

<論 文>

Min-max DP에 의한 昭陽 및 忠州湖의 洪水調節運營
 (Flood Control Operation of Soyang and Choongju Reservoirs
 by the Min-max DP)

오 영 민*
 Oh, Young min
 이 길 성**
 Lee, Kil seong

Abstract

A real-time single reservoir operation model using the Min-max Dynamic Programming for the flood control of Soyanggang Dam and Choongju Dam is developed. The objective function is to minimize the maximum release from each dam and the constraints are those from the reservoir and channel characteristics. Control and utilization efficiencies are used to measure the performance of the reservoir operation method (ROM). In comparison with those of simulation models (such as the Rigid ROM, the Technical ROM and the Linear Decision Rule), the efficiencies of the optimization model are superior for all return periods.

要 旨

소양강댐 및 충주댐의 實時間 洪水調節 模型을 개발하기 위한 방법으로 Min-max Dynamic Programming에 의한 최적화 기법을 사용하였다. 최적화 모형의 목적 함수로서는 각 댐의 최대 放流量을 최소화하도록 하였으며, 각 저수지 및 하도의 특성에 따른 제약 조건을 고려하였다. 개발된 단일 저수지 운영 모형에 의한 홍수조절 효과를 평가하는 척도로서 調節率과 利用率을 사용하였다. Technical ROM, Rigid ROM 및 Linear Decision Rule과 같은 Simulation 모형에 의한 조절 효과의 비교한 결과 모든 頻度에 대하여 DP에 의한 최적화 方法이 더 좋은 것으로 나타났다.

1. 序 論

홍수라 함은 비교적 많은 양의 降雨로 인한 流出이 하천 제방을 범람하여 인명과 재산에 피해를 주는 것을 말한다. 이러한 피해를 경감시키기 위한 구조적 방법으로서 하천 제방의 축조, 하천 개수, Flood Way의 건설과 더불어 저수지 운영에 의한 홍수조절을 들 수 있다.

일반적으로 저수지 운영은 장기 운영(Long-term Operation)과 단기 운영⁹⁾(Short-term Operation)으로 나눌 수 있는데 홍수조절을 위한 저수지 운영은 後者에 해당한다. 또한 저수지 운영은 운영 규모에 따라 단일 저수지 운영(Single Reservoir Operation)과 저수지群의 운영¹²⁾(Multiple Reservoir Operation)으로 나누어지며, 저수지 운영 방안(Reservoir Operation Method, ROM)으로는 Simulation 기법과 최적화(Optimization) 기법을 생각할 수 있다. Simulation은 일반적으로 최적력을 얻

* 서울대학교 토목공학과 대학원졸
 ** 서울대학교 토목공학과 조교수

기는 어려우나 상세하고 복잡한 문제를 다루기에 적합한 방법으로서, Simulation에 의한 단일 저수지 운영 방안으로는 자동조절, Automatic ROM, Rigid ROM 및 Technical ROM 등이 있으며 저수지群的 운영에 관해서도 연구되어 온 바 있다.⁶⁾ 최적화 기법은 주로 장기 운영 방안에 많이 적용되며 대표적인 기법으로 線型計劃法(Linear Programming, LP)²⁾과 動的計劃法(Dynamic Programming, DP)³⁾을 들 수 있다. LP를 이용한 홍수조절은 Windsor,¹⁴⁾ Jan Märien¹⁵⁾ 등에 의해 연구되었는데, LP의 적용에 있어서는 목적 함수와 모든 제약 조건의 선형화에 따른 어려움이 문제가 된다. DP를 이용한 홍수조절은 Jamieson et. al.,¹⁰⁾ Schultz et. al.,¹³⁾ 김 치홍¹¹⁾ 등에 의하여 연구되었는데, DP는 선형화된 목적 함수와 제약 조건을 사용해야 하는 제약은 없으나 전산화에 있어서 계산 시간이 많이 걸리고 계산가 용량을 많이 차지한다는 단점이 있고 특히 저수지群的 운영에 적용할 경우 Curse of Dimensionality의 문제가 생길 수 있다. 또한 河道를 포함하고 있는 저수지群的 홍수시 시간별 운영(Hourly Operation)에 있어서 최적화 기법의 적용은 매우 어려운 문제로서 현재까지 연구되어 온 바가 최소한 상태다.

本 論文의 목적은 소양강댐과 충주댐에 대하여 최적화 기법에 의한 홍수시 단일댐 운영 방안을 개발하는데 있다.

2 자료의 검토 및 분석

2.1. 제약 조건의 수립

소양강댐과 충주댐의 제원은 表 2.1과 같으며 홍수 기간 중 댐 운영에 관한 자료로서 소양강 다목적댐 관리규정⁷⁾, 충주 다목적댐 설계보고서⁸⁾ 등을 검토하여 이를 최적화 모형에 반영되도록 하였다. 또한 모형의 분석을 위한 流入量 자료로는 각 댐의 재현 기간 5년

〈表 2.1〉 소양강댐 및 충주댐에 관한 諸資料

	소양강댐	충주댐
홍수위 (El. m)	198	145
수문월류부 (El. m)	185.5	126
제한수위 (El. m)	190.3	138
총저수량 (10 ⁶ m ³)	2872	2627
홍수조절용량 (10 ⁶ m ³)	501	600
한계방류량 (m ³ /sec)	3600	11900
계획홍수량 (m ³ /sec)	10500	16000
최대방류량 (m ³ /sec)	5500	14000
최소방류량 (m ³ /sec)	700	없음

부터 200년까지의 빈도별 홍수 유입량 곡선^{5,6)}을 사용하였다.

2.2. 貯水量—放流量 관계식의 도출

각 댐의 水位—貯水量 관계와 水位—放流量 관계^{5,6)}로부터 貯水量(S)—放流量(O) 관계를 알 수 있는데 회귀분석에 의하여 구한 관계식은 다음과 같다.

① 소양강댐

$$O=0 \quad (S \leq 2092)$$

$$O=0.2886 \times (S-2092)^{1.4815} \quad (2092 \leq S \leq 2872)$$

여기서 2092(×10⁶m³)는 소양강댐 Crest의 높이 El. 185.5m에서의 貯水量이다.

② 충주댐

$$O=0 \quad (S \leq 1200)$$

$$O=0.9424 \times (S-1200)^{1.3412} \quad (1200 \leq S \leq 2627)$$

여기서 1200(×10⁶m³)은 충주댐 Crest의 높이 El.126m에서의 貯水量이다.

이상의 관계식으로부터 구한 값이 주어진 貯水量에서 방류 가능한 최대량이 된다.

3. Min-max DP 모형의 개발

3.1. 접근 방법

댐 하류에서의 홍수 피해는 대개 방류수문곡선(Outflow Hydrograph)의 첨두유량 부근 즉 댐에서의 최대 방류량(Outflow Peak)에 의하여 좌우된다고 볼 수 있으며, 따라서 홍수피해를 최소한으로 줄이기 위해서는 댐에서의 최대방류량을 최소화하는 것이 필요하다.

本 論文에서는 최적 운영 모형의 개발에 있어서 제약 조건의 비선형성 등을 고려하여 DP기법을 적용하였으며, 목적 함수로는 댐에서의 최대방류량을 최소화하도록 하였다. 즉 모든 제약 조건을 만족시키는 여러 방류 계열(Sequence of Outflows) 중 그 계열의 최대값이 가장 적은 계열에 따라 방류할 수 있도록 하는 Min-max DP 기법을 적용한 모형을 개발하였다.

3.2. Min-max DP 모형의 구성

DP 모형을 구성하는 변수들에 대한 설명은 다음과 같다.

① 단계(Stage), *n* :

시간을 한 시간 단위로 이산화시켰을 때 *n*번째 기간의 종료 시각

② 상태변수(State Variable), *S_n*

Stage *n*에서의 貯水量으로 제한수위와 홍수위 사이의 홍수조절용량을 소양강댐은 3600×100(m³), 충주댐

은 $3600 \times 200 (m^3)$ 의 일정 간격으로 이산화시켰을 때의 값을 갖는다.

③ 결정변수(Decision Variable), O_n :

n 번째 기간 동안의 放流量으로 소양강댐은 $100 (m^3/sec)$, 충주댐은 $200 (m^3/sec)$ 로 이산화된 값을 갖는다.

④ 최적화 함수(Optimal Value Function), $f_n(S_n)$:

모든 제약 조건을 만족하는 각 방류량 계열의 최대 방류량 중 최소값.

이와 같이 정의되는 변수들 사이에는 다음의 식들이 성립된다.

$$f_n(S_n) = \text{Minimize}[\text{Max}\{O_n; f_{n-1}(S_{n-1})\}] \dots (3.1)$$

$$f_0(S_0) = 0 \dots (3.2)$$

$$S_n = S_{n-1} - 0.0036O_n + 0.0036I_n \dots (3.3)$$

式(3.1)은 Recurrence Relation을 나타내고 있으며 式(3.2)는 그 초기 조건이다. 이 때 $\text{Max}\{a, b\}$ 는 a, b 중 큰 값을 뜻한다. 式(3.3)은 연속 방정식으로서 DP 모형에서의 전환식(Transition Equation)이 된다. 여기서 $0.0036 = 3600/10^6$ 으로 저수량과의 단위를 맞추기 위한 값이며, 유입량은 소양강댐의 경우에는 $100 (m^3/sec)$, 충주댐의 경우에는 $200 (m^3/sec)$ 의 배수가 되도록 하였다.

또한 DP 모형의 상태 변수인 貯水量과 결정 변수인 放流量은 다음과 같은 水理, 水文學의 제약조건을 만족해야 한다.

① 초기 貯水量(S_0)은 제한수위에서의 貯水量으로,

소양강댐은 $2371 (\times 10^6 m^3)$, 충주댐은 $2027 (\times 10^6 m^3)$ 로 한다. 이는 홍수기간 중의 댐수위를 제한수위로 유지함을 의미한다.

③ 放流量은 주어진 貯水量에 방류할 수 있는 최대량, 즉 자유유향류(Free Overflow) 시킬 경우 방류할 수 있는 放流量을 넘지 못한다. 또한 소양강댐의 경우에는 $700 m^3/sec$ 이하로는 방류할 수 없다는 최소방류량의 제약 조건이 있으며, $700 m^3/sec$ 이상의 유입량을 홍수 조절 대상이 되는 유량으로 보아 유입량이 $700 m^3/sec$ 이하일 때는 방류하지 않는 것으로 한다.

이와 같이 구성된 DP 모형을 전산화하여 소양강댐 및 충주댐 운영 방안으로서 적용하였으며, 그 흐름도는 그림 3.1과 같다.

4. 모형에 의한 소양강댐 및 충주댐의 운영 방안

Min-max DP에 의한 홍수조절 모형을 소양강댐 및 충주댐에 적용, 분석하였으며 또한 이를 다음과 같이 정의되는 調節率과 利用率의 관점에서 Simulation에 의한 모형들과 비교, 분석하였다.

$$\text{조절률} = \frac{\text{최대 유입량} - \text{최대 방류량}}{\text{최대 유입량}} \times 100 (\%) \dots (4.1)$$

$$\text{이용률} = \frac{\text{최고 저수위} - \text{제한 수위}}{\text{홍수위} - \text{제한 수위}} \times 100 (\%) \dots (4.2)$$

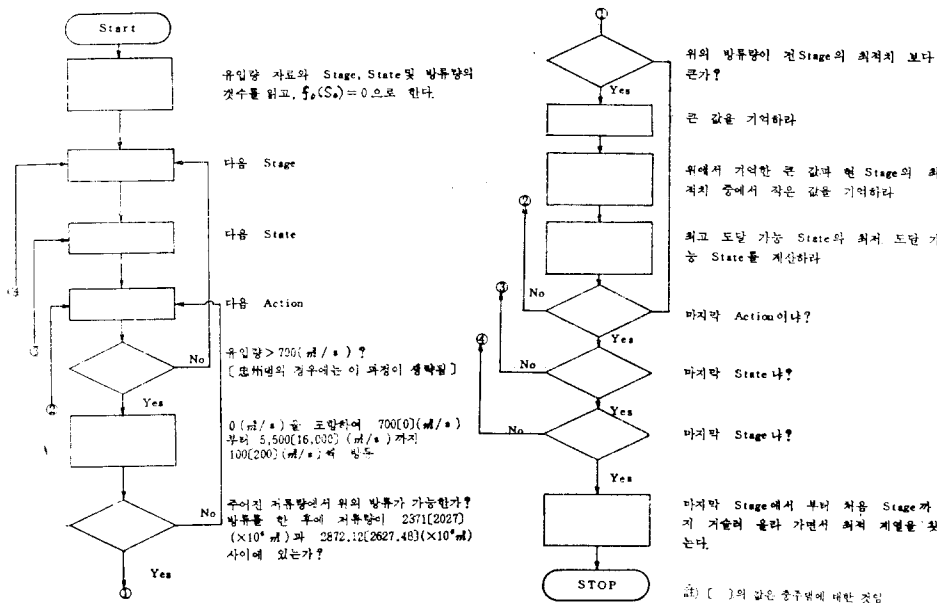


그림 3.1 昭陽江댐 및 忠州댐 運營 模型의 흐름도

즉, 調節率은 최대 유량의 감소율(Peak Reduction Rate)이며, 利用率은 홍수조절용량의 활용 정도를 나타내는 척도가 된다.

또한 각 빈도별 홍수에 대하여 댐 운영에 따른 저류율(Detention Ratio)을 구하였다.

4.1. 소양강댐의 최적 운영

4.1.1 DP에 의한 결과 및 분석

Min-max DP에 의한 홍수 조절 모형을 소양강댐에 적용하면 그림 4.1과 같은 放流量 및 貯水量 곡선을 얻는다. 실선 B는 홍수 감쇄기에서 流入量과 放流量이 같아지는 시각부터는 流入量만큼만 방류하여 홍수 이후의 저수 수준을 실선 BB와 같이 유지하도록 한 것으로, 각 빈도별 홍수에 대하여 적용한 결과는 表 4.1과 같다. 절선 A는 홍수 감쇄기에서 流入量과 放流量이 같아지는 시각 이후에 그 전의 일정 放流量을 계속 방류함으로써 절선 AA와 같이 낮은 저수 수준을 유지하여 이후의 홍수에 대비하게 한 방안에 의한 것으로서 이에 대한 결과는 表 4.2와 같다.

이들 결과로부터, 5년 빈도 이하의 홍수에 대해서는 전혀 방류를 하지 않고도 홍수위 El. 198m 이하에서 홍수 조절을 할 수 있다는 사실을 알 수 있다. 또한 200년 빈도의 홍수에 대해서는 홍수위 이하에서는 한계방류량 3600m³/sec 이하로 조절할 수 없으며 이를 한계방류량 이하에서 조절하기 위해서는 홍수 시작 전

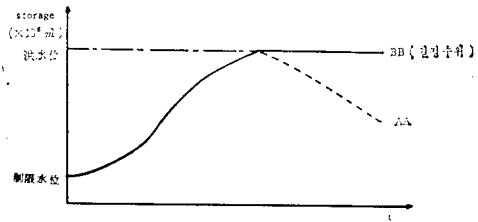
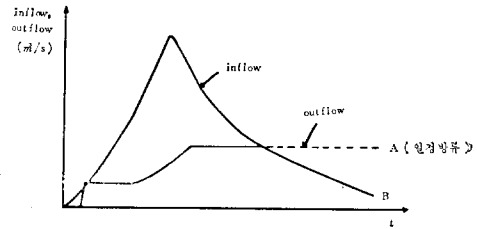


그림 4.1 放流量과 貯水量의 模型

에비 방류에 의한 댐수위 강하가 필요할 것이다.

4.1.2 Simulation에 의한 운영 방안과의 비교 분석

Simulation에 의한 소양강댐의 운영 방안으로 기 개발된 Technical ROM, Linear Decision Rule (LDR) 및 Rigid ROM에 의한 홍수 조절 결과와 Min-max DP에 의한 결과와의 비교는 그림 4.2과 같다. 여기서 DP에 의한 결과는 홍수 감쇄기에서 일정 수위를 유지하도록 했을 때의 결과이다.

<表 4.1> 昭陽江댐의 各 頻度別 流入量에 따른 調節率과 利用率(一定水位)

頻 度	最大流入量 (m ³ /s)	最大放流量 (m ³ /s)	最高貯水位 (m)	調 節 率 (%)	利 用 率 (%)	저 류 율* (%)
5	4100	0	197.76	100	97	100.0
10	5300	700	198.00	87	100	79.2
25	6900	1200	198.00	83	100	61.6
50	8200	2100	198.00	74	100	48.1
100	9400	3000	198.00	68	100	39.7
200	10500	4100	198.00	61	100	35.2

註) *저류율=홍수저류량/총 홍수체적

<表 4.2> 昭陽江댐의 各 頻度別 流入量에 따른 調節率과 利用率(一定放流)

頻 度	最大流入量 (m ³ /s)	最大放流量 (m ³ /s)	最高貯水位 (m)	調 章 率 (%)	利 用 率 (%)	저 류 율 (%)
5	4100	0	197.76	100	97	100.0
10	5300	700	196.86	87	86	67.4
25	6900	1200	197.87	83	98	56.2
50	8200	2100	197.86	74	98	40.3
100	9400	3000	197.97	68	100	22.5
200	10500	4100	198.00	61	100	15.8

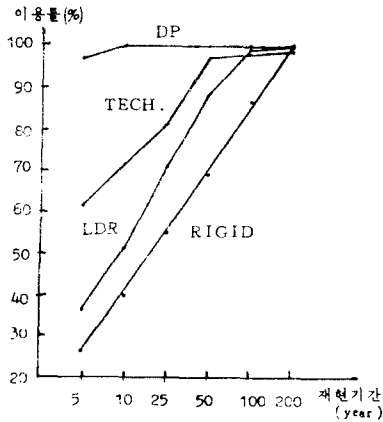
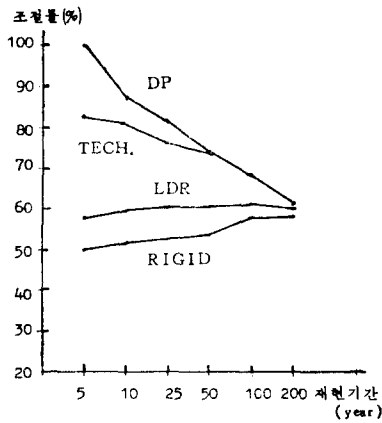


그림 4.3 昭陽江댐의 各 頻度別 調節率과 利用率

이 결과에 의하면 DP에 의한 방안이 調節率과 利用率의 측면에서 Simulation에 의한 방안들에 비하여 효율적임을 알 수 있으며, 특히 홍수 규모가 작을수록 이러한 사실이 현저하게 나타나고 있다.

4.2. 충주댐의 최적 운영

4.2.1 DP에 의한 결과 및 분석

<表 4.3> 충주댐의 各 頻度別 流入量에 對한 調節率과 利用率

頻 度	最大流入量 (m ³ /s)	最大放流量 (m ³ /s)	最高貯水位 (m)	調節率 (%)	利用率 (%)	저류율 (%)
5	7400*(7490)**	1000	145.0	87	100	72.3
10	9200(9160)	2200	145.0	76	100	59.1
25	11400(11300)	3600	145.0	68	100	47.9
50	13000(12900)	4600	145.0	65	100	42.0
100	14400(14400)	5800	145.0	60	100	37.6
200	16000(16000)	7000	145.0	56	100	33.9

註) *차분화시킨 최대유입량
 **실 최대유입량

충주댐의 각 빈도별 홍수 流入量자료에 대하여 Min-max DP에 의한 홍수 조절 모형을 적용한 결과는 表 4.3과 같다. 이 결과에 의하면 모든 빈도의 홍수에 대하여 한계방류량 11900m³/sec 이하로 조절이 가능하며 이 때 댐수위는 항상 홍수위 El. 145m에 도달한다. 특히 5년 빈도 이하의 홍수에 대해서는 댐하류에 전혀 피해를 주지 않는 무해방류량 1500m³/sec 이하로 조절할 수 있다.

소양강댐의 경우와 달리 충주댐의 경우에는 홍수 감쇄기에 일정 수위를 유지하는 방안에 대해서만 적용하였는데, 이는 홍수 감쇄기에는 放流量이 流入量을 초과하는 시각부터 放流量과 流入量을 같게 하여 일정 수위를 유지한다는 충주 다목적댐 설계 보고서의 조항을 반영한 것이다. 그러나, 2차 홍수가 예상되는 경우에는 홍수 감쇄기에 일정 방류를 계속하여 수위를 강하시킴으로써 이에 대비할 수 있다.

충주댐의 방류 형태는 홍수 전반부와 후반부에는 流入量과 같고 중반부에는 최대 放流量으로 일정 방류의 형태를 갖는다. 각 빈도별 최대 流入量과 이에 따른 최대 放流量과의 관계는 그림 4.3과 같으며, 회귀분석에 의하여 구한 관계식은 다음과 같다.

$$\text{최대 방류량} = 0.683 \times \text{최대 유입량} - 4181$$

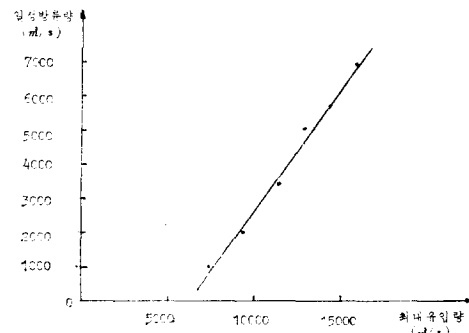


그림 4.3 충주댐의 頻度別 최대 流入量에 對한 一定 放流量

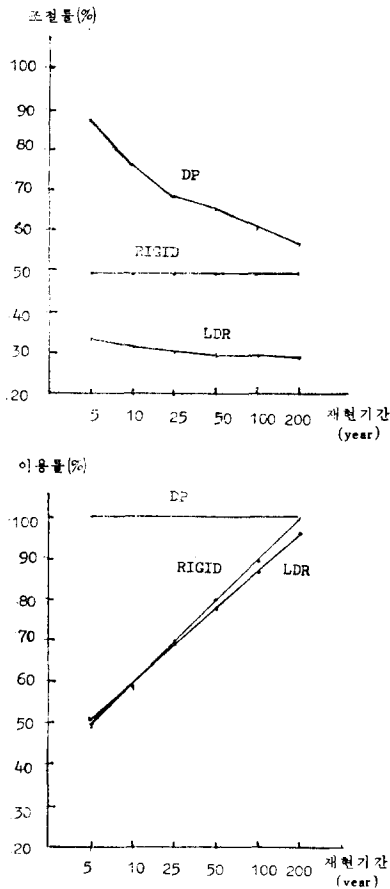


그림 4.4 忠州댐의 各 頻度別 調節率과 利用率

4.2.2 Simulation에 의한 운영 방안과의 비교 분석
Simulation에 의한 충주댐의 운영 방안으로 개발된 LDR과 Rigid ROM⁴⁾에 의한 결과와 DP에 의한 홍수 조절 결과와의 비교는 그림 4.4와 같다.

소양강댐의 경우와 마찬가지로 충주댐의 경우에도 DP에 의한 방법이 Simulation에 의한 방법들보다 조절률과 이용률의 면에서 보다 효율적임을 알 수 있다.

5. 結 論

本 論文에서 개발된 Min-max DP 홍수 조절 모형의 적용에 따른 각종 분석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

① 소양강댐의 경우 5년 빈도 이하의 홍수에 대해서는 전혀 방류를 하지 않고도 홍수위 이하에서 조절이 가능하며, 200년 빈도의 홍수를 홍수위 이하에서

한계 방류량 이하로 조절하기 위해서는 홍수 시작전의 예비 방류에 의한 수위 강하가 필요하다.

② 충주댐의 경우 모든 빈도의 홍수를 한계방류량 이하로 조절할 수 있으며 특히 5년 빈도 이하의 홍수에 대해서는 무해방류량 이하로 조절이 가능하다. 또한 댐수위는 항상 홍수위에 도달하며 최대 流入量과 최대 放流量 사이의 관계는 선형으로 나타나므로, 최대 유입량만 예측하던 방류 형태를 결정할 수 있다.

③ 本 論文에서 개발한 DP에 의한 홍수 조절 모형은 Simulation에 의한 타 모형들에 비하여 調節率과 利用率의 관점에서 효율적이며 이는 홍수 규모가 작을수록 더욱 현저하게 나타난다.

謝 辭

본 연구를 위한 자료의 제공과 재정적인 도움을 준 한강홍수통제소에 謝意를 표한다.

참 고 문 헌

1. 김 치홍, "Dynamic Programming에 의한 洪水調節", 大韓土木學會誌, 제20권, 제 2호, 1972, pp. 9~21.
2. 이 길성, "저수지 최적운명을 위한 시스템 해석기법의 적용", 한국수문학회 특강교재, 1983. 7. 30.
3. 이 길성, 전 경수, "洪水時 昭陽江댐 및 華川댐의 最適運營을 위한 시뮬레이션", 大韓土木學會論文集, 제 6권, 제 1호, 1986, pp. 13~24.
4. 이 길성, 정 동국, "홍수시 충주댐 運營方案의 比較檢討", 韓國水文學會誌, 제18권, 제 3호, 1985, pp. 225~233.
5. 일본공영, 昭陽江 多目的댐 Project 設計報告書, 1969.
6. 일본공영, 忠州 多目的댐 Project 設計報告書, 1979
7. 韓國電力, 昭陽江 多目的댐 管理 規程
8. 韓國電力, 昭陽江 水力發電所 管理 規程
9. Jamieson, D.G., "A Short-Term Control Strategy for Multipurpose Reservoir Systems," WRR. Vol. 8, No. 4, 1972, pp. 911~920.
10. Jamieson, D.G., D.K. Smith, and J.C. Wilkinson, "Evaluation of Short-Term Operational Policies for a Multipurpose Reservoir System", J. of Hydrology, Vol. 28, 1976, pp. 191~213.
11. Jan Märien, "Regulation of a Flood Reservoir with the Use of On-Line Forecasts," IAHS-AISH, 1980,

- pp. 477~483.
12. Meredith, D.D., "*Optimal Operation of Multiple Reservoir System*," ASCE, Vol. 101, No. HY2, 1975, pp. 299~312.
 13. Schultz, G.A., and E.J. Plate, "*Developing Optimal Operating Rules for Flood Protection Reservoirs*", J. of Hydrology, Vol. 28, 1976, pp. 245~264.
 14. Windsor S. James, "*Optimization Model for the Operation of Flood Control Systems*", WRR., Vol. 9, No. 5, pp. 1219~1226.