한국해안·해양공학회지
제 16 권 제 2 호, pp. 108~119, 2004년 6월

동해 안목항 주변 연안 토사이동
Nearshore Sediment Transport in Vicinity of Anmok Harbor, East Coast of Korea

김인호* · 이정렬**
In Ho Kim* and Jung Lyul Lee**

요 지 : 안목항의 방파제 확장 건설로 인하여 항 남측에 심각한 침식현상이 광범위하게 발생하고 있는 데 본 연구에서는 이를 규명하기 위하여 수지 분석법과 수치 해석적 방법이 수행되었다. 또한 효율적인 연안통합관리를 위한 주기적인 관측 및 분석 시스템의 필요성을 강조하고 상세한 표사이동의 변화를 제공하는 수치모형 시스템이 제시되었고 연안관리의 측면에서 어떻게 활용될 수 있는 지 안목항 침식 문제를 통하여 살펴보았다. 수치모형 시스템은 토사의 재부상율과 중력에 의한 침강율의 차이로 해저면의 변화를 산정하는 데 파랑 변형, 해빈류, 그리고 부유사 이송 및 확산 예측 모형과 결합되었다. 또한 침강율 산정시 필요한 수심 평균 부유사 농도와 해저면 부유사 농도의 새로운 관계가 부유사 수직구조의 수학적 분석으로부터 제시되었다.

핵심용어 : 해안침식, 표사량 수지, 해안선 관측, 연안통합관리, 수치모형실험, 안목항

Abstract : *The breakwater extension at Anmok Harbor has resulted in erosional stresses along the wide range of* shorelines immediately south of the harbor. In this study, therefore, the downdrift affects caused by the breakwater extension are investigated through both analytical and numerical approaches. In addition, this study stresses the need of monitoring and analysis system for the effective integrated coastal zone management and shows through the case study of Anmok Harbor how the numerical experiments are accomplished for the coastal zone management. The numerical model system, which predicts the seabed changes obtained from the difference between the rates of sediment pickup and settling due to gravity, is combined with the wave, wave-induced currents, and suspended sediment transport models. A new relationship between the near-bed concentration and the depth-mean concentration, which is required in estimating the settling rates, is presented by analyzing the vertical structure of concentration.

Keywords : Beach erosion, sediment budget, shoreline measurement, integrated coastal zone management, numerical experiments, Anmok Harbor

1. 서 론

1.1 우리 나라의 연안관리체제

현재 한국 동해안은 주기적인 연안 관측 시스템의 부재로 해안선 변형을 초래할 가능성이 많은 기존 항만의 확장 또는 정온도 개선을 목적으로 하는 방파제 연장 공사, 임해 발전소 건설 등이 충분한 자료도 없는 상태에서 다분히 형식적인 수준으로 해안선 변형에 대한 평가가 이루어지고 있다. 그러다 보니 평가 결과와는 달리 심각하게 해안선이 변형되어 연안구조물이나 인근 주거환경을 위협하는 경우가 많다. 따라서 인공구조물이 건설된 후에는 건설 전의 토사이동 환경으로 되돌리기가 쉽지 않다. 또한 해안 침식 문제에 그치지 않고 해안환경은 물론 해양생태에까지 영향을 미쳐 주변 양식장에 피해를 줄 수도

*동해대학교 건설시스템공학과(Department of Civil Engineering, Donghae University, Donghae 240-713, Korea. inkim@donghae.ac.kr)
**성균관대학교 토목환경공학과(Corresponding author: Department of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea. jllee@skku.edu)

있다. 따라서 주기적인 해안선 및 해안단면의 관측, 신뢰성 있는 심해 파랑정보의 제공 등 관련 자료에 대한 확보가 우선시 되어야 하며 기존의 항공사진 등의 정보도 정리, 분석하거나 따로 체계적으로 보관할 필요가 있다. 그렇지 않으면 현재 이루어지고 있는 항만 매몰 및 해안선 변형에 대한 검토가 형식적인 수준에서 수행될 수밖에 없으며, 그 심각성이 제대로 평가되지 못하는 건설위주의 난개발은 계속될 수밖에 없다. 또한 연안은 이해관계가 복잡하므로 이를 조정하는 통합적 연안관리가 수립되지 않으면 행정단위 및 이용자 간의 빈번한 대립으로 사회문제가 대두될 수밖에 없다.

1972년 미국을 시작으로 연안통합관리(ICZM; integrated coastal zone management) 시스템이 수립되어 일부 해안공학 분야의 선진국에서 효율적으로 운용되고 있으며 각국의 해안 특성은 물론 행정, 법, 정치, 문화적 특성에 맞춰 계획적이면서 효율적인 해안 개발이 유도되고 있다. 동시에 환경침해를 최소화하여 개발 전의 환경을 최대한 보전하고 나아가 쾌적한 환경을 조성하기 위한 관리 프로그램들에 대한 연구가 최근 활발해지고 있다.

미국은 주마다 각기 다른 관리 프로그램을 갖고 있으며 플로리다 주가 그 중 가장 동해안 해안 환경과 유사하며 가장 체계적인 해안역 관리 시스템을 운용하는 곳으로 해안방재 및 공학기술 프로그램, 플로리다 해빈 침식 억제 프로그램, 환경 인 · 허가 프로그램, 해안 자료 및 분석 프로그램으로 이루어져 있다. 특이한 것은 '해안 자료 및 분석 프로그램'에 의하여 플로리다 해빈을 따라 300 m 폭으로 해안선 및 해안단면 관측이 정기적으로 이루어지고 있다는 것과 해안방재 차원에서 ECL(Erosion Control Line)과 CCCL(Coastal Construction Control Line)을 두어 해안개발을 철저히 통제 및 관리하고 있다는 것이다.

우리나라도 1999년 연안관리법을 제정 · 공표하여 연안통합관리 계획을 수립하고 시행할 수 있는 제도적 기반이 완비되었다. 따라서 연안통합관리에 대한 관심이 높아지고 있으나 아직 상대적으로 해안역 통합 관리에 대한 인식이 부족하여 기초적 조사도 이루어지지 못하고 있다.

또한 해안역 통합 관리를 수행하는 데 걸림돌이 많은 문화적 배경으로 인하여 최적의 프로그램이 수립된다 하더라도 그 실행에 있어 어려움이 많을 것으로 인식되고 있다. 따라서 이를 극복하기 위하여 사전에 주기적인 관측과 조사가 충분히 이루어져야 하며 그리고 충분한 검토를 통하여 한국(동해안) 실정에 맞는 관리 프로그램의 수립이 요망된다.

1.2 안목항의 침식 문제

강원도 강릉시에 위치한 안목항의 확장 공사가 Table 1과 같이 진행되고 있으며 공사가 진척되면서 2004년 3월 현재 항 북측에서는 해안선이 계속 전진하고 있으며 남측에 위치한 남항진 해안 북단에서는 Fig. 1과 같이 심각한 해안침식이 광범위하게 발생되고 있다. 또한 항공사진 분석 결과 남대천으로부터 1 km 떨어진 지점까지 해안선의 변화 형태가 매우 불규칙하게 변형되기 시작하고 있어 이 구간에서 해안 침식 현상이 진행되고 있는 것으로

Table 1. Breakwater construction plan at Anmok Harbor(단위: 백만원)

년도	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97
공사비	110	286	945	1,629	3,768	4,932	5,207
공사 개요	- 호안축조 67 m, - 호안하부 22 m	- 북방파제축조 5 m - 호안축조 16 m - 호안상부 22 m	- 북방파제축조 86 m	- 북방파제축조 70 m	- 북방파제축조 102 m	- 북방파제축조 85 m - 물양장하부 60 m	- 북방파제축조 77 m

년도	'98	'99	'2000	'2001	'2002	'2003	'2004계획
공사비	4,593	4,355	4,295	6,381	6,104	2,725	4,534
공사 개요	- 북방파제축조 49 m	- 북방파제축조 61 m	- 북방파제축조 73 m	- 북방파제축조 97 m	- 북방파제축조 34 m - 남방파제축조 84 m	- 남방파제축조 40 m	- 남방파제축조 40 m

■기시공('04계획분 포함)
※북방파제축조: 739 m, 남방파제축조: 164 m, 호안축조: 105 m

Fig. 1. Shoreline crosions after construction of a breakwater at Anmok Harbor.

판단되고 있다(정승진 등, 2003). 이는 전적으로 안목항의 북방파제 확장으로 인하여 유발되는 현상으로 간주된다. 본 논문에서는 현재의 해안선 변화 현상을 토대로 남향진 해안일대에 광범위하게 발생한 침식구간을 초래한 원인을 규명하기 위하여 표사량 이동도를 작성하였고 취득 가능한 기존 자료를 토대로 추정한 연안토사의 이동경향을 비교 · 검토하였다. 결론적으로 표사량 관련 관측 및 분석이 턱없이 부족하다는 것을 인식하는 계기가 되었으며 해안선 변형에 대한 그릇된 평가를 초래할 수밖에 없었던 주기적인 연안관측 프로그램의 부재에 대하여 지적한다. 좀 더 상세한 원인 규명을 위하여 널리 사용되는 수치 모형 시스템의 하나인 SADEM을 이용하여 수치 실험도 수행하였다.

2. 안목항 주변의 연안표사 이동

2.1 안목항의 위치

안목항은 Fig. 2와 같이 동해안에 위치하고 있으며 안목항 바로 남쪽에 강원도 강릉 남대천이 흐르고 있다. 안목항 남측 및 북측 해안선의 방위는 해안선에 직각인 방

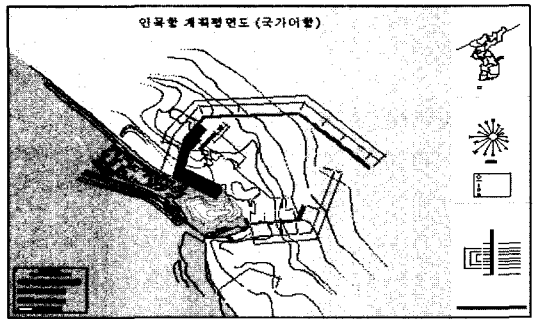

Fig. 2. Location of Anmok Harbor.

향이 정북으로부터 43° 정도로 45° 보다 다소 작은 것으로 평가된다. 따라서 NE방향으로부터 유입되는 파랑에 대하여 북쪽으로의 연안류가 약하게 발생될 수 있다. 안목항의 방파제 건설로 인한 주변 해안선의 변화를 예측하기 위하여 해안선에 직각인 방향을 중심으로 NE-NW에 속한 파랑(북측 계열)과 NE-SE에 속한 파랑(남측계열)을 구별하여 분석하는 것이 유익하다. 수산청(1995)에 의한 심해 파랑(일본기상청: 1983-1986년)의 파향 분석 결과에 의하면 겨울철 북측계열이 우세하며 그 평균 파고는 1.7 m, 파향은 대략 NNE이며 여름철에는 남측계열이 우세하고 그 평균 파고는 0.55 m, 파향은 ENE이었다.

2.2 안목항 주변의 연안표사량

해안선을 효율적으로 관리하기 위해서는 우선 신뢰할 만한 해안 침식율 자료가 필요하다. 그런 자료를 얻는 데는 다음 2가지 방법이 있다. 첫째는 5-10년 정도의 시간폭을 갖는 장주기의 해안선 변화 자료를 이용하여 산출하는 방법이다. 이 방법은 양빈이나 준설 등 인위적인 행위로 인하여 오차를 낳을 수 있다. 새로운 해안구조물이 설치되는 경우는 특별히 큰 변화가 없을 때까지 계절별 해안선 및 해안단면 관측이 한동안 필요하다. 두 번째 방법은 경험식에 기초한 통계적인 방법으로 해안선에 영향을 미치는 심해파, 토사입경 등의 자료로부터 취득된다. 그러나 이 방법들은 비교적 선형적인 해안선에 적용가능하며 파향 취득 방법에 대한 신뢰가 아직 확보되지 않아 현장자료와의 비교를 통한 계속적인 보정이 요구된다. 이상의 2가지 방법은 또한 연안구조물 주변의 민감한 해안선 변화를 추정하기에는 근본적으로 적용상 한계가 있으므로, 최근에는 상세한 정보를 제공할 수 있는 수치 모형 기법을 이용한 접근 방법이 병행되고 있다.

연안 표사량 추정을 위하여 연안표사량을 직접 연안류와 연계시키기보다는 오히려 개괄적으로 연안류를 발생시키는 파랑 에너지와 연안 표사량과의 관계를 구하려는 시도가 초기에 수행되었다(Caldwell, 1956; Inman and Bagnold, 1963). 현재 널리 사용되고 있는 연안 표사량 산정식은 연안표사량을 에너지 flux의 연안성분으로 표시한 것으로 다음과 같이 쇄파점에서의 파랑에너지 E_b, 군속도 Cg_b, 그리고 파향 θ_b로 표현된다.

$$Q = \frac{C'}{\rho g} E_b C g_b \cos\theta_b \sin\theta_b \tag{1}$$

여기서 Q는 횡방향(cross-shore)으로 적분된 단위시간당

연안 표사량의 총량이며, g는 중력 가속도, ρ는 밀도이고

$$C' = \frac{K}{(s-1)(1-p)} \tag{2}$$

K는 실험 상수(0.2~2.2)이고, s는 모래의 비중(2.65 정도), 그리고 p는 모래 공극율(0.3~0.4)이다.

심해파 정보로부터 연안 표사량을 산정하기 위해서 식 (1)에서 주어진 쇄파점에서의 정보를 심해파 정보로 환산할 필요가 있다. 해안선과 등수심선이 거의 일직선으로 평행한 경우 식 (1)은 심해파의 평균 파고 $\overline{H}_0$, 파향 β, 주기 T의 함수로 다음과 같이 주어진다.

$$Q = C' \frac{g^{0.6} \overline{H}_0^{2.4} T^{0.2} \cos^{1.2}\beta \sin\beta}{16(4\pi)^{0.2} 0.78^{0.4}} \tag{3}$$

연안 표사량 산정식 (3)은 해안선의 변화가 완만한 경우에 적용되는 식으로 복잡한 지형이나 구조물에 의한 파랑의 국지적 변화는 고려되지 않았다. 그러나 지형 또는 구조물에 의하여 연안방향의 쇄파고가 변할 때 이로 인한 연안류의 국지적 변형으로 식 (3)으로부터 추정되는 표사량과는 상당한 차이를 보일 수 있다.

심해 파랑 자료로부터 해안선의 방향에 따라 연안 표사량 정보를 제공하는 연안표사도(littoral drift diagram)는 임의의 연안에서 해안선의 방향 정보만으로도 년간 발생하는 표사량을 추정하는 데 상당히 유용한 도구로 활용될 수 있다. 해안선의 방향 α는 Fig. 3에 도시된 것과 같이 진북(N)에 대하여 동편에 바다가 존재하게끔 방향 설정을 하였다. 따라서 진남(S)의 α에 대하여 바다는 서편에 위치하게 된다. 해안선 방향에 따라 식 (3)의 심해 입사 파향이 달라지므로 Fig. 3에서 정의된 α를 고려하면 식 (3)의 단위시간당 표사량은 다음과 같이 주기, 심해 파고와 심해 파향의 함수만으로 표현될 수 있다.

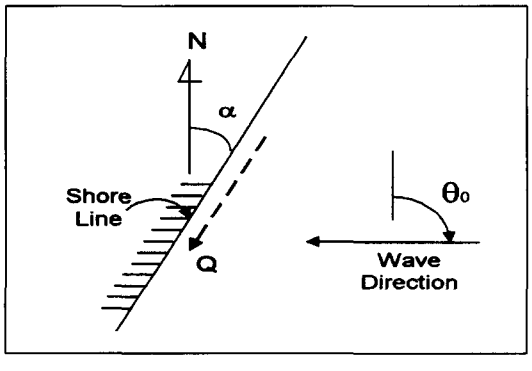

Fig. 3. Definition sketch of shoreline angle α.

$$Q(\alpha) = C'Q' = C' \frac{g^{0.6} \overline{H}_0^{2.4} T^{0.2} \cos^{1.2}\beta \sin\beta}{16(4\pi)^{0.2} 0.78^{0.4}} \tag{4}$$

여기서 $\beta = \theta_0 - \alpha - \pi/2$ 이고

수산청(1995)에 제시된 안목항 월별 대표파랑 자료를 이용하여 지역적 경험계수를 배제한 연간 연안표사량(littoral drift rates) Q'을 계산한 결과, Table 2에 제시된 바와 같이 남향하는 토사가 우월하게 나타나고 있다(남향계열과 북향계열의 출현비율은 정보가 없는 관계로 동일하다고 간주하였다). 따라서 안목항의 방파제 건설이 안목항 남측에서의 해안 침식을 유발하는 근본 원인이 되는 것이다. Q'은 파랑 조건만을 고려한 것으로서 해빈 조건에 따라 지역적으로 다른 값을 갖는 C'을 배제한 것이므로 경우에 따라 0.2~2.2 정도의 값을 곱하여야 최종 연안표사량(m^3/sec)을 얻을 수 있다.

2.3 연안 표사 이동 경향의 변화 분석

현재 항 남측에서 발생하는 해안침식현상의 원인을 규명하기 위하여 여름철과 겨울철 각각에 대하여 토사량의 유출입을 살피고 사업전의 결과와 비교하여 분석한다. 우선 여름철의 경우 방파제의 건설로 항 남측 침식구간에서의 파랑 및 해빈류(wave-induced current)는 거의 변화가 없을 것이므로 건설 전과 비교하여 해안선 및 수심에 있어서는 큰 변화를 초래하지 못할 것으로 판단된다. 여름철 ENE계열 파랑은 그리 크지 않아 남대천으로부터 유입된 토사를 해안쪽으로 밀어붙이는 역할을 다하지는 못하지만 북측 죽도봉쪽으로 표사를 이동시켜 남대천 하구 전면에 사주가 북쪽으로 발달하도록 영향을 발휘하는 것으로 판단된다. 그러나 겨울철 NNE계열 파랑에 대하여 안목항의 외곽방파제는 항남측 토사이동에 커다란 변화를 일으킨다. Fig. 4a와 같이 건설 전 남대천으로부터 유입된 토사와 죽도봉을 우회하여 넘어온 표사가 파랑 작용으로 인하여 남대천 남측 해안의 광범위한 구간에 넓게 공급되어 평형을 유지하였던 것으로 판단된다. 그러나 방파제 건설 후에는 Fig. 4b와 같이 남측으로 향하던 연안표사량의 대부분이 차단될 뿐만 아니라 방파제로 인하여 남측에 차폐구간이 형성되어 남대천으로부터 여름철에 유입된 토사가 건설 전 파랑 작용으로 남대천 남측 해안에 공급되던 것을 막는다. 오히려 차폐구간은 Fig. 4b와 같이 와류를 형성하여 해안선의 침식을 촉진하고 남대천 하구측의 토사가 퇴적되어 하구폐색을 촉진할 수 있다.

해안선 침식문제를 해결하기 위한 공학적인 기법으로

Table 2. Deep water incident wave data (수산청, 1995) and estimated annual littoral drift rates Q'(m^3/yr)

월	심해파랑 (JMA)			심해파랑 (DSA-5)			계열
	파고 (m)	주기 (sec)	파향 (°)*	파고 (m)	주기 (sec)	파향 (°)*	
1	1.76	7.23	16.91	1.78	7.18	21.47	NNE
	0.43	7.09	48.16	0.82	7.68	52.91	ENE
2	1.63	6.94	17.85	1.58	6.70	23.04	NNE
	0.66	6.72	52.13	1.07	7.17	57.34	ENE
3	1.12	6.44	20.15	0.95	6.42	25.99	NNE
	0.66	6.26	59.70	0.96	6.73	62.14	ENE
4	0.71	5.83	22.72	0.68	5.86	25.12	NNE
	0.72	5.77	62.32	0.89	6.37	65.18	ENE
5	0.45	5.89	28.63	0.58	6.05	30.52	NNE
	0.52	5.79	61.10	0.81	6.12	58.61	ENE
6	0.25	5.69	30.22	0.43	5.92	26.79	NNE
	0.61	5.77	65.90	0.80	5.45	66.30	ENE
7	0.22	5.40	34.56	0.61	6.42	18.55	NNE
	0.40	5.46	61.04	0.56	6.41	62.14	ENE
8	0.44	5.87	33.79	0.95	6.94	33.73	NNE
	0.66	5.74	62.09	1.13	6.58	54.04	ENE
9	0.60	5.96	27.03	0.75	5.80	26.67	NNE
	0.77	6.17	62.06	0.87	6.39	58.38	ENE
10	1.23	6.31	20.49	1.20	6.22	28.47	NNE
	0.53	6.05	59.48	1.15	6.68	58.65	ENE
11	1.46	6.58	17.89	1.43	6.15	21.85	NNE
	0.47	6.54	49.83	0.84	6.66	56.08	ENE
12	1.82	7.11	20.60	1.85	6.85	20.74	NNE
	0.67	7.00	48.34	0.81	7.26	53.58	ENE
Q'**		1.7325×10^6			1.0537×10^6		남향

*파향은 진북으로부터 시계방향의 degree로 제시되었음.
**Q'은 파랑 조건만을 고려한 것으로서 해빈 조건에 따라 지역적으로 다른 값을 갖는 계수(0.2~2.2)를 배제한 것임.

는 양빈(beach nourishment), 돌제(groins), 방파공(seawalls and revetments), 방파제(offshore breakwater), 모래운송장치(sand bypassing), 모래언덕축조(dune building) 등이 있다. 이 기법 중에 양빈과 모래언덕축조는 연성구조기법(soft structural approach)에 해당되며 나머지는 강성구조기법(hard structural approaches)에 해당된다. 안목항 침식 현상의 유발요인이 방파제에 의한 연안표사의 차단 및 남대천으로부터 유입된 토사의 차폐지역에서의 고립에 있으므로 이를 남측 해안에 공급하여야 하며 이를 위하여는 모래운송장치를 두거나 준설한 토사를 모두 남측에 공급하는 일이다. 이러한 토사의 운송은 가을철에 이루어지는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 방파공이나 방파제 건설과 같은 강성구조기법은 추후 정기적인 관측을 통하여 해안선 변화를 살피고 충분히 토사과정이 이해가 된 후 불가피한 경우 조치를 취하는 것이 바람직하다. 남대천 하구의 사주 변화가 심하므로 이를 안정화시키기 위하여 모래언덕축조 후 식생대 피복도 장기적인 후속 대책으로 권장할만 하겠다.

3. 국지 토사이동 수치모형시스템

동해안 해안선의 특성상 해안선을 따라 상당량의 토사이동이 가능함에도 그 동안 대부분의 토사이동 모형은 측면으로부터의 토사 유입 또는 유출량의 고려도 없고 장기간의 예측이라기 보다는 단기간의 이벤트성 예측으로 근본적인 문제 해결의 묘책을 제시하지 못하는 경우가 많았다. 동해 연안에서의 항 내 매몰 문제는 이와 같이 단기적 그리고 국지적인 토사이동 모형의 적용만으로는 그 대책을 강구하기에는 충분하지 못하다. 해안을 따라 이동되는 표사량이 동해안의 경우 파랑의 크기 및 방향에 따라 상당히 변화무쌍하고 이 토사 이동량을 국지 모형만으로 반영하기에는 어려움이 많다. 따라서 장기 파랑 자

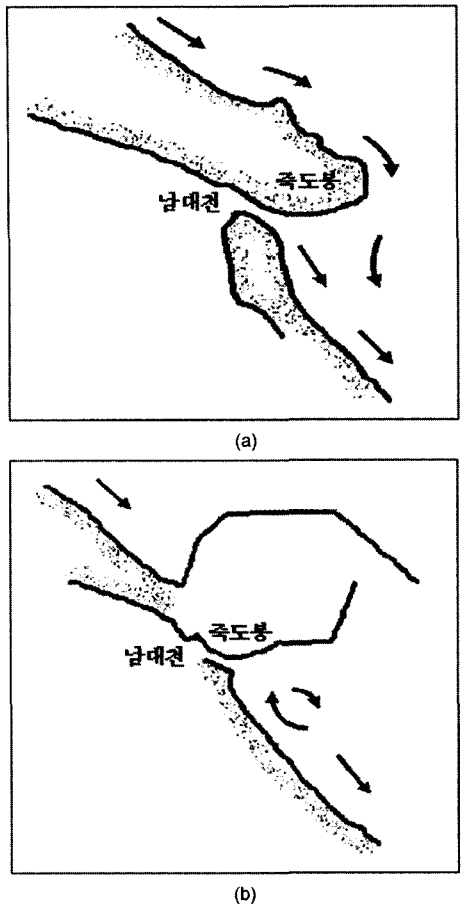

Fig. 4. Changes in the pattern of sediment transport before and after a construction.

료를 분석하여 연안에서의 표사수지를 우선 제공하며 이를 실지형에 적용하여 그 반영 효과를 제시하는 것이 바람직하다.

연안역에는 그 기인력이 서로 다른 다양한 흐름(coastal currents)이 존재한다. 이러한 흐름으로는 조석현상에 의한 조류, 계절적으로 변화하며 공간적으로도 그 규모가 비교적 큰 해류, 바람의 영향에 의한 취송류, 그리고 파랑의 직접적 영향으로 발달되는 해안류 등을 들 수 있다 이 중 단기간에 지역적으로 연안역에 가장 큰 영향을 미치는 것은 파랑의 변형으로부터 비롯되는 해빈류(海濱流)라 할 수 있다. 즉, 심해에서 주로 바람에 의해 발생하고 발달된 파랑은 연안역으로 전파함에 따라 상대적으로 급격히 변하는 수심 및 흐름에 의해 천수, 굴절, 회절현상으로 변형되고, 그리고 해안선 가까이에서 쇄파되어 결국 소멸되는 과정을 거치게 된다. 이러한 파랑의 변형과정에서 수반되는 파랑의 잉여응력의 변화에 따라 해안류도 발생하게 된다. 따라서 연안역 해수순환 현상 및 해저 퇴적물 이동현상을 연구하기 위해서는 보다 정확한 파랑장 재현 및 해석이 필수적이며 해빈류의 실측을 통하여 검증할 필요가 있다. 앞에서 언급하였듯이 쇄파대에서의 유속이 3차원적인 변화를 갖고 있지만 항 내에서는 유속이 3차원적인 변화가 미약하므로 비용절감을 위하여 3차원 모형의 적용보다는 2차원 모형을 수립한다.

해빈류의 예측을 위하여 광각 포물선형 파랑 모형(PALMA-WA)과 해빈류 모형(WICM)이 사용된다. 파랑 모형은 22.5도 이상의 광각에 대한 정확도를 높이기 위하여 같은 격자망에서 사선(45도)으로 수치계산이 진행되는 계산법으로 수치실험이 수행되었다. 파랑작용 하에서의 표사이동은 주로 부유사에 의하여 이루어지므로 표사이동은 부유사 농도의 이송 및 확산에 의하여 예측하는 모형(FOTADIM-SS)을 적용하였다(Goda, 2001). 파랑모형으로부터 표사이동 모형까지의 흐름도가 Fig. 5에 도시되었다.

3.1 수심평균 해빈류 및 부유사 전단응력

수치모형 실험은 포물선형 파랑 변형 모형인 PALM-WA와 잉여응력을 이용하여 해빈류 및 수면 변화를 산출하는 모형인 WICM으로 수행되었다(Lee et al., 2004). 파랑 모형으로부터 산정된 파랑의 질량이송 및 잉여응력은 다음 수심적분된 연속방정식의 원천(source)으로 그리고

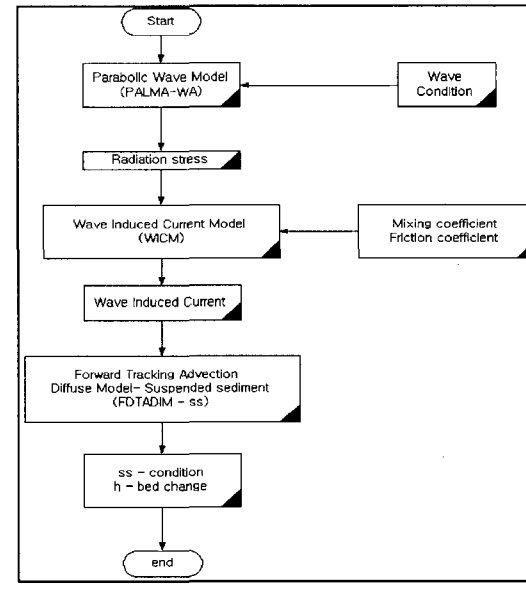

Fig. 5. Flow chart of a numerical model system for nearshore sediment transport (SADEM).

운동방정식의 외력으로 작용하여 연안역에서 해빈류를 발생시킨다.

해저면의 형태학적인 변화의 예측에 현 모형을 적용하기 위하여 2차원 영역에서 천수와 굴절 그리고 회절과 같은 작용들에 영향을 받는 쇄파에 따른 에너지 소산의 비율을 정의하는 것이 필요하다. 간편한 접근방법은 쇄파조건을 고려한 파랑 에너지 쇄파조건과 그렇지 않은 것의 차이를 쇄파에 의해 소산되는 파랑 에너지 플럭스의 양, W_s로 간주하는 것이다. 즉,

$$W_s = W - W_b$$

여기서

$$W = \frac{1}{8}\rho g(H_{rms})^2 C_g \cos\beta \text{ 이며 } W_b = \frac{1}{8}\rho g(H_{rms})_b^2 C_g \cos\beta$$

이다.

여기서 W는 쇄파가 없는 플럭스, W_b는 쇄파에 의해 소산된 후 남아 있는 파랑 에너지의 플럭스이다. 최소자승 파고인 (H_{rms})와 $(H_{rms})_b$는 각각 쇄파조건을 고려한 것과 하지 않은 경우에 대한 파고이다. x축은 해안선에 위치해 있고, 해역에서 양의 값을 취한다. β는 파 전파 방향과 x축에 직각인 선이 이루는 사이 각이다. W_s의 공간적 변화가 부유사의 전단응력으로 작용한다(Goda, 2001).

3.1.1 포물선형 파랑모형

파랑 모형의 결과로부터 해빈류의 발생을 일으키는 잉여응력과 해저면으로부터 부유사의 발생량에 영향을 미치는 전단응력이 산정된다. 광역의 연안역에서 파랑변형에 따른 파랑장 재현을 위해 포물선형의 완경사방정식(mild-slope equation)이 사용되었다. 파랑 모형은 격자간 거리의 제약에 따라 광역모델과 협역 모델로 나누어지며 광역 모델은 진폭 및 파수 벡터를 미지수로 하는 주기 평균된 타원형 모델과 파의 주 진행 방향으로 파 진동에 의한 위상(phase)변화를 완화시킨 포물선형 모델 등이 있다.

주기 평균된 타원형 모델은 격자크기에 제한이 적고 비교적 부드러운 계산 결과를 제공하므로 광역에 적용하기 가장 유력한 수치모형으로 추천되어 왔으나, 실제 지역에 적용한 결과 천퇴(shoal)가 있는 지역에서 천퇴후면에서의 파의 교차를 소화시켜주지 못하고 있다. 파가 교차할 수 없다는 것은 파수벡터의 비회전성이 진행파의 위상변화로부터 얻어지기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 주기 평균된 타원형 모형보다는 포물선형 모형을 사용하여 수치해석하며, 광각에 대한 포물선형 모형의 근본적인 오차를 줄이기 위하여 22.5도보다 큰 경우에는 45도를 주입사각으로 계산이 수행되도록 하였다. 사용된 지배방정식과 수치해석은 부록 A에 간략히 제시되었다.

3.1.2 해빈류 예측 수치모형

부유된 토사는 다시 해저면으로 가라앉는 동안 연안역에서 발생하는 흐름에 의하여 그 위치를 이동하며 확산되는 데 연안역에서의 흐름에는 기인력이 서로 다른 해류, 조류, 취송류, 파랑류 등이 존재하며, 또한 이 해역은 복잡한 과정을 거치면서 생성, 전파, 변형된 파랑이 쇄파라는 마지막 변형과정를 거치면서 소멸되는 해역으로서, 다양한 흐름과 파랑변형 현상의 복합적 상호작용에 의한 결과로 연안역 해수 순환현상이 나타난다. 이 흐름은 해안류와 해빈류로 대별된다.

해안류는 연안해류와 조류로 이루어지고 일반적으로 해안선에 평행하게 흐르고 외빈보다도 원빈에서 탁월하다. 우리 나라 동해안 해황의 특징 중 하나는 동해가 일본열도와 한반도에 의하여 갇힌 형상을 하고 있어서 조석이 상당히 미약하다는 점이다. 예를 들면, 주요 조석 분조인 M_2의 반조차가 부산 가까이의 해안을 제외한 대부분의 동해안의 해안선에서 20 cm 내외로 알려져 있다. 이러한 해역에서는 조석이 퇴적물 이동에 기여하는 정도가 미약하므로, 주로 파랑과 해빈류에 의해 퇴적물이 이동하게 된다.

단순화된 자연해빈 주변 연안역의 해수 순환 현상을 재현하고자 하는 연구가 지난 20년 동안 광범위하게 진행되어 왔다. 이에 대한 관련 문헌 조사 및 평가가 Basco(1983) 및 Battjes(1988)에 의해 수행된 바 있다. 이러한 대부분의 연구들이 수심적분된 형태이거나 수심평균된 형태의 방정식을 기초로 수행되었으며, 이는 수심에 따라 유속이 일정하다는 가정을 내포하고 있다. 때로는 해안류의 수심에 따른 유속분포가 개수로 정상류의 경우에 적용되는 로그함수적 분포를 갖는다는 가정하에 수행되기도 하였다.

최근 이론적으로, 그리고 수리모형실험을 통한 연구결과, 연안역에서의 향안류 또는 이안류에 대한 구조 및 해석방법에 많은 발전이 이루어졌다. 즉 수면부근에서는 해안을 향해 흐르나 해저면에서는 반대 방향(외해방향)으로 흐르는 흐름, 저층 이안류(undertow)의 생성이유 및 발달과정 등을 이해할 수 있게 되었으며, 연안역 해저퇴적물 이동 분석시 수심 평균된 이안류 등을 이용하는 것은 큰 오류를 범할 수 있으며, 3차원적 해석을 통해 보다 정확한 유속분포를 파악하는 것이 중요하다는 것이 입증되었

다(De Vriend, 1986).

해안환경 및 해안건설에서 기본이 되는 바다에 대한 기본적인 정보는 파랑 에너지이며 이 파랑에너지는 해수에 잉여응력을 일으켜 특히, 쇄파대 인근에서 해안선 변형 및 주변 토사의 이동에 상당한 영향을 끼치는 해빈류를 일으킨다. 해빈류의 발생역학에 대한 연구는 잉여응력의 소개와 함께 급진전 되었으며 대부분의 해빈류 모형은 천수방정식에 잉여응력을 포함시켜 해석함으로써 파랑작용으로 인한 잔차류인 해빈류를 모의하고 있다.

해빈류 산정 모형이 잉여응력 유도상의 제한으로 주로 진행파에만 적용되었으나 최근 Boussinesq 또는 완경사 방정식 형태의 비선형 방정식의 유도로 이러한 잉여응력의 유도과정 없이 항 내와 같은 반사파 우세 해역에도 사용될 수 있게 되었다. 이러한 모형은 잉여응력에 의한 해빈류 예측 모형이 갖는 반사파 영역에서 적용될 수 없다는 제한성이 적용되지 않는다는 장점이 있다(Lee and Park, 2000). 잉여응력 접근방법은 파랑 위상에 대하여 시간 적분된 천수방정식을 이용하므로 비교적 격자 간폭의 제한이 적어 광역에 적용할 수 있는 반면 비선형 파랑모형을 이용한 방법은 한 주기당 위상재현을 위하여 요구되는 격자수가 있으므로 광각에 적용하는 데 어려움이 있다.

본 논문에서의 적용영역인 안목항은 방대하며 일부 항내를 제외하고는 잉여응력을 이용한 접근방법이 가능한 진행파 우세 영역이므로 비선형 파랑모형을 이용한 접근방법보다는 잉여응력을 이용한 모형을 적용하여 수치실험한다. 사용된 지배방정식과 수치해석은 부록 B에 간략히 제시되었다. 현장 자료가 충분하지 않은 관계로 범용적으로 사용되고 있는 파라메타를 사용하였다. 추후 현장 자료와의 비교를 통하여 수치 모의시스템이 신뢰를 쌓도록 해야 할 것이며 본 연구에서는 단지 연안 관리의 한 기술적 과정의 이해를 돕기 위하여 수치모형 결과를 제공한다.

3.2 해저면 변화 예측 모형

하천이나 해안에서의 토사의 이동에는 2가지 형태로 소류사 이동과 부유사 이동이 있다. 소류사 이동에는 개별입자의 이동과 sheet flow에 의한 이동이 있으나 최근의 관측분석 결과 파랑작용 하에서는 Komar(1978)의 소류사 우월설과 달리 그리 크지 않은 것으로 알려지고 있으며 부유사 이동에는 sand ripple로부터의 부유와 쇄파에 의한 부유 등이 있는데 쇄파로 인한 부유가 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 최근 보고되고 있다. Goda(2001)는 CERC 공식과 비교한 Kana and Ward(1980)의 결과를 토대로 유의파고가 1.3-1.6 m 이상인 경우 부유사 모형으로 해안선 및 해저면 변화를 예측할 수 있다고 판단하고 있다. 또한 소류사 모형은 양해법이라 계산시간이 오래 걸리며 현재 수치계산상의 불안정이 근본적으로 해결되지 않고 있다. 따라서 Goda(2001)와 같이 파랑의 쇄파현상이 주로 유발되는 해저면의 변화에 가장 합리적이고 가장 널리 사용되고 있는 산정식을 본 논문에서 사용한다. 이 산정식은 관측 자료와 비교하여 검증할 계수가 많지 않아 효율적이지만 정확성이 떨어질 수 있다. 관련 검증 계수가 많은 산정식은 관측자료와의 접근성에 유리하지만 복잡한 실지형에 적용하였을 때 그릇된 결과를 산출할 가능성이 있다는 점에서 주의를 요한다.

표사이동에 따른 해저면의 수심 변화는 침식량과 퇴적량의 차이에 따라 주로 결정된다고 볼 수 있으며 다음 관계로부터 산정된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = S_E - S_D \tag{5}$$

여기서 h는 평균해수면으로부터 해저면까지의 깊이인 수심이다.

해저면은 식 (5)에서 주어진 바와 같이 토사의 재부상과 중력에 의한 침강의 비율의 차이로 결정되는데 연안역에서 토사는 쇄파에 의하여 재부상되고 중력에 의해 점차적으로 가라앉는 동안해빈류에 의하여 이송된다. 따라서 강한 쇄파작용으로 인해 토사 재부상율이 침강율을 초과하는 곳에서는 해저지형이 침식되고 수심은 깊어진다. 재부상율이 침강율보다 적은 곳에서는 토사가 쌓여 수심이 낮아진다. 부유토사에 대한 이송 및 확산 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + u\frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + v\frac{\partial \bar{C}}{\partial y} = \frac{1}{h\partial x}\left(hD_x\frac{\partial \bar{C}}{\partial x}\right) + \frac{1}{h\partial y}\left(hD_y\frac{\partial \bar{C}}{\partial y}\right) + \frac{S_E - S_D}{h} \tag{6}$$

여기서 $\bar{C}(x, y)$는 수심 평균 부유사 농도, D_x와 D_y는 각각 x와 y방향에 대한 수평 확산 계수이고, u와 v는 각각 x와 y방향에 대한 해빈류의 유속 성분이다. 식 (6)은 파랑 수치모형으로부터 얻는 해빈류 장과 토사 발생률을 입력으로 하여 수심 평균 부유사 농도에 대해서 푼다. 그래서 일단 우리가 파랑에너지 플럭스 $W_s(x, y)$의 소산양의 공간적인 분포를 계산하면 쇄파에 의해 해저지형으로부터 토사발생률을 예측할 수 있다.

이송 및 확산 방정식 (6)의 수치해석은 fractional step method에 의해서 이송 및 확산의 2가지 독립과정으로 분류될 수 있다. 이송항은 Lee(1998)에서 소개된 바와 같이 후향 추적(backward-tracking)이 아닌 전방 추적 특성곡선법(forward-tracking method of characteristics)으로 처리된다. 이 방법은 이송(advection)이 우월한 흐름 또는 확산 계수가 적은 영역에서 수치확산(numerical diffusion)을 제거하는 방법으로 토사와 같이 확산 거동이 적고 흐름의 영향력이 우세한 경우에 적용성이 우수하다. 확산항은 해수 순환 모형의 확산단계 수치 해석법과 동일하게 음해법의 유한차분법으로 수치 계산되므로 확산 모의를 위하여 많은 입자를 필요로 하는 무작위방법과는 달리 적은 입자로도 확산이 우월한 영역에서도 정확히 모의될 수 있다.

식 (6)에서 퇴적율은 부유사 모형의 농도로부터 추정한다. 해저퇴적물은 교란에 의해서 부유하면 약한 흐름에 의해서도 쉽게 그 방향으로 운반된다. 따라서 해저퇴적물 이동현상을 명백히 하기 위해서는 해저면의 흐름도 충분히 파악하여야 한다. 연안에서의 퇴적물 이동현상은 대상해역이 해저퇴적물의 분포와 수리적 환경, 주변으로부터의 퇴적물 공급상태에 따라 매우 다양하게 나타난다. 하천에서의 퇴적물 이동과 비교하면 연안역에서는 조석과 파랑이 퇴적물 이동에 큰 영향을 미친다. 따라서, 지역적 특성에 따라 퇴적물 이동현상을 재현 또는 예측하기 위한 방법도 다양하게 발전해 왔다. 본 연구에서 식 (6)의 S_D와 S_E는 다음과 같이 적용되었다.

$$S_D = w_s C_b \tag{7}$$

$$S_E(x,y) = \frac{\beta_s}{(\rho_s-\rho)gh}\frac{\partial}{\partial x}W_s(x,y) : \frac{\partial W_s}{\partial x} \geq 0$$
$$= 0 \qquad\qquad : \frac{\partial W_s}{\partial x} < 0 \tag{8}$$

여기서 해저면 농도 C_b는 해저면에서의 농도이고 β_s는 부유계수이다(Goda, 2001). C_b와 $\overline{C}$의 관계를 추정하기 위하여 정상상태일 때 토사의 수직방향 이송 및 확산식은 다음과 같다.

$$K_z\frac{\partial^2\overline{C}}{\partial z^2} + \omega_f\frac{\partial\overline{C}}{\partial z} = 0 \tag{9}$$

식 (9)의 해는 해수면에서의 부유사 농도가 거의 0이라는 가정하에 $\overline{C}$와 C_b의 관계를 ω_f와 K_z의 함수로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\overline{C} = \frac{\omega_f h}{K_z}C_b \quad \text{for} \quad \frac{\omega_f h}{K_z} \gg 1 \tag{10}$$

무차원 파라미터인 $\frac{\omega_f h}{K_z}$가 증가함에 따라 퇴적과정이 빠른 속도로 이루어진다.

침강 속도 w_s는 입경 d(meter unit)의 함수로 레이놀즈의 수에 따라 다음과 식들이 사용될 수 있다.

$$w_s = \frac{g}{18}(S_s-1)\frac{d^2}{\nu} = k_3 d^2, \qquad \mathrm{Re} < 0.5$$
$$w_s = \left[\frac{g}{18}(S_s-1)\right]^{0.667}\nu^{-0.333}d = k_2 d \quad 30 < \mathrm{Re} < 500 \tag{11}$$
$$w_s = [3.3g(S_s-1)d]^{1/2} = k_1 d^{1/2}, \quad 500 < \mathrm{Re} < 10^4$$

여기서 ν는 동점성 계수이며 S_s는 입자의 비중이다. 첫 번째 식이 Stokes의 식이고 두 번째가 Allen의 식, 세 번째가 Newton의 식이다.

3.3 수치 모형 검증 및 결과

표사이동 수치모형의 검증을 위하여 이안제 후면에 대한 Goda(2001)의 수치결과와 비교한다. 1/50의 일정수심에 수심 4 m에 길이 200 m, 폭 10 m의 불투수성 이안제를 두고 유의파고 2 m, 주기 8초의 파가 이안제에 직각으로 유입될 때 이안제 후면에 형성되는 해빈류 및 그에 따른 3일 후의 수심변화를 비교 검토한다. 토사입경은 0.2 mm로 2.4 cm/s의 침강속도를 갖는 것으로 주어졌으며, 수평확산계수 K는 0.01 m^2/s로 동일하게 두었다. 수직방향 확산계수 $K_z = 5\omega_f$로 가정하였다.

해빈류는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 이안제 후면에서 해안으로부터 이안제로 향하는 방향의 2중 와류가 거의 동일하게 유사한 크기로 형성되고 있으며 Fig. 7에 제시된 해저면의 변화는 유사한 경향을 보이고 있다.

안목항의 경우는 사업 전후의 지형에 대하여 비교적 큰 겨울철 북측계열의 입사파랑 조건(H_o = 3.4 m, T = 9 sec, θ = NNE)에 대하여 수치모형 실험이 수행되었다. 수직방향 확산계수 $K_z = 5\omega_f$로 가정하였다. 여름철은 사실 사업 전후의 변화가 거의 없어 생략한다. Fig. 8a에서와 같이 안목항이 확장되기 전에는 안목항 북측의 토사가 해빈류를 타고 우회하여 항 남측으로 이동될 수 있으나 Fig. 8b에서와 같이 방파제가 확장되면 해빈류가 차단되어 토사의 이동이 거의 차단된다. 실험 조건이 비교적 파고가 큰 경우임에도 Fig. 8b와 같이 해빈류는 거의 차단되고 있음을 볼 수 있다. 또한 사업 전에는 여름철 남대천으로부터 유입된 토사가 하구에 쌓여 수

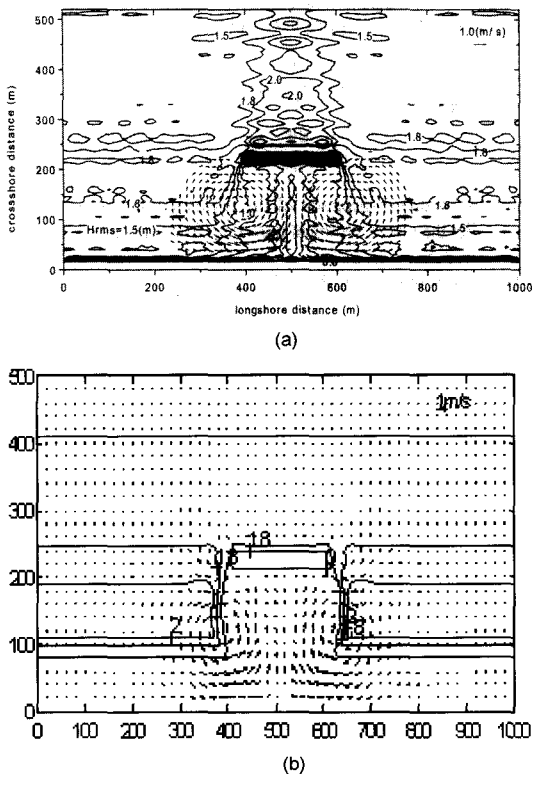

Fig. 6. Comparison with numerical results of wave-induced currents represented by Goda (2001); (a) Goda's results, (b) the present results.

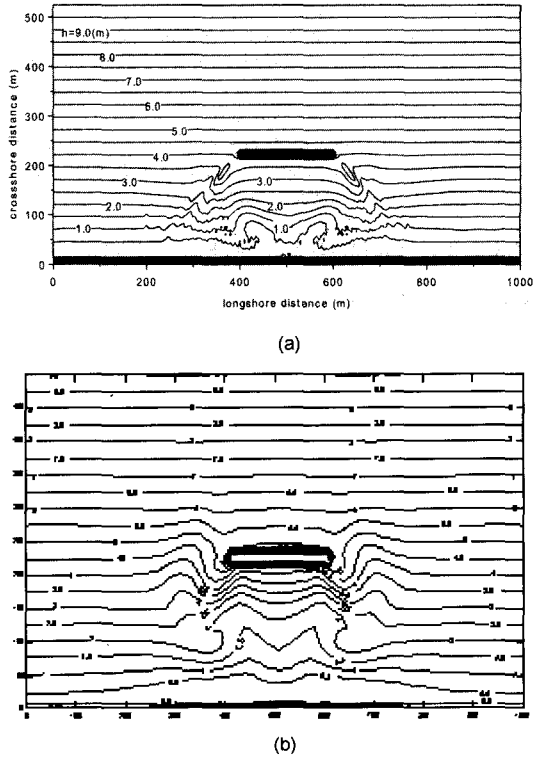

Fig. 7. Comprison with numerical results of morphological changes represented by Goda (2001); (a) Goda's results, (b) the present results.

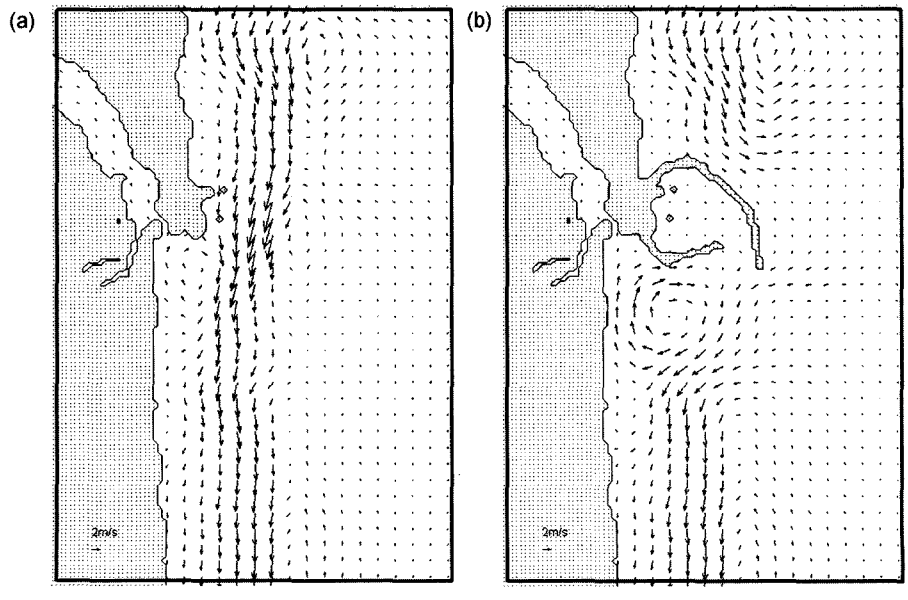

Fig. 8. Wave-induced currents for waves of NNE group; (a) before, (b) after a construction.

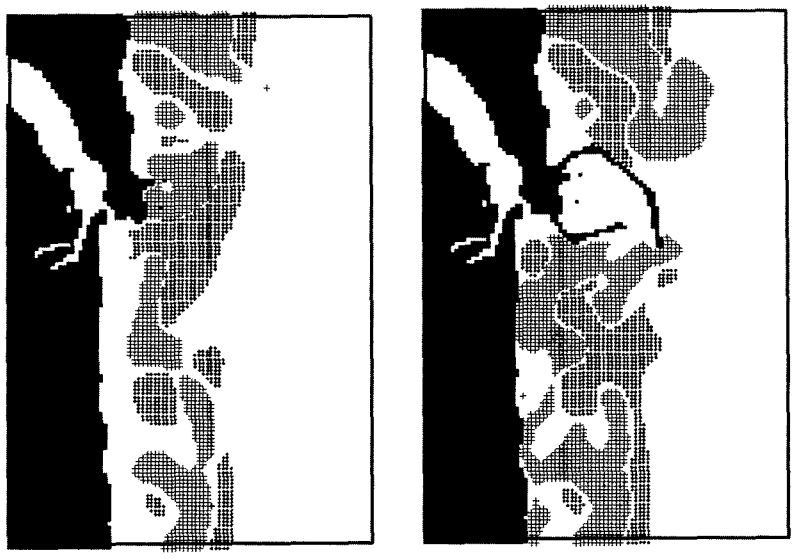

Fig. 9. Seabed changes for waves of NNE group; (a) before, (b) after construction ('+': erosion, '::': deposition).

심이 낮아지면서 겨울철 파랑의 유입시 넓은 쇄파대가 형성된다. 따라서 Fig 9a와 같이 많은 부유사가 남측으로 운송하는 현상이 발생하지만 사업 후 차폐구간의 형성으로 파랑의 유입이 차단되므로 부유사의 발생이 작아지고 더욱이 시계방향 와류의 발생으로 Fig. 9b에서 도시된 수치 결과와 같이 남쪽으로의 토사이동은 더욱 봉쇄된다. 따라서 와류의 발생지점과 그 남측은 극심한 해안침식이 발생되며 이 해안침식현상은 토사공급의 부족으로 남측으로 계속적으로 파급되며 궁극적으로는 전 남향진 해안의 해안선이 불안정한 변화를 보일 가능성이 있다.

4. 토의 및 결론

안목항 남측에서의 심각한 해안선 침식을 규명하기 위하여 이론적인 분석 및 수치모형 실험이 수행되었다. 해저면 변화 예측모형에서는 부유사 수직구조의 수학적 분석으로부터 얻은 수심 평균 부유사 농도와 해저면 부유사 농도간의 새로운 관계가 적용되었다. 아직 동해안 지역의 연안관리차원의 장기 모니터링 시스템이 수립되지 못하여 토사이동 관련 장기간 현장 자료를 확보할 수는 없었지만 앞으로 효율적인 연안통합관리를 위하여 해안선 침식율 분석 및 수치모형실험을 수행하는 데 필요한 자료가 무엇인지를 파악할 수 있도록 하였다. 해안 구조물이 건설된 후에 발생하는 해안선 침식문제를 해결하기 위하여 취할 수 있는 조치는 원래의 해안선으로 회복시킬 수 있는데 한계가 있으며 할 수 있다 하더라도 그 비용이 상당하다고 할 수 있다. 그러므로 해안의 특성에 대한 충분한 정기적인 관측 자료의 축적, 그리고 해안 침식이 유발될 수 있는지에 대한 현장 자료 및 전문가 집단의 활용을 통한 신뢰성 있는 평가를 하지 않으면 안목항의 경우와 같이 해안 구조물의 건설로 인한 후유증은 돌이킬 수 없을 만큼 심각할 수밖에 없다. 따라서 효율적인 연안 통합 관리 시스템을 수립하여 최적의 연안 개발을 유도하고 해안 환경의 변화에 따른 후유증을 최소화 할 필요가 있다.

참고문헌

수산청 (1995). 안목항 수치모형 실험 보고서.

정승진, 김규한, 편종근 (2003). 남향진 해안의 장기해안선 변화 조사 및 정확도 평가. 2003 대한토목학회 정기학술대회, 4976-4981.

Basco, D.R. (1983). Surfzone currents. Coastal Eng., 7, 331-355.

Battjes, J.A. (1988). Surf zone dynamics. Ann. Rev. Fluid Mech., 20, 257-293.

Caldwell, J. (1956). Wave action and sand movement near Anaheim Bay. California, Tech.

De Vriend, H.J. (1986). 2DH computation of transient seabed evolutions. Proc. 20th Int. Conf. on Coastal Engrg., ASCE, 1689-1712.

Inman, D.L. and Banold, R.A. (1963). Littoral processes. In The Sea, ed. Hill, M.N., Interscience, New York, 3, 529-33.

Kana, T.W. and Ward, L.G. (1980). Nearshore suspended sediment load during storm and post-storm conditions. Proc. 17th Int. Conf. on Coastal Engrg., Sydney, ASCE, 1158-1173.

Komar, P.D. (1978). Relative quantities of suspension versus bed-load transport on beaches. J. Sedimentary Petrology, 48(3), 921-932.

Lee, J.L, Liu, J. and Teng, M. (2004). A numerical study on nearshore sediment transport around Oahu Island in Hawaii. Journal of Coastal Research, SI 39.

Lee, J.L. and Park, C.S. (2000). Development of weakly non-linear wave model and its numerical simulation. J. Korean Soc. of Coastal and Ocean Engineers, 12(4), 181-189.

부록 A. 파랑변형 수치모형

A.1 포물선형 지배 방정식

입사파의 주 진행방향에 대하여 수치해석상 편리한 다음 포물선형 편미분 방정식이 사용된다.

$$-(k_c^2+3k_o^2)\frac{\partial A}{\partial x}+2ik_o(k_c^2-k_o^2)A-2k_cA\frac{\partial k_c}{\partial x}+\left(2ik_o-\frac{\partial}{\partial x}\right)\frac{\partial^2 A}{\partial y^2}=0 \quad (A.1)$$

여기서 k_o는 일정한 값으로 본 연구에서는 외해 경계에서의 x방향 파수 성분으로 하며

$$k_c^2=k^2-\frac{\nabla^2(CC_g)^{0.5}}{(CC_g)^{0.5}}$$

이고 C는 파속 C_g는 군속도이다. 식 (A.1)에서 A는 복소수 진폭함수로 입사면에서 입사파 진폭과 다음 관계가 있다.

$$A(0,y)=\frac{ig(CC_g)^{0.5}a_o}{\omega}e^{ik_y y} \quad (A.2)$$

여기서 a_o는 입사면에서의 진폭이고 ω는 각주파수이다.

A.2 수치해석

포물선형 완경사 방정식 (A.1)은 Crank-Nicolson 방법으로 유한차분되어 tridiagonal matrix를 형성하므로 Thomas algorithm으로 쉽게 수치해석된다. 쇄파대에서 파의 쇄파모의 는 여러 방법이 있지만 수평 2차원적인 경우 검증된 방법이 아직 없으므로 여러 면에서 무리없이 적용될 수 있는 Miche's criterion을 사용하여 간단히 그 영향을 반영한다.

부록 B. 해빈류 수치모형

B.1 해빈류 지배방정식

· Conservation of Mass (Continuity Equation)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial Q_x}{\partial x}+\frac{\partial Q_y}{\partial y}=0 \quad (B.1)$$

· Conservation of Momentum(Momentum Equation)

x-direction

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{Q_x^2}{h+\eta}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{Q_x+Q_y}{h+\eta}\right]+\frac{\partial S_{xx}}{\rho\partial x}+\frac{\partial S_{yx}}{\rho\partial y}-fQ_y$$

$$g(h+\eta)\frac{\partial \eta}{\partial y}-\frac{\tau_{Wy}}{\rho}+\frac{\tau_{By}}{\rho}=\frac{\partial}{\partial x}D_x\frac{\partial Q_y}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}D_y\frac{\partial Q_y}{\partial y} \quad (B.2)$$

y-direction

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{Q_x+Q_y}{h+\eta}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{Q_y^2}{h+\eta}\right]+\frac{\partial S_{xy}}{\rho\partial x}+\frac{\partial S_{yy}}{\rho\partial y}-fQ_x$$

$$g(h+\eta)\frac{\partial \eta}{\partial y}-\frac{\tau_{Wy}}{\rho}+\frac{\tau_{By}}{\rho}=\frac{\partial}{\partial x}D_x\frac{\partial Q_y}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}D_y\frac{\partial Q_y}{\partial y} \quad (B.3)$$

여기서,

$Q_x=\int_{-h}^{\eta}u\,dz$, $Q_y=\int_{-h}^{\eta}v\,dz$: 수심 적분된 유량벡터

$S_{xx}=E\left[\frac{C_g}{C}(\cos^2\theta+1)-\frac{1}{2}\right]$: (E: 파랑 에너지 θ: 파향)

$S_{xy}=E\left[\frac{C_g}{C}\sin\theta\cos\theta\right]$

$S_{yy}=E\left[\frac{C_g}{C}(\sin\theta+1)-\frac{1}{2}\right]$

η: 정수면상에서 평균 수면까지의 높이

f: 코리올리 계수(=$2\omega\sin\alpha$, ω: 지구 자전 각속도, α: 위도)

$\tau_w(\tau_{Wx}, \tau_{Wy})$: 바람에 의한 해수면 전단응력

$\tau_B(\tau_{Bx}, \tau_{By})$: 해저면 마찰응력 $\left(=\frac{\rho g}{C_z^2}\frac{Q|Q|}{(h+\eta)^2}\right)$

D_x, D_y: 난류확산계수

B.2 수치해석

Fractional step method를 사용하여 수평대류과정은 수치적으로 안정적인 Eulerian-Lagrangian 방법에 의하여 모의되었고 확산과정은 ADI 유한차분법에 의하여 신속하게 수치해석된다. 전파과정은 staggered-grid system하에서 마찬가지로 ADI 유한차분법에 의하여 수치해석된다.

Received May 25, 2004
Accepted June 7, 2004