

벽골제의 수공학적 고찰

Hydraulic Investigation of Pyokkolche Reservoir

이 장 우*

Lee, Jang Woo

Abstract

The Pyokkolche Reservoir was constructed as a major public project of the ancient agricultural society, 1600 years ago. From a hydraulic point of view, it is considered to have been carried out with a distinguished technology. It should be in particular noticed that for a consecutive banking the main stream was diverted and drained to the Yonpo stream and the dam with same sea levels on its top along the whole length was built in a nearly straight line in spite of the different sea levels between both ends on the bottom. These suggest that the carrying out artifice and surveying technigue of those days were considerably excellent. However, the insufficient plan and design at the time of the construction, the temporary management and the repeated repair works in the later ages caused the Pyokkolche to lose its function. The Changsaenggeo and Kyungjanggeo gate sites being the facilities for sluices composed of a simple span and a vertical lift hand-operated sing a pully. The advantage of the geographical characteristics at both ends of the main dam was scientifically taken to these sites which also functioned as a spillway against a flood. The gate site of Suyogeo must have been located in an entrance to Suwolri, the northern end of the Pyokkolche and Yutonggeo is presumed to have been located on the right of Sangsori, the southern end of the Pyokklche.

Keywords : Pyokkolche Reservoir, construction technology, gate site location.

요 지

1600여년 전에 축조된 벽골제 저수지는 우리나라 고대 농경사회의 대규모 토목사업으로 건설되었고, 당시의 대체적인 시공기술은 우수하였다. 특히 본체의 계속적인 성토공사를 위해서 본류를 연포천에 우회적으로 배수시킨 현장기술자의 시공대책과 장대한 돌마루 표고를 일치시킨 공사측량기술은 탁월하였다. 그러나 기본계획의 미흡함과 이후의 반복된 보수공사의 소극적인 관리체제와 임시적인 방법이 벽골제의 저수기능을 상실하게 된 원인이 되었다. 또한, 장생거·경장거수문지는 관개배수용 수문시설물로서 구조는 단경간의 수문석주와 인양식 목재문비로 되어 있고, 그 목재문비는 고정 도르래 장치를 이용한 수동식(인력)으로 조작 하였으며, 수여거·유통거수문지는 홍수시 여수로시설로서 본체 양단의 지형적 특성을 잘 이용 할 줄 아는 토목공학적인 식견이 높았던 것으로 볼 수 있다. 그리고, 수여거수문지의 위치는 벽골제 북단 수월리 입구가 확실하고, 유통거수문지의 위치는 본체 남단 상서리 우측으로 추정된다.

핵심용어 : 벽골제, 시공기술, 수문지 위치.

* 전주공업대학 토목과 교수

1. 서 론

우리나라에서 가장 오래 된 김제(金堤) 벽골제(碧骨堤)는 1600여년 전 AD 300년 백제 비류왕 27년에 축조한 고대 농경사회의 중요한 토목사업 유적물이다.

이 벽골제에 대한 역사적 연혁(민족문화추진회, 1978)을 살펴보면 삼국사기의 기록에서는 790년 신라 원성왕 6년에 증축공사를 하였고, 벽골제증수비문에 따르면 1010~1031년 고려 현종 때에 복원공사를 했고 1146년 인종 때에도 증축을 하였으나 얼마 후 심하게 훼손 된 것으로 추측된다.

그 후, 세종실록지리지와 김제군사(김제군, 1978)에 의하면 1415년 이조 태종 15년에 대대적인 보수공사를 실시 하였으나 1420년 세종 2년에 일어난 대홍수로 인하여 본체가 크게 붕괴되어 저수기능을 상실하였다. 이후 500여년간 방치 되면서 제내측은 농경지화 되었고 1925년 일제시대 동진수리조합에 의해 본체를 이용한 관개용 간선도수로써 내어 현재까지 이용되고 있는 실정이다.

또한, 1959년 벽골제비(碑)와 본체를 일괄해서 사적 제111호로 지정하였고, 1967년 수문지(水門址) 복원을 위하여 동진농지개발조합은 장생거수문지 부근에서 발굴 조사를 실시 하였으며, 1975년 벽골제 발굴조사단에 의해서 장생거, 경장거수문지의 발굴 조사가 시행되었다. 그 조사 결과로 1980년 장생거수문지의 복원공사가 있었고, 1990년 벽골제개발위원회가 구성되어 현재의 벽골제 수리민속유물전시관이 조성되었다.

이와같은 벽골제에 대한 문헌적 근거(김제군, 1978; 정진형, 1982)에서 원래의 규모와 현재의 현황을 살펴보면 벽골제의 위치는 전북 김제군 부량면 초혜산이 있는 포교리에서 월송리 입구 명금산에 이르는 평탄한 농경지대 가운데 거의 일직선 상태로 시축되었고, 원래 벽골제의 길이는 3,240 m(1,800보)이었으나 현재는 2,500 m정도이고 그 본체를 횡단한 원평천과 연포천의 하폭만큼 본체의 일부가 절단 되었으며, 중심거수문지가 있었던 곳으로 추측되는 제외측 일부에는 부락이 형성되어 있다.

원래 벽골제의 제형표준단면은 둑 높이 4.3 m(17척), 둑 마루폭 7.5 m(30척), 둑 바닥폭 17.5 m(70척)이었으나 현재는 본체를 제외측 간선도수로의 둑으로 하고, 신축한 제내측 간선도수로 둑 사이에 제형단면 수로의 상변 폭 20 m, 하변 폭 14 m, 수로 깊이 2.0 m인 관개용수로로 이용하고 있다. 또한, 복단 포교리

쪽 제내측 표고가 4.3 m, 남단 월송리 쪽 표고는 3.3 m로서 지표면 차가 1 m 이었다. 벽골제의 수문지는 원래 5개소로서 홍수시 저수지의 여수로로 이용한 것으로 알려진 벽골제 남단에 유통거(流通渠)와 복단의 수여거(水余渠)가 있었으나 현재는 존재하지 않는다. 또한, 평시 저수지의 관개용수량을 조절하는데 사용한 중심거(中心渠)와 장생거(長生渠) 및 경장거(經藏渠) 수문지가 있었으나 현재로는 일부 복원된 장생거 수문지와 경장거 수문석주만 남아 있다. 이 수문지의 규모는 수문 석주의 높이 5.5 m, 두 석주의 간격 4.2 m, 석주의 단면 0.75 m×0.5 m이고, 제외측으로 나 있는 도수로의 폭도 두 석주의 간격과 거의 동일하다. 또한, 벽골제사와 문헌적 근거에 의하면 벽골제 저수지의 만수상태의 수면적은 37 km²이고, 저수지의 물리구역은 35 km²(9,840결)이었다(김의원, 1983).

이러한 벽골제는 시축된 이후 증축 보수되고, 훼손, 붕괴, 방치되어 오다가 1975년 벽골제 발굴 조사단에 의해 고고학·역사적 입장에서 부분적으로 발굴 조사되었고, 장생거수문지의 복원사업도 미흡한 상태이며, 최근의 벽골제 수리민속유물전시관 사업도 벽골제 자체에 대한 구체적 발굴 조사와 문화사적 의미와는 거리가 있어 보인다.

우리나라 고대 농경사회의 중요한 문화유산인 벽골제에 대한 발굴조사와 연구 및 복원사업은 종합적으로 이루어져야 하고, 특히, 벽골제는 고대의 대규모 농업 토목사업으로 축조되었기 때문에 종래의 고고학·역사적 입장에서 발굴, 조사, 연구, 평가되기 보다는 토목·수공학적인 입장에서 중점적으로 발굴 조사하고, 연구, 평가하여 벽골제의 본체와 수문지를 복원함으로써 한국 문화사의 세계적인 자랑거리가 되게 해야 한다.

따라서, 본 연구에서는 벽골제의 토목·수공학적인 입장에서 연구, 고찰하여 앞으로 대대적인 복원사업이 시행될 때 기여함을 목적으로 한다. 그 연구방법에서는 현지답사와 지형측량을 실시하고, 대상구역의 유역특성을 분석한다. 벽골제 유역의 수문계측자료가 미흡하므로 지형학적 특성에 근거하여 SCS 방법과 나카이스(中安) 합성단위도법으로 설계홍수량을 산정하고, 근사적인 평균단면적법으로 저수량을 구하여, 참고문헌에 근거한 축조 당시의 벽골제 규모를 추정하였다. 또한, 관개배수용 수문지의 문비시설의 조작방법과 홍수조절용 수문지의 위치 추정과 기존의 발굴 조사 결과와 문헌적 자료에 근거하여 토목공사 시공상의 축조 기술등을 고찰하고자 하였다.

2. 설계홍수량과 저수량 산정방법

2.1 유역특성

벽골제 유역의 지형학적 특성에서 위치는 전북 김제군 부량면 초혜산 포교리에서 명금산 월승리에 이르는 두 뚝줄의 병목지점에 축조한 토사제로서 우리나라 도작문화의 발상지에 소재하고 있다.

지형은 소백산맥에서 뻗어 나온 노령산맥의 봉황산과 모악산, 구성산과 상두산을 비롯한 군소연봉으로 둘러져 있고, 상류부는 높지 않은 산악지대와 작은 소구릉지대이고, 중·하류부는 본체를 포함하여 서해안에 이르는 평야지대와 낮은 습지대로 형성되어 있다.

수계는 동진강 수계의 제1지류인 원평천을 벽골제 유역의 본류로 하여 최상류에서 제2지류인 유각천이 합류하고, 중류에서 제2지류인 용복천과 금구천이 합류

하여 흘러 오다가 다음으로 감곡천이 합류한다. 또한, 벽골제 유역의 다른 제2지류를 이루고 있는 두월천은 그 상류에서 금천과 대율천이 합류하여 흐르다가 하류에서 본류인 원평천과 합하고, 마지막으로 동진강과 합류하여 서해에 이르고, 동진강의 독립된 한 지류인 연포천을 포함하여 벽골제 유역의 수계를 형성하고 있다.

이와같은 벽골제 유역특성을 신중 동국여지승람과 김제시 지형도(1/25,000)와 한국하천일람(건설부, 1980)으로부터 구한 결과는 표 1 및 그림 1과 같고, 벽골제의 평면측량 결과는 그림 2와 같으며 벽골제의 표준단면도 및 현재 도수로 단면도는 그림 3과 같다.

벽골제 유역의 기상학적 특성은 우리나라의 강우특성과 같이 여름 성수기에 집중되어 있고 강우량은 우리나라 평균강수량 이상이고, 수답농업에 최적한 기후대이다. 본 연구에 이용한 수문자료는 85~96년간의 한국강수량자료(기상청, 1998)에서 벽골제 유역에 인접한 전주, 부안, 정읍 3개 지점의 강수량 자료를 사용하

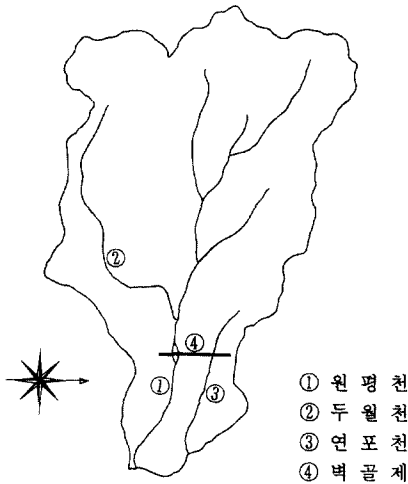
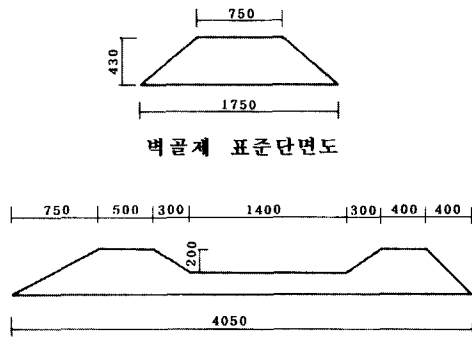


그림 1. 벽골제 유역도



벽골제 표준단면도

현재 도수로 A-A 단면도

그림 3. 벽골제 표준단면도 및

현재 도수로 A-A 단면도

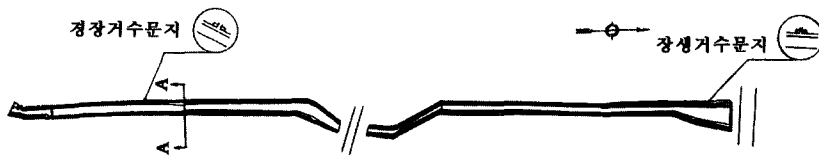


그림 2. 벽골제 평면도

표 1. 벽골제의 유역특성

구분	유역면적(km ²)	유로연장(km)	유역중심점거리(km)	유로경사	유역형상계수	평단지율
특성치	280.6	26.0	14.8	0.0108	0.31	74.0

였다.

2.2 설계홍수량 산정방법

일반적으로 소하천유역에서 수공구조물 설계를 위해서 설계홍수량을 산정하는데 벉골제 유역은 시축 당시의 기상 및 지형학적 특성이 시·공간적으로 1,600 여년이라는 너무나 장구한 기간이 경과하였고, 대상유역의 수문계측자료도 미흡한 상태이므로 본 연구에서는 최근의 복잡한 수문학적 모형기법으로 접근하기보다는 오히려 현재의 유역특성에 근거하여 홍수빈도를 고려하지 않은 설계홍수량을 산정하는 것이 타당하다고 생각하였다.

본 연구에서는 미계측유역에서 설계홍수량을 산정하는데 널리 이용되는 SCS 방법과 나카야스 합성단위도법(윤용남, 1996)으로 인접한 3개 지점의 강우량자료를 사용하여 총유출수문곡선을 작성하고 설계홍수량을 결정하였다.

2.2.1 SCS 방법

한 유역의 홍수량은 유역을 구성하고 있는 지형학적 특성인 토양의 종류와 토지이용 및 처리상태등에 영향을 많이 받는다. SCS 방법은 유출량 수문자료가 거의 없는 경우에 유역의 토양특성과 식생피복상태에 대한 자료만으로도 총강우량으로부터 초과강우량을 산정할 수 있는데, 초기손실이 유출이 시작되기 이전에 생기는 차단·침투·지표저유를 포함하고 있다고 가정할 때 유효우량은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (1)$$

한 유역의 잠재보유수량을 고려하여 유출능력을 표시하는 유출곡선지수는 다음 식과 같다.

$$CN = \frac{25400}{S + 254} \quad \text{또는} \quad S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

SCS 방법에 따라 설계유효우량을 산정하고, 설계유량주상도를 작성할 때 우리나라에서는 실무적으로 모노노베(物部) 강우강도공식에 시간간격을 곱하여 총강우량을 시간별로 분포시키는 방법을 사용하고 있다.

$$R_t = \frac{R_T}{T} \left(\frac{T}{t} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot t \quad (3)$$

여기서 R_T 는 지속기간 T 인 총강우량이고, R_t 는

강우시점으로부터 t 시간까지의 누가우량이다. 이러한 총우량의 시간적 분포는 대체적으로 중앙집중형이 가장 큰 설계홍수량을 나타내는 것으로 알려져 있다. 다음으로 설계홍수량 수문곡선은 역시 SCS에서 제안한 지체 시간 및 수정지체시간과 침투유량을 구하여 수문곡선의 시간비와 유량비로서 대상유역의 단위도를 유도하여 작성할 수 있다.

$$T_p = 0.6 T_c \quad (4)$$

여기서 T_p 는 지체시간이고, T_c 는 홍수의 도달시간이다. 또한 수정지체시간은 유달시간이 6 hr 이상인 경우에 사용할 것을 제안하고 있다(Viessman, 1987).

$$\bar{T}_p = \frac{T_0}{\left(\frac{T_0}{\bar{T}_p} \right)} \quad (5)$$

여기서 \bar{T}_p 는 수정지체 시간이고, T_0 는 시간비와 강우지속시간을 곱한 것이며, SCS 방법의 침투유량은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$q_p = 2.082 \frac{A}{\bar{T}_p} \quad (6)$$

여기서 A 는 유역면적(km²)이고 단위도의 합성된 수문곡선을 구하는 식은 다음과 같다.

$$q = (q_c / q^p) (Q \cdot q^p) \quad (7)$$

여기서 q_c 는 단위유효우량에 대한 수문곡선틀이고, q^p 는 단위유효우량에 대한 수문곡선침투율이며, Q 는 단위도의 합성된 수문곡선 유출량이다.

2.2.2 나카야스 합성단위도법

나카야스 합성단위도법은 유역의 특성인자와 매개변수등을 사용하여 단위도의 상승부와 강하부로 나누어서 강우지속시간이 t_r 인 R_0 의 유효우량으로 인한 단위도를 다음 식으로 구한다.

$$\text{상승부곡선} \quad Q/Q_p = (t/t_p)^{2.4} \quad (8)$$

$$\text{강하부곡선} \quad 0.3 \leq Q/Q_p \leq 1.0 \text{일 때}$$

$$Q/Q_p = (0.3)^{\frac{t-t_p}{t_p}} \quad (9)$$

$(0.3)^2 \leq Q/Q_p \leq 0.3$ 일 때

$$Q/Q_p = (0.3) \frac{t - t_p + 0.5t_k}{1.5t_k} \quad (10)$$

$Q/Q_p \leq (0.3)^2$ 일 때

$$Q/Q_p = (0.3) \frac{t - t_p + 1.5t_k}{2t_k} \quad (11)$$

여기서, Q_p 는 첨두유량이고, Q 는 임의시각의 시간별 유량이며, t_p 는 도달시간이다. 그리고 $0.8 t_r$ 시각으로부터 첨두유량 발생까지의 시간길이를 지체시간 t_g 라 하고, 첨두유량 발생 이후 유량의 감수시간을 t_k 라 하는데 나카야스는 유역특성인자와 연관 시켜서 다음 식을 제시하였다.

$L > 15$ km일 때

$$t_g = 0.4 + 0.58L \quad (12)$$

$$t_k = 0.47(AL)^{0.25} \quad (13)$$

$$t_p = 0.8t_r + t_g \quad (14)$$

여기서, A 는 유역면적, L 은 최장유로연장이다.

한 단위도의 전체면적인 직점유출용적은 총유효우량 $0.2778 R_0 A$ 와 동일하다는 관계에서 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$Q_p = \frac{0.2778 R_0 A}{0.3t_p + t_k} \quad (15)$$

2.3 저수량 산정방법

일반적인 이수상의 목적으로 축조된 저수지는 하천 유량의 크기를 안정화하여 변동하는 물 수요를 충족시키는 것이기 때문에 가장 중요한 물리적 특성은 저수지의 저수량이라 할 수 있다. 실제적인 저수지의 저수량은 저수지내의 상시만수위와 최저수위 사이의 내용적(內容積)을 채우고 있는 유효저수량인데 그 일반적인 산정법은 평균단면적법(average end-area method)으로서 지형도상의 각 등고선간의 면적과 간격으로 구할 수 있다.

$$S = \frac{1}{2} h (a_0 + a_n + 2 \sum_{i=1}^{n-1} a_i) \quad (16)$$

여기서 S 는 저수량이고, a_0, a_1, \dots, a_n 은 각 등고선간

의 면적이고, h 는 등고선간의 간격이다.

3. 수문구조와 문비조작 방법

3.1 수문지의 현황

벽골제의 5개 수문지 현황을 살펴보면 저수지의 홍수조절용 여수로로 이용하기 위해 본제의 양단에 설치하였던 수여거수문지와 유통거수문지는 현존 하지 않고, 저수지의 관개용수의 유통조절용으로 설치하였던 수문지 중에서 중심거수문지는 현존하지 않으며, 1980년 일부 복원한 장생거수문지와 거의 방치되어 있는 경장거수문지만 현존하고 있다. 두 수문지의 규모는 수문석주의 높이 5.5 m, 두 석주의 간격 4.2, 석주 안쪽의 폭 0.75 m, 석주 양측면 두께 0.50~0.60 m, 석주 안쪽의 홈통 깊이 0.12 m, 홈통의 폭 0.20 m, 홈통의 길이 4.9 m이다. 또한 수문석주의 상단은 거의 평면이고 그 상단으로부터 0.25 m지점의 양 측면부에 깊이 0.05 m, 폭 0.3m의 오목부를 이루고 있으며, 그 아래 0.55 m지점에 직경 0.12 m, 깊이 0.07~0.08 m 구멍이 3개 측면에 나 있고, 그 아래 홈통 쪽 0.3 m 지점에도 직경 0.05 m, 깊이 0.1 m 구멍이 뚫려 있다. 그리고 수문석주의 최하단 확대부는 홈통의 폭 0.3 m, 홈통의 길이 0.63 m, 홈통의 깊이는 역시 0.12 m 이다. 이 수문에 연결된 방수로의 길이 6.5 m, 수로의 폭 4.15 m, 수로벽 높이는 1.1~1.9 m이고, 여기서 분류되는 좌방향 도수로의 길이 8.5 m, 우방향 도수로의 길이 7.7 m이며, 방수로의 바닥은 큰 반석으로 깔았고 문헌에 의하면 수문석주의 기초공은 석주의 지표 아래 1.8 m 이상을 쇄물로 땀질하여 수문석주의 안정을 유지시켰다(정진형, 1982; 최영박, 1988). 두 수문석주의 규모는 거의 동일하지만 장생거수문석주의 상단의 일부가 석주 안쪽으로 돌출되어 있는 것이 다른 점이고, 두 수문석주는 본제의 제형표준단면의 상단 제외측 법

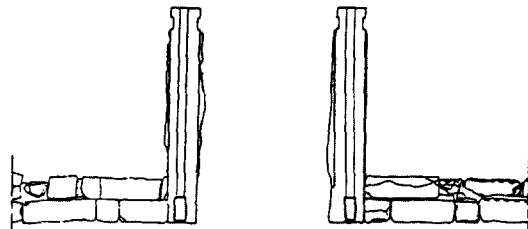


그림 4. 경장거 수문지
(벽골제 발굴조사보고서 제공)

선에 거의 일치 시킨 위치에 있다. 이와같은 경장거수문지 형상은 그림 4와 같다.

3.2 수문구조와 문비조작법

벽골제의 현존하는 장생거·경장거수문지의 수문석주의 현황에서 본 바와 같이 2개 지점의 수문시설은 저수지의 관개배수량을 조절하기 위한 목적으로 설치한 단경간의 제수문이고 인양식 문비(vertical lift gate)로서 수동식(인력) 조작을 한 것으로 판단된다(Chow, 1984; Linsley와 Franzini, 1992). 저수지의 상시만수면이 장방형 목재 문비 상단으로부터 0.5 m 아래에 있고, 동수압을 무시할 때 연직방향으로 작용하는 전수압은 다음과 같다.

$$P = w_0 H_G A \quad (17)$$

여기서 w_0 는 물의 단위중량이고 H_G 는 도심거리이며 A 는 문비의 단면적이다.

인양식 문비를 끌어 올리는 힘은 문비의 무게와 최대수심에 의한 문비의 마찰저항의 합력보다 커야 하며 그 인양력은 문비의 무게와 전수압의 합력에서 부력을 뺀 것과 같다.

$$P_0 = W + fP \quad (18)$$

여기서 P_0 는 인양력이고, W 는 문비의 무게, f 는 마찰계수 0.4이고, P 는 전수압이다.

4. 해석 및 고찰

4.1 설계홍수량과 저수량 해석

앞의 설계홍수량을 구하기 위한 방법에서 먼저, SCS 방법의 이론에 근거하여 대상유역의 AMC-II조건과 토지이용상태, 토양형별 평균유출곡선지수를 구하고, 모노노베 설계우량주상도의 분포식으로 중앙집중형 설계

우량주상도를 작성하였다. 다음으로, SCS 방법으로 지체시간과 침투유량을 구하고, 무차원 단위도로 합성된 수문곡선율을 산정하였다. 그리고 각 시간별 유효유량에 대한 홍수수문곡선을 유도하여 설계홍수량을 결정하였다. 그 결과는 표 2 및 표 3과 같다.

다음으로, 나카야스 합성단위도법의 이론에 근거하여 상승부·강하부곡선의 지속기간별 유량비를 산정하고, 단위도의 지체시간과 강우지속기간과 침투유량을 구하여, 대상유역의 합성단위도를 유도하였다. 그리고, 앞의 SCS 방법에서와 같이 모노노베 분포식의 산정 결과를 이용하여 각 시간별 설계유량에 대한 홍수수문곡선을 작성하여 설계홍수량을 결정하였고, 그 결과는 표 3과 같다.

벽골제 유역의 당시 홍수빈도를 고려하지 않은 설계홍수량은 500 m³/s 내외일 것으로 추정되고, 1415년 태종 15년에 대규모 보수공사 후인 1420년 세종 2년에 일어난 대홍수로 인하여 크게 붕괴된 사실로 미루어 볼 때 과소한 설계홍수량이거나 표 3의 대체적인 확률홍수량 860 m³/s를 고려하지 못한 근원적인 원인이 있었을 것으로 판단되며, 여기에 직접적인 원인은 5개 수문지의 단면부족과 토사제의 월류일 것으로 짐작된다.

또한, 제체의 기초지반 결함으로 인한 붕괴는 주로 축조 후, 짧은 기간 내에 일어나므로 그 가능성도 배제할 수 없으며, 토사재료를 가지고 성토공으로 축조한 본체에 차수공이 미흡한 상태로 관개용 수문시설을 3개소나 설치한 것도 문헌상의 기록과 같이 다소의 붕괴 위험 요소를 동반한 것으로 여겨진다(한건연 등, 1997; Tung과 Mays, 1981).

벽골제 저수지의 저수량은 순용수량을 몽리구역에 필요한 양만큼 용수를 적절하게 관개 배수할 수 있는 저수용적을 확보하는 것인데 당시의 저수지의 저수그릇이든 것이 현재는 대부분이 농경지로 변경되었기 때문에 평균단면적법으로 정확하게 저수 가능량을 산정하는

표 2. 토지이용상태 및 최대잠재보유수량

구분	논(km ²)	밭(km ²)	농가(km ²)	산림(km ²)	평균유출곡선 지수	최대잠재보유수량
	98.23	38.89	33.14	113.25	81.27	75.76

표 3. 벽골제의 설계홍수량

구분	SCS 방법	나카야스 방법	건설부 이리국토관리청(1993)
설계홍수량(m ³ /s)	531.80	466.80	860.0

것이 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 문헌(김제군, 1978)상의 만수면적 37 km²과 현재 지형도상의 수답 면적 34 km²을 평균하고, 저수지의 최저수위와 상시만 수위에 대한 수심차를 3 m로 할 때 저수지의 저수량은 표 4와 같다. 이것은 근사적으로 물리면적 1 ha당 순용수량 30,000 m³ 내외일 때 소규모 저수지의 만수면적과 물리면적의 비(이창구 등, 1971)를 참고 할 때 도 타당한 것으로 짐작된다.

또한, 시축 당시에는 관개배수용 제수문시설을 하여 홍수량과 용수량을 조절하였으나 문헌상의 기록과 앞의 지적인 바와 같이 3개 수문지 부근이 붕괴의 취약지점이 되고, 수차례의 반복되는 훼손과 수문시설 관리상의 애로사항을 고려 할 때 또 다른 방법의 안전하고 편리한 배수시설법을 모색한 것이 일종의 취수탑과 같은 주연통공법(柱連桶工法) 또는 수통공법(水桶工法)일 것으로 추측된다. 이 배수시설은 종래의 문비가 설치되었던 곳에 본체 높이까지의 석축을 쌓고, 목통을 세워 그 내측에 3~5개의 배출구를 내어 저수지 내의 수위변화에 따라 출구를 개폐하면서 유량을 조절케 하고, 외측에는 목통을 배수로에 횡단 설치하여 물이 분류되어 좌우측 도수로로 흐르게 하는 방법으로 제안되었으나 사용여부는 명확하지 않다. 그리고 제체의 훼손과 붕괴를 미연에 방지하기 위한 비상조치로서 본체의 일부분을 목통의 상단 배수구보다 낮게하여 홍수시 여수로의 기능을 가지도록 한 것은 축조 당시의 유통거·수여저수문지가 정상적인 여수로의 역할을 할 수 없는 상태에 있었던 것으로 추측된다.

또한, 1460년 세조 5년에는 오늘날의 하천시설기준(건설부, 1993)과 같이 큰 저수지에 3개, 중간에 2개와 작은 곳에는 1개의 수문을 설치하도록 한 것은 당시의 저수지 안전관리에서 수문시설의 부실여부에 영향을 가장 많이 받는 것으로 판단한 조치였다고 생각하며, 이 조 말엽으로 올수록 제체에 수문시설을 거의 하지 않은 것으로도 이를 반증하고 있다.

4.2 수문구조와 문비조작법 고찰

일반적으로 수문설계에서는 수문의 설치위치와 수리학적 조건, 수문의 규모와 문비수, 통수부 마루높이와

통수단면의 폭이 결정되면 수문의 형식 및 구조를 결정하게 되는데, 본 연구에서는 현존하는 두 수문석주와 본체의 표준단면을 근거로 하여 수문시설을 분석하여 보면 관개배수용의 두 수문지는 인양식 문비의 단경간 수문시설로서 석주의 간격이 4.2 m이고, 이동 가능한 양측 홈통의 깊이가 0.22 m일 때 문비의 폭은 4.42 m이며, 문비의 높이 결정에서 벽골제 저수지의 설계홍수량 500 m³/sec 내외에 대한 여유고 1.0 m이내로 할 때, 본체의 높이 4.3 m에 대한 여유고를 0.9 m로 하고, 저수지 바닥에서 문비의 확대부까지와 받침높이를 더하여 0.9 m라 할 때 나머지 2.5 m와 상시만수위보다 0.5 m정도 문비의 여유높이를 감안하면, 결론적으로 문비의 높이는 3 m로서 문비의 단면은 4.42×3 m이고, 이것은 Smith의 경험치(권오현, 1994; Davis와 Sorensen, 1969)를 만족시키고 있다. 이러한 수문구조는 양측 수문석주 상단부의 오목부에 폭 0.3 m, 길이 5.2 m이상의 지지보를 두 석주의 양측면에 겹으로 고정시켜서 한개의 단순지지보로 결속하여 목재문비를 끌어 올리고 내리는 고정 도르래 장치(Davis와 Sorensen, 1969)를 한 것으로 추정된다. 또한 문비의 수밀성을 높이고 구조의 일체감을 위해서 10개 내외의 각락을 연환철삭(連環鐵索)한 목재문비로써 그 결과는 표 4 및 그림 5와 같다.

문비를 도르래 장치로 끌어 올려서 어떻게 고정시켰는지는 아직 알 수가 없으나, 단순하게 생각하여 양측에 충분한 무게를 가진 고정지지석을 두고 이에 연결시켜 고정하였을지도 모른다. 또한 문비의 확대부는 문비 받침부로서 문비자중에서 전달되는 연직하중을 안전하게 지지하는 동시에 문비의 수밀구조로서 틈새 누수를 최소화하고 문비를 강하할 때 충격력을 줄이기 위해 설치한 것으로 추측된다.

그리고 저수지의 관개용수를 방류 할 경우 벼농사에 냉해를 주지 않는 적절한 수온의 등온상태와 풍부한 용존산소량이 포함되고 DO균형을 적절하게 이룬 방류 수위 3 m 내외인 것도 저수지의 좋은 수답환경을 가지게 한 결과라고 생각된다.

그러나, 수문석주의 현황에서 3개 측면에 나 있는 3개 구멍과 홈쪽 30 cm 지점에 뚫려 있는 1개 구멍의

표 4. 저수지규모 및 수문시설물의 결과치

구분	만수면적(km ²)	저수량(m ³)	물리면적(km ²)	전수압(ton)	문비자중(ton)	인양력(ton)
	37.0	106.5 x 106	35.0	13.80	1.60	7.12

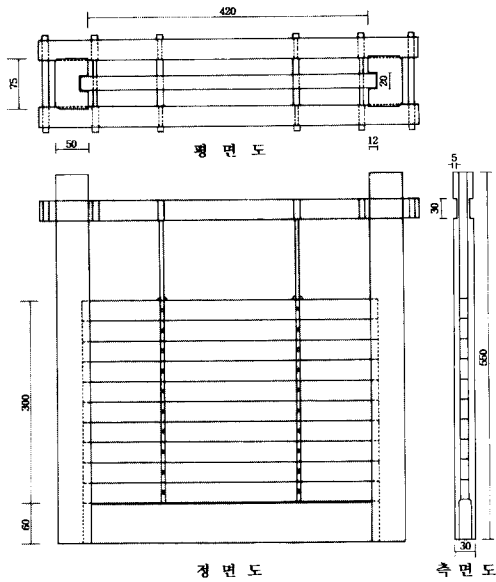


그림 5. 관개배수용 수문구조와 문비시설

용도는 알 수 없었고, 중심거수문지의 위치는 용골리 부근으로 추측되고 있지만 확인하지 못하였다.

4.3 홍수조절용 수문지의 위치 고찰

벽골제 저수지의 홍수시 여수로로 사용한 수여거·유통거수문지는 현존하지 않고 있지만 벽골제의 토목·수공학적인 연구에서 빼 놓을 수 없는 중요 수공시설물이다.

신증 동국여지승람과 벽골제사 등의 문헌적 근거(민족문화추진회, 1978; 정진형, 1982)와 현지 답사를 통한 결과에서 먼저, 수여거수문지의 위치는 벽골제 북단 신태2교에서 1000 m 떨어진 자연 구릉지의 오목부를 가진 수월리 입구에 수담의 폭 15 m 정도로 활모양으로 굽어진 수로의 형상을 이루고 있는 지점이 수여거 여수로가 있었던 곳으로 판단된다. 또한, 인접한 수담 바닥에서 수문석주의 파손된 일부와 방수로 바닥의 반석들이 방치되어 있었던 것으로도 이를 입증하고 있다. 그리고, 수여거수문지의 여수로가 홍수시 물을 월류시켰으므로 당시에 붙여진 수월리(水越里) 또는 '무네미'라는 마을 이름이 현재의 부락명인 수월리(水月里)로 변경되었을 가능성도 크다.

다음으로, 유통거수문지의 위치는 문헌적 근거(정진형, 1982)에 의하면 인의현(仁義縣)의 서쪽으로 물이 흘러 들었다고 하는데 현재 지명으로는 태인 방면일 것으로 추측 되지만 확인되지 않았다. 본 연구자는 수

차례의 답사 결과에서 벽골제 남단 명금산에서 400 m 떨어진 상서리 입구 우측에서 여수로의 지형적 조건을 갖추고 있는 유통거수문지로 판단되는 지점을 발견하였다. 앞의 문헌 기록(최영박, 1988)에서와 같이 두 석주 사이에 느티나무 판으로 다리를 놓아서 왕래할 수 있는 여수로의 폭인 10 m 정도의 거리를 가지고 있고, 좌우측 언덕배기는 수담바닥에서 2~3 m 높이에 있다. 또한, 통상적으로 저수지의 여수로는 본체의 양단으로부터 인접한 위치에 설치하는 경우가 많고, 앞의 수여거수문지와 같은 용도로 설치한 여수로이므로 유통거수문지도 거의 비슷한 위치와 지형적 조건을 가진 곳에 설치 하였을 것으로 추측한다. 두 수문지의 홍수터 지점과 본체의 둑마루에 대한 수준측량 결과에서 2 m 내외의 표고차가 있어서 현재로서는 월류가 어려울 것으로 짐작되지만 1600여년 동안에 자연·인위적인 지형변형의 가능성을 배제 할 수 없으며, 두 수문지가 홍수시 여수로와 잉여유량 이용을 동시에 가능케 하였는지는 알 수 없었다. 본체를 유역의 병목지점에 축조한 것과 같이 두 수문지의 위치도 여수로의 지형적 조건



사진 1. 수여거 수문지의 여수로

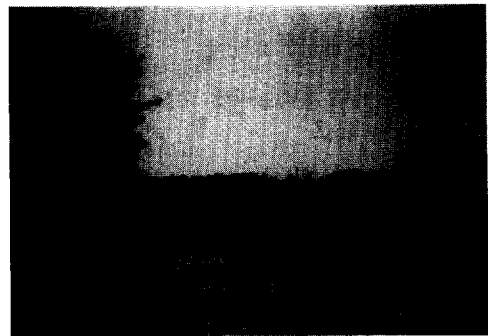


사진 2. 유통거 수문지의 여수로

을 가지고 있는 지점을 잘 이용 할 줄 아는 토목공학적인 식견이 높았던 것으로 판단된다. 이와같은 수여거·유통거 수문지의 위치는 사진 1, 2와 같다.

4.4 축조 시공상의 고찰

벽골제 저수지의 본체를 시축한 이후 3차례의 증축·보수공사를 한 관계 문헌상의 기록과 벽골제 발굴조사보고서(김제군, 1978; 최영박, 1988) 그리고 본 연구자의 답사결과에서 먼저, 토목공사의 규모면에서 벽골제 표준단면도와 같은 성토공사의 본체길이 3240 m, 성토의 총체적 164,253 m³을 축조하는데 소요된 총동원 인원이 322,500명정도로 추정되고, 5개소 수문시설공사와 공사에 동원된 인력을 관리하는데 소요된 기술·관리인력을 총동원된 인력의 5 %로 계산하여도 16,125명이고, 여기에 포함되지 않은 축력(畜力)도 상당히 많았을 것이다. 이는 이미 다른 문헌들에서도 언급한 바와 같이 벽골제 저수지는 우리나라 고대 농경사회의 대규모 농업토목사업으로 건설된 것이 확실하다.

시공기술면에서 앞의 벽골제 유역의 수계 현황에서 언급한 바와 같이 벽골제 유역의 본류는 원평천으로서 저수량 확보에 수원이 되는 주된 하천이지만 여기에 인접한 동진강의 한 작은 지류인 연포천은 저수지의 저수용량을 증대 시키는데는 그 역할이 아주 미미한 지류에 불과하지만 시공상 지장이 없는 원만한 배수를 위해서 평시와 홍수시의 원평천을 통과하는 하천용량을 우회 배수로로 연포천에 유입시키고, 정상적인 본체의 축조공사를 계속적으로 진행한 현장기술자의 탁월한 시공기술상의 면모를 짐작할 수 있다. 또한, 본체의 복단 제내측의 표고가 남단 제내측의 표고보다 1 m정도 낮은 상태에서 독마루 표고를 동일하게 본체 길이 3,240 m를 거의 일직선으로 축조한 것도 매우 정밀한 공사측량 기술이 있었다는 증거가 된다.

시축 공사 후 3차례에 걸쳐 증축·보수공사를 하였는데 발굴 조사(김제군, 1978)에 의하면 본체의 성토층이 크게는 3층으로 구분되어 있다고 하지만 어떤 축조층이 어느 보수공사 때에 성토한 것인지를 규명하려면 제체에 대한 본격적인 발굴 조사를 실시하기 전에는 그 전모를 쉽게 파악하기 어렵다고 생각한다.

벽골제 축조지점은 기초지반이 연약지반이거나 지지력이 낮은 상태에서 성토의 불안정과 침하가 우려되었을 것으로 추측되고, 성토재료의 인력·축력운반과 운반거리 관계를 고려한다면 시축 공사기간이 길었고, 대량의 토사운반이 곤란하므로 성토 두께는 비교적 얇고

많은 박층으로 축조되어 작업여건상 자연스럽게 다짐이 이루어 졌을 것으로 추측되지만 앞의 발굴조사 결과와 수차례의 훼손과 붕괴로 보아 제체 내에 불투수의 중심점토층은 없을 것으로 짐작된다.

또한, 문헌자료(최영박, 1988)의 기록에 의하면 1415년 태종 15년 대대적인 보수공사에 군민 10,000명과 간사자 300명이 동원되었는데 그 공사기록에서는 제체에 나무올타리를 5겹으로 세워서 사이마다 매우고 제체 내외측에는 버들나무를 2줄로 심고 기초지반을 견고케 하였다고 한다.

1418년 태종18년에도 수문지 일대를 견고하게 하는 보수공사를 하였는데 제방의 경사면에 굵은나무를 시수 횡결(斜堅橫結)하여 고정시키고, 제방 양측 사면 하단 부에는 낙석과 소나무 가지들을 쌓아서 물이 흘러 넘쳐도 수문지 일대가 훼손되지 않게 하였다고 한다. 그리고, 본체의 상당한 부분이 훼손된 이후 저수지 제내측에 퇴적된 유사와 제체의 보수공사 때 굴착한 연약토사와 잔토를 저수지 밖으로 완전히 운반하지 않고, 흙덤이를 제내측에 그대로 방치하여 저수용량을 감소시키고, 홍수시 본체 위로 물이 월류하여 제체의 안전을 위협하는 요인이 되기도 하였다. 이러한 제체의 붕괴를 방지하기 위한 일념으로 수 차례의 보수공사가 실시되었지만 제천 의림지(정인규, 1982)의 점토와 대경목을 사용하여 내심벽 구조로 축조한 것과 비교한다면 사면보호의 시공법은 아주 원시적이고, 시공기술의 저급함을 짐작케 한다. 또한 공사기간 중 벽골제의 인근 주민들은 당시의 상황에서 오히려 저수지의 기능이 더욱 약화되거나 상실되어 저수지 내측의 담수지역이 농경지화 되어 자기들이 직접적으로 경작하고자하는 마음이 남아 있었을 것으로도 짐작 할 수 있다.

5. 결 론

벽골제 저수지에 대한 수공학적 연구에서 대상유역의 지형학적 특성과 역사적 문헌 자료에 근거한 현지 답사와 측량과 수공학적 방법으로 축조 당시의 설계홍수량과 저수량을 구하여, 벽골제의 규모를 추정하고, 수문지의 문비 조작방법과 위치를 추적하여 본체의 축조 계획, 시공 기술상에 대한 결론은 다음과 같다.

(1) 1,600여년 전에 축조한 벽골제 저수지의 전체적인 규모와 시설은 우리나라 고대 농경사회의 대규모 토목사업으로 건설하였고, 대체적으로 시공기술은 우수하였다.

특히, 본체의 계속적인 성토공사를 위해서 원평천 본

류를 배수로로 우회하여 연포천에 유입시킨 현장책임기술자의 시공대책과 장대한 독마루의 표고를 일치시킨 공시측량기술은 매우 탁월하였다. 그러나 문헌상의 기록과 발굴조사의 결과에서 시축 이후 수 차례의 보수공사에서 보는 바와 같이 홍수 빈도를 고려하지 못한 설계홍수량과 연약한 기초지반에 토사재료로 불투수층이 없는 심벽축조공사, 그리고, 3개의 관개배수용 수문지의 차수공이 부실한 상태로 수문시설을 한 것이 근본적인 원인이 되고, 소극적인 공사 관리체제와 졸속한 보수공사방법등이 추가되어 붕괴, 훼손, 방치되고 결국에는 저수지 기능을 상실하게 되었다.

(2) 저수지의 중요 수공시설물인 장생거, 경장거수문지는 본제상에 설치한 관개배수용 수문시설물로서 단경간의 수문석주와 인양식의 목재문비 구조이고, 그 목재문비는 고정 도르레 장치를 이용하여 수동식(인력)으로 조작하였다. 또한, 본체의 양단에 시설한 수여거, 유통거수문지는 홍수시 제체의 월류와 붕괴를 방지하기 위한 여수로 시설로서 수로단면을 통한 월류와 통행로로 이용한 것으로 판단된다.

특히, 두 수문지는 여수로의 입지 조건을 갖추고 있는 지형특성을 잘 이용 할 줄 아는 토목공학적인 식견이 높았던 것으로 보인다.

그리고, 수여거수문지의 위치는 벽골제 복단 수월리 입구가 확실하고, 유통거수문지의 위치는 본체의 남단 상서리 우측으로 추정된다.

본 연구자의 벽골제의 수공학적 연구가 계기가 되어 본격적인 발굴조사와 활발한 연구가 계속되고, 앞으로 대대적인 벽골제 복원사업이 이루어질 때 토목·수공학적 입장에서 다소나마 도움이 되기를 기대한다.

감사의 글

본 연구자는 1997년도 전주공업대학 산업기술연구소의 연구비 지원과 벽골제 발굴 조사단의 일원이었던 공주교육대학교 박물관장 유원재 교수의 자문에 대하여 감사드립니다.

참고 문헌

건설부 (1980). 한국하천일람.
 건설부 (1993). 하천시설기준. pp. 944-963.
 건설부 이리국토관리청 (1993). 동진강·만경강 하천 정비기본계획(보완). pp. 21-64.

권오현 (1994). 수자원공학. 새론, p. 280.
 기상청 (1998). 한국강수량자료. 제4권, pp. 100-250.
 김의원 (1983). “우리나라 수리기술 변천사” 한국수문학회지, 한국수문학회. 제20권. 제4호. pp. 209-212.
 김제군 (1978). “벽골제 발굴조사 보고서.” 김제군사, 호남문화사, pp. 778-791.
 민족문화추진회 (1978). 국역 신증 동국여지승람. 제4권, pp. 428-431.
 윤용남 (1996). 공업수문학. 청문각.
 이창규, 유한열, 고재균 (1971). “호남지방의 저수지의 매물상황과 저수량에 관한 조사연구.” 한국농공학회지, 한국농공학회. 제13권. 제2호. pp. 38-51.
 정인구 (1982). “천여년 전의 댐 축제기술과 용두산의 임상변천.” 한국정원학회지, 한국정원학회. 창간호. pp. 63-71.
 정진형 (1982). 벽골제사. 대홍출판사. pp. 101~158.
 최영박 (1988). “한국 수공기술의 발달.” 한국수문학회지, 한국수자원학회. 제21권. 제11호. pp. 51-58.
 한건연, 이종석, 김상호 (1997). “댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발.” 한국수자원학회지, 한국수자원학회. 제30권. 제6호. pp. 680-688.
 Chow, T.V. (1984). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill. pp. 307-324.
 Davis, C.V. and Sorensen, K.E. (Eds) (1969). *Handbook of applied hydraulics*. 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, pp. 419-463.
 Linsley, R.K. and Franzini, J.B. (1992). *Water resources engineering*. 4th Edition., McGraw-Hill, pp. 241-283.
 Tung, Y.K. and Mays, L.W. (1981) “Risk models for flood Levee design.” *Water Resources Research*. Vol.17, No. 4, pp. 833-841.
 Viessman, W. Jr., Knapp, J.W., Harbaugh, T.E. and Lewis, G.L. (1987). *Introduction to Hydrology*. 3rd Edition, Intext Educational Publishers, New York, pp. 505-520.
 (논문번호:98-028/접수:98.05.01/심사완료:98.06.01)