

제방 유지관리체계 개선을 위한 노후도 평가방안 제시

김동현¹, 정찬진², 이승오^{3*}

Proposal for an Aging Assessment Method to Improve Levee Maintenance

Dong-Hyun Kim¹, Chan-Jin Jeong², Seung-Oh Lee^{3*}

Abstract: This study aims to develop an integrated evaluation model for systematically assessing the aging status of levee facilities and to validate its effectiveness by applying it to a hypothetical levee. The aging assessment of levees is broadly categorized into structural aging assessment and institutional aging assessment. The structural assessment includes factors such as overtopping stability, slope stability, and seepage stability. The institutional assessment focuses on activity state assessment and seepage state assessment, based on safety inspection grades and performance evaluation grades. In this study, equal weights (50%) were assigned to each evaluation category, and the structural aging assessment score and institutional aging assessment score were integrated to derive a comprehensive aging score. By combining structural and institutional aging assessments, this study presents a methodology that allows for a more accurate understanding of the overall aging status of levee facilities. Additionally, future research is suggested to improve the weighting methods for each evaluation category and to validate the model using various real-world cases. It is expected that this will enhance the stability and sustainability of levees and contribute to the establishment of effective maintenance strategies.

Keywords: Levee, Aging assessment, Technical aging, Institutional aging

1. 서론

최근 기후변화로 인한 홍수량 증가로 국가하천의 제방 유실 등 대규모 홍수피해가 빈번하게 발생하고 있다. 2006년에는 태풍 ‘에위니아’의 영향으로 영천강 일대 제방 6개소가 붕괴되어 인근 주택 및 농지 침수가 발생되었고 상당한 피해가 발생하였다. 최근에는 대표적으로 2020년 8월초 영산강, 섬진강, 금강, 낙동강 유역을 강타한 집중호우로 인해 섬진강의 본류와 지류, 영산강의 지류 등에서 다수의 제방이 붕괴 및 유실되었다. 2021년 8월에는 제 12호 태풍 ‘오마이스’ 내습 시 시간당 평균 113 mm의 집중호우가 내려 도로와 제방이 일부 붕괴되거나 유실돼 막대한 재산 및 인명피해가 발생하였다. 이러한 현상은 기후변화에 따른 홍수량 증가가 현실화되고 있음을 시사하며, 향후 4대강 유역의 기본홍수량은 20%에서 최대 50%까지 증가할 것으로 예상된다(ME, 2023).

최근 국가하천 제방 피해는 제방의 외형적인 규격보다는 체제 및 기초 지반의 문제로 인한 누수와 파이핑 현상 등 구조

적 요인에 기인하고 있다. 그러나 현재 하천기본계획 등에서는 주로 제방의 외형 규격인 제방고, 둑마루폭, 비탈경사 등에 대한 조사 및 정비계획을 수립하고 있어 제방 자체의 안전성에 대한 검토는 미흡한 실정이다. 또한, 제방 및 부속물의 안전점검은 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」(MOLIT, 2021)에 따라 이루어지지만, 주로 외관 상태평가에 초점이 맞춰져 있어 실제 안전성 평가에는 한계가 있으며, 지방하천 제방은 안전성 검토의 대상에서 제외되어 있다.

이에 더해 인구 고령화, 노동시간 감소, 건설업종기피 등으로 건설산업 구조가 변화하고 있어 시간이 지남에 따라 관리가 필요한 시설물은 급격히 증가하고 있다. 이러한 노후화 시설물의 증가는 정부, 지자체, 민간 등 유지관리 주체의 재정 부담을 가중시킬 것으로 예상되며, 시설물 관리에 대한 부담은 더욱 심화되고 있다. 안전점검 및 진단에 관한 법령은 지속적으로 개정되어 왔으나, 시설물에 대한 점검 및 유지관리 체계의 전반적인 개선 노력이 여전히 필요하다.

MOLIT(2023)의 ‘제5차 시설물의 안전 및 유지관리 기본계획’에서는 정책, 제도, 기술, 산업 등 다양한 분야에서 개선이 필요하다는 의견을 제시하였다. 또한, 2020년 「지속가능한 기반시설 관리 기본법」(MOLIT, 2020)의 시행으로 기반시설 관리 기본계획이 수립되었으며, 보다 실효성 있는 국가하천 유지관리 방안을 마련하고자 하였다. 현재 국가하천 유지관리는 실태조사, 점검 및 진단, 성능평가, 관리대책 수립 등의 단

¹정희원, 홍익대학교 건설환경공학과 연구교수

²정희원, 홍익대학교 건설환경공학과 석사과정

³정희원, 홍익대학교 건설환경공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: seungoh.lee@hongik.ac.kr

Civil and Environmental Engineering, Hongik University, Seoul, 04066, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2025년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2025년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

계로 이루어지지만, 인력 및 재정 마련 등의 어려움으로 선제적 유지관리에 한계가 있는 실정이다.

기후변화로 인한 구조적 피해에 대응하기 위해서는 제방의 규격과 내부 토질 특성을 종합적으로 평가하는 제도를 도입하는 등 제방 구조 안전성 점검 체계의 개선이 필요하다. 미국은 2014년부터 모든 제방에 대한 안전성 평가 제도를 시행하여 ‘제방 DB 구축 → 취약 제방 선별(사전평가) → 안전성 평가(본평가) → 보강 및 유지관리’의 체계를 구축하고 있으며, 일본도 제방의 규격, 기초지반, 내부재료 특성 등을 고려한 정기 점검 및 평가를 통해 보수·보강을 실시하고 있다(ME, 2023).

이에 따라 우리나라도 제방의 기술적 노후도와 함께 제도적 노후도를 종합적으로 검토하여 제방 유지관리의 효율성을 높일 필요가 있다. 본 연구는 제방 유지관리를 위한 기술적, 제도적 노후도에 대한 현황과 한계를 분석하고, 개선 방안을 제시하고자 한다. 이를 통해 기후변화에 대응하는 제방 안전성 확보와 지속가능한 유지관리 체계 구축에 기여하고자 한다.

2. 시설물 노후도 평가 고찰

2.1 시설물별 노후도 평가 개요

시설물은 시간의 경과와 함께 재료의 열화, 환경 변화, 사용 조건 등의 영향으로 성능이 저하될 수 있다. 이러한 노후화는 시설물의 안전성 저하와 기능 상실을 초래하여 국민의 생명과 재산에 위협이 될 수 있다. 따라서 시설물의 노후도를 체계적으로 평가하여 사전에 문제를 발견하고 적절한 유지관리 대책을 수립하는 것은 시설물 관리에 있어서 필수적이다.

일반적인 노후도 평가는 다음과 같은 절차로 이루어진다. 첫째, 시설물의 기본 정보와 과거 유지관리 이력을 수집하여 현황을 파악한다. 둘째, 현장 조사를 통해 시설물의 물리적 상태와 열화 정도를 확인한다. 셋째, 평가 기준과 방법을 설정하여 수집된 데이터와 조사 결과를 바탕으로 노후도를 산정한다. 마지막으로, 평가 결과를 분석하여 유지보수 필요성을 판단하고 적절한 대책을 수립한다. 시설물의 노후화는 안전성 저하, 기능 상실, 유지관리 비용 증가 등 다양한 문제를 초래할 수 있다. 따라서 시설물의 노후도를 정확히 평가하고 적절한 유지관리 대책을 수립하는 것은 매우 중요하다. 본 장에서는 시설물 노후도 평가의 필요성과 일반적인 접근 방법을 살펴보고, 상수도관, 교량, 건축물 등 다양한 시설물의 노후도 평가 사례를 고찰하여 제방시설물의 노후도 평가에 적용할 수 있는 방안을 도출하고자 한다.

2.2 시설물별 노후도 평가 사례

2.2.1 상수도관의 노후도 평가

상수도관은 지하에 매설되어 있어 외부에서 상태를 직접

확인하기 어렵기 때문에 노후도 평가를 통해 파손 위험성을 예측하는 것이 중요하다. Kim(2003)은 상수도관의 노후도에 영향을 미치는 요인으로 토양, 물, 주변환경, 관 자체, 사고 및 민원 이력 등을 제시하였다. 토양의 종류, 부식성, 매설 깊이 등 토양 요인은 관의 부식에 영향을 주며, 수질의 부식성, 수압 등 물 요인은 관 내부의 부식을 촉진한다. 또한 매설 지역의 교통량과 진동 등 주변환경 요인, 관경, 매설년도, 재질 등 관 자체의 특성, 그리고 누수 및 파손 사고, 수질 민원 등의 사고 및 민원 이력이 관의 노후화를 반영한다.

노후도 평가는 각 요인에 대한 데이터를 수집하고 이를 점수화하여 종합 점수를 산정하는 방식으로 이루어진다. 파손 이력 분석과 파손 확률 모델을 활용하여 관의 잔존 수명을 예측하기도 한다. 이러한 평가 방법은 지하 시설물의 특성상 직접적인 관찰이 어려운 상황에서 다양한 요인을 종합적으로 고려하여 노후화를 평가한다는 점에서 의미가 있다.

2.2.2 교량의 노후도 평가

교량은 도로 교통의 핵심 인프라로서, 노후화로 인한 안전성 저하는 심각한 사고로 이어질 수 있다. Al-Rashed et al.(2023)은 교량의 노후도에 영향을 미치는 요인으로 환경, 구조적 결함, 교통량, 사용 연수, 유지보수 이력, 기술 및 설계의 발전 등을 제시하였다. 습도, 온도 변화, 염해 등 환경 요인은 교량 재료의 열화를 촉진하며, 피로와 과도한 하중 등 구조적 결함은 구조적 손상을 유발한다. 교통량의 증가는 교량에 가해지는 부담을 증가시키고, 사용 연수가 길어질수록 재료의 열화와 피로 누적이 발생한다. 유지보수 이력은 노후화 진행을 지연시킬 수 있으며, 최신 설계 기준과의 차이는 안전성에 영향을 미친다.

교량 노후도 평가는 정기적인 안전 점검과 상세한 구조 분석을 통해 이루어진다. 비파괴 검사 기술과 실시간 모니터링 시스템을 활용하여 교량의 상태를 지속적으로 파악하고, 평가 결과에 따라 보수·보강 계획을 수립한다. 이러한 평가 방법은 구조적 안전성에 초점을 맞추고 있으며, 첨단 기술을 활용하여 정확한 상태 진단이 이루어진다.

2.2.3 건축물의 노후도 평가

건축물 특히 아파트와 같은 공동주택은 거주자의 안전과 생활 편의에 직접적인 영향을 미치므로 노후도 평가가 중요하다. Cho and Lee(2009)는 건축물의 노후도 평가를 물리적, 사회적, 경제적 차원으로 구분하여 접근하였다. 물리적 차원에서는 구조 안전성, 재해 안전성, 편의성 등이 고려되며, 사회적 차원에서는 세대 친화성, 주변 안전성, 커뮤니티 시설 등이 평가된다. 경제적 차원에서는 유지관리성, 환경 친화성 등이 중요하게 다루어진다.

평가는 현장 조사와 설문 조사를 통해 정량적·정성적으로

이루어지며, 종합적인 평가 결과를 토대로 리모델링 또는 재건축 여부를 결정한다. 건축물 노후도 평가는 물리적 요인뿐만 아니라 사회적, 경제적 요인을 함께 고려하는 종합적인 접근 방식을 취한다는 점에서 특징이 있다.

2.3 국외 제방시설물 노후도 평가

국외에도 국내와 유사하게 직접적인 노후도 개념보다는 제방의 안정성을 평가를 통해 하천 제방을 관리하고 있다. 일본의 제방 안정성 평가기준은 일본 MLIT(2004)의 하천제방 설계 지침에 제시되어 있다. 국내와 유사하게 활동안전율과 누수안전율을 활용하여 제방 안정성 평가를 실시하고 있다. 미국의 제방 안정성 평가기준은 미공병단의 ‘Design and construction of levee (USACE, 2000)’에 제시되어 있다. 미국의 경우 시공 및 설계 조건에 따라 적용 강도 및 최소 안전율을 구분하여 평가하고 있다. 시공 및 설계조건은 제방 시공 직후, 장기간 정상 침투 시, 급격한 수위 저하 시, 지진 시로 구분하고 있다. 국외의 제방시설물 안정성 평가와 비교하였을 경우 활동 안정성평가는 다소 높은 기준을 갖고 있으나, 누수의 경우는 반대로 다소 낮거나 유사한 수준의 기준을 갖고 있음을 확인하였다.

미국은 제방의 위험도를 평가하기 위하여 제방안전프로그램을 수행하고 있으며, 기본적으로 위험도 측정을 위하여 제방의 위험요소(hazard), 성능(performance), 피해 발생 결과(consequence)를 기반으로 수행하고 있다. 이는 피해관점에서 제방의 위험도를 평가하는 것으로 볼 수 있다.

일본의 경우 장수명화와 유지관리비용의 절감을 기본방향으로 하여 지속적 점검과 예방보전에 중점을 두고 있다. 1차 평가에서는 점검자의 의해 시설물의 상태를 평가하며, 2차 평가에서는 시설관리 조직에 의한 평가를 수행하여 종합평가를 수행한다. 해외의 경우도 유지관리의 효율성은 강조하고 있으나 재정상태를 직접적으로 평가한 평가기준은 미비한 실정이다.

2.4 노후도 평가항목 및 방법 검토

시설물별 노후도 평가 사례를 종합적으로 검토하면 다음과 같은 공통점과 차이점을 발견할 수 있다. 공통적으로 모든 시설물에서 물리적 특성, 환경적 요인, 운영 및 유지관리 이력 등이 노후도에 영향을 미치는 주요 요인으로 고려된다. 평가

방법 역시 정량적 평가와 정성적 평가를 병행하여 노후도 산정이 이루어지며, 안전성 확보를 위한 의사결정 도구로 활용되고 있다.

반면 시설물의 특성에 따라 평가항목과 방법에는 차이가 있다. 상수도관은 토양 부식성 및 수질 부식성이 중요하며, 교량은 교통량과 환경 요인이 큰 영향을 미친다. 건축물은 사회적·경제적 요인이 크게 작용한다. 또한 시설물의 특성에 따라 점수화 방법, 비파괴 검사, 모니터링 시스템 등 다양한 평가방법이 적용되며, 각 시설물에 적용되는 법령과 관리 체계도 상이하다.

3. 제방시설물의 유지관리체계

3.1 제방시설물 유지관리체계

시설물안전법에 의거 국가하천 제방시설물의 경우 모두 제2종시설물으로써 법적으로는 정기안전점검 및 정밀안전점검, 성능평가를 의무적으로 실시하여야 한다. Table 1과 같이 정밀안전점검은 등급에 따라 1~3년에 1회 실시, 성능평가는 5년에 1회 실시하도록 되어있다. 정밀안전진단은 세부지침 상 평가항목 및 평가기준은 제시되어 있으나, 의무사항이 아니기 때문에 실제로 실적건수도 5건 미만으로 나타나있다.

3.2 제방시설물 중대한 결함

시설물안전법에 의하면 대통령령으로 정하는 중대한 결함이 제시되어 있다. 점검 시 중대한 결함이 발견될 경우 관리주체는 조치명령 또는 중대한 결함에 대한 통보를 받은 날로부터 2년 이내에 보수·보강 등 필요한 조치에 착수해야 한다. 시설물안전법 세부지침(제방편)(MOLIT, 2021)에 의하면 제방시설물의 중대한 결함은 제체 비탈사면활동, 호안 및 직립구조물 기초부 세굴, 제체 및 접속부의 누수 또는 세굴, 직립구조물 철근콘크리트의 염해 또는 탄산화에 따른 내력손실이다. 이러한 중대한 결함은 노후도 평가 시 국부적인 혹은 세부적인 제방시설물 부재의 한계상태의 기준으로 볼 수 있다고 판단된다.

3.3 제방시설물 유지관리계획 및 목표

2020년 기반시설관리법(MOLIT, 2020)의 제정으로 국토

Table 1 Frequency of Safety Inspections and Performance Evaluations

Grade	Regular Safety Inspection	Detailed Safety Inspection		Detailed Safety Evaluation	Performance Evaluation
		Building	Other facilities		
A	At least once every six months	at least once every 4 years	at least once every 3 years	at least once every 6 years	at least once every 5 years
B · C		at least once every 3 years	at least once every 2 years	at least once every 5 years	
D · E	at least 3 times a year	at least once every 2 years	at least once every a year	at least once every 4 years	

교통부는 제1차 국가하천 관리계획을 수립하였다. 해당 계획에 의하면 국가하천은 최소유지관리기준에 의거 제방시설물을 평균 양호(B등급) 수준 이상으로 관리하는 것을 원칙으로 하고 있다. 이는 제도적으로 제방시설물의 노후도 목표기준으로 볼 수 있다.

3.4 제방시설물의 체계 상 점검항목

제방시설물의 유지관리는 크게 3가지 종류로 나눌 수 있다. 등급에 따라 반기에 1~2회 수행하는 정기안전점검은 육안점검으로 이루어져 있다. 정밀안전점검의 경우 육안점검에 재료시험을 포함하여 수행하며, 성능평가의 경우에는 육안점검, 재료시험에 더해 구조적 안전성평가를 추가하여 실시한다. 성능평가가 가장 상세한 점검방식이지만 실시주기가 가장 길다. 2018년 성능평가 도입 시 제방시설물의 성능평가체계는 정밀안전진단의 평가항목 기준을 대다수 활용하여 구축되었다. 정밀안전진단의 일부 지표들이 성능평가에서 내구성능과 사용성능으로 변경되어 재료시험이 수행되는 경우가 있다. Table 2에 나타나 있는 것처럼 정밀안전점검과 성능평가의 큰 차이점은 구조적 안전성능 평가이고, 정밀안전점검이 안전등급은 제방시설물의 상태등급, 성능평가는 구조적 안전성능이 포함된 성능등급이라 할 수 있다.

Table 2에는 제방시설물의 정밀안전점검 및 성능평가의 기본과업을 비교하였다. 자료수집 및 분석, 보수보강 방법 제안, 보고서 작성 등의 내용은 제외하였고, 현장조사 및 시험과 관련된 부분만 비교하였다. Table 2에 나타난 것처럼 평균적으로 3년 주기로 콘크리트 시험, 제방 중·횡단 측량, 수문자료 조사가 이루어져야 한다. 성능평가의 경우 재료시험의 항목은 다양하나 하천측량, 제체물리탐사, 제체 시추조사, 강제시험 등의 시설물의 상태를 면밀히 확인할 수 있는 항목들은 모

두 선택과업으로 되어 있다.

인력 및 예산 등을 고려할 때 선택과업을 수행하는 것은 현실적으로 어려움을 알고 있으나, 제방의 안전성 측면에서는 이를 주기적으로 실시해야 하는 것이 필요하다.

4. 제방시설물의 노후도 평가방안

제방시설물은 홍수와 같은 자연재해로부터 인명과 재산을 보호하는 중요한 시설물로서, 그 안전성과 기능 유지는 사회적으로 큰 의미를 갖는다. 그러나 시간이 지남에 따라 제방은 노후화되며, 이에 대한 종합적인 평가와 관리가 필요하다. 본 장에서는 제방시설물의 노후도 평가 개념을 제시하고, 기술적 노후도 평가와 제도적 노후도 평가를 통합한 노후도 평가 모델을 제안하였다.

4.1 노후도 평가 개념 제시

현재 제방시설물의 노후화 개념은 일반적으로 기반시설에서 사용되는 준공 후 경과년수를 기준으로 판단하고 있다. 이는 노후화시설물이라고 하는 기준일뿐 노후화에 따른 점검방식의 변화나 점검체계의 변화는 다루어지고 있지 않다. 제방의 실제 상태와 안전성을 충분히 반영하기 위해서는 노후화를 판단할 수 있는 노후도의 개념이 필요하다. 노후도에 따라 30년 이상 된 시설물이라도 적절한 유지관리로 양호한 상태를 유지할 수 있으며, 반대로 30년 미만의 시설물이라도 환경적 요인이나 설계·시공상의 문제로 인해 노후화가 진행될 수 있다. 따라서 제방시설물의 노후도 평가를 위해 경과년수 뿐만 아니라 구조적 상태, 유지관리 이력, 환경적 영향 등 다양한 요인을 종합적으로 고려하는 접근이 필요하며, 이를 위해 본 연구에서는 기술적 노후도와 제도적 노후도를 종합적

Table 2 Comparison of Detailed Safety Inspection and Regular Performance Evaluation for Levee Facilities

Category	Detailed Safety Inspection	Performance Evaluation
Field Investigation	<ul style="list-style-type: none"> • Visual inspection of basic facilities or main components and preparation of a visual inspection map • Investigation of hydrological data 	<ul style="list-style-type: none"> • Visual inspection of all components and preparation of a visual inspection map
Material Testing	<ul style="list-style-type: none"> • Non-destructive concrete strength test (rebound hardness) • Measurement of concrete carbonation depth • Crack depth investigation • Longitudinal and cross-sectional surveying of embankments 	<ul style="list-style-type: none"> • Non-destructive concrete strength test (rebound hardness) • Measurement of concrete carbonation depth • Crack depth investigation • River surveying (optional task) • Geophysical survey of embankments (optional task) • Embankment drilling investigation (optional task) • Steel material testing (optional task) • Operation check of mechanical, electrical, and instrumentation equipment (optional task)

으로 고려하는 개념의 제방의 노후도 평가 방안을 제시하였다.

제도적 노후도는 제방시설물의 관리와 유지보수를 위한 법령, 정책, 관리 체계 등의 시설물안전법에서 의무적으로 수행 중인 정밀안전점검, 정밀안전진단의 결과에 의한 제도적인 측면에서의 노후도를 의미한다. 제방시설물의 경우 시설물안전법에 의하여 제2종시설물로 관리되고 있으며, 정밀안전점검과 성능평가를 의무적으로 실시하고 있다. 실시주기에 따라 안전등급과 성능등급이 A~E등급 사이로 도출된다. 그러나, 이는 각 부재별로 평가 후 단계별 가중치 및 최소값 접근 방식을 통해 제방시설물 전체의 안전등급이 도출되어 제방의 취약지점과 같은 국부적인 노후도 평가는 힘들다.

이에 기술적 노후도는 제방의 물리적 상태, 구조적 안전성, 재료의 열화 정도 등 세부적인 측면에서의 노후도를 의미한다. 이는 재료의 열화, 구조적 결함, 지반 침하, 수리학적 변화 등 물리적 요인에 의해 발생한다. 따라서 제방시설물의 노후도 평가는 기술적 측면과 제도적 측면을 모두 고려하여 종합적인 안전성 평가와 유지관리 전략을 수립하는 것이 중요하다. 이는 기후변화로 인한 홍수 위험 증가와 시설물의 노후화로 인한 위험에 효과적으로 대응하기 위한 필수적인 접근 방법이다. Table 3에는 제방시설물의 노후도 평가를 위해 제도적 노후도와 기술적 노후도의 영향 인자를 제시하였다.

Table 3 Identification of Factors influencing the Deterioration of Levee

Category	Factors	
Institutional Aging Assessment	• Elapsed years	Long-term
	• Safety Grade	Mid-term
	• Performance Grade	Long-term
Technical Aging Assessment	• Overtopping Stability	Short-term
	• Slope Stability	Short-term
	• Seepage Stability	Short-term

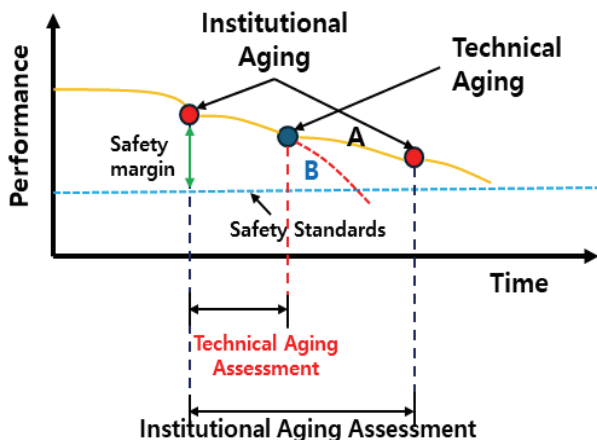


Fig. 1 Levee Aging Assessment Model Concept

Fig. 1은 제도적 노후도와 기술적 노후도의 개념도를 나타낸 것이다. 시설물의 성능은 경과년수에 따라 성능이 저하된다. 이 때, 노후도는 두 가지로 평가할 수 있는데 먼저 상태등급이나 성능등급으로 평가하는 것을 제도적 노후도라 명명하였다. 그러나, 제도적 노후도는 시설물의 국부적인 혹은 취약 지점의 상태를 대표할 수는 없다. 예를 들어 Fig. 1에서 제도적 노후도 평가에 의하면 A 추세를 따라가야 하나, 실제로 구조적 안전성 등 면밀히 시설물을 살펴보았을 때 B 추세를 따라가야 하는 경우가 발생할 수 있다. 이 때는 기술적 노후도를 고려해야 한다. 따라서 중장기적 관점에서는 제도적 노후도를 단기적 관점에서는 기술적 노후도를 평가하여 제방시설물의 유지관리를 수행해야 한다.

4.2 노후도 평가 모델

제방의 노후도 평가 모델은 기술적 노후도 평가 결과와 제도적 노후도 평가 결과를 통합하여 종합적인 노후도를 산정하는 방식으로 구성된다.

Fig. 2은 제방의 노후도 평가 모델을 나타낸다. 제방시설물의 노후도는 실시주기별로 이루어져야 한다. 중장기적 관점에서 제도적 노후도 평가가 필요하다. Fig. 1의 노란색 선이 제도적 노후도 평가를 통한 성능수준의 변화를 나타낸다. 이 때 안전등급 및 성능등급 변화 외에도 재정적인 부분도 검토가 필요하다. 안전등급 및 성능등급 산출 시 기본과업과 선택과업을 실시하게 되는데, 세밀한 제방시설물의 노후도 평가를 위해서는 선택과업이 필요하나 이는 재정적으로 관리주체의 부담이 크다. 안전등급이 C등급(보통) 시설물이라도 관리주체의 예산이 부족할 경우 후순위로 밀려날 수 밖에 없다. 따라서 같은 C등급이라 하더라도 관리주체의 재정상황에 따라 시설물의 노후도는 다르게 평가되어야 하는 것이 적절하다. 최근

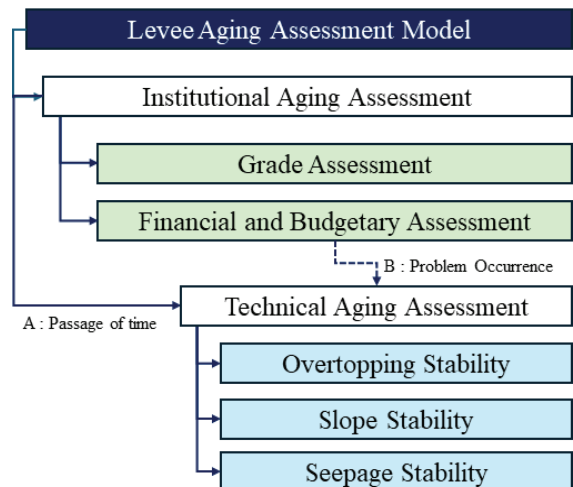


Fig. 2 Levee Aging Assessment Model

10년간 국가하천 유지·보수 연도별 예산추이를 확인하여 보면 2012년부터 2017년까지 꾸준히 감소하다가 최근 홍수로 인해 사고 발생 후 2020년까지 소폭 증가하였다. 그러나, 2012년 예산(약 1,997억원)에 비해 2020년의 예산(1,808억원)이 감소하였다. 이는 경과연수에 따라 증가하고 있는 중점관리 대상의 제방시설물의 노후도가 관리주체의 재정적 상황에도 영향을 받는다는 것을 의미한다. 즉, 제한된 재정 속에서 우선 순위 따라 제방시설물의 제도적 노후도가 관리되어야 함을 의미한다. 따라서 중장기 관점에서 유지관리에 대한 재정 및 예산 평가가 필요하다.

단기적 관점의 노후도 평가인 기술적 노후도는 Fig. 1의 B line으로 확인할 수 있다. 기술적 노후도는 시간 경과에 따라 시행도 가능하지만 제도적 노후도 평가 시 이상징후가 발생한다면 B line 가능성에 대한 확인이 필요하다.

4.3 노후도 평가 방안 제시

노후도 평가방안 제시를 위해 문헌 조사를 통해 기술적 및 제도적 노후도 평가를 위한 평가 항목을 각각 제시하였다. 제도적 노후도 평가 항목으로는 기존의 정밀안전점검 및 성능평가에서 실시하고 있는 상태등급 및 안전성능등급과 예산 및 재정 확보방안으로 제시하였다.

4.3.1 제도적 노후도 평가 항목

성능평가의 경우 2018년에 도입되어 5년에 1회 실시하고 있기 때문에 대부분의 제방시설물들이 1회 실시하여 성능등급으로 노후도 변화 추이를 판단하기에는 시기상조라 할 수 있다. 또한 정밀안전점검보다 세밀한 평가라고는 하지만 실제로 성능평가는 책임기술자의 의견에 따라 성능 가중치를 조율할 수 있으며, 제도가 정착화 되는 과정이다 보니 데이터의 확보가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 제도적 노후도 평가 항목을 크게 정밀안전점검의 안전등급의 변화와 시설물 개소수당 투입예산으로 제안하였다.

(1) 안전등급 변화 추이 분석

시설물안전법에 의거하여 관리주체별 관리하고 있는 제방 시설물은 약 1,500 개소이다(FMS, 2024). FMS에서 관리되고 있는 제방시설물은 모두 국가하천에 해당하는 시설물이다. 지방하천까지 포함한다면 그 개소수는 확대될 것이다.

경과연수 30년을 기준으로 하여 노후화를 판단할 때 FMS 자료를 기반으로 제방시설물의 노후화는 현재 약 24.0%를 나타내지만, 향후 20년 후에는 노후화 시설물이 86.2%로 급격히 증가한다. 이에 제방시설물의 성능수준(노후도)은 급격히 감소할 것으로 보인다. 제방시설물의 제도적 노후도는 안전등급의 변화 추이를 정량적으로 분석하는 것이 전제되어야

Table 4 Elapsed years of selected levee

Category	5~10 years	10~15years	15~20years
Number	6	6	1

한다. 그러나, 제방시설물은 유역특성, 강우특성, 제체의 구조적 특성 등이 다양하기 때문에 이를 하나의 식으로 일반화하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 안전등급의 변화 추이를 평가항목으로 제시하기 위하여 경과연수가 30년 이상인 시설물과 미만인 시설물을 대상으로 준공 후 안전등급이 처음으로 C등급이 발생한 연수를 평균하여 제시하였다.

정밀안전점검 횟수가 3회 이상이고, C등급 이하 이력이 존재하는 시설물을 대상을 선별하였다. 분석 결과 대상 시설물 중 30년 이상 된 제방시설물의 경우 준공연도나 최초 정밀안전점검을 시행 시기에 따라 안전등급의 결과가 상이한 것으로 나타나 분석 대상에서 제외하였다. Table 4에 나타난 것처럼 30년 미만의 제방시설물 13개소를 대상으로 최초 정밀안전점검 실시 이후 첫 C등급이 발생하는 경과연수를 산출한 결과 10.4년으로 나타났다. 첫 정밀안전점검 시행 이후 10년 이후부터는 C등급으로 저하될 가능성이 높으므로 기술적 노후도(상세점검)이 필요하다.

(2) 개소당 예산 분석

주기적으로 성능평가 및 정밀안전점검을 실시한다고 하더라도 성능평가 시 시추조사나 체체 물리탐사 등의 재료시험과 내구성능, 사용성능은 제방 형식이나 책임기술자의 판단에 의해 생략가능하다. 결국 이러한 부분들은 예산과 직결되기 때문에 지자체의 경우 재정적 지원이 없으면 현실적으로 어렵다. 따라서, 제방시설물의 개소당 예산을 기준으로 상대적으로 예산투자가 지속된 시설물은 가중치 1.0, 그 외의 시설물은 예산 투자 범위 따라 1.0~2.0 사이의 노후도 저하에 대한 가중치를 뒤야할 필요가 있다. 본 연구에서는 예산 투자에 대한 구체적인 가중치는 산출할 수 없으나, 향후에는 각 시설물에 투자된 예산에 따른 제도적 노후도를 함께 반영되어야 할 것으로 보인다.

(3) 제도적 노후도 평가방안

현재 분석 가능한 결과를 기반으로 제도적 노후도 평가방안을 Table 5와 같이 제시하였다. Table 5에 의하여 제방시설물이 2.5점 이하일 경우, 기술적 노후도 평가를 수행해야 한다. 제도적 노후도는 0.5~5점 사이의 값을 가지며, 0.5점일 경우 경과연수가 15년 이상이고, 안전등급이 C등급 이하로 노후도가 심각한 것을 의미한다.

$$A_j = 0.5\alpha\beta P \quad (1)$$

Table 5 Evaluation Criteria and Scoring for Technical Aging

Elapsed years	5~10	10~15	15 ≥
Score (P)	5	3	1
Grade	A	B	C, D, E
Weight (α)	2.0	1.5	1.0

여기서, A_f 는 제도적 노후도, P 는 경과년수에 의한 평가점수, α 는 안전등급에 의한 가중치, β 는 소요예산에 의한 가중치이다. 현재는 β 를 모두 1.0으로 가정하였다.

예를 들어, 경과년수가 15년 이상된 제방시설물의 경우 안전등급에 따라 최대 1.0점($0.5 \times 1.0(P) \times 2.0(\alpha) \times 1.0(\beta)$)을 평가받기 때문에 기술적 노후도 평가를 수행해야 한다. 또한, 경과년수가 5~10년된 시설물이 A등급일 경우 제도적 노후도는 5.0점으로 기술적 노후도 평가 미실시, C~E등급일 경우 2.5점으로 기술적 노후도 평가를 실시해야 하는 것을 의미한다.

4.3.2 기술적 노후도 평가 항목

기술적 노후도 평가 항목으로는 월류 안정성, 활동 안정성, 누수 안정성이 있으며, 제방의 구조적 안정성을 직접적으로 위협하는 주요 요인인 월류, 활동(사면 안정성), 누수에 중점을 두어 평가한다.

ME(2023)는 제방안전성 평가제 도입을 위한 제방시설물의 기초조사를 실시하였다. 시범대상 제방에 대하여 시추조사, 현상시험, 실내시험, 지반특성 분석 등을 수행하여 제체 내부의 불안전성을 분석하였다. 이와 함께 정밀안전점검 및 진단 세부지침 사항 등을 함께 고려하여 다음 설명과 같이 기술적 노후도 평가항목을 제시하였다.

Table 6 Safety Evaluation Criteria for Overtopping

Evaluation score	Evaluation Criteria
5	<ul style="list-style-type: none"> Levee height > Design Flood Level + Freeboard Revetment Height > Design Flood Level
4	<ul style="list-style-type: none"> Design Flood Level + Freeboard ≥ Levee height > Design Flood Level + (Freeboard × 0.9) Revetment Height ≥ Design Flood Level
3	<ul style="list-style-type: none"> Design Flood Level + (Freeboard × 0.9) ≥ Levee height > Design Flood Level + (Freeboard × 0.75), Revetment Height ≥ Design Flood Level
2	<ul style="list-style-type: none"> Design Flood Level + (Freeboard × 0.75) ≥ Levee height > Design Flood Level, Revetment Height < Design Flood Level
1	<ul style="list-style-type: none"> Levee height < Design Flood Level

(1) 월류 안정성(Overtopping stability)

월류 안정성 평가는 제방이 설계 홍수 수위를 초과할 때 발생할 수 있는 월류 현상에 대한 제방의 저항력을 평가한다. 이는 제방의 일반적으로 제방고를 검토하여 수행된다. Table 6에 따라 설계 홍수위를 초과하는 월류에 대한 저항력을 평가한다. 이는 제방의 여유고가 충분히 확보되어야 함을 의미하며, 관련 하천설계기준(KWRA, 2019)에 따라 판단한다. 주로 현장 측량을 통해 제방고를 확인하고 월류 가능성을 평가한다. 반드시 현장측량이 기반되어야 한다.

(2) 활동 안정성(Slope stability)

제방의 비탈면이 침식, 붕괴, 활동 등의 현상에 대해 얼마나 안정적인지를 평가한다. 비탈면의 경사도, 재료 특성, 배수 상태, 식생 상태 등을 고려하여 사면의 안정성을 평가한다. 제방의 비탈면이 침식, 붕괴, 활동 등의 현상에 대해 얼마나 안정적인지를 평가한다. 이는 사면 안정 해석을 실시하여 안전율(Factor of Safety)을 계산한다. Table 7을 기반으로 지반조사와 토질 시험을 통해 지반 물성을 확보하고, 한계평형해석법 등을 적용하여 사면의 안정성을 평가한다.

(3) 누수 안정성(Seepage stability)

누수 안정성 평가는 제방 내부를 통한 물의 침투와 관련된 위험을 평가한다. 주로 제방 본체나 기초에서의 물의 누수가 제방의 안정성에 미치는 영향을 평가하여 제방 파괴로 이어질 수 있는 파이핑 현상의 가능성을 진단한다.

식 (2), (3)는 각각 한계동수경사와 한계유속에 의한 한계치 산정식이다. Table 8은 한계치를 이용하여 누수와 관련하여 제방 시설물의 안전성을 평가하는 데 사용된다.

$$Limit\ value = \frac{Hydraulic\ gradient\ from\ seepage\ flow\ analysis \times 200}{Critical\ hydraulic\ gradient} \quad (2)$$

Table 7 Safety Evaluation Criteria for Slope Stability

Evaluation score	Evaluation Criteria
5	<ul style="list-style-type: none"> Safety Factor (SF) exceeds the Standard Safety Factor.
4	<ul style="list-style-type: none"> Safety Factor (SF) is equal to or exceeds the Standard Safety Factor, but there is loss of cross-sectional area in the levee body.
3	<ul style="list-style-type: none"> 90% of the Standard Safety Factor ≤ Safety Factor (SF) < 100% of the Standard Safety Factor
2	<ul style="list-style-type: none"> 75% of the Standard Safety Factor ≤ Safety Factor (SF) < 90% of the Standard Safety Factor
1	<ul style="list-style-type: none"> Safety Factor (SF) < 75% of the Standard Safety Factor

Table 8 Safety Evaluation Criteria for Seepage

Evaluation score	Evaluation Criteria
5	▪ The limit value is less than 100%
4	▪ The limit value is less than 100% ▪ The material composition is poor or uncertain
3	▪ The limit value is equal to or greater than 100% but less than 110%
2	▪ The limit value is equal to or greater than 110% but less than 130%
1	▪ The limit value is equal to or greater than 130%

$$\text{Limit value} = \frac{\text{Seepage velocity from seepage flow analysis} \times 100}{\text{Critical seepage velocity}} \quad (3)$$

(4) 기술적 노후도 평가 방안

기술적 노후도 평가 점수 산정은 정밀안전진단의 구조적 안전성평가 결과 산정방법과 동일하게 수행한다. 위의 율류, 활동, 누수 평가 결과를 종합하여 식(4)와 같이 점수를 산출한다. 해당 식은 시설물안전법 세부지침 (제방편)을 참고할 수 있다. 다만 제도적 노후도 평가 결과에 따라 기술적 노후도 평가를 실시한 경우에는 3가지의 안정성 평가를 모두 실시하여야 한다.

$$A_t = L + 0.3(H - L) \frac{\sum_{i=1}^{N-2} M_i}{5 \times (N - 2)} \quad (4)$$

여기서, N 은 안전성 평가항목수, L 은 검토항목의 안전성 평가점수 중 최솟값, H 는 검토항목의 안전성 평가점수 중 최댓값, M_i 는 검토항목의 최대 및 최솟값을 각각 1개씩 제외한 나머지 값들을 의미한다.

누수 안정성 평가를 위한 침투해석은 일반적으로 널리 사용되고 있는 유한요소해석 프로그램인 SEEP/W를 활용할 수

있다. 제체 내의 정상 침투류에 대한 해석 및 비정상상태의 흐름에 대한 해석을 수행한다. 활동 안정성평가를 위한 비탈면 안정 해석은 SLOPE/W를 활용할 수 있으며, 원호 형상의 파괴면, 활동 Block 특성의 가상파괴면, 불규칙 형상의 임의 파괴면 발생 등 다양한 해석이 가능하다.

예를 들어, 율류 평가3점, 활동평가4점, 누수평가3점인 경우 식에 의해 기술적 노후도를 3.18점($3 + 0.3(4 - 3) \{3 / (5 \times (3 - 2))\}$)으로 평가할 수 있다.

4.3.3 종합 노후도 평가 기준 및 방법

위의 제도적 노후도와 기술적 노후도 평가 항목을 통해 도출된 기술적 및 제도적 노후도 평가 결과로 제방의 종합적인 노후도(A)를 산정할 수 있다.

종합 노후도 평가는 경과년수, 안전등급, 소요예산으로 제도적 노후도(A_j)를 산출하고, 제방시설물의 전반적인 제도적 노후화를 평가하는 과정이다. 기술적 노후도 평가는 제도적 노후도 결과에 따라 합산할지 여부를 판단한다. Fig. 3에 나타난 것처럼 제도적 노후도가 2.5이하일 경우 기술적 노후도를 합산하여 종합 노후도를 판단하며, 가중치는 0.4와 0.6으로 합산한다. 기술적 노후도가 정밀하고 상세한 노후도이므로, 가중하여 평가하도록 구성하였다. 제도적 노후도가 2.5를 초과할 경우 상세 조사인 기술적 노후도 평가는 실시하지 않으며, 제도적 노후도가 제방시설물의 종합노후도로 산정된다.

Table 9는 최종적으로 산출된 종합 노후도의 평가기준이며, 점수 분포에 따라 5등급인 A~E등급으로 평가할 수 있다.

Table 9 Integrated Aging Criteria

Range	Grade	Score	Remarks
$4.5 \leq A \leq 5.0$	A	5	
$3.5 \leq A < 4.5$	B	4	
$2.5 \leq A < 3.5$	C	3	
$1.5 \leq A < 2.5$	D	2	
$\leq A < 1.5$	E	1	

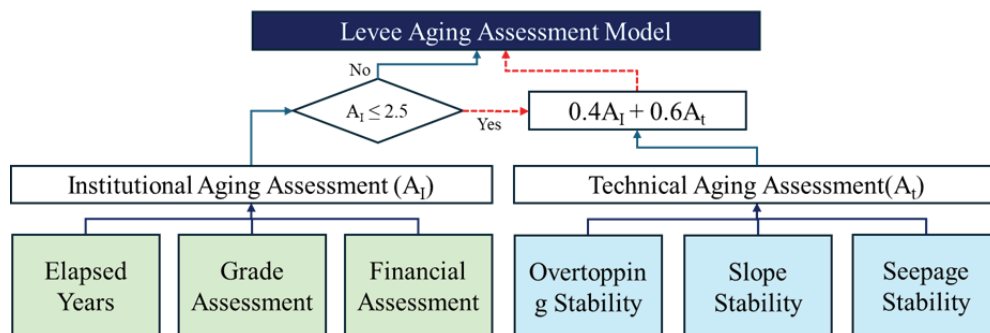


Fig. 3 Integrated aging assessment

4.4 노후도 평가방안 타당성 검토

2018년~2020년 사이에 집중호우로 인한 제방시설물에 피해가 다수 발생하였다. 국내의 A제방의 경우에도 2020년 이전의 정밀안전점검의 점검결과는 모두 A등급으로 평가받았으나, 집중호우로 인해 일부 제방 구간이 유실되는 사고가 발생하였다. 해당 제방은 정기안전점검도 ‘양호’의 평가를 받았다. 해당 제방은 준공년도 2004년, 준공 후 경과년수는 사고연도 기준으로 16년이 경과되었다.

기존의 유지관리체계에 의하면 정밀안전점검은 A등급이므로 제방시설물의 안전성 측면에서는 우수한 상태라 볼 수 있다. 하지만, 제시한 제방시설물의 종합 노후도 평가에 의하면 제도적 노후도는 1점으로 기술적 노후도 평가를 실시하여 제방시설물의 세부적인 안전점검의 실시가 필요하다.

해당 제방을 대상으로 일부 구간의 기술적 노후도 평가를 실시하였을 때 비탈면 활동에 대한 불안정한 구간이 발생하는 것으로 검토되었다. 이는 안전등급으로만 제방의 종합적인 안전성을 평가하기에는 한계가 있음을 알 수 있으며 제시한 노후도 평가방안을 통해 정밀안전진단으로만 수행되는 구조적 안정성 평가에 대한 실시주기 문제 등을 보완할 수 있다. 또한, 안전등급 뿐만 아니라 경과년수, 재정상태도 함께 고려할 수 있는 제도적 노후도 평가를 통해 안전등급만으로 관리하는 유지관리체계 한계를 보완할 수 있다.

5. 결론 및 향후연구

본 연구는 제방시설물의 노후화 상태를 평가하기 위한 통합적인 평가 모델을 제시하였으며, 이 모델은 기술적 노후도 평가와 제도적 노후도 평가를 포함한다.

제방시설물의 제도적 노후도 평가는 법령에 근거한 제방 관리와 유지보수를 통해 산정된 안전등급, 경과년수, 재정 상황을 고려하여 노후화 정도를 평가하는 것을 목표로 한다. 제도적 노후도 평가는 운영 및 유지관리 이력, 점검 및 진단 기록, 보수·보강 이력, 과거 사고 및 피해 이력이 중요하며, 관리 체계의 효율성, 유지관리 예산 및 인력 확보 등의 상황도 엿볼 수 있다.

기술적 노후도 평가항목은 4~6년 주기의 정밀안전진단에서만 수행하는 평가 중 일부를 반영하여 제시하였다. 기술적 노후도 평가는 율류 안정성, 활동 안정성, 누수 안정성 등의 주요 요소를 중심으로 수행되도록 제시하였다. 최종적으로는 기술적 노후도 평가와 제도적 노후도 평가의 결과를 합산하여 종합 노후도를 제시하였다.

이를 검증하기 위하여 2020년에 사고가 발생하였던 제방을 대상으로 종합 노후도 평가방안을 적용하였고, 그 결과 안

전등급으로만 제방시설물을 유지관리하는 한계를 보완할 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 제방시설물의 기술적 상태와 제도적 관리 체계를 종합적으로 평가함으로써, 보다 효과적인 유지관리 전략을 수립할 수 있는 기초를 제공하였다. 제도적 노후도는 장기적 관점의 유지관리전략에 활용될 수 있고, 기술적 노후도는 단기적 관점과 제방의 안전성을 구체적으로 평가할 수 있다. 이를 통해 제방시설물의 안정성과 기능성을 지속적으로 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

현재는 점수 평가체계에 맞춰 중요도를 임의로 설정하였다. 그러나 전체적인 제방의 노후도 평가결과를 합리적으로 도출하기 위해서는 각 항목별 중요도에 따라 상이한 가중치를 산정하는 것이 중요하다. 또한 기술적 노후도 평가의 실시 기준값 설정 근거를 뒷받침하기 위해 실사례를 통한 검증이 필요하며, 제도적 노후도 평가 시 필요한 재정적 평가기준을 각 관리주체별 유지관리예산 등의 통계분석을 통해 제시할 필요가 있다. 향후, 평가 모델 내 각 평가 항목의 가중치를 합리적으로 산정하기 위한 방법론 연구 등 추가적인 연구가 필요하다고 판단되며, 전문가 의견을 반영한 델파이 방법, 계층적 분석법(AHP) 등을 활용하여 평가 항목 간의 상대적 중요도를 객관적으로 결정하는 방안을 연구할 필요가 있다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 미래변화 대응 수자원 안정성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.(RS-2024-00332877)

References

1. Ministry of Environment. (2023). Establishment of Introduction Plan for Embankment Safety Evaluation System and Preliminary Investigation (in Korean).
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2021). SPECIAL ACT ON THE SAFETY CONTROL AND MAINTENANCE OF ESTABLISHMENTS (in Korean).
3. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2020). FRAMEWORK ACT ON SUSTAINABLE INFRASTRUCTURE MANAGEMENT (in Korean).
4. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2016). River Maintenance and Repair Manual (in Korean).
5. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Land Safety Management Institute. (2021). Detailed Guidelines for the Implementation of Facility Safety and Maintenance Management (Performance Evaluation Edition) (in Korean).
6. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Land Safety Management Institute. (2021). Detailed Guidelines for the Implementation of Facility Safety and Maintenance Management

- (Safety Inspection and Diagnosis Edition) (in Korean).
7. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2023). 5th Basic Plan for Facility Safety and Maintenance Management (in Korean).
 8. Ministry of Land, Maritime and Fisheries, Korea Facility Safety Corporation. (2010). Detailed Guidelines for Safety Inspections and Precision Safety Diagnoses (in Korean).
 9. Korean Water Resources Association, Korean River Association. (2019). Commentary on River Design Standards (in Korean).
 10. Kim, J. H. (2003) Improvement of the Evaluation Method for Deteriorated Water Pipes, *Journal of Water Treatment*, 11(2), 63-73 (in Korean).
 11. Al-Rashed, R., Abdelfatah, A., and Yehia, S. (2023). Identifying the Factors Impacting Bridge Deterioration in the Gulf Cooperation Council. *Designs*, 7(6), 126.
 12. Cho, S. H., and Lee, T. K. (2009). A Study on the Evaluating Indicators of the Level of Deterioration in High-rise and high-density Apartments, *Journal of the Korean Housing Society*, 20(4), 131-142 (in Korean).
 13. USACE (2000). Design and construction of levees.
 14. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2004). River embankment design guidelines (in Korean).

Received : 10/16/2024

Revised 12/02/2024

Accepted : 12/04/2024

요 지 : 본 연구는 제방시설물의 노후화 상태를 체계적으로 평가하기 위한 통합 평가 모델을 개발하는 것을 목적으로 한다. 제방의 노후도 평가는 크게 기술적 노후도 평가와 제도적 노후도 평가로 구분되며, 구조적 평가는 월류 안정성, 활동 안정성, 누수 안정성 등의 요소를 포함한다. 제도적 평가는 활동의 상태평가와 누수의 상태평가를 중심으로 진행되며, 이는 안전점검등급과 성능평가등급을 기반으로 한다. 본 연구에서는 각 평가 항목에 중요도에 따라 가중치를 부여하여 기술적 노후도 평가 점수와 제도적 노후도 평가 점수를 통합하여 종합 노후도 점수를 산출하였다. 본 연구는 구조적 및 제도적 노후도 평가를 통합함으로써 제방시설물의 전반적인 노후화 상태를 보다 정확하게 파악할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한, 향후 연구에서는 평가 항목별 가중치 산정 방법의 개선과 다양한 실제 사례에 대한 모델의 검증이 필요함을 제안한다. 이를 통해 제방의 안정성과 지속 가능성을 높이고, 효과적인 유지관리 전략을 수립하는 데 기여할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 제방시설물, 노후도 평가, 기술적 노후도, 제도적 노후도
