필댐의 비상방류시설 규모 적정성 평가기법 연구

Appropriateness Assessment of the Emergency Discharge Facility of a Fill Dam

손광익* · 권현한** · 문장원*** · 김원범****

Son, Kwangik*, Kwon, HyunHan**, Moon, Jangwon***, and Kim, Wonbeom****

Abstract

The uncertainty resulting from a natural disaster could be reduced by increasing the drawdown capability for reservoir safety that, in turn, leads to dam-break due to seepage. However, there is no general method to assess the appropriateness of an emergency discharge facility by comparing the drawdown rates. This study aims to propose the appropriateness assessment method depending on the type of dam. More specifically, examination steps for a rockfill/fill, including five different categories, were mainly developed. The proposed approach was applied to the Sayeon dam, which is 50 years of age. The results showed that the emergency discharge facility is within the range of the appropriate scale.

Key words : Drawdown Rate, Reservoir Lowering, Emergency Discharge Facility, Dam

요 지

저수지의 안정성 측면에서는 비상방류 규모가 크면 클수록 기상현상의 불확실성에 대한 대응능력을 키울 수 있는 반면 저수위의 과다한 급감은 댐 체체의 안정성 등에 악영향을 미칠 수 있다. 이러한 점에서 비상방류시설 규모의 적정성 평가기법 수립이 요구되나 댐의 다양한 특성과 지역별 수문특성으로 인하여 범용적인 평가기법이 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 댐 특성에 따른 비상방류시설의 규모에 대한 적절성을 평가하는 방안을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 필댐 5가지 사항에 대한 수위강하율의 적절성 평가방안을 제시하였다. 또한 경과연수가 50년 이상된 사연댐에 대하여 연구결과를 적용하여 비상방류시설 수위강하율의 고려사항에 대한 적합성을 평가, 검토함으로써 연구결과의 활용방안을 제시하였다.

핵심용어 : 수위강하율, 저수지 강하, 비상방류시설, 댐

1. 서 론

최근 지구온난화로 인한 기후변화로 기상변동성이 크게 증가하고 있으며, 국지적인 극치강수, 이상고온, 이상가뭄 등 수공구조물의 안정성을 저해하는 요인이 크게 증가하고 있다. 또한 우리나라의 수공 구조물은 노후화가 급격히 진행되고 있어 기후변화에 따른 수문학적 안정성 측면에서 더욱

불리한 상황이라 할 수 있다. 특히, 댐과 같은 대형 수공구조물에서 비상상황 발생으로 인한 댐의 구조적 손상은 댐의 붕괴로 이어질 수 있으며 결과적으로 댐 하류에 막대한 사회적, 경제적 피해를 미치게 된다. 댐의 월류나 댐 체체의 파손으로 인한 제체붕괴 위험의 비상상황 발생 시 여수로를 통한 방류 이외에 댐의 비상방류시설이 필요하게 된다. 댐 및 비상방류시설은 국가기반시설로 법, 제도 개선에

*정회원, 영남대학교 토목공학과 교수(E-mail: kison@ynu.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Yeongnam University

**교신저자, 정회원, 세종대학교 건설환경공학과 교수(Tel: +82-2-3408-3726, Fax: +82-2-3408-4332, E-mail: hkwon@sejong.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Sejong University

***홍익대학교 토목공학과 연구원

Researcher, Department of Civil Engineering, Hongik University

****정회원, 국립재난안전연구원 방재연구실 연구원(E-mail: wonbeom92@korea.kr)

Member, Researcher, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute

관한 연구로 Choi et al. (2014)은 국가기반 체계 보호계획 관련 법·제도의 빈도분석과 내용분석을 통해 중복성 문제와 국가기반체계 보호제도 개선안을 제시하였다. Song and Kim (2018)은 국가기반시설 보호계획의 문제점을 도출하고, 국가기반시설 보호계획 수립지침 상의 취약항목 개선에 필요한 방안을 제시하였다. Nam (2017)은 복합재난의 위험 감소 방안 및 복합재난관리체계 구축에 필요한 정책 방향을 제시하였다.

비상방류설비를 계획하거나 운영기준을 제시한 국내 연구로는 비상방류설비 규모산정기준(K-water, 2013) 연구가 있다. Son and Yi (2015)는 수어댐을 대상으로 SEEP 프로그램 등을 활용하여 수위저하 속도에 따른 제체의 사면 안정성을 검토함으로써 비상방류시설의 적정규모를 수위강하 속도를 기준으로 제시하였다. 또한 Yi et al. (2013)은 저수지 모의 모형인 HEC-ResSim을 이용하여 저수지 저류량을 배제시킬 수 있는 비상방류설비의 규모를 산정하고 배제일수를 제시하였다. 그러나 다양한 국내 댐 특성을 고려할 때 이러한 보편적 기준 이외에도 댐 특성이 고려된 산정방법에 대한 검토가 필요하다.

이에 본 연구에서는 국내외 비상방류시설의 설계기준 및 운영사례들을 토대로 기존 댐의 비상방류시설규모의 적절성을 평가할 수 있는 객관적 접근방법을 제시하고자 한다. 국내외의 보편적 방류권고 기준외에도 댐 붕괴 취약성 및 기타 비구조적 요소들을 고려하며 댐의 안전 등급 및 과거유입량 기준 등을 활용한 체계적 접근방법을 제시하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 연구 동향 및 문헌 검토

국의 비상방류설비에 대한 기준 현황을 살펴보면 USBR (1990)에서는 저수지 배제기간 산정시 4개월 이내에 저류수를 배제할 것을 규정하고 있으며 방류 시 댐 하류에 미치는 영향과 댐에 작용하는 위험도가 고려된 기준을 제시하였다. 미국의 모든 저수지는 장래의 시설 보수, 환경 등의 목적으로 저류지 물을 모두 배제할 수 있도록 저수위 방류시설을 갖춰야하며, 시설에 따라 방류가 불가능한 경우는 예외로 하는 규정을 제시하고 있다(USACE, 1975). 영국 DEFRA (2006)에서는 댐 높이 비율, 1일 강하수심, 저류 용량비 등을 정하여 세계에서 사용하고 있는 수위강하에 대한 세계 각국/기관 기준을 제시하였다. 호주 대담회(ANCOLD)에서는 비상방류시설에 대한 적정규모에 대한 기준이 없으며, USBR (1990)의 기준을 참조하여 운영하고 있다(Johnson et al., 2010). 호주와 마찬가지로 국내에서도 USBR (1990)의 기준을 참고하고 있으나, 대략적인 가이드만이 제시되고 있어 댐의 안전성 및 국내 댐 관리기준을 고려한 비상방류시설의 규모에 대한 적정성을 평가하는데 한계가 있다. 이러한 점에서 본 연구에서는 국내외에서 활용되고 있는 비상방류시설

규모 및 운영 기준 등을 평가 하여 현재의 제시되고 있는 비상방류시설의 규모의 적정성을 평가할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2.1 저수위에서의 방류량과 유입량 비교

비상방류시 수위를 저수위까지 낮추기 위해서는 방류시설의 가능방류능과 유입량을 비교해야 한다. 비상방류시설은 수위에 따라 방류량이 달라지므로 방류량이 가장 작은 저수위일 때의 평균 유입량과 비교하여 비상방류시설의 수위저하 기능을 판단하도록 권장하고 있다(Environment Agency, 2017). K-water (2013) 연구결과에 따르면 우리나라의 대 중 소규모 댐에 대하여 일평균최대, 홍수기 평균, 연평균 등을 대상으로 검토한 결과 홍수기(6-9월) 평균을 유입량으로 사용할 것을 제안하고 있다.

2.2 댐 위험도 등급에 따른 비상방류 규모

비상방류량 산정방법은 크게 댐의 위험등급에 따라 수위강하율 상한선을 제시하는 기준으로 댐 위험성 분류(Fig. 1)에 따라 각 위험군 별 수위강하율을 Table 1과 같이 제시하였다(ICE, 2015). 단, 댐 높이(H')가 높은 경우 낮은 댐에 비하여 일반적으로 더 높은 설계기준을 적용하여 시공된 것으로 판단하여 수위강하율 상한선 기준은 댐 높이(H') 20 m 이하에 적용할 것을 제안하고 있다. 따라서 이 기준은 보수적으로 제안된 비상방류규모로 판단할 수 있다.

우리나라에서는 전국의 모든 댐 중 댐 체제 특성상 안전율이 비교적 낮을 것으로 예상되는 수어댐을 대상으로 수위강하율에 대한 안전성을 검토한 연구(Son and Yi, 2015) 결과에 의하면 수위강하율 1 m/day에 대한 안전율은 1.841-1.578이었으며 국내 타 댐의 경우 안전율은 이 보다 더 높을 것으로 예상된다. 한편, 우리나라의 경우 시설물의 안전도 평가등급은 5단계로 A(우수)부터 E(불량)등급으로 분류하고 있으며 C등급이 보통에 해당한다(국토교통부고시 제 2018-45호).

Fig. 1. Overall Consequence Class (reproduction of Fig.3.3 from Defra, 2006)

Table 1. The Dam Classification Criteria According to Dam Characteristics (ICE, 2015)

Dam Category	Recommended min. rate	Upper cap on practical drawdown rate
A	5%H"/day	1m/day
B	3%H"/day	0.6m/day
C or D	2%H"/day	0.3m/day

2.3 국내외 비상방류 규모 산정 기법

국가 또는 기관에서 제시하는 기준은 정량적 정성적 등 다양한 기법이 있다. Norwegian Dam Safety Regulation 및 영국 Thames Water 등은 Philpott et al. (2008) 등을 인용하여 최대 수위강하율을 1m/day로 제한하고 있다. 댐 비상방류시설 규모산정기준 수립연구(K-water, 2013)에서도 저수지의 사면 안정을 위해 일일 최대 수위강하율을 1 m/day로 제한할 것을 제안하였다. 뿐만 아니라 방류대상 수심의 상위 75% 수위에 해당하는 저류량은 7-10일 이내에 배제하는 것을 원칙으로 하며 저수위까지 방류하는 경우 40-50일 이내를 원칙으로 제안하고 있다. “Dams and Reservoirs Journal (Hinks, 2009)”에는 제시된 Eq. (1)으로부터 산정된 초기 수위강하율을 설치된 비상방류시설의 수위강하율과 비교하여 그 적절성을 평가한다. USBR (1990)에서는 인명 피해 및 경제적 손실을 고려한 댐 하류의 장애(hazard) 정도와 댐의 안정성에 영향을 미치는 정성적 인자에 대한 위험도(risk) 정도를 각각 3단계로 분류하여 댐 높이별 방류일수를 제시하고 있다. 이 기준은 우리나라 댐 설계기준에서도 인용되고 있으나 정성적 3단계에 대한 판단기준이 모호한 실정이다.

$$\text{Initial drawdown rate (mm/day)} = 300 + 5H + 8,640 \times Q_{10}/a \quad (1)$$

여기서, H는 저수지 배제수위(m)로 월류정고에서 저수위까지의 높이이며, Q10은 10% 초과확률에 해당하는 유입량(m³/s), a는 저수지 면적(hectares)이다.

Table 2. Summary of Drawdown Rate Equations

Drawdown rate	Reference	Institute
0.75H“ in 10-20 days;	USBR (1990)	USBR, Melbourne Water
0.7h, in 20-50 days 0.5h, in 40-70 days 0.25h in 80-100days	IS 15472 (2004)	Bureau of Indian Standards
h ≤6.1m in 4 months or 0.1h	USACE (2016)	USACE
1m/day	Philpott et al. (2008)	Thames Water
300mm/day+5H+8640Q10/a	Hinks (2009)	Private individual
min. 0.5m/day	Northern Ireland Water (2014)	Northern Ireland Water
0.5▽ in 8 days	Combelles et al. (1985)	France

비상방류 규모 산정에 많이 인용되고 있거나 국제기관에서 제시한 공식들을 요약하면 Table 2와 같으며 댐 높이(H”), 1일 수위 강하율, 수심(h), 저류용량(▽)비 등으로 표현되고 있다.

2.4 댐 붕괴 취약성 평가기법

댐 붕괴 취약성 검토는 수치모형 프로그램 등을 이용하여 제체 내의 침윤선 동수경사 등을 분석하여 제체의 안정성을 평가하는 기법이 있으며 ICOLD (2013)에서는 제체재료와 관리상태를 정량화한 침식률 지수(IHET)를 Table 3과 같이 제안하였다.

한편, Environmental Agency (2017)에서는 제체내의 동수구배(i)와 침식률 지수를 이용하여 이론적 권장 수위강하율(Do)을 제안하였다.

Fig. 2는 동수구배를 간략히 산정하는 기법으로 최대수심(H”)과 유효저폭(L)으로부터 동수구배(i)를 Eq. (2)와 같이 유도하였다.

Table 3. Erosion Rate Index Versus Soil Classification (reproduction of Table 3.4 from ICOLD, 2013)

Unified Soil Classification	Representative Erosion Rate Index (I _{HET})		
	Likely Minimum	Best Estimate	Likely Maximum
SM with < 30% fines	1	<2	2.5
SM with > 30% fines	<2	2 to 3	3.5
SC with < 30% fines	<2	2 to 3	3.5
SC with > 30% fines	2	3	4
ML	2	2 to 3	3
CL-ML	2	3	4
CL	3	3 to 4	4.5
CL-CH	3	4	5
MH	3	3 to 4	4.5
CH with Liquid Limit < 65%	3	4	5
CH with Liquid Limit > 65%	4	5	6

Fig. 2. Determining Hydraulic Gradient (Environment Agency, 2017)

$$i = \frac{H'}{L} \quad (2)$$

여기서, i 는 동수구배, H' 는 최대수심(m)으로 계획홍수위에서부터 저수지 바닥까지의 높이이며, L 은 유효저폭 길이(m)이다.

Fig. 3은 Environment Agency (2017)에서 제시한 기준댐(V-형태 계곡에 설치되어 저류량은 수심의 지수형태로 저류량이 증가되는 댐)에 대한 동수구배(i), 침식률지수(I_{HET}) 및 이론적 권장 수위강하율(Do) 관계를 나타내고 있다.

예를 들어 동수구배(i)가 0.2, I_{HET} 가 4인 경우 내부 침식을 막기 위한 이론적 권장 수위강하율(Do)은 12% H' /day임을 알 수 있다(Fig. 3). 그러나 이 식은 댐 높이가 20 m 이상 높아지면 수위 강하율이 계속 커지는 문제점을 안고 있어 사용 시 전문가의 공학적 판단이 필요하다.

Fig. 3. Theoretical Drawdown Rate to Avert Internal Erosion, Do (Environment Agency, 2017)

2.5 기타 제체 안정성 평가 요소

기타 요소들에 대한 검토에서는 감시 빈도 및 품질, 수위강하에 필요한 시간, 긴급복구능력, 저수지를 일정량 비우는데 걸리는 시간, 수리가 진행되는 동안 방류 가능 능력 등이 있다. 감시 빈도 및 품질은 위험요소가 발견되고 조치를 시작하는 시점까지 걸리는 시간과 대처 방안 능력정도로 평가하며 Fig. 4와 같다.

Fig. 4. The Period Between Discovery of Danger and Taking Action for Drawdown

수위강하에 필요한 시간은 구조적 문제가 발생된 후 수위강하를 시작하기 전까지 지체되는 시간으로 정의되며 긴급복구능력이란 구조적 문제를 확인하고 이를 처리하는 능력으로 수리가 진행되는 동안 방류가능 여부는 댐 보수를 위한 방류시설 유무를 통해 판단할 수 있다. 체제에 누수현상이 나타난 이후 댐 붕괴에 소요되는 시간에 대한 이론적 검토과정은 ICOLD (2013) 보고서에 상세히 기술되어 있다.

3. 비상방류규모 적정성 평가기법 개발

비상방류규모를 산정 할 수 있는 기법은 크게 최소 방류능을 산정하는 기법과 최대 방류능을 산정하는 기법으로 나뉜다. 또한 댐 유지관리 상태나 댐 운영팀의 비상상태 대응능력에 따른 비구조적 항목에 대한 평가가 필요함도 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 최소 방류능 산정기준과 최대 방류능 산정기준, 그리고 비구조적 평가기준에 대한 적정성으로 나뉘며 비상방류시설규모의 적정성 여부를 판단하는 기법을 Fig. 5와 같이 제안하였다. 다만 방류능을 표현하는 방법은 댐 높이, 수위강하율, 저류량 등 다양하므로 본 연구에서는 이후 이 용어들을 통일하여 ‘방류능’으로 사용하고 비교평가 시에는 각 기준들이 제시하는 단위로 변환하여 사용하였다.

Fig. 5. Flow Chart of the Drawdown Rate Evaluation Procedure

1단계 유역 및 댐 특성 분석에서는 유입량 등 수문특성과 비상방류시설 능력, 그리고 댐 위험도 등을 평가한다. 이 과정에서 댐 유역 특성을 조사하여 유입량, 침투 특성, 토양분류 등으로 수위강하율 산정 및 적절성 평가에 필요한 인자들을 계산한다. 2단계 비상방류시설의 최소 방류능 평가에서는 기존의 방류시설 규모에 대한 적정성을 평가하는 경우 유입량이 고려된 실제 방류능이 기준에서 제시하는 최소 방류능보다 커야한다. 3단계 비상방류시설의 최대 방류능 평가에서는 제체 안정성이 침윤에 민감한 필댐 및 록필댐과 상대적으로 영향이 작은 콘크리트 댐 등 댐 형식에 따라 평가방법을 달리해야 한다. 따라서 댐 형식에 따라 고려사항을 분리 검토하여 적절성을 평가한다. 4단계에서는 검토된 내용을 바탕으로 각 평가단계에 대한 만족도 여부에 따라 적정성 여부를 판단한다. 기존 연구에서는 수위강하율에 대한 권고안만 제시되고 있으나, 본 연구에서는 댐위험도, 과거실적 기반의 유입량 및 방류량 조건과 댐 안정성 모니터링 주기 등을 종합적으로 고려한 단계별 비상방류규모 적정성 평가기법을 제시하고 궁극적으로 댐의 수위강하율을 제시할 수 있도록 한 점에서 기존 연구와 차별성을 가진다.

3.1 유역 및 댐 특성 분석

유역의 특성은 저수지의 면적, 평균 유입량, 유입 전환 능력 등을 산정하여 분석한다. 댐의 특성은 최대 수심(H), 유효저폭 길이(L)로부터 동수경사를 산정하고 Table 3을 이용하여 침식률 지수(I_{HEI})를 산정하여 분석한다. 또한 상시 만수위/웨어정고 수위 기준 비상방류시설의 방류량과 저수위에서의 방류량을 산정하며 저수지 배제수위(H)의 25%와 100%에 대한 배제소요 일수를 산정하여 분석한다.

3.2 유입량을 고려한 실제 방류능 평가

비상방류시 수위를 낮추기 위한 방류시설의 수리학적 방류능(Q_R)은 저수지 유입량(Q_P)보다 커야한다. 또한 저수지 수위를 낮출 수 있는 방류시설의 실제 방류능(Q_L)은 방류시설 자체 방류능(Q_R)과 저수지로의 유입량(Q_P)의 차로 계산할 수 있으며 방류능에 대한 평가는 실제 방류능(Q_L)

이 각종 기준에서 제시하는 권고 최소 방류능 보다 커야 한다.

3.3 방류능 적정성 평가

최소 방류능 기준과 최대 방류능 기준을 산정하여 실제 방류능의 적정성을 아래 식으로부터 평가한다.

$$(\text{최소 방류능}) \leq (\text{실제 방류능}) \leq (\text{최대 방류능}) \quad (4)$$

3.3.1 최소 또는 권고 방류능 산정 기법

최소 또는 권고 방류능 산정 기법으로는 K-water, ICE (2015), USBR (1990), Hinks (2009)가 있으며 K-water 기준은 저수지 배제수심(H')의 25%를 10일 이내에 방류하며 100%를 50일 이내에 방류할 것을 권장한다. ICE (2015) 기준은 댐의 등급에 따라 댐 높이(H')의 5%, 3%, 2%의 수위강하율을 권장한다. USBR (1990) 기준은 저수지 배제수심(H')의 25%를 20일 이내에 방류할 것을 권장한다. Hinks (2009) 기준은 방류 초기 수위저감 속도는 Eq. (1)을 권장한다.

3.3.2 최대 방류능 산정 기법

최대 방류능 산정 기법으로는 K-water, ICE (2015), ICOLD (2013), Environment Agency (2017)가 있으며 K-water 기준은 최대 수위강하율은 1m/day를 넘지 말 것을 권장한다. ICE (2015) 기준은 댐의 등급에 따라 다르며 댐 높이(H')가 20 m 이하의 경우 1.0m/day, 0.6m/day, 0.4m/day를 넘지 말 것을 권장한다. ICOLD (2013) 기준은 내부침식 억제 가능 여부와 지속적으로 억제 가능여부를 평가한다. Environment Agency (2017) 기준은 침윤에 의한 제체내 붕괴를 방지하기 위한 이론적 권장 수위강하율(Do) 산정기법을 제시하고 있다(Fig. 3).

한편, 비상방류시설의 수위강하율은 Eq. (5)로 산정할 수 있으며 이 때 저수지 수위 저감을 위한 방류량(Q_L)은 수위에 따라 달라지기 때문에 배제수위 구간에서의 평균 방류량을 사용한다.

$$D_I = \frac{86,400 \times Q_L}{A \times H} \times 100\% \quad (5)$$

여기서, D_I 는 방류시설에 의한 저수지 수위강하율(%H/day), Q_L 은 저수지 수위 저감을 위한 방류량(m^3/s), A 는 만수위시의 저수지 표면적(m^2), H 는 배제높이(m)이다.

3.3.3 비구조적 요소 평가

댐 붕괴 위험이 있는 경우 붕괴에 소요되는 예상시간과 함께 수위강하에 필요한 시간, 대체 응급조치 등 비구조적 대응능력에 대한 영향을 고려해야 한다. 또한 댐 시설물

안전성 평가 등급이나 댐의 목적(다목적 댐, 용수 댐, 홍수조절 등), 그리고 댐의 규모(대규모, 중규모, 소규모 등) 및 댐 연령 등을 검토해야 한다.

댐 규모가 커질수록 소규모 댐에 비해 관리 인원과 댐 운영기준이 상대적으로 높으며 최근 준공된 댐일수록 댐 설계기준의 강화로 인하여 구조적 안전성은 더 높을 것으로 예상된다. 이러한 가정은 Fig. 1 (DEFRA, 2006)과 Table 1 (ICE, 2015)로부터 간접적으로 확인할 수 있다. 한편, 댐 시설물의 안전성 평가 결과는 시설물의 경과연수와는 무관하게 현 상태에 대하여 평가하므로 시설물의 안전성에 미치는 영향은 무시할 수 있을 것이나 안전등급이 낮은 경우 별도의 주의가 필요할 것으로 판단된다.

따라서 댐의 안전성 등급을 정량화하기 위해서는 댐의 경과연수, 댐 규모 및 댐의 목적에 따라 등급 군을 분류하고 가중치를 배정할 필요가 있다(Table 4). 본 연구에서는 가중치를 산정하기 위하여 Table 3 (ICOLD, 2013)의 침식률지수 (I_{HEI})를 이용할 것을 제안하였다. 제체상태가 일반적인 경우를 기준으로 상태가 양호한 경우와 나쁜 상태를 비교해 보면 제체의 재료에 따라 약간의 차이는 있으나 양호한 경우 일반상태에 비해 I_{HEI} 는 평균적으로 약 0.75배 낮으며 나쁜 경우는 평균적으로 약 1.29배 높다. 또한 재료에 따른 표준편차는 각각 0.1, 0.07로 나타났다. 댐의 안전성과 I_{HEI} 는 반비례하므로 비구조적 항목에 대한 가중치는 댐의 안전도가 우수할 때 1.101, 보통일 때 1.0, 낮을 때 0.919를 배정하였다. 세 가지 항목(댐의 경과연수, 댐 규모 및 댐의 목적)별 비구조적 평가 결과의 가중치를 곱해서 최종 가중치를 산정한다. 예를 들어 20년 미만된 중규모 홍수조절 댐의 경우 가중치는 $1.101 \times 1.0 \times 1.0 = 1.101$ 점이 되어 (2)단계에서 산정된 최대 방류능보다 1.101 배 높은 기준을 적용할 수도 있다.

아직 우리나라에서는 비상방류시설의 적정성을 평가하는 방법이 없으므로 본 연구의 평가기법의 개발은 기존 비상방류시설의 정량적 평가를 통해 객관적인 평가와 함께 개선점을 쉽게 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 비상방류시설 적정성 평가 예시

본 연구에서는 위험에 상대적으로 취약한 필댐 중에서 건설된지 50년 이상인 사연댐을 대상으로 앞에서

설명한 이론을 바탕으로 비상방류시설의 적정성을 평가하였다.

4.1 비상방류시설의 수위강하율 산정

사연댐의 비상방류시설의 수위강하율을 산정하기 위해서는 Table 5와 같이 각 항목을 조사하고 계산하여야 한다. 사연댐의 조사 결과 저수지의 면적은 만수 기준으로 1,920 m^2 이며, 평균 유입량은 6.65 m^3/s , 유입 전환 능력은 용수공급량 2.09 m^3/s 로 나타났다. 최대 수심(H')은 42.62 m, 유효저폭(L)은 36.91 m로 동수경사는 1.15로 평가되었다. 침식률지수(I_{HEI})는 앞서 설명한 토양분류표를 이용하여 산정하였으며 5로 평가되었다. 또한 상시만수위/웨어정고 수위 기준으로 비상방류시설의 방류량은 13.46 m^3/s , 가장 낮은 저수위에서의 방류량은 9.48 m^3/s 로 나타났다. 월류정고의 수위는 60 m, 저수위의 수위는 45 m, 배제용량은 19,514,000 m^3 으로 평가되었다. 저수지 배제수위 H 의 25% 비율시간은 9.00 day, 전체 배제일은 31.47 day로 나타났다. 사연댐의 비상방류시설의 최대, 최소 방류능력은 13.46 m^3/s , 9.48 m^3/s 이며 평균 방류능력은 11.74 m^3/s 인 것으로 나타났다. 그리고 저수지의 저장량은 4.56 m^3/s , 저수지 저감을 위한 방류량은 7.18 m^3/s 로 나타났다. 댐의 배제수위의 높이는 월류정고에서 저수위까지의 높이로 사연댐은 15 m이므로 위 조사된 자료로 설치된 수위강하율을 계산하면 3.18 %H/day, 476.64 mm/day로 나타난다(Table 6).

4.2 비상방류시설 수위강하율 적합성 평가 및 결과

사연댐은 50년 이상된 중규모 홍수조절 댐으로 가중치는 $0.919 \times 1.0 \times 1.0 = 0.919$ 점이 되며, 최대 방류능 기준에 가중하여 최종 평가한다.

4.2.1 유입량을 고려한 실제 방류능 평가

사연댐의 저수위에서의 방류량과 유입량 조건은 저수위에서의 방류량 9.48 m^3/s 이 유입량 4.56 m^3/s 보다 크며 비상시 평균유입량을 배제시키는데 문제가 없는 것으로 나타났다(Table 7).

4.2.2 최소 또는 권고 방류능 산정 기법

K-water 기준은 저수지 배제수심(H)의 25%를 10일 이내, 100%를 50일 이내에 방류 가능 여부를 판단하는 것으로

Table 4. The Dam Safety Classification Criteria According to Dam Characteristics

Classification	High (W.F = 1.101)	Normal (W.F = 1.0)	Low (W.F = 0.919)
Elapse year	< 20 years	20 ~ 30 years	≥ 30 years
Dam type	Multi-purpose dam	Flood control dam	Water supply dam
Dam size*	Large scale dam	Midium scale dam	Small scale dam

* Dam size classification follows K-water (2013) report.

Table 5. The Basic Characteristics of Sayeon Dam

Classification	Unit	Factors		Description
Reservoir inflows	m ²	A	1,920.00	- Area of full water
	m ³ /s	Q _{50%}	1.56	- 50% exceedance probability of inflow (June ~ August)
	m ³ /s	Q _{10%}	12.41	- 10% exceedance probability of inflow (June ~ August)
	m ³ /s	Q _A	6.65	- Average inflow during flood season (June ~ August)
Ability to divert inflows	m ³ /s	Q _X	2.09	- inflow diversion facility or Water supply amount
Dam geometry, construction and foundation	m	H'	42.62	- Design flood level ~ Reservoir floor
	m	L	36.91	- The width of the dam measured along the dam/foundation interface.
	-	I	1.15	- H' / L
	-	I _{HET}	5.00	
Discharge	m ³ /s	Q _{max}	13.46	- Outflow at the normal high water level
	m ³ /s	Q _{min}	9.48	- Outflow at the low water level
Water level	m	H _{max}	60.00	- Weir crest
	m	H _{min}	45.00	- Low water level
Evacuation storage	m ³	V ₁	19,514,000	
Time to empty reservoir	day	H _{25%}	9.00	- Time to empty the top fourth of the reservoir volume, T25%
		H _{100%}	31.47	- Time to empty the entire reservoir storage

Table 6. Estimation Results of Installed Drawdown Rate of Sayeon Dam

Classification	Unit	Factors		Description
Installed discharge capacity	m ³ /s	Q _I	13.46	
Reliable discharge capacity	m ³ /s	Q _R	11.74	- Average emergency discharge capacity
Inflow pass-through allowance	m ³ /s	Q _P	4.56	
Discharge capacity available for reservoir lowering	m ³ /s	Q _L	7.18	
Height	m	H	15.00	- (Weir crest - low water level)
Installed drawdown rate	%H/day	D _I	3.18	
	mm/day		476.64	

Table 7. Outflow and Inflow Condition at the Low Water Level

Classification	Unit	Evaluation	Description
Outflow and inflow condition at the low water level	m ³ /s	9.48 > 4.56	- Comparing outflow with reservoir storage (average inflow-water supply amount) at the low water level

Table 8. Evaluation of Minimum and Recommended Discharge Capability

Classification	Unit	Evaluation	Description	Status
K-water				
25% of evacuation level (H)	day	10 > 9	- Compared with the 10 days evacuation time (25% of evacuation level)	O.K
100% of evacuation level (H)	day	50 > 31.47	- Compared with the total evacuation time (50 days)	O.K
USBR (1990)				
USBR standard	day	20 > 9	- Comparing installed drawdown rate and USBR standard at high hazard and risk (20 days)	O.K
Hinks (2009)				
Formula for target capacity (Hinks, 2009)	mm/day	513 > 476.64	- Comparing installed drawdown rate and Do = $300 + 5H + 8,640 \times Q_{10} / a$	N.G

Table 9. Evaluation of Maximum Discharge Capability

Classification	Unit	Evaluation	Description	Status
K-water				
1.0m/day	mm/day	919 > 476.64	- Comparing installed drawdown rate and recommendation standard (1,000 mm/day)	O.K
ICE (2015)				
Estimation of dam risk class		B		
Comparison of basic recommendation standards by height	mm/day	551 > 476.64	- Comparing computed drawdown rate and recommendation standard (600 mm/day)	O.K
ICOLD (2013)				
Conditions that may inhibit internal erosion initiating		YES	- Assess the likelihood of internal erosion initiating (e.g. details of any designed filter).	O.K
Conditions that may inhibit internal erosion continuing		-	- Assess whether there are any factors that may prevent internal erosion from continuing.	-
Environmental Agency (2017)				
Overall vulnerability	%H/day	11 > 10	- Consider the potential for internal erosion to initiate and the speed at which it may progress. Consider the theoretical drawdown rate to avert internal erosion, Do, and the critical leakage rate, relative to assumed values on which the basic recommended standard is based.	O.K

사연댐은 25%를 9일, 100%를 31.5일에 배출하므로 만족하는 것으로 나타났다. ICE (2015) 기준은 댐의 등급에 따라 평가하는 방법으로 사연댐의 댐 높이가 42.62 m로 20 m가 넘으므로 최대 방류능 기준으로 평가한다. USBR (1990) 기준은 저수지 배제수심(H)의 25%를 20일 이내에 방류가능 여부를 판단하며 9일내에 배출하므로 만족한다. Hinks 기준은 Eq. (1)로 산정한 방류 초기 수위저감 속도 513 mm/day보다 급회 산정한 수위강하율 476.64 mm/day가 낮으므로 불만족하는 것으로 나타났다. 3개의 평가 기법 중 2개가 만족하는 것으로 나타나므로 사연댐의 최소, 권고 방류능 산정 기법을 이용한 평가는 만족하는 것으로 나타났다(Table 8).

4.2.3 최대 방류능 산정 기법

최대 방류능 기준에 가중치 0.919를 적용하여 평가를 하였으며 사연댐의 방류량이 이 기준보다 작으면 적절한 것으로 평가한다. 사연댐의 방류능은 476.64 mm/day으로 가중치를 적용한 K-water 기준 최대 수위강하율 919 mm/day 보다 낮으므로 평가기준을 만족한다. ICE (2015) 기준은 댐의 등급에 따라 다르며 댐 높이(H)가 20 m 이하의 경우 1.0 m/day, 0.6 m/day, 0.4 m/day를 넘지 말 것을 권장하나 사연댐은 댐 높이가 42.62 m로 20 m가 넘는다. B 등급의 권장 수위강하율 상한선은 600 mm/day로 가중치를 적용하면 551 mm/day이며 사연댐의 방류능 476.64 mm/day은 이

기준보다 낮으므로 평가기준을 만족한다. ICOLD (2013) 기준은 내부침식 억제 가능 여부 검토는 댐 단면 중앙의 축조제 중 필터 혹은 필터 역할을 하는 재료로 축조 되었는지를 검토하고, 내부침식의 지속적으로 억제 가능 여부는 투수 계수(투과속도)가 10^{-3} m/s와 누수량 $10 \ell/s$ 를 기준으로 평가한다. 사연댐의 경우 내부침식 억제가능 여부 검토는 축조제료에 필터 역할을 하는 코어가 있으므로 만족, 내부 침식의 지속적으로 억제 가능여부는 자료 부족으로 평가가 불가능하다. Environment Agency (2017) 기준은 침윤에 의한 제체 내 붕괴를 방지하기 위한 이론적 권장 수위강하율(Do) 산정 기법을 도시하여 평가하는 것으로 기준 댐 12 %H/day에 가중치를 적용하면 11 %H/day이며 사연댐은 10 %H/day으로 11 %H/day 보다 작으므로 만족한다.

평가 결과 사연댐의 방류시설은 현재 구축되어 있는 방류시설로 충분히 비상사태에 대비가 가능할 것으로 판단된다(Table 9). 그러나 정량적인 판단이 어렵거나, 자료 부족, 신뢰성 문제 등 많은 문제들이 해결되어야만 정확한 평가가 될 것으로 판단되며 국가기반시설의 효과적인 안전과 관리를 위해서는 민관 협력을 통한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 비상방류시설의 적정성 평가를 위해 일반

적으로 적용 가능한 인자인 수위강하율을 이용하여, 국내의 기존방식에서 제시하는 기준과 방류량, 유입량, 동수경사, 침식률지수 등 댐특성 인자들을 비교하여 평가하는 방법을 제시하였다.

댐의 상태를 고려하기 위해 댐의 중요도 및 경과년수에 따라 등급화하여 평가하였으며, 수리학적으로 댐 붕괴 취약성 검토에 관한 기준도 고려하였다.

기존 방법에서는 댐의 안정성과는 별개로 비상방류시설의 규모에 근거한 수위강하율이 제시함으로써 기존 댐에 대한 수위강하율의 적절성을 평가하는 데에는 한계가 있었으며, 주로 신규댐의 설계 시 필요한 기본적인 가이드라인 제공만이 활용될 수 있다. 이러한 점에서 본 연구에서는 기존댐 비상방류시설의 규모 및 수위강하율의 적절성을 평가하는데 주요 목적이 있다는 점에서 기존연구와 차별성을 가진다. 더불어 본 연구에서는 비상방류시설의 규모와 수위강하율을 재평가하기 위한 방안으로 댐위험도를 활용함과 동시에 실제 운영시 축적된 유입량자료를 활용할 수 있는 방안을 제시함으로써 가정 사항에 근거한 수위강하율이 아닌 댐의 수문학적 및 구조적 안정성을 직간접적으로 고려할 수 있는 방안 제시가 가능하였다.

본 연구에서 제시된 규모적절성 평가 방안은 기존 댐의 비상방류시설의 적정 운영방안을 수립하는데 있어 보다 합리적인 기준을 제시할 수 있을 것으로 판단되며, 설계기준 측면에서도 활용성이 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 영남대학교 연구년 결과로 제출된 논문입니다.

References

- Choi, D.S., Yoon, K.H., and Shin, J.D. (2014). A study on law analysis for efficient critical infrastructure protection. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 1, pp. 233-245 (in Korean).
- Combelles, J., Goubet, A., Llopis, N., and Paccard, M. (1985). Mesures destinées à améliorer la sécurité des ouvrages hydrauliques des barrages. *Transactions of the 15th International Congress on Large Dams*, Lausanne, Switzerland, C15-Q59-R46.
- Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA). (2006). *Engineering guide to emergency planning for UK reservoirs*. Volume 1 of 3: Main guide, Draft for informal consultation.
- Environment Agency. (2017). *Guide to drawdown capacity for reservoir safety and emergency planning*. SC130001, Volume 1: Main guide, Bristol, UK.
- Hinks, J. (2009). Low level outlets 1: Formula for target capacity. *Dams and Reservoirs*, Vol. 19, No. 1, pp. 7-10.
- Institution of Civil Engineers (ICE). (2015). *Floods and reservoir safety* (4th ed). London, UK: ICE Publishing.
- International Commission on Large Dams (ICOLD). (2013). *Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations*. ICOLD Bulletin 164.
- IS 15472. (2004). *Guidelines for planning and design of low level outlets for evacuating storage reservoirs*. Bureau of Indian Standards.
- Johnson, C., Stephens, D., Arnold, M., and Vitharana, N. (2010). *2010 - Emergency release capacity for dams - International to local perspectives*. Australian National Committee on Large Dams Incorporated (ANCOLD).
- K-water. (2013). *A study on emergency outlet works scale determination benchmark for the dam*. Korea water resources cooperation (in Korean).
- Nam, K-H. (2017). The risk management policy suggestions for effective compound disaster management. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 4, pp. 105-112 (in Korean).
- Northern Ireland Water. (2014). Booklets given to delegates during tours to the following reservoirs. carried out as part of the *18th Biennial British Dam Society (BDS) Conference*, Belfast: (a) Copeland Reservoir, (b) Middle South Woodburn Reservoir, (c) Upper South Woodburn Reservoir.
- Philpott, B., Oyeyemi, Y., and Sawyer, J. (2008). Queen Mary and King George V emergency draw down schemes. *Proceedings of the 15th Biennial BDS Conference*, Warwick, pp. 379-391. doi:10.1680/jersitf.35225.0032
- Son, K.I., and Yi, J.E. (2015). Hydraulic & hydrologic design criteria for an emergency discharge of reservoir (I). *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 3, pp. 149-158 (in Korean).
- Song, C.Y., and Kim, D.H. (2018). Improvement proposals for the guidelines for the national infrastructure protection plan. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 5, pp. 193-201 (in Korean).
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (1975). *Low level discharge facilities for drawdown of impoundments*. Engineer Regulation 1110-2-50.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (2016). *Design criteria for dam and lake projects*. 33 CFR 220.1d,

Code of Federal Regulations, Title 33 (7-1-16 Edition), Chapter 2, Part 220.

United States Bureau of Reclamation (USBR). (1990). *Criteria and guidelines for evacuating storage reservoirs and sizing low level outlet works*. ACER Technical Memo No. 3, Assistant Commissioner - Engineering and Research.

Yi, J.E., Son K.I., and Kang, M.S. (2013). Hydraulic &

hydrologic design criteria for an emergency drainage of reservoir (II). *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 3, pp. 159-167 (in Korean).

Received	■	June 18, 2019
Revised	■	June 24, 2019
Accepted	■	July 12, 2019