

식생/모래기반 자연해빈에서의 지하수위 변동특성

박정현¹ · 윤한삼^{2,†}¹한국과학기술정보연구원²부경대학교 생태공학과

Variation Characteristics of the Groundwater Level of Natural Vegetation and Sandy Beaches

JungHyun Park¹ and Han-sam Yoon^{2,†}¹Disaster Management HPC Technology Research Center, KISTI, Daejeon 34141, Korea²Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요 약

식생/모래기반 자연해빈에서의 파랑, 조석, 강우조건에 의한 지하수위 변동은 식생 환경과 밀접한 관련이 있으며 이는 식생 발달 및 지반 안정화에 크게 영향을 주는 요소이다. 본 연구는 낙동강 하구역의 사주섬 중 최서측에 위치하는 진우도를 대상으로 실험구를 구축한 후 해안선의 법선 방향으로 관측점 5곳을 선정하여 2012년 3월부터 2014년 9월까지(약 799일간) 관측된 수온, 전기전도도, 압력값을 이용하여 지하수위 변동해석을 하였다. 지하수위의 수온, 염분, 수위 변동과 조위, 파랑, 강수량 등의 외력조건과의 시계열 분석 및 상관분석을 통하여, 소상대 정점에서는 파랑 및 조위의 영향, 식생 및 모래지반 정점에서는 강수량 및 조위의 영향을 크게 받음을 알 수 있었다. 고파랑 내습시 관측점간의 지하수위 및 전기전도도의 공간적 거동을 살펴본 결과 Sand dune 및 Vegetation zone이 시작되는 인근에서 담수층과 해수층의 천이 영역(Transition zone)이 존재하였다.

Abstract – The variation of groundwater by wave, tide and precipitation conditions is closely related to the vegetation environment at the natural vegetation and sandy based beach, and it has a significant impact on the vegetation development and ground stabilization. In this study, the water temperature, electrical conductivity, and pressure were monitored at five observational stations normal to the Jinu-do(Island) shoreline of Nakdong river estuary from March 2012 to September 2014 (approximately 799 days) with the aim of measuring the variation in groundwater-table characteristics. The purpose of the study was to identify factors (tide, wave etc.) affecting groundwater-table variation using time series and correlation analysis, and to record spatial variations in the groundwater level and electrical conductivity as a result of storm events. The observational station in the intertidal zone was strongly affected by wave period and tide level. During the storm period, the groundwater-table and electrical conductivity were stabilized at the edge of sand dunes, vegetation, and areas of transition between freshwater and seawater.

Keywords: Nakdong river estuary(낙동강 하구역), Jinu-do(island)(진우도), Groundwater level(지하수위), Transition zone(천이영역), Vegetation zone(식생대)

1. 서 론

낙동강 하구역(34°55'~35°10'N, 128°50'~129°00'E) 삼각주에는 다양한 크기의 사주섬들(진우도, 신자도, 도요등 등)이 동-서 방향으로 발달되어 있다. 이중 진우도는 낙동강 하구역의 가장 서측에 위치하고 있으며(Fig. 1) 배후로는 서낙동강 및 하구둑 하천수의 영

향을, 전면으로는 동남해역의 조석 및 해양파랑 영향에 의해서 지형 변동 및 식생환경이 불규칙하게 변화하고 있다. 진우도 전면은 다양한 외력조건하에서 사질 지반의 침식과 퇴적, 식생(염생식물, 갈대군락 등)의 성장과 소멸 현상이 반복되고 사질토 지반내부에는 담수 성분의 지하수위가 존재하고, 그 배후면에는 염습지가 발달해 있다(Yoon *et al.*[2013]).

특히, 자연해빈의 지하수위는 해양과 대기기상의 영향을 동시에 받으며 유동성 있는 지반(모래)의 이동이나 그 상부에 서식하는 식

[†]Corresponding author: yoonhans@pknu.ac.kr

생의 성장에 영향을 주어 해빈의 생태적, 환경적, 수문학적인 부분에서 필수적인 요소라고 할 수 있다(Park et al.[2014]).

기존 연안역 지하수위 변동과 관련한 연구로서 지하수위와 조석 및 파랑의 연구(Kang et al.[1997]), 투과성 방파제의 지하수위 변동에 관한 수리실험 연구(Jeon et al.[2002]), 하구역 지하수의 시·공간적 거동 연구(Stieglitz et al.[2008]; Taniguchi et al.[2008]) 등을 살펴볼 수 있다.

이처럼 사주섬의 지하수와 흐름체계에 대한 연구는 최근 관심을 두고 연구되고 있는 중요한 메커니즘이며, 이것을 규명하는 것은 사주섬의 식생 성장과 지형 변화의 복합적인 해안 수리현상을 파악하는데 있어 대단히 중요한 부분이다(Yoon et al.[2007]; Je et al.[2011]).

본 연구는 Park et al.[2014]의 지하수위 현장조사 기간(1,2차 조사 기간 281일) 이후 추가조사된 연구결과(3~5차 추가 조사기간 518일)를 포함하여 총 799일동안 관측된 현장조사 결과를 재분석하였다. 일정한 이격거리를 두고 관측된 정점별 수온, 전기전도도, 압력 자료를 바탕으로 각 정점간의 상호 연관성을 고찰하였으며, 관측되어진 지하수위가 특징적으로 변동하는 태풍 내습 시점에서의 입사 해양파랑과 지하수위 변동 특성을 평가하고 구축되어진 수치모형 결과와 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 지하수위 현장조사

자연해빈의 지하수위를 계측하기 위하여 Fig. 1와 같이 진우도 남측 중앙부 물가선에 법선방향으로 총 5개 정점에서 지하수위 현장 관측실험을 수행하였다. 선정된 실험구는 진우도내에서 해양파랑의 입사 및 지형변화가 활발한 곳이며 소규모 사구(Sand dune)가

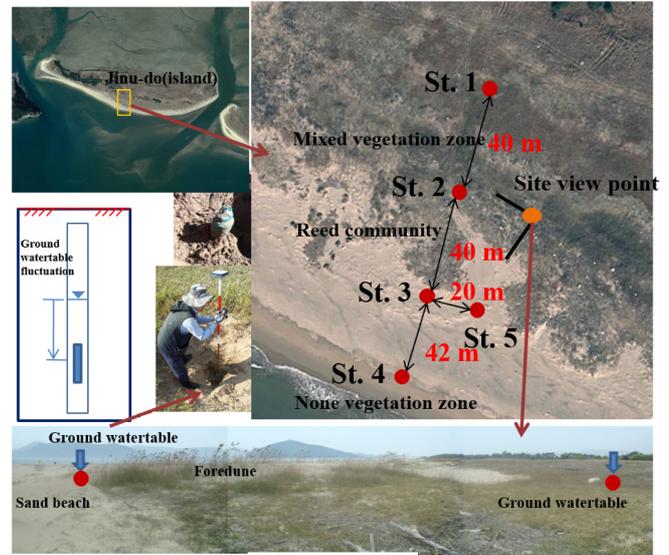


Fig. 1. Field monitoring locations and observation methods on Jinu-do (Island).

존재하고 식생의 외해 방향으로 전진 발달이 일어나는 지역적 특징을 보인다(Park et al., 2014). 물가선에 가장 인접한 St.4는 사질지반의 소상대에 위치하고, St.3은 사구(Sand dune)의 전면에, St.2와 St.1은 식생대(Vegetation area)에 위치하고 있다. 또한 St.5는 St.3과 20m 이격하여 배후 사구가 없는 사질지반에 설치하여 식생 유무에 따른 지하수위 변화를 관찰하고자 하였다. 즉, Fig. 2에 CTD계 설치시 각 정점의 지형단면도를 나타내었는데 각 정점마다 다른 식생 분포를 보인다. 내측에 위치한 St.1, St.2는 염생 식물군이 분포하였고, St.3에서는 갈대군락, St.4와 St.5에서는 식생이 존재하지 않았다.

조사기간은 2012년 3월 1일부터 5회에 걸쳐 총 799일동안 10분

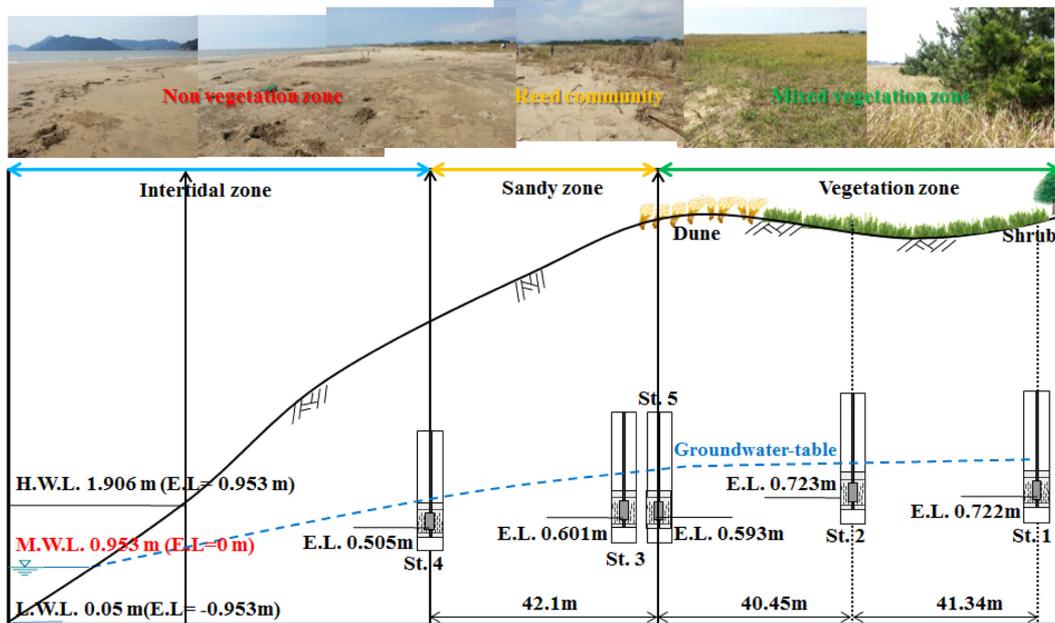


Fig. 2. A schematic diagram of the ground water table gauges for cross-sectional study site.

Table 1. Field observation dates and time intervals

Observation	Date(YY.MM.DD)		Days	Time interval
	Start	Finish		
1 st.	2012.03.01	2012.06.05	97	10 min
2 nd.	2012.06.15	2013.01.15	184	
3 rd.	2013.06.03	2013.10.03	153	
4 th.	2013.10.09	2014.05.12	225	
5 th.	2014.05.13	2014.09.29	140	
Total			799	

Table 2. Resolution of the CTD instrument

Division	Pressure	Temperature	Conductivity
Measurement range	50 m	-20°C ~ +80 °C	0~120 ms/cm
Accuracy	± 0.2% FS	± 0.1 °C	± 1%
Size	18-22 mm × 135 mm		
Memory	48,000		
Measurement time	1sec ~ 99hr		
Power	ground battery, About 10 yr.		
Material	Ceramic (ZrO2)		

간격으로 데이터를 수집하였다(Table 1). 5개 관측 정점에는 CTD계(CTD-Diver 50m, Eijklkamp)를 매설하여 수온, 전기전도도 및 압력(지하수위) 값을 계측하였다(Table 2).

각 정점간의 거리는 약 40 m이며, 각 CTD계의 수직 깊이를 보정하기 위하여 관측점의 E.L.값을 레벨기로 측정하였다. CTD계는 직경 3 cm의 작은 구멍들을 뚫은 PVC 파이프(D=12 cm, L=80 cm, t=0.5 cm) 내부에 철사 wire로 연결 후 관입하였으며, 지면 아래 약 65~75 cm 깊이에 설치하였다(Fig. 3).

해빈의 지질 특성을 살펴보기 위해 각 정점별로 CTD계를 설치한

깊이에서의 표사입도 분석을 실시하였으며, 중앙입경(d_{50} , mm)은 St.1이 0.216, St.2가 0.241, St.3이 0.239, St.4가 0.264, St.5가 0.278로 조사되었다. 시험구에서 해양 외력이 가장 크게 작용할 것으로 판단되는 영역의 지반 특성을 알아보기 위하여 조간대(Intertidal zone)에 위치한 St.4의 표사를 이용하여 실내 정수위 투수시험을 수행한 결과 투수계수(k)는 0.0191 cm/sec로서 가는 모래와 중간모래 사이의 특성을 나타내었다.

2.2 해양파랑 내습 특성

지하수위 관측기간 동안(2012년 3월부터 2014년 9월까지) 대상 해역에 내습하는 해양파랑을 파악하기 위해 실험구와 가장 인접한 거제 해양기상관측부이(기상청, Korean Meteorological Administration)의 자료를 이용하여 파랑을 통계분석하였다. 해양기상관측부이는 매시간 풍향, 풍속(평균, Gust), 파향, 파고(최대, 유의, 평균), 파주기, 해면기압 등의 자료를 제공하고 있다. 관측부이에서 취득한 유의파고, 최대파고, 파향에 대한 시계열 및 파향에 따른 파고, 주기 분포 및 파고와 주기의 통계적 관계를 표로 정리하였다. 아울러 동기간의 풍향에 따른 풍속의 통계적인 분포를 풍향 장미도 및 표로 정리하였다. 상세한 내용은 Park[2015]을 참조하기 바람이며 그 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

2.2.1 파랑분포

거제 해양기상관측부이의 파향 및 최대/유의파고의 계절별 특성을 살펴보면 년별로 약간의 차이를 보이나 파향은 S, SW, SSW, NE 계열이 주를 이루었다. 하계와 추계에는 태풍의 영향으로 유의파고 및 최대파고가 4 m 이상인 고파랑이 빈번히 발생하였으며 춘계와 동계에는 2 m 이하의 파랑이 지배적이었다.

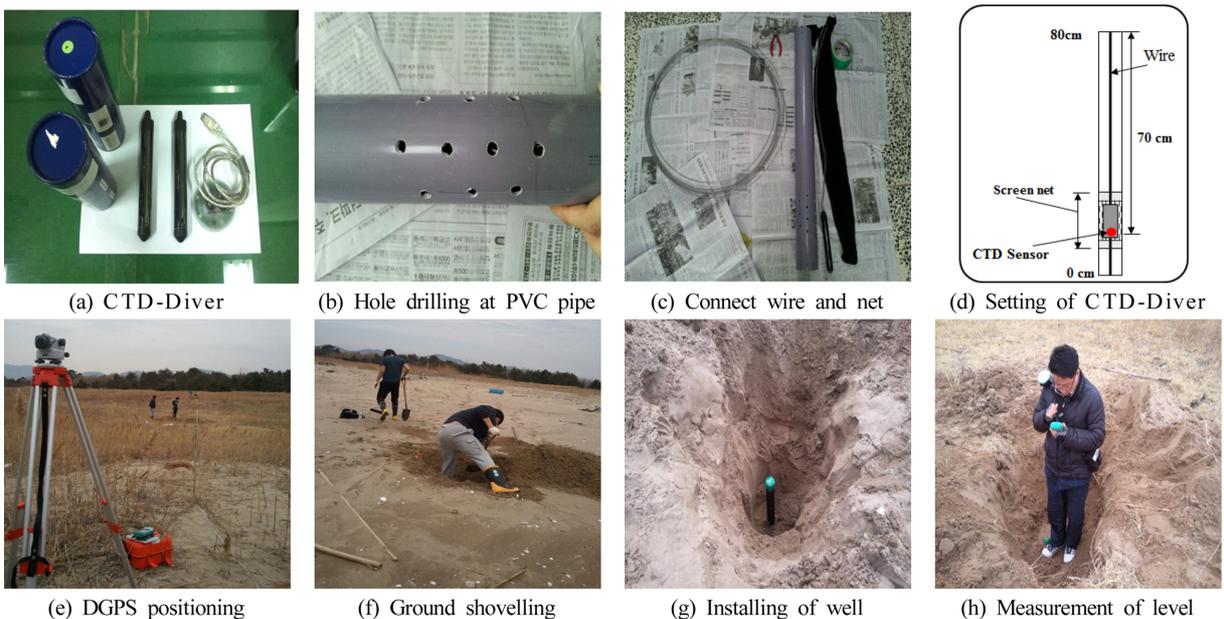
**Fig. 3.** Fabrication and installation process of a well to monitor the water level.

Table 3. Data describing the wind characteristics

Season	Wind direction (%)	Wind velocity (m/s)/(%)
Spring	SW(18.5), WSW(10.9), ENE(10.6)	4~8 / (45.1) 0~4 / (28.9)
Summer	SW(24.1), NE(16.4), ENE(14.9)	4~8 / (46.5) 0~4 / (33.2)
Autumn	NE(16.6), ENE(15.0), N(12.4)	4~8 / (52.7) 8~12 / (24.0)
Winter	NNW(22.5), N(16.9), NW(12.7)	4~8 / (46.0) 8~12 / (31.3)

2.2.2 풍향 및 풍속분포

거제 해상기상관측부이의 바람자료(풍향, 풍속)의 특성을 살펴보면 Table 3과 같이 정리할 수 있다. 춘계와 하계에는 주로 SW계열 풍향이 풍속 4~8 m/s 범위에서 우세하였으며, 추계에는 NE계열, 동계에는 NNW계열이 우세한 경향을 나타내었다. 특히 춘계와 하계에 반해 추계와 동계에는 풍속 4~8 m/s 다음으로 풍속 8~12 m/s가 우세한 것이 특징이라 할 수 있다.

2.2.3 태풍내습 현황

1951년 이후 2014년까지 북태평양에서 발생한 태풍은 1,673개로 이중 203개의 태풍이 한반도에 직접적인 영향을 주었다. 평년(1981~2010년) 기준으로 연 25.6개의 태풍이 발생하였으며, 평균 3.1개의 태풍이 한반도에 직접 영향을 미치는 것으로 나타났다(KMA, National Typhoon Center, <http://typ.kma.go.kr/TYPHOON/>). 결과적으로 현장 관측기간동안 한반도에 직접적인 영향을 주었던 주요 태풍을 정리하면 Table 4와 같으며, 2012년 5개, 2013년 3개, 2014년 3개의 태풍 영향이 현장 관측자료에 포함되어 있다고 할 수 있다.

2.3 해양파랑 수치모의

진우도 전면해역의 해양파랑 내습에 따른 지하수위 변동 특성을 평가하기 위해서 수치모형을 구축하고 관측되어진 지하수위가 특징적으로 변동하는 시점에서의 해양파랑 내습 상황을 추정하고 그 영향을 평가하고자 하였다. 수치모형은 미공병단(US ARMY Corps.)에서 개발한 STWAVE (Steady-state-Spectral Wave Model)를 사용하였다.

2.3.1 수치모형 지배방정식

STWAVE 모델은 연안역에서 풍파의 성장과 전파에 있어 수심변화에 의한 굴절·천수변형, 흐름에 의한 굴절·천수변형, 수심 및 파형경사에 의한 쇄파, 회절, 바람에 의한 파의 성장, 그리고 파 상호작용 및 파랑장의 성장에 있어서 에너지를 재분배하고 감쇠시키는 백파현상을 수치모의 할 수 있는 모형이다(Smith *et al.*[1999]). 파 에너지 전파를 따라서 정상상태의 스펙트럼 파랑작용 보존에 대한 지배방정식은 다음과 같다(Jonsson, 1990).

$$(C_{ga})_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C_a C_{ga} \cos(\mu - \alpha) E}{w_r} = \sum \frac{S}{w_r} \quad (1)$$

여기서, E : ($\rho_w g$)파랑에너지, ρ_w : 물의 밀도, S : 에너지의 source와 sink 항, μ : 파향선 각도, w : 각주파수, g : 중력가속도, k : 파수, d : 수심, r : 기준축에서 흐름에 상대적인 파의 매개변수, α : 흐름에 절대적인 파의 매개변수를 의미한다.

2.3.2 계산영역의 설정

계산영역은 Fig. 4와 같이 거제 해상기상관측부이(T.1)와 진우도 전면 해양파랑관측 정점(T.2)을 포함한 영역으로 구성하여 모델을 구축하였다(Yoo *et al.*[2008]). 계산영역의 해안선 및 수심은 국립해양조사원(NORI)에서 발간하는 수치해도(n224a, 2013.11)에서 추출하였으며, 계산격자에 대한 설명은 Table 5에 나타내었다.

2.3.3 수치모형검증

수치모형의 검증은 Fig. 4의 거제 해상기상관측부이(T.1) 및 Yoo *et al.*(2008)에 의해 수행된 낙동강 하구 파랑관측 정점(T.2)과 동일 지점 격자의 모델계산 값과 관측값을 비교하였다. 수치모형 검증 실험이 수행된 기간은 파랑관측(2007년 4월 12일 13:00~27일 09:00, 약 15일) 기간과 동일하다. Yoo *et al.*[2008]의 분석 결과에 의하면 거제 관측부이(T.1)에서 최대파고 약 3~4 m, 유의파고 약 2 m, 주기는 5~8 sec의 범위를 보이고, N방향의 파향 내습시 T.2에서 최대 파고는 약 2.2 m, 유의파고는 약 1.3 m가 파랑변형에 의해 저감되는 것으로 조사되었다.

구축되어진 수치모형을 통해 T.1과 T.2에서의 파고 시계열을 관

Table 4. Typhoons affected around Korea during field observation period

Year	NO.	Name	Developing ~ Decaying (YYYY-MM-DD)
2012	2012-07	KHANUN	2012-07-16 ~ 2012-07-19
	2012-10	DAMREY	2012-07-28 ~ 2012-08-03
	2012-14	TEMBIN	2012-08-19 ~ 2012-08-31
	2012-15	BOLAVEN	2012-08-20 ~ 2012-08-29
	2012-16	SANBA	2012-09-11 ~ 2012-09-18
2013	2013-04	LEEPI	2013-06-18 ~ 2013-06-21
	2013-15	KONG-REY	2013-08-26 ~ 2013-08-31
	2013-24	DANAS	2013-10-04 ~ 2013-10-09
2014	2014-08	NEOGURI	2014-07-04 ~ 2014-07-11
	2014-11	HALONG)	2014-07-29 ~ 2014-08-11
	2014-12	NAKRI	2014-07-30 ~ 2014-08-03

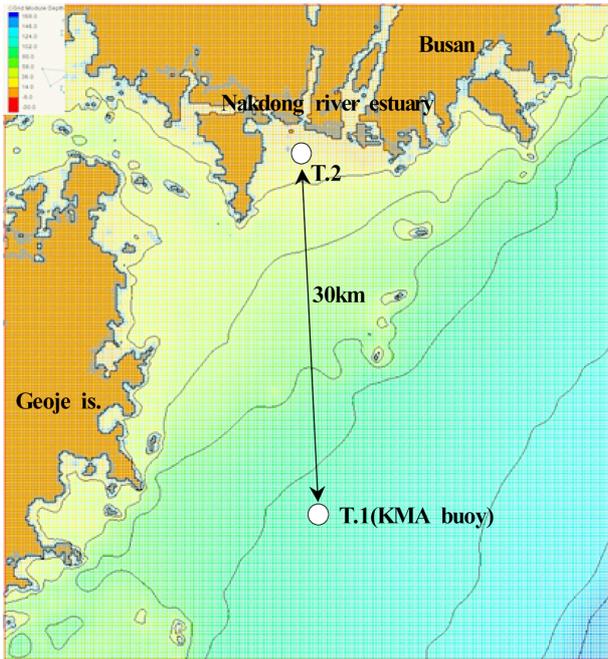


Fig. 4. Computational domain and depth.

Table 5. Computation grid information

Location	Distance (km)	Grid size (m)	Grid number
34° 20'12"~35° 10'21" N 128° 36'53"~129° 10'51" E	52.5×57.5	250×250	210×230

측치와 비교한 결과는 Fig. 5와 같다. 수치모의된 유의파고 계산치와 현장 관측치가 양호하게 재현되는 것으로 판단되어진다.

3. 결과 및 고찰

3.1 내부 지하수 변동 특성

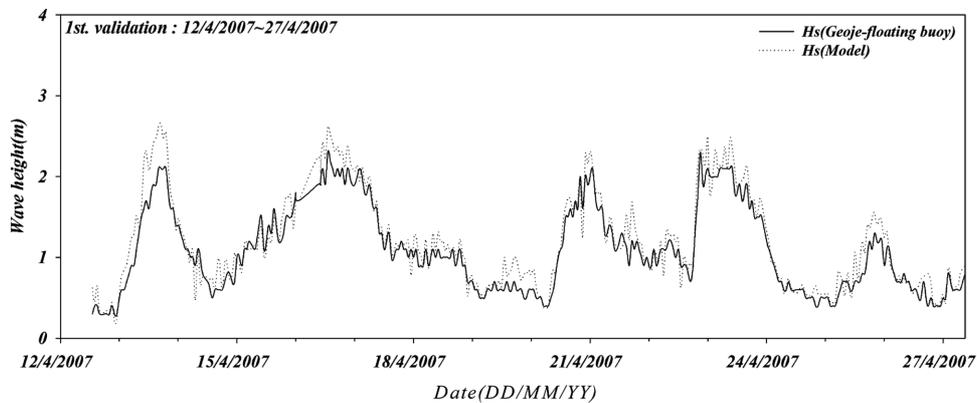
진우도 남측 중앙부 자연해빈의 총 5개 정점 CTD계에서 관측된 현장조사 결과(수온, 전기전도도, 압력)를 분석하였다. 관측자료는 10분 간격으로 취득하였기 때문에 방대한 양의 raw data라 할 수 있다. 하지만 거제 해상기상관측부이는 1시간 간격으로 관측 자료를 제공하므로 이와 실시간 시계열 분석을 위해 상기 수집된 자료를 1시간 단위 자료로 필터링하였다.

Fig. 6은 대표적으로 해빈 소상대에 위치한 St.4와 소규모 사구 (Sand dune) 배후에 위치한 St.2의 수온, 전기전도도, 지하수위 시계열을 나타내고 있다.

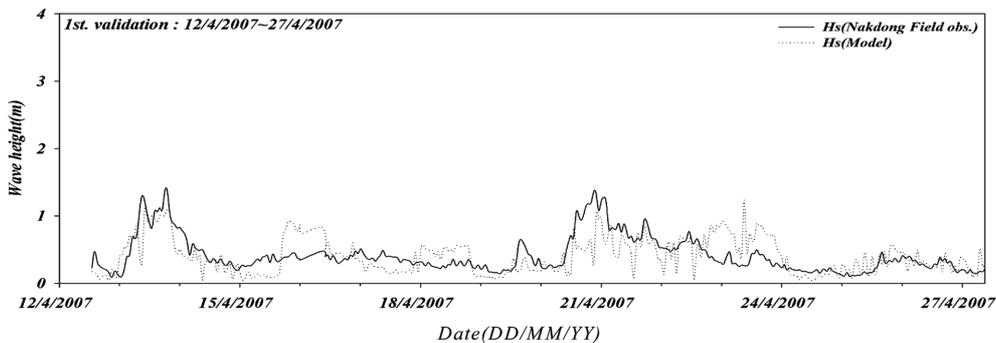
3.1.1 수온

내부 지하수의 수온(ground water temperature) 변동은 전 계측점에서 계절적인 특성을 나타내고 있다(Fig. 6(a)). 사구 전면의 소상대에 위치한 St.4의 경우 약 2.3~27 °C의 범위, 그 내측에 위치한 St.1~St.3, St.5는 전 관측기간 동안 약 10~27 °C를 나타내었다.

St.4(소상대)의 경우 해수의 영향을 상대적으로 강하게 받는 영역



(a) Hs - Geoje floating buoy(T.1) and model result



(b) Hs - Field observation(T.2) and model result

Fig. 5. Comparison of significant wave and spectrum density for the first observation period (12th-27th April, 2007).

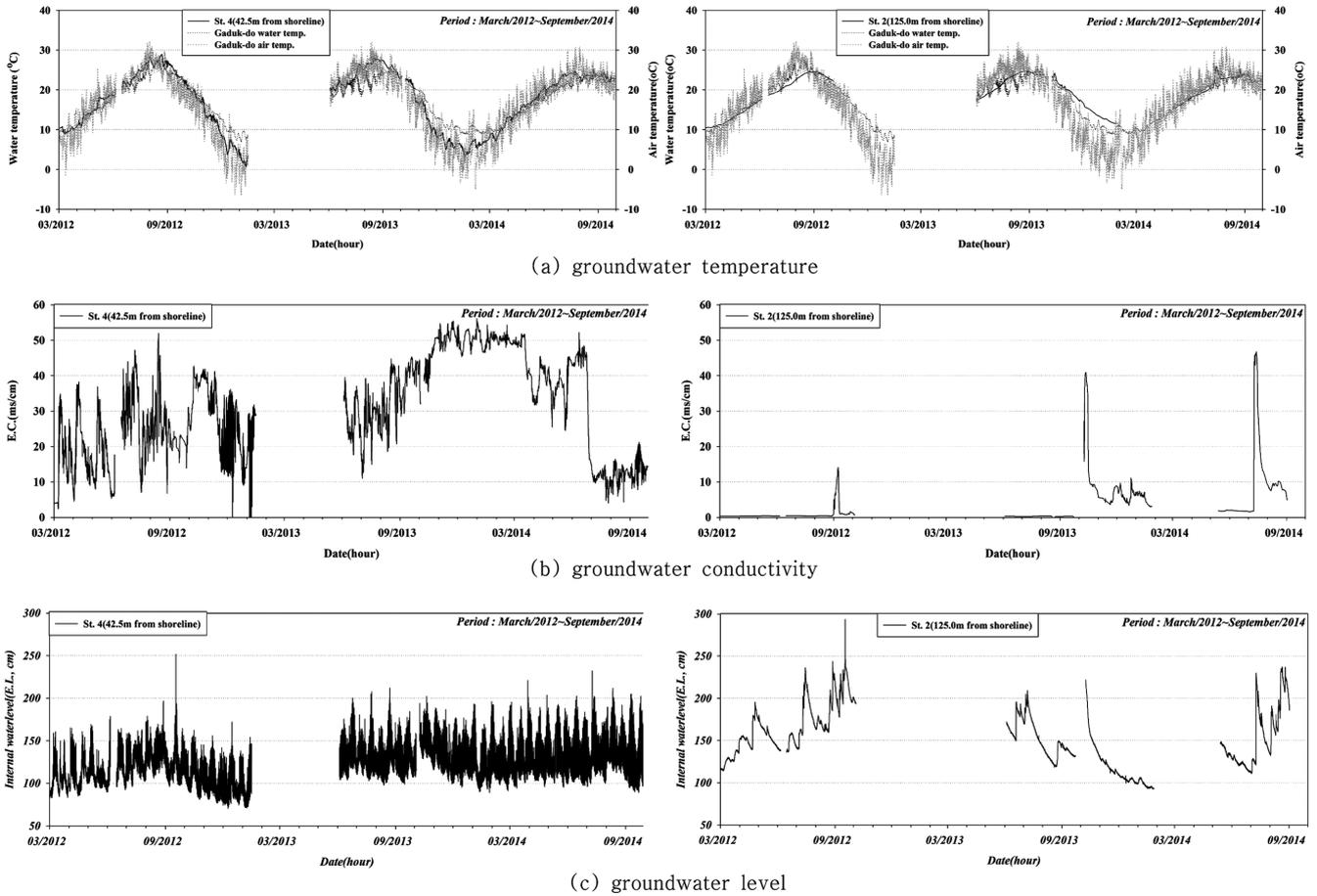


Fig. 6. Time series of water temperature, conductivity and water level observed at St.4 and St.2 by CTD gauges.

이며, 식생 피복이 없는 지역으로서 사질지반을 통해 대기로부터의 열교환이 다른 정점에 비해 크게 일어난 것으로 판단되어진다. Park et al.[2014]에 따르면 각 정점별 수온과 인근 가덕도 검조소의 해역 수온 및 기온과의 상관 분석결과, 상관계수가 0.7~0.96으로서 강한 양의 선형관계를 가진다고 연구된 바 있다.

또한 월평균 수온을 나타내면 Fig. 7(a)와 같은데, 인근 가덕도 검조소의 조위 변동과 비교할 때 조시에 따라서 수온이 변동함을 알 수 있으며 특히 소상대에 위치한 St.4의 경우 다른 정점들에 비해 그 변동폭이 크고 대조기시 수온이 증대되고 소조기시 감소함을 보여주고 있다. 반면 내측 정점으로 갈수록 수온편차가 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 이는 내측의 경우 표층 식생대가 지반의 온도를 상대적으로 안정된 상태로 유지시켜 주기 때문으로 판단된다.

3.1.2 전기전도도

내부 지하수의 전기전도도(E.C., Electric Conductivity) 변화는 전 정점에서 다소 차이를 나타내고 있다(Fig. 6(b)). 내측에 위치한 St.1, St.2의 경우 관측시기에 큰 변동 없이 평균 0.27~3.65 ms/cm 범위로 거의 0에 가까운 값을, St.3과 St.5는 평균 3.48~5.37 ms/cm의 값을 나타내어 대부분의 관측 시기 동안 담수인 상태를 알 수 있다. 더구나 강우가 집중되는 장마철과 태풍 내습 시점인 6~10월에 큰 폭

으로 변동이 발생하였다.

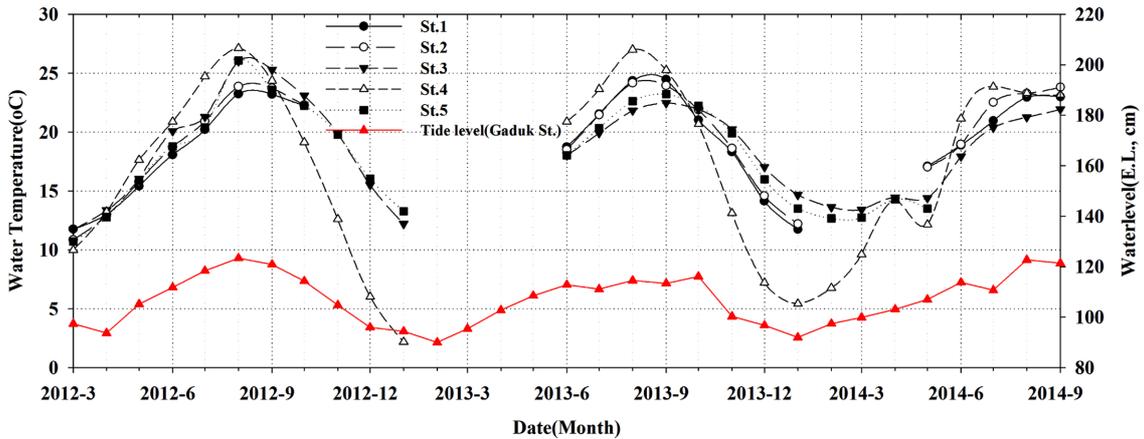
소상대 정점인 St.4는 평균적으로 9~50.1 ms/cm 범위에서 변동하였으며, 조위와의 분석을 통해 조위에 따라 전기전도도 변화가 발생함을 알 수 있다(Fig. 7(b)). 정점 St.4는 해수와 담수의 교환이 활발히 일어나는 지점이라 할 수 있다.

이상의 결과를 통해 모든 정점에서 내부 지하수의 전기전도도는 외력인자와는 약하거나 무시할 수 있을 정도의 선형관계를 가진다. 이는 시험구내 정점들은 해수와 담수의 혼합이 발생하며, 내측에는 담수층이 두껍게 형성되어 있을 뿐만 아니라 해양의 특정 외력이 작용할 경우 해수의 침투작용이 공간적으로 상이(相異)하게 발생하고 있음을 의미한다(Park et al.[2014]).

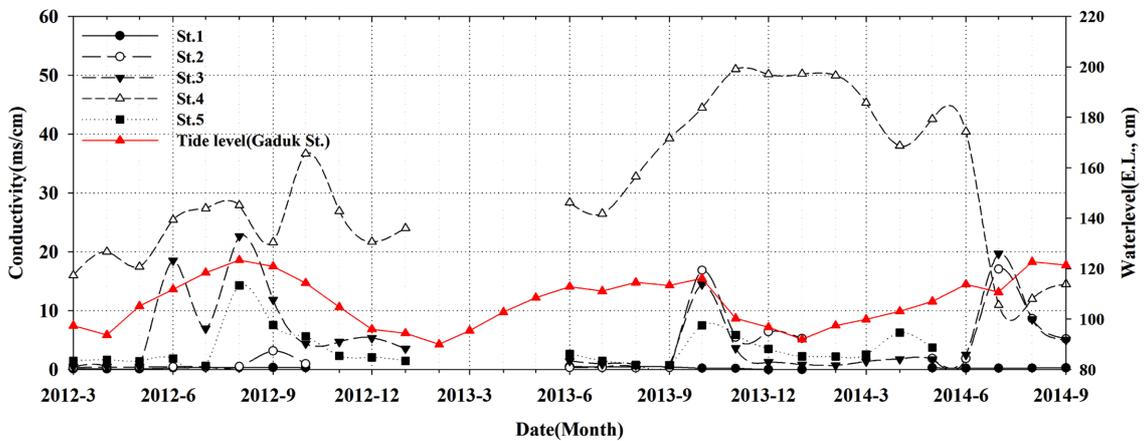
3.1.3 압력

내부 지하수의 압력은 관정내의 압력(Pressure, cm)으로 계측이 된다. 그러므로 CTD계 설치지점의 대기압 및 표고를 보정 후 조위와의 분석이 가능한 실지하수위(지하수위의 높이=관측점의 압력(cm) - 대기압(cm) + 표고(E.L.))로 환산하였다(Fig. 6(c)). 인근 가덕도 검조소의 비조화상수인 평균해면은 D.L.95.2 cm이다.

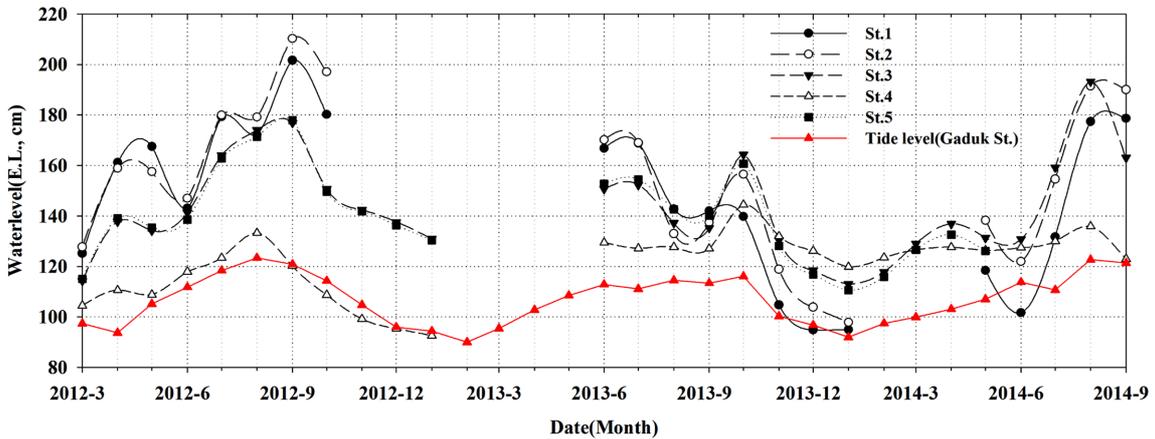
결과적으로 St.4(소상대)의 경우 조위와 파랑의 영향으로 변동하는 것을 알 수 있으나 그 외 내측의 정점들은 Fig. 6(c)의 St.2와 같이



(a) groundwater temperature



(b) groundwater conductivity



(c) groundwater level

Fig. 7. Average monthly variation in groundwater temperature, conductivity and level observed at each study site, and at the Gaduk tidal observation station.

하계 상승, 동계 하강하는 경향을 나타낸다. 2012년에는 총 5회의 태풍(KHANUN & SANBA 등)으로 인하여 지하수위의 평균값이 크게 상승하였고 2013년에 걸쳐서 지속적으로 하강하며, 2014년은 대량의 강우를 동반한 태풍 너구리(NEOGURI)로 인해 평균 지하수위가 큰 폭으로 상승한 것을 알 수 있다.

일반적으로 지하수위 변동은 강우에 의해 크게 영향을 받으며, 해안선에서 횡단 방향인 지하수위면(groundwater-table)의 평균적인 높이는 하계 우기와 동계 건기의 영향에 따라서 증감함을 알 수 있다. 한편, St.4(조간대)의 경우 조위변동과의 상관계수가 0.67로서 양의 선형관계를 나타내지만 평균 해수면 보다는 20~30 cm 가량

높은 상태에서 수위가 변동하였다(Park et al.[2014]).

Fig. 7(c)의 월평균 지하수위고를 살펴보면 평균적인 지하수위면의 상승 및 하강이 정점마다 차이나는 것을 알 수 있다. 즉, 같은 외력이 작용하여도 해안선에서 이격거리에 따라, 소규모 사구의 전면 및 후면에 위치하는 것에 따라서 응답특성이 달라짐을 나타내고 있다. 조사 정점중에서 사구 바로 후면에 위치한 St.2에서 지하수위가 가장 높게 나타나는 경향을 보여주고 있다.

3.1.4 상관성 분석

각 정점별로 관측된 수온, 전기전도도, 압력 자료는 일정한 이격거리(약 40~42 m)를 두고 분포하기 때문에 각 정점간의 상호 연관성을 파악한다면 파랑 작용, 식생, 사구 유무 등의 외력과 식생 환경특징과 연관지어 분석이 용이할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 각 정점 자료간의 피어슨(Pearson) 이변량 상관계수를 도출하였다. 이는 -1에서 1의 값을 가지며 1인 경우 완전한 선형관계(즉, x가 증가할수록 y도 비례해서 증가하는 관계)를, -1인 경우 반비례 관계를, 0인 경우에는 서로 상관성이 없음을 의미하며 (Table 6), 다음 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\rho_{x,y} = \text{corr}(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (2)$$

여기서, X, Y는 각 인자의 개별 성분값, σ_x (또는 σ_y)는 X(또는 Y)의 표준편차이고, Cov(X, Y)는 식 (3)과 같으며, X와 Y의 공분산

이다.

$$\text{Cov}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - x_{ave})(y_i - y_{ave})}{k} \quad (3)$$

결과적으로 각 정점의 수온, 전기전도도, 압력의 자료를 사용하여 정점별 상관계수를 산정한 결과는 Table 7과 같다. 즉, 각 정점간 상관계수를 살펴보면, 최내측 정점인 St.1과 인접한 St.2가 모두 강한 양의 선형관계를 나타내었다. 그 다음 물가선에 동일하게 평형하게 위치하는 St.3과 St.5의 값들이 양의 선형관계를 나타내었으며, 소상대 정점 St.4는 모든 정점과 약한 양의 선형관계를 나타내었는데 이는 Fig. 6에서와 같이 물가선에 인접한 위치관계로 장주기 및 단주기 파랑의 내습에 따른 직접적이며 복합적인 영향으로 판단할 수 있다.

이상의 결과로 판단할 때, 소상대에 위치한 St.4를 제외한 식생에 인접한 조사 정점인 St.1과 St.2, St.3과 St.5가 해양 외력 및 식생 변동에 의한 지반내 수리특성이 유사하게 변동할 것으로 판단할 수 있으며, 이는 해안선(물가선)으로부터 이격거리에 따라 지반내 수리특성이 차이를 보이고 있는데 이는 자연해빈에서 담수층과 해수층의 천이 영역(Transition zone)이 존재함을 나타낸다고 할 수 있다.

3.2 태풍 내습시 지하수위 변동 특성

3.2.1 실험 Case 선정

Fig. 7(c)에서 살펴본 바와 같이 지하수위는 관측시기별로 다소 차이를 나타내고 있다. 이에 본 연구에서는 무강우 조건에 해당하는 시점에서 4개 정점(St.1, St.2, St.3, St.5)에서 지하수위 변동이 발생했던 시기의 지하수위면이 높고 낮은 2가지 경우에 대해서 수치실험결과와 비교를 하고자 하였다(입사파랑에 의한 영향 및 변동 특성만을 검토하고자 함). 지하수위면이 낮은 경우를 Case 1, 높은 경우를 Case 2로 구분하였으며, 이때 당시의 인근 가덕도 검조소 조위와 수치 모의로 계산되어진 시험구 해빈 전면의 파고, 주기 및 동시기의 바람장(풍속, 풍향)과 지하수위 변동을 비교 분석하였다. 각 Case 별로 지하수위 변동치와 조위를 고려한 파랑 변형 수치모의에

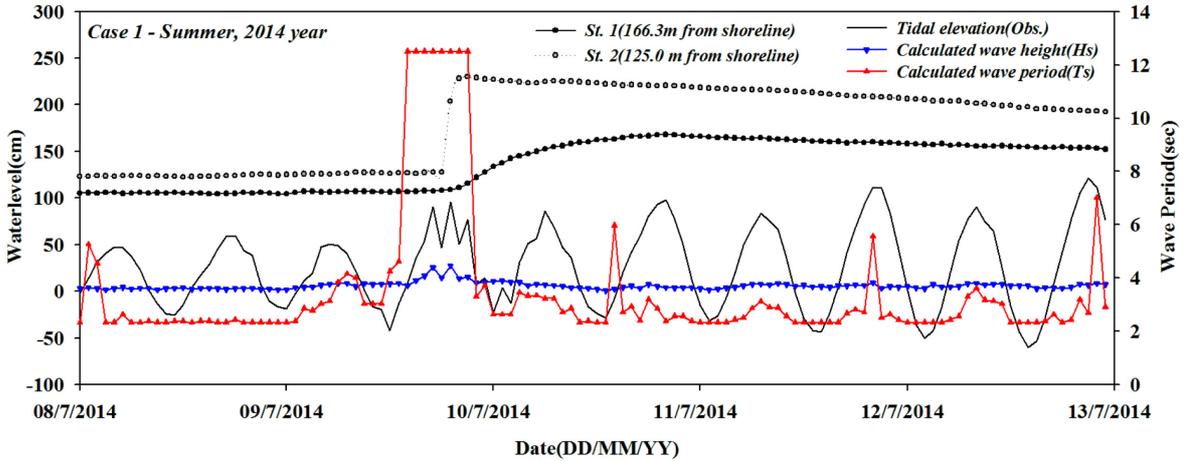
Table 6. Pearson correlation coefficient

Correlation coefficient	Linear relationship
-1 < γ < -0.7	A strong negative
-0.3 < γ < -0.7	A clear negative
-0.1 < γ < -0.3	A weak negative
-0.1 < γ < 0.1	Almost ignored
0.1 < γ < 0.3	A weak positive
0.3 < γ < 0.7	A clear positive
0.7 < γ < 1	A strong positive

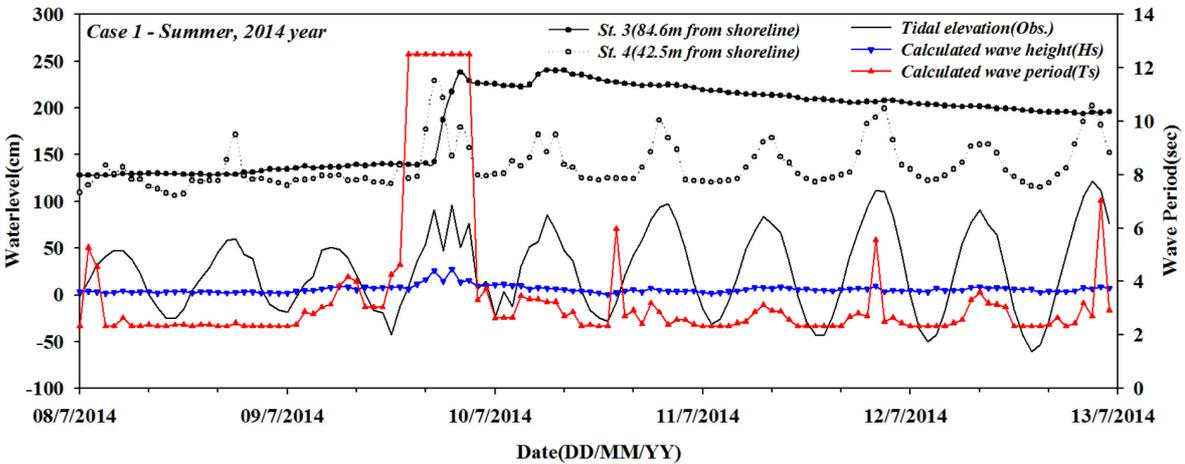
Table 7. Water temperature, conductivity and pressure correlation coefficients observed at each station

		St.1	St.2	St.3	St.4
Temperature	St.2	0.987**			
	St.3	0.902**	0.923**		
	St.4	0.907**	0.897**	0.793**	
	St.5	0.949**	0.968**	0.984**	0.812**
Conductivity	St.2	-0.183**			
	St.3	0.111**	0.520**		
	St.4	-0.090**	0.004**	-0.197**	
	St.5	0.004**	0.201**	0.663**	0.084**
Pressure	St.2	0.950**			
	St.3	0.757**	0.877**		
	St.4	0.036**	0.122**	0.294**	
	St.5	0.826**	0.886**	0.986*	0.275**

**p < 0.01, *0.01 < p < 0.05



(a) St.1 and St. 2



(b) St.3 and St. 4

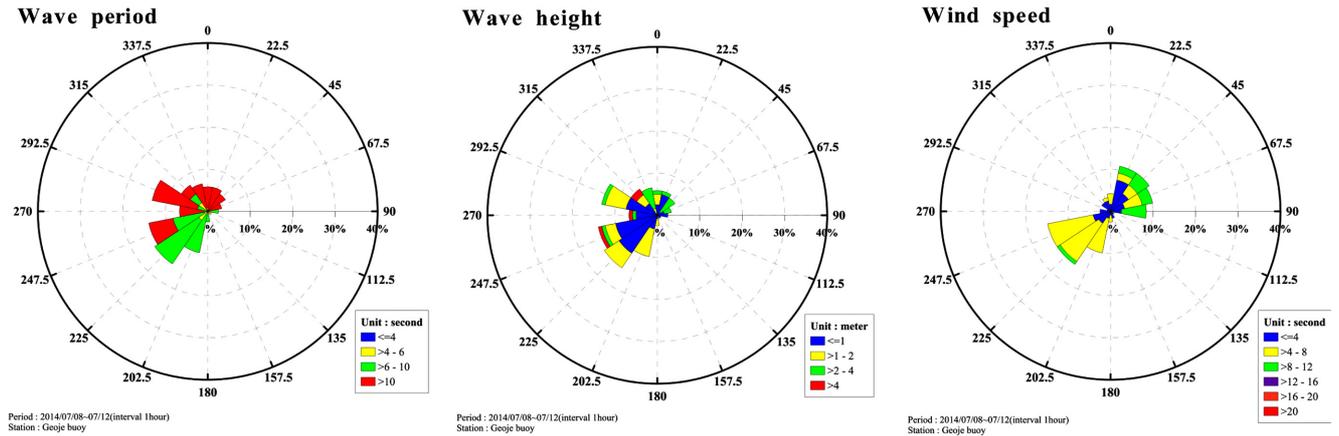


Fig. 8. Comparison of the calculated foreshore wave conditions, and groundwater level in the summer of 2014 (Case 1).

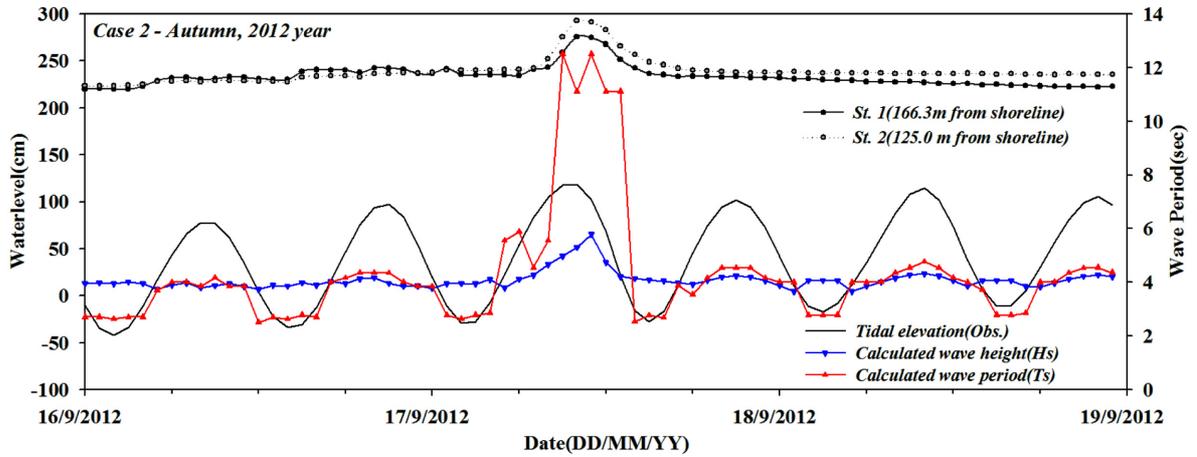
의해 도출되어진 해빈 전면의 파랑상태를 실시간 시계열 분석한 결과는 Fig. 8과 Fig. 9와 같다.

3.2.2 지하수위면이 낮은 경우(Case 1)

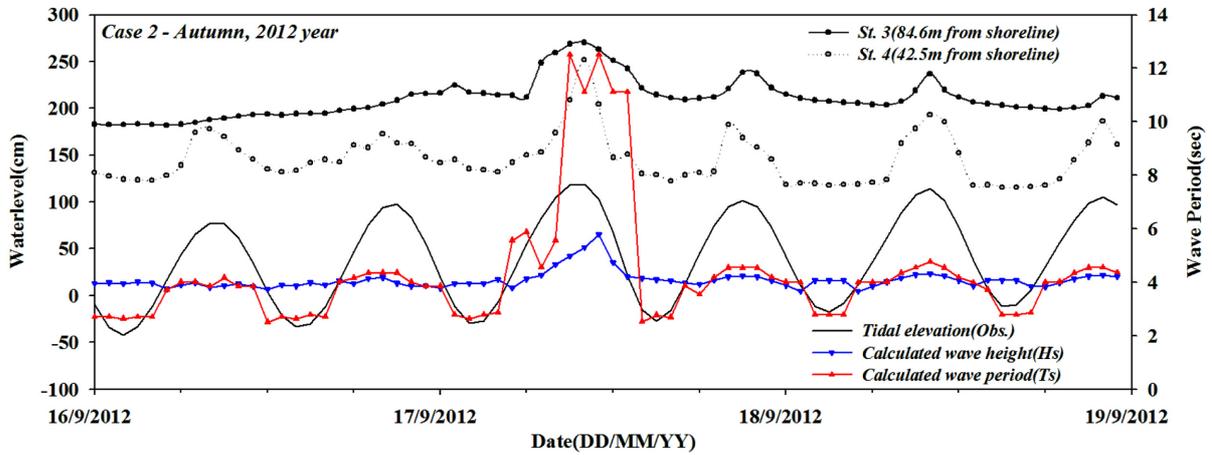
Fig. 8은 2014년 태풍 SANBA가 내습할 당시의 7월 8일부터 12

일까지의 가덕도 검조소의 조위, 시험구 각 정점의 지하수위 변동치, 수치모델로 산출된 해빈 전면의 파랑 및 거제 해상기상관측부이로부터 관측된 파향 및 풍향 장미도를 나타낸 그림이다.

그림에서 살펴보면 해상기상관측부이에서는 파고 1~4 m, 주기 6~10 sec 이상의 파랑이 관측되었으며, 풍향은 NE, SW계열로 8 m/sec



(a) St.1 and St. 2



(b) St.3 and St. 4

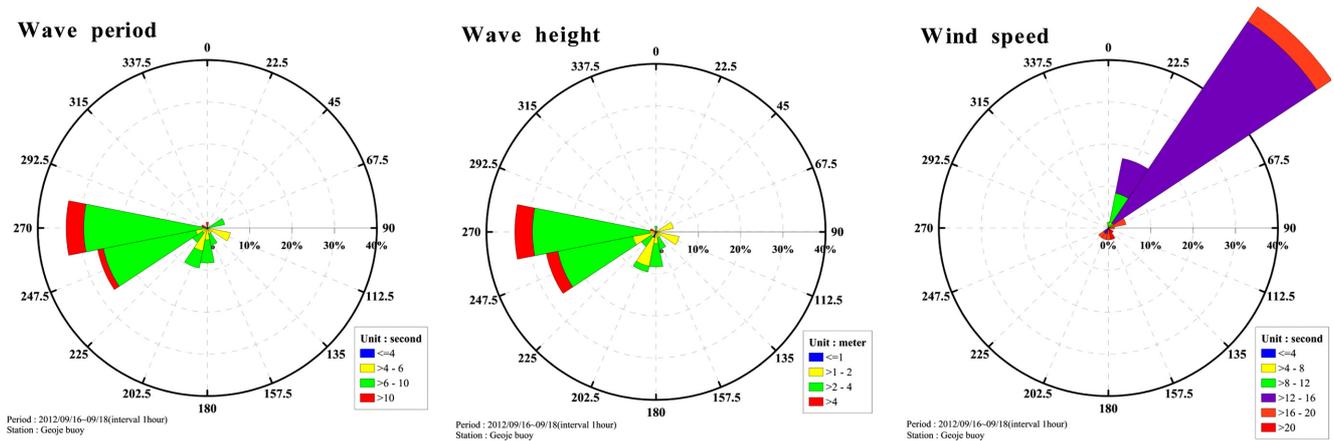


Fig. 9. Comparison of the calculated foreshore wave conditions and groundwater level in the autumn of 2012 (Case 1).

이하의 풍속이 지배적이었다. 또한 수치모의에 의해 계산되어진 해빈 전면 파랑은 2014년 7월 9일 14시부터 21시까지 8시간 동안 주기 12초 이상의 파랑이 해빈 전면에 내습하였으며 그와 더불어 모든 정점에서 지하수위가 큰 폭으로 상승하였다.

해안선에서 이격거리에 따라 St.4의 경우 해빈전면에 파랑 내습 후 1시간, St.3의 경우 4시간, St.2의 경우 6시간, St.1의 경우 14시간

후에 최고 지하수위고를 기록하였고, 각 정점간 시간지연(Time lag)이 존재하는 것을 알 수 있다. 더불어 내측 정점에서 지하수위 상승 폭이 점진적으로 줄어드는 것으로 보아 해안선에서 이격거리에 따라 파랑에 의한 지하수위 변동이 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 해수가 사질 지반을 침투해 해빈 배후로 전달될 경우 시간 지연이 발생하고 장주기 성분의 파랑에너지에 의해 전달되는 것을 나타내고

있다. 대상 연구 지역에서는 주기 12 sec 이상의 파랑이 8시간 이상 지속되면 지하수위 변동에 큰 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 이러한 경우 조석과 지하수위의 수두 차이 및 장주기 성분의 파랑이 내습한 상태이며, 해수 침입에 의하여 큰 폭으로 염분 상승이 발생할 수 있는 조건이라 할 수 있다.

3.2.3 지하수위면이 높은 경우(Case 2)

Fig. 9는 2012년 태풍 NEOGURI가 내습할 당시의 9월 16일부터 18일까지의 가덕도 검조소의 조위, 시험구 각 정점의 지하수위 변동치, 수치모델로 산출된 해빈 전면의 파랑 및 거제 해상기상관측부로부터 관측된 파랑 및 풍향 장미도를 나타낸 그림이다.

그림에서 살펴보면 해상기상관측부에서는 W와 WSW계열의 파랑으로 파고 2~4 m 및 주기 6~10 sec의 파랑이 관측되었으며, 풍향은 NE계열로 12 m/sec 이상의 풍속이 지배적이었다. 또한 대조기였던 만큼 평균해수면도 상당히 올라간 시기이다. 또한 수치모의에 의해 계산되어진 해빈 전면 파랑은 2012년 9월 17일 10~15시 사이에 파고 65.3 cm, 주기 10 sec 이상의 장주기 파랑이 5시간에 걸쳐 해빈 전면에 작용하였고 그와 더불어 모든 정점에서 지하수위가 상승 하는 것을 확인 할 수 있다.

본 연구의 전체 조사기간 중 가장 높은 지하수위고를 기록하였던 이는 각 정점의 지반고보다 높은 수위상태였다. 즉, 지반이 완전히 포화된 상태라는 것을 의미한다. 2012년에 내습한 태풍 Sanba (2012.09.01.~09.18)가 영향을 미친 시기이며, 관측기간 동안 최대(Maximum) 지하수위고가 발생한 것은 본 Case 직전에 대량의 강우가 원인이며 더불어 태풍 등에 의한 고파랑 상태가 지속되었기 때문으로 판단된다.

위와 같은 상태가 지속되면 지형 변동 및 해수 침입에 의한 식생대 변동에 큰 영향을 미칠 수 있으나 평균 지하수위면이 높은 상태이고 순간적인 상승고가 높지 않은 것으로 미루어 보아 파랑의 영향이 사주내의 지하수위면에 의해 감쇠된 것으로 판단할 수 있다. 더불어 지반이 완전 포화 상태가 지속되면 지반이 액상화(Liquefaction)가 되어 소상대부터 상부 해빈까지 외력에 취약한 상태가 될 수 있으며 지속적으로 고파랑 내습시 해빈 침식(erosion)이 발생할 가능성이 높다고 할 수 있다.

3.2.4 Case 1과 Case 2의 요약 및 시사점

전술한 Case 1과 Case 2의 경우는 무강우 조건하에서 해양파랑의 영향에 의한 지하수위의 변동 특성을 살펴보고자 하였다.

먼저 Case 1인 2014년 태풍 SANBA 내습 당시의 경우 평균 지하수위면이 1.1 m로서 가장 낮았던 시기이며 중조기 만조시에 평균파고 0.05 m, 평균주기 12.5 초 이상의 파랑이 해빈전면에 8시간 지속되었을 때 해안선에서 166.3 m 이격거리에 위치한 St.1에서 지하수위가 약 50 cm 가량 상승하였다.

또한 Case 2인 2012년 태풍 NEOGURI 내습 당시의 경우 평균 지하수위면이 E.L.2.0 m로 관측기간 중 가장 높았던 시기이며 중조기 만조시에 유의파고 0.45 m, 평균주기 11.5 sec 이상의 파랑이

해빈 전면에 5시간 지속되었을 때 St.1에서 수위가 약 25 cm 가량 상승하였다.

앞서 2가지 Case의 공통점은 평균주기(Tm) 11.5 sec 이상으로 장주기 성분의 파랑이 5시간 이상 지속되었다는 점이며, 차이점은 평균 지하수위면의 차이이다. 즉, 평균 지하수위면이 높았던 시기에는 평균파고가 0.45 m, 낮았던 시기에는 0.05 m로서 시간 평균된 지하수위가 내습파랑에 응답하는 특성이 다르게 나타남을 알 수 있다.

따라서 Case별로 차이를 보이나 년별 평균 지하수위면과 조위와 파랑에 의한 해수면의 수두 차이가 해수 침수 현상으로 인해 지하수위의 변동을 일으키는 요인이라 할 수 있으며, 해안선에서의 이격거리에 따라 지연시간이 존재할 뿐만 아니라 특정 입사 파랑에 의한 지하수위 변동치가 다르게 발생함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 낙동강 하구역 진우도 전면해빈 총 5개 정점에 지하수위계를 해안선으로부터 일정한 이격거리를 두어 설치하여 수온, 전기전도도, 압력을 총 799일 동안 관측하였다. 각 정점에서 관측된 자료를 바탕으로 관측 자료의 상호 연관성을, 또한 입사 해양파랑 특성에 따른 지하수위 변동 특성을 평가하기 위해서 수치모형을 구축하고 관측되어진 지하수위가 특징적으로 변동하는 시점에서의 해양파랑 내습 상황을 추정하고 그 영향을 평가하고자 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 자연해빈 소상대에서의 수온은 약 2.3~27 °C, 그 내측인 식생대에서는 약 10~27 °C 범위를 가지고 변동하였다.

(2) 전기전도도의 경우 소상대에서는 평균적으로 9~50.1 ms/cm 범위에서 조위에 따라 변동하였으나 그 내측에 식생대에서는 평균 0.27~5.37 ms/cm의 값을 나타내어 대부분의 관측 시기 동안 담수인 상태임을 알 수 있다.

(3) 지하수위 변동은 경우에 의해 크게 영향을 받으며, 해안선에서 횡단 방향인 지하수위면(groundwater-table)의 평균적인 높이는 하계 우기와 동계 건기의 영향에 따라서 증감함을 알 수 있다.

(3) 모래 기반의 소상대 정점과 식생 기반의 조사 정점에서는 지하수위 변화가 차이를 보이고 있으며, 표층 식생대가 지반의 온도를 상대적으로 안정된 상태로 유지시켜 주는 것으로 판단된다.

(4) 해안선(물가선)으로부터 이격거리에 따라 지반내 수리특성이 차이를 보이고 있는데 이는 자연해빈에서 담수층과 해수층의 천이영역(Transition zone)이 존재함을 나타낸다고 할 수 있다.

(5) 조위와 파랑에 의한 해수면 상태가 지하수위면으로의 침입으로 인해 지하수위의 변동을 일으키는 요인이라 할 수 있으며, 해안선에서의 이격거리에 따라 지연시간이 존재할 뿐만 아니라 특정 입사 파랑에 의한 지하수위 변동치가 다르게 발생함을 알 수 있다.

향후 본 연구결과는 해양 고파랑 내습(Storm event)시 연안 지하수위 공간적인 변동을 파악하여 자연해빈에서의 해수 침투 현상, 담수층과의 천이영역(Transition zone)의 정량적 평가를 위한 기초자료로 활용될 수 있다고 생각된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년: C-D-2014-1107) 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- [1] Kang, T.S., Oh, H.M., Lee, H.M. and Eum, H.S., 2015, "Storm Surge Vulnerability Assessment due to Typhoon Attack on Coastal area in Korea", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, Vol. 21, No. 5, 608-616.
- [2] Je, Y.J., Yoon, H.S. and Park, J.H., 2011, "Spatiotemporal Variation of Foreshore Vegetation Belt Line on the Jinu-do Coast", *Proceeding of the Annual Autumn Meeting, J. Korean Environment Sciences Society*, 2295-2298.
- [3] Jeon, J.W., Yoon, H.S. and Ryu, C.R., 2002, "Hydraulic Characteristics of Permeable Breakwater in Relation to the ground Waterlevel Fluctuation", *J. Ocean Eng. Technol.*, Vol. 16, No. 3, 46-53.
- [4] Jonsson, I.G., 1990, "Wave-current interactions. In: Lemehaute, B., Hanes, D.M. (Eds.)", *The Sea*, Vol.9, John Wiley and Sons, Inc., New York (Part A).
- [5] Kang, H.Y., Kobayashi, N. and Ryu, C.R., 1997, "Tide, Swash Infiltration and ground water Behavior", *J. Ocean Eng. Technol.*, Vol. 11, No. 3, 153-162.
- [6] Korean Meteorological Administration (KMA), National Typhoon Center (<http://typ.kma.go.kr/TYPHOON/>).
- [7] Park, J.H., Yoon, H.S. and Lee, I.C., 2014, "Analysis of Ground Watertable Fluctuation at the Sandy Barrier Island on Jinu-do in Nakdong River Estuary", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, Vol. 20, No. 4, 382-388.
- [8] Park, J.H., 2015, "A study on the characteristics of ground-water-level fluctuation with a topography at the estuary sand bar", Ph.D. thesis, Pukyong National Univ., Korea.
- [9] Smith, J.M., Resio, D.T. and Zundel, A.K., 1999, "STWAVE: state spectral wave model", *Instruction Report CHL-99-1, US Army Engineer Waterways Experiment STATION, Vicksburg, MS, USA.*
- [10] Stieglitz, T., Taniguchi, M. and Neylon, S., 2008, "Spatial variability of submarine ground water discharge, Ubatuba, Brazil, Estuarine", *Estuar. Coast. Shelf S.*, Vol. 76, 493-500.
- [11] Taniguchi, M., Stieglitz, T. and Ishitobi, T., 2008, "Temporal variability of water quality of submarine ground water discharge in Ubatuba, Brazil, Estuarine", *Estuar. Coast. Shelf S.*, Vol. 76, 484-492.
- [12] Yoo, C.I., Yoon, H.S. and Park, H.B., 2008, "Correlation between Spring Weather Factors and Local Wind Waves in the Nakdong River Estuary, Korea", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, Vol. 14, No. 2, 119-125.
- [13] Yoon, H.S., Yoo, C.I., Kang, Y.K. and Ryu, C.R., 2007, "Delta Development in the Nakdong River Estuary: a Literature Survey", *J. Ocean Eng. Technol.*, Vol. 21, No. 2, 22-34.
- [14] Yoon, H.S., Yoo, C.I., Park, J.H. and Lee, I.C., 2013, "Field survey of the ground waterlevel fluctuation at natural sandy beach on Jinu-do", *Proc. of the KOSOMES Annual Spring Meeting*, 61-64.

Received 14 December 2015

1st Revised 14 January 2016, 2nd Revised 15 February 2016

Accepted 16 February 2016