

이동상 수리모형실험의 상사법칙과  
실험방법에 대한 고찰

(A Review of similarity law and hydraulic  
model test for movable bed)

책임연구원 : 김 규 한

(관동대학교 토목공학과, 교수)



## 1. 머리말

일반적으로 하천 및 해안공사를 실시할 경우, 실제로 해결해야 할 수많은 수리학적 문제에 부딪히게 된다. 따라서 사업의 실시에 앞서서 이들의 문제점을 해명하고 그 해결책을 강구하는 것이 무엇보다 필수적인 과제라 할 수 있는데, 이를 위해서는 타당성있는 문제 해석방법을 선정해야 할 필요가 있다. 혹시라도 이들 문제에 대한 해석방법을 잘못 설정하면 오히려 새로운 문제가 발생하거나 문제해결에 실패해 버리고 때로는 재해로까지 연결되는 경우가 있을 수 있다. 수리학적 문제점에 대한 해석방법들을 열거해 보면, 현지자료의 해석, 현지조사 및 관측, 하천수리모형실험, 수치해석, 수리기초실험 등 실로 다양하다.

이들 해석방법의 상호관계는 완전히 이질적인 것은 아니며, 서로 다소의 중복(overlap)이 존재한다. 따라서 단독으로 해결을 추구하기 보다는 서로 상호보완하여 해답을 유추해내는 경우가 많다. 현지조사, 관측 및 자료해석은 모형실험과 수치해석을 위한 입력조건의 설정은 물론, 검증자료와 해석결과의 정도(精度)판정자료를 제공한다는 측면에서 중요하다고 할 수 있다. 한편 수리기초실험은 모형실험에 비해 스케일이 작고 아울러 원형(Prototype)현상과의 상사성은 반드시 고려되지 않아도 되므로 정량적 평가를 기대하는 것은 아니지만 충분히 계획된 실험을 수행하면 문제로 되어있는 현상의 이해와 판단에 도움이 될 수 있다.

수리모형실험은 원형의 현상을 지배하고 있는 기초방정식을 모형에서 해석하므로써 실제로 발생하고 있는 수리현상을 상세하게 파악하고 발생될 가능성이 있는 계획된 규모의 현상을 필요한 정도로 예측하며, 필요하다면 대책공법까지 검토하고자 하는데에 주 목적이 있다. 자연의 현상은 여러 가지 요소로 성립되어 있고 이러한 경우 모형실험은 수리현상을 비교적 정확하게 그리고 용이하게 살펴 볼 수 있는 유력한 수단으로서 중요한 역할을 차지한다고 할 수 있다.

아울러, 해석적, 수치적으로 해를 얻기 어려운 경우라도 해를 얻기 쉽다는

점과 다수의 케이스를 비교적 용이하게 검토할 수 있으며, 자연계에서는 드물게 발생하는 홍수와 같은 현상도 모형상에서는 직접 눈으로 확인함으로써 용이하게 검토할 수 있는 장점을 지니고 있다.

그 이외의 모형실험의 이점으로는 모형상에 있어서 복잡한 현상이 재현되어 문제를 검토하기 위한 소재가 부여될 수 있다. 그에 따라서 새로운 문제점의 발견으로도 연결되고 개선상의 유의한 정보를 창출해 낼 수도 있다.

그러나 이와 같은 장점에도 불구하고, 수리모형실험은 나름대로 상사법칙의 결정, 실험방법의 설정등에 난해한 어려움을 지니고 있음은 부인하기 어렵다. 따라서 본고에서는 이와같은 수리모형실험중 더욱 어려움이 뒤따른다고 할 수 있는 이동상수리모형실험을 위주로 상사법칙의 결정방법과 실험방법에 대해 비교적 구체적으로 살펴보고자 한다.

## 2. 이동상실험의 상사법칙

### 2.1 흐름의 상사법칙

#### 2.1.1 3차원흐름의 상사법칙

실제하천에서 발생하는 현상을 수리모형실험에 의해서 검토하기 위해서는 실제하천과 하도모형에서 검토의 대상이 되는 현상이 상사되지 않으면 안된다. 따라서 검토의 대상이 무엇인가에 따라서 상사조건이 달라진다. 만약 상사조건이 3차원흐름이고 비압축성의 중력장흐름을 고려한다면, 유체의 운동은 Navier-Stokes의 운동방정식 및 연속방정식에 의해서 지배된다. 따라서 직교좌표에서 언급한 두 식은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$V_t + V \cdot \text{grad}V = F - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad}P + \nu \nabla^2 V \quad (2-1)$$

$$\text{div}V = 0$$

여기서  $t$ 는 시간이고  $V, P$  및  $F$ 는 각각 유속, 압력 및 외력의 벡터 표시이다. 또한  $\rho$ 는 유체의 밀도이고  $\nu$ 는 동점성계수이다. 위 식에서 원형과 모형의 길이 축척이 다를 경우, 유속분포가 상사되기 위해서는 각각의 방정식에서 각항의 비가 같아야 한다. 이러한 조건은, 원형과 모형의 비를 아래첨자  $r$ 이라 하면, 다음과 같이 표시된다.

$$\left(\frac{u}{t}\right)_r = \left(\frac{u^2}{x}\right)_r = \left(\frac{uv}{y}\right)_r = \left(\frac{uw}{z}\right)_r = X_r = \left(\frac{P}{\rho x}\right)_r = \left(\frac{\nu u}{x^2}\right)_r = \left(\frac{\nu u}{y^2}\right)_r = \left(\frac{\nu u}{z^2}\right)_r$$

$$\left(\frac{v}{t}\right)_r = \left(\frac{vu}{x}\right)_r = \left(\frac{v^2}{y}\right)_r = \left(\frac{vw}{z}\right)_r = Y_r = \left(\frac{P}{\rho y}\right)_r = \left(\frac{\nu v}{x^2}\right)_r = \left(\frac{\nu v}{y^2}\right)_r = \left(\frac{\nu v}{z^2}\right)_r$$

$$\left(\frac{w}{t}\right)_r = \left(\frac{wu}{x}\right)_r = \left(\frac{wv}{y}\right)_r = \left(\frac{w^2}{z}\right)_r = Z_r = \left(\frac{P}{\rho z}\right)_r = \left(\frac{\nu w}{x^2}\right)_r = \left(\frac{\nu w}{y^2}\right)_r = \left(\frac{\nu w}{z^2}\right)_r$$

$$\left(\frac{u}{x}\right)_r = \left(\frac{v}{y}\right)_r = \left(\frac{w}{z}\right)_r$$

따라서 위 식에서 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\left. \begin{array}{l} (y/x)_r = (z/x)_r = 1 \\ (v/u)_r = (w/u)_r = 1 \\ (u/\sqrt{gx})_r = 1 \\ (ux/\nu)_r = 1 \\ (x/tu)_r = 1 \\ (P/\rho u^2)_r = 1 \end{array} \right\} \quad (2-2)$$

따라서 유체를 물이라고 하면 원형과 모형의 수온이 같을 경우,  $\rho_r = \nu_r = 1$  이기 때문에  $X_r = 1$ 이 되고 축척을 변경할 수 없게 된다. 즉 Reynolds수  $(ux/\nu)_r = 1$ , Froude수  $(v/\sqrt{gx})_r = 1$ 을 동시에 만족시키기 위해서는 동일한 축척의 場에서만 가능하게 된다. 또한 식(2-2)에서는 11개의 물리량이 관계하고 있고 기본차원량이 3개이기 때문에  $\pi$ 정리를 이용하면 8개의 무차원량은 서로 하나의 관계로 연결되어 질 수 있다. 따라서 식(2-2)의 하나는 다른 무차원량의 종속함수로 표시될 수 있다.

이처럼 점성의 영향이 있는 흐름에서는 식(2-2)의 점성에 관한  $(ux/\nu)_r = 1$ 의 조건, 즉 Reynolds수를 고려해야만 한다. 흐름의 Reynolds수  $V_m H/\nu$ 가 크게

되면 흐름은 난류장이 되고, 식(2-2)의 점성항 대신에 Reynolds 응력을 생각하지 않을 수 없다. 여기에서  $V_m$ ,  $H$ 는 각각 흐름장의 대표유속, 대표수심이다.

난류장에서 식(2-1)은 다음과 같이 3개의 식으로 표시될 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \nu \nabla^2 \bar{u} - \left[ \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right] \\ \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \nu \nabla^2 \bar{v} - \left[ \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right] \\ \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \nu \nabla^2 \bar{w} - \left[ \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right] - g \end{aligned} \right\} (2-3)$$

여기서,  $u = \bar{u} + u'$  이고,  $\bar{u}$ 는 시간평균유속,  $u'$ 는 난류의 속도를 나타내며,  $v$ ,  $w$ 에 대해서도 마찬가지이다. 위 식에서 우변 제2항은 제3항보다 작아서 무시할 수 있으면 앞에서 행한 방법과 마찬가지로 다음의 식(2-4)가 성립한다.

$$(\bar{y/x})_r = (\bar{z/x})_r = 1$$

$$(\bar{v/\bar{u}})_r = (\bar{w/\bar{u}})_r = 1$$

$$(\bar{u/\sqrt{gx}})_r = 1, \quad (\bar{P/\rho \bar{u}^2})_r = 1 \quad (2-4)$$

$$(\overline{u'^2})_r = (\overline{u'v'})_r = (\overline{u'w'})_r = (\overline{u'v'})_r = (\overline{v'^2})_r = (\overline{v'w'})_r = (\overline{u'w'})_r,$$

$$= (\overline{v'w'})_r = (\overline{w'^2})_r = (\overline{u^2})_r,$$

식(2-4)는 길이 축척이 다른 장에서 상사되는 흐름조건이다. 그런데  $V_m H / \nu$ 가 큰 난류장에서는 식(2-4)의 위로부터 3항이 성립하면 4항의 난류특성에 대한 상사조건은 당연히 성립한다고 할 수 있다. 이것을 두 가지의 예에 의해서 살펴보고자 한다.

(1)개수로 전단류장에서의 Reynolds 응력

개수로의 Reynolds 응력  $-\rho \overline{u'w'}$ 는  $u_* k_s / \nu$ 가 크게 되면

$$-\rho \overline{u'w'} = \rho u_*^2 \left(1 - \frac{z}{H}\right) \quad (2-5)$$

이고, 또 Nikuradse에 의하면 조면완전난류장에서 개수로의 유속분포형은  $\overline{u}/u_* = f(z/k_s)$ 이므로  $(k_s/H)_r = 1$ 이 성립한다면, Reynolds 응력의 상사조건이 성립한다. 또한, 하상이 평탄하면  $k_s \propto d$ 이기 때문에 Reynolds의 상사조건이 성립하게 된다. 여기서  $u_*$ 는 마찰속도,  $k_s$ 는 조도계수,  $d$ 는 입경이다.

또한, 평탄하상의 유속분포는 Nikuradse의 실험에 의해  $u_* k_s / \nu < 5$ 이면 저면은 점성저층으로 되어 실험에 의해 다음의 관계식이 성립된다.

$$\overline{u}/u_* = 5.5 + 5.75 \log(u_* k_s / \nu \cdot z/k_s) \quad (2-6)$$

$$V_m/u_* = 3.0 + 5.75 \log(u_* k_s / \nu \cdot H/k_s) \quad (2-7)$$

$u_* k_s / \nu > 70$ 이면, 완전조면 난류상태이고 다음 관계식이 성립한다.

$$\overline{u}/u_* = 8.5 + 5.75 \log\left(\frac{z}{k_s}\right) \quad (2-8)$$

$$V_m/u_* = 6.0 + 5.75 \log\left(\frac{H}{k_s}\right) \quad (2-9)$$

$5 < u_* k_s / \nu < 70$ 이면, 저면의 상태는 활면으로부터 조면으로의 천이상태이고



다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\bar{u}/u^* = f(u^*k_s/\nu, z/k_s) \quad (2-10)$$

$$V_m/u^* = f(u^*k_s/\nu, H/k_s) \quad (2-11)$$

또한,  $k_s = d$ 라고 알려져 있다.

이상 완전조면난류의 상태의 흐름에서는 흐름의 평균적인 성질이 Reynolds 수에 영향을 받지 않는 것이 경험적으로 알려져 있다.

## (2)자유로운 난류의 상사성

하상면은 하상파가 존재하고 이에 따라서 흐름의 박리(separation)가 일어난다. 이러한 박리에 의해 발생하는 난류의 통계적 성질은 구조물에 의한 후류(wake)의 상사성 문제와 비슷하다. 이같은 후류의 난류구조는  $VD/\nu$ 가 크게 되면, 소위 자기보존의 상태이고 흐름이 하류에 옮겨 갈 경우에는 단순히 난류의 운동흐름, 시간 및 속도의 척도가 변화하는 만큼의 상태로 된다. 여기에서  $D$ 는 흐름장의 대표길이(구조물의 크기 등),  $V$ 는 대표속도이다. 이 경우 후류의 흐름운동에 관한 길이  $l(x)$ , 속도  $\bar{u}(x)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$l(x)/D \propto (X/D)^p, \quad \bar{u}(x)/V \propto (x/D)^{-q} \quad (2-12)$$

예를 들면, 원주의 배후에서는  $p=1/2$ ,  $q=1/2$ 이다.

이처럼 후류의 난류구조는 자기보존의 상태이고 또한 유속분포형이 형상만에 의해 결정된다고 하는 경험적 사실은 하상파 부근의 흐름구조는 식(2-4)의

위로부터 3항이 성립하면 4항은 성립할 것이라고 하는 것을 의미하고 있다. 이상과 같이 충분히 흐트러진 난류장이고,  $u_* k_s / \nu$ 가 70 이상이면 흐름의 상사성을 얻기 위해 점성의 영향을 무시할 수 있다. 식(2-4)의 위로부터 3항의 식은 9개의 물리량이 관계하고 기본차원량이 3개이기 때문에  $\pi$ 정리로부터 6개의 무차원량은 서로 하나의 관계로 연결될 수 있다. 따라서 왜곡이 없는(기하학적 상사) Froude 상사법칙을 만족하는 하도모형이 상사조건으로 된다.

### 2.1.2 1차원흐름의 상사법칙(왜곡모형)

하천의 흐름을 간단하게 1차원흐름이라고 가정하고, y축과 z축의 평균유속  $\bar{u}$ ,  $\bar{w}$ 를 무시하고, 아울러 Reynolds 응력의 항을 와동점성계수  $\epsilon$ 을 사용하여 나타내면 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_x \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_y \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon_z \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}) \quad (2-13)$$

원형과 모형에서 흐름의 상사성을 얻기 위해서는 이같은 운동방정식이 원형 하도와 모형하도에서 동시에 성립하지 않으면 안된다. 일반적으로는 단면평균류를 생각하여 식(2-13)의 각 항을 단면평균하고 단면평균유속을  $U$ , 수심을  $h$ , 하상경사를  $I$ , 운변에 작용하는 전단력을  $\tau$ , 운동량보정계수를  $\beta$ , 에너지의 보정계수를  $\alpha$ , 경심을  $R$ 로 정의하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\beta}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\alpha}{2g} \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - I + \frac{\tau_0}{\rho g R} = 0 \quad (2-14)$$

여기서, 위 식은 다음과 같은 조작에 의해 얻어진 것이다.

$$\frac{1}{A} \int \int_A \left\{ \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_y \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon_z \frac{\partial u}{\partial z}) \right\} dA = \frac{1}{\rho A} \int \int_A \left\{ \frac{\partial \tau_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} \right\} dA = \frac{1}{\rho A} \oint_s \tau_n d_s$$

$$S \cdot \tau_o = \oint_s \tau_n \cdot d_s \quad (S: \text{윤변길이}, A: \text{단면적}; S \cdot R = A)$$

이에 따라 하상전단력  $\tau_n$ 을 윤변에 따라 평균한  $\tau_0$ 를 사용하면 다음과 같이 치환된다.

$$\frac{1}{A} \int \int_A \left\{ \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_y \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon_z \frac{\partial u}{\partial z}) \right\} dA = - \frac{\tau_0}{\rho A}$$

$$P + \epsilon_x \frac{\partial u}{\partial x} = P$$

연속방정식을 일차원흐름에 대하여 평균하면 유량을  $Q$ , 수로단위길이당의 유출량을  $q$ 라 하면 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + q = 0 \quad (2-15)$$

이상의 식(2-14) 및 식(2-15)은 점변류에 대한 일차원 해석이고, 그것은 일반적으로 사용되어 지고 있는 운동방정식과 연속방정식이다. 이 경우 식(2-14)는 흐름이 소비하는 에너지가 모든 평균유속과 수심의 상사를 얻는데 그친다면 벽면에 인공적인 조도를 부여함에 따라 상사가 성립된다. 이와같이 식(2-14), 식(2-15)가 원형하도와 모형하도에서 동시에 성립되게 될 경우(양자에 기본식의 각항의 비가 같다), 제량의 축척은 다음과 같이 표시되고, 소위 Froude 상사법

칙을 만족하는 모형상의 하도를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{유속} & : U_r = h_r^{1/2} \\
 \text{시간} & : t_r = x_r \cdot h_r^{-1/2} \\
 \text{하상구배} & : I_r = h_r \cdot x_r^{-1} \\
 \text{유량} & : Q_r = x_r \cdot h_r^{3/2} \\
 \text{조도} & : n_r = h_r^{2/3} \cdot x_r^{-1/2} \\
 \text{단면적} & : A_r = x_r \cdot h_r
 \end{aligned} \tag{2-16}$$

여기서  $x_r$ 는 흐름방향의 길이 축척비이고,  $h_r$ 은 수심방향의 길이 축척비이다.

그러나 유속분포의 상사까지 고려하면 무왜곡의 Froude 상사법칙이 성립하는 모형이 필요하게 된다. 단 왜곡율이 크지 않고 왜곡모형에 있어서도 흐름이 점변류라면 일정한 정도의 상사성이 성립되고, 특히  $z$ 축방향의 하상의 변화가 점변적이고 박리 등의 현상이 일어나지 않는다면 수평방향의 유속분포형은 거의 상사의 형태로 된다.

## 2.2 이동상 하상면의 상사법칙

### 2.2.1 이동상흐름을 규정하는 물리량과 무차원화

이동상일 경우의 흐름장을 고려하면 흐름과 토사입자의 운동은 하상면에 생기는 하상파에 크게 영향을 받고, 역으로 하상파는 흐름과 토사의 운동에 따라서 형성되기 때문에 하상파, 흐름, 토사의 운동은 상호작용을 일으키게 된다. 이와같이 흐름장의 상태량이라 할 수 있는 하상파, 흐름의 저항계수, 유사량을 규정하는 물리량은 직선수로, 장방향단면에서 측벽에 따라 흐름이 구속되는 수로

에서 저질재료가 거의 균일 입경이고 극단적으로 편평하지 않으며 또한 흐름의 상태가 정상적이라면, 다음과 같은 물리량에 대해 규정된다고 할 수 있다.

수로의 특성 : 수로폭  $B$ , 경사  $I$

흐름의 특성 : 수심  $H$

유체의 특성 : 물의 밀도  $\rho_w$ , 물의 동점성계수  $\nu$

저질의 특성 : 입경  $d$ , 밀도  $\rho_s$

장의 특성 : 중력가속도  $g$

따라서 이동상흐름의 상태량  $\lambda$ 는 다음과 같다.

$$\lambda = f(B, I, H, \rho_w, \nu, d, \rho_s, g) \quad (2-17)$$

기본차원량으로서  $\rho_w, g, d$ 를 사용하고  $u_* = \sqrt{gHI}$ 의 관계를 이용하면 흐름장의 상태유량  $\lambda$ 의 무차원량  $\pi\lambda$ 는 차원해석으로부터 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\pi\lambda = f(\sqrt{gd} \cdot d/\nu, u_*^2/sgd, H/d, B/d, s) \quad (2-18)$$

여기서  $s = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$ 이다.

각 항에 무차원량을 곱하거나 또는 나눔으로서 위 식은 잘 알려진 무차원량의 형태로 표현할 수 있다. 즉  $\lambda$ 로서 유사량  $q_s$ , 혹은 유속계수  $\phi$  (평균유속  $V_m$ 을  $u_*$ 로 나눈 값)을 취하면 다음과 같다.

$$q_s/u_* d \text{ or } \phi = f(Re_*, \tau_*, H/d, B/H, s) \quad (2-19)$$

여기서  $Re_* = u_* d/\nu$  (입자 Reynolds수),  $\tau_* = u_*^2/sgd$  (무차원 소류력)이다.

만약, 저질재료로서 일반적인 하천에서 보여지는 모래와 자갈 즉, 인공적으로 만들어지지 않은 모래 혹은 극단적으로 편평하지 않은 모래를 저질재료로 하고 수로의 측벽이 활면이고 수로폭 수심비  $B/H$ 가 3 이상이고 또한 사주가 발생할 만큼 크지 않다면, 식(2-19)에서  $s$ ,  $B/H$ 를 무시할 수 있다. 왜냐하면  $s$ 는 거의 1.6~1.7 정도로 일정하고 또 측벽의 영향도 수로측벽이 유사량에 미치는 영향에 대한 실험적 연구로부터  $B/H$ 가 3 이상이면 측벽의 영향은 거의 고려하지 않아도 좋다는 것이 알려져 있기 때문이다(Williams, G.P, 1970). 따라서 이 경우 식(2-19)은 다음과 같이 된다.

$$q_s/u_* d \text{ or } \phi = f(Re_*, \tau_*, H/d) \quad (2-20)$$

단, 하상의 3차원적 형태(사주 등) 및 그것이 유사량과 흐름의 저항에 미치는 영향을 알기 위해서는  $B/H$ 를 무시하는 것이 불가능하다.

또한 식(2-20)의 3가지 양중에서  $q_s/u_* d$  및  $\phi$ 에 영향을 미치는 효과로서는  $\tau_*$ ,  $H/d$ 가 우선적이고  $Re_*$ 는 그것을 다소 변형하는 두번째량이라고 하는 기본적 입장을 본고에서는 취하기로 한다.

이상에서 언급한 것처럼 이동상흐름의 무차원 상태량  $\pi$ 를 규정하는 것은  $Re_*$ ,  $\tau_*$ ,  $H/d$ ,  $B/H$ ,  $s$ 의 5가지의 무차원량이다. 이중 이차원적 흐름을 고려하면  $B/H$ 의 영향을 무시할 수 있다. 이차원적 흐름의 무차원 상태량을 규정하는 나머지 4가지량의 역학적 의미와 그 영향 정도를 명확히 하고, 또한 이동상 흐름의 무차원 상태량을 규정함에 있어서 위에서 논의한 무차원량은 적절한 것

인가를 검증하기 위해서 이동상흐름의 부분현상을 살펴보고자 한다.

(1)부유사 운동의 상사성

부유사의 운동은 난류장 흐름에서 발생한다. 따라서 각각의 입자운동의 상사성으로 부터 그 운동의 통계적 특성의 상사성이 중요하다. 여기서는 통계적 특성의 하나인 부유사의 평균농도  $C$ 에 대한 분포의 상사성에 대해서 고찰하고자 한다.

이차원 등류일 경우,  $x$ 방향 및  $y$ 방향의 확산을 무시할 수 있기 때문에 부유사의 농도분포에 관한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dz}(\epsilon_z \frac{dC}{dz}) + w_0 \frac{dC}{dz} = 0 \quad (2-21)$$

수면 및 바닥을 통하여 물질의 이동이 없기 때문에, 위식을 적분하면 다음 식으로 된다.

$$\epsilon_z \frac{dC}{dz} + w_0 C = 0$$

저면으로부터  $a$ 만큼 떨어진 지점의 농도를  $C_a$ 라 하고  $\frac{z}{H} = x$ ,  $\frac{a}{H} = x_a$ 라 하면, 다음의 관계식이 성립한다.

$$C / C_a = \exp \left\{ - \int_{x_a}^x (w_0 H / \epsilon_z) dx \right\} \quad (2-22)$$

이로부터 수심  $H$ 가 다른 경우라도 동일한 농도분포형이 되기 위해서는 다

음식이 성립해야만 한다.

$$(w_0 H / \varepsilon_z)_r = 1, (x_a)_r = 1 \quad (2-23)$$

여기서  $\varepsilon_z$ 를 운동량의 와동점성계수라 하면, 다음과 같이 표시된다.

$$\varepsilon_z = u_* \cdot x \cdot H \cdot x(1-x) \quad (2-24)$$

여기서  $x$ 는 Karman정수이다. 이것을 식(2-23)에 대입하면, 다음 식이 성립된다.

$$(w_0 / x u_*)_r = 1, (x_a)_r = 1 \quad (2-25)$$

그런데 부유입자의 침강속도  $w_0$ 는 항력계수를  $C_D$ 로 표시하면 다음과 같다.

$$w_0^2 \propto \frac{1}{C_D} sgd$$

따라서 위 식은 다음과 같이 표시된다.

$$\left(\frac{sgd}{C_D x^2 u_*^2}\right)_r = \left(\frac{1}{C_D x^2} \tau_*^{-1}\right)_r = 1, (x_a)_r = 1 \quad (2-26)$$

그림 1은 입경과 침강속도의 관계를 나타낸 것이다. 입경이 0.3cm 정도까지는  $w_0 \propto \sqrt{d}$  이고  $C_D$ 는 일정하다. 입경이 0.01cm 이하에서는  $w_0 \propto d^2$ 에 비례하고, 소위 Stokes의 침강속도식이 성립하게 된다. 0.01cm로 부터 0.3cm는 천



이영역에 해당한다.

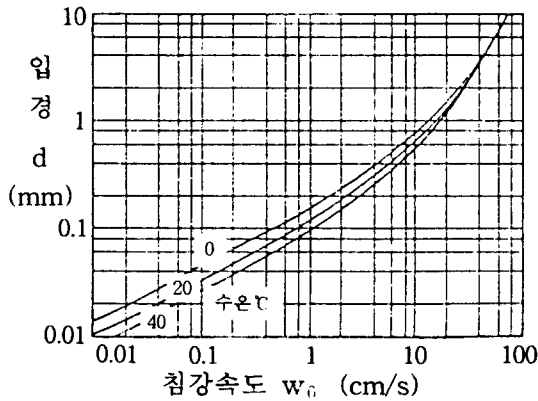


그림 1 침강속도와 입경과의 관계

따라서  $d$ 가 0.3cm 이상이라면, 농도분포의 상사가 성립하기 위해서는  $(\tau_*)_r=1, (x_a)_r=1$  이면 양호하고,  $d$ 가 0.3cm 이하의 경우에는  $(C_D \tau_*)_r=1, (x_a)_r=1$  이 된다.

또한  $s$ 가 다르면 같은 값의  $w_0/xu_*$  라도 입경이 다르기 때문에 난류에 대한 입자의 응답과 가상질량력의 효과도 다르게 나타난다. 따라서  $s$ 에 따라 다소 농도분포형에 차이가 발생한다고 알려져 있다.

## (2)저면에서 움직이는 입자운동의 상사성

저면근처를 움직이는 입자의 운동식은 저면이 평편할 경우 다음과 같다 (Hinze, 1975).

$$\rho_s \frac{\pi}{6} d^3 \frac{du_s}{dt} = C_D \frac{\rho_w}{8} \pi d^2 |u - u_s| (u - u_s) - [(\rho_s - \rho_w) \frac{\pi}{6} g d^3 - C_L \frac{\pi}{8} \rho d^2 |u - u_s|]$$

$$\begin{aligned}
& (u - u_s) \mu_s - \frac{1}{2} \rho_w \frac{\pi}{6} d^3 \left( \frac{du_s}{dt} - \frac{du}{dt} \right) + \frac{\pi}{6} \rho_w d^3 \frac{du}{dt} \\
& + \frac{3}{2} \rho_w d^2 \sqrt{\pi \nu} \int_{t_0}^t \left[ \frac{du}{dt_1} - \frac{du_s}{dt_1} \right] / \sqrt{t - t_1} \cdot dt_1 \quad (2-27)
\end{aligned}$$

여기에서  $u_s$ 는 입자의 이동속도,  $\mu_s$ 는 입자의 마찰속도,  $C_D, C_L$ 은 입자의 항력 및 양력계수이다.

식(2-27)의 우변 제1항은 물입자와 사립자의 속도차에서 발생한 항력이고, 제2항은 마찰에 의한 항력, 제3항은 가상질량을 가속시키기 위한 힘, 제4항은 입자주위의 유체압력경사에 의해 생기는 힘, 제5항은 소위 Basset 항으로써 비정상적인 운동을 하고 있는 입자에 작용하는 저항과 정상적인 운동에 작용하고 있는 입자에 작용하는 저항과의 차이에 기인하는 항을 나타내 준다. 또한 본래 저면근처에서는 흐름은 속도경사를 갖고 또한 입자의 존재상태에 따라  $\mu_s$  등도 변화하기 때문에, 식(2-27)은 정확하게 저면근처의 입자운동을 표현하지 않지만, 여기서는 단순히 입자에 작용하는 힘이 어떤 것인가를 살펴보는데 식(2-27)의 의미가 있다.

대표속도로서  $y = d$ 에서 유속  $u_d$ 를 취하고  $T$ 를 대표시간으로 하여  $u'_s = u_s/u_d$ ,  $t' = t/T$ ,  $t'_1 = t_1/T$ ,  $u' = u/u_d$ 로 한다면, 식(2-27)은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
& \left( \rho_s + \frac{1}{2} \rho_w \right) \frac{\pi}{6} d^3 \frac{u_d}{T} \cdot \frac{du'_s}{dt'} = \frac{\rho_w}{8} \pi d^2 u_d^2 |u' - u'_s| (u' - u'_s) - [C_D - \mu_s C_L] \\
& + (\rho_s - \rho_w) \frac{\pi}{6} g d^3 \mu_s + \frac{3}{2} \rho_w d^3 \frac{u_d}{T} \cdot \frac{du'}{dt'} \\
& + \frac{3}{2} \rho_w d^2 \sqrt{\pi \nu} \cdot u_d / T^{1/2} \times \int_{t'_0}^{t'} \left[ \frac{du'}{dt'_1} - \frac{du'_s}{dt'_1} \right] / \sqrt{t' - t'_1} \cdot dt'_1 \quad (2-28)
\end{aligned}$$

윗 식으로 부터 저면 근처에 작용하는 입자운동의 상사조건은 다음과 같다.

$$\left\{ \frac{(C_D - \mu_s C_L) \cdot T \cdot u_d}{(\rho_s / \rho_w + 1/2) d} \right\}_r = \left\{ \frac{\rho_s / \rho_w - 1}{\rho_s / \rho_w + 1/2} \cdot \mu_s \cdot \frac{gT}{u_d} \right\}_r = \left\{ \frac{1}{\rho_s / \rho_w + 1/2} \right\}_r$$

$$= \left\{ \frac{\sqrt{\nu T}}{(\rho_s / \rho_w + 1/2) d} \right\}_r = 1$$

그런데  $d$ 를 대표거리 축척으로 하면,  $T = d/u_d$ 로 할 수 있기 때문에 윗 식은 다음과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} (C_D - \mu_s C_L)_r &= 1 \\ s_r &= 1 \\ (\mu_s g d / u_d^2) &= 1 \\ \left( \frac{u_d \cdot d}{\nu} \right)_r &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (2-29)$$

식(2-29)로 부터  $u_* d / \nu$ 가 크다면  $u_d \propto u_*$ 가 되고, 또한  $C_D, C_L, \mu_s$ 는  $\frac{u_* d}{\nu}$ 에 의해 거의 변화하지 않으며 Basset항의 영향도 무시할 수 있기 때문에 다음 식을 만족시키면 거의 저면근처 운동의 상사성이 성립된다.

$$\left. \begin{aligned} s_r &= 1 \\ (u_*^2 / s g d)_r &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (2-30)$$

그러나  $u_* d / \nu$ 가 작은 경우에는  $u_d / u_* = f(u_* d / \nu)$ 이고,  $C_D, C_L$ 도  $u_* d / \nu$ 에 따라 변화하기 때문에 다음 식이 필요하게 된다.

$$\left. \begin{aligned} s_r &= 1 \\ (u_*^2/sgd)_r &= 1 \\ \left(\frac{u_*d}{\nu}\right) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (2-31)$$

또한 이동한계 소류력을 고려하면 식(2-23)의 우변의 2항 및 3항만을 생각할 경우가 많다. 이 경우에는 이동한계상태에서의  $u$ 를  $u_c$ 로 하면 다음의 관계식이 성립한다.

$$\left\{ \frac{sgd\mu_s}{(C_D + \mu_s C_L)u_c^2} \right\}_r = 1 \quad (2-32)$$

$u_*d/\nu$ 가 크다면,  $C_D, C_L, \mu_s$ 는  $\frac{u_*d}{\nu}$ 에 의하지 않고,  $u_c \propto u_*$ 이기 때문에

다음 식이 성립한다.

$$\left(\frac{u_*c^2}{sgd}\right)_r = 1 \quad (2-33)$$

따라서 한계상태에서 무차원 소류력  $\tau_*$ 은 일정하게 된다. 또한  $s$ 의 효과는  $s$ 가 1.06으로 부터 5 정도까지는 그다지 많지 않지만, 유체가 공기일 경우  $s = 1000 \sim 2000$ 으로 되어 이 경우에는  $s$ 에 따라  $\tau_{*c}$ 가 변하는 것을 알 수 있다. 본래  $s$ 는 독립변수로 취급해야 하며, 2항과 3항만에 의해 이동한계상태를 표현하는데는 문제성이 존재한다.

또한 Iwagaki(1956)에 의하면, 이동한계소류력  $\tau_{*c}$ 는  $R_{e*}$ 가 거의 150을 초과하면 일정치로 되어  $R_{e*}$ 의 영향을 받지 않게 된다( $s=1.65$ 일 경우,  $R_{e*}=150$ 에서 이동한계소류력 상태로 되는 입경은 0.3cm 정도이다).

이상을 종합하면 일반적으로 하천모래와 자갈을 저질재료로 할 경우 유체의 운동, 부유사의 운동, 저면을 움직이는 입자의 무차원상태량을 규정하는 무차원 매개변수로서  $\tau_*$ ,  $R_{e*}$ ,  $H/d$ 의 세가지 양이 필요하다는 것을 알 수 있다. 단  $R_{e*}$ 가 150이상( $s=1.65$ 의 경우,  $d$ 가 0.3cm 이상)이면,  $R_{e*}$ 는 무차원상태량이 되지 않고,  $\tau_*$ ,  $H/d$ 의 두 개의 양으로 표현할 수 있다.

이로부터 이동상 흐름의 무차원상태량은 식(2-19)과 식(2-20)으로 충분히 표현할 수 있을 것이라고 판단된다.

### 2.2.2 이동상모형의 상사법칙

그런데 인공적으로 조도를 부여할 수 없는 이동상 모형실험에서는 흐름의 상사법칙을 만족시키기 위해서 하상형태의 상사가 이루어져야 한다. 즉 평균류 상사의 경우, 식(2-14)에서 전단저항을 결정하는 하상형태가 어떠한 함수로 이루어져 있는가를 알지 못한다면 이동상의 상사법칙을 검토할 수 없다. 일반적으로 하상형태를 포함한 흐름은 식(2-19)의 무차원량에 지배된다. 이동상의 흐름은 식(2-19)의 각 항중 하상저항에 크게 관계하는 소규모 하상형태에 지배적인 요소는 입자 Reynolds수  $R_{e*} = u_* d / \nu$ , 무차원소류력  $\tau_* = u_*^2 / (\rho_s / \rho_w - 1)gd$ , 수심입경비  $H/d$ , 수중비중  $s = (\rho_s / \rho_w - 1)$ 이고,  $u_* d / \nu$ 가 클 경우에는 입자 Reynolds수를 제외하고 나머지 항들을 무시할 수 있다. 따라서 하상재료가 큰 선상지 하천에서는 하상재료의 입경을 모형의 기하학적 축척과 같이 축척하고 그 모형의 재료가 0.6mm 이상이라면 원형하도와 모형하도에서는 같은 하상의 형태가 발생하므로 Froude 상사관계를 적용할 수 있다. 그러나 원형하천에서  $R_{e*}$ 의 값이 충분히 크고 무시할 수 있어도, 일반적인 모형하도에서는  $R_{e*}$ 의 값이 작아져 가끔 이 항이 현상을 지배할 때도 있다. 구체적으로는 원형하천에

서 발생하지 않는 ripple이라고 불리워지는 하상파가  $R_{e*}$ 의 값이 작으면 발생하고 원형하도와 다른 하상형태, 즉 많은 경우 원형하천과 다른 하상저항을 일으키게 된다. 이같은 영역은 모형에 있어서 입경  $d$ 가 작고 마찰속도가 작을수록 발생하기 쉽다.

그런데 모형에 있어서 하도의 표면형상과 중규모 하상파에 의해 결정되는 3차원 유황을 파악하는 것을 목적으로 할 경우, 이동상 모형에서는 중규모 하상형태의 상사도 필요하게 된다. 이 경우 위에서 언급한 소규모 하상형태에 관련된 무차원량의 하폭과 수심의 비  $B/H$ 를 부가시킬 필요가 있고 왜곡이 없는 모형의 조건이 필요하게 된다.

이동상모형에 있어서 또 한가지 큰 문제점은 유사량 및 유사형태의 상사이다. 유사량을 나타내는 함수의 무차원표시도 식(2-19)과 마찬가지로  $R_{e*}$ 가 무시될 수 있다면 유사량은  $\tau_*$ 와  $H/d$ 을 원형하도와 모형하도에서 같게 하면, 유사량과 유사형태에 따라 하상변동형태도 흐름과 같은 축척으로 상사시킬 수 있게 된다.  $R_{e*}$ 가 하도모형에서 무시할 수 없을 경우에는 원형하도에서는 발생하지 않는 ripple이 하도모형에서 생길 수 있고, 하상저항과 마찬가지로 유사량의 상사도 얻어질 수 없게 된다. 또한 부유사형태의 유사량이 많을 경우에는, 마찰속도와 모래입자의 침강속도 비가 현상을 결정하는 중요한 요소가 된다. 따라서 모형의 모래입자의 입경이 0.2mm 이상이면 문제가 없지만, 그 이하의 경우 혹은 비중이 가벼운 모형하상재료의 경우는 침강속도의 축척이 Froude 상사법칙에 의한 속도의 축척과 다르기 때문에 유사형태의 상사성이 얻어질 수 없고, 또한 일반적으로 유사량도 상사되지 않는다. 실제로 이동상 모형실험에서 위에서 언급한 바와 같은 무차원량 모두를 모형과 원형에서 일치시키지 않더라도 하상형태와 유사형태의 상사조건은, 지배적인 무차원량이 동일형태 영역의 범위내에 있으면, 비교적 상사되기 쉽다.

유사량이 상사되지 않는 경우에는 Froude 상사법칙에 의한 시간축척과는 별

도로 모형과 원형에서 하상변동량이 상사되도록 시간축척을 결정하여 하도의 변동사항을 조사할 수가 있다. 단면평균의 하상변동량 식은 다음과 같다.

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial (Bq_s)}{\partial x} = 0 \quad (2-34)$$

여기서  $Z$ 는 하상고,  $Q_s$ 는 전단면의 유사량이다. 대표적인 평면 길이를  $x_0$ , 수직 길이를  $h_0$ , 시간을  $T_0$ , 대표유사량을  $q_{s0}$ 라고 하면 식(2-34)은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial Z'}{\partial t'} + \frac{T_0}{(1-\lambda)} \frac{q_{s_0}}{x_0 h_0} \frac{\partial (B' q'_s)}{\partial x'} = 0 \quad (2-35)$$

여기서  $Z = Z/h_0$ ,  $t = t/T_0$ ,  $B = \frac{B}{x_0}$ ,  $q'_s = q_s/q_{s_0}$ ,  $x' = x/x_0$ 이다. 모형과 원형에서 하상변동량의 상사가 성립하기 위해서는 식(2-35)의 각 항의 비가 동일해야 한다.

$$\left( \frac{T_0 q_{s_0}}{(1-\lambda) x_0 h_0} \right)_r = 1 \quad (2-36)$$

따라서 모형의 시간축척은 다음과 같다.

$$t_r = (1-\lambda)_r x_r h_r q_{sr}^{-1} \quad (2-37)$$

그러나 식(2-37)이 성립하기 위해서는  $\partial (B' q'_s) / \partial x'$ 이 모형과 원형에서

동일하다는 가정을 포함하고 있다. 실제로 모형과 원형의 소규모 하상형태가 다르면 이 가정은 일반적으로 성립하지 않고 하상변동속도를 상사시킬 수 없게 된다. 이것을 좀더 부연하여 설명하면 다음과 같다.

유사량에 대한 다음의 관계가 성립한다고 가정한다.

$$q_s = C u_*^p \quad (2-38)$$

이것을 식(2-34)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{q_s}{(1-\lambda)} \left( \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{p}{u_*} \cdot \frac{\partial u_*}{\partial x} \right) = 0 \quad (2-39)$$

만약 공간적인 소류력의 분포가 모형과 원형에서 동일하다면, 위 식으로부터 구해지는 시간 축척은 다음과 같이 두 개가 된다.

$$t_{r1} = (1-\lambda)_r x_r h_r q_{sr}^{-1} \quad (2-40)$$

$$t_{r2} = (1-\lambda)_r x_r h_r p_r^{-1} q_{sr}^{-1} \quad (2-41)$$

따라서  $p_r$ 이 1이라면  $t_{r1}$ 과  $t_{r2}$ 가 일치하고, 식(2-37)과 동일하게 되어 이 시간축척을 사용하여 하상의 변동속도를 예측할 수 있다. 그러나  $p_r=1$ 이 아닐 경우에는 시간 축척이 2개가 되고, 또 장소적으로도 시간축척을 변경하지 않으면 안되기 때문에 엄밀하게는 하상의 변동형태를 상사시킬 수 없게 된다. 그러나 모형실험은 현상파악의 한 수단이기 때문에 상사성이 어느 정도 만족하지 않는 부분을 용이할 수도 있다.



그러면  $p_r=1$ 이 아닌 경우 모형의 시간축척을 어떻게 결정하면 좋은 결과를 얻을 수 있는가가 문제가 된다. 그런데 실제로  $q_{sr}$ 을 결정할 경우에는 모형 전구간에 대해 평균적인 유사량 혹은 대표단면의 유사량을 예측하여 결정하여야 한다. 따라서 평균적인 유사량과 다른 장소일수록 (소류력이 평균적인 값보다 빛나가 있는 장소일수록)  $p_r$ 이 1이 아닌 경우에는 하상변동 속도가 원형과 상사되지 않게 된다. 이렇게 하여  $q_{sr}$ 을 결정하고  $t_{r1}$ 과  $t_{r2}$ 을 구하면  $t_{r1}$ 은  $t_{r2}$ 의  $p_r$ 배로 된다. 여기서  $t_{r1}$ 은 대표적인 단면을 통과하는 유사량(겉보기 체적)을 모형과 원형에서 같게 하기 위한 시간축척이다. 다시말해서, 모형의  $q_s$ 을  $(1-\lambda)_r \cdot x_r \cdot h_r$  배하면 원형의 유사량으로 되는 시간축척  $t_{r2}$ 는 하천폭의 변화가 없을 경우에 대표적인 단면에서 하상에서 미소 요철의 전파속도, 성장 혹은 소멸속도를 같도록 하기 위한 시간축척이라 할 수 있다. 또한 중규모 하상파의 전파속도는 식(2-38)과 식(2-39)의 연립방정식을 풀어서는 구할 수 없고, 그 속도를 맞추기 위해서는 사주형태를 지배하는 길이 축척과 유사량의 상사성이 필요하다. 실제로 모형실험에서는 실험목적에 따라 시간축척을 결정해야 하지만, 일반적으로 모형의 현상을 원형에 접근시키기 위한 시간축척은  $t_{r1}$ 과  $t_{r2}$ 의 사이에 있다고 할 수 있다.

### 3. 모형축척의 제반 고려사항

#### 3.1 혼합입경 하상재료와 모형재료입경

모형에서 사용하는 하상재료는 현지 하상재료의 평균입경을 하도모형의 길이 축척과 같게 할 뿐만 아니라 입도분포형까지 상사시키는 것이 요구된다. 실제로는 하상재료의 입도분포 형상은 하도의 종단방향과 장소에 따라서도 변화한다. 하도의 일정구간에 있어서 이같은 입도분포형의 변화는 하상재료가 미분급한 선상지 하도에 있어서 특히 현저하다. 그러나, 모형실험에서는 하도전역에 걸쳐서 동일 입도분포형의 하상재료를 사용하지 않으면 안되기 때문에 종단방향으로도 평균화한 분포형을 상정하고, 모형에서 사용할 하상재료에 대한 입도분포를 결정할 필요가 있다. 또한, 현지 하상재료입경에 대한 입경누가곡선이 그림 2에 나타내는 것처럼 A, B, C 구간으로 구분될 경우, A구간을 무시하고 B, C

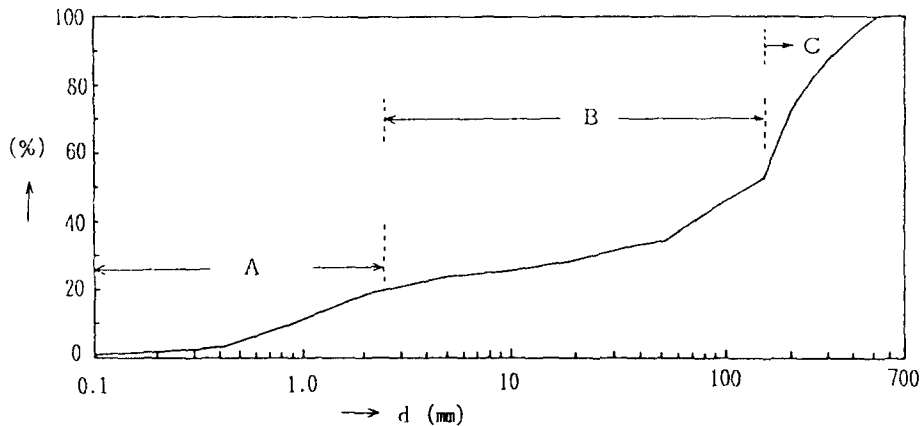


그림 2 입경누가곡선도

구간만에 맞추도록 혼합입경을 결정하면 된다. 이것은 현지하천에서의 A구간은

하상변동에 그다지 영향을 미치지 않기 때문이다. 또한, A집단은 B, C구간의 저질과는 전혀 다른 운동형태(부유운동)로 이동하고 있다고 볼 수 있다.

### 3.2 하구 주변 이동상 모형의 상사법칙

하구 주변에 대한 모형실험에 있어서도, 지금까지 논한 Froude 상사법칙이 적용된다는 것은 두말 할 나위도 없는 사실이다. 여기에서는 하구 주변 모형실험을 수행할 경우의 상사조건에 대해서 살펴보기로 한다.

#### (1) 하구로부터 유출된 토사의 퇴적에 관한 상사성

하구로부터 유출된 토사는 해변에 퇴적되지만, 소류사까지는 고려하지 않더라도 부유사의 퇴적에 있어서는 사립자의 침강속도  $w_0$ 와 유속  $u$ 의 비가 중요한 요인으로 작용하게 된다. 사립자는  $w_0/u$ 가 크면 하구부근에 침강하고, 작으면 하구로부터 떨어진 곳에서 침강한다. 따라서 모형과 원형에서  $w_0/u$ 의 비가 일치되어야 침강특성 즉, 퇴적현상이 잘 재현된다고 볼 수 있다. 또한, 소류사량과 부유사량에 대한 모형과 원형의 비율이 같아야 할 필요가 있다.

#### (2) 표면장력의 영향

파의 파장이 5cm 정도로 짧아지면, 파속자체가 약 5% 정도 증가한다. 따라서 모형을 너무 작게하여 모형상에서의 파장을 짧게 해버리면 표면장력파의 영향을 받게 되기 때문에, 모형의 축척을 무작정 작게 해서 안된다.

#### (3) 반사에 대한 상사성

모형과 원형에 대한 파의 반사율은 동일하게 맞춰줘야 한다. 반사율은 벽면

경사와 파형 경사에 따라 다르다. 따라서 원형과 모형은 적어도 기하학적 상사 (왜곡이 없는 모형)를 유지해야만 한다.

#### (4) 쇄파조건에 대한 상사성

연안근처에서의 해저지형의 변형은 쇄파에 의한 에너지에 의해 주로 지배될 경우가 많다. 따라서 쇄파지점이 모형과 원형에서 동일 지점이 아니라면, 해변 지형의 변화에 대한 상사성을 만족시킬 수 없다.

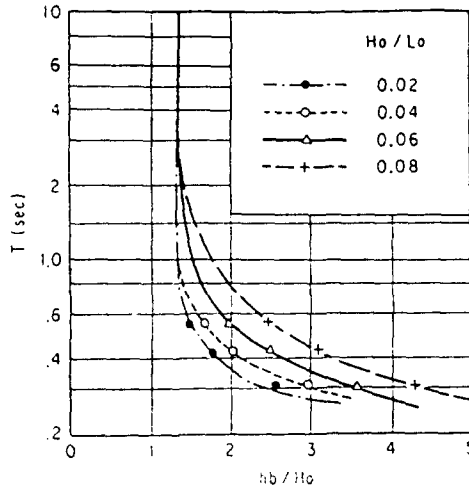


그림 3 쇄파수심에 대한 주기의 영향

쇄파수심과 심해파고의 비  $h_b/H_0$ 는 주기가 2초 보다 클 때는 심해파에 대한 파형경사  $h_b/L_0$ 의 함수이고, 모형을 기하학적상사, Froude 상사시키면 쇄파점의 위치 및 쇄파파고는 거의 상사된다. 그러나 모형이 작고 주기가 짧은 파를 사용하면, 쇄파수심에 주기의 효과가 작용하여 Diephuis의 실험에 의하면 그림 3 과 같이 된다. 그림에 따르면  $H_b/L_0$ 의 값이 0.02일 경우,  $T \geq 0.7\text{sec}$ 이

라면 모형에 미치는 축척의 영향은 없지만,  $H_0/L_0 = 0.08$ 에 이르면  $T \geq 2\text{sec}$ 의 조건을 만족하지 않을 경우 축척효과(scale effects)가 작용함을 나타내고 있다.

### (5) 해상변화의 상사성

균일 입경의 해상일 경우, 해상변화의 상사성은

$$h/L_0 = f(x/L_0, H_0/L_0, \sqrt{gH_0}/w_0, s, \sqrt{\nu} (H_0)^{1/4} g^{3/4} w_0^2, i_0) \quad (2-47)$$

로 나타내어 진다. 여기에서 우변 제5항은 입경이 극단적으로 작지 않으면, 그 영향은 2차적이라 할 수 있다. 여기서,  $h$ 는 수심,  $x$ 는 기준점으로부터의 거리,  $H_0, L_0$ 는 심해파고와 파장,  $w_0$ 는 입자의 침강속도,  $s$ 는 입자의 수중비중 ( $= \rho_s/\rho - 1$ ),  $i_0$ 는 해상의 초기형상이다.

따라서,  $H_0/L_0, \sqrt{gH_0}/w_0, s$ 가 동일하도록 파와 저질재료를 선정하면, 해상변화의 상사성이 성립한다. 그러나 현지해빈의 입경  $d$ 가 작을 경우, 모형의 해빈 이동상재료로서 사용하는 입경은 0.1mm 정도까지이고, 일반적으로 이동상재료의 기하학적 상사율을 맞추는 것은 불가능하다. 다시말해서 왜곡모형을 피하기 어렵다. 이같은 경우에  $s$ 가 작은 재료를 사용하고,  $H_0/L_0$ 와  $\sqrt{gH_0}/w_0$ 만을 상사시키는 것이 일반적이다.

또한 이동한계수심은 저질이 작게 되면  $\sqrt{\nu} (H_0)^{1/4} \cdot g^{3/4} / w_0^2$ 의 영향을 받지만, 이동상 모형실험의 목적 자체가 해안측의 해빈변형이 주가 되므로 쇄파점보다 해안지역의 현상이 중요하기 때문에 그다지 크게 고려하지 않아도 별 큰 문제는 없을 것으로 여겨진다. 또한  $\sqrt{gH_0}/w_0$ 는 저질의 움직임에 대한 편

이성을 나타내는 지표라고 할 수 있다.

### (6) 하구밀도류의 상사성에 미치는 영향

하구에는 염수썰기가 존재하고, 이 염수썰기는 모형실험의 상사성에 종종 어려운 문제를 유발시킨다. 염수썰기에 의한 모형과 원형의 차이는 다음과 같은 것이 있다.

- ① 염수썰기의 존재에 따라 상층의 유속이 빠르게 되고, 사주에 대한 침식력이 원형에서 더욱 크다.
- ② 상층의 유속이 크고, 2층류로 됨에 따라서 파의 변형이 원형과 모형에서 달라진다.
- ③ 부유토사의 해변부에서의 퇴적현상이 밀도류에 의해 달라진다.
- ④ 소류사의 움직임이 2층류 때문에 달라진다.

홍수에 대한 실험일 경우에는 하수가 해수를 하도로 부터 밀어내어 하도의 하상변동에는 영향을 미치지 않지만, 해변부에서의 퇴적상태는 약간의 차이가 발생할 수 있다. 파에 의한 사주의 형성에 관한 실험은 하수의 영향이 작게 될 우려가 있다.

이들의 문제를 해결하기 위해서는 해변부에 염수를 담아두어 실험을 시행하는 방법도 있지만, 실험시설 등의 제약도 있어서 일반적으로 곤란하다.

### 3.3 왜곡모형의 문제점

모형을 왜곡시킨다는 것은 원형과 모형의 상사법칙중 기하학적 상사성을 고려하지 않는다는 것을 의미한다. 일반적으로 수평축척을 작게하면 수심이 매우 작아지므로, 점성의 영향이 작용하지 않을 정도로 수심만을 키워줘야 할 필요성이 생기게 되는데, 이러한 이유로 인하여 모형을 왜곡시키게 된다. 따라서 모형

을 왜곡시키는 것은 大를 위해 小를 희생하는 것에 해당한다고 할 수 있다. 왜곡모형이 사용되는 예를 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 원형의 흐름은 난류이지만 모형에서는 층류가 되는 경우
- 2) 수심이 작기 때문에 모형에서 점성과 표면장력의 영향이 커지는 경우
- 3) 하상재료의 이동이 적기 때문에 모래의 운동을 활발하게 하기 위하여 모형을 왜곡시킬 경우

모형을 왜곡시키는 방법은 다음 5가지를 들 수 있다.

- ①수평과 연직의 위치를 변경한다.
- ②모형의 경사를 증가시킨다.
- ③유량과 통수시간을 변경한다.
- ④모형의 하상재료를 변경한다.
- ⑤조도를 변경한다.

이상과 같은 여러 가지 종류의 방법중 여기에서는 ①에 해당하는 왜곡모형을 대상으로 논의를 하고자 한다. 이 경우 다음과 같은 문제점이 있다.

1) 왜곡시킨 모형에 대해서 유체는 그 수로에 특유의 흐름특성을 갖는다. 따라서 모형을 왜곡시켰을 때 유체운동으로서의 상사성 측면에서 보면 엄밀한 의미에서는 물리적 의미를 상실해 버리고 있다고 할 수 있다. 즉, 1차원 흐름을 대상으로 할 때에는 왜곡축척의 영향은 없지만, 3차원 흐름의 경우에는 그 영향이 발생한다.

2) 왜곡모형에 있어서 수로폭과 수심의 비  $B/h$ 가 10이상의 범위에서는 모형을 왜곡시킨 효과는 그다지 없지만, 10이하의 경우에는 그림 4에 나타내는 것처럼 최대유속을 나타내는 점의 위치가  $B/h$ 에 따라서 크게 영향을 받게 되는 등 유속분포가 달라지게 된다.

3) 수평축 vortex는 모형을 왜곡시키면 강조된다. 특히 만곡부에서의 흐름과 하상변동의 형태에서는 현저한 영향을 미친다. 경우에 따라서는 비정상류 효과도 발생할 수 있다.

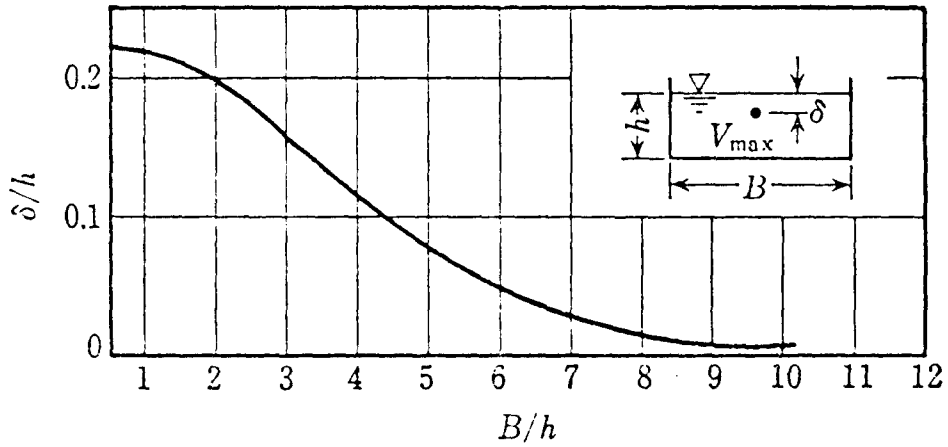


그림 4 수로폭에 따른 최대유속위치의 변화

4)비점성 하상재료는 자신이 가지는 안식각보다 급하게 되면 붕괴된다. 따라서 안식각이 하상재료 자신의 성질에 의해 왜곡모형의 법칙에 따르지 않는다.

5)모형을 왜곡시킴에 따라 하상경사가 크게 되고, 예를 들면 상류이어야 하는 흐름이 사류로 되는 경우가 있다. 또한, 유량계수들도 달라지게 된다.

왜곡모형은 이상과 같은 문제점을 포함하고 있지만, 한편으로는 실험부지, 급수능력, 실험비용 및 시간적 제약과 이동상실험에서의 조도조정 등 모형을 왜곡시켜야 할 필요성이 발생된다. 그리고 총류로 될 위험성이 있을 때에는 수심을 크게하여 난류를 만들고, 유속을 크게 하여 소류력을 증대시키고 아울러 표면장력의 영향을 상대적으로 무시할 수 있는 범위로 만들어야 할 것이다. 또한 수면에서 불규칙하게 변동하는 파의 영향을 적게하고 수심측정의 오차율을 감소시켜, 측정기 센서의 영향을 감소시키고, 아울러 유속측정 가능범위에 유속을 증대시킬 필요가 있을 것이다. 따라서, 모형을 왜곡시킴으로서 파급되는 영향을 명확히 하고, 그에 따른 보정법이 확립된다면 왜곡모형실험이 오히려 효과적인 방법이 될 수 있다. 지금까지의 경험에 의하면 하천의 경우에는 수심이 하천폭에 비하여 작기 때문에 흐름의 2차원성이 강하고 많은 경우 왜곡도  $\alpha=2$  정도



까지는 왜곡시킬 수가 있을 것이다. 단, 현상론적으로는 어쩔 수 없이 왜곡시켜야 하므로 모형을 가능한한 대규모 모형으로 하여 왜곡도는 가능한 1에 기압도록 해야 할 것이다. 또한, 하천의 상황과 실험의 목적에 따라서 왜곡도의 한계가 존재한다. 예를 들면 만곡부와 국소세굴 및 사행의 문제 등에 관한 모형은 왜곡시키지 않은 편이 바람직하다. 또한 파를 취급하는 모형에 있어서도 왜곡모형을 사용하면 파형경사 자체가 원형과 모형에서 달라지게 된다. 이와같이 파형경사가 다른 파를 부여하는 것은 근본적으로 바람직하지 않기 때문에 왜곡모형은 피하는 편이 바람직하다.

### 3.4 이동상 상사법칙의 문제점

이동상모형에서 Froude 법칙에 기반한 물의 흐름은 소규모 하상파에 의한 국소적인 흐름 현상과 저항법칙의 상이에 따른 수위와 유속의 차이 및 vortex 와 확산현상중 Reynolds 법칙의 영향을 받는 범위내의 현상을 제외한다면, 흐름의 상사조건 자체가 만족되어져 있다고 판단된다. 모형에 있어서 흐름에 관한 실험결과의 근사도를 높이기 위해서는 조도가 가능한 한 일치하는 모형축척 및 하상재료를 선정할 필요가 있다.

이동상실험에서는 경계가 가변적이고 또한 조도가 주로 하상파에 지배되고 수위의 조정이 자유롭지 않기 때문에, 종종 왜곡모형이 사용된다. 중요한 예를 열거하면 다음과 같다.

- ①연직방향과 수평방향의 축척이 다른 기하형상왜곡
- ②종단경사와 수평과 연직축척비가 다른 경사왜곡
- ③입경의 축척과 연직축척 혹은 수평축척 등이 다른 입도왜곡
- ④사립자의 수중밀도비가 다른 밀도비 왜곡
- ⑤사립자의 침강속도비와 유속비가 다른 침강속도 왜곡
- ⑥사립자의 침강에 필요한 시간비와 하상변동비가 다른 시간왜곡

⑦소류사량비와 부유사량비 또는 전 유사량비가 다른 유사량 왜곡

이동상실험에서는 피하기 어려운 사항이지만, 이와같은 여러 가지 왜곡의 영향을 축소시키고자 하는 노력이 필요할 것이다.

이동상모형은 하도의 일정구간을 잘라내어, 물과 모래를 흘려보내고 원형하도의 현상을 근사 시킨다. 그런데 하도에는 각각 개성이 있고 아울러 변화와 변동이 있다. 따라서 이 잘라낸 모형에 있어서 이같은 원형 하천의 특성을 반영시키는 것이 중요하다. 이것은 매우 어려운 일이다.

모형에 나타나는 현상을 원형에 적용시킬 수 있는 시간은 모형의 상·하류에 있어서 부여되는 조건의 신뢰성에 따른다. 일반적으로 하도와 외력의 변화가 클 경우에는 예측 불가능이라고 생각되어져 안정한 하도가 아닌한 수십년 앞의 하도 상태를 모형실험에 의해 추정한다는 것은 곤란하다. 모형에 있어서는 조건을 일정하게 해주면 통수시간과 함께 하상의 변화가 일어나고, 이윽고 동적 혹은 정적인 평형상태에 달하게 된다. 그러나 원형에서는 모형에 대응하는 시간이 명확하지 않고 또한, 모형에서와 같은 조건이 일정하게 지속되어 작용한다고 하기 어렵다. 원형에서는 유량의 발생이 확률론적 혹은 시계열론적이고, 유사량도 결정론적, 확률론적일 뿐만 아니라 시계열론적인 현상이다. 이같은 유량과 공급토사량의 조건이 과거의 자료에 의해 추정가능한 년수의 범위를 결정해 줄 수 있을 것이다. 또한, 이때 하상굴삭과 구조물의 축조 등 인위적인 변화를 모형실험중에 충분히 반영시킬 필요가 있다.

모형에서는 하상재료로서 거의 균일한 모래를 사용하고, 세립자분을 제거시킨 재료를 사용하는 경우가 많다. 이때의 문제점을 열거하면 다음과 같다.

- ① 하도의 종단경사가 변화하고 있을 때, 모형의 상류부와 하류부의 하상재료의 폭이 대폭적으로 다를 때가 있다.
- ② 현지의 하도의 하상재료의 조성은 평면적으로 변할 뿐만 아니라 수심방향으로도 변화하고 있다. 이 상태는 시간적으로도 변화하지만, 특히 대홍수가 발생한 이후와 대규모의 굴삭을 실시한 후에는 대폭적으로 변화한다.

- ③ 장갑화 현상(amoring)에 의한 amor coat가 다르다.
- ④ 소규모 하상파의 상사성을 얻기 힘들다.
- ⑤ 사주의 전파속도에 의한 상사조건이 불명확하다.
- ⑥ 모형에서는 사용하는 하상재료의 한계소류력에 상당하는 유량보다 큰 유량이 실험대상 유량으로 설정되어 실험을 실시하지만, 원형하천에서는 이 이하의 유량이 존재하고, 아울러 이 유량에 의해서도 하상변동이 생긴다.
- ⑦ 장시간 스케일의 하상저하와 하상상승 현상을 모형상에서 재현시키는 것이 용이하지 않다.
- ⑧ 구조물의 강도와 변형사주와 고수부의 고결도 및 식생의 효과 등에 관한 상사조건이 어렵다.
- ⑨ 구조물 주변에서는 반복세굴이 발생되어 장갑화현상이 발달하여 원형에서는 모형에서 만큼 세굴되지 않는 것이 일반적이지만, 이같은 상황의 상사조건을 얻는 것이 용이하지 않다.
- ⑩ 토사의 공급량은 산허리의 상황의 개선, 댐저수지, 사방댐, 골재채취, 호안의 건설 및 토사조절능력이 있는 자연하도의 개수 등에 의해 변하고, 그 입도 조성은 대폭적으로 변화할 경우가 있다.
- ⑪ 유사형식에 대한 상사조건이 아직 미확립되어 있다.

이상에서 처럼 이동상실험에는 상사조건만에 한정해도 많은 미해결의 문제점이 있다. 여기에 검증실험의 중요성이 있다고 할 수 있다. 또한, 실험은 목표로 하는 현상에 따라 방법이 달라질 수 있다. 즉, 모형실험을 실시할 경우에 특히 강조하지 않으면 안되는 것이 있다. 그것은 모형범위만의 현상의 이해와 인식만으로는 불충분하고, 그 하천 전체를 하나의 살아있는 시스템으로서 파악하여 그중에서의 위치확립이 불가결하다고 하는 것이다. 이것은 역으로 모형실험이 하천의 시스템을 고찰할 경우에 중요한 역할을 발휘한다는 것을 의미한다.

## 4. 이동상 모형실험 실시방법

### 4.1 모형실험 계획

#### 4.1.1 모형실험의 진행

모형실험을 실시하고자 할 때 구하고자 하는 검토항목에 대하여 필요한 현지자료의 수집과 해석, 수리계산, 경계조건의 검토, 현지상황의 조사 등이 중요하다. 이들을 기초로 하여 모형실험의 전체 계획이 작성되고 모형제작, 검증실험에 의한 상사성의 검토, 본실험에서의 측정, 아울러 측정자료의 해석을 수행하고, 필요하다면 모형을 개조하여 실험을 반복한다. 이 같은 과정에 대하여 흐름도를 이용하여 개략적으로 나타낸 것이 그림 5이다.

실험의 목적에 따라 고정상모형 또는 이동상모형실험의 실시여부, 아울러 실험목적에 대한 필요 精度, 실험시설(부지면적, 급배수설비의 능력등), 이동상하상재료의 제약과 상사성 등으로부터 모형축척이 결정된다. 이때 현지의 각종자료가 필요하게 되고, 이들의 자료수집 및 해석이 불충분하면 실험전체의 신뢰성이 현저하게 저하될 뿐만이 아니고, 실험계획의 입안과 그 수행이 곤란하게 될 경우도 있다. 따라서 모형실험의 실시에 있어서는 현지자료의 해석과 수리계산 이외에 현지의 하도 계획 등 많은 부분을 미리 확실히 확인할 필요가 있다. 이와같은 사항을 준비하는데 충분한 시간을 기울여 다소 실험개시가 늦어진다 하더라도 결과적으로는 빨리 결론에 도달할 수 있는 경우가 오히려 많다.

#### 4.1.2 모형축척 및 모형범위의 결정

모형은 대축척이 요망되지만, 일반적으로 실험목적에 대한 실험 정도, 실험시설(면적, 급배수 설비의 능력등) 및 상사성과 관계에 의해 결정된다. 특히, 이동상모형의 경우에는 원형의 하상재료입경이 매우 중요하게 된다. 모형축척의 결

정에 있어서 이상과 같은 항목 이외에 다음과 같은 제약조건을 고려할 필요가 있다.

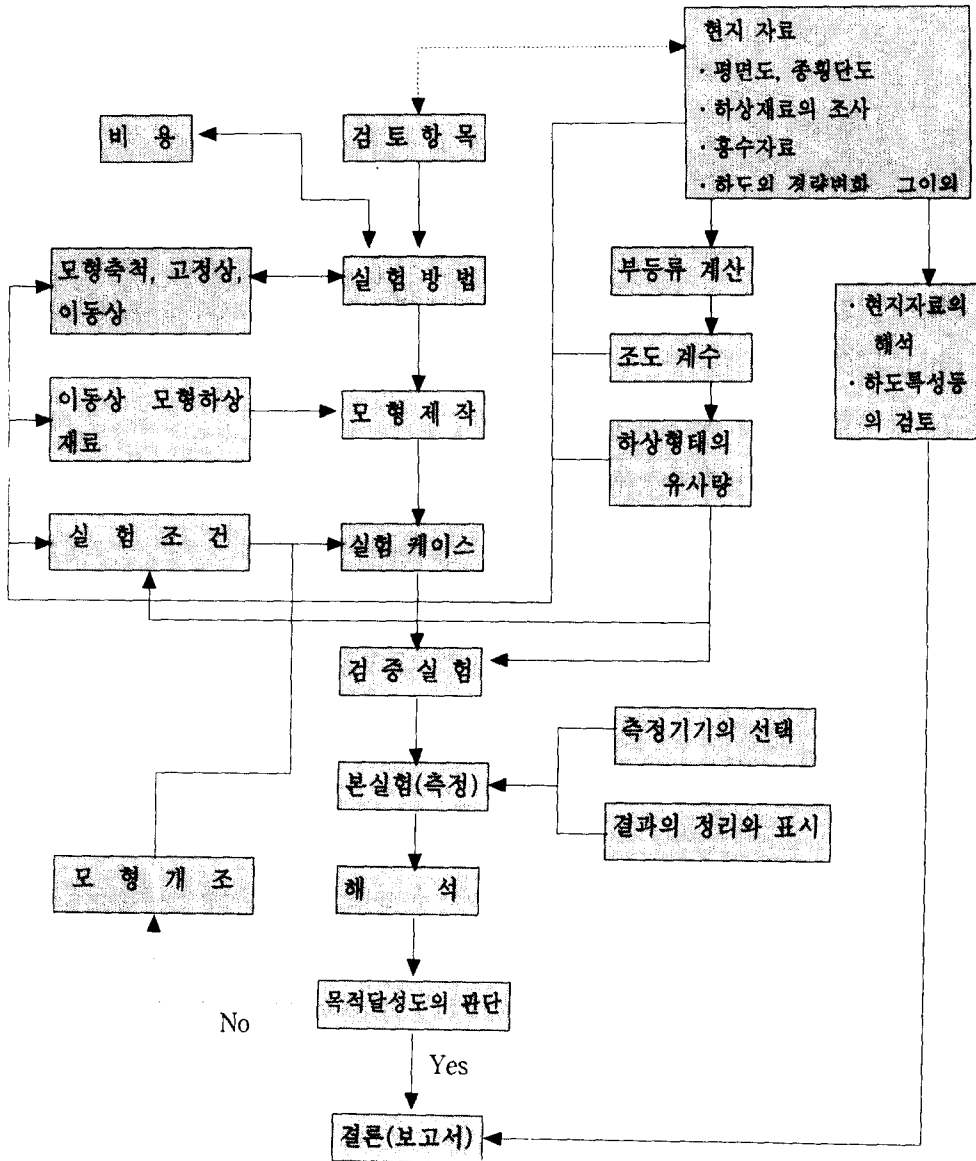


그림 5 실험계획의 흐름도

① 수심 : 중요구간의 수심은 3cm 이상이 되게끔 하고, 점성의 영향을 무시할 수 있는 난류역으로 한다.

② 측정정도와 능력

최근은 미유속까지 측정 가능한 기기도 개발되어 있지만, 일반적으로 유속은 5cm/s, 수위의 정도는 0.5mm, 하상변동량의 정도 2mm이다.

③ 흐름의 상사성

고정상모형은 통상 몰탈을 나무흙손으로 마무리하여 제작되어 진다. 이때의 조도계수  $n$ 은 약 0.012~0.015이고, 쇠흙손으로 마무리 할 경우에도 약 0.010~0.012 정도이다. 또한, 이동상모형에서는 하상형태가 상사되지 않으면 하상저항 즉, 조도계수도 달라진다.

④ 한계소류력, 하상형태, 유사형태의 상사

하상재료와도 관계되는 문제이지만, 대상 유량이 작은 범위까지 완전하게 상사시키는 것은 매우 곤란하다. 모래를 하상재료로 한 하천의 이동상모형에서는 모형에 사용하는 이동상재료에 제한이 있다.

이들 조건을 만족시킬 수 없을 경우, 왜곡모형을 사용할 경우도 있다.

#### 4.1.3 고정상, 이동상실험의 선정

모형실험은 하상의 취급방법에 따라서 고정상실험과 이동상실험으로 나눌 수 있다. 고정상실험은 하상이 몰탈 등으로 된 움직이지 않는 재료로 구성되어진 모형을 사용하여 수행한다. 이동상실험은 하상이 모래 등과 같이 이동가능한 재료로 구성되어진 모형을 사용하여 수행한다. 각각의 특징은 표 1과 같다.

고정상실험에서는 하상변동의 정보는 얻어질 수 없지만, 수위와 유황의 정보는 이동상실험에 비하여 정도높게 얻어진다. 따라서 유하능력, 하도형상의 변화에 의한 수리제랑, 수리량의 변화에 의한 형상손실, 유속분포 및 유황 등을 검토할 경우에 적당하다. 단, 원형에서 하상변동이 현저할 경우에는 부적당하고,

현지자료와 하상변동계산에 의해 사전의 검토구간에 대한 하상의 안정성에 대해 충분히 검토해 둘 필요가 있다. 이에 반해 이동상실험은 하상변동과 구조물

표 1 고정상 실험과 이동상 실험의 비교

	실험내용	주요측정 항목	상사성과의 문제점	경계조건의 부		비용 과 시간	비고
				여방법 수위유량조건의 변화	형상의 변화		
고정상 실험	· 유하능력 · 유량계수 · 조작방법 등	수위, 유속 유량, 유량	조도계수	용이	곤란	적게 든다	원형하천에서의 하상변동이 현저하지 않을 경우를 전제로 함
이동상 실험	· 하상변동 · 구조물의 배치계획 · 세굴대책의 효과	수위, 유속 유량, 하상고, 국소세굴	· 하상형태 · 한계소류력, 보급사 · 시간축척	곤란	용이	많이 든다	

부근의 세굴의 예측 및 그 대책 효과의 검토가 가능하다. 그러나, 고정상실험에 비하여 비용과 시간이 많이 소요되고, 또한 상사성을 만족시키는 것이 곤란할 경우도 있다. 이들 고정상, 이동상실험의 장점 및 단점을 정리하면 표 1과 같다.

#### 4.1.4 실험조건 및 필요자료

모형실험은 시간의 취급방법에 따라 정류실험과 부정류실험이 있고, 유량을 단계적으로 변화시키는 실험도 있다. 정류실험은 부정류실험에 비하여 간편하고, 현상의 시간적 변화과정을 필요로 하지 않는 정류량시의 수리량의 파악과

유하능력의 검토에 적합하다. 부정류실험은 범람과정, 홍수중 및 홍수후의 하상 변화, 제방조작시의 수위변화, 유수지의 저류효과 등의 시간변화량을 검토하는데 적당하다.

이때 사용하는 입력조건, 경계조건의 수리량은 파악하려고 하는 현상에 따라서 조건도 다르다. 이를테면 하구조위의 영향을 받는 하도의 세굴현상을 조사할 경우는 하류단 수위를 낮은 조건으로 설정한다. 이처럼 모형실험의 수리조건은 목적으로 하는 현상에 따라 다르기 때문에 이 현상을 해명하기 위한 수리제량을 충분히 검토하여 결정한 뒤, 실험을 실시하는 것이 바람직하다.

모형실험을 실시할 경우 우선 중요한 것은 실험의 목적은 물론 하천의 전체 계획과 하도의 특성을 충분히 검토하고, '무엇을 구하고자 하는가'라는 실험목적과 하도의 문제점을 확실히 파악하는 것이다. 이에 따라 목적에 따른 형상을 바르게 해명하기 위한 모형이 제작되어 실험도 최소시간으로 합리적으로 진행시킬 수 있고, 아울러 정확한 실험성과가 얻어지게 된다. 따라서, 모형실험의 실시 에 있어서는 원형자료의 해석과 수리계산 이외에 원형의 하도특성, 하도계획 등을 사전에 충분히 검토해 둘 필요가 있다. 이들 검토자료를 포함하여 모형실험에 필요한 원형자료는 다음과 같다. 또한 이들의 자료가 모두 준비되어지지 않더라도 실험은 진행될 수 있으나, 정도 향상과 충실한 검토를 위해서도 제반 자료의 정비가 요망된다.

#### 1) 모형제작에 필요한 자료

- ① 하도의 종횡단도, 평면도, 평상시의 항공사진
- ② 하천구조물과 구조물의 설치상황
- ③ 하상재료 및 지반 보링 자료

#### 2) 실험에 필요한 현지자료

- ① 하도의 종횡단도, 평면도와 경년변화도



- ②하천구조물 및 구조물의 설치상황
- ③하상재료 및 지반 보링자료
- ④과거의 홍수 및 수리상황자료
- ⑤수위~유량곡선
- ⑥홍수흔적수위, 조도계수자료
- ⑦개수계획자료
- ⑧하도특성의 검토자료
- ⑨기타 자료

이처럼 모형실험의 실시에 있어서는 실험목적에 부합되는 원형 각종자료의 수집과 해석이 중요하다. 이에 따라 실험의 기간이 달라질 경우도 있다. 또한 옥외실험의 경우 날씨의 문제도 있고 아울러 이동상실험에서는 하상관리와 정형 등에도 많은 인력과 시간을 요한다. 일반적으로 모형실험은 대략 다음과 같은 기간이 필요로 된다.

- ① 모형설계 : 2주간
- ② 모형제작 : 2~3개월(약 1000  $m^2$  정도의 모형일 경우)
- ③ 실험 : 3개월 ( 1 검토 과제당)
- ④ 해석 및 보고서작성 : 3개월

단, 경우에 따라서는 검증실험만으로 3개월~1년정도 소요되는 경우도 있다. 일반적으로는 하나의 실험에 2~3년, 조금 복잡한 실험은 4~5년을 요하는 것이 일반적이다.

#### 4.2 이동상 검증실험

①모형실험으로부터 얻어지는 결과는 근사해이다. 실험목적과 조건에 따라 가정이 성립하고, 모형의 유한성과 수리량의 범위가 있고, 정도면에서 각종의

오차를 수반하는 것이다. 따라서, 모형의 현상은 원형과 반드시 같지만은 않다. 검증은 모형이 올바른가의 여부를 검토하기 위해 행하는 것이 아니며 어느 정도까지의 재현성을 갖고 있는가를 조사하기 위한 것이다. 예를들면, 지배유량, 시간축척, 보급수량, 통수시간 등에 대한 원형현상에서의 위치설정, 재현되는 모형구간 등은 조사해야만 한다. 일반적으로 고정상모형실험에서는 원형의 홍수시에 대한 흔적수위 또는 조도계수를 맞춤에 따라 검증을 실시한다.

②인공적으로 조도를 부여할 수 없는 이동상모형실험에서는 수리조건과 입경에 따라 하상면에 각종의 하상과가 발생하고, 이것이 흐름의 저항계수와 유사량에 큰 영향을 미친다. 따라서, 흐름의 상사를 위해서는 하상형태의 상사가 필수적이며, 아울러 하상변동의 상사를 위해서는 유사량 및 유사형태가 상사될 필요성이 존재한다. 따라서, 이동상 검증실험은 하상저항, 유사량, 혹은 3차원 유황의 상사를 검증하는 것이고, 또한 계획하도에서의 실험결과를 검토할 경우에 비교자료를 얻는 역할을 한다.

#### 4.2.1 검증방법

이동상모형은 우선 모형하상재료의 입경선정이 매우 중요하다. 이것은 하상 재료를 한번 결정해 버리면 도중에 변경이 곤란한 데에도 그 원인이 있다. 이동상 검증실험은 가능한 한 검토대상으로 하는 수리량에 가까운 과거 홍수를 통수시키고, 그 때의 수위, 유황, 이동형태, 최심하상고와 그 위치, 하상 변동상황 등의 상사성에 대하여 검증이 수행되어 진다. 실험은 원형의 홍수전 하상형상으로 모형을 제작한 뒤, 과거의 홍수 수문곡선(hydrograph)을 시간축척에 의해 물을 공급한다. 이때의 수위, 유황, 수층부위치와 최심하상고, 소규모 하상과, 사주의 형성과 하상변동상황 등이 원형의 현상에 대하여 어떠한 정도의 상사성이 얻어질 수 있는가를 검토한다. 우선 수위는 원형과 모형하도에서 소규모 하상형태의 상사가 얻어진다면 수위도 거의 상사로 된다. 또한 홍수시 및 평수시의 항

공사진등으로부터는 유험과 하상형태에 대한 상사성을 조사할 수가 있다. 아울러 원형의 홍수후와 실험결과의 하상횡단을 비교함으로써 최심하상위치와 하상변동량의 상사성에 대해 검토가 수행될 수 있다.

한편, 원형의 홍수자료와 그때의 하상변동상황을 구하지 못한 채, 하도계획 등 장기적인 하상변동을 규명하고자 할 경우에는 저수로내 혹은 하상이동 가능 단면내를 평균하상고로 하여 모형을 제작하고, 일정한 지배유량을 공급하여 실험을 수행한다. 이것은 水衝部의 최심하상과 사주의 형성, 유험상황이 거의 안정된 시간동안 실시하고, 최심하상고와 그 위치 및 사주형상 등에 대한 재현성을 검증한다. 이처럼 이동상모형의 검증은 모형이 올바른가, 올바르지 못한가를 판단하기 위하여 수행하는 것이 아니고, 어느 정도까지 재현성을 갖고 있는가를 조사하기 위한 것이다. 이때 지배유량, 시간축척, 보급유수량, 통수시간 등의 원형 현상에 대한 설정, 모형과 원형하천의 하상재료의 입도분포의 차이의 영향 등의 검토도 포함되어 진다. 또한, 앞서 살펴본 바와 같이 모형의 검증에는 원형에서의 각종 실측자료가 필수불가결하다. 원형자료가 있어야 비로소 모형상의 재현성의 정도를 확인할 수 있기 때문이다. 즉, 원형자료가 정성적 판단과 정량적 판단과 精度의 기본이 된다.

또한, 이동상실험의 검증의 기준은 실험목적에 대한 필요 정도 이외에, 모형에 있어서의 하상형태와 유사형태 등에 관계된 상사조건의 측면으로 부터도 어느 정도 결정되어 진다고 할 수 있다.

#### 4.2.2 하구부 이동상모형실험의 검증

하구부 이동상모형실험의 상사조건은 이미 논한 바대로 이고, 또한 홍수류에 관한 검증실험의 방법도 앞절과 마찬가지로이다. 여기에서는 홍수에 의한 하구사주 플라슈 및 하구사주 플라슈 후에 파에 의한 하구사주 재현성에 관한 검증방법을 논하기로 한다.

하구사주 플라슈에 관한 검증실험은 하도모형과 마찬가지로 홍수전의 하구 지형으로 모형을 제작하여 과거 홍수의 수문곡선을 공급하여 모형에서 발생하는 현상이 원형현상에 대해서 어느 정도 상사성이 얻어지고 있는가를 검토한다. 검증의 대상은 하구사주 상류의 수위 및 사주부 개구폭, 사주플라슈 상황, 바다로의 토사유출 범위와 그 토사유출량 등이고, 그 상사성에 대해 검토를 수행한다.

파의 운동에 관해서는 3.3에서 논한 바와 같은 조건을 만족하면 상사성은 거의 성립한다고 판단되어지지만, 이에 따른 해상변화, 하구사주의 형성에 관한 상사성의 문제가 된다. 이것은 어떠한 파랑조건을 사용할지의 문제이며, 그 선정이 중요하게 된다. 하구부의 지형변화의 재현에 대해서는 많은 경우 지형변화 상황을 계속 검토하고, 실험조건에 수정을 가하면서 최종적으로 상사성을 얻어 낼 수 있는 실험조건을 결정하게 된다. 이에 대해서 원형 저질입경과 모형하상 재료의 입경으로부터 저질의 주요 이동범위와 해빈의 횡단현상, 사주고 등이 상사되기 위한 파랑조건을 선정한다. 이 방법은 우선 원형의 해빈형상도 및 하구사주의 변동상황으로부터 모래가 이동하고 있는 범위의 사주고를 구한다. 아울러 이때의 전빈경사를 구하고, 이 전빈경사의 변화점에서 쇄파하여 사주고까지 쳐 오르는 파랑조건을 선정한다. 쳐오름 높이는 Saville의 가상경사법으로 부터, 쇄파조건은 Goda에 의한 파형경사와 쇄파수심의 관계로 부터 양자를 만족하는 파고와 주기를 쉽게 구할 수 있다.

한편, 원형 파랑조건을 모형에 적용했을 때 모래의 쳐올림높이 및 전빈경사가 어느 정도로 될 것인가를 확인할 필요가 있다. 아울러, 해빈변형이 발생하는 수심과 저질재료의 이동한계수심 등도 검토해 둘 필요가 있다.

이상과 같은 검토로부터 얻어진 파랑조건에 대하여 검증실험은 파형경사와 파형변화에 대해 실시하여, 하구사주형성의 상사성을 검토한다. 이때 실험에서 사용되는 하천유량은 평균유량을 사용해야 하지만, 하구부의 하층에는 해수가 침입하여 표층유속이 크게되는 것을 고려한 유량을 설정할 필요가 있다.

### 4.2.3 수온의 영향

원형과 모형에서의 소규모 하상형태가 상사되기 위해서는 모형의 하상재료가 0.6mm 이상일 필요가 있다는 것은 2.2에서 이미 언급한 바 있다. 그런데 사련과 사퇴(dune)에 관계하는 입자 Reynolds수  $Re^*$ 는  $u^*$ 와  $d$ 가 정해져 있을 경우, 물의 동점성계수  $\nu$ 에 반비례한다.  $\nu$ 는 수온에 의하여 변화하고, 수온이 20℃에서 40℃로 상승하면  $Re^*$ 가 약 50% 증가한다. 역으로 수온이 20℃로부터 0℃로 내려가면 50% 감소한다. 따라서 0.4~0.8mm의 모형하상재료를 사용하면 수온이 높은 시기에 입자 Reynolds수가 크고, 사퇴 혹은 평탄하상인 것은 수온이 낮게 되면 원형하천에서는 반사퇴(antidune) 혹은 평탄하상이 발생하는 현상이 모형에서는 아주 소규모의 하상파인 사련이 발생하는 현상으로 바뀔 가능성이 있다. 따라서, 소규모 하상형태가 상사되지 않을 뿐만 아니라 흐름의 저항과 함께 유사량도 달라져 버린다. 사례에 의하면, 소규모 하상형태가 상사되었던 하절기의 실험결과에 대해 동절기에는 사련이 발생하고, 이에 수반하여 수위가 상승하고 아울러 하상변동도 매우 줄어들게 된다. 수위는 하절기에 약 10cm의 수심이였지만, 동절기에는 약 0.4~0.7cm로 상승했다. 또한, 하상변동상황은 정류실험에 있어서 하절기의 2배의 통수시간을 취했음에도 불구하고, 하절기의 약 8할 정도의 세굴 및 변동이 있었던 것이 확인되어져 있다. 따라서 이같은 수온의 영향에 따라 실험결과가 좌우되는 경우가 있기 때문에 상사성과 실험精度 측면에서 살펴본다면 영향이 없는 상태로서의 실험을 수행해야 할 필요가 있다.

## 4.3 본실험

### 4.3.1 하상의 준비 및 조건의 설정

## (1)河床

이동상모형 실험시, 실험에 앞서서 수행해야 될 모형의 하상관리로서는 모형 부착구조물을 포함한 모형의 청소 이외에 모형하상재료중의 이물질 제거작업을 들 수 있다. 다음으로 물을 공급하기 전의 준비작업으로서 하상정형이 이루어져야 한다. 하상정형이란 이동상부분을 통수전에 소정의 하상지형으로 제작하는 작업을 말한다. 일반적으로 모형 횡단면상에 피아노선을 설치하고, 각 변화점의 거리를 측정하여 정형단면을 만든다. 이외에 레벨에 의해 단면상의 변화점을 나타내 주고, 틀을 만드는 방법도 사용되어 진다. 단면간은 이 틀과 평면도 및 공중사진 등을 참고로 하여 바르게 연결하고, 아울러 정형을 수행한다. 하상정형에 있어서 주의하지 않으면 안되는 것은 균일 입경의 경우도 마찬가지지만, 특히 혼합입경의 경우는 정형할 때마다 하상재료를 잘 섞어주는 것과 하상재료를 습윤상태로 하여 균일하게 다져야만 하는 것이다. 실험을 실시해 가면서 case가 끝날 때마다 퇴적장소는 각아내고 세굴장소에는 퇴적장소로부터 깎아낸 토사를 메워주는 하상정형이 수행되기 쉽다. 이 경우 실험 case마다 거의 같은 하상변동상황이 이루어져, 재현성의 정도가 매우 좋은 것처럼 생각될 경우도 있지만, 이것은 정도가 좋은 것이 아니고 하상재료의 다짐에 있어서 문제가 있는 것으로서, 앞의 실험 case에서 하상변동이 생긴 부분의 하상만이 쉽게 움직일 수 있게 된데에 기인한 것이라 할 수 있다. 특히 혼합입경의 경우는 입경에 따라 마디가 생기는 현상이 생기기 때문에 실험에 임하기에 앞서 혼합과 균일한 다짐을 수행해야 할 필요성이 있다.

## (2)실험조건 설정

이동상모형의 실험조건 설정은 언급한 고정상실험의 작업외에 통수초기에 단수, 통수 중의 유사공급, 통수후의 배수작업이 부가되어 진다. 또한, 통수초기

에 단수 및 통수후의 배수작업은 정형하상과 실험에서 형성된 하상형태를 변화시키지 않도록 주의해서 수행해야 한다.

#### 4.3.2 검토항목과 실험방법

이동상실험에서는 하상변동과 구조물 주변의 세굴의 예측 및 그 대책효과 등의 검토가 주요 항목들로 되어 있다. 이동상실험의 검토 항목에 대한 실험방법 등의 개요를 살펴보기로 한다.

##### (1) 하도의 종횡단계획에 관한 실험

하도계획에 관한 실험은 사주의 형태와 변동상황, 그에 따른 하상변동 상황 및 수층부위치와 그의 국소세굴심을 예측하고, 아울러 이에 대한 대책공법과 그 효과 등의 파악, 검토가 주요한 항목이라 할 수 있다. 물론 이같은 검토는 원형 하도에서도 수행되어 진다. 이러한 실험에 사용하는 유량조건 등은 고정상실험과 마찬가지로이다. 단, 하상변동의 규명은 홍수의 부정류실험에 의한 검토 이외에 장기적인 하상변동현황을 파악하는 경우 비교적 출수빈도가 높은 유량조건에 정류실험에 의한 검토가 실시된다. 실험에 의해서 하상변동과 국소세굴상황 혹은 유황 등의 문제가 있으면 우선적으로 가능한 범위에서 단면형 및 법선형의 수정이 수행되어져 문제점의 해소 또는 경감을 추구한다. 이같은 검토에 의해서도 문제점이 해소되지 않을 경우, 대책공법에 의해 대처하는 방법을 취하고, 그 공법과 범위 및 대책효과 등에 대해서도 검토가 수행되어 진다. 이로부터 최종적인 하도단면형과 법선형 및 대책공법 등의 제안이 이루어 진다. 또한 이외에 단계 시공시의 문제점 파악과 대책공법의 검토도 수행되어져야 한다.

## (2) 합류부에 관한 실험

하도의 평면형상과 단면형, 저수로 법선형의 검토방법은 앞의 (1)과 마찬가지로이다. 이외의 검토항목으로서는 분류실험의 경우 분류점 구조물 주변에서의 하상변동 상황과 그 영향 및 대책공법과 그 효과에 대한 검토가 수행되어질 수 있다. 합류부의 실험에 있어서는 배활제 및 도류제의 배치와 그 효과 등의 검토가 포함되어져 있다. 실험조건과 방법등의 기본은 본질의 (1)과 마찬가지로이다.

## (3) 제방, 교각 등에 관한 실험

제방 및 교각 등의 하천구조물에 관해서는 구조물 주변에서의 세굴상황 혹은 설치효과와 그 영향과 대책효과의 검토가 주요한 항목으로 된다. 단, 이때 하도의 저수로 단면형과 법선형의 검토도 함께 행해 진다. 다음으로 제방에 대해서는 그 위치와 제방축 방향의 선정, 시공시의 가체절공 설치에 수반한 문제점 파악과 대책공법 등의 검토가 중요하다. 교각에 대해서는 배치, 방향 등의 검토가 필요할 것이다.

## (4) 하구처리에 관한 실험

하구부에 관한 실험은 홍수에 의한 하구사주 플라시상황과 하구수위, 유하능력 및 도류제 등 구조물 부근의 세굴예측과 대책 등에 관해서 검토가 수행되어 진다. 한편, 파에 의한 하구 사주형성 실험으로부터 사주 플러슈 후의 재형성 상황과 하구처리 대책효과의 검토도 주요한 항목이다. 파에 의한 하구사주 형성은 앞서 설명한 검증실험에서 상사성이 얻어진 파랑조건을 사용한 검토가 주로 실시되어 진다.



### 4.3.3 측정항목과 방법

이동상실험에서의 측정항목은 고정상실험의 측정항목 이외에 하상변동과 하상과 형성상황 등의 측정이 추가된다. 이들의 측정방법과 유의사항은 살펴보면 다음과 같다.

#### (1)유황관찰

이것은 고정상 실험에서 논한 측정항목에 사련의 발달, 사퇴 및 사력태의 형성, 이동상황, 국소세굴, 유선의 변화 등이 추가된다. 아울러 하구부의 실험에서는 하구 단면변화 혹은 해안선의 변화 등을 덧붙일 필요가 있다.

#### (2)하상고 측정

하상고 측정은 원칙으로서 모형에서 10cm 간격으로 특정 단면상의 하상고에 대해 수행하고, 사진촬영도 병행한다. 또한, 측정방법으로는 하상정형시와 마찬가지로, 이때 사련, 사퇴 등의 형상요소가 포함되도록 측정하여야 한다. 사진촬영은 사주, 사퇴 및 사련 등의 상황을 알 수 있게끔 백색의 수성페인트를 저유량에서 흘려보낸 상황과 다소 물이 남아 있는 상태로 촬영하면 좋다.

#### (3)국소세굴심 및 형상의 측정

구조물 주변의 일정 장소에서 세굴심의 시간적 변화에 대한 측정을 수행할 필요가 있다. 또한, 이들의 국소세굴장소는 상세한 등고선도가 그려질 정도로 종횡으로 하상고 및 위치를 측정해야 한다.

#### (4)유출사량의 측정

이동상 부위 이외로 유출하고 있는 하상재료의 회수와 그 측정을 수행할 필요가 있다. 대상구역은 원칙적으로 고정상모형부, 침사지 및 배수로부로 하고, 각 부분마다 측정해야 한다. 또한, 고정상모형부에 유출사가 있을 경우는 유황도 또는 그 이외의 평면도, 혹은 다른 방법에 의해 그 분포상황을 파악할 수 있도록 한다.

## 5. 맺음말

최근 계산기의 급속적인 진보 및 수치계산기술의 발달과 더불어 중요한 연구방법중의 하나인 수리모형실험이 뒷전으로 밀리는 경향이 없지 않으며 특히 국내에서는 실험기자재의 부족 등은 물론 소요경비 등의 이유로 수리모형실험을 이용한 연구성과가 외국에 비해 매우 부족한 실정이다. 한편 수리모형실험 방법에 관한 구체적인 해설서 조차 매우 드물다는 점은 이와 같은 국내 수리모형실험의 현 상황을 나타내주는 일례라 여겨진다. 이상과 같은 문제점에 착안하여 수리모형실험에 관한 의의와 내용을 재인식시키고, 실험실시에 있어서의 계획, 방법 등을 재조명하고 아울러 수리모형실험에 관한 연구의 활성화를 기하고자 하는 목적으로 수리모형실험 방법과 상사법칙의 정리를 시도해 보았다. 본고에서는 지면관계상 수리모형실험 중 특히 어려움이 많이 뒤따른다고 할 수 있는 이동상실험을 위주로 기술하였다. 정리에 있어서는 Dr. Yamamoto와 Dr. Suga의 집필서적을 많은 부분 참조하였다.

수치계산기술은 앞으로 한층 진보하여 그 적용범위가 오늘날보다도 더욱 확대될 전망이다. 그러나 점점 다양화되는 하천·해안의 수리문제를 해결하기 위해서는 수리모형실험과 수치시뮬레이션이 상호보완적 관계에 있어야 하는 것은 앞으로도 변화하지 않을 것이며, 두 방법은 더욱 밀연적 관계로 될 가능성이 충분하다고 생각된다.

## 참 고 문 헌

- 1) 順賀堯三 (1974) 河川水理模型實驗の最近の進歩, 土木學會水工シリーズ
- 2) Williams, G. P. (1970) Flume width and water depth effects in sediment-transport experiment, U. S. Geological Survey Professional Paper 562-H
- 3) 山本晃一 (1975) 相似律の觀點から見た移動床流れの水理, 土木研究所資料第1059号
- 4) 順賀堯三, 山本晃一 (1974) 河口部水理模型實驗の問題点, 第18回水理子演會
- 5) 山本晃一 (1988) 河道特性論, 土木研究所資料第2662号
- 6) 山本晃一 (1989) 河川模型實驗手引, 建設省土木研究所
- 7) 山本晃一, 林 正男(1990) 河川移動床模型實驗材料としての輕量材料の水理特性, 土木研究所資料第号
- 8) 土木學會水理委員會 (1973) 移動床流れにおける河床形態と粗度, 土木學會論文第210号
- 9) 岩恒雄一 (1956) 限界掃流力の流体力學的研究, 土木學會論文集第41号, pp. 1-21

- 10)岩佐義郎, 高橋 保 (1968) 開水路非常の相似律に関する問題点, 京都大學防災研究所年保11号
- 11)金圭漢 (1993) 海底砂漣の形成過程と漂砂移動に関する研究, 大阪大學博士學位論文
- 12)芦田和男 (1972) 道上正規 移動床流の抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木學會論文集第206号, pp. 59-69
- 13)田中則男, 新保 修 (1973) 移動床模型實驗用底質材料としての石炭粉の特性について, 港湾研究所報告, Vol. 12 No. 1 Mar
- 14)Best, A. D. and Bijker, E. M. (1971) Scouring of a sand bad in front of a vertical break-water, Proc. 1st Cont. on Port and Ocean Eng., 1077-1085
- 15)Dean, R. G. (1973) Heuristic model of sand trasport in surfzone, Conf. on Eng. Dynamics in the surfzone, 208-215
- 16)Bijker, E. W., Stapel, D. R. A. and deVries, M. (1957) Some seele-effects in modils with bed-load-transportation, Proc. IAHR, S. 32
- 17)deVries, M (1973) Desing and operation of movable-bed river-models, IAHR Seminar on Hydraulics of Alluvial Streams
- 18)Nayak I. V. (1970) Equilibrium Profiles of Model Beaches, University of California Technical Reoport HEL-2-25