

# 이완성 하천모형이론의 개발 Development of Relaxed Similarity Theory for River Models

서일원\*, 오 정태성\*\*, 김영한\*\*\*

## 1. 서론

지금까지 실제 하천에서의 흐름에 가까운 하천모형을 제작하기 위하여 Einstein과 Chien (1954)의 이론을 기반으로한 많은 이론적, 경험적 방법을 이용한 모형이론 연구가 이루어져 왔다. 그러나 이러한 이론들은 적용면에서 조금씩 차이를 보이고 그 결과도 차이가 있어 각 공식의 적용한계와 하천 상황에 따른 적정 공식의 선정지침에 대한 연구가 필요하다.

Einstein과 Chien (1954)은 흐름, 유사이동, 그리고 하상변동의 물리적 과정을 포함하는 이동상 하천모형에 대한 일반적인 모형이론을 수립하였다. Henderson (1966)은 Einstein과 Chien (1954) 이론 중 가장 핵심적인 요소만을 고려한 단순화된 형태의 이동상 하천모형이론을 제시하였다. Novak과 Čábelka (1981)는 Einstein과 Chien (1954)의 이론을 기초로 경험적 연구를 통해서 입자 Reynolds수의 상사조건을 완화하는 등 기존의 경험적 연구 성과들을 반영하여 보다 완화된 이동상 하천모형이론을 수립하였다.

이원환 등 (1983)은 흐름, 유사량, 그리고 유사이동의 상사성을 만족시키기 위하여 한계소류력, 침강속도, 그리고 유사시간 등을 원형과 모형에서 일치하도록 하는 이동상 모형이론을 적용하여 한강하류부에 대한 왜곡 이동상 하천모형실험을 수행하였다. 안수한 등 (1990)은 임의로 선정된 모형사를 적용하여 유사량과 마찰속도가 원형과 모형에서 일치하도록 하는 이동상 모형이론을 적용하여 한강하류부의 왜곡 이동상 하천모형실험을 수행하였다. 선우중호 등 (1993)은 Henderson (1966)이 제안한 모형이론을 적용하여 모디콜라강의 침사지 이동상 모형을 제작하여 모형실험을 수행하였다. 서일원 등 (1997)은 기존 모형이론 연구들에 대한 분석을 통하여 흐름 및 유사이동의 상사를 이용하여 모형축척 및 모형사의 입경과 비중을 선정하고 유사량과 유사시간의 상사를 이용하여 하상변동의 상사를 이룰 수 있도록 보다 완화된 모형이론을 개발하고 이를 적용하여 남한강에 대한 왜곡 이동상 하천모형실험을 수행하였다.

본 연구에서는 Einstein과 Chien (1954) 그리고 Novak과 Čábelka (1981)의 이론을 기초로 대 하천의 모형 제작에 적용할 수 있도록 단순화된 이동상 모형이론을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 모형이론은 Froude상사법칙과 점성력의 상사법칙을 만족하도록 하는 흐름의 상사, 입자 Reynolds수의 제한조건 내에서 Shields의 유입함수비를 원형과 모형에서 일치하도록 하는 유사이동의 상사, 유사량의 상사와 유사량 연속방정식으로 부터 구한 유사시간이 원형과 모형에서 만족되도록 조정하는 하상변동의 상사이다. 남한강 하류부 구간의 왜곡 이동상 하천모형 실험결과를 이용하여 본 연구에서 개발한 이동상 모형이론의 적용성을 평가하였다.

## 2. 이동상 모형이론의 개발

### 2.1 흐름의 상사

하천모형실험에서는 중력이 가장 중요한 힘으로 작용하므로 관성력과 중력의 비인 Froude수의 상사를 만족하여야 하나 현실적으로 정확하게 Froude수의 상사를 만족시키지 못할 경우가 있다. Einstein과 Chien (1956)은 하천모형의 Froude수가 1보다 상당히 작아서 Froude 상사가 그다지 중요하지 않다고 판단될 때 Froude수의 상사를 다음과 같이 완화할 수 있다고 제안하였다.

$$\Delta F = U_r H_r^{-1/2} \quad (1)$$

여기서  $\Delta F$ 는 Froude수의 비,  $U_r$ 은 유속비,  $H_r$ 은 수직길이비, 그리고 첨자  $r$ 은 원형(첨자  $p$ )과 모형(첨자  $m$ )의 비로서 이후의 모든 첨자  $r$ 은 원형의 양을 모형의 양으로 나눈 것으로 나타내기로 한다. 이 식에서  $\Delta F$ 가 1이면 모형과 원형간에 정확한 Froude상사가 이루어진 것을 의미하나, 원형의 Froude수가 작은 경우,  $\Delta F$ 를 1

\* 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수

\*\* 서울대학교 공과대학 토목공학과 박사수료

\*\*\* 서울대학교 공학연구소 연구원

이 아닌 값을 채택함으로써 Froude상사를 완화시킬 수 있다.

점성력의 상사를 위해서는 Reynolds수의 상사를 만족하면 되지만 Froude수의 상사와 동시에 만족시키는 것은 실제적으로 불가능하다. 긴 하천에서와 같이 마찰항력 (friction drag)이 중요한 경우, 원형과 모형 모두에서 Manning의 평균유속 공식이 적용된다는 조건을 사용함으로써 점성력의 상사가 만족되는 것으로 가정할 수 있다. 이때 모형에서 흐름이 난류를 유지하여야 한다. 이 경우 Manning의 평균 유속공식의 비로부터 다음과 같은 점성력의 상사를 만족하는 식을 구할 수 있다.

$$\Delta M = U_r^{-1} n_r^{-1} R_r^{2/3} S_r^{1/2} \quad (2)$$

여기서  $S_r$ 은 경사축척비로서  $H_r/L_r$ 와 같으며,  $R_r$ 은 동수반경비,  $L_r$ 은 수평길이비, 그리고  $n_r$ 은 Manning공식의 조도계수비로서 Strickler가 제안한 다음 식을 사용할 수 있다.

$$n_r = D_r^{1/6} \quad (3)$$

여기서  $D_r$ 은 모형사입경비이다. 식 (2)에서  $\Delta M$ 이 1이면 모형과 원형간에 정확한 점성력의 상사가 성립한 것을 의미하며,  $\Delta M$ 의 값을 1 이외의 값으로 채택함으로써 점성력의 상사를 완화시킬 수 있다. Novak과 Čábelka (1981)는 Manning의 평균유속공식과 Strickler의 공식이 특정 조도 범위에서 정확하다고 보고한 바 있는데, 이는  $\Delta M$ 의 값이 1인 점성력의 상사조건을 완화할 수 있음을 의미한다.

흐름의 상사를 만족하기 위해서는 Froude수의 상사와 Manning의 평균 유속공식의 비 상사가 동시에 이루어져야 하는데, 수심에 비해 하폭이 상당히 큰 하천인 경우에는  $H_r$ 은  $R_r$ 과 같게 되고 식 (1) ~ (3)을 결합하면 흐름의 상사조건식을 유도할 수 있다.

$$\Delta F \Delta M = H_r^{2/3} D_r^{-1/6} L_r^{-1/2} \quad (4)$$

$\Delta F \Delta M$ 이 1이면 정확한 흐름의 상사를 의미하나, 상술한 바와 같이  $\Delta F \Delta M$ 의 값이 1 이외의 값을 채택하는 완화된 상사조건을 만족 시킴으로써 모형사의 비중 및 입경의 축척 결정에 있어서 자유도를 증가시킬 수 있다.

## 2.2 유사이동의 상사

하상변동을 야기시키는 유사입자의 운동과 하상형상은 Shields곡선 상의 위치에 의해 결정되는 것으로 알려져 있으므로 유사이동의 상사를 만족하기 위해서는 다음 식들과 같은 Shields의 유입함수와 입자 Reynolds수 가 원형과 모형에서 동일하게 유지되도록 조정하면 된다.

$$F_s = \frac{1}{\psi} = \frac{\tau_o}{\gamma(S_s - 1)D} \quad (5)$$

$$R_s^* = \frac{u^* D}{\nu} = \frac{\sqrt{\tau_o} / \rho D}{\nu} \quad (6)$$

여기서  $F_s$ 는 Shields의 유입함수로서 일종의 Froude수로 볼 수 있으므로 입자 Froude수로 정의하기도 하며,  $\psi$ 는 전단강도,  $\tau_o$ 는 마찰응력으로서  $\gamma R S$ 와 같으며,  $S_s$ 는 입자의 비중,  $R_s^*$ 는 입자 Reynolds수,  $u^*$ 는 전단속도, 그리고  $\nu$ 는 물의 동점성계수이다.

Novak과 Čábelka (1981)는 경험식을 이용해서  $R_s^*$ 가 3.5이상이면 입자에 작용하는 힘이 주로 형상 마찰에 의한 것으로서 점성력의 영향은 무시할 수 있음을 밝혔다. 그러나 이 경우 하상형태는 원형과 모형이 다를 수 있으므로 유사운동 시작의 상사만이 근사하게 유지된다고 판단된다. 따라서 입자 Reynolds수 상사조건을 무시하는 경우에 원형과 모형간의 유사이동에 대한 상사성을 확보하기 위해서는 다음 식과 같이 Shields의 유입함수 상사조건만을 만족하면 된다.

$$\Delta F_s = (S_s - 1)_r^{-1} D_r^{-1} H_r^2 L_r^{-1} \quad (7)$$

## 2.3 하상변동의 상사

이동상 하천모형에서는 유사이동의 상사와 더불어 하상변동의 상사를 만족시켜야 한다. 이원환 등 (1983)과 안수한 등 (1990)은 기초실험을 통해서 유사량 공식으로서 Brown 공식이 한강의 실측치와 근사하다고 보고한 바 있으며 Brown 공식은 다음과 같다.

$$\frac{q_b}{u^* D} = 10 F_s^2 \quad (8)$$

여기서  $q_b$ 는 단위 폭당 소류사량으로서 공극을 제외한 순수한 입자의 부피를 나타낸다. 하천에서의 유사량 거

동이 Brown 공식을 따른다면, 유사량의 상사식은 다음과 같다.

$$q_{br} = (S_s - 1)_r^{-2} D_r^{-1} L_r^{-5/2} H_r^5 \quad (9)$$

하상변동과 유사량에 대한 관계식은 비정상 개수로 흐름에서의 연속방정식과 유사하게 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Henderson, 1966).

$$\frac{dz}{dx} \pm \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_r}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

여기서  $z$  은 하상고,  $\lambda$  는 공극률이다. 원형과 모형의 기하학적 상사를 만족하기 위해서는  $Z$ , 은  $H$ , 이되어야 하며, 이 경우 유사시간의 상사식은 식 (10) 으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$T_{2r} = q_{ir}^{-1} (1-\lambda) L_r H_r \quad (11)$$

여기서  $T_2$  는 유사시간으로서 총 유사량,  $q_r$ , 로써 일정한 체적을 채우는데 소요되는 시간으로 정의된다. 유사 시간비는 원형의 홍수수문곡선을 모형에서 재현할때의 시간비로 사용하여야 한다. 본 연구에서는 하상변동이 대부분 소류사 이동에 의해 이루어진다고 가정하여 부유사의 양을 무시하여  $q_r$  와  $q_b$  를 같은 것으로 간주 하였다.

## 2.4 요약 및 비교

본 연구에서 개발한 모형이론의 경우, 2개의 상사식 [식 (4) 와 (7)] 에서  $\Delta FAM$  와  $\Delta F_s$  의 값이 1 이 되도록  $L_r$ ,  $H_r$ ,  $D_r$ , 그리고  $(S_s - 1)_r$  을 조정하여야 한다. 여기서 결정하여야 할 변수는 4개인 반면에 만족되어야 할 식은 2개뿐이므로 자유도는 2가 된다. Einstein 과 Chien (1954) 또는 Novak 과 Čabelka (1981) 의 이론에서와 같이 유사량, 유사시간, 그리고 침강속도 등 다른 여러 조건을 추가하더라도 모형이론 식과 더불어 미지수도 따라서 추가되므로 자유도에는 변화가 없다. 그러나 이러한 조건조차도 실질적으로 거의 만족시키기 어려운데, 본 연구에서는 기존의 경험이론을 토대로  $\Delta FAM$  의 값이 1에서 벗어나도록 함으로써 하상변동의 상사에 중점을 두고 일정한 한도 내에서 자유도가 3이 될 수 있도록 하였다. 따라서 하천 수리모형실험의 일반적인 절차대로 모형의 축척에 관련된 변수들  $L_r$  과  $H_r$  이 먼저 결정된 경우라면, 완화된 흐름의 상사 ( $\Delta FAM \neq 1$ ) 와 정확한 유사이동의 상사 ( $\Delta F_s = 1$ ) 를 이용하여 모형사에 관련된 변수들  $D_r$  과  $(S_s - 1)_r$  을 구하고 유사량 및 유사시간의 상사를 이용하여 모형에서의  $q_b$  와  $T_2$  를 결정할 수 있다. 이 때 모형에서의 흐름이 난류가 되고 입자 Reynolds수가 3.5 이상이 되도록 유의하여야 한다.

본 연구에서 개발된 모형이론과 비교할 때 Henderson (1966) 의 이론은  $\Delta FAM$ ,  $\Delta F_s$ , 그리고 입자 Reynolds수의 상사가 1이 되도록 하천과 하천모형에서  $L_r$ ,  $H_r$ ,  $D_r$ , 그리고  $(S_s - 1)_r$  을 조정하도록 하는 것인데, 이 경우 식 3개에 변수 4개로 단지 1개의 변수만을 자유로이 선택할 수 있는데 이것은 모형사의 입경과 비중을 독립적으로 선정할 수 없는 등의 문제점이 있으므로 실질적으로 거의 만족시키기 어렵다. 또한 Henderson의 경우, 정상모형에 적용하는 것이 불가능한 것으로 드러나는 등의 문제점도 있다.

## 3. 모형실험

본 연구에서 개발한 모형이론의 적용성을 검토하기 위하여 남한강 수리모형실험 (서일원 등, 1997) 에서 취득한 실측자료를 이용하였다. 본 연구에서는 남한강 수리모형실험 결과 중 주요 구간에 대한 실험결과를 5개의 모형으로 분류한 후 이들을 사용하여 모형이론의 적용성을 검토하였다. 모형 I은 남한강 구간의 전구간 (팔당댐~섬강합류점,  $L=69\text{km}$ ) 에 대한 모형이며, 모형 II는 양촌리섬 구간 (용담천 합류점~신래천합류점 상류,  $L=8.0\text{km}$ ), 모형 III은 도리섬 구간 (남한강교 하류~청미천합류점,  $L=6.0\text{km}$ ), 그리고 모형 IV와 V는 여주 구간 (소양천 합류점~여주 상수도 취수장,  $L=2.8\text{km}$ ) 이다. 모형 II~IV는 모형 I에 포함된 구간 중 국부 구간만을 선정하여 축척을 변화시켜 제작한 모형이다. 모형 IV와 V는 여주 구간에 대하여 모형사만을 변화시켜 실험을 수행한 것이다. 본 모형실험의 대상 하천인 남한강 구간은 하천 길이가 매우 긴데 반해 실험공간은 한정되어 있어서 모형 모형 IV와 V를 제외하고는 모두 왜곡모형을 사용하였다.

이동상 하천모형에서의 통수시간은 하상재료의 비중과 입경에 따라 결정되는데, 통수시간이 각 측정별로 같아야 하므로 한 종류의 모형사를 사용할 경우, 하상재료도 하나의 특정한 입경으로 대표하는 것이 바람직하다. 남한강 수리모형실험 (서일원 등, 1997)에서는 한강종합개발사업 타당성 조사 및 기본계획 보고서 (경기도, 1995)와 한강수계 치수기본계획 보고서 (건설부, 1992)의 결과로부터 남한강 구간의 각 지점별 하상재료의 중앙입경 자료를 수집하여 하상재료를 모래 및 자갈로 추정하여 비중을 2.65로 정하였다. 본 연구에서 각

모형의 모형사는 수집된 중앙입경 자료를 이용하여 모형에 포함되는 각 측정에서의 입경을 구간별로 산술평균하여 각 모형 구간에서의 대표입경으로 결정하였다. 그런 다음 현실적으로 사용가능한 조건으로부터 선정된 모형사가 상사조건을 만족시키는지의 여부를 검토해 보는 절차를 채택하였다. 각 모형별 선정된 수평방향비, 수직방향비, 그리고 모형사 등을 표 1에 요약하여 수록하였다.

표 1. 각 모형의 축척 및 모형사

모형		축척		모형사		
		$L_r$	$H_r$	종류	$S_{sm}$	$D_m$ (mm)
Case 1	모형 I	220	80	해사	2.59	0.35
	모형 II	100	50	해사	2.59	0.40
Case 2	모형 I	220	80	해사	2.59	0.35
	모형 III	100	50	해사	2.59	0.40
Case 3	모형 I	220	80	해사	2.59	0.35
	모형 IV	100	100	안트라사이트	1.47	0.07
	모형 V	100	100	규조토	2.00	0.26

이동상 모형실험에서 하상변동의 상사를 만족하기 위해서는 모형실험에서 재현하고자 하는 대상 유역의 수문곡선의 통수시간을 유사시간비 ( $T_r$ )로 나누어 축소된 값을 모형실험에 적용하는 유사시간의 상사가 하천과 모형간에 이루어져야 한다. 모형에서의 통수시간을 결정하기 위해서는 대상 유역에서의 홍수시 유출 수문곡선과 유사시간비가 결정되어야 한다. 남한강 수리모형실험 (서일원 등, 1997)에서는 1995년 홍수시 여주 수위표지점의 실측 수위자료로부터 1983년 수위-유량관계식을 이용하여 유량을 계산한 홍수수문곡선을 사용하였다. 모형실험에서 유량의 연속적인 증감을 재현하는 것은 현실적으로 불가능하므로 실제 홍수수문곡선을 참조하여 5 단계의 이산화된 유량으로 대표되는 수문곡선을 도출하였다.

#### 4. 실험결과분석

수평 및 수직방향비가 먼저 결정된 경우,  $\Delta F_{AM}$ 와  $\Delta F_s$ 의 상사로 부터 모형사의 입경과 비중을 결정하여야 하나 실험에서는  $\Delta F_s$ 의 값이 1에 근접하는 모형사의 입경 및 비중을 선정하여 이 들을 이용하여 모형에서의 유사량, 유사시간 등 각종 수리량을 결정하였다. 이 경우 모형이론 중에서  $\Delta F_{AM}$ 와  $\Delta F_s$ 의 상사가 가장 중요하게 되므로 이 두 상사율의 거동에 따른 하상변동 자료를 비교함으로써 모형이론의 적용성을 검토하는 것이 바람직하다. 각 모형별 상사조건을 비교하여 표 2에 수록하였다.

표 2. 각 모형의 상사조건 비교

모형		$D_p$ (mm)	$D_r$	$(S_s - 1)_r$	$\Delta F_{AM}$	$\Delta F_s$
Case 1	모형 I	8.3	23.7	1.038	0.74	1.18
	모형 II	8.3	20.8	1.038	0.82	1.16
Case 2	모형 I	6.2	17.7	1.038	0.78	1.58
	모형 III	6.2	15.5	1.038	0.86	1.55
Case 3	모형 I	1.7	4.86	1.038	0.96	5.77
	모형 IV	1.7	24.3	3.510	1.27	1.17
	모형 V	1.7	6.54	1.650	1.57	8.91

원형에서의 모형 I 구간 중앙입경은 전구간 평균 입경이 아닌 각 Case별 비교 대상 모형 구간의 평균입경을 택하였다. 표 2에서 모형 II 및 IV는  $\Delta F_s$ 의 값이 1에 가까우므로 원형과 모형간의 유사이동 시작의 상사는 충분히 만족된다고 판단된다. 그러나 실제 하천의 각 지점의 입경은 구간별 평균입경과는 다를 수 있으므로 평균적인 의미의 유사이동 상사가 만족되는 것으로 해석되어야 한다. 그림 1은 원형과 모형에서 축선에서의 무차원 소류력과 입자 Reynolds수를 도시한 것이다. 이 그림에서 각 모형에서 축선별 수심은 HEC-

2의 수치모의 결과를 이용하여 무차원 소류력과 입자 Reynolds수를 구하였다. 그림 1에서 모형 IV를 제외하고는 입자 Reynolds수가 3.5이상의 조건을 만족하는 것으로 나타났으며, 대부분 Shields의 한계곡선 위에 존재하는 것으로 나타났다. Shields의 이론에 비추어 볼 때 유사운동은 소류사의 형태로 일어나고 있으며, 하상형태는 사주 (bar)의 형태를 갖는 것으로 나타났다.

본 모형실험은 1995년 홍수사상에 대하여 수행되었으므로 대상 하천에서의 그 당시 홍수사상에 따른 남한강에서의 하상변동 자료와 모형실험결과를 비교하여 모형이론의 적용성을 검토하여야 하나 현장 실측자료가 존재하지 않기 때문에 모형간 하상변동 자료를 비교하였다. 본 실험의 경우, 동일한 구간에 대해서 축척이 다른 두개의 모형을 제작하였고, 모형 IV, V의 경우 모형을 다르게 선정하여 수행되었으므로 모형별로  $\Delta F_{AM}$ 와  $\Delta F_s$ 의 값에 차이가 있어 모형간 하상변동량의 비교를 통해 본 연구에서 개발한 모형이론의 적용성을 검토할 수 있다고 판단된다. 본 연구에서는 축선별 총 하상변동량을 퇴적량과 세굴량 절대값의 합으로 정의하였다. 이렇게 계산된 모형별 총 하상변동량을 비교하여 그림 2에 도시하였다.

$\Delta F$ 의 값이 1이고 조도와 입경의 관계가 Strickler 공식을 따른다고 가정하면  $\Delta F_{AM}$ 은 다음 식과 같이 입경만의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\Delta F_{AM} = f(D_s^{-1/6}) \quad (12)$$

여기서  $\Delta F_{AM}$ 의 값이 1이면 선택된 모형사가 Manning공식의 조도계수비 관계를 만족시키는 조도가 모형에서 실현되었다는 것을 의미한다.  $\Delta F_{AM}$ 의 값이 1보다 작으면, 모형의 조도가 원형에 비해 작다고 할 수 있다. 이 경우, 유속의 증가와 수위의 저하를 초래하고 이로 인해 유사의 운동이 활발해져 총 하상변동량이 원형에 비해 커지게 된다.  $\Delta F_s$ 는 무차원 소류력비이며 이 값이 1일 경우, 원형과 모형에서 유사의 거동이 같다고 할 수 있다.  $\Delta F_s$ 의 값이 1보다 작으면, 모형에서의 무차원 소류력이 커지게 되고 이로 인해 모형의 유사이동이 원형에 비해 활발해져서 총 하상변동량이 원형에 비해 커지게 된다.

이상과 같이 총 하상변동량에 영향을 미치는 요인으로서  $\Delta F_{AM}$ 와  $\Delta F_s$ 의 값이 매우 중요한데, 본 연구에서는  $\Delta F_{AM}$ 와  $\Delta F_s$ 의 값의 변화에 따른 총 하상변동량을 비교함으로써 민감도를 분석하였다. 하천모형의 축척이 결정된 경우, 모형사 입경의 선정이 상사성 만족에 중요한 역할을 하게 된다.  $\Delta F_s$ 는  $1/D$ 의 함수로서 모형사의 입경에 민감한 반면  $\Delta F_{AM}$ 은 식 (13)에서 알 수 있듯이 입경변화에 상대적으로 둔감하게 변화한다. 표 2의 Case 1과 2에서 모형 I과 II, 모형 I과 III의 비교와 같이 모형간  $\Delta F_s$ 의 값의 차이가  $\Delta F_{AM}$ 의 값의 차이에 비해 적은 경우, 그림 2(a)와 2(b)에서 알 수 있듯이  $\Delta F_{AM}$ 의 값이 작은 모형 I에서 총 하상변동량이 큰 것으로 나타났다. 따라서  $\Delta F_{AM}$ 의 값이 작을 수록 모형에서의 총 하상변동량은 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Case 3의 모형 I, IV, 그리고 V의 비교와 같이 모형간  $\Delta F_{AM}$ 의 값의 차이가  $\Delta F_s$ 의 값의 차이에 비해 적은 경우, 그림 2(c)에서 알 수 있듯이  $\Delta F_s$ 의 값이 작을 수록 총 하상변동량이 커지는 것으로 나타났다. 즉, 앞에서 서술한 바와 같이  $\Delta F_{AM}$  값의 차이 (0.96~1.57)도 총 하상변동량에 영향을 주겠지만 일반적으로  $\Delta F_s$ 의 값이 작을 수록 모형에서의 총 하상변동량은 크게 발생한다고 할 수 있을 것이다. 이러한 실험결과는 상술한 이론과 부합하는 것으로서 본 연구에서 개발한 모형이론의 적용성을 입증하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 Einstein과 Chien (1954)의 이론을 토대로 하천 모형실험에 적합한 완화된 이동상 모형이론을 개발하였다. 개발된 모형이론을 남한강 수리모형실험 결과를 이용하여 검증하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

$\Delta F_s$ 는 모형사의 입경변화에 따라 민감하게 변화하는 반면  $\Delta F_{AM}$ 은  $\Delta F_s$ 에 비해 상대적으로 둔감하게 변화하는 것으로 나타났다.  $\Delta F_{AM}$ 의 값이 작을 수록 총 하상변동량은 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그리고  $\Delta F_s$ 의 값이 작을 수록 총 하상변동량은 크게 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 하천모형 실험시  $\Delta F_{AM}$ 와  $\Delta F_s$ 의 값이 1에 가능한 한 가깝게 되도록 모형을 선정하여야 하며, 특히  $\Delta F_{AM}$ 의 값은 모형사의 변화에 둔감하게 변화하므로  $\Delta F_{AM}$  값의 작은 차이가 하상변동량의 큰 변화를 야기시키므로 이에 주의를 요한다.

본 연구에서 개발된 모형이론은 실험장소 또는 모형사의 제한으로 모형이론을 이상적으로 만족시킬 수 없는 경우에 각 모형이론의 제한조건을 완화하는 것이 필요한데, 이런 경우에 유용하다고 할 수 있다. 단, 실험이 모형이론의 검증을 위하여 계획된 것이 아니었기 때문에 소류사 공식의 선정이 모형이론에 미치는 영향 등을 검증치 못하였으며, 원형과 모형간의 직접적인 유사이동의 비교가 이루어지 못하였는데 앞으로 이에 대한 연구가 더 필요하다고 판단된다.

## 참고문헌

- 건설부, 국립건설시험소 (이원환 등, 1983). 한강하류부 이동상 수리모형실험 보고서.  
 건설부 (1992). 한강수계 치수기본계획.  
 경기도 (1995). 한강(남한강)종합개발사업 타당성조사 및 기본계획 보고서.  
 서울특별시 (안수한 등, 1990). 한강하류부 수리모형실험 (한강본류 및 중랑천).  
 현대엔지니어링 (주) (선우중호 등, 1993). 네팔모디강 수력발전소 건설 실시설계 사업 수리모형실험 보고서.  
 건설부, 국립건설시험소 (서일원 등, 1997). 남한강 수리모형실험 보고서.  
 Einstein, H.A., and Chien, N. (1954). "Simiarity of Distorted River Models with Movable Beds." *Trans. Am. Soc. Civil Engrs.*, Vol. 121, pp.440-462.  
 Henderson, F.M. (1966). *Open Channel Flow*. Macmillan Publishing Co., Inc., N.Y.  
 Novak, P., and Čábelka, J. (1981). *Models in Hydraulic Engineering (Physical Principles and Design Applications)*. Pitman Publishing Inc.

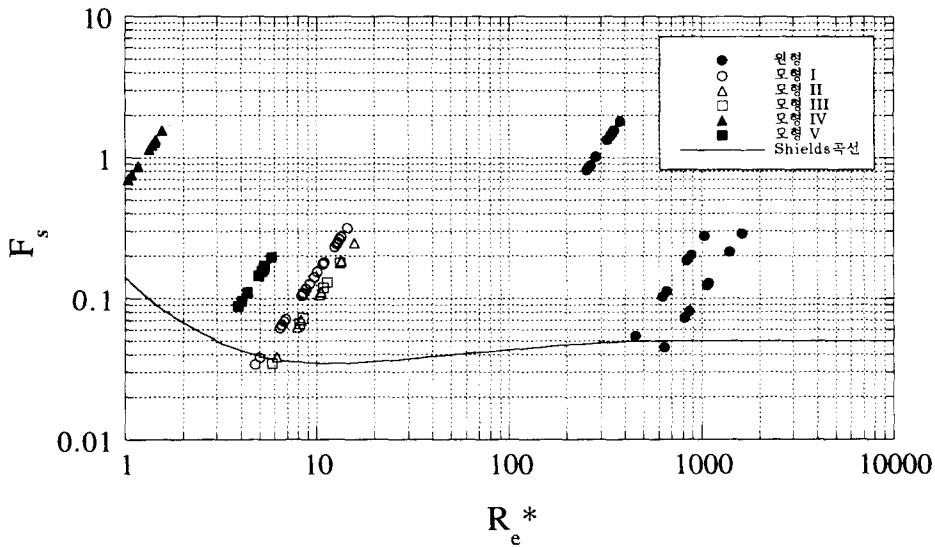


그림 1. 상사조건별 유사운동 양상

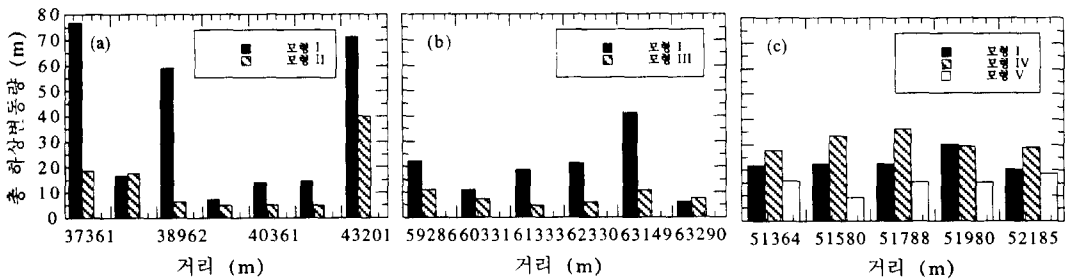


그림 2. 모형별 총 하상변동량 비교