

〈論 文〉

네팔 Modi Khola 수력발전소 수리모형실험 연구

A Study on the Hydraulic Experiments of Modi Khola Hydroelectric in Nepal

선우중호*, 박창근**
SONU J.H. and PARK C.K

Abstract □ This study is concerned with the hydraulic experiments of Modi Khola Hydroelectric in Nepal. The experimental domain consists of the intake structure and the settling basin. The intake structure was made by the undistorted model with the scale of 1:20, the settling basin by the distorted model with the scale of 1:10(vertical) and 1:15(horizontal). Based on the movable bed model theory, the 'Anthracite'($\rho_s=1.48$) is chosen as a model material. According to the model tests, the installation of the guide wall with proper height and the proper control of the flushing gate are required for the effective flushing in the intake structure. In the settling basin a more proper design of the inlet in order to constrain the turbulence flow is required for an efficient sedimentation and the installation of another flushing pipe near the maximum sedimental area is required. Since the trap efficiency is measured about 95%, it is concluded that the design of the settling basin is proper.

요 지 : 본 연구는 네팔의 Modi Khola 강 유역에 건설되는 Modi Khola 수력발전소의 취수구 구조물 및 침사지 구조물에 대한 수리모형실험 연구이다. 취수구 구조물은 축척이 1:20인 정상모형으로, 침사지 구조물은 수직방향 축척이 1:10, 수평방향 축척이 1:15인 왜곡모형으로 제작되었다. 본 실험에서는 이동상 모형이론에 의해 'Anthracite'($\rho_s=1.48$)를 모형사로 선택하였다. 실험결과 취수구 구조물 부분에서는 세사영역의 유사퇴적을 막기 위해 적절한 높이의 guide wall 설치가 바람직하며, 효율적 배사를 위해 배사수문의 적절한 조작이 필요한 것으로 나타났다. 침사지 구조물 부분에서는 효율적인 침사를 위해 침사지내의 난류흐름을 억제시키는 설계가 요구되었고, 침사지내 퇴사를 처리하기 위하여 설치된 유출구측의 배사 파이프는 침사지 전영역의 배사를 효율적으로 수행하지 못하였으므로 최대 퇴사가 발생하는 지점 근처에 추가로 배사 파이프를 설치하는 것이 바람직하다. 또한 침사효율은 평균 약 95%로 관측되었는데, 비교적 좋은 침사지 설계라 판단된다.

1. 서 론

점점 증가하는 네팔의 전력수요를 충족시키기 위하여 NEA(네팔 전력청)는 1996년 10월 완공 예정인 Modi Khola 수력발전사업을 1991년 4월 계획하였다. 이 사업은 히말라야 산맥아래에 위치 하

여 유사의 이동이 극심하고 하상경사가 약 1/150인 Modi Khola강에 14MW 발전용량을 가진 run-of-river형태의 중규모 수력발전소를 건설하는 것이다. 이를 위해 Modi Khola수력발전소에 대한 수리모형실험을 수행하였는데 수리모형의 영역은 크게 취수구 구조물(intake structure)과 침사지 구조물(settling basin) 두 부분으로 구성되어 있

* 서울대학교 토목공학과 교수

** 서울대학교 토목공학과 조교, 공학박사

Table 1. Summary of Modi Khola Hydroelectric Project

Structure	Features
Hydrological Features	- Catchment Area : 510km ²
	- Mean Annual Precipitation : 3,461mm
	- Annual Total Inflow : 1,429 × 10 ⁶ m ³
	- Longterm Average Flow : 45.3m ³ /sec
	- Design Flood(100 year) : 1,161m ³ /sec
Power Generation	- Design Turbine Discharge(Max) : 25m ³ /sec
	- Average Discharge : 18.7m ³ /sec
	- 90% Firm Discharge : 10.07m ³ /sec
	- Firm Peak Discharge(2hour) : 12.5m ³ /sec
Diversion Weir	- Height × Width : 3.5 m × 33.0m
	- Flushing Gate(Slide Type) : 2 nos × 3.0m (W) × 3.8m (H)
	- Design Flood : 1,161m ³ /sec
	- Design Head : 9.45m
Intake Structure	- Type : Vertical Gravity(Side- Located)
	- Height Width : 8.7 m × 23.5m
	- Control Gate(Roller) : 1nos × 4.8m(W) × 3.3m(H)
Box Culvert	- Length : 347 m
	- Design Discharge : 27.5m ³ /sec
Settling Basin	- Type : Dufour
	- No. of Bays : 2(Two)
	- Nominal Size of Trapped Particles : 0.2mm
	- Size : 100m(L) × 10m(W) × 5.0m(H)
	- Side Spillway : 34 m(W) × 1.0m(H)
	- No. of Flushing Pipes : 2ea(φ=60cm)
- Discharge in Pipes(total) : 2.5m ³ /sec	

다. Modi Khola강의 수위-유량 관계식은 식 (1) 과 같으며, 유량-유사농도 관계식(sediment rating curve)은 식(2)와 같다. Modi Khola강의 수문학적 특성 및 모형실험영역인 취수구 구조물 및 침사지 구조물의 중요특성은 Table 1과 같다.

본 연구는 Modi Khola수력발전소 수리모형실험 과정에서 수행된 내용으로, 먼저 이동상 모형 이론에 의해 모형의 축척을 결정하는 방법과 모형사의 선택 및 실제 모형실험에 사용될 수 있는 유사공급 장치에 대한 내용을 담고 있으며 또한 수리모형실험에 대한 결과를 수록하였다.

$$Q = 14.13089 \times H^{2.9009} \quad (1)$$

$$C = 2.018 \times Q^{1.6} \quad (2)$$

여기서 Q(m³/sec)는 유량, H(m)는 수심, C(ppm)는 유사농도이다.

2. 이론적 모형 및 모형사의 결정

수리모형 실험은 고정상 실험과 이동상 실험으로 나눌 수 있다. 상기 두 방법의 가장 근본적인 차이점은 이동상 실험의 경우 원형과 모형에서 물과 유사 이동에 동시에 만족시켜야 한다는 것이다. 그러나 일반적으로 개수로에서는 물의 이동은 Froude법칙에 의존하고 유사의 이동은 Reynolds 법칙에 의존하므로, 이론적으로 물과 유사이동을

한꺼번에 고려할 경우 모형축척을 구할 수 없다는 근본적인 문제점이 있다. 또한 이동상에서는 고정상에서와 같이 하상조도를 임의로 조정할 수 없고 하상과 유사운동 상태에 의해 결정되므로 하상조도의 선택에 어려움이 있다(Sharp,1980).

언급한 바와같이 이동상 실험에서는 물과 유사의 상사를 이론적으로 동시에 만족시킬 수 없기 때문에 일반적으로 다음과 같은 세가지 방법을 이용하여 모형의 축척과 모형사를 결정한다. 첫째, 시산법(trial-and-error method)으로 반드시 검증(verification)단계를 거쳐야 한다(Kobus,1980). 예비실험에서 조정되어야 할 모형의 변수는 모형에서의 유량, 하상기울기, 모형사의 종류, 시간축척, 고정된 경계조건 등이다. 둘째, 완전한 실험적 접근으로 이루어진 regime방법이다(Shen,1990). 이것은 하천의 주어진 유량에 대하여 하폭, 수심, 하상경사에 대한 실험식으로 모형의 축척을 결정하는 방법이다. 마지막으로 유사량 공식에 기초한 이론적 방법으로 다음 절에서 부연 설명하고자 한다.

모형을 제작할 때 축척에 따라 정상모형과 왜곡모형으로 나눌 수 있다. 모형의 조도는 선택된 모형사의 함수이고 또한 하상자체의 함수이므로, 이동상 실험에서는 왜곡모형을 피하거나 최소화하는 것이 바람직하다(French, 1987). 그러나 모형실험에서 왜곡모형을 사용하는 이유는 다음과 같다. 모형에서의 높은 유속(난류)을 얻을 수 있고, 모형실험 시간을 짧게 할 수 있다. 또한 모형에서 상대적으로 높은 Reynolds수의 값을 제공하여 상사율(similarity)을 향상시키고, 수심측정에서와 같이 측정의 정확성을 증가시킬 뿐만 아니라 모형에서의 물손실의 중요성을 감소시킬 수 있다.

이동상 모형실험에서 가장 중요한 문제는 적절한 모형사의 선택이다. 모형사의 선택이란 모형사의 밀도(또는 비중), 크기 및 입도분포의 결정을 의미한다. 주어진 축척으로 만들어진 모형실험에서 물을 사용하여야만 한다는 사실은 그만큼 모형사의 설정에 제한을 가하게 한다. 또한 적합한 모형의 축척이 결정되고 모형사가 선택되어도 실제 이동상 모형실험 수행시 모형사를 어떻게 공급할 것인가라는 문제가 대두된다. 본 연구에서는 이를 위해 유사공급장치(sand feeder)를 개발하였다.

2.1. 이론적 모형

이동상 모형에서는 유사이동이라는 수리학적으로 복잡한 문제에 직면하게 된다. 실제 모형축척을 결정하기 위하여 Manning식으로 대표되는 Reynolds법칙과 Froude법칙 외에도 또 다른 기준을 이용하여야 한다. 그것은 유사의 초기운동(initial motion) 문제에 대하여 다음 식과 같은 Shields 매개변수로 알려진 쇄굴기준(scour criterion)이다.

$$\frac{(\tau_0)_c}{d \cdot (\gamma_s - \gamma)} = fct\left(\frac{d \cdot U_*}{\nu}\right) \quad (3)$$

여기서 $(\tau_0)_c$ 은 하상에서 유사이동 시점에서의 한계전단응력, d 는 유사입경, γ_s 와 γ 는 각각 유사와 물의 단위 중량, ν 는 물의 동점성계수, $U_* = (\tau_0/\rho)^{1/2}$ 는 마찰속도이다. 식(3)의 좌변은 무차원한계 전단응력이고 우변은 입자 Reynolds수이다.

조도계수 n 과 하상의 입자직경과의 관계를 나타내는 Strickler의 실험식($n=d^{1/6}$)을 Manning식에 대입하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다(Froude 법칙 이용, $V_R = (L_V)_R^{1/2}$).

$$(d^{1/6})_R = n_R = (R_R)^{2/3} \left\{ \frac{1}{(L_H)_R^{1/2}} \right\} \quad (4)$$

여기서 $(\cdot)_R = (\cdot)^p / (\cdot)^m$, 첨자 p 와 m 은 각각 원형과 모형을 의미한다. R 은 동수반경, L_H 는 수평 길이를 나타낸다.

$\tau_0 = \gamma R S$ (S : 에너지 경사)이므로 식(3)의 좌변은 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_R R_R (L_V)_R \frac{1}{(L_H)_R d_R (\gamma_s - \gamma)_R} = 1 \quad (5)$$

여기서 L_V 는 연직길이이다. 또한 $U_*^2 = (\tau_0/\rho)$ 이므로 식(3)의 우변은 원형과 모형에서 일치해야 하므로 다음과 같다.

$$(d^2)_R \gamma_R (R_R) (L_V)_R \frac{1}{(L_H)_R (\nu^2)_R \rho_R} = 1 \quad (6)$$

현실적으로 원형과 모형에서 선택의 여지없이 물을 사용하므로 $\gamma_R = \nu_R = \rho_R = 1$ 이다. 따라서 식(4)에서 유사입자 직경의 축척은 다음과 같다.

$$d_R = (R^4)_R \frac{1}{(L_H^3)_R} \quad (7)$$

또한 식(5)로부터 다음의 관계를 얻는다.

$$\frac{R_R (L_V)_R}{(L_H)_R d_R (\gamma_s - \gamma)_R} = 1 \quad (8)$$

식(7)을 식(8)에 대입하면 동수반경의 축척은 다음과 같다.

$$R_R = \left(\frac{(L_V)_R (L_H^2)_R}{(\gamma_s - \gamma)_R} \right)^{1/3} \quad (9)$$

다시 식(7)과 식(9)를 식(6)에 대입하면 다음의 관계를 얻는다.

$$(\gamma_s - \gamma)_R = \left(\frac{(L_V^4)_R}{(L_H)_R} \right)^{1/3} \quad (10)$$

따라서 식(10)에 세개의 독립변수 L_V , L_H 와 $(\gamma_s - \gamma)$ 가 포함되어 있는데, 그중 2개만 결정된다면 축척문제는 해결된다. 예를들면 모형의 축척(L_V , L_H)이 결정되면 모형사의 비중 γ_s^m 은 식(10)에 의하여 계산된다.

유사이동에 대한 정량적인 정보를 얻으려면 소류사 기준의 도입이 필요하므로 Einstein(1951)의 소류사 공식을 이용하면 다음과 같다.

$$\phi = \frac{g_s}{\gamma_s} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho}} \frac{1}{gd^3} \quad (11)$$

여기서 ϕ 는 소류사 이송강도, ρ 는 밀도, g 는 중력 가속도, g_s 는 단위시간당 단위폭당 소류사량 (bedload rate in weight)이다. 원형의 단면에 해당하는 모형의 단면에서 ϕ 의 값이 같아야 하고 또

한 모형에서 물을 사용하므로 소류사 기준은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_R = \frac{(g_s)_R}{(\gamma_s)_R} \frac{1}{(\gamma_s - \gamma)_R^{1/2}} \frac{1}{d_R^{2/3}} = 1 \quad (12)$$

따라서 식(12)로부터 g_s 에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

$$(g_s)_R = (\gamma_s)_R \cdot (\gamma_s - \gamma)_R^{1/2} \cdot (d_R)^{2/3} \quad (13)$$

원형사의 비중과 직경이 측정되고 식(10)에 의해 모형사가 선택되면 식(13)으로부터 $(g_s)_R$ 이 계산 되어진다. 계산된 $(g_s)_R$ 을 이용하여 모형에서의 소류사량 $(g_s)^m$ 은 다음 관계식으로부터 얻을 수 있다.

$$(g_s)^m = C^p q^p / (g_s)_R \quad (14)$$

여기서 C^p 는 원형에서 유사농도이고 q^p 는 원형에서 단위폭당 유량이다.

2.2. 모형사의 결정

NEA는 Table 2와 같이 Modi Khola 강의 부유사와 소류사 샘플을 이용하여 대표입경 $d = d_{50}$ 을 결정하였다. 이들 자료와 모형의 전체 크기 및 모형실험에 필요한 제반시설을 고려하여 Table 3과 같은 취수구 구조물과 침사지 구조물의 모형축척을 결정하였다.

원형사의 밀도를 $(\rho_s)^p = 2.65$ 라고 가정하면 침사지 구조물 모형의 축척이 $(L_V)_R = 10$, $(L_H)_R = 15$ 이므로 식(10)으로부터 모형사의 비중은 $(\rho_s)^m \approx 1.2$ 이고, 취수구 구조물 모형의 축척이 $(L)_R = 20$ 이므로 $(L_s)^m \approx 1.1$ 로 계산되기 때문에 매우 가벼운 모형사를 선택하여야 한다. 그러나 실험수행에 충분한 모형사의 확보와 그 비용 그리고 가벼운 모형사를 사용할 때 발생하는 문제점 즉 실험에서 유사 퇴적 깊이를 일반적인 방법으로 측정하는 경우 상당한 오차를 발생시키기 때문에 가벼운 모형사의 선택에 제한이 따른다. 국내에서는 이동상 모

Table 2. Two Different Types of Material in Prototype

Type	Component	Material	$d_{50} = d^p$
Type I	Sample 1	Suspended & Bedload	0.6mm
Type II	Average of Sample 2,3	Bed Material	17mm

Table 3. Model Scales

Part	Name	Model Type	Scale =
Part I	Intake Structure Part	Undistorted	$L_R = 20$
Part II	Settling Basin Part	Distorted	$(L_V)_R = 10$ $(L_H)_R = 15$

Table 4. Calculated Particle Diameters(d_{50})

Part (Table 3)	Scale	Material (Table 2)	d_R	d^p	d^m
Settling Basin	$(L_V)_R = 10$ $(L_H)_R = 15$	Type I	1.684	0.6mm	0.4mm
		Type II	1.684	17mm	10mm
Intake Structure	$L_R = 20$	Type I	0.143	0.6mm	4.2mm
		Type II	0.143	17mm	119mm

형실험의 모형사로 밀도가 2.07-2.14인 규조토를 대부분 사용하여 왔다. 밀도가 큰 규조토를 이용하여 실험을 수행하기에는 계산된 밀도와 너무나 많은 차이를 보이기 때문에, 본 연구에서는 비중이 $(\rho_s)^m = 1.48$ 인 Anthracite를 모형실험의 모형사로 선택하였다. Anthracite의 사용은 소류사 기준인 식(10)을 다소 완화시키지만 규조토를 사용하는 것보다 우수한 모형의 상사성을 보장한다.

이상과 같이 다소 완화된 조건하에서 계산된 취수구 구조물과 침사지 구조물 모형에서의 모형사 Anthracite의 직경($d = d_{50}$)은 Table 4에 나타나 있다.

취수구 구조물 모형에 사용될 모형사의 직경이 119mm로 계산된다. 그러나 이것은 현실적이지 못하다. 이러한 계산 결과는 소류사 기준인 식(10)을 완화시켰기 때문에 발생한다고 판단된다. 따라서 취수구 구조물에서의 모형사를 침사지 구조물에서의 계산된 모형사로 대치하여 사용하는 것이 바람직할 것이다. 이러한 판단에 의하여 두가지 대표 입경 즉 부유사의 직경은 0.4mm이고 소류사의 직경은 10mm인 Anthracite를 선택하고자 한다. 이와 같은 경우 침사지 구조물 모형실험에서는 정성적인

정보와 정량적인 정보를 다소 얻을 수 있는 반면, 취수구 구조물 실험에서는 정성적인 정보만을 얻을 수 있을 것이다.

2.3. 유사공급장치(sand feeder)의 개발

유사공급장치의 개발은 수행한 이동상 모형실험에서 가장 어려운 문제중 하나였다. 유사공급 장치는 다음의 두가지 기능을 가져야 한다. 첫째는 각 유량에 대하여 모형에서 계산된 유사농도에 해당하는 모형사의 양을 조절할 수 있어야 하고, 둘째는 주어진 하폭에 균일한 양의 모형사를 연속적으로 공급할 수 있어야 한다. 이러한 두가지 문제점은 모터에 부착된 컨트롤러와 컨베이어 벨트를 사용함으로써 해결할 수 있다. 개발된 유사공급장치의 개요는 Fig. 1에 나타나 있다. 유사공급장치는 장치 지지대, 유사용기, 컨베이어 벨트, 모터와 컨트롤러 등 크게 4부분으로 구성되어 있다.

유사공급장치에 의해 공급되는 모형사의 양은 각 유량에 대하여 식(2), 식(13)과 식(14)에 의해 결정된다. 개발된 유량공급장치는 다음의 두가지 방법으로 공급되는 모형사의 양을 조절한다. 첫째

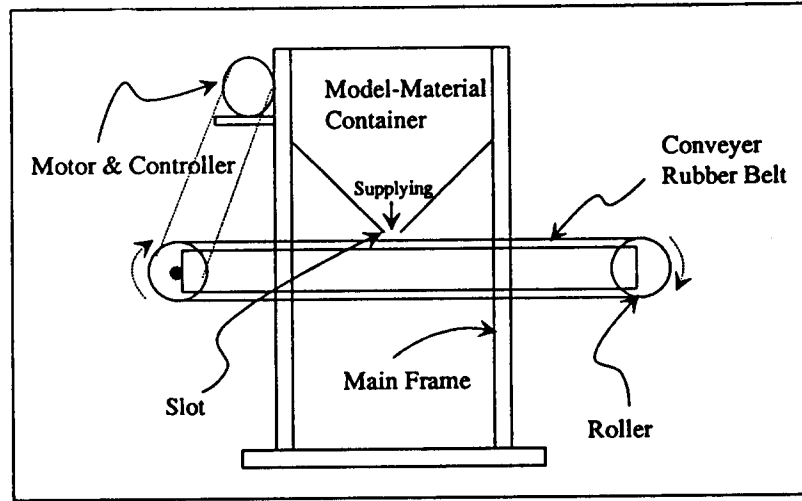


Fig 1. Schematic of Sand Feeder

유사용기와 컨베이어 벨트사이의 간격(T)을 조절하는 것이고, 둘째는 컨트롤러에 의해 벨트회전속도(S)를 변화시키는 것이다. 간격이 5mm, 15mm 일 때 소류사량 g_s 와 벨트속도 S사이의 보정된 곡선(calibrated curve)을 다음과 같이 얻었다.

$$g_s = 16.56991 * S - 0.078, T = 5\text{mm} \quad (15)$$

$$g_s = 74.07047 * S - 7.11725, T = 15\text{mm} \quad (16)$$

3. 수리 모형 실험

3.1 실험의 영역 및 내용

수리모형실험의 영역은 크게 취수구 구조물과 침사지 구조물의 두영역으로 구성되어 있다. 취수구 구조물은 주 하천으로부터 발전 수량을 취수하는 구조물로서 하천을 가로지르는 웨어, 세사를 위한 수문(flushing gate), 세사지역(flushing area)을 주 하천으로부터 구분시켜 주는 guide wall, 그리고 취수를 위한 취수수로(intake canal)로 구성된다. 취수 수로는 사각수로(box culvert)를 통해 침사지로 연결되는데 각 부분은 Fig. 2에 나타나 있다.

침사지 구조물은 취수된 물과 함께 섞여있는 유

사중 직경이 기준치 0.2mm 이상인 유사를 침전시키는 구조물로서 사각수로와 연결되어 있는데 길이가 100m, 폭이 10m의 쌍으로된 긴 구조물이다. 약 20m의 유입구와 유출구를 가지고 있는데, 유입구에는 각 침사지로 공급된 유량을 나누는 다이어몬드 모양의 구조물과 유속을 줄이기위한 tranquilizer가 설치되어 있으며 유출구 부근에는 침전된 유사를 배출하는 배사파이프가 설치되어 있다. Fig. 3에 침사지 구조물의 각 부분이 나타나 있다.

본 실험의 내용은 먼저 취수구 구조물 주위의 유속, 수심 및 유황을 측정하고 홍수시 배사수문(flushing gate)의 효율을 점검하며 취수구 구조물 주위의 국부세굴(local scour)과 유사퇴적의 특성 관찰 및 적절한 세사와 취수 설계유량인 27.5 m^3/s 를 유지하기 위한 적절한 수문조작 방법을 결정하는 것이다. 또한 침사지 구조물에서 기준치 이하로 유사가 제거된 설계 터빈 유량(25 m^3/s)을 유지하기 위하여 침사지가 적절히 설계되었는지의 여부를 검토하는데 먼저 침사지 입구에서의 유속, 수위와 유황을 측정하고 침사지의 침사효율(trap efficiency)을 측정하며 이와 함께 배사 파이프의 배사효율 검토하고자 한다.

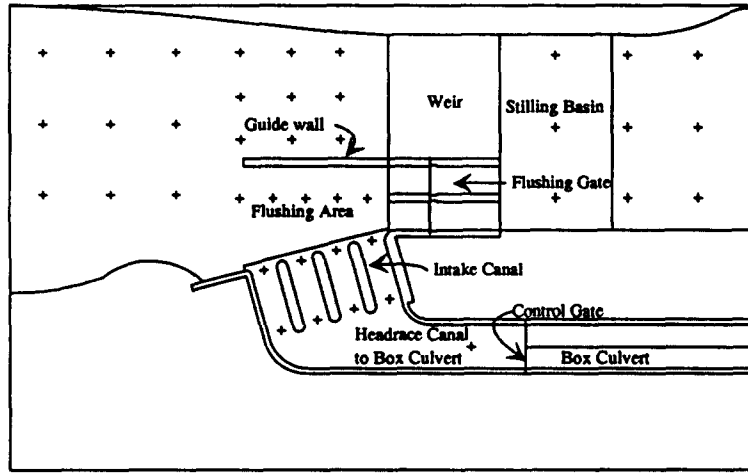


Fig 2. Part of Intake Structure

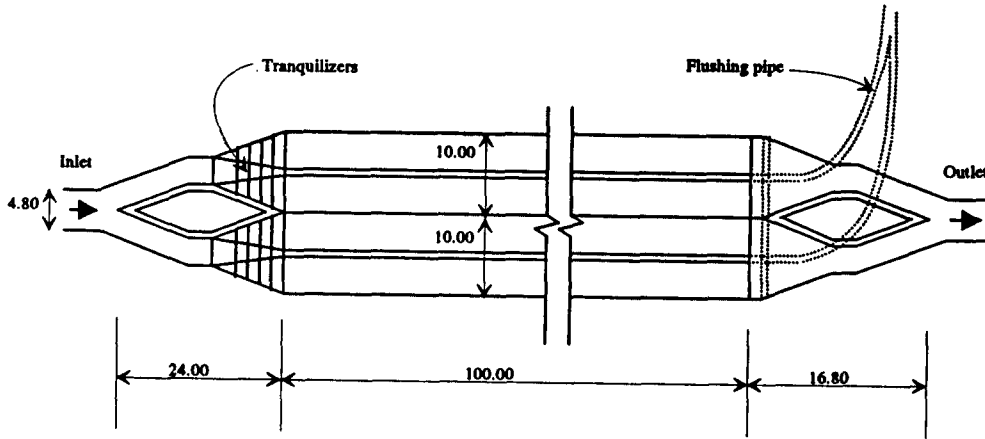


Fig 3. Part of Settling Basin

3.2. 실험장치

수리모형은 앞 장에서 언급한 모형이론에 근거하여 제작 되었다. 수리모형은 취수구 구조물과 침사지 구조물을 구분하여 제작되었는데 취수구 구조물은 정상모형으로 침사지 구조물은 왜곡모형으로 제작되었다. 모형실험에서 사용한 물 순환도는 Fig.

4와 같다.

본 실험을 수행하기 위하여 다음과 같은 실험기기를 사용하였다. 수위는 1/10mm의 정도를 갖는 point-gauge를 이용하여 각 측정점에 설치 측정하였고, 유속은 C-512AP(SANKO, Japan) 프로펠러형 유속계를 사용하였다. 유량은 KS B 6302의 규격을 만족하는 사각 웨어를 사용하였다. 전체모형의 유량을 측정하는 사각 웨어와 사각수로를 통하

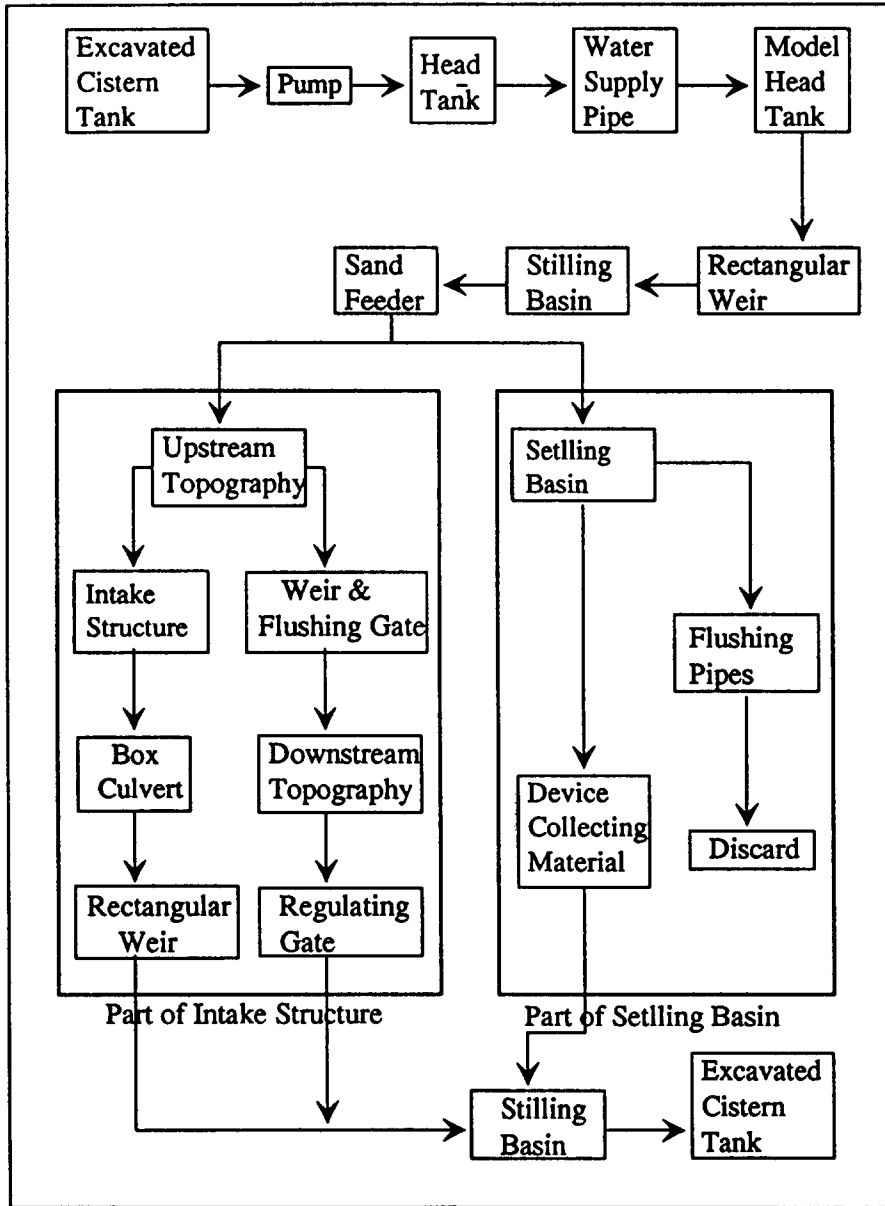


Fig 4. Outline of Water Circulation System

여 배출되는 유량을 측정하는 웨어를 따로 설치하여 운용하였다. 유황은 물 흐름에 따라 움직이는 과망간산 칼륨의 자주색 색소 관찰을 통해 관측하였다. 유사공급은 개발된 유사공급장치를 이용하였

다. 실험에 사용된 모형사는 상기 모형이론에 근거하여 밀도가 1.48인 Anthracite를 선택하였고, 입경분포가 다른 두가지 형태의 Anthracite를 주문 제작하여 사용하였다. 대표입경이 0.6mm인 An-

thracite는 유사공급장치에 의해 모형하천에 공급되며, 이것은 모형하천에서 부유사와 소류사의 모형사가 된다. 그리고 대표입경이 10mm인 Anthracite는 모형하천의 바닥에 깔려졌는데, 이것은 모형하천 하상토의 모형사로 이용된다.

4. 실험 및 결과

4.1 취수구 구조물

취수구 구조물의 취수 설계유량은 27.5m³/s인데 이는 터빈가동을 위한 발전수량 25m³/s와 세사용수 2.5m³/s를 합한 것이다. 상류에서 공급되는 유량중 취수 설계유량만이 사각수로를 통해 침사지 구조물로 보내진다. 실험에서 주로 사용한 공급유량은 27.5m³/s, 45m³/s, 92m³/s로서 각 유량에 대해 각 측정에서 수심 및 유속을 측정한 결과는 아래 Table 5와 같다. 유량이 클수록 수심이 증가하며 이에 따라 취수로(intake canal)의 유속이 안정됨을 알 수 있었고, 상류수량이 모두 취수로로 유입되는 27.5m³/s의 경우 다소 큰 유속분포가 발생하였다.

취수구 근처의 유황은 기동 측면에 작은 와(eddy)가 발생하지만 대체로 양호하였다. 세사 영역에서의 유황은 퇴사형태와 직접적인 관계가 있으므로 매우 중요하다. 세사영역의 유황을 개선하기 위하여 본류와 세사영역을 나누어 주는 guide wall 설치가 필요한데, 실험결과 guide wall의 형

상은 계단형 보다 일직선형일 때 그리고 높이는 본류에 설치된 웨어와 같은 4m일 때 세사효과가 가장 뛰어났다. 취수구 구조물의 모형실험에 있어 가장 중요한 목적은 사각수로의 설계유량인 27.5m³/s를 유지할 경우 취수구 구조물 설계가 적합한가였다. 따라서 유량이 27.5m³/s에서 부터 100년 빈도 홍수 유량인 1161m³/s까지 수행하는 것은 실험의 정확도에 있어 무리가 있기 때문에, 유량 27.5m³/s 경우를 중심으로 만들어진 수리모형에서 유량이 증가함에 따라서 상류 흐름장이 취수구 구조물에 미치는 영향의 정도를 토대로하여 100년 빈도홍수인 1161m³/s경우 취수구 구조물에 미치는 영향을 추정하였다. 이를 위하여 기여영역(contribution region)이라는 개념을 사용하였다. 기여영역이란 취수구 구조물에 직접적으로 영향을 주는 상류의 흐름장 폭을 의미한다. Table 6은 5가지 유량에 대하여 기여영역의 크기를 측정한 결과이다. 이 결과를 보아 유량이 증가함에 따라 기여영역이 하천 우안으로 치우치며, 폭은 줄어들음을 알 수 있다. 이는 유량이 증가함에 따라 취수구 구조물의 취수능력과 구조물의 안정성이 감소하지 않음을 의미한다. 27.5m³/s와 130m³/s 경우의 유황 및 기여영역은 Fig. 5에 나타나 있다.

본류 공급유량이 27.5m³/s의 경우는 부분 세굴(local scour)이 발생하지 않았으며 그 외 모든 경우에 부분세굴과 퇴사가 발생하였다. 배사수문을 열지 않았을 때 유량이 클수록 퇴사는 증가 하였으며 특히 취수구 구조물의 상류부에 퇴사가 집중되

Table 5. Measured Depth and Velocity at Intake Structure

Discharge(m ³ /s)	Depth(m)	Velocity(cm/s)		
	Flushing Area	Flushing Area	Intake Canal	box culvert
27.5	3.56-4.00	33.23-71.73	95.21-238.24	346.72
45	3.90-4.40	54.98-72.73	160.75-162.74	-
92	4.62-5.26	82.73-115.23	105.75-159.23	268.73

* Table의 값은 수위및 유속의 범위를 표시한 것임.

Table 6. Length of Contribution Region

Q(m ³ /s)	27.5	45	76	92	130
L(m)	44	27	21	9	4

L : Lengths of contribution region measured from right bank of main channel

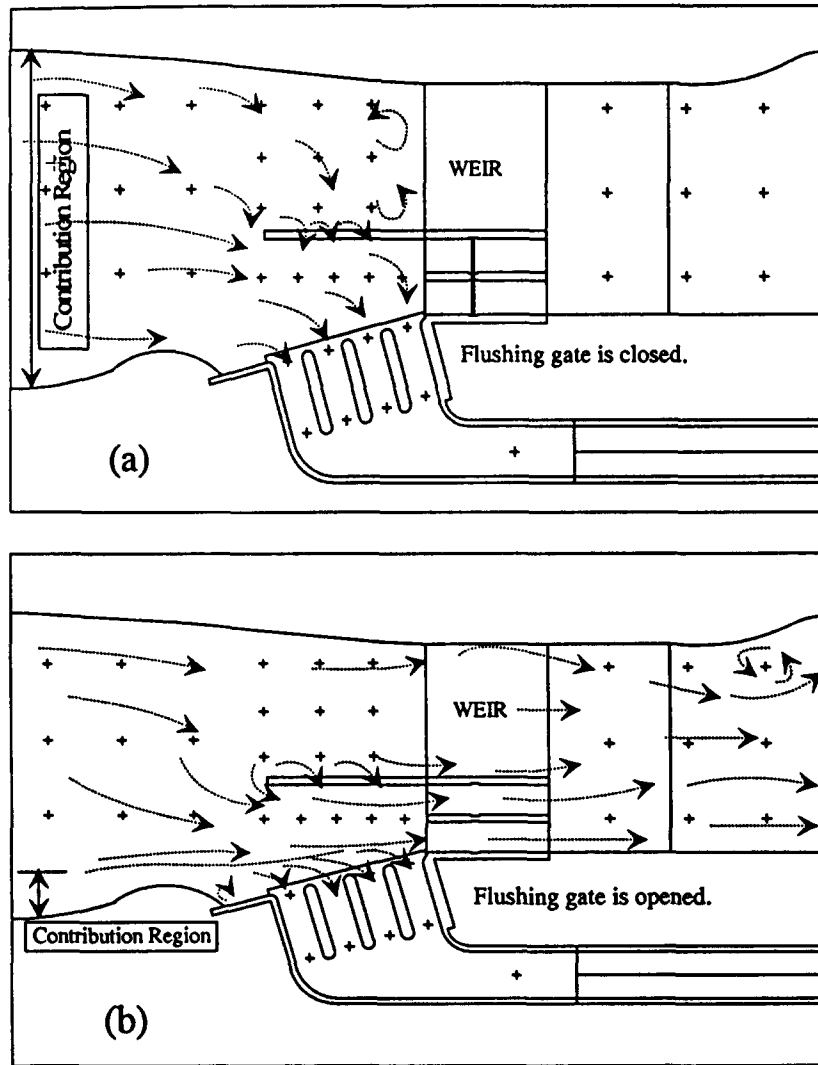


Table 5. Flow Pattern near Intake
 Structure (a) $Q=27.5\text{m}^3/\text{s}$
 (b) $Q=130/\text{m}^3\text{s}$

는 현상을 보였다. 부분세굴은 guide wall의 끝 부분에서 심하게 발생하였다. 이러한 퇴사현상을 막기 위해서 배사수문의 적절한 개도조절이 필요하다. 본 실험에서는 각 유량에서의 배사수문의 개도높이를 실험을 통해 결정하였다. 배사수문(flushing gate)과 취수조절수문(control gate)의 수문조작 방법은 아래 Table 7과 같다.

4.2 침사지

침사지에 유입되는 유량은 취수조절수문(control gate)의 수문조작에 의해 $27.5\text{m}^3/\text{s}$ 를 유지하며 잉여유량은 침사지 측벽에 설치된 측방향 여수로(side spillway)를 통해 버려진다. 침사지의 수직, 수평방향 유황을 관찰하였는데 유입구 근처의

Table 7. Gate Opening Height

Discharge	Flushing Gate	Control Gate
$Q < 120 \text{ m}^3/\text{s}$	closed	$H_{cr} = 8.4 * Q^{-0.4}$
$27.5 < Q < 120 \text{ m}^3/\text{s}$	$H_{cr} = 0.03 * Q - 0.792$	full-opened
$Q > 120 \text{ m}^3/\text{s}$	full-opened	$H_{cr} = 46593164 * Q^{-0.349}$

Table 8. Sieve Analyses in Three Divided Parts

Diameter (mm)	Part near Inlet	Part at Max. Deposit	Part near Outlet
≥ 0.85	17.78%	29.86%	10.21%
≥ 0.425	77.63%	84.97%	51.33%
≥ 0.250	94.46%	93.71%	91.63%
≥ 0.150	98.89%	98.73%	98.57%
≥ 0.075	99.95%	99.98%	99.89%
≤ 0.075	100%	100%	100%

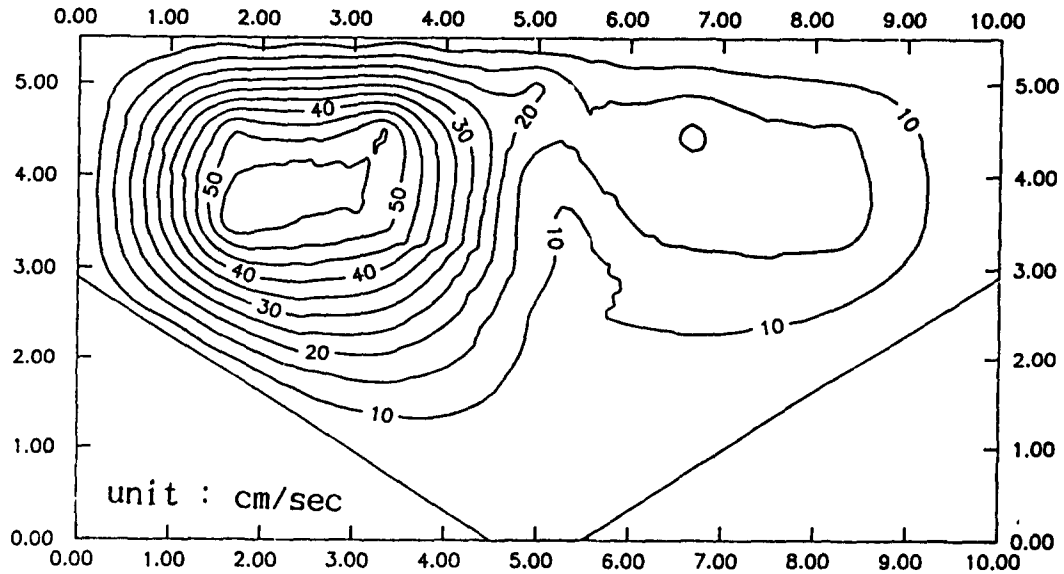


Fig 6. Cross Sectional Velocity Profile at Point of 5m

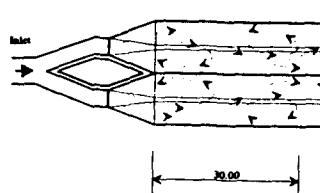


Fig 7. Flow Pattern in Settling Basin

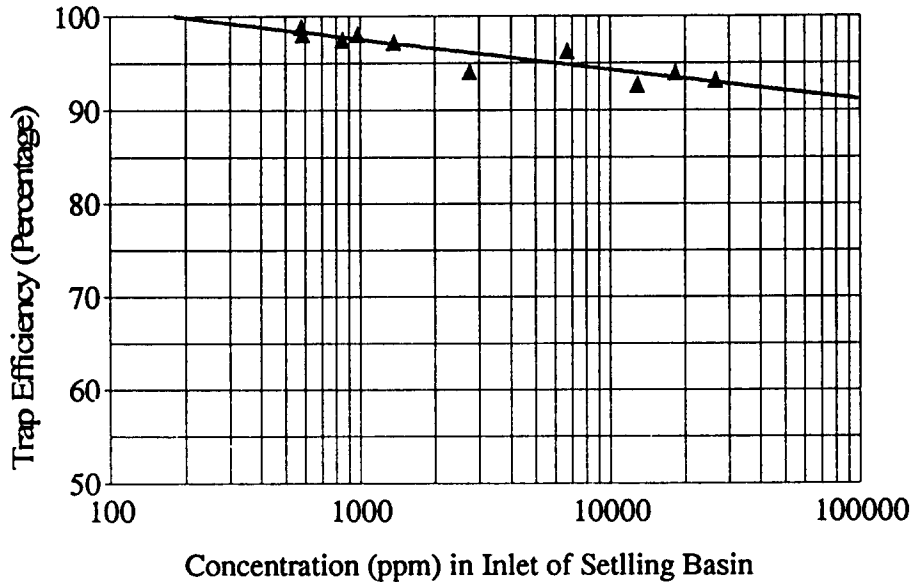


Fig 8. Efficiency in Settling Basin

유황이 불안정하였다. Fig. 6은 유입구에서 5m 떨어진 침사지의 수직단면 유속분포를 보여주고 있으며, Fig. 7은 침사지의 수평방향 유황을 보여주고 있다. 유입구로부터 하류 약 30m에 이르는 지점까지 비대칭형 와(eddy)를 동반하는 난류가 발생하는데, 이는 침사지의 입구에 있는 다이어몬드형 유입구에 의한 것으로 이러한 형태의 유입구는 침사효율을 떨어뜨리는 중요한 요소가 된다. 유입구로부터 30m 하류지역에 가장 많은 퇴사가 발생하였고, 침사지에서 모형사의 침전특성을 알아보기 위해 침사지의 영역별(유입구 지역, 최대 퇴사지역, 유출구 지역) 입경분포를 조사하였다. 이들 세 영역에 대한 침전 모형사의 입경분포는 Table 8과 같으며, 퇴사된 모형사의 입경크기는 최대 퇴사지역, 유입구 지역, 유출구 지역 순으로 분포함을 알 수 있다. 효율이 보다 우수한 침사지의 설계를 위해서는 침사지의 유황이 한쪽으로 치우치는 것을 방지하여야 하며, 이를 위해 침사지 길이방향으로 충분히 긴 유입수로가 설치되어야 한다. 본 실험에서는 배사파이프가 유출구쪽에만 설치되었는데 유출구측 배사효과는 상당히 좋은 편이나 효율을

더욱 높이기 위해서는 최대 퇴사지역 부근에 추가의 배사파이프를 설치하는 것이 바람직하다. 침사지의 전체적인 침사효율은 Fig. 8에서와 같이 공급되는 유사량이 늘어날 수록 효율이 떨어지고 있지만, 평균 침사효율이 약 95% 정도로 비교적 좋은 침사지 설계라 판단된다.

5. 결 론

네팔 Modi Khola강 수리모형실험을 수행하는 과정에서 발생한 문제점은 적절한 모형사의 선택과 유사공급장치의 개발이었다. 모형사의 선택을 위하여 모형과 모형사의 축척 결정이 선행되어야 한다. Shields 매개변수와 Einstein의 유사량 공식을 이용함으로써 각종 축척을 구할 수 있었다. 수리모형 실험의 취수구 구조물 영역은 축척율이 1/20인 정상모형으로 만들어졌고, 침사지 구조물 영역은 수평 축척율이 1/15이고 수직 축척율은 1/10인 왜곡모형으로 만들어 졌다. 모형사로는 규조토 대신 비중이 1.48인 Anthracite의 선택은 소류사 기준을 다소 완화시키지만, 그것은 본 연구과정에서 최

선의 선택이었다. 또한 본 연구에서 원형에서의 각 유량에 대하여 모형에서 계산된 유사농도에 해당하는 모형사의 양을 조절할 수 있고 주어진 하폭에 균일한 양의 모형을 연속적으로 공급할 수 있는 유사공급장치를 개발하였다. 개발된 유사공급장치는 이동상 수리모형 실험에서 효율적으로 사용되었다.

취수구 구조물 영역에 대한 수리모형실험 결론은 다음과 같다. 취수구 구조물은 사각수로의 설계유량인 $27.5\text{m}^3/\text{s}$ 를 적절하게 유지하였고, 또한 취수구 구조물내 4개의 취수수로(intake canal)에서 흐름이 거의 등류임이 관찰되어 설계유량 취수에 대해서는 적절한 설계임을 알 수 있었다. 또한 취수구 구조물 상류부의 효율적인 세사를 위하여 하천중앙에 설치되는 guide wall의 형상은 세사영역을 완전히 분리시키는 직선형태가 계단형 보다 바람직하며 효율적인 세사를 위하여 적절한 세사수문 조작이 필요하다.

침사지 구조물 영역에 대해서는 다음과 같은 결론을 얻었다. 효율이 우수한 침사지의 설계를 위해서는 침사지의 유황이 안정되어야 하는데 특히 유입구의 설계는 매우 중요한 부분이다. 침사지의 효율을 높이기 위하여 중심선에 대해 침사지의 유황이 가능한 대칭이어야 한다. 이를 위해 공급수로가 침사지 길이방향으로 충분히 길게 설치되어야 한다. 유출구측 배사효과는 상당히 좋은 편이나 효율을 더욱 높이기 위해서는 최대 퇴사지역 부근에 추가의 배사파이프를 설치하는 것이 필요하다. 침사지의 평균 침사효율이 약 95%로 측정되었는데,

비교적 좋은 침사효율을 가지는 침사지 설계라 판단된다.

감사의 글 : 본 연구수행에 재정적인 뒷바침을 해주신 (주)현대엔지니어링 관계자에 사의를 표한다.

참 고 문 헌

1. French, R. H., "Open-Channel Hydraulics", McGraw-Hill Book Company, 1987
2. Garde, R. J. and Raju, K. G. Range, "Mechanics of Sediment Transport and Alluvial Stream Problems", John Wiley & Sons, 1985
3. Kobus, H., "Hydraulic Modeling", Pitman Books Limited, 1980
4. Kraijenhoff, D. A. & Moll, J. R., "River Flow Modeling and Forecasting", D. Reidel Publishing Company, Holland, 1986
5. Sharp, J. J., "Hydraulic Modeling", Butterworth & Co., Ltd, 1981
6. Shen, Hsish Wen, "Movable Bed Physical Models", Kluwer Academic Publishers, 1990
7. Simons, D. B. and Senturk, F., "Sediment Transport Technology", Water Resources Publications, 1977
8. Water & Power Resources Service, "Hydraulic Laboratory Techniques", United States Government Printing Office, 1980

(접수 : 9월 28일)