

02

저수지 월류 위험도 평가를 위한
주요 인자

심규현
한국농어촌공사 농어촌연구원
/ 선임연구원
shimkh@ekr.or.kr

1. 머리말

예상치 못한 기후변화로 설계빈도를 초과하는 강우 사상 등이 발생하면서 저수지 피해사례가 증가하고 있다. 최근 발생하고 있는 저수지의 붕괴 사례를 살펴보면 설치된 지 50년 이상이 경과한 노후 저수지로 안전등급이 D등급 뿐만 아니라, B, C등급 시설에서도 발생하고 있으며, 집중호우에 의한 붕괴와 더불어 취수시설(복통부) 노후에 따른 사고가 빈번히 발생하고 있다(한국농어촌공사, 2013). 농어촌공사 관리 저수지 약 3,400개 중 74.5%는 건설한지 50년 이상 된 노후 저수지이며, 저수지 시공이후 사회적 변화에 따라 당초 설계조건과 현재의 유역현황, 제원 등 실제와 차이가 많고, 이상기후에 의한 집중호우와 태풍 등에 의한 자연재해에 대하여 설치 당시 설계빈도로는 방어능력이 취약하다(농어촌연구원, 2003). 또한 농업용 저수지는 대부분 자연월류식 물넘이 구조로 되어 있어 홍수배제능력을 뛰어넘는 홍수량이 유입된다면 월류 피해 가능성을 높아질 수 밖에 없다. 이에 저수지 재해위험 상황시 시설관리자가 신속히 상황을 파악하고 주민대피, 긴급조치 등을 취해야 하지만 적은 인원으로 많은 저수지를 관리하고 있어 홍수대비 효율적인 관리가 이루어지지 못하고 있다. 집중 호우 등 재해위험 상황이 발생하였을 때 모든 저수지에 대한 모니터링이 필요하나 선택과 집중을 통한 효율적 관리가 필요하다.

현재 농업용 저수지의 안전등급은 대체로 “C(보통)”의 상태로 주요 부재에 내구성, 기능성 저하 방지를 위한 보수가 필요하거나 보조 부재에 간단한 보강이 필요한 상태로 평가되었고, 대부분 준공후 30년 이상 경과되어 노후화로 인한 붕괴위험성이 높은 실정이다. 특히 수문학적 안전성 검토 경과에서는 최근의 주요 호우 사상을 고려하여 산정한 200년빈도의 1.2배

홍수량이 당초 설계시의 홍수량 보다 증가한 것으로 검토되어 제체 및 여수로 등의 안전성 확보가 필요한 것으로 검토되어 극한 강우에 의한 가능최대홍수량(PMF) 유입시 제체의 월류 가능성이 증가하고 있다. 따라서 본 고에서는 수문학적 안전성 평가시 검토 항목과 주요 인자들을 파악하고, 물수지 기반 월류 위험도 평가시 필요한 주요 인자에 대해서 소개하고자 한다.

2. 수문학적 안전성 평가

2.1 저수지 안전성 검토(정밀안전진단)

수문학적으로 연최대유량 대 연최소유량의 비인 하상계수를 외국 하천의 경우와 비교해 보면 우리나라 하천의 경우가 수십 배에 달해 매년 홍수 피해에 노출되어 있음을 알 수 있다(박대규 등, 2008). 이러한 조건을 극복하기 위하여 해방 이후 댐 건설을 적극적으로 추진하여 홍수와 가뭄에 대처하여 왔다.

최근 산업화와 도시화에 따라 화석연료의 사용이 급증하여 CO2 등의 기체가 증가하면서 지구의 온실효과가 발생하고 엘니노와 라니냐의 영향으

로 이상기후가 빈발하고 있다.

이러한 상황에서 최근의 수문기상학적 변화를 감안하여 현재의 시점에서 관측자료의 누적에 따른 수문자료의 확충과 발전된 해석기법을 기반으로 기존 댐(저수지)의 홍수방어능력을 평가하는 것은 저수지 정밀안전진단에 있어서 매우 중요하다.

수리·수문학적 안전성을 검토하기 위해 최근까지의 강우자료를 사용하여 확률강우량은 산정하고 있으며, 저수지 유역인자, 시설물 위치자료 및 강우-유출 모형을 이용하여 빈도별 홍수량은 산정하고 물넘이의 방류능력과 방수로의 측벽여유고 및 제방단면에 대한 안전성을 검토하고 있다.

2.2 저수지 위험성 평가(비상대처계획)

저수지 비상대처계획은 최근 이상기후에 따른 빈번한 국지성 집중호우와 대규모 홍수로 인해 저수지 붕괴 등 예기치 못한 대형재해에 신속하고 효과적으로 대처할 수 있도록 시설관리자 및 주민의 행동요령을 사전에 준비하는 능동적인 안전대책이다. 세부 항목중 저수지 위험성 평가는 피해 잠재성 평가를 통해 이상홍수로 저수지 제방붕괴 시 하류지역의 침수구역내에서 예상되는 인명과

표 1. 안전성 검토내용

구분		검토내용
수문학적 안전성 검토	홍수량 산정	· 최근까지의 강우 자료를 이용한 지역빈도 확률강우량 해석 및 강우 강도식 유도 · 현장조사, 최신수치지도 (국토지리정보원), 토지피복도(환경부 위성영상)를 GIS 프로그램을 이용 유역특성 조사 및 정밀토양도(국립농업과학원)와 중첩시켜 저수지유역의 유출곡선지수(CN) 산정 · Clark 유역추적법, NRCS 합성단위도법을 이용한 홍수량 산정
	저수지 홍수추적	· 저수지 유입 홍수 수문곡선으로부터 물넘이를 통해 방류되는 수문곡선을 계산하기 위해 저수지 홍수추적 실시 및 침투홍수위 산정
여수로 안전성 검토	여수로 단면검토	· 「KDS 54 00 00 : 2022, 댐 설계기준(환경부)」, 「KDS 17 10 00 : 2018, 내진설계 일반(국토교통부)」의 여유고 기준에 의거 여수로 방류능력 및 감세공의 여유고 확보 여부 검토
제방 안전성 검토	댐마루 높이 및 사석고	· 「KDS 67 10 20 : 2019, 농업용 필댐 설계(농림축산식품부)」, 「KDS 54 00 00 : 2022, 댐설계기준(환경부)」, 「KDS 17 10 00 : 2022, 내진설계 일반(환경부)」의 검토기준에 의거 댐마루 여유고 확보 여부 검토
	침투류 및 사면안정 해석	· 「농업생산기반시설 설계기준-농업용댐(KDS 67 10 20 : 농업용 필댐 설계(농림축산식품부, 2019))」의 기준에 의거 제방 사면안전성 여부 검토

재산피해규모에 따라 그 규모를 등급으로 구분하여 중요도에 따라 차등관리를 하고 있다.

대상저수지 선정기준은 저수지가 도십지, 주택지, 자연부락 등 상류에 위치하고, 하류하천이 도십지, 산업단지 또는 그 인근을 통과하여 저수지 제방 붕괴시 인명과 재산피해가 우려되는 저수지를 대상으로 하며, 저수지가 도십지, 주택지, 자연부락 등 상류에 위치하더라도 유사시 예상침수 구역 밖에 위치하여 제방붕괴시 하류 지역의 인명과 재산피해 우려가 없는 시설은 제외하고 있다.

3. 월류 주요 위험요인

우리나라는 최근 이상기후로 인한 집중호우, 게릴라성 호우, 태풍 등 고강도 호우가 빈발하고 있어 저수지 피해에 노출되어 있다. 특히 월류, 누수, 사면활동 등이 사고유형으로 많이 발생하고 있으며, 그 중 80% 이상이 월류로 인한 피해가 차지하고 있다. 그만큼 월류 피해에 대한 대응이 필요하고 월류에 노출되어 있는 저수지의 집중관리가 필요하다.

농어촌공사에서는 우기 대비 월류와 연관되어 있는 주요 인자는 정밀안전진단 및 정기안전점검 결과 중 저수지 피해유형과 안전 및 재해 항목에 대해 전문가 의견 및 공사 부서간 협의를 통해 검증하여 수리, 수문학적 요인과 하류부 피해, 유역 특성 등을 반영한 주요 위험요인을 선정하고, 월류대비 중점관리가 필요한 저수지를 평가, 관리하고 있다.

Lee(2014)는 농업용저수지의 수문학적 안전성을 평가하기 위하여 영향을 미치는 다양한 인자에 대하여 전문가들의 경험과 직관을 동원하여 합의를 통해 6개의 상위항목(제체의 여유고, 여수로의 방류능력, 유지관리 상태, 하류하천 제방의 여

표 2. 월류 위험요인

월류 주요 위험요인	
제방	여유고 부족, 침투수 유출, 안전율 부족, 침하균열, 도달시간
여방수로	물넘이 연장부족, 옹벽고 부족
기타	하류부 피해 인원, 평야부 및 양수저류 저수지 등

유고, 잠재 홍수피해, 홍수량 산정 인자)과 11개의 하위항목을 도출하고 항목별 중요도에 따라 지표를 개발하였다. 동일한 배점만으로 평가 지표를 제안할 경우 수문학적 안전성에 대한 평가는 가능하지만 평가 지표의 목적과는 다르게 나타날 가능성이 크기 때문에 가중치를 부여하여 구체화 하는 방법에 대해서도 제안하였다. 중요도를 부여하는 일반적인 방식은 평가 항목간의 정량적인 분석의 기준이 없어 평가 항목간의 상대적인 비교에 따라 가중치 값을 결정해야 하기 때문에 평가 항목별 상대비교를 통한 상대적인 중요도를 효과적으로 획득할 수 있는 계층적의사 결정법을 활용하여 평가항목별 중요도를 산정하는 연구를 수행하였다.

4. 평가항목결정

우리나라의 수문학적 특성을 살펴보면 유로가 짧고 경사가 급하며, 하계에 연강우량의 2/3 이상이 집중하기 때문에 치수적으로 매우 불리한 조건에 처해있다. 그리하여 설계빈도를 초과하는 강우 발생시 여수토방수로 등 시설물의 홍수배제능력을 뛰어 넘는 홍수량이 유입이 되면서 홍수 피해가 발생한다. 이상기후로 인한 예측이 어려운 게릴라성 호우, 태풍 등에 의한 자연재해를 인위적으로 완전히 근절 시킬 수가 없기 때문에 저수지 제원, 유역현황 등 지형학적 특성을 기반으로 물순환이 부족한 저수지를 찾아낼 수 있다면 저수지 관리자의 집중관리와 하류 지역주민들의 인명 피

표 3. 수리학적 안전성 검토 항목(이재주 등, 2014)

Evaluation factors	
Superordinate factors	Subordinate factors
Embankment-freeboard	Considering probable precipitation(frequency of 200years)
	Considering probable maximum flood
Discharge capacity of outlet channel	Considering probable precipitation(frequency of 200years)
	Considering probable maximum flood
Levee-freeboard	Considering spillway discharge in case of probable precipitation(frequency of 200years)
Maintenance status	Maintenance status class of Safety evaluation
Potential flood losses	Upstream flooded area in case of probable maximum flood
Precipitation estimation factors	Probable precipitation(frequency of 200years)
	Catchment area
	Runoff curve number(CNⅢ)
	Time of concentration(Tc)

해 최소화 등 월류 대응에 충분히 도움이 될 것으로 판단된다. 본 고에서는 물수지 기반으로 접근하여 월류와 연관된 주요 인자 중 최소항목으로 선별할 수 있는 방안을 검토하였다.

$$I - O = \frac{dS}{dt}$$

I : 유입량, O : 유출량, $\frac{dS}{dt}$: 저수변화량,
 S : 저수량

4.1 유입량

유입량은 저수지 상류 유역과 가장 밀접한 관계가 있다. 유역의 유출능력은 선행강수량의 크기에 따라 영향을 많이 받는다. 요즘 이상기후로 인한 극지성 호우 등 많은 강우가 발생하고 있어 유역의 토양이 거의 포화되어 유출률이 높은 상태로 계산이 반영 되고 있다. 모두 포화되어 있는 상태에서 유입량 파악에 가장 중요한 인자는 홍수도달시간이다. 홍수도달시간(Time of concentra-

tion)이랑 강우가 해당 유역에 발생하였을 때 유역의 최상류점에서 최하류부까지 유량이 도달하는데 소요되는 시간으로 홍수도달시간이 될 때 하류부는 최대유량이 발생되며, 이때가 치수를 위한 시설물의 설계기준이 되므로 월류에 취약한 저수지 선정에 중요한 인자가 될 수 있다.

도달시간은 홍수량 산정에 있어 매우 중요한 인자로서 최근 개정된 홍수량 산정방법 중 도달시간에 관련된 기준을 살펴보면 ‘홍수량 산정 표준지침(환경부, 2019.7)’에서는 유역의 최원점에서 하도시점까지 표면류 흐름의 유입시간을 무시할 수는 없지만, 도달시간에서 차지하는 비중이 작은 점, 하도시점이 지도축척에 따라 달라지는 문제점 등을 감안하여 하천 유역에서 도달시간은 유역의 최원점에서 하도 종점까지의 유하시간을 동일한 방법으로 산정하는 방식을 채택하도록 제시되어 있다. 산정 공식은 Kirpich 공식, Rziha 공식, Kraven 공식(I), Kraven 공식(II) 등의 공식들이 있으며, 산정요령, 설계기준에서 Clark 단위도법의 도달시간 산정시 연속형 Kraven 공식으로 산정하는 것을 원칙으로 하고 있다. 연속형

표 4. 연속형 Kraven 공식 개념

연속형 Kraven 공식	$T_c = 16.667 \frac{L}{V}$	$V_{\text{값}}(S = H/L)$ - 급경사 $S > 3/400$
	T_c : 홍수유하시간(min) L : 유로연장 S : 유역출구와 유로시점의 표고차(H)를 유로연장으로 나눈 경사(m/m)	$V = 4.592 - \frac{0.01194}{S} V_{\text{max}} = 4.5m/s$ 완경사 $S \leq 3/400$ $V = 35,151.215 S^2 - 79.393939 S + 1.6181818$ $V_{\text{min}} = 1.6m/s$

Kraven 공식에서 제한조건으로 경사에 따라 적용 식을 달리 하고 있으며, 이 식을 활용하여 유입량을 대신할 수 있는 인자를 결정할 수 있다. 유역이 급경사이면 유출계수가 크고 완경사이면 유출계수가 작게 반영된다. 하지만 한국 국토의 약 70%가 산지이고 지형이 비교적 험한 곳에 농업용 저수지가 위치해 있어 대부분의 저수지 상류 유역은 급경사에 해당된다. 유역면적, 도달시간, 경사는 유입량을 대신할 수 있는 주요 인자가 될 수 있다.

4.2 저수용량

농업용저수지는 대부분 수자원의 안정적 확보와 공급을 위해 이수목적으로 건설되어 있어 치수측면에서 저수지 관리가 미흡하다. 농업용수를 공급하는 단일 목적으로 축조되어 수자원의 시간적, 공간적인 편중을 극복하는 방법으로 홍수기의 풍부한 수량을 저류할 수 있어야 한다. 이수관리를 위한 용량은 만수위까지의 용량이며, 홍수관리를 위한 용량은 관리수위 이상으로 홍수위까지의 용량으로 저수지 월류의 위험성을 고려한 관리는 제정고까지의 용량으로 정리될 수 있다. 저수지 저수용량 결정방법에서 기상학적 특성 및 지형학적 특성 등 여러요인에 의해 결정되지만 공급량 중에서 유입량은 저수용량 결정에 중요한

요인으로, 지형학적 특성 중 월류에 위험한 저수지 선정에 위한 인자로 홍수관리 면적을 이야기할 수 있다.

4.3 유출량

저수지 안전성 확보를 위하여 여수토 시설이 충분한 홍수배제능력과 유수를 안전하게 방류시킬 수 있는 시설을 갖추고 있어야 한다. 홍수배제능력과 가장 연관이 있는 인자는 수문과 여수토방수로이지만 농업용 저수지의 대부분은 자연유하식 물넘이를 통하여 홍수량을 배제할 수 밖에 없어 집중호우나 폭우를 감당하기에는 구조적으로 취약한 실정이다. 저수지 개보수사업이나 치수능력 확대사업 수행시 비상수문, 보조여수로 설치 또는 기존 여수로 확장을 통해 홍수배제능력을 키우고 있다.

여수로 홍수배제능력을 검토하기 위해서는 계획홍수량 유입시 저수지 홍수추적에 의한 완전 월류 조건의 최대 홍수량을 산정한다. 산정된 홍수량을 안전하고 효율적으로 방류할 수 있도록 여수로를 설치한다. 농업용 저수지의 일반적인 개수로형의 월류식 여수로는 많은 양의 수량을 월류시킬수 있는 가장 경제적인 여수로로서 흔히 사용된다. 월류형 여수로에서는 여수로 물넘이(Spillway crest)에서 한계류가 발생하므로 여수로 물

넘이를 기준으로 여수로 상류와 여수로 물넘이 사이에 에너지 방정식을 적용하여 광정위어와 같은 방법으로 아래 식을 사용하고 있다.

$$Q = CL_e H_e^{3/2}$$

식에서, Q : 유량(m^3/s), C : 유량계수,

L_e : 웨어마루의 유효길이(m),

H_e : 접근속도수두를 포함한 총수두

여기서 유량계수 C 는 Roberson et al.(1998)이 제시한 그래프인 그림 1에서 여수로 높이에 대한 전수두의 비인 P/H_d 로부터 C_D 를 구한후 아래식을 활용하여 산정한다. 월류형 여수로의 C_D 의 산정은 계산의 효율성을 위하여 3개구간으로 구분하여 비선형 회귀식을 구성하여 활용한다(오지환 등, 2018).

$$C = \sqrt{2g} C_D$$

월류웨어 유량공식을 통해 유출량이 결정되기 때문에 이론적으로 물넘이 길이와 접근수심, 월류수심을 유출량을 대신할 수 있는 인자가 될 수 있다.

5. 마치면서

저수지 월류 대응을 위한 위험저수지를 선정하기 위해선 기상학적 특성과 지형학적 특성 등 여러 요인에 영향을 받는다. 기상학적 요인은 변동성이 크고 예측에 어려움이 있어 변동성이 적은 지형학적 특성과 관련된 인자를 가지고 평가를 시행하고 있다. 과거에는 피해유형을 통합한 안전등급 기반의 위험성 평가를 수행하였으나 최근에는 정밀안전진단 보고서와 정기안전점검 등 결과를

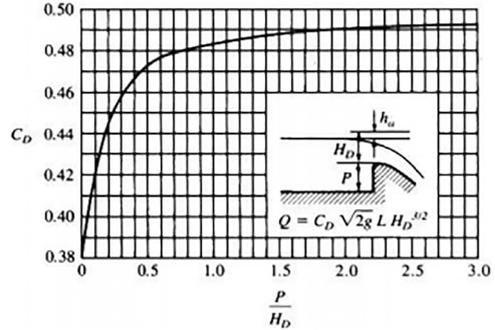


그림 1. 유출계수 추정(C_D)
(Roberson et al., 1998, 오지환 등, 2018)

표 5. 유출계수에 대한 회귀식 추정
(Roberson et al., 1998, 오지환 등, 2018)

No.	Condition	Regression equation
1	$0.1 \leq P/H_d \leq 0.5$	$C_D = 0.50 + 0.03 \ln(P/H_d)$
2	$0.6 \leq P/H_d \leq 2.5$	$C_D = 0.48 + 0.011 \ln(P/H_d)$
3	$2.6 \leq P/H_d$	$C_D = 0.49 + 0.003 \ln(P/H_d)$

참고하여 피해유형별(월류, 누수, 사면활동 등) 주요 인자를 설정하여 위험 저수지를 평가하고 집중, 관리하고 있다. 저수지 피해의 80% 이상을 차지하고 있는 월류 피해는 예측하기 어려운 기상학적 문제점을 크게 차지하고 있기 때문에 본 고에서 설명한 물수지 이론을 기반으로 지형학적 안전성을 파악하고 일 최대 강수량 또는 강우강도식 등 기상학적 요인을 반영할 수 있다면 보다 정확한 결과로 월류에 어느정도 대응할 수 있을 것으로 판단된다.

한국농어촌공사에서는 농업용 저수지의 홍수 피해 예방과 하류 지역 주민 안전을 위해 인공지능(AI)을 기반으로 한 저수지 홍수 예·경보 시스템이 구축을 추진중에 있으며, 시스템 구현을 통해 홍수 예보 시 사전 홍수량 예측과 함께 치수기능이 포함된 저수지 운영이 가능할 것으로 예상되며, 재난상황 발생시 빠른 예측을 통해 신속한 대응이 가능해질 것으로 보인다.

참고문헌

1. 농어촌연구원. 2003. 저수지 수리현황 분석과 개선방안연구(1).
2. 김진국, 김진영, 권현한. 2017. 수리수문학적 댐 위험도 평가기법 소개. 물과미래. 50(3): 28-35.
3. 이재주, 이경훈, 박종석, 한창화, 진완규. 2014. 농업용저수지 수문학적 안전성 평가 항목 및 지표 개발. 한국습지학회지. 16(4): 403-411.
4. 오지환, 장석환, 오경두. 2018. 다기능보의 방류량 산정 개선을 위한 운영 분석 및 수정 경사면적법의 적용. 한국수자원학회지. 51(8): 687-701.
5. Cassidy, J. J., Chaudhry, M. H., and Roberson, J. A., (1998). Hydraulic Engineering. John Wiley and Sons, New York, p. 158.
6. 한국농어촌공사. 2023. 농업생산기반시설 정밀 안전점검 보고서(농어촌정비법에 의한 정밀안전진단).
7. 한국농어촌공사. 2023. 저수지 비상대처계획(EAP).
8. 한국농어촌공사. 2023. '저수지 치수능력확대사업' 사전타당성 조사 연구.
9. 박대규, 권지혜, 권혁기, 배태호, 류근준. 2008. 필댐의 홍수방어능력평가에 따른 보수·보강 방안 검토. 한국수자원학회학술발표회. 2197-2201.