

洪水時 昭陽江댐 및 華川댐의 最適運營을 위한 시뮬레이션

Simulation for the Optimal Operation of Soyanggang Dam and Hwachon Dam in the Flood Periods

李	吉	成*
Lee,	Kil	Seong
田	庚	秀**
Jun,	Kyung	Soo

Abstract

A real-time hourly operation model for the flood control of Soyanggang Dam and Hwachon Dam, which are located in the North Han River is developed. The method is based on simulation with a feedforward-feedback control. The feedforward control was mainly concerned with providing the release history from the single dams. The outflows from the single dam operation rules with forecasted inflows were used as the inputs to simulation. And then feedback control is applied to reduce the peak discharge at the junction. Also, sensitivity analysis of the operation model was provided to respect the temporal and spatial distribution of storms to the model.

要 旨

本論文에서는 北漢江 水系の 昭陽江댐 및 華川댐의 實時間 洪水調節 模型을 開發하였다. 그 방법으로는 Feedforward-Feedback Control 에 의한 Simulation 기법은 사용하였다. 즉, 예측 유입량을 이용한 단일댐 운영방안에 의하여 구한 각 댐의 방류량으로부터 두 댐의 合流點에서의 유량을 구한 후 Feedback Control 에 의하여 合流點의 첨두 유량을 경감하도록 상류댐 방류량을 재조정하도록 하였다. 또한 開發된 模型에 관한 敏感度 分析을 행하였다.

1. 序 論

漢江 流域에는 여름철에 강우가 집중되어 이로 인한 人命 및 財產被害를 내고 있다. 이러한 洪水被害를 경감시키기 위해서는 정확한 洪水豫測(flood forecasting)과 더불어 적절한 洪水調

節(flood control)이 필요하다. 여기서 洪水豫測이란 流域追跡 및 河道追跡을 포함한 洪水豫測模型에 豫測 또는 實測된 강우량을 입력자료로 하여 時間, 空間別 洪水量을 豫測하는 것을 말하며, 洪水調節이란 洪水豫測模型으로부터 구해진 댐유입량을 입력자료로 하고, 洪水調節模型에 의하여 洪水被害를 줄이도록 댐에서의 방

* 正會員 · 서울大學校 工科大學 助教授

** 正會員 · 서울大學校 工科大學 大學院

류량을 調節함을 뜻한다.

일반적으로 댐의 最適運營 방안으로 최적화기법과 Simulation기법을 생각할 수 있다. 댐의 長時間運營^(1,2,3)에 관해서는 線型計劃法^(3,4,5) (linear programming), 動的計劃法^(2,3,4,6) (dynamic programming) 등의 최적화기법이 많이 적용, 연구되어 왔다. 그러나 洪水時의 댐 운영에 있어서는 그 制約條件이 매우 많고 또한 복잡하기 때문에 최적화기법을 적용하기가 매우 어려우며, 이는 離散化된 時間單位의 길이가 짧은 시간별 운영^(5,7,8) (hourly operation) 문제에 있어서는 더욱 그러하다. 더욱이 河道를 포함하고 있는 댐群의 운영에 있어서 최적화기법의 적용은 매우 어려운 문제로서 현재까지 연구되어 온 바가 최소한 상태이다. 반면, Simulation은 일반적으로 최적해를 얻기는 어려우나, 상세하고 복잡한 문제 및 불확실성(uncertainty)이나 가변성(variability)을 포함한 문제를 다루기에 적합한 방법이다.

本論文의 目的은 洪水時 昭陽江댐 및 華川댐에 대하여 Simulation에 의한 最適運營 방안을 개발하는 데 있으며, 특히 洪水期間 중의 댐 운영에 관계된 法令⁽⁹⁾인 災害對策本部 댐 조작기준, 水力發電所 댐 관리규정, 昭陽江 多目的댐 관리규정 등을 검토, 분석하여 이들의 내용을 최적화 模型에 반영되도록 하였다.

2. 資料의 검토 및 분석

2.1. 資料의 검토 및 制約條件의 수립

昭陽江댐과 華川댐의 운영에 관계된 法令을 비롯한 諸資料(表 2.1 참조) 중에서 특히 洪水位, 常時滿水位, 制限水位, 洪水調節容量, 指定流量, 限界放流量, 最大放流量, 最小放流量 등이 洪水期間 중 댐 운영에 관한 制約條件이 되며 개략적으로 다음과 같이 해석 적용하였다.

① 非洪水期에는 常時滿水位를 유지하여, 洪水期間中에는 制限水位를 유지하여 制限水位와 洪水位 사이의 洪水調節容量을 이용하여 洪水를 調節하도록 한다. 여기서 洪水期間은 매년 6월 21일부터 9월 20일까지의 3개월간을 말한다(水力發電所 댐 관리규정 제 5조 2항).

② 華川댐의 洪水位는 사실상 滿水位와 같으

表 2.1. 昭陽江댐 및 華川댐에 관한 諸資料

	소양강댐	화천댐
홍수 위 (El. m)	198	183
상서 만수 위 (El. m)	193.5	181
제한수 위 (El. m)	191	175
저수 위 (El. m)	150	156.8
총저수량 (10 ⁶ m ³)	2,900	1,018
사수량 (10 ⁶ m ³)	703	360
홍수조절용량 (m ³ /sec)	500	213
지정유량 (m ³ /sec)	700	1,000
한계방류량 (m ³ /sec)	3,600	3,000
계획홍수량 (m ³ /sec)	10,500	9,500
최대방류량 (m ³ /sec)	5,500	5,428
최소방류량 (m ³ /sec)	700	없음
최대사용수량 (m ³ /sec)	251	185
수문의 폭 (m)	13	12
수문의 높이 (m)	13	8(중앙), 6(양단)
수문의 갯수	5	4(중앙), 12(양단)
유역면적 (km ²)	2,703	4,063

며(水力發電所 댐 관리규정 제11조 2항), 따라서 洪水調節容量도 制限水位에서 滿水位 사이의 容量을 말한다. 華川댐 상류의 유역면적은 昭陽江댐 유역면적의 약 1.5배 정도로 큰 데 반하여 洪水調節容量은 약 2/5 정도로 昭陽江댐에 비하여 調節能力이 매우 적다.

③ 指定流量 이상의 유량을 洪水調節 대상으로 한다(水力發電所 댐관리규정 제 5조 1항).

④ 限界放流量(豫備放流量 限界)은 댐 하류하천의 홍수피해 등을 고려하여 정해진 값이다(災害對策本部 댐 조작기준 제 3조 2항).

⑤ 昭陽江댐의 最大放流量은 洪水位에서 방류할 수 없는 최대량이고, 華川댐의 경우에는 滿水位에서 방류할 수 있는 최대량이다.

⑥ 昭陽江댐은 댐의 구조적 문제 때문에 700 m³/sec 이하로는 방류할 수 없다(昭陽江 多目的 댐 관리규정 제12조 1항).

또한 洪水時 댐 운영 방안의 수립에 있어서,

관계 法令의 내용 중 다음의 사항을 분석하여 반영하였다.

- ① 유입량 豫測에 의한 洪水調節
- ② 下流의 流況을 고려한 洪水調節
- ③ 洪水期間 중의 制限水位에 관한 사항

2.2 圖 유입량 자료의 분석

本 論文에서는 각종 분석을 위한 頂유입량 자료로서 각 壩의 頻度別 洪水水文曲線을 사용하였다. 昭陽江壩의 경우에는 기존의 자료들⁽¹⁰⁾ 사용하였으며, 華川壩의 경우에는 기존의 자료가 없을 뿐만 아니라 上流 流域에 대한 降雨資料 및 流出模型의 不在 또는 不正確 때문에 精確한 洪水水文曲線의 도출이 사실상 불가능하므로 다음과 같은 방법에 의하여 頻度別 洪水水文曲線을 구하였다. 즉, 먼저 Peaks-Over-Threshold(POT)⁽¹¹⁾ 방법에 의하여 華川壩의 最大流入量(inflow peak)에 대한 頻度解析을 행한 후 昭陽江壩의 頻度別 洪水水文曲線을 最大流入量의 比로 확대하여 華川壩의 洪水水文曲線으로 사용하였다.

POT 방법에 의한 最大流入量의 頻度解析에 있어서 1974年~1983年의 華川壩 유입량 자료 중 크기 순으로 선택한 30개의 頂두유량 자료를 表 2.2와 같이 사용하였다. 昭陽江壩의 頻 유입량 (m³/sec)

表 2.2. 頻度解析에 이용한 華川壩의 頂두유량 자료
단위 : m³/sec

발 생 일	頂 두 유 량	발 생 일	頂 두 유 량
1974. 8. 3	2,023	1978. 8. 11	1,611
8. 6	2,340	8. 15	1,675
1975. 7. 11	2,776	8. 16	2,386
7. 15	3,568	8. 19	4,149
7. 20	2,744	1979. 8. 2	6,302
7. 25	3,207	8. 4	6,667
9. 3	2,276	1981. 7. 2	3,431
9. 4	2,567	7. 12	3,159
9. 7	1,757	8. 18	3,173
1976. 8. 13	3,162	9. 2	7,757
8. 20	1,529	1982. 8. 15	5,410
1978. 6. 27	3,584	8. 20	1,713
6. 30	2,459	8. 28	2,112
7. 12	2,832	1983. 7. 25	2,547
7. 16	1,623	8. 1	5,120

度別 洪水水文曲線(既存)의 最大流入量과 POT 방법에 의하여 구한 華川壩의 頻度別 最大流入量의 비교는 表 2.3과 같다. 그림 2.1은 昭陽江壩의 頻度別 洪水水文曲線을 最大流入量의 比로 확대한 華川壩의 頻度別 洪水水文曲線을 나타내고 있다. 또한 POT 방법에 의하면 華川壩의 指

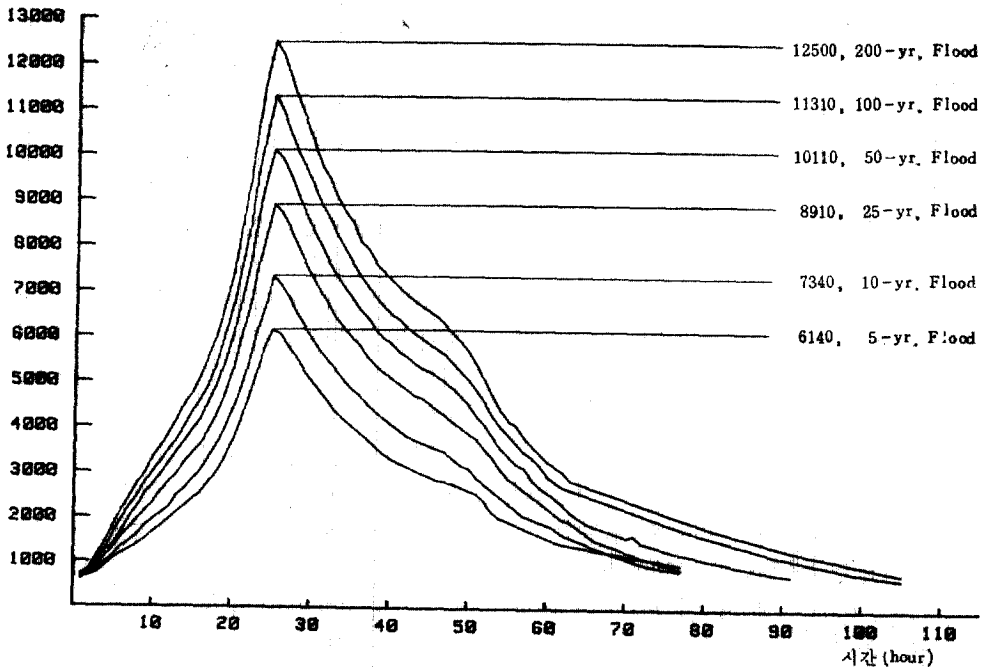


그림 2.1. 華川壩의 頻度別 洪水水文曲線

表 2.3. 昭陽江댐 및 華川댐의 頻度別 最大流入量
단위 : m³/sec

빈도(年)	5	10	25	50	100	200
소양강댐	4,100	5,300	6,900	8,200	9,400	10,500
화천댐	6,140	7,340	8,910	10,100	11,310	12,500

定流量 1,000 m³/sec는 약 0.25年 頻度の 洪水量이며, 計劃洪水量 9,500 m³/sec는 약 66年 頻度の 洪水量이다.

2.3. Storage Indication 식의 도출

화천댐과 소양강댐의 저수위에 따른 방류능력을 決定하기 위하여 各 댐의 수위-저류량 관계와 수위-방류량 관계^(9,10)를 이용하여 各 댐의 수문일류부를 고려한 회귀분석에 의하여 구한 Storage Indication 식은 式 (2-1)과 (2-2)이다.

① 화천댐

$$\begin{aligned}
 O &= 0.5725(SI-383)^{1.4695}, H \leq 175.0 \text{ m} \\
 &= 0.0095(SI-383)^{2.4485}, \\
 &\quad 175.0 \text{ m} < H \leq 176.6 \text{ m} \\
 &= 0.0921(SI-383)^{1.9701}, \\
 &\quad 176.6 \text{ m} < H \leq 178.0 \text{ m} \cdots (2-1) \\
 &= 0.3310(SI-383)^{1.7186}, \\
 &\quad 178.0 \text{ m} < H \leq 179.3 \text{ m} \\
 &= 0.8013(SI-383)^{1.5552}, H > 179.3 \text{ m}
 \end{aligned}$$

② 소양강댐

$$\begin{aligned}
 O &= 0.914(SI-2025)^{1.2847} \cdots \cdots \cdots (2-2) \\
 \text{여기서, } SI &= S + \frac{1}{2} \Delta t \cdot O, \Delta t = 3,600 \text{ sec이다.}
 \end{aligned}$$

이상의 Storage Indication 식을 사용하여 구한 값이, 주어진 저수량에서 방류 가능한 최대량이 된다.

3. Simulation 에 의한 昭陽江댐 및 華川댐 運營模型의 개발

3.1. 접근방법

本 論文에서는 昭陽江댐 및 華川江댐의 最適 運營을 위한 方法으로서 Simulation 기법을 사용하였으며 그 評價基準(performance measure)으로는 두 댐 하류의 合流點에서의 尖頭流量(peak discharge)을 最小化하도록 하였다. Simulation의 初期值로는 各 댐의 단일댐 運營 방

안(single dam operation rule)에 의하여 계산된 방류량 값을 사용하였으며, 단일댐 運營 방안에 있어서는 예측 유입량을 고려하였다. 즉, 洪水豫測模型으로부터 예측된 댐유입량 및 단일댐 運營 방안에 의하여 방류량을 결정한 후 하도 추적에 의하여 合流點에서의 유량 변화를 예측하여 그 尖頭流量을 最小化하도록 댐방류량을 다시 조정하도록 하였다.

洪水時 단일댐 運營 방안으로서는 댐의 水門을 모두 열어 놓거나 일정한 開度로 고정하여 自然히 방류시키는 自然調節(uncontrolled release), 일정한 수위를 유지하도록 하는 Automatic ROM⁽¹²⁾, 一定率·一定量 방류에 의하는 Rigid ROM⁽¹¹⁾, 예측 유입수문 곡선으로부터 구한 일정량 방류의 Technical ROM⁽¹¹⁾ 등을 들 수 있다. 洪水調節容量이 비교적 적은 華川댐에 대해서는 단일댐 運營 방안으로서 自然調節에 의한 方法을 적용하였으며, 昭陽江댐에 대해서는 Technical ROM 및 Rigid ROM을 각각 적용하여 그 結果를 비교, 분석하였다.

Simulation에 있어서 저수지 추적 方法으로는 貯溜指示法(storage indication method)⁽¹³⁾을 사용하였으며, 하도 추적 方法으로는 貯溜函數法(storage function method)⁽¹⁴⁾을 사용하였다. 또한 華川댐 하류의 支川流入量(lateral inflow)은 華川댐 유입량을 해당 구역과 華川댐 상류 구역의 면적비로 축소하여 사용하였다. Simulation 과정을 나타내는 개략적 흐름도는 그림 3.1과 같다.

3.2. 華川댐 運營 방안

3.2.1. 自然 조절 방안의 수립

華川댐은 洪水調節容量이 적으므로 自然調節 方法을 사용하되 最大 저수위 EL. 181.0 m, 한계 방류량 3,000 m³/s의 두 가지 制約條件을 반영하였다.

貯水位의 制約은 댐의 安全에 관련되며 放水量의 制約은 댐하류의 洪水被害에 관련된 것으로서 이들 條件이 相反되는 경우에는 貯水位 制約條件을 우선토록 하였다(그림 3.2).

3.2.2. Simulation 및 結果의 해석

댐의 初期水位를 制限水位인 EL. 175 m로 하여 華川댐 運營 방안에 의한 Simulation을 행

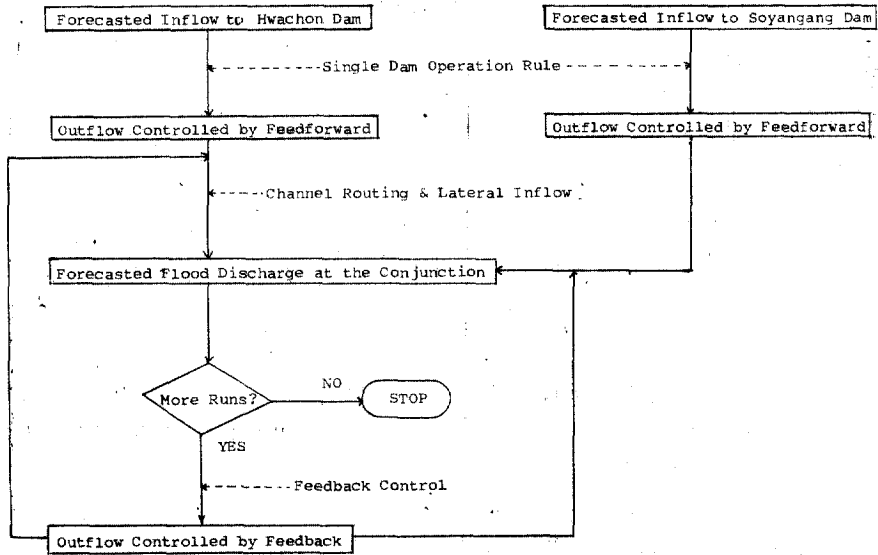
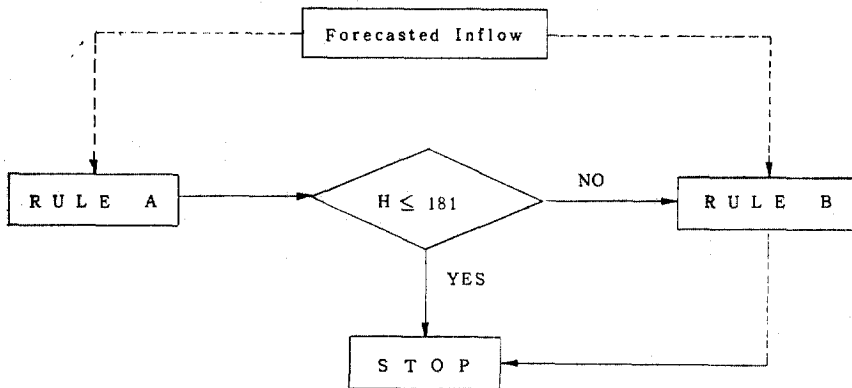


그림 3.1. Simulation에 의한 운영모형의 흐름도



RULE A : Uncontrolled Release with the restriction, $Q \leq 3000 \text{ m}^3/\text{sec}$

RULE B : Fully Uncontrolled Release

그림 3.2. 華川댐 운영방안에 관한 흐름도

表 3.1. 화천댐 운영 방안에 의한 Simulation 결과(방류량)

빈 도 (year)	최대 유입량 (m^3/sec)	최대 방류량 (m^3/sec)	조 절 륜 (%)
5	6,140	4,112	33
10	7,340	4,942	33
25	8,910	6,130	31
50	10,110	6,940	31
100	11,310	7,681	32

한 결과는 表 3.1 및 그림 3.3과 같다. 表 3.1에서 조절률은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{조절률} = \frac{\text{최대유입량} - \text{최대방류량}}{\text{최대유입량}} \times 100\%$$

이 결과에 의하면 5年 頻度 이상의 모든 洪水에 대하여 방류량이 限界放流量 $3,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 초과하고 있으며, 조절률은 洪水 頻度에 관계없이 거의 일정한 값을 보이고 있다. 또한 25年 頻度 이상의 홍수에 대하여 댐수위가 滿水位 El. 181 m를 넘고 있는데 이는 制限水位를 El.

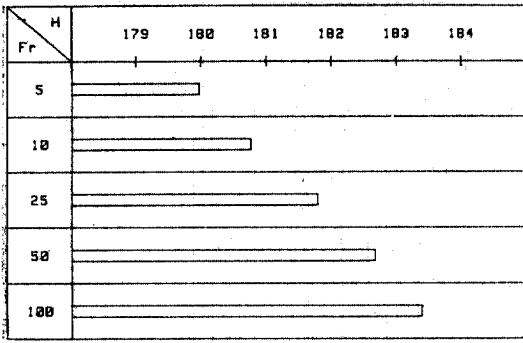


그림 3.3. 華川댐 운영방안에 의한 Simulation 결과(뎀수위)

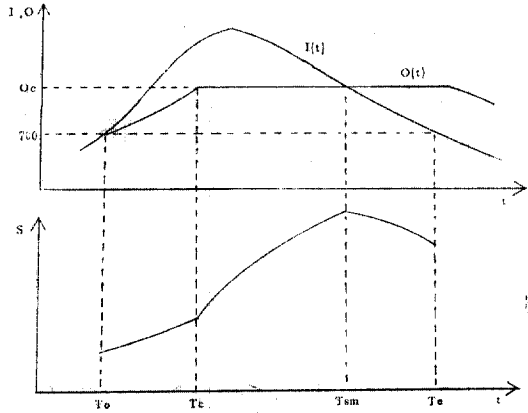


그림 3.4. Technical ROM의 적용

175 m로 할 경우 어떠한 운영 방안으로도 25年 頻度 이상의 洪水를 滿水位 이하에서 조절할 수 없음을 의미한다. 즉, 華川댐의 洪水調節 능력을 향상시키기 위해서는 制限水位의 조정이나 豫備放流에 의한 水位降下가 필요할 것으로 생각된다.

3.3. 昭陽江댐 운영방안

3.3.1. Technical ROM

昭陽江댐 운영 방안의 하나로서 예측 유입량을 이용한 洪水調節 방법인 Technical ROM을 적용하였다. Technical ROM이란 그림 3.4에서 계산 시점 T_0 에서의 뎀수위와 洪水位 사이의 洪水調節容量(S)이 洪水에 의하여 저류되도록 式(3.1)에서 구한 O_c 로 一定量 방류를 행하는 방법이다.

$$S = \int_{T_0}^{T_c} [I(t) - O_c] dt \dots\dots\dots(3-1)$$

여기서 $I(t)$ 는 예측 유입량 곡선이며 T_c 는 $I(t)$ 가 하강하여 O_c 와 같아지는 시각으로 미지수이다. 즉, 式(3-1)에서 O_c 와 T_c 가 미지수이므로 試算法에 의하여 O_c 를 구하게 된다. 그러나 실제로 Technical ROM을 적용함에 있어서 O_c 와 T_c 를 구하는 절차가 복잡하며 많은 계산 시간을 필요로 하기 때문에 T_c 를 유입량이 指定流量인 $700 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 될 때의 시각으로 정함으로써 O_c 만을 미지수로 하였다. 또한 洪水初期에는 뎀수위가 낮은 이유로 一定量 O_c 만큼 방류하지 못할 경우가 발생할 수 있으며(그림 3.4의 $T_0 \sim T_c$ 구간), 이 때 실제로 필요한 調節所要容量은 式(3-1)의 값보다 크게 된다. 이러한 문

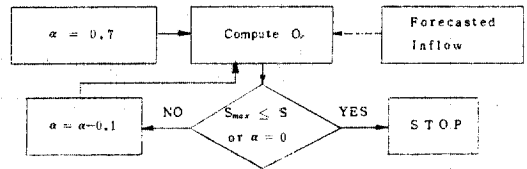


그림 3.5. 昭陽江댐 운영방안(Technical ROM)에 관한 흐름도

제점은 式(3-1)의 S 를 실제의 調節容量보다 작다고 보고 계산하여 O_c 를 상대적으로 크게 함으로써 해결할 수 있다. 즉, 式(3-1)을 다음과 같이 수정한다.

$$\alpha S = \int_{T_0}^{T_c} [I(t) - O_c] dt, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \dots\dots(3-2)$$

이 式으로부터 O_c 를 계산하여 그림 3.4와 같이 저수지 추적을 하였을 때 최대 저수량은 T_{sm} 에서 발생되며 그 값은 T_0 에서의 저수량을 零으로 하였을 때 다음과 같이 된다.

$$S_{max} = \alpha S + \int_{T_0}^{T_c} [O_c - O(t)] dt + \int_{T_{sm}}^{T_c} [O_c - I(t)] dt \dots\dots\dots(3-3)$$

이 때 $S_{max} > S$ 이면 주어진 調節容量을 초과하게 된다. 따라서 α 의 初期值를 0.7로 하여 O_c 를 구한 후 저수지 추적을 하여 저수량이 調節容量 S 를 초과하게 되면 α 를 0.1씩 감소시켜 가며 O_c 의 계산 및 저수지 추적 과정을 반복하도록 하였다(그림 3.5). 만약 $\alpha=0$ 일 때에도 주어진 調節容量을 초과하게 되면 그 때 계산된 O_c 로서 一定量 방류를 하도록 하였으며, 이 때 뎀수위는 洪水位를 초과하게 된다. 또한 式(3-2)로부터 계산된 O_c 의 값이 最小放流量 $700 \text{ m}^3/\text{sec}$

보다 작게 되면 $Q_c=700 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 하였다.

3.3.2. Rigid ROM 과의 비교 분석

初期水位를 制限水位인 El. 191 m로 하여 Technical ROM 및 Rigid ROM에 의한 Simulation을 각각 행하여 비교한 결과는 表 3.2 및 그림 3.6과 같다. Rigid ROM의 적용에 있어서는 既開發된 Computer Program⁽¹⁵⁾ 중 저수지 추적 방법을 貯溜指示法으로 수정하고 最小放流量의 制約條件을 적용하여 사용하였다.

表 3.2에 의하면 Technical ROM을 사용할 경우의 최대 방류량이 Rigid ROM을 사용할 경우보다 항상 적으며 모든 頻度의 洪水에 대하여 최대 방류량이 限界放流量 $3,600 \text{ m}^3/\text{sec}$ 을 초과하지 않음을 알 수 있다. 또, 홍수 조절률도 Technical ROM이 Rigid ROM에 비하여 항상 높으며, 홍수 규모가 작을수록 두 방법에 의한 조절률의 差가 커지는 경향을 보이고 있다. 즉, 홍수 규모가 작아짐에 따라 Rigid ROM을 사용할 경우에는 조절률이 감소하는 데 반해, Te-

表 3.2. 소양강댐에 대한 Simulation 결과(방류량)

빈도 (year)	최대 유입량 (m^3/sec)	최대 방류량 (m^3/sec)		조절률(%)	
		R	T	R	T
5	4,100	2,245	700	45	83
10	5,300	2,647	963	50	82
25	6,900	3,277	1,635	53	76
50	8,200	3,362	2,079	59	75
100	9,400	3,677	2,701	61	71
200	10,500	4,040	3,525	62	66

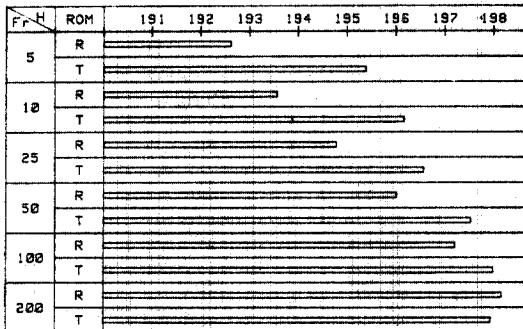


그림 3.6. 昭陽江댐 운영방안에 의한 Simulation 결과(범수위)

chnical ROM을 사용할 경우에는 조절률이 증가하고 있다. 또한 그림 3.6에 의하면 Technical ROM이 Rigid ROM에 비하여 調節容量을 충분히 활용하고 있으며, 이는 홍수 규모가 작을수록 더욱 두드러진다.

이상의 결과를 종합하면, 홍수 규모가 작을수록 Technical ROM은 Rigid ROM에 비하여 주어진 調節容量을 활용하여 방류량을 줄임으로써 높은 홍수 조절률을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 Technical ROM이 홍수 규모에 관계없이 調節容量이 洪水에 의하여 저류되도록 一定量 방류를 하는데 반하여 Rigid ROM은 대규모 홍수를 가정한 운영 방안이기 때문에 소규모 홍수에 적용하였을 때 조절의 효율성이 떨어지기 때문이다. 한편 댐의 안전의 측면에서 볼 때에는 유입량 예측의 불확실성(uncertainty)을 갖고 있는 Technical ROM에 비하여 Rigid ROM이 더 나은 면을 갖는다. 이와 같은 Technical ROM의 불확실성 및 Rigid ROM의 비효율성은 예상되는 홍수 규모에 따라 模型의 매개변수를 조정하는 방법, 또는 洪水가 진행됨에 따라 저수량을 실제의 값으로 대치하고 이로부터 방류량을 결정하는 Adaptive Control 방법 등을 적용함으로써 개선될 수 있을 것이다.

3.4. Feedback Control 模型의 개발

3.4.1. Feedback Control의 방법

3.3.2의 Simulation 결과로부터 알 수 있듯이 華川댐은 洪水調節 능력이 未洽하므로 合流點에서의 最大流量을 最小化시키기 위한 Feedback Control에 있어서 昭陽江댐의 방류량을 조정하도록 하였으며, 그 방법은 다음과 같다. 즉, 각 댐의 단일댐 운영 방안에 의하여 구한 合流點에

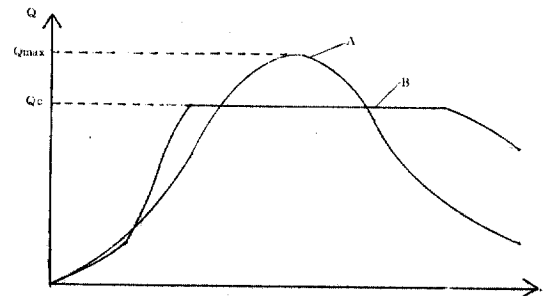


그림 3.7. Feedback Control

서의 유량 곡선(그림 3.7의 A) 중 최대값 Q_{max} 를 다음의 식에 의하여 구한 Q_c 로 감소시키도록 昭陽江댐의 방류량을 재조정하였다.

$$Q_c = \beta \cdot Q_{max}, \quad 0 \leq \beta \leq 1$$

위 식에서 β 의 초기치를 0.95로 하여 Q_c 를 구한 후, 合流點에서의 매시각 유량이 Q_c 를 넘지 않는 범위 내에서 최대가 되도록 昭陽江댐의 방류량을 조정하였다(그림 3.7의 B). 단, 이때 방류량은 限界放流量인 $3,600 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 넘지 않도록 하였다. 이와 같이 방류량을 조정하는 과정에서 방류량이 最小放流量 $700 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이하로 되지 않고 저수량이 調節容量을 초과하지 않으면 β 를 0.05만큼 감소시켜 가며 위의 과정을 되풀이하고, 그렇지 않은 경우에는 이전 과정에서 ($\beta = \beta + 0.05$ 일 때) 구한 매시각 방류량 값 (Q_c^*)에 따라 방류하도록 하였다(그림 3.8).

3.4.2. Simulation 및 결과의 해석

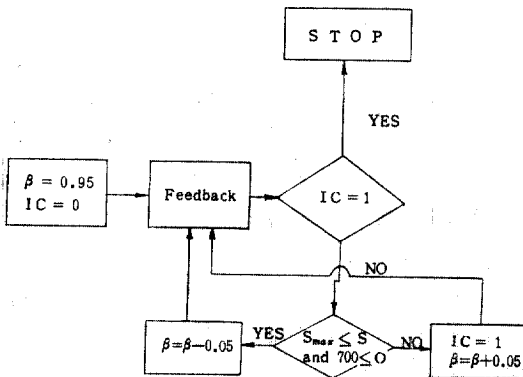


그림 3.8. Feedback Control에 관한 흐름도

각 댐의 頻度別 洪水水文曲線을 유입량 자료로 하고 初期水位를 制限水位로 하여 단일댐 운영 방안 및 Feedback Control에 의한 Simulation을 행하였다. 昭陽江댐 운영 방안으로는 Rigid ROM과 Technical ROM을 적용하였으며, 각 경우에 대한 비교는 表 3.3과 같다. 여기서 조절물은 Feedback Control에 의한 合流點 最大流量의 감소율로서 그 값은 결국 $1 - \beta$ 와 같다. 表 3.3에 의하면 Feedback Control 이전의 合流點 最大流量(Q_{max})은 Technical ROM을 사용한 경우에 더 작은 값을 보이고 있는데 이는 Technical ROM에 의한 昭陽江댐 방류량이 Rigid ROM에 의한 것보다 작기 때문이다. 한편 Feedback Control에 있어서 Q_{max} 의 값은 Q_c 의 初期值를 결정해 주며, β 의 변화폭을 아주 작게 하면 Technical ROM 및 Rigid ROM으로부터 구한 Q_c^* 는 결국 동일한 값에 수렴하게 된다. 表 3.3은 β 의 변화폭을 0.05로 하였을 때의 Q_c^* 의 값으로 단일댐 운영 방안에 관계없이 거의 같음을 알 수 있다. 즉, 上記한 Feedback Control 模型을 사용하였을 때 合流點 最大流量은 단일댐 운영 방안에 관계없이 거의 일정한 값을 갖게 된다.

4. 模型의 敏感度 분석

4.1. 洪水期間 中的 制限水位에 따른 분석

4.1.1. 制限水位의 검토

현재 昭陽江댐 및 華川댐의 制限水位는 각각 El. 191 m 및 El. 175 m로 되어 있으나, 利水의 측면을 고려할 때 洪水期間 후반부로 갈수록 댐

表 3.3. Feedback 전후의 합류점 최대 유량의 변화

빈도 (year)	Feedback 전 (m^3/sec)		Feedback 후 (m^3/sec)		조절물 (%)	
	Rigid	Technical	Rigid	Technical	Rigid	Technical
5	7,103	5,590	5,682	5,590	20	0
10	8,444	6,842	6,755	6,842	20	0
25	10,389	8,944	8,311	8,050	20	10
50	11,649	10,366	9,319	9,329	20	10
100	12,806	11,876	11,525	11,282	10	5
200	14,127	13,660	14,127	13,660	0	0

수위를 이보다 높게 유지함이 불가피할 것이다. 또한 華川댐의 경우에는 홍수조절용량을 늘리기 위한 制限水位의 降下도 고려할 필요가 있을 것으로 보인다. 梁興錫과 朴永文⁽¹⁶⁾은 華川댐의 旬別 制限水位를 表 4.1과 같이 제안하고 있으며, 昭陽江댐 Design Report에서는 昭陽江댐의 月別 制限水位를 表 4.2와 같이 제안하고 있다. 洪水期間 중의 差等 制限水位 설정 문제는 댐의 장기 운영에 관계된 연구 과제이며, 여기서는 制限水位의 변화에 따른 단일댐 운영 방안의 敏感度 분석을 행하기로 한다.

表 4.1. 華川댐의 旬別 制限水位案

제한수위 (El. m)	8월			9월	
	1일	11일	21일	1일	11일
	175.8	176.8	179.1	179.8	무제한

表 4.2. 昭陽江댐의 月別 制限水位案

제한수위 (El. m)	7월	8월	9월~6월
	193.5	195	196

4.1.2. 制限水位의 설정에 따른 분석

華川댐의 制限水位를 中央 4개 水門의 Crest 높이인 El. 173 m 및 表 4.1의 9月初旬에 대한 制限水位인 El. 179.8 m로 하여 華川댐 운영 방안에 의한 Simulation을 행하였으며 그 결과는 表 4.3 및 表 4.4와 같다. 이 결과에 의하면 10年 頻度 이상의 洪水에 대해서 制限水位를 El. 173 m로 낮추거나 El. 179.8 m로 높임에 따른 최대 방류량 및 최고 수위의 변화가 매우 작은 것으로 나타나고 있다. 制限水位를 낮출 경우 최대 방류량이 그다지 감소하지 않는 것은 홍수 초기의 방류량이 적으므로 저수량이 상대적으로 늘어나 최대 방류량이 되는 시각의 저수량이 크게 줄어들지 않기 때문이며, 반대로 制限水位를 높일 경우에는 홍수 초기의 방류량이 커지는 데 따른 수위 저하로 최대 방류량이 크게 늘어나지 않고 있다. 단, 5年 頻度の 洪水에 대해서는 制限水位를 El. 173 m로 낮출 경우 滿水位 El. 181 m 이하에서 限界放流量 3,000

表 4.3. 制限水位에 따른 최대 방류량(華川댐)
단위 : m³/sec

제한수위 (El. m)	173	175	179.8
빈도(year)			
5	3,000	4,112	4,396
10	4,754	4,942	5,214
25	5,985	6,130	6,343
50	6,800	6,940	7,160
100	7,545	7,681	7,892

表 4.4. 制限水位에 따른 최고 수위(華川댐)
단위 : El. m

제한수위 (El. m)	173	175	179.8
빈도(year)			
5	180.63	179.96	180.23
10	180.56	180.73	180.97
25	181.58	181.75	182.00
50	182.53	182.68	182.92
100	183.34	183.49	183.71

m³/sec 이하로 방류량을 조절할 수 있는 것으로 나타났다.

昭陽江댐의 制限水位를 El. 193.5 m 및 El. 196 m로 하여 Rigid ROM 및 Technical ROM에 의한 Simulation을 행하였으며 그 결과는 表 4.5 및 表 4.6과 같다. 表 4.5에 의하면 制限水位를 El. 193.5 m 또는 El. 196 m로 높임에 따라 최대 방류량이 증가하나, Technical ROM을 사용할 경우에는 거의 限界放流量 3,600 m³/sec 이하에서 방류량을 조절할 수 있다. 그러나 表 4.6에서 알 수 있듯이 댐 수위에 있어서는 制限水位를 El. 196 m로 했을 때 25年~50年 頻度 이상의 洪水에 대하여 각각 洪水位 El. 198 m를 넘게 된다.

이상의 결과를 종합하면, 華川댐의 경우에는 10年 頻度 이상의 洪水에 대해서는 制限水位의 降下로 인한 洪水調節 효과의 향상을 기대하기 어려우나 5年 頻度 이하의 洪水에 대해서는 制限水位의 降下로써 限界放流量 이하로 방류량을 조절할 수 있다. 또한 制限水位를 높이는 데 따른 최대 방류량 및 최고 수위의 증가는 매우 적

表 4.5. 制限水位에 따른 최대 방류량(昭陽江댐)

단위 : m³/sec

제한수위 (El. m)	191		193.5		196	
	Rigid	Tech.	Rigid	Tech.	Rigid	Tech.
빈 도(year)						
5	2,245	700	2,346	874.3	2,546	1,396
10	2,647	963	2,926	1,379	2,926	1,970
25	3,277	1,635	3,435	2,024	3,701	2,813
50	3,362	2,079	3,808	2,536	4,330	3,170
100	3,677	2,701	4,171	3,316	4,910	3,371
200	4,040	3,525	4,524	3,565	5,322	3,617

表 4.6. 制限水位에 따른 최고 수위(昭陽江댐)

단위 : El. m

제한수위 (El. m)	191		193.5		196	
	Rigid	Tech.	Rigid	Tech.	Rigid	Tech.
빈 도(year)						
5	192.61	195.39	194.61	196.70	197.01	197.81
10	193.57	196.17	195.10	196.92	197.47	197.91
25	194.78	196.57	196.10	197.42	198.43	197.96
50	196.00	197.53	197.38	197.98	199.60	198.82
100	197.21	197.99	198.52	198.21	200.50	199.77
200	198.16	198.23	199.41	199.19	201.12	200.42

으므로 利水의 觀點에서 볼 때 洪水期間 후반부에 制限水位를 높게 유지하는 것도 바람직하다. 반면에 昭陽江댐의 경우에는 制限水位를 높임에 따른 댐수위의 상승이 두드러지며, 따라서 差等 制限水位의 설정에 앞서 月別 또는 旬別 洪水量의 크기 등에 대한 신중한 검토가 선행되어야 할 것이다.

4.2. 降雨의 時間的·空間的 分布에 따른 분석

漢江 流域에 내리는 豪雨는 그 성격상 크게 颱風型 및 前線型 降雨로 나눌 수 있다. 颱風型 降雨의 경우에는 颱風의 이동에 따라 降雨의 中心이 이동하여 地域마다 降雨의 時間差가 발생하게 된다. 또한 前線型 降雨의 경우에는 降雨이 지역마다 산발적으로 발생하는 경우가 많으며, 이로 인하여 降雨의 時間的, 空間的 分布가 생겨나게 되고, 따라서 각 댐에서의 洪水 발생시각 및 洪水의 크기가 좌우된다. 여기서는 이러

한 降雨의 時間的, 空間的 分布에 따른 合流點의 유량 변화 및 Feedback Control 模型의 敏感度 분석을 행하기로 한다.

4.2.1. 降雨의 時間的 分布에 따른 분석

25年 頻度の 洪水水文曲線을 유입량 자료로 하고, 각 댐에서의 洪水 발생시각을 변화시켜 가며, 3.4.2에서와 같이 Simulation을 행한 결과는 表 4.7과 같다. 이 결과에 따르면, Technical ROM을 사용할 경우 두 댐의 洪水 발생시각의 差에 따른 Feedback Control 이전의 合流點 最大流量의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 한편 Feedback Control 후의 合流點 最大流量은 3.4.2에서의 결과와 마찬가지로 昭陽江댐의 단일댐 운영 방안에 관계없이 근사한 값을 나타내고 있으며, 또한 각 댐의 洪水 발생시각에 따른 변화도 매우 작음을 나타내고 있다. 즉, 降雨의 時間的 分布에 따른 Feedback Control 模型의 敏感度

表 4.7. 降雨의 間時分布에 따른 合流點 최대유량의 변화

홍수 시작 시각		Feedback 전 (m ³ /sec)		Feedback 후 (m ³ /sec)		조 절 륜 (%)	
소양강댐	화 천 댐	Rigid	Tech.	Rigid	Tech.	Rigid	Tech.
t	t-24	8,671	8,622	8,237	8,190	5	5
t	t-12	9,532	8,944	8,103	8,050	15	10
t	t	10,389	8,944	8,311	8,050	20	10
t	t+12	10,400	8,935	8,320	8,041	20	10
t	t+24	10,577	8,925	8,461	8,032	20	10

表 4.8. 降雨의 空間分布에 따른 合流點 최대유량의 변화

빈 도 (year)		Feedback 전 (m ³ /sec)		Feedback 후 (m ³ /sec)		조 절 륜 (%)	
소양강댐	화 천 댐	Rigid	Tech.	Rigid	Tech.	Rigid	Tech.
25	5	7,994	6,525	5,596	5,873	30	10
25	10	8,975	7,514	6,731	6,763	25	10
25	50	11,362	9,922	9,090	9,426	20	5
25	100	12,251	10,810	10,414	10,270	15	5
25	200	13,211	11,770	11,229	11,181	15	5
5	25	9,518	8,009	8,090	8,009	15	0
10	25	9,861	8,272	8,875	8,272	15	0
50	25	10,671	9,388	8,537	8,449	20	10
100	25	10,962	10,010	9,318	9,509	15	10
200	25	11,324	11,834	11,324	11,834	0	0

가 매우 낮음을 알 수 있다.

4.2.2. 降雨의 空間的 分布에 따른 분석

昭陽江댐 및 華川댐의 洪水 규모를 변화시켜 가며 3.4.2에서와 같은 방법으로 Simulation 하여 合流點에서의 유량을 구하였으며 그 결과는 表 4.8과 같다. 이 결과에 의하면 昭陽江댐의 洪水 규모가 일정할 경우 華川댐의 洪水 규모가 작을수록 Feedback Control에 의한 조절 효과가 큰 것으로 나타나고 있는데, 이는 華川댐의 洪水 규모가 작을수록 合流點 유량 중 昭陽江댐 방류량이 차지하는 비중이 상대적으로 크기 때문이다. 또한 華川댐의 洪水 규모가 일정할 경우 昭陽江댐의 洪水 규모에 따른 合流點 유량의 조절 효과는 表 3.3과 같은 양상을 보이고 있다. 이는 Feedback Control 模型이 昭陽江댐을

대상으로 하고 있기 때문에 나타나는 결과이다.

5. 結 論

本 論文에서 개발한 洪水調節 模型 및 이에 대한 각종 분석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

① 華川댐은 洪水調節容량이 未洽하므로 自然調節에 의하여 洪水를 조절하도록 하였다. 그러나 制限水位를 현재의 El. 175 m로 유지할 경우 5年 頻度 이상의 洪水를 滿水位인 El. 181 m 이하에서 限界放流量인 3,000 m³/sec 이하로 조절할 수 없으며, 25年 頻度 이상의 洪水에 대해서는 滿水位 이하에서 조절할 수가 없다. 또한 制限水位를 El. 173 m로 낮출 경우에는 5年 頻

度 이하의 洪水에 대해서는 限界放流量 이하에서 조절할 수 있으나, 10年 頻度 이상의 洪水에 대해서는 이에 따른 방류량의 경감 및 댐수위의 저하 효과가 거의 없다. 한편 制限水位를 현재보다 높게 유지할 경우 이에 따른 방류량의 증가 및 댐수위의 상승 또한 매우 적으므로, 洪水期間 후반부에 利水를 고려하여 制限水位를 높게 유지하는 것도 바람직할 것이다.

② 昭陽江댐의 운영 방안으로서 Rigid ROM은 대규모 홍수를 가정하여 수립된 방법으로서 댐의 안전이라는 면에서는 좋은 방법이나, 홍수량의 경감에 있어서는 효율적인 방법이 못된다. 반면 Technical ROM은 洪水豫測 模型으로부터 구한 예측 유입량 자료를 이용하여 주어진 空容量을 충분히 활용하여 방류량을 최대한 경감시키는 효율적인 방법이나, 유입량 예측의 불확실성에 따른 위험을 내포한다.

③ Feedback Control 후의 合流點 유량은 昭陽江댐의 운영 방안으로서 어떤 방법을 사용하는가에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 따라서 전체 洪水調節 模型을 놓고 볼 때 Feedback Control을 포함할 경우에는 昭陽江댐의 운영 방안으로서 Technical ROM 또는 Rigid ROM 중 어느 방법을 사용하더라도 무방할 것으로 보이며, 이 때 Rigid ROM을 사용할 경우에도 Feedback Control을 위한 유입량 예측을 필요로 한다. 또한 降雨의 時間的 分布에 따른 Feedback Control 模型의 敏感度는 매우 낮은 것으로 나타났다.

謝 辭

이 論文은 1985年度 문교부 학술연구조성비에 의하여 研究되었으며, 연구수행에 도움을 준 漢江洪水統制所에 謝意를表한다.

참 고 문 헌

1. 권오현, 함세진, "북한강 댐군의 최적 운영을 위한 시스템 모델의 개발," 土木學會誌, 제28권 제4호, 1980. 8, pp.95~104.

2. 양홍석, "Dynamic Programming에 의한 최적 제어", 전기학회지, 제22권 제2호, 1973. 3, pp. 61~67.
3. Becker, L., and W.W.G. Yeh, "Optimization of a Multiple-Reservoir System", WRR. 10(6), 1974, pp.1107~1112.
4. 이길성, "저수지 최적운영을 위한 시스템 해석기법의 적용", 한국수문학회 특강교재, 1983. 7. 30.
5. Windsor, J.S., "Optimization for the Operation of Flood Control System", WRR. 9(5), 1973, pp.1219~1226.
6. 김치홍, "Dynamic Programming에 의한 洪水調節", 土木學會誌, 제20권 제2호, 1972. 6, pp. 9~21.
7. Jamieson, D.G., "A Short-Term Control Strategy for Multipurpose Reservoir System", WRR. 8(4), 1972, pp.911~920.
8. 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.
9. 發電部, 水力發電所運用資料集, 韓電, 1983, pp. 194~209.
10. Nippon, Koei Co. LTD., Soyang Gang Multi-Purpose Project Design Report, Vol. 1, 1969, pp. 71.
11. Kottegoda, N.T., Stochastic Water Resources Technology, Macmillan Press LTD, 1980, pp. 247~250.
12. Nippon Koei Co. LTD., Daechong Multi-purpose Dam Project Report on Spillway Gate Operation during Flood Period, 1976, pp. 12~19.
13. 鮮于仲皓, 水文學, 東明社, 1983, pp. 280~285.
14. 漢江洪水統制所, 忠州 多目的댐 建設에 따른 漢江洪水 豫警報 프로그램 改善 報告書, 建設部, 1983, pp.106~117.
15. 漢江洪水統制所, 漢江 洪水 豫警報 프로그램 改善 報告書, 1975, pp.2-67~2-71.
16. Yang, H.S., and Y.M. Park, "Report of Research Institute of Industrial Science", Vol. 1, No. 1 1976.

(接受: 1985. 10. 30)