



소규모 저수지 대상 비상대처계획 수립 선정기준 연구

Study on Selection Criteria of Small-Scales Reservoirs for Emergency Action Plan(EAP) Establishment

박기찬^a · 최경숙^{b, †}

Park, Ki-Chan · Choi, Kyung-Sook

ABSTRACT

This study developed selection criteria of small-scales reservoirs, having under 300,000m³ storage capacity, for the Emergency Action Plan(EAP) establishment in order to reduce the disaster risks of the reservoir's failures. Those reservoirs are out of ranges of Korean EAP establishment standard, but have potential risk of disasters as they have often failed by the recent extreme rainfall events and earthquakes, causing economical and life losses. The problem of reservoir aging is also one of the reasons of them. In this study, the developed selection criteria of small reservoirs for EAP establishment are storage capacity, embankment height, reservoir age, heavy rain factor and earthquake factor. These criteria were selected based on the review of the existing EAP establishment guidelines, analysis of the past dam failure cases, and the previous related studies. The quantification of these criteria were conducted for the practical applications in the fields, and applied to 67 previous failures in order to investigate the relation of each criteria with these failures. The earthquake factor found to be the highest relations followed by heavy rain factors, combination of earthquake and heavy rain factors, and reservoir age. The classification was made as observation and review groups for EAP establishments based on overlapping numbers of each criteria. This classifications applied to 354 reservoirs designated as having the potential disaster risk by MOIS, and showed 38.4% of observation and 11.9% of review groups. Anticipatory monitoring and regular inspection should be made by professional facility managers for the observation group, and necessity of EAP establishment should be assessed for the review group based on the downstream status and financial budget.

Keywords: Emergency Action Plan(EAP); reservoirs; small scales; dam failure; disaster risk

1. 서 론

기후변화에 따른 강우의 시간적·지역적 편중 심화, 계절 별 패턴 변화 등으로 극한홍수 및 극한 가뭄의 발생이 잦아지고 있다. 홍수 위험성은 1일 강수량 100mm 이상의 집중호우 발생 횟수가 과거에 비해 2.7배 이상 증가하였고, 가뭄 위험성은 가뭄 발생 기간이 과거에 비해 3.4배 증가했다(MOLIT · K-water, 2017). 1916~2015년까지 우리나라 물 관련 재해에 따른 인명 및 재산 피해액 변화 추이를 보면 인명피해는 1936년에 1,916 인으로 가장 크게 발생하였으며, 재산 피해액은 1980년대 후반부터 급증하여 2002년에 81,940억원으로 가장 크게 발생하였다(MOLIT · K-water, 2017). 특히 풍수해로 인한 댐·저수지의 붕괴는 소중한 인명피해 및 막대한 경제적 손실로 인한 엄청난 사회적 혼란을 야기시킨다. 이러한 피해를 최소화 하고자 최근 댐·저수지를 대상으로 비상대처계획(EAP: Emergency

Action Plan)을 수립하고 있다. EAP 수립은 시설물 붕괴 혹은 위험 발생 시 주변지역의 인명피해 및 재산손실을 최소화하기 위해 그 지역의 물리적·지형적 특성을 반영한 비상상황 발생 모의 결과에 따른 사전 대피계획 수립과 주민 대피 모의 훈련에 필요한 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

해외에서는 이미 재해예방 차원에서 댐·저수지 EAP 수립을 의무적으로 수립하고 있다. 미국에서는 1996년에 국가 댐 안전계획법(National Dam Safety Program Act)이 법률로 통과되고, 1998년에는 "Federal Guidelines for Dam Safety"가 재정비됨으로써 댐의 비상상황에 대비한 EAP 수립을 의무화 하였다. 프랑스에서는 1968년 댐 소유자에게 댐 붕괴 홍수와 해석 및 EAP를 수립하고, 이를 정기적으로 수정·보완토록 법으로 규정하였다. 일본에서는 EAP 수립에 대한 별도의 규정은 없으나, 제방붕괴 및 제체 월류에 대한 홍수위험지도 작성을 수해방지법에 규정하고 있다.

국내의 경우 댐·저수지 EAP 수립은 2001년 12월 수해방지종합대책의 일환으로 시행되었다. 댐·저수지 EAP 추진 법적근거는 하천법 제26조, 자연재해대책법 제37조, 농어촌정비법 제20조에 의한다. 2004년 1월 하천법 개정 및 2005년 1월 자연재해대책법 개정으로 저수용량 30만톤 이상 댐 및 저수지의 EAP 수립이 의무화 되었다. EAP 수립 및 계측 등을 통한 주기적인 시설관리가 이루어지고 있는 다목적댐, 발전

^a Senior Manager, Head Office, Korea Water Resources Corporation

^b Professor, Department of Agricultural Civil Engineering, Institute of Agricultural Science & Technology, Kyungpook National University

† **Corresponding author**

Tel.: +82-53-950-5731 Fax: +82-53-950-6752

E-mail: ks.choi@knu.ac.kr

Received: February 28, 2019

Revised: May 13, 2019

Accepted: May 14, 2019

용댐, 저수용량 30만톤 이상의 댐·저수지는 전체 시설물의 7.4%에 국한되며, 나머지 92.6%는 중소규모 저수지이다(MOIS, 2015).

농업용 저수지 17,310개소 중에서 30년 이상 시설은 총 16,647개소로 전체 96.2%를 차지하고, 대부분이 노후화된 시설로서 관리소홀 등으로 인한 제방 붕괴의 위험이 상당히 높은 실정이다(MAFRA, 2016a, MAFRA 2016b). EAP 수립 의무화 이후에도 지속적으로 농업용 저수지 붕괴피해가 발생하고 있는데, 2013년 경기 여주 옥천저수지와 경북 경주 산대저수지 붕괴사례, 2014년 부산 기장 내덕저수지와 2016년 울산 사당골 저수지 등의 붕괴사례가 이에 속한다. 또한, 과거 붕괴 사례 67건 중 30만톤 이상 댐·저수지 붕괴는 단 3건에 불과한 실정이다.

국내의 EAP 관련 기존 연구들은 댐과 저수지 안전성 평가를 위한 위험도 해석기법(Risk Analysis)에 대한 연구(ICOLD, 1998; DESW, 2013; FEMA, 2013)와 수리수문학적 댐 위험도 평가기법에 대한 연구(Choi, 2009; Kim et al., 2017), 필댐의 붕괴 예보 기준 마련 연구(Choi et al., 2017), 댐붕괴 모의(Lee, 1987) 등이 있으나, EAP 수립 대상을 결정하기 위한 선정기준 관련 연구는 매우 미흡한 실정이다. 최근 기상이변의 영향 및 지진 발생과 저수지 노후화 등으로 지속적으로 저수지 붕괴가 발생하고 있어, 이로 인한 EAP 수립기준에서 제외된 저수지들에 대해서도 재해 위험성도 지속적으로 증대되고 있다. 이에 따라 기존의 EAP 수립 대상에서 제외되는 시설물에 대한 EAP 수립 대상 여부를 판단할 수 있는 선정 기준 개발 연구에 대한 필요성이 있다고 판단되었다.

따라서 본 연구에서는 EAP 수립 법적기준 이하 소규모 댐·저수지의 재해위험성을 경감하고 비상상황 발생시 체계적인 대응체계 구축하기 위해 법적 기준인 저수용량 30만톤 이하 저수지를 대상으로 EAP 수립여부를 판단할 수 있는 EAP 수립 선정지표를 개발하고자 한다.

II. EAP 수립 대상 선정지표 개발 및 정량화

본 연구에서는 EAP 수립 기준 이하 소규모 저수지에 대해 EAP 수립이 필요한 대상저수지를 선정할 지표를 개발하기 위해 먼저 최근 댐 저수지 붕괴사례에 대한 원인을 분석하고,

기존의 EAP 수립지침을 검토하여 소규모 저수지의 EAP 수립 필요성이 있는 대상 저수지 선정지표를 개발한 후, 선정지표 별 기준의 정립을 통한 정량화를 실시하고, 이를 실제 적용해 보았다. 본 연구의 주요 내용 및 수행절차는 Fig. 1과 같다.

1. 최근 댐·저수지 붕괴사례 원인 분석

본 연구에서는 소규모 저수지 EAP 수립 대상 선정지표 개발을 위해 먼저 국내외 댐·저수지의 붕괴사례에 대한 원인분석을 실시하였다. 국제대댐회(ICOLD: International Commission on Large Dams)에서 조사한 바에 따르면, 1900년부터 1973년 간의 붕괴된 제체 높이 15m 이상의 댐 붕괴 요인을 세 가지로 분류하여 제시하였다. 여기에는 월류 및 여수로 규모의 부적정, 기초부 결함, 파이핑 및 누수현상이 포함된다. Fig. 2는 국제대댐회에서 제시한 댐 형식별 붕괴원인 및 경과연수별 붕괴원인을 나타낸다. 댐 형식에 따른 주요 붕괴원인은 콘크리트 댐의 경우 기초부 결함이 대부분이었으며, 흙댐의 경우 파이핑과 누수현상 및 월류에 의한 붕괴 사례가 대부분이었다(Fig. 2a). 댐 붕괴시 댐 경과연수와 노후화의 관계에서는 댐의 사용기간이 경과 할수록 월류로 인한 붕괴 위험이 가중되는 것으로 나타났다(Fig. 2b). 국내에서도 댐의 내구연한을 고려한 적정 홍수 소통 능력의 확보 및 수문조작을 통해 댐 안전성 확보 필요성을 제시하고 있다.

각종 문헌을 통해 총 67건의 국내 댐·저수지 붕괴사례가 파악되었다(OPM, 1999; KRC Branch of Gangleung, 2002; K-water, 2016; MOLIT·K-water, 2016; KRC 2017). 이들 저수지를 대상으로 소규모 저수지의 붕괴원인을 파악하기 위해 붕괴연도와 붕괴된 저수지의 규모를 파악해 보았다(Fig. 3, Fig. 4). 붕괴된 국내 댐·저수지 중에서 확인이 불가능한 2개소를 제외하고 높이 15m 미만의 저수지는 61개소로 붕괴된 저수지의 91.0%를 차지하였으며, 붕괴사례의 대부분은 소규모의 저수지에서 발생한 것으로 나타났다.

연도별 댐·저수지 붕괴 발생사례는 1980년대 13건(19.4%), 1990년대 43건(64.2%)으로서 우리나라 전체 댐·저수지 붕괴 사례의 약 83.6%는 1980년에서 1990년대에 발생한 것으로 나타났다(Fig. 3). 1980년대의 붕괴사례는 1987년에 집중되어 있고, 1990년대 붕괴사례는 1998년에 집중되어 있는 것으로 파악되었는데, 이는 1987년과 1998년에 집중적으로 발생한 태

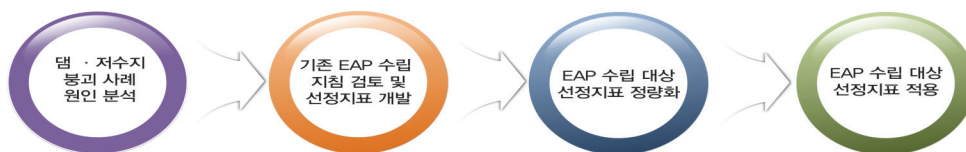


Fig. 1 Procedure of the study

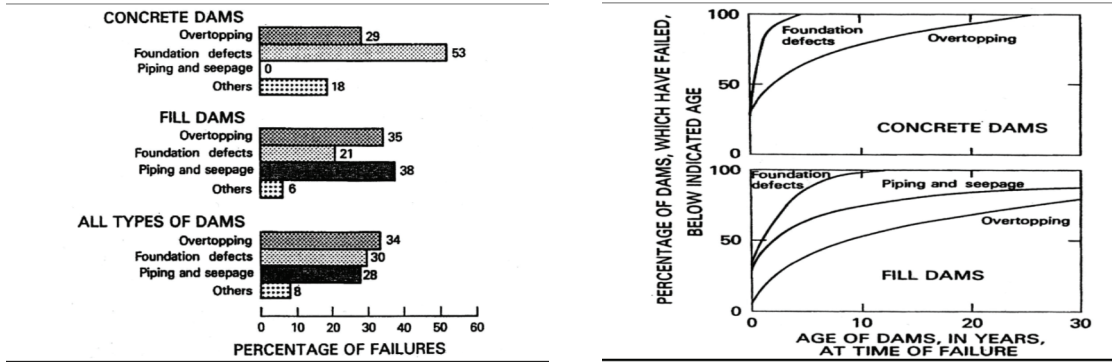


Fig. 2 Causes of the failures: (a) By dam type, (b) By dam age (MOLIT · K-water, 2016)

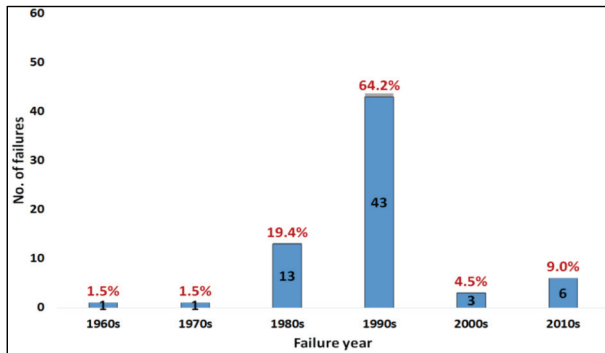


Fig. 3 Failure records of dams and reservoirs

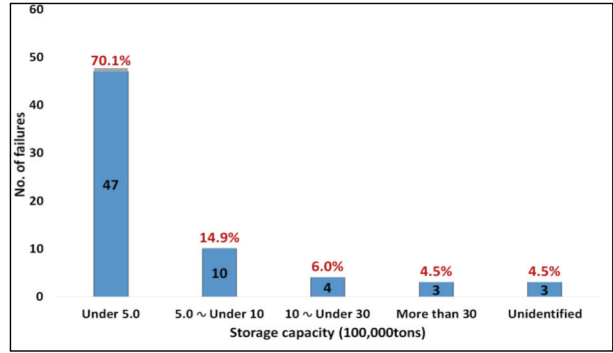


Fig. 4 Classification of dam and reservoir failures based on storage capacity

풍, 호우 및 장마에 따른 댐 제체 포화가 붕괴의 주요 원인이었다(MOLIT · K-water, 2016). 2000년 이후에는 태풍 루사에 의한 동막저수지 및 장현댐 붕괴, 태풍 차바 및 집중호우에 의한 사당골저수지 붕괴 등 설계홍수량 초과에 따른 제체 붕괴 현상이 지속적으로 발생하였다.

국내 댐 · 저수지 붕괴사태 총 67건 중에서 붕괴 원인과 경과연수의 확인이 가능한 시설물은 총 12개소로써, 저수지 준공에서부터 붕괴까지 평균 50년 정도 경과된 것으로 파악되었다. 특히 붕괴사태 중 산대저수지, 대관저수지, 옥천저수지는 붕괴 발생 전 시설물 안전진단에서 모두 D등급을 받은 시설물이었다. 과거 붕괴사태 분석 결과 호우, 태풍 등 호우인자에 따른 설계홍수량 초과가 10건, 시설 노후화 및 제체 누수현상이 2건으로 붕괴의 직간접인 원인으로 파악되었다.

또한 국내에서 발생한 댐 · 저수지 붕괴사태를 대상으로 현재 EAP 수립 대상에 포함되는지에 대해 조사해 본 결과, Fig. 4에 나타난 바와 같이 EAP 수립대상에 포함되는 저수용량 30만톤 이상의 저수지는 3개소만 해당되고, 저수용량 확인 불가 저수지 3개소를 제외하고는 모두 EAP 수립대상에서 제외되는 저수용량 30만톤 미만의 저수지이었다. 이는 전체 댐 ·

저수지 붕괴사태 중 EAP 수립 대상에서 제외되는 저수지가 약 91%를 차지하는 것으로, 저수용량 30만톤 미만 저수지들의 붕괴 및 재해발생 위험이 매우 높은 것으로 파악되었다. 현재까지 붕괴빈도가 높게 나타난 저수지는 저수용량 5만톤 미만으로 70.1%를 차지하였으며, 5만톤 이상 10만톤 미만 사이는 14.9%, 10만톤 이상 30만톤 미만은 6%를 각각 차지하였다(OPM, 1999; KRC Branch of Gangleung, 2002; K-water, 2016; MOLIT · K-water, 2016; KRC 2017).

2. 기존 EAP 지침 검토 및 EAP 수립 선정지표 개발

본 연구에서는 EAP 수립 법적기준 이하 소규모 저수지의 붕괴 발생에 대한 재해위험을 경감시키고 시설물의 안정적인 관리를 도모하고자 이들 저수지에 대한 EAP 수립 선정지표를 개발하고자 하였다. 이를 위해 국외 지침(CDA, 2017)을 검토하여 저수용량 및 높이에 따른 댐의 분류(Table 1), 댐 규모 및 설계홍수량에 따른 위험도(Table 2), 위험도에 따른 피해현황(Table 3)을 통해 하류부 피해에 영향을 주는 주요 요소로써 저수용량, 제체높이 및 호우인자가 파악되었다.

Table 1 Classification of dam size based on storage capacity and height (CDA, 2017)

Index	Small	Medium	Large
Storage capacity	1.2×10 ⁶ m ³ or less	1.2×10 ⁶ m ³ ~60×10 ⁶ m ³	60×10 ⁶ m ³ or more
Height	12m or less	12m~30m	30m or more

Table 2 Classification of dam risk based on design flood (CDA, 2017)

Index	Small	Medium	Large
Low risk	100 years frequency	100 years frequency~0.5×PMF	0.5~1.0×PMF
Middle of risk	100 years frequency~0.5×PMF	0.5~1.0×PMF	1.0×PMF
High risk	0.5~1.0×PMF	1.0×PMF	1.0×PMF

Table 3 Classification of dam risk based on human injury and property damage (CDA, 2017)

Index	Low risk	Middle of risk	High risk
Human injury	None	Almost none	Yes
Property damage	Small	Comparable scale	Large

다음으로 국내 기존 EAP 수립 지침의 하류부 영향평가에서 댐 붕괴 원인 및 영향을 평가하는 주요한 항목으로 댐·저수지 붕괴 위험성의 평가, 댐·저수지 붕괴 홍수류 해석 등이 포함되었다. 하류부 영향평가는 시나리오에 기반한 댐 붕괴 모의를 통해 하류부 영향구간을 분석하는데, 여기서 시나리오 구성은 댐이 붕괴되는 최악조건을 통상적으로 극한홍수(PMF; Probable Maximum Flood)와 극대지진(MCE; Maximum Credible Earthquake)으로 설정하며, 이에 따른 저수지·댐 붕괴 위험성을 평가한다. 그리고 저수지·댐 붕괴에 따른 하류 영향에 대해서는 DAMBRK 모형을 적용한 홍수파 모의를 통해 댐 종류에 따른 평균 붕괴 폭과 붕괴 시간 등이 파악되며, 저수지·댐 붕괴시 하류지역의 홍수파를 추적하여 하류 피해 영향 구간을 파악한다(MOIS, 2009).

따라서 본 연구에서는 법적 기준 이하 소규모 저수지에 대한 EAP 수립 선정지표로서 앞에서 언급한 최근 댐·저수지

붕괴사례 원인 분석 결과와 국내외 EAP 수립 지침 관련 댐 하류부 피해에 영향을 주는 주요 요소들을 고려하였다. ‘저수용량’은 기존 EAP 수립 지침에서 유일하게 제시하고 있는 정량적 기준으로써 댐 붕괴시 하류부 피해와의 연관성을 고려하여 선정하였으며, ‘제체높이’는 댐 붕괴 모의 시 붕괴 폭 선정 및 하류부 피해와의 연관성을 고려하여 선정하였다. ‘경과연수’는 과거 댐·저수지 붕괴사례가 대부분 30년 이상 노후화된 시설물에서 발생됨에 따라 시설 노후화로 인한 제체 누수와의 연관성을 고려하였다. 또한 ‘호우 및 지진인자’는 댐 붕괴 시나리오 구성시 붕괴 극한조건인 극한홍수(PMF; Probable Maximum Flood) 및 극대지진(MCE; Maximum Credible Earthquake)과의 연관성을 고려하여 선정하였다. Table 4는 본 연구에서 선정한 법적 기준 이하 소규모 저수지에 대한 EAP 수립 선정지표인 저수용량, 제체높이, 경과연수, 호우인자, 지진인자를 나타낸다.

Table 4 Selection criteria for EAP establishment in this study

Consideration factors	Main consideration	Selected criteria
Downstream flood damage	Contributed in downstream flood damage and past dam failure	Storage capacity
Dam failure simulation	Main factor in dam failure simulation	Embankment height
Aging of facilities	Main factor of the past dam failure	Reservoir age
PMF (Probable Maximum Flood)	Main factor in dam failure simulation	Heavy rain factor
MCE (Maximum Credible Earthquake)	Main factor in dam failure simulation	Earthquake factor

3. EAP 수립 대상 선정지표 정량화

본 연구에서는 법적 기준 이하 소규모 저수지에 대한 EAP 수립 대상을 선정하기 위해 고려한 5개 지표의 정량화를 통해 실무적용에서 의사결정이 용이하도록 객관적 기준을 제시하고자 하였다. ‘저수용량’ 지표는 현재 EAP 수립 법적기준에 “30만톤 이상”으로 명시된 유일한 정량적 지표로서 댐·저수지 붕괴 시 하류부 인명 및 재산 피해 규모에 영향을 미치는 중요한 지표이다. 법적 기준 이하 소규모 저수지를 대상으로 EAP 수립을 위한 최소 저수용량 기준을 설정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 과거 댐·저수지 붕괴사례 원인분석 결과를 기반으로 적정 저수용량 기준을 결정하였다. 과거 댐·저수지 붕괴는 85%가 10만톤 이하의 저수지에서 발생하였으나 하류피해가 소규모인 점과 농업생산기반통계연보(MAFRA, 2016a)에 저수지 17,310개소 중 10만톤 이하 저수지가 15,170개소 약 87.6%로 대부분을 차지하고 있어 향후 EAP 수립기준 적용시에 실효성 등을 고려하여 “10만톤 이상 30만톤 미만”으로 결정하였다.

‘제체 높이’ 지표는 댐의 파괴 양상(Lee, 1987), 국내 댐 붕괴폭 적용 관련 EAP 보고서(K-water, 2011; MOLIT · K-water, 2016)를 비교분석하여 정량적인 기준을 제시하였다. 그 결과, 댐의 파괴 양상(Lee, 1987) 연구에서 제시된 흙댐의 평균 붕괴폭은 $h_f \sim 3h_f$ 이며, 이미 EAP 수립이 완료된 국내 EAP 대상 댐들의 붕괴폭도 대부분 $3h_f$ 를 적용하고 있는 것으로 조사되었다(Table 5). 또한 과거 댐·저수지 붕괴에서 댐 붕괴 폭을 파악할 수 있는 사당굴, 대관, 옥천, 장현, 동막, 송호, 산대, 괴연 등 총 8개 저수지 붕괴 사례를 분석한 결과, 저수지 제체의 평균 붕괴 폭이 33.8m로 파악되었다. 이 결과를 제체 높이와 흙댐 평균 붕괴폭의 관계($B \leq 3h_f$)에 적용해 본 결과, 제체 높이가 11.3m으로 나타나 본 연구에서는 ‘제체 높이’ 지표의 정량적 기준을 “11m 이상”으로 결정하였다.

‘경과연수’ 지표는 시설물의 노후화와 관련 있으며, 국내의 경우 사회간접자본 시설물의 노후화 정도는 시설물 준공 이후 30년 이상의 사용연수를 기준으로 하고 있다(KISTEC, 2015). 본 연구에서는 경과연수 지표의 정량화를 위해 우리나라 전체 저수지의 경과연수를 조사해 보았다. 그 결과, 전체 저수지 17,310개 중 30년 이상에서 50년 미만의 저수지는 22.6%, 50년 이상 저수지는 73.6%, 30년 이상 저수지는 96.1%를 차지하는 것으로 조사되었다(MAFRA, 2016a, MAFRA 2016b).

실제 최근에 붕괴된 저수지의 경과연수를 조사해본 결과 대관저수지는 경과연수가 56년, 옥천저수지는 경과연수가 68년, 산대저수지는 경과연수가 49년으로 파악되었으며, 모두 정밀안전진단 D등급 판정을 받은 것으로 나타났다. 여기서 정밀안전진단 D등급은 시설물 사용 폐쇄 전 단계로서 노후화가 상당히 진행되어 신속한 보수·보강이 필요하다는 것을 의미한다.

한편 재해위험저수지·댐 관리지침(MOIS, 2016)에 의하면, 재해위험저수지·댐 정비계획 수립 타당성 평가 항목으로 시설노후도(경과연수), 재해발생 위험도(정밀안전진단 결과) 등이 활용되고 있다(Table 6). 여기서, 시설노후도(경과연수)와 재해발생 위험도(정밀안전진단 결과)의 평가기준에 의하면 저수지 경과연수가 50년 이상인 경우와 정밀안전진단 D등급의 재해위험 정도를 동일하게 평가하고 있다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 저수지의 노후화 정도와 과거 붕괴된 저수지의 경과연수 및 정밀안전진단 판정등급, 재해위험저수지·댐 관리지침 상의 타당성 평가 기준 등을 고려하여 ‘경과연수’ 지표의 정량적 기준을 “50년 이상”으로 결정하였다.

다음으로 ‘호우인자’의 정량화는 행안안전부 재해연보 상의 우심피해지역(MOIS, 2014)을 기준으로 설정하였다. 호우인자의 경우 앞에서 언급한 바와 같이 과거 저수지 붕괴사례에서 저수지 붕괴의 주요 원인인 태풍 및 집중호우에 의한

Table 5 Average break width and break time of fill dam (Lee, 1987)

Dam type	Average break width(B)	Break time(T, hr)
Fill dam(well constructed)	$h_f \leq B \leq 3h_f$	$0.5 \leq T \leq 3.0$
Fill dam	$h_f \leq B \leq 3h_f$	$0.1 \leq T \leq 0.5$

where, h_f : fill dam hight(m)

Table 6 Feasibility evaluation criteria for renovation of the disaster risk reservoirs (MOIS, 2016)

Class.	Evaluation criteria for facility deterioration	Criteria for disaster occurrence
A	Over 60 years of completion year	Precision safety diagnosis result E
B	Over 50 years of completion year	Precision safety diagnosis result D
C	Less than 50 years of Completion year	Precision safety diagnosis result C

피해지역을 파악함으로써 호우인자와 관련된 저수지 붕괴 가능성을 파악하고자 하였다.

Fig. 5는 행정안전부에서 제공하는 집중호우, 태풍 등 기상 여건에 따른 우심피해 발생 횟수를 행정구역별로 나타낸 지도이다(MOIS, 2014). 우심피해 발생 지도를 기준으로 과거 저수지 붕괴사례를 중첩 시켜 본 결과, 총 67건의 저수지 붕괴 사례에서 우심피해 3회 이하 지역에 해당하는 경우는 64.2%, 4회 이상 7회 이하 지역에 해당하는 경우는 34.3%, 8회 이상 지역에 해당하는 경우는 1.5%를 나타내었다. 이 중에서 최근 2000년 이후의 붕괴사례에 대해서는 우심피해 3회 이하 지역에 해당하는 경우는 44.4%, 4회 이상 7회 이하 지역에 해당하는 경우는 55.6%를 차지하였다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 ‘호우인자’ 지표의 정량화는 우심피해 지역에 위치한 저수지와 과거 붕괴사례의 연관성을 고려하여 우심피해의 대다수를 차지하는 3회 이하의 우심피해지역은 제외하고 “4회 이상 우심피해 발생지역”을 기준으로 결정하였다.

마지막으로 ‘지진인자’ 지표는 기상청에서 제공하는 역대

지진발생 현황(KMA, 2017) 및 한국수자원학회의 댐 설계기준(KWRA, 2011)을 바탕으로 정량화 하였다. 2016년 9월 경주에서 발생한 규모 5.8 지진과 2017년 11월 포항에서 발생한 규모 5.4 지진 이후 공공 시설물 안정성 확보에 대한 관심이 증대함에 따라, 호우인자와 마찬가지로 지진인자에서도 저수지 붕괴 가능성을 지진발생위험지역을 기준으로 파악하고자 하였다.

이를 위해 본 연구에서는 지진과 저수지 붕괴사례의 연관성을 검토하기 위해 과거 지진발생 현황을 바탕으로 역대 지진발생 20위권 내에 해당하는 규모 4.0이상 지진 발생지역을 과거 저수지 붕괴사례에 중첩시켜 보았다. 그 결과, 규모 4.0 이상 지진발생 지역에 위치하는 저수지는 38.8%로 나타나 저수지 붕괴와 지진과의 직간접적인 연관성을 보였다. 또한 국내 댐설계기준(KWRA, 2011)에서 내진설계 기준 중 특등급에 해당하는 I 구역을 역대 지진발생 20위권 내에 해당하는 규모 4.0이상 지진 발생지역에 중첩해 보았다. 그 결과, 15개 지역이 내진설계 기준 특등급에 해당하는 I 구역에 속하여 78.9%의 높은 중첩율을 나타내었다. 따라서 본 연구결과를 토대로

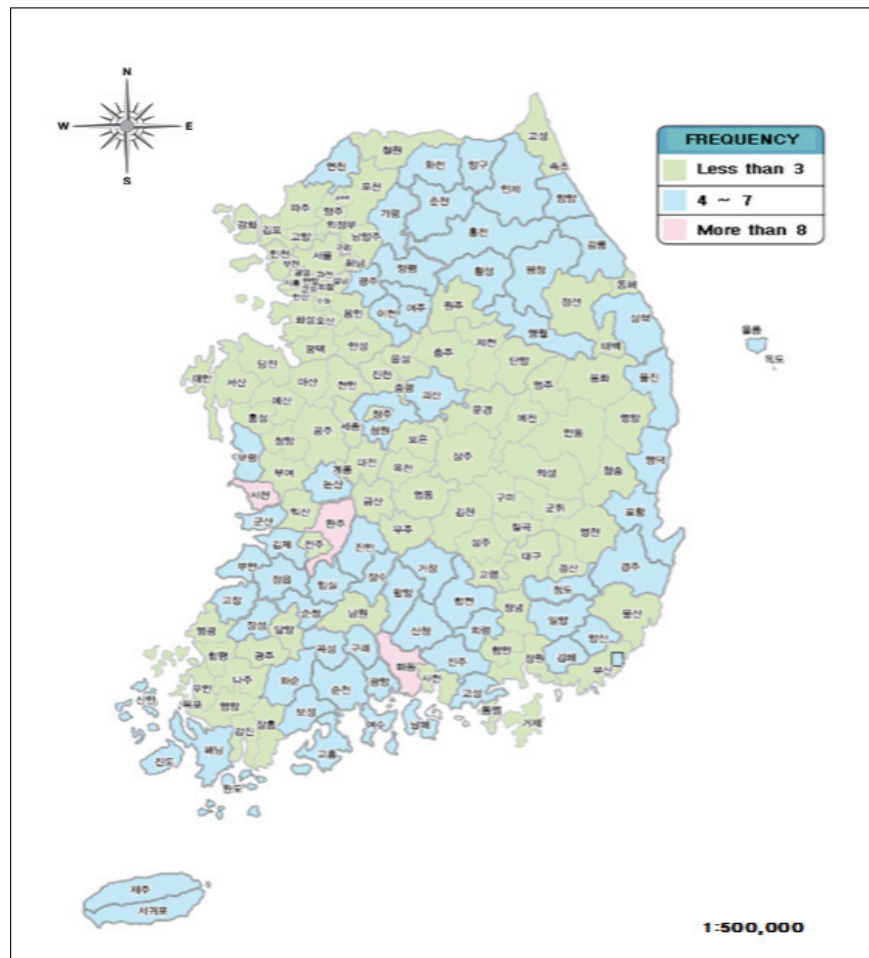


Fig. 5 Frequency of damage by heavy rainfall (MOIS, 2014)

Table 7 Over 4 magnitude earthquake occurrence area and earthquake zone of dam design standard (KMA, 2017; KWRA, 2011)

Ranking	Over 4 magnitude of earthquake			Earthquake zone of dam design standard	Earthquake occurrence area
	Magnitude	Date	Location		
1	5.8	2016. 9. 12	Gyeongbuk Gyeongju	I	○
2	5.4	2017. 11. 15	Gyeongbuk Pohang	I	○
3	5.2	1978. 9. 16	Chungbuk Boeun	I	○
4	5.1	2004. 5. 29	Gyeongbuk Ulsan	I	○
5	5.1	2004. 4. 1	Chungnam Taeon	I	○
6	5.0	1978. 10. 07	Chungnam Hongseong	I	○
7	5.0	2003 3. 30	Incheon	I	○
8	5.0	2016. 7. 5	Ulsan	I	○
9	4.9	1994. 7. 26	Jeonnam Shinan	I	○
10	4.8	2007. 1. 20	Gangwon Pyeongchang	II	
11	4.5	1993. 3. 28	Jeju-do	II	
12	4.5	1996. 12. 13	Gangwon Yeongwol	I	○
13	4.2	1985. 1. 14	Busan	I	○
14	4.2	1996. 1. 24	Gangwon Yangyang	II	
15	4.2	1999. 1. 11	Gangwon Sokcho	II	
16	4.0	1979. 2. 28	Chungnam Hongseong	I	○
17	4.0	2003. 6. 9	Jeonbuk Gunsan	I	○
18	4.0	2005. 6. 29	Gyeongnam Geoje	I	○
19	4.0	2009. 5. 2	Gyeongbuk Andong	I	○

‘지진인자’ 지표의 정량화는 Table 7에 나타난 바와 같이 규모 4.0 이상 발생지역 및 댐 설계기준 내진설계 I 구역에 중첩되는 “15개 지진발생 위험지역”으로 설정하였다.

Table 8은 본 연구에서 도출한 법적 기준 이하 소규모 저수지의 EAP 수립 필요 여부를 결정하는 선정지표인 저수용량, 제체높이, 경과연수, 호우인자, 지진인자의 정량적인 기준을 나타낸다.

III. 결과 및 고찰

본 연구를 통해 개발된 법적 기준 이하 소규모 저수지에 대한 EAP 수립 대상 선정지표 5가지를 과거 댐·저수지 붕괴 사례 67건과 행정안전부(MOIS, 2016)의 재해위험저수지로 지정·고시된 354개 저수지에 적용해 보았다. Fig. 6는 과거 댐·저수지 붕괴사례에 선정지표를 적용한 결과를 나타내며, Fig. 7는 재해위험 저수지에 선정지표를 적용한 결과를 나타

Table 8 Quantification of the reservoir selection criteria for EAP establishment

Index	Quantification	Related references
Storage capacity	- Over 100,000 tons to 300,000 tons	- Past Failure Case(67EA) - Statistical Yearbook of Agricultural Production Infrastructure Maintenance Project(MAFRA, 2016)
Embankment height	- Over 11m	- Destruction of Dam(Lee, 1987)
Reservoir age	- Over 50 years	- Disaster risk reservoir and dam management guidelines(MOIS, 2016)
Heavy rain factor	- More than 4 frequent damaged area by heavy rainfall	- Disaster annual report(MOIS, 2014)
Earthquake factor	- Over 4 magnitude earthquake occurrence area and dam design criteria earthquake zone	- Over 4 magnitude earthquake occurrence (KMA, 2017) - Dam design standard(KWRA, 2011)

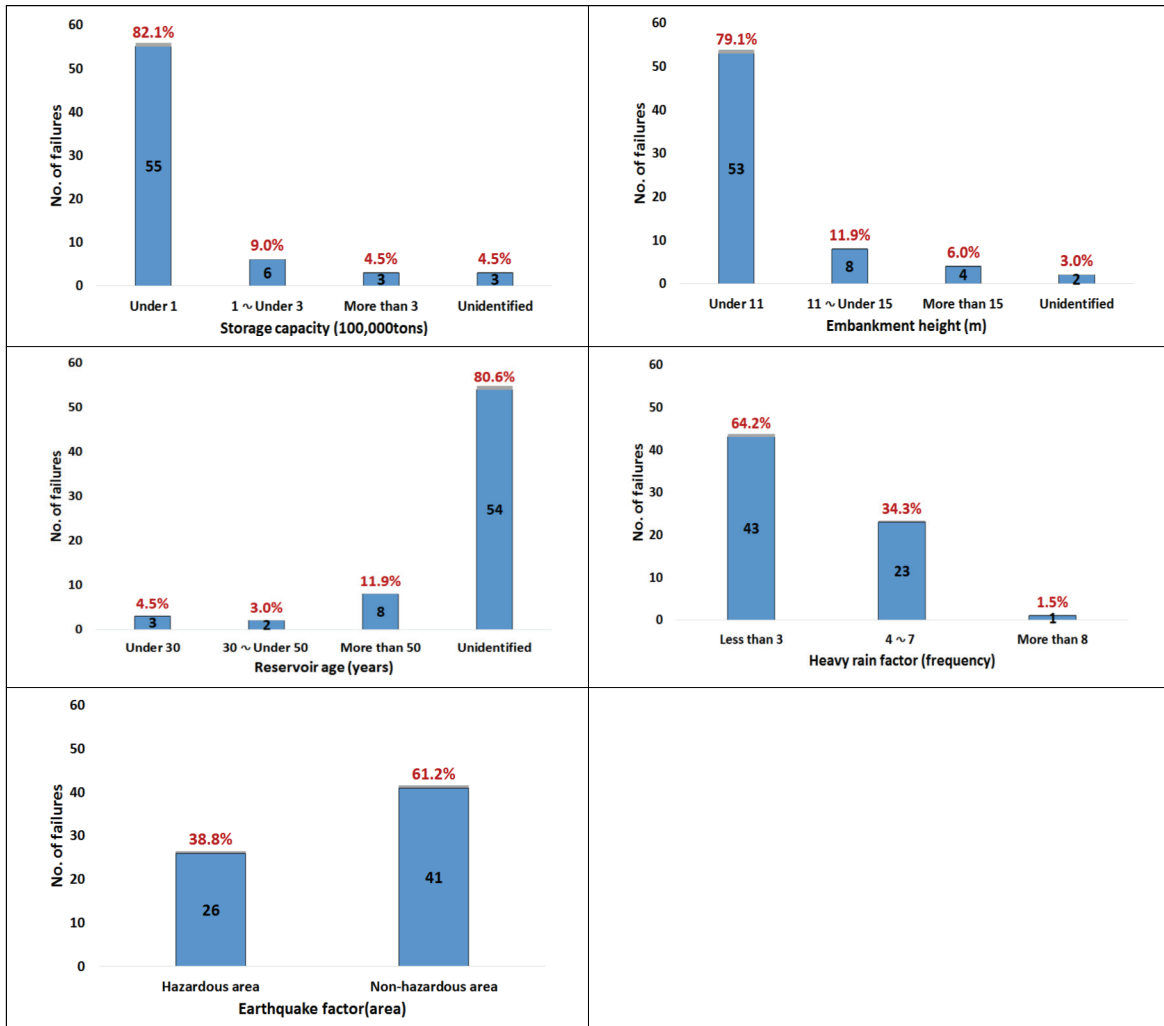


Fig. 6 Selection criteria application results for the past failure cases

낸다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 과거 댐·저수지 붕괴사례 67건 중 저수용량 10만톤 이상 30만톤 미만에 해당되는 저수지는 9.0%로 나타났으며, 제체 높이 11m 이상에 해당되는 저수지는 17.9%로 나타났다. 또한, 경과연수 50년 이상에 해당되는 저수지는 11.9%로, 자료 부족에 의한 경과연수 확인 불가 저수지 80.6%를 제외하고는 61.5%가 이에 해당하였다. 호우인자의 경우 4회 이상 우심피해지역에 해당되는 저수지는 35.8%를 차지하였으며, 지진인자의 경우 지진발생 위험지역에 해당되는 저수지는 38.8%로 나타났다. 따라서 과거 댐·저수지 붕괴사례의 경우에는 경과연수 > 지진인자 > 호우인자 > 제체높이 > 저수용량 순으로 높은 연관성을 보였다.

또한, Fig. 7에 나타난 바와 같이 재해위험 저수지 중 저수용량 10만톤 이상 30만톤 미만에 해당되는 저수지는 7.3%로 나타났으며, 제체 높이 11m 이상에 해당되는 저수지는 14.7%로 나타났다. 또한, 경과연수 50년 이상에 해당되는 저수지는

84.2%로 나타났으며, 4회 이상의 우심피해지역에 해당되는 저수지는 56.2%, 지진발생 위험지역에 해당되는 저수지는 16.4%로 나타났다. 따라서 재해위험 저수지의 경우에는 경과연수 > 호우인자 > 지진인자 > 제체높이 > 저수용량 순으로 높은 연관성을 보였으며, 과거 댐·저수지 붕괴사례 및 재해위험 저수지에 선정지표 적용 결과는 유사한 경향을 보이는 것으로 파악되었다.

댐 및 저수지의 붕괴는 내·외부 복합요인에 의해 발생하는 경우가 대부분이므로 본 연구에서는 과거 저수지 붕괴사례 67건을 대상으로 EAP 수립 대상 선정지표 5가지의 중첩 정도를 검토하였다. Fig. 8은 각 선정지표별 중첩 정도를 나타낸다. 단일 지표만 고려한 경우 5개 선정지표 중 지진인자 16.4%, 호우인자 11.9%, 경과연수 4.5%, 제체높이 1.5% 순으로 높은 연관성을 보였으며, 저수용량에 해당되는 경우는 없는 것으로 나타났다.

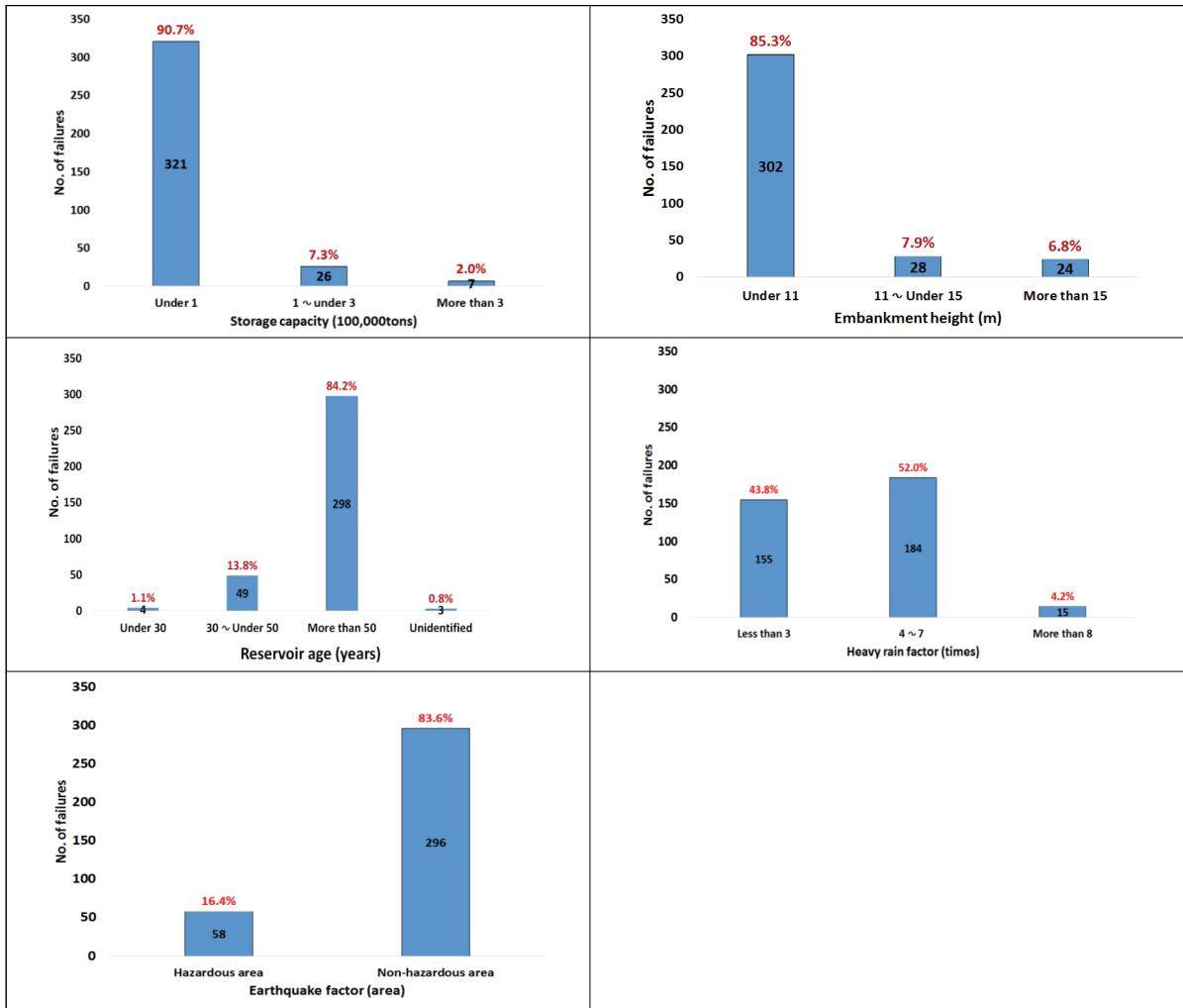


Fig. 7 Selection criteria application results for the disaster risk reservoirs

선정지표 간의 중첩정도는 두 개의 선정지표를 중첩한 경우, 호우인자와 지진인자 11.9%, 저수용량과 제체높이 3.0%, 제체높이와 호우인자 3%, 제체높이와 지진인자 3%, 경과연수와 호우인자 3%, 저수용량과 호우인자 1.5%, 경과연수와 지진인자 1.5% 순으로 중첩도를 나타내었으며, 그 외의 경우는 전무하였다. 세 개의 선정지표를 중첩한 경우, 저수용량과 제체높이와 지진인자, 제체높이와 경과연수와 호우인자, 제체높이와 경과연수와 지진인자, 제체높이와 호우인자와 지진인자의 중첩도는 모두 1.5%를 나타내었으며, 그 외의 경우는 전무하였다. 네 개의 선정지표를 중첩한 경우에는 저수용량과 제체높이와 호우인자와 지진인자만 중첩되는 1.5%를 제외하고는 전무하였으며, 5개 선정지표 모두 중첩되는 경우는 없는 것으로 나타났다.

결과적으로 단일 지표만 고려한 경우 5개 선정지표 중 지진인자 16.4%, 호우인자 11.9%, 경과연수 4.5% 순으로 높은

연관성을 보였으며, 선정지표간 중첩한 경우는 호우인자+지진인자가 11.9%로 가장 높게 나타났다. 따라서 이러한 결과를 바탕으로 법적 이하 소규모 저수지의 EAP 수립 대상 선정을 5개 선정지표 중 높은 연관성을 나타낸 지진인자, 호우인자, 경과연수를 대상으로 중첩정도에 따라서 EAP 수립을 위한 관찰그룹과 EAP 수립을 위한 검토그룹으로 분류하여 나타내었다. Table 9는 선정지표 중첩에 따른 EAP 수립 대상 그룹 분류를 나타낸다.

본 연구에서 개발된 5개 선정지표를 단일 또는 중첩으로 재해위험저수지(MOIS, 2016) 354개소에 적용하여 EAP 대상 관찰그룹과 검토그룹으로 분류해 보았다. Table 10은 그 결과를 나타낸다. 2개의 선정지표간 중첩도는 40.9%, 3개의 선정지표간 중첩도는 18.4%, 4개의 선정지표간 중첩도는 0.9%, 5개 선정지표간의 중첩도는 0.3%로 나타났다.

EAP 수립대상 관찰그룹에 해당하는 경우는 2개의 선정지

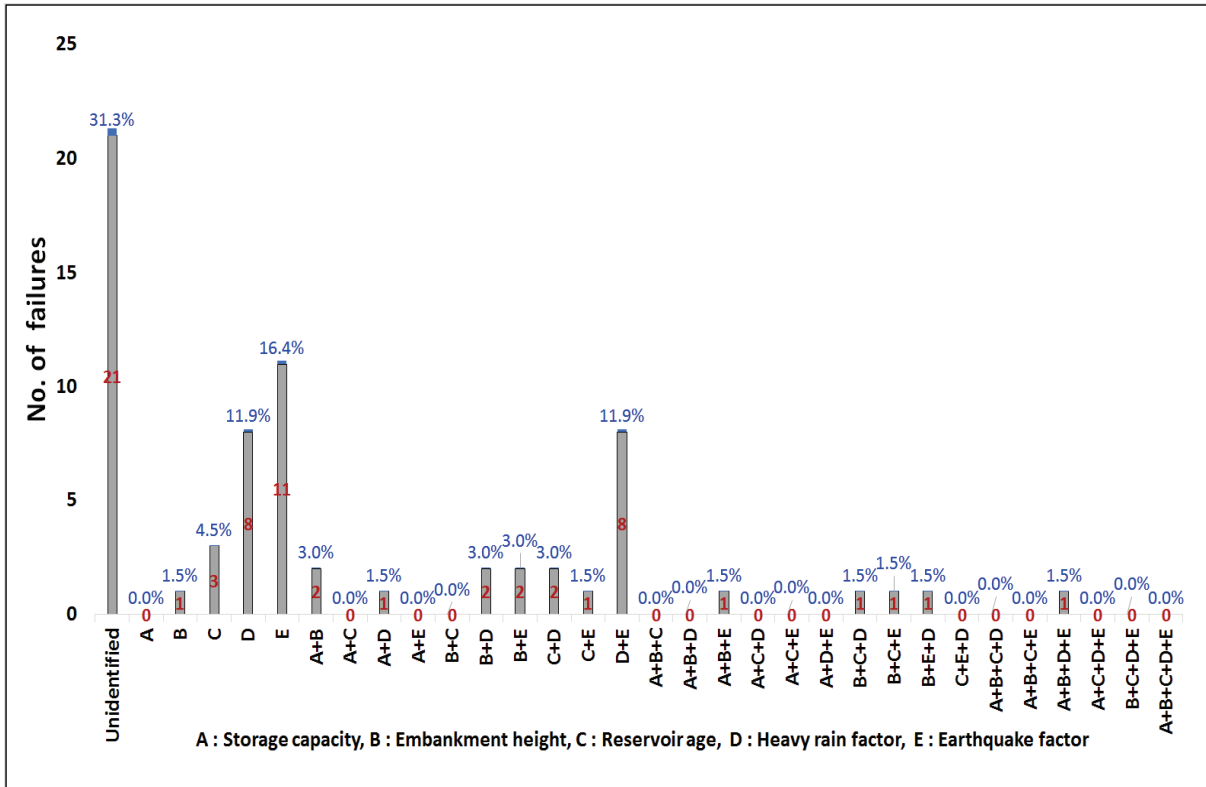


Fig. 8 Degree of overlapping criteria on the past failure cases

Table 9 Classification of EAP establishment group based on degree of overlapping criteria

Index	Criteria status
Observation group	Reservoir age + Heavy rain factor, Reservoir age + Earthquake factor, Heavy rain factor + Earthquake factor
Review group	Reservoir age + Heavy rain factor + Earthquake factor

표를 중첩한 경우에 116개소이며 32.7%를 차지한다. 3개의 선정지표를 중첩한 경우에는 17개소이며 4.9%를 차지한다. 4개의 선정지표를 중첩한 경우에는 3개소이며, 0.9%를 차지한다. 전체적으로는 EAP 수립 대상 관찰그룹은 136개소가 해당하며, 38.5%를 차지한다.

EAP 수립 대상 검토그룹에 해당되는 경우는 2개의 선정지표를 중첩한 경우는 없으며, 3개의 선정지표를 중첩한 경우에는 41개소이며 11.6%를 차지하고, 5개의 선정지표를 중첩한 경우에는 1개소이며 0.3%를 차지하여 전체적으로는 42개소가 EAP 수립 대상 검토그룹에 해당하며, 이는 11.9%를 차지한다.

EAP 수립 대상 관찰그룹에 해당하는 저수지 136개소에 대해서는 전문기관 관리자에 의한 주기적 점검 및 계측기 설치 등을 통한 상시 모니터링 실시 등으로 세심한 시설물 관리가 필요할 것으로 판단된다. 또한 EAP 수립 대상 검토그룹에 해

당하는 41개소 저수지에 대해서는 제체 하류부 구간의 주민 거주 현황, 경작지, 축사 등 재산 현황 및 EAP 수립에 소요되는 예산 등을 종합적으로 고려하여 저수지 관리기관에서 최종적으로 EAP 수립 여부를 결정하여 잠재적인 피해 발생을 사전에 저감시켜야 하겠다. 본 연구를 통해 법적 이하 소규모 저수지의 제원, 이력 및 위치만으로 EAP 수립여부를 현장에서 쉽게 활용 가능할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 최근 기상이변의 영향 및 지진 발생과 저수지 노후화 등으로 지속적으로 발생되고 있는 소규모 저수지 붕괴에 의한 재해 위험성을 경감하고자 댐·저수지 EAP 수립 기준 이하 소규모 저수지를 대상으로 EAP 수립 대상여부

Table 10 Application results of EAP establishment grouping for the disaster risk reservoirs

No. of overlapping	Criteria status*	Numbers	%	EAP establishment group
Unidentified	Unidentified	9	2,5	—
	Sum	9	2,5	
1 criteria	A, B, C, D, E	131	37,0	—
	Sum	131	37,0	
2 criteria	A+B	4	1,1	—
	A+C	7	2,0	—
	A+D	0	0	—
	A+E	0	0	—
	B+C	11	3,1	—
	B+D	7	2,0	—
	B+E	0	0	—
	C+D	104	29,3	observation
	C+E	4	1,1	observation
	D+E	8	2,3	observation
	Sum	145	40,9	
3 criteria	A+B+C	2	0,6	—
	A+B+D	5	1,4	—
	A+B+E	0	0	—
	A+C+D	1	0,3	observation
	A+C+E	2	0,6	observation
	A+D+E	1	0,3	observation
	B+C+D	13	3,7	observation
	B+C+E	0	0	—
	B+D+E	0	0	—
	C+D+E	41	11,6	review
	Sum	65	18,4	
4 criteria	A+B+C+D	2	0,6	observation
	A+B+C+E	0	0	—
	A+B+D+E	1	0,3	observation
	A+C+D+E	0	0	—
	B+C+D+E	0	0	—
	Sum	3	0,9	
5 criteria	A+B+C+D+E	1	0,3	review
	Sum	1	0,3	
Total		214	100,0	

* A : Storage capacity, B : Embankment height, C : Reservoir age, D : Heavy rain factor, E : Earthquake factor

를 판단할 선정지표를 개발하였다.

연구는 과거 붕괴사례 원인 분석, 기존의 EAP 수립 지침 검토 및 관련분야 선행 연구 등을 분석하여 저수용량, 제체 높이, 경과연수, 호우인자 및 지진인자를 포함하는 5개 선정지표를 개발하고 정량화하여 실무적용을 용이하게 하고자 하였다.

- 1) 과거 붕괴사례 원인분석 결과, 붕괴는 EAP 수립 법적기준 이하의 소규모 저수지에서 발생했다. 붕괴의 주요 원인은 대부분 내구연한 50년 이상으로 시설물 노후화, 설계홍수량 과소 산정, 월류, 파이핑 현상 등으로 파악되었다.
- 2) 개발된 선정지표별 저수지 붕괴와의 연관성을 파악해본 결과, 호우인자, 지진 및 호우인자, 경과연수 지표 순으로 높은 연관성을 나타냈다. 이는 집중호우, 태풍 등 호우인자, 시설 노후화에 따른 제체 누수, 우심피해 및 지진 발생위험 지역에 저수지가 위치한 지리적 요인이 복합적으로 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- 3) 재해위험 저수지(MOIS, 2016)를 대상으로 저수지 붕괴와 연관성이 높은 지표가 2개 중첩된 경우 관찰그룹, 3개 중첩된 경우 검토그룹으로 분류하고 각 그룹별로 재해위험성에 대비하기 위한 대책 수립 방향도 제시하였다.
- 4) 관찰그룹 중에서 저수용량 선정지표를 포함한 4개소에 대해서는 붕괴시 하루 피해의 심각성을 고려하여 보다 면밀한 모니터링이 필요할 것으로 판단되며, 검토그룹 중에서 저수용량 및 제체높이 선정지표를 포함한 1개소에 대해서는 우선적으로 EAP 수립 여부를 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 결과는 기존의 EAP 수립 기준의 보완책으로 법적기준 이하 소규모 저수지의 EAP 수립 필요성 여부 판단기준으로 활용가능할 것으로 사료된다.

REFERENCES

1. CDA, 2017. Canadian dam safety guideline. Canadian Dam Association, Toronto, Canada.
2. Choi, B. H., and C. H. Ryu, 2017. Preparing the failure forecast for the reservoir (fill dam) for doubling the performance utilization of the reservoir disaster prevention measurement business. *Journal of the Korea Water*

- Resources Association* 50(3): 36-44.
3. Choi, H. S., 2009. Research trend analysis of flood from the reservoir failures. *Journal of the Korean National Committee on Irrigation and Drainage* 16(1): 30-33. doi:10.5391/JKIIS.2006.16.1.030.
 4. DESW (Department of Ecology State of Washington), 2013. Guidelines for developing dam emergency action plans. Washington, USA.
 5. FEMA, 2013. Federal government guidelines for dam safety. The Federal Emergency Management Agency of Washington, USA.
 6. ICOLD, 1998. Dam-break flood analysis. Bulletin of International Commission on Large Dam, 111. Paris, France.
 7. Kim, J. G., J. Y. Kim, and H. H. Kwon, 2017. Introduction of hydrologic dam risk assessment technique. *Journal of the Korea Water Resources Association* 50(3): 28-35.
 8. KISTEC, 2015. A study on the identification and improvement of vulnerable factors through analysis of diagnosis results of dams and reservoir facilities. Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation (in Korean).
 9. KMA, 2017. The records of over 4 magnitude earthquake occurrence (<http://www.kma.go.kr/>). Korea Meteorological Administration (in Korean).
 10. KRC Gangleung Branch, 2012. Water disaster prevention business plan. Korea Rural Community Cooperation, Gangleung Branch (in Korean).
 11. KRC, 2017. Accident records and management status of irrigation facilities. Korea Rural Community Cooperation (in Korean).
 12. K-water, 2011. Research report of Emergency Action Plan (EAP) establishment for Gunwi multipurpose dam. Korea Water Resources Corporation, 1-7 (in Korean).
 13. KWRA, 2011. Dam design standard and commentary. Korea Water Resources Association, 609-617 (in Korean).
 14. Lee, J. T., 1987. Destruction of dam. *Journal of the Korea Water Resources Association* 20(3): 186-188 (in Korean).
 15. MAFRA, 2016a. Statistical yearbook of agricultural infrastructure maintenance projects. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (in Korean).
 16. MAFRA, 2016b. Status of national agricultural infrastructure facilities. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (in Korean).
 17. MOIS, 2009. Guidelines of emergency action plan (EAP) establishments for dam and reservoirs' failures. Ministry of the Interior and Safety (in Korean).
 18. MOIS, 2014. Annual report of disasters. Ministry of the Interior and Safety, 13-24 (in Korean).
 19. MOIS, 2016. Disaster risk reservoir and dam management guidelines. Ministry of the Interior and Safety (in Korean).
 20. MOIS, 2015. Annual business report in 2015. Ministry of the Interior and Safety (in Korean).
 21. MOLIT · K-water, 2016. Research report of emergency action plan (EAP) establishment for Four-major rivers multifunctional weir. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Water Resources Corporation, 3-1-3-31 (in Korean).
 22. MOLIT · K-water, 2017. Water and future. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Water Resources Corporation, 40-62 (in Korean).
 23. OPM (Office for Government Policy Coordination, Prime Minister's Secretariat), 1999. Water disaster prevention report. Sejong, Korea (in Korean).