

경상북도 지역 노후 콘크리트사방댐 정밀점검 결과의 통계적 분석

김정식¹ · 김동엽^{2*}

¹한국치산기술협회 연구조사처, ²대구대학교 산림자원학과

A Statistical Analysis of Results of Detailed Inspections on Aged Concrete Erosion Control Dams in Gyeongsangbuk-do

Jeongsig Kim¹ and Dongyeob Kim^{2*}

¹Division of Research and Investigation, Korea Association of Forest Enviro-conservation Technology, Osong 28165, Korea


²Department of Forest Resources, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

요약: 이 연구는 「사방시설의 유지관리 지침」에 의거하여 수행된 노후 콘크리트사방댐에 대한 정밀점검 결과를 분석하여, 향후 콘크리트사방댐의 관리 방안을 수립하는데 필요한 기초자료를 제공하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 경상북도 사유림에 위치한 준공 후 20년 이상 경과된 54개 콘크리트 사방댐에 대한 정밀점검의 결과를 통계적 방법으로 분석하였다. 외관 결함사항 점검의 결과, 보수 혹은 후속조치가 필요한 것이 18개소(33.4%)를 차지하였으며, 조사자 보정점수로 인하여 종합등급이 변경된 사례로 15개소가 나타나 관련 기준과 지표의 표준화가 필요할 것으로 생각되었다. 콘크리트 압축강도시험의 결과, 기준치에 미달하는 것은 19개소(35.2%)로 조사되었으며, 이 중에는 외관 결함사항 점검 결과 상태가 양호한 것으로 판단된 A등급에서도 8개소가 포함되어 있었다. 또한, 종합점수와 콘크리트 압축강도 사이에는 뚜렷한 상관관계가 나타나지 않았으나, 종합등급별로 콘크리트 압축강도는 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 한편, 준공 후 경과연수에 따른 사방댐의 특성 변화를 분석한 결과, 시간 경과와 종합점수 및 압축강도의 변화는 특별한 경향을 나타내지 않았다. 하지만, 보수·후속조치가 필요한 사방댐과 압축강도 기준치 미달 사방댐의 누적 비율은 모두 시간 경과와 강한 양의 선형관계가 있는 것으로 분석되어, 이를 활용하면 콘크리트사방댐의 노후 특성을 파악할 수 있을 것으로 기대되었다.

Abstract: We carried out this study to provide basic data necessary to establish a management plan for concrete erosion control dams in the future by analyzing results of detailed inspections of aged dams conducted in accordance with 「Guidelines for the Maintenance of the Erosion Control Facility」. We analyzed the results of a detailed inspection of 54 concrete erosion control dams which had been built over 20 years previously, located in private forests of Gyeongsangbuk-do using statistical methods. Having conducted exterior defect investigations, we found 18 dams (33.4%) in need of repair or follow-up measures and 15 dams in which the overall grade was changed due to investigator's corrections; we therefore considered that standardization of related standards and indicators would be necessary. After conducting concrete compression strength tests, we found 19 dams (35.2%) to be below the standard value of 21 MPa, and in particular, we included, in grade A, eight dams which we judged to be in good condition as a result of the exterior defect inspection. There was little clear correlation between the total score and the compressive strength of concrete, but there was a statistically significant difference in the compressive strength by overall grade. After analyzing the changes in the characteristics of the erosion control dams according to the elapsed years after construction, we detected no particular trend in the changes of total score and compressive strength over time. However, the cumulative ratio of the dams that required repair and follow-up measures and the dams below the compression strength standard had a strong positive linear relationship over time, suggesting that it would be possible to identify the aging characteristics of concrete erosion control dams.

Key words: detailed inspection, aged concrete erosion control dam, exterior defect, erosion control dam maintenance

* Corresponding author
E-mail: dy.kim@daegu.ac.kr

ORCID
Dongyeob Kim  <https://orcid.org/0000-0001-5243-0780>

서론

사방댐은 황폐계류에서 각종 침식유송물질을 저류하고 토석 퇴적에 의해 계상기울기를 완화시키며, 산각의 고정과 산복붕괴를 방지하기 위하여 설치하는 황공작물을 일컫는다(Korea Forest Service, 2014). 우리나라에서 사방댐은 1986년에 최초로 도입된 이래 지속적으로 시공되어 2018년까지 전국적으로 11,865기가 설치되어 있다(Korea Association of Soil and Water, 2020). 특히, 2000년대 중반부터 2010년대 중반까지는 산사태·토석류에 의한 피해가 커지면서, 이를 예방하기 위한 시설로서 사방댐 설치에 대한 사회적 요구가 증대되어 1년에 최대 900여 기가 시공되기도 하였다.

2000년대 초반까지만 하더라도 사방댐은 재해 예방 구조물보다는 산지 계류의 보전을 위한 구조물로서 인식되는 경향이 있어서, 이에 대한 정기적인 점검이나 유지관리가 간과된 것이 사실이다. 건설분야에서는 성수대교 붕괴 사고를 계기로 1995년에 「시설물의 안전관리에 관한 특별법」이 제정되어 도로, 철도, 댐, 교량, 터널 등 건축물에 대한 안전점검 및 정밀안전진단이 정기적으로 실시되어 왔으나, 사방댐은 그 대상에서 제외되었었다. 하지만, 최초 사방댐의 도입 이후 경과연수가 30년 이상이 되고 재해 예방 구조물로서 그 설치 개수가 대폭적으로 증가함에 따라, 사방댐에 대한 정기적인 점검 및 유지관리에 대한 필요성도 증대되었다.

이에 산림청에서는 2007년에 「사방사업법」을 개정하여 ‘사방시설의 안정성 확보를 위하여 필요한 경우에는 점검·안전진단을 실시하고 그 결과에 따라 안전조치를 하여야 한다(제15조2항)’는 조항을 만들어 사방댐에 대한 점검 및 유지관리의 근거를 마련하였다. 이후, 2014년에 「사방시설의 유지관리 매뉴얼」이 제정되었고, 2018년에는 사방시설의 점검방법을 외관점검과 정밀점검으로 구분한 내용을 수록한 「사방시설의 유지관리 지침(산림청고시 제2018-27호, 2018.2.28. 제정)」이 제정됨에 따라, 사방댐에 대한 점검 및 안전진단 등을 망라한 유지관리 체계가 확립되었다.

현행 「사방시설의 유지관리 지침」에 따르면, 사방시설 중 사방댐은 ‘외관점검 → 정밀점검 → 안전진단 → 안전조치’의 단계에 따라 점검과 조치가 수행된다. 사방댐에 대한 외관점검은 준공 후 4년이 지난 것을 대상으로 상태에 따라 매년 혹은 격년 등 점검 주기를 달리하여 정기적으로 실시하며, ‘외관점검 결과 육안 점검의 한계로 인해 보다 정밀한 점검이 필요하다고 판단되는’ 사방댐에 대해서는 각종 장비 등을 사용하여 정밀하게 측정·조사·분석하여 점검등급을 판정하는 정밀점검을 실시하도록 되어있다. 또한, 준

공 후 20년 이상 기간이 지난 사방댐 중에서 정밀점검을 실시한 이력이 전혀 없는 사방댐에 대해서는 외관점검의 등급에 관계없이 정밀점검을 실시하도록 규정함으로써, 노후 사방댐에 대한 점검의 중요성도 강조하고 있다.

사방댐 점검, 노후화 및 유지관리와 관련된 연구는 2007년 사방사업법 개정에 따른 관련 법령의 근거가 갖춰진 이후에 본격적으로 실시되어 왔다. 초기에는 주로 육안점검을 통해서 사방댐 피해를 유형화하는 연구가 주를 이루었다. Lee et al.(2012)은 국유림 내 사방댐의 피해 실태를 부위별로 분석하여 육안점검의 한계점을 지적하고, 점검 지침 마련의 필요성을 강조하였다. 또한, Lee et al.(2013)은 사방댐의 부위별 피해 상황과 환경유역인자와의 관계성을 분석한 바 있다. Ko(2014)는 1986~2007년 동안 경남지역에 시공된 사방댐의 피해 상황을 조사하고, 그 유형을 분석하였다. 더불어, Lee(2015), Kim(2016), Kim(2019) 등은 콘크리트사방댐에 대한 부위별 피해를 유형화하였으며, 이를 바탕으로 향후 사방댐의 효과적인 유지관리 방안을 제시하였다.

한편, 사방댐 노후화와 관련된 연구로서 Lee et al.(2014)은 외관상태평가를 이용하여 콘크리트 사방댐의 노후 특성을 분석하였으며, Lee(2017)는 경북지역 사방댐에 대한 외관상태평가를 통하여 준공 후 경과연수와 노후화의 상관관계를 분석하였다. 또한, Lee et al.(2021)은 강원지역 콘크리트사방댐에 대한 피해 유형 분류와 함께 산지유역의 환경특성과 사방댐 노후화의 관계성을 분석하였으며, Lee and Woo(2021)은 사방댐 유지관리 의사결정에 있어서 외관상태평가의 활용성을 종합적으로 검토하였다.

상기한 선행연구는 주로 사방댐 외관에 대한 육안점검과 보조적인 비파괴검사의 결과를 현장에서 수집 및 분석하여 수행된 것으로, 이를 근거로 「사방시설의 유지관리 지침」의 주요한 내용이 마련될 수 있었다. 하지만, 이전의 육안점검 혹은 외관점검과는 그 내용과 체계가 다른 관계로, 노후 사방댐에 대한 정밀점검의 결과를 정량적으로 분석한 사례는 부족한 실정이다.

이에 이 연구는 준공 후 20년 이상 지난 노후 콘크리트 사방댐에 대해서 수행된 정밀점검의 결과를 정량적으로 분석하여 현행 정밀점검 운용에서의 개선사항을 도출하고, 노후 콘크리트사방댐의 관리 방안을 수립하는데 필요한 기초자료를 제공하기 위하여 수행되었다. 먼저 노후 콘크리트사방댐 정밀점검의 내용으로서 외관 결함사항 점검과 콘크리트 압축강도시험의 결과값을 정량적으로 제시하고, 그 상관관계를 분석하였다. 또한, 준공 후 경과연수에 따른 각 점검·시험 결과의 변화를 분석하여, 시간 경과에 따른 노후 콘크리트사방댐의 특성 변화를 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

경북지역의 사유림에 시공된 콘크리트사방댐 중에서 준공 후 20년 이상 경과된 54개소를 대상으로 하였다. 이들의 준공 후 경과연수는 정밀점검을 실시한 시점을 기준으로 21~33년에 걸쳐 있었으며, 평균은 24.8년이었다. Table 1은 준공 후 경과연수별 사방댐의 개소수와 설치지점을 행정구역으로 구분한 것이다.

2. 현장조사 내용 - 콘크리트사방댐 정밀점검의 내용

1) 외관 결함사항 점검

외관 결함사항 점검은 본댐, 측벽, 물받이 또는 물방석 등 세 부위에 대한 각각의 결함사항을 항목별로 점검하고 점수를 부여한 후 합산하여 최종 종합점수를 산정하는 방식으로 진행된다. 본댐은 총점 70점을 기준으로 다음의 5개 결함사항에 대해서 점검하게 되는데, 이것은 ① 파손, 변위, 변형, ② 균열, 누수, ③ 기초부 세굴, ④ (콘크리트사방댐) 박리, 박락, 백화, 마모, (전석불임사방댐) 이격, 유실, 풍화 및 채움콘크리트 열화, ⑤ 수문시설 상태 등 기타 사항이다. 측벽은 총점 15점을 기준으로 ① 파손, 변위,

변형, ② 균열, 누수, ③ 기초부 세굴, 물받이 및 수직벽(앞댐)과의 유탈, 재료의 상태 등 기타사항에 대하여 점검하며, 물받이 또는 물방석은 역시 총점 15점을 기준으로 ① 파손, 변위, 변형, ② 기초부 세굴, 수직벽(앞댐)과의 유탈, ③ 균열, 재료의 상태 등 기타사항 등에 대하여 점검한다.



Figure 1. The spatial distribution map of erosion control dams.

Table 1. The elapsed year after construction of erosion control dams in administrative regions.

Administrative region	Total	Elapsed year after construction (Year of construction)													
		21 ('98)	22 ('97)	23 ('96)	24 ('95)	25 ('94)	26 ('93)	27 ('92)	28 ('91)	29 ('90)	30 ('89)	31 ('88)	32 ('87)	33 ('86)	
Total	54	7	15	4	4	6	1	5	4	2	1	1	2	2	
Andong	5	1	1			2								1	
Bonghwa	1		1												
Cheongdo	2								2						
Cheongsong	4	2	1		1										
Chilgok	2		1			1									
Gimcheon	3	1	2												
Gumi	1		1												
Gyeongju	12		1	2	1	1	1	3	1		1		1		
Gyeongsan	3	1	1	1											
Mungyeong	2	1	1												
Pohang	5							1	1	1			1	1	
Sangju	2			1		1									
Uiseong	3	1	1					1							
Ulsan	1				1										
Yeongcheon	3		2							1					
Yeongdeok	1		1												
Yeongju	1		1												
Yeongyang	3				1	1						1			

한편, 결함사항 점검에서는 조사자 보정점수로서 ± 10 점을 부여할 수 있어서 총점 합계는 0~110점이 되며, 점수가 높을수록 결함 정도 혹은 파손 상태가 심하여 조치가 필요한 상태를 가리킨다.

2) 콘크리트 압축강도시험


콘크리트사방댐 정밀점검에서는 외관 결함사항 점검 결과인 종합점수에 근거하여 최종등급을 5단계(A-E)를 부여하게 되고, 콘크리트 압축강도시험 혹은 균열깊이시험 등의 비파괴 검사를 통하여 각각의 기준치(압축강도 21 MPa 이상, 균열깊이 부재 두께의 50% 미만)를 통과하지 못하는 경우에는 최종등급을 하향조정할 수 있도록 되어 있다.

이 연구에서는 슈미트 해머(Schmidt hammer)에 의한 반발경도를 측정하여 콘크리트 압축강도를 추정하는 방법을 적용하였으며, 연구에 활용한 장비의 제원은 Table 2와 같다. 반발경도는 본댐의 단면적을 Figure 2와 같이 4등분하여 각 부분별(Span A~D)로 현장 상황에 따라 댐둑마루, 대수면, 반수면 중 한 곳에서 타격횟수를 20회 이상으로 하여 부분별 값을 측정하였으며, 최종적으로 각 부분별 측정값의 평균값을 해당 사방댐의 반발경도로 산정하였다. 산정된 사방댐 반발경도는 한국시설안전공단(2011)에 의거하여 타격방향, 재령, 습윤상태 등에 의해 보정되었으며, 보정된 반발경도를 아래의 일본건축학회 추정식(식 1)에 적용하여 콘크리트 압축강도를 도출하였다.

$$f_c = (7.3R_o + 100) \times 0.098 \quad (1)$$

여기서, f_c = 콘크리트 압축강도(MPa), R_o = 보정 반발경도이다.

Table 2. The specification of the Schmidt hammer used in the current study.

Model	R-7500 (NR type)
Test material	Normal concrete
Hammering energy	0.225 kgf m
Measurement range	100-600 kg cm ²
Standard R value	80 \pm 2
Weight	1.9 kg
Picture	

3) 종합등급 산출

콘크리트사방댐 정밀점검의 종합등급은 외관 결함사항 점검에 따른 합산 종합점수에 따라 Table 3과 같이 5개 등급으로 판정된다. 종합점수 30점 미만은 전반적으로 양호하며 필요한 경우에 보수가 필요한 상태로서 A등급으로 판정받으며, 30점 이상부터 70점 미만까지의 경우는 일부 결함이 발생하였으나 시설물 기능 발휘에는 문제가 없으며 일부 보수가 필요한 상태로서 B등급으로 판정받게 된다. 반면에 70점 이상의 경우에는 중대한 결함이 발생하여 추가적인 조치가 필요한 상태이며, 조사자 판단에 따른 추가조치 내용에 따라 C, D, E등급으로 판정받게 된다. 한편, 콘크리트 압축강도시험 부분에서 서술하였듯이 비파괴 검사의 기준치에 미달될 경우에는 종합등급 결과는 (하향) 조정이 가능하도록 되어 있다.

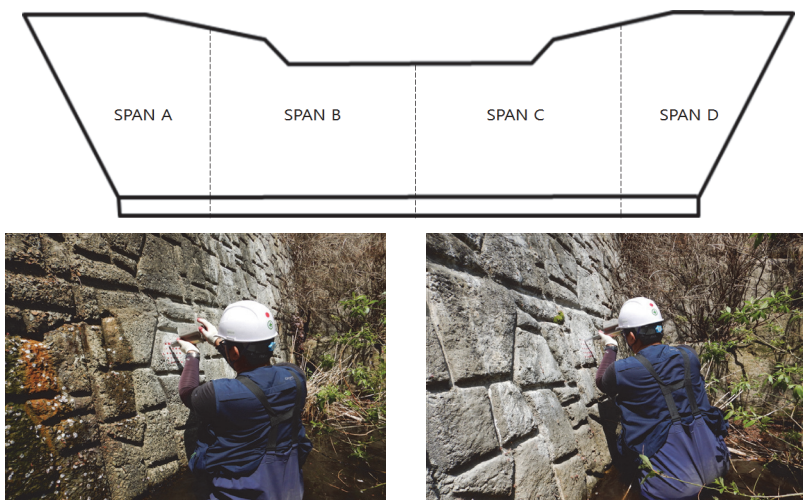


Figure 2. The conceptual diagram and picture of compress strength test on concrete erosion control dam.

Table 3. Status grade by detailed inspection on concrete erosion control dam (from 「Guidelines for the Maintenance of the Erosion Control Facility」).

Grade	Total score	Status of concrete erosion control dam
A (Good, repair if necessary)	< 30	Good condition without any problems such as deformation or damage
B (Repair)	30 ≤, < 70	Condition in which some defects have occurred, but there is no hindrance to the functioning of the facility, and some repairs are required
C (Reinforcement or improvement)	70 ≤	Condition in which urgent reinforcement or improvement is required due to a decrease in the function of the facility and an abnormality in safety management by the occurrence of a serious defect
D (Safety diagnosis)	70 ≤	Condition in which unsafety is expected due to a serious defect, but additional safety diagnosis is required because it is insufficient to suggest countermeasures at the level of detailed inspection
E (Additional construction or re/replacement construction)	70 ≤	Condition in which additional construction or re/replacement construction is required when it is impossible to supplement or improve construction, or it is economically inefficient, even when serious defects are found

3. 분석 방법

이 연구에서는 콘크리트사방댐의 외관 결함사항 점검 결과와 압축강도와의 상관성을 분석하고, 준공 경과연수에 따른 정밀점검 등급 및 압축강도의 변화를 파악하고자 하였다. 이를 위하여 현장조사의 결과를 기술통계로 정리하고 외관 결함사항 점검 종합점수와 압축강도 간의 선형적 상관관계(Pearson correlation coefficient)를 분석하였으며, 종합등급별 압축강도의 차이는 T-검정을 통하여 규명하였다. 이러한 분석의 목적은 현행 사방댐 정밀점검이 그 취지와 목적에 맞게 현장에서 운용되고 있는가를 파악하고자 하는 것이며, 특히 육안에 의한 외관 결함사항 점검과 콘크리트 압축강도시험이 상호보완적으로 운용되고 있는지를 파악하고자 하였다. 또한, 준공 후 경과연수에 따른 노후 콘크리트사방댐의 특성 변화를 파악하기 위하여, 시간 경과와 사방댐의 노후 특성인자 간의 선형 회귀 분석을 실시하였다. 이를 통하여 도출된 회귀식은 경과연수에 따른 보수 혹은 정밀점검 후속조치가 필요한 노후 사방댐 관련 정보를 정량적으로 제공하여, 향후 노후 사방댐 관리방안을 마련하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단되었다. 상기한 통계분석은 Microsoft 365 EXCEL 및 R 4.1.1을 활용하여 실시되었다.

결과 및 고찰

1. 종합점수 조사 결과 분석

노후 콘크리트사방댐 54개소에 대한 외관 결함사항 점검 결과, 종합점수는 평균 30.5점, 표준편차는 24.6점이었으며, 최소값과 최대값은 각각 0점과 83점이었다(Table 4). 종합점수의 평균값은 종합등급에서 B등급에 해당하는 것이었다. 종합점수를 구성하는 사방댐 부위별 점수를 평균값 위주로 살펴보면, 본댐은 24.0점, 측벽은 2.9점, 물받이는 4.7점이었으며, 조사자에 의한 보정점수는 -1.2점으로 종합점수에서의 감소 즉 종합등급의 상향에 기여하는 것으로 조사되었다.

Table 5는 콘크리트사방댐 각 부위별 점수, 보정점수 및 종합점수 간의 상관분석을 실시한 결과이다. 항목간 모든 관계에서 통계적으로 유의한 양의 상관관계($p < 0.01$)가 나타났다. 종합점수는 본댐, 측벽, 물받이 및 보정점수의 합으로 산정되므로 모든 항목 간에 0.6 이상의 높은 상관성을 나타내었으며, 특히 종합점수에서의 높은 비중(100점 중 70점)을 차지하고 있는 본댐 점수는 종합점수와 매우 강한 상관관계가 나타났다($R=0.9220$). 반면에 본댐, 측벽 및 물받이 등 콘크리트사방댐의 부위 간에는 0.6 미만의

Table 4. Summary of scores by exterior defect investigations.

Item	Score				
	Main dam	Side wall	Apron	Correction value by investigator	Total
Mean	24.0	2.9	4.7	-1.2	30.5
S.D.	14.6	4.1	5.0	6.7	24.6
Min.	3	0	0	-10	0
Max.	60	15	15	10	83

Table 5. Results of correlation analyses among items of exterior defect investigations.

Items	Main dam	Side wall	Apron	Correction value	Total score
Main dam	1				
Side wall	0.5987***	1			
Apron	0.4462***	0.3503***	1		
Correction value	0.5070***	0.4286**	0.4865***	1	
Total score	0.9220***	0.7086***	0.6573***	0.7421***	1

P<0.01, *P<0.001,

상대적으로 약한 상관관계가 나타났으며, 보정점수 역시 콘크리트사방댐 각 부위별 점수와는 상관성이 높지 않게 나타났다. 이를 통하여 각 부위별 평가 및 보정점수 판정이 비교적 독립적으로 수행되었음을 간접적으로 추정해 볼 수 있었다.

2. 종합등급 판정 결과 분석

외관 결함사항 점검에서의 종합점수를 근거로 종합등급을 A(종합점수 30점 미만), B(30점~70점 미만), C(70점 이상)의 세 개의 등급으로 구분하였다(Table 6). 실제 정밀점검에서는 종합점수가 70점 이상인 경우 콘크리트사방댐의 상태 및 조치내용에 따라 C, D, E등급으로 세분화하여 판정하지만, 이 연구에서는 종합점수만을 반영하여 C, D, E등급을 묶어서 한 개의 등급(C등급)으로 간주하였다. 그 결과, A등급은 36개소로 전체의 66.7%를 차지하며 가장 높은 비율로 나타났으며, B와 C등급 각 9개소씩으로 판정되었다. 그래서 전체 조사 대상 사방댐 중 33.4%에 해당하는 18개소는 보수 혹은 보강·개량·안전진단·추가시공·재시공 등의 후속조치가 필요한 것으로 조사되었다. 또한, A, B, C등급의 종합점수 평균값은 각각 15.53점, 44.22점,

76.56점으로 나타났으며, 각 등급의 표준편차는 9.24점, 7.84점, 3.02점으로 A등급에서 C등급으로 갈수록 작은 값을 나타내었다.

한편, 조사자 보정점수로 인해서 종합등급의 변경이 있었던 것은 총 15개소로 전체의 27.8%로 나타났으며, 이를 통하여 종합등급 판정에 있어서 조사자 보정점수가 상대적으로 중요한 것으로 나타났다. 세부적으로는 상대적으로 점수 범위가 넓은 B등급(30~70점 미만)에서 A등급 혹은 C등급으로의 변경이 14개소로 대부분을 차지하고 있었다. 그러므로 현장 외관 결함사항 점검 시 조사자가 보정점수를 부여하는 기준과 지표를 표준화하여, 그 결과의 객관성과 통일성이 유지되도록 하는 것이 중요할 것으로 사료되었다.

3. 콘크리트 압축강도시험 결과 및 종합등급·점수와 의 상관 관계 분석

Table 7은 콘크리트 압축강도시험의 결과를 정리한 표이다. 전체 54개소의 콘크리트사방댐에 대한 압축강도 평균값은 22.00 MPa, 표준편차는 3.90 MPa였으며, 그 범위는 13.8~38.9 MPa였다. 종합등급별로 압축강도의 평균값

Table 6. Results of grade rating based on total scores by exterior defect investigations.

Grade	No. (Ratio)	Total score by exterior defect investigations				Grade change by correction value
		Mean	S.D.	Min.	Max.	
A	36 (66.6%)	15.53	9.24	0	29	B → A: 8 dams
B	9 (16.7%)	44.22	7.84	31	57	A → B: 1 dam
C	9 (16.7%)	76.56	3.02	71	83	B → C: 6 dams

Table 7. Results of compressive strength tests.

Grade	No. (Ratio)	Compressive strength (MPa)				No. of dams below the standard, 21 MPa (Ratio)
		Mean	S.D.	Min.	Max.	
Total	54 (100%)	22.00	3.90	13.8	38.9	19 (35.2%)
A	36 (66.6%)	23.01	3.88	16.2	38.9	8 (22.2%)
B	9 (16.7%)	19.44	3.77	13.8	25.0	6 (66.7%)
C	9 (16.7%)	20.54	2.05	17.0	22.8	5 (55.6%)

Table 8. Result of T-test on compressive strength between A grade and B/C grade.

Group	N	Mean	S.D.	t
A	36	23.01	3.93	2.819**
B and C	18	19.99	3.17	

**P<0.01

을 비교하면, A등급이 23.01 MPa로서 가장 높은 값을 나타내었고, C등급(20.54 MPa)와 B등급(19.44 MPa)이 그 뒤를 이었다.

콘크리트 압축강도 현장 측정값을 기준치(21 MPa)와 비교한 결과, 전체 54개소 중 35.2%에 달하는 19개소가 기준치에 미달하는 것으로 분석되었다. 기준치에 미달하는 사방댐을 종합등급별로 나누어서 보면, A등급이 8개소로 가장 많았고 그 뒤를 B등급(6개소), C등급(5개소)의 순으로 이었다. 하지만, 등급 내 사방댐 개수에 대한 비율로 보면 B등급이 66.7%로 가장 높았으며, C등급은 55.6%, A등급이 22.2%로 가장 작은 비율로 나타났다. 외관 결함사항 점검에서는 큰 이상이 없이 양호한 A등급에서도 압축강도 기준을 만족하지 못하는 사방댐의 비율이 20% 이상으로 나타난 점을 통하여, 콘크리트 압축강도시험이 외관 결함사항 점검의 한계점을 일정 부분 보완해 줄 수 있을 것으로 판단되었다. 한편으로는 「사방시설의 유지관리 지침」의 콘크리트 압축강도시험 결과에 따라 조사자가 등급을 (하향) 조정할 수 있다는 규정에도 불구하고, 실제 현장에서는 등급 조정 사례가 발생하지 않아서 관련 내용의 수정이 필요하다는 생각도 들었다.

한편, 등급별 압축강도의 차이를 분석하기 위해서, 상태가 양호한 A등급과 보수 혹은 후속조치가 필요한 B, C등급 두 그룹으로 나누어 압축강도 평균값에 대한 T-검정을 실시하였다. 우선 F-검정을 실시하여 두 그룹이 등분산(p=0.1747)이라는 것을 알 수 있었으며, 이를 바탕으로 등분산 가정의 T-검정을 실시하였다. 그 결과, A등급의 압축강도 평균값(23.01 MPa)과 B, C등급의 평균값(19.99MPa)은 통계적으로 유의한 차이(p<0.01)가 있는 것으로 분석되었다(Table 8).

마지막으로 콘크리트사방댐의 압축강도와 종합점수의 피어슨 상관계수를 구한 결과 그 값은 -0.3710(p<0.01)으로 계산되어, 약한 음의 상관관계를 나타내었다. Figure 3에 나타낸 압축강도와 종합점수의 산포도에 확인할 수 있듯이, 압축강도와 종합점수 간에는 뚜렷한 상관관계가 나타나지 않았다.

종합적으로 콘크리트 압축강도와 종합점수와의 직접적인 상관관계를 규명하기는 힘들었으나, 종합등급 간에는 압축강도의 통계적으로 유의한 차이가 있는 것을 알 수 있었다. 이를 압축강도 기준치에 미달하는 A등급 사방댐

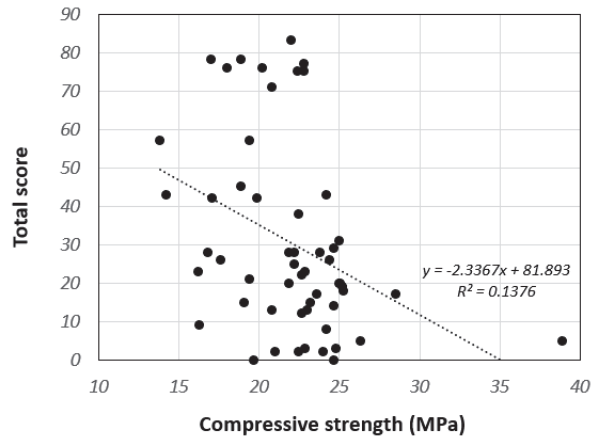


Figure 3. The scatter plot of compressive strength and total score.

사례와 함께 고려하면, 콘크리트사방댐 정밀점검에서 콘크리트 압축강도시험 결과에 의해 종합등급을 하향 조정하는 현재의 방식이 비교적 합리적이라는 것을 간접적으로 확인해 볼 수 있었다.

4. 준공 후 경과연수에 따른 콘크리트사방댐 특성 변화 분석

1) 종합점수 및 압축강도 분석

Figure 4와 Figure 5는 준공 후 경과연수에 따른 종합점수와 압축강도의 변화를 각각 나타낸 것이다. 준공 후 경과연수와 종합점수는 상관계수가 0.4367(p<0.01)로 양의 상관관계를 나타내었고, 압축강도의 경우에는 경과연수

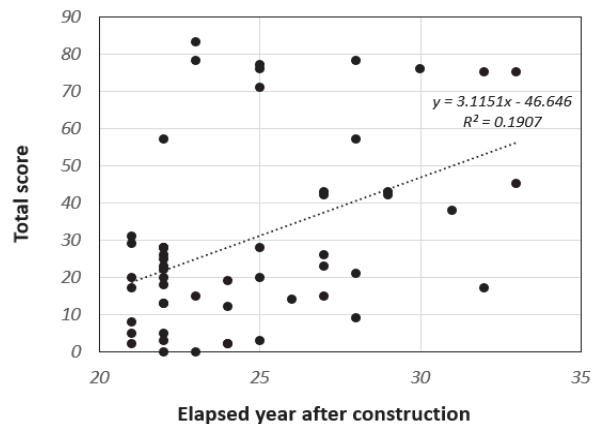


Figure 4. The change of total score by elapsed year after construction.

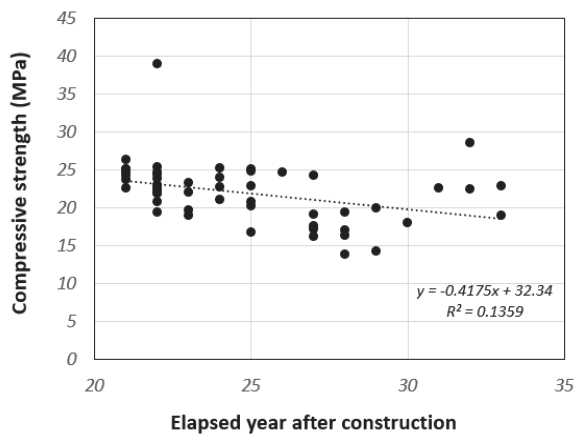


Figure 5. The change of compressive strength by elapsed year after construction.

와의 상관계수가 $-0.3687(p < 0.01)$ 로 분석되어 음의 상관관계를 나타내었다. 하지만, 선형 회귀분석 결과, 각 그래프에서 알 수 있듯이 준공 후 경과연수에 따른 종합점수와 압축강도의 변화는 뚜렷한 선형적 경향성을 나타내지 않았다($R^2 < 0.2$).

Lee(2015)는 강원도 사유림 내 콘크리트사방댐에 대하여 외관상태평가와 콘크리트 압축강도시험을 실시한 결과, 준공 후 경과연수에 따라서 외관상태는 불량해지고, 압축강도는 감소하는 경향을 확인하였다. 비록 평가 및 분석 방법의 차이로 직접적인 정량 비교는 힘들지만, 본 연구의 결과는 Lee(2015)의 결과와 유사한 경향성을 보인다고 할 수 있다. 다만 실무적으로 활용할 수 있는 적합도가 높은 회귀식을 도출할 수는 없었다. 준공 후 경과연수에 따른 종합점수와 압축강도의 회귀식은 콘크리트사방댐 노후 상태를 파악하고 정밀점검 대상 기준 경과연수를 결정하는데 유용하게 활용될 수 있으므로, 이와 관련된 후속 연구가 필요할 것으로 생각되었다.

2) 보수·후속조치 필요 및 압축강도 기준치 미달 사방댐의 누적 비율 분석

Figure 6은 해당 준공 후 경과연수까지를 포함하는 사방댐 전체 개소수 대비 보수·후속조치가 필요한 사방댐 개소수의 누적 비율을 나타낸 그래프이다. 준공 후 경과연수 25년을 예로 들면, 경과연수 21~25년에 해당하는 36개소 사방댐 중 종합점수 30점 이상인 것(B등급 및 C등급 합산)은 7개소로 그 누적 비율은 19.4%이며, 70점 이상인 것(C등급)은 5개소로 누적 비율은 13.9%이 된다. 해당 그래프에서 종합점수가 30점 이상인 경우와 70점 이상인 경우 모두 준공 후 경과연수와 강한 양의 상관관계를 나타내었으며, 각각은 식 2와 3의 선형식으로 표현할 수 있었다.

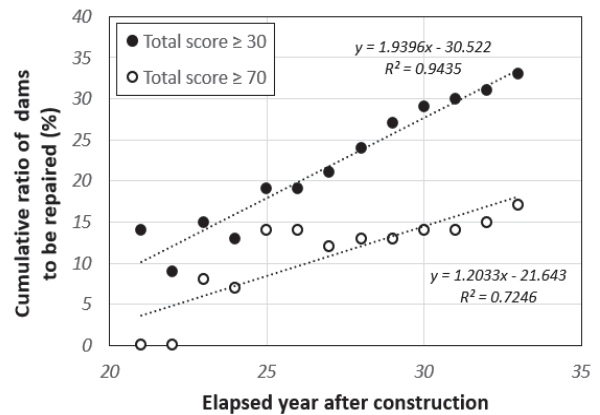


Figure 6. The change of cumulative ratio of dams to be repaired by elapsed year after construction.

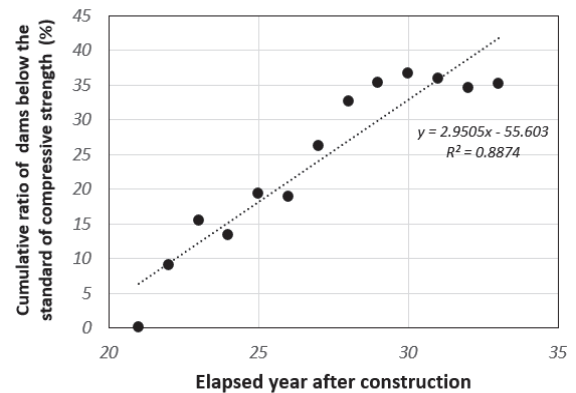


Figure 7. The change of cumulative ratio of dams below the standard of compressive strength by elapsed year after construction.

$$y = 1.9396x - 30.522 \quad (R^2=0.9435) \quad (2)$$

$$y = 1.2033x - 21.643 \quad (R^2=0.7246) \quad (3)$$

여기서, y = 보수·후속조치가 필요한 사방댐의 누적 비율(%), x = 준공 후 경과연수이다.

Figure 7은 해당 준공 후 경과연수까지를 포함하는 사방댐 전체 개소수 대비 콘크리트 압축강도 기준치에 미달한 사방댐 개소수의 누적 비율을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 나타나는 것처럼 압축강도 기준치 미달 사방댐의 누적 비율은 경과연수와 강한 양의 상관관계를 나타내었으며, 아래의 식 4의 선형식으로 나타낼 수 있었다.

$$y = 2.9505x - 55.603 \quad (R^2=0.8874) \quad (4)$$

여기서, y = 콘크리트 압축강도 기준치 미달 사방댐의 누적 비율(%), x = 준공 후 경과연수이다.

한편, Figure 7에서 경과연수가 30년 이후로는 누적 비율이 감소 혹은 정체되는 것으로 나타나는데, 이것은

Figure 5에서 확인할 수 있듯이 경과연수 30년 이후의 사방댐의 콘크리트 압축강도가 상대적으로 높게 측정된 것이 반영된 결과이다. 그래서 실제로 측정 자료에 근거하면 선형식보다는 로그(log)식($y = 79.708\ln(x) - 237.87$ ($R^2=0.9129$))의 적합도가 더 높게 분석되었다. 하지만, 표본의 크기가 더 크고 경과연수별 표본 개수가 균등하게 되면 적합도가 더 높을 것으로 기대되는 선형식을 최종 결과로 선택하였다.

식 2-4의 추정 선형식은 경과연수별로 전체 정밀점검 개소수에 대한 보수·후속조치가 필요한 사방댐과 압축강도 기준치가 미달되는 사방댐의 비율을 추정하는데 활용할 수 있다. 이를 통하여 향후 노후 콘크리트사방댐에 대한 보수 및 후속조치 관련 예산 산정 계획을 보다 현실적으로 마련할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 이 연구에서 활용한 표본 자료가 경북 지역에 한정되고 그 개수도 많지 않았으며 또한 경과연수별 표본의 포집 비율이 동일하지 않은 관계로, 도출된 선형식의 활용성은 제한적일 수밖에 없다고 생각한다. 하지만, 현재 정밀점검 대상 노후 콘크리트사방댐의 개소수가 빠르게 증가하는 한편 이에 대한 현장조사 결과가 부족한 상황에서, 정책 수립의 기초 자료로서의 가치는 충분하다고 판단되었다.

결론

이 연구는 준공 후 20년 이상 경과된 노후 콘크리트사방댐에 대한 정밀점검 결과를 분석하여, 현행 정밀점검의 개선사항을 도출하고 향후 노후 콘크리트사방댐의 관리 방안을 수립하는데 필요한 기초자료를 제공하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 경상북도 사유림에 설치된 54개 노후 콘크리트 사방댐에 대한 외관 결함사항 점검 및 콘크리트 압축강도시험을 실시하고 그 결과를 통계적 방법을 활용하여 분석하였다.

그 결과, 외관 결함사항 점검에서 조사자 보정점수로 인하여 종합등급이 변경된 사례가 15개소로 분석되어 그 중요성을 파악할 수 있었으며, 외관 결함사항 점검 결과 상태가 양호한 것으로 판단된 A등급에서도 콘크리트 압축강도시험에 미달하는 8개소가 포함된 것을 확인할 수 있었다. 또한, 종합점수와 콘크리트 압축강도의 뚜렷한 상관관계를 확인할 수 없었으며, 준공 경과연수에 따른 사방댐 누적 비율의 변화를 선형식으로 도출하여 향후 노후 사방댐 관리방안 수립 시 활용할 수 있도록 하였다.

이상의 연구결과를 종합해보면 현재 외관 결함사항 점검 및 콘크리트 압축강도시험에 기반한 노후 콘크리트사방댐 정밀점검은, 사방댐 외관 및 내부적 결함을 파악하여 보수 혹은 후속조치가 필요한 사방댐을 판정하는데 효용

성이 있는 것으로 판단되었다. 다만 조사자 보정점수에 의한 종합등급의 변경 사례가 다수 존재하였고 압축강도 기준치 미달에 따라서도 종합등급이 하향될 수 있는 여지가 있어서, 조사자에 의한 자의적인 판단을 억제할 수 있도록 관련 기준과 지표의 표준화가 필요할 것으로 생각되었다. 또한, 콘크리트 압축강도시험 결과에 따라 조사자가 종합등급을 조정할 수 있음에도 불구하고 현장에서는 그러한 사례가 발생하지 않았던 점을 감안하여, 「사방시설의 유지관리 지침」의 관련 내용에 대한 수정의 필요성도 대두되었다. 외관 결함사항 점검을 보완하기 위한 콘크리트 압축강도시험의 목적과 취지를 고려하면, 조사자의 자율적 판단보다는 압축강도 결과값에 따른 등급 조정의 명확한 기준이 필요할 것으로 생각된다.

한편, 사방댐의 설치 개수가 증가할수록 노후 사방댐에 대한 관리의 중요성을 더욱 커질 수 밖에 없다. 현장 조사 결과에 의해 도출된 준공 후 경과연수에 따른 노후 콘크리트사방댐의 특성 변화 추정식은 노후 사방댐 관련 정책 수립 및 예산 책정에 실효적인 도움을 줄 수 있다. 그러므로 이러한 사방댐 노후 특성 추정식을 새롭게 도출하고 또한 기도출된 추정식의 정확도를 향상시킬 수 있도록, 현장 점검결과 자료에 대한 체계적이고 지속적인 수집과 신속한 분석이 뒤따라야 할 것으로 생각되었다.

감사의 글

이 연구논문은 김정식의 2020년 대구대학교 석사학위 논문 “정밀점검을 통한 경북지역 노후 콘크리트사방댐의 결함 특성 분석”의 내용을 바탕으로 작성되었습니다.

References

- Kim, J. 2016. Concrete deterioration type analysis for erosion control of dam and its facilities in Yeongwol-gun, Gangwon-do. (M.S. Dissertation). Chuncheon. Kangwon National University.
- Kim, B.K. 2019. A study on the damage types analysis and improvement plan of concrete dams in private forests in Kangwon-do. (M.S. Dissertation). Chuncheon. Kangwon National University.
- Ko, Y. 2014. Studies on the damage types of erosion control dam in Gyeongsangnam-do area. (M.S. Dissertation). Jinju. Gyeongsang National University.
- Korea Association of Soil and Water. 2020. Soil Erosion Control Techniques I. Making Books. Seoul. pp. 462.
- Korea Forest Service. 2014. The Revised Soil Erosion Control Technical Manual. Publication No. 11-1400000-006673-14.

- pp. 432.
- Lee, J. 2015. Analysis of condition assessment and damage patterns of concrete check dam. (Ph.D. Dissertation). Chuncheon. Kangwon National University.
- Lee, J., Chun, K., Lee, S., Park, J., Kim, B., Kim, S. and Seo, J.I. 2013. A study on the safety inspection of erosion control facilities (I): In case of check dams located in the Gangwon region. *Journal of Forest Science* 29(3): 226-236.
- Lee, J., Kim, S., Lee, K., Bae, H. and Chun, K. 2021. Analysis of factors affecting damage of the concrete check dams based on the exterior condition assessment. *Crisisonomy* 17(8): 59-72.
- Lee, K. 2017. A study on the determination of maintenance priority order among debris barriers on the basis of exterior condition evaluation. (Ph.D. Dissertation). Gyeongsan. Yeungnam University.
- Lee, K. and Woo, C. 2021. Study on the applicability of exterior condition assessment to evaluate the physical vulnerability of check dams. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 21(6): 71-84.
- Lee, S., Jung, C., Kim, J., Jung, H. and Kim, M. 2012. A study on the management guidelines of erosion control facilities in national forests (I) - The inspection results of erosion control facilities form 2009 to 2011 -. *Journal of Korean Forest Society* 101(2): 251-258.
- Lee, H., Park, K., Ewane, E.B., Kwon, T., Oh, S. and Lee, K. 2014. Analysis of deterioration features of concrete debris barriers using the exterior condition assessment. *Proceedings of the 2014 meeting of the Korean Forest Society, Jeju, Republic of Korea*, pp. 125.

Manuscript Received : January 20, 2022

First Revision : March 1, 2022

Second Revision : March 8, 2022

Accepted : March 10, 2022

Appendix. Part of the detailed inspection report for concrete erosion control dam (from 「Guidelines for the Maintenance of the Erosion Control Facility」).

콘크리트 사방댐 정밀점검 조사서

□ 일반사항

종 류 :				형식 :				점검일시 :			
사방댐관리번호 :				점검자 :							
국가지점번호 :											
소재지						시설제원					
도	시·군	읍·면	리·동	지번 (속칭)	시설 년도	상장 (m)	하장 (m)	높이(m)		천단폭	사공비 (천원)
								전고	유효고		
산사태정보시스템 위치정보 (WGS84)						속벽					
북위		동경		길이		높이					
현지계측 위치정보 (WGS84)						물발이					
북위		동경		기준		세도					

□ 정밀점검 평가표

항목	검사항목	평가기준 및 배점			평가점수	
본 댐 (70)	1. 파손, 변위, 변형 (25)	5% 미만	5~15% 미만	15% 이상		
		0	20	25		
	2. 균열, 누수 (20)	균열 5% 미만	균열 5~15% 미만	균열 15% 이상		
		가로균열이 덮길이의 10% 미만	가로균열이 덮길이의 10~30% 미만	가로균열이 덮길이의 30% 이상		
		세로균열이 유효고의 10% 미만	세로균열이 유효고의 10~30% 미만	세로균열이 유효고의 30% 이상		
		누수 없음	누수흔적 관찰	누수 관찰		
			0	15	20	
	3. 기초부 세굴, 물발이외의 유발 (15)	양호 (보수 및 보강 불필요)	보통 (경미결함 보수필요)	불량 (중대결함 보강필요)		
		0	10	15		
	4. 딱1	콘크리트: 박리, 박락, 백화, 마모 (5)	5% 미만	5~20% 미만	20% 이상	
0			3	5		
전석블림: 이격, 유실, 풍화 및 재골콘크리트 덮화 (5)		5% 미만	5~20% 미만	20% 이상		
		0	3	5		
5. 수문시설 상태 등 기타사항		양호 (보수 및 보강 불필요)	보통 (경미결함 보수필요)	불량 (중대결함 보강필요)		
		0	3	5		
속벽 (15)	1. 파손, 변위, 변형 (7)	5% 미만	5~20% 미만	20% 이상		
		0	5	7		
	2. 균열, 누수 (5)	균열 5% 미만	균열 5~20% 미만	균열 20% 이상		
		누수 없음	누수흔적 관찰	누수 관찰		
		0	3	5		
	3. 기초부 세굴, 물발이 및 수직벽 (앞면)과의 유발, 재료의 상태 등 기타사항 (3)		양호 (보수 및 보강 불필요)	보통 (경미결함 보수필요)	불량 (중대결함 보강필요)	
			0	2	3	