

산지유역에서 USLE 모형의 적용성 평가

Application Evaluation of USLE model on the Mountain Watersheds

○박상덕¹⁾, 신승숙²⁾, 이규송³⁾, 윤영호⁴⁾, 이종설⁵⁾

1. 서론

최근 우리나라는 국토 개발에 따른 피해가 증가하고 있으며, 또한 몇 년 전부터 계속해서 발생하는 산불재해는 토사유출을 증가시키는데 한 몫을 하고 있다. 특히 우수한 산림경관을 보유하고 있는 강원도 지역에 산불이 대규모로 발생하여 생태계 파괴뿐만 아니라 산림의 황폐와 토양의 침식 및 홍수피해 증가 등의 2차 적인 피해를 가져오고 있다. 산불로 인해 파괴된 산림에는 지표에 쌓여져 있던 낙엽뿐만 아니라 교목층, 관목층, 초본층이 손상된 상태이기 때문에 강우의 토양침식 에너지 강도가 증대하게 된다. 또한 강우가 지면에서 저류하는 시간이 줄어들게 되고, 보다 빠른 속도로 유출하게 되며, 유출시 다량의 유기물과 토사를 유송하게 되어 산림의 영양상태를 더욱 악화시킬 뿐만 아니라, 하천에서의 다량의 토사 퇴적으로 하상을 상승시켜 홍수위 증가로 홍수피해가 늘어나게 된다. 토사유출량 산정을 위하여 국외적으로 개발된 여러 모형이 이러한 경우에 적용될 수는 있으나, 아직까지 국내에서는 식생이 다양한 산지에 대해 적용 가능성을 검토한 적은 거의 없는 실정이다. 우리나라에서 많이 이용되고 있는 경험적 토사유출 산정 모형인 USLE 및 RUSLE 모형은 산지에 대한 피복인자 C를 다양한 경우에 적용할 수 있도록 제시하고 있으나, 실질적인 산지 유역에 대한 적용범위 및 한계성을 검토한 적은 없다. 토양보존을 위한 설계에 활용하기 위해서 개발된 USLE, RUSLE 모형은 세류간 그리고 세류 침식량을 산정하기 위해 개발되었으므로 유역의 침식량이나 구곡침식, 수로내의 침식 등의 산정에 쓰이는데 무리가 있으며, 이 기법은 퇴적을 반영하지 못하기 때문에 사면 침식이 유역 전체 침식량에 미치는 영향 산정 시 많은 주의가 필요하다. 그러므로 이러한 USLE, RUSLE의 취약점을 보완하기 위한 연구가 필요하다. 이 모형에 관한 국내 적용성 검토 연구에서는 강우침식도(R), 토양침식인자(K), 지형인자(LS) 등의 지배인자의 관한 연구는 다소 수행되어 왔으나 피복인자(C)나 토양보존대책인자(P)에 관한 연구는 부족한 상태이며, 특히 지표환경이 다양한 산지에서의 모형의 적용성에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 2001년도 영동 지역의 산불피해 지역을 대상으로 실시한 소규모 조사구 및 시험 유역 등의 실측 결과를 가지고, USLE, RUSLE 모형에 적용하여 식생이 다양한 산지에서의 피복인자 C값의 적용범위와 한계성을 검토하고자 한다. 또한 유역이 비교적 큰 산지유역에 C값을 적용하여 토사생산량과 토사유출량이 어떠한 관계가 있는지 해석하여 USLE, RUSLE 모형 적용의 취약점이 어디에 있는지 파악하고, 그것에 영향을 미치는 토사유출 지배인자들을 고려해보고자 한다.

- 1) 강릉대학교 토목공학과 교수
- 2) 강릉대학교 대학원 토목공학과 석사과정
- 3) 강릉대학교 생물학과 교수
- 4) 강원도립대학 토목공학과 조교수
- 5) 국립방재연구소 토목연구관

2. USLE 및 RUSLE모형 이론

강우에 의하여 발생하는 토양침식에 대해서 토지이용이 미치는 영향을 예측할 목적으로 개발된 USLE(Universal Soil Loss Equation)모형은 Wischmeier와 Smith(1965, 1978)에 의하여 제안된 이후 설계목적으로 널리 사용되고 있다. 이 모형은 강우에너지, 강우강도, 토양의 침식성, 사면길이, 사면경사도, 토양의 피복상태 및 토양보존대책의 함수로 토양침식을 설명하고 있다. 최초 개발 당시에 이 모형은 연평균 토양침식 예측을 목적으로 한 것이었으나, 월 침식 또는 단일 호우에 의한 침식을 추정하기 위하여 그 동안 많은 수정이 이루어졌다. 따라서 예측에서 발생할 수 있는 오차는 장기간 예측보다 단기간 예측에서 커질 수 있다. 다음 식 (1)과 같이 모형은 경사진 소유역의 토양 침식량 추정에 합리적인 방법이다.

$$A = RKLSCP \quad (1)$$

여기서 A는 단위면적당 평균 토양침식량(tons/acre/year)으로 그 단위는 R과 K에 적용된 단위에 좌우된다. R은 강우에너지계수(Rainfall Energy Factor), K는 토양침식계수(Soil Erodibility Factor), L은 사면길이계수(Slope Length Factor), S는 사면경사계수(Slope Steepness Factor), C는 피복인자(Cover and Management Factor), P는 토양보존대책인자 (Supporting Conservation Practice Factor)이다. RUSLE모형은 Renard 등(1993)이 USLE 모형을 수정한 것으로서 기본식이나 각 매개변수는 USLE모형과 같다. 그러나 이들 사이의 특징적인 차이점은 C값을 보다 상세하게 분류함으로써 USLE 모형을 산림조건, 건설현장, 광산활동 등과 같은 부문에도 적용할 수 있도록 한 것이다.

3. 소규모 조사구의 토사유출

식생피복이 다양한 산불지역의 토사생산 및 토사유출 특성을 조사하기 위하여 소규모 조사구를 설치하였다. 산지의 토양침식은 지표의 식생 종류 및 피복도, 지표의 유기물, 지형경사, 토질, 강우량, 강우강도에 따라 달라지므로 각각의 특성을 잘 반영할 수 있는 지역을 선정하여, 37개소의 소

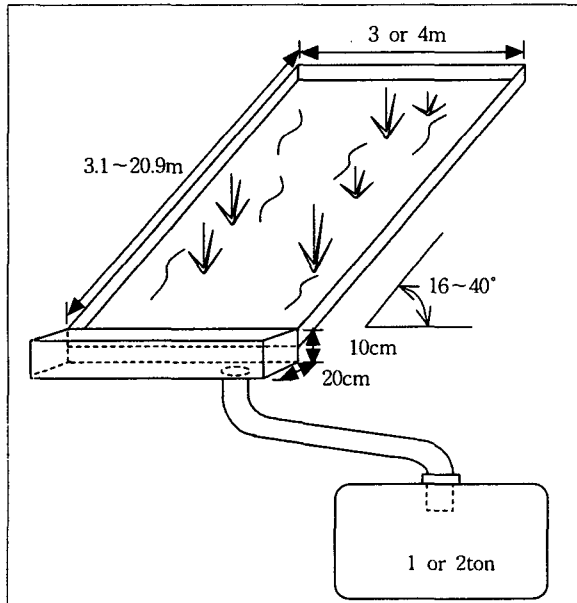


그림 1. 소규모 조사구의 형태

규모 조사구 장치를 그림 1과 같이 설치하였다. 토사유출 특성을 파악하기 위하여 각 소규모 조사구의 면적, 길이, 폭, 경사, 유기물 함량, 식생 피복도, 식생구조를 고려한 피복도, 낙엽층을 포함한 식생구조 피복도 등을 조사하였고, 강우에 따른 토사유출량 및 강우 유출량을 실측하였다. 강우사상의 우량, 지속시간 및 최대강우강도를 알기 위해 장비를 설치하거나 인근 지역의 기상 자료를 이용하였다. 2001년 6월말~10월초 강우사상에 따른 토사유출 조사자료는 한 조사구당 4~6번정도 얻을 수 있었다. 강우에 따른 토사생산에 영향을 미치는 지배인자들이 다양함에 따라 각 조사구에서의 유출량, 토사유출량은 상이했으며, 강우량, 강우강도, 강우지속시간이 증가함에 따라 강우사상에 대한 토사생산량도 증가하였다.

4. 시험구역에서의 토사유출

시험구역은 산불발생 후 그대로 보존한 지역, 산불발생 후 벌목 및 조림 등의 대책을 시행한 지역, 산불이 발생하지 않은 지역으로 구분하여 시험장비 설치 및 조사를 수행하였다.

표 1. 시험구역의 지형특성

시험구역명	산불보존	산불대책	산불미발생
수계명	연곡천	사천천	연곡천
구역 면적	1.085ha	0.852ha	7.273ha
해발 고도	180~215m	180~215m	115~228m
구역 폭	70~100m	50~90m	120~230m
구역 길이	144m	124m	500m

표 1과 같은 지형특성을 가진 세 시험구역을 지형적 수계에 따라 또는 식생분포 따라 세분화하여, 소규모 조사구에서 행한 조사항목을 시험구역에서도 수행하였다. 또한 강우에 의한 시험구역 유출구에서의 토사유출량을 실측하고, 강우량도 측정하였다.

세 개의 시험구역은 지형 및 지질의 차이는 다소 있으나, 각 시험구역의 식생피복에 따른 토사유출량의 변화가 큰 것으로 나타났다. 산불대책지역은 구역면적이 작음에도 불구하고 비교적 유출이 여러 번 발생하였으며, 토사유출량 또한 많았다. 그에 반에 산불보존지역은 유출발생도 적고 토사유출량도 적게 나타났다.

5. 피복인자 특성분석

5.1 USLE모형의 피복인자 추정

실제 소규모 조사구에서 얻어진 결과를 가지고 USLE모형의 강우에너지계수, 토양침식계수, 사면길이 계수, 사면경사계수, 토양보존대책인자, 단위면적당 평균 토양침식량의 값을 구하여 피복인자 C값을 역추적 한다. 계산된 평균 C값과 소규모 조사구에서 직접 조사한 식생피복도, 식생구조를 고려한 피복도, 낙엽층을 포함한 식생구조 피복도와의 관계를 파악하기 위하여 그림 2, 3, 4와 같이 나타내면 상관계수 0.7이상의 회귀방정식을 얻을 수 있다.

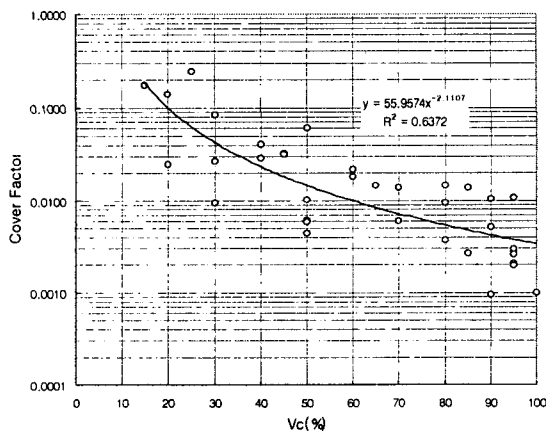


그림 2. 피복인자와 식생피복도와의 관계

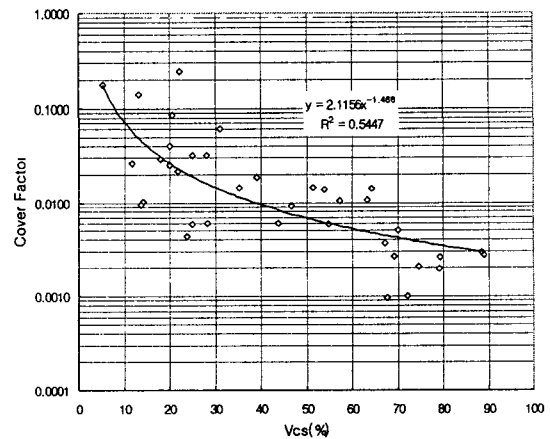


그림 3. 피복인자와 식생구조를 고려한 피복도와의 관계

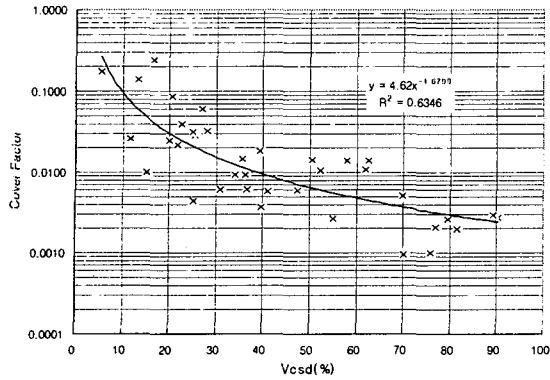


그림 4. 피복인자와 낙엽층을 포함한 식생피복도와의 관계

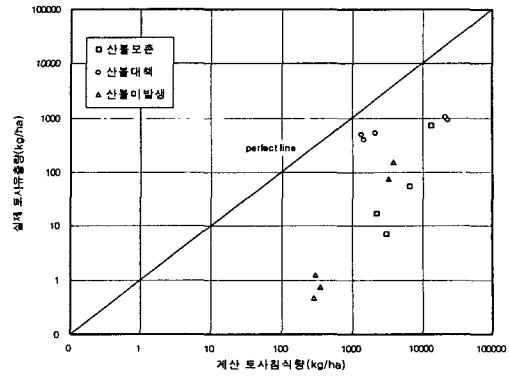


그림 5. 계산 토사침식량과 실제 토사유출량의 비교

5.2 시험구역에 피복인자 적용

세 시험구역의 각 소구역별 USLE 매개변수 값에서 피복인자 C는 5.1에서 얻어진 소규모 조사구에서의 식생피복도와 피복인자 C와의 관계로부터 계산된다. 이 값을 가지고 각 소구역에서의 토사침식량을 계산하여 합하면, 세 시험구역에서의 총 토사침식량을 얻을 수 있다. 계산된 토사침식량과 실제 측정된 토사유출량의 관계를 보면 그림 5와 같고, 그 관계는 식생분포가 상이한 세 시험구역 모두 실제 토사유출량보다 계산된 토사침식량이 크다는 사실을 보여주었다.

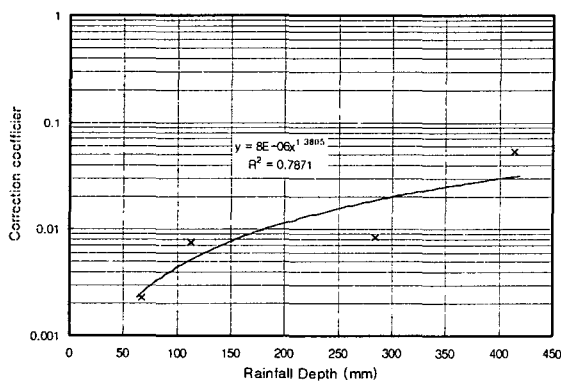


그림 6. 보정계수와 강우량과의 관계(산불보존)

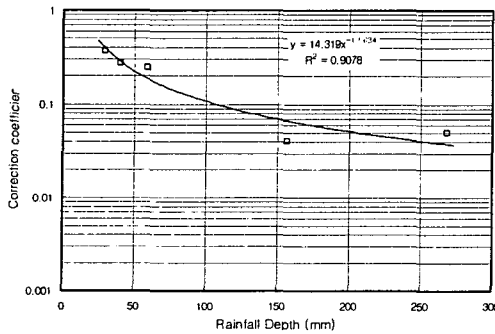


그림 7. 보정계수와 강우량과의 관계(산불대책)

계산 토사침식량과 실제 토사유출량의 비인 토사유출보정계수(correction coefficient)는 강우사상과 밀접한 관계가 있을 것으로 판단되어 해석한 결과 그림 6 ~ 그림 8과 같은 그래프를 보였다. 이 경우 산불대책지역만이 그래프가 다른 경향을 보였으며, 강우량이 작을 때 보정계수가 1에 가깝다는 사실을 알 수 있었다. 강우량이 증가함에 따라 산불대책, 산불보존, 산불미발생 지역 모두 보정계수가 0.01~0.1한계의 범위 내에 수렴하는 경향을 보였다.

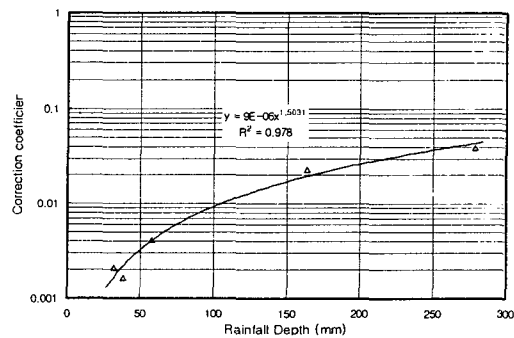


그림 8. 보정계수와 강우량과의 관계(산불미발생)

6. 비교고찰

USLE 모형에서 제시한 피복인자 C는 나지 상태나 교란된 상태의 최악의 경우 C값은 0.9~1.4의 범위를 보였으며, 교란되지 않은 산림지역의 최상의 경우 C값은 0.0001~0.009의 범위를 보였다. 본 연구의 소규모 조사구에 모형을 적용하여 얻은 식생피복도와 피복인자 C의 관계를 나타낸 그림 2을 보면 식생이 10%인 경우 0.4337을 나타내고, 식생이 최대인 100%의 경우 0.0034를 나타내고 있다. 이는 USLE 모형에서 제시한 범위 내에 값을 가지고 있음을 보여준다. 이는 추정된 피복인자 C값은 상당히 신뢰할 만한 값의 범위에 속함을 보여준다. RUSLE모형에서 제시한 C값 추정은 USLE 모형보다 더욱 세밀하게 조사하여 적용할 수 있게 되어 있으나 이는 개인적으로 파악하는 과정에서 오차가 클 수 있으며, 계산 과정 또한 복잡한 것이 특징이다. 이 모형 또한 추정된 C값의 범위를 수용하고 있음을 알 수 있었다. 그림 3과 그림 4에서 보면 피복인자 C값은 식생피복도 뿐만 아니라 식생구조 및 낙엽층의 피복에도 관계가 있음을 알 수 있는데, 이는 피복인자가 식생피복도만의 함수가 아님을 보여주는 것이다. 즉 피복인자를 결정함에 있어 관여될 수 있는 다른 인자들을 세밀하게 파악하여 C값 추정 시 적용한다면 좀더 정확한 C값 추정이 가능할 것이다.

USLE, RUSLE 모형은 퇴적을 반영하지 못하기 때문에 사면 침식이 유역 전체 침식량에 미치는 영향 산정 시 많은 어려움이 따름에도 불구하고 실제 실무에서는 비교적 큰 유역에서 토사유출량을 산정하기 위해 이 모형을 적용한다. 본 연구 결과 모형을 이용하여 얻은 토사침식량은 실측 토사유출량에 비해 상당히 큰 것으로 나타났다. 이는 식생조건이 다른 유역일지라도 면적이 크면 클수록 면적당 토사침식에 비해 토사퇴적이 더 많이 이루어질 것이므로 그 차이는 더욱 증가하게 되는 것이다. 이는 그림 5에서 확인할 수 있었다.

각각의 산불보존, 산불대책, 산불미발생지의 식생피복에 따른 단위면적당 토사유출량이 확연히 차이가 남을 알 수 있었는데, 이는 식생의 분포가 강우에 저항하고, 유출을 저지시키는 역할을 하기 때문이다. 그리고 그림 6, 7, 8에서 보면 강우량이 증가함에 따라 산불대책, 산불보존, 산불미발생 지역의 보정계수는 어느 한계의 범위 내에서 수렴함을 보이는데, 이는 강우량이 증가하면 할수록 강우 낙하에너지에 의한 침식보다는 지표유출에 의한 토사유출의 영향이 커지게 되어 식생의 분포나 지표상태의 상황 등에 크게 관계없이 토사유출을 발생한다는 사실을 시사한다. 강우량뿐만 아니라 보정계수와 관련된 변수들과의 정밀하고 정확한 분석은 USLE, RUSLE모형을 실무에 더욱 용이하게 적용할 수 있는 방안이 될 것이다.

7. 결 론

산불지역이나 벌채지역과 같이 식생이 크게 손상을 입거나, 인위적인 지표교란이 가해지게 되면 강우에 의한 토사유출량은 증가한다. 실질적인 시험결과에 따르면 토사유출량이 산불 발생 전보다 발생 후 토사유출이 크게 증가하였고, 또한 벌채 및 조림과 같은 인위적인 지표 교란은 토사유출을 가중시킨다는 사실을 알 수 있었다. 산지유역에서 지형조건, 토질조건, 강우조건이 비슷한 유역이라 하더라도 식생조건이 상이하게 다르면 토사유출량은 큰 변화를 가져온다. 즉 식생 조건을 어떻게 결정하느냐는 상당히 중요한 과제인 것이다.

본 연구에서는 강우에 의하여 발생하는 토양침식에 대해서 토지이용이 미치는 영향을 예측할 목적으로 개발된 USLE, RUSLE 모형에서의 C값을 식생이 다양한 산지유역의 소규모 조사구 실측 데이터를 사용하여 추정하였으며, C값의 적용범위와 한계성을 검토하였다. 또한 피복인자를 식생조건이 다른 세 시험유역 산불보존, 산불대책, 산불미발생지역에 적용하여 실제 측정된 토사유출량

과 모형을 이용하여 계산된 토사침식량과의 관계를 파악하였다. 그 결과 계산 토사침식량에 비해 실측 토사유출량이 상당히 적은 것으로 나타났다. 모형이 세류간 그리고 세류 침식량을 산정하기 위해 개발되었으므로 유역의 침식량이나 구곡침식, 수로내의 침식 등의 산정에 쓰이는데 무리가 있었으며, 이 기법은 퇴적을 반영하지 못하기 때문에 사면 침식이 유역 전체 침식량에 미치는 영향을 산정하는 효과를 발휘하였다. 그러므로 식생분포가 다양한 모든 산지 유역에 이 모형을 적용할 수 있도록 계산 토사침식량에 대한 실측 토사유출량의 비인 관계 보정계수 Cr과 강우량의 관계를 파악하였다. 위 과정에서 보정계수는 강우량이 증가함에 따라 유역의 식생 및 면적에 관계없이 0.01~0.1범위에 수렴하는 경향을 보였고, 이는 식생이나 지형적 조건이 다양한 산지유역에 USLE모형 적용시 일정한 보정을 행하여 토사유출량을 예측할 수 있다는 사실을 시사한다.

참 고 문 헌

- 국립방재연구소, 江原道 산불地域의 災害의 低減對策 樹立, 연구보고서, pp. 140~222, 2001.11
- 국립방재연구소, 산불로 加重되는 土砂流出量, 山沙汰, 洪水增加 實測 및 對策樹立 研究, 연구보고서, 2000.11
- 신승숙, 박상덕, 심관섭, 이종설, 산불지역 와지의 토사유출 저감효과, 대한토목학회논문초록집, pp. 112, 2001.11
- 박정환, 우효섭, 편종근, 김광일, “토양유실공식의 강우침식도 분포에 관한 연구”, 한국수자원학회 논문집, pp. 603~610, 2000.10
- 건설교통부, 국제수문개발계획, 토사유출량 산정기법의 적용성 분석, 1998.12
- 국립방재연구소, 開發에 따른 土砂流出量 算定에 關한 研究(I), 연구보고서, 1998.4
- 손광익, “해외 토사유출량 산정공식의 국내적용성 검토”, 한국수자원학회논문집, pp. 199~216, 2001.6
- 東正史, 降雨による斜面侵食に關する研究, 愛媛大學, 1998
- 砂防學會, 土砂災害對策-水系砂防 (1, 2), 砂防學講座 第5卷, 山海堂, 1993
- 砂防學會, 斜面の土砂移動現象, 砂防學講座 第3卷, 山海堂, 1992
- Kirkby, M. J., Hillslope Hydrology, Jon Wiley & Sons, 1978
- Haan, C. T., Barfield, B. J. and Hayes, J. C. Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments, Academic Press, pp. 238~310, 1981