



Weighting assessment on evaluation indicators of dam rehabilitation using the AHP analysis

Choi, Ji-Hyeok^a · Kim, Jong-Suk^b · Kwon, Ji-Hye^c · Moon, Young-Il^{a, b*}

^aDept. of Civil Engineering, The University of Seoul, Seoul, South Korea

^bUrban Flood Research Institute, The University of Seoul, Seoul, South Korea

^cInfrastructure Safety Research Institute, KISTEC, Jinju, South Korea

Paper number: 16-016

Received: 5 February 2016; Revised: 5 March 2016 / 11 March 2016; Accepted: 11 March 2016

Abstract

In this study, we developed evaluation indicators of dam rehabilitation considering climate change in order to prepare for safety of aging dam facilities in accordance with changes in rainfall intensity. The validity and appropriateness of each indicator, and the evaluation criteria were selected for quantitative indicators for each detail through domestic and international case studies, literature review, and expert advice. The survey was carried out to estimate the importance of each indicator for dam rehabilitation. The subjective assessment of the respondents was rearranged using pairwise comparison from the Analytic Hierarchy Process (AHP). The reliability of the survey results was evaluated through consistent verification. In addition, a comparative assessment was carried out which evaluated the reliability importance estimation result to refine the criteria to distinguish rating scales between expert and non-expert groups on dam-related fields.

Keywords: Dam Rehabilitation Evaluation, Climate Change, AHP, Consistency analysis

AHP분석을 통한 댐 재개발 평가항목 중요도 평가

최지혁^a · 김중석^b · 권지혜^c · 문영일^{a, b*}

^a서울시립대학교 토목공학과, ^b서울시립대학교 도시홍수연구소, ^c한국시설안전공단 시설안전연구소

요 지

본 연구에서는 기후변화로 인한 강우강도의 변화와 댐 시설물의 노후화에 따른 댐 안전성의 문제를 대비하기 위하여 댐 재개발 평가항목을 개발 하였으며, 국내외 사례 및 문헌조사, 그리고 전문가 자문을 통해 각 평가항목에 대한 타당성 및 적합성 검토를 실시하고, 각 세부지표에 대한 정량적 평가기준을 선정하였다. 댐 재개발에 대한 항목별 중요도 산정을 위하여 설문조사를 실시하였으며, 평가항목간의 쌍대비교를 통해 응답자의 주관적 평가결과를 재정리하고 일관성 검증을 통하여 조사결과에 대한 신뢰성을 평가하였다. 또한, 댐 관련 분야에 대한 전문가와 비전문가 그룹을 구분하기 위한 기준과 평가척도를 세분화하여 응답결과의 신뢰도와 평가항목의 중요도 산정결과에 대한 비교평가를 수행하였다.

핵심용어: 댐 재개발 평가, 기후변화, AHP, 신뢰도 분석

1. 서 론

국내에서 관리되고 있는 댐은 18,000여개에 달하며, 1960년대부터 약 40여년에 걸쳐 대규모 다목적댐과 중규

모 다목적댐을 건설하여 왔으며, 경제발전과 도시화로 인한 용수수요 증가, 기상이변 등에 따른 이상홍수의 발생 빈도 증가, 하천 수질의 악화 등 변화하는 수자원환경과 사회·시대적 요구에 부응하기 위해서는 신규댐 건설 등의 대책이 필요한 실정이다(Choi, 2007; MLTMA, 2011). 그러나 댐건설의 최적지 희소, 사업비 증가, 공사비 갈등, 댐건설의 장기화, 지역주민 및 환경단체의 반발 등으로

*Corresponding Author. Tel: +82-2-6490-5600
E-mail: ymoon@uos.ac.kr (Y. -I. Moon)

인하여 소규모의 댐 건설 조차도 점점 어려워지고 있다 (Lee et al., 2008; Kang et al., 2015). 특히, 우리나라의 경우 일제 강점기부터 건설되기 시작한 댐 시설물의 노후화가 빠르게 진행되고 있으며, 준공 후 30년이 경과한 1, 2종 댐이 60.3%를 차지하고 있어 댐 안전성에 큰 영향을 주고 있는 실정이다(KISTEC, 2015).

최근 국제대담회의 연차회의시 중요한 안건으로 기후변화와 댐안전, 노후한 댐 성능개선 및 재개발, 유지관리 효율화 증대방안 등이 활발히 논의되고 있다(ICOLD, 2015). 미국의 경우, 1980년대 후반부터 미개척국(USBR)에서는 신규수자원 확보보다는 관개시설의 보수 및 확장, 여수로 방류시설의 보수보강, 댐중고 및 기존 댐 하류부에 신규 댐 건설 등의 댐 재개발 사업이 활발하게 진행되고 있다(Shim, 2014). 일본의 경우, 신규댐 건설이 줄어들고 있으며, 사회·환경적 파급효과를 고려하여 기존 노후화된 댐의 기능과 성능강화 등의 성능개선 사업과 기존 댐 재개발 사업이 병행되어 추진되고 있다(MOLIT, 2003; Shim, 2014). 중국의 경우, 30,000여개의 노후화된 고위험군 댐이 분류되고 있으며, 인구밀집 지역을 우선적으로 다기준 홍수위험도 분석을 실시하여 댐 재개발 및 해체, 현 상태의 시나리오에 대한 우선순위 평가기준으로 활용하고 있다(Yang et al., 2011). 국내에서는 물 부족에 따른 지속적인 신규수자원 개발의 목적으로 기존 댐 재개발의 규모와 우선순위 결정에 대한 연구가 진행되었으며(MST, 2004), 한국수자원공사에서는 댐 사업의 투자 우선순위 결정을 위하여 경제성, 사회성, 환경성, 그리고 실현성 부분으로 구분하여 수자원 사업 정책 및 우선 순위 결정 기준을 제시한 바 있다(K-water, 2006). 또한, 농어촌공사에서는 제한성과 가능성 등의 평가항목을 포함한 농업용 저수지 재개발선정시스템을 개발하여 저수지 재개발 사업시 우선순위 결정에 활용하고 있다(KRC, 2007).

기후변화로 인한 집중호우의 강도와 발생빈도의 증가, 태풍의 대형화 등으로 댐으로 유입되는 수문량의 변동폭이 커짐에 따라 극심한 홍수 및 가뭄의 발생이 빈번하게 일어나고 있어 물관리 어려움이 가중되고 있으며 이에 대한 대비책 마련이 시급한 실정이다. 그러나 아직까지 국내에서는 기후변화에 대한 영향을 고려한 댐 재개발에 대한 연구는 미흡한 상태이며, 기후변화와 신규 수자원 개발사업의 정체, 댐 시설물의 노후화 등 제반여건을 고려할 때 기존 댐 시설물의 재개발의 전면적 재검토가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기후변화의 영향과 댐 시설물의 노후화 등에 따른 복합적인 댐 안전성 문제 등에 대비하기

위하여 댐 재개발 평가항목을 개발하였으며, 국내외 사례 및 문헌조사, 그리고 전문가 자문을 통해 각 평가항목에 대한 타당성 및 적합성 검토를 실시하고, 각 세부지표에 대한 평가기준과 댐 관련 분야의 전문도를 고려한 상대적 중요도 평가방법을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 댐 재개발 평가기준 선정절차

본 연구에서의 댐 재개발 우선순위 평가기표 개발 절차는 다음과 같다. 먼저, 선행연구 및 사업 등을 대상으로 분석하였으며, 수자원공사(K-water, 2006), 농어촌공사(KRC, 2007), 과학기술부(MST, 2004), 그리고 국토부(MOLIT, 2007)에서 수행한 신규수자원 개발 및 댐사업 우선순위 결정기준 등을 재검토하였다. 국외사례로는 미국, 중국, 일본, 캐나다 등 조사(MLIT, 2003; ASDSO, 2009; Yang et al., 2011; PIEVC, 2012)를 통해 기후변화의 영향을 고려한 댐재개발 평가를 위해 고려해야 할 항목을 선정하였다. 1차로 선정된 평가항목에 대해서는 댐관련 분야의 전문가 자문위원의 검토를 실시하였으며, 추가 검토된 사항에 대해서 국내실정에 적합하고, 객관성 및 합리성을 갖는 평가기준을 제시하고자 하였다(Fig. 1).

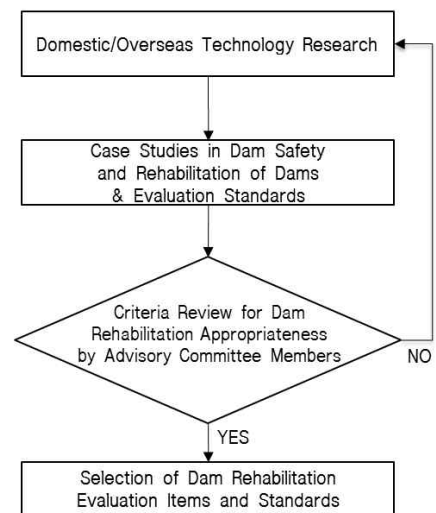


Fig. 1. Procedures for selecting evaluation standards of dam rehabilitation

2.2 AHP기법을 적용한 항목별 중요도 평가

AHP (Analytic Hierarchy Process)기법은 설문자료에

기반을 둔 분석방법으로 평가항목의 중요도 결정에 있어서 계량이 가능한 '정량적 요소'와 '정성적 요소'의 고려가 가능하며, 일관성 검증을 통하여 평가결과에 대한 신뢰성을 확보할 수 있는 장점이 있다(Song et al., 2007; Jung et al., 2012; Lee et al., 2014). 계층적 구조를 가지는 평가항목간의 쌍대비교(상대측정법 또는 절대측정법)를 통해 패널의 주관적인 평가내용을 재정리하여 객관적이고 체계적인 결과를 도출하여 다양한 기준에 대한 대안을 평가할 수 있는 다기준 의사결정을 위해 사용된다(Satty, 1987; Cho, 2002; Song et al., 2009). AHP분석은 의사결정 계층 설정(Hierarchy of decision problem), 쌍대 비교(Pairwise comparison of decision elements), 가중치 추정(Estimation of relative weights), 그리고 가중치 종합(Aggregation of relative weights)을 하는 4단계 과정을 통해 수행된다. 항목별 중요도(가중치) 산정 및 일관성 평가는 설문조사 자료의 쌍대비교 행렬을 검증하는 것으로 시작하여 상대적가중치, 최대고유치(λ_{max}), 그리고 일관성지수(CI: Consistency Index) 계산을 통하여 분석결과의 신뢰성을 평가하기 위한 일관성비율(CR: Consistency Ratio)을 추정하게 되며(Eq. (1), Eq. (2)), AHP 산정절차에 대한 자세한 설명은 Saaty (1990)을 참조할 수 있다.

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

$$CR = (CI / RI) \times 100\% \quad (2)$$

여기서, λ_{max} : 최대고유치, n:한 계층에서 비교 대상이 되는 개수, 그리고 RI는 난수지수(Random Index)를 나타내며 Saaty (1990)가 제안한 행렬차원에 따른 값을 적용한다. 일반적으로 CR이 20%이내일 경우에는 해당 쌍대비교 행렬이 용납할 수 있는 수준의 일관성이 있다고 판단된다(Saaty, 1990; Lee et al., 2005).

AHP분석의 경우, 패널전문가의 능력이 동등하다고 가정하여 분석과정을 진행하기 때문에 패널의 전문도가 크게 다를 경우 결과의 신뢰도를 감소시키는 문제점이 있다(Song et al., 2009). 따라서 본 연구에는 경력년수, 댐 관련 분야의 학술발표 및 논문발표 횟수, 그리고 댐관련 분야의 심의 및 자문 횟수에 대해서 5개 척도를 적용하여 전문가와 비전문가 그룹을 분류하였으며, 패널의 전문도를 고려하여 응답결과의 신뢰도와 평가항목별 중요도 산정결과에 대한 비교평가를 실시하였다. 댐 재개발 평가기준의 가중치를 산정하기 위해서 AHP기법을 통한 설문조

사를 적용하였으며, 학회/방문을 통한 설문조사, 온라인 설문, E-Mail 등 다양한 방법의 조사가 실시되었다. 설문조사시 평가항목간의 상대적 중요도는 17점 척도(동등비교 1점을 기준으로 16개 등급구분)를 적용하여 대항목 및 세부항목에 대한 일관성분석과 가중치를 산정하였다.

3. 분석결과

3.1 댐 재개발 평가지표 및 기준선정

국내외 댐 재개발 분석방법 및 사례조사를 통하여 평가 기준 항목을 종합하고, 1차로 선정된 댐 재개발 우선순위 평가항목에 대하여 자문위원 7인(대학교 2인, 연구기관 1인, 공기업 2인, 용역사 2인)의 의견을 반영하여 평가항목에 대한 타당성 및 적합성을 검토하고, 국내실정을 고려하여 각 세부지표에 대한 정량적인 평가기준을 구체화하였다(Table 1).

선정된 댐 재개발 평가기준은 크게 경제성, 환경성, 정책·사회성, 수문학적 안전성, 그리고 댐 구역별 기후변화 영향 등 5개 항목으로 분류하였으며, 경제성 항목에서는 재개발 사업으로 인한 투자비용과 비용편익(B/C) 방법으로 분석한 결과가 지표에 반영되도록 하고, 기존 댐 사용기간 중 운영에 따른 내용적 감소, 준설 등 퇴사 특성 및 유지관리 현황을 반영한 댐 규모 및 효율성 평가기준을 고려하였다. 환경성 평가항목에서는 하천수질, 생태자연도 면적, 보호대상 생물, 안개일 수 증가에 영향 등을 고려하였으며, 정책·사회성 항목에서는 식수, 가뭄, 홍수 등 국민 복지 및 재산보호를 등급화 하여 사업의 시급성을 판단하고, 기존 댐 운영관리자 및 전문가, 그리고 지방자치단체와 지역민의 의견을 반영하였다. 또한, 보전 문화재의 수와 이전 가능성을 고려하여 문화재 보전 항목을 추가하였으며, 댐 주변지역의 경제발전 및 지역개발 계획과의 연계성 항목을 등급화하여 지역발전 기여도 요인으로 추가하였다. 수문학적 안전성 항목에서는 최근 수행된 댐 정밀안전진단 상태평가 결과를 반영하였다. 또한 기후변화 고려전·후에 대한 댐의 형식별 여유고에 대한 평가결과와 PMF에 대한 구조적 안전성 평가 결과와 PMF 유입시 하류부의 위험도에 따른 평가 결과를 포함하였다. 마지막으로 댐 구역별 기후변화 영향 항목에서는 RCP4.5/8.5 시나리오 기반의 연평균 강수량, 강우강도, 결빙일수를 등급별로 분류하여 별도로 적용하는 것으로 구성하였다.

Table 1. Standards for priority evaluation of dam rehabilitation in consideration of climate change

category	evaluation index	evaluation standards
economics	B/C ratio	cost of water resources development
	dam scale and effectiveness	use rates of water resources
environmental characteristics	water quality	water quality (BOD)
	area of ecological nature	area of 1 st class ecological nature
	living creatures subject to protection	number of animals and plants subject to protection
	influence of the increase of foggy days	number of foggy days
policy-sociality	project urgency	current condition of national welfare and property protection regarding drinking water, drought, and floods
	opinions of group I	opinions of experts and dam managers
	opinions of group II	opinions of the local government and residents
	preservation of cultural assets	number of cultural assets to be preserved
	contribution to community development	connection between the economic development of the dam area and the local development plans
hydrologic safety	condition assessment result	condition assessment result based on the recently performed in-depth inspection
	assessment of freeboard appropriateness considering dam type and condition	freeboard appropriateness according to the detailed guideline of in-depth inspection on dams
	structural stability during overtopping caused by PMF (especially for concrete dams)	structural stability during overtopping caused by PMF (especially for concrete dams)
	risk assessment of downstream due to PMF	risk assessment (loss of life and property) of downstream due to dam-break according to the EAP (Emergency Action Plan) report
influence of climate change on each dam catchment	projected change in average annual precipitation	projected change in average annual precipitation considering climate change scenarios
	projected change in rainfall intensity	projected change in rainfall intensity considering climate change scenarios
	projected change in freezing (or thawing) degree days	projected change in freezing (or thawing) degree days considering climate change scenarios

3.2 조사대상자 분석

본 연구에서는 댐재개발 평가기준을 선정하기 위하여 댐관련 분야 종사자를 대상으로 설문조사를 실시하였다. 설문조사는 학계, 연구소, 공사 및 공기업, 설계 및 건설사에 종사하는 인원을 대상으로 학회발표, 과제 회의 및 개별 방문과 온라인 설문조사 시스템을 구축하여 실시하였으며, 전체 조사인원 150명 중 86명(응답률 57.33%)의 조사결과를 분석하여 각 항목별 중요도 가중치 산정에 적용하였다. 조사분야에서는 수공학 분야가 71명으로 전체조사 인원의 82.6%를 차지하였으며 지반공학(4명), 구조공학(2명), 환경생태학(1명), 기타(8명)으로 나타났다. 직업별로는 학계(교수 7명, 대학원생 29명)가 41.9%로 가장 많은 인원을 차지하였으며, 그 다음으로 엔지니어링 및 건설사(20명, 23.3%), 연구원 15명(17.4%), 공사 및 공무원 12명(15.2%), 기타(2명)로 조사되었다. 연령대는 30대 이하가 61.6%(53명)를 나타내었으며, 40대(19명, 22.1%), 그리고 50대 이상(14명, 16.3%) 순으로 조사되었다. 경력년수 10년 이상의 인원은 조사인원 86명중 32명 (37.2%)으로 나타났으며, 댐관련 분야에 대한 국내외 학술발표 및 학술논문, 심의/자문에 대한 경험이 10회 이상 있는 인원은 11명(12.8%)을 차지하는 것으로 나타났다.

3.3 조사 자료의 신뢰도 평가

AHP분석은 다기준의사결정 방법으로 각 평가항목의 쌍대비교를 통하여 응답자의 객관적인 감정요인과 주관적인 감정 요인을 쉽게 분석할 수 있는 기법으로 평가자의 의견에 대한 일관성 검증을 통하여 조사결과의 신뢰성을 확보한다. 일반적으로 CR이 10%이내이면 응답자가 각 평가항목에 내린 결정이 합리적인 일관성을 갖는 것으로 판단되며, 20%이내일 경우에는 용납할 수 있는 수준이나 20% 이상을 초과하였을 경우에는 조사결과의 일관성이 부족한 것으로 판단한다(Song and Lee, 2013). Fig. 2와 Table 2는 유효응답자 86명에 대한 대항목 및 세부항목에 대한 일관성 비율(CR) 분석결과를 나타내고 있으며, 경제성 항목에서 B/C와 댐규모 및 효율성 항목에 대한 사항은 비교 대상이 부족하여 CR값을 제시하지 않았다.

평가항목에 대한 일관성 분석결과, 환경성항목이 일관성지수(CR_{50%}=0.107)로 가장 낮아 응답자의 평가결과가 일관성과 신뢰성을 보이는 것으로 산정되었으며, 그 다음으로 정책·사회성(CR_{50%}=0.120), 수문학적 안전성(CR_{50%}=0.131), 댐 구역별 기후변화 영향(CR_{50%}=0.147), 그리고 대항목(CR_{50%}= 0.168) 순으로 나타났다. 유효 설문 응답자 중 일관성 부족(CR>0.2)으로 판단되는 인원이 가장 많은 항목은 “댐구역별 기후변화 영향”으로 나타났다.

Table 2. Statistical summary of reliability distribution of evaluation items

		Quantiles					Mean	S.D	COV
		10%	25%	50%	75%	90%			
sub-categories	main category	0.066	0.090	0.168	0.277	0.349	0.206	0.174	0.846
	environmental characteristics	0.001	0.025	0.107	0.209	0.382	0.161	0.187	1.163
	policy·sociality	0.024	0.065	0.120	0.221	0.365	0.177	0.188	1.057
	hydrologic safety	0.000	0.033	0.131	0.272	0.416	0.176	0.176	0.997
	influence of climate change on each dam catchment	0.000	0.012	0.147	0.320	0.458	0.299	0.791	2.648

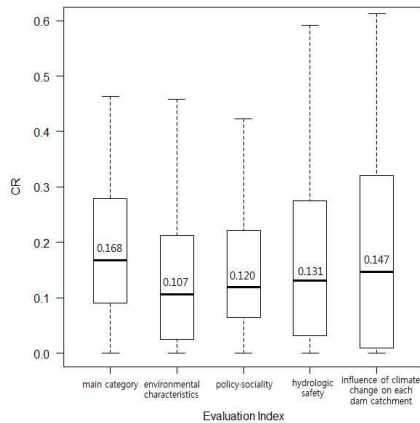


Fig. 2. Distribution of CR for each evaluation item

쌍대비교를 위한 평가항목의 전체수가 적음에도 불구하고 이러한 요인이 발생하는 것은 특정 평가요인에 대한 선호가 매우 강하거나 불성실한 응답 또는 각 항목에 대한 이해도가 낮아서 정확한 판단이 되지 못했기 때문인 것으로 판단되며, 응답자중 CR지수의 변동성(COV)이 가장 큰 항목 또한 “댐 구역별 기후변화 영향”으로 나타났다(평균 CR=0.299, S.D= 0.791, COV_{CR}=2.648). 조사결과에서 쌍대비교 항목의 전체수가 가장 많은 것은 “대항목”과 “정책·사회성” 평가로 10개 항목의 비교가 이루어지고 있으며, “대항목” 평가의 경우 CR의 변동계수(COV_{CR}=0.846)는 크지 않는 것으로 나타났다.

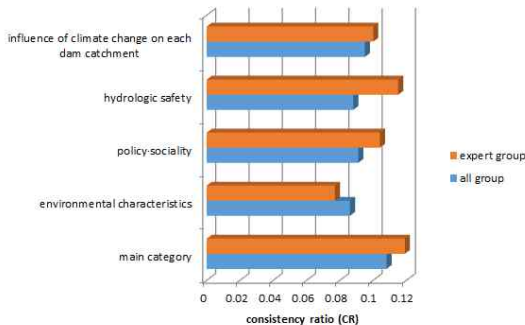


Fig. 3. Comparison of CR results for each category after the application of CR standards

CR값의 한계범위를 초과(CR>0.2)한 자료를 제외한 유효응답자(대항목: 49명, 환경성: 55명, 정책·사회성: 56명, 수문학적 안전성: 43명, 댐 구역별 기후변화영향: 30명)에 대해서 각 Case (전체그룹, 전문가그룹)에 대하여 평가항목별 CR값을 재산정하여 비교하였다(Fig. 3). 대상 자료 중 “환경성” 항목의 경우, 전체그룹에 대한 일관성 지수(CR_{case1}=0.086)가 전문가 그룹(CR_{case2}=0.077) 보다 11.7% 크게 분석되었으며, “환경성” 항목을 제외한 전체 항목에서는 전문가 그룹의 CR지수 값이 다소 크게 나타나는 경향을 보였으며, 그 변화의 차이는 크지 않는 것으로 나타났다.

3.4 Case별 평가항목 중요도 분석

기후변화를 고려한 댐 재개발 평가를 위한 평가항목에 대한 중요도 평가결과는 Fig. 4와 같다. 전문가그룹과 비전문가 그룹으로 나누어 분석한 결과, 비전문가 그룹(case 1)에서는 경제성(11.8%), 환경성(15.8%), 정책·사회성(9.9%), 수문학적 안전성(45.2%), 그리고 댐 구역별 기후변화영향(17.2%)의 순으로 중요도를 가지는 것으로 평가되었다. 전문가그룹(case 2)에서의 평가 결과는 정책·사회성(9.4%)에서는 비전문가 그룹과 큰 차이를 보이지 않고 있으나, 경제성(8.5%), 환경성(10.3%). 그리고 댐 구역별 기후변화영향(11.7%)로 비전문가 그룹보다 상대적으로 과소평가되고 있는 것으로 나타났다. 댐관련 분야의 전문도를 고려한 전체 그룹의 경우(case 3), 비전문가 그룹(case 2)과 유사한 결과를 보이고 있지만 수문학적 안전성에 대한 평가에서 가중치 산정결과가 50%를 초과하여 상대적으로 중요하게 평가되고 있는 것으로 나타났다.

세부평가 요소에 대한 중요도 분석결과는 Fig. 5와 Table 3에 제시되어 있다. 우선 비전문가그룹과 전문가그룹간의 중요도 평가에서 가장 큰 차이를 보이고 있는 수문학적 안전성 평가항목을 살펴보면, 전문가그룹(case 1)에서 월류 및 여유고 확보에 대한 중요도(47.3%)를 비전문가그룹(case 2)보다 1.91배 더 중요하게 평가하고 있었으며, PMF에 대한 월류시 구조적 안전성에 대해서도 1.24

배(case 1: 36.8%, case 2: 29.6%) 차이를 보이는 것으로 분석되었다. 그러나 하류부 위험도 평가에서는 전문가그룹(case 1) 11.4%, 비전문가 그룹(case 2) 26.6%로 역전되는 현상을 보이는 것으로 나타났다.

댐 구역별 영향평가에서는 연평균 미래강우량의 변화에서는 전문가그룹(22.3%)에서 상대적으로 크게 중요하게 생각하지 않는 것으로 나타났고, 미래 강우강도의 변화에서는 전문가그룹에서는 67.7%로 평가한 반면 비전문가 그룹에서는 45.0%로 조금 낮은 중요도를 보이는 것으로 평가하였다. 그러나 나머지 경제성, 환경성, 그리고 정책 사회성 항목에서는 비전문가와 전문가의 중요도의 차이가 크지 않는 것으로 분석되었다. 댐관련 분야의 전문도를 고려하였을 경우(case 3)에서는 case 2의 결과와 유사한

결과를 보였으며, 다만, PMF에 대한 월류시 구조적 안전성과 월류 및 여유고 확보 항목에서 다소 크게 나타났다.

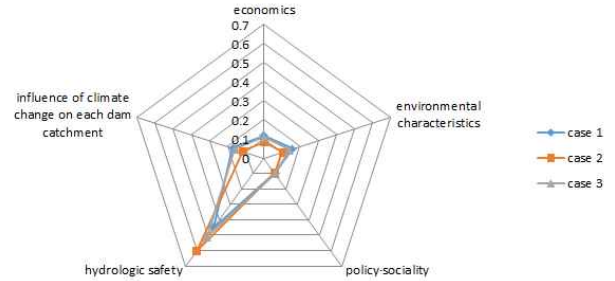


Fig. 4. Analysis results of the importance evaluation of each category. case 1: non-expert group, case 2: expert group, case 3: weighted group by professional experiences

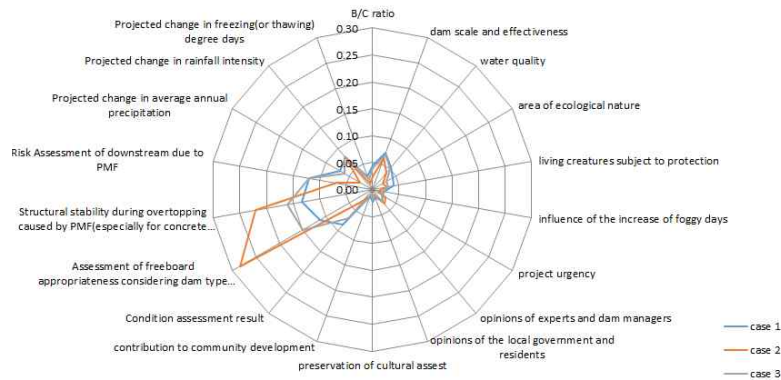


Fig. 5. Analysis results of the comprehensive importance of sub-categories. case 1: non-expert group, case 2: expert group, case 3: weighted group by professional experiences

Table 3. Analysis results of the importance of evaluation factors

category	evaluation index	importance evaluation of each category			comprehensive importance		
		case1	case2	case3	case1	case2	case3
economics	B/C ratio	0.38	0.28	0.35	0.04	0.02	0.04
	dam scale and effectiveness	0.62	0.72	0.65	0.07	0.06	0.07
environmental characteristics	water quality	0.34	0.40	0.35	0.05	0.04	0.05
	area of ecological nature	0.27	0.21	0.24	0.04	0.02	0.03
	living creatures subject to protection	0.25	0.28	0.26	0.04	0.03	0.03
policy-sociality	influence of the increase of foggy days	0.14	0.11	0.14	0.02	0.01	0.02
	project urgency	0.22	0.30	0.25	0.02	0.03	0.02
	opinions of experts and dam managers	0.27	0.36	0.30	0.03	0.03	0.03
	opinions of the local government and residents	0.16	0.13	0.15	0.02	0.01	0.01
hydrologic safety	preservation of cultural assets	0.23	0.11	0.18	0.02	0.01	0.02
	contribution to community development	0.14	0.10	0.13	0.01	0.01	0.01
	Condition assessment result	0.19	0.05	0.15	0.09	0.03	0.07
	Assessment of freeboard appropriateness considering dam type and condition	0.25	0.47	0.30	0.11	0.28	0.15
influence of climate change on each dam catchment	Structural stability during overtopping caused by PMF (especially for concrete dams)	0.30	0.37	0.32	0.13	0.22	0.16
	Risk Assessment of downstream due to PMF	0.27	0.11	0.24	0.12	0.07	0.12
	Projected change in average annual precipitation	0.40	0.22	0.37	0.07	0.03	0.06
	Projected change in rainfall intensity	0.45	0.68	0.49	0.08	0.08	0.08
	Projected change in freezing (or thawing) degree days	0.15	0.10	0.14	0.03	0.01	0.02

※case 1: non-expert group, case 2: expert group, case 3: weighted group by professional experiences

3.5 댐 재개발 우선순위 결정 방법 및 적용

본 연구에서 선정한 댐 재개발 평가기준은 경제성, 환경성, 정책·사회성, 수문학적 안전성, 댐 구역별 기후변화 영향으로 구분하여 전문 자문위원들의 의견을 반영하여 다양한 측면에서 댐 재개발평가 요소들을 고려하여 정량적 평가를 할 수 있도록 하였다. 댐 재개발 우선순위 결정을 위해서는 대상 댐에 대한 항목별 현황을 분석하여 세부항목별 등급 기준에 따라 표준화 점수를 산정하고, 댐 관련 전문도를 고려하여 도출된 각 항목별 가중치를 곱하여 댐별 세부항목 점수를 합산하여 평가한다. 각 평가항목에 대한 등급적용 기준은 다음과 같다.

첫 번째, 경제성 평가에서는 홍수조절, 생공용수, 관개용수, 발전용수 등으로 인한 편익과 댐 건설/재개발비, 보상비, 관리비 등을 고려한 자료를 이용하여 B/C비율을 산정하였으며, 표준화점수로 평가한다. 댐 규모 및 효용성 항목은 규모 및 수자원의 활용여부를 평가하기 위해 산정된 수자원이용률을 5등급으로 구분하여 표준화점수를 반영한다. 두 번째, 환경성 평가는 하류 하천수질상태를 평가하기 위하여 BOD 농도가 높을수록 최대 5점을 부여하도록 하고, 생태자연도 면적항목은 댐 주변 생물다양성 및 동식물의 서식지 등으로 보존가치가 높다고 인정되는 지역이 10ha 이하일 때 1점, 151ha 이상일 때 5점을 부여하는 방식으로 5등급으로 구분하여 평가한다. 보호대상 생물항목은 주변 멸종위기종의 동·식물 수를 조사하여 101종 이상일 때를 가장 큰 배점을 부여하고 10종 이하일 때를 1점을 부여하여 보호대상종 수에 따라 등급을 구분하여 표준화 점수를 적용한다. 안개일수 증가에 따른 영향항목은 댐 유역의 안개일수를 조사하여 크게 증가할수록 낮은 점수로 평가하도록 하였다. 세 번째, 정책·사회항목에서 사업의 시급성은 홍수, 가뭄과 같은 재난 문제와 식수, 지역발전 등과 같은 주민 복지를 분석하여 사업의 시급정도를 5등급(매우 시급하지 않음, 시급하지 않음, 보통, 시급, 매우 시급)으로 구분하여 적용하며, 전문가 및 댐 관리자 의견항목과 지자체 및 지역민 의견항목은 댐 관련 전문가 및 관리자, 지자체, 지역민들의 의견을 설문조사를 통하여 수렴한 후 5등급(매우 반대, 반대, 보통, 찬성, 매우 찬성)으로 나누어 댐 재개발에 찬성하는 정도가 클수록 높은 점수로 평가하도록 한다. 문화재 보전항목은 대상 유역 내 보전가치가 높은 문화재 수를 조사하여 41개 이상일 경우 5점, 10개 이하의 경우에는 1점을 부여하여 표준화된 점수를 산정하여 평가한다. 지역발전 기여도는 최근 댐 주변 지역의 경제발전과 지역개발계획의 연계성을 5등급(매우 미흡, 미흡, 보통, 우수, 매우 우수)

으로 분류하여 평가를 실시한다. 네 번째, 수문학적 안전성 평가는 댐상태평가등급, 월류 및 여유고 확보, PMF에 대한 월류시 구조적 안전성, 하류부 위험도를 고려한다. 댐 정밀안전진단 토목시설의 상태평가등급항목은 최근 수행된 토목시설물 상태평가결과로 등급을 표준화하여 반영하고, 월류 및 여유고 확보여부항목은 댐 형식별(콘크리트, 필댐, 복합댐, CFRD)로 검토여유고가 여유고 기준을 만족하는지 여부, PMF에 대한 월류시 구조적 안전성(콘크리트댐)항목과 하류부 위험도항목은 가능최대홍수량(PMF)에 따른 콘크리트 댐의 구조적인 안전성 평가결과 및 하류부 위험도 평가결과를 분석하여 반영한다. 수문학적 안전성 평가의 각 세부항목은 5등급을 적용하여 평가하도록 한다. 마지막으로 댐 구역별 기후변화 영향에서는 댐 구역별 미래 강우량, 강우강도, 결빙일수항목은 RCP4.5와 8.5 시나리오를 기반으로 영향평가를 실시하여 5등급으로 구분하고 기후변화 영향이 큰 댐일수록 높은 점수(5점)의 등급을 부여하도록 한다.

Table 4. Example of hydrologic safety evaluation

Dam	Weighting factor				Total score	Ranking
	HS ₁ (0.15)	HS ₂ (0.30)	HS ₃ (0.32)	HS ₄ (0.24)		
Dam ₁	B	A	A	A	1.16 (B)	6
Dam ₂	C	E	B	E	3.79 (D)	1
Dam ₃	C	E	A	B	2.75 (C)	2
Dam ₄	C	E	A	B	2.75 (C)	2
Dam ₅	C	A	A	A	1.31 (B)	5
Dam ₆	C	E	A	B	2.75 (C)	2

Here, HS_i: Condition assessment result, HS₁: Assessment of freeboard appropriateness considering dam type and condition, HS₂: Structural stability during overtopping caused by PMF(especially for concrete dams), HS₄: Risk Assessment of downstream due to PMF

다음 Table 4는 5개의 댐 재개발 평가항목 중 수문학적 안전성 평가에 대해서 순위결정 결과의 예를 보여주고 있다. 댐 시설물 정밀안전진단 결과를 토대로 수행된 세부항목에 대한 평가결과와 본 연구를 통해 제시된 가중치를 적용한 댐에 대한 종합평가결과를 제시하였다. 수문학적 안전성 평가는 종합점수결과에 따라 등급별 보수·보강의 필요성 여부를 판단할 수 있으며, 결함발생 원인에 대한 정확한 분석 후 대상 댐에 적합한 보수·보강공법을 선정할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 댐 재개발 우선순위 결정을

위해서는 수문학적 안전성 평가항목 이외에도 경제성, 환경성, 정책·사회성, 그리고 댐 구역별 기후변화 영향 등이 고려되어야 하며, 총 18개의 세부항목들의 분석을 실시하여 댐 관련 전문도를 고려하여 평가된 가중치와 세부항목별로 표준화된 점수를 곱하여 종합적인 평가점수에 따라 우선순위를 결정하게 된다. 그러나 결정된 댐 재개발 우선순위에 따라 실제 대상유역에 적용할 경우에는 앞서 제시한 평가항목 뿐 아니라 개별 댐의 유역 상황에 맞는 평가항목의 재검토가 요구되며, 대상 댐에 적합한 댐 재개발 유형 및 공법적용의 검토가 필요하다.

4. 요약 및 결론

기후변화로 인한 강우강도의 변화와 국지성 호우로 인한 유역의 수문량 증가가 전망되고 있는 상황에서 댐 시설물의 노후화에 따른 댐 안전성 문제가 대두되고 있으며, 신규댐 건설보다는 기존 댐의 재개발 필요성이 부각되고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 댐에 대한 기후변화 적응 능력 향상을 위하여 국내외 문헌조사와 전문가 자문을 통한 댐 재개발 관련 평가항목의 합리적인 선정과 세부항목에 대한 패널의 주관적 판단을 AHP 다기준 의사결정기법을 적용하여 정량화된 댐 재개발의 평가지표를 도출하였다.

본 연구에서 선정된 댐 재개발 평가기준으로는 경제성, 환경성, 정책·사회성, 수문학적 안전성, 그리고 댐 구역별 기후변화 영향 등의 5개 대항목이다. 개별 방문과 온라인 설문조사를 통하여 각 항목별 가중치 분석결과, 전문가그룹과 비전문가 그룹을 비교에서 정책·사회성 항목에서는 큰 차이는 보이지 않았으나, 경제성, 환경성, 그리고 댐 구역별 기후변화 영향에서는 전문가그룹이 비전문가 그룹보다 상대적으로 덜 중요하게 인식하고 있는 것으로 나타났다. 평가항목에 대한 중요도 분석에서 가장 큰 의견 차이를 보이고 있는 것은 수문학적 안전성 항목으로 분석되었다(비전문가 그룹: 45.2%, 전문가 그룹: 60.1%). 전문도를 고려하였을 경우의 수문학적 안전성에 대한 평가는 50.0%로 다른 평가항목보다 상대적으로 중요하게 평가되었다. 세부평가 요소에 대한 중요도 분석에서는 월류 및 여유고 확보에 대한 항목에 대해서 전문가 그룹(47.3%)이 비전문가 그룹(24.8%)보다 2배가량 중요하게 평가되었으며, 댐 관련 분야의 전문도를 고려하였을 경우에는 30.0%를 보여 비전문가 그룹보다 약간 크게 나타났다. 수문학적 안전성에서 하류부의 위험도 평가에서는 전문가 그룹보

다 비전문가 그룹에서 더 중요하게 인식하고 있는 것을 나타났다. 미래 강우강도의 변화에 대해서는 비전문가 그룹(45.5%) 보다 전문가 그룹(66.0%)에서 1.3배 더 큰 가중치를 고려해야 한다고 조사되었으며, 전문도를 고려한 경우에서의 강우강도의 변화에 대한 평가(50.0%)에서도 다른 평가요소(연평균강우량 및 결빙일수)에 비해서 상대적으로 중요하게 평가되었다.

기후변화의 영향과 댐 시설물의 노후화 등에 따른 댐 안전성확보를 위하여 기존 댐 시설물의 재개발 검토가 필요한 실정이다. 비록 본 연구가 댐 재개발 평가지표 개발 및 중요도 평가에 대한 연구로 한정되어 있지만, 국내에서는 아직까지 기후변화를 고려한 댐 재개발 평가가 전무한 실정에서 평가방법 및 절차, 패널의 전문도를 고려한 가중치 적용은 기후변화로 인한 안정적인 댐 저류 능력과 댐 치수안전도 확보에 대한 중요한 자료를 제공할 것으로 기대된다. 향후 국내외 전문가, 관련기관과의 의견수렴을 통해 평가절차에 대한 기준을 재검토하고, AR5시나리오 기반의 PMP 및 PMF 산정결과를 기후변화의 영향요소로 반영하여 한강, 낙동강, 금강 등 5대강 유역을 대상으로 댐 재개발에 대한 평가 지표들의 검증 및 비교평가를 통하여 종합우선순위를 도출하고, 대상 댐에 적합한 댐 재개발 유형 및 공법을 제시하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(14AWMP-B082564-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Association of State Dam Safety Officials (ASDSO) (2009). The Cost of Rehabilitating Our Nation's Dams.
- Cheng-Tan Tung, Henry Chao, Peterson Julian (2012). "Group Geometric Consistency Index of Analytic Hierarchy Process (AHP)." *African Journal of Business Management*, Vol. 6, No. 26, pp. 7659-7668.
- Choi, B.G. (2007). "Application of water resources through dam rehabilitation." *Journal of Water Resources Association*, Vol. 40, No 5. pp. 88-95.
- Cho, K.T. (2002). "Aggregation of Multiple Evaluator's Weights in Applying the AHP to Evaluate Technology Alternatives." *Korean Management Science Review*, Vol. 19, No. 2, pp. 139-154.
- Facility Management System (FMS) (2015). <http://www.fms.or.kr>

- International Commission on Large Dams (ICOLD) (2015) <http://www.icold-cigb.org/home.asp>
- Jung, Y., Choi, M.H. (2012). "Survey-Based Approach for Hydrological Vulnerability Indicators Due to Climate Change: Case Study of Small-scale Rivers." *Journal of the American Water Resource Association*. Vol. 48, No. 2, pp. 256-265.
- Jung, Y., Kim, D.E., Choi, M.H., Kim, S.D., Park, M.J. (2014). "Vulnerability Resilience in the Major Watersheds of the Korean Peninsula." *Atmospheric and Oceanic Sciences*, Vol. 25, No. 6, pp. 857-868.
- Jung, Y.L., Nam, H.H. (2014). "A Development of the Post-evaluation Index about Maintenance of Remains by using Delphi and AHP Method." *Journal of Architectural History*, Vol. 23, No. 4, pp. 19-33.
- Kang, H.Y., Lee, S.H., Kim, J.S., Moon, Y.I. (2015). "Characterizing Changes of Hydrologic Variability at Multi-purpose Dams in Korea" *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 1, pp. 123-130.
- Kim, H.D., Kim, S.J., Kim, P.S. (2011). "Development of the Priority Decision System for Redevelopment of Agricultural Reservoir." *Journal of the Korean society of Agricultural Engineers*, Vol. 63, No. 2, pp. 45-52.
- Korea National Committee on Large Dams (KNCOLD) (2015) <http://www.kncold.or.kr>
- Korea Infrastructure Safety Corporation (KISTEC) (2011). Specific Guide for In-depth Inspection on Dams.
- Korea Infrastructure Safety Corporation (KISTEC) (2015). '14~'15 In-depth Insepection Report.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2011). Projection Report of Climate change over Korean Peninsula.
- Korea Rural Community Corporation (KRC) (2007). Priority Decision for Redevelopment of Agricultural Reservoir.
- K-water (2006). Development of Policies and Investment Ranking in Water Resources Projects(In case of Dam Project).
- Lee, C.C., Jang, S.H., Lee, C.H. (2008). "A Study on the Effective Operation System for Water Supply of Andong Dam Considering the Flow of Nak-dong River." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 8, No. 6, pp. 129-136.
- Lee, J.J., Park, J.S., Rhee, K.H. (2014). "Development and Application of Hydrological Safety Evaluation Guidelines for Agricultural Reservoir with AHP." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 16, No. 2, pp. 235-243.
- Meng Yang, Xin Qian, Yuchao Zhang, Jinbao Sheng, Dengle Shen, Yi Ge. (2011). "Spatial Multicriteria Decision Analysis of Flood Risks in Aging-Dam Management in China: A Framework and Case Study." *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 8, No. 5, pp. 1368-1387.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT) (2007). Decision Making Model for Most Preferable Alternative in Flood Control Projects.
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2003), Report of river project assessment in Japan.
- Ministry of Science and Technology (MST) (2004). Technology for Sustainable Dam Development.
- Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee (PIEVC) (2012). Climate change and Infrastructure Vulnerability Assessment.
- Saaty, T.L. (1987). "Rank Generation, Preservation, and Reversal in the Analytic Hierarchy Process." *Decision Science*, Vol. 18, pp. 157-177.
- Seo, J.P., Lee, C.W., Woo, C.S., Lee, H.H. (2014). "Development of Indicators for Dredging Evaluation and Form on Erosion Control Dam Using the Delphi Technique and AHP Analysis." *Journal of Korean Environmental Restoration Technology*, Vol. 17, No. 6, pp. 1-15.
- Shim, S.B. (2014). "National policy recommendations of aging dam rehabilitation, Water Policy Vision." *Korean Water Resources Association*, pp. 2-15.
- Song, K.W., Lee, Y. (2013). "Re-Scaling for Improving the Consistency of the AHP Method." *Social Science Research Review*, Vol. 29, No. 2, pp. 271-288.
- Song, S.H., Gwon, S.H., Park, J.B., Hong, S.K. (2009). "Application of the Delphi Technique in Modifying AHP Method." *Korean Management Science Review*, Vol. 26, No. 1, pp. 53-64.
- Srdjevic, Z., Blagojevic, B., Srdjevic, B. (2011). "AHP Based Group Decision Making in Ranking Loan Applicants for Purchasing Irrigation Equipment: A Case Study." *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, Vol. 18, No. 4, pp. 531-543
- Yang, M., Quan, X., Zhang, Y., Sheng, J., Shen, D., Ge, Y. (2011). "Spatial multicriteria decision analysis of flood risks in aging-dam management in China: a framework and case study." *International Journal Environmental Research and Public Health*, Vol. 8, No. 5, pp. 1368-1387.
- Yi, C.S., Lee, S.C., Kim H.S., Shim M.P. (2005). "Multi-Criteria Decision Making Model for Flood Control Project 1. A Comparative Analysis of AHP and MAUT." *Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 5, pp. 337-346.