것으로 조사되었다.

따라서, 침투해석시에 외력조건으로서 대상 하천의 대표홍수파형의 이용은 과소설계에 따른 제방붕괴위험이나 과대설계에 따른 비용증가를 최소화할 수 있도록 하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

3. 국내 여건에 맞는 침투해석 설계홍수파형 검토

3.1 분석대상지점 선정 및 수문자료 수집

전술한 바와 같이 일본의 경우 침투해석을 위한 홍수파형을 결정할 때, 계획홍수량 산정시 이용했던 여러 개의 홍수파형을 사용하는 것으로 되어 있다. 이러한 경우, 과거 홍수사상에 의한 홍수지속시간이 반영되지 않으므로 안정성 향상 측면에서 보면, 과거 홍수를 고려한 홍수파를 결정하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 계획홍수량을 산정할 때 선택된 수문곡선을 기본으로 하고, 과거 홍수자료를 추가하여 안전측의 설계홍수파형 개발하고자 한다.

국내 여건에 맞는 설계홍수파형을 개발하기 위하여 과거 홍수자료를 얻을 수 있는 수위관측소 지점을 분석대상지점으로 선정하였고, 그 지점에 해당하는 계획홍수 수문곡선은 하천정비기본계획에서 계획홍수량 산정시 사용하였던 홍수수문곡선을 이용하였다. 표 1에 나타난 바와 같이 최근 제방붕괴사례가 많은 낙동강 수계의 수위관측소중에서 자료가 양호가 9개 지점을 선정하여 분석하였다. 과거 홍수자료는 1987년 이후 낙동강 유역에 발생했던 대표적 홍수사상 11개를 추출하여 분석에 이용하였으며, 표 2에 나타난 바와 같다.

표 1. 홍수파형 분석 대상 지점

순번	분석대상 지점	하천명	측선 (하천정비 기본계획)	계획 홍수량 (m^3/s)	계획 홍수위 (EL.m)	계획 빈도 (년)	유역면적 (km^2)	비고
1	동촌	금호강	No.57	5,590	34.65	200	1,544.0	
2	정암	남강	No.53+240	3,630	17.02	100	3,283.0	
3	월포	내성천	No.52	2,930	82.33	100	1,134.5	
4	낙동	낙동강	No.505	12,580	44.16	200	9,369.0	
5	지보	낙동강	No.596+370	6,460	63.19	200	4,516.9	
6	사별	낙동강	No.561	10,740	55.50	200	7,247.9	
7	왜관	낙동강	No.411+130	13,420	28.71	200	11,074.4	
8	삼랑진	낙동강	No.108+20	16,840	11.69	100	22,891.9	
9	구포	낙동강	No.30+20	19,370	6.57	200	23,273.6	

표 2. 분석대상 홍수사상

연도	기간	호우원인	해당지점	비고
1987	7.13 01:00-7.18 21:00	태풍 셀마	동촌, 정암, 지보, 사별, 왜관, 삼랑진, 구포	
	7.21 01:00-7.29 19:00	집중호우	동촌, 정암, 사별, 왜관, 삼랑진, 구포	
	8.28 01:00-8.31 22:00	태풍 디나	동촌, 월포, 지보, 사별, 왜관, 삼랑진, 구포	
1988	7.08 01:00-7.19 17:00	장마	사별, 왜관, 구포	
	7.20 01:00-7.22 23:00	집중호우	월포, 지보, 사별	
1989	7.25 01:00-8.03 23:00	태풍 Judy	동촌, 월포, 지보, 사별, 왜관, 삼랑진, 구포	
1995	7.23 01:00-7.25 23:00	태풍 Faye	정암, 낙동, 구포	
	8.19 01:00-9.05 15:00	태풍 Janis	동촌, 정암, 월포, 낙동, 지보, 사별, 왜관, 삼랑진, 사별	
1998	7.31 01:00-8.21 22:00	집중호우	동촌, 정암, 월포, 낙동, 지보, 왜관, 삼랑진, 구포	
2002	8.30 01:00-9.10 17:00	태풍 Rusa	동촌, 정암, 월포, 낙동, 지보, 사별, 왜관, 삼랑진, 사별	
2003	9.12 01:00-7.17 21:00	태풍 Maemi	동촌, 정암, 월포, 낙동, 지보, 사별, 왜관, 삼랑진, 사별	

3.2 설계홍수파형 결정을 위한 합성홍수파형 작성

침투해석을 위한 설계홍수파형의 결정을 위하여 계획홍수량상정시 이용된 계획홍수 수문곡선과 과거 홍수자료를 이용하여 합성홍수파형을 작성하였다. 합성홍수파형 작성 방법은 일본의 하천제방설계지침(2000)에서 제시한 기본홍수파형을 결정하는 방법과 거의 유사하나, 본 연구에서는 계획홍수 수문곡선뿐만 아니라, 과거 홍수사상을 추가하여 사용한 점이 다르다. 그림 4~그림 7은 분석대상 지점 중 남강의 정암 지점에 대해서 합성홍수파형을 작성하는 과정을 나타낸 것이다.

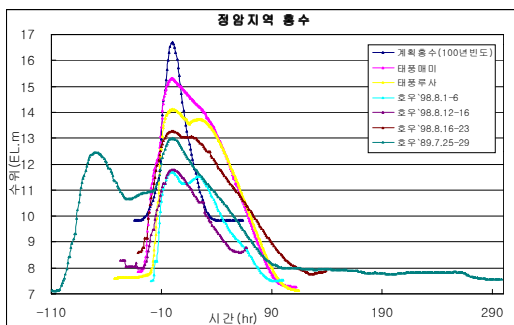


그림 4. 계획홍수와 홍수사상

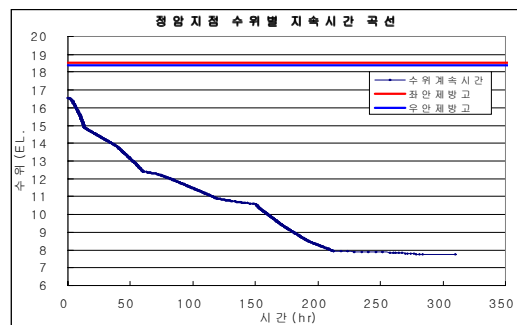


그림 5. 수위별 지속시간 합성

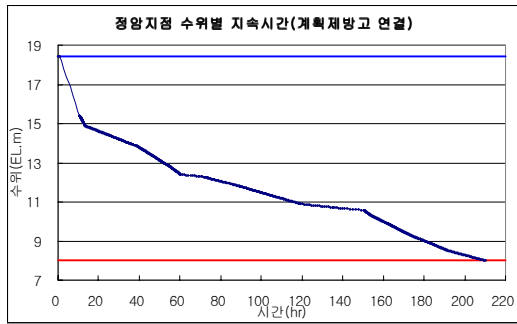


그림 6. 보정된 수위별 지속시간

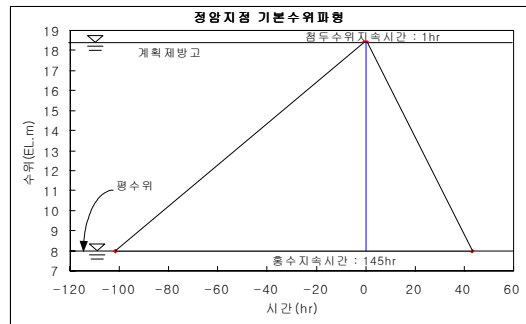


그림 7. 합성홍수파형

3.3 결과 분석

위의 절차에 따라 9개 지점에 대해서 침투해석을 위한 합성홍수파를 작성하여 홍수지속시간과 홍수파의 감수부 경사를 산정하였다. 설계홍수파형을 결정하는데 있어서 가장 중요한 인자인 합성홍수파의 지속시간의 산정결과와 계획홍수파(계획홍수량 산정시 사용했던 홍수수문곡선)의 비교 결과는 그림 8과 그림 9에 나타낸 바와 같다. 그림 8은 합성홍수파형의 홍수지속시간과 계획홍수파형의 홍수지속시간을 나타낸 것인데, 과거홍수사상의 지속시간을 반영한 합성홍수파의 지속시간이 계획홍수량 산정시 이용했던 계획홍수파의 지속시간보다 큰 것으로 나타났다. 이는 계획홍수량이 24시간 강우량으로 홍수량을 산정하기 때문에 강우분포가 제각각인 실제 홍수사상에서의 홍수지속시간보다는 작은 것으로 보인다. 그림 9는 합성홍수파의 감수부 경사와 계획홍수파의 감수부 경사를 비교한 것이다. 그림에서 점들의 편차는 있으나, 대체로 합성홍수파의 감수부 경사와 계획홍수파의 감수부 경사가 일치하는 것으로 나타났다. 여기서 감수부 경사나 계획홍수파와 과거 홍수사상중 가장 급하게 감소하는 경사인데, 대체로 계획홍수파의 감수부가 급경사를 이룬다는 것을 알 수 있다.

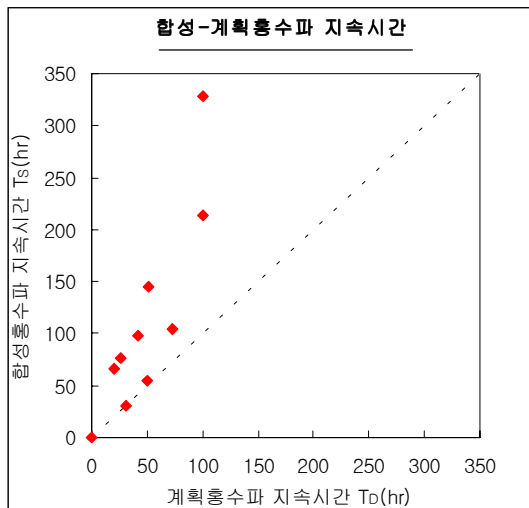


그림 8. 합성-계획홍수파 지속시간 비교

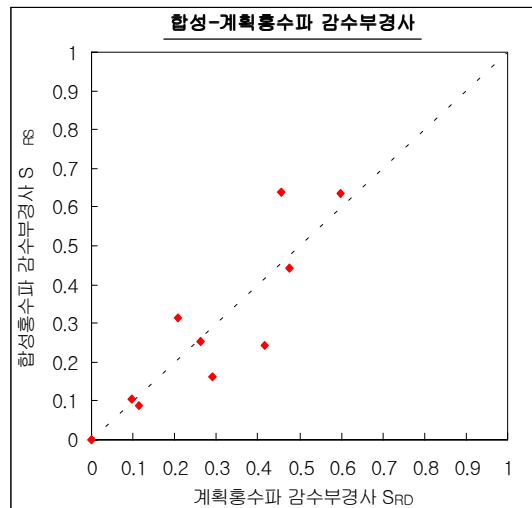


그림 9. 합성-계획홍수파 감수부 경사 비교

그림 10은 홍수파 지속시간과 분석대상 지점의 유역면적과의 관계를 도시한 것이다. 그림에 보인 바와 같이 계획홍수파의 경우 유역면적이 증가하면 홍수파 지속시간도 길어지는 경향을 보이고 있으나, 합성홍수파의 경우 계획홍수파의 경향보다는 관계성이 미흡한 것으로 판단된다. 합성홍수파의 경우, 과거 홍수사상 중에서 가장 긴 홍수기간이 반영되어 작성되었으므로 유역면적보다는 강우분포에 영향을 더 많이 받을 것이라 판단된다. 그림 11은 감수부 경사와 유역면적과의 관계를 나타낸 것으로, 유역면적이 클수록 홍수파 감수부

경사는 작아지는 것을 알 수 있다. 또한, 감수부경사 상단부를 연결하는 포락선을 그릴 수 있는데, 유역면적 별로 감수부 경사의 상한값이 있을 수 있다는 추정을 해 볼 수 있는 결과이다. 그 이유는 감수부 경사는 대체로 과거 홍수사상보다는 계획홍수과의 값을 채택하기 때문에 유역면적과 밀접한 관계가 있다고 말할 수 있으며 분석에 사용된 과거홍수사상의 감수부 경사보다는 계획홍수과의 감수부 경사가 크므로 설계시 감수부 경사는 계획홍수과값을 사용하는 것이 보수적인 방법일 것이라 판단된다.

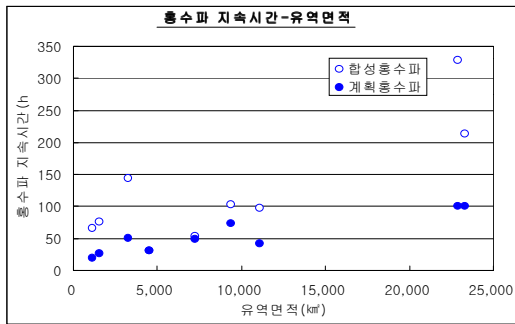


그림 10. 홍수과 지속시간-유역면적 관계

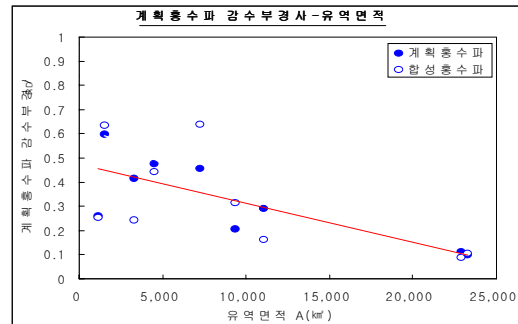


그림 11. 감수부 경사-유역면적 관계

4. 결론 및 향후 연구

일본 하천제방설계지침(2000)에서 제시하고 있는 침투해석을 위한 기본홍수과 산정 방법을 낙동강 유역 수위관측소 지점 9개소에 적용하여 합성홍수과를 산정했다. 적용된 홍수사상은 1987년 이후 11개이며, 계획홍수과는 하천정비기본계획상의 계획홍수량 산정시 이용되었던 홍수 수문곡선을 이용하여 작성하였다.

제방의 비정상 침투해석을 위한 설계홍수과형은 홍수지속시간과 감수부 경사로 결정할 수 있는데, 홍수지속시간은 합성홍수과의 홍수지속시간이 계획홍수과의 지속시간보다 크게 산정되었는데, 이는 설계시 계획홍수과의 지속시간에 어느 정도 안전율을 적용해야 함을 의미한다. 감수부 경사는 분석된 과거 홍수사상중에는 계획홍수과의 감수부 경사보다 급하게 감소하는 것은 거의 없는 것으로 나타났는데, 감수부 경사는 계획홍수량 산정시 사용했던 수문곡선을 사용하는 것이 안전측 설계가 될 것으로 판단된다.

본 연구는 최근 누수에 의한 제방붕괴가 발생한 바 있는 낙동강 유역에 대해서 시험적으로 적용해 보았으며 그 방법론에 대한 타당성을 확인했다. 향후, 설계홍수과형을 결정할 수 있는 홍수지속시간과 감수부 경사 등의 설계인자를 결정하기 위해서는 더 많은 자료의 분석이 필요할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- 강릉시(2003). 군선천 수해복구공사 실시설계보고서
- 건설교통부(1997). 금호강 하천정비기본계획(보완)
- 건설교통부(1999). 낙동강 봉산제 수해복구공사 보고서
- 건설부(1984). 낙동강(내성천,감천)하천정비기본계획
- 건설부(1992). 낙동강 하천정비기본계획(보완2)
- 건설부(1993). 낙동강 하천정비기본계획(보완3)
- 충청북도(2003). 추풍령천 추풍령제 수해복구공사 실시설계 보고서
- 한국건설기술연구원(2003). 하천제방 관련 선진기술 개발 연구보고서, 건설교통부/한국건설교통기술평가원
- 한국수자원학회(2002) 하천설계기준
- 建設省(2000) 河川堤防設計指針
- U. S. Army Corps of Engineers(2002). Design and Construction of Levees