

유역통합 물관리 Toolkit을 이용한 저수지군 시스템 연계운영 효과



고 익 환 ▶▶▶

한국수자원공사 수자원연구원 연구위원
ihko@kwater.or.kr



김 승 권 ▶▶▶

고려대학교 정보경영공학부 교수
kimsk@korea.ac.kr



김 영 오 ▶▶▶

서울대학교 건설환경공학부 부교수
yokim05@snu.ac.kr



강 신 옥 ▶▶▶

한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원
sukang@kwater.or.kr

실시간 정보로 획득하면서 기상과 유출 분석기술을 활용하여 운영기간 동안의 용수수요와 공급을 예측하고, 이를 바탕으로 하천과 저수지의 수량과 수질을 고려한 유역 저수지군 시스템의 최적 물공급계획을 수립·시행할 수 있도록 지원하는 통합 물관리 Toolkit과 운영 기술이 필요하다(고익환과 정세웅, 2002).

한국수자원공사 수자원연구원이 주관하여 구축, 시범 적용중인 '유역통합 물관리시스템(IRWMS, Integrated Real-time Water Management System)'은 유역의 유출량 산정과 예측을 담당하는 유역유출 예측시스템(RRFS)과 연동하여 장·단기 저수지군 시스템의 최적운영 의사결정을 지원하기 위한 월단위 최적운영모형(SSDP)(음형일 등, 2006), 일단위 최적운영모형(CoMOM)(Kim et al., 2005), 그리고 유역물배분 모의운영모형(KModSim)이 포함되어 있다.

RRFS로부터 예측된 수계내 소유역별 유입량 및 수요량(농업, 공업, 생활용수) 정보를 토대로, SSDP 또는 SSDP-CoMOM 연계모형으로부터 구한 월 또는 일 단위 최적저류량 및 방류량을 산정, 이를 KModSim모형에 입력하여 장·단기 모의를 통하여 유역 물관리 의사결정의 최종단계에 해당하는 저수지군 최적방류량 결정에 필요한 정보 및 시나리오를 제공하게 된다.

이 글에서는 개발된 저수지운영 요소모형들의 주요 특성과 이를 이용한 금강수계 저수지군의 연계운영 시험적용 성과를 소개한다.

1. 서론

우리나라는 계절적으로 편중된 강우특성 때문에 이수관리와 치수관리가 분리될 수 없고, 하천유역 상·하류의 수량과 수질은 유기적으로 연관되어 있으므로 수자원관리는 하천유역단위로 통합적으로 이루어져야 한다. 특히 한정된 수자원으로 하천의 수량과 수질 목표를 동시에 달성하기 위해서는 물의 수요와 공급을

2. 유역통합 물관리시스템의 요소모형

2.1 월단위 저수지 최적운영 모형(SSDP)

월단위 저수지 최적운영 모형은 수계 내에 존재하는 저수지들을 효율적으로 연계운영할 수 있는 월간 최적 운영 방안을 제시하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 불확실성이 큰 중장기 예측에 유리한 앙상블 유량예측(ensemble streamflow prediction, ESP) 기법과 SDP 최적화식에 직접 적용하여 수계 내 시·공간적 상관관계를 재현할 수 있는 SSDP/ESP 모형을 개발하였다. 이 모형은 수계 내 저수지 상태뿐만 아니라 수계 전체에서 발생하는 유출량을 고려하여 유역 단위의 수자원 관리방안을 제시할 수 있는 장점이 있다.

앙상블 유량예측은 과거에 발생했던 사상은 미래를 대표한다는 가정 하에 관측된 강우사상을 예측시점의 토양함수비나 온도 등을 고려하여 산정한다(Day, 1985). 따라서 ESP를 사용할 경우 현재의 유역 수문 상황을 반영한 유량예측이 가능하다. Faber와 Stedinger(2001)는 이러한 ESP와 SSDP 모형을 접목시켜 현재시점의 유역 수문상황을 반영한 시나리오를 ESP 기법을 통해 생성하여 SSDP 모형에 적용하였다. 그러나 중장기 저수지 운영계획을 위하여 Faber와 Stedinger(2001)가 제안한 방법을 사용하면 예측 기간이 이시기 전체 기간에 걸쳐 필요하다. 이와 같이 예측 기간이 길어지면 예측정확도는 현저히 떨어질 수밖에 없고 이러한 정확도가 떨어지는 자료를 사용하면 미래의 용수부족 등으로 표현되는 잔여최적편익함수도 정확하게 평가되기 어렵다. 특히 국내의 경우 토양함수비 등의 관측자료가 불충분하기 때문에 모형 내 매개변수의 추정에 많은 어려움이 있어 예측 기간이 한 달을 초과되는 경우 그 정확도가 현저하게 떨어진다. 또한 전 기간에 대해 후진방향으로 최적화를 실시할 경우 시간이 지남에 따라 관측된 예측시점의 초기조건을 반영할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 관측된 예측시점의 초기조건을 반영하고자 매월 초 한 달의 앙상블 예측을 실시하여 전진방향으로 문제를 해

결해 매월 최적 운영률을 갱신할 수 있는 on-line 모형을 구성하여 이를 SSDP/ESP라 칭하였다. SSDP/ESP는 기 산정된 잔여최적편익함수를 사용함으로써 SSDP/Hist 모형에 비해 프로그램 수행시간이 현격히 줄어든다는 장점을 가지고 있다. 또한 도출된 운영률을 실제 시스템에 적용할 때 이산화된 각 상태변수에 대해 최적 운영률을 바탕으로 보간법(interpolation)을 사용하는 대신 현재의 실제 저수량에 대해 기 산정된 잔여최적편익함수를 사용하여 다시 한 번 더 최적화를 실시하여 운영률을 결정해 나가는 재최적화(re-optimization) 기법(Tejada-Guibert et al., 1993)을 적용하였다. 더불어 국내에서 개발한 SSDP/ESP는 10일 단위로 ESP를 갱신하고 이를 저수지 운영에 반영할 수 있다는 장점을 또한 가지고 있다.

2.2 일단위 저수지 최적운영 모형(CoMOM)

CoMOM(Coordinated Multi-reservoir Operating Model)은 연계운영의 시너지효과를 얻고자 댐군 연계 운영에 이용 가능한 정보를 최대한 활용하여 시물레이션 관점에서 최적화 모형으로 구축된 것이다. 시물레이션 관점이란 '총편익 최대화' 같이 단위 분석기간이 줄어들수록 정확히 산정하기 어려운 경제적 목적함수 대신에 연계운영의 시너지 효과를 최대화하기 위하여 당연히 추구되어야 할 현실적이고 기능적인 목적함수를 설정하여 활용함을 의미한다. 즉 CoMOM은 하천유역관리를 위한 연계운영 시물레이션 관점에서 요구되는 상황과 목표를 충족시키기 위하여 1) 유역 시스템에 대한 유기적이고 총체적인 관점(Holistic Approach), 2) 수자원 보존적 접근(Water Conservation Approach), 3) 확률적 분석을 감안한 확정론적 접근(Deterministic Approach utilizing Probabilistic models), 4) 지속 가능한 용수 공급(Sustainable Water Supply), 5) 다 기준 의사결정 지원(Assistance in Multicriteria Decision Making)의 기본 원칙을 토대로 수립되었으며, 월단위 운영을 위한 확정론적 모형을 먼저 수립하고 (김승

권과 박영준, 1998), 그 모형을 일별 실시간 운영에 적용할 수 있도록 확대 발전시켰다. 이 다섯 가지 원칙들 중 첫째 원칙은 Hirsh 등(1977)이 제시한 시너지 효과를 얻기 위한 기본 원칙이다. 두 번째 원칙은 유역 내 댐의 방류량 결정시 유입량의 불확실성과 시기적으로 편중된 한반도의 수문 지리학적인 요소를 감안하여 최대한 저류하는 방식을 유지하고, 수력발전은 하류 하천의 생태 및 환경 보전을 위한 최소방류요건과 총 용수 수요량 범위 내로 제한함으로써 유역 내 수자원 보존을 유도하고, 댐의 저수위를 높게 유지함으로써 한정된 수력발전 에너지의 활용도와 발전효율을 높이고자 하는 원칙이다. CoMOM 모형은 세 번째 원칙 아래 Sampling Stochastic DP(SSDP)에서 산정한 확률적 분석에 따른 월별 유지 저수량을 추구해야 할 목표 설정하고 목표계획 모형화 함으로써 Hirsch 등(1977)과 Eschenbach 등(2001)이 실험과 모형 개발을 통하여 얻은 통찰을 모두 수용하는 모형이라고 할 수 있다. 네 번째 지속 가능한 용수 공급 원칙은 모든 수자원 모형의 기본으로써 수질의 경우엔 유역 내 수질이 자연 정화되는 속도보다 오염되는 속도가 커지지 않도록 하는 것을 의미하고, 용수 공급의 경우 연간 새로 유입되는 양 보다 사용되는 연간 순 물 소모량이 크지 않도록 유역 내 수량이 재충전 될 수 있는 한도량 내에서 공급하도록 한다는 것이다. 그리고 마지막 다섯 번째 원칙에 따라 '저수량 최대화' vs. '발전량 최대화'의 Trade-off 분석을 통하여 댐 운영자의 경험과 직관에 의한 선택이 가능하도록 파레토 최적해(Non-inferior frontier)를 제시하게 된다. 또한 모형 활용의 편의성을 고려하므로 CoMOM은 유역 통합 운영의 원칙 속에서 시너지 효과를 극대화하기 위한 이론에 충실하되 실무적 환경에 적합한 최적화 모형으로 개발하였다.

2.3 유역 물배분 모의 모형(KModSim)

KModSim 모형은 미국 텍사스의 수자원개발부가 개발한 SIMYLD 네트워크 모형을 미국 콜로라도주립대

학교의 Labadie 교수가 수정하여 개발한 MODSIM (Modified SIMYLD)을 기본모델로 하여 한국의 유역 특성과 물배분 환경에 맞도록 업그레이드한 모형이다. 이 모형은 일반화된 하천유역 네트워크 모형(river basin network model)으로 네트워크 최적화기법인 Lagrangian relaxation algorithm을 사용하여 실수계산보다는 효율이 매우 좋은 정수계산 방식을 선형 네트워크의 해법으로 적용하였으며, 매트릭스 계산은 개량된 simplex method를 확장한 표준 선형프로그램을 사용하여 정수계산 방식이 필요한 정도의 정확도를 갖는 해를 계산할 수 있도록 하였다. 또한 하천유역 관리에 있어 물리적, 수문학적, 제도적인 측면에서 물이 배분될 수 있고, 유역 수자원관리 시설물들의 전체적인 배치 및 운영조건을 다양하게 반영할 수 있도록 구축되어 있다. 최신 버전인 KModSim 모형은 MS .Net Framework을 기반으로 개발되어 모형 내에서 MS Visual C++ .Net 코드를 생성 및 수행할 수 있다. KModSim 모형의 사용자 지원 편의시스템(GUI)은 Visual Basic .Net상에서 개발되었다. KModSim의 강력한 사용자 편의 시스템은 운영에 필요한 데이터베이스 자료와 최적모의 흐름 네트워크와의 동적 연결을 가능하게 한다. 최적모의를 위한 목적함수와 제약조건은 GUI 상에서 자동적으로 생성되며, 더불어 사용자에게 최적화 모델링 또는 컴퓨터 프로그래밍에 대한 편의성을 제공한다. 원칙적으로 최적화는 유역수 자원운영을 위한 물리적, 수문학적, 그리고 산업적/법적/관리적 결정 등의 조건에 따라 유역 내 모든 저수지 운영 수위 혹은 운영율, 수리권 혹은 경제적 가치 등을 고려하여 우선순위를 만족하도록 물을 효율적으로 배분하는 것이다.

3. 물관리시스템의 연계운영 효과평가 절차

유역통합 물관리시스템을 이용한 금강수계 저수지군 시스템의 실제적인 연계운영 효과를 평가하기 위하여 그림 1에 도시된 절차에 따라 실시간적 모의 운영

을 수행하였다. 모의과정의 전기에는 무강우시 RRFs 유출량을 사용하고 우기에는 평균 강우량을 사용한 RRFs 유출량을 사용하였다. 이 같은 유입량을 기반으로 하고, SSDP/ESP가 제시하는 월말 목표저수위를 목표값으로 하여 매일 CoMOM을 수행하여 저수지별 일단위 방류 계획을 설정한 뒤, KModSim 모형으로 하여금 CoMOM이 정한 방류 계획대로 방류를 수행하였을 때의 당일 말기저수량을 도출하도록 하였다. 이때 일별 방류량은 예측 유입량에 근거하여 CoMOM이 제시한 것을 사용하지만 KModSim 모형 적용시에는 과거에 실제에 준하는 상황을 재현하기 위해서 과거 실적 유입량을 사용하였다.

즉, 과거 실적 유입량을 적용하여 각 저수지 당일 말기 저수량을 KModSim 모형을 통해 도출하고, 이를 다음날 CoMOM의 초기 저수량으로 사용하여 실시간 운영과정을 반복 모의하였다. 이와 같은 모의 운영을 통하여 유역유출 예측시스템과 연동한 저수지군 모의 및 최적화시스템을 통합운영 하였을 때의 효과를 분석하기 위하여 표 1과 같이 두 가지 케이스로 나누

표 1. 모형의 현실 적용에 따른 효과 분석을 위한 실시간 모의 운영 조건

구분	Case 1	Case 2
목표	일별 CoMOM 자체의 최적화 효과 분석	실시간 물관리 운영 '시스템의 통합 효과' 분석 (단기 유입량 예측 + 추계학적 월 모형 + 일별 CoMOM)
월말 목표 수위	실적 월말 저수위	SSDP ESP에서 제시한 월말 목표 수위
예측 유입량	평균 유입량 (유입량 예측 능력 없음)	RRFS 유출량 (긴가 무 강우, 우가 평균 강우 사용)
실험 방법	불확실성을 고려한 실시간 모의 운영	

어 모의를 진행하였다.

〈Case 1〉은 CoMOM 만을 활용한 일별 운영 효과만을 분석하기 위한 실험으로써 일단위 운영 모형 및 단기 유입량 예측 모형의 도움 없이 CoMOM에 내재되어 있는 시스템 최적화 기능으로 얻을 수 있는 효과를 분석한다. 이를 위하여 미래 유입량을 모른다는 가정 아래 평균 유입량을 CoMOM의 예측 유입량으로 적

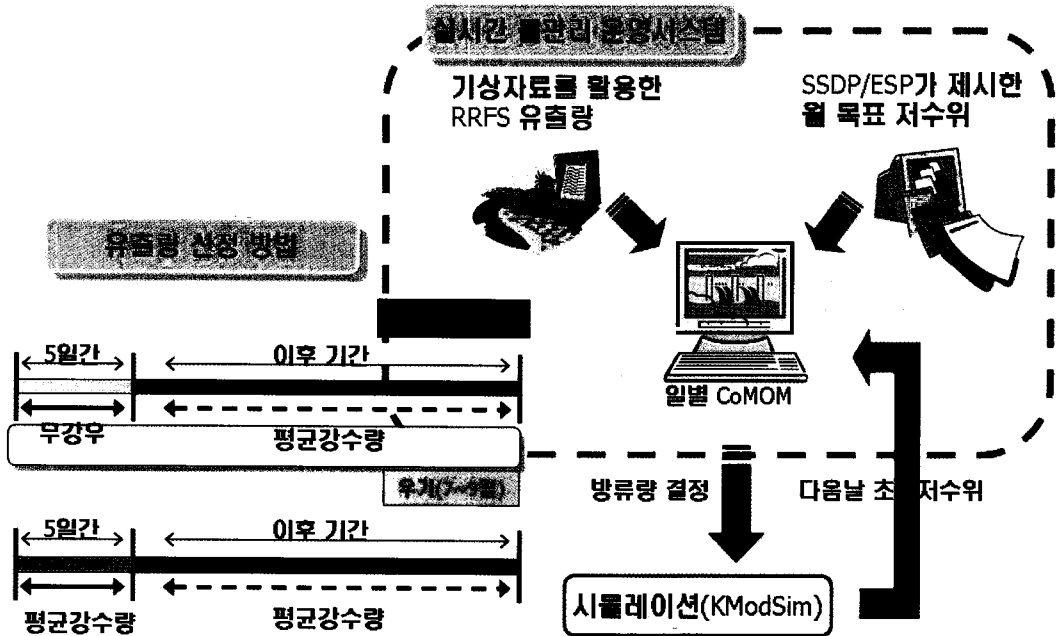


그림 1. 실시간 물관리 시스템 모의 운영 절차(CASE 2)

용하였으며, 월 말 목표 수위는 실적 자료와의 비교의 편의상 월말 실적 저수위를 사용하였다.

〈Case 2〉는 그림 1과 같이, 기상 예측, 유역유출 예측시스템 및 월단위 최적운영 모형이 함께 적용되었을 때의 효과를 분석하기 위한 실험이다. 이때 미래 유입량은 장단기 기상예측 모형을 사용하고 그 예측자료를 기반으로 RRFS 를 이용하여 ESP 유입량 시나리오 생성한 후 이를 유입량 자료로 사용한다. 그러나 장단기 기상예측 모형 결과의 부재로 인해 건기에는 무 강우시 RRFS 유출량을 사용하고 우기에는 평균 강우량을 반영한 RRFS 유출량을 사용했다. 월말 목표 수위는 SSDP/ESP에서 도출한 목표 수위를 준수하도록 하였다.

4. 모의 운영 적용 결과

금강수계의 용담과 대청 다목적댐에 대하여 2003년 1월~2007년 12월까지 1년 단위로 나누어 실시간 모의 운영을 수행하였다. 초기저수량은 용담, 대청댐 과거 운영실적의 저수량으로 설정하였으며, 월말 목표 저수량과 유입량은 각 Case별로 표 1의 운영조건을 따랐다. 각 수요지의 용수수요량은 2003년 기준 수요량을 적용하여 CoMOM을 수행하였다. CoMOM결과를 따라 실시한 방류량의 하천 방류 효과와 다음날의 새로운 방류량을 산정하여 방류하기까지 발생하는 실제 유입량과 예측유입량의 차이를 보정한 다음날의 실제 가능한 초기 수위를 도출하기 위하여 유역 물배분 모의 모형인 KModSim 모형을 사용하였다. 유역 물배

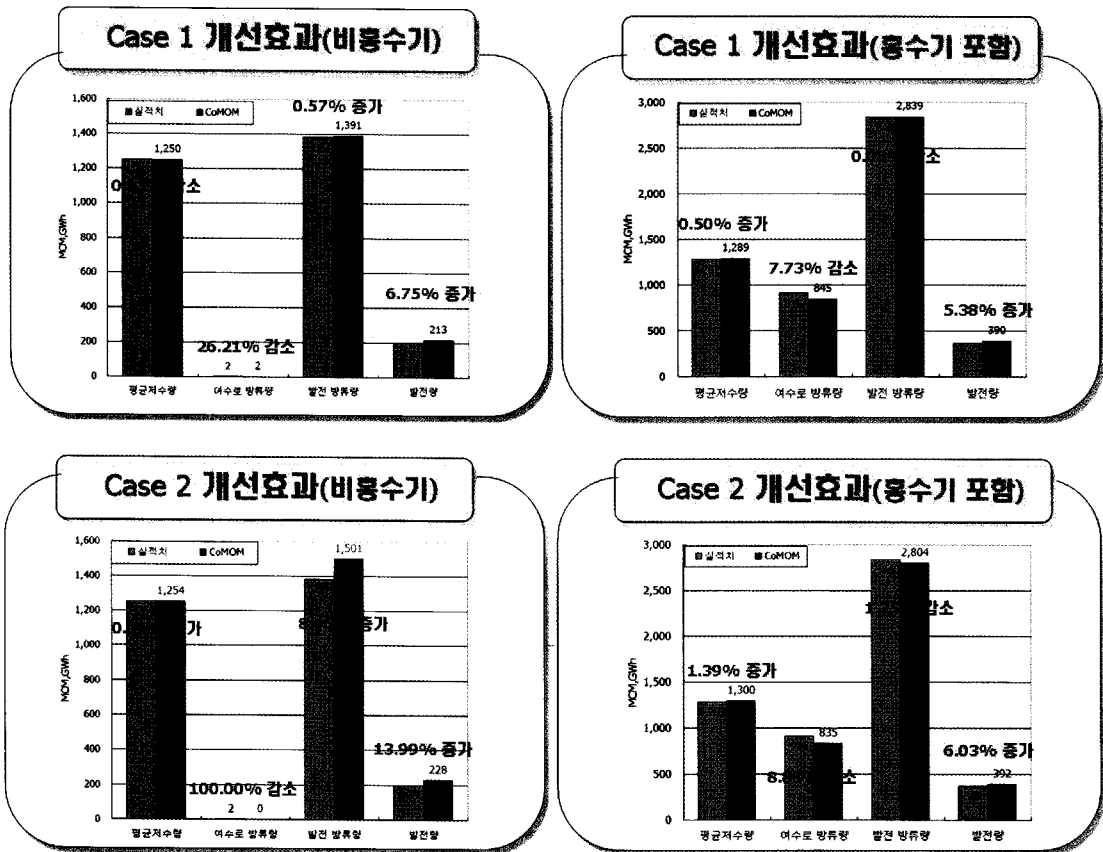


그림 2. 각 Case 별 개선효과(실적 대비)

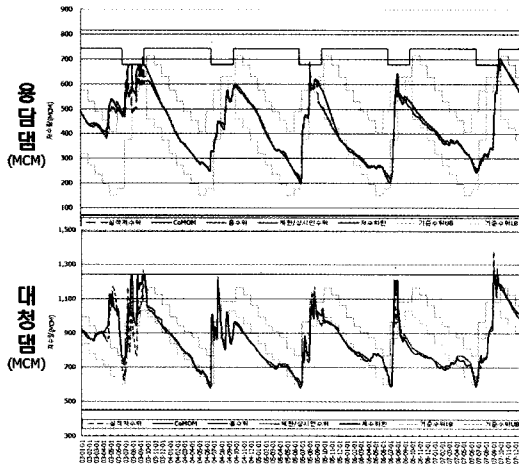


그림 3. Case 1의 용담/대청댐 저수량 그래프 (2003.1~2007.12)

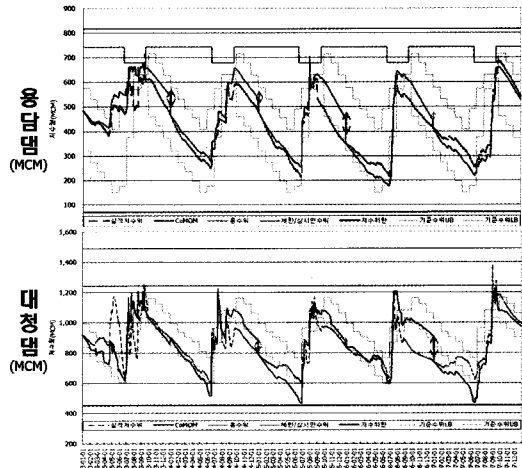


그림 4. Case 2의 용담/대청댐 저수량 그래프 (2003.1~2007.12)

본 모의 모형은 시스템 제약을 확인하여 CoMOM에서 제시한 방류계획을 그대로 수행 하였을 때 얻게 되는 기말 저수량을 도출해준다. 이렇게 도출된 기말 저수위는 다음날 초기 저수위로 CoMOM에 입력되어 모의 운영이 반복된다. 이와 같은 실험을 각 Case별로 진행 하였으며, 그 결과는 그림 2~그림 5 및 표 2와 같다.

그림 2에는 각 Case별 실적대비 연평균 개선효과를 홍수기를 포함한 경우와 포함하지 않은 경우에 대해 나타내었다. 그림 3에는 <Case 1>에 대한 모의기간동안 용담댐과 대청댐의 저수량 변화를 나타내었고, 그림 4에는 <Case 2>에 대한 저수량 변화를 나타내었다. 그림 3과 4에서 각 해의 12월 31일과 다음해의 1월 1일에 저수량이 급하게 변하는 것은 1년 단위의 결과를 연속해서 도시하였기 때문이다. 그림 5에는 각 케이스별 모의운영 결과를 나타내었다.

금강 수계에 대하여 실시간 모의 운영을 진행한 결과 <Case 1>의 일별 CoMOM 만의 효과로 평균저수량은 1,289백만톤이며, 실적대비 7백만톤 (0.50%) 증가

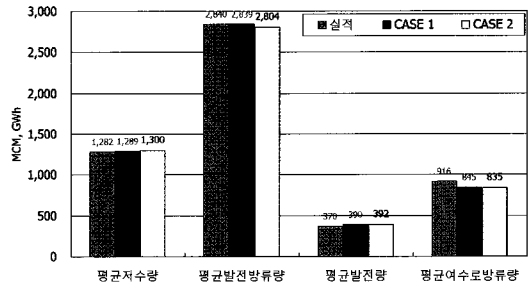


그림 5. 각 Case 별 실시간 모의 운영 결과

하였고, 평균 발전량은 390GWh로 실적대비 20Gwh (5.38%)증가하는 효과를 얻을 수 있었다. 즉, 유입량 예측 능력이 전혀 없다는 가정하에 CoMOM만의 효과만으로도 현재보다 개선된 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. <Case 2>의 실시간 물관리 운영시스템의 통합 효과로 평균저수량은 1,300백만톤으로 실적대비 18백만톤 (1.39%) 증가하였고, 여수로 방류량은 835백만톤으로 실적대비 81백만톤(8.83%) 감소하는 결과를 보임으로써, RRFs를 통한 유입량 예측개

표 2. 금강 수계 실시간 모의 운영 결과

구분	평균저수량		여수로방류량		발전량		발전방류량	
	MCM	실적대비	MCM	실적대비	GWh	실적대비	MCM	실적대비
Case 1	1,289	0.50%	845	-7.73%	390	5.38%	2,849	-0.03%
Case 2	1,300	1.39%	835	-8.83%	392	6.03%	2,804	-1.25%

선, 그리고 SSDP/ESP와 같은 월단위 운영모형에서 제시한 결과까지 활용할 경우 보다 우수한 결과를 도출할 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

유역통합 물관리시스템을 이용한 저수지군 시스템의 최적 연계운영 효과를 평가하기 위해 실시간적 모의운영을 수행하였다. 금강 수계의 용담 및 대청 다목적댐 저수지군 시스템을 대상으로 하고, 단기 유입량 예측(RRFS), 월단위 저수지 최적운영 모형(SSDP), 일단위 저수지 최적운영 모형(CoMOM), 유역 물배분 모의 모형(KModSim)을 사용하는 유역 물관리 운영 시스템의 통합 적용효과로 평균저수량은 1,300백만톤으로 실적대비 1.39%, 약 18백만톤 증가하였고, 여수로 방류량은 835백만톤으로 실적대비 8.83%, 81백만톤 감소하는 결과를 도출하였다.

이와 같이 유역물관리 Toolkit을 실제 적용할 경우 비구조물적인 물관리기술 향상만으로도 물관리의 경제적 효율성과 지속가능성을 획기적으로 높일 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 아마도 금강 수계보다 규모가 더 크고, 직렬과 병렬로 이루어진 복잡한 수계의 경우 더 큰 효과가 있을 것이다. 한정된 수자원으로 하천의 수량과 수질 목표를 동시에 달성하기 위해서는 기상과 유출 분석 및 운영기간 동안의 용수수급 예측 정보를 바탕으로 하천과 저수지의 수량과 수질을 고려한 유역 저수지군 시스템의 최적 물공급계획을 수립·시행을 지원하는 본 시스템을 세계적 수준으로 향상시키려면 앞으로도 국내·외 유역 수자원계획 및 관리 현장적용과정을 통한 시스템 보강과 활용성 검증을 위한 지속적인 노력이 필요하다.

감사의글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원

의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호:1-6-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 고익환, 정세웅 (2002). “통합수자원관리 기반기술 구축방안(Ⅱ).” 한국수자원학회지, 제35권, 제6호, 한국수자원학회.
- 과학기술부 (2007). 유역 물관리 운영 기술 개발.
- 김승권, 박영준 (1998). “댐군의 연계운영을 위한 수학적 모형 (A Mathematical Model for Coordinated Multiple Reservoir Operation),” 한국수자원학회논문집, 제31권, 제6호, pp. 779-793
- 음형일, 고익환, 김영오 (2006). “이수기 저수지 운영을 위한 양상불 유량예측의 효용성.” 한국수자원학회논문집, 제39권, 제3호, pp. 187-198.
- Day, G. N. (1985). “Extended streamflow forecasting using NWSRFS.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 111(WR2), pp. 147-170.
- Eschenbach, E.A., Magee, T., Zagona, E., Goranflo, M., and Shane, R. (2001). “Goal Programming Decision Support System for Multiobjective Operation of Reservoir Systems.” *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, Vol. 127, No. 2, pp. 108-120.
- Faber, B. A., and Stedinger, J. R. (2001). “Reservoir optimization using SSDP with extended Streamflow prediction (ESP) forecasts.” *Journal of Hydrology*, Vol. 249, pp. 113-133.
- Hirsh, R.M., Cohon, J.L., and Reville, C.S. (1977). “Gains from joint operation of multiple reservoir systems.” *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 2, pp. 239-245.
- Tejada-Guibert, J. A., Johnson, S. A., and

Stedinger, J. R. (1993). "Comparison of two approaches for implementing multireservoir operating policies derived using stochastic dynamic programming." *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 12, pp. 3969-3980.

Kim S.K., Lee Y.D., Kim J.H., and, Ko I.H. (2005). "A multiple objective mathematical model for daily coordinated multi-reservoir operation." *Water Science and Technology : water supply*, Vol. 5, Issue 3-4, pp. 81-88. 🍵

