

하천망과 사면의 방향성 정량화

Quantification of Directional Properties of Channel Network and Hill Slope

박창열* · 유철상**

Park, Changyeol · Yoo, Chulsang

Abstract

This study quantified directional properties of channel network and hill slope for a river basin by applying the von Mises distribution, also examined the relation between them. Ultimately, it was examined that whether the directional properties of channel network and hill slope have a certain relation, which might be considered to the rainfall-runoff modeling. From the results derived by analyzing the Naesung stream basin, the von Mises distribution was found well to explain the directional characteristics of directional properties of channel network. There was a clear relation between directional properties of channel network and hill slope. The higher-order streams also showed very obvious modal characteristics. The results derived in this study could be helpful to estimate more quantitatively the difference in the runoff response with respect to the directional properties of channel network and hill slope.

Keywords : *directional properties, channel network, von Mises distribution*

요 지

본 연구에서는 하천유역에서 사면과 하천망의 방향적 특성을 von Mises 분포를 이용하여 정량화하고, 그 둘 사이의 관계를 살펴보았다. 궁극적으로는 사면과 하천의 방향성이 일정한 관계를 갖는지, 이러한 특성이 강우-유출 모형에 고려될 수 있는지에 대해 살펴보았다. 대상유역인 내성천 유역에 적용한 결과, von Mises 분포는 하천망의 방향적 특성을 적절히 표현할 수 있음을 확인하였다. 또한 하천망의 방향성은 사면의 방향성과 뚜렷한 관계를 가지며, 고차 하천일수록 뚜렷한 mode 특성을 나타냄을 확인하였다. 본 연구의 결과는 하천과 사면의 방향성에 따른 유출응답 특성을 정량적으로 파악하는데 이용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 방향성, 하천망, von Mises 분포

1. 서 론

지형은 강우에 의한 유역 유출응답을 결정하는 중요한 인자이다. 따라서 유역의 지형형태학적 인자를 수문해석에 이용하기 위한 시도는 긴 역사를 갖는다(Rodriguez-Iturbe and Valdes, 1979). 지형을 구성하는 대표적인 요소로 하천망과 사면을 들 수 있다. 당연히 이들이 어떤 방식으로 결합되는지에 따라 유출특성의 차이가 발생하게 된다(Zevenbergen and Thorne, 1987; Brierley and Fryirs, 2005).

지형형태학적 순간단위도(GIUH)에서와 같은 유출모형에서 유역의 지형형태학적 특성은 하천을 기준으로 정량화한다. 이를 통해 하천분기비, 길이비, 면적비, 경사비, 수계밀도, 하천주기 등을 추정할 수 있다. 이들 특성만으로도 미세측유역에서 성공적인 유출모형의 구성이 가능함은 여러 연구에서 입증된 바 있다(Rodriguez-Iturbe 등, 1979; Gupta 등, 1980; Rodriguez-Iturbe 등, 1982; Rinaldo 등, 1991; Bhaskar 등,

1997; Lee and Chang, 2005; Kumar 등, 2007). 그러나 이러한 연구에서는 하천과 사면이 갖는 방향적 특성이 반영되지 못하고 있다. 이로 인해 호우사상의 방향성을 유출모형에 반영하는 것은 불가능하다. 이러한 원인은 근본적으로 하천 및 사면의 방향적 특성을 정량화할 수 있는 방법론의 부재에서 찾을 수 있다.

하천망과 사면의 방향적 특성에 따른 유출특성의 차이는 이미 그 중요성이 널리 인정되어 왔다(조홍제와 이상배, 1990; Beasley 등, 1980; Zevenbergen and Thorne, 1987; Brierley and Fryirs, 2005). 예를 들어, 단순하게 하천망이 “Y”와 “T” 형태를 갖는 유역을 고려해 보자. 이 유역에서 하천망이 갖는 하천길이, 유역면적, 하천경사가 동일하다고 가정하면, 하천분기비, 길이비, 면적비, 경사비, 수계밀도, 하천주기는 모두 동일하게 결정된다. 이로 인해 동일한 방향을 갖는 강우조건 하에서 두 유역에 대한 유역응답은 동일하게 나타날 것이다. 그러나 실제로는 “Y” 형태의 유역에서 침투발생시간이 상대적으로

*고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 박사수료 (E-mail : changyeol@korea.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수 (E-mail : envchul@korea.ac.kr)

로 더 빨리 침투유량은 더 크게 나타날 수밖에 없다. 물론 이와 같은 특성을 단위도와 같은 강우-유출 모형에 정량적으로 고려하는 것은 간단한 문제가 아니다.

수문분야에서 하천망과 사면의 방향성을 연구한 사례는 드물지만, 지형학 또는 지질학 분야에서는 쉽게 찾아볼 수 있다. 예를 들어 Morisawa(1963)는 하천망 구조를 결정짓는 인자를 파악하기 위해 하천망 구조가 갖는 방향성의 분포 특성을 분석하였으며, 특히 하천망 구조가 사면 방향과 암석 구조의 특성에 의해 결정됨을 보였다. Jarvis(1976)는 19,600 여개의 하천을 이용하여 하천망 구조의 공간적 형태를 분석하였으며, 하천망이 갖는 방향적 특성을 파악하였다. Beasley 등(1980), Zevenbergen and Thorne(1987)은 사면 방향성을 고려하여 유출 흐름방향을 결정하고, 이를 유역추적 알고리즘에 적용하기도 하였다. Mácka(2003)는 유역의 배수구조가 갖는 방향성과 유역의 공간적 지질 특성과의 상관관계를 분석하였으며, Zabidi and Freitas(2006)는 석회암 지대의 암석구조가 사면에 의한 유역의 배수구조에 미치는 영향을 파악하기도 하였다. 국내의 대표적인 연구로는 김주환(1985), 오미선 등(2000), 이민부 등(2001), 이민부와 김남신(2007) 등을 들 수 있다. 특히, 이민부와 김남신(2007)은 하천망의 방향성과 선구조선(lineament)과의 상관관계를 분석하여 하천망의 방향성이 지형학적 특성에 의해 결정됨을 보인 바 있다. 그러나 유역 유출해석에 적용될 수 있는 하천과 사면의 방향적 연결 특성은 찾아보기 힘들다. 이들 특성이 정리되어야만 유출해석에 하천망과 사면의 방향성을 고려할 수 있게 되고, 나아가서는 호우 방향성이 유출응답에 어떤 식으로 영향을 미치는지를 이론적으로 파악할 수 있게 된다.

이에 본 연구에서는 하천유역에서 사면과 하천망의 방향적 특성을 정량화하고, 그 둘 사이의 관계를 살펴보고자 한다. 만일 사면의 방향성과 하천의 방향성이 일정한 관계를 가지고 정량화될 수 있다면, 이러한 특성은 보다 간단히 강우-유출 모형에 고려될 수 있을 것이다. 일례로 확률밀도함수 형태로 제시되는 사면과 하천 방향성을 GIUH 이론에 근거하여 재해석할 수 있다. 궁극적으로는 호우 방향성에 반응하는 유역 유출응답의 차이를 파악할 수 있게 된다. 본 연구는 내성천 유역을 대상으로 수행하였다.

2. 하천망과 사면의 방향성 및 그 관계

2.1 하천망의 방향성

2.1.1 하천망의 구조

하천망의 구조는 자연계의 구조적 요소와 순환적인 요소들의 상호작용의 결과물로 알려져 있다(이민부 등, 2001). 이때 구조적 요소는 지반활동과 기반암의 특성을 말하며, 주로 대하천망의 구조를 결정짓는다. 또한 순환적 요소는 기후와 유수의 특성을 말하며, 풍화물의 퇴적과 침식작용으로 중·소규모 하천망의 발달을 주도하게 된다. 이들 두 가지 요소의 동적 상호작용으로 인해 하천망은 시간이 지날수록 점차 복잡해진다. 일반적으로 지반활동이 안정된 유역에서는 그 복잡성이 덜하고, 반대의 경우 복잡성이 매우 크게 나타난다(오경섭, 1996; Tricart, 1971).

강우-유출 해석에 하천망의 구조를 반영하기 위해서는 이

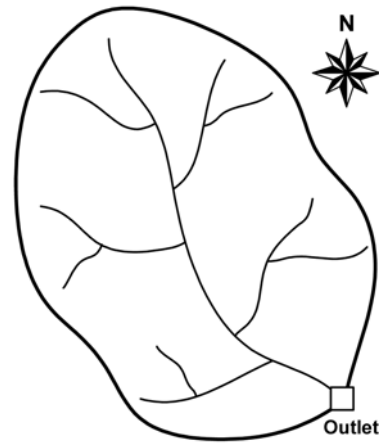


Fig. 1 Stream Network

들 구조적 특성이 정량화되어야 한다. Fig. 1은 하천유역에서 하천망의 기본구조를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 하천망 구조는 유역의 특성을 반영하고 있음을 알 수 있다. 즉, 유역 경사가 완만한 저지대 유역의 경우에는 (n-1)차 하천이 n차 하천에 직각으로 유입될 가능성이 높고, 반대로 유역 경사가 급한 산지 유역의 경우에는 합류되는 각이 상대적으로 작게 나타날 가능성이 높다.

2.1.2 하천망의 방향성 추정 방법

하천의 방향은 하천의 상류에서 하류로 향하는 방향을 나타낸다. 이를 결정하기 위해서는 대상유역의 DEM을 근거로 하천망이 정의되어야 하고, 이를 이용하여 하천의 시점부와 종점부에 대해 정의해야 한다. 이렇게 되면 각 하천의 node를 이용하여 방향을 결정할 수가 있다.

먼저, DEM은 1/25,000 수치지형도를 이용하여 구축할 수 있다. 그러나 이와 같이 만들어진 DEM은 평야나 호수지역에서 실제 지형과 차이를 갖게 된다. 이로 인해 하천망이 실제 하천과 다르게 추출될 수도 있다. 이를 극복하기 위한 방안으로 실제 하천망을 수치지형도에서 추출한 후, 가공된 DEM 위에 투영시켜 DEM을 재가공하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 대상유역의 하천차수도를 WAMIS(www.wamis.go.kr)에서 획득하여 Arc/Info의 Grid 모듈에 적용하여 Agree DEM으로 가공하였다. 하천망 추출은 ArcGIS/Arcmap의 Extension 중 Hydro-tool을 이용하였다. 이때 하천망 추출 임계값의 결정이 필요하며, 이 값은 하천의 시점부를 결정하는 것으로 입력한 값에 따라 하천차수 및 그 특성이 달라진다. 본 연구에서는 이 값으로 50을 적용하였다. 이를 통해 생성된 하천에 하천차수를 부여하고, 각 node를 연결하여 하천망을 단순화하였다. 이렇게 단순화된 하천망을 이용하면 하천망의 방향성을 정리하는 것이 간단해진다. Fig. 2는 이에 대한 모식도를 나타낸 것이다.

2.2 사면의 방향성

2.2.1 사면의 구조

사면은 기본적으로 하천의 침식과정에 의해 생성하거나 변형된다(김주환, 2009). 이러한 사면의 형성 원인은 사면 주변의 지질 특성과 하천 또는 해안이 어느 정도 인접해 있는가에 따라 달라진다. 즉, 한반도의 대표적 지질 특성인 용암

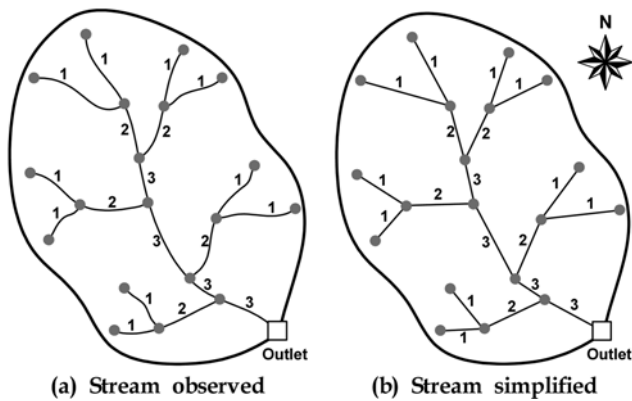


Fig. 2 Simplification of Stream Network

대지, 침식분지, 카르스트 지형, 단구 지형(해안단구, 하천단구)과 같은 지형 특성에 의해 사면의 형성 과정과 이의 구조적 특성이 결정된다.

강우-유출 과정에서 사면은 유역을 구성하는 주 요소로, 수문순환 과정에서 지표면 유출에 관여하는 주요 인자가 된다. 당연히 하천 유출에도 기여하게 된다. 따라서 유역의 수문순환 시스템을 이해하기 위해서는 사면의 구조적 특성을 파악할 필요가 있다.

먼저 유역에서 사면의 구조를 이해하기 위해 유역의 한 지점에서 바라보는 사면을 생각해 보자. 유역 출구에서 상류 방향으로 사면을 바라보면, 분수계(divide) 부근의 산지 유역은 유역 출구에서 파노라마 형태로 펼쳐진다. 하천의 중앙에서 상류 방향을 바라보면, 좌안과 우안의 사면은 하천을 바라보는 형태를 갖게 된다. 좀 더 구체적인 특성은 Fig. 3과 같은 일반적인 하천유역을 통해 살펴보도록 하자.

Fig. 3(a)에 나타난 DEM을 보면, 표고에 따른 유역 형상은 마치 잎사귀(leaf)와 같은 형태를 보인다. 즉, 유역을 대표하는 주 하천이 존재하고 이를 기준으로 “Y” 형태로 중·소규모 하천들이 생성된다. 이들 하천은 궁극적으로 유수가 유역 출구까지 원활히 전달되도록 구성된다(Fetter, 1994). 즉, 고차 하천일수록(유역 출구에 가까운 하천일수록) 하천 방향성의 복잡성이 적을 뿐만 아니라 뚜렷한 방향적 특성을 나타낸다. 두 번째로 분수계를 결정짓는 사면은 유역 출구를 둘러싸는 형상을 갖게 된다. 이로 인해 분수계 부근의 사면

은 모두 유역 출구를 바라본다. 사실 이러한 특성은 하천유역에서 배수구조가 갖는 기본 특성으로 이해할 수 있다. 즉, 유역내로 유입된 강우가 유역 출구로 원활히 배출될 수 있도록 하기 위함이다. 마지막으로 유역 내부에는 수많은 능선들이 존재하게 되는데, 이들 능선이 유역 출구를 향해 뻗어 있음을 알 수 있다. 만약 두 능선을 명확하게 구분할 수 있다면, 능선 사이에 존재하는 사면은 하천을 향하게 된다. 이 경우 사면의 대표적 방향 특성이 두 방향으로 나타날 가능성이 크다.

2.2.2 사면의 방향성 추정 방법

사면 방향은 사면이 바라보는 방향으로 정의된다. 이를 파악하기 위해서는 수치지도 또는 DEM과 같은 유역 사면의 표고 정보가 요구된다. 격자별 사면 방향은 주어진 표고 정보를 이용하여 결정할 수 있다. 본 연구에서는 대상 하천유역에 대한 1/25,000 수치지도를 수집하여 DEM을 구축하고, ArcGIS/Arcmap의 Spatial 분석기법 중 향(aspect) 추출 방법을 이용하여 격자별 사면 방향 정보를 획득하였다.

향 분석은 기본적으로 산사태 발생가능지역 예측, 하천유역내에 국립공원, 도로, 댐, 저수지 등의 최적 입지 조건, 스키장 슬로프 입지 조건, 산지 유역에서 헬기의 비상 착륙 지역을 결정시에 유용하게 활용된다(ESRI 홈페이지). 뿐만 아니라 수문 분야에서는 유수의 흐름 방향을 결정하거나 하천유역의 기본적인 지형환경과 경관 분석을 위해 주로 이용된다(김창환, 1999). 향 분석에서 사면 방향은 유역의 DEM이 주어질 때 Fig. 4(a)에서와 같이 결정된다(Burrough and McDonell, 1998).

먼저 Fig. 4(a)의 격자 e에 대한 x, y방향의 고도 변화율은 각각 다음과 같다(Fig. 4(a) 참조).

$$\frac{dz}{dx} = \frac{(c+2f+i)-(a+2d+g)}{8} \quad (1)$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{(g+2h+i)-(a+2b+c)}{8} \quad (2)$$

여기서 a, b, c, d, e, f, g, i는 각 격자의 표고를 나타낸다. 이때 위 식을 고려하여 격자 e에 대한 x, y방향으로의 변화율은 다음 식에 의해 결정된다.

$$Temp = 57.29578 \times atan2(-dz/dx, dz/dy) \quad (3)$$

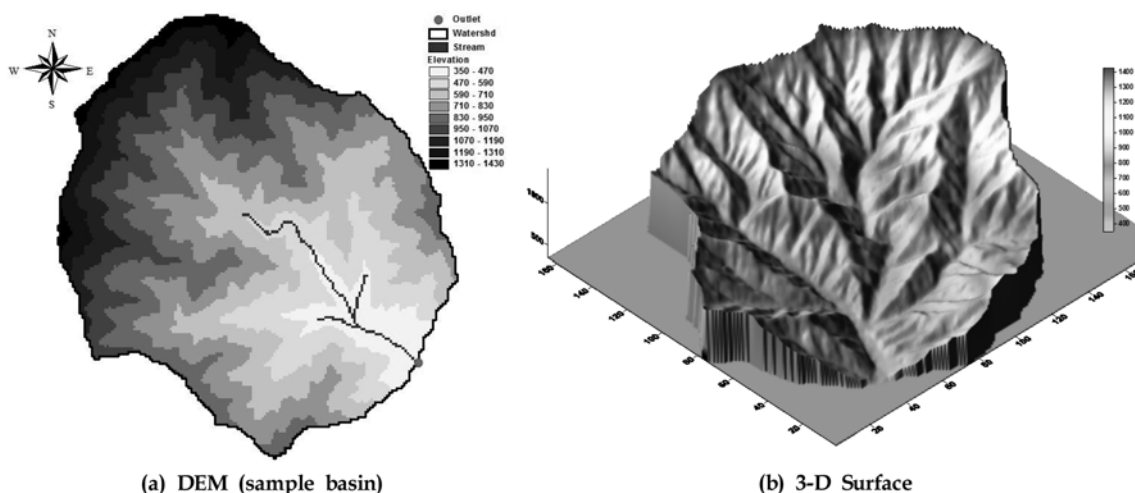


Fig. 3 Examples of Land Surface

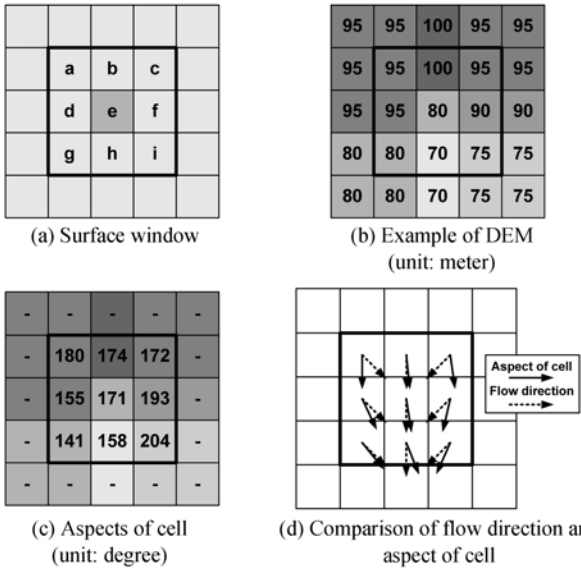


Fig. 4 Determination of Aspects of Cell and Comparison of Flow Direction

여기서 $atan2(x, y)$ 는 (x, y) 좌표에서 역탄젠트 값을 나타낸다. 계산된 $Temp$ 값을 0도와 360도 사이의 값으로 변환하기 위해서는 다음 알고리즘을 적용한다.

```

if Temp < 0
    Aspect = 90.0 - Temp
else if Temp > 90.0
    Aspect = 360.0 - Temp + 90.0
esle
    Aspect = 90.0 - Temp
    
```

Fig. 4(b)에 주어진 DEM을 이용하여 사면 방향을 결정하면 Fig. 4(c)와 같다. 이를 유수의 흐름방향(flow direction)과 비교하면 Fig. 4(d)와 같다. Fig. 4(d)에서 볼 수 있듯이 사면 방향(Fig. 4(d)의 점선)은 반드시 유수의 흐름방향(Fig. 4(d)의 점선)과 동일하게 나타나진 않는다. 이러한 이유는 유수의 흐름방향 결정방법이 단순히 주변 8개 격자 중 가장 낮은 표고를 갖는 격자로 결정되기 때문이다. 그러나 사면 방향은 주변 8개 격자의 고도를 모두 고려하게 된다. 이로 인해 사면 방향은 유수의 최단경로로써 유출 모형에 고려되기도 한다(Beasley 등, 1980).

2.3 하천망과 사면의 방향적 관계

하천망과 사면의 방향성이 정의되면, 이들 사이의 특성을 확인할 수 있다. 본 연구의 궁극적인 목적은 하천망과 사면의 방향성을 강우-유출 모형에 고려하기 위함이다. 이를 위해서는 하천망과 사면의 방향성을 정량화한 결과를 각각 이용할 수도 있고, 두 인자의 방향적 관계를 고려하여 하나의 결과만을 이용할 수도 있다. 본 연구의 경우에는 후자의 방안이 보다 현실적일 수 있다. 이는 기본적으로 모형의 단순화뿐만 아니라 호우의 방향성을 고려할 경우 이에 대한 유출응답을 보다 명확하게 확인할 수 있기 때문이다. Fig. 5는 실제 하천유역을 대상으로 소유역을 추출하여 DEM을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 소유역의 DEM을 나타낸 것이고, Fig. 5(b)는 DEM을 근거로 결정된 하천방향과 사면의 방향을 나타낸 것이다. 여기서 하천차수는 Stralher의 차수법칙에

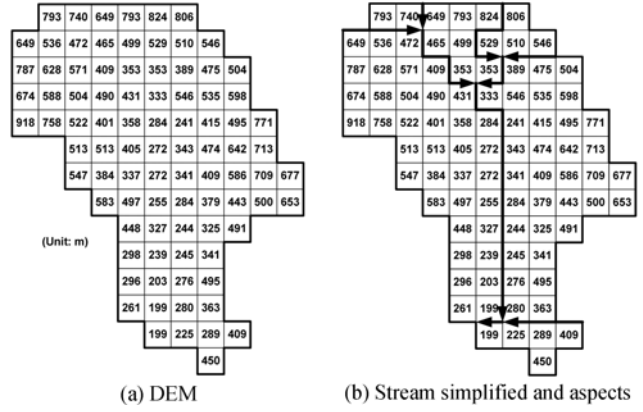


Fig. 5 Stream Direction and Land Aspects Based on DEM

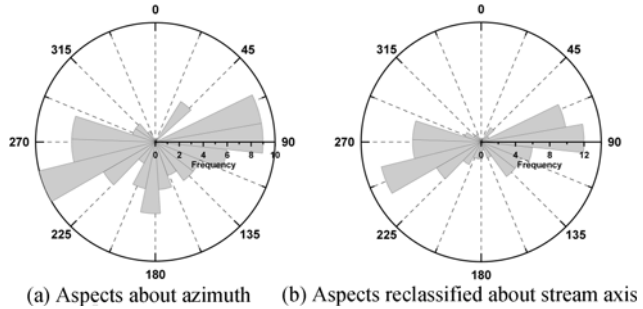


Fig. 6 Rose Diagrams of Aspects According to the Axis Transformation

의해 결정하였다. 이와 같이 세분화된 하천차수별 소유역은 1차 하천인 경우 5개, 2차 하천인 경우 2개, 3차 하천인 경우 2개로 구성된다.

하천망과 사면의 방향적 관계를 파악하기 위해서는 사면의 방향을 각 소유역에 해당하는 하천을 기준으로 정리할 필요가 있다. 이를 통해 사면이 어떤 방향으로 하천에 유입되는지 확인 가능하다. 본 연구 대상유역에 대해 격자별로 결정된 사면 방향을 해당하는 하천에 대해 정리하면(즉, 하천 시점이 0도를 향하고, 소유역 출구가 180도를 향하게 사면 방향을 회전시키면) 사면 방향에 대한 장미그림(rose diagram)은 Fig. 6과 같다.

Figs. 6에서 볼 수 있듯이 하천을 기준으로 사면 방향을 정리하면, 하천을 기준으로 사면 방향은 대칭인 형태를 갖는다. 즉, Fig. 6(a)에서 방위 기준으로 정리된 경우 사면 방향은 mode 특성이 불분명한 형태이지만, Fig. 6(b)와 같이 하천을 기준으로 정리하면 사면 방향은 뚜렷한 bi-modal 특성을 나타낸다. 이는 사면 방향이 하천을 기준으로 정리되어 지표면 유출 흐름이 하천 방향으로 집중되기 때문이다. 사실 이러한 특성은 유역 상류 또는 하류에서 유역 전체를 바라보게 되면 쉽게 이해할 수 있는 결과이기도 하다. 따라서 대상 하천유역의 하천망 방향성이 주어지면, 이에 대한 사면 방향은 모두 대칭인 구조를 갖게 되는 것으로 가정할 수 있다.

3. 하천망의 방향성 정량화

3.1 하천망의 방향성 정량화 방법

유출모형에 하천망 방향성을 고려하기 위해서는 크게 두 가지 방법의 정량화 방법을 생각해볼 수 있다. 각각의 방법은 하천망의 방향을 결정하는 기준에 의해 달라진다. 먼저,

기본적으로 주어지는 하천망의 방향을 그대로 정량화하는 경우이다(Fig. 2(b) 참조). 즉, 방위를 기준으로 하천망을 정리하는 것이다. 이때 하천유역에 대한 하천망의 방향성은 mode 특성이 한 방향으로 나타날 가능성이 높다. 이는 나무의 가지와 유사한 특성을 갖는 하천망의 구조를 생각해 보면 쉽게 이해할 수 있다(김연준과 양인태, 2002). 즉, 이 경우 유역의 최원점에서 유역 출구를 향하는 방향이 대표방향으로 결정될 가능성이 높다.

이 경우 방향성 자료에 일반적으로 적용되는 von Mises 확률밀도함수를 이용할 수 있다. 하천망의 방향적 특성이 uni-modal일 경우 von Mises 분포의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(\theta) = [2\pi I_0(\kappa)]^{-1} \exp[\kappa \cos(\theta - \mu)], 0 \leq \theta < 2\pi, 0 \leq \kappa < \infty \quad (5)$$

여기서 μ (주방향, preferred direction), κ (집중계수, concentration parameter)는 von Mises 확률밀도함수의 매개변수이다. 이때 주방향은 하천망이 갖는 방향적 구조의 주요 방향을 의미하며, 집중계수는 분포형의 형태를 나타내는 변수이다. 즉, 집중계수는 분포형태가 뾰족한 형태인지 평활한 형태인지를 나타낸다. $I_0(\kappa)$ 는 수정된 베셀함수(modified Bessel function)로 다음과 같이 정의된다.

$$I_0(\kappa) = (2\pi)^{-1} \int_0^{2\pi} \exp[\kappa \cos(\phi - \mu)] d\phi \quad (6)$$

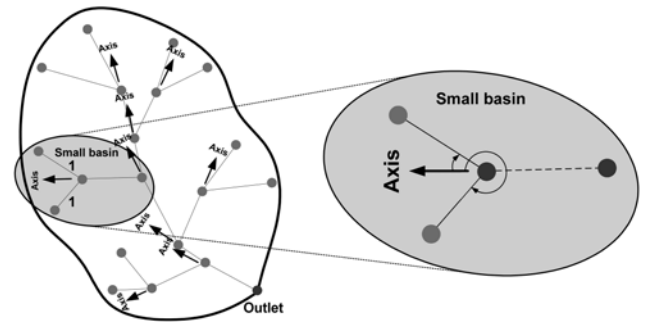
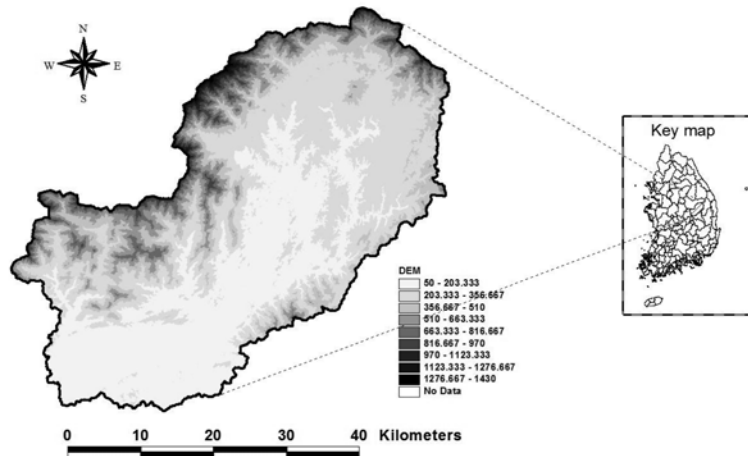


Fig. 7 Stream Network Reclassified about the stream by the Confluence of Branches

하천망 방향성 정량화의 두 번째 방법은 하천 합류점에서 합류 후 하천의 방향을 기준으로 하천의 방향을 정리하는 것이다(Fig. 7 참조). 하천망의 구성은 소규모 하천의 합류에 의해 이뤄지며, 이때 모든 합류점에서의 하천은 양 방향에서 유입된다. 다시 말해 Fig. 7에서와 같이 이 방법은 합류 후의 하천을 기준으로 합류 전의 두 하천의 방향을 정리하는 것으로, 정리된 하천망이 유역별로 비교될 수 있다는 장점을 갖는다. 이와 같은 방법으로 하천망의 방향을 구하면, 하천망의 주방향은 최고차 하천에서 하나의 mode를 갖게 되고, 그 외의 모든 하천에서 두 개의 mode를 갖게 될 가능성이 높다. 이 방법을 준용할 경우 bi-modal 형태를 갖는 von Mises 분포의 적용이 필요하며, 이는 다음과 같다.



(a) DEM of study basin

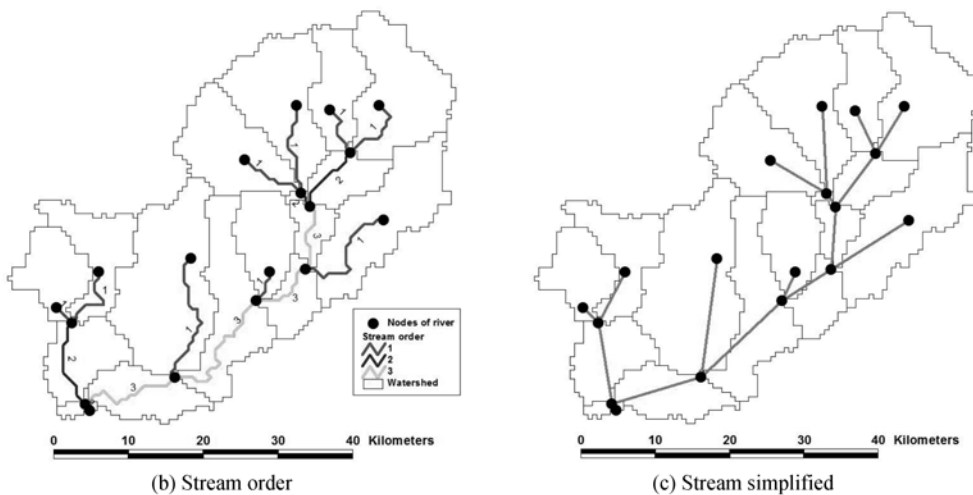


Fig. 8 DEM and Stream Network in Study Basin

$$f_2(\theta) = \sum_{j=1}^2 p_j f(\theta; \mu_j, \kappa_j) = p_1 [2\pi I_0(\kappa_1)]^{-1} \exp[\kappa_1 \cos(\theta - \mu_1)] + p_2 [2\pi I_0(\kappa_2)]^{-1} \exp[\kappa_2 \cos(\theta - \mu_2)] \quad (7)$$

주어진 하천망의 방향성 분포 특성이 uni-modal 또는 bi-modal 형태로 주어질 때 von Mises 분포의 매개변수를 결정하는 방법은 유철상과 박창열(2010)에서 자세히 살펴볼 수 있다.

3.2 대상유역의 DEM 구축 및 하천망 추출

본 연구에서는 낙동강 지류인 내성천 유역을 대상으로 하였다. 하천망의 방향성을 결정하기 위해 내성천 유역에 대한 1/25,000 수치지도를 수집하여 DEM(600 m×600 m)을 구축하였다. 격자 크기를 600 m×600 m으로 선정한 이유는 DEM의 해상도 문제를 최소화하고 매우 작은 소하천의 간섭 영향을 최소화하기 위함이다. 이 DEM은 Arc/Info의 Grid 모듈을 이용하여 Agree DEM으로 변환하였으며, 완성된 Agree DEM은 함몰지(sink)를 제거하여 Agree Fill DEM으로 가공되었다(Hellweger, 1997). 하천망은 ArcGIS/Arcmap의 Extension 중 Hydro-tool을 이용하여 추출하였으며, 하천망 추출 임계값은 200을 적용하였다(Fig. 8 참조). 추출된 하천망에 하천치수를 부여하기 위해 Stralher의 치수법칙을 이용하였다. 이때 하천망 방향의 결정과 정량화를 용이하게 하기 위해서는 하천을 단순화할 필요가 있다. 이렇게 단순화된 내성천 유역의 하천망은 그 방향적 구조를 정량화하는데 이용되었다.

3.3 방위를 기준으로 한 하천망의 방향성 정량화

하천망 방향성의 정량화를 위한 첫 번째 방법은 각 하천 별로 결정된 하천 방향을 방위를 기준으로 정량화하는 것이다. 방향성을 갖는 자료의 히스토그램은 장미그림(rose diagram)이 이용되며, 이를 통해 분포 특성과 mode의 수를 파악할 수 있다. Fig. 8에서 결정된 내성천 유역의 하천망 방향성 정보를 장미그림으로 나타내면 Fig. 9와 같다.

실제로 유출모의에 이용되는 소유역의 규모는 매우 작은 편은 아니다. 그러나 여전히 유역의 하천치수는 높지 않다. 따라서 하천망의 방향성을 정량화한다 해도 그 대표성이 높을 수 없다. 이를 보완하는 측면에서 하천연장을 가중인자로 고려할 수 있다(유철상과 박창열, 2010).

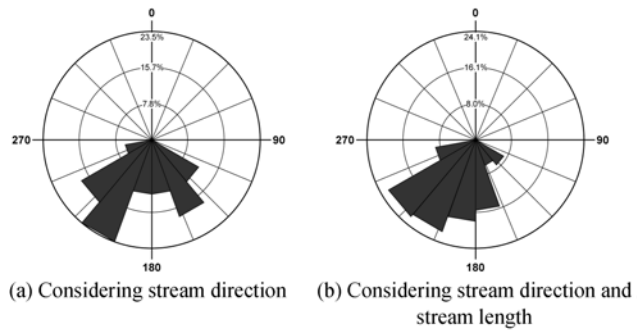


Fig. 9 Rose Diagram for Directions of Stream Network

하천연장의 고려 여부에 따른 하천 방향성의 정량화 결과인 Figs. 9(a)와 9(b)의 차이를 비교해보면, 하천연장을 고려할 경우 상대적으로 높은 집중계수를 갖게 된다. 즉, 하천의 주방향이 갖는 대표성이 더욱 커지게 된다. 본 연구 대상유역의 경우, 하천연장을 가중인자로 고려하지 않을 경우(Fig. 9(a)) 주방향은 약 200도, 하천연장을 고려한 경우(Fig. 9(b)) 약 230도 정도로 나타난다. 이 방향들은 내성천 유역의 최원점에서 유역 출구를 향하는 방향과 유사함을 알 수 있다.

내성천 유역에서 하천망의 지형적 특성을 살펴보면, 본류의 방향은 유출구가 위치한 남서쪽에서 동북방향으로 뻗어 있고, 그 위치는 유역의 중앙이 아닌 하단부에 치우쳐있다. 만약 본류 흐름이 유역 중앙을 지나간다면, 하천망 방향의 mode는 유역의 최상류에서 유역 출구를 향하는 방향으로 결정될 가능성이 높다. 그러나 Fig. 8(a)을 살펴보면, 내성천 유역에서 본류는 유역의 하단부에 위치해 있으며, 대부분의 산지는 유역의 북서쪽에 분포되어 있다. 즉, 북서쪽에서 유입되는 지류의 영향으로 인해 하천방향만 고려할 경우 하천망 방향성의 mode 특성이 왜곡될 여지가 있다. 따라서 하천망 방향성을 정량화하기 위해서는 하천연장을 동시에 고려하는 것이 보다 타당할 것으로 보인다.

하천망 방향성 정량화를 위해 하천연장을 고려한 후, 이를 하천치수별로 구분하여 나타내면 Fig. 10과 같다.

Fig. 10에서 볼 수 있듯이 각 하천치수별로 하천망의 방향성은 크게 다르게 특성을 나타낸다. 전체적으로 보면, 고차 하천으로 갈수록 방향적 특성은 더욱 뚜렷해진다. 이러한 경향은 하천망의 구조를 나무의 가지로 비교하여 생각해보면, 쉽게 이해된다. 즉, 고차 하천일수록 유수 흐름이 유역출구

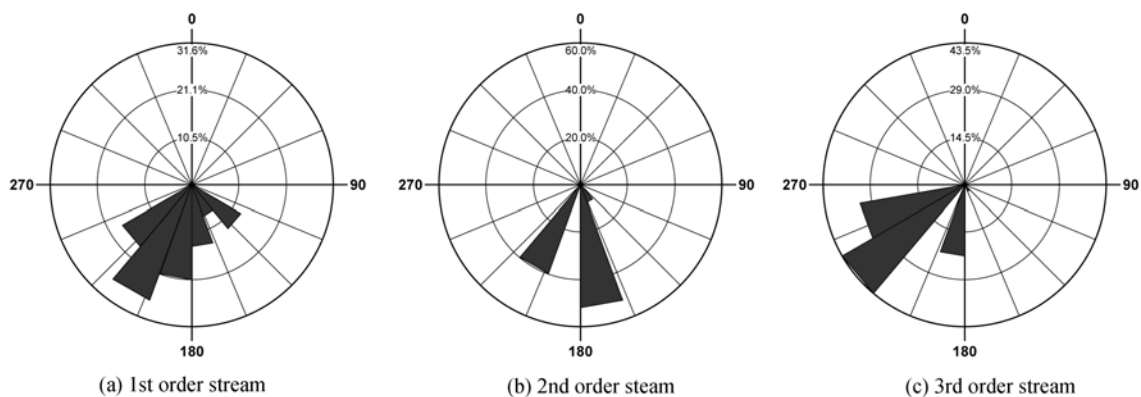


Fig. 10 Rose Diagrams for Directions of Stream Network about the Azimuth

Table 1. Parameters of von Mises Distribution for Stream Orders about the Azimuth (unit: degree)

Axis	Stream order	Preferred direction (degree)	Concentration parameter
North	All	200.5	3.265
	1	191.9	3.365
	2	187.3	5.644
	3	225.3	4.777

로 집중되고, 1차 하천에 가까울수록 더욱 다양한 방향적 특성을 갖게 된다.

Fig. 10 결과를 von Mises 분포에 적용하여 정량화하면, 그 결과는 Table 1과 Fig. 11과 같다. 먼저 Fig. 10을 보면, 집중계수의 차이는 1차 하천에서 가장 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 1차 하천에서 그 방향성이 더욱 복잡해짐을 의미한다. 즉, 고차 하천일수록 유수의 흐름이 합류부(최고차 하천인 경우 유역 출구)로 집중됨을 나타내며, 치수가 낮은 하천일수록 유수를 빨리 이동시키기 위한 방향적 구조를 갖게 되는 것으로 이해할 수 있다. 그러나 전체적으로는, Table 1에서 살펴볼 수 있는 것처럼, von Mises 분포의 주방향은 하천치수별로 큰 차이가 없는 것으로 나타난다. 즉, 대상유역 전체의 하천 방향성은 하천치수별 결과의 평균적인 특성으로 이해할 수 있다.

3.4 하천 합류점을 기준으로 한 하천망의 방향성 정량화

하천의 방향성을 정량화하기 위한 두 번째 방법은 하천 합류점을 기준으로 정리하는 것이다(Fig. 7 참조). 이와 같은 방법을 따른다면, mode 특성이 두 방향으로 나타날 가능성이 높다. 이는 두 i 차 하천이 합쳐져서 $(i+1)$ 차 하천으로 합류되는 형태를 생각해 보면 당연하다. 하천치수에 따른 차이를 생각해 보면, 상대적으로 높은 산지에 위치한 1차 하천에

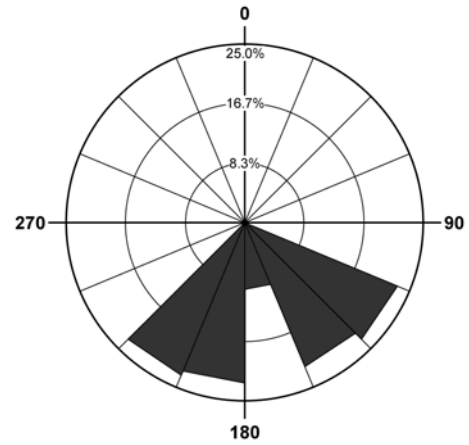


Fig. 12 Rose Diagram for Directions of Stream Network about the Stream by the Confluence of Branches

서는 유입되는 각이 좁게 되므로 180도 주변의 양쪽에서 최빈방향이 결정되고, 2차 하천의 경우 그 유입각이 더 넓어져 상대적으로 180도에서 양방향으로 더 떨어진 방향에서 최빈방향이 결정될 가능성이 크다. 이 방법을 준용하여 3차 하천유역으로 분할된 내성천 유역의 하천망에 적용하면, 장미그림은 Fig. 12와 같다.

Fig. 12에서 볼 수 있듯이 mode는 뚜렷하게 두 방향으로 나타난다. 이는 하천 합류점을 기준으로 하천 방향을 정리하였기 때문이다. 즉, $(i+1)$ 차 하천의 시점부가 180도에 위치하고, 차 하천이 양 방향에서 $(i+1)$ 차 하천으로 유입되기 때문이다. 사실 이 결과는 호우의 방향을 고려하여 유출규모를 정량적으로 해석할 때 이용될 수 있다. 다시 말해서 유역 출구에서 어느 방향으로 호우가 이동하든지 그 유출특성의 파악이 가능해지는 것이다. 이 문제는 다음 연구에서 다루기로 한다.

하천망 방향성을 하천 합류점을 기준으로 정리한 후, 이를 하천치수별로 구분하여 나타내면 Fig. 13과 같다.

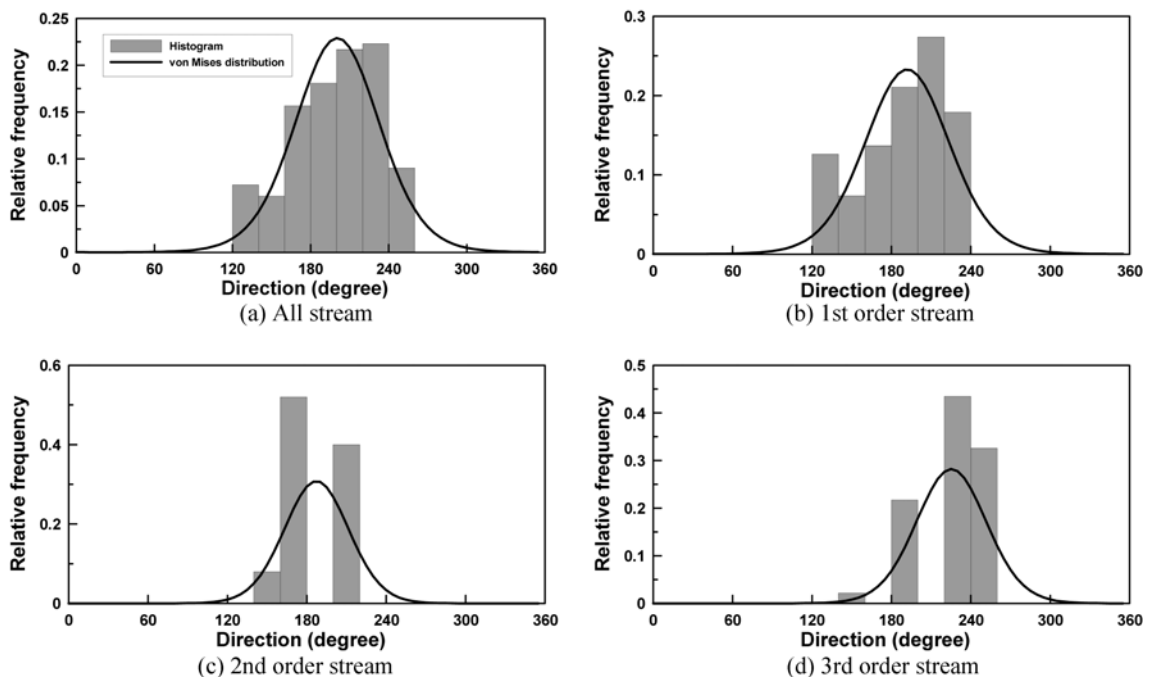


Fig. 11 Rose Diagrams for Directions of Stream Network about the Azimuth

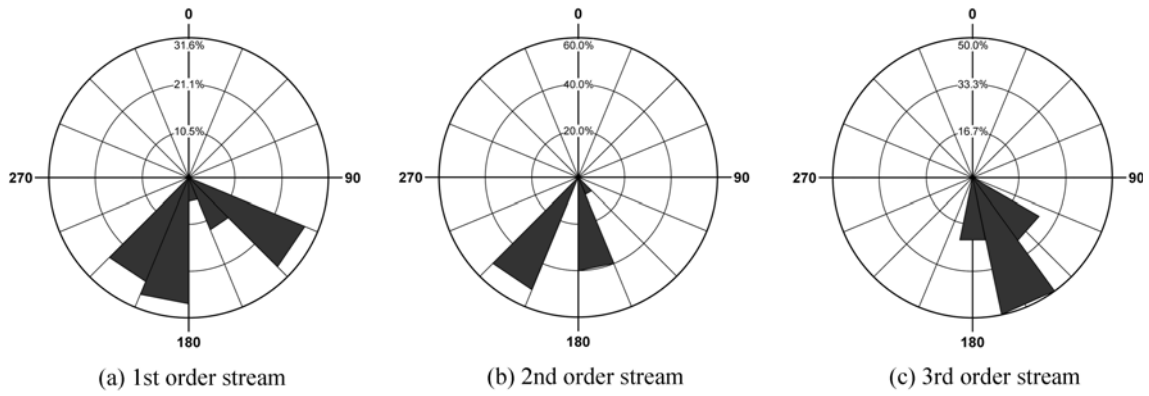


Fig. 13 Rose Diagrams for Directions of Stream Network about the Stream by the Confluence of Branches

Table 2. Parameters of von Mises Distribution about the Stream by the Confluence of Branches (unit: degree)

Axis	Stream order	μ_1	μ_2	κ_1	κ_2	p_1	p_2
Confluence of branches	All	143.2	200.5	10.368	14.235	0.51	0.49
	1	128.9	197.7	11.356	10.864	0.46	0.54
	2	165.6	207.4	18.321	17.647	0.47	0.53
	3	154.4	-	7.096	-	1.00	0.00

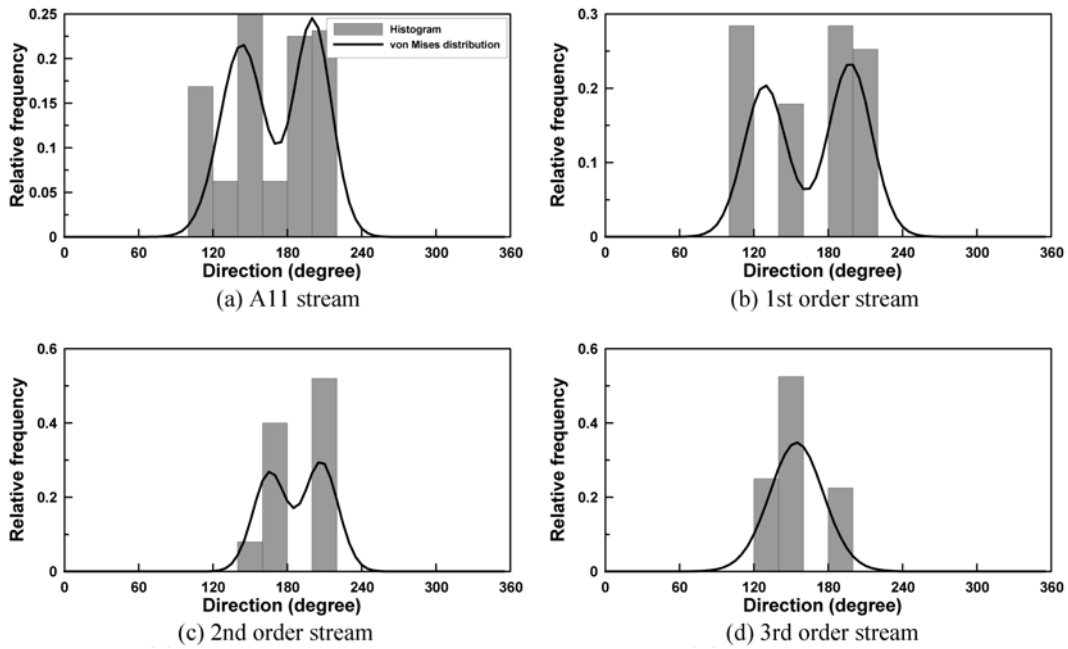


Fig. 14 Rose Diagrams for Directions of Stream Network about the Stream by the Confluence of Branches

Fig. 13에서 볼 수 있듯이 하천차수로 구분한 경우에 1차 하천과 2차 하천에선 뚜렷하게 mode가 두 방향으로 나타나고 있다. 3차 하천의 경우에는 하나의 mode를 보이고 있다. 이러한 이유는 유역의 원활한 배수구조에서 찾아볼 수 있다. 즉, 최고차 하천의 경우 유역 내의 배수를 효율적으로 진행시키기 위해 그 방향은 유역 출구로 향하게 된다.

이 결과를 von Mises 분포에 적용하여 정량화하면 Table 2와 Fig. 14와 같다. 먼저, Table 2의 결과를 보면, 공교롭게도 von Mises 분포의 주방향은 최빈방향으로 결정되지 않음을 알 수 있다. 이는 von Mises 분포의 형태가 bi-modal로 나타날 때 각각의 확률밀도함수를 추정하여 이들의 합으로 최종적인 von Mises 분포가 결정되기 때문이다. 이로 인해 두 개의 주방향이 근접해 있을 경우에는 하나의 주방

향을 갖는 형태로 분포형이 결정된다. 그러나 이를 그림으로 나타내면, von Mises 분포가 하천망의 방향적 특성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다(Fig. 14).

이러한 방법에 의해 정량화된 하천망 방향성 정량화 결과는 유역내의 모든 하천망이 0도와 180도를 기준으로 정리된 것을 의미한다. 이 결과의 의미는 무엇보다도 모든 하천을 하나의 기준으로 정리할 수 있는데 의의가 있다. 따라서 이 결과를 이용하게 되면, 호우의 방향이 다양하게 주어지면, 유역 유출응답의 차이를 정량적으로 해석하는 것이 가능해진다.

4. 결 론

본 연구에서는 하천유역을 대상으로 사면과 하천망의 방향

적 특성을 살펴보고, 하천망의 방향성이 강우-유출 모형에 고려될 수 있도록 확률밀도함수 형태로 정량화하였다. 이를 위해 내성천 유역의 수치지형도를 수집하여 DEM을 구축하였으며, ArcGIS의 Hydro Tool을 이용하여 하천망을 생성하였다. 이들 하천망의 방향성은 von Mises 분포에 적용하여 정량화하였으며, 이를 통해 하천유역에서 하천망의 방향적 특성을 살펴보았다. 추가로 하천망과 사면의 방향적 구조를 확인함으로써 이들 특성이 강우-유출 모형에 유연하게 고려될 수 있도록 하였다.

1. 본 연구에서 고려한 von Mises 분포는 하천망의 방향적 특성을 적절히 표현할 수 있음을 확인하였다. 방위 기준으로 정리한 하천망의 방향성은 하나의 mode 특성이 뚜렷하고, 하천 합류점 하천을 기준으로 정리할 경우에는 두 개의 mode 특성이 뚜렷해짐을 알 수 있었다.
2. 하천망의 방향성은 사면의 방향성과 뚜렷한 관계를 갖는 것을 알 수 있었다. 하천망과 사면의 방향적 결합 구조는 유역의 특성을 보다 현실적으로 묘사할 수 있고, 이들 관계를 가정하고 하천망의 방향성이 정량화된다면, 강우-유출 모형에 이들 특성이 쉽게 반영될 수 있을 것으로 기대된다.
3. 하천망의 방향성은 고차 하천일수록 뚜렷한 mode 특성을 나타냄을 확인하였다. 이러한 결과는 고차 하천일수록 그 방향성이 한반도의 지구조선과 잘 일치하는 것으로 기존 연구성과와도 일치하는 것이다.
4. 하천망의 주방향은 하천연장에 대한 영향을 크게 받을 수 있었다. 이는 대상 하천유역의 유역응답에서 하천유출이 사면유출보다 상대적으로 큰 영향력을 갖기 때문이다. 강우-유출 모형에 하천망 방향성을 고려하기 위해서도 하천연장을 고려하여 이들 방향성을 정량화하는 것이 호우 방향에 보다 뚜렷한 유출반응 특성을 나타낼 것으로 보인다.
5. 본 연구에서 고려한 하천망의 방향성 정량화 방안을 이용할 경우 이들 결과는 유출모형에 고려될 수 있을 뿐만 아니라 유출응답 특성을 정량적으로 파악하는데 이용될 수 있다. 방위 기준으로 정리한 하천망 방향성은 실제 유역에 대한 유출모형에 적용이 가능하며, 하천 합류점을 기준으로 정리한 결과는 호우의 방향성에 대한 유출응답의 반응을 정량적으로 살펴보는 데 이용될 수 있다. 이를 근거로 GIUH 모형을 개선한다면, 호우 방향성에 반응하는 유역 유출특성의 변화를 살펴볼 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것입니다 (KRF-2008-313-D01083). 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

김연준, 양인태(2002) DEM으로부터 하천망 추출을 위한 흐름수적 임계값의 분석. **한국측량학회지**, 한국측량학회, 제10권, pp. 691-712.

김주환(1985) 한국동남아지대에 발달한 선구조선에 관한 연구. **지리학연구**, 제10권, pp. 691-712.

김주환(2009) **기후지형학**. 동국대학교 출판부.

김창환(1999) GIS 기법을 이용한 동강 유역의 지형 경관 분석. **한국지형학회지**, 한국지형학회, 제6권, 제1호, pp. 1-10.

오경섭(1996) 한국의 지형·토양 환경 정밀 지도화 방안에 관한 연구. **한국지형학회지**, 한국지형학회, 제3권, 제1호, pp. 19-21.

오미선, 김원사, 지광훈, 김형수(2000) 광역지구물리 자료를 이용한 수도권 지역의 선구조선과 수계 분석. **2000년도 학술발표대회 논문집**, 대한지질공학회, pp. 205-213.

이민부, 김남신, 양철수, 한옥(2001) 추가령 구조곡 하계망의 방향성과 프랙탈차원 해석. **지질공학**, 대한지질공학회, 제37권, 제4호, pp. 597-609.

이민부, 김남신(2007) 선구조선과 하계망 패턴간의 관계에 관한 연구-미원·속리산 일대를 중심으로. **한국지형학회지**, 한국지형학회, 제14권, 제1호, pp. 41-51.

유철상, 박창열(2010) 호우사상의 대표 이동방향 결정. **한국방재학회 논문집**, 한국방재학회, 제10권, 제2호, pp. 91-102.

조홍제, 이상배(1990) 하도망의 기하학적 특성을 이용한 지형학적 순간단위도 해석. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제23권, 제1호, pp. 89-98.

Beasley, D.G., Huggins, L.F., and Monke, E.J. (1980) ANSWERS-a model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*, Vol. 23, pp. 938-946.

Bhaskar, N.R. (1997) Flood estimation for ungauged catchments using the GIUH. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. 123, No. 4, pp. 228-238.

Brierley, G.J. and Fryirs, K.A. (2005) *Geomorphology and River Management*. Wiley-Blackwell.

Burrough, P.A. and McDonell, R.A. (1998) *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press, New York.

ESRI www.esri.com

Fetter, C.W. (1994) *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall, New Jersey.

Gupta, V.K. (1980) A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 5, pp. 855-862.

Hellweger, F.L. (1997) AGREE-DEM Surface Reconditioning System. <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/ferdi/research/agree/agree.html>

Jarvis, R. (1976) Stream orientation structures in drainage networks. *Journal of Geology*, Vol. 84, No. 5, pp. 563-582.

Kumar, R., Chatterjee, C., Singh, R.D., Lohani, A.K., and Kumar, S. (2007) Runoff estimation for an ungauged catchment using geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUH) models. *Hydrological Processes*, Vol. 21, pp. 1829-1840.

Lee, K.T. and Chang, C. (2005) Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology based IUH modeling. *Journal of Hydrology*, Vol. 311, pp. 91-105.

Mácka, Z. (2003) Structural control on drainage network orientation-an example from the Loucka drainage basin, SE margin of the Bohemian Massif." *Landform Analysis*, Vol. 4, pp. 109-117.

Morisawa, M. (1963) Distribution of stream-flow direction in drainage pattern. *Journal of Geology*, Vol. 71, No. 4, pp. 528-529.

Rinaldo, A., Rigon, R., and Marani, M. (1991) Geomorphological dispersion. *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 4, pp. 513-525.

Rodriguez-Iturbe, I. and Valdes, J.B. (1979) The geomorphologic structures of hydrologic responses. *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1409-1420.

Rodriguez-Iturbe, I., Gonzalez-Sanabria, M., and Caamano, G. (1982) On the climatic dependence of the IUH: a rainfall-runoff analysis of the Nash model and the geomorphoclimatic theory. *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 887-903.

Tricart, J. (1971) *Structural Geomorphology*. Longman, London.
WAMIS www.wamis.go.kr
Zabidi, H. and Freitas, M.H. (2006) Structural studies for the prediction of karst in the Kuala Lumpur limestone. *10th IAEG International Congress*, Nottingham, United Kingdom, September, 2006.

Zevenbergen, L.W. and Thorne, C.R. (1987) Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 12, pp. 47-56.

(접수일: 2010.11.11/심사일: 2011.1.13/심사완료일: 2011.2.16)