

퇴적물 이동경로 식별을 위한 입도경향 분석법의 가능성과 한계

김성환* · 류호상** · 유근배***

Grain-Size Trend Analysis for Identifying Net Sediment Transport Pathways: Potentials and Limitations

Sung Hwan Kim*, Ho Sahng Rhew**, and Keun Bae Yu***

요약 : 입도경향 분석법은 파이척도로 표현된 평균입도, 분급, 왜도 등 퇴적물 입도조직변수가 퇴적물의 이동경로를 따라 특정한 경향을 보이는 성질을 이용한 퇴적물 이동경로 식별 방법론이다. 적용이 간편하고 저렴하여 지형학 연구에 널리 응용될 수 있는 가능성을 지니고 있으나 방법론상의 한계도 몇 가지 측면에서 지적되고 있어 주의가 필요하다. 이 연구는 McLaren과 Bowles의 1차원 경로분석법, Gao와 Collins, Le Roux의 2차원 이동벡터법 등 현재까지 정립된 입도경향 분석의 대표적인 세 가지 기법을 비교 평가하여 적절한 활용법을 도출하고, 입도경향 분석의 추후 연구과제를 제안한 것이다. McLaren-Bowles의 1차원 경로분석법은 연구자의 현장경험을 분석에 효과적으로 결합시킬 수 있고 X-분포를 통해 퇴적환경에 대한 해석을 제공해주며 장기적인 퇴적물 순이동 패턴을 파악하는데 효과적이거나 연구자의 주관적 해석에 의존해야 한다는 점, 식별할 수 있는 시간 해상도가 낮다는 점 등이 단점이다. Gao-Collins의 2차원 이동벡터법은 명확한 절차, 2차원적인 시각화, 세밀한 시간 해상도 등이 장점이지만, 입계거리 선정, 잡벡터 제거과정 등이 문제를 유발할 수 있으므로 분석 시 주의를 요한다. 셋째, Le Roux의 2차원 이동벡터법은 확장된 경험규칙과 조직변수 간의 구배를 고려하고 시간해상도도 세밀하지만, 분석개념이 모호하고 복잡하다. 입도경향 분석은 현장에 대한 연구자의 이해도, 조사하고자 하는 퇴적물 순이동 패턴의 시간적 스케일, 초점을 맞추고자 하는 정보 등에 따라 적절한 기법을 선택하고, 거기에 부합되는 시료채취방안을 기획하는 것이 중요하다. 또한 입도경향 분석이 지형학 연구에 기여하기 위해서는 시료채취 깊이, 교란층의 두께 등 시료채취 과정의 요소들과 퇴적물 순이동 패턴이 지시하는 시간스케일 간의 관계가 체계적으로 규명되어야 한다고 판단된다.

주요어 : 입도경향분석, 퇴적물 순이동경로, 1차원 경로분석, 2차원 이동벡터

Abstract : Grain-Size Trend Analysis is the methodology to identify net sediment transport pathways, based on the assumption that the movement of sediment from the source to deposit leaves the identifiable spatial pattern of mean, sorting, and skewness of grain size. It can easily be implemented with low cost, so it has great potentials to contribute to geomorphological research, whereas it can also be used inadequately without recognition of its limitations. This research aims to compare three established methods of grain-size trend analysis to search for the adequate way of application, and also suggest the research tasks needed in improving this methodology. 1D pathway method can incorporate the field experience into analyzing the pathway, provide the useful information of depositional

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

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

*** 서울대학교 지리학과 교수(Professor, Department of Geography, Seoul National University), kbyu@plaza.snu.ac.kr

environments through X-distribution, and identify the long-term trend effectively. However, it has disadvantage of the dependence on subjective interpretation, and a relatively coarse temporal scale. Gao-Collins's 2D transport vector method has the objective procedure, has the capability to visualize the transport pattern in 2D format, and to identify the pattern at a finer temporal scale, whereas characteristic distance and semiquantitative filtering are controversial. Le Roux's alternative 2D transport vector method has two improvement of Gao-Collins's in that it expands the empirical rules, considers the gradient of each parameters as well as the order, and has the ability to identify the pattern at a finer temporal scale, while the basic concepts are arbitrary and complicated. The application of grain size trend analysis requires the selection of adequate method and the design of proper sampling scheme, based on the field knowledge of researcher, the temporal scale of sediment transport pattern targeted, and information needed. Besides, the relationship between the depth of sample and representative temporal scale should be systematically investigated in improving this methodology.

Key Words : grain-size trend analysis, net transport pathways, 1-D pathway, 2-D transport vector

1. 서론

1) 연구배경과 필요성

입도경향분석(grain size trend analysis, GSTA)은 파이(ϕ ; phi)척도로 측정된 평균입도, 분급, 왜도 등 세 가지 퇴적물 입도조직변수의 공간적 경향 패턴을 이용하여 퇴적물의 순이동경로를 추정하는 방법론이다. 입도경향분석은 퇴적물 이동경로를 추정하는데 퇴적물 입도조직변수의 공간적 분포 정보만을 활용하기 때문에, 퇴적물 이동경로를 추정하는 여타 방법론에 비해 간편하고 저렴하며, 수치 모델링 등 다른 연구와 연계시켜 진행시킬 수 있다는 장점을 지니고 있다 (Hughes, 2005). McLaren(1981)에 의해 최초로 기본적인 아이디어가 제안된 이후 McLaren and Bowles(1985)의 McLaren-Bowles 방법(이하 MB법), Gao and Collins(1992)의 Gao-Collins 방법(이하 GC법), Le Roux(1994a)의 Le Roux 방법(이하 Rx법) 등이 개발되었다. 입도경향분석은 만입부(McLaren et al., 1993), 대륙붕(Gao et al., 1994), 조간대 해빈(Pederos et al., 1996) 등 다양한 퇴적환경에서 그 타당성이 확인된 바 있다. 국내의 경우 1990년대 이후 GC법을 중심으로 입도경향분석이 도입되어 대륙붕의 사퇴(추용식, 2001), 대조차 환경의 만입부(신동혁 외, 1998), 해빈(유규철 · 오재경, 1999; 성효현 · 방경화, 2005), 사주섬(김성환 · 류호상, 2007) 등의 환경에서 퇴적물의 순이동 경로를 분석하는 데 적용되었다.

입도경향분석은 지형학 연구에 널리 활용될 수 있다. 퇴적물 이동경로는 퇴적지형의 성장과 쇠퇴, 변화 추세, 취약도 등을 분석하고 이해하는 데 필수적인 정보 중 하나이기 때문이다. 지형학 연구자들에게 익숙한 퇴적물 입도조직변수를 이용한다는 점과 시료의 수집과 분석과정이 복잡하지 않고 간편하다는 점, 소요 비용이 상대적으로 저렴하다는 점 등을 감안하면, 입도경향분석은 퇴적물 이동경로와 관련된 지형학적 연구 문제를 해결하는 데 중요하게 활용될 수 있다.

반면 입도경향분석은 오용될 가능성 또한 크다. 입도경향분석은 간편하고 저렴하기 때문에 일단 분석절차에 익숙해지게 되면 누구나 쉽게 방법론에서 제시하는 절차에 따라 퇴적물 입도변수 자료로부터 퇴적물의 (순)이동경로를 추출할 수 있다. 그러나 입도경향분석이 기반을 두고 있는 핵심전제는 확고한 '법칙'이라기 보다는 아직은 경험적인 지지 증거를 다수 확보하고 있는 '그럴듯한 가정'에 가깝다. 이런 이유로 입도경향분석에 내재되어 있는 문제점들을 파악하지 않은 채 사용하게 될 경우 잘못된 결론에 도달할 수 있다. 입도경향분석은 현재 두 가지 측면에서 비판을 받는다. 첫째, 입도경향분석의 기본전제를 만족하는 현상이 극히 제한되어 있다는 것이다. 이런 비판을 제기하는 연구자들은 입도경향분석이 매우 제한적이고 이상적인 환경을 가정하고 있기 때문에, 비록 다양한 퇴적환경에서 활용될 수 있는 가능성을 보여주는 연구들이 있기는 하나(McLaren et al., 1993; Gao et al., 1994; Pederos et al., 1996), 전제 조건을 만족시키지 못하

는 환경에서는 현실을 반영하는 결과를 내지 못한다고 주장한다(Masselink, 1992; 1993). 또한 하천과 대륙붕의 퇴적물 이동을 다룬 몇몇 연구들은 입도경향분석이 퇴적물의 실제 이동경로를 반영하지 못하는 것처럼 보이며 현장 적용가능성이 의문스럽다고 지적한다 (Asselman, 1999; Vanwesenbeeck and Lankneus, 2000). 이와 같은 비판은 입도경향분석을 적용하고자 할 때 대상지역의 퇴적환경에 대한 고려가 필요할 수 있음을 시사한다. 둘째, 입도경향분석 절차가 연구자의 주관적 판단으로부터 자유롭지 못할 뿐 아니라 원자료의 정보를 왜곡시킬 수 있다는 것이다. 예를 들어, MB법의 경우 경로를 설정하는 과정에서, GC법의 경우 임계거리 선정과 잡벡터 제거 과정에서, Rx법의 경우 퇴적물 이동벡터를 표준화시키는 과정에서 왜곡이 발생할 수 있다. 다만 이와 같은 비판은 입도경향분석 방법론이 연구자의 주관을 최소화하고 원자료의 정보를 최대한 보전하는 방향으로 개선되는 추동력이었다는 점에서 입도경향분석의 유효성에 의문을 던지는 비판이라고 할 수는 없다(Poizot *et al.*, 2006). 이와 같은 비판은 입도경향분석의 적절한 사용을 위해 각 방법론의 기본전제와 분석절차, 장단점 등에 대한 이해가 우선되어야 하며 기계적인 사용을 지양하고 결과해석에 주의를 기울여야 한다는 점을 상기시킨다.

현재까지 정립된 입도경향분석 방법론은 MB법, GC법, Rx법 등 세 가지이다. 각각의 방법은 입도경향을 이용하여 퇴적물의 순이동을 추정한다는 면에서는 공통점을 가지고 있지만, 문제를 다루는 방식과 산출되는 정보 등에서 차이를 보이고, 사용 목적에 따라 각 방법론별로 서로 다른 장단점을 지니고 있다. 세 가지 방법론을 중심으로 입도경향분석의 기본전제와 분석절차를 이해하고 그 가능성과 문제점을 짚어보는 것은 지형학 연구에 입도경향분석을 적절하게 적용하고 분석결과를 올바르게 해석하는 데 도움이 될 수 있을 것이다.

2) 연구목적과 연구범위

이 연구는 현재까지 정립된 입도경향분석 방법론인 MB법, GC법, Rx법을 비교 평가하여 적절한 활용법을

도출하는 한편, 입도경향분석의 개선을 위한 추후 연구과제를 제안하는 것을 목적으로 한다. 문헌연구를 통해 입도경향분석의 기본전제와 각 방법론별 장단점을 비판적으로 검토하고 각 방법론의 적절한 활용 지침을 제시하고자 하였다. 이를 위해 크게 두 가지 측면에 초점을 맞춰 분석을 진행하였다. 첫째는 입도경향분석의 출현과 발전과정을 이해하는 것이다. 입도경향분석의 기본적인 문제의식을 살펴보는 한편 세 가지 방법으로 분화한 과정을 추적하였다. GC법이 MB법의 개선 방안으로, Rx법이 GC법의 개선 방안으로 제안되었으나, 어느 하나가 다른 하나를 대체하지 못하고 세 가지 방법이 서로 상호보완적인 위치를 점하게 된 이유를 분석하였다. 둘째는 입도경향분석의 타당성과 결부되어 있는 주요 쟁점들에 비추어 MB법, GC법, Rx법의 개별 방법론들의 장단점을 살펴보는 것이다. MB법, GC법, Rx법이 각각의 쟁점에 대해 제시하고 있는 입장을 통해 각각의 방법이 지니는 장점과 약점을 정리해보았다. 위의 두 과정을 통해 입도경향분석이 지형학 연구 분야에서 활용될 때 유념해야 할 부분과 추후 보다 체계적으로 규명되어야 하는 쟁점을 정리하였다.

2. 퇴적물 입도경향 분석의 발전 과정과 확립된 절차

1) 입도경향과 퇴적물 이동의 연결고리: 기본 경험칙의 제안

퇴적물 입경의 분포특성은 기원지의 퇴적물 특성과 퇴적과정에 영향을 미치는 여러 가지 환경요인에 의해 결정되기 때문에 퇴적환경이나 퇴적작용에 대한 중요한 정보를 담고 있는 지시자로 인식되어 왔다. 퇴적물 입경의 분포특성과 퇴적환경·퇴적작용을 연관시키려는 시도는 1930년대부터 지속적으로 이루어졌다.

초기의 문제의식은 퇴적물 입경의 분포특성을 요약하는 적절한 방법이 무엇인지를 규명하는 것이었다. Krumbein(1938)은 자신의 관찰과 측정을 토대로 퇴적물의 입도가 파이척도, 즉 로그척도로 표현될 때 입도 분포가 정규분포를 따르는 것으로 보인다고 보고하고,

정규분포에 대해서는 이미 수학적 이론이 잘 확립되어 있으므로 파이척도가 퇴적물 입도를 분석하는 데 적절한 수단이 될 수 있다고 주장하였다. Krumbein (1934, 1938)의 주장은 이후 퇴적물 입도를 분석하는 연구자들 사이에서 널리 수용되어 퇴적물 입도를 분석하는 데 로그정규분포를 기본분포로 가정하고 입도통계치를 계산하는 경향이 일반화되었다¹⁾.

이후 1980년대에 이르기까지 퇴적물 입도의 분포특성을 다루는 연구를 관통하는 근본적인 문제의식은 '퇴적물 입도의 분포특성, 즉 퇴적물 입도조직 변수는 퇴적환경을 구분하는 지표로 활용될 수 있는가? 혹은 퇴적 프로세스의 구조를 분석하는 정보로 활용될 수 있는가?' 라는 것이었다. 만일 퇴적물 입도조직변수를 통해 퇴적환경 혹은 퇴적프로세스를 구분할 수 있는 방법이 확립된다면 퇴적물 입도정보는 과거 퇴적환경과 퇴적 당시 주도적으로 작용한 프로세스를 규명할 수 있는 도구가 될 수 있기 때문이다. 특히 1960년대를 중심으로 활발하게 진행된 연구는 크게 두 가지 범주로 구분할 수 있다. 하나는 퇴적물 입도조직변수를 이용하여 퇴적물의 기원 혹은 퇴적환경을 규명하고자 시도이고(Friedman, 1961; Shepard and Young, 1961), 다른 하나는 퇴적물의 분포 패턴을 통해 해당 환경에서 작동하는 주요 퇴적물 이동 프로세스 - 바닥 이동(surface creep or traction), 도약(saltation), 부유(suspension) - 를 규명하려는 시도이다(Klovan, 1966; Visher, 1969). 후자는 전자의 접근을 비판하는 과정에서 제시된 것으로서 당시로는 새로운 접근이었다. 그러나 1970년대를 거치면서 이러한 문제의식과 연구에 대한 근본적인 비판들이 제기되기 시작했다. 실제 측정된 자료들을 종합해 볼 때 입도조직변수의 특징을 특정한 퇴적환경 혹은 퇴적 프로세스와 연관 짓는 것은 무리가 따른다는 것이다(Syvitski and Murray, 1977; Tucker and Vacher, 1980). 퇴적물 입도와 퇴적환경, 퇴적 프로세스를 연결 짓는 전통적인 연구들은 이와 같은 비판에 직면하며 대부분 추동력을 잃었고, 현재는 이와 같은 가정 자체가 신뢰하기 어려운 것이라는 데 대부분의 연구자들이 동의하고 있는 상황이다.

입도경향분석의 기본분석틀을 제시한 McLaren

(1981)의 연구는 퇴적물 입도조직 변수가 담고 있는 정보를 다른 방식으로 해석할 수 있음을 보여주었다. 그는 퇴적물 입도분포 자체보다는 퇴적물 입도특성의 '공간적 분포'로 눈을 돌렸다. 그는 평균입도, 분급, 왜도 등 세 가지 입도조직변수의 공간적 경향을 이용하여 퇴적물의 이동경로를 추정하는 가설적인 관계를 제안하였다. 퇴적물 입도조직변수의 공간적 추세가 퇴적물의 이동경로를 지시하는 도구가 될 수 있다는 가능성에 대해서는 Krumbein(1938)에 의해 이미 간단히 언급된 바 있고, 입도평균이나 분급과 같은 개별 조직변수를 이용하여 퇴적물의 이동방향을 규명하려는 시도도 없었던 바는 아니지만(Stapor and Tanner, 1975; McCave, 1978), 현재와 같은 입도경향분석의 기본틀은 McLaren(1981)과 McLaren and Bowles(1985)에 힘입은 바가 크다.

McLaren(1981)은 퇴적물이 기원지로부터 퇴적지로 이동하면서 퇴적물 입도조직변수 상에 식별 가능한 추세가 발생한다고 가정하였다. 퇴적물의 이동과 결부되어 발생하는 공간적 추세는 퇴적과정(바닥이동, 도약, 부유)이나 퇴적환경(사구, 해변, 석호 등)과 무관하다고 주장한다. McLaren(1981)은 퇴적물 공급원이 단일하고 세립 퇴적물이 조립 퇴적물에 비해 더 잘 이동한다고 전제할 수 있을 경우, 두 지점(기원지, 퇴적지)의 세 가지 퇴적물 입도조직변수 간에 상정할 수 있는 8가지 경향 중 다음의 2가지 경향을 실제 이동을 지시하는 경험칙으로 간주할 수 있다고 주장하였다²⁾.

$$\text{case I. } \mu_1 < \mu_2, \sigma_1^2 > \sigma_2^2, \gamma_1 > \gamma_2$$

$$\text{case II. } \mu_1 > \mu_2, \sigma_1^2 > \sigma_2^2, \gamma_1 < \gamma_2$$

(μ 는 파이척도로 표시된 평균입도, σ^2 는 분급, γ 는 왜도이며, 첨자 1은 기원지, 2는 퇴적지를 의미한다.)

case I은 평균입도는 세립해지고, 분급은 양호해지며, 왜도는 음의 방향으로 이동하는 경우이다. 이를 이후 (F, B, -)로 표현한다. case II는 평균입도는 조립해지고, 분급은 양호해지며, 왜도는 양의 방향으로 이동하는 경우이다. 이를 이후 (C, B, +)로 표현한다. case II는 보통 조립질 퇴적물이 이동할 때 '방패효과'로 인해 세립질 퇴적물의 이동이 저해되는 현상을 반영하

는 것으로 해석한다(Pye and Tsoar, 1990; Hughes, 2005). McLaren(1981)은 수조실험에서 얻어진 자료들과 현장자료들을 토대로 이와 같은 두 가지 경향을 퇴적물 이동경로를 지시하는 '경험칙'으로 인정될 수 있다고 주장했다.

McLaren(1981), McLaren and Bowles(1985)가 제안한 두 가지 경험칙은 이후 전개되는 입도경향분석 방법론 발전의 이론적 기반이 된다. McLaren(1981)은 자신이 제안한 경험칙을 근거로 퇴적물 입도조직원수와 퇴적환경, 퇴적 프로세스를 연결 지으려 했던 기존의 연구에서 '왜도'의 의미를 잘못 해석해 왔다고 지적한다³⁾. '왜도'란 단지 선별적인 침식과 퇴적이 일어났음을 의미하는 것이지, 특정한 퇴적환경을 지시하는 인자로 해석되기는 어렵다는 것이다. 또한 McLaren and Bowles(1985)는 2가지 경험칙을 이용하여 실제 퇴적물 이동경로를 분석하는 1차원 경로분석법을 제안하였다. 이것은 일종의 추론 통계학적 절차를 따르는 연역적 방법론으로서, 연구자가 예상하는 퇴적물 순이동경로상의 n 개 위치로부터 도출되는 $N = \frac{n(n-1)}{2}$ 개의 쌍에 대하여 경험칙을 만족시키는 경우의 수가 우연적으로 발생할 수 있는 경우의 수보다 충분히 큰 지를 판단하는 것이다. McLaren(1981), McLaren and Bowles(1985)의 일차원 경로분석법은 연구자들이 대상지역의 퇴적물 이동경로에 대하여 가지게 되는 직관을 경험칙에 근거하여 확인할 수 있는 방법을 제공하였다. McLaren은 자신의 일차원 경로분석법을 지속적으로 발전시켰다(McLaren *et al.*, 1993; Hughes, 2005). 그러나 퇴적물 이동은 일차원적인 프로세스라기보다는 2차원적인 프로세스이므로 McLaren의 1차원적 접근법을 2차원적으로 확장시키려는 노력이 계속 이어지게 된다.

2) 1차원 경로분석법에서 2차원 이동벡터 분석법으로 확장

McLaren and Bowles(1985)의 1차원 경로분석법을 2차원적 접근으로 확장하는 작업은 Gao and Collins(1992)에 의해 처음 시도되었다. Gao and Collins(1992)의 2차원적 확장은 MB법에 대한 비판에

근거를 두고 있다. Gao and Collins(1991)는 MB법에 대해 두 가지를 비판하였다. 첫째, MB법에서 채택하는 유효성 검정이 부적절하다는 것이다. MB법의 경우 퇴적물 이동이 없을 경우에도 기본 경험칙과 부합되는 결과를 얻을 수 있는 확률(배경확률, p_0)을 두 지점의 평균입도, 분급, 왜도 관계로부터 도출되는 8가지 경우 중의 하나로 가정한다. 즉, $p_0=0.125$ 이다. Gao and Collins(1991)는 기본 경험칙이 제시하는 평균입도, 분급, 왜도에 대한 조건들이 서로 연관되어 있으므로 각 경우가 독립인 것처럼 가정하여 배경확률을 일률적으로 $p_0=0.125$ 으로 설정하는 것은 문제가 있다고 지적한다. 그보다는 무작위화(randomization)를 통해 현장자료로부터 직접 배경확률을 계산하는 방식이 낫다고 제안한다. 둘째, MB법이 공간적인 관계를 고려하지 못하고 있다고 지적한다⁴⁾. Gao and Collins(1991)는 근접한 시료와 서로 떨어져 있는 시료를 동일한 방식으로 비교하는 것은 문제가 있다고 비판하면서 거리에 따른 시료 간의 상호관계를 고려하는 것이 필요하다고 주장한다. 이는 MB법의 일차원적 접근에 대한 비판이자 2차원적 접근의 필요성을 주장한 것이다.

Gao and Collins(1992)는 2차원 이동벡터 분석법을 제시하면서 위의 두 가지 문제에 대한 대안을 다음과 같이 제시하였다. 첫째, 공간적 관계를 고려하지 못하는 MB법의 한계를 극복하기 위해 '근린점 설정 임계거리(characteristic length)'라는 개념을 이용할 수 있다는 것이다. '근린점 설정 임계거리(이하 임계거리)'란 각 표본점들 간의 상호작용이 이루어진다고 간주할 수 있는 거리를 의미한다. Gao and Collins(1992)는 사전에 퇴적경로를 지정하고 경로 상의 점들 간에 가능한 조합들의 입도경향을 조사하는 MB 법의 방식 대신 입도경향을 비교할 표본점을 해당 표본점에서 임계거리 반경 내에 존재하는 다른 점들(근린표본점)로 제한하여 이 문제를 해결할 수 있다고 보았다. 둘째, 일률적인 배경확률을 적용한다는 문제점에 대해서는 무작위화(randomization) 과정을 이용하여 주어진 시료로부터 생성된 배경확률분포를 퇴적물 순이동방향의 통계적 유의성을 판단하기 위해 기준으로 삼는 방식을 제시하였다. Gao and Collins(1992)는 우선 임계거리 내에 위치한 다른 점들(근린표본점)과의 입도경향을

조사하여 기본 경험칙을 만족하는 쌍을 찾고 이동방향을 고려하여 두 점을 잇는 단위벡터(경향벡터, trend vector)를 정의한다. 각 표본점에서 정의된 경향벡터는 하나 이상일 수 있다. 경향벡터가 하나 이상일 경우 벡터합 방식으로 경향벡터의 합을 계산한다. 이렇게 얻어진 경향벡터 혹은 경향벡터의 합 속에는 퇴적물의 운반기작과 연관없이 무작위로 발생하는 효과에 의해 잡벡터(noise) 성분이 포함되어 있을 수 있다. 잡벡터 성분은 특정한 방향을 가지고 있지 않을 것이므로 평활법을 이용하여 공간적으로 평균화한다면 잡벡터 성분은 0에 가까운 값을 가지게 되고 순이동 방향만 남게 될 것이다. 이러한 논리에 바탕을 두고 각 표본점과 근린 표본점의 경향벡터 혹은 경향벡터의 합을 평균하여 구해진 최종 벡터량이 GC법이 제시하는 퇴적물 순이동 방향이다. Gao and Collins(1992)는 이 벡터량을 '이동벡터(transport vector)' 라고 부른다. 이렇게 얻어진 이동벡터(퇴적물 순이동방향)가 통계적으로 유의한지를 평가하기 위해 '고유길이(characteristic length)' 라는 개념을 도입한다. '고유길이'란 각 표본점의 퇴적물 이동벡터의 크기를 모두 합한 것이다. 각 표본점의 퇴적물 이동벡터의 크기(길이)가 클수록 퇴적물 순이동방향이 뚜렷하다고 판단할 수 있으므로 고유길이가 클수록 퇴적물 순이동방향이 무작위적인 방식이 아니라 실제 퇴적물 이동경향을 반영한다고 판단할 수 있다. 이러한 논리를 바탕으로 Gao and Collins(1992)는 실제 시료로부터 얻어지는 고유길이를 각 시료의 위치를 무작위화하여 얻은 고유길이의 분포와 비교한다. 만일 고유길이의 값이 무작위화로 얻어진 고유길이 분포 상에서 상위값에 해당한다면, 퇴적물 순이동방향을 통계적으로 유의하다고 판단할 수 있다는 것이다.

GC법은 MB법에 비해 연구자의 주관적인 의사가 개입될 소지가 상대적으로 적고, 2차원적인 고려를 하고 있으며, 비교적 간편하고 명료한 절차에 따라 분석이 이루어진다는 점으로 인해 입도경향분석을 적용하는 연구들에서 널리 사용되는 방법으로 자리 잡았다(Gao and Collins, 1994a, 1994b; Rios *et al.*, 2002; Cheng *et al.*, 2004). 그러나 단위벡터(경향벡터)를 계산하는데 사용하는 '임계거리'라는 개념과 '잡벡터 제거'의 개념은 문제의 소지가 있다는 지적이 지속적으로 제기

되고 있다(Le Roux, 1994c; Asselman, 1999; Le Roux *et al.*, 2002; Poizot *et al.*, 2006).

한편 Le Roux(1994a, 1994b, 1994c)는 Gao and Collins(1992)의 2차원 확장 방식에 대해 비판하면서 대안적인 독자적인 방법을 제안하였다. 그는 우선 퇴적물 이동경로를 결정하는 기본 경험칙으로 기존의 (F, B, -), (C, B, +)외에 (C, B, -)와 (F, B, +)를 함께 고려하여 분급이 양호해지는 경향 모두를 기본 경험칙의 범주 안으로 끌어들었다. 또한 Le Roux(1994a)는 Gao and Collins(1992)가 경향벡터를 단위벡터로 정의한 것을 비판하면서 퇴적물 입도조직변수 간의 차이가 가중치 평균의 형태로 벡터의 크기에 반영될 수 있다고 주장하였다. 이와 함께 Gao and Collins(1992)가 제안한 '임계거리'라는 개념 대신 각 점에서 동일한 크기의 단위원을 설정한 뒤 전역적인 경향이 존재한다는 가정 하에 주변의 4개의 점을 단위원 상의 동서남북 지점의 값으로 변환하고, 이 값으로부터 퇴적물 이동경로를 추출하는 방법을 사용하였다. 그는 추출된 퇴적물 이동경로의 통계적 유의성을 검증하는 데 방향 데이터를 검증하는 데 널리 사용되는 비모수검정법인 Watson 검정 통계량을 이용할 것을 제안하기도 하였다(Le Roux *et al.*, 2002).

Rx법은 GC법에 대한 개선책으로 제시되었으나 기본개념이 상대적으로 모호하고 복잡하여 널리 활용되지는 않는다. 그러나 퇴적물 이동을 지시하는 경험칙의 범위를 확대하려고 시도했다는 점에서 입도경향분석이 근거하고 있는 경험칙의 적용에 유연성을 부여할 수 있음을 보여준 것으로 평가할 수 있다. Le Roux *et al.*(2002)은 연구자의 현장 경험에 기초하여 현재 현존하는 방법들을 적절히 조합해서 쓰고, 결과를 비교한 뒤 퇴적물의 순이동경로를 지시하는 다른 증거들을 참고하여 연구자가 최종결론을 내려야 한다고 주장한다. 이를 위해 그는 GC법, Rx법을 조합하여 적용할 수 있는 프로그램을 개발하여 제시하였다(Le Roux *et al.*, 2002).

3) 각 방법론들의 자체적인 개선

입도경향분석의 발전과정을 보면 GC법은 MB법에

대한 개선 방안으로, Rx법은 GC법에 대한 대안으로 제시되었으나, 어느 하나가 다른 방법론을 대체하는 방식으로 진행되기보다는 세 가지 방법론이 고유 영역을 구축하면서 공존하는 방식으로 진행되었다. 이는 각 방법론의 범주 안에서 방법론의 단점을 보완하려는 노력이 지속적으로 진행되면서 각 방법론 고유의 강점이 확립되었기 때문이라고 할 수 있다.

MB법의 1차원 분석법의 경우, 가장 큰 약점으로 지적되는 것은 퇴적물 이동경로를 설정하는 과정에서 연구자의 주관에 개입될 여지가 크다는 것이다. 이것은 MB법의 1차원 경로분석이 기본적으로 자료로부터 규칙성을 도출한다기보다는 연구자의 직관과 경험에 기초한 가설을 설정하고 이를 통계적으로 검정한다는 논리 구조를 지니고 있기 때문이다. 만일 설정한 가설이 통계적으로 유의하지 않다는 결론을 얻게 될 경우 새로운 가설을 재설정하게 되는데, 이 과정에서 분석 대상이 되는 퇴적물을 채취 지점을 고려하여 임의로 하위 단위로 나누는 등의 주관적 절차가 종종 개입되기도 한다. 이러한 부분은 MB법을 비판하는 이들의 주요 표적이 되어 왔으며(Masselink, 1992), 2차원 이동벡터법(GC법, Rx법)이 제안되는 과정에서 비판을 받은 부분 중 하나이기도 하였다. 이러한 비판에 대해 McLaren(1993)은 자신의 방법론이 연구자의 주관성에 의존하고 있다는 지적에 대해 일부 시인하면서 이런 측면이 방법론의 약점이 될 수는 없다고 주장한다. 퇴적물 이동경로 분석은 연구자의 경험과 직관에 대한 보조 도구가 되어야 하며, 자신의 방법론은 자료로부터 기계적으로 결과를 도출하는 절차라기보다는 연구자가 연구자의 직관과 경험을 활용하여 자료에 포함된 퇴적물 이동 경로에 대한 정보를 제대로 도출할 수 있도록 해 주는 훌륭한 도구가 될 수 있다는 것이다. 이와 함께 MB법은 자체적인 개선과정을 통해 X-분포라는 개념을 도입하고, X-분포의 형태를 퇴적물 이동 기작과 연결시키는 작업을 진전시켰다. 다시 말해 퇴적물 입도경향을 통해 퇴적물 순이동 경로 뿐 아니라 퇴적 기작에 대한 측면도 함께 다룬다는 뜻이다. X-분포를 이용한 퇴적 기작 분석은 기본적으로 정성적인 분석이며, 분석과정에서 연구자의 주관에 개입될 여지가 커서 여러 가지 문제점을 담고 있는 것은 사실이지만,

퇴적물 입도를 이용한 전통적인 연구의 전통을 일부 계승하고 있다는 점에서 여타 2차원 분석법과는 다른 독특한 특징을 지니고 있다고 할 수 있다.

한편 최근에 가설 검정 단계에 소요되는 시간과 계산량을 줄이려는 기술적인 개선이 시도되기도 하였다. MB법은 가설적으로 설정된 퇴적물 이동 경로의 타당성을 판단하기 위해 정규분포 가정에 기초한 Z-검정법을 사용한다. 이에 대해 Lucio *et al.*(2004)은 'Structural Exact Test(SET)' 라는 이항분포에 근거한 검정법을 제안하였다. 이 방법은 퇴적물 이동 경로 상의 모든 쌍을 고려하는 대신 인접한 두 개의 퇴적물 쌍만을 고려하는 것이다. MB법에 비해 가설 검증에 드는 시간과 계산량은 현저하게 줄어든 반면 그 결과는 크게 다르지 않다는 분석결과를 내놓고 있다.

GC법은 세 가지 입도경향 분석법 중 현재 가장 널리 사용되고 있는 방법론으로 방법론의 개선을 위한 연구가 가장 활발하게 진행되었다. Gao-Collins의 방법론에서 지속적인 개선의 대상이 되어 왔던 부분은 '임계거리' 개념을 적용하는 과정에서 개입되는 불명료함을 최소화하는 것과 퇴적물 이동 경로의 통계적 유의성을 검증하는 부분이다. 크게 세 가지 연구를 방법론 개선에 기여한 중요한 연구로 꼽을 수 있다. 첫째는 Asselman(1999)과 Poizot *et al.*(2006)의 연구이다. Asselman(1999)의 연구는 기본적으로 GC법을 하천 환경에 적용하고 그 타당성을 조사한 논문이지만, 여기서 그는 '임계거리'를 다루는 새로운 기술적인 방법을 제안하였다. '임계거리'는 다소 임의적인 개념으로 Gao and Collins(1992, 1994a)는 최대 퇴적물 시료채취 간격을 '임계거리'로 사용할 수 있다고 보았다(Gao and Collins, 1994a). 그러나 Asselman(1999)은 이 문제를 다른 방식으로 접근하였다. Gao and Collins(1992)가 고유거리 개념의 모호성을 완화시키는 방법의 하나로 원래의 자료를 이용하는 것이 아니라 내삽된 자료를 이용하는 방법을 제안한 바 있으나 실제 이에 기초한 분석을 행하지는 않았다. Asselman(1999)은 Gao-Collins 방법을 GIS의 래스터 기반 중첩 연산을 통해 구현할 수 있음을 보여주면서, 원자료가 아닌 내삽된 자료를 활용하였다. 이 때 그가 활용한 내삽법은 크리깅이었다. 크리

기는 자료가 본래 지니고 있는 공간구조를 내삽 과정에 반영하는 특징을 지니고 있기 때문에 ‘임계거리’를 정의하는데 객관적인 기준을 제공할 수 있는 단초를 지니고 있다. Poizot *et al.* (2006)은 Asselman (1999)의 지적을 보다 발전시켜 GC법에서 ‘임계거리’가 베리오그램 분석을 통해 얻어지는 ‘상관거리’에 기초하여 보다 합리적으로 정의될 수 있음을 보여주었다. 이 두 가지 연구는 GC법의 ‘임계거리’ 개념이 지니고 있는 애매성을 다소 완화시켜 주었다고 평가할 수 있다. 둘째는 Chang *et al.* (2001)의 연구이다. GC법을 통해 도출된 퇴적물 이동 경로의 통계적 유의성은 ‘고유길이(Characteristic Length)’를 이용해 정해진다. 퇴적물 시료의 위치를 무작위로 재배치한 뒤 동일한 절차를 통해 얻어진 각 지점의 퇴적물 이동 경로의 벡터합의 분포를 구하고, 실제 자료로부터 얻어진 값이 이 분포 상에서 희귀한 경우인지를 판단하는 것이다. Chang *et al.* (2001)은 이 과정이 퇴적물 시료 전체에 대해 이루어지기 보다는 각 점에 대해

이루어지는 것이 타당하다는 논의를 펴면서 퇴적물 이동 경로의 타당성 검증을 전체 경향에 대해 적용하기 보다는 각 지점에서 얻어지는 퇴적물 이동 벡터에 대해 적용하는 방식을 개발하였다. 이를 통해 퇴적물 이동 경향 내에 존재하는 공간적인 변이를 보다 합리적으로 고려할 수 있는 길을 열어 놓았다.

Rx법은 위의 두 가지 방법론에 비해 다소 복잡한 면이 있는 반면 퇴적물 이동경로를 반영하는 경향 규칙을 보다 자유롭게 조합하여 분석을 할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 따라서 Rx법은 적용 현장의 상황에 따라 경향 규칙을 적절하게 조합할 수 있도록, 즉 다양한 경향 규칙을 시험해 볼 수 있는 환경을 개발하는 방향으로 기술적인 발전이 진행되어 왔다(Le Roux *et al.*, 2002). 또한 Rx법은 퇴적물 이동 경로의 타당성을 판단하는 검증법으로 구조선 분석 등에 사용되는 등 방향의 타당성을 검증하는데 널리 사용되어 온 비모수 검정법인 왓슨의 검정법을 원용하고 있다는 점에서 다른 두 가지 방법과는 다른 검증법을 적용하고 있다.

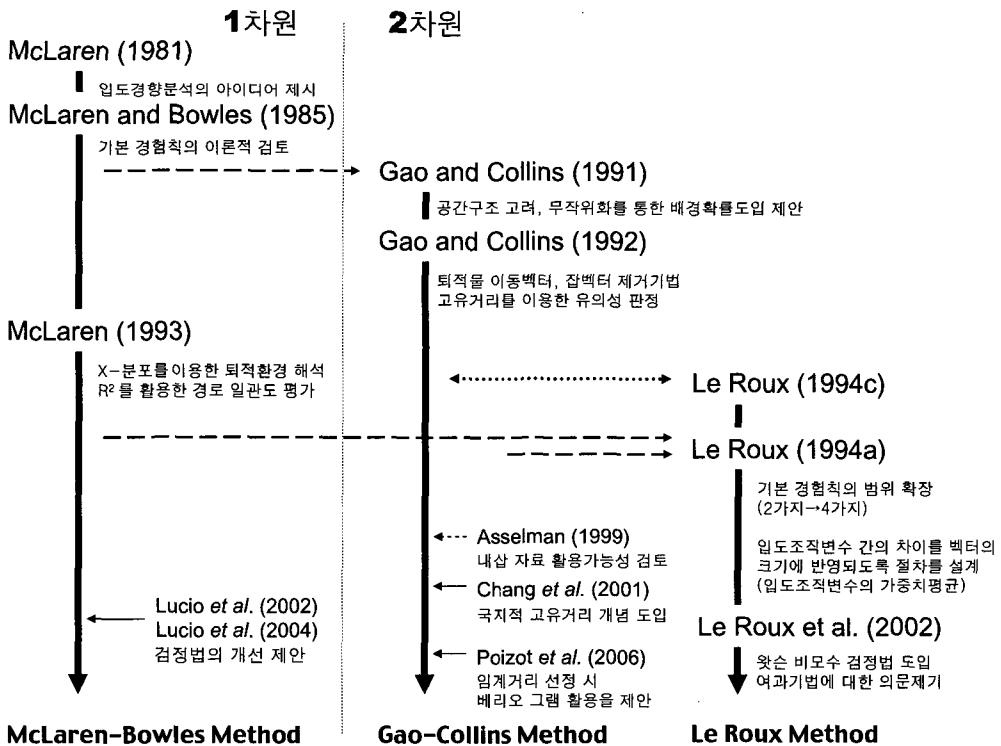


그림 1. 입도경향분석의 발전 과정

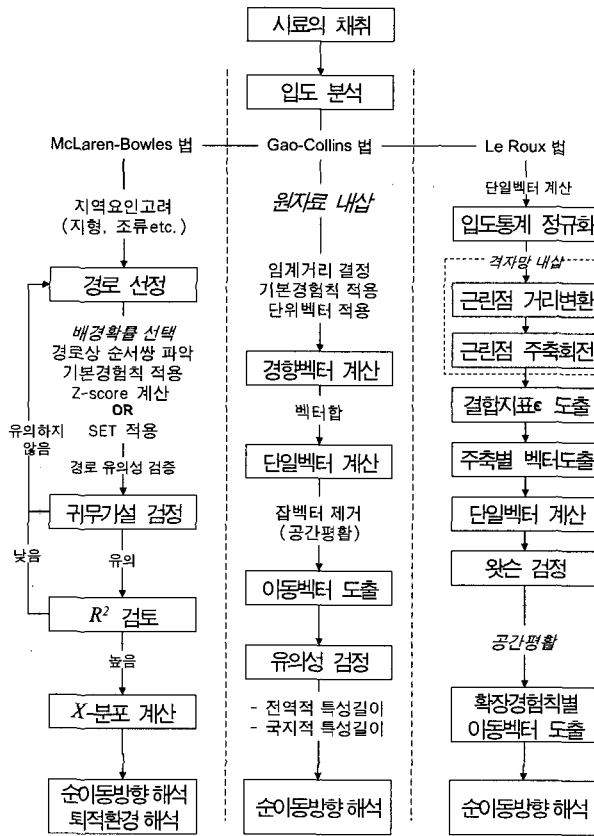


그림 2. 입도경향분석의 분석절차

세 가지 방법론의 특징과 발전과정, 개선과정은 그림 1로, 확립 절차는 그림 2로 요약될 수 있다.

3. 입도경향분석의 분석단계별 주요 쟁점에 대한 각 방법론의 특징

1) 표본 설계

입도경향분석과 관련하여 퇴적물 표본 채취 단계에서 제기되는 질문은 크게 세 가지로 요약될 수 있다. 첫째, 통계적으로 유의한 결과를 얻기 위해서는 얼마나 많은 수의 퇴적물 표본이 필요한가? (표본의 수) 둘째, 퇴적물 표본은 어떠한 공간적 표본 전략에 따라 채취되어야 하는가? (퇴적물 표본 간의 적절한 간격 혹은 퇴적물 표본망의 적절한 형태는 무엇인가?) (표본

지점의 최적 배치) 셋째, 어느 정도 깊이로 퇴적물 표본을 채취해야 하는가? 혹은 퇴적물 표본의 채취 깊이가 반영하는 시간 규모는 어떻게 판단할 수 있는가? (표본의 채취 깊이) 입도경향분석을 적절히 활용하기 위해서는 우선 각 방법론이 위에서 제시된 세 가지 문제를 다루는 방식을 이해해야 한다.

(1) 표본의 수

표본의 수에 대해 구체적으로 자세한 언급이 되는 경우는 드물다. 다만 MB법의 경우 통계적 유의성을 판정하는 최소요건으로서 경로 상 9개의 점이 필요하다고 지적한다(McLaren and Bowles, 1985). 따라서 MB법에서는 모든 방향의 경로를 판정하기 위해서 최소 $9 \times 9 = 81$ 개의 표본이 필요하다. 이외에 McLaren은 자신의 회사 홈페이지를 통해 유의미한 결과를 얻기 위해서는 보통 200개 이상의 표본이 필요하다고 말

표 1. 입도경향분석과 퇴적을 표본채취 과정의 쟁점

구분 ⁶⁾	MB 법	GC 법	Rx 법
표본수	<ul style="list-style-type: none"> • 통계적 입장에서 볼 때 최소 81개 표본이 요구됨 • 일반적으로 약 200개의 표본이 입도경향분석에 활용됨 • 조사지역의 규모가 클 경우 최대 2000개의 표본이 이용될 수도 있음 	<ul style="list-style-type: none"> • 표본의 수와 관련된 문제가 연구자들에 의해 명시적으로 다루어지지 않는 않음 • 조사지역의 규모에 따라 50~260 정도의 표본이 사용됨 	<ul style="list-style-type: none"> • 표본의 수와 관련된 문제가 명시적으로 다루어지지 않는 않음 • 여타 입도경향분석과 동일한 수준의 논의
최적 배치	<ul style="list-style-type: none"> • 현장상황에 따라 표본 간격이 다양하게 설정될 수 있음 • 경험적으로 볼 때 퇴적물 이동 경로의 해상도는 표본 간격의 2배 정도로 간주될 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> • 삼각망은 표본간 거리가 같다는 면에서 장점이 있음(Gao and Collins, 1994a) • 경계효과와 퇴적조건을 고려해야 함(Gao and Collins, 1994a; 1994c) • 사각망은 검토하는 방향이 가장 많아 (8방향) 유리(Peng <i>et al.</i>, 2004) • 내삽 통한 격자망 변환 유용(Gao and Collins, 1992; Asselman, 1999; Poizot <i>et al.</i>, 2006) 	<ul style="list-style-type: none"> • 최적배치에 대한 언급은 없음 • 이 경우 기존의 MB법, 혹은 GC 법에서 다루어진 논의를 수용 • 방법론 상 내삽을 통해 원자료를 격자망 자료로 변환하여 분석을 실시하게 됨. 이런 의미에서 격자망 배치를 최적배치로 간주한다고 해석할 수도 있음
채취 깊이	<ul style="list-style-type: none"> • 명시적으로 이 문제가 다루어지지 않는 않음 • 채취 깊이가 대표하는 시간 스케일은 퇴적환경에 따라 다르다고 언급 • 일반적으로 상부 10~15cm 의 퇴적물을 이용하여 입도경향분석을 실시함(McLaren <i>et al.</i>, 1993) • 지역적·장기적 경향을 분석을 위해서는 표층퇴적물 중심의 조사를 지양해야 한다고 봄(McLaren, 1993) 	<ul style="list-style-type: none"> • 채취 깊이가 깊어질수록 반영하는 시간 스케일이 늘어난다는 점을 이론적으로 다룸(Gao and Collins, 1992) • 보통 5~10cm 깊이로 퇴적물 채취(Gao and Collins, 1992; 1994; Gao <i>et al.</i>, 1994). ~10년 반영 간주 • Pedreros <i>et al.</i>(1996)은 형광물질 추적실험 결과를 토대로 폭풍이 없을 경우는 상부 ~6cm, 폭풍 시에는 상부 ~25cm 정도가 작용하는 퇴적 프로세스를 반영한다고 간주 	<ul style="list-style-type: none"> • 채취 깊이에 대해서도 기존의 MB 법, GC법의 논의를 수용함 • GC법과 함께 계절적인 변동의 분석이 가능하다는 연구도 있어 Rx법을 염두에 둘 경우 표층 퇴적물을 대상으로 하는 경향이 있는 듯함(e.g. Rios <i>et al.</i>, 2002)

하고 있다⁵⁾. GC법이나 Rx법을 다루는 연구에서는 특별히 ‘통계적으로 유의한’ 표본의 수를 거론하지는 않는다. 기존 연구들의 경우를 참조하면 대체로 50~300 개 정도의 표본이 다루어지고 있으나 해당 지역의 면적이 다르기 때문에 단순히 표본의 수를 거론하는 것은 무의미하다. 다만 두 방법 모두 가장자리 효과(edge effect) 문제가 존재하기 때문에 경계를 제외한 내부 영역이 확보되기 위해서는 거기에 맞는 표본의 수가 확보되어야 한다.

(2) 표본지점의 최적 배치

표본의 배치 방식에 대해서는 크게 격자망과 삼각망

이 제시되고 있다. McLaren *et al.*(1993)은 격자망을 기준적인 표본 배치 방식으로 제시하지만, 자신의 홈페이지에서는 삼각망을 최적망으로 제시하고 있어 두 가지 모두를 긍정하는 것으로 판단된다. 적절한 표본 지점 간 거리에 대해서는 자신의 경험을 기초로 이동 경로의 공간적 해상도가 표본지점 간의 거리의 2배 정도가 되는 것을 염두에 두고 설정할 것을 제안하였다. Gao and Collins(1994a)은 임계거리 개념을 고려하여 삼각망의 표본배치가 가장 좋다는 견해를 피력하기도 하였으나 Cheng *et al.*(2004)의 경우 삼각망의 경우는 6 방향을 기준으로 경향벡터를 얻지만, 격자망의 경우는 8 방향에 대해 경향벡터를 얻을 수 있기 때문에 방

향에 대해서 보다 상세한 정보를 줄 수 있다고 지적한다. Gao and Collins(1994a)가 지적하는 바와 같이 2차원 입도경향분석법의 경우 가장자리의 경계지점은 근린점의 편향으로 인해 편이현상이 발생한다. 따라서 경계점은 분석에서 제외되어야 한다. 표본지점을 배치할 때는 이와 같은 점에 유의하여야 한다.

(3) 표본의 채취 깊이

입도경향분석에서 가장 문제가 되는 부분이 바로 표본이 대표하고 있는 시간 규모이다. Gao and Collins(1992)는 퇴적물 표본이 대표하는 시간 규모는 표본의 채취 깊이와 연관이 있다는 견해를 피력하였다. MB법을 사용한 연구들은 대부분 상부 10-15cm 부분의 퇴적물을 채취한다. McLaren(1993)은 입도경향 분석의 목적은 지역적인, 장기적인 퇴적물 순이동방향을 추정하기 위한 것이므로 표층만을 채취하는 방식에 대해서는 오히려 오차를 가중시킬 수 있다고 지적한다. GC법의 경우 일반적으로 5-10cm의 퇴적물에 대한 분석을 행하는 것이 일반적이다. 조간대에서 이루어진 Pedreros *et al.*(1996)의 연구에서는 조석 한 주기의 퇴적물 순이동방향을 파악하기 위해 폭풍이 없을 경우와 폭풍 시의 혼합층의 크기가 달라지는 것을 고려하여 퇴적물을 채취하였다. 혼합층의 두께는 해빈의 특성과 쇄파고, 쇄파의 형태 등에 따라 달라지므로 (Anfuso, 2005), 퇴적물의 채취 깊이를 혼합층의 두께에 준하여 결정하고자 한다면, 조사 지역의 특성에 대한 이해가 선행되어야 할 것이다.

그러나 Rios *et al.*(2002)은 동일한 시료에 대해 MB법, GC법, Rx법을 적용한 분석 결과를 통해 MB법의 경우 계절적인 퇴적물 이동변화를 식별하지 못하는 데 반해 GC법과 Rx법은 식별한다는 보고를 내 놓고 있어 시간규모의 문제를 고려할 때는 퇴적물 채취 깊이와 함께 각 방법별 식별력을 고려해야 할 것으로 보인다.

2) 퇴적물 입도조직변수의 매개화 방식

입도경향분석은 파이척도를 퇴적물 입도를 표시하는 적절한 체계로 간주하고 있다. 이는 입도경향분석에서 퇴적물의 입도분포는 로그정규분포를 따른다는

암묵적 전제가 통용된다는 것을 의미한다. 그러나 퇴적물 입도 문제를 다루는 일단의 연구자들은 퇴적물 입도가 로그정규분포보다는 로그쌍곡선분포를 전제할 때 훨씬 정교하게 분석될 수 있다는 주장을 제기하고 있다(Bartholdy *et al.*, 2004; Hartmann, 2004). 이들은 로그쌍곡선분포가 퇴적물입도를 설명할 수 있는 더 많은 조직변수(parameter)를 가지고 있다는 점, 퇴적물 입도특성의 미세한 변화를 포착할 만큼 민감도가 뛰어나다는 점, 로그정규분포 역시 로그쌍곡선분포의 한 예로 포섭될 수 있다는 점 등을 들어 로그쌍곡선분포가 퇴적물 입도분포를 설명하는 가장 적절한 방식이라는 주장한다. 이와 같은 주장은 로그쌍곡선분포가 로그정규분포에 비해 수학적으로 복잡한 형태를 띠고 있고 로그정규분포에서 사용되는 모멘트(평균입도, 분급, 왜도)에 비해 분포를 특성화하는 4개 모수($\phi, \gamma, \mu, \delta$)의 의미가 직관적으로 이해되기 어렵다는 점 등으로 인해 연구자들 사이에서 널리 수용되지는 못하고 있다 (Pye and Tsoar, 1990; Hartmann, 2004). 하지만 퇴적물 입도가 로그정규분포가 아닌 로그쌍곡선분포로 특성화될 수 있는 가능성을 제시한다는 측면에서, 로그정규분포를 기반으로 발전된 기존의 입도경향 분석법을 로그쌍곡선분포에 의한 입도조직변수를 기반으로 한 분석법으로 확장시킬 수 있는지 여부는 지적된 바는 있으나 아직 규명되거나 구체적으로 연구되지는 않았다⁷⁾.

이와 관련하여 Hill and McLaren(2001)이 로그쌍곡선분포를 이용하여 퇴적물 입도조직변수를 계산하는 것이 로그정규분포에 입각한 기존의 방법에 비해 특별한 장점이 없다는 보고를 한 바 있으나 이에 대해 로그쌍곡선분포 옹호론자인 Hartmann and Flemming(2002)은 Hill and McLaren(2001)의 분석은 근본적으로 로그쌍곡선분포에 대한 오해에서 비롯된 것이라고 강하게 비판하였다. 입도경향분석의 맥락에서 로그쌍곡선분포가 지닌 가능성을 탐색하려면 먼저 로그쌍곡선분포의 4가지 모수를 이용하여 퇴적물 입도를 특성화한 뒤 입도경향 경험칙을 재정의하는 방식으로 접근하여야 하나 Hill and McLaren(2001)의 경우 로그쌍곡선분포 가정을 응용한 최적화 알고리즘으로 파이 스케일로 처리된 실험적 입도분포로부터 평균입도와 분급,

왜도를 계산한 후 이것을 이용하여 입도경향분석을 수행한 것일 뿐이라는 것이다. 로그쌍곡선분포를 이용한 퇴적을 입도조직의 특성화를 바탕으로 입도경향분석을 재구성할 수 있는지의 여부는 흥미로운 연구주제가 될 수 있을 것으로 보이지만, 아직까지 이 주제에 대해 다른 연구는 보고된 바가 없다. 그러므로 이 문제는 추후 규명되어야 할 사안이라고 할 수 있다.

3) 경험칙의 타당성 여부

경험칙의 타당성 여부에 대한 논의는 크게 두 가지 범주로 구분될 수 있다. 첫째는 기본 경험칙의 토대가 되는 가정의 효용성에 대한 의문이다. McLaren and Bowles(1985)가 제시한 기본 경험칙 (F, B, -)과 (C, B, +)는 세립질 퇴적물이 조립질 퇴적물에 비해 이동할 확률이 높고, 조립질 퇴적물이 세립질 퇴적물에 비해 퇴적될 확률이 높다는 단순한 가정으로부터 도출된 것이다. 이에 대해 Hughes(2005)는 기본 경험칙의 기본전제가 항상 성립하는 것은 아니기 때문에 모든 경우에 기본 경험칙을 적용할 수 있는 것은 아니라고 지적하고 있다. 입도경향분석의 가정에 대한 이와 같은 비판은 타당한 비판임에도 불구하고 종종 중요한 점을 간과하고 있다. McLaren and Bowles(1985)가 위 2가지 기본 경험칙을 기본전제로부터 바로 유도한 것이 아니라 전달함수의 조합으로부터 도출했다는 점이다. McLaren and Bowles(1985)는 기본전제의 논리적 귀결은 한 지점에서 다른 지점으로 이동하는 퇴적물의 입도별 분포인 전달함수(transfer function)의 모양이 단조증가함수의 꼴을 가진다는 것이지만 실제 자료를 검토할 경우 전달함수는 대부분 단조증가함수가 아니라 음의 왜도값을 가지는 함수 형태를 띠는 것을 보였다. (F, B, -), (C, B, +)의 두 가지 경우는 전달함수 간의 조합을 고려한 이론적 고찰로부터 얻어낸 것이다. 그러므로 McLaren and Bowles(1985)가 제시한 기본 경험칙은 기본전제가 지니고 있는 문제에도 불구하고 범용성을 띠고 있다고 볼 수 있다. Gao and Collins (1994b)는 입도조직변수들의 다양한 조합에 대해 기본 경험칙이 실제 퇴적물의 이동경로를 가장 잘 반영한다는 점을 확인하기도 하였다. 이와 같은 점

을 종합해 볼 때 기본 경험칙은 전제가 지니고 있는 문제에도 불구하고 어느 정도 범용성을 띠고 있다고 판단된다. 둘째, 기본 경험칙 이외에 분급이 양호해지는 경우를 포함해야 하는지에 대한 여부이다. Rx 법의 경우 기본 경험칙 (F, B, -), (C, B, +) 이외에 (F, B, +), (C, B, -)을 퇴적물 이동을 판단하는 기준으로 받아들인다. Gao and Collins (1994b)에 따르면 분급이 양호해지는 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 실제 퇴적물 이동방향을 반영하는 경우가 높게 나타난다. 그러므로 이러한 기본 경험칙의 확장은 어느 정도 타당한 면을 지니고 있다. 그러나 그만큼 결과의 해석이 모호해지는 문제를 안고 있다. 퇴적물 이동경로를 독립적으로 판단할 수 있는 다른 자료가 있는 경우 기본 경험칙을 확장하여 비교 가능성을 늘리는 것도 좋은 연구 방향이 될 수 있으나, 기본 경험칙이 어느 정도 경험적인 타당도를 지니고 있는 점을 인정하고 거기에 입각한 분석을 하는 편이 결과를 해석하는 과정에서 개입되는 모호성을 줄일 수 있다고 판단된다.

4) 방법론 상의 쟁점

(1) 이동경로인가? 이동벡터인가?

입도경향분석의 세 가지 방법론 중 MB법은 1차원 경로분석법이며, GC법과 Rx법은 2차원 이동벡터법이라고 구분지을 수 있다. 2차원 방법론이 출현한 이후에도 여전히 McLaren-Bowles 방법이 활용된다는 점은 MB법이 1차원 경로분석법이라는 한계에도 불구하고 2차원 경로벡터법에 비해 장점을 지니고 있음을 반영하는 것이라 할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 입도경향분석은 경험칙에 근거한 분석법이다. 2차원 분석법의 경우 자동화가 가능한 객관적 절차에 기초한 분석법인 반면, 경험칙에 근거했다는 점에서 도출된 결과는 상당한 불확실성을 안고 있다. 이에 반해 1차원 분석법의 경우 분석을 하는 연구자가 자신의 선행 지식에 기초하여 경로를 설정하고, 경로 설정의 유의성을 검증하는 형태로 이루어지기 때문에 연구자의 주관이 반영되기는 하지만, 그만큼 해당지역에 대해 연구자가 갖추고 있는 전문성이 연구결과의 유의미한 해석으로 이어지게 될 가능성이 높다. 이런 이유로 MB

법은 '과학'이라기보다는 '기술'이라는 비판을 받기도 하지만(Masselink, 1993), 어느 정도 실용성을 인정받고 있다는 측면에서 시사하는 바가 크다(Hughes, 2005). 현재로서는 2차원 경로벡터법이 1차원 경로분석법에 비해 우월하다고 보기 어려우며, 각각의 장단점을 지니고 있으므로 연구자가 해당 지역의 특성에 맞게 선택해야 할 문제라고 판단된다.

(2) 평활은 잡음의 제거인가? 주요정보의 상실인가?

GC법에서 '임계거리'와 함께 비판을 받는 것 중 하나가 잡벡터 제거 절차이다. Asselman(1999)과 Le Roux *et al.*(2002)는 GC법의 잡벡터 제거 절차가 잡벡터를 제거하고 전체적인 경향을 드러낸다기보다는 정보의 손실을 유발하며(Asselman, 1999), 인위적인 정보를 생성한다고 주장한다(Le Roux *et al.*, 2002). 주목할 만한 점은 잡벡터 제거 문제에 대해 문제를 제기한 Asselman(1999)과 Le Roux *et al.*(2002) 모두 퇴적물 이동벡터를 계산하는 과정 중에 내삽 과정을 거쳤다는 것이다. 그렇다면 잡벡터 제거와 내삽 과정이 동시에 작용할 때 문제가 발생하는 것일 수도 있다는 의문이 제기된다. 이 문제에 대해서는 Poizot *et al.*(2006)의 연구가 몇 가지 흥미할만한 통찰을 제공하고 있다. Poizot *et al.*(2006)는 GC법의 '임계거리' 설정을 퇴적물 표본간 거리를 토대로 결정하는 것보다는 베리오그램 분석을 통해 얻게 되는 '상관거리'에 비추어 결정하는 것이 더 타당하다고 주장한다. 만일 퇴적물 표본 간 거리를 통해 결정된 '임계거리'가 '상관거리'에 비해 작을 경우 이동벡터를 계산하는 과정에서 인근의 변이를 충분히 고려하지 못하는 결과를 얻게 된다는 것이다. 이들의 지적은 GC법의 잡벡터 여과정이 문제를 일으킬 수 있는 부분을 보여주고 있다. GC법에서 잡벡터를 여과하기 위해 인근 벡터들을 '임계거리'를 토대로 결정한다. 잡벡터 여과의 기본 가정은 잡벡터들의 평균은 0에 가까울 것이라는 것이다. 만일 '임계거리'가 '상관거리'보다 작아서 변이를 충분히 고려하지 못하는 결과를 얻게 된다면 잡벡터들의 변이를 충분히 고려하지 못하는 결과를 낳게 되어 잡벡터들의 평균이 0이 아닌 결과를 얻게 될 수 있다. 내삽을 적용할 경우 내삽 과정에서 고려되는 자료의 공

간구조와 여과과정에서 고려되는 공간구조의 충돌로 인해 문제가 발생할 수도 있다. 따라서 잡벡터 여과정은 베리오그램을 통해 얻어진 '상관거리'를 기초로 시도되는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

5) 각 방법론으로 얻어진 퇴적물 이동경로가 대표하는 시간 규모

입도경향분석에서 가장 크게 문제가 되는 부분은 입도경향분석을 통해 얻어진 퇴적물 순이동방향이 대표하는 시간 규모가 불명료하다는 점이다. 퇴적물 표본의 채취 깊이가 시간규모를 반영할 것이라는 지적(Gao and Collins, 1992)이 있기는 하지만, 또한 동일한 방식으로 채취한 퇴적물 표본에 대해 세 가지 방법을 동시에 적용했을 때 MB법의 경우는 퇴적물 이동의 계절적 변동을 포착하지 못하는데 반해 GC법이나 Rx법은 계절적인 변동을 반영하는 것으로 나타난다는 연구결과도 존재한다(Rios *et al.*, 2002). 그러므로 입도경향분석으로부터 도출된 퇴적물 순이동방향의 시간 규모를 판단할 때는 그것이 퇴적물의 채취 깊이에서 비롯된 것인지 아니면 적용한 방법론에서 비롯된 것인지를 고려해 주어야 한다. 현재로서는 이 문제에 대한 체계적인 조사는 이루어지지 않았다고 할 수 있다. 입도경향분석의 가능성을 확장하기 위해서는 이 문제에 대한 체계적인 연구가 요구된다고 판단된다.

4. 지형학 연구에서 퇴적물 입도경향 분석법의 활용

입도경향 분석법은 퇴적물 입도조직변수의 공간적 분포경향을 통해 퇴적물의 이동방향을 추정하는 방법론이다. 입도경향 분석법은 퇴적물의 입도정보만을 이용하여 퇴적물의 이동방향을 추정하기 때문에 비교적 간편하고 저렴하게 퇴적물의 이동경로를 분석할 수 있는 장점을 지니고 있다. 퇴적물의 입도특성은 비교적 지형학 연구자에게 있어 익숙한 개념이며, 분석에 필요한 퇴적물 시료를 수집하고 분석하는 과정이 복잡하

지 않고 간편하며, 분석에 소요되는 비용이 상대적으로 저렴하다.

퇴적물 이동경로는 퇴적지형의 성장과 쇠퇴, 변화 추세, 취약도 등을 분석하고 이해하는 데 있어서 필수적인 정보의 하나이기 때문에 지형학 연구에 널리 활용될 수 있는 가능성이 크다. 지형변화를 연구하는 과정에서 형태변화를 관찰하는 측면과 프로세스적인 측면에서 동시에 접근을 시도할 경우, 형태변화를 관찰하는 측면에서는 주기적으로 형태변화를 관찰하여 얻게 되는 시기별 지형자료를 이용해 지형의 부피나 면적의 증감, 지형의 공간적 변화추세와 변이를 밝히고자 접근한다. 프로세스적인 측면에서는 지형변화에 영향을 미치는 주요 요인을 식별하여 퇴적물의 유입과 유출을 시공간적으로 예측하고자 한다. 두 가지 측면의 접근은 시간적 규모에서 수 년-수십 년에 이르는 중규모 수준의 형태적 접근과 미시적인 규모의 프로세스적인 접근 간에 차이가 존재한다. 입도경향 분석법을 이용한 퇴적물 이동경로 분석은 이러한 두 가지 접근을 연결하고 연구결과 분석을 통합하는 과정에 중요한 역할을 담당할 수 있다.

앞서 입도경향 분석법의 분석단계 별 주요 쟁점에서 살펴본 바와 같이 입도경향 분석법은 표본을 설계하고 분석을 진행하여 산출된 이동경로를 적용하는 과정에서 아직까지 명확하게 확립되지 못한 문제점이 존재한다. 지형학적 연구를 진행하는 과정에서 입도경향 분석법을 이용하여 유의미한 분석결과를 얻기 위해서는 이러한 방법론상의 특성과 한계에 대한 이해가 선행되어야 한다. 따라서 지형학적 연구에 기여하기 위해서는 입도경향 분석법의 타당성과 결부되어 있는 주요 쟁점 사항에 대하여 실제 연구를 진행하는 과정에서 신중하게 고려하고 적용할 필요성이 제기된다. 이 장에서는 지금까지 진행된 논의를 바탕으로 향후 지형학적 연구를 진행하는 과정에서 입도경향 분석법을 적용할 경우 고려해야 하는 사항을 살펴보기로 한다. 이점은 현 단계에서 입도경향 분석법을 이용하여 최적의 연구결과를 얻기 위해서도 필수적인 작업이지만, 앞으로 지형학 연구에서 입도경향 분석법을 보다 명확하고 확고한 방법론으로 자리매김 하기 위해서도 다양한 연구결과가 필요하기 때문에 중요한 의미를 가진다.

1) 분석의 설계 단계에서 고려할 사항들

입도경향 분석법을 이용하여 실제 지형학 연구에서 의미 있는 분석결과를 얻기 위해서는 분석의 설계 단계에서부터 신중한 접근이 요구된다. 앞서 분석단계별 주요 쟁점에서도 나타났지만 분석의 설계에서는 표본의 수와 채취 깊이, 그리고 채취지점의 배치를 설계하는 과정에서 연구자들 간에 다양한 논의가 진행되었다. MB법과 GC법 그리고 Rx법 중에서 연구자가 선택한 분석방법이 개별적으로 가지고 있는 특성과 한계를 고려한 연구의 설계가 진행되어야 한다. 이러한 부분은 표 1에서 제시한 표본수와 표본 채취지점의 배치, 그리고 표본의 채취 깊이에 대한 논의의 결과가 충분히 도움이 될 것으로 판단된다.

또한 분석의 설계에서 고려해야 할 중요한 점이 연구 대상지역의 특성이다. 현재까지 입도경향 분석법을 이용한 퇴적경로의 분석은 만입부나 대륙붕, 조간대 해빈이나 사주섬 등의 환경에서 진행되었고 적용지역의 차이에도 불구하고 비교적 안정적인 결과를 얻었다고 보고되고 있다. 그러나 경로분석 결과가 실제 퇴적물 이동경로를 반영하지 못한다는 보고도 존재한다 (Masselink, 1992; 1993; Vanwesenbeeck and Lankneus, 2000). 다시 말해 아직까지는 적용지역에 무관하게 안정적인 결과를 얻는 방법론이라고 단정 짓기는 어렵다. 동일한 만입부나 조간대 환경이라 하더라도 퇴적환경을 지배하는 지형형성 인자나 반복적으로 진행되는 지형형성과정의 빈도나 강도 등이 지역에 따라 서로 다르게 나타날 수 있으므로 입도경향분석이 연구 대상지역의 특성에 어느 정도 영향을 받는지에 대해서는 사례연구의 축적으로 해결되어야 할 문제이다. 그러므로 입도경향분석을 연구에 활용하고자 할 때 설계 단계에서 연구 대상지역의 특성을 고려하는 것이 필요하며, 결과를 보고할 때에도 수행된 연구 대상지역의 특성을 자세히 기술하는 것이 중요하다. 이와 같은 자료가 축적될 때 입도경향분석의 타당성에 대해 보다 견고한 결론을 내릴 수 있는 기반이 마련될 수 있을 것이다.

입도경향 분석법으로 지금까지 제시된 세 가지의 방법론 중에서 2차원 분석법에 해당하는 GC법과 Rx법의

경우는 가장자리 효과를 제거할 수 있도록 설계하는 것이 중요하다. 2차원 분석법의 경우 분석의 대상이 되는 한 지점과 이 지점에 인접한 주변 지점과의 입도경향 분포 관계를 통해서 분석이 진행된다. 이 때 가장 자리에 위치한 지점의 경우 근린점의 편향으로 인해 입도경향의 편이현상이 발생하게 된다. 그러므로 2차원 분석을 행하고자 할 경우는 가장자리 지점은 분석에서 제외시켜야 한다는 점을 유념해야 한다. 만일 시간과 비용의 한계로 인해 격자형의 시료 채취망을 설계하는 것이 어렵고, 여타 다른 조건으로 인해 퇴적물 이동경로를 어느 정도 예상할 수 있다면(예를 들어 연안표사이동 방향을 판단하고자 할 때), 예상되는 퇴적물 이동경로 상에서 최소 9개 이상의 시료를 확보할 수 있도록 시료망을 설계하여 1차원 분석법을 적용해 보는 것이 대안이 될 수 있을 것이다.

2) 결과 해석에서 고려할 사항들

입도경향 분석법을 이용하여 퇴적물의 이동경로를 산출한 경우 분석결과를 해석하는 과정에서도 고려해야 할 사항들이 존재한다. 가장 우선되어야 할 사항은 각 방법론으로 얻어진 퇴적물 이동경로에 대한 신뢰성 검토이다. 물론 입도경향 분석법의 세 가지 방법론 모두가 분석을 진행하는 과정에서 통계적으로 분석결과에 대한 유의성 검증과정을 거치도록 고안되어 있다. 각각의 분석법 자체 내에서 통계적으로 이동경로 해석에 유의성이 부족한 실험결과를 검증하는 과정을 거치기 때문에 실제 입도경향 분석법이 기본적으로 목적하고 있는 이동경로의 해석은 가능해진다. 그렇지만 산출된 이동경로와 실제 지형학적 연구에서 지형변화 과정에 적용을 하는 경우라면 이동경로 분석의 신뢰성 내지는 타당성을 확보하는 것이 필요하다.

이러한 측면은 실제 연구자가 살펴보고자 하는 지형변화의 시간적 규모와 산출된 퇴적물 이동경로가 설명할 수 있는 시간적 규모의 문제로 볼 수 있다. 입도경향 분석법을 통해 산출된 퇴적물의 순이동방향이 대표하는 시간 규모가 명확하지 않다는 점은 현재 중요한 문제점으로 남아 있다. 따라서 지형변화를 연구하는 과정에서 입도경향 분석법을 이용하여 퇴적물 이동경

로를 산출한다면 이와 독립적으로 지형변화를 파악할 수 있는 방법을 적용해 지형변화량을 조사하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 항공사진을 이용한 사진측량 혹은 현장에서 진행된 지형측량 등으로 파악된 지형변화 패턴이 퇴적물 이동벡터로부터 얻은 퇴적물 이동경로 패턴과 서로 잘 부합한다면 해당 시기의 지형변화가 동일한 시기에 퇴적물 이동벡터로 대표되는 퇴적물의 이동과정으로 지속적으로 일어난 결과로 해석하는 것이 가능해져서 연구 대상지역에 대하여 보다 정확하고 상세한 지식을 얻을 수 있을 것이다.

반면 퇴적물 이동경로 분석 결과와 병행하여 진행된 시기별 지형변화의 결과가 부합하지 않는 것으로 해석이 이루어 질 경우도 생길 수 있다. 이러한 경우에는 지형변화를 관찰하고 추출한 시기별 자료의 시간적 규모와 퇴적물 이동경로가 설명하고 있는 시간적 규모에서 차이가 존재한다고 볼 수 있을 것이다. 연구 대상지역에서 지속적으로 진행되고 있는 퇴적과정에서 변화가 발생하였거나 지속적으로 반복되는 조건의 지형형성과정 보다는 격변적인 지형형성과정은 주도적으로 연구 대상지역의 지형변화를 주도하는 것으로 해석이 가능하므로 보다 신중한 연구자의 접근이 필요한 경우가 된다. 이러한 측면에서 퇴적물 이동경로가 설명하는 시간적 규모와 관련하여 표본채취의 깊이와 관련한 논의가 진행되었음을 확인한 바 있다.

결론적으로 퇴적물 이동경로의 결과 해석에서 고려할 사항은 분석을 설계하는 단계에서 고려할 사항들과 밀접하게 관련되어 있다고 할 수 있다. 연구 대상지역의 지형변화를 추적할 때 시간적인 규모에 따라 발생하는 문제를 최소화하기 위해서는 대상지역에서 현재 주도적이거나 지속적으로 진행되고 있는 퇴적과정에 대한 전문적인 사전지식(educated guess)이 절실하게 요구된다. 다시 말하면 분석결과를 유효적절하게 해석하기 위해서는 분석을 설계하는 과정부터 관련된 시간 규모에 유의하는 접근이 필수적이라 할 수 있다.

5. 결론

이 연구는 퇴적물 이동경로를 손쉽게 저렴하게 추정할 수 있는 입도경향분석의 세 가지 방법(MB법, GC법, Rx법)에 대한 비교 분석을 통하여 지형학 연구에 입도경향분석을 적용하고자 할 때 유의해야 할 부분과 추후 과제를 제안하는 것을 목적으로 진행된 것이다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 입도경향분석의 발전과정에서 1차원 경로분석에 기초한 MB법과 2차원 이동벡터에 근거한 GC법, Rx법 등이 확립되었으나, 어느 한 방법이 다른 방법에 비해 우월하다고 판단하기는 어렵다. MB법의 경우 가설연역적인 논리구조를 갖추고 있어 분석과정에서 연구자의 현장경험을 결합시키는 것이 용이하며, 퇴적환경을 지시하는 X-분포라는 분석 장치를 갖추고 있으며, 장기적인 퇴적물 순이동 패턴을 재현하는 특징을 지니고 있다. 1차원 접근법이라는 점에서 사실상 2차원적인 현상인 퇴적물 순이동 패턴을 모사하는데 한계가 있고 절차상 연구자의 주관이 개입될 소지가 많다는 문제를 지니고 있으나, 연구자가 현장의 조건과 상황에 경험이 많은 경우, 혹은 퇴적물 순이동 패턴을 지시하는 보조 자료들이 충분한 경우 오히려 안정적인 결과를 제공해 줄 수도 있다. GC법의 경우 절차가 명확하고 2차원적인 시각화가 가능하다는 장점을 지니고 있고, 퇴적물 순이동 패턴의 시간적인 해상도가 MB법에 비해 높은 장점을 지니고 있으나 임계거리나 잡벡터 제거과정이 원래의 정보를 왜곡시킬 수 있는 소지를 안고 있고 가장자리 효과에 취약하다. 이는 베리오그램 분석을 통해 도출할 수 있는 상관거리를 임계거리로 정의하는 방식을 통해, 가장자리 시료를 분석에서 제외하는 것을 통해 어느 정도 해소될 수 있다. 격자형태의 시료채취가 가능하고 가장자리 시료를 분석에서 제외하더라도 분석에 필요한 시료수가 확보되는 곳이라면 GC법의 활용을 효과적이다. Rx법의 경우는 퇴적물 순이동 패턴에 대한 다양한 가능성을 탐색하고자 할 때 적합하나 도출된 패턴을 해석하는 데는 주의가 필요하다. 이와 함께 GC법과 마찬가지로 가장자리 효과를 제거할 수 있도록 시료채취망을 설계해야 한다.

둘째, 지금까지의 연구결과에 비추어 볼 때 입도경향분석은 연구지역의 특성에 무관하게 적용될 수 있는 방법이라고 보기는 어렵지만, 이것이 입도경향분석의 활용가치를 저하시키는 것이라고 보기는 어렵다. 오히려 실증적인 자료의 축적을 통해 보다 명확한 이해를 얻는 것이 필요한 상태라고 판단된다. 그러므로 입도경향분석을 이용한 연구를 행하는 연구자들은 대상지역의 특성을 보다 상세히 보고하여 연구지역의 특성과 입도경향분석의 타당성 사이의 관계에 대한 이해가 진전될 수 있도록 하는 것이 필수적이다.

셋째, 입도경향분석을 통해 얻어진 퇴적물 순이동 패턴을 이용하여 지형변화를 설명하고자 할 경우 설명하고자 하는 지형변화의 시간 스케일과 입도경향분석을 통해 얻어진 퇴적물 순이동 패턴의 시간스케일 간의 일치, 불일치 문제에 대한 고려가 필요하다. 현재까지 입도경향분석 방법의 연구에서 퇴적물 순이동 패턴의 시간 스케일의 문제는 시료채취의 깊이와 방법론 간의 시간 해상도와 관련이 있다. 그러나 아직 이 문제에 대한 체계적인 연구는 미진한 실정이다. 퇴적물 순이동 패턴의 시간 스케일이 시료채취 깊이나 방법론과 어떤 관계를 맺고 있는지 규명하는 것은 입도경향분석을 통해 지형변화의 특성을 설명하는데 매우 중요한 문제이다. 그러므로 추후 이런 측면에 착목한 연구가 진행될 필요가 있을 것이라고 판단된다.

결론적으로 입도경향 분석은 현장에 대한 연구자의 경험, 조사 대상이 되는 퇴적물 순이동 패턴의 시간 스케일, 연구목적이나 현장상황에 따라 적절한 기법을 선택하고, 거기에 부합되는 시료채취 방안을 기획하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 입도경향 분석이 지형학 연구에 효과적으로 적용되기 위해서는 연구를 설계하는 단계에서 입도경향 분석의 분석단계별 고려사항을 연구목적에 비추어 하나하나 검토해 나가는 노력이 필요하다. 또한 향후 입도경향분석이 중요한 지형학적 도구로 확고하게 자리매김하기 위해서는 연구지역의 특성에 따른 입도경향분석의 타당성 문제와 퇴적물 순이동 패턴의 시간 스케일을 식별하는 문제가 해결되어야 한다. 이를 위해서는 입도경향분석을 사용하는 연구자 간의 일관된 형태의 자료축적을 위한 공동 노력과 퇴적물 시료채취와 방법론에 따른 퇴적물 순이동

패턴의 시간 스케일을 체계적으로 규명하려는 후속연구가 요구된다고 하겠다.

註

- 1) 퇴적물 입도를 분석할 때 로그정규분포보다는 로그쌍곡선 분포가 더 적합하다는 주장이 있으나, 로그쌍곡선분포로 얻어지는 입도통계치가 직관적으로 이해하기 어렵다는 점과 로그쌍곡선분포의 도입이 퇴적물 특성을 이해하는 데 새로운 통찰을 제공하지는 못하는 것 같다는 의구심으로 인해 아직 학계에서 폭넓게 수용되고 있지는 않다(Pye and Tsao, 1990).
- 2) 엄밀하게 말하면 1981년 연구에서 McLaren이 제안한 것은 3가지 경우(F, B, - / C, B, + / C or F, B, +)였으나 이후 발표된 McLaren and Bowles(1985)에서 X-distribution 이라는 개념을 이용하여 초기에 제안한 3가지 경우를 2가지 경우로 수정하였다. X-distribution 개념은 후속연구(McLaren *et al.*, 1993; Hughes, 2005)에서 퇴적물의 이동경로 뿐 아니라 퇴적패턴을 구분하는 데에도 활용되고 있다. X-distribution 개념은 McLaren-Bowles 의 방법론을 상술하는 부분에서 자세히 다루기로 한다. 이 절에서는 McLaren-Bowles 방법의 변천사를 서술하는 데 목적을 두고 있다기보다 입도경향분석의 발전과정을 설명하려는 데 더 목적을 두고 있으므로, McLaren(1981)과 McLaren and Bowles(1985)의 차이를 굳이 구분하지 않았다. 위의 두 연구가 차이를 보인다는 것은 주(註)로 언급하는 정도에서 마무리 짓고자 한다.
- 3) McLaren and Bowles (1985)는 case II 에 대한 물리적 의미를 제시하지는 않는다. 그들은 예상 가능한 전달함수의 조합으로부터 case II 의 경우가 퇴적물 이동을 지시할 수 있음을 유도하였다.
- 4) Gao and Collins(1991)의 논리는 다음과 같다. 만일 $x = \mu_2 - \mu_1$, $y = \gamma_2 - \gamma_1$ 라 두고, 퇴적물 기원지와 퇴적지의 입도분포 함수를 각각 $d_1(s)$, $d_2(s)$ 라 하면, $\sigma_2^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (s - \mu_2)^2 d_2(s) ds = \int_{-\infty}^{\infty} s^2 d_2(s) ds - \mu_2^2$ 이므로, $\int_{-\infty}^{\infty} s^2 d_2(s) ds = \sigma_2^2 + \mu_2^2$ 이고, $y = \gamma_1 - \gamma_2 = \gamma_1 - (\sigma_2^2)^{-3/2} \int_{-\infty}^{\infty} (s - \mu_2)^3 d_2(s) ds$
 $= \gamma_1 (\sigma_2^2)^{-3/2} \left[\int_{-\infty}^{\infty} s^3 d_2(s) ds - 3\mu_2 \int_{-\infty}^{\infty} s^2 d_2(s) ds + 2\mu_2^3 \right]$
 $= \gamma_1 (\sigma_2^2)^{-3/2} \left[\int_{-\infty}^{\infty} s^3 d_2(s) ds - 3\mu_2 (\sigma_2^2 + \mu_2^2) + 2\mu_2^3 \right]$
 $= \gamma_1 (\sigma_2^2)^{-3/2} \left[\int_{-\infty}^{\infty} s^3 d_2(s) ds - 3\sigma_2^2 (x + \mu_1) - (x + \mu_1)^3 \right]$
 이 된다. 여기서 $A = (\sigma_2^2)^{-3/2}$ 라 두면,
 $y = Ax^3 + 3\mu_1 Ax^2 + 3A(\mu_1^2 + \sigma_2^2)x + \gamma_1 - A \left[\int_{-\infty}^{\infty} s^3 d_2(s) ds - 3\mu_1 \sigma_2^2 - \mu_1^3 \right]$
 이 된다. 이 때, $y' = 3Ax^2 + 6\mu_1 Ax + 3A(\mu_1^2 + \sigma_2^2)$ 이고 $D^4 = (3\mu_1^2 A)^2 - (3A)(3A(\mu_1^2 + \sigma_2^2)) = -9\sigma_2^2 A^2 < 0$ 이므로, y 는 오직 하나의 실근

- 만을 갖는 삼차함수가 된다. 만일 y 가 원점을 지나지 않는다면, x, y 의 부호가 항상 같을 수는 없게 된다.
- 5) McLaren 은 현재 GeoSea Consulting 이라는 회사의 CEO 중 한 명이다. 홈페이지(www.geosea.ca)에는 McLaren-Bowles 방법을 소개하는 항목이 포함되어 있다.
 - 6) 여기서 MB법은 McLaren and Bowles(1985)의 McLaren-Bowles 방법을, GC법은 Gao and Collins(1992)의 Gao-Collins 방법을, Rx법은 Le Roux(1994a)의 Le Roux 방법을 각각 가리킨다.
 - 7) Hughes(2005)는 현재 방법론으로 입도경향분석이 지니고 있는 한계를 논의하는 과정에서 이 문제를 간단히 언급하고 있다. 로그정규분포에 입각하여 퇴적물 입도특성을 파이척도로 표현할 경우 평균입도, 분급, 왜도 등에 편의(bias)가 포함될 수 있다는 사실을 지적하고, 이러한 편의가 입도경향분석의 결과에 영향을 줄 수 있다고 주장하고 로그쌍곡선 분포에 입각한 퇴적물 입도특성의 특성화가 고려될 수 있음을 언급하고 있다.

文獻

김성환 · 류호상, 2007, “낙동강 삼각주연안 사주섬의 지형 변화에 대한 입도경향 분석의 활용도 탐색,” 한국지역지리학회지, 13(2), 119-128.

성효현 · 방경화, 2005, “만리포 해빈퇴적물의 동절기 퇴적 환경,” 한국지형학회지, 12(2), 87-98.

신동혁 · 이희일 · 한상준 · 오재경 · 권수재, 1998, “황해 가로림만 조간대 표층퇴적물의 이동경로,” 한국해양학회지(바다), 3(2), 59-70.

유규철 · 오재경, 1999, “동해 연안 표층 퇴적물의 이동경로,” 한국해양해양공학학회지, 11(1), 50-55.

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

Asselman, N.E.M., 1999, Grain-size trends used to assess the effective discharge for floodplain sedimentation, River Waal, the Netherlands, *Journal of Sedimentary Research*, 69(1), 51-61.

Bartholdy, J., Christiansen, C. and Petersen, J.B.T., 2004, Comparing advantages and disadvantages in the interpretation of grain-size trends described by the log-normal and the log-hyperbolic

- distribution model, *Proceeding of the International Workshop HWK: From Particle Size to Sediment Dynamics, Delmehost 15-18 April, 2004*, 16-22.
- Chang, Y.H., Scrimshaw, M.D., and Lester, J.N., 2001, A revised Grain-Size Trend Analysis program to define net sediment pathways, *Computers and Geosciences*, 27, 109-114.
- 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.
- Friedman, G.M., 1961, Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics, *Journal of Sedimentary Petrology*, 31(4), 514-529.
- Gao, S. and Collins, M., 1992, Net sediment transport patterns inferred from grain size trends based upon definition of "transport vectors", *Sedimentary Geology*, 80, 47-60.
- Gao, S. and Collins, M., 1994a, Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vector" — reply, *Sedimentary Geology*, 90, 157-159.
- Gao, S. and Collins, M., 1994b, Analysis of grain size trends, for defining sediment transport pathways in marine environments, *Journal of Coastal Research*, 10(1), 70-78.
- 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, *Marine Geology*, 121, 171-185.
- Gao, S. and Collins, M., 1991, A critique of the "McLaren Method" for defining sediment transport paths-discussion, *Journal of Sedimentary Petrology*, 61(1), 143-146.
- Hartmann, D. and Flemming, B., 2002, Discussion of: Steven, H. Hill and Patrick McLaren, 2001, A comparison between log-hyperbolic and model-independent GSD in sediment trend analysis, *Journal of Coastal Research*, 18, 592-595.
- Hartmann, D., 2004, From reality to model: the parameterization problem of particle size distributions, *Proceeding of the International Workshop HWK: From Particle Size to Sediment Dynamics, Delmehost 15-18 April, 2004*, 65-67.
- Hill, S.H. and McLaren, P., 2001, A comparison between log-hyperbolic and model-independent grain size distribution in sediment trend analysis, *Journal of Coastal Research*, 17, 931-935.
- Hughes, S.A., 2005, Use of Sediment Trend Analysis for Coastal Projects, CHETN-6-40.
- Klovan, J.E., 1966, The use of factor analysis in determining depositional environments from grain-size distribution, *Journal of Sedimentary Petrology*, 36(1), 115-125.
- Krumbein, W.C., 1934, Size-frequency distribution of sediments, *Journal of Sedimentary Petrology*, 4, 65-77.
- Krumbein, W.C., 1938, Size-frequency distribution of sediments and the normal phi curve, *Journal of Sedimentary Petrology*, 8, 84-90.
- Le Roux, J.P., 1994a, An alternative approach to the identification of net sediment transport paths based on grain-size trends, *Sedimentary Geology*, 94, 97-107.
- Le Roux, J.P., 1994b, A spreadsheet template for determining sediment transport vectors from grain-size parameters, *Computers and Geosciences*, 20(3), 433-440.
- Le Roux, J.P., 1994c, Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors" — comment, *Sedimentary Geology*, 90, 153-156.
- Le Roux, J.P., O' Brien, R.D., Rios, F., and Cisternas, M., 2002, Analysis of sediment transport paths using grain-size parameters, *Computers and Geosciences*, 28, 717-721.
- Lucio, P.S., Dupont, H.S., and Bodevan, E.C., 2004, Sediment transport paths in the Waterschelde: One-dimensional alternative to determine sediment trend, *Journal of Coastal Research*, 20(3), 771-775.

- Masselink, G., 1992, Longshore variation of grain size distribution along the coast of the Rhone Delta, Southern France: A test of the 'McLaren Model', *Journal of Coastal Research*, 8(2), 286-291.
- Masselink, G., 1993, Longshore variation of grain size distribution along the coast of the Rhone Delta, Southern France: A test of the 'McLaren Model' - Reply, *Journal of Coastal Research*, 9(4), 1142-1145.
- McCave, I.N., 1978, Grain-size trends and transport along beaches: an example from eastern England, *Marine Geology*, 28, 43-51.
- McLaren, P. and Bowles, D., 1985, The effects of sediment transport on grain size distribution, *Journal of Sedimentary Petrology*, 55(4), 457-470.
- McLaren, P., 1981, An interpretation of trends in grain size measures, *Journal of Sedimentary Petrology*, 51(2), 611-624.
- McLaren, P., 1993, Discussion of: Masselink, G., 1992, Longshore variation of grain size distribution along the coast of the Rhone Delta, Southern France: A test of the "McLaren Model", *Journal of Coastal Research*, 8(2), 286-291, *Journal of Coastal Research*, 9(4), 1136-1141.
- McLaren, P., Cretney, W.J., and Powys, R.I., 1993, Sediment pathways in a British Columbia Fjord and their relationship with particle-associated contaminants, *Journal of Coastal Research*, 9(4), 1026-1043.
- 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.
- Poizot, E., Mear, Y., Thomas, M., and Gamaud, S., 2006, The application of geostatistics in defining the characteristic distance for grain size trend analysis, *Computers and Geosciences*, 32, 360-370.
- Pye, K. and Tsoar, H., 1990, *Aeolian Sand and Sand Dunes*, Unwin Hyman, London.
- Rios, F., Cisternas, M., Le Roux, J., and Correˆa, I., 2002, Seasonal sediment transport pathways in Lirquen Harbor, Chile, as inferred from grain-size trends, *Investigaciones Marinas, Valparaˆiso*, 30(1), 3-23.
- Shepard, F.P. and Young, R., 1961, Distinguishing between beach and dune sands, *Journal of Sedimentary Petrology*, 31(2), 196-214.
- Stapor, F.W. and Tanner, W.F., 1975, Hydrodynamic implications of beach, beach ridge and dune grain size studies, *Journal of Sedimentary Petrology*, 45, 926-931.
- Syvitski, J.P. and Murray, J.W., 1977, Grain-size distribution using log-probability plots-a discussion, *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 25, 683-694.
- Tucker, R.W. and Vacher, H.L., 1980, Effectiveness of discriminating beach, dune, and river sands by moments and the cumulative weight percentages, *Journal of Sedimentary Petrology*, 50, 165-172.
- Vanwesenbeeck, V. and Lankneus, J., 2000, Residual sediment transport paths on a tidal sand bank: A comparison between the modified McLaren model and bedform analysis, *Journal of Sediment Research*, 70(3), 470-477.
- Visher, G.S., 1969, Grain size distributions and depositional processes, *Journal of Sedimentary Petrology*, 39(3), 1074-1106.
- 교신: 김성환, 404-708, 인천광역시 서구 경서동 종합환경연구단지 내 국립환경과학원 생태평가과 (이메일: phygeokim@chol.com, 전화: 032-560-7423)
- Correspondence: Sung Hwan Kim, Ecosystem Survey Team, National Institute of Environmental Research, Environmental Research Complex, Gyongseo-dong, Seo-gu, Incheon, 404-708, Republic of Korea (e-mail: phygeokim@chol.com, phone: +82-32-560-7423)

최초투고일 07. 06. 01.

최종접수일 07. 09. 19.