

해안사구의 지하수위와 식생 발달의 공간적 특성 연구

박정현¹ · 윤한삼^{2,†} · 전용호³¹한국과학기술정보연구원²부경대학교 생태공학과³연안수공학연구소

Spatial Characteristics of Vegetation Development and Groundwater Level in Sand Dunes on a Natural Beach

JungHyun Park¹, Han-sam Yoon^{2,†} and Yong-Ho Jeon³¹Disaster Management HPC Technology Research Center, KISTI, Daejeon 34141, Korea²Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea³Coastal Hydro-Engineering Institute, Busan 48039, Korea

요 약

본 연구는 낙동강 하구사주 전면(해빈영역) 지하수위 변동 특성에 관한 연구로서 현장 관측에 기반한 실험적 논문이며, 외력에 의한 사주 지하수위 변동 및 식생대와의 상호작용을 중심으로 해석하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다. 강우 발생시 지하수위의 상승이 발생함을 알 수 있는데 하계 강우량이 20 mm/hour 이상인 경우 내부 수위는 20 cm 이상 급격히 상승하게 되며 상승한 지하수위는 무강우 상태일 때 서서히 감소한다. 또한 계절적 변화 특성을 살펴보면 전반적으로 하계(우기)에 상승하며 동계(건기)에 하강하는 경향을 보인다. 또한 3년간(2012년~2014년) 관측 결과로부터 시간 평균된 지하수위면(Average groundwater-table)은 평균해수면(M.S.L.) 보다 약 1.47 m 가량 상승한 상태였으며, 조간대 정점보다는 내측으로 갈수록 연평균 지하수위면이 상승하는 것으로 조사되었다. 아울러 사구 식생대는 공간상으로 차이를 보이며 해안사구의 유무는 식생대의 전진에 영향을 주고 있다. 즉, 해안선에서 이격거리 및 해빈경사에 따라 지하수위 변동이 공간적으로 동일하다면, 염수 침입시 사구의 유무는 식생대가 안정적으로 생육할 수 있는 지반조건 및 지하수위를 제공한다고 할 수 있다.

Abstract – Field observations were used to study the characteristics and influence of groundwater level fluctuations on vegetation development on the natural beach of a sandy barrier island, in the Nakdong River estuary. The spatial/temporal fluctuations of the groundwater level and the interactions with the external forces (weather, ocean wave and tide) were analyzed. The results indicated that when it rains the groundwater level rises. During summer, when precipitation intensity is greater than 20 mm/hour, it rose rapidly over 20 cm. Subsequently, it fell gradually during periods of no precipitation. Seasonal characteristics indicated that the groundwater level was high during the summer rainy season and tended to fall in the winter dry season. The time-averaged groundwater level, observed from the four observations over 3 years (2012-2014), was about 1.47 m, higher than mean sea level (M.S.L.). It was shown that the average annual groundwater level rises toward the land rather than showing intertidal patterns observation. Differences in the presence or absence of a coastal sand dunes affected the progress of vegetation. In other words, in environments of saltwater intrusion where the groundwater level varies, dependent on the distance from the shoreline and bottom slope, sand dunes can be provided to affect soil conditions and groundwater, so that vegetation can be grown reliably.

Keywords: Coastal dune(해안 사구), Beach-dune interaction(해빈-사구 상호작용), Vegetation(식생), Groundwater level(지하수위)

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

1. 서 론

모래로 이루어진 해안지역의 경우 해변의 침식문제와 이에 대한 대안이 매우 중요한 이슈가 되고 있다. 해변 침식문제의 증가는 기후변화, 해수면 상승과 같은 자연적 요인뿐만 아니라 실제 항만, 방조제, 해안도로 등의 해안개발에 따른 부작용이라는 지적도 많다. 하지만 침식에 관여하는 변수가 대단히 많고 그 프로세스가 복잡하기 때문에 근본적인 원인을 파악하는 것은 매우 어려운 일이다 (Choi *et al.*[2012]).

해안사구와 사빈 사이에서는 모래의 교환, 염분의 확산, 지하수 유동, 유기물의 이동 등이 발생하는데, 이러한 해빈-사구상호작용 (beach-dune interaction)은 해안사구의 중규모 형성과정에서 특히 중요한 과정-반응체계이다(Nordstrom *et al.*[1990]; Choi *et al.*[2012]).

일반적으로 해안사구의 형성은 사빈폭과 해양파랑의 파장과 상관관계가 있을 것으로 판단되며 이는 해안침식을 제어할 수 있는 기능이 있을 것으로 예견된다. 이러한 해안사구의 침식은 평상시 보다는 사리의 만조시 또는 태풍 통과와 같은 갑작스런 기상 사건이 일어날 때 바닷물의 수위 상승에 따라 해양파랑이 해안사구에 직접적으로 도달하기 때문에 발생하며, 자연 해변에서는 침식된 사빈과 사구가 일정한 시간이 흐르면 다시 원래의 지형단면을 회복하게 된다(Houser and Hamilton[2009]; Stone *et al.*[2004]). 결과적으로 사주섬의 해양 외력에 대한 응답 특성은 표사 이동으로 인한 침식 혹은 퇴적으로 귀결되지만 그 잉여 에너지는 사주 지반내의 지하수위 변동으로 표출된다(Park *et al.*[2014]).

자연해빈의 지하수위는 해양과 대기기상의 영향을 동시에 받으며 유동성 있는 지반(모래)의 이동이나 그 상부에 서식하는 식생의 성장에 영향을 주어 해빈의 생태적, 환경적, 수문학적인 부분에서 필수적인 요소이며(Park *et al.*[2014, 2016]), 식생의 안정적인 생육 및

발달에 큰 영향을 미치고 있다(Je *et al.*[2011]). 즉, 기후와 지형, 지질특성, 식생 등의 요인과 밀접한 관련이 있으며, 이러한 지하수위 변화는 기압변화, 조석, 증발산 등에 의한 주기적 특성과 파랑, 강수량 등에 의한 비주기적 특성이 혼합되어 나타나게 된다. 특히 연안섬(사주섬 등)에 위치하는 해안사구의 지하수위는 파랑과 조석의 영향을 강하게 받을 뿐만 아니라 강우 조건 및 하천수 유입의 복합적인 영향을 받는다.

본 연구 대상지역인 낙동강 하구역 진우도 전면해역은 해변경사 1/400 이상으로 매우 완만하고 낙동강으로부터 운반되는 퇴적물의 양이 풍부하며, 하천수 유입 및 해양파랑 환경조건에 따라 하구퇴적현상이 발생하기에 적합한 조건을 이루고 있다. 고파랑 내습시 파랑의 작용에 의해 진우도 전면해빈은 지속적으로 침식현상을 동반하지만 평형형 해빈상태를 유지하면서 하구 사주의 지속적인 발달을 보여주고 있는 지역이다(Fig. 1).

현재 낙동강 하구 사주는 해안침식에 대한 효과적 방안인 동시에 배후 연안 재해를 경감시키는 자연방파제로서의 역할도 수행하고 있는 것이다. 이는 피복식생의 성장에 영향을 주어 해빈 모래 및 지하수위 저장고의 가치 및 중요성이 대단히 높으며 또한 해안방재 측면에서 내습하는 파랑에너지를 소산시키는 주요 기제로 작용하기도 한다. 본 연구에서는 하구 사주의 침식방지 대책으로 진우도 전면해빈의 지형변화에 영향을 미치는 지하수위의 변동 특성을 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 지하수위 특성

일반적으로 지하수위의 물리·화학적 특성은 기압변화, 조석, 증발산 등에 의한 주기적 특성과 파랑, 강수량 등에 의한 비주기적 특

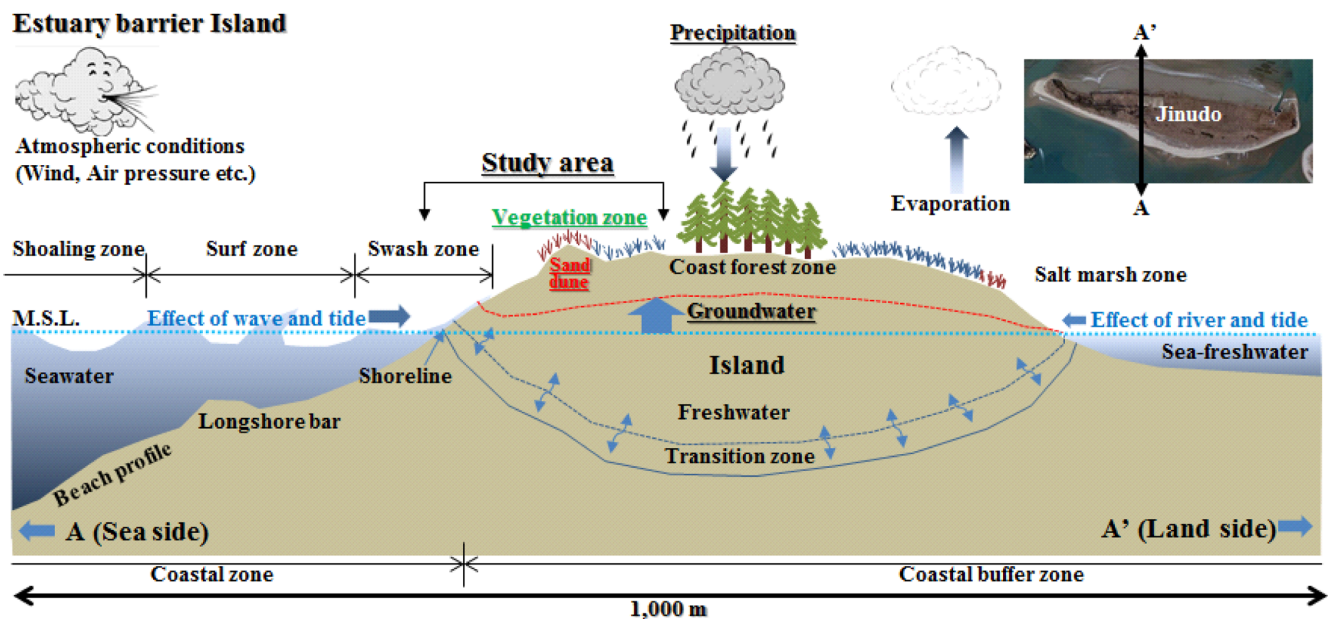


Fig. 1. Schematic diagram of environment and physical processes related to groundwater level at a sandy barrier island.

성이 중복되어 나타나게 된다. 지하수위(Groundwater)는 주요 외력조건(파랑, 조위 및 강우량 등)에 응답하여 민감하게 변동할 뿐만 아니라 지반내로 침투하여 변동하는 특성으로 인하여 특정 외력(중발랑, 비사 등)의 배제(排除)에도 용이(容易)하기 때문에 실제 해역에서 장기간의 지형과 지하수위 변동을 관측하여 분석하는 것 만으로도 고정도의 해안 외력변수(Coastal impact variables) 산정 및 평가에 중요한 지표(Index)가 될 수 있다.

Kang *et al.*[1997]은 해안 지하수위를 현장조사한 결과로부터 파랑과 조석에 의하여 평균 지하수위가 내륙쪽에 강우가 없는 경우에도 평균해수면(MSL: Mean Sea Level) 보다 1.0~2.0 m 상승하고 시간 평균된 지하수위면은 강우량에 의해 크게 변동을 하며 조위 상태와 특정 파랑에 의해 변동하는 특성을 보인다고 주장하였다.

이러한 해안 지하수위의 계측방법은 Piezometer나 CTD계 등의 전기량 및 전도도 특성을 이용하는 계측기기를 대수층이 있는 영역까지 관입한 후 공간적으로 분포시켜 분석하는 것이 일반적이다(Turner[1998]). 대수층의 특성은 지하수위 전도도 변동 특성으로 해석이 가능하며, 수온, 전기전도도, 압력의 3가지 인자가 취득 가능한 CTD계를 이용한다면 지하수위의 수리·화학적 특성에 대한 해석이 가능하다. 아울러 해변 단면적(Cross-shore direction)으로 일정한 이격거리를 두어 계측기를 분포시켜 관측할 경우 해안선 횡단 지하수위면의 해석도 가능하다(Park[2015]).

2.2 강우량 자료

일반적으로 지하수위 변동은 강우량에 가장 큰 영향을 받으며 이는 지반특성에 따라 지반 상태를 포화 혹은 불포화 상태로 분류하는데 중요하게 작용한다. 강우가 발생하여 포화도가 높은 상태의 사질토 해변은 지반내의 표사 간극이 액상화(Liquefaction)되어 간극수압을 상승시키며, 유효 응력 발생시 전단저항 감소로 해변 표사 지지력을 저감시킨다. 지지력이 저감된 해변은 조위 및 파랑에 의한 외력조건에 취약한 상태가 되기 때문에 강우량 발생과 더불어 고

조위 및 고파랑 내습시에는 지반내 해수 침투 및 침식이 발생할 수 있는 가능성이 높다.

대부분의 경우 태풍 등의 고파랑 내습시에는 강우를 동반하기 때문에 지하수위 변동에 대한 주요 외력 조건을 명확히 구분해내기 어려운 경우가 많으므로, 조위 및 파랑에 의한 지하수위 변동 분석에 앞서 강우량에 따른 지하수위 변동 해석은 필수적이다.

하지만 강우와 지하수위 변동은 강우량에 따라 지하수위 변동이 선형적인 형태로 발생한다고는 할 수 없기 때문에 시계열 분석 및 평균적인 변동치로 해석하여야 한다. 본 연구의 분석에 이용된 강우자료는 기상청의 지역별 상세관측자료(AWS: Automatic Weather Station, No.921)로서 가덕도(부산광역시 강서구 대항동) 무인 기상자료를 이용하였으며, 강수60(자료시간에서 과거 60분간 내린 강수의 양, mm) 자료를 매시간 자료로 취득하였다. 매시간 취득한 60분간 내린 강우량(강수60)은 강우강도(Rainfall intensity, mm/hour)로 해석하는 것이 가능하고, 강우관측 정점(가덕도 최남측 : 34°59'52"N, 128°49'55"E, 고도 : 73 m)은 진우도내 현장 시험구(35°03'59"N, 128°52'05"E)에서 약 8.5 km 떨어진 곳으로 같은 강우지역(Rainfall area)이라고 판단하여 동시간대의 지하수위 계측치와의 시계열 분석을 실시하였다. Table 1에는 상술한 가덕도와 더불어 인근 부산기상대의 동일 기간의 월별 강수량과 중발랑을 함께 제시하였다. 가덕도 기상 관측의 경우 중발랑에 대한 자료가 없기 때문에 부산기상대의 자료를 참조하였다.

본 연구 지역의 년평균(2012, 2013, 2014년) 강우량은 1,315.3 mm/year이었다. 연구지역의 평균 강우량(1,600 mm/year)에 비해 상대적으로 적은 양을 기록하였으며 그 중 2013년은 948.5 mm/year로서 연구지역 연평균 강우량의 절반에 가까웠다.

2.3 지하수위 현장조사

본 연구에서는 낙동강 하구 진우도 전면해역에 지하수위를 계측하기 위해 시험구를 선정하여 현장 관측을 실시하였다. 시험구는

Table 1. Comparison of monthly precipitation and evaporation observed at Gaduk-do and Busan (2012~2014year)

Month	Gaduk-do			Busan					
	Precipitation (0.1 mm)			Precipitation (0.1 mm)			Total evaporation (0.1 mm)		
	2012yr	2013yr	2014yr	2012yr	2013yr	2014yr	2012yr	2013yr	2014yr
JAN	120	230	135	195	225	96	543	663	696
FEB	220	680	335	221	466	441	615	762	541
MAR	1,115	855	1,190	1,739	937	1,367	985	1,046	860
APR	1,760	1,105	1,125	2,138	1,362	1,478	1,191	1,189	1,072
MAY	310	1,665	960	361	2,010	1,459	1,432	1,353	1,522
JUN	855	940	325	978	1,590	445	1,172	1,125	1,126
JUL	4,180	1,045	1,605	5,020	1,310	1,693	1,165	1,396	1,172
AUG	1,555	1,000	5,485	1,694	1,445	6,422	1,421	1,866	891
SEP	2,375	460	1,150	3,560	302	1,287	1,017	1,238	1,122
OCT	800	900	1,745	1,465	912	1,625	1,048	1,016	1,038
NOV	770	485	515	835	616	405	990	817	695
DEC	1,225	120	120	1,627	126	213	636	752	626
Total	15,285	9,485	14,690	19,833	11,301	16,931	12,215	13,223	11,361
Ave. 3 years		13,153.3			16,021.7			12,266.3	

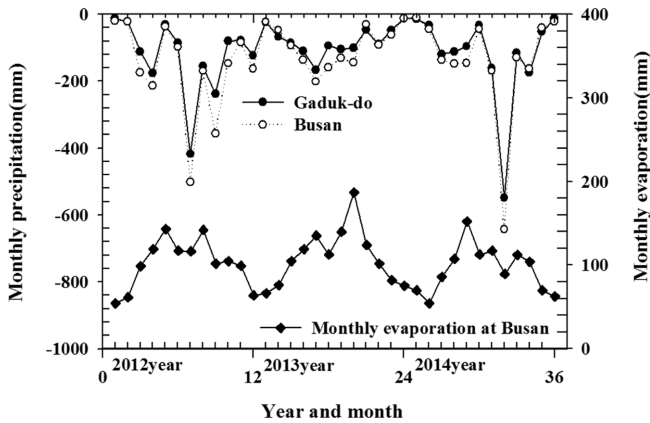


Fig. 2. Time series of monthly precipitation and evaporation observed at Gaduk-do and Busan weather stations.

중앙입경(d_{50})이 0.225 mm 이상의 사질토로 이루어진 해변이며 계측 센서의 위치는 평균해수면(M.S.L)보다 상부에 위치하므로 강우가 발생하게 되면 즉시 지하수위의 상승이 발생한다(Park[2015]).

지하수위 계측시 CTD계(CTD-Diver 80 m, Eijkelkamp)를 이용하였으며, Well의 제원은 1×3 cm의 직사각형의 작은 구멍들을 뚫은 PVC 파이프(D=12 cm, L=80 cm, t=0.5 cm) 내부에 철사 wire로 CTD계를 연결하였다. 계측 정점의 위치 및 센서부 심도는 Kang *et al.*[1997]의 논문을 참조하여 설정하였다. 연구해역은 평균 해수면(D.L.: 0.95 m)보다 지반고가 2~3 m 가량 높은 상태이므로(Yoon *et al.*, 2010) 정점별 지반고에 따라 센서부의 깊이를 1.2~1.8 m로 설정하였다. 각 정점별 CTD계 센서부의 수직 깊이를 보정하기 위하여 레벨기(Level instrument)로 정점마다 Well의 상부 Elevation level을 측정하였으며 Well의 길이에 따라 CTD계 센서부의 위치를 보정하였다(Fig. 2).

조사기간은 2012년 3월 1일부터 5회에 걸쳐 총 799일동안 10분 간격으로 데이터를 수집하였다. 보다 상세한 내용은 Park *et al.*[2016]의 논문을 참조하기 바란다.

2.4 피복식생대 현장조사

본 연구에서는 광파측거의와 DGPS를 사용하여 낙동강 하구역 진우도 전면 및 대상 시험구 해변 피복식생대 전선의 변화를 관찰하였다. 조사방법은 지하수위 계측 기간 동안에 진우도 서측에서 동측으로 이동하면서 위성좌표를 획득하였으며 이를 25 m간격으로 분할하여 그 변화를 비교하였다. 현장조사 및 분석 방법에 대한 보다 상세한 내용은 Yoon *et al.*[2014]의 논문을 참조하기 바란다. 본 논문에서 제시된 초기상태의 식생대선은 2008년 3월에 광파측거의로 관측한 식생대선이며(Yoon *et al.*[2014]), 2012년 1월과 6월, 2013년 6월, 2014년 5월, 2015년 5월에 DGPS를 이용하여 식생대 위치를 계측(Tracking)하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 지하수위 현장조사 결과

Fig. 4는 관측기간 동안(2012년 3월 1일부터 5회에 걸쳐 총 799일) 각 정점별 계측되어진 지하수위를 시간평균하여 평균 지하수위면(Average groundwater level)으로 나타낸 것이다. 또한 관측시점에서의 인근 가덕도 기상관측소에서 기록된 강우량 자료를 함께 도시하였다. 각 연도별로 계측되어진 값을 계절별로 구분하여 나타내었으며 결측된 계절인 경우(2013년 춘계)는 나타내지 않았다.

그림에서 살펴보면 전반적으로 강우가 발생하게 되면 즉시 지하수위의 상승이 발생함을 알 수 있다. 특히, Fig. 4(c)의 춘계 관측에서 강우량이 10 mm/hour 미만인 경우 지하수위는 완만한 형태의 상승 곡선을 나타내지만 Fig. 4(c)의 하계와 같이 강우량이 20 mm/hour 이상인 경우 지하수위는 20 cm 이상 급격히 상승하게 되며 상승한 지하수위는 무강우 상태일 때 서서히 감소한다. Fig. 4(a)의 하계와 같이 50 mm/hour 이상의 강우가 발생하는 시기에는 지하수위의 상승과 아울러 Well의 상부 지반고를 완전 포화시키는 상태가 되며 상승된 지하수위는 일정기간 지속되고 있음을 알 수 있다.

또한 계절적 변화 특성을 살펴보면 전반적으로 하계 우기에 상승하며 동계 건기에 하강하는 경향을 보인다. Fig. 4(b)의 동계 관

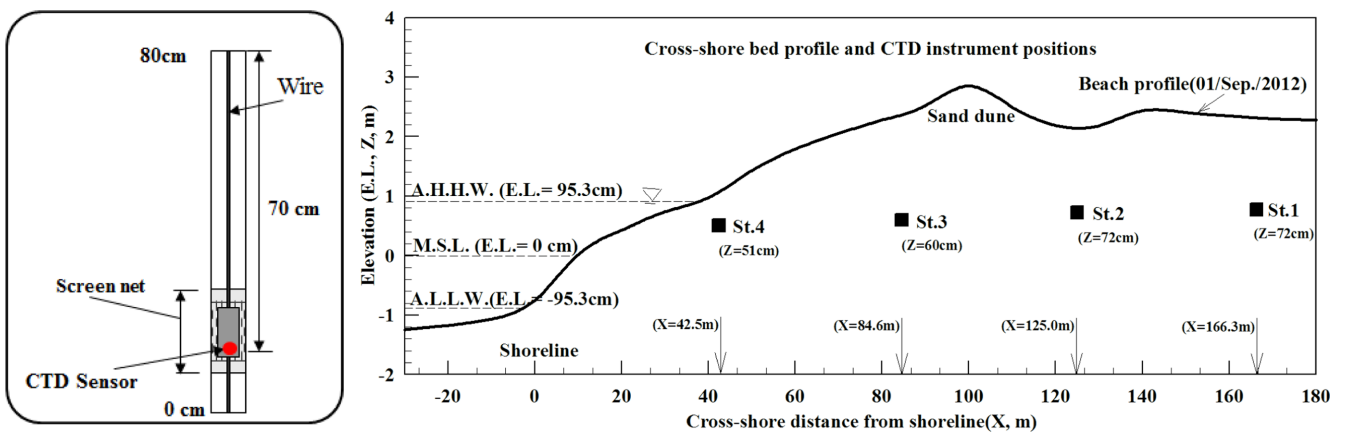
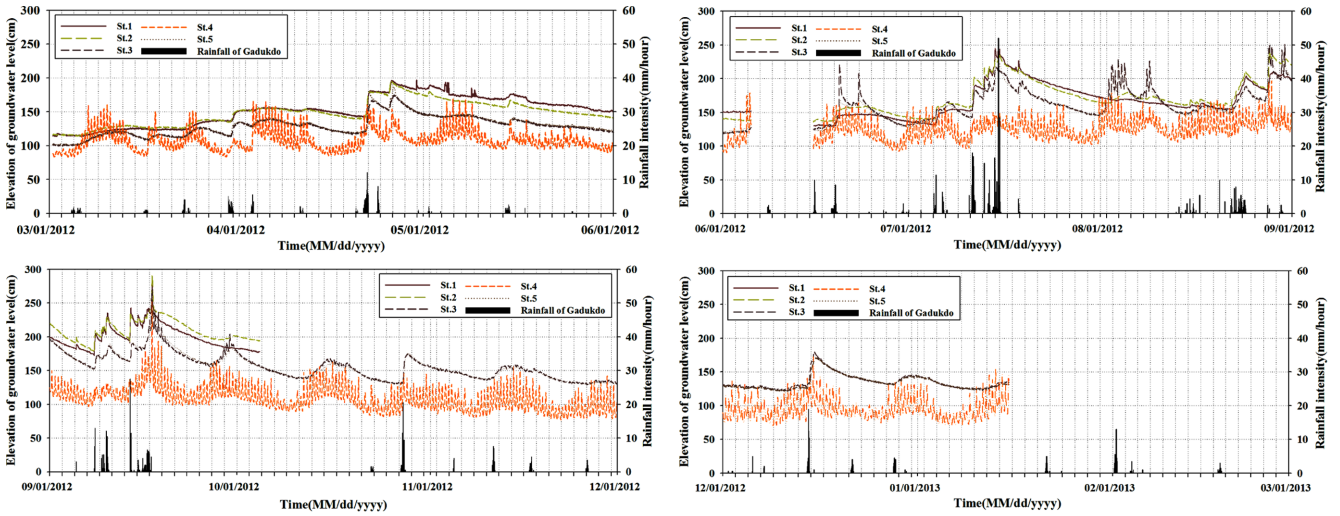
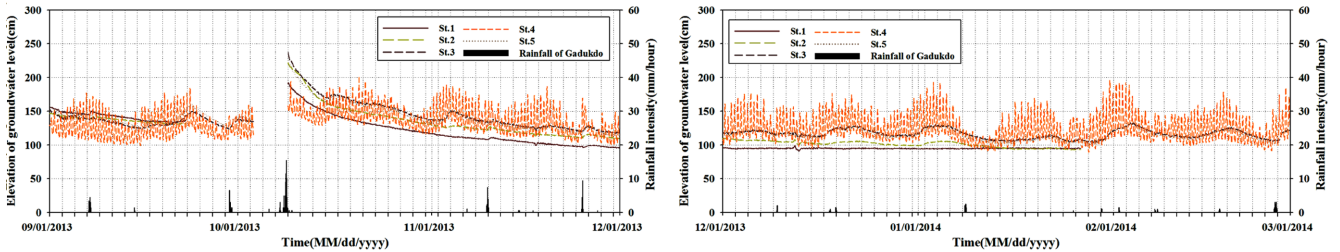
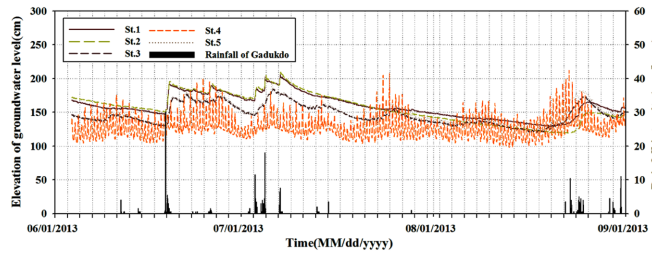


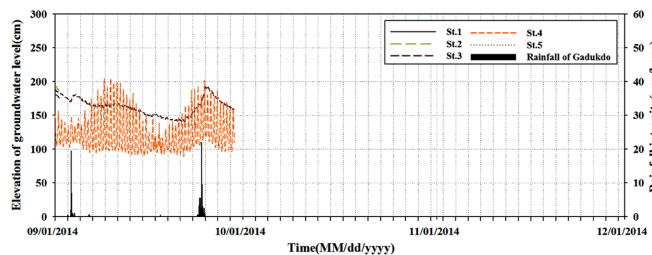
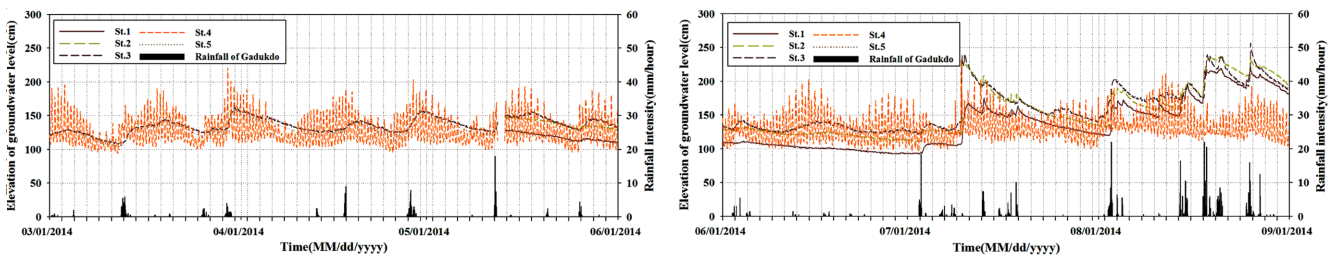
Fig. 3. Schematic diagram of groundwater monitoring wells and cross-shore bed profile providing distance between measurement stations and the coastline.



(a) 2012 year(from spring to winter season)



(b) 2013 year(from summer to winter season)



(c) 2014 year(from spring to autumn season)

Fig. 4. Time series of groundwater level and precipitation intensity (March 2012–October 2014).

Table 2. Annual mean groundwater level at each observation station

Year	Average groundwater level(m)			
	St.4	St.3	St.2	St.1
2012	1.10	1.46	1.70	1.66
2013	1.29	1.35	1.36	1.32
2014	1.28	1.49	1.59	1.42
Average	1.21	1.43	1.54	1.47

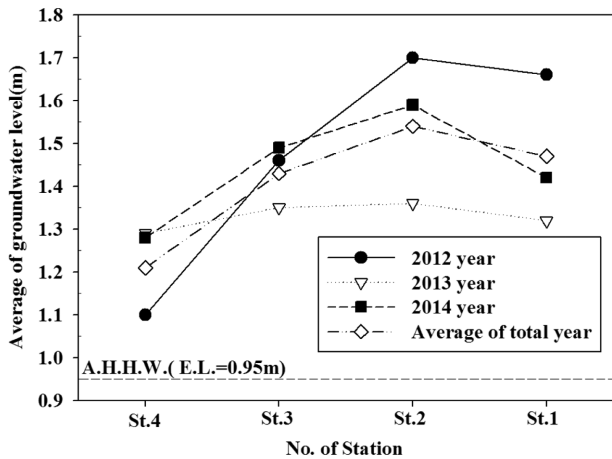


Fig. 5. Spatial distribution of yearly value of average groundwater level at each observation station.

측 결과를 살펴보면 무강우 시기에는 내측 정점(St.1~St.3)의 경우 큰 변동이 발생하지 않으며, 조간대 정점인 St.4의 조위와 파랑에 의한 영향에 따라서 변동하는 양상을 나타내고 있다.

각 정점에서 계속되어진 지하수위 관측값을 바탕으로 시간 평균된 연평균 지하수위를 산정하였다. 그 결과는 Table 2 및 Fig. 5와 같은데 연평균 지하수위가 정점별로 차이를 보인다. 조간대 정점인 St.4의 경우 1.10~1.29 m의 범위를, 내측 정점인 St.1의 경우 1.42~1.66 m로 조간대에서 내측으로 갈수록 연평균 지하수위면이 상승하는 것을 알 수 있다. 전체 관측기간동안의 평균 지하수위면의 상승량은 St.1이 1.47 m, St.2이 1.54 m, St.3이 1.43 m, St.1이 1.21 m이었다. 또한 Table 1의 강우량 자료와 함께 검토해 보면 관측기간 중 2013년에 가장 적은 강우량을 기록하였는데 이때 평균 지하수위면은 2012년

보다 약 0.3 m 하강하였다. 2014년(9월까지)에는 봄과 여름에 발생한 강우에 의해 0.1 m 가량 상승하였다. 결과적으로 관측기간 동안 지하수위는 평균해수면 보다 약 1.4 m 가량 상승한 상태를 보이고 있으며, 이는 시간 평균된 해안의 지하수위는 평균해수면 보다 1.0~2.0 m 높다고 밝힌 Kang *et al.*[1997]의 연구 결과와도 부합되는 결과이다.

3.2 피복식생대 현장조사 결과

하구 사주내의 지하수위면과 식생대의 발달 및 쇠퇴는 공간적으로 상이하며 그 분석 또한 광범위한 scale에서 진행되어야 한다. 하지만 전체 사주를 대상으로 장기간의 조사는 어려운 부분이 있다. 그러므로 앞서 제시된 결과를 연도별로 측정한 식생대선(Vegetation line)과의 분석을 통하여 지하수위 상태와 식생대선과의 분석을 수행하였다. 관측된 결과를 정리하면 Fig. 6과 같다.

먼저 Fig. 6(a)에서 초기 관측인 2008년과 비교하면 식생대 전선의 변화가 큰 곳은 서측 끝단부, 중앙부, 동측에 해당하며 서측 끝단으로부터 약 500 m지점은 거의 변동이 없는 식생대선을 나타낸다. 식생대선 변동이 가장 큰 폭으로 발생한 진우도 중앙부를 살펴보면, 2012년 1월에 식생대가 외해방향으로 최대로 전진하였으며 2012년 6월에 약 10 m 가량 후퇴하였고, 2012년 6월에 비해 2013년 6월에는 약 50 m 후퇴하였으며, 2013년에 비해 2014년 5월에는 같은 식생대선을 유지하였다.

또한 Fig. 6(b)의 지하수위 관측정점이 포함된 시험구의 소영역(Small area)를 확대하여 살펴보면 식생대가 전진하는 과정에서 St.2과 St.3의 중앙에 Sand dune이 발달하였다. 전반적으로 식생대는 외해로(남측으로) 전진 발달하는 경향을 보이고 있으나 일부 영역에서 전진-후퇴를 반복하는 것을 알 수 있다. 지하수위계를 설치한 단면(St.1~St.4)의 경우 2008년 초기 식생대선이 St.2에 위치하였으나 점차 외해로 전진하여 2015년 5월에는 St.3과 St.4의 중앙에 위치함을 알 수 있는데 결과적으로 식생대선이 약 60 m 전진하였음을 알 수 있다. A 지점에서 동측으로 약 40 m 이격된 대조군 정점인 St.5가 위치한 B 지점에서는 식생대가 A 지점에 비해 급격하게 변동하고 있는 것을 알 수 있다.

결과적으로 A와 B 지점의 차이는 해안 사구(Sand dune)의 유무

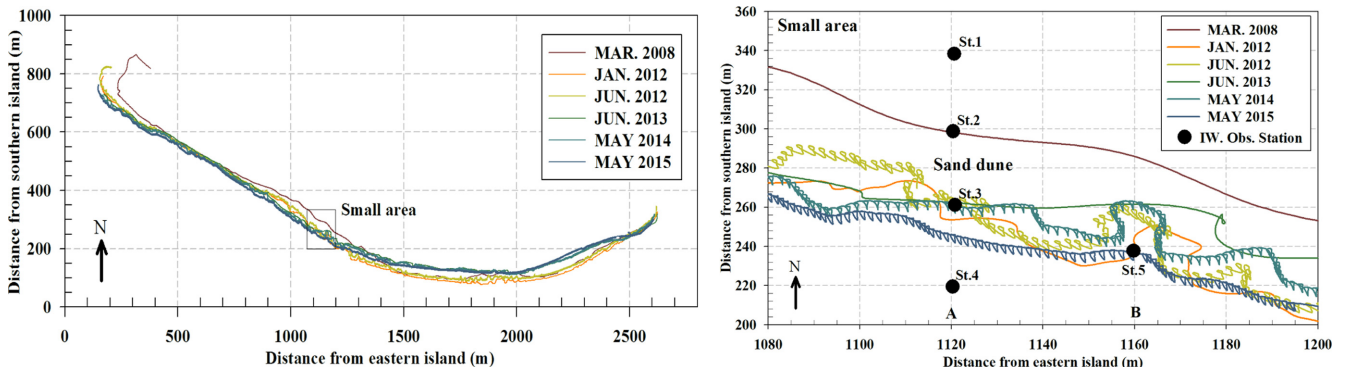


Fig. 6. Spatial-temporal distribution of vegetation line and sand dune position in the small area of Jinu-do.

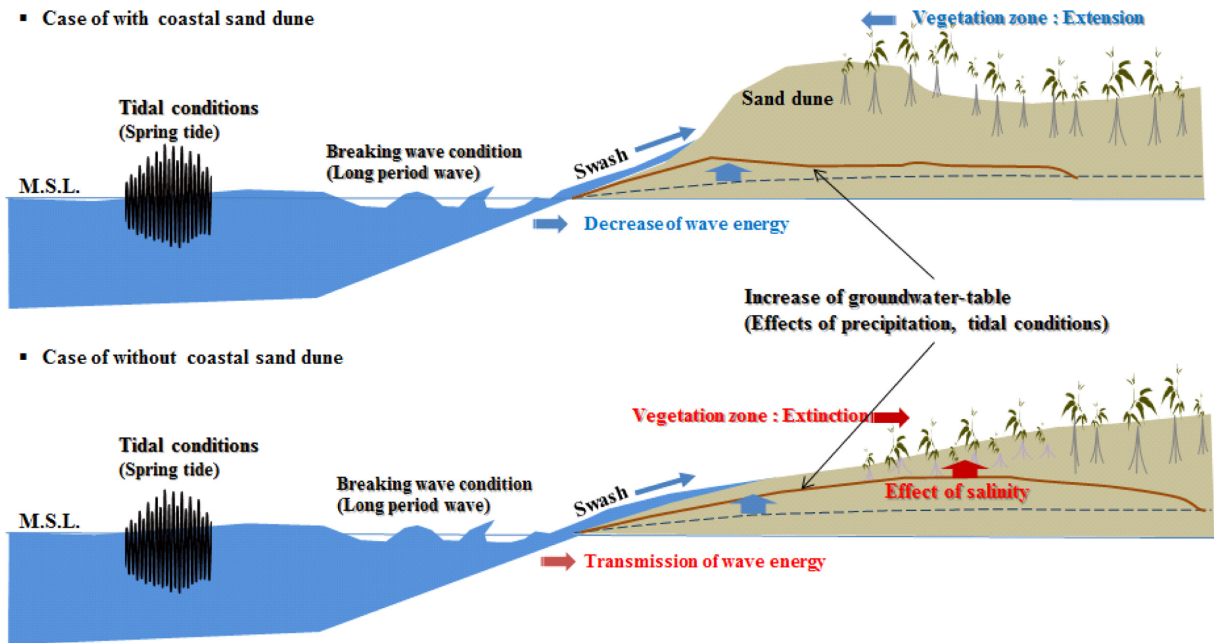


Fig. 7. Schematic diagram of the relationship between the vegetation line and groundwater level for cases with and without coastal sand dunes.

이다. A 지점에서 St.2와 St.3사이에서 존재하는 사구의 크기는 약 16.7 m²로서 Sand dune의 최대 지반고는 E.L.(+2.97 m)이었다. 하구 사주에서 해수·담수의 혼합 및 변동은 지하수위가 존재하는 지형(지반고)에 큰 영향을 받는다(Yoon *et al.*[2010]). St.2와 St.3은 해수가 침입하여 염분이 상승할 수 있는 영역이다. 하지만 식생대 선은 사구가 없는 B 지점에 비하면 A 지점이 상대적으로 작은 폭으로 변동하였다. 즉, 해안선에서 이격거리 및 해빈경사에 따라 지하수 변동이 공간적으로 동일하다면, 염수 침입시에 사구의 유무는 식생대가 안정적으로 생육할 수 있는 지반조건 및 지하수위를 제공한다고 할 수 있다.

3.3 지하수위와 피복식생대 상관성

하구 사주내에서 외력에 의한 해수·담수 전이대와 지하수위면의

수리·물리학적 변동은 해빈 상부 식생의 생육(Survival) 및 식생대 전선의 발달(Extension) 그리고 소멸(Extinction)에 영향을 미치는 요인이 된다(Park *et al.*[2016]), 즉, Fig. 8과 같이 파랑 또는 비사의 작용으로 해빈의 안정적인 지반고(Sandy platform)가 형성되면 그 하부에 지하수위면의 높이(H_{iw})에 따라 식생 뿌리와의 상호작용에 의해서 식생(Vegetation)은 생육할 수 있는 조건을 만들게 된다. 식생의 생육은 뿌리로부터 공급되는 지하수위 전기전도도(E.C., 염분)에 큰 영향을 받으며 지반고와 지하수위면과의 차이(r_i)가 커질수록 식생 생육 조건을 충족하게 되고 표층에서 식생 성장 및 식생대의 발달·전진이 만들어지는 메카니즘을 가진다고 할 수 있다. 식생 발달의 생태학적 기작에 대한 연구는 미흡한 실정이나 농어촌공사(2006)의 식생 생육조건에 대한 평균 전기전도도 실내 실험을 통해 제시된 결과를 살펴보면 Table 3과 같으며 본 시험구에서 조사된 정점별

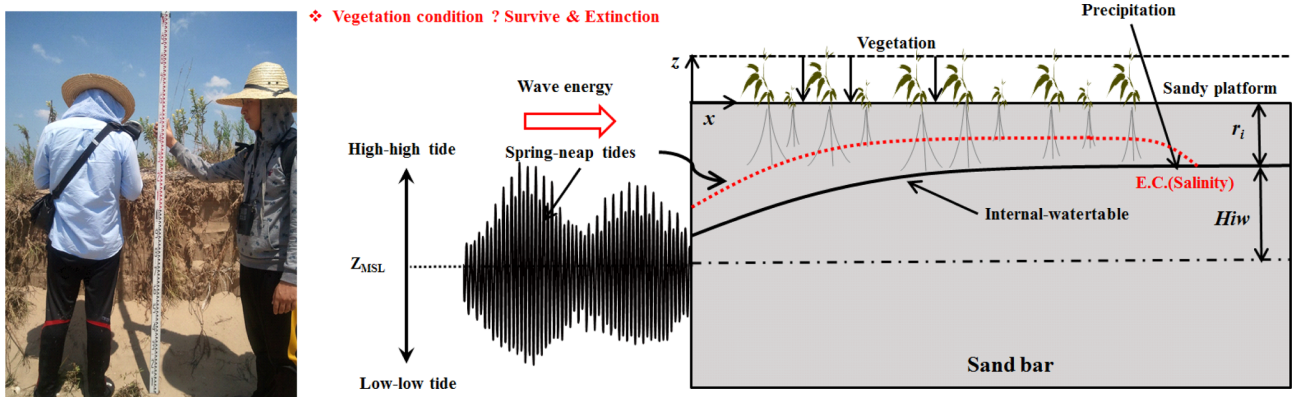


Fig. 8. Schematic diagram of the relationship between vegetation and groundwater level affected by the external ocean forces (tide and ocean wave) and weather conditions (precipitation and evaporation).

Table 3. Relationship between electrical conductivity (E.C.) and plant growth and average conductivity at stations, including data from the Korea Agricultural Corporation (2006)

This study area			Korea Agricultural Corporation (2006)	
Station	Obs. ave. E.C. (ms/cm)	Species of plant	E.C. (ms/cm)	Plants growth condition
St.1	0.27	Carex pumila	~2	All plants possible
St.2, St.5	3.65, 3.48	Cynodon dactylon	2~4	Salt-sensitive plants growth retardation
St.3	5.37	Phragmites communis	4~8	Salt-tolerant plants possible
			8~15	Most of plants growth retardation
St.4	31.17	Non-vegetation	15~	All plants impossible

평균 전기전도도(2012~2014)와 식생종(Yoon, 2010)을 분류하여 나타내었다. 제시된 기존 결과와 본 시험구의 평균전도도 및 식생 분포가 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 시험구에서 조사된 지하수위의 전기전도도는 하구 사주 해변 전면의 식물생장과 밀접한 연관이 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 낙동강 하구사주 전면(해빈영역) 지하수위 변동 특성에 관한 연구로서 현장 관측에 기반한 실험적 논문이며, 외력에 의한 사주 지하수위 변동 및 식생대와의 상호작용을 중심으로 해석하였다. 결과적으로 해안사구의 내부 지하수위의 변동이 표층의 식생대 성장과 발달에 영향을 미치고 이로 인해 사주 지형들이 외해 방향으로 지속적으로 발달한다고 할 수 있다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 강우가 발생하게 되면 즉시 지하수위의 상승이 발생함을 알 수 있는데 춘계 관측에서 강우량이 10 mm/hour 미만인 경우 내부 수위는 완만한 형태의 상승 곡선을, 하계와 같이 강우량이 20 mm/hour 이상인 경우 지하수위는 20 cm 이상 급격히 상승하게 되며 상승한 지하수위는 무강우 상태일 때 서서히 감소한다. 또한 계절적 변화 특성을 살펴보면 전반적으로 하계 우기에 상승하며 동계 건기에 하강하는 경향을 보인다.

(2) 3년간(2012년~2014년) 관측결과로부터 시간 평균된 지하수 위면(Average groundwater-table)은 평균해수면(M.S.L.) 보다 약 1.47 m 가량 상승한 상태였으며, 조간대 정점보다는 내측으로 갈수록 연평균 지하수위면이 상승하는 것으로 조사되었다.

(3) 사구 식생대는 공간상으로 차이를 보이며 해안사구의 유무는 식생대의 전진에 영향을 주고 있다. 즉, 해안선에서 이격거리 및 해빈경사에 따라 지하수위 변동이 공간적으로 동일하다면, 염수 침입 시에 사구의 유무는 식생대가 안정적으로 생육할 수 있는 기반조건 및 지하수위를 제공한다고 할 수 있다.

(4) 파랑 또는 비사의 작용으로 해변의 안정적인 지반고(Sandy platform)가 형성되면 그 하부에 지하수위면과의 높이(Hiw)가 결정되며 지반고와 지하수위면과의 차이(r_i)에서 식생 뿌리와 지하수위 간의 상호작용에 의해서 식생(Vegetation)은 생육할 수 있는 조건을 만들게 된다고 할 수 있다.

최종적으로 해안사구의 퇴적은 비사의 공급과 식생의 퇴적유도

과정에 따라 달라지며 지하수위에 따라서 식생의 성장이 결정될 수 있음을 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 본 연구결과는 향후 하구 또는 해안의 모래 포집기 설치, 해안 탐방로, 교목해안림 조성 등과 관련된 해안관리 정책을 수립하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 최근 해안경관의 질 증진 및 지진해일과 같은 재해 대비, 해안보전 등 사빈 침식과 해안선 후퇴 등의 문제를 해결하기 위해 초본으로 이루어진 사구성 식물 군락을 대상으로 하는 방풍림이나 방사림 조성 등에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Choi, K.H., Jung, P.M., Kim, Y.M. and Suh, M.H., 2012, "Erosion and Recovery of Coastal Dunes after Tropical Storms", J. Korean Geomorphological Association, Vol.19, No.1, 17-27.
- [2] Houser, C. and Hamilton, S., 2009, "Sensitivity of post-hurricane beach and dune recovery to event frequency", Earth Surface Processes and Landforms, 34, 613.
- [3] Je, Y.J., Yoon, H.S. and Park, J.H., 2011, "Spatio-temporal Variation of Foreshore Vegetation Belt Line on the Jinu-do Coast", Proceeding of the Annual Autumn Meeting, J. Environ. Sci. Int., 2295-2298.
- [4] 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.
- [5] Korea Rural Community Corporation, 2006, Research Project Report of Seawater Intrusion, GOVP 1200701077, 16-17.
- [6] Nordstorm, K.F., Psuty, N.P., and Carter, R.W.G, 1990, "Coastal dunes: form and process", Wiley, England.
- [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. Pukyong National University, Busan, Korea.
- [9] Park, J.H. and Yoon, H.S., 2016, "Variation Characteristics of the Groundwater Level of Natural Vegetation and Sandy Beaches", J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, Vol.19, No.1, 62-73.
- [10] Stone, G.W., Liu, B., Pepper, D.A., and Wang, P., 2004, "The importance of extratropical and tropical cyclones on the short-term

- evolution of barrier islands along the northern Gulf of Mexico, USA”, *Mar. Geol.*, 210, 63-78.
- [11] Turner, I.L., 1998, “Monitoring groundwater dynamics in the littoral zone at seasonal, storm, tide and swash frequencies”, *Coast. Eng.*, Vol.35, 1-16.
- [12] Yoon, H.S., Park, S.Y. and Yoo, C.I., 2010, “Review of the Functional Properties and Spatial Distribution of Coastal Sand Dunes in South Korea”, *J. Fish. Mar. Sci. Educ.*, Vol.22, No.2, 180-194.
- [13] Yoon, H.S. and Yoo, C.I., 2014, “Interaction between Coastal Debris and Vegetation Zone Line at a Natural Beach”, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, Vol.17, No.3, 224-235.

Received 16 May 2016

1st Revised 24 June 2016, 2nd Revised 25 July 2016

Accepted 8 August 2016