

## 토지이용도, RUSLE, 그리고 산사태 위험도를 이용한 낙동강유역의 토양 침식에 대한 위험성 및 잠재성 분석

### Risk Assessment and Potentiality Analysis of Soil Loss at the Nakdong River Watershed Using the Land Use Map, Revised Universal Soil Loss Equation, and Landslide Risk Map

지 운\* / 황 만 하\*\* / 여 운 광\*\*\* / 임 광 섭\*\*\*\*

Ji, Un / Hwang, Man Ha / Yeo, Woon Kwang / Lim, Kwang Suop

#### Abstract

The land use map of the Nakdong River watershed was classified by each land use contents and analyzed to rank the risk of soil loss and erosion. Also, the soil loss and erosion was evaluated in the Nakdong River watershed using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and the subbasin with high risk of soil loss was evaluated with the analysis results of land use contents. Finally, the analyzed results were also compared with the landslide risk map, hence the practical application methods using developed and analyzed results were considered in this study. As a result of land use analysis and RUSLE calculation, it was represented that the Naesung Stream watershed had the high risk for soil loss among the subbasins of the Nakdong River watershed. It was also presented that the high risk area identified by computation of RUSLE was corresponding to the landslide risk area. However, the high risk of soil erosion by land use near the river or wetland was confirmed only through the calculation results of RUSLE.

**Keywords** : land use map, landslide risk grade, Nakdong River Watershed, Revised Universal Soil Loss Equation, soil loss

#### 요 지

본 연구에서는 낙동강유역을 대상으로 토양 침식 및 유실의 위험성을 분석 및 평가하기 위해 토지이용도를 세부적으로 분석하여 유역별 토양침식 발생의 위험성을 순위화하였다. 또한, 토양침식량을 RUSLE 모형을 이용하여 산정하였고 토지이용도 분석 결과와 함께 토양침식 위험성이 높은 유역을 평가하였다. 최종적으로 해당 유역에 산사태 위험지도와의 비교를 통해 유역내 토양유실 대책 수립을 위한 자료의 활용 방안을 분석하였다. 분석 결과, 전체 낙동강유역내 토양침식 위험성이 높은 것으로 선정된 유역은 내성천유역으로 토지이용도 분석결과와 RUSLE 모형의 결과에서 모두 토양유실 측면에서 위험성이 높은 것으로 나타났다. RUSLE 모형 결과에서 토양침식량이 높은 것으로 나타난 지역과 산사태 위험 지역의 분포는 유사한 것으로 나타났으나, 하천 주변의 토지이용에 따른 토양유실의 위험성은 RUSLE를 이용한 산정 결과에서만 확인할 수 있었다.

\* 명지대학교 토목환경공학과 연구교수 (e-mail: jiuncivil@gmail.com)

Research Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng, Myongji University, San 38-2 Namdong, Yongin, Gyeonggi-do 449-728, Korea

\*\* 한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원 (e-mail: hwangmh@kwater.or.kr)

Research Fellow, Water Resource Research Center, Korea Water Resource Corporation, 462-1 Jeonmin-dong, Daejeon 305-730, Korea

\*\*\* 국립방재연구원 원장 (e-mail: yeo@mju.ac.kr)

President, National Disaster Management Institute, 136 Mapo-ro, Mapo-gu, Seoul 121-719, Korea

\*\*\*\* 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원 (e-mail: oklim@kwater.or.kr)

Senior Researcher, Water Resource Research Center, Korea Water Resource Corporation, 462-1 Jeonmin-dong, Daejeon 305-730, Korea

## 1. 서론

일반적으로 유역내 발생하는 토양 침식은 사면붕괴, 지표면과 하상의 침식 그리고 산사태와 토사류 발생 등에 의한 자연적인 요인과 도로건설, 산림의 벌채, 단지개발 등의 인위적인 요인에 의해 발생할 수 있다. 침식된 토사는 유역내 지표와 하도를 통해 이동하게 되며 이러한 요인들에 의해 발생하는 유사는 농업생산성을 떨어뜨리고 목초지를 손상시키며, 물의 흐름을 방해하여 홍수위 상승, 저수지의 저수용량 감소 등 다양한 문제를 야기 시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 토양 침식에 영향을 주는 유역특성에 따라 토양침식 위험성을 분석 및 평가하여 유역유사 관리의 의사결정 자료로 활용할 필요가 있다.

대상 유역에서 얼마만큼의 토양이 침식될 것인가 하는 토양 보존의 개념에서 산정되는 유실량을 토사 침식량(sediment loss)이라고 하며 유실된 토양 중 하도를 통해 유역 출구로 빠져나가는 유사량을 토사 산출량(sediment yield)이라고 한다. 토사 산출량의 경우 토사 전달률(sediment delivery ratio)을 고려하여 토사 침식량으로부터 산정될 수 있다. Nicklow and Muleta (2001)는 농경지가 지배적인 유역에서 다량의 토양 침식을 방지하기 위한 적절한 토지이용방법 분석과 최소 유사량 산정 및 평가를 수행할 수 있는 모형을 개발하여 유역별 발생하는 토사 산출량을 평가하였다. Owens and Collins (2006)는 벌목 등에 의한 산림의 감소로 인해 증가하는 토양침식량을 분석하여 산림유역에서 표면 침식된 토사가 하천으로 이송되는 문제를 연구하였다. USACE (2007)는 St. Joseph River 유역을 대상으로 토지이용도를 분석하여 토양침식 위험이 있는 유역을 선정하고 이를 토대로 수치모의를 수행하여 토양침식량을 산정하였으며 Hammad (2011)의 경우는 Mediterrance의 동부지역에 RUSLE 모형을 적용하여 RUSLE 모형의 인자 중 C 인자(토지이용인자)를 제외한 모든 인자들을 고정시켜 토양 침식의 위험성을 평가하였다. 이처럼 대부분의 최근 유역유사 특성 분석 및 평가 연구들은 토지이용방법에 따른 토양침식량 및 유출구에서의 토사 산출량에 대한 내용들이 주를 이루고 있다. 토지 이용방법뿐만 아니라 토지이용 자체를 조사하는 방법에 따라서도 토지이용도가 다르게 구축될 수 있으며 유역내에서의 유출량과 토양침식량이 다르게 산정되기도 한다.

Sharifi and Kalin (2010)은 수치모형의 여러 입력자료 중 서로 다른 조사방법으로 구축된 세 가지의 토지이용도를 각기 적용하여 그 영향성을 분석한 바 있으며 비슷한 시기에 조사된 토지이용도라도 조사방법에 따라 유역 유출량과 토양침식량은 다르게 나타난다는 사실을 제시하였다. 최근 국외연구 동향에서 나타나듯이 토지이용의 분포 양상과 변화에 따라 발생하는 유역내 토양 침식의 양상은 다르게 나타나며 유역유사량 산정에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 토지이용의 경우도 공간적으로 토지가 이용되는 분포에 따라 토양침식량에 미치는 영향이 다르기 때문에 토지이용항목에 대한 세부적인 분석이 반드시 선행되어야 할 것이다.

본 연구의 목적은 낙동강유역 전체를 대상으로 여러 유역특성 중 토양 침식에 지배적인 영향을 미치는 토지이용도를 세부적으로 분석하고 경사, 토양, 경작형태 등 다양한 유역특성이 적용되었을 경우를 종합적으로 고려하여 유역별 토양침식 위험성을 평가하기 위한 것이다. 또한 토지이용도만을 활용한 분석 결과와 기존의 범용토양유실량 산정공식을 이용한 분석 결과를 산사태발생 위험지역과 상호 비교함으로써 토양침식 위험지역과 산사태 위험지역과의 연관성을 최종적으로 분석하고자 한다. 연구 수행 절차 및 방법은 Fig. 1과 같다. 이러한 연구 수행을 통해 유역별 토양침식 위험성의 적절한 평가 방안을 제시하고 다량의 토양 유실이 발생할 수 있는 위험지역을 규명하여 토양유실 관리 방안 및 대책안 도출의 효율성을 높이고 의사결정 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 대상유역의 선정

낙동강유역은 한반도 동남부에 위치하며 북쪽으로는 한강 유역, 서쪽으로는 금강 및 섬진강 유역과 접하고 동쪽으로는 태백산맥이 동해안 유역과 분수령을 형성하고 있는 우리나라 제2의 유역이다. 유로길이 510.36 km, 유역면적 23,817.21 km<sup>2</sup>로 강원 태백 함백산(1,573 m)에서 발원하여 동쪽으로 태백산맥과 서북쪽 속리산, 덕유산, 지리산으로 이어지는 소백산맥을 유역경계로 하여 낙동강 유역의 중심부를 통과하며, 산악으로 인하여 최단거리로 유하하지 못하고 유향을 4차례나 급변시키면서 우회하여 남해안에 유입한다(국토해양부, 2009). 낙동강의 경사는 매

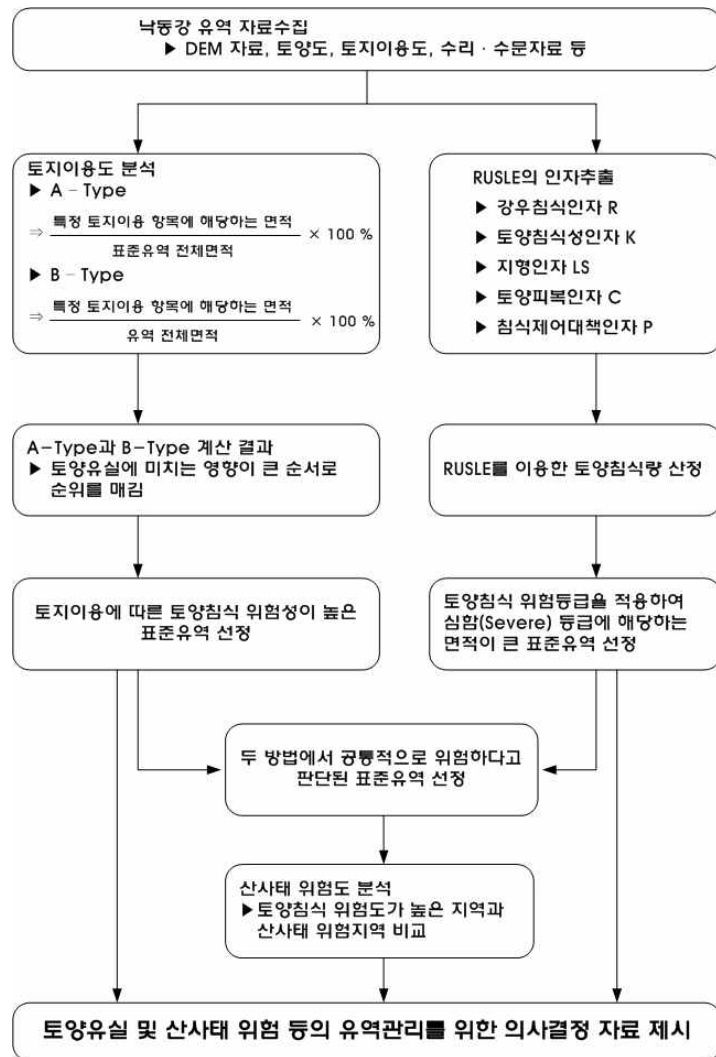


Fig. 1. Flow Chart of Soil Loss Risk Analysis

우 완만하여, 400 km 상류의 안동에서도 해발고도 100 m 에 달하지 못한다. 완만한 경사로 인해 유역으로부터 유입되어 발생하는 유사의 퇴적은 홍수위 상승, 수리구조물 붕괴 등 다양한 문제를 야기하고 있다. 또한 4대강 살리기 사업의 일환으로 가장 많은 보(8개)와 신규댐(3개)이 건설되고 있어 이로 인해 유역과 하도의 변화가 많이 나타날 것으로 예상되는 유역이다. 유역의 상류로부터 유입되는 유사의 퇴적으로 인해 하천제방이나 하천구조물의 안전이 위협받고 홍수시에는 농경지의 매몰과 저수지의 퇴적현상이 발생하는 등 유역유사로 인한 다양한 문제가 발생할 것으로 예측된다. 따라서 낙동강유역(Fig. 2)을 본 연구의 대상유역으로 선정하였으며 특히 33개 중권역 중 기타수계 11개를 제외한 22개 중권역을 최종 대상유역으로 선정하였다. 본 연구에서는 한국건설기술연구원(2010)에서 4대강 사업으로 신설되는 보와 저수지를 고려하여

제작한 표준유역분할도를 이용하였으며 낙동강유역을 226개의 표준유역으로 분할하였다.

### 3. 토지이용에 따른 표준유역별 토양침식 위험성 평가

인간의 인위적인 개발로 인해 변경된 토지는 유역에서 발생하는 토양 침식의 양상을 변화 시킨다. 예를 들어 어느 특정한 유역에 과거부터 수역과 습지가 일정하게 증가하고 있는 경우 그 유역은 강우에 직접적으로 영향을 받지 않는 면적이 상대적으로 증가하게 되어 토양침식량이 감소하게 될 것이다. 이와는 반대로 산림을 벌목하거나 농경지를 확장 할 경우 강우 발생 시 직접적으로 노출된 토양이 침식되어 토양 침식의 발생 잠재성을 높인다 (USACE, 2007). 이것은 유역내 토지이용항목이 변경됨에

따라 유역내 토양침식 발생량에 영향을 미친다는 것을 나타내며, 이러한 사실에 기초해 본 연구에서는 낙동강유역을 대상으로 총 8가지의 토지이용항목 중 다른 항목들에 비해 분포면적이 매우 작은 녹지, 습지, 나지를 제외한 5가지의 항목(시가화, 논, 밭, 산림, 수역)을 대상으로 토지이용항목별 토양유실의 위험도를 소유역별로 순위화 하

였다. 토양 유실 및 침식 위험성을 소유역내에서의 분포와 전체 유역내 분포 비율로 각각 구분하여 A-Type과 B-Type 순위로 분석하였다.

A-Type은 전체유역을 구성하고 있는 각각의 표준유역내에서 특정 토지이용항목(시가화, 논, 밭, 산림, 수역)이 차지하는 면적 비율을 나타낸 것이며, B-Type은 낙동강 전체유역에서 각각의 표준유역내 특정 토지이용항목들이 분포하고 있는 면적 비율을 나타낸 것이다. 즉, A-Type의 경우 표준유역의 크기를 고려하지 않고 표준유역내 구성하고 있는 토지이용항목이 차지하는 비율만을 고려하여 토양 침식 위험성 및 잠재성을 절대적으로 평가한 것이다. 반면, B-Type의 경우 각각의 표준유역 면적이 서로 다르다는 사실을 고려해 전체유역 면적에서 해당 표준유역의 특정 토지이용항목이 차지하는 면적을 고려하여 토양침식의 위험성 및 잠재성을 상대적으로 평가한 것이다. 이는 A-Type에서 위험성 및 잠재성이 낮다고 평가된 표준유역이라도 표준유역의 크기가 크다면 발생하는 토양 침식량은 많을 수도 있다는 점을 B-Type 결과를 통해 보완할 수 있다. 본 연구에서는 보다 정확한 토양 침식의 위험성 및 잠재성 평가를 위해 A-Type과 B-Type 모두를 고려하여 연구를 수행하였다.

본 연구의 대상유역인 낙동강유역의 A-Type 분석결과는 Fig. 3과 같으며, 전체 낙동강유역내 토지이용항목별

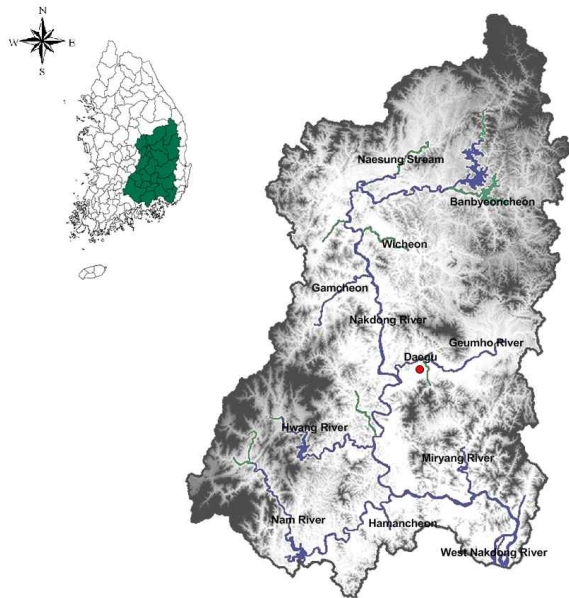


Fig. 2. Nakdong River Watershed

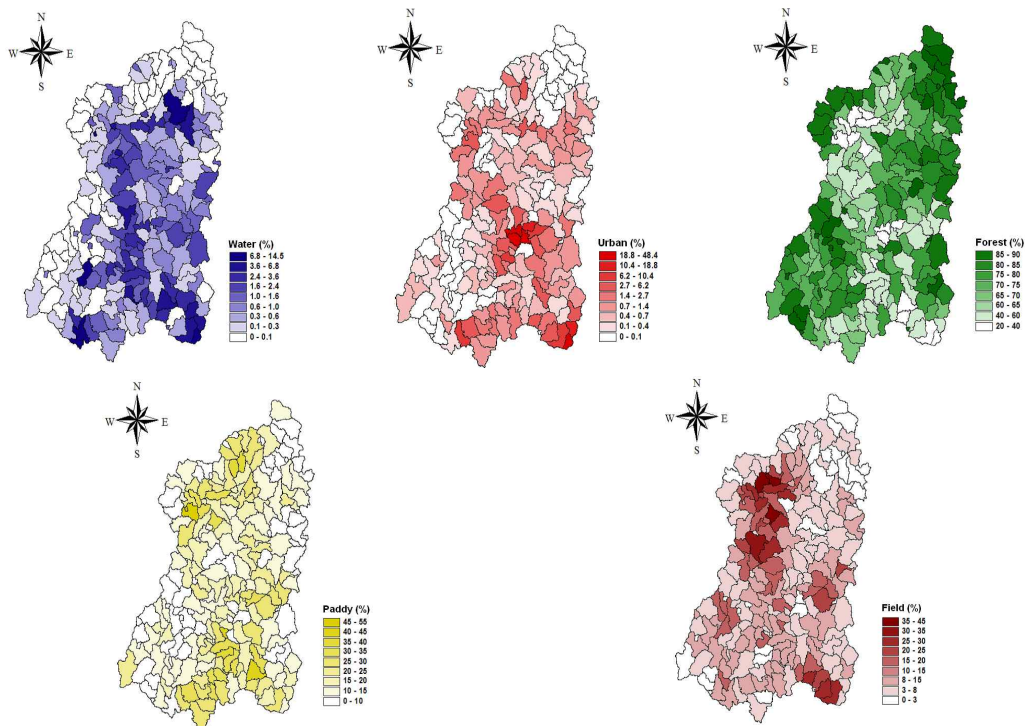


Fig. 3. Distribution of Land Use Contents by A-Type

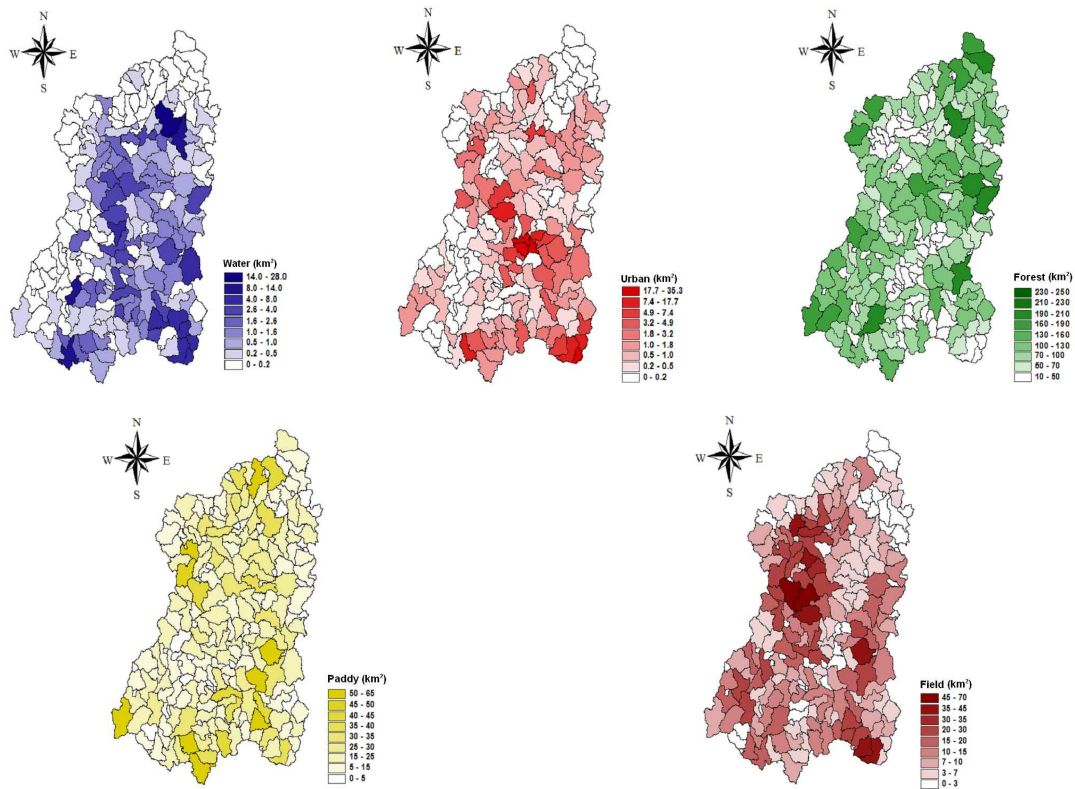


Fig. 4. Distribution of Land Use Contents by B-Type

분포면적을 나타내는 B-Type 분석 결과는 Fig. 4와 같다. 먼저 낙동강유역내의 수역은 하천을 중심으로 높은 구성비와 분포면적을 보이며 시가화(도시)의 경우 A-Type의 분석결과, 대구광역시를 구성하고 있는 표준유역들은 18%에서 48%, 부산광역시를 구성하고 있는 표준유역들은 10.4%에서 33%가 시가화(도시) 지역이었으며 다른 토지이용항목들에 비해 매우 높은 구성비를 나타냈다. B-Type의 분석결과에서도 낙동강유역의 전체면적(23,703 km<sup>2</sup>) 중 시가화 면적은 964.97 km<sup>2</sup>이며 대구광역시와 부산광역시를 구성하고 있는 표준유역들에서 넓은 시가화 면적이 나타났다. 산림은 수역과 시가화 분포가 높은 표준유역을 제외한 나머지 표준유역에서 일정한 구성비와 면적으로 분포하고 있으나 안동댐유역의 경우 평균 87.7%가 산림으로 구성되어 있다. 논은 A-Type 분석결과 내성천유역에 18%, 병성천유역에 36%, 남강유역에 27%의 구성비를 나타냈으며, B-Type 분석결과 낙동강유역 전체 논 면적(2,899 km<sup>2</sup>) 중 내성천, 병성천, 남강유역에 넓은 면적으로 분포되어 있다. 밭의 경우, A-Type 분석결과 내성천 남서쪽 유역, 낙동상주, 낙동구미, 낙동왜관유역을 중심으로 높게 분포해 있고 평균 30%의 구성비를 나타냈으며, B-Type 분석결과 역시 전체 밭의 면적(2,701 km<sup>2</sup>)

중 내성천 남서쪽 유역, 낙동상주, 낙동구미, 낙동왜관유역을 중심으로 넓은 분포면적을 나타냈다.

낙동강유역의 토지이용항목별 분포를 모두 종합하여 토양침식 위험성 및 잠재성이 높은 유역에 순위를 정해 Fig. 5(a)에서 Fig. 5(b)와 같이 나타내었다. 토양침식 가능성의 순위 평가결과 토양 유실의 위험성 및 잠재성이 높은 표준유역들로 구성되어 있는 중권역은 내성천유역, 위천합류점유역, 합천댐유역으로 나타났으며 A-Type과 B-Type에서 모두 높은 순위를 차지했다. 이는 내성천유역, 위천합류점유역, 합천댐유역의 경우는 토양 침식의 위험성이 큰 지역이 공간적으로도 집중(A-Type)되어 있으면서 동시에 해당되는 면적 크기(B-Type) 또한 크게 분포하고 있음을 나타낸다.

내성천유역은 총 21개의 표준유역으로 구성되어 있으며 전체 낙동강유역의 226개 표준유역 중 11개 표준유역이 A-Type에서 그리고 13개 표준유역이 B-Type에서 각각 토양유실 위험순위의 상위권을 차지했다. 위천합류점유역은 총 3개의 표준유역으로 구성되어있어 유역면적은 작지만 각각의 표준유역들 모두 토양 침식의 위험성이 큰 것으로 나타났다. 합천댐유역은 총 10개의 표준유역으로 구성되어 있으며 그 중 4개(A-Type)에서 5개(B-Type)

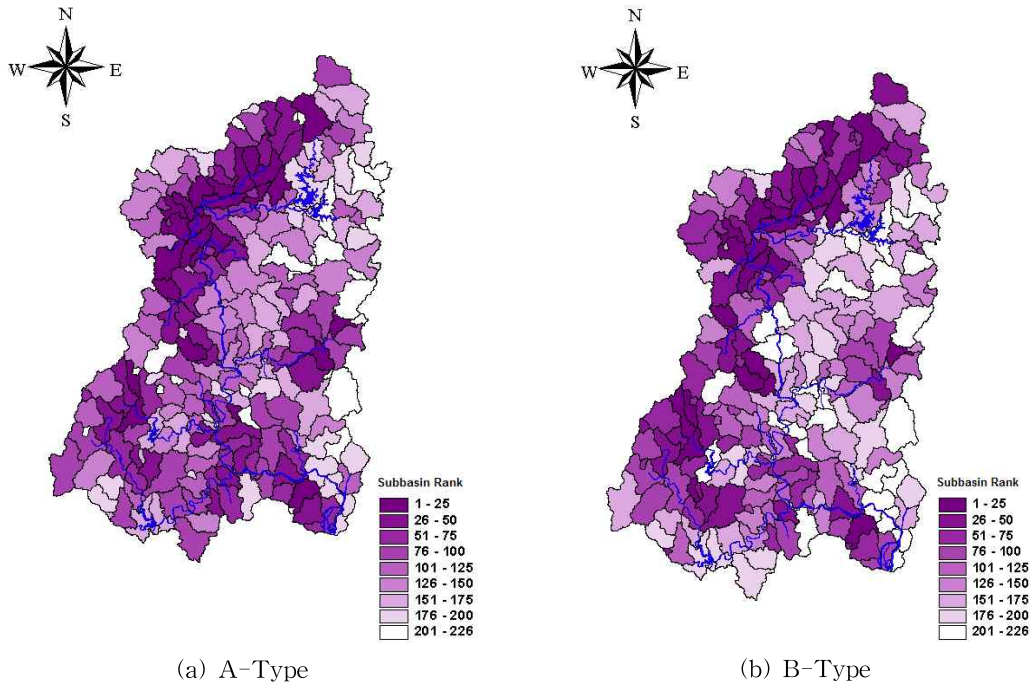


Fig. 5. Map of Soil Loss Risk Ranking in Nakdong River Basin

의 표준유역이 상위권 순위를 차지했다. 내성천유역, 위천합류점유역, 합천댐유역은 유역을 구성하고 있는 표준유역의 반 이상이 토양침식 위험성 및 잠재성이 매우 높다는 결과를 나타냈다. 그 외 안동댐유역과 안동댐하류유역은 내성천유역, 위천합류점유역, 합천댐유역에 비해 토양침식의 위험성은 낮지만 구성하고 있는 소수의 표준유역들이 낙동강유역내 토양유실 발생 위험성이 가장 큰 1 순위를 차지하였으며 이러한 결과를 통해 안동댐유역과 안동댐하류유역 또한 토양 유실의 위험성과 잠재성이 높다고 볼 수 있다.

#### 4. 표준유역별 토양침식에 대한 정량적 분석

##### 4.1 RUSLE 모형 및 인자 산정

대상지역의 토양조건, 피복조건 및 환경조건 등과 같은 복합적 요소에 의해 지배되는 토양침식량의 정확한 예측은 현재까지의 수준에서 어려운 과제라고 할 수 있어 통계적이고 기본적인 접근방법을 토대로 한 여러 예측공식들이 개발되어 이용되고 있다. 이러한 통계적인 방법을 이용하여 토양침식량을 산정하는 모형에는 USLE (Universal Soil Loss Equation), TRB (Transport Research Board), USDA-WEPP (Water Erosion Prediction Project) 등 여러 가지가 있으나(박무중과 김양수, 2001), 본 연구에서는 USLE 모형을 유역에 적용할 수 있도록 개선한 RUSLE

(Revised Universal Soil Loss Equation) 모형을 활용하였다.

RUSLE 모형의 장점으로서는 계절별 피복조건 및 다양한 침식조절기법의 영향을 고려 할 수 있고, 다른 모형에 비해 토양침식량 산정결과의 신뢰성이 뛰어나다. 또한, 원격탐사 자료를 효과적으로 조합하여 사용할 수 있으며, GIS와 같은 자료처리시스템에서 필요로 하는 자료의 호환성을 생각할 때 많은 장점을 가지고 있다(국립방재연구소, 1998). 또한 유역에 적용이 용이하고 토양침식에 가장 민감한 최신 토지피복 특성을 반영할 수 있으며, 토양침식 원인 지역에 대한 유역대책을 효과적으로 지원할 수 있다는 특징이 있다. RUSLE 모형의 산출공식은 아래와 같다.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

여기서, A는 토양침식량(ton/ha/yr), R은 강우침식인자, K는 토양침식성인자, LS는 지형인자(경사도·경사길이), C는 토양피복인자, 그리고 P는 침식제어대책인자이다.

낙동강 대상유역의 토양침식량 산정을 위해 GIS 자료를 이용한 RUSLE 모형의 인자별 주제도는 Fig. 6과 같다. 먼저 강우침식인자(R)는 연평균 강우의 침식능력으로 강우의 시간적인 분포와 공간적인 특성으로 얻어진다. 본 연구에서는 강우인자 R을 산정하는데 있어 국내에서 개발된 R값 분포도를 사용하기에는 낙동강유역 전역에

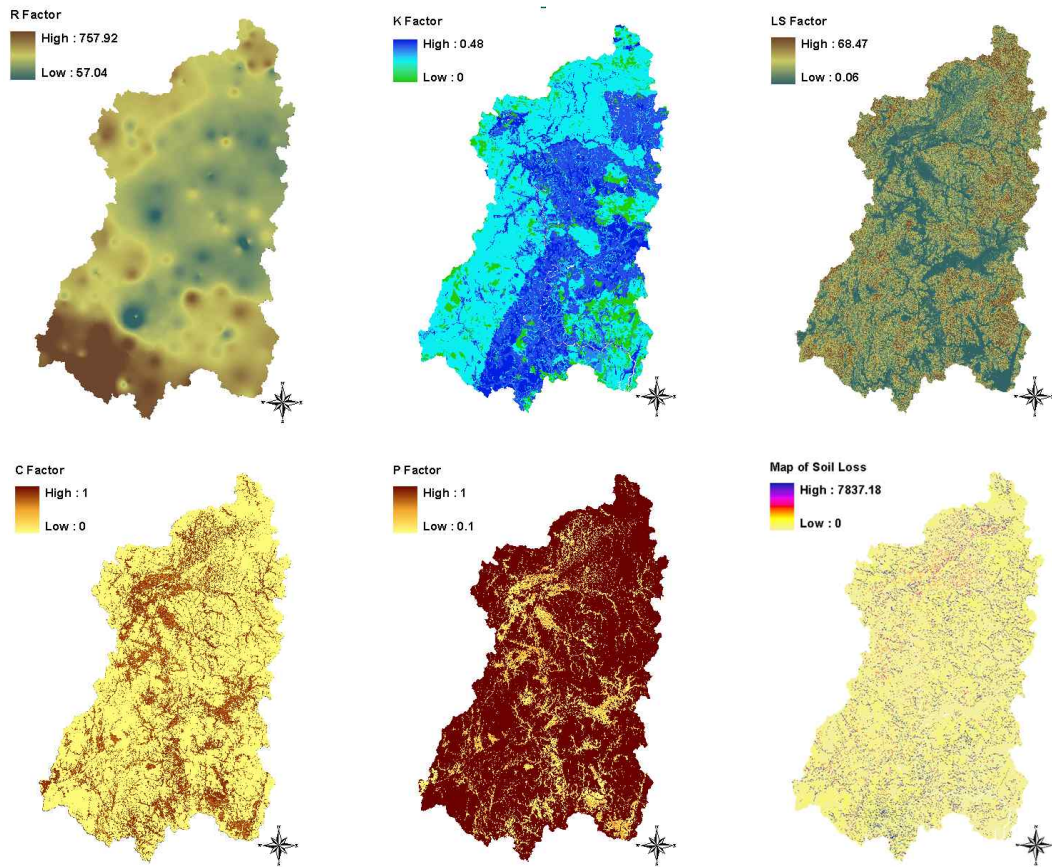


Fig. 6. Thematic Map of RUSLE

일관성 있게 구축된 것이 아니기 때문에 적용하는데 한계가 있었다. 최대 30분 강우강도를 계산하기 위해서는 20년 이상의 장기 측정자료가 필요하나 낙동강유역의 관측 강우자료가 있는 지점에는 20년 이상의 자료가 확보되지 못한 경우가 많았으며 따라서 이 같은 자료가 확보되지 않았을 경우 활용할 수 있는 Toxopeus (1996)의 방정식 (김남신, 2010)을 연평균 강수량 자료와 함께 활용하였다. 본 연구에서는 2000년부터 2009년까지 낙동강유역내 강우관측소에서 측정한 강우자료를 토대로 강우분포자료를 구축하였다. 구축된 강우분포자료를 토대로 Toxopeus (1996)가 개발한  $R = 3.85 + 3.05 \times P$  (연평균강우량, mm/yr)를 이용하였으며 분석에 필요한 R factor를 추출하였다.

토양침식성인자(K)는 토양입자의 입경, 유기물 함량, 토양의 구조 및 배수관계 등에 따라 달라진다. 토양의 침식정도는 토양통별로 다른데, 이는 토양통에 따라 입도조성과 유기물의 함량이 다르기 때문이다. K값이 높을수록 극세사(very fine sand)와 미사(silt)의 함량이 높음을 의미한다. 반대로 극세사와 미사의 함량이 낮아지면 점도

(Clay)의 함량이 높아지기 때문에 토양구조가 발달하여 토양침식이 적게 일어나게 된다. 또한 토양 내 투수성이 높아지면 발생하는 유거수가 적기 때문에 토양침식이 덜어지게 된다. 본 연구에서는 국가 수자원관리정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 낙동강 토양도를 이용하였다. 낙동강유역의 토양도에는 47가지의 토양종류별로 유역에서 차지하는 면적이 기록되어 있으며 이 면적에 따른 토양분류 기호를 국가 수자원관리 종합정보시스템에서 확인한 후, 분류된 기호에 따라 책정되어있는 토양침식량 K인자 값을 입력한 후 주제도를 생성하였다.

지형인자(LS)는 경사길이와 경사도가 토양침식에 영향을 미치는 정도를 나타내는 것으로 경사길이인자(L)와 경사도인자(S)에 따른 단위 구획당 예상되는 토양침식의 비를 말한다. 경사길이는 흐름이 시작되는 지점에서 퇴적이 일어나는 곳까지의 거리, 경사도는 지표면의 평균경사로서 수평거리에 대한 고도차의 백분율로 표시된다. 지형인자 값은 경사길이 약 22.1m와 경사 9%를 기준으로 하여 경사도와 경사길이에 따른 발생비율을 나타내며 경사

길이(L)와 경사도인자(S)의 곱으로 나타낸다. 본 연구에서는 Wischmeier and Smith (1978)가 개발한 관계식을 이용하여 지형인자를 추출하였다.

토양피복인자(C)는 토양침식에 대한 식생피복 및 작물상태 효과를 반영한 인자이다. 지표면의 피복상태가 토양침식에 미치는 영향은 식생으로 인한 빗방울의 운동에너지경감, 지표류의 유속감소로 인한 토립자의 이송경감 및 퇴적증진, 식생의 뿌리로 인한 토양 덩어리의 이동역제 및 공극증대, 식물의 증산작용과 토양내에서 생물학적 활동증진에 따른 토양수분감소 등이 있다. 지표의 침식에 미치는 인자는 강수량과 강우강도, 사면경사와 사면길이, 토양 특성 외에도 토지이용도 중요한 침식인자이다. C값 추정은 미 농무성에서 발표한 C값이 주로 활용되고 있으며 이를 각 유역 특성에 맞게 수정한 후 활용한 경우도 많다. 특히 기존 낙동강유역내 특정 소유역에서의 토양침식량을 산정한 연구에서는 C값을 나지 1.0, 산림 0.1, 논 0.3, 밭 0.4(송성태, 2006)로 채택하였으나 이는 특히 산림과 밭에 대해 토양침식량을 과다 산정하는 경향이 있으므로 본 연구의 C값 책정 기준에서 배제하였다. 따라서, 본 논문에서는 박경훈(2003), 오정학과 정성관(2005), 이근상(2006), 광동욱(2007) 등이 낙동강유역의 토양유실량 산정을 위해

사용한 미 농무성 자료의 C 인자 값을 활용하였다. 나지 1.0, 논 0.3, 밭 0.24, 산림 0.009, 수계와 도시는 침식이 발생하지 않으므로 0으로 구성해 C값을 입력하였다.

침식제어대책인자(P)는 논이나 밭과 같은 경작지 형태와 지형 경사에 따른 영향을 고려하는 것으로 경작지 형태로는 경사도별 비율로 계산된다. 계단식 경작(Terracing), 등고선 경작(contouring), 등경사 경작(contour strip cropping) 등의 형태에 따라서 지표의 침식유형이 달라진다(권형중 등, 2002). 경작형태 중에서 침식량이 적은 것은 계단식 경작이고, 침식이 가장 빠른 것은 등고선 경작이다. 본 연구에서는 DEM 자료로부터 추출한 경사도와 중분류체계의 토지피복도에서 분석한 경작상태를 중첩 분석한 후 경작인자 기준을 적용하여 계산하였다.

#### 4.2 낙동강유역의 토양침식량 산정 및 토양침식위험도 분석

낙동강유역의 토양침식량 산정 결과는 Fig. 6에서 확인할 수 있으며 평균토양침식량은 42.65 ton/ha/yr으로 나타났다. 낙동강유역의 중권역별 토양침식량을 나타낸 표는 Table 1과 같다. 토사 침식량의 경우 일반적으로 현장 자료가 없기 때문에 직접적인 검증은 불가능하다. 따라서 본

Table 1. Soil Loss by Middle Region

(Unit: ton/ha/yr)

Middle Region	Maximum Soil Loss	Average Soil Loss	Standard Deviation
Andong Dam	<b>7,347.92</b>	44.19	150.35
Imha Dam	6,875.83	53.03	164.41
Andong Dam Downstream	7,239.22	44.26	133.61
Naeseong Stream	<b>7,837.18</b>	41.21	122.83
Yeong River	5,794.10	44.77	153.64
Byeongseong Stream	2,988.93	34.59	103.21
Nakdong Sangju	5,303.76	35.24	114.27
Wicheon	6,563.82	38.47	123.14
Nakdong Gumi	3,568.64	24.85	77.78
Gamcheon	4,614.34	32.97	96.23
Nakdong Waegwan	4,224.89	25.38	86.89
Kumho River	5,757.00	35.11	114.33
Hui Stream	5,424.65	36.65	118.61
Nakdong Goryeong	3,565.79	35.65	118.37
Hapcheon Dam	4,692.61	33.22	99.43
Hwang River	4,772.31	40.17	117.99
Nakdong Changyeong	4,788.14	<b>55.99</b>	161.23
Nam River Dam	5,227.77	48.19	147.22
Nam River	5,658.59	<b>81.39</b>	221.09
Nakdong Milyang	5,743.76	42.05	141.59
Milyang River	6,730.96	45.39	155.07
Nakdong River Estuary Barrage	3,120.89	24.02	97.46



연구에서 산정한 토사 침식량을 기존 자료에서 제시하고 있는 비유사량(건설부, 1992)과 비교하여 유사전달률을 산정하였고 이를 기존의 Boyce (1975) 유사전달률 경험식과 비교함으로써 간접적으로 검증하였다. 건설교통부(1992) 자료에는 안동댐, 내성천, 위천, 남강댐의 비유사량 자료가 제시되었고 본 논문에서 산출한 각 해당 구역에서의 토양침식량을 이용하여 유사전달률을 계산한 결과, 안동댐 구역에서의 전달률(4.7%)은 Boyce (1975) 식에 의해 계산된 유사전달률(4.5%)과 비슷한 값을 나타냈으며 위천과 남강댐 구역은 약 2배, 내성천 구역의 경우는 비유사량 자료와 본 연구의 토양침식량 자료를 이용하여 계산한 유사전달률이 Boyce (1975) 식에 의한 계산 값보다 약 3배 정도 큰 것으로 나타났다. 중권역별 토양침식량 산정 결과, 평균토양침식량이 큰 표준구역은 남강구역 81.39 ton/ha/yr, 낙동창녕구역 55.99 ton/ha/yr, 임하댐구역 53.03 ton/ha/yr 순으로 나타났으며 표준편차는 각각 164.41, 161.23, 164.41로 나타났다. 최대 토양침식량을 기준으로 한 결과에서는 내성천구역 7,837.18 ton/ha/yr, 안동댐구역 7,347.92 ton/ha/yr, 안동댐하류구역 7,239.22 ton/ha/yr 순으로 나타났다.

RUSLE로 산정된 토양침식량을 현장자료를 이용하여 검보정하는 데는 실질적으로 한계가 있으므로 정량적인 평가보다는 Gupta가 제시한 토양침식위험 평가기준(Table 2)을 적용하여 낙동강구역의 토양침식 위험도를 작성하여 위험성을 평가할 필요가 있다. 평가등급은 가벼움(Slight), 보통(Moderate), 높음(High), 심함(Severe) 총 4가지 등급으로 구분되어 있으며 대상구역인 낙동강구역의 경우 토양침식이 가벼운 것으로 나타난 면적은 전체면적의 약 91.5%로 나타났다. 반면 토양침식이 매우 극심한 것으로 나타난 면적은 전체면적의 약 6.1%로 나타났다(Fig. 7). 즉, 낙동강구역 전체에서 심함(Severe) 등급에 해당되는 구역면적은 1,424 km<sup>2</sup>인 것으로 나타났으며 평가등급별 토양침식 위험분포 분석 결과, 심함(Severe) 등급의 분포면적이 가장 넓게 분포한 곳은 남강댐 구역으로 총 1,424 km<sup>2</sup>의 분포면적 중 143.38 km<sup>2</sup>를 차지했으며, 임하댐 133.35 km<sup>2</sup>, 내성천 128.42 km<sup>2</sup>, 남강 123.30 km<sup>2</sup>의 순으로

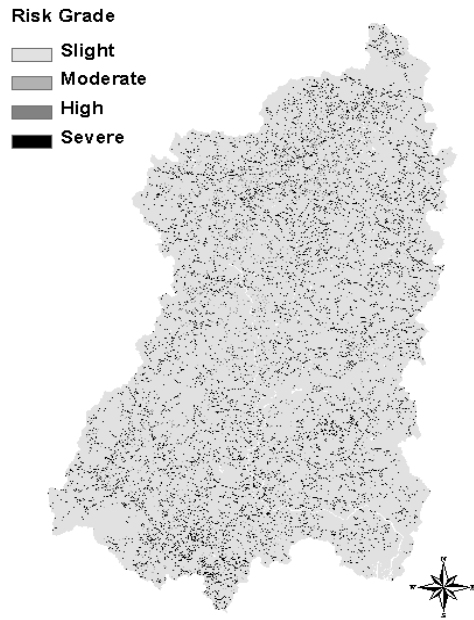


Fig. 7. Map of Soil Loss Risk Assessment

나타났다.

## 5. 낙동강구역 토양 침식 및 유실 잠재성 종합평가

### 5.1 토양침식 위험구역 선정

토지이용도만을 이용하여 토양침식 발생 위험성을 분석한 결과에서는 안동댐, 내성천, 위천하류점, 함천댐 구역이 위험성이 높은 것으로 나타났으며(Fig. 8(a)), RUSLE 계산 결과를 바탕으로 토양침식위험 등급을 고려한 결과에서는 심함(Severe) 등급이 가장 많이 분포되어 있는 구역이 남강댐, 임하댐, 내성천, 남강 구역 순이었다(Fig. 8(b)). 두 연구방법에 의하면 내성천구역이 공통적으로 토양침식 위험구역으로 평가되었다. 내성천구역은 약 7,837 ton/ha/yr의 최대 토양침식량이 구역내 특정 지점에서는 나타날 수 있다는 가능성을 나타냈으며 토양침식 위험분포 등급 중 심함(Severe)의 분포면적은 128.42 km<sup>2</sup>로 표준구역들 중 세 번째로 크게 나타났다. 토지이용도 분석을 통한

Table 2. Distribution of Soil Loss (Gupta, 2001)

Class	Slight	Moderate	High	Severe
Soil Loss (ton/ha/yr)	1-50	51-100	101-200	more than 200
Area (km <sup>2</sup> )	21,411	260	305	1,424
Rate (%)	91.5	1.1	1.3	6.1

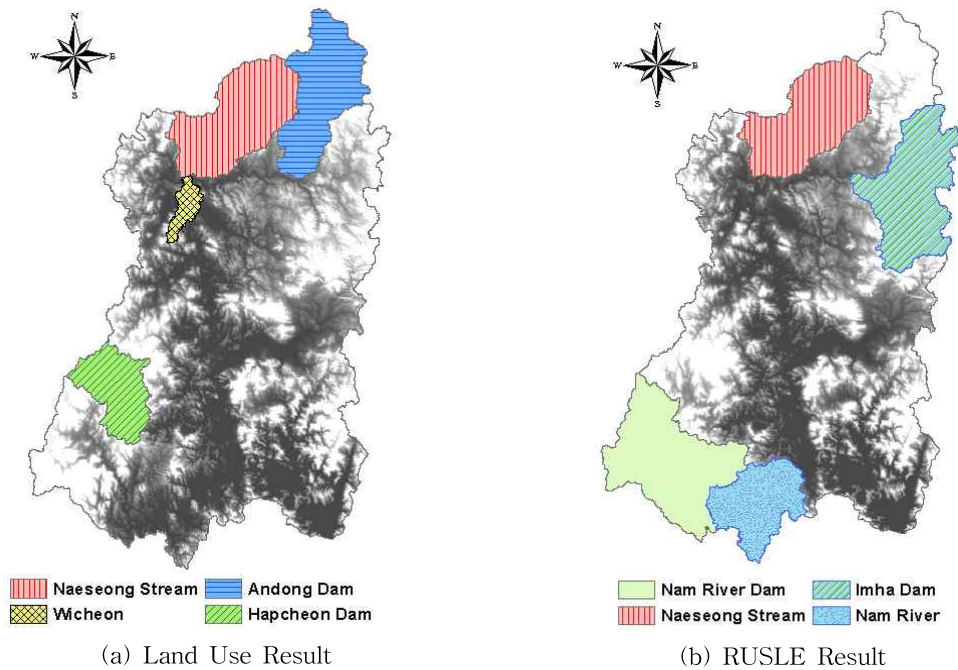


Fig. 8. Selected Watersheds by Soil Loss Risk Assessment

Table 3. Summary of Soil Loss Risk Assessment for Naesung Stream Watershed

RUSLE Results	Land Use Analysis Result		
	Standard Basin	Risk Ranking	
		A TYPE	B TYPE
· Maximum Soil Loss = 7,837.18 ton/ha/yr · Average Soil Loss = 41.21 ton/ha/yr · Area for Severe Level = 128.42 km <sup>2</sup>	Naesung Down Stream	2	7
	Okgye Stream	3	6
	Wolpo Station	7	5
	Hancheon Down Stream	9	10
	Geumcheon	14	17
	Naesung Middle Stream	19	11
	Seocheon Down Stream	30	30
	Yecheon Station	38	49
	Naesung Up Stream	40	·
	Nakhwaam Stream	44	24
	Toil Stream	50	25
	Hancheon Up Stream	·	26
	Unam Reservoir	·	34
	Geumbong Reservoir	·	50

위험순위에서도 상위 50위 안에 14개의 표준유역(총 22개의 표준유역으로 구성)이 포함되었으며 따라서 토양 침식 위험지역 분석결과, 내성천유역의 위험도가 낙동강 22개 소유역 중 상대적으로 높은 것으로 나타났다(Table 3).

## 5.2 산사태 위험지역과의 비교

토양손실의 주요 원인은 경작지, 산림, 광산 및 각종 공사현장 등 인위적인 개발 때문이며 이로 인해 발생하는 산사태는 토양침식의 총량면에서 가장 큰 비율을 차지한

다(신계중, 2001). 토양손실 평가를 통한 유역관리 대책 수립을 위한 분석 방법으로 산사태 자료의 연관성을 분석하기 위해 본 연구에서는 산림청(산사태위험지 관리시스템)에서 제공하는 산사태 위험지도와 앞서 선정된 토양침식 위험성이 높은 유역의 토양침식량 산정 결과(RUSLE)를 비교, 분석하였다. 산사태 위험지도는 자료조사(문헌조사), 지형상태(지형도, 항공사진), 야외개략조사를 실시하여 작성되었으며 산사태 발생이 진행될 가능성이 높은 지역을 위험 순으로 1등급에서 4등급까지 구분하여 구축되었다(산업자원부, 2008). 본 연구에서는 앞서 토양침식 위험성이 높은 유역으로 선정된 내성천 유역을 대상으로 산사태 위험도가 큰 A와 B 지점(Fig. 9)에 대해 비교분석을 실시하였다.

우선 산사태 위험지도를 살펴보면 내성천유역은 전체적으로 산사태의 위험성이 크며, 산사태 위험 1등급 분포가 하류로 갈수록 넓게 나타났다. RUSLE 결과와 산사태 위험지도 비교 결과 토양침식량이 높은 것으로 나타난 지역과 산사태 위험지역이 유사하게 분포하고 있었으며, 산사태 위험지역으로 나타난 지역에서 많은 양의 토양침식

이 발생하는 것을 알 수 있다(Fig. 10). 토양침식 위험성이 높게 평가된 유역은 산사태의 위험성 또한 큰 것으로 볼 수 있으나 RUSLE 모형을 이용한 분석에서 습지나 하천 주변의 토지이용에 따른 토양침식의 위험성은 산사태 위

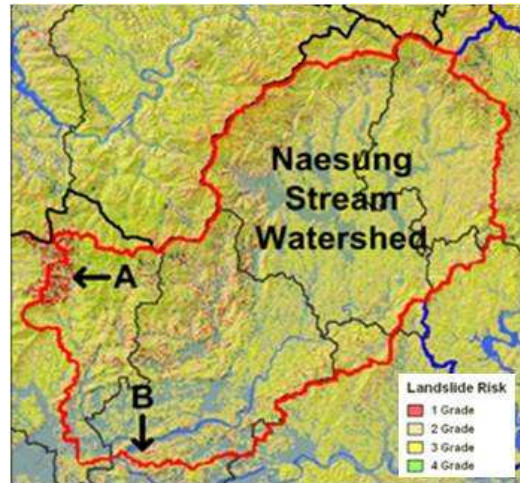


Fig. 9. Landslide Risk Map of Naesung Stream Watersheds

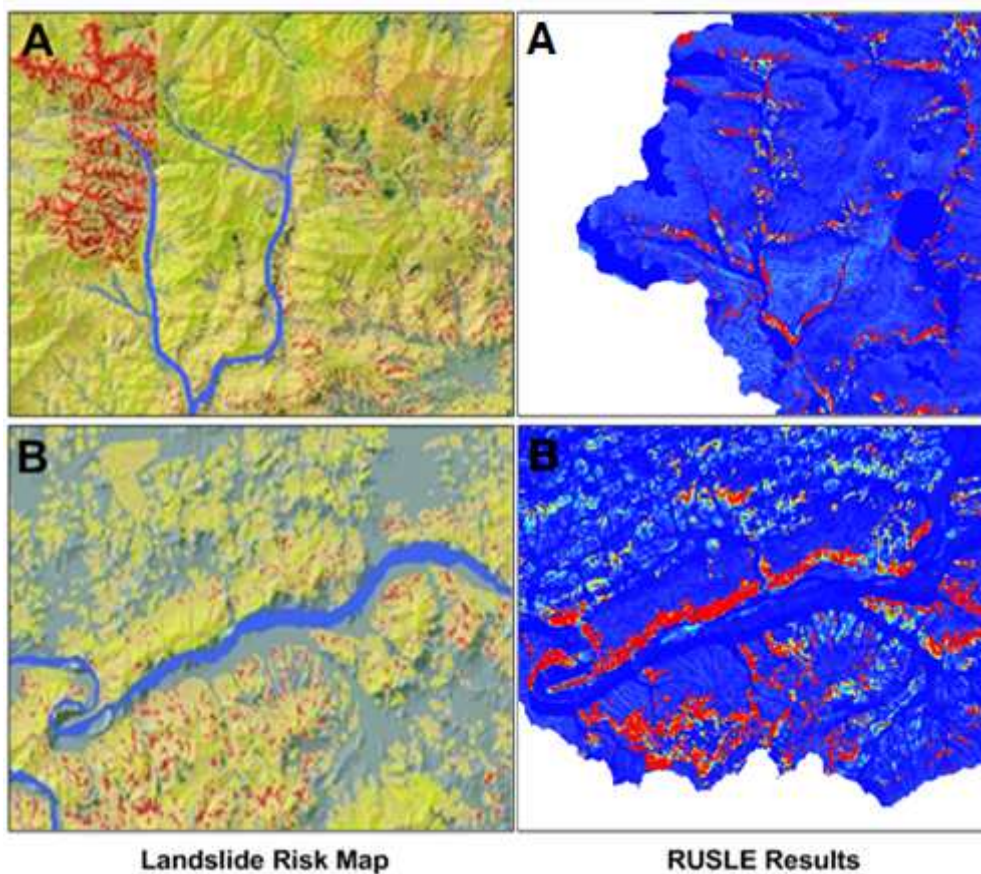


Fig. 10. Comparison of Landslide Risk Map and RUSLE Results for Naesung Stream Watershed

험도에서는 나타나지 않았다.

## 6. 결론

본 연구에서는 낙동강유역을 대상으로 토지이용도를 세부적으로 분석하여 유역별 토양 유실 및 침식 발생의 위험성을 등급화하고, 토지이용뿐만 아니라 강우, 경사, 토양, 경작형태의 유역특성의 요소가 모두 고려되었을 경우를 RUSLE 모형을 이용하여 유역별 토양 침식의 위험성을 분석하였다. 또한 최종적으로 도출된 토지이용도 분석결과와 RUSLE 모형의 결과를 비교 및 종합하여 낙동강유역의 총 22개의 소유역 중 토양침식 위험성이 높은 유역을 선정하였으며 해당 유역에 대한 산사태 위험지도와의 비교를 통해 산사태와 토양침식 발생의 연관성을 분석하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 낙동강유역의 토지이용항목별 분석을 통해 토양 침식 위험성이 높은 것으로 나타난 소유역은 내성천, 안동댐, 위천합류점, 합천댐 유역이었으며 이 소유역들은 구성하고 있는 표준유역들의 과반수가 낙동강유역의 22개 표준유역 중 상위 50위에 속해있는 것으로 나타났다. 따라서 유역에서의 토양유실 관리 및 방지를 위한 토지이용 측면의 대책 방안들은 주로 내성천, 안동댐, 위천합류점, 합천댐 유역을 대상으로 수립될 필요가 있다.

둘째, 낙동강유역의 소유역별 RUSLE 모형을 이용한 토양침식량 산정 결과를 이용하여 Gupta (2001)의 토양유실 평가등급을 적용한 후 토양침식 위험분포를 분석한 결과, 심함(Severe) 등급의 분포면적을 가장 많이 차지한 곳은 남강댐 유역으로 143 km<sup>2</sup>로 나타났으며, 임하댐 133 km<sup>2</sup>, 내성천 128.42 km<sup>2</sup>, 남강 123 km<sup>2</sup>의 순으로 나타났다. 따라서 토지이용도 분석 결과와 RUSLE 모형 분석 결과를 모두 종합해 봤을 때 낙동강유역의 상류에 위치한 내성천유역이 토양침식의 잠재성과 위험성이 상대적으로 높다는 것을 알 수 있었다.

셋째, 내성천유역에 대한 산사태 위험지도 분석결과, 전체적으로 산사태의 위험성이 크며 산사태 위험 1등급 분포가 하류로 갈수록 넓게 나타났다. RUSLE 모형을 이용한 결과에서 토양침식량이 높은 것으로 나타난 지역과 산사태 위험지도에서 산사태위험이 높게 나타난 지역의 분포는 서로 유사한 것으로 나타났으나 습지 및 하천 주변에서의 토양침식 잠재성 및 위험성은 산사태 위험도에서 나타나지 않았다. 이에 따라 하천으로 유입되는 유사 공급을 차단하기 위한 직접적인 대책 방안 마련을 위해서는 RUSLE 모형을 이용한 분석 결과를 반드시 활용할 필

요가 있으며 극한 호우 혹은 태풍 발생 등으로 인한 단기간의 토양유실 방지를 위한 대책 마련 자료로는 산사태 위험도를 반드시 활용할 필요가 있다.

결론적으로 토지이용도, RUSLE, 산사태 위험도를 이용한 분석 결과, 낙동강유역의 토양유실 위험지역은 내성천 유역인 것으로 나타났으며 많은 양의 유사가 하천이나 댐으로 유입 될 잠재성을 가지고 있는 것으로 나타났다. 이로 인한 고탁수, 퇴적으로 인한 홍수위 상승, 하천제방이나 하천구조물의 붕괴 등의 이차적 문제 발생 가능성을 수반하고 있으며 이러한 토양침식 위험성이 높은 유역은 산림법목을 자제하고 논과 밭을 계단식, 등고선 경작을 이용하여 운영하는 등 토양침식을 저감시킬 수 있는 일반적인 방안들을 우선 적용해야 할 것이다. 본 연구에서 도출된 결과들은 보다 구체적인 토양침식 관리 및 대책 수립 마련을 위한 의사결정 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 건설교통부 (1992). 댐설계를 위한 유역단위 비유사량 조사 연구.
- 곽동욱 (2007). GIS를 이용한 댐유역 토사유실 원인지역 선정 연구. 석사학위논문, 전북대학교.
- 권형중, 박근애, 김성준 (2002). "GIS 및 다시기 RS 자료를 이용한 토양침식량 변화 및 이동경로 추정." 한국GIS학회, Vol. 10, No. 1, pp. 151-163.
- 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS). www.wamis.go.kr.
- 국립방재연구소 (1998). 개발에 따른 토사유출량 산정에 관한연구(1).
- 국토해양부 (2009). 낙동강유역종합치수계획(보완) 보고서.
- 김남진 (2010). 지리정보활용 : ArcGIS를 이용한 자료관리와 공간분석, 한울, p. 316.
- 박경훈 (2003). "GIS 및 RUSLE 기법을 활용한 금호강 유역의 토양침식위험도 평가." 한국지리정보학회지, 한국지리정보학회, 제6권, 제4호, pp. 24-36.
- 박무중, 김양수 (2001). "개발지역에서의 토사발생규모와 모형의 적용성 연구." 한국수자원학회논문집, 한국수

- 자원학회, Vol. 34, No. 3, pp. 3-18.
- 산사태위험지 관리시스템, <http://sansatai.forest.go.kr>.
- 산업자원부 (2008), 산사태재해 예측 및 저감기술 개발, pp. 453-456.
- 송성태 (2006). GIS 및 RUSLE 모형을 이용한 가야산 국립공원의 토양침식 위험지역 연구, 석사학위논문, 대구대학교.
- 신계중 (2001). “토양유실인자가 적용된 GIS를 이용한 산사태분석.” **산업과학기술연구소 논문집**, Vol. 9, pp. 289-303.
- 오정학, 정성관 (2005). “토지자원관리를 위한 낙동강 유역의 잠재적 토양유실량 산정.” **한국농촌계획학회 농촌계획**, 제11권, 제2호, pp. 9-19.
- 이근상 (2006). “GIS 공간분석을 이용한 안동·임하호 유역의 토사유실 비교 평가.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제2D호, pp. 341-347.
- 한국건설기술연구원 (2010). 신설 보를 고려한 유역분할, 한국건설기술연구원.
- Boyce, R.C. (1975). “Sediment routing with sediment delivery ratios.” *In present and prospective technology for predicting sediment yields and sources*, ARS-S-40, USDA-ARS.
- Gupta, H.S. (2001). “Terrain evaluation for eco-restoration using remote sensing and GIS.” *Conference on GIScience*, AGILE, session 7 Environmental modelling and remote sensing.
- Hammad, A.A. (2011). “Watershed erosion risk assessment and management utilizing revised universal soil loss equation-geographic information systems in the Mediterranean environments.” *Water and Environment Journal*, Vol. 25, Issue 2, pp. 149-162.
- Nicklow, J.W., Muleta, M.S. (2001). “Watershed management technique to control sediment yield in agriculturally dominated areas.” *Water International*, Vol. 26, No. 3, pp. 435-443.
- Owens, P.N., and Collins, A.J. (2006). *Soil erosion and sediment redistribution in river catchments: measurement, modelling and management*. CABI, UK. pp. 177-185.
- Sharifi, A., Kalin, L. (2010). “Effect of land use uncertainty on watershed modeling.” *World Environmental and Water Resources Congress*, Vol. 6, pp. 4730-4739.
- Toxopeus, A.G. (1996). *ISM: An interactive spatial and temporal modeling system as a tool in ecosystem management*, Ph.D. Thesis, ITC.
- USACE (2007). *St. Joseph river sediment transport modeling study*; U.S. Army Corps of Engineers Detroit District, USA.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978). “Predicting rainfall erosion losses—a guide th conservation planning.” *Agriculture Handbook*, USDA, Washington D.C. p. 58.

논문번호: 11-092	접수: 2011.08.08
수정일자: 2012.02.29/04.04	심사완료: 2012.04.04