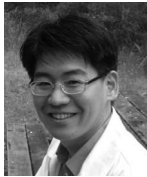


# DEM에서 물의 흐름방향 찾기



**백 경 록 |**

고려대학교 건축사회환경공학부 부교수  
paik@korea.ac.kr

**들어가며**

어떠한 주어진 지형에서 그 위로 흐르는 지표수의 흐름방향을 찾는 문제는 수문학에서 매우 중요한 문제의 하나이다. 전통적으로는 지형도에서 등고선의 생김새를 보고 유역의 경계를 결정하고 하천의 위치를 찾는 방법이 쓰여 왔다. 그러나, 이러한 방법은 사람의 주관이 개입되는 다분히 정성적이라는 문제가 있었다. 이런 방법에서 벗어나 지표수 흐름방향을 정량적으로 결정하는 계기는 수치고도모형이라 불리는 DEM(Digital Elevation Model)의 등장으로 이루어 졌다. 즉, 그 동안 수작업으로 지표수 흐름방향을 결정하던 데에서 벗어나 지표면의 고도자료를 직접 이용해 컴퓨터로 흐름방향을 탐색하는 것이 가능해진 것이다.

이러한 자동화 기법은 객관적인 결과를 주게 되므로 기존의 등고선을 이용한 수작업에서 기술자마다 주관에 따라 다른 결과를 도출할 수 있다는 우려

가 없어지게 되었다. 그뿐만 아니라, 자동화 기법은 사람의 수작업으로 다루기 어려운 방대한 문제를 다룰 길을 열어서, 현대적인 수문모형의 발전에 크게 이바지하게 되었다. 또한, 이러한 자동화 기법의 개발로 인해 DEM은 빠르게 그 쓰임새를 넓혀 가게 되었으므로 더욱 정밀한 DEM제작에 투자를 하게 된 매우 중요한 계기가 되었다. 이렇게 하여 오늘날 많은 수문모형에 DEM자료가 빠지지 않고 쓰이게 된 것은 주지의 사실이다.

이처럼 DEM과 지표수 흐름방향을 자동탐색기법의 등장 덕분에 현대 수문학은 공간적으로 분포된 변량을 객관적으로 모형화하여 다룰 수 있는 시대에 접어들게 되었다. 자연히 현대적인 분포형 모형에서 DEM자료는 기본적으로 필요한 자료이며 지표수 흐름방향을 자동탐색과정은 가장 기초적으로 수행되는 과정이다. 따라서, DEM자료의 품질 및 흐름방향 탐색기법의 정확도는 모든 지표수문모의 과정에서 기본적으로 확보되어야 할 사항이 되었다.

그런데, 이처럼 중요한 역할을 하는 흐름방향 탐색기법에 대해 자세히 알아보면, 한가지의 표준화된 기법이 존재하는 것이 아니라 여러 가지 방법들이 제안되고 쓰인다는 것을 알 수 있다. 이는 DEM에서 흐름방향을 탐색하는 일이 생각만큼 간단하지 않다는 방증이기도 하며 앞으로 많은 근본적인 연구가 필요하다는 의미이기도 하다. 일반적으로 실무에서

흐름방향을 탐색하는 경우에는 특정한 소프트웨어를 쓰게 되는데, 이러한 소프트웨어는 대부분 제한된 방법만 지원하곤 한다 (한 가지 방법만 지원하는 소프트웨어도 상당수임). 그러나 DEM에서 흐름방향을 추출하는 물리적인 이론과 그것을 실제에 응용하는 과정에서의 어려움을 알게 되면, 지표수 흐름방향 기법에 대한 깊은 고민 없이 특정 소프트웨어가 지원하는 기법을 단순히 적용하는 것이 반드시 바람직한 것은 아니라는 것을 알게 된다.

본 원고에서는 지표수 흐름방향을 추출하는 데에 쓰이는 다양한 기법과 이론적 배경에 대하여 간략하게나마 정보를 제공하고자 한다. DEM은 지형을 어떤 식으로 디지털화하느냐에 따라 여러 종류가 있을 수 있으나, 본 원고에서는 편의상 가장 많이 사용되는 격자형 (Raster) DEM을 기준으로 서술한다.

## D8

지표수 흐름방향 탐색기법으로 가장 흔히 쓰이는 방법은 소위 D8이라고 불리는 팔방 흐름탐색법이다 (O'Callaghan and Mark, 1984). 이 방법이 가장 많이 쓰이게 된 것은 가장 처음 나온 방법이기도 하지만, 여전히 가장 간단한 방법이기도 하기 때문이다. D8은 어떤 셀로부터 물이 흘러가는 방향은

|    |    |    |
|----|----|----|
| 90 | 85 | 90 |
| 75 | 80 | 95 |
| 70 | 70 | 90 |

그림 1. DEM에서 D8방법에 의해 흐름방향을 결정하는 예. 각 셀 안의 숫자는 셀의 고도를 나타낸다. 그림의 3×3 크기의 DEM에서 가운데 셀의 흐름방향은 주변 8개 방향으로의 경사를 모두 계산하여 비교한 후 가장 경사가 급한 방향 (그림의 화살표 방향)으로 결정한다.

그 셀을 둘러싼 8개 셀로 가는 각 방향의 경사를 계산해 그 중 가장 가파른 곳으로 물이 흘러간다고 결정하는 방법이다 (그림 1).

얼핏 보면 지표수 흐름방향을 정하는 것은 이 단순한 방법만으로도 충분한 것처럼 보일 수 있다. 그러나, 실제 흐름방향 탐색에는 여러 가지 복잡한 현상들이 발생하게 되고 이러한 문제를 해결하기 위해 더 정교한 방법들이 제시됐다.

## 평평한 지형을 다루는 문제

흐름방향 탐색이 어려운 예의 하나는 평평한 지형의 문제이다. 평평한 지형이라 함은 DEM의 인접한 셀들의 고도 값이 똑같아서 서로의 경사를 계산할 수 없는 지형을 말한다. 이러한 지형은 실제로 지형이 평평해서 그럴 수도 있지만, 많은 경우 DEM의 제작과정에서 발생한다. 즉, 지형의 높낮이가 있기는 하지만 그 차이가 DEM의 수직해상도 범위 미만이면 같은 값으로 기록되기 쉽다. 어떤 경우는 DEM제작상의 실수/오차로 같은 고도로 기록되기도 한다.

평평한 지형문제를 다루는 방법의 하나로 소위 stream burning방법이 있다 (Callow et al., 2007). 이 방법은 DEM이 실제 지형에서 보이는 하천을 제대로 반영하지 못하고 있을 때, 임의로 DEM의 일부 값을 고쳐서 하천이 탐색 되도록 하는 방법이다. 이 방법은 주어진 지역에 대한 실제 하천 정보를 알고 있을 때에만 적용할 수 있다.

Stream burning이 주관적으로 DEM을 교정하여 문제를 해결하는 방법임에 비해, 이러한 문제를 해결하기 위한 알고리즘을 고안하여 흐름방향 탐색기법을 개선한 예도 있다. 그중 대표적인 것이 Imposed gradient방법이다 (Garbrecht and Martz, 1997). 이 방법은 주어진 지역 내에서 고도가 높은 곳과 낮은 곳에서부터 점차 경사를 주어 가면서 평평한 셀들을 없애는 알고리즘을 적용한다 (그림 2).

|    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|
| 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| 90 | 30 | 30 | 30 | 30 | 90 |
| 90 | 30 | 30 | 30 | 30 | 90 |
| 70 | 30 | 30 | 30 | 30 | 90 |
| 50 | 30 | 30 | 30 | 30 | 80 |
| 40 | 40 | 5  | 40 | 50 | 60 |

(a) 원래 DEM

|    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|
| 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| 90 | 35 | 35 | 35 | 35 | 90 |
| 90 | 34 | 33 | 33 | 34 | 90 |
| 70 | 33 | 32 | 32 | 33 | 90 |
| 50 | 30 | 30 | 30 | 33 | 80 |
| 40 | 40 | 5  | 40 | 50 | 60 |

(b) 수정된 DEM

그림 2. Imposed gradient방법의 적용 예. (a) 원래 DEM에는 고도가 같은 셀들(가운데 색칠한 셀들)이 포함되어 흐름방향을 결정할 수 없다. (b) 규칙에 따라 인위적으로 경사를 가한 최종 DEM. 본 예제에서는 독자의 편의를 위해 인위적으로 변경하는 DEM의 고도의 범위를 크게 하였으나 실제로는 고도의 차이만 표시할 수 있는 범위에서 아주 작게 경사를 가하여 DEM의 변화를 최소화 한다.

### 확산/비확산 방법

D8이 가진 근본적인 문제는 흐름방향을 8방향 중 하나로 결정해야 한다는 점이다. 당연하게도 실제 지표수의 흐름방향은 이 8개 방향에 국한되지 않는다. 오히려 실제 흐름방향이 이 8개 중 하나와 같은 경우는 매우 드물다. 이러한 현실과의 차이는 상당한 오차를 가져온다. D8은 실제 하천의 흐름방향을 8개 방향 중 가장 가까운 방향으로 가정하게 되는데, 이 가정에서 오는 각오차는 ±22.5도나 된다. 게다가 이러한 오차는 하천을 따라가면서 계속 누적될 수 있다.

이러한 단점을 개선하기 위해 여러 가지 방법들이 제시되었는데 이들은 크게 두 개의 부류로 나눌 수 있다. 첫 번째 부류는 8개의 흐름방향만 가능한 D8의 단점을 직접 다루어 8개 이외의 흐름방향도 가능하도록 한 방법들이다 (Freeman, 1991; Quinn et al., 1991; Costa-Cabral and Burges, 1994; Tarboton, 1997; Seibert and

McGlynn, 2007). 이들 방법은 흐름방향을 8개 중 하나로 확정하지 않는다. 대신 실제 흐름방향을 두 흐름방향의 합성으로 표현한다. 예를 들어 실제 흐름방향이 북북서 방향이라면 D8에서는 이 흐름방향을 북서 또는 북쪽으로 가정한다. 하지만, 이들 방법에서는 북서쪽으로 39 %가 흐르고 북쪽으로 61 %가 흐른다는 식으로 표현한다. 이렇게 해서 이론적으로는 무한대의 흐름방향을 표현할 수 있다. 이들 방법 중 잘 알려진 D∞방법 (Tarboton, 1997)의 이름은 이런 의미에서 붙여진 것으로 이해할 수 있다.

하지만 이러한 방법들도 근본적인 문제를 안고 있다. 이것은 곧 하천이 어디로 흐르는지를 확실하게 정해주지 못한다는 것이다. 앞서 설명한 예와 같이 ‘물의 45 %는 이쪽으로 흐르고 55 %는 저쪽으로 흐른다...’는 식의 결정은 다시 바꿔 말하면 물이 이쪽으로도 저쪽으로도 흐른다는 이야기이다. 그러나 잘 알다시피 실제의 지표수 흐름은 확실한 하천의 경계를 따라 흐른다. 그래서 이러한 평면상의 확

산(planar dispersion)현상은 물리적인 의미가 없는 것으로 흐름방향 계산과정에서의 부산물이라고 할 수 있다. 이 부류의 방법들은 모두 평면상의 확산을 가져오게 되며 따라서 이러한 방법들을 확산 방법(dispersive methods)이라고도 부른다.

전술한 평면상의 확산현상은 당연히 바람직하지 않기에, 이러한 확산현상이 발생하지 않도록 하는 방법들도 고안되었다. 이러한 방법들을 비확산 방법(non-dispersive methods)이라고 부를 수 있다. 이러한 구분에 따라 지표수 흐름방향 탐색방법은 크게 확산 방법과 비확산 방법의 두 부류로 구분할 수 있다. 그럼 가장 간단한 D8방법은 어디에 속하는 것일까? D8은 흐름방향을 8개 중 하나로 '확정' 하는 방법이므로 대표적인 비확산 방법이다.

비확산 방법도 단점이 있다. D8의 예에서 볼 수 있듯이 흐름방향을 확정하려고 하니 선택의 폭이 넓지 않다. 또 한가지 생각해 볼 것은, 자주 발생하는 것은 아니지만, 물리적인 의미가 있는 확산현상이다. 볼록한 경기장 지붕에 내린 빗물이 퍼져 나가는 것과 같은 실제 물리적인 확산 현상은 비확산 방법으로는 표현할 수가 없다. 요약하면 확산 방법이든 비확산 방법이든 모두 장단점이 있는 것이다. 따라서, 우수한 흐름방향 탐색방법은 장점은 살리되 단점은 최소화하는 방법이 되어야 할 것이다.

비확산 방법을 이용하면 하천이 어디로 흐르는지를 확실하게 결정할 수 있다 (그 결정이 맞고 틀리고를 떠나서). 이러한 장점이 있는 비확산 방법이지만, 역시 흐름방향이 8개로 국한된다는 D8의 한계를 극복해야만 더욱 합리적인 흐름방향 탐색기법으로 인정받게 될 것이다. 문제는 확산현상이 발생하지 않도록 하려면 각 셀의 흐름방향을 8개 중 하나로 확실하게 결정되어야 한다는 점이다. 이는 D8과 같다. 하지만, 한발 물러서서 전체적인 흐름의 경향에 대해서는, D8보다 합리적으로 결정할 수 있을 것이라는 생각에 이른다.

흐름방향이 다양하지 않다는 비확산 방법의 한계를 개선하려는 초기 연구로는 Fairfield and

Leymarie (1991)의 연구를 들 수 있다. 그들은 D8의 흐름방향 결정과정에 무작위한 잡음을 가하여 D8의 결과보다 자연스러운(?) 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 무작위의 잡음을 섞는 것의 물리적 당위성이 없고, 똑같은 DEM에 대해서도 계산할 때 마다 다르게 발생하는 무작위 값 때문에 결과가 다르게 나온다는 합리성의 부족이 문제가 된다.

비확산 방법을 개선하는 보다 합리적인 방법으로 GD8방법을 들 수 있다 (Paik, 2008). GD8이란 Global D8의 약자로 D8을 확장한 방법이라고 볼 수 있다. D8은 어떤 셀의 흐름방향을 결정할 때, 주변 셀과의 경사를 구하여 결정하게 된다. GD8에서는 이렇게 결정된 흐름방향을 Local Steepest Direction(LSD)이라고 정의한다. 그러나 실제 흐름방향이 LSD일 확률은 매우 낮다. GD8에서는 8개 방향 중 LSD의 인접한 방향을 secondary direction이라고 정의한다. 이론적으로 실제 흐름방향을 LSD와 secondary direction 사이에 있다. 여기서 확산 방법을 쓰면 LSD와 secondary direction으로 유량을 분배하게 될 것이다. 그러나 비물리적인 확산을 막기 위해서 GD8은 LSD와 secondary direction 중 한 흐름방향을 결정하게 된다. 기본적으로는 LSD가 선택되지만 특정한 상황에서는 secondary direction이 흐름방향이 된다. 이러한 흐름방향 결정과정에서는 D8에서처럼 주변 8개 셀의 고도도 필요하지만, 그 외곽 셀들의 고도도 최대한 활용한다. 즉, 주어진 정보는 최대한 활용하여 더 합리적인 흐름방향을 결정한다는 것이 핵심이다. 이렇게 국부적이 아닌 전체 영역에 걸친 고도 자료를 모두 활용하여, 국지적으로는 8개 흐름방향 중 하나로 결정하지만 거시적으로 보면 전체적인 흐름의 패턴이 D8보다 합리적이라는 의미에서 Global D8이라고 불린다. 다르게 설명하면, D8은 나무만 보는 방법인 데 비해, GD8은 나무도 보고 한걸음 물러서 숲도 보는 방법이라고 할 수 있다.

D8과 GD8이 가져오는 차이는 그림 3의 원뿔과

같은 지형을 통해 잘 보여줄 수 있다. 실제 이런 지형에서는 꼭짓점을 기준으로 방사상으로 무한개의 방향으로 물이 흘러나간다. 하지만, D8으로 구한 결과는 8개 흐름방향으로 한정됨으로 인해 상당히 부자연스러운 흐름패턴을 보여주고 있다 (그림 4). 주목할 것은 D8은 각 셀의 흐름방향이 8개 방향으로 한정되어 있을 뿐만 아니라, 전체적인 흐름 패턴도 8개 방향으로 한정된다는 점이다. 혹자는 DEM의 해상도를 높이면 이런 현상이 해소될 것으로 생각할 수 있겠다. 그러나, 이러한 문제는 D8의 근본적인 한계때문에 발생하며 본 예제의 해상도를 아

무리 높여도 8개 방향으로 한정된 D8의 전체적인 흐름 패턴에는 변화가 없다. 이에 비해 GD8은 훨씬 더 다양한 흐름 패턴을 표현하고 있다 (그림 4). GD8도 각 셀에 대해서는 8개 방향 중 하나로 흐름 방향이 주어지지만, 흐름방향을 결정하므로 전체적인 패턴은 D8보다 자연스럽게 결정되는 것이다.

### 마치는 글

흐르는 물이 가지는 에너지를 수두로 표현하면 위치수두, 속도수두, 압력수두의 합이 된다. 지표수 흐름에서는 수표면에서 압력수두가 없다고 볼 수 있으며, 위치수두에 비해 상대적으로 속도수두를 무시한다면 결국 위치수두에 의해 흐름이 결정된다. 이렇게 보면 등고선은 곧 에너지가 같은 지점을 이은 선이 되며 흐름방향은 등고선에 대해 연직방향이라야 한다. 앞의 예에서 (그림 4) GD8의 결과가 D8보다 우리 눈에 더 자연스러워 보이는 이유도 D8의 흐름패턴은 8개 방향으로 국한되어 일부 흐름선을 제외하고는 등고선과 연직한다고 보기 어려운 데에 비해, GD8의 전체적인 흐름 패턴은 보다

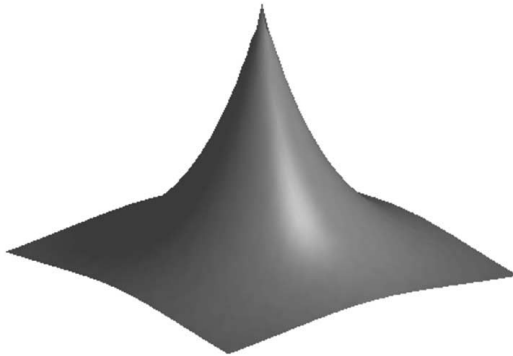
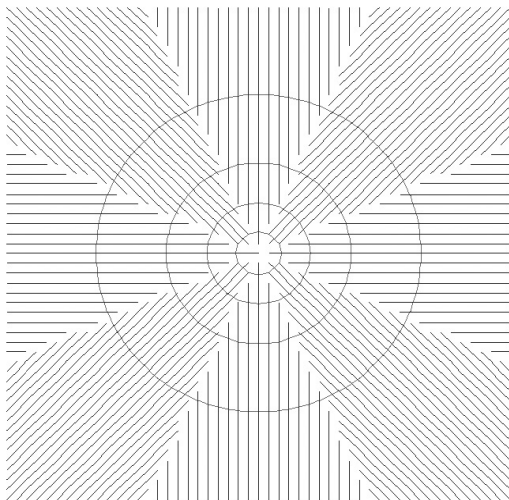
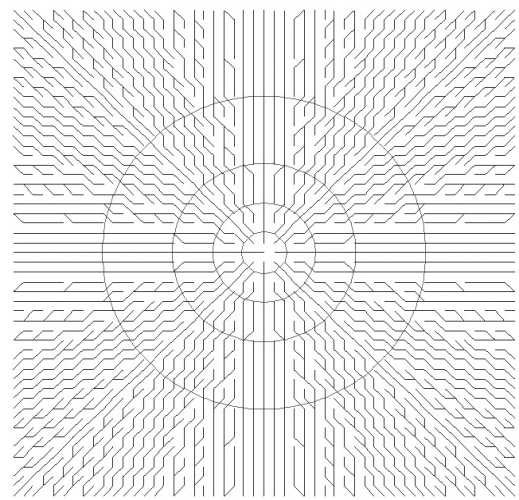


그림 3. 원뿔형으로 생긴 가상의 지형



(a) D8결과



(b) GD8결과

그림 4. 그림 3의 지형에 대해 흐름방향을 D8과 GD8으로 각각 구한 결과. 동심원은 등고선을 나타냄.

연직방향을 따라가고 있기 때문이다. 이는 등포텐셜선(equipotential lines)에 대한 전류의 방향이나 지하수의 흐름과 같은 문제에서도 같은 원리를 공유하는 기본 이론이다 (Paik, 2008).

그러나, 실제로 이 기본 이론을 이용해 DEM에서 흐름방향을 탐색하는 것은 그렇게 간단하지가 않음을 이 원고를 통해 살펴보았다. 이렇듯 이론은 명쾌한데 적용이 어려운 문제의 근본은 어디서 오는 것일까? 이것은 결국 지형을 디지털화한데에서 비롯된 문제이다 (Paik, 2008). 디지털화한 지형

에서는 이론적인 매끈한 등고선에 연직방향을 정의할 수가 없다는 한계가 있는 것이다. 온 세상이 온통 디지털로 치닫고 있는 시절이지만, 아날로그가 아쉬워지는 대목이다. 결국 우리가 깨닫게 되는 것은 DEM에서 흐름방향을 탐색하는 완벽한 방법은 없다는 점이다. 아마 앞으로도 지금과 같은 DEM을 쓰는 한, 완벽한 방법이라는 것은 개발할 수 없을 것이다. 다만, 우리가 할 수 있는 것은 사용 목적에 맞춰 적합한 흐름방향 탐색 방법을 택하는 슬기로움을 가지는 것이 아닌가 한다. ☯

## 참고문헌

1. Callow, J. N., K. P. Van Niel, and G. S. Boggs (2007) How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis? *J. Hydrol.*, Vol. 332, pp. 30-39.
2. Costa-Cabral, M. C. and S. J. Burges (1994) Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas, *Water Resour. Res.*, Vol. 30(6), pp. 1681-1692, doi: 10.1029/93WR03512.
3. Fairfield, J. and P. Leymarie (1991) Drainage networks from grid digital elevation models, *Water Resour. Res.*, Vol. 27(5), pp. 709-717. (Correction, *Water Resour. Res.*, Vol. 27(10), p. 2809)
4. Freeman, T. G. (1991) Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid, *Comput. Geosci.*, Vol. 17(3), pp. 413-422.
5. Garbrecht, J. and L. W. Martz (1997) The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models, *J. Hydrol.*, Vol. 193, pp. 204-213.
6. O'Callaghan, J. F. and D. M. Mark (1984) The extraction of drainage networks from digital elevation data, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 28, pp. 323-344.
7. Paik K. (2008) Global search algorithm for nondispersive flow path extraction, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, F04001, doi:10.1029/2007JF000964. (또한 다음 논문도 참고: Paik, K. (2009) Reply to comment by Stefano Orlandini and Giovanni Moretti on "Global search algorithm for nondispersive flow path extraction". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 114, F04005, doi:10.1029/2009JF001351)
8. Quinn, P., K. Beven, P. Chevallier, and O. Planchon (1991) The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models, *Hydrol. Process.*, Vol. 5, pp. 59-80.
9. Seibert, J. and B. L. McGlynn (2007) A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models, *Water Resour. Res.*, Vol. 43, W04501, doi:10.1029/2006WR005128.
10. Tarboton, D. G. (1997) A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resour. Res.*, Vol. 33(2), pp. 309-319.