



소규모 저수지의 특성을 고려한 제체 안전진단의 정량적 상태평가 기준 개선

Improvement of Quantitative Condition Assessment Criteria for Reservoir Embankment Safety Inspection Considering Characteristics of Small Reservoirs in Korea

전건영^{a,†} · 방돈석^b

Jeon, Geonyeong · Bang, Donseok

ABSTRACT

The physical condition assessment criteria of fill dam safety inspection are now weakly regulated and inappropriate for small agricultural reservoirs since these criteria have fundamental backgrounds suitable for large-scale dams. This study proposes the degree (critical values) of defects for the quantitative condition assessment of the embankment in order to prepare the condition assessment criteria for a small reservoir with a storage capacity of less than one (1) million cubic meters. The critical values of defects were calculated by applying the method that considers the size ratios based on the dimensional data of reservoirs, and the method of statistical analysis on the measured values of the defect degree which extracted from comprehensive annual reports on reservoir safety inspection. In comparison with the current criteria, the newly proposed critical values for each condition assessment item of the reservoir embankment are presented in paragraphs 4 and 6 of the conclusion. In addition, this study presents a method of displaying geometric figures to clarify the rating classification for condition assessment items with the two defect indicators.

Keywords: Quantitative condition assessment; size ratios; critical values; geometric figures

1. 서론

우리나라의 농업용 저수지는 「농어촌정비법」에 따르면 농어촌용수를 확보하기 위한 시설물로 정의하며, 「댐건설 및 주변지역지원 등에 관한 법률」에서 정의하는 생활 및 공업용수, 농업용수 등 특정용도의 높이 15 m 이상의 공작물인 댐과 차이가 난다. 농업용 저수지는 “2019년 농업생산기반정비 통계연보”에 따르면, 17,147개이며, 시군 관리는 13,747개, 한국농어촌공사 관리는 3,400개이고, 저수지를 총저수용량과 높이의 규모별로 살펴보면, 100만 m³ 미만이 16,609개로 97%이고, 15 m 미만이 15,737개로 92%를 차지한다고 하였다 (MAFRA and KRC, 2020). 저수지의 ‘안전점검 및 정밀안전진단’ (이하 “안전진단”이라 한다)은 「농어촌정비법」과 그 행정규칙인 ‘농업생산기반시설 관리규정’을 근거로 한국농어촌공사가 2005년에 발간한 “농업생산기반시설 정밀안전진단 실무지침”(이하 “안전진단 실무지침”이라 한다)의 실시방법과 절차를 따른다. 저수지의 안전진단은 1987년 한국농어촌공사 (당

시 농업진흥공사) 수리시설관리단의 기술진단을 모태로 시작되었으며, “1995년 수리시설 기술진단 종합보고서”에 따르면 당시의 상태평가를 위한 평가항목 (30개)과 평가등급 (5등급)이 현행 (2010년 6월~2021년 현재)의 평가기준과 비교하여 유사한 항목과 동일한 5등급 평가를 가지고 있었음을 알 수 있다. “안전진단 실무지침”은 국토교통부 (한국시설안전공단, 현 국토안전관리원)의 “2009년 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 (댐편)” (이하 “안전진단 세부지침”이라 지칭)을 준용하여 2010년에 새로운 평가절차와 계산방법으로 개정되었고, 그에 따라 저수지 안전진단 평가기준도 현행의 평가기준체계로 크게 전환되었다.

안전진단의 평가는 상태평가와 안전성평가 및 종합평가로 구분되며, 국토교통부 행정규칙인 ‘시설물의 안전 및 유지관리 실시 등에 관한 지침’의 용어정의에 따르면 “상태평가”라 함은 안전점검 등에서 시설물의 외관을 조사하여 결함의 정도를 포함한 시설물의 상태를 평가하는 것을 말한다. 댐 안전진단 세부지침의 상태평가 항목의 분류, 명칭 및 내용은 미국 전력연구원 (Electric Power Research Institute)이 발간한 “댐 점검 및 성능평가 (Sarkaria et al., 1986)”에 제시된 수력발전용 댐을 위한 안전점검 체크리스트와 상당히 일치하고 있다 (Park and Jung, 2015; Jeon and Sim, 2020). 이러한 배경에는 댐 안전진단의 대상이 1995년 건설교통부 「시설물의 안전에 관한 특별법」 제정 당시에는 저수용량 기준 2천만톤 이상이었고, 2002년 태풍 루사로 인한 장현지, 동막지 등의 붕괴를 계기로

^a Executive Director, Institute of Rural Environment and Engineering

^b Vice President, SQ Engineering Co., Ltd.

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-8091-2467, Fax: +82-31-8091-2468

E-mail: j8300171@nate.com

Received: July 02, 2021

Revised: August 13, 2021

Accepted: August 18, 2021

2003년부터 총저수용량 1백만톤 이상의 용수전용댐도 포함하도록 확대되었음에도 여전히 농업용 저수지에 비하여 규모가 큰 댐을 대상으로 하였기 때문이다.

따라서 상태평가 기준은 소규모 저수지에 맞지 않는 부분이 있기 때문에 개선이 필요하며, 이를 위해 국내외 평가기준 및 연구성과와 안전진단 종합보고서를 비교분석하여 국내 저수지의 규모나 형태에 따른 시설상태의 특성을 파악할 필요가 있다.

Park and Jung (2015)은 농업용 저수지 상태평가 기준은 대댐 위주의 평가기준이 반영되고 있어 적합하지 않으므로, 평가등급의 기준을 강화하는 차원에서 댐마루의 균열, 침하, 유실, 슬라이딩, 상하류사면의 침하 및 변형, 사면침식 등의 고정수치(등급 경계값)를 전문가 의견을 수렴하여 현행기준보다 낮추어 제시하였다. Min (2019)은 한국농어촌공사 안전진단 실적을 바탕으로 농어촌연구원의 2015년 안전진단 평가기준 개선 연구성과에 따른 평가항목의 등급별 고정수치 등을 비교하면서 구체적 분석 없이 일부 개선안을 제시하였다. Jeon and Sim (2020)은 미국의 개척국(USBR), 국토관리국(BLM), 공병단(USACE) 및 전력연구원(EPR)과 일본의 농림수산성(MAFF) 및 캐나다의 British Columbia 주에서 제시한 댐 상태평가 체크리스트를 현행 평가기준과 비교분석하여, 이들의 평가항목은 같은 항목이 많으나, 평가기준은 국내의 경우 각종 손상 및 결함의 상태를 정량 평가하는 비율이 높은 반면, 외국의 대부분은 정성적 평가방법을 갖고 있음을 보고하였다. Jung et al. (2021)은 필댐의 수위변동으로 소성전단변형률이 축적되어 변위가 증가하는 제체의 거동특성 분석을 통하여, 정상부의 침하량과 수평변위에 대한 D등급을 현행 기준의 50% 수준 이하로 낮추어 20~30 cm로 제안하였다. 상기 연구는 본 연구와 관련하여 소규모 저수지의 규모 특성 및 고정수치에 대한 비교근거를 제시하고 있으나, 이들의 여러 고정수치가 전문가 의견이나 연구자 주관적 판단에 따른 점은 개선안으로서 한계를 가지고 있다.

안전진단 평가기준에 대한 연구는 평가내용과 평가방법으로 대별되며, 평가항목이나 중요도 등과 같은 평가방법에 대해서는 많은 연구가 이루어져 있으나, 손상 및 결함의 등급별 고정수치 등과 같은 평가내용에 대해서는 연구가 매우 부족하다. 그 배경에는 현행 평가기준의 평가내용을 정한 근거를 제시한 보고서가 부재하고, 정량적 평가내용이 외국의 평가기준에는 거의 없으며, 안전진단 현장조사를 통하여 시설상태에 대한 많은 실측값을 통계분석하여 시설규모에 따른 평가내용의 적정성을 높이도록 접근한 연구가 없는 점 등이 있다. 현행 평가기준에 있어서, 제체는 손상과 결함의 크기에 따라 평가등급이 시설의 규모에 비례하는 평가항목을 많이

포함하나, 여수로 및 취수시설은 평가등급이 재료특성상 시설 규모와 비례 관계가 없는 절대수치로 되어 있는 평가항목이 많으므로, 평가기준의 개선효과는 제체가 더 크다.

따라서 본 연구에서는 저수지 제체에 대한 상태평가항목의 정량적 평가내용을 대상으로 국내 저수지의 규모 통계자료, 국내외 상태평가기준, 연구성과 및 안전진단 종합보고서의 손상·결함요소를 비교분석하여, 소규모 저수지 제체의 손상·결함요소에 대한 적절한 평가등급별 크기(고정수치)와 구분방법을 제시한다.

II. 연구 내용 및 방법

1. 한국 저수지의 규모 특성

총저수용량 100만 m^3 이상의 필댐은 안전진단 세부지침의 적용 대상이 되며 농업용을 제외하면 금회 74개로 조사되었다. 이들의 저수용량과 제방 크기를 포함하는 규모 특성을 조사하기 위하여 환경부의 ‘댐건설장기계획(2012~2021) 수정계획’, 수자원공사의 ‘K-Water 댐관리현황’, ‘시설물통합정보관리시스템(FMS)’, “한국의 댐(K-Water, 2000)”, “한국대담회 40년사(2002)” 등을 수집하여 기초자료를 구축하였다. 조사결과, 현재 최고댐은 평화의 댐이고, 최저댐은 원천저수지이며, 댐마루폭이 최대댐은 경북 포항의 진전댐이다. 이들 댐에 대한 중·횡단면 형태의 크기 특성은 Table 1과 같다.

농업용 저수지는 시군과 한국농어촌공사가 관리하고 있으며, 본 연구에서는 이들의 규모를 조사하기 위하여 시군자료는 ‘국가수자원종합관리정보시스템(WAMIS)’를, 한국농어촌공사(이하 “공사”라 지칭)의 자료는 ‘농어촌알리미(ALIMI)’와 ‘농촌용수종합정보시스템(RAWRIS)’의 시설제원 자료파일을 수집하였고, 누락 및 오류자료에 대해서는 관리기관에 정정 요청하거나 제외하여 기초자료를 구축하였다. 2020년 조사자료에 따르면, 시군관리 저수지는 전체 저수지 13,674개 중 100만 m^3 미만의 저수지(이하 “소규모 저수지”, “Small reservoir”라 지칭)가 99% 이상으로 대부분을 차지하고 있어 조사된 전체 저수지와 소규모 저수지 사이에 평균크기의 차이가 거의 없는 반면, 공사관리 저수지의 경우 전체의 최고높이는 70.6 m, 평균높이는 12.5 m인 반면, 소규모 저수지의 최고높이는 55 m, 평균높이는 10.1 m로 나타났다. 이들 저수지의 중·횡단면 형태의 크기 특성은 Table 2에 나타내었다.

또한 시군과 공사관리 저수지를 합한 농업용 저수지 전체 17,080개소의 평균높이는 7.7 m, 평균길이는 113 m이고, 100만 m^3 미만 16,536개소의 평균높이는 7.1 m, 평균길이는 103 m이며 이를 Table 4와 Table 6에 나타내었다. 한편 제방마루

Table 1 Description of fill dams with a storage capacity of over 1 MCM

Description		Total	Fill dam	Max (m)	Min (m)	Avg (m)	Remark
Multiple	Height	21	15	123	34	66.4	Conc Dam: 6
	Length			1,126	205	447	
	Crest width			11	7.5	9.4	
Water supply	Height	Total: 54	Total: 45	67	11.4	31.9	Total of 45
	Length	K-W: 14	K-W: 14	575	80	255	Total of 45
	Crest width	Local gov.: 40	Local gov.: 31	20	5	8.6	K-Water of 14
Hydro power	Height	Total: 21	Total: 13	90	43	70.5	Conc Dam: 8 PSH: Pumping storage hydroelectricity
	Length	Impoundment: 8	Impoundment: 1	620	234	366	
	Crest width	PSH: 13	PSH: 12	10	10	10	
Flood control		5	1	H=125	L=601	Cw=12	Conc Dam: 4

Note: Multiple 15 [군위, 김천부향, 남강, 밀양, 보령, 부안, 소양강, 안동, 영주, 용담, 임하, 장흥, 주암(본, 보), 횡성]. Water supply 중 K-Water 14 [감포, 광동, 구천, 달방, 대곡, 대암, 사연, 선암, 수어, 안계, 연초, 영천, 운문, 평림], Local gov. 31 [가창, 고창, 공산, 광백, 광고, 대동, 대야1, 덕동, 동북, 법기, 보령, 석곡, 신대, 용동, 왕암, 울진, 원천, 장수, 진전, 흥복, 회야, 완도 지방상수도 10]. Hydro power 12 [무주상·하, 산청상·하, 삼랑진상·하, 양양하, 예천상·하, 청송상·하, 청평상]. Flood control 1 [평화]. Underscore (-): No data of crest width (Cw)

MCM: Million cubic meters (10⁶ m³)

Table 2 Description of fill reservoirs in Korea

Status of Reservoirs	Operated by local govt. (Si, Gun)			Operated by KRC		
	Storage (m ³)	Height (m)	Length (m)	Storage (m ³)	Height (m)	Length (m)
Total no.	13,674 (100%)			3,406 (100%)		
-Max	6.3×10 ⁶	38.2	2,170	258.6×10 ⁶	70.6	6,390
-Min	<1,000	<1.0	<10	<1,000	1.5	<10
-Average	22×10 ³	6.5	90	869×10 ³	12.5	205
Small< 1 MCM no.	13,672 (99.99%)			2,864 (84%)		
-Max	730×10 ³	38.2	2,170	998×10 ³	55	2,033
-Min	<1,000	<1.0	<10	<1,000	1.5	9
-Average	21.5×10 ³	6.5	90	183×10 ³	10.1	167

Note: Capacity of Si and Gun reservoirs is the effective storage capacity, and capacity of KRC reservoirs is the total storage capacity. MCM: Million cubic meters

Small<1 MCM represents small reservoirs with a storage capacity of less than 1 MCM.

폭과 사면기울기에 대한 크기는 Table 6과 Table 7에 나타나 있으며, 소규모 저수지의 제방마루폭은 평균 3.3 m, 사면기울기는 평균 1:2로 분석되었다.

2. 상태평가 기준의 구성 및 특징

가. 상태평가 기준의 구성

안전진단의 상태평가 기준은 평가대상 (시설, 부재)별 평가 항목, 평가등급 (현재, 평가기준으로 사용) 및 평가내용으로 구성된다. 저수지의 상태평가 시설은 제체, 여수로, 취수시설,

기전설비 및 콘크리트 구조물로 구성되며, 평가항목 수는 총 61개로 제체 21개, 여수로 16개, 취수시설 4개, 기전시설 10개, 콘크리트 구조물 10개이다. 이 중 제체는 복합부재별로 나누면, 제방 (댐)마루는 중·횡방향 균열, 침하, 수평변위, 제체유실, 사면불안정의 5개, 상류사면은 누수, 침하 및 변형, 사면불안정, 사면보호, 사면침식, 차수벽노후화의 6개, 하류사면은 누수, 침하 및 변형, 사면불안정, 사면보호상태, 사면침식, 식생, 동물굴의 7개, 기초 및 양안부는 침하, 기초의 불안정, 기초의 침식 및 침투의 3개 항목으로 구성된다.

Table 3 Quantitative condition assessment item and defect for fill dams or reservoirs

Feature	Assessment item	Defect indicator for rating
Crest	• Transverse or longitudinal cracking	• Length of crack, depth of crack
	• Settlement	• Settlement
	• Horizontal displacement	• Bulge or depression, lateral movement
	• Loss of embankment material	• Areas of loss
	• Slope instability	• Length of sliding
Upstream face	• Settlement & Deformation	• Settlement, percentage of deformation
	• Condition of slope protection	• Loss rate of embankment materials
	• Slope erosion	• Depth of erosion
	• Concrete facing deterioration	• Width of slab crack, separation of joint, corrosion of rebar
Downstream face	• Leakage	• Leak rate
	• Settlement & Deformation	• Settlement, percentage of deformation
	• Condition of slope protection	• Loss rate of embankment materials
	• Animal burrows	• Diameter of burrow, number of burrow

나. 상태평가 기준의 특징

상태평가 기준의 대표적 특징은 평가내용이 5등급으로 정량화되어 있다는 점이며, 저수지 전체 평가항목 61개 중 정량적 항목이 38개 (62%), 정성적 항목이 23개 (38%)이며, 제체는 평가항목 21개 중 정량항목이 13개 (62%), 정성항목이 8개 (38%)이다. 또한 정량항목의 평가내용을 나타내는 손상과 결함의 요소는 1개에서 3개로 구성되어 있으며 Table 3과 같다. 또한 평가등급은 손상·결함요소의 크기 (고정수치)에 따라 구분한다.

3. 상태평가 기준의 개선 방법

상태평가 기준의 개선은 전체 댐과 저수지를 대상으로 하는 현행 기준을 비교분석의 중심으로 하여 100만 m³ 미만의 소규모 저수지에 맞는 개선 방법을 마련한다. 이를 위해 본 연구에서는 제체에 대한 정량적 평가항목을 대상으로 손상·결함요소의 고정수치에 대한 설정 근거와 크기를 ① 국내외 기준이나 논문 등을 통하여 조사분석하여 구하거나, ② 연도별 농업생산 기반시설 안전진단 종합보고서 (이하 종합보고서라고 지칭)에

나타난 측정값을 통계분석하여 구하거나, ③ 댐·저수지 제원 자료파일로부터 전체 저수지의 크기와 비교하여 소규모 저수지의 크기에 적절한 고정수치를 산정한다. 또한 ④ 현행 등급 구분에 대한 개선방법과 고정수치를 제시한다.

가. 저수지의 크기 비교 분석

저수지의 손상과 결함 요소의 고정수치가 저수지의 규모, 특히 높이와 제방 (댐)마루폭과 비례 관계를 갖는 평가항목은 제방마루에서는 중·횡방향 균열, 침하, 수평변위, 체제유실 항목이고, 상류와 하류사면에서는 침하 및 변형 항목이 해당된다. 필댐과 저수지의 평균 높이는 Table 1과 Table 2로부터 산정하였고, 제방 (댐)마루폭은 1995~2016년까지 정밀안전진단 4,845개 저수지의 시설물 현황 자료파일로부터 각종 오류 및 중복 지구를 제외하고 구축한 2,149개 자료로부터 산정하여 Table 4에 나타내었다 (Yoon et al., 2017). 이로부터 소규모 저수지와 필댐, 소규모 저수지와 전체 댐·저수지에 대한 높이와 제방 (댐)마루폭을 비교 분석한 결과, 평균 높이의 비율은 15% (7.1/46.9), 90% (7.1/7.9)이고, 평균 제방 (댐)마루폭의 비율은 3.9/9.1=43%, 3.9/4.4=89%이다.

Table 4 Height and crest width of fill dams or reservoirs by size

Description	Fill dam > 1MCM	Reservoir	Total of D & R	Small R < 1MCM
Number for H	15+45+13+1=74	17,080	17,154	16,536
Average height (H)	46.9 m	7.7 m	7.9 m	7.1 m
Number for W	15+25+3+1=44	2,149	2,193	1,706
Average crest width (W)	9.1 m	4.3 m	4.4 m	3.9 m

Note: Number of fill dams are based on fill dam used in Table 1.

D&R: Number of fill dams and reservoirs, > or <: inequality symbol like as Table 1

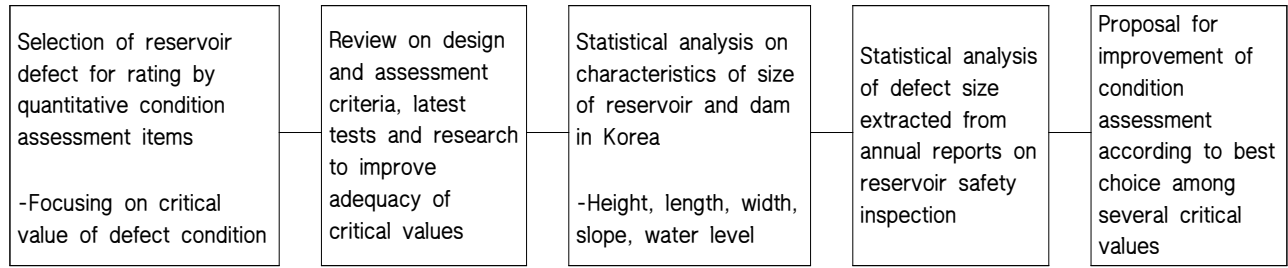


Fig. 1 Improvement procedure of condition assessment for small reservoir

나. 상태평가 기준의 개선 절차 및 방법

안전등급은 A, B, C, D, E의 5등급으로 구분되며, C등급은 주요부재에 경미한 결함 또는 보조부재에 광범위한 결함이 발생한 상태이고, D등급은 주요 부재에 결함이 발생하여 긴급한 보수·보강이 필요한 상태이다. C등급과 D등급의 경계가 되는 손상·결함요소의 한계값(고정수치)은 저수지 제체의 경우 E등급(즉각 사용을 금지해야 하는 상태)과의 경계가 되기도 한다. 현행 한계값은 저수지 규모에 관계없이 고정수치로 되어 있는 경우(유실면적 15m²)가 있거나, 소규모 저수지에는 상당히 커서 부적합하다는 여러 연구보고가 있어 개선이 필요하다(Park and Jung, 2015; Yoon et al., 2017; Min, 2019). 일례로 2013~2020년 안전진단 종합보고서에서 제체 침하깊이가 50 cm 이상 발생한 D등급 비율은 10% 수준으로서(Table 8 참조), “농업생산기반시설 안전진단사 및 안전진단 DB구축(Yoon et al., 2017)”에 따른 2000~2016년 4,119개 저수지의 D등급 비율이 23.3%인 것과 비교하면 매우 낮은 비율을 나타내는 문제가 있다. 상태평가 정량항목의 손상·결함요소에 대한 한계값을 개선하는 절차는 Fig. 1에 나타내었다.

한계값의 개선 방법은 저수지 규모에 대한 각종 통계자료와 2013~2020년 안전진단 종합보고서를 활용하여 손상·결함요소의 특성을 분석하였다. 저수지통계는 중·횡방향균열, 수평변위, 제체유실, 사면불안정, 상류사면침식의 5개 평가항목에 적용하였고, 종합보고서는 침하, 수평변위, 제체유실(제방마루상태), 사면침하 및 변형, 사면보호상태, 상류사면 침식의 6개 평가항목에 적용하였다.

종합보고서의 손상·결함요소에 대한 분석은 ① 종합보고서에서 해당 또는 관련 저수지의 제원과 손상·결함 크기를 발췌 ② 100만 m³ 미만 저수지를 분류 ③ 제체 평가등급 C등급, D등급의 저수지를 분류 ④ 한계값의 통계량(표본수, 평균, 신뢰도, 분산분석 등) 산정의 절차로 실시하였다.

현행 기준의 한계값은 종합보고서로부터 산정한 한계값과 차이가 크고, 또한 타 시설물 평가기준의 한계값과도 차이가 크게 나는 경우가 많다. 한계값을 설정하는 방법에는 손상·결함의 평균값, 중간값, 일정비율값 등 여러 방법이 가능하나 이

에 대해 명확히 제시된 사례는 전무하다. 본 연구에서는 D등급이 C등급보다 표본수는 적으나 평균값의 크기는 큰 것이 일반적이므로, 한계값으로 C등급과 D등급 전체 표본의 평균값(CUD , “평균-C-D”이라 지칭) 대신에 C등급의 평균값과 D등급의 평균값에 대한 평균($(\bar{C} + \bar{D})/2$, “평균- $\bar{C} - \bar{D}$ ”이라 지칭)을 적용하였다. 또한 저수용량별로 손상·결함의 평균값이 차이므로, 한계값을 산정하기 위하여 저수지를 총저수용량 100만 m³ 미만, 30만 m³ 미만, 5만 m³ 미만의 그룹으로 구분하여 비교하였다. 이는 2021년 3월 농림축산식품부 행정규칙으로 고시된 ‘농업용 저수지 최소유지관리기준’에서 주기적 정밀안전진단의 대상을 30만 m³에서 5만 m³ 이상으로 상향하였고, 특히 5만 m³ 미만의 저수지는 국내 저수지수의 82% 수준이고, 100만 m³ 미만 저수지의 85% 수준을 차지하고 있기 때문이다.

III. 결과 및 고찰

1. 상태평가 기준의 정량요소 분석

소규모 저수지 제체의 정량항목에 대한 손상·결함요소의 한계값을 개선하기 위한 분석의 대상은 제방마루의 중·횡방향 균열, 침하, 수평변위, 제체유실, 사면불안정의 5개 항목과, 상하류사면의 침하 및 변형, 사면보호상태, 상류사면 침식의 3개 항목으로 하였다.

가. 중·횡방향 균열

중·횡방향 균열의 평가는 균열의 크기로 평가등급을 구분하며, 균열길이의 한계값은 5 m이고 제방마루쪽의 한계값은 50%이다. 이 한계값은 댐마루폭이 10 m인 필댐에 댐마루 균열이 50% 발생된 상태를 나타내는 것으로 판단된다.

중·횡방향 균열의 평가는 등급별로 정해진 균열길이 상수값과 제방마루폭의 비율로 각각 평가한 등급 중 작은 등급으로 결정하며 이를 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$R_c = \text{Min}(R_{c1}, R_{c2}) \quad (1)$$

여기서, R_c 는 균열의 평가등급, R_{c1} 은 등급별 균열길이 상숫값에 따른 평가등급, R_{c2} 는 제방마루폭의 비율에 따른 평가등급이다.

Table 6에 나타난 전체 댐·저수지 15,930개의 평균 제방(댐)마루폭은 3.4 m이고, 소규모 저수지 15,441개의 평균 제방마루폭은 3.3 m이다. 따라서 균열길이 한갯값 5 m는 대부분 저수지의 제방마루폭을 초과하므로 D등급은 물론 C등급에서도 100%의 횡단균열 상태가 될 수 있다. 소규모 저수지에 대한 균열길이 한갯값의 개선은 전체 저수지에 대한 소규모 저수지의 제방마루폭의 규모비를 고려하여 산정할 수 있으며 그 제안방법과 내용을 Table 5에 나타내었다.

그러나 현행 한갯값은 균열길이 5 m와 제방마루폭의 50% 중 작은 값을 선정하도록 되어 있다 (Fig. 4 참조). Table 5를 이용하여 균열길이의 상숫값을 3 m로 가정하면, 제방마루폭이 6 m를 초과하는 저수지의 경우 균열이 3 m만 되어도 D등급으로 평가되어 현행보다 낮은 평가등급으로 판정하게 된다. 따라서 소규모 저수지에 대한 종·횡방향 균열의 한갯값은 현행 기준을 낮추기보다는 유지하는 것이 적절하다고 판단된다.

나. 침하

침하의 평가는 침하 및 부등침하의 크기로 평가등급을 구분하며, 한갯값은 50 cm이다. 한갯값 50 cm는 Table 4를 보면 100만 m³ 이상의 필댐 (농업용 제외)에 대한 평균높이의 1% 수준에 해당한다.

“필댐 설계기준 (MOLIT, 2019)”에 따르면 댐 완공 후 침하량은 댐높이의 1% 미만인 대부분이며, 특히 프랑스의 소규모 댐 설계시공지침 (2002)에서는 15 m 이하의 댐에서는 더 낮은 것으로 되어 있다. “토지개량사업 계획설계기준 활댐편 (MAF, 1968)”, USBR의 필댐 설계기준 (2011)에서는 기초지반이 견고하고 다짐이 충분한 흙댐에서의 침하량은 장기적으로 보아도 댐높이의 0.2~0.4%이며 0.5%를 거의 초과하지 않는다고 한다.

필댐 설계기준에 제시된 Lawton and Lester (1964)의 록필댐

최종침하량 공식은 식 (2)와 같다.

$$S = 0.001H^{3/2} \quad (2)$$

여기서, S 는 침하량 (m), H 는 댐높이 (m)이며, 식 (2)는 댐높이가 100 m, 50 m, 30 m, 10 m일 때 침하율이 1%, 0.7%, 0.5%, 0.3%로 낮아진다. Lee and Kim (2014)은 중심코어형 석괴댐 (CCRD)의 장기침하량 예측에 대한 논문에서 국내 다목적댐과 발전용댐 10개 필댐 (평균높이 77 m)의 실측 침하율 (침하량/댐높이)은 평균 0.46% (0.18~0.75%)이라고 발표하였으며, 이는 식 (2)에 따른 침하율 0.88%보다 낮다.

한편 지진으로 인한 댐침하율 추정식으로 Swaisgood의 경험식은 식 (3)과 같다.

$$\% STTLMT = \frac{\Delta}{DH + AT} \times 100 = e^{(6.07PGA + 0.57Ms - 8.0)} \quad (3)$$

여기서, %STTLMT는 침하율, Δ 는 침하량 (m), DH 는 댐높이 (m), AT 는 기초지반 두께 (m), PGA 는 최대지반가속도 (g), M_s 는 지진규모 (상수)이다.

“농지개량사업 계획설계기준 댐편 (MAF, 1982)”에 따르면 양호한 기초지반 위에 신중히 축조된 댐은 최대가속도 0.2g 정도의 지진에는 거의 피해를 받지 않고 견디어 온 것이 많다고 한다. 국내 지진침하율은 식 (3)을 이용하여, 지진규모는 최근 경주지진 ($M_s=5.8$)을 감안하여 6.5, 재현주기는 500년, 최대지반가속도 (PGA)는 0.132 (구역계수 0.11, 균일형 필댐 20% 할증)를 적용하면 0.03%가 된다. 한편, 일본의 댐종합점검실시요령 (2013)에서는 록필댐의 강진 (100gal)에 대한 침하량은 댐높이의 0.2~0.5% 이하라고 한다.

소규모 저수지의 침하에 대한 한갯값을 산정하기 위하여, 총침하율은 장기침하율과 지진침하율을 합하여 안전성이 확보되도록 한다. 장기침하율은 필댐 설계기준 등의 상한값 0.4%를, 지진침하율은 일본 “댐종합점검실시요령”의 하한값 0.2%를 적용하면 총침하율은 0.6%가 되어 현행 1.0%의 60%가 되므로, 소규모 저수지의 침하량 한갯값은 현행 한갯값 50 cm의 60%인 30 cm가 된다. 한편 종합보고서에 따른 소규모 저

Table 5 Analysis for improvement of critical crack length

Defect	Proposed	Crest of fill dam		Crest of reservoir		Remark C _L =critical crack length
		Avg W _d (m)	C _{Ld} (m)	Avg W _r (m)	C _{Lr} (m)	
Crack length	Current (for all)	9.1	5	3.4	C _{Lra} = 5	If C _{Lr} >W (width), most reservoir may not be safe. NG
	Improvement (for small res.)	9.1	5	3.3	C _{Lrs}	C _{Lrs} =5×3.3/3.4=4.9 > W _r =3.3 For safety, C _{Lrs} ≤3.3 m

Table 6 Description of fill dams and reservoirs by size

Description	Length		Crest width	
	Number	Average	Number	Average
Total of Dam and Reservoir	17,154	113m	15,930	3.4m
Small reservoir < 1MCM	16,536	103m	15,441	3.3m

Note: 1. Statistics of average length are based on Table 1 and Table 2.

Sum 17,154 = Dam 74 + Reservoir of local gov. 13,674 + Reservoir of KRC 3,406

2. Statistics of average crest width are based on Table 4 and research report by KRC (2011).

Sum 15,930 = Dam 44 + Reservoir of local gov. 13,737 + Reservoir of KRC 2,149

수지의 제방마루 침하량은 평균 $\bar{C}-\bar{D}$ 가 25.6 cm로 산정되었고, 그 내용을 사면침하량과 비교되도록 Table 8에 나타내었다. 따라서 소규모 저수지의 침하량 한계값은 일반 이론식과 안전진단 측정분석값 및 현장측정 용도를 고려하면 30 cm가 적절한 것으로 판단된다.

다. 수평변위

수평변위의 평가는 용기와 측방이동의 크기로 평가등급을 구분하며, 용기의 한계값은 50 cm이고 측방이동의 한계값은 30cm이다.

USBR의 필댐 설계기준 (2011)에 따르면 시공 후 수평 이동의 변화는 주로 제방재료가 새로 작용하는 응력 분포에 적응하기 위한 것이며, 수직침하보다 작으나 실무적으로 침하범위는 수평변위도 허용하고 있다. 한국시설안전공단의 “기존댐 내진성능평가 및 향상요령”에 따르면 흙댐 및 사력댐의 허용 수평변위는 제체 높이의 1.0%를 기준으로 하고, 수자원공사는 대부분 댐의 내진에 대한 허용변위를 30 cm로 하며, Jung et al. (2021)은 필댐 제체의 거동특성을 분석하면서 수평변위의 D등급을 20~30 cm로 제안하였다.

소규모 저수지의 수평변위에 대한 한계값을 산정하기 위하여

전체 댐·저수지와 크기를 비교하여 규모비를 적용하였다. 필댐과 저수지의 평균 길이와 제방 (댐)마루폭은 Table 1, Table 2, Table 4 및 “저수지 재해예방을 위한 안전관리기법 및 DB구축 개발 연구보고서 (KRC, 2011)”로부터 산정하여 Table 6에 나타내었다. 이로부터 소규모 저수지와 전체 댐·저수지의 길이와 제방 (댐)마루폭을 비교한 결과, 평균 길이의 비율은 91% (103/113) 이고, 평균 제방 (댐)마루폭의 비율은 97% (3.3/3.4)이다. 따라서 소규모 저수지의 측방이동은 규모비가 1에 가까우므로 한계값은 현행 한계값 30 cm를 유지하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 한편, 용기의 한계값은 앞에서 제안한 제방 (댐)마루의 침하량 한계값이 30 cm이고, 소규모 저수지의 높이는 전체 댐·저수지 대비 90%이므로, 수평변위의 용기 또는 함몰의 한계값도 30 cm가 적절한 것으로 판단된다.

라. 제체유실 (제방마루상태)

제체유실은 제방마루 유실면적의 크기로 평가등급을 구분하며, 한계값은 15 m²이다.

유실면적의 평가는, 필댐과 소규모 저수지를 비교하면 평균 마루폭이 Table 5와 Table 6을 보면 9.1 m와 3.3 m로 차이가 크므로, 상술했던 면적비율로 정하는 것이 합리적이라 판

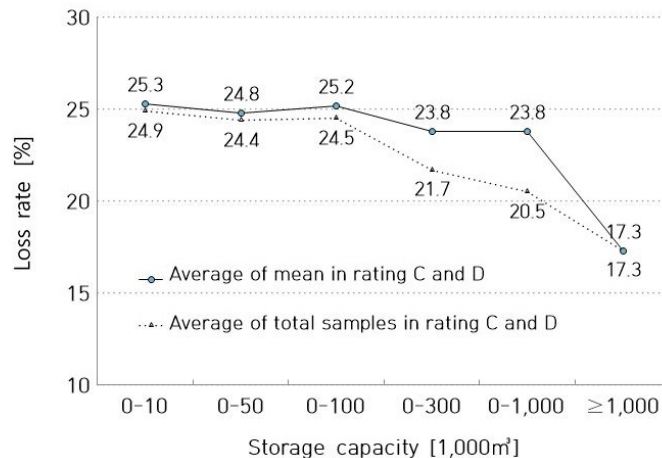


Fig. 2 Loss rate of embankment crest materials by total storage capacity

단된다. 한껏값 15 m²는 현장조사망의 평균면적이 길이 20 m, 마루폭 3.3 m이면 66 m²가 되므로 23%에 해당한다.

제방마루의 유실은 종합보고서에 거의 나타나지 않으나, 중요도가 낮은 침식은 많이 나타나고 있고 일부 저수지에서는 유실과 함께 나타나고 있어, 침식을 포함하여 유실면적률을 추정하였다. 다만 어깨부 침식은 매우 일반적이고 경미한 손상이므로 제외하였다.

종합보고서에서 유실과 침식이 발생한 저수지 중 제체의 상태평가등급이 C등급 또는 D등급인 213개소를 선별하여 통계 분석한 결과, 유실면적률의 평균-C-D는 총저수용량의 크기에 따라 반비례하는 경향을 나타내었으며, 평균- $\bar{C}-\bar{D}$ 은 평균-C-D보다 크고 5만 m³ 이하에서는 약 25%로 나타났고, 두 평균 모두 총저수용량 100만 m³ 이상과 미만에 따라 차이가 나는 것으로 분석되었으며, 이를 Fig. 2에 나타내었다.

따라서 제방마루에 발생한 유실면적의 한껏값에 대한 평가 방법은 현행의 상수면적값에서 면적비율로 변경하고, 면적비율의 한껏값은 현장조사망의 크기비율 (23%)과 저수용량 5만 m³ 미만의 평균- $\bar{C}-\bar{D}$ 유실면적률 (25%), 또한 유실에 침식을 포함하고 있는 점을 종합적으로 고려해 볼 때 25%가 적정한 것으로 판단된다.

마. 사면불안정

사면불안정은 슬라이딩의 길이로 평가 등급을 구분하며, 한껏값은 2m이다.

슬라이딩은 사면기울기와 관련되므로 소규모 저수지의 사면불안정에 대한 한껏값을 산정하기 위하여 전체 저수지의 사

면기울기와 비교하여 기울기 비율을 적용하였다. 소규모 저수지와 전체 저수지에 대한 상류사면과 하류사면의 평균기울기를 Table 7에 나타내었으며, 이들의 비율은 각각 99%, 100%로서 사면기울기가 거의 같음을 알 수 있다. 따라서 소규모 저수지의 슬라이딩의 한껏값은 현행 2 m를 유지하는 것이 적절하다고 판단된다.

바. 사면침하 및 변형

사면침하 및 변형은 침하깊이와 변형 백분율의 크기로 평가 등급을 구분하며, 침하깊이의 한껏값은 50 cm이고, 변형은 50%이다.

USBR의 필댐 설계기준 (2011)은 댐마루에서 최대 침하, 사면 중간부에서 최대 수평변위를 나타내는 일반 변형패턴을 보여준다. 소규모 저수지의 침하깊이의 한껏값을 산정하기 위하여, 종합보고서에서 소규모 저수지의 제체 상태평가 등급이 C등급과 D등급이고 제방마루와 사면의 침하가 함께 발생한 20개소를 통계분석한 결과, 평균- $\bar{C}-\bar{D}$ 침하깊이를 구하면 제방마루 26 cm이고, 상류사면 32 cm, 하류사면 25 cm가 되며 이를 Table 8에 나타내었다.

제방마루와 상하류사면 간의 침하량은 분산분석 (ANOVA)에 따르면 유의미한 차이가 없는 것으로 검정됨으로써, 상·하류사면의 침하깊이는 제방마루 침하량과 같은 수준으로 분석되었다. 따라서 소규모 저수지의 사면 침하깊이의 한껏값은 제방마루와 같이 30 cm가 적정한 것으로 판단된다.

한편 댐·저수지의 변형 한껏값을 산정하기 위하여 간접방법으로서 침하 평균면적률을 고려하였다. 소규모 저수지의 제

Table 7 Slope of fill reservoirs by size

Description	Number	Average upstream slope	Average downstream slope
Total reservoir = Local + KRC	15,886	1 : 2.06	1 : 2.08
Small reservoir < 1MCM	15,441	1 : 2.04	1 : 2.08

Note: Average slope of local government reservoirs is based on research report by KRC (2011), and that of KRC reservoirs is based on research report by Yoon et al. (2017).

Table 8 Settlement of fill reservoirs with a storage capacity of under 1 MCM

Description	Number	Settlement depth and Ratio of settlement		
		Crest	Upstream slope	Downstream slope
Average for C and D (\overline{CUD})	20	22.1 cm	27.7 cm	24.6 cm
Average for C (\bar{C})	14	16.9 cm	24.0 cm	23.3 cm
Average for D (\bar{D})	6	34.2 cm	40.0 cm	27.5 cm
Average for \bar{C} and \bar{D} ($(\bar{C}+\bar{D})/2$)	-	25.6 cm	32.0 cm	25.4 cm
(No. of D ≥ 50cm) / (No. of C&D)	-	10% (2/20)	15.4% (2/13)	7.7% (1/13)

Table 9 Settlement rate of fill reservoir slope by total storage capacity

Description	Storage		0~50,000 m ³				0~300,000 m ³				0~1,000,000 m ³			
			Upstream		Downstream		Upstream		Downstream		Upstream		Downstream	
Embankment rating			C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D
No. of reservoirs			23	21	33	35	60	25	56	41	96	25	104	41
Average height (m)			9.3	6.5	8.6	6.9	13.3	6.6	12.3	7.0	14.2	6.6	12.9	7.0
Average length (m)			156	117	116	119	210	130	187	127	230	130	211	127
Settlement block (%)			42.2	51.3	42.8	46.6	35.2	45.5	37.9	45.5	33.4	45.5	32	45.5
95% confidence interval for settlement area (%)			6.5	6.9	4.1	4.5	3.4	6.4	3.2	4.1	2.5	6.4	2.2	4.1
Settlement area rate by $(\bar{C} + \bar{D})/2$ (%)			23.4		22.4		20.2		20.9		19.7		19.4	

체 평가등급이 C등급, D등급인 204개소를 대상으로 사면의 조사블록 침하율 (침하블록수/전체사면블록수의 비율)을 산정한 결과, 침하 면적률 (침하면적은 조사블록 면적의 50%로 가정, 즉 블록 침하율의 50%)은 총저수용량의 크기에 따라 반비례하는 것으로 나타났으며, 5만 m³ 미만인 저수지의 경우 약 23%로 분석되었고 Table 9에 나타내었다. 총저수용량의 크기 그룹간에 조사블록의 침하 면적률이 통계적 차이가 난다는 점은 분산분석 (ANOVA)에서 F-value가 F기각치 (F-critical)보다 크고, 유의확률 (p-value)이 유의수준 0.1보다 작게 나타남으로써 인정되었다. 따라서 소규모 저수지의 변형 한계값은 25% 수준이 적절할 것으로 판단된다.

사. 사면보호상태 (유실)

사면보호상태는 사면 전체의 유실면적 비율의 크기로 평가 등급을 구분하며, 한계값은 50%이다.

소규모 저수지의 사면유실에 대한 한계값을 산정하기 위하여 종합보고서에서 소규모 저수지의 상하류사면에 토사 또는

사석 유실이 발생한 사례 중 체체의 상태평가 등급이 C등급 또는 D등급인 145개소를 선별하여, 사면의 조사블록 유실률 (유실블록수/전체사면블록수의 비율)을 산정한 결과, 유실 면적률 (블록 유실률의 50%)은 총저수용량의 크기에 따라 반비례하는 경향이 있고 상류사면과 하류사면이 차이가 나는 것으로 분석되었으며 Fig. 3에 나타내었다. 100만 m³ 미만 저수지의 평균 $\bar{C}-\bar{D}$ 유실 면적률은 상류사면 26.1%, 하류사면 12.4%로 나타났고, 5만 m³ 미만인 경우는 상류사면 28.1%, 하류사면 16.9%로 나타났다. 총저수용량의 크기와 상·하류사면 그룹간에 평균 유실 면적률이 통계적 차이가 있다는 점은 분산분석 (ANOVA)의 반복없는 이원배치법에서 F-value가 F기각치 (F-critical)보다 크고, 유의확률 (p-value)이 유의수준 0.01보다 작게 나타남으로써 인정되었다.

한편, 시설물의 결함손상 평가를 면적으로 평가하는 국내 다른 시설물의 한계값을 조사해본 결과, 급경사지 재해위험도 평가기준 (고시)에 따른 인공비탈면 붕괴·유실은 20%이다. 상기 통계분석 결과와 인공비탈면의 한계값을 함께 고려해보면

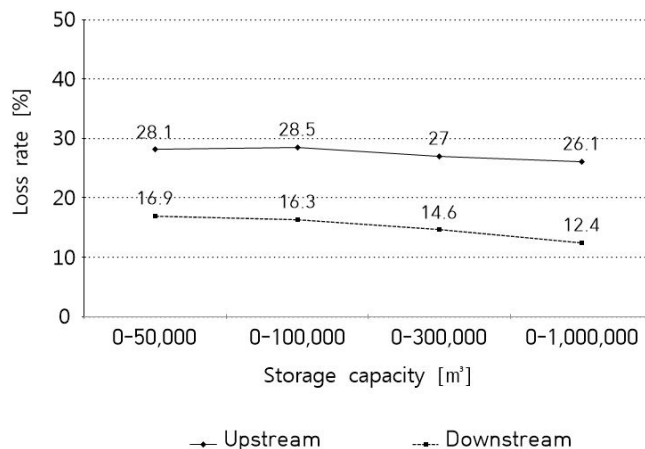


Fig. 3 Loss rate of embankment slope materials by total storage capacity

제체의 상·하류사면에 발생한 유실면적의 한계값은 상류사면은 30%, 하류사면은 20%가 적절한 것으로 판단된다.

아. 상류사면 침식

상류사면의 침식은 사면침식고의 크기로 평가등급을 구분하며, 한계값은 2m이다.

댐·저수지의 상시만수위에서 제방마루까지 높이는 Table 10을 보면 필댐은 평균 5.5 m이나 저수지는 평균 2.2 m이다. 따라서 필댐과 달리, 소규모 저수지 사면에서 침식고가 2 m 수준으로 발생하면 제체가 매우 위험한 상태가 되므로 한계값을 낮출 필요가 있다.

Table 10 Crest and water level of fill reservoirs by size

Description	No. of Dam & Reservoir	Crest EL.-NHWL	Crest EL.-FWL
Fill Dam (K-W)	29	5.5m	3.3m
Reservoir (KRC)	2,137	2.2m	1.1m
Small res. < 1MCM	1,694	2.0m	1.0m

Note: NHWL (Normal High Water Level), FWL (Flood Water Level)

상류사면 침식은 파랑과 강우에 따르며 파랑침식은 상시만수위 부근에, 강우침식은 양안부 부근에 주로 발생하는 것으로 알려져 있다. 미국 주정부 댐안전협의회 (ASDSO)의 웹페이지에 따르면 상류사면보호공의 침식고가 1ft 미만인 경우 안정에 문제가 없다고 한다 (Accessed 2021. 3). “농지개발사업 계획설계기준 댐편 (MAF, 1982)”에서는 사석공 (사석+필터)의 두께를 45cm 이상으로 하며, USBR의 필댐 설계기준 사석보호공 (2014)에서는 최소두께를 60 cm로 하고 있고, 50만 m³ 이상을 대상으로 했던 109개 저수지 독높이기사업에서는 주로 1.0 m로 설계하였다.

종합보고서에서 소규모 저수지에 상류사면 침식이 발생한 사례 중 제체 상태등급이 C, D등급인 34개소를 선별하여 통계 분석한 결과, 평균 $\bar{C}-\bar{D}$ 침식고가 33cm이었으며 이를 Table 11에 나타내었다.

Table 11 Statistical analysis on erosion height of upstream slope of small reservoir

Description	Rating C	Rating D	Avg. of (C-D)	Avg. of ($\bar{C}-\bar{D}$)
No. of reservoirs	23	11	34	
Average height (cm)	26	40	30	33
95% confidence interval (cm)	5	8	5	

소규모 저수지의 상류사면에 대한 침식 한계값은 종합보고

서의 사면침식고가 33 cm이나, ASDSO에 따르면 1ft는 안정에 문제가 없는 수준이고, 사면침식고의 평가유형이 국부결함 (현행 기준의 영향계수 최댓값 2.0)으로서 중요결함 (영향계수 최댓값 1.0)보다 안전에 미치는 영향이 최대 50%로 작은 점을 감안하면 30 cm보다 크게 정하는 것이 합리적이라 판단된다. Min (2019)은 한계값으로 기준강화를 위해 0.5 m를 제안하였다. 따라서 침식고의 한계값은 ASDSO 1 ft의 2배이고 USBR 필댐 설계기준의 사석공 최소두께에 해당하는 0.6 m로 제안한다.

2. 등급 구분방법의 분석

상태평가 정량항목의 등급 구분은 손상·결함요소가 1개인 경우 간단하지만 2개 이상이면 복잡하다. 저수지 제체의 손상·결함요소가 2개로 구성된 평가항목은 Table 3을 보면 제방 (댐)마루의 중·횡방향균열, 수평변위와 상하류사면의 침하·변형의 3개 항목이다. 또한 평가내용은 한 문장 안에 요소 문구들을 쉼표 (콤마)로 구분하거나 별도의 문장으로 구분하고 있으나, 논리곱 (and, 그리고)과 논리합 (or, 혹은)을 사용하여 명확한 판별을 할 수 있도록 설명되어 있지 않아 등급 판정의 혼동과 오류가 발생할 소지가 있다. 평가내용에 대한 논리적 문맥을 파악해보면, 균열항목의 쉼표는 두 요소 (상숯값과 제방 (댐)마루쪽의 백분율)의 논리곱이 아니라 두 요소의 작은 값이 적정하며, 수평변위항목과 사면의 침하·변형항목의 쉼표는 평가등급 (B~E)에 따라 각각의 두 요소 (용기와 측방이동, 침하깊이와 변형 백분율)의 논리합과 논리곱이 혼재되어 사용된 것으로 판단된다. 따라서 등급을 명확히 구분하기 위한 방법을 평면도형으로 표시하였으며 이들 항목의 등급평가 유형은 Figs. 4, 5, 6과 같다.

한편, 상태평가 B등급은 양호한 시설상태로 보조부재에 경미한 결함이 발생한 상태이다. 소규모 저수지에 적정한 B등급 경계값은 현행 기준을 기본으로 유지하되 금번 한계값 변경의 영향과 국내의 유사시설의 상태평가 기준과의 차이 등을 종합 고려하여 제안한다. 첫째, 제방마루의 균열과 사면불안정 (슬라이딩)에 대한 경계값 길이는 1 m, 제방마루 및 상·하류사면의 침하깊이는 10cm이며, 이들에 대해서는 현행 기준을 유지한다. 둘째, 사면의 변형 (Fig. 5 참고)과 유실은 현행 10%이나 Park and Jung (2015)와 Min (2019)은 B등급을 5%로 변경 제안하였으며, 일본 농림수산성의 “저수지 기능진단 매뉴얼 (2016)”에서는 5% 이상이면 개보수 대상으로 되어 있고, 또한 금번 한계값이 50%에서 25%로 저하되는 영향도 있으므로 5%로 낮춘다. 셋째, 제방마루 유실은 현행 B등급 5 m²와 D등급 15 m²의 비율을 25%에 적용하면서 안전 여유를 두어 5%로 제안한다. 넷째, 수평변위는 Fig. 6에서 보면, 용기와 측방이동에 대한 고정수치가 없고 양호한 상태라는 정성적 표현으로만 되어 있

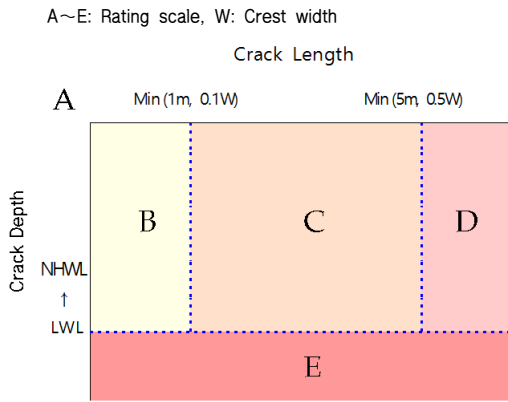


Fig. 4 Rating assessment for crack

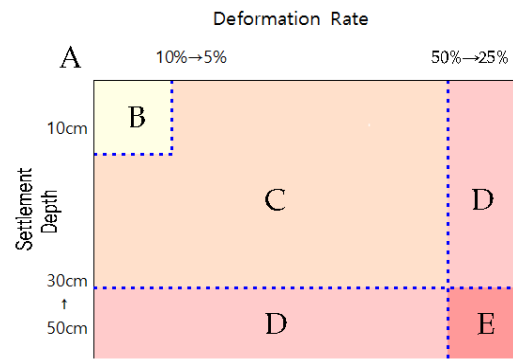


Fig. 5 Rating assessment for settlement and deformation (proposed)

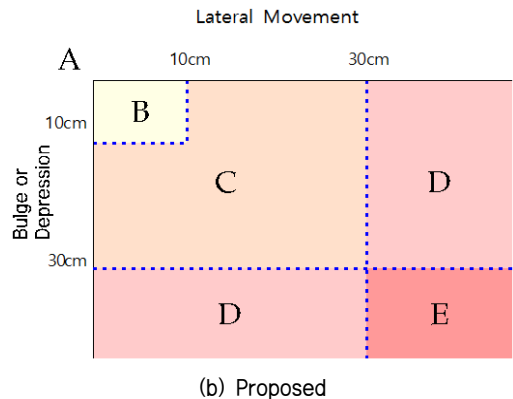
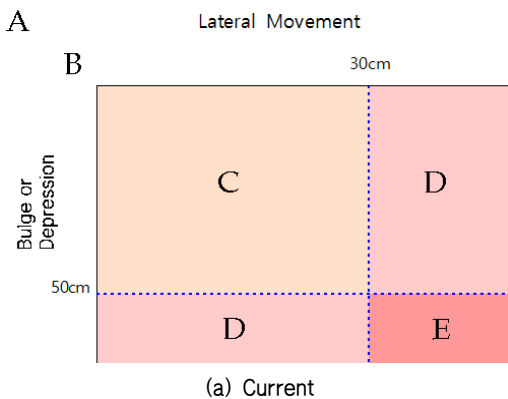


Fig. 6 Rating assessment for horizontal displacement (no scale)

어 다른 항목의 기준과 같이 10 cm로 정량화한다. 다섯째, 상류사면 침식은 현행 경계값이 0.5 m인데 ASDSO의 안전에 문제없는 수준인 1 ft에 비하여 매우 크고, 또한 급변 제안한 C등급과 D등급 한계값 0.6 m의 영향도 고려하여 0.3 m로 제안한다.

IV. 결론

본 연구에서는 농업용 소규모 저수지에 대한 안전진단 상태 평가 기준을 개선하기 위하여 국내외 설계기준 및 상태평가 기준, 저수지 통계자료 및 안전진단 종합보고서 등을 이용하여, 제체의 정량 평가항목을 대상으로 손상·결함요소의 평가 등급별 크기 (고정수치) 중 C등급과 D등급을 구분하는 경계인 한계값과 B등급과 C등급을 구분하는 경계값을 산정하였고, 또한 등급 구분방법을 제시하였으며 다음의 결론을 얻었다.

1. 댐과 저수지의 시설규모 특성을 적용하기 위하여 농업생 산기반정비 통계연보, 국가수자원종합관리정보시스템 (WAMIS), 농촌용수종합정보시스템 (RAWRIS), 농어촌

알리미 (ALIMI), K-Water 댐관리현황 및 시설물통합정보관리시스템 (FMS) 등에서 수집정리한 시설제원 자료 파일을 활용하여 전체 저수지와 총저수용량 100만 m³ 이하인 소규모 저수지의 규모비를 산정하였으며, 이를 제방마루의 균열, 수평변위 (측방이동), 제체유실, 사면불안정, 상류사면 침식의 5개 평가항목에 대한 손상·결함요소의 한계값 산정에 적용하였다.

2. 2013~2020년 안전진단 종합보고서의 저수지 안전진단 결과를 통계분석하여 제방마루의 침하, 수평변위 (용기), 제체유실, 사면침하·변형, 사면보호상태 (유실) 및 상류사면침식의 6개 평가항목에 대한 손상·결함요소의 한계값 산정과 특성을 분석하였다.
3. 안전진단 종합보고서를 이용한 한계값은 C등급, D등급인 제체의 손상·결함요소의 크기를 표본으로 하여 C등급 표본평균과 D등급 표본평균에 대한 평균값을 적용하였다.
4. 평가항목별 한계값으로, 제방마루와 사면의 침하, 수평변위 (용기)의 경우 현행 50 cm에서 30 cm로, 제방마루 유

실은 15 m²에서 25%로, 사면 변형은 50%에서 25%로, 사면보호상태 (유실)는 50%에서 상류 30%, 하류 20%로, 상류사면 침식은 2 m에서 0.6 m로 제안한다.

5. 제체유실, 사면침하·변형 및 사면보호상태 (유실)의 크기 (한껏값)가 총저수용량 (5만, 30만, 100만 m³ 미만)에 반 비례하는 것으로 분석됨으로써 소규모 저수지의 취약성이 부분적으로 확인되었다.
6. 평가등급의 구분을 명확히 하기 위하여 평면도형의 표시 방법을 제시하였고, 또한 B등급과 C등급의 경계값으로, 수평변위 (용기와 측방이동)의 경우 현행 정성적 표현에서 10 cm로, 제방마루 유실은 5 m²에서 5%로, 사면 변형은 10%에서 5%로, 사면보호상태 (유실)는 10%에서 5%로, 상류사면 침식은 0.5 m에서 0.3 m로 제안한다.

감사의 글

이 연구는 2020년 한국농어촌공사 (안전진단본부)의 재원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. ASDSO, Webpage on upstream slope protection for dam safety, <https://damsafety.org/dam-owner/upstream-slope-protection>
2. HRFCO, Si and gun reservoir specification data files in excel from WAMIS (wamis.go.kr).
3. Jeon, G. Y. and M. S. Sim, 2020. Improvement of condition assessment criteria for reservoir safety inspection, 9-62. KRC (in Korean).
4. Jung, H. D., Y. S. Kim, M. J. Lee, S. J. Lee, B. Tamang, J. Heo, and S. S. Ahn, 2021. Behavioral characteristics and safety management plan for fill dam during water level fluctuation using numerical analysis. *Journal of the Korean Geosynthetic Society* 20(1): 45-55. doi:10.12814/jkgss.2021.20.1.045 (in Korean).
5. KALIS, Dam specification data files in excel from FMS (www.fms.or.kr).
6. KRC, Reservoir specification data files in excel from ALIMI (www.alimi.or.kr) and RAWRIS (rawris.ekr.or.kr/main.do).
7. KRC, 2011. Total reservoir investigation, Ch. 2. *In A study on development of the safety management and the data base for reservoir disaster prevention*, 50-53 (in Korean).
8. KRC, 2012-2020. Comprehensive annual report on reservoir safety inspection (in Korean).
9. K-water, Dam specification data files in excel from MyWater. <https://www.water.or.kr>. Accessed 11 June. 2021.
10. Lee, C. W. and Y. S. Kim, 2014. Long-term settlement prediction of center-cored Rockfill Dam using measured data. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society* 15(11): 21-27. doi:10.14481/jkges.2014.15.11.21 (in Korean).
11. MAFRA and KRC, 2020. Statistical yearbook of land and water development for agriculture 2019, 316-441, Ansan, Korea.
12. Min, S. P., 2019. The improvement of condition assessment criteria for reservoir safety inspection. The Workshop on Safety Inspection for Agricultural Infrastructures: Safety Inspection Project Office, KRC (in Korean).
13. Park, S. K. and N. S. Jung, 2015. The improvement of assessment criteria and techniques of safety inspection for agricultural infrastructures (Final), 187-200. KRC (in Korean).
14. Sarkaria, G. S., M. P. Forrest, M. I. Gazit, E. B. Kollgaard, R. P. Sharma, and J. Torrico, 1986. Inspection and performance evaluation of dams, a guide for managers, engineers, and operators, 4-1 to 4-29: EPRI.
15. USBR, 2011. Static deformation analysis, Ch. 9. *Riprap slope protection*, Ch. 9. *In embankment dams*.
16. Yoon, K. S., K. S. Kim, W. H. Choi, and G. Y. Jeon, 2017. Histories and creation of data file on safety inspection for agricultural land and water development facilities: KRC (in Korean).
17. 日本 農林水産省 農村振興局, 平成28年 (2016). *ため池機能診断マニュアル(2次調査) 暫定版*, 12-13.