

하천유사량을 고려한 장기적인 해안선변동 특성

Long Term Shoreline Change including Sand Discharge from River

이성대*, 박정철**, 홍창배***

Seong Dae Lee, Jung Chul Park, Chang Bae Hong,

요 지

최근 연안 해역에서의 표사문제는 사회적인 문제로 관심의 집중이 되고 있다. 특히 자연 환경 변화와 연안 구조물 건설과 같은 인위적 환경변화가 복합적으로 작용하여 연안에서의 침식이 가중되고 있으며 이에 따라 해안표사, 연안 생태환경 및 연안방재에 심각한 상태에 이르고 있다. 따라서 환경적인 측면뿐 아니라 이용자의 측면에서 장기적인 해빈보전 계획의 수립이 불가피한 실정이다.

장기적인 해빈보전계획을 수립하기 위해서는 연안해역 자체의 표사 변동 뿐만 아니라 연안으로 유입되는 표사의 공급원을 파악하는 것이 중요하다. 따라서 하천에서 연안해역으로 공급되는 유사량을 예측하고 유사량이 어떻게 연안해역에 표사로 이송되어가는가를 파악하는 것은 연안표사 문제를 이해하는데 중요한 요소라 할 수 있다.

본 연구에서는 강릉 남대천하구역에서 유출되는 하천유사량을 혼합입경의 관점에서 검토하여 도류제 설치에 따른 하구역에서의 지형변동 및 하구폐색현상을 해석하였으며, 하천으로부터 공급되는 유사량을 고려하여 강릉 남대천과 인접한 남향진해수욕장 인근에서의 장기적인 해안선변동 특성을 고찰하였다.

핵심용어 : 하천유사량, 혼합입경, 하구지형변동, 해안선변동모형,

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. 연안에서의 표사문제를 규명하기 위해서는 파랑이나 흐름과 같은 연안 해역에서의 외력을 이해하여야 하지만 기본적으로는 표사의 공급원인 하천에서의 유사 유출특성 기구를 파악하는 것도 중요하다. 해역으로 유출되어지는 유사량을 예측하고 이들이 어떻게 연안 해역으로 표사로서 이송되는지를 파악하는 것은 토사관리의 측면 뿐 아니라 연안과정(Coastal Process)을 이해하는데 기초적인 과제가 된다.

하천에서 연안해역으로 유출되는 유사량은 하천유량과 함께 이송되며 이 같은 하천유량은 시간에 따른 변동이 심하고, 특히 유사량을 특정의 유량으로부터 규정하는 것이 간단하지 않다. 그리고 이에 따른 하구에서의 사주 발생과 발달, 하구폐색 현상과 같은 복잡한 하구 현상을 해석하는

* 정회원 · 한라대학교 토목공학과 교수 · E-mail : sdlee@halla.ac.kr

** 정회원 · (주)제이스기술단 · E-mail : ppjun@dreamwiz.com

*** 정회원 · 한라대학교 토목공학과 대학원 · E-mail : waveecho@hanmail.net

것은 어려운 문제이다. 또한 연안에서의 침식, 퇴적관계는 토사공급원의 장기적인 확보여부와 하천에서 해역으로 공급되는 유사량의 예측과 이들이 어떻게 연안해역으로 이송되어 가는가를 파악하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 강릉 남대천하구역에서 유출되는 유사량을 혼합입경의 관점에서 검토하여 도류제 설치에 따른 하구역에서의 지형변동 및 하구폐색현상을 해석하였으며, 유출되는 토사량은 소류사와 부유사 해석을 통해 검토하였다. 그리고 하천에서 유출된 유사를 고려하여 남대천과 인접한 남향진해수욕장 인근에서의 10년에 걸친 장기적인 해안선변동 특성을 1-Line 모형인 GENESIS에 의해 예측하였고, 모형에 의해 해석된 해안선변동 계산결과를 관측자료들과 비교·고찰하였다.

2. 강릉 남향진 해변의 변화 분석

강릉 남향진 해변으로 유입되는 하천은 지방1급 하천인 남대천으로서 유역면적은 258.80km², 유로연장은 31.70km으로서 하구지점에 이르러 섬석천과 합류된 후 동해로 유입된다.

남대천 하구의 연안사주 변동 흔적과 남향진 해변의 해안선 변화를 분석하기 위하여 남대천 상류에 오봉댐이 건설되기 전·후인 1972년, 1979년과 1996년, 2000년의 수치정사영상에 의한 항공사진의 분석결과를 Fig.1과 Table 1에 각각 비교하였으며 표에서 알 수 있듯이 안목항 구조물이 건설되기 이전인 1979년까지는 해안 침식현상은 거의 나타나지 않고, 하천의 공급토사량과 연안표사의 순환체계가 전반적으로 평형을 유지하고 있었던 것으로 판단된다. 그러나 1996년과 2000년의 항공사진 분석결과를 보면 ③, ④번구역에서 침식현상이 계속 나타나고 있으며, 2002년의 측량성과와 비교해 보면 더욱 현저한 해안침식 현상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 본 남대천 하구역은 1990년부터 안목항 건설공사와 남대천의 하천정비사업이 진행되었는 바 이 지역의 해안침식 현상은 안목항의 구조물 건설로 인해 북측에서 남측으로 이동되던 연안표사의 차단과 함께 하천정비사업으로 인한 하천공급토사의 감소가 가장 큰 원인으로 작용했을 것으로 추정된다.

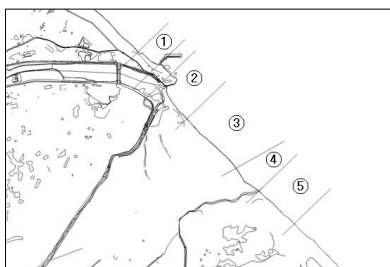


Fig. 1 Map in the vicinity of Namhangjin Beach

Table 1 Change of Beach Area in Each section (m²)

	①번 구역	②번 구역	③번 구역	④번 구역	⑤번 구역
1972년	15,823	44,359	39,838	17,782	29,126
1979년	12,533	43,951	50,180	25,999	48,232
1996년	18,053	38,905	34,983	20,781	34,220
2000년	-	44,898	34,211	15,646	35,571

3. 하구현상 및 해안선 변동 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.

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

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

유송토사량을 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.

$$Q_{SED} = \frac{q_B B + q_s B dx - w_f B dx}{1 - \lambda} \quad (2)$$

여기서, B 는 하폭, λ 는 하상재료의 공극률이다.

3.2 해안선 변동 해석

장기간의 해안선 변동을 수치해석하기 위해서는 일반적으로 1-line 모형이 사용되고 있으며, 본 연구에서는 Kraus(1991)가 개발한 GENESIS를 적용하였다. 본 모형은 연안표사의 시간적 및 공간적 변동에 의해 나타나는 해안선 변동을 해석하는 모형으로 파랑조건이나 연안구조물에 의한 해안선의 응답을 해석하는 것이다.

남향진 해변의 장기적인 해안선변동해석을 위한 1-line 모형의 해안선변동을 위한 저질 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_B + D_C)} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0 \quad (3)$$

식(3)을 통해 해안선변동량 ∂y 을 얻기 위해 초기해안선 위치, 경계조건 그리고 연안표사량 Q , 종단표사량 q , 전빈고 D_B , 해저질 이동한계수심 D_C 이 요구된다. 특히 연안표사량 Q 의 산정이 중요하며 본 연구에서는 다음과 같은 경험적인 연안표사량식을 적용하였다.

$$Q = (H^2 C_g)_b (a_1 \sin 2\theta_{bs} - a_2 \cos 2\theta_{bs} \frac{\partial H}{\partial x})_b \quad (4)$$

여기서, H 는 파고, C_g 는 군속도, b 는 쇄파조건을 나타내는 첨자, θ_{bs} 는 쇄파각 그리고 a_1, a_2 는 무차원 파라메타이다.

4. 수치해석결과의 비교·분석

4.1 유송토사량 및 하구지형변동

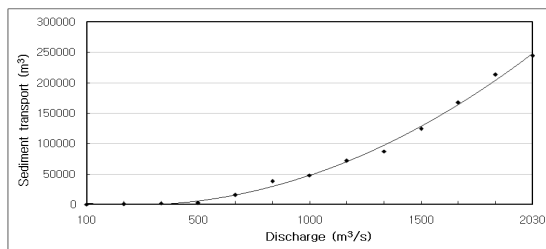
강릉 남대천에서 동해역으로 유출되는 토사유출량에 의한 하구지형변동 해석을 위해 유량은 남대천의 하천기본계획에서 얻어진 200년확률 홍수량이 $Q = 2,030 m^3/s$ 인 것을 고려하여 하구지형변동에 영향을 미치는 유량으로서 $Q = 100 \sim 2,030 m^3/s$ 의 범위를 검토하였다. 수치실험은 하구에서부터 상류로 5,400m, 하구에서 외해측으로 2,000m 지점까지의 구간에 대해 60시간동안 계산을 수행하였으며 도류제의 축조에 따른 유송토사량 및 하구지형변동을 검토하기 위하여 도류제 축조전과 축조후에 대해 계산을 수행하였으며, 해석결과의 신뢰성을 확보하기 위해 저질입경을 10%, 50% 및 90%를 혼합입경으로 입력하여 사용하였다. 실험 결과는 Fig.2에 도시하였으며 횡축은 홍수량을 그리고 종축은 하구원점에서의 유송토사량을 나타낸다.

토사유출은 유량이 $500 m^3/s$ 이상에서 서서히 증가하기 시작하여 $1,000 m^3/s$ 이상이 되면 비선형적으로 증가하는 특성을 보여주고 있다. 유출토사량의 계산결과 도류제 축조후가 축조전에 비해 유량이 $1,500 m^3/s$ 이하에서는 토사량 유출이 증가하고 있음을 보여주고 있는데 이는 도류제 축조

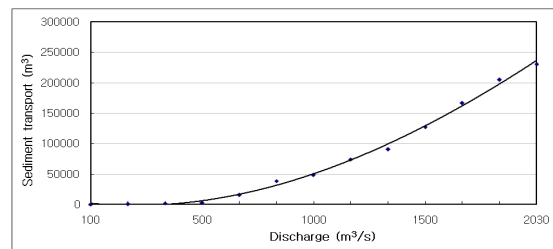
에 따라 도류제내부 유속이 증가하였기 때문이라 판단된다. 그리고 유량 $1,500\text{m}^3/\text{s}$ 이상이 되면 외해로 유출되는 유송토사량이 다소 감소하는 경향을 보이고 있다.

홍수량 $1,000\text{m}^3/\text{s}$ 인 경우에 시간에 따른 하상 및 수위변동을 Fig.3에 나타내었으며 그림에서 횡축은 -방향은 외해측, + 방향은 하천방향을 의미하고 있으며 그리고 종축은 하상을 나타낸 것이다.

실험결과 시간의 경과에 따라 하구부에서의 하상변동이 점차 크게 나타나고 있으며 그 영역이 외해측으로 확장되어가는 경향을 보여주고 있다. 도류제 축조후에는 도류제 내부에는 하상의 변동이 거의 나타나지 않고 있으며 도류제 바깥쪽에 토사가 퇴적하는 경향을 보여주고 있다. 즉, 홍수 유출량에 의해 도류제 바깥쪽으로 점차 사주가 이동·확장되어가는 특성을 보여주고 있다.

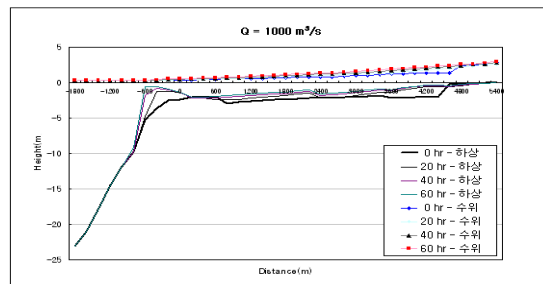


(a) without jetty

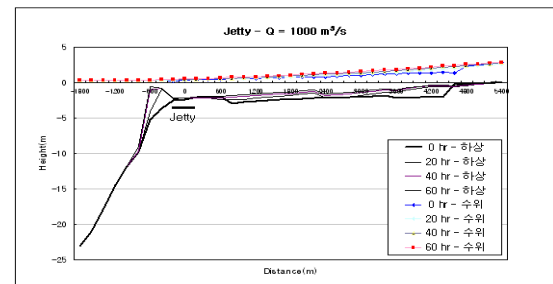


(b) with jetty

Fig. 2 Relationship of the flux rate of sediment transport due to the mixed grain



(a) without jetty



(b) with jetty

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

4.2 남향진 해안선 변동 특성

강릉 남향진 해빈에서의 장기적인 해안선변동 특성을 파악하기 위하여 대상해역을 남향진해빈의 해안선 및 지형변동에 영향을 주는 표사 공급원인 남대천 유사계를 단위공급 표사계로 판단하여 안목항에서 남측 염전해빈까지를 대상해역으로 하였다.

장기적인 해안선변동을 해석하기 위해 입사파조건과 해빈조건 및 해안구조물조건 등이 요구되며 본 연구에서 적용된 입사파조건은 장기과량산출자료집(1997)에서 추출한 17년간의 에너지평균과 고, 주기, 파향을 사용하였으며 1개월마다 1개의 과량을 입력하였다. 또한 남대천에서 유출되는 유사량은 상기한 수치해석적 방법과 유사량 실측에 의한 상관관계법에 의한 해석 등이 있으나 여기서는 강릉남대천 정비기본계획(2005)에서 제시한 상관관계법에 의한 유사량을 적용하였다. 그리고 남대천에서의 하천유출토사량(유사량)이 남향진 해빈변형에 미치는 영향을 파악하기 위하여 하천에서 유출되는 유사량을 하구에 양분하는 개념으로 하여 해석하였다. 즉, 연간 유출토사량을 하구 폭과 표사이동범위에 의해 유사의 단위년하구전진폭을 식(7)과 같이 구하여 사용하였다.

$$\text{단위년하구전진폭(m)} = \text{유출토사량} / \{ \text{하구폭} \times (\text{전빈고 } D_c + \text{한계수심 } D_B) \} \quad (7)$$

여기서 전빈고(D_c)는 0.5m, 이동한계수심(D_B) 6.0m를 사용하였으며 이를 포함한 해빈조건은 "안목항해안선변화 및 매물관련모니터링보고서(2007, 해수부)"에서 추출하여 적용하였다.

Table 2 Input wave condition for long term change of beach(wave height and period)

Mon		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Tot.
Wave	Hs(m)	1.05	0.98	0.83	0.73	0.64	0.67	0.67	0.74	0.85	0.84	0.94	0.99	0.83
	Ts(sec)	4.5	4.6	4.4	4.2	4.1	4.3	4.3	4.3	4.7	4.5	4.4	4.4	4.4

Table 3 Annual river sand discharge

Discharge (m ³ /sec)	Days	Sand Dis. (tons/day)	Total Sand (ton)	Sand Amount (m ³)
~10.35	181	71.8	6,183.0	
35.92	155	155.9	11,498.5	
176.27	25	1100.1	10,547.5	
537.83	4	4047.6	7,362.0	
				13,121

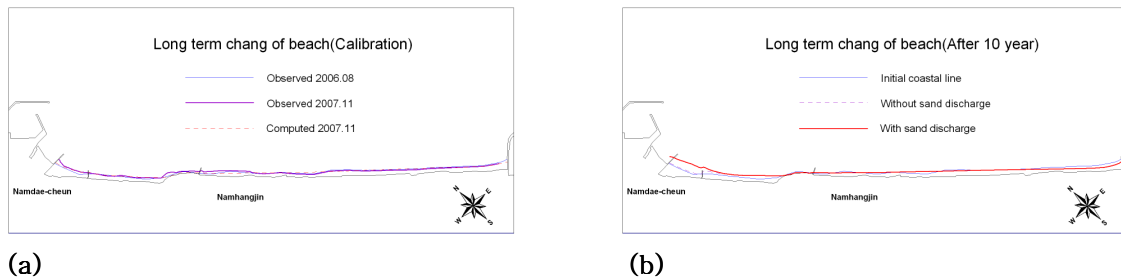


Fig. 4 Observed and simulated shorelines(a)calibration (b)simulated shioreline after 10 years

검증실험에 사용된 해안선 실측자료와 수치실험의 결과를 Fig.4(a)에 도시하였다. 1년간에 걸쳐 중앙부 돌제(유도등)의 좌안에서는 침식이 그리고 남대천 하구 도류제 우안에는 퇴적현상이 강하게 나타나고 있으며 이는 돌제(유도등)좌측의 모래가 남대천 도류제 측으로 이동되고 있는 것으로 예상된다. 이의 결과는 수치실험에 의해 잘 재현되고 있음을 알 수 있다. Fig.5(b)에는 이에 따라 남대천의 유사량을 고려한 경우와 무시한 경우에 대해 2006년부터 2015년 까지의 10년동안의 해안선변화를 재현하기 위한 수치실험을 수행하였다. 남대천에서의 하천 유사량을 고려한 경우 남향진 해빈의 해안선이 전진(퇴적)하는 양상을 보이고 있다. 그러나 홍수시 남대천에서 유출되는 토사량의 대부분은 부유형태로 외해측으로 이동되는 것으로 판단되며 따라서 실제 유사량의 표사에로의 기여에 관해서는 유사에 관한 수리학적 검토가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 남대천에서 유출되는 토사량을 수치해석을 통해 해석하고, 하구역에서의 지형변동 및 하구폐색현상을 검토하였으며 이를 통해 하천유량에 따른 유사량과 하구도류제 축조에 따른 하구사주의 발생특성을 검토하였다. 그리고 하천에서 유출된 유사의 이동특성이 해안선 변동에 미치는 영향을 파악하기 위해 남대천과 인접한 남향진해수욕장 인근에서의 10년에 걸친 장기적인 해안선변동 특성을 1-Line 모형을 통해 예측하였고, 모형에 의해 해석된 해안선변동 계산결과를 관측자료들과 비교·고찰하였다. 그 결과 하천유사량을 고려한 해안선변동특성을 재현할 수 있었으나, 홍수시 대부분의 유사량이 외해측으로 이동되는 것으로 예측되어 실제 적용성을 위해서는 유사의 표사이동에 관한 수리학적 검토가 필요한 것으로 판단된다.