

# 혼합입경을 고려한 회야강 하구에서의 지형변동에 관한 연구

A study of topography fluctuation from the HEOYA estuary  
considering mixed grain size

박해성\*, 이성대\*\*, 김성득\*\*\*

Hae Sung Park, Seong Dae Lee, Seong Deuk Kim

## 요    지

연안 해역에서의 표사는 하천에서의 유사가 주요한 공급원이므로 산지—하천—해안을 통합한 유사 및 표사에 관한 관리가 필요하며, 해안수리 및 환경적인 측면에서 강성 연안구조물의 건설을 통하지 않고 연안에서의 침식을 억제해야하는 방지대책의 수립 요구가 증대하고 있는 실정이다. 즉 연안에서의 침식, 퇴적관계는 토사공급원의 장기적인 확보여부가 중요하며 하천에서 해안역으로 공급되는 유사량을 예측하고 또한 이들이 어떻게 효과적으로 연안 해역으로 이송되어 가는지를 파악하는 것은 연안표사문제를 이해하는데 매우 중요한 요소이다. 이를 위해서는 무엇보다도 하천에서 연안 해역으로의 유사량을 파악하는 것이 중요하며 그리고 하천 유사량이 하구에 사주를 형성하고 어떤 형태를 거쳐 연안표사로 이동하는가 하는 특성을 파악할 필요가 있다.

울산광역시 울주군 온산읍에 위치한 회야강의 하구폐색은 1990년대 중반부터 연구의 관심이 되어오고 있으며, 1986년 회야강 상류 회야댐 건설 이후 하구폐색이 가속화됨에 따라 매년 회야강 하구에서의 준설이 필요한 실정이다. 특히 회야강 하구부에서는 파랑류, 취송류와 하천류 뿐만 아니라 해류나 조류 등에 의한 흐름과 지형특성등 복합적으로 발생하는 하구현상에 의해 하구에서의 사주 발달이 상대적으로 강하여 하구폐색이 강하게 나타나고 있다. 이의 대책으로 최근 회야강 하구부에 도류제가 건설되었으며 이에 따른 장기적인 하구부 하상변동특성과 토사이동의 특성·파악이 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이 같은 관점에서 회야강 하구부의 도류제 설치에 따른 하구에서의 지형변동과 유송토사량의 특성을 파악하기 위해 하천 상류부에서는 동적 평형상태의 유사량을 가정하고 하상재료 및 유사는 혼합입경으로 하여 하상고 및 하상교환층 중의 입도조성의 시간변화를 구하여 1차원적인 하상변동과 토사이동 특성을 해석하였다.

**핵심용어 :** 회야강하구, 하구사주, 하상변동, 토사이동특성, 혼합입경

## 1. 서    론

최근 연안 해역에서의 표사는 산지—하천—해안을 종합적인 통합적인 토사관리의 필요성이 증가하고 있고, 환경적인 측면뿐만 아니라 이용자의 측면에서 해안구조물에 의하지 않고 해빈을 확보해야하는 요구가 점차 대두되고 있는 실정이다. 이 같은 관점에서 하천에서 해역으로 공급되는 유사량을 예측하고 이들이 어떻게 하구사주를 형성하고 연안 해역으로 표사로서 이송되어 지는지 그 특성을 파악한 후 가능한 한 효과적으로 해빈으로 이동시키는 것이 필요하다. 이를 위해서는 하구부에서 토사의 퇴적효율을 향상시키는 대책과 홍수시의 하천유출 토사를 효과적으로 표사원

\* 정회원 · 울산대학교 건설환경공학부 교수 · E-mail : [sdkim1@ulsan.ac.kr](mailto:sdkim1@ulsan.ac.kr)

\*\* 정회원 · 한라대학교 토목공학과 교수 · E-mail : [sdlee@hit.halla.ac.kr](mailto:sdlee@hit.halla.ac.kr)

\*\*\* 울산대학교 건설환경공학부 석사과정

으로 활용해야 하는 과제가 필요하다 하겠다.

장기적인 해빈보전계획을 수립하기 위해서는 연안 해역에서의 표사량 변동 기구를 이해하여야 할 뿐만 아니라 하천에서 공급되는 유사량을 해석하여야 할 필요가 있다. 하지만 하천유량은 시간에 따른 변동이 심하고, 하천에서의 공급 유사량을 임의의 유량으로부터 규정하는 것도 어려운 과제이다. 그리고 이에 따른 하구에서의 사주 발생과 발달 그리고 하구폐색 현상과 같은 복잡한 하구 현상의 기구를 이해하고 해석하는 것이 중요한 과제로 대두되고 있다.

울산광역시 울주군 온산읍에 위치한 회야강의 하구폐색은 1990년대 중반부터 연구의 관심이 되어오고 있으며, 1986년 회야강 상류 회야댐 건설 이후 하구폐색이 가속화됨에 따라 매년 회야강 하구에서의 준설이 이루어지고 있는 실정이다. 하지만 하구폐색으로 인하여 2000년도부터 준설작업이 계속적으로 행하여지고 있고, 2004년 회야강 하구부에 도류제가 건설되었음에도 불구하고 계속적인 하구폐색현상이 이루어지고 있다. 특히 회야강 하구부에서는 파랑류, 쥐송류와 하천류 뿐만 아니라 해류나 조류 등에 의한 흐름과 지형특성등 복합적으로 발생하는 하구현상에 의해 하구에서의 사주 발달이 상대적으로 강하여 하구폐색이 강하게 나타나고 있다. 이에 따른 장기적인 하구부 하상변동특성과 토사이동의 특성·파악이 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이 같은 관점에서 회야강의 지형자료와 수리특성 자료를 통해 하구부의 도류제 설치에 따른 하구역에서의 지형변동 및 하구폐색현상의 해석과 하천에서 외해측으로 유출되는 유송 토사량을 해석하는 것이다. 이를 위해 회야강 하구로 부터 유출되는 유송토사량은 소류사와 부유사 해석을 통해 검토하였다. 그리고 하천 상류부에서는 동적 평형상태의 유사량을 가정하고 하상재료 및 유사는 단일 및 혼합입경으로 하여 하상고 및 하상교환층 중의 입도조성의 종단분포의 시간변화를 구하여 하상변동과 토사이동특성을 해석하였다.

## 2. 하상변동 해석

### 2.1 하상변동수치모형

하천에서의 하상 및 지형변동을 해석하기 위하여 1차원 하상변동 수치모형에 의해 해석하였으며 본 하상변동 수치모형의 기본 가정은 다음과 같다.

- 수로단면은 광폭구형단면으로 하였다. 즉 경심  $R$ 은 수심  $h$ 와 같으며 단면적  $A$ 는  $Bh$ 이다. 여기서  $B$ 는 수로 폭을 나타낸다.
- 하천유량은 정상상태이며 흐름은 상류이며 수위의 경계조건은 하류측에 나타낸다. 그리고 하상에서의 마찰은 Manning법칙에 따른다.
- 유사량은 소류사 및 부유사를 대상으로 하며 하천의 상류측에서는 동적 평형상태의 유사량을 가정하였다.
- 하상재료 및 유사는 단일 및 혼합입경으로 가정하였다.

### 2.2 하상변동 계산

흐름의 운동방정식은 다음과 같은 부등류 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \right) + i_e = 0 \quad (1)$$

여기서,  $x$ 는 하류방향을 +로 하는 좌표축,  $H$ 는 수위,  $i_e$ 는 에너지경사이다.

혼합입경을 고려한 소류사량을 구하기 위해 다음의 芦田(1972)의 입경별 해석식을 이용하였다.

$$\frac{q_{Bi}}{\sqrt{sgd_i^3}} = p_i 17 \gamma_{*i}^{3/2} \left( 1 - \frac{\gamma_{*ci}}{\gamma_{*i}} \right) \left( 1 - \frac{u_{*ci}}{u^*} \right) \quad (2)$$

여기서,  $q_{Bi}$ 는 입경별 단위폭당 소류량,  $d_i$ 는 모래입경, 아래첨자  $i$ 는 혼합입경  $d_i$ 에 대한 물리량을 나타낸다. 그리고  $s$ 는 모래의 수중비중,  $p_i$ 는 입경  $d_i$ 인 입자가 하상의 교환층에 존재하는 비율,  $\gamma_{*i}$ 는 입경별 무차원 소류력,  $\gamma'_i$ 은 입경별 무차원 유효소류력,  $u^*$ 은 유효마찰속도,  $\gamma_{*ci}$ 는 입경별 무차원 한계소류력 그리고  $u_{*ci}$ 는 입경별 한계마찰속도이다.

부유사의 하상에서의 부유사량은 다음과 같은 Itakura and Kishi(1980)에 의해 구하였다.

$$q_{si} = p_i k \left( \alpha_* \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \frac{gd_i}{u^*} \Omega_i - w_{fi} \right) \quad (3)$$

$$\Omega_i = \frac{\gamma_{*i}}{B_{*i}} \frac{\int_a^\infty \xi \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi}{\int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi} + \frac{\gamma'_i}{B_{*i} \eta_o} - 1 \quad (4)$$

여기서,  $q_{si}$ 는 입경별 부유사의 단위면적당 하상에서의 부상량,  $w_{fi}$ 는 입경별 부유사의 침강속도이다. 그리고  $a = B_{*i}/\gamma'_i - 1/\eta_o$ 이며  $\eta_o=0.5$ ,  $\alpha_*=0.14$ ,  $K=0.008$ ,  $\rho_s$ 는 부유입자의 밀도,  $\rho$ 는 물의 밀도이다.  $B_{*i}$ 는 양력을 계산할 때 마찰속도  $u^*$ 를 적용하기 위한 환산계수이고 균일입경인 경우는  $B_{*i}=0.143$ 으로 일정값을 사용하였다.

입경별 부유사 농도 연속방정식은 다음과 같다

$$\frac{\partial}{\partial t} (\langle c_i \rangle h) + \frac{1}{B} \frac{\partial (Q \langle c_i \rangle)}{\partial x} = q_{si} - w_{fi} c_{bi} \quad (5)$$

여기서,  $c_{bi}$ 는 하상부근의 입경에서의 거리,  $\langle c_i \rangle$ 는 수심평균의 입경별 부유사 농도이다.

혼합입경에서의 입경별 유사의 연속방정식은 교환층에서의 입경별 유사의 교환, 하상의 변동 및 하상변동에 따라 새롭게 교환층에 가해지는 입경분포를 고려하면 다음식과 같다.

$$\delta \frac{\partial p_i}{\partial t} + p_i^* \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left( \frac{1}{B} \frac{\partial (q_{Bi})}{\partial x} + q_{sui} - w_{fi} c_{bi} \right) = 0 \quad (6)$$

유송토사량의 해석유송토사량을 해석하기 위해 소류사  $q_B (m^3/s)$ , 부유사  $q_s (m/s)$ , 부상한 후 침강속도  $w_f (m/s)$ 로 침강하여 가는 유사와 같이 3종류로 분류하였고 다음의 식을 사용하였다.

$$Q_{SED} = \frac{q_B B + q_s B dx - w_f B dx}{1 - \lambda} \quad (7)$$

### 3. 계산결과 및 비교 검토

본 수치계산에는 2006년 7월 울산 회야강을 대상으로 측정된 자료를 사용하여 해석하였으며, 본 하천은 동해로 유입하는 지방2급 하천으로서 유역면적은 218.34km<sup>2</sup>, 유로연장은 40.80km인 중소 하천으로 유역은 장방형의 형상을 이루고 있다. 본 연구의 결과를 검토하기 위하여 HEC-6모형의 결과와 비교하였으며 일반적으로 HEC모형에서는 단일입경을 사용하고 있으므로 본 연구에서도

단일입경과 혼합입경을 가정하여 각각 해석하였다.

대상하천에서의 하상변동, 하구사주의 발달 및 유송토사량의 특성을 해석하기 위해 수치계산은 하구에서 상류로 4400m, 외해측으로 2000m 지점까지의 구간을 대상으로 일정유량이 60시간동안 정상상태로 흐르는 경우를 가정하여 계산하였다. 수치해석에 사용되어진 하상재료는 단일입경인 경우는 50%입경을 그리고 혼합입경을 고려하는 경우는 대상하천의 10%입경, 50%입경 및 90%입경을 입력조건으로 사용하였다.

수치해석 결과는 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 도시하였으며 Fig. 1에서는 단일입경을, 그리고 Fig. 2에서는 혼합입경을 고려한 경우 도류제의 축조전·후의 해석결과를 도시하였다. 그림에서 보듯이 혼합입경을 고려한 경우 특히 시간의 경과에 따라 하구부에서의 사주발달이 현저하며 하구폐색의 특성을 잘 예측하고 있는 것으로 확인되었다. 그러나 단일입경에 의한 경우 하구에서의 사주발생의 변동이 다소 미약한 것으로 예측되었다. 그리고 도류제 축조에 따른 하구부에서의 지형변동 특성이 나타나고 있음을 알 수 있다. Table 1.에서는 회야강 하구부에서 하상고의 변화를 비교 분석한 결과로 단일입경에 대한 하상고의 변화는 큰 차이를 보이지 않았으나 혼합입경으로 계산된 결과는 하상고가 상승되어진 것을 나타내고 있다.

홍수량에 따른 유출토사량의 결과는 Table 2.에 나타내었으며, 홍수량에 따른 유출토사량의 변동은 Fig. 3.에 도시하였으며 유량의 증가에 따라 유출토사량이 비선형적으로 증가하고 있음을 보여주고 있다.

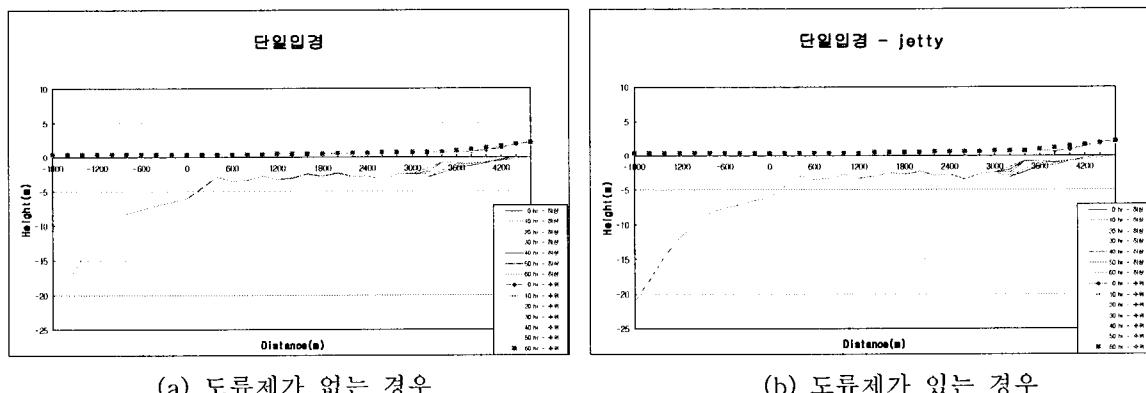


Fig 1. 단일입경에 의한 하상고 변화 ( $Q = 500 \text{ m}^3/\text{sec}$ )

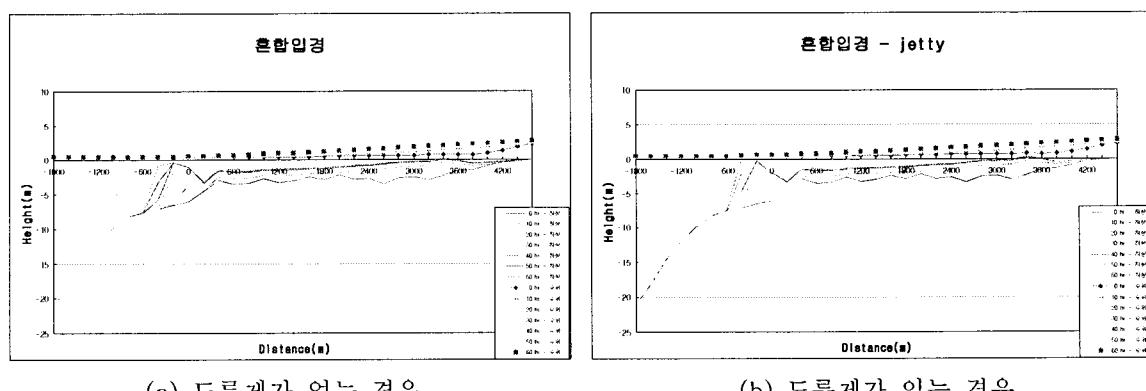


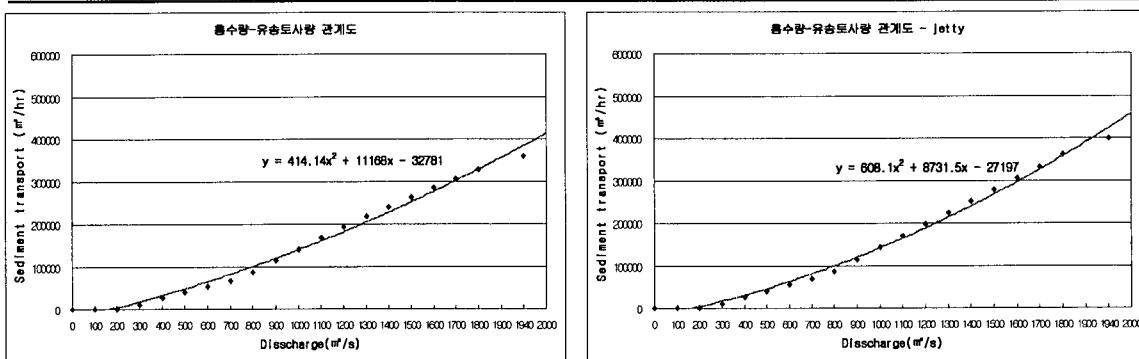
Fig 2. 혼합입경에 의한 하상고의 변화 ( $Q = 500 \text{ m}^3/\text{sec}$ )

Table 1. 평형하상고 산출 결과

위 치	최심 하상고(m)		
	HEC-6	단일입경	혼합입경
회야강 하구	-4.38	-4.40	-3.48

Table 2. 유출량에 따른 유송 토사량

유량 (m <sup>3</sup> /sec)	단일입경		혼합입경	
	도류제가 없는 경우	도류제가 있는 경우	도류제가 없는 경우	도류제가 있는 경우
	유출 토사량 (m <sup>3</sup> /hr)			
500	7.46	7.41	507.5	506.25
1000	606.25	593.75	1787.5	1775
1500	2900	2762.5	3475	3287.5



(a) 도류제가 없는 경우

(b) 도류제가 있는 경우

Fig 3. 혼합입경에 의한 유량-유송토사량의 관계도

#### 4. 결 론

본 연구에서는 울산시 회야강 하구에서의 지형변동과 유송토사량의 특성을 파악하기 위하여 단일입경과 혼합입경을 가정한 1차원하상변동 및 유출토사량에 관한 수치해석을 행하였으며 본 해석결과의 타당성을 검토하기 위하여 HEC-6모형에 의한 결과와 비교 분석 하였다. HEC-6의 해석결과는 단일입경( $d_{50}$ )을 가정한 수치결과와 비교하여 거의 동일한 결과를 얻었으나 통수시간의 증가에 따른 하구사주의 발달은 나타나지 않고 있다. 그러나 혼합입경( $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{90}$ )을 고려한 결과는 시간의 경과에 따라 하구역에서의 하상고가 상승되어 하구사주의 발달을 확인할 수 있었으며 이에 따른 하구 폐색의 특성을 확인할 수 있었다. 또한 유출토사량에 대한 해석결과 혼합입경을 고려한 경우 홍수량 증가에 따라 비례하여 유출토사량이 점차 증가하고 있는 것으로 예측되었다.

따라서, 혼합입경을 고려하여 하구의 지형변동을 1차원적으로 해석한 결과 하구역에서의 사주 형성을 예측할 수 있었으며, 최근 지속적으로 이루어지고 있는 회야강 하구지역의 준설작업을 고려할 때 매우 타당한 결과를 나타내고 있는 것으로 판단되었다.

회야강 하구폐색에 대한 특성기구를 파악하기 위해서는 지속적인 모니터링이 요구되며 현재 본 대상지역을 중심으로 계속적인 관측이 이루어지고 있으므로 하구사주 형성에 관한 정량적인 검토에 관해서는 계속적인 연구로 남긴다.