

# 네팔 Modi Khola강 수리모형실험을 위한 모형사의 결정과 유사공급장치 Determination of Model-Material and Sand Feeder for Hydraulic Experiments of Modi Khola River in Nepal

선우중호<sup>1)</sup>, 박창근<sup>2)</sup>, 박재현<sup>3)</sup>

## 1. 서론

네팔 Modi Khola강 수리모형실험의 개요는 다음과 같다. 히말라야 산맥아래에 위치하여 유사의 이동이 극심하고 하상의 경사가 약 1/150인 Modi Khola강에 run-of-river형태의 중규모 수력발전소를 건설하기 위하여 사전 수리모형실험을 수행하였다. 모형은 취수구구조물과 침사지로 크게 두부분으로 나누어져 있다. 본 연구는 Modi Khola강 수리모형실험 과정에서 수행된 내용으로, 이동상모형 실험에 대하여 모형의 축척을 결정하는 방법과 모형사의 선택 및 실제 모형실험에 사용될 수 있는 유사공급장치에 대하여 논하고자 한다.

수리모형 실험은 고정상실험과 이동상실험으로 나눌 수 있다. 상기 두 방법의 가장 근본적인 차이점은 이동상의 경우 원형과 모형에서 물과 유사의 이동을 동시에 만족시켜야 한다는 것이다. 그러나 일반적으로 개수로에서는 물의 이동은 Froude법칙에 의존하고 유사의 이동은 Reynolds법칙에 의존하므로, 이론적으로 물과 유사이동에 대한 모형축척을 구할 수 없다는 근본적인 문제점이 있다. 또한 이동상에서는 고정상에서와 같이 하상조도를 임의로 조정될 수 없고 하상과 유사운동 상태에 의해 결정되므로 하상조도의 선택에 어려움이 있다.

모형을 제작할 때 축척에 따라 정상모형과 왜곡모형으로 나눌 수 있다. 모형의 조도는 선택된 모형사의 함수이고 또한 하상자체의 함수이므로, 이동상에서는 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 설정은 모형사의 밀도(또는 비중), 크기 및 입도분포의 결정을 의미한다. 주어진 축척으로 만들어진 모형실험에서 물을 사용하여야만 한다는 사실은 그만큼 모형사의 설정에 제한을 가하게 한다. 언급한 바와같이 이동상실험에서는 물과 유사의 상사를 이론적으로 동시에 만족시킬 수 없으므로 다음과 같이 세가지 방법을 이용하여 모형의 축척과 모형사를 결정한다. 첫째, 시산법(trial-and-error method)으로 반드시 검증(verification)단계를 거쳐야 한다. 실험에서 검증하는 과정에서 조정되어야 할 모형의 변수는 모형에서의 유량, 하상기울기, 모형사의 종류, 시간축척, 고정된 경계조도 등

- 1) 서울대학교 토목공학과 교수
- 2) 서울대학교 토목공학과 조교, 공학박사 (발표자)
- 3) 서울대학교 토목공학과 박사과정 수료

이다. 둘째, 완전한 실험적 접근으로 이루어진 regime방법이다. 이것은 하천의 주어진 유량에 대하여 하폭, 수심, 하상경사에 대한 실험식으로 모형의 축척을 결정하는 방법이다. 마지막으로 유사량 공식에 기초한 이론적 방법으로 다음 절에서 상세히 부연하고자 한다.

적합한 모형의 축척이 결정되고 모형사 선택되어도 실제 이동상 모형실험 수행시 모형을 어떻게 공급할 것인가라는 문제가 대두된다. 본 연구에서 Modi Khola강 수리모형실험 수행을 위하여 개발한 유사공급장치(sand feeder)의 개요와 보정(calibration) 결과를 상술하고자 한다.

## 2. 이론적 모형

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

$$\frac{(\tau_0)_\alpha}{d(\gamma_s - \gamma)} = fct \left( \frac{d U_*}{\nu} \right) \quad (1)$$

여기서  $(\tau_0)_\alpha$ 은 하상에서 유사이동 시점에서의 한계전단응력,  $\gamma_s$ 와  $\gamma$ 는 각각 유사와 물의 비중,  $\nu$ 는 물의 동점성계수,  $U_* = (\tau_0/\rho)^{1/2}$ 는 마찰속도이다. 식(1)의 좌변은 무차원 한계전단응력이고 우변은 입자 Reynolds수이다.

조도계수  $n$ 과 하상의 입자직경과의 관계를 나타내는 Strickler의 실험식( $n=d^{1/6}$ )을 Manning식에 대입하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

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

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

$\tau_0 = \gamma R S$  ( $S$ :에너지 경사)이므로 식(1)의 좌변은 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_R R_R (L_V)_R \frac{1}{(L_H)_R d_R (\gamma_s - \gamma)_R} = 1 \quad (3)$$

여기서  $L_V$ 는 수직길이이다. 또한  $U_*^2 = (\tau_0/\rho)$ 이므로 식(1)의 우변은 다음과 같다.

$$(d^2)_R \gamma_R (R_R) (L_V)_R \frac{1}{(L_H)_R (v^2)_R \rho_R} = 1 \quad (4)$$

현실적으로 원형과 모형에서 선택의 여지없이 물을 사용하므로  $\gamma_R = v_R = \rho_R$ 이다. 따라서 식(2)에서 유사입자 직경의 축척은 다음과 같다.

$$d_R = (R^4)_R \frac{1}{(L_H^3)_R} \quad (5)$$

또한 식(3)으로부터 다음의 관계를 얻는다.

$$\frac{R_R (L_V)_R}{(L_H)_R d_R (\gamma_s - \gamma)_R} = 1 \quad (6)$$

식(5)를 식(6)에 대입하면 동수반경의 축척은 다음과 같다.

$$R_R = \left( \frac{(L_V)_R (L_H^2)_R}{(\gamma_s - \gamma)_R} \right)^{1/3} \quad (7)$$

다시 식(5)와 식(7)을 식(4)에 대입하면 다음의 관계를 얻는다.

$$(\gamma_s - \gamma)_R = \left( \frac{(L_V^4)_R}{(L_H)_R} \right)^{1/3} \quad (8)$$

따라서 식(8)에는 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  $\gamma_s^m$ 은 식(8)에 의하여 계산된다.

유사이동에 대한 정량적인 정보를 얻으려면 소류사 기준의 도입이 필요하다. 따라서 Einstein(1951)의 소류사 공식을 이용하면

$$\phi = \frac{g_s}{\gamma_s} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \frac{1}{g d^3}} \quad (9)$$

여기서  $\phi$ 는 소류사 이송강도이고,  $g_s$ 는 단위시간당 단위폭당 소류사량(bedload rate in weight)이다. 원형의 단면에 해당하는 모형의 단면에서  $\phi$ 의 값이 같아야 하고 또한 모형에서 물을 사용하므로 소류사 기준은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_R = \frac{(g_s)_R}{(\gamma_s)_R} \frac{1}{(\gamma_s - \gamma)_R^{1/2}} \frac{1}{d_R^{2/3}} = 1 \quad (10)$$

따라서 식(10)으로부터  $g_s$ 에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

$$(g_s)_R = (\gamma_s)_R \cdot (\gamma_s - \gamma)^{1/2} \cdot (d_R)^{3/2} \quad (11)$$

원형사의 비중과 직경이 측정되고 식(8)에 의해 모형사가 선택되면 식(11)로부터  $(g_s)_R$ 이 계산되어진다. 계산된  $(g_s)_R$ 을 이용하여 모형에서의 소류사량  $(g_s)^m$ 은 다음 관계식으로부터 얻을 수 있다.

$$(g_s)^m = C^p q^p (g_s)_R \quad (12)$$

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

### 3. 모형사의 결정

Nepal Electricity Authority(NEA)는 Table 1과 같이 부유사와 소류사 샘플을 채취하여 대표 입경  $d=d_{50}$ 을 측정하였다.

Table 1. 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

또한 Table 2에서와 같이 취수구구조물은 정상모형으로 침사지는 왜곡모형으로 제작되었다.

원형사의 밀도를  $(\rho_s)^p=2.65$ 라고 가정하면 침사지 모형의 축척이  $(L_V)_R=10$ ,  $(L_H)_R=15$ 이므로 식(8)로부터 모형사의 비중은  $(\rho_s)^m \approx 1.2$ 이고, 취수구구조물 모형의 축척이  $(L)_R=20$ 이므로  $(\rho_s)^m \approx 1.1$ 로 계산되므로 매우 가벼운 모형사를 선택하여야 한다. 그러나 실험수행에 충분한 모형사의 확보와 그 비용 그리고 가벼운 모형사를 사용할 때 발생하는 문제 즉 실험에서 유사 퇴적 깊이를 일반적인 방법으로 측정할 때 상당한 오차를 발생시키기 때문에 가벼운 모형사의 선택에 제한이 따른다. 우리나라에서 이동상 모형실험에 사용된 모형사는 주로 구조토였으며, 그 밀도는 2.07-2.14로 측정

Table 2. Model Scales

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

되었다. 이와같은 구조도를 이용하여 실험을 수행하기에는 계산된 밀도와 너무나 많은 차이를 보이기 때문에, 본 연구에서는 측정된 비중이  $(\rho_s)^m=1.48$ 인 Anthracite를 모형사로 선택하였다. 그러나 Anthracite의 선택은 구조도보다는 덜하지만 소류사 기준인 식(8)을 다소 완화시키는 것을 의미한다.

이상과 같이 다소 완화된 조건하에서 침사지와 취수구구조물 모형에서 Anthracite의 직경 ( $d=d_{50}$ )은 Table 3에 나타나 있다.

Table 3. Estimated Particle Diameters( $d_{50}$ ) in Prototype and Model

Part (Table 2)	Scale	Material (Table 1)	$d_R$	$d^p$	$d^m$
Desanding Basin	$(L_V)_R = 10$	Type I	1.684	0.6mm	0.4mm
	$(L_H)_R = 15$	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

취수구구조물 모형에 사용될 모형사의 직경이 119mm로 계산되어 이것은 현실적이지 못하다. 이러한 계산 결과는 소류사 기준인 식(8)을 완화시켰기 때문에 발생한다고 판단된다. 따라서 취수구구조물에서의 모형사를 침사지에서의 계산된 모형사로 대치하여 사용하는 것이 바람직할 것이다. 이러한 판단에 의하여 두가지 대표입경 즉 부유사의 직경은 0.4mm이고 소류사의 직경은 10mm인 Anthracite를 선택하고자 한다. 이와같은 경우 침사지 모형실험에서는 정성적인 정보와 정량적인 정보를 다소 얻을 수 있는 반면, 취수구구조물 실험에서는 정성적인 정보만을 얻을 수 있을 것이다.

#### 4. 유사공급장치(sand feeder)

유사공급장치의 개발은 수행한 이동상 모형실험에서 가장 어려운 문제중의 하나였다. 유사공급장치는 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 콘트롤러와 컨베이어 벨트를 사용함으로써 해결할 수 있다. 개발된 유사공급장치의 개요는 Fig.1에 나타나 있다. 유사공급장치는 장치지지대, 유사용기, 컨베이어 벨트, 모터와 콘트롤러로 크게 4부분으로 구성되어 있다.

유사공급장치에 의해 공급되는 모형사의 양은 각 유량에 대하여 유사농도-유량관계곡선 (sediment rating curve)와 식(12)에 의해 결정된다. 따라서 개발된 유량공급장치는 다음의 두가

Fig. 1

지 방법으로 공급되는 모형사의 양을 조절한다. 첫째는 유사용기와 컨베이어 벨트사이의 간격(T)를 조절하는 것이고, 둘째는 컨트롤러에 의해 벨트회전속도(S)를 변화시키는 것이다. 소류사량  $g_s$ 와 벨트속도 S사이의 보정된 곡선(calibrated curve)은 간격 T=5mm에 대하여

$$g_s = 16.56991 * S - 0.078 \quad (13)$$

간격 T=15mm에 대하여 다음 식을 구할 수 있었다.

$$g_s = 74.07047 * S - 7.11725 \quad (14)$$

보정된 곡선은 Fig.2에 나타나 있다.

Fig. 2,3

## 5. 결 론

네팔 Modi Khola강 수리모형실험을 수행하는 과정에서 발생하는 여러가지 문제점을 해결하기 위하여 본 연구가 수행되었다. 그 문제점은 적절한 모형사의 선택과 유사공급장치의 개발이었다. 모형사의 선택을 위하여 모형과 모형사의 축척을 결정이 선행되어야 한다. Shields 매개변수와 Einstein의 유사량 공식을 이용함으로써 각종 축척을 구할 수 있었다. 모형사로는 구조토 대신 비중이 1.48인 Anthracite의 선택은 소류사 기준을 다소 완화시키지만, 그것은 본 연구과정에서 최선의 선택이었다. 또한 본 연구에서 원형에서의 각 유량에 대하여 모형에서 계산된 유사농도에 해당하는 모형사의 양을 조절할 수 있고 주어진 하폭에 균일한 양의 모형사를 연속적으로 공급할 수 있는 유사공급장치를 개발하였다. 개발된 유사공급장치는 이동상 수리모형 실험에서 효율적으로 사용되었다.

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

## 6. 참고문헌

- (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, 1981
- (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, 1987
- (6) Shen, Hsish Wen, "Movable Bed Physical Models", Kluwer Academic Publishers, 1990
- (7) Simons, D. A. and Senturk, F., "Sediment Transport Technology", Water Resources Publications, 1977
- (8) Vennard & Street, "Elementary Fluid Mechanics", John Wiley & Sons, 1982
- (9) Water & Power Resources Service, "Hydraulic Laboratory Techniques", United States Government Printing Office, 1980

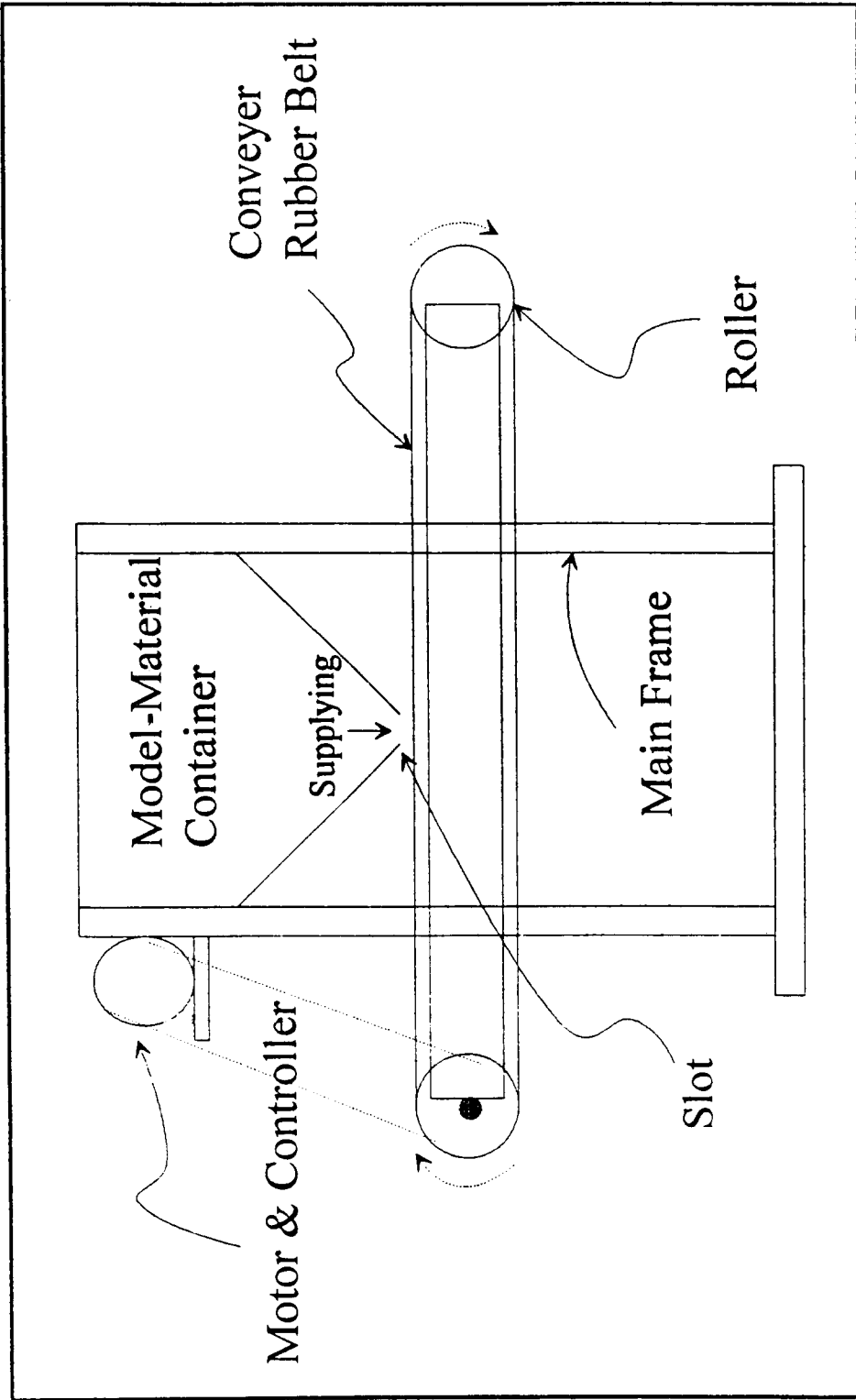
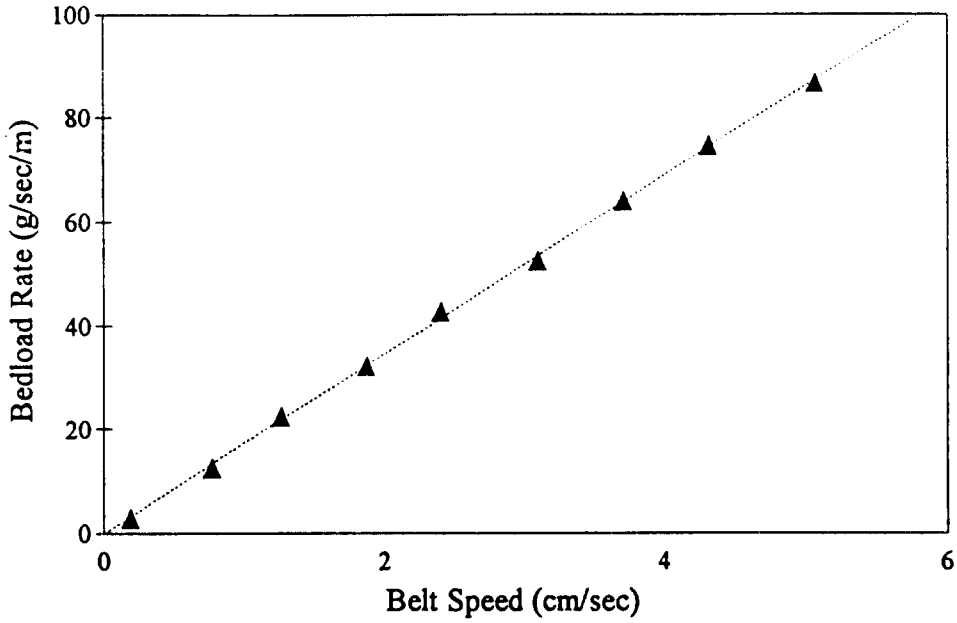
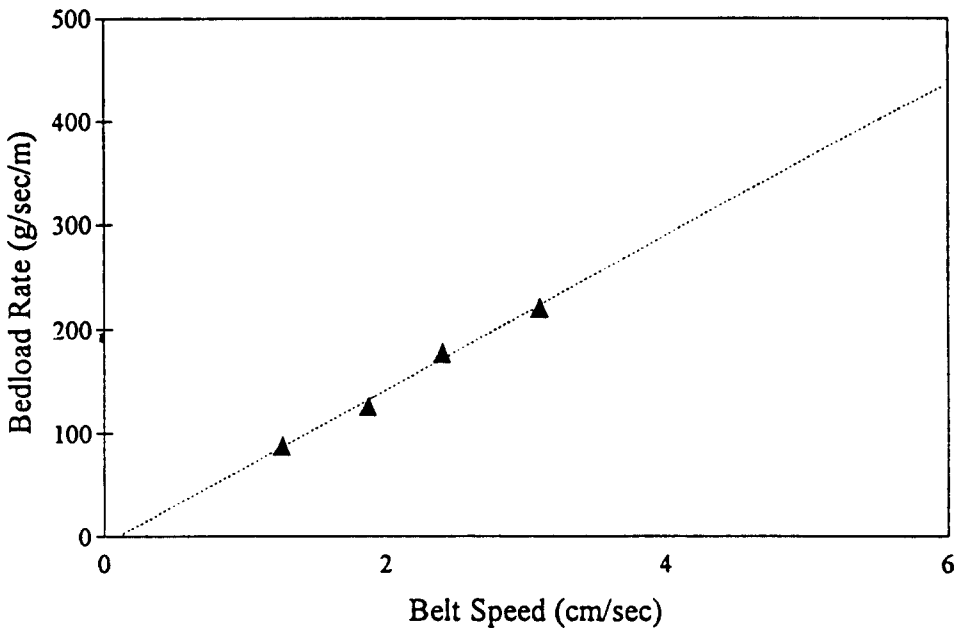


Fig. 1. Schematic of Sand Feeder



**Fig. 2.** Calibrated Curve of Sand Feeder between Bedload Rate( $g_s$ ) and Belt Speed(S) in Case of  $T=5\text{mm}$



**Fig. 3.** Calibrated Curve of Sand Feeder between Bedload Rate( $g_s$ ) and Belt Speed(S) in Case of  $T=15\text{mm}$