

## 댐 비상방류 설계기준 선정을 위한 수리수문학적 검토(I)

### Hydraulic & Hydrologic Design Criteria for an Emergency Discharge of Reservoir (I)

손 광 익\* / 이 재 응\*\*

Son, Kwang Ik / Yi, Jaeung

#### Abstract

It is well known that emergency outlet works have to be provided for the safety of dams. However, concept of emergency outlet works did not applied for the design of the most dams in Korea. Korean design standard for low-level outlet works does not provide enough design criteria which could be used in design of emergency outlet works. In this research, as-built status and hydraulic design criteria of outlet works, such as drawdown rate or hydraulic pressure due to the impounded water depth, were examined. Another relationship between drawdown rate and the dam slope stability was also examined with SEEP model. It was found that 25% reduction of impounded water depth decreases the pressure forces about 50%. Therefore, outlet works should be designed to drawdown properly at the beginning of the emergency. Seepage analysis of dam bodies showed that most of Korean dams could safely stand for 1m/day drawdown rate. Higher drawdown rate could result high discharge so the drawdown rate must be related with the flood risk of downstream. Finally, multi-stage design was recommended that faster discharge for the initial 25% of water depth in 7-10 days than the rest of it in 1-2 months.

**Keywords** : rapid drawdown, emergency outlet works, dam safety

#### 요 지

비상방류시설은 안전한 댐 운영 및 유지관리를 위해서 절대적으로 필요한 시설임에도 불구하고 국내 댐의 경우 이를 고려한 설계가 이루어지지 않아 각 댐의 비상방류 대응 적정성을 판단하기 곤란한 상황이다. 특히 국내 댐의 경우 비상방류 시설규모를 산정하는 기준이 일정치 않을 뿐만 아니라 대부분의 용수댐은 별도의 방류시설 조차도 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기존댐 방류시설 현황 분석, 국내외 비상방류시설 설계기준 등의 검토와 함께 국내 댐설계기준을 적용한 가상 댐체와 수어댐을 대상으로 수위에 따른 방류능 분석을 수행하였다. 또한 SEEP 프로그램 등을 활용, 수위저하 속도에 따른 제체의 사면 안정성을 검토함으로써 비상방류 시설의 적정규모 산정기준을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 수리학적 해석을 통해 저류수심에 따른 제체에 작용하는 힘을 분석하였으며 수위저하 속도 변화에 따른 제체의 안정성을 검토하여 허용수위저하 속도 범위를 제시하였다. 수위 25% 저감은 하중을 50%까지 감소시켜 초기수위 저감이 중요한 것을 알 수 있었다. 가상 댐체는 물론 수어댐에 수위저하 속도 1m/일을 적용하더라도 제체의 안전성은 보장됨을 확인하였다. 다만, 방류능과 방류 소요일수는 수위별 저류용량 등 저류지 특성과 밀접한 관계가 있어 초기대응을 위해서는 7~10일 이내에 저류수심의 25%를 먼저 방류시키고 나머지 방류량은 1~2개월 이내에 방류할 것을 제안하였다.

**핵심용어** : 수위 급강하, 비상방류시설, 제체의 안정성

\* 교신저자, 영남대학교 공과대학 건설시스템공학과 교수 (e-mail: kison@ynu.ac.kr, Tel: 82-53-810-2591)

Corresponding Author, Prof, Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ., 214-1 Gyungsan-si, Gyungbuk 712-749 Korea

\*\* 아주대학교 건설시스템공학과 교수 (e-mail: jeyi@ajou.ac.kr)

Prof, Dept. of Civil Engrg., Ajou Univ., Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyunggi-do 443-749 Korea

## 1. 서론

2013년 독 붕괴사고가 발생한 경주 산대 농업용 저수지의 경우 농어촌 공사의 정기점검에서 붕괴가 우려되는 D 등급을 받았으나 보수가 이루어지지 않았다. 특히 붕괴 사고 전부터 독에서 물이 새는 것이 관측되었던 것으로 알려져 있으나 비상시 저류수를 방류할 수 있는 시설이 없어 마땅한 대응책을 수립할 수 없었던 것으로 판단된다. 저류지의 방류시설은 여수로와는 별도로 여수로 월류부 수위 이하의 저수용량을 배제시키는 시설물로서 저수지 초기 담수 시 담수속도 조절뿐만 아니라 운영 또는 유지관리를 위해 저수지를 비워야 할 경우 저수지의 안전측면에서 반드시 설치되어야 하는 시설물이며, 용도에 맞는 기능이 발휘될 수 있도록 충분한 방류능력을 가지고 있어야 한다.

국내의 경우 2011년 댐설계기준에서는 비상방류설비(low-level outlet, bottom outlet)로 명명하고, 규모산정 기준을 제시하고 있다. 그러나 기준의 내용이 비상방류시 저수지 수위를 가능한 한 단기간에 배제할 수 있도록 “최대한 크게” 계획하도록 기술하고 있어 방류기간 동안의 유입량 및 배제목표시간 등의 핵심적 설계인자를 객관적으로 선정할 수 있는 기준이 없는 실정이다. 또한, 국내 댐의 방류시설을 살펴보면 다목적댐의 경우 발전 및 비상방류를 통해 방류기능이 수행될 수 있도록 설계되어 있으나 그 규모는 다양하며, 용수댐의 경우 관로를 통해 수도 시설로 용수를 공급하게 되므로 최근 건설된 일부 댐을 제외하고는 별도의 하천 방류시설이 구비되어 있지 않은 실정이다. 방류기능을 잘 갖추고 있는 댐의 경우에도 설계 시 규모산정에 대한 설계기준의 일관성이 없으며, 국내 관련 연구실적 또한 저조한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 기존 댐 방류시설 현황 분석, 수위배제용 시설의 적정규모, 국내의 비상방류시설 설계기준 등의 검토를 통해 방류시설의 기능이 충분히 발휘될 수 있는 시설을 계획할 수 있도록 적정 규모산정 기준을 검토, 제시하고자 한다. 다만 연구범위가 너무 방대하여 본 논문에서는 수리학적 검토를 집중적으로 수행하였으며 수문학적 검토는 연속으로 게재된 동일 논문제목(III)편에 기술하였다.

## 2. 국내외 설계기준 및 연구동향

### 2.1. 국내의 방류시설 설계기준

우리나라의 댐 설계기준(KWRA, 2011)의 방류설비 설

계기준은 사실상 미국의 USBR (1990) 기준을 따르고 있다. 비상방류시설은 저수지 초기 담수, 운영 또는 유지관리 중 저수지를 비워야 하는 비상시에 사용되며, 여수로 월류부 수위 이하의 저류수를 가능한 빠른 시간 내에 안전하게 방류시킬 수 있는 시설물로 정의하고 있다. 방류대상은 저수용량 중, 홍수조절용량과 사수량은 고려치 않으며, 여수로 월류부 수위 이하를 대상으로 한다. 방류시설의 설치 위치는 사수위보다 높게 설치하며 규모는 수위의 급강하, 하류하천의 피해, 저수지 주변 사면의 슬라이딩 등이 발생하지 않는 범위 내에서 단기간에 배제할 수 있도록 규모를 최대한 크게 계획하도록 기술하고 있다. 그러나 방류기간 산정 시 ‘최단기간’이라는 지나치게 정성적인 기술과 함께 댐의 장애도와 위험도에 따라 방류일수를 제시하고 있는 USBR (1990) 기준을 수정 없이 인용하고 있어 국내 실정이 고려되어 있지 않다.

댐 설계지침(KOWACO, 2004)에서는 비상시 저수지 수위를 가능한 1개월 이내에 배제할 수 있도록 제시하고 있다. 특히 방류기간 동안의 유입량은 방류시설의 규모를 설계하는 중요한 수문학적 인자이나 이에 대한 언급은 없는 실정이다.

앞에서 검토한 기준 및 지침서 내용을 요약하면 방류시설 규모 산정 시 수위저하 속도, 하류하천 상태 등은 물론 유입량과 방류일수가 가장 지배적인 인자임을 알 수 있다. 그러나 댐 저수용량, 댐의 높이, 기능, 수위저감 목적 등 고려해야 할 요인이 많아 일률적 기준 적용에 어려움이 있다. 또한 댐의 공학적(지질 및 구조) 안정성 및 붕괴가 하류에 미치는 경제적 사회적 영향을 나타내는 댐의 장애도와 위험도에 따라 댐 안전도 확보를 위한 다양한 정책적 고려가 필요하나, 국외의 관련 기준별 정량화된 산정 근거에 대한 파악이 곤란한 실정으로 사회적 상황이 다른 나라의 기준을 그대로 인용하기도 곤란한 실정이다.

USBR (1990)의 경우 선언적으로는 저류수는 4개월 이내에 모두 방류시킬 것을 규정하고 있으나 댐에 미치는 위험도와 댐 하류의 장애 정도에 따라 7개월 이상의 기준도 제시되어 있다. 국내 설계지침과 일본의 하천관리시설 구조령(1997)의 기준은 아래 Table 1과 같다.

일본의 하천 사방기술 기준(안)(1997)에서는 수위저하 능력은 평수량시 1일당 0.5~1m 이상을 표준으로 하며 시험담수시 서차지(surcharge) 수위까지 수위를 상승시킨 후의 수위 하강속도는 1m/일 이하를 원칙으로 하고 있다. 한편 댐의 형식에 따라서도 필댐의 경우 상시만수위로부터 최저수위까지 표면차수벽형은 약 4일, 그 외 종류는 7일부터 10일 이내에 방류가 가능한 시설을 설계하도

**Table 1. Criteria of Drawdown Period**

Discription	Period	Remarks
Dam Design Criteria (2011)	Possible short period	MLTM (Emergency Outlet)
Design Guidelines for Dam Outlet-Work (1986)	7~10days	Industrial Zone Development Corporation
Design Guidelines for Dams (2004)	less than 30days	K-water
Decree Law for River Manangement Facilities (1997)	7~10days	Japan

록 되어 있다.

Philpott et al. (2008)은 Queen Mary 저류지와 King George 저류지의 허용 수위저하 속도로 0.75 m/day, 1.0 m/day를 제안하였다. 제체의 안전성을 고려한 수위저하 속도의 경우 Tran (2004)은 수심 28 m, 상류사면경사 1:4~1:4.5인 Dau Tieng 저류지의 수위 급강하에 대한 안전율을 분석한 결과 최고수심의 약 50~60%까지 수심이 낮아지는 동안 사면의 안전율은 불과 10~15% 정도 감소하나 이후 최고수심의 약 30%까지 수심이 낮아지는 동안 추가적으로 20~25%의 안전율이 감소하여 Dau Tieng 저류지의 경우 최고수심의 30~60% 범위에서의 수위저하 속도를 가장 보수적으로 운영하는 것이 필요하다고 제안하였다. Liu et al. (2009)은 투수계수가 낮아질수록 안전율도 낮아지며 투수계수가 큰 경우 안전율의 안정화에 필요한 기간은 짧아짐을 확인하였다. 한편, 캐나다 Ontario ministry of natural resources (2011)는 해석을 통한 제체의 안전계수 기준으로 방류일수를 제시하고 있다. New York State (1989) 지침서는 유입유량을 무시한 조건에서 저류용량의 90%를 14일 이내에 배제 할 수 있는 방류시설을 설계하도록 하며 댐의 장애도 분류에 따라 “C” 등급의 경우 사면의 안정성을 USACE의 제체 설계기법을 따르도록 규정하고 있다.

NSW government (2010)의 경우 본 댐의 방류시설을 설계함에 있어 수위별로 방류일수를 3~11일까지 설정하고 있다. 프랑스의 경우 Combelles et al. (1985)은 댐에 가해지는 하중을 8일 이내에 50% 감소시키도록 규정하고 있으며 영국의 경우 ICE (2004)는 댐 등급에 따라 만수위에 대한 저류용량의 50%를 방류하는 방류기준을 댐의 등급에 따라 3~9일 이내로 정하고 있다. 방류범위에 대해서는 USBR (1990)의 경우 저수지 바닥에서부터 여수로 월류부 수위에 해당하는 저류량으로 규정하고 있고 USACE (1975)에서는 4개월 이내에 저류지 수위가 최대 수로수심의 20ft 범위 내의 수위까지 방류하거나 초기 저류지 수위(여수로 월류부 수위)에 대한 저류량의 10% 이내에 해당

하는 수위까지 방류해야 한다고 명시하고 있다.

### 2.2 국내 댐 방류시설 설계현황

용수댐 비상방류시설 현황을 보면 최근 준공된 3개 댐(대곡, 감포, 평립)만 비상방류시설을 구비하고 있을 뿐 대부분의 용수댐은 도수관로를 통해 정수장 등의 수도시설에 직접 용수를 공급하는 기능만을 목적으로 설계, 건설되어 사실상 방류기능을 확보하지 못한 실정이다. 또한 하천유지용수 및 소규모 유량공급이 필요한 경우, 도수관로에서 분기된 이토밸브를 개방하는 개념으로 방류하고 있어 전용밸브의 미설치에 따른 관로와 밸브 등의 진동현상이 나타나고 도수관로 내 압력저하 등으로 인하여 방류가능량 자체도 부족한 실정이다.

이와 같이 대부분의 기존 용수댐의 경우 방류기능이 부족하여 댐 안전 또는 저수지 수질문제 등 심각한 위기상황 발생 시 댐 관리자가 취할 수 있는 대응책이 대단히 제한적이며 피동적인 상황에 부딪힐 것으로 예상된다. 따라서 향후 안전한 댐 운영 및 유지관리를 위해서는 방류기능을 확보할 수 있는 추가 시설물 설치, 개선 등 대책마련이 필요할 것으로 판단된다. 다목적댐 비상방류시설 설계 현황을 보면 대규모댐의 경우 발전 중단 시에도 월 최대 공급량 방류가 가능한 시설 설치를 통해 하류하천 용수공급을 보장하고 있으며 소양강댐 등 일부 댐을 제외한 대부분의 대규모 댐은 발전방류 병행 시 약 50일 이내에 수위저하가 가능하다. 소규모댐의 경우 하류 하천 용수공급량이 크지 않아 방류관 규모는 직경 약 1,500 mm이며, 20~30일내 배제하도록 설계되어 있다.

### 3. 비상방류시설 규모 분석 검토

국내의 비상방류시설 규모는 방류 소요일수를 기준으로 설계하도록 제시되어 있으나 해외의 경우 수위저하 속도를 기준으로 활용하는 경우도 많은 것으로 확인되었다. 그러나 국내의 저수지와 댐 특성에 따라 각 기준의 적용

Table 2. Design Status for 5 Dams

Dam		Jangheung	Kunwee	Buhang	Sungduk	Bohyun
Drainage Volume (Max)		Weir crest	Weir crest	Weir crest	Weir crest	Weir crest
Drainage Volume (Min)		L.W.L	L.W.L	D.S.L	L.W.L	L.W.L
Inflow (m <sup>3</sup> /s)	AFS	11.49	3.31	3.58	1.69	1.13
	MMA	14.47	4.04	4.95	2.20	1.73
	application	AFS	AFS	Max. 10.1m <sup>3</sup> /s	non	MMA
EP (days)		29	28	23	20	19
Dia.(mm)		1,500 mm	1,500 mm	2,000 mm	1,000 mm	1,400 mm
Applied Criteria		EP (30days)	EP (30days)	EP (20days)	Drawdown rate (1m/day)	Velocity in Pipe (< 10m/s)

AFS : Average in Flood season, DSL : Dead Storage Level, LWL : Low Water Level, MMA : Max. Monthly Average, EP : Evacuation Period

성이 상이할 수 있어 본 연구에서는 아래와 같이 다양한 조건에 대하여 방류시설 규모를 산정하고 그 결과를 비교 분석하였다.

- 규모 산정조건 ; 유입량, 방류대상 수위 및 저류용량 등
  - 적정규모 기준 ; 방류소요 일수 또는 수위강하 속도 등
- 각종 방류시설 규모산정 기준을 선정하기 위하여 수압에 의한 제체 작용력과 수위급강하에 따른 제체사면 안정성 등 댐 수위에 따른 방류기준에 대한 다양한 수리학적 분석과 함께 우리나라 저류지의 수위-저류량 관계 특성 및 방류규모 현황 등을 검토하였다.

### 3.1 수위-방류능, 수위-하중 관계 특성

댐의 방류가 가장 시급한 시점은 일반적으로 저류지의 수위가 높은 경우이므로 수위가 낮을 때와 수위가 높을 때의 방류규모 또는 수위저하 속도에 대한 수리학적 비교 검토가 요구된다. 또한 수심에 따라 댐 사면이 받는 수압에 의한 힘의 상대적 크기 역시 댐의 안정성 확보에 중요한 인자가 된다. 수위-방류능 관계를 분석하기 위하여 수위에 의한 방류능과 부정류 해석을 통한 방류 소요시간을 산정하면(Fig. 1)

$dt$  시간동안 저류량 감소 비는

$$dQ = A_s dh / dt \quad \text{또는} \quad dt = A_s dh / dQ \quad (1)$$

여기서,  $A_s$ 는 특정 수위에 대한 저류지 수면적이다.

Manning 공식을 사용할 경우 저류지와 연결된 단일관로 끝단에서의 자유방류능  $dQ$ 는

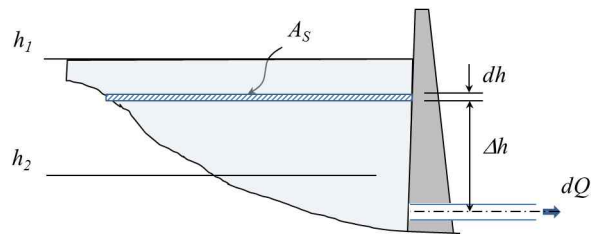


Fig. 1. Discharge Capability Estimation System

$$dQ = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\Delta h / \left( \frac{1 + \sum K}{2g} + \frac{n^2 L}{(D/4)^{2/3}} \right)} \quad (2)$$

여기서,  $\sum K$ 는 기타손실 계수의 합,  $D$ 는 관경,  $n$ 은 조도계수,  $L$ 은 관길이,  $\Delta h$ 는 현재 수위와 자유방류 관로끝단의 수위 차이이다. 조도계수는 방류관 재질에 따라 0.012~0.014를 적용하였다.

Eqs. (1) and (2)로 부터

$$dt = \frac{A_s dh}{\frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\Delta h / \left( \frac{1 + \sum K}{2g} + \frac{n^2 L}{(D/4)^{2/3}} \right)}} \quad (3)$$

따라서, 각 댐별로 수위가  $h_1$ 부터  $h_2$ 로 감소되는데 필요한 방류 소요시간  $t$ 는

$$t = \int_{h_2}^{h_1} dt = \int_{h_2}^{h_1} \left[ A_s / \left( \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\Delta h / \left( \frac{1 + \sum K}{2g} + \frac{n^2 L}{(D/4)^{2/3}} \right)} \right) \right] dh \quad (4)$$

수위-하중관계분석에 필요한 댐 사면의 단위 폭에 작용

하는 힘의 산정식은

$$F = \gamma h_c A = \frac{1}{2} \gamma h^2 / \sin \theta \quad (5)$$

여기서,  $h_c$ 는 수면으로부터 댐 사면의 도심까지의 깊이이며  $\theta$ 는 댐 사면과 수면 사이각이다.

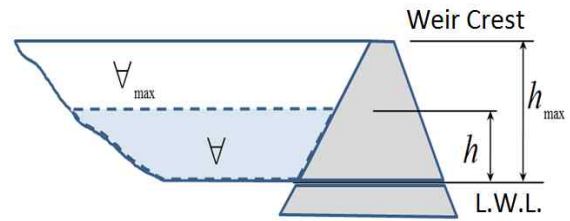
댐 체체의 사면에 작용하는 힘은 수심의 제곱에 비례하며 수심 감소비에 따른 하중 감소비는 Table 3과 같다. 최고 방류수위로부터 방류대상 수심의 75%까지 낮출 경우 댐에 작용하는 힘은 초기의 56%까지 감소하는 사실을 알 수 있으며 따라서 초기 수위저감이 댐의 안정성 확보에 중요하다는 사실을 알 수 있다.

**Table 3. Hydrostatic Force Reduction Rate with Water Depth**

water depth/max. depth ( $h/h_{max}$ )	1.0	0.75	0.5	0.25
applied force/max. force ( $F/F_{max}$ )	1.0	0.56	0.25	0.06

### 3.2 수위-저류량 관계 특성

앞 절에서 기술한 수위에 따른 방류능 분석은 저류량을 고려하지 않은 경우이며 방류일수 산정을 위해서는 수위별 저류량이 반드시 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 우리나라의 다목적 댐과 용수 댐에 대하여 수위별 저류량 관계를 분석하였다. 각 댐의 수위-저류량 특성을 동시에 비교하기 위하여 수위 비-저류량 비를 분석하였다(Fig. 2). 수위 비( $h/h_{max}$ )는 수위와 저수위 차에 해당하는 수심( $h$ )에 대한 저수위부터 여수로 월류부 수위의 수심( $h_{max}$ )이며 저류량 비( $V/V_{max}$ )는 저수위부터 대상

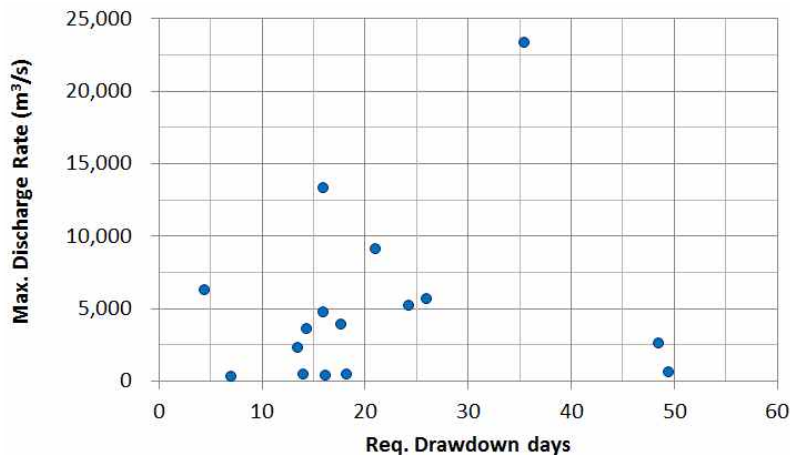


**Fig. 2. Definition of Water El. and Storage Volume**

수위까지의 저류량( $V$ )에 대한 저수위부터 여수로 월류부 수위 사이의 저류량( $V_{max}$ ) 비이다.

수위 비-저류량 비 분석결과 우리나라 다목적 댐의 경우 수위에 따른 저류용량은 선형에 가까운 것으로 나타났으며 용수댐의 경우 수심이 깊어질수록 저류용량이 급감하는 형태를 보이고 있다. 다목적댐의 경우 방류대상 수위의 상위 25%를 낮출 경우 저류량은 27~36%를 방류할 수 있으며 용수댐의 경우 방류대상 수위의 상위 25%를 낮출 경우 저류량은 28~47%까지 방류할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 댐의 안정성 확보를 위해 수위를 최대한 낮추어야 하는 경우  $h/h_{max} > 75%$ 에 대한 구간을 경계로 다른 설계기준의 적용이 효과적인 것으로 판단되었다.

저류량 방류기간은 저류지 특성에 따라 수위저하 속도에 영향을 미치며 수위저하 속도는 다시 댐 체체의 수리학적 안정성에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 뿐만 아니라 댐으로부터의 방류량은 댐 하류의 하도범람 위험과 밀접한 관계가 있어 방류시설 설계기준의 적절성은 기존 댐 하류에 대한 홍수위험도 분석과 병행해 이루어져야 한다. Fig. 3은 우리나라 16개 다목적 댐에 대하여  $h_{max}$ 인 경우 수위저하 속도 1m/일에 따른 최대 방류량과 수위저하 속도 1m/일로 지속될 때의 방류 소요일수를 도



**Fig. 3. Max. Discharge vs. Required Drawdown Days (for 1 m/day Drawdown Rate)**

시하고 있다. 수위저하 속도 2m/일 또는 3m/일에 대해서 하류의 홍수 위험성이 없는 댐도 있으나 수위저하 속도 1m/일에도 하류에 홍수위험 가능성을 증가시킬 뿐만 아니라 소요 방류일수도 최대방류량 기준으로 약 35일간 지속되어야 하는 시설도 있어 최종적인 방류시설 설계기준은 수위저하 속도는 물론 비상방류 소요일수와 방류량 규모에 대한 인자를 고려하여 선정되어야 할 것이다.

문헌조사에서 나타나는 바와 같이 일본은 7~10일 이내에 수위를 저하하도록 제시하고 있으며 New York State (1989)은 저류용량의 90%를 14일 이내에, 호주 NSW (2010)는 3~11일, 영국의 경우 저류용량의 50%를 3~9일내에 방류, 프랑스의 경우 댐에 가해지는 하중을 8일 이내에 50% 감소시키도록 규정하고 있다. 한편, USACE (1975)에서는 4개월 이내에 저류량의 10% 이내에 해당하는 수위까지 방류할 것을 제시하고 있다. 대부분의 국가에서 제시하고 있는 방류 하한수위 기준은 저수위에 해당되며 국내 대댐의 경우, 용수공급 가능 수위부터 여수로 월류부 수위의 50% 정도 높이가 저수위에 해당된다.

Fig. 4는 우리나라 다목적댐에 대하여 1m/일의 속도로 수위를 강하할 때 소요되는 방류일수를 나타내고 있는데 저류수위의 상위 25%를 방류할 경우 소요 일수는 약 12일부터 1일 범위이나 평균적으로는 7일 이내로 나타났다. 한편, 저류수위의 상위 50%를 방류할 경우 소요되는 일수는 약 24일부터 3일인 것으로 확인되었다. 수압에 의해 제체가 받는 하중을 8일 이내에 50%까지 감소시키는 프랑스의 기준, 3~9일내에 저류용량의 50%를 방류하는 영국의 기준 등을 고려할 때 방류대상의 초기 저류수위 일부

는 최대한 빠른 시간 내에 낮추는 것이 바람직하다. 이러한 초기방류 개념과 국내 댐 설계 현황을 종합적으로 고려하면 방류대상 상위 25%까지 수위를 낮추는 기준은 12일 이내가 적절한 것으로 판단된다. 단, 이 조건은 수위저하 속도가 제체에 영향을 미치지 않는다는 가정이 선행되어야 한다.

반면, 방류대상 저류량 전체를 방류해야 하는 경우 방류시간에 대한 USBR 기준은 최장 7개월에 달하나 일반적으로 4개월 이내로 제안하고 있다. 그러나 사계절이 분명하며 대부분 댐들이 상류유역에 위치함으로써 실질적으로 방류 및 보수 가능한 기간이 최장 4~5개월 이내인 현실을 감안할 때 1~2개월 내에 필요한 방류가 이루어져야 홍수가 이전에 보수가 완료될 수 있을 것으로 판단된다. 단, 이 조건 역시 비상방류에 의한 제체의 수리학적 안전성이 보장되어야 할 것이다.

### 3.3 댐 사면 안정성 분석

수위 급강하에 따른 제체의 안정성은 잘 알려진 바와 같이 제체의 체원 및 구성재료의 특성에 따라 달라진다. 본 연구에서는 댐 설계기준에서 제시하는 보편적 체체기준에 준하는 가상의 체체모형과 실제 댐에 대하여 실무에서 많이 사용되는 수치모형(SEEP/W, SLOPE/W)을 이용하여 제체의 안전성을 지배하는 인자의 특성을 분석하였다.

#### 3.3.1 활용 수치해석모형(SEEP/W, SLOPE/W) 개요

SEEP/W는 Geoslope사의 지하수 침투해석 프로그램

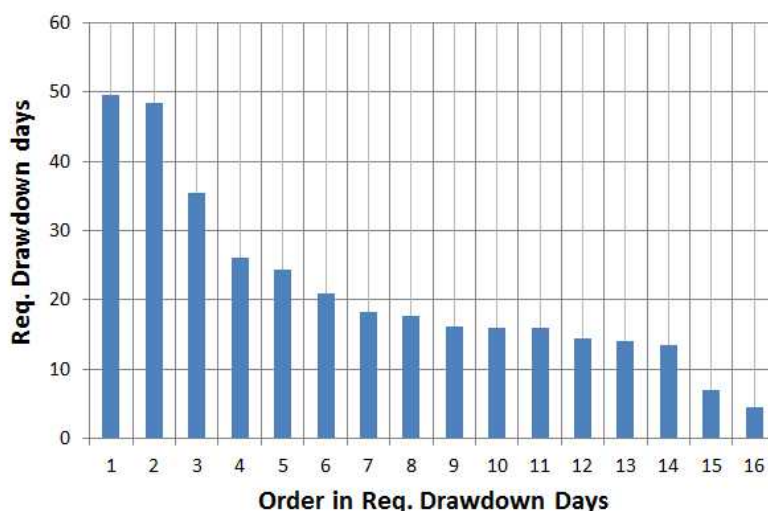


Fig. 4. Required Drawdown Days with Max. Discharge Rate (for Multi-Purpose Dams)

으로 지하수 거동과 간극수압 소산 등의 모델링을 통하여 흙이나 암에서 간극수압의 분포를 구할 수 있다. SEEP/W를 통해 산정된 간극수압 데이터는 SLOPE/W, SIGMA/W, QUAKE/W 등과 연동하여 지반 내 침투 해석이 가능하다. 특히 SEEP/W는 비정상류 경계조건 적용이 가능하며 SEEP/W에서 산정된 수두분포는 SLOPE/W에 활용하여 사면안정 해석이 가능하다. 예를 들어 댐 해석의 경우 수위가 만수위에서 저수위로 급강하하는 댐에 대하여 각각의 원하는 시간 단계별로 사면안정 해석을 수행할 수 있으며 SEEP/W의 시간 단계별 결과를 SLOPE/W의 안정 해석에 활용하여 댐 체체의 안정성을 검토할 수 있다.

### 3.3.2 안정성 분석

댐 설계기준에 의하면 체체의 안정성 분석은 안전율 (Factor of safety)을 근거로 하여 판단하고 있는데, 안전율이란 사면활동을 유발하는 힘과 이에 대한 저항력의 비, 즉, 주어진 활동면에 대해 흙의 전단강도를 현재의 전단 응력으로 나눈 값을 의미한다. 댐 설계기준의 안전율은

허용 안전율(Allowable factor of safety) 이상이 되면 안전한 것으로 판단하며 대체로  $F_s=1.1\sim 1.5$  정도의 범위를 제시하고 있다.

설계인자의 영향을 검토하기 위하여 안정성분석은 두 가지 형태의 체체를 대상으로 수치해석을 수행하였다. 첫 번째는 댐설계기준(KOWACO, 2011)에 부합하는 가상체체로써 체체 제원은 Table 4, 투수계수 및 내부 마찰각 등 지반정수는 Table 5와 같이 가정하여 안전율을 산정, 분석함으로써 설계인자의 영향을 검토하였으며 두 번째는 국내 댐 중 비교적 안정성이 낮을 것으로 예상되는 수어 댐에 대한 안정성 평가를 수행하였다.

가상체체는 코어가 있는 경우와 없는 경우로 다시 분류하여 분석하였으며 저류수심 9.0m, 수위 저하속도 1m/일~3m/일에 대하여 투수계수를  $1.0\times 10^{-3}cm/s$ 부터  $1.0\times 10^{-7}cm/s$ 까지 변화시켜가며 안전율에 미치는 영향을 검토하였다. Table 6은 수위저하 속도에 따른 초기, 최소 및 간극수압 소산 후 안전율이다.

Table 6으로부터 수위 저하속도가 커짐에 따라 최소 안전율이 다소 감소하기는 하나 그 차이는 미미하며 초기

Table 4. Geometric Characteristics of Typical Dam

Classification	Applicaition	Reference
Free Board	2 m	Design Criteria for Dams (2011)
Top Width	10 m	Design Criteria for Dams (2011)
Slope	1:2	Design Criteria for Dams (2011)

Table 5. Material Characteristics of Typical Dam

	Specific Weight ( $kN/m^3$ )	Cohesive Stress ( $kPa$ )	Internal Friction Angle (°)	Permeability Coeff. ( $cm/sec$ )
Dam Body	18	8	30	$1\times 10^{-3}$ $1\times 10^{-5}$ $1\times 10^{-7}$
Burried Layer	18	8	30	$1\times 10^{-5}$
Rock level	-	-	-	$1\times 10^{-8}$
Core	18	15	15	$1\times 10^{-7}$
Drain	19	35	0	$1\times 10^{-3}$

Table 6. Safety Factor Variation with Drawdown Rate ( $k = 1.0\times 10^{-5}cm/s$ )

Classification	1 m/day		2 m/day		3 m/day	
	core	no core	core	no core	core	no core
Normal	2.165	1.558	2.165	1.558	2.165	1.558
Min.	1.394	1.558	1.327	1.482	1.279	1.413
Post-pressure dissipation	1.797	1.900	1.802	1.903	1.804	1.903

안전율은 코어가 있을 때 그리고 최소 안전율과 간극수압 소산 후에 대한 안전율은 오히려 코어가 없을 때 더 높은 것을 알 수 있다. 또한 수위저하 속도가 1m/일로부터 2~3 m/일로 증가함에 따른 안전율의 감소는 각각 95.2, 91.8%로 감소하나 예상보다 수위저하 속도가 안전계수에 미치는 민감도는 크지 않음을 알 수 있다.

또한 제체 안정성 평가기법은 수치모형에서 제공하는 모든 해석기법(Janbu, Bishop, Lowe-Karafiath, Morgenstern-Price, Spencer 등)에 대하여 안전율의 변화를 검토하였다(Table 7). 수위저하 속도 1m/일에 대한 검토결과 해석기법에 따른 안전율의 차이는 초기 수심에서는 다소 차이를 보이고 있으나 수위가 낮아질수록 안전율에는 기법별 차이가 없는 것으로 나타났다. 수위가 낮아졌을 때 안전율이 낮아져 더 위험한 점을 고려한다면 기법별 안전율 평가 결과에는 큰 차이가 없는 것으로 판단된다.

두 번째는 국내 댐 중에서 사면경사가 가파르고 수심이 깊어 안전계수가 상대적으로 낮아 수위저하 속도가 제체의 안전에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 수어 댐을 선정, 다양한 수위 저하속도에 대한 제체의 안정성을 비교

분석하였다. 분석을 위한 초기 수위조건을 설계방류 수위의 100~25%로 설정하여 초기수심의 영향을 검토하였으며 수위는 방류대상 수위(여수로 월류부 수위 : 64m, 저수위 : 44m)까지 선형으로 감소하며 수위강하 속도는 1m/일~3m/일 범위로 설정하였다. Table 9는 수위강하속도 1m/일에 대한 수어 댐 안전율 분석결과이다.

분석 결과 수어 댐도 이상제체와 유사하게 수위 강하속도가 안전율에 미치는 영향은 상대적으로 크지 않은 것으로 확인되었다. 또한 수위 강하속도가 1m/일인 경우 방류대상 최고수심에 대한 안전율과 초기수심의 영향에 의한 상대적 안전율은 각각 94.9, 90.1, 87.8%로 확인되어 초기수심이 높은 경우에 비해 낮은 경우 안전율은 낮아져 수심이 낮아질수록 수위 강하속도를 낮추는 단단계 운영 기준이 필요함을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 비상방류 시설규모 산정을 위해 국내의 설계기준 비교검토는 물론 댐의 초기수위와 수위 급강

Table 7. Safety Factor Variation with Methods ( $k = 1 \times 10^{-5}$  cm/s)

Water Lev.(m)	Relative Depth (%)	Janbu	Bishop	Lowe-Karafiath	Morgenstern-Price	Spencer
10	82.6	2.85	2.624	3.087	2.617	2.618
9	73.9	2.444	2.349	2.553	2.344	2.345
8	65.2	2.191	2.144	2.269	2.141	2.142
7	56.5	2	1.981	2.077	1.98	1.981
6	47.8	1.865	1.855	1.918	1.856	1.857
5	39.1	1.749	1.733	1.826	1.773	1.774
4	30.4	1.711	1.732	1.759	1.732	1.733
3	21.7	1.698	1.717	1.739	1.72	1.721
2	13.0	1.726	1.687	1.739	1.690	1.690
1	4.3	1.774	1.693	1.755	1.694	1.694

Table 8. Safety Factor Variation with Relative Water Depth

Relative water depth	Elapsed time (days)			
	0	5	10	15
100%	1.841	1.747	1.674	1.617
75%	1.747	1.674	1.617	1.578
50%	1.674	1.617	1.578	1.578
25%	1.616	1.578	1.578	1.578
0%	1.578	1.578	1.578	1.578



**Table 9. Safety Factor Variation with Initial Water Depth for Suo Dam**

Elapsed time (days) \ Relative water depth	0	5	10	15
100%	1.841	1.747	1.674	1.617
75%	1.747	1.674	1.617	1.578
50%	1.674	1.617	1.578	1.578
25%	1.616	1.578	1.578	1.578
최저	1.578	1.578	1.578	1.578

하에 따른 댐의 안정성을 검토한 결과 비상방류시설 규모 설계기준은 방류일수와 수위저하 속도 및 댐체에 작용하는 하중감소 등을 기준으로 다양하게 제시하고 있음을 확인하였다. 각 기준에 대한 검토결과 방류일수 기준은 댐의 안정성과 하류의 재해위험도 등 수문학적 기준이 내재된 반면 수위저하 속도는 상대적으로 그 기준 범위가 비교적 작게 나타났으며 제체의 특성에 따라 그 기준의 적정성은 수리학적 판단이 가능한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 보편적 제체 댐 설계기준에 부합되는 가상의 이상제체와 국내 댐 중 사면경사는 가파르며 수심이 깊어 안전율이 낮을 것으로 예상되는 수어 댐을 대상으로 수위저하 속도에 따른 안전율, 초기 수위가 안전율에 미치는 수리학적 영향을 검토하였으며 다음과 같은 설계기준을 제시하였다.

수위저하 속도가 동일한 경우 초기 수심이 댐에 미치는 안전율은 수심이 낮을수록 안전율도 낮아져 높은 수위에서의 방류규모가 댐체의 안정성에 미치는 영향은 상대적으로 낮은 것으로 확인되었다. 또한 초기수심을 25% 낮출 경우 수압이 댐제체에 작용하는 힘은 56%까지 감소하여 댐 안정성 확보에 효과적인 것으로 확인되었다. 따라서 방류기준은 저류지 수위에 따라 달리 적용하는 다단계 운영기준을 제안하였다.

제체의 안정성에 대해서는 가상제체는 물론 수어 댐도 수위 강하속도 3m/일 범위까지는 댐의 안전율이 보장되는 것으로 분석되었으나 허용 수위저하 속도는 설계대상 댐에 대한 정밀해석이 필요하다. 본 연구에서는 국내외 설계기준 및 운영관리 경험 등을 고려하여 1m/일 이하의 보수적 설계기준 적용을 권장하였다.

댐 안전관리를 위해서는 비상방류시설 규모가 크면 유리하나, 용수공급 안정성과 하류의 치수적 안정성 등과는 상충되므로 총 배제용량에 대한 방류기간은 2단계로 나누어 초기 방류수심 상위 25%는 7~10일 이내, 그 이하의 수위에 대해서는 우리나라의 기후와 중소규모 다목적댐

설계사례 그리고 USBR 기준 등을 고려하여 1~2개월을 제안하였다.

이상의 방류기준에 대한 연구결과는 수리학적 검토만을 통해 얻은 결론으로 수자원 활용 및 저류지 유입량 등 수문학적 검토는 논문 2부에서 추가적으로 수행하였다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (14AWMP-B079364-01)에 의해 수행되었습니다.

### References

ICE. (2004). "Design Criteria for Reservoir Drainage Period." QRA, Japanes Ministry of Construction (1997). "River structural Facilities Design Guide." Ministry of Construction  
 Japanes Ministry of Construction (1997). "Technical guideline for River Training." Ministry of Construction  
 KOWACO (2004). "Design Guidline of Dam." Korean Water-Resources Corporation  
 KWRA (2011) "Dam Design Criteria." Korean Water-Resources Research Association  
 Liu X., and Zhang Z. (2009). "Stability of bank slope under reservoir water drawdown."  
 New York State (1989). "Guidelines for design of dams New York State." Bureau of flood protection  
 NSW government (2010). "Dam safety emergency plan for RYLSTONE DAM." NSW government  
 Ontario (2011). "Technical bulletin for Geotechnical design and factors of safety." Ontario ministry of natural resources

Philpott, B., Oyeyemi, Y., and Sawyer, J. (2008). "Queen Mary and King George V emergency drawdown schemes."

Tran. (2004) "Stability problems of an earth fill-dam in rapid drawdown condition."

USACE (1975). "Low level discharge facilities for draw-down of impoundments." ER 1110-2-50, USACE

USBR (1990). "Criteria And Guidelines For Evacuating

Storage Reservoirs And Sizing Low-level Outlet Works." ACER Technical memorandum No. 3, USBR

paper number : 14-090

Received : 18 September 2014

Revised : 19 November 2014 / 3 February 2015

Accepted : 3 February 2015