

# 효율적 저수지 운영시스템 구축모형의 개발

## Development of Management Model for Efficient Reservoir Operation System

장수형\*, 윤재영\*\*, 안재현\*\*\*, 김원석\*\*\*\*, 윤용남\*\*\*\*\*

Su Hyung Jang, Jae Young Yoon, Jae Hyun Ahn, Won Seock Kim, Yong Nam Yoon

### 요 지

본 연구에서는 장수형 등(2005)이 제시한 실시간 저수지 유입량 예측모형과 통합하여 하나의 시스템을 구축한 후 하류 하도의 홍수통수능력과 현재 저수지 수위에서 방류 가능량을 고려하여 수문에서의 조절방류 방안을 제시하였다. 또한, 현재시간 이후로 유입되는 홍수량을 감안하여 강우가 종료되어서도 이수용량이 확보되도록 하였다. 연구는 예당저수지에 적용하였으며, 방류량 계산시 최대 방류가능량은 저수위와 수문의 개도고에 따라 오리피스와 완전월류 흐름을 구분하여 계산하였으며, 방류기준은 하류 하도의 통수능력, 강우종료 후 이수용량 확보 등을 감안하여 결정하였다. 연구의 적용결과, 본 연구에서 개발된 저수지 운영시스템을 적용한 결과 강우종료 후에도 이수용량 확보가 가능하였으며, 하류하도의 피해를 최대한 주지 않는 범위 내에서 저수지의 수문조작이 가능하여 예당지의 홍수조절능력을 극대화할 수 있는 방안을 제시하였다.

**핵심용어** : 실시간유입량예측모형, 예비방류, 조절방류, 저수지운영 시스템 구축

### 1. 서 론

홍수방어를 위한 수단으로 크게 구조물적 방법과 비구조물적 방법으로 나뉘어지고 정치, 사회, 경제, 환경 등을 감안하면 구조적 대책에는 여러 어려움이 따르게 된다. 홍수조절기능을 가진 저수지의 운영을 최대한 활용한다면 환경 및 경제적 손실이 없는 유역의 홍수방어대안으로 효과적일 것으로 기대된다.

저수지의 운영을 효과적으로 관리하기 위해서는 비홍수기의 용수공급을 위한 이수대책과 홍수기의 피해 경감을 위한 치수대책을 각각 수립하여야 한다. 특히, 우리나라와 같이 홍수기에 집중되는 강우특성상 한정된 저수지의 저수공간을 최대한 활용하여 홍수조절을 우선순위로 홍수기의 진행에 따라 비홍수기를 대비한 용수확보에도 전념하여야 한다. 그러나, 효과적인 저수지 운영을 위해서는 예측강우, 토양수분함량 등의 예측이 정확하다는 전제조건이 선행되어야 한다. 뿐만 아니라 저수지 수위에 따른 수문에서의 방류 가능량은 한정되어 있으며, 하류 하도의 통수능력을 고려하지 않을 수가 없다. 이러한 이유에서 실무자들은 예비방류와 같은 저수지 운영을 적절히 시행하면 비용적의 소요 없이 홍수조절용량을 추가로 확보할 수 있음에도 불구하고 실제로 시행하지 못하는 이유로 불확실성이 내재된 상태에서 예비방류를 시행할 경우 이수용량의 손실이 발생할 위험 때문이다. 즉, 강우초기에 예비방류를 시행하여 홍수조절용량을 확보하였으나, 강우가 예측한 만큼 발생하지 않을 경우 유입량 부족으로 만수위를 확보하지 못할지 모른다는 부담 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 강우 등 저수지 유입량 예측에 따른 불확실성을 장수형 등(2005)이 제시한 실시간 저수지 유입량 예측모형과 통합하여 하나의 시스템으로 구축하고 하류 하도의 통수능력과 저수위에 따른 최대 방류가능량을 고려하고 강우종료 후에도 이수용량이 충분히 확보될 수 있는 저수지 운영시스템을 제시하고자 하였다.

\* 정회원·고려대학교 사환경시시스템공학과 박사수료·E-mail:angel452@korea.ac.kr  
\*\* 정회원·고려대학교 환경시시스템공학과 교수·E-mail:jyoon@korea.ac.kr  
\*\* 정회원·서경대학교 토목공학과 교수·E-mail:wrr@skuniv.ac.kr  
\*\*\* 정회원·(주)삼안건설기술공사 수자원부 이사·E-mail:wskim@samaneng.com  
\*\*\*\* 정회원·고려대학교 사환경시시스템공학과 교수·E-mail:yonyoon@korea.ac.kr

## 2. 대상유역의 특성

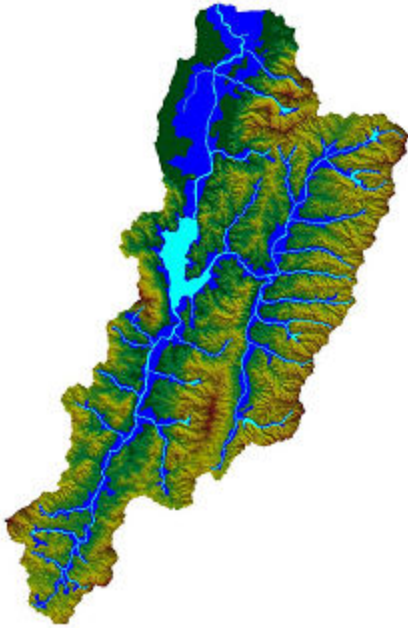


그림 1. 예당저수지 유역도

본 연구의 적용대상인 예당저수지는 삼교천의 제1지류인 무한천 중류부에 위치하고 있다. 유역면적과 유로연장이 비슷한 무한천, 신양천, 화산천이 그림 1과 같이 구성하고 있어 첨두홍수가 비슷한 시점에 저수지로 유입되지만 저수지 하류부에는 저지대가 집중적으로 분포되어 있어 저수지의 운영뿐만 아니라 치수적으로 상당히 불리한 여건을 갖추고 있다.

예당저수지의 일반 제원 특성은 표 1과 같다.

표 1. 예당저수지의 일반 제원 특성

월류부 표고 (EL.m)	규 모 (W×H×련)	홍 수 기 제한수위 (EL.m)
19.5	6.0×3.6×26	21.5
만수위 (EL.m)	홍수조절용량 (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	최대 방류량 (m <sup>3</sup> /sec)
22.5	10,000	1,621

## 3. 예당저수지의 방류능력 검토

예당저수지의 여수로는 3.6m(H)×6.0m(W)×26련의 tainter gate가 설치되어 있다. 그러나, 여수로를 통한 방류량은 저수지의 수위와 수문의 개도고에 따라 차이가 크게 나타나며, 저수지 수위보다 개도고가 낮을 경우 방류형태는 오리피스 흐름이 형성되고 높을 경우는 웨어 흐름을 형성하게 된다. 또한, 사전에 예비방류를 충분히 시행하려하여도 저수지 수위에 따라 방류할 수 있는 양에는 한계가 있기 때문에 웨어흐름 및 오리피스흐름에 대한 영향을 충분히 고려하여야 한다.

따라서, 저수지 수위에 따른 방류량 계산은 다음의 방법에 의해 산정하였다.

### ■ 웨어 흐름

$$Q = C \cdot L \cdot H^{3/2}$$

여기서, Q는 월류유량(m<sup>3</sup>/sec), L은 여수로의 폭, H는 여수로의 정점을 기준으로한 수두(m)이며, C는 유량계수로서 접근수로의 성질에 따라 대략 1.66~2.26의 값을 가진다.

### ■ 오리피스 흐름

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} CL (H_1^{3/2} - H_2^{3/2})$$

여기서, Q는 방류량(m<sup>3</sup>/sec), L은 여수로의 폭, H<sub>1</sub>과 H<sub>2</sub>는 각각 수문 아래로 흐르는 오리피스 수맥의 하단 및 상단에 걸리는 전수두(m)이며, C는 그림 2에서와 같이 H<sub>1</sub>에 대한 수문개구 d의 비(d/H<sub>1</sub>)에 따라 감소하는 유량계수이다.

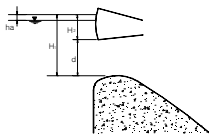


그림 2. 오리피스 흐름

이와 같은 방법으로 계산된 저수지 수위별 개도고에 따른 최대 방류 가능량을 참조하여 실측유입량과 조절방류량을 결정하게 된다.

#### 4. 예당저수지의 방류기준 설정

'82년 5월 7일 부터 시행된 예당지 관리규정에는 '용수공급에 지장이 없는 범위내에서 방류량 및 방류시간을 정하여 홍수발생 즉시 하류지역에 무해유량으로서 예비방류를 시행할 수 있다(제10조 (1)항).'고 하였으며 13조 (1)항에서는 '예비방류량으로서 하류 하천의 개수전은 200m<sup>3</sup>/sec, 하천 개수후는 677m<sup>3</sup>/sec으로 한다.'고 규정하고 있다. 이 규정은 2000년 1월 3일 개정되어 예비방류량을 하류 하천의 개수후 조건인 최대 677m<sup>3</sup>/sec으로 상향조정하였다. 예당지의 예비방류량이 결정 된 것은 삽교천 유역에 '81년 7월 11, 12일 양일간 발생한 집중호우에 대한 '수해원인조사 및 항구대책조사(1981.12, 대전지방국토관리청)'용역의 성과로서 현 일정률-일정량 형태의 예당지의 운영방법과 함께 하류 하천의 개수전 조건에서 200m<sup>3</sup>/sec, 개수후에는 677m<sup>3</sup>/sec로 예비방류량이 제시되었다. 이후 예당지 하류의 무한천 국가하천 구간 및 삽교천 하류부가 '94년의 기본계획(보완) 성과에 의해 완전개수 되었으므로 2000년에 관리규정을 일부 개정하여 예비방류량을 최대 677m<sup>3</sup>/sec으로 조정하였다.

따라서, 본 연구에서는 현재 경우가 종료된다는 가정 하에서 추가하여 유입되는 유입량과 저수지 수위의 관계 그리고 하도 홍수통수능력을 고려하여 저수지의 방류기준을 표 2와 같이 설정하였다.

표 2. 예당저수지의 방류기준

최종 예측수위 ( $h_f$ , EL.m)	1시간 후 예상 저수위 ( $h_{i+1}$ , EL.m)	조절방류량 ( $q_p$ , m <sup>3</sup> /sec)	비고
$h_f \leq 21.5$	-	0	
$21.5 < h_f \leq 22.5$	$h_{i+1} \leq 21.5$ $Q_i \geq Q_{i-1}$	$Q_{i+1}$ 과 $q_f$ 200중 작은 값	
$22.5 < h_f$	$21.5 < h_{i+1} \leq 22.5$	$Q_{i+1}$ 과 $q_f$ 677중 작은 값	
	$22.5 < h_{i+1} \leq 23.0$	1,619와 $q_L$ 중 작은 값	상시만수위에서의 최대 방류 가능량
	$h_{i+1} > 23.0$	가능 최대 방류량	모든 수문을 개방한 상태에서 $h_{i+1} =$ EL.23m가 되는 방류가능량
$h_f \geq 21.5$	$h_{i+1} \geq 21.5$ 이고 $Q_{i+1} < 100$ $Q_i < Q_{i-1}$	100 또는 $q_f$ 중 작은 값	

주)  $Q_{i+1}$ 은 1시간 후 저수지 예측 유입량이다.

$q_f$ 는 조절방류량( $q_p$ )를 조정하여 최종 예측수위( $h_f$ )가 21.5EL.m가 되도록 하는 조절방류량 값이다.

$q_L$ 는 조절방류량( $q_p$ )를 조정하여 이 22.5EL.m가 되도록 하는 조절방류량 값이다.

#### 5. 적용 및 결과분석

표 3은 1995년 8월 3일 10시~22시까지 매시간 강우로 인한 추가되는 유입량을 표 3은 장수형 등(2005)이 제시한 저수지 실시간 유입량 예측모형을 통해 예측된 결과이다. 계산시점은 매시간 달라지게 되며, 계산시점에서 더 이상 강우량은 없다는 가정 하에서 계산된 결과이다. ①란은 11시~19시까지의 강우로 20시 이후부터는 예측 유입량이며, ②란은 11시~20시까지의 강우, ③란은 11시~21시까지의 강우, ④란은 11시~22시까지의 강우, ⑤란은 11시~23시까지의 강우로 각각 계산시점 이후의 유입량은 예측된 값으로 매시간 예측유입량의 누가 값은 표 4의 ⑥란의 예측유입총 용적에 이용되어 현 시간 이후 방류를 하지 않을 경우 예상되는 최종 예상 저수위 예측에 이용된다. 물론, 예측유입량 값은 매시간 강우가 추가됨에 따라 재 산정 되고 계산시

점 이전의 실측유입량은 매개변수 보정에 이용되게된다.

장수형 등(2005)이 제시한 저수지 실시간 유입량 예측모형과 해당지의 방류능력이나 방류기준을 토대로 매시간 최적 저수지 운영 시스템은 표 4와 같은 방법으로 적용하게된다. 표 4는 1995년 8월 23일 24시 현재 강우가 종료되어 더 이상 강우가 발생하지 않는 조건으로 최종적으로 저수지의 수위는 홍수기 제한수위인 EL.21.5m를 회복하게된다. 이와 같은 운영시스템은 매시간 변경되며, 강우가 종료될 때까지 지속하게된다. 또한, 예측유입량의 오차가 0% ~ 100% 포함되어 있는 경우에 대하여도 비교·검토하였다.

**<표 3> 매 시간 저수지 추가 유입량 예**

시 간	강우량 (mm)	저 수 지 유 입 량										
		19시(9hr), ①		20시(10hr), ②		21시(11hr), ③		22시(12hr), ④		23시(13hr), ⑤		
		m³/sec	10 <sup>6</sup> m³	m³/sec	10 <sup>6</sup> m³	m³/sec	10 <sup>6</sup> m³	m³/sec	10 <sup>6</sup> m³	m³/sec	10 <sup>6</sup> m³	
8 월	10	0.00	11.40		11.40		11.40		11.40		11.40	
	11	2.10	11.40		11.40		11.40		11.40		11.40	
	12	1.46	11.84		11.40		11.40		11.40		11.40	
	13	1.82	13.60		11.49		11.40		11.40		11.40	
	14	3.68	19.86		13.95		11.40		11.42		11.42	
	15	0.81	21.17		14.31		11.41		11.52		11.53	
	16	0.66	21.10		14.12		11.48		11.65		11.66	
	17	1.81	25.44		16.27		11.96		12.33		12.33	
23 일	18	9.64	59.51		39.36		21.39		23.46		23.50	
	19	22.39	174.96		131.71		77.07		84.40		84.53	
	20	21.62	277.67	1.00	300.79		194.43		209.67		209.95	
	21	45.36	331.05	1.19	442.35	1.59	471.59		497.69		498.17	
	22	30.98	344.65	1.24	513.78	1.85	733.58	2.64	903.59		904.27	
	23	10.62	297.29	1.07	507.77	1.83	862.00	3.10	1201.58	4.33	1249.42	
	24		233.66	0.84	426.46	1.54	872.32	3.14	1312.63	4.73	1419.55	5.11
	8 월	1		174.16	0.63	329.16	1.18	738.73	2.66	1223.63	4.41	1367.31
2			125.89	0.45	241.70	0.87	571.29	2.06	995.31	3.58	1157.25	4.17
3			89.65	0.32	172.19	0.62	418.51	1.51	750.98	2.70	893.85	3.22
4			63.73	0.23	120.66	0.43	296.23	1.07	540.73	1.95	653.26	2.35
5			45.81	0.16	84.14	0.30	205.22	0.74	377.57	1.36	460.56	1.66
6			33.73	0.12	59.06	0.21	140.56	0.51	258.47	0.93	317.07	1.14
7			25.73	0.09	42.23	0.15	96.09	0.35	174.96	0.63	215.10	0.77
8			20.52	0.07	31.14	0.11	66.21	0.24	118.08	0.43	144.96	0.52
9			17.16	0.06	23.93	0.09	46.50	0.17	80.15	0.29	97.83	0.35
10			15.01	0.05	19.30	0.07	33.69	0.12	55.27	0.20	66.75	0.24
11			13.66	0.05	16.35	0.06	25.45	0.09	39.17	0.14	46.54	0.17
12			12.80	0.05	14.48	0.05	20.20	0.07	28.86	0.10	33.54	0.12
13			12.27	0.04	13.31	0.05	16.88	0.06	22.31	0.08	25.27	0.09
14			11.93	0.04	12.58	0.05	14.80	0.05	18.19	0.07	20.04	0.07
15			11.72	0.04	12.13	0.04	13.50	0.05	15.60	0.06	16.76	0.06
16			11.59	0.04	11.85	0.04	12.70	0.05	14.00	0.05	14.71	0.05
17		11.40	0.04	11.40	0.04	12.20	0.04	13.00	0.05	13.44	0.05	
18		0.00	-	0.00	0.00	11.89	0.04	12.38	0.04	12.65	0.05	
19		0.00	-	0.00	0.00	11.70	0.04	12.00	0.04	12.17	0.04	
20		0.00	-	0.00	0.00	11.40	0.04	11.77	0.04	11.87	0.04	
21		0.00	-	0.00	0.00	0.00	-	11.62	0.04	11.69	0.04	
22		0.00	-	0.00	0.00	0.00	-	11.54	0.04	11.57	0.04	
23		0.00	-	0.00	0.00	0.00	-	11.40	0.04	11.51	0.04	
24		0.00	-	0.00	0.00	0.00	-	0.00	-	11.46	0.04	
누계			6.95		10.32		17.89		25.29		24.34	

적용은 1995년 8월 23 ~ 8월 26일과 1999년 8월 2일 ~ 8월 4일에 적용하였으나 그림 3은 지면상 1999년의 경우만 수록하였다. 분석결과에 따르면, 예측유입량의 오차에 따라 초기 방류의 시행여부가 결정되기 때문에 신뢰수준을 높게 보면 볼수록 초기의 예비방류시행이 빠르기 때문에 보다 효과적이며 저수위 또한 낮출수 있었으나 오차가 50%이하에서는 홍수방어 효과가 비슷하였다.

**<표 4> 매시간 저수지 운영 시스템 적용 예**

날짜	강우량	실 측 유입량	실 측 방류량	실측 수위	예 측 유입량	예측유입 총 용 적	최종예상 저 수 위	최대방류 가 능 량	조 절 방류량	조절 수위		
월 일	(mm)	(cms)	(cms)	(EL.m)	(cms)	(m³)	(EL.m)	(cms)	(cms)	(EL.m)		
시	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩		
8월	10	3.01	11.40	0.00	20.73	11.40	-	20.73	0.00	0.00	20.73	
	11	2.10	11.40	0.00	20.69	11.40	-	20.73	0.00	0.00	20.73	
	12	1.46	11.40	0.00	20.69	11.40	-	20.73	0.00	0.00	20.73	
	13	1.82	11.40	0.00	20.70	11.40	-	20.73	0.00	0.00	20.73	
	14	3.68	11.40	0.00	20.70	11.41	774	20.73	0.00	0.00	20.73	
	15	0.81	11.40	0.00	20.71	11.49	1,423	20.73	0.00	0.00	20.73	
	16	0.66	11.40	0.00	20.71	11.61	1,828	20.73	425.61	0.00	20.73	
	17	1.81	11.40	0.00	20.72	12.24	7,521	20.73	425.61	0.00	20.73	
	23일	18	9.64	24.70	200.00	20.73	23.00	443,990	20.78	424.75	82.79	20.73
		19	22.39	243.00	200.00	20.77	82.79	6,949,069	21.57	424.75	200.00	20.73
20		21.62	243.00	200.00	20.86	206.35	10,319,630	21.94	426.24	200.00	20.73	
21		45.36	243.00	200.00	20.86	492.06	17,890,020	22.67	496.59	200.00	20.86	
22		30.98	955.00	660.00	21.04	895.57	25,294,300	23.53	675.05	480.00	21.17	
23		10.62	1251.00	660.00	21.32	1239.20	24,342,370	23.79	880.99	677.00	21.50	
24		5.58	1403.00	660.00	21.64	1433.98	20,908,600	23.68	1088.92	677.00	21.80	
8월		1	-	-	-	-	1414.19	22,016,700	24.44	1285.60	677.00	22.07
	2	-	-	-	-	1225.53	16,925,616	23.78	1424.51	677.00	22.25	
	3	-	-	-	-	973.78	12,513,708	23.33	1496.46	677.00	22.34	
	4	-	-	-	-	724.76	9,008,100	23.03	1507.82	517.28	22.36	
	5	-	-	-	-	517.28	6,398,964	22.84	1507.82	359.08	22.36	
	6	-	-	-	-	359.08	4,536,756	22.70	1507.82	244.86	22.36	
	7	-	-	-	-	244.86	3,244,068	22.61	1507.82	165.38	22.36	
	8	-	-	-	-	165.38	2,362,572	22.55	1507.82	111.53	22.36	
	9	-	-	-	-	111.53	1,767,204	22.50	1507.82	100.00	22.36	
	10	-	-	-	-	75.78	1,365,696	22.46	1502.06	100.00	22.35	
	11	-	-	-	-	52.40	1,092,888	22.43	1490.71	100.00	22.34	
	12	-	-	-	-	37.31	904,248	22.39	1475.67	100.00	22.32	
	13	-	-	-	-	27.67	769,932	22.36	1458.18	100.00	22.30	
	24일	14	-	-	-	-	21.56	670,320	22.33	1439.06	100.00	22.27
		15	-	-	-	-	17.71	592,704	22.30	1418.83	100.00	22.24
		16	-	-	-	-	15.31	528,948	22.26	1397.83	100.00	22.22
		17	-	-	-	-	13.81	473,832	22.23	1376.26	100.00	22.19
		18	-	-	-	-	12.88	424,116	22.20	1354.27	100.00	22.16
		19	-	-	-	-	12.31	377,748	22.17	1331.94	100.00	22.13
		20	-	-	-	-	11.96	333,432	22.13	1309.35	100.00	22.10
		21	-	-	-	-	11.74	290,376	22.10	1286.51	100.00	22.07
		22	-	-	-	-	11.61	248,112	22.06	1263.46	100.00	22.04
		23	-	-	-	-	11.53	206,316	22.03	1240.23	100.00	22.01
		24	-	-	-	-	11.48	164,808	21.99	1216.83	100.00	21.98
8/25		1	-	-	-	-	11.45	123,480	21.96	1193.28	100.00	21.95
	2	-	-	-	-	11.43	82,260	21.92	1169.58	100.00	21.91	
	3	-	-	-	-	11.42	41,112	21.88	1145.75	100.00	21.88	

그리고, 개략적 저수지 유입량 예측에 따라 저수지 수위를 여수로 물넘이 수위인 EL.21.5m로 설정하였을 경우 초기방류량을 일단 저장하지만 결과적으로는 침투홍수가 유입되는 시점이 되면 방류량은 거의 비슷해져 초기방류의 효과는 방류시기를 2시간 정도 늦추는 효과정도로 분석되었다. 반면, 1995년의 경우는 단시간내 급격히 홍수가 유입되기 때문에 예측유입량의 오차에 따른 효과보다는 조절방류효과가 가장 큰 것으로 분석되었으며, 초기수위를 낮출경우는 1999년과 동일하게 분석되었다.

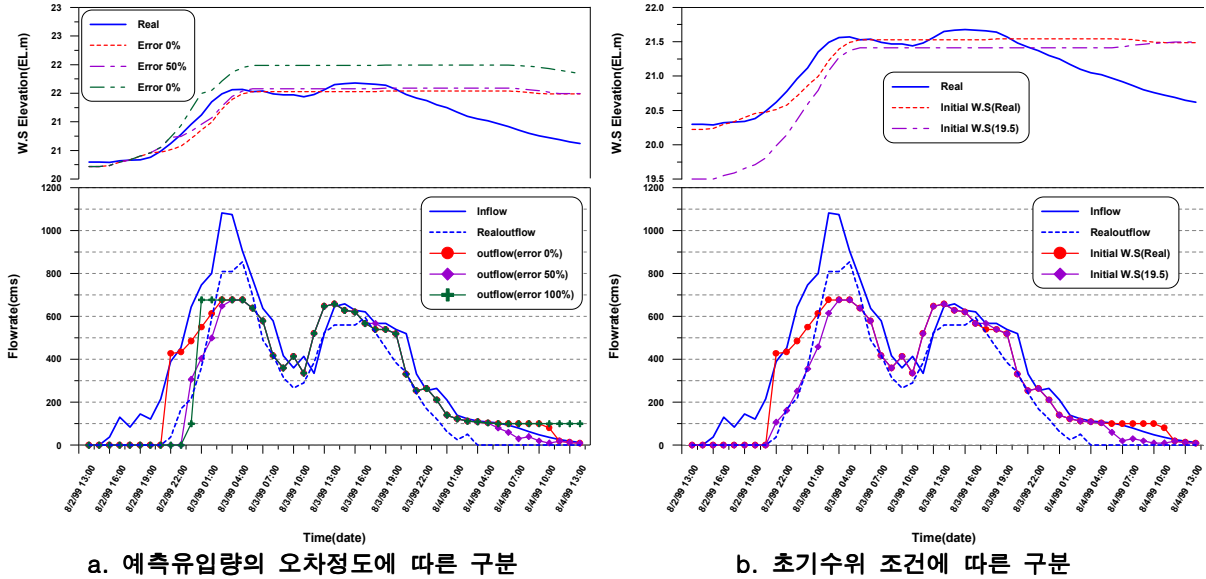


그림 2. 저수지 운영시스템 적용결과(1999년 8월 2일~8월 4일)

## 6. 결 론

본 연구에서 개발된 저수지 운영시스템을 적용할 경우 홍수방어 효과는 상당히 크게 나타났으나, 예측유입량의 오차여부에 따른 효과는 비슷하였다. 또한, 초기저수위를 낮출 경우 초기방류를 약 2 ~ 3시간 정도 늦출 수는 있지만 침투홍수의 방류시기는 늦추는데는 효과가 거의 없는 것으로 분석되었다. 또한, 예당저수지의 경우 침투홍수량이 약 1,500m<sup>3</sup>/sec 이하인 홍수사상에 대하여는 무해방류량인 677m<sup>3</sup>/sec 이하로 조절하여 방류가 가능하였으나 이상일 경우에는 저수지 하류 하도의 피해는 불가피한 것으로 분석되었다. 결과적으로 본 연구에서 개발된 저수지 운영시스템을 적용할 경우 하류 하도의 피해를 최소화하고 강우종료 후에도 이수용량이 충분히 확보할 수 있는 홍수방어대안으로 효과적일 것이라 판단되었다.

## 참 고 문 헌

1. 심명필, 권오익, 이환기(1995a). 홍수기중 가변제한수위에 의한 저수지 운영, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제28권, 제6호, pp. 217-228.
2. 선우중호, 이재형, 전일권, 황만하(1995b) 소양호의 예비방류 효과에 관한 연구. **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp.431-436
3. 박봉진, 강권수, 정관수(1997) 예비방류를 고려한 대형댐의 홍수기중 운영방안, **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 414-419.
4. 건설교통부(1994a). **삼교천 하천정비기본계획(보완)**.
5. 건설교통부(1994b). **삼교천 (무한천, 곡교천) 하천정비기본계획 (보완)**.
6. 농림부(1999). **관개저수지의 한발 및 홍수 예측기법과 관리지침 개발**, 연구보고서