

중국산둥성 黃水河유역 수자원 종합개발사업

Integrated Water Resources Development for Hwangshuihe River Basin in Shandong-Sheng, China

이 정 철*
Lee, Jeong Chol

1. 머리말

2025년에는 세계의 3분의 1에 해당하는 국가 및 지역에서 수자원 부족을 겪게 된다고 한다. 그러나 일부 수자원 부족지역에서는 해마다 홍수기에 많은 양의 물이 그대로 바다로 흘러가는데 계절풍 기후지대에서 더욱 그러하다. 중국은 대표적인 대륙성 계절풍 기후를 나타내는 국가로 창지양(長江)일대는 5~6월과 8~9월, 후아이허(淮河) 이북지역은 6~9월에 집중되는 등 대부분 지역에서 강우가 짧은 기간에 집중되어 있기 때문에 효율적인 수자원 관리가 어려워 한발, 홍수 및 침수피해가 빈번하게 발생하고 있다.

중국정부는 1949년 정권설립 이래 물문제를 해결하기 위해 수자원 개발사업을 적극 추진해 왔다. 1949년 이전에 23개소뿐이던 중대형 저수지가 현재 85,100개소에 달하고 있다. 적극적인 수자원 개발정책의 추진으로 수자원 개발 이용률은 하이허(海河)유역에서 90%로 가장 높고 후양허(黃河), 후아이허(淮河), 쑹허(宋河)유역에서는 60% 이상으로 높게 나타나고 있지만 전체적으로는 20%에 그치고 있어 여전히 용수

수요량을 충족시키기에는 역부족으로 평가되고 있다.

한편, 수자원 개발이용률이 비교적 높은 후양허(黃河), 하이허(海河), 후아이허(淮河) 등 일부 유역에서는 과도한 수자원의 개발로 지표수가 고갈되고 하천의 건천화 및 호수·습지의 축소 현상이 발생하고 있으며 지하수 고갈에 의한 지하수위 저하, 지표면 침하 및 연해지구 해수침입 현상도 나타나고 있다. 그 외에 지표수와 지하수의 오염, 해수침입, 토사유실 및 토지의 사막화, 지면침하, 토양의 염해 등도 문제점으로 지적되고 있다. 특히 후양허(黃河)에서는 1972년이래 69차례에 걸쳐 단류가 발생하였으며, 특히 1997년에는 2월 7일부터 12월 31까지 13차례에 걸쳐 총 226일간의 단류현상이 나타났다. 경제성장에 따른 도시화, 공업화의 진전과 화학비료, 농약 사용으로 수질오염 또한 심각한 수준이다.

최근 중국정부에서는 물문제의 심각성을 인식하고 300명 이상의 전문가들이 참여하는 '지속가능 수자원 전략연구단'을 구성하여 2050년까지의 수자원 장기전략을 수립하는 등 대책마련에 나서고 있다.

*농업기반공사 농어촌연구원(ijc@karico.co.kr)

본 고에서는 2004년 10월 중국 산동반도 일대 지하댐 실태 조사를 위한 현장 방문시에 파악한 후양수이허(黃水河)유역의 종합개발사업에 대하여 소개하고자 한다. 이 사업은 기존의 저수지, 보 등 수리시설의 효율적 이용을 위해 전체유역을 대상으로 수자원 개발 및 이용시스템을 구축하는 사업으로, 특히 해안 지역 지하수와 지표수 연계이용의 성공적인 모델로 평가되고 있다.

2. 후양수이허(黃水河)유역 개발의 기원

산동성의 칭다오(靑島), 옌타이(煙臺), 웨이하이(威海) 등 7개시로 이루어진 산동반도는 중국 산동성 동쪽 황해와 발해 사이에 위치하며 총면적은 5.97만km² 이고 총인구는 3,033만명이다. 해안선 길이는 2,960km 이고 근해에 약 240여 개의 섬이 있다. 연평균 기온은 12~13℃, 연평균 강우량은 650~910mm 이다. 가장 큰 하천으로 후양허(黃河)가 있고 그 외에 독립적으로 황해에 유입하는 하천들이 있다.

그동안 산동반도 일대는 중국의 개혁개방정책에 따른 한국 등 외국자본의 투자로 급격한 경제성장을 이루었다. 하지만 경제성장에 따른 용수수요량 증가로 수자원의 대규모 난개발이 행해져 수자원 환경측면에서 여러 가지 문제점을 보이고 있다.

우선 수자원의 절대량 부족 및 수요와 공급간의 불균형 현상이 가장 큰 문제점으로 꼽히고 있다. 산동반도 일대의 연간 용수 이용량은 73억m³이며 그 중 지표수는 38억m³이고 지하수는 35억m³으로 지하수 이용비중이 상당히 높은 편이다. 개발가능량에 대한 개발이용량의 비율로 나타내는 개발이용률은 지표수의 경우에 50%인데 반해 지하수의 경우에는 93%에 달하여 지

하수 개발이 너무 과도하게 된 것으로 평가되고 있다. 그럼에도 불구하고 2000년도 연간 부족량은 약 56억m³으로 나타나 산동반도 지역의 수자원 부족은 급변하는 경제발전을 뒷받침하지 못하고 있는 실정이다.

산동반도의 물문제가 전반적으로 어려운 가운데 유역종합개발로 효율적인 수자원의 이용을 이루었다고 평가받는 지역이 바로 후양수이허(黃水河) 유역이다.

후양수이허(黃水河)는 유역면적이 1,034.47km², 유로연장이 55.43km인 산동반도의 북쪽에 위치한 지방하천이다. 제1지류로 허이산허(黑山河), 푸산허(阜山河), 동잉허(東營河), 후양청지허(黃城集河), 지양수이허(絳水河) 등 11개가 있으며, 푸산(阜山), 쑤시아디안(蘇家店), 스톤리양(石良), 치지아(七甲), 란까오(蘭高), 쭈유(諸由) 등 8개 지방도시를 거쳐 산동반도 북부 항구도시인 룡커우(龍口)시를 통해 황해로 유입된다.

1950년대부터 1980년대 초에 이르기까지 유역내에서는 지표수의 저류를 위한 대규모 수자원 개발사업이 본격적으로 추진되었다. 그 결과 대형저수지 1개소, 소형저수지 50개소, 대형보 5개소 등을 개발하여 유역전반의 이수 및 치수 기능을 수행할 수 있는 기본적인 틀을 마련하게 되었다.

그러나 경제발전에 따른 용수 수요량의 증가는 유역내에서 지표수와 지하수의 수요량 증가를 가져왔고 이는 수자원의 공급과 수요간의 평형을 깨뜨리는 결과를 초래하였다. 특히 지하수 위의 급격한 하강으로 하천의 건천화 현상, 내륙지역으로의 해수침입 등 수자원 환경 변화가 심각하였고 공업, 농업 및 일상생활에 큰 악영향을 미치게 되었다.

한편, 이 유역은 지형경사가 급하고 강수가 7월~9월에 집중되어 있어 유역내에 이미 왕우(王屋)저수지 등 대중규모 저수지들이 있지만



그림 1. 후양수이허(黃水河)유역 수자원개발사업 모식도

해마다 평균 6,400만 m^3 의 수자원이 지표유출을 통해 바다로 흘러들고 있었다. 이 유역은 토사유실이 아주 심한 지역으로 유역내 토사유실 면적은 전체 유역면적의 11%인 115 km^2 에 달하며 연간 토양유실량은 68만 m^3 나 된다.

따라서 수자원 환경의 개선, 토사유실의 감소, 용수공급량 증대 및 경제·사회 등 각분야의 지속발전을 위한 수자원 잠재력 개발 목적의 유역종합개발이 1980년대 중반부터 본격적으로 시작되었으며, 10년간 총 300억원의 사업비를 투자하여 마무리 되었다. 이 사업은 수자원 저류 시스템과 보충 시스템을 완벽하게 구성하고 개발사업과 치수사업을 동시에 추진함으로써 홍수량 이용과 해수침입방지 등의 효과를 거둘 수 있게 되었다는 점에서 높이 평가되고 있다. 구체적으로 왕우(王屋)저수지 보강, 수원함양 집수정, 가동보, 지하댐, 용수공급시스템 등 수자원 개발·이용 시설과 공업폐수 집중처리 시설 외에 산수이(三水) 수질감시측정망 등 수자원보호시설 등의 개발이 추진되었

다. 이 사업으로 수자원 이용률은 13% 증가하였고, 효율적이고 합리적인 수자원의 공급 및 이용체계의 수립으로 한발 시에도 수자원의 공급과 수요간의 균형을 유지할 수 있는 것으로 평가되고 있다.

3. 후양수이허(黃水河) 유역종합 개발사업의 내용

가. 지표 저수지

1958년 유역의 중상류에 관개, 생활용수 공급, 양어, 발전, 관광 등을 위한 다목적 저수지인 왕우(王屋)저수지가 개발되었다. 이 저수지는 유역면적 320 km^2 , 저수용량 1.49억 m^3 , 설계 관개면적 6,667ha이며 유효 관개면적은 6,000ha으로 다년 조절기능을 가지고 있다. 댐은 진동에 따른 액상화로 제체사면이 활동(sliding)하는 위험을 5차례나 겪었지만 1998년 9월에 81억원의 사업비가 투입된 댐체의 안전성

제고 공사를 통해 현재 1,000년 빈도의 홍수에 견딜 수 있게 보강된 것으로 알려지고 있다. 댐은 중심 코어형 록필댐이며 미관개선을 위해 댐의 내측사면에도 장식 라이닝 처리를 한 점이 특징적이다.

후양수이허(黃水河)의 8개의 지류에는 중소형 저수지, 고정보, 롤링게이트형 가동보 등 239개소의 수리시설을 설치하는 등 소유역 단위의 단계적 개발을 통해 유역전반의 저류능력이 증가되었다.

나. 수원함양 집수정

유역의 중하류 지역에서는 하상 하부 2m 이내에 점토성 사질토의 분포면적이 61%에 달해 지표수가 유출과정에서 지하수로 전환되는 침투능력을 저하시키고 있다. 따라서 이 지역에 얕은 심도의 인공함양정 2,218공, 비교적 깊은 심도까지 기계굴착한 인공함양정 300공, 침투지법(浸透池法)을 적용한 집수침투池 773개소, 지하트렌칭 침투법을 적용한 집수암거 448개소를 만들어 얕은 인공함양정과 깊은 인공함양정, 집수

침투池와 집수암거, 함양정과 집수암거가 서로 연계된 복합적인 지표수 침투 시스템을 형성함으로써 지표수의 지하수로의 전환능력을 높였다.

다. 자동 전도식 가동보

유역 본류의 중하류 처까오(側高), 뤼지아(呂家), 시장지아(西張家), 미요구어(妙果), 후양허잉(黃河營) 등 6개소에 대형 수력자동제어식 철근콘크리트 구조의 보를 설치하여 지표수를 단계적으로 저류하고 인공 함양정과 연계시킴으로써 지표수의 하상을 통한 침투능력을 향상시켰다.

보에는 20m×2.5m 규격의 8련 전도식 게이트가 있고, 좌안에는 폭이 2m이고 2련인 인양식 게이트가 설치되어 있다. 수위가 2.6~2.8m에 도달할 경우 철근 콘크리트 구조의 수문이 자동으로 전도되어 저수를 배출하게 된다. 보 6개소의 1회 저수능력은 360만 m^3 이며 연간 용수 총이용량은 1,000만 m^3 이다. 하구에 위치한 후양허잉보의 하부는 지하댐의 제정부와 연결되어 있다.

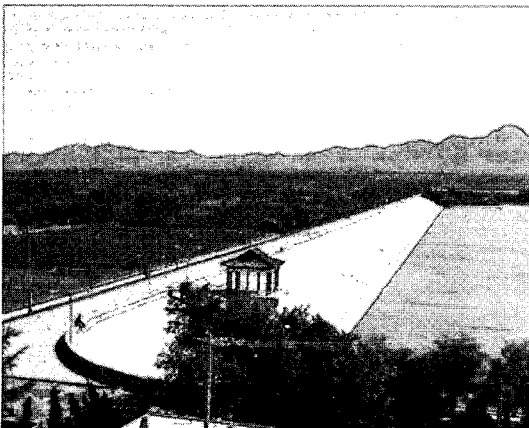


그림 2. 왕우(王屋)저수지 전경

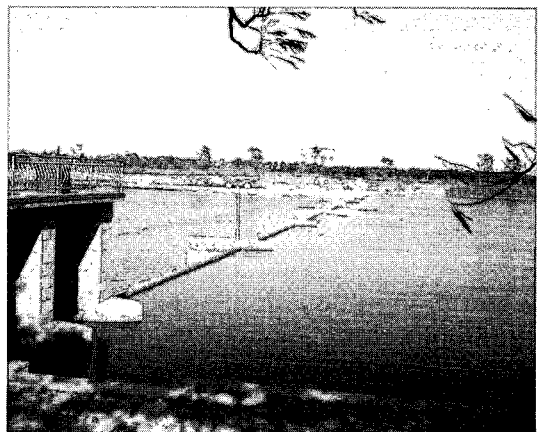


그림 3. 후양허잉(黃河營) 보 전경

라. 지하댐

1998년 약 100억원의 사업비를 투자하여 유역하구에서 1.2km 떨어진 곳에 인공적으로 지하수를 저류하는 지하댐을 개발하였다. 이 지하댐은 길이 5,996m, 평균 높이 26.7m, 최대 높이 40.1m, 최대매설 심도 43.4m, 댐종단 면적 16만²의 대형지하댐으로서 바다 쪽으로 유하하는 지하수의 흐름을 차단하여 저류하는 지하저수지와 내수 측으로의 해수침입을 막는 해수침투 차수벽으로의 두 가지 기능을 수행한다. 지하댐에 의해 조성된 지하저수지의 저수용량은 5,359만³이며, 최대 조절용량은 3,929만³이다. 고압분사공법(Grouting공법)이 이용되었고 현재 아시아 최대규모 지하댐으로 평가되고 있다. 한편, 지하수의 오염방지를 위해 길이가 38.6km에 달하는 오폐수 배출관로체계가 연계되어 있다.

마. 용수공급 시스템

황수하 유역내에 저수지, 집수정, 보, 지하댐 등 저류시설을 개발하게 된 가장 큰 목적은 수자원의 이용가능량을 증대시키기 위해서이다. 저류시스템을 통해 확보된 용수를 룡커우(龍口)시와 앤타이(煙臺)시의 경제발전과 주민생활을 위해 공급하는 공급시스템은 이 사업에서 중요한 부분으로 차지한다.

분산적으로 취수하는 개별관정 외에 용수공급 노선으로 왕우(王屋)저수지-도시지역 노선, 모지아(莫家)수원지-도시지역 노선, 따바오(大堡)수원지-도시지역 노선, 지하댐-발전소 노선 등 4개 노선이 있으며, 이를 통해 연간 4,000만³의 용수가 도시지역과 수력발전소 등으로 공급된다.

바. 공업폐수 집중배출 시스템

유역의 중하류 지역은 공업이 비교적 발달되어 있으며 특히 중소기업이 많아 수질오염이 비교적 심각하다. 따라서 저수지 지역내 배출량이 비교적 많은 7대 기업에 대하여 관로(管路)를 통해 오폐수를 해변에 위치한 오수처리장에서 집중 처리한 후 바다에 배출하도록 함으로써 공업오폐수의 저수지 지역 지하수에 대한 수질오염을 저감시켰다. 간선 오폐수 배출관로의 총길이는 38.6km이고, 관경은 0.5m이며 중력흐름식 배출방식을 적용하였다. 지선 배출관로는 탑식(塔式) 조정지에서 배출이 제어되므로 기본적으로 압력흐름 상태이며 연간 총 오폐수 처리능력은 374만³이다.

사. 토사유실 제어

약 20년간의 토사유실 방지사업 추진으로 토사유실 제어 가능면적은 총 대상면적의 29%인 46km²에 달하게 되었다. 토사유실 방지를 위해 추진된 사업내용으로 533ha의 계단식 밭, 2,000ha의 토사유출방지림 및 2,067ha의 경계림 조성과 2,780개소의 사방댐과 같은 토사유실방지 시설 건설 등이다.

아. 삼수(三水) 수자원감시관측망

사업 완공후 시스템 가동을 시작됨에 따라 수자원 관측망 구축과 관리대책도 취해졌다. 유역내에 자동화된 원격제어 우량측정 장비, 홍수정보 관측 및 최첨단 통신장비가 설치되었다. 왕우(王屋)저수지와 대형보 5개소에는 상주인원을 배치하여 수량변화를 파악하고, 수질측정 및 감시를 실시하고 있다. 또한 유역내에는 38개소의 관측정이 있어 정기적으로 지하수의 수위, 수질 측정 및 감시를 진행하고 있어 유역종합개발

시스템 가동 및 유역내 지하수 개발이용에 필요한 자료를 제공하고 있다.

자. 기 타

하천 양안의 제방 덧쌓기 및 넓히기, 하상굴착, 사면보호공 기초의 개보수 및 보강, 가교 및 도로 부설, 사면 녹화 사업 등의 하도정비를 통해 홍수방어 능력을 향상시키고 생태환경의 개선을 이루었다.

또한 유역내 수원오염을 심하게 발생시키는 공장, 광산에 대한 개선, 이동 및 폐쇄 조치를 취하였다. 결과적으로 개선 및 이동조치 대상 기업이 각각 1개소였고, 13개 기업 및 소규모 금광에 대하여 폐쇄조치를 취함으로써 양우저수지와 지하저수지의 수질이 보호받을 수 있게 되었다.

5. 맺는말

10여년 간에 걸친 후양수이허의 전체 유역을 대상으로 하는 개발 및 정비사업에 총 300억원 이상의 자금이 투자되었으며, 소위 '3종 수원 저장고 연계시스템'이라는 유역종합정비의 신규 모델이 창출되었다. '3종 수원 저장고'는 유역 상류의 대형 지표수 저수지, 중류지역의 다단 대형보, 하류의 지하저수지를 말한다. 이 유역의 개발사업을 통해 단계적 개발, 개발과 정비의 병행, 지표수와 지하수의 연계운영관리 등 여러 측면에서의 귀중한 경험을 축적한 것으로 평가되고 있다.

이 사업이 완공된 후 연간 수자원 이용가능량은 3,000만 m^3 가 증가하였고 그중 실제 이용량의 증가량은 2,000만 m^3 에 달해 유역내 수자원 환경 개선, 토사유실 감소, 수자원의 수요와 공급간 격차 완화, 경제건설 및 생활에 필요한 용

수문제 해결 등의 효과를 거두고 있는 것으로 알려지고 있다. 1998년에 100년 빈도의 가뭄이 있었지만 지하수의 효과적인 이용이 가능하여 무난하게 극복할 수 있었다고 한다. 따라서 이 사업은 중국내 수자원 부족문제가 심각한 다른 지역, 특히 해안지역의 수자원 개발 및 이용의 모델로 평가받고 있으며 실제로 현재 산동반도에서 따구허(大沽河) 지하댐 등 지하댐이 이미 개발되었거나 개발 예정인 지구에서 동일한 개발 및 이용 시스템이 적용되고 있다. 지하댐과 연계한 수자원의 종합적인 개발 및 이용에 관한 방법론과 아시아 최대의 지하댐 개발을 통해 축적한 노하우는 최근 환경 문제, 토지보상문제 등으로 지상에서의 저수지의 신규개발이 점점 어려워지고 있는 우리나라의 경우에도 적용할 가치가 충분히 있다고 생각하며 관련연구가 활발하게 이루어지기를 기대하는 바이다.