홍수침수지역의 수문지형학적 특성

Hydrological Topographic Characteristics of the Flood Submerged Area

박민규*

Park, Minkyu*

Abstract

The study investigated the usefulness of flooding region identification using a hydrological characteristic called the wetness index. The wetness index value is >10 in the Horton's first river. A considerable number of areas may have a wetness index of approximately 10, and it is difficult to identify areas vulnerable to inundation using the wetness index alone. However, basket analysis showed that including the wetting index can help find useful association rules with support scores ≥ 1.0 .

Key words : Wetness Index, Flood-prone Region, Association Rule, Basket Analysis

요 지

본 연구에서는 습윤지수라는 수문지형학적 특성을 이용하여 홍수침수지역을 식별하는 경우의 유용성을 살펴보았다. 호튼의 하천분류에서 1차하천의 경우 습윤지수 값이 10을 기준으로 그 이상의 값을 가지고 있는 경우를 상당히 많은 사례에서 발견할 수 있다. 다만, 제내지의 경우에도 습윤지수 10 내외의 값을 가지고 있는 지역이 상당히 많을 수 있어 단순히 이 지수만으로 홍수침수에 취약한 지역을 식별하는 것은 어렵다. 그러나 장바구니 분석 등을 통해 실제 침수가 발생한 지역의 원인인자들을 함께 살펴본 결과 습윤지수를 포함하여 분석한 경우 지지도 1.0이상의 유용한 연관성 규칙을 찾는 데 도움이 될 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 습윤지수, 홍수취약지역, 연관성 규칙, 장바구니 분석

1. 서 론

홍수로 인한 침수지역은 우리나라 재난관리에서 특히 중요하게 다루어지고 있다. 이를 식별하기 위해서는 정확한 강우 유출모형과 침수모델링의 적용, 그리고 과거 이력조사를 통한 검증 등이 있어야 하나 이 경우 막대한 예산과 장기간이 소요되어 실제 적용에는 어려움이 크다. 이러한 문제로 홍수 침수지역, 홍수취약지역, 위험지역, 위험도평가 등 이름은 다르지만 특정 지역이 홍수에 취약한지를 판단하기 위한 다양한 간편법들이 국내외에서 개발되어 사용되고 있다.

본 연구에서는 이러한 간편법을 적용할 때 수문지형학적 인 인자를 포함하는 경우의 유용성을 확인하고자 한다. 이를

위해 실제 침수가 발생한 지역의 지도상 경계 및 침수원인들을 다년간 수집한 기록자료와 GIS 기술 발전 및 데이터 축적의 결과로 확인 가능한 공간데이터를 이용하기로 한다. 본 연구에서 집중적으로 살펴볼 수문지형학적인 인자는 습윤지수이다. Beven and Kirkby (1993)가 제안한 습윤지수는 여러 종류의 수문모델링이나 지역분석의 인자로 사용되어 오며 그 유용성이 보고된 바 있다(Jaeger, 2004; Hattajji and Matsushi, 2006; McNamara et al., 2006). 본 연구에서는 대상유역의 습윤지수를 산정한 후 유역내 각 분류된 지역과 그 지역들이 가지는 습윤지수 값의 관계를 살펴보기로 한다. 또한 이를 기초로 홍수취약지역을 식별하기 위해 간편법을 적용할 때를 가정하여 장바구니 분석을 실시해 보고 습윤지

*교신저자, 정회원, 중원대학교 창의융합공학부 소방방재공학전공 교수(Tel: +82-43-830-8683, Fax: +82-43-830-8683, E-mail: mkhojin@daum.net)
Corresponding Author, Member, Professor, Department of Fire and Disaster Protection Engineering, Jungwon University

수를 포함하는 경우의 유용성을 검토하기로 한다.

2. 대상유역과 습윤지수 산정

본 연구에서 검토대상으로 하는 유역은 침수지역 자료와 그 침수조사기록지를 보유하고 있는 불광천이다. 침수조사 기록은 1984, 1987, 1990, 1998, 2001, 2003, 2010, 2011년 총 8개년도에서 찾아볼 수 있다. 이를 지도상에 정리하면 Fig. 1과 같고 침수된 이력이 있는 지역의 총면적은 131.82 ha 이었다.

한편, 지형을 표현하는 인자로써 상부사면 기여면적을 경사도의 비로 나눈 습윤지수(wetness index)가 수문모형에 쓰이고 있다(Beven and Kirkby, 1993). 습윤지수는 포화성향성 혹은 수문학적 상사성을 수치지형모형에서 구현하는 수문학적 대리지수로서 TOPMODEL, THALES, TOPOG 등의 많은 분포형 수문 모형에서 활용되고 있으며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$W_i = \ln \left(\frac{A_i}{\tan \beta_i} \right) \quad (1)$$

여기서, W_i 는 습윤지수(wetness index) 혹은 지형지수(topographic index)이고, A_i 는 상부사면 기여면적이며, $\tan \beta_i$ 는 해당 격자와 하부사면 인접격자 사이의 경사이다.

Fig. 1. Flood Submerged Region in Bulkwang-cheon Watershed

Fig. 2는 앞의 Eq. (1)을 이용하여 불광천 유역의 습윤지수를 산정하는 과정을 보여주고 있으며 Fig. 3은 계산결과 얻은 습윤지수 값들의 히스토그램을 보여준다.

Fig. 2. Wetness Index Calculation in Bulkwang-cheon Watershed

Fig. 3. Wetness Index Histogram in Bulkwang-cheon Watershed

Fig. 3에서 불광천 유역 전체 2,086.0 ha를 대상으로 습윤지수 분포를 살펴보면 a와 같고, 1에서 27까지 범위의 습윤지수 값이 얻어졌다. 비교를 위해 불광천 수계의 하천구역으로 지정된 곳을 추출한 결과는 Fig. 3의 b와 같고 총 면적은 20.8 ha였다.

불광천 하천구역의 습윤지수의 최소수치는 6부터 나타나고 있다. 이 값은 유역최상류의 극히 작은 면적에 불과한 것으로 확인되었고, 하천부지에 해당하는 지역들의 의미있는 습윤지수는 10이었다. 이는 이 숫자를 넘어서자 하천구역으로 지정된 지역이 급속히 증가하는 것으로 나타났기 때문이다. 한편, 하천구역의 가장 빈도가 높은 습윤지수는 16-20 사이에서 발생하고 있었다. 특이사항으로 Fig. 3의 b에서 3개의 첨두가 나타나는 양상은 그 산정결과를 하천차수에 따라 분류할 경우 어느 정도 설명이 가능하였다. 1차 하천의 경우 대부분 습윤지수 10 전후의 값을 가지고 있었으며, 불광천 본류구간 대부분이 속하는 2차 하천의 경우 습윤지수 18 전후의 값을 가지고 있었다. 마지막으로 3차 하천의 영향을 받는 불광천 하류구역의 습윤지수 값은 24 이상이었다. 여기서 주목할 만한 것은 불광천 유역에서 하천흐름 형태를 보이기 시작하는 1차 하천에서 주로 나타나는 습윤지수의 범위가 6-14의 범위를 가지고 있으며 그 중 80% 이상은 8-11 사이에 집중되고 있다는 것이다. 한편, 불광천 유역 전체를 살펴보면 6-14사이의 습윤지수를 가지는 지역의 면적비율은 유역전체의 약 70%에 이르고 8-11 사이의 습윤지수를 가지는 면적비율은 약 30%에 가까운 비중을 차지하고 있어 홍수발생시 이러한 1차 하천의 기능을 할 가능성이 높은 성격의 토지가 유역 내에 상대적으로 높은 비율로 포함되어 있음을 확인할 수 있어 이 값이 단순히 하천부지와 제내지를 구분하는 인자로 사용되기에는 곤란한 값임을 쉽게 확인할 수 있었다. 한편, 유역전체에서 습윤지수가 15이상인 지역이나 하천부지에 속하지 않은 토지 대부분은 제방으로 보호되고 있는 지역이 차지하고 있었으며 극한홍수인 가능최대강수량에 의한 유하지역과 일치하는 것으로 검토되었다.

3. 수문지형학적 특성 고찰

불광천 유역을 대상으로 하천계획홍수위보다 낮은 지역 중 하천이 아닌 지역을 식별한 결과는 Fig. 4의 a와 같고 총 면적은 77.4ha였다. 이러한 방법처럼 홍수위 이하 지역을 저지대로 정의하여 식별하는 분석방법은 풍수해저감종합계획이나 침수해석을 위한 예비분석에서 많이 사용되고 있다. 이 방법의 유용성을 확인하기 위하여 불광천 유역에서 침수이력을 가지고 있는 지역과 홍수위 이하 지역을 중첩분석한 결과 침수이력을 가진 지역의 15.5%에 해당하는 낮은 값으로 얻어졌다. 이는 침수의 분류가 외수침수와 내수침수로 분류할 수 있으며 하천의 홍수량이 크게 증가하여 제방월류 등의 형태로 범람이 발생하는 형태가 외수침수인데 현대의 도시는 내수침수가 차지하는 비중이 높기 때문에 해석할 수 있다. 즉, 대도시 하천구간은 제방의 개수율을 100% 달성하여 외수로 인한 홍수피해가 발생하지 않은지 상당히 오래 기간이 이미 지난 경우가 많기 때문이다. 이에 비해 내수침수는 주로 도시지역에서 배수를 담당하는 하수관거나 우수관거의 용량부족 등의 원인으로 발생한다.

Fig. 1에서 불광천 유역은 전체에서 산발적으로 크고 작은 침수피해가 발생한 반면에 홍수위 이하 지역은 유역하류의 하천주변으로 집중되어 나타나고 있었다. 이는 불광천 유역이 도시화가 상당히 이루어졌고 대부분의 침수피해의 원인이 하수관로의 용량 부족이기 때문으로 볼 수 있다. 즉, 홍수취약지역을 살펴보기 위한 목적으로 홍수위 이하 지역을 검토하는 것은 대규모 외수침수 가능지역을 파악하기 위한 목적으로는 유용할 수 있으나 불광천 유역과 같은 도시지역의 내수침수 분석 목적에서는 큰 한계가 있는 것을 확인할 수 있다.

침수지역의 습윤지수만을 분석한 결과는 Fig. 5와 같다. 불광천의 침수이력이 있는 곳을 대상으로 습윤지수의 편입비율을 검토해 보면 침수가 되었는데 조사결과 습윤지수가 11이 넘는 경우는 침수지역 전체의 40%, 침수가 되었는데 조사결과 습윤지수가 7이 넘는 경우는 침수지역 전체의 약

(a) Regions with elevation below flood water level

(b) wetness index histogram

Fig. 4. Wetness Index in Regions with Elevation Below Flood Water Level

(a) flood submerged region

(b) wetness index histogram

Fig. 5. Wetness Index in Flood Submerged Region

80% 정도로 나타나고 있었다. 이를 통해 확인할 수 있는 것은 단순히 습윤지수 한 가지를 가지고 특정한 값을 적용해 대상지역의 침수특성을 판단하는 것은 적절하지 않다는 것이다. 이는 습윤지수의 특정 값이 분명 해당 지점의 침수위험성이나 가능성과 관련은 있으나 유역에 따라 상당히 많은 지역이 이러한 습윤지수 값을 가지고 있을 수 있어 실제 침수와 연관될 가능성이 높게 나타나지 않을 수 있기 때문이다.

습윤지수만을 사용하는 경우를 보완하기 위해 다른 인자와 연동할 경우 침수지역의 식별도가 얼마나 높아지는지를 확인하기 위해 연관성 분석기법(affinity analysis)을 사용하였다. 여기서의 연관성 분석기법은 어떤 침수사건이 발생하였을 때 또 다른 어떠한 속성이 동반되는가를 분석하는 기법으로 데이터마이닝 방법 중 대표적인 한 가지이다. 이 방법은 데이터마이닝에서는 고객의 장바구니 안을 살펴서 상품의 구매형태를 분석하는 목적으로 자주 사용되어 장바구니 분석(market basket analysis)이라고도 명명되고 있다. 장바구니 분석에 의한 연관성 규칙은 원래는 어떠한 상품이 다른 상품과 함께 판매될 가능성을 확률로 보여주는 규칙을 이야기 한다. 상품 A와 상품 B의 연관성은 그 규칙이 활용가

치를 가지기 위해서 먼저 상품 A와 상품 B의 동시발생이 충분히 많아서 일회성이 아니라 빈번히 발생하고 있어야 한다. 이러한 높은 연관성을 평가하기 위한 기준이 되는 지표에는 Support, Confidence, Lift가 있다. 다만, 여기서는 홍수침수지역을 분석하기 위한 것이므로 분석대상이 되는 침수발생지역과 그 지역의 침수에 영향을 미치는 속성들이 상품을 대체하여 사용하게 된다. Eq. (2)은 Support를 산출하는 식으로 $n(A \cap B)$ 은 침수취약성과 관련된 A속성과 B속성이 동시에 발생한 건수를 N은 전체건수를 의미하는 것으로 속성 A와 속성 B가 동시에 만족되는 확률은 얼마인지를 판단하여, 발견한 연관성을 얼마만큼 지지하는 가를 수치로 보여준다. Eq. (3)은 침수취약성과 관련하여 속성 A가 발생한 상태에서 속성 B도 관측될 조건부 확률을 의미하며 도출된 규칙의 신뢰정도를 확인할 때 사용되는 지표이다. Eq. (4)는 두 속성 A와 B가 독립이라고 할 때 Confidence를 속성 B의 발생확률인 Benchmark Confidence로 나눈 값이다. 이는 도출해낸 연관성 규칙이 실제 강한 연관성을 보이는지를 식별하기 위한 지표로 사용된다. 연관성 규칙은 이러한 3가지 지표를 기준으로 추출하게 되는데 통상 Lift 값이 1이상일 때

식별된 규칙이 의미 있는 것으로 실무에서 사용되고 있다. 각 지표의 기준값은 이론적으로 결정되어 있는 것은 아니며 일반적으로 분석자의 판단과 경험으로 결정하는 것이 일반적이다.

$$Support = \frac{n(A \cap B)}{N} \quad (2)$$

$$Confidence = Pr(B|A) \quad (3)$$

$$Lift = \frac{Pr(B|A)}{Pr(B)} \quad (4)$$

Fig. 6은 앞서 얻은 8개년 침수기록에서 원인으로 제시된 내용을 요약정리한 그림이다. 주로 저지대라는 피상적인 개념으로 표시된 것이 32.6%나 되었으며 관로 통수능력 부족에 의한 직접적인 침수피해도 31.7% 정도나 기재되어 있었다. 이러한 불명확한 원인인자를 대체하기 위해 해당지역의 서울지 공간데이터 정보로부터 명확히 얻을 수 있는 몇 가지 수문지형학적인 인자와 기타 원인으로 이용가능한 인자들을 선정하였다. 즉, 홍수위 이하 지역, 습윤지수(10초과), 경사(1%이내, 2%이내, 5%이내), 통수능력부족관거, 용도지역, 불투수지역면적, 도시생태현황도 비오름유형, 지하공간을 가지는 건축물 등을 활용하여 8개년 침수기록과 연관성분석을 실시하였다.

Fig. 6. Flood Causes

Fig. 6은 앞서 얻은 8개년 침수기록에서 원인으로 제시된 내용을 요약 정리한 그림이다. 주로 저지대라는 피상적인 개념으로 표시된 것이 32.6%나 되었으며 관로 통수능력 부족에 의한 직접적인 침수피해도 31.7% 정도나 기재되어 있었다. 이러한 불명확한 원인인자를 대체하기 위해 해당

지역의 서울지 공간데이터 정보로부터 명확히 얻을 수 있는 몇 가지 수문지형학적인 인자와 기타 원인으로 이용가능한 인자들을 선정하였다. 즉, 홍수위 이하 지역(Y1), 습윤지수(10초과 Y2, 15초과 Y3), 경사(2%이내 Y4, 5%이내 Y5), 통수능력부족관거(Y6), 불투수지역비율(20% Y7, 30% Y8, 40% Y9), 지하공간을 가지는 건축물(Y10) 등을 활용하여 8개년 침수기록과 연관성분석을 실시하였으며 지지도가 1이상인 결과들 중에서 습윤지수를 포함한 것을 정리한 내용은 Table 1과 같다. 이 표의 결과에 따르면 단순히 한 가지 요인이 침수가 반복적으로 발생하는데 기여하는 규칙을 형성하는데 지지도가 1이상으로 나타나지는 않는다. 대부분 세 가지 이상의 인자를 함께 사용하는 경우 침수취약지역을 판단하는데 장바구니 분석에서 지지도가 1.0이 넘는 동시발생 속성인자를 추출할 수 있었다. 이때 주목할 만한 점은 이렇게 얻어진 규칙 대부분에 습윤지수가 포함되어 있다는 것이다. 즉, 습윤지수를 포함하지 않는 것보다 포함하는 경우 장바구니 분석 등과 같은 방법에서 유용한 연관성 규칙을 발견하는데 도움이 되는 것을 확인할 수 있다.

Table 1. Association Rules

Rule	Sup	Conf	Lift	If	Then
1	100	98.22	1.02	Y2 & Y4 & Y6	flood
2	100	98.22	1.02	Y2 & Y5 & Y9	flood
3	100	98.22	1.02	Y2 & Y6 & Y7	flood
4	100	98.22	1.01	Y1 & Y3 & Y6	flood
5	100	98.05	1.01	Y3 & Y9 & Y10	flood

4. 결 론

본 연구에서는 실제 침수이력에 기초하여 홍수침수지역을 식별하는데 있어 도움이 될 수 있는 수문지형학적 특성을 살펴보았다. 그 결과 외수침수가 아닌 내수침수에 취약한 지역을 식별하려고 하는 경우 습윤지수를 포함하면 장바구니 분석 등에서 상당히 유용한 규칙을 발견하는데 도움이 된다는 것을 확인하였다. 습윤지수 10 내외의 값은 하천분류상 1차하천인 경우에 주로 나타나는 값이다. 그러나 하천부지가 아닌 제내지의 상당한 지역들도 습윤지수 10이상의 값 가지고 있는 경우가 많아 단순히 습윤지수만을 가지고 침수에 취약하다고 보기는 어렵다. 그러나 큰 비가 내릴 때 주요한 물길이 될 수 있는 토지가 될 수 있다는 그 의미를 고려할 때 저경사 지역이나 불투수비율이 높은 지역 등을 함께 고려하면 내수침수 가능지역을 식별하기 위한 방법으로서 상당히 유용성이 있음을 확인할 수 있었다.

References

- Beven, K., and Kirkby, M.J. (1993). *Channel Network Hydrology*. Chichester, New York: John Wiley&Sons Ltd.
- Hattanji, T., and Matsushi, Y. (2006). Effect of runoff processes on channel initiation: Comparison of four forested mountain in Japan. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, Vol. 27, No. 3, pp. 319-336.
- Jaeger, K. (2004). *Channel-initiation and surface water expression in headwater streams of different lithology*. Master's thesis, University of Washington.
- McNamara, J.P., Ziegler, A.D., Wood, S.H., and Vogler, J.B. (2006). Channel head locations with respect to geomorphologic thresholds derived from a digital elevation model: A case study in northern Thailand. *Forest Ecology and Management*, Vol. 224, No. 1-2, pp. 147-156.

Received	November 16, 2018
Revised	November 16, 2018
Accepted	November 23, 2018