

# 전국 농업용 저수지 안정성 제고를 위한 방안 (1)



김 성 준  
건국대학교 사회환경시스템공학과 교수  
kimsj@konkuk.ac.kr



박 종 윤  
건국대학교 사회환경시스템공학과  
박사후연구원  
bellyon@konkuk.ac.kr

## 1. 서론

최근 전 세계적으로 기후변화에 따른 기온의 계절적 불안정 그리고 강우의 양이나 패턴의 변화로 인해 이상 홍수 피해가 속출하고 있는 실정이며, 우리나라의 경우에도 최근 기록적인 홍수와 이상 가뭄, 폭설, 냉해 피해 등이 예상의 범위를 벗어나 빈번히 발생하고 있는 상황이다. 특히 국지성 집중호우와 태풍은 농업용 저수지의 설계빈도를 초월하는 폭우를 동반함으로써 저수지 체계의 수문학적 안정성을 위협함과 동시에 구조물의 노후화로 인한 구조적 결함이 발생할 경우 저수지 붕괴와 같은 예기치 않은 비상상황을 초래하게 된다. 이에 정부는 하천법 개정(2004.1)에 따라 총저수량이 백만톤 이상이면서 하류의 피해 잠재능이 큰 댐, 저수지와 하천부속물에 대한 비상대처계획(Emergency Action Plan, EAP) 수립을 의무화하였다.

한편 전국의 저수지 17,505개 중에서 백만톤이하의

저수지가 97.2%(17,020개)를 차지하며, 축조된 지 약 50년이상(1962년 이전)에 이르는 저수지가 68.4%(11,970개)나 된다. 이들 저수지는 모두 흙으로 만든 토사댐으로 구조적 그리고 지반학적으로 불안정한 상태에 있다고 간주할 수밖에 없으며, 또한 최근의 기록적인 집중호우 발생시 물리적으로 운영의 한계를 가질 수 밖에 없다. 특히 올해 4월 초에 붕괴된 산대저수지는 강우에 의한 붕괴가 아닌 댐 체체(코어가 없음) 및 지반불안정(제방 중앙하단부에 설치된 복통)으로 인한 평시에 발생된 붕괴로 국민적 불안함과 정부의 신속한 대응책이 요구된다.

그러나 이들 중소규모 저수지의 경우, 그 숫자가 너무 많아 이들을 대상으로 한 정밀안전진단과 EAP수립 등을 기존의 중대규모 저수지 위주의 분석방법으로 진행하는 데에는 시간과 예산확보 면에서 무리가 따른다. 따라서, 이들 저수지를 대상으로 한 별도의 간편화가 가능한 저수지 안전진단 방법 그리고 저수지의 붕괴시 하류

피해 규모를 정량화 하는 방법(저수지 붕괴예측, 붕괴에 따른 하류부 홍수해석 및 피해액 산정을 위한 간편한 방법)이 필요하다. 특히 중요하고도 시급한 사항은 이들 저수지 하류를 대상으로 한 붕괴시의 인명 및 재산 피해에 대한 DB구축과 더불어, 피해예상지역에 대해서는 지자체의 개발허가 규제조치가 시급히 요구된다(김성준 등, 2009).

본 고에서는 우리나라 농업용 저수지의 최근 현황과 국내외 댐붕괴 사례를 살펴본 후, 저수지 안정성 평가 및 하류피해 예측을 위한 간편법을 제안하고자 한다.

## 2. 저수지 비상대처계획 수립현황 및 산대저수지 붕괴 사례

국내에는 농업용수 공급을 목적으로 축조된 저수지가 2012년 통계연보기준에 따르면 17,505개소가 있으며, 이 중 3,372개소는 한국농어촌공사에서 관리하고, 나머지 14,133개소는 지자체에서 관리하고 있다.

농업용 저수지의 축조년도를 살펴보면, 지자체관리

저수지의 57%인 8,066개의 저수지가 1948년 이전에 축조된 저수지로, 축조된 지 60년 이상된 시설물은 공용내구연한이 경과한 시설로서 노후손상부위를 복구해야 함은 물론 이상기후에 따른 강우사상의 변화로 설계빈도를 달리하여 재해대비 보강이 필요한 시설이다. 따라서 이들 저수지에 대한 안전관리방안의 마련을 통한 재해대비보강 및 기능강화가 시급한 실정이다. 특히 지자체 농업용저수지의 축조년도를 보면, 지자체관리 저수지의 57%인 8,066개소의 저수지가 1948년 이전에 축조된 일명 '밀가루 댐'으로 불리는 저수지가 대부분이다. 축조된 지 60년 이상 된 시설물은 공용내구연한이 경과한 시설로서 노후손상부위를 개수해야 함은 물론 농업용저수지 설계기준 변화가 반영된 설계빈도를 적용하여 재해대비 보강이 필요한 시설이다(소방방재청, 2011).

한국농어촌공사관리 저수지는 총 3,372개소로 그 중 경과연수가 30년 이상된 노후시설은 2,934개소로 전체의 87%를 차지하고 있다. 표 1은 한국농어촌공사관리 저수지 현황을 나타낸 것으로 50년 이상된 저수지는 총 2,235개소로 전체의 66%를 차지하고 있는 실정이다.

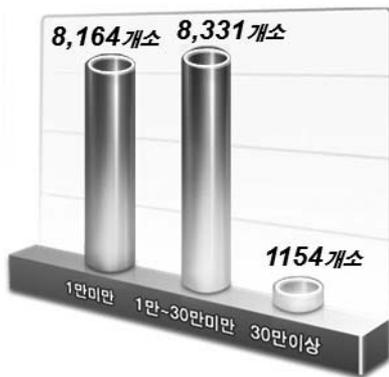


그림 1. 저수지 규모별 분포 현황

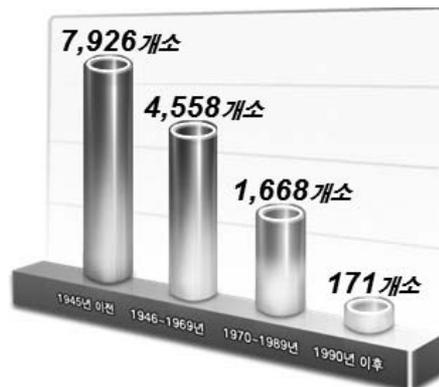


그림 2. 축조 연도별 저수지 분포 현황

표 1. 한국농어촌공사 저수지 경과년수 현황

구분	계		30년미만		30~50년미만		50년이상	
	시설수	%	시설수	%	시설수	%	시설수	%
계	3,372	100	438	13	699	21	2,235	66
1 종	859	25	313	9	231	7	316	9
2 종	2,513	75	126	4	468	14	1,919	57

비상대처계획(Emergency Action Plan, EAP)은 태풍, 지진, 이상홍수 등의 재해로 저수지 댐 붕괴 등의 예기치 못한 비상상황 예상시 하류지역의 주민대피 명령 등을 수립하여 피해를 최소화하기 위한 것으로, 『농어촌정비법 제20조 및 동법 시행령 제27조』에 따라 2017년까지 농업용저수지에 대한 년차별(5개년) EAP 수립이 의무화 되었으며, 추진경위를 살펴보면 다음과 같다.

- 2002년 태풍 “루사”로 강릉 장현·동막지 붕괴를 계기로 2003년부터 2004년까지 EAP 수립 (저수지 100만<sup>3</sup>이상 445개소)
- 2004년~2011년까지 일정규모이상 저수지(117개소)에 국고 지원EAP 수립 (저수량 300만<sup>3</sup> 이상 97개소, 300만<sup>3</sup> 미만 중 하류에 주택밀집 20개소)
- (2005년 8월 정비법 개정) 비상대처계획수립 의무화 (100만<sup>3</sup>이상)
- (2012년 5월 정비법 시행령 개정) 비상대처계획수립 대상 시설 확대 (당초) 총저수량 100만<sup>3</sup>이상 저수지 → (변경) 총저수량 30만<sup>3</sup>이상 저수지
- (2013년 3월) 농업용 저수지 비상대처계획 수립 요령 개정

2013년 6월 현재까지의 추진현황을 살펴보면 공사관

표 2. EAP 추진 계획

구분	합계	2013	2014	2015	2016	2017	비고
저수지수	618	80	160	160	160	58	
(%)	(100)	(13)	(26)	(26)	(26)	(9)	

리 30만<sup>3</sup> 이상의 EAP 수립대상 저수지 총 1,129개소 중 511개소가 수립되었으며, 나머지 618개소 저수지가 추진 계획에 있다(표 2).

ICOLD(International Commission on Large Dams)와 ASCE/US COLD(United States Committee on Large Dams in Cooperation with the American Society of Civil Engineers)의 보고서에 따르면 지난 약 100년간 전세계적으로 200여개의 크고 작은 저수지 혹은 댐이 붕괴되어 1만 명이 넘는 피해자가 발생한 것으로 보고되고 있다. 표 3과 같이 전체 댐 붕괴사고 가운데 약 40%가 기초부실로 인한 경우였고 여수로의 방류능력 부족이 약 23%였으며, 부실시공과 부등침하가 각각 12%와 10%가량을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 전체 댐 붕괴사고 가운데 상당 부분이 댐 본체를 통과하는 침윤(seepage)이나 파이프(piping) 작용이 붕괴의 직접적인 원인이 되었으며, 기초에 관한 문제나 경사에 따른 댐 본체 사면의 활동, 흙댐에서 지진으로 인한 손괴나 액상화 현상, 댐 유역 내

표 3. 원인별 댐 붕괴 발생 비율

붕괴의 원인	발생비율(%)
기초 불안정	40.0
여수로의 방류능력 부족	23.0
부실 시공	12.0
부등 침하	10.0
파이핑에서의 이상고압	5.0
전쟁	3.0
제체 사면의 활동	2.0
축조재료의 불량	2.0
부적절한 저수지 운영	2.0
지진	1.0
계	100.0

Source: Dam Breach Modeling Technology (Singh, 2010)

부로의 산사태에 의한 수면파의 월류 현상 등이 원인이 되어 붕괴된 것으로 조사되었다.

국내의 경우 1961년 효기리 저수지가 높이 15.6m인 흙댐의 붕괴로 인하여 57명의 실종과 128명의 사망자를 내고 9,800여명의 이재민이 발생하였으며, 1972년 부산의 구덕저수지, 1980년 충북보은의 장속저수지, 그 외 1987년과 1998년 대홍수로 국내 많은 소규모 농업용 저수지가 붕괴되었으며 1999년에는 경기도 연천군의 연천댐 붕괴가 발생하여 피해를 입혔고 2002년에는 태풍 '루사'로 인하여 강릉지역의 동막저수지와 장현저수지, 경포저수지가 파괴되어 하류부에 큰 피해를 입힌 예가 있다. 현재 국내에 존재하는 2,000여개의 농업용 저수지 댐은 대부분 흙댐이므로 태풍 루사와 같이 예기치 못한 수준의 강우가 발생할 경우 막대한 인명피해와 재산피해가 예상되기 때문에 철저한 안전관리가 필요하다.



그림 3. 산대저수지 하류부 침수피해 위치 현황

가장 최근의 댐 붕괴 사고는 경상북도 경주시에 위치한 흙댐형식의 산대저수지 붕괴사태이다. 붕괴 원인은 시설 노후화(1964년도 준공)에 따른 복통(제방 밑을 관통하여 용수를 공급하는 관수로) 주변이 누수되면서 토사가 유출되어 2013년 4월 12일 제방붕괴가 발생한 것으로 조사되었다. 산대저수지 붕괴는 홍수에 의한 재해가 아니란 점에서 시사하는 바가 크다고 할 수 있다. 특히, 2013년 정밀안전진단 대상지구에 포함된 보수예정지구로서 그간 개보수 실적은 없는 상태였다. 그림 3과 그림 4는 붕괴 당시의 현장사진 및 하류부 피해 상황을 보여주고 있다. 피해액은 2억1천6백만원으로 추정(4월 17일자 경북매일)되며, 다행히도 하류 농경지 및 주택 등 재산상의 피해가 발생하였으나 인명피해는 없었다. 한편, 표 4는 산대저수지 전문가(한국농공학회) 현장조사에 따른 붕괴원인 분석 결과 일부를 정리한 것이다.



a. 누수 초기 단계 (하류부)



b. 누수 초기단계(상류부)



c. 제체 결괴 후 배수상태



d. 제체 결괴 상태(상류부)



e. 하류부 침수 피해(농경지)



f. 하류부 침수 피해(농경지)



g. 응급복구 개시



h. 응급복구 중

그림 4. 산대저수지 피해상황 사진

표 4. 산대저수지 농공학회 전문가 현장조사 결과 요약

■ 붕괴원인

가. 구조적원인

- 50년 내구연한이 이미 경과되어 체체 상태가 매우 불안정함
- Core가 없는 균일형 흙댐임에도 불구하고 체체단면이 부족한 저수지 구조임

나. 지반학적 원인

- 북동과 흙 접촉부에서 오랫동안 누수가 진행되어 점차적으로 확대되는 Piping 현상이 발생됨
- 점토 Core를 시공하지 않아 Piping 현상을 방지하지 못함

다. 수문학적 원인

- 일반적으로 4월말에 저수율 100%를 유지토록 관리하여 왔음
- 2013년 3월에 두 번의 큰 봄비(누적 강우 80mm)로 예년보다 한달 일찍 저수율 100%에 도달함
- 2013년 3월 및 4월은 특히 이상기온으로 동결융해가 반복되는 현상으로 체체의 취약을 가중시킴

라. 사회적 원인

- 유지관리 예산부족으로 장기적 누적된 문제가 발생된 측면이 있음

■ 복구계획

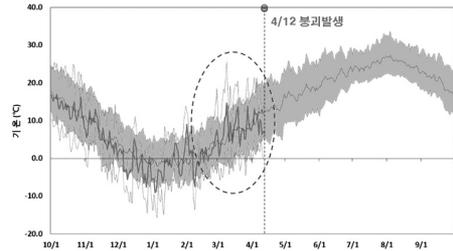
- 붕괴 후 수위 급강하에 따른 사면 안정을 저하와 부등침하로 전체 제방이 위험하므로 저수지를 새로이 축조하는 것이 합리적인
- 설계방법은 중심 Core형 댐으로 함
- 기존의 토사 준설을 통하여 저수용량을 충분히 확보하도록 함
- 확보된 저수량은 다목적 용수(농업용수, 환경용수, 레크리에이션 용수)로 활용하도록 함
- 저수지 수변 및 하류부에 친수공간을 조성하도록 함

■ 정책제안

- 농어촌공사 관리 저수지의 정밀조사 C등급 이하는 학계 전문가와 함께 현장 조사와 더불어 실질적인 대책 및 보수보강 예산 배정이 시급함

■ 기온변화

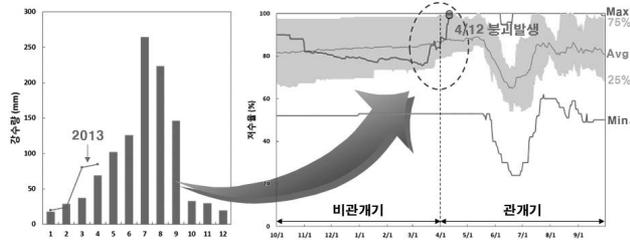
- 2013년 2월부터 일 평균기온의 차이가 평년보다 크게 나타남
- 특히, 3월부터 이상기온으로 인해 동결융해 현상이 반복 된 것으로 보임 (큰 일교차)



<기온변화 2000-2013>

■ 저수율 변화

- 산대저수지 유역 연평균 강수량: 1098.9 mm (2000-2012)
- 올해 3월 강수량이 평년(37.3 mm)보다 2 배 이상 많음 (80.2 mm-40mm 강우 2회)
- 3월13일(75.9%)부터 저수율이 급격히 증가, 붕괴발생 당시 99.4% (206 천m<sup>3</sup>)
- 수위상승으로 인한 수압 증가



<저수율 변화 2000-2013>

3. 기존 저수지 안정성 평가방법 및 최근 3년간 안전진단 결과

저수지의 안정성을 평가하는 기존의 방법으로는 크게

2가지 방법이 있다. 하나는 「시설물의 안전관리에 관한 특별법」에 의거하여 「시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침」에 의한 것이고, 다른 하나는 「농어촌정비법」에 의거하여 「농업기반시설 정밀안전진단 실무지침」

에 의한 것이다.

(가) 시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 이 지침에 의한 대상 시설물은 '시특법'에 의한 1,2종 시설물<sup>1)</sup>에 해당하는 저수지이다. 안전 평가수준에 따라 안전점검과 정밀안전진단으로 구분하여 실시하며, 그림 5는 안전관리 업무 흐름도이다. 안전점검은 다시 정기 점검, 정밀점검, 긴급점검으로 구분된다.

「시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침」에서 안전 평가는 상태평가와 안정성 평가로 구분하여 평가한다. 상태평가는 시설물의 각 부재로부터 발견된 상태 변화(결함, 손상, 열화)를 근거로 하여 상태평가 기준에 따라 실시한다.

안정성 평가는 정밀안전진단시 실시하는데 시설물이 제 기능 및 역할을 유지할 수 있는 구조적 및 운영상의 안전성에 대한 확보여부를 평가하는 데 그 목적이 있으며 평가 항목은 ① 제체의 사면안전 해석, ② 제체의 침투수에 대한 안전성 해석, ③ 제체의 응력-변형 해석, ④ 구조물의 내하력 해석, ⑤ 구조물의 안정해석, ⑥ 수리, 수문학적 안전성 해석, ⑦ 시설물의 내진성능 평가, ⑧ 계측자료 분석 등, ⑨ 기타 안정성 평가를 위하여 필요한 사항이 있다. 제체의 안전조건으로 제체가 활동하지 않을 것, 비탈면이 안정되어 있을 것, 기초지반이 압축에 대해 안전할 것 등의 3가지를 제시하고 있다. 이러한 조건하에서 계측데이터 분석, 침투수의 안전성 분석, 사면활동의 안전성 분석, 응력-변형의 안전성 분석, 수문학적 안전성 평가와 같이 5가지 측면에서 안정성 평가를 실시한다.

(나) 농업기반시설 정밀안전진단 실무지침

농업기반시설 정밀안전진단 실무지침(2005.12)에서 제시하고 있는 한국농어촌공사에서의 필댐 상태평가 내용은 표 5와 같다.

표 5. 댐 상태평가 항목(측수로형)

구 분		항 목
제체	댐마루	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 표면균열상태</li> <li>• 침하(세굴) 상태</li> <li>• 보호공 및 유지관리 상태</li> </ul>
	상류사면	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 양안부 접속 상태</li> <li>• 사석 보호공 상태</li> <li>• 식생 및 유지관리 상태</li> </ul>
	하류사면	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 양안부 접속 상태</li> <li>• 경사면 유실(세굴) 상태</li> <li>• 누수(습윤·포화) 상태</li> <li>• 식생 및 유지관리 상태</li> </ul>
여수로	언체	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 접근수로 상태</li> <li>• 언체 손상 상태</li> </ul>
	측수로	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 바닥 손상 상태</li> <li>• 측벽 손상 상태</li> <li>• 상단부 접속사면 상태</li> </ul>
방수로	바닥	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 방수로 바닥 손상 상태</li> <li>• 감세공 바닥 손상 상태</li> <li>• 퇴적(식생) 상태</li> </ul>
	측벽	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 방수로 측벽 손상 상태</li> <li>• 감세공 측벽 손상 상태</li> <li>• 상단부 접속사면 상태</li> </ul>
취수시설	복통	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사통(취수탑) 접합부 상태</li> <li>• 복통 손상 상태</li> <li>• 바닥 퇴적(장애물) 상태</li> </ul>
	사통	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 문비 누수 상태</li> <li>• 콘크리트 손상 상태</li> <li>• 철재류 부식(손상) 상태</li> <li>• 조작실 상태</li> </ul>
주변 여건		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 경고판 설치 상태</li> <li>• 저수지내 토사 퇴적</li> <li>• 수질 오염 상태</li> <li>• 하류하천 단면</li> <li>• 재해시 하류에 미치는 영향</li> </ul>

1) 1종 시설물 : 다목적댐, 발전용댐, 홍수전용댐 및 저수용량 1천만m<sup>3</sup> 이상의 용수전용댐

2종 시설물 : 1종 시설물에 해당하지 아니하는 댐으로서 지방상수도 전용댐 및 총저수용량 1백만m<sup>3</sup> 이상의 용수전용 댐

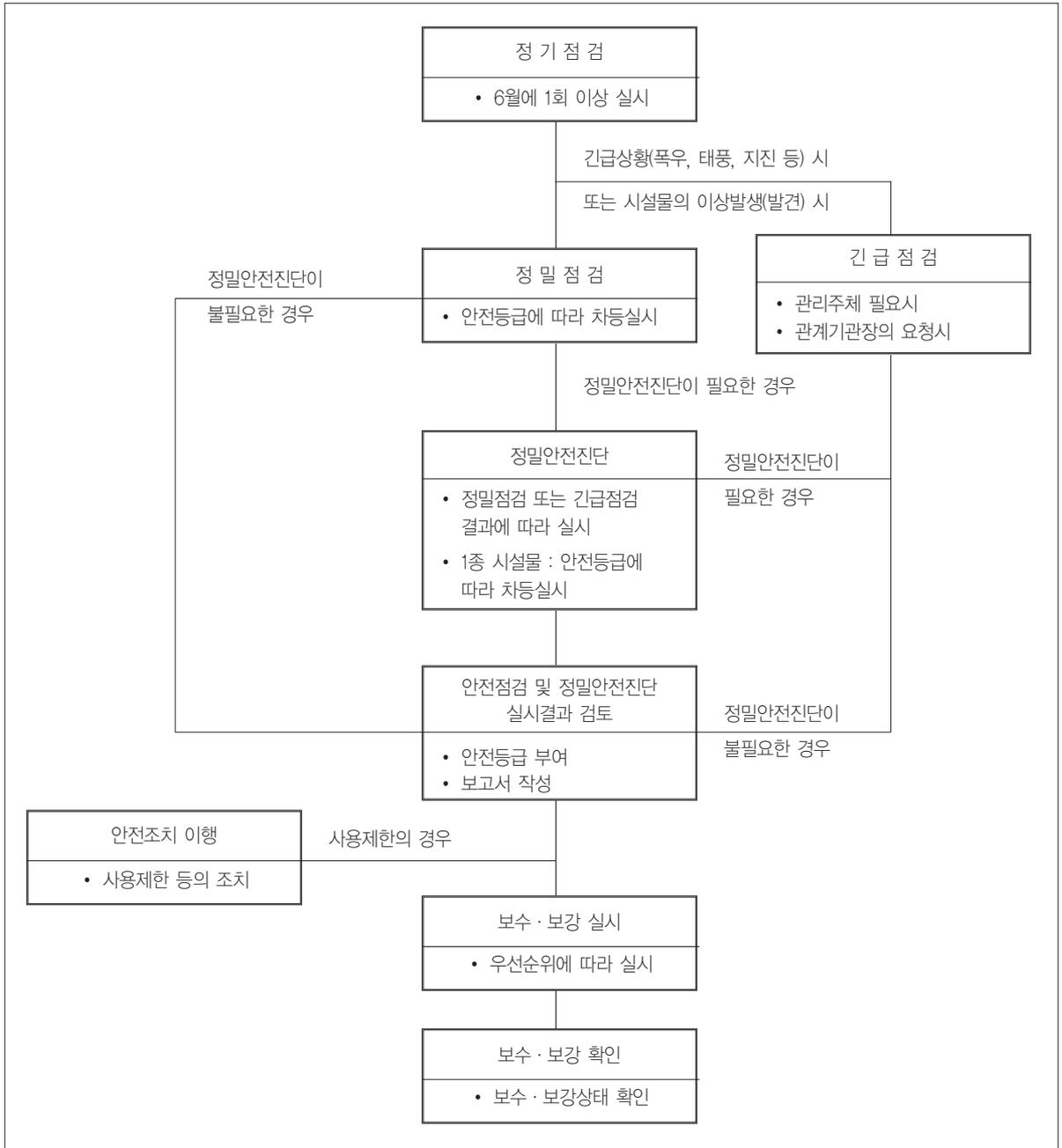


그림 5. 안전평가 업무 흐름도



그림 6. 수리시설안전진단 사업추진 절차

표 6. 최근 5년간 안전진단 사업비 배정

(단위: 억)

사업명	'09년	'10년	'11년	'12년	'13년
- 수리시설개보수	4,670	4,000	2,600	3,700	4,300
- 안전진단 사업비	160	160	160	160	160

그림 6은 현재 수리시설안전진단을 위한 사업절차를 나타낸 것으로 안전진단 지원대상은 한국농어촌공사 및 시군 관리지역의 보수보강이 필요한 농업생산기반시설이다. 지원방식은 전액 국고 지원으로 이루어지고 있으며, 한국농어촌공사 기술본부에서 시행하도록 되어 있다. 표 6은 최근 5년간 수리시설개보수 사업비 및 안전진단 사업비 배정 내역을 정리한 것이다.

다음 저수지 안전진단 분석자료는 최근 3년간 한국농어촌공사에서 수행한 자료로서 총 926개소이며, 관리주체별로 보면 공사관리 저수지 579개소, 지자체관리 저수지 347개소이다.

정밀안전진단에서 제체, 여방수로 및 취수시설의 상태평가등급을 종합하여 등급을 평가하였을 때 B, C, D 등급별 경과년수 분포와 전체 경과년수 분포를 함께 나타내면 그림 7과 같다.

종합 진단결과를 보면, 정밀안전진단을 수행할 필요가 있는 저수지에 대한 결과이므로 그림에서 보는바와

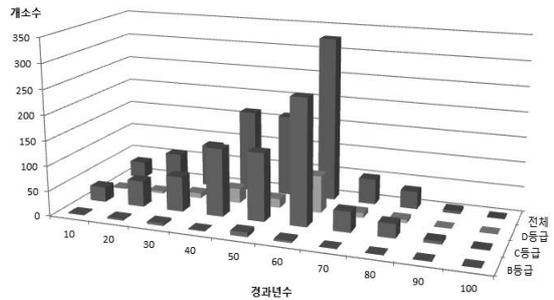


그림 7. 안전진단 종합등급별 경과년수 분포

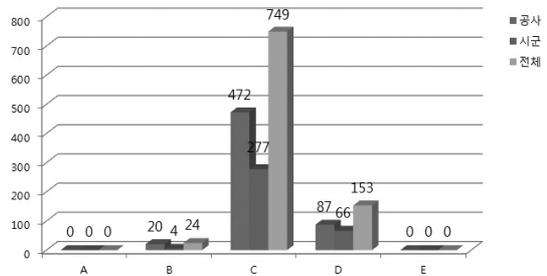


그림 8. 종합평가 현황

같이 B 평가는 거의 없고, 대부분 C, D 등급으로 평가되었다(그림 8). 특히, 한국농어촌공사관리, 지자체관리 저수지 모두 C 등급이 가장 많이 분포하는 것으로 조사되었다.



그림 9. 저수지의 안정성 변화원인

저수지 안정성의 변화는 수리수문학적, 지반공학적, 구조재료적, 측면에서 원인분석이 가능하다. 그림 9는 저수지 안전진단 자료 분석에 따라 3가지 측면에서의 안정성 변화원인을 나타낸 것이다.

### 참고문헌

김성준, 이주현, 강부식, 정관수, 박종윤, 정인균 (2009) 지자체 관리 소규모 저수지의 붕괴에 따른 하류부 해예측모델 개발에 관한 연구. 한국재난관리표준학회지 제2권, 제4호, pp. 1-6.

소방방재청 (2011) 저수지의 재해예방을 위한 안전관리기법 및 DB구축 개발 등에 관한 연구.

Singh, V.P. (2010) Dam Breach Modeling Technology: Volume 17 of Water Science and Technology Library. Springer.

기획: 박창연 [cepark@shingu.ac.kr](mailto:cepark@shingu.ac.kr)