

예측홍수의 방류량 결정방안에 관한 연구

A Study on Releases Determination Scheme for a Forecasted Flood

권 오 익 * · 심 명 필 **

Kwon, Oh Ig · Shim, Myung Pil

Abstract

Reservoir operators and managers need to present a rational basis of determining releases for a flood event. This study divides a forecasted flood hydrograph by two parts on the basis of non-damaging discharge, which consists of one part controlled by non-damaging discharge and another controlled by using flood control storage of the reservoir. In case of using flood control storage, a new reservoir operation method, called TRF (Transformed Reservoir Flood) ROM, is suggested for the operating rules during a flood to consider the reservoir security as well as the operational efficiency. This paper presents an application of the methodology to the operation of a single multipurpose reservoir at the Taechong Dam during flood and the results analyzed.

요 지

홍수시 최적의 방류량을 목표로 하는 댐 운영자의 경우 방류량을 결정하는데 있어 댐의 안전과 저수지의 운영효율을 고려한 이해할 만한 근거를 제시할 필요가 있다. 본 연구에서는 예측된 홍수수문곡선을 댐 규정에 명시된 무피해방류량을 기준으로 분할하여 무피해방류량으로 조절되는 부분과 홍수조절용량을 이용하여 조절되는 부분으로 구분하였다. 홍수조절용량을 이용하는 경우 예측홍수를 판단하는 기준을 마련하여 저수지 운영의 안전과 효율을 고려한 홍수조절계획을 수립하는 방안 ("저수지 홍수변환법")을 강구하였다. 본 연구에서는 연구범위를 단일 댐의 홍수시 저수지 운영 방안으로 제한하여 대형 다목적 댐을 대상으로 적용하고 그 결과를 분석하였다.

keywords : flood control, non-damaging discharge, reservoir operation

* 인하대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료

** 인하대학교 토목공학과 교수

1. 서 론

홍수시 저수지 운영이란 기상정보로부터 홍수징후가 판단되면 유역 및 저수지의 초기 상태, 예측된 수문정보, 댐 규정에 따른 방류계획, 댐 상류와 하류의 유행상태 등에 따라 수문·경제학적인 불확실성을 고려하여 최적의 방류량을 결정하는 일련의 의사결정문제이다. 홍수시 긴박한 상황에서 수시로 변하는 수문자료들을 on-line으로 입력받아 매시간 입력되는 관측치와 새롭게 수정되는 예측치로부터 최적의 방류량을 결정하여야 한다. 홍수시 저수지 운영을 위해서는 강우량과 유입량, 최적 방류량, 홍수피해액 등을 예측할 필요가 있다. 그러나 예측된 수문정보에는 많은 불확실성이 내포되어 홍수가 끝난 뒤 평가된 저수지의 운영효율에는 이러한 불확실성의 영향이 단적으로 나타나고 있다. 예측시점에서는 최적이라 판단된 수문량이 사후평가시에는 최선의 수문량으로 평가되고 있는 것이 현행 홍수시 저수지 운영의 기본적인 배경이다. 이러한 불확실성의 영향을 저수지 운영에 반영함으로써 저수지 운영의 안전성과 효율성을 향상시킬 수 있을 것이다. 그러나 국내의 경우 불확실성의 영향을 객관적으로 판단하기 보다는 분석자의 주관적인 판단에 대부분 의존하고 있는 실정이다. 따라서 현행의 홍수시 저수지 운영에 있어 댐 운영자의 주관적인 판단은 상당한 영향을 미치고 있다. 국민의 생명과 재산을 담보하는 사명감은 댐 운영자로서 하여금 안정적인 저수지 운영을 강조할 우려가 있으며 홍수시 안전과 효율은 서로 상반되게 작용하는 문제이기도 하다. 안전과 효율은 이해당사자의 주관에 따라 관점을 달리 할 수 있는 요소로 홍수피해와 최적운영이란 양면을 고려할때 쉽게 답할 수 없는 문제이다. 홍수시 최적의 방류량을 목표로 하는 댐 운영자의 경우 결정된 방류량에 대하여 이해할 만한 근거를 제시할 필요가 있다.

본 연구에서는 홍수시 방류량을 결정하는데 있어 이해할만한 근거를 제시할 수 있는 방안을 강구하고자 한다. 불확실한 예측정보와 분석시점의 홍수조절능력을 토대로 홍수시 상반되는 저수지 운영의 안전과 효율을 고려하여 방류량을 결정하는 일련의 절차에 관해 논의하고자 한다. 본 연구에서는 홍수유입량의 특성과 댐 규정에 명시된 무피해방류량을 이용하여 홍수수문곡선을 무피해방류량을 기준으로 분할하고 무피해방류량으로 조절되는 부분과 홍수조절용량을 이용하여 조절되는 부분으로 구분하였다. 본 연구에서는 예측된 홍수량을

확보된 홍수조절용량 개념으로 수치적으로 변환시키는 방법을 고안하여 변환수치를 사전 홍수조절계획에 가감함으로써 효율적인 홍수시 저수지 운영 방안을 검토하였다. 또한 예측된 홍수량의 불확실성을 반영할 수 있는 임의의 수치를 효율적인 홍수조절계획에 더해줌으로써 저수지 운영의 안전도 고려하도록 하였다. 이와 같이 예측된 홍수에 대한 저수지 운영의 안전과 효율을 고려하여 방류량을 결정하는 일련의 절차를 본 연구에서는 “저수지 홍수변환법”이라 정의하고 이를 홍수시 저수지 운영방안으로 제안하고자 한다. 제안된 “저수지 홍수변환법”은 예측된 홍수에 대해 적절한 방류량을 결정하는 홍수시 저수지 운영 방안으로 활용될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 현행의 기술적인 수준내에서 저수지 홍수변환법의 이용에 따른 전반적인 홍수시 저수지 운영의 향상을 목적으로 연구범위를 단일 다목적 댐으로 제한하여 대청 다목적 댐을 대상으로 적용하고 그 결과를 분석하였다.

2. 홍수시 저수지 운영의 적정성 검토

홍수시 기상예보로부터 홍수징후가 판단되면 유역과 저수지의 초기상태에 따라 적절한 홍수조절용량을 확보하기 위한 홍수초기의 방류유무가 결정된다. 이때의 방류는 강우전이므로 예비방류라 할 수 있다. 강우시작을 전후로 기상정보와 T/M 정보를 종합하여 댐 유역에 내릴 예상총강우량과 지속시간을 판단하고 강우를 모의발생시켜 강우를 예측한다. 이때, 예측된 강우와 실제 강우사이에는 불확실성이 존재한다. 예측된 강우는 강우-유출모형의 입력자료가 되어 강우로부터 저수지로 유입하는 유입량이 추정되며 이때 예측된 수문곡선과 실제의 수문곡선사이에 불확실성이 존재한다. 예측된 수문곡선으로부터 추정된 홍수유입총량과 분석시점에서 확보된 저수지 홍수조절용량을 비교하여 추가적인 홍수조절용량이 필요하다고 판단되면 추가적인 홍수조절용량을 확보하기 위한 예비방류 성격의 방류가 결정된다. 홍수의 진행에 따라 방류량 결정모형에 의해 본 방류량이 결정되면 결정된 방류량이 하류에 미치는 영향을 파악하기 위해 하도추적모형이 이용된다. 하도추적모형을 통해 예측된 하류 유행과 실제의 하류 유행사이에도 불확실성이 존재하며 하도추적을 통해 하류의 피해를 최소화 할 수 있는 최적의 방류량이 결정되어야 한다. 하류의 피해를 최소화 하는 방류량은 방류량의 함수인 손실함수에 의해 판단되나 손실함수의 구성이 쉽지 않음 뿐만 아니라 정확한 피해액의 산정도 어려운 실정이다.

홍수시 최적의 저수지 운영을 위해서는 앞서 언급한 바와 같이 필요한 수문량을 추정할 때마다 추정오차와 관련한 불확실성이 고려되어야 한다(Arrau, 1987; Krzysztofowicz, 1993). 그러나 불확실성의 영향을 객관적으로 분석할 수 있는 한쌍의 예측치와 실측 자료가 확보되지 않은 관계로 현행의 홍수시 저수지 운영에 있어 존재하는 불확실성의 영향은 댐 운영자의 판단에 따라 주관적으로 반영되고 있다.

3. 운영기준의 수립

댐 상류유역에 내린 강우는 강우-유출현상에 따라 유역상태(지표면, 지표하, 지하수 유출성분의 복합)를 반영하여 저수지로 유입하게 된다. 시간의 추이에 따라 유입된 일련의 유입량은 유입수문곡선으로 나타낼 수 있다. 홍수란 큰물의 의미로 외수와 내수의 요인으로 구분되나 홍수조절을 목적으로 하는 댐의 경우, 호우로 인해 댐으로 유입되는 유입량중 방지하면 하류의 피해를 유발할 수 있는 유입량을 지정하여 홍수량이라고 정의할 수 있을 것이다. 홍수량은 하류 하천의 지정수위 또는 경계수위에서의 유하능력, 댐 지점에서 연 2~3회 발생하는 유량, 하천 개수상태, 기왕의 홍수자료와 피해의 관계 등을 충분히 고려하여 정하는 것으로 정확한 홍수량을 결정하기란 쉽지 않다(한국수자원 공사 댐 운영처 1993). 그러나 지정된 홍수량은 홍수조절의 시작을 판단할 수 있는 중요한 지표로써 이용될 수 있다. 저수지로 유입하는 홍수유입량의 특성은 홍수수문곡선으로 나타낼 수 있다. 홍수시 홍수수문곡선은 강우의 특성(집중·지속·간헐, 단순·복합 등)이 가장 지배적으로 강우에 따라 홍수지속시간, 첨두유량의 크기와 수, 지체시간 등의 전반적인 곡선 모양을 통해 홍수특성이 반영된다. 홍수지속시간은 저수지의 운영관점에서 강우 시작을 기점으로 홍수조절이 완료된 이후 다시 저수지의 수위가 안정화 단계에 이르는 전(全) 기간을 포함시킬 수 있다. 본 연구에서는 홍수수문곡선을 거시적으로 관찰하여 홍수조절을 위한 운영기준을 마련하고자 한다.

3.1 무피해방류량을 기준으로 한 홍수수문곡선의 분할

홍수시 하류의 피해를 유발하지 않는 의미의 무피해방류량은 하류의 상황에 따라 변하는 값으로 그 결정에 있어 어려움이 있으나 댐 규정에 명시되어 있다면 우선 명시된 값을 이용할 수 있을 것이다. 댐 규정에 명시된 무피해방류량이란 홍수통제소의 승인 없이도 방류가

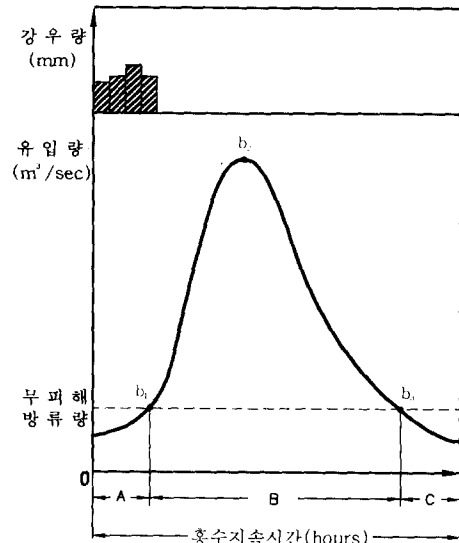


그림 1. 분할된 홍수수문곡선

가능한 양으로 홍수시 저수지 운영에 있어 신속성과 자율성을 부여할 수 있는 의미있는 값이기도 하다. 따라서 무피해방류량이 규정되어 있다면 규정된 무피해방류량을 기준으로 그림 1과 같이 홍수수문곡선을 3개의 구간으로 분할할 수 있다. 그림 1에서 홍수지속시간은 A와 B, C 구간으로 구간 A는 강우시작에서 유입량이 무피해방류량이하로 유입되는 구간으로, 구간 B는 유입량이 무피해방류량이상인 유입되는 구간으로, 구간 C는 첨두유입 이후 유입량이 점차로 감소하여 무피해방류량 이하로 유입되는 구간으로 각각 설명될 수 있다. 구간 A와 구간 C는 무피해방류량이하로 방류하면서 수위조절이 가능한 구간으로, 구간 A는 추가적인 홍수조절용량을 확보할 수 있으며, 구간 C는 홍수후반부에서 수위조절의 완급을 조정할 수 있다. 이처럼 구간 A와 구간 C는 무피해방류량이하로 조절이 가능하다고 볼 때 홍수수문곡선에서 조절해야 할 주된 홍수량은 구간 B의 유입량이라고 할 수 있다. 따라서 구간 B에 대한 적절한 방류량을 결정하여 홍수를 분산시킬 수 있다면 홍수조절효과를 높일 수 있을 것이다.

3.2 제한수위별 저수시상당홍수 개념

홍수기 가변제한수위방식의 저수지 운영을 고려할 때 구분된 홍수기간별로 홍수조절용량에 대한 능력을 사전에 파악해 둔다면 홍수시 판단기준으로 활용될 수 있다. 구분된 홍수기간별로 파악된 홍수조절용량에 대응하는

홍수 규모를 결정할 수 있다면 홍수시 예측된 홍수와의 비교를 통해 방류실시 여부 등을 판단할 수 있다. 본 연구에서는 임의의 저수지 수위에서 홍수위까지의 홍수 조절용량에 상당하는 홍수 규모를 구하여 이를 "저수지상당홍수"라 정의하고 저수지상당홍수에 대한 안정적인 방류시기별-방류량별-저수지 수위변화 등을 검토하는 방안을 강구하였다. 제한수위별로 할당된 홍수조절용량에 상응하는 저수지상당홍수의 경우에는 그림 2와 같이 표현하여 이를 "제한수위별 저수지상당홍수"라 명칭하였다. 그림 2의 5각형 형태로 표현된 제한수위별 저수지상당홍수의 경우, 계획된 제한수위별로 확보된 홍수조절용량을 기준으로 예측된 수문곡선의 상승부와 침두유량, 하강부의 형태를 간략히 모사(模寫)한 것이다. 5각형으로 표현된 저수지상당홍수의 경우 그림 1의 무피해방류량과 구간 B에 대한 홍수지속시간으로 표현되는 사각형의 모양과 무피해방류량 이상을 표현하는 삼각형의 모양을 합성한 것이라고 할 수 있다. 그림 2에서 실선과 점선으로 표현된 저수지상당홍수의 경우 침두위치는 침두유량의 발생시간에 따라 조정이 가능하며 침두의 위치는 달라도 5각형의 면적은 서로 동일하다. 실시간 홍수조절의 경우에는 분석시점의 특성에 따라 저수지상당홍수의 모양은 상승부 형태와 하강부 형태로 구분될 것이다. 그림 2의 5각형의 형태는 무피해방류량이 유입되는 시점을 포함하여 상승부 형태를 모사한 것이라 할 수 있다.

그림 2와 같이 표현된 제한수위별 저수지상당홍수는 제한수위별로 확보된 저수지의 홍수조절용량에 상당하는 홍수유입량의 규모를 가정한 것으로 저수지의 홍수조절용량을 100% 이용한다면 제한수위별 저수지상당

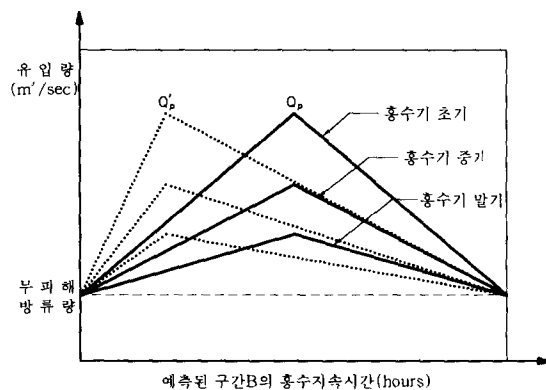


그림 2. 제한수위별 저수지상당홍수

홍수에 대해 방류없이 저류만으로도 홍수조절이 가능한 경우이다. 그러나 실제로는 저수지의 안전을 고려하여 안정적인 저수지 운영을 위한 적절한 방류시기와 방류량이 결정될 것이다. 제한수위별 저수지상당홍수에 대해 사전에 안정적인 방류시기별 방류량과 조절수위 등을 정량적으로 분석한 값들은 실제 홍수시 예측된 홍수와의 비교를 통해 홍수조절을 수행하는데 있어 유용한 정보로 활용될 것이다.

3.3 예측된 홍수의 평가 방법

강우-유출모형을 이용하여 홍수를 예측하는 경우 예측된 홍수에 대해 평가할 필요가 있으며 예측된 홍수를 평가할 수 있는 명확한 기준이 있다면 보다 용이한 홍수조절을 수행할 수 있을 것이다. 가능한 평가 기준으로 우선 빈도별 홍수량을 고려해 볼 수 있다. 빈도별 홍수량에 대한 예상 가능한 상황 등을 설정하여 상황별 대책을 수립한 후 홍수시 예측된 홍수에 대한 빈도가 파악되면, 사전에 수립된 해당빈도의 시나리오는 예측 홍수에 대한 적절한 홍수조절계획이 될 수 있을 것이다. 그러나 예측홍수를 빈도별 홍수로 파악하기에는 곤란한 문제가 있다. 빈도별 홍수량은 가정된 빈도별 침두유량과 홍수지속시간에 따라 결정된다. 예측홍수를 빈도별 홍수량으로 파악하기 위해서는 침두유량과 홍수지속시간간의 관계를 고려하여야 한다. 예측된 홍수량만을 비교할 수도 있겠으나 홍수지속시간을 고려하는 문제가 발생하고 또한 빈도별 홍수량의 출처는 침두유량을 기준으로 하고 있으므로 예측홍수와 빈도별 홍수의 단순 비교는 곤란하다. 따라서 빈도별 홍수량의 경우 저수지의 계획과 설계에는 유용한 판단정보로 활용이 가능하나 홍수조절을 위한 평가기준으로는 보다 세부적인 검토를 필요로 한다. 본 연구에서는 예측된 홍수를 평가하는 기준으로 저수지의 확보된 홍수조절용량과 연관시키고자 한다. 즉, 예측된 홍수를 예측시점에서 확보된 저수지의 홍수조절용량에 대한 저수지상당홍수로 변환시키는 것이다. 강우-유출모형을 이용하여 홍수를 예측하는 경우 예측된 홍수수문곡선에 의해 홍수유입총량과 홍수지속시간 등이 추정된다. 예측된 홍수량과 저수지의 확보된 홍수조절용량과의 차이량을 홍수지속시간으로 나누어 일정량을 저수지상당홍수에 가감하는 방법으로 예측홍수를 저수지상당홍수로 변환시킬 수 있다. 본 연구에서는 예측홍수를 저수지상당홍수로 변환시켜 변환된 예측홍수를 "변환된 저수지상당홍수"로 명칭하였다. 그림 3은 저수지상당홍수와 예측홍수, 변환된 저수지

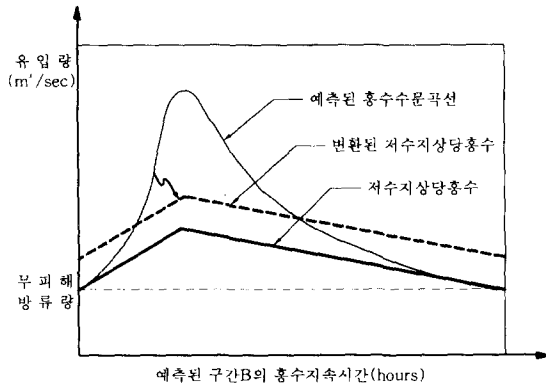


그림 3. 예측홍수의 저수지 홍수 변환법

상당홍수를 함께 나타낸 것으로 저수지상당홍수와 변환된 저수지상당홍수의 비교를 통해 예측된 홍수에 대한 양적인 홍수조절계획을 수립할 수 있다. 분석시점의 저수지 수위가 제한수위를 확보한 경우라면 제한수위별 저수지상당홍수에 대해 정량적으로 분석된 방류시기별 방류량과 조절수위 등은 예측된 홍수에 대해 홍수조절계획을 수립하는데 있어 유용한 정보일 것이다.

4. 예측된 홍수수문곡선의 구간별 홍수조절방안

본 연구에서는 홍수시 홍수조절 방안으로 홍수유입량의 특성과 댐 규정에 명시된 무피해방류량 값을 이용하여 무피해방류량 이하의 유입량에 대해서는 무피해방류량 이내로 방류하면서 저수지의 수위조절을 유도하고, 무피해방류 이상의 유입량에 대해서는 확보된 홍수조절용량을 최대한 이용하는 방안을 강구하였다. 그림 1과 같이 무피해방류량을 기준으로 구분된 홍수수문곡선의 경우 구분된 홍수구간별 홍수조절계획을 다음과 같이 수립할 수 있다.

4.1 구간 A의 홍수조절계획

그림 1의 구간 A는 홍수유입량이 무피해방류량이하로 유입되는 홍수초기에 해당하는 구간이다. 기상예보를 통해 홍수의 징후가 판단되면 기상청의 예보강우를 토대로 강우-유출모형을 수행하는 한편 초기의 홍수조절용량을 확보하기 위한 초기 방류가 결정될 것이다. 이때의 방류량은 홍수통제소의 승인을 얻지 않아도 되는 무피해방류량내로 계획될 것이다. 구간 A에서는 홍수에 관한 정보를 수집하면서 이수과 치수를 고려하여 계획된 제한수위를 확보함으로써 최소한 계획된 홍

수조절용량을 확보하여야 한다. 또한, 구간 A에서는 예측 상황에 따라서는 계획된 홍수조절용량외에도 추가적인 홍수조절용량을 확보하여 전반적으로 원활한 홍수조절을 계획할 수 있다. 그러나 예측정보에 대한 신뢰성이 저하되는 관계로 구간 A는 관망의 경향이 두드러지는 경향이 있다. 홍수 판단부터 구간 A의 저수지 운영은 심명필 등(1996)이 제안한 예비방류 방안이 고려될 수 있다.

4.2 구간 B의 홍수조절계획

그림 1의 구간 A를 통해 가변제한수위가 확보된 경우 무피해방류량이상이 유입되는 시점에서는 구간 A의 실측 유입량 자료로부터 강우-유출모형의 매개변수 조정이 가능하므로 조정된 매개변수로부터 구간 A의 강우량과 구간 B의 강우발생을 예측하여 구간 B의 홍수를 예측하게 된다. 이때의 예측수문곡선은 매개변수의 조정으로 강우-유출모형은 비교적 신뢰할 수 있으나, 강우예측의 불확실성이 여전히 큰 비중으로 존재하므로 예측수문곡선의 신뢰성은 저하된다. 그러나 현재로서는 최선의 예측정보이므로 이를 근거로 홍수조절계획을 수립하여야 한다. 예측된 구간 B의 홍수수문곡선으로부터 구간 B의 홍수유입총량과 홍수지속시간을 구하여 저수지상당홍수를 구하고 구간 B의 예측홍수를 저수지상당홍수로 변환시킬 수 있다. 이때, 변환된 저수지상당홍수는 예측홍수를 100% 신뢰한 경우로 예측유입량의 불확실성을 고려하지 않을 수 없다. 불확실성을 고려함에 있어 물본 과소와 과대 추정, 두가지 경우를 모두 고려하여야 하나 본 연구에서는 과소추정에 따른 위험만을 고려하고자 한다. 과대추정의 경우 불필요한 방류로 인해 수자원의 낭비를 초래하게 되나 홍수시에는 과대추정의 오류보다는 과소추정에 따라 가중되는 위험을 우선적으로 고려할 필요가 있다. 과대추정의 경우에는 실시간 저수지 운영에 있어 분석시점마다 예측유입량과 실측유입량이 검토되므로 오차의 반영이 가능하나 과소추정의 경우에는 검토된다 해도 가중되는 위험이 누적될 뿐이다. 현재로서는 강우예측의 불확실성이 정량화되고 있지 않으므로 예측홍수에 대한 과소추정의 위험을 객관적으로 평가하기에는 어려움이 있다. 따라서 주관적인 판단에 의존해야 하는 실정이다. 본 연구에서는 주관적인 판단에 따라 변환된 저수지상당홍수에 일정량을 더하는 방법으로 과소추정의 위험을 고려하였다. 변환된 저수지상당홍수에 예측유입량의 불확실성을 주관적으로 고려하여 최종적으로 결정한 저수지상당홍수를

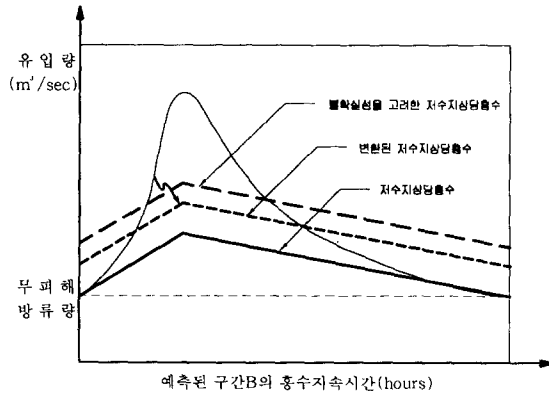


그림 4. 불확실성을 고려한 저수지상당홍수

“불확실성을 고려한 저수지상당홍수”로 명칭하였다. 주관적인 판단에 따라 더해지는 일정량은 계산의 편의를 위해 발전방류량, 500 m³/sec, 1000 m³/sec 등의 적절한 정수값을 선택하도록 하였다. 과거의 댐 운영기록으로부터 예측유입량과 실제유입량 자료를 확보할 수 있다면 적절한 일정량을 결정하는 별도의 방안이 강구될 수 있겠으나 본 연구에서는 이들 자료를 확보할 수 없었다. 그림 4는 저수지상당홍수, 예측홍수, 변환된 저수지상당홍수, 불확실성을 고려한 저수지상당홍수를 모두 함께 나타낸 것이다.

그림 4와 같이 저수지상당홍수와 최종적으로 불확실성을 고려한 저수지상당홍수가 구해지면 저수지의 상태와 예측된 홍수를 양적으로 대표하는 두 곡선을 비교하여 예측된 홍수에 대한 적절한 방류시기와 방류량을 결정할 수 있다. 저수지상당홍수가 불확실성을 고려한 저수지상당홍수보다 커서 홍수조절에 여유가 있는 경우라면 홍수의 진행에 따라 적절한 방류량을 결정할 수 있다. 반면에 저수지상당홍수보다 더 큰 홍수가 예측되어 방류가 불가피한 상황이라면 그림 5와 같이 저수지상당홍수와 일정량의 차이로 표현되는 변환된(또는 불확실성을 고려한) 저수지상당홍수와의 관계를 이용하여 적절한 방류량을 결정할 수 있을 것이다. 그림 5를 이용하여 예측된 홍수에 대해 적절한 방류량을 결정하는 방안에 대해서는 5.3 절의 적용예를 통해 구체적으로 논의될 것이다.

4.3 구간 C의 홍수조절계획

그림 1의 구간 C는 강우가 종료되고 침투유입이 지난 이후 유입량이 점차로 감소하여 무피해방류량이하로

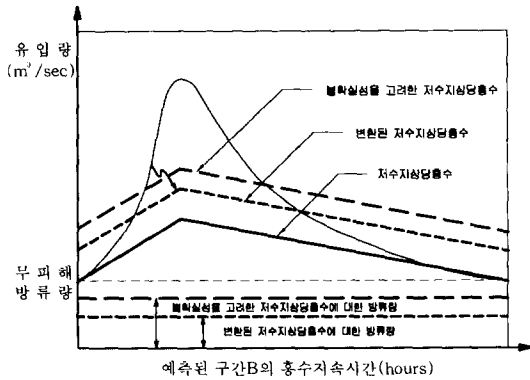


그림 5. 예측된 홍수에 대한 방류량 결정

유입되는 구간으로 홍수 후반부의 상황이다. 구간 C에서 새로운 강우가 예측된다면 또 다른 홍수 강우의 징후가 없다면 저수지의 수위를 조절함에 있어 발전편익도 고려할 수 있는 구간이다. 또한 홍수기를 구분하는 시기적으로 완충적인 시점에서는 가변제한수위의 수위차를 연결해줄 수 있으며 특히, 홍수기 말기에 있어서는 상시만수위로 복귀할 수 있는 기회를 제공하는 구간이기도 하다. 그러나 구간 C의 경우 수위조절의 완급을 조정하는 조절방류량이 이해관계에 따라 달리 평가되므로 댐 운영자의 어려움이 있다. 급격한 수위조절이 때로는 불필요한 방류로 판명되거나 홍수지속시간을 연장시킨다는 지적이 있을 수 있다. 구간 C는 주된 홍수조절을 수행한 후 새로운 이수와 치수 목적이 상충하는 구간으로 댐 운영자의 숙련된 경험과 판단을 필요로 한다.

5. 대청댐 적용

5.1 무피해방류량을 기준으로 한 과거 홍수 수문 곡선의 분할

대청댐의 홍수사상을 선정하기 위해 Votruba (1989)와 심명필 등(1995)이 제안한 방법에 의해 댐 규정에 명시된 무피해방류량(1,000 m³/sec)을 기준으로 홍수사상을 추출하였다. 대청댐 과거 홍수기(6월~9월) 일 유입량자료(1981년 6월 1일~1996년 7월 8일)를 근거로 1,000 m³/sec 이상의 유입량을 기록한 홍수사상을 추출한 결과 총 39건이었다. 이 중 부분적인 자료로 인해 홍수의 시작과 끝을 나타낼 수 없는 자료를 제거하여 총 26건의 홍수사상을 선별하였다. 선별된 홍수사상중 여수로의 방류가 없었거나 저수지의 최고수위가 상시만수위(EL. 76.5 m) 이하인 사상, 홍수유입총량

표 1. 대청댐 과거홍수수문곡선의 구간별 수문분석

구분	과거 홍수 (년월일)	구간별 홍수시간 (hrs.)				구간별 누가 강우량 (mm)				구간별 유입량 (10 ⁶ m ³)				구간별 방류량 (10 ⁶ m ³)			
		합	A	B	C	합	A	B	C	합	A	B	C	합	A	B	C
초기	90714	212	41	111	60	196.8	49.9	146.9	0.0	780.8	88.7	594.7	97.4	292.6	37.6	102.1	152.8
	93712	250	19	58	173	236.2	60.0	127.3	56.9	864.7	19.2	534.4	311.1	361.4	14.4	41.9	305.0
중기	84831	192	64	56	72	222.2	115.8	105.8	0.6	726.3	52.7	546.6	127.0	264.4	17.3	81.4	165.7
	85814	239	50	61	128	147.2	50.1	97.1	0.0	574.5	62.8	385.4	126.3	451.6	27.7	198.7	225.2
	87721	109	30	61	18	177.3	29.5	147.8	0.0	655.8	31.3	597.3	45.2	178.9	11.8	88.8	78.3
	87803	94	33	29	32	96.8	93.5	3.2	0.1	320.7	40.7	218.1	61.9	172.8	40.4	50.6	81.8
	87820	81	8	34	39	145.0	90.0	55.0	0.0	458.4	179.9	206.7	71.8	374.6	85.3	118.2	171.1
	87828	213	21	89	103	218.6	63.3	147.4	7.9	932.7	47.9	731.0	153.7	865.8	16.5	517.4	331.9
	89725	168	30	93	45	225.4	67.6	157.8	0.0	817.7	29.0	705.7	83.0	482.3	17.6	428.9	35.8
95830	74	11	41	22	185.4	79.3	106.1	0.0	581.3	23.5	511.5	46.3	235.6	3.9	145.5	86.2	
말기	85915	209	21	117	11	189.5	62.0	127.5	0.0	785.0	34.3	649.6	101.1	625.6	17.1	524.4	84.1
최 소		74	8	29	11	96.8	29.5	3.2	0.0	320.7	19.2	206.7	45.2	172.8	3.9	41.9	35.8
최 대		250	64	117	173	236.2	115.8	157.8	56.9	932.7	179.9	731.0	311.1	865.8	85.3	524.4	331.9
평 균		167	30	68	64	185.5	69.2	111.1	6.0	681.6	55.5	516.5	111.3	391.4	26.3	208.9	156.2

이 $100 \times 10^6 \text{ m}^3$ 미만인 사상들을 제외시켜 결과적으로 11개의 홍수사상을 최종적으로 선정하였다. 본 연구에서는 대청댐의 경우 홍수기에는 가변제한수위 운영방식이 효과적이라 판단되어 홍수기를 홍수기 초기·중기·말기로 구분하였다. 대청댐에 홍수기를 구분하여 가변제한수위를 할당하는 문제는 본 연구와 병행하여 별도의 논문을 준비하고 있으므로 본 연구에서는 홍수기의 구분과 가변제한수위의 할당에 관해서는 따로 언급하지 않았다. 표 1은 대청댐의 홍수기별로 선정된 홍수사상에 대한 유입수문곡선을 무피해방류량을 기준으로 분할하여 각 구간별 수문특성을 분석한 것이다. 대청댐 선정된 홍수사상의 홍수지속시간은 평균적으로 167시간으로 구간 A는 30시간, 구간 B는 68시간, 구간 C는 64시간이다. 홍수사상의 평균 누가 강우량은 185.5 mm이며 이중 구간 B에서 약 60%의 강우가 집중된다. 평균 누가 유입량이나 방류량 역시 구간 B에서 집중되는 경향이 있으므로 구간 B의 홍수조절계획이 차지하는 비중이 상대적으로 중요하다는 것을 알 수 있다.

5.2 제한수위별 저수지상당홍수

대청댐 제한수위별 홍수조절용량에 상당하는 홍수 규모를 파악하기 위해 가정된 제한수위별로 저수지상당홍수를 구한 것이 그림 6이다. 구간 B의 홍수지속시간은 우선은 임의로 60시간 정도를 가정하였다. 홍수시에는 예

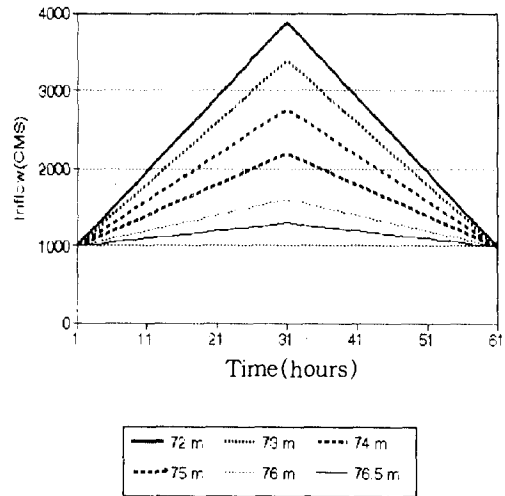


그림 6. 대청댐 제한수위별 저수지상당홍수

측된 구간 B의 홍수지속시간을 이용하여 분석시점의 홍수조절용량에 상당하는 저수지상당홍수를 구할 수 있다.

5.3 예측홍수의 홍수조절계획 수립

대청댐의 홍수기 중기(7월 21일~8월 31일)의 가변제한수위가 EL. 74 m로 계획되었다면, 대청댐 홍수기 중기의 저수지 운영에 있어 홍수정후가 판단되기까지는 가능한 계획된 제한수위의 확보에 주력할 것이다. 홍수

징후가 판단되면 그림 1의 구간 A를 통해 수집된 각종수문정보로부터 상황을 판단하여 최소한 계획된 제한수위를 확보하면서 홍수규모에 따라서는 예비방류등을 실시하여 추가적인 홍수조절용량의 확보도 계획할 수 있다. 홍수의 진행에 따라 무피해방류량이 유입되는 분석시점에서 예측된 구간 B의 유입수문곡선을 근거로 분석시점에서 확보된 홍수조절용량에 상당하는 저수지상당홍수를 구하여 저수지상당홍수에 대한 방류시기별-방류량별-저수지 수위변화 등을 분석시점에서 바로 모의할 수 있다. 또한 구간 B에 대한 예측홍수를 저수지상당홍수로 변환시켜 불확실성을 고려한 저수지상당홍수도 결정할 수 있다. 예측된 홍수를 저수지상당홍수로 변환한 결과 저수지상당홍수보다 상당히 작은 홍수가 예상된다면 모두 저류하여 홍수가 지난후 조절방류를 계획할 것이다. 저수지상당홍수와 비슷한 규모의 홍수가 예상된다면 방류시점은 침투유입 이후 또는 분석시점에서의 계획이 가능하며 저수지상당홍수보다 규모가 큰 홍수가 예상되는 경우라면 방류시점은 분석시점부터 바로 검토될 것이다. 본 연구에서 제안한 저수지 홍수변환법의 적용으로 분석시점을 설명하면 다음과 같다. 무피해방류량이 유입되는 시점에서 계획된 제한수위인 EL. 74 m를 확보한 상황에서 1995년 8월 30일(구간 B의 홍수지속시간 : 41 시간, 침투유량 발생시각 : 13시)과 같은 홍수가 예측된 경우이다. 우선 예측된 구간 B의 홍수지속시간과 침투유량 발생시간을 이용하여 저수지상당홍수를 구하고 저수지상당홍수에 대한 안정적인 방류시기별-방류량별-저수지 수위변화를 분석시점에서 바로 모의할 수 있다. 그림 7과 그림 8은 저수지상당홍수에 대해 침투발생 이후의 방류량에 대한 저수지 수위변화를 모의한 것이고 그림 9와 그림 10은 분석시점에서의 방류량별 저수지 수위변화를 나타낸 것이다. 또한 예측된 구간 B의 홍수유입총량을 이용하여 변환된 저수지상당홍수를 그림 11과 같이 구하여 그림 11을 근거로 예측된 홍수에 대한 적절한 방류량을 결정할 수 있다. 그림 11에서 확보된 저수지 수위(EL. 74 m)에 대한 저수지상당홍수(ERF)의 침투유량의 크기는 $4.512 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이다. 예측된 홍수(F-Flood)를 저수지상당홍수로 변환시킨 결과 변환된 저수지상당홍수(T-ERF)의 침투유량은 $5.221 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 저수지상당홍수보다 $709 \text{ m}^3/\text{sec}$ 더 큰 홍수이다. 따라서 예측된 홍수에 대해 양적인 홍수조절계획을 수립함에 있어, 변환된 저수지상당홍수에 대해 $709 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 방류를 계획한다는

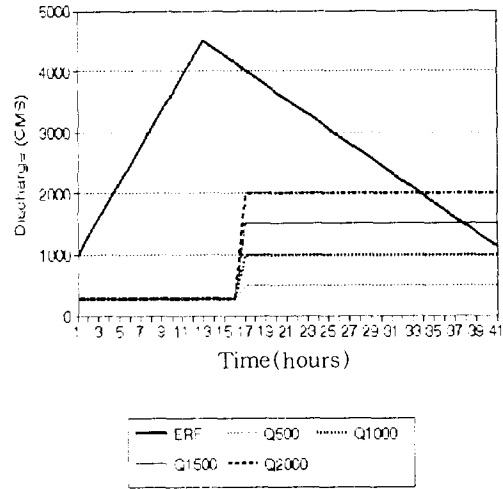


그림 7. 저수지상당홍수에 대한 방류량 (침투발생시점)

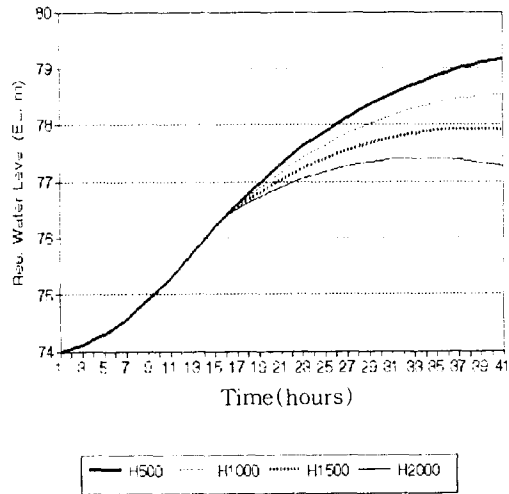


그림 8. 저수지상당홍수에 대한 저수지 수위 변화 (침투발생 시점)

것은 그림 9의 저수지상당홍수에 대해 방류량이 $0 \text{ m}^3/\text{sec}$ 인 경우와 동일한 개념의 양적인 홍수조절계획이라 할 수 있다. 따라서 이때 예측된 홍수를 양적으로 대표하는 변환된 저수지상당홍수에 대한 저수지의 수위 변화는 그림 10의 H0를 따르되 두 곡선의 차이에 따른 수위변동이 예상되나 결과적으로 조절되는 최고수위(이하 조절최고수위)는 H0곡선의 최고수위로 추정할 수 있다. $709 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 방류하는

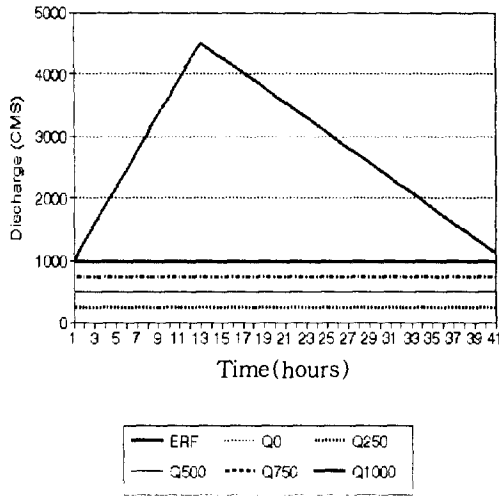


그림 9. 저수지상당홍수에 대한 방류량(분석시점)

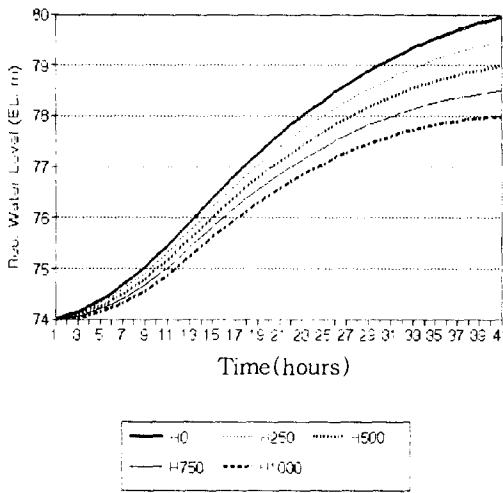


그림 10. 저수지상당홍수에 대한 저수지 수위 변화 (분석시점)

경우 조절최고수위는 대형댐의 홍수위인 EL. 80 m로 이때의 저수지의 이용률은 100%이다. 따라서 709 m³/sec라는 일정 방류량 값은 Technical ROM의 최적방류량 값에 해당될 것이다. 저수지를 100% 이용한다는 것은 매우 효율적이며 지향해야 할 목표라고 할 수 있다. 그러나 예측된 수문곡선에는 과소추정의 위험이 존재하므로 불확실성을 고려할 수 있는 일단의 조치가 취해져야 한다. 예측된 수문곡선에 대해 주관적인 판단에 따라 불확실성을 고려함에 있어 다음의 두 가지

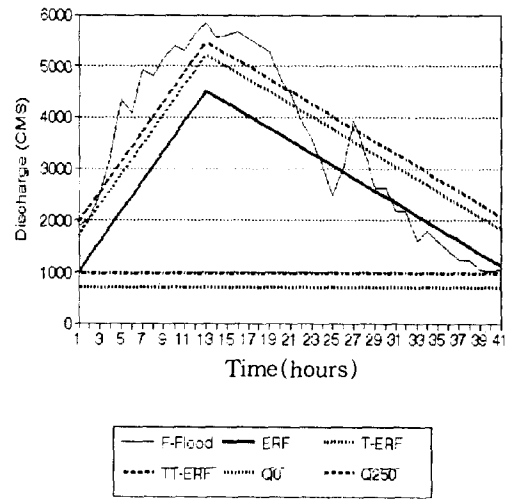


그림 11. 예측홍수의 불확실성을 고려한 방류량 결정 방안이 모두 가능할 것이다. 첫번째는 예측된 수문곡선을 신뢰하되 조절최고수위로 불확실성을 고려하는 방법이며 두번째는 예측된 수문곡선을 신뢰하지 않고 예측된 수문곡선에 직접 불확실성을 고려하여 최적방류량을 결정하는 방법이다.

예측된 수문곡선을 신뢰하되 조절최고수위로 불확실성을 고려하는 첫번째 방법의 경우 709 m³/sec를 방류하면 조절최고수위는 홍수위로 홍수위로 조절되는 것이 저수지의 안전에 위험이 있다고 판단하여 그림 10을 이용하여 조절최고수위를 79.48 m로 계획한다면 이때 결정되는 방류량은 709 m³/sec에 250 m³/sec를 더한 959 m³/sec로 결정될 것이다. 조절최고수위와 계획 홍수위(EL. 80 m)와의 차이는 예측된 수문곡선에 대한 불확실성을 고려하는 의미라고 할 수 있다. 표 2는 조절최고수위로 불확실성을 고려하는데 따른 방류량별 계획 홍수위와의 수위차를 나타낸 것이다. 표 2에서 당연히 불확실성을 고려하여 조절최고수위를 낮게 책정할수록 그만큼 방류되는 일정량의 크기는 증가될 것이다.

표 2. 방류량별 계획 홍수위와의 수위차

결정되는 방류량 (m ³ /sec)	조절 최고 수위(EL.m)	홍수위와의 수위차 (EL.m)
709 (709+0)	80.00	0.00
959 (709+250)	79.48	0.52
1,209 (709+500)	79.00	1.00
1,459 (709+750)	78.39	1.61
1,709 (709+1000)	77.97	2.03

계획 홍수위와의 수위차가 커질수록 저수지의 안전은 확보될 것이나 반대로 저수지의 운영효율은 그 만큼 저하될 것이므로 댐 운영자의 적절한 판단을 필요로 한다. 예측된 수문곡선을 신뢰하지 않고 예측된 수문곡선에 직접 불확실성을 고려하여 최적방류량을 결정하는 두번째 방법의 경우 과소추정의 위험을 대청댐의 발전방류량을 표현한 250 m³/sec 만큼 고려한다면, 그림 11에서 불확실성을 고려한 저수지상당홍수(TT-ERF)의 첨두유량 크기는 5,221 m³/sec에 250 m³/sec를 더한 5,471 m³/sec이다. 이때 결정되는 최적방류량 값은 709 m³/sec 에 250 m³/sec(변환된 저수지상당홍수와 불확실성을 고려한 저수지상당홍수의 차이폭)를 더한 959 m³/sec가 될 것이며, 이때의 저수지 수위 변화는 그림 10의 H0 곡선을 따라 조절최고수위는 홍수위인 EL. 80 m로 추정된다. 표 3은 불확실성을 고려하는데 따른 변환된 저수지상당홍수에 더해지는 일정량 값과 최적방류량 값을 나타낸 것으로 이때 조절최고수위는 모두 홍수위로 추정된다. 예측된 수문곡선에 대한 불확실성을 고려하는 절차가 다름에도 불구하고 결정된 방류량 값이 결과적으로 같은 이유는 바로 불확실성을 고려하는 정도가 서로 250 m³/sec로 같았기 때문이다. 저수지상당홍수 개념을 이용하는 본 연구의 경우 조절최고수위와 관련된 일정 방류량 값과 불확실성을 고려하여 변환된 저수지상당홍수에 더해지는 일정량 값이 서로 같다면 예측된 홍수에 대해 불확실성을 고려하여 결정되는 방류량 값은 동일하다. 따라서 두 방법 모두 예측된 수문곡선에 대해 불확실성을 고려하는 방법으로 이용될 수 있을 것이다. 그러나 예측된 수문곡선을 평가하는 기준과 조절최고수위 개념은 서로 다른 방법이다.

홍수시 실시간 저수지 운영을 하는 경우 그림 11에 실측 유입수문곡선이 첨가되어 다른 곡선들과 비교되므로 예측과 실제 및 불확실성을 고려하여 수립된 계획 등이 비교될 수 있다. 따라서 예측치와 실측치를 비교하여 실측치가 예측치보다 크다면 예측은 과소평가된

표 3. 불확실성을 고려한 일정량별 최적방류량

정량 (m ³ /sec)	최적 방류량 (m ³ /sec)	조절 최고수위 (EL. m)
0	709 (709+0)	홍수위 80
250	959 (709+250)	
500	1,209 (709+500)	
750	1,459 (709+750)	
1000	1,709 (709+1000)	

것으로 다음 시점의 방류량을 결정하는데 있어 저수지의 안전이 고려될 것이다. 실측치가 예측치보다 작은 경우에는 예측유입량은 과대평가되었던 것으로 저수지 운영은 안전이 확보된 상황에서 비교된 결과를 바탕으로 다음 시점에서는 저수지의 운영 효율이 반영될 것이다.

5.4 적용결과 및 분석

5.4.1 과거홍수의 구간별 분담률

대청댐 과거홍수사상에 대한 방류기록(1981년~1995년)을 살펴보면 홍수초기에는 방류를 거의 자제하다가 상시만수위(EL. 76.5 m)를 전후로 방류를 개시하여 홍수중반 이후나 후반부에서 방류를 하는 경향이 있다. 대청댐의 경우 댐의 방류가 홍수지속시간을 연장시킨다는 지적도 이와 전혀 무관하지는 않을 것이다. 표 4는 대청댐 과거 홍수사상의 구간별 분담률을 분석한 것이다. 표 4에 나타난 바와 같이 구간 A에 대한 과거 홍수사상의 평균적인 방류 분담률은 8.4%로 홍수초기에는 발전방류로 일관하는 관망의 경향이 두드러진다. 홍수조절의 경우 초기의 홍수조절용량이 미치는 홍수조절효과는 지대한 것으로 댐 규정에 명시된 무피해방류량(1,000 m³/sec) 범위내에서 홍수초기의 방류 분담률을 높여야 한다. 홍수초기의 방류는 홍수 중반과 후반부의 저수지 운영에 대한 여유는 물론 홍수조절효과에도 상당한 기여를 할 수 있다. 홍수초기의 방류를 결정하기 위해서는 홍수초기의 시(時) 강우량에 대한 유출효과를 판단할 수 있는 별도의 방안을 필요로 한다.

표 4. 대청댐 과거홍수의 구간별 분담률 분석

구 분		최소	최대	평균	
구 간 별	홍수 지속 시간	A	7.6	35.1	18.1
		B	23.2	56.0	42.5
		C	5.3	69.2	36.1
분 담 률	강우량	A	16.6	96.6	40.6
		B	3.3	83.4	57.2
		C	0.0	24.1	2.6
(%)	유입량	A	2.2	39.2	9.6
		B	45.1	91.1	74.5
		C	6.9	36.0	16.1
	방류량	A	1.7	23.4	8.4
		B	11.6	88.9	47.8
		C	7.4	84.4	43.8

표 5. 제한수위별 홍수조절능력

제한수위 (EL. m)	홍수조절용량 (10 ⁶ m ³)			유출률을 고려한 상당우량(mm)						저수지 상당홍수의 첨두유량 (m ³ /sec)
	규정	추가	계	1.0			0.75			
				규정	추가	계	규정	추가	계	
72	248.3	273.9	522.2	60	66	126	80	88	168	3,878.0
73		217.5	465.8		53	113		70	150	3,390.0
74		158.5	406.8		38	98		51	131	2,744.6
75		97.0	345.3		23	83		31	111	2,197.0
76		33.0	281.3		8	68		11	91	1,604.2
76.5		0.0	248.3		0	60		0	80	1,299.1

5.4.2 제한수위별 홍수조절능력

홍수기 계획된 제한수위에 대한 저수지의 홍수규모를 사전에 파악해 둔다면 홍수시 예측된 홍수와의 비교를 통해 적절한 홍수조절계획을 수립할 수 있다. 표 5는 대청댐 상시만수위이하의 가정된 제한수위에 대한 홍수 규모를 나타낸 것이다. 홍수기 초기의 제한수위로 EL. 72 m를 계획한 경우 홍수조절용량은 522.2×10⁶ m³이며 상당우량은 유출률을 1.0과 0.75로 고려할 때 각각 126 mm와 168 mm에 해당한다. 또한 저수지상당 홍수로 표현하고자 하는 경우 그림 6과 같이 홍수지속 시간을 판단하여 첨두유량의 크기가 3,878 m³/sec인 저수지상당홍수로도 나타낼 수 있다. 기타의 저수지 수위에 대한 홍수규모 역시 표 5와 그림 6을 이용하여 파악할 수 있다

5.4.3 홍수조절 효과

1995년 8월 30일과 같이 분석시점의 저수지 상당홍수보다 큰 홍수에 대해 조절최고수위로 예측유입량의 불확실성을 고려하여 방류계획을 수립하는 경우 표 6과 같은 홍수조절효과를 기대할 수 있다. 조절되는 최고수위로 EL. 79.48 m를 계획하는 경우 결정되는 방류량에 대한 저수지의 이용률은 85.1%로, 방류율과 저류율은 각각 10% 와 90%인 홍수조절효과를 기대할 수

표 6. 방류량별 홍수조절 효과

결정되는 방류량 (m ³ /sec)	조 절 최고수위 (EL. m)	저수지 이용률 (%)	방류율 (%)	저류율 (%)
709 (709+0)	80.00	100.0	0	100
959 (709+250)	79.48	85.1	10	90
1,209 (709+500)	79.00	71.6	18	82
1,459 (709+750)	78.39	54.0	29	71
1,709 (709+1000)	77.97	42.1	36	64

있다. 본 연구에서는 분석시점의 저수지 수위와 예측유입량 자료를 입력시키면 그림 7에서 그림 11까지의 결과와 표 6의 내용 등이 출력되도록 프로그램을 구성하였다. 따라서 댐 운영자는 출력된 결과를 바탕으로 적절한 방류량을 결정할 수 있을 것이다.

5.4.4 저수지 홍수변환법의 평가

홍수시 방류량을 결정하는 여러 방법중 예측유입수문곡선에 따라 분석시점의 홍수조절용량을 최대한 이용하여 방류량을 결정하는 Technical ROM은 모의기법중 가장 효율적인 방법으로 평가되고 있다. 그러나 실시간 저수지 운영의 경우 강우예측의 불확실성에 따른 예측치와 실측치의 오차를 직접 반영할 수는 없다.

이에 반해 저수지 홍수변환법의 경우 Technical ROM의 제 기능을 모두 발휘하는 한편 추가적인 기능을 가지고 있다. 예측홍수의 평가에 따른 저수지상당홍수와의 시각적인 비교가 가능하며 방류시점별-방류량별 몇 가지 대안을 제공하고 또한 비록 주관적인 방법이지만 하나 예측유입량의 불확실성을 고려함으로써 저수지 운영의 안전과 효율을 표현할 수 있다. 그러나 저수지 홍수변환법의 경우 실시간 적용을 위해 보다 세부적인 검토를 필요로 한다.

6. 결 론

본 연구는 홍수수문곡선을 댐 규정상의 무피해방류량을 기준으로 분할하여 무피해방류량으로 조절되는 부분과 홍수조절용량이 이용하여 조절되는 부분으로 구분하였다. 무피해방류량으로 조절되는 부분에서는 무피해방류량이하로 방류하면서 저수지의 수위조절을 유도하고, 홍수조절용량이 이용되는 부분에서는 본 연구에서 제안한 "저수지 홍수변환법"에 의해 저수지 운영의 안전과 효율을 고려하여 예측된 홍수에 대해 적절한 방류량을 결정하도록 하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 기술적인 한계에서 기인하는 각종 불확실성과 현실적인 장애요인을 수반하고 있는 현행의 홍수시 저수지 운영의 경우, 연구의 방향은 자연현상을 규명하고자 하는 기술적인 발전과 주어진 상황을 최대한 활용하고자 하는 운영방법의 개선이 병행되어야 한다.

(2) 홍수시 예측정보의 불확실한 영향을 저수지 운영에 반영함으로써 저수지의 운영효율을 높일 수 있을 것이다. 이를 위해 예측치와 실측치를 한쌍으로 정리·보관하여 불확실성을 객관적으로 평가할 수 있도록 후속 연구를 위한 토대가 필요하다.

(3) 홍수시 상반되는 저수지 운영의 안전과 효율을 고려하여 댐 운영자는 예측된 홍수에 대해 적절한 방류량을 결정하여야 한다. 본 연구에서 제안한 저수지 홍수변환법의 경우 예측된 홍수에 대해 안전과 효율을 고려한 방류량에 대한 근거를 제시할 수 있다.

(4) 관망의 경향이 두드러지는 홍수초기에 적극적인 방류를 결정할 수 있도록 홍수초기의 시 강우량에 대한 유출효과 등이 세부적으로 검토되어야 한다.

(5) 홍수시 실시간 저수지 운영을 위해 예측된 홍수를 저수지상당홍수로 변환시키는 경우 저수지상당홍수의 모양은 분석시점의 상황을 반영할 수 있어야 한다.

이를 위해 분석시점의 특성을 반영할 수 있는 저수지상당홍수의 모양과 관련한 세부적인 연구가 지속되어야 한다.

참 고 문 헌

한국수자원공사 댐운영처(1993). 다목적댐 표준 관리 규정 및 해설서(안).

심명필, 권오익, 이환기 (1995). "홍수기중 가변제한수위에 의한 저수지 운영." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제28권, 제6호, pp. 217-228.

Arrau, L. (1987). "A model for the operation of spillway gates in pluvial floods." *Flood hydrology*, V. P. Singh, ed., D. Reidel Publishing Company, pp. 299-308.

Krzysztofowicz, R. (1993). "A theory of flood warning systems." *Water Resour. Res.*, Vol. 29, No. 12, pp. 3981-3994.

Votruba, L. (1989). "Water management in reservoirs." *Development in water science*, Vol. 33, pp. 330-340.

〈최종본 도착일 : 1997년 6월 7일〉