

## 危險度制約 線形計劃法에 의한 洪水期 貯水池運營

### Reservoir Management in Flood Period with Chance Constrained LP

이길성\* · 강부식\*\*

Lee, Kil Seong · Kang, Bu Sik

#### Abstract

A reservoir operation model was established under the varying restricted water level(r.w.l.) subject to the inflow distributions in flood period. The optimization model consists of 2 sub-models. One model minimizes deviations of releases from the expected release and the other minimizes capacity requirement for flood control. In order to make deterministic equivalents, the inflow distribution of reservoir is assumed to be 2-parameter Lognormal, and its parameters are estimated by the maximum likelihood method. The model is applied to joint operation of Soyang and Chungju dam. The results show that Soyang was designed for larger flood event than that for Chungju. The operation under the varying r.w.l. turns out to be more effective than one under the uniform r.w.l. Such effect is more obvious at Chungju compared with Soyang. Release pattern shows diminishing and delaying effect in a period of high inflows and larger discharges than actual in a period of low inflows.

#### 요 지

유입량의 분포에 따른 可變 制限水位아래서 洪水期 저수지 利水運營모형을 수립하였다. 사용된 최적화모형은 放流量의 期待放流量으로부터의 편차를 최소화하는 모형과 홍수조절용량을 최소화하는 危險度制約 線形計劃法(CCLP)모델의 2가지 副模型으로 구성되어 있다. 확정론적 등가식을 만들기위해 유입량의 분포는 2母數 對數正規分布를 가정하였으며 母數는 最尤推定法에 의하여 구하였다. 모형은 昭陽江댐과 忠州댐의 홍수기 連繫運營에 적용되었다. 그 결과 昭陽이 忠州보다 상대적으로 큰 규모의 홍수사상에 대하여 설계되었음을 알 수 있었다. 可變制限水位를 이용한 운영은 一律制限水位의 운영보다 효율적인 것으로 나타났는데 이는 忠州에서 더욱 두드러졌다. 유입홍수량이 큰 시구간의 방류형태는 홍수량의 규모를 줄이는 조절효과와 지체효과를 보이며, 갈수시에는 상대적으로 실제보다 많은 방류를 하는 형태를 보인다.

\* 정회원 · 서울대학교 토목공학과 부교수

\*\* 정회원 · 서울대학교 대학원 토목공학과 박사과정

## 1. 序 論

한강수계의 대표적 다목적댐인 昭陽江댐과 忠州댐의 운영은 현재 2원화된 最高貯水位 아래서 이루어지고 있다. 즉, 洪水期에는 貯水位를 制限水位로, 非洪水期에는 상시만수위로 제한시키고 있다. 과거에 설정된 最高貯水位의 이와같은 2원성은 설계홍수량만을 고려하여 설정된 것이다. 이와달리, 利水運營의 출발은 유입량의 양적 규모와 시기적 분포를 추측하는 것에서 출발한다. 만일 특정한 시구간의 유입량 규모가 --이 시기에 설계홍수량의 수문사상이 일어날 가능성이 있더라도 -- 계속 작게 관측되었다면 제한수위라는 규정은 너무 가혹한 제약이 아닐 수 없다. 즉 유입량 규모가 작은 시기라도 댐의 수위가 제한수위를 초과한다면 물을 방류해야 할 것이다. 그러므로 이수운영을 위해서는 특정시기가 필요로 하는 홍수조절소요용량을 과거의 자료로부터 분석할 필요가 있다. 그리고 각 시기의 홍수조절소요용량이 크게 다르다면 그에 대하여 “가변 제한수위”를 도입할 수 있겠다. 가변제한수위란 설계홍수량에 대한 제한수위가 아니라 이수운영 구간의 총(홍수)유입량에 대해서 정의되는 이수목적의 제한수위를 의미한다. 그리고 시구간에 대한 홍수유입량을 확률변수로 정의하면 그 구간에 대한 가변 제한수위도 확률변수가 된다. 그래서 특정 시구간에 정해진 확률값을 가진 홍수유입량은 그 확률에 상응하는 홍수조절용량을 요구할 것이고 그에 따라 제한수위는 상향 또는 하향될 것이다. 이러한 가변제한수위의 개념을 위험도제약 선형계획법의 제약식의 일부와 목적함수에 반영하여 이수운영모형을 구성하였다.

다목적댐의 운영에 관하여 국내에서는 김치홍,<sup>(1)</sup> 이길성과 오영민,<sup>(2)</sup> 이재형 등,<sup>(3)</sup> 김택수,<sup>(4)</sup> 김승권 등<sup>(5)</sup>이 동적계획법(DP)을 이용하였다. 또한 漢江水系의 댐군에 선형결정룰(Linear Decision Rule; LDR)을 사용하여 모의발생기법에 의한 최적 저수지 운영을 시도한 바 있다.<sup>(6)</sup> 외국에서는 DP에 의한 운영모형으로서 Jamieson 과 Wilkinson,<sup>(7)</sup> Schultz 와 Plate<sup>(8)</sup> 등의 연구가 있고, 선형계획법(LP)에 의한 운영모형은 Windsor<sup>(9)</sup>나 Marien<sup>(10)</sup> 등에 의해 시도되었다.

한편 ReVelle 등<sup>(11)</sup>은 貯水池群의 最適運營에 危

險度制約 線形計劃法(Chance Constrained LP; CCLP)를 최초로 도입했고 이 후 Nayak과 Arora,<sup>(12)</sup> Joeres 등<sup>(13)</sup>, Takeuchi<sup>(14)</sup> 등에 의해 실제 운영에 적용된 바 있다. 신뢰도(또는 위험도)를 고려하기 위한 국내의 연구로는 최근에 이희승 등<sup>(15)</sup>이 과거의 유입량 자료와 模擬發生된 유입량 자료를 토대로 信賴水準에 따른 最適 貯水位區間을 DP로 산정하고 이 때 回歸分析을 통하여 유도된 線形決定律을 月別 貯水池運營律로 제시한 바 있다. 그러나 이 모형은 洪水期에 대하여 相關係數값이 떨어지는 短點이 지적되었다. 그리고 이는 본댐과 재조정지댐으로 구성된 忠州 단일댐에 대한 연구로서 昭陽江댐과 忠州댐을 함께 고려한 위험도제약모형은 아직 개발되지 않고 있는 실정이다.

본 논문에서는 현재 한강 수계의 다목적댐군의 운영을 개선하기 위하여 유입량의 분포에 따라 가변 制限水位下에서 洪水調節所要容量을 최소화하는 위험도제약모형을 개발하는데 목적을 두고 있다. 저수지 이수운영의 연구목표는 특정기간에 대한 방류안을 책정하는 것이다. 그러므로 먼저 기간의 크기를 선정해야 한다. 보통 “洪水時”라는 말의 의미는 호우에 의한 홍수가 발생하는 것으로 大洪水의 경우 약 3~4일의 기간 안에 일어난다. 그리고 1~2일 동안 지속하는 호우가 1~2일 동안 멈추었다가 다시 1~2일 동안 지속하는 양태를 보이더라도 일주일 이내에 발생하는 경우가 대부분이다. 그렇다면 “洪水期”의 분할은 최소한 언급한 양상의 호우를 포함하는 기간으로 이루어져야 하며, 10일, 15일, 1개월 등의 기간을 임의로 나열할 수 있겠다. 이들 중에서 제일 작은 旬(10일)을 단위로 한다면 그 이상으로 설정한 경우에 대하여 대체적인 경향을 추측할 수 있겠다. 그런데 우리나라의 홍수기는 6월 21일부터 9월 20일 까지로 명시되어 있으므로, 旬을 단위로 분할한다면 이 규정의 시작과 끝에 간편하게 일치시킬 수 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 10일을 時區間으로 정하였다.

## 2. 貯水池 運營模型의 構成

### 2.1 期待放流量에 대한 偏差의 最小化

ReVelle과 Kirby<sup>(16)</sup>는 제시된 期待放流量과 實際

放流量的 편차제공 加重合에 대한 기대값을 취하고 이를 최소화하는 목적함수를 다루었다. 만일 貯水池容量이 이미 주어져 있고 이 容量이 다른 제약식을 만족시킬만큼 충분히 크다면 목적함수는 다음과 같은 형식을 갖는다.

$$\begin{aligned} \min z &= E[\sum w_i(R_i - T_i)^2] \\ &= \sum w_i \text{Var}(R_i) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $R_i$  : 기간  $i$ 에 대한 실제放流量

$T_i$  : 기간  $i$ 에 대한 期待放流量(= $E(R_i)$ )

$w_i$  : 기간  $i$ 의 목표량 달성과 관련된 加重係數

선형결정률( $R_i = Q_{i-1} + b_{i-1} - b_i$ ; 原 線型決定律)을 따르면, 분산값인 (1)식의 우변항을 설계자가 제어할 수 없다. 이는 放流量  $R_i$ 의 분산이 前 시구간의 유입량  $Q_{i-1}$ 의 분산과 일치하기 때문이다. 그런데 유입량 변동에 민감하지 않고 用水를 안정적으로 공급한다는 측면에서 볼 때, 放流量의 분산을 가능한 줄이기 위하여 보다 일반화된 결정률이 필요하다. 본 논문에서는 原 線型決定律(Original LDR; OLR)보다 개선된 一般化 線型決定律(Generalized LDR; GLDR)을 사용하여 昭陽댐과 忠州댐을 연계운영하고자 한다.

## 2.2 確率論的 制約式

본 모형의 목적함수는 총저수지 용량이 이미 정해진 상태에서 홍수조절소요용량을 최소화하는 것이다. 이와 관련된 선형의 제약식은 각 댐에서의 最大와 最小貯留量, 最大와 最小放流量 제약 등이 된다. 댐군에 대한 모형을 수립할 때는 각 댐의 放流量이 모이는 합류점에서의 최대유량과 최소유량에 대한 제약식이 추가로 필요하다. 또한 홍수조절용량에 대한 제약식도 필요하다. 제한수위는 급작스런 홍수유입에 대비하기 위하여 설정되어야 하는 것으로서, 일반적으로는 댐 설계홍수량의 유입수문곡선에 대한 홍수조절을 模擬하여 貯水位가 계획 홍수위를 넘지 않도록 정하는 것이 타당하다. 그러나 본 논문은 저수지의 단기운영에 관한 것이지만 시구간이 각 旬(ten-day)이므로 유입수문곡선에 대한 유출수문곡선을 모의발생시켜서 제한수위를 구하는 방법을 모형에 적용할 수 없다. 그래서 유입량, 방류량, 그

리고 저류량사이에 다음과 같은 관계를 가정함으로써 장기운영의 관점에서 홍수조절용량에 대한 제약식을 세울 수 있다. LDR에서의  $R_i$ 란  $Q_i$ 이전의  $Q_{i-1}$ ,  $Q_{i-2}$ 등의 함수로서  $Q_i$ 와 무관한,  $i$ 시구간의 초기에 알 수 있는  $i$ 기간 동안에 방류될 양을 의미한다. 즉 이를  $i$ 기간 동안의 目標放流量이라 볼 수가 있다. 만약  $i$ 기간에 홍수유입량이 발생하고 방류를 目標放流量대로 한다면 홍수유입량으로부터 目標放流量을 제외한 나머지 양을 홍수조절용량에 저류되 수위가 홍수위를 넘겨서는 안된다. 따라서 다음과 같은 확률론적 제약식을 제시할 수 있다.

$$\Pr[C - CF_i + Q_i^* - R_i \leq C] \geq P_i$$

즉  $\Pr[Q_i^* - R_i \leq CF_i] \geq P_i$

여기서  $C$  : 저수지 총용량( $m^3$ ),  $CF_i$  : 시구간  $i$ 의 홍수조절용량( $m^3$ )

$R_i$  : 시구간  $i$ 의 放流量 ( $m^3$ ),

$Q_i^*$  : 시구간  $i$ 의 CDF상의 정해진 확률값에 해당하는 홍수기 유량

$P_i$  : 신뢰수준

이상과 같은 제약조건들은 다음과 같이 수식화된다.

$$\Pr[S_{ij} \leq C_j - CF_{ij}] \geq P_{1ij}, \quad \forall i, \forall j \quad (2)$$

$$\Pr[S_{ij} \geq S_{\min,ij}] \geq P_{2ij}, \quad \forall i, \forall j \quad (3)$$

$$\Pr[R_{ij} \leq R_{\max,ij}] \geq P_{3ij}, \quad \forall i, \forall j \quad (4)$$

$$\Pr[R_{ij} \geq R_{\min,ij}] \geq P_{4ij}, \quad \forall i, \forall j \quad (5)$$

$$\Pr[\sum_j R_{ij} + \sum_j a_j Q_{ij} \leq RC_{\max,i}] \geq P_{5i}, \quad \forall i \quad (6)$$

$$\Pr[\sum_j R_{ij} + \sum_j a_j Q_{ij} \geq RC_{\min,i}] \geq P_{6i}, \quad \forall i \quad (7)$$

$$\Pr[Q_{ij}^* - R_{ij} \leq CF_{ij}] \geq P_{7ij}, \quad \forall i, \forall j \quad (8)$$

여기서

$S_{ij}$  : 시구간  $i$ , 저수지  $j$ 의 末期貯留量( $m^3$ )

$S_{\min,ij}$  : 시구간  $i$ , 저수지  $j$ 의 最小貯留量( $m^3$ )

$R_{\max,ij}$  : 시구간  $i$ , 저수지  $j$ 의 最大放流量( $m^3$ )

$R_{\min,ij}$  : 시구간  $i$ , 저수지  $j$ 의 最小放流量( $m^3$ )

$RC_{\max,i}$ ,  $RC_{\min,i}$  : 제어지점의 시구간  $i$ 에 대한 최대·최소放流量( $m^3$ ),

$Q_{ij}$  : 시구간  $i$ , 저수지  $j$ 의 流入量( $m^3$ ),

$R_{ij}$  : 시구간  $i$ , 저수지  $j$ 의 放流量 ( $m^3$ ),

$a_j$  : j 저수지에서 제어지점까지의 유역면적비에 의한 支川流入量 係數

$$\left( = \frac{\text{제어지점에서 j 저수지까지의 유역면적}}{j \text{ 저수지의 유역면적}} \right)$$

식 (2)~(8)에서는 저수지에 대한 기본 지배방정식인 물수지방정식이 직접적으로 표현되지 않았는데 이는 위 확률식을 확정론적 증가식으로 표현할 때 포함되게 된다. 본 논문은 한강수계의 昭陽댐과 忠州댐에 대하여 적용하게 되므로 (6)식과 (7)식에서  $j=1$ 을 昭陽으로  $j=2$ 를 忠州로 생각한다. 동시에 昭陽에 대한 支川流入量 係數는  $a_1=2.992$ , 忠州에 대한 支川流入量 係數는  $a_2=0.95$ 로 한다. 만약 6월부터 9월 까지의 旬別로 12개의 시구간을 생각한다면 구성할 수 있는 제약식은 총 144개이다. 이는 OLDR과 GLDR로부터 구성되는 제약식에서도 똑같이 적용된다. 그런데 우리나라의 기후 특성은 하절기에 많은 양의 비가 내리고, 간혹 하절기에 한 발이 심한 해가 있다고 해도 몇 년씩 지속되는 경우가 드물므로 제약식 (3)은 불필요한 조건이 되기 쉽다. 또한 제약식 (5)는 홍수기에 발전방류 등의 용수방류뿐만 아니라 홍수방류가 있으므로 해의 구성에 강한 제약을 주지 않는 "inactive" 제약조건일 수 있다. 그렇지만 모형의 일반성을 위하여 그대로 기술하였다. 또한 홍수조절소요용량에 보다 비중을 두는 의미에서 위의 확률값들이  $P1, P7 > P4, P6 > P3, P5$ 의 대소관계를 가지는 것이 보다 타당하리라고 보지만 본 연구에서는 같은 값을 사용하였다.

### 2.3 線型決定律과 危險度制約模型

본래의 선형결정률(LDR)은 위험도제약식의 확정론적 증가식을 유도하는 과정에서 만들어진 일종의 방류결정률이다. ReVelle등<sup>(11)</sup>은 이러한 목적을 만족시키는 다음과 같은 형태의 LDR을 제시하였다.

$$R_i = S_{i-1} - b_i \quad (9)$$

OLDR의 결정은 放流案(release commitment)의 계산이 시구간  $i-1$ 의 말기저류량에만 전적으로 의존한다는 것이다. 그러므로 만약 방류안의 결정식에 연구구간과 이전 시구간의 유입량에 대한 항을 추가

한다면 시스템 응답의 柔軟性이 증가될 것이다. 이를 일반화된 선형결정률(GLDR)로 나타내면 다음과 같다.<sup>(17)</sup>

$$R_i = S_{i-1} + \alpha_i \cdot Q_i - \beta_{i-1} \cdot Q_{i-1} - \gamma_{i-2} \cdot Q_{i-2} - \dots - b_i \quad (10)$$

여기서  $\alpha_i, \beta_{i-1}, \gamma_{i-2}$  등의 매개변수는 陰이 아닌 결정변수다.

분산에 관하여 살펴보면, OLDR의 경우 앞서 밝혔듯이 時區間 放流量의 분산은 그 前時間의 유입량의 분산과 같아서 줄어들지 않는다. 반면에 GLDR의 경우 계수를 적절히 선택함으로써, 각 시구간에 주어지는 개별방류안의 분산에 대한 加重平均(weighted average)을 최소화 할 수 있다. 저수지에 대한 물수지방정식은 다음과 같다.

$$S_i = S_{i-1} + Q_i - R_i - EV_i \quad (11)$$

$EV_i$  : i기간 동안의 저수지 증발량( $m^3$ )

물수지방정식은 (10)으로부터 다음과 같이 변형된다.

$$S_i = (1 - \alpha_i) \cdot Q_i + \beta_{i-1} \cdot Q_{i-1} + \gamma_{i-2} \cdot Q_{i-2} + \dots + b_i - EV_i \quad (12)$$

따라서 식 (12)로부터  $S_{i-1}$ 을 구하여 식(10)에 대입하면 다음의 GLDR 식이 된다.

$$R_i = \alpha_i \cdot Q_i + (1 - \alpha_{i-1} - \beta_{i-1}) \cdot Q_{i-1} + (\beta_{i-2} - \gamma_{i-2}) \cdot Q_{i-2} + \dots + b_{i-1} - b_i - EV_{i-1} \quad (13)$$

이로써 일련의 流入量만의 항으로 放流量  $R_i$ 를 정의할 수 있다.

만일 (13)식의  $Q_i$ 의 계수를  $a_i$ 로 치환하면  $R_i$ 의 분산은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\text{Var}(R_i) = \sum_j a_j^2 \cdot \text{Var}(Q_j) + \sum_{\substack{j, k \\ j \neq k}} \sum_j a_j \cdot a_k \cdot \text{Cov}(Q_j, Q_k) \quad (14)$$

(14)식을 (1)식에 대입하고 각 계수  $\beta_i$ 에 대하여 미분하여 0으로 놓아 구성된 연립방정식을 풀면 放流量들의 분산합을 최소화하는 계수의 집합을 얻을 수 있다.

GLDR을 이용하여 저수지운영에 대한 선형계획법을 수식화하기 이전에 2가지 변수를 다음과 같이

정의할 필요가 있다.

$$J_i = (1 - \alpha_i) \cdot Q_i + \beta_{i-1} \cdot Q_{i-1} + \gamma_{i-2} \cdot Q_{i-2} + \dots \quad (15)$$

$$K_i = \alpha_i \cdot Q_i + (1 - \alpha_{i-1} - \beta_{i-1}) \cdot Q_{i-1} + (\beta_{i-2} - \gamma_{i-2}) \cdot Q_{i-2} + \dots \quad (16)$$

그러므로  $J_i$ 와  $K_i$ 는  $Q_i$ 들의 선형조합으로 정의된 확률변수이다. (15)식과 (16)식을 이용하면 (12), (13)식은

$$S_i = J_i + b_i - EV_i \quad (17)$$

$$R_i = K_i + b_{i-1} - b_i - EV_{i-1} \quad (18)$$

로 쓸 수 있다. (17)식과 (18)식을 사용하면 7가지 危險度制約式(2)~(8)은 다음과 같이 확정론적 등가식으로 표현된 제약식을 갖는 CCLP모형으로 바꿀 수 있다.

$$\min \sum_{j=1}^{j_{\max}} \sum_{i=1}^{i_{\max}} CF_{ij} \quad (19)$$

s.t.

$$CF_{ij} + b_{ij} \leq C_j + EV_{ij} - F_{jij}^{-1}(P_{1ij}), \quad \forall i, \forall j \quad (20)$$

$$b_{ij} \geq S_{\min,ij} + EV_{ij} - F_{jij}^{-1}(1 - P_{2ij}), \quad \forall i, \forall j \quad (21)$$

$$b_{ij} - b_{i-1,j} \geq F_{Kij}^{-1}(P_{3ij}) - R_{\max,ij} - EV_{i-1,j}, \quad \forall i, \forall j \quad (22)$$

$$b_{ij} - b_{i-1,j} \leq F_{Kij}^{-1}(1 - P_{4ij}) - R_{\min,ij} - EV_{i-1,j}, \quad \forall i, \forall j \quad (23)$$

$$b_{i1} - b_{i-1,1} + b_{i2} - b_{i-1,2} \geq [F_{K_{i1}+K_{i2}+a_1Q_{i1}+a_2Q_{i2}}]^{-1} (P_{5i}) - RC_{\max,i} - EV_{i-1,1} - EV_{i-1,2}, \quad \forall i \quad (24)$$

$$b_{i1} - b_{i-1,1} + b_{i2} - b_{i-1,2} \leq [F_{K_{i1}+K_{i2}+a_1Q_{i1}+a_2Q_{i2}}]^{-1} (P_{6i}) - RC_{\min,i} - EV_{i-1,1} - EV_{i-1,2}, \quad \forall i \quad (25)$$

$$b_{ij} - b_{i-1,j} - CF_{ij} \leq F_{jij}^{-1}(1 - P_{7ij}) - Q_{ij}^* - EV_{i-1,j}, \quad \forall i, \forall j \quad (26)$$

여기서  $F^{-1}(\cdot)$ 는 누적확률분포의 역함수이다.

본 연구에서는 期待放流量으로부터의 편차를 최소화하는 모형과 洪水調節所要容量을 최소화하는 2가지 모형으로 구성된다. 즉, 期待放流量으로부터의 편차를 최소화하는 모형에서 導出된 결과는 GLDR의 放流量係數로 나타나는데 이는 홍수조절소요용량을 최소화하는 CCLP모형의 제약식의 입력자료가 되어 CCLP를 수행하게 된다.

### 3. 模型의 適用

#### 3.1 貯水池 流入量의 分布 檢定

모형내의 확률론적 제약식을 확정론적 등가식으로 변환하기 위해서는 유입량자료의 분포함수를 알아야 한다. 사용된 자료로서 昭陽江댐은 1974~1990년 사이의 저수지 유입량자료를, 忠州댐은 1958~1990년 사이의 저수지 유입량자료를 사용했다. 각 댐이 완공되기 이전의 자료는 수문조사연보<sup>(18)</sup>의 자료를 참고했고 완공이후의 자료는 건설기술연구원에서 전산 화일로 보관하고있는 댐자료를 사용했다. 저수지 유입량자료의 분포에 대한 檢定을 하기전에 우선 자료로부터 분포의 대략적인 모양을 살펴본 결과 일부 시구간에서의 자료를 제외하고는 대부분의 시구간에서 자료가 어떤 특정한 분포함수를 갖는다는 증거를 찾기 힘들었다. 또한 표본을 가지고 母集團의 2차 moment까지 추정할 하기 위해서는 최소한 30개 이상의 자료가 필요한데 昭陽地點의 경우 자료가 17개 밖에 되지않아 이러한 자료를 가지고 분포의 檢定을 한다는 것은 무리라고 판단된다. 따라서 일단 昭陽, 忠州 자료의 분포를 모두 2-母數 對數正規分布(2-Parameter lognormal distribution)로 가정하고 最尤推定法(maximum likelihood method)에 의해 母數를 추정하였다. 이에 대한 결과는 표 1과 같다.

표 1. PDF parameters for Soyang and Chungju  
 $y = \ln Q_{iat}$

i	Soyang		Chungju	
	$\mu_y$	$\sigma_y$	$\mu_y$	$\sigma_y$
1	16.980	0.860	18.036	0.821
2	16.858	0.751	17.968	0.650
3	17.947	1.149	18.681	1.089
4	18.138	1.076	19.398	1.044
5	18.708	0.706	20.020	0.677
6	18.860	0.753	19.884	0.853
7	18.170	0.885	19.403	0.953
8	18.396	0.935	19.441	0.748
9	18.684	1.103	19.665	0.868
10	18.684	1.103	19.665	0.868
11	17.832	1.220	19.459	0.802
12	17.259	0.652	18.793	0.685

(unit :  $10^7 m^3$ )

### 3.2 適用模型의 樹立

#### 3.2.1 分散方程式의 解析

본 모형에 GLDR을 적용할 때 현구간의 유량  $Q_i$ 는 쉽게 고려하기 어렵다. 현구간의  $Q_i$ 는  $i-1$  시구간의 말기에서 확정적으로 주어질 수 없고 추정해야 할 양이며 이를 위해서는 또다른 예측모형이 필요하다. 이런 모형까지 고려된다면 많은 자료를 이용한 보다 일반적인 GLDR을 구성할 수 있겠으나 본 연구에서는 제외하였다.

현구간의 유량  $Q_i$ 는 고려하지 않고( $\alpha=0$ ) 기타 계수는  $\beta$ 만 고려하면 (13)식은

$$R_i = (1 - \beta_{i-1}) \cdot Q_{i-1} + \beta_{i-2} \cdot Q_{i-2} + b_{i-1} - b_i - EV_{i-1} \quad (27)$$

로 된다. 여기서 첨자기호는 그림 1에서 정의하였다. 계산하는 구간의 경계밖에서는  $\beta$ 를 零으로 하여 2-3절에서 밝힌 바와같은 과정의 계산을 수행하였고 그 결과는 표 2와 같다. 구성된 연립방정식은

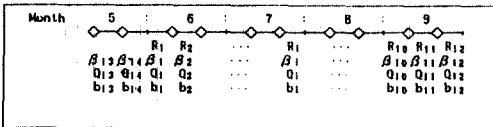


그림 1. Index notation of GLDR

표 2.  $\beta_i$  values for Soyang and Chungju

i	$\beta_i$ (Soyang)	$\beta_i$ (Chungju)
13	.458	0.359
14	0.557	0.516
1	0.473	0.530
2	0.500	0.500
3	0.406	0.459
4	0.513	0.503
5	0.486	0.436
6	0.544	0.495
7	0.542	0.544
8	0.422	0.484
9	0.325	0.502
10	0.505	0.480
11	0.572	0.637
12	0.408	1.015

IMSL의 NEQNF 副프로그램을 사용하여 해를 구하였다. 여기서  $i=2$  일때 계산값은 昭陽에 대하여 -0.658, 忠州에 대하여는 -0.374였으나 이상값임이 분명하므로 0.5로 대체하여 앞으로의 계산에 이용하였다. 소양, 충주에 대해  $\beta_2$ 값이 음수로 계산된 원인은 아직 밝히지 못하였다. ReVelle과 Gundelach<sup>(19)</sup> 논문에서는 1년 전체를 사용하는 단편 시구간을 사용하고 시구간은 1달 간격으로 나누어 유사한 모형을 적용하였으며 모든  $\beta_i$ 가 양수로 계산되었다. 본 연구에서  $\beta_2$ 가 음수로 계산된 것이 열린 시구간을 사용해서인지 6월 중순 주위의 입력자료가 적절하지 못해서인지는 확실하지 않다. 그렇지만 식(12)에 대하여 물리적인 의미를 생각하면  $\beta_i$ 값이 가져야 할 범위를 제한할 수 있다. 식(12)에서 현재 시구간 말기의 저류량  $S_i$ 는 현재구간의 유입량  $Q_i$ 와 그 이전의 유입량  $Q_{i-1}, Q_{i-2}, \dots$  등의 합으로 이루어진다. 만일  $\beta_{i-1}, \beta_{i-2}$  등의 계수가 1을 초과한다면 과거의 유입량보다 增幅된 양이 현재 저류량에 기여하게 된다. 이것은 저수지 물수지의 측면에서 타당하지 못하다고 생각된다. 또한  $\beta_{i-1}, \beta_{i-2}$  등이 陰數라면 과거 유입량이 현재 저류량에 逆(negative)방향으로 기여하게 된다. 이런 생각도 역시 합당하지 못하다고 생각된다. 그러므로 계산된 陰數값을 그대로 사용하는 것은 덜 합리적이라고 생각하였으며 다른  $\beta_i$  값이 대부분 0.5주위의 값을 갖는 것으로부터 임의로 0.5의 값을 택하였다. 忠州의 경우  $\beta_{12}$ 가 1을 초과하지만 이 값은 저류량이나 放流量식에서 사용하지 않는 값이므로 크게 문제는 되지 않는다고 보여진다.

#### 3.2.2 制約條件과 境界條件의 檢討

각 댐의 貯留量은 저수지의 규모에 따라 上限과 下限의 제약을 받게 되고 댐 여수로의 통수능력과 하류부 하도의 통수능력을 비교하여 그중 작은 값이 最大放流量이 되며 하천이 수행하고 있는 여러가지 기능들을 원활히 하기에 필요한 最小유량 또는 最小수위를 유지하기 위하여 댐에서 방류해야 하는 유량이 最小放流量이 된다. 이의 설정을 위한 각 댐에서의 貯留量과 放流量의 최대와 最小, 댐 지점에서의 증발량 등에 관한 자료는 표 3에 정리되어 있고 기타 저수지 체원 및 위 값들의 산정근거는 문헌(20)에 구체적으로 설명되어 있다. 증발량에 대하여 수집할 수 있었던 자료는 월별 증발량이어서 이를 세개의 순으로 균일하게 분배하였다.

표 3. Reservoir data used in constraints

		Soyang	Chungju	Paldang
Flood capacity(MCM)		2,841.5	2,750.0	244.0
Min. storage(MCM)		1,000.0	491.0	18.0
Max. discharge(MCM/T)		4,752.0	13,996.8	17,280.0
Min. discharge(MCM/T)		14.64	36.42	129.6
Evaporation rate(mm)	June	145.9	138.4	-
	July	124.3	121.2	-
	August	117.4	112.7	-
	September	93.7	89.0	-

MCM/T=Million Cubic Meter/Tenday

경계조건은 (17)식으로부터 구해진다. 실제로 홍수기 저수지운영은 제한수위에 훨씬 못미치는 수위에서 운영되고 있지만 본 연구에서는 이상적인 저수지운영을 가정하고 시구간의 초기(6월초)와 말기(9월말)에서 현 제한수위에 수위가 유지되도록 경계조건을 설정하여 해를 구하였다. 따라서 경계조건을 구할때  $S_i$ 는 현재의 제한수위(昭陽: 190.3m, 忠州: 138m)에 대한 貯留量을 사용한다. 이때  $J_i$ 값은 CDF상에서 값을 취하게 되는데  $J_i$ 를 어느 수준에서 취하는가의 여부에 따라 해의 적합영역(즉, 한계신

표 4. Storage and release formula for Soyang (unit :  $10^7m^3/tenday$ )

貯留量	放流量
$S_1 = Q_1 + 0.557 \cdot Q_{14} + 216.159$	$R_1 = 0.443 \cdot Q_{14} + 0.458 \cdot Q_{13} + 1.935$
$S_2 = Q_2 + 0.473 \cdot Q_1 + 213.787$	$R_2 = 0.527 \cdot Q_1 + 0.557 \cdot Q_{14} + 2.372$
$S_3 = Q_3 + 0.500 \cdot Q_2 + 211.059$	$R_3 = 0.500 \cdot Q_2 + 0.473 \cdot Q_1 + 2.727$
$S_4 = Q_4 + 0.406 \cdot Q_3 + 209.453$	$R_4 = 0.594 \cdot Q_3 + 0.500 \cdot Q_2 + 1.606$
$S_5 = Q_5 + 0.513 \cdot Q_4 + 209.801$	$R_5 = 0.487 \cdot Q_4 + 0.406 \cdot Q_3 - 0.348$
$S_6 = Q_6 + 0.486 \cdot Q_5 + 209.488$	$R_6 = 0.514 \cdot Q_5 + 0.513 \cdot Q_4 + 0.313$
$S_7 = Q_7 + 0.544 \cdot Q_6 + 212.203$	$R_7 = 0.456 \cdot Q_6 + 0.496 \cdot Q_5 - 2.715$
$S_8 = Q_8 + 0.542 \cdot Q_7 + 217.796$	$R_8 = 0.458 \cdot Q_7 + 0.544 \cdot Q_6 - 5.594$
$S_9 = Q_9 + 0.422 \cdot Q_8 + 218.863$	$R_9 = 0.578 \cdot Q_8 + 0.542 \cdot Q_7 - 1.067$
$S_{10} = Q_{10} + 0.325 \cdot Q_9 + 205.047$	$R_{10} = 0.675 \cdot Q_9 + 0.422 \cdot Q_8 + 13.817$
$S_{11} = Q_{11} + 0.505 \cdot Q_{10} + 208.972$	$R_{11} = 0.495 \cdot Q_{10} + 0.325 \cdot Q_9 - 3.926$
$S_{12} = Q_{12} + 0.572 \cdot Q_{11} + 211.829$	$R_{12} = 0.428 \cdot Q_{11} + 0.505 \cdot Q_{10} - 2.857$

표 5. Storage and release formula for Chungju (unit :  $10^7m^3/tenday$ )

貯留量	放流量
$S_1 = Q_1 + 0.516 \cdot Q_{14} + 189.093$	$R_1 = 0.484 \cdot Q_{14} + 0.539 \cdot Q_{13} + 1.536$
$S_2 = Q_2 + 0.530 \cdot Q_1 + 186.936$	$R_2 = 0.470 \cdot Q_1 + 0.516 \cdot Q_{14} + 2.157$
$S_3 = Q_3 + 0.500 \cdot Q_2 + 184.911$	$R_3 = 0.500 \cdot Q_2 + 0.530 \cdot Q_1 + 2.024$
$S_4 = Q_4 + 0.459 \cdot Q_3 + 165.473$	$R_4 = 0.541 \cdot Q_3 + 0.500 \cdot Q_2 + 19.438$
$S_5 = Q_5 + 0.503 \cdot Q_4 + 130.799$	$R_5 = 0.497 \cdot Q_4 + 0.459 \cdot Q_3 - 34.675$
$S_6 = Q_6 + 0.436 \cdot Q_5 + 119.457$	$R_6 = 0.564 \cdot Q_5 + 0.503 \cdot Q_4 + 11.342$
$S_7 = Q_7 + 0.495 \cdot Q_6 + 129.134$	$R_7 = 0.505 \cdot Q_6 + 0.436 \cdot Q_5 - 9.677$
$S_8 = Q_8 + 0.544 \cdot Q_7 + 129.032$	$R_8 = 0.456 \cdot Q_7 + 0.495 \cdot Q_6 + 0.102$
$S_9 = Q_9 + 0.484 \cdot Q_8 + 145.636$	$R_9 = 0.516 \cdot Q_8 + 0.544 \cdot Q_7 - 16.604$
$S_{10} = Q_{10} + 0.502 \cdot Q_9 + 143.366$	$R_{10} = 0.498 \cdot Q_9 + 0.484 \cdot Q_8 + 2.270$
$S_{11} = Q_{11} + 0.480 \cdot Q_{10} + 157.558$	$R_{11} = 0.520 \cdot Q_{10} + 0.502 \cdot Q_9 - 14.191$
$S_{12} = Q_{12} + 0.637 \cdot Q_{11} + 136.516$	$R_{12} = 0.363 \cdot Q_{11} + 0.480 \cdot Q_{10} + 21.042$

뢰수준)이 달라진다. 다시말해  $J_i$ 값이 작아지면  $b_i$ 값이 커지고 이 경우에 어떤 신뢰수준을 초과할 때 제약식(20)을 만족할 수 없어서 비가능 오류(infeasible error)가 발생한다. 본 논문에서 GLDR식의  $J_i$ 는 CDF상의 90%에 해당하는 값을 사용하였는데, 이때 CCLP모형의 한계 신뢰수준은 昭陽이 80%, 忠州가 81%였다.

### 3.3 適用結果의 分析

#### 3.3.1 GLDR에서의 分散減少效果

표 2에서의  $\beta_i$ 를 (1)식에 대입하면 GLDR에 대한 방류의 최소분산함을 얻을 수 있다. 이는 昭陽江댐과 忠州댐에 대하여 각각

$$\Sigma \text{Var}(R_{i1}) = 21.78 \times 10^6 \text{ (m}^3\text{)}$$

$$\Sigma \text{Var}(R_{i2}) = 112.9 \times 10^6 \text{ (m}^3\text{)}$$

이다. 또한 유입량의 분산함은

$$\Sigma \text{Var}(Q_{i1}) = 38.53 \times 10^6 \text{ (m}^3\text{)}$$

$$\Sigma \text{Var}(Q_{i2}) = 205.3 \times 10^6 \text{ (m}^3\text{)}$$

따라서 GLDR은 유입량에 대하여 昭陽의 경우 43.5%, 忠州의 경우 45.0%의 분산감소 효과가 있음을 알 수 있다.

#### 3.3.2 敏感度 分析

본 논문의 LP모형((19)-(26)식)은 修正單體法(revised simplex algorithm)을 이용한 IMSL의 최적화 副프로그램인 DLPRS를 이용하여 해를 구하였다. 모형의 결정변수는  $CF_{ij}$ ,  $b_{ij}$  등인데 이를 이용하여 貯水位 수준과 放流量등을 결정할 수 있다. 이 모형에서 각 저수지에 관한 매개변수로는  $P_i$ ,  $Q_i^*$ ,  $R_{max,i}$  등이 있다. 이러한 매개변수들의 값을 변화시키면서 해의 변화를 구할 수 있고 그에 따라 貯水位와 放流量등을 분석할 수 있다. 민감도 분석에서는 나머지 변수들을 적당히 가정한 값으로 고정시켰다. 모형을 수행하는 과정에서 신뢰수준  $P_i$ 는 昭陽, 忠州, 제어 지점으로만 구분해서 사용하였고  $P_{11} \sim P_{71}$ 는 각 제어 지점에 대하여 일률적으로 같은 값을 사용하였다.

먼저 신뢰수준에 대한 貯水位의 민감도 분석 결과가 그림 2~5까지이다. 대상 시구간은 1986년 6월에서 9월 중의 최소유입량과 최대유입량이 발생

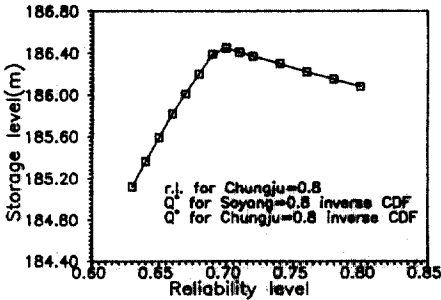


그림 2. Storage level of Soyang for various reliability level(1986, July 1st tenday)

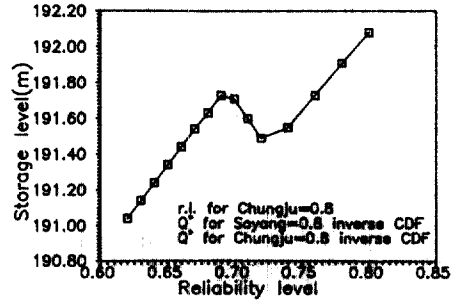


그림 3. Storage level of Soyang for various reliability level(1986, Aug. 3rd tenday)

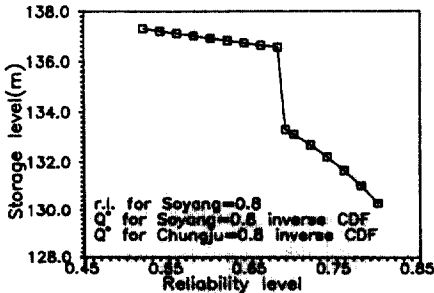


그림 4. Storage level of Chungju for various reliability level(1986, June 3rd tenday)

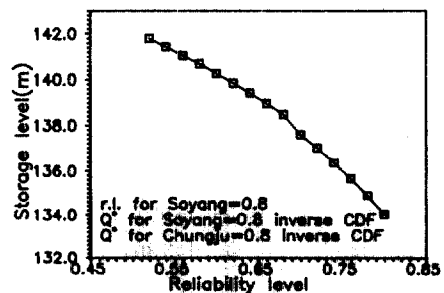


그림 5. Storage level of Chungju for various reliability level(1986, July 3rd tenday)



한 旬으로 하였다. 昭陽댐은 유입량이 적었던 7월 초순의 경우 신뢰수준이 0.70을 정점으로 貯水位가 최고에 이른다. 반면 유입량이 가장 많은 8월 하순의 경우에는 신뢰수준 0.68일때와 0.72일때 국부최대값과 국부최소값을 갖는 3차 곡선 형태를 보인다(그림 2,3). 이 결과를 가지고 2가지 관점에서 신뢰수준에 대한 해석을 할 수 있다. 첫째로 유입량이 적은 순에서 高水位를, 유입량이 많은 순에서는 低水位를 유지하는 것이 바람직한 형태라고 볼때 7월 초순을 기준으로 보면 0.70이 최적값이지만 8월 하순을 기준으로 보면 신뢰수준이 0.68이하에서 낮을수록 좋다. 그러나 貯水位를 낮추기 위해 신뢰수준을 지나치게 낮추는 것은 문제가 있기 때문에 그림 2로부터 얻어진 0.70값을 사용하면 8월 하순에 대하여도 적절한 수위를 유지할 수 있다. 둘째로 직관적으로 생각할때 貯水位가 높아지면 신뢰수준은 낮아지게 마련이다. 실제로 忠州의 경우는 이러한 경향이 결과로도 그대로 일치하고 있으나 昭陽은 그림 2의 신뢰수준 0.70이하 그림 3의 신뢰수준 0.68~0.72를 제외한 부분에서 이와 반대현상을 보인다. 따라서 이구간을 異狀구간으로 보면 나머지 구간에서의 최적값인 0.70을 최적 신뢰수준으로 사용할 수 있다. 忠州의 경우 그림 4와 5에 최저유입량 시구간인 6월 하순과 최대유입량 시구간인 7월 하순에 대하여 貯水位 곡선이 그려져 있다. 두 그림이 모두 신뢰수준에 대하여 貯水位가 단조감소하는 형태를 보이는데 다만 그림 4에서 신뢰수준이 0.68에서 0.69로 올라갈때 貯水位가 급히 떨어진다. 0.68과 0.69가 큰 차이라고 생각하지는 않지만, 그림 4의 결과로부터, 6월 하순에 대해 貯水位를 높이는 것이 좋겠으므로

忠州의 신뢰수준을 0.68로 선택하였다.

그림 6, 7은 가변 제한수위에서 逆  $Q^*$ 의 변화에 대한 최소 순별제한수위의 변화를 그린 것이다. 최소 순별제한수위가 현재의 제한수위와 일치하는 때의 逆  $Q^*$ 를 보면 昭陽의 경우가 0.94, 忠州는 0.85로 나타났다. 그림 6에서 逆  $Q^*$  0.90과 0.91사이에서 최소제한수위 190.3m를 갖는 점이 있는데 이는 그래프의 보간 과정에서 나타난 것이고 실제로 모형을 수행하여 얻어진 결과는 아니다. 중요한 것은 0.94에서 최소 순별제한수위를 190.3m로 할 수 있다는 것이며 그 이하의 逆  $Q^*$ 값들의 최소 순별제한수위는 별 의미가 없다.  $Q^*$ 가 각 旬을 대표할 수 있는 홍수유입량의 개념으로 보았을때 이 결과는 昭陽이 忠州보다 상대적으로 큰 규모의 홍수사상에 대하여 설계되었음을 알 수 있다.

$R_{max,i}$ 는 旬別操作입을 감안하여 댐의 최대방류능력의 일부만을 사용하게 되는데 9% 이상의 어느 값을 사용하든지 해에 영향이 없으며 9% 미만에서는 부적합 오류가 발생하였다.

### 3.3.3 最適解에 의한 貯留量, 放流量 曲線式

모형을 수행하는데 있어서 case 1과 2의 2가지 경우를 고려하였다. case 1은 본문에서 전개된 모형으로서 CF를 결정변수로 놓고 수행된 경우이고 case 2는 제한수위를 현재 제한수위로 고정시키고 모형을 수행한 것이다. 이 경우에는  $CF_i$ 가 상수가 되므로  $Q^*$ 를 결정변수로 놓고 목적함수도  $Q^*$ 의 합을 최대화하는 것으로 수정하였다. case 1의 경우에는 민감도 분석의 결과에 따라 昭陽의 신뢰수준 0.70, 忠州의 신뢰수준 0.68, 시구간의 초기수위(즉, 식(17)에서  $S_i$ )를 現제한수위로 하여 모형을 수행하

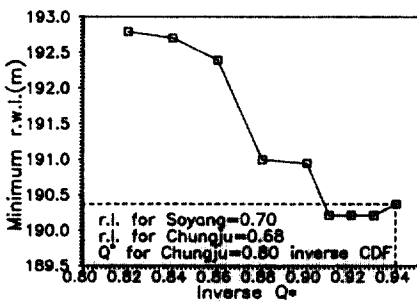


그림 6. Minimum r.w.l. of Soyang for various inverse  $Q^*$ (r.w.l.=restricted water level)

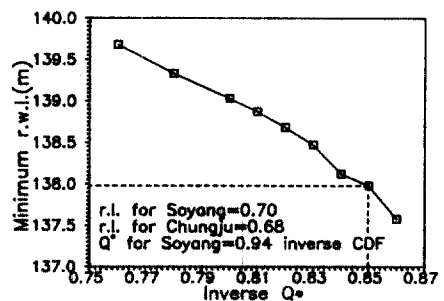


그림 7. Minimum r.w.l. of Chungju for various inverse  $Q^*$ (r.w.l.=restricted water level)

었다. case 2의 경우도 신뢰수준과 경계조건은 case 1과 같은 값을 사용하여 모형을 수행하였다. case 1의 결과로서 昭陽과 忠州에 대한 저류량과 방류량 곡선식은 각각 표 4와 5에 정리된 바와 같다. 각 지점에 대한 가변제한수위와 1990년도에 대한 case 1과 2의 운영실적과 계산치를 비교해 보면 그림 8~15 까지와 같다.

그림 8과 9는 昭陽과 忠州에 대한 가변제한수위 곡선이다. 두 지점 모두에서 실질적으로 홍수조절 용량이 필요한 시구간은 6월 하순에서 9월 중순까지임을 알 수 있다. 그림 10과 11에서 case 1과 2의 결과를 살펴보면 昭陽의 경우 유입량이 적은 8월 초에서 8월 말까지의 기간중에 case 1의 경우가 보다 높은 수위를 유지하고 있으며, 忠州의 경우는 전체적으로 case 1의 수위가 높으며 크기는 20m 이상 차이가 나는 구간도 있다. 높은 수위를 유지함은 高落差에 의한 효율적인 發電을 보장하는 것이므로 兩 地點에서 모두 가변제한수위 개념을 사용한 결과가 효율적이라는 것을 알 수 있다. 이는 忠州의 경우 더욱 두드러진다. 설계홍수사상의 규모와 가

변제한수위의 효율성과의 직접적인 상관성여부는 본 연구의 범위를 벗어나므로 생략하기로 하고 다만 여기서는 상대적으로 작은 홍수사상에 대하여 설계된 忠州지점에서 가변제한수위의 사용이 더욱 효과적이라는 사실을 주목할 만하다.

방류특성을 살펴보면 case 1의 경우 유입량이 많은 구간에서 실제보다 적은 방류를 하게 되고(그림 12와 13의 6월 하순, 9월 중순등), 유입량이 적은 구간에서는 상대적으로 실제보다 많은 방류를 하게 된다(그림 12와 13의 7월 초순, 8월 상순.중순등). 한편 case 2의 방류 형태는 case 1과 비슷하나 case 1에 비해 효율적이지 못하거나 특이한 부분이 발견된다(그림 14와 15의 8월 중순, 그림 15에서 6월 중순의 과대방류 등).

그림 16와 17은 순별 최대유입량으로 유입량 시계열을 구성하여 계산된 貯水位曲線이다. case 1과 2의 결과는 일부 시구간을 제외하고 거의 일치하고 있으며 대부분의 시구간에서 貯水位는 홍수위에 이르고 있다.

본 논문의 결과를 가지고 실제로 운영을 할 경우

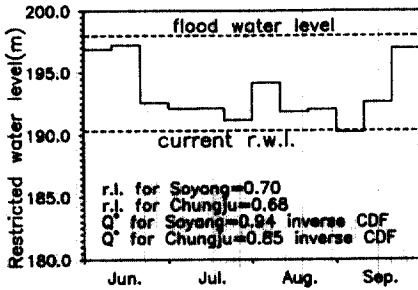


그림 8. Restrictd water level for Soyang

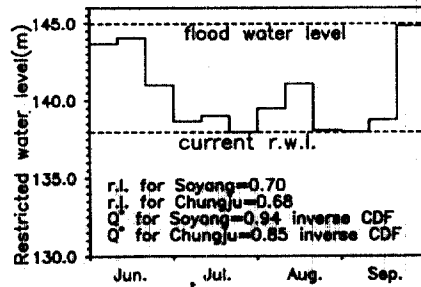


그림 9. Restrictd water level for Chungju

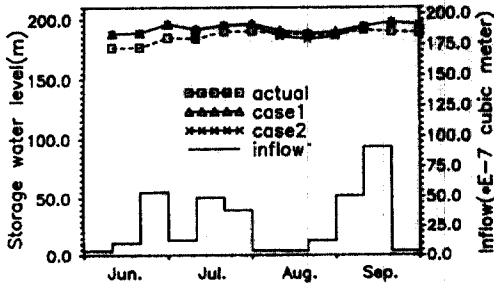


그림 10. Computed storage vs. actual storage for Soyang(1990)

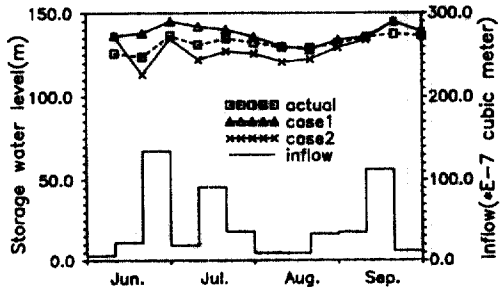


그림 11. Computed storage vs. actual storage for Chungju(1990)

가장 기준이 되는 것은 순별 목표방류량을 제시하는 방류식이다. 순별 제한수위곡선은 결과를 얻는 과정에서 개념적으로 만들어지는 것이고 실제 운영에서는 방류식이 기준이 된다. 즉, 旬別 운영에서 旬別 제한수위곡선을 넘기지 않으려고 노력하지 않아도 된다. 이 점이 홍수시 時運營과 다르다.

현 단계에서 본 논문의 결과가 가지는 한계는 설계홍수량에 대한 운영을 결합시켜 고려하지 않았다는 것이다. 그런데 대홍수를 조절하기 위하여 가장 우선되는 일은 홍수 시작전에 현존 제한수위를 유

지하는 것이다. 그러나 그림 8,9에서 보듯이 홍수기인 6월 하순부터 9월 중순까지 대부분의 시구간에서 가변 제한수위가 현존 제한수위를 상회하고 있다. 그리고 이 상회하는 정도는 6월 초·중순과 9월 하순을 제외하면 그리 크지 않다. 만일 대홍수가來襲한다는 예측이 가능하고 그에 따라 가변 제한수위로 유지되던 저수위를 예비방류에 의해 하강시킨다면 무리없는 홍수시 운영을 수행할 수 있을 것이다. 이러한 경우에 제시한 가변 제한수위는 이수 운영의 관점에서 매우 큰 이득을 가져다 줄 것이다.

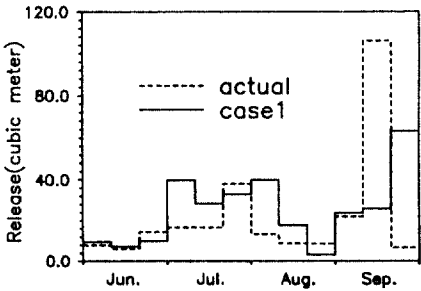


그림 12. Computed release vs. actual release for Soyang(1990, case 1)

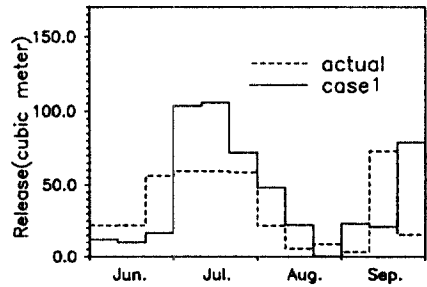


그림 13. Computed release vs. actual release for Chungju(1990, case 1)

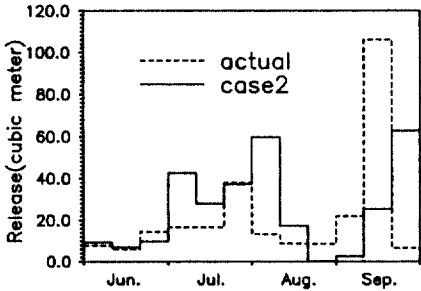


그림 14. Computed release vs. actual release for Soyang(1990, case 2)

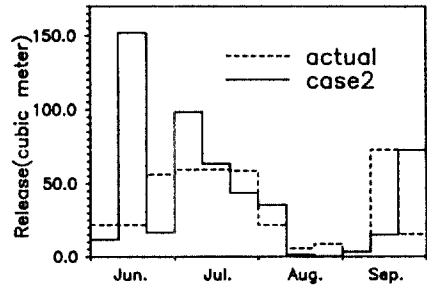


그림 15. Computed release vs. actual release for Chungju(1990, case 2)

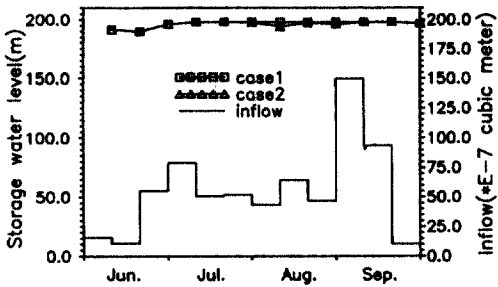


그림 16. Storage in worst case for Soyang

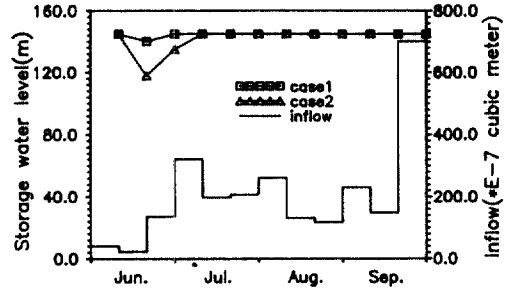


그림 17. Storage in worst case for Chungju

추후 연구되어야 할 문제는 과연 대홍수를 예측하여 예비방류를 수행할 수 있는 시간이 어느정도이며, 그 시간안에 가변 제한수위로부터 현존 제한수위까지 저수위를 신속히 하강시킬 수 있는가 하는 점이다. 그러한 연구가 진전된다면 제시된 가변 제한수위는 수정, 보완되어야 할 것이다.

#### 4. 結論 및 向後 課題

소양강댐과 충주댐에 대하여 과거의 자료로부터 최소분산방류를 목적으로 하는 일반화 선형결정플을 유도하였다. 그리고 위험도 제약아래 가변 제한수위를 허용함으로써 홍수조절소요용량을 최소화하는 CCLP모형에 이를 대입하여 순별 방류방식을 제시하였다. 그리고 이 CCLP모형은 홍수기의 利水 연계운영을 목표로 충주와 소양의 관련식들을 결합하여 하나의 모형으로 구성하였다. 이로부터 실제 유입량자료를 사용한 홍수기 운영을 모의하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 각 저수지에 대한 최적 신뢰수준은 昭陽이 70%, 忠州가 68%로서 비슷했고, 홍수조절용량의 관점에서 본 결과로는 소양이 忠州보다 상대적으로 큰 규모의 홍수사상에 대하여 설계되었음을 알 수 있다.

2) 可變 制限水位下에서의 운영은 一律 制限水位下에서의 운영보다 高水位를 유지하여 효율적인 것으로 나타났는데 昭陽의 경우는 유입량이 적은 시구간에서, 忠州의 경우는 全 시구간에 걸쳐 이와같은 현상이 두드러졌다.

3) 방류형태에 있어서는 첨두 홍수량이 발생하는 시구간에서는 홍수유입량의 규모를 줄이면서 시간적으로 지체효과도 보이고 있으며, 갈수시에는 상대적으로 실제보다 많은 방류를 하는 효과를 지니고 있다.

4) 극한상황인 순별 최대 유입량 시계열에 대하여 모형을 수행하면 可變 制限水位下에서의 一律制限水位下에서의 貯水패턴은 비슷한 양상을 보인다.

5) 전체 대상시구간은 홍수기인 6월에서 9월까지로 국한함으로써 불가피하게 경제조건을 부가할 수밖에 없었는데 만일 모형을 1월에서 12월까지 닫힌 시구간(closed loop)에 대하여 적용하면 경제조건이 필요없이 현실성이 고려된 좀더 합리적인 해를 얻을 수 있을 것이다.

닫힌 시구간을 사용하여 분산방정식의 최소조건을 구하였을때  $\beta_2$ 값이 양수로 계산될지 또는 입력자료의 문제로 인하여 계속 음수값으로 계산될지의 여부는 향후에 확인해야할 과제이다. 그리고 보다 완벽한 방류식이나 저류식을 얻기 위해서는 합성유량을 가지고 저수지 운영을 모의하여, 얻어진 저수위나 방류량 자료가 신뢰수준을 만족할 수 있도록 결정변수를 보정해야 할 것이다. 또한 홍수예측과 예비방류에 의한 저수위 하강문제에 대한 연구가 수행된다면, 본 논문의 결과와 결합시켜 가변 제한수위나 순별 방류식을 보완하고 홍수기 운영의 효율성 여부를 검토할 수 있겠다.

#### 感謝의 말

본 논문은 修巖獎學文化財團의 지원으로 이루어졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

#### 記 號

- $R_i$  : 기간  $i$ 에 대한 실제放流量
- $T_i$  : 기간  $i$ 에 대한 期待放流量(= $E(R_i)$ )
- $w_i$  : 기간  $i$ 의 목표량 달성과 관련된 加重係數
- $C$  : 저수지 총용량( $m^3$ )
- $CF_i$  : 시구간  $i$ 의 홍수조절용량( $m^3$ )
- $Q^*$  : 시구간  $i$ 의 CDF상의 정해진 확률값에 해당하는 홍수기 유량
- $P_i$  : 신뢰수준
- $S_{ij}$  : 시구간  $i$ , 저수지  $j$ 의 末期貯留量( $m^3$ )
- $S_{min,ij}$  : 시구간  $i$ , 저수지  $j$ 의 最小貯留量( $m^3$ )
- $R_{max,ij}$  : 시구간  $i$ , 저수지  $j$ 의 最大放流量( $m^3$ )
- $R_{min,ij}$  : 시구간  $i$ , 저수지  $j$ 의 最小放流量( $m^3$ )
- $RC_{max,i}, RC_{min,i}$  : 제어지점의 시구간  $i$ 에 대한 최대 最小放流量( $m^3$ )
- $Q_{ij}$  : 시구간  $i$ , 저수지  $j$ 의 流入量( $m^3$ )
- $R_{ij}$  : 시구간  $i$ , 저수지  $j$ 의 放流量 ( $m^3$ )
- $a_j$  :  $j$  저수지에서 제어지점까지의 유역면적비에 의한 支川流入量 係數
- (=  $\frac{\text{제어지점에서 } j \text{ 저수지까지의 유역면적}}{j \text{ 저수지의 유역면적}}$ )
- $EV_i$  :  $i$ 기간 동안의 저수지 증발량( $m^3$ )
- $Var(R_i)$  :  $R_i$ 의 분산

$F^{-1}(\cdot)$ 는 누적확률분포의 역함수이다.

$\alpha_i, \beta_{i-1}, \gamma_{i-2}, b_i$  : GLDR식의 계수

### 参 考 文 献

1. 김치홍, "Dynamic Programming에 의한 홍수조절", **대한토목학회지**, 제 20권, 제 2호, pp. 9-21, 1972
2. 이길성, 오영민, "Min-max DP에 의한 소양 및 충주호의 홍수조절운영", **한국수문학회지**, 제 19권 제 4호, pp. 339-345, 1986
3. 이재형, 이길성, 정동국, "Incremental DP에 의한 홍수시 댐군의 연계운영", **한국수문학회지**, 제25권, 2-2호, pp. 47-59, 1992
4. 김택수, 댐군의 이수운영을 위한 체계학적 DP, 공학석사 학위논문, 서울대학교, 1989년 2월
5. 김승권, 윤용남, 이성윤, "最適化 技法에 의한 南江-安東댐의 洪水調節", **한국수문학회지**, 제 8권, 제 1호, pp.49-60, 1988
6. 이길성, 정동국, "홍수시 충주댐 운영방안의 비교 검토", **한국수문학회지**, 제 18권 제 3호, pp. 225-233, 1985
7. Jamieson, D. J. and J. C. Wilkinson, "A Short-Term Control Strategy for Multipurpose Reservoir Systems", **WRR**, 8(4), pp. 911-920, Aug. 1972
8. Schultz, A. G. and E. J. Plate, "Developing Optimal Operation Rules for Flood Protection Reservoirs", **J. of Hydro.**, Vol. 28, pp. 245-265, 1976
9. Windsor, S. J., "Optimization Model for the Operation of Flood Control Systems", **WRR**, 9(6), pp. 477-483, Oct. 1973
10. Märien J., "Regulation of a Flood Reservoir with the Use of On-Line Forecasts", **IAHS-AISH**, No. 129, pp. 477-483, Apr. 1980
11. ReVelle, C., E. Joeres, and W. Kirby, "The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design. 1. Development of the Stochastic Model", **WRR**, 5(4), pp. 767-777, 1969
12. Nayak, S. C. and S.R. Arora, "Optimal Capacities for a Multireservoir System Using the Linear Decision Rule", **WRR**, 7(3), pp. 485-498, 1971
13. Joeres, E. F., J. C. Liebman, and C. S. ReVelle, "Operating Rules for Joint Operation of Raw Water Sources", **WRR**, 7(2), pp.225-235, Apr. 1971
14. Takeuchi, K., "Chance-Constrained Model for Real-Time Reservoir Operation Using Drought Duration Curve", **WRR**, 22(4), pp.551-558, Apr. 1986
15. 이회승, 심순보, 고석구, "신뢰도를 고려한 다목적 저수지의 월별 운영율", **한국수문학회지**, 제25권, 제1호, pp. 75-82, 1992
16. ReVelle, C., and W. Kirby, "Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design. 2. Performance Optimization", **WRR**, 6(4), pp. 1033-1044, 1970
17. ReVelle, C. and J. Gundelach, "Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design. 4. A Rule that Minimizes Output Variance", **WRR**, 11(2), pp. 197-203, 1975
18. 건설부, 한국수문조사연보, 1962-1984
19. ReVelle, C., and J. Gundelach, "A Variance Minimizing Linear Decision Rule for Reservoir Management and Design", **Stochastic Programming**, edited by M.A.H. Dempster, pp. 341-355, 1980
20. 강부식, 위험도제약 선형계획법에 의한 홍수기 저수지운영, 공학석사 학위논문, 서울대학교, 1992년 2월

(接受 : 1992. 3. 20.)