

# 氣象豫報를 考慮한 灌溉用 貯水池의 最適 操作 模型 (II)

— 模型의 構成 —

## Optimal Reservoir Operation Models for Paddy Rice

### Irrigation with Weather Forecasts (II)

— Model Development —

金 秉 辰\* · 朴 承 禹\*\*  
Kim, Byeong Jin · Park, Seung Woo

### Summary

This paper describes the development of real-time irrigation reservoir operation models that adequately allocate available water resources for paddy rice irrigation. Water requirement deficiency index(WRDI) was proposed as a guide to evaluate the operational performance of release schemes by comparing accumulated differences between daily release requirements for irrigated areas and actual release amounts.

Seven reservoir release rules were developed, which are constant release rate method (CRR), mean storage curve method(MSC), frequency analysis method of reservoir storage rate(FAS), storage requirement curve method(SRC), constant optimal storage rate method (COS), ten-day optimal storage rate method(TOS), and release optimization method(ROM).

Long-term forecasting reservoir operation model(LFROM) was formulated to find an optimal release scheme which minimizes WRDIs with long-term weather generation. Rainfall sequences, rainfall amount, and evaporation amount throughout the growing season were to be forecasted and the results used as an input for the model. And short-term forecasting reservoir operation model(SFROM) was developed to find an optimal release scheme which minimizes WRDIs with short-term weather forecasts. The model uses rainfall sequences forecasted by the weather service, and uses rainfall and evaporation amounts generated according to rainfall sequences.

\* 서울대학교 大學院

\*\* 서울대학교 農業生命科學大學

키워드 : 最適 貯水池 操作, 實時刊 操作, 放流許數,  
必要水量缺乏指數

## I. 緒 論

관개용 저수지의 최적 운영을 위해서는 미래 기상상황을 예측함으로써 적합한 급수량 및 시기를 조절하여야 한다. 본 연구에서는 기상예측으로부터 계산된 저수지 유입량과 저수량을 등을 이용한 저수지 조작 모형을 개발하였다.

기상예보를 이용한 관개계획 및 저수지 조작에 관한 연구는 강수량에 따라 관개량이 좌우되는 경우에 적용되는데, 기상자료를 이용한 관개시기 및 급수량 결정모형에 관한 연구는 Heermann et al. (1974),<sup>15)</sup> Von Bernuth et al. (1884),<sup>22)</sup> Martin et al. (1983),<sup>19)</sup> Chesness et al. (1986),<sup>12)</sup> Hood et al. (1987),<sup>17)</sup> Villalobos와 Fereres(1989)<sup>21)</sup> 등 많은 연구자들에 의해서 수행된 바 있다.

한편, 우리나라에서의 관개용 저수지 조작을 위한 연구에는 과거 기상자료에 의한 평년 수준의 관개방법이 제안된 바 있다. 金 (1988)<sup>5,6)</sup> 은 tank 모형과 Penman 식을 이용한 일별 저수지 조작모형 DIROM (Daily Irrigation Reservoir Operation Model)을 개발하고 반월저수지 등 4개 저수지에 적용하여 그 응용성을 살펴 보았다. 朴과 任(1991)<sup>7)</sup>, 任(1991)<sup>9)</sup> 등은 관개용 저수지 조작을 위한 전문가 시스템을 개발하여 半月貯水池에 적용하였다. 金(1992)<sup>3)</sup>은 조용수량 결정과 합리적 이수관리 및 적정 홍수조절 방법의 제시를 위한 일별 물수지 모형을 개발하였다. 그러나, 기상예측에 의한 관개용 저수지 조작에 관한 연구는 아직 전무한 실정이다.

본 보에서는 저수지 조작방법을 평가할 수 있도록 일별 필요수량과 저수지 방류량의 차이를 능가한 필요수량 결핍지수(Water Requirement Deficiency Index, WRDI)와 이를 이용하여 최적 급수 방법을 결정할 수 있는 저수지 조작 모형의 개발, 그리고 기상예측을 현재부터 관개 종료일까지 無作爲 抽出을 통한 降水日, 降水量 豫測을 실시하는 長期 氣象豫測과, 기

상청의 강수 발생 예보를 입력하여 降水時의 降水量만을 모의발생하고 이에 따른 蒸發量을 예측하는 短期 氣象豫測의 두가지로 구분하여, 효율적인 물관리를 위한 실시간 저수지 조작 모형의 구성에 대하여 언급하였다.

## II. 模型의 概念

본 연구에서 관개용 저수지 조작을 위하여 貯水池 操作 模型, 放流係數 決定 模型, 그리고 기상예측에 의한 저수지 最適 操作 模型 등을 개발하였는데, 그 기본 개념은 다음과 같다.

저수지 조작 모형은 저수지 물수지 방정식을 사용하였으며, 물수지 인자중 유입량 계산은 金과 朴(1986, 1988)<sup>4,5)</sup>의 수정 Tank 모형을 사용하였고 방류량 계산은 포장물수지를 통한 포장 필요수량을 산정하도록 구성하였다.

저수지의 실제 조작에서는 저수율에 따라 방류량을 조절하게 되는데 실제 방류량에 대한 방류 필요량의 비를 방류계수로 정의하고, 이를 결정하는 방법으로 저수율, 필요수량 등을 고려한 7가지 방법을 제안하여 각 방법을 비교하였다. 각 방법의 비교를 위하여 필요수량의 충족도를 표시하는 必要水量 缺乏指數(WRDI)를 개발하였는데, WRDI는 필요수량에서 방류량을 뺀 값의 누가치로 정의된다.

본 연구에서 고려한 7가지 방류계수 결정 방법은 다음과 같다.

① 一定率法: 필요수량 전량을 방류하되 부족시에는 저수 전량을 방류한다.

② 平均 貯水率 曲線法: 전국 저수지 순별 평균저수율 자료로부터 최저 저수율을 25, 40%로 유지할 수 있는 저수율을 기준으로 하여 각 正常, 節水, 制限 給水 등의 방류수준을 결정하도록 한다.

③ 時期別 貯水率 頻度 分析法: 경기도 소재 저수지 순별 평균 저수율 자료로 빈도분석하여, 10년, 20년 빈도 저수율을 기준으로 각 방류

수준을 결정하도록 한다.

④貯水 必要量 曲線法: 저수지의 조작 특성을 고려하여 저수지가 필요수량을 전량 급수할 수 있는 양을 기준하여 그 양의 90, 70, 50, 30% 저수량을 구하고 각 수준에 따른 저수율 값을 방류계수로 한다.

⑤一定 最適 貯水率法: WRDI를 최소로 하는 저수율-방류계수 조합을 정하여 방류를 실시하는 방법이다.

⑥時期別 最適 貯水率法: WRDI를 최소로 하는 순별 저수율-방류계수 조합을 정하여 방류를 실시하는 방법이다.

⑦放流係數 最適化法: 수학적 최적화법을 이용하여 WRDI를 최소로 하는 순별 최적 방류계수를 구하는 방법이다.

기상예측에 의한 저수지 최적조작을 위해서는 크게 장기 기상예측과 단기 기상예측의 2가지에 의한 조작 방법을 개발하였다. 장기 기상예측이란 현재일로 부터 관개 종료일까지 강수발생 여부와 강수량, 증발량 등을 모두 재현하는 것을 말하며, 단기 기상예측이란 기상청의 강수예보를 이용하여 강수 발생일을 입력하고 이에 따라 증발량과 우천시 강수량 만을 재현해 내는 과정을 말한다. 따라서 최적 저수지 조작 모형은 장기 및 단기 기상 예측을 통하여 기상예측을 실시하고 앞서 살펴 본 7가지 방류계수 결정 방법중 WRDI를 최소로 하는 방법을 응용하여 저수지 조작을 실시하도록 하는 방법을 의미한다.

### III. 貯水池 操作 模型

#### 1. 貯水池의 물收支

저수지에서의 일별 물수지는 식(1)과 같이 표시할 수 있다.

$$S_t = S_{t-1} + RI_t + RP_t + RU_t - (RR_t + RO_t + RE_t + RG_t + SP_t) \dots\dots(1)$$

- 여기서,  $S_{t-1}$ : 저수량
- $RI_t$ : 유입량
- $RP_t$ : 수면강수량
- $RU_t$ : 지하수 유입량
- $RR_t$ : 방류량
- $RO_t$ : 여수토 월류량
- $RE_t$ : 저수지 수면 증발량
- $RG_t$ : 지중 침투량
- $SP_t$ : 제방 침투량

단위는  $m^3$ 이며 첨자,  $t, t-1$ 은 각각 계산 당일, 계산 전일을 가리킨다.

식(1)의 지하수 유입량( $RU_t$ ), 지중 침투량( $RG_t$ ), 그리고 제방 침투량( $SP_t$ ) 등은 실측이 거의 불가능한 요소들이다. 따라서, 이들을 기타 손실량으로 하여 식(1)을 다시 쓰면 식(2)와 같다.

$$S_t = S_{t-1} + RI_t + RP_t - (RR_t + RO_t + RE_t + L_t) \dots\dots\dots(2)$$

여기서,  $L_t$ 는 기타 손실량으로  $L_t = G_t + SP_t - RU_t$ 이다.

저수지 수면에 내리는 강수량( $RP_t$ )은 식(3)과 같이 정의할 수 있다.

$$RP_t = PP_t \times FWA / 1,000 \dots\dots\dots(3)$$

- 여기서,  $PP_t$ : 강수량(mm)
- FWA: 저수지 만수면적( $m^2$ )이다.

저수지 수면 증발량( $RE_t$ )은 Veihmeyer(1964)의 大型 Pan 계수를 사용하여 식(4)와 같이 계산한다.

$$RE_t = C_{pan} \times RA_t \times E_t / 1,000 \dots\dots\dots(4)$$

- 여기서,  $RA_t$ : 저수지 수면적( $m^2$ )
- $E_t$ : Pan 증발량(mm)
- $C_{pan}$ : 증발계 종류에 따른 Pan 계수이다.

본 연구에서 Pan 증발계수  $C_{pan}$ 의 값은 0.7로 하였다.

여수토 월류량( $RO_t$ )은 자연월류식인 경우 물수지의 계산단위가 1일이므로 식(5)와 같이 당일의 저수량이 저수지 만수량 이상일 때 그 이상되는 저수량은 모두 월류되는 것으로 하였다.

$$\begin{aligned} RO_t &= S_t - SF & \text{if, } S_t > SF \\ RO_t &= 0 & \text{if, } S_t \leq SF \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(5)$$

여기서, SF : 저수지 만수량( $m^3$ )이다.

### 2. 流入量

저수지의 일 유입량( $RI_t$ )은 유역의 유출심에 유역면적을 곱함으로써 식(6)과 같이 계산할 수 있다.

$$RI_t = Q_t \cdot WA / 1000 \quad \dots\dots\dots(6)$$

여기서,  $Q_t$  : 유역의 일별 유출심(mm)  
 WA : 유역면적( $m^2$ )  
 상수 1000 : 단위 환산치이다.

유역의 일별 유출심( $Q_t$ )은 金과 朴(1986, 1988)<sup>4,5</sup>이 수정한 tank 모형을 사용하여 추정하였다.

### 3. 放流量

방류량 산정에 영향을 주는 인자에는 기상, 용수로 및 포장 특성, 작물 조건 등의 물리적 요인과 관개방식, 관습 등과 같은 인위적 요인이 있다. 이와 같은 요인들은 자체 특성과 상호간에 복잡한 관계를 이루고 있기 때문에 이들을 전부 고려하여 방류량을 결정하는 데에는 어려움이 많다. 대부분의 우리나라 관개용 저수지의 경우, 답작을 대상으로 하고 내리흐름식 관개방식을 채택하고 있기 때문에 저수지 측면에서 보면 전체 관개지구를 하나의 큰 포장으로 보고 이의 수요량을 산정하는 것이 합리적일 것으로 생각된다.

일 방류량의 산정은 포장에서의 필요수량과 용수로의 흐름을 유지시켜 주는 최저방류량 및 이양용수 등의 합으로 볼 수 있으며 여기에 수로 손실율을 고려하여 식(7)로 계산할 수 있다.

$$RR_t = 10 \cdot CR \cdot [REQ_t + MR_t + TR_t] \cdot \left(1 + \frac{CL}{100}\right) \times IA \quad \dots\dots\dots(7)$$

여기서,  $RR_t$  : 방류량( $m^3$ )  
 CR : 방류계수  
 $REQ_t$  : 필요수량(mm)  
 $MR_t$  : 최저 방류량(mm)  
 $TR_t$  : 이양용수량(mm)  
 CL : 수로 손실율(%)  
 IA : 관개면적(ha)이다.

식(7)의 주요 변수는 다음과 같이 계산하였다.

#### 가. 必要水量

필요수량( $REQ_t$ )은 논벼의 증발산량과 유효우량 등으로 부터 식(8)과 같이 계산할 수 있다.

$$REQ_t = ET_a + PF - ER_t \quad \dots\dots\dots(8)$$

여기서,  $ET_a$  : 논벼의 증발산량(mm)  
 PF : 논에서의 침투량(mm)  
 $ER_t$  : 유효우량(mm)이다.

논벼의 증발산량은 소형 Pan 증발량과 소형 Pan 증발량에 대한 작물계수로 부터 식(9)와 같다.

$$ET_a = K_{pt} \cdot Epan_t \quad \dots\dots\dots(9)$$

여기서,  $K_{pt}$  : 논벼의 시기별 소형 Pan 증발량에 대한 작물계수  
 $Epan_t$  : 소형 Pan 증발량(mm) 등이  
 다.

Table-1은 소형 Pan 증발량에 대한 수원지방 벼의 순별 작물계수  $K_{pt}$ 를 보여준다. Table-1

Table-1. Crop coefficient  $K_{pt}$  of paddy rice for small Pan evaporation(鄭 등, 1986)<sup>10)</sup>

Month	June			July			August			Sep.	Mean
	F	M	L	F	M	L	F	M	L	F	
$K_{pt}$	0.85	1.07	1.10	1.18	1.36	1.43	1.47	1.35	1.44	1.13	1.24

에서와 같이  $K_{pt}$  값은 생육시기별로 0.85~1.47의 범위로서 차이를 보이고 있으며 평균은 1.24였다.

논으로 부터의 침투손실은 토양의 특성과 논에서의 포장조건 등에 따라 좌우되는데, 장기간 담수심을 유지하기 때문에 지하수의 영향을 받게 되므로 시기적으로 변화하는 경향을 나타낸다. Bolton와 Zandstra(1981)은 논두렁 손실과 침투손실량은 상수로 사용할 수 있다고 제안하였으며, 李 등(1990)<sup>8)</sup>에 의하면 답지역에서의 누가 수직 침투량은 시간에 따라 거의 직선적 증가를 나타낸다고 보고한 바 있다. 따라서, 본 모형에서는 관개기간 동안 논에서의 수직 침투량(PF<sub>t</sub>)은 일정하다고 가정하였다.

답에서의 유효우량은 수도 생육기간중의 총 강수량에서 포장내에서 사용되지 않은 강수량을 뺀 양으로 정의된다. 유효우량은 포장의 물꼬 높이에 직접적으로 영향을 받는다. 이를 계산하기 위해서는 일별 담수심의 변화를 고려하여야 한다. 이 일별 담수심( $D_t$ ) 변화는 식(10)과 같은 답에서의 물수지식으로 부터 계산되었다.

$$D_t = D_{t-1} + ER_t - CU_t \dots\dots\dots(10)$$

여기서,  $CU_t$ : 소비수량(mm)으로 식(11)과 같다.

$$CU_t = ET_a + PF \dots\dots\dots(11)$$

따라서, 유효우량( $ER_t$ )은 식(12)와 식(13)의 값 중에서 작은 값을 유효우량으로 정의하였다.

$$ER_t = PP_t \dots\dots\dots(12)$$

혹은

$$ER_t = D_{max} + CU_t - DT_{t-1} \dots\dots\dots(13)$$

여기서,  $D_{max}$ : 물꼬높이(mm)이다.

논에서의 적정담수심은 논벼의 생육시기별로 변화하는데, Kung(1971), 농촌진흥청, 정 등(1986),<sup>16)</sup> 이 등(1989)<sup>8)</sup> 등의 자료를 참조하여, 활착기에는 60mm, 유효분얼기 30mm, 무효분얼기 10mm, 유수형성시 30mm, 수잉기, 출수기, 호숙기에는 60mm, 황숙기, 완숙기는 0mm 등으로 Fig. 1과 같이 정의하였다. 본 연구에서는 논 물꼬높이( $D_{max}$ )의 값을 적정담수심과 같다고 가정하였다.

이양용수량( $TR_t$ )은 토성, 토양의 함수비 등에 따라 차이가 있지만 대체로 100~140mm이다. 그 양과 이양기간은 포장 상황에 따라 좌우되므로, 본 연구에서는 입력자료로 처리하였다.

나. 放流係數

관개용 저수지는 비관개기나 홍수시에 물을 저류해 두었다가 관개기에 필요한 수량을 공급하게 된다. 저수지로 부터 관개지역에 급수하는 방류량은 저수량이 충분한 경우에는 몽리구역의 필요수량 전량을 방류할 수 있지만, 한발등으로

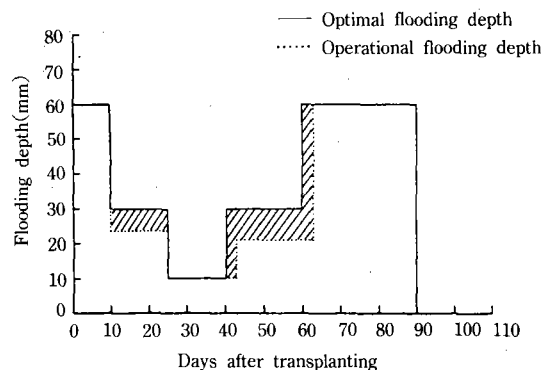


Fig. 1. Conceptual diagram of water requirement deficiency index, WRDI

저수량이 부족하거나 전무한 경우는 필요수량보다 작은 양을 방류하게 된다.

방류필요량에 대한 실제방류량의 비를 방류계수로 정의하면 식(14)와 같다.

$$CR = \frac{RR_t}{RR_{req}} \dots\dots\dots(14)$$

여기서, CR : 방류계수  
 RR<sub>t</sub> : 실제방류량  
 RR<sub>req</sub> : 방류필요량이다.

따라서, 저수지 방류량은 식(15)와 같다.

$$RR_t = CR \times RR_{req} \dots\dots\dots(15)$$

#### IV. 貯水池 放流係數 模型

##### 1. 必要水量 缺乏指數

저수지의 방류량이 필요수량보다 작을 경우는 관개지구의 작물 소비수량 이하의 물을 공급하게 되므로 작물 생육에 지장을 초래할 수 있다. 그런데 물 부족량에 따른 생육 저해요인은 보통 물 부족이 상당 기간 이상 지속될 때 뚜렷하게 되므로, 이와 같은 결핍량의 정도를 나타내는 지수로서 결핍지수(stress index)를 사용한다. 결핍지수에는 Hiler(1969)<sup>16)</sup>의 수분 결핍지수(Stress Day Index, SDI)와 Palmer(1965)<sup>20)</sup>의 Palmer 지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI) 등이 있다.

SDI는 주로 濕潤灌溉를 실시하는 발작물의 경우에 적용되며 PDSI는 月單位의 평균적인 한발정도를 나타내기 때문에 논벼와 같이 澆水灌溉를 실시하는 경우나 일별 물수지를 고려하는 경우에는 적용이 어렵게 된다.

본 연구에서는 담수관개를 실시하는 답에서의 필요수량 부족분을 정량화하기 위하여 필요수량 결핍지수(Water Requirement Deficiency Index, WRDI)를 개발하였다.

WRDI의 개발을 위하여 다음의 4가지 방법을 고려하였다.

① 관개 단위면적당 필요방류량과 실제 방류량의 차이를 누가하는 방법

② 관개수의 필요정도에 따른 가중치를 고려하여 ①의 값에 Kung(1971)이 제안한 생육시기별 적정 담수정도인 Deep, Medium, Shallow의 경우에 가중치를 각각 1.5, 1.3, 1.0 곱하여 누가하는 방법

③ 한발시 담수심이 "0"이 됐을 때에는 ②의 값에 가중치 1.2를 곱하여 누가하는 방법

④ 한발이 계속되어 토양 수분이 圃場用水量 이하로 내려갔을 경우 ③의 값에 다시 가중치 1.5를 곱하여 누가하는 방법 등이다.

그런데, 실제 이 4가지 방법을 응용하여 WRDI를 계산한 결과, 이들이 그 크기에서만 차이가 날 뿐 서로 높은 상관관계를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 WRDI를 필요방류량과 실제방류량과의 차이를 누가한 값으로 정의한 ①의 방법을 사용하였다. WRDI는 식(16)과 같다.

$$WRDI = 1000 \sum_{t=1}^n (RR_{req} - RR_t) / IA \dots\dots\dots(16)$$

여기서, WRDI : 필요수량 결핍지수(mm)

RR<sub>req</sub> : 필요방류량(m<sup>3</sup>)

RR<sub>t</sub> : 실제방류량(m<sup>3</sup>)

IA : 관개면적(m<sup>2</sup>)

상수 1000은 단위 환산치이다.

##### 2. 放流係數 模型

저수지 물수지 모형의 구동을 위하여는 초기 조건 및 일별 물수지 인자 등의 추정과 함께 식(14)의 방류계수를 정해야 한다. 방류계수의 값은 1.0의 경우가 가장 이상적인 값이 된다. 그러나, 저수량이 부족하거나 없을 경우에는 부득이 방류계수의 값이 1.0 보다 작거나 0.0이 된다. 만약 상당기간 방류량이 1.0 보다 적은 경우에는 논벼의 경우는 한해를 입을 수 있다. 따라서, 물이 부족할 경우 방류계수를 적절히 조절함으로써 작물이 입을 한해를 최소화 할

수 있는 방안이 마련되어야 하며, 곧 계절별, 시기별 방류계수의 조정이 필요하게 된다.

방류계수의 결정방법은 대체로 다음의 3가지 방법이 가능할 수 있다. ① 저수량과 무관하게 방류계수를 1.0으로 저수량 전량을 급수하는 경우, ② 저수지의 저수율의 변화에 따라 방류계수를 변화시켜 방류하는 경우, ③, ②의 경우에서 작물의 필요수량을 고려하여 방류계수를 정하는 경우 등이다.

본 연구에서는 방류계수 결정을 위하여 다음의 7가지 경우로 세분하여 비교하였다.

가. 一定率法

저수량과 무관하게 방류계수를 1.0으로 하여 저수량 전량을 급수하는 경우를 일정율법(Constant Release Rate method, CRR)으로 정의하였다. 즉 방류계수는 식(17)과 같다.

$$CR = 1.0 \quad \text{if, } RR_{req} \leq S_t \quad \dots\dots(17)$$

$$CR = \frac{S_t}{RR_{req}} \quad \text{if, } RR_{req} > S_t$$

나. 平均 貯水率 曲線法

朴과 任(1991)<sup>7)</sup>은 전국 저수지의 순별 평균 저수율을 구하여, Fig. 2와 같이 최저 저수율 40% 이상을 유지할 수 있는 저수상태와 25% 이하의 저수상태로 구분하여 40% 이상의 경우는 정상급수, 25% 이하의 경우는 제한급수

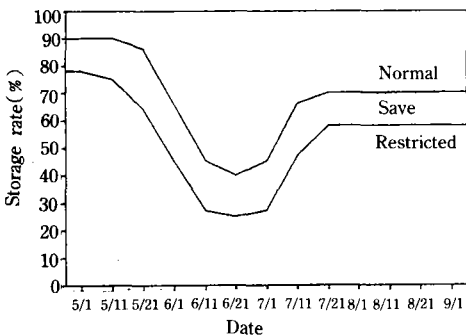


Fig. 2. Divisions of reservoir storage rate for mean storage curve method, MSC

25~40%의 경우는 절수급수로서 구분하였다. 본 연구에서는 이 방법을 평균 저수율 곡선법(Mean Storage Curve method, MSC)이라 하였으며 정상급수에서는 방류계수를 1.0으로 하고, 절수급수시는 활착기, 무효분얼기, 등숙기에는 0.85, 다른 생육기에는 1.0을 적용하였으며, 제한급수시에는 활착기, 무효분얼기, 등숙기에는 0.70, 유효분얼기, 수잉기 및 출수기에는 0.85를 적용하였다.

다. 時期別 貯水率 頻度分析法

朴과 任(1991)<sup>7)</sup>의 결과와 유사한 방류계수 조절방법으로, 관개기간의 순별 평균 저수율의 빈도분석을 통하여 방류수준을 정하는 것으로써 이를 순별 저수율 빈도분석법(Frequency Analysis method of Storage rate, FAS)이라 하였다.

경기도 소재 저수지의 1968~1987년의 20년간 순별 평균저수율을 자료로 부터 각 순별 저수율에 대하여 빈도분석한 결과, Perason Type III 분포에 가장 근접한 것을 알 수 있었다. 따라서, 시기별 저수율에 따른 방류수준의 구분은 Fig. 3과 같이 10년 빈도, 20년 빈도의 저수율을 기준하여 10년 빈도 이하의 경우는 정상급수를 적용하고, 20년 이상의 경우는 제한급수, 10~20년 빈도 저수율은 절수급수로 하였다. FAS에서 각 급수 수준별 방류계수는 정상급수 수준인 경우 1.0, 절수급수인 경우 0.8, 제한급수인

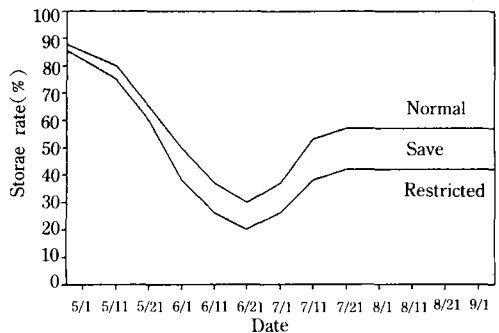


Fig. 3. Division of reservoir storage rates for frequency analysis method of storage method, FAS

경우는 0.6을 각각 적용하였다.

라. 貯水必要量 曲線法

金(1992)<sup>3)</sup>은 저수지의 조작특성을 고려하여 저수지가 필요수량을 전량 급수할 수 있는 양을 기준하여 그 양이 일정을 만큼 부족할 경우 방류계수를 감소시켜 조절하는 방법을 제시하였다. 이를 저수 필요량 곡선법(Storage Requirement Curve method, SRC)으로 하였다.

SRC의 계산 방법은 다음과 같다.

- ① 순별 평균 강수량, 증발량으로 부터 저수지의 물수지를 계산한다.
- ② 관개 종료일부터 개시일까지 역산으로 필요수량을 누가하여 필요 존치량을 구하여 순별 저수 필요량으로 한다.
- ③ 저수필요량으로 부터 90%, 70%, 50%, 30%의 저수량을 구한다.
- ④ 시기별 실제 저수량과 저수필요량 곡선을 비교하여 해당 절수 수준을 적용하여 방류계수를 정한다.

이상의 방법으로 부터 구한 京畿道 安城郡에 위치한 용설 저수지의 저수필요량 곡선은 Fig. 4와 같다. 각 시기별 방류계수는 방류 당시 저수율의 위치에 따라 그 위·아래 저수율의 평균값을 적용하였다.

마. 一定 最適 貯水率法

WRDI를 최소화 하는 저수율에 따른 방류계

수의 조합을 구하여 조작하는 것으로, 저수율별 방류계수 조합을 가정하고 Univariate method를 적용하여 WRDI의 값이 최소가 되는 조합을 정하도록 하였다.

Univariate method는 모형의 매개변수가 여러개 있을 때 한 매개변수의 값을 바꾸어 가면서 모형의 오차를 계산하여 오차를 최소로 하는 매개변수 값을 정하고 그 값을 고정시킨 후 다른 매개변수들을 같은 방법으로 정해 나가는 방법이다. 한번 전체 매개변수의 값이 정해지면 처음부터 다시 이를 수행하고 최소 오차를 보일 때까지 전체 과정을 반복하여 모형의 매개변수를 결정한다.

본 연구에서는 저수율을 10등분하여 WRDI를 최소화 하는 각 저수율별 방류계수 조합을 구하였는데 이를 일정 최적 저수율법(Constant Optimal Storage rate method, COS)으로 하였다. 여기서, 방류계수의 조절 최소값을 5%로 하여 이 값의 범위내에서 최적 방류계수를 정하도록 하였다.

바. 時期別 最適 貯水率法

저수율-방류계수의 관계를 관개기간 동안 순별로 변화하도록 하여 COS 모형과 같은 방법으로 최적 방류계수를 구하도록 하였으며, 본 연구에서는 이를 순별 최적 저수율법(Ten-day Optimal Storage rate method, TOS)이라 하였다.

사. 放流係數 最適化法

WRDI를 최소화 하는 최적 방류계수를 구하기 위하여 수학적 최적화 기법인 SUMT법(Kuester & Mize, 1973)<sup>18)</sup>을 이용하여 최적화 모형을 구성하였다.

SUMT법은 非線形의 制約條件을 가지는 多變量의 비선형 함수를 최소화하는 기법으로서 Fiacco와 McCormick(1968)<sup>14)</sup>에 의하여 개발되었다. 본 연구에서는 이를 방류계수 최적화법(Release rate Optimization Method, ROM)이라 하였다.

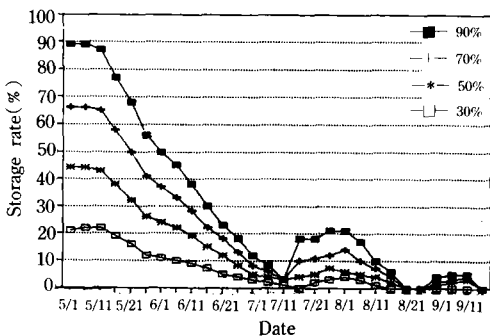


Fig. 4. Division of reservoir storage rate for storage requirement curve method, SRC



ROM에 사용된 목적함수와 제약조건식은 식 (18), (19)와 같다.

목적함수 :  $F = \min WRDI$   

$$= \sum_{i=1}^n (RR_{req} - RR_t) \dots\dots\dots(18)$$

제약조건 :  $0.0 < CR_k < 1.0 \dots\dots\dots(19)$

여기서,  $CR_k$  : 순별 방류계수,  
 $k$ 는 순을 나타내는 첨자이다.

ROM의 계산 순서는 다음과 같다.

① 저수지 조작 모형의 입력자료와 수정 목적함수의 초기치  $MF_{min}$ , 제약함수(penalty function)의 상수 CPF를 읽는다.

② 식(18)의 원래 목적함수와 제약함수로 식 (20)과 같은 수정 목적함수를 구성한다.

$$MF = F - CPF \cdot \sum_{i=1}^n \ln G_k \dots\dots\dots(20)$$

여기서, MF : 수정 목적함수  
 CPF : 상수( $\geq 0$ )

이며, 제약함수  $G_k$ 는 식(19)의 제약조건을 수정한 것으로 식(21)과 같다.

$$G_k = 1 - CR_k \dots\dots\dots(21)$$

③ 설정된  $CR_k$ 를 이용하여 저수지 조작모형으로 부터 F를 계산하고, 새로운 MF를 산정한다.

④ 새로 계산된 MF와 이전의  $MF_{min}$ 의 차이를 계산한다.

⑤ 최저 수정 목적함수 값을  $MF_{min}$ 로 치환하고 새로운  $CR_k$ 조합을 구성한다.

⑥ ④에서 계산된 값이 수렴한계( $10^{-4}$ ) 이내에 도달하면 결과를 출력, 계산을 종료하고 그렇지 않으면 CPF를 축소하여 ③으로 간다.

이상의 계산순서를 도시하면 Fig. 5와 같다.

### V. 實時間 貯水池 操作模型

실시간 저수지 조작에 있어서는 현재의 저수량과 미래의 사상인 유입량, 관개지역의 필요

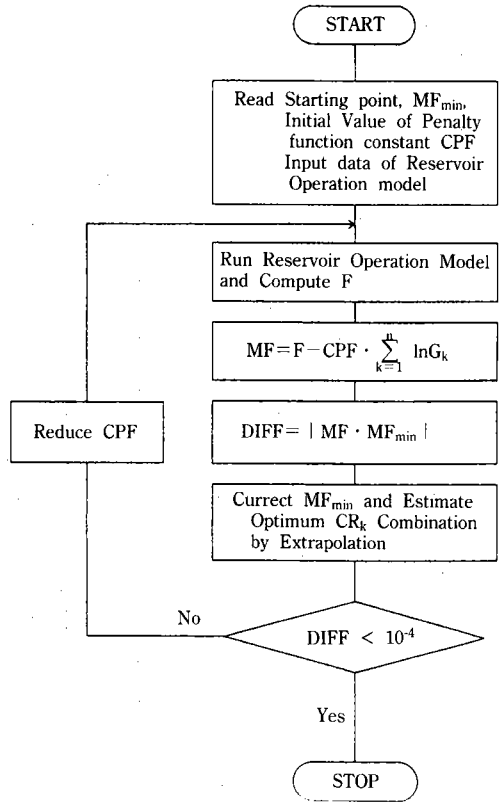


Fig. 5. Flow chart of release rate optimization model, ROM

수량 등을 고려하여 작물 생육에 필요한 양의 물을 급수할 수 있도록 해야 한다. 그러나, 유입량 및 필요수량 등은 미래의 강수 시공간 분포에 따라 좌우되기 때문에 이를 감안한 급수조절, 즉 방류계수의 조절이 선행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 최적 저수지 조작을 위하여 일 강수의 시공간 분포를 장기 및 단기 기상 예측을 실시하고, 그 결과를 근거로 하여 방류계수를 조정함으로써 적절한 급수가 될 수 있도록 모형을 구성하였다.

#### 1. 長期 氣象豫測 操作模型

장기 기상예측이란 현재일로부터 관개 종료일까지 강수발생 여부와 강수량, 증발량 등을

모두 재현하는 것을 말한다. 장기 기상예측 조작모형(Long-term Forecasting Reservoir Operation Model, LFROM)은 장기 기상예측을 통하여 저수지 유입량과 필요수량을 구하고, 이를 근거로 하여 WRDI를 최소로 하는 시기별 방류계수를 정하여 급수하는 방법이다. LFROM에서는 생육기간의 경과에 따라 실현된 실측 자료를 보완, 수정하게 되어 관개기간 후반에 이르러서는 보다 높은 정도의 조작을 기대할 수 있다.

LFROM의 계산 단계를 상술하면 다음과 같다.

- ① 조작계획 시작 전일( $t-1$ 일)의 저수량, 포장담수심 자료를 입력한다.
- ②  $t$ 일로 부터 강수 유무에 따라 관개기간의 일 강수량, 소형 Pan 증발량을 모의발생한다.
- ③ ②의 결과를 이용하여 방류계수 모형을 적용, WRDI를 최소로 하는 시기별 방류계수를 구한다.
- ④ 관개기간의 경과에 따라 ①~③을 반복하여 조작계획을 수정한다.

이상의 장기 기상예측 조작모형(LFROM)의 계산단계를 도시하면 Fig. 6과 같다.

## 2. 短期 氣象豫測 操作模型

단기 기상예측이란 기상청의 강수예보를 이용하여 강수 발생일을 입력하고 이에 따라 증발량과 우천시 강수량 만을 재현해 내는 과정을 말한다. 단기 기상예측 조작모형(Short-term Forecasting Reservoir Operation Model, SFROM)은 기상청의 일기예보를 이용하여 미래의 강수 발생 상황을 입력함으로써 강수량 예측 모형(DRFM)의 결과를 개선하여 저수지 조작의 정도를 높이는 조작 방법이다. 기상청의 주간 또는 순별 기상예보를 근거로 하여 청명일과 우천일을 입력하고, 이에 따라 강수량과 소형 Pan 증발량을 모의발생함으로써 동기간의 기상 상황에 가까운 조건에 따른 저수지 조작을 계

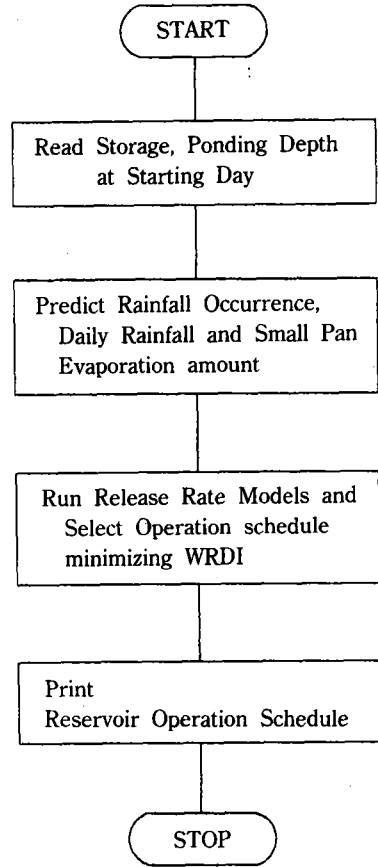


Fig. 6. Flow chart of long-term forecasting reservoir operation model, LFROM

획하며 그 이후부터 관개 종료일까지의 조작은 장기 기상예측과 동일한 방법으로 조작 계획을 수립하도록 구성하였다.

SFROM의 계산 단계를 상술하면 다음과 같다.

- ① 조작계획 시작 전일( $t-1$  일)의 저수량, 포장담수심 등 초기자료를 입력한다.
- ②  $t$ 일로 부터 기상예측 종일( $t+n-1$  일)까지 단기예측 기간( $n$  일) 동안의 우천일을 입력한다.
- ③ 예측 기간 동안의 일 강수량과 소형 Pan 증발량을 모의발생한다.
- ④  $t+n$  일부터 관개 종료일까지의 일강수량,

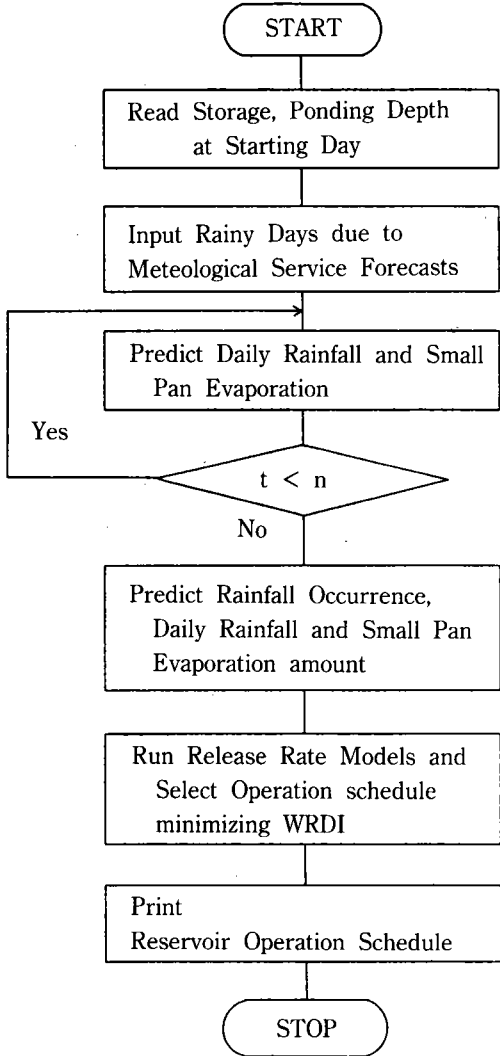


Fig. 7. Flow chart of short-term forecasting reservoir operation model, SFROM

일증발량을 장기예보 모형과 같은 방법으로 모의발생한다.

⑤ 장기예보 조작모형(LFROM)의 ③~④ 단계를 실시한다.

⑥ 관개기간의 경과에 따라 ①~⑤ 단계를 반복하여 조작 계획을 수정한다.

이상의 단기 기상예측 조작모형(SFROM)의 계산 단계를 도시하면 Fig. 7과 같다.

## VI. 요약 및 결론

1. 관개용 저수지의 최적 운영을 위하여 최적 운영을 기상예측으로부터 계산된 저수지 유입량과 저수량 등을 이용하여 저수지 물수지에 의한 저수지 조작 모형을 개발하였다.

2. 저수지 유입량은 3개의 Tank로 구성된 수정 Tank 모형을 응용하여 계산하였다.

3. 저수지 방수량은 포장 물수지로부터 계산된 필요수량에 방류계수를 곱하여 계산하였다.

4. 작물 필요수량의 충족정도를 표시하기 위하여 일별 필요수량과 저수지 방류량의 차이를 누가한 필요수량 결핍지수(WRDI)를 개발하고 이로부터 최적 저수지 조작방법을 결정하였다.

5. 저수지 조작방법으로 일정률 모형(CRR), 평균저수율 곡선법(MSC), 순별 저수량 빈도 분석법(FAS), 저수 필요량 곡선법(SRC), 일정 최적 저수율법(COS), 순별 최적 저수율법(TOS), 그리고 방류계수 최적화법(ROM) 등의 7가지를 모형화하였다.

6. 저수지의 실시간 조작을 위하여 장기 기상예측 조작 모형(LFROM)과 단기 기상예측 조작모형(SFROM)을 개발하였다.

## 參 考 文 獻

1. 金秉辰, 1993. 氣象豫報를 考慮한 灌溉用貯水池의 最適 操作 模型, 서울大學校 大學院 博士學位 論文.
2. 金秉辰, 朴承禹, 1993. 氣象豫報를 考慮한 灌溉用貯水池의 最適 操作 模型 (I), 韓國農工學會誌 掲載 豫定.
3. 金泰喆, 1992. 農業 水資源 綜合管理시스템 開發-貯水池 日別 물收支 模型 (II), 忠南大學校 農業科學研究所 研究報告書, 農林水産部, 農漁村振興公社.
4. 金顯榮, 朴承禹, 1986. 流域特性에 따른 탱크模型 媒介變數의 變化, 韓國農工學會誌,

- 28(2), pp. 42-52.
5. 金顯榮, 朴承禹, 1988. 灌溉用 貯水池의 日別流入量과 放流量의 模型 發生 (I), 韓國農工學會誌, 30(1), pp. 50-62.
  6. 金顯榮, 朴承禹, 1988. 灌溉用 貯水池의 日別流入量과 放流量의 模擬 發生 (II), 韓國農工學會誌, 30(2), pp. 95-104.
  7. 朴承禹, 任相浚, 1991. 專門家 시스템을 利用한 灌溉用 貯水池 操作, 韓國農工學會誌, 33(1), pp. 100-109.
  8. 李南鎬, 鄭夏禹, 朴承禹, 1988. 半月地區의 日別 旱 淡水深의 特性分析, 韓國農工學會誌, 30(4), pp. 117-126.
  9. 任相浚, 1991. 專門家 시스템을 利用한 灌溉用 貯水池 操作, 서울大學校 大學院 碩士學位 論文.
  10. 鄭夏禹 外, 1984-1986. 作物消費水量 算定 方法 의 定立, 農林水産部, 農業振興公社, 서울大學校 農科大學 附屬 農業開發研究所.
  11. 許遺萬, 1992. 中小流域의 日別 用水需給解析을 위한 河川網 模型의 開發, 서울大學校 大學院 博士學位 論文.
  12. Chesnes, J. L., D. L. Cochran, and J. E. Hook, 1986. Predicting seasonal irrigation water requirements on coarse-textured soils, Trans. of the ASAE, 29(4), pp. 1054-1057.
  13. Dastane, N. G., 1974. Effective rainfall in irrigated agriculture, FAO, Irrigation and Drainage Paper No. 25, FAO, UN, Rome, Italy.
  14. Fiacco, A. V. and G. P. McCormick, 1968. Nonlinear sequential unconstrained minimization techniques, John Wiley & Sons, Inc.
  15. Heermann, D. F. H. H. Shull, and R. H. Mickelson, 1974. Center pivot design capacities in eastern Colorado, J. Irrig. and Drain. Div., ASCE, 100(IR2), pp. 127-141.
  16. Hiler, E. A., 1969. Quantitative evaluation of crop-drainage requirement, Trans. of the ASAE, 12(4), pp. 499-505.
  17. Hood, C. P., R. W. McClendon and J. E. Hook, 1987. Computer analysis of soybean irrigation management strategies, Trans. of the ASAE, 30(2), pp. 417-423.
  18. Kuester, J. L. and J. H. Mize, 1973. Optimization technique with FORTRAN, McGRAW-HILL, Inc.
  19. Martin, D. L. et al., 1983. Optimal seasonal center pivot management ASAE paper No. 83-2004, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
  20. Palmer W. C., 1965. Meteorologic drought, Res. Paper No. 45, U. S. Bureau, Washington, D. C.
  21. Villalobos, F. J. and E. Fereres, 1989. A simulation model for irrigation scheduling under variable rainfall, Trans. of the ASAE, 32(1), pp. 181-188.
  22. Von Bernuth, R. D. et al., 1984. Irrigation system capacities for corn production in Nebraska, Trans. of the ASAE. 27(2), pp. 181-188.