

영산강 하구둑 구조개선사업에 따른 배수갑문 주변 수리현상 검토 - 수리모형실험에 의한 -

김 하 집

(khj@ekr.or.kr)

농어촌연구원 책임연구원

박 병 준

(jiwhaja1@ekr.or.kr)

농어촌연구원

김 흥 식

(khs85@ekr.or.kr)

농어촌연구원

■ 서 론

▶ 사업개요

영산강 유역은 한반도 남서부 전라남·북도에 위치하며 영산강 하구둑은 준공당시 내수위와 EL.(+)1.39m였으나 1998년 “영산강하천기본계획(1998, 건설교통부)”에서 영산호 주변 방조제 설치 및 상류 유입토사의 퇴적에 따른 내용적 감소 등으로 계획홍수위를 EL.(+)1.64m로 상향조정하였다.

2004년 8월 영산호 내수위를 관측한 결과 EL.(+)2.05m로 계획홍수위를 0.41m 초과하였으며 현재 상태의 내수위를 검토한 결과 EL.(+)2.30m로 준공 당시와 비교하여 0.91m가 증가되었다. 홍수량의 경우 “영산강유역종합치수계획(2005, 건설교통부)”에

따르면 현재의 기본홍수량이 8,310 m^3/s 로 “영산강하천기본계획(1998, 건설교통부)”의 계획홍수량인 6,720 m^3/s 보다 1,590 m^3/s 증가된 것으로 검토되었으며, 대조평균만조위의 경우에도 EL.(+)1.39m에서 EL.(+)1.89m로 증가된 것으로 나타났다.

따라서 영산강 유역의 증가된 홍수량 및 외수위 상승 등의 영향으로 초과된 영산호 내수위를 계획홍수위 EL.(+)1.64m 이하로 하강시키기 위하여 연락수로를 통한 홍수량분담과 배수갑문 증설이 요구되었다.

본 사업은 영산강 하구둑 구조개선사업인 영산호 배수갑문 확장, 영암호 배수갑문확장, 연락수로 및 제수문 확장 등 3개 방안 중 영산호 배수갑문 확장 계획에 따른 배수갑문의 최적규모 및 홍수조절능력의 검토를 위한 실시설계에 해당한다.

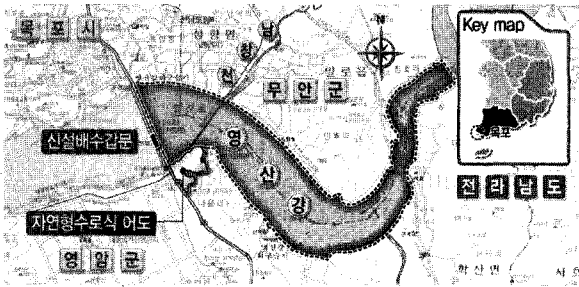


그림 1. 영산강 하구둑 구조개선사업 기본 계획도

▶ 과업목적

영산강 하구둑 수리모형실험은 설계안을 근거로 하여, 배수갑문을 기준으로 호측과 해측 등 포함한 영역을 상사에 맞추어 축소 물리모형을 제작하고, 설계조건과 동일하게 주수를 했을 때 발생하는 복잡한 수리현상을 직접 관찰하고 계측하여, 정량적이고 정성적인 결과를 도출함으로 수학적으로 규명하기 어려운 부분에서의 수리특성을 밝히고 가시화함으로써 경제적이고 안전한 구조물 설계를 위한 기초자료 제공에 있다.

■ 배경이론

▶ 수리모형실험

수리모형실험이란 실물과 상사를 맞춘 모형에 물을 흘려, 실물과 같은 수리현상을 얻어 목적에 맞는 검사를 행하기 위한 연구기법이다. 바꿔 말하면 현상을 지배하는 기초방정식을 모형에서 흐름에 의해 해석하는 것이다.

특히, 자연현상은 복잡하기 때문에 기술경험이 상당수 축적되었다 하더라도 예상치 못한 현상에 직면하게 되는 경우가 발생하게 되고, 최종적으로 계획된 수리구조물이 제 역할을 할 수 있는 지에 대한 사전확인을 함으로써 경제적이고, 안전하며,

환경적인 수리구조물 설계에 기여할 수 있는 점이 바로 수리모형실험이 가지는 의의라 할 수 있다.

이와 같이 수리모형실험은 기초방정식을 모형의 운동으로 풀이하고, 그 근사해를 얻는 것이다. 그 근사도는 상사율의 적합도, 조도를 포함한 모형의 제작 정밀도, 수리량의 측정 정밀도를 향상시키는 것에 달려 있다고 말할 수 있으며, 그러한 노력의 과정이 모형실험에서의 공학상의 문제점으로 떠오르고 있고, 현재 많은 연구가 진행 중에 있다.

수공학 분야 이외에도 많은 분야에서 모형실험이 이루어지고 있는데, 펌프 등의 유체기계, 선박과 자동차 혹은 항공기 등과 관련된 유체운동, 인체의 혈류와 그외 생물에 관계된 유체문제, 기상현상 등에 관한 흐름 등의 모형실험 등이 있다.

▶ 상사법칙의 적용

모형과 원형은 기하학적 상사성, 운동학적 상사성, 동력학적 상사성을 만족시켜야 한다. 기하학적 상사성은 원형과 모형의 대응점에서의 길이의 비가 일정해야 함을 의미하며, 운동학적 상사성은 원형과 모형의 대응점에서의 속도와 가속도의 비가 일정해야 함을 의미한다. 동력학적 상사성은 원형과 모형의 대응점에서의 작용하는 힘의 비가 일정해야 함을 의미하는데, 운동학적 상사성은 동력학적 상사성이 만족되면 자동으로 만족된다. 그러나 모형 실험에서는 현실적으로 관련된 모든 힘을 고려한 엄밀한 의미에서의 동력학적 상사성을 만족시키는 것은 불가능하다. 따라서 가장 지배적인 힘에 대한 상사만을 고려하게 되는데, 실물에서의 현상이 중력이 지배적일 경우에는 프루드(Froude) 상사, 점성력이 지배적일 경우에는 레이놀즈(Reynolds) 상사, 표면장력이 지배적일 경우에는 베버(Weber) 상사, 탄성력이 지배적일 경우에는 마흐(Mach-Cauchy) 상사를 모형실험에 적용한다.

표 1. Froude 상사법칙에 따른 원형과 모형의 제량비

변수	관계식	정상축척	왜곡축척($G=X_r/Y_r$)
길이	$L = \text{길이}$	$L_r = X_r = Y_r$	$L_{rx} = X_r, L_{ry} = Y_r$
경사	$S_r = \frac{\text{수평길이}}{\text{수직길이}}$	$S_r = \frac{L_r}{L_r} = 1$	$S_r = \frac{Y_r}{X_r} = \frac{1}{G}$
속도	$U_r = \frac{\text{길이}}{\text{시간}}$	$U_r = L_r^{1/2}$	$U_r = Y_r^{1/2} = \left(\frac{X_r}{G}\right)^{1/2}$
시간	$t_r = \frac{\text{길이}}{\text{속도}}$	$t_r = \frac{L_r}{U_r} = L_r^{1/2}$	$t_{X_r} = \frac{X_r}{Y_r^{1/2}} = (GX_r)^{1/2}$ $t_{Y_r} = \frac{Y_r}{Y_r^{1/2}} = Y_r^{1/2}$
가속도	$a_r = \frac{\text{속도}}{\text{시간}}$	$a_r = \frac{U_r}{t_r} = \frac{L_r^{1/2}}{L_r^{1/2}} = 1$	$a_{X_r} = \frac{U_r}{t_{X_r}} = \frac{1}{G} \quad a_{Y_r} = \frac{U_r}{t_{Y_r}} = 1$
유량	$Q_r = \text{속도} \times \text{면적}$	$Q_r = U_r = L_r^{5/2}$	$Q_{H_r} = U_r Y_r X_r = G Y_r^{5/2}$ $Q_{V_r} = U_r X_r Y_r = G^2 Y_r^{5/2}$
힘	$F = \text{질량} \times \text{가속도}$	$F_r = \rho_r L_r^2 L_r = L_r^3$	$F_{H_r} = a_{H_r} Y_r X_r^2 = Y_r^2 X_r$ $F_{V_r} = a_{V_r} Y_r X_r^2 = Y_r X_r^2$
압력	$p = \frac{\text{힘}}{\text{면적}}$	$p_r = \frac{\rho_r L_r^2 L_r}{L_r L_r} = L_r$	$p_{H_r} = Y_r^2 \frac{X_r}{Y_r X_r} = Y_r$ $p_{V_r} = \frac{Y_r X_r^2}{X_r^2} = Y_r$
Reynolds 수	$R_e = U \frac{L}{\nu}$	$R_{e_r} = L_r^2 L_r = L_r^{3/2}$	$R_{e_r} = Y_r^{1/2} Y_r = Y_r^{3/2} = \frac{X_r^{3/2}}{G}$

일반적인 개수로의 수류에 대해서는 중력이 흐름을 지배하고, 흐름상태가 난류이면서 모형과 원형간 기하학적, 운동학적, 동력학적 상사가 요구되므로 본 과업에서는 프루드 상사법칙을 적용하였으며, 원형과 모형간의 제량비는 표 1과 같다.

▶ 축척의 결정

모형의 축척은 실험에서 관찰하고자 하는 대상과 실험조건, 상사법칙의 효율성을 보장할 수 있는 규모 등을 종합적으로 고려하여 결정한다. 상사법칙이란

표 2. 모형 치수의 제한

구조물	최소값(mm)	비고
밸브, 수문, 관거의 직경 또는 폭	100	· 관거와 밸브에서 난류흐름 확보 · 방류모형(Outlet Model)에도 적용
수로구조물(Canal Structure)의 개수로부 바닥저면	100	· 난류흐름 확보
월류부 수심	75	· 점성과 표면장력의 영향 배제
모형 밸브와 수문	150	

원형에서 흐름을 지배하는 지배력의 영향을 모형에서 그대로 적용시키는 것이므로 모형에서도 원형과 같은 지배력이 흐름을 지배해야 한다. 그러나 원형에서는 중력의 지배를 받는 흐름상태가 모형의 축척이 과다한 경우 수심이 너무 작아져서 점성력의 지배를 무시할 수 없게 되는 경우도 있다. 이러한 바람직하지 못한 축척효과(Scale Effect)를 배제하기 위해서는 축척을 결정할 때 원형과 모형에서의 흐름상태가 같은 지배력의 상관관계 하에 있도록 다음과 같이 모형에서 일정치수를 보장해 줄 필요가 있다.

모형은 가능한 대축척으로 제작하는 것이 바람직하지만 현실적으로 요구되는 축척정도, 실험설비 규모, 현상의 상사성 등을 고려하게 되며, 이를 근거로 본 과업에서는 수직 및 연직 1/80(정상모형)의 축척을 적용하게 되었다.

조건은 호측의 경우 유량 혹은 수위를 적용하며, 하류의 경우 수위를 적용하게 된다.

▶ 제작과정 및 기법

원형에서 배수갑문 구조물, 문비 등의 인공구조물은 콘크리트와 철재로 만들어지므로 축소 모형에서는 보다 매끄럽고 탄성이 강한 재료를 요구하게 된다. 따라서 이 부분의 모형재료는 아크릴을 사용하여 제작하였고, 목재 등과 같이 물을 흡수함으로써 생기는 체적변화가 없도록 하였다.

모형의 경계외벽은 8" 중공블럭 3겹을 막힌줄눈쌓기하고 모든 줄눈에 몰탈 속채움 후 내·외벽 미장을 하였다. 하상은 고저측량을 통해 띠철근으로 고정하고 모래를 채운 후 물다짐을 완료한 다음 10cm의 시멘트 몰탈로 미장 후 양생하였으며, 아크릴로

■ 모형제작

▶ 재현범위

모형의 범위는 영산강 방조제를 근간으로 하여 종방향으로는 배수갑문 상류 1.5km와 하류 2.5km를 범위로 하였고, 방조제 노선방향으로는 기설 및 신설 배수갑문을 포함하여 1.0km까지를 재현하였다. 경제

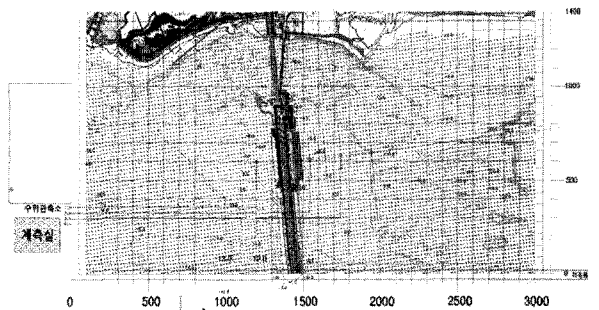


그림 2. 모형제작 평면도

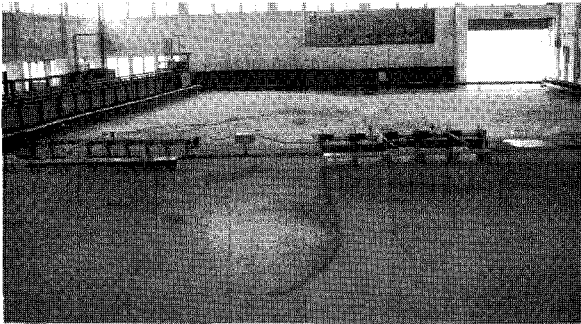


그림 3. 완성된 수리모형의 전경

제작된 모형과 연결되는 부분은 충전재를 사용하여 틈새를 채우고, 우레탄 도장을 하여 누수를 막았다.

모형의 상·하류 개방경계 밖으로는 충분한 크기의 배출구가 설치된 정수지를 마련하였으며, 상류 정수지에는 유입수의 유속과 유향이 편향되지 않고, 수면요동이 소파될 수 있도록 중공블럭을 횡방향으로 쌓은 후 망을 씌웠다.

▶ 시설

영산강 하구둑 배수갑문 수리모형실험을 축척 1/80으로 수행하기 위해서는 순환유량 0.30m³/s이 안정적으로 급배수 될 수 있는 설비를 갖추고 있어야 한다. 따라서 본 과업은 경기도 안산시에 소재한 한국농어촌공사 농어촌연구원 수리시험연구팀의 댐·수로공시험동에서 실시되었으며, 직경 \varnothing 500mm의 급수관로 1열, 양수능 0.13m³/s의 양·흡입 펌프 4기가 사용되었다. 또한, 상·하류의 유량과 수위조절을 통하여 경계조건을 맞추기 위한 미세조절 밸브와 가동필요로 한다.

▶ 계측장비

수리모형실험 결과의 정확도 확보는 수래량의 측정 정밀도를 향상 시키는 것에 달려있다. 본 과업에서는 수리모형의 경계조건을 제어하고, 물리량을

실시간으로 모니터링 할 수 있도록 센서와 PC를 배선하고 프로그래밍을 하여 별도의 시스템을 구축함으로써 계측의 정확도 확보에 심혈을 기울였다. 계측장비로부터 출력되는 애널로그 신호는 시계열로 모니터링 및 저장이 되는데, 진폭이 일정한 경우에만 평균값으로 취득하였으며, 사용된 계측장비의 목록은 다음과 같다.

- 가. 전자기유량계 : 정밀도 $\pm 0.5\%$
- 나. 초음파 미세거리 측정센서 : 정밀도 $\pm 0.5\text{mm}$, 3~30cm까지 측정가능
- 다. 2차원 전자기 유속계 : 정밀도 $\pm 1\%$, 250cm/s까지 측정가능
- 라. IP 카메라 : 30만화소, 30fps
- 마. 디지털 포인트 게이지 : 정밀도 $\pm 0.1\text{mm}$
- 바. 계측용 이동대차
- 사. 디지털 카메라 및 캡코더 : 화각 24mm, AVCHD 포맷 지원

■ 검토항목

▶ 배수갑문 통수능

간척사업에 있어 가장 중요한 시설은 외곽 방조제 공사와 배수갑문으로서 배수갑문은 외해로부터 조수를 차단하고, 강우 시 유역에서 유출되는 홍수를 배제시켜 침수로부터 피해를 방지하는 역할을 한다. 또한, 배수갑문은 계획홍수와 상시배수를 안전하게 처리할 수 있어야 하며, 계획홍수를 초과하는 경우도 제 기능을 발휘할 수 있어야 한다. 따라서 수리학적 측면에서 배수량 추정공식 및 그 유량계수가 결정되었다 하더라도 이를 검토해 볼 필요성이 있으며, 배수량 및 유량계수는 현장에서 실측하기가 어려우므로 수리모형실험을 통하여 기존에 적용된 배제유량과 유량계수를 비교·검토하여 평시

및 홍수시에 적절하게 홍수량을 배제시킬 수 있는 지에 대한 배수갑문의 통수능 검토가 중요하다.

▶ 배수갑문 주변 수리현상

영산강 하구둑 배수갑문을 확장은 호측 및 주변 해역의 수리현상 변화를 초래하므로, 영산강 하구둑 구조개선사업 전·후에 대한 유황을 관찰하고, 물리량 등을 계측하고 분석하여, 그에 따른 비교·검증이 필요하다.

■ 실험결과

▶ 배수갑문 통수능

기설 배수갑문과 신설 배수갑문의 방류 분담비를 찾아내기 위하여 기설 및 신설 배수갑문의 완전개폐를 번갈아 시도하고, 방류량을 측정하였다. 그 결과 호측의 수위가 EL.(+)1.64m(홍수위)이고, 해측의 수위가 약최저저조위 EL.(-)2.43m인 경우 기설 배수갑문과 신설 배수갑문의 방류량은 13,052m³/s와 13,336m³/s인 것으로 나타나, 각 수문별 분담 비율은 49.46:50.54 정도로 거의 동등한 비율을 보여주었다.

신설 배수갑문의 수문 운영조건에 따른 방류능력

검토는 총 5개의 수문에 대해 완전개방시 상류 수위별 방류량과 부분 개도별 방류능력, 각각의 문비조합에 의해서 운영되는 조건들에 대하여 실험을 진행하여 수위와 방류량간의 관계를 산출하였다.

가. 1련 개방

수문 운영계획을 위하여 신설 배수갑문의 문비를 조합하여 상·하류 수위별 방류량을 측정 하였다. 측정은 5련의 수문 중 순차적으로 1련만 개방하여 방류량을 측정하였으며 수문별 방류량은 1,162m³/s에서 1,185m³/s을 나타내었다.

나. 2련 개방

5련의 수문을 2련씩 조합하여 방류하였을 경우 방류량을 측정한 결과 방류량은 1련개방시 각각 방류량의 합계보다 작게 나타났다. 수문1과 수문 3을 개방하고 방류 하였을 경우 중앙부인 No.2 수문 전면 에 와류가 발생하였으며 No.2와 No.4 개방의 경우에는 No.3 수문 전면에서 와류가 발생하였다.

다. 3련, 4련 개방

5련의 수문 중 3련 및 4련을 조합하여 방류할 방류량은 3련의 경우 2,017.1m³/s 4련 조합의 경우 2,012.6m³/s의 방류량을 나타내었으며 개방하지 않은 수문에 와류를 형성하였다.

▶ 배수갑문 주변 수리현상

가. 기설 배수갑문

기설 배수갑문 단독 방류시 내의 수위조건에 따른 유속은 배수갑문 통과 직전 좌안부에서 6.73m/s의 유속이 측정되었으나, 이는 삼호대교 교각부가 위치한 지점으로 교각에 의한 단수축 영향으로 지점 유속이 증가된 것으로 판단된다. 배수갑문 통과 후의 최대유속은 해측과 호측 수위차가 최대인 홍수위

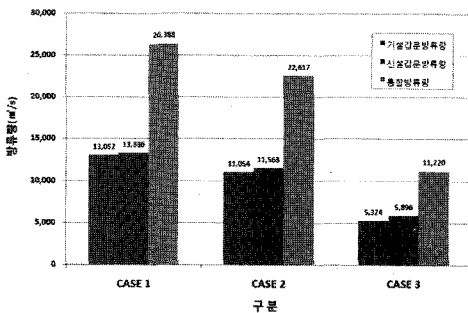


그림 4. 배수갑문별 방류량 비교



그림 5. 돌출부 외류



그림 6. 제방부

(EL.+1.64m)와 외측 약최저저조위(EL.(-)2.43m)를 유지하였을 경우, 배수갑문 우안 No.8 수문의 하류부에서 나타났으며 유속은 6.59m/s로 측정되었다.

나. 신설 배수갑문

신설 배수갑문 단독 방류시 내·외 수위조건에 따른 유속은 배수갑문 통과 후 좌안부 수문 No.9 하류부에서 8.71%의 유속이 측정되었으며, 배수갑문을 통과한 고속의 난류가 경사면과 충돌 후 발생한 유속으로 판단된다. 배수갑문 통과 후의 하류부에서의 유속은 해측과 호측 수위차가 최대인 홍수위(EL.+1.64m)와 외측 약최저저조위(EL.(-)2.43m)를 유지하였을 경우 중앙부인 No. 11 및 No. 12 사이에서 나타났으며 유속은 7.73%로 측정되었다.

기설 배수갑문 방류시 유황은 상류부에서 좌편향된 흐름이 나타났으나 신설 배수갑문의 경우 중앙부를

통과하는 유황을 나타내었으며 유선 또한 직선화된 경향을 나타내었다. 배수갑문 통과 후 좌안에 위치한 돌출부의 영향으로 좌안부에 일부 도수현상이 발생하였으나 도수거리가 짧고 도수 후의 수심이 낮아 큰 문제는 없을 것으로 판단된다. 배수갑문 전면부 흐름이 전체 흐름을 주도하였으며, 배수갑문 좌안(신설 배수갑문) 및 우안방향으로 대형 와류를 형성하였으나, 유속이 작아 양안에 미치는 영향이 미비할 것으로 판단된다.

신설 배수갑문 확장으로 인한 제2삼호대교 건설로 교각 8개소와 교대2개소가 계획되어 있으며 신설 배수갑문 단독 방류시 구조물 통과부의 유황은 좌·우안 접근부의 경우 No.9 및 No.13 수문에 단수축이 관측되었다. 단수축의 발생은 통수단면을 감소시켜 통수량을 저하시키며 제방부에 세굴을 발생시킬 수 있으므로 접근부 제방에 대한 사면 보호

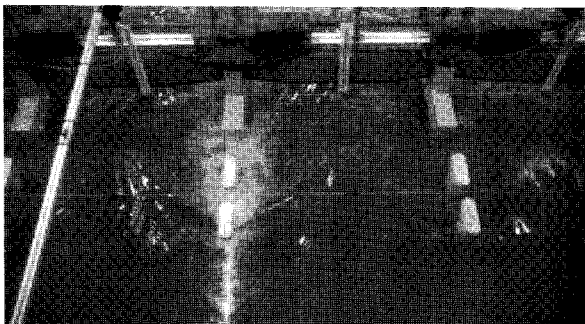


그림 7. 제2삼호대교 교각



그림 8. 영산강 하구둑 배수갑문 수리모형실험 전경

시설이나 각도의 조정이 필요할 것으로 판단된다.

제2삼호대교의 교각은 배수갑문의 교각과 동일한 위치에 배치되어 있어 전체적으로 삼각형의 흐름을 유도하였다. 교각으로 인하여 흐름축소 현상이 발생하였으나 교각설치 방향이나 위치 변동시 현재 계획보다 수리적으로 불리하므로 교각의 배치는 현 상태가 양호한 것으로 판단된다.

한편, 정수지 설치에 따른 수위변동은 발생치 않았으며 정수지가 위치한 측선에서의 유속 및 유황 변화도 관측되지 않았다. 이는 신설 배수갑문의 sill 표고가 EL.(-)9.35m로 하류부 약최저저조위 EL.(-)2.43m와는 6.92m의 수위차가 발생하며, 실제 이 수위차가 정수지(Stilling-basin)역할을 수행함으로써 에너지가 감세된 것으로 판단된다.

