

다목적 댐운영 방안 수립에 관한 연구

권오현*, 정동국**, 유주환***, 박명기****, ○김정엽*****

1. 서론

다목적댐은 운영 목적이 다른 치수와 이수 문제를 적절하게 조합하여 최선의 운영을 하여야 한다. 그러나 다목적댐에서는 목적별로 이해 당사자인 기관이 다른 경우가 있는데 이 경우 각 기관은 적절한 타협안을 모색하여 최적의 다목적댐 운영 방안을 수립하는 것이 다목적 저수지 운영에서 편익을 최대로 낼 수 있는 방법이라 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 다목적댐 운영상의 이수 또는 치수적 제약조건을 고려한 최적의 저수지 운영 방안을 강구하여 효율적인 다목적댐 운영 관리와 수자원 이용을 극대화할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 이에 본 연구대상으로는 현재 운영상 치수와 이수를 동시에 성공적으로 다룰 수 없는 섬진강 다목적댐을 대상으로 하였다. 빈도별 홍수 유입에 대하여 홍수조절기법(Rigid ROM, Technical ROM, Auto ROM 등)을 적용할 경우의 섬진강댐의 홍수 조절 능력을 평가하였다. 이 결과 등을 바탕으로 설정한 상시만수위 대안별로 동적계획기법(Dynamic Programming)을 사용하여 최대 용수공급 및 발전량을 산정하여 댐의 이수능력을 평가하였다. 이와 같은 대안별로 목표별 편익 또는 손실등을 평가하여 다목적 운영 방안을 제시하였다.

우선 연구대상인 섬진강댐의 운영은 이수와 치수 목적을 동시에 모두 만족시킬 수 없다. 섬진강댐은 우선적으로 농업용수와 수력에너지를 기득수리권으로 보장해 주어야 된다. 이때 기득수리권과 관리권은 서로 다른 기관이 갖는다. 한편 홍수가 유입되면 상시만수위로부터 홍수위 사이의 저류 공간으로 홍수조절을 하도록 설계되었다. 그러나 섬진강 다목적댐은 1925년 靈岩堤에 기원을 두고 있으며, 그 후 수력발전, 다목적댐이 건설되는 등 지속적인 변화를 겪어 왔다. 1965년 댐 준공 이래 주민 거주 등으로 사실상 홍수 조절 공간을 사용할 수 없었고, 더 나아가 상시만수위에서도 저수지 연안에 침수 문제가 야기되고 있다. 이와 같은 상황에서 댐 관리 방안 수립의 핵심적인 목표는 ① 농업용수 및 수력에너지 공급의 기득 수리권을 보장한다 ② 저수지내의 인명과 재산에 침수 피해가 발생되지 않도록 한다 ③ 섬진강댐 하류 방류도 허용범위 이내로 억제하여 침수피해를 막도록 홍수 조절을 한다 등이나 현실적으로 실현이 불가능하므로 본 연구에서는 다음과 같이 해결 가능한 사안을 마련 해답을 얻고자 하였다.

- ① 현실적인 상시만수위를 설정하여 利水와 治水의 結合을 도출한다. 다시 말하면 기득수리권의 손실과 홍수 침수를 최소화하도록 한다. 이를 위해 상시만수위 사안을 EL. 191.50 m 로부터 설계 상시만수위 EL. 196.50 m 까지 상향 조정함에 따른 이수 및 치수효과를 분석한다.
- ② 홍수위 EL. 197.70 m 를 확보토록 원칙에 입각한 댐 관리를 한다. 이 경우에는 집단 민원에 직면하게 되고 이주 및 보상 등의 분석이 요구되어진다.
- ③ 적절한 홍수조절용량 확보 및 댐 조작으로 유입홍수를 조절하여 댐 하류 홍수피해를 최소화할 수 있도록 한다.

2. 치수 측면 댐 운영 방안

2.1 홍수 조절 방법 및 기준

홍수기에 섬진강댐의 운영방안을 수립하기 위하여 저수지의 상·하류를 포함한 제약조건과 빈도별 유입 홍수 등에 따라 일정률-일정량 방류를 시행하는 Rigid ROM, 예비방류를 포함한 일정량 방류형태인 Technical ROM, 그리고 기준수위에서부터 자유유통토록하는 Auto ROM에 대하여 검토 하였다. 각 방안의 작성시 공통적으로 고려한 기본 방침은 다음과 같다.

- * 前 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수
- ** 한남대학교 공과대학 토목공학과 교수
- *** 충남대학교 대학원 박사수료
- **** 충남대학교 대학원 박사과정
- ***** 충남대학교 대학원 석사수료

- 1) 홍수조절의 기본단위는 유입량 자료와 같이 1시간 단위로 한다.
- 2) 기준 설계홍수는 100년 빈도 홍수 유입 수문곡선으로 한다.
- 3) 홍수시 직전 초기수위는 기준수위(여수로 마루 EL. 192.70 m, 현재 운영상 최고저수위 EL. 193.50 m, 상시만수위 EL. 196.50 m)로 한다.
- 4) 주어진 설계홍수에 대하여 최고저수위는 홍수위 EL. 197.70 m 또는 상시만수위로 한다.
- 5) 최소 방류량은 최대 이수 방류량인 59.39^{m³}/sec 로 한다.
- 6) 방류량은 자유월류시 저수위에 따른 최대 방류능력(이수량 포함)을 초과할 수 없다.
- 7) 홍수 감쇄기에는
 - i) 방류량이 유입량을 초과하는 시점부터 방류량을 유입량과 같게 하여 일정 저수위를 유지하는 방안
 - ii) 2차 홍수에 대비하여 초기수위에 이를때까지 방류하는 방안
- 8) 저수지 추적에 적용하는 연속방정식은 중앙차분 형태의 $(I_1+I_2)/2 - (O_1+O_2)/2 = (S_2-S_1)/\Delta t$ 를 사용하고, 방류량 O_t 와 저류량 S_t 는 반복계산에 의하여 결정한다.

그리고 각 방안의 서로 다른 특성은 Rigid ROM은 방류량이 유입량의 함수로 결정되고, Technical ROM은 홍수조절 용량에 따라 결정된 일정량에 의하여 방류형태가 결정된다. 또한 Auto ROM은 기준수위까지 방류결정을 보류하다가 기준수위 이상에서는 자유월류시킴으로써 잔여 홍수 조절량과 무관하다.

2.2 홍수 조절 방안 적용 및 결과 분석

각 방안에 적용하는 홍수 초기수위와 최고저수위는

- ① 여수로 마루에서 홍수위까지 운영하는 방안
- ② 이수분석 결과를 고려하여 현재 운영중인 저수위 EL. 193.50 m(기준수위)를 초기수위로 하여 상시만수위까지 운영하는 방안
- ③ 기준수위에서 홍수위까지 운영하는 방안
- ④ 당초 설계대로 상시만수위에서 홍수위까지를 홍수조절용량으로 이용하여 운영하는 방안에 대하여 제약조건을 수립한다.(표 1)

그러나 Auto ROM은 자유월류를 시작하는 목표수위를 상시만수위로 한 경우에 초기 방류가 갑자기 증가하기 때문에 제외하고 표 2와 같은 제약조건 아래에서 운영한다. 여기서 목표수위는 자유월류 방류를 시작하는 수위이다.

표 1. Rigid ROM 및 Technical ROM의 제약조건(저수위)

제약조건	①	②	③	④
수위				
초기수위(EL. m)	192.7	193.5	193.5	196.5
최고저수위(EL. m)	197.7	196.5	197.7	197.7

표 2. Auto ROM의 제약조건(저수위)

제약조건	①	②	③	④
수위				
초기수위(EL. m)	192.7	192.7	192.7	193.5
목표수위()	193.5	192.7	193.5	193.5
최고저수위()	197.7	197.7	196.5	196.5

홍수시 섬진강댐 운영방안으로 Rigid ROM, Technical ROM, Auto ROM에 의한 방안을 여러가지 빈도의 홍수에 대해 적용하여 비교 검토한 결과는 아래와 같다.

- ① 저수위에 관한 4가지 제약조건에 대하여 각 방안을 검토한 결과, 현재의 댐 상·하류의 여건과 이수관점에서 초기수위 EL. 193.50 m 와 최고저수위 EL. 196.50 m 에 의한 홍수조절이 합리적이다.
- ② Technical ROM의 경우는 정확한 유입량 예측이 어렵고, Auto ROM은 홍수조절 용량을 충분히 활용하지 못하는 단점이 있는 반면, Rigid ROM의 경우 유입량에 대한 일정량, 일정률에 의한 방류가 가능하다. 그리고 홍수의 크기 및 잔여조절용량에 따라 일정률을 산정함으로써 홍수 조절 용량을 최대한 이용할 수 있다.

3. 설계홍수에 대하여 현재 운영중인 기준수위 이상을 조정하여 관련기관의 협약수위를 확보해야 하고, 궁극적으로는 당초 댐 설계시 산정한 상시만수위와 홍수위에 의한 홍수조절이 가능하도록 차후 대책 수립이 요구된다.

3. 이수 측면 댐 운영 관리 방안

3.1 최적 운영 모형 설계

섬진강댐의 이수 목표 최적 운영은 다음의 3가지로 요약된다.

- (1) 수력발전량 보장
- (2) 관개용수 보장
- (3) 댐 상·하류 홍수 침수피해 발생 방지

그러나 섬진강댐은 운영 관행상 홍수위 EL. 197.70 m 는 사실상 실효되었으므로 실제로는 상시만수위 EL. 196.50 m 이하로 운영하면서 치수와 이수 목적을 달성하고자 한다. 이수 문제는 저수지 조작에 널리 쓰이는 동적계획기법(dynamic programming)에 의하여 최적화하였으며, 저수지 시스템 구성은 표 3과 같이 정의하였다.

표 3. 최적화 함수의 구성

모형	구 성	비 고
목적함수	수력발전	
제약조건	시스템 방정식	
	관개용수 수요 충족	
	저수량 상하한	
	농업용수 방류량 상하한	
	수차 사용 수량 및 수경 용량 여수로 방류량 상하한	

표 4. 이수 만수위 검토 대안

구분	수위(EL. m)	수심(m)	용량(10 ⁶ m ³)	비 고
I	191.50	5.00	311.04	
II	193.50	3.00	350.71	현행 홍수위
III	195.50	1.00	395.72	
IV	196.00	0.50	408.18	
V	196.50	0.00	420.70	NHWL(설계치)

가. 목적함수

이 모형은 수력발전 최대화를 목적함수로 설계하였으며, 관개용수 공급 등을 제약조건으로 반영하였다. 관개용수 공급 조건시 관개기와 비관개기는 다음의 4개 계절로 분할하였다.

- (1) 모내기(4월) (2) 이앙기(5월) (3) 성숙기(6월~10월) (4) 비관개기(11월~다음해 3월)

목적함수는

$$\text{maximize } \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N E_{ijk} \text{ -----(1)}$$

Q_1, Q_2

여기서, Q_1 : 칠보 1, 2호기 사용수량(m^3/s)

Q_2 : 칠보 3호기 사용수량(m^3/s)

M : 조작기간($M=30$ 年)

N : 1년중 월수($N=12$ 月)

$$E_{ijk} = \eta \rho g Q_{ijk} H_{ijk} / 10^9 \text{ -----(2)}$$

여기서, η : 합성효율

ρ : 물의 밀도(10^3 kg/m^3)

g : 중력가속도(9.81 m/s^2)

Q_{ijk} : 수차 i 의 j 년 k 월 사용수량(m^3/s)

H_{ijk} : 수차 i 의 j 년 K 월 유효낙차(m)

나. 이수만수위 설정

섬진강댐은 실제로 운영할 수 있는 홍수조절 용량이 거의 없다. 따라서 유입 홍수는 이수 용량의 Surchage 효과 외에는 여수로로 방류할 수 밖에 없다. 본 연구에서는 농업용수와 수력발전의 기득권을 보장하면서 댐 상·하류의 침수피해를 최소화할 수 있는 방안을 마련하고자 한다. 그러므로 일단 EL. 191.50 m 로부터 당초 설계 상시만수위 EL. 196.50 m 까지 제한수위를 설정하는 표 4와 같은 여러가지 대안별로 용수와 수력을 검토하였다.

다. 제약 조건

(1) 제약조건식

☞ 시스템 방정식

이 식은 저류방정식 또는 연속 방정식으로 저수지의 시간에 대한 동적응답을 나타낸다.

$$S(k+1) = S(k) - R_1(k) - R_2(k) - R_3(k) - S_p(k) - S_c(k) - L_s(k) + I(k) \quad (3)$$

여기서,

- S : 계절 k초의 저류량
- R : 관개 목적 방류량
 - 1 : 칠보 1, 2호기 방류
 - 2 : 칠보 3호기 방류
 - 3 : 운암 수갱
- S_p : 여수로로 일류량
- S_c : 배수로를 통한 방류량
- L_s : 저수지 수면 증발 손실
- I : 저수지 유입량
- k : 조작 기간의 시간 단위 (월)

☞ 저수지 및 방류량 상·하한 제약

$$S_{min} \leq S(k) \leq S_{max} \quad (4)$$

단, $S_{min} = \min(S_{1min}, S_{2min}, S_{3min})$

$$R_{1min} \leq R_1(k) \leq R_{1max} \quad (5)$$

$$R_{2min} \leq R_2(k) \leq R_{2max} \quad (6)$$

$$R_{3min} \leq R_3(k) \leq R_{3max} \quad (7)$$

$$R_1(k) + R_2(k) + R_3(k) \geq D(k) \quad (8)$$

$$S_c(k) \leq S_{cmax} \quad (9)$$

$$S_p(k) \leq S_{pmax} \quad (10)$$

- 여기서 S_{1min} : 칠보 1, 2호기 발전 가능 최소저류량
- S_{2min} : 칠보 3호기 발전 가능 최소저류량
- S_{3min} : 발전 중지, 용수 공급 가능 최소저류량

(2) 제약조건의 우선순위

제약조건을 모두 만족시키려면 초기치의 유효영역(feasible region) 설정에 제한을 받는다. 그러므로 실제 조작에서는 위 제약조건식의 우선순위를 설정하여야 되는 경우가 대부분이다. 다음 표 5에서 나타내는 것은 우선순위를 나타내는데 특히 시스템방정식은 시스템의 물리적 특성, 즉 동적 관계를 나타내며, 절대 엄수되어야 한다.

표 5. 제약조건식의 우선순위

우선순위	조건식의 구분	조건식 번호	비고
1	시스템 방정식	(3)	
2	저수지 제약	(4)	
3	방류공 방류	(9)	영 하류
4	칠보 1, 2호기 사용수량 제약	(5)	농업용수로 충분한 경우
4	칠보 3호기 사용수량 제약	(6)	
4	운암 수갱	(7)	농업용수 부족인 경우
7	여수로 방류	(10)	영 하류

표 6. 저수지 관련 입력 자료

구분	단위	입력치	적용기간	비고
상시만수위(NHWL)	EL. m	196.50	9.21~ 翌年 6.20	
상시만수위 대안1	EL. m	196.00	6.21~9.20	
상시만수위 대안2	EL. m	195.50	6.21~9.20	
상시만수위 대안3	EL. m	193.50	6.21~9.20	
상시만수위 대안4	EL. m	191.50	6.21~9.20	
발전 최저수위	EL. m	169.00	全期間	
저수위(LWL)	EL. m	154.54	全期間	발전중단, 관개

3.2 입력 주요 자료

저수지 관련 입력 자료는 표 6과 같고 수갱은 지름 3m 로 취수탑으로부터 799.39m 길이의 터널로 연결되어 있다. 수갱의 최대 방류능력은 이론치로는 50m³/s 이고 실적치로는 최대 33 m³/s이다. 수력발전소에 관한 자료는 표 7에 정리하였다. 그리고, 동진농조의 업무자료에 의하면 용리구역은 2개시, 1개군, 72개의 읍·면·동이고 용리 면적은 36.405ha 이다. 농업용수 수요 실적(1988~1994)은 다음과 같다.

○ 모내기(4월) : 49.811×10⁶m³ ○ 이앙기(5월) : 84.118×10⁶m³ ○ 성숙기(6월~10월) : 237.283×10⁶m³ 계: 371.212×10⁶m³/년

한편 한국수자원공사의 분석에 의하면 섬진강댐에 의한 용리면적은 29.860ha로서 17개년(1966~1982)간 순별 수요를 분석한 결과는 다음과 같다.

○ 최대(1968) : 438.2×10⁶m³/년 ○ 최소(1970) : 248.8×10⁶m³/년 ○ 평균 : 333.4×10⁶m³/년

이 두 값의 차이는 약 11% 차이를 보이므로 본 연구에서는 관개용수 수요량으로 실적치의 값을 채택하고 성숙기 월별 배분은 분석 결과에 의한 수요비를 적용하였다.

표 7. 섬진강 수력 발전소 현황

구분	단위	철보 1, 2호기	철보 3호기	계
시설용량	Kw	14,400×2	6,000	34,800
최대사용수량	m ³ /s	21.93	4.46	26.39 ¹⁾
정격유효낙차	m	151.70	162.20	-
발전기	KVA	16,500×2 (力率 90%)	6,700 (力率 90%)	39,700
수차출력	Kw	14,500×2	6,230	-
형식	-	Francis	Francis	-
취수가능수위	EL. m	166.48	166.48	-
방수위	EL. m	29.75	30.78	-
합성효율	%	85	85	-
손실낙차	m	6.5	6.5	-
연간발전량	GWH	160.3	9.3 ¹⁾	-

1) 본 연구 적용치 : 1994년 발전소 연보(제 18회), 한국전력공사/섬진강 수력발전소
2) 본 연구 추정치

3.3 연산 및 조작의 종류

가. 조작의 종류

- 검증모형 : 1987. 1 ~ 1993.12(84단계)
(철보 3호기 운영후부터 극한적 가뭄이었던 1994 ~ 1995년을 배제한 기간.)
- 최적화 모형 : 1966. 1 ~ 1995.12(360단계)

나. 연산의 흐름

본 연구에서 용수 및 발전의 이수 분석을 목적으로 한 연산의 논리과정을 요약하면 다음과 같다.

- 자료 입력
- 상태변수 증분 분석 : 발전량 최대화
- 제약조건 검사 : 제약조건이 위배될 경우에는 변수 경계치로 이동
- 최적화 수렴까지 반복계산
- 용수공급량 및 발전량 등 최적치 계산
- 결과 출력

3.4 결과 검토

가. 수력 에너지

각 대안별로 30년간 운영한 결과의 발전량을 그림 1에 나타냈다. 수력 발전량 측면에서는 상시만수위(NHWL) 대안을 EL. 193.50, 195.50, 196.50 m 로 압축할 수 있다. 그림 1에서 수력 에너지는 상시만수위 EL. 195.50 m까지 선형적으로 증가하고 설계 상시만수위 EL. 196.50 m에서 효율이 높음을 알 수 있다.

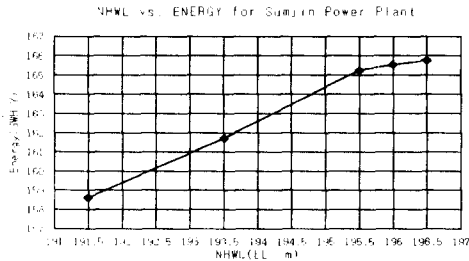


그림 1. 섬진강댐 상시만수위별 수력에너지 생산량

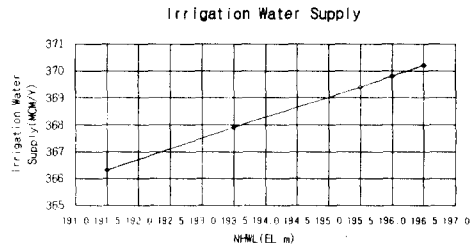


그림 2. 상시만수위별 용수공급 가능량

나. 용수 공급

1966년부터 30년간 최적 댐운영 결과 용수공급가능량은 최대 약 $370.2 \times 10^6 \text{m}^3/\text{년}$ 으로 나타났다. 만수위별로 연간 용수공급가능량은 그림 2와 같다. 이 때 검토한 결과 5개안별로 30년간 물부족은 가뭄이 극심한 1995년에 발생하였으므로 표 8에서 물 부족은 없다고 보아도 될 것으로 판단된다. 용수 공급의 관점에서 상시만수위 대안은 EL. 193.50 m, EL. 195.50 m, EL. 196.50 m 으로 볼 수 있다.

다. 댐 운영 방안

표 8. 성진강 다목적댐 만수위별 이수 효과(1966~1995)

NHWL (EL. m)	발전량(GWH/Y)			관개용수(MCM/Y)					
	실적(A)	최적화 (B)	대비 (B/A)	수요	공급		부족량**	부족월	부족년
					총량	조정량*			
191.50	132.5	158.6	1.196	371.2	417.3	366.3	4.9(146.2)	4	2
193.50	132.5	161.7	1.220	371.2	422.5	367.9	3.3(98.7)	2	1
195.50	132.5	165.3	1.247	371.2	420.3	369.4	1.8(53.7)	2	1
196.00	132.5	165.5	1.249	371.2	420.0	369.8	1.4(41.2)	1	1
196.50	132.5	165.7	1.251	371.2	416.2	370.2	1.0(28.7)	1	1

* : 조정량 = 수요량 - 물 부족량

** : ()는 30년 총부족량.

1). 1971 - 1994 평균

2). 한국수자원공사, 「성진강 다목적댐 국유지 용도 폐지 검토서」 1995 : 249~438 MCM/Y (1966~1982)

4. 결론

성진강 다목적댐의 홍수 조절능력 및 이수 능력을 종합적으로 평가한 다목표 댐운영 방안 수립 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다. 표 8에서 만수위별 최적 발전량 대비는 실적치 132.5GWH/Y를 기준으로 한 것이다.

- ① 당초 설계대로 댐을 운영하는 것이 최상의 대책이다.
- ② 수력 발전의 관점에서는 상시만수위 EL. 191.50 m 로부터 EL. 195.50 m 까지 거의 선형적 증가를 보인다. 따라서 수리 기득권을 명확히 평가하여 보장해 줄 발전량과, 최적화와 실적치의 차이가 약 70~80% 내외임을 고려하면 가장 낮은 상시만수위 대안은 EL. 193.50 m 이다. 수력 발전 측면에서 발전 편익은 126.40 GWH/Y(1987~93) 내지 137.30 GWH/Y 에서 결정될 수 있을 것이다.
- ③ 용수 공급의 효율면에서 EL. 193.50 m 를 상시만수위로 하면, 1988 - 1994 실적 평균 공급량 $371.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ 을 기준으로 할 때 물 부족은 1995년의 극한적 가뭄을 포함한 조작결과에서도 30년간 1회 정도이었다. 이 때 용수공급량은 연평균 $367.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$, 부족량은 총수요의 약 0.89% 밖에 되지 않으므로 용수에 대한 기득수리권은 보장된다. 그러나 용수공급량을 $359 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ 로 보면, 그림 2 에서 NHWL EL. 193.50 m 일 경우에도 수요를 충족할 수 있을 것이다.

또한 홍수조절 분석결과는 다음과 같다.

- ④ 홍수시 성진강댐 운영방안으로 Technical ROM, Rigid ROM, 그리고 Auto ROM 에 대하여 검토한 결과 Rigid ROM 에 의한 방안이 합리적이다. 그리고 홍수크기 및 잔여조절 용량에 따라 일정률을 산정함으로써 홍수조절 용량을 최대한 이용할 수 있다.
- ⑤ Rigid ROM 에 의한 홍수조절 방안을 FWL EL. 196.50 m로 (원설계 EL. 197.70 m) 하면 100년 빈도홍수량 $2,312.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 유입시에 댐 하류로 $437.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 방류하게 된다. 이 때 홍수 조절 용량은 $70 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이 된다.

이상을 종합적으로 고려할 때 성진강 다목적댐에 대한 이수 및 치수의 다목표 운영 방안을 수립한다면 다음과 같은 대안으로 축약하여 제시할 수 있다.

- I. 제1안 원설계 (NHWL EL. 196.50 m, FWL EL. 197.70 m)대로 운영한다.
- II. 제2안 NHWL EL. 193.50 m, FWL EL. 196.50 m로 운영한다.

참 고 문 헌

1. 권오현, 수자원공학 2판, 새문출판, 1995.
2. 성진강 다목적댐 집단취락지역 건축물 조사측량 보고서, 한국수자원공사, 1995
3. '83 성진강 다목적댐 관개용수 수위상향 타당성 조사 보고서, 산업기지개발공사/삼안, 1984
4. 수문자료집, 한국수자원공사, 1990~1995
5. 안전도 평가 및 유지관리 방안 연구보고서-성진강다목적댐, 한국수자원공사, 1995