

한강 홍수예경보시스템의 저수지 운영모듈 추가 구현

○ 권 오 익* / 김 승** / 심 명 필***

1. 서론

홍수예경보란 홍수예측시 적기에 홍수예경보를 발령하여 홍수피해를 경감시키고자 하는 방재활동의 일환으로 이는 홍수조절과정을 전제로 한다. 유역내에서 홍수조절을 직접 수행할 수 있는 곳은 홍수조절용량을 갖추고 있는 다목적 댐으로 홍수시 다목적 댐의 역할은 매우 중요하다고 할 수 있다. 홍수시 다목적 댐의 역할은 댐의 안전을 우선으로 저수지로 유입하는 홍수량을 저류하여 조절방류함으로써 홍수 분산에 따른 하류의 홍수피해를 최소화시키는데 있다. 한강유역의 경우 다목적 댐이 차지하고 있는 유역면적은 전체 유역면적의 약 51%(화천댐: 14.8%, 소양강댐: 10.4%, 충주댐: 25.6%)로 특히, 화천댐 유역은 상류에 건설된 평화의 댐으로 인해 실질적으로 홍수조절능력이 상당히 증가되어 있는 상태이다. 따라서 한강수계의 경우, 홍수시 이러한 다목적 댐들의 홍수조절능력을 최대로 활용하여 홍수피해를 최소화 시켜야 한다. 구축된 한강 홍수예경보시스템중에서 이러한 다목적 댐의 저수지 운영과 관련된 부분이 바로 저수지 운영모듈이다. 저수지 운영모듈이란, 강우-유출모형을 통해 예측된 유입량에 대해 유역 상하류의 상황과 댐의 안전을 충분히 고려하여 하류의 피해를 최소로 하는 최적의 방류방을 결정하는 일련의 의사결정과정이라 할 수 있다.

본 연구에서는 한강 홍수통제소에 구축된 홍수예경보시스템중에서 저수지 운영모듈의 현황과 문제점을 고찰하여 한정된 범위내에서 개선작업을 수행하였다. 한정된 범위란 모의기법을 이용하되 예측정보의 불확실한 영향을 직접 고려하지 않고 기존에 구축되어 있는 저수지 운영모듈에 보다 효율적인 방류량 결정방법을 추가적으로 구현하는 것이다. 따라서, 어떤 의미에서는 한국수자원공사에 구축되어 있는 저수지 운영모듈을 담보하는 연구의 성격이 있을 수 있다. 그러나 각각의 기관은 서로 독립된 기관으로 한강 홍수통제소 나뉘대로 시급히 개선될 현안을 직접 처리한 의미가 있다고 할 수 있다. 본 연구의 수행결과, 한강 홍수통제소는 추가적으로 구현된 저수지 운영모듈을 이용하여 보다 실질적인 홍수통제 및 예측업무를 수행할 수 있을 것이다.

2. 한강 홍수예경보시스템에 구축된 저수지 운영모듈의 현황과 문제점

실제 홍수시 저수지 운영의 경우, 강우예측모형과 강우-유출모형, 방류량 결정모형, 하도추적모형 등이 서로 연계되어 운영된다. 이중 현실적으로 가장 어려움이 큰 모형은 강우예측모형이다. 강우예측모형이란 호우와 관련된 기상정보로부터 앞날의 강우발생을 예측하는 것으로 이는 강우-유출모형의 입력자료로 이용된다. 많은 노력에도 불구하고 아직 현실적인 기술수준으로는 강우발생을 정확히 예측하기가 매우 어려운 실정이다. 따라서 기대와는 달리 현재 강우발생의 예측 정도(精度)는 매우 낮으며 이에 따른 오차로 말미암아 저수지의 운영효율도 매우 낮은 것이 현실이다. 사실 각 모형의 이용에 따른 예측정보들이 100% 정확하다면 저수지의 운영은 단지 사칙연산에 불과하다고 할 수 있다. 그러나 강우발생오차 뿐만 아니라 각각의 모형이 내재하고 있는 오차로 인해 홍수시 저수지 운영은 매우 어려운 의사결정과정을 수반할 수 밖에 없다. 이러한 어려움은 예측정보의 불확실성이란 용어로 통용되고 있으며 저수지의 운영효율을 평가하는데 있어 이러한 이해가 전제되어야 한다.

* 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원

** 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 부장

*** 인하대학교 토목공학과 교수

현재 한강 홍수예경보시스템에 구축되어 있는 저수지 운영모들은 모두 모의기법으로 SRC ROM, LDR ROM, Rigid ROM이 이용되고 있다. 그러나 구축된 각 방법의 경우 저수지의 운영과 효율적인 측면에서 다음과 같은 문제점이 지적되고 있다. SRC 방법은 저수지 수위에 따라 미리 결정된 방류량으로 방류하기 때문에 설계 홍수량과 비슷한 홍수량이 유입하는 경우에는 하나의 홍수조절방안이 될 수 있으나, 설계홍수량과 차이가 심한 홍수량이 유입하는 경우에는 부적절한 홍수조절방안이라 할 수 있다. 즉, 설계 홍수량과 다른 규모의 홍수에 대해서는 유역의 홍수 진행상황을 적절히 반영하지 못하므로 불필요한 방류에 따른 이수의 편익이 감소되거나 오히려 댐 방류에 의한 하류의 피해를 유발시키는 경우가 있다. 따라서 설계홍수량과 다른 규모의 홍수에 대한 방류량 결정방안으로는 제고될 필요가 있다. LDR방법은 저수지에서의 방류형태를 선형으로 가정하고 방류량을 저류량의 일차식으로 표시하여 설계빈도홍수에 대한 한계방류량의 제약조건을 만족시키면서 일차식의 계수를 결정하는 방법이다. 이 방법 역시, 저류량에 따라 방류량이 결정되므로 홍수조절용량을 탄력적으로 이용하지 못하는 문제점이 지적되고 있다. Rigid ROM 역시 유역 상황의 적절한 반영과 사전예보시간 준수, 일정률 방식의 수문조작방식 등을 고려한다면 다목적 댐의 방류량 결정방안으로는 미흡한 측면이 있다.

그림 1과 그림 2는 충주댐의 가정된 홍수상황에 대해 SRC ROM, LDR ROM, Rigid ROM, Technical ROM의 모의운영 결과를 함께 비교한 것이다. 홍수예측시 충주댐의 초기수위는 홍수기 제한수위(EL. 138m)를 유지하고 있고 방류량 결정시 유역의 하류상황은 고려하지 않는다는 가정하에 동일한 홍수유입량에 대한 각 방법을 모의한 것이다. 그림 1은 가정된 초기수위와 유입량에 대한 각 방법의 모의 방류량을 나타낸 것으로 최대방류량의 크기와 방류형태를 비교할 수 있다. 그림 2는 그 때의 저수지 수위를 나타낸 것으로 저수지의 최고수위와 수위변화의 양상을 비교해 볼 수 있다.

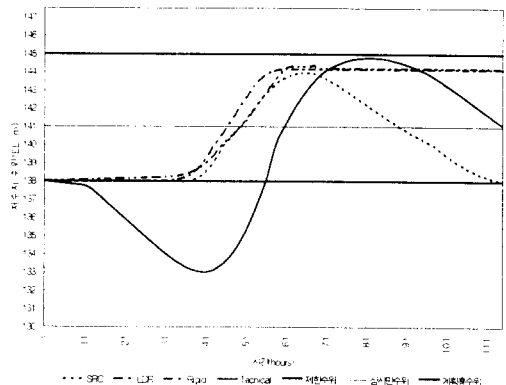
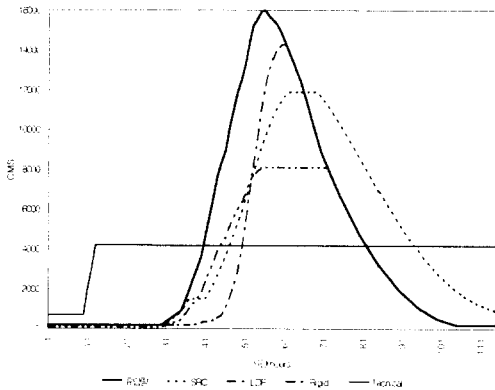


그림 1. 동일한 유입량에 대한 각 방법의 모의방류량 그림 2. 동일한 유입량에 대한 각 방법의 저수지 수위

앞서 모의된 결과를 바탕으로 각 방법의 홍수조절효과를 비교해 볼 수 있으며 비교 항목으로는 침투 유입량 조절률과 저수지 이용률, 저류량 및 방류량 등이 해당될 것이다. 저수지 이용률이 높으면서 최대 방류량의 크기가 작은 방법이 보다 효율적인 홍수시 저수지 운영방안이라 할 수 있다. 물론, 실시간 홍수조절시에는 댐의 안전과 예측유입량의 불확실성 등이 고려되어 최적의 저수지 운영에 제한이 가해지겠지만 결국, 모의된 최적의 홍수조절방안을 고려하여 최선의 저수지 운영이 계획될 것이다. 표 1은 모의 운영에 따른 각 방법의 홍수조절효과를 분석한 것이다. 충주댐에 동일한 유입량과 동일한 홍수조절용량을 가지고 모의운영한 결과, 침투유입량 조절률과 저수지 이용률에 있어 Technical ROM이 각각 74%와 97%로 가장 홍수조절효과가 우수하다고 할 수 있다. 이는 최대방류량의 크기가 타 방법보다 월등히 작고 최고 수위가 높기 때문이다. 그러나 Technical ROM의 경우, 방류율이 높은 관계로 저류율이 낮는데 이는 최고수위 도달이후 종료수위까지 방류 방식에 따라 개선되어질 수 있는 사안이라 할 수 있다.

표 1. 모의운영에 따른 홍수조절효과 분석

비교 항목	모의방법			
	SRC	LDR	Rigid	Technical
유입총량 (10^6 m^3)	1,772	1,772	1,772	1,772
방류총량 (10^6 m^3)	1,772	1,297	1,175	1,594
침투 유입량 (m^3/sec)	16,000	16,000	16,000	16,000
최대 방류량 (m^3/sec)	11,900	14,306	8,112	4,200
초기 수위 (EL. m)	138.00	138.00	138.00	138.00
최고 수위 (EL. m)	143.97	144.17	144.39	144.79
종료 수위 (EL. m)	138.00	144.17	144.22	141.08
침투유입량 조절률 (%)	26	11	49	74
저수지 이용률 (%)	85	88	91	97
방류율 (%)	100	73	66	90
저류율 (%)	0	27	34	10

홍수시 홍수조절용량을 초과하는 홍수유입량에 대해서는 방류가 불가피하므로 각 방법 모두 그 차이량 만큼을 방류하여야 한다. 일반적으로 침투유입이후 방류량 곡선이 유입량 곡선과 만나는 시점이 바로 최고수위 도달 시점이 되며 이후 유입량에 대한 방류량의 크기에 따라 홍수기 제한수위로 복귀하는 완급이 조정된다. 그림 1에 나타난 바와 같이 최고수위 도달이후에 유입량의 크기 만큼 방류한다면 LDR, Rigid ROM과 같이 최고수위가 유지되며, 유입량보다 방류량이 큰 경우에는 SRC, Technical ROM처럼 저수지의 수위가 다시 홍수기 제한수위로 복귀하게 된다. 유입량에 비해

SRC ROM의 방류량이 Technical ROM의 방류량보다 상대적으로 크기 때문에 그림 2에 나타난 바와 같이 SRC ROM이 홍수기 제한수위로 빠르게 복귀하고 있음을 알 수 있다.

홍수시 저수지 운영이란 결국 홍수시 유역의 상하류를 고려한 최적의 방류량을 결정하기 위한 것으로 최적의 방류량을 결정하기 위해서는 댐 규정과 제약조건, 유역 상하류의 상황, 입출력 정보의 신뢰성 등을 실시간 상황하에서 모두 종합하여 결정하여야 한다. 또한, 다목적 댐의 역할은 치수뿐만이 아니라 이수도 고려하여야 하므로 이러한 특성까지도 방류량 결정에 반영되어야 한다. 그러나 현재 한강 홍수예경보에 구축된 저수지 운영방안들은 이러한 상황들을 모두 종합하기에는 다소 미흡한 측면이 있다. 이치수를 함께 고려하는 문제나 홍수조절용량을 최대한으로 활용하는 측면, 일정을 방식의 수문조작 어려움 등이 그 이유이다. 따라서 한강 홍수예경보시스템의 저수지 운영모듈에 모의기법중 가장 효율적인 방법으로 알려져 있는 Technical ROM을 추가시킬 필요가 있다.

한편, 홍수시 저수지 운영모듈은 실제의 홍수진행상황을 정확히 모의할 필요가 있다. 홍수시 실제의 저수지 운영은 앞서 언급한 방류량 결정방법 등을 이용하여 모의운영을 실시한 후에 이를 바탕으로 댐의 안전과 예측유입량의 불확실성, 하류의 상황 등을 판단하여 보다 안정성을 확보할 수 있는 방류량 값을 최종적으로 결정하게 된다. 따라서 실제로 실시되는 방류량 값은 모의운영 결과보다 다소 큰 값으로 방류되고 있는 것이 일반적이며 반대로 심각한 하류상황으로 인해 방류를 지연시킬 필요가 있는 경우에는 모의운영 결과보다도 적은 방류를 실시하여 이상 상황의 저수지 운영이 전개되는 경우도 있다. 현재 구축된 한강 홍수예경보시스템의 저수지 운영모듈에는 이러한 실시간 저수지 운영 상황을 모의할 수 있는 저수지 운영모듈이 없으므로 실시간 홍수진행상황을 정확히 모의하지 못하고 있다. 따라서 실시간 저수지 운영상황을 고려하여 실제로 실시되고 있는 방류상황을 그대로 재현할 수 있는 저수지 운영모듈의 추가적인 구현이 필요하다고 할 수 있다.

3. 개선된 저수지 운영모듈의 추가적인 구현

Technical ROM이란 저수지의 홍수조절용량을 100% 활용하여 일정 방류량을 결정하는 방법이다. 홍수유입수문곡선에서 위에서부터 저수지의 홍수조절용량만큼을 감하였을 때, 계산되는 일정한 직선이 바로 구하고자 하는 최적의 일정 방류량이다. 본 연구에서는 기존에 잘알려져 있는 Technical ROM을 토대로 실제의 저수지 운영에 따른 제약조건들을 추가적으로 고려하였다. Technical ROM에 대해서는 많은 참고문헌들(한국수자원공사, 1990)을 쉽게 접할 수 있으며 본 연구에서는 심명필등(1996)이 개발한 FORTRAN 버전의 "실시간 Technical ROM"을 토대로 필요한 부분만을 발췌하여 본 연구의 특성에 맞추어 Turbo C로 재 구성하였다.

현재 수계내의 홍수통제소를 위한 명령계통은 홍수통제소를 상위기관으로하고 한국수자원공사(이하 수공)를 하위기관으로하여, 댐 상류지역은 수공에서 댐 하류지역은 홍수통제소에서 각각 분할하여 관리하고 있으며 양기관은 홍수시 서로 긴밀한 공조체제를 구축하고 있다. 그러나 홍수시 댐 방류량을 결정함에 있어 서로의 입장이 다소 다를 수 있다. 수공의 관점은 댐의 안전에 있고, 홍수통제소의 관점은 인도교를 비롯한 수도권 지역의 한강 하류부에 있으므로 홍수상황에 따라 저수지의 방류량을 결정하는데 있어 서로의 이견이 있을 수 있다. 결국, 실제 실시되는 저수지의 방류량은 댐의 안전을 우선으로하는 수공의 의견이 대부분 채택되어 이를 홍수통제소에서 승인하는 형태로 이루어지게 된다. 반대로 한강 하류부의 위험이 보다 크다고 판단되는 경우에는 홍수통제소의 의견이 수렴되어 방류시기를 적절히 조정하는 경우도 있다. 한강 홍수통제소의 경우, 홍수통제소의 독자적인 모의운영 결과를 바탕으로 수공에서 요청한 승인 방류량에 대해 충분히 이해할 필요가 있다. 이러한 이해를 바탕으로 홍수통제소에서는 방류량을 승인하고 승인된 방류량을 이용하여 한강 하류부의 수위를 다시 예측하여야 한다. 그러나 현행의 저수지 운영 모듈에는 이러한 승인된 방류량 값을 이용하는 모듈이 구축되어 있지 않기에 본 연구에서는 이러한 모듈을 추가하였고 이를 ARD(Approved Release Discharge) ROM으로 명칭하였다. 승인된 방류량의 경우, 홍수상황에 따라 일정방류 또는 부분일정방류의 형태가 예상되므로 이를 고려하여 프로그램을 구성하였다.

4. 구축 결과

본 연구에서 추가적으로 구현한 저수지 운영모듈인 Technical ROM과 ARD ROM의 최종 출력 형태는 각각 그림 3에서 그림 6과 같다. 그림 3과 그림 4는 충주댐에 홍수유입량과 초기수위 및 제약조건 등을 가정하여 Technical ROM을 모의운영한 결과이고, 그림 5와 그림 6은 동일한 조건하에서 승인된 단단계 일정방류를 가정하여 ARD ROM을 운영한 결과이다.

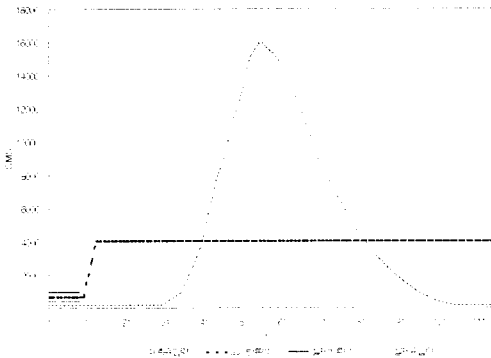


그림 3. 충주댐 모의운영(Technical ROM)에 따른 유입량과 방류량

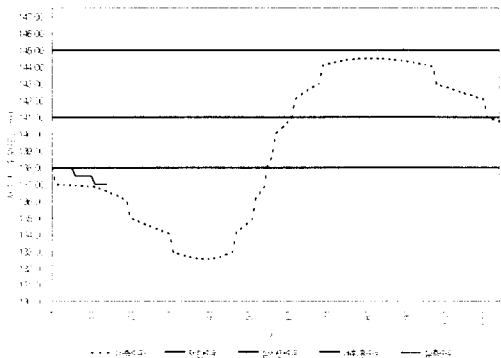


그림 4. 충주댐 모의운영(Technical ROM)에 따른 저수지 수위변화

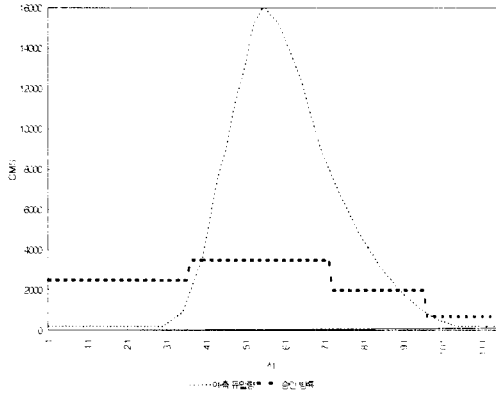


그림 5. 충주댐 부분일정방류 모의운영(ARD ROM)에 따른 유입량과 방류량

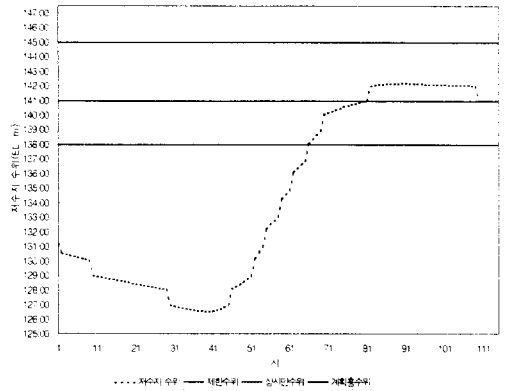


그림 6. 충주댐 부분일정방류 모의운영(ARD ROM)에 따른 저수지 수위 변화

충주댐의 경우 200년 빈도의 홍수유입량을 가정하였으나 실제 저수지 운영에 있어서는 예측유입량이 이용될 것이다. 저수지의 초기수위 역시 홍수기 제한수위(EL. 138m)를 가정하였으나 실제 저수지 운영에 있어서는 분석시점에서의 저수지 수위가 이용될 것이다. 그림 5와 그림 6의 다단계 일정방류의 경우, 3단계를 가정한 것으로 1단계 방류는 36시간 동안 2,500 m³/sec를, 2단계 방류는 36시간 동안 3,500 m³/sec, 3단계 방류는 24시간 동안 2,000 m³/sec를 방류한 결과이다. 입력구성에 있어 홍수지속시간에서 계획방류시간을 뺀 잔여시간은 발전방류로 대처하도록 하였다.

5. 분석 및 고찰

저수지 운영을 위한 제약조건으로 본 연구에서는 관련 변수값들을 모두 가정하였으나 실제 저수지 운영에 있어서는 상황에 따라 적절한 변수 값들이 결정될 것이다. 가정된 모의운영 방법에 따른 각 댐별 홍수조절효과는 표 2와 같다. 표 2에서 저수지 이용률이 100%를 초과하는 이유는 댐수위

표 2. 가정된 모의운영에 따른 각 댐별 홍수조절효과 분석

홍수조절효과	단위	Technical ROM			일정 ARD ROM		
		충주	소양강	화천	충주	소양강	화천
가정된 빈도유입량	년	200	100	100	200	100	100
본방류 시작시간	시간	56	7	9	-	-	-
첨두유입량 (발생시간)	m ³ /sec	16000 (56)	9400 (26)	11310 (28)	16000 (56)	9400 (26)	11310 (28)
최대방류량 (발생시간)	m ³ /sec	4100 (14)	3357 (57)	8363 (31)	3300 (1)	2500 (1)	4800 (1)
첨두유량 조절률	%	74	64	26	79	73	58
유입총량	10 ⁶ m ³	1771.67	1304.15	1567.78	1771.67	1304.15	1567.78
방류총량	10 ⁶ m ³	1557.63	799.75	1540.72	1366.20	990.00	1900.80
저류율	%	12	39	2	23	24	-21
최고수위 (발생시간)	EL. m	144.50 (82)	197.00 (57)	184.02 (37)	144.93 (85)	198.04 (63)	182.80 (56)
저수지 이용률	m ³ /sec	93	87	113	99	101	97

-저류용량 자료에 기인한 것으로, 본 연구에서 이용한 수위자료의 간격이 2m인 이유도 있겠으나 홍수예경보에 구축된 댐수위-저류용량 자료와 본 연구에서 조사한 자료간에 차이가 발생한 관계도 있다. 이는 향후 세밀한 검토후에 보다 정확한 자료를 수집하여 조정될 사항이기도 하다. 표 2의 일정 ARD ROM 모의운영은 각 댐별로 1단계 일정 방류량 값으로 각각 3300 m³/sec, 2500 m³/sec, 4800 m³/sec를 임의로 가정한 결과이다. 본 연구에서는 단지 추가적으로 구축된 저수지 운영모듈에 대한 거동만을 예시하였으나 실시간 저수지 운영을 하는 경우에 있어서는 그림 3에서 그림 6에 간략히 표시한 바와 같이, 분석시점에서의 실제 유입량과 방류량, 저수지 수위 변화들이 함께 표시되어 예측과 실제상황에 대한 비교작업이 수행될 것이다.

6. 결론

본 연구에서 수행한 저수지 운영모듈의 개선사항은 다음의 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 기존에 구축된 방류량 결정모형의 경우, 홍수조절 효과가 미흡하므로 가장 효율적인 방류량 결정방법으로 알려져 있는 Technical ROM을 추가하였다. 그러나 Technical ROM 역시 확정론적인 모의방법이므로 실시간 저수지 운영을 위해, 유역의 댐을 실질적으로 관리하고 있는 수공과의 방류승인 과정을 고려할 필요가 있다. 따라서 댐재, 홍수통제소와 수공간에 최종적으로 결정되는 승인 방류량을 이용하여 예측 업무를 수행할 수 있도록 ARD ROM을 추가적으로 구현하였다. ARD ROM은 실제로 실시되어질 방류량에 따라 그 운영결과를 모의하는 것이므로 실시간 예측 업무에 활용될 수 있다. 따라서 홍수통제소는 Technical ROM과 같은 확정론적인 모의방법을 통해 우선 홍수통제에 대한 1차적인 계획을 수립하고, 이후 수공과의 방류 승인 과정을 통해 승인된 방류량을 이용하여 최종적인 홍수통제 및 예측 업무를 수행할 수 있을 것이다.

일반적으로 Technical ROM과 같은 모의방법에 의해 결정된 방류량의 의미는 예측유입량이 100% 확실하다는 가정하에 수행할 수 있는 방법이라 할 수 있다. 그러나 실제로 예측된 유입량에는 불확실성이 존재하며 과대와 과소 추정의 위험중 특히, 과소추정에 대한 위험은 반드시 고려되어야 한다. 따라서 댐 운영자는 예측된 수문곡선의 불확실성과 댐의 안전을 고려하여 보다 안정적인 방류량 값을 결정하고 유역 상하류의 상황에 따라 결정된 방류량의 크기와 그 시기 등을 식절히 재조정할 필요가 있다. 물론, 현재에도 모의된 결과를 바탕으로 댐 운영자의 경험과 판단에 따라 이러한 순차적인 과정이 수행되어 승인을 요청하는 방류량이 최종적으로 결정되어 지고 있다. 이러한 의사결정과정은 실시간 저수지 운영상황에서 충분히 이해될 수 있는 일이며 따라서, 이러한 댐 운영자의 주관적인 의사결정과정을 이해할 만한 절차에 따라 저수지 운영모듈에 추가적으로 구현시킨다면 보다 향상된 저수지 운영모듈을 기대할 수 있을 것이다. 그 결과, 홍수시 단일댐에 대한 명확한 운영계획이 수립될 수 있으므로 유역을 총괄하는 댐군의 연계운영방안도 강구될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 심명필, 이재형, 권오익 (1996). "홍수예측에 의한 예비방류 방안." 한국수문학회지, 제29권, 제1호, pp. 235-247.
- 이재형, 이길성, 정동국 (1992). "Incremental DP에 의한 홍수시 댐군의 연계 운영.", 한국수문학회지, 제25권, 제2호, pp. 47-59.
- 한국수자원공사 (1990). 저수지 수문조작을 위한 홍수유입량의 예측모형 개발 연구 보고서.
- 한국수자원공사 (1993). 다목적댐 홍수유출해석 및 홍수기 저수지운영 프로그램 해설서.
- Loganathan, G.B., and Bhattacharya, D. (1990). "Goal programming techniques for optimal reservoir operation." *J. Water Resour. Plng. Mgmt.*, ASCE, 116(6), pp. 820-838.
- Yeh, W.W. (1985). "Reservoir management and operations models: A state-of art review." *Water Resour. Res.*, 21(12), pp. 1797-1818.