

SATEEC, USPED, SHALSTAB을 이용한 충주호 유역 부댐(사방댐) 최적지 선정

Application of the Technique for Determining the Most Appropriate Spot for a Check-dam in Chungju-dam Watershed

저자 장원석, 류지철, 강현우, 김기성, 이철, 김영석, 임경재

(Authors) Won Seok Jang, Jichul Ryu, Hyunwoo Kang, Ki-Sung Kim, Chul Lee, Youngsug Kim, Kyoung Jae Lim

출처 Journal of the Environment 7(1), 2010.12, 19-31 (13 pages)

(Source)

발행**처** 강원대학교 환경연구소

(Publisher) Environmental Research Institute Kangwon National University

URL http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE01797347

APA Style 장원석, 류지철, 강현우, 김기성, 이철, 김영석, 임경재 (2010). SATEEC, USPED, SHALSTAB을 이용한 충주호 유

역 부댐(사방댐) 최적지 선정. Journal of the Environment, 7(1), 19-31.

이용정보 강원대학교

(Accessed) 203.252.82.*** (Accessed) 2017/07/27 09:49 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법 으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

SATEEC, USPED, SHALSTAB을 이용한 충주호 유역 부댐(사방댐) 최적지 선정

장원석, 류지철, 강현우, 김기성, 이 철¹, 김영석², 임경재* 강원대학교 지역건설공학과, ¹포스코 건설 글로벌마케팅실, ²한국건설기술연구원 건설환경연구실

Application of the Technique for Determining the Most Appropriate Spot for a Check-dam in Chungju-dam Watershed

Won Seok Jang, Jichul Ryu, Hyunwoo Kang, Ki-Sung Kim, Chul Lee¹, Youngsug Kim², Kyoung Jae Lim*

Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

Global Marketing Department, Posco E&C

Construction Environment Research Division, Korea Institute of Construction Technology

A check-dam has been known that it is good to manage pollutants and improve water quality in the areas where water flow is slow. However, the selection of the best site able to construct the check-dam is so important to maximize the effect after the construction, and one of the most important qualification to select the most appropriate spot is to estimate the accurate soil erosion including sheet/rill erosion, gully erosion, and landslide. In this study, the various types of soil erosion were estimated by overall consideration of Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC) system, Unit Stream Powerbased Erosion/Deposition (USPED) model and Shallow Landsliding Stability (SHALSTAB) model to select the best site able to construct the check-dam among the 11 subwatersheds in Chungju-dam Watershed. As a result of this study, subwatershed 7 was selected to the most appropriate spot for the check-dam. The result of this study could be a guide to decide on the best site to construct the check-dam, and in order to get more objective and effective data for the check-dam, other various qualifications should be considered in the future study.

Key words: Check-dam, Gully erosion, Landslide, Sheet/rill erosion, SATEEC, SHALSTAB, USPED

서 론

세계적으로 비점오염원에 의한 수질 악화로 효과적 인 수질관리 방안에 대한 요구가 증대되고 있다. 또한 하천, 호소 및 연안 해역과 같은 유속감소 지역에서의 오염물질 관리, 토사 유입방지, 산사태 예방 및 수생태 이 집중되고 있다. 그러나 사방댐 설치에 따른 수질개 선 및 생태복원효과는 다양하기 때문에 최적지 선정 기술을 개발하여 사방댐 적지를 선정하는 것이 그 무 엇보다도 중요하다. 하상구배가 큰 계곡 등에서 자주 일어나는 산사태를 방지하고, 토사가 흘러가는 것을 방 지하기 위해 만든 사방댐은 상류부, 사방댐 본체, 하류 부로 구성되어 있기 때문에 이로 인한 유출 및 토양유

건전성을 확보하기 위하여 부댐(사방댐)에 대한 관심

^{*} Corresponding authors Tel. +82-33-250-6466, E-mail. kjlim@kangwon.ac.kr

실 저감효과, 그리고 생태 복원효과를 기대하기 위해서는 사방댐 설치 지점을 기준으로 하는 유역내 발생 토사량을 정확히 파악하는 것이 선행되어야 한다. 이를 위해서는 먼저 유역내 발생하는 토양유실 및 산사태발생에 관한 정확한 평가가 선행되어야 한다. 유역내발생하는 토양유실로는 면상 침식(sheet erosion), 세류침식(rill erosion), 걸리 침식(gully erosion), 그리고 하천둑침식(stream bank erosion)이 있다. 또한 이렇게 장기간에 걸쳐 발생하는 토양유실 이외에 집중 호우로 인한 산사태에 의한 토석류 발생 등이 있다. 따라서 사방댐 적지 선정 기술을 개발하기 위해서는 먼저 면상, 세류, 걸리, 하천둑 침식과 산사태 발생으로 인한 토양유실에 관한 정확한 분석이 필요하다.

토양유실을 모의하기 위하여 전 세계적으로 많은 컴 퓨터 모형이 개발되어 왔는데, 지난 30여 년 동안 Universal Soil Loss Equation (USLE) 모형이 많이 이용되어 왔으며(Wischmeier and Smith, 1978), 이외에도 Water Erosion Prediction Project (WEPP) (Flanagan and Nearing, 1995), Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold et al., 1998), European Soil Erosion Model (EUROSEM) (Morgan et al., 1998) 등의 모형이 개발되어 이용되어 왔다. 그러나 USLE 및 Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE; Foster et al., 1996) 등과 같은 USLE 기반 을 기반으로 하는 모형들은 유역 단위(Watershed scale) 모형이 아니라 시험포 단위(Field Scale) 모형이며 유역 내 토양유실 및 유사량을 모의하는 데 한계점이 있을 수 있다. 시험포 단위 토양유실 모형을 활용하여 유역 에서의 토양유실을 모의하기에는 유달률을 산정하여 유사량을 평가할 수가 있으며 이 유달률 산정에 관해 많은 연구가 수행된 바 있다. 그러나 이는 유역내 토양 유실에 대한 발생원 및 유사 발생의 공간적 분포 특성 을 고려할 수 없는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하 기 위하여 Lim et al. (2005)은 Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC) system을 개발 하였으며, SATEEC system은 유역내 토양유실의 공간 적 특성을 고려하여 USLE R Factor, USLE K Factor, USLE C Factor, USLE P Factor와 같은 USLE 모형의 입력 자료와 Digital Elevation Model (DEM)만으로 토 양유실량과 유역 최종 유출구에서의 유사량을 평가/분 석할 수 있다.

그러나 SATEEC system은 유역내에서 면상침식 및 세류침식에 의해 유실된 토양이 하류하천으로 얼마나 유입되는지를 모의할 수 있을 뿐, 걸리 혹은 산사태에 의해 발생되는 토양유실을 모의할 수 없는 단점이 있다. 따라서 면상침식이나 세류침식이 지배적인 수계에

대해서는 SATEEC system을 적용할 수 있으나, 걸리 (gully)나 하천둑 침식(stream bank erosion)이 지배적인 곳에서는 SATEEC system이 적용될 수 없다. 따라서 걸리 침식, 산사태 등이 모두 고려되어야 하는 사방댐 최적지 선정에 SATEEC system이 이용된다면, 많은 문제점이 발생할 수 있다.

그리하여 본 연구에서는 사방댐 최적지 선정에 있어 다양한 종류의 토양 침식을 고려하기 위하여 USLE 입력자료만으로 걸리 침식을 포함한 토양유실 산정이 가능한 Unit Stream Power-based Erosion/Deposition (USPED; Mitasova et al., 1996; Mitas and Mitasova, 1998) 모형과 간단한 입력자료로 산사태 발생 지점 예측이 가능한 Shallow Landsliding Stability (SHALSTAB) (Montgomery and Dietrich, 1994) 모형을 연동하여 사방댐 최적지를 선정하는 데 있어 좀 더 다양한 사항을 고려하고자 하였다.

본 론

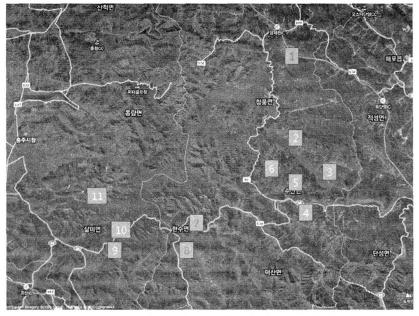
1. 대상유역의 선정

본 연구에서는 충주호 유역 총 11개 지점 중 토양유실로 인한 유사발생이 많을 것으로 예측되는 3개 지점을 선택하여 토양유실의 시공간적 분석을 수행하였다 (Fig. 1). 1번 지점의 경우 유역면적이 30.15 km²이며, 농경지가 유역면적의 약 20.56% 정도 차지하고, 7번 지점의 유역면적은 114.22 km²이며, 농경지가 유역면적의약 15.63%를 차지하며, 8번 지점의 유역면적은 53.85 km²이며, 농경지가 4.12% 가량 차지한다.

2. SATEEC system

본 연구에서는 Universal Soil Loss Equation (USLE) 기반의 Sediment Assesment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC) 시스템을 이용하여 토양유실의 시공 간적 분석을 수행하였다. SATEEC system은 유역내 임의의 지점에서 토양유실방지대책을 수행하였을 경우하천하류에 얼마나 유사발생을 저감시킬 수 있는지를 모의하는 시스템으로 유역단위로 적용할 수 있는 장점이 있다.

또한 개선된 SATEEC system ver. 1.8은 여러 모듈을 탑재하여 그동안 한계점으로 지적되어 오던 지표피복의 시간 변화 및 강우 패턴의 영향을 고려하여 토양유실량을 모의할 수 있으며, 또한 현장 적용성에 대해 지적되어 오던 유달률 산정에 있어 개선된 모듈을 사용함으로써 높은 적용성을 보인 바 있다. SATEEC system



(a) 11 subwatersheds in Chungju-dam watershed



(b) Selected sites able to construct a check-dam (Subwatershed 1, 7, 8)

Fig. 1. The selection of a site able to construct a check-dam in Chungju-dam watershed.

ver. 1.8은 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 USLE 모형의 입력자료 (Rainfall erosivity, Soil erodibility, Slope length and steepness, Crop management, Practice factor)만을 이용하여 유역내 토양유실 및 유사발생을 모의할 수 있는 시스템이다. 이 SATEEC system은 유역면적에 따른 유달률을 산정하여 유역에서 유실된 토양이 얼마만큼 하류로 유달되는지를 모의한다. 유역면적은 USLE 입력자료 중 경사장(L)과 경사도(S) 입력값을 추출하기 위하여 이용된 Digital Elevation Model (DEM) 지형자료를 이용하여 자동으로 추출된다. 이전 버전인 SATEEC system ver. 1.6이 모의 기간 내 단일 강우 인자 값을 사용하여 모의하기 때문에 장기간에 걸친 연평균 토양유실가능 추정치와 유사량을 모의하는 데에 비해, SATEEC system ver. 1.8은 일별 강우 자료값을 강우 인자값으로

사용하고 일 단위 토지이용별 작물별 지표피복 인자 값을 이용하여 월별/연별 토양유실 가능 추정치 및 유사량을 모의하기 때문에 대상 유역의 시간적 강우 패턴 및 지표 피복 패턴을 고려할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 충주댐 유역 현장 조사를 통해 충주호유역의 소유역 중 토양유실이 많이 발생하여 수생태계에 악영향을 미칠 수 있는 1번, 7번 8번 소유역에 대하여 면상, 세류 침식에 의한 토양유실량을 분석하였다.

1) 각 소유역의 입력자료 구축

(1) 강우 인자(Rainfall-runoff factor)

SATEEC system ver. 1.8에는 일단위 강우 자료를 이용하여 강우 인자 값을 산정할 수 있으며 월/연 단위 강우 인자값을 산정하여 모의할 수 있다. 우리나라 강

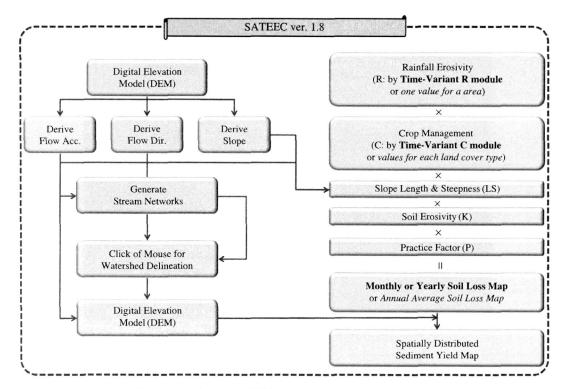


Fig. 2. Overview of SATEEC system ver. 1.8 (Park et al., 2010)

우 인자 R의 계산은 정 등(1983)이 각 지역별로 $8\sim21$ 년 정도의 강우자료를 바탕으로 하여 제시한 식(1), 식(2)를 이용하여 산정한다. 본 연구에서는 충주호 유역내 청풍 지점에서의 일별 강우량 자료(1999 ~2005)를 이용하였다.

월 강수량에 대해,

$$R = 0.0378X^{1.4190} \tag{1}$$

연 강수량에 대해,

$$R = 0.0115Y^{1.4947} \tag{2}$$

여기서 R은 강우강도, X는 각 월 강수량의 합(mm), Y는 각 연 강수량의 합(mm)이다(정 등, 1983).

(2) 토양 인자 (Soil erodibility factor)

K는 토양 인자(soil erodibility factor)는 토양의 고유한 침식성을 정량적으로 표시한 것으로, 토양유실은 토양침식에 끼치는 인자가 동일한 경우 토양 특성의 차이로 인하여 달라진다. 토양 인자는 토양의 물리적, 화학적 특성에 따라 좌우된다. Wischmeier et al. (1978)은 토양에서의 미사(silt)와 극세사(very fine sand)의 함량과 모래, 유기물, 토양구조, 투수성 등의 토양 특성에따라 K 값을 결정하는 데 식(3)을 제안하였다.

$$K = (2.1/100)M^{1.14} \times (10^{-4}) \times (12^{-a}) + 3.25 \times (b^{-2})$$
$$\times 2.5 \times (c^{-3})$$
(3)

여기서 M은 (미사(silt) 함량(%)+극세사(very fine sand) 함량(%))×(100-점토 함량(%))이며, a는 유기물 함량(%), b는 토양 구조 코드(1~4), c는 투수도 등급 (1~6)이다.

Williams (1975)는 위의 공식을 토대로 K값을 정할수 있는 Monograph를 제시하였는데 우리나라 토양에 적용성 검토 결과 타당한 것으로 보고된 바 있다(정등, 1976). 본 연구에서는 MUSLE 공식에서 K값을 구하였다. 적용한 방법은 다음 식(4)와 같다.

$$K = (0.2 + 0.3 \exp(-0.0256 SAN \left(1 - \left(\frac{SIL}{100}\right)\right))$$

$$\times (1.0 - \left(\frac{0.25CLA}{CLA + \exp(3.72 - 2.95C)}\right)$$

$$\times (1.0 - \left(0.7 \frac{SN1}{SN1 + \exp(-5.51 + 22.9SN1)}\right)$$
(4)

여기서 SAN, SIL, CLA는 모래, 실트, 점토 함량(%) 이며, SN1은 1-SAN/100이다.

(3) 작물 피복 인자(Cover and management factor) 식생은 유출수의 유속과 강우의 타격력을 감소시키

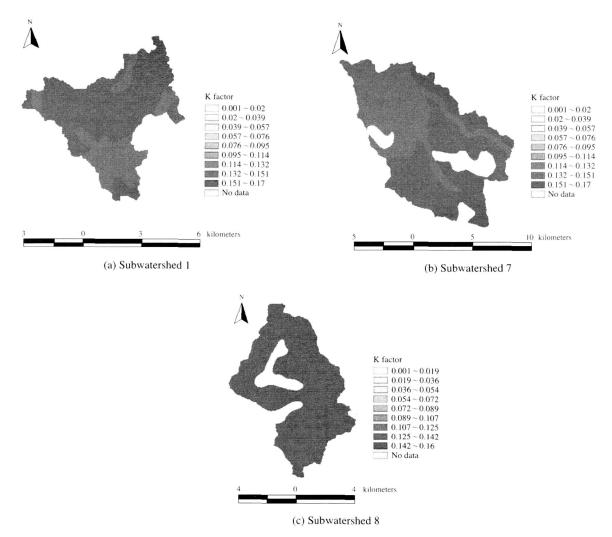


Fig. 3. K factors of SATEEC system.

는 한편, 뿌리에 의한 토양구조의 발달 및 공극률 증가로 강우의 침투율을 증가시킴으로써 토양유실량을 감소시키는 효과를 갖는다(정 등, 1983). SATEEC system ver. 1.6.에서의 식생 피복 인자는 특정한 조건 하에서 식생지역의 토양유실량과 나지의 토양유실량과의 비로나타낸 값으로 정의되므로, 그 값은 나지에서 1이고 식생지역에서는 1 이하로 된다. Table 1은 토지 이용에 따른 C값을 보여주고 있다.

그러나 지표를 피복하고 있는 이 식생은 시간에 따라 다른 조건을 갖기 때문에, 이에 의한 영향을 고려하기 위해서는 기상 등을 비롯한 시간에 따라 변하는 조건에 의한 식생의 상태를 고려하여야 식생에 의한 지표 피복 상태에 따른 합리적인 토양유실 및 유사량을 모의할 수 있다. SATEEC system ver. 1.8에서의 작물 인자는 작물에 따라 Julian-day 별로 구축되어 있는 값을 이용하여 시간에 따라 변하는 값으로 모의한다(Fig. 4).

(4) 경작 방법 인자(Supporting conservation practice factor)

작물 경작 방법 인자는 보전영농시설과 경작방법 등에 의한 토양 침식량의 감소를 설명하는 값이다. 박(1999)은 토지이용과 경사도에 따른 경장 방법 인자를 제안한 바 있다. Table 2, Fig. 5은 토지이용별 작물 경작인자 값을 나타내고 있으며, 밭의 경우 등고선 경작 방식을 택한다는 가정 하에 경사도에 따른 작물 경작인자 값을 나타낸 것이다.

(5) 지형자료(DEM)와 경사도와 경사장 인자(LS)

경사장과 경사도는 USLE에서 경사장 인자(L)와 경사도 인자(S)로 표기되는 지형 인자(LS)로 알려져 있다. 경사장은 유역의 끝지점에서 경사진 지점까지의 거리, 즉 유출구까지의 거리이며, 표준 시험포에서의 길이(22.13 m)의 비로 나타내어진다. 경사도는 표준 시험

포에서의 경사도(9%)와의 비로 나타내어진다. 경사장 과 경사도 인자를 SATEEC은 DEM(Digital Elevation

Table 1. C factors for different land uses (Jeong et al., 1985).

| Land use | | С | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------|--|-----------|-------------------------|-------|
| Fallow/Bared land Paddy field Upland | | 0.34 0.31 | | | | |
| | | | | Grassland | (95 ~ 100% cover) Grass | 0.003 |
| | | | | | Weeds | 0.01 |
| | (80% cover) Grass | 0.01 | | | | |
| | Weeds | 0.04 | | | | |
| | (80% cover) Grass | 0.04 | | | | |
| | Weeds | 0.09 | | | | |
| Forest | (75 ~ 100% cover) | 0.01 | | | | |
| | $(40 \sim 75\% \text{ cover})$ | $0.002 \sim 0.004$ | | | | |
| | $(20 \sim 40\% \text{ cover})$ | $0.003 \sim 0.01$ | | | | |

Model)을 이용하여 Moore et al. (1986a, b)의 방법을 이용하여 계산한다. DEM Fig. 6을 이용하여 LS값을 산정할 때 (식(5)), RUSLE User Guide (Foster et al., 1996)에 따르면 경사장의 실험에 의한 모의 길이는 10.7 m (35 ft)에서 91.4 m (300 ft)이나 자연 상태에서 세류가 일어나기 시작하는 최대 경사장 122 m (400 ft)를 사용할 수도있다.

$$LS = \left(\frac{A}{22.13}\right)^{0.6} \left(\frac{\sin\theta}{0.0896}\right)^{1.3} \tag{5}$$

여기서 A는 유역면적(km²), θ는 경사도(degree)이다.

(6) SATEEC system에서의 유달률

유사량은 보통 총 토양유실에 대한 유사량의 비로 정의되는 유달률을 통해 산정될 수 있으며, 다음 식(6) 과 같이 나타낼 수 있다(Yin et al., 2005).

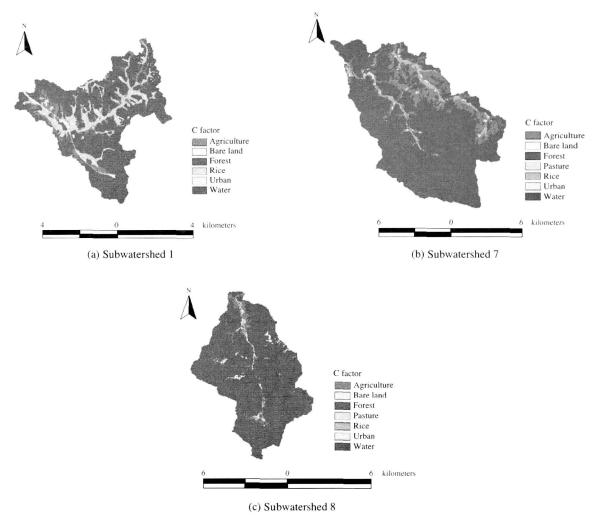


Fig. 4. C factors of SATEEC system.

$$SDR = \frac{S_y}{T} \tag{6}$$

여기서 SDR은 유달률이고, S_y 는 최종 유출구 혹은 임의 지점에서의 유사량이며, T는 유역의 총 토양유실 량이다.

Table 2. P factors for different land uses and slopes.

| Land use | P fa | ctor |
|------------|----------------|----------|
| Paddy land | 0. | 2 |
| | Slope | P factor |
| | 0~2% | 0.60 |
| | $2 \sim 7\%$ | 0.50 |
| 11-1 | $7 \sim 12\%$ | 0.60 |
| Upland | $12 \sim 18\%$ | 0.80 |
| | $18 \sim 24\%$ | 0.90 |
| | $24 \sim 30\%$ | 0.95 |
| | > 30% | 1.00 |

유달률은 유역의 크기 및 형상, 강우 패턴, 직접 유출 량, 첨두 유량, 토지 이용도, 작물, 경사, 토양 입자 등과 같은 유역의 물리적 인자의 영향을 받는다. 이러한 모든 자연 요소를 고려하는 유달률을 식으로 정의한다는 것은 거의 불가능하다. 이에, 몇 가지 인자를 고려한 경험적인 식이 많은 연구자들에 의해 개발되었다(식(7)~(9)). 널리 알려진 것 중 하나가, 유달률과 유역의 크기의 관계로 표현된 SDR 곡선이다(USDA, 1972).

여기서 SDR은 유달률이고, AREA는 유역 면적(km²)이다.

그리고 Williams et al. (1977)에 의해 유역의 평균 경

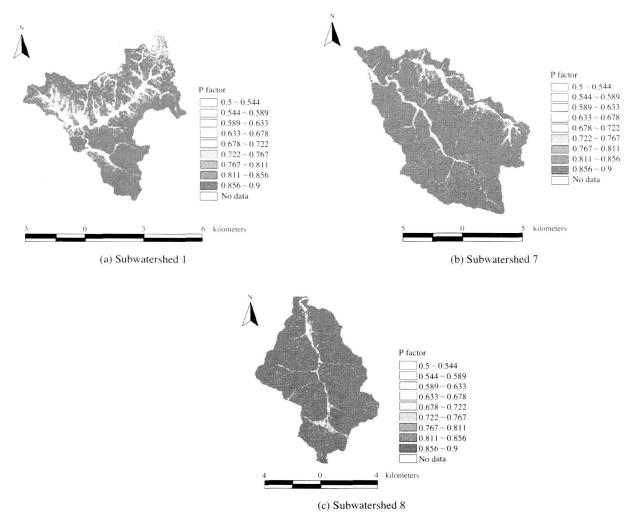


Fig. 5. P factors of SATEEC system.

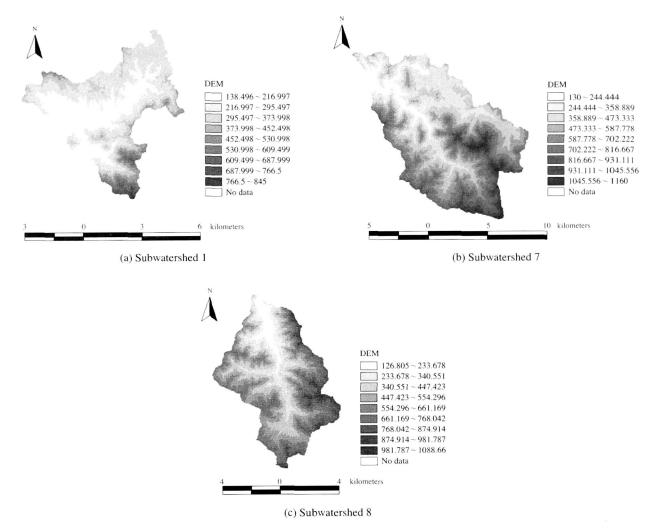


Fig. 6. DEMs of SATEEC system.

사도를 고려하여 유달률을 산정하는 방법이 제안되었다(식(10)).

 $SDR = 0.627SLOPE^{0.403}$ (Williams et al., 1977) (10)

여기서 SDR은 유달률이고, SLOPE는 경사도(degree) 이다.

SATEEC은 이러한 유달률을 이용하여 최종 유출구 나 임의 지점에서의 유사량을 모의할 수 있다.

3. USPED 모형

USPED 모형은 강우 시 유출에 의해 발생되는 토양에 침식과 침식 과정에서 발생하는 토양의 퇴적을 모의하는 모형이다 (Mitasova et al., 1996; Mitas and Mitasova, 1998). 본 연구에서는 걸리에 의한 토양유실량은 USPED 모형을 이용하여 산정하였다. 본 연구의 목표가 사방댐 적지 선정 기법 개발이기 때문에 유역에서의 토

양유실을 평가하는 데 있어서 매우 제한적이지만 비교적 정확성이 검증된 모델링 기법을 활용/개발해야 한다. 유역에서의 걸리 발생을 정확하게 예측하기란 현재기술로는 부족한 상태이며 현재 다양한 연구가 시도되고 있다. 따라서 본 연구에서는 정확한 걸리 발생량을 산정하는 데 한계가 있지만, 상대적인 걸리 발생량 평가에 활용될 수 있는 USPED 모형을 사용하였다. USPED 모형은 USLE/SATEEC 모형의 입력 변수만을 이용하여 걸리를 평가할 수 있기 때문에 본 연구에서 개발하려는지점 선정 기법에 매우 효과적이라 할 수 있다. 본 연구에서 사용된 USPED 모형의 운반능 T는 식(11)과 같이산정될 수 있으며, 이는 USLE 입력 자료만으로 연산이가능하다.

Table 3. Input data of SHALSTAB model.

| | Subwatershed 1 | Subwatershed 7 | Subwatershed 8 |
|---|----------------|----------------|----------------|
| Cohesion | 2500 | 2500 | 2500 |
| Saturated soil density (kg/m ³) | 1800 | 1800 | 1800 |
| Soil depth (m) | $0.1 \sim 2.2$ | $0.1 \sim 2.2$ | $0.1 \sim 2.2$ |
| Hydraulic conductivity (m/day) | 60 | 60 | 60 |
| Internal fraction angle (deg) | $35 \sim 45$ | $35 \sim 45$ | $35 \sim 45$ |
| Accumulation area (km²) | 29.95 | 114.04 | 53.74 |

여기서 T는 유역의 운반능, R, K, C, P는 각각 USLE 의 입력자료를 뜻하고, A는 유역의 면적(km²), m과 n은 토양유실의 종류(면상, 세류 침식)에 의해 결정되는 계수이고, b는 경사도(degree)이다. 면상 침식일 경우 m=n=1이고, 세류 침식일 경우 m=1.6, n=1.3이다.

운반능 T를 기본적인 계수로 하고 있는 USPED의 공식은 식(12)와 같다.

$$USPED = \frac{d(T\cos\alpha)}{dx} + \frac{d(T\sin\alpha)}{dy}$$
 (12)

(Mitasova et al., 1996; Mitas and Mitasova, 1998)

여기서 T는 유역의 운반능이고, α는 지형의 각도 (degree)이다.

걸리 침식을 고려한 유역내 토양유실량 모의를 위하여 현재 SATEEC System에 탑재되어 있는 USPED를 사용하였으며, 유역내 각 지점에서 침식(- 값)과 퇴적(+ 값)을 고려하여 유역내에서 면상 침식(Sheet Erosion)과 걸리 침식(Gully Erosion)을 고려하여 토양유실량을 산정한다. USPED 모형은 USLE의 입력자료(R, K, C, P, LS factor)만으로 걸리 침식을 포함한 토양유실 모의가가능하다.

4. SHALSTAB 모형

SHALSTAB (Montgomery and Dietrich, 1994) 모형은 간단한 수치해석 모델로 토양층 붕괴를 예측할 수 있 는 모델이다. SHASTAB은 안정성평가를 위해 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 기준으로 한 무한사면 평면식 을 사용하고 Darcy's Law를 이용하여 토양층 내에서의 포화 흐름을 추정한다(식(13)).

$$\tau = C + (\sigma - u) \tan \phi \tag{13}$$

식(13)에서 τ는 저항강도, C는 soil cohesion, σ는 Normal stress, u는 공극수압 그리고 φ는 내부 마찰각이다. 식(13)의 점착력(Cohesion)을 없애면 다음의 간단한 식으로 쓸 수 있다.

 $\rho_s gz \cos\theta \sin\theta = [\rho_s gz \cos^2\theta - \rho_w gh \cos^2\theta] \tan\phi$

$$\Rightarrow \frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \tag{14}$$

식 (14)에서 z는 토양의 깊이, h는 파괴면 위의 수면 이고, ρ_s 는 토양의 bulk density이며 ρ_w 는 물의 bulk density, θ 는 사면경사 그리고 g는 중력가속도이다.

여기에, 토층 내 지하수의 깊이(m)인 Dw를 구하기 위 TL

nsmissivity), L은 흐름길이(flux length), I는 수리경사 (hydraulic head gradient), A는 단면적(cross sectional area) 를 적용시키면 qa=k_shcosθsinθb로 표현할 수 있으며 식(14)와 커플링을 통해 식(15)로 표현 가능하다.

$$\frac{q}{T} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \frac{b}{a} \sin \theta \tag{15}$$

결과물은 $\log q/T$ 인 hydrological 비율로 q는 토양층 내에 침투된 물의 양이고, T는 토양 내에서 흐르는 물이다. 또한 drainage area는 a, the outflow boundary length는 b이며 사면각 θ 는 수치표고모형에서 사용된 numerical surface에 의해 정의되어진다. SHALSTAB 모형의 soil bulk density는 ρ_s , 내부마찰각은 ϕ , 투수량은 T 그리고 유효강우 q가 필요하다. 항상 투수량은 유효강우보다 크기 때문에 q/T의 비율이 낮아서 $\log q/T$ 를 사용한다(과학기술부, 2007).

SHALSTAB 모형은 DEM (Digital Elevation Model)을 기본으로 하여 수치계산을 하게 된다. 즉 입력되는 DEM의 정확도에 따라 사면의 방향 및 흐름을 계산하게 되는데 본 연구에서는 $10\,\mathrm{m}\times10\,\mathrm{m}$ 의 격자를 만들어분석에 사용하였다. 그리고 전국 개략 토양도를 근거로 각 유역의 대표 Cohesion, Saturated soil density (kg/m³), Soil depth (m), Hydraulic conductivity (m/day), Internal Friction angle (deg), Terrain slope (deg), Accumulation Area (km²)를 산정하여 입력 자료로 사용하였으며 그 값은 아래 Table 3와 같다. Terrain slope는 $10\,\mathrm{m}\times10\,\mathrm{m}$ 의 격자의 DEM을 통하여 계산되었다.

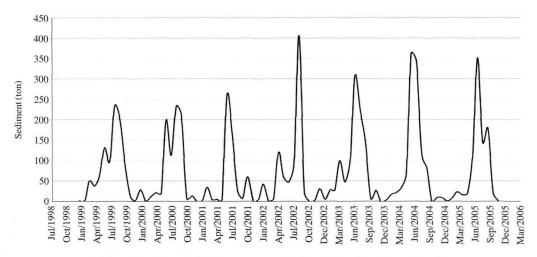


Fig. 7. Monthly sediment yield from subwatershed 1 calculated by SATEEC system.

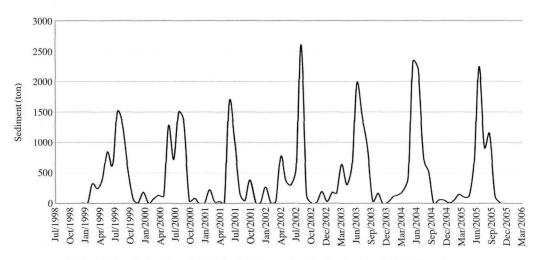


Fig. 8. Monthly sediment yield from subwatershed 7 calculated by SATEEC system.

결과 및 토의

1. SATEEC system을 이용한 부유 유사 발생량 모의 결과

1) 소유역 1의 모의 결과

소유역 1지점의 유역 면적은 30.15 km²이며, 산림이 22.40 km² (74.30%), 밭지역이 2.36 km² (7.82%), 논이 3.84 km² (12.74%), 나지가 0.29 km² (0.98%), 주거지역이 1.18 km² (3.91%), 수역이 0.07 km² (0.25%)를 차지하고 있다. 대부분의 유역을 산림이 차지하고 있기는 하나 농경지의 대부분이 하천과 인접하고 있기 때문에, 농경지에서 발생한 부유 유사 및 오염 물질의 하천으로의 유입이 많이 일어날 것으로 생각된다. Fig. 7에서 보이는 바와 같이 모의 기간 중 월별 평균 부유 유사량은

73.35 ton이나 여름철(7월, 8월, 9월) 평균 부유 유사량은 175.56 ton으로 분석되었으며, 또한 여름철에 발생하는 부유 유사량은 연중 발생하는 부유 유사량 중 연평균 60.56%를 차지하고 있다. 이는 여름철에 집중하여 발생하는 강우에 의한 부유 유사량을 저감할 수 있는 대책이 필요할 것으로 사료된다.

2) 소유역 7의 모의 결과

소유역 7지점의 유역 면적은 114.22 km²이며, 산림이 93.92 km² (82.22%), 밭지역이 14.34 km² (12.55%), 논이 3.51 km² (3.08%), 초지가 0.16 km² (0.14%), 나지가 0.08 km² (0.07%), 주거지역이 1.33 km² (1.16%), 수역이 0.88 km² (0.77%)를 차지하고 있다. 대부분의 유역을 산림이 차지하고 있기는 하나 농경지의 대부분이 하천과 인접하고 있기 때문에, 농경지에서 발생한 부유 유사 및 오

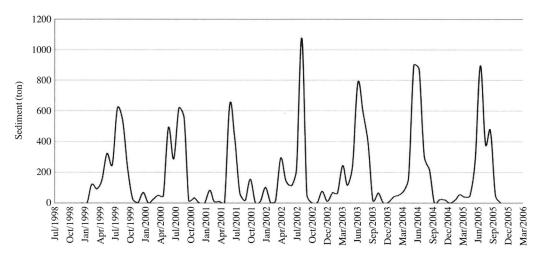


Fig. 9. Monthly sediment yield from subwatershed 8 calculated by SATEEC system.

Table 4. Comparison of soil losses from subwatershed 1, 7, and 8 calculated by USPED model.

| | Subwatershed 1 | Subwatershed 7 | Subwatershed 8 |
|---|----------------|----------------|----------------|
| Area (km²) | 29.95 | 114.04 | 53.74 |
| Soil loss (ton/yr) | 11,065.44 | 51,663.71 | 23,952.48 |
| Soil loss per unit area considering gully erosion (ton/ha/yr) | 3.68 | 4.52 | 4.46 |

염 물질의 하천으로의 유입이 많이 일어날 것으로 생각된다. Fig. 8에서 보이는 바와 같이 모의 기간 중 월 별 평균 부유 유사량은 470.56 ton이나 여름철(7월, 8월, 9월) 평균 부유 유사량은 1125.81 ton으로 분석되었으며, 또한 여름철에 발생하는 부유 유사량은 연중 발생하는 부유 유사량 중 연평균 60.53%를 차지하고 있다.이는 여름철에 집중하여 발생하는 강우에 의한 부유유사량을 저감할 수 있는 대책이 필요할 것으로 사료된다.

3) 소유역 8의 모의 결과

소유역 8지점의 유역 면적은 53.85 km²이며, 산림이 50.24 km² (93.30%), 밭지역이 1.86 km² (3.46%), 논이 0.35 km² (0.66%), 초지가 0.12 km² (0.21%), 나지가 0.71 km² (1.32%), 주거지역이 0.45 km² (0.83%), 수역이 0.11 km² (0.21%)를 차지하고 있다. 대부분의 유역을 산림이 차지하고 있기는 하나 농경지의 대부분이 하천과 인접하고 있기 때문에, 농경지에서 발생한 부유 유사 및 오염 물질의 하천으로의 유입이 많이 일어날 것으로 생각된다. Fig. 9에서 보이는 바와 같이 모의 기간 중 월별 평균 부유 유사량은 188.39 ton이나 여름철(7월, 8월, 9월) 평균 부유 유사량은 459.63 ton으로 분석되었으며, 또한 여름철에 발생하는 부유 유사량은 연중 발생하는 부유 유사량 중 연평균 61.73%를 차지하고 있

다. 이는 여름철에 집중하여 발생하는 강우에 의한 부 유 유사량을 저감할 수 있는 대책이 필요할 것으로 사 료된다.

2. USPED 모형을 이용한 토양유실량 모의 결과

강우 인자(USLE R Factor) 산정을 위해 1999년 2007 년 동안의 유역내 청풍 강우 관측소의 일별 강우 자료 를 사용하여 식(2)에 의해 산정하였다. 유역내에서 전 체적으로 작은 양의 토양 침식이 발생할 가능성이 있 으며, 하천의 형상을 따라 유역내 다른 지점보다 심각 한 토양유실(걸리 침식)이 발생할 가능성이 있는 것으 로 보인다. 충주호 1번 소유역에 대한 면상 및 걸리 침 식에 의해 발생할 수 있는 토양유실량은 유역 전체에 대해 11,065.44 ton/year로 분석되었으며 이는 단위면적 당 3.68 ton/ha/year인 것으로 나타났다. 충주호 7번 소 유역에 대한 면상 및 걸리 침식에 의해 발생할 수 있 는 토양유실량은 유역 전체에 대해 51,663.71 ton/yr로 분석되었으며 이는 단위면적당 4.52 ton/ha/yr인 것으로 나타났다. 충주호 8번 소유역에 대한 면상 및 걸리 침 식에 의해 발생할 수 있는 토양유실량은 유역 전체에 대해 23,952.48 ton/yr로 분석되었으며 이는 단위면적당 4.46 ton/ha/yr인 것으로 나타났다(Table 4).

Table 4에서 보이는 바와 같이 7번 소유역이 유역내

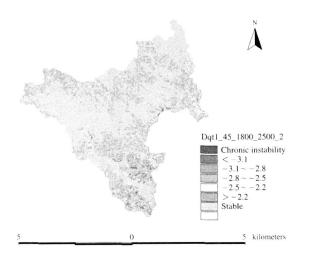


Fig. 10. Landslide possibility of subwatershed 1 estimated by SHALSTAB model.

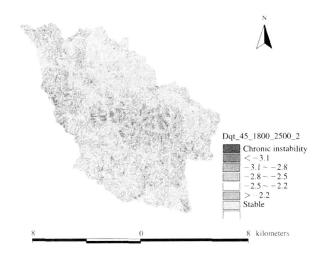


Fig. 11. Landslide possibility of subwatershed 7 estimated by SHALSTAB model.

면상 및 걸리 침식에 의한 발생 가능한 토양유실량이 가장 심각한 것으로 분석되었다. 또한 이는 단위 면적 당 면상 및 걸리 침식에 의한 발생 가능한 토양유실량 을 비교하였을 때도 동일한 결론을 내릴 수 있다.

3. SHALSTAB 모형을 이용한 산사태 모의 결과

충주호 1, 7, 8번 유역에서의 SHALSTAB 모형을 이용하여 산사태 모의 비교 결과 Figs. 10, 11, 12와 같이산정되었다. 1, 7, 8번 유역의 경우 사면의 경사가 큰계곡을 따라 붕괴의 위험성이 크게 보였다. 또한 1번유역의 경우 7번, 8번 유역에 비해서 산사태에 대해 안정적인 지역이 많은 것으로 나타났다.

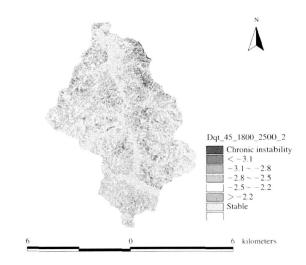


Fig. 12. Landslide possibility of subwatershed 8 estimated by SHALSTAB model.

결 론

본 연구에서는 면상, 세류 침식뿐만 아니라 걸리 침식, 산사태 발생 가능 지점까지 고려하여 유역내 발생가능한 토양유실량이 가장 심각한 소유역 즉, SATEEC system, USPED, SHALSTAB을 이용하여 산정한 모의결과를 수치화하여 가장 수치가 높은 소유역을 사방댐 설치 최적지로 선정하고자 하였다. 그리하여 충주호 1번, 7번, 8번 유역에 SATEEC system, USPED, SHALSTAB 모형을 각각 적용하였으며, 적용 결과 7번 유역이 토양유실 발생에 가장 심각한 것으로 나타나 사방댐 설치최적지로 선정되었다. 모델을 이용한 토양유실량 산정은 실측 자료와의 검보정 작업을 통하여 검증되어야하지만, 본 연구에서는 장기간의 모니터링 자료의 부족으로 인하여 모형의 보정 및 검정 작업이 이루어지지 못했다.

본 연구의 결과는 사방댐 최적지를 선정하는 하나의 기준이 될 수 있지만, 사방댐의 최적지 선정은 본 연구의 결과 이외에도 사방댐 설치 지역의 지형분석, 생태호의 면적, 생태호의 생태 환경 등 다른 여러 가지 사항이 통합적으로 고려되어야만 사방댐 설치가 하천 및호소의 오염물질 관리 및 수생태 건전성 확보에 좀 더크게 기여할 수 있을 것이다. 따라서 차후 연구에서는 실측 자료와의 비교를 통한 보정 및 검정 작업뿐만 아니라 좀 더 다양한 사방댐 설치 조건 및 분석을 통해서 향후 더욱 객관적인 사방댐 최적지 선정이 이루어지도록 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project(과제번호: EW32-07-10, 부댐(생태호) 조성기술 및 생태복원 기술 개발)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 과학기술부. 2007. 지질재해 피해평가기술 및 대응기술 실 용화사업. GP-2007-018-2007(1). 한국지질자원연구원.
- 박철수. 1999. 율문천 소유역에서 토지이용에 따른 불특정 오염 Monitoring. 강원대학교 대학원 석사학위논문.
- 정영상, 신재성, 신용화. 1976. 경사지 토양의 침식인자에 관하여. 한국토양비료학회지 9(2): 107-113.
- 정필균, 고문환, 엄기태. 1983. 토양유실량 예측을 위한 작부 인자 검토. 한국토양비료학회지 16(2): 112-118.
- Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah and J. R. Williams.
 1998. Large are hydrologic modeling and assessment part
 I: model development. Journal of American Water Resources Association 34(1): 73-89.
- Boyce, R. C. 1975. Sediment routing with sediment delivery ratios. *In* Present and Prospective Technology for ARS, USDA, Washington, D. C.
- Flanagan, D. C. and M. A. Nearing. 1995. USDA water erosion prediction project: hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN 47907-1194.
- Foster, G. R., K. G. Renard, D. C. Yoder, D. K. McCool and G. A. Weesies. 1996. RUSLE User's Guide, Soil and Water Conservation Society, Ankey, IA 173.
- Lim, K. J., M. Sagong, B. A. Engel, T. Zhenxu, J. D. Choi and K. S. Kim. 2005. GIS-based sediment assessment tool. Catena 64: 61-80.
- Mitas, L. and H. Mitasova. 1998. Distributed erosion modeling for effective erosion prevention. Water Resources Research 34(3): 505-516.
- Mitasova, H., J. Hofierka, M. Zlocha and L. R. Iverson. 1996.

- Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. Int. Journal of Geographical Information Science 10(5): 629-641. (reply to a comment to this paper appears in 1997 in Int. Journal of Geographical Information Science, 11(6)).
- Montgomery, D. R. and W. E. Dietrich. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow land-sliding. Water Resources Research 30: 1153-1171.
- Moore, I. and G. Burch. 1986a. Physical basis of the lengthslope factor in the universal soil loss equation. Soil Science Society of America Journal 50: 1294-1298.
- Moore, I. and G. Burch. 1986b. Modeling erosion and deposition: topographic effects. Transaction of the ASAE 29(6): 1624-1640.
- Morgan, R. P. C., J. N. Quinton, R. E. Smith, G. Govers, J. W. A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci, D. Torri and M. E. Styczen. 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catachments. Earth Surface Processes and Landforms 23: 527-544.
- USDA. 1972. Sediment Sources, Yields, and Delivery Ratios. National Engineering Handbook, Section 3 Sedimentation.
- Vanoni, V. A. 1975. Sedimentation Engineering, Manual and Report No. 54. American Society of Civil Engineers, New York, N. Y.
- Williams, J. R. 1975. Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. Proceedings of the sediment-Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi.
- Williams, J. R. and H. D. Berndt. 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Transaction of the ASAE 20: 1100-1104.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A Guide to Conservation Planning. The USDA Agricultural Handbook No. 537.
- Yin, Z., S. Walcott, B. Kaplan, J. Cao, W. Lin, M. Chen, D. Liu and Y. Ning. 2005. An analysis of the relationship between spatial patterns of water quality and urban development in Shanghai, China. Computers. Environment and Urban Systems 29: 197-221.