

위험도 평가기준을 적용한 저수지 최적운영방안 연구(II)
(한강수계 저수지군을 중심으로)

A Study of Optimal Operation Policy using Risk Evaluation Criteria(II)
(for the Han River Reservoirs System)

박 명 기* / 김 재 한** / 정 관 수***

Park, Myung Ky / Kim, Jae Han / Jung, Kwan Sue

Abstract

In this study, the formulation of the developed mixed-integer programming model for a multi-reservoir system including hydro electric power generation (Park et al., 2001) has been improved for multiple reservoir system operation using risk evaluation criteria. Sequential linear programming(SLP) was applied for the linearization of the hydro-electric energy term in the model. In order to allocate monthly reservoir release reasonably the value of weight for hydro-electric energy was assigned by level of power generation hour. The improved model was applied to the five reservoirs system in the Han river. And could be confirmed the availability of new formulation applying risk evaluation criteria.

keywords : mixed-integer programming, sequential linear programming, risk evaluation criteria, optimal reservoirs system operation, Han river basin

요 지

위험도 평가기준을 발전함수를 고려하여 단일저수지에 적용한 박명기 등(2001)의 혼합정수계획법 모형을 다중 저수지군 운영에 적합하도록 개선하였다. 본 모형중의 축차선형계획기법(SLP)은 목적함수중 수력발전함수의 선형화를 위하여 적용되었으며, 저수지 방류량의 합리적인 월별 방류배분을 위하여 수력발전량에 대한 가중치를 발전시간 수준별로 적용하도록 정식화요소에 반영하였다. 개선된 모형은 한강수계 5개 저수지군에 시험적용 하였으며, 수계내 연계운영을 위한 복합저수지군의 최적연계에 본 위험도 평가기준을 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 혼합정수계획법, 축차선형계획기법, 위험도 평가기준, 저수지군 최적운영, 한강수계

* 충남대학교 대학원 토목공학과 박사과정수료, 한국수자원공사 물관리종합상황실
 Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Eng., Chungnam National Univ., Taejon 305 764, Korea
 (E mail : mkpark11@hananet.net)

** 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수, 공학박사
 Professor, Dept. of Civil Eng., Chungnam National Univ., Taejon 305 764, Korea
 (E mail : jhkim@hydro.enu.ac.kr)

*** 충남대학교 공과대학 토목공학과 조교수, 공학박사
 Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Chungnam National Univ., Taejon 305 764, Korea
 (E mail : ksjung@hanbat.cnu.ac.kr)

1. 서론

댐의 기능은 홍수조절과 적정 목표 방류량의 공급, 그리고 하천수질보존을 위한 적정유량 유지, 수력발전 등에 있다. 결국 댐의 최적운영방안이란 이러한 댐의 기능들을 공공성의 측면에 부합하도록 운영하고, 이와 함께 부가적인 경제적 이익을 추구하도록 결정되어진다. 이러한 최적 운영방안에 의한 결과로서 댐의 적정 기능이 정의되고 이에 따라 댐개발의 규모나 중단기 운영방안의 수립이 가능하게 된다. 더욱이 오늘날과 같은 사회적인 NIMBY 현상 및 NGO의 활동이 활성화된 시점에서 신규 수자원의 개발에는 그 규모 및 위치에 대한 명확한 당위성을 필요로 하는 바 이를 위한 방안으로 최적운영방안의 관점에서 댐의 구체적 기능을 도출하는 문제는 현실적 가치를 가지며, 신규 수자원확보방안의 어려움에 따른 비구조적 기능개선을 통한 댐의 기능 증대를 도모하는 요구도 보다 절실해지고 있다.

기존 저수지군 최적운영방안의 정식화과정에서 주로 사용되는 목적함수는 용수공급에 대한 보장수량 및 연간 수력발전량의 최대화이다. 그러나 이러한 Max-Min 개념의 보장수량 최대화 개념은 시스템에서 가지는 물 부족에 대한 상황을 내부적으로 반영할 수 없으며 실제 운영상황에서는 이러한 물부족이 예상되거나 진행되고 있는 상황에 대하여 적정 운영을 결정할 수 있는 최적화 모형의 도입이 요구된다. 본 연구의 목적은 박명기 등(2001)이 다목적댐에 적용하였던 단일댐에 대한 3가지 위험도 평가기준(신뢰도, 복원도, 부족심도)을 실제 유역물관리에 적용할 수 있는 방안을 제시하는데 있으며, 이를 위하여 수계 불관리에 필요한 현실적인 요인들(발전함수의 적용단계, 증발 효과, 댐하류 취수상황)을 감안하여 복합 저수지군을 대상으로 목적함수 및 제약조건을 개선하였다. 또한 개선된 정식화기법의 적용평가를 위하여 한강수계 5개 저수지군을 대상으로 최적 연계운영모형을 개발하고 그 실효성을 평가하였다.

2. 위험도 평가기준에 대한 최적화 연구동향

Hashimoto 등(1982)에 의해 처음으로 제시된 저수지 운영의 3가지 수행성 평가기준은 다음과 같은 관점에서 도출되었다. 이 논문에서는 실패(failure)를 수행의 표준 또는 지켜야할 계약량과 같은 시스템의 임계치에 불만족스러워지는 출력치라고 정의하고, 다음과 같이 그 개념을 제시하였다.

첫째, 얼마나 자주 시스템의 실패(failure)가 발생하

는가(reliability)

둘째, 시스템에 실패(failure)가 발생하였을 때, 얼마나 빨리 시스템이 만족스러운 상태로 회복될 수 있는가(resilience)

셋째, 실패(failure) 발생결과가 얼마나 심각한가(vulnerability)

2.1 기존 연구동향

신뢰도(reliability)는 수자원계획에 있어서 폭넓게 사용되고 있는 개념으로서 최초의 신뢰도(reliability)에 대한 개념 도입은 Revelle 등(1969)의 선형결정론에 의한 기회계약기법 적용으로부터였다. Loucks 등(1981)은 다양한 저수지 평가 지수들에 대한 사용성을 기술한 바 있으며, 이후에도 Hashimoto 등(1982), Moy 등(1986), Bayazit 등(1990), Srinivasan 등(1999)에 의한 용수공급 저수지의 운영을 위한 연구가 신뢰도(reliability), 복원도(resilience), 부족심도(vulnerability)의 3가지 기준을 통해 제시된 바 있다. Moy 등(1986)의 논문은 혼합정수계획기법을 적용하여 평가기준들을 명확하게 최적화 모형 내에 포함시켰지만 저수지의 복원도 부분은 연속 물부족 발생의 최대치로서 부분적으로만 고려하였다. Srinivasan 등(1999)은 이러한 Moy 등(1986)의 논문이 가지는 결점을 보완하기 위하여 용수 불만족상황(failure)으로부터 정상으로 회복되어 가는 과정을 추적하는 2개의 정수형 변수를 추가함으로써 복원도에 대한 정량화를 개선하였다. 박명기 등(2001)은 이러한 3가지 위험도 평가기준을 다목적댐에 대해 적용하여 국내 댐운영에 적용한 바 있다.

2.2 단일댐 용수공급 목적 저수지운영을 위한 정식화

Moy 등(1986) 및 Srinivasan 등(1999)에 의하여 제시된 용수공급목적의 단일댐에 관한 신뢰도, 복원도, 부족심도에 대한 평가기준 정식화는 식(1)~식(11)과 같다.

$$\text{Minimize } \bar{Z} = 0.01 \sum_{t=1}^T M_t + D_{\max} \quad (1)$$

subject to

$$S_t = S_{t-1} + I_t - X_t - W_t \quad \forall t \quad (2)$$

$$S_t - C \leq 0 \quad \forall t \quad (3)$$

$$X_t + M_t \leq D_t \quad \forall t \quad (4)$$

$$M_t - Y_t \cdot D_t \leq 0 \quad \forall t \quad (5)$$

$$M_t - D_{\max} \leq 0 \quad \forall t \quad (6)$$

$$\sum_{k=K}^{K+N} Y_t \leq N \quad K=1,2,\dots,(n-N) \quad \forall t \quad (7)$$

$$S_n - S_0 \geq 0 \quad (8)$$

$$\sum_{t=1}^n Y_t = P \quad (9)$$

$$Y_t + Y_{t-1} + k_t - 2 R_t = 0 \quad \forall t \quad (10)$$

$$0.5 \sum_{t=1}^n k_t - \gamma \sum_{t=1}^n Y_t \geq 0 \quad \forall t \quad (11)$$

- 여기서, S_t : 기간 t 종점에서의 유효 저수량
 X_t : 기간 t 동안의 저수지 방류량 (spill 량 제외)
 W_t : 기간 t 동안의 저수지 수분방류량
 M_t : 기간 t 동안의 물부족
 D_{\max} : $\max.(M_t)$
 A_t : 연속된 물부족 기간 수(정수형)
 E_t : 연속 물부족기간 산정을 위한 변수 A_t 의 보완변수
 A_{\max} : $\max.(A_t)$
 Y_t : 기간 t 동안 물부족이 생기면 1, 아니면 0
 n : 분석이 수행된 총 기간수
 P : 총 물부족 발생기간수(모형 입력조건)
 N : 연속 물부족 발생기간(모형 입력조건)
 I_t : 기간 t 동안 저수지 유입량
 D_t : 기간 t 동안 목표 수요량
 C : 저수지 용량(유효저수용량 개념)
 k_t, R_t : 0, 1 정수형 변수들
 γ : 하한치로서 복원도(resilience)
 단, 모든 위 변수들은 0이상

2.3 수력발전함수 정식화

박명기 등(2001)이 언급한 바와 같이 선형계획문제

에 대한 수력발전 최적화의 대표적 연구사례로는 Grygier 등(1985)과 Martin 등(1983, 1987)에 의한 축차선형계획법(Sequential Linear Programming)의 적용성 검토가 대표적이다. 국내에서도 이규탁 등(1995)에 의하여 급강수계 대청다목적댐에 대하여 적용된 바 있으며 이를 낙동강수계 4개 다목적댐군에 대하여 최영송 등(2000)에 의해 적용된 바 있다. 그러나 기존 연구에서와 같이 전체 총 발전량 최대화의 발전함수 최적화 방식의 경우, 저수지의 월별 방류계획은 특정 원에 저수위의 최대치인 조건에서 집중방류되는 특성을 나타내게 된다. 그러나 실제 운영조건에서는 댐별 발전기 설계에 반영되어지는 1차에너지 및 2차에너지의 발전편의 단가구분이 존재하며 전력사용이 비교적 적은 심야 발전시간에는 전력수급계획에서 수력발전의 가치가 급격히 감소하여 현실적 발전편의를 기대하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 발전시간별로 3단계로 수력발전량을 구분하여 서로 다른 가중치를 적용할 수 있도록 하여 사용수량의 시간적 편중을 완화하도록 시도하였다.

수력에너지는 식(12)와 같이 표현된다.

$$EGY_t = 9.8 \cdot \eta \cdot X_t \cdot H_t / 3.6 \quad (12)$$

여기서, EGY_t : t기간 중 생산되는 수력에너지 (MWh)

η : 수차와 발전기의 합성 효율

X_t : 발전 사용수량(106m³)

H_t : 발전기 유효낙차(m)

위 식(12)는 2개의 의사결정 변수의 곱으로 표현된 비선형 방정식이다. 따라서 댐의 저수량활용에 따른 이수목적 조절효과가 크기 때문에 수력발전량 산정을 위해서는 비선형에 대한 고려가 필요하다.

식(12)의 발전기 유효낙차(H_t)는 이용수심구간에서 식(13)과 같이 표현될 수 있다.

$$H_t = a \cdot \overline{S}_t^b - TWL - HL \quad (13)$$

표 1. 발전시간을 고려한 3단계의 편익고려

단계별	적용시간(Hr)	정수형 변수			발전량 가중치	비고
		IT_1	IT_2	IT_3		
1 단계	P	1	0	0	1.0	
2 단계	16 - P	1	1	0	0.7	
3 단계	8	1	1	1	0.1	
총량	24					

여기서, a, b : 저수량으로부터 댐수위 산정을 위한 회귀상수

\bar{S}_t : t 기간중 평균저수량(106m)

TWL : 평균방수위(EL. m)

HL : 손실수두(m)

그리고 발전시간을 고려하여 표 1과 같이 3단계로 발전량에 대한 가중치를 부여하면 각 단계별 사용수량은 식(14) 및 식(15)와 같이 표현할 수 있다.

$$X_t = \sum_{j=1}^3 TU_{j,t} \quad \forall t \quad (14)$$

여기서, $TU_{j,t}$: 각 단계에 상당한 사용수량

또한 각 단계별 사용수량에 대한 상한치는 식(15)로서 제약할 수 있으며, 표 1의 정수형 변수에 대한 관계를 설정하기 위해서는 식(16)과 같은 추가적인 정수형 변수 제약이 필요하다.

$$TU_{j,t} \leq IT_{j,t} \cdot T_{\max_j} \quad \forall t \quad (15)$$

여기서, $IT_{j,t}$: 각 단계별 0, 1 정수형 변수

T_{\max_j} : j단계 적용 발전시간을 고려한 최대 사용수량

$$IT_{3,t} \leq IT_{2,t} \leq IT_{1,t} \quad \forall t \quad (16)$$

식(12)를 최영송 등(2000)이 전개한 축차선형계획기법에 의한 선형화 조건으로 정리하면, 발전시간별 가중치를 고려한 최종적인 수력발전 정식화가 식(17) 및 식(18)과 같이 얻어질 수 있다.

$$EGY_t = \sum_{j=1}^3 EG_{j,t} \quad \forall t \quad (17)$$

$$EG_{j,t} = F_{j,t} \cdot \bar{S}_t + G_{0,t} \cdot TU_{j,t} + H_{j,t} \quad \forall t \quad (18)$$

여기서, $F_{j,t} : 9.8\eta/3.6 \cdot a \cdot TU_{j,t}^o \cdot b \cdot \bar{S}_t^{b-1}$

$G_{0,t} : 9.8\eta/3.6 \cdot a \cdot (\bar{S}_t^b - TWL - HL)$

$H_{j,t} : -9.8\eta/3.6 \cdot a \cdot TU_{j,t}^o \cdot b \cdot \bar{S}_t^o$

2.4 상류 취수량 처리를 위한 정식화

대규모 취수원을 전제로 한 다목적 저수지의 경우에

는 댐 상류의 취수량을 상수로 취급하여 정식화의 우변항으로 처리할 수도 있으나 물부족이 심각한 경우 infeasible condition이 되어 모형내에서 취수량과 하류 방류량을 연계할 수 있는 추가적인 정식화가 필요하다.

본 연구에서는 상류 취수량과 하류 방류량의 우선순위를 상류 취수량에 우선하였다. 따라서 팔당댐 지점의 취수량과 사용수량에 대한 정식화는 취수량이 1차적으로 충족된 이후에 발전사용수량 등의 하류 방류가 가능하도록 식(19)~식(21)과 같이 고려되었다.

$$DIV_t \leq DIV_{\max_t} \quad \forall t \quad (19)$$

$$IDV_t \leq DIV_t / DIV_{\max_t} \quad \forall t \quad (20)$$

$$X_t - IDV_t \cdot B \leq 0 \quad \forall t \quad (21)$$

여기서, IDV_t : 0, 1 정수형 변수

B : X_t 를 표현할 수 있는 충분히 큰 값

DIV_t : 팔당댐상류 취수량

DIV_{\max_t} : 팔당댐상류 취수량 상한치

2.5 저수지 수면증발량 처리

Loucks 등(1981)은 선형계획기법에 의한 저수지군 최적화 모형에서 증발량에 대한 적용식을 식(22)와 같이 제안하였다.

$$EVA_t = AR_a \cdot e_t \cdot \left(\frac{S_{t-1} + S_t}{2} \right) + AR_0 \cdot e_t \quad (22)$$

여기서, EVA_t : t기간중의 저수지 수면증발량

e_t : t기간중의 단위면적당 평균 증발율

AR_a, AR_0 : 저수량 대 저수면적간의 회귀상수(그림 1 참조)

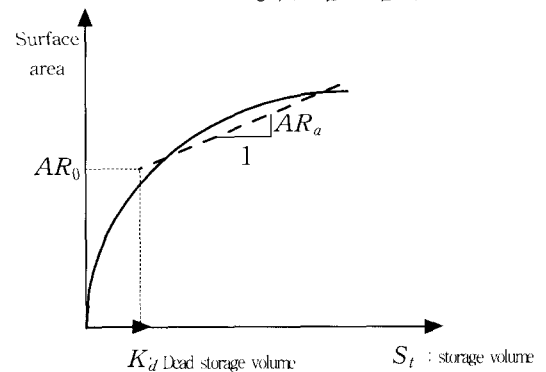


그림 1. 저수량-저수면적간의 선형근사화

그러나 운영모형의 적용단계에서 $e_{i,t}$ 는 각 기간별 평균치로 적용할 때 식(23)과 같이 정리할 수 있다.

$$EVA_t = AR'_{a,t} \cdot \left(\frac{S_t + S_{t+1}}{2} \right) + AR'_{b,t} \quad (23)$$

여기서, $AR'_{a,t}, AR'_{b,t}$: 월별 저수량 대 증발량간의 회귀상수

3. 한강수계 저수지군 최적화에 대한 적용

3.1 한강수계 저수지군 정의

그림 2는 본 연구의 대상인 소양강, 충주, 화천, 청

평, 팔당댐을 포함한 모식도이다. 수계관리를 위한 하류 주요 제어지점은 향후 확장성을 고려하여 주요 댐지점 하류에 1개씩 고려하였으며, 각 제어지점간 합류점에 합류수에 대한 확인 및 제어를 위한 추가 제어점(node)을 고려하여 총 8개 제어지점으로 적용하였다.

3.2 한강수계 저수지군 연계운명을 위한 정식화

기존 연구에서는 신뢰도, 복원도, 부족신도에 대한 검토를 용수공급목적의 단일댐을 대상으로 제시 및 검토하여왔다. 그러나 다목적댐을 포함한 수계관리를 위해서는 정식화 요소중 발전에 대한 항이 포함되어야하며, 전체 댐에 의한 하류 물수급 상황 고려가 필요하게 되는

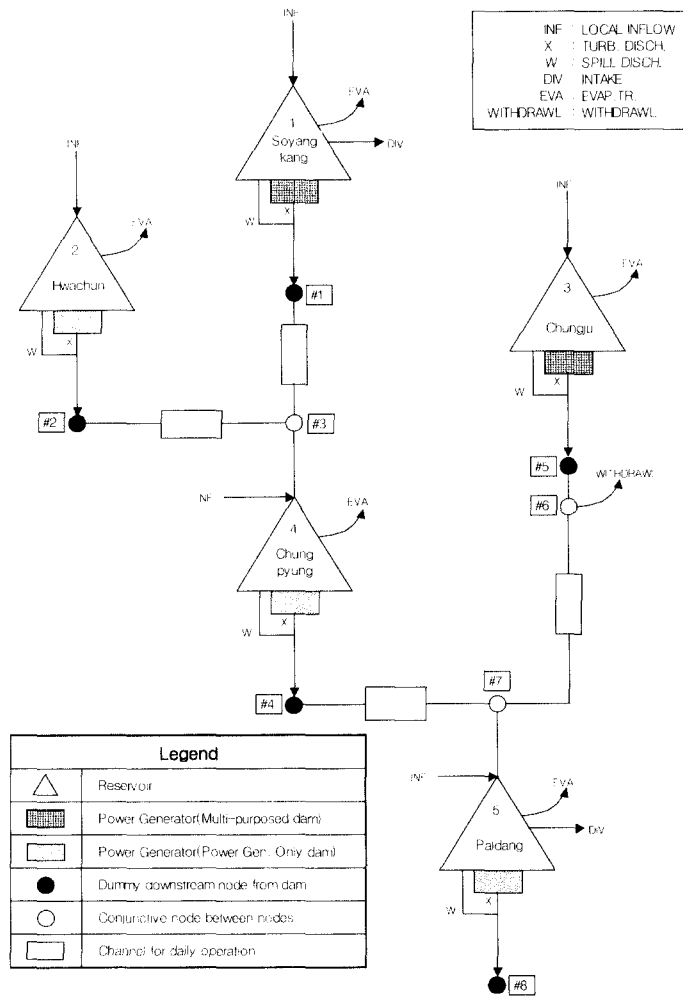


그림 2. 한강수계 저수지군 정의

데, 이럴 경우 목적함수항의 과다로 인한 적정 Trade-off 분석이 곤란해지며, 각 목적별 경향을 파악하기가 어렵게 된다. 그러나 한강수계는 주요 용수수급이 팔당댐지점에서 이루어지므로 물부족에 대한 검토는 팔당댐 지점으로 한정하여 고려할 수 있었으며, 수계내의 세부구간별 하천유지용수 고려는 기존 Max-Min개념에 의한 보장수량 증대개념을 적용할 수 있도록 하였다.

앞에서 정리된 정식화 내용을 한강수계 저수지군에 적용하기 위한 정식화 개선결과는 총 5개 저수지군에 대하여 식(24)~식(60)에 정리하였다. 또한 발전부분에 대한 정식화는 저수지 이용수심 구간이 큰 소양강, 충주, 화천댐에 대해서만 축차선형계획기법으로 고려하였으며, 청평 및 팔당댐의 경우에는 Trezos(1991)의 경우와 같이 이용수심(draw-down)이 작은 유희식(Run-of-River type) 형태로 고려하여 평균 유효낙차를 적용하여 발전량 산정에 적용하였다.

$$\begin{aligned} \text{MAX } \bar{ZZ} = & -0.01 \sum_{r=1}^8 \sum_{t=1}^n M_{l,t} - \sum_{r=1}^8 \text{coef}_{DMAX_r} \cdot DMAX_r \\ & + \sum_{r=1}^5 \left(\text{coef}_{XMIN_r} \cdot XMIN_r + \sum_{j=1}^3 \text{coef}_{EG_{r,j}} \cdot \left(\sum_{i=1}^n EG_{r,j,i} \right) \right) \end{aligned} \quad (24)$$

subject to

$$S_{1,t} = S_{1,t-1} + I_{1,t} - X_{1,t} - W_{1,t} - UDU_t - EVA_{1,t} \quad \forall t \quad (25)$$

$$S_{2,t} = S_{2,t-1} + I_{2,t} - X_{2,t} - W_{2,t} - EVA_{2,t} \quad \forall t \quad (26)$$

$$S_{3,t} = S_{3,t-1} + I_{3,t} - X_{3,t} - W_{3,t} - EVA_{3,t} \quad \forall t \quad (27)$$

$$S_{4,t} = S_{4,t-1} + I_{4,t} - X_{4,t} - W_{4,t} + FLW_{3,t} - EVA_{4,t} \quad \forall t \quad (28)$$

$$S_{5,t} = S_{5,t-1} + I_{5,t} - X_{5,t} - W_{5,t} - DIV_t + FLW_{7,t} - EVA_{5,t} \quad \forall t \quad (29)$$

$$EVA_{r,t} = A1_{r,t} \cdot (S_{r,t-1} + S_{r,t}) \cdot 0.5 + A2_{r,t} \quad \forall t \quad (30)$$

$$FLW_{1,t} = X_{1,t} + W_{1,t} \quad \forall t \quad (31)$$

$$FLW_{2,t} = X_{2,t} + W_{2,t} \quad \forall t \quad (32)$$

$$FLW_{3,t} = FLW_{1,t} + FLW_{2,t} \quad \forall t \quad (33)$$

$$FLW_{4,t} = X_{4,t} + W_{4,t} \quad \forall t \quad (34)$$

$$FLW_{5,t} = X_{3,t} + W_{3,t} \quad \forall t \quad (35)$$

$$FLW_{6,t} = FLW_{5,t} - INTAKE_{YEOJU,t} \quad \forall t \quad (36)$$

$$FLW_{7,t} = FLW_{4,t} + FLW_{6,t} \quad \forall t \quad (37)$$

$$FLW_{8,t} = X_{5,t} + W_{5,t} \quad \forall t \quad (38)$$

$$S_{r,n} - S_{r,0} \geq 0 \quad \forall t \quad (39)$$

$$SMIN_r \leq S_{r,t} \leq SMAX_{r,t} \quad \forall r, t \quad (40)$$

$$X_{r,t} - XMIN_r \geq 0 \quad \forall r, t \quad (41)$$

$$b_{r,t} \leq S_{r,t} / SMAX_{r,t} \quad \forall r, t \quad (42)$$

$$W_{r,t} - b_{r,t} \cdot B \leq 0 \quad \forall r, t \quad (43)$$

$$DIV_{5,t} \leq DIVmax_{5,t} \quad \forall t \quad (44)$$

$$IDV_{5,t} \leq DIV_{5,t} / DIVmax_{5,t} \quad \forall t \quad (45)$$

$$X_{r,t} - IDV_{5,t} \cdot B \leq 0 \quad \forall t \quad (46)$$

$$FLW_{l,t} + M_{l,t} \geq D_{l,t} \quad \forall l, t \quad (47)$$

$$M_{l,t} - DMAX_l \leq 0 \quad \forall l, t \quad (48)$$

$$M_{l,t} - Y_{l,t} \cdot D_{l,t} \leq 0 \quad \forall l, t \quad (49)$$

$$\sum_{i=K}^{K+N_i} Y_{l,t} \leq N_l \quad K=1,2,\dots,(n-N_i) \quad \forall l, t \quad (50)$$

$$\sum_{l=1}^n Y_{l,t} = D_t \quad \forall t \quad (51)$$

$$Y_{l,t} + Y_{l,t+1} + k_{l,t} - 2 R_{l,t} = 0 \quad \forall l, t \quad (52)$$

$$0.5 \sum_{l=1}^n k_{l,t} - \gamma_l \sum_{l=1}^n Y_{l,t} \geq 0 \quad \forall l, t \quad (53)$$

$$X_{r,t} - Tmax_{r,t} \leq 0 \quad \forall r, t \quad (54)$$

$$-\Delta_{S_r} \leq \frac{(S_{r,t} - S_{r,t}^0)}{S_{r,t}^0} \leq \Delta_{S_r} \quad \forall t, (r=1,2,3) \quad (55)$$

$$-\Delta_{X_r} \leq \frac{(X_{r,t} - X_{r,t}^0)}{X_{r,t}^0} \leq \Delta_{X_r} \quad \forall t, (r=1,2,3) \quad (56)$$

$$EG_{r,j,t} - F_{r,j,t} \cdot \bar{S}_{r,t} - G_{r,t} \cdot TU_{r,j,t} - H_{r,j,t} = 0 \quad \forall r, j, t \quad (57)$$

$$X_{r,t} = \sum_{j=1}^3 TU_{j,t} \quad \forall r, t \quad (58)$$

$$TU_{r,j,t} \leq IT_{r,j,t} \cdot Tmax_{r,j} \quad \forall r, t, j \quad (59)$$

$$IT_{r,3,t} \leq IT_{r,2,t} \leq IT_{r,1,t} \quad \forall r, t \quad (60)$$

여기서, $S_{r,t}$: 댐별 기간 말기 저수량
 $I_{r,t}$: 댐별 기간별 자체 유입량
 $X_{r,t}$: 댐별 기간별 발전사용수량
 $W_{r,t}$: 댐별 기간별 수문방류량
 $EVA_{r,t}$: 댐별 기간별 수면증발량
 $A1_{r,t}$: 수면증발량 산정을 위한 계수

($AR'_{u,t}$ 에 상당)

$A2_{r,t}$: 수변증발량 산정을 위한 계수
($AR'_{0,t}$ 에 상당)

UDU_l : 소양강댐 상류 우두보 취수량

$SMIN_r$: 댐별 최소 저수량 제약(LWL 상당 저수량)

$SMAX_{r,t}$: 댐별 최대 저수량 제약(NHWL 및 RWL 상당 저수량)

$FLW_{l,t}$: 노드별 하천유량

$M_{l,t}$: 노드별 물부족량

$XMIN_r$: 댐별 최소방류량(Soft Bound)

$D_{l,t}$: 노드별 목표 용수공급량

$Y_{l,t}$: 노드별 물부족 발생 0.1 정수형 변수

p_l : 노드별 최대 물부족 발생기간(입력상한)

N_l : 노드별 최대 연속물부족 발생기간(입력상한)

γ_l : 노드별 복원도(입력상한)

$DMAX_l$: 노드별 최대 물부족 발생량

$k_{l,t}$: 노드별 복원도 산정을 위한 cross-over발생 횟수(정수형)

$R_{l,t}$: 노드별 복원도 산정을 위한 dummy 변수(정수형)

$b_{r,t}$: 댐별 spill 발생을 알리는 0, 1 정수형 변수

B : 충분히 큰 값(최대 가능 수분방류량 보다 큰 값)

$S^0_{r,t}$: SLP수행을 위한 진단계의 저수량(그림 3 참조)

$X^0_{r,t}$: SLP수행을 위한 진단계의 사용수량(그림 3 참조)

$Tmax_{r,j}$: 댐별 발전구간별 상당 사용수량의 최대치

$TU_{r,t}$: 댐별 발전구간별 상당 사용수량

$F_{r,j,t}$: SLP수행을 위한 상당 발전량 구간별 F 계수치

$G_{r,t}$: SLP수행을 위한 상당 발전량 구간별 G 계수치

$H_{r,j,t}$: SLP수행을 위한 상당 발전량 구간별 H 계수치

$EG_{r,j,t}$: 댐별 발전구간별 발전량

3.3 흐름도 및 프로그래밍

본 연구에서는 위에서 정식화된 내용을 미국 ILOG사의 CPLEX S/W를 사용하여 해석하였다. 그러나 선형계획기법 유형의 최적화에서는 많은 수의 목적함수항

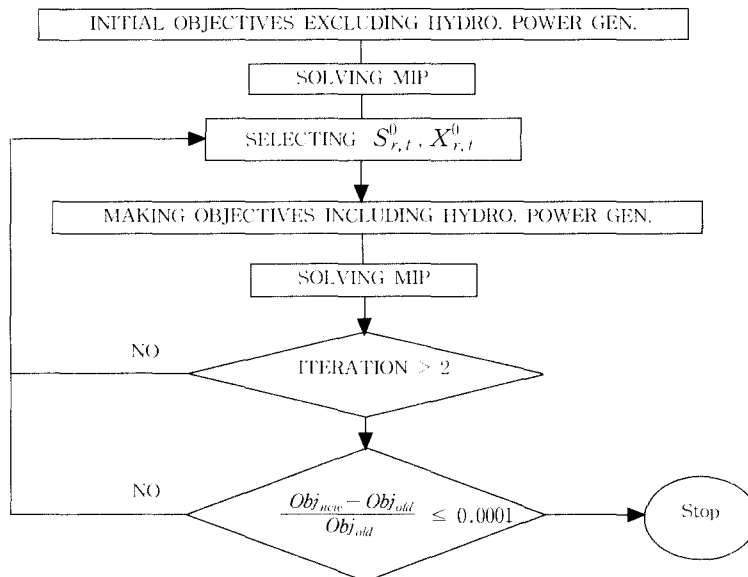


그림 3. MIP-SLP 모형의 수행과정

및 제약조건들이 부여되어지고 해석되어져야 한다. 더욱이 본 연구에서 적용된 제약조건의 경우에는 3년간의 용수공급목적 운영의 경우 입력제약조건수가 3448개, 정수형 변수가 648개, 총 산정될 변수 2230개가 된다. 또한 발전목적 운영인 경우에는 입력제약조건의 수가 6081개, 정수형 변수의 수가 1188개, 총 산정될 변수가 4254개가 되어 축차선형계획법을 적용하기 위해서는 반복연산을 위한 자동화 프로그램이 그림 3과 같이 필요하였다.

4. 모형 수행결과 및 분석

4.1 검토조건 및 입력자료 구성

적용된 댐별 월평균 증발량 자료는 표 2와 같이 적용되었다.

또한 이용수심(draw-down) 구간이 작은 청평 및 팔당댐을 제외하고 축차선형계획법의 적용을 위하여 저수량과 저수위에 관한 지수식을 그림 4와 같이 도출하였다. 또한 각 댐별 발전량 산정에 적용된 주요 자료는 표 3과 같다.

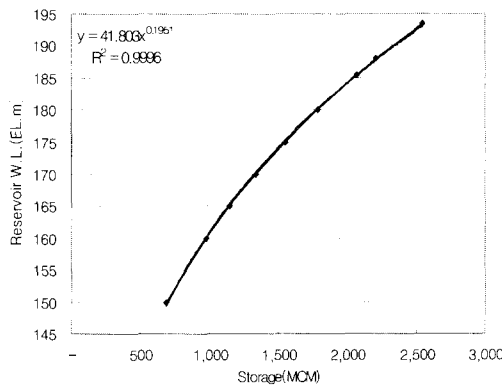
현재 각 지점별로 고시되어 운영중인 하천 유지용수는 팔당댐 지점을 기준으로 하류 보장수량 $124 \text{ m}^3/\text{s}$ 가 적용중이며, 관련 기관들과 제도적인 공조체제를 유지한 채 운영중인 한강수계 댐통합운영협의회에서는 팔당댐의 목표 방류량을 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 제안하고 있는 입장이다. 본 연구에서는 최소 방류량에 대한 제약으로서 소양강댐에 46.1, 화천댐에 10.0, 충주댐에 75.0, 청평댐에 56.1, 팔당댐에 $124.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 적용하였으며, 팔당댐 지점의 하류 목표 방류량을 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 적용하였다. 또한 팔당댐 상류 취수량은 광역상수도 1~5단계까지를 고려하였다. 다만, 화천댐 유입량 감소 영향은 본 연구에서 제외하였다.

축차선형계획법(SLP)의 step-size를 결정하기 위하여 사용수량 부분을 15~40%의 범위내에서 변동시키고 저수량 부분을 15~40% 범위에서 변동시켜 목적함수의 수렴성과 계산시간을 비교하였다. 이 결과 목적함수 수렴은 안정적이나 반복연산횟수는 사용수량의 변동폭에 보다 예민하게 반응하는 특성을 보였다. 이러한 특성을 고려하여 축차선형계획법의 사용수량 부분 변동폭 제약을 기존 X^0 에 대해 30%, 저수량 부분의 변

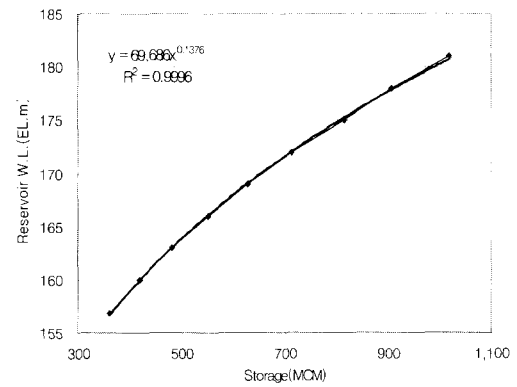
표 2. 댐별 적용된 월별 평균 증발량 자료

단위 : mm

댐 별	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	비 고
소양강	33.2	41.8	72.7	119.0	142.2	142.5	126.0	125.8	97.2	70.8	42.5	33.5	춘천 취수소
화 천													
충 주	34.9	44.8	71.6	125.8	146.0	140.3	125.9	127.5	101.6	75.0	44.4	34.0	충주 관측소
청 평	21.6	30.0	65.6	111.7	126.9	128.5	97.8	113.5	83.9	65.8	37.6	23.3	양평 관측소
팔 당	37.2	46.3	80.8	121.6	136.6	134.8	110.5	121.4	104.7	87.7	54.2	39.6	서울 취수소



(a) 소양강댐



(b) 화천댐

그림 4. 소양강, 화천댐의 저수량 대 저수위 관계식

표 3. 댐별 주요 발전제원

항 목 별	단 위	소양강댐	화천댐	충주댐	청평댐	팔당댐
최대 사용수량	m^3/s	251	185	828	373	800
합성효율	-	0.931	0.910	0.948	0.890	0.960
방수위+순살낙차	m	87.97	111.4	68.84	25.95	9.45
첨두발전시간	hr	5.0	-	2.6	-	-
수위-저수량 계수(a)	-	41.80	69.69	34.76	-	-
수위-저수량 계수(b)	-	0.1951	0.1376	0.1798	-	-

표 4. 적용결과(발전함수 미고려시)

P	N	K	DMAX	DEFL.	P	N	K	DMAX	DEFL.
3	1	3	171.4	514.3	10	1	10	74.7	511.5
	2	2	171.2	513.7		2	6	53.4	511.5
	3	1	171.2	513.6		3	4	51.2	512.1
4	1	4	127.8	511.2		4	3	51.2	511.8
	2	3	127.7	511.0		5	3	51.2	511.7
	3	2	127.7	510.9		6	3	51.2	511.7
5	1	5	102.3	511.3		7	3	51.2	511.7
	2	4	102.3	511.7		8	2	51.2	511.6
	3	3	102.3	511.7		11	1	11	74.8
6	1	6	85.5	512.8	2		7	53.4	524.6
	2	4	85.4	512.3	3		4	46.7	511.5
	3	4	85.3	512.0	4		4	46.7	511.6
	4	3	85.4	512.2	5		3	46.6	512.3
7	1	7	74.7	511.3	9	3	46.6	512.2	
	2	6	73.2	512.7	12	1	12	74.8	511.9
	3	4	73.2	512.7		2	7	53.4	511.5
	4	4	73.2	512.6		3	5	46.7	511.5
	5	3	73.2	512.6		4	4	46.7	511.3
8	1	8	74.7	577.1		5	3	42.6	511.7
	2	5	63.9	511.3		8	4	42.6	511.7
	3	5	63.9	511.6		9	2	42.6	511.5
	4	3	63.9	511.3		9	1	9	74.7
1	9	74.7	511.8	2			6	56.9	512.2
2	6	56.9	512.2	3	4		56.8	511.5	
3	4	56.8	511.5	4	3		56.8	511.3	
4	3	56.8	511.3	6	3		56.8	511.2	
6	3	56.8	511.2	7	2		56.8	511.2	
7	2	56.8	511.2	* P=9, N=5인 경우와 P=11, N=6,7,8인 경우 및 P=12, N=6,7인 경우는: 제약조건이 활성화되지 않은 조건임					

동쪽 제약을 S^0 의 30%로 채택하여 신뢰도, 회복도, 부족심도 및 발전함수에 미치는 영향을 검토하였다. Srinivasan(1999)의 경우와 같이 총 물부족량 계수를 0.01로 하고 최대 물부족량 계수를 1.00으로 적용하였으며, 이에 대하여 발전함수에 대한 영향을 3 단계로 구분한 보정 발전량 함수에 가중치를 0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0으로 달리 적용하며 분석을 실시하였다.

4.2 모형 수행결과 및 고찰

'93. 1월부터 '95년 12월까지의 36개월에 대하여 시점 및 종점의 5개댐 수위로 실적자료를 적용하고 개발한 최적연계운영모형을 수행하였다. 그림 5는 수행결과 중 P=10, N=1, 발전함수 가중치가 10.0인 경우로서 발전시간에 따라 구분한 각 단계별 발전량의 반복횟수별 변동상황을 도시하였다. 그림 5를 볼 때 반복횟수가 증가하면서 단계 1의 1차에너지 생산이 증가되고 단계

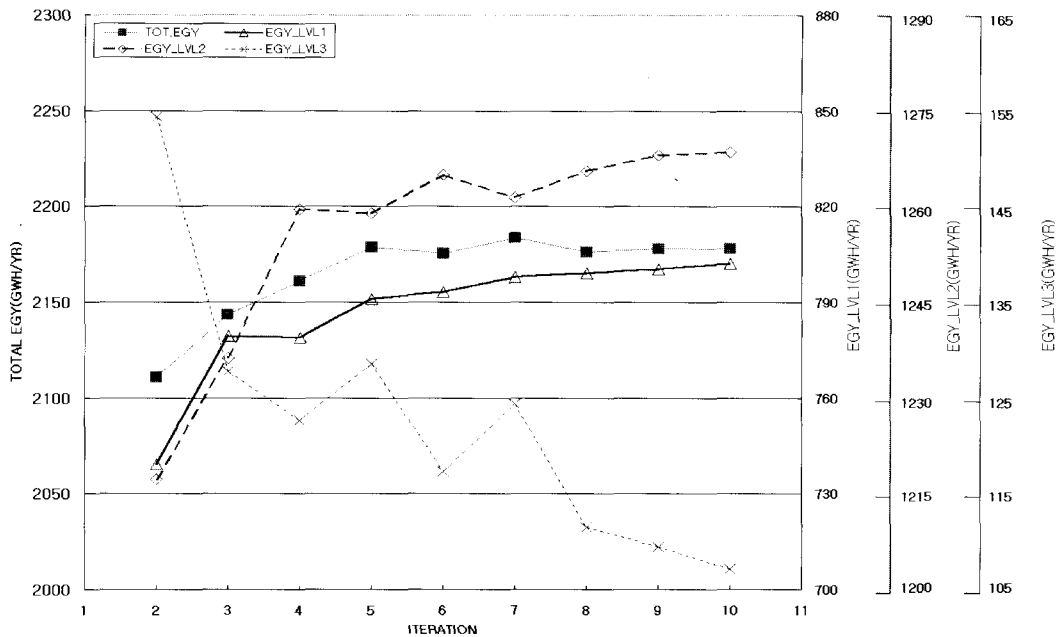


그림 5. P=10, N=1, 발전가중치 10.0일 때 발전시간 단계별 발전량 변화

3의 심야발전량이 줄어 발전함수의 단계별 운영패턴 적용이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

표 4는 발전함수를 고려하지 않는 경우의 물부족 발생횟수(P), 연속 물부족 발생기간의 최대치(N), CROSSOVER의 발생횟수(K)의 변동에 따른 최대 물부족량(DMAX) 및 총 물부족량(DEFL)을 나타내며, 각 항목별 이행도 결과는 그림 6에 정리하였다.

그림 6은 발전량을 포함하지 않은 경우에 의한 신뢰도, 복원도 및 부족심도간의 관계를 도시한 결과이다. 박명기 등(2001)에서 정리하였듯이 최적의 신뢰도와 최소의 부족심도는 동시에 확보 할 수 없음을 보여준다. 또한 부족심도간에 대한 복원도의 변동특성은 신뢰도 만큼 결과에 큰 영향을 주지는 않았으나 신뢰도와 유사한 움직임을 보임을 알 수 있었다. 결국 Hashimoto 등(1982)이 정리했던 바와 같이 신뢰도와 복원도는 비슷한 특성을 가지나 부족심도는 이들 두가지 특성기준과는 반대의 방향으로 변동하고 있다. 또한 부족심도(vulnerability)의 악화는 복원도(resilience)에 의한 영향보다는 신뢰도(reliability)에 대해 보다 예민하였다.

또한 Bayazit 등(1990)의 hedging에 의한 시뮬레이션 결과에 의하면 평균 물부족량에 대한 변동특성은 신뢰도 및 복원도와의 변동과 같은 방향으로 움직이는 것으로 알려져 있으나 본 연구의 적용결과로는 표 4와

같이 총 물부족량의 일정한 변동특성을 발견할 수 없었다. 이는 '93년과 '95년의 여수로 방류를 가지는 제한된 기간 내에서 제약되어졌으므로 물부족량에는 별다른 영향을 주지 않았다고 판단된다.

한편 용수공급부분의 물부족량과 발전량과의 이행도 분석에서 물부족은 신뢰도 및 복원도와 함께 해석되어야 한다. 그러나 실제 용수공급계획이나 월단위 운영 상황에서 2개월 이상 지속되는 물부족에 대해서는 그 심각성이 커진다고 판단하여 연속최대 물부족량이 2 이하인 상태에서의 총 물부족 발생횟수(P), 최대 물부족 발생량(DMAX), 발전량간의 관계를 기초로 이행도 곡선을 N=1인 경우(그림 7)와 N=2인 경우(그림 8)를 대상으로 작성하였다.

그림 7 및 8에서 발전함수부분에 대한 가중치가 1.0을 초과하면서 물부족심도가 발전량의 증가를 위하여 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 물부족심도의 증가는 시스템의 총 물부족 발생횟수가 높은 값인 경우에 N값이 큰 경우에 더욱 많이 발생하는 것으로 분석되었다. 이는 P 및 N값의 상승에 따라 제약이 제거되면서 발생하는 것으로 해석된다.

그러나 실제 운영상황에 있어서 그림 7 및 8과 같은 발전량 증가를 위한 부족심도의 상승을 초래하는 운영은 불가하며, 용수부분에 대한 상황이 침해되지 않는

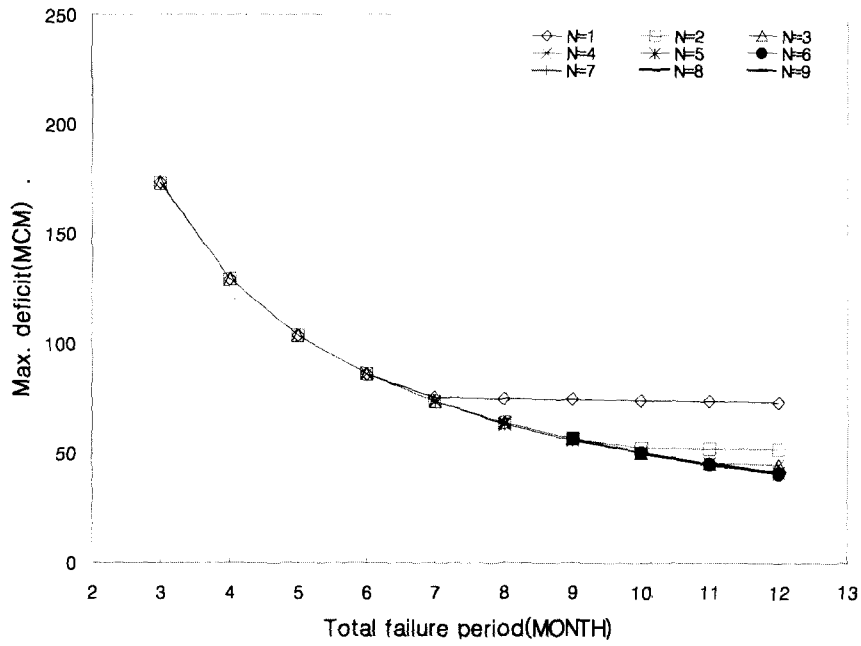


그림 6(a). P, N, Dmax간의 이행도 분석(P의 변화에 따른 도시)

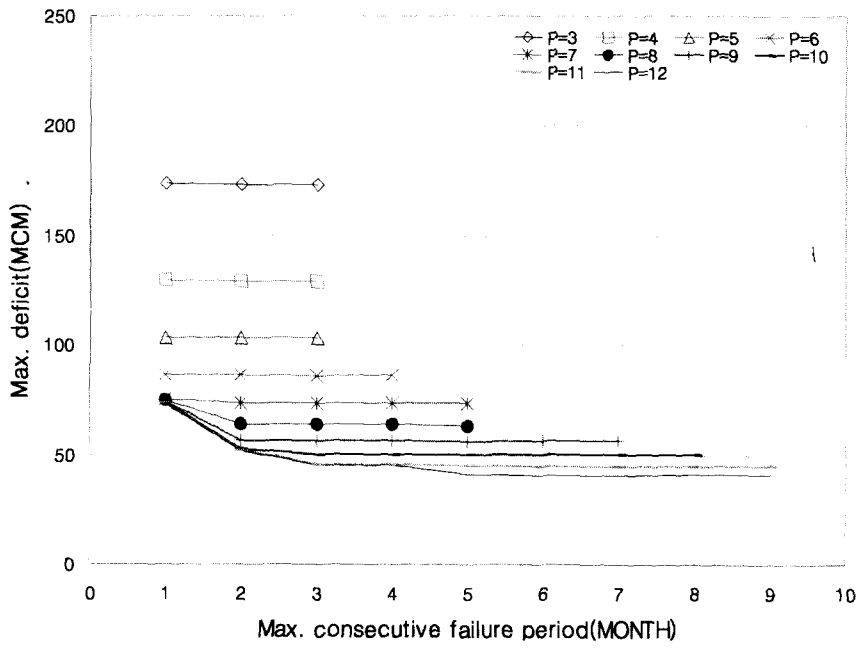


그림 6(b). P, N, Dmax간의 이행도 분석(N의 변화에 따른 도시)

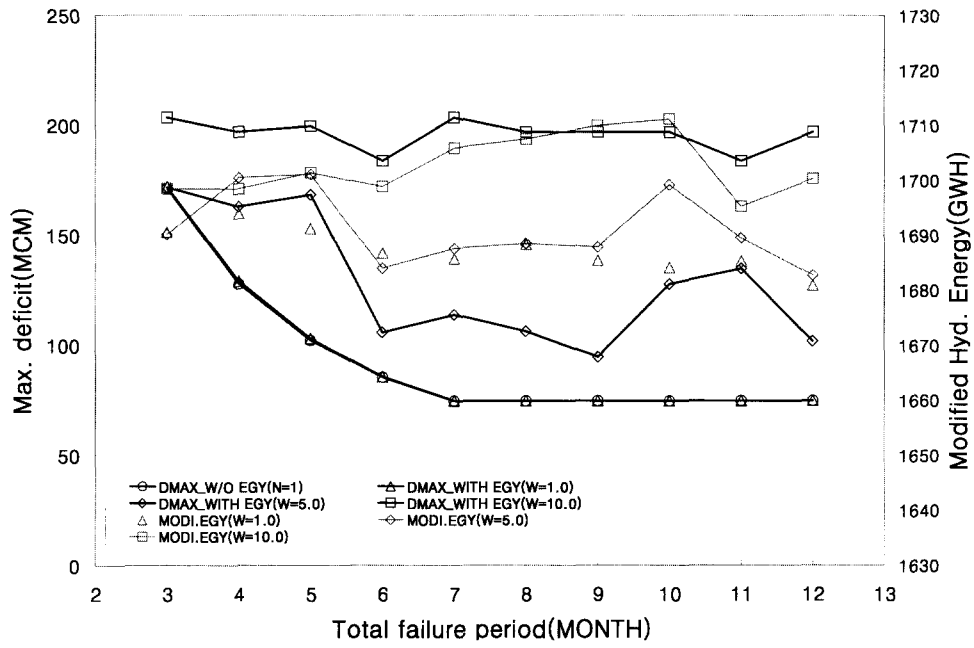


그림 7. N=1인 경우, P의 변동에 따른 Dmax 및 발전량간의 이행도

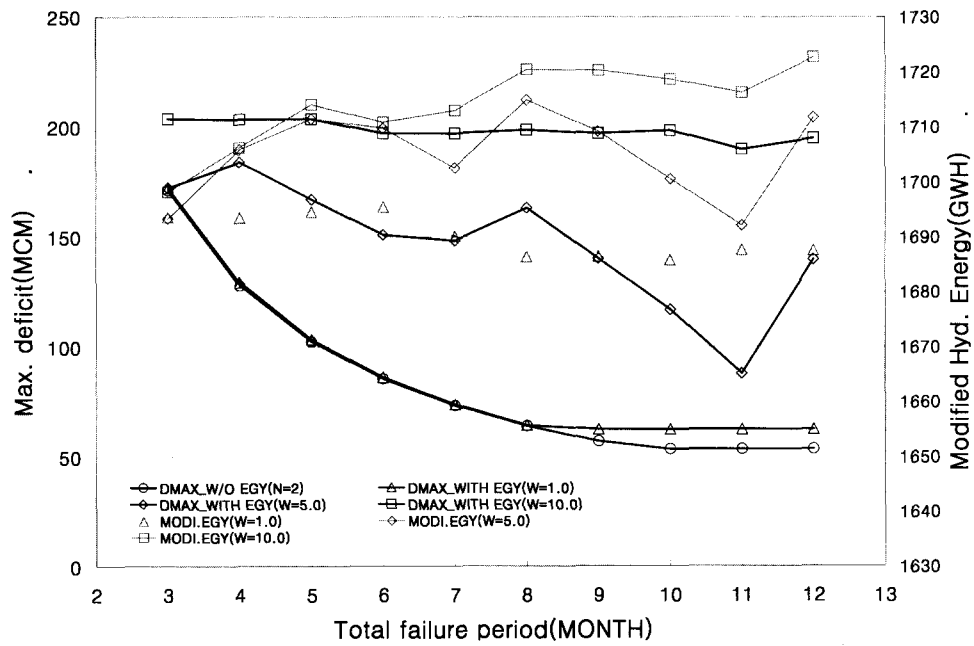


그림 8. N=2인 경우, P의 변동에 따른 Dmax 및 발전량간의 이행도

범위 내에서의 발전량 최적화가 현실적으로 타당하여 적용 가능한 발전부분에 대한 가중계수는 1.0으로 판단된다.

5. 결 론

위험도 평가기준으로 단일 댐의 용수공급 목적으로 제시된 Moy 등(1986), Srinivasan 등(1999)의 정식화 내용을 수계 저수지군의 최적관리를 위한 정식화로 그 사용성을 확장하여 새롭게 정식화를 시도하였다. 이 과정에서 수력발전함수, 상류 취수량, 증발량 부분의 선형화를 위한 새로운 방안을 제시하였다. 그리고 이들을 혼합정수계획기법을 통하여 한강수계 5개 저수지군을 대상으로 최적 연계운영모형을 구상하였으며 이를 통하여 댐운영 이후 최대 갈수조건인 '93~'95년에 적용하여 그 실효성을 검토하였다. 검토결과 용수공급만을 고려하는 경우에는 기존 연구성과와 마찬가지로 신뢰도 및 복원도의 변동 방향은 일치하며 시스템의 불부족심도와 총 발전량은 이들 기준과 반대방향으로 움직임을 수치모의를 통하여 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

김승권, 박영준 (1998). "댐군의 연계운영을 위한 수학적 모형". **한국수자원학회논문집**, 제31권, 제6호, pp. 779~793.

박명기, 김재한, 정관수 (2001). "위험도 평가기준을 적용한 댐군 최적운영방안 연구(I) - 대청댐을 중심으로 -". **심사중**

이규탁, 권오현, 고석구 (1995). "축차선형계획기법에 의한 수력 발전량의 최대화". **대한토목학회논문집**, 제15권, 제5호, pp. 1343~1349.

최영송, 안경수, 박명기 (2000). "MIP에 의한 댐군연계운영 최적화모형 개발과 개발모형에 의한 낙동강수계 용수공급능력 재평가." **한국수자원학회논문집**, 제33권, 제4호, pp. 447~459.

Bayazit, M., and Unal, N. E. (1990). "Effects of hedging on reservoir performance." *Water Resour. Res.*, 26, 713~719.

Datta, B., and Burges, S.J. (1984). "Short-term, single, multiple-purpose reservoir operation: importance of loss functions and forecast error." *Water Resour. Res.*, 20, 1167~1176.

Fiering, M. B. (1982). "Alternative indices of resilience." *Water Resour. Res.*, 18, 33~39.

Grygier, J. C. and Stedinger, J. R. (1985). "Algorithms for optimizing hydropower system operation." *Water Resour. Res.*, 21(1), 1~10.

Hashimoto, T. (1980). "Robustness, reliability, resilience and vulnerability criteria for planning water resources systems." Ph.D. dissertation, Cornell Univ., Ithaca, N. Y.

Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P. (1982). "Reliability, resilience and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation." *Water Resour. Res.*, 18, 489~498.

CPLEX MANUAL (2000). ILOG CPLEX 7.0 User's Manual, ILOG COMPANY.

Joeres, E. F., Seus, G. J., and Engelmann, H. M. (1981). "The linear decision rule(LDR) reservoir problem with correlated inflow. I: Model development." *Water Resour. Res.*, 17, 18~24.

Loucks, D. P., and Dorfman, P. J.(1975). "An evaluation of some linear decision rules in chance constrained models for reservoir planning and operation." *Water Resour. Res.*, 11, 777~782.

Loucks, D. P., Stedinger, J. R., and Haith, D. A. (1981). *Water resources systems planning and analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

Martin, Q. W. (1987). "Optimal daily operation of surface-water systems." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 113(4), 453~469.

Moy, W. (1983). "Reliability, resilience and vulnerability in reservoir operations." Ph.D. dissertation, The Johns Hopkins Univ., Baltimore, Md.

Moy, W. S., Cohon, J. L., and ReVelle, C. S. (1986). "A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir." *Water Resour. Res.*, 22, 489~498.

ReVelle, C. S., and Gundelach, J. (1975). "Linear decision rule in reservoir management and

- design. IV: A rule that minimizes output variance." *Water Resour. Res.*, 11, 197~203.
- ReVelle, C. S., and Joeres, E., and Kirby, W.(1969). "The linear decision rule in reservoir management and design. I: Development of the stochastic model." *Water Resour. Res.*, 5, 767~777.
- Shih, J. S., and ReVelle, C. S. (1994). "Water supply operations during drought: continuous hedging rule." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 120, 613~629.
- Srinivasan, K., and Philipose, M. C. (1998). "Effect of hedging on over year performance." *Water Resour. Mgmt.*, 12, 95~120.
- Srinivasan, K., T. R. Neelakantan, P. Shyam Narayan, and C. Nagarajukumar (1999). "Mixed-integer programming model for reservoir performance optimization." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 125(5), 298~301.
- Trezos, T. (1991). "Integer programming application for planning of hydropower production." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 117(3), 340~351.
- Trott, W. J. and Yeh, W. W-G. (1971). "Multi-level optimization of a reservoir system." ASCE Annual Meeting.
- (논문번호:01-032/접수:2001.04.10/심사완료:2001.12.18)