

洪水期中 實時間 저수지 운영 (I)

- 大淸댐의 단일 저수지 운영 방안 -

Real-time Reservoir Operations during Flood Period (I)

- Single Reservoir Operating Rules at Daecheong Dam -

인하대학교 토목공학과 부교수 심 명 필
서울대학교 토목공학과 교 수 선우중호
국민대학교 토목공학과 교 수 박 인 보

요 지

洪水期中에는 降雨, 流出, 貯水地 및 下流 水位 등의 수시로 변하는 자료들을 on-line system으로 읽어서 實時間으로 저수지를 운영하므로써 현상태에서의 최선의 放流量을 결정하는 것이 가장 바람직하며, 이를 위한 선행조건으로 정확한 降雨 및 流出豫測模型과 下流의 洪水追跡模型이 연계 된다면 저수지의 홍수조절 용량을 최대한 활용하여 최적의 방류량을 결정할 수 있다.

본 연구에서는 洪水期中 실시간 저수지 운영을 위해 여러가지 제약조건을 고려한 모델을 개발하여, 단일 저수지인 大淸 多目的 댐을 대상으로 적용하였다. 예측 유입량 대신에 재현기간별 홍수수문곡선과 실제의 저수지 유입량을 이용했으며, 하류의 홍수추적 모형은 일정한 유량을 방류하는 것이 가장 안전하다고 가정하여 최대 방류량을 변화시키므로써 河道 追跡模型을 대신 하였다. 본 모델은 별도의 강우·유출예측모형과 河道의 홍수추적모형과 더불어 종합적인 실시간 저수지 운영모델이 된다.

1. 서론

일반적으로 저수지 운영방안은 장기적인 운영방안과 단기적인 운영방안으로 나눌 수 있으며 전자는 비홍수기의 용수공급과 발전등의 이수대책이며 후자는 홍수기중의 최적의 홍수조절을 통한 치수대책을 뜻한다. 단기적인 홍수조절 방법으로 SRC, Rigid ROM (Rigid Reservoir Operation Method), Technical Rom 등의 모의기법(Simulation)에 의한 방안과 LP, DP, IDP, DDDP 등을 이용한 최적화 기법(Optimization)등이 이용되고 있다. 모의기법에 의한 방안은 일반적으로 최적해를 얻기는 어려우나 상세하고 복잡한 문제및 불확성이나 가변성을 포함한 문제를 다루기에 적합하며, 최적화기법은 최적운영방안을 얻을 수 있으나 시간별 운영에 따른 상태변수의 다원화에 따른 Computer의 기억용량과 많은 계산을 요한다. 홍수조절을 위한 실시간저수지 (Real-time Reservoir Operation)운영은 예측유입량의 불확실성으로 인해 최적화 기법을 이용한 연구는 거의 없는 편이다.

2. 모형의 개발

2.1 기본원칙

홍수기중 적절한 홍수조절을 위해서는 다음의 몇가지 원칙을 지켜야한다.

- (1) 홍수기중에는 홍수조절이 주목적이므로 초기에는 제한수위(THWL: Temporary High Water Level)를 유지하여 저수지의 홍수조절용량을 최대한 이용하여야 하나, 비홍수기에는 상시만수위(HWL)를 유지하여 수자원의 확보도 고려하여야 한다.
- (2) 댐 수위는 구조물의 안전을 위해 계획홍수위 (FWL : Flood Water Level)를 넘어서는 안된다.
- (3) 방류량은 여수로의 최소방류량 (QMIN)을 넘어야 하나 최대방류량 (QMAX)은 넘을 수 없으며, 방류에 의한 하류의 피해를 최소로 한다.
- (4) 실시간 방류를 하여 예측유입곡선으로부터 각 시점에서의 최적치를 방류한다.

2.2 방류량의 결정방법

홍수기중에는 예측시점에서의 수위는 제한수위보다 높거나 낮을 수가 있으나, 사전예보 시간을 지켜야하고 급격한 방류량의 변화는 피해야 한다. 방류량의 결정시간은 한시간 단위로 했으며 단위시간 동안은 수문조작을 통해 일정량을 방류하는 것으로 가정한다.

(가) 방류형태에 따른 해석

방류량의 결정은 홍수조절을 원칙으로 하여야 하나, 비교적 큰 홍수가 아닌 경우에는 예측유입량의 불확실성으로 인한 초기의 불필요한 방류는 가급적 피하여 용수보존의 측면도 고려하도록 한다. 즉, 실제유입량의 변경으로 인해 발생할 수 있는 방류 말기의 댐수위가 제한수위 이하로 내려가는 것은 방지하고 비홍수기에는 만수기를 유지하도록 하여야 한다.

하도의 홍수추적에 의한 완전무해유량(QFREE)을 결정하여 완전무해방류량(QFREE)을 기준으로 방류방법을 달리한다. QFREE는 일정량을 계속 방류할 경우 하도가 안전한 값으로서, 외수위 증가에 의한 하류지역의 내수 배제불량으로 인한 침수등과 하류의 현재상황을 충분히 고려하여 낮은 값 중에서 최대치를 취한다. 댐관리 규정에 명시된 예비방류량(QPRE)은 사전예비방류를 위한 최대치로서 고정된 값이나 완전무해방류량(QFREE)은 하류의 상황에 따라 시간별로 다른 값이므로 안전치를 취해야 한다. 실례로 대청댐의 경우에는 하류지역이 비교적 저지대이고 제방이 낮아서 대청댐의 직접방류가 아니더라도 쉽게 홍수터화하는 경우가 많으므로 하류상황에 따라서는 완전무해방류량(QFREE)은 0으로 둘 수도 있다. 저수지로의 유입량이 예측되면 현재의 댐수위에서 일정량을 방류할 경우 완전무해유량을 넘느냐에 따라서 그림 1에서와 같이 방류기준을 달리하며 다음과 같이 두가지 형태로 나눈다.

- (1) 방류량이 전기간 동안 완전무해유량 이하인 경우 (Type I)
- (2) 방류량이 전기간동안 완전무해유량을 넘는 경우 (Type II)

(나) 최대 방류량의 해석

홍수기간중에 발전을 하는 경우 발전수량(QPLANT)을 고려했으며 댐으로부터

의 총 방류량은 발전수량과 여수로의 수문을 통한 방류량의 합이 된다. 발전수량의 고려는 댐수위에 따른 여수로의 방류량의 한계를 고려하기 위한 것이며 발전을 안할 경우는 $QPLANT = 0$ 이다.

(다) 사전예보 및 안전율의 고려

최적방류 계열이 전기간 혹은 일부기간 동안 최대방류량(QMAX)을 넘거나, 하류의 수위가 안전수위를 넘게되면 방류시작시간(KI)은 앞당겨져서 제한수위보다 낮은 경우라도 사전방류를 하게된다. 첫운영의 방류시작 시간은 순차적으로 앞당겨지나, 사전예보 시간(3-5시간)을 지켜서 방류로 인한 하류의 피해를 대비하도록 하여야 한다.

방류기간중의 운영에서는 사전예보가 필요없으며 방류시작 시간(KI)은 현재 시간(1)이 된다. 방류기간 중에 예측유입량이 수정되어 보다 큰 유입량이 예측된다면 최대방류량을 넘을 수 없으므로 댐은 위험하게 된다. 이를 위하여 방류중의 예측유입량의 불확실성을 부담하기 위한 안전계수를 고려하였다.

(라) 댐하류의 하도추정

현 시점에서의 최적방류량이 결정되면 댐하류의 하도추적을 통해서 제방의 월류 유무를 계산하게 된다. 현재의 최적방류량 계열로는 하류의 침수위험이 있다고 판단되면 방류시작 시간을 자동적으로 앞당겨서 사전방류를 하게되며, 실시간 예측유입량에 의해 현 시점에서의 홍수조절용량을 최대한 활용하여 댐수위는 계획홍수위에 이르도록 한다.

(마) 침수시간의 고려

앞에서 전술한 (나)-(라)의 조건을 만족하는 현시점 혹은 사전예보시간뒤부터의 최적방류량계열이 댐의 안전에 관련된 최대방류량을 넘거나 하류의 침수가 예상되면 일정량 방류로는 침수를 막을 수 없게 된다. 이러한 경우에는 댐하류의 침수에 의한 피해를 최소로 줄이도록 해야 한다.

그림 2 와 그림 3 은 대청댐에 100년 빈도홍수량이 유입될때 최소침수시간을 달리한 경우를 보여준다. 방류 전기간의 중간부터 최대방류량을 방류하여 침수시간은 각각 전기간의 1/10, 2/10 와 3/10 이다.

2.3 실시간 운영방안

홍수기중 실시간 운영을 위해서는 정확한 홍수예측모형과 하류의 하도추적모형을 통해 예상하류수위 및 피해유무를 알아야한다. 하류의 수리및 지형 특성자료가 없거나 하도추적모형이 없으면 안전계수를 사용하여 최적방류량을 결정할 수 있다. 이러한 경우의 최대방류량(QMAX)은 댐구조물의 안전에 관한 최대치와 하류상황에 따른 통수능력을 고려하여 방류 가능한 최대치중 작은값을 취해야한다.

3. 모형의 적용

3.1 대청댐의 재원 및 관리 규정

금강 유역의 전 유역면적은 9,886 km²이고 대청댐의 유역면적은 전 유역의 40%에 해당하는 4,134km²에 달한다. 금강유역의 1987년도의風水害피해액은 약 2,200억원에 달하며, 이는 대청댐의 직접적인 방류로 초래된 홍수²아니나 하류지역은 비교적 저지대로서 제방이 낮아서洪水터화 할수있고 内水配制의 不良으로 쉽게 침수되는 편이므로 대청댐의 방류로 인해 홍수가 가중되는 위험이있다. 대청댐의洪水調節 容量은 약 2억 5000ton 으로서 주요제원 및 관리규정은 표 1과 같고, 표 2는 대청댐의 홍수기중 방류자료이다.

3.2 운영 방안

홍수기 중의 실시간 저수지 운영을 위해서는 정확한洪水豫測模型과 하류의 홍수추적을 통한 예상 수위 및 피해유무를 알아야한다. 본 연구에서는再現期間別 洪水水文曲線을 이용했으며, 下流追跡模型은 일정한 유량을방류 하는것이 가장 안전하다고 가정하여 최대방류량(Qmax)을 변화시키므로 서 下流追跡模型을 대신하였다. 정확한 下流追跡模型이 개발되면 같은 원리 로 최적 방류량을 결정할수 있다. 대청댐의 방류의 사전예보 시간은 3시간 으로 하였으며 (즉, ipre=3) 방류중 일때는 ipre=0 이 되어 방류는 현 시점 으로 부터 계속된다. 初期豫測水文曲線에 의해 방류

Type을 결정하며, 방류량이 完全無害流量 (Q_k)을 넘는 경우에는 Q_{max} 을 낮은 값으로 취하여 放流開始時間을 당겼으며 일단 방류가 시작되면 Q_{max} 는 $6,000\text{m}^3/\text{s}$ 이 된다. 홍수기중의 발전수량은 $220\text{m}^3/\text{s}$ 을 주었다.

3.3 결과 및 분석

(가) 빈도별 홍수에 의한 방류량

그림 4 에서 그림 9 는 대청댐의 5년, 20년 및 50년 빈도홍수에 대한 방류형태와 수위변화이다. 5년 빈도의 경우에는 초기수위를 75, 76.5(제한수위), 78 m로 각각 가정하였다. 초기수위가 75 m 인 경우에 제한수위를 넘는 시간은 24시이나 방류형태가 Type I 에 해당하므로 댐수위가 77.51 m 에 도달한 28시에는 발전수량을 포함하여 584.39 cms 를 방류한다. 29시부터는 완전무해유량 ($1,000\text{ cms}$)을 방류하게 되어 52시에는 홍수수위인 80.0 m 에 이르게 된다. 홍수가 끝나는 시간인 69시에는 댐수위가 79.61 m 에 달하므로 하류상황에 따라 방류를 조절하여 제한수위 또는 만수위를 유지할 수 있다.

20년 빈도 홍수의 경우에는 초기수위를 제한수위로두고, 사전예보는 0 시간으로 두었다. 그림 6 에서 보면 1시부터 17시까지는 $1,000\text{ cms}$ 를 방류하고 18시부터는 $2,880\text{ cms}$ 를 방류하게된다. 초기의 $1,000\text{ cms}$ 의 방류는 제한수위 이하에서의 사전예비방류량을 적용한 결과이다. 위의 제약을 풀면 두시간의 단계별 방류를 한후 3시부터는 $2,239\text{ cms}$ 를 방류하게 된다. 그림 8 은 50년 빈도홍수의 방류해석으로서 초기수위를 75 m 와 76.5m 로 둔 경우의 최대 방류량은 각각 $2,964\text{ cms}$ 와 $2,393\text{ cms}$ 를 방류하는것을 보여준다.

표 3 은 대청댐의 빈도별 홍수에 따른 여러가지 변수를 달리한 저수지운영 결과를 비교한 것이다. 표에서 최대방류량은 여수로를 통한 방류량으로서 댐하류의 총방류량은 발전수량을 더해야 한다.

(나) 실유입량의 모의 운영

1987.8.29 1:00 에서 9.3 24:00 까지 144시간동안 대청댐의 방류기록을 보면 8월 29일 1시부터 11시간동안은 여수로의 수문은 닫은채 발전수량만 댐하류로 보내었다. 같은날 12시부터 수문을 열고 133시간 동안 방류를 하였으며

방류기간중의 최대방류량은 발전수량 210 cms 를 포함한 3,713 cms 를 13 시간 방류했으며 최고 댐수위는 79.81 m 에 달하였다.

그림 10 은 실제 유입량과 방류량을 나타내며, 실제유입량을 예측유입곡선으로 가정했을때의 최적방류량도 나타내어 비교하였다. 그림에서 보면 계산에 의한 최적방류량은 8월 29일 11시 부터 방류를 시작하며, 최고 방류량은 1,600 cms 이고 최고 댐수위는 80.01 m 에 이른다. 자연현상을 완벽하게 예측하는 것은 불가능하므로 그림 10 은 실시간 운영을 한 결과가 아니고 가상의 최적방류량계열을 의미한다. 그림 11 은 방류에 따른 수위변화를 비교하였다.

(다) 실시간 모의 운영

상기 기간중 실시간으로 운영하기 위해 1987년 8월 30일 12시부터 9월 3일 24시까지 강우유출모형을 이용하여 저수지 유입량을 예측하고 최적방류량을 산정하였다. 초기의 댐수위는 78.0 m 이며 매시간 마다 120시간씩 예측한 저수지 유입량으로부터 최적방류량을 구하여, 처음 한시간 동안은 방류한 뒤에 댐수위를 보정하고 같은 절차를 25 시간 시행하였다. 모의운영 기간중의 발전수량은 220 cms 로 주었다.

대청댐은 댐하류의 제방이 낮아서 하도추적 결과 작은량의 방류에도 수개의 제방이 월류현상을 보였다. 본 저수지운영 모델은 최소침수시간을 유도할 수 있으나 현시점에서는 판정하기가 어려우므로 최소침수시간은 고려하지 고려하지 않았다.

25시간의 실시간 모의운영 결과에 의하면 최대방류량은 3,000 cms를 나타내며 47시간 후인 9월 1일 11시에 최고수위 79.99 m 를 나타낸다. 실시간 운영은 25시간만 했으므로 26시간 후의 값들은 계속적인 저수자유입량의 예측으로 수정되어질 것이다. 그림 12 와 그림 13 은 관측된 실제 값들과 모의 운영한 결과로 부터 의 방류형태와 수위변화를 보여준다. 그림에서 점선은 25시에서의 예측유입량에 의한 최적방류량과 수위변화를 뜻한다.

4. 결론

본연구에서는 홍수기중 실시간 저수지 운영을 위하여 홍수조절과 용수보존의 두목적을 고려한 프로그램을 개발하였다. 대형댐을 대상으로 적용하고 결과를 분석하였으며 결론은 다음과 같다.

1. 대형댐의 경우 재현기간이 5년을 넘는 홍수가 예측될 때는 초기수위가 제한수위보다낮은경우라도방류를하지않으면홍수위를 넘게된다.
2. 실시간 예측수문곡선의 불확실성을 고려하기위해 안전율을 적용하면 수위 이하에서 방류가 가능하며 홍수조절용량을 최대로 이용할 수 있다.
3. 본모델로 단일댐의 실시간 운영을 하는 경우 홍수조절과 용수보존의 두 목적을 충분히 고려할 수 있으므로 다른 단일댐의 경우에는 쉽게 적용할 수 있다.

표 1 대형댐의 제원및 관리규정

저수지 수위 (m)	계획 홍수위(FWL)	80.0
	상시 만수위(HWL)	76.5
	홍수기 제한수위(THWL)	76.5
	저수위(LWL)	60.0
댐높이 (m)	수문월류부	64.5
	바루높이	83.0
저수량 (억 ton)	총저수량	14.90
	유효저수량	7.90
	사수량	4.50
	홍수조절량	2.50
방류량 (m ³ /s)	예비방류량	1,000
	계획홍수량	9,500
	최대방류량	6,000
방류예보시간 (hrs)		3~5
최대발전수량 (m ³ /s)		264

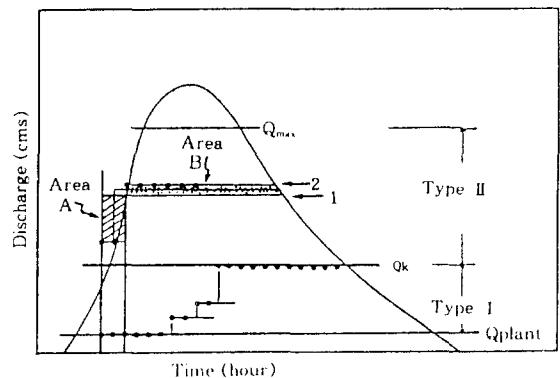


그림 1 방류형태에 따른 분류

표 2 대청댐의 홍수기중 방류자료

연도	강우대상기간	방류기간 여수로	강우기간중 조기수위(m)	방류조기 수위 (m)	방류기간 최고수위(m)	방류말기 수위(m)	최대유입량 (cms)	최대방류량 (여수로+발전) (cms)
1983	7.24 03:00	7.25 01:00	71.95	73.14	73.62	73.62	1,356.7	28 (268)
	-7.24 19:00	-7.25 17:00						
1984	8.02 09:00	9.04 14:00	76.82	78.55	78.61	77.96	4,618.8	1,100 (1,314)
	-9.05 01:00	-9.06 22:00						
1985	8.16 06:00	8.17 14:00	75.30	77.41	78.33	76.59	3,884.4	1,000 (1,218)
	-8.17 21:00	-8.28 09:00						
1987	7.21 17:00	7.24 15:00	71.04	79.17	79.17	76.82	5,214.3	2,000 (2,216)
	-7.27 21:00	-7.29 16:00						
	8.03 14:00	8.04 11:00	76.43	76.46	78.87	77.75	4,057	1,000 (1,218)
	-8.08 1:00	-8.08 24:00						
	8.29 5:00	8.29 12:00	76.08	76.71	79.81	78.01	6,577	3,500 (3,713)
-9.07 18:00	-9.08 24:00							
1988	7.27 01:00	7.27 13:00	71.65	76.83	77.47	75.32	4,104.1	2,781 (3,000)
	-7.29 07:00	-7.29 11:00						

표 3 대청댐의 빈도별 홍수에 따른 저수지 운영 결과

Input Data								Output Data			
홍수의 재현기간 (yr)	초기 수위 (m)	무 해 방류량 (cms)	안전 계수	IPRFQ (2)	예보 시간	방류개시 시간 (hr)	방류개시 수위 (m)	최소방류량 (1) (cms)	최대방류량 (1) (cms)	최대댐수위 발생시간 (hr)	최대댐 수위 (m)
5	75.0	1,000	0.5	0	3	28	77.51	364	780	52	80.00
	78.0	1,000	0.5	0	0	1	78.00	630	1,530	46	80.00
	76.5	1,000	0.5	0	0	1	76.50	355	935	51	80.00
	76.5	500	0.9	0	0	24	76.54	680	680	53	79.98
	76.5	1,200	0.9	0	0	33	78.91	672	980	50	80.00
10	75.0	1,000	0.5	0	3	23	76.66	705	1,630	48	80.00
	76.5	1,000	0.5	0	0	1	76.50	630	1,480	49	80.00
20	76.5	1,000	0.5	0	0	1	76.50	780	2,260	44	79.96
	76.5	1,000	0.5	0	0	1	76.50	780	2,019	49	79.92
50	75.0	1,000	0.5	0	0	1	75.00	780	2,173	49	79.90
	76.5	1,000	0.5	0	0	1	76.50	780	2,744	46	79.94
100	76.0	1,000	0.3	0	3	7	75.92	780	2,789	58	79.93
	76.0	1,000	0.5	0	3	25	76.36	780	4,539	52	79.99
	76.0	1,000	0.7	0	3	26	76.51	780	4,737	52	79.99
	76.5	1,000	0.5	0	0	1	75.00	780	3,261	46	79.97
200	76.5	1,000	1.0	0	0	1	76.50	780	3,880	45	80.00

(1) 최소 및 최대방류량은 여수로를 통한 방류량으로 하류로의 총 방류량은 발전수량을 더해야 한다.

(2) 사전예비방류를 지키면 1이다.

기타자료 : 재한수위 (THWL) = 76.5 m, 계획홍수위 (FWL) = 80.0 m, 최소방류량(QMIN) = 0.0 cms,
한계방류량(QMAX) = 9,455 cms, 사전예비방류량(OPRE) = 1,000 cms, 발전수량(QPLANT) = 220 cms

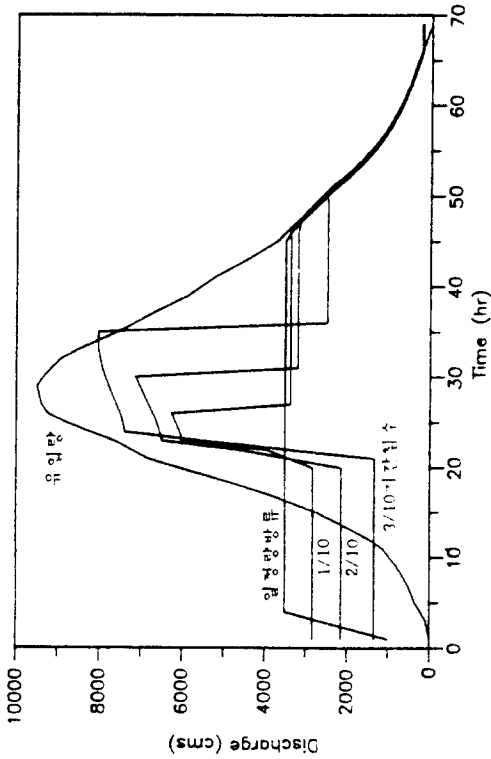


그림 2 최소침수시간의 변화에 따른 반류해석

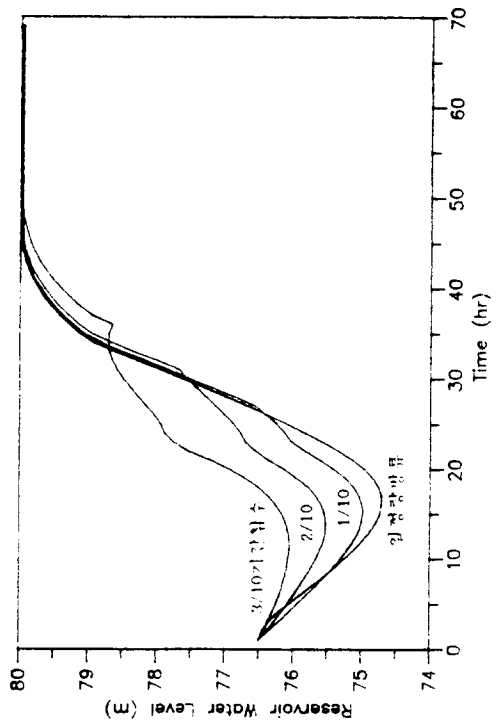


그림 3 최소침수시간의 변화에 따른 수위변화

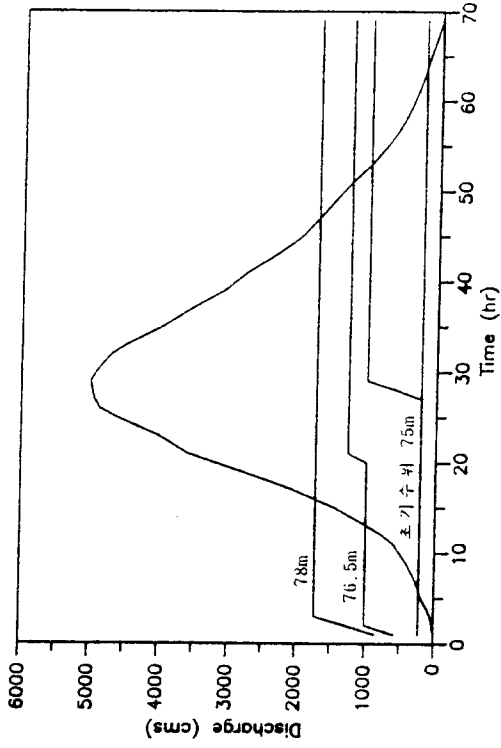


그림 4 내정법의 5년빈도 홍수의 방류형태

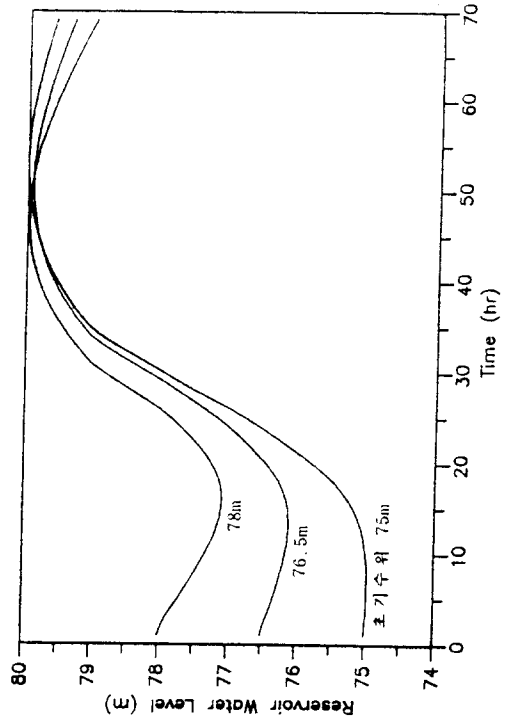


그림 5 내정법의 5년빈도 홍수의 수위변화

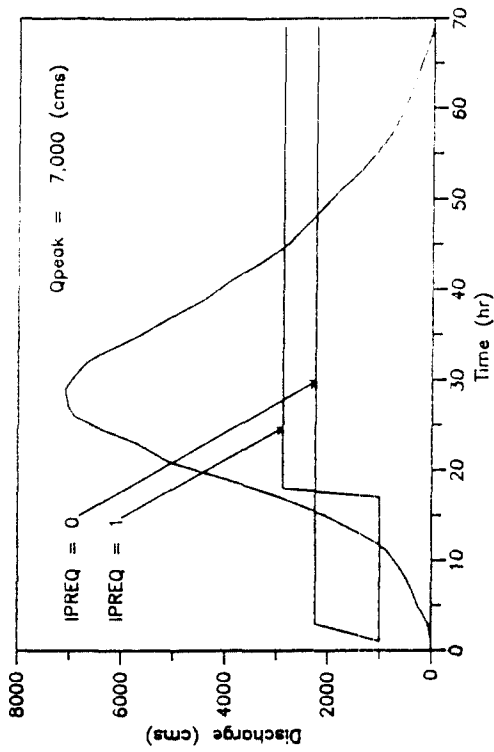


그림 6. 내침범의 20년빈도 홍수의 방류형태

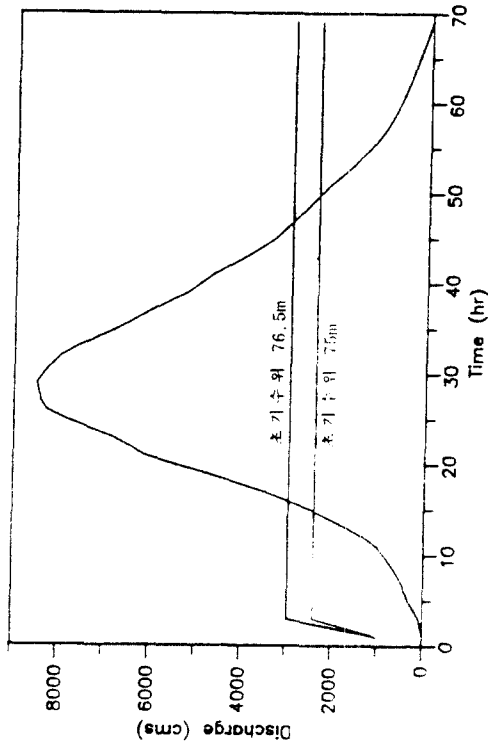


그림 8. 내침범의 50년빈도 홍수의 방류형태

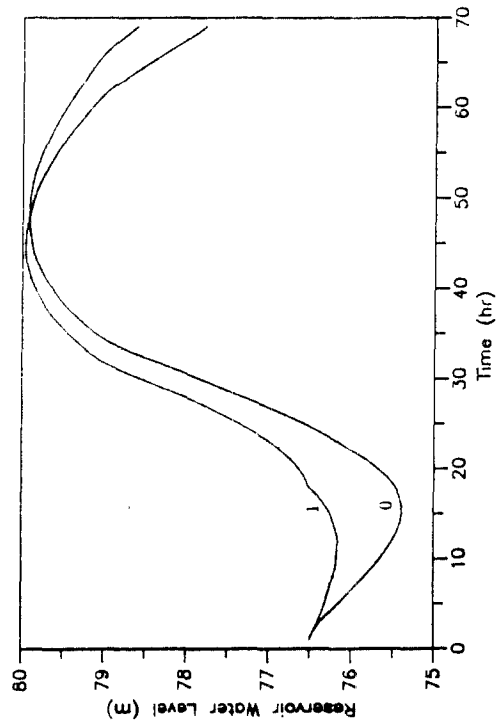


그림 7. 내침범의 20년빈도 홍수의 수위변화

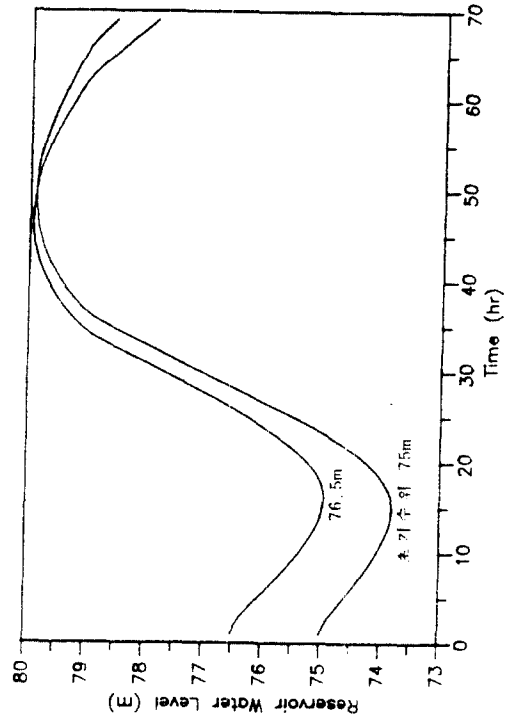


그림 9. 내침범의 50년빈도 홍수의 수위변화

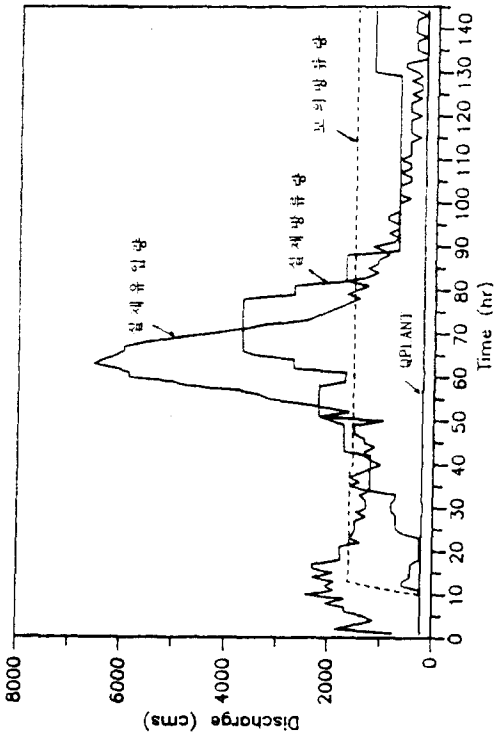


그림 10 대청댐의 침식간 모의운영에 의한 방류형태
(기간 1987.8.29.1:00 9.3.24:00)

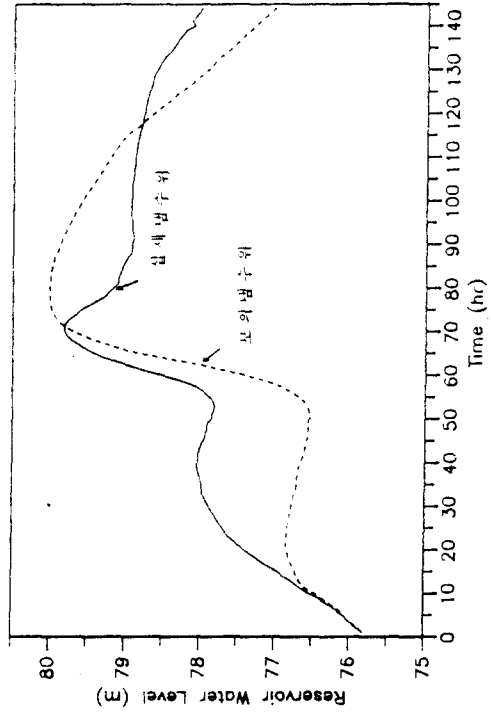


그림 11 대청댐의 침식간 모의운영에 의한 수위변화
(기간 1987.8.29.1:00 9.3.24:00)

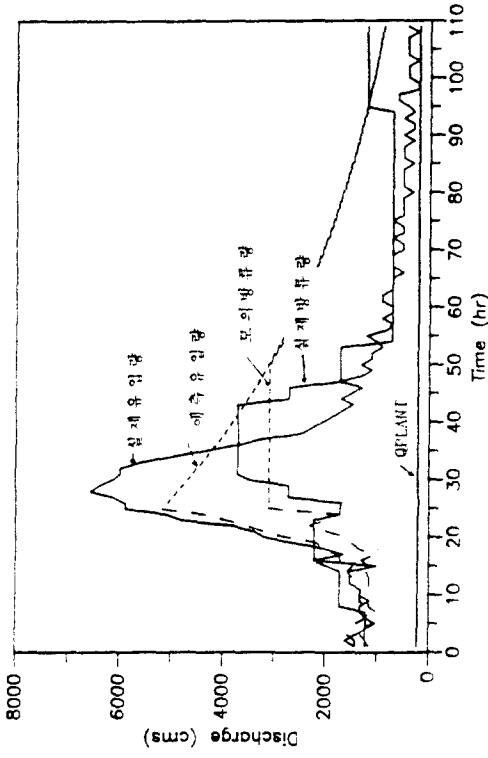


그림 12 대청댐의 침식간 모의운영에 의한 방류형태
(기간 1987.8.30.12:00 9.3.24:00)

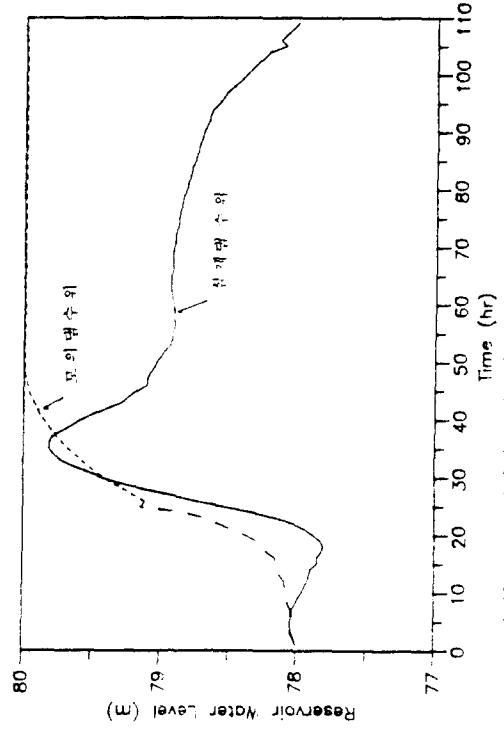


그림 13 대청댐의 침식간 모의운영에 의한 수위변화
(기간 1987.8.30.12:00 9.3.24:00)