사방댐 유지관리 의사결정을 위한 외관상태평가 적용성 연구

Study on the Applicability of the Exterior Condition Assessment to Evaluate The Physical Vulnerability of Check Dams

이기환* · 우충식**

Lee, Kihwan*, and Woo, Choongsik**

Abstract

Check dams are a typical structural approach used in watershed disaster management systems. Currently, approximately 12,000 check dams have been estimated to be constructed on mountain streams in Korea. More than 90% of these have been constructed in the last 20 years. This rapid increase over a short period of time has attracted attention to the necessity of maintenance strategies for check dams. The purpose of this study is to examine the applicability of the exterior condition assessment to evaluate the degree of deterioration in check dams. We classify the typical damage types of check dams and describe its key characteristics. Moreover, we apply a modified version of the condition assessment for large dams to meet the characteristics of check dams.

Key words : Debris Flow, Non-permeable Check Dam, Management Decision-making, Condition Assessment

요 지

사방댐은 산림유역의 재해재난관리 시스템에서 중추적 역할을 하는 구조물적 대책이다. 현재, 우리나라의 사방댐 수는 약 12,000여개로 추정되며, 이들 중 약 90.0%가 지난 20년간 집약적으로 건설되었다. 이러한 재고 현황의 급격한 증가는 사방댐 유지관리 전략의 필요성을 증가시켰다. 이 연구는 사방댐 유지관리를 위한 의사결정 수단으로서 시설물 안전진단 기술의 하나인 외관상태평가의 적용성을 검토하였다. 이를 위해 사방댐의 대표 열화유형을 분류하고 그 특성을 분석하였으며, 또한 댐시설물의 평가체계를 사방댐의 구조적 특징에 맞게 조정하여 연구대상에 적용하였다.

핵심용어 : 토석류, 불투과형 사방댐, 유지관리 의사결정, 상태평가

1. 서 론

산지 계류와 하천(이하 산지계류)은 산지사면과 범람원에 서 생산된 토사의 주요 이동통로이다. 이러한 산림유역의 유사수송은 때로 토석류와 대규모 하천 수송을 유발하여 하류 선상지와 범람원의 개발지역에 큰 피해를 주고는 한다(Rickenmann and Koshni, 2010). 특히, 우리나라와 같은 산악지형의 국가에서는 홍수 및 토사재해에 취약한 하천 상류의 산간지역까지 주거지 및 농경지의 개발이 이루어지고 있어 태풍과 집중호우로 촉발된 대규모 토사유출로 인한

생활권의 피해가 지속해서 발생하는 추세이다. 따라서 사방 기술자들은 지난 수십년 동안 하도의 침식제어 및 토사유출량의 저감을 통해 산지계류 주변의 취약지역을 보호하고자 다양한 형태의 사방시설물을 건설하였다(Huebl and Fiebiger, 2005; Mizuyama, 2010; Piton et al., 2016).

사방댐은 산각 고정과 토사유출량 조절을 목적으로 산지 계류를 가로질러 건설하는 횡방향의 계간사방공종으로 산림유역의 토사재해 저감대책을 대표하는 구조물적 대책의 하나이다(Makita et al., 1987; Ryu and Jang, 1998; Huebl and Fiebiger, 2005; KFS, 2020). 하지만 사방댐은 이러한

*정회원, 국립산림과학원 산림환경보전연구부 박사연구원(E-mail: leekh2020@korea.kr)

Member, Postdoctoral Researcher, Department of Forest Environment and Conservation, National Institute of Forest Science

**교신저자, 정회원, 국립산림과학원 산림환경보전연구부 임업연구사(Tel: +82-2-961-2684, Fax: +82-2-961-2699, E-mail: woocs@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Researcher, Dept. of Forest Environment and Conservation, National Institute of Forest Science

설계 목적으로 인해 그 생애주기 동안 지속해서 손상되며, 때로 구조물의 열화 및 저사 능력의 감소에 따른 노후화의 결과로 하류 지역에 큰 피해를 초래하는 대규모 토사유출 현상의 원인이 되기도 한다(Huebl and Fiebigler, 2005; Suda et al., 2009; Dell'Agnese et al., 2013; Mazzorana et al., 2014). 그러므로 산지계류의 사방댐이 목표로 하는 성능을 발휘하기에 충분한 상태인지를 평가하고 그 기능이 유지될 수 있도록 관리를 지속하는 것은 산림유역의 토사재해 위험 관리에 있어 중요한 요소라고 할 수 있다.

우리나라의 사방댐은 1986년~2020년까지 약 12,000여개가 건설된 것으로 추정된다(KFS, n.d.). 특히, 전국적으로 대규모 산사태 피해를 야기한 2000년대 초반의 대형 태풍 이벤트를 분수령으로 사업량이 크게 증가하여 2001년~2010년까지 약 3,400여개, 2011년~2020년까지 약 7,300여개의 사방댐이 건설되었다. 이는 다시 말하면, 우리나라 사방댐 재고(check dam inventory)의 약 90.0%가 2001년~2020년까지 20년간 집약적으로 건설되었음을 의미한다. 산림청은 건설 후 20년이 경과한 사방댐을 노후 시설물로 분류하여 최근의 사방댐보다 보수적 기준으로 관리하고 있다(KFS, 2018; 2020). 그러므로 앞으로 노후 사방댐의 누적 현황은 빠르게 증가할 것으로 보이며, 이에 따른 유지관리 부담은 더욱 가중될 것으로 예상된다(Lee, 2017). 그러나 사방댐의 노후화 원인과 유지관리 의사결정을 위한 조사 및 평가체계에 관한 연구는 부족하다(Lee et al., 2021).

이 연구에서는 부재의 노후화에 따른 사방댐의 상태저하를 체계적 방법으로 평가하기 위해 시설물 안전진단 기술의 하나인 외관상태평가의 적용성을 검토하였다. 연구대상으로는 우리나라 사방댐 현황의 가장 큰 비중을 차지하는 무근 콘크리트 구조의 불투과형 콘크리트 사방댐과 메쌓기 또는 혼합쌓기로 축조된 돌 사방댐(이하 콘크리트와 돌 사방댐)을 선정하였다.

산림청의 「사방사업법 시행령」에서 사방댐의 안전진단은 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」에 따른 정밀안전진단 기관에 의뢰하여 실시하도록 하고 있다. 그러나 현재 안전진단 용역은 사방댐에 대한 조사 및 평가체계의 부재로 인해 하천의 댐시설물을 대상으로 개발된 “안전진단 및 정밀안전진단 세부지침”을 준용하여 시행되고 있으며, 이러한 실정은 안전진단의 기초가 되는 외관상태평가의 경우에도 마찬가지이다. 이 점에서 이 연구는 현장에서 사용 중인 “댐시설물의 상태평가 기준 및 절차”를 사방댐의 특징에 맞게 조정하였다. 특히, 연구대상에 대한 상세외관조사(또는 정밀점검) 결과를 토대로 사방댐의 특징적 열화·손상 유형을 분류하여 상태평가 항목으로 활용하였고, 또한 사방댐의 크기와 구조적 특징에 맞게 상태평가 절차를 조정하여 연구대상에 적용하였다.

2. 연구배경

산지계류에서 사방시설물의 유지관리 계획은 유역의 재해 안정성 확보와 비용 효율의 두 가지 측면을 함께 고려하여 수립된다(기존 사방시설물의 사용수명 연장 또는 새로운 사방시설에 대한 투자) (Piton et al., 2016). 그리고 이는 하나의 구조물 또는 전체 시설군의 현재 상태에 관한 현장 정보에 기초한다. 지금까지 사방댐의 성능 및 안정성 평가에 관한 연구는 외관조사 또는 비파괴 시험을 이용하여 구조물의 물리적 취약요인을 조사 및 평가하였으며(Mizuyama, 1979; Kasahara et al., 2010; Ogasawara and Kambara, 2015; Dell'Agnese et al., 2013; Lee et al., 2012; Park et al., 2013; Lee et al., 2014; Lee, 2015; Cortes Arevalo et al., 2016; Lee, 2017; Lee et al., 2018; Mazzorana et al., 2018), 그리고 사방댐의 산각 고정 효과와 계상경사 완화, 침사지의 저사 능력 등 구조물의 성능과 기능적 요인을 조사 및 실험을 통해 분석하였다(Makita et al., 1987; Lenzi et al., 2003; Comiti et al., 2010; Seo et al., 2014; Chahrour et al., 2021; Seo et al., 2016).

사방댐 외관상태평가는 사용환경적 요인과 건설재료의 특성에 의한 구조물 열화 또는 허용한계를 초과하는 토석류 및 홍수 이벤트에 의한 구조물 피해를 조사·분석하여 사방댐 외관의 상태변화 정도를 평가하는 것으로 주로 유지관리 실무에 관한 연구에 적용되었다(Ogasawara and Kambara, 2015; Dell'Agnese et al., 2013; Lee et al., 2014; Lee, 2015; Cortes Arevalo et al., 2016; Lee, 2017; Lee et al., 2018; Mazzorana et al., 2018). 특히, 국내 연구에서는 산지계류의 환경적 요인에 의한 구조물 손상과 콘크리트의 재료적 열화에 의한 균열, 침식, 누수, 파손 등의 상태변화(또는 열화·손상)를 조사하여 사방댐의 유지관리 필요성과 노후화 경향을 분석하였다. 대표적으로 Lee et al. (2014)은 건설 후 20년이 지난 노후 콘크리트 사방댐의 리모델링에 앞서 대상물의 구조적 안정성을 외관상태평가를 이용하여 검토하였다. Lee (2015), Lee et al. (2021)은 강원도 지역의 콘크리트 사방댐에 대한 외관상태평가 및 비파괴 시험을 통해 콘크리트 사방댐의 피해유형을 분류하였고, 산지계류의 환경적 특성이 사방댐의 노후화에 미치는 영향을 분석하였다. Lee (2017)는 경상북도 지역의 불투과형 사방댐을 조사하여 콘크리트와 돌 사방댐의 대표 열화유형을 분류하였다. 이를 근거로 하여 Lee (2017), Lee et al. (2018)은 경상북도 지역의 콘크리트와 돌 사방댐을 대상으로 외관상태평가를 실시하여 사방댐의 건설 후 경과연수와 노후화의 관계를 분석하였다. 특히, Lee et al. (2014), Lee (2017), Lee et al. (2018)에 의한 콘크리트와 돌 사방댐의 열화·손상 유형 및 외관상태평가 절차는 이 연구의 기초자료로 활용되었다.

이 연구는 시설물 유지관리 시스템에서 보수·보강 및 재시공 대상의 우선순위 결정에 널리 적용되고 있는 외관상

태평가를 이용하여 사방댐의 열화 정도를 평가하였다. 외관 상태평가는 시설물의 열화·손상을 표준화된 방법으로 평가하여 유지관리 의사결정에 필수적인 정보를 제공한다(Andersen and Torrey, 1995; Park et al., 2016; Jeong et al., 2018). 특히, 평가대상의 구조적·기능적 상태를 계산적 접근방법을 통해 수치화(상태지수)할 수 있어 댐, 교량, 도로 등 다양한 시설물의 유지관리 우선순위 결정에 사용되고 있다(MLIT, 2014; FHWA, 2016; MOLIT, 2019).

외관상태평가에 의한 상태지수는 사용자(국가 또는 책임 기관)와 유지관리 대상에 따라 산정방식이 다양하지만, 기본적으로 시설물을 구성하는 최하위 요소의 열화 상태에 관한 정보(유형, 규모, 심각성)를 근거로 결정된다(Andersen and Torrey, 1995; Miyamoto et al., 2000). 특히, 계산적 접근방법에 의한 상태지수 산정방식의 경우 보편적으로 중요도가 높은 부재에 가중치를 부여하여 전체 시설물의 상태지수를 결정하는 “가중평균을 이용한 접근방법(weighted average approaches, 이하 가중평균법)”과 피해가 가장 심한 부재의 상태정보를 이용하여 평가대상의 열화 상태를 추정하는 “최소 상태지수를 이용한 접근방법(worst-conditioned component approaches, 이하 최소법)”을 적용하고 있다(FHWA, 2016).

이 연구에서 사방댐의 외관상태평가는 국토안전관리원

(구 한국시설안전관리공단)의 “댐시설물의 상태평가 기준 및 방법”을 준용하여 실시하였다. 댐시설물의 외관상태평가는 상류면과 하류면, 수문, 전기시설 등 다양한 댐 구성요소의 상태정보를 토대로 가중평균법과 최소법에 의한 단계별 평가를 실시하여 유지관리 대상의 상태지수를 결정한다(KISTEC, 2019a). 사방댐 외관상태평가에서는 기능적 특징으로 구분한 각 구성요소의 열화 상태를 국토안전관리원 등의 기준과 방법으로 평가하고 그 결과를 종합하여 연구대상의 상태지수를 결정하였다. 여기서 평가의 체계 및 세부 검토항목(열화·손상 평가항목)은 사방댐의 특징이 평가결과에 반영될 수 있도록 조정하여 연구대상에 적용하였다.

3. 재료 및 방법

3.1 사방댐 특징

외관상태평가는 경상북도 지역에서 1986년~2013년까지 건설된 콘크리트 사방댐 30개와 1988년~2014년까지 건설된 돌 사방댐 23개를 대상으로 실시하였다(Fig. 1). 이는 물과 토사의 투과가 불가능한 구조의 볼투과형 사방댐으로 주로 퇴사에 의한 산각 고정요 요구되는 해발 36 m~586 m의 산지계류에 건설되었다(Fig. 2). 사방댐이 건설된 산지계류

Fig. 1. Map of the Study Area and Check Dam Locations

(a) Concrete check dam

(b) Stone check dam

Fig. 2. Front View of Concrete and Stone Check Dams

의 계상 폭과 계상 경사는 각 3.5 m~22.0 m, 4.8%~24.9%의 범위였다. 콘크리트 사방담의 크기는 길이 10.1 m~33.3 m (평균 22.7 ± 6.1 m), 높이 2.2 m~7.5 m (평균 5.1 ± 1.2 m)의 범위였으며(Fig. 2(a)), 돌 사방담의 길이와 높이는 각 12.0 m~31.7 m (평균 19.5 ± 4.9 m), 높이 3.1 m~6.4 m (평균 4.6 ± 0.9 m)의 범위로 측정되었다(Fig. 2(b)). 사방담의 건설 후 평균 경과연수는 현장조사를 완료한 2016년을 기준으로 하여 콘크리트 사방담과 돌 사방담에서 각 18.8년, 16.9년으로 산출되었다. 이 밖의 연구대상에 관한 자세한 정보는 Lee (2017)의 논문에서 제시되었다. 콘크리트와 돌 사방담은 본체의 자중을 이용하여 안정을 유지하는 중력식 구조로 건설되었다. 다만, 돌 사방담은 석재와 콘크리트를 함께 사용하여 축조한 복합체라는 점에서 콘크리트 단일 요소로 구성되는 콘크리트 사방담과 구조적 차이를 보였다.

3.2 상세외관조사

상세외관조사에서는 연구대상 외관의 상태변화를 육안으로 관찰하고 피해의 유형, 크기, 정도 등의 내용을 야장에 기록하였다. 이는 외관상태평가의 기초자료가 되는 열화·손상에 관한 정보를 획득하기 위한 과정으로 구조물의 상태변화를 크랙 스케일(측정 범위 0.05 mm~7.0 mm), 균열경(10 × 배율), 함척(5 m), 줄자(20 m, 50 m) 등의 측정 도구를 이용하여 조사하는 점에서 보통의 육안점검(정기점검)과 구별된다.

상세외관조사에서 1회 조사범위가 과대해질 경우 국소적으로 발생한 결함이 조사결과에서 누락되거나 과소 평가될 우려가 있다. 따라서 이 연구는 사방담의 조사범위를 우선 댐마루(dam crest, DC), 반수면(downstream face, DS), 대수면의 3개 부재로 구분하였다. 그리고 이를 기능적 특징에

의해 방수로부와 어깨부의 6개 개별부재(DC₁, DC₂, DC₃, DS₁, DS₂, DS₃)로 세분하여 상세외관조사를 적용하였다(Fig. 3). 한편, 대수면의 조사는 대부분 사방담의 침사지가 물과 토사로 채워진 상태였기 때문에 이 연구에서는 생략되었다.

최종적으로 외관조사 결과는 Auto Cad 2010을 이용하여 외관조사망도로 나타냈다. 외관조사망도는 상세외관조사에서 확인된 열화·손상의 종류 및 위치를 도면에 표시하여 구조물의 상태변화를 일목요연하게 정리할 목적으로 작성되었으며, 특히 수직 관통균열과 같이 현장에서 관찰하기 어려운 열화의 규모와 연속성을 파악하는 데 유용하게 이용되었다.

3.3 외관상태평가

일반적으로 댐시설물의 외관상태평가 체계는 ① 구조물의 열화·손상에 대한 정밀점검을 통해 최하위 구성요소인 ② 개별부재의 상태를 분석하고, 그 결과를 이용하여 상위 구성요소에 해당하는 ③ 복합부재(상류면, 하류면, 접근수로 등, $n = 1, \dots, i$), ④ 개별시설물(비월류부, 월류부, 기전설비 등, $j = 1, \dots, k$), ⑤ 복합시설물(제체, 여수로, 기타시설), ⑥ 통합시설물(댐시설물)의 상태를 차례로 평가하여 이루어진다(KISTEC, 2019a). 산지계류의 사방담은 이처럼 다양한 구조물과 부대시설로 구성되는 하천의 댐시설물과 비교했을 때 구조적으로 소규모 시설물의 특징을 나타낸다(Lee et al., 2021). 특히, 이 연구에서는 측벽과 물받이 등 부대시설에 대한 평가를 생략하고 사방담 본체를 대상으로 외관상태평가를 수행하였기 때문에 평가절차의 조정이 필요하였다. 따라서 이 연구에서는 위의 댐시설물에 대한 외관상태평가 체계를 ① 열화·손상의 평가, ② 개별부

Fig. 3. Detailed Visual Inspection of the Concrete and Stone Check Dams

재의 상태평가, ③ 복합부재의 상태평가, ④ 종합평가의 4단계로 조정하여 연구대상에 적용하였다(Lee et al., 2018의 “사방댐 상태평가 절차”를 참조).

한편, 상세외관조사에서는 연구대상에서 관찰된 다양한 종류의 열화·손상을 형태적 특징을 기준으로 분류하여 콘크리트와 돌 사방댐의 대표 열화유형을 선정하였다. 그 결과, 콘크리트 사방댐의 열화·손상은 표층균열, 관통균열, 이음부 결함, 마모/침식 등 11개 대표 유형으로 분류할 수 있었다. 그리고 돌 사방댐의 대표 열화유형은 식생침입, 줄눈열화, 누수, 공동 등의 9개로 분류되었다(4.1과 4.2를 참조). 콘크리트와 돌 사방댐의 대표 열화유형은 외관상태평가의 기초자료가 되는 열화·손상의 평가항목으로 활용되었다. 또한, 콘크리트와 돌 사방댐의 대표 열화유형에서 중력식 사방댐의 안정조건(전도, 활동, 파괴, 지지력)에 직접 영향을 미치는 기초침식, 수직/수평변위, 파손 등의 구조적 결함을 “중요결함”으로 재분류하고 이에 대한 평가의 가중치를 차등 적용하여 “중요결함”의 발생에 따른 연구대상의 안정성 저하가 평가결과에 반영될 수 있도록 고려하였다(4.3을 참조).

3.3.1 열화·손상

열화·손상의 평가를 위해 상세외관조사를 통해 파악한 개별부재의 상태변화를 대표 유형별로 분류하였다. 그리고 개별적으로 조사한 열화·손상의 길이, 폭, 피해면적 등을 대표 열화유형에 대한 현황으로 병합하고 이를 이용하여 평가를 실시하였다. 예를 들어, Fig. 3의 사방댐 방수로부(DS₂)에서 수직/수평균열의 길이(L : 15.8 m)는 대표 열화유형인 관통균열(L : 8.4 m)과 표층균열(L : 7.4 m)의 현황으로 병합되었다. 마찬가지로 본체 반수면 세곳에서 발생한 박리/박락의 피해면적(A)은 총 9.7 m²로 집계되었다.

열화·손상의 평가는 KISTEC (2019a; 2019b)의 “시설물(댐·옹벽) 상태평가 기준 및 방법”, MLIT (2014)의 “사방관제시설의 점검요령”, KFS (2018)의 “사방시설의 유지관리 지침”에 따른 “상태평가 항목별 평가기준”을 적용하여 이루어졌다(Table 1). 상태평가 항목은 콘크리트와 돌 사방댐의 대표 열화유형으로 구성되었으며, 평가결과는 피해의 유형, 크기, 위치에 따른 평가기준에 근거하여 상태등급(a~e)으로 나타났다. 상태지수는 대표 열화유형에 대한 상태등급을 단순 점수(1.0~5.0)로 변환하고 해당 열화의 중요도를 가중치로 곱하여 산정되었으며, Eq. (1)과 같다.

Table 1. Visual Inspection Items and Assessment Criteria

Inspection Items		Condition	Assessment Criteria	Target ^b
Cracking	Direction, Length, Width, Location	A	Crack width less than 0.1 mm	C
		B	Area ratio under 20%, crack width less than 0.5 mm	
		C		
		D		
		E	Area ratio above 20%, crack width 0.3 mm or more	
Scaling /Spalling	Depth, area	A	No damage	C
		B	Area ratio under 10%, scaling depth less than 1.0 mm, spalling less than 20.0 mm	
		C	Area ratio above 10%, scaling depth less than 0.5 mm, spalling less than 15.0 mm	
		D	Area ratio under 10%, scaling depth 1.0 mm or more, spalling 20.0 mm or more	
		E	Area ratio above 10%, scaling depth 0.5 mm or more, spalling 15.0 mm or more	
Abrasion /Erosion	Location, Depth	A	No damage	C, S
		B	Aggregate exposed, spillway cross section reduced by abrasion/erosion	
		C		
		D		
		E	Abrasion/erosion depth of ~1 m in vertical direction	
Foundation Erosion	Depth, Length	A	No damage.	C, S
		B	Vertical depth of erosion less than 1/2 point of foundation	
		C		
		D		
		E	Vertical depth of erosion at 1/2 point of foundation or more	

Table 1. (Continued)

Inspection Items		Condition	Assessment Criteria	Target ^b
Joint Deterioration	Cracking, Width, Length, Leakage	A	No damage	C
		B	Crack width less than 2 mm, minor leakage	
		C		
		D		
		E	Crack width 2 mm or more, conspicuous leakage	
Leakage	Location, Degree of Leakage, Area	A	No damage	C, S
		B	Minor leakage partially progressing on the dam body surface	
		C		
		D	Conspicuous progressing leakage on dam body surface and foundation	
		E		
Efflorescence	Area	A	No damage	C
		B	Area ratio less than 10%	
		C		
		D	Area ratio of 10% or more	
		E		
Cavity	Quantity, Displacement, Leakage	A	No damage	S
		B	Less than three instances, no displacement or leakage in damaged area	
		C		
		D	Three or more instances, displacement or leakage in damaged area	
		E		
Breakage	Depth, Area	A	No damage	C, S
		B	Area ratio less than 10%, breakage depth less than 50.0 mm	
		C	Area ratio of 10% or more, breakage depth of less than 50.0 mm	
		D	Area ratio of less than 10%, breakage depth of 50.0 mm or more	
		E	Area ratio of 10% or more, breakage depth of less than 50.0 mm	
Uncontrolled Vegetation	Type of Vegetation, Area	A	No damage	C, S
		B	Grasses (perennial) or shrubs taking root on part of dam body surface	
		C		
		D	Shrubs taking root on entire dam body, trees invading part of dam body	
		E		
Displacement	Displacement (Subsidence, Stepping, Swelling)	A	No damage	C, S
		B	Vertical/horizontal displacement of less than 50.0 mm	
		C		
		D	Vertical/horizontal displacement of 50.0 mm or more	
		E		
Falling Out	Quantity, Displacement	A	No damage	S
		B	Less than three instances of occurrence, no displacement in damaged area	
		C		
		D	Three instances of occurrence or more, displacement in damaged area	
		E		

^aRefer to the “Guideline and Commentary of Safety Inspection and In-depth Safety Inspection for Structures-Dam” by KISTEC (2019a) for cracking, scaling/spalling, joint deterioration, and efflorescence. Refer to “Guideline Commentary of Safety Inspection and In-depth Safety Inspection for Structures-Retaining wall” by KISTEC (2019b), “Inspection Procedure Manual for Sabo Facilities” by MLIT (2014), and “Maintenance Guidelines for Erosion Control Facilities.” by KFS (2018) for abrasion/erosion, foundation Erosion, leakage, breakage, uncontrolled vegetation, falling out, and cavity.

^bC and S refer to concrete and stone check dams, respectively.

Table 2. Application of Weighting Coefficients for Each Defect Type

	Inspected Content	Condition	s	λ	Maintenance Measures ^a
Important Defect	Defects that directly affect the entire check dam's structural stability: clear displacement of the dam body, through cracking, severe structural breakage, erosion and leakage in the foundation and embedded components	A	5	1.0	Requires immediate repair and reinforcement
		B	4	1.0	
		C	3	1.0	
		D	2	1.0	
		E	1	1.0	
Local Defect	Defects that are not currently a severe problem but may affect the structural safety of the check dam if the damage develops: concrete cracking, scaling/spalling, abrasion/erosion, stone cavities and falling out, leakage, infiltration and growth of trees	A	5	1.0	Requires continued observation and consideration of repair or reinforcement for damaged area
		B	4	1.1	
		C	3	1.2	
		D	2	1.4	
		E	1	2.0	
Normal Damage	Normal damage that does not greatly affect the safety of the check dam: concrete material segregation and aggregate exposure, annual grasses infiltrating and taking root, joint deterioration, efflorescence phenomena	A	5	1.0	Requires continued observation, repair if needed
		B	4	1.1	
		C	3	1.3	
		D	2	1.7	
		E	1	3.0	

^aApplied to Grades C, D, and E grade defects as a result of the assessment.

$$DI_i = s_i \times \lambda_i \quad (1) \quad \text{에 의해 산정되었으며, Eq. (3)과 같다.}$$

여기서, DI_i , s_i , λ_i 는 각 i^{th} 열화·손상의 상태지수, 상태등급에 따른 점수, 중요도에 따른 가중치이다. λ 는 검토한 열화·손상이 평가대상에 미치는 영향에 따라 “중요결함”, “국부결함”, “일반손상”의 3개 유형으로 구분되었다(Table 2). 특히, “중요결함”에 비해 상대적으로 구조물에 미치는 영향이 적은 “국부결함”과 “일반손상”에 대한 가중치를 상향 조정함으로써 이들이 전체 구조물에 미치는 영향이 평가절하될 수 있도록 고려하였다(KISTEC, 2019a). 예를 들어, Fig. 3에서 C등급의 관통 균열($s = 3.0$)에 대한 DI 값은 “중요결함”에 대한 가중치($\lambda = 1.0$)가 적용되므로 3.0이 된다.

3.3.2 개별부재 및 복합부재

개별부재의 상태지수는 i 개의 열화·손상 중 상태지수가 가장 낮은 열화·손상의 평가결과에 의해 산정되었으며, Eq. (2)와 같다.

$$EI_j = \min(DI_i) \quad (2)$$

여기서, EI_j 는 DI 의 최솟값에 의해 결정된 j^{th} 개별부재의 상태지수이다.

복합부재의 평가를 위해 사방댐 본체를 유심선의 제어 및 피크 유량(또는 토석류) 조절 기능을 하는 방수로부(DC_2 , DS_2)와 월류에 의한 본체의 피해를 방지하는 댐어깨부(DC_1 , DC_3 , DS_1 , DS_3)로 나누었다. 복합부재의 상태지수는 각 구조부(방수로부와 댐어깨부)를 구성하는 개별부재의 상태지수

$$SI_k = \frac{\sum_{j=1}^n EI_j \times w_j \times \delta_j}{\sum_{j=1}^n w_j \times \delta_j} \quad (3)$$

여기서, SI_k 는 k^{th} 복합부재(방수로부와 양쪽 댐어깨부)의 상태지수, w_j 와 δ_j 는 각 j^{th} 개별부재의 상태지수와 중요도에 따른 가중치이다. w 는 KISTEC (2019a)의 “개별부재의 상태지수에 따른 조정계수”에 의해 결정되었다. δ 는 개별부재의 규모를 반영한 가중치로 그 합이 1.0을 초과하지 않는 범위에서 현장 기술자의 판단에 의해 차등 적용할 수 있다(KISTEC, 2019a). 이 연구에서 δ 값은 Lee (2015), Lee (2017), Lee et al. (2018)의 상태평가 결과를 참고하여 방수로부와 날개부에 각 0.4와 0.6을 적용하였다.

3.3.3 종합평가

종합평가에 의한 사방댐 상태지수(CI)는 복합부재 중 열화 상태가 가장 심한 구조부의 상태지수를 우선하여 산정되었으며, Eq. (4)와 같다.

$$CI = \min(SI_k) + (v_1 \times v_2) \quad (4)$$

여기서, v_1 과 v_2 는 평가결과의 정규화를 위한 계수이며, Eqs. (5)와 (6)에 의해 산정되었다.

Table 3. Assessment of Check Dam Condition Based on CI

Condition	CI	Descriptions
A	4.5 - 5.0	Optimal condition with no problems
B	3.5 - 4.5	Minor damage and deterioration have occurred but no safety problems
C	2.5 - 3.5	Widespread damage and deterioration have occurred but no safety problems
D	1.5 - 2.5	Service limitation must be considered owing to significant damage and deterioration
E	1.0 - 1.5	Service must be ended immediately owing to severe damage and deterioration

Fig. 4. Typical Types of Damages of the Concrete and Stone Check Dams

$$v_1 = 0.3 \times \{\max(SI_k) - \min(SI_k)\} \quad (5)$$

$$v_2 = \frac{\sum_{k=1}^n SI_k \times A_k}{5.0 \times \sum_{k=1}^n A_k} \quad (6)$$

여기서, v_1 은 복합부재 상태 간의 편차를 조정하는 계수로 SI_k 범위의 30.0%에 해당하는 값을 적용하였으며($v_1 \neq 0.0$ 일 때), v_2 는 평가대상의 상태 저하율을 평가대상이 최고의 상태일 때($SI_k = 5.0$)와 비교한 것으로 상태지수에 복합부재의 규모(A_k)를 반영하여 결정되었다(KISTEC, 2019a).

최종적으로 사방댐의 외관상태는 1.0~5.0 범위의 상태지수로 표현되었으며, 이에 따른 상태등급은 우수(A), 양호(B), 보통(C), 미흡(D), 불량(E)의 5개로 분류되었다(Table 3).

4. 사방댐의 대표 열화유형

4.1 콘크리트 사방댐

Fig. 4에서 콘크리트 사방댐의 대표적 열화·손상은 표층균열(surface crack, SC), 관통균열(through crack, TC), 이음부열화(joint deterioration, JD), 마모/침식(abrasion and erosion, AE), 박리/박락(scaling and spalling, SS), 재료결함(defects

of construction materials, MD), 누수(leakage, L), 식생침입(uncontrolled vegetation, V), 백태(efflorescence, EF), 수직/수평변위(vertical and horizontal displacements, VD/HD)의 11개 유형으로 분류되었다(Fig. 4(a)).

균열은 24개(80.0%)의 콘크리트 사방댐에서 발생하였다. 이는 균열의 깊이가 구조물 표면으로 한정되는 표층균열과 본체의 상하류로 연결되는 관통균열로 구분되었다. 또한, 진행 방향에 따라 종/횡방향 균열, 수직/수평 균열, 사방향 균열, 망상균열로 세분되었다. 콘크리트 균열은 주로 건조수축에 의한 본체의 체적변화에 기인하는 열화현상이다. 따라서 콘크리트 사방댐은 건조수축에 의한 균열을 제어할 목적으로 일정 간격의 불연속 단면, 즉 수축 이음을 설치한다. 이러한 본체 내부의 불연속면은 건설 과정에서 분할하여 타설한 콘크리트 블록 사이의 시공이음에도 형성된다. 이음부 열화는 수축/시공 이음을 적용한 부위에 나타나는 균열, 틈 매우기재 박락, 누수, 식생침입 등의 피해로 19개(63.3%)의 콘크리트 사방댐에서 관찰되었다.

마모/침식은 우수(또는 유사)의 침식작용에 의해 구조물 단면이 손실되거나 콘크리트 표면이 박리되는 현상이다. 이는 유량이 풍부하고 유사수송이 활발한 산지계류에서 피해가 심화되는 것으로 나타나며, 특히 수류 및 토석류의 충격력을 직접 받는 방수로부와 그 직하의 기초부에 피해가 집중되는 경향이 있다. 마모/침식에 의한 피해는 20개의

콘크리트 사방댐(66.7%)에서 관찰되었고, 손상부위의 경우 표층부 골재가 노출되거나 깊게 침식되는 모습을 보였다.

재료결합은 저품질의 골재, 부적절한 콘크리트 배합과 같은 시공상의 문제로 발생하는 경향이였다. 특히, 재료결합이 발생한 12개의 콘크리트 사방댐(40.0%) 중 8개(26.7%)에서는 열화된 콘크리트층이 본체로부터 이탈되어 박리/박락으로 발전되었다. 일반적으로 철근 콘크리트 구조물에서 박리/박락 현상은 철근의 부식 및 팽창에 의한 내부균열이 성장하며 촉발된다. 하지만, 무근 콘크리트 구조의 콘크리트 사방댐에서 이는 겨울철 동결융해가 반복되는 누수부위와 배수구 주변에서 가장 많이 발생하였다.

4.2 돌 사방댐

돌 사방댐의 대표 열화유형은 식생침입(V), 줄눈열화(JD), 누수(L), 공동(internal erosion and cavity, IC), 침식(Erosion, E), 결손(falling out, F), 수직/수평변위(VD/HD), 파손(breakage, B)의 9개로 분류되었다(Fig. 4(b)).

식생침입은 돌 사방댐에서 가장 많이 관찰된 피해 형태로 13개(56.5%)의 사방댐에서 발생하였다. 이는 사방댐 주변식생이 구조물 표면의 손상부위로 침입한 후 점차 성장하였으며, 크게 초본이 단독으로 침입해 활착하는 사례, 초본과 관목이 혼합되어 나타나는 사례, 그리고 목본이 단독으로 침입해 성장하는 사례로 구분되었다.

돌 사방댐의 줄눈은 본체 내부의 채움 콘크리트를 외부로부터 보호하기 위해 석재 사이에 펼쳐 바른 시멘트 모르타르를 말한다. 서로 경화시기가 다른 줄눈과 내부 콘크리트 사이에는 점진적으로 틈이 생겨나며, 이는 11개(47.8%)의 돌 사방댐에서 시공면이 들뜨거나 박리되는 피해로 이어졌다.

누수는 사방댐의 내부 공동이나 간극에 형성되는 물의 흐름으로 6개(26.1%)의 돌 사방댐에 관찰되었다. 특히, 성질이 다른 두 재료, 즉, 석재와 콘크리트를 축조하여 완성하는 돌 사방댐의 경우 구조적으로 콘크리트 사방댐보다 수밀성이 낮아 지수벽을 삼입하지 않는 이상 누수를 억제하기 어려운 것으로 나타났다. 누수는 돌 사방댐 내부의 콘크리트를 지속해서 침식하여 공동을 발생시켰다. 이는 9개(39.1%)의 돌 사방댐에서 발생하였으며, 구조물 내부의 공극률을 증가시켜 본체의 안정성을 저하하는 것으로 나타났다.

결손 피해는 돌 사방댐을 구성하는 석재 중 일부가 내외적 요인(토석류 충격력, 범람, 인위적 훼손, 채움 콘크리트 열화)에 의해 본체로부터 이탈되는 현상이다. 이는 2개(8.7%)의 돌 사방댐에서 관찰되었으며, 홍수 흐름이 집중되는 방수로부 및 공동으로 재료 간 결속력이 약해진 반수면에서 발생하였다.

4.3 사방댐의 중요결합

산지계류에서 사방댐의 안정조건은 구조물에 발생한 손상과 결합(내적요인)뿐만 아니라 주변의 환경적 요인(외적

요인)에도 큰 영향을 받는다(Suda et al., 2009). 그리고 대부분 경우 사방댐의 심각한 결함이나 변형은 내적요인과 외적요인이 복합적으로 작용하여 발생한다. 중력식 사방댐의 안정조건은 전도, 활동, 제체의 파괴, 기초지반의 지지력의 4개 항목에 의해 검토된다(Chun, 2011). 이 점에서 사방댐 하류의 계상침식은 유체력(수압과 토압) 또는 충격력(토석류)에 대한 제체의 저항력을 저하시켜 사방댐의 파괴를 유발할 수 있는 중요결합으로 판단된다(Mizuyama, 1979; Senoo et al., 1986; Hueble and Fiebigler, 2005; Suda and Huebl, 2007; Rudolf-Miklau and Suda, 2011). 이는 상류의 유사공급 제한 또는 수로부를 낙하하는 유체의 수리적 거동이 원인으로(Lenzi et al., 2003; Comiti et al., 2010; Recking, 2012; Chahrouh et al., 2021), 이 연구에서는 사방댐 기초부의 국부세굴과 기초노출로 나타났다. 또한, 누수는 사방댐의 내구성 및 구조적 안정성을 저하하는 중요한 요인의 하나였다. 특히, 사방댐의 근입부와 밀면에 발생한 누수는 수평외력에 대한 본체의 저항력(마찰력)을 저하시키는 중요결합으로 판단된다. 그리고 돌 사방댐에서 누수는 내부의 공극률을 증가시켜 중요결합인 침하의 원인이 되었다(Lee et al., 2018).

한편, 콘크리트 사방댐에서 관통균열의 발생 및 성장은 누수의 원인이 될 뿐만 아니라 구조물의 내하력을 저하시키는 중요한 요인이다. 이는 주로 건조수축, 이음부의 열화와 같은 내적요인에 의해 발생한 것으로 추정되지만 설계하중을 초과하는 퇴사압의 작용으로 촉발되기도 한다. 그러므로 관통균열은 콘크리트 사방댐의 외관상태평가에서 주의하여 조사해야 하는 중요결합의 하나인 것으로 판단된다.

이 연구에서는 사방댐의 상태변화 중 “기초침식”, “수직/수평변위”, “기초 및 근입부의 누수”, “심각한 파손”의 네 가지를 콘크리트와 돌 사방댐의 “중요결합”으로 분류하였다. 그리고 이를 구조물의 안정성 확보를 위해 긴급히 보수해야 하는 피해 유형으로 정의하고 표층균열, 마모, 박리/박락, 결손과 같이 사방댐의 내구성과 기능에 영향하는 바가 큰 열화·손상과 구분하여 평가하였다. 또한, 누수, 균열, 공동과 같이 중요결합으로 발전될 가능성이 높은 결함은 “국부결합”으로 구분하였으며, 이를 제외한 나머지는 “일반손상”으로 분류하였다.

5. 사방댐 외관상태평가

5.1 평가결과

콘크리트 사방댐의 상태지수(CI)는 1.5~4.9의 범위($n = 30$)로 평균과 분산은 각 3.37, 0.55로 나타났다(Fig. 5). 보수·보강은 17개의 콘크리트 사방댐에서 요구되었으며($CI < 3.5$), 이 중 4개는 사용제한($CI < 2.5$)이 고려되었다. 돌 사방댐의 상태지수는 1.3~5.0의 범위($n = 23$)로 데이터의 평균과 분산은 각 3.84, 1.30으로 나타났다. 전체적으로 돌 사방댐의 상태지수는 콘크리트 사방댐의 데이터보다 더 큰 산포를

보였으며, 이러한 결과는 이탈리아 남부 산지계류에서 토석류 피해 전후 사방댐(불투과형 콘크리트와 돌 사방댐)의 상태변화를 관찰한 Mazzorana et al. (2018)의 연구결과와 일치하였다. Lee (2017)은 돌 사방댐 건설이 기술자의 숙련도에 의존하는 바가 큰 점을 지적하며, 돌 사방댐의 경우 콘크리트 사방댐 건설보다 품질관리가 힘든 측면이 있다고 보고하였다. 즉, 이러한 현장 요인이 돌 사방댐에 대한 데이터의 균일성을 저하시키는 것으로 추정된다. 한편, 돌 사방댐의 평가결과 보수·보강 대상은 8개였으며, 이 중 3개는 사용제한이 고려되었다.

콘크리트 사방댐에서 방수로부 및 댐어깨부의 상태지수(SI)는 각 1.5~4.9, 2.3~5.0의 범위였다(Fig. 6). 그리고 방수로의 상태지수 평균은 3.2로 댐어깨부의 상태지수 평균(SI = 4.2)보다 1.3배 낮았다. 돌 사방댐의 경우 방수로부의 상태지수는 1.0~5.0, 댐어깨부의 상태지수는 1.5~5.0의 범위였다. 또한, 방수로부의 상태지수 평균은 3.7로 댐어깨부(SI = 4.7)와 비교하여 1.2배 낮았다. 결과적으로 콘크리트와 돌 사방댐에서 방수로부의 물리적 상태는 댐어깨부보다 저하되어 있는 것으로 나타났다(Lee, 2017; Lee et al., 2018; Mazzorana et al., 2018). 이러한 사실은 연구대상을 대상으로 사방댐의

Fig. 5. Comparison of Condition Index for the Concrete and Stone Check Dams

Fig. 6. Comparison of Condition Index for the Spillways and Wings of Check Dams

취약요소를 검토하였을 때 방수로부의 내구성이 상대적으로 저하되어 있음을 나타낸다. 그리고 예방적 유지관리 측면에서 방수로의 설계기준을 강화(고강도 콘크리트 또는 보강구조물)하는 것 또한 사방댐의 사용수명을 연장할 수 있는 효과적인 대책으로 판단된다.

산림청이 제시하는 노후 사방댐의 기준(건설 후 20년 이상)을 참고하여 연구대상을 건설 후 경과연수를 기준으로 구분하고 상태지수를 비교하였다(Fig. 7). 건설 후 20년이 경과(이하 ≥ 20 년)한 콘크리트 사방댐에 대한 상태지수는 1.5~4.1의 범위였으며, 이는 건설 후 20년 미만(이하 < 20 년)의 콘크리트 사방댐에 대한 결과(CI = 2.4~4.9)보다 평균적으로 1.2배 낮았다. 또한, 보수·보강대상의 경우 ≥ 20 년의 콘크리트 사방댐에서 12건으로, < 20 년의 콘크리트 사방댐에서 확인된 5건 보다 2.4배 많았다. 마찬가지로, ≥ 20 년의 돌 사방댐에서 상태지수는 1.4~3.9의 범위로 < 20 년의 돌 사방댐에 대한 데이터(CI = 2.8~5.0)와 비교하였을 때 평균적으로 1.6배 낮았다. 그리고 보수·보강 대상은 ≥ 20 년의 돌 사방댐에서 7건으로 < 20 년의 돌 사방댐에서 확인된 2건 보다 3.5배 많았다. 결론적으로 ≥ 20 년의 사방댐은 < 20 년의 사방댐보다 상태가 저하되어 있는 것으로 나타났고, 따라서 노후한 구조물에 대한 보수·보강 필요성이 상대적으로 높다고 볼 수 있다. 이와 관련하여 Fujita et al. (2020)은 방수로의 침식 정도와 경과연수의 관계를 분석하여 침식의 발생 빈도 및 깊이는 건설 후 20년~30년을 기점으로 증가한다고 하였으며, Dell'agnese et al. (2013)은 홍수 및 토석류 피해를 입은 콘크리트와 돌 사방댐의 외관상태 변화를 조사하여 건설 후 20년 이상의 사방댐에 발생한 피해가 최근의 사방댐보다 심한 사실을 확인하였다. 특히, Lee (2015)에 의하면 강원도 지역에서 1988년~2008년까지 건설한 콘크리트 사방댐을 대상으로 반발경도시험을 실시한 결과, < 20 년의 사방댐(21개)은 전체의 90.0% 이상이 설계기준강도(210.0 kgf/cm²)를 만족하는 반면, ≥ 20 년의 사방댐(13개)은 전체의 약 46.5%가 설계기준강도 미달인 것으로 나타났다.

Fig. 7. Comparison of Condition Index for Check Dams of Less Than 20 Years Old and 20+ Years Old

5.2 적용성 검토

연구대상의 외관상태평가 결과를 산림청 산하의 치산기술협회(구 사방협회)에서 동일한 사방댐을 대상으로 실시한 정기점검 결과와 비교하였다(Korea Association of Soil and Water Conservation, 2014; 2015; 2016). 한국 치산기술협회는 2009년부터 전문가 집단(책임 공무원, 기술사, 산림 엔지니어 등)을 구성하여 정기적으로 기존 사방댐에 대한 외관점검을 실시하고 있다. 다만, 이 연구를 수행한 시점의 외관점검 결과는 “양호(A)”, “보통(B)”, “불량(C)”의 3개 등급으로 판정되었고, 따라서 5개 등급으로 구분되는 외관상태평가 결과와의 직접 비교는 어려웠다. 이에 연구대상의 보수·보강 여부를 기준으로 다음과 같이 데이터를 분류하여 외관상태평가의 적용성을 검토하였다(Table 4).

- 1) 그룹 1 : 보수·보강 대상에 대한 외관상태평가(C, D, E등급)와 정기점검(C등급, 필요에 따라 B등급)의 결과가 일치
- 2) 그룹 2 : 외관상태평가 결과에 따른 준치 대상이 정기점검 결과에서 보수·보강 대상으로 판정
- 3) 그룹 3 : 준치 대상에 대한 외관상태평가와 정기점검의 결과가 일치
- 4) 그룹 4 : 외관상태평가 결과에 따른 보수·보강 대상이 정기점검 결과에서 준치 대상으로 판정

사방댐 유지관리에 관한 외관상태평가의 결과는 43개(81.1%)의 검토대상에서 전문가 집단에 의한 정기점검 결과와 일치하였다(그룹 1과 그룹3). 보수·보강 대상에 대한 외관상태평가 결과를 보면, 16개(64.0%)의 검토대상에서 정기점검 결과와 일치하였고(그룹 1), 9개(36.0%)의 검토대상은 정기점검 결과에서 준치 대상으로 판정되었다(그룹 4). 그룹 4에서 건설 재료의 차이가 판정 결과에 미친 영향은 명확하지 않았다. 하지만, 한가지 예상되는 불일치의 원인은 외관상태평가 및 정기점검에 적용되는 조사 및 평가방법의 차이인 것으로 추정된다. 실제로 피해가 명확한 D, E등급의 사방댐에 대한 유지관리 의사결정은 외관상태평가 및 정기점검의 결과가 모두 일치하였다. 그러나 기술자의 판단에

따라 해석이 달라질 수 있는 B, C등급의 사방댐에 대한 유지관리 의사는 외관상태평가에서 더 보수적 결과를 도출하는 것으로 나타났다. 사방댐의 안전점검 시 수면 아래 기초부는 장화나 사다리 등의 접근장비 없이 피해 상황을 파악하기 어려운 부위이다. 마찬가지로 콘크리트 균열과 누수 등은 점검대상의 표면이 습윤한 상태일 경우 관찰이 어려운 열화·손상이다. 그리고 돌 사방댐의 공동과 누수 등은 내부의 피해 규모가 외관으로 잘 드러나지 않는 특징이 있다. 결론적으로 정기점검에 적용되는 보통의 육안관찰이 가지는 한계로 인해 외관상태평가에 의한 유지관리 내용이 상대적으로 보수적인 결과를 도출하는 것으로 판단된다.

한편, 외관상태평가 결과는 준치 대상에 대한 1개의 검토대상에서 전문가 집단에 의한 정기점검과 다른 결과를 보였다(그룹 2). 이는 이 연구의 현장조사가 치산기술협회의 점검으로 피해부위가 보수된 이후 이루어졌기 때문이었다.

6. 결 론

우리나라의 사방댐 유지관리 수요는 최근 급속히 증가하는 추세이다. 집중호우 시 돌발적으로 발생하는 산지토사재해의 특성을 고려하면 사방댐의 유지관리는 모든 대상에 대하여 같은 수준의 투자를 하는 것이 국민의 안전을 담보할 수 있는 가장 확실한 대책으로 생각된다. 하지만 이는 비용적 측면을 고려하였을 때 현실적으로 불가능한 일이므로 객관적이고 신뢰할 수 있는 현장 정보를 바탕으로 중요도가 높은 사방댐을 선별하여 우선적으로 관리하는 전략적 의사결정이 필요한 것으로 판단된다.

이 연구는 사방댐의 유지관리를 위한 의사결정 수단으로서 시설물 정밀안전진단 기술의 하나인 외관상태평가의 적용성을 검토하였다. 외관상태평가의 현장적용은 우리나라의 사방댐 현황에서 유지관리 수요가 가장 많은 것으로 나타난 불투과형 콘크리트 사방댐과 돌 사방댐을 대상으로 하였다.

외관상태평가는 댐시설물의 상태평가 체계를 사방댐의 구조적 특징에 맞게 조정한 “4단계 평가체계”를 적용하였으며, 또한 콘크리트와 돌 사방댐의 대표 열화유형(콘크리트 : 11개, 돌 사방댐 : 9개)을 분류하여 열화·손상의 평가항목(상태평가 항목)으로 활용하였다. 특히, 콘크리트와 돌 사방댐의 열화·손상 중 “기초침식”, “수직/수평변위”, “기초 및 근입부의 누수”, “심각한 파손”의 네 가지를 사방댐의 안정조건에 영향을 미치는 “중요결함”으로 분류하여 평가의 가중치를 차등 적용하였다. 최종적으로 외관상태평가 결과에 따른 연구대상의 유지관리 의사결정을 한국 치산기술협회에서 동일한 사방댐을 대상으로 실시한 안전점검 결과와 비교한 결과, 평가대상의 81.1%에서 보수·보강 의견이 일치하는 것으로 나타났다. 그러므로 이 연구에서 조정한 상태평가 항목과 평가체계를 이용하여 사방댐의

Table 4. Differences in the Results for the Condition Assessment and Regular Inspection

		Exterior Condition Assessment	
		Repair and reinforcement	Continued observation
Regular Inspection	Repair and reinforcement	16 (Group 1)	1 (Group 2)
	Continued observation	9 (Group 4)	27 (Group 3)

취약요소를 평가하고 그 결과를 유지관리 의사결정에 이용하는 것이 가능한 것으로 판단된다.

외관상태평가는 표준화된 절차를 통해 시설물의 상태에 대한 균일하고 객관적인 현장 정보를 획득할 수 있는 점에서 사방댐 유지관리의 합리적 의사결정 수단이 될 것으로 기대된다. 특히, 각 단계의 평가결과를 수치로 나타낼 수 있어 사방댐의 유지관리 우선순위 및 취약요소 도출에 유용한 것으로 판단된다. 그러나 사방댐의 열화·손상에 대한 정량적 평가기준은 여전히 부족한 실정으로 매년 점검을 통해 수집되는 현장 정보를 활용하여 상태평가를 위한 과학적 근거를 개발해나가는 것이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 경상북도 산림환경연구소의 연구비지원에 의해 수행되었습니다. 아울러 소중한 데이터를 제공해 주신 한국 치산기술협회에 감사드립니다.

References

- Andersen, G.R., and Torrey III, V.H. (1995). Function-based condition indexing for embankment dams. *J. Geotech. Eng.*, Vol. 121, pp. 579-588.
- Chahrour, N., Nasr, M., Tacnet, J., and Bérenguer, C. (2021). Deterioration modeling and maintenance assessment using physics-informed stochastic Petri nets: Application to torrent protection structures. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, Vol. 210. doi:10.1016/j.ress.2021.107524
- Chun, K.W. (2011). *New erosion control engineering*. Seoul, Korea: Hyangmunsa. p. 427.
- Comiti, F., Lenzi, M.A., and Mao, L. (2010). "Local scouring at check-dams in mountain rivers," in check dams. In M. Conesa-Garcia, and M.A. Lenzi (Eds.), *Morphological adjustments and erosion control in torrential Streams* (pp. 263-282.). NY, USA: Nova Science Publ.
- Cortes Arevalo, V., Sterlacchini, S., Bogaard, T., Junier, S., and Giesen, N. (2016). Decision support method to systematically evaluate first-level inspections of the functional status of check dams. *Struct. Infrastruct. Eng.*, Vol. 12, pp. 1487-1504.
- Dell'Agnese, A., Mazzorana, B., Comiti, F., Von Maravic, P., and D'Agostino, V. (2013). Assessing the physical vulnerability of check dams through an empirical damage index. *J. Agric. Eng.*, Vol. 44, pp. 9-16.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2016). *Synthesis of national and international methodologies used for bridge health indices*.
- Fujita, M., Mizuyama, T., Honda, N., Ikeda, A., Nagayama, T., Mike, C., et al. (2020). Effect of chatchment characteristics on Sabo dam deterioration. *Proceedings of the 68th Annual Meeting of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, Iwate, Japan, pp. 109-110.
- Huebl, J., and Fiebiger, G. (2005). Debris-flow mitigation measures. In M. Jakob, and O. Hunger (Eds.), *Debris-flow Hazards and Related Phenomena* (pp. 445-488). Berlin: Springer.
- Jeong, Y.S., Kim, W.S., Lee, I.K., and Lee, J.H. (2018). Bridge inspection practices and bridge management programs in China, Japan, Korea, and U.S.. *J. Struct. Integr. Maint.*, Vol. 3, pp. 126-135.
- Kasahara, Y., Otsubo, S., Ogawauchi, Y., Nihei, A., Yamakage, S., and Yamanaka, R. (2010). A study on the soundness evaluation method of the existing Sabo Dams. *Proceedings of the 59th Annual Meeting of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, Nagano, Japan. pp. 392-393.
- Korea Association of Soil and Water Conservation. (2014). *Annual check inspection report: Gyeongsangbuk-do*.
- Korea Association of Soil and Water Conservation. (2015). *Annual check inspection report: Gyeongsangbuk-do*.
- Korea Association of Soil and Water Conservation. (2016). *Annual check inspection report: Gyeongsangbuk-do*.
- Korea Forest Service (KFS). (2018). *Guidelines for maintenance of erosion control facilities*.
- Korea Forest Service (KFS). (2020). *Development of a safety assurance guidance for sediment-related disaster prevention measures and a watershed management framework for risk reduction in forest watersheds*.
- Korea Forest Service (KFS). (n.d.). *Statistical yearbook of forestry*. Retrieved September 9, 2021, from <https://kfs.s.forest.go.kr/stat/ptl/fyb/frstyYrBookList.do?curMenu=9854>
- Korea Infrastructures Safety and Technology Corporation (KISTEC). (2019a). *Guidelines and commentary of safety inspection and in-depth safety inspection for structures - Dam*.
- Korea Infrastructures Safety and Technology Corporation (KISTEC). (2019b). *Guidelines and commentary of safety inspection and in-depth safety inspection for structures - Retaining wall*.
- Lee, C.W., Joh, S.H., Park, K.H., Kim, M.S., Youn, H.J., and Hah, S.N. (2012). Quality grading of concrete soil erosion control dam in the aspect of unconfined

- concrete strength by surface-wave technique. *J. Korea For. Sci.*, Vol. 101, No. 3, pp. 90-96.
- Lee, H.H., Park, K.H., Ewane, B.E., Kwon, T.H., Oh, S.W., and Lee, K.H. (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, Korea, p. 125.
- Lee, J.H. (2015). *Analysis of condition assessment and damage patterns of concrete check dam*. Ph.D. dissertation, Kangwon National University, Kangwon, Korea.
- Lee, J.H., Kim, S.W., Lee, K.Y., Bae, H.S., and Chun, K.W. (2021). Analysis of factors affecting damage of the concrete check dams based on the exterior condition assessment. *Crisisonomy*. Vol. 17, No. 8, pp. 59-72.
- Lee, K.H. (2017). *A study on the determination of maintenance priority order among debris barriers on the basis of exterior condition evaluation*. Ph.D. dissertation, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea. http://www.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p_mat_type=b e54d9b8bc7cdb09&control_no=193d14685a63724a ffe0bdc3ef48d419&outLink=K
- Lee, K.H., Lee, H.H., Ewane, B.E., Uchida, T., and Sakurai, W. (2018). Analysis of damage characteristics and aging trend of debris barriers using exterior condition assessment. *Proceedings of the International Symposium Interpraevent*, Toyama, Japan, pp. 204-205. http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2018_EA_204.pdf
- Lenzi, M.A., Marion, A., and Comiti, F. (2003). Local scouring at grade-control structures in alluvial mountain rivers. *Water Resour. Res.*, Vol. 39. doi:10.1029/2002WR001815
- Makita, K., Ohkubo, S., Mizuyama, T., and Ido, K. (1987). Analysis of an example of disaster prevention with a Sabo dam. *J. Japan Soc. Eros. Control Eng.*, Vol. 40, pp. 3-10.
- Mazzorana, B., Trenkwalder-Platzer, H., Fuchs, S., and Hübl, J. (2014). The susceptibility of consolidation check dams as a key factor for maintenance planning. *Österr. Wasser-u. Abfallwirtschaftsverb.* Vol. 66, pp. 214-216.
- Mazzorana, B., Trenkwalder-Platzer, H., Heiser, M., and Hübl, J. (2018). Quantifying the damage susceptibility to extreme events of mountain stream check dams using Rough Set Analysis. *J. Flood Risk Manag.*, Vol. 11, e12333.
- Ministry of Land Infrastructure Transport and Tourism (MLIT). (2014). *Inspection procedure manual for Sabo facilities*.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT). (2019). *Guideline of safety inspection and in-depth safety inspection for facilities*.
- Miyamoto, A., Kawamura, K., and Nakamura, H. (2000). Bridge management system and maintenance optimization for existing bridges. *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, Vol. 15, pp. 45-55.
- Mizuyama, T. (1979). Survey of disaster of check dam. *J. Jpn Soc. Eros. Control Eng.*, Vol. 4, pp. 26-30.
- Mizuyama, T. (2010). Recent developments in sabo technology in Japan. *Int. J. Japan Soc. Erosion Control Eng.*, Vol. 1, pp. 1-4.
- Ogasawara, K., and Kambara, J. (2015). Efforts in maintenance of sabo facilities in nagano prefecture. *J. Japan Soc. Eros. Control Eng.*, Vol. 68, pp. 47-51.
- Park, J.Y., Kwon, J.H., and Kim, T.H. (2016). A study on determining repair and reinforcement priority for the each component using in-depth inspection results on existing dams. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 5, pp. 199-208.
- Park, K.H., Kim, M.S., Joh, S.H., Lee, C.W., Youn, H.J., and Kim, K.H. (2013). Study on the stability evaluation of concrete erosion control dam by using non-destructive test for compressive strength. *J. Korea For. Sci.*, Vol. 102, No. 1, pp. 90-96.
- Piton, G., Carladous, S., Recking, A., Tacnet, J.M., Liebault, F., Kuss, D., et al. (2016). Why do we build check dams in alpine streams? An historical perspective from the french experience. *Earth Sur. Process. Landforms.*, Vol. 42, pp. 91-108.
- Recking, A. (2012). Influence of sediment supply on mountain streams bedload transport. *Geomorphology*, Vol. 175, pp. 139-150.
- Rickenmann, D., and Koshni, A. (2010). Sediment loads due to fluvial transport and debris flows during the 2005 flood events in switzerland. *Hydrol. Process.*, Vol. 24, pp. 993-1007.
- Rudolf-Miklau, F., and Suda, J. (2011). Technical standards for debris flow barriers and breakers. *Proceedings of the 5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, Padua, Italy, pp. 1083-1091.
- Ryu, T.K., and Jang, K.K. (1998). Effect Of soil erosion control dam in the hillside area. *J. Life Sci. Nat. Resour.*, Vol. 20, pp. 42-47.
- Senoo, K., Mizuyama, T., and Shimohigashi, H. (1986).

- Application of the debris flow impact model to the design of concrete Sabo structures. *J. Jpn Soc. Eros. Control Eng.*, Vol. 38, No. 6, pp. 12-16.
- Seo, J.I., Chun, K.W., and Song, D.G. (2016). Estimation of sediment discharge controlled by sediment-filled check dam in a forested catchment. *J. Korean For. Sci.*, Vol. 105, No. 3, pp. 321-329.
- Seo, J.P., Lee, H.H., Woo, C.S., Lee, C.W., and Kim, K.H. (2014). Topographical changes in torrential stream after dredging in erosion control dam-using terrestrial LiDAR data. *J. Korean For. Sci.*, Vol. 103, No. 3, pp. 392-401.
- Suda, J., and Huebl, J. (2007). Schäden und schadmechanismen an schutzbauwerken der wildbachverbauung. *Wildbach- und Lawinenverbau.*, Vol. 155, pp. 56-83.
- Suda, J., Strauss, A., Rudolf-Miklau, F., and Hubl, J. (2009). Safety assessment of barrier structures. *Struct. Infrastruct. Eng.*, Vol. 5, pp. 311-324.

Received ■ October 27, 2021

Revised ■ October 28, 2021

Accepted ■ December 2, 2021