

‘퇴적임 기반’ 사구 역학 모형의 호환 가능성에 대한 이론적 고찰*

— 플럭스, 사면조정, 바람그늘 문제를 중심으로 —

류 호 상**

Theoretical Investigations on Compatibility of Feedback-Based Cellular Models for Dune Dynamics: Sand Fluxes, Avalanches, and Wind Shadow*

Hosahng RHEW**

요약: 풍성사구는 바람, 모래 지면, 식생 간 상호작용의 결과로 발달하는 지형이다. 퇴적임 기반 사구역학 모형은 풍성사구가 자기조직 현상에 의해 생성된다는 데 초점을 맞춘다. 풍속장의 정확한 재현에 초점을 맞추는 외력 기반 모형과는 달리 퇴적임 기반 모형은 지형발달 과정에서 도출한 현상학적 규칙을 이용해 지형 역학을 분석한다. 퇴적임 기반 모형은 성공적으로 사구형성 과정을 재현하지만, 규칙 설정의 융통성 수준에 대한 이해를 요구한다. 이 연구는 사구의 패턴을 재현하는 데 성공적이라고 평가되는 ‘모래판 모형(sand slab models)’, ‘Nishimori 모형’, ‘de Castro 모형’을 비교하여 알고리즘간 호환 가능성을 분석하였다. 주요 결과는 다음과 같다. 첫째, 모래이동 플럭스의 관점에서 모래판 모형과 de Castro 모형은 호환이 용이하지만 Nishimori 모형은 조정인자를 고려해야 한다. 둘째, 사면조정에 관한 Nishimori 모형의 알고리즘은 다른 모형이 채택하고 있는 안식각 기준을 손쉽게 이식할 수 있다. 셋째, 모래판 모형과 de Castro 모형이 채택하는 바람그늘 규칙은 사구 성장 및 발달에 필수 요인은 아닐 수 있으며, 사구열 수준의 상호작용에서 보다 중요한 역할을 할 것으로 보인다. 모래판 모형과 de Castro 모형, Nishimori 모형은 대체로 호환 가능한 구조를 갖추고 있다고 판단되나 호환 가능성의 수준을 판단하려면 보다 체계적인 검토가 필요하다.

주요어: 풍성사구, 층면구조 패턴, 계층이론, 자기조직 현상, 수치모형

Abstract: Two different modelling approaches to dune dynamics have been established thus far; continuous models that emphasize the precise representation of wind field, and feedback-based models that focus on the interactions between dunes, rather than aerodynamics. Though feedback-based models have proven their capability to capture the essence of dune dynamics, the compatibility issues on these models have less been addressed. This research investigated, mostly from the theoretical point of view, the algorithmic compatibility of three feedback-based dune models: sand slab models, Nishimori model, and de Castro model. Major findings are as follows. First, sand slab models and de Castro model are both compatible in terms of flux perspectives, whereas Nishimori model needs a tuning factor. Second, the algorithm of avalanching can be easily implemented via repetitive spatial smoothing, showing high compatibility between models. Finally, the wind shadow rule might not be a necessary component to reproduce dune patterns unlike the interpretation or assumption of previous studies. The wind shadow rule, rather, might be more important in understanding bedform-level interactions. Overall, three models show high compatibility between them, or seem to require relatively small modification, though more thorough investigation is needed.

Key Words: Aeolian dunes, bedform patterns, hierarchical theory, self-organization, numerical simulation.

1. 서론

풍성사구(風成砂丘, Aeolian Dunes)¹⁾는 흔히 바람에 의해 형성되는 지형이라고 설명하지만 보다 정확히 말하면 바람과 지표 기복, 식생 간의 상호작용에 의해 발달·유지되는 지표상의 패턴이다 (Baas, 2007; Kocurek *et al.*, 2010). 일정 풍속 이상의 바람에 의해 지표의 모래가 이동하기 시작하

면 바람에 의해 이동되는 모래 중 일부가 퇴적되어 둔덕을 형성한다. 일단 둔덕이 형성되고 나면, 둔덕은 다시 바람의 흐름에 영향을 미친다. 바람 맞이 사면에서는 풍속이 빨라지고 바람그늘에서는 풍속이 감소한다(Wiggs, 2001). 풍속의 공간적 변이는 모래이동 플럭스의 공간적 변화로 이어져 지표 위에 풍성사구군(群)이라는, 규칙적인 층면구조(層面構造, bedform)를 발달시킨다. 이는 대기과

* 이 논문은 2013년도 전북대학교 연구기반 조성비 지원에 의하여 연구되었음.

** 전북대학교 사범대학 지리교육과 조교수(Assistant Professor, Department of Geography Education, Chonbuk National University)(serious53@jbnu.ac.kr)

지면의 경계면에서 에너지의 소산이 최대가 되도록 하는 소산구조(dissipative structure)의 일종으로 해석된다(Baas, 2007; Nishimori, 2015). 사구에 식생이 정착할 수 있는 조건이 허용되는 경우 식생 또한 사구발달의 상호작용 고리에서 중요한 역할을 담당한다. 식생은 바람의 영향을 차단하는 경계층의 두께를 증가시켜 모래의 퇴적을 유도한다(Pethick, 1984). 사구 식생은 모래에 의한 매몰에 적응되어 있어 매몰이 발생할 때 오히려 성장이 촉진되는 양태를 보인다(Maun, 2009), 매몰을 이긴 식생이 모래의 지속적인 퇴적을 유도하므로 사구는 식생으로 인해 더욱 성장한다. 모래의 퇴적을 유발하는 수준과 양태는 식생종마다 차이를 보이기 때문에, 식생이 서식하는 사구의 경우는 바람, 모래와 함께 식생이 사구의 상태를 결정짓는 주요 인자로서 작용한다(Stallins and Parker, 2003; Stallins, 2005). 요컨대 풍성사구의 형태와 구조는 지면에 가해진 바람의 힘과 식생의 생물작용에 대한 지형의 반응이자 바람, 모래, 식생 간 상호작용의 산물이라고 할 수 있다.

‘되먹임 기반’ 모형은 지형발달이 지형형성기구의 일방적인 작용에 의한 것이 아니라 지형과 외력의 상호작용, 지형 내부 구성요소 간의 상호작용 등에 의해 지배된다는 점을 중시하는 접근법에 토대를 둔 것이다(Coco and Murray, 2007). 되먹임 기반 격자형 모형을 이용하여 사구 지형역학을 이해하고자 하는 접근은 사구가 바람, 지형, 식생 간 상호작용의 산물이라는 데 착안한다.²⁾ 되먹임 기반 모형이란 지형형성과정이 본질적으로 자기조직현상이라고 보고, 자기조직을 조절하는 내적 동역학 변수를 중심으로 지형발달을 분석하고 모의하는 일련의 모형을 지칭한다.³⁾ 되먹임 기반 모형의 속성과 가치를 이해하기 위해서는 사구 지형역학을 다루는 서로 다른 두 가지 접근인 ‘외력 기반’ 모형과 ‘되먹임 기반’ 모형을 비교·검토해 볼 필요가 있다(Kocurek *et al.*, 2010).

‘외력 기반’ 모형이란 사구의 지형역학을 이해하고 재현하는 데 풍속장의 재현이 최우선적이라고 보는 입장에서 개발된 모형이다. 외력 기반 모형이 암묵적으로 전제하는 바는 사구지형에 의해 발생하는 풍속장의 요동과 이로 인해 발생하는 전단응력의 공간적 분포를 가급적 정확히 재현하는

것이 사구의 지형역학을 이해하는 데 핵심 요소라는 것이다(Kocurek *et al.*, 2010; Durán *et al.*, 2010). 사구 지형은 바람의 흐름에 요동을 일으킨다. 사구로 인해 발생한 공기 흐름의 요동은 풍속의 공간적 변화를 초래한다. 평지 위를 지나가는 바람이 사구를 만나면 사구 전면의 말단부에서는 잠시 풍속이 감소하지만 바람맞이 사면을 따라 유선(streamline) 간격이 좁아지면서 풍속이 증가하는 현상이 일어난다(Wiggs, 2001). 바람이 사구 정상부를 넘어 사구후면으로 진입하면, 흐름 분리 현상에 의해 바람그늘 영역 내에 맴돌이 현상과 함께 풍속이 급격히 저하되는 현상이 발생한다. 사구에 의해 발생하는 풍속의 변화는 바람이 지면에 가하는 전단응력의 변화로 이어진다. 외력 기반 모형은 이와 같은 과정을 가급적 ‘정확하게’ 재현하는 데 역점을 둔다.⁴⁾

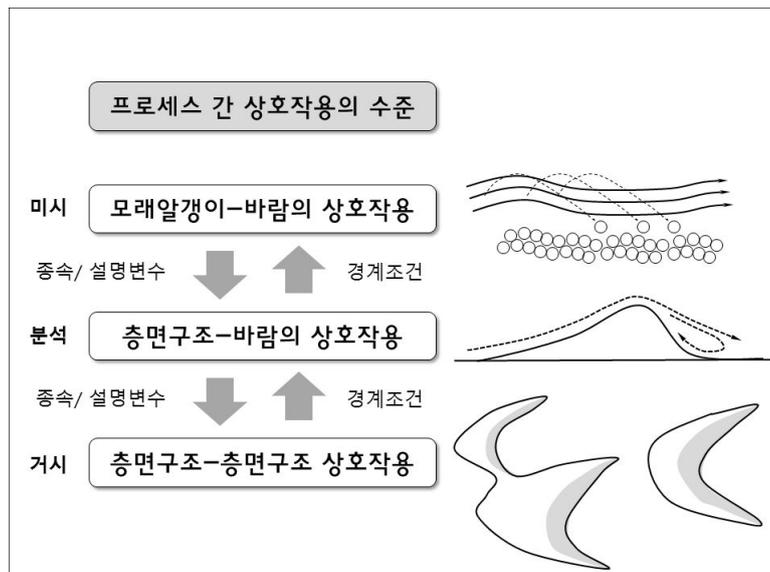
외력 기반 모형의 가장 큰 장점은 풍속장과 지형과의 상호작용 결과 발생하는 전단응력의 공간적 분포를 명시적으로 다룬다는 점이다. 이 때문에 외력의 변화와 지형 변화 간의 관계를 보다 직관적으로 설명할 수 있다는 것이 강점이다. 특히 바른함과 같은 단일사구의 이동과 형태 변화 혹은 형태 유지 등과 같은 문제를 다루는 데 효과적이다. 다만 사구지대의 규모로 다루는 규모가 커지게 되면 계산량이 기하급수적으로 증가하기 때문에 모형을 통해 사구지대의 거동을 탐색하는 과정이 번거로워지는 문제가 있다.⁵⁾

‘되먹임 기반’ 모형은 바로 외력 기반 모형이 한계를 보이는 후자의 영역에서 빛을 발한다. 외력 기반 모형과는 달리 되먹임 기반 모형에서는 대부분 풍속장과 지형 간의 상호작용을 단순한 규칙으로 처리한다. 바람의 영향은 침식 확률을 증가 혹은 감소시키는 등과 같은 방식으로 축약하거나(e.g. de Castro, 1995; Werner, 1995), 바람장의 속성과 연계된 지형의 속성을 대리변수로 원용한다(e.g. Nishimori *et al.*, 1998). 그럼에도 되먹임 기반 모형은 대체적으로 사구 및 사구지대의 거동을 충분히 재현하는 것으로 평가된다(Kocurek *et al.*, 2010). 되먹임 기반 모형은 사구지대에서 발견되는 다양한 유형의 사구를 재현할 수 있었으며(Werner, 1995; Nishimori *et al.*, 1998; Momiji *et al.*, 2001; Bishop *et al.*, 2002), 사구의 지형역

학에서 식생이 미치는 효과를 분석하는 데 활용되었다(de Castro, 1995; Baas and Nield, 2007; Nield and Baas, 2008a, b). 사구지대 내에서 발생하는 사구 간의 상호작용(i.e. 충돌과 병합)을 탐색하는 데 활용되었을 뿐 아니라(e.g. Katsuki *et al.*, 2005), 30여 년에 걸친 이동사구의 진화에 식생피복이 미친 영향을 평가하는 데 이용되기도 하였다(Pelletier *et al.*, 2009).

바람에 의한 모래입자의 이동으로부터 사구지형의 발달을 설명하려는 환원주의적 입장에서 볼 때 퇴적 기반 모형을 이용하여 사구 지형역학을 탐색하는 접근은 현상론적 접근일 뿐 지형의 생성, 발달, 진화를 설명하기에는 부적합한 것으로 치부될 수도 있다. 그러나 계층이론은 지형역학을 다루는 데 있어 전통적인 환원주의적 입장과는 다른 비전을 제시한다. Werner(1999)에 따르면 비선형 시스템은 다양한 규모의 현상과 변수들이 상호작용의 끈으로 묶여 있다. 서로 다른 시공간 스케일에서 작동하는 다양한 변수들이 상호작용을 통해 시스템의 창발적 거동을 발생시킨다. 미시적 수준에서 파악된 변수들 간의 관계로부터 거시적 수준의 지형변화를 이해하려고 하는 전통적인 환원주의적 관점은 변수들 간의 상호관계로 인하여 발생

하는 창발적 거동으로 인해 시스템 전체의 거동을 분석하기에 부적절하다. 그 대안이 계층이론에 따른 계층적 접근이다. 계층이론에 따르면 시스템의 거동은 분석하고자 하는 시공간 스케일에 부합하는 변수들을 이용하여 기술되어야 한다. 분석 시공간 스케일보다 상대적으로 미시적인 수준에서 확인되는 변수와 현상으로부터 분석 시공간 스케일 변수를 지배하는 규칙이 도출되며, 분석 시공간 스케일보다 상대적으로 거시적인 수준에서 파악되는 시스템의 거동으로부터 분석 시공간 스케일 변수의 경계조건이 결정된다(그림 1). 사구 지형역학의 분석에 계층이론의 관점을 적용하면 단일사구 혹은 사구지대 수준의 거동은 이보다 미시적인 수준에서 발생하는 모래와 바람 간의 상호작용(i.e. 선택이론)으로부터 직접 도출되는 것이 아니다. 미시적 수준에서 확인된 모래-바람 상호작용의 방식은 사구 및 사구지대 수준의 거동을 기술하는 변수들 간의 규칙을 결정하는 근거를 제공할 뿐이다(Kocurek *et al.*, 2010). 퇴적 기반 모형에서 바람의 영향이 침식/퇴적 확률로 표현되거나 지형구배의 함수로 표현되는 것은 계층이론의 관점을 따른 결과이다. 그것만으로도 단일사구나 사구지대의 거동을 분석하기에 충분하다는 것이다.



(출처: Kocurek *et al.*(2010)의 Fig.10을 수정·편집)

그림 1. 계층이론에 입각한 퇴적 기반 모형 구축원리

되먹임 기반 사구 지형역학 모형의 ‘성공’은 계층이론 관점의 타당성을 시사하는 동시에 ‘성공’의 원인에 대한 새로운 질문을 제기한다. 되먹임 기반 모형은 현상을 지배하는 핵심 규칙을 포착하여 이를 토대로 지형 역학을 구성한다. 현상을 지배하는 핵심 규칙은 대체로 정성적인 언명이다. 이를테면 사구지형의 발달로 이어지는 모래의 이동과 퇴적은 각 지점에서 일정량의 모래가 바람에 의해 침식된 후 운반되어 일정한 거리를 이동한 후 퇴적되는 것으로 설명될 수 있다. 문제는 ‘어느 정도의 양’이 ‘어느 정도의 거리’를 이동하는 지 여부이다. 지형 역학 모형의 구현을 위해서는 모래의 양과 이동거리를 기술하는 구체적인 함수, 규칙, 관련 계수 등을 정해야 한다. 지배방정식이 존재하고, 지배방정식을 근사하는 표준적인 접근법이 존재하는 외력 기반 모형의 경우와는 달리 되먹임 기반 모형은 규칙을 결정하고 수립하는 과정에 대한 명료한 기준이 아직은 불분명하다. 동일한 현상에 대한 인식만 공유할 뿐 모형 내부에서 규칙으로 변환하는 과정이 서로 조금씩 다름에도 불구하고 되먹임 기반 모형들의 모의로 얻어진 패턴이 유사하다는 것은 사구의 지형역학을 지배하는 핵심 기작이 존재하며, 각각의 기작은 세부적인 변수화 과정(parameterization)에 다소 덜 민감하다는 것을 함축한다. 이와 같은 문제에 대한 논의는 동일한 계열의 되먹임 기반 모형을 수정·보완하는 연구에서는 일부 등장하지만(i.e. Momiji *et al.*, 2001; Nield and Baas, 2008a), 서로 다른 유형의 모형을 상호 비교하는 연구는 찾아보기 힘들다.

이 연구의 목적은 현재까지 개발된 주요 되먹임 기반 사구 지형역학 모형들의 구조와 알고리즘을 상호 비교하여 사구 지형역학 모형의 호환성을 파악하고자 하는 것이다. 되먹임 기반 사구 지형역학 모형 중 격자형 모형을 중심으로 모형별 특징, 모형의 구조 및 알고리즘간의 유사성과 차이점을 대비하여 사구 지형역학을 재현하는 데 핵심적인 공통 구조 및 알고리즘을 분석하고자 한다. 모형간의 공통구조 및 알고리즘간의 호환성을 파악하는 것은 기술적으로는 보다 효율적인 모형을 개발하는 기반이 되며, 이론적으로도 사구 지형역학의 핵심 요소를 이해하는 데 기여할 수 있다. 지형패

턴의 생성원리를 탐색하는 도구로서 되먹임 기반 모형의 가능성과 가치가 재조명되고 있는 최근의 사정을 감안할 때(Murray *et al.*, 2010), 이 연구는 사구 지형역학을 지배하는 핵심 기작에 대한 이해를 돕고 개개의 모형들이 채택하고 있는 알고리즘의 상호 호환을 통해 모형 선정 및 적용의 폭을 넓혀줄 수 있다는 점에서 의의가 있을 것으로 판단된다.

가장 널리 알려진 되먹임 기반 사구 지형역학 모형인 모래판 모형과 그 변종 및 이와 유사하지만 고유의 알고리즘을 갖춘 Nishimori 모형과 de Castro 모형 등을 집중 검토한다. 이 연구는 각 모형이 제시하는 알고리즘의 이론적 성격을 분석·고찰하여 ① 모형 간 거동을 대비하려면 모래이동량과 관련되는 격자의 크기와 두께(혹은 단위모래이동량), 이동거리, 시간단위 등을 어떻게 설정해야 하는지 ② 모형 간 차이를 보이는 알고리즘이 호환 불가능한 차이인지 동일한 논리구조를 가지고 있는지 ③ 모형 간의 상호 호환이 되려면 어떤 조건이 부가되어야 하는지 등에 초점을 맞춘다.

2. 되먹임 기반 사구 지형역학 모형의 유형과 특징

1) 배경

이 연구에서 검토할 모형은 3가지 유형의 모형이다(그림 2)⁶⁾. 첫 번째는 흔히 ‘모래판 모형’으로 불리는 모형 군(群)이다. 모래판 모형은 Werner(1995)가 사막사구 패턴을 탐색할 목적으로 개발한 모형이다. Momiji *et al.*(2000)과 Bishop *et al.*(2002)은 Werner(1995)의 알고리즘 중 일부를 수정하여 사구단면의 풍속가속효과를 반영함으로써 바람맞이 사면은 완만하고 바람그늘 사면은 안식각에 가까운 급애를 이루는 사구단면의 비대칭성을 재현하였다. 한편, Baas and Nield(2007)와 Nield and Baas(2008a)는 Werner(1995)의 알고리즘은 간소화한 반면 매물에 대한 식생의 반응을 고려한 규칙을 결합하여 ‘DECAL’ 알고리즘을 제시하고, DECAL 알고리즘이 포물형 사구나 네브카(nebhka) 사구를 적절하게 재현하는 것을 보여 주었다.⁷⁾ 이 연구에서는 Werner(1995)의 알고리즘

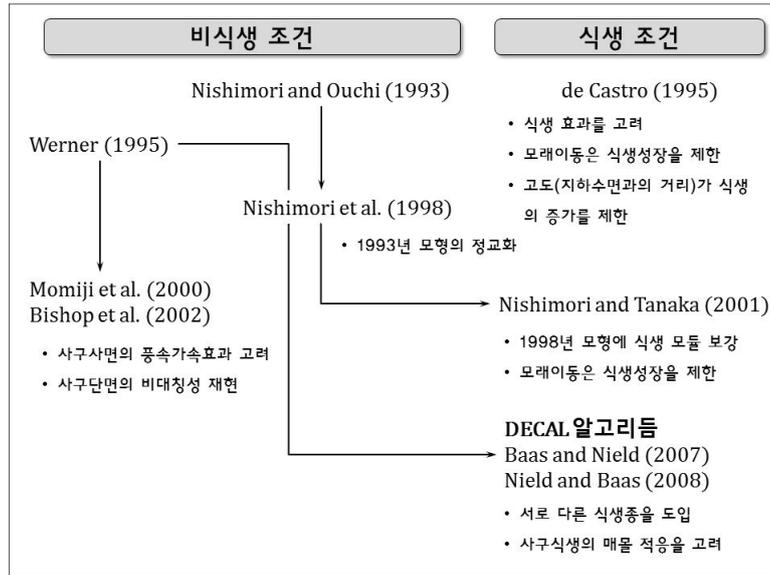


그림 2. 퇴먹임 기반 모형의 유형

을 일부 수정한 Mimiji *et al.*(2000)와 Bishop *et al.*(2002)의 알고리즘을 비식생 조건 하의 모래판 모형의 사례로, 사구식생의 매물 적응 생태를 규칙으로 포함시킨 Nield and Baas(2008a)의 DECAL 알고리즘을 식생 조건 하의 모래판 모형의 사례로 보고 분석을 수행하였다. 두 번째는 Nishimori *et al.*(1998)이 제안한 모형(이하 Nishimori 모형)이다. Nishimori 모형은 Nishimori and Ouchi(1993)의 제안을 발전시킨 것으로 초기의 알고리즘은 식생의 역할을 고려하지 않았으나 Nishimori and Tanaka(2001)에서 식생의 모래이동 제한 알고리즘을 추가하였다. Nishimori 모형은 사구의 바람맞이 사면과 바람그늘 사면의 플럭스 차이, 사면조정 효과를 모두 사면 경사의 함수로 구현한다. 세 번째는 de Castro(1995)가 제안한 모형(이하 de Castro 모형)이다. de Castro 모형은 앞의 모래판 모형이나 Nishimori 모형과 비교할 때 처음부터 식생 사구(해안사구)에 초점을 맞추어 개발된 모형으로 식생효과를 포함하고 있다. de Castro 모형은 1995년 제안된 이후 모형의 알고리즘을 개선·보완하는 후속연구가 진행되지는 못했으나 Nishimori and Tanaka(2001)는 Nishimori 모형의 식생 알고리즘을 설계하는 데 영향을 미쳤다고 기술하고 있다.⁸⁾

2) 모형별 특징

(1) 모래판 모형

모래판 모형은 여타 퇴먹임 기반 모형과 크게 두 가지 점에서 구별되는 특징을 가지고 있다. 첫째는 모래의 이동이 모래판 단위로 이루어진다는 것이다. 다시 말하면 모래의 이동이 연속적이지 아닌 이산적인 형태로 이루어진다는 것이다. 이것은 모래판 모형에서 모래판의 크기(d)와 두께(h_s)가 모래이동 플럭스를 재현하는 데 핵심적인 역할을 하게 됨을 의미하는 것이다. Werner(1995), Momiji *et al.*(2001), Bishop *et al.*(2002)는 모래판의 크기와 두께에 대한 조건을 명확히 제시하지 않고 오직 모래판 한 변의 길이와 두께 사이의 비율만을 1/3로 둔다고 언급한다. 다만 Bishop *et al.*(2002)는 모의를 통해 구현된 바른 사구의 크기와 현실의 바른 사구의 크기를 비교하여 모래판의 한 변의 길이에 1m라는 값을 부여할 수 있다고 언급한다. Nield and Baas(2008a)는 식생의 효과를 고려하게 될 경우 식생 자체의 평균 크기를 고려할 수밖에 없으므로 모래판의 한 변의 길이로 선택할 수 있는 값이 제한된다고 주장한다. 예를 들어 통상 서식반경이 최소 1m 이상이 되는 메스키투(*mesquite*)⁹⁾에 의해 발달되는 네브카 사구의 경우

모래판의 크기가 1m 이상인 경우에는 그 형태나 규모가 재현되었으나 1m 이하가 되는 경우는 전혀 다른 형태와 규모를 가진 사구가 발달하였다. 둘째는 여타의 퇴먹임 기반 모형과는 달리 모래판의 이동이 전 격자에서 동시에 이루어지는 것이 아니라 순차적으로 이루어진다는 것이다. $n \times n$ 격자로 구성된 공간이라면 전체 격자 중 하나를 임의로 선택하여 해당 격자에 위치한 모래판을 이동시키는 과정을 $n \times n$ 번 순차적으로 시행한다는 것이다. 이로 인해 모래판 모형에서 1회의 시행이란 전체 격자점에 대한 검색이 모두 완료된 시점이 된다. 먼저 이동하여 퇴적된 모래판은 이후 이동할 모래판에 대해 새로운 경계조건으로 작용한다. ‘순차적 시행’이라 부를 만한 이와 같은 절차는 모래판 모형의 모의 결과를 현실의 시간과 연계시키기 어렵게 만드는 요인이 된다. 모래판 모형의 1회 시행에 대응하는 현실의 시간 단위가 무엇인가에 대해서는 연구자들마다 차이가 있다. Bishop *et al.*(2002)은 바르한 사구의 평균 규모와 이동속도를 모의된 바르한 사구의 규모 및 속도와 비교하여 격자 1변의 길이를 1m로 둘 때 4회의 시행이 1년에 해당된다고 본 반면, Nield and Baas(2008a)은 격자 1변의 길이를 1m, 두께를 0.1m로 둘 때 50회를 1년으로 취급한 경우와 80회를 1년으로 취급한 경우를 모두 제시한다. 결론적으로 명확한 표준은 없다는 뜻이다.

모래판 모형은 바람이 부는 방향에 대해 사구의 배후지역에 바람그늘이 존재하고, 바람그늘에서는 모래판의 침식은 불가능하고 오직 퇴적만 가능하다고 가정한다. 이는 사구의 배후지역에서 발생하는 흐름 분리 현상과 경계층의 발달을 감안한 규칙이다. Kocurek and Frank(1996)는 바람 그늘이 사구 높이의 4배에 해당되는 영역에 형성된다고 본다. 이를 바람그늘의 하방각이 대략 15° 임을 의미하는 것이다. 모래판 모형에서는 이 값을 차용한다.

모래판의 이동규칙은 매우 간단하다. 첫째, 위에 제시한 방식으로 선정된 모래판의 이동 여부는 침식확률(p_e)에 의해 결정된다. 바람그늘 내에 위치한 모래판의 침식확률은 어떤 경우라도 0이다. 식생의 효과를 고려하는 DECAL 알고리즘을 적용할 경우 침식확률(p_e)이 식생 활력도($\rho \in [0, 1]$)만큼 감소하여 $\min\{0, p_e - \rho\}$ 의 값을 가진다고 규정한다. 둘째, 이동이 시작된 모래판은 일정한 거리(l)를 이동한다. 이 때 모래판이 퇴적될 확률(p_d)은 ① 모래판이 이미 존재하는 지점일 경우는 0.6, ② 모래판이 존재하지 않는 지점일 경우는 0.4, ③ 바람그늘일 경우는 다른 조건에 상관없이 1.0, ④ 식생의 효과를 고려할 경우 $p_d + \rho(1 - p_d)$ 의 식에 따라 계산된 값이 부여된다. 이동거리(l)의 경우 합의된 바가 없다. Werner(1995)는 $l=5$ 로 상수를 제안하지만, Nield and Baas(2008a)는 $l=1$ 로 주는 것과 $l>1$ 를 주는 것은 모의 결과에 큰 차이를 유발하지 않는다고 주장한다. Bishop *et al.*(2002)은 이동거리에 대한 규칙을 바람맞이 사면과 배후사면의 비대칭성을 구현하는 핵심 기작으로 보고, 이동거리 l 을 기준고도 h_{ref} 의 함수로 정의한다. 우선 매 시간마다 기준고도 h_{ref} 는 격자 $n \times n$ 의 평균고도 h_{avg} 를 이용하여 식 (1)과 같이 정의한다. 이 때, 이동거리 l 은 식 (2)와 같이 정의된다. Bishop *et al.*(2002)는 $l_0=5$, $C_1=0.4$, $C_2=0.002$ 을 이용하였다.

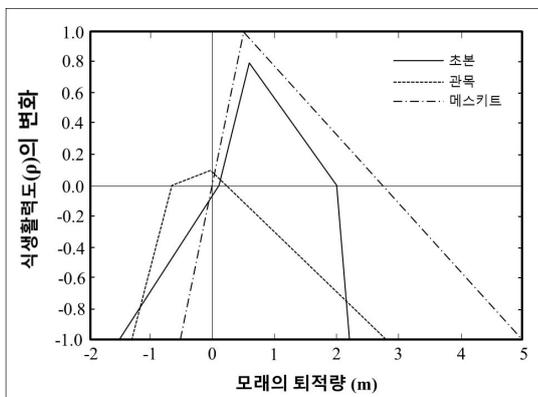
셋째, 이동이 끝난 모래판은 사면의 경사가 안식각을 초과하지 않는 형태로 조정된다. Werner(1995), Momiji *et al.*(2001), Bishop *et al.*(2002)의 경우는 격자 한 변의 길이와 두께의 비를 1/3로 두기 때문에 동서남북 방향의 격자에 대해서는 안식각 조건을 $\tan^{-1}(2/3) = 33.7^\circ$, 대각 방향의 격자에 대해서는 $\tan^{-1}(2/3) = 25.2^\circ$ 로 둔다. 이는 인접 격자 간 모래판의 개수가 3개 이상 차이가 나면 사면조정이 일어나야 한다는 것이다. 모

$$h_{ref} = h_{avg} - \frac{1}{n^2} \sum_{i,j=1}^n \frac{|h(i,j) - h_{avg}|}{2} = \frac{1}{n^2} \sum_{i,j=1}^n \left[h(i,j) - \frac{|h(i,j) - h_{avg}|}{2} \right] \quad (1)$$

$$l(i,j) = \begin{cases} l_0 + C_1(h(i,j) - h_{ref}) + C_2(h(i,j) - h_{ref})^2, & h(i,j) \geq h_{ref} \\ l_0 + C_1(h(i,j) - h_{ref}), & h(i,j) < h_{ref} \end{cases} \quad (2)$$

래판의 길이와 두께를 임의로 부여하는 DECAL 알고리즘에서는 안식각 조건을 30°로 두며, 식생 활력도(ρ)가 0.3 이상이 되는 경우는 40°로 증가시킨다. 사면조정이 일어나야 될 경우 모래판은 고도차가 가장 큰 방향으로 이동하며, 동일한 고도차를 보이는 격자가 복수 개 존재할 경우는 그 중 임의로 하나를 선정하여 모래판을 이동시킨다. 사면조정은 모래판 하나의 이동이 끝난 직후에 각각 시행한다.

식생의 효과를 고려하는 DECAL 알고리즘은 각 격자마다 식생 활력도(ρ)를 부여한다. 격자별 식생활력도는 해당 격자에 서식하는 식생종들의 식생활력도를 모두 합한 값으로 정의한다. 앞서 언급한 바와 같이 식생활력도는 0과 1 사이의 값을 지니며, 침식확률, 퇴적확률, 안식각의 크기 등에 영향을 미친다. DECAL 알고리즘의 특징은 식생이 지나는 매물에 대한 반응을 고려한다는 점이다. 1년으로 간주되는 모의횃수가 지나면 각 격자의 식생 활력도는 해당 격자의 침/퇴적량에 따라 증가하거나 감소한다. 초본의 식생 활력도는 일정 수준까지는 퇴적이 발생하는 지점에서 오히려 증가하는 패턴을 보이는 반면, 관목의 식생 활력도는 매물이나 퇴적이 일어나지 않는 지점에서 증가한다. 메스키트와 같이 매물에 적응한 관목류 식생의 경우는 초본류보다는 덜하지만 매물이 일어날 경우 일정 수준까지는 식생 활력도가 증가한다 (그림 3).



(출처: Baas(2007), Fig. 7 수정·편집)

그림 3. 식생별 성장함수의 예

(2) Nishimori 모형

Nishimori *et al.*(1998)은 사구의 지형역학과 관련된 모래이동의 양태를 이송 프로세스(advection process)와 확산 프로세스(diffusion process) 등 2가지로 요약한다. 이송 프로세스란 바람의 직접적인 작용에 의해 모래입자가 선택이전이나 선택이전 등의 방식으로 이동하는 것을 의미한다. 반면 확산 프로세스는 바람의 간접적인 영향 혹은 중력의 작용 등에 의해 모래가 이동하는 것을 의미한다. 예를 들면 모래의 사면경사가 안식각 이상일 때 사태의 형태로 모래가 이동하는 것이 여기에 해당한다.¹⁰⁾ Nishimori *et al.*(1998)이 제시하는 이송 프로세스와 확산 프로세스는 이후 Nishimori and Tanaka(2001)에서 일부 조정계수가 간략화되거나 신규 도입되는 방식으로 수정되었다. 이 논문에서는 Nishimori and Tanaka(2001)에 제시된 규칙을 중심으로 소개한다.

Nishimori 모형에서 n시간에 격자 (i, j)에 부여되는 값은 고도 $h_n(i, j)$ 이다. 지형의 변화는 매 시간단위마다 이송과 확산의 형태로 발생하는 모래 이동의 결과이다. 모래 이동은 해당 시간에 각각의 격자 (i, j)에서 발생하는 비사의 질량 $m_n(i, j)$ 과 발생한 비사가 해당시간동안 이동하는 거리 $l_n(i, j)$ 으로 특성화될 수 있다. 두 변수로부터 격자 (i, j)에서 발생하는 비사 플럭스 $q_n(i, j)$ 는 식 (3)과 같이 계산된다. 여기서 플럭스의 단위는 $kg/m/s$ 혹은 $m^3/m/s$ 이다.

$$q_n(i, j) = m_n(i, j)l_n(i, j) \quad (3)$$

모래의 질량은 격자의 면적 $S(=d^2, d$ 는 격자 한 변의 길이), 모래의 밀도 ρ 를 이용하면 각 격자의 1회 시행별 고도 변화는 식 (4)와 같이 주어진다. 단, 아래첨자 in과 out은 격자 (i, j)에 유입 혹은 유출되는 양을 의미한다. 문제를 단순화하기 위해 $\rho S=1$ 이라 둔다. 이는 밀도값에 대해 격자의 한 변 d 를 조정하여 구현할 수 있다. 결과적으로 각 격자에서 고도 변화는 해당 격자로 유입되는 비사의 질량과 유출되는 비사의 질량 차이로부터 자연스럽게 얻어진다.

격자 (i, j)에서 발생하는 비사의 질량과 비사이동

‘되먹임 기반’ 사구 역학 모형의 호환 가능성에 대한 이론적 고찰

$$h_{n+1}(i,j) - h_n(i,j) = \frac{m_{n,in}(i,j) - m_{n,out}(i,j)}{\rho S} \equiv m_{n,in}(i,j) - m_{n,out}(i,j) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} m_n^a(i,j) &= m_0^a [\tanh(-a \nabla h_n(i,j)) + 1.0 + \alpha] \\ l_n^a(i,j) &= l_0^a [\tanh(a \nabla h_n(i,j)) + 1.0] \\ q_n^a(i,j) &= m_n(i,j) l_n(i,j) = m_0 l_0 [\tanh(-a \nabla h_n(i,j)) + 1.0 + \alpha] [\tanh(a \nabla h_n(i,j)) + 1.0] \end{aligned} \quad (5)$$

거리는 프로세스의 유형에 따라 서로 다르게 정의된다. Nishimori 모형에서 이송 프로세스의 비사 질량, 이동거리, 비사 플럭스는 풍향과 평행한 방향으로 나타나는 사면경사 $\nabla_x h_n(i,j) = h_n(i,j) - h_n(i-1,j)$ 의 함수로 식 (5)와 같이 정의된다. 위 첨자로 나타나는 a 는 이송 프로세스로 인한 것임을 지시하는 것이며, 식 내부에 나타나는 a 는 모래 이동량을 결정하는 계수이다.¹¹⁾

식 (5)를 사구의 바람맞이 사면($\nabla_x h_n(i,j) > 0$)과 바람그늘 사면($\nabla_x h_n(i,j) < 0$)에 적용시켜 보면, 바람맞이 사면에서는 $m_n(i,j)$ 는 작아지는 대신 $l_n(i,j)$ 가 커지고, 바람그늘 사면에서는 그 반대의 값을 가진다. 바람맞이 사면의 경우를 사면을 따라 풍속이 강해지는 현상이 일어나고 바람그늘 사면의 경우는 유속분리(flow separation) 현상으로 인해 풍속이 급격히 떨어지는 영역이 나타난다. $l_n(i,j)$ 은 단위시간당 이동거리, 즉 모래이동의 속도로 해석할 수 있으므로 현실을 잘 반영한다고 할 수 있다. $m_n(i,j)$ 의 경우는 바람맞이 사면보다 바람그늘 사면에서 더 큰 값을 가지는 것으로 표현되고 있기 때문에 이를 비사량으로 ‘직역’하면 현실과는 다소 차이가 있다고 생각할 수 있다. 그러나 두 양의 곱으로 나타나는 비사 플럭스 $q_n(i,j)$ 의 패턴을 살펴보면, α 값으로 인해 바람그늘 사면($\nabla_x h_n(i,j) < 0$)의 값은 거의 0에 가깝게 나타나는데 반해 바람맞이 사면의 경우는 이보다 큰 값을 가지게 되며, 평지와 정상부($\nabla_x h_n(i,j) = 0$)에서 최댓값을 가지는 형태를 보인다. Nishimori *et al.* (1998)와 Nishimori and Tanaka(2001)은 $q_n(i,j)$ 의 패턴을 근거로 식 (3)은 현실의 모래이동 패턴을 반영하고 있다고 주장한다(그림 4). <그림 4>에 따르면 일정한 경사를 넘는 사구의 배후사면에서는 모래이동 플럭스가 0에 가깝게 되지만, 사구

배후의 평지에서는 플럭스가 다시 커지는 것으로 나타난다. 이는 바람그늘에 해당하는 영역일 지라도 모래이동이 가능한 것으로 해석되므로, 다른 되먹임 기반 모형의 바람그늘 규칙과는 차이가 있다. 이 부분에 대해서는 다음 절에서 보다 자세히 논의하기로 한다.

Nishimori 모형의 확산 프로세스 알고리즘은 모래이동이 중심격자와 5×5 근린격자¹²⁾ 간의 고도 차에 의해 발생한다고 본다. 확산 프로세스에 의해 중심격자 (i,j) 에서 5×5 근린격자로 이동하는 모래의 질량과 이동거리, 확산 프로세스에 의한 모래이동 플럭스는 식 (6)과 같이 정의된다. 여기서 위 첨자 c 는 확산프로세스가 주로 포행(creep)의 형태로 일어남을 강조하는 것으로 Nishimori *et al.*(1998)의 표기법을 준중한 것이다.

단, (i',j') 의 값은 중심격자의 좌표를 (3.3)으로 볼 때, 5×5 근린격자 행렬의 좌표이며, d 는 격자 한 변의 길이, $m_n^c(i,j|i',j')$, $l_n^c(i,j|i',j')$, $q_n(i,j|i',j')$ 는 각각 중심격자 (i,j) 에서 5×5 근린격자 내의 임의의 한 격자 (i',j') 로 이동하는 모래의 질량,

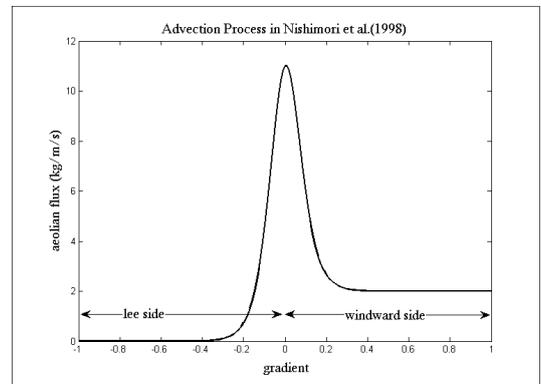


그림 4. 이송 프로세스에 의한 비사 플럭스 ($\alpha = 0.1, a = 10.0, q_0 = 10.0$)

이동거리, 모래이동 플럭스를 의미한다.

Nishimori and Tanaka(2001)는 Nishimori *et al.*(1998)이 제시한 모형에 식생을 고려한 알고리즘을 추가한다. 이 알고리즘에 따르면 격자 (i, j) 는 시간 n 에 대하여 식피율 $c_n(i, j)$ 를 가진다. 식피율 $c_n(i, j)$ 은 최댓값 c_{\max} 와 최솟값 c_{\min} 의 사이의 임의의 한 값이다. 식피율 $c_n(i, j)$ 은 식 (7)과 같은 규칙에 따라 갱신된다.

여기서 $b_n(i, j) = |h_n(i, j) - h_{n-1}(i, j)|$ 로 격자 (i, j) 에 발생한 고도변화의 절대값 또는 침식 혹은 퇴적의 절대량이며, A 는 식피율의 증가패턴과 관련된 상수이다. 이 식을 의미를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 식피율이 직전에 발생한 침식 혹은 퇴적의 절대량에 비해 낮으면 다음 단계에서 최솟값을 갖게 된다. 둘째, 식피율이 직전에 발생한 침식 혹은 퇴적의 절대량에 비해 낮지 않다면, 그 차이에 선형으로 비례하는 값으로 증가한다. 마지막으로 식피율이 직전에 발생한 침식 혹은 퇴적량에 대해 일정한 크기 이상으로 증가하게 되면 최댓값에 이르게 된다.

각 격자별로 부여되는 식피율은 이송 프로세스와 확산 프로세스에 의한 모래이동을 제한하는 효과를 나타낸다. 모래이동이 현저하게 감소하는 식피율을 임계식피율 c_{cr} 이라 하면, 모래이동 억제인자 $\alpha_{n,\beta}(i, j)$ 는 식 (8)과 같이 정의된다.

동일한 임계식피율 c_{cr} 에 대해 이송 프로세스와 확산 프로세스는 서로 다르게 반응한다고 가정하고, 이는 β 값을 조정하는 방식으로 구현된다. 식피율을 고려한 모래이동은 식 (8)에 의해 얻어진 모래이동 억제인자의 제곱을 식생을 고려하지 않았을 때의 모래이동 플럭스에 곱하여 식 (9)와 같이 얻어진다.

(3) de Castro 모형

de Castro(1995)는 스페인의 도나냐 국립공원(Doñana National Park) 내 이동사구를 모의·재현하는 지형역학 모형을 제안하였다. de Castro 모형이 묘사하는 모형공간은 한 변의 길이가 10m인 격자 100×100 개로 구성된 행렬이다. 해안사구인 도나냐 사구의 지형역학 재현에 초점을 맞추

$$m_n^c(i, j) = \sum_{(i', j')} m_n^c(i, j | i', j') = \sum_{(i', j')} D_c [h_n(i, j) - h_n(i', j')] \quad (6)$$

$$(i' = i-2, i-1, i, i+1, i+2, j' = j-2, j-1, j, j+1, j+2, i' \neq j')$$

$$l_n^c(i, j | i', j') = \begin{cases} d & , (i', j') = (2, 3), (3, 2), (3, 4), (4, 3) \\ \sqrt{2}d & , (i', j') = (2, 2), (2, 4), (4, 2), (4, 4) \\ 2d & , (i', j') = (1, 3), (3, 1), (3, 5), (5, 3) \\ 2\sqrt{2}d & , (i', j') = (1, 1), (1, 5), (5, 1), (5, 5) \\ \sqrt{5} & , (i', j') = (1, 2), (1, 4), (2, 1), (2, 5), (4, 1), (4, 5), (5, 2), (5, 4) \end{cases}$$

$$q_n^c(i, j) = \sum_{(i', j')} q_n^c(i, j | i', j') = \sum_{(i', j')} m_n^c(i, j | i', j') l_n^c(i, j | i', j') = \sum_{(i', j')} D_c [h_n(i, j) - h_n(i', j')] l_n^c(i, j | i', j')$$

$$c_{n+1}(i, j) = \begin{cases} c_{\min} & , c \leq b \\ A(c_n(i, j) - b_n(i, j)) + c_{\min} & , b \leq c \leq \frac{c_{\max} - c_{\min}}{A} + b \\ c_{\max} & , \frac{c_{\max} - c_{\min}}{A} + b < c \end{cases} \quad (7)$$

$$\alpha_{n,\beta} = \frac{1}{2} [\tanh\beta(c_{cr} - c) + 1] \quad (8)$$

$$q_n^a(i, j) = (\alpha_{n,\beta_a}^a)^2 q_n^c(i, j) = (\alpha_{n,\beta_a}^a) m_n^a(i, j) (\alpha_{n,\beta_a}^a) l_n^a(i, j)$$

$$q_n^c(i, j) = (\alpha_{n,\beta_c}^c)^2 q_n^c(i, j) = (\alpha_{n,\beta_c}^c) m_n^c(i, j) (\alpha_{n,\beta_c}^c) l_n^c(i, j) \quad (9)$$

고 있어 일반적인 사구 지형역학을 재현하는 데 초점을 맞추는 여타 모형과는 다소 차이가 있다. 이로 인해 여타 되먹임 기반 모형과는 다른 경계 조건이 부여된다. 경계를 서로 연결시키는 주기경계조건은 오직 상하 경계에만 적용한다. 좌우 경계는 주기 경계조건을 적용하는 대신, 좌측 경계를 해빈, 우측 경계를 내륙으로 두어 해빈으로부터의 모래공급 및 내륙으로의 이동을 묘사하고자 한다.

de Castro 모형에서는 바람에 의해 격자 (i, j) 에서 발생하는 비사량 $E(i, j)$ 와 이동거리 $L(i, j)$ 가 각각 최댓값과 최솟값으로 정의되는 균등분포를 따라 확률적으로 부여되는 값이라고 본다. $E(i, j)$, $L(i, j)$ 와 모래이동 플럭스 $q(i, j)$ 에 대해 식 (10)과 같은 관계가 성립한다.

바람에 의한 모래이동과 더불어 de Castro 모형에서 고려하는 또 하나의 모래이동 기작은 사면경사가 안식각 이상을 초과하지 못한다는 것이다. 안식각을 ϕ , 격자의 한 변을 d , 중심격자 (i, j) 와 3×3 근린격자 (i', j') 간의 고도차를 $\Delta_n(i, j; i', j')$ $h_n(i, j) - h_n(i', j')$ 라 하면, $\Delta_n \geq d \tan \phi$ 인 경우 격자 간의 사면경사가 안식각을 초과하게 되므로 사태가 일어날 가능성이 발생한다. de Castro (1995)가 제안한 알고리즘은 조건 $\Delta_n \geq d \tan \phi$ 을 만족하는 3×3 근린격자 (i', j') 중 $h_n(i, j) - \{h_n(i', j') + d \tan \phi\} = \Delta_n(i, j) - d \tan \phi$ 의 값이 최대가 되는 격자로 $\Delta_n(i, j) - d \tan \phi$ 만큼을 이동시키는 것이다. 만일 $\Delta_n(i, j) - d \tan \phi$ 의 값이 동일하게 나타나는 격자가 복수 개 존재한다면, 이 중 하나를 임의로 선택하여 해당 격자로 모래를 이동시킨다.

de Castro 모형에서도 바람그늘 규칙을 채택한다. 다만 모래관 모형과 달리 사구 배후에 사구 높이의 3배에 달하는 지역에 바람그늘이 형성된다고 간주한다. 바람그늘에 해당되는 지역의 $E(i, j)$ 는 0으로 재설정하여, 바람그늘에서는 침식이 발

생하지 않음을 표현한다. 또한 de Castro 모형에서는 4도 이상의 경사를 모래가 이동할 수 없다고 간주한다.

de Castro 모형은 오직 한 가지 종에 의한 식피밀도의 영향을 고려한다. 식피밀도 $\rho_n(i, j)$ 는 3가지 조건에 의하여 결정된다. ① 지하수면과의 거리가 2m를 초과하는 경우 수분부족으로 인해 식피밀도가 0이 된다. ② 사면조정 작용에 의해 모래의 유입이 발생한 지역의 경우 식생이 매물로 인해 고사한다. ③ 매 시행마다 식피밀도는 1단위씩 증가한다. 그리고 임계값에 도달하게 되면 더 이상 모래의 이동이 일어나지 않는다. de Castro 모형이 채택하는 식피밀도 규칙에서는 식생의 매물이 식피밀도에 부정적인 영향을 끼치는 사건일 뿐 매물에 의해 성장률이 증가하는 긍정적 효과를 반영하지 않는다. 식피밀도의 침식억제 능력도 점진적으로 증가하는 것이 아니라 임계값을 기준으로 급격히 증가하는 것으로 본다. 이런 점이 DECAL이 채택하는 식피밀도(혹은 식생활력도) 규칙과는 차이가 있다.

3) 모형별 속성의 대비

〈표 1〉은 되먹임 기반 사구 지형역학 모형의 공통점과 차이점을 공간구조, 시간구조, 이동기작, 식생 효과 등 4가지 측면에서 정리한 것이다. 〈표 1〉을 통해 우리는 다음과 같은 사실을 확인할 수 있다.

첫째는 모형의 시공간 구조를 결정하는 기준이 뚜렷이 제시되어 있지 않다는 것이다. 〈표 1〉의 주에 제시한 바와 같이 선행연구에서 등장하는 모래관 혹은 격자의 크기 및 단위 두께 등에 대한 언급은 현실 사구의 지형발달 속도나 크기 등을 근거로 한 일종의 제안이다. 개별 모형의 결과를 검토하고 해석하는 정도라면, 기존의 연구에서 제시한 언급으로 충분할 수 있으나, 이 정보만으로는 서로 다른 모형이 채택한 알고리즘을 호환하기

$$\begin{aligned}
 E(i, j) &\sim \text{uni}(E_{\min}, E_{\max}) \\
 L(i, j) &\sim \text{uni}(L_{\min}, L_{\max}) \\
 q(i, j) &\sim \text{uni}(q_{\min}, q_{\max}) \equiv \text{uni}(E_{\min} L_{\min}, E_{\max} L_{\max})
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

표 1. 퇴적물 기반 사구 지형역학 모형의 유형별 특징

	모래관 모형	Nishimori 모형	de Castro 모형
공간구조: 격자(모래관)의 규모			
격자의 변(邊)	임의값 부여 가능 예) 1m ^a , (>1m) ^b	임의값 부여 가능 예) 1m ^c	임의값 부여 가능 예) 10m ^d
격자의 두께	격자크기 대 두께=1/3 0.077-0.13m ^e	고정된 두께 없음	고정된 두께 없음
시간구조: 시행 방식과 시간단위			
격자상태갱신	순차 갱신	동시 갱신	동시 갱신
시간단위	연구자에 따라 다양 (4, 50, 80회=1년)	1시간 ^c	1회 = 1년
이동기작			
모래이동 단위	고정 (모래관)	변동	변동
이송 프로세스	모래관의 이동/정지 여부는 침식/퇴적확률로 구현하며, 1회 이동거리는 상수 (i.e. 격자 한 변 거리) ^f , 혹은 고도에 따른 함수로 됨 ^g	격자별 이송량과 이송거리는 국지경사에 대한 tanh 함수임	최대, 최소값으로 정의되는 균등분포로부터 매 회 시행마다 격자별 이송량과 이동거리를 생성·부여함
확산 프로세스	안식각에 의한 매스무브먼트를 고려하며 식생이 개입될 경우 안식각이 증가함	근린과의 고도차에 따라 모래가 대상격자로 유입되거나 유출되는 것으로 정의. 안식각을 고려하지 않음	안식각에 의한 매스무브먼트를 고려함
바람그늘 조건	15° (사구높이의 4배)	명시적인 규칙이 없음	18.4° (사구높이의 3배)
식생의 효과^h			
침식방지 효과	식생활력도가 증가할수록 침식확률은 감소하고 퇴적확률은 증가함	식피밀도가 임계값 이상이면 침식방지효과 급증	식피밀도가 임계값 이상이면 침식불가
식생성장 제한	종별 매물 적응반응 고려	임계값 이상의 매물이나 침식이 발생하면 식피밀도 저하되지만 최소값이 존재	매물이나 침식이 일어나면 식생의 고사가 일어남 지하수면과 거리가 멀어지면 수분부족으로 고사발생

주: ^a 바르한 사구의 일반적인 규모와 모의 결과를 비교하여 부여(Bishop *et al.*, 2002)

^b 식생 효과를 고려할 경우 격자 크기는 식생의 규모에 의해 제한. 1m 혹은 1.25m 사용(Nield and Baas, 2008a)

^c 외력 기반 모형의 수치모의 결과와 대비하여 1회 시행에 대응되는 시간을 1시간, 격자 한 변의 크기를 1m로 추론함(Nishimori *et al.*, 1998). 식생 효과를 고려하는 모형에서 격자 면적(S)을 '편의상' S=1로 둠. 이는 격자의 크기를 1m로 간주한 것과 동일하지만, 중요한 값으로 고려한 것은 아님(Nishimori and Tanaka, 2001)

^d 특별한 설명없이 격자의 크기를 10m로 제시함

^e 풍성연혼의 이동속도와 모래관 이동속도를 대비하여 산정(Nield and Baas, 2008a).

^f Werner(1995); Nield and Baas(2008a)

^g Momiji *et al.*(2001); Bishop *et al.*(2002)

^h 모래관 모형은 Nield and Baas(2008a), Nishimori 모형은 Nishimori and Tanaka(2001)을 참고

는 어렵다. 격자의 크기, 단위 두께는 각 모형이 모의하는 환경의 모래이동 플럭스와 긴밀히 연계 채택하는 시간구조, 모래의 이동 거리 등과 함께 되어 있기 때문이다. 모형 간의 비교를 통해 환

성을 검토하려면 각각의 모형에서 격자의 크기 및 두께가 가지는 의미와 역할을 시간구조 및 이동거리 등과 함께 모래이동 플럭스의 관점에서 보다 명확히 규정할 필요가 있다.

둘째는 이송 프로세스 및 확산 프로세스의 규칙이 외견상 차이를 보인다는 점이다. 특히 Nishimori 모형은 ① 국지경사에 대한 \tanh 함수의 형태로 이송 프로세스를 정의한다는 점, ② 확산 프로세스를 정의하는 데 안식각 개념을 채택하지 않는다는 점 등에서 모래판 모형이나 de Castro 모형과는 뚜렷한 차이를 보인다. 규칙의 외견상 차이에도 불구하고 각각의 모형이 사구지형 패턴을 재현하는 능력을 갖추고 있다면, 외견상 차이가 실제 호환 불가능한 차이인지, 아니면 동일한 수학적 구조로 포섭되거나 추가 규칙으로 해소될 수 있는 차이인지 여부를 검토할 필요가 있다.

셋째는 모래판 모형과 de Castro 모형은 바람그늘의 영역을 결정하는 하방각 수치는 서로 다른 것을 사용하지만 바람그늘의 효과를 사구 지형역학 규칙 내에 포함하고 있는데 반해 Nishimori 모형은 바람그늘 효과를 명시적으로 고려하지 않는다는 점이다. Momiji *et al.*(2000)은 모래판 모형에서 바람그늘 규칙이 없을 경우 사구지형의 발달이 일어날 수 없음을 이론적으로 증명하였고, Nield and Baas(2008a)는 이를 실험적으로 확인하였다. 이는 흔히 사구 지형발달의 되먹임 구조에서 바람그늘의 침식 억제, 퇴적 유도 효과가 핵심적인 역할을 담당하고 있음을 시사하는 것으로 해석된다. Nishimori 모형이 바람그늘 효과를 명시적으로 고려하지 않음에도 불구하고 사구지형의 패턴을 재현한다면, 바람그늘 효과가 사구지형 발달의 핵심 요소인지 여부에 대해 재검토해 볼 필요가 있다고 판단된다.¹³⁾

3. 되먹임 기반 모형의 호환성 분석

1) 되먹임 기반 모형의 시공간 구조와 모래이동 플럭스

되먹임 기반 모형에서 한 번의 시행에서 이동하는 격자의 크기와 두께, 이송거리 및 시간 단위 등은 각 모형의 모래이동 플럭스 수준을 결정하는 변수이다. 모형 간의 호환성을 검토하려면, 각 모형에서 선택한 격자 및 시간 구조가 규정하는 모래이동 플럭스의 수준을 파악하고 모형 간 모래이동 플럭스의 수준이 대비 가능한 범위를 확인하는 작업이 이루어져야 한다.

(1) 모래판 모형과 de Castro 모형

모래판 모형의 1회 시행의 시간단위를 I_1 라 두자. 시간단위를 I_1 라고 두는 것은 모래판 모형의 1회 시행에 대응되는 현실의 시간단위를 결정하는 문제를 잠시 보류한다는 뜻이다. 모래판의 총 이송거리를 L 이라 두고 각 격자별 모래이동 플럭스 $q(i,j)$ 라 하면 식 (11)이 성립한다.

모래판의 이동 규칙에 따라 모래판의 총 이송거리 $L(=kl, k=1,2,\dots)$ 은 확률분포 $(1-p_d)^{k-1}p_d$ 를 따르므로, 격자별 평균 모래이동 플럭스 $\bar{q}(i,j)$ 는 식 (12)와 같다.¹⁴⁾

de Castro 모형에서 매 시행에서 움직이는 모래의 양은 E , 이송거리는 L 이므로 식 (10)은 식 (12)와 대응된다. 모래판 모형의 h_s 는 고정된 값인 반면, de Castro 모형의 E 는 최솟값과 최댓값 범위에서 균등분포에 따라 임의로 선정되는 값이다. 이송거리 L 의 경우는 모래판 모형의 경우 $(1-p_d)^{k-1}p_d$ 로 주어지는 확률분포를 따르는데 반해 de Castro 모형의 경우는 균등분포를 따른다. 한 가지 덧붙일 점은 de Castro 모형의 경우 시간

$$q(i,j) = p_e \left[\frac{d^2 \cdot h_s}{d^2} \right] \left[\frac{L}{I} \right] = \frac{p_e h_s L}{I} \quad (11)$$

$$\bar{q}(i,j) = \frac{p_e h_s \bar{L}}{I_1} = \frac{p_e h_s}{I_1} \sum_{k=1}^{\infty} kl(1-p_d)^{k-1}p_d = \frac{p_e h_s l}{I_1} \sum_{k=1}^{\infty} k(1-p_d)^{k-1}p_d = \frac{p_e h_s}{I_1} \left(\frac{l}{p_d} \right) \quad (12)$$

단위(I_2)를 명시적으로 1년으로 분다는 것이다. 식 (10)과 (12)의 대비를 통해 $\frac{p_c h_s}{I_1} \in \left[\frac{E_{\min}}{I_2}, \frac{E_{\max}}{I_2} \right]$ 이고 $\bar{L} = \frac{l}{p_d} \in [L_{\min}, L_{\max}]$ 가 되도록 격자의 두께, 시간단위가 결정된다면, 두 모형의 모의 결과는 유사한 모래이동 플럭스 환경에서 이루어진 것으로 간주할 수 있음을 알 수 있다.

모래판 모형과 de Castro 모형과 구조적 유사성은 모래판이 차지하는 지점의 퇴적확률이 모래판 존재 여부에 따라 달라지지 않고 모든 지역에서 동일하다고 가정한다면, 모래판 모형의 순차적 시행 방식을 준(準)등가의 동시 시행 방식으로 변환하는 것이 가능함을 시사한다.¹⁵⁾ 모래판을 순차적으로 선정하여 움직이는 대신 de Castro 모형에서 채택하는 바와 같이 격자별 총 이송거리 $L (=kl, k=1,2,\dots)$ 를 확률분포 $(1-p_d)^{k-1} p_d$ 에 따라 $n \times n$ 개 생성하여 각각의 격자에 1차 배정한 후 모래판이 지나는 경로에 바람그늘이 존재할 경우 모래판의 이동이 바람그늘 영역에서 중단되도록 이송거리를 재조정하는 방식으로 전 격자의 이송거리를 미리 부여하는 것이다. 격자마다 이송거리가 미리 부여되면, 순차적 시행 대신 동시 시행 방식을 적용하여 모래판의 이송 프로세스를 진행시킬 수 있다. 이러한 준(準) 등가의 알고리즘은 두 가지 측면에서 의의를 가진다. 기술적인 관점에서 보면 모형의 수행 시간을 대폭 줄일 수 있기 때문에 유용한 우회로가 될 수 있다. 보다 중요한 것은 순차적 시행 방식이 가지는 실제현상과의 괴리감을 해소할 수 있는 방안이 될 수 있다는 것이다.

(2) 모래판 모형과 Nishimori 모형

Nishimori 모형의 모래이동 플럭스는 식 (5)와 같다. 모래판 모형과 달리 매 시행마다 이동하는 모래량 m_n^a 과 이송거리 l_n^a 가 모두 국지경사(∇h)에 연동되어 변한다. 따라서 Nishimori 모형의 평균 모래이동 플럭스는 모형공간의 국지경사(∇h) 분포에 따라 결정된다. 그런데, tanh 함수의 성질에 따라 식 (5)는 식 (13)과 같이 근사된다.

식 (13)에서 a 를 충분히 크게 하면 $a \nabla h \ll 1$ 이 되는 ∇h 은 실질적으로 평지($\nabla h = 0$)일 때로 국한시킬 수 있다. 사구의 바람맞이 사면($\nabla h > 0$)이 차지하는 비율을 β_1 , 평지($\nabla h = 0$)가 차지하는 비율을 β_2 , 바람그늘 사면($\nabla h < 0$)이 차지하는 비율을 β_3 라 하면, Nishimori 모형의 평균 모래이동 플럭스는 식 (14)와 같이 주어진다. (단, I_3 는 Nishimori 모형의 시간 단위이다.)

여기서 $\langle x \rangle$ 의 의미는 x 가 취할 수 있는 다양한 값을 감안한 평균값을 의미한다. 이는 바람맞이 사면과 평지의 비율 β_1, β_2 에 따라 결정되는 값 $\Psi(\alpha, \beta_1, \beta_2) = 2\alpha\beta_1 + \alpha\beta_2 + \beta_2$ 의 β_1, β_2 는 지형발달 모의 과정에서도 계속 변하는 값이라는 점을 감안한 것이다. 모형 조정계수 α 의 서로 다른 값에 대해 $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1$ 을 만족하는 임의의 값 β_1, β_2 를 이용하여 Ψ 의 분포와 평균을 구해 보면 이 값은 0.37-2.74 사이의 값을 지닌다(그림 5).¹⁶⁾ 식 (12)와 (14)로부터 두 모형 간의 호환 혹은 상호대비를 위해서는 격자의 크기를 동일하게 둘 때 두께(혹은 1회분 이동량)와 이동거리, 시간단위, 퇴적확률 등이 $\frac{p_c h_s}{I_1} \left(\frac{l}{p_d} \right) \sim \frac{m_0 l_0}{I_3} \langle \Psi \rangle$ 를 만족시키는 수준에서 설정되어야 함을 알 수 있다.

$$q_n^a(i,j) = \begin{cases} m_0 l_0 (2\alpha) & , a \nabla h \rightarrow +\infty \\ m_0 l_0 a^2 \left[\frac{1.0 + \alpha}{a} - \nabla h \right] \left[\frac{1.0}{a} + \nabla h \right] & , a \nabla h \ll 1 \\ 0 & , a \nabla h \rightarrow -\infty \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \overline{q_n^a(i,j)} &= \frac{\langle \beta_1 (2m_0 l_0 \alpha) + \beta_2 m_0 l_0 (1.0 + \alpha) \rangle}{I_3} \\ &= \frac{m_0 l_0}{I_3} \langle 2\alpha\beta_1 + \alpha\beta_2 + \beta_2 \rangle = \frac{m_0 l_0}{I_3} \langle \Psi(\alpha, \beta_1, \beta_2) \rangle \end{aligned} \quad (14)$$

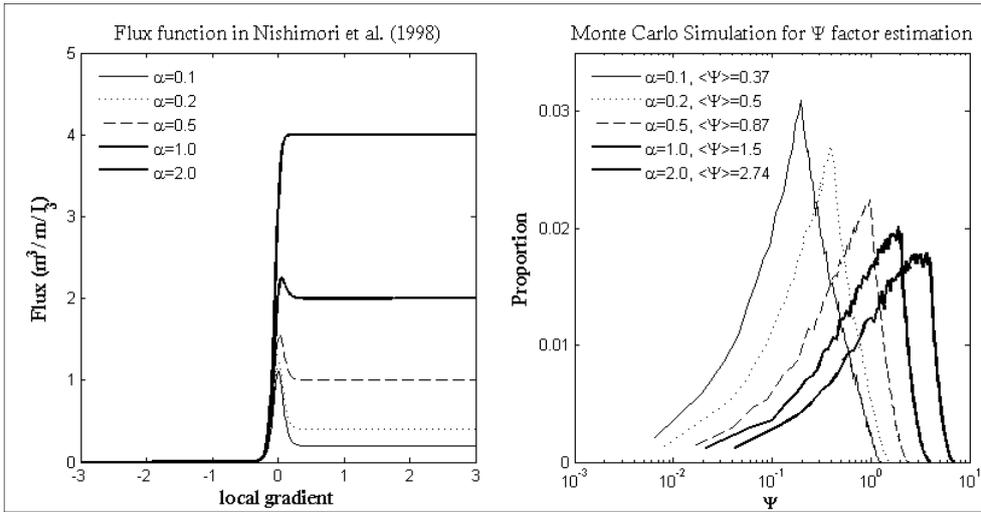


그림 5. 모형 조정계수 α 에 따른 플럭스 함수와 Ψ 인자의 범위

(3) 모래이동 플럭스의 대비 관계

모래판 모형과 de Castro 모형, Nishimori 모형 간의 모래이동 플럭스를 정리하면 아래의 <그림 6>과 같다. 모래판 모형과 de Castro 모형은 한 번 시행에서 움직이는 모래의 양과 단위시간 당 이동거리를 서로 독립된 요소로 취급한다. 비록 개별 요소에 대해서는 서로 다른 접근을 채택하지만 기본 구조가 동일하기 때문에 개별 요소 간의 대비가 가능하다. 따라서 모래이동 플럭스의 수준을 유사하게 두고자 할 경우 각각의 개별 요소를 유사한 수준으로 설정하면 된다. 반면 Nishimori 모형은 모래판 모형이나 de Castro 모형과는 달리 한 번 시행에서 움직이는 모래의 양과 단위시간 당 이동거리가 모두 국지경사의 함수로서 서로 연관되어 있는 요소이며, 임의로 정해지는 값이 아니라 사구지형의 발달 과정에서 나타나는 국지경사의 분포에 의해 결정되는 값이다. Nishimori 모형의 모래이동 플럭스는 모래판 모형이나 de Castro 모형과는 구조적인 측면에서 서로 차이를 보인다. 따라서 모래이동 플럭스를 구성하는 개별요소 간의 대비는 무의미하며, 오직 플럭스 수준에서의 대비만 가능하다. 이 때 국지경사의 분포에 의해 결정되는 인자 Ψ 가 다양한 조합에 대해 유한한 값을 가지므로, 인자 Ψ 의 분포를 참조하면 모래판 모형, de Castro 모형, Nishimori 모형의 모래이동 플럭스를 대비되는 수준으로 상호 조정할 수 있다.

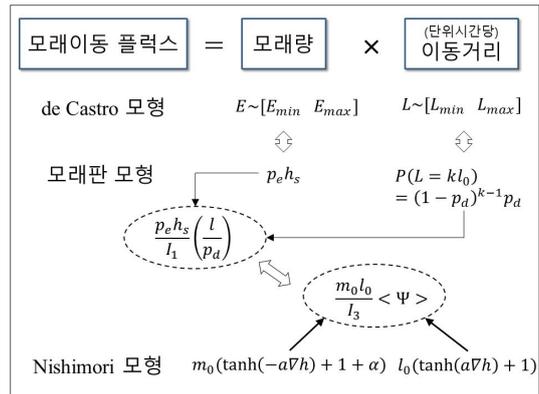


그림 6. 모형 간 모래이동 플럭스의 대비

2) Nishimori 모형의 확산 프로세스와 안식각 조건

Nishimori 모형은 다른 모형과는 달리 지형발달 규칙에 안식각 조건을 사용되지 않고 식 (6)을 이용하여 확산 프로세스에 따른 모래의 이동을 기술한다. 확산 프로세스에 의해 격자 (i,j) 가 얻는 모래의 양을 δ 라 하면, δ 는 식 (6)의 첫 번째 식으로부터 식 (15)와 같이 정의될 수 있다.

여기서 n 은 근린격자의 크기($n=5$)이며, \bar{h} 는 근린격자 내의 고도 평균, $h_n(i,j)$ 는 중심격자의 고도, D_c 는 모형 조정계수를 의미한다. $\kappa=2D_c n^2$ 으로 둔다. κ 의 값은 D_c 를 이용하여 조정할 수

$$\begin{aligned}
 \delta &= m_{n,in}^c(i,j) - m_{n,out}^c = \sum_{(i',j')} m_n^c(i',j'|i,j) - \sum_{(i',j')} m_n^c(i,j|i',j') \\
 &= \sum_{(i',j')} D_c[h_n(i',j') - h_n(i,j)] - \sum_{(i',j')} D_c[h_n(i,j) - h_n(i',j')] \\
 &= \sum_{(i',j')} 2D_c[h_n(i',j') - h_n(i,j)] = 2D_c \left[\sum_{(i',j')} h_n(i',j') - \sum_{(i',j')} h_n(i,j) \right] \\
 &= 2D_c \left[\sum_{(i',j')} h_n(i',j') - n^2 h_n(i,j) \right] = 2D_c n^2 [\bar{h} - h_n(i,j)] = \kappa [\bar{h} - h_n(i,j)]
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

있다. 식 (15)은 Nishimori 모형이 채택하는 확산 프로세스가 근린과의 기복 차이를 평균화하는 과정임을 보여 준다. κ 의 값은 평균화 과정의 속도를 조정하는 계수이다.

식 (15)은 Nishimori 모형의 사면조정 알고리즘은 사면의 경사를 지속적으로 완만하게 하는 과정이지 사면의 경사가 안식각을 초과하지 못하도록 만드는 장치는 아니다. 그런 점에서 보면 Nishimori 모형의 사면조정 알고리즘과 모래관 모형 및 de Castro 모형의 사면조정 알고리즘은 분명히 다르다. 그러나 전혀 호환이 불가능한 것은 아니다.

Momiji *et al.*(2000)는 모래관 모형의 사면조정

알고리즘이 단파장의 기복구조(undulation)가 성장하는 것을 막고 장파장의 기복구조만 성장하도록 하는 역할을 함을 보여주었다.¹⁷⁾ Nishimori 모형의 확산 프로세스가 채택하는 평균화 과정도 기복을 완만하게 만드는 과정이므로 이와 유사한 특성을 가지고 있다. 다만 Nishimori 모형의 평균화 과정은 기복을 특정값 이상으로 초과하지 못하게 한다든지, 특정값 이하로 저하되지 못하게 한다든지 하는 기능은 없다. κ 에 의해 결정되는 수준만큼 매회 사면의 경사를 평균화시키는 방향으로 기복을 조정할 뿐이다. 여기서 Nishimori 모형과 여타 모형 간 호환성 구현의 단초를 얻을 수 있다.

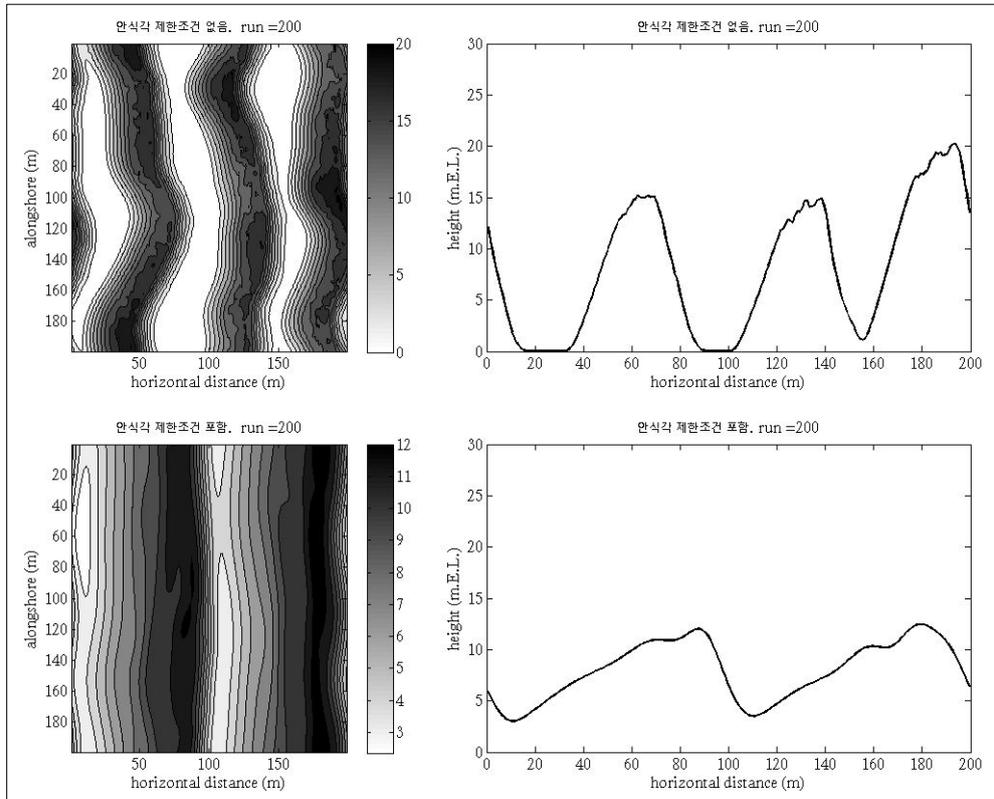


그림 7. Nishimori 모형의 안식각 제한 규칙 (상) 추가 전 (하) 추가 후

Nishimori 모형 알고리즘 내에 안식각 조건을 만족시킬 때까지 평균화 과정을 반복하는 요소를 추가하는 것이다.

〈그림 7〉은 Nishimori 모형의 확산 프로세스에 안식각 조건의 만족 여부를 묻는 규칙을 추가한 효과를 보여준다. 주기 경계조건으로 무한 평면으로 정의된 200×200 격자 상에서 격자의 크기는 1m, 초기 가용 모래층의 두께는 3-13m, 모래 이송량과 거리를 정의하는 조정변수는 각각 $m_0=2$, $l_0=10$, $a=10$, $\alpha=0.3$, $\kappa=2$ 로 두고 200회 시행을 한 결과이다. 안식각 조건은 33.7°로 주었다. 안식각 조건이 추가되었을 때의 사구 단면이 현실 사구와 유사하게 바람맞이 사면이 완만하고 바람그늘 사면이 급한 모습을 보인다. 이 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 안식각 조건 규칙은 Nishimori 모형 본래의 평균화 알고리즘을 안식각을 만족시킬 때까지 반복시키는 방식으로 손쉽게 추가될 수 있으며, 모의 결과도 보다 현실과 유사해진다. 그 이유는 이어질 논의와 연결된다.

요컨대, 사면조정 알고리즘은 Nishimori 모형과 모래판 모형 및 de Castro 모형이 서로 다르게 설정되어 있으나, Nishimori 모형의 사면 평균화 알고리즘에 안식각 조건을 추가하는 방식으로 호환성이 확보될 수 있다. 이는 실용적인 측면에서도 새로운 가능성을 열어주는데, Nishimori 모형의 방식이 계산을 처리하는 데 걸리는 시간이 가장 빠르기 때문에 여타 모형의 사면조정 알고리즘을 Nishimori 모형의 방식으로 대체하는 것을 고려할 수도 있다는 것이다. 물론 대체 이전에 알고리즘 상에 존재하는 세부적 차이의 영향에 대해서는 보다 정밀한 검토가 선행되어야 할 것이다.

3) 바람그늘의 역할: Nishimori 모형의 통찰

앞서 제기한 바와 같이 되먹임 기반 사구 지형 역학 모형 중 Nishimori 모형은 바람그늘 조건을 지형역학 규칙 내에 포함하지 않는다. 사구의 배후에서 바람그늘이 형성되어 풍속이 급격히 낮아지는 것은 이미 잘 알려진 사실이며(Kocurek and Frank, 1996), 모래판 모형과 de Castro 모형은 이 현상을 지형역학 규칙의 하나로 포함하고 있

다. 그뿐 아니라 바람그늘 규칙의 포함 여부가 사구지형의 발달과 성장의 핵심 요소라는 해석도 제시된 바 있다(Momiji *et al.*, 2000; Nield and Baas, 2008a). Nishimori 모형이 바람그늘 효과를 명시적으로 고려하지 않음에도 불구하고 사구지형의 발달이 모의되는 것은 사구지형의 성장을 유발하는 요소에 대한 보다 세밀한 검토가 필요하다는 점을 시사하는 것이다.

2가지의 가능성이 존재한다. 첫 번째 가능성은 Nishimori 모형이 자체 규칙 내부에 바람그늘 효과를 반영하는 요소를 지니고 있기 때문에 사구지형의 패턴이 재현되는 것일 수 있다는 것이다. 두 번째 가능성은 바람그늘 효과 자체가 사구지형 발달을 유도하는 핵심 요소가 아닐 수 있다는 것이다.

〈그림 4〉, 〈그림 5〉은 Nishimori 모형의 플럭스 함수가 ① 국지 경사가 양수인 구역, 즉 바람맞이 사면 구역인 경우 0보다 큰 일정한 값을 갖고, ② 국지 경사가 0 주변인 경우 국지 경사가 양수이거나 음수인 경우에 비해 큰 값을 가지며, ③ 국지 경사가 음수인 구역, 즉 바람그늘 사면의 경우 0에 가까운 값을 가짐을 보여준다. 이는 평지를 통과하는 모래가 바람맞이 사면을 만날 경우 플럭스가 감소하면서 모래이동에 정체(停滯)가 일어난다는 뜻이다. 더욱이 모래의 둔덕이 배후에 음의 사면을 갖추게 되면, 모래의 이동이 중지되는 지점이 발생하여 모래이동의 정체를 가속화시킬 수 있다는 것이다. 이것이 Nishimori 모형에서 사구의 성장이 일어나는 원인 기작이다. Nishimori 모형은 사구그늘 규칙을 채택하지 않음에도 불구하고, 음의 사면경사가 나타나는 영역에서 모래이동이 중지되는 규칙을 채택하여 사구의 성장을 유발시킨다.

이런 점에서 보면 사구 배후의 일정 영역이 바람그늘의 생성으로 인해 침식의 제한을 받는다는 것 자체가 사구의 발달에 핵심 요소는 아니다. 모래이동 플럭스를 공간적으로 감소시키는 기작이 존재하기만 하면 그것으로 사구의 발달은 가능하다. 바람그늘 효과는 사구의 생성 및 발달의 측면보다 사구열 간의 상호작용을 조절하는 데 보다 큰 역할을 하는 것일 수도 있다. Nishimori 모형의 모의 과정에서 사구열 간의 충돌, 병합, 붕괴 등의 현상이 모래판 모형 및 de Castro 모형에서

확인할 수 있는 것보다 활발하게 일어나는 것은, Nishimori 모형에서 담보되는 침식불가 지역이 음의 국지경사를 가지는 바람그늘 사면에 국한될 뿐 사구 높이의 4배에 달하는 영역을 포괄하지는 못하기 때문일 것이다.

모래관 모형이나 de Castro 모형에서 사면조정 규칙은 장과장의 기복구조만을 성장시키는 일종의 필터 역할을 하며, 사구의 성장과 관련된 모래이동 플럭스의 공간적 변이를 생성하는 기능은 바람그늘 규칙에 의존한다(Momiji *et al.*, 2000). 이 두 규칙은 서로 독립된 별개의 규칙이다. Nishimori 모형에서는 다소 다르다. 안식각 제한 규칙에 의해 형성된 음의 국지경사는 모래이동 플럭스가 0이 되는 지점을 생성하여 모래이동 플럭스의 정체를 유발하며, 이는 사구의 성장으로 이어진다. Nishimori 모형이 채택하고 있는 규칙은, 의도하지는 않았다 하더라도 안식각에 따른 사면조정 작용이 사구의 성장을 가속화시키는 역할을 담당하고 있는 셈이다. 이것이 단순히 모형을 구성하는 과정에서 도입된 규칙인지, 아니면 실제 사구 발달에서 중요한 위치를 차지하는 특징인지는 보다 체계적인 추가 조사가 필요하다.

4. 결론 및 함의

이 연구는 사구 지형역학을 다루는 서로 상이한 퇴적기반 모형들을 비교하고 각 모형에 포함된 규칙들의 호환 가능성을 탐색한 것이다. 이를 위해 퇴적기반 사구 지형역학 모형인 모래관 모형, Nishimori 모형, de Castro 모형의 구조와 속성을 검토하고, 상호 대비를 통하여 모형 간 호환성에 대한 분석을 실시하였다. 주요 내용은 다음과 같다.

첫째, 격자의 크기를 동일하다고 둘 때 모형의 모의 조건을 비교하고자 할 경우에는 모형별 플럭스를 대비하는 방식을 취할 수 있다. 모래관 모형과 de Castro 모형은 전자가 순차적 시행, 후자가 동시 시행을 한다는 것을 제외하고는 구조적으로 매우 유사한 형태를 띠고 있다. 이로 인해 모래관 모형과 de Castro 모형의 플럭스 규모의 대비는 항목별로 분리해서 다룰 수 있다. 모래관 모형의 침식율과 모래관의 두께는 de Castro 모형의 침식

율과 유사한 규모가 되도록 정의되어야 하며, 모래관 모형의 퇴적확률도 de Castro 모형의 이송거리와 대비될 수 있는 형태로 정의되어야 한다. 아울러 모래관 모형과 de Castro 모형의 유사 구조를 활용하여 모래관 모형의 순차 시행을 동시 시행의 형태로 준등가 변환이 가능하다. 모래관 모형과 Nishimori 모형의 경우 역시 플럭스 수준의 대비를 통해 격자 두께, 퇴적확률, 단위 이동거리 등을 호환 가능하도록 결정할 수 있다. 다만 이 경우는 모래관 모형과 de Castro 모형의 대비와는 달리 플럭스를 구성하는 개별 구성요소의 비교로 이어지기는 어렵다. 모래관 모형의 경우는 단위 이동 모래량과 관련되는 모래관의 두께와 이동 거리와 관련되는 퇴적확률을 별개의 개념으로 분리해서 취급할 수 있는데 반해 Nishimori 모형은 양자가 국지적인 사면 경사를 매개로 서로 연결되어 있기 때문이다.

둘째, 세 종류의 모형 중 Nishimori 모형은 안식각 제한 규칙을 명시적으로 적용하지 않는다. 사면 조정과 관련된 Nishimori 모형의 알고리즘을 분석해 보면, Nishimori 모형의 알고리즘은 근린과의 고도 차이를 감소시켜 사면의 경사를 완만하게 만드는 평균화 알고리즘일 뿐 안식각 이상의 경사를 제한하는 기능을 그 자체로 수행하지는 못한다. 그러나 여타 모형에서 사용하는 안식각을 기준으로 한 사면경사 제한 규칙을 Nishimori 모형 내에서 구현하는 일은 의외로 간단하다. 평균화 알고리즘을 안식각 기준 사면경사 제한 조건을 만족하는 순간까지 반복하도록 하면 된다. 외견상 확인된 알고리즘의 차이는 호환 불가능한 수준의 차이가 아니라 간단한 수정을 통해 호환성이 담보되는 정도의 차이이다. Nishimori 모형의 사면조정 알고리즘(혹은 확산 프로세스 알고리즘)에 안식각 기준 사면경사 제한 조건을 간단히 부가할 수 있다는 것은 실용적으로 큰 의미를 지닌다. 기존의 안식각 기준 사면조정 알고리즘에 비해 Nishimori 모형의 평균화 알고리즘을 사용하는 것이 보다 빠르고 간편하기 때문이다.

셋째, 바람그늘 규칙의 채택과 관련하여 모래관 모형 및 de Castro 모형과 Nishimori 모형은 뚜렷한 차이를 보여준다. 바람그늘 규칙을 채택하지 않은 Nishimori 모형에서 사구의 성장과 발달이

모의된다는 것은 일부 선행연구에서 제시한 바와 같이 ‘바람그늘’ 자체가 사구 성장의 핵심 요소라고 보는 해석이 다소 지나친 해석임을 시사한다. 사구의 성장과 발달에 필요한 것은 그것이 무엇이든지 간에 모래 플럭스의 공간적 증감을 유발하는 요소이며, 이러한 요소를 포함할 경우 어떠한 모형이든 사구의 성장과 발달을 모의하는 것은 가능하다. 오히려 사구 높이의 3배 혹은 4배에 걸쳐 형성되는 바람그늘의 존재는 사구의 성장, 발달 과정에서 중요한 역할을 한다기보다 사구열 간의 상호작용, 소위 ‘층면구조 간 상호작용(bedform-level interaction)’을 조절하고 지배하는 데 보다 큰 기여를 할 가능성이 있다고 판단된다.

위의 결론들은 새로운 연구 질문들을 제기한다. 크게 3가지를 제기해 볼 수 있다. 첫째, 모래판 모형과 de Castro 모형의 구조적 유사성을 통해 모래판 모형의 순차시행을 준등가 동시시행으로 변환시키는 가능성이 보다 면밀하게 검토되어야 한다. 순차시행 방식은 지속적으로 모래판이 경험하는 조건이 달라지는 특성을 지니고 있다. 동시시행 방식으로 전환할 경우 이동 경로의 분포는 동일성을 유지할 수 있지만, 모래판의 이동으로 야기되는 바람그늘 효과나 사면조정 효과의 차이는 일부 소실된다. 이러한 차이가 모형의 거동에 어느 정도 영향을 미치게 되는지 검토가 필요하다. 둘째, Nishimori 모형의 사면조정 알고리즘에 안식각 기준 사면조정 규칙을 포함하도록 수정된 알고리즘이 기존의 알고리즘과 속도 외에 어떤 차이를 보이는지에 대해 이론적인 검토와 함께 실험적인 검증이 필요하다. Nishimori 모형의 평균화 알고리즘은 근린격자와 중심격자 간의 모든 고도차를 고려의 대상으로 삼는데 반해 기존의 안식각 기준 사면조정 알고리즘은 안식각이라는 임계값보다 높은 값을 나타내는 고도 차이만을 조정한다. 이 양자의 차이가 사구 지형역학에서 중요한 의미를 가지는지, 그렇지 않은지에 대한 체계적 검토가 필요할 것이다. 마지막으로 사구배후의 바람그늘 효과를 사구의 성장과 발달이라는 측면보다 사구 간의 상호작용 패턴을 지배하는 요소로 보고 이에 초점을 맞춘 분석이 필요하다. 사구열 간의 충돌과 병합이 일어나는 속도나 횡수, 사구열 간의 파장 등의 패턴을 사구그늘 규칙과 연계한 수

치모의 실험을 유용하리라 본다.

전반적으로 이 논문에서 검토한 모래판 모형과 de Castro 모형, Nishimori 모형은 비교적 호환적인 구조를 갖추고 있다고 판단된다. 모래판 모형과 de Castro 모형은 각 모형에서 채택하고 있는 하위 알고리즘은 상호 이식할 수 있을 정도의 유사성을 가지고 있다. Nishimori 모형은 국지사면경사 기반의 알고리즘을 채택하고 있어 모래판 모형이나 de Castro 모형과는 차이를 보임에도 불구하고 호환 가능한 형태로 알고리즘을 수정하거나 보완하는 작업은 가능한 것으로 판단된다. 다만, Nishimori 모형과 모래판 모형 및 de Castro 모형 간에 채택하는 세부 변수는 서로 대비하기 쉽지 않아 유사한 조건 하에서 모의가 수행되는지 여부를 보장하기 위해서는 모래이동 플럭스의 수준을 대비하여 기본변수를 설정하고, 모의 과정의 변화를 추적하는 등의 보완조치가 필요하다고 판단된다.

사사

본 논문을 꼼꼼히 검토하여 유용하고도 통찰력 있는 제언을 해 주신 3분의 심사위원께 감사사를 드립니다.

주

- 1) 사구(砂丘, dunes)는 하천의 하상이나 해양의 저면에서 물에 의해 형성되는 것과 해변의 후면이나 모래가 풍부한 사막 등지에서 바람에 의해 형성되는 것을 통칭하는 용어이다. 이 논문에서는 바람에 의해 형성되는 사구에 초점을 맞추고 있어 ‘풍성사구’라는 용어를 사용하였다. 특별한 지시가 없는 한 이 논문에서 ‘사구’로 지칭되는 것은 ‘풍성사구’를 의미한다.
- 2) 이 논문에서 ‘사구 지형역학 모형’은 ① 단일사구와 단일사구들의 복합체인 사구지대를 모형이 다루는 대상규모로 하되 ② 그 추상화 수준이 적어도 사구의 단면지형을 재현하는 정도까지는 구현되는 모형으로 그 범위를 국한한다. 이러한 기준으로 평가할 때 사구지대의 차원에서 사구열의 거동을 ‘선’으로 추상화하여 다루는 Werner and Kocurek(1997, 1999)의 모형이나 단일사구를 점 혹은 선으로 추상화한 후 속도 관계를 이용하여 사구지대 수준의 거동을 분석하는 Lima *et al.*(2002)나 Parteli and Herrmann(2003) 등의 접근은 이 논문에서 분석하는 대상에서 제외된다.

3) 이 논문에서 사용하는 ‘외력 기반 모형’과 ‘되먹임 기반 모형’이라는 용어는 기존 논문에서 각각 ‘연속형 모형’(continuous models, Kocurek *et al.*, 2010; Durán *et al.*, 2010)과 ‘이산형 모형’(discretized models, Kocurek *et al.*, 2010) 혹은 ‘세포자동자 모형’(Cellular Automaton models, Kocurek *et al.*, 2010) 등으로 언급되는 모형을 지칭한다. 이 논문에서 ‘외력 기반 모형’, ‘되먹임 기반 모형’이라는 용어를 도입한 것은 이렇게 명명하는 편이 실제 모형의 성격을 더 잘 드러내 줄 수 있겠다고 생각했기 때문이다. ‘연속형’이나 ‘이산형’과 같은 관형어는 각각의 모형에서 시공간을 어떻게 다루는지를 지시하지만 수치모형의 형태로 구현되는 과정에서 모두 이산화이 이루어지기 때문에, 각 모형의 성격을 잘 드러내 줄 수 없다고 생각했다. ‘외력 기반’이라는 용어는 해당 모형에서 모래의 이동을 주도하는 동인으로서 바람을 중요하게 다룬다는 점을 강조한 것이고, ‘되먹임 기반’이라는 용어는 해당 모형에서 모래 이동 및 사구 발달과 관련된 핵심 기작을 사구의 내적 동역학에서 찾는다는 점을 강조한 것이다. 물론 외력 기반 모형이 되먹임을 무시하는 것은 아니다. 여기서는 단지 각각의 모형에서 보다 더 강조하는 측면을 부각시키는 데 초점을 맞춘 것이라고 이해해 주기 바란다.

4) 외력 기반 모형도 풍속장을 다루는 방식에 따라 일종의 스펙트럼이 존재한다. 첫째는 풍속장과 지형간의 상호작용으로 발생하는 요동을 준(準) 정상상태로 근사하여 접근하는 방식이다(Sauermann *et al.*, 2001; Kroy *et al.*, 2002a, b; Durán *et al.*, 2010). 이와 같은 접근은 풍속장의 요동이 발생하는 시간 스케일(i.e. 수 초)과 사구지형이 변화하는 시간 스케일(i.e. 수 시간~수 일)간 차이가 충분히 커서 별개로 다룰 수 있다는 가정에 기반을 둔 것이다. 풍속장의 요동을 평균상태로 근사하더라도, 풍속장의 요동이 사구지형 변화에 미치는 영향을 재현하는 데 충분하다는 것이다. 풍속장을 준 정상상태로 근사하는 접근은 Jackson and Hunt(1975)와 Weng *et al.* (1991)가 제시한 풍속장의 요동과 경계층의 형성을 모의하는 모형을 원용한다. Jackson and Hunt(1975)와 Weng *et al.*(1991)이 제시한 모형은 사구의 너비대 고도의 비가 0.05보다 작은 조건을 전제하고 있다. 이와 같은 조건은 현실에서 관찰되는 대부분의 사구에서 적용되기 어려운 조건임에도 불구하고, 준 정상상태를 가정한 접근을 통해 얻어진 모형은 사구지형의 지형발달 과정을 비교적 현실과 부합하는 방식으로 재현한다(Kocurek *et al.* 2010; Durán *et al.*, 2010). 다만 준 정상상태를 가정한 접근에서는 사구의 배후에서 발생하는 풍속장의 흐름 분리 및 바람그늘 형성 과정을 재현하지는 못한다. 흐름 분리 및 바람그늘 구역은 모래의 이동을 억제하기 때문에 사구지형 발달에서 중요하게 고려해야 하는 요소이다. 이를 해결하기 위해 준 정상상태를 가정한 외력 기반 모형에서는 ‘분리거품(separation bubble)’이라는 개념을 도입한다. ‘분리거품’은 사구의 배후지역

에 발달하는 흐름 분리 영역을 감싸는 형태로 존재하고, 풍속장의 요동은 분리거품의 외곽을 따라서 발생한다. 풍속장의 요동으로부터 전단응력의 분포를 유도하는 과정에서 분리거품 지역의 전단응력은 0으로 처리하여 사구의 배후 지역에서 모래이동이 억제되는 현상을 구현한다. 둘째는 Jackson and Hunt(1975)와 Weng *et al.*(1991)의 모형이 전제하는 사구 형태가 현실 사구의 형태에 비해 지나치게 기복이 작다는 점을 비판하고, 사구지형의 효과를 보다 현실적으로 구현하기 위해 네비어-스토크스 방정식(Navier-Stokes equation)의 고차항을 지배방정식에 포함시키는 형태로 풍속장을 구현하는 접근이다. van Boxel *et al.* (1999)가 제안한 2차항 포함 수치 모형(second order closure model)이나 Ortiz *et al.* (2006)이 강풍이 부는 환경에서 사구지형의 변화를 재현하기 위한 목적으로 제안한 2차항 포함 수치 모형 등이 여기에 속한다. 이와 같은 접근은 첫 번째 모형과는 차이를 보이지만, 수치모형을 구현하는 방식에 따라 사구 배후의 흐름 분리를 재현하지 못하기도 하고(van Boxel *et al.*, 1999), 일부 재현하기도 한다(Ortiz *et al.*, 2006). 최근에는 전산 유체역학(CFD) 분야의 발전에 힘입어 사구에 의한 풍속장의 요동을 재현하는 데 초점을 맞추는 연구도 등장하고 있다. 이런 유형의 연구들은 사구로 인한 바람장의 요동 패턴(i.e. 바람그늘의 재현)을 재현하고 검증하는 데 초점이 맞추어져 있고(Parsons *et al.*, 2004; Jackson *et al.*, 2011; Smyth *et al.*, 2011), 이를 지형변화와 연계하는 데에까지 나아가지는 않는다.

5) 이로 인해 사구지대 규모의 거동을 탐색하는 데에는 외력 기반 모형 중에서 상대적으로 풍속장과 지형의 상호작용을 축약하여 기술하는 준 정상상태 근사법이 사용된다.

6) 모형 간의 계보는 →로 표현된다. 그러므로 Nishimori *et al.* (1998)의 경우는 Nishimori and Ouchi(1993)과는 동일 계보에 속해 있으나 Werner(1995)와는 무관하다.

7) ‘DECAL’이란, ‘Discrete ECogeomorphic Aeolian Landscapes’의 두문자로서 식생의 역할을 고려하였음을 강조하는 용어이다(Baas and Nield, 2007).

8) 다만 Nishimori and Tanaka(2001)이 구현한 식생 관련 규칙과 de Castro의 규칙은 세부적인 측면에서 같은 것은 아니다. Nishimori and Tanaka(2001)의 언급은 de Castro가 식생과 모래이동 간의 상호작용에서 핵심 요소라고 생각했던 부분들은 일부 받아들였다는 뜻으로 해석된다.

9) 메스키투(mesquite)는 건조지역에서 자라는 콩과 관목류인 Prosopis 속의 관목류를 부르는 일반명이다. 미국 남서부와 멕시코가 원산지이다(<http://en.wikipedia.org/wiki/Mesquite>). 메스키투는 최소한 1m 이상의 영역을 차지하며 모래의 매몰에 대해 저항하는 능력을 갖추고 있어 배후에 허목(hummock) 형태의 네브카 사구의 발달을 유도한다(Nield and Baas,

- 2008a).
- 10) Nishimori *et al.* (1998)이 설명하는 모래이동의 양태 2가지는 여타 되먹임 기반 모형에서 흔히 ‘셀테이션’과 ‘사태’로 제시되는 모래이동 방식을 재명명한 것이다. 저자의 설명에 따르면 이와 같은 명명법을 채택한 것은 사구 지형역학 모형에서 채택하는 격자의 크기가 셀테이션 시 모래입자가 이동하는 평균거리(셀테이션 거리)나 사태가 일어나는 규모보다는 충분히 크기 때문에 단순히 동일시할 수는 없기 때문이다. 이와 같은 저자의 지적은 경청할 만한 가치가 있다고 본다. 이 논문 역시 Nishimori *et al.* (1998)의 관점을 따라 되먹임 기반 모형에서 흔히 ‘셀테이션’, ‘사태’로 설명되는 모래이동 양식을 각각 ‘이송 프로세스’와 ‘확산 프로세스’로 명명한다.
 - 11) Nishimori *et al.* (1998)은 tanh 함수를 도입한 이유에 대한 별다른 설명을 제공하지는 않는다. 다만 본 연구자는 x 값이 양의 무한대 혹은 음의 무한대로 커지거나 작아질 때 1 또는 -1로 접근하는 성질을 가지고 있다는 점을 활용하려고 했던 것으로 추정하고 있다.
 - 12) 5×5 근린격자는 내부의 3×3 근린격자(1차 근린격자)와 외곽의 16개 격자(2차 근린격자)로 구성된다. Nishimori *et al.* (1998)과 Nishimori and Tanaka (2001)은 이를 1차 근린격자와 2차 근린격자의 결합이라고 표현한다.
 - 13) 이 연구에서는 위에 정리한 세 가지 쟁점에 대한 이론적 논의에 초점을 맞추기로 한다. <표 1>에서 나타나는 또 하나의 뚜렷한 대비는 모래판 모형의 식생 모듈은 매물에 대한 식생의 적극적 반응을 감안하는데 반해 Nishimori 모형이나 de Castro 모형은 매물에 대한 식생의 적극적 반응을 고려하지 않는다는 것인데, 식생 모듈에 대한 비교는 추후의 연구과제로 돌린다.
 - 14)
$$f(x) = \sum_{k=1}^{\infty} (1-x)^k = \frac{1-x}{1-(1-x)} = \frac{1-x}{x} \quad (0 \leq x \leq 1)$$

이므로 양변을 미분하면, $\sum_{k=1}^{\infty} k(1-x)^{k-1} = \frac{1}{x^2}$ 이다.
 본문은 $x = p_d$ 인 경우이다.
 - 15) ‘준(準)동기’라고 묘사한 것은 순차시행 알고리즘과 이 논문에서 제시하는 동시시행 알고리즘은 완전히 동일한 것은 아니기 때문이다. 순차시행은 앞선 모래판의 이동과 퇴적이 이후 모래판의 이동과 퇴적에 영향을 미친다. 동시시행의 경우는 이와 같은 가능성을 배제한다. 이송거리의 확률적 분포는 두 경우 모두 일치하지만, 바람그늘 효과의 차이로 인해 모래판의 퇴적 과정은 다소 달라질 수 있다.
 - 16) ψ 인자의 분포와 평균값 $\langle \psi \rangle$ 은 $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1$ 을 만족하는 임의의 $(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ 를 100만 번 생성한 후 주어진 α 값에 대하여 $\psi = 2\alpha\beta_1 + \alpha\beta_2 + \beta_3$ 를 계산하는 방식으로 추정되었다.
 - 17) Momiji *et al.* (2000)은 사인함수 형태를 가진 임의의 기복구조 $f = (\eta_A - \eta_{avg}) \sin\left(\frac{2\pi}{A}x\right)$ 를 도입하여 다

음과 같이 설명한다. 모래판 모형의 안식각 조건으로 인해 $\left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \leq (\eta_A - \eta_{avg}) \left(\frac{2\pi}{A} \right) \leq \frac{2}{3} (= \tan 33.7^\circ)$ 가 된다. 따라서,

$$\eta_A - \eta_{avg} \leq \left(\frac{A}{2\pi} \right) \cdot \frac{2}{3} \cong 0.11A$$

위의 식은 안식각 조건 하에서 기복구조의 최대 진폭이 파장의 1/10을 넘지 못한다는 점을 보여준다. 따라서 파장이 짧은 기복구조는 성장이 억제되고, 파장이 긴 기복구조만 성장이 가능해진다.

문헌

- Baas, A.C.W. and Nield, J.M., 2007, Modelling vegetated dune landscapes, *Geophysical Research Letters*, 34, L06405, doi:10.1029/2006GL029152.
- Baas, A.C.W., 2007, Complex systems in aeolian geomorphology, *Geomorphology*, 91, 311–331.
- Bishop, S.R., Momiji, H., Carretero-González and Warren, A., 2002, Modelling Desert Dune Fields Based on Discrete Dynamics, *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 7(1), 7–17.
- Coco, G. and Murray, A.B., 2007, Patterns in the sand: From forcing templates to self-organization, *Geomorphology*, 91, 271–290.
- de Castro, F., 1995, Computer simulation of the dynamics of a dune system, *Ecological Modelling*, 78, 205–217.
- Durán, O., Parteli, E.J.R. and Herrmann, H.J., 2010, A continuous model for sand dunes: Review, new developments and application to barchan dunes and barchan dune fields, *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 1591–1600.
- Jackson, D.W.T., Beyers, J.H.M., Lynch, K., Cooper, J.A.G., Baas, A.C.W. and Delgado-Fernandez, I., 2011, Investigation of three-dimensional wind flow behaviour over coastal dune morphology under offshore winds using computational fluid dynamics (CFD) and ultrasonic anemometry, *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 1113–1124.
- Jackson, P.S. and Hunt, J.C.R., 1975, Turbulent wind flow over a low hill, *Quarterly Journal*

- of the Royal Meteorological Society, 101, 929–955.
- Katsuki, A., Nishimori, H., Endo, N. and Tankguchi, K., 2005, Collision Dynamics of Two Barchan Dunes Simulated Using a Simple Model, *Journal of the Physical Society of Japan*, 74(2), 538–541.
- Kocurek, G., Ewing, R.C. and Mohrig, D., 2010, How do bedform patterns arise? New views on the role of bedform interactions within a set of boundary conditions, *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 51–63.
- Kroy, K., Sauermann, G. and Herrmann, H.J., 2002a Minimal model for sand dunes, *Physical Review Letters*, 88(5), DOI:10.1103/PhysRevLett.88.054301.
- Kroy, K., Sauermann, G. and Herrmann, H.J., 2002b, Minimal model for aeolian sand dunes, *Physical Review*, E, 66, 031302, DOI:10.1103/PhysRevE.66.031302.
- Lima, A.R., Sauermann, G., Herrmann, H.J. and Kroy, K., 2002, Modelling a dune field, *Physica*, A, 310, 487–500.
- Maun, M.A., 2009, *The Biology of Coastal Sand Dunes*, Oxford University Press.
- Momiji, H., Carretero-González, R., Bishop, S.R. and Warren, A., 2000, Simulation of the effect of wind speedup in the formation of transverse dune fields, *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 905–918.
- Nield, J.M. and Baas, A.C.W., 2008a, Investigating parabolic and nebkha dune formation using a cellular automaton modelling approach, *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 724–740.
- Nield, J.M. and Baas, A.C.W., 2008b, The influence of different environmental and climatic conditions on vegetated aeolian dune landscape development and response, *Global and Planetary Change*, 64, 76–92.
- Nishimori, H. and Ouchi, N., 1993, Formation of Ripple Patterns and Dunes by Wind-blown Sand, *Physical Review Letters*, 71(1), 197–200.
- Nishimori, H. and Tanaka, H., 2001, A simple model for the formation of vegetated dunes, *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1143–1150.
- Nishimori, H., 2015, Dynamics of Sand Ripples and Dunes, *Forma*, 30, S91–S94.
- Nishimori, H., Yamasaki, M. and Andersen, K.H., 1998, A simple model for the various pattern dynamics of dunes, *International Journal of Modern Physics*, B, 12(3), 257–272.
- Ortiz, P. and Smolarkiewicz, P.K., 2006, Numerical simulation of sand dune evolution in severe winds, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 50, 1229–1246.
- Parsons, D.R., Walker, I.J. and Wiggs, G.F.S., 2004, Numerical modelling of flow structures over idealized transverse aeolian dunes of varying geometry, *Geomorphology*, 59, 149–164.
- Parteli, E.J.R. and Herrmann, H.J., 2003, A simple model for a transverse dune field, *Physica*, A, 327, 554–562.
- Pelletier, J.D., Mitasova, H., Harmon, R.S. and Overton, M., 2009, The effects of interdune vegetation changes on eolian dune field evolution: a numerical modeling case study at Jockey's Ridge, North Carolina, USA, *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 1245–1254.
- Pethick, J., 1984, *An Introduction to Coastal Geomorphology*, Routledge.
- Sauermann, G., Kroy, K. and Herrmann, H.J., 2001, Continuum saltation model for sand dunes, *Physical Review*, E, 64, 031305, DOI:10.1103/PhysRevE.64.031305.
- Smyth, T.A.G., Jackson, D.W.T. and Cooper, J.A.G., 2011, Computational Fluid Dynamic modelling of Three-Dimensional airflow over dune blowouts, *Journal of Coastal Research*, SI64, 314–318.
- Stallins, J.A. and Parker, 2003, The Influence of

- Complex Systems Interactions on Barrier Island Dune Vegetation Pattern and Process, *Annals of the Association of American Geographers*, 93(1), 13–29.
- Stallins, J.A., 2005, Stability domains in barrier island dune systems, *Ecological Complexity*, 2, 410–430.
- van Boxel, J.H., Arens, S.M. and van Dijk, P.M., 1999, Aeolian processes across transverse dunes I: modelling the air flow, *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 255–270.
- Weng, W.S., Hunt, J.C.R., Carruthers, D.J., Warren, A., Wiggs, G.F.S., Livingston, I. and Castro, I., 1991, Air flow and sand transport over sand-dunes, *Acta Mechanica (Suppl.)*, 2, 1–22.
- Werner, B.T. and Kocurek, G., 1997, Bed-form dynamics: does the tail wag the dog? *Geology*, 25, 771–774.
- Werner, B.T. and Kocurek, G., 1999, Bedform spacing from defect dynamics, *Geology*, 27, 727–730.
- Werner, B.T., 1995, Eolian dunes: computer simulations and attractor interpretation, *Geology*, 23(12), 1107–1110.
- Wiggs, G.F.S., 2001, Desert dune processes and dynamics, *Progress in Physical Geography*, 25 (1), 53–79.
- 교신 : 류호상, (우) 561-756 전북 전주시 덕진구 백제대로 567, 전북대학교 사범대학 지리교육과, serious53@jbnu.ac.kr (Tel) 063-270-2725 (Fax) 063-270-2730
- Correspondence : RHEW, hosahng, Department of Geography Education, College of Education, Chonbuk National University, 567 Bakjedaero, Duckjin-gu, Jeonju, Chollabuk-do, Korea, serious53@jbnu.ac.kr, (Tel) +82-63-270-2725 (Fax) +82-63-270-2730
- (접수: 2016.08.11, 수정: 2016.08.20, 채택: 2016.08.25)