

## 자연스러운 지형 생성을 위한 침식 시뮬레이션

한영덕

우석대학교 정보보안학과

ydhan@woosuk.ac.kr

## Creation of Natural Terrain by Erosion Simulation

Yeong-Deok Han

Dept. of Information Security, Woosuk University

## 요 약

지형에 대한 기존의 침식 시뮬레이션은 주로 소규모의 지형 변화에 초점을 맞추고 있다. 이 논문에서는 물에 의한 침식과 열적 침식과정을 결합하여 강의 네트워크와 산들로 이루어진 자연스러운 대규모의 지형을 형성하는 방법을 제안한다. 물의 흐름에는 shallow water 시뮬레이션의 파이프 모델을 사용하며, 강물의 줄기가 쉽게 형성되게 하기 위해 속도에 의존하는 침식을, 강줄기 주변에 V자형 골짜기가 생성되게 하기 위해 열적 침식을 적용한다. 시뮬레이션 결과  $K_c$ (퇴적물 수용상수)와  $K_v$ (속도의존 침식강도)의 값이 적당한 범위에 있을 때만 목적인 모양의 지형이 생성되며, 이렇게 생성된 대표적인 자연스러운 모양의 지형을 예시한다. 또한 기존의 열적 침식 방법의 개선과  $K_c$ 가 큰 값일 때 발생하는 문제점을 해결할 방안을 제시한다.

## ABSTRACT

Existing hydraulic terrain erosion simulations mainly focus on small scale terrain deformations. In this paper, we propose a simulation method combining hydraulic terrain erosion and thermal erosion, by which a natural large scale terrain of mountainous regions with river networks can be created. For water movement we use the pipe model of shallow water simulation, and for the easy formation of watercourse we use velocity dependent erosion, also we apply thermal erosion for the formation of V-form slopes in the vicinity of stream lines. As a result, we can obtain good natural shaped terrains for certain ranges of  $K_c$ (sediment capacity constant) and  $K_v$ (velocity dependent erosion strength) values. Also we present improved thermal erosion method, and suggest a way to avoid problems caused by large  $K_c$  value.

**Keywords** : terrain(지형), erosion(침식), simulation(시뮬레이션), river network(강 네트워크), mountain(산), sediment capacity(퇴적물 수용계수)

Received: Nov. 40. 2015 Accepted: Dec. 18. 2015  
Corresponding Author: Yeong-Deok Han(Woosuk University)  
E-mail: ydhan@woosuk.ac.kr

© The Korea Game Society. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ISSN: 1598-4540 / eISSN: 2287-8211

## 1. 서론

지형(terrain)은 컴퓨터 그래픽스 응용에서 빼 놓을 수 없는 시각적 요소로서 컴퓨터 게임이나 영화, 애니메이션, 가상현실 등에서 사실적 느낌의 환경을 만들기 위해 많이 사용된다[1,2,3]. 보통 지형을 생성하기 위해서는 프랙탈이나 노이즈 생성에 기반을 둔 랜덤 알고리즘을 이용하거나 인터랙티브(interactive)한 디자인 방식의 저작 도구를 이용한다.

그러나 이러한 방법으로 생성된 지형은 오랜 세월 동안 복잡한 물리화학적 과정을 거쳐 형성된 실제 자연의 지형에 비해 사실성이 떨어진다. 예를 들어 모든 부분이 지리적 특징이 없이 닳은 모양이 되거나 물의 흐름에 대한 고려가 안 되어 강의 하류가 상류보다 높게 되거나 산의 배치가 물의 흐름을 막아 물길이 끊기고 곳곳에 웅덩이들만 형성되는 경우 등이 나타날 수 있다.

자연의 지형에서는 주로 물에 의한 오랜 시간 동안의 침식 작용을 통해 지면의 세세한 모양을 비롯하여 보다 큰 스케일에서의 산과 계곡, 강줄기 등의 모양이 형성된다. 따라서 이러한 요소를 지형 생성 과정에 도입하면 보다 사실적인 모양의 지형을 얻을 수 있다. 예를 들어 침식작용을 모델링한 지형 변형 규칙을 도입하여 지형의 각진 모서리가 점점 사라지고 흙이 물에 의해 아래로 쓸려 퇴적되는 모양을 쉽게 생성할 수 있다[4,5].

좀 더 나은 결과를 위해서는 물의 움직임과 침식의 과정에 유체역학적 방법이나 입자의 운동역학적 방법을 적용하여 다루어야 하고 지금까지 많은 연구가 이루어져 왔다.[5,6] 그 결과 이러한 방법들을 적용한 강변의 침식, 강바닥의 퇴적물, 흩더미가 물의 흐름으로 흩어지는 등과 같은 한정된 예에서의 시뮬레이션은 상당히 성공적이라고 할 수 있다. 그러나 같은 방법으로 오랜 세월의 침식 결과인 산과 강 네트워크 등의 지리적 구조를 생성하는 데는 어려움이 있다. 그 이유로는 사실적인 시뮬레이션일수록 많은 변수를 고려한 복잡한 모델이 되어야 하는 것과 오랜 세월에 해당하는 긴 시

간 동안의 계산이 필요하다는 것을 들 수 있다. 따라서 최근에는 이들을 시뮬레이션과 별도로 디자인하거나 다른 방법으로 삽입하는 것도 많이 연구되고 있다[7,8,9,10,11].

이 논문에서는 기존의 침식에 의한 지형 시뮬레이션이 주로 소규모의 지형 변화에 초점을 맞춘 연구인 것과 달리 침식 시뮬레이션으로 자연과 유사한 대규모의 강의 네트워크 및 산들을 생성하는 방법에 대해 연구하였다. 이를 위해서 shallow water의 파이프 모델[12]에 기반을 둔 물의 속도 의존 침식[13,14,15]과 열적 침식[16]을 결합하여 사용하는 방법을 연구하였다. 그 결과 인위적으로 디자인된 강과 달리 물의 물리적 흐름과 잘 일치하는 강의 네트워크 모양을 생성하였고 침식이 덜 된 나머지 부분은 실제 산들의 모양과 비슷한 지형이 되었다.

2절에서는 기존의 연구에 대해 알아보고 3절에서는 구체적 시뮬레이션 방법과 그 결과에 대해 설명한 후 4절에서 결론을 맺는다.

## 2. 기존 연구

프랙탈 생성으로 지형을 만들어 내는 방법은 효과적인 방법이나 오랜 세월 동안 침식 및 풍화작용을 거쳐 형성된 실제 자연의 지형과는 차이를 보인다. 이에 따라 실제 지형과 비슷하도록 임의로 적당한 변형을 가하는 방법들이 연구되었는데, Kelly 등은[17] 미리 지형의 능선과 계곡을 구성한 뒤 그 주위를 프랙탈 지형으로 보간하였다. Prusinkiewicz 와 Hammel은[18] 강의 유역을 미리 정하고 강줄기 생성을 지형 생성 과정에 포함시켰다.

한편 침식 및 풍화작용을 모델링한 시뮬레이션을 통해 보다 실제와 닳은 지형을 생성하기 위한 방법이 연구되었다. Musgrave 등은[16] 침식작용을 열적 풍화작용(thermal weathering)과 물에 의한 침식(hydraulic erosion)으로 설명하였는데, 열

적 풍화작용이란 열적 노화에 의해 흙이나 바위가 부스러져 주변에 퍼뜨려지거나 경사가 어느 한계 이상 심한 지형에서 물체가 아래로 떨어져 내리는 과정을 말하며, 물에 의한 침식이란 화학적 또는 물리적으로 토양의 일부가 녹아 물의 이동을 따라 다른 곳에 퇴적되는 과정을 말한다. 물의 이동은 지면의 경사에 의존하여 주변으로 퍼지는 방식으로 설명하였다.

Nagashima는[19] 먼저 강줄기를 별도의 방법으로 생성한 후, 물리에 기반한 물에 의한 침식과정을 통해 강바닥이 점차 깊게 파이는 과정 등을 시뮬레이션 하였다.

또한, Benes 등[20]은 증발 과정을 처음 도입하였고 전체 과정을 비, 침식, 퇴적, 증발의 독립적인 스텝으로 분리하고 각 스텝의 빈도와 강도를 독립적으로 조절하는 것을 고려하였다.

물을 구성하는 입자의 이동 속도에 따른 효과를 처음 도입한 것은 Chiva 등인데[13] 입자들이 경사면에서 중력에 의해 에너지를 얻은 뒤 지면과 충돌하면서 이에 따라 지면이 변형되는 방법으로 산과 계곡을 생성하는 것을 제안하였다. Mei 등[14] 물의 움직임에 shallow water 시뮬레이션을 적용하고 토양의 물에 의한 침식 과정을 GPU에서 빠르게 계산할 수 있도록 구현하였다. Benes[21] 또한 shallow water simulation을 적용하여 기 생성된 프랙탈 지형 위에 침식에 의한 물줄기나 웅덩이가 나타나는 것을 관찰하였다. Stava 등은[15] Mei 등과 유사한 모델을 사용하였는데, 힘에 의한 침식, 용해에 의한 침식, 퇴적물 이동의 과정을 시뮬레이션에 도입하였다. 이러한 방법들은 물의 움직임을 물리적 법칙에 기반하여 상당히 사실적으로 처리함으로써 빗물에 의해 흩더미가 쓸려 변형되는 것이나 강변의 침식 현상 같은 것을 상당히 잘 구현해 내고 있다.

지형에 산과 들, 강의 네트워크 등을 자연스럽게 도입하기 위한 연구도 많이 이루어졌는데 주로 사용자가 원하는 모양의 디자인과 지형의 자동적 생성을 결합한 것이다. Zhou 등은 자연의 실제 지형

모양에 사용자가 디자인한 능선 패턴 모양을 결합하는 방법을 연구하였다[7]. Hnaidi 등은 확산 방정식을 이용하여 사용자가 그린 3D 곡선으로 전체 지형의 모양을 제어하는 방법을 연구하였으며[8], Doran 등의 산, 해변 등의 특정 지형을 생성하는 각 agent를 이용하여 이들이 복합된 지형을 생성하는 방법을 연구하였고[9], Belhadj 등은 능선의 모양을 어떤 규칙을 따라 움직이는 입자를 도입하여 생성한 후 중력의 영향 하에 움직이는 입자로 강의 모양을 생성하고 역중간점 이동 방법으로 나머지 부분을 채우는 방법을 연구하였다[10]. Genevoux 등은 [17]을 발전시켜 먼저 강의 네트워크를 사용자의 스케치로부터 생성한 뒤 물에 의한 침식을 적용하여 나머지 지형 부분을 생성하는 방법을 제안하였다[11].

위와 같이 작은 흩더미나 모래언덕의 침식과 같이 주어진 지형 하의 미세한 변화에는 물리적 시뮬레이션 방법이 적용되고 있으나, 산 및 강의 네트워크와 같은 대규모 지형의 생성은 주로 사용자의 디자인이나 적절히 고안된 생성 규칙에 의존하고 있다. 즉 자연스러운 대규모 지형의 생성에 침식 시뮬레이션 방법을 적용하는 연구는 아직 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 기존의 침식 방법들을 결합하여 자연스러운 모양의 대규모 지형을 얻는 방법을 제안한다.

### 3. 물에 의한 침식 시뮬레이션

기존의 방법 중 물에 의한 침식은 다시 물에 화학적으로 지면이 녹는 것과 물의 속도에 의해 지면이 깎이는 침식으로 나눌 수 있다. 이 중 화학적 침식은 호수와 같은 지형을 형성하게 할 뿐이지만 속도에 의한 침식은 물이 이동하며 지면을 깎아나가는 특성 때문에 강물줄기를 형성하는데 효과적이다. 한편 열적 침식은 골짜기 주변의 기울기가 큰 경사면을 완화된 경사면으로 손쉽게 만들어 주는

특성이 있다. 따라서 물의 속도에 의한 침식과 열적 침식을 결합하면 강의 네트워크로 이루어진 골짜기 및 그 사이의 산들로 이루어진 자연스러운 모양의 지형을 기대할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 아이디어에 바탕을 둔 자연스러운 대규모의 지형 생성 방법을 연구하였다.

본 논문의 침식 시뮬레이션은 물에 의한 침식과 열적 침식으로 이루어진다. 물에 의한 침식 부분에는 shallow water 의 파이프 모델[12]을 적용한 Mei 등[14]과 Stava 등[15]의 방법을 참고하였는데, 각 cell의 경계면 마다 in-out 플럭스를 정의하는 대신 플럭스 변수가 중복되지 않도록 정의하였다. 열적 침식작용에 대해서는 기존의 방법[4] 좌표축에 따른 방향 특성을 가지므로 여기서는 그 점을 개선하여 사용하였다.

이하 3.1에서는 시뮬레이션에 사용할 모델의 변수들을 설명하며 3.2에서는 시뮬레이션의 구체적인 알고리즘을, 3.3에서는 시뮬레이션의 결과와 자연스러운 지형을 얻을 수 있는 계수 값들 및 문제점에 대해 논의한다.

### 3.1 지형 침식 모델링 변수

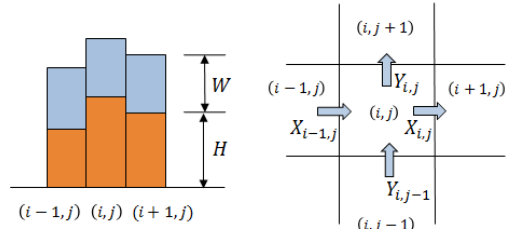
자연의 지형에는 동굴이나 오버행과 같이 3차원적 기하구조로만 표현되는 형태도 있다. 여기서는 [Fig. 1]과 같이 2차원 격자(grid)의 각  $(i, j)$  cell에 사각기둥 모양의 지형과 물이 있는 것으로 표현할 수 있는 형태만 다루기로 한다. 격자(grid)의 한 변의 길이는 1로 간주한다.

모든 cell은 각각 주변의 4개의 cell과 가상적 파이프를 통해 연결된다. 물의 이동은 인접한 cell간의 물의 높이 차로 인한 수압에 의해 발생하며 단위 시간당 인접한 cell로 경계를 넘어 흘러가는 물의 부피인 플럭스(flux)로 표현된다.

시뮬레이션을 위해 먼저 각  $(i, j)$  셀(cell)에서 다음과 같은 변수들을 정의하자.

- 지면의 높이:  $H_{ij}$
- 지면 위로부터의 물의 높이:  $W_{ij}$

- 물의 플럭스(x 방향):  $X_{ij}$
- 물의 플럭스(y 방향):  $Y_{ij}$
- 물에 녹은 퇴적물의 양:  $S_{ij}$



[Fig. 1] Columns of terrain and water and the definition of flux over the grid.

[Fig. 1]에서 보는 것처럼  $X_{ij}$ 는  $(i, j)$  cell로부터  $(i+1, j)$  cell 방향으로의 플럭스를 의미하며  $X_{ij}$ 의 양, 음에 따라 반대 방향의 흐름을 나타낸다.  $Y_{ij}$ 에 대해서도 마찬가지로 정의한다.

물의 높이  $W$ 는 cell의 면적이 1이므로 물의 양(부피)과 같다. 뒤의 침식 과정에서 물의 속도를 사용하지만 속도를 나타내는 변수는 중복의 의미가 있어 정의하지 않았는데, 그 이유는 플럭스와 물의 높이로부터 물의 속도를 알 수 있기 때문이다.

$(i, j)$  cell의 수면의 높이는 다음 식으로 주어진다. 단, 물이 있을 때만 ( $W_{i,j} > 0$ ) 의미가 있다.

$$Z_{i,j} \equiv H_{i,j} + W_{i,j} \quad (\text{eq. 1})$$

퇴적물  $S_{ij}$ 는 물에 녹아 있는 흙과 같은 것을 말하며 물의 부피에 포함되어 있는 것으로 본다.

### 3.2 침식 시뮬레이션의 단계별 알고리즘

자연에서의 침식 과정의 시뮬레이션을 위해 다음과 같이 6단계 과정으로 구분하자.[20]

- 높이차와 중력에 의해 물의 이동 플럭스가 변화한다.
- 퇴적물(sediment)이 물의 플럭스에 의한 이동에 따라 같이 이동한다. (여기서 퇴적물은 흙과 같은 것이 물에 녹아있는 것을 뜻한다.)
- 플럭스 및 비 또는 증발에 의해 cell의 물의 양

이 변화한다.

- 지면이 물의 속도에 의존하여 물에 녹는다.
- 각 cell에서 물에 녹을 수 있는 최대 퇴적물의 양은 그 곳의 물의 양과 속도에 따라 정해지며, 녹은 퇴적물이 최대량을 초과하면 초과되는 부분은 침전되어 지면으로 환원된다.
- 지면의 경사가 어느 이상 가파른 경우, 지면의 일부가 이동하여 경사가 완화되는 열적 침식이 일어난다.

시물레이션에서는 최초 지형 위에 비에 의해 물이 공급된 후 시간  $t$ 일 때의 변수 값들로부터 다음 시간  $t + \Delta t$ 일 때의 변수 값들을 구해나가며, 주기적으로 비와 증발이 반복되게 한다. 그 과정에서 침식되는 지면의 양과 퇴적으로 환원되는 양을 구하여 지형의 변화를 구한다. 시물레이션의 각 단계별 구체적인 내용은 다음과 같다.

### 3.2.1 수면의 높이에 따른 플럭스 변화

인접한 cell들 사이의 플럭스의 시간에 따른 변화를 살펴보자. 예를 들어 두 cell  $(i,j)$ 와  $(i+1,j)$  사이의 길이  $l$ , 단면적  $A$ 인 파이프 안의 물의 속도를  $v$ 라 하면 (부피)플럭스는 다음과 같이 정의된다.

$$X_{i,j} = Av \quad (\text{eq. 2})$$

두 cell의 수면의 높이차에 의해 연결된 파이프의 양 끝에 압력차  $\rho g(Z_{i+1,j} - Z_{i,j})$ 가 발생한다. 여기서  $\rho$ 는 물의 밀도이고,  $g$ 는 중력가속도이다. 따라서 파이프에 든 물은  $(-1)A\rho g(Z_{i+1,j} - Z_{i,j})$ 의 힘을 받게 되며 질량이  $\rho Al$ 이므로 가속도는 다음과 같다.

$$a = (-1) \frac{g}{l} (Z_{i+1,j} - Z_{i,j}) \quad (\text{eq. 3})$$

따라서 시간  $\Delta t$  후의 파이프 안의 물의 속도는  $\Delta v = a\Delta t$  만큼 변화하고, 이에 따른 플럭스의 변화는  $A\Delta v$ 가 된다. 단, 이 때  $Z$ 값이 큰 쪽 cell에 물이 없는 경우는 이에 의한 플럭스 변화가 있을 수 없으므로 0이 되어야 한다.

$$\Delta X_{i,j} = \begin{cases} A(-1) \frac{g}{l} (Z_{i+1,j} - Z_{i,j}) \Delta t \\ 0 \quad (\text{if } Z_{i+1,j} > Z_{i,j} \text{ and } W_{i+1,j} \leq 0 \\ \quad \text{or } Z_{i+1,j} < Z_{i,j} \text{ and } W_{i,j} \leq 0) \end{cases} \quad (\text{eq. 4-1})$$

플럭스  $Y_{i,j}$ 에 대해서도 같은 방법을 적용한다.

$$\Delta Y_{i,j} = \begin{cases} A(-1) \frac{g}{l} (Z_{i,j+1} - Z_{i,j}) \Delta t \\ 0 \quad (\text{if } Z_{i,j+1} > Z_{i,j} \text{ and } W_{i,j+1} \leq 0 \\ \quad \text{or } Z_{i,j+1} < Z_{i,j} \text{ and } W_{i,j} \leq 0) \end{cases} \quad (\text{eq. 4-2})$$

각 cell의 플럭스의 업데이트는 다음의 식으로 이루어진다.

$$\begin{cases} X'_{i,j} = X_{i,j} + \Delta X_{i,j} \\ Y'_{i,j} = Y_{i,j} + \Delta Y_{i,j} \end{cases} \quad (\text{eq. 5})$$

cell에 물이 없는 상태이면 이 cell에서 밖으로 나가는 플럭스도 0이 되어야 한다. 그런데 (eq. 4-1,2)에서는 플럭스의 변화를 막을 뿐이므로 나가는 플럭스가 계속 유지될 수 있고 물의 양이 큰 음수가 될 수 있다. 따라서 다음과 같은 조건을 추가하여 보정한다.

$$X'_{i,j} = 0, \quad (\text{eq. 6-1})$$

$$\begin{cases} (\text{if } X'_{i,j} > 0 \text{ and } W_{i,j} \leq 0 \\ \text{or } X'_{i,j} < 0 \text{ and } W_{i+1,j} \leq 0) \end{cases}$$

$$Y'_{i,j} = 0, \quad (\text{eq. 6-2})$$

$$\begin{cases} (\text{if } Y'_{i,j} > 0 \text{ and } W_{i,j} \leq 0 \\ \text{or } Y'_{i,j} < 0 \text{ and } W_{i,j+1} \leq 0) \end{cases}$$

### 3.2.2 플럭스에 의한 퇴적물의 이동

cell의 물에는 퇴적물(sediment)이 녹아 있다. 플럭스에 의해 물의 일부가 인접한 cell로 이동할 때 이동하는 물의 비율과 같은 비율로 퇴적물도 이동한다.

$(i,j)$  cell의  $S'_{i,j}$ 의 변화는 인접한 4개의 cell 과의 플럭스  $X_{i,j}$ ,  $X_{i-1,j}$ ,  $Y_{i,j}$ ,  $Y_{i,j-1}$ 에 의하여 발생하는데 이들은 각각 다음과 같다.

$$\Delta S_{i,j}^{(1)} = \begin{cases} -S_{i,j}X_{i,j}\Delta t / (W_{i,j}+w), & (X_{i,j} \geq 0) \\ -S_{i+1,j}X_{i,j}\Delta t / (W_{i+1,j}+w), & (X_{i,j} < 0) \end{cases}$$

$$\Delta S_{i,j}^{(2)} = \begin{cases} S_{i-1,j}X_{i-1,j}\Delta t / (W_{i-1,j}+w), & (X_{i-1,j} \geq 0) \\ S_{i,j}X_{i-1,j}\Delta t / (W_{i,j}+w), & (X_{i-1,j} < 0) \end{cases}$$

$$\Delta S_{i,j}^{(3)} = \begin{cases} -S_{i,j}Y_{i,j}\Delta t / (W_{i,j}+w), & (Y_{i,j} \geq 0) \\ -S_{i,j+1}Y_{i,j}\Delta t / (W_{i,j+1}+w), & (Y_{i,j} < 0) \end{cases}$$

$$\Delta S_{i,j}^{(4)} = \begin{cases} S_{i,j-1}Y_{i,j-1}\Delta t / (W_{i,j-1}+w), & (Y_{i,j-1} \geq 0) \\ S_{i,j}Y_{i,j-1}\Delta t / (W_{i,j}+w), & (Y_{i,j-1} < 0) \end{cases}$$

(eq. 7)

위 식에서 분모의  $w$ 는  $W \approx 0$ 인 경우 발산을 막기 위해 도입한 작은 상수이다. 물리적으로 cell에 물이 없으면 cell로부터의 플럭스도 없을 것이지만 시뮬레이션의 근사적 수치계산의 과정에서는 위의 수식에서 분자는 0이 아닌데 분모는 거의 0인 상황이 발생하여 발산할 수 있다.  $w$ 의 유무가 차이를 주는 경우는  $W$ 가 매우 작을 때인데 이 경우  $S$ 도 작을 수 밖에 없고  $\Delta S$ 도 작을 수 밖에 없어 결과에 큰 영향을 주지 않는다. 실제 시뮬레이션에서는  $w = 0.001 \sim 1$  정도의 값을 실험하였는데 시뮬레이션 결과는 이 값에 거의 의존하지 않았다.

플럭스에 의한  $(i,j)$  cell의 퇴적물  $S_{i,j}$ 의 전체 변화는 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta S_{i,j}^F = \Delta S_{i,j}^{(1)} + \Delta S_{i,j}^{(2)} + \Delta S_{i,j}^{(3)} + \Delta S_{i,j}^{(4)} \quad (\text{eq. 8})$$

### 3.2.3 플럭스, 비, 증발에 의한 물의 양 변화

각 cell의 물  $W_{i,j}$ 의 변화는 인접한 4개의 cell과의 플럭스와 비 및 증발에 의해 이루어진다.

$$\Delta W_{i,j} = \Delta t(-X_{i,j} + X_{i-1,j} - Y_{i,j} + Y_{i,j-1}) + \Delta t(rR - (1-r)D)$$

(eq. 9)

여기서  $R$ 은 비의 플럭스이며,  $D$ 는 증발 플럭스이고 비 또는 증발의 선택은  $r = 1, 0$ 의 값으로 정해진다. 비가 오는 기간  $P_{rain}$ 과 증발하는 기간  $P_{dry}$ 은 모두  $20\Delta t$ 로 두었다.

### 3.2.4 퇴적물 수용계수와 침식량의 계산

물에 녹을 수 있는 퇴적물의 최대량은 (퇴적물 수용계수) × (물의 양)으로 정해진다. 먼저 퇴적물 수용계수  $C$ 는 다음과 같은 실험식으로 정해진다.[19,20]

$$C = K_c |\vec{v}| \sin \theta \quad (\text{eq. 10})$$

여기서  $K_c$ 는 퇴적물 수용상수이고  $|\vec{v}| \equiv \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ 는 속도의 크기이며  $\theta$ 는 그 지점에서 지면의 경사각으로  $\theta > 0$ 이다.

물의 속도  $v$ 는 (eq. 2)의 가상적 파이프의 단면적  $A$  대신 인접한 cell간의 단면적에 해당하는 양인  $W_{i,j}$ 를 사용하였다.

$$\begin{cases} v_x = X_{i,j} / (W_{i,j} + w) \\ v_y = Y_{i,j} / (W_{i,j} + w) \end{cases} \quad (\text{eq. 11})$$

$w$ 를 도입한 이유는 앞의 3.2.2에서 설명한 바와 같다.  $\sin \theta$ 는 cell에 인접한 4개의 cell과의 경사각의  $\sin$  값의 평균을 사용하였다.

cell의 물의 양이  $W_{i,j}$ 일 때, 수용 가능한 최대 퇴적물 양은 다음과 같다.

$$S_{i,j}^{\max} = C_{i,j} W_{i,j} \quad (\text{eq. 12})$$

지면이 물에 녹아 퇴적물이 증가하는 과정은 매우 복잡한 과정이라고 할 수 있는데, Mei 등과[14] Stava 등[15]은 위와 같이 물의 속도를 퇴적물 수용계수에는 반영하였으나 침식의 강도에는 반영하지 않았다. 즉 침식에는 화학적 용해에 의한 침식만을 고려하였다. 그러나 실험해 본 결과 이 방법으로는 강물 줄기를 형성하기가 어려웠다. 따라서 본 논문에서는 Chiva 등이[13] 속도 의존 침식을 도입한 것과 같이 물의 속도에 따라 지면이 퇴적물이 되는 정도가 달라지게 하는 방법을 도입하였다. 즉 속도에 따라 녹는 퇴적물의 양은 상수  $K_c$ 에 의해 다음과 된다고 가정한다.

$$\Delta S_{i,j}^V = K_c |\vec{v}| \Delta t = K_c \Delta t \sqrt{(X_{i,j}^2 + Y_{i,j}^2)} / (W_{i,j} + w_1)$$

(eq. 13)

이 식에서 발산을 막고 좋은 결과를 주는 값으

로  $w_1 = 1$  을 사용하였다.

좀 더 정확한 시뮬레이션을 위해서는 지형에 물이 침투되는 비율[22] 같은 지형의 사실적 특성들을 반영하여야 한다. 다만 여기서는 가능한 단순한 모델로 자연스러운 지형을 생성하려는 목적에 따라 이러한 특성들에의 의존은 고려하지 않았다.

퇴적물의 변화는 이동에 의한 것까지 포함하여 다음과 같다.

$$S'_{i,j} = S_{i,j} + \Delta S_{i,j}^F + \Delta S_{i,j}^V \quad (\text{eq. 14})$$

위 식들에 나타난 상수  $K_c$ ,  $K_v$  는 지형의 침식 특성을 나타내는 양들로서 시뮬레이션의 결과를 결정하는 중요한 역할을 한다. 이들을 여러 가지 값들로 변화시키며 강의 네트워크가 어느 경우에 형성되는지를 관찰한 결과는 뒤에 설명하였다.

### 3.2.5 퇴적물 변화에 따른 침전 및 지형 변형

위에서 계산한 퇴적물 양만큼 지면이 침식된다. 단, 퇴적물 양이 최대 수용량을 초과하는 경우 최대 수용량 까지만 침식되고 초과되는 양은 침전이 되어 다시 지면으로 환원되어야 하므로, 먼저 퇴적물 양을 다음과 같이 재조정한다.

$$S''_{i,j} = \begin{cases} S'_{i,j}, & (S'_{i,j} < S_{i,j}^{\max}) \\ S_{i,j}^{\max}, & (S'_{i,j} \geq S_{i,j}^{\max}) \end{cases} \quad (\text{eq. 15})$$

최종적으로 퇴적물 양의 변화만큼 지면의 높이도 변화한다.

$$H'_{i,j} = H_{i,j} - (S''_{i,j} - S_{i,j}) \quad (\text{eq. 16})$$

### 3.2.6 열적 침식 작용

지면의 기울기가 어느 이상( $\tan\beta$ ,  $\beta$ : Talus angle) 심해지면 중력에 의해 윗부분의 물체가 아래로 떨어지는 등의 작용으로 기울기가 줄어든다. 이러한 과정은 다음과 같이 구현될 수 있다. 예를 들어 x-방향의 기울기만 고려한다면 이 값이  $\tan\beta$  보다 클 때, 즉

$$H_{i+1,j} - H_{i,j} \equiv h > \tan\beta \quad \text{이면}$$

$$\begin{cases} \Delta H_{i,j} = \Delta t K_t (h - \tan\beta) \\ \Delta H_{i+1,j} = -\Delta t K_t (h - \tan\beta) \end{cases} \quad (\text{eq. 17})$$

와 같이 두 cell의 지면 높이를 조정해준다. 여기서  $K_t$ 는 열적 침식의 강도를 나타내는 상수이다.

그런데 이 방법은 비탈면의 방향이 x, y 방향이 아닌 그 사이의 방향인 경우는 만족스럽지 못한 결과를 준다. 예를 들어 원뿔 모양의 지형에 적용해 보면 사각뿔 같은 형태가 결과로 나타난다. 따라서 이를 임의의 방향의 경사면에 대해서도 동일하게 작용하도록 다음과 같이 방법을 개선하였다.

먼저 각  $(i,j)$ 에서  $(i,j)$ ,  $(i+1,j)$ ,  $(i,j+1)$ 의 세 높이에 의한 방향에 무관한 기울기  $h$ 를 구하기 위해 두 높이 차를 계산한다.

$$h_x \equiv H_{i+1,j} - H_{i,j}, \quad h_y \equiv H_{i,j+1} - H_{i,j} \quad (\text{eq. 18})$$

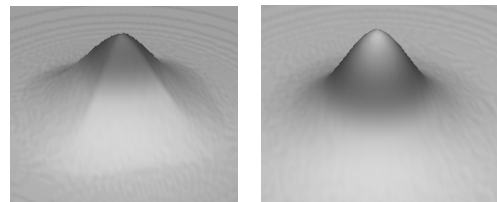
빗면에  $x-z$ 평면,  $y-z$ 평면과 교차하는 부분을 따라 두 벡터  $(1, 0, h_x)$ ,  $(0, 1, h_y)$ 를 정의한다. 이를 이용하여 빗면에 수직인 단위 벡터를 얻어 빗면의 기울기  $\tan\theta$ 를 구하면

$$\tan\theta = \sqrt{h_x^2 + h_y^2} \equiv h \quad (\text{eq. 19})$$

와 같다. 이제  $h > \tan\beta$  이면  $(i,j)$ 와 함께  $(i+1,j)$ ,  $(i,j+1)$  cell의 높이를 다음과 같이 조정한다.

$$\begin{cases} \Delta H_{i,j}^{(1)} = \Delta t K_t (h - \tan\beta) (h_x + h_y)/h \\ \Delta H_{i+1,j}^{(2)} = -\Delta t K_t (h - \tan\beta) h_x/h \\ \Delta H_{i,j+1}^{(3)} = -\Delta t K_t (h - \tan\beta) h_y/h \end{cases} \quad (\text{eq. 20})$$

최초 회전 대칭인 원뿔 모양에 대해 (eq. 17) 과 (eq. 20)의 두 가지 열적 침식 방법을 적용한 결과를 [Fig. 2]에 나타내었다. 왼편은 사각뿔 모양으로 변한 반면 오른편은 회전 대칭 모양을 유지하고 있음을 볼 수 있다.



[Fig. 2] Comparison between two thermal erosion method: (eq. 17) (left) and (eq. 20)

하나의 cell에 대해 3 cell의 높이를 조정하므로 각 cell마다 3개의 높이 조정 요인이 있다. 따라서 지형의 최종 높이 변화는 다음과 같다.

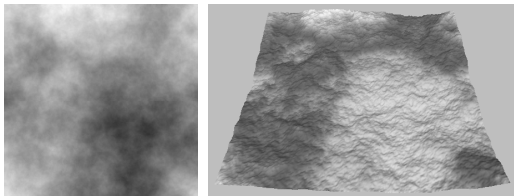
$$\Delta H_{i,j} = \Delta H_{i,j}^{(1)} + \Delta H_{i,j}^{(2)} + \Delta H_{i,j}^{(3)} \quad (\text{eq. 21})$$

열적 침식은 개울이나 강의 줄기가 형성된 후 그 사이의 부분이 자연스러운 산과 같은 모양이 되게 하는데 중요한 역할을 한다.

### 3.3 침식 시뮬레이션 결과

#### 3.3.1 최초 지형 및 물의 흐름 관련 상수값

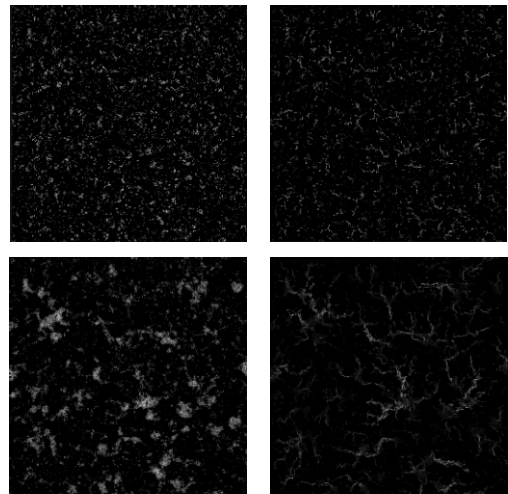
침식 전 최초의 지형으로는 다이아몬드-스퀘어 알고리즘으로 생성한 프랙탈 모양의 지형을 사용하였다. 격자 크기는  $256 \times 256$ 이며 최고높이와 최저 높이의 차이는 약 25정도로 생성하였다. [Fig. 3]는 명암으로 표시한 Height map(왼쪽)과 3D로 본 지형의 모습이다. Height map에서는 밝은 곳이 높은 곳이며, 3D 표현에서는 높은 곳부터 흰색-붉은색-노란색-초록색의 순서로 시각적 효과를 주었다. 랜덤한 프랙탈 특성을 가진 지형 모양을 하고 있음을 볼 수 있다.



[Fig. 3] Shape of initial terrain: height map(left), 3d representation(right)

먼저 물의 흐름에 관련되는 일부 상수들을 안정된 시뮬레이션이 수행될 수 있는 한도 내에서 물의 플럭스가 가능한 큰 값이 되도록 정하였다. 그 이유는 플럭스가 클수록 물의 이동이 빨라 실제 긴 시간을 시뮬레이션한 효과가 있기 때문이다. 시간간격  $\Delta t$ 는 수식에서 항상 다른 양과 결합하여 나타나기 때문에 임의의 크기라도 상관없으므로  $\Delta t = 0.01$ 로 두었다. 이 때 플럭스에 대한 시뮬레

이션 결과 대략  $(Ag/l)\Delta t < 0.3$ 의 범위에서 진동이나 발산이 나타나지 않고 안정하였다.  $Ag/l$  값은 [Fig. 4]에 보는 바와 같이 클수록 물줄기의 흐름이 잘 형성되므로 위의 범위 내에서 가능한 크게 정하였다. 비와 증발의 양  $R, D$ 와 주기  $P_{rain}, P_{dry}$ 는 시뮬레이션 도중에 지면이 물에 완전히 잠기거나 완전히 마르는 경우가 없도록 적당히 정하였다. 이렇게 정한 값들을 [Table 1]에 나타내었다.



[Fig. 4] Water map(left) and flux map(right) for  $Ag/l = 2$ (upper) and  $20$ (lower) cases.

[Table 1] Parameter values for water movement simulation

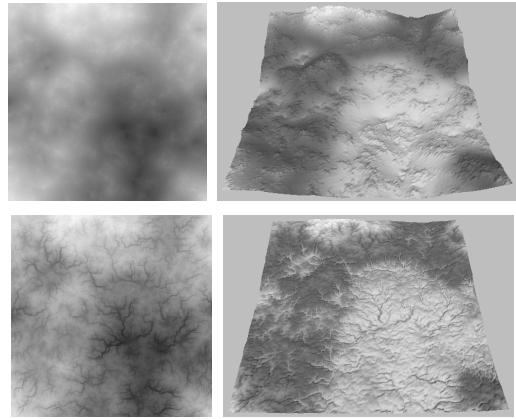
Parameter	$\Delta t$	$Ag/l$	$R$	$D$	$P_{rain}$	$P_{dry}$
Value	0.01	20	0.05	0.15	$20\Delta t$	$20\Delta t$

한편, 시뮬레이션에서 경계조건은 no-slip 조건, 즉 경계를 통해 나가거나 들어오는 플럭스가 모든 경계에서 0이 되도록 하였다. 시뮬레이션 프로그램은 Visual Studio 2010에서 C++로 작성하였으며, 시스템 사양은 i7-3770 CPU 3.4GHz, 8GB이다. 지형의 3D 표현에는 GeoGen Studio를 이용하였다.



### 3.3.2 효과적인 $K_c$ , $K_v$ 의 값

[Fig. 4]에서도 짐작할 수 있듯이 물의 속도가 큰 곳에서 침식량이 많아야 물의 줄기가 점점 세지고 강 네트워크 모양이 형성될 수 있다. 침식의 양은 퇴적물 수용상수  $K_c$ 와 침식 강도  $K_v$ 에 의해 정해지므로 적당한 값을 찾기 위해 여러 값으로 실험하였다. 그 결과 [Table 2]에 나타난 것과 같이 강 네트워크 모양이 잘 형성되는 값을 찾을 수 있었다. 대략  $K_v \approx 0.1$ ,  $K_c \approx 10 \sim 1000$  정도에서 좋은 결과였는데, 이는  $K_c$ 가 클수록 같은 양의 물에 더 많은 퇴적물이 녹을 수 있으며,  $K_v$ 가 클수록 같은 속도에 대해 더 많은 퇴적물이 생성되기 때문이다. 너무 값이 작으면 침식의 강도가 약해 오랜 시간이 걸리게 되며, 너무 큰 값이 되면 시뮬레이션의 안정성이 깨지거나 물의 속도가 0이 아닌 곳의 침식이 너무 강하여 짧은 골짜기만 생기고 이들이 연결되어 긴 줄기가 형성되지 못하므로 알맞은 범위가 존재하는 것으로 이해할 수 있다. 단, 여기서  $K_c$ 와  $K_v$ 의 값은 [Table 1]의 특정 조건하에서 구한 것이므로 일반성을 띠는 것은 아니다. 다만 자연스러운 모양의 지형 생성이 적당한 계수일 때만 가능함을 나타내기 위하여 제시하는 것이다. [Table 2]의 대표적인 두 경우를 [Fig. 5]에 나타내었다.



[Fig. 5] Terrain form after erosion: upper( $K_c = 0.1$ ,  $K_v = 1$ ), lower( $K_c = 100$ ,  $K_v = 0.1$ ); 2000  $\Delta t$  iteration

### 3.3.3 열적 침식과 산 모양의 생성

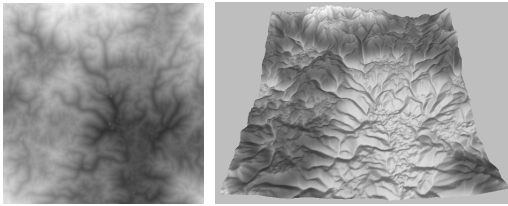
앞에서 강의 네트워크를 형성하기에 알맞은 계수값을 알아보았는데, 대표적인 경우인  $K_c = 100$ ,  $K_v = 0.1$  일 때의 지형의 3D모습을 보면 물의 흐름은 작은 개천에서 시작하여 점차 합쳐지며 큰 줄기가 되는 자연스러운 모양을 하고 있지만 물이 흐르는 곳만 깊이 패인 모양이어서 전체적으로 산과 강이 어우러진 대규모 지형의 모습으로 보기에 일반적으로 어렵다.

실제 자연에서는 개천이 그 주변을 오랜 세월 동안 깎아내어 V자의 넓은 골짜기를 만들며 산이 형성되는데 위의 모델에서는 물이 많이 흐르는 부분만 계속 깎이므로 좁고 깊게 골짜기가 만들어지고 있는 것이다. 3.2.6의 열적 침식을 도입하면 이를 해결하여 좀 더 자연스러운 지형을 만들 수 있다. 즉 좁고 깊은 골짜기 가장자리의 기울기가 매우 큰 부분이 열적 침식의 기울기 완화 작용의 결과로 기울기가 완화되어 골짜기의 단면 모양이 점차 V자 모양으로 변하게 된다.

$\tan\beta = 0.5$ 의 열적 침식을  $K_t = 1.0$ 의 강도로 추가한 결과 [Fig. 6]와 같이 물줄기의 네트워크가 더 많이 합쳐져 굵은 줄기가 형성되며 그 사이는 산과 같은 모양이 되는 것을 볼 수 있다.

[Table 2]  $K_c$  and  $K_v$  values and terrain forms

$K_c \backslash K_v$	0.001	0.01	0.1	1	10
0.1	거의 원형	거의 원형	거의 원형	문드러짐	발산
1	거의 원형	부분적 개천모양	실개천	문드러짐	발산
10	거의 원형	부분적 개천모양	실개천 네트워크	문드러짐	발산
100	거의 원형	부분적 개천모양	실개천 네트워크	구멍같이 패임	발산
1000	거의 원형	부분적 개천모양	실개천 네트워크	발산	발산



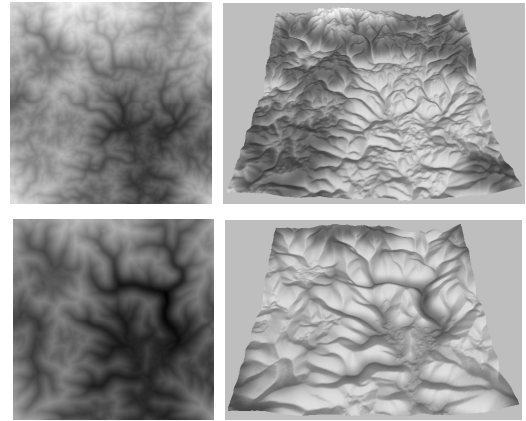
[Fig. 6] Result of hydraulic and thermal erosion ( $K_c = 100$ ,  $K_v = 0.1$ ,  $K_t = 1.0$ ,  $\tan\beta = 0.5$ ,  $3000\Delta t$  iteration)

또한 열적 침식의  $\tan\beta$  값을 조정하면 지형의 확대 또는 축소 효과를 얻을 수 있다. 예를 들어  $\tan\beta$  값을 작게 하면 기울기가 완만하게 되므로 골짜기 간의 간격이 멀어져 확대된 지형 모양이 된다.

### 3.3.4 큰 $K_c$ 값으로 생기는 문제 해결 방안

이상에서 시뮬레이션의 안정성 범위 내에서 최대한 빨리 침식이 일어나도록  $K_c$ 의 값을 크게 하여 강의 네트워크를 생성하는 것이 가능함을 보았다. 그러나 큰  $K_c$ 의 값 때문에 물에 녹은 퇴적물의 부피가 물의 부피보다 훨씬 클 수 있고 ( $S_{i,j} \gg W_{i,j}$ ), 따라서 물이 증발하는 과정에서 이 퇴적물이 침전되면 물의 부피보다 큰 지면이 생성된다. 물이 고이지 않는 곳에서는 문제가 없으나 물이 고이는 곳에는 비현실적 현상이 발생할 수 있고 많은 회수의 이터레이션을 할 때 발산할 수 있는 요인이 된다.

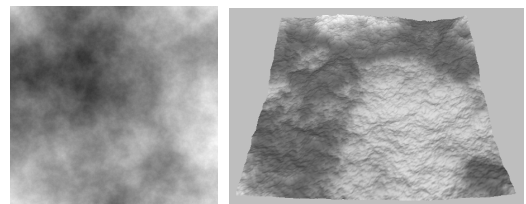
이 문제를 피할 수 있는 방법으로 다음과 같은 간단한 방법을 생각할 수 있다. 즉 퇴적물이 침전될 때(eq. 15) 원래보다 부피가 줄어들며 침전되게 하는 것이다. 이 비율을  $1/K_c$ 로 두고 다시 시뮬레이션한 결과가 [Fig. 7]의 위 그림인데 [Fig. 6]에 비해 호수에서 침전에 의해 생긴 지형이 많이 사라져 개선된 것을 볼 수 있다. 아래 그림은  $10,000\Delta t$ 의 시간이 지난 후의 결과인데 침식에 의해 강의 폭이 넓어지고 작은 지류들이 단순하게 정리되는 것을 볼 수 있다.



[Fig. 7] Result of hydraulic and thermal erosion ( $K_c = 100$ ,  $K_v = 0.1$ ,  $K_t = 1.0$ ,  $\tan\beta = 0.5$ ;  $3000\Delta t$ (upper),  $10000\Delta t$ (lower) iteration)

### 3.3.5 기존 모델과의 비교

Mei 등의[14] 방법은 속도 의존 침식 대신 화학적 용해 방식을 사용한 점과 열적 침식이 고려되지 않은 점에서 본 논문의 방법과 다르다. [14]의 방법에 따라 매  $\Delta t$ 마다  $(S_{i,j}^{\max} - S_{i,j}) \times 0.001$  만큼 퇴적물이 되는 경우를 시뮬레이션한 결과는 [Fig. 8]과 같다.



[Fig. 8] Hydraulic erosion by existing method(ref.[14]);  $K_c = 0.1$ ,  $2000\Delta t$  iteration

[Fig. 8]은 전형적인 결과를 보여주고 있는데, 곳곳에 침식이 많이 진행되었으나 강줄기는 전혀 형성되지 않고 있음을 알 수 있다. 그림에 표시하지는 않았지만 이 경우도 플렉스의 모양은 [Fig. 4]의 아래와 거의 비슷하게 나타난다. 그러나 속도 의존 침식이 아니어서 강줄기가 형성되는 방향으로 진행되지 않는 것이다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 다른 방법으로 생성된 초기 지형에 물의 속도에 따른 침식과 열적 침식을 적절한 시뮬레이션 계수 값을 통해 적용하므로써 산 및 강의 네트워크가 자연스럽게 형성된 지형을 생성하는 방법을 연구하였다.

물의 흐름에는 shallow water model의 파이프 모델을 적용하였고, 플릭스 맵의 모양이 물줄기 모양이 되도록 하는 적정 계수 값을 시뮬레이션을 통해 실험적으로 구하였다. 물줄기에 따른 침식을 유도하기 위해 물의 속도에 의존한 침식 모델을 사용하였고, 이를 통해 나뭇가지 모양의 강 네트워크가 생성될 수 있는 적절한 퇴적물 수용계수 등의 범위를 구하였다. 열적 침식을 도입한 결과 보다 자연스러운 강과 산 모양을 만들 수 있음을 보였으며, 시뮬레이션의 효율성을 위해 택한 비현실적 퇴적물 수용계수 값으로 인한 문제점을 완화하는 간단한 방안을 제시하였다.

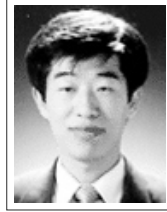
이상의 방법은 강과 산 등의 배치가 사실적이어야 하는 대규모의 지형을 시뮬레이션으로 생성하는데 이용될 수 있을 것이다.

## REFERENCES

- [1] Mandelbrot B. B., "The Fractal Geometry of Nature", W.H. Freeman and Company, 1983.
- [2] I. S. Baek, K. H. Um, K. E. Cho, "A 3D Terrain Reconstruction System using Navigation Information and Realtime-Updated Terrain Data", Journal of Korea Game Society, Vol. 10, No. 6, pp. 157-168, 2010.
- [3] I. W. Jo, E. S. Lee, B. S. Shin, "Terrain Rendering Using Vertex Cohesion Map", Journal of Korea Game Society, Vol. 11, No. 1, pp. 131-138, 2011.
- [4] Olsen, J., "Realtime Procedural Terrain Generation", Technical Report, University of Southern Denmark, 2004.
- [5] R. M. Smelik, K. J. de Kraker, S. A. Groenewegen, T. Tuteneel and R. Bidarra "A Survey of Procedural Methods for Terrain Modelling", Proceedings of the CASA Workshop on 3D Advanced Media In Gaming And Simulation, 2009.
- [6] R. M. Smelik, T. Tuteneel, R. Bidarra, B. Benes, "A survey on procedural modelling for virtual worlds", Computer Graphics Forum Vol. 33 No. 6, pp. 31-50, 2014.
- [7] Zhou H., Sun J., Turk G., Rehg J. M., "Terrain synthesis from digital elevation models", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 13, No. 4, pp. 834 - 848. 2007.
- [8] Hnaidi, H., Guerin, E., Akkouche, S., Peytavie, A., and Galin, E., "Feature based terrain generation using diffusion equation", In Computer Graphics Forum: Proceedings of Pacific Graphics, Vol. 29, No. 7, pp. 2179-2186, 2010.
- [9] Doran J., Parberry I., "Controlled procedural terrain generation using software agents", IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games 2, 2, pp. 111 - 119, 2010.
- [10] Belhadj F., Audibert P., "Modeling landscapes with ridges and rivers: Bottom up approach", In GRAPHITE '05: Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia, ACM, pp. 447 - 450, 2005.
- [11] Genevaux J.D., Galin E., Guerin E., Peytavie A., Benes B., "Terrain generation using procedural models based on hydrology", ACM Transactions on Graphics 32.4, 4, 2013.
- [12] J. O'Brien and J. K. Hodgins, "Dynamic simulation of splashing fluids", In Proceedings of Computer Animation'95, pp. 198 - 205, 1995.
- [13] Chiba N., Muraoka K., Fujita K., "An erosion model based on velocity fields for the visual simulation of mountain scenery", The Journal of Visualization and Computer Animation, Vol. 9, No. 4, pp. 185 - 194, 1998.
- [14] Mei X., Decaudin P., Hu B. G., "Fast hydraulic erosion simulation and visualization on GPU", In Proc. of Pacific Graphics, pp. 47

- 56, 2007.

- [15] Stava O., Benes B., Brisbin M., Krivanek J., "Interactive Terrain Modeling Using Hydraulic Erosion", Proceedings of the 2008 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation pp. 201-210, 2008.
- [16] Musgrave F. K., Kolb C. E., Mace R. S., "The synthesis and rendering of eroded fractal terrains", In Proc. of SIGGRAPH '89, pp. 41 - 50, 1989.
- [17] Kelley A. D., Malin M. C., Nielson G. M., "Terrain simulation using a model of stream erosion", Vol. 22, No. 4, pp. 263-268, ACM, 1988.
- [18] Prusinkiewicz P., Hammel M., "A fractal model of mountains with rivers", In Proc. of Graphics Interface, Vol. 93, pp. 174-180, 1993.
- [19] Nagashima K., "Computer generation of eroded valley and mountain terrains", The Visual Computer, Vol. 13, No. 9, pp. 456-464, 1997.
- [20] B. Benes and R. Forsbach, "Visual simulation of hydraulic erosion", Journal of WSCG, Vol. 10, pp. 79 - 86, 2002.
- [21] B. Benes, "Real time erosion using shallow water simulation", VRIPHYS, pp. 43-50, 2007.
- [22] Green, W.H. and G. Ampt, "Studies of soil physics, part I - the flow of air and water through soils.", J. Ag. Sci. 4:1-24, 1911.



한 영 덕(Han, Yeong Deok)

약력 : 1993 한국과학기술원 물리학 박사  
1993 국과학기술원 연수 연구원  
1994- 우석대학교 정보보안학과 교수

관심분야 : 게임물리, 게임엔진, 게임그래픽