

II. 학술 · 기술기사 (6편)

수질-수량 연계 강화를 위한 댐-보 운영 고도화 방안 (김현식 처장, K-water)

불확실성 증가에 따른 댐 · 저수지 위험도 평가 (임정열 수석연구원, K-water)

콜롬비아 이투안고 댐 건설 중 수재해 위험 사례 (김남룡 책임연구원, K-water)

『내진설계기준 공통적용사항』 제정에 따른 『댐 내진설계기준』 개정 (유진권 선임연구원, 김선욱 처장, 오병동 처장, 양승인 처장, K-water)

내진설계기준 강화에 따른 댐 내진안정성 평가 (조성배 선임연구원, 김태민 선임연구원, 김남룡 책임연구원, K-water)

파키스탄 Patrind 수력발전사업 소개 (임경희 처장, K-water)

콜롬비아 이투안고 댐 건설 중 수재해 위험 사례



김남룡 책임연구원
(K-water)

개요

2018년 5월 12일 콜롬비아 북서부 안티오quia(Antioquia) 지역 카우카 강(Rio Cauca)에 건설 중 이던 이투안고 댐 (Ituango Dam) 하류 측에 갑자기 유량이 증가, 하류 지역에 홍수 위험으로 인하여 약 25,000명의 지역 주민이 긴급 대피하는 사건이 발생하였다. 2013년 본격적인 건설이 시작된 이투안고 댐은 2018년 말 준공 및 상업발전 개시를 앞두고 있었으나, 2018년 4월과 5월 사이에 발생한 집중호우와 이에 따른 영향으로 인하여 현재로서는 준공 시점이 모호한 상황이다.

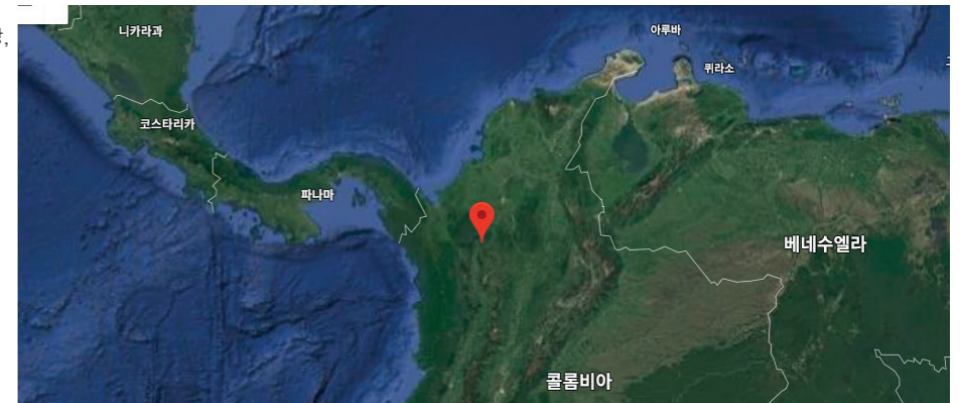
콜롬비아의 이투안고 수력댐(Hidroituango Project) 건설은 1960년대부터 구상되기 시작하였으며, 1983년 최초의 타당성검토가 완료된 것으로 알려졌다. 그러나 남미지역의 경제위기로 인하여 건설사업이 1990년대로 연기되었다. 본격적인 사업은 2000년대 후반에 들어 시작, 2008년 기본 설계가 완료되고 2011년 가시설 및 기초기반시설 공사에 착공하여 본격화되었다. 2018년 말 예정 대로 이투안고 댐이 완공되어 상업발전을 개시할 경우 콜롬비아 전체 전력수요의 약 20%를 담당하는 콜롬비아 최대의 전력시설로서 국가적으로 매우 중요한 개발사업이라 할 수 있다. 이투안고 댐의 기술적 상세 사항은 <표 1>과 같다.

그림 1. 이투안고 댐 (콜롬비아 안티오quia 지역)



이투안고 댐 전경

이투안고 댐 위치 (콜롬비아 북서부 카우카 강, Google Maps)



이투안고 댐 대표단면

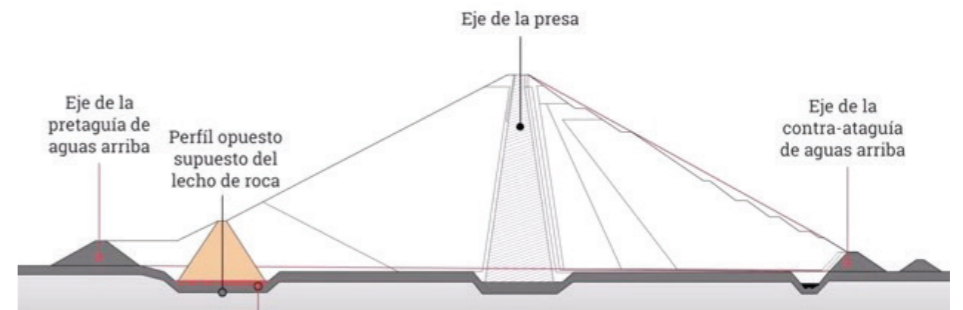


표 1. 이투안고 댐 개요

시설명	이투안고 댐 (Ituango Dam 또는 Pescadero-Ituango Dam)
시행사	EPM Ituango
시공사	CCC Ituango Consortium (브라질 & 콜롬비아 건설사)
제체 형식	중심코어형 사력댐 (ECRD)
총 투자비용	약 28억 달러 (약 3조원)
제체 규모	높이 225m, 길이
총 저수용량	2,720 백만톤
유효 저수량	980 백만톤
여수로	슈트식 (4개 radial gate), 최대방류량 22,600 CMS
설계 발전용량	2,456 MW (307 MW 급 프랜시스 수차 8기)

**피해발생 과정
및 문제점**

이투안고 댐 하류 지역의 인명 및 재산피해가 발생하고 대규모 긴급대피명령이 발효된 후 각국의 주요 언론 및 댐 기술 전문매체는 피해 발생에 이르기까지 댐 주변에서 발생한 문제점 및 대응 과정을 상세히 보고하였다. 2018년 4월과 5월은 콜롬비아 지역의 우기에 해당하는 계절로, 이에 따라 <그림 2>와 같이 댐 상류측 수위가 급격히 증가하였으며, 특히 4월 28일부터 5월 7일 사이에는 댐에 인접한 상류측에서 대규모 급경사면의 붕괴가 세 차례 발생하였다. 공사 과정에서 제체 우안에 총 3개의 가배수터널이 시공되었으며, 이 중 2개는 사건 당시 폐색된 상태로 1개 가배수터널만 운영 중이었다. 급경사면 붕괴로 유입된 토석류가 운영 중인 가배수터널의 폐색을 유발한 것으로 추정되며, 이에 따라 방류가 불가능해진 제체 내측에 수위가 급격히 상승하는 결과를 초래하였다.

그림 2. 이투안고 댐 저수지 현황 - 위성사진 (a) 4월 7일, (b) 5월 17일

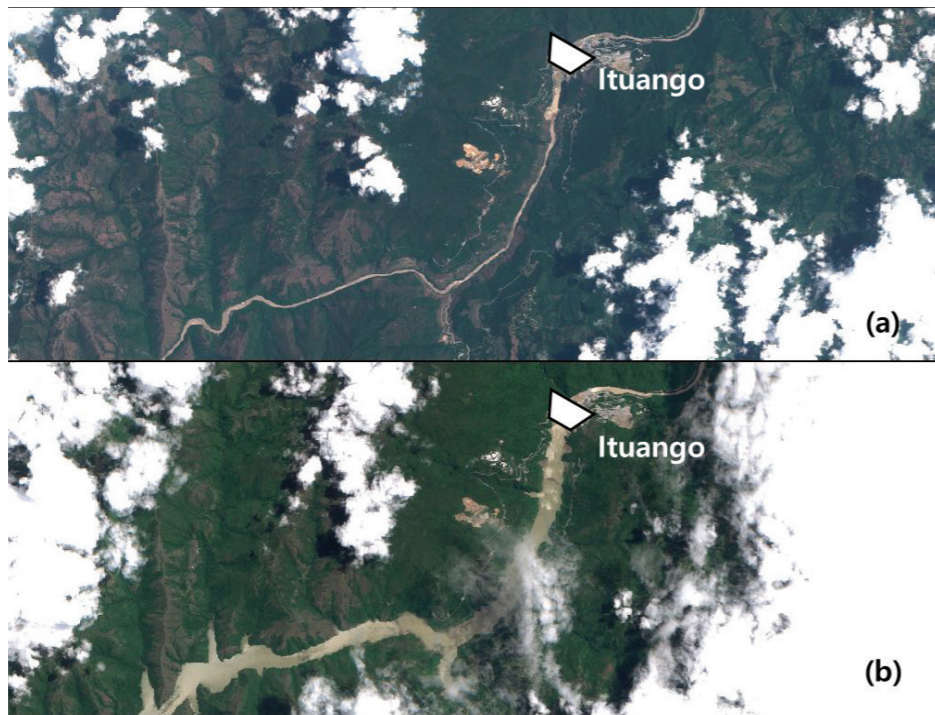


그림 3. 이투안고 댐 주변지역 피해



(a) 상류 우안 급경사면 붕괴 (가배수터널 유입부 인접)

(b) 하류 수위 증가

시공 관계자들은 급격한 수위 상승에 따라 발생하는 시공 중 제체로의 월류 위험을 해소하고자 기존에 폐색하였던 2개 터널을 발파를 통해 개방하고자 하였으나 잇따라 실패하였으며 5월 10일 수위가 발전소 유입부에 이르자 발전용 터널(Penstock)로 방류를 시작, 건설 중이던 제체로의 월류를 방지하고자 하였다. 5월 12일에 이르러 개방하고자 하였던 2개 가배수터널 중 1개가 스스로 개방되었으며 이에 따라 하류측에 급격한 방류수가 유입, 기존의 3배 이상에 해당하는 하천수량이 발생하였으며 결과적으로 하류측 약 25,000명의 주민들에 대한 긴급 대피명령이 발효되었다. 이러한 현상에 따라 다수의 마을에서 수백명의 사상자와 교량 등 시설물의 붕괴와 같이 큰 홍수 피해가 발생하였다.

그림 4. 이투안고 댐 여수로 및 제체 현황 (5월 12일, gettyimages)

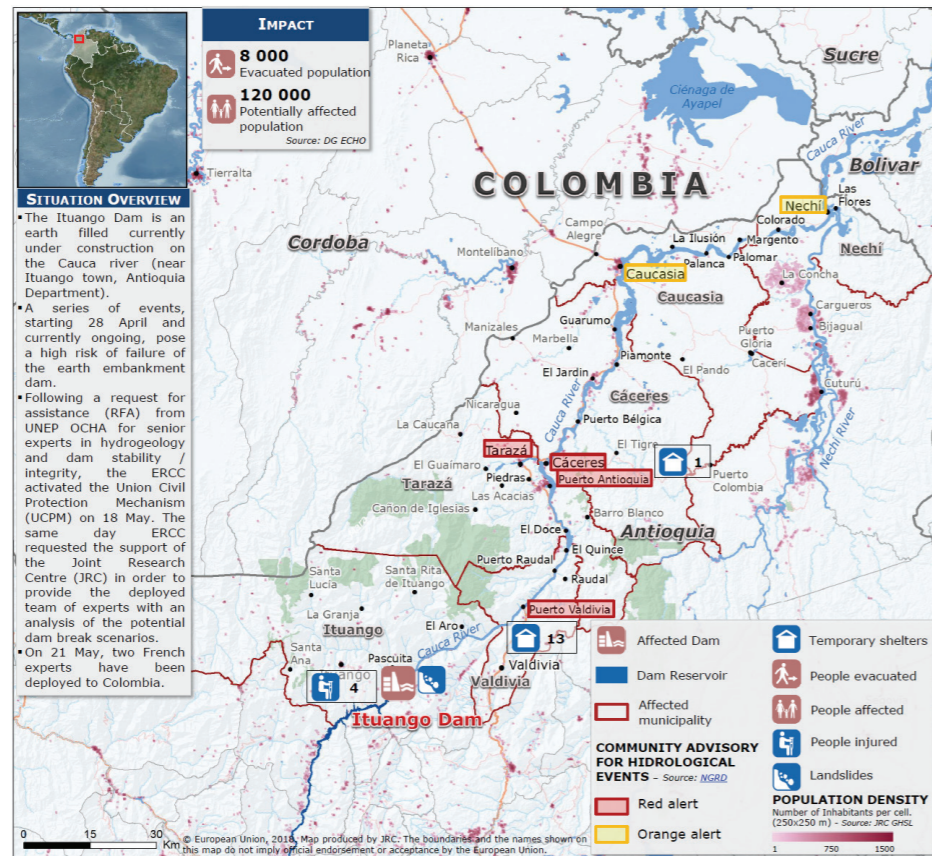


5월 16일 당시 중요한 방류 수단이었던 발전용 터널에 큰 손상이 발생하여 방류 능력이 감소함에 따라 공사용 중장비 진출입용 터널 (transit gallery)로의 방류를 시작하였다. 해당 터널의 하류측 출구는 댐 제체와 근접하여 방류수의 소류력에 의한 도로 및 제체 하단부 손상이 우려되었다. 이에 따라 시행사는 댐 붕괴 위험을 공표함과 동시에 제체를 통한 월류 방지와 이미 건설된 여수로를 통한 방류가 가능하도록 댐 본체 성토 시공을 가속하였다. 당시 콜롬비아 카우카 강 유역에는 5월 말까지 우기가 지속될 것으로 예보되었으며, 특히 이투안고 댐의 유역면적이 넓고 수천에 이르는 지류로부터의 유입량 및 유사량이 막대하여 콜롬비아 역사 최악의 재해가 우려되는 바 영향권 안에 놓인 수많은 지자체에 비상대피령이 확대되었다. 일부 전문가들의 견해에 따르면 댐 붕괴 시 인류 역사상 두 번째로 큰 규모의 재해가 발생할 수 있었다고 한다.

5월 18일 하류의 유량은 약 20% 가량 감소하기 시작하였으며, 댐 건설공사와 비상 대응이 비교적 수월해졌다. 그러나 5월 21일 기존의 폐색되었던 나머지 한 개의 가배수터널이 열리면서 다시 기존의 비상상태로 이어졌다.

5월 24일 제체의 성토고는 여수로의 활용이 가능한 해발 410m까지 축조되어 월류 위험은 해소되었으나, 계속되는 상류측 급경사면 곳곳의 활동이 발생하여 건설현장의 대피명령이 빈번히 발효되는 등 비상상황은 계속되었다. 6월 1일, 시행사는 공식적으로 제체 축조가 완료되어 4개의 여수로 수문을 통한 방류 통제가 가능함을 알렸으며 이 후 위험 상황은 대부분 해소되어 현재의 정상

그림 5.
이투안고 댐 비상사태 통
계자료 (European
Commission, 2018)



5월의 비상상황 이후 이투안고 댐에서는 손상 복구 및 정상화를 위한 시공이 지속되었으며, 11월 4일에 이르러 수문 개방을 통한 시험 방류를 시작하였다.

이투안고 댐의 사례는 지속된 강우에 의한 댐 주변 급경사면의 붕괴와 댐 건설사업 공정관리 상의 문제가 복합적으로 작용하여 발생한 것으로 보인다. 댐 준공이 약 7개월 후로 가까워짐에 따라 총 3개의 가배수터널 중 2개를 영구 폐색하여 조속한 상업발전 개시를 도모하고자 한 것으로 예상된다. 따라서 홍수기 비상상황에서 방류가 가능한 시설은 단 하나의 가배수터널만이 남은 상황이였다. 때마침 유일한 가배수터널 유입부 인근에서 발생한 급경사면의 붕괴와 이에 따른 토석류의 유입은 가배수터널의 폐색을 야기했으며, 시공 중 홍수배제 수단이 소멸되는 결과를 낳게 되었다. 이렇듯 댐 설계, 시공 과정에서 발생 가능한 독립적 위험인자가 복합적으로 작용함에 따라 발생한 사고라 할 수 있다.

시사점

이번 사례에서 보듯 댐 시공 과정에서 예상할 수 있는 각종 문제가 복합적으로 작용할 경우 예기치 않은 심각한 피해를 유발할 수 있다. 또한 공사 중 댐의 방류수단인 가배수터널이 단 하나만 남은 상황에서 별도의 대안이 준비되지 못한 것은 이번 사례의 직접적인 원인이라 할 수 있으며, 댐 인접 시설의 위험관리 부족이 이와 같은 구조적 문제를 드러내는 계기가 된 것이라 할 수 있다. 이와 같이 다양한 문제의 복합적인 작용이 결과적으로 콜롬비아 역사상 최악의 인재라고도 평가되는

이번 사건의 핵심 원인이라 할 수 있다.

따라서 댐 건설 및 관리 과정에서 예상 가능한 다양한 문제점을 고려하는 복합재난안전관리를 통하여 보다 정교한 안전관리 및 비상대응체계의 구축은 효과적인 재난대응을 위한 중요 과제라 할 수 있다.



참고문헌

Wikipedia, Ituango Dam, https://en.wikipedia.org/wiki/Ituango_Dam <https://es.wikipedia.org/wiki/Hidroituango>

The Guardian, "Colombia: tens of thousands ordered to evacuate after floods at dam" 2018. 5. 16, <https://www.theguardian.com/world/2018/may/16/colombia-tens-of-thousands-of-ordered-to-evacuate-after-floods-at-dam>

European Commission, "Colombia Ituango Dam Emergency 22 May 2018", 2018. 5. 25.