한국지역지리학회지 제9권 제3호(2003) 373-384

북한 회령지역의 농경지 변화에 따른 토양침식 추정*

이민부** · 김남신*** · 강철성*** · 신근하*** · 최한성*** · 한 욱****

Estimation of Soil Loss Due to Cropland Increase in Hoeryeung, Northeast Korea*

Min-Boo Lee** · Nam-Shin Kim*** · Chul-Sung Kang*** · Keun-Ha Shin*** · Han-Sung Choe*** · Uk Han****

요약 : 북한 회령지역을 중심으로 1987(TM)년과 2001(ETM)년의 Landsat 위성영상을 통하여, 농경지 개간에 따른 토양침식량을 분석하였다. 분석을 위해 Landsat 영상 외에 수치고도자료, 1:5만 토양도와 지질도, 20년간 평균 강수량 자료 등을 이용하였다. 위성영상 분석은 연구목적상 농경지, 시가지, 산림지, 하천, 사질퇴적지 등 5개 항목으로 밴드 1, 2, 3을 이용하여 감독분류하였다. 토양 침식량을 측정하기 위하여 RUSLE 모델을 적용하고, AML 언어를 통해 계산하였다. 위성영상과 수치고도모델의 지리좌표일치를 위해 수치고도모델을 푸리에 전환하는 방법을 이용하였으며, GTD는 지형도상의 지표 정보를 이용하였다. 두 시기 모두 침식량이 연간 100 ton 이상의 지역은 하천과 시가지 배후사면이지만, 2001년에는 산록구릉대까지 확대되고 있다. 농경지의 경우 1987년에 비해 2001년에는 평균고도 24m, 경사도 0.8°가 상승했으며, 두 시기 간에 확대된 농경지는 평균 고도 75m, 경사도는 2.5°가 상승하였다. 토양침식이 상대적으로 많은 고도는 300~500m이며, 이 고도에서의 침식량은 1987년 57 ton에서 2001년 85 ton으로 증가하였다. 경사도에서는 두 시기 모두 30~50°에서 높은 침식량을 보이고 있으며, 2001년에는 30°이하에서도 높은 증가율을 보이고 있다. 산사태의 위험이 높은 침식량 200 ton 이상 지역은 1987년 28.6㎢에서 2001년 48.8㎢로 현저히 증가하였다.
주요어 : 농경지 개간의 고도상승, 토양침식, 산사태, RUSLE 모델

Abstract : This study analyses the soil loss due to cropland increase in the Hoeryeung area of northeast Korea, using Landsat images of 1987 TM and 2001 ETM, together with DTED, soil and geological maps, and rainfall data of 20 years. Items of land cover and land use were categorized as cropland, settlement, forest, river zone, and sand deposit by supervised classification with spectral bands 1, 2 and 3. RUSLE model is used for estimation of soil loss, and AML language for calculation of soil loss volumes. Fourier transformation method is used for unification of the geographical grids between Landsat images and DTED. GTD was selected from 1:50,000 topographic map. Main sources of soil losses over 100 ton/year may be the river zone and settlement in the both times of 1987 and 2001, but the image of the 2001 shows that sources areas have developed up to the higher mountain slopes. In the cropland average, increases of hight and gradient are 24m and 0.8° from 1987 to 2001. In the case of new developed cropland, average increases are 75m and 2.5°, and highest soil loss has occurred at the elevation between 300 and 500m. The soil loss 57 ton of 1987 year increased 85 ton of 2001 year. Soil loss is highest in 30~50° slope zones in both years, but in 2001 year, soil loss increased under 30° zones. The size of area over 200 ton/year, indicating higher risk of landslides, have increased from 28.6㎢ of 1987 year to 48.8㎢ of 2001 year.
Key word : Development of cropland in mountain, Soil loss, Landslide, RUSLE model

1. 서 론

인류는 인구 증가로 인한 식량문제를 해결하기 위해 전통적으로 산림이나 저습지를 개간하면서 농경지를 확대해 왔다. 연구대상지역인 북한의 경우도 국토의 80% 이상이 산지로 구성되기 때문에 산지고지대로 올라가면서 경지개간이 진행되어 왔다. 이러한 운동은 90년대의 자연재해와 더불어 식량난이 악화되면서 경사지 개간이 안식각 이상의 경사도에까지 진행되고 있는 실정이며, 최근의 인공위성 영상분석에서도 인구 규모가 읍 단위 이상의 지역은 경사지 개간의 정도가 보다 높게 나타나고 있다(이민부 외, 2003).

따라서 북한에서는 산지개간에 따른 산록경사지

* 이 논문은 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-072-BS1525).
** 한국교원대학교 지리교육과 교수(Professor, Department of Geography Education, KNUE)(minblee@cc.knue.ac.kr)
*** 한국교원대학교 통일교육연구소 연구원(Researcher, Institute of Education for National Unification, KNUE)
**** 육군사관학교 환경학과 교수(Professor, Department of Environmental Science, KMA)

의 나대지화와 그에 따른 사면침식으로 인한 2차적인 자연재해의 피해가 따르고 있다. 2차적인 자연재해로는 산림의 감소로 인해 지표유출수가 식생에 의해 통제되지 않은 상태로 이동되면서 발생하는 토사 유출과 토사의 하곡 매립에 의한 홍수, 산사태 등이 있다. 즉 북한지역의 자연재해는 30년간 지속된 산록경사지 개간에 따라 더욱 심해졌다고 할 수 있다.

개간된 경사지에서의 유수에 의한 사면침식은 일반적으로 미지형적인 요소인 rill, interrill, gully 등이다. 이러한 요소들은 농경지의 미기복을 증가시키고 상당량의 토사 유출을 일으켜 농업에 불리한 조건을 만든다.

본 논문에서는 농경지 개간이 토양침식과 자연재해를 일으키는 주요 원인으로 보고, 회령지역을 대상으로 10년간의 경지개간의 변화를 통해 토양침식량을 추정해보고자 한다.

2. 연구지역 및 연구방법

연구지역은 함경북도의 두만강 중류에 위치한 회령군 일대로 지리좌표상 129° 45′E, 42° 10′N에 해당하며 석탄과 석회석이 많이 생산되는 지역이다. 회령군의 북서부 지역은 온성, 새별, 은덕 등의 취락이 두만강 하류를 따라 발달해 있다. 회령시 지역은 두만강변을 제외하고는 대부분 1,000m 내외의 산지로 둘러싸여 있으며, 연평균 기온은 5.5℃, 연평균 강수량은 500mm로 대륙성 기후의 특징을 보인다(통일원, 1993; 기상청, 1995)(그림 1).

주요 하천들은 남북 방향의 구조선을 따라 부령군 무산리 일대를 중심으로 남과 북으로 분기되는데 남류하는 수성천과 분기되어 회령천이 북류한다. 회령 분지의 지형은 남동쪽이 산지로 둘러 싸여 있고 북서쪽이 개방되어 있는 모습이다. 분지 남쪽의 오봉산(1,329m)과 동쪽의 산성산(739m)을 중심으로 크고 작은 봉우리와 구릉열들로 차단되어 있고 북서쪽은 두만강을 향하여 개방되어 있는 상태이다. 지질은 남동쪽의 주요 500m 이상의 산지는 고생대 퇴적암류와 화강암류로 구성되어 있고 회령시를 중심으로 한 낮은 지역은 3기 퇴적암으로 구성되어 있다(Kim, et al. 1993; 대한지질학회, 1999)(그림 2). 3기 퇴적암은 풍화정도가 높아 낮은 구릉성 산지를 이루면서 경지로 많이 이용되고 있다.

본 연구에서 사용된 위성영상으로는 Landsat TM (1987. 9. 18 path and low(115-31))과 Landsat ETM (2001. 11. 3 path and low(115-31)), 30m 해상도의 수치고도 자료(digital terrain elevation data; DTED), 1:50,000 개괄토양도와 지질도, 그리고 지난 20년간 관측된 평균 강수량 자료 등을 이용하였다.

Landsat 영상은 14년간의 농경지 변화와 지표피복별 토양침식의 정도를 파악하기 위해 사용되었다. 영상자료가 주로 늦가을(1987, TM)과 초겨울(2001, ETM)을 사용한 것은 농경지와 산림의 변화는 농작물 재배기간인 봄에서 여름기간은 산림과의 분광적 특성이 잘 분리되지 않기 때문에 산지와의 농지가 비교적 구분이 잘 되는 수확직후나 수확후의 기간을 택하였다. 토양도는 토양통 별 지표침식의 정도, 강수량은 강수에 의한 침식, 수치고도 자료는 지표피복의 공간적 변화 즉 고도, 사면경사 등을 분석하기 위해 사용되었다. 이상의 자료들을 결합한 모델을 적용해 농경지변화에 따른 지표 침식량을 추정하였다.

Landsat 영상은 계절적으로 경지와 산림지역이 비교적 구분이 잘되는 가을의 영상을 사용하였다. 봄이나 농경활동이 활발한 여름의 영상은 오히려 산림지역과 농경지에서 나타나는 산림식생과 농작물의 분광적 특성으로 인해 잘 구분되지 않기 때문이다.

위성영상, 수치고도 자료 및 토양도는 UTM Zone 52 구역으로 통일하였다. 위성영상의 GCP는 1997년에 제작된 「최근 북한 5만분지 1지형도」의 도로와 하천의 교차점을 중심으로 취득하였다.

전처리 작업이 끝난 영상은 농경지, 시가지, 산림지, 그리고 하천과 사질퇴적지 등 5개 항목으로 밴드 1, 2, 3을 이용하여 감독분류를 실시하였다. 이상의 분류 항목을 가장 잘 드러내는 밴드는 주성분분석과 밴드비율 비교 결과 밴드 조합 1, 2, 3이 14년간의 농경지 변화와 산림지역의 분석에 효과적으로 반영하고 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 RUSLE(revised universal soil loss equation) 모델을 적용하여 두 시기 사이에 회령지역에서의 농경지 개간에 따른 토양침식량을 추정하고자 하였다. RUSLE 모델링은 AML(arc macro language) 언어를 이용하여 계산하였다.

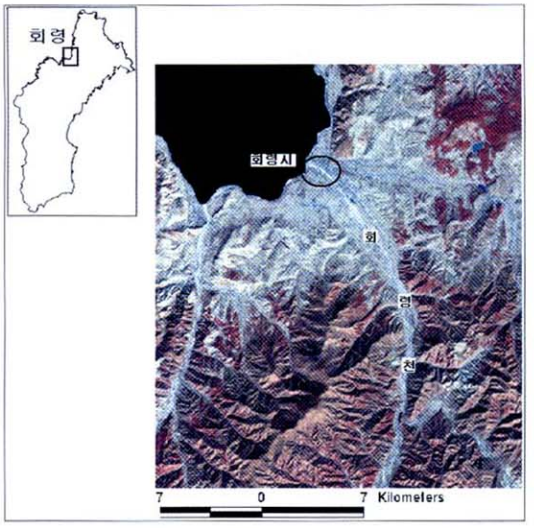


그림 1. 연구지역 개관도

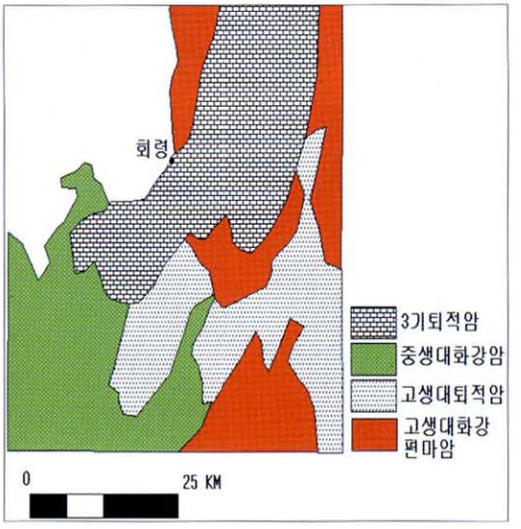


그림 2. 연구지역의 지질도(자원연구소, 1995 재구성)

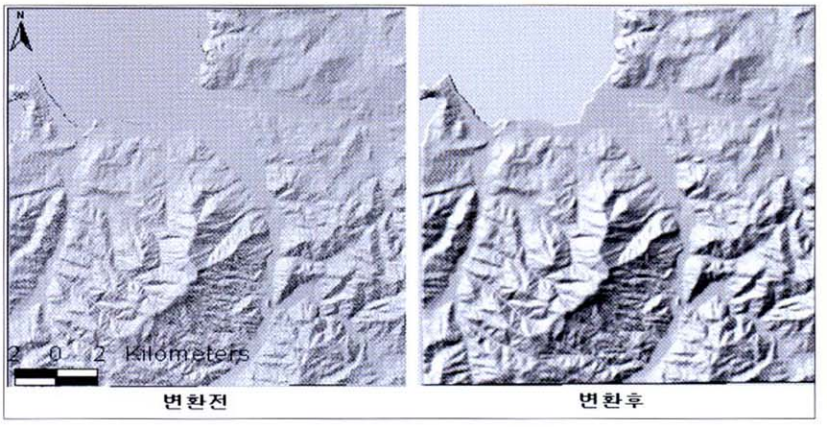


그림 3. 수치고도자료의 Fourier 변환

3. 선행연구

북한의 농업환경과 관련된 연구는 크게 농경지의 변화와 이에 따른 토양침식으로 나누어 볼 수 있다. 이에 대한 연구는 자료 획득의 어려움, 기술적인 한계로 인해 특히 북한지역에서 농경지가 산록경사지로의 확대개간에 의한 지표의 침식에 대한 정량적인 연구는 매우 드물다. 북한의 농업 및 환경변화와 관련된 직·간접적인 연구들은 다음과 같다.

김의홍·이석민(1996), 황순욱(1997) 그리고 김동실(1999)은 다 시기의 NOAA/AVHRR를 이용하여 북한 지역 토지피복 변화를 분석하였다. 이들의 연구는 낮은 해상도로 인해 구체적인 결과보다는 북한 전역의 대략적인 경향을 파악하였다.

또한 이형호 외(1997)와 김두일 외(1998)는 Landsat TM 영상을 이용하여 1990년과 1995년 의 황해도 북부 지역의 농촌 지역을 사례로 단기간의 토지이용변화를 분석하였다. 북한의 자연재해와 관련된 연구로서 김 천(1996)은 95. 7.30~8. 18일과 96. 7.24~7.28일 사이에 발생한 재령평야 지역에 대한 분석에서 97년 현재 재령평야와 그 주변지역

의 경우, 홍수피해 미복구 농경지는 약 7,447ha로, 산림복구를 위한 면적은 156.69ha 이며, 산림불량지의 면적은 54,458ha로 추정하였다. 이기석 · 남영(1999)은 다중분광 TM 영상의 변환 기법을 적용하여, 두만강 하류 지역은 맑은 수면, 혼탁 수면, 나지, 논, 초지, 밭, 활엽수, 침엽수, 거주지 등의 9가지 분류 항목으로 분석하였다. 비교적 항목별로 구분은 잘되었으나 대체로 거주지와 나대지의 구분이 불분명하고, 세부 분류에서 산지지형에 의한 그림자 효과 때문에 산림의 구분에 한계를 드러내고 있다. 또한 이기석 외(2002)는 Landsat TM을 이용하여 두만강 하류의 토지이용변화를 분석하고 있다.

두 번째 주제로서 북한의 농경지에서 발생될 수 있는 토양침식과 관련한 직접적인 연구는 드물지만 그동안 토양침식과 관련된 경험적인 연구의 사례들은 다음과 같다. 이근상 외(2001)는 GSIS를 활용한 토양침식 모형을 용담댐 지역에 적용하여 지형(LS)인자인 사면경사(S)와 경사사면길이(L)가 토양침식에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 정영상 외(1999)는 강원도 일대의 경사지 토양의 침식량을 산정하기 위해 RUSLE를 적용한 결과 밭토양에서 연간 14.6ton/ha의 토양이 침식된 것으로 평가하였다. 박재훈 외(2000)은 강원도 홍천강 유역을 중심으로 수정토양침식 모형을 GIS와 통합하여 유사량을 측정하였다. 한편 장영률 외(2002)는 RUSLE 모형적용에 적절한 Raster 데이터의 해상도는 150m로 분석하였다.

한편 Honda et al.(1996), Hazarika and Honda (2001) 등은 원격탐사와 GIS를 적용한 토양침식 모델의 적용에 있어 입력인자의 제한을 받는 지역에서는 국지적인 USLE모델을 적용하기 힘들다고 보고 이에 대한 대안으로서 NDVI와 사면경사도를 이용한 전역적인 토양침식 모델을 제안하였다. 그동안 토양침식 모델은 지표의 침식 양상을 설명하기 위해 20 여가지 이상 다양하게 개발되었다(김성준, 2001). 본 연구에서는 국지적인 지표의 침식 즉 rill, gully 등에 의한 지표유출을 추정하기에 적합한 RUSLE 모델을 적용하고 있다. 그런데 RUSLE 모델은 침식에 의해 발달한 지형의 구체적인 형태를 추정하거나 지도화 하기 어려운 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 보다 분광학적인 field data를 적용한 연구들이 진행되고 있다. 이러한 연구의 사례로 Zinck et al.(2001)은 연구에서 레이다영상과 Landsat 및 고해상도를 적용한 분광학적인 연구에서 지표면의 침식형태에 대하여 gully, 표면침식지역(sheet eroded area), 세류침식지역(rill eroded area) 등으로 침식유형을 분류하고 있다.

4. 농경지 변화의 공간적 특성

위성영상을 이용한 농경지 변화를 파악하기 위해서는 영상의 지리좌표계를 정립해야 한다. 이를 위해 115-31 궤도를 갖는 Landsat 영상의 지상기준점으로 지형도에서 10개의 지역을 선정해 GCP (ground control point)로 사용하였으며 재배열과정에서 나타난 RMS error는 0.3으로 Landsat 1 픽셀당 해상도 30m를 만족한다. 이런 과정을 거쳐 영상소들의 재배열이 끝난 후 연구에 필요한 회령지역일대를 별도로 추출하였다.

마찬가지로 지표피복의 공간적 특성을 분석하기 위해 사용된 수치고도 모델도 위성영상과 같은 해상도와 좌표계로 통일하였다. 그런데 수치고도 모델의 경우 지형면들이 계단상으로 나타나 연속적인 지형을 반영하지 못하는 것으로 분석되었다. 이 문제를 해결하기 위해 수치고도모델에 대한 푸리에 변환(Fourier transformation)을 실시하였다. 푸리에 변환은 영상에서 나타나는 잡음을 제거하여 화질을 복원하기 위해 개발된 방법이다. 본 연구에서는 수치고도 모델에서의 고도점의 임계치가 변화되는 부분들이 연속적인 특성을 갖도록 푸리에 변환을 한 결과를 영상으로 복원하였다(그림 3).

보정된 위성영상에 의한 14년간의 지표피복의 변화를 보면 육안으로도 관찰이 될 만큼 뚜렷하다(그림 4). 그림 4에서와 같이 1987년의 영상은 농경지가 주로 하천변이나 곡지의 낮은 구릉대를 따라서 개간되고 있다. 그러나 2001년의 영상에서는 농경지 개간이 구릉지 전체로 확대되고 있다. 특히, 1987년의 영상에서 남아 있던 구릉대의 침엽수림이 2001년 영상에서는 상당부분이 제거된 것이 육안으로도 관찰된다.

이상의 결과를 바탕으로 농경지, 산림, 시가지, 하천, 사질퇴적지 등의 5 항목으로 감독분류를 실시하였다(그림 5). 5가지 항목들은 무감독 분류를

적용해본 결과 지표의 열적·수리적 요인으로 분광적 특성이 모호하여 분류가 되지 않았다. 감독분류를 실시하였는데 GTD(ground truth data)는 지형도에 파악되는 지표정보를 활용하였다. 분석결과 <그림 5>에서와 같이 14년간 농경지와 산림지역의 변화가 뚜렷하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 특히 농경지는 두 시기 사이에 36.9% 증가한 반면 산림지역은 16.5%로 감소한 것을 알 수 있다(표 1). 농경지 증가와 산림의 감소율이 일치하지 않는 것은 농경지 개간이 산림지역 외에 하천주변, 저습지, 평지 그리고 나대지 등에서도 이루어졌기 때문이다.

표 1. 농경지와 산림지역의 상대적인 변화량

시기	1987년(㎢)	2001년(㎢)	변화율(%)
농경지	182.2	249.5	36.9(증가)
산림	391.7	327.4	16.5(감소)

농경지만을 대상으로 평균 경사도와 고도를 분석해본 결과 87년의 농경지에 비해 2001년의 농경지 고도는 24m 상승했으며, 경사도는 0.8° 높아졌다(표 2). 그렇지만 두 시기 동안 확대된 농경지만을 대상으로 분석한 결과 고도는 87년의 평균에 비해서 75m 높게 개간되었으며 경사도도 2.5°로 급해졌다. 이 지역의 고도 515m, 경사도가 11°이고 비교적 풍화도가 높아 평탄화가 많이 이루어진 퇴적암 지대라는 점을 고려한다면 농경지가 상당한 면적의 산록대로 확대되었다는 것을 의미한다.

전체적으로 농경지 개간은 골짜기를 따라 진행되기 보다는 산록대를 따라 고도를 높여가며 진행되었고, 특히 인구가 집중된 시가지 주변의 배후산지 구릉을 따라서 개간이 진행된 것을 알 수 있다. 이는 14년간의 시가지 변화가 34% 증가한 점에서도 확인된다.

표 2. 농경지의 공간적 분포특성

결과 / 항목	전체적인 농경지 평균		14년간 개간지역	DEM의 평균
	1987	2001		
고도(m)	368	392	443	515
경사도(°)	7.0	7.8	9.5	11

5. RUSLE을 이용한 토양침식 추청

지금까지 살펴본 바와 같이 회령지역의 경우 농경지와 산림에 있어 많은 변화가 있었으며, 이러한 경향은 두만강 하류 뿐만 아니라 북한 전역에 걸쳐 나타나고 있다(이민부 외 2003). 북한에서의 산지개간은 30여년 동안 진행되었지만 전술한 바와 같이 90년대 중반의 자연재해로 인한 식량난이 가중되면서 농경지 개간이 일정고도와 경사도 이상의 산록구릉지나 산록대까지 진행되었기 때문인 것으로 파악된다(이민부 외, 2003).

식생피복이 제거되면 농경지로 이용되더라도 지표면에서 침식이 일어난다. 따라서 농경지와 산림의 변화에 의해 회령지역에서 어느 정도 토양 침식이 일어나는지 분석하기 위해 경사지로의 농경지 확대와 지표의 나대지화에 따른 rill, interill, gully 등으로 유출되는 토사량을 추정하는데 가장 잘 알려진 USLE(universal soil loss equation) (Wischmeier and Smith, 1965, 1987)를 개량한 RUSLE 모델을 적용하기로 한다(Desmet and Govers, 1996; Ogawa, et a.l, 1997).

여기서 RUSLE는

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

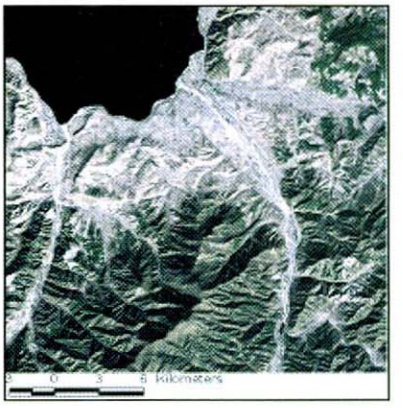
A: 토양침식량($t/ha/yr$),
K: 토양에 의한 침식인자($t/ha/yr$)
C: 지표피복별 인자
R: 강수에 의한 침식인자(J/m^2)
LS: 지형인자(L: 침식사면길이, S: 침식사면의 경사각)
P: 경지개간 형태에 의한 침식조절인자

1) 강수에 의한 침식인자 계산

강수에 의한 침식은 강우량과 강우집중도의 영향을 받는데, 강우집중도의 영향을 보다 많이 받는 것으로 보고 되고 있다(장영률 외, 2002). 강수에 의한 침식인자는 Toxopeus가 개발한 식을 사용하였다(최상규, 1999; 이근상 외, 2001; 장영률 외, 2002; Toy and Foster, 1998; Engel, 1999).

$$R = 38.5 + 0.35 \times P \quad \cdots\cdots (2)$$

1987. 9. 18 영상



2001. 11.3 영상

그림 4. True color 영상간의 변화

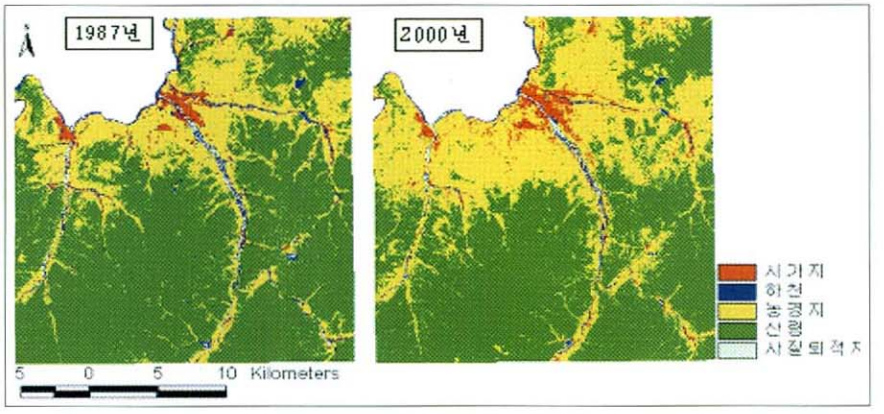


그림 5. 토지이용의 분포와 변화

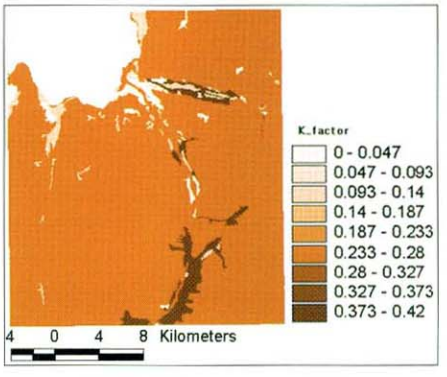


그림 6. 토양의 침식인자 분포도

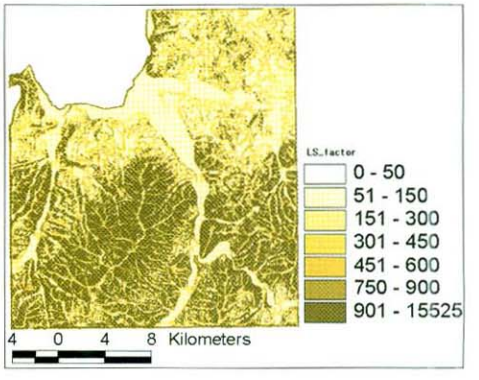


그림 7. 지형인자(LS) 분포도

R은 침식인자(J/m^2)이고 P는 연평균 강수량(mm/yr)이다. 관측 자료가 없기 때문에 함경북도의 지난 20년간의 관측자료를 이용하여 Thiessen 다각형망을 분석한 결과 회령지역은 강수량이 500 mm로 계산되었으며, 이에 따른 강수침식인자는 213.5 이다.

2) 토양에 의한 침식인자

토양의 침식정도는 토양통별로 다른데 이는 토양통에 따라 입도조성과 유기물의 함량이 다르기 때문이다. 토양통별 침식의 정도는 Wischmeier and Smith(1965)가 고안한 방법을 토대로 미국의 미국토양보존국(Soil Conservation Service:SCS)(http://mepas.pnl.gov)에서 제시한 표 3을 이용하여 k값을 추출하였다(그림 6). 기존의 연구에서 검증된 k값의 결정은 토양의 입도조성, 유기물, 함수량 등에 따라 토양통별로 계산에 의해 결정하는 방법과 분류기준이 정리된 도표를 바탕으로 결정하는 방법이 있다(정영상 외, 1999; 권형중 외, 2002). 본 연구에서 K값은 수치토양도의 데이터베이스의 토양의 입도조성과 유기물량에 따라 <표 3>의 분류체계에 따라 결정하였다

표 3. 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
Loamy sand	0.12	0.10	0.08
Loamy 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	

3) 지형인자(LS)

지형인자는 침식을 받는 사면의 길이 즉 능선으로부터 곡저까지의 길이(L)와 침식사면의 경사(S), 즉 경사도의 *sine* 값을 말한다. 수치고도모델의 해상도는 30m로 하여 격자를 계산하였다. 여기서 침식사면의 길이인자의 산정은 Desmet and Govers (1996)가 제안한 공식을 적용하였다(장영률 외, 2002; Shi et al., 2002).

$$L_{ij} = \frac{(A_{ij-jn} + D^{2})^{m+1} - A_{ij-jn}^{m+1}}{D^{m+2} \times x_{ij}^{m} \times 22.13^{m}} \quad \cdots\cdots (3)$$

Lij : 침식사면의 길이
Aij-jn : 격자에 유입되는 상류의 면적
D : 격자의 크기
m : 침식사면의 길이의 멱지수
X : 흐름방향에 직교하는 등고선의 길이
(| sin a ij| + |cos aij|, aij 는 격자의 흐름방향)

그리고 침식사면의 경사인자는 침식사면의 길이보다 침식에 미치는 영향과 민감도가 크며 그 계산에는 Nearing이 제안한 공식이 적용되었다(이근상 외, 2001에서 재인용).

$$S = -1.5 + \frac{17}{1 + \exp(2.3 - 6.1 \sin\theta)} \cdots (4)$$

여기서 θ는 tangent 경사각이다. 이상의 계산식 1, 2, 3, 4는 AML을 이용하여 작성하였다(그림 7).

4) 지표피복별 인자와 침식조절인자

지표의 침식에 미치는 인자는 지금까지 살펴본 강수량과 강우강도, 사면경사와 사면길이, 토양 특성 외에도 인간의 간섭, 즉 토지이용도 중요한 침식인자이다.

신계종(1999)의 연구결과 지표의 토지이용별로 Wischmeier and Smith(1978)가 제시한 지표피복인자(c)는 우리나라에 적합지 않아 수정된 c값을 제시하고 있는데, 그는 논(0.3), 밭(0.4), 산림(0.1), 초지(0.2), 수계와 도시는 침식이 발생하지 않으므로

0으로 재구성하였다. 이 값을 바탕으로 본 연구에서는 5항목 분류에 대해 농경지(0.4), 산림(0.1), 수계와 시가지(0), 사질퇴적지(0.2)로 c값을 분류하였다(그림 8).

경지 개간에 따른 침식조절인자 P는 경작형태를 고려한 것으로 경사도별 비율로 계산된다. 계단식 경작(terracing), 등고선 경작(contouring), 등경사 경작(contour strip cropping) 등의 형태에 따라서 지표의 침식유형이 달라진다(권형중 외, 2002). 경작형태 중에서 침식량이 적은 것은 계단식 경작이고 가장 빠른 것은 등고선 경작이다. 남한의 경우는 논은 계단식을 하지만 밭은 등고선식을 많이 하고 있다.

회령지역은 Landsat 영상에서 경작의 형태는 판독이 되지 않으나 6m 해상도를 갖는 KOMSAT 영상에서는 경작지가 주로 등고선식을 따르는 것으로 판독되었다. Wischmeier and Smith(1978)는 경작의 형태에 따라 사면경사도별 침식조절인자 P

표 4. 토양침식 조절인자 P(Wischmeier and Smith, 1978 재구성)

사면경사(%)	등고선	등경사	계단식
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

를 제안하고 있다(표 4).

여기서 %로 계산된 경사도는 본 연구에서 도(°) 단위로 환산하여 적용하였다. 그 결과 침식조절인자 P는 그림 9와 같은 분포의 변화를 보여주고 있다.

5) 회령지역의 토양침식량

이상의 개별 토양침식 인자를 바탕으로 계산된 침식량의 변화는 그림 10과 같다. 그림에서와 같이 1987년의 토양침식이 년간 100 ton 이상인 지역은 주로 하천변과 시가지 배후와 접하는 곡지 사면 주로 나타나고 있었으나 2001년에서는 산록구릉대까지 확대되었다.

고도별로 침식의 정도를 살펴보면 그림 11과 같다. 두 시기 모두 토양침식이 높게 나타나는 고도는 300~500m이다. 하지만 평균침식량은 상당한 차이가 있다. 1987년은 같은 고도에서 평균 57 ton의 침식이 일어나지만 2001년은 85 ton 정도의 토양침식이 일어나고 있다. 그리고 500~700m 고도에서는 2001년에서 45 ton 정도의 침식이 일어나고 있는데 이는 경지개간의 고도화(高度化)에 따른 것으로 해석된다. 하지만 80~300m 고도에서는 두 시기 모두 평균 침식량이 비슷한 것으로 나타났다.

사면경사도별 침식량을 살펴보면 그림 12와 같다. 그림 12와 같이 두 시기 모두에 침식량이 높게 나타나는 경사도는 30~50°로 나타났다. 1987년의 경우 30~40°에서는 250 ton 정도이고 2001년은 290 ton 정도로 나타났다. 그렇지만 40~50°에서는 1987년은 250 ton, 그리고 2001년은 340 ton으로 40~50°의 경사지역에서 토양의 침식이 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 전제적으로는 2001년에 30° 이하의 낮은 경사도에서도 년간 50 ton 이상을 유지하는데 이는 경작지의 황폐화에 따라 지표가 불안정해져 발생된 것으로 보인다

따라서 토양침식은 경사도에 가장 큰 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다. 이를 바탕으로 토양침식의 잠재적 가능성이 높고 또한 산사태의 위험이 높은 지역을 추정해보기 위해 년간 토양침식량이 200 ton 이상 지역만을 표시해보면 그림 13과 같다. 곡지와 구릉지를 면한 급사면에서 높은 분포를 보이고 있으며, 87년에 비해 2001년에 들어 현저한 분포 증가를 보이고 있다.

년간 200 ton 이상 침식이 진행되는 지역을 비교해보면, 1987년 토양침식량은 평균 422 ton이고 면적은 28.6㎢, 2001년은 411 ton, 면적이 48.8㎢으로 약 70%정도 확대되었다. 또한 경사도에 있어 두 시기 모두 17°로 분석되었다. 이 같은 결과를 종합할 때 토양침식량이 높은 지역에서는 우기에 산사태와 같은 자연재해의 위험도가 높은 지역이라고 할 수 있다.

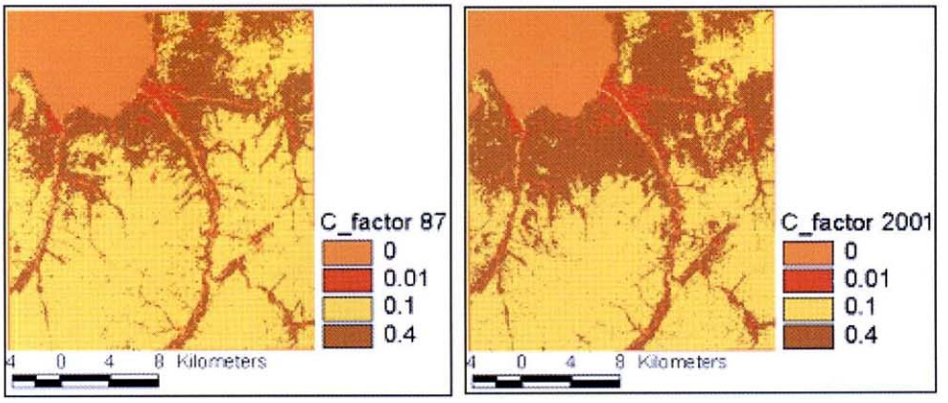


그림 8. 지표피복별 침식인자 분포도 변화

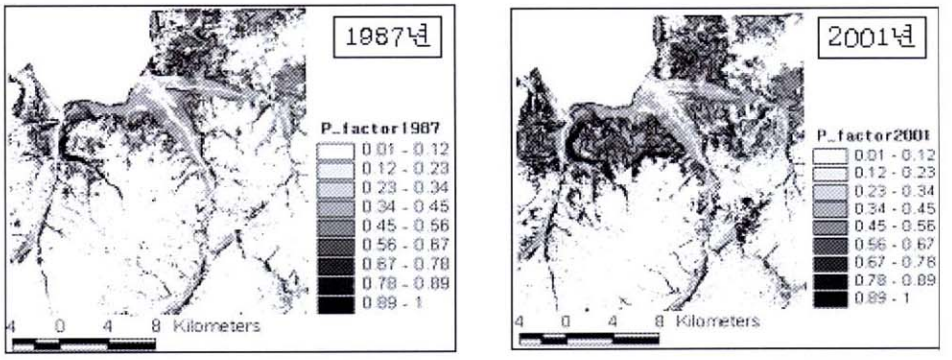


그림 9. 침식조절인자의 분포도 변화

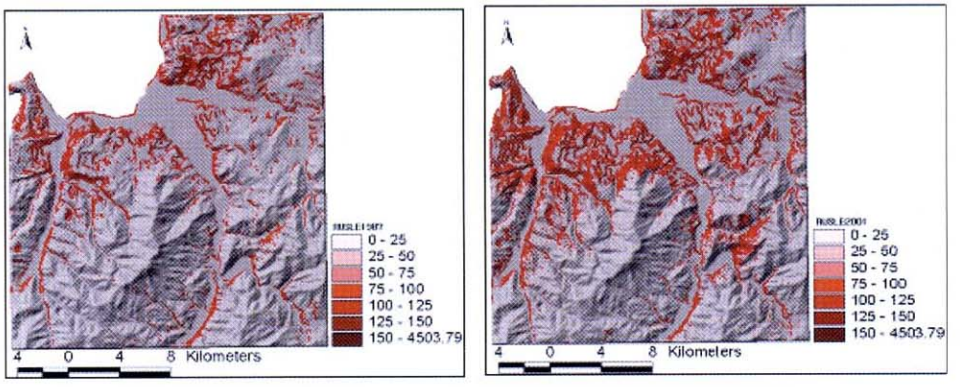


그림 10. 토양침식량의 변화(단위: ton)

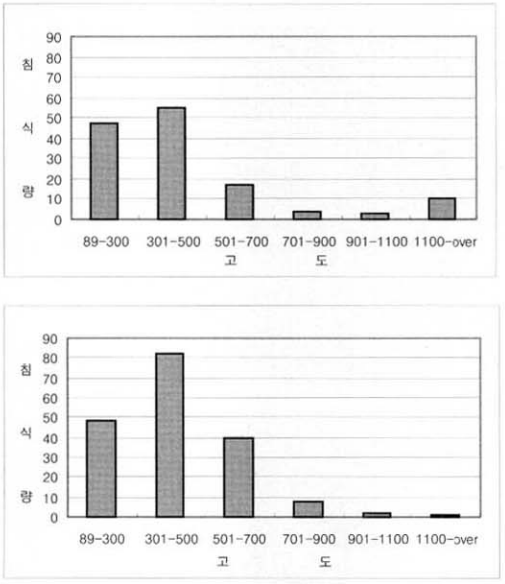


그림 11. 고도별 토양침식량(상: 1987년, 하: 2001년) (단위: ton)

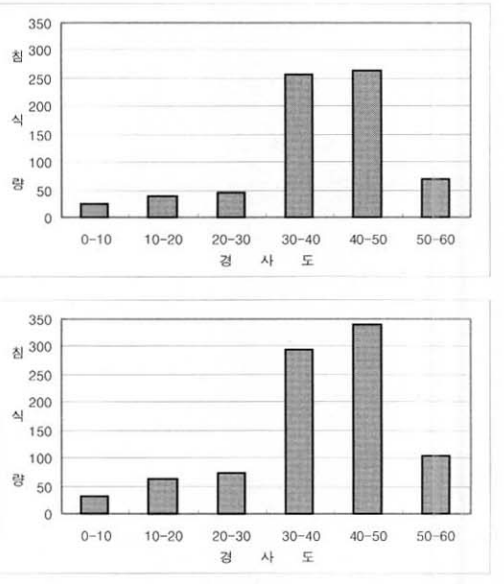


그림 12. 경사도별 토양침식량(상: 1987년, 하: 2001년) (단위: ton)

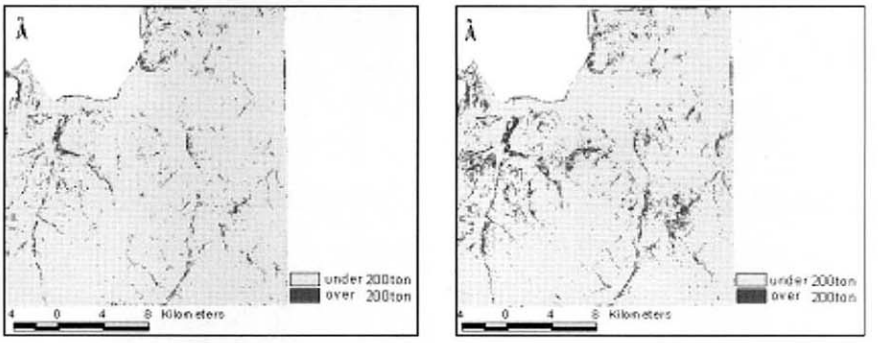


그림 13. 년간 200 ton 이상 토양침식지역 분포(좌: 1987년, 우: 2001년)

5. 결 론

이 글은 RUSLE 모형을 적용하여 북한 회령지역을 대상으로 1987년과 2001년 위성영상을 이용하여 토양침식량을 비교 분석한 것으로 14년 기간 동안 농경지 개간에 따른 침식량의 증가가 현저하였음을 알 수 있었다. 두 시기 모두 침식이 년간 100 ton 이상 지역은 하천, 시가지 배후사면이지만, 2001년에는 산록구릉대까지 확대되고 있다. 농경지의 경우 1987년에 비해 2001년에는 평균고도가 24m, 경사도는 0.8°로 상승했다. 두 시기 사이에 확대된 농경지만을 보면, 고도는 75m, 경사도는 2.5°로 상승하였다. 토양침식이 두 시기 모두 높은 고도는 300~500m 이지만, 이들 고도에서의 침식량은 87년의 57 ton에 비해 2001년은 85 ton으로 증가하고 있어 경지개간의 고도화를 알 수 있다.

경사도의 경우에는 두 시기 모두 30~50°에서 높은 침식량을 보이고 있는데, 2001년에는 40~50°에서 침식량이 증가하고 있다. 2001년에는 30° 이하의 경사지에서도 침식량이 상당히 증가하고 있다. 산사태의 위험이 높은 침식량 200ton 이상 지역의 경우 87년 28.6㎢에서 2001년 48.8㎢로 현저히

증가하였다.

본 연구 결과는 영상 자료에 크게 의존하므로 어느 정도의 분석상의 오차가 인정되며 보다 많은 문헌자료와 현지조사가 가능하다면 이러한 오차를 줄일 수 있을 것이다.

文 献

김동실, 1999, 인공위성(NOAA/AVHRR) 영상자료에 의한 한반도 식생분포에 관한 연구, 한국교원대학교 석사학위논문.

김두일 · 한 욱 · 정상조, 1998, 위성 영상을 이용한 황해도 농촌 지역의 토지이용 변화 연구, 지리학연구, 32(4), 135-146.

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

김수대, 2001, 최근 북한에서 전개된 토지(농경지) 정리사업, 북한국토의 이해와 개발에 관한 국제학술 세미나, 대한지리학회, 117-125,

김의홍 · 이석민, 1996, NOAA AVHRR 자료를 이용한 한반도 토지피복 변화 연구, 한국GIS학회지, 4(1), 13-20.

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

박재훈 · 양인태 · 김동문 · 천기선, 2000, 지형공간정보체계와 토양유실모형을 이용한 토양유실량과 유사량에 대한 비교, 한국측량학회지, 18(3), 225-231.

신계종, 1999, 지형정보체계를 이용한 유역의 토양유실분석, 강원대 박사학위논문.

이민부 · 한욱 · 김남신 · 한주연 · 신근하 · 강철성, 2003, Landsat 영상과 수치고도자료를 이용한 두만강 하류지역의 농경지 개간에 따른 환경문제 분석, 대한지리학회 춘계학술대회 자료집, 93-97.

이기석 · 남영, 1999, 다분광 TM 영상 변환기법과 감독분류 정확도 비교 연구-두만강 하류지역을 중심으로-, 한국측지학회지, 17(3), 311-320.

이기석 · 이옥희 · 최한성 · 안재섭 · 남영, 2002, 나진-선봉 경제 무역지대의 입지 특성과 지역구조, 대한지리학회지, 37(4), 293-316.

이근상 · 이환주 · 임승현 · 조기성, 2001, GSIS를 활용한 토양침식모형에서 지형인자의 영향분석, 대한토목학회지, 21(4-D), 545-554.

이형호 · 한욱 · 김두일, 1997, 인공위성 영상을 이용한 황해도 북부지역의 토지이용 변화연구, 화랑대연구소.

임상규, 2000, Landsat TM 자료를 이용한 농경지의 변화 분석에 관한 연구, 경희대학교 대학원 박사학위논문.

임석민, 2001, 위성 영상을 이용한 비접근 지역에 대한 지형정보분석에 관한 연구, 한양대학교 산업대학원 석사학위논문.

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.

최상규, 1999, 비접근 지역에 대한 지형정보 분석체계에 관한 연구, 건국대학교 산업대학원 석사학위논문.

한국과학기술단체연합회, 1998, 위성 원격탐사자료를 이용한 북한 홍수피해지역의 환경계측연구, 한국과학기술단체연합회.

한국농촌경제연구원, 1997, 북한의 농림축산업 현황과 전망, 한국농촌경제연구원.

_____, 1999, 1998년 북한의 식량 생산량 추정, 한국농촌경제연구원.

황순욱, 1997, NOAA/AVHRR 자료를 이용한 북한지역 지피식생 및 농경지 모니터링, 서울대학교 환경대학원 환경조경학과 석사학위논문.

기상청, 1995, 북한 기상 20년보(1973-1994), 기상청

경인문화사, 1997, (最近)北韓 五萬分之一 地形圖(上), 경인문화사.

대한지질학회, 1999, 한국의 지질, 시그마프레스

통일원 정보분석실, 1994, 북한의 자연지리와 사적, 통일원.

Kim, S-J et al., 1993, *Geology of Korea, Foreign Languages Book*, Publishing House, Pyongyang.

Desmet, P. J. J. and Govers, G., 1996, A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex

landscape units, *Journal of Soil and Water Conservation*, 515, 427-433.

Engel, B., 1999, *Estimation soil erosion using RUSLE using arcview*, Prudue University. http://pasture.ecn.purdue.edu.

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.

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.

Ogawa, S., Saito, G., Mino, N., Uchoda, S., Khan, N.M. and Shafig, M., 1997, Estimation of soil erosion using USLE and Landsat TM in Parkistan, http://gisdevelopment.net.

Shi,A.H., Cai, C.F., Ding, S.W., Li, Z.X., Wang, T.W. and Sun, Z.C., 2002, Assessment of erosion Risk with the Rusle and GIS in the middle and Lower Reaches of Hanjiang River, 12th ISCO Conference, 73-78.

Toy, T. J., and Foster, G. R.(ed), 1998, Guidelines for the RUSLE ver 1.06 on mined lands, construction sites and reclaimed lands, Department of Geography, University of Denver, 1-148.

Wischmeier, W. H. and Smith, D. D, 1965, Predicting rainfall erosion losses from cropland east of Rocky mountains-guide for selection of practices for soil and water conservation, *Agricultural Handbook*, 282, U.S., Department of Agriculture, Washington,D.C.

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

Zinck, J. A. Z., Lopez, J., Metternicht, G. I., Shrestha, D. P and Vazquez-Selem, L., 2001, Mapping and modeling mass movement and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques, *JAG*, 3(1), 43-53.

http://krsc.kigam.re.kr, 김천, 위성 원격탐사자료를 이용한 북한 홍수피해지역의 환경계측.

http://mepas.pnl.gov. soil erodity Factor.

(접수 : 2003. 7. 1, 채택 : 2003. 8. 13)