

유역중심의 농업용저수지 치수능력 강화방안

김 해 도

(searoad@ekr.or.kr)

한국농어촌공사 농어촌연구원 주임연구원

이 광 야

(kylee@ekr.or.kr)

한국농어촌공사 농어촌연구원 책임연구원

조 진 훈

(leeyj@ekr.or.kr)

한국농어촌공사 농어촌연구원 수석연구원

■ 서 론

4대강살리기사업에 필요한 수량의 확보차원에서 시작된 「농업용저수지 독높이기사업」의 기본 목표는 이수측면에서 농업지역 관개용수의 공급과 함께 하류하천 지역용수의 공급이고, 더불어 재해측면에서 취약한 농업용저수지를 보강하는 것이다. 이러한 농업용저수지 재개발이 주목받는 이유는 신규용수 개발을 대안으로 용수확보의 효과가 매우 크기 때문이다. 현재 전국에 약 17,300여개의 농업용저수지가 산재되어 있는데 유효저수량이 100만^m 이상인 중규모 이상의 저수지는 3,000여개 정도로 대부분은 소규모 농업용저수지로 재개발시 용수확보가 신규개발에 비해 효과적이기 때문이다. 따라서 상류하천의 건전화 방지 및 이상기후를 대비한 농업용저수지의 재개발사업은 국가전체의 수자원건전화

및 재해대비 차원에서 지속적으로 추진되어야 할 것이며, 지금까지 독높이기사업을 통해 재개발계획이 추진된 농업용저수지는 전체 농업용저수지의 1% 미만으로 앞으로도 지속적으로 추진되어야 할 필요가 있다.

농업용저수지는 위치적·이용측면의 특성상 동일수계내에 여러 저수지가 위치해 있다. 따라서 치수측면에서는 저수지 개별의 치수능력도 중요하지만 유역 개념에서 비추어 볼 때, 시설간의 연계 운영을 통해서 이상기후의 영향에 의한 돌발적인 재해를 대비하는 것이 치수능력을 강화할 수 있는 방안이라 할 수 있다. 특히, 최근의 치수와 관련된 사업의 특징은 제방중심의 선단위 안전도가 아닌 유역중심의 면단위 치수안전도를 증대할 수 있는 방향으로 진행되고 있으며, 면단위 치수안전도 증대에 가장 중요한 핵심은 홍수량의 유역 배분이며, 이를 가능케

하는 시설 중 가장 규모가 큰 시설은 농업용저수지이다.

본 기고에서는 농업용저수지의 재해대비방법으로 기후변화에 대비하여 유역중심의 치수능력 강화를 위해 저수지군 연계운영 기법을 소개하고 안정적인 치수관리를 위해 유역중심의 하류하천 영향검토 방법을 소개하고자 한다.

■ 저수지군 연계운영 기법 검토

▶ 최적화 기법에 의한 홍수조절

저수지군 연계운영의 궁극적인 목표는 치수효과를 극대화하기 위함이며 이를 위해서는 하류하천의 영향을 고려한 홍수기 저수지의 최적 연계운영으로 말할 수 있다. 저수지의 연계운영방법은 용수공급 및 발전 등 이수관점에서의 장기운영방안과 홍수시 치수관점에서의 단기운영방안으로 구분할 수 있다.

홍수시 댐 운영방안으로 방류량 조절 목적인 Rigid ROM, Auto ROM 및 Technical ROM 등으로 구분할 수 있으며, 단기연계운영에서는 운영목적과 제약조건 변수간의 최적관계를 도출하기 위해 최적화 기법의 도입이 요구된다. 다음은 종류별 최적화 기법에 의한 홍수조절방법이다.

- 비선형 계획법(Nonlinear Programming ; NP): 최적화 과정이 다른 기법에 비해 느리고 유입량의 추계학적 특성을 고려하기 어려우므로 저수지 운영사례가 거의 없음
- 선형 계획법(Linear Programming ; LP): 목적함수 및 제약조건이 선형관계일때 적합하므로 실제 댐군 단기연계운영상의 비선형성 때문에 선형화작업이 필요하고 유입량의 추계학적 특성을 고려하기 어렵기 때문에 장기 댐의 장기 운영에 대해 적용
- 혼합정수계획법(Mixed Integer Programming;

MIP): 개별저수지로부터 방류량을 결정함으로써 전체구간의 피해를 최소화시키기 위해 HEC-FCLP 모형 적용

- Recursive LP 모형: 홍수시 피해지역의 손실을 최소화시키는 목적함수아래 복합적 댐 조작을 고려한 제약조건을 설정하며 모형적용을 위해서는 첨두유량에 따른 피해액 자료가 요구됨
- 동적 계획법(Dynamic Programming; DP): 선형화 과정이 불필요하며 유입량의 추계학적 특성을 고려할 수 있으므로 댐군 단기연계운영에 부분적으로 적합하여 일부 연구가 수행됨
- 증분동적계획법(Incremental DP): 하류부 합류점의 첨두유량을 최소화시키는 목적함수 아래 개별 댐 및 하도특성을 고려한 제약조건을 설정하여 댐군 연계운영에 적용됨

우리나라의 경우 최적화 기법을 이용한 저수지군 연계운영에 대한 연구는 주로 이수관리목적을 위한 댐의 장기운영에 대하여 적용되었으며, 홍수조절 목적의 단기운영에 관한 연구사례는 극히 제한적이며 기존의 홍수기 저수지 연계운영사례는 다음과 같다.

▶ 기존 홍수기 저수지 연계운영 사례

가. 증분동적계획법(Incremental DP)에 의한 홍수시 댐군 연계운영

북한강 수계의 화천댐과 소양강댐의 홍수시 연계 운영을 위하여 증분동적계획법을 이용한 최적운영 모형을 개발하였다. 목적함수는 각 댐의 방류량 합류점의 첨두유량을 최소화하고 수리·수문학적 제약조건은 홍수시 댐조작에 관한 관리규정과 각 댐 및 하도특성을 고려하여 설정하였으며, 각 댐의 유입량 자료는 빈도별 홍수수문곡선을 사용하였다. 그리고 각 댐의 시간별 방류량은 하류부 유량을 고려하여 설정된 한계방류량 이하로 설정하여 홍수

시작전 각 댐의 초기저류량과 홍수종기의 댐 저류량은 제한수위에서의 저류량으로 설정하여 홍수조절이 가능토록 구성하였다. 하류부 하도추적은 수문학적 추적법인 Muskingum 방법을 사용 (지천유입량 고려)하였다.

나. 한강수계 댐군 홍수조절 연계운영시스템 구축

한강수계의 댐군에 홍수조절을 목적으로 연계운영 시스템을 구축하기 위해 1단계로 소양강댐, 충주댐, 팔당댐을 대상으로 구축하였다. 본 시스템에서는 하류의 목표 방류량 설정을 위해 댐상류의 예측 홍수량 및 저수위, 댐하류의 예측홍수량 및 홍수위를 고려하였다. 댐하류의 하도추적은 수문학적 모형인 Muskingum-Cunge방법 적용하였고, 여수로 방류량 초기값에 따른 팔당댐 유입량에 대한 영향을 분석함으로써 댐군 연계운영의 효과 검토하였다.

2단계로는 홍수조절 댐 운영의 효율성과 신뢰성도모를 목적으로 수계내의 댐 상·하류 홍수분석체계를 일원화하는 시스템을 개발하여 한강수계의 8개 댐의 방류량이 한강하류 잠수교 및 한강대교의 수위에 미치는 영향과 하류 조위와의 상관관계를 검토하였다. 수계내 주요지점의 홍수예측 정보와 댐 방류정보에 대해 관련기관에 공유가 되었으며, 댐 상류의 홍수량 분석은 매개변수의 자동보정기법을 적용한 저류함수 기반의 강우-유출 모형 도입하였고,

하류부 홍수추적은 수리학적 수치해석모형(FLDWAV)을 도입하여 댐 하류 홍수예측의 정확성을 높였다.

운영방법은 하류의 홍수조절에 영향을 미치는 댐에서의 최적방류량을 선정한 후 주요 목표지점의 홍수량 및 홍수위 변화를 모의할 수 있도록 구성하였고 실시간으로 댐 상·하류 피해를 최소화하기 위해 수계의 홍수량 변화를 종합적으로 반영할 수 있도록 하였다.

■ 저수지군 최적연계운영 기법

저수지군의 최적연계운영기법은 하류부의 홍수피해를 최소화 할 수 있도록 수계별 저수지간 홍수조절 기능을 연계 운영하여 치수효과를 극대화하기 위한 것이다.

▶ 저수지 연계운영방식 결정 기준

저수지 연계운영방식의 결정기준은 하류하천의 목표지점의 침투유량을 최소화시키는 기준으로 저수지군 운영을 검토하는 것이다. 이를 위해서는 다음의 내용이 요구되며, 개별저수지의 치수안정성 및 하류하천을 고려한 운영방법을 적용해야 한다.

- 저수지 조작을 통한 홍수조절은 저수지의 홍수 조절용량을 최대한 활용하여 가능한 범위에서 방류량을 줄이는 것이 요구됨
- 저수지군에서는 각 시설이 유기적인 상관관계에서 합류점까지의 하도추적과 저류유입량을 고려하여야 치수기능을 극대화시킬 수 있으므로 방류량이 합류하는 지점의 침투유량을 최소화하는 것이 요구됨

▶ 저수지 최적연계 운영 방안

하류하천을 고려한 저수지 연계운영 시스템 구성은

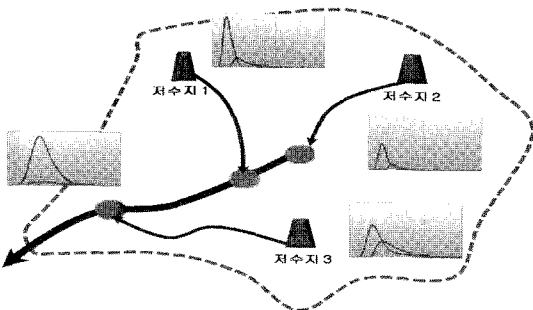


그림 1. 저수지 연계운영 개념도

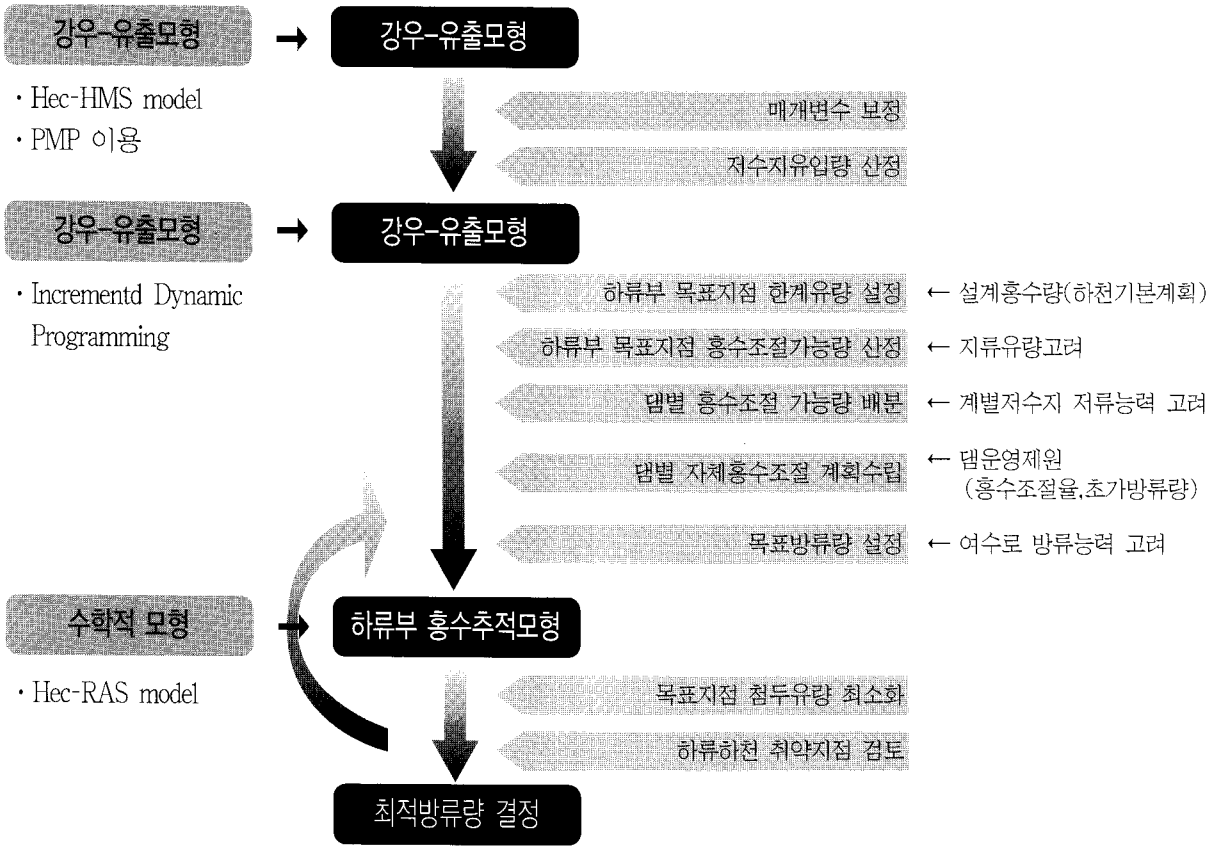


그림 2. 저수지군 최적 연계운영시스템 흐름도

다음과 같다.

가. 홍수량 분석모형 절차

- 수문학적 강우-유출모형 적용(HEC-HMS 모형)
- 모형의 매개변수 보정을 통한 저수지 유입수 문곡선(PMF) 산정
- 홍수량 분석 절차
 - 소유역별 수문자료 및 유역자료 수집
 - 빈도별 확률강우량 및 가능최대강수량 산정
 - 면적감소계수(ARF)를 이용한 강우의 공간 분포 적용
 - HUFF 방법 및 교호블럭 방법 등을 이용한

강우의 시간분포 적용

- 유출 매개변수 추정 및 검정에 의한 강우유출모형 적용(손실율 및 기저유출 고려)
- 저수지유역 및 하류하천의 기준홍수량(PMF) 산정(임계지속시간 고려)
- 시나리오별 저수지 운영 가이드라인을 고려하여 저수지 홍수추적 실시
- 댐별 초기 조절방류량 산정

나. 댐군 연계운영 모형

- 증분동적계획법을 이용한 최적화 기법 적용
- 목적함수: 목표지점의 침투유량 최소화

- 제약조건: 저수지 운영제원, 하도특성
- 저수지간 통합홍수조절에 의한 목표방류량을 결정하기 위해 방류규모별로 단계적 검토 후 시행
- 목표방류량 산정절차
 - 하천기본계획상에 고시된 설계홍수량을 근거로 하류부 목표지점의 한계유량을 설정
 - 하류부 목표지점의 홍수조절 가능량을 산정하되 가능량은 목표지점 상류의 홍수조절 가능 댐들이 조절방류를 하지 않는다는 가정아래 댐유역 이외의 지류유입량은 목표지점 한계유량에서 차감하여 산정함
 - 개별 저수지에 대한 홍수조절 가능량을 배분, 배분방법은 홍수조절 시점에 상류댐들의 저류가능 능력을 고려한 등가 저수지 개념을 적용하여 저류가능 능력이 부족한 댐에 우선적으로 홍수조절 가능량을 배분
 - 개별 저수지의 홍수조절 가능량에 대한 자체 홍수조절계획을 반영, 댐의 운영제원 (홍수조절율, 초기 방류량 및 저수위 등)을 고려한 저수지 운영률 (Auto ROM, Rigid ROM, Technical ROM 등)을 적용
 - 개별 댐의 여수로 방류능력을 고려한 목표방류량 설정

- 각 댐의 목표방류량에 따른 하류하천의 영향검토를 목적으로 함
- 측량된 하도단면자료를 이용하여 지형자료를 구축하여 댐의 목표방류량을 유입경계조건으로 지정, 하류경계조건은 기점수위자료를 활용함
- 수리학적 모형인 HEC-RAS(또는 FLDWAV)로 하도의 동역학적 홍수추적 실시하여 홍수량 및 홍수위 예측
- 하류부 목표지점의 침투유량을 최소화하기 위해 홍수추적결과를 개별 댐 운영에 피드백 후 반복계산으로 최적 홍수조절계획에 의한 방류량을 결정 (증분동적계획법에 의한 최적화기법 적용)
- 댐군 연계에 의한 최적방류량이 결정되면 하류부 지점별 예측수위 및 유량을 분석한 후 취약지점 분석 및 영향검토

■ 하류하천 영향 검토

저수지 연계운영에 의한 하류하천의 영향을 분석하기 위해서는 수리·수문학적 영향, 침수면적 저감 등을 통해 분석할 수 있다. 하류하천 영향검토는 빈도별 홍수량에 대한 저수지군의 최적연계 방류량이 결정되면 하류하천에 대한 수리·수문학적 영향, 침수면적 저감 등을 합리적으로 고려함으로써

다. 하류부 홍수추적 모형

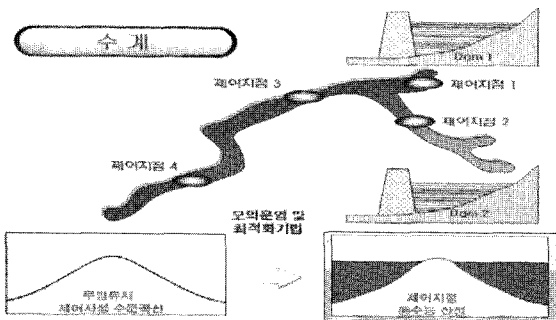


그림 3. 댐 방류량 의사결정 방법

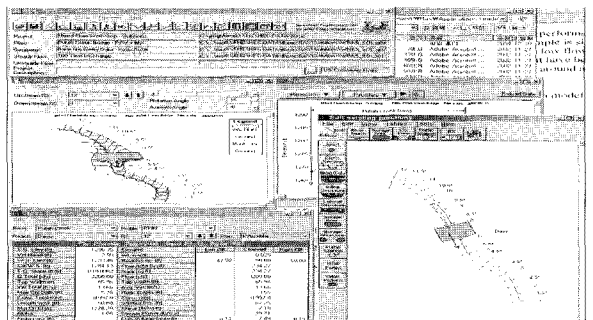


그림 4. HEC-RAS에 의한 하천단면자료 구축

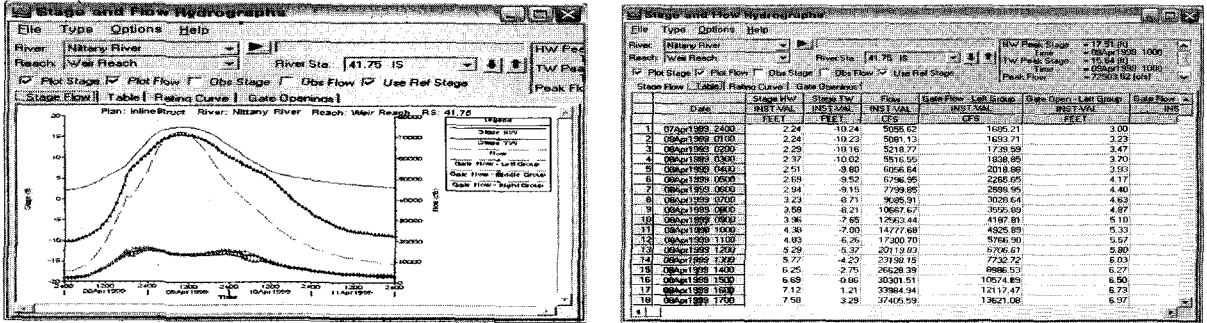


그림 5. HEC-RAS에 의한 하류부 지점의 홍수량 및 홍수위 예측

취약지점 분석 및 잠재적 위험성을 검토할 수 있다.

가. 수문학적 영향검토

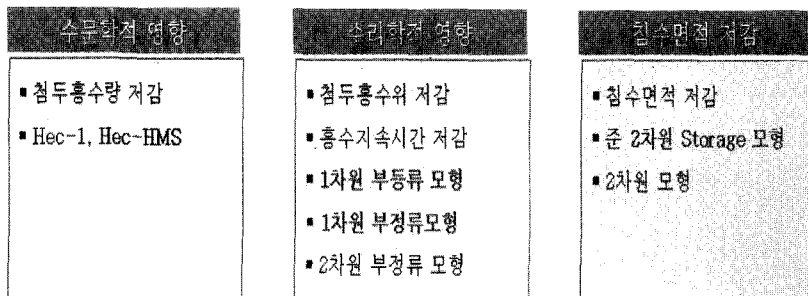
- HEC-1, HEC-HMS를 이용한 수문학적 홍수추적
 - Muskingum-Cunge 방법에 의한 하도추적 실시
 - 지천의 유입에 따른 홍수량 변화 고려
 - 하도 주요 구간에 대한 첨두홍수량 분석
- 저수지군 연계운영에 의한 최적방류량에 따른 하류 주요지점의 첨두홍수량 변화를 분석함으로써 저감효과를 검토함
 - 저수지군 연계운영 이전의 하류 주요지점의 첨두홍수량과 연계운영 이후의 주요지점의

첨두홍수량 변화를 비교검토

- 수리학적 모형을 이용한 하도추적 결과와 비교
 - 동역학적 홍수추적 모형인 HEC-RAS 모의결과와 비교검토를 통해 주요지점의 홍수량변화 및 저감 효과 검토

나. 수리학적 영향 검토

- 동역학과모형을 이용한 홍수추적을 위해 HEC-RAS의 1차원 부정류해석모형인 UNET 모형을 적용
- 상류단 경계조건으로 최적 방류량을, 하류단 경계조건으로 본류 수위수문곡선이나 수위-



영리사업 하도하천 영향 검토

그림 6. 하류하천의 영향검토 개요

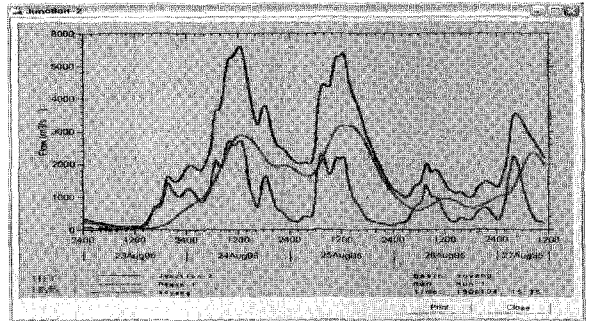
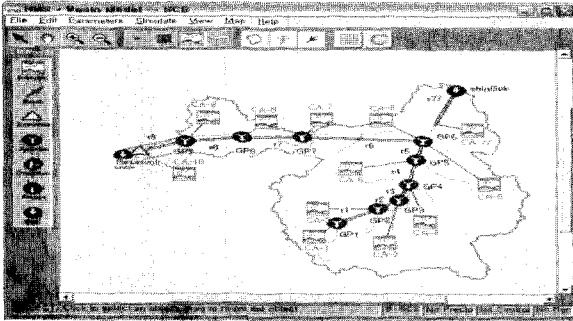


그림 7. 수문학적 홍수추적 모식도 및 첨두홍수량(HEC-HMS)

- 유량곡선식을 지정
- 지류하천을 고려한 하천네트워크 흐름 모의
 - 본류 수위상승으로 인한 지류 영향 검토
 - 실제 하천의 상황을 반영하는 정교한 동수역학적 분석기법 적용
- 최적연계 댐방류량에 따른 주요지점의 첨두홍수위/홍수지속시간 변화를 분석함으로써 저감효과 검토
 - 저수지 최적연계운영 이전조건과 이후조건인 방류량을 유입조건으로 하도추적을 실시하여 첨두홍수위와 홍수지속시간의 변화를 분석함으로써 하류부 치수효과 검토
- 조석으로 인한 배수영향 구간 검토
- 하천구조물에 의한 수위영향 검토
 - 하천내의 교량, 암거, 배수문 등의 대한 수리학적 영향 검토

- 하천 범람 및 침수에 대한 기본자료 구축
 - 하도 구간 내 원하는 지점의 홍수량에 따른 수위 계산
 - 침수범람예측에 필요한 기초자료(상하류 경계조건) 구축

다. 침수면적 저감효과 검토

유역의 홍수분담을 고려한 홍수방어대안에 따른 침수면적 저감효과 분석은 유역의 홍수방어를 위해 수계 전체를 통하여 일관성 있고 목적하는 홍수조절기능이 최대한 발휘될 수 있도록 해야 한다. 중요한 점은 홍수의 분담을 하천에서만 분담하는 것이 아니라 유역전체가 분담하도록 해야 한다.

홍수방어대안은 크게 구조적 대책과 비구조적 대책으로 구분되는데 일반적으로 우선 비구조적 대책을 위주로 고려되고 있다. 비구조적 대책은 유역상류부의 홍수시 방류량을 최적 댐군 연계운영에 의하여 최소화함으로써 하류의 홍수피해를 줄이기 위한 대안을 고려할 수 있으며, 홍수방어대안의 도입 전·후에 따른 수리·수문학적 평가를 통해 홍수범람지역의 침수면적 저감효과를 분석한다.

다음은 우리나라에서 적용할 수 있는 침수해석 모형의 종류 및 적용절차이며, 대상지역의 지리학적 특성 및 수문학적특성을 고려하여 적용해야 한다.

- 준 2차원 Storage 모형을 이용한 저지대 침수 해석

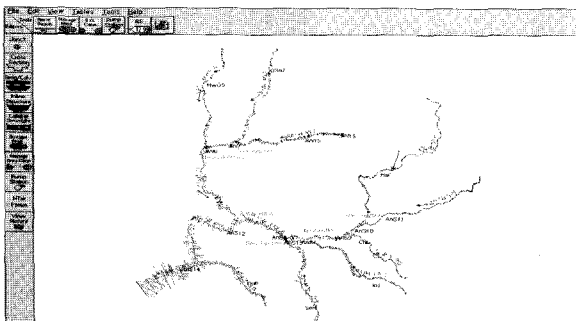
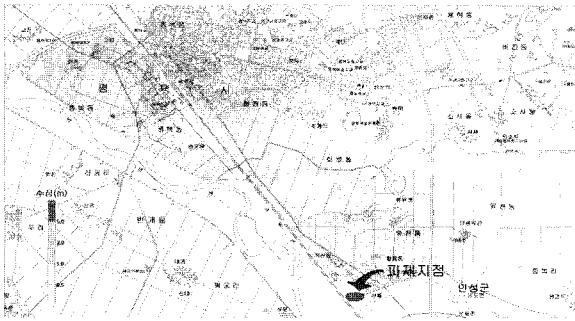
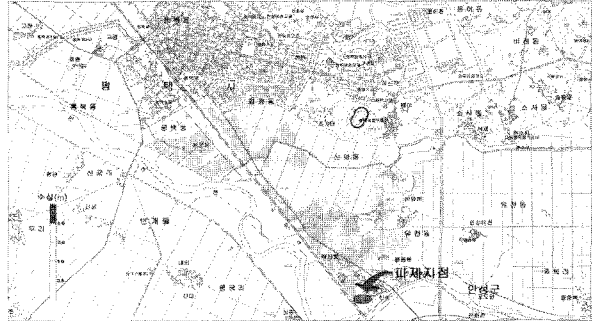


그림 7. 수문학적 홍수추적 모식도 및 첨두홍수량(HEC-HMS)



홍수방어대안 도입전



홍수방어대안 도입후

그림 9. 홍수방어대안의 도입전·후 홍수범람특성

- HEC-RAS와 연계한 침수예상지역 모의
- 침수피해 발생이 예상되는 주요 하천의 중·하류부 하천변 저지대를 대상으로 지형특성과 배수체계를 고려하여 침수예상지역 구분
- GIS기법(Arc-View)을 활용하여 침수예상지역의 내용적과 수치고도자료 추출
- 현장조사 및 관련기관 자료조사를 통해 저지대내 배수시설(배수문, 펌프장) 조사
- 침수예상지역을 HEC-RAS모형의 Storage로 구성
- 저지대 침수해석 모형의 구성
- 2차원 FLUMEN 모형을 이용한 외수범람 모의
 - 2차원 불규칙 격자를 이용한 대상영역의 이산화
 - 파제나 범람에 따른 침수범람 예측구간의 검토
 - 홍수빈도별 침수시간, 최대침수심, 침수면적 등 예측가능
- FLUMEN(FLUvial Modeling ENgine) 모형
 - 스위스 Beffa(1994)에 의해 개발된 동수역학 모형으로 홍수범람해석에 사용
 - 국내에서는 한강홍수지도제작에 적용된 바 있음
 - 지배방정식으로 천수방정식을 이용하여 상류 및 사류, 천이류를 안정적으로 해석
 - 불규칙한 격자구조에 대해 적용이 가능하고 하천의 합류점이나 만곡부분과 같이 수리학적으 복잡한 흐름해석에 적합함
 - 이동경계조건 가능, Wet/Dry 모의 적합
 - 침식과 퇴적에 대한 하상변동 모의 가능
 - 후처리 과정으로 수심, 유속벡터 등의 도시가 가능
 - 적용범위로 홍수모의 및 홍수위험 평가, 댐 붕괴 해석 및 거주지역 적합성 평가, 흐름해석 등에 적용가능

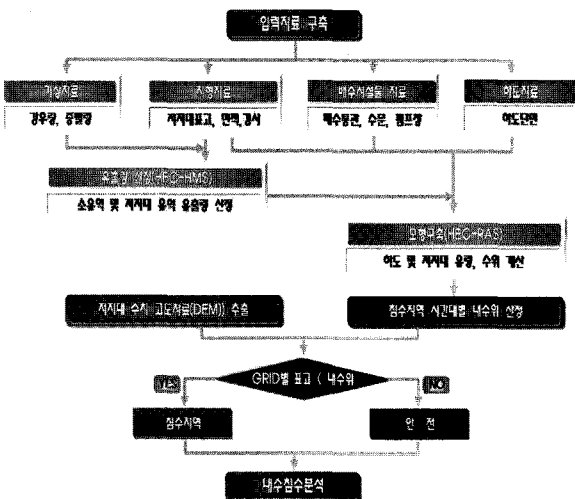


그림 10. 저지대 침수해석기법 모형 흐름도

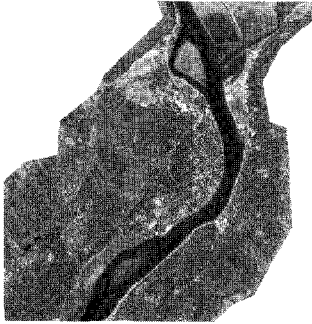


그림 11. 저지대 침수예상지역 결과(HEC-RAS 연계)HMS)

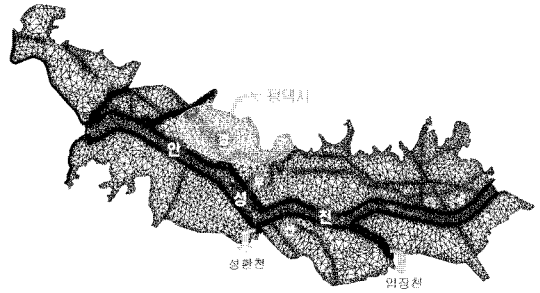


그림 12. 홍수범람해석을 위한 격자망

■ 결론

본 기고에서는 농업용저수지의 재해대비방법으로 기후변화에 대비하여 유역중심의 치수능력 강화를 위해 저수지군 연계운영 기법을 소개하고 안정적인 치수관리를 위한 유역중심의 하류하천 영향검토 방법을 소개하였다. 수자원의 이상적인 관리방법은 유역단위의 운영이며, 이를 실현하기 위해서는 유역특성을 잘 고려할 수 있는 개별 시설의 운영과 함께 연계하여 운영할 수 있는 시스템의 구성이다. 특히, 농업용저수지는 하천의 상류뿐만 아니라 하류에도 위치해 있기 때문에 이상기후대비 적절한

재해대책수립을 위해서는 유역별 저수지를 연계한 운영이 필요하다. 여기서 설명한 각 공정별 분석 방법은 우리나라의 지형적 특성을 고려하여 주로 사용되고 있는 분석방법을 위주로 설명하였으며, 외에도 고려할 수 있는 모델이 지속적으로 개발되고 있기 때문에 실제 계획에서는 각 공정별로 고려할 수 있는 분석방법을 최대한 비교하여 사용하는 것을 추천한다.

참고문헌

1. 농업생산 기반정비 사업계획 설계기준, 1999, 농림부.
2. 댐군 홍수조절을 위한 연계운영모형, 2005, 한국수자원공사.
3. 댐설계기준, 2004, 건설교통부.
4. 댐시설유지관리기준, 1994, 건설교통부.
5. 수자원장기종합계획(보완), 2006, 건설교통부.
6. 수자원 관리기법 개발 연구조사, 1998, 건설교통부.
7. 치수사업 경제성분석 방법 연구, 2004, 건설교통부.
8. 풍수해저감 종합계획 수립, 2008, 한국방재협회 방재연수센터.
9. 하천설계기준, 2009, 한국수자원학회.
10. 하천제방관련 선진기술개발, 2004, 건설교통부.
11. 하천정비기본계획 지침, 2004, 건설교통부.
12. 한강수계 댐군 홍수조절 연계운영시스템 구축, 2006, 한국수자원공사.

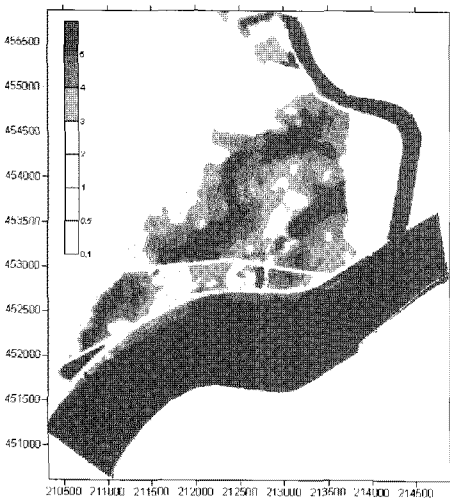


그림 13. 홍수범람에 따른 최대 침수심 예상도