

# 도류제 건설 후 남대천 하구의 해안선 생성 및 변화

## Evolution and Changes of Coastal Topography due to Jetty Construction at Namdae River Mouth

김인호\* · 이성대\*\*

Kim, In Ho · Lee, Seong Dae

### Abstract

Recently, in the light of environments and utilization, countermeasures to preserve beaches in coastal area are required without depending on such as jetties and breakwaters. The necessity of integrated sand management including not only coastal sediment but also sediment discharge from hinterland rivers is increased so as to establish long-term counterplan for sediment transport. In this regard, the following subjects are examined in this study; efficient ways for discharged sand to be transported from a river to the neighboring coast, the river terrace occurrence and its growth at the river delta, measures to improve storage efficiency of the discharged sand and measures to prevent the sand resources from being discharged into the deep sea during flooding. In recent, A jetty of 260 m length was constructed at Namdae River mouth in the year of 2005 as a countermeasure against the occurrence of sand-bar at river mouth and its close. In this study, a series of numerical experiments were carried out to investigate the characteristics of sediment transport and morphological change due to the construction of jetty at the entrance of Namdae River mouth. Firstly, The sand discharge from Namdae River is quantified by one-dimensional numerical analysis assuming the mixed sand of three different particle diameters. Then, in order to understand the transport behavior of the sand discharge from river and river mouth phenomena the numerical experiments were then conducted to examine the flow behaviors of river efflux and wind generated circulations in coastal area. And, after establishing the numerical model system, which predicts the sea bed changes obtained from the flux model combining with the wave propagation, wave-induced currents and sediment transport models, the sediment transport in the vicinity of Namdae River mouth is analyzed.

**Keywords :** *namdae river mouth, jetty, sediment transport, morphological change, mixed sand, river efflux, wind generated circulation, wave induced currents*

### 요 지

최근 해안환경적 측면 뿐 만 아니라 사용자의 측면에서 도류제나 방파제와 같은 연안구조물에 의하지 않고 연안에서의 해변을 보존하기 위한 대책이 요구되고 있다. 연안에서의 표사문제의 대책을 수립하기 위해서는 연안에서의 표사 뿐만 아니라 배후지의 하천으로부터 유출되는 유사량을 포함한 종합적인 토사관리의 필요성이 증가하고 있다. 이같은 관점에서 본 연구에서는 연안해역으로 유출되는 하천 유사와 이송, 하구에서의 사주발생과 발달 그리고 하구폐색과 연안으로 유출된 유사의 효율적인 저류문제와 홍수시 외해로 유출되는 유사의 특성에 대해 검토하였다. 최근 강릉 남대천 하구에는 하구폐색과 하구사주의 발생에 따른 대책으로 2005년에 총연장 260 m의 도류제를 건설하였다. 이에따라 본 연구에서는 도류제 건설에 따른 남대천하구에서의 토사이동특성 및 해저지형 변동과 표사이동을 해석하기 위한 다양한 수치실험을 수행하였다. 이를 위해 먼저 남대천 하구역에서 유출되는 유사량을 혼합입경의 관점을 가정하여 1차원 수치해석을 통하여 해석하였다. 또한 하천에서 유출된 유사의 이동특성과 하구현상을 파악하기 위해 하천류의 유동특성과 바람장에 의한 취송류를 검토하였다. 그리고 파동장, 해변류 및 해저지형변동을 수립하여 본 남대천 하구인근에서의 표사이동 특성을 해석하였다.

**핵심용어 :** 남대천 하구, 도류제, 표사이동, 지형변동, 혼합입경, 하천류, 취송류, 해변류

### 1. 서 론

최근 연안 해역에서의 표사문제는 사회적인 문제로 관심의 집중이 되고 있다. 특히 각종 연안에서의 자연 환경변화와 연안 구조물 건설과 같은 인위적 환경변화에 의한 악영향이

복합적으로 작용하여 연안에서의 침식이 가중되고 있으며 이에 따라 해안표사, 연안 생태환경 및 연안방재에 심각한 문제가 야기되고 있다. 해안침식은 여러 가지 원인에 의해 해안의 육지부가 침식하는 현상으로서 이의 기구를 이해하기 위한 다양한 연구나 접근법이 시도되고 있다(윤재욱, 2004).

\*정회원 · 교신저자 · 강원대학교 건설공학부 조교수 (E-mail : kimih@kangwon.ac.kr)  
\*\*정회원 · 한라대학교 토목공학과 교수 (E-mail : sdlee@halla.ac.kr)

연안에서의 표사문제를 규명하기 위해서는 파랑이나 흐름과 같은 연안 해역에서의 외력을 이해하여야 하지만 기본적으로는 표사의 공급원으로 작용하는 하천에서의 유사 유출특성 기구를 파악하여야 한다. 이와 같은 관점에서 산지하천해안을 종합한 통합적인 토사관리의 필요성이 증가하고 있으며, 산지에서 발생한 토사가 하천을 통해 흐름과 함께 해역으로 유출되어지는 유사량을 예측하고 이들이 어떻게 하구에서 사주를 형성하고 연안 해역으로 표사로서 이송되는지를 파악하는 것은 토사관리의 측면 뿐 만 아니라 연안과정(Coastal Process)을 이해하는데 기초적인 과제가 된다.

하천에서 연안해역으로 유출되는 유사량은 하천유량과 함께 이송되며 이같은 하천유량은 시간에 따른 변동이 심하고, 특히 유사량을 특정의 유량으로부터 규정하는 것은 간단하지 않다. 그리고 이에 따른 하구에서의 사주 발달과 발달 그리고 하구폐색 현상과 같은 복잡한 하구 현상을 해석하는 것은 어려운 문제이다. 특히 우리나라 동해안으로 유입되는 대부분의 하천은 홍수시를 제외하면 하천을 통한 유출량이 작아 외해로부터의 파랑류 등에 의해 하구사주 발달이 용이하여 하구를 통한 소형어선의 입·출항이 제한되고 있는 실정이다.

강원도 강릉시에 위치한 강릉 남대천은 동해로 유입하는 지방1급 하천으로서 유역의 형상은 수지상을 이루고 있으며 하구부에서는 하구사주의 발달에 의해 하구폐색 현상이 나타나 연구의 관심이 되어오고 있다. 남대천 하구의 북측에는 안목항이 위치하고 있으며 강릉시에 위치한 국가어항으로 1991년부터 어항 확장 공사가 시작되어 최근에는 어촌어항 복합공간으로 계획되어 2008년 현재 남방파제 축조공사가 거의 마무리되고 있는 실정이다. 안목항은 하구의 북측에 위치하고 있는 돌출부인 죽도봉을 둘러싸는 형태로 이루어져 있으며 해안선 방향은 북에서 서쪽으로 약 45도 기울어져 있고, 등수심선은 해안선과 대체로 평행하게 발달되어 있는 특성을 보이고 있다. 또한 남대천 하구부에는 평수시 계속적인 하구사주의 발달과 하구폐색이 지속됨에 따라 이의 방지 대책으로 2005년 하구부에 남측 도류제를 건설하였다. 그럼에도 불구하고 홍수시 하구부 외측에는 하구테라스가 나타나고 있으며, 갈수시에는 남측 도류제와 북측 안목항의 남방파제 사이에 지속적으로 하구사주가 형성되고 있다. 이같은 현상은 외해에서 밀어 닳치는 파랑류, 취송류와 하천류 뿐만 아니라 해류 등에 의한 흐름과 지형특성 등 복합적으로 발생하는 하구현상에 의해 나타나고 있는 것으로 파악되고 있다. 특히 남대천 하구의 남측 도류제와 안목항 남방파제의 축조에 따라 하천의 남측에 위치하고 있는 남향진 해변에서의 연안 침식현상이 계속적으로 진행되고 있는 것으로 확인되고 있다. 따라서 남대천 하구부에서의 장기적인 하상변동 특성과 토사이동의 기구 그리고 도류제 건설에 따른 인근해역에서의 해안선 변동특성을 예측하는 것은 중요한 문제가 될 것이다.

강릉 남대천 하구 인근해역에서의 지형변동에 관해서는 정승진 등(2003), 김인호와 이정렬(2004) 등에 의해 연구되고 있으며 안목항과 같은 하구항은 하구현상에 의해 해저지형 및 표사이동 특성이 복잡하게 나타나고 있다. 특히 연안해역에서의 표사원은 하천에서의 유사가 주요한 공급원이므로 연

안에서의 침식, 퇴적관계는 토사공급원의 장기적인 확보여부와 하천에서 해역으로 공급되는 유사량의 예측과 이들이 어떻게 효과적으로 연안해역으로 표사원이 되어 이송되어 가는지를 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 남대천 하구역에서는 도류제나 방파제와 같은 새로운 연안구조물이 설치됨에 따라 표사와 유사의 이동의 급격한 변동이 예상되므로 이같은 변동을 야기하는 다양한 해안공학적 영향인자를 고려하여 해석할 필요가 있다.

본 연구에서는 강릉 남대천하구역에서 유출되는 유사량을 혼합입경의 관점에서 검토하여 도류제 설치에 따른 하구역에서의 지형변동 및 하구폐색현상을 해석하였으며, 하천에서 유출되는 토사량은 소류사와 부유사 해석을 통해 검토하였다. 그리고 하천에서 유출된 유사의 이동특성과 하구현상을 파악하기 위해 파랑에 의한 해변류장과 하천류의 유출에 따른 유동특성 및 바람장에 의한 취송류를 검토하여 유출토사의 이동특성을 예측하였고, 모형에 의해 계산된 토사의 이동 패턴과 해저지형 변동 계산결과를 강릉 남대천하구 인근의 지형변동 관측자료들과 비교고찰하였다.

## 2. 강릉 남대천 하구의 변화 분석

### 2.1 남대천의 하구 특성

강릉 남대천은 지방1급 하천으로서 유역면적은 258.80, 유로연장은 31.70으로서 강릉시 왕산면 목계리에서 발원하여 흐르는 도마천과 왕산면 대거리에서 발원하여 흐르는 왕산천이 오봉담(강릉저수지)에서 합류하며, 오봉담을 지난 강릉 남대천은 유향을 북동향으로 유하하면서 하구지점에 이르러 섬석천과 합류된 후 동해로 유입된다.

1983년 남대천 상류부에 강릉 상수원 개발과 농업용수 확보를 위해 유역면적 109.0의 오봉담이 건설되었으며 이에 따라 남대천 하구를 통해 유출되는 토사량이 줄어들어 하구부에 위치하는 섬석천 합류부의 토사 퇴적량이 감소하였으며 이와 더불어 남대천 남측에 위치한 남향진해빈에 파랑류의 작용에 의해 연안침식현상이 나타나기 시작하였다. 그리고 1992년부터 안목항 축조공사가 시작되면서 연안표사의 증가에 의해 남향진해빈에서 지속적인 침식이 계속되고 있으며 특히 남대천 하구부에서는 북향의 연안사주가 강하게 형성되어 섬석천 합류부에 위치한 소규모 어항으로 입출항하는 어선들이 지장을 받고 있어 2005년 남대천 하구남측에 총 연장 260 m의 도류제와 62 m의 돌제를 축조하였으며, 하구에서 준설한 토사를 이용하여 도류제 남측에 양빈을 실시하였다. 그 결과 평수 및 갈수시 하구사주는 섬석천 합류부 직상류에 나타나고 있으며, 홍수발생시에는 하천류에 의해 사주가 도류제를 통해 먼바다쪽으로 이동되는 특성을 보이고 있다.

### 2.2 항공사진을 통한 남대천 하구 분석

강릉 남대천 하구의 연안사주 변동 흔적과 남향진 해변의 해안선 변화를 분석하기 위하여 남대천 상류에 오봉담이 건설되기 전후인 1979년과 1996년의 항공사진영상으로 Fig. 1과 2에 비교하였으며 1996년 사진에는 안목항 북방파제가 공사중에 있음을 알 수 있다. 사진에서 보듯이 1979년의 남대천 하구부에는 상류측에서 유입된 토사가 먼바다쪽으로 이

동되지 못하고 모래톱(sand spit)형태의 연안사주 내측에 남아있으며, 1996년에는 오봉담 건설후 상류에서의 토사가 감소하고 하천정비의 영향에 의해 연안사주 내측에는 하구사주가 나타나지 않고 있으며, 남대천 하구에서는 북향의 모래톱이 발달하여 하구폐색이 강하게 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 그리고 남대천 하구에서 남향진으로 이어지는 백사장을 살펴보면 대체로 큰 변화 없이 백사장 폭을 유지하고 있음을 알 수 있다.

### 3. 하구현상 및 지형변동 해석

#### 3.1 유송토사량 및 하구지형변동

하천에서의 하상 및 지형변동을 해석하기 위하여 1차원 하상변동 수치모형에 의해 해석하였으며 하천에서의 흐름은 정상상태의 상류이며 유사량은 소류사 및 부유사를 대상으로 하며 하천의 상류측에서는 동적 평형상태의 유사량을 그리고 하상재료 및 유사는 혼합입경으로 가정하였다(Wongsa and Shimizu, 2001).

하상변동의 계산에는 1차원하상변동 수치모형을 이용하고 흐름의 운동방정식은 다음과 같은 부등류 방정식을 사용하였다.

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

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

그리고, 혼합입경을 고려한 소류사량을 구하기 위해 다음과 같은 입경별 해석식을 이용하였다(芦田·道上, 1972).



Fig. 1 Aerial photo view in the vicinity of Namdae River mouth (Nov., 1979)



Fig. 2 Aerial photo view in the vicinity of Namdae River mouth (Nov., 1996)

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

여기서,  $q_{Bi}$ 는 입경별 단위폭당 소류량,  $d_i$ 는 모래입경, 아래첨자  $i$ 는 혼합입경  $d_f$ 에 대한 물리량을 나타낸다. 그리고  $s$ 는 모래의 비중,  $p_i$ 는 입경  $d_i$ 인 입자가 하상의 교환층에 존재하는 비율,  $\gamma_{*i} (= u_{*i}^2/sgd_i)$ 는 입경별 무차원 소류력,  $\gamma'_{*i} (= u_{*i}'^2/sgd_i)$ 은 입경별 무차원 유효소류력,  $u_{*i}'$ 은 유효마찰속도,  $\gamma_{*ci} (= u_{*ci}^2/sgd_i)$ 는 입경별 무차원 한계소류력 그리고  $u_{*ci}$ 는 입경별 한계마찰속도이다.

부유사의 하상에서의 부유사량은 다음에 의해 구하였다 (Itakura and Kishi, 1980).

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

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

여기서,  $q_{si}$ 는 입경별 부유사의 단위면적당 하상에서의 부상량,  $w_{fi}$ 는 입경별 부유사의 침강속도이며 다음과 같은 Rubey식을 사용하였다.

$$w_{fi} = \left( \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{sgd_i^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{sgd_i^3}} \right) \sqrt{sgd_i} \quad ; d_i \leq 0.1 \text{ cm} \quad (5)$$

$$w_{fi} = 32.8 d_i^{1/2} \quad ; d_i > 0.1 \text{ cm}$$

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 균일 입경인 경우는  $B_{*i} = 0.143$ 으로 일정값을 사용하였다.

입경별 부유사 농도 연속방정식은 다음과 같다

$$\frac{\partial}{\partial t} (\langle c_i \rangle h) + \frac{1}{B} \frac{\partial (Q \langle c_i \rangle)}{\partial x} = q_{si} - w_{fi} c_{bi} \quad (6)$$

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 다음과 같다.

$$\delta \frac{\partial p_i}{\partial t} + p_i \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left( \frac{1}{B} \frac{\partial (q_{Bi})}{\partial x} + q_{sui} - w_{fi} c_{bi} \right) = 0 \quad (7)$$

흐름이 상류인 경우 안정한 계산을 위하여 시간에 대해서는 전진차분, 거리에 대해서는 후방차분을 통해 수치해석하였다.

유송토사량을 해석하기 위해 소류사  $q_B (m^2/s)$ , 부유사  $q_S (m/s)$ , 부상한 후 침강속도  $w_f (m/s)$ 로 침강하여 가는 유사와 같이 3종류로 분류하였고 다음의 식을 사용하였다.

$$Q_{SED} = \frac{q_B B + q_S B dx - w_f B dx}{1-\lambda} \quad (8)$$

여기서,  $B$ 는 하폭,  $\lambda$ 는 하상재료의 공극률이다.

#### 3.2 하천류의 유동장 및 취송류장 해석

강릉 남대천에서 평수시 및 홍수시 흘러나가는 하천류의 거동을 해석하기 위한 지배방정식은 2차원 유동 모형으로

지배방정식은 운동방정식과 연속방정식으로 구성되며 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - A_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + u \frac{(u^2 + v^2)^{1/2}}{C^2(\zeta + h)} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - A_h \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + v \frac{(u^2 + v^2)^{1/2}}{C^2(\zeta + h)} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial[(\zeta + h)u]}{\partial x} + \frac{\partial[(\zeta + h)v]}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

여기서,  $u, v$ 는  $x, y$  방향의 평균유속,  $\zeta$ 는 수면변위,  $h$ 는 평균수면하 수심,  $f$ 는 Coriolis 계수,  $g$ 는 중력가속도,  $C$ 는 해저조도에 관한 Chezy계수,  $A_h$ 는 수평와동점성계수이다.

강릉 남대천 하구에서 평수시 및 홍수시의 유동수치계산은 유송토사량 수치실험에서 얻어진 하천 및 외해에서의 수위 결과를 입력조건으로 하천류의 해역유출에 따른 유동장 변동을 해석하였으며, 하천유량이 500 m<sup>3</sup>/s, 1,000 m<sup>3</sup>/s 및 2,030 m<sup>3</sup>/s에 대해 적용하였으며 이들은 수치해석결과 강릉 남대천에서 연안사주가 발생하기 시작하는 평수시 유량, 5년 설계 홍수량 및 200년 설계홍수량에 해당된다.

본 모형에서는 수치계산을 위해서 Leendertse(1970)에 의해 조류해석에 널리 사용되고 있는 ADI법(Alternating Direction Implicit Method)을 사용하였다. ADI법은 양해법과 음해법을 동시에 사용하여 계산하는 방식으로 해의 수렴성과 연산시간의 측면에서 우수한 것으로 알려져 있다.

연안에서의 다양한 흐름가운데 바람에 의해 발생하는 취송류는 표면류의 유동장에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 이의 해석법은 유속을 수심으로 평균한 2차원모형과 수심에 따라 유속분포를 몇 개의 층으로 나누어 근사시킨 3차원 모형 등이 있다. 본 연구에서는 흐름의 연직 분포를 가정하여 수면에서 바다까지 적분하여 평균화한 방정식을 이용한 Koutitas *et al.*(1985)의 취송류장 모형을 사용하여 해석하였다. 그리고 취송류장 해석을 위해서는 바람장의 해석이 이루어 져야 하며 본 연구에서는 지표면에서의 열수지 변화를 고려한 중규모 지역기상장 모형을 적용하여 8월 맑은날을 대상으로 강원도 영동지역에서의 시간에 따른 바람장을 계산하였으며 시간에 따른 바람장의 해석결과를 입력조건으로 하여 취송류의 특성을 해석하였다(이성대, 2006).

### 3.3 해빈류장 및 해저지형변동 해석

심해에서 발달한 파랑이 연안해역으로 전파함에 따라 수심이나 흐름에 의해 천수, 굴절 및 회절현상에 의해 변형되고, 그리고 해안선 가까이에서 쇄파되어 결국 소멸되어가게 된다. 이러한 파랑변형과정에서 수반되는 파랑의 잉여에너지의 변화에 따라 해빈류가 발생하게 된다. 따라서, 파랑에 의한 연안역의 해수순환 및 해저 침퇴적 관계를 파악하기 위해서 보다 정확한 파랑장 해석과 해빈류장의 해석이 요구된다.

본 연구에서는 타원형완경사 방정식을 수면변동과 선유량

에 대한 1계 연립미분방정식으로 변환한 비정상 완경사방정식모형을 적용하여 파동장을 해석하였으며 해빈류는 수심 평균된 천수방정식에 잉여에너지항과 마찰항 및 난류에 의한 수평혼합항을 고려한 해빈류장 모형을 적용하여 파랑에 의한 흐름장을 계산하였다. 해저지형변동은 파동장 및 해빈류장의 계산 결과로부터 해석이 가능하다. 파랑과 흐름이 공존하는 해역에서의 표사량 해석은 Bagnold(1956)의 에너지 모형을 적용한 Bailard(1981)모형과 부유사와 소류사를 분리하여 정식화하는 Flux모형 등이 사용되고 있으나 본 연구에서는 토사의 부상과 중력에 의한 침강에 따른 해저지형의 변동을 예측하는 Flux모형을 사용하였다.

표사이동에 따른 해저 수심변화는 다음과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left[ -Q_s + \left( \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) \right] \quad (12)$$

여기서,  $t$ 는 시간,  $h$ 는 수심,  $q_{bx}, q_{by}$ 는 소유사량의  $x, y$  방향 성분,  $\lambda_o$ 는 해저질의 공극율 그리고  $Q_s$ 는 토사의 부상율과 침강율의 차를 나타내며 다음과 같이 쓸 수 있다

$$Q_s = -F_z + \bar{C} \cdot w_{fo} \quad (13)$$

여기서,  $w_{fo}$ 는 연안에서의 침강속도,  $\bar{C}$ 는 평균부유사 농도이며 부상량을 나타내는  $F_z$ 는 다음과 같이 된다.

$$F_z = (1-r)c_o w_{fo} \alpha \left( \frac{u_*}{w_{fo}} - 1 \right) \quad (14)$$

여기서,  $u_*$ 는 해저면마찰속도이며  $u_* > w_{fo}$  이면  $r=0$  그리고  $u_* < w_{fo}$  이면  $r=1$ 이다.  $\alpha$ 는 0~1 범위의 상수이며,  $C_o$ 는 부유사의 기준점농도를 나타낸다.

## 4. 해석 결과 및 비교분석

### 4.1 유송토사량 및 하구지형변동 해석

강릉 남대천에서 동해역으로 유출되는 토사유출량에 의한 하구지형변동 해석을 위해 유량은 남대천의 하천기본계획에서 얻어진 200년확률 홍수량이  $Q=2,030$  m<sup>3</sup>/s인 것을 고려하여 하구지형 변동에 영향을 미치는 유량으로서  $Q=100 \sim 2,030$  m<sup>3</sup>/s의 범위를 13개로 나누어 하상변동을 계산하였다. 하상변동의 계산은 하구에서부터 상류로 5,400 m, 하구에서 외해측으로 2,000 m 지점까지의 구간에 대해 60시간동안 계산을 수행하였으며 도류체의 축조에 따른 유송토사량 및 하구지형변동을 검토하기 위하여 도류체 축조전과 축조후에 대해 계산을 수행하였으며, 해석결과를 타당성을 확보하기 위해 남대천 하구부에서의 10%입경, 50%입경 및 90%입경을 혼합입경으로 입력하여 사용하였다. 본 연구에서는 혼합입경  $d_{10}=0.120$  mm,  $d_{50}=0.397$  mm,  $d_{90}=1.480$  mm 을 사용하였다. 강릉 남대천의 홍수유출량 변동에 따른 도류체 축조전 및 축조후의 하구에서의 유송토사량에 대한 계산결과는 Fig. 3에 도시하였으며 그림에서 황축은 홍수량을 그리고 종축은 하구원점에서의 유송토사량을 나타낸다.

남대천 하구부를 통해 동해로 유출되는 유출토사량을 평가하기 위해 홍수량은 일정하다고 가정하여 계산하였다. 그림에서 알 수 있듯이 홍수량  $Q=500$  m<sup>3</sup>/s 미만에서는 남대천 하구를 통해 동해로 유출되는 유송토사량은 그다지 크지 않은 것으로 계산되었으며 남대천을 통한 토사유출은 유량

이  $500\text{m}^3/\text{s}$  이상에서 서서히 증가하기 시작하여  $1000\text{m}^3/\text{s}$  이상이 되면 비선형적으로 증가하는 특성을 보여주고 있다. 그리고 도류제 축조전 및 축조후의 강릉 남대천을 통해 계산시간 동안 유출되는 토사량은 식(7)을 통해 해석하였으며 이의 결과는 다음 식(14)와 식(15)에 나타내었다.

도류제 축조전

$$Q_{SED} = 0.065Q^2 - 15.446Q - 893.248 ; Q > 500\text{m}^3 \quad (14)$$

도류제 축조후

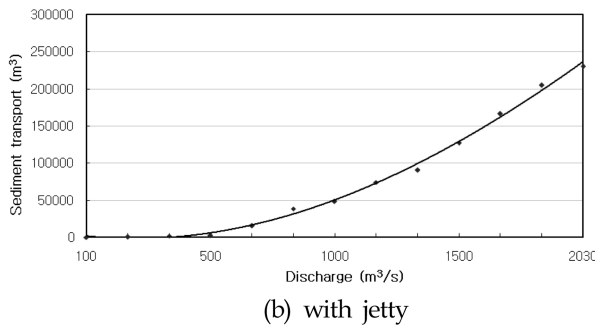
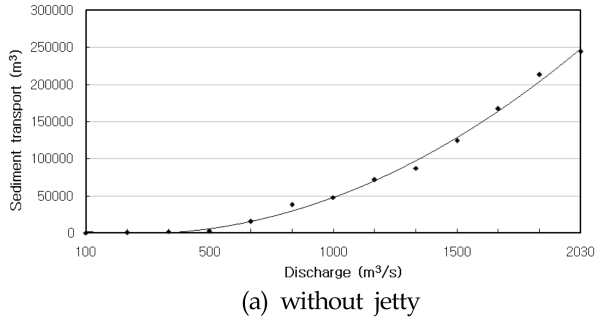


Fig. 3 Relationship of the flux rate of sediment transport due to the mixed grain

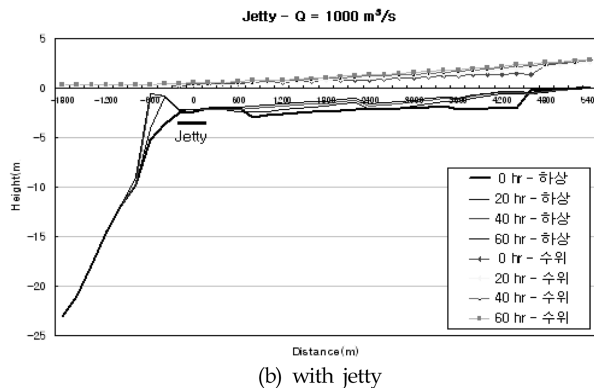
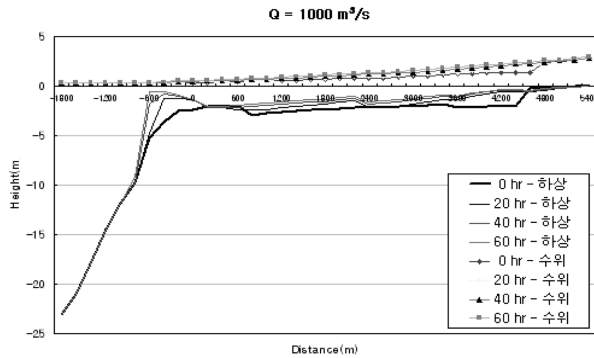


Fig. 4 Change of the river bed height due to discharge ( $Q = 1,000\text{m}^3/\text{sec}$ )

$$Q_{SED} = 0.732Q^2 - 28.230Q + 1358.970 ; Q > 500\text{m}^3 \quad (15)$$

여기서,  $Q_{SED}$ 는 유송 토사량( $\text{m}^3$ ),  $Q$ 는 홍수량( $\text{m}^3/\text{s}$ )을 나타내고 있으며, 유송토사량의 계산결과 도류제 축조후가 축조전에 비해 유량이  $1,500\text{m}^3/\text{s}$  이하에서는 토사량 유출이 증가하고 있음을 보여주고 있는데 이는 도류제 축조에 따라 도류제내부 유속이 증가하였기 때문이라 판단된다. 그리고 유량  $1,500\text{m}^3/\text{s}$  이상이 되면 외해로 유출되는 유송토사량이 다소 감소하는 경향을 보이고 있다.

그리고 홍수량에 따른 하구에서의 하상변동은 Fig. 4에 나타내었으며 그림에서 횡축은 하구를 원점으로 - 방향은 외해측을 +방향은 하천방향을 의미하고 있으며 그리고 종축은 하상을 나타내며, 그림에서는 홍수량  $1,000\text{m}^3/\text{s}$ 인 경우에 시간에 따른 하상 및 수위변동을 도시하였다.

도류제 축조전의 경우 시간의 경과에 따라 하구부에서의 하상변동이 점차 크게 나타나고 있으며 그 영역이 시간과 함께 점차 외해측으로 확장되어가는 경향을 보여주고 있다. 그리고 도류제 축조후에는 도류제 내부에는 하상의 변동이 거의 나타나지 않고 있으며 도류제 바깥쪽에 토사가 퇴적하는 경향을 보여주고 있다. 즉, 도류제가 축조되면 홍수유출량에 의해 도류제 바깥쪽으로 점차 사주가 이동확장되어가

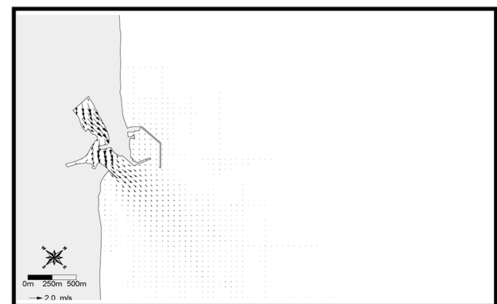
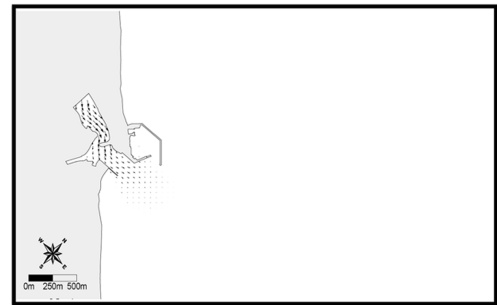


Fig. 5 Velocity distribution due to river discharge

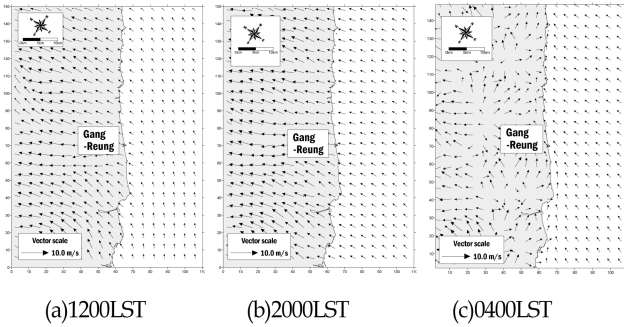


Fig. 6 Horizontal wind vectors over Yeongdong Area in Gangwon-Do

는 특성을 보여주고 있다.

#### 4.2 하천류의 유동장 및 취송류장 해석

강릉 남대천에서 평수시 및 홍수시 동해로 유출되는 하천류의 유동특성을 해석하기 위해 하천유량이  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$  및  $2,030 \text{ m}^3/\text{s}$ 에 대해 적용하였으며 이들은 유송토사량 및 하상변동 수치실험 결과 강릉남대천에서 하상변동과 연안사주가 발생하기 시작하는 평수시 유량, 5년 및 200년 설계홍수량에 해당된다. 이들의 결과는 Fig. 5에 나타내었으며 하구부에서 유속은 평수시( $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ )는 약  $0.35 \text{ m/s}$ 이고 홍수시에는 최대  $2.0 \text{ m/sec}$  내외로 나타났다.

그리고 남대천에서 유출되는 하천류는 그림에서 알 수 있듯이 남측도류제를 따라 하구부에서 E 및 SE계열의 흐름이 나타나고 있으며, 평수시에는 하천류가 미치는 범위는 안목항 입구부 전면으로 제한되어 나타나고 있으며, 유량  $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$  일때는 하구에서 외해역으로 약  $1 \text{ km}$  내외까지 그리고 200년 빈도 홍수유출시는  $2 \text{ km}$ 까지 하천류의 영향이 나타나고 있다.

그리고, 취송류에 의한 남대천 인근해역에서의 해수유동특성을 해석하기 위해 연안역의 고유한 국지풍계인 해륙풍장을 입력조건으로 하였으며, 해륙풍장의 해석은 육상지형과 지표면 경계에서의 열수지 변화 특성을 고려할 수 있는 단층의 식생모형을 적용한 중규모지역 기상장 모형을 적용하였다.

바람장 모형은 정역학적 평형을 가정하였으며 시간에 따른 풍향, 풍속의 변동특성을 해석하고 이의 결과를 취송류장 해석의 입력자료로 사용하여 바람장 변동에 따른 취송류장의 1일동안의 변동을 수치해석하였다(이성대, 2006). 바람장 수치계산의 결과는 Fig. 6에 나타내었으며 그림에서 알 수 있듯이 연안역의 고유국지풍인 해륙풍장의 특성을 타당성있게 예측하고 있으며 주간에는 해풍과 곡풍이 탁월하며 야간에는 육풍과 산풍이 탁월하게 나타났다. 그리고 취송류장의 해석결과는 평균류에 대해 Fig. 7에 나타내었으며 해륙풍장의 변동에 따라 취송류의 양상이 약간씩 다르게 나타나고 있다. 특히 해안선 부근에서는 지형적 특성에 따라 취송류가 다소 복잡하게 나타나고 있으며 전체적으로는 N 및 NW계열의 흐름이 예측되었고, 해안선의 지형적인 영향에 따라 시계방향의 흐름셀이 국부적으로 나타나고 있다.

따라서, 하천류와 취송류에 의한 강릉 남대천 하구 인근해역에서의 유동장은 해륙풍의 영향이 강하게 나타나는 경우

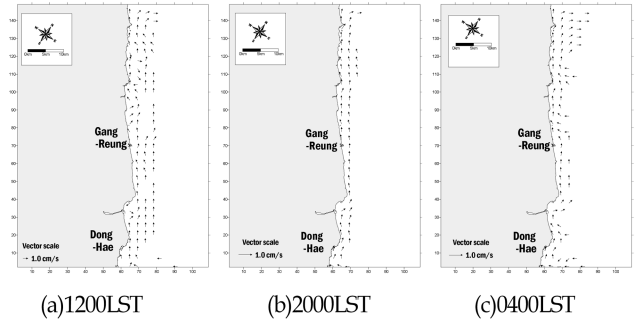


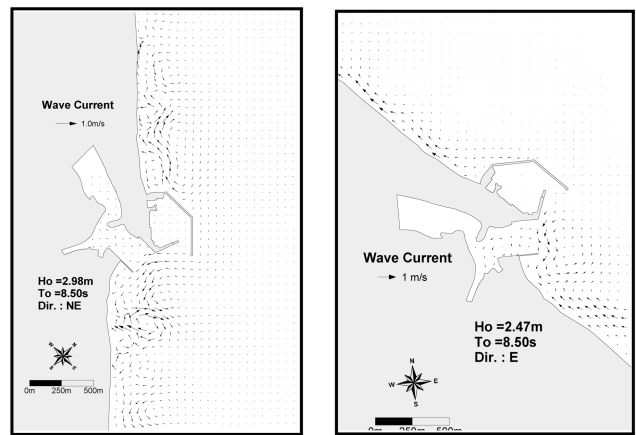
Fig. 7 Mean flow of wind driven current

는 북서계열의 흐름이 그리고 하천류의 영향이 강한 경우에는 남동계열의 유동이 지배하는 것으로 파악되었다.

#### 4.3 해빈류장 및 해저지형변동 해석

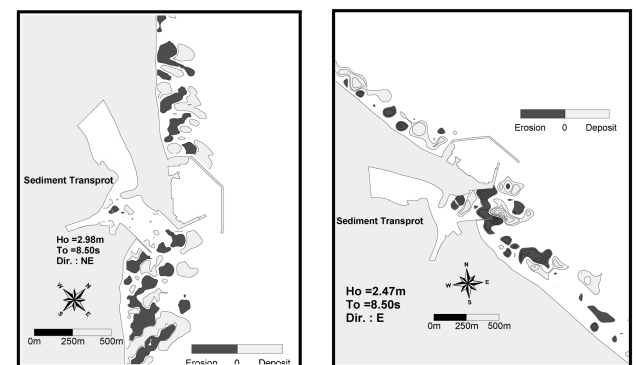
강릉 남대천 하구도류제 건설에 따른 해빈류에 의한 표사 이동 특성을 검토하기 위하여 실험대상 입사파랑을 선정하였다. 본 대상 해역은 겨울철에는 NE계열이 그리고 여름철에는 E계열의 심해파랑이 주로 내습하고 있으며(김인호, 이정렬; 2004) 여기서는 우리나라 장기파랑산출자료집을 근거하여 겨울철에는  $H_o=2.98 \text{ m}$ ,  $T=8.5 \text{ s}$ ,  $\theta=NE$ , 여름철에는  $H_o=2.47 \text{ m}$ ,  $T=8.5 \text{ s}$ ,  $\theta=E$ 를 입사파랑 조건으로 수치계산하였다.

Fig. 8a에 NE계열의 파랑이 내습하는 경우 해빈류를 나타내었으며 안목항과 도류제에 의해 해빈류가 차단되어 각기



(a) Waves of NE group (b) Waves of E group

Fig. 8 Wave induced currents after construction of jetty



(a) Waves of NE group (b) Waves of E group

Fig. 9 Sea bed changes after construction of jetty

독립된 해빈류 흐름을 보이고 있으며 특히 남대천 하구전면에는 반시계방향의 해빈류셀이 그리고 도류제 남측에는 시계방향의 셀이 형성되어 Fig. 9a와 같이 남대천하구와 도류제 내측에 퇴적이 나타나고 있고 도류제 전면에는 강한 침식현상을 보이고 있다. 그리고 Fig. 9b와 같이 E계열의 파랑이 내습하는 경우는 도류제 전면에서 반시계 방향의 해빈류가 상대적으로 강하게 나타나고 있으며 이로 인해 도류제 내부에서 퇴적이 상대적으로 강하게 형성되고 있는 것으로 예측되었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 강릉 남대천하구역의 도류제 건설에 따른 표사이동 및 지형변동을 수치해석을 통해 해석하였다. 이를 위해 하천에서 유출되는 유사량을 혼합입경의 관점에서 검토하여 도류제 설치에 따른 하구지형변동을 해석하였으며, 하천에서 유출되는 토사량은 소류사와 부유사 해석을 통해 검토하였다. 그리고 하천에서 유출된 유사가 어떠한 이동 특성을 통해 연안표사로 이송되어 가는 현상을 파악하기 위해 하천류의 유출에 따른 유동특성 및 바람장에 의한 취송류를 검토하여 유출토사의 이동특성을 예측하였고, 파랑에 의한 해빈류 검토를 통해 해저지형변동을 해석하였다. 특히 본 연구에서는 하천을 통해 해역으로 유출되는 유사량이 시간 경과에 따라 하구역에서 하상고가 상승되어 하구사주로 발달되어 가는 과정을 해석할 수 있었으며 이에 따른 하구 폐색의 특성을 확인할 수 있었다. 최근 연안침식 문제의 해결을 위해 검토되고 있는 양빈이나 모래운송공법(sand by passing)의 적용성을 고려한다면 유송토사량의 계산은 실용성이 있을 것으로 판단되며, 하천에서의 유사와 표사관계를 장기적인 지형변동의 관점에서 이해하기 위해서는 유사량을 고려한 해안선변화모델의 수립이 요구되며 이에 대해서는 계속 연구되어야 할 것이다. 그리고 하천류와 취송류에 의한 유동장과 파랑에 의한 해빈류장 해석을 통해 강릉 남대천 하구에 건설되고 있는 안목항 및 도류제, 돌제와 같은 해안 구조물에 의한 하구현상을 파악할 수 있었다. 강릉 남대천 하구에서의 도류제 축조에 따른 하구현상을 파악하기 위해

서는 흐름특성 뿐 만 아니라 토사이동과 지형변동에 대한 지속적인 모니터링이 요구되며, 관측결과와의 정량적인 검토에 관해서는 계속적인 연구로 남긴다.

## 감사의 글

본 연구는 강원대학교 2006년도 자체학술연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김인호, 이정렬(2004) 동해 안목항 주변 연안 토사이동. **한국해양해양공학회지**, 한국해양해양공학회. 제16권 제2호, pp. 108-119.
- 윤재옥(2004) 우리나라 연안침식현황과 대처방안에 대한 제안. **방재연구**, 제6권 제3호, pp. 25-37.
- 이성대(2006) 육상지형을 고려한 연안해역에서의 중규모 기상장과 취송류에 관한 수치해석. **한국해양공학회지**, 한국해양공학회. 제20권 제5호, pp. 23-29.
- 정승진, 김규환, 편종근(2003) 남항진 해안의 장기해안선 변화조사 및 정확도 평가. **2003 대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회. pp. 4976-4981.
- 芦田和男, 道上正規(1972) 移動河床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究. **土木學會論文集**, 제206호, pp. 59-69.
- Bailard, J.A. (1981) An Energetics Total Load Sediment transport Model for a Plane Sloping Beach. *J. Geophysical Research*, Vol 86, No. C11, pp. 10938-10954.
- Itakura, T. and Kishi, T. (1980) Open channel flow with suspended sediments. *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 106, No. 8, pp. 1325-1343.
- Koutitas, C. and Koutitas, M. (1986) A comparative study of three mathematical model for wind-generated circulation in coastal areas. *Coastal Engineering*, Vol. 10, pp. 127-138.
- Leendertse, J.J. (1970) A water-quality simulation model for well mixed estuaries and coastal seas: Principles of computation. Report RM-6230-RC, Rand Corporation, Santa Monica, CA.
- Wongsa, S. and Shimizu, Y. (2001) Modelling pre-channelization and their impact on flood and sediment yield in Ishikari river basin. *Ann. J. of Hydraulic Eng.*, Vol. 47, pp. 223-228.

(접수일: 2008.1.23/심사일: 2008.2.29/심사완료일: 2008.4.3)