

Erosion Fractal 기반의 하천지형 보간 기법 개발

Development of Erosion Fractal-based Interpolation Method of River Morphology

황 의 호* / 정 관 수**

Hwang, Eui Ho / Jung, Kwan Sue

Abstract

In this study, a technique based on Fractal Theory with Erosion Model was developed to interpolate the river morphology data at the border area between river bed and river side where both surface and under water surveyings can not be committed easily. Three dimensional river morphology data along the Ara River was generated by the developed technique. The Ara River is an artificially constructed waterway for vessels between the Han River and West Sea of Korea. The result was compared with the survey data by RMSE of 0.384, while the IDW interpolation result has RMSE of 0.802. Consequently, the developed river morphology data interpolation technique using Erosion Model based Fractal Theory is conceived to be superior to the IDW which has been generally used in generating the river morphology data.

Keywords : Erosion, Fractal, River morphology, LiDAR, Interpolation method

요 지

본 연구에서는 프랙탈 이론의 하천유역분야 적용성을 고찰을 통하여 하상의 불연속 경계면을 보간하기 위한 침식모형기반 프랙탈 기법을 제시하고, 이를 이용하여 적용 대상인 하상 경계부분의 3차원 지형을 생성하여 실제 측량성과와의 비교, 공간 통계학적 분석을 통해 이론의 적용성을 검증하였다. 침식모형기반 프랙탈 기법의 검증을 위해 표본을 추출하여 실제 지형측량 결과 및 IDW 기법에 의한 보간 지형과의 분산분석을 수행하였다. 표본집단이 모집단과 동일 분산을 갖고 있는지에 대한 표고값 간의 F-검정 결과, 유의확률 0.501로 유의수준 0.05보다 큰 것으로 분석되어 표고의 표준차이는 없는 것으로 나타났다. 분산분석 결과 RMSE는 IDW 및 침식모형기반 프랙탈 기법 각 0.802, 0.384로 침식모형기반 프랙탈 기법이 우수한 것으로 나타났다. 이러한 결과로 부터 3차원 정밀 하상 지형 생성 방법으로 침식모형기반 프랙탈 기법의 적용성이 우수한 것으로 사료된다.

핵심용어 : 침식, 프랙탈, 하상지형, LiDAR, 보간기법

1. 서 론

하천관리 분야에 있어 직관적이고 현실감 있는 의사결정 체계 구축을 위해 현재 3차원 하천관리체계 구축 연구가 활발히 진행되고 있다. 하천관리시스템은 기본적으로

홍수 재해 저감 및 수질사고 대응을 위하여 관련된 각종 자료를 수집, 분석하여 국민에게 정확한 재해 정보를 적시에 제공해야 한다. 이를 위해서는 신뢰성 있는 하천지형 자료를 구축이 선행되어야 하며, 고정밀 위성영상, LiDAR 측량 및 음향측심 측량 자료 등 첨단 기술을 적용한 자료

* 한국수자원공사 K-water 연구원 책임연구원 (e-mail: ehhwang@kwater.or.kr)

Principal Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Korea

** 교신저자, 충남대학교 토목공학과 교수 (e-mail: ksjung@cnu.ac.kr, Tel: 042-821-5675)

Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

확보가 필요하다.

일반적으로 하천의 주변지역 및 하상구조는 고정밀도의 위성 영상 또는 항공 센서 영상인 LiDAR 측량자료를 활용하여 3차원으로 모델링하여 표현하고, 하도구조는 하천의 측선별 횡단측량 및 음향측심 측량에 의한 횡단면에 대한 고도값을 이용하여 모델링하여 표현한다. 이 때 하상과 하도 구성 데이터를 융합 처리를 통한 다차원 공간정보로 구축하게 되는데, 수위가 유지되고 있는 상태에서는 하상과 하도의 경계면은 측량이 불가능한 한계점이 있다.

현재 측량 방법으로는 측량이 불가능한 하천의 횡단면의 하상과 하도의 경계면과 하천의 각 측선 사이의 종단면을 융합 처리하여 다차원 공간자료로 구성할 수 있는 해법이 필요하며, 측량하기 힘든 하상과 하도의 경계면에 대해서는 지형특성을 고려한 최적의 보간 및 모델링 기법 적용이 필수적이다.

디지털 지형 모델링 시 센서의 한계 또는 여러 센서 정보를 융합하는 과정에서 셀의 고도 데이터를 확정할 수 없는 경우가 발생되고 또한 관심 지역의 DTM(Digital Terrain Model)을 컴퓨터 화면상에 확대해서 보고자 할 경우에는 데이터가 없는 픽셀은 인위적으로 보간하여 표시할 수밖에 없다.

인접 픽셀 정보를 근간으로 새로운 픽셀 값을 보간하는 전통적인 방법으로는 Bilinear법과 Bicubic법, IDW 기법 등이 있고, 이 방법은 컴퓨터상에서 이미지를 확대할 때 자주 이용된다. Bilinear법과 Bicubic법은 고도가 완만한 모델에는 적합하지만, 특히 자연지형과 같이 무한의 상세함을 가지고 있는 곳에 적용하면 저역통과 필터(Low-pass filter)와 같은 역할로 인해 지형이 왜곡되는 문제점이 발생될 수 있다(권기욱, 2006).

이러한 기존 방법들의 문제점을 극복하여 보다 완성도 높은 하천의 3차원 정밀 지형 자료를 생성하기 위한 새로

운 보간 기법에 대한 연구가 필요하다. 또한 하천관리에 기본이 되는 하천지형자료를 실제 지형에 가깝게 구축하기 위해서는 자연 지형의 형성 과정인 침식과 퇴적 작용을 모형화하여 정밀도와 정확도를 향상시킬 수 있는 기법에 대해서도 연구가 필요하다(황의호, 2012).

2. 프랙탈 지형보간 이론

2.1 프랙탈 브라운 운동

Mandelbrot의 fBm은 자연에서 찾을 수 있는 형상들을 모델링하기 위한 효과적인 수학적 방법이다. fBm은 브라운 운동을 확장한 것으로 가우시안 랜덤 함수로 정의되는 확률적 프로세스이다(Voss, 1985). 브라운 운동을 $\frac{1}{f}$ 노이즈라고 하는 반면 fBm을 $\frac{1}{f^{\beta}}$ 노이즈라고도 한다. Mandelbrot은 산의 윤곽선 모양이 브라운 운동과 유사하다는 것을 추론하여 브라운 운동을 2차원으로 확장한 뒤, 이를 이용하여 프랙탈 지형을 근사하였다. 그 후, 좀 더 일반화된 프랙탈 지형을 모델링 할 필요성에 의해 fBm을 제안하게 된 것이다. fBm은 매개변수 h를 통하여 움직임의 거칠음 정도를 조정할 수 있으며, 브라운 운동이 갖고 있던 통계적 자기유사성을 그대로 유지하고 있다. 랜덤 프랙탈을 이용하여 모델링 되었던 대표적인 자연물로는 산, 구름과 해안선 등이 있으며, 이들은 자기 유사성의 특징을 갖고 있다(Batty et al., 1994).

프랙탈 차원은 표면의 굴곡에 대한 기준을 제공한다. 또한 작은 허스트 값은 높은 프랙탈 차원을 가지고 있다(Fig. 1).

fBm의 특성을 나타내기 위해서는 하나의 변수 t를 가지는 일차원적 프랙셔널 브라운식 $X(t)$ 를 고려해야 한다. $X(t_2) - X(t_1)$ 의 차이는 가우스편차 분포를 따른다(Neidhold

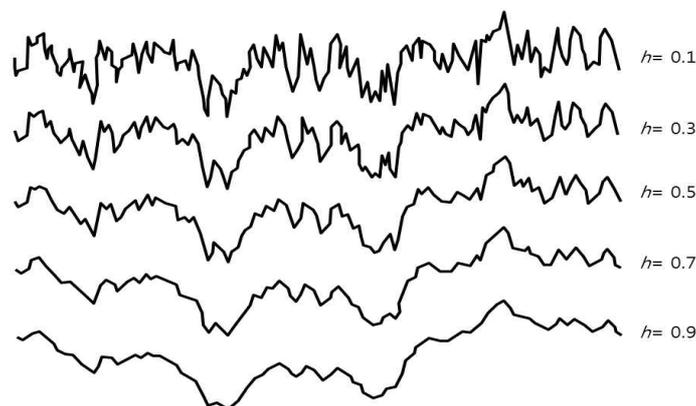


Fig. 1. Fractal Brownian Motion and Hurst Exponent (h)

et al., 2005).

$$VAR = \langle |X(t_2) - X(t_1)|^2 \rangle > \propto |t_2 - t_1|^{2h} \quad (1)$$

여기서, “<”과 “>”은 함수 X(t)의 많은 표본들의 기대값 범위를 나타내고, 매개변수 h는 0과 1 사이의 값을 가진다. 또한 평균제곱의 차이는 단지 시간(time)의 차이 ($t_2 - t_1$)에 기인하고, 모든 t의 값은 통계적으로 등가적이다. h값이 1/2일 때 브라운 운동과 유사해진다.

$$VAR \propto |\Delta t| \quad (2)$$

2.2 중간점 변위 방법

중간점 변위 방법은 1920년대 초기에 N. Wiener에 의해 브라운 운동을 정규화하기 위해 적용되었던 재귀적 방법을 이용한 것이다. 이 방법은 Mandelbrot에 의해 많은 프랙탈 적용 사례에서 묘사되었다. 지형 보간방법에서 중간점 변위 방법은 Fourier, Fussell 그리고 Carpenter에 의해 널리 일반화되었다(Barnsley and Sloan, 1988).

0과 1 사이의 시간을 매개변수로 하는 함수 X가 있을 경우, X(0)=0으로 하고 평균 0과 분산 δ^2 를 갖는 Gaussian 랜덤 변수의 예로서 X(1)=1을 취한다.

$$\text{var}(X(1)-X(0))=\delta^2 \quad (3)$$

$$\text{var}(X(t_2)-X(t_1))=|t_2-t_1| \delta^2 \quad (4)$$

$$X(1/2)-X(0)=1/2(X(1)-X(0))+D_1 \quad (5)$$

여기서, D_1 은 평균 0과 분산 Δ_1^2 를 갖는 Gaussian 랜덤 offset이다.

$$\text{var}(X(1/2)-X(0))=1/4 \text{ var}(X(1)-X(0))+\Delta_1^2=1/2\delta^2 \quad (6)$$

그러므로 $\Delta_1^2=1/4\delta^2$ 이다. 같은 방식으로 전개하면

$$X(1/4)-X(0)=1/2(X(0)-X(1/2))+D_2 \quad (7)$$

$\text{var}(X(1/4)-X(0))=1/4 \text{ var}(X(1/2)-X(0))+\Delta_2^2=1/4\delta^2$, $\Delta_2^2=1/8\delta^2$ 이 된다.

X(1/2)-X(0)와 X(1/2), 그리고 X(1/2)-X(1/4)와 X(1/4)-X(0)는 각각 Gaussian이고 평균 0을 갖는다. 같은 방식으로 계속하여 D의 분산을 구하면 다음과 같다.

$$\Delta_n^2=(1/(2^{n+1}))\delta^2 \quad (8)$$

이렇게 해서 시간차인 $\Delta t=2^{-n}$ 에 상응하여 Δt 에 비례하는 분산의 랜덤요소 $2^{-(n+1)}\delta^2$ 을 더한다. 이것을 확장하면 다음과 같은 식을 얻는다(Barnsley and Sloan, 1988).

$$\text{var}(X(t_2)-X(t_1))=|t_2-t_1| \delta^2 \quad (9)$$

$$\Delta_n^2=(\delta^2/(2^n)^H)(1-2^{-1}) \quad (10)$$

$$\text{var}(X(1/2)-X(0))=\text{var}(X(1)-X(1/2))=(1/2)\delta^2 \quad (11)$$

따라서 중간점 변위는 중간점을 기준으로 양 구간에서 같은 분산을 갖고 좌우균형을 이룬다. 다음은 중간점 변위 방법을 이용하여 프랙탈 곡선을 갖기 위한 알고리즘을 나타낸다.

랜덤 중간점 변위 방법을 이용하여 생성되는 프랙탈 곡선 방법은, 먼저 재귀적으로 구간을 나누고 그 중간점에서 스칼라 값을 산출한다. 이 값을 재귀적으로 각 단계에서 그 중간점의 변위로 받아들여 초기 구간에 대한 정규 벡터(normal vector)를 따라 그 중간점으로부터 하나의 offset으로 사용된다. 이 offset의 d는 다음과 같다.

$$d=s \times \text{GAUSS}(sd, tm) \quad (12)$$

여기서, GAUSS는 평균이 0이고 단위 분산을 갖는 Gaussian 랜덤 값을 돌려준다. sd는 seed이고 tm은 구간의 중간값 즉, $(t_2+t_1)/2$ 이고, s는 현재의 표준편차로 다음과 같이 구한다.

$$s=K \times 2^{-H} \quad (13)$$

여기서, K는 scale의 요소, H는 프랙탈 차원이다.

중간점 변위방법의 적용 모식도는 Fig. 2와 같다. 표면의 모서리 점을 각각 A, B, C, D라고 명명하고 초기 높이 값을 H(A), H(B), H(C), H(D)라 한다. 각 옆선의 중간점은 길이에 비례한 양만큼 랜덤하게 위치를 바꾼다. 예를 들어, (A+B)/2 점의 높이는(H(A)+H(B))/2의 값에 A점에서부터 B점까지의 길이에 비례하여 랜덤하게 이동된 값을 더해준다. 같은 방법을 모든 4면에 동일하게 반복한다. 중심점의 높이는 모서리 4점의 높이 값의 평균이다.

$(H(A)+H(B)+H(C)+H(D))/4$ 에 옆선의 길이의 총량에 비례하여 랜덤 이동값을 더 해준다. 원래 표면의 5개의 이동점은 Fig. 2에서 보여진다. 이동된 점들은 4개의 새로운 표면의 형식과 연관되어 있다. 위의 과정은 요구된 프랙탈 그리드 표면이 생성될 때까지 반복해야 한다.

2.3 다이아몬드-격자형 방법

자연에서 불규칙적인 성질을 갖는 지형을 모델화하는 여러 가지 프랙탈 기법은 일반적으로 Poisson faulting, Fourier filtering, diamond & square, mid-point displacement, successive random addition, summing band-

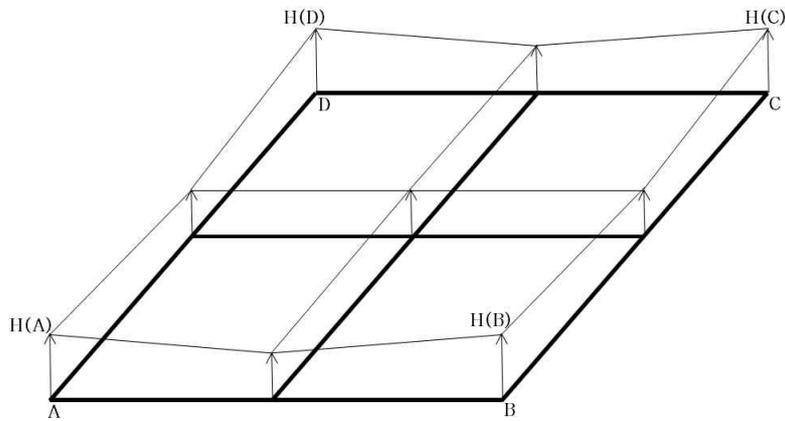


Fig. 2. Mid-point Displacement Method (Mandelbrot, 1977)

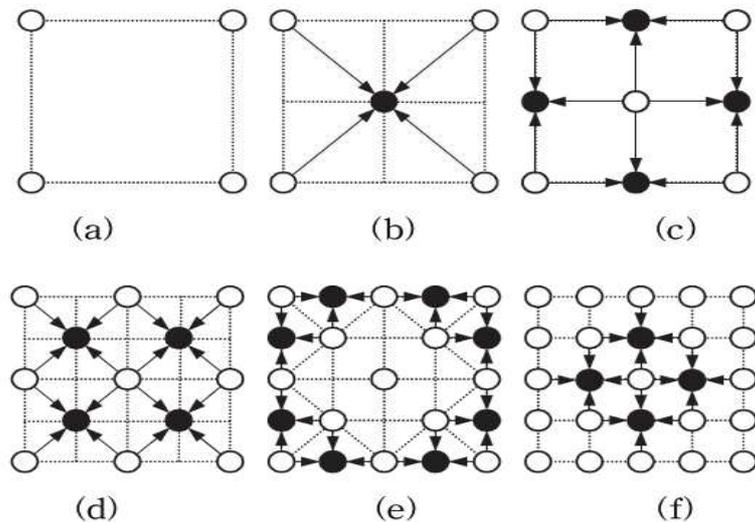


Fig. 3. Process of Diamond & Square Method (Mandelbrot, 1977)

limited noise 등의 여러 가지 기법들이 있으나, 그 중에서 최근 많이 사용되고 있는 프랙탈 기법으로는 diamond & square 및 mid-point displacement 방법이 있다.

Diamond & square 방법에서 격자의 수는 4개의 계수에 의한 수만큼 증가한다. 그래서 i 번 반복 후의 격자의 수는 4^i 이며, 각 모서리의 점의 수는 2^{i+1} 이다.

구현 과정은 4개 모서리의 고도 평균값에 오프셋(offset)을 더해 두 대각선 이 만나는 지점(사각형의 중점)의 고도를 발생시킨다. 이 결과 도형은 아래 Fig. 3(b)와 같은 다이아몬드 모양이 된다. 다음으로는 Fig. 3(c)와 같이 인접한 3개 셀의 고도 평균값에 오프셋을 더해 가장자리 셀의 고도를 만든다. 이 결과로 4개의 작은 사각형이 만들어진다. 이후 원하는 해상도의 지형을 만들어낼 때까지 Figs. 3(d)~(f)의 과정을 반복하게 된다.

3. 침식 프랙탈 적용 기법 개발

3.1 대상지역 선정

본 연구에서 개발된 침식모형기반 프랙탈 하상 보간 기법을 평가하고 그 적용성을 검토하기 위한 대상구역으로 비교적 정밀 하천지형 측량(LiDAR, 항공사진 측량 등) 자료 및 최신 하상단면자료의 확보가 용이한 아라천 유역의 본류구간을 선정하였다.

아라천은 경인운하사업 일환으로 인공적으로 건설된 국가하천으로 서울시 강서구 개화동 한강분기점에서 인천 서구 오류동 해안으로 유하하여 서해로 유입되는 국가하천이다. 총 유역면적 157.14 km², 유로연장 35.03 km인 아라천 유역은 굴포천, 시천천과 같은 지류하천을 포함하고 있다(한국수자원공사, 2008).

본 연구를 통해 개발된 하상 보간 알고리즘 적용 대상



Fig. 4. Map of Study Area

지역의 위치는 아라천 본류구간 및 연결수로 1.2km을 대상으로 그 위치는 Fig. 4에 나타난 바와 같다.

3.2 침식 프랙탈 알고리즘 구성

3.3.1 정밀지형측량 자료 이용 하천지형 처리 기법

본 연구에서 사용한 공간데이터인 LiDAR 측량 자료(제내지: '08년, 제외지: '11년)와 하상단면측량 자료, 고해상도 항공사진을 이용하였으며, 구축한 정밀 지형자료를 기초로 하여 지형보간 알고리즘을 개발 및 적용·검증 수행하였다. 구축한 LiDAR 측량 자료는 국토지리정보원의 '08년 다차원공간정보 구축사업 일환으로 구축된 자료와 아라뱃길 사업으로 인해 변화된 하천지형을 반영하기 위하여 '11년 신규 측량을 통해 정밀 지형자료를 구축하였다. LiDAR 측량의 특성상 수체로 구성된 하상지형에 대한 표고자료 확보는 불가능하기 때문에 아라뱃길 사업 준설 후 횡단면 측량한 자료를 활용하여 하상지형을 융합하였다.

일반적으로 하상지형 측량방법으로는 수심이 깊고 선박운항이 가능한 하천에서는 음향측심 측량 방법을 사용하며, 수심이 얇고 선박운항이 곤란한 하천에서는 횡단면 고저 측량 방법을 통해 하상지형 자료를 취득하게 된다. 음향측심 측량 방법의 경우 수심이 얇은 지역은 관측이 어려워 미계측 지형이 발생하게 되며, 횡단면 측량 방법은 하천기본계획의 경우 종방향 400~500m 간격, 횡방향 1~20m 간격으로 측량하게 됨으로써 관측지점 구간 간격에서 발생하는 지형의 변화에 대하여 정밀한 지형자료 확보가 곤란하다.

따라서 본 연구에서는 기존 음향측심 및 횡단면 측량 방법을 통해 취득한 지형자료를 활용하여 미계측 하상지형을 실제 지형에 가깝게 생성하기 위하여 알고리즘을 개발하고자 하였으며, 우선적으로 측량된 지형자료를 알고리즘 개발에 활용하기 위하여 Fig. 5와 같이 레이어 융합 과정과 기초지형 자료 처리 과정을 통해 지형자료를 생성하였다.

3.3.2 침식기반 하천지형 생성 알고리즘 구현

현재 국가 및 지방하천의 하천기본계획에서는 하천의 하상지형 현황 측량 방법으로 고저측량에 의한 종·횡단 측량이 수행되고 있으며, 댐저수지의 경우 일반적으로 음향측심 측량 장비로 하천의 종단면과 횡단면을 일정 간격으로 실측한다.

본 연구에서는 기존 측량 장비 및 직접법에 의해 측량이 불가능한 하도의 횡단면 경계면을 보간하기 위한 알고리즘을 구현하고자 한다. 이를 위해 기초 단면 측량자료를 활용하여 우선적으로 랜덤 기반의 프랙탈 기법을 적용하여 Mid-point displacement, Diamond & square method 방법을 활용하여 하상과 하도 경계면에 대해 3차원 지형을 생성한다. 그리고 하천의 단면과 단면 사이의 각 구간별 지형을 보간하고 프랙탈 적용을 위한 기본 지형을 구축한다. 최종적으로 유량, 유속, 토성 등의 특성 값을 반영하여 통계적 기법을 활용하여 침식 기반의 프랙탈 기법을 적용한다.

랜덤 기반 프랙탈 지형 생성은 기존 지형보간 방법은 측량된 참조점(고도값)을 활용하여 각 참조점간의 거리와 영향범위 등을 고려하여 지형을 보간하는 반면에 프랙탈

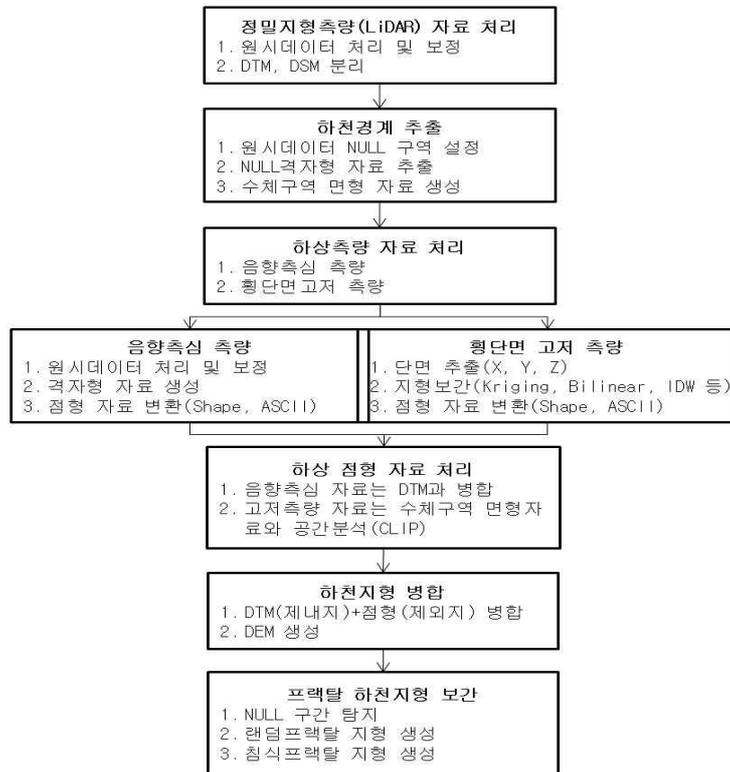


Fig. 5. High-precision Topographic Data Processing

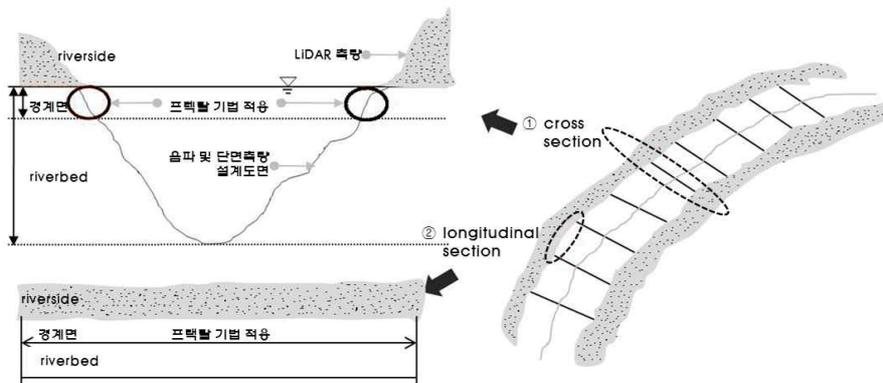


Fig. 6. Areas for Erosion Model Based Fractal Interpolation

기반 지형 보간 기법은 지형의 유사성을 근간으로 지형을 실제 지형과 유사하게 재현하는 기법이다.

이러한 프랙탈 기법을 기반으로 측량이 불가능한 하천의 횡단면 하상과 하도의 경계면을 생성하고자 하며, 랜덤 기반의 프랙탈 차원의 조절에 따라 지형의 변화가 어떠한 형상으로 나타나는지 검증하고자 한다.

제외지의 단면 및 음향측심 측량에 의해 취득한 하상단면과 제내지의 LiDAR 및 정밀 지형측량에 의해 구축된 지형의 접합면 상에 발생하는 부정합 문제를 모식화 하였다(Fig. 6). 본 연구에서는 보다 정밀한 제내·외지의 지

형자료를 생성하여 1차원, 2차원, 3차원 수치해석의 기초 자료를 제공할 뿐만 아니라, 분석 자료의 검증 및 시뮬레이터를 통해 하천에서의 기작을 모의하여 의사결정지원에 효율적으로 활용하고자 한다.

랜덤 기반 프랙탈 적용 과정은 크게 4단계로 프랙탈 구간 제어, 프랙탈 진폭 제어, 프랙탈 적용구간 정의, 프랙탈 구간 재구성으로 구성된다.

프랙탈 구간 제어는 하천의 하상과 하도 사이의 경계면 구간을 몇 개로 나누어 적용할 지를 설정한다. 프랙탈 진폭 제어는 하천의 하상과 하도 사이의 경계면 구간의 진

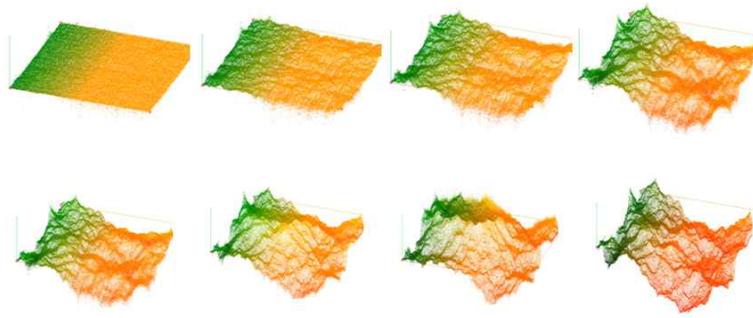


Fig. 7. Terrain Generation by Fractal Amplitude Control

폭 제어를 통해 지형 구조의 거칠기를 표현할 수 있다.

프랙탈 적용 구간 정의는 하천의 하상과 하도 사이의 경계면 구간을 임의로 설정하여 적용한다. 프랙탈 구간 재구성은 2차원 횡단면에서 프랙탈 기법을 적용할 경계면 구간을 지정하고 그 구간에 대하여 랜덤 기반으로 재구성한다. 이 때 중간점 대체 알고리즘(Midpoint displacement)과 다이아몬드 스퀘어 알고리즘(Diamond & square method)을 적용한다. 프랙탈 보간 지형의 진폭은 지형의 거칠기를 나타내며 거칠기 계수가 적을수록 거칠기는 커지고, 거칠기 계수가 클수록 매끄러운 형상을 나타내게 된다.

침식 기반 프랙탈 적용 과정은 크게 4단계로 유량배분, 수체거동, 유속 계산, 침식과 퇴적 산정으로 구성된다.

유량 배분(Water Allocation)은 각 격자의 높이를 기반으로 Eq. (14)에 의해 계산된다.

$$W = W_{\min} + W_0 \cdot \frac{H_0}{H_{\max}} \quad (14)$$

여기서, W_0 만큼 유량이 분포될 때 W_{\min} 은 가장 낮은 셀에 분포된 유량이다. W_0 은 가장 높은 셀에 더해질 수 있는 최대 유량이며 H_0 와 H_{\max} 는 현재 높이와 최대 높이를 나타낸다.

수체 거동(Water Movement)은 현재 셀의 유량을 W 라고 하면 주변의 낮은 셀로 이동하는 유량은 Eq. (15)에 의해서 구해진다. $\Sigma(\Delta h)$ 은 현재 셀과 주변의 낮은 모든 셀의 높이 차이이다. 주변 셀로 이동하는 유량은 현재 셀과 주변 셀의 높이 차의 비율이다.

$$\Delta W = W \cdot \frac{\Delta h}{\Sigma(\Delta h)} \quad (15)$$

여기서, ΔW 만큼의 물이 한 셀에서 주변 셀로 이동할 때 새로운 유량, W_{new} 은 기존 셀의 유량과 ΔW 의 합이며 속도(\vec{v}_{new})는 다음의 공식에 의해서 계산된다.

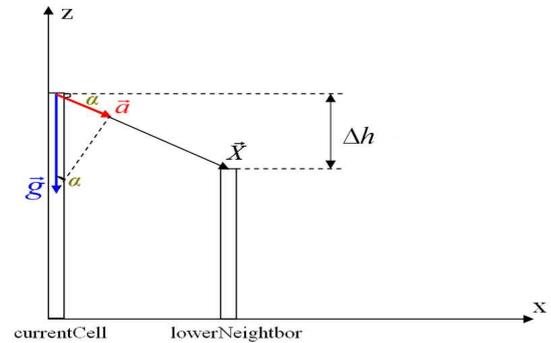


Fig. 8. Schematic Diagram of Elevation Difference Between the Cells

$$W_{\text{new}} = W_{\text{dest}} + \Delta W \quad (16)$$

$$\vec{v}_{\text{new}} = \frac{W_{\text{dest}} \cdot \vec{v}_{\text{dest}} + \Delta W \cdot \vec{v}_{\Delta W}}{W_{\text{new}}} \quad (17)$$

여기서, \vec{v}_{dest} 는 인접 도달 셀의 속도이며, $\vec{v}_{\Delta W}$ 는 ΔW 의 속도를 나타낸다.

가속도는 중력 벡터로부터 아래의 공식에 의해서 구해진다. X 는 현재 셀에서 그것의 이웃 셀로의 벡터이다. Δh 는 두 셀 간의 높이 차이이다.

$$\vec{a} = \vec{g} \cdot \sin \alpha, \quad g \approx 9.8 \text{ m/s}^2 \quad (18)$$

$$\sin \alpha = \frac{\Delta h}{|X|}$$

\vec{X} 는 현재 셀에서 주변의 낮은 셀로 향하는 벡터이며 Δh 는 두 셀의 높이 차이이다. 각 셀의 높이는 지형의 높이와 유량으로 간주되며 유속은 가속도에 의해서 재산정되며 다음의 공식에 시간 간격마다 구해진다.

$$\vec{v}_{t+\Delta t} = \vec{v}_t \cdot (1 - K_A) + \vec{a}_t \cdot \Delta t \quad (19)$$

여기서, 각 셀의 높이는 $K_A \in [0 \dots 1]$ 는 지형과 수체 간의 미끄러짐 마찰계수이다.

Sediment Transport Capacity는 Force-based erosion 알고리즘을 적용하여 Eq. (20)에 의해 계산된다.

$$S_k^m(x, y) = C_k \cdot \|\vec{V}(x, y)\| \cdot \sin(\alpha)(x, y) \quad (20)$$

여기서, C_k 는 Sediment capacity 상수이며 토성에 따라 정해진다. α 는 지형의 기울어진 각도이며, $v(x, y)$ 는 유속이다. C_k 는 바위의 경우 0.0001이며 모래의 경우 0.1이다 (Stava et al., 2008).

침식과 퇴적 산정(Erosion and Deposition)은 수압에 의한 침식 함수는 각각의 시뮬레이션 단계에서 침전물이 침전되는지 분해되어 사라지는 지를 결정한다. 침식 모델에서는 다음과 같은 재질 상수를 사용한다.

- Sediment Capacity Constant $K_c = 250$
- Deposition Constant $K_d = 0.05$
- Dissolving Constant $K_s = 0.04$

침전 용량은 S_{cap} 는 다음의 공식에 의해서 구해진다.

$$S_{cap} = K_c \cdot \Delta W \cdot |\vec{v}| \quad (21)$$

구해진 침전 용량은 실제 침전량과 비교하여 침식되는지 분해되는지를 결정한다. 침전 용량과 침전량을 비교하여 실제 침전량이 더 많으면 침식작용이 발생하며 반대의 경우에 분해 작용이 발생한다. 각각의 경우에 해당 셀의 침전물의 높이가 구해진다.

If $\Delta S > S_{cap}$, then deposit:

$$H' = H + K_d \cdot (\Delta S - S_{cap})$$

$$S' = S + \Delta S - K_d \cdot (\Delta S - S_{cap})$$

Otherwise, dissolve:

$$H' = H - K_s \cdot (S_{cap} - \Delta S)$$

$$S' = S + \Delta S + K_s \cdot (S_{cap} - \Delta S)$$

여기서, H, S 는 물이 흐르기 전에 셀의 높이와 침전물이며 H', S' 는 물이 흐르고 나서는 셀의 높이와 침전물이다. 즉 물이 흐르고 나서는 해당셀에 침전물이 퇴적되거나 지형이 침식되고 나서는 높이이다.

침전물의 높이에 의한 프랙탈 적용 과정에서 프랙탈의 높이는 주변 셀의 높이에 특정 구간범위 내에서의 높이값을 랜덤하게 더한다. 이 경우 구간범위는 실제 지형의 높이에 의한 고려없이 임의의 값을 지정한다. 하지만 위에서 언급한 절차와 같이 실제 셀의 침전물의 높이가 구해지면 임의의 구간값 대신 구해진 높이를 기반으로 실제 지형의 요소가 반영된 높이를 구할 수 있다. 아래의 공식에서 $\text{Rand}()$ 함수의 인자로서 구해진 셀의 침전물의 높이가 대입된다.

$$\text{프랙탈 높이} = (p[c].y + p[c+1].y) / 2 + \text{Rand}(H/20, H'/20)$$

여기서, $p[i]$ 는 선택 격자의 표고이며, $\text{Rand}()$ 는 침식을 고려한 랜덤프랙탈 표고를 나타내며, H' 는 표고를 나타낸다. 다음은 침식기반 프랙탈 알고리즘의 상세 적용 과정에 대하여 설명한 내용을 나타내고 있다.

3.3.3 개발 모형을 이용한 지형보간

본 연구에서 개발된 하천지형 생성 기법의 적용성 및 검토를 위하여 대상유역으로 비교 하도 구간 내에서 정밀 지형자료 보간을 위한 기초자료로는 LiDAR 측량 자료,

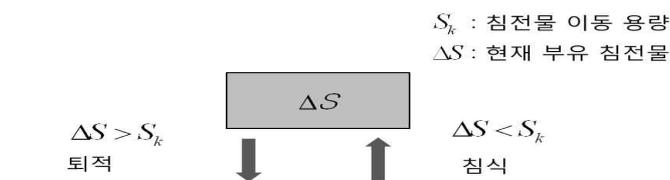


Fig. 9. Calculation Procedure of Erosion and Deposition

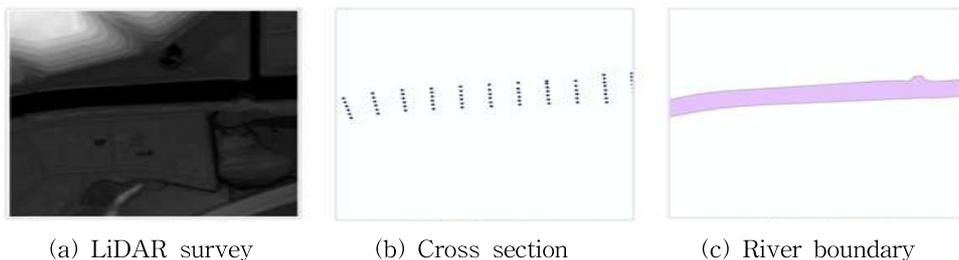


Fig. 10. Basic Data of River Bed

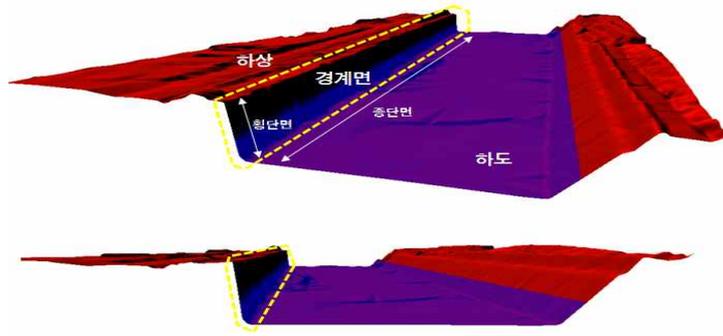


Fig. 11. Applicable Section of the Fractal

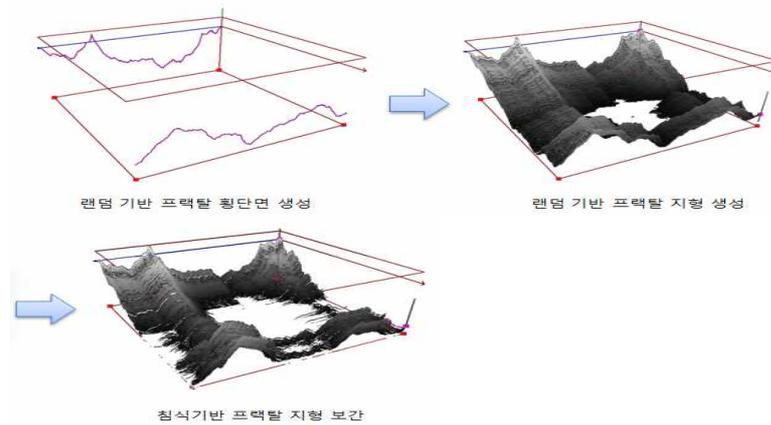


Fig. 12. Results of Erosion-based Fractal Topographic by the Interpolation Procedure

하상단면측량 자료, 하천경계 등이 필요하다.

지형보간을 위해서는 하천 경계면에 해당되는 단면 정보를 추출하고 추출된 자료를 근간으로 프랙탈 기법을 적용하게 된다.

본 연구에서 개발한 침식기반 프랙탈 기법을 적용하기 위하여 아래첨 하천구역을 대상으로 하였다. Fig. 11은 대상구역을 상세 설명하기 위하여 정밀 하천지형의 LiDAR 지형 자료를 3차원으로 시각화하여 나타낸 것이며, 적용 대상 구간은 하상과 하도의 경계면의 지형 데이터를 대상으로 한다.

개발 기법 적용 단계는 먼저 횡단면에 대해서 프랙탈 구간 및 진폭 제어를 통해서 지형을 생성하고 중단면 구간도 랜덤 기반의 프랙탈 기법을 적용을 통해서 하도를 구성하고 물의 이동과 퇴적 작용에 대한 침식 기반 프랙탈 기법을 적용을 통해서 최종적으로 정밀 지형을 보간한다.

하천의 하상과 하도 사이의 경계면 구간을 분할 개수 설정을 통해 프랙탈 지형을 분할하고 구간의 진폭 제어를 통해 지형 구조의 거칠기를 표현한다. 아래와 같이 두 개

의 횡단면에 대한 프랙탈 지형을 생성하고 랜덤기반 프랙탈 기법 적용을 통해서 3차원 하도를 구성한다.

이렇게 생성된 랜덤 기반의 프랙탈 하도 구간에 횡단면 간의 경사도, 유속 등이 반영하여 침전물 이동용량과 부유 침전물을 계산하여 최종적으로 침식기반의 프랙탈 지형을 생성한다.

3.3.4 침식기반 프랙탈 기법 적용 결과

하상의 불연속 경계면의 보간은 우선 프랙탈 브라운 운동을 근간으로 mid-point displacement 방법을 이용하여 연속된 경계면을 생성하였다. 일차 생성된 지형을 보다 정밀한 지형으로 생성하기 위하여 diamond & square 기법을 적용하여 프랙탈 기반 지형을 생성하였다.

본 연구에 적용된 mid-point displacement 방법은 격자가 직사각형 또는 정사각형 형태가 아니더라도 임의의 네 점에 대해서 적용 가능하며 융기선을 그리는 좋은 알고리즘이다. 또한 diamond & square 방법은 격자가 직사각형 또는 정사각형 형태로 구성되어야 하며 그 크기가 $2N$ 이

어야 한다. 따라서 임의의 4점을 기준으로 알고리즘을 적용하기 복잡하며 지형의 정밀도는 2N2의 크기로 고정될 경우, 주변 4개의 점을 보간하여 새로운 점을 생성하므로 측정 기준점을 기반으로 하는 기울기 적용에 어려움이 있으나, 정밀 3차원 하상을 생성하는데 유용한 방법이다.

침식기반 프랙탈 지형의 생성에 필요한 주요 인자로는 프랙탈 구간(반복수), 프랙탈 진폭(거칠기), 토양특성, 평균가속도 등이 있다. 본 연구에서는 지형을 보간하는데 있어 주요 인자 값의 변화에 따라 생성된 지형의 특성을 분석하고 실제 지형에 근접한 특성을 나타내는 인자 값을 도출하고자 한다. 이를 위해 Table 1과 같이 인자 값의 변화에 따라 지형의 변화 양상이 어떻게 나타나는지를 확인

하였다(Figs. 13~16).

침식기반 프랙탈 적용 시 초기 유량값 설정에 있어 아라천 하도 경사는 상·하류 평균경사도 차이가 작아 유량은 상수가 적용되었으며, 향후 아라천 운영 시 실측된 유량자료와 하상 정밀 토양도를 근간으로 침식모형기반 프랙탈 알고리즘을 적용할 경우보다 신뢰성 있는 결과 도출이 가능할 것이다.

아라천 전체 하상 경계면 지형은 랜덤 프랙탈을 기초로 반복수 8, 거칠기 0.8을 적용하여 지형의 상, 하류의 표고차에 의한 가속도를 계산하여 각 격자에서의 유속을 계산 후 침전물의 침식, 퇴적량을 반영하여 지형을 생성하였다. 침식 기반 알고리즘에 의해 생성된 3차원 point 형식의

Table 1. Applied Values of Simulation Parameters Used in Our Simulator

기호	내용	값	단위
I	프랙탈 구간	6, 8, 10	-
R	프랙탈 진폭	0.4, 0.8, 1.2	-
Kr	강우율	0.012	%
W0	초기유량	1	m ³ /s
\vec{v}	평균가속도(격자)	x: 0.002, y: 0.049	m/s
Kc	sediment capacity 상수	0.1	-
Kd	침전 상수	1	-
Ks	침식 상수	0.5	-

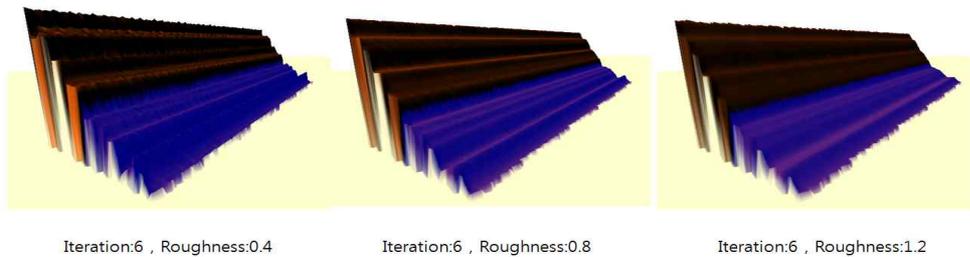


Fig. 13. Interpolation Results of Roughnesses after 6th Iteration

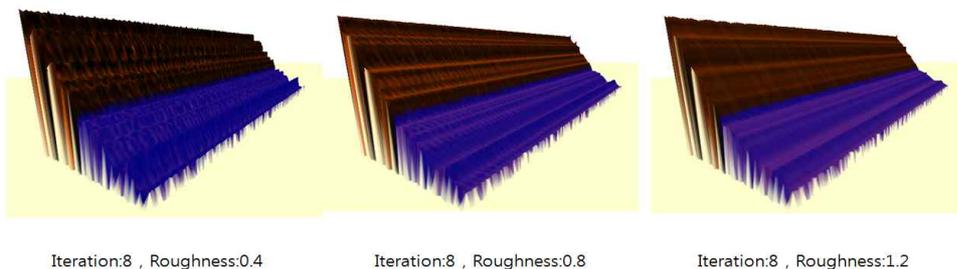


Fig. 14. Interpolation Results of Roughnesses after 8th Iteration

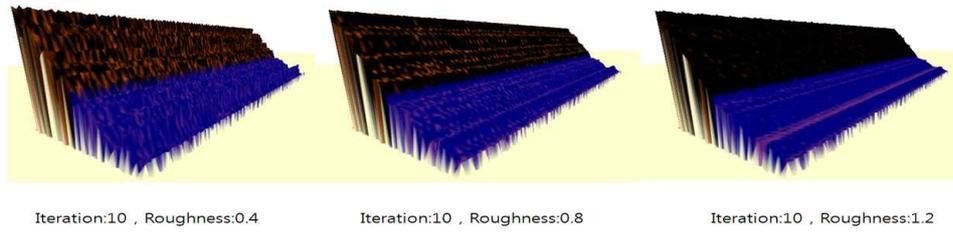


Fig. 15. Interpolation Results of Roughnesses after 10th Iteration

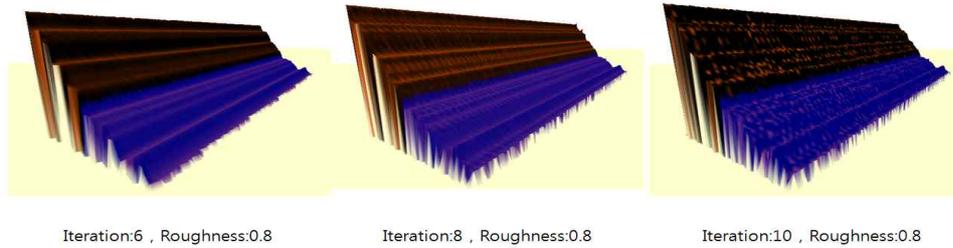


Fig. 16. Interpolation Results of Roughness of 0.8 after Three Different Iterations

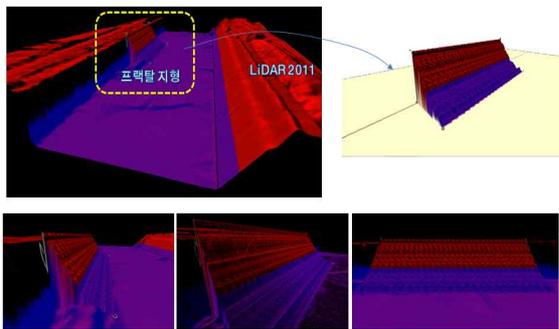


Fig. 17. Merge of Erosion Model-based Fractal and LiDAR Terrain

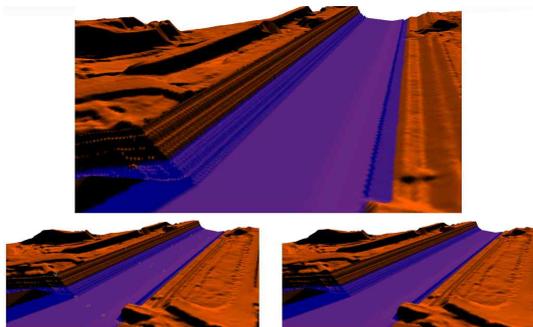


Fig. 18. Results of 3D Erosion Fractal Terrain

DEM과 실제 측량한 정밀 지형 LiDAR 측량 자료를 융합한 결과는 Fig. 17과 같다. 향후 고려될 사항으로는 실제 측량된 수심과 유량을 반영하여 각 지점의 수압과 유속을 계산하여 반영하면 보다 실제 지형에 가까운 지형 생성이

가능할 것으로 사료된다.

실제 지형에 가장 가까운 보간 방법을 적용하기 위하여 반복수 및 거칠기 변화에 따른 침식기반 프랙탈 기법을 적용하였다. 적용 결과 반복수가 상수이고 거칠기를 변수로 하여 값을 증가시켜 지형을 보간 할 경우 지형의 표면은 비교적 부드러운 형상으로 나타나게 된다. 또한 거칠기가 상수이고 반복수를 변수로 하여 값을 증가시켜 지형을 보간할 경우에도 지형의 표면은 비교적 부드러운 형상으로 나타남을 확인할 수 있었다.

4. 개발 기법 적용결과 검증

4.1 보간법과 비교 분석

본 연구에서 제시한 침식모형기반 프랙탈 지형 보간 기법을 통해 생성된 하상지형의 검증 대상으로는 기존 보간법 중 IDW 방법을 적용하여 생성된 결과물과 랜덤기반 프랙탈 지형 생성 결과로 하였다. IDW 방법은 가장 많이 사용되고 있는 선형보간 기법이며, 랜덤기반 프랙탈 지형은 침식모형기반 프랙탈 지형 보간 이전 단계에서 적용되는 기법이다. 따라서 랜덤기반 프랙탈 지형과 침식모형기반 프랙탈 지형 보간 결과 차이는 비교적 작게 나타나며, 상세 지형통계학적 차이에 대해서는 4.2절에서 논하고자 한다.

정밀 지형자료 생성 시 하상단면 측량자료와 LiDAR 측량 자료의 융합시 두 자료 간의 접합 부분인 하상 경계부분에서 자료 불부합 문제가 발생하며, 자료 불부합 부분에 대해서는 IDW 보간 방법을 통해 지형자료를 처리하였다.

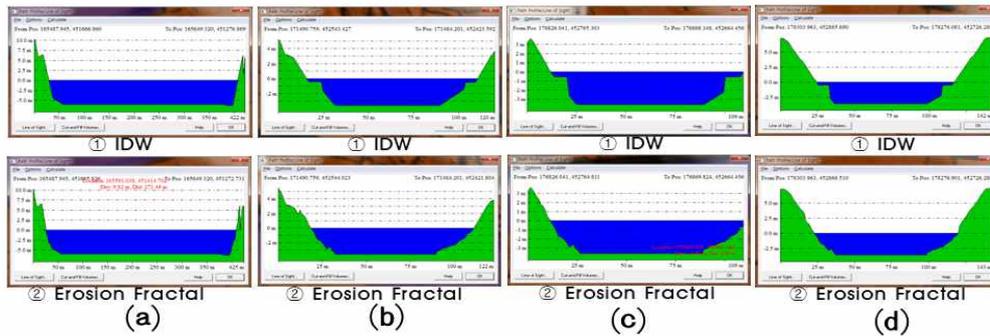
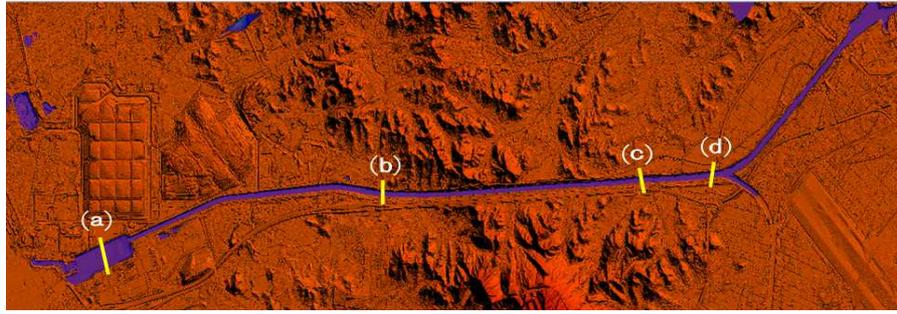


Fig. 19. Comparison of Cross-sections between IDW and Erosion Model-based Fractal Interpolation Method (① West Sea dike sluice, ② Sicheon bridge, ③ Gulhyun bridge, ④ Connection waterway)

Table 2. Correlation Analysis by Interpolation Methods

Class.	IDW	Random	Erosion
IDW	1		
Random	0.999023	1	
Erosion	0.999041	0.999994	1

이러한 처리 방법을 적용하면 하상이 직선 형상으로 생성되며 실제 하천지형을 반영하는데 한계가 있다. 또한 하천 만곡부의 경우 가까운 주변 값의 영향으로 인해 실제 하상 거리가 아닌 직선거리가 가까운 단면의 영향을 받게 됨에 따라 지형이 왜곡되는 현상이 발생하는 문제가 있다.

Fig. 19는 IDW 보간기법과 침식기반 프랙탈 지형에 의해 생성된 아래천 주요 지점별 하상단면 결과 프로파일을 나타내고 있다. 2가지 보간 기법에 의해 생성된 하상단면 결과는 확연한 차이를 나타내고 있으며, 선형보간 기법인 IDW는 인접 지형의 표고를 참조함으로써 지형의 상사성을 근간으로 하는 침식모형기반 프랙탈 보간기법에 비해 지형이 단순화되며 실제 지형을 왜곡하는 현상이 나타나는 것으로 판단된다.

침식모형기반 프랙탈 지형 생성 결과의 검증에 필요한 표본자료를 추출하였으며, 표본자료 추출은 하상경계면의 불부합 지역으로 본 연구를 통해 보간 생성한 지역을 대상

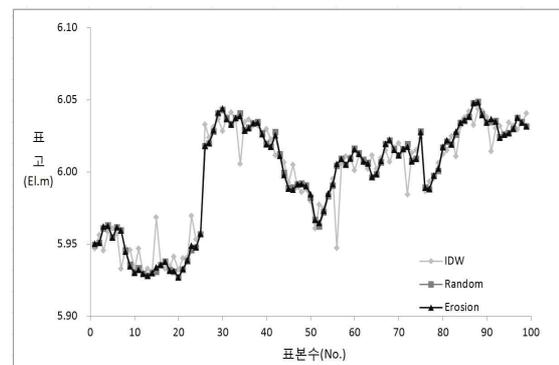


Fig. 20. Comparison of Elevation by Interpolation Methods

으로 하였다(Fig 20). 표본자료에서 나타나는 바와 같이 랜덤 프랙탈과 침식모형기반 프랙탈 보간 지형은 유사한 형상으로 지형이 생성되는 반면 IDW보간 기법은 상관관계가 비교적 크게 나타나는 것으로 분석되었다(Table 2).

4.2 측량 결과에 의한 결과 검증

침식기반 지형 보간 알고리즘을 개발하여 생성한 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 하도구간에서의 주요 지형 보간 지점에 대해 고저측량을 수행하여 검증 자료로 활용하였다. 검증 방법은 고저측량에 의해 취득한 표고(H) 자료와 IDW 방법에 의해 생성된 보간 지형, 침식기반 프랙탈 지형보간 방법에 의해 생성된 지형의 분산분석(ANOVA)을 수행하여, 고저측량 결과와 상호 비교·분석하였다. 랜덤기반 프랙탈 지형은 침식기반 프랙탈 지형 생성과정에서 처리되는 중간 단계의 기법으로 두 기법 간에 발생하는 지형 표고 차이는 미비하여 본 고저측량 결과와 비교는 수행하지 않았다.

비교분석에 사용되는 고저측량 지점은 총 461개 지점으로, IDW 및 침식기반 생성 지형의 아래천 분류구간의 하상경계면으로 하여 보간법에 생성된 지형이 실제 지형측량 결과와 통계적 차이가 나타나는지 분석하고자 하였다.

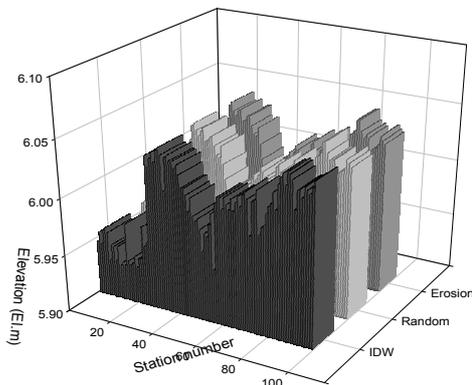


Fig. 21. Solid Graph of Comparison of Elevation by Interpolation Methods

고저측량자료와 보간을 통해 생성된 지형 표고의 정규성을 검증하기 위하여 P-P Plot을 Fig. 22와 같으며, 횡축은 관측누적확률을, 종축은 예측누적확률을 나타낸다.

Figs. 22~Fig. 24에서 알 수 있는 바와 같이 모든 점이 직선 상에 있지 않지만 정규분포를 따르지 않는다고 판단하기 어렵다. 따라서 모집단의 분포가 정규분포라는 가정이 충족된다. Table 3은 고저측량 자료와 각 보간기법의 H 값의 수, 평균, 표준편차, 표준오차 등의 통계적 특성 결과를 나타내고 있다.

고저측량 자료를 기준으로 IDW 및 침식기반 프랙탈 보간 기법의 RMSE는 각 0.802, 0.384로 나타났으며, 침식기반 프랙탈 보간 기법이 IDW 보간 기법에 비해 작게 나타남을 알 수 있다. 침식기반 프랙탈 지형보간 자료의 모집단이 동일한 분산을 가지고 있다는 가정을 충족시키고 있는지를 검증하기 위해 F 검정을 실시하였다. 분석 결과 F 값이 0.997로 임계치 $F=2.21$ 이하 값이므로 모집단의 분산

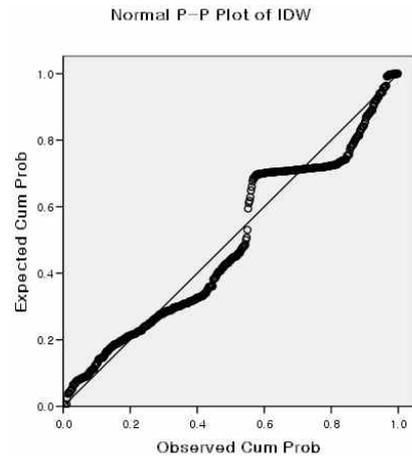


Fig. 23. P-P Plot (IDW)

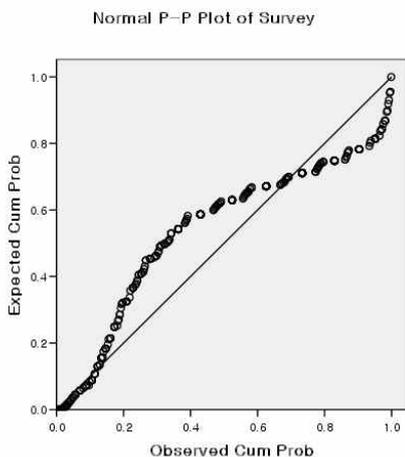


Fig. 22. P-P Plot (고저측량)

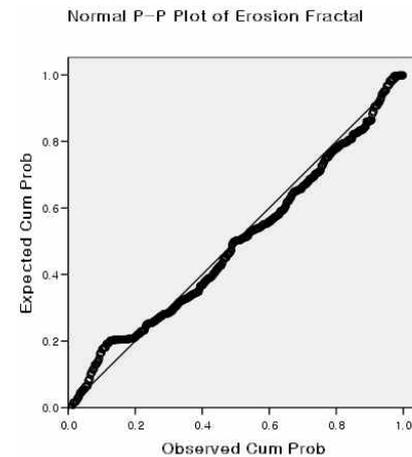


Fig. 24. P-P Plot (Erosion Fractal)

Table 3. Statistical Characteristics of the Study Area by Interpolation Methods

Class.	N	Min (m)	Max (m)	Sum	Mean		Std. Deviation	Variance	RMSE
					Statistic	Std. Error			
Survey	461	-4.111	-3.340	-1,682.43	-3.649525	0.004149	0.089090	0.008	-
IDW	461	-3.600	2.936	-503.34	-1.091833	0.045029	0.966813	0.935	0.802
Erosion Fractal	461	-3.652	-0.057	-861.98	-1.869806	0.028106	0.603467	0.364	0.384

Table 4. Results of Analysis of Variance

Class.	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	47.227	130	0.363	0.997	0.501
Within Groups	120.292	330	0.365	-	-
Total	167.519	460	-	-	-

이 같다는 것을 알 수 있다. 또한 유의확률 값이 0.501로서 유의수준 $\alpha=0.05$ 보다 크므로 귀무가설을 기각할 수 없다.

따라서 침식기반 프랙탈 보간 기법은 고저측량 자료와 평균의 차이는 없다는 것을 확인 할 수 있으며, IDW 기법에 비해 검증대상으로 사용한 고저측량 결과에 상대적으로 근접함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 하천 유역에서 하상과 하도의 횡단면과 종단면 경계부분에 대해 고도, 수심, 유속 등 주어지는 수리학적 데이터와 통계적 특성데이터를 이용하여 침식기반 프랙탈 기법을 이용한 보간 방법을 개발하였다. 또한 시계열에 따라 지형 형성에 영향을 주는 특성치를 반영하여 프랙탈 기반의 정밀 지형을 보간하고, 이를 하천 및 유역의 전반으로 확장 적용하여 하천관리 및 의사결정지원 시스템의 기초 자료로 활용하고자 하였다.

개발된 기법의 적합성 및 적용성을 검증하기 위하여 현지 고저측량을 수행하여 선형보간 기법인 IDW 방법과 침식기반 프랙탈 지형에 대한 공간통계학적 지형특성을 비교 분석하여 개발 기법의 적합성에 대해 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 기존 프랙탈을 이용한 지형 보간 연구들은 프랙탈 진폭과 거칠기만을 인자로 하여 소규모 지역을 대상으로 지형을 생성하였으나, 본 연구에서는 프랙탈 이론을 근간으로 지형의 침식과 퇴적 작용, 경사, 유량, 토성 등과 같은 수리학적 물리 특성을 반영하고, 실제 좌표를 이용하여 대규모 지역에 대해 GIS를

이용하여 침식모형기반 프랙탈 기법을 개발 적용하여 실제 지형에 가까운 3차원 지형을 생성하였다.

- 2) 침식모형기반 프랙탈 기법의 검증을 위해 표본을 추출하여 실제 지형측량 결과 및 IDW 기법에 의한 보간 지형과의 분산분석을 수행하였다. 표본집단이 모집단과 동일 분산을 갖고 있는지에 대한 표고값 간의 F-검정 결과, 유의확률 0.501로 유의수준 0.05보다 큰 것으로 분석되어 표고의 표준차이는 없는 것으로 나타났다.
- 3) 분산분석 결과 RMSE는 IDW 및 침식모형기반 프랙탈 기법 각 0.802, 0.384로 침식모형기반 프랙탈 기법이 우수한 것으로 나타났다. 이러한 결과로 부터 3차원 정밀 하상 지형 생성 방법으로 침식모형기반 프랙탈 기법의 적용성이 우수한 것으로 판단되었다.
- 4) 3차원 지형좌표를 근간으로 하는 침식기반 프랙탈 지형 보간 기법은 하상의 수리학적 하상변동을 격자간의 연산을 통해 산정하는 방식으로, 현재 2차원 하상변동 모형의 수리학적 연산 알고리즘을 반영하여 개선할 경우 3차원 하상변동 모형으로 확장이 가능할 것이며, 나아가 하상변동의 특성을 3차원으로 시각화하여 향후 아라뱃길 및 4대강 사업 후 유사 및 하천운영 관리 기술에 있어 획기적인 기술 확보가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 충남대학교 학술연구비에 의해 지원받아 수행된 연구입니다.

참고문헌

권기욱 (2006). 프랙탈 기법에 의한 지형복원에 관한 연구, 박사학위논문, 영남대학교.

한국수자원공사 (2008). 경인 아라뱃길사업 홍수처리계획 검토 보고서.

황의호 (2012). 침식모형기반 프랙탈 하상보간기법에 관한 연구, 박사학위논문, 충남대학교.

Barnsley, M.F., and Sloan, A.D. (1988). "A Better Way to Compress Image." *Byte*, pp. 215-223.

Batty, M, and Longley, P. (1994). *Fractal cities : A Geometry of Form and Function*, ACADEMIC PRESS.

Neidhold, B, Wacker, M., and Deussen, O. (2005) "Interactive Physically Based Fluid and Erosion Simula-

tion," In *Proceedings of Eurographics Workshop on Natural Phenomena*, pp. 25-32.

Mandelbrot, B.B. (1977). *Fractals, form, chance and dimension*, W.H. Freeman, New York.

Stava, O., Benes, B., Brisbin, M., and Krivanek, J. (2008). "Interactive Terrain Modeling Using Hydraulic Erosion." *Eurographics, ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*.

Voss, R.F. (1985). "Random Fractal Forgeries." *Fundamental Algorithms for Computer Graphics*.

논문번호: 12-056	접수: 2012.05.29
수정일자: 2012.06.25	심사완료: 2012.06.25