

홍수조절용량 설정에 따른 증고저수지의 용수공급능력 변화

Affecting Water Supply Capacity Followed by Allocating Flood Control Volume in Heightening Reservoir

노재경*

Noh, Jaekyoung

Abstract

This study was performed to analyze the affect of water supply capacity followed by allocating flood control volume in heightening reservoir, of which Baegkog reservoir was selected as a case study in here.

Baegkog reservoir is located in Jincheon county, Chungbuk province, of which full water level will be heightened from EL. 100.1m to EL. 102.1m, and total storage from 21.75M m³ to 26.67M m³. Flood inflow with 200year frequency was estimated to 997 m³/s in peak flow and 22.54M m³ in total volume. Reservoir flood routing was conducted to determine flood limited water levels, which was determined to have scenarios such as EL 97-98-99m in periods of 6.21.-7.20., 7.21.-8.20., and 8.21.-9.20., respectively, EL 97-97-97m, EL 98-98-98m in present reservoir, and EL 99-100-101m, EL 99-99-99m, and EL 100-100-100m in heightened reservoir. Reservoir inflow was simulated by DAWAST model. Annual paddy irrigation requirement was estimated to 33.19M m³ to 2,975ha. Instream flow was allocated to 0.14mm/d from October to April. Operation rule curve was drawn using inflow, irrigation and instream flow requirements data. In case of withdrawal limit reservoir operation using operation rule curve, reduction rates of annual irrigation supply before and after flood control by reservoir were 2.0~4.3% in present size and 1.5~3.6% in heightened size. Reliability on water supply was decreased from 77.3% to 63.6~68.2% in present size and from 81.6% to 72.7~79.5% in heightened size. And reduction rates of water storage at the end of year before and after flood control by reservoir were 7.3~16.5% in present size and 7.7~16.9% in heightened size. But water supplies were done without any water deficiency through withdrawal limit reservoir operation in spite of low flood regulating water level.

* 충남대학교 농업생명과학대학 지역환경토목학과 (jknoh@cnu.ac.kr) 키워드 : Flood control: Operation rule curve: Reservoir heightening: Water supply

I. 서론

독 높이기에 의해 저수량을 확보하여 기존 수혜지역에 관개용수를 공급하고, 홍수를 조절하고, 하천유지유량을 공급하는 사업이 진행 중에 있다. 추가 확보된 저수량을 활용하여 하천유지유량을 어느 시기에 어느 정도 공급할 수 있는지 큰 관심이 집중되고 있다. 다목적댐이나 성주댐, 동화댐 등 수문이 있는 저수지나 수혜면적이 50%이상 감소된 저수지는 홍수기인 6월 21일부터 9월 20일 사이에 제한수위를 설정하여 홍수조절 효과를 증대시키고 있다.

저수지 운영은 효율적인 홍수조절과 용수공급을 위해 적절하게 이뤄져야 한다. Rohde and Naparaxawong(1981)은 2단계 최적화에 의해 상하 한계 저수량을 갖는 저수율을 결정하는 방법을 제안하여 태국의 발전, 관개 및 하천 저수량 증대를 위한 연계 저수지에 적용하였다. Wei and Hsu(2009)는 다목적 저수지군의 실시간 홍수조절을 위해 나무형의 최적 방류 기준을 설정하였으며, 2004년의 Aere, Haima, Nock-ten 등 태풍에 대해 대만의 Tanshui 강 저수지 군에 적용한 결과 기존 방법에 비해 침투유량 감소, 목표 저수량 달성 등에서 우수하다고 하였다. Chang et al.(2010)은 제약조건이 있는 유전자 알고리즘(CGA)의 최적 저수지 운영 방법을 제안하여 대만의 Shihmen 저수지와 하류하천에 적용한 결과 인간을 위한 용수부족을 적게 하고 자연을 위한 생태유량을 증가시키는 효과를 보여주었다. Ngo et al.(2007)은 최적화와 모의 방법을 병합하여 베트남의 Hoa Binh 저수지의 홍수조절과 발전, 갈수기의 수위확보를

위한 운영 전략을 수립하였다.

Kwon and Shim(1997)은 홍수기에 이수 및 치수 목적수위를 검토하여 대청댐에 대해 가변제한수위 개념을 도입하였다. Kwon and Shim(1998)은 홍수가 예상될 때 무피해 방류량 이상의 홍수유입량의 적정 방류량을 결정하는 홍수변환법을 대청댐에 적용하였다. Jeong et al.(2005)은 최적화 기법인 타부탐색에 의해 퍼지의 제어규칙을 설정하여 충주댐에 적용한 결과 침투방류량, 총 방류량이 감소되고, 홍수 후 가용 수자원의 양이 증가되는 결과를 얻었다. Yi and Kwon(2007)은 대청 다목적댐의 홍수조절공간과 이수공간을 재할당하여 홍수피해를 최소화하고 용수공급량을 증대하는 방안을 검토하였다. Kim et al.(1998)은 홍수조절용량이 관개용수공급에 미치는 영향을 검토하기 위해 방류제한강도 개념을 도입하여 예당지에 적용하였다.

이수관리곡선은 일본의 관개용 저수지의 이수관리를 위해 제시한 방법(Senga, 1989)으로 관개기말부터 거꾸로 하천유량과 관개 필요수량을 비교하여 부족수량을 누가시켜 작성된 곡선이다. 주로 관개용수 공급을 위해 작성하였으나 타 용수를 위해서도 작성할 수 있으며, 우리나라 다목적댐의 시기별 확보수위도 이 방법에 의해 계산하고 있다.

Kim et al.(1992)은 예당저수지의 이수관리곡선을 작성하였고, Kim et al.(2003)은 이수관리곡선에 의해 순환관개모형을 개발하여 동화댐 수혜지역에 적용하였다.

Noh(2009a)는 방동저수지의 증고와 괴곡지의 신설안을 비교하여 하류 갑천의 하천유지유량의 증가를 비교하였고, Noh(2009b)는 논산천의 상류에 위치한 탐정, 대둔, 계룡, 갑천

저수지 등의 증고 시나리오에 따른 논산관측소 지점의 하천유지유량 증가효과를 분석하였다.

이 연구에서는 독높이기 사업이 진행중인 백곡저수지를 선정하여 홍수유입량을 산정하여 홍수제한수위를 설정하고, 이수관리곡선을 작성하여 기존저수지와 2m 증고 저수지에 대해 정상운영과 방류제한운영으로 구분하여 홍수제한수위가 있는 경우와 없는 경우에 대해 용수공급량 및 이수안전도 변화, 연말 저수량 확보량 변화에 대해 분석하고자 하였다.

II. 연구자료 및 방법

1. 연구자료

백곡저수지는 충청북도 진천군 진천읍 건송리에 위치하고, 1984년에 준공하였고, 총저수량 21,750천 m^3 , 유효저수량 21,504천 m^3 , 유역면적 84.79 km^2 , 수해면적 2,975ha이다 (<http://rims.ekr.or.kr>). 토지이용은 Fig. 1과 같으며, 밭은 7.97 km^2 로 8.2%, 논은 9.57 km^2 로 11.3%, 산림은 64.1 km^2 로 75.5%를 차지하고 있다.

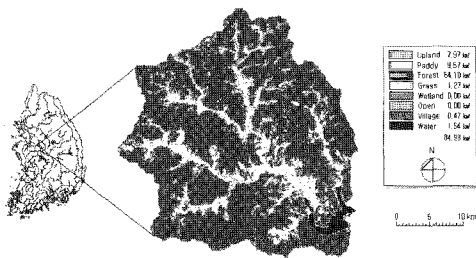


Fig. 1. Land Use of Baekgok Reservoir

1991년부터 유효저수율 자료가 기록되고 있으며, 이로부터 저수량을 계산하여 유입량 모형의 매개변수를 결정하는데 사용한다.

본 용수 수요량 및 저수지 유입량은 일별로 추정하며, 1966년부터 2009년까지의 기상자료와 강수량 자료를 사용한다. 기상자료는 인근 청주 기상관측소의 자료를 사용하였다. 강우자료는 유역조사의 표준유역 자료를 사용하는 것을 기본으로 하고, 조사되지 않은 기간은 청주 자료를 사용하는 것으로 하였다. 설계 홍수량은 일 강우량을 시간배분하여 모의에 의해 추정하며, 홍수기 20mm이상의 일 강우량의 분포는 Fig. 2와 같다.

2. 연구방법

연구내용과 흐름은 Fig. 3과 같다. 첫째 홍수기에 월별로 빈도별 홍수량을 추정하여 홍수조절용량을 설정한다. 둘째 홍수제한수위의 시나리오를 작성한다. 셋째 이수관리곡선을 작성한다. 넷째 홍수제한수위 시나리오별 용수공급량을 분석한다.

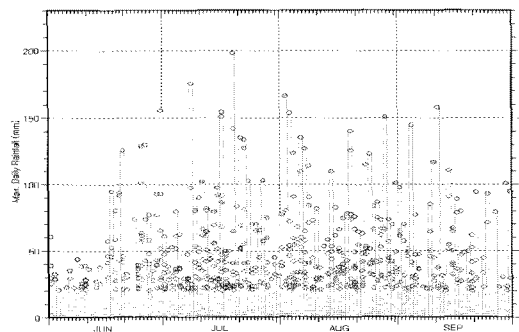


Fig. 2. Daily Distribution of Rainfall from June to September

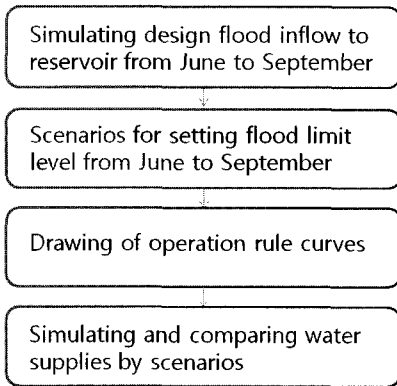


Fig. 3. Flow of This Study

가. 저수지 월별 홍수 유입량 모의

일반적으로 설계홍수량은 연 시계열의 일 최대강우량을 빈도분석하여 시간배분시켜 SCS 단위도 방법, Clark 유역추적법, Nakayasu 단위도법 등에 의해 모의한다. 여기서는 홍수기의 기간별 홍수량 크기를 파악하기 위해 연 홍수량과 함께 월별 홍수량을 계산하는 것으로 하였다.

나. 홍수기 제한수위 설정 시나리오

홍수기 제한수위를 과도하게 설정하면 홍수 후 수위를 확보하지 못해 용수공급에 지장을 미친다. 홍수조절용량과 용수공급량과는 항상 상반되기 때문에 용수공급에 미치는 영향을 최소화시킬 수 있는 홍수조절용량을 설정해야 한다. 여기서는 월별 홍수량을 참고하고, 연말 저수위 회복율을 고려하여 단계별로 홍수조절용량을 설정한다. 저수지 관리규정에는 홍수기를 6월 21일부터 9월 20일까지로 하고 있으며, 6월 21일부터 7월 20일, 7월 21일부터 8월 20일, 8월 21일부터 9월 20일까지 3단계로 기간을 설정하고 있다.

다. 이수관리곡선 작성

이수관리곡선은 하천유량과 용수수요량의 차이를 거꾸로 누가시켜 얻은 곡선이다. 농업 용수는 관개기말을 시점으로 거꾸로 계산하며, 다른 용수는 용수수요가 끝나는 시점을 기준으로 해야 하나 편의상 연말이나 관개기말을 기준으로 한다. 필요저수량(V)은 식(5)와 같이 저수지 유입량(QI)에서 관개용수량(Req)과 하천유지유량(Qm)을 공급하고 남은 값이 양이면 감소하고, 음이면 증가하며, 이를 거꾸로 누가한 값이 시기별 확보 저수량이 된다. 또한 필요저수량이 0보다 적으면 0으로 한다.

$$V(t) = V(t+1) - (QI(t) - Req(t) - Qm(t)) \quad (1)$$

$$\text{if } V(t) < 0 \text{ then } V(t) = 0 \quad (2)$$

또한 용수 수요량을 제한하여 공급량을 새롭게 산정하여 작성한 것은 방류제한곡선이 되며, 5~50%까지 5% 간격으로 방류제한곡선을 작성한다. 예로 방류제한 5%이면 용수수요량의 95%를 공급하는 것이며, 저수량이 이수관리곡선 이하로 내려오면 해당 방류제한을 만큼 방류를 제한하여 용수를 절약한다. 여기서 50%이상의 방류제한은 50%로 하였다.

라. 홍수제한수위 시나리오별 용수공급량 비교

일별 저수량 변화를 모의하는 방법에 의해 용수공급량을 분석한다. 저수지로부터 관개용수와 하천유지용수를 공급할 때 저수량(S)은 식 (3)과 같이 유입량(QI)에 의해 증가하고, 저수량 증발량(EW), 관개용수공급량(Req)과 하천유지유량(Qm)에 의해 감소한다. 저수위(H)가 만수위(FH)를 초과하거나 홍수기에 홍수제한수위(FL1, FL2, FL3 등)을 초과하면

면 식 (4)~식(7)과 같이 월류량(OV)이 발생한다. 여기서 FS는 만수위 저수량, FS1, FS2, FS3는 각각 단계별 홍수제한수위 저수량이다.

$$S(t) = S(t-1) + QI(t) - EW(t) - Req(t) - Qm(t) \quad (3)$$

$$OV(t) = S(t) - FS, \text{ if } H(t) > FH, \text{ if } t < 6.21, \text{ or } t > 9.20. \quad (4)$$

$$OV(t) = S(t) - FS1, \text{ if } H(t) > FL1, \text{ if } 6.21 \leq t < 7.20. \quad (5)$$

$$OV(t) = S(t) - FS2, \text{ if } H(t) > FL2, \text{ if } 7.21 \leq t < 8.20. \quad (6)$$

$$OV(t) = S(t) - FS3, \text{ if } H(t) > FL3, \text{ if } 8.21 \leq t < 9.20. \quad (7)$$

관개용수가 위주이기 때문에 용수공급능력의 판단은 이수안전도 90%에 상당하는 것으로 한다.

저수지 유입량 모의에는 Fig. 4와 같이 회귀수를 고려한 DAWAST 모형(Noh, 2003)을 사용하며, 논용수량의 일별 수요량(Noh, 2004)을 추정하여 그의 35%를 회귀수로 반영한다(MOCT and KOWACO, 2006).

DAWAST 모형은 우리 고유의 기상, 지상자료를 이용하여 개발한 개념적 집중형 일 유출 모형이다. 토양층을 불포화층과 포화층으로

구분하고 물수지에 의해 토양수분저류능을 일별로 나타낸다. 일 강우 및 증발 자료를 입력하여 불포화층의 높이(Umax), 포화층의 높이(Lmax), 포장용수량 높이(FC), 심층투수계수(CP), 유역증발산계수(CE) 등 6개 매개변수를 조정하여 일 유출을 모의한다(Noh, 1991).

논에서 비가 필요로 하는 수량은 식(9)와 같이 증발산량(ET)와 침투량(I)를 더한 감수심에서 유효유량(Re)를 뺀 값이다. 증발산량은 식(8)의 잠재증발산량(ETo)에 작물계수를 곱해 구하며, 잠재증발산량은 태양복사량(Rn, mm/day)과 풍속함수(f)와 포화증기압과 실제증기압의 차이(ea-ed)의 온도가중값(W)과 기상조건 조정값(C)에 의해 산정하는 수정 Penman 법에 의하며, 현재 우리나라에서 논의 증발산량을 추정하는 표준 방법이다.

한편, 논의 담수심(D)은 식(10)과 같이 유효유량(Re)과 관개수량(Req)에 의해 증가하고 소비수량(U)에 의해 감소한다. 이로부터 저수지로부터 공급되는 관개수량은 식(11)과 같이 계산된다(Noh, 2004).

$$ETo = C [W \cdot Rn + (1 - W) \cdot f(u) \cdot (ea - ed)] \quad (8)$$

$$Req(t) = ET(t) + I(t) - Re(t) \quad (9)$$

$$D(t) = D(t-1) + Re(t) + Req(t) - U(t) \quad (10)$$

$$Req(t) = D(t) - D(t-1) - Re(t) + U(t) \quad (11)$$

하천유지유량은 대개 평균갈수량 정도의 크기를 가지며, 하천 구간마다 수질, 수량 여건 등에 따라 다르며, 최근 자연사회환경을 고려하여 그 크기가 증가하는 있는 추세이다. Table 1 은 수계별로 다목적 댐을 1개소씩 선정하여 유입량 자료에 의해 유황분석을 한 것으로 평균갈수량은 0.1~0.14mm/일의 값을

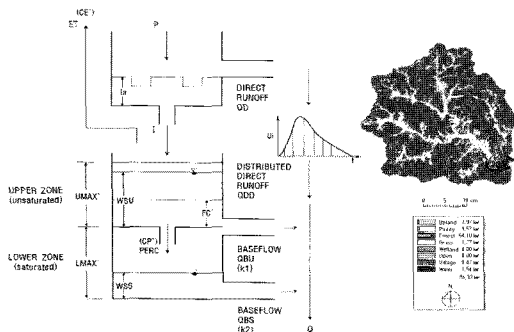


Fig. 4. Modeling Concept of DAWAST Model Responded by Return Flows

갖는 것으로 나타났다. 저수지로부터 기본적으로 이 값을 항상 흘려내려야 하지만 기왕 설계된 저수지 용량은 이 값이 반영돼 있지 않다.

4대강 살리기 추진본부는 독 높이기로 확보한 저수량에 의해 하천유지유량을 갈수기에 1~3개월 집중 공급하는 방안을 검토하였다 (MLTM, 2009). 여기서는 단순하게 관개기가 아닌 10월에서 4월 사이에 하천유지유량을 공급하는 것으로 설정하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 저수지 월별 홍수 유입량 모의

우리나라 홍수기는 6월에서 9월까지로 저수지 홍수관리도 이에 맞춰 실시되고 있다. 홍수 유입량은 설계 일 강우량을 시간 배분시켜 모의에 의해 추정하는 것으로 하였다. 월별 홍수량의 크기를 파악하기 위해 월별로 일 최대 강우량 시계열을 정리하여 부분계열과 최대치 계열로 극치1 분포에 의해 확률강우량을 산정한 결과 최대치 계열이 크게 산정되었다. 또한 백곡지 유역의 평균강우량과 청주 지점 강우량으로

산정한 결과 Fig. 5, Fig. 6에서 보는 바와 같이 청주 지점 확률 강우량이 크게 나타났다. 7, 8월 확률강우량이 6, 9월 보다 크게 나타났으며, 7, 8월 확률강우량은 연 확률강우량과 거의 같은 값을 보여주었다. 여기서는 연 일 최대치 계열로 구한 청주의 200년 빈도 확률 강우량인 314mm를 기준으로 분석하였다.

확률 일 강우량을 후방형으로 시간배분시켰고, 백곡지 유역의 최원점에서 제체까지 경사 1/200 이상은 Rziha 공식에 의해, 1/200 이하는 Kraven공식에 의해 홍수도달시간을 계산하였으며, Fig. 7과 같이 경사구간별로 계산하여 누계한 값은 136분이었다. SCS공식을 선정하여 홍수 유입량을 계산하였으며, CN값은 AMC III의 85를 적용하였다. Fig. 8은 백곡지로의 200년 빈도 확률 홍수유입량 수문곡선을 나타낸 것이며, 최대 시간강우량은 74.8mm, 첨두 유입량은 997.4m³/s이었다.

2. 홍수기 제한수위 설정 시나리오

산정된 홍수유입량이 저수지로 유입되면 저수지의 저류효과에 의해 첨두 방류량은 첨두 유입량에 비해 크게 감소된다. Fig. 9는 2m 증고된

Table 1. Flow Durations Analyzed by Using Inflows to the Selected Multipurpose Dams

Dam	Duration	Watershed area (km ²)	Item	1 st Q		95 th Q		185 th Q		275 th Q		355 th Q	
				mm	m ³ /s	mm	m ³ /s	mm	m ³ /s	mm	m ³ /s	mm	m ³ /s
HS	2001~2009	209	Mean	122.5	296	1.35	3.26	0.51	1.23	0.23	0.54	0.10	0.24
			10yr	56.33	136	0.59	1.44	0.26	0.63	0.11	0.27	0.09	0.22
IH	1992~2009	1,361	Mean	62.10	978	0.74	11.65	0.30	4.72	0.14	2.22	0.10	1.58
			10yr	15.88	250	0.24	3.82	0.13	2.04	0.10	1.58	0.10	1.58
DC	1981~2000	4,134	Mean	56.49	2703	1.22	58.31	0.59	28.11	0.31	15.06	0.14	6.93
			10yr	17.33	829	0.47	22.53	0.25	11.96	0.15	7.30	0.10	4.78
SJ	1975~2009	763	Mean	68.65	606	1.22	10.75	0.45	3.97	0.17	1.52	0.10	0.88
			10yr	28.20	249	0.56	4.90	0.23	2.00	0.10	0.88	0.10	0.88

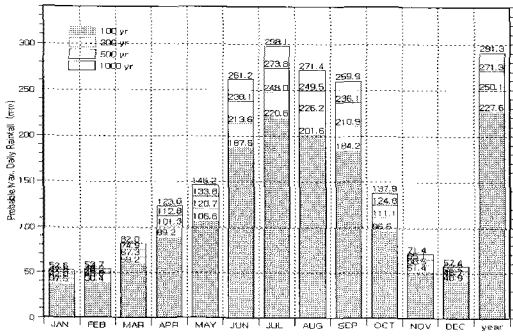


Fig. 5. Probable Maximum Daily Rainfall of Each Month in Baegog Watershed by Extreme Value Type I Distribution

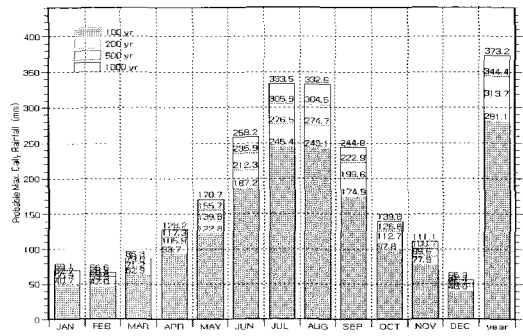


Fig. 6. Probable Maximum Daily Rainfall of Each Month in Cheonju by Extreme Value Type I Distribution

만수위 EL 102.1m인 저수지에서 홍수제한수위를 EL 98.0m로 하고, 사전방류량을 5m³/s, 여수로 길이를 55m로 하였을 때, 수위변화와 방류량 변화를 나타낸 것이다. 편의상 수문이 없는 것으로 가정하였으며, 홍수조절용량은 945만m³으로 총저수량 2,667만m³의 35%에 상당하는 양이다. 총 유입량은 2,254만m³, 총 방류량은 948만m³, 저류량은 1,307만m³이었으며, 첨두유입량은 997.4m³/s, 첨두방류량은 348.6m³/s로 감소된 첨두유량은 648.7m³/s에 이르렀다. 최대수위는 EL 104.48m로 월류수심은 2.38m이었다.

기존저수지와 2m 증고된 저수지에 대해 제한수위별로 분석한 홍수조절효과는 Table 2와 같으며, 홍수제한수위에 따라 총 유입량 2,254만m³ 중에서 방류량은 932만m³~1,658만m³, 저류량은 597만m³~1,486만m³이었다. 이 중에서 기존저수지에서는 EL 97.0m, 2m 증고 저수지에서는 EL 99.0m를 홍수제한수위의 최저수위로 설정하고, 연말저수위 확보를 위해 홍수기를 초기(6.21.-7.21.), 중기(7.21.-8.20.), 말기(8.21.-9.20.)로 구분하여 Table 3과 같이 홍수제한수위를 다양하게 구성하여 홍수조절수위가 없는 경우와 용수공급량을 비교할 수 있도록 하였다.

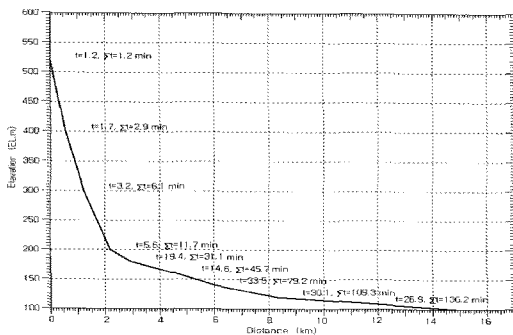


Fig. 7. Travel Time of Food Inflow to Baegog Reservoir

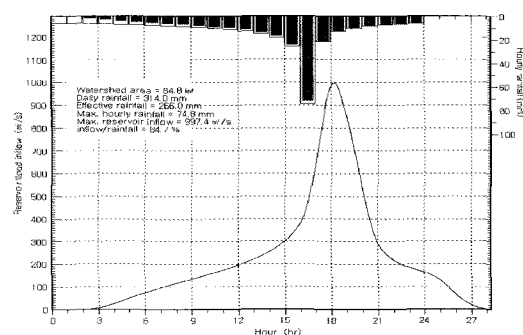


Fig. 8. Probable Flood Inflow to Baegog Reservoir with 200 Year Frequency by SCS Equation

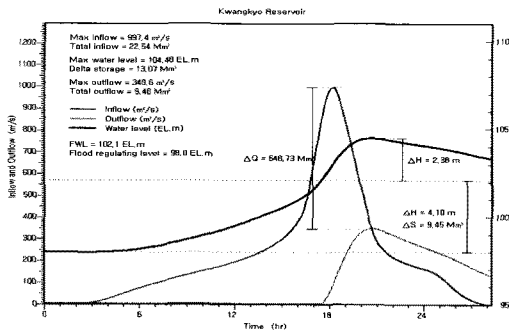


Fig. 9. An Example of Regulating Flood Inflow to Baekgog Reservoir

3. 이수관리곡선 작성

만수위 EL 100.1m, 총저수량 2,175만³m인 기존의 백곡저수지와 만수위 EL 102.1m, 총저수량 2,667만³m인 2m 증고저수지에 적용하였다. 또한 2,975ha의 수해지역에 관개용수만을 공급하는 경우와 관개용수 공급과 함께 하천유지유량을 대청댐의 평균갈수량 0.14mm/d를 10월~4월까지 공급하는 경우에 대해 식 (1)에 의해 이수관리곡선을 작성하였다.

기존저수지의 이수관리곡선은 Fig. 10, 2m

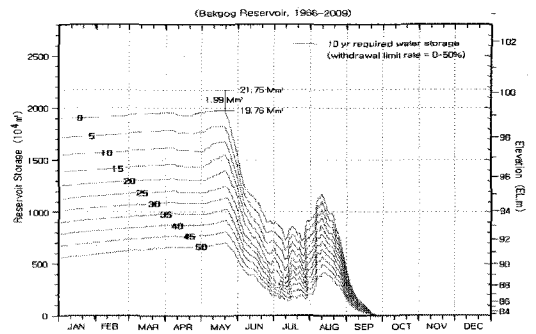


Fig. 10. Operation Rule Curve of Baekgog Reservoir with Full Water Level of EL.100.1m for Irrigating to Paddy Field of 2,957ha and for Supplying Instream Flow of 11,870³m/d from October to April

증고저수지의 경우는 Fig. 11과 같다. 그림에서 가장 위의 곡선은 기준저수량곡선이고, 5~50까지 숫자가 있는 곡선은 5~50%의 방류제한저수량곡선이다. 최대 확보저수량은 1,976만³m으로 기존저수지의 총저수량과 199만³m, 증고저수지의 총저수량과 691만³m의 차이가 있는 것으로 나타났다.

Table 2. Summary of Regulating Flood Volumes by Various Flood Limited Water Level in Baekgog Reservoir with Full Water Levels of EL 100.1m and EL 102.1m

Full water level (EL.m)	Flood regulating level (EL.m)	Max. inflow-outflow (Mm ³)	Spillway overflow depth (m)	Flood control volume (Mm ³)	Max. water level (EL.m)	Total outflow (Mm ³)	Reservoir storage (Mm ³)
100.1	95.0	655.29	2.35	10.01	102.45	9.32	13.23
	96.0	588.78	2.65	8.30	102.75	10.93	11.62
	97.0	523.42	2.93	6.47	103.03	12.68	9.87
	98.0	466.93	3.16	4.53	103.26	14.55	8.00
	99.0	425.36	3.33	2.46	103.43	16.58	5.97
102.1	97.0	724.68	2.02	11.38	104.12	7.69	14.86
	98.0	648.73	2.38	9.45	104.48	9.48	13.07
	99.0	569.47	2.74	7.38	104.84	11.42	11.13
	100.0	499.24	3.03	5.15	105.13	13.56	8.99
	101.0	448.14	3.24	2.77	105.34	15.87	6.68

Table 3. Scenario of Flood Limited Water Level for Analyzing the Effect of Flood Regulation in Heightening Reservoir

Scenario	Full water level (EL.m)	Early 6.21.-7.20. (EL.m)	Intermediate 7.21.-8.20. (EL.m)	Late 8.21.-9.20. (EL.m)
1	100.1	100.1	100.1	100.1
2		97.0	98.0	99.0
3		97.0	97.0	97.0
4		98.0	98.0	98.0
5	102.1	102.1	102.1	102.1
6		99.0	100.0	101.0
7		99.0	99.0	99.0
8		100.0	100.0	100.0

4. 홍수제한수위 시나리오별 용수공급량 비교

1991년부터 2009년까지 백곡지의 저수량 자료를 이용하여 저수지 일 유입량 모형의 매개변수를 결정하였다. 보정기간은 1991년부터 2000년까지, 검정기간은 2001년부터 2009년까지 설정하여 식 (12)의 목적함수로 Simplex 법(Mathews, 1987; Nelder and Mead, 1965)에 의해 매개변수를 결정한 결과 UMAX 315.6,

LMAX 33.7, FC 164.8, CP 0.0173, CE 0.0079 등으로 나타났다. Fig. 12의 저수량 변화와 Fig. 13, Fig. 14의 등가선 비교에서 양호한 결과를 보여줘 유입량의 모의 결과가 적합한 것으로 인정하였다.

$$Objective\ function = \min \frac{1}{nyear} \frac{1}{365}$$

$$\sum (Os - Ss) \quad (12)$$

여기서 nyear는 연수, Os는 관측 일 저수량, Ss는 모의 일 저수량이다.

결정된 매개변수를 1991년부터 2009년까지

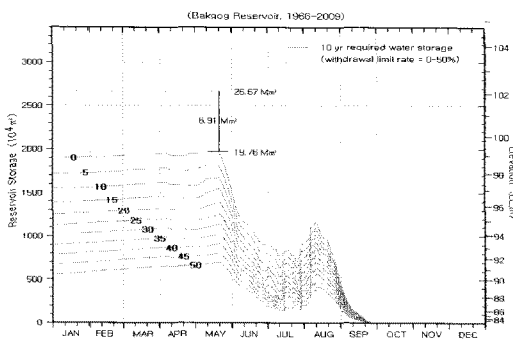


Fig. 11. Operation Rule Curve of Baekgog Reservoir with Full Water Level of EL.102.1m for Irrigating to Paddy Field of 2,957ha and for Supplying Instream Flow of 11,870m³/d from October to April

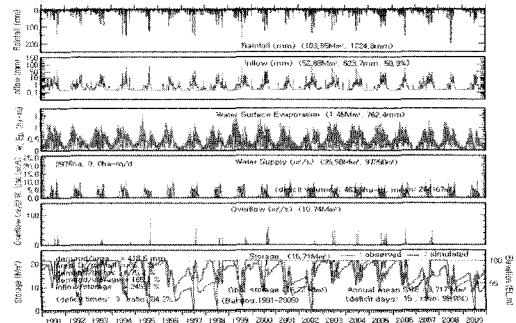


Fig. 12. Comparison of Observed and Simulated Daily Water Storages in Baekgog Reservoir from 1991 to 2009

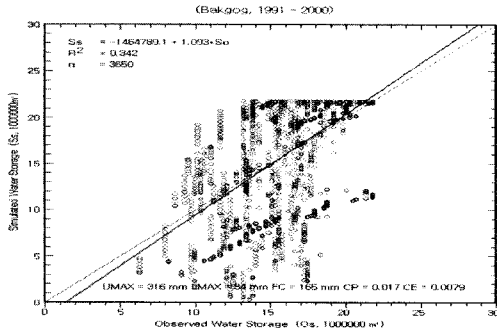


Fig. 13. Equal Value Line Between Observed and Simulated Daily Water Storages of Baekgog Reservoir in Calibration Period (1991-2000)

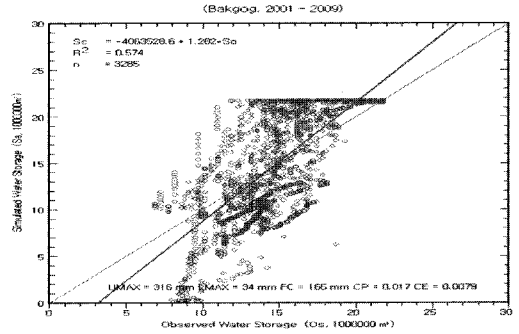


Fig. 14. Equal Value Line Between Observed and Simulated Daily Water Storages of Baekgog Reservoir in Verification Period (2001-2009)

백곡지의 유입량을 모의하는데 적용한 결과 강우량은 연평균 1,224.8mm, 유입량은 623.7 mm로 나타나 유출률은 50.9%이었다.

1966년부터 2009년까지 2,957ha의 수혜지역에 공급할 논 관개용수 수요량을 일별로 추정하였다. 월평균 관개수량은 5월 55만^m³, 6월 576만^m³, 7월 891만^m³, 8월 968

만^m³, 9월 314만^m³에 이르며, 년 관개수량은 최소 1,000만^m³, 최대 4,173만^m³, 평균 3,319만^m³에 이르렀다.

또한 백곡지와 같은 수계인 금강수계에 위치한 대청댐 유입량의 평균갈수량 0.14mm/일을 하천유지유량으로 10월부터 4월까지 공급하는 것으로 계산하면 일 11,870^m³, 연 252만^m³에 이른다.

결정된 매개변수로 유입량을 모의하였고, 논 관개용수와 하천유지용수를 공급할 때, 시나리오 6에 대해 이수관리곡선을 적용하지 않은 정상운영한 경우와 이수관리곡선을 적용하여 방류제한 운영한 경우의 저수량 변화를 모의하여 비교한 결과는 Fig. 15와 같았다. 정상운영인 경우 연평균 관개용수 공급량은 3,319만^m³, 하천유지용수 공급량은 252만^m³, 용수부족량은 507만^m³, 저수량은 1,792만^m³, 이수안전도는 79.5%이었다. 방류제한운영인 경우 연평균 관개용수 공급량은 3,245만^m³, 하천유지용수 공급량은 252만^m³, 용수부족량은 없었고, 저수량은 2,152만^m³, 이수안전도는 100%이었다.

나머지 시나리오에 대한 저수량 변화를 모의한

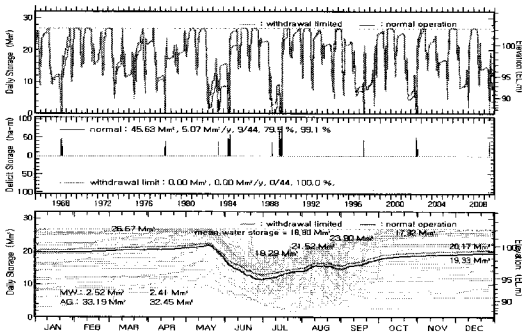


Fig. 15. Comparison of Water Storages with Withdrawal Limited and Normal Operations in Baekgog Reservoir with Full Water Level of EL.102.1m and Flood Regulating Levels of EL 99.0m (6.21.-7.20.), EL 100.0m (7.21.-8.20.), and EL 101.0m (8.21.-9.20.) in Case of Irrigation and Instream Water Supply

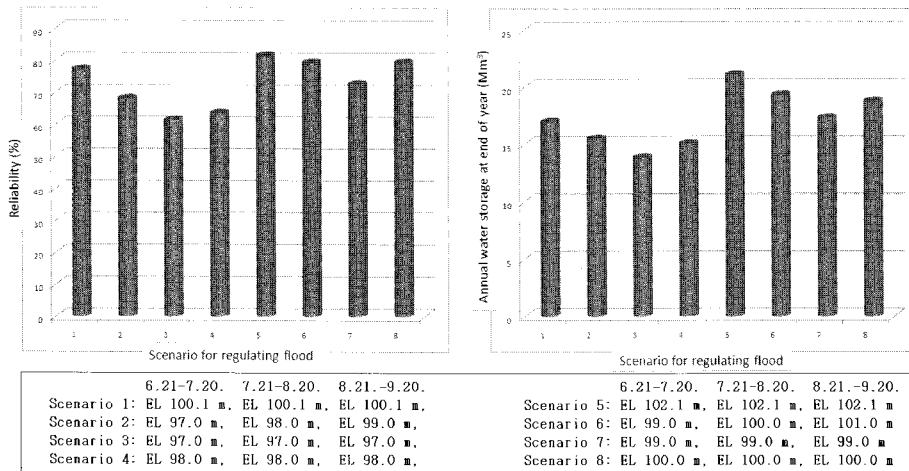


Fig. 16. Reliability and Annual Water Storage at the End of Year by Flood Regulating Scenario in Baekgog Reservoir

결과는 Table 4와 같으며, 이수관리곡선을 이용하여 방류제한운영을 하는 경우는 모든 홍수 제한수위 시나리오에 대해 용수부족이 발생하지 않았다. 정상운영을 한 경우 이수안전도와 연말 확보저수량을 시나리오별로 비교한 결과는

Fig. 16과 같다.

방류제한운영시 관개용수 공급량을 비교하면 기존저수지에서 홍수제한수위가 없는 경우 3,151만³, 홍수제한수위가 있는 경우는 3,014 ~ 3,087만³로 제한수위가 없는 경우와 비교하여

Table 4. Annual Summary of Simulating Water Storages in Baekgog Reservoir with Normal and Withdrawal Limit Operations

Size	Scenario	Operation	Water storage (Mm ³)	Irrigation (Mm ³ /y)	Instream flow (Mm ³ /y)	Deficit water (Mm ³ /y)	Mean storage (Mm ³)	Rr (%)	End storage (Mm ³ /y)
L.100.1	1	normal	21.75	32.60	2.52	6.43	15.74	77.3	16.98
		withdrawal limit	21.75	31.51	2.40	0.0	16.77	100	17.80
	2	normal	21.75	32.17	2.52	5.63	14.09	68.2	15.50
		withdrawal limit	21.75	30.87	2.35	0.0	15.27	100	16.49
	3	normal	21.75	31.47	2.52	6.06	12.60	61.4	13.88
		withdrawal limit	21.75	30.14	2.31	0.0	13.88	100	14.87
4	normal	21.75	31.97	2.52	5.33	13.80	63.6	15.08	
	withdrawal limit	21.75	30.75	2.34	0.0	14.95	100	16.02	
EL.102.1	5	normal	26.67	33.43	2.52	4.63	19.88	81.6	21.07
		withdrawal limit	26.67	32.93	2.44	0.0	20.65	100	21.85
	6	normal	26.67	33.19	2.52	5.07	18.83	79.5	19.33
		withdrawal limit	26.67	32.45	2.41	0.0	17.95	100	20.17
	7	normal	26.67	32.52	2.52	5.62	16.03	72.7	17.30
		withdrawal limit	26.67	31.75	2.38	0.0	17.04	100	18.16
	8	normal	26.67	32.93	2.52	5.96	17.54	79.5	18.77
		withdrawal limit	26.67	32.29	2.41	0.0	18.42	100	19.58

64~137만 m^3 감소하였으며, 2m 증고 저수지에서 홍수제한수위가 없는 경우 3,293만 m^3 , 홍수제한수위가 있는 경우는 3,175~3,245만 m^3 로 제한수위가 없는 경우와 비교하여 48~118만 m^3 감소한 것으로 나타나 각각 2.0~4.3%, 1.5~3.6% 감소하였다.

기존 저수지의 이수안전도는 홍수제한수위가 없는 경우 77.3%, 홍수제한수위가 있는 경우는 63.6~68.2%로 제한수위가 없는 경우와 비교하여 9.1~13.7% 감소하였으며, 2m 증고 저수지의 이수안전도는 홍수제한수위가 없는 경우 81.6%, 홍수제한수위가 있는 경우는 72.7~79.5%로 제한수위가 없는 경우와 비교하여 2.1~8.9% 감소하였다. 시나리오 2, 4와 그리고 시나리오 6, 8은 각각 기간과 홍수조절용량을 곱한 값이 같지만 시나리오 2와 6은 수위의 단계를 두고, 시나리오 4와 8은 수위를 일정하게 한 경우로 시나리오 2와 6이 이수안전도에서 높게 나타났다. 연말 저수량 확보 측면에서도 똑같은 경향을 보여주었다. 따라서 시나리오 2, 6과 같은 단계별 제한수위 설정 방안에 대해 도입을 적극 검토할 필요가 있는 것으로 나타났다.

IV. 결 론

충북 진천의 백곡지의 만수위 EL.100.1m, 총저수량 2,175만 m^3 인 기존 규모와 만수위 EL.102.1m, 총저수량 2,667만 m^3 인 2m 증고된 규모로부터 2,975ha의 수해지역에 관개용수와 하천유지유량을 0.14mm/일씩 10월~4월까지 공급하는 경우에 대해 이수관리곡선을 작성하고, 홍수유입량을 산정하여 홍수제한

수위를 설정하여 정상운영 및 방류제한 운영의 경우에 대해 저수량 변화 모의에 의해 홍수조절용량 설정에 따른 용수공급량 변화와 연말저수량 확보에 대해 분석한 결과는 다음과 같다.

첫째, 저수지 홍수추적 분석한 결과 홍수제한수위별로 총 유입량 2,254만 m^3 중에서 방류량은 932만 m^3 ~1,658만 m^3 , 저류량은 597만 m^3 ~1,486만 m^3 이었으며, 기존저수지에서 EL 97.0m, 2m 증고 저수지에서 EL 99.0m를 홍수제한수위의 최저수위로 설정하고, 홍수기를 초기(6.21.-7.21.), 중기(7.21.-8.20.), 말기(8.21.-9.20.)로 구분하여 기존 저수지에서 EL 97-98-99m, EL 97-97-97m, EL 98-98-98m, 2m 증고저수지에서 EL 99-100-101m, EL 99-99-99m, EL 100-100-100m 등으로 홍수제한수위 시나리오를 설정하였다.

둘째, 1966년부터 2009년까지 2,957ha의 수해지역에 공급할 논 관개용수 수요량을 일별로 추정하였으며, 연 관개수량은 최소 1,000만 m^3 , 최대 4,173만 m^3 , 평균 3,319만 m^3 에 이르렀다. 백곡지와 같은 수계인 금강수계에 위치한 대청댐 유입량의 평균갈수량 0.14mm/일을 10월부터 4월까지 하천유지유량으로 공급하는 것으로 계산하여 일 11,870 m^3 (연 252만 m^3)을 공급하는 것으로 할당하였다. 백곡지 저수량 자료를 이용하여 유입량 모형 매개변수를 결정하여 저수지 유입량을 일별로 모의하였고, 기존저수지와 2m 증고저수지에 대해 이수관리곡선을 작성하였다.

셋째, 방류제한 운영시 관개용수 공급량을 비교하면 기존저수지에서 홍수제한수위가 없는 경우 3,151만 m^3 , 홍수제한수위가 있는 경우는 3,014~3,087만 m^3 로 64~137만 m^3 감소

하였으며, 2m 증고 저수지에서 홍수제한수위가 없는 경우 3,293만 m^3 , 홍수제한수위가 있는 경우는 3,175~3,245만 m^3 로 48~118만 m^3 감소한 것으로 나타나 감소율은 각각 2.0~4.3%, 1.5~3.6%에 불과하였다.

넷째, 이수안전도를 비교하면 기존 저수지에서 홍수제한수위가 없는 경우 77.3%, 홍수제한수위가 있는 경우는 63.6~68.2%로 9.1~13.7% 감소하였으며, 2m 증고 저수지에서 홍수제한수위가 없는 경우 81.6%, 홍수제한수위가 있는 경우는 72.7~79.5%로 2.1~8.9% 감소하였다.

다섯째, 연말 저수량 확보를 비교하면 기존 저수지에서 홍수제한수위가 없는 경우 1,780만 m^3 , 홍수제한수위가 있는 경우는 1,487~1,649만 m^3 로 131~293만 m^3 감소하였으며, 2m 증고 저수지에서 홍수제한수위가 없는 경우 2,185만 m^3 , 홍수제한수위가 있는 경우는 1,816~2,017만 m^3 로 168~369만 m^3 감소한 것으로 나타나 감소율은 각각 7.3~16.5%, 7.7~16.9%로 나타났다.

종합하면 홍수제한수위를 설정하여도 용수공급량의 감소는 매우 적었으며, 이수관리에 의해 모두 극복할 수 있는 것으로 나타났으며, 단계별 홍수제한수위가 연말 저수량 확보에서 유리한 것으로 나타났다.

참고문헌

- Chang, L.C., F.J. Chang, K.W. Wang, and S.Y. Dai, 2010. Constrained genetic algorithms for optimizing multi-use reservoir operation. *Journal of Hydrology* 390(1-2): pp.66~74.
- Jeong, H.W., S.A. Choi, H.S. Kim, and M.P. Shim, 2005. Reservoir operation by Tabu search method during flood. *Journal of the Korean Water Resources Association* 38(9): pp.761~770 (in Korean).
- Kim, T.C., J.K. Noh, and S.K. Park, 1992. Operation rule of irrigation reservoir. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*: 34(1): pp.33~49 (in Korean).
- Kim, T.C., J.P. Moon, J.W. Min, and H.K. Lee, 1998. Optimal flood control volume in the irrigation reservoir. *Journal of Korean Agricultural Engineers* 40(2) : pp.81~91 (in Korean).
- Kim, T.C., J.M. Lee, and D.J. Lee, 2003. A Rotational irrigation scheduling for an irrigated paddy blocks with operation rule curve. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 45(5): pp.67~77 (In Korean).
- Kwon, O.I. and M.P. Shim, 1997. Determination scheme of variable restricted water level during flood period of multipurpose dam. *Journal of the Korean Water Resources Association* 30(6) : pp.709~720 (in Korean).
- Kwon, O.I. and M.P. Shim, 1998. Reservoir operation at flood time by transformed reservoir flood(TRF) reservoir operation method(ROM). *Journal of the Korean Water Resources Association* 31(1) : pp.105~113 (in Korean).
- Mathews, J.H., 1987. *Numerical Methods for Computer Science, Engineering, and Mathematics*, pp.295~302. Prentice-Hall International, Inc.
- Ministry of Construction and Transportation and Korean Water Corporation, 2006. 2020 Water Vision(Modified) (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2009. Master plan for 4 Major Rivers Restoration Project.
- Nelder, J.A. and R. Mead, 1965. A simplex method for functional minimization. *The Computer Journal* 9: pp.308~313.
- Ngo, L.L., H. Madsen, and D. Rosbjerg, 2007. Simulation and optimisation modelling approach for operation of the Hoa Binh reservoir, Vietnam. *Journal of Hydrology* 336(3-4): pp.269~281.
- Noh, J.K., 1991. A conceptual watershed model for daily streamflow based on soil water storage. Ph. D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea (in Korean).
- Noh, J.K., 2003. Applicability of the DAWAST considered return flows. *Journal of the Korean Water Resources Association* 39(11) : pp.1095~1105 (in Korean).
- Noh, J.K., 2004. A system for estimating daily paddy irrigation water requirements in simulating daily streamflow. *Journal of Korean Agricultural Engineers* 46(7): pp.71~80.
- Noh, J.K. 2009a. Planning for securing instreamflow of Gapcheon stream in Daejeon.

Journal of Agricultural Science 36(1): pp.87~98, Chungnam National University (in Korean).

17. Noh, J.K. 2009b. Increasing instreamflow in Nonsancheon by water storage securing scenario of upstream reservoirs. Journal of Agricultural Science 36(1): pp.99~109, Chungnam National University (in Korean).
18. Rohde, F.G. and K. Naparaxawong. 1981. Modified standard operation rules for reservoirs. Journal of Hydrology 51(1-4): pp.169~177.
19. Senga, Y. 1989. Soft science of water resources, pp.45~75, Rokudowu Publishing (in Japanese).
20. Wei, C.C. and N.S. Hsu, 2009. Optimal tree-based release rules for real-time flood control operations on a multipurpose multireservoir system. Journal of Hydrology 365(3-4): pp.213~224.

※ 정정합니다.

한국관개배수논문집 제17-1호에 실린 노재경 교수님의 논문 “금봉저수지 신설에 따른 기존저수지의 용수확보 활용성 평가” 중 영문이름이 'Noh, Jaek Young'으로 잘못 표기되어 'Noh, Jae Kyoung'으로 정정합니다.