대한지리학회지 제43권 제3호 2008(263~275)

임진강유역의 토지이용에 따른 지표침식에 관한 연구*

이민부** · 김남신*** · 金石株**** · 김항덕*****

A Study on the Soil Erosion by Landuse in the Imjin River Basin, DMZ of Cental Korea*

Min-Boo Lee** · Nam-Shin Kim*** · Shizhu Jin**** · Hang-Deok Kim*****

요약 : 본 연구는 임진강 유역 DMZ 지역의 남북한을 대상으로 토지이용에 따른 지표침식량을 RUSLE 모델을 이용하여 비교 · 분석한 것이다. 토양유실이 상대적으로 많이 일어나는 지역은 북한의 나대지 그리고 경사가 급한 곳에 위치한 밭농사 지역 등이며, 남한지역은 북한 유실량의 1/3 정도로 낮게 나타났다. 북한의 토양유실은 다년간 옥수수 밭과 같은 야산의 농경지 개간으로 인해 노출된 지표토양이 강우 시에 씻겨 내려 하천으로 유입되기 때문이다. 또한 하천의 정비가 제대로 이루어 지지 않아 운반된 하상퇴적물이 높이 쌓이고 하류로 이동하여 하류의 댐 저류지에 퇴적되어 담수용량이 줄어들면서 퇴적물 위로 물이 넘쳐 결국 더 큰 홍수유발의 위험이 있다. 연구지역은 현실적인 접근성의 불리함 때문에 그동안 연구에 많은 제한을 받아왔으나 위성영상 및 수리적 분석을 통해 앞으로 발생할 수 있는 환경문제를 최소화시키는데 기여할 것으로 본다.

주요어 : 지표침식, DMZ, RUSLE, 산림훼손, 임진강 유역

Abstract : This Study deals with the comparative analysis on the estimation of surface soil erosion volume between South and North Korea using RUSLE model in Imjin River basin located on DMZ of Central Korea. Comparatively North Korea areas have been more eroded three times as much as South Korea parts. Because of cropland development such as corn field in the hillslope, in North Korea, more surface soil erosion and transportation to the river bed has given rise to frequent flood hazards. It seems that the study can dedicate to mitigation of environmental problems such as soil erosion and flooding in unaccessible Imjin River basin located on DMZ.

Key Words : soil erosion, RUSLE, DMZ, deforestation, Imjin River basin

---

* 이 논문은 2007년도 정부(교육인적자원부 기초연구과제 인문사회)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-B00197).

** 한국교원대학교 지리교육과 교수(Professor, Department of Geography Education, KNUE), minblee@knue.ac.kr

*** 한국교원대학교 통일교육연구소 연구원(Researcher, Institute of Education for National Unification, KNUE), kns9027@dreamwiz.com

**** 연변대학교 지리학과 부교수(Associate professor, Department of Geography, Yanbian University), jinsz@hanmail.net

***** 육군사관학교 환경연구관(Resssearcher, Department of Civil Engineering and Environmental Sciences, KMA), khd78@hanmail.net

1. 서론

경제발전에 따른 인구증가와 인구압을 완화를 위한 토지부양력 증대책으로 지표공간은 다양한 형태의 농경지가 개발되어왔다. 인구밀도가 높고 농업에 대한 의존도가 높았던 우리나라는 오랫동안 평야, 하천, 산지, 구릉지 등을 개간하여 왔다.

북한의 경우, 그동안 만성적 식량부족, 자연재해로 인한 식량문제를 해결하기 위해 무분별한 삼림벌채와 경사지개간 등으로 토양침식과 하천 토사매립, 범람과 홍수 등 국토의 황폐화가 진행되어 왔다(이민부 외, 2006).

또한 현재의 지구온난화로 인한 지역적인 이상 기후 현상은 자연재해의 위험을 강화시키고 있다(존 휴턴, 2007). 우리가 살고 있는 한반도에 있어서도 강우의 빈도와 강도가 강해져 그로 인하여 최근 다년간 폭우로 하천이 범람하고 토양유실 인한 피해가 발생하고 있다. 남한에서는 이를 복구하기 위하여 국가적으로 많은 경비를 지출하고 지방자치단체에서도 하천의 정비, 토사유출 방지 공사, 사방공사 등을 통하여 지속적인 국토관리를 행하고 있다. 그러나 북한지역은 부족한 식량을 보충하기 위해 다락밭과 뙈기밭 등을 개발하고 땔감을 위한 삼림벌채로 산지와 구릉지의 지표토양의 노출이 심해져 작은 강우에도 토양유실이 발생하고 있지만 문제해결을 위한 노력은 어려운 실정이다(이민부 외, 2003).

최근에 북한지역의 삼림훼손이나 황폐화에 대한 연구들이 많이 진행되었으나(공우석, 2006), 남북 연속지역에 대한 연구는 드물다. 따라서 남북한이 공유하고 있는 비무장 지대를 관통하여 흐르는 임진강 유역에 대한 연구는 환경, 정치 · 경제 · 군사적인 측면에서 남북협력과 문제해결에 매우 유용한 사례가 될 수 있다.

한때 동부산간지역의 북측 금강산댐으로 인하여 사회적 혼란을 초래했고 방지책으로 많은 돈을 들여 평화의 댐을 건설하기도 하였다(조선일보, 2005. 10.14). 서부지역에서는 임진강 본류에 황강 댐 외 4개의 댐이 건설되어있고 DMZ 근거리에 있는 북한의 '4월5일댐'은 총 저수량 3만 5천ton으로 2001년 3월 완공되면서 남쪽의 임진강의 수위가 급격하게 줄었다(건설교통부, 2001). 당시 경계수위 2m에 이르던 연천 취수장 수심이 3일 만에 1.5m로 줄어 연천지역의 영농철 농업용수 공급에 비상이 걸렸고 임진강변 양수장 6곳이 가동 불가능상태까지 갔었다(건설교통부, 2002). 또한 이 댐에 가두어진 물을 예고 없이 방류하면서 남한의 파주와 연천 등 임진강 하휴에서는 물난리가 일어나 수위가 갑자기 2-3m 상승하여 어장과 어구 등에 피해를 주기도 했다(조선일보, 2005. 9.7).

임진강은 남북한간의 군사적 경계를 이루며 북에서 남으로 흘러가면서 관리주체가 남북으로 분리되어 있다. 임진강 유역은 강의 길이가 254km, 유역면적 8,118km^{2}로 남북이 공유하는 가장 큰 하천이다. 북측의 임진강 유역은 농경지 개간이 심하고 토양이 척박하여 우기에 토사유출이 클 것으로 예상된다. 토사유출은 중상류인 북한에서 진행되지만 하류까지 운반 될 경우 하상퇴적으로 인해 남쪽에서도 홍수가 일어날 가능성이 높다. 물론 집중호우로 인해 북한지역의 댐방류나 붕괴가 일어난다면 연천, 파주, 문산 등 경기북부지역이 심각한 수해를 입을 수 있다.

이에 본 연구는 임진강을 대상으로 토지이용에 따른 남북의 토양유실량을 비교분석하였다. 연구결과는 남한지역에서 발생할 수 있는 홍수 예방, 환경문제 해결, 남북한 경제협력 등에 기여할 것으로 기대된다.

2. 연구지역 및 연구방법

연구지역은 전체적으로 동북-서남 방향의 추가령 구조곡 단층대를 따라 단층선과 하곡들이 발달하고 있다. 지형구조는 구조곡내의 중생대 화산암과 함께 신생대 4기에 분출한 화산암계열에 의한 용암대지와 하각과 융기에 의한 협곡과 단애, 하성단구 등으로 이루어져 있다(이민부 외, 2004).

임진강의 발원지는 마식령 산맥의 함경남도 덕원군이며 총 길이 254km 유역면적 약 8,118km^{2}이다(건설교통부, 2002. 이중 남한지역이 3,008km^2, 북한지역이

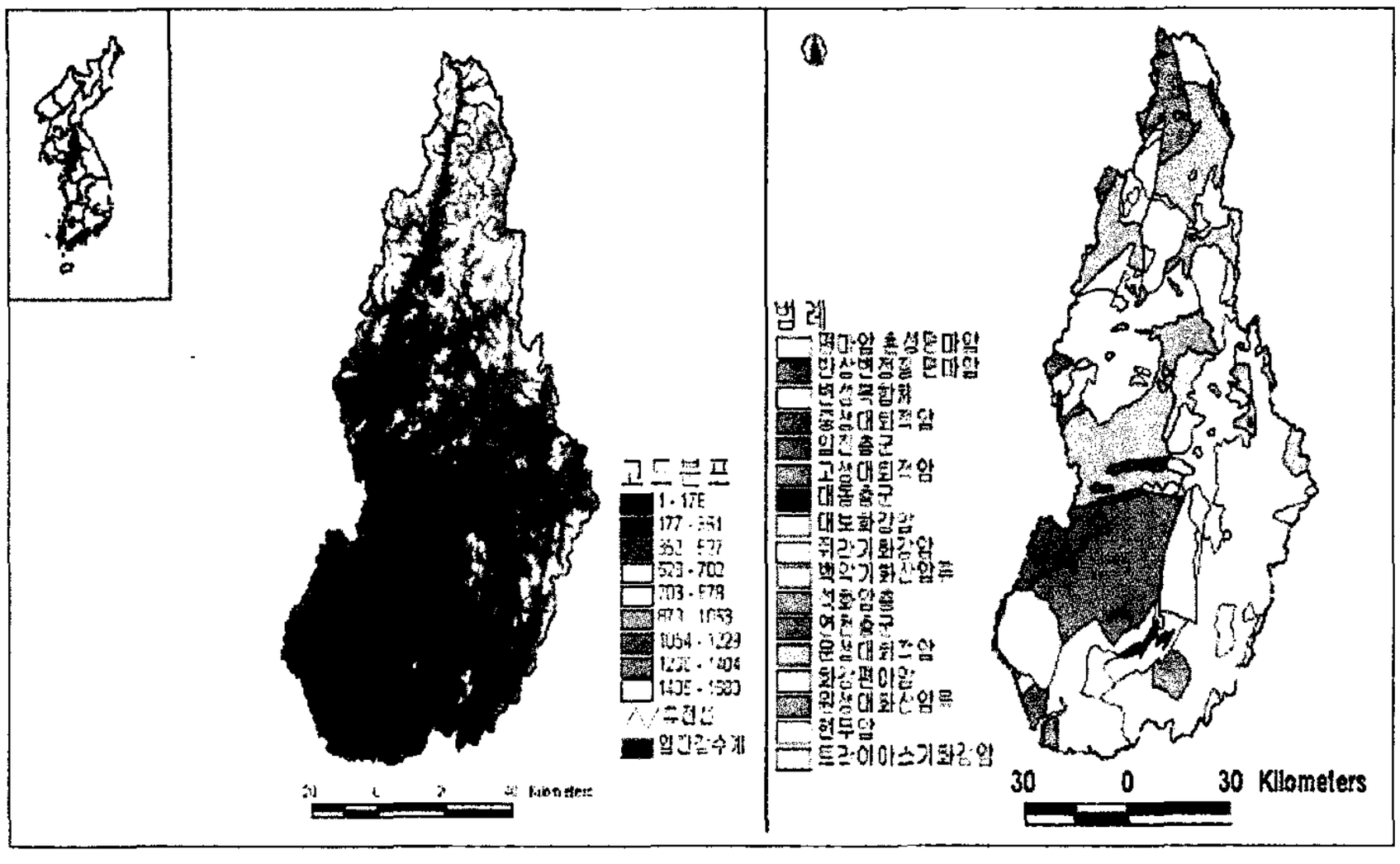

그림 1. 임진강 유역의 지형과 지질

5,108.8km²를 차지하고 있는데 본 연구에서 수치적으로 계산된 유역면적은 8,169km²이다(그림 1). 유역내 고도 분포는 0m-1,520m까지이며 서쪽으로는 마식령 산맥, 동쪽으로는 추가령 구조곡을 끼고 있다. 주요 산으로는 응봉산(1,665m), 추애산(1,530m), 흘령산(1,345m), 입암산(1,107m) 봉황산(1,259m), 건령산(1,345m), 범북산(921m), 대왕덕산(789m), 달마산(797m), 서방산(717m), 고암산(780m) 등이 있으며, 지류로서 고미탄천, 평안천, 역곡천, 김화 남대천, 차탄천,영평천, 한탄강, 사미천, 문산천, 사천 등이 임진강으로 유입한다(이민부 외, 2004).

그림 2 . 연구지역의 위성사진(Landsat:2002년)

(휴전선을 경계로 북한의 식생이 훼손된 것을 확인할 수 있다)

용암대지 주변의 지형은 화산암류와 편마암 및 변성암 계통이 주를 이룬다(그림 1; 최위찬 외 편, 1995). 남쪽의 연구지역은 군사적인 제한으로 구릉지 개간이 적어 산림이 비교적 잘 보존되어 있다. 이에 반해 북한의 임진강 유역은 산림이 많이 훼손된 것으로 위성영상에서도 잘 파악된다(그림 2). 북한지역은 그 동안 지속된 산림훼손으로 인해 식생지역 감소가 꾸준히 진행되었으며 그로 인한 환경문제가 지속적으로 발생하여 왔다(공우석, 2006; 이민부 외, 2006).

분석에 사용된 자료는 Landsat(Path-row: 116-33, 34, 촬영일: 2006. 9.13)영상, 수치고도모델, 지질도 및 토양도, 기상관측자료 등이다. 영상은 1997년에 제작된 「최근 북한 5만분지 1지형도」에서 GCP 자료점을 취하여 기하보정을 실시하였다.

Landsat에서 추출한 지표피복 유형은 나대지, 시가지, 수체, 경작지, 초지, 범람지, 습지, 과수재배지, 논, 덤불숲, 산림식생(숲)의 11개 항목으로 분류하였다.

공간자료의 좌표체계는 TM 도법과 Bessel 타원체를

사용하였으며, 데이터 베이스작업은 ArcGIS 프로그램(Arc/Info, ArcView)과 RS 프로그램(Erdas Imagine)을 이용하여 처리하였다. 토양침식 추정을 위해서는 Wischmeire and Smith(1965)가 창안한 USLE를 개량한 RUSLE Ⅱ((Revised Universal Soil Loss Equation Ⅱ, 2001년) 모델의 표준 인자 값을 적용하여 강수 자료(29개 지역의 강우자료(1988년-2004년)), 토양 자료, 수치고도모델에서 분석한 경사도 자료, 식생 자료(Landsat), 토지피복 자료 등을 각 인자별 coverage로 제작하였고 이를 공간해상도 30m×30m인 Grid로 변환하여 분석하였다.

3. 선행연구

북한의 토지이용과 산림 경관 훼손에 대한 연구는 최근 북한에 대한 관심이 늘어나면서 과거에 비해 비교적 많은 연구들이 진행되고 있다. 이 연구들은 구체적인 조사와 사례에 의한 접근보다는 기존의 문헌, 위성영상에서 추출되는 정보를 분석하는 연구들이 주가 되고 있다. 북한의 산림훼손에 토양, 침식, 자연재해 등에 대한 연구는 자료접근의 한계로 제한적인 수준에서 진행되고 있다. 토양유실량과 관련된 연구 사례들은 다음과 같다.

정영상 외(1999)는 강원도 고랭지 농업지역의 밭농사 지역에 대해 RUSLE 모델을 적용한 결과 밭토양에서 연간 14.6ton/ha의 토양이 침식된 것으로 평가하였다. 이근상 외(2001)는 토양유실에 미치는 인자를 분석하기 위해 용담댐 지역을 사례로 분석한 결과 지형인자인 사면경사와 경사면길이가 토양침식에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 장영률 외(2002)는 RUSLE 예측모형 적용에 필요한 그리드자료의 해상도 적절성을 평가한 결과 150m 해상도가 적당하다는 결론을 내렸다.

이민부 외(2005)는 서해안 온천군과 남포군 구릉지를 사례로 농경지 개간에 따른 지표침식을 분석하였다. 해상도 60cm 고해상도를 이용해 기존의 침식모델에서 확인되지 않던 우곡, 걸리 등의 선형침식을 확인하였다. 이민부 외(2003)는 북한의 회령지역을 대상으로 1987년과 2001년 Landsat 위성영상을 이용하여 산지 경사지 농경지 확대에 따른 RUSLE 모델을 이용하여 토양침식을 추정하였다. 여기서 토양침식이 상대적으로 많은 고도는 300-500m이며, 1987년 57ton에서 2001년 85ton으로 유실량이 증가한 것으로 분석되었다.

남한의 사례를 보면, 기근도(2002)는 우리나라의 기후불안정 지역 중에 하나인 대관령 소황병산 일대를 대상으로 풍화 및 토양형성 작용에 대한 연구에서 토양침식 동결과 융해를 유발하는 적설, 서릿발 등의 작용으로 주도된다고 보고 있다. 이러한 지형에서는 사면풍화층이 노출되면 지표침식이 잘 일어나는 것으로 연구에서 밝히고 있다. 허승오 외(2007)의 연구는 상주, 여주, 이천, 괴산, 가평, 청원, 공주, 용인 등의 소유역 단위로 화강암 및 편마암 지역을 대상으로 RUSLE 모델을 적용하여 기반암별 토양유실량을 산정하였다. 연구결과 기반암에서 기원하는 토양모재 보다는 지역의 지형 · 식생 · 토양 환경에 따라 유실량에 차이가 있는 것으로 드러났다. 조홍래 · 정종원(2005)은 고랭지 경작지로부터 발생하는 토양유실을 정량적으로 평가하기 위해 강원도 내린천 유역을 대상으로 연간 토양유실량을 RUSLE을 이용하여 추정하고, SEDD 모형을 이용하여 산정하였다.

Honda *et al.*(1996), Hazarika and Honda(2001) 등은 위성영상을 이용한 토양침식모델 적용에 있어 입력인자의 제한을 받는 지역에서는 USLE 모델을 적용하기 힘들다고 보고 그 대안으로서 NDVI와 사면경사도를 이용한 전역적인 모델을 제안하였다. 그동안 토양침식 모델은 지표의 침식 양상을 설명하기 위해 다양하게 개발되어 왔다(김성준, 2001).

본 연구에서는 임진강 유역의 농업적인 토지이용에 따른 지역 단위에서 발생되는 RUSLE 모델을 적용하여 토양유실량을 추정하였다.

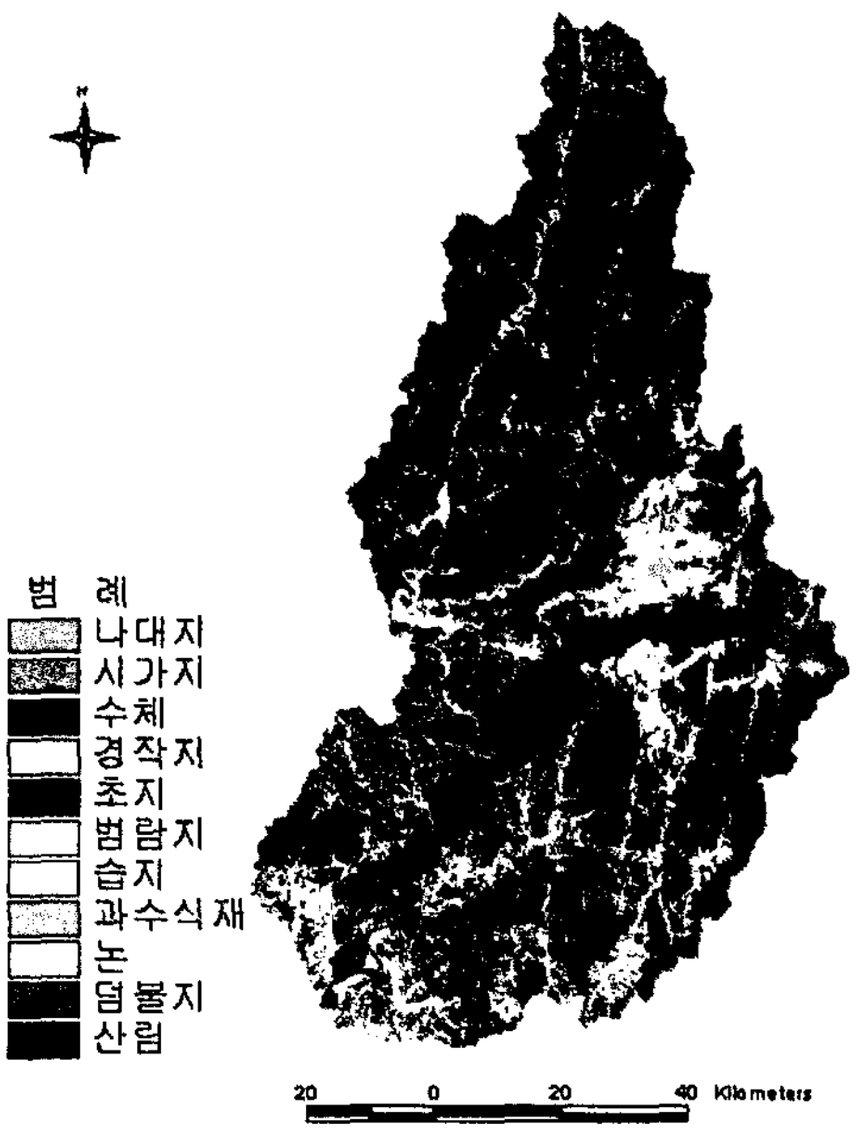

그림 3. 연구지역의 토지이용도

4. 토지이용 및 지표피복의 공간적 특성

연구지역의 토지이용 및 토지피복을 분석하기 위해 2006 Landsat 위성영상을 사용하였다. 토양침식량을 추정하기 위한 영상분류 항목은 나대지, 시가지, 수체, 경작지, 초지, 범람지, 습지, 과수재배지, 논, 덤불숲, 삼림식생(숲)의 11 항목으로 선정하였다. 분류항목 중 경작지는 밭으로 산지나 구릉지 경사지의 개간이 진행된 곳이다.

영상분류는 구글어스(Google Earth) 위성 영상 및 북한 1: 5만 지형도에서 지표피복을 확인하였으며 감독분류에 의한 극대분류법을 이용하였다.

토지이용 분포는 나대지 7km^2, 시가지 57km^2, 수체 51km^2, 경작지 678km^2, 초지 366km^2, 범람지 74km^2, 습지 5km^2, 과수식재 35km^2, 논1,055km^2, 덤불숲 353km^2, 삼림 5,488km^{2}이며 전체 면적 8,170km에서 숲(삼림)이 전체 면적의 67%를 차지하는 것으로 분석되었다(그림 3).

분류항목 별 평균고도와 경사도는 표1과 같다. 항목 중에서 토양유실이 예상되는 과수재배지, 나대지, 경작지, 덤불숲 등의 경사도가 8.5~9.9°로 나타났다. 또한 경작지와 과수 및 덤불숲의 고도는 267~305m 정도로 주변지역에 비해 상대적으로 높은 곳에 위치하고 있어 강우 시에 상당한 침식이 예상되는 지역이다.

이 중에서 지표침식률이 높을 것으로 예상되는 밭농사 경작지의 침식 속도가 상승되는 임계각 15%(8.5°) 지역만을 추출하면(김도형, 2006), 임진강 유역을 따라 북한쪽의 분포가 높게 나타난다(그림 4). 분석결과 경작지 분포는 경사도 8.5~50°, 고도 20~900m이다.

표 1. 토지이용 항목별 평균경사도와 고도

항목	경사도(°)	고도(m)
과수재배지	8.5093	267.3758
삼림	18.9593	394.4774
수체	3.2586	119.7144
시가지	5.2715	141.9904
범람지	4.8960	80.6303
나대지	7.2064	122.2417
경작지	9.9580	274.6166
논	5.4792	147.3997
초지	8.8006	249.0099
덤불숲	15.3478	305.7705
습지	0.7744	20.8444

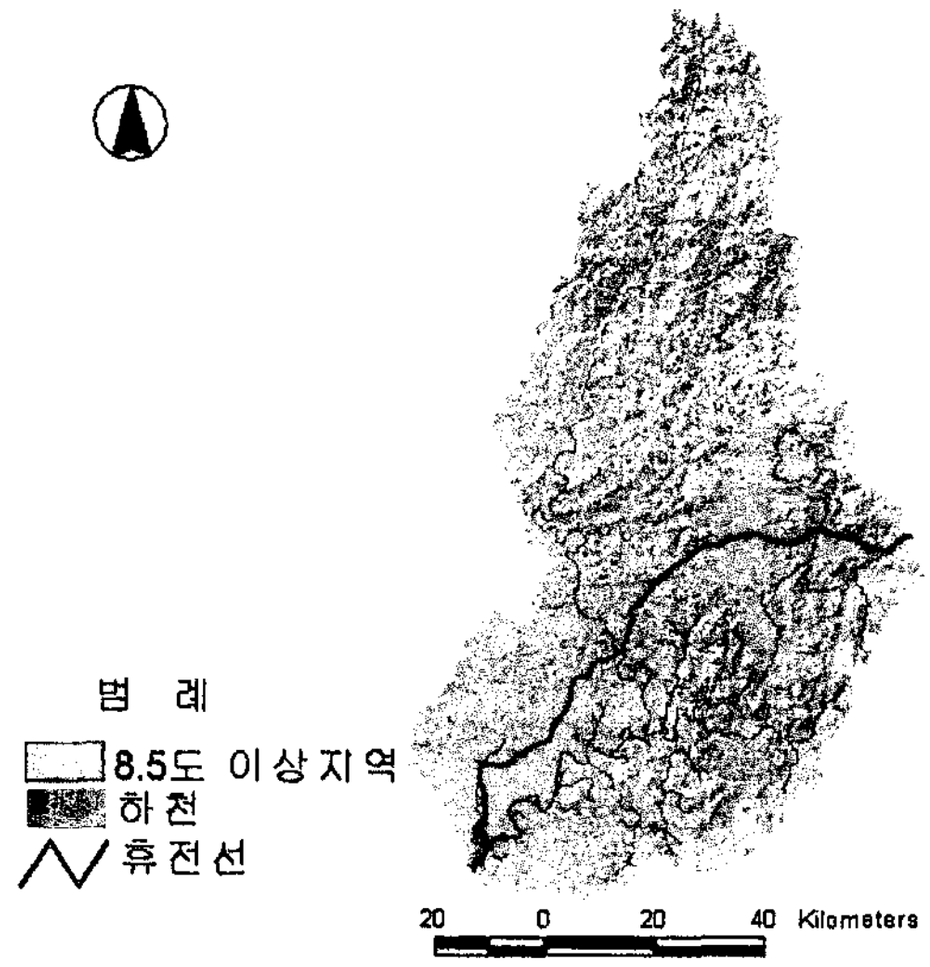

그림 4. 경사도 8.5° 이상의 경작지 분포

5. 지표침식 분석

1) 토양유실량 산정모델

Wischmeier and Smith의 RUSLE 모델식은 아래와 같다.

$$A=R\times K\times LS\times C\times P \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(식\ 1)$$

A : 연간 토양 유실량(ton/ac/yr)
R : 강우인자, K : 토양침식인자, LS : 지형인자,
C : 식생인자,
P : 토양보전인자

2) 강우인자

강우인자 R은 강수의 시간적 분포로부터 구하는데 연평균 침식률(mean annual erosivity: EI_{30})을 100으로 나눈 값이다(Morgan and Davidson, 1986). 이 침식률은 빗방울에 의한 충격 에너지, 강우의 운동 에너지, 최대 30분 강우강도 등에 의해 좌우 된다. 토양침식인자 중에서 강수인자는 가장 큰 비중을 차지한다. 강우침식인자에서 EI_{30}의 계산은 강우가 지표면에 떨어질 때의 운동에너지와 30분 동안 최대 강우 강도의 곱으로 표현된다(Wischmeier and Smith, 1978). 그러나 본 연구에서는 이와 같은 방법을 사용하여 계산된 20년 이상의 장기측정 강우자료가 없으므로 연간 평균 강수량을 이용하는 Toxopeus(1996)가 제안한 방정식을 사용하였다.

$$R=3.85+0.35\times P \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (식\ 2)$$

여기서 R=강우인자(강우침식인자)
P=연평균 강수량(mm/yr) 이다.

강우인자는 위 식의 평균값 항목을 적용하여 R factor를 생성하였다.

본 연구대상지역에서의 강우자료는 북한지역 관측소인 문천, 원산, 양덕, 안변, 법동, 고산, 판교, 곡산, 회양, 창도, 신계, 이천, 평강, 김화, 평산, 토산, 철원, 금천, 개성, 개풍, 금강, 고성, 통천, 그리고 남한의 동송, 문산, 동두천, 사창리, 의정부, 가평 등의 자료로서 연평균 강수량은 1,330mm이다. 북한지역의 강수는 20년간의 연평균값을 참고 하였으며 남한지역의 강수량은 기상청 연평균 데이터를 참고 하였다.

유역의 평균 강우량을 구하는 방법으로 본 연구에서는 Thissen망 경계의 오차를 줄이면서 현실성을 고려하여 IWD(Invert Weighted Distance) 보간법을 이용하였다(그림 5).

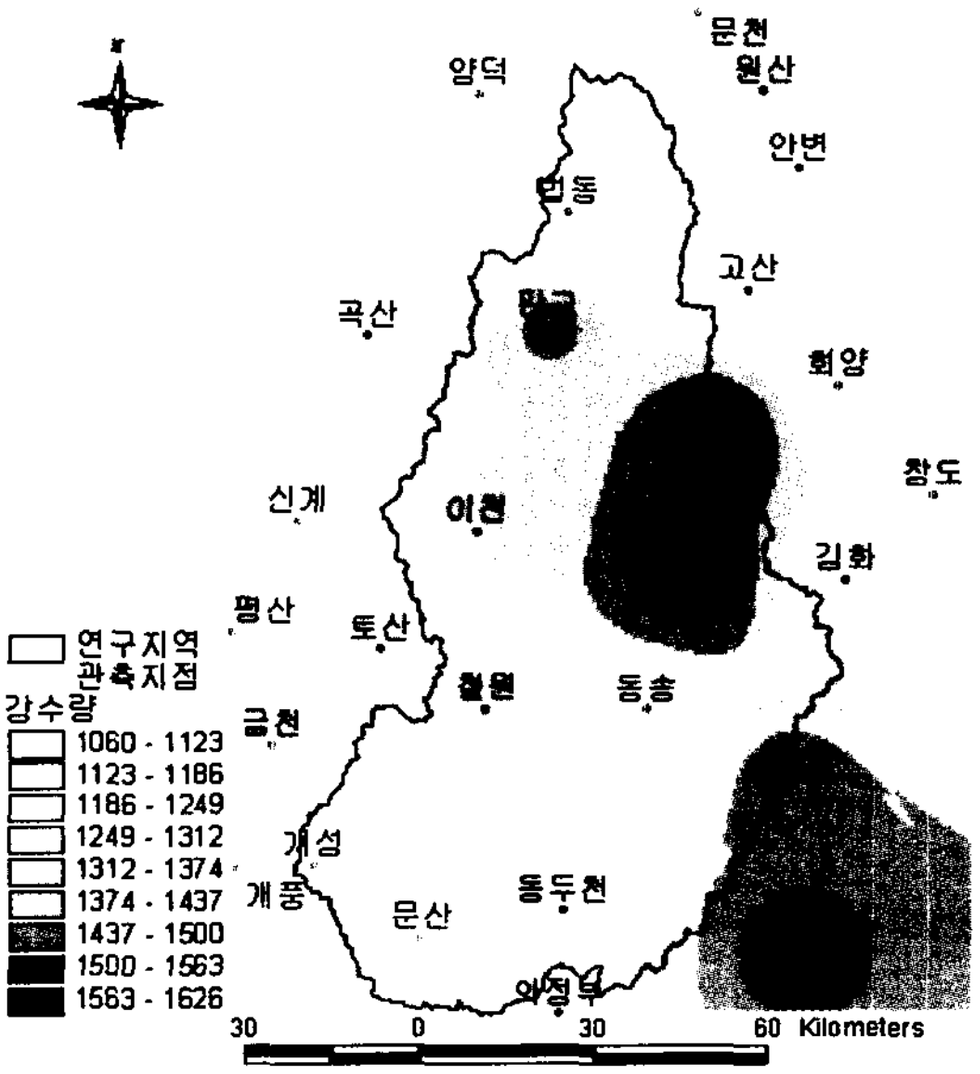

그림 5. 연구지역의 강수량 분포도

3) 토양침식인자

입자의 굵기와 유속의 상관관계에 따라 침식, 운반, 퇴적 작용이 영향을 받으므로 토양침식인자 K는 모래의 함량과 유기물의 분포, 토양의 구조 및 배수관계 등을 따라 값이 달라진다(그림 6).

운하 건설기술자인 스웨덴의 Hjulström에 의해 토양침식에 대한 수리모델연구가 시작되었는데, 그는 유속과 토양입자의 직경사이의 관계를 규명하였다(Hjulström, 1935).

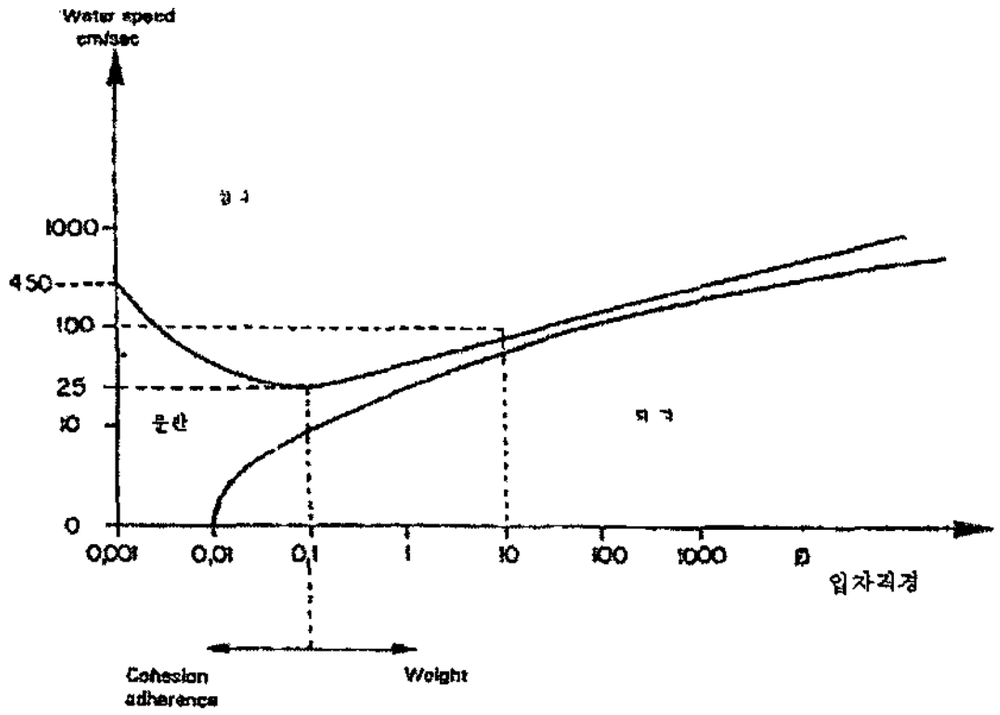

그림 6. 침식유속곡선(Hjulström, 1935)

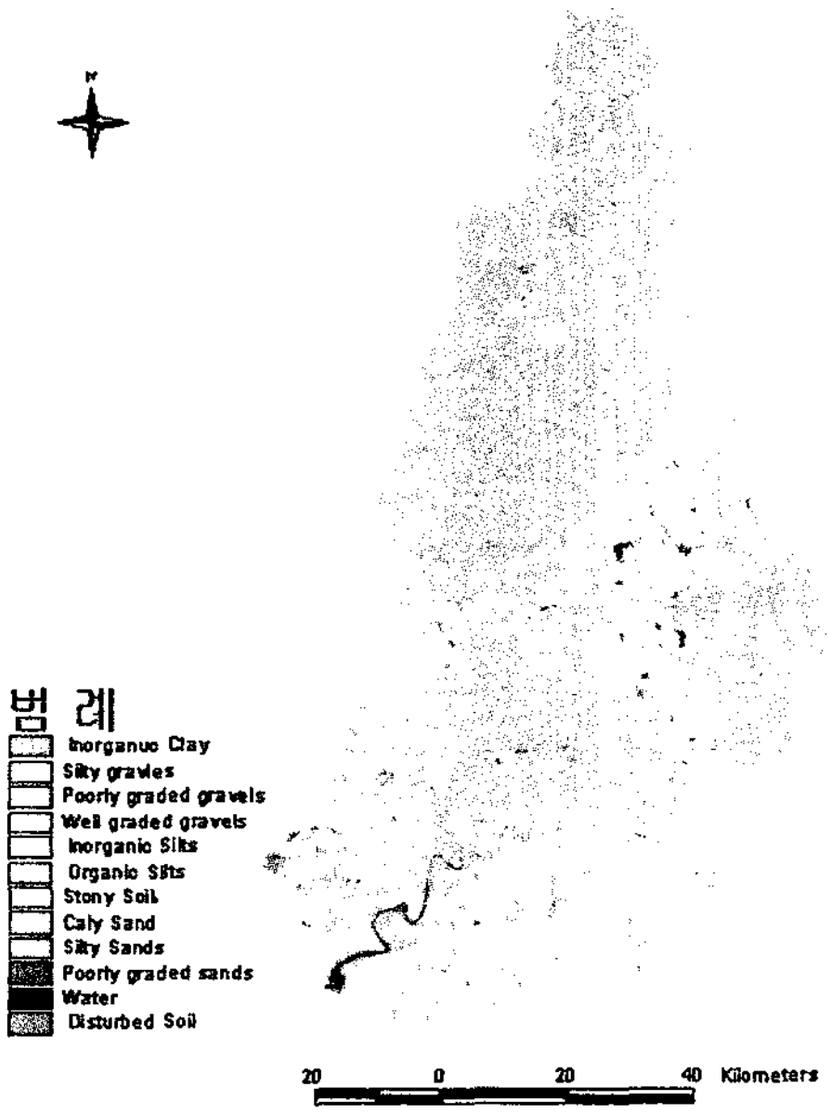

그림 7. 연구지역의 토양

그림 6은 Hjulström이 여러 해 동안 연구하여 얻은 토양유실에 관한 Diagram으로서 X축은 토양입자의 크기(mm)이며, Y축은 유속(cm/sec)이다. 0.1mm 이하 실트입자는 크기가 작아도 침식에는 더 큰 유속을 필요로 한다. 그것은 입자가 작아짐에 따라 중량에 대한 표면적의 비율이 커지면서 응집력이 상승하기 때문이며 입자가 더욱 작은 점토들은 판상구조 형태를 띠게 되어 입자간 상호 결합력이 커진다. 입자의 크기가 중간 이상 경우 입자가 커질수록 더 큰 침식유속을 요구한다. 반면 유속이 느려지면 운반되던 입자들이 퇴적되기 시작하며, 이때 퇴적 유속은 입자의 크기에 거의 비례한다. 이에 따라 하천에는 입자의 크기별로 쌓이는 분급현상(sorting)이 나타나는데, 큰 홍수일 때는 이러한 분급현상이 줄어든다(Hjulström, 1935; 권혁재, 1980 재인용).

$$K=1.32\left[\frac{2.1e^{-4}M^{1.14}(12-a)+3.25(b-2)+2.5(c-3)}{100}\right] \quad (식\ 3)$$

K : 토양침식인자(ton/hr/R)
M : 실트와 극세사의 구성비(%)×(100−점토의 구성비(%))
a : 유기물의 구성비(%)
b : 토양의 구조 코드 : 1~4
c : 투수도 등급 : 1~6

위의 식으로 토양을 계산한 토양침식인자 값은 일반적으로 0에서 0.7의 범위내의 값을 가진다(그림 7, 9). 일반적으로 사질토 성분이 많고 투수성이 높을수록 토양침식인자 값은 작아진다. 0.2 보다 작은 값을 갖는 토양은 높은 투수성을 갖고 있으며 0.3보다 큰 값을 갖는 토양은 낮은 투수성을 갖고 있어 토양유실이 쉽게 일어난다(Brady, 1996). 또한 유기물의 함량이 많을수록 탄성력과 응집력이 높아 침식률이 작아진다. 따라서 토양침식인자는 토양의 모래 및 유기물 함량과 토양구조 그리고 침투성 등의 토양 특성에 의해 결정된다(표 2; Brady, 1996). 표 2에서 보면 같은 입도에서는 유기물 함량이 적을수록 침식인자 값이 높고, 입도가 적을수록 침식인자 값이 높아지지만 실트와 점토질 등 더욱 낮은 입도로 내려가면 다시 침식인자 값이 낮아지는 경향을 보여준다.

표 2. 토양의 침식인자 K(U.S Soil Conservation Service)

입도조성	유기물함량(%)		
Textural Class	<0.5	<2	<4
Sand	0.05	0.03	0.02
Fine sand	0.16	0.14	0.10
Very fine sand	0.42	0.36	0.28
Lcamy sand	0.12	0.10	0.08
Loarny fine sand	0.24	0.20	0.16
Loamy very fine sand	0.44	0.38	0.30
Sandy loam	0.27	0.24	0.19
Fine sandy loam	0.35	0.30	0.24
Very fine sandy loam	0.47	0.41	0.33
Loam	0.38	0.34	0.29
Silty loam	0.48	0.42	0.33
Silt	0.60	0.52	0.42
Sandy clay loam	0.27	0.25	0.21
Clay loam	0.28	0.25	0.21
Silty clay loam	0.37	0.32	0.26
Sandy clay	0.14	0.13	0.12
Silty clay	0.25	0.23	0.19
Clay		0.13-0.2	

자료출처: hpp://mepas.pnl.gov.

4) 지형인자

지형인자 LS는 경사길이와 경사도가 토양유실에 영향을 미치는 정도를 나타내는 것으로 경사길이인자(L)와 경사도인자(S)에 따른 단위 구획 당 예상되는 토양유실의 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%(그림 8)에서 기준이 설정되며 이때의 지형인자 값을 1로 정하고 이 기준 값과 비교하여 상대적인 경사길이와 경사도의 변화에 의해 지형인자 값을 구한다.

그림 8에서 경사도(%)가 클수록 LS의 값이 높다.

$$LS=[0.065+0.0456(slope)+0.006541(slope^2)\times (slope_length+constant)^{nn} \quad \cdots (식\ 4)$$

slope=경사도(%)
slope length=경사길이(ft)
contant=72.5 imperial or 22.1 metric
nn=0.2(<1), 0.3(1<slope<3), 0.4(3<slope<5), 0.5(>5)

5) 식생인자

식생인자(C)는 식생피복에 의해서 침식이 방지하는 정도를 양적으로 나타낸다. C 인자의 증가는 지표 또는 수관 피복의 감소를 나타내며 토양침식비율의 증가를 가져온다. 식생피복은 식생수관(canopy), 피복의 밀도, 구조, 그리고 토양과 연계된 피복의 종류와 양을 나타낸다.

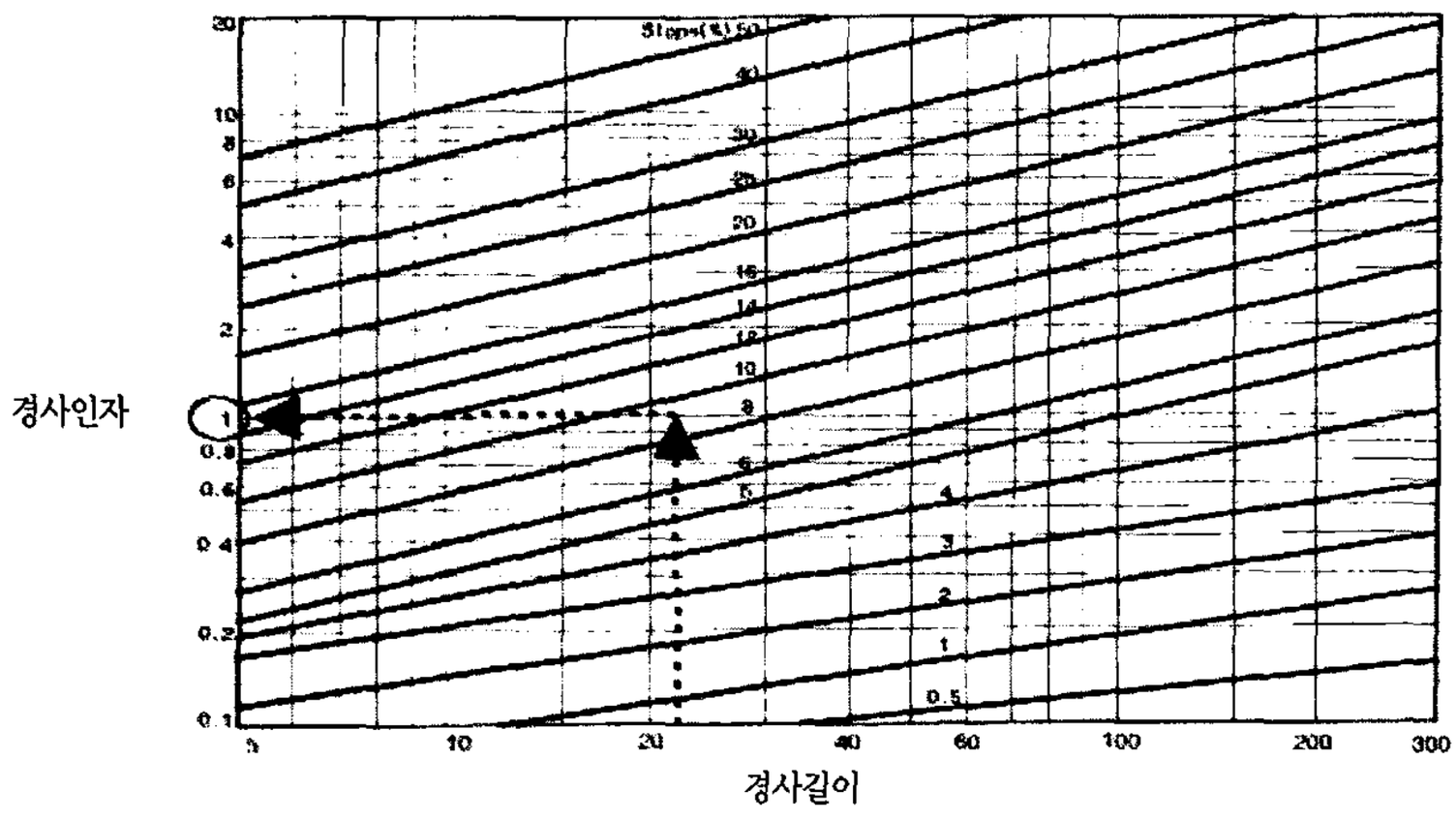

그림 8. 경사길이(Wischmeier and Smith,1965)

표 3. C 인자 값 비교

토지이용		김윤중	김태웅	Brady	Wischmeier	C-Value
논		0.2–0.3	0.1–0.2	0.3	0.1–0.2	0.1
밭		0.2–0.3	0.1–0.3	0.3		0.2
나지					1	1
수관	100–75%	0–0.1	0.001–0.1		0.001	0.001
	75–50%	0–0.1	0.001–0.1		0.002–0.004	0.003
	50–25%	0–0.1	0.001–0.1		0.003–0.01	0.006
	25% 이하	0–0.1	0.001–0.1			0.012
도시지역, 물						0
초지		0.1–0.2			0.01–0.025	0.013

표 4. 경사도와 경작 유형을 고려한 p값

경사(%)	등고선재배	대상재배	계단식재배
1–2	0.60	0.30	0.12
3–8	0.50	0.25	0.10
9–12	0.60	0.30	0.12
13–16	0.70	0.35	0.14
17–20	0.80	0.40	0.16
21–25	0.90	0.45	0.18

C 값은 작물이 자라나기 전의 피복에서는 대략 1 정도로 높고, 산림 밀집 지역이나 곡물의 밀도가 높은 지역에서는 0.1 이하로 낮다(표 3; Brady, 1984).

신계종(1999)은 Wischmeier and Smith(1978)가 제시한 토지이용별 식생인자(C)는 우리나라에 적합지 않아 수정된 값을 제시하고 있는데, 예를 들어 논(0.3), 밭(0.4), 산림(0.1), 초지(0.2) 등의 값을 제시하며, 수계와 도시는 침식이 발생하지 않으므로 0으로 하고 있다. 본 연구에서는 표3의 C-value 값을 재구성하여 분석하였다(그림 9)

6) 토양보전인자

토양보전인자(P)는 경작지 이용에 따른 지표상의 토양유실 비율의 차이를 말한다. 경작지 형태 요소는 등고선(contour) 재배, 등고선 대상재배(strip-cropping) 그리고 계단식(terrace systems) 재배 등으로 구분하고, 기타 보존행위가 없는 경우에는 토양보전인자 값을 1.0으로 하였다.

토양보전인자를 추출하기 위해서는 Wischmeier and Smith(1978)가 제안한 값(표 4)을 이용하여 토양보전 인자 값을 추정하는데, 본 연구지역에서는 계단식 재배 지역인 논은 경사 10% 이내에 경작되므로 0.12% 값으로, 과수원, 밭 등은 경사 10% 정도의 범위에 해당되어 각각 0.6%, 0.3% 등으로 하였고 기타 지역은 1%로 하여 처리 하였다. 여기서 %로 계산된 경사도는 본 연구에서 도(°) 단위로 환산하여 적용하였다. 그 결과 토양보전인자 P는 그림 9와 같은 분포를 보여주고 있다.

7) 연구결과

연구지역에서의 R 인자의 최소값 375, 최대값 566.6, K 인자의 최소값 0, 최대값 0.42, LS 인자의 최

표 5. 연구지역의 각 인자 값

인자(Factor)	최소(Min)	최대(Max)	평균(Mean)	표준편차(Std)
유실량(A)	0.000000	3770.130371	10.896753	52.830886
강우(R)	375.000061	566.641296	480.297109	31.333501
침식(K)	0.000000	0.420000	0.196355	0.086829
경사(LS)	0.000000	60.702473	6.111362	5.913040
식생(C)	0.000000	1.000000	0.055396	0.102600
토양보전(P)	0.120000	1.000000	0.834838	0.301738

소값 0, 최대값 60.7, C 인자의 최소값 0, 최대값 1, P 인자의 최소값 0, 최대값은 1이었다(표 5).

이렇게 생성 된 5개의 인자 값을 모두 곱하여 RUSLE를 산출하였다(그림 9). 연구지역은 토양 유실량에 따라 (1) 토양유실이 전혀 일어나지 않는 지역 0 t/ha/yr ($tonha^{-1})year^{-1}$), (2) 토양유실이 거의 일어나지 않는 지역 1–10t/ha/yr, (3) 토양 유실이 조금 일어나는 지역 10–100t/ha/yr, (4) 토양 유실이 많이 일어나는 지역 100–1,000t/ha/yr, (5) 토양유실이 심하게 일어나는 지역 1,000t/ha/yr 이상으로 구분하여 표 4로 정리하였다.

토양 유실이 전혀 일어나지 않은 지역은 K 값이 0으로서 암석 노출지 또는 식생이 많은 지역이며 토양 유실이 조금 일어나는 지역은 잡초지역, 덤불지역, 논 · 밭 지역으로 나타났으며 토양유실이 많이 일어나는 지역은 나대지 그리고 경사가 급한 곳에 위치한 밭농사 지역 이다.

DMZ 이남의 지역인 임진강 지류인 한탄강 유역을 대표적인 사례로 하여 DMZ 이북 지역과 토양유실량

표 6. 연구지역의 RUSLE 결과 값

유실상태	지역	유실량(t/ha/yr)	셀의 수	면적(ha)	면적 비(%)
토양침식이전혀 없는 곳	북한	0	6,813,323	272,533	33.38
	남한	0	4,993,801	199,752	24.46
	소계	0	11,807,124	472,285	57.84
거의 일어나지 않는 곳	북한	1–10	4,442,855	177,714	21.76
	남한	1–10	2,221,860	88,875	10.89
	소계	1–10	6,664,715	266,589	32.65
조금 일어나는 곳	북한	10–100	874,354	34,974	4.28
	남한	10–100	465,309	18,612	2.28
	소계	10–100	1,339,663	53,586	6.56
많이 일어나는 곳	북한	100–1000	541,344	21,654	2.65
	남한	100–1000	60,182	2,407	0.30
	소계	100–1000	601,526	24,061	2.95
심히 많이 일어나는 곳	북한	1000–3770	1,424	57	0.00007
	남한	1000–3770	595	24	0.00003
	소계	1000–3770	2,019	81	0.0001
합계			20,415,047	816,602	100

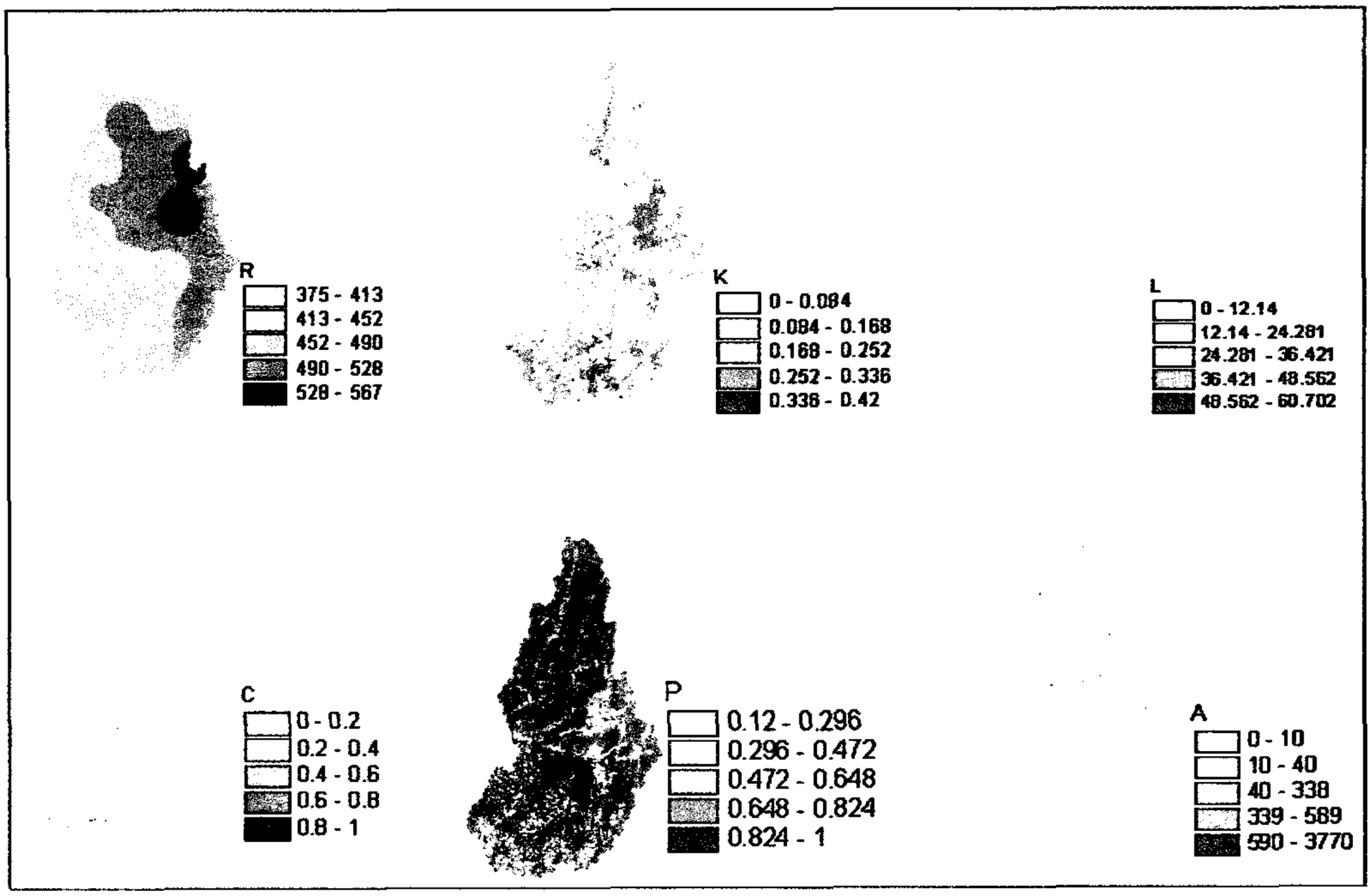

그림 9. 각 인자요소 및 토양유실량(ton/ha/yr)

을 비교하였다(표 6). 여기에서 남한지역은 북한 유실량의 1/3 정도 밖에 되지 않았다. 남한은 나대지가 별로 없고 밭으로 개간된 토지도 거의 없으며 하천변은 정비되어 토양유실이 거의 없는 반면 북한지역은 산지사면을 다락밭을 개간하여 토양 유실이 많으며 경제적인 여건으로 하천변 관리가 부실하여 토양 유실이 많은 것으로 판단된다.

6. 결론

연구지역에서의 토양유실량은 그 유역의 면적의 비율과 관계없이 절대량이 남측보다는 북측이 훨씬 많았다. 그 대표적 이유는 북한에서는 식량부족을 메우기 위하여 다년간 야산을 개발하여 주로 옥수수 재배 다락밭을 조성하면서 토양이 척박해졌으며, 땔감을 위한 무분별한 삼림벌채로 토양의 피복이 노출되어 조그마한 강우에도 토사가 하천으로 유입되기 때문이다. 두번째 이유로 북한은 열악한 경제 사정으로 하천의 정비가 제대로 이루어 지지 않아 강 여기저기에 자갈이나 바위 등이 돌출되어 있고, 하천변도 관리가 잘 이루어지지 않아 빠른 유속에 많은 양의 토양이 침식되기 때문이다. 이렇게 침식된 토양들은 결국 하류로 이동하여 퇴적되는데 특히 댐 저류지를 매립하고 담수능력을 떨어뜨리게 된다. 이러한 퇴적물을 준설하지 않으면 담수용량이 작아지고 퇴적물 위로 물이 넘쳐 결국 더 큰 홍수유발 환경을 만든다.

환경문제에 있어서도 임진강변의 훌륭한 자연 생태계인 습지들이 개간되어 밭이나 논으로 변경되기 때문에 생물의 종이 감소되었을 것으로 예상된다. 본 연구를 계기로 차후 전체 유역에 대한 토양유실량이 조사된다면 이는 임진강 유역의 토지이용 관리와 환경보전을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

文獻

건설교통부, 2001, 임진강 하천정비 기본계획(보완), 서울지방국토관리청.

건설교통부, 2002, 임진강유역 홍수피해 원인조사 및 항구대책 수립 요약보고, 서울지방국토관리청.

공우석, 2006, 북한의 자연생태계, 집문당.

기근도, 2002, "소황병산 일대의 주빙하지형," 한국지형학회지, 9(1), 45-59.

김도형, 2006, MODIS 다중시기 영상을 이용한 북한지역의 토지피복 변화분석, 서울대환경 대학원 석사학위논문.

김성준, 2001, "토양침식 및 유사 운송 모델링," http: // aginfo.snu.ac.kr 농생명과학연구동향, 1(2), 9-17.

권형중 · 박근애 · 김성준, 2002, "GIS 및 다시기 RS 자료를 이용한 토양손실량 변화 및 이동결로 추정," 한국GIS학회지, 10(1), 139-152.

신계종, 1999, 지형공간정보체계를 이용한 유역의 토양유실분석, 강원대학교 토목공학과 박사학위논문.

이민부 · 김남신 · 강철성 · 신근하 · 최한성 · 한욱, 2003, "북한 회령지역의 농경지 변화에 따른 토양침식추정," 한국지역지리학회지, 9(3), 373-384.

이민부 · 이광률 · 김남신, 2004, "추가령 열곡의 철원-평강 용암대지 형성에 따른 하계망 혼란과 재편성," 대한지리학회지, 39(6), 833-844.

이민부 · 김남신 · 이광률 · 한욱, 2005, "Quick Bird 영상을 이용한 북한 서해안 구릉지 개간에 따른 지표침식 분석," 한국지역지리학회지, 11(4), 453-462.

이민부 · 김남신 · 한욱 · 한주연 · 최한성 · 강철성 · 신근하, 2006, 북한의 환경변화와 자연재해, 한울.

이근상 · 이환주 · 임승현 · 조기성, 2001, "GIS를 활용한 토양침식모형에서 지형인자의 영향분석," 대한토목학회, 21(4), 545-554.

장영률 · 이근상 · 조기성, 2002, "GIS기반에서 토양침식 정량화를 위한 해상도 결정에 관한 연구," 대한원격탐사학회지, 10(2), 301-316.

정영상 · 권영기 · 임형식 · 하상건 · 양재의, 1999, "강원도 경사지 토양 유실 예측용 신USLE의 적용을 위한 강수 인자와 토양 침식성 인자의 검토," 한국토비지, 32(1), 31-38.

조홍래 · 정종원, 2005, "RUSLE와 SEDD를 이용한 고랭지 경작지로부터 토양유실 평가," 한국GIS학회지, 13(1), 79-80.

존 휴턴(이민부 · 최영은 역), 2007, 지구온난화, 한울.

최위찬 · 김규봉 · 홍승호 · 이병주 · 황재하 · 박기화 · 황상기 · 최범영 · 송교영 · 진병식 편, 1995, 한국지질도, 한국자원연구소.

허승오 · 손연규 · 정강호 · 박찬원 · 이현행 · 하상건 · 김정규, 2007, "소유역단위 화강암/편마암 기원 토양연접군(catena)에 따른 토양유실 평가," 40(5), 383-391.

Brady, N.C. and Weil, R.R., 1996, *The Nature and Properties of Soils*, 11th ed, Prentice Hall, New Jersey.

Hazarika, M.K. and Honda, K., 2001, Estimation of soil erosion using remote sensing and GIS, Its valuation and economic implification on agricultural production, *International Soil Conservation Organization Meeeting*, 1090-1093, Peer-Review Paper.

Hjulström, F., 1935, Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris, Bulletin, *Geological Institute of Upsala*, 25, Upsala, Sweden, 221-527.

Honda, K., Samrakon, L., Mabuchi, Y., and Miyajima, S., 1996, Remote sensing and GIS technologies for denudation estimation in Siwalik Watershed of Nepal, http://gisdevelom nent.net.

Morgan, R.P.C, and Davidson, D.A., 1986, *Soil erosion and conservation*, Longman Group UK.

Toxopeus, B., 1996, ISM: an interactive spatial and temporal modelling system as a tool in ecosystem management; with two case studies: Cibodas Biosphere Reserve, West Java Indonesia: Amboseli Biosphere Reserve, Kajiado District, central-southern Kenya.

Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, 1965, Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains, *Agriculture Handbook No 282*, USDA.

Wischmeier, W.H. and Smith, D.D., 1978, Predicting rainfall erosion losses, *Agricultural Handbook, 537*, U.S., Department of Agriculture, Washington, D.C.

hpp://mepas.pnl.gov. Soil Erodity Factor

교신: 김남신, 363-791, 충북 청원군 강내면 다락리 한국교원대 통일교육연구소(이메일: kns9027@dreamwiz.com, 전화: 016-557-5148)
Correspondence: Nam Shin Kim, Institute of Education for National Unification, Korea Natioal University of Education, Darak-ri, Gangnae Myeon, Cheongwon, Chungbuk, 363-791, Korea(e-mail: kns9027@dreamwiz.com, Phone: 82-16-557-5148)

최초투고일 08. 02. 19
최종접수일 08. 06. 04