

## 동해 연안 표층퇴적물의 이동경로 Transport Paths of Nearshore Surface Sediment on Coast of East Sea, Korea

유규철\* · 오재경\*  
Kyu-Cheul Yoo\* and Jae-Kyung Oh\*

**요 旨** : 모멘트 입도분석을 통해 구해진 퇴적물 입도조직변수(평균입도, 분급도 및 왜도)를 이용하여 동해 연안 사질 퇴적물 이동경향을 밝힐 수 있는 Gao and Collins(1992) 방법을 소개하였다. 그 결과로서 파랑에 기인한 연안류가 연안 퇴적물 이동에 관여하는 것으로 밝혀졌다. 동해 연안 표층퇴적물의 이동 경로를 제시할 수 있는 퇴적물 이동벡터가 제시되었으며, 실제 이를 반영하는 지형적인 형태로서 남대천 입구에 사취가 존재하는데 연안류에 의한 퇴적물 이동의 결과로 사취가 남쪽으로 길게 발달해 남대천과 바다와의 순환을 차단하는 결과를 가져왔다. 차후 이를 검증할만한 계절적인 조사와 수역학적인 관측이 보완되어야 할 것으로 생각된다.

**핵심용어** : 입도분석, 퇴적물 이동, 해변류

**Abstract** □ Gao and Collins method (two-dimensional sediment transport trend-vector model) using grain-size parameters (mean grain size, sorting coefficient, and skewness) calculated by the statistical moment method is introduced to understand semi-quantitatively the sandy and surficial sediment transport trends on a coast of the East Sea. The result is the sediment transport vectors which indicate transport paths of surficial sediment by wave-induced currents. The corresponding morphological feature is a spit developed at the mouth of the Namdae stream, which is a resultant sediment transported by longshore current and is blocking the circulation of ocean. After this, it is thought that seasonal research and hydrodynamic measurements are needed for verification of the results.

**Keywords** : grain size analysis, sediment transport, littoral currents

### 1. 서 론

입도경향의 공간적인 변화는 침식, 선택적인 이동 및 여러 기원의 퇴적물 혼합과 같은 퇴적물 이동 과정에 기인하며(Russell, 1939), 따라서 공간적인 표층퇴적물의 입도특성을 퇴적물의 이동현상과 연계하여 해석하려는 연구가 많이 시도되었다(McCave, 1978; McLaren, 1981; Nordstrom, 1989). 실제 표층퇴적물의 입도조직변수(평균입도, 분급도 및 왜도)에 따라 근원지와 퇴적지의 구별이 가능하고 퇴적물의 순수 이동방향(net transport direction)이 결정된다. 이 사실을 기초로

일차원적인 퇴적물 이동경로 모델인 McLaren and Bowles(1985) 방법이 제안되어 퇴적학자에 폭넓게 사용되었다(Narayana and Pandarinath, 1991; Pandarinath and Narayana, 1993). 그 후 Gao and Collins(1992)의 이차원 퇴적물 이동벡터(transport vector) 방법으로 발전하여 이론적인 적용의 제한성(근원 퇴적물과 공급원 퇴적물사이의 단방향 이동, 해수 유동이 단순한 환경 및 단조로운 지형)에도 불구하고 다양한 퇴적환경에서 이용되었다(Gao and Collins, 1994; Gao *et al.*, 1994; Pedreros *et al.*, 1996).

우리나라에도 신 등(1998)과 Shin *et al.*(1995)은 서

\* 인하대학교 해양학과 (Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea)

해안 가로림만 조건대내 표층퇴적물의 근원 및 이동과정을 밝히는데 Gao and Collins(1992) 방법을 사용하였고 퇴적환경의 특징(지형, 층면형태 등)을 고려한 퇴적물 실제 이동방향을 계산·비교하여 이 방법의 신뢰도를 검증하였다. 또한 위의 방법에 대한 분석시 세립질 퇴적물을 제거하고 분석한 퇴적물 이동방향 결과와 현장 비교검증한 이동방향이 가장 잘 일치한다고 제시하였다. 즉 조류가 강한 환경에서 Gao and Collins(1992) 방법 적용시 수정된 입도분석과 통계처리가 요구되며 적용 선택의 범위가 좁아진다. 하지만, 퇴적물이 조립하고 거의 일정한 해수 흐름이 정의되는 환경에서 표층퇴적물 이동경로를 추적하는데 매우 유용한 방법으로 생각된다.

본 논문은 Gao and Collins 모델을 적용하여 해안환경 중 연안(nearshore)내 조립질 표층퇴적물의 이동경로를 파악하고자 한다. 동해 연안환경은 그 모델을 적용하기에 매우 유리한 조건을 지닌다. 즉 퇴적물의 90% 이상이 모래로 구성된 조립질 퇴적물이고 설정된 환경범위가 크지 않아 각 정점간 퇴적 기작의 영향이 분명하며 주요 이동기작을 일으키는 수리역학적인 영향이 분명해(Davis, 1985) 모델 결과에 대한 신뢰성이 좋아진다는 점이다.

## 2. 지역 개관

강원도 양양에 위치한 낙산과 오산 해변은 각각 길이 약 1.8 km와 약 2.6 km로 북서-남동 방향으로 발달한 직선형 사질 해변으로 작은 하천인 남대천을 포함한다(Fig. 1). 해안선의 지형은 단조로운 직선형이지만, 낙산 해변 북서단에 돌출 절벽이 존재한다. 동해안의 조석은 매우 작으며 하루의 승강현상은 최대 0.3 m 내외에 불과하고 보통 0.2 m 내외의 조차를 갖는다. 결과적으로 1 m 이하의 소조차(microtidal range) 해변으로 조석의 영향보다는 강한 파랑의 영향을 받는 파랑우세 환경임을 시사한다(오·유, 1997). 해변의 주변해역에서 발생하는 파랑은 일반적으로 바람에 의해 생성, 발달, 전파되는 풍파의 특성을 지니며 유의파고의 계절별 변화 또는 바람의 변화와 일치한다. 서로 다른 다양한 연안 흐름(coastal current)이 존재하는 파랑우세 연안역에서의 해저 퇴적물 이동에 가장 큰 영향을 미치는 것은 파랑의 잉여응력 경사에 기인하는 해안류(nearshore current)이며, 본 연구 지역도 이와 같은 환경에 속한다.

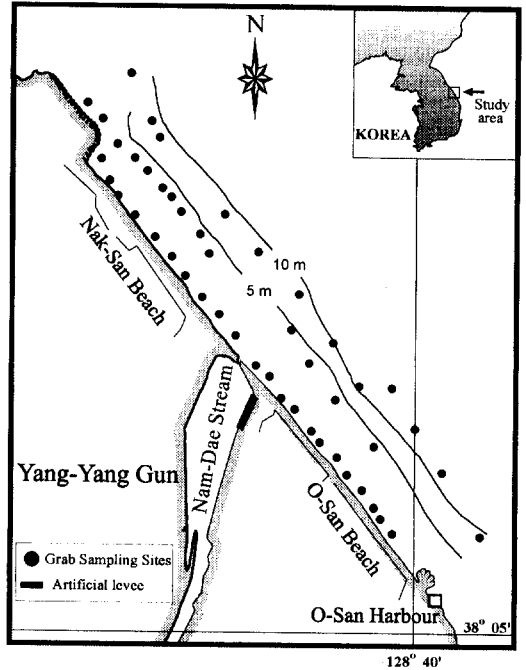


Fig. 1. Study area and sampling stations.

## 3. 실험 방법

본 연구에 이용된 시료는 1996년 11월 강원도 양양군 소재 남대천과 만나는 해변과 외안(offshore)에서 채취된 표층퇴적물이다. 그랩형 시료 채취기로 26개 정점(약 5 m 수심에서 14개 정점, 약 15 m 수심에서 11개 정점)에서 연안 표층퇴적물을 채취하였고 하천 양쪽 해변을 따라 약 200 m 간격으로 오산 해변에서 12개, 낙산 해변에서 10개의 표층퇴적물을 얻었다.

채취된 시료는 입도분석을 위해 약 100-130 g을 취해 회석방법으로 염분을 제거한 후, 각각 10% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>와 10% HCl을 사용하여 유기물과 탄산염을 제거하였다. 이와 같이 처리된 시료는 62.5 μm(4 φ) 체(sieve)를 사용하여 조립부와 세립부로 분리하였으며, 조립부는 0.5 φ 간격으로 건식체질하고 세립부는 전체의 7% 미만으로 5 φ에 해당하는 무게로 산정하였다(Folk, 1968). 퇴적물 입도의 조직변수는 모멘트 통계처리 방법으로 구하였다(Clark and Hosking, 1986).

## 4. 퇴적물 이동방향 이론과 분석

McLaren and Bowles(1985) 모델은 퇴적물 입도조직

변수를 이용하여 퇴적물 이동경로를 결정하는 모델이다. 퇴적과정이 동일한 연속선상의 한 지역에서 두 지점간의 세가지 퇴적물 통계변수 즉 평균입도( $\mu$ ), 분급도( $\sigma$ ) 및 왜도( $S_k$ )를 비교하면 기본적인 8가지 입도경향이 존재한다. 즉 정점 1에서 정점 2로 퇴적물 이동이 발생한다고 가정하면,  $\phi$  단위의 관점에서(Folk and Ward, 1957) 입도경향은 다음과 같다.

- 경우 1:  $\sigma_2 < \sigma_1, \mu_2 > \mu_1$  및  $S_{k2} < S_{k1}$
- 경우 2:  $\sigma_2 < \sigma_1, \mu_2 < \mu_1$  및  $S_{k2} > S_{k1}$
- 경우 3:  $\sigma_2 < \sigma_1, \mu_2 > \mu_1$  및  $S_{k2} > S_{k1}$
- 경우 4:  $\sigma_2 < \sigma_1, \mu_2 < \mu_1$  및  $S_{k2} < S_{k1}$
- 경우 5:  $\sigma_2 > \sigma_1, \mu_2 > \mu_1$  및  $S_{k2} < S_{k1}$
- 경우 6:  $\sigma_2 > \sigma_1, \mu_2 < \mu_1$  및  $S_{k2} > S_{k1}$
- 경우 7:  $\sigma_2 > \sigma_1, \mu_2 > \mu_1$  및  $S_{k2} > S_{k1}$
- 경우 8:  $\sigma_2 > \sigma_1, \mu_2 < \mu_1$  및  $S_{k2} < S_{k1}$

이 중에서 경우 1 (하류방향에서 평균입도가 보다 세립해지고, 분급이 양호해지며, 왜도가 감소하는 경우)와 경우 2(하류방향에서 평균입도가 보다 조립해지고, 분급이 양호해지며, 왜도가 증가하는 경우)가 경향 분석에 가장 적합하다.

통계적 모멘트 이론으로 각 정점의 세가지 입도조직 변수가 계산되면 Gao and Collins(1991, 1992)에 의해 발전된 해석 과정을 적용시킨다. 우선 두 개의 이웃 정점간의 임계 최대거리(critical maximum distance;  $D_{cr}$ )를 정하는데 이는 정점 격자 크기의 함수로 정의되며 이 거리보다 먼거리의 정점은 경향벡터(trend vector)를 구하는데서 제외시킨다. 즉 임의의 정점에서  $D_{cr}$ 안에 포함된 모든 정점의 조직변수를 비교하여 경우 1과 2가 성립되는 경우에 한해 경향벡터를 구하고 그 외의 경우는 경향벡터가 존재하지 않는 것으로 본다. 두번째로 임계 최대거리를 고려한 모든 두 정점간의 무차원 경향벡터를 만들고 이 벡터의 길이를 임의적으로 정의하며 모두 크기가 같도록 한다. 그리고 다음 각 정점에 대한 경향벡터의 합으로 단일벡터(single vector)를 만든다.

$$\vec{R}(x, y) = \sum_1^n \vec{r}(x, y), \quad (1)$$

여기서  $n$ 은 한 정점 경향벡터의 수이고  $\vec{r}(x, y)$ 는 하나의 경향벡터이다. 각 정점에서 단일벡터가 정해지면 그 안에는 이동경향과 일부 잡벡터(noise) 모두가 포함되며 다양한 잡벡터 요소는 특정한 형태를 보여주지

않는다. 주파수 영역에서 보면 고주파수 변동(high frequency fluctuation) 형태로 나타나는 각 정점의 잡벡터를 제거하기 위해 평균화 작업(필터 작업)을 적용한다. 평균화 과정을 통한 이동벡터(transport vector)는 다음의 수식으로 구해진다.

$$\vec{R}_{av}(x, y) = \frac{1}{k+1} [\vec{R}(x, y) + \sum_1^k \vec{R}_i] \quad (2)$$

여기서  $\vec{R}_i$ 는 식 (1)의 단일벡터이고  $k$ 는 이웃 정점의 총 갯수이다. 이동벡터는 고주파수의 잡벡터 영향이 거의 없는 잔류이동경향(residual transport pattern)을 보여준다. 모든 이동벡터를 도면화하면 주요 퇴적물 이동방향의 인식이 가능해진다.

입도조직변수의 각각에 대한 치우침(bias)이 내포되어 각 구성 이동벡터의 길이를 양적 의미로 추정하는 것은 불가능하다(Le Roux, 1994). 결국 Gao and Collins (1992) 방법으로 퇴적물 이동경로를 결정할 수 있지만 이동률(transport rate)에 대한 정보는 알 수가 없다.

## 5. 결과 및 토의

### 5.1 퇴적물 형태와 조직변수 결과

조직변수의 분포형태는 Fig. 2에서 볼 수 있다. 오산 해빈은 0.27  $\phi$ 에서 1.23  $\phi$ (전체 평균: 0.85  $\phi$ )이며 낙산 해빈은 0.38  $\phi$ 에서 0.88  $\phi$ (전체 평균: 0.57  $\phi$ )이다. 퇴적물의 형태는 오산과 낙산 해빈 모두 자갈을 포함한 모래(slightly gravely sand: (g)S)로 구성되어있고 외안은 자갈이 없는 모래로 이루어져있다. 또한 수심 약 5 m에서 채취한 표층퇴적물의 결과는 남쪽의 전체 평균한 평균입도가 1.84  $\phi$ 이고 북쪽은 1.96  $\phi$ 이다. 마찬가지로 수심 약 15 m에서는 남쪽 2.26  $\phi$ , 북쪽 2.28  $\phi$ 이다. 해빈 전안(foreshore)의 오산과 낙산 해빈을 보면, 낙산 해빈이 오산 해빈보다 조립하다. 해빈 전안에서 외안으로 갈수록 세립화되는 경향을 보여준다. 하지만 수심 약 5 m의 평균 입도는 상대적으로 남쪽이 조립하고 북쪽이 세립하다. 수심 약 15 m의 표층퇴적물은 전 정점에서 거의 유사한 평균입도 특성을 지닌다.

조직변수의 분포 결과에 의하면 수심이 낮아질수록 평균입도가 조립해지고 분급이 좋아지며 왜도가 감소한다(Fig. 3). 하지만 남대천 입구(inlet)를 기준으로 약 15 m 수심선을 따라 북쪽이 남쪽보다 분급이 더 불량하고 왜도는 증가한다. 표층퇴적물의 주요 구성이 모래

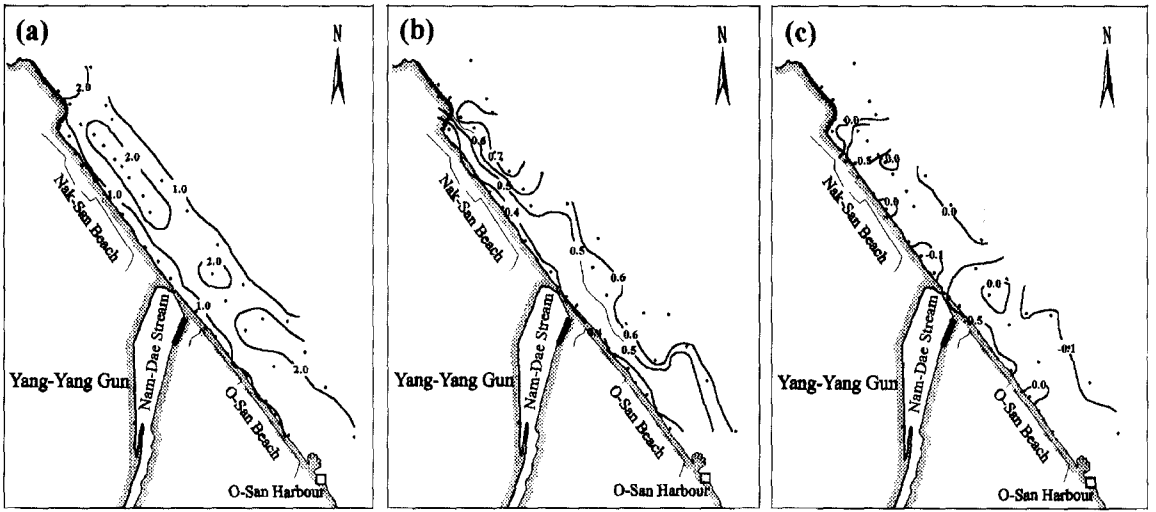


Fig. 2. Distribution of (a) mean grain size ( $\phi$ ), (b) sorting coefficient ( $\phi$ ), and (c) skewness of surficial sediments over study area.

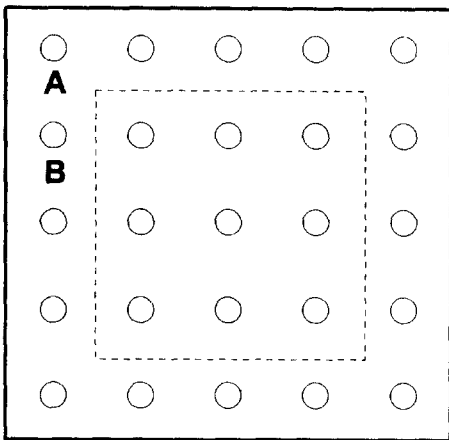


Fig. 3. The edge effect illustrated by the idealised sampling site locations. If the critical maximum distance is the diagonal of the grid mesh, any site lying within the dashed lines will have eight neighbouring sites. But Sites A and B have only three and five neighbouring sites, respectively. Hence, the number of trend vectors for a sampling site on the edge is statistically smaller than the inner sites of grid.

이지만 상대적으로 북쪽의 해안 바깥이 세립하다는 사실을 보여준다.

### 5.2 입도경향의 잔류이동경향

퇴적물 이동경향분석을 위해 우선 계산된 일련의 입도조직변수 자료가 필요하다. 이동벡터를 계산하기 위해 Gao(1996)의 FORTRAN 프로그램 GSTA(grain size trend analysis)을 이용하였다. 이 프로그램의 입력

자료는 첫 행에 정점의 총수, 척도 계수(A) 및 임계 최대거리( $D_{cr}$ )가 주어지고 다음에는 정점번호, 그 정점 위치, 평균입도값, 분급도값, 왜도값이 반복된다. 계수 A는 위도 대 경도의 비로서  $\cos \theta$  ( $\theta$ 는 조사해역의 평균 위도)로 정의된다. 임계 최대거리는 정점간 최대거리를 말한다. 이 분석의 적합성을 향상시키기 위해 표층 퇴적물 채취 간격이 그 퇴적환경의 척도와 비교해 작아야 한다. 이 프로그램의 실행결과로써 출력자료의 기록은 정점번호, 위경도 그리고 잔류벡터의 크기 및 방향이 주어진다.

해빈 및 최외곽에 위치한 정점은 다른 정점보다 구해지는 경향벡터의 수가 통계적으로 작아진다(Fig. 3). 이런 가장자리 영향(edge effect)으로 얻어진 경향벡터의 모습은 잡벡터가 섞인 이동 경향 이미지(image)를 만들 수 있어 가장자리 정점은 일부 왜곡된 이동벡터를 가질 가능성이 존재한다. 하지만 잡벡터가 섞인 이미지를 제대로 복원할 수 있는냐의 관건은 필터 작업과 사용되는 채취 격자에 달려있다. 결국 입도분석에서 오는 오류의 영향을 면할 수 있도록 채취 간격이 충분히 커야할지라도 퇴적환경의 차원과 비교해 채취 간격을 줄이고 채취 정점을 늘리는 것이 분석상 이상적일 것이다. 연구지역이  $38^\circ$  선 바로 위에 위치하고 있어 계수 A는 0.78, 임계 최대거리는 700 m로 설정하였다. 임계 최대거리 700 m는 두 정점간의 퇴적물 조직변수를 비교할 수 있는 최대거리에 해당하며 700 m 이상의 거리를 입력했을 때 구해진 이동벡터 결과

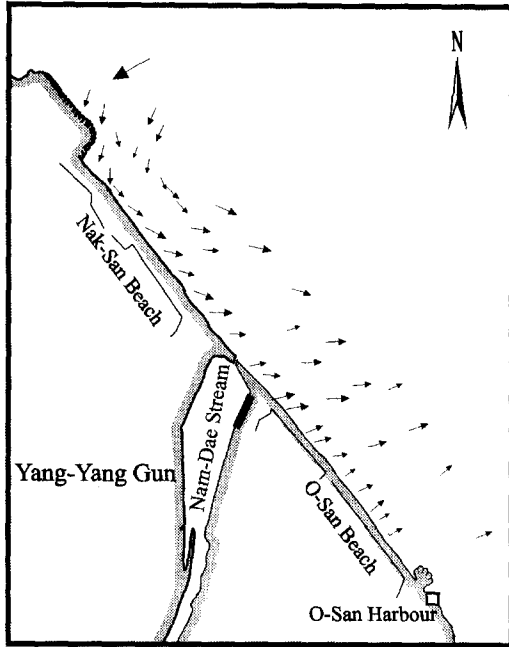


Fig. 4. The residual grain-size trend pattern. The arrows indicate transport vectors.

는 유사하였다.

입도경향에 의한 퇴적물 순이동경향을 이동벡터로 나타낸 결과에 의하면(Fig. 4), 이동벡터 방향은 낙산 해변 북쪽 바깥 수심 15 m에서 해안선을 향해 들어오다가 수심 5 m 이하에서는 해안선을 따라 이동한다. 하지만 해안선을 따라 오산 해변으로 오면 주된 이동 방향은 외안이다. 동해안은 조석이 퇴적물이동에 기여하는 정도가 미약하므로 파랑과 파랑류(wave-induced current)에 의해 퇴적물이 이동한다. 동해안 파랑 방향은 계절적으로 변한다. 즉 춘하계에는 남동 계열의 파랑이 우세하고 동계에는 북서 계열이 우점한다(과학기술처, 1992). 또한 이 지역은 하천을 포함하는 해안환경으로 하천의 흐름과 퇴적물 이동량에 따른 파랑 및 파랑류의 상대적 이동기여를 생각해야 한다. 하지만 조사시기인 11월은 하천의 갈수기에 해당되어 하천의 영향을 무시할 수 있다. 결과적으로 주로 북서 계열의 파랑으로 인해 해안선을 따라 퇴적현상이 발생하는 것을 보여주며 낙산 해변에서 오산 해변으로 퇴적물이동이 진행되고 오산 해변은 전반적으로 해안 바깥으로 진행됨을 보여준다. 그 결과적인 지형형태로서 남대천 입구에 사취(spit)가 해안선을 따라 발달하여 남대천과 바다와의 순환이 차단된다. 일

반적으로 10월은 남대천 연어가 회귀하여 귀환하는 시기로 바다와 연결되는 남대천 입구의 개방이 요구되는데 사취의 발달로 귀환로가 차단되어 인위적으로 입구를 만들기 위한 준설 흔적이 현장조사 당시 존재하였다.

## 6. 요약

(1) 퇴적물 이동방향을 추정하는 퇴적물 입도변수(평균입도, 분급도 및 왜도)를 통한 Gao and Collins (1992) 방법을 서술하였고 이 방법은 퇴적물이 조립하고 수리역학적인 해수운동을 정의하기가 단순하며 일정한 퇴적물 공급이 이루어지는 해역에서 퇴적물 순이동경향을 밝히는데 유용할 것으로 생각된다.

(2) 동해안 해안을 따라 얕은 수심 지역은 파랑과 파랑에 기인한 연안류에 의해 주로 퇴적물이동이 발생하는데 내적 요인 즉, 하천의 영향을 무시할 수 있는 조건에서 파랑의 계절변화에 의해 좌우된다. 북서 계열의 우세한 파랑이 존재하는 11월에 낙산 해변에서 해안을 따라 남쪽으로 퇴적물 순이동이 진행되다가 오산 해변이 시작되는 장소에서부터 전면적으로 외안을 향해 퇴적물 순이동경향이 나타난다.

(3) 결과에서 나타난 퇴적물 순이동경향을 신빙성있게 증명할 수 있는 수리적인 자료는 이 논문에서 제시되지 못하였다. 차후 연구지역의 연속 및 동시 파랑 관측이나 부표추적 등 이를 검증하고 비교할 수 있는 수역학적인 관측과 연구가 요구된다.

## 감사의 글

본 연구는 '97년도 교육부 학술연구조성비(해양분야, KIOS-97-M-06) 및 '97년도 인하대학교 연구비 지원에 의해 수행되었으며 일부 이 연구를 위해 실험을 도와주신 김문경님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 과학기술처, 1992. 동해안 항만매물 및 해안변형에 관한 연구(III), 한국해양연구소, BSPG 00236-747-2.  
 신동혁, 이희일, 한상준, 오재경, 권수재, 1998. 황해 가로림만 조간대 표층퇴적물의 이동경로. 한국해양학회지 '바다', 3(2): 59-70.  
 오재경, 유규철, 1997. 한반도 동남부 해변 퇴적물의 조직

- 변수의 특징. 인하대학교 기초과학연구소, **18**: 87-94.
- Davis, R.A., 1985. Beach and nearshore zone. In: *Coastal Sedimentary Environments*, edited by R.A. Davis, Springer, New York, pp. 379-444.
- Clark, W.A.V. and Hosking, P.L., 1986. *Statistical Methods for Geographers*, John Wiley and Sons, pp. 184-208.
- Folk, R.L., 1968. *Petrology of Sedimentary Rocks*, Hemphill's, 159 p.
- Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain-size parameters, *J. Sediment. Petrol.*, **27**(1), pp. 3-26.
- Gao, S., 1996. A fortran program for grain-size trend analysis to define net sediment transport pathways, *Computers and Geosciences*, **22**, pp. 449-452.
- Gao, S. and Collins, M., 1991. A critique of the "McLaren Method" for defining sediment transport paths, *J. Sediment. Petrol.*, **61**, pp. 143-146.
- Gao, S. and Collins, M., 1992. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors", *Sediment. Geol.*, **81**, pp. 47-60.
- Gao, S., Collins, M., Lanckneus, J., De Moor, G. and Van Lancker, V., 1994. Grain size trends associated with net sediment transport patterns: An example from the Belgian continental shelf, *Mar. Geol.*, **121**, pp. 171-185.
- Gao, S. and Collins, M., 1994. Analysis of grain-size trends for defining sediment transport pathways in marine environments, *J. Coastal Res.*, **10**(1), pp. 70-78.
- Le Roux, J.P., 1994. An alternative approach to the identification of net sediment transport paths based on grain-size trends, *Sediment. Geol.*, **94**, pp. 97-107.
- McCave, I.N., 1978. Grain-size trends and transport along beaches: an example from eastern England, *Mar. Geol.*, **28**(1/2), pp. M43-M51.
- McLaren, P., 1981. An interpretation of trends in grain-size measures, *J. Sediment. Petrol.*, **51**, pp. 611-624.
- McLaren, P. and Bowles, D., 1985. The effects of sediment transport on grain-size distributions, *J. Sediment. Petrol.*, **55**, pp. 457-470.
- Narayana, A.C. and Pandarinath, K., 1991. Sediment transport direction derived from grain-size statistics on the continental shelf off Mangalore, west coast of India, *J. Geol. Soc. India*, **38**, pp. 293-298.
- Nordstrom, K.F., 1989. Downward coarsening of beach foreshore sediments at tidal inlets: an example from the coast of New Jersey. *Earth Surface Processes and Landforms*, **14**(8), pp. 691-701.
- Pandarinath, K. and Narayana, A.C., 1993. Computer program for the determination of grain-size statistics and sediment transport direction, *Computers and Geoscience*, **19**(5), pp. 735-743.
- Pedreiros, R., Howa, H.L. and Michel, M., 1996. Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas, *Mar. Geol.*, **135**, pp. 35-49.
- Russell, R.D., 1939. Effects of transportation of sedimentary particles. In: *Recent Marine Sediments* edited by P.D. Trask, Tulsa (Oklahoma): The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, pp. 32-47.
- Shin, D.H., Yi, H.I., Han, S.J. Oh, J.K. and Won, J.S., 1995. Applications of the sediment-transport path model to the tidal flats of Garolim Bay, west coast of Korea, *Korean J. Geophys. Res.*, **23**, pp. 39-51.

---

Received November 28, 1998

Accepted February 24, 1999