

유출메커니즘을 활용한 감천유역에서의 새로운 홍수위험지도 작성

김태형* · 한건연** · 박준형***

Kim, Tae Hyung*, Han, Kun Yeun**, Park, Jun Hyung***

New Flood Hazard Mapping using Runoff Mechanism on Gamcheon Watershed

ABSTRACT

This study performs the potential flood hazard analysis by applying elevation data, soil data and land use data. The susceptibility maps linked to elevation, soil and land use are combined to develop the new types of flood hazard map such as runoff production map and runoff accumulation map. For the development of the runoff production map, land use, soil thickness, permeability, soil erosion and slope data are used as runoff indices. For the runoff accumulation map, elevation, knick point and lowland analysis data are used. To derive an integrated type of flood potential hazard, a TOPSIS (The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) technique, which is widely applied in MCDM (Multi-Criteria Decision Making) process, is adopted. The indices applied to the runoff production and accumulation maps are considered as criteria, and the cells of analysis area are considered as alternatives for TOPSIS technique. The model is applied to Gamcheon watershed to evaluate the flood potential hazards. Validation with large scale data shows the good agreements between historical data and runoff accumulation data. The analysis procedure presented in this study will contribute to make preliminary flood hazard map for the public information and for finding flood mitigation measures in the watershed.

Key words : Flood hazard map, Runoff production, Runoff accumulation, Runoff indices, TOPSIS method

초 록

본 연구에서는 유역에서의 잠재적인 홍수위험도를 예측하기 위해서 지형도, 토양도, 토지이용도를 조합하여 해석하였다. 유역에서의 표고자료, 토양도자료 및 토지이용자료 등을 활용하여 유출생성지도와 유출누적지도를 작성하였고, 이를 홍수위험지도 작성에 활용하였다. 유출생성지도 작성을 위해 토지이용, 토양두께, 불투수성, 토양침식도, 그리고 지형기복을 유출인자로 고려하였고, 유출누적지도 작성을 위해 토지이용, 경사도, 유출 천이점, 그리고 저지대분석 결과를 이용하였다. 지도 작성을 위해 다기준의사결정법의 하나인 TOPSIS 기법을 적용하였고, 유출생성 및 누적과 관련한 인자들을 평가기준으로, 각 분석지역의 격자들을 대안으로 고려하였다. 제안된 방법론을 낙동강의 감천유역에 적용하였으며, 기존의 홍수위험지도 작성방법과 비교하여 합리적인 범위내에서 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 방법론은 다양한 홍수 위험지도 작성시 가이드라인으로 제시될 수 있으며, 국토계획 수립이나 비상대처계획 수립시 홍수에 대한 위험지역 선정을 위한 사전검토 단계에서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

검색어 : 홍수위험지도, 유출생성, 유출누적, 유출인자, TOPSIS 기법

* 국토교통부 낙동강홍수통제소 예보통제과 (MOLIT · kimth3515@korea.kr)

** 종신회원 · 경북대학교 토목공학과 교수 (Kyungpook National University · kshanj@knu.ac.kr)

*** 정회원 · 교신저자 · 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Corresponding Author · Kyungpook National University · sjin3615@naver.com)

Received February 5, 2016/ revised March 27, 2016/ accepted August 3, 2016

1. 서론

홍수피해저감을 위한 비구조적 방안의 하나인 홍수위험지도는 홍수에 의한 인명 및 재산 피해를 최소화하기 위해 침수 범위, 침수 심도 등의 침수정보와 대피로, 대피처 등의 대피정보를 지도상에 표시한 것을 말한다. 평상시에는 침수 피해의 가능성이 있는 구역과 그 정도를 주민들에게 알려 홍수에 대한 관심을 높이고, 홍수시에는 대피로, 대피지역 등에 대한 정보를 제공하여 홍수 피해를 최소화하기 위해 제작된다. 국내의 홍수위험지도는 제내지 침수의 가장 큰 원인이 되어온 제방 월류 및 붕괴에 의한 외수범람과 맨홀 월류 등에 의한 내수침수에 대비하여 작성되고 있다. 외수범람은 제방의 월류 및 붕괴에 따른 홍수과의 흐름을 정확히 파악하여야 하며 내수침수는 도시 내배수 시스템의 과부하로 인해 야기되는 범람유량에 의한 제내지 침수해석이 필요하다. 하지만 외수 및 내수범람의 예측기술은 그 해석상의 어려움과 정교한 수리수문학적인 기초이론을 바탕으로 해야 하므로 홍수위험지도 제작에 시간과 노력을 필요로 한다.

최근에는 기후변화로 인한 도시하천유역에 단시간에 집중적으로 내리는 호우 및 도시화로 인한 불투수면적의 증가 등으로 인해 외수범람이나 내수침수에 의한 극한홍수 뿐만 아니라 지표수의 직접적 침수피해도 늘어나고 있다. 지표수에 의한 홍수는 주로 폭우로 인해 경사 분기점과 같은 평지에서 일시적인 유출수의 집적이 일어남과 동시에 맨홀 등의 수계망이 빠르게 물을 제거하지 못하는 원인 때문에 발생한다. 지표수 침수는 유역 표면의 침수지대에서 생성된 유출수에 의해 경사를 따라 하류로 이동되어 경사분기점이나 저지대로 향하게 된다. 이 유출의 일부분은 이동 중 사면으로 침투될 수 있고, 하천으로 환원될 수 있지만, 유역의 특성에 따라 침투 및 저류 등으로의 확산이나 하천으로의 유입량이 매우 적은 경우 누적된 지표수들은 침수를 일으키는 하나의 원인이 될 수 있다.

기존의 홍수위험지도는 홍수의 주요 원인인 집중호우 등에 의한 지표수의 직접적 침수는 고려하지 못하고 있다. 지표수의 유출로 인한 홍수해석에 있어 지금까지 제안되었던 방법들은 수리수문학적 분석 방법을 기초로 한다. 이러한 수리수문학적 분석 방법은 하천으로 유입되는 유량을 산정하기 위해 개발된 방법이기 때문에 유출로 인한 홍수 위험지역이나, 하천의 영향이 미치지 않는 지역의 유출에 대해서는 거의 고려하지 못했다. 지표수 유출로 인해 발생하는 홍수의 해석기법이 부재함에 따라 유출해석에 관한 다각적인 문제들의 전반적인 해결방안의 개발이 필요하게 되었다.

홍수위험지도에 대한 연구는 학술적으로 활발히 이루어지고 있는데, 미국, 일본, 유럽 등 많은 국가에서 효율적인 방재대책 수립과 지역주민들의 홍수대처능력 제고를 위해 인터넷의 형식

등으로 배포되고 있다. 미국은 1951년 Kansas와 1965년 Colorado 등에서 발생한 대홍수를 계기로 연방재난관리국(Federal Emergency Management Agency, FEMA)에서 “홍수위험지도 제작 지침”을 제정하고, 국가홍수보험프로그램의 일환으로 홍수위험지도 제작하고 있다. 제작된 홍수위험지도는 웹상으로 서비스되고 있다.

유럽의 하천은 여러 국가를 관통하므로 국가 간의 상호 영향권에 있다. 따라서 홍수위험지도 제작을 위해 여러 국가 및 단체가 연합하여 공동연구체계를 구축하고 있다. European Water Director는 2006년 초 서유럽 24개의 국가 및 단체로부터의 40여명의 대표로 구성되는 EXCIMAP (European EXchange Circle on flood MAPping)을 설립하고, 각국의 전문가 및 정책 결정자들에 의해 홍수위험지도 제작에 대한 공동연구체계를 구축하였다(Schmid and Goudie, 2007; Schmid et al., 2007). 홍수기마다 큰 피해를 유발시키는 도나우 강의 영향권에 있는 동유럽 국가 약 20여개 기관은 2007년 도나우 강에 대한 홍수위험지도 작성을 주된 목표로 하여 DANUBE Flood Risk Project를 설립하고 공동연구체계를 구축하였다.

또한 지표수의 직접적 침수 등 유역홍수에 관련된 연구도 지속적으로 진행되어 왔는데, 이러한 유역홍수에 있어 유출의 생성과 누적이 원인이 될 수 있으며 유역경사체가 유출의 생성과 누적에 미치는 영향에 대해 연구가 진행되어왔다(Esteves, 1989; Fox, 1997; LeBissonnais, 1998; Chaplot, 2000). 특히, Beven and Kirkby (1979)는 지형지수의 개념을 도입하여 유역에서의 유출 및 배수특성을 분석하였고, Mérot et al. (2003)은 지하수위가 유출에 미치는 특성을 평가하였다. Esteves and De Rosa (1989)는 지표면 저류와 지표유출의 공간적 분포에 대해서 연구한 바 있다. Le Gouée and Delahaye (2008)는 농경지 지역이 유출에 미치는 영향과 토양이 침식현상의 상호 연관성을 분석하였고, Nicolas (2010)은 토양의 함수비가 유출속도에 미치는 상관관계를 분석하였다.

지금까지 유출로 인한 홍수발생구역 및 홍수피해지역 예측은 주로 수리수문학적 분석 방법들을 기초로 실시하고 있는데, 이는 정확한 물리적 해석을 기반으로 강우-유출-흐름-범람해석으로 이어지는 복잡한 메커니즘을 필요로 한다. 또한 대부분 제방이나 맨홀을 월류하는 제내지로의 유입량을 기반으로 해석하기 때문에 돌발홍수 등의 집중호우에 의해 유출수가 직접적으로 침수에 영향을 미치는 상황을 해석하기에는 무리가 있다. 따라서 본 연구의 목적은 기존의 홍수위험지도 제작방법이 안고 있는 정교하고 복잡한 해석상의 문제와 계산시간 상의 문제를 해결하고, 유역인자를 고려한 새로운 홍수위험도 작성 방법에 대해 제안하고 이를 감천유역에 적용하여 기존의 홍수위험지도 및 침수흔적과 비교·검토하였다.

2. 유출인자를 고려한 홍수위험도 작성 기법 개발

2.1 기본 개념

유출은 유역에 위치한 토양 표면에서의 유출수 개념으로 표현할 수 있다. 강우 발생 후, 유출은 유역 표면의 침수지대에서 생성되고 이렇게 생성된 유출수는 경사와 지형의 형상을 따라 하류로 이동된다. 이 과정에서 유출의 대부분 또는 일부는 이동 중 사면으로 침투될 수 있다. 이 유출수는 하천으로 환원될 수 있고, 저지대나 자연적·인공적 저류지역에서 누적될 수도 있다.

유출경로나 유출누적지역에서의 유출수의 역학적 움직임은 각종 피해를 초래할 수 있고, 유출로 인해 홍수를 직접 발생시킬 수 있다. Fig. 1은 유출로 인해 지표수 범람이 야기될 수 있는 상류로부터 하류까지의 유출에 대한 메커니즘을 구체적으로 설명하고 있다.

특정 지역의 유출로 인한 잠재성을 고려하여 유출에 대한 홍수위험도 작성 알고리즘을 개발하기 위해서는 쉽게 이용가능한 지리학적 정보의 분석이 필요하다. 유출에 대한 위험도는 유역의 유출을 야기하는 지표면의 특성들에 대한 자료를 활용하여 작성할 수 있다. 자연적 및 인공적 조건들은 유출을 발생시키고, 발생시킨 유출수를 이동시키며, 특정지역에서 누적을 일으킬 수 있는데, 이러한 유출의 발생, 이동, 누적에 대해 가용한 지리학적 정보의 데이터베이스들을 활용하여 공간적 유출위험도를 작성할 수 있다.

우리나라는 지역에 따른 강수분포가 모두 다르고 동일한 지역이라 하더라도 계절적 특성과 호우 또는 태풍 등의 시간적 특성이 일정하지 않다. 따라서 홍수위험지도를 작성하고자 할 때에는 강수의 총량과 시간분포가 고려되어야 한다. 하지만 유출에 대한 홍수위험도 측면에서 대규모 유역에서 강수의 시간분포에 따른 홍수위험도를 함께 고려하는 것은 방대한 실시간 자료와 그에 따른 복잡한

과정의 분석이 필요하다. 본 연구는 정확한 수리수문학적 검토시 자료의 수집 및 분석에 따르는 시간과 비용을 절감하는데 가장 큰 목적이 있으므로 강수에 대한 고려는 좀 더 세분화된 대상 유역에 대한 연구에서 수행됨이 적절하다 판단된다. 필요시 향후 후속연구에서 설계강수량 등이 반영된 점강우의 공간분포결과 등을 고려할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 공간적 위험도만을 고려하여 유출의 위험성을 나타내고자 하였으며, 이를 위해 유출의 이동과 누적에 취약한 지역을 선정하고 GIS를 이용한 공간분석을 통해 유출로 인한 홍수위험도를 작성하고자 하였다.

2.2 유출에 따른 홍수위험도 작성

2.2.1 유출에 영향을 미치는 인자 분석

지표면에서의 유출수의 생성은 강우 발생 후 토양이 포화된 후 이루어진다. 유출에 대한 위험도의 개념은 유출을 발생시키고, 이동, 누적시키는 과정에서 유역환경의 다양한 특성들과 관련된다. 본 연구에서 유출에 대한 위험도 분석을 위해 지형 및 기복에 의한 인자, 토지이용도 및 토양도로부터 추출할 수 있는 인자 등을 이용하였다.

지형 기복은 유출의 생성 및 누적에 가장 중요한 지배인자이다. 유출분석에 있어서 지형은 지표면 저류 및 지표유출의 공간적 분포에 중요한 역할을 한다. 예를 들어 높은 지표면의 경사는 지표유출속도를 증가시키고, 급경사를 지닌 지형은 유출의 생성과 이동에 유리한 경향이 있다. 반대로 유출수의 누적은 완만한 경사, 저지대 지역, 또는 급경사에서 완경사까지의 천이점에서 발생한다. 따라서 경사의 지역적 특징들에 따라 유출수의 생성, 이동, 누적과정이 발생한다. 유출에 대한 위험도를 산정하기 위해 적용된 기본 인자는 지표면 경사, 배수표면의 형태, 경사의 천이점 등이다.

토지이용은 유출의 발생을 촉진시키거나 지연시킬 수 있다. 일반적으로 도시지역은 낮은 강도의 강우에도 유출을 생성한다. 농경지도 유출 생성에 유리한 조건을 가지고 있는데, 경사진 농경지는 토양의 침식과 유출수의 이동에 유리한 조건을 가지고 있다. 또한 식생이 발달한 곳의 토양은 유기물과 뿌리의 공극 등에 의한 작용으로 유출수에 대한 침투능을 증가시키고 많은 양의 물을 흡수하면서 유출 발생을 저감시킨다. 식물은 강우의 일부분을 차단해서 토양에 도달하는 강우 강도를 감소시키면서 침투능 초과로 인한 유출 현상 또한 감소시켜 어떠한 유출 메커니즘이든 유출의 생성과 이동을 동시에 저감시키는 역할을 한다.

토양도를 통해 판단할 수 있는 토양층의 지질구조는 유출의 생성과 이동, 유출이 누적되는 지대에서 발생하는 유출현상에 중요한 요소들이다. 암석지역은 투수성이 거의 없어서 유출의 발생에 유리하게 작용하는 요인이 된다. 토양도를 통해 추출할 수 있는 토양의 두께 또한 강한 투수성을 지닌 토양에서 유출의 생성에

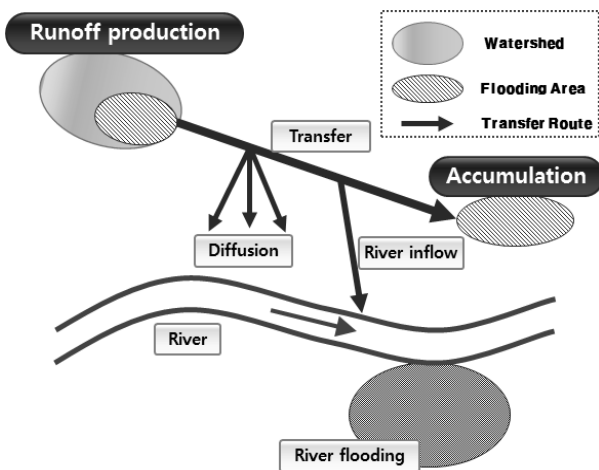


Fig. 1. Runoff Process for Flood Mapping within Watershed

영향을 미친다. 즉, 얇은 두께의 토양은 포화속도가 빠르기 때문에 유출 생성에 유리한 요소가 된다.

2.2.2 유출생성지도 및 유출누적지도 작성 기법

앞서 언급된 유출에 영향을 미치는 요인들과 관련된 모든 자료로부터 적절한 가공을 통해 유출생성지도 및 유출누적지도를 작성하였다. 지도를 제작하기 위해 수집된 모든 자료를 격자기반의 래스터 자료로 가공하여 분석, 제작하였다. 모든 분석 자료들은 다음절에서 기술된 TOPSIS 기법을 이용하여 조합하였으며, TOPSIS의 기준(Criteria)으로 활용된 각 인자들은 생성 및 누적과정에 미치는 영향에 따라 적절히 가공되었다.

유출생성지도는 하류방향으로 유하할 수 있는 유출수가 지표면에서 발생하도록 영향을 주는 모든 요소들을 인자로 고려하여 작성된다. Fig. 2에서 제시된 바와 같이 토양도, 토지이용도, 그리고 수치지형도를 통해 추출되어 가공된 토지이용, 토양의 두께, 토양의 불투수성, 토양의 침식도, 그리고 지형의 기복 등의 5가지 요소를 유출생성지도 작성을 위한 인자로 고려하였다.

유출생성지도 작성을 위해 토지이용은 토지이용도로부터 유출 생성에 유리한 정도에 따라 분류된다. 즉, 포장지대는 유출생성 가능성이 높은 지대이기 때문에 토지이용에 관련된 인자에 대해 최대값을 취하고, 식생이 분포한 지대는 최소값을 취한다. 토양의 두께, 불투수성, 그리고 토양 침식도에 대한 인자는 토양도로부터 토양의 성질과 지질구조를 분석하여 추출하였다. 즉, 높은 침식지수를 지닌 토양에서는 침적물의 흐름과 유출이 쉽게 이루어지고,

약한 투수성을 지닌 토양은 지면에 유출수를 쉽게 생성한다. 또한 얇은 두께를 지닌 토양은 빨리 포화되어 포화상태의 표면에서 유출수를 생성하는 경향이 있다.

유출누적지도는 유출수에 의해 잠재적으로 침수되기 쉬운 지대들을 나타낸다. Fig. 3에서 제시된 바와 같이 토지이용, 경사도, 유출천이점, 그리고 저지대로 분석된 지역이 유출누적지도 생성을 위한 평가 인자로 채택되었다.

토지이용은 유출생성과 마찬가지로 토지이용도로부터 유출누적에 유리한 정도에 따라 분류하였다. 즉, 도심지로 흘러들어 온 유출수는 맨홀 등의 인공적 배수시설 없이는 누적된 유출수를 배제할 수 없다. 따라서 도시지역은 유출의 생성뿐만 아니라 유출의 누적에도 유리한 영향을 줄 수 있다. 또한 습지상태를 나타내는 토양상태는 유출을 누적시키는 경향을 가지는 영역이 된다.

지형기복인자와 유출천이점은 지형형태가 유출 누적이 미치는 영향을 고려하여 생성하였다. 즉, 완경사를 지닌 지대들은 유역의 하류 쪽으로의 유출을 경감시키고 많은 누적조건을 만들게 되므로, 완만한 지역경사들은 유출수의 누적에 유리한 요인으로 간주된다. 또한 급경사에서 완경사로 변화하는 천이점은 지표유출의 누적에 유리한 지형이 된다. 이러한 논리에 기반하여 지형고와 경사도를 이용하여 지형기복 인자와 유출천이점 인자를 생성하였다.

제내지가 제방고 또는 하천홍수위보다 낮은 지형고를 가지는 우리나라의 지형형상은 유출누적에 유리한 조건을 갖는다. 따라서 하천의 계획홍수위와 제내지의 지형고를 비교·분석한 저지대 형상을 유출누적을 위한 인자로 함께 고려하였다.

위에 같은 방법론에 의해 작성된 유출생성지도와 유출누적지도는 기존의 홍수위험지도 작성 또는 국토개발 및 이용에 대한 여러 계획에 활용될 수 있다. 유출생성지도는 홍수방어 대책의 수립시 유출의 생성을 억제하고 침투를 증가시킬 수 있는 시설물 설치를 위한 기본 계획 수립 등에 활용될 수 있다. 이렇게 생성된 유출은 도로 및 하천, 그리고 지표물 따라 상류에서 하류까지 이동하며 침적물의 흐름이나 침식 등의 일시적인 피해를 야기할 수도 있다. 유출누적지도는 침수가능지점 등의 분석으로 국토계획 수립이나 건물 및 사회기반시설 설치시의 위험도를 판단하는데 효과적으로 활용될 수 있고, 위기관리 측면에서 비상대처계획 수립 등에 활용될 수 있다.

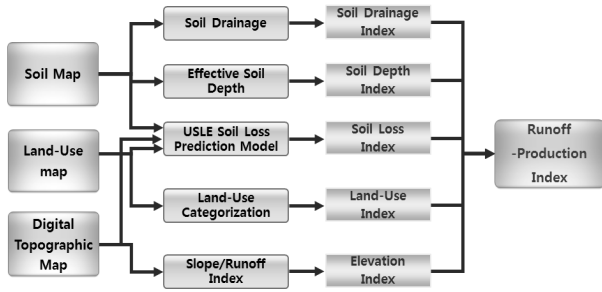


Fig. 2. Process for Runoff Production Mapping

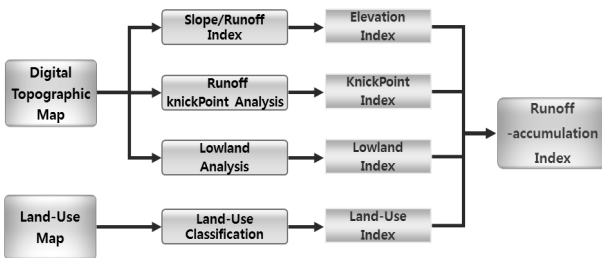


Fig. 3. Process for Runoff Accumulation Mapping

3. TOPSIS기법의 적용

홍수위험지도 작성 시 여러 인자를 동시에 고려하여 연계 및 통합하기 위한 다양한 방법들이 있지만, 본 연구에서는 다기준의사결정(Multi-Criteria Decision Making, MCDM)기법을 이용하여 홍수위험도를 작성하고자 하였다. 이 기법은 현실 문제에 대한

여러 기준에 입각해서 대안들에 대한 선호의 순서를 결정하거나 하나의 최적 대안을 선택하는 방법론이다.

유출 생성 및 누적지도 작성을 위한 평가인자로 앞절에서 채택한 각각의 인자를 고려하였으며, 이 인자들을 평가 기준(Criteria)으로 선정하여 대안(Alternative)으로 설정된 각 격자의 유출 생성과 누적에 대한 위험도를 TOPSIS 기법을 이용하여 작성하였다. 본 연구에서는 최근에 MCDM 기법 중 가장 많이 적용되고 있는 TOPSIS 기법을 적용하였다.

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) 기법에서 다기준의사결정 문제의 해로 제시된 대안은 Fig. 4에서 보느바와 같이 이상적 최적해(A^+ , PIS; Positive Ideal Solution)에서 가장 짧은 거리에 위치하고, 이상적 최악해(A^- , NIS; Negative Ideal Solution)에서는 가장 먼 거리에 위치해야 한다는 개념에 근거하는 기법이다(Chen and Hwang, 1992). 여기서 PIS는 고려하고 있는 기준이 가질 수 있는 값 중 가장 이상적인 값이고, NIS는 가장 비이상적인 값이다. PIS는 유출의 생성과 누적에 가장 유리한 조건을 가지는 래스터 영역이 되고, NIS는 반대로 가장 불리한 조건을 가지는 래스터 영역에 해당한다.

TOPSIS를 적용하기 위해 가장 먼저 이루어져야 하는 절차는 서로 다른 단위와 물리량을 가지는 다양한 자료를 하나의 단위로 표준화하는 과정으로 기법의 적용, 자료의 특성에 따라 다양한 방법이 있다(Nardo et al., 2005). 본 연구에서는 TOPSIS 기법이 제안된 당시의 방법인 Eq. (1)을 이용하여 자료를 표준화하였다(Chen and Hwang, 1992).

$$r_{ij} = f_{ij} / \sqrt{\sum_{j=1}^J f_{ij}^2} \quad \text{for } j = 1, \dots, J; i = 1, \dots, n \quad (1)$$

표준화된 자료는 각 기준들에 대한 가중치를 곱하여 다음 Eq. (2)와 같은 매트릭스를 구성할 수 있다. 가중치는 각 인자들 간의 상대적 중요성을 고려하기 위해 매우 중요한 요소이다. 본 연구는

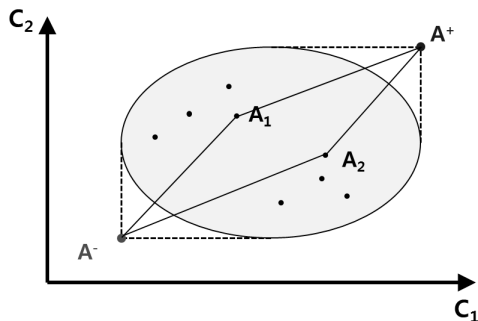


Fig. 4. Concept of TOPSIS Method

홍수위험지도 활용을 위해 유출생성과 유출누적이라는 개념을 도입하는데 초점을 맞추고 있고, 부적절한 가중치의 적용은 평가결과 의 왜곡을 초래할 수 있다고 알려져 있어(Lim et al., 2010) 각 인자들의 가중치를 동일하게 적용하였다. 다양한 기법들을 활용한 가중치 산정과, 그 가중치에 대한 검증은 향후 후속연구를 통해 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

$$v_{ij} = w_i r_{ij} \quad (2)$$

Eqs. (3) and (4)에 의해 유출발생과 유출누적에 대해 이상적 최적해(A^+)와 최악해(A^-)을 결정하고, 대안으로 적용된 각 래스터의 인자값에서 A^+ 와 A^- 까지의 차이를 Eqs. (5) and (6)을 이용하여 계산한다. 즉, 가장 높은 위험도를 가지는 기준값인 A^+ 까지의 거리(D_j^+)와 가장 낮은 위험도를 가지는 기준값인 A^- 까지의 거리(D_j^-)를 계산하여 각 격자의 평가결과를 계산한다.

$$A^+ = \{v_{1}^+, v_{2}^+, \dots, v_{n}^+\} = \{(\max v_{ij}, i \in I'), (\min v_{ij}, i \in I'')\} \quad (3)$$

$$A^- = \{v_{1}^-, v_{2}^-, \dots, v_{n}^-\} = \{(\min v_{ij}, i \in I'), (\max v_{ij}, i \in I'')\} \quad (4)$$

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^+)^2}, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (5)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2}, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (6)$$

D_j^+ 와 D_j^- 가 얻어지고 나면, 각 격자에 대하여 이상적인 솔루션 으로부터 상대적인 근접성을 Eq. (7)을 이용하여 계산한다. 계산된 상대적 근접성 결과를 이용하여 랭킹화 또는 등급화를 이용하여 유출생성 또는 유출누적에 대한 정도를 나타내는 지도를 작성하였다.

$$C_j^+ = D_j^- / (D_j^+ + D_j^-), \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (7)$$

4. 감천유역에 대한 적용

유출생성지도 및 유출누적지도를 작성하고 홍수위험지도로 활용하기 위해 낙동강의 중권역인 감천유역을 시범유역으로 선정하였다. 감천유역은 낙동강 유역에 포함되어 있는 중권역으로써 국가

하천인 감천 중하류부와 지방하천인 감천 상류부 및 10여개의 지류들로 구성되어 있다. 7개의 표준유역을 포함하는 감천유역은 지형학적인 불리함 때문에 대형 태풍의 내습시 빈번한 피해를 입어왔으며, 특히 직지사천 합류부를 포함하는 감천시가지는 저지대를 포함하는 지형학적 특성 때문에 그 피해도 상당한 것으로 알려져 있다.

4.1 감천유역에서의 유출생성 및 유출누적 인자 분석

유출생성지도를 작성하기 위해 앞서 인자로서 채택된 투수성, 토양두께, 토양침식도, 토지이용도, 경사도의 자료를 활용하였다. 분석을 위해 GIS 도구를 사용하였고, 감천유역에 대해 수집된 모든 자료를 5m×5m 격자기반의 래스터자료로 변환하였다. 토양의 투수성과 토양두께 인자는 토양도의 속성을 이용하여 추출되었고, 경사도는 수치지형도를 이용하여 추출한 등고정보를 TIN으로 변환

한 후 산정하였다.

토양의 투수성을 유출생성지도 작성을 위한 인자로 고려하기 위해 토양도로부터 배수구분에 따른 정도를 구분하여 분류하였다. 배수구분에 대한 코드가 높을수록 배수상태가 양호하지 못한 토양을 의미하며, 49로 나타난 지역은 암석노출지로서 유출생성률이 가장 높은 지역으로 설정하였다. 적용유역에 대해 토양도를 이용하여 추출된 투수성 인자를 Fig. 5(a)에 도시하였다. 유출생성지도 작성을 위해 토양도로부터 유효토심 정보를 추출하여 토양두께 인자를 생성하였다. 토심이 얇을수록 토양수분 빠른 속도로 포화되므로 유출에 유리하게 작용하게 된다. 토양두께에 대한 코드가 높을수록 낮은 유효토심을 가지는 토양을 의미하며, 49는 암석노출지로서 유출생성에 가장 유리한 지역으로 분석되었다. 적용유역에 대해 토양도를 이용하여 추출된 토양두께 인자를 Fig. 5(b)에 도시하였다.

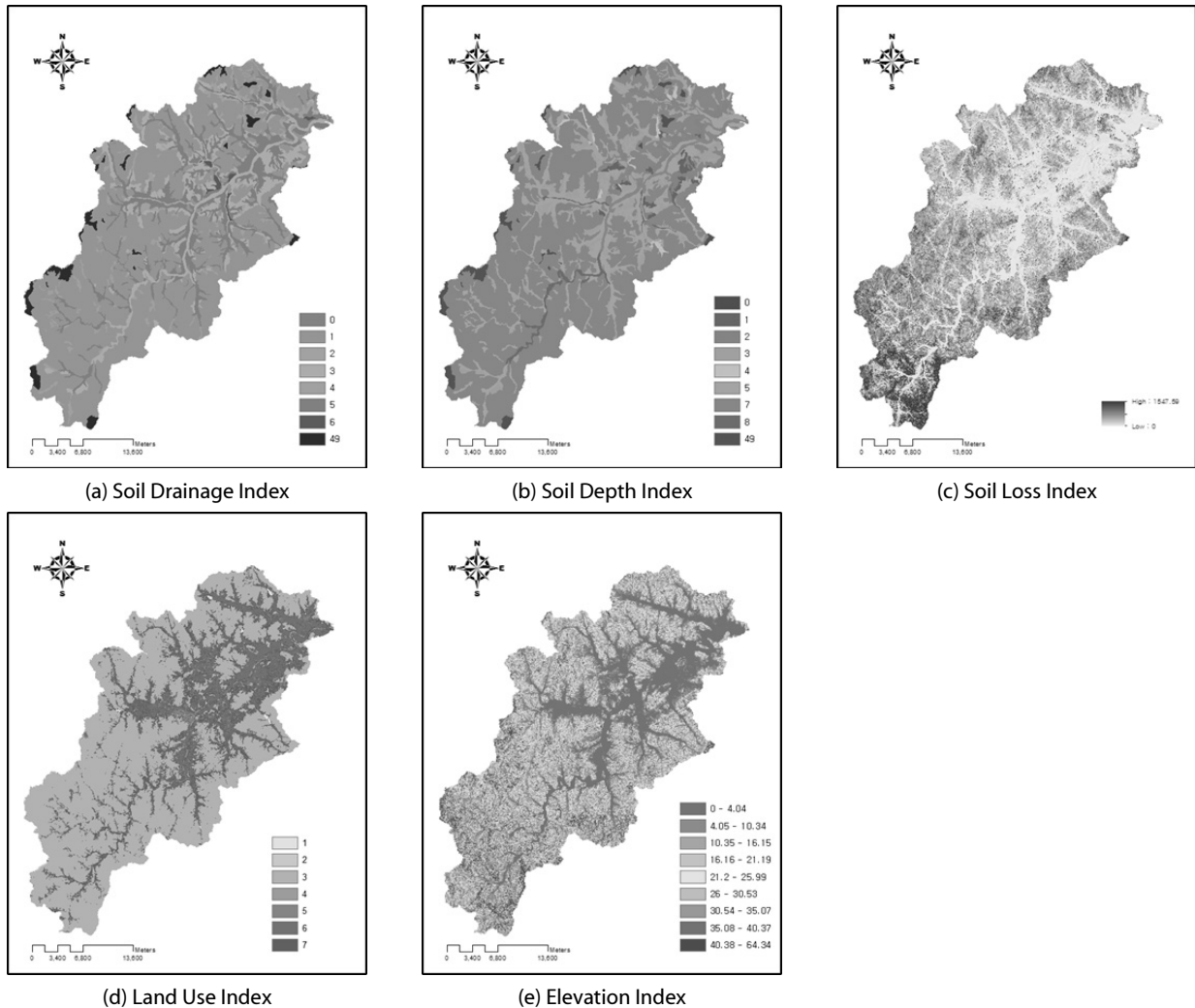


Fig. 5. Runoff Production Index

앞서 설명한 대로 토양의 침식도가 크면 유출에 유리한 영향을 미친다. 본 연구에서는 USLE (Universal Soil Loss Equation) 범용토양침식공식을 이용하여 토양의 침식도를 산정하여 유출생성 지도의 지표로 사용하고자 하였다. USLE 범용토양침식공식으로 산정된 토양침식도를 Fig. 5(c)에 나타내었다. 토지이용의 형태는 유출에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 시가지역이나 논 등과 같은 토지이용형태는 유출에 유리한 영향을 미치고, 초지, 산림 등은 유출에 불리한 영향을 미친다. 또한 경사는 지표유출속도를 증가시키므로 급경사를 지닌 지형은 유출의 생성과 이동에 유리한 경향이 있다. 토지이용도를 통해 적용된 토양이용 인자와 적용유역에 대해 계산된 경사도를 Figs. 5(d) and 5(e)에 각각 나타내었다.

유출누적지도를 작성하기 위해 앞서 기술한대로 지형기복, 천이점 인자, 토지이용도, 경사도 등의 자료를 활용하였다. 지형고와 경사도를 이용하여 추출된 유출누적에 유리한 지형기복과 유출천

이점 인자를 Figs. 6(a) and 6(b)에 각각 도시하였다. 저지대 분석을 위해 감천 및 직지사천의 계획홍수위와 주변 지형고를 이용하였으며, 계획홍수위에서 지형고를 뺀 값을 저지대 인자로 이용하여 Fig. 6(c)에 나타내었다. 유출생성과 마찬가지로 토지이용의 형태는 유출누적에 큰 영향을 미친다. 앞서 언급한 바와 같이 도시지역 또는 습지지역 등을 유출누적에 유리한 조건으로 설정하여 토지이용 인자를 생성하였다(Fig. 6(d)).

4.2 TOPSIS 적용을 위한 지표의 표준화

선정된 인자에 대한 자료를 수집하면 각 자료는 정량적, 정성적인 다양한 형태와 규모로 구성되어 있다. 이 데이터베이스를 평가에 적용하기 위해서는 자료의 형식을 파악하고 이들을 평가에 적용할 방안을 고안해야 한다. 즉, 서로 다른 단위와 성질을 가진 다양한 자료를 이용하여 수학적으로 결합하여 하나의 지표를 제시하는

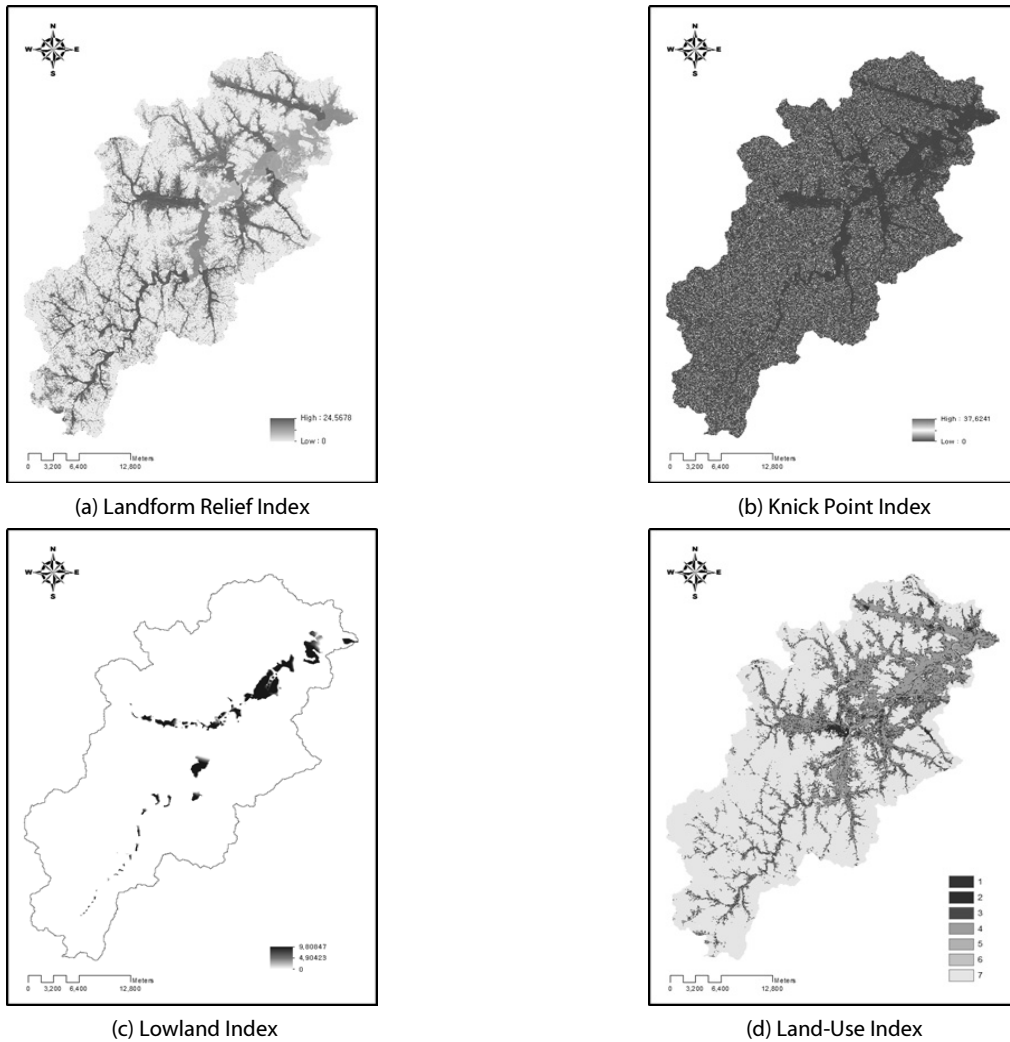


Fig. 6. Runoff Accumulation Index

복합지표 방법에서는 적용되는 각 개별지표를 표준화하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 추출된 자료를 대상으로 Eq. (8)과 같이 표현될 수 있는 Re-scaling 방법을 이용하여 전체 자료를 0과 1사이 범위 내에서 표준화 하였다(Nardo et al., 2005).

$$I_{qc}^t = \frac{x_{qc}^t - \min_c(x_{qc}^{t_0})}{\max_c(x_{qc}^{t_0}) - \min_c(x_{qc}^{t_0})} \quad (8)$$

이와 같은 표준화 과정을 통하여 추출한 유출생성지도와 유출누적지도에 대한 인자들을 Figs. 7 and 8에 각각 나타내었다.

4.3 작성된 유출생성지도 및 유출누적지도의 비교·검토

앞서 설명한 TOPSIS를 이용하여 적용유역에 대한 유출생성지도와 유출누적지도를 작성하였다. 작성된 지도들을 통해 ‘재해가

일어나기 쉬운’ 영역들의 개념으로 유출에 영향을 받는 침수 위험이 있는 지대들, 유출발생에 민감한 지역들을 확인할 수 있다. TOPSIS 기법에 의해 생성된 유출누적지도는 TOPSIS로 산정된 근접도 계수(C_j^*)를 하나의 평가값으로 고려함으로써 다양한 목적으로 활용이 가능하다. 본 연구에서는 유출누적지도를 유역유출에 대한 Flood Hazard Map으로 고려하고자 하였고, 하천홍수에 의한 홍수 위험지도의 비교를 통해 유역유출에 대한 홍수위험지도의 활용성을 검토하였다.

유출누적지도는 “홍수가 가장 잘 발생할 수 있는 지역”의 개념을 기반으로 제작되었으므로, 유출누적지도의 제작과정에 있어서 유출누적에 민감한 지역들은 본래 홍수가 가장 일어나기 쉬운 지대들을 의미한다. 따라서 유출누적지도를 홍수위험지도로 활용하기 위해 분석 영역을 Z-점수법에 의해 5개의 등급으로 구분하였다. 김천 시가지 인근지역에 대해 등급화되어 작성된 유역인자를 고려

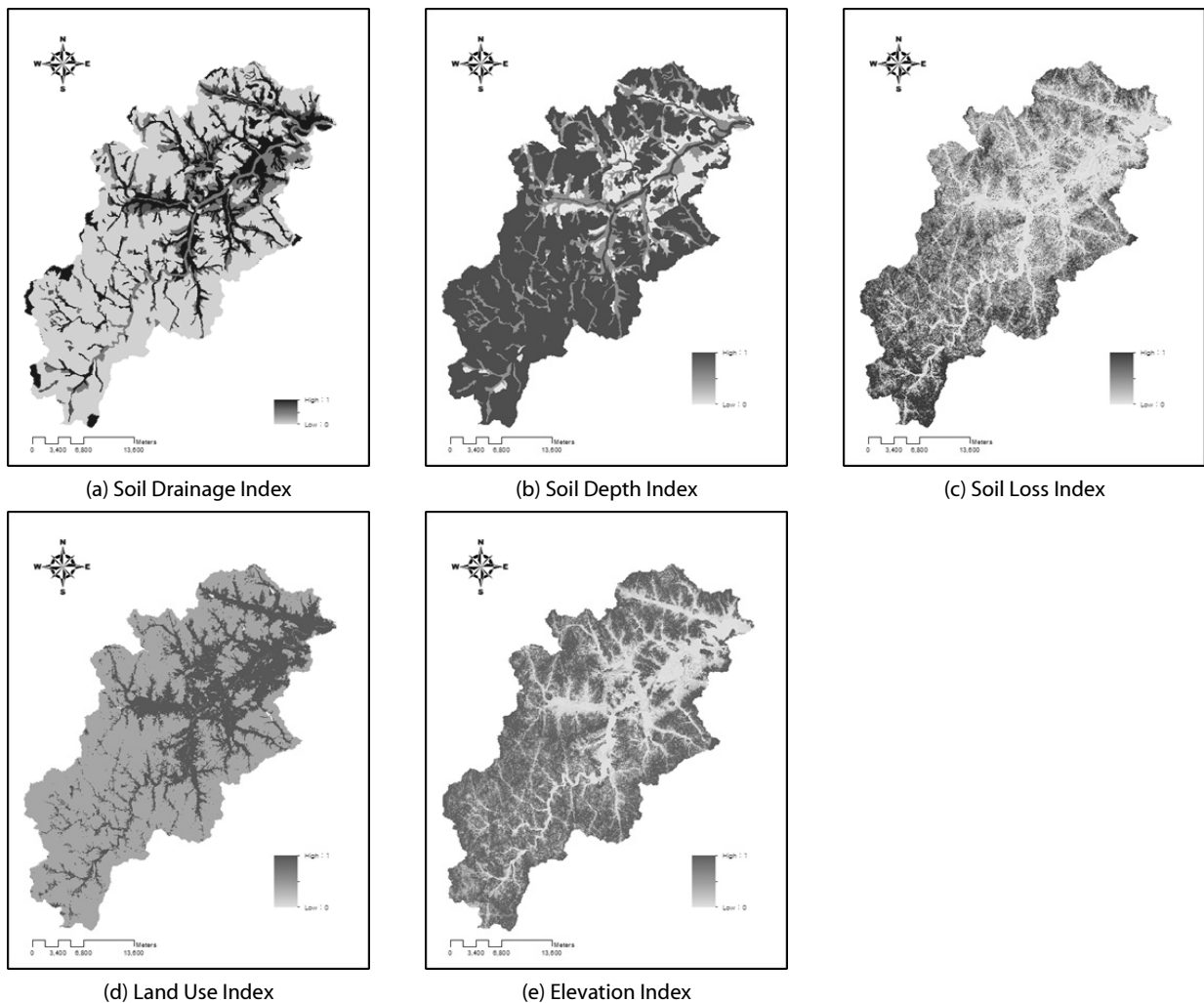
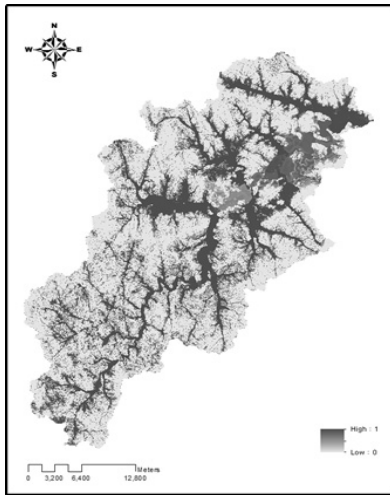
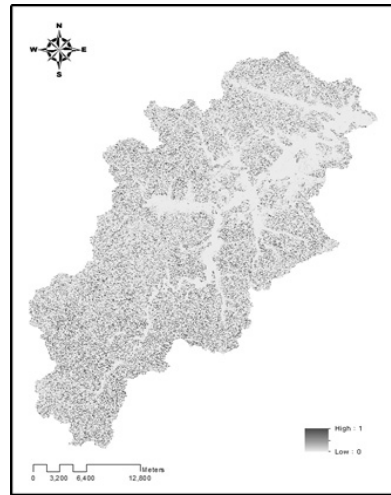


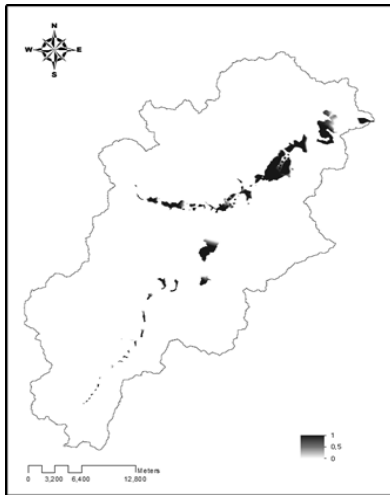
Fig. 7. Standardized Runoff Production Index



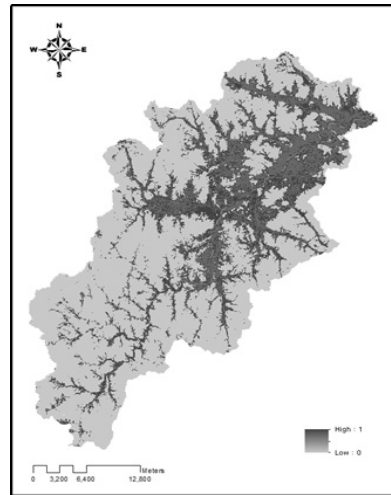
(a) Landform Relief Index



(b) Knick Point Index



(c) Lowland Index



(d) Land-Use Index

Fig. 8. Standardized Runoff Accumulation Index

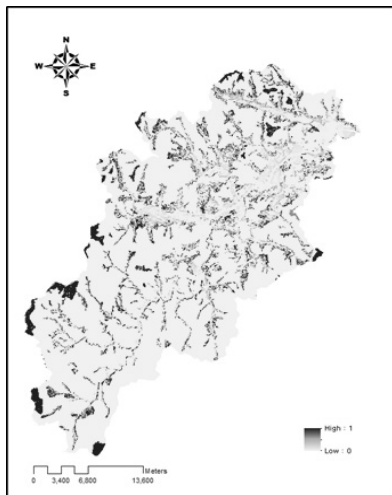


Fig. 9. Runoff Production Map

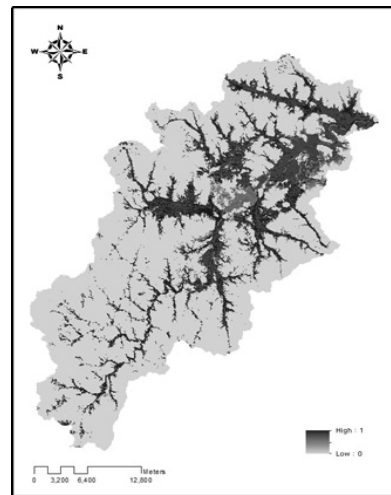


Fig. 10. Runoff Accumulation Map

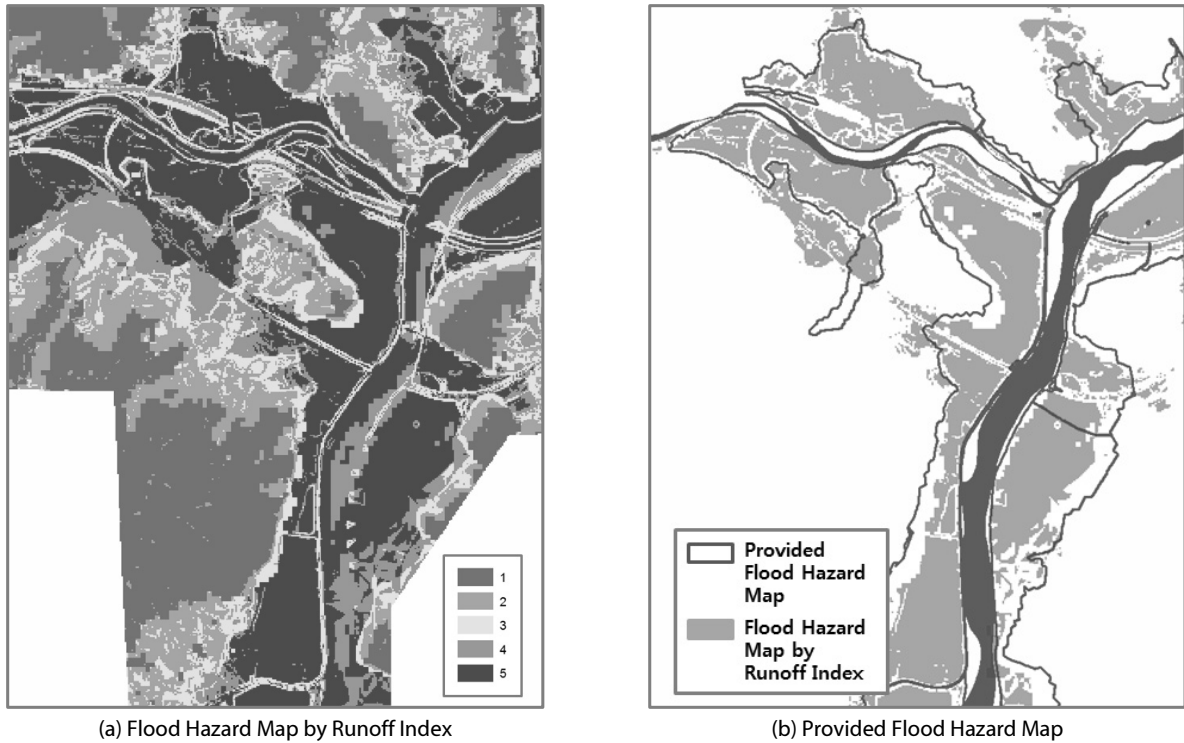


Fig. 11. Comparisons of the Simulation Results

한 홍수위험도를 Fig. 11(a)에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 홍수가 발생할 가능성이 높은 하천 인근과 저지대를 중심으로 높은 등급의 위험도를 나타내는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11(b)는 내수침수와 외수범람을 수리수문학적 방법에 의해 분석하여 제시한 Flood Hazard Map의 경계선(Kim, 2013)과 유역인자를 고려한 홍수위험도의 가장 높은 등급인 5등급으로 나타난 지역을 중첩하여 나타낸 지도이다. 중첩된 영역은 하천홍수에 대한 적용범위로 한정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 하천홍수의 경계면과 유역인자를 고려한 홍수위험도의 5등급 영역이 유사하게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다.

유역인자를 고려한 홍수위험도의 5등급 내에서 하천홍수에 대한 Flood Hazard Map과 같이 상대적 위험도를 구분하는 것은 무리가 있으나, 제시된 정보만으로도 홍수에 의해 침수될 수 있는 잠재적 지역을 제시해 주는 자료로써 충분한 가치를 가질 수 있다고 판단된다. 또한 내수침수와 외수범람을 고려한 Flood Hazard Map 작성을 위해서는 다양하고 복잡한 단계의 해석과 정확도를 기반으로 한 분석이 이루어져야 한다. 하지만 유역인자를 고려한 홍수위험지도는 공간적으로 복잡성을 가지는 분석지역에 대해서 지형자료와 관련한 데이터만으로 GIS를 이용한 간단한 공간 분석을 통해 홍수에 가장 민감한 지역들을 탐지할 수 있다는 장점을 가진다.

즉, 유역인자를 고려한 홍수위험도는 간편하고 신속한 분석이라

는 점에 있어서 강점을 갖고, 내수침수와 외수범람을 고려한 Flood Hazard Map은 정확성 및 다양한 정보의 반영이라는 면에서 큰 강점을 갖는다고 볼 수 있다. 따라서 토지이용 및 개발단계에 있어서 사전검토 등의 짧은 기간 동안 단순한 분석을 요할 때에는 유역인자를 고려한 홍수위험도를, 홍수위험지도 및 재해정보지도의 작성이나 장기적인 개발계획단계에 있어서는 물리적으로 타당성을 가지면서 정확한 분석을 통해 작성된 내수침수와 외수범람을 고려한 Flood Hazard Map을 이용하는 것이 적합하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 복잡하고 정교한 방법론에 의해 작성되는 홍수위험지도 제작 기법보다 간편하고 빠른 속도로 작성할 수 있는 홍수위험지도 작성을 위해, 유역유출에 의한 홍수를 고려할 수 있는 방법론을 제시하였다. 이를 위해 감천을 시범유역으로 선정하고 유출에 영향을 미치는 인자들을 채택 및 분석하여 유출생성지도와 유출누적지도를 작성하였으며, 유출인자를 고려한 홍수위험도와 기존에 제작되는 내수침수 및 외수범람에 대한 Flood Hazard Map을 비교하여 적용성을 검토해보았다. 본 연구를 통하여 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 유역으로부터의 유출의 메커니즘을 분석하여 지표유출과정을 유출발생, 이동, 누적과정으로 구분하였고, 유출발생과 누적과정에 대한 메커니즘을 바탕으로 유역에서의 잠재적인 홍수위험도 예측을 위한 유출에 영향을 미치는 인자를 산정하였다.
- (2) 유출생성지도를 작성하기 위해 토지이용, 토양두께, 토양불투수성, 토양침식도, 지형기복 등의 5가지 인자를 채택하였으며, 유출누적지도를 작성하기 위해 지형기복, 유출천이점, 저지대분석, 토지이용도 등을 평가 인자로 채택하여 각각의 지도를 작성하기 위해 고려하였다. 각 인자들의 다양성을 하나의 지표로 활용하기 위해 다기준의사결정법(MCDM)의 하나인 TOPSIS 기법을 적용하였다. 홍수위험도의 종합적인 평가를 위해서 TOPSIS 기법의 상대근접도 지수를 활용하였고, 홍수위험도를 등급화하기 위해서 Z-score 방법을 적용하였다.
- (3) 본 연구에서는 침수피해가 빈번히 발생하는 낙동강의 감천유역을 시범유역으로 선정하였다. 감천 사가지 인근지역에 대해 등급화되어 작성된 유출인자를 고려한 홍수위험도는 홍수가 발생할 가능성이 높은 하천 인근과 저지대를 중심으로 높은 등급의 위험도를 나타내는 것을 확인할 수 있었고, 유출인자를 고려한 홍수위험도의 가장 높은 등급인 5등급으로 나타난 지역은 내수침수와 외수범람을 수리수문학적 방법에 의해 분석하여 작성된 Flood Hazard Map의 경계선과 일치하고 있어 분석의 정확성 및 적용성을 확인할 수 있었다.
- (4) 유출인자를 고려한 홍수위험도는 간편하고 신속한 분석이 가능한 장점이 있으며, 수집하기 용이한 자료들을 활용하여 의미있는 분석이 가능하다. 또한, 정확성 및 다양한 정보를 반영한 기존의 제작된 Flood Hazard Map과도 함께 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 다양한 홍수위험지도 작성 시 가이드라인으로 제시될 수 있으며, 국토계획 수립이나 비상대처계획 수립시 홍수에 대한 위험지역 선정 등에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임(MPSS-자연-2014-75).

References

- Available at: <http://msc.fema.gov/>
 Available at: <http://www.mlit.go.jp/river/bousai/index.html>
 Available at: <http://www.wamis.go.kr/>
- Beven, K. and Kirkby, M. J. (1979). "A physically-based variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrol. Sci. Bull.*, Vol. 24, pp. 43-69.
- Chaplot, V. and Bissonais, Y. L. (2000). "Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 25, No. 2, pp. 145-153.
- Chen, S. J. and Hwang, C. L. (1992). "Fuzzy multiple attribute decision making: method and application." *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, No. 375, Springer, New York.
- Esteves, A. and De Rosa, C. (1989). "A simple method for correcting the solar radiation readings of a Robitzsch-type pyranometer." *Solar Energy*, Vol. 42, No. 1, pp. 9-13.
- Fox, D. and Bryan, R. B. (1997). "The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions." *Geoderma*, Vol. 80, No. 1-2, pp. 181-194.
- Kim, T. H. (2013). *Flood Risk Mapping based on the Fuzzy MCDM by Combining Inland and River Inundations with Basin Runoff*, Ph.d. Dissertation, Kyungpook National University, Daegu, Korea (in Korean).
- Le Bissonais, Y., Montier, C. (1998). "Cartographie de l'aléa Erosion des sols en France." *IFEN Collection Etudes et Travaux 18* (in French).
- Le Gouée, P. and Delahaye, D. (2008). *Modélisation et cartographie de l'aléa érosion des sols et des espaces de ruissellement dans le Calvados*, Rapport d'étude (in French).
- Lim, K. S., Choi, S. J., Lee, D. R. and Moon, J. W. (2010). "Development of flood risk index using causal relationships of flood indicators." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 1B, pp. 61-70 (in Korean).
- Mérot, P. and Squividant, H. (2003). "Testing a climato-topographic index for predicting wetlands distribution along an European climate gradient." *Ecological Modelling*, Vol. 163, No. 1-2, pp. 51-71.
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A. and Taranta, S. (2005). *Tools for Composite Indicators Building*. European Communities, Available at: <http://europa.eu.int.>, pp.44-51.
- Nicolas, M. (2010). *Etude expérimentale et numérique du ruissellement de surface : effets des variations d'intensité de la pluie. Application à une parcelle de vigne en Cévennes-Vivarais*, Thèse de doctorat, LTHE - Université Joseph Fourier, Grenoble (in French).
- Schmid, F. and Goudie, J. (2007). *Atlas of Flood Maps: Examples form 19 European Countries, USA and Japan*, Ministry of Transport, Public Works and Water Management.
- Schmid, F., Renne, M. and Rieger, D. (2007). *Handbook on Good Practices for Flood Mapping in Europe*, EXCIMAP 29-30.