수계 댐을 연계한 홍수조절시스템 구축

김 성 탁 |
건설교통부 수자원개발팀장
kst1111@moct.go.kr

오 영 진 |
건설교통부 사무관
k7849@moct.go.kr

이 한 구 |
한국수자원공사 한강수계차장
hglee@kwater.or.kr

이 을 래 |
한국수자원공사 선임연구원
erlee@kwater.or.kr

1. 서 론

최근 지구온난화 등에 따른 기상이변으로 댐 및 하류 하천의 홍수량이 점차 증가하고, 과거 설계당시의 계획홍수량을 초과하는 상황이 발생하는 등 물관리의 여건이 보다 악화되고 있다. 이러한 상황에서 정부는 신규 댐 건설과 같은 수자원의 추가확보 방안과 더불어 기존 시설의 더욱 정교하고 효율성을 극대화하는 운영을 도모하고자 댐군을 연계하여 유역의 홍수량을 보다 효과적으로 조절할 수 있는 대책을 수립 중에 있다.

이러한 배경에서 1999년에 홍수로 인한 재해의 방지와 수자원의 효율적인 운영을 위하여 한강수계 댐 통합운영규정이 제정되었고, 2003년에는 수해방지 특별대책의 추진과제로 댐 연계운영에 의한 홍수조절 과업이 선정되었다. 이에 따라 건설교통부에서는 2004년부터 우선적으로 한강수계에 대하여 보다 합리적인 운영관리를 위한 "댐군 홍수조절 연계운영시스템 구축"과업을 착수하였고, 2006년에 구축이 완료됨에 따라 시스템의 안정적 운영을 위한 시험운영을 수행하고 있다. 아울러 시스템의 확장을 위하여 낙동강 수계 등 기타 수계에 대하여도 산학 기술협력을 통한 시스템 개발을 가속화하고 있다.

2. 연계운영시스템의 특징 및 의의

한강 수계의 예를 들면, 수계 상류에는 북한강의 5개댐(소양강댐, 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐)과 한강본류의 3개댐(충주댐, 괴산댐, 횡성댐)이 위치하고 있으며, 상기 8개 댐에서 방류된 물이 팔당댐으로 모여서 한강하류로 방류된다. 이들을 홍수기에 유기적으로 통제하기 위해서는 댐으로부터 방류된 물이 한강하류 잠수교나 한강대교의 수위에 어떠한 영향을 주는지, 한강하류 조위와는 어떠한 관계를 가지는지 등을 실시간으로 종합 분석하고 판단할 수 있는 댐군의 연계운영 시스템이 필요하다. 과거에는 이러한 종합적인 분석과정을 다원화된 분석시스템에서 기관별

로 수행하여 급변하는 홍수상황에 효율적으로 대처하는데 한계가 있어왔다. 이에 정부(건설교통부)는 홍수통제소, 한국수자원공사, 한국수력원자력(주) 등 기관별로 각자 여건에 맞게 실시하고 있는 홍수분석 기술을 통합 적용할 수 있는 "수계별 댐간 홍수조절 연계운영시스템"을 구축하도록 계획을 입안하였고, 모형개발 및 시스템 구축경험이 풍부한 학계 및 산업체와의 협업을 통해 시스템의 구축을 추진하였다. 2006년까지는 한강수계에 대하여 댐 상·하류 홍수분석체계를 일원화하는 시스템을 개발하였으며, 2007년부터 시스템의 안정적 활용성을 검증하고자 개발된 시스템을 다목적댐의 운영업무에 조기 도입하여 적극 활용 중에 있다.

상기 개념에 따라 기타수계 댐군의 연계운영을 고려한다면, 낙동강 수계의 5개 다목적댐(안동,임하, 합천,남강,밀양)과 4개의 용수전용댐(운문,영천,공산, 가창) 및 2개의 농업용댐(성주,경천)을 고려한 연계운영을 고려할 수 있으며, 금강 및 섬진강 수계에 대하여도 직렬 및 병렬로 연계된 각종 댐을 연계하여 비구조적 홍수조절 효과를 얻을 수 있으리라 기대된다.

3. 연계운영시스템의 기본구성

댐군 홍수조절 연계운영시스템의 기본구성 및 특성은 크게 세가지이다.

첫째로 홍수조절 댐 운영업무의 효율성과 신뢰성

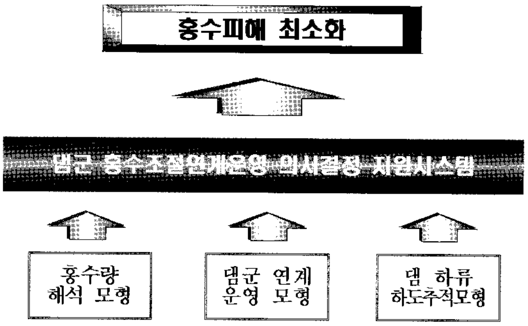

그림 1. 시스템 구성 내용

이다. 기존의 댐 운영은 다목적댐 각각을 개별적으로 분석하고 하류에 대한 영향을 분석한 다음, 다시 각 댐을 독립적으로 운영하는 피드백(Feedback) 과정을 수동으로 진행하였다. 하지만 이 시스템에서는 홍수관리 주체들이 독자적으로 실시하고 있는 홍수분석 기술을 통합하여 그림 2~3과 같이 댐 상황과 하류 상황을 고려하는 과정이 하나의 시스템(그림 1) 내에서 이루어지게 되어 효율성과 신뢰성을 도모할 수 있다.

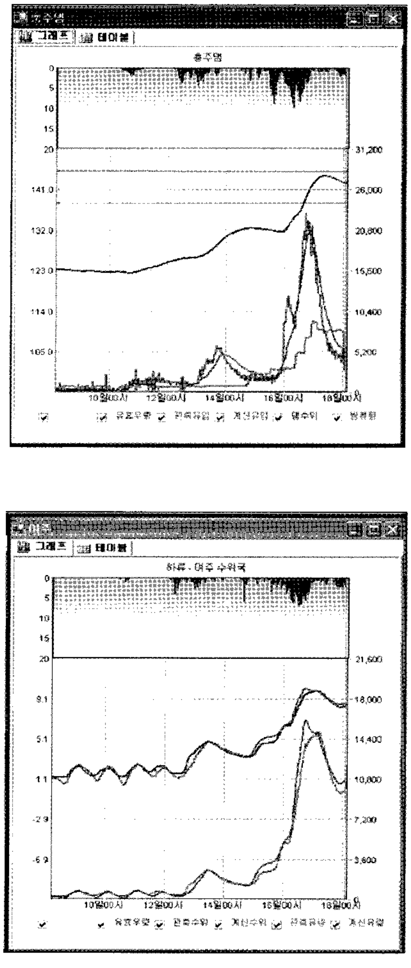

그림 2. 댐 및 직하류 분석결과

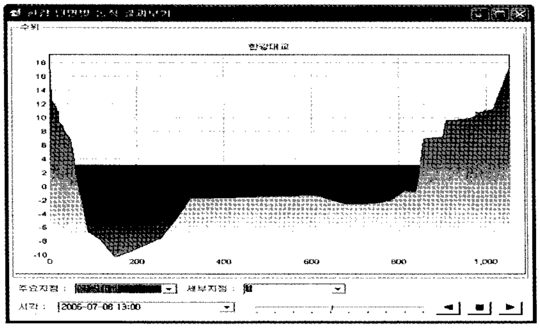

그림 3. 주요지점 횡단면 수위 변화

둘째로 관련기관 간 정보의 공유이다. 시스템으로부터 도출된 수계내 주요지점의 홍수예측 정보와 주요 댐의 방류정보를 건교부 산하 홍수통제소와 한국수력원자력, 한국수자원공사 및 관련 지자체가 공유하게 되면, 댐 방류 의사결정의 정확성, 효율성, 신뢰성을 제고하게 될 것이며, 기존의 방류량 결정을 위한 종이 문서의 팩스 송수신에서 실시간 전자문서 공유방식(그림 4)의 도입을 통해 효과적인 홍수조절 댐 통합운영을 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

셋째로 댐 하류 홍수예측의 정확성을 높이는 것이다. 기존 홍수예측 모형에서 조석 및 하구둑의 영향을 고려한 보다 과학적인 홍수예측모형의 도입으로 댐 방류계열에 대하여 정교한 홍수예측이 가능하게 되었다. 특히 수계 하류부의 흐름에 미치는 수리학적 영향을 적절하게 모의할 수 있도록 모형을 수정, 개

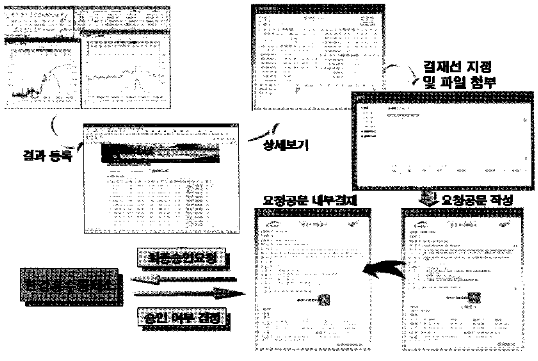

그림 4. 분석결과에 대한 기관협의용 문서작성 시스템

선함으로써 다양한 형태의 흐름을 모의할 수 있는 발전적인 모형의 수립이 가능하게 되었다. 기존의 주요지점 수위-유량식에 의존하던 수문학적 방법에 의한 홍수분석에서 정교한 수치해석을 통한 수리학적을 분석으로 하도구역내 상세 지점에 대한 홍수위 예측이 가능하며, 수공구조물에 대한 영향까지도 실시간 추적이 가능하게 되었다.

3.1 수문학적 홍수예측 모형의 개선

연계운영시스템내의 기본 모듈인 수문학적 강우-유출 모형은 건교부 산하 4대강 홍수통제소와 다목적댐의 홍수분석모형에 적용중인 저류함수 기반의 실시간 홍수분석기술을 도입하였으며, 모형의 선정 배경으로 모의 정확도는 물론 현업 실무자의 친숙도를 최우선으로 고려하였다. 아울러 저류함수 모형의 단점을 보완할 수 있는 여러 가지 기법들을 추가 보완하여 일반적인 수문학적 지식을 갖춘 실무자들이 쉽게 적응할 수 있는 사용자 편의환경 개발에 중점을 두었다.

수문학적 모형의 소유역 및 하도 분할은 기존의 홍수예경보 및 댐운영 모형에서 적용중인 소유역 분할을 기준으로 기관간 상충하는 부분을 모두 포용하는 방향으로 재분할 하였으며, 모형의 분석결과는 기존시스템간의 호환이 충분이 이루어질 수 있도록 하였다.

홍수시작 전 하천유량 또는 댐의 유입량과 상류 유역의 초기 토양습윤상태를 대표하는 유출상수(F1, Rsa)의 관계를 회귀분석(그림 5)하여 유역별 기저유량-유출상수 회귀식을 도출하였다. 이는 과거 실적자료에 대한 특성값을 추출하여 현재의 토양수분에 근사한 유출율을 유추할 수 있는 비교수문 개념을 도입한 사례라 할 수 있다. 이로서 사용자는 현재의 유역 습윤상태를 예견하기 위하여 현재 흐르는 하천의 유황만을 모니터링 하기만 하면 손쉽게 유역의 유출상황을 예측할 수 있게 되었다.

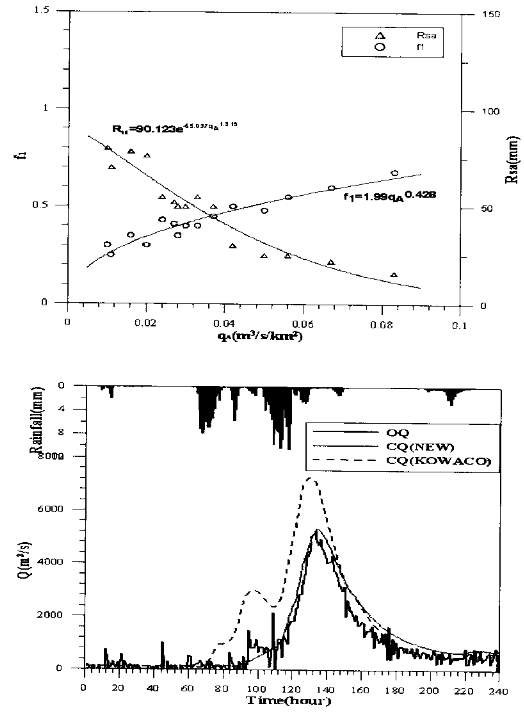

그림 5. 유출상수 회귀분석 결과 및 비교 결과

유역의 자연적인 유출 현상을 좌우하는 인자는 매우 많다. 하지만 토양습윤, 강우, 풍향, 풍속, 식생 등 모든 인자를 고려한 자연계의 모형화는 불가능하며 비효율적이다. 따라서 효과적인 자연계의 모형화를 위해서는 지배적인 인자들만을 모형에 반영하여야 하며, 저류함수 기법에서는 이러한 유출기작을 유수의 저류시간에 관계한 매개변수들로 개념화 하였다. 하지만 이러한 매개변수들은 여전히 강우감쇄효과 등의 계측 불확실성에 의하여 고유의 매개변수를 가지기 곤란하며, 홍수 예측시마다 운영자들은 적절한 매개변수를 찾기 위하여 많은 시간을 보내고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 댐군 연계운영모형에서는 최적화 기법에 의한 매개변수의 자동보정 기법을 적용하여 분석시간을 대폭 감소시켰다. 최적화에 사용된 기법은 GOLDEN 및 PATTERN SEARCH 기법과 전역최적화기법(SCE)을 적용하였다. GOLDEN SEARCH 기법은 개별 매개변수에 대한 순차적 최적화 방법으로 황금분할계수를 반영하여 비교적 간편하게 목적함수를 만족시키기는 방법이나 최적화 과정에서 국부적인 해답에 수렴하는 단점을 지니고 있다. 반면 PATTERN SEARCH 방법은 각각의 매개변수에 대한 민감도별 방향성을 고려하여 다차원 최적화를 실시하는 방법으로 실무차원에서 손쉽게 적용이 가능하다. 마지막으로 전역최적화기법인 SCE(Shuffled Complex Evolution) 방법은 상기 2개의 최적화 기법을 보완하는 방법으로 국부적인 해답에 빠지는 오류를 극복하고자 매개변수간의 혼합진화를 통한 전역 최적 해답를 구하는 방법으로 최적화 효과가 비교적 높으나 수행시간이 비교적 긴 단점이 있다. 본 모형에서는 사용자가 기호에 맞게 선택 · 적용이 가능하도록 하였고, 최적화 목적함수도 전 구간 및 첨두유량 구간을 선택가능토록 구성하였다.

모형의 개선 사항은 그 외에도 유역별 기저유량 분리를 위한 지하수 감수곡선의 도입 및 예상 강우량별 최적 방류량 산정을 위한 다중의사결정 기법, 수문학적 강우 형태를 고려한 강우 시간 분포모듈 개발 및 강우수치예보 모형과의 실시간 연동 도구 등을 구축하였다.

3.2 수리학적 하도추적 모형

자연하천에서는 댐이나, 교량 등 내부구조물의 영향과, 상하류의 수문학적 영향에 의해서 다양한 하천흐름이 발생하게 된다. 이와 같은 다양한 특성을 분석하기 위해서는 흐름특성을 물리적으로 반영할 수 있는 동역학적 홍수추적이 필수적이다. 특히 댐군연계에 의해 하천의 상류에 위치하고 있는 댐의 최적 방류량이 결정되면, 하류하천에 대한 취약지점의 분석 및 발생가능한 위험성 검토를 위해서 방류량에 따른 하류 영향검토가 필요하게 된다. 한강수계의 예를 들면, 수문학적 연계운영 모형에서 최적의 팔당댐방류량이 산정된 경우에 방류로 인한 하류하천의 영향분석을 수행하게 되고, 낙동강수계에서는 상류의 안

동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐 등에 대해서 동일절차에 의한 최적방류량 산정이 되고 이를 바탕으로 하천에서의 취약지점을 분석하여 댐운영에 활용하게 된다. 이를 위해 본 시스템에서는 1차원 부정류해석모형인 FLDWAV 모형을 이용하여 각 수계에 맞게 리모델링을 거쳐 실시간운영에 참여시키고 있다. 제시된 모형은 단일하도 뿐만 아니라 지류와 연계된 하도망의 해석도 가능하다. 또한 정확한 모형의 보정 및 검증과정을 통하여 대상구간내 모든 지점에서 흐름특성을 분석할 수 있는 장점이 있다.

모형의 구축절차는 그림 6에서 나타난 바와 같다. 우선, 최근 측량된 단면자료를 이용하여 지형자료를 구축한다. 그 후 계측된 수위 및 우량자료를 이용하여 강우량에 따른 강우유출모형을 수행하여 구축된 소유역 모식도에 의해 유출량을 산정한 후 유입경계조건을 지정하게 된다. 이때 하류경계조건은 한강의 경우 한강하구의 조위자료가 입력이 되며, 낙동강의 경우 하구둑에서의 수위값이 본류 홍수량에 따른 상관관계에 따라 가공되어 입력된다. 이와 같이 입력자료가 구축되면, 수리학적 하도추적모형을 이용하여 모든 지점에서 수위, 유량 및 유속분석이 가능하게 된다.

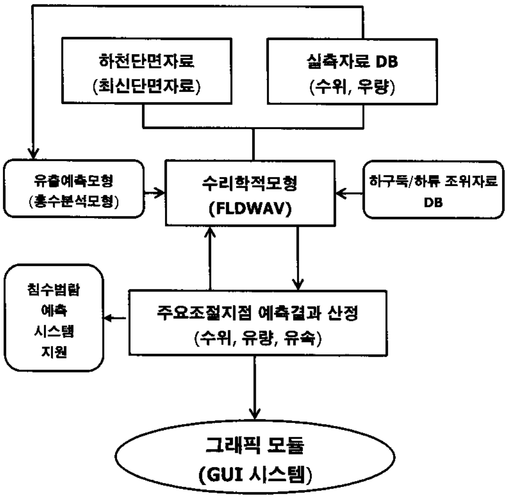

그림 6. 수리학적 모형 수행절차

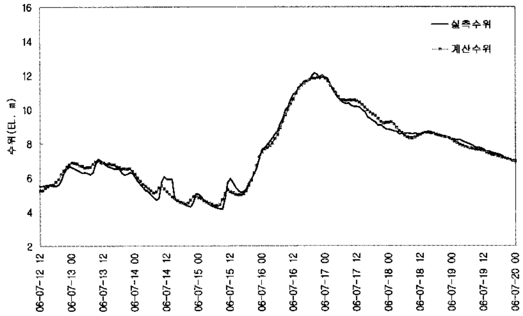

그림 7. 계산 및 관측 수위 비교(한강대교)

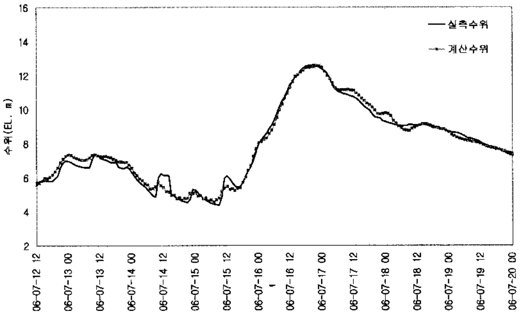

그림 8. 계산 및 관측 수위 비교(잠수교)

또한 이러한 절차들이 GUI 시스템으로 구축되어 수문학적연계운영 시스템과의 실시간 자료공유로 신속한 모형수행 및 분석이 이루어진다. 그림 7~8은 2006년 7월경 남한강 유역에 발생한 대홍수를 대상으로 한강하류구간에 수행한 수리 모형 분석 결과이며, 관측수위와 홍수연계모형에서 나온 계산수위 자료를 비교한 결과 한강 하구의 조위 및 충주댐 방류 경계조건을 모형에서 잘 반영하는 것으로 검토 되었다.

본 시스템에서는 수행결과를 즉각적으로 분석하기 위해서, GUI시스템에서 도시가 가능하도록 작성하였다. 그림 9~10은 구축된 수리학적 모형을 이용하여 대상 홍수사상에 대한 상황을 신속히 판단할 수 있도록 분석자 모니터 상에서 표출되는 그래프를 낙동강 수계의 적용에에서 보여주고 있다.

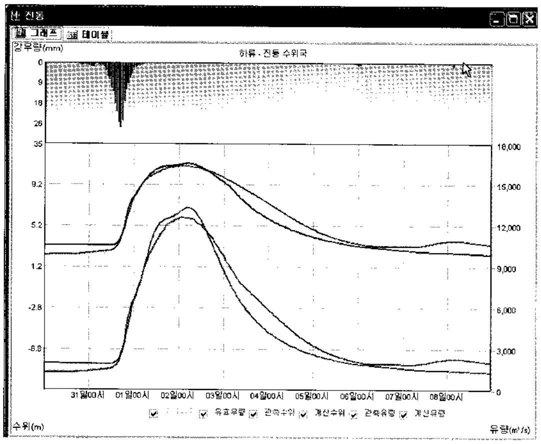

그림 9. GUI에 의한 수위비교(진동)

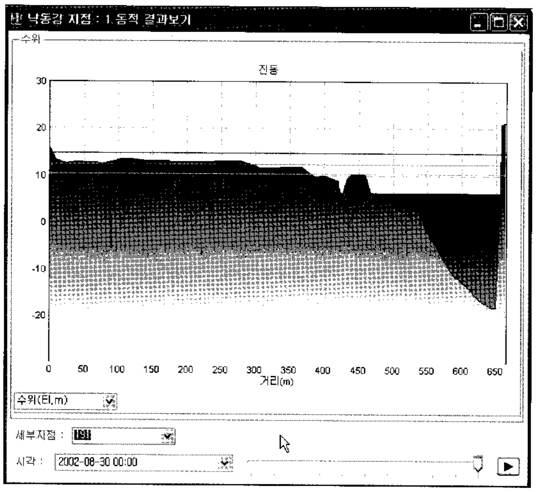

그림 10. Animation 효과에 의한 수위변화

4. 댐의 연계운영률 개발

댐간 홍수조절 연계운영시스템은 개별 댐을 중심으로 한 댐방류의 규모를 결정하는 방식에서 유역단위를 대상으로 한 모든 댐 및 하류 주요지점들을 고려한 통합관리시스템으로 개발되었다. 즉, 하류의 홍수조절에 영향을 미치는 댐에서의 최적방류량을 선정한 후, 주요 하류지점(한강수계의 경우 잠수교, 한강대교, 여주수위표 등)의 홍수량 및 하천수위의 변화를 모의하게 된다. 이러한 일련의 과정에 대해서 실시간으로 댐상 · 하류 피해를 최소화하기 위한 수계의 홍수량 변화를 종합적으로 판단 · 반영할 수 있도록 개발하였다.

상세한 댐방류량 산정 절차(그림 11)는 다음과 같다.

첫째, 하천 제어지점의 홍수조절 제약유량을 설정하는데, 이는 과거의 홍수조절 실적이나 하천정비기본계획상의 설계홍수량에 대한 제방설계 제약사항을 반영하여 설정한다.

둘째, 제어지점의 홍수조절 여유량을 산정한다. 여유량은 조절점 상류의 홍수조절 가능 댐들이 홍수조절방류를 하지 않는다는 가정 아래에 댐유역 이외의 잔여유역에서 유출되는 자연유량 값을 조절점 제약유량에서 차감하여 산정한다.

셋째, 홍수조절댐들에 대한 홍수조절 여유량을 배분한다. 배분방법은 홍수조절 시점에 상류댐들의 저류 가능 능력을 고려한 등가 저수지 개념을 적용하여 저류가능 능력이 부족한 댐에 우선적으로 홍수조절 여유량을 배분한다.

넷째, 댐별 배분된 홍수조절 여유량에 대한 자체 홍수조절 계획을 반영한다. 댐의 설계 및 운영제원을(홍수조절율, 수위대 방류능력, 초기 수문방류 개시 유량 및 저수위 등) 고려한 시간별 수문 및 발전방류량을 산정하되, 여기에는 하류 조절점의 첨두유량을 최소화 하는 관점에서 반복 계산에 의한 최적 홍수조절 계획을 결정하도록 구성하였다.

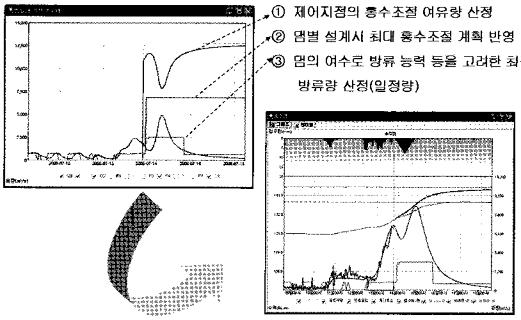

그림 11. 주요지점을 고려한 모의연계 기법의 댐방류의사결정

상기의 복잡한 분석절차는 관리자의 신속한 의사결정을 지원하기 위해 사용자의 요구사항을 반영한 사용자편의시스템(Computer Graphic User Interface)으로 구축되었으며, 전국의 시시각각 변동하는 수위, 우량자료, 댐운영자료를 신속 정확하게 감시하는 기능까지 포함되어 있다.

상기의 복잡한 분석절차는 관리자의 신속한 의사결정을 지원하기 위해 사용자의 요구사항을 반영한 사용자편의시스템(Computer Graphic User Interface)으로 구축되었으며, 전국의 시시각각 변동하는 수위, 우량자료, 댐운영자료를 신속 정확하게 감시하는 기능까지 포함되어 있다.

5. 결론 및 향후계획

본 과업을 통해 개발된 한강수계 댐군 홍수조절 연계운영 시스템을 시험운영 하여, 2006년 7월 한강 대홍수시에 소양강댐, 충주댐, 횡성댐, 화천댐을 중심으로 홍수조절 방류량을 연계하여 분석할 수 있었으며, 1973년 기상청 관측시작 이래 최고 강우량을 경신한 집중호우에 효율적으로 방류량을 결정하는 등 개발시스템의 효용성을 입증한 바 있다.

최근 전 세계적인 기상이변에 따라 우리나라에도 기록적인 강수량의 발생 가능성은 항상 존재한다. 따라서 사전 예방을 위한 과학적 물관리시스템과 신속한 위기대응관리 능력이 지속적으로 향상 되어야 한다.

수계별 댐군 홍수조절 연계운영 시스템은 향후 지속적인 안정화와 사용자 편의환경 개선을 거쳐서 더욱 과학화된 홍수조절 의사결정을 지원함으로써, 홍수로 인한 피해 최소화에 일조할 것으로 기대가 된다.

참고문헌

건설교통부 한국수자원공사(2006), 한강수계 댐군 홍수조절 연계운영시스템 구축 보고서

한국수자원공사(2003), Kwater 홍수분석모형 개발 보고서

Fread, D. L. and Lewis, J. M. (1998). NWS FLDWAV MODEL, Theoretical Description and User Documentation, NOAA.