

낙동강 삼각주연안 사주섬의 지형변화에 대한 입도경향 분석의 활용도 탐색

김성환* · 류호상**

Exploring the Applicability of Grain Size Trend Analysis to Understanding the Morphological Responses of the Deltaic Barrier Islands in the Nakdong River

Sung Hwan Kim* · Ho Sahng Rhew**

요약: 입도경향분석은 퇴적물 입도경향으로부터 퇴적물의 순이동방향을 도출하는 방법론이다. 입도경향으로부터 도출된 퇴적물의 순이동방향이 낙동강 하류의 삼각주연안 사주섬의 지형변화 패턴과 잘 부합한다면 입도경향분석은 삼각주연안 사주섬의 지형변화를 연구하는 과정에서 효과적인 접근법이 될 수 있을 것이다. 이 연구는 Gao and Collins(1992)의 '퇴적물 이동벡터'법에 따라 도출한 퇴적물 순이동방향이 낙동강의 삼각주연안 사주섬의 지형변화를 이해하는 데 적절히 활용될 수 있는지를 검토한 것이다. 연구결과 퇴적물 이동벡터로부터 얻어진 퇴적물 순이동방향은 대체로 항공사진을 통해 추출한 지형변화 패턴을 반영하고 있음을 확인하였으나 지형변화가 급속히 일어나는 지역에서는 그렇지 않았다. 이는 입도경향분석을 통해 얻은 퇴적물 순이동방향이 대표하는 프로세스의 시간적 규모와 지형변화 분석자료의 시간적 규모, 지형변화율 등의 요소의 부합, 불부합 여부 등이 관련되어 있다고 판단된다. 입도경향분석을 낙동강 삼각주연안 사주섬에 적용하고자 할 경우 설명가능한 시간적 규모를 고려한 신중한 접근과 해석이 필요하다고 사료된다.

주요어: 삼각주연안 사주섬, 퇴적물 이동벡터, 퇴적물 이동방향, 지형변화, 시간적 규모

Abstract: Grain-size trend analysis is the methodology to obtain the net sediment transport pattern from the spatial trends of grain size parameters. It has the potentials to be an effective tool to address the morphological changes of the deltaic barrier islands in the Nakdong River once we make sure net transport patterns inferred from grain size trend analysis represent the morphological evolution patterns. This research aims to investigate the applicability of the net transport patterns obtained by 'transport vector', proposed by Gao and Collins(1992), to understanding the morphological changes of the Nakdong River deltaic barrier islands. The results indicate that the net transport directions are overall in concordance with the morphological evolution patterns; however, the level of concordance is low in the island with fast growing rate. The reasons may be match or mismatch of temporal scales involved between processes represented by net transport patterns and morphological change analyzed or the rate of morphological change. Consequently, the application of grain size trend analysis in analyzing the morphological changes of deltaic barrier islands requires the careful consideration of temporal scales involved.

Key Words: deltaic barrier islands, sediment transport vector, net transport pattern, morphological change, temporal scale

1. 서론

1) 연구배경

삼각주연안 사주섬(deltaic barrier island)은 삼각주가 형성된 해안의 전면부에 위치한 사주섬을 지칭한다(Stutz and Pilkey, 2001). 삼각주연안 사주섬은 대륙연안 사주섬(coastal plain barrier island)과 동일하게 퇴적물 공급이 적당하고 경사가 완만

하며 파랑의 작용이 퇴적물을 재동시킴에 충분한 지역에 형성된다. 대다수의 삼각주연안 사주섬은 조차가 1~4m 이고, 보통 혹은 강한 파랑에너지가 공급되며 상대적으로 대륙붕의 너비가 좁은 지역에 주로 위치하고 있다. 전 세계에 분포하는 전체 사주섬의 약 3분의 1을 차지함에도 불구하고 그동안 삼각주연안 사주섬은 대륙연안 사주섬에 비해 그다지 활발한 연구가 이루어지지 못했다(Stutz and Pilkey, 2002). 그러나 삼각주연안 사주

* 환경부 국립환경과학원 생태평가과 책임연구원(Research Fellow, Ecosystem Survey Team, National Institute of Environmental Research)(phygeokim@chol.com)

** 서울대학교 대학원 지리학과 박사과정(Ph.D. Candidate, Department of Geography, Seoul National University)(rhew0503@hanmail.net)

섬은 흥미로운 지형학적 연구주제가 될 수 있는 몇 가지 중요한 특징을 지니고 있다. 첫째는 삼각주연안 사주섬이 전지구적인 해수면 변동에 대한 지형의 반응을 이해하는 중요한 자료가 될 수 있다는 점이다. 전 세계적으로 볼 때 삼각주연안 사주섬은 대륙연안 사주섬이 존재하지 않는 지역에 분포하고 있다. 그 이유는 아직 밝혀지지 않았으나 Stutz and Pilkey(2002)는 지역적으로 서로 상이한 해수면 변동의 역사를 반영하는 것일 수 있다는 흥미로운 추측을 제시하고 있다. 이와 같은 추측은 검토해 볼만한 가치를 지니고 있다고 판단된다. 둘째는 삼각주연안 사주섬이 인간의 간섭에 의한 지형변화 패턴을 살필 수 있는 중요한 대상이 될 수 있다는 점이다. 전 세계적으로 하천개발이 활발하게 이루어지고 있는 추세를 고려할 때 삼각주연안 사주섬에 공급되는 퇴적물의 양과 패턴이 과거와는 달라질 것이 자명하다(Stutz and Pilkey, 2002). 이 때 나타나는 지형변화를 연구하는 것은 인간의 간섭과 자연의 반응을 입체적으로 이해하는 데 도움을 주는 중요한 자료가 될 수 있다. 셋째는 삼각주연안 사주섬이 위치하고 있는 하구역이 생태적으로 중요한 서식지이기 때문에 삼각주연안 사주섬의 지형동역학(morphodynamics)에 대한 연구는 서식지 관리 측면에서 유의미한 기여를 할 수 있다는 점이다. 이탈리아의 포 강 하구와 미국 미시시피 강 하구의 삼각주연안 사주섬 파괴가 하구역의 습지유실로 이어지고 있다는 연구보고는 이런 점에서 시사하는 바가 크다(Cencini, 1998; Stone and McBride, 1998).

이와 같은 측면에서 살펴볼 때 낙동강 삼각주연안 사주섬은 삼각주연안 사주섬의 특성을 이해하고, 관련지식을 생산하기에 더할 나위 없이 훌륭한 연구지역이다. 특히 인간의 간섭이 지형변화에 미치는 영향을 살펴보고 개념화할 수 있다는 측면에서 독특한 가치를 지니고 있다고 판단된다. 낙동강 삼각주연안 사주섬은 1900년대를 전후하여 활발한 성장이 이루어지기 시작한 것으로 알려져 있다(반용부, 1986)¹⁾. 1987년 낙동강 하구둑 건설이 완료된 후 퇴적물 감소로 인해 사주섬의 성장이 둔화되거나 침식이 일어날 것이라는 추측이 우세하였으나, 20년이 지난 현재 사주섬의 성장과 전진이 중단된 것은 하천의 유출이 차단된 낙동강 하구 서쪽지역

의 사주섬 군에 국한되었고 하구둑 수문개폐의 영향을 받는 동쪽지역의 경우 오히려 기존의 백합등과 나무섬등의 남쪽으로 도요등과 새로운 퇴적체가 형성, 병합되는 등 사주섬의 성장과 전진이 지속되고 있다(오건환, 1999; 김성환, 2005). 인간의 간섭으로 인한 삼각주연안 사주섬의 지형동역학이 '퇴적물 공급 감소에 의한 정체와 침식'이라는 식으로 요약할 수 있을 만큼 단순하지만은 않음을 보여주고 있는 셈이다. 그동안 연구가 미진했던 삼각주연안 사주섬을 이해하는 데 기여할 수 있다는 측면에서, 또한 인간의 간섭으로 인한 지형변화가 어떠한 패턴으로 일어나는지에 대한 새로운 지식을 제공할 수 있다는 측면에서 낙동강연안 사주섬의 지형변화를 지속적으로 관찰·분석하는 것은 중요한 연구 과제이자 기회라고 할 수 있다.

낙동강연안 사주섬의 지형변화는 크게 형태적인 측면과 프로세스적인 측면에서 접근할 수 있다. 형태적인 접근이란 사주섬 지형을 주기적으로 관찰하여 각 시기별 지형자료를 획득하고 이 자료를 이용하여 시기별 부피 혹은 면적의 증감, 지형변화의 공간적 추세와 변이를 밝히는 것이다. 이렇게 얻어진 결과는 지형변화에 영향을 준 인자를 결정하거나 향후의 추세를 예측하는 토대가 된다. 이와 달리 프로세스적인 접근이란 지형변화에 영향을 줄 수 있는 요인들 -파랑, 조류, 퇴적물 공급량 등을 식별하여 퇴적물의 유입/유출량을 시공간적으로 예측하는 것이다. 낙동강연안 사주섬의 지형변화를 종합적으로 이해하려면 두 가지 측면의 측정과 분석이 통합되어야 한다. 그러나 보통 전자는 시간적으로 볼 때 중규모 수준(수 년~수십 년)에서 연구가 진행되고, 후자는 미시규모(수 시간~수 일)에서 이루어진 측정을 토대로 수치분석을 수행하는 형태로 연구가 진행되는 경향이 있어 양자가 통합되기에는 아직 어려움이 있다. 이러한 상황에서 입도경향분석을 통한 퇴적물 이동방향 분석은 낙동강 하구역 사주섬의 중규모적 지형변화와 실제 진행되는 프로세스를 연결하는 연결고리 역할을 해 줄 수 있는 가능성이 있다.

입도경향분석이란 퇴적물 입도조직변수의 공간적 분포경향을 통해 퇴적물의 이동방향을 추정하는 방법론이다. 퇴적물 입도정보만으로 퇴적물의 이동방향을 추정한다는 면에서 간편하고 저렴하다.

입도경향분석은 McLaren(1981)이 입도조직변수 - 평균입도, 분급, 왜도- 의 공간적 분포경향 중 퇴적물의 이동방향을 지시하는 조합을 선별하는 경험칙을 제시한 이후 방법론의 개발이 지속적으로 진행되어 현재 McLaren and Bowles(1985)의 1차원 분석법, Gao and Collins(1992)의 퇴적물 이동벡터(transport vector)법, Le Roux(1994)의 '오점 벡터 평균법(five point vector averaging)' 등이 존재한다. 현재 가장 널리 활용되는 방법은 McLaren(1981)의 경험칙을 토대로 Gao and Collins(1992)가 정립한 '퇴적물 이동벡터'법이다. 퇴적물 이동벡터를 이용한 입도경향분석은 대륙붕의 사퇴(Gao and Collins, 1994; 추용식, 2001), 조간대 해빈(Pedrerros et al., 1996; 성효현·방경화, 2005), 만입부(신동혁 등 1998; Cheng et al., 2004) 등 다양한 퇴적환경에서 그 타당성이 확인된 바 있다. 퇴적물 이동벡터법은 퇴적물의 이동방향만을 지시할 뿐 퇴적물의 이동량을 정량화할 수 없다는 점과 경험칙을 정당화할 수 있는 이론적 근거가 아직 탄탄하지 못하다는 점, 분석절차 상에서 주관이 개입될 여지가 있다는 점, 분석결과로 얻어진 퇴적물 이동방향에 반영되는 시간스케일이 모호하다는 점 등으로 인해 문제점을 내포하고 있다. 그러나 적용이 간편하고 저렴하다는 점을 감안할 때 입도경향분석을 통해 얻은 퇴적물 이동방향이 낙동강 삼각주연안 사주섬의 지형변화를 설명하는 데 어느 정도 활용이 가능한지 검토해 볼 만한 가치는 충분하다고 판단된다.

2) 연구목적

이 연구는 입도경향분석을 통해 도출한 퇴적물 이동방향이 낙동강 삼각주연안 사주섬의 지형변화를 이해하는 데 적절하게 활용될 수 있는지를 검토하고자 하는 것이다. 퇴적물의 이동방향은 사주섬 지형의 성장 혹은 쇠퇴, 공간적인 성장 패턴 등과 밀접하게 연관을 맺고 있다. 입도경향분석을 통해 얻어진 퇴적물 이동방향이 실제 퇴적체의 변화 추세와 잘 부합한다면, 입도경향분석은 낙동강 삼각주연안 사주섬의 지형변화 연구에서 효과적으로 활용될 수 있을 것이다. 이 연구에서는 현재까지 방법론으로 제시된 입도경향분석 중 Gao and Collins(1992)의 '퇴적물 이동벡터법'의 활용 가능성을

을 살펴본다. 구체적인 연구목적은 다음과 같다.

첫째, 낙동강 하구역 사주섬에서 채취한 표층퇴적물 입도분석자료에 '퇴적물 이동벡터'법을 적용하여 퇴적물 이동방향을 도출한다. 이를 위해 먼저 Gao and Collins(1992)의 '퇴적물 이동벡터'법의 주요 개념과 절차를 검토한다.

둘째, 도출된 퇴적물 이동방향과 항공사진분석을 통해 얻어진 지형변화 패턴을 상호 비교하여 퇴적물 이동방향이 지형변화 패턴을 어느 정도 반영하는지 확인한다.

셋째, 퇴적물 이동벡터법의 한계와 지형변화 패턴과의 관계를 종합적으로 고려하여 낙동강하구 사주섬 연구에서 퇴적물 이동벡터법이 활용될 수 있는 범위에 대해 논의한다.

2. 사주섬 퇴적물 이동방향 산출

1) 이동방향 분석을 위한 시료채취

연구지역인 낙동강 삼각주연안 사주섬은 <그림

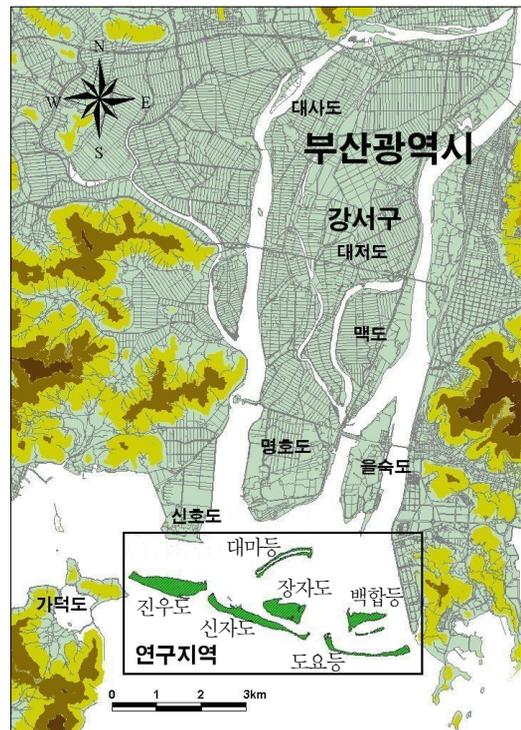


그림 1. 낙동강 하류지역과 낙동강 삼각주연안 사주섬의 분포

1>에 나타난 것과 같이 낙동강 하구역의 서쪽으로부터 동쪽으로 크게 3개열을 형성하면서 분포하고 있다. 진우도가 하구역의 서쪽에 형성되어 있으며 대마등, 장자도, 신자도가 가운데 열에 분포한다. 하구역의 동쪽으로는 백합등과 도요등이 위치하고 있다. 사주섬이 형성된 하구역에는 사질 간석지가 넓게 형성되어 분포하고 있으며, 하구역의 최남단 해안선을 형성하고 있는 진우도와 신자도, 도요등의 전면으로는 파랑과 조류의 영향을 직접적으로 받는 조건대 환경이 형성되어 있다. 표층 퇴적물 시료는 현재 낙동강 하구역 사주섬 군 중에서 최남단의 해안선 전면에 위치하고 있는 진우도와 신자도, 도요등에서 채취하였다.

각 사주섬에서 퇴적물 이동방향을 산출하기 위한 퇴적물 시료의 채취는 <그림 2>에 나타난 것과 같이 설계한 후 현장 작업으로 실시하였다. 각 사주섬의 외해 방향으로 전면에 형성된 조건대에서 해안선과 평행한 형태로 3개의 시료채취열을 구성하여 시료를 채취하였다. 시료 채취를 위한 각 열의 간격은 15m²⁾로 하였고, 해안선과 평행한 방향으로 이어지는 시료 채취 지점간의 거리는 100m로 설정하였다. 이 연구에서는 <그림 2>에서처럼 표본망을 격자망으로 설계하여 시료 간의 간격이 일정하도록 함으로써 추후 공간통계 기법을 원용한 상호작용 거리 분석이 가능하도록 표본망을 계획하였다.

퇴적물 이동방향을 산출하기 위한 퇴적물 이동벡터의 경우 각 시료 채취 지점으로부터 일정 거리 내에 위치하는 지점을 근린표본점으로 설정하여 다음의 2절에서 소개하는 절차에 따라 1차적으로 경향벡터를 계산한다. 이동벡터 계산에서는 근

린표본점의 범위를 정하는 거리를 임계범위로 설정한다. 따라서 시료 채취지점의 간격을 어느 규모로 설정하고 근린표본점의 범위를 어디까지로 두느냐에 따라 퇴적물 이동벡터의 산출결과는 달라질 수 있다. 퇴적물 이동벡터를 계산하는 과정에서 표본의 간격을 어떻게 잡아야 하는가와 임계범위의 설정에 대해서는 아직 연구자들 간에 합의된 바가 없다. 이 연구에서는 <그림 2>에서처럼 표본 시료의 채취 간격을 남북방향 15m, 동서방향 100m로 설정하였다. 근린표본점의 범위는 각 지점으로부터 200m 이내로 설정하여 상하좌우의 8개 지점 시료가 이동벡터 계산에 포함되도록 설계하였다.

퇴적물 이동벡터 산출을 위하여 시료 채취를 격자형태로 설계할 경우 가장자리 효과(edge effect)를 고려해야 한다. 3개열로 구성된 시료채취열 중에서 가운데에 위치하는 시료채취열을 제외한 상부와 하부 조건대의 지점들과 동서방향 최외곽에 위치하는 지점의 경우는 근린표본점에서 계산되는 경향벡터의 수가 줄어 잡벡터(noise)의 영향 제거에 문제가 발생한다. 따라서 이 연구에서는 이러한 가장자리 효과를 최소화하기 위하여 <그림 2>에 검은색 점으로 표시한 사각형 내부의 지점에 대해서만 이동벡터가 계산되도록 설계하였다. 투명한 점으로 표시된 지점에서 채취한 퇴적물 분석 자료는 주변에 위치하는 지점의 이동벡터 계산에만 이용하였다.

표층 퇴적물 시료 채취의 시기는 퇴적물의 퇴적 과정과 이동방향 분석에 적합하도록 결정하였다. 퇴적물 이동방향 분석을 위한 표층 퇴적물 시료의 채취는 동일한 과정에서 이동한 퇴적물을 대상으로 하므로 조석의 영향으로 창조와 낙조가 반복되

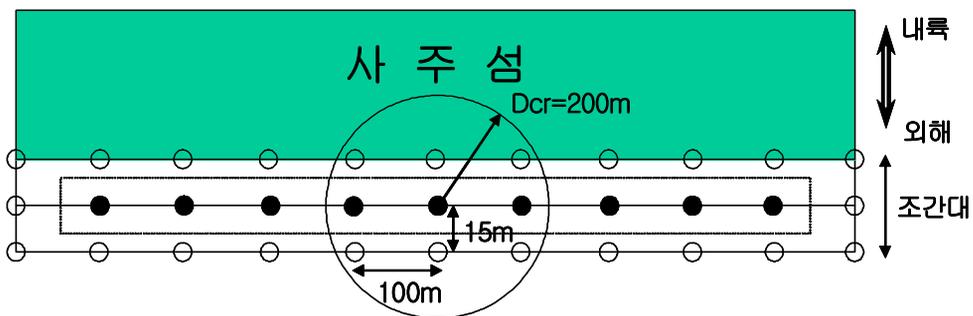


그림 2. 퇴적물 이동방향 산출을 위한 시료채취의 설계

는 연구지역의 해안환경 특성을 고려하여 1회의 조석과정에서 퇴적이 진행된 퇴적물을 채취하기 위하여 낙조와 창조 1회 주기가 진행된 상태의 최고조위 시간에 맞추어 시료 채취를 시작하여 최저조위 시간까지 작업을 진행하였다. 조차가 최대에 해당하여 조간대 구역이 최대한 드러나는 조석 주기인 사리를 현지 조사 일정으로 선택하였다.

2) 퇴적물 이동벡터의 계산

퇴적물 이동벡터를 계산하기 위해서는 퇴적물 시료를 채취한 지점의 좌표정보와 퇴적물의 입도 통계치, 즉 평균입도, 분급, 왜도가 필요하다. 각각의 사주섬에서 채취한 표층 퇴적물에 대해서 건식 체질법을 통하여 입도분석을 실시하였다. 입도분석 과정에서는 각 입경별 시료의 구성비를 계산하고 이를 모멘트계산법을 이용하여 평균입도와 분급, 왜도를 계산하였다(Blott and Pye, 2001). 계산된 퇴적물의 입도 특성과 좌표정보를 이용하여 퇴적물 이동벡터를 계산하는 알고리즘은 다음과 같다 (<그림 3> 참조).

① 경향벡터(trend vector)의 계산

퇴적물 시료를 채취한 각 점에 대하여 ‘임계범위(Dcr)’를 설정한다. 임계범위 내에 위치하는 근린표본점들(B)에 대해 해당 점을 공급지(A)로 볼 때 [경우 1]과 [경우 2]를 만족시키는 경우가 나타나면, 해당 점(A)으로부터 근린표본점(B)을 향하는 길이 1인 경향벡터를 지정한다.

[경우 1]: $\mu_A \leq \mu_B, \sigma_A \geq \sigma_B, sk_A \geq sk_B$ (F. B -)
 분급은 양호해지고, 입도는 세립화, 왜도는 음성왜도로 변화

[경우 2]: $\mu_A \geq \mu_B, \sigma_A \geq \sigma_B, sk_A \leq sk_B$ (C. B +)
 분급은 양호해지고, 입도는 조립화, 왜도는 양성왜도로 변화

(단, μ_A, μ_B 는 A, B 지점의 평균입도로서 파이척도로 표현되었기 때문에 값이 클수록 세립한 입자를 의미하며, σ_A, σ_B 는 A, B 지점의 분급으로 값이 작을수록 분급이 양호함을 의미한다. sk_A, sk_B 는 왜도이다. 이후 표현의 간소화를 위해 각각의 관계를 (F. B. -)와 (C. B. +)로 표현하기로 한다.)

한 점에 대해 경향벡터는 여러 개가 존재할 수 있다. 각 점에 대한 경향벡터의 벡터합을 \vec{R} 이라고 하고 다음의 식 <1>과 같이 계산한다.

$$\vec{R}(x, y) = \sum_{k=1}^n \vec{r}(x, y)_i \quad <1>$$

(n은 분석 지점의 경향벡터 수, $\vec{r}(x, y)_i$ 는 경향벡터)

② 이동벡터의 계산

경향벡터에는 퇴적물의 운반기작과 관련이 없이 발생하는 잡벡터가 포함되어 있다. 잡벡터를 제거하기 위한 방법으로 준정량 여과기법(semi-quantitative filtering)에 의한 평균화를 실시한다. 이것은 경향벡터 내에 우연적인 요소가 포함되어 있을 때 이들의 평균은 0에 가까울 것이라는 가정에 바탕을 둔 것이다. 우선 ‘임계범위’ 내에 위치한 근린표본점 각각에서 구해진 경향벡터의 합을 이용하여 다음의 식 <2>와 같은 벡터평균을 정의한다.

$$\vec{R}_{av}(x, y) = \frac{1}{k+1} \left[\vec{R}(x, y) + \sum_{j=1}^k \vec{R}_j \right] \quad <2>$$

(\vec{R}_j = 이웃 지점의 단일벡터, k는 이웃 지점의 수)

이를 ‘이동벡터’라고 한다. 만일 각 점의 경향벡터합에서 잡벡터의 비중이 클 경우 이동벡터의 크기, 즉 $|\vec{R}_{av}(x, y)|$ 의 값은 작게 나타날 것이다. 그러나 잡벡터의 비중이 작을 경우는 이동벡터의 크기가 크게 나타날 것이다.

③ 유의성 검증

퇴적물 이동벡터가 구해지게 되면 해당지역의 퇴적물 이동벡터가 실제 퇴적물 이동방향을 대표할 수 있는 지를 평가하기 위하여 매우 엄격한 검증 기준을 적용하게 된다. 이를 위해 고유벡터의 길이 L(the length of the characteristic vector)을 정의한다. L 값은 아래의 식 <3>과 같이 표현된다.

$$L = \sum_{i=1}^N |\vec{R}_{av}(x, y)_i| \quad <3>$$

만일 각 점의 퇴적물 이동벡터가 특별한 경향을 보이지 않은 잡벡터로부터 얻어진 값이라면 상쇄

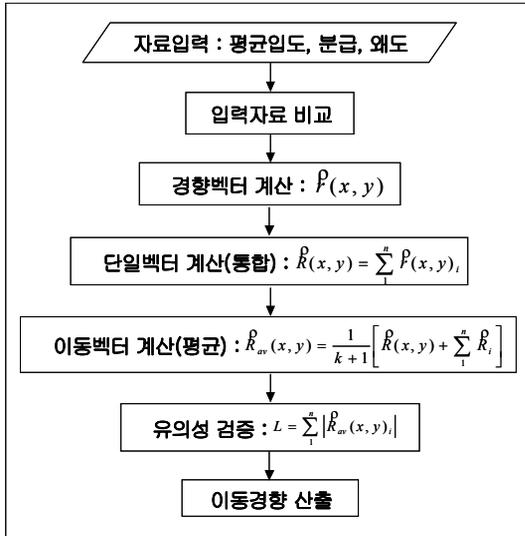


그림 3. 퇴적물 이동방향의 산출과정

효과에 의해 그 크기가 작아지게 될 것이다. 이에 비해 어떤 경향을 나타내는 벡터들로부터 얻어진 값이라면 그 크기가 커질 것이다. 따라서 앞 절의 절차로부터 얻어진 퇴적물 이동벡터가 유의한 값인지 여부를 판단하기 위해서는 무작위로 배치된 자료로부터 얻어진 값에 비해 큰 값이라는 점을 확인해야 한다.

각 지점에서 얻어진 퇴적물 입도 통계치를 무작위로 재배치한 뒤 동일한 절차로 걸쳐 퇴적물 이동벡터 L 값을 구하고, 이와 같은 절차를 수 차례 반복하면 무작위로 배치한 경우에 얻게 되는 L 값의 분포를 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 분포에서 상위 99%에 해당되는 L 값(L_{99})과 실제자료에서 얻는 L 값을 비교하였을 때 실제 자료에서 얻은 L 값이 더 크다면 유의하다고 판단할 수 있다. 그러나 반대의 경우에는 유의하지 못하다고 판단할 수 있다.

3. 퇴적물 이동방향의 산출과 지형변화 분석

삼각주연안 사주섬 퇴적체를 구성하고 있는 퇴적물의 실제 이동방향을 파악하기 위하여 퇴적물 이동벡터를 산출하였다. 진우도, 신자도, 도요등에서 표층퇴적물 시료를 채취한 지점의 좌표와 퇴적물 이동벡터의 방향과 크기를 계산하였다. 산출된

퇴적물 이동벡터가 실제 퇴적물 이동방향을 대표할 수 있는지는 고유벡터의 길이 L 을 이용하여 검증하였다. 신자도와 도요등에서는 고유벡터의 길이가 무작위 반복 산출로 얻어진 고유벡터 길이 분포의 99% 이상이라는 조건을 만족하여 유의한 것으로 나타났으나, 진우도의 경우 고유벡터의 길이가 무작위 반복 산출한 고유벡터 분포의 상위 99% 수준을 만족하지 못하였다. 이 연구의 퇴적물 이동방향 분석은 이동벡터의 유의성 검정을 만족하는 신자도와 도요등에 대해서만 실시하였다.

1) 신자도의 퇴적물 이동방향과 지형변화

신자도를 대상으로 산출한 퇴적물의 이동방향을 나타낸 것이 <그림 4>이다. <그림 4>에서 화살표로 나타난 것이 신자도의 퇴적물 이동벡터이다. 이동벡터의 방향은 신자도의 해안에서 퇴적물이 이동하는 (순)방향을 지시한다. 신자도의 경우 퇴적물이 외해에서 육지로 이동하는 패턴을 보이고 있다. 해안선에 평행한 방향에 대해서는 퇴적물의 순 이동방향이 사주섬의 동단과 서단을 향해 다소 집중되는 경향을 보이고 있다. 퇴적물 이동벡터의 크기를 살펴보면 퇴적물의 이동방향이 집중하는 경향을 보이는 지역에서 상대적으로 긴 길이가 나타난다. 이동벡터의 길이가 절대적인 퇴적물 이동량을 지시하는 것은 아니지만, 유사한 방향으로 형성되는 이동벡터의 합으로 크기가 결정된다는 점을 감안하면 상대적으로 이동벡터의 크기가 크게 나타나는 지역에서 퇴적물이 집중되는 경향을 보일 것이라고 해석할 수 있다.

항공사진 분석을 통해 얻어진 1996년과 2001년 사이의 신자도 지형변화 패턴은 <그림 5>와 같다³⁾.

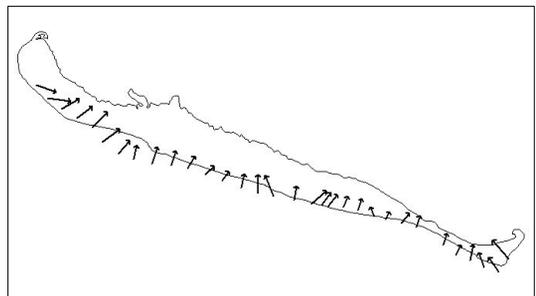


그림 4. 신자도의 퇴적물 이동벡터 분포

신자도의 5년간의 지형변화는 사주섬 서단과 동단에 위치한 조수통로 부근에서 집중적으로 발생하였음을 알 수 있다. 서쪽의 조수로 부근에서는 사주섬의 서단이 북쪽으로 휘어져 분기사취(recurved spit)형태로 변화해 가는 양상을 보이고 있으며, 동쪽 조수로 부근의 경우 지형의 축소와 함께 북서쪽으로 이동하는 형태를 확인할 수 있다. 이와 같은 지형변화의 패턴은 퇴적물 이동벡터로부터 얻어진 퇴적물(순)이동방향과 잘 부합한다. 다만 퇴적물의(순)이동방향으로부터 사주섬의 부피증가 혹은 감소여부를 판정하기는 어렵다. 퇴적물(순)이동방향과 지형변화의 방향은 일치하나 지형변화의 측면에서 보면 서단의 경우는 부피가 유지되면서 이동한 것으로 나타나는 반면 동단의 경우는 사주섬의 협소화 형태로 나타나고 있기 때문이다.

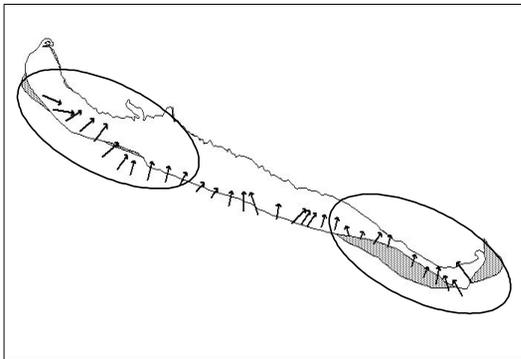


그림 5. 신자도의 퇴적물 이동방향과 지형변화 (2001년 지형이 1996년 지형(음영 처리) 위에 표현되어 있다.)

2) 도요등의 퇴적물 이동방향과 지형변화

도요등을 대상으로 산출한 퇴적물의 이동방향을 나타낸 것이 <그림 6>이다. <그림 6>에서 화살표로 나타난 것이 도요등 해안의 퇴적물 이동벡터이다. 도요등의 경우 퇴적물의(순)이동은 사주섬의 서쪽 영역의 경우 외해에서 육지쪽으로 이동하는 양상을 보이며, 동쪽의 경우는 육지에서 외해 쪽으로 전진하는 양상을 보인다.

항공사진 분석을 통해 얻어진 1996년과 2001년 사이의 지형변화 패턴은 <그림 7>과 같다. 이 기간 동안 도요등의 경우 동쪽과 서쪽에서 서로 분리되어 있던 퇴적체들이 하나로 결합하면서 단일

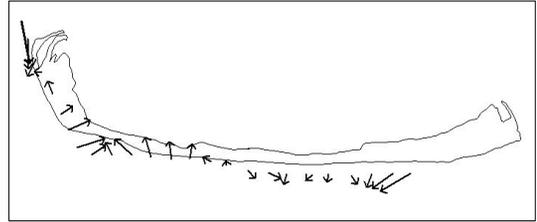


그림 6. 도요등의 퇴적물 이동벡터 분포

한 사주섬을 이루는 형태로 지형변화가 진행되었다. 그 과정에서 현 사주섬 서쪽의 퇴적체는 형태를 유지하면서 내륙 쪽으로 이동하였고 현 사주섬 동쪽의 퇴적체는 회전을 하면서 부피가 증가한 것으로 나타났다.

도요등의 경우 사주섬 서쪽에서 확인되는 퇴적물 이동방향은 사주섬 서쪽의 지형변화를 비교적 잘 설명하고 있으나 동쪽의 경우는 과거의 지형변화를 반영하고 있지 않는 것으로 보인다. 사주섬의 전면에 해당하는 남쪽방향으로 퇴적물 이동벡터가 집중되고 있는 것은 수면 하에서 지속적으로 퇴적이 진행되어 속도의 성장을 지시하는 것으로 해석될 여지는 있으나 분명하지는 않다.

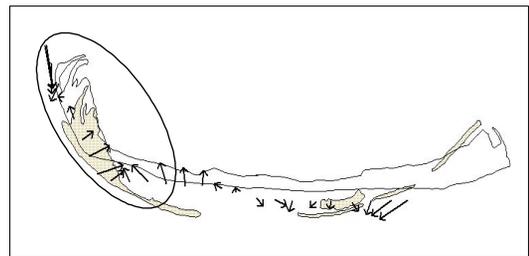


그림 7. 도요등의 퇴적물 이동방향과 지형변화 (어둡게 나타나는 부분이 1996년 지형이며 투명하게 처리된 부분이 2001년 지형이다.)

4. 사주섬 지형변화와 퇴적물 이동벡터법의 활용에 대한 논의

앞서 제3장에서 진행된 연구결과를 통해 볼 때, 낙동강 하구역의 사주섬 지형변화를 연구하는 과정에서 퇴적물 이동벡터의 활용 가능성이 있음을 확인할 수 있었다. 전반적으로 퇴적물 이동벡터로부터 얻어진 퇴적물 순이동방향은 항공사진을 통해 추출한 지형변화 패턴을 어느 정도 반영하고

있음을 보여준다. 그렇지만 퇴적물 이동벡터법을 이용한 퇴적물의 이동방향을 사주섬 지형변화를 연구하는 과정에 활용하기 위해서는 두 가지 측면의 논의가 필요하다.

우선 한 가지 유의해야 할 점은 퇴적물 이동벡터법을 이용한 퇴적물 이동방향이 대표하는 시간적 규모에 대한 문제이다. 이 연구에서 사용된 항공사진을 통해 분석된 지형변화 패턴은 1996년부터 2001년까지 5년간의 변화를 의미하고, 퇴적물 이동벡터는 2005년에 채취된 시료로부터 얻은 것이다. 즉, 지형변화의 방향에 대한 자료와 퇴적물 이동방향을 대한 자료에는 4년의 시간차가 존재한다. 이 두 가지 자료를 종합적으로 연구한 결과 신자도에 대한 퇴적물 이동방향과 항공사진에서 나타난 지형변화의 패턴이 비교적 잘 부합하는 것에 반하여, 도요등에서 얻은 분석 결과는 서쪽지역에서는 부합하지만 동쪽 지역에서는 부합하지 않는 결과가 나타났다.

도요등의 경우 하구둑이 축조된 후, 낙동강의 주요 유출로가 되고 있는 낙동강 본류(동낙동강)의 하류에 위치하여 하구둑 수문 개폐에 따른 영향을 직접적으로 받고 있다. 따라서 변화속도가 다른 사주섬에 비해 매우 빠를 가능성이 높고 실제 사주섬 지형변화를 다룬 연구에서 가장 큰 변화양상을 보이고 있다는 것을 고려한다면(김성환, 2005), 도요등에서의 퇴적물 이동벡터와 지형변화 패턴이 부합하지 않는 문제는 2001년부터 2005년 사이에 기존에 확인된 방향과는 다른 방향으로 지속적인 지형변화가 상당한 수준으로 진행되었기 때문에 발생한 것일 수도 있다.

이러한 퇴적물 이동방향과 지형변화 패턴의 부합 관계를 반대로 해석한다면, 신자도에서는 항공사진에서 확인된 방향과 유사한 방향으로 지형변화가 진행되고 있다고 볼 수 있다. 즉, 현재의 퇴적물 이동방향을 유발한 영력이 신자도에서는 유사한 형태로 지속적으로 유지되고 있음을 의미한다고도 할 수 있다. 퇴적물 이동벡터법으로 얻어진 이동방향이 실제 사주섬 지형변화 방향과 잘 일치한다면 이러한 환경에서 진행되는 주요 퇴적작용은 조석 한 주기마다 반복되는 과정과 일치한다는 의미를 가질 수 있다. 격변적인 사건에 의해 지형변화가 이루어진다고보다는 규칙적이고 지속적인

지형형성과정이 진행되는 환경으로 볼 수도 있을 것이다. 이러한 측면에서 퇴적물 이동벡터법에 의한 퇴적물 이동방향을 지형변화에 활용하는 과정에서는 연구 대상지역에서의 지형변화율을 고려하여 퇴적물 이동벡터가 과연 어느 정도까지의 시간 규모를 반영할 수 있을지에 대한 보다 신중한 고려가 필요하다고 생각된다.

또한 퇴적물 이동경로 분석에서는 이동벡터의 길이를 양적 의미로 추정하는 것이 불가능하다. 퇴적물 이동벡터를 통해서 실제 퇴적물이 이동하는 과정에서 나타나는 이동률에 대한 정보 획득이 어렵다. 이 연구의 대상지역인 신자도의 경우에서도 나타났지만 퇴적물 이동벡터의 집중화 경향을 통해서도 지형변화의 양적인 해석이 이루어지기 힘들다. 퇴적물 (순)이동방향과 지형변화의 방향은 일치하나 지형변화의 측면에서 보면 서쪽의 경우는 부피가 유지되면서 이동한 것으로 나타나는 반면 동쪽의 경우는 사주섬의 협소화 형태로 나타나고 있기 때문에 퇴적물의 (순)이동방향으로부터 사주섬의 부피증가 혹은 감소여부를 판정하기는 어렵다. 이러한 부분을 보완하기 위해서는 연구지역의 연속 및 동시 파랑관측이나 부표 추적 등 수리역학적인 관측과 연구의 필요성이 제기된다.

5. 결론

이 연구에서는 입도경향 분석을 통해 도출한 퇴적물 이동방향이 낙동강 삼각주연안 사주섬의 지형변화를 이해하는 과정에 적절하게 활용될 수 있는지를 검토하고자 하였다. 퇴적물의 이동방향은 현재 진행되고 있는 퇴적과정에 대한 정보와 함께 퇴적과정의 결과로 나타나는 퇴적체의 성장이나 쇠퇴 등의 지형변화와 연결되어 있다. 입도경향 분석을 통해 산출된 퇴적물의 이동방향이 실제 지형변화의 패턴과 잘 부합한다면 시간적으로 주로 중 규모의 지형변화를 다루는 측면과 미시적인 규모에서 지형형성 과정을 다루는 측면을 연결할 수 있게 되어 낙동강 삼각주연안 사주섬 지형변화 연구에 효과적인 접근법이 될 수 있을 것이다. 이 연구에서는 현재까지 방법론으로 제시된 입도경향분석 중 Gao and Collins(1992)의 ‘퇴적물 이동벡터법’의 활용 가능성을 살펴보았다.

사주섬을 구성하고 있는 전면 조건대 표층 퇴적물의 입도경향 분석을 통해 도출한 퇴적물의 이동 방향은 전반적으로 1996년부터 2001년까지 항공사진 분석을 통해 확인된 지형변화의 방향과 일치하는 것으로 나타났다. 신자도의 경우에는 사주섬의 전체 지역에서 퇴적물의 이동방향과 지형변화의 방향이 잘 부합하는 것으로 나타난 반면, 도요등의 경우에는 사주섬의 서쪽 지역을 제외한 지역에서는 부분적으로 부합하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 분석결과를 통해 신자도의 경우 퇴적물 이동방향을 유발한 과정이 지형변화의 방향과 유사한 방향으로 지속적으로 진행되고 있는 것으로 볼 수 있으며, 도요등의 경우에는 지형변화의 방향과 퇴적물 이동방향을 유발한 과정이 다른 방향으로 이루어지고 있다고 볼 수 있다.

이상의 연구결과를 통해 볼 때, 퇴적물 이동백터법에 의한 퇴적물 이동방향 분석이 낙동강 하구역의 사주섬 지형변화를 연구하는 과정에서 퇴적물 이동백터의 활용 가능성이 있음을 확인할 수 있다. 그렇지만 지형변화의 연구에서 퇴적물 이동방향을 설명하는 시간의 규모 측면에서는 신중한 접근이 필요하다. 일정 기간 지속된 지형변화의 방향과 퇴적물 이동방향이 부합하는 경우에는 격변적인 사건에 의한 지형변화보다는 규칙적이고 지속적인 지형형성과정에서 진행되는 환경으로 해석이 가능하지만 추후 다양한 지역에서의 사례연구를 통하여 검토하여야 할 주제로 생각된다.

註

- 1) 이는 1861년의 대동여지도와 1916년 일제 하에서 제작된 지형도를 비교하여 얻어진 결론이다(반용부, 1986). 1861년의 대동여지도는 현재의 대저도와 명호도만이 나타나 있는데 반해, 1916년에는 현재의 신호도, 진우도, 대마등, 장자도가 나타나기 때문이다. 그러므로 1900년도를 전후하여 사주섬의 형성이 활발하게 이루어지는 원인이 제공된 것은 분명하다. 그러나 보다 그보다 소급되는 시기를 포괄하는 보다 장기적인 변화패턴에 대해서는 아직 알려진 바가 없다.
- 2) 시료채취열의 남북방향 15m 폭은 사주섬 전면에 형성되는 조건대의 사면거리를 30m로 보고, 가장자리 효과를 최소화하기 위한 장치로서 최소 3개열이 필요하다는 가정으로 각각 15m 간격의 시료채취열을 설정한 결과이다.
- 3) 낙동강 하구의 삼각주연안 사주섬이 나타나 있는 국

토지정보원에서 간행(2005년 12월)된 수치지형도는 1:5,000 축척의 경우 2001년의 항공사진을 반영하고 있으며, 1:25,000 축척의 경우는 1996년의 항공사진에 나타난 지형을 반영하고 있다. 따라서 최근에 촬영된 항공사진을 이용한 별도의 지도화 작업이 이루어지지 않는다면 지형변화의 분석에 한계가 있음을 밝혀둔다.

참 고 문 헌

김성환, 2005, 하구둑 건설 이후 낙동강 하구역 삼각주 연안사주의 지형변화, 대한지리학회지, 40(4), 416-427.

반용부, 1986, 낙동강 하구 연안사주 지형, 부산여대논문집, 21, 463-518.

성효현·방경화, 2005, 만리포 해변퇴적물의 동절기 퇴적환경, 한국지형학회지, 12(2), 87-98.

신동혁·이희일·한상준·오재경·권수재, 1998, 황해 가로림만 조건대 표층퇴적물의 이동방향, 한국해양학회지, 3(2), 59-70.

오건환, 1999, 낙동강 삼각주 말단의 지형변화, 한국지리학회지, 13(1), 67-78.

추용식, 2001, Sediment dynamics and maintenance of processes of linear tidal sand body: Jangan sandbank in the central west coast of Korea, 서울대학교 대학원 박사학위논문.

Blott, S.J. and Pye, K., 2001, Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments, *Earth Surface Processes and Landform*, 26, 1237-1248.

Cencini, C., 1998, Physical processes and human activities in the evolution of the Po Delta, Italy, *Journal of Coastal Research*, 14(3), 774-793.

Cheng, P., Gao, S. and Bokuniewicz, H., 2004, Net sediment transport patterns over the Bohai Strait based on grain size trend analysis, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60, 203-212.

Gao, S. and Collins, M., 1992, Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of 'transport

- vectors', *Sedimentary Geology*, 81, 47-60.
- McLaren, P. and Bowells, D., 1985, The effects of sediment transport on grain-size distributions, *J. Sediment. Petrol.*, 55, 457-470.
- McLaren, P., 1981, An interpretation of trends in grain size measures, *J. Sediment. Petrol.*, 51 (2), 611-624.
- Pedreras, R., Howa, H.L. and Michel, D., 1996, Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas, *Marine Geology*, 135, 35-49.
- Roux, J., 1994, An alternative approach to the identification of net sediment transport paths based on grain-size trends, *Sedimentary Geology*, 94, 97-107.
- Stone, C.W. and McBride, R.A., 1998, Louisiana barrier islands and their importance in wetland protection: forecasting shoreline change and subsequent response of wave climate, *Journal of Coastal Research*, 14(3), 900-915.
- Stutz, M. L. and Pilkey, O. H., 2001, A review of global barrier island distribution, *Journal of Coastal Research*, SI. 34, 15-22.
- Stutz, M.L. and Pilkey, O.H., 2002, Global distribution and morphology of deltaic barrier island systems, *Journal of Coastal Research*, SI. 36, 694-707.
- 교신 : 김성환(국립환경과학원 생태평가과, phygeokim@chol.com)
 - Correspondence: Kim, Sung Hwan(Ecosystem Survey Team, National Institute of Environmental Research, phygeokim @chol.com)
- (집수 : 2007. 3. 26, 채택 : 2007. 4. 3)