Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety Vol. 22, No. 5, pp. 527-535, August 31, 2016, ISSN 1229-3431(Print)/ISSN 2287-3341(Online) Research Paper

http://dx.doi.org/10.7837/kosomes.2016.22.5.527

잠제설치에 따른 만성리해빈에서 해안선의 장기변화 예측

박일흠*^{*} · 강성욱** · 강태순*** *, ** 전남대학교 해양기술학부, *** ㈜지오시스템리서치

Predicting Long-Term Shoreline Change Due to the Construction of Submerged Breakwaters in Manseongri Beach

Il Heum Park $*^{\dagger}$ · Seong Wuk Kang $*^{*}$ · Tae-Soon Kang $*^{***}$

*, ** School of Marine Technology, Chonnam National University, Chonnam 59626, Korea *** GeoSystem Research Corporation, Kyeonggi 15807, Korea

요 약: 만성리 해안은 중조차 해빈으로 조립한 해저질으로 구성되어 있으며, 외해에 대해 남동쪽으로 열려있어 조석·조류보다 파랑 에 의한 해빈변형이 우세하게 나타났다. 파랑은 춘계와 하계에 강하여 유의파고가 2~3m에 달하는 폭풍파가 자주 출현하였으나 추계와 동 계는 고파랑이 출현하지 않는 정온한 해상상태를 보였다. 관측된 해안선변화의 계절적 특징은 입사파와 깊은 관계를 나타내었다. 춘계와 하계의 고파랑시에 해안선이 침식하였고 추계과 동계의 정온시에 침식을 회복하였다. 이런 현장자료를 바탕으로 실측해안선자료를 사용 하여 해안선변화의 검증수치실험을 수행하였는데, 검증매개변수 $C_1 = 0.2$ 와 $C_2 = 1C_1$ 일 때 사후예측된 해안선은 실측해안선과의 RMS 오차 가 1.26 m 정도로 만족스러웠다. 이 값을 사용하여 잠제와 도류제 등이 완공된 10년 후 만성리 해빈의 해안선을 예측한 결과, 잠제배후역에 서 5~15 m 정도 해안선이 전진하며, 잠제배후역 북측에서 5~15 m 정도 해안선이 후퇴하는 결과를 나타내었다.

핵심용어 : 해안선변화, 파랑, 잠제, 조립질 퇴적물, 만성리 해빈

Abstract: The Manseongri Coast meets the sea on the southeast and is composed of coarse sediment as a mesotidal beach. The waves that strike the beach are stronger than the tides or tidal currents as external forces of beach deformation. Storm waves frequently reach significant wave heights of 2-3m and hit in spring and summer, leaving the sea calm during fall and winter. Incident waves reach remarkable heights that correspond with observed shoreline changes. The shoreline erodes in spring and summer due to these strong waves but recovers in fall and winter as a result of the more moderate waves. On the basis of these observed results, a numerical calibration for experiments on shoreline change was established. Results revealed that according to hindcast data, calculated shoreline changes agreed with the observed shoreline, with a minimum RMS error of 1.26m with calibration parameters $C_1 = 0.2$ and $C_2 = 1 C_1$. Using these calibration parameters, long-term shoreline change was predicted after the construction of submerged breakwaters and jetties, etc. The numerical model showed that the shoreline would move forward by 5-15m behind the submerged breakwaters and recede by 5-15m north of the structure.

Key Words : Shoreline change, Waves, Submerged breakwaters, Coarse sediment, Manseongri Beach

1. 서 론

해빈은 조석작용에 비해 파랑작용이 우세한 해안을 따라 분포하는 좁고 긴 연안환경으로 전세계 해안에 약 40% 정 도 분포한다. 대부분 모래와 자갈 등의 미고결 퇴적물로 구 성된 해빈은 모래의 쉬운 이동성으로 말미암아 그 형태가 쉽게 변화하는 매우 역동적인 환경이다. 또한 해빈은 해양 외력으로부터 육지를 보호해주는 연약한 방어전선으로 끊 임없는 변화와 모래 이동을 통해 해양 에너지를 흡수하고 완화함으로써 파랑, 조류 그리고 태풍과 같은 강력한 외력 으로부터 해안을 보호하는 기능을 한다(Park, 1994; Haslett, 2009; Yeosu City, 2012).

이렇듯 중요한 해빈이 최근에 인구집중과 각종 개발압력

^{*} Corresponding Author : parkih@chonnam.ac.kr, 061-659-7152 ** '과랑이 우세한 조립질 해안에서 해빈변화', 2016년도 (사)해양환경 안전학회 춘계학술발표회, 국립해양생물자원관, 2016년 4월 28일, p. 98.

에 의해 크게 훼손되고 있다. 따라서 미국과 같은 선진국들 은 이미 1972년도에 연안관리법(Coastal Zone Management Act) 을 제정하여 (1) 깨지지 쉬운 해안의 보호, (2) 연안재해로부 터 생명과 재산손실의 최소화, (3) 연안자원의 이용 및 여가 활동 증진을 위한 연안환경 개선 그리고 (4) 각종 연안문제 해결을 위한 지방정부의 협력증진 등의 목표를 위해 많은 노력을 기울이고 있다(Williams and Micallef, 2009). 우리나라 의 경우 1980년대부터 하천에 댐과 하구둑 건설, 하구에 방 조제 축조, 해안역에 항만개발 그리고 연안역에서 무분별하 게 바다모래를 채취하는 것과 같은 각종 개발사업들을 시행 하면서 인공해안선이 증가하였고 육지로부터 공급되는 모래 의 유입량이 감소하여 해빈의 모래유실과 해안침식이 크게 증가하였다(Park, 1994; Uda, 2004; Haenam-Gun County, 2008; Korea Tourism Organization, 2010; Lee et al., 2014).

1939년에 개장되어 약 80년의 역사를 가진 전남 여수시의 만성리해빈은 검은 모래로 유명한 대표적인 관광지이다. 그 런데 1980년대 들어서면서 해안도로의 건설, 하천의 정비, 그리고 해빈주변에 물양장과 방파제를 건설함에 따라 이 해 안에 커다란 해양환경변화가 발생하였으며, 이로 인해 모래 유실이 증가하여 해빈의 기능과 가치를 크게 상실하였다 (Yeosu City, 2012). 이에 Ministry of Oceans and Fisheries(2013) 는 해빈의 복원을 위한 잠제와 도류제를 설치하고 자갈과 모래를 양빈하는 연안정비사업을 계획하여 현재 시공 중에 있다. 본 연구는 만성리해빈의 연안정비사업 이후 해빈유지 를 위한 관리대책을 수립하기 위하여, 만성리해빈에서 장기 간의 해안선변화를 예측하고자 하였다. 이를 위하여 2014년 3월부터 2015년 2월까지 1년에 걸쳐 해빈변형의 주요 외력 으로 판단되는 조석, 조류 및 파랑을 외해역과 내해역에서 계절별로 관측하여 외력특성을 파악하였으며, 2014년 하계 에 표층퇴적물을 채취하여 해저질의 조성, 입도분포 및 조 직변수 등을 분석하였다. 그리고 2014년 3월부터 2015년 2월 까지 3개월 간격으로 해안선을 주기적으로 측량하여 각 계 절별의 외력특성에 따른 해안선의 변동양상을 파악하였다. 이러한 현장조사결과를 바탕으로 실측된 해안선자료를 사 용하여 해안선변화모형의 검증수치실험을 수행하여 전연안 표사량의 경험상수 C1과 C2를 만성리해빈에서 사용할 수 있는 값으로 결정하였고, 이로부터 잠제와 도류제 등 각종 구조물이 설치된 10년 후 만성리해빈의 해안선변화를 예측 하고 그 결과를 토의하였다.

2. 현장조사

2.1 만성리해빈

전라남도 여수시에 위치한 만성리해빈은 경남 남해도와

여수반도로 둘러싸인 여수해만의 서측해안을 따라 남북방 향으로 발달한 해빈으로, 그 길이는 약 800 m, 폭이 40 m 정 도로 서해안의 해수욕장에 비해 폭이 좁으며 경사가 급한 편이다. 이 해빈의 북측은 광양만과 섬진강 하구로 연결되 며, 해빈의 남동측은 직접 외해와 연결되어 있다. 따라서 이 러한 지형적인 특성으로 이 해빈에서 외해역의 입사파는 주 로 SE계열의 파랑이 주류를 이루며 E계, W계 및 N계는 지 형적으로 발달하기 어려운 조건을 가지고 있다(Fig. 1).



Fig. 1. Location of the study area and the observation stations.

해빈의 퇴적물은 주로 자갈과 모래로 이루어져 있으며, 북측해안은 자갈이 그리고 남측해안은 모래가 분포하는 특 징을 갖는다. 해빈의 남측으로 유역면적 5.62 km², 유로연장 3.27 km, 유역평균폭 1.72 km 그리고 연평균유사량 2,618 ton/year 인 주요 모래공급원으로 기대되는 만흥천이 유입되고 있으 며(Ministry of Oceans and Fisheries, 2013), 만흥천 하구의 남측 에 186m 길이의 방파제와 물양장이 건설되어 있다. 만성리 해빈은 1939년에 개장되어 약 80년의 역사를 자랑하며, 특히 검은 모래로 유명하다. 검은 모래는 일반 모래보다 입경이 3~4배 가량 굵고, 몸에 달라붙지 않으며, 열전도율도 높기 때문에 모래찜질을 하는 해수욕객에게 인기가 높다. 하지만 1970년대 중반부터 검은 모래가 차츰 사라지기 시작해 현재 는 곳곳이 움푹움푹 패이고 모래와 자갈이 뒤섞여 본래의 모습을 잃어가고 있다(Yeosu City, 2012). 만성리해빈의 주변 육지에 분포하는 암석은 대부분 중생대 백악기의 화산암이 다. 이 화산암은 암회색의 중성화산암인 안산암으로 주요 구 성광물은 사장석, 각섬석, 정장석, 흑운모 그리고 석영 등이다. 그리고 이 암석의 내부 단면에서는 다수의 반정(Phenocryst)이 포함된 반상조직이 관찰된다. 바로 이러한 화산암이 풍화되 어 만성리해안으로 유입되었기 때문에 이 해빈의 모래가 검 다(Yeosu City, 2012).

한편, 만성리해빈의 주변해역에서 해저질의 입도특성을 파악하기 위하여 2014년 하계에 표층퇴적물의 입도를 분석 한 결과, 중앙입경은 -5.77~7.92 ϕ (0.041~55 mm)로 퇴적상은, 만성리해빈에서 자갈(G)과 역질사(gS)가 우세하였고, 외해측 에서 펄(M)이 우세하였으며, 내해측에서 모래, 펄 그리고 자 같의 혼합 퇴적상이 분포하였다. 그리고 퇴적물의 조직변수 를 살펴보면, 평균입도(Mean)는 -5.52~8.25 ϕ 의 범위였고, 분 급도(Sorting)는 0.56~3.36 ϕ 로 Moderately Well Sorted에서 Very Poorly Sorted의 분포를 나타냈다. 왜도(Skewness)는 -0.25~0.82 로 Coarse-Skewed에서 Strongly Fine-Skewed까지 폭넓은 분포 를 나타내었으며, 첨도(Kurtosis)는 0.58~4.05의 범위로 Very Platy-kurtic에서 Extremely Leptokurtic의 분포를 나타내었다.

2.2 조석, 조류 및 파랑

만성리해안에서 Fig. 1의 W1(수심 DL-13 m)과 W2(수심 DL-5 m) 정점에서 2014년 3월부터 2015년 2월까지 계절별로 관측한 조석에서 조석형태수는 0.21~0.22로 이 해역은 반일 주조가 우세한 혼합조의 조석특성을 보였다. 계절별로 국지 적으로 차이가 있지만, 대조차는 280~305 cm이며, 평균고조 간격은 8h 54~55 m 정도로 규칙바른 조석형태를 보였으며, 약최고고조위는 344~372 cm로서 해안 근접할수록 큰 값을 보였다. 이에 따라 Davies(1964)에 의하면 이 해안은 중조차 해빈(Mesotidal Beach)로 분류될 수 있었다.



2014년 3월부터 2015년 2월까지 계절별로 외해역의 W1과 내해역의 W2 정점에서 충별조류를 관측한 결과를 살펴보 면, 정점 W1에서 조류는 북-남서방향의 주류를 보였으며 최 강창조류의 유속은 26~48 cm/s 그리고 최강낙조류의 유속은 29~49 cm/s였으며, 조석잔차류는 2~4 cm/s 크기로 북서류하 였다. 정점 W2에서 조류는 북북서-남남동향의 주류를 보였 으며 최강창조류의 유속은 7~22 cm/s 그리고 최강낙조류의 유속은 13~24 cm/s였으며, 조석잔차류는 1 cm/s 크기로 남류 하였다. 그러나 Fig. 2에 보는 바와 같이 W2 정점에서 하계 의 태풍내습시 67~73 cm/s의 해빈류로 추정되는 강한 북향 류의 유속이 나타났다. 즉 동일지점에서 동계에 흐름이 최 대 10 cm/s 정도이지만, 하계에 북향의 강한 흐름이 간헐적 나타난 것이 관측되었다.

2014년 3월부터 2015년 2월까지 4계절에 걸쳐 정점 W1과 W2에서 파랑을 관측하였다. 외해역인 정점 W1에서 계절별 파랑특성을 살펴보면, 2014년 춘계에 평상파의 유의파고는 0.27 m, 피크주기는 5.7초 그리고 피크파향은 SE(136°)이었으 며, 폭풍시 유의파고는 2.31 m, 피크주기 11.1초 그리고 피크 파향은 SE(130°)로 나타났다. 2014년 하계에 평상파의 유의 파고는 0.38 m, 피크주기는 7.2초 그리고 피크파향은 SE(136°) 이었으며, 폭풍시(2014년 12호 태풍 NAKRI) 유의파고는 2.88 m 피크주기는 13.4초 그리고 피크파향은 역시 SE(134°)로 관측 되었다. 2014년의 추계와 동계에 평상파의 유의파고는 0.17 m 과 0.12 m, 피크주기는 6.0초와 7.6초 그리고 피크파향은 추계 와 동계에 모두 SE계열(128°와 134°)로 나타났고, 유의파고 1 m 이상의 고파랑은 두 계절 모두 출현하지 않았다. 만성리해 역의 계절별 파랑특징은 춘계와 하계에 고파랑이 출현하였 고, 추계와 동계는 고파랑이 출현하지 않는 정온한 해상상 태를 보였다. 그리고 파향은 외해에 대해 남동방향으로 열 려져 있는 지형적인 영향으로 전 계절에 걸쳐 외해역 정점 W1은 SE 계열이 우세하였고, 잠제 배후의 내해역 정점 W2 는 이들 파가 진행하면서 굴절에 의해 변형되어 ESE 계열이 우세하게 나타났다(Table 1).

Table 1. The seasonal Incident waves at St. W1

Factors		H_S (m)	T_P (s)	D_P (°)
Ordinary Waves	Spring	0.27	5.7	136(SE)
	Summer	0.38	7.2	136(SE)
	Fall	0.17	6.0	128(SE)
	Winter	0.12	7.6	134(SE)
Storm Waves	Spring	2.31	11.1	130(SE)
	Summer	2.88	13.4	134(SE)
	Fall	0.72	3.2	41(NE)
	Winter	0.46	6.2	127(SE)
Yearly Average Waves		0.24	6.6	134(SE)

2.3 해안선

일반적으로 해안선의 전진과 후퇴는 단기변화와 장기변 화의 양상을 보인다. 단기적으로는 해상상태에 따른 계절적 변화로서 파랑이 강할 때는 해안선이 후퇴하고 파작용이 약 할 때는 해안선이 전진하며, 대개 1년을 주기로 전진과 후퇴 가 순환되는 경향을 보인다. 본 조사는 계절적인 해안선의 변화양상을 파악하기 위하여 2014년 3월부터 2015년 2월까 지 3개월 간격으로 5회에 걸쳐 해안선을 측량하였다. 측량시 기는 되도록 월말경의 대조기 간조시에 수행하였고 VRS GPS (SOUTH Co., China)를 이용하여 인천평균해면기준(EL+0 m)의 해안선을 측량하였다. 이들 해안선측량자료로부터 해안선의 계절별 변동양상을 파악하기 위해, 2014년 3월의 해안선을 기준으로 2014년 6월(춘계동안의 변화), 2014년 9월(하계동안 의 변화), 2014년 12월(추계동안의 변화) 그리고 2015년 2월 (동계동안의 변화)의 해안선과의 차를 구하여 Fig. 3에 도시 하였다.



Fig. 3. Seasonal variation of beach width from Mar. 2014 to Feb. 2015.

Fig. 3에서 나타나는 계절별 해안선의 변화추이를 살펴보 면, 춘계(2014년 6월)는 만성리해빈북측(x = 200~500 m)에서 -3.0~+6.0 m 범위로 해안선의 증감이 반복하여 나타났고(평 균 -0.4 m), 해빈중앙부(x = 500~800 m)는 +3.0 m 범위로 해안 선이 전진하였다. 해빈남측(x = 800~1000 m)은 만흥천 하구 주변에 차후 양빈을 위해 많은 양의 퇴적물을 인위적으로 쌓아 놓아 해안선이 크게 전진한 것으로 나타났다. 하계 (2014년 9월)는 8월에 내습한 태풍 나크리(2014년 제12호)와 태풍 할롱(2014년 제11호)에 의해 전반적으로 많은 양의 모 래들이 외해로 유실되었는데, 해빈북측(x = 200~500 m)은 -10.0~-5.0 m 범위의 침식이 일어나 해안선이 후퇴하였으며, 해빈중앙부(x = 500~800 m)는 거의 2014년 3월의 해안선 수 준으로 후퇴하였고 그리고 해빈남측(x = 800~1000 m)은 침

식이 극심하여 만흥천 주변의 양빈사가 유실된 것을 볼 수 있었다. 추계(2014년 12월)의 해안선은 2014년 하계에 태풍으 로 인하여 침식되었던 해빈이 점차 회복되고 있는 것을 알 수 있지만, 2014년 3월의 원래 상태로 회복되진 않았다. 즉 해빈북측은 -6.0~+0.1 m 범위에서 해안선이 침식된 상태였 고, 해빈중앙부는 +1.0~+8.0 m 범위에서 해안선이 전진하였 고, 남측에서는 0.0~+10.0 m 범위에서 해안선이 전진하였다. 그리고 동계(2015년 2월)는 추계와 아주 비슷한 경향으로 해 안선의 변화가 나타났는데, 해빈남측의 만흥천 하구주변 (x = 900~970 m)에 많은 양의 양빈사를 쌓아 놓은 것을 알 수 있었다. 결론적으로 만성리해빈의 계절적 해안선변화의 특징은, 만흥천 하구의 인위적인 양빈사의 영향을 배제한 경우, 입사파와 깊은 관계를 나타내었는데, Table 1과 같이 춘계와 하계의 고파랑시에 해안선이 침식하였고 추계과 동 계의 정온시에 퇴적되어 침식을 회복해가는 특징을 보였다. 그러나 2014년과 같이 강력한 태풍이 하계에 2차례 이상 내 습하여 심각한 침식이 발생한 경우에 해안선은 침식전의 원 래 상태로 회복되지 않았다.

3. 해안선변화의 장기예측

3.1 수치모형의 개요

해안선변화모형은 기본적으로 해빈단면변화량(ΔA)이 해 안선변화량(Δl)과 선형적인 관계(A-l 특성)에 있다는 가정 하에 표사의 연속방정식을 유도하여 시간변화에 따른 해안 선의 전진 및 후퇴를 계산하는 모형이다. 표사의 연속방정 식은 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{D} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \pm q \right) = 0 \tag{1}$$

여기서, y는 종단방향의 해안선위치(m), t는 시간(s), D는 표사이동한계깊이(m), Q는 전연안표사량(m³/s), x는 연안방향 의 축, $q(=q_s+q_0)$ 는 표사량의 Sink 혹은 Source 항으로 q_s 는 해빈측에서 유입량 그리고 q_0 는 외해측에서 유입량이다.

식(1)에서 해안선의 전진 및 후퇴치를 계산하기 위해서는 전연안표사량 Q의 산정이 중요하다. 전연안표사량은 대개 쇄파점에서 에너지와 군속도의 곱으로 표현되는 쇄파에너 지 Flux의 해안방향성분에 비례한다는 경험식을 많이 사용 하며, 구조물의 그림자 영역(Shadow Zone)에서 파고의 연안 방향분포로부터 해빈순환류의 영향을 고려하는 산정식(Ozasa and Brampton, 1980; Kraus, 1981)도 널리 사용되고 있다. 본 연 구는 Kraus(1981)가 제안한 식(2)와 같은 전연안표사량 산정 식을 사용하였다.

$$Q = \left(H_b^2 c_{gb}\right) \left(C_1' \sin 2\alpha_{bs} - C_2' \cos \alpha_{bs} \frac{\partial H_b}{\partial x}\right)$$
(2a)

$$C_{1}' = \frac{C_{1}}{16(\rho_{s}/\rho - 1)(1-p)1.412^{5/2}}$$
(2b)

$$C_2' = \frac{C_2}{8\tan\beta(\rho_s/\rho - 1)(1-p) \, 1.412^{5/2}}$$
(2c)

여기서, H_b 는 쇄파파고(m), c_{gb} 는 쇄파군속도(m/s), α_{bs} 는 해안선과 쇄파파향이 이루는 각도, ρ_s 는 해저질의 밀도 (kg/m³), ρ 는 해수의 밀도(kg/m³) 그리고 p는 해저질의 공극률 이다. 또한 식(2b)와 식(2c)에서 경험적 상수 C_1 과 C_2 는 전 연안표사량에 관한 검증매개변수(Calibration Parameters)로서 외력으로 유의파를 사용할 경우 $C_1 = 0.58$ 그리고 $C_2 = (1.62 \sim 2.62)C_1$ 정도(Komar, 1976; Horikawa, 1988)의 값으로 알려져 있다.

해빈 배후에 직립벽 또는 해안도로와 같은 구조물이 존재 할 경우, 해안선의 위치 y가 식(3a)와 같이 존재하면 연안표 사량 Q는 안벽의 간섭을 받으므로, 식(2a)를 수정한 식(3b)로 평가한다(Ozasa and Brampton, 1980).

$$y_w \leq y < y_w + \frac{D_b}{\tan\beta}$$
 (3a)

$$Q' = \frac{(y - y_w) \tan\beta}{D_b} Q$$
(3b)

여기서, y_w 는 종단방향(On-offshore Direction)으로 기준선에 서 방해구조물까지의 거리(m) 그리고 $\tan\beta$ 는 저면경사이다. 그리고 표사이동한계깊이 $D = D_b + D_c$ 이며, 파의 소상고 (Swash Limit) $D_b(m)$ 와 표사이동한계수심(Closure Depth) $D_c(m)$ 는 Swart(1974)와 Hallermeier(1983)가 제안한 다음의 경험식을 각각 사용하였다.

$$\frac{D_b}{d_{50}} = 7644 - 7706 \exp\left(-0.000143 \frac{H_0^{0.488} T^{0.93}}{d_{50}^{0.786}}\right)$$
(4a)

$$D_c = \frac{2.9 H_0}{\sqrt{\rho_s / \rho - 1}} - \frac{110 H_0^2}{(\rho_s / \rho - 1) g T^2}$$
(4b)

여기서, d_{50} 은 해저질의 중앙입경(m), H_0 는 심해파고(m), T는 파의 주기(s)이다.

한편 기본방정식인 식(1)은 식(5)와 같이 FTCS(Forward difference of Time and Central difference of Space)의 차분식으 로 이산화하여 수치계산할 수 있다.

$$y_{i}^{n+1} = y_{i}^{n} - \frac{\Delta t}{2D\Delta x} (Q_{i+1}^{n} - Q_{i-1}^{n} \pm 2\Delta x q_{i}^{n})$$
(5)

여기서, n과 n+1은 각 시간 Step, i-1, i 그리고 i+1은 공간격자번호, △t는 시간증분, △x는 공간격자간격이다. 그 리고 경계조건은 불투과경계와 안정해빈의 경우 각각 식(6) 과 같이 처리할 수 있다.

$$Q_{ib} = 0$$
, for Impermeable Boundary (6a)

 $Q_{ib} = Q_{ib+1}$ or Q_{ib-1} , for Stable Beach (6b)

여기서, ib는 경계에서 격자점이다.

실제 수치계산을 수행할 경우 전연안표사량에 관한 경험 상수들이 간단화된 가정의 결과로서 구해졌고, 표사이동깊 이의 정확한 산정이 어려우므로 이들 상수를 검증을 통하여 결정하는 검증매개변수(Calibration Parameters)로 취급하는 것 이 바람직한 것으로 알려져 있다(Kraus, 1981; Park and Lee, 2007; Park and Lee, 2010).



Fig. 4. The observed shorelines for shoreline change simulation.

3.2 검증실험

만성리해빈에서 획득가능한 과거의 해안선자료를 도시한 것은 Fig. 4와 같다. 도시된 자료는 국립지리정보원의 수치지 형도에서 추출한 해안선자료(1996년과 2013년)와 만성리해 빈의 연안정비사업의 설계와 관련하여 2012년에 측량한 자 료(Ministry of Oceans and Fisheries, 2013), 그리고 2014년에 본 연구에서 측량한 해안선자료 등으로 모두 하계에 관측된 값 이다. 이 중에서 2013년의 지형도자료는 해빈중앙부가 침식 되어 있고 해빈북측이 퇴적된 것과 같은 어떤 특별한 기상 이벤트 이후에 관측된 해안선으로 판단되고, 2014년의 관측 자료는 외해에서 준설한 모래를 만흥천 하구주변에 거치한 때의 것으로 인위적인 요소가 포함된 해안선자료이므로 이 둘의 해안선자료는 해안선변화의 검증계산에 사용하기 어 립다. 따라서, 검증실험에 사용할 수 있는 해안선자료는

1996년과 2012년의 자료이다. 이에 따라 1996년의 해안선을 초기해안선으로 2012년의 해안선을 검증해안선으로 입력하 여 만성리해빈의 해안선변화의 검증수치실험을 수행하였다. 그리고 전연안표사량과 표사이동방향을 결정하기 위한 외력은 Table 1의 연간평균유의파에 대한 파랑으로, 그 파랑 변형은 SWAN 모형(The SWAN Team, 2015)을 이용하여 계산 하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이때 입사경계에서 불규칙 입사파는 JONSWAP 스펙트럼을 적용하여, 파랑관측 값으로부터 검증실험을 통한 극대증진계수(γ)는 파형경사와 방향집중도(방향집중도 파라메터 dd = 1)를 고려하여 1을 적 용하였고, 방향분해능은 72방위이며 그리고 주파수분해능은 0.04~1 Hz로 34개로 분할하여 계산하였다. 또한 쇄파(쇄파지 수=0.73), 저면마찰(kn=0.05) 및 백파에 의한 에너지 감쇠를 고려하였다. 그리고 수치모형에서 사용된 계산영역은 만성 리해안을 중심으로 잠제 및 어항구조물의 영향을 충분히 나 타낼 수 있고 W1 정점의 파랑관측자료를 외해입사경계로 활 용하기 위하여 동서방향으로 1.42 km 및 남북방향으로 1.38 km 의 크기로 하였으며, 격자간격은 계산의 안정도와 정밀도 등 을 고려하여 정격자의 20 m로 설정하였으며, 조위면은 평균 해면으로 하였다.



Fig. 5. Wave deformation for the yearly averaged significant waves in Manseongri Coast.

그리고 이 파랑변형 계산결과로부터 연안방향 격자점별 의 쇄파파고, 쇄파파향 및 쇄파군속도를 Fig. 6과 같이 추출 하여 사용하였다. 이 그림에서 빨간선은 잠제와 도류제 등 의 구조물설치전의 외력값으로 검증실험에 사용된 것이며, 파란선은 구조물 설치후의 외력값이다. 한편 검증계산시 사 용된 외력은 부드러운 해안선을 만들기 위하여 약간의 이동 평균이 수행되었으며, 해안선 계산의 오차를 줄이기 위하여 여러 번의 계산을 시행착오적으로 반복수행하여 최종입력 값으로 사용하였다.



Fig. 6. The external forces for the shoreline change.

이상과 같이 결정된 외력으로부터 전연안표시량에 대한 검증매개변수(Calibration Parameters) C_1 과 C_2 의 계산결과는 Fig. 7~8과 같다. Komar(1976)에 의하면 자연해빈에서 전연안 표사량을 결정하는 계수 C_1 (전연안표사량과 파에너지 Flux 와의 비)은 RMS 파고를 사용하는 경우 0.77 혹은 유의파고 를 사용하는 경우 0.58(Horikawa, 1988)이 적합한 것으로 알려 져 있으며, 구조물에 의한 파의 회절영역에서 전연안표사량 을 보정해주는 $C_2 = (1.62 \sim 2.62)C_1$ 정도(Horikawa, 1988; Lee and Park, 1990)의 값으로 알려져 있다. 그러나 전연안표사량 의 산정식은 여러 변수에 따른 다양한 오차를 포함하고 있 고 표사이동한계깊이를 산정할 때 식(4)와 같은 경험식이 사 용되었으므로 이들 계수의 검증이 필요하다.



Fig. 7. The RMS errors for the calibration parameters C_1 .



Fig. 8. The RMS errors for the calibration parameters C_2 .



Fig. 9. The hindcasted shoreline using the calibration parameters $C_1=0.2$ and $C_2=1.0 C_1$ from 1996 to 2012.

이에 따라 만성리해빈의 해저질이 아주 조립하였으므로 검증실험에서 C_1 을 0.0~0.4까지 0.1씩 증가시키면서 우선 실험을 수행하였다. 그 결과, C_1 = 0.0일 때 실측해안선과 예 측해안선과의 RMS 오차는 6.98 m, C_1 = 0.1일 때 RMS 오차는 1.80 m, C_1 = 0.2일 때 RMS 오차는 1.26m, C_1 = 0.3일 때 RMS 오차는 1.35 m 그리고 C_1 = 0.4일 때 RMS 오차 1.90 m로 계산 되어, C_1 = 0.2일 때, 관측치와의 RMS 오차가 1.26 m로 가장 작게 나타났다. 그리고 구조물의 회절영역에 대한 검증매개 변수 C_2 의 검증실험을 C_1 에 대해 0~3배의 비율로서 1씩 증 가시키면서 실험을 수행하였다. 그 결과, $C_2 = 0C_1$ 일 때 RMS 오차는 1.30 m, $C_2 = 1C_1$ 일 때 RMS 오차는 1.26 m, $C_2 = 2C_1$ 일 때 RMS 오차는 1.30 m 그리고 $C_2 = 3C_1$ 일 때 RMS 오차는 1.41 m로서, $C_2 = 1C_1$ 일 때 관측해안선에 대한 RMS 오차가 가장 작게 나타났다. 이상과 같이 만성리해빈에서 결정된 해안선변화에 관한 검증매개변수는 $C_1 = 0.2$ 와 $C_2 = 1$ C_1 이다. 이 경우 실측해안선과의 RMS 오차는 1.26 m 정도로 사후예측된 해안선을 실측해안선과 대비하여 나타낸 결과 는 Fig. 9와 같이 만족스러운 편이었다. 따라서 이후의 해안 선변화의 예측에서는 이 값들을 고정하여 사용하였다.

3.3 예측실험

만성리해빈에서 Fig. 1과 같이 잠제와 도류제가 설치된 시 점에서 10년 후 해안선변화를 예측하기 위하여, 초기해안선 으로 검증실험에서 사용하였던 2012년의 해안선을 입력하였 고, 전연안표사량과 표사이동방향을 결정하기 위한 외력은 Fig. 6과 같은 값을 파랑변형 계산결과로부터 추출하여 사용 하였다. 다만 추후 도류제 남측의 해안선은 물양장으로 건 설되어 인공해안선화되므로 그 의미가 없어서 계산에서 제 외하였다. 이상과 같은 입력자료로부터 전연안표시량에 대 한 검증매개변수(Calibration Parameters)는 검증계산에서 이미 결정된 $C_1 = 0.2$ 와 $C_2 = 1C_1$ 을 사용하였다.

이러한 계산조건으로부터 만성리해빈에서 10년 후 해안 선변화를 예측한 결과는 Fig. 10과 같다. 그림에서처럼 잠제 와 도류제 등이 완공된 후 만성리해빈의 해안선은 잠제배후 역에서 현재의 해안선보다 5~15m 정도 해안선이 전진하 며, 잠제배후 해빈역에서 북측으로 가면서 5~15m 정도 해 안선이 후퇴하는 결과를 나타내었다. 이것은 잠제배후역과 도류제주변역에서 표사이동의 외력특성이 잘 반영된 해안 선변화의 예측결과로 보인다. 즉, Fig. 6에서, 도류제 남측해 안(x = 800~1000 m)은 물양장과 같은 인공해안선이 설치되 므로 토의에서 제외하면, 잠제설치에 따라 쇄파군속도는 거 의 변화없으며, 잠제의 남측과 중앙배후역(x = 560~740 m) 에서 잠제의 영향으로 쇄파파고가 1~2 cm 정도 증가하였고 잠제의 북측배후와 북측측면역(x = 380~560 m)은 쇄파파고가 1~3 cm 정도 감소하였다. 쇄파각은 잠제의 중앙부와 북측측 면역(x = 400~640 m)에서 구조물의 영향으로 1~3° 정도 증 가하였다. 이 같은 외력의 변화 특히 연안표사의 이동방향을 결정하는 쇄파각의 경우 이 부근은 원래 북향의 해빈류가 강 하였지만 잠제의 영향으로 잠제의 북측측면배후역(x = 530 m) 에서 쇄파각이 최대로 증가함에 따라 이 지점을 기점으로 남측으로의 순환류가 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 이 에 따라 Fig. 10과 같이 예측된 해안선은 잠제북측면배후역

의 x = 560 m 지점에서 해안선의 전진과 후퇴에 관한 변곡 점이 나타나, 이 지점부터 그 남측영역은 해안선이 전진하 고 이 지점부터 북측영역은 해안선이 후퇴하는 결과를 보였 다. 그리고 남측과 북측의 해안선의 끝단경계는 모두 폐경 계로 처리하여 표사수지의 변화가 없는 것으로 나타났다.



(b) Difference of bech width

Fig. 10. The predicted shoreline after construction of structures.

그리고 이상과 같은 예측결과는 잠제배후의 해빈을 보호 하는 잠제설치에 관한 원래의 목적과 잘 합치되었는데 이 해역에서 잠제의 설치는 적절했다고 할 수 있다. 그러나 잠 제설치역의 북측해안은 침식이 예상되고 있어 향후 잠제를 북측으로 다소 확장하는 것과 같은 검토가 뒤따라야할 것으 로 판단된다.

4. 결 론

만성리해안의 대조차는 280~305 cm로 중조차 해빈(Mesotidal Beach)으로 분류될 수 있으며, 외해역에서 조류는 26~49 cm/s 이지만 내해역에서 조류는 7~24 cm/s로 해안에 근접할수록 조류의 크기가 작아지는 경향을 보였다. 그러나 내해역에서 하계의 태풍내습시 67~73 cm/s의 해빈류로 추정되는 강한 북향류가 관측되어 이 해역은 조석조류보다 파랑에 의한 해 빈변형이 지배적인 곳으로 판단되었다.

만성리해역의 계절별 파랑특징은 춘계와 하계에 파랑이 강한 편으로 유의파고가 2~3 m에 달하는 폭풍파가 자주 출 현하였다. 그러나 추계와 동계는 유의파고 1 m 이상의 고파 랑이 출현하지 않는 아주 정온한 해상상태를 보였다. 그리 고 파향은 이 해안이 외해에 대해 남동방향으로 열려져 있 어 모든 계절에 걸쳐 외해역은 SE계열이 우세하였고 내해역 은 굴절의 영향으로 ESE계열이 우세하였다.

만성리해빈의 계절적 해안선변화의 특징은 입사파와 깊 은 관계를 나타내었는데 춘계와 하계의 고파랑시에 해안선 이 침식하였고 추계과 동계의 정온시에 침식을 회복하는 특 징을 보였다. 그러나 2014년과 같이 강력한 태풍이 하계에 두 차례 이상 내습하여 심각한 침식이 발생한 경우에 해안 선은 원래의 상태로 회복되지 않았다.

만성리해빈에서 1996년의 해안선자료를 초기조건으로 하고 2012년의 해안선을 검증해안선으로 입력하여 만성리해빈 의 해안선변화의 검증실험을 수행하였다. 연안표사량에 관 한 검증매개변수 C_1 과 구조물의 회절영역에서 연안표사량 을 보정해주는 매개변수 C_2 를 검증실험한 결과, C_1 =0.2와 C_2 =1 C_1 일 때 사후예측된 해안선은 실측해안선과의 RMS 오 차가 1.26 m 정도로 만족스러웠다.

잠제와 도류제 등이 완공된 10년 후 만성리해빈의 해안선 은 잠제배후역에서 현재의 해안선보다 5~15m 정도 해안선 이 전진하며, 잠제배후 해빈역에서 북측으로 가면서 5~15m 정도 해안선이 후퇴하는 결과를 예측하였다. 이것은 잠제배 후의 해빈을 보호하는 잠제설치에 관한 원래의 목적과 잘 합치되어 이 해역에서 잠제의 설치는 적절했다고 할 수 있 다. 그러나 잠제설치역의 북측해안은 침식이 예상되고 있어 향후 잠제를 북측으로 다소 확장하는 것과 같은 검토가 뒤 따라야할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 해양수산부 연안침식 실태조사 중 ㈜지오시스 템리서치 지역거점대학 지원 프로그램으로 수행되었습니다.

References

- Davies, J. L.(1964), A morphogenic approach to world shorelines, Ziets. Gemorph., Vol. 8, pp. 126-142.
- [2] Haenam-Gun County(2008), Report of sand loss survey and management plan in Songho Beach, p. 100.
- [3] Hallermeier, R. J.(1983), Sand transport limit in coastal

structure design, Proc. Coastal Structures '83, ASCE, pp. 253-277.

- [4] Haslett, S. K.(2009), Coastal systems, Taylor & Fransis Group, 2nd Ed., p. 276.
- [5] Horikawa, K.(1988), Nearshore dynamics and coastal processes, Univ. of Tokyo Press, p. 529.
- [6] Komar, P. D.(1976), Beach processes and sedimentation, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, p. 429.
- [7] Korea Tourism Organization(2010), Report for the technical review of beach stabilization in the beach resorts, p. 333.
- [8] Kraus, N. C.(1981), One-line model development and simulation for Oarai beach, NERC Report No. 15, Japan, pp. 155-192.
- [9] Lee, J. S. and I. H. Park(1990), A shoreline change model around coastal structures, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineering, Vol. 2, No. 2, pp. 67-74.
- [10] Lee, J. S., K. H. Kwon and I. H. Park(2014), Analysis of littoral currents by the coupled hydrodynamic model, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 20, No. 2, pp. 247-258.
- [11] Ministry of Oceans and Fisheries(2013), The basic and execution design report for the coastal improvement project in Yeosu Manheung Area, p. 582.
- [12] Ozasa, H. and A. H. Brampton(1980), Mathematical modelling of beaches backed by seawalls, Coastal Eng., Vol. 4, No. 1, pp. 47-64.
- [13] Park, I. H.(1994), Sediment transport and beach deformation models in the littoral zone, Ph.D. Thesis, Department of Ocean Engineering, National Fisheries University of Pusan, p. 162.
- [14] Park, I. H. and Y. K. Lee(2007), Long term shoreline change and evaluation of total longshore sediment transport rate on Hupo Beach, Journal of Korean Society of Ocean Engineering, Vol. 21, No. 4, pp. 15-20.
- [15] Park, I. H. and Y. K. Lee(2010), Shoreline change near the Daewangam Beach influenced by stream flows in the East Coast of Korea, The Journal of Korean Island, Vol. 22, No. 1, pp. 151-166.
- [16] Swart, D. H.(1974), Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles, Delft Hydraulics Laboratory Publication, p. 131.
- [17] The SWAN Team(2015), SWAN User Manual SWAN Cycle III version 41.01AB, Environmental Fluid Mechanics Section, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, home page: http://www.swan.tudelft.nl.
- [18] Uda, T.(2004), Coastal erosion The realities and solutions,

Sankaido Co., Ltd., Japan, p. 241.

- [19] Williams, A. and A. Micallef(2009), Beach Management Principles and Practice, Earthscan, p. 445.
- [20] Yeosu City(2012), Report for simulation investigation of the black sand in Manseongri Beach, p. 125.

Received	:	2016.	06.	20.	
Revised	:	2016.	08.	12.	(1st)
	:	2016.	08.	26.	(2nd)
Accepted	·	2016.	08.	29.	