

시화호 조력발전소 건설 3차원 수리모형실험 Hydraulic Scale Model Test for the Construction of Siwha Tidal Power Plant

박영진¹, 어대수¹, 조재희², 박덕희²
Young Jin Park¹, Deasu Eo¹, Jae Hee Cho² and Duck Hee Park²

1. 서 론

본 실험은 주식회사 대우건설의 요청에 따라 “시화호 조력발전소 건설공사 일괄입찰 설계를 위한 수리모형실험”을 위해 용역계약을 체결하고, 세부설계에서 직접 분석하기 어려운 발전소 가동 시 주변의 흐름변화, 수차 구조물 및 수문 구조물에 대한 각종 수리현상 규명, 구조물의 적합성 등을 검토하여 경제적이고 안전한 구조물 설계에 필요한 자료를 수리모형실험을 통해 얻기 위하여 수행하였다.

수리모형실험결과에 따라 흐름이 지나치게 왜곡되는 등 구조물의 안전과 효율성에 문제가 생길 수 있다고 판단되는 부분에 대해서는 대안을 마련해야 하며, 대안을 근거로 수정 재실험을 실시하여 수리모형 실험결과를 유기적으로 설계에 반영할 수 있도록 하였다.

수리모형(hydraulic scale model)실험은 원형(prototype)에서의 수리현상을 일정한 상사법칙에 따라 모형을 제작하여 수리인자를 계측하고 원형에서의 값으로 환산하여 수리특성을 파악하는 것이다. 이를 위해 우선 원형에서의 정확한 자료와 설계조건 등을 파악하여야 한다.

본 수리모형실험의 목적은 시화호 조력발전소에 건설되는 수리구조물 중 수차, 수문 및 두 구조물의 연결부 세부설계에서 계산을 통해 직접 밝히기 어려운 구조물 및 주변 해역에서의 흐름변화와 와류현상 등 각종 수리현상을 규명하고, 수리구조물 배치의 적합성 등을 검토하여 경제적이고

안전한 구조물 설계에 필요한 자료를 얻기 위한 것이다.

2. 실험 방법

2.1 모형의 축척

원형의 수리현상을 모형에서 재현하기 위해서는 두 흐름사이에 수리학적 상사성이 보장되어야 하며, 모든 모형실험은 원형과 모형 사이의 수리학적 상사성을 근거로 실행되어야 올바른 의미를 가지게 된다. 물론 모형과 원형을 일정한 축척에 따라 작게 만들기 때문에 완전한 의미의 상사관 없다고 할 수 있으나, 모형을 가능한 한 크게 만들어(소축척 사용) 축척에 의한 영향을 어느 정도 극복할 수 있다.

시화호 조력발전소 실험과 같은 조건의 흐름은 자유표면을 갖는 흐름이므로 중력의 영향이 지배적이다. 따라서 모형축척은 Froude 상사법칙에 따라 결정되며, 유체의 다른 특성(압력, 점성력, 표면장력)들에 의한 영향은 무시한다. 흐름을 주로 지배하는 힘이 중력이라고 생각하므로 관성력과 중력의 비가 각각 원형과 모형에서 동일하면 두 흐름은 수리학적 상사를 이룬다고 보는 것이다.

$$\frac{(F_I)_p}{(F_I)_m} = \frac{(F_G)_p}{(F_G)_m} \quad (1)$$

위의 식은 원형과 모형에서의 관성력과 중력의 비가 같아야 함을 뜻한다. 모형의 길이축척비 L_r 과 시간축척비 T_r 의 향으로 표시하기 위하여 중

1 농업기반공사 농어촌연구원 수리시험장

2 (주)삼안건설기술공사

력축척비를 표시해 보면,

$$(F_G)_r = m_r g_r = \rho_r L_r^3 g_r \quad (2)$$

여기서 g_r 은 원형과 모형에서의 중력가속도비이다. 한편 관성력은,

$$(F_I)_r = m_r a_r = \rho_r L_r^4 T_r^{-2} \quad (3)$$

로서 처음 식에 대입하면,

$$\rho_r L_r^4 T_r^{-2} = \rho_r L_r^3 g_r \quad (4)$$

$$\frac{L_r^2}{T_r^2} = g_r L_r \quad (5)$$

혹은,

$$\frac{V_r}{\sqrt{g_r L_r}} = 1 \quad (6)$$

처음 식의 형태로 표현하면,

$$\frac{V_p}{\sqrt{g_p L_p}} = \frac{V_m}{\sqrt{g_m L_m}} \quad (7)$$

상기 식의 좌우 항은 각각 원형과 모형에서의 Froude 수(F)임을 알 수 있으며 이것이 바로 중력이 흐름을 지배하는 수리학적 상사조건이다.

수리모형은 가능한 한 축척을 작게 하여 모형을 크게 제작하는 것이 유리하지만, 실제 실험에 있어서는 실험설비의 규모(모형수조의 면적, 급배수설비의 능력 등), 필요한 정확도 및 수리현상의 상사성과의 관계에서 선정한다. 시화호 조력발전소의 전체구조물 수리모형은 시설이 허용하는 범위 안에서 다음과 같은 규모의 한계를 적용하여 축척 $L_r = 100$ 으로 제작하여 원형에서의 수리적 거동을 정확하게 재현하고자 노력하였다. Froude 상사법칙에 의한 축척비는 Table 1과 같다.

■ 모형에서의 수심 : 바닥과 수면에서의 마찰력을 고려하여 모형에서의 수심 5cm 정도 이상

■ 관로의 규모 : 관벽에서의 마찰력과 유입부에서의 수리현상 관찰을 위해 모형관로의 직경 15cm 이상

■ 모형 통로부(throat) 에서의 유속 : 관 유입부 수리현상의 적절한 재현과 관찰을 위해 유속 0.6m/s 이상

■ 레이놀즈 수 (Reynolds number) : 모형에서의 난류 발생과 관 유입부 수리현상의 적절한 재현을 위해 7×10^4 이상

Table 1. Scale relationships based on Froude similitude

Variable	Relationship	Scale ratio
Length (L_r)	L_r	100
Area (A_r)	L_r^2	10,000
Time (T_r)	$L_r^{1/2}$	10,000
Velocity (V_r)	$L_r^{1/2}$	10,000
Discharge (Q_r)	$L_r^{5/2}$	100,000
Force (F_r)	L_r^3	1,000,000
Pressure (P_r)	L_r	100
Roughness Coefficient (n_r)	$L_r^{1/6}$	2.154

2.2 실험시설 및 모형

본 수리모형실험은 경기도 안산에 위치하고 있는 농어촌연구원 수리시험장 옥외실험수조에서 수행하였다. 모형의 실험에 이용하는 실험수는 지하저수조에서 고수조로 양수하여 정수두를 유지하고 모형까지는 관로를 통해 공급한다. 모형에서 배수되는 물은 순환배수로를 통하여 다시 지하저수조로 환원해서 순환된다.

전체구조물 모형의 범위는 수차와 수문구조물을 중심으로 2.1km × 2.0km 의 영역을 포함하고 있다. 모형의 바닥은 모래와 시멘트모탈을 사용하여 지형을 정확하게 재현한 고정상모형이며, 구조물은 아크릴로 제작하였다. 모형에서 흐름은 모형경계에서의 수위차에 의해 발생하였으며, 경계조건을 조절하기 위하여 해측과 호측에 각각 5개씩의 수위조절 웨어를 설치하였다.

2.3 측정 및 분석

모형에서 유속 측정은 일본 Alec사에서 제작한 전자식 2차원 유향유속계를 이용하였으며, 수위 측정은 편게이지와 눈금자 및 전기식 서보수위계를 이용하였다. 유속은 신호변환장치와 Test point 소프트웨어를 이용하여 컴퓨터 하드디스크에 저장한 후 분석하였다.

수차 및 수차 구조물 주변의 유향을 파악하기 위한 수위 및 유속 측정점은 Fig. 5와 같이 배치하였다.

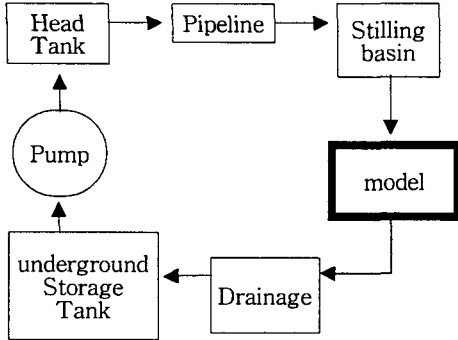


Fig. 1. Water supply system

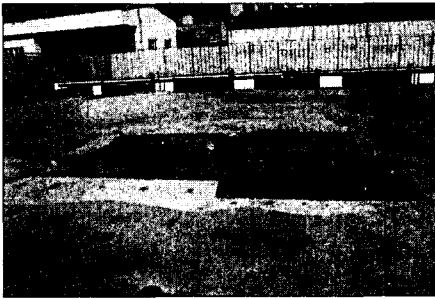
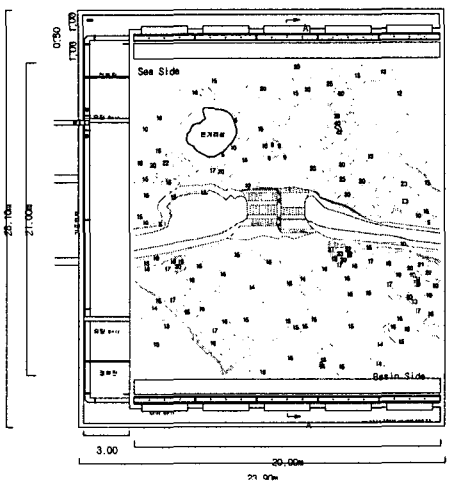


Fig. 2. Model of Siwha tidal power plant (scale : 1/100)



(a) Plan view of model



(b) Section A-A

Fig. 3. Layout of the model

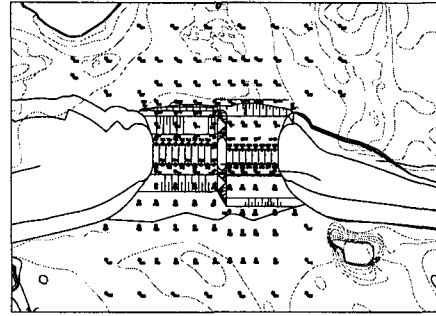


Fig. 4. Location map of measurement points

2.4 실험내용

시화호 조력발전소는 발전을 위해 1기당 25.4MW의 발전기 10기와 호내에서의 수위를 조절할 목적으로 조지의 물을 외해로 배수하기 위해 8련의 수문을 포함하고 있다.

축척 1/50의 세부모형을 통해 수차구조물과 수문구조물의 기본계획안과 기본설계안 실험을 수행하여 이미 기본계획안 수차 및 수문구조물의 단점인 흐름의 불안정성과 통과유량의 부족을 도출하였으므로 축척 1/100의 전체모형에서는 기본설계안에 대한 실험을 수행하였다.

수차구조물이 설치되는 바닥의 표고는 해측 (-)21.0m, 호측 (-)20.0m이며, 수문이 설치되는 바닥의 표고는 해측 (-)16.0m, 호측 (-)16.0m이다. 특히, 수차는 창조때 발전을 목적으로 만드는 구조물이며, 수문은 외해의 조위가 낮아졌을 때 조지의 배수를 위해 설치하는 구조물이다. 두 구조물을 통해 드나드는 통과유량도 큰 차이를 보일 수밖에 없어 연결구조물은 주변 흐름이 안정된 흐름이 되도록 설치해야 한다.

창조시 충분한 발전을 할 수 있으며 조지에서 관리수위를 유지시키기 위해 수차를 통해 발전시 유입하는 유량과 배수시 유출되는 유량 및 수문을 통해 배수시킬 수 있는 유량이 평가되어야 하며, 이와 함께 연결구조물이나 날개벽 주위의 흐름이 안정되어 큰 와류현상을 보이지 않고 에너지 손실을 최소화시킬 수 있도록 해야 한다. 그러므로 본 전체구조물 수리모형실험은 발전모드와 배수모드에서 수차 및 수문의 연결구조물과 주변 지역에서의 흐름이 수리적으로 안정된 흐름인가를 검토하는 것으로 다음 사항을 포함하고 있다.

① 굴착의 범위와 깊이 및 주변지형에 따른 접근수류의 안정성

- ② 연결구조물 배치의 적정성과 흐름의 안정성
- ③ 날개벽의 선형 및 크기 특성 등의 영향에 대한 평가

3. 실험결과

3.1 실험조건

발전모드와 배수모드의 기본설계안 수리모형 실험을 위해 적용한 실험조건은 각각 <Table 5.1> 발전모드의 CASE1~CASE3 의 3가지 경우와 <Table 5.1>의 배수모드 CASE4를 포함한 4가지 경우이다. 각각의 실험조건에 따른 호측(조지)과 해측(외해조석)의 수위조건은 각각 Table 2에서 표시한 바와 같으며, 기준표고는 평균해면(MSL)이다.

Table 2. Boundary conditions for model test

Item	Generation mode			Drainage mode
	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
Tidal level	(+)4.50	(+)2.50	(-)1.00	(-)4.50
Reservoir water level	(-)3.00	(-)3.50	(-)5.00	(-)2.50

3.2 수차 및 수문구조물 유출입부에서의 흐름

발전모드 낙차 6m인 CASE2의 실험결과를 보면, 수차구조물의 해측 유입부에서 측정된 평균유속은 2.01~2.91m/s의 분포를 보이고 있으며, 호측 유출부에서 측정된 평균유속은 3.31~7.01m/s의 분포를 보이고 있다. 유출부의 유속이 큰 폭으로 변동하는 원인은 수차모형의 수차에서 발생하는 강한 난류의 영향을 유향유속계로 측정하는데 한계가 있기 때문인 것으로 추정된다.

수차구조물 유출입부의 수위는 비교적 고르게 분포하고 있으며, 연결구조물의 영향으로 연결구조물쪽 수차유입부의 수위가 날개벽 쪽 수차의 유입부 수위보다 약간 낮은 경향을 보이고 있으나 큰 차이는 보이지 않는다. 연결구조물을 지나는 흐름이 휘면서 간헐적인 표면 와류가 관찰되었으나, 수차 유입부쪽 공기의 유입은 관찰되지 않았다.

수차구조물의 종단방향 수두손실은 구조물 부근에서 약 4.7m의 손실을 보이며, 그 이외의 부분에서는 안정되어 있다. 다시 말해 대부분의 손실은 발전수차를 통과하면서 발생하며, 수차 runner의 회전과 함께 유출부에서 강한 난류의 불안정한

흐름을 나타내고 있다.

배수모드 CASE4의 경우, 수차구조물 호측 유입부에서의 유속이 1.49~1.90m/s로 거의 일정하여 원활한 흐름을 보이고 있음을 알 수 있으며, 수문구조물 유입부에서는 6.00~7.01m/s의 유속분포를 보이고 있다. 수위의 분포는 수차구조물 유입부가 수문구조물 유입부 보다 약 0.4m 정도 높아 수차구조물 쪽에서 수문구조물을 향하여 약한 흐름이 발생하고 있음을 알 수 있다.

수차구조물 해측 유출부의 유속은 0.41~0.91m/s까지 분포하여 수차구조물을 통과한 직후의 흐름은 변화의 폭이 크지만 큰 유속은 발생하지 않고 있다. 수문구조물 해측 유출부에서는 5.94~7.50m/s의 큰 유속이 비교적 고르게 발생하며, 연결구조물에 가까운 수문구조물에서 보다 날개벽에 가까운 수문구조물에서의 유속이 약간 크게 나타났다. 이는 수차구조물 유입부에서 연결구조물을 지나 수문구조물 유입부로 흐르는 흐름이 연결구조물 곡선부를 따라서 휘면서 수위가 낮아지는 현상이 발생하기 때문이다. 또한 날개벽에 가까운 쪽의 접근 흐름은 안정되어 있기 때문인 것으로 판단 된다.

수문구조물의 종단방향 수두손실은 구조물 부근에서 흐름의 가속과 감속으로 약 0.8m의 수두손실을 보이고 있다. 수차구조물의 종단방향 수두손실은 구조물 부근에서 약 1.1m의 손실을 보인다.

3.3 구조물과 주변지역에서의 유황

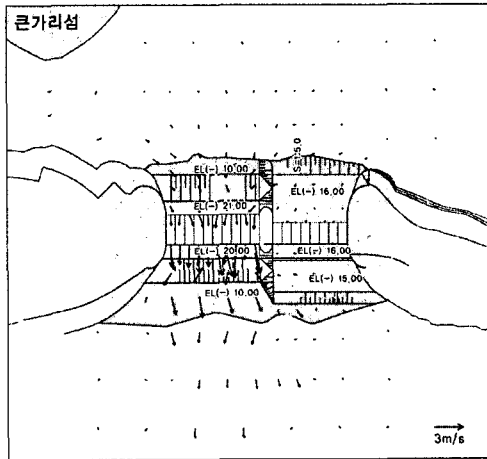
발전시 수차구조물 해측 유입부에서의 흐름은 전반적으로 안정되어 있으며, 수심이 얕은 우측 수문구조물 접근수로 흐름의 영향으로 연결구조물을 지나는 흐름이 연결구조물 곡선부를 따라 흐르면서 간헐적인 표면 와류가 발생한다. 날개벽 쪽으로 접근하는 흐름은 안정된 흐름상태를 유지하고 있다.

호측 유출부에서의 흐름은 수차구조물을 통과한 뒤 수차구조물의 중심선과 평행한 방향으로 물줄기가 형성된다. 날개벽과 연결구조물은 유출 흐름에 큰 영향을 미치지 않고 있다.

배수모드의 흐름은 호측 접근수로에서 수차구조물 및 수문구조물쪽으로 안정된 흐름상태를 보여 주고 있다. 수차구조물 호측 유입부에서의 흐름은 수문구조물 유입부와 수차구조물 유입부의 수위차로 인한 약한 횡방향 흐름이 발생하며, 이 흐름은 연결구조물의 곡선부를 따라 수문구조물쪽으로 휘게 된다. 이 때 연결구조물에 인접한 수문쪽으로 수위가 낮아지는 현상이 발생한다. 날개벽쪽 수문

으로 유입하는 흐름은 안정된 상태를 보여준다.

수문구조물을 통과한 흐름은 수문과 거의 직각 방향으로 의해를 향해 흐르고, 일부는 수차구조물 쪽으로 휘어 수차구조물에서 유출되는 흐름과 중첩되어 큰가리섬 우측으로 흐른다. 수문구조물 해측 굴착사면이 끝나고 표고 (-)9.0m 정도의 원지반과 연결되는 구역에서 수심이 작아지고 빠른 유속으로 사류가 발생하였으며, 수심이 깊어지면서 약도수가 발생하였다. 이 구역의 유속은 7.0m/s 이상 발생하였으며, 수차구조물 전면의 원지반과 연결되는 구역의 유속은 3.0m/s 이상의 유속이 발생한다. 따라서 이 구역의 원지반은 조력발전소 초기 가동시 세굴될 것으로 예상된다. 도수 발생후 유속은 도수 발생 전에 비해 크게 감소된다.



(a) Generation mode

Fig. 5. Flow velocities in the vicinity of the power plant

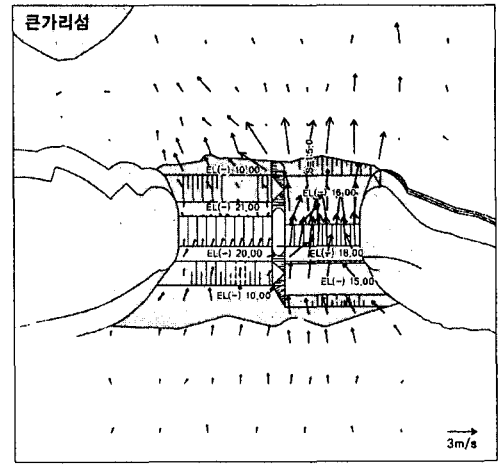
3.4 연결구조물 및 날개벽 주위의 흐름

수차 및 수문구조물의 날개벽 주위의 흐름은 지나친 와류나 흐름분리현상 없이 곡면을 따라 안정된 흐름을 보이고 있으며, 연결구조물의 곡선부를 따라 흐름의 방향이 바뀌면서 발전모드에서 간헐적인 표면 와류현상이 관측되었고 배수모드 수문 유입부에서 국부적인 수위변화가 나타났다.

4. 결 론

시화호 조력발전소의 수차 및 수문구조물과 연결구조물 그리고 날개벽 부근의 흐름 현상과 조력

발전소 가동시 주변 해역에 미치는 영향을 파악하기 위하여 3차원 수리모형실험을 수행하였다. 모



(b) Drainage mode

Fig. 5. Continued

형은 축척 1/100인 정상모형으로 제작하였다. 모형에서 해측 및 호측 말단부에 고정 수위 경계조건을 설정하여 흐름을 발생하였다. 실험은 발전모드와 배수모드에 대해 수행하였으며 결과는 다음과 같다.

발전모드시 지반이 높은 수문구조물 접근수로 쪽에서 수차구조물 방향으로 유입하는 흐름이 있으나, 큰가리섬이나 주변지역의 영향은 무시할 수 있을 정도로 작다. 배수모드의 경우 수문구조물 유출부에서 굴착사면과 원지반이 연결되는 구역에서 도수가 발생하였으며, 수차 및 수문구조물 전면의 해측 원지반에서 발생하는 빠른 유속으로 원지반의 세굴이 예상된다.

배수모드의 경우 수차구조물 유입부에서의 유속은 거의 동일하고 흐름은 안정되어 있으며, 수문구조물 유입부에서의 유속도 큰 차이가 없으나, 수위가 높은 수차구조물쪽에서 수문구조물 방향으로 흐름이 발생한다.

수차 및 수문구조물의 날개벽 주위의 흐름은 지나친 와류나 흐름분리현상 없이 곡면을 따라 안정된 흐름을 보이고 있으며, 연결구조물의 곡선부를 따라 흐름의 방향이 바뀌면서 발전모드에서 간헐적인 표면 와류현상이 관측되었고 배수모드 수문 유입부에서 국부적인 수위변화가 나타났다.

참고문헌

- 한국수자원공사 (2002). 시화호 조력발전 건설사업 타당성조사 및 기본계획 보고서.
- Daborn, G.R. (1977). Fundy tidal power and the environment, Proceedings of a workshop on the Environmental Implications of Fundy Tidal Power, the Acadia University Institute, Wolfville, Nova Scotia.
- Ettema, R., Arndt, R., Roberts, P. and Wahl, T. (2000). Hydraulic modeling concepts and practice, ASCE.
- Novak, P. and Cabelka, J. (1981). Models in hydraulic engineering, Pitman Press, UK.