

해안선 변화로부터 연안표사량의 추정 Estimation of Longshore Sediment Transport Rates from Shoreline Changes

정지선* · 이정렬* · 김인호** · 권혁민***

Ji Sun Jung*, Jung Lyul Lee*, In Ho Kim** and Hyuck Min Kweon***

요 지 : 해안 방재 또는 연안 개발 목적으로 축조되는 해안 및 항만 구조물은 건설된 후 건설 전의 연안 토사 이동의 양상을 변화시켜 해안선 침식은 물론 해안 환경까지 영향을 미친다. 본 연구에서는 건설 후의 해안선 변화 예측을 위하여 필수적인 해안선 또는 해안 단면 자료를 이용하여 연안 표사 이동량을 예측하는 새로운 기법을 제시하고 하와이 Kailua 해변의 단면 관측 자료와 강릉 일대 해안선 관측 자료를 이용하여 연안 표사의 이동량 양상을 규명한다.

핵심용어 : 해안선 변화, 연안표사이동, DGPS

Abstract : Coastal and harbor structures, which are constructed for the beach protection and coastal zone development, often cause the severe beach erosion problem resulted from changes of longshore sediment transport. In this study, we present a new methodology to estimate the longshore sediment transport rates using the measured data of beach profiles or shorelines. The methods is applied for the prediction of longshore sediment transport rates along Kailua beach, Hawaii and shorelines in the vicinity of Anmok Harbor, Korea.

Keywords : shoreline change, longshore sediment transport, DGPS

1. 서 론

현재 우리나라는 주 5일제 근무 실시로 인한 여행 인구가 증가하고 있으며, 교통의 편리로 이동 시간이 단축되는 등 관광 산업 여건이 향상되어 연안의 경제적 수익이 높아지고 있는 실정이다. 그러나 우리나라는 지금까지 해역 공간을 해상수송, 항만 및 어업의 장으로 활용하고 있으면서도, 관광자원으로서의 연안의 경제적 잠재력을 경시하여 왔다. 그러므로 연안에서의 쾌적한 레저를 즐길 수 있는 여가 시설이 턱없이 부족한 형편이고, 부가가치가 높은 해변의 중요성이 경시되어 모래가 유실되는 해안이 우리나라에서도 사회적 문제가 될 만큼 그동안 연안 관리에 소홀하였다.

해빈은 파랑으로부터 육역의 보호와 레크리에이션을 포

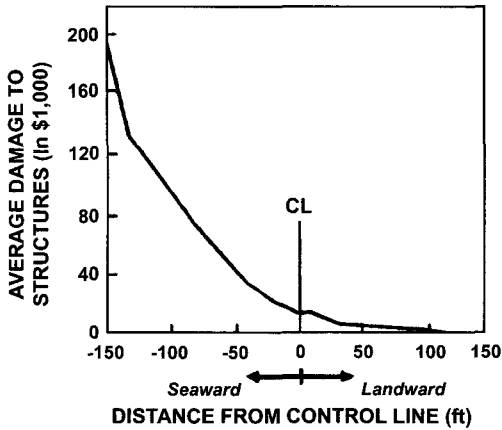
함한 광범위한 사회적 이득과 수많은 생물 종들의 서식지를 제공한다. 그러나 많은 해변들이 자연적 또는 인위적인 원인에 의한 침식의 압력에 노출되어 있다. 특히 한국 동해안의 경우 해안선 변형을 초래할 가능성이 많은 기존의 항만을 확장 또는 정온도 개선을 목적으로 하는 방파제 연장공사와 같은 토목 사업이 진행되어 왔다. 이러한 사업 시행 시 주기적인 연안 관측 시스템의 충분한 자료도 없이 형식적으로 해안선 변형에 대한 평가가 이루어지다 보니 평가 결과와는 달리 심각하게 해안선이 변형되어 연안 구조물이나 인근 주거환경을 위협하는 경우가 많이 발생하였다.

해빈의 넓은 폭은 파랑에너지를 흡수하여 태풍의 피해로부터 피해 규모를 줄이는 완충제 역할을 한다. Fig. 1(a)는 Shows(1978)에 의해 제시된 것으로 1975년에 미

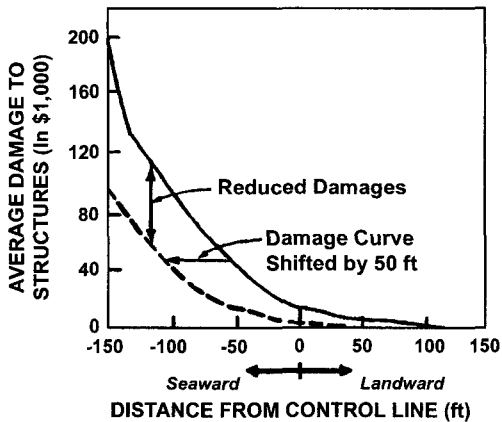
*성균관대학교 토목환경공학과(Corresponding author: Ji Sun Jung, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea. benedictus97@naver.com)

**동해대학교 토목공학과(Dept. of Civil Engineering, Donghae University)

***경주대학교 건설환경공학부(School of Construction and Environment Engineering, Gyeongju University)



(a) Average damage per structure vs distance from control line



(b) Effect of shifting the damage curve by 50 ft (15m)

Fig. 1. Illustrating the damage vs distance from the control line and the damage reduction resulting from an additional 50 feet (15 m) beach width.

국 Florida의 서쪽 해안선을 강타한 허리케인(태풍) Eloise 이후에 540개의 구조물들에서 경험한 피해의 측정결과를 나타낸다. Fig. 1(a)에서의 'CL'은 Florida주에서 재정되고 허가된 사법적인 '관리선(Control Line)'으로, 해안선과 평행하게 설정된 선이다. Fig. 1(b)는 양빈을 통하여 해빈의 폭을 50ft(15 m) 넓힐 경우, 양빈 된 해빈의 폭만큼 파랑에너지가 더 감소한다는 것을 의미하며, 이는 곧 피해곡선이 양빈 된 폭 만큼 이동하여 피해저감 효과가 발생함을 의미한다. 따라서 해빈의 폭이 축소되는 침식을 방관하는 것은 그만큼 재해의 규모가 커지도록 방관하는 것이다. 따라서 침식의 원인을 규명하여 그 원인을 해소 하든지 아니면 해빈의 폭을 인위적으로 확장하는 양빈을 적극적으로 검토하는 것이 필요하다.

지금까지 우리나라는 관리라는 개념이 없이 무분별하게 연안을 개발하여 왔기에 해안선 변형을 초래할 많은 문제점이 나타나고 있다. 해안선 변형의 원인을 파악하기 위해서는 파랑, 해안선 변화 또는 해안 단면 변화, 해저 질에 대한 기초 조사 등이 장기간에 걸쳐 이루어져야 하며, 침식 해안에는 주변 해안에 피해를 줄이는 환경친화적인 양빈을 수행하거나 불가피한 경우 돌제나 잠제 등과 같은 해안 구조물의 설치를 검토하여 더 이상의 해안선 침식을 막아야 한다. 그러나 사실 침식 압력에 효과적으로 대처하기 위한 대책은 극히 제한적이다. 본 연구에서는 효과적인 연안 관리를 위한 해안선 및 해안 단면의 주기적인 관측 자료를 이용하여 토사 이동량 예측을 위한 새로운 기법을 제시하고 하와이 Kailua 해빈의 단면 관측 자료와 강릉 일대 해안선 관측 자료를 이용하여 연안 표사의 이동량 양상을 파악한다.

2. 이 론

본 논문에서는 해안선 변형에 따른 연안 표사 이동량의 변화를 산출하기 위하여 다음 토사 보존식을 이용한다(Pelnard and Considere, 1956).

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial x} \tag{1}$$

여기서, Q 와 A 는 각각 연안 표사량, 해안 단면 면적이고, t 는 시간, x 는 해안선 방향을 의미한다. 해안 단면의 면적 A 는 Fig. 2에서와 같이 관측된 profile과 하단의 기준면에 의하여 이루어진 면적이므로 관측치 간의 변화 값을 구하기 위해서는 기준면 및 시작, 끝 점이 같도록 하여야 한다. 식 (1)을 이용하여 해안선 측량과 해안 단면 측량을 통해 얻어진 자료로부터 연안 표사 이동량을 산정하고자 한다. 식 (1)은 그동안 본 논문의 의도와는 달리 아래 경험식을 바탕으로 해안선의 변화를 추정하는 데 사용되어 왔다.

$$Q = K \frac{H_b^{2.5} \sqrt{g/\kappa}}{8(S-1)(1-p)} \sin 2\beta_b \tag{2}$$

위의 방정식에서 K 는 무차원의 소위 표사 이동 계수, H_b 는 쇄파고, g 는 중력가속도, κ 는 쇄파대 수심과 쇄파고의 비(0.78 정도), S 는 모래의 비중(2.65 정도), p 는 토사의 공극률(0.3-0.4)이다. β 는 해안선과 쇄파 점에서의 파봉선이 이루는 각이다.

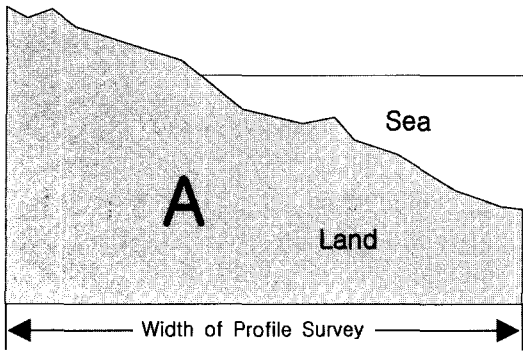


Fig. 2. Definition sketch of A (filled area; land part).

식 (1)은 다음과 같은 유한 차분식으로 차분될 수 있다.

$$\frac{A_i^{n+1} - A_i^n}{\Delta t} = \frac{Q_{i+1}^{n+1/2} - Q_i^{n+1/2}}{\Delta x_i} \quad (3)$$

미지수를 Q 로 두면 다음과 같이 해안 단면 자료로부터 얻는 A 로부터 산출될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ M \\ M \\ Q_N \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \Delta A_1 \\ \Delta x_2 \Delta A_2 \\ M \\ M \\ \Delta x_N \Delta A_N + Q_{N+1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)는 다음 장에 제시되는 미국 하와이, Oahu 섬의 Kailua 해변에서의 해안 단면 변화에 따른 토사 이동량을 산정하는데 사용된다.

해안선이 Δy 로 변하는 것에 기인하는 Q 를 예측하기 위하여 식 (4)는 다음과 같이 수정된다.

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ M \\ M \\ Q_N \end{bmatrix} = \frac{D_* \Delta x}{\Delta t} \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ M \\ M \\ \Delta y_N + Q_{N+1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, $\Delta A = D_* \times \Delta y$ 로 가정하고, $D_* = h_* + B$ 이다. 여기서 h_* 는 표사이동의 한계 수심, B 는 모래둔덕(berm)의 높이이다. 식 (5)는 강릉 일대의 해안선 자료로부터 표사 이동량을 산정하는데 사용된다.

적용 예로서 돌제(groin) 및 섬이 있는 단순한 경우의 해안선 변화로부터 어떻게 연안 표사의 이동이 일어나는지 살펴본다. Fig. 3은 돌제를 넘어 지나가는 표사의 이동 경향과 Q 의 변화량을 나타내고, Fig. 4는 섬 후면에서 표사의 이동 경향과 Q 의 변화량을 나타낸다. 따라서 돌제나 도류제 주변에서는 표사량이 작아졌다 커지며 천퇴와 같이 수심이 낮은 지형이 존재하는 경우는 그 영향으로 표사가 모이는 경향을 보여준다.

3. 적 용

3.1 해빈단면 자료에의 적용: Hawaii의 Kailua 해변

Kailua 해변은 Fig. 5에 도시된 바와 같이 하와이, Oahu 섬의 Windward coast의 south에 위치하고 있다. Fig. 6은 Kailua 해변에서 해안 단면이 측량된 지점을 나타낸다. 하와이 대학 Fletcher박사의 연구 팀에 의한 장기간의 현장 관측과 분석에 의하면, Kailua 해변의 모래는 장기간에 걸쳐 퇴적된 양상을 보이고, 해안선은 연간 0.5m씩 육지와 반대 방향으로 전진해 가는 양상을 보인다(Norcross et al., 2002).

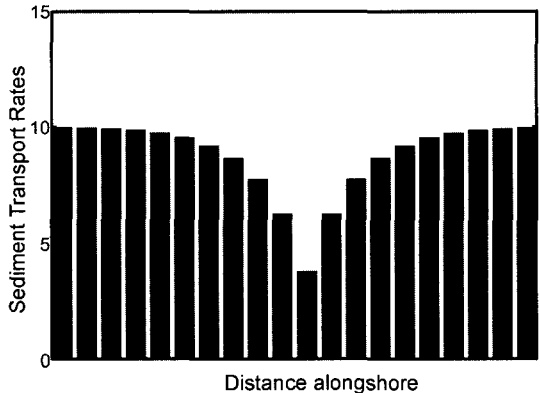
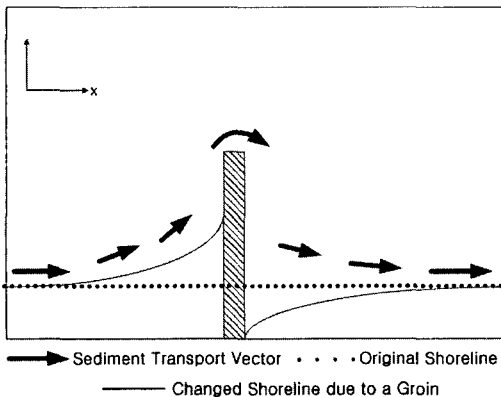


Fig. 3. Sediment transport patterns around a groin & variation of in quantity.

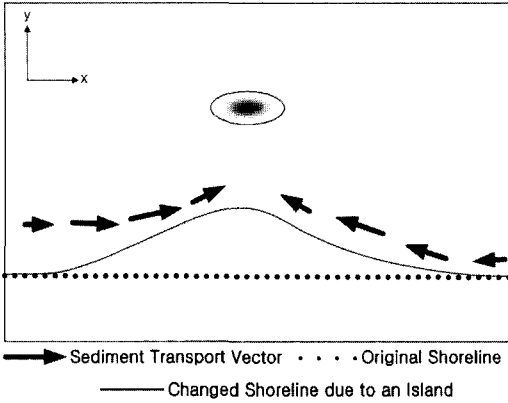
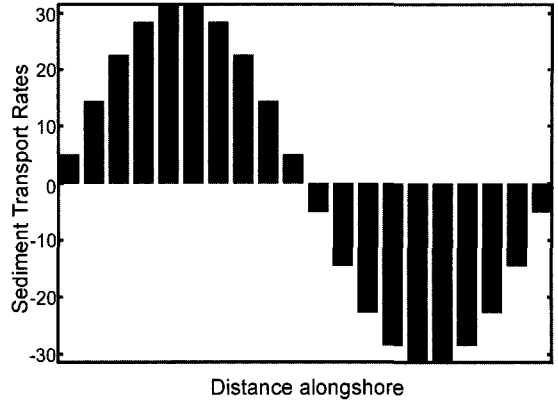


Fig. 4. Sediment transport patterns behind an island & variation of in quantity ('+' : right-directed; '-' : left-directed).



Oahu Beach Profile Locations

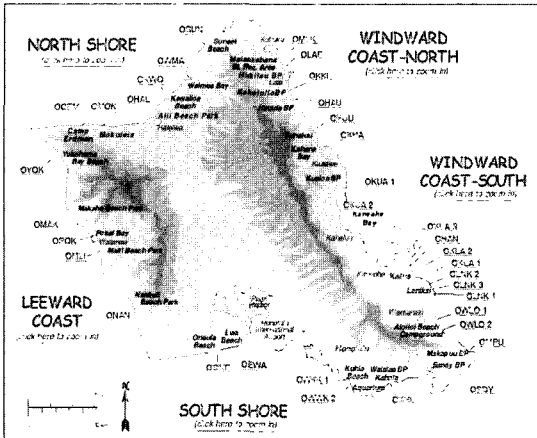


Fig. 5. Location of beach profile measurements in Oahu Island.

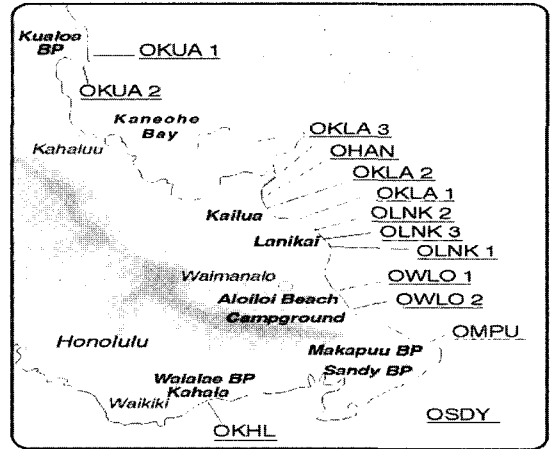


Fig. 6. Windward south coast.

Kailua 해변에 영향을 미치는 파랑은 남동 무역풍의 영향을 받아 발생한 약 1.5~3 m의 파고와 5~8 sec의 주기를 가진 너울이 지배적이다. 겨울철 동안에는, 매우 강력한 겨울철 폭풍에 의해 발생한 3~5 m의 파고와 10~17 sec의 주기를 가진 북 태평양 너울 또한 Kailua 해변에 영향을 준다.

하와이 근해의 심해 파랑 조건은 NOAA에서 통계학적인 분석을 수행하여 얻은 자료에 기초하였다. 이는 3군데 지역에서 관측 부이를 띄워 측정된 자료와 비교하여 검증된 자료이다. 2002년의 파랑 자료를 분석한 결과 하와이의 연안 지역에서는 여름과 겨울철 파랑 특성이 특이하다. 유의 파고, 주기 그리고 파향에 대한 월별 변화량이 Fig. 7(a)에 도시되었고, 2002년 5월의 파랑 자료에 대한 상관 분포는 Fig. 7(b)에 도시되었다.

본 논문에 적용된 Kailua해변의 관측 지점은 OKLA3, OHAN, OKLA2 그리고 OKLA1으로 최근 것인 1998년 5월부터 1999년 6월까지 1년간의 자료를 이용하였다. 그 중 변화가 뚜렷한 4개 지역에 대한 해안 단면도와 계산된 해빈 단면의 면적 변화를 Fig. 8에 도시한다.

Inverse method에 의해 얻어진 연간 토사 이동 경향은 Fig. 9에 도시되었다. 이러한 경향은 일년 중 약 75%를 차지하는 남동 무역풍에 의해 생성된 너울에 의해 발생한 것으로 사료되며, Fig. 9에 도시된 바와 같이 관측 기간동안 토사 이동이 남쪽에서 북쪽으로 향함을 알 수 있다. 즉, OKLA1에서는 유입 토사량보다 유출 토사 이동량이 증가하며 해안선 침식이 발생하고 OKLA3에서는 유입 토사량보다 유출 토사량이 감소하며 퇴적이 발생하고 있다.

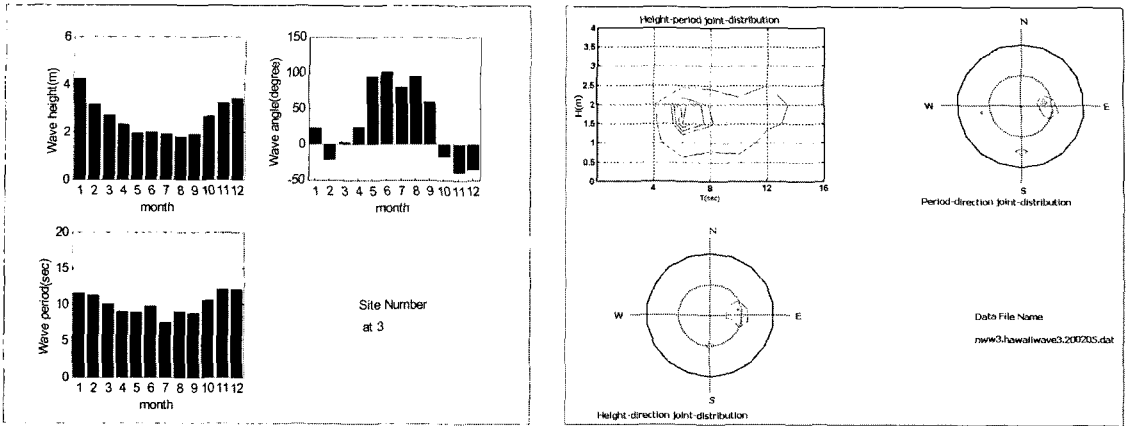


Fig. 7. (a) Monthly variations, (b) joint distributions for wave data of May, 2002.

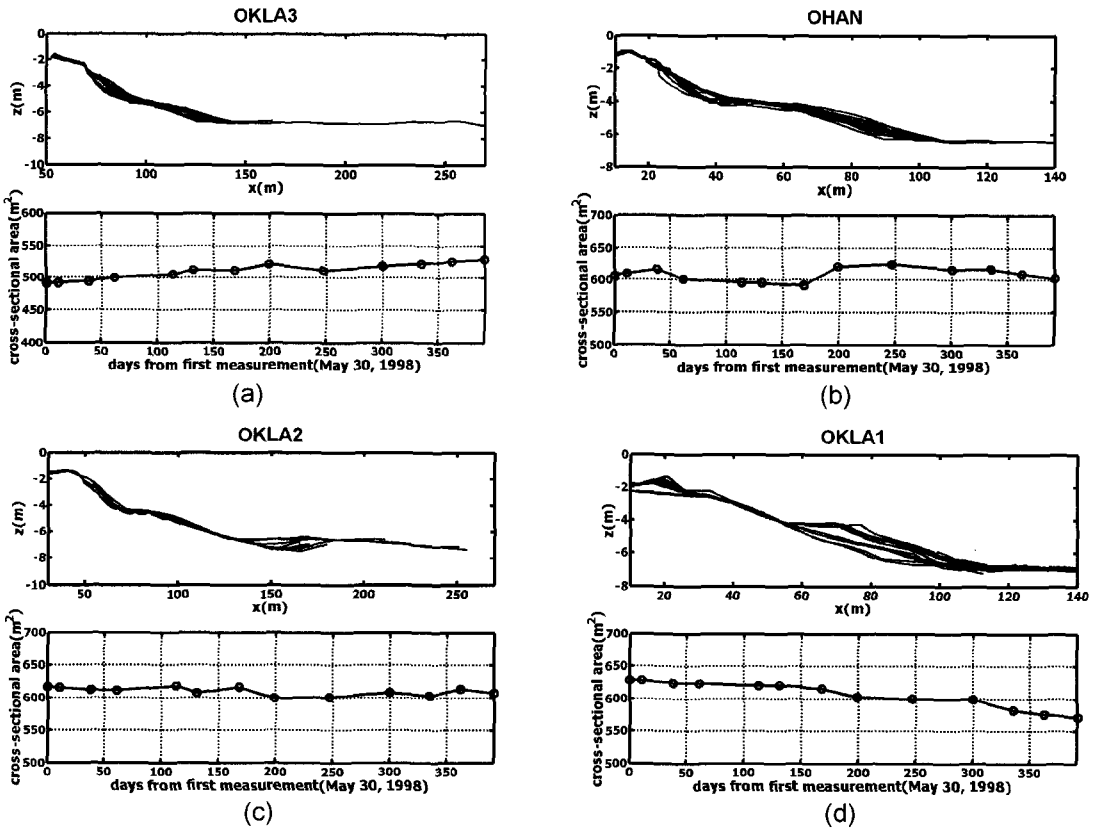


Fig. 8. Beach profiles and time variation of calculated areas; (a) OKLA3, (b) OHAN, (c) OKLA2, (d) OKLA1.

3.2 해안선 자료에의 적용: 강릉 연안

본 연구의 대상 지역인 강릉 연안 일대의 추계 해안선 변화를 추정하기 위하여 DGPS를 휴대하고 동해안 강릉의 경포해수욕장 북단을 시작으로 강문~안목항~남항진 ~

염전까지 약 12 km의 해안을 따라 swash zone의 중간을 걸으면서 약 1초간격의 해안선 경·위도 좌표 자료를 취득하였다.

해안선 측량은 THALES사의 Ashtech G12 Board를

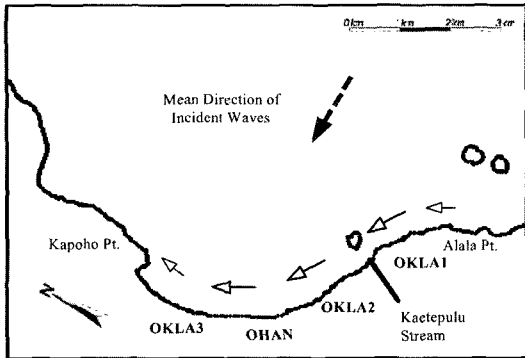


Fig. 9. Longshore pattern of sediment transport.

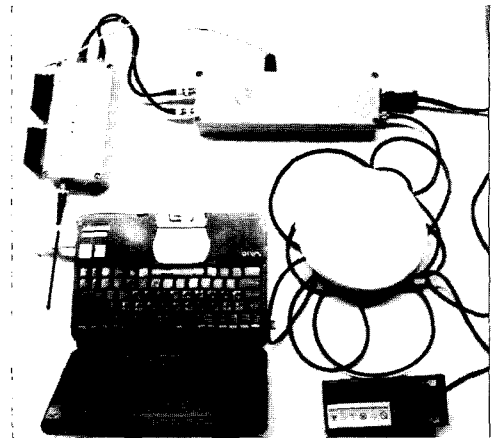
Table 1. Information of DGPS

Ashtech G12 board	
Number of receiver	12-channel
Updating rate	20hz for real-time
Type of output	Position & Raw data
Differential accuracy	Better than 40 cm
Re-acquisition time	Less than 2 seconds

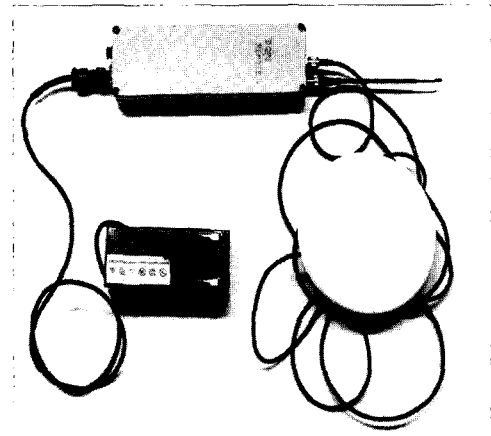
장착한 DGPS를 사용하여 실시하였다. DGPS 기계에 대한 정보는 Table 1에 제시하였고, 설치된 모습은 Fig. 10과 같다. Ashtech G12 Board로 제작된 DGPS의 측정 오차는 위성이 6개 이상 수신되었을 경우 약 40 cm 이내로 들어오는 것으로 보고되었다. 본 연구 대상 지역이 해안가이므로 주변에 전파를 방해할 구조물이 없다고 판단되며, 매 측정 시 위성의 수신 개수가 8~10개 정도이었으므로 본 연구에서 사용된 자료는 오차 범위가 40 cm이내인 것으로 사료된다.

측량 방법은 DGPS의 Base(Fig. 10(a))를 기준점에 설치하고 DGPS의 Remote(Fig. 10(b))를 휴대하여 해안선을 따라 걸으면서 측정하고자 하는 지역의 경·위도 좌표 자료를 수신받는다.

이 때 동일 지역을 주기적으로 측량을 할 때 방파제나 돌제와 같은 고정 구조물을 매번 측량하여 매 측량시의 오차 발생 정도를 확인하였다. Fig. 11은 고정 구조물인 안목항의 측량 결과를 비교하기 위하여 도시한 것으로 한 걸음의 폭에 해당되는 1 m이내의 오차를 보이고 있다. 첫 번째 측량은 2004년 8월 28일에 실시하였고 41일 후인 2004년 10월 8일에 두 번째 측량을 실시하였다. 두 관측 결과가 Fig. 12와 같이 함께 도시되었다. 즉, 41일 동안의 추계 해안선의 변화를 보여준다. Fig. 13은 300 m 간격으로 산출된 해안선 변화 폭을 도시한 것으로 본 연구



(a)



(b)

Fig. 10. Images of DGPS base with potable computer (a) and DGPS remote (b).

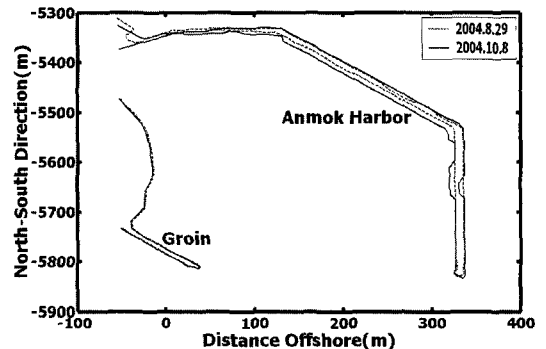


Fig. 11. DGPS measurements of Anmok harbor and groin.

에서 제시된 inverse method의 입력인 해안선 변화 폭, Δy 이다. 경포해수욕장 남단에서의 해안선 후퇴, 강문에서

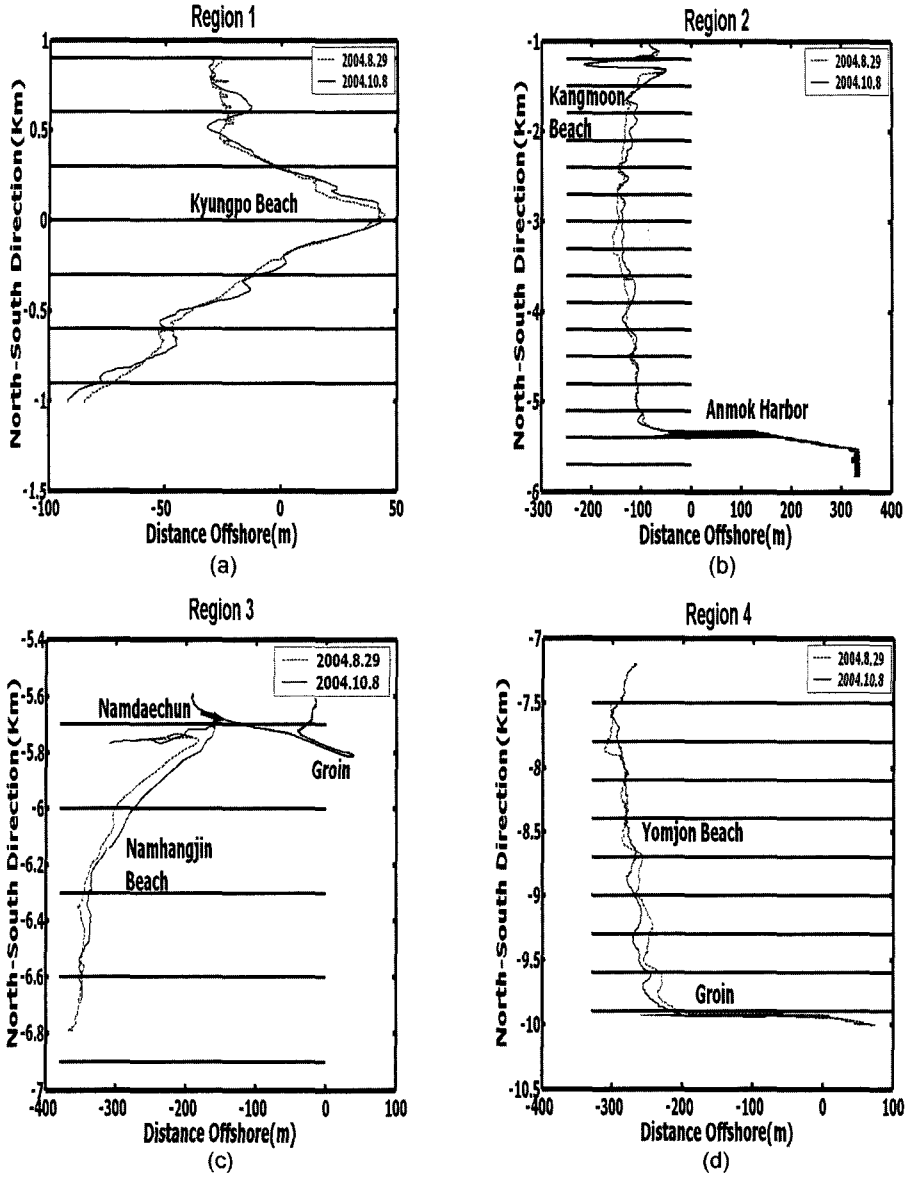


Fig. 12. Comparison between shoreline data measured at Aug. 29, and Oct. 8, 2004.

의 해안선 전진, 그리고 염전에서 해안선 후퇴 등으로 이루어 관측기간 동안 남쪽에서 북쪽으로의 연안 표사 이동이 발생한 것으로 사료된다. 안목항에서의 약최고만조위는 0.3732 m이고, 평균만조위(MHWL)는 0.2501 m이며, 평균해면은 약 0.1866 m로 대조차가 0.154 m 정도이지만 swash zone의 경사(강문: 9°, 경포해수욕장 남단: 11.2°, 안목항 북단: 12°, 남항진: 13.5°)를 통하여 MHWL로 보정하였으며 파랑은 쇄파고 1 m 이내인 경우에 관측이 수

행되었고 파고의 관측 및 setup에 대한 예측 기술의 신뢰가 아직 낮아 무시되었다. 해안선의 정의는 다양하지만 본 연구에서는 가장 보편적인 MHWL에서의 경계를 해안선으로 하였다.

Fig. 14는 2001년과 2002년 그리고 2003년의 9월 심해파랑 산출 자료를 분석한 결과로서 정복을 기준으로 강릉 지역의 해안선에 수직인 법선이 시계방향으로 45° 정도 기울어진 것을 고려하면 심해 입사파와의 각도는 거

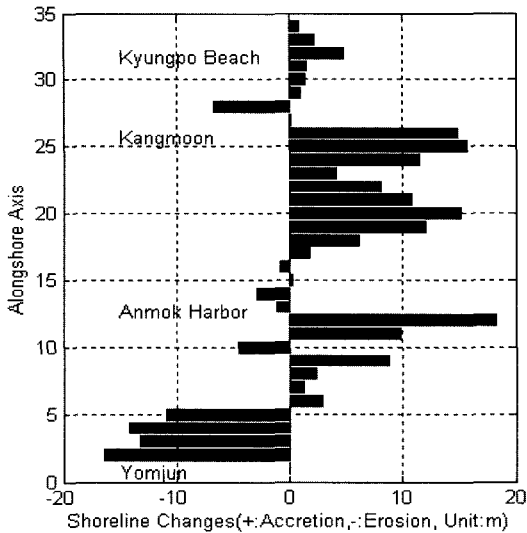


Fig. 13. Shoreline changes between Aug. 28 and Oct. 8, 2004.

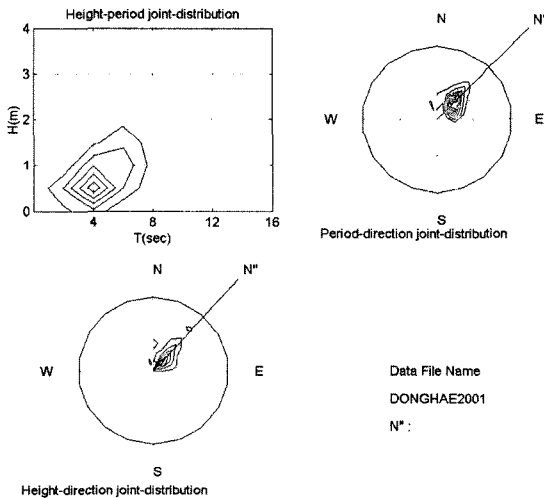


Fig. 14. Joint distributions for wave data of September from 2001 to 2003.

의 같이 보이나 현장 관측 결과 주 입사 파향이 약간 더 커서(시계방향으로) 토사의 이동이 남쪽에서 북쪽으로 이동되는 것으로 판단된다.

관측된 해안선 자료를 식 (5)에 적용하여 Fig. 15와 같은 결과를 얻었다. 모래 둔덕 높이 B 와 표사이동의 한계 수심 h_s 는 합쳐서 15m로 가정하였다. Fig. 16은 연안을 따라 산출된 토사이동을 벡터를 도시한 것이다. 300m 정도의 도류제가 놓인 염전과 같은 경우 남단으로부터의 토사 유입은 거의 차단되는 것으로 판단되며 관측 기간 동

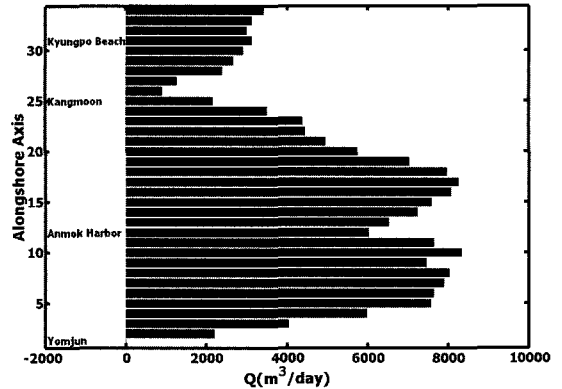


Fig. 15. Longshore transport rates (positive: north directed).

안 해안선에 대하여 평균적으로 북쪽을 향하는 파향으로 인하여 염전 해안은 상당한 해안 침식이 일어나고 있다. 반면 안목항 남단에 위치한 남항진에서는 안목항으로 인하여 연안토사 이동이 차단되어 해안선 전진이 발생하였다. 경포호 도류제를 통한 우회 토사 이동량은 도류제 남측에 최근 건설된 돌제의 규모로 보아 타당하다고 판단되나 안목항을 통한 우회 토사 이동량이 크게 평가되고 있다. 이 결과는 현실적으로 납득하기 힘든 것으로 해변 단면 측량으로부터 얻은 결과가 아니고 해변단면을 이상적으로 가정한 해안선에 의한 결과로부터 기인한 것으로 판단되며 지속적인 관측으로부터 그 이유를 분석하는 것이 바람직하다고 본다. 또한 남대천으로부터 유입되는 토사량을 관측하여 이를 반영하는 것도 필요할 것이다. 파고가 비교적 작은 여름철의 경우 해안선의 전진이 이루어지는 것을 감안하여 기간 내 전진 폭을 전 구간에 일정하게 3.5m로 취하였고 그 결과 일부 문제가 있지만 Fig. 15와 같이 비교적 타당한 결과가 도출되었다. Kailua와 같이 해변단면 측량자료로부터 결과가 도출되었다면 이와 같은 보정은 불필요하다. 따라서 우리나라도 부분적으로나마 해변단면 측량을 병행해 나가는 것이 바람직하다.

4. 결 론

본 연구에서는 해안 환경의 변화로 인하여 유발되는 해안선 변화의 원인을 규명하기 위하여 해안선 또는 해안 단면 자료를 이용하여 연안 표사 이동량을 예측하는 새로운 기법인 간단한 inverse 기법을 제시하였다. 적용 예로서 하와이 Kailua 해변의 단면 관측 자료와 강릉 일대 해안선 관측 자료를 이용하여 연안표사의 이동량 양상을

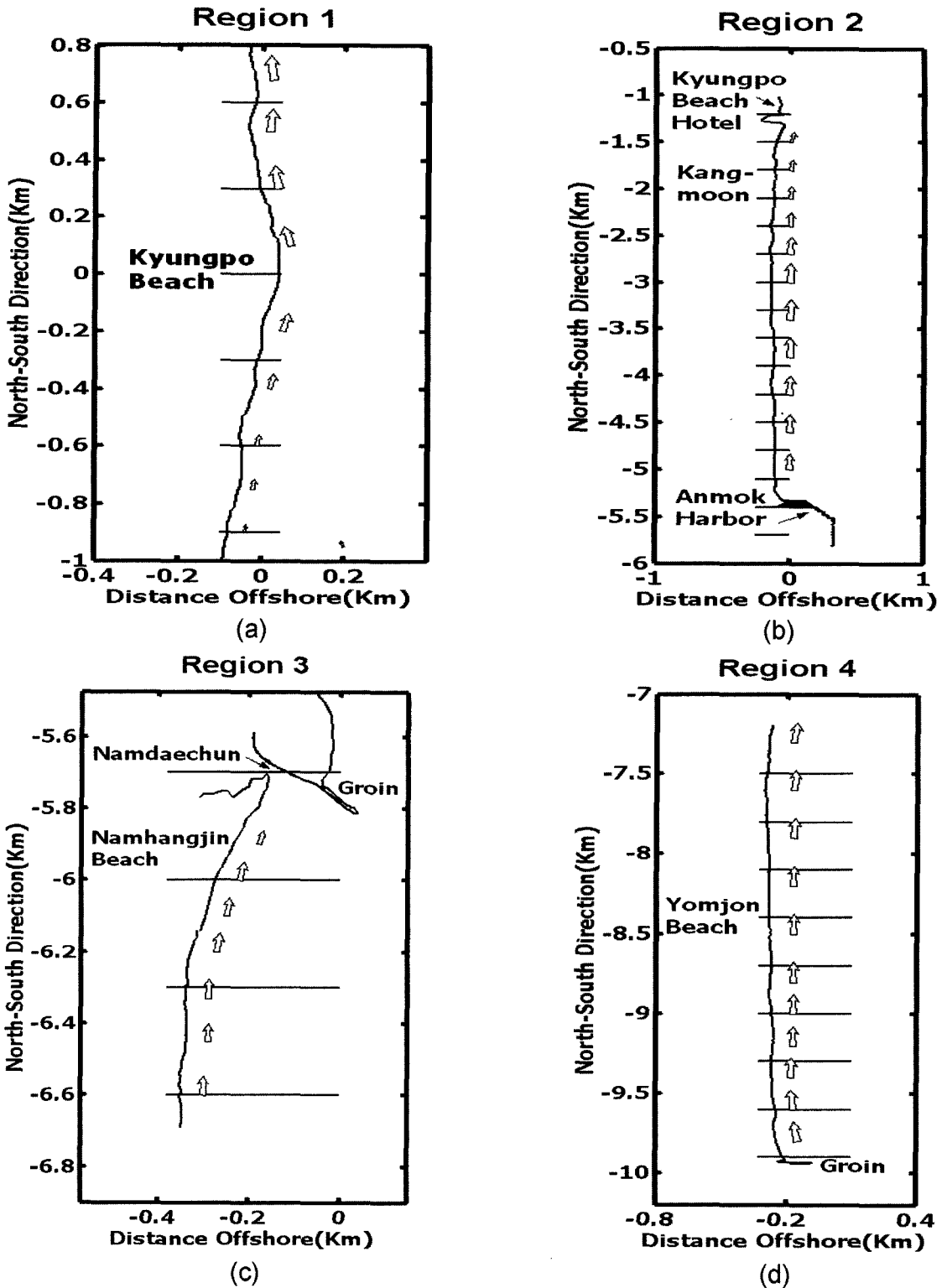


Fig. 16. Alongshore patterns of sediment transport from Kyungpo beach to Yomjon.

규명하였다.

경포 해수욕장 북단으로부터 염전까지 12 Km에 이르는 강릉 일대의 해안선 관측 결과, 강문의 방사제, 안목항, 염전 도류제 등으로 인하여 단기적 또는 계절적 변화가 상당히 이루어지는 것을 확인하였다. 관측 기간이 태풍의 영향을 받은 기간이라 그 변화 폭이 클 수 있었겠지만 최대 20 m를 상회하는 해안선 전진 및 침식이 관측되었다. 염전 도류제를 우회(bypassing)하여 북쪽으로 이동하는 토사량은 미미한 것으로 판단되며 2004년 8월 말부터 11월 초까지의 관측 기간동안 토사의 이동이 전반적으로 북측으로 이루어지고 있었으며 그 결과, 돌제나 방사제의 남측 해안선이 전진하고 북측 해안선이 후퇴하는 결과를 초래하고 있었다. 또한 자료가 불충분하여 단언할 수 없지만 여름철의 잔잔한 파랑으로 인하여 onshore로의 횡적인(cross-shore) 토사이동이 유발되어 전반적으로 3~4 m 가량의 해안선 전진이 이루어진 것으로 판단된다. 이를 명확히 파악하기 위해서는 해빈 단면 관측이 필요하다.

앞으로도 해안선 및 해빈단면 관측이 지속되어 좀 더 다양한 장·단기 변화 양상을 파악할 자료가 충분히 축적되어야 하겠다. 또한 관측 방법이 손쉽고 추후 자료의 활용도 측면에서도 우수한 점을 감안하면 체계적인 해안선 통합관리의 기본 조사로서 동해안은 물론 전 연안역에 빠른 시일 안에 우선적으로라도 DGPS 측량을 실시

하여 전 연안의 토사이동 메커니즘을 파악하는 것이 필요하다.

참고문헌

- 김인호, 이정렬 (2004). 동해 안목항 주변 연안 토사 이동. 한국해양·해양공학회지 16(2), 108-119.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (2002). Coastal processes with engineering applications.
- Liu, J.J. (2003). Numerical simulation of coastal current and sediment transport around Oahu Island: Honolulu, Hawaii. MS Thesis, University of Hawaii at Manoa.
- Norcross, Z.M., Fletcher, C.H. and Merrifield, M. (2002). Annual and interannual changes on a reef-fringed pocket beach: Kailua Bay, Hawaii. *Marine Geology*, 190, 553-580.
- Pelnard-Considere, R. (1956). Essai de theorie de l'evolution des formes de rivage en plages de sable et de galets. 4th Journees de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, Rapport No.1.
- Shows, E.Q. (1978). Florida's Setback Line - An effort to regulate beachfront development. *Coastal Management Journal*, 4(1-2), 151-164.

Received November 12, 2004

Accepted December 15, 20004