

제내지와 하도를 연계한 하천유역의 홍수유출해석기법 : II. 하구호 유출해석에의 적용

Method for Flood Runoff Analysis of Main Channel Connected with Interior Floodplain :
II. Application for Analysis of Flood Runoff in Estuarine Lake

장수형* · 윤재영** · 윤용남*** · 김원석****

Jang, Su Hyung · Yoon, Jae Young · Yoon, Yong Nam · Kim, Won Seok

Abstract

In this study, a method for flood runoff analysis in main channel connected with interior floodplain, is applied for evaluation of hydraulics of Sapgyo lake for the purpose of flood protection by considering tidal effect of West Sea and runoff from the watershed. Especially, operational condition of sluice gate was explicitly modeled in conjunction with various runoff scenarios from watershed. The change in hydraulics of main channel and interior floodplain was found to be predominantly affected by tidal effect, and explicit modeling of gate operation made possible the evaluation of hydraulic characteristics of different alternatives. Until now, such an analysis was not made due to the lack of models with such capability, however, with the proposed method, it is possible to perform such an analysis and is thought that the proposed method can be a valuable tool for flood protection planning.

Keywords : Flood Runoff Analysis, Estuary Barrage, Sluice Gate, Hydraulic Characteristics, Flood Control Policy

요 지

본 연구에서는 제내지와 하도를 연계한 하천유역의 홍수유출해석기법을 적용하여 홍수방어를 위한 치수측면에서 삼교호의 수리특성을 서해안 조위 및 유역의 유출상황과 연계하여 검토하였다. 특히, 삼교호 배수갑문의 운영조건을 모형 내에서 모의 되도록 하여 다양한 형태로 하도내로 유입되는 유입수문량과 배수갑문을 연계한 해석을 시행하였다. 하도 및 제내지의 수리 특성 변화는 여러 경계조건에 비해 조위의 영향을 지배적으로 받는 것으로 분석되었으며, 이는 배수갑문의 실제와 같은 역할을 모형에 추가함으로써 다양한 대안별 수리특성 검토가 가능하였다. 지금까지 이와 같은 기능을 수행할 모형이나 방안이 없어 적용이 힘들었으나, 본 연구에서 개발한 기법을 적용함으로써 가능하게 되었고 이는 홍수방어를 위한 치수계획수립에 있어서 충분한 활용가치가 있을 것으로 기대되었다.

핵심용어 : 홍수유출해석기법, 하구호, 배수갑문, 수리특성, 치수대책

1. 서 론

유역의 종합적 치수계획을 수립하는데 있어서 하도에서의 계획홍수량은 홍수조절용 댐 등에 의한 홍수조절량을 감안하여 순수하게 하도가 부담하여야할 홍수량이다. 그러나 하천정비기본계획과 같이 아직도 하도 대응 위주의 치수사업에 치중하면서 야기된 하도 지향적인 개념으로 유역에서 산정된 기본홍수량이 모두 하도로 유입되는 것으로 가정하여 유역의 지형특성과 하도에서의 흐름특성을 지배하는 상·하류 경계조건 및 하도차체의 영향이 배제된 홍수량을 산정하는 것이 관행처럼 이어져왔다.

하지만 우리나라 중·대규모 하천유역의 대부분은 하천 중·하류부 연안에 홍수위 보다 낮은 저지대가 분포하고 있고 하천의 출구는 바다이거나 대하천에 유입되게 된다. 이러한 하천유역의 경우 조위나 하류 하천 수위의 조건에 따라 유역으로부터의 유출이 하도를 통해 유역출구로 즉시 배제되지 못하고 하도의 수위 상황에 따라 다양한 흐름특성을 가지게 된다. 그리고 기본적으로 이러한 하천흐름을 해석하기 위해선 부정류해석이 필요하며, 해석시 제내지와 하도간의 연계운영이 되어야만 한다.

외국의 경우 치수목적과 더불어 환경복원 측면에서 하구 모델링이 많이 이루어졌는데 이중 Khangaonkar 등(2003)

*정회원 · 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 박사과정(E-mail: angel452@korea.ac.kr)

**정회원 · 교신저자, 고려대학교 과학기술대학 환경시스템공학과 교수(E-mail: jyyoon@korea.ac.kr)

***정회원 · 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수(E-mail: nyoon@korea.ac.kr)

****정회원 · (주)삼안 수자원부 이사(E-mail: wskim@samaneng.com)

에 의해 미국 워싱턴주 Chinook River 하구에 위치한 배수갑문의 대안을 찾고자 하는 연구가 있다. 이 연구에서는 Chinook River 유역의 유출을 HEC-HMS로 모의하고 이를 경계조건으로 하여 하구 지역은 수리동역학 모형인 RMA-10에 의해 모의하였다. 연구의 목적은 하천을 자연 상태로 복원해 서식처 확보를 도모하면서 동시에 원래의 배수갑문이 가졌던 상류지역에 대한 치수목표를 유지할 수 있는 대안을 모색하는 것이며 이러한 것들이 배수갑문을 철거하고 복원된 하천의 적정 폭으로 넓힘으로서 기능함을 모델링을 통해 제시하였다.

김중해 등(2002)은 하천범람 위험도 평가를 위해 Saint Venant 방정식에 Monte-Carlo 기법을 도입하여 추계학적 부정류해석을 실시한 바 있고 최계운 등(2000)은 1차원 부정류해석 프로그램을 개발 경인운하에 적용하여 조위변화 등과 같은 경계조건변화에 따른 경인운하내 수리특성을 검토하였으며, 정태성 등(2000)은 황성댐 건설 전·후 홍수로 인한 댐 하류부 섬강의 흐름변화를 1차원 부정류해석 모형인 FLDWAV 모형을 적용하여 검토한 바 있다. 한강에 대한 적용 예로 황의준과 전경수(1996)는 폐합형 수계에 대한 부정류 계산모형을 잠실수중보 및 신곡수중보 등을 내부경계조건으로 수공구조물에 의한 홍수류 영향을 분석한 바 있고 유명관과 전경수(1998)는 팔당댐을 내부경계로 수리학적 모형에 포함하여 홍수시 댐의 운영조건에 대한 모의가 가능하도록 1차원 계산모형을 개발하고 과거 홍수사상에 적용하여 검토한 바 있으며, 이정규와 전세호(2004)는 1차원 부정류해석 모형인 FLDWAV 모형을 적용 조위와 하도의 조도계수에 따른 한강본류수위 상승효과와 한강본류수위 상승에 따른 지류의 배수영향을 검토한 바 있다. 낙동강에 적용한 예로 연규방 등(1997)은 하구에서의 조위영향을 고려하기 위해 MIKE11 모형을 적용한 부정류해석으로 배수영향에 대한 검토를 연구한 바 있으며, 추태호(2002)는 부정류해석 모형인 Loopnet 모형과 FLDWAV 모형을 적용하여 낙동강 하구둑에서 수문개도별 방류량과 유량측정조사 성과에 대한 검증자료로 이용하였다. 금강에 대한 적용 예로 선우중호(1983)는 하류부 홍수위 결정을 위한 부정류 해석에 있어서 연속방정식과 운동량 방정식을 고수부지의 영향이 고려되도록 수정하고 이를 수치해석기법에 의해 해를 구하고자 하였으며, 김현영과 박승우(1989)는 하류부 본류 및 지류에 대한 하천망을 수지상으로 모형화 하고 양해식의 차분법에 의한 부정류해석을 적용한 바 있다.

그러나 이러한 연구들은 기본적으로 상·하류 경계조건에 따른 하도위주의 해석방법들로 실제 제내지와 하도간의 흐름해석과 배수펌프 등에 의한 강제배제효과 등을 고려하지 못하였으며, 하천 출구에 배수갑문이 설치되어 외수위와 내수위에 따른 수문조작이 이루어 질 경우는 더더욱 고려가 어렵다.

만약 하천 출구에 배수갑문이 설치되어 외수위와 내수위에 따른 수문조작이 이루어 질 경우는 하도의 수리특성은 배수갑문을 기준으로 유입홍수량과 내수위와 외수위에 따른 수문조작에 따라 다양한 수리특성을 갖게 된다. 아직 이러한 배수갑문에 의한 수문조작 등 경계조건을 추가하여 부정류해석을 실행할 방법이 없어 통상적으로 수리실험을 이용하

여 검토하였다. 실험적 검토로서 김진홍과 김주창(1994)은 새만금 방조제 배수갑문의 통수능력과 개방고 결정을 위해 계획홍수량 방류시 아산호 내수위를 관리수위, 평균해면, 홍수위 등으로 유지시키면서 외수위를 저극수위, 대조평균간조위, 소조평균간조위, 평균해면 등으로 조합하여 배수갑문 개방고에 따른 유량을 수리실험을 통해 검토한 바 있다. 그러나 이는 침투홍수량 유입에 따른 내수위와 외수위 조건별 검토로서 실제 조위의 증가로 배수갑문을 통한 방류가 불가할 경우 수문을 차단하게 되며, 담수호의 수위증가는 이후 유입되는 유입수문곡선에 따라 달라지기 때문에 유입수문곡선 대비 조위수문곡선의 연속적 연계해석이 필요하다.

실제로 안태진 등(1999)에 의하면 1998년 홍수시 삼교천과 함께 서해로 유입되는 안성천 아산호의 경우 유역내 확률강우량을 초과하지 않은 강우에도 불구하고 아산호 수위가 계획홍수위를 초과하여 인근지역의 침수피해가 발생하였는데 이에 대한 원인분석을 내수위가 조위보다 낮아 수문을 개방하지 못한 상태로 지속적으로 홍수가 유입되어 아산호의 수위가 증대되는데 반하여 조위가 내수위보다 낮아 수문을 통한 방류를 신속히 하여야 하지만 계획홍수량은 증가된 데 반해 계획홍수위는 변경되지 않아 충분한 배수갑문확보가 없었기 때문인 것으로 분석하였다.

한편, 이승호(1996)는 1차원 부정류해석을 위한 연속방정식과 운동량방정식을 Preissmann의 음해법으로 차별화하고 이 식을 double sweep 이론을 사용하여 해석 하였으며, 배수갑문에 의한 경계조건을 추가하여 담수호 내에서의 여러 가지 수리특성 분석을 가능하도록 제시한 바 있다. 즉, 배수갑문의 조작에 따른 내수위, 조위자료 및 배수갑문의 개방높이 등을 고려한 자료의 입력뿐 아니라 지류와 같은 횡유입량, 강수량, 증발량 등도 고려되도록 모형을 구성한 후 시화호에 적용하여 검증한 바 있다. 그러나 이승호(1996)의 연구는 기존 방법들과는 달리 배수갑문의 경계조건을 부정류 해석모형과 함께 해석되도록 구성하고 암거와 같이 연결된 지류의 유출입해석도 가능하게 다양한 조건에서의 수리특성의 검토가 가능하지만 근본적으로 제내지 내에서의 유출특성 분석이 불가능한 하도위주의 유출해석이라는 기존연구의 틀과 맥락을 같이하고 있다.

따라서 본 연구에서는 하천변 저지대의 저류와 유출지체를 반영하여 실제 유역에서 발생하는 홍수유출 특성을 가능한 근사하게 모의할 수 있는 침수해석 기법을 개발, 하도 내·외의 여러 경계조건에 따른 하도의 흐름특성을 분석할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 삼교천 하류 하도의 수리특성 검토

본 연구의 적용유역인 삼교천 유역에서 발생한 홍수량은 최종적으로 삼교호 방조제의 배수갑문을 통해 서해로 유출되며, 이 과정에서 배수갑문은 삼교호의 내수위와 서해안 조위에 따라 운영된다. 결과적으로 삼교천 하류구간의 수위는 서해안 조위에 영향을 받는다고 볼 수 있다. 따라서 조위가 삼교천의 홍수위 계산결과에 미치는 불확실성 요인을 검토하고, 삼교호 배수갑문의 최적운영을 위한 기준을 마련하기 위해 본 연구에서 개발된 기법인 저지대 저류 및 지체유출

표 1. 삼교호의 주요 제원

구분	단 위	제 원	구분	단 위	제 원	
유역면적	km ²	1,649	홍수위	EL.m	+5.10	
만수면적	ha	2,017	만수위	EL.m	+2.50	
총저수량	만 m ³	8,408	사수위	EL.m	-1.50	
유효저수량	만 m ³	6,279	수해면적	ha	14,700	
방조제	방조제 연장	m	3,360	간척면적	ha	989
	최대높이	m	18	도로폭	m	12
	최대저폭	m	168	제정표고	EL.m	+8.50

표 2. 삼교호 방조제 배수갑문의 주요 제원

구분	단 위	제 원	구분	단 위	제 원
배수갑문연장	m	137.5	배제능력	m ³ /s	5,800
문비규격	B×H×런	20×6×6	Sill 표고	EL.m	-3.50

특성을 고려하여 조위가 삼교천 하류부의 홍수위에 미치는 영향을 분석하였다.

2.1 삼교호 및 배수갑문의 특성

삼교호는 충남 당진, 아산, 홍성, 예산군 일대의 가뭄과 홍수의 악순환을 극복하여 안정된 영농기반을 조성하기 위한 농업종합개발사업의 일환으로 1976년 12월에 착공하여 1979년 10월에 준공된 삼교방조제 축조로 조성된 담수호이다. 삼교호의 원공으로 약 84백만m³의 담수를 저수하여 삼교호 유역내는 물론 태안반도 일대의 농업용수 공급과 인근 지역의 생활용수 및 공업용수 공급도 가능하게 되었으며, 하구연안에 위치한 상습적인 침수구역의 배수개선, 염해방지 및 육운개선 등 지역발전에 기여하고 있다. 삼교호의 경계는 설계당시 자료를 확인할 수 없어 명확히 구분하기 곤란하지만 이때 작성된 내용적과 수표면적을 기준으로 추정 한 결과 삼교천의 경우는 방조제로부터 약 23.5 km지점까지, 무한천은 약 20 km까지, 그리고 곡교천은 하구로부터 약 11 km 상류지점까지인 것으로 파악되었다. 삼교호의 주요제원은 표 1과 같다.

한편, 삼교호 방조제에 설치된 배수갑문은 20 m(B)×6 m(H) 6련의 규모로 상하로 작동하는 sulice gate형식의 문비가 설치되어 있다. 현재 배수갑문의 관리는 농업기반공사 당진지사에서 맡고 있으며, 삼교호의 관리수위는 평상시 EL. 2.5 m를 유지하고 있으나, 홍수기에는 제한수위 EL. 2.0 m를 유지하며 삼교천의 지류인 무한천 중류부에 위치한 예당지의 완전 방류시 홍수도달시간 이전에 EL. 1.0 m의 수위로 저하시켜 홍수에 대비하도록 운영하고 있다.

2.2 검토방법

삼교호 배수갑문 지점에 그림 1과 같이 RAS의 inline structure 기능을 사용하여 하구둑을 형성하고 여기에 실제 배수갑문과 동일한 형태의 sulice gate를 설치하여 서해안 조위에 비해 삼교호의 내수위가 높을 경우 방류하도록 설정함으로써 하도의 유출특성 및 조위와 연계하여 삼교호의 수리특성을 분석할 수 있도록 하였다(USACE, 2002a, 2002b,

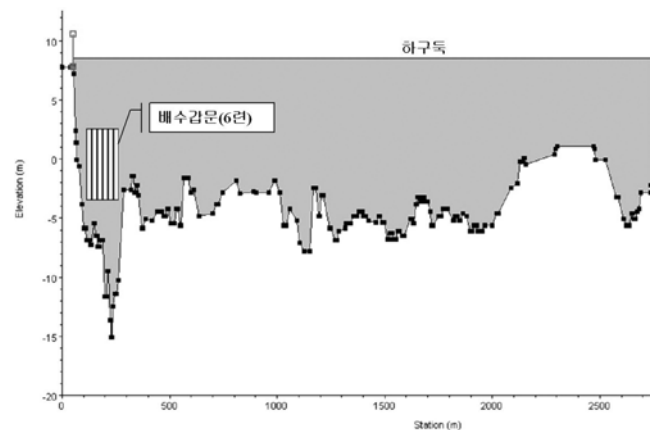


그림 1. 삼교호 배수갑문의 설정

2002c). 그리고 본 모형의 하류경계조건인 서해안 조위는 인천지방해양수산청에서 '97년에 삼교호 방조제 지점에서 1년간 관측한 자료를 이용하여 조회분석을 실시하여 결정된 조회상수와 조위 모의발생 프로그램인 TidePre에 의해 모의 발생한 조위를 실측치와 비교하여 적용성을 검토한 후 최대조위가 발생하는 시기를 전후한 96시간의 조위를 채택하였다.

이렇게 산정된 설계조위는 26시간을 주기로 반복하여 발생하므로, 홍수발생 시간을 고정된 상태에서 한 주기의 조위를 1시간 간격으로 변화시켜서 하류단 경계조건을 설정한 후 100년 빈도 홍수 발생시의 삼교호 배수갑문을 통한 방류량과 삼교호 내수위를 계산하였다. 또한 배수갑문은 매시간 단위로 운영되며 내수배제가 가능한 조건에서는 수문을 전면개방하며, 조위가 높아 해수의 역류가 발생할 수 있는 시간동안은 수문을 완전 폐쇄하여 역류가 전혀 발생하지 않도록 하였다.

2.3 삼교호 수리특성 검토 결과

2.3.1 조위와 홍수위의 관계

본 연구에서 그림 2와 같이 산정된 설계조위는 26시간을 주기로 변화하며 그 과정에서 각 2회씩의 고조와 저조가 발생하는데 규모에 따라 고조는 고고조와 저고조로, 저조는 고

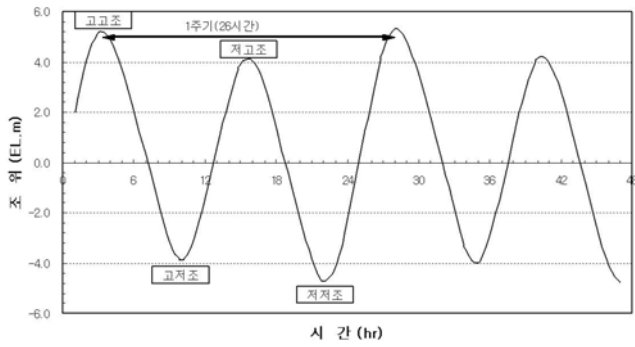


그림 2. 본 연구 적용 설계조위

저조와 저저조로 구분된다. 따라서 산정된 설계조위가 26시간을 주기로 반복되는 특징을 가지는 것으로 분석되어 홍수 발생 시간을 고정된 상태에서 한 주기의 조위를 1시간 간격으로 변화시켜서 하류단 경계조건을 설정한 후 검토구간의 계획규모인 100년 빈도 홍수 발생시 조위에 따른 삼교호 내수위의 변화를 비교하였다. 26개의 조건별 모의 결과 조위의 변화 과정과 맞물려 변화하는 삼교호의 내수위 형태는 공통적인 특징에 따라 다음과 같이 4가지 유형으로 구분할 수 있었다.

2.3.1.1 고고조 일치형 조위-내수위 관계

홍수 초기에 저저조와 만나 최저수위 발생조건이 되면서 수위상승이 완만하여 내수위 곡선의 상승부 중간이 처진 형태가 되지만 이후 삼교호로 유입되는 홍수량이 급증하는 시기가 고고조 주기에 해당하여 내수위가 가파르게 상승하며 고고조 1, 2시간 후에 침두내수위가 발생한다. 26개 분석 조건 중 침두 내수위의 최고 값이 이 조건에서 발생하는 경우로서 그림 3(a)와 같다.

2.3.1.2 고저조 일치형 조위-내수위 관계

유역에서 발생한 홍수량이 본격적으로 삼교호로 유입하는 시기가 고고조에 해당되어 배수갑문을 통한 방류가 불가하므로 삼교호 내수위의 상승부 중 전반부의 경사가 급하지만 침두유입량이 발생하는 시기의 조위가 고저조에 해당하여 내수위 수문곡선의 침두부가 침예하지 않고 평활한 형태를 띤다. 따라서 침두수위는 삼교호에 침두홍수량이 유입하는 시기에서 대략 6시간 정도 지체되어 삼교호 유입량이 감소하는 시기에 저고조의 영향으로 발생한다. 26개 조위조건 중 침두내수위의 최저 값이 발생하는 경우로 그림 3(b)와 같다.

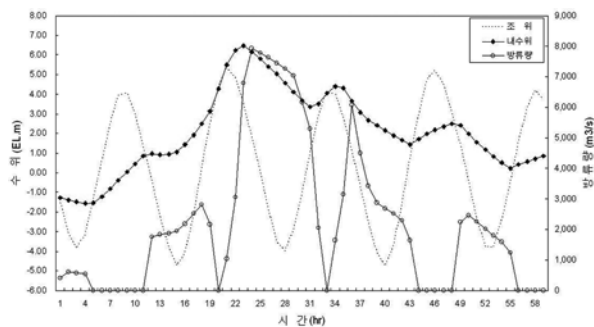
2.3.1.3 저고조 일치형 조위-내수위 관계

그림 3(c)의 경우로 내수위 상승부 증반에 고저조 주기에 해당하여 방류조건이 양호하지만 삼교호 내수위가 낮아 방류량은 크지 않고 내수위 상승이 완만하다. 그러나 고저조에서 저고조로 조위가 상승하는 시기에 삼교호로 유입하는 홍수량이 급증하여 내수위가 가파르게 상승하며 저고조 1, 2시간 후에 침두내수위가 발생한다. 기본적인 특징은 '고고조 일치형'과 같지만 침두수위가 저고조에 의해 발생하므로 고고조 일치형'에 비해 작은 값을 가진다.

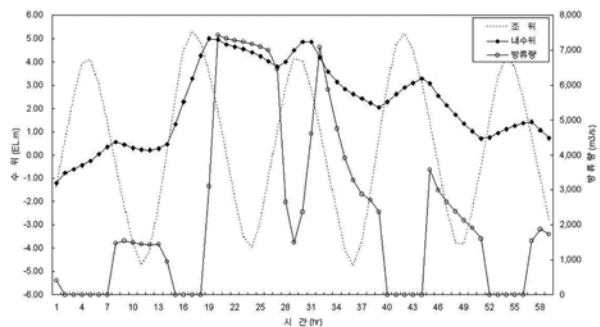
2.3.1.4 저저조 일치형 조위-내수위 관계

그림 3(d)의 경우로 홍수 초기에 저고조 주기에 해당하여 배수갑문을 통한 방류가 불가하므로 내수위 상승부 전반부의 경사가 급하지만 삼교호로 침두홍수량이 유입하는 시점에서 저저조와 일치하여 내수위 곡선의 침두부가 뭉개진 형상이 되며, 기본적인 특징은 고저조 일치형과 같지만 내수위 상승부가 저고조~저저조에 해당하는 것이 차이점이다.

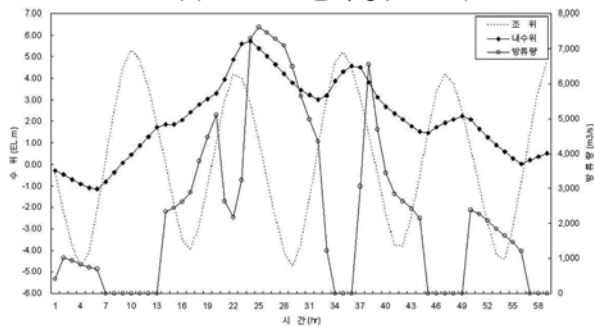
삼교호의 유입량이 감소하는 시기에 고고조가 발생하여 이 시기에 침두내수위가 발생하며 그 정도는 '고저조 일치형'에



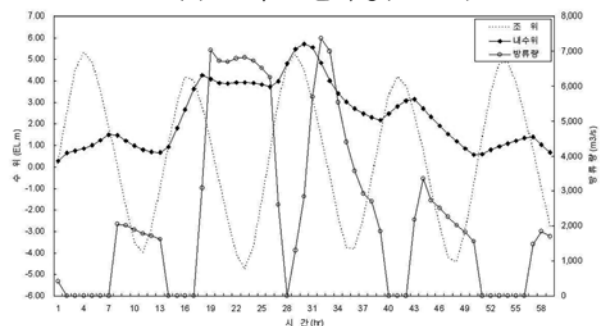
(a) 고고조 일치형(case 3)



(b) 고저조 일치형(case 9)



(c) 저고조 일치형(case 15)



(d) 저저조 일치형(case 22)

그림 3. 조위-내수위 관계

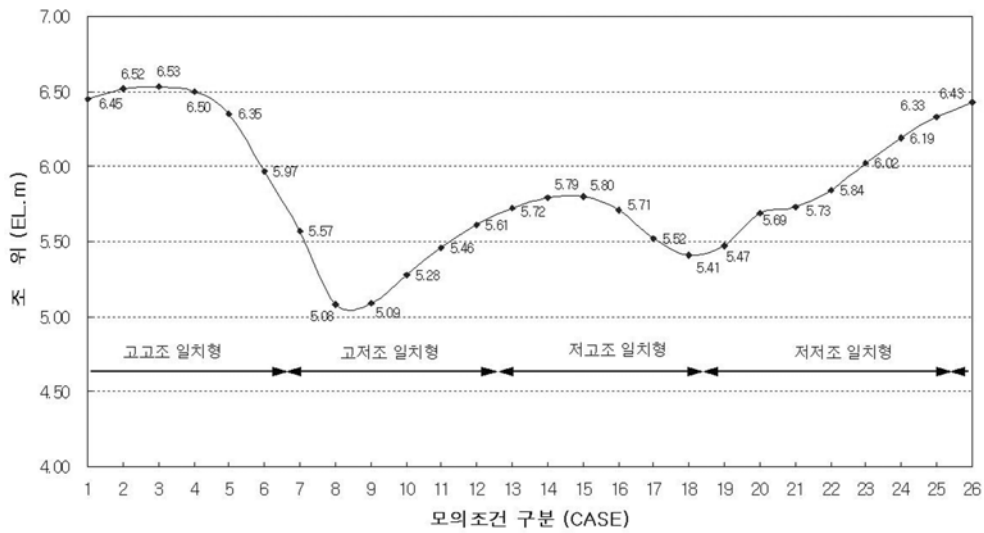


그림 4. 조위에 따른 삼교호 침두수위 변화

표 3. 조위-내수위 관계군별 삼교호 침두수위 비교
단위 : EL. m

구분	고고조 일치형	고저조 일치형	저고조 일치형	저저조 일치형	비고
최대	6.53	5.61	5.80	6.33	
최소	5.97	5.08	5.41	5.47	
평균	6.39	5.35	5.66	5.90	

비해 다소 크다. 고저조 일치형과 저저조 일치형은 삼교호 유입량이 감소하는 시기에 침두수위가 발생하므로 침두내수위 발생시간이 저고조 일치형이나 고고조 일치형에 비해 지체된다.

그림 4와 표 3에서 보는 바와 같이 조위 변화에 따른 26개 Case의 모의결과 100년 빈도 홍수 발생조건에서 삼교호의 침두홍수위는 조위조건에 따라 EL. 5.08~6.53 m로 최대 1.45 m의 편차를 보이고 있으며, 침두수위가 EL. 6.53 m를 기록한 경우와 EL. 5.08 m를 기록한 조위조건에 배수갑문 지점의 수리특성을 비교하면 눈에 띄는 것이 침두수위가 발생하는 시간에 조위의 주기가 약 5시간의 차이를 두고 상반

된 위치에 있다는 점이다. 즉, 그림 3(a)의 최고침두수위 발생시에는 내수위의 침두부와 조위가 함께 상승하면서 침두수위 발생 전 약 4시간 동안 방류량이 급감한 반면, 그림 3(b)의 최저침두수위가 발생한 경우에는 반대로 이 기간 동안 조위가 저조위 상태에 있어 방류량이 최대가 되었다는 것이다.

이상의 분석결과 삼교호로 유입된 홍수의 방류에 지장을 초래하여 삼교호의 홍수위를 상승시킴으로써 치수적으로 가장 불리한 조건이 발생하는 것은 삼교호로 침두홍수량이 유입하는 시기에 고고조가 발생하는 경우이며, 그 반대로 최저수위 발생조건이 조성되어 삼교호의 침두수위가 가장 낮아지기 위해서는 고저조 주기에 삼교호로 침두홍수량이 유입하여야 한다. 이 두 경우에 있어 시간차는 대략 5시간 정도이다.

조위-내수위 관계에 의해 분류한 4개의 군에서 삼교호의 침두수위가 가장 높게 형성되는 상황은 '고고조 일치형'이며, 다음으로 '저저조 일치형', '저고조 일치형' 순이고 '고저조 일치형'일 경우 삼교호의 침두수위가 가장 낮아지는데 '고고조 일치형'에 비해 평균 1.0 m 이상 낮은 값을 보이고 있다.

따라서 삼교호의 홍수위를 저감하여 삼교천 유역 하류부의

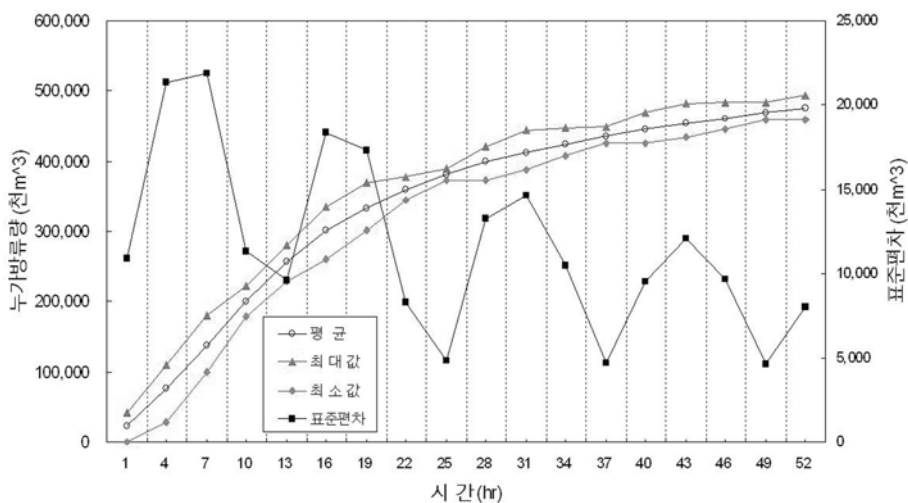


그림 5. 조위 조건에 따른 누가방류량 계열의 시간대별 특성

부담을 감소시키기 위해서는 고고조 주기에서 삼교호로 침투홍수량이 유입하지 않도록 홍수유출을 조절하여야 하며, 약 5시간 동안 침투홍수량의 유입을 지체시킬 경우 배수갑문을 통한 홍수배제에 가장 유리한 '고저조 일치형'의 조위-내수위 관계가 되어 삼교호의 침투수위를 크게 저하시킬 수 있을 것이다. 이것이 불가능할 경우 역으로 침투홍수량이 조기에 유입되도록 하는 것도 이론적으로는 대안이 될 수 있을 것이다.

2.3.2 배수갑문을 통한 방류 특성 검토

그림 5는 조위조건에 따른 26개 모의결과의 배수갑문을 통한 시간대별 누가방류량 계열의 최대값, 최소값, 평균 그리고 표준편차를 도시한 결과로 조위 조건이 어떠한 간에 배수갑문을 통한 누가방류량은 13시간 또는 26시간을 주기로 유사한 값을 보인다는 점이다. 즉, 그림에서 누가방류량 최대값과 최소값이 약 13시간을 주기로 평균값에 근접하며, 26개 누가방류량 계열의 표준편차 역시 13시간을 주기로 증가와 감소를 반복하는 것을 알 수 있다.

이러한 결과는 13시간을 주기로 고조위와 저조위가 반복되며, 26시간을 주기로 크고 작은 주기가 반복되는 조위의 특성을 감안할 때, 결국 홍수가 어떤 조위에서 시작되든 혹은 침투홍수량이 어떤 조위 조건에서 삼교호로 유입하든 조위의 한 주기에 해당하는 13시간 혹은 26시간 동안 배수갑문을 통해 방류되는 홍수량의 규모는 거의 같다는 것을 의미한다.

일반적으로 삼교호 배수갑문의 통수능력이 부족하다고 알려져 있는데 이상의 분석결과에 의하면 적어도 100년 빈도의 홍수 발생시 삼교호의 배수지체가 발생할 경우 그 원인은 배수갑문의 통수능 부족이 아니라 조위 때문이라고 할 수 있다. 이는 그림 6에서와 같이 삼교호로 침투홍수량이 유입하는 시기에 조위가 저조위 주기에 있어 방류조건이 최적의 상태가 되면 삼교호의 수위가 증가하지 않는 결과로서 반증된다고 하겠다.

같은 이유에서 배수갑문의 통수능을 확대하여도 고조위 주기에서는 방류조건이 최적인 경우에 비해 방류능력이 감소함으로써 홍수배제에 지장을 받게 되며 이렇게 지체된 홍수량이 삼교호의 수위상승을 유발할 것이다.

따라서 배수갑문의 통수능을 아무리 확대하여도 조위 조건에 따라 일정 시간의 방류불능이 불가피하게 되어 홍수지속시간이 조위의 한 주기 이상이 되는 장기간의 홍수시에는 우기동안 삼교호의 수위를 낮추어 홍수에 대비하는 현 운영방식에 의

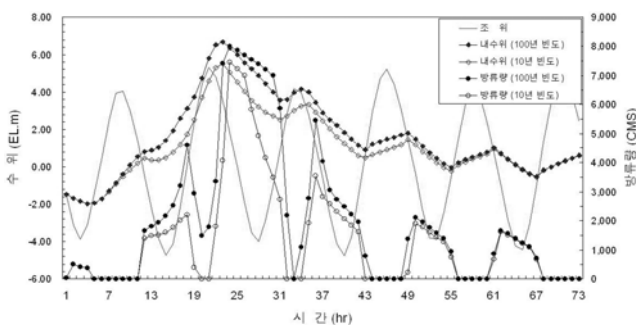


그림 6. 홍수규모별 삼교호의 수리특성 검토

한 치수효과는 크게 기대할 수 없을 것으로 판단된다.

2.3.3 홍수규모에 따른 배수지체 특성 검토

그림 6은 배수갑문을 통한 홍수배제에 가장 지장을 받는 조위조건에서 100년 빈도 홍수와 10년 빈도 홍수 유입시의 삼교호 수리특성을 비교한 것이다. 두 경우에 있어 조위는 일정한데 비해 홍수발생 후 약 13시간 후부터 즉, 삼교호로 홍수량이 본격적으로 유입하는 시기부터 홍수위의 차이가 발생하고 그로 인해 배수갑문을 통한 방류량이 상이해지며, 조위가 내수위 보다 높아서 발생하는 방류불능 시간도 전체 모의 기간 72시간 중 100년 빈도 홍수시에는 24시간인데 비해 10년 빈도 홍수시에는 30시간으로 약 25% 정도 증가한다.

그림 7은 상기한 수리특성 중 시간당 방류량만을 비교한 결과인데 삼교호로 홍수량이 본격적으로 유입하는 기간 동안 시간당 방류량과 방류곡선의 형태가 상이함을 명확히 확

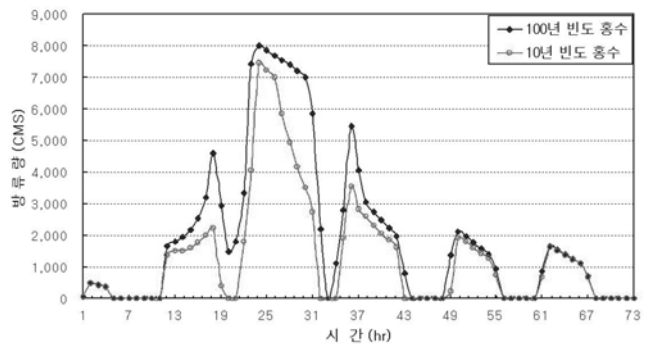
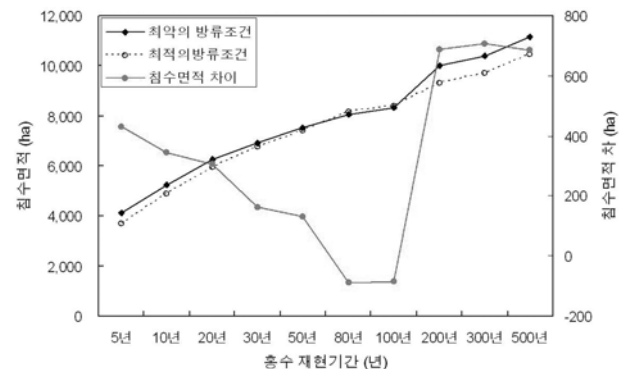
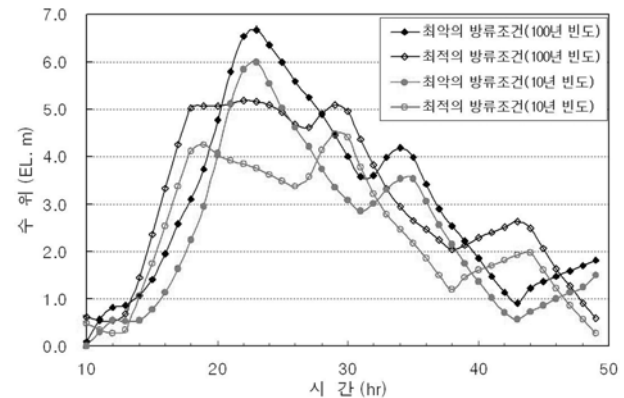


그림 7. 홍수규모별 방류특성 검토



(a) 방류조건에 따른 침수면적 비교



(b) 조위조건에 따른 수문곡선 비교

그림 8. 홍수규모에 따른 비교

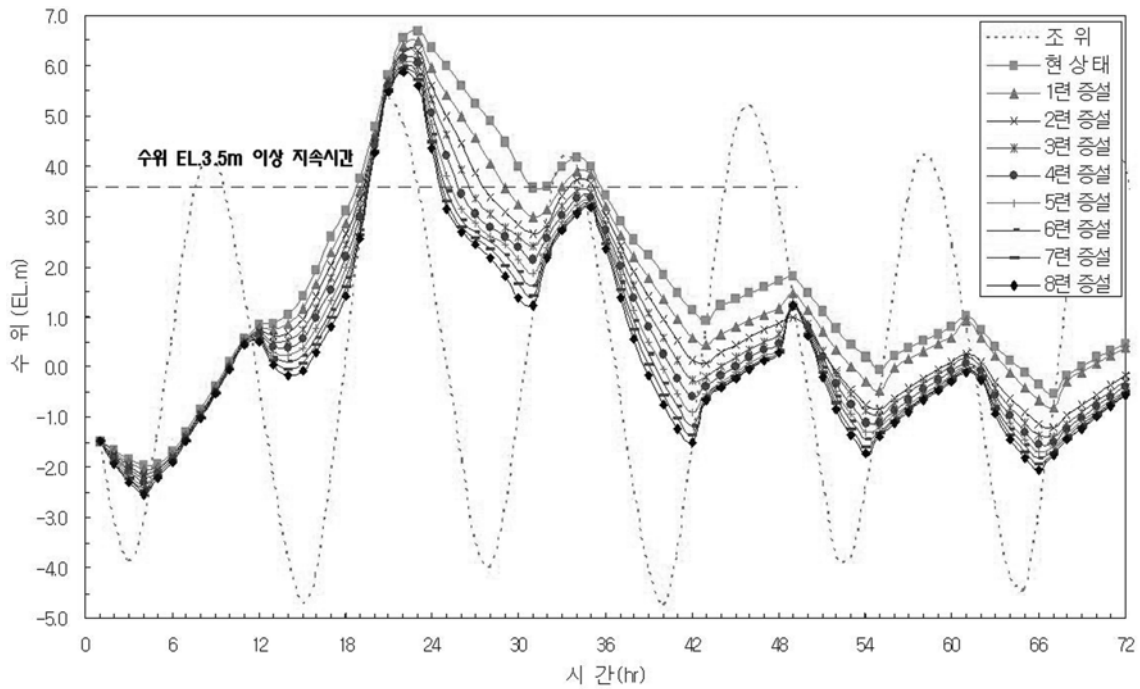


그림 9. 배수갑문 증설에 따른 삼교호 수리특성 변화 검토

인할 수 있다. 이 결과로서 대규모 홍수보다 소규모 홍수에서 삼교호 배수갑문을 통한 홍수배제가 상대적으로 원활하지 못함을 알 수 있는데, 이렇게 홍수의 규모가 작으면 내수위가 낮아 방류불능 기간이 길어지고 시간당 방류량도 줄어들기 때문에 현지 주민들이 체감하는 배수갑문의 통수능력은 소규모 홍수시에 오히려 더 부족하게 느껴질 수 있을 것이다.

2.3.4 방류조건에 따른 제내지 침수영향 검토

홍수 규모별로 최저수위 발생조건인 고저조 일치형과 최고수위 발생조건인 고고조 일치형 조건에 대한 침수면적을 산정한 결과 그림 8(a)와 같이 30년 빈도 미만의 소규모의 홍수나 200년 빈도 이상의 대규모 홍수시에는 최고수위 발생조건에서 침수면적이 크게 발생하지만 일반적인 하천의 계획빈도에 해당하는 50년에서 100년 빈도 규모의 홍수시에는 두 경우의 침수면적 차이가 크지 않거나 오히려 최저수위 발생조건에서 침수면적이 크게 발생하였다.

이러한 결과는 그림 8(b)의 삼교호 지점 수위수문곡선을 통해 설명할 수 있는데 10년과 100년 빈도의 홍수시 홍수위는 최고수위 발생조건일 때 높게 형성되지만 이 지역에 침수피해를 유발하는 EL. 4.0 m 이상의 수위지속시간은 100년 빈도의 경우 최저수위 발생조건일 경우가 약 15시간으로 최고수위 발생조건일 경우의 12시간에 비해 3시간 정도 증가하기 때문이다. 따라서 치수적인 측면으로 최저수위 발생조건에는 홍수위가 낮아 외수에 대한 안전성은 증가하지만 수위지속시간이 길어 내수침수에는 불리한 결과를 초래할 수 있음을 의미한다.

2.3.5 배수갑문 증설에 따른 방류효과 검토

20 m(B)×6 m(H) 6련인 삼교호 배수갑문을 1련(20 m×6 m)부터 8련 까지 증설하는 것을 가정하여 삼교호의 수리

특성을 그림9와 같이 분석한 결과 100년 빈도 홍수를 기준으로 삼교호의 침두홍수위가 0.08~0.76 m 까지 감소하였으나, 배수문 증설수가 증가 할수록 수위저하 효과는 감소하는 것으로 나타났다.

이에 비해 홍수위의 지속시간은 현저한 감소를 보이고 있는데, 예를 들어 삼교천 유역 하류부의 내수침수를 유발하는 삼교호의 수위를 최소 EL. 3.5 m로 가정할 때 이 이상의 수위지속 시간이 현 상태에서는 약 15시간에 달했지만, 배수갑문을 현재의 2배로 확장할 경우에는 약 6시간 정도로 현저하게 감소하였다. 따라서 배수갑문의 증설이 100년 빈도 홍수시 삼교호의 수위를 현 계획홍수위 산정 기준이 되었던 EL. 5.10 m로 저하시킬 수는 없지만 신속하게 홍수를 배제하여 내수침수 피해를 경감 하는데 큰 효과가 있을 것으로 판단된다.

한편 그림 10은 배수갑문의 적정 확장규모를 결정하기 위해 100년 빈도 홍수와 10년 빈도 홍수시 배수갑문 증설수에 따른 최고수위와 최대방류량을 비교한 것인데, 배수갑문 증설수에 따라 점진적으로 감소하는 최고수위에 비해 최대방류량의 변화성향은 변곡점이 6련 증설부터 명확하게 나타나고 있다.

만약 배수갑문 증설에 소요되는 비용이 배수갑문 수에 비례한다고 가정하면 한계비용 측면에서 최적의 증설규모가 100년 빈도 홍수를 기준으로 할 경우 6련에 해당하며, 하천연안 저지대의 침수시간에 직접적인 영향을 미치는 수위지속시간 역시 배수갑문 증설수가 6련 이상이 될 경우 큰 차이가 없게 되어 삼교호 배수갑문의 증설규모는 6련이 적절할 것으로 판단된다.

2.3.6 삼교호-예당지 연계운영에 따른 효과 검토

침두홍수량의 삼교호 유입 시기를 조절함으로써 삼교호의 내수위를 저하시킬 수 있으면 삼교호 주변 지역을 포함한

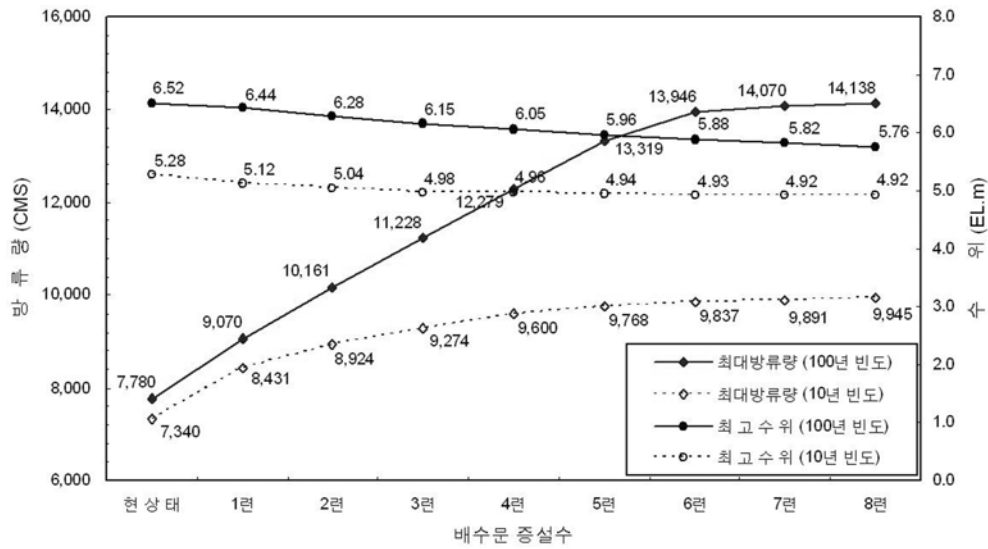


그림 10. 배수갑문 증설에 따른 최고수위와 방류능력 변화 비교

표 4. 예당지 방류 조절에 따른 삼교호 침두수위 비교

단위 : EL.m

구분	CASE 3	CASE 8	CASE 15	CASE 21	
조위·내수위 관계	고고조 일치형	고저조 일치형	저고조 일치형	저저조 일치형	
조절전 침두수위	6.53	5.08	5.80	5.73	
예당지 방류 지체	2시간	6.40(▽0.13)	5.01(▽0.07)	5.64(▽0.16)	5.74(△0.03)
	3시간	6.37(▽0.16)	5.04(▽0.04)	5.55(▽0.25)	5.87(△0.14)
	4시간	6.30(▽0.23)	5.05(▽0.03)	5.48(▽0.32)	5.87(△0.14)
	5시간	6.24(▽0.29)	5.05(▽0.03)	5.42(▽0.38)	5.86(△0.13)
예당지 방류 당김	2시간	6.62(△0.09)	5.29(△0.21)	5.90(△0.10)	5.58(▽0.15)
	4시간	6.63(△0.10)	5.60(△0.52)	5.92(△0.12)	5.43(▽0.30)
예당지 일정량(100%) 방류	6.53 (-)	5.08 (-)	5.80 (-)	5.73 (-)	

유역 하류부의 치수안전성 확보와 침수지역 감소에 크게 기여할 수 있을 것이다. 그리고 인위적으로 홍수유출을 조절할 수 있는 시설로는 삼교천 제 1지류인 무한천 중류부에 위치한 예당지가 유일하다. 예당지의 홍수기 제한수위는 EL.21.5 m로 만수위인 EL.22.5 m에서 1.0 m 낮추어 약 1,000만³m(유효저수량의 22%)의 홍수조절용량을 두고 있으며, 수문은 3.6 m(H)×6.0 m(W)×26련의 tainter gate로 되어 있다.

따라서 예당지의 침두방류 시기를 조절하여 삼교호의 내수위를 저하 시키는 방안을 삼교호 배수갑문과 연계운동을 통해 검토하였다. 그리고 앞서 분석된 삼교천 하구부의 수리특성이 4개 군으로 분류한 조위·내수위 관계의 특징을 가장 잘 나타내는 경우는 case 3, 9, 15, 22이며, 이 조건에서 예당지의 침두방류 시기를 2~5시간 지체 시키거나 2~4시간 앞당길 경우의 삼교호 침두수위를 비교하였다. 아울러 예당지의 홍수조절 방식을 60% 일정률·일정량 방식에서 일정량 방식으로 변경하였을 때 예상되는 방류량에 대해서도 같은 분석을 실시하였다.

그 결과 표 4에서와 같이 고고조 일치형과 저고조 일치형에 해당하는 Case 3과 Case 15 및 고저조 일치형의 Case 9의 모의 결과는 예당지의 방류를 지체시킬 경우 침두수위가 감소하며 그 반대의 경우에는 침두수위가 증가하는 것으로

나타난 반면 저저조 일치형인 Case 22는 예당지의 방류를 지체하면 침두수위가 증가하고 앞당길 경우 침두수위가 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 고조 발생 1, 2시간 후에 침두수위가 나타나는 고조 일치형의 경우 예당지의 방류를 지체시킴으로써 고조 발생시의 삼교호 유입 홍수량을 감소시킨 효과로 침두수위가 감소하며, 예당지에서 침두방류량을 앞당겨 방류하면 고조의 영향으로 삼교호의 수위가 급격히 증가하는 시기에 삼교호 유입량이 더 증가하기 때문에 풀이할 수 있다.

그러나 침두수위가 감수부에서 발생하는 저조 일치형의 경우 고저조 일치형과 저저조 일치형이 상반된 결과를 보이고 있다. 즉 고저조 일치형인 Case 9의 경우 고조 일치형과 같이 예당지의 침두방류를 지체시킬 경우 침두수위가 감소하고, 예당지의 침두방류를 앞당기면 삼교호의 침두수위가 증가하는데 비해 저저조 일치형인 Case 22는 정반대의 성향을 보이고 있다.

저조 일치형 조위·내수위 관계에서는 감수부에서 고조를 만나서 침두수위가 형성되는데, 고저조 일치형은 저고조에 의해, 저저조 일치형은 고고조에 의해서 침두수위가 발생하므로 저저조 일치형이 상대적으로 조위의 영향을 크게 받는다고 할 수 있다. 따라서 예당지에서 침두방류를 2~5시간 지체시킬 경우 고조가 발생하는 시기에 삼교호로 침두홍수

량이 유입하게 되지만, 고조조에 의해 침두수위가 발생하는 고저조 일치형의 경우 해당지의 침두방류를 지체함으로 인한 삼교호의 내수위 감소 효과가 고조가 발생하는 시기에 해당지 침두방류 영향으로 삼교호 유입량이 증가하여 발생하는 수위 증가에 비해 크기 때문에 침두수위가 감소한다. 그러나 고고조에 의해 침두수위가 발생하는 저저조 일치형의 경우 해당지 침두방류 지체로 인한 초기의 수위감소 보다는 고고조가 발생하는 시기에 삼교호 유입량이 증가함에 따른 수위 증가가 커서 침두수위가 증가하는 것으로 판단되었다.

그 밖에 해당지의 홍수조절 방식을 일정률-일정량 방식에서 일정량 방식으로 변경하여도 삼교호의 침두수위에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났는데 그 이유는 현 해당지 여수로 조건에서 유입량과 동일하게 동시간대에 방류하는 것은 불가능 하며, 유입량의 100%를 목표로 방류하여도 실제 방류되는 유량은 실제 형성되는 저수위로 인해 유입량의 대략 60% 정도만 되기 때문이다.

본 연구에서와 같이 서해안 조위의 주기를 고려하여 삼교호로 유입하는 홍수량을 조절함으로써 최저수위 발생조건에서 유입량을 늘리고, 불리한 방류조건에서 유입량을 감소시킬 수 있다면 삼교호의 침두홍수위는 유입량 조절이 없는 상태에 비해 낮게 유지할 수 있을 것이다.

그러나 해당지의 경우 조절용량이 작아 삼교호로 유입되는 총 침두홍수량의 규모에 미치는 영향도 제한적일 수밖에 없다. 그리고 해당지의 방류를 앞당김으로써 삼교호의 침두홍수위를 저감할 수 있는 경우는 저저조 일치형 조위-내수위 관계에 국한되며, 조위 예측과 해당지 삼교호 배수갑문 조작의 불확실성 및 해당지 방류를 앞당길 경우 해당지 하류 지역의 내수침수를 조기에 유발하여 결과적으로 침수지속시간이 증가하는 역효과 발생도 배제할 수 없으므로 해당지의 조기 방류는 실질적으로 기대되는 효과가 크지 않은 것으로 판단된다.

따라서 삼교호-해당지 연계운영을 통해 치수효과를 기대할 수 있는 가장 현실적인 방안은 해당지의 홍수저류능력을 증대하여 무한천 유역의 홍수유출을 가능한 지체시키는 것이라 할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 제내지와 하도를 연계한 하천유역의 홍수유출해석기법을 적용하여 홍수방어를 위한 치수측면에서 삼교호의 수리특성을 서해안 조위 및 유역의 유출상황과 연계하여 검토하였다. 특히, 삼교호 배수갑문을 실제와 같이 운영되도록 모형에 추가하여 다양한 형태로 하도내로 유입되는 유입수문량과 배수갑문을 연계한 해석을 시행하였으며, 그 결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

1. 조위-내수위 관계 분석결과 삼교호의 홍수위를 저감하여 삼교천 유역 하류부의 홍수부담을 감소시키기 위해서는 고고조 주기에서 삼교호로 침두홍수량이 유입하지 않도록 홍수유출을 조절하여야 하며, 약 5시간 동안 침두홍수량의 유입을 지체시킬 경우 배수갑문을 통한 홍수배제에 가장 유리한 고저조 일치형의 조위-내수위 관계가 되어 삼교호

- 의 침두수위를 크게 저하시킬 수 있을 것으로 분석되었다.
2. 배수갑문을 통한 26개 누가방류량 계열은 13시간을 주기로 고조위와 저조위가 반복되며, 26시간을 주기로 크고 작은 주기가 반복되기 때문에 홍수가 어떤 조위에서 시작되거나 침두홍수량이 어떤 조위 조건에서 삼교호로 유입하는 조위의 한 주기에 해당하는 13시간이나 26시간 동안 배수갑문을 통해 방류되는 홍수량의 규모는 거의 같아지게 되어 배수갑문의 통수능을 아무리 확대하여도 조위 조건에 따라 일정 시간의 방류불능이 불가피하여 홍수지속시간이 조위의 한 주기 이상이 되는 장기간의 홍수시에는 우기동안 삼교호의 수위를 낮추어 홍수에 대비하는 현 운영방식에 의한 치수효과는 크게 기대할 수 없을 것으로 판단되었다.
 3. 배수갑문을 통한 홍수배제에 가장 지장을 받는 조위조건에서 홍수규모별로 분석한 결과 대규모 홍수보다 소규모 홍수에서 삼교호 배수갑문을 통한 홍수배제가 상대적으로 원활하지 못한 것으로 분석되었으며, 이는 홍수의 규모가 작으면 내수위가 낮아 방류불능 기간이 길어지고 시간당 방류량도 줄어들기 때문인 것으로 판단되었다.
 4. 홍수 규모별로 최저 및 최고수위 발생조건에 대한 홍수규모별 침수면적은 일반적으로 최고수위 발생조건에서 침수면적이 크게 발생하지만 일반적인 하천의 계획빈도에 해당하는 50년에서 100년 빈도 규모의 홍수시에는 두 경우의 침수면적 차이가 크지 않거나 오히려 최저수위 발생조건에서 침수면적이 더 크게 발생하였으며, 하도고수위 지속시간에 따른 내수배제 불능시간은 최저수위 발생조건에서 고수위지속시간이 길어 내수침수에는 불리한 결과를 초래할 수 있는 것으로 분석되었다.
 5. 삼교호 배수갑문과 해당지의 연계운영에 따른 삼교호 내수위 저하는 해당지의 홍수 조절용량이 작아 그 효과는 미미하였으며, 치수효과를 기대할 수 있는 가장 현실적인 방안은 해당지의 홍수저류능력을 증대하여 무한천 유역의 홍수유출을 가능한 지체시키는 것이라 판단되었다.
- 따라서 이러한 다양한 수리특성 검토를 통한 최적의 치수 방어대책을 수립하기 위해서는 유역의 홍수유출모형이 실제 유출상황을 모의할 수 있어야하나 아직까지 이와 같은 기능을 수행할 모형이나 방안이 연구된 바 없으므로 본 연구에서 개발한 기법을 적용하게 되면 충분한 활용가치가 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 대전지방국토관리청에서 시행한 “삼교천수계 유역종합치수계획” 수립 용역의 일환으로 수행되었으며, 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

김중해, 한건연, 최혁준, 김지성(2002) 하천범람위험도 평가를 위한 체계학적 부정류 해석. 2002년도 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 621-626.
 김진홍, 김주창(1994) 배수갑문의 통수능과 개방고 및 호상공 설계를 위한 실험적 연구. 1994년도 학술발표회 논문집, 한국

- 수자원학회, pp. 63-70.
- 김현영, 박승우(1989) 금강 하류 홍수의 부정류 해석. **한국수자원 학회지**, 한국수자원학회, 제 22권, 제 1호, pp. 99-107.
- 선우중호(1983) 부정류 해석에 의한 금강하류부 홍수위결정. **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제 16권, 제 2호, pp. 123-129.
- 안태진, 류희정, 박정웅(1999) 아산호 배수갑문 규모 검토 및 안성천 홍수관리 대책. **1999년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 268-273.
- 유명관, 전경수(1998) 팔당댐을 내부경계로 포함하는 부정류 계산모형. **1998년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 333-338.
- 연규방, 이은태, 김남원(1997) 낙동강 하구의 배수영향을 고려한 홍수추적. **1997년도 학술발표회 논문집(II)**, 대한토목학회, pp. 179-182.
- 이승호(1996) 배수갑문조작에 의한 답수호의 부정류현상에 대한 해석. **농공기술, 농어촌진흥공사**, 제 50권, pp. 25-37.
- 이정규, 전세호(2004) 부정류 모형을 이용한 한강의 수리학적 홍수추적에 관한 연구. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제 24권, 제 4-B호, pp. 301-310.
- 전경수(1996) 월류흐름을 포함한 부정류 계산모형에 관한 연구. **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제 29권, 제 2호, pp. 153-165.
- 정태성, 정동국, 고태진, 전병호(2000) 황성댐 하류 홍수 영향분석. **2000년도 학술발표회 논문집(III)**, 대한토목학회, pp. 217-220.
- 최계운, 김동욱, 이동희(2000) 경인운하내 부정류 흐름해석. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제 33권, 제 S1호, pp. 547-552.
- 추태호(2002) 낙동강하구둑 방류량 산정방법 개선연구-엔트로피 개념에 의한 유량측정방법 적용. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제 22권, 제 4-B호, pp. 485-494.
- 황의준, 전경수(1996) 한강하류부에 대한 부정류 계산모형. **1996년도 학술발표회 논문집(II)**, 대한토목학회, pp. 161-164.
- Khangaonkar, T., Breithaupt, S., Roy, L., Kristanovich, F., Yang, Z. (2003) Hydrodynamic and Hydrologic Feasibility Assessment-Chinook River Restoration Project, Proceedings of Lower Columbia River and Estuary Research Needs Identification Workshop, March 24-25, 2003, Portland, OR.
- U.S. Army Corps of Engineers (2002a) *HEC-RAS river analysis system user's manual*, CPD-68, Version 3.1, HEC, Davis, Calif.
- U.S. Army Corps of Engineers (2002b) *HEC-RAS river analysis system hydraulic reference manual*, CPD-69, Version 3.1, HEC, Davis, Calif.
- U.S. Army Corps of Engineers (2002c) *HEC-RAS river analysis system application guide*, CPD-70, Version 3.1, HEC, Davis, Calif.

(접수일:2005.10.14/심사일:2005.12.20/완료일:2005.12.20)