

MIP에 의한 댐군연계운영 최적화모형 개발과 개발모형에 의한 낙동강수계 용수공급능력 재평가

Development of Optimal Reservoir System Operation Model for Water Supply by Applying MIP Technique and Reappraisal of Water Supply Capability of Nakdong River Basin

최 영 송* / 안 경 수** / 박 명 기***

Choi, Young Song / Ahn, Kyung Su / Park, Myeong Ki

Abstract

Since the development of water resources is getting more difficult than ever before because of human-sociological condition, it would be necessary to develop a practically applicable technique for the management of water resources based on demand-side concept that could reduce unusable release for more effective and appropriate allocation of limited water resources. The objective of the study is to develop an optimal reservoir system operation model for water supply and energy augmentation by the combination of water budget analysis method in downstream area by MIP technique. The applicable study of the developed model was carried out and water supply capability of Nakdong river basin was re-evaluated by the developed model. The model has been found successful to guarantee appropriate water supply to the basin by means of deficit-supply management method and also turned out to be more practical tool for an optimal reservoir system operation model than other existing models.

keywords : MIP, reservoir system operation, water budget, deficit-supply management method

요 지

수자원 개발이 인문 사회적 여건으로 날로 어려워짐에 따라 공급위주의 물 관리 정책이 한계에 달하고 있어 수요관리개념에 따른 적용 가능한 수자원관리 기법의 개발이 필요해 지고 있다. 무효방류량을 최소화하여 한정된 물 자원 배분을 합리적으로 이룰 수 있는 실제 적용 가능한 수요관리기법은 수자원의 효율적 이용과 유역물관리 시스템의 방법론적 완성을 위해 반드시 필요하다. 본 연구는 기존의 물수지분석 기법을 댐 연계운영 모형과 조합하여 MIP기법에 의해 이수목적 다목적댐 최적연계운영모형을 개발하고 낙동강 수계를 대상으로 모형의 적용성에 대한 검증을 실시하였으며 낙동강 수계의 용수공급능력을 재평가하였다. 이 결과를 계획 당시 자료 및 다른 모형에 의한 운영결과와 비교한 바 개발된 모형은 훌륭히 물 부족량 공급방식으로 수계의 물 공급을 보장 할 수 있고 기존모형 등에 의한 방식보다 물배분과 관리에 효율적으로 활용 될 수 있음이 평가되었다

핵심용어 : MIP, 댐연계운영, 물수지, 물 부족량 공급방식 수계관리

- * 한국수자원공사 충주권 관리단장
General Manager, Chungju Regional Office, Korea Water Resource Corporation (KOWACO)
Chungju, Chungbug, 380-810, Korea(yschoi@kowaco.or.kr)
- ** 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수
Professor, Department of Civil Engineering, Incheon Univ., Incheon, Korea
- *** 한국수자원공사 댐 관리처 대리
Engineer, Dam Management Dept. KOWACO, Daedeug, Daegon. 306-090, Korea

1. 서 론

최근 수량확보를 위한 댐 개발이 인문 사회적 제약과 환경보존과 관련된 논란으로 과거처럼 용이치 못하게 되고 심지어 가까운 장래에 용수공급을 위한 절대수량마저 부족할 사태에 처해있어 이제까지 볼 문제를 공급측면 위주로 관리해오던 수자원 정책은 지금의 현실에서는 그 한계에 달하고 있다고 보여진다. 여기에서 기 개발되어 있는 수자원의 효율적 관리 즉, 수요관리측면에서의 '구체적이고도 실제 적용 가능한 저수(底水)시 저수지 운영기법'의 개발이 요구되고 있다. 여러 가지 수요관리 기법 중 무효(無效)방류량을 최소화하고 한정된 물 자원의 배분을 합리화 할 수 있는 저수관리 시스템의 방법론적 완성은 수요관리상 하나의 큰 과제로서 물 수지 분석이론을 댐 연계운영모형과 조합한 물 부족량(deficit-supply) 공급개념의 저수지 최적운영관리기술을 확보하는 것은 물 관리에 있어 주요한 목표라고 판단된다.

저수지 제의 최적관리란 수계를 일관한 적징 장소에 필요한 시기별로 적절한 용수를 공급해주는 것을 말하며, 아울러 용수 및 수력 에너지를 최대로 공급할 수 있도록 저수지를 조작하는 것 등을 뜻한다. 저수지 조작문제는 근본적으로 유입량 또는 강수량 예측이 실제적으로 거의 불가능하고 물 수요가 시간과 지역적으로 변동되며, 더구나 물 수급 구조가 복잡해지고 저수지가 직렬 및 병렬 구조로 다원화되어 있는 시스템을 형성하고 있는 경우에 종래의 Ripple의 Mass curve방법 또는 기타 해석적 방법만으로는 그 해답을 얻을 수 없는 다차원 벡터공간에서의 최적화 문제이다.

이에 따라 본 논문에서는 기존의 물 수지 분석방법을 MIP(혼합정수계획법)에 의하여 댐군 연계운영을 위한 최적화 모형으로 정식화하여 이를 일반적인 MIP 해석 엔진(본 연구에서는 CPLEX s/w를 이용하였음)을 사용·해석할 수 있도록 저수관리 기본모형을 연구 제시함으로써 효율적인 물 배분을 위한 의사결정을 지원할 수 있도록 함과 함께 당초 설계나 건설 시와는 다른 현재의 조건에서 수계에 대한 다목적댐군의 효율 가치를 제 산정 하고자 하였다.

1.1 연구 사

저수지 시스템의 최적운영을 위한 수학적 프로그래밍은 매우 다양하다. 그 동안 사용되었던 저수지 시스템 최적화 기법은 선형계획기법(Linear Programming,

LP), 비선형계획기법(Nonlinear Programming, NLP), 동적계획기법(Dynamic Programming, DP), 제어이론(Optimal Control Theory) 등이 있고, 최근에는 수자원분야에도 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm) 등의 적용가능성이 연구되고 있는 실정이다. 이들 외에도 유사분야로 모의조작(Simulation), GIS 및 FUZZY이론, 의사 결정 지원 시스템(Decision Support System, DSS) 등이 있으며, 이들은 각기 상호 보완적인 도구로서 연구나 실무분야에서 밀접하게 적용되고 있다. 특히 이러한 분석기법들은 하나만을 선정하여 적용되기도 하지만 때로는 몇 가지의 기법을 종합하여 사용하기도 한다. 이러한 분석기법들에 대한 계통 분류는 1985년 Yeh(1985)에 의하여 정리된 바 있다.

선형계획기법(Linear Programming, LP)은 SIMPLEX ALGORITHM의 일반성 때문에 별도의 계산노력이 필요하지 않으므로 프로그램의 원결성, 범용성 등의 장점이 있어 수자원관리에 널리 쓰이는 기법의 하나이다. 그러나 저수지조작은 다단계의 문제로서 여러 개의 저수지로 구성되는 시스템 문제에서는 행렬의 규모가 커지고 계산상의 어려움을 가지며 목적함수나 제약조건이 모두 선형이어야 하므로 시스템의 동적특성을 나타내는데는 미흡한 점이 많다. 현재로서는 Linear Programming을 이용하는데 있어 제약으로 작용하는 것이 비선형 함수의 처리문제라고 할 수 있는데 Mixed-Integer Programming(MIP 혼합정수계획법) 모형을 사용하여 각 구간데별로 가중치를 부여하는 고려가 가능한 실정이다.

비선형계획기법(Nonlinear Programming, NLP)은 시스템의 모형화에 있어서 선형계획기법 보다는 유연성이 있지만 시스템의 동적 구조를 효과적으로 반영시킬 수 없는 단점을 가진다. 비선형계획기법중 저수지 시스템 운영을 비교적 잘 표시할 수 있는 방법은 Rosen의 경사투영법(Rosen, 1960)과 Fletcher-Powell기법을 제약문제에까지 확장한 Goldfarb의 방법(Goldfarb, 1969)이 있으며, Lee와 Waziruddin(1970)은 3계법에 대하여 5계 계절로 하여 저수지 조작문제를 해결하였다. 그러나 이 방법은 경계 및 꼭지점에서 투영행렬(projection matrix)을 얻기 위한 연산시간이 길어서 실시간 조작에는 적합하지 않은 단점이 있다.

동적계획기법(Dynamic Programming, DP)은 저수지문제와 같은 동적특성의 모형화가 쉽고 프로그램의 작성원리도 단순하여 널리 쓰이고 있다. 다만 컴퓨터

터의 용량과 계산시간의 제약을 극복하기 위하여 여러 가지 수정기법이 연구·개발되었다. IDP(1968), DDDP(1971), MIDP(1976) 등이 그것으로서 여기서 IDP는 Larson에 의하여 제안된 상태변수의 증분 및 감소를 통하여 다단계별로 적용하여 전단계가 수렴할 때까지 적용하는 DP의 수정기법이다. DDDP는 Heidari 등에 의해 제안된 이산화 미분형 동적계획(Discrete Differential Dynamic Programming)으로서 축차적으로 개선된 궤적을 찾는다는 기법이다. MIDP는 다단계 동적계획기법(Multilevel Incremental Dynamic Programming)으로서 IDP를 다 단계로 적용하도록 수정 및 변형한 것이다.

1.2 국내 관련 연구사례

저수지조작에 관련한 국내 연구는 근래 비교적 활성화되고 있다. 이수에 관한 연구로서 권오헌과 성세진(1980)은 한강수계 댐군의 최적운영을 위한 시스템 모형을 개발하기 위하여 상태증분 분석법에 의한 IDP를 적용하였다. 이순탁과 이진우(1985)는 하천유역에서 공간적인 불의 최적배분을 해석하기 위하여 DP를 적용하였다. 박병기(1990)는 확률제약 LP(Chance Constrained LP)로서 대청호의 용수 및 발전을 최적화하기 위한 LDR을 제안하였고, 이규탁(1993)은 SLP(Successive Linear Programming, 축차선형 계획기법)을 사용하여 수력발전부분의 발전함수를 선형화시키는 해법을 대청댐에 적용한 바 있다.

2. 연계운영 모형의 개발

본 논문을 통해 개발된 모형은 기존의 LP, MIP기법이 가지는 컴퓨터 용량의 문제가 기술발전과 함께 상당부분 해결되었고, 낙동강과 같은 대규모 다차원시스템 모형의 경우 현재의 하드웨어 및 소프트웨어 측면에서 MIP기법이 DP기법보다도 효율적이라고 판단되어 모형의 기본 구조를 MIP모형으로 선정하였으며, 발전함수의 비선형성 고려를 위하여 SLP (Successive Linear Programming) 기법을 병행 적용하였다.

2.1 수계 시스템 정의 및 물수지 모식도

본 연구에서 개발된 MIP모형에 대한 내용전개를 위해 고려되어진 낙동강 수계 수자원 시스템에 대한 물수지 상황 모의를 위한 모식도는 그림 1과 같고 현재 우리나라의 물관리 여건상 중요하게 선택 운영되어지고 있는 수위표 지점을 기준으로 제어지점 14개소를 선정하여 하류 물수지 평가의 기준지점으로 적용하였다.

2.2 댐군 연계운영 모형의 정식화

물수지를 고려한 댐군 연계운영 모형의 목적함수(Objective Function)에서 고려되어진 사항은 각 소유역 구간별 생공·농업 용수공급 부족량의 최소화, 댐 방류량 및 주요 제어지점의 하천수 보자유량의 최대화, 발전량의 최대화, 보장 발전량의 최대화 등으로 이러한 다양한 목적함수 조건들에 대하여 직절한 벌점(penalty) 또는 가중치(weight)를 부여하여 서로 상충되는 목적들간의 타협을 이룰 수 있도록 목적함수를 다음 식(1)과 같이 구성하였다.

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \sum_{i=1}^{N_{\text{point}}} \text{WCof}_{i,j} \cdot \text{Qmin}_{i,j} + \sum_{i=1}^{N_{\text{DAM}}} \text{ECof}_{i,j} \\ & \sum_{j=1}^{N_{\text{time}}} \text{ENG}_{i,j} + \sum_{i=1}^{N_{\text{DAM}}} \text{RCof}_{i,j} \cdot \text{Rmin}_{i,j} + \\ & \sum_{i=1}^{N_{\text{point}}} \text{MCof}_{i,j} \cdot \sum_{j=1}^{N_{\text{time}}} \text{Sht1}_{i,j} + \sum_{i=1}^{N_{\text{point}}} \text{ACof}_{i,j} \\ & \sum_{j=1}^{N_{\text{time}}} \text{Sht2}_{i,j} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

N_{point} : 댐하류에서의 주요 Control Point의 개수

N_{DAM} : 수계내 검토대상 댐의 개수

N_{time} : 모형에서 계산될 계산기간의 수

$\text{WCof}_{i,j}$: i 번 Control point에 대한 최소 유량 가중치

$\text{ECof}_{i,j}$: i 번째 댐에 대한 에너지 가중치

$\text{RCof}_{i,j}$: i 번째 댐에 대한 최소방류량의 가중치

$\text{MCof}_{i,j}$: i 번째 구간에 대한 생공용수 불부족량 penalty

$\text{ACof}_{i,j}$: i 번째 구간에 대한 관개용수 불부족량 penalty

$\text{Qmin}_{i,j}$: i 번 Control Point 에서의 minimum flow

$\text{ENG}_{i,j}$: i 번 댐에서의 j 기간 동안 발생된 전력 에너지

$\text{Rmin}_{i,j}$: i 번 댐에서의 minimum flow

$\text{Sht1}_{i,j}$: i 번 구간에서의 j 기간 생공용수 불부족량

$\text{Sht2}_{i,j}$: i 번 구간에서의 j 기간 관개용수 불부족량

본 모형에서 적용된 제약조건들은 식 (2)~(5)와 같이 4가지이다.

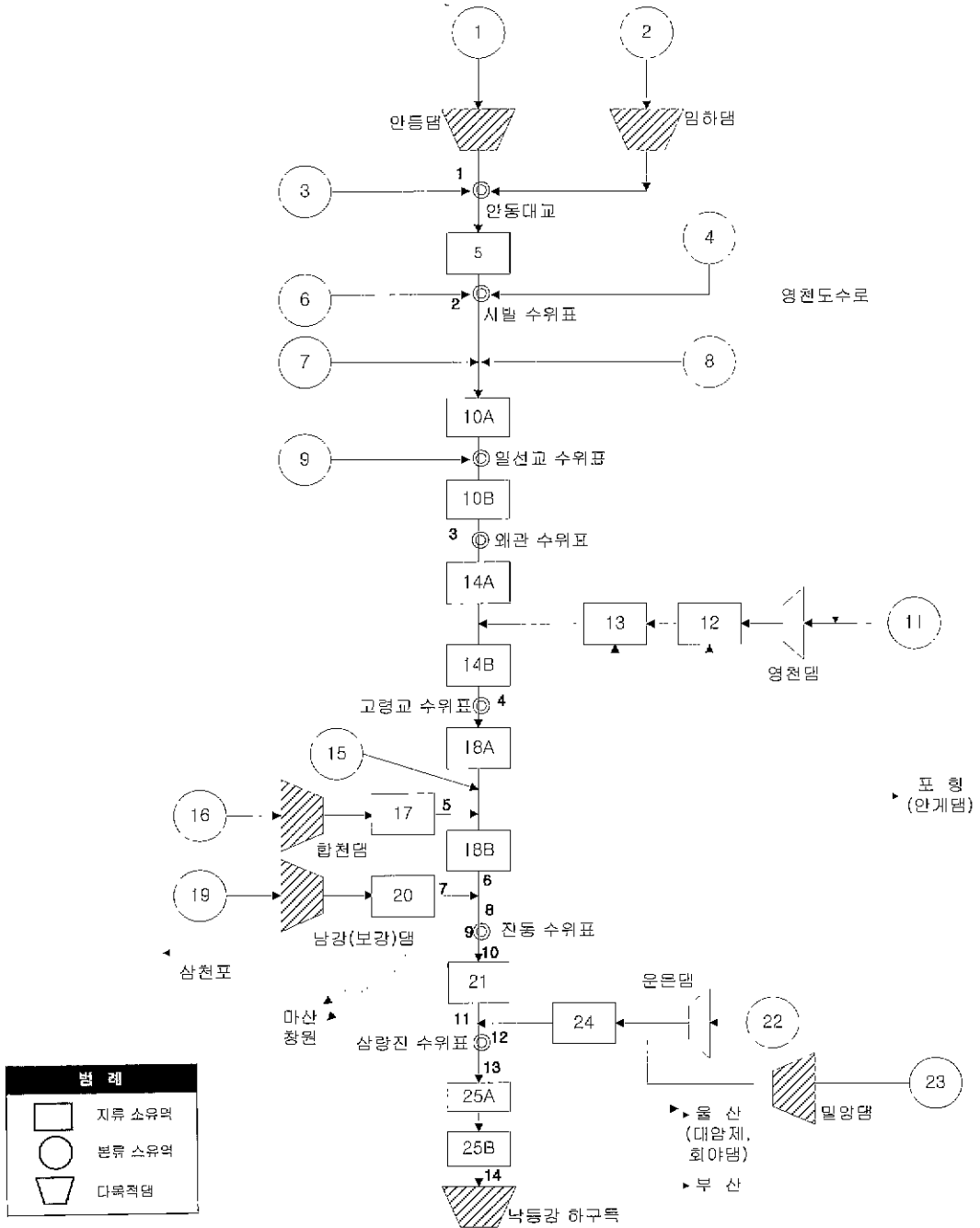


그림 1. 낙동강유역 물수지 모식도

1) 저수지의 이수목적 운영에 적용되는 제약조건 계 용량제약과 최소 방류량 제약 그리고 저수지의 유
 저수지의 이수목적 운영에 적용되는 제약조건은 크 입량-방류량-저수량 간의 물리적 보존관계를 나타내는

등호계약으로 구성된다. 본 논문에서도 식 (2)에 언급된 바와 같이 저수지의 최대용량 제약, 최소용량 제약, 최소 방류량 제약, 매 기간별 저수지 상태방정식인 등호계약으로 구성하였으며, 본 연구에서 고려된 보강유량의 개념에서 정식화의 일반성을 기하기 위하여 최소 방류량 제약을 Hard bound와 Soft bound로 구분하여 정식화하였다. 여기서 Hard bound란 제약조건에서 일정한 기준치인 값을 입력시키는 형태를 의미하며, 댐에서 현재 비용배분 되어있는 또는 유지용수라는 형태로 공급중인 방류량 부분을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 Sto_{i,j} &\leq S_{max_{i,j}} \\
 &\quad (\text{상시만수위, 홍수기 하계 제한수위 고려}) \\
 Sto_{i,j} &\geq S_{min_{i,j}} \quad (\text{저수위 : LWL}) \\
 Rel_{i,j} &\geq Rel_{min_{i,j}} \\
 &\quad (\text{최소방류량 제약 : Hard bound}) \\
 Rel_{i,j} &\geq R_{min_{i,j}} \\
 &\quad (\text{최소 방류량 제약 : Max-Min고려}) \\
 Sto_{i,j+1} &= Sto_{i,j} + I_{i,j} - Rel_{i,j} - EVP_{i,j} \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서,

- Sto_{i,j} : i년 j기간 초 저수량
- I_{i,j} : i년 j기간 중 유입량
- Rel_{i,j} : i년 j기간 중 방류량
- EVP_{i,j} : i년 j기간 중 증발손실(본 연구에서는 고려하지 않음) 유입량
- Rel_{min i,j} : i년 j기간 중 최소방류량

2) 제어지점의 연속방정식 제약조건

하류의 제어지점에 대하여 연속방정식을 적용하기 위하여, 본 모형에서 적용한 식은 아래의 식 (3)과 같다. 본류 구간별로 용수수요량을 생공용수와 농업용수로 수요를 구분하고 여기에 용수목적별 회귀율을 별도로 고려하여 적용하였다.

$$\begin{aligned}
 Q_{i,j} &= \sum_{k=1}^{N_i} Q_{i,j} + \sum_{k=1}^{N_i} Tri_{k,j} + \sum_{l=1}^{N_R} Rel_{i,j} \\
 &\quad - \sum_{M=1}^{N_S} (DTAK_{MI_{M,j}} + DTAK_{AG_{M,j}}) \\
 &\quad + \sum_{M=1}^{N_S} (DTAK_{MI_{M,j}} \times Coef_{MI} \\
 &\quad + DTAK_{AG_{M,j}} \times Coef_{AG}) \quad (3)
 \end{aligned}$$

여기서,

- Q_{i,j} : i지점 j기간 중의 유하량(대상구간의 말단에서 산정)
- DTAK_{MI i,j} : i구간에서의 j기간 생공용수 취수량
- DTAK_{AG i,j} : i구간에서의 j기간 관개용수 취수량
- N_O : i지점 상류에 있는 제어지점 수
- N_T : i지점 상류에서 유입되는 구간 지류의 수(지류 유입수 고려)
- N_R : i지점 상류에 댐의 수(방류량 영향 고려)
- N_D : i지점 상류에서 취수되는 물수요자료의 수(생공용수(MI) 및 관개용수(AG) 수요자료)
- Tri_{k,j} : k번 지류로부터의 j기간 유하량

또한 최소 유량의 제약식을 고려하기 위하여 Soft bound로 고려된 사항은 아래의 식(4)와 같다.

$$Conv_{i,j} \times Q_{i,j} \geq Q_{min_{i,j}} \quad (4)$$

여기서, Conv_{i,j} : 단위환산계수

3) 용수목적별 우선순위 고려를 위한 MIP모형의 정식화 제약조건

실제 운영모형의 경우에 발생할 수 있는 극한 가문의 시나리오를 분석하는 경우에 대비하여 목적별 용수 공급 우선 순위의 고려가 필요하다. 용수수요에 대한 좀 더 정확한 고려가 될 수 있도록 본 검토에서는 순물 소모량의 개념을 고려하지 않은 수요량과 자연유량과의 관계를 사용하여 모형을 구성하였으며, 검토결과 생공용수의 회귀율은 65%로, 관개용수는 35%로 적용되었다. 극한 가문에 대한 물 수요의 우선 순위를 부여하기 위하여 본 모형에서는 MIP모형을 사용한 2단계의 용수공급상황을 식(5)와 같이 모형화 하였다. 일반적으로 MIP모형은 수자원 시스템의 분석에서 비선형 문제를 piece-wise 선형화 시키는 경우 흔히 적용되며, 상황에 따른 변수 값에 서로 다른 기울기 또는 대응 관계를 가지는 경우 적용된다. 본 모형에서는 용수공급 상황 중 공급수량이 적어져 생공용수만 공급하는 경우와 생공용수 수요량 이상의 공급수량이 있어 생공용수와 농업용수가 함께 공급되는 경우의 2가지의 경우를 설정하고 모형화 하였으며, 아래의 식(5)에서 MW1_{m,j}의 값과 MW2_{m,j}의 값은 같은 m_j에 대하여 동시에 0 또는 1이 될 수 없으며, IW1_{m,j}의 값이 1인

경우가 생공용수에 대해서만 용수가 공급되는 경우이고, $MW2_{m,j}$ 의 값이 1이 되는 경우가 생공용수와 농업용수에 동시에 공급되는 경우가 된다.

$$\begin{aligned} TAK_{m,j} &= DTAK_{MI\ m,j} + DTAK_{AG\ m,j} \\ DTAK_{MI\ m,j} &= MI1_{m,j} + MI2_{m,j} \\ MI1_{m,j} &\leq MW1_{t,j} \cdot DTAK_{MI\ m,j}^{max} \\ MI2_{m,j} &\leq IW2_{m,j} \cdot DTAK_{MI\ m,j}^{max} \\ DTAK_{AG\ m,j} &\leq IW2_{m,j} \cdot DTAK_{AG\ m,j}^{max} \\ MW1_{m,j} + MW2_{m,j} &= 1 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

- $TAK_{m,j}$: m구간에서의 j기간 취수량
- $DTAK_{MI\ m,j}$: m구간에서의 j기간 생공용수 취수량
- $DTAK_{MI\ m,j}^{max}$: m구간에서의 j기간 생공용수 수요량
- $DTAK_{AG\ m,j}$: m구간에서의 j기간 관개용수 취수량
- $DTAK_{AG\ m,j}^{max}$: m구간에서의 j기간 관개용수 수요량
- $MW1_{m,j}, MW2_{m,j}$: m구간 j기간에 대해 결정될 MIP모형의 변량 인자

4) 발전함수 정식화 제약조건

대부분의 수자원 문제는 본래 구조면에서 비선형이기 때문에 LP기법을 직접 적용할 수 없다. 이러한 형태의 문제에 표준 LP를 적용하기 위해서는 적당한 선형화 기법이 필요하다. 비선형 문제를 선형화시키는 기법은 크게 두 가지 방법이 적용되어지고 있다.

일반적으로 SLP기법이라고 알려진 방법은 반복회수의 증가에 따라 비선형성을 의도하는 정도까지 반영할 수 있고 접근이 용이하기 때문에 보편적으로 이용되고 있다. Sequential Linear Programming은 비선형 목적함수를 초기해에 대해 Taylor 급수전개하여 얻은 1차항을 이용하여 비선형항을 근사 선형화시킴으로서 일련의 선형문제를 가지고 비선형 최적화 문제를 축차적으로 반복하여 해석하는 방법이다. Taylor급수 전개는 초기해에 대하여 전개하고 축차적 반복은 해의 결과가 지정된 수렴범위내에 들 때까지 반복한다.

가) 수력에너지의 특성

수력에너지 시스템은 높은 곳에 있는 물이 가지고 있는 위치에너지를 수차로서 기계에너지로 변환하고 이것으로 발전기를 운전하여 전기에너지를 생산하는 체계이다. 발전기에서 생산되는 전력에너지는 순 또는 적정기간당 운전되어질 때 아래 식(6)과 같이 표현되어진다.

$$Et = 9.8 \eta Q_t H_t / 3.6 \quad (MWh) \quad (6)$$

여기서,

- E_t : t 기간동안 생산된 발전량(MWh)
- Q_t : 발전사용수량(백만 m^3)
- H_t : t기간동안 평균유효낙차
- η : 합성효율

식(6)과 함께 본 모형에서 가정된 유효낙차에 대한 산정식은 다음 식(7)과 같다.

$$H_t = a \cdot \overline{V}_t^b - TWL - HL \quad (7)$$

여기서, \overline{V}_t 는 t 기간동안 평균 저수량으로서 t기간초의 저수량과 t+1기간초의 저수량의 평균값을 저수지 수위로 환산하여 적용하였으며, TWL, HL은 각각 발전 방수위 및 손실낙차로서 본 연구에서는 상수로 취급하였다. 또한 a 및 b의 값은 저수지 수위계산을 위한 회귀상수를 말하며 위와 같이 평균 저수량 개념을 도입 함으로서 발전량 계산식을 간편하게 할 수 있고 저수지의 기하학적 특성도 더 잘 반영할 수 있는 장점이 있다.

나) 발전함수의 선형화

식(7)을 식(6)에 대입하면 식(8)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} E_t &= (9.8\eta/3.6) \cdot Q_t \cdot (a \cdot \overline{V}_t^b - TWL - HL) \\ &= (9.8\eta/3.6) \cdot (Q_t \cdot a \cdot \overline{V}_t^b - Q_t \cdot (TWL + HL)) \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)은 비선형항을 가진 2변수 함수이므로 이중 비선형항 $Q_t \cdot a \cdot \overline{V}_t^b$ 를 선형화시키기 위해, $f(\overline{V}_t, Q_t)$ 와 그 모든 도함수가 $\overline{V}_t = \overline{V}_t^0$, $Q_t = Q_t^0$ 의 인근에서 연속이면, 초기치 $[Q_t^0, \overline{V}_t^0]$ 에 대해 Taylor 급수전개하여 2차항 이상은 무시하여 전개하여 식(9)를 얻게 된다

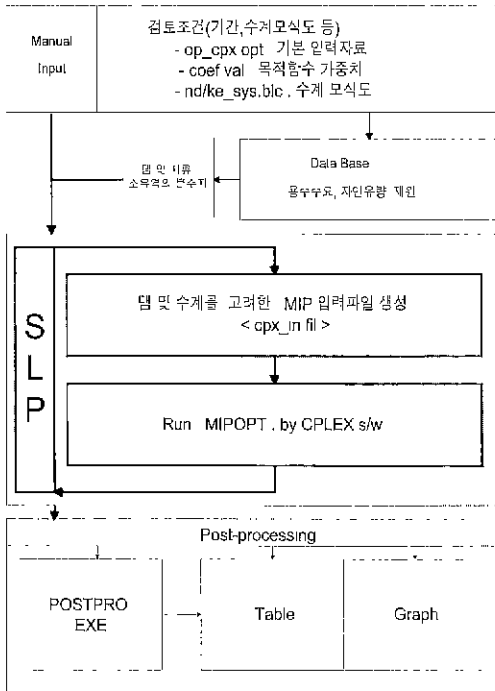


그림2.a 개발모형의 모듈별 흐름도

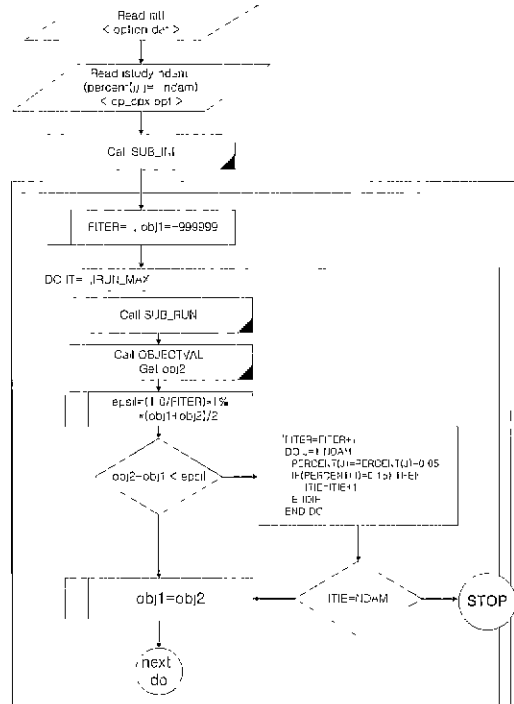


그림2.b MAIN_SYS 흐름도

$$E_t = F \times \overline{V}_t + G \times Q_t + H \quad (9)$$

여기서,

$$F = (9.8 \eta / 3.6) \times a \times b \times Q_{ot} \times \overline{V}_t^{(b-1)}$$

$$G = (9.8 \eta / 3.6) \times (a \times \overline{V}_t^b - TWL - HL)$$

$$H = -(9.8 \eta / 3.6) \times a \times b \times Q_{ot} \times \overline{V}_t \times \overline{V}_t^{(b-1)}$$

η : 발전기 및 수차의 합성효율

a, b : 저수량 대 저수위간의 회귀계수

TWL : 발전기의 방수위(상수로 가정함)

HL : 발전기의 총 수두손실(상수로 가정함)

Q_t^0 : (기간의 발전사용수량(SLP연산의 초기치, 106m³))

\overline{V}_t^0 : t기간의 저수지 평균저수량(SLP연산의 초기치, 106m³)

2.3 개발모형의 기본구성과 해석 과정

본 연구에서 개발된 이수목적 댐군 최적연계운영 모

형(이후 opt-ROM/ws 라 칭함)의 연산과정은 그림2와 같으며, LP 및 MIP 기법의 적용은 미 ILOG사의 상용화된 CPLEX s/w를 사용하였다. 알고리즘의 적용을 위하여 CPLEX s/w의 입력화일을 구성시켜주고, 이를 해석하고, 이때의 해석결과가 다음단계의 반복 계산에 입력화일로 적용되어질 수 있도록 하는 feed back 연산과정이 필요하게 된다. 이러한 반복연산을 위하여 별도의 MAIN_SYS EXE 라는 총괄 프로그램을 개발·적용하였다

3. 개발모형의 검증 및 이행도 평가

3.1 모형의 검증

본 연구에서 개발된 저수관리 댐군 최적연계운영(opt-ROM/ws) 모형의 유용성 및 적합성을 확인하기 위하여 과거자료인 '66년부터~70년까지 5년간의 수문 자료를 이용하여 검증작업을 실시하였다. '66년부터~70년까지 5년간은 낙동강 수계에 다목적 댐이 건설되기 이전의 기간이며 이 기간중의 왜관, 진동지점에 대한 실측 유하량 자료(댐 고려 없이)와 댐을 고려한

표 1. 분석모형 적정성 평가 항목 및 분석 결과

구분	적정성 평가 항목	분석 결과
1	댐별 최소 방류량의 증가 여부	각 댐의 최소 방류량은 공히 목적함수에서 설정한 중요도와 부합되게 증가하였으며 타 목적에 상호 위배되지 않음을 판단할 수 있었다
2	각 댐별 방류량의 유입량 대비 유행개선 정도	각 댐의 방류량 및 유입량에 대한 유행분석 결과를 볼 때 현저한 유행 개선효과가 있었다
3	댐별연계운영시 댐의 최적운영 궤적(Trajectory)	최적운영 결과로 산정되어진 Trajectory에서 만수위 및 저수위의 전 구간에 대하여 충분히 활용되어지는 것을 볼 수 있었으며, 이에 따라 만족할만한 연계 상태를 보여주고 있다고 판단된다
4	왜관 및 진동유량에 대한 심층유량과의 유행분석 대비	하천의 주기능을 살려주는 다목적댐 연계운영의 효과를 잘 반영해 주고있다

최적화 모형을 통하여 모의된 자료를 상호 비교·검토 하였다.

분석에서는 주요지점별 최소유량, 댐별 최소방류량의 증가, 하류지점인 진동, 왜관에서의 95% 보장유량 증가상향 등을 검토하였으며 분석결과는 표 1과 같다. 표 1에 의한 분석 결과를 종합해 보면 본 모형의 수행 정도는 적정하다고 판단할 수 있다.

3.2 개발모형의 이행도 평가

이수목적간 운영패턴을 확립하는 이행도 평가시 '66년~'95년의 30년간의 자료를 적용하여 이루어졌으며 자료기간 및 분석횟수를 고려하여 월별 검토로 수행하였다. 이수목적간의 이행도 평가는 용수공급과 댐에 대한 발전량 생산 측면을 생각할 수 있는데, 용수공급은 진동지점에 대한 용수공급량을 기준으로 하였고, 발전량은 각 댐별 연 평균 발전량의 합을 산출해 비교하였다. 검토조건은 용수 및 발전부분에 대한 목적함수 계수값을 경우별로 가정하면서 이에 따른 수계 다목적 댐의 용수 및 발전량을 최대화한 결과치를 각 경우별로 비교하였다. 기중계수의 적용은 용수의 경우에 왜관과 진동지점을 최우선으로 고려하였으며, 진동지점 이후에 대해서는 수질의 악화를 고려하여 균등한 기중계수를 적용하였다. 용수편익은 최적 연계운영모형에서 계산된 진동지점 보장수량에서 진동지점 하천유지용수인 50m³/sec를 공제하여 용수단가를 곱하여 산정하였으며, 분석결과 용수편익이 증가함에 따른 발전편익의 감소분은 적음을 알 수 있었다. 이러한 결과만을 본다면 용수공급을 위한 보장수량을 늘려주는 방향으로 저수지군이 연계 운영되어야 하겠지만, 실제 용수수요

가 발생하지 않아 용수대금이 취득되어지지 않는 상황에서 보장수량만의 증대는 그 경제적인 현실성이 떨어 지므로 현재 담당하고 있는 사회·경제적인 주변여건을 고려할 때 주변여건을 만족시키는 상태에서 최대한의 발전량을 충족시키는 것이 바람직할 것이며, 본 연구에서는 편익의 경향이 가장 많은 조건을 기준으로 낙동강 수계의 용수공급능력에 대한 검토를 수행하였다

4. 개발모형에 의한 낙동강수계 연계운영 및 용수공급능력

4.1 연계운영 효과분석

이행도 분석에서 결정된 조건을 채택하여, 표 2의 목적함수 계수치를 적용한 연계운영 모형을, 이행도 평가에서와는 달리, 순별 운영을 실시하여 낙동강수계 댐군의 연계운영에 의한 용수공급능력을 검토하였으며 그 결과 댐의 방류량 조절에 의한 하류 유행개선 효과가 우수함을 판단할 수 있었다.

이러한 댐 운영 상황을 그림 3 안동댐 경우에서와 같이 4개댐에 대해 1966~1995년 기간에 대한 유입량, 방류량, 진동유량, 저수지 저수위를 수문곡선으로 분석하였으며 이러한 결과를 볼 때 각 댐의 경우 저수구간에 대한 충분한 활용이 이루어져 이수용량 규모를 최대한 활용하고 있음을 알 수 있어 이에 따른 최적화 부분이 충분히 반영되어졌음을 판단할 수 있었다.

그림 4~7은 4개댐에 대한 유입량 및 방류량에 대한 유행개선 사항을 정리한 것이며 안동, 임하, 합천댐의 경우 90% 보장유량을 현저히 개선하고 있음을 보

표 2. 용수공급능력 검토에 적용된 목적함수 가중계수

지점(구간)명	계 수	지점(구간)명	계 수	댐별	최소 방류량	보장 발전량 계수	연산 발전량 계수
1 안동대교	10	8 남강합류부	20	안동댐	5.00	0.01	10.0
2 사벌	10	9 진동수위표	50				
3 왜관	40	10 청원취수점	50	임하댐	5.00	0.01	10.0
4 고령교	20	11 밀양강합류점	50	합천댐	5.00	0.10	30.0
5 황강말단	20	12 삼랑진수위표	50				
6 적포교	20	13 부산,울산취수	50	남강댐	20.00	0.01	1.0
7 낙동강말단	10	14 낙동강 하구둑	50				

표 3. 개발모형에 의한 1966~1995년간 순별 모의운영 결과

하류주요지점별 최소유량 (m/sec)	안동대교	시 널	왜 관	고령교	황강합류부	적포교	남강합류부
		13.3	20.2	38.1	38.10	10.0	38.7
	마산취수점	진 동	장원취수부	밀양강 합류점	삼랑진	원동취수부	낙동강 하구둑
	72.5	72.5	72.5	51.4	47.0	47.0	39.0
댐 별 최소방류량 (m/sec)	안동댐	임하댐	합천댐	남강댐	합 계		
	5.6	6.8	1.5	6.0	19.9		
댐 별 평균발전량 (GWh)	안동댐	임하댐	합천댐	남강댐	합 계		
	123.8	67.2	134.6	55.4	381.0		

이고 있다 남강댐의 경우에는 저류용량의 부족으로 인하여 유황에 대한 개선효과가 뚜렷이 부각되지는 않지만 사천만으로서의 유역변경에 의한 홍수조절능력이 반영된 것으로 해석된다. 이러한 연계운영 결과를 볼 때 본 개발모형은 충분히 물부족량 공급(Deficit-Supply) 방식으로 수계의 물 공급을 보장하고 있음을 보여주고 있다

4.2 낙동강 수계 용수공급능력 검토

낙동강 수계 다목적댐군의 연계운영에 따른 댐의 방류량 조절에 의한 하류유황의 개선효과는 바로 낙동강 수계의 용수공급 능력과 관계되며 연계운영모형은 그 능력을 평가하는 수단이다. 본 연구에서 개발된 모형의 상대적 비교를 위해 댐 건설 당시의 설계자료와 HEC-5모형에 의한 단독운영 및 연계운영분석내용과 비교하였으며, 그 결과는 표 4와 같다

본 최적화 연계운영 모형에 의해 댐의 방류량, 즉 댐에 의한 공급량을 조절할 경우 설계당시나 HEC-5 모형에 의한 운영결과에 비해 용수공급량은 연간 3.2% 및 2.2%가 증가하고, 연간 발전량의 경우는 두 경우 보다 81% 및 103%가 증가하게되어 본 모형에 의한 연계운영은 기존모형 등에 의한 방식보다 물 배분과 관리에서 효율적이라고 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 기존의 물 수지분석 방법을 MIP(혼합정수계획법)에 의하여 댐군 연계 운영을 위한 최적화 모형으로 정식화하여 이를 일반화된 LP 또는 MIP/sw를 이용, 이수목적 댐군 연계운영모형을 개발하여 낙동강수계를 대상으로 그 적용성 검토와 이행도 분석을 수행하고 낙동강 수계의 용수공급 능력을 재평가하였다. 기본모형의 개발과 함께 연구에서 수행한 사항과

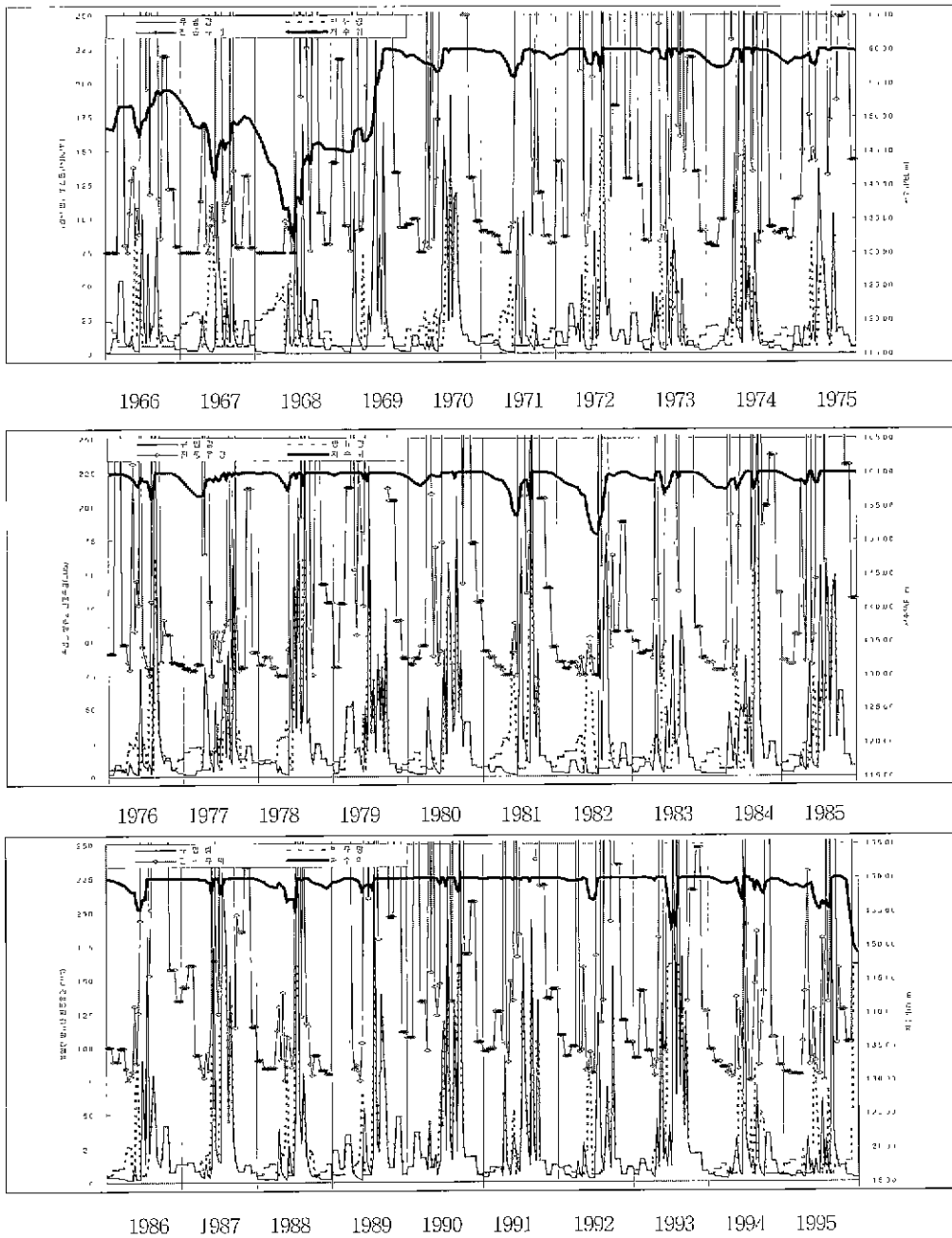


그림 3. 안동댐 연계운영결과 (1966~1995)

결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 입력파일을 읽어 이를 해석하고, 해석 결과가 다음 반복계산의 입력 파일로 적용될 수 있도록 MAIN_SYS.EXE 라는 총괄 프로그램을 개발 적용하

였으며 방대한 자료파일을 위한 입력파일을 효율적으로 생성하고 수계상황을 쉽게 정식화 할 수 있도록 관련 통합환경을 제공할 수 있는 GUI 프로그램을 개발 하였다.

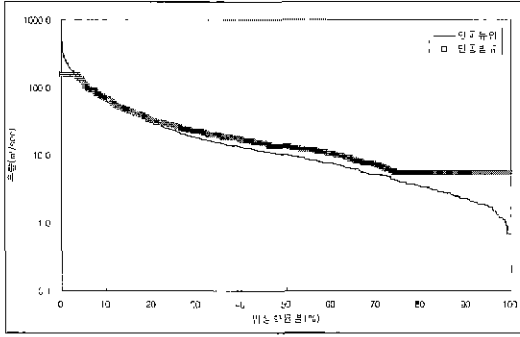


그림 4. 안동댐 유입량, 방류량 유황변동

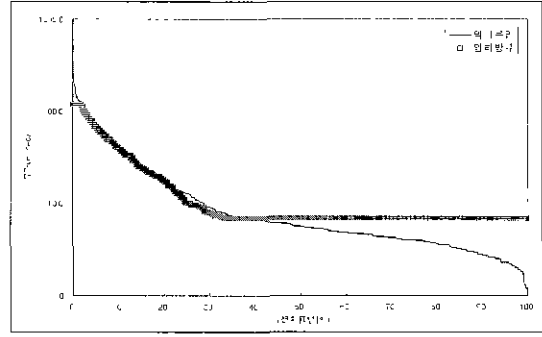


그림 5. 임하댐 유입량, 방류량 유황변동

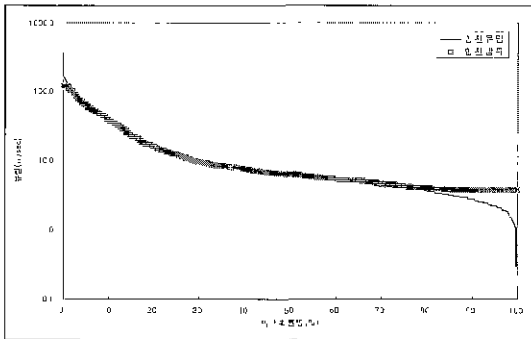


그림 6. 합천댐 유입량, 방류량 유황변동

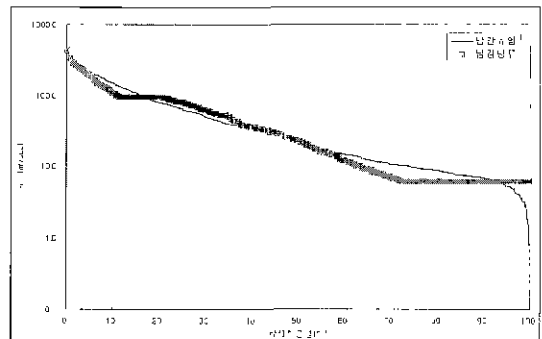


그림 7. 남강댐 유입량, 방류량 유황변동

표 4. 연계운영에 의한 용수공급 능력평가

(단위, 백만 m³, GWh)

댐 명	설계시 (단독운영)		급회 분석					
			단독운영		연계운영(HFC-5)		연계운영(최적화모형)	
	용수공급량	발전량	용수공급량	발전량	용수공급량	발전량	용수공급량	발전량
안 동	926	89	867	118	2,678	401	2,737 (142)	813 (363)
임 하	497	97	451	83				
합 천	599	232	504	165				
남강보강	573	41	628	40				
계	2,595	450	2,450	406				

(2) 개발된 모형은 댐별 최소 방류량의 증가, 댐별 계획, 중·하류 지점의 실측유량과의 유황분석 대비 측면 등에서 적정성이 검토되었으며 만족할 만한 수행 정도를 보였다.

(3) 연계운영결과 각 댐의 방류량을 하류상황에 따라 댐의 이수용량규모를 최대한 활용하면서 적절히 조절할 수 있으므로 공급능력을 늘리는 효과와 함께 본 개발모형으로 물 부족량 공급방식(Deficit-supply)의

수계관리가 가능하다고 판단된다. 본 최적화모형 활용 시에는 기존의 모의기법 적용시 보다 더욱 효율적으로 댐 관리 의사결정지원이 가능하다고 판단되며 장기간에 걸쳐 실제 운영되는 과정에서 모형에 대한 제 인자들의 보완이 필요하다.

본 연구는 1998년도 인천대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- 권오현, 성세진 (1980). "북한강유역댐군의 최적운영을 위한 시스템모델의 개발." 대한토목학회지, 대한토목학회, 제28권, 제4호, pp 95~104.
- 권오현 (1984) 이산형선형추적에 의한 제약저수지계의 최적제어. 박사학위논문, 서울대학교.
- 김승권, 박영준 (1998). "댐군의 연계운영을 위한 수학적 모형." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제31권, 제6호, pp. 777~791
- 박명기 (1990). 선형결정물에 의한 수력발전의 최적화. 석사학위논문, 충남대학교
- 박영준, 김승권 (1998). "댐군의 최적연계 운영을 위한 혼합정수계획모형." 대한산업공학회/한국경영과학회 춘계 학술대회.
- 이규탁 (1993). 축차선형계획법에 의한 수력발전량 최대화를 위한 저수지운영. 석사학위논문, 충남대학교.
- 이순탁, 이진우 (1985) "동적계획법에 의한 물배분." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제18권, 제2호, pp. 163~174.
- 한국수자원공사 (1998). 기존댐 용수공급능력조사(낙동강수계), 건설교통부.
- Becker, L., and Yeh, W.W-G. (1974). "Optimization of real time operation of multiple reservoir systems." *Water Resources Research*. Vol. 10, No. 6. pp. 1107 ~1112.
- Bellman, R. (1957). *Dynamic programming*. Princeton University Press, NJ.
- Dantzig, G.B. (1951). "Application of the simplex method to a transportation program." *Activity analysis of production and allocation*, T. C. Koopmans (ed.), John Wiley & Sons. New York, NY pp. 359~373.
- Goldfarb, D. (1969). "Extension of Davidon's variable metric method to maximization under linear inequality and equality constraints" *J. of SIAM*, Vol. 17. No 4, pp 739~764.
- Grygier, J.C. and Stedinger, J.R. (1985). "Algorithms for optimizing hydropower system operation of continuous processing systems." *Management Science*. Vol. 7, pp. 1~10.
- Heidari, M., Chow, V.T., Kokotovic, P.V., and Meredith, D.D. (1971). "Discrete differential dynamic programming approach to water resources systems optimization." *Water Resources Research*, Vol. 7, No. 2, pp. 273~283.
- ILOG CO (1999) "User Manual : CPLEX VER. 6.0".
- Kottegoda, N.T. (1980). Stochastic water resources technology.
- Labadie, J.H. (1990) *Dynamic programming with the microcomputer : Program CSUDP*. Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, CO. 30.
- Larson, R.E. (1968). *State increment dynamic programming*. American Elsevier Pub Co., Inc. N.Y.
- Lee, E.S., and Waziruddin, S "Applying gradient projection and conjugate gradient to the optimum operation of reservoirs." *W. R. Bulletin*.
- Linsley, R.K., and Franzini, J.B. (1979). *Water Resources Engineering*. 3th ed., McGraw-Hill. New York, NY
- Loucks, D.P., Dorfman, P.J (1975). "An evaluation of some linear decision rules in chance-constrained models for reservoir planning operation." *Water Resources Research*. Vol. 7, No 6, pp 777~782.

- Loucks, D.P (1967). *Management models for water resources systems*. Technical Report No. 1. Water Resources Center. Cornell Univ, N.Y.
- Mays, L.W., and Tung, Y.K. (1992). "Hydrosystems engineering and management." Chapters 10-13, McGraw-Hill.
- Nopmongkol, P., and Askew, A.J. (1976). "Multilevel incremental dynamic programming." *Water Resources Research*, Vol 12, No. 6, pp. 1291~1297
- Revelle, C., Joeres, E.F., Kirby, W. (1969). "The linear decision rule in reservoir management and design I. Development of the stochastic model." *Water Resources Research*, Vol. 5, No. 4, pp. 767~777.
- Rosen. J.B. (1960). "The gradient projection method for nonlinear programming Part I. Linear constraints" *J of SIAM*, pp. 181~217
- Votruba, L et al (1989) *Developments in water sciences 33. Water management in reservoirs*, Elsevier.
- Yeh, W, W-G (1985). "Reservoir management and operations models : A State-of-the-Art review." *Water Resources Research*, Vol, 21, No 12, pp. 1797~1818.

(논문번호:00-014/접수 2000.02.29/심시 원료 2000.06.08)