

조류가 탁월한 해역에 대한 이동상 실험과 시간축척

A Prediction of Sea Bottom Changes in Tidal Basin using Movable Hydraulic Model Test

김규한¹·곽봉영²·편종근³

Kyu Han Kim¹, Bong Young Kwak², and Chong Kun Pyun³

1. 서 론

연안역 구조물 건설에 따른 제반영향 및 환경변화를 사전에 예측하기 위해서는 수치모형실험이나 수리모형실험등이 주로 사용되어진다. 최근에는 경제적 측면 및 검토소요시간상의 문제를 들어 수치모형실험만으로 현상을 해석하는 경우가 종종 있다. 그러나 보다 정확한 사전예측을 위해서는 양자의 방법이 동시에 수행되어 상호 비교·검토함으로써 서로의 단점을 극복시켜주어 상호검증효과를 추구할 필요가 있다.

수리모형실험은 실제의 자연상황을 축척에 의해 작은 모형으로 축소시켜 제작하고, 실제와 유사한 현상을 인위적으로 발생시켜 물리현상을 검토하는 것이다. 이 방법은 모형내에서의 제반현상을 직접 눈으로 보고 확인할 수 있으며, 복잡한 3차원적인 현상이라도 이해하는데 큰 도움을 준다. 따라서 모형실험은 오래전부터 모든 자연현상을 해석하는 방법의 하나로서 널리 이용되어져 왔다(金, 1987).

그러나, 수리모형실험은 이와 같은 장점에도 불구하고, 그에 버금가는 문제점 즉, 상사법칙의 결정 및 실험방법의 설정등에 있어서 난해한 어려움을 지니고 있음을 부인하기 어렵다(Kamphuis, 1985). 이러한 모형실험에 있어서 현재까지도 가장 큰 문제는 대표파의 결정방법과 지형변동의 시간축척이며 지형변동의 시간축척은 태풍시의 현지관측결과와 실험결과를 비교해서 결정하고 있으며 현지 재

현정도가 가장 양호한 파를 대표파로 사용하고 있다. 특히, 하상을 실제와 같이 모래·실트 등의 이동상(移動床)으로 설정하여 실험하는 이동상 수리모형실험에 있어서 가장 많은 문제점이 내포되어 있다고 할 수 있다. 예를 들어 항로매물, 해안선 변형 및 구조물 주위의 국소세굴 등을 다루는 지형변화 실험에서는 저질인 모래·실트 등의 입경이 구조물 및 지형의 축척에 맞춰 축소될 수 없는 절대적 문제에 봉착함으로써 발생하는 문제 등으로 인해 현재까지 완전한 상사법칙은 구축되지 못한 상태이다(Isaacson, M., 1985).

본 연구에서는 실제해역의 구조물 건설에 따른 연안역 수리환경 변화, 특히 지형변동 현상을 사전 예측함에 있어서 수리모형실험을 실시하여, 그 현상을 해석하고 이동상 수리모형실험에 있어서 가장 문제시 되는 상사법칙을 충분히 고찰함으로써, 시간축척을 유도해낸 뒤 실험을 수행하여 그 적용성을 검토하였다.

2. 이동상실험의 시간축척결정

이동상실험은, 모르타르 고정상 위에 중앙입경 $D_{50} = 0.012 \text{ cm}$ 의 표준사를 두께 0.5 cm 로 포설한 상태에서 이동상으로 실험하였다. 일반적으로, 해역에서 표사 이동에 의해서 발생하는 수심변화는 다음의 표사이동연속속에 의해서 나타낼 수 있다.

¹ 관동대학교 건설환경시스템공학부 (Division of Civil and Envir. System Eng., Kwandong University, Kangwondo, 215-800, Korea)

² ㈜ 유일종합기술단 (Yooil Engineering Consultants Co., Ltd., Seoul, 121-200, Korea)

³ 명지대학교 토목환경공학과 (Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Kyunggido, 449-728, Korea)

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (1)$$

여기서, h 는 수심, q_x, q_y 는 x, y 축방향의 국소표사량, λ 는 저질의 공극율이다. 후술하는 것과 같이, 검토대상해역에서의 표사이동은 소류상태의 이동이 탁월하다. 따라서, 다양한 입경, 흐름의 범위로 발생하는 소류표사이동에 대하여 적용성이 확인되어 있는 Meyer-peter-Muller의 다음식에 기초를 둘 수 있다. 여기서, q_b 는 소류표사량, ϕ_e 는 유효 shield 수, ϕ_c 는 이동한계 shield 수로, 각각 마찰속도를 이용하여 나타내는 shield 수 ϕ 를 이용하여 다음 식으로 나타내고 있다 (Meyer-Peter, 1948).

$$\frac{q_b}{\sqrt{\sigma' g D_{50}}} = 8(\phi_e - \phi_c)^{3/2} \quad (2)$$

$$\phi_e = \phi(n_b/n)^{3/2} \quad (3)$$

$$\phi_c = 0.047 \quad (4)$$

$$\phi = u_*^2 / \sigma' g D_{50} \quad (5)$$

식(3)중의 n_b, n 는, 하상이 평탄한 경우의 Manning의 조도계수와 실제의 조도계수, σ' 는 저질의 수중비중, g 는 중력가속도이다.

$$n_b = 0.0192 D_{50}^{1/6} \quad (6)$$

$$n = 0.0417 D_{50}^{1/6} \quad (7)$$

단, 식(6), (7)중의 D_{50} 은 cm 의 단위로 주어진다.

현지대상해역의 저질입경은 $0.07\sim 0.6\text{ cm}$ 의 사이에 넓게 분포하고 있다. 이와 같은 저질의 이동한계 마찰속도에 대해서 우선 검토한다.

그림 1은, 식(5)에 있어서, 주어진 평균입경 D_{50} 에 대한 이동한계 Shield 수로부터 이동한계 마찰속도를 계산하여 나타낸 것이다.

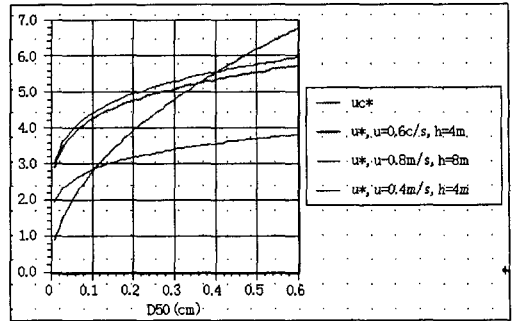


Fig. 1. Relationship of Sediment size and critical movement friction velocity.

Fig. 1로부터, 현지 해안에서의 저질($D=0.2\sim 0.6\text{ cm}$)의 이동한계마찰속도 u_c^* 는 $4.0\sim 6.6\text{ cm/s}$ 모형에서 사용한 저질($D=0.012\text{ cm}$)의 u_c^* 는 0.8 cm/s 정도인 것을 알 수 있다. Fig. 1은 현지대상해역에서 출현한다고 예상되는 흐름의 조건, 즉, 수심 4 m 에서 유속 $u=0.6\text{ m/sec}$, 수심 8 m 에서 유속 $u=0.8\text{ m/sec}$ 및 수심 4 m 에서 유속 $u=0.4\text{ m/sec}$ 의 경우에 저질입경 $D_{50} < 0.6\text{ cm}$ 의 해저에 작용하는 마찰속도를, 다음식으로 부터 계산하여 나타내고 있다(金, 1997).

$$u_*^2 = \frac{\tau}{\rho} = g R I_e \quad (8)$$

$$I_e = n^2 u_*^2 / R^{4/3} \quad (9)$$

여기서, I_e 는 마찰손실수두, R 은 경심이며, 여기서는 수심으로 상정된다.

Fig. 1에서 구한 이동한계마찰속도와 예상되는 마찰속도를 비교하면 명확히 알 수 있듯이, 현지해저에서 유속 $u=0.6\text{ m/sec}$ 정도의 흐름에 의해 이동하는 것은, 입경이 $D_{50} < 0.35\text{ cm}$ 이하의 저질, 유속 $u=0.4\text{ m/sec}$ 정도의 흐름에 의해서 이동하는 것은, 입경이 $D_{50} < 0.1\text{ cm}$ 이하의 세립의 저질이다. 이 결과로부터, 현지대상해역의 현황해상은 이미 흐름에 의해서 이동할만한 저질은 거의 이동한 상태이며, 소위 armor-coat가 형성되어, 현저한 수심변화는 발생하지 않는 상태일 것이 예상된다. Fig. 2는 실험에서 사용한 저질의 이동한계마찰속도와 흐름의 유속관계를 수심 $h=4\text{ cm}$ 의 위치에서 나타낸 것이다.

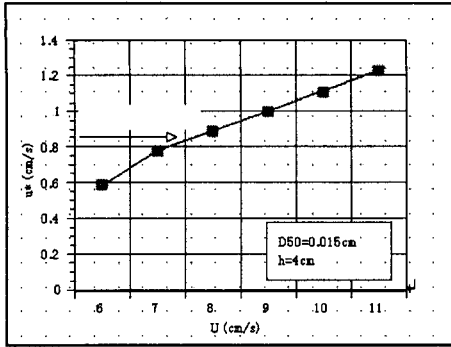


Fig. 2. Relationship of critical movement friction velocity and flow velocity in model.

Fig. 2로부터 명확히 알 수 있듯이, 수심 $h = 4 \text{ cm}$ 의 위치에서는, 유속 $u = 7.5 \text{ cm/sec}$ 이상의 영역에서 저질이동이 발생하게 된다. 따라서, 모형전역에서는 저질의 이동과 수심변화가 발생하지 않지만, 국소적으로 유속이 빨라지는 장소에서는 수심변화가 발생하게 된다. 한편, 일반적으로 흐름에 의해서 발생하는 표사의 이동형태는, 저질의 침강속도 W_f 와 저부마찰속도 u^* 의 비 u^*/W_f 의 크기에 의해서 결정되고, 그 값이 1.0 이하의 경우는 소류상태, 1.0 이상에서는 부유사가 발생하며, 1.0 보다 훨씬 크게 되면 부유사가 탁월하다고 일컬어진다. 침강속도는 일반적으로 식(10)의 Rubey(1933)의 식으로 계산된다(河村三郎, 1977).

$$\frac{W_f}{\sqrt{\sigma' g D_{50}}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{\sigma' g D_{50}^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{\sigma' g D_{50}^3}} \quad (10)$$

여기서, ν 는 동점성 계수이다.

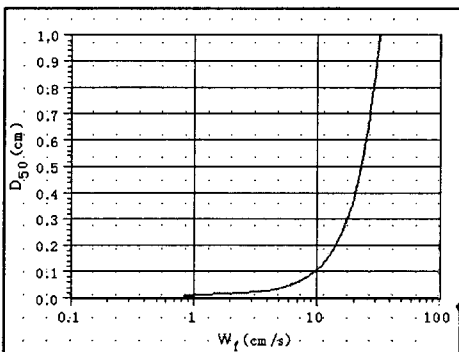


Fig. 3. Relationship of sediment size and falling velocity

Fig. 3은 $\sigma' = 1.65$, $\nu = 0.01$ 로 한 경우에 식(10)

에 기초하여 계산한 침강속도와 저질입경의 관계를 나타낸 것이다. 현지해안의 $D_{50} = 0.2 \sim 0.4 \text{ cm}$ 에 대응하는 침강속도는, $W_f = 15 \sim 25 \text{ cm/s}$ 의 범위이고, 실험에서 사용한 저질 $D_{50} = 0.012 \text{ cm}$ 의 침강속도는 $W_f = 1 \text{ cm/s}$ 이다.

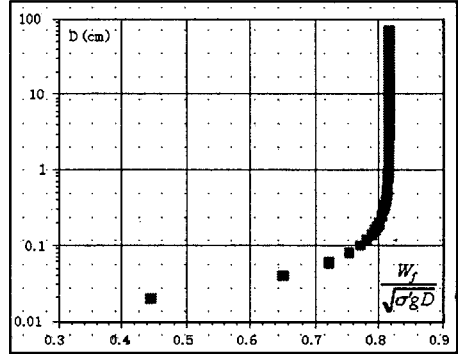


Fig. 4. Relationship of sediment size and dimensionless falling velocity.

Fig. 4는, 식(10)에 기초하여 무차원 침강속도 $W_f/\sqrt{\sigma' g D}$ 와 저질입경의 관계를 나타낸 것이다. 그림으로부터, $D_{50} > 0.2 \text{ cm}$ 이상 입경의 저질에 대해서는, 무차원침강속도는 일정하게 되는 것을 알 수 있다. Fig. 1과 Fig. 2에 나타낸 것과 같은 현지해안에서의 마찰속도 또는 모형실험에서의 마찰속도는, 모든 입경에 대해서 Fig. 3의 침강속도보다 작고, 따라서 현지해안에서는 소류상태의 유사이동이 탁월한 것을 알 수 있다. 이제, 다음의 식(11)-(14)에 기초하여, 이동상모형실험의 시간축척에 대하여 생각해본다. 본 연구에서 수행한 조류실험의 공간축척 S 는 비왜곡모형이며, 1/144이기 때문에, 수심 h , 유속 V , 흐름의 시간스케일 T_c 에 대한 축척은 Froude 법칙으로 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} N(h) = S = 1/144, \quad N(V) = \sqrt{S} = 1/12, \\ N(T_c) = \sqrt{S} = 1/12 \end{aligned} \quad (11)$$

한편, 식(11)으로부터, 수심변화의 시간스케일 T_s 는,

$$N(T_s) = N(h)N(x)/N(q) \quad (12)$$

이된다. 식(12) 중의 표사량의 축척을 결정하는데

에 있어서 $n_b = n$ 으로 하고, ϕ_c 를 생략한 형으로 모형과 실험의 비로 나타내면,

$$N(q) = N(u_*^3) \quad (13)$$

을 얻을 수 있다. 최종적으로 이동상 모형실험의 축척은 다음과 같이 결정된다.

$$N(T_s) = N(h)N(x)/N(n_*^3) \\ = S^2 / (SN(D_{50}^{1/6})) = \frac{1}{144} \left(\frac{0.012}{0.2} \right)^{-1/2} = \frac{1}{35.3} \quad (14)$$

즉, 모형의 1시간이 현지에서의 35.3시간에 상당하는 것이 된다. 참고적으로, (11)식에서 알 수 있듯이 Froude 상사법칙으로 시간축척을 사용하면 모형의 1시간은 현지에서 12시간에 해당한다.

3. 이동상 수리모형실험

3.1 실험방법

본 연구에서는 조류발생장치가 있는 평면수조를 사용하여, 연안역 매립에 따른 조류유속의 변화 및 국소적인 유속의 가속에 의한 국소세굴의 발생유무에 대하여 고정상 및 이동상실험을 수행하여 주변수리환경변화를 사전 검토하는 데에 그 목적이 있다.

실험은 모형실험계획, 예비실험, 그리고 본 실험으로 나누어 수행하였다.

모형실험계획에 있어서는 모형축척 및 모형범위의 결정, 실험조건의 설정과 모형을 제작하는 작업을 수행하였다. 예비실험은 유속의 보정, 침강속도의 결정, 그리고 저질이동특성의 특성에 대한 부분을 반복하여 보정작업을 수행하였으며, 마지막으로 본 실험에 있어서는 현지지형의 재현 및 조건의 설정, 계측항목 및 방법을 설정한 뒤 실험을 수행하였으며, 실험결과에 대해 검토·분석하였다. 실험에 사용할 수조는 길이 15m, 폭 5m, 높이 0.6m의 평면수조에서, 수조의 외부에는 프로펠라를 회전시켜서 흐름을 발생시키는 순환류발생장치가 부착되어 있다. 수조외부의 관로내의 프로펠라를 정·역회전하는 것에 의해, 순류·역류를 발생

시키는 것이 가능하다. 또한, 프로펠라의 회전은 전기신호에 의해서 제어되고, 임의의 주기에서 제한적으로 변화시키므로서, 정현파형의 유속을 발생시킬 수 있다.

3.2 실험내용

모형의 축척 S 는, 현지대상해역 및 실험수조의 크기를 고려하여, $S=1/144$ 의 무왜모형으로 하고, 수조내에 모르타르로 마무리하여 현지해저지형을 작성하였다. 모형제작영역은 Fig. 5에 나타나고 있다. 이 모형상에, 현지실측 조류유속이 재현 가능하도록 동류 및 서류시의 프로펠라회전수를 조정하였다. 조류실험에서는, 동류 및 서류최강시의 유황을 정상류로서 재현하여 수행하였다. 본 실험에서 사용된 조건들은 아래의 Table 1과 같다

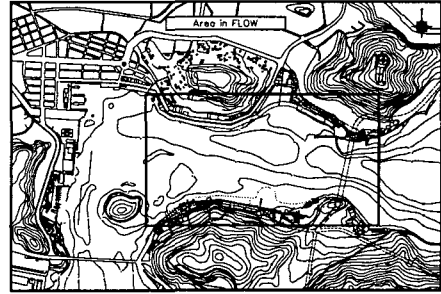
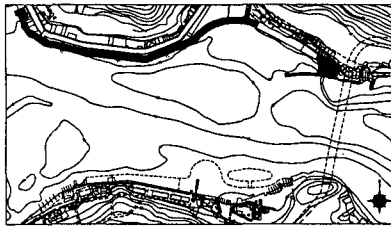


Fig. 5. Test boundary in hydraulic model

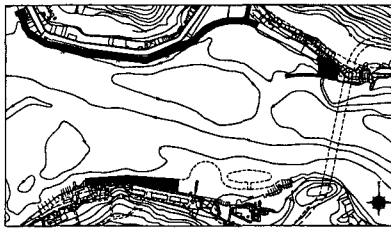
Table 1. Test conditions

| Model | Non-distorted model |
|-------------------------------------|---------------------|
| Scale | 1/144 |
| Sediment | Standard sand |
| D_{50} | 0.012cm |
| Falling velocity | 1cm/sec |
| Critical movement Friction velocity | 0.8cm/sec |

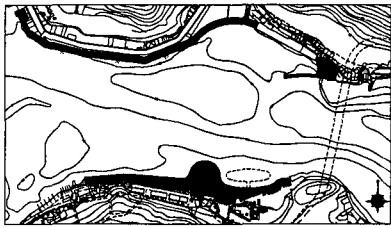
본 실험에서는 조류가 탁월한 남서해안의 Y해역을 선정하여 새로운 매립지형을 건설함에 있어서 3case를 정하여 실험을 수행하였다. 실험안은 Fig. 6과 같다.



(a) case 1



(b) case 2



(c) case 3

Fig. 6. Cases of hydraulic model test.

고정상실험은, 창조 및 낙조시의 평균적인 흐름이 재현되도록 조류발생장치의 프로펠라의 회전수를 조정하고, 각각의 흐름이 정상상태가 된 후에, 24지점의 중층에서 수평방향 2성분 전자유속계로 약30초간 유속을 측정하여, 최대치·최소치와 평균치를 구하였다.

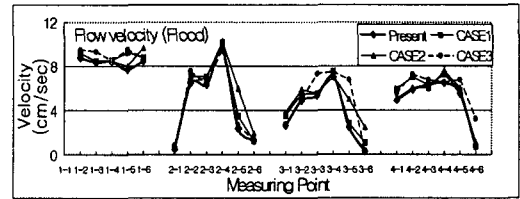
이동상실험에서는, 앞서 설명한 표준사를 사용하여 이동상을 만들고, 초기지형을 계측한 후, 1시간동안 흐름을 발생시켜 그 결과 변형된 단면형상을 측정하였다. 수심의 측정에는 佐藤等(1978)과 마찬가지로 광학식 연속사면측정기를 사용하였고, 각 측선상 2 cm 간격으로 수심을 측정하였다.

4. 실험결과

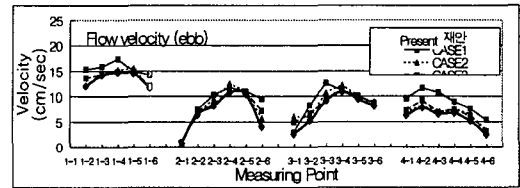
조류가 탁월한 남서해안의 Y 해역을 선정하여

고정상 및 이동상수리모형실험을 수행한 결과, 새로운 매립지형을 건설함에 따라 유수단면적이 감소하고 그로 인해 유속이 빨라짐을 알 수 있었다. 아울러, 유수단면적이 감소함에 따라 새로운 매립지형이 건설되는 부분에 있어서 다소의 지형변화가 발생됨을 발견할 수 있었다.

이동상 수리모형실험의 결과는 유속의 측정결과와 지형변동량변화를 통해 분석하고, 다음의 Fig. 7~8 과 같이 정리되었다.



(a) Flow velocity (flood tide)



(b) Flow velocity (ebb tide)

Fig 7. Results of fixed hydraulic model test.

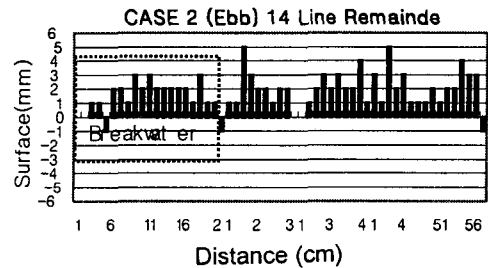


Fig. 8. Results of movable hydraulic model test (case2).

5. 결론

본 연구에서는 이동상 수리모형실험을 통해 한국 남서해안에 위치하고 있는 Y해역을 대상으로 새로운 매립지형 및 방파제를 건설함에 따라 변화하는 유속장과 지형변동상황을 검토하여 보았다.

실험결과 대상해역의 매립 및 구조물 건설에 따라 관심구역의 유속이 증가되는 현상이 확인되었다. 이것은 일견, 수리학적 개념에 의하면 유수단면적의

축소에 따른 당연한 결과로 해석될 수 있으나, 본 수리모형실험의 타당성을 나타내주는 것이며, 이로부터 공간별 유속장의 다양한 변화를 예측할 수 있었다. 매립 및 구조물 건설에 따른 유속장의 변화에 기인하여 발생하는 지형변동량은 그다지 크게 나타나지 않았으며, 구조물 근방에서는 세굴 및 퇴적 현상이 일어나고 있음을 알 수 있었다. 방파제 내해쪽에서는 퇴적현상이 발생하고, 새로운 매립지형이 건설되는 호안 영역에서는 대부분 침식현상이 발생하는 것으로 나타났다.

본실험에서는 이동상실험의 최대관건인 시간 축척을 엄밀히 검토 적용하였다. 사전검토결과, 대상해역에서의 표사이동은 소류상태의 이동이 탁월한 것으로 나타났으므로, 다양한 입경, 흐름의 범위로 발생하는 소류표사이동에 대하여 적용성이 확인되어 있는 Mayer-Perer-Miller식에 기초하여 이동상수리모형 실험의 시간축척에 대해 유도하였다.

유도된 시간축척에 대해 수리모형실험을 실시하고, 현재상태의 상황과 비교한 결과, 매우 비슷한 경향을 나타내 주었다. 이것은 이동상 수리모형 실험에서 사용한 시간축척에 대한 상사법칙이 타당성이 있음을 나타내 주는 것으로 사료된다.

향후 지형변동 수치모형실험 결과와 이동상실험 결과와의 상호비교를 통해 보다 신뢰성 있는 정량적 해석을 수행하고 수치계산에 있어서의 변수들을 변화시켜봄으로써 결과값에 미치는 영향을 보다 상세히 파악하여 볼 필요가 있다고 사료된다.

참고문헌

- Isaacson, M., 1985. Laboratory measurement and generation of directional surface waves. *21th IAHR Congress, Melbourne*, 119-121.
- J.W. Kamphuis., 1985. On Understanding Scale Effect in Coastal Mobil Bed Model. *Conf. Physical Modeling in Coastal Eng.*, 141-162.
- Meyer-Peter, E. and R. Muller, 1948. Formulas for bed-load transport, *Proc. Of the 2nd Congress of the International Association for Hydraulic Research*. Stockholm, Sweden.
- Savage, R. P., 1962. Laboratory determination of littoral-transport rate. *Proc. ASCE, Vol. 88, No. WW2*
- 佐藤昭二·小笹博昭·永井紀彦, 1978. 移動床模型實驗による海岸變形豫測の一例, *海構.*, Vol. 25, 194-198, (海岸過程(漂砂·飛砂と海濱變型, 河口域

の漂砂, など)

河村三郎, 1977. 流送土砂搬算, 1977年度水工學に關する夏期研修會講義集, Aコース, 土木學會水理委員會, 7.1-7.21.

金圭漢 等, 1987, 海岸構造物周邊의 漂砂移動豫測. 韓國水文學會論文集, 61-65.

金圭漢, 1997. 移動床 水理模型實驗의 相似法則과 實驗方法에 대한 考察. 韓國水資源學會, 7.1-7.51.