

저수지 생애주기 유지관리를 위한 성능저하예측 모델 연구

이후석, 김란하, 조종연*
유니콘스(주)

A Study on the Performance Prediction Model for Life Cycle Maintenance of Reservoir

Huseok Lee, Ran-Ha Kim, Choong-Yuen Cho*
Unicons

요약 2020년부터 시행된 「지속가능한 기반시설 관리기본법」에 의해 저수지는 체계적인 유지관리와 성능개선 등의 선제적인 관리로 노후화에 따른 생애주기 비용을 최소화하도록 관리해야 한다. 생애주기를 고려한 유지관리를 위해서는 공용기간이 증가함에 따라 지속적인 성능저하에 의해 수명이 종료되는 시점을 생애 주기적인 관점에서 도출하는 것이 필수적이며 이를 위해서 저수지의 성능저하예측 모델 개발이 요구된다. 본 논문에서는 저수지를 주요 복합시설인 제체, 여수로, 취수시설로 구분하고, 생애주기 유지관리를 위한 성능저하예측 모델을 개발하였다. 모델 개발을 위해 농어촌공사의 농업기반시설 시스템(RIMS; Rural Infrastructure Management System)이 관리 중인 유지관리 정보 데이터를 수집하였으며, 수집된 데이터를 통계적으로 분석하여 모델 개발에 활용 가능한 데이터를 선별하고 추세분석을 통해 모델을 개발하였다. 개발된 모델을 통해 저수지가 현행의 유지관리 체계에서 예상되는 기대수명과 미조치시 예상되는 기대수명을 예측하였으며, 현행 유지관리체계에서의 기대수명은 미조치시 기대수명보다 약 네 배가 증대되는 것으로 나타났다. 본 논문을 통해 제안된 모델을 활용하여 향후 저수지의 생애주기를 고려한 운영관리와 유지보수의 의사결정 지원이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract According to the Framework Act on Sustainable Infrastructure Management, which has been enforced since 2020, reservoirs should be managed to minimize life cycle costs caused by aging through preemptive management such as systematic maintenance and performance improvement. For maintenance in consideration of the life cycle, it is essential to derive the end of life due to continuous performance degradation as the common period increases. For this purpose, it is necessary to develop a performance-predicting model for reservoirs. In this study, a reservoir was divided into main complex facilities to develop a model for the maintenance of the life cycle. A model was developed for each facility. For model development, maintenance information data were collected under management by the Rural Community Corporation. The data available for model development were selected by analyzing the collected data. The developed model was used to predict the expected life expectancy of the reservoir in the current maintenance system and the expected life expectancy in the case of no action. By using the developed model, it is expected that it will be possible to support decision making in operation management and maintenance while considering the life cycle of the reservoir.

Keywords : Reservoir, Life Cycle, Performanc Perdiction Model, Infrastructure, Maintenance

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반 및 재해대응 기술개발 사업의 지원을 받아 연구되었음. (320004-01)

*Corresponding Author : Choong-Yuen Cho(Unicons CEO, Ph.D)

email: uniconsccy@hanmail.net

Received December 1, 2020

Revised December 21, 2020

Accepted January 8, 2021

Published January 31, 2021

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

2020년 1월 1일 「지속가능한 기반시설 관리기본법 (약칭: 기반시설관리법)」이 시행되었다. 이 법의 시행 목적은 기반시설의 체계적인 유지관리와 성능개선을 통하여 국민이 보다 더 안전하고 편리하게 기반시설을 활용할 수 있도록 하기 위한 것이다. 이 법의 대상 기반시설 15종에 포함되어 있는 저수지는 대부분의 시설이 노후화되어 시설의 안전 성능에 대한 평가가 필요하다. 또한 최근 국내 이상기후 현상으로 자연재난의 발생빈도가 증가함에 따라 저수지는 농업생산과 관련된 역할 뿐만 아니라 자연예방은 물론 인적·물적 자산피해 예방 등의 사용 성능의 평가도 요구되고 있다. 따라서 기반시설관리법 시행에 발맞추어 저수지의 현재 성능 저하 문제점을 파악하고 생애주기를 고려한 유지관리를 위해서 성능평가가 요구되는 실정이다.

J. H. Lee 등은 한국 지리 기후 분류 체계에 의해 분리된 양수장 및 배수장에 초점을 맞추어 성능평가 모델 연구를 진행하였다. 성능평가 모델은 통계모델 분석 결과 변수 간 다중 공선성(Multicollinearity) 문제를 해결하고, 라쏘(LASSO; Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) 기법을 활용하여 개발하였다. 성능평가 모델을 이용한 각 시설의 평가는 기후 변화로 인한 성능 저하를 예측하기 위해 기후 변화 대응 변수의 분류하고 활용하였다. 그러나 기후 변화 시나리오 자체의 한계점과 제한한 성능평가 모델의 평가방법이 기상자료 중 온도에 대한 가장 높은 매개변수를 부여하고 있어 기후 변화에 따른 성능저하 원인 및 정도를 제한적으로 규명하는 한계를 보였다[1]. C. B. Lee 등은 2004~2013년까지 저수지 정밀안전진단 보고서를 통하여 농업용 저수지의 유형화에 사용할 수 있는 자료를 추출하고 통계적 방법을 이용하여 유형화에 이용할 수 있는 성능 인자를 결정하여 자료의 빈도 분석을 통해 농업용 저수지를 유형화하였다. 그러나 저수지의 유형화 과정에서 손상의 유형이 아닌 통계의 인자 결정에서 형태적 또는 지리적 등 독립적인 특성을 가지는 항목으로 결정하는 부분에서 데이터 분류에 어려움을 보였다[2]. K. H. Park 등은 생애주기비용을 고려한 성능기반 최적 유지관리 전략 수립 시스템을 개발하였다. 교량의 공용기간 중 유지관리비용과 성능이라는 상반되는 목적을 균형 있게 만족시킬 수 있는 유지관리 시나리오의 생성을 다중목적 조합의 최적화 문제로 정식화하고 유전자알고리즘을 적용하였다. 개발

된 시스템은 교량 유지관리 전략 수립의 방법을 개선하여 교량 관리주체에게 다양한 제약 및 요구조건에 부합하는 효율적인 도구로 활용이 가능하였다[3].

기존의 연구는 생애주기를 고려한 성능평가 또는 성능평가모델 개발 등이 진행되었지만 저수지의 현황을 고려한 성능저하예측 모델은 연구가 미흡한 상황이다. 따라서, 본 연구에서는 저수지의 생애주기를 고려한 유지관리를 수행하기 위한 기초연구로 저수지의 점검진단 결과를 추세 분석하여 저수지의 성능저하를 예측하는 모델을 개발하고 기대수명을 예측하는 연구를 수행하였다.

2. 저수지 성능요소 정보 현황

2.1 연구절차 및 분석 방법

본 연구는 성능저하예측 모델 개발을 위해 Fig. 1.과 같이 4단계의 연구를 수행하였다. 먼저, 성능저하요인 분석 및 성능평가를 진행한 기존 동향을 분석하고, 성능요소 정보 현황은 시설물 현황자료와 통계연보 및 농업기반시설 시스템(RIMS)자료를 활용하여 조사하였다. 다음으로 조사된 데이터를 토대로 성능저하예측 모델을 개발하고, 개발 모델을 통해 저수지의 수명을 예측하였다.

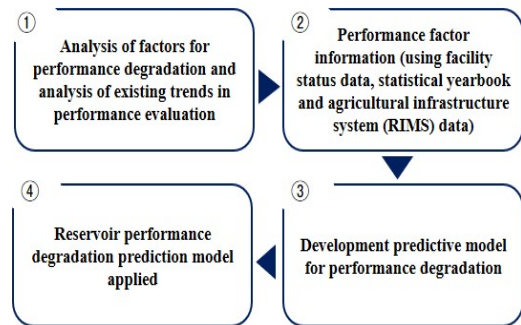


Fig. 1. Research procedure

2.2 저수지 성능요소 정보

한국농어촌공사에서는 농어촌정비법에 의해 지속적으로 정밀안전진단을 수행하고 있으며, 외관조사를 통한 부재별 상태평가, 안전성 평가를 진행하여 이를 토대로 종합평가와 안전등급을 산정한다[4]. 이러한 저수지 안전등급은 다양한 세부 부재와 시설물들의 평가를 통해 결정되므로 각각 성능평가를 하기에는 그 범위가 방대하고 표준화된 저수지 모델을 구성하기에는 평가의 한계가 존

재한다. 따라서, 저수지를 구성하는 부재별 특성과 성능을 고려하여 성능저하예측 모델을 개발해야 한다. 저수지를 구성하는 부재는 Fig. 2와 같이 제체, 여수로, 취수시설로 구분할 수 있다. 제체는 저수지의 본체로 댐마루, 상류사면, 하류사면 등을 구성되어 댐과 같이 물을 가두는 기능을 갖는 구조물이고, 여수로로는 용량을 초과한 물을 방류하기 위한 시설로 접근수로 및 물넘이, 방수로, 감세공 및 접속하천 등으로 구분된다. 취수시설은 저수지에 가두어진 물을 이용하는 시설로 취수탑과 취수터널 등으로 구분되어 기계시설의 특성을 보인다. 따라서 한 개의 성능저하예측 모델로 저수지 성능을 예측하는 것은 적절하지 못하며 주요세부 부재인 제체, 여수로, 취수시설별로 성능저하예측 모델을 개발하였다.

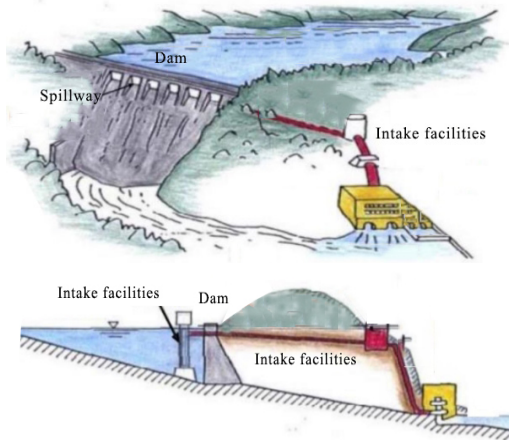


Fig. 2. Reservoir rating status by absence

2.3 저수지 성능요소 등급현황

저수지의 안전진단 결과 정보는 농업기반시설관리시스템(RIMS)에 등록하여 관리되고 있으며, Table 1.은 2019년 부재별 저수지 등급 현황을 정리하여 나타낸 것이다[5].

Table 1. Reservoir rating status by absence

Spec.	Division	A	B	C	D	E	Sum
Dam	Reservoir (place)	30	873	3470	932	3	4405
	ratio(%)	0.68	19.82	78.77	21.16	0.07	100
Spillway	Reservoir (place)	12	1258	4347	1917	9	7543
	ratio(%)	0.16	16.68	57.63	25.41	0.12	100
Intake facilities	Reservoir (place)	11	1179	3210	612	8	5020
	ratio(%)	0.22	23.49	63.94	12.19	0.16	100

Fig. 3.은 제체, 여수로, 취수시설의 등급 현황을 그래프로 나타낸 것으로 여수로, 제체, 취수시설 순으로 C등급 발생 비율이 높아 안전성능이 낮은 것으로 예측된다.

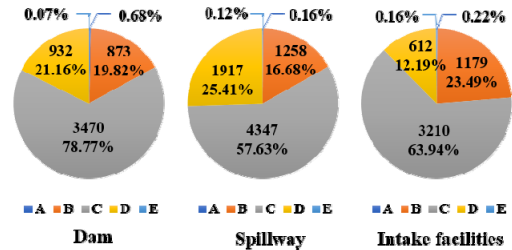


Fig. 3. Reservoir rating status by absence

3. 저수지 성능저하예측 모델 개발방법

저수지 생애주기 유지관리를 위한 성능저하예측 모델 개발은 저수지의 과거 이력 정보를 분석하여 준공 이후 공용기간이 증가함에 따라 지속적인 성능저하에 의해 수명이 종료되는 시점을 생애 주기적인 관점에서 도출하는 것을 목표로 하였다. 이러한 생애 주기적 관점은 저수지의 공용수명 간에 어떻게 유지할지에 대한 방법론을 의미하며, 수명뿐만 아니라 안전 측면에서도 저수지의 생애 주기적 관점으로 고려하였다.

성능저하예측 모델은 저수지가 시간 경과에 따라 나타나는 성능등급의 변화를 분석한 것으로, 개별부재 단위에 어떠한 조치도 이루어지지 않을 때, 각각의 성능등급이 유지되는 기간을 분석하였다. 이를 위해 정보조사에서 수집된 설계정보, 유지관리정보를 활용하여 저수지의 부재별로 정보를 분류하고, 해당 정보를 추출하여 성능저하 시점분석에 활용하였다. 정보조사를 통해 수집된 정보 중 성능저하예측 모델 분석에 필요한 정보는 준공 이후부터 현시점까지의 해당 저수지의 부재 종류, 성능등급(또는 상태등급, 결함도 지수), 발생 시기, 손상유형이다. 이때, 준공 이후부터 현시점까지의 해당 시설물의 추출된 정보 중에서 조치를 통한 성능이 변화된 정보는 활용하지 않고, 최초 조치 전까지의 정보를 활용하여 성능저하예측 모델로 분석하고, 이를 미조치시 성능저하예측 모델이라고 구분하였다.

성능이 향상된 시점 이후의 정보는 조치 후 성능평가 모델로 생애주기 분석 시, 보수보강 조치 이후 성능저하예측 모델의 가속률을 결정하는 정보로 활용한다. 미조치

와 조치 후 성능저하예측 모델을 구분하여 분석하는 이유는, 실제 시설물이 노후화가 될수록 등급의 저하 속도가 빨라지는 경향을 반영하기 위함이다. 성능저하예측 모델은 저수지의 세부 부재별로 개발하였으며, 이때 상태등급은 성능등급으로 환산하고, 그래프 상에 성능등급과 발생 시기를 사상하여 예측 곡선을 도출하고 예측 곡선 분석 시 하자보수 및 특수 손상, 오염력된 정보 등의 오류 정보는 판별을 통해 제거하였다.

성능등급 변화 예측 곡선은 다양한 함수 형태를 활용하여 적합도가 가장 높은 모델을 선택하였으며, 등급별로 구간을 나누어 분절된 예측 곡선을 활용하는 것도 가능하다. 다만, 예측 곡선은 향후, 저수지의 부재 단위의 최적 조치 시기 결정을 위해 유지관리조치 수준별 상댓값의 분석에 사용되므로, 본 연구에서는 적용하지 않았다. Table 2.는 성능저하 시점분석에 대한 세부 절차를 나타낸 것이다. 성능저하 시점분석의 1단계에서는 정보조사에서 수집한 데이터(안전점검 및 정밀안전진단 보고서)에서 저수지의 부재 종류, 부재형식, 준공연도, 점검진단 용역 시기별 상태등급 등의 정보를 추출하였다. 2단계에서는 성능저하 시점분석을 위해 안전점검 및 정밀안전진단 보고서를 통해 수집된 부재별 상태등급을 성능등급으로 환산(성능등급 = 1 - 상태등급)하여 시간 경과에 따른 성능등급 변화를 그래프로 표현하고, 3단계에서 저수지 각 부재의 경과년수에 따른 성능등급 정보를 그래프로 나타내었다. 이 때 각 부재별 손상유형에 해당하는 정보만 적용하고, 하자보수 손상(설계 및 시공 오류), 특수조건 손상(충돌, 화재 등)은 저수지의 공용수명 동안 외력이나 환경여건 등에 의해 발생하는 노후화로 인한 손상이 아니므로 오류정보로 판정하여 손상유형에서 제외하였다. 이후 데이터 필터링을 통해 생성된 정보에 대하여 1차, 2차 및 지수함수 형태의 회귀분석을 통해 성능저하

곡선을 도출하였다. 1차, 2차 함수 또는 지수함수를 이용하여, 다양한 회귀분석(다항 함수 등)을 통해 결정계수(R²)가 1에 가까운 함수 즉, 적합도가 높은 함수를 선택하여 성능저하예측 곡선을 결정하였다. 마지막 단계에서 성능저하예측 모델의 갱신을 위해 매해 지속해서 발생하는 점검진단 결과 정보를 축적하여 모델을 갱신하도록 하였다.

Fig. 4.는 성능저하 시점분석의 지속적인 갱신 방법을 나타낸 그림이다. 먼저 성능변화 경향에 대한 예측을 위해 데이터를 추세분석하여 대표 성능저하예측 모델을 산정하였다. 이후에 추가적인 데이터를 확보하여 베이지안 업데이트 기법을 통해 성능저하예측 모델을 갱신하여, 모델의 불확실성을 줄이고 최적 예산 산정을 위한 미래예측의 정확도를 개선하였다.

Table 2. Analysis procedure for the timing of performance degradation

Step	Process
Step1	Data collection and extraction of target facilities (Part types by span, Absence type, Completion year, Status grade by period of inspection and diagnosis service et cetera)
Step2	After converting the status grade to the performance grade, create a graph of performance grade change (x: lifespan, y: performance class)
Step3	Filtering error data (Repair damage, Excluding special condition damage)
Step4	Deduction of performance degradation curve
Step5	Analysis of individual performance degradation points

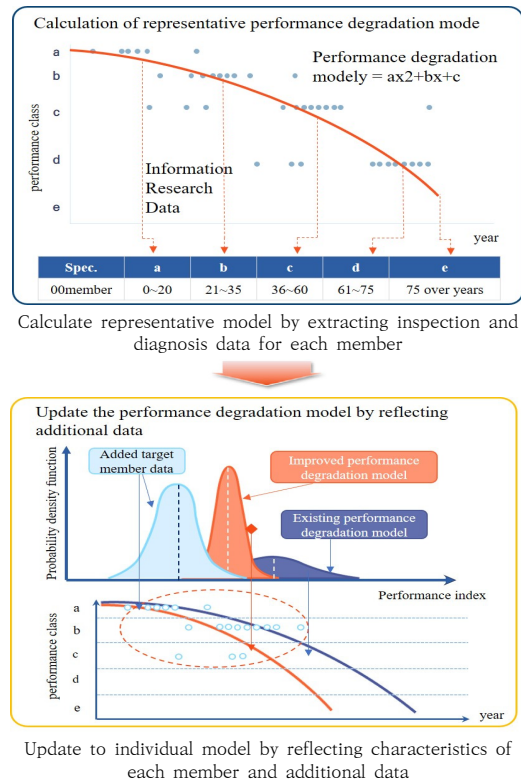


Fig. 4. Continuous update plan of performance evaluation model

4. 저수지 성능저하예측 모델의 적용

저수지 주요 세부부재인 제체, 여수로, 취수시설을 구

분으로 하여 성능저하예측 모델을 개발하였다. Fig. 5.는 저수지 제체의 경과년수별 보수보강 공사 수행 횟수 분석을 통해 보수공사 1회, 2회, 3회에 따른 데이터 분류를 진행한 것이다.

분류된 데이터를 통해 제체의 보수보강공사 정보를 분석한 결과 공용년수가 오래된 대부분의 저수지가 시스템 활용 이전의 정보가 부실하여 조치여부 확인에 어려움이 발생하였다. 따라서 저수지의 제체를 1회 보수보강공사를 수행한 데이터를 선별하여 데이터분포 검토를 한 후 분포도가 10%에 속하는 데이터를 미조치 데이터로 가정하고 성능저하예측 모델을 개발하였다. Fig. 6.은 1회 보수보강공사 수행한 저수지 제체의 데이터 중 개발에 사용한 저수지 1,589개소를 나타낸 것이다.

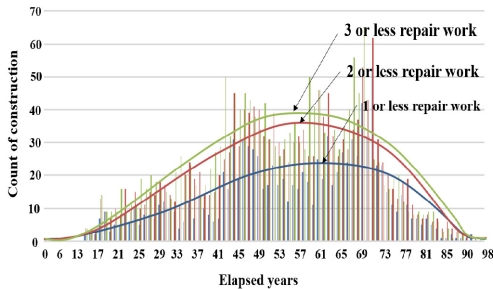


Fig. 5. The number of repair and reinforcement work for the reservoir body

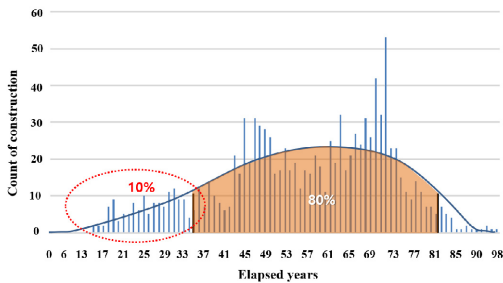


Fig. 6. Selection of one-time repair and reinforcement work of the body

Fig. 7.은 저수지의 안전진단 5,700건의 결과에서미 조치 저수지 1,589개소와 전체 저수지 제체의 성능등급 (결함도 점수)를 공용년수별로 나타낸 것이다. 전체 데이터 중 주변 부재에 비해 성능등급이 큰 차이를 보이는 데이터, 오염력으로 예상되는 데이터 등은 필터링을 통해 제외하였다.

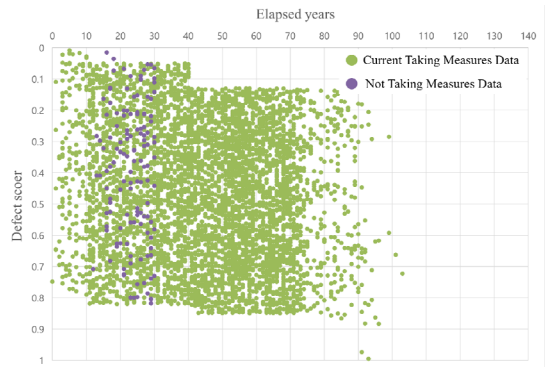


Fig. 7. Normally distributed data

Fig. 8.은 Fig. 7.의 데이터 분포 추세를 분석하여 저수지 제체에 대한 미조치시 성능저하예측 모델과 현행 유지관리체계에서 지속적인 보수보강이 이루어진 조치시 성능저하예측 모델을 나타낸 것이다. 미조치시 성능저하예측 모델의 추세함수식은 (1)과 같이 나타났으며, 현행 유지관리체계 모델의 추세함수식은(2)와 같이 나타났다.

$$y = 0.0009x^2 - 0.0054x \quad (1)$$

$$y = 0.000002x^3 - 0.00004x^2 + 0.0232x \quad (2)$$

미조치시 성능저하예측모델에 의한 기대수명은 성능이 100% 저하되는 시기로 수명을 결정하였으며, 현행 조치시 모델은 성능이 95%로 저하되는 시기에 실제 시설이 폐쇄 될 것이라는 가정을 통해 기대수명으로 정의하고 각각의 모델에 대한 기대수명을 예측하였다.

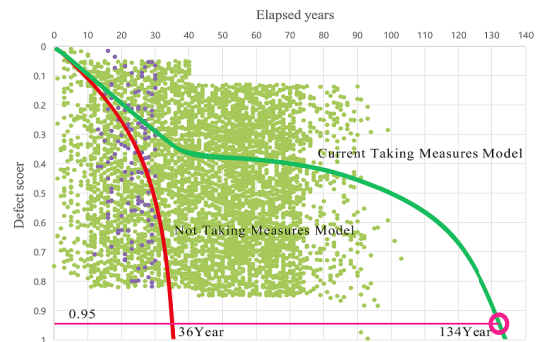


Fig. 8. Reservoir system's model of not taking action and taking action

Fig. 9.는 저수지 제체와 동일한 방법으로 여수로 Fig. 10. 취수시설도 점검진단정보를 활용하여 성능저하예측 모델에 적용한 결과이다.

통계학적 분석을 통해 다양한 측면의 변수를 고려하고 저수지의 성능향상과 저수지의 안전성을 보유했을 수 있도록 조치시점을 성능저하예측 모델을 통해 분석한 결과, 저수지 주요세부시설인 제체, 여수로, 취수시설의 미조치시 모델 수명과 현행 조치시 모델의 수명 결과를 도출했다. 제체는 미조치시 36년, 현행 조치시 134년, 여수로는 미조치시 36년, 현행 조치시 124년, 취수시설은 미조치시 29년, 현행 조치시 121년으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 저수지의 효율적인 운영관리와 유지보수의 의사결정 지원과 더불어 기반시설관리법에 따른 생애주기 유지관리를 위한 성능저하예측 모델 개발을 수행하였다. 저수지의 성능저하예측 모델 개발은 한국농어촌공사의 농업기반시설시스템(RIMS)의 실제 데이터를 활용하였으며, 안전점검 및 정밀안전진단 결과보고서를 참고하였다. 모델을 위해 저수지 주요세부시설인 제체, 여수로, 취수시설로 구분하여 개발했으며 통계학적 분석 연구와 최적 시기조치 결정에 대한 다양한 측면의 변수를 고려하였다. 개발된 모델을 적용하여 저수지의 부재별 성능저하를 예측한 결과 미조치시 제체와 취수로는 약 36년, 취수시설은 약 29년의 기대수명을 나타냈고, 현행의 유지관리체계에서는 약 120년 이상의 기대수명이 예측되었다.

개발된 모델은 기존 관리 중인 데이터를 활용하여 생애주기동안 발생하는 유지관리 비용의 예측, 최적조치시기의 판단, 보수보강과 성능개선의 유효리 판단 등의 분석 등에 활용 가능하고, 저수지의 성능평가 방안 및 저수지의 세부시설별 목표관리 수준 도입 연구에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 수집된 데이터의 한계와 제체, 여수로, 취수시설간의 시설물별의 성능적 특징이 상이하여 단일 시설물인 저수지의 성능저하예측 모델을 개발하지 못하고, 각각의 세부 부재별로 모델을 개발한 한계가 있다. 이후 연구에서는 세부 부재로 구분된 성능평가 외에 단일 시설의 평가체계 구축과 비용모델에 대한 추가적인 연구를 진행하여 저수지의 효율적인 운영관리를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

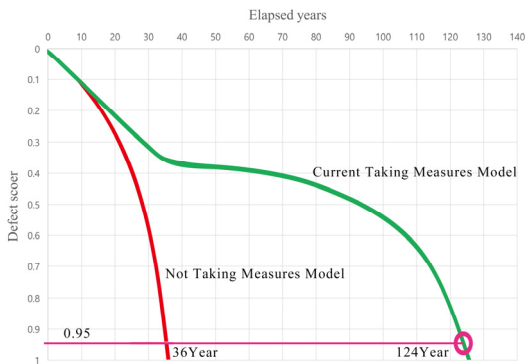


Fig. 9. Performance evaluation model (Spillway)

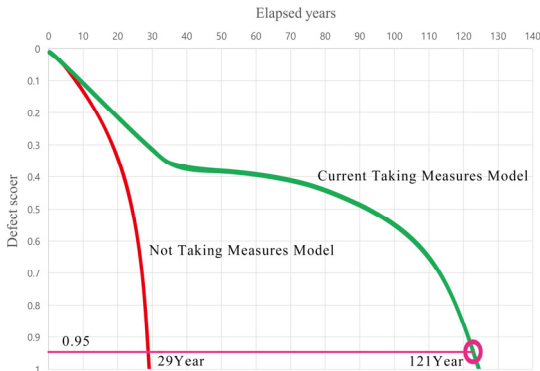


Fig. 10. Performance evaluation model (Intake facilities)

Table 4. Lifespan in case of Not Taking Measures by reservoir facility and life in case of Current Taking Measures

(Unit: year)

Spec.	Dam	Spillway	Intake facilities
Not Taking Measures	36	36	29
Current Taking Measures	134	124	121

References

- [1] J. H. Lee, S. I. Lee, Y. J. Jeong, J. M. Lee, S. S. Yoon, 4 others, "Development of Evaluation Model of Pumping and Drainage Station Using Performance Degradation Factors", *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 61, No. 4, pp. 75-86, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5389/KSAE.2019.61.4.075>
- [2] C. B. Lee, N. S. Jung, S. K. Park, S. O. Jeon, "A Study on the Typology of Agricultural Reservoir for Effective Safety Inspection Systems", *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 57, No. 5, pp. 89-99, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.5389/KSAE.2015.57.5.089>

- [3] K. H. Park, S. Y. Lee, Y. K. Hwang, J. S. Kong, J. K. Lim, "Development of the Performance-Based Bridge Maintenance System to Generate Optimum Maintenance Strategy Considering Life-Cycle Cost", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 11, No.4, pp.109-120, 2007.
- [4] Y. J. Kim, J. S. Kim, C. H. Kim, Y. K. Park, Y. Song 2 others, Detailed guidelines for reservoir precision safety diagnosis, Korea Rural Community Corporation, Manual, Korea, pp.19-38
- [5] Korea Rural Community, RIMS (Rural Infrastructure Management System), <http://rims.ekr.or.kr>. Accessed 30 Oct. 2019.

조 중 연(Choong-Yuen Cho)

[정회원]



- 2008년 8월 : 한양대학교 대학원 (토목공학과석사)
- 2020년 8월 : 충남대학교 대학원 (토목공학박사)
- 2006년 8월 ~ 현재 : 유니콘스(주) 대표

<관심분야>

시설물 자산관리, Life Cycle Cost, Value Engineering

이 후 석(Huseok Lee)

[정회원]



- 2008년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (구조공학석사)
- 2013년 2월 : 한양대학교 대학원 건설환경공학과 (구조공학박사)
- 2016년 5월 ~ 2019년 4월 : 한국 건설기술연구원 인프라안전연구본부 연구원
- 2019년 5월 ~ 현재 : 유니콘스(주) 부장

<관심분야>

기반시설 유지관리, 정보관리시스템 개발

김 란 하(Ran-Ha Kim)

[정회원]



- 2015년 8월 : 홍익대학교 건축공학부 건축학전공
- 2018년 2월 : 홍익대학교 일반대학원 건축학과 (건축학석사)
- 2018년 5월 ~ 2018년 12월 : 강원연구원 연구원
- 2019년 10월 ~ 현재 : 유니콘스(주) 과장

<관심분야>

기반시설 유지관리