

GIS를 이용한 댐 저수지의 흙탕물 발생 가능성 비교 평가

이근상¹ · 최연웅^{2*} · 박진혁³

Comparative Evaluation of Muddy Water Occurrence Possibility in Dam Reservoir Using GIS

Geun-Sang LEE¹ · Yun-Woong CHOI^{2*} · Jin-Hyeog PARK³

요 약

본 연구에서는 GIS 기반 토사유실모델과 유사전달률 그리고 유효저수용량을 고려하여 댐 저수지별 흙탕물 발생 가능성을 분석하였다. 이를 위해 DEM, 토양도, 토지피복도 등의 공간자료를 기반으로 RUSLE 모델의 입력인자를 평가하여 유역대책 수립시 필요한 각 유역별 취약인자를 분석하였으며, 고령지발 특성을 고려한 토사유실량 평가를 통해 강우시 유역내 토사발생 잠재성을 분석하였다. 또한 유역면적을 고려한 유사전달률을 통해 유역별 토사유출량을 계산한 결과 충주댐과 소양강댐이 가장 높은 값을 나타내었으며, 유효저수용량을 고려한 유사농도 분석결과에서는 임하댐과 충주댐이 각각 0.791 kg/m³/yr와 0.526 kg/m³/yr로 가장 높게 나타났다. 특히 임하댐의 토사유출량은 소양강댐유역에 비해 약 2.36배 낮게 나타났으나 임하댐 저수지의 유효저수용량이 소양강댐에 비해 약 4.48배 작아 유사농도는 오히려 임하댐 저수지가 1.90배 높게 분석되었다. 본 연구에서는 10년 평균 강우사상을 이용하여 유사농도를 계산하였으며, 이를 통해 각 유역별 토양, 지형, 식생, 경작상태 그리고 유효저수용량 측면을 검토할 수 있었다. 따라서 이러한 정량화된 유사농도 자료들은 저수지의 고탁수 발생 잠재성을 평가할 수 있고 저수지 관리를 위한 효과적인 도구로도 활용될 수 있으리라 판단된다.

주요어 : GIS, 유사농도, 토사유실, 유역대책

ABSTRACT

The muddy water occurrence possibility of reservoir were analyzed by considering GIS based soil erosion model, sediment delivery ratio and effective reservoir capacity. For the purpose, the weakness factors for the establishment of countermeasures of

2011년 1월 19일 접수 Received on January 19, 2011 / 2011년 2월 24일 수정 Revised on February 24, 2011 / 2011년 3월 17일 심사완료 Accepted on March 17, 2011

1 전주비전대학 지적부동산과 Dept. of Cadastre and Real State, Vision University of Jeonju

2 조선이공대학 토목건설과 Dept. of Civil Construction Engineering, Chosun University of Science & Technology

3 한국수자원공사 Kwater연구원 K-water Institute, Kwater

* 연락처자 E-mail : ywchoi@cst.ac.kr

basin were analyzed by evaluating input factors of RUSLE model based on spatial data such as DEM, soil map, landcover map and so on. The potential of soil erosion was estimated considering highland upland. The sediment yields of Chungju-Dam and Soyanggang-Dam showed the highest result in sediment yield using sediment delivery ratio with considering basin area. The sediment concentration of Imha-Dam and Chungju-Dam showed the highest value as 0.791 kg/m³/yr and 0.526 kg/m³/yr respectively in sediment concentration with considering effective reservoir capacity. Especially, sediment yield of Imha-Dam was about 2.36 times lower than Soyanggang-Dam, but the sediment concentration was 1.90 times higher preferably, because the effective reservoir capacity of Imha-Dam was about 4.48 times lower. This study calculated sediment concentration using the 10 years mean rainfall event and could consider the aspects of soil, terrain, landcover, cultivation condition and effective reservoir capacity of each basin effectively through the results. Therefore, these quantitative sediment concentration data could be used to estimate the potential of high density turbid water for reservoir and applied with effective tools for the management of reservoir.

KEYWORDS : GIS, Sediment Concentration, Soil Erosion, Countermeasures of Basin

서 론

우리나라는 여름철 집중호우로 인한 수재해 발생 가능성이 매우 높은 나라로서, 특히 댐 유역에서 유입되는 토사는 하천의 통수능력을 저하시키고 댐 저수지에 다량의 유사가 유입되어 댐저수용량 감소 및 흙탕물 발생으로 많은 문제를 야기하고 있다. 특히 고탁질의 흙탕물은 댐 저수지를 취수원으로 하는 정수장의 정수처리 능력을 크게 악화시키는 물론, 혼탁한 수질문제로 인한 저수지 양식 산란장 피해 및 관광객 감소는 지역사회의 재원 부분에도 큰 영향을 주고 있다. 또한 저수지 하류 지역 역시 댐에서 방류되는 고탁수로 인한 지역주민들의 심미적인 영향 및 하천의 생태학적 측면에서도 부정적인 시각을 보이고 있다.

이러한 흙탕물 발생의 원인 및 대책을 수립하기 위한 사업들이 2004년부터 추진되고 있다. 먼저 2002년 태풍 루사 및 2003년 태풍 매미에 의한 집중강우로 최고탁도 1,221 NTU가 발생한 임호호유역의 흙탕물 저감을

위해 2003년 3월 “임호호유역 수질보전대책 협의회”가 구성되어 임호호 탁수원인조사 및 저감대책 관련 연구를 수행하였다. 아울러 한국수자원공사(2004)는 “임하댐탁수저감방안 수립” 용역을 수행하여 임하호 수질 및 탁수조사, 부유물 입도 및 분포특성 분석 등을 토대로 탁수저감대책을 수립한 바 있으며 이를 기초로 2004년 12월 국무조정실 등의 관계부처 주관으로 임하댐 탁수대책을 확정하여, 2005년부터 영양군, 청송군 그리고 안동시를 대상으로 받기반 정비, 소하천 정비, 고랭지 비점오염원 저감 그리고 사방댐 건설 등의 사업이 추진되고 있다. 또한 강우시 일정 탁수가 관측되고 있는 소양호, 충주호, 대청호 그리고 안동호 유역에 대한 탁수저감 연구사업을 2005년도에 실시하여 소양호유역에 대해서는 약 4800억원의 예산을 투입하여 대책을 시행중에 있으며, 2008년부터 2009년까지는 국토해양부 주관으로 전국 다목적댐을 대상으로 “수계단위 탁수예방 기본계획 수립 용역”을 수행하여 탁수발생에 기여하는 토사유출 원인지역 파악 및 기후, 환경, 하천수리, 저수

지 수질모델링 등과 같은 다양한 기법을 통해 하천 및 저수지에 대한 탁수영향 평가 및 탁수저감을 위한 업무 메뉴얼을 제작하였다(국토해양부·한국수자원공사, 2009).

국내에 다양한 공간정보 구축사업이 안정적으로 접어들면서 토사유출 평가 연구도 과거에 비해 보다 정량화된 기법들이 적용되고 있으며, 이를 통해 유역 및 저수지 탁수 및 퇴사관리를 위한 체계적인 의사결정이 가능하게 되었다. 공간정보 및 원격탐사 자료를 이용하여 유역내 토사유출 및 토양침식을 평가한 연구로는 강상혁(2008), 우충식 등(2008), 서정일 등(2010), 신승숙 등(2008)이 있다. 특히 집중호우에 의한 토사유출이 고탁수 및 흙탕물 발생에 미치는 영향을 평가한 연구로서, 이근상과 조기성(2004)은 임하호 탁수의 원인이 되는 토사유출량을 52개 주요하천별로 분석하여 임하호 탁수저감을 위한 의사결정자료로 제공하였으며, 이재일 등(2009)은 대청댐을 대상으로 댐의 배수조작에 따른 저수지내 탁수변화를 모델링하였다. 또한 Lee *et al.*(2010)은 공간정보와 지질조사 특성자료를 기반으로 AHP 기법을 도입하여 사연, 대곡, 광동, 임하댐의 토사유출 및 고탁수 발생 가능성을 분석하였다.

본 연구에서는 강우시 발생하는 저수지 흙탕물 발생의 주요 인자인 유역내 유사발생량을 분석하기 한국수자원공사에서 관리하고 있는 대표적인 다목적댐 10개를 선정하여 공간정보 기반의 토사유출모델링을 수행하였으며, 산정된 연단위의 토사유출량으로부터 유사전달률(SDR; Sediment Delivery Ratio)을 고려하여 토사유출량을 평가하였다. 또한 토사유출량을 저수지의 유효저수량 자료로 나누어 유사농도를 산정함으로써, 각 다목적댐 저수지별 흙탕물 발생 가능성을 비교 평가하였다.

이론적 고찰

강우발생에 따른 토사유출은 강우강도와 그 지속시간에 따라 다양한 형태로 나타난다. 토

사유출의 개념은 토립자가 분리 이탈되는 잠재량으로서 하천으로 유입되는 토사유출량과는 구분되어진다. 토사유출은 집중강우에 의해 유발되지만 농경활동, 개간 및 벌목 등 인간활동으로 인해 발생하고 있는 토사유출문제가 유역 및 농업지역의 환경보전측면에서 더 심각한 상황에 이르고 있다. 따라서 토사유출이 높은 지역에 대한 보존대책인 BMP(Best Management Plan)가 중요하게 대두되고 있으며, 특히 강원도 지역을 중심으로 시행되고 있는 고랭지밭 농경지에 대한 다양한 작물별 혹은 경작형태별 토사유출 특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(이근상, 2007; 전용익 등, 2009; 최용훈 등, 2009; 현근우 등, 2010).

저수지로 유입되는 유사농도를 계산하기 위해서는 유역내 토사유출량을 계산한 후 유사전달률을 반영한 토사유출량을 평가해야 하며, 이러한 토사유출량은 저수지를 중심으로 한 유역측면에서 보면 유사량에 해당되며 여기에 저수지의 유효저수량을 고려해주면 유사농도로 환산된다. 토사유출량은 주로 농경지를 중심으로 발생하기 때문에 일반적으로 적용되고 있는 범용토양손실공식인 USLE(Universal Soil Loss Equation)의 경우 농경지를 대상으로 실험한 식들이 주로 이용되었다. 그러나 댐 저수지로 유입되는 퇴사나 고탁수에 대한 관심이 높아지면서 산간지를 비롯한 다양한 식생들이 분포하는 댐 유역차원의 식들이 개발되고 있으며, 특히 다양한 공간정보가 구축되면서 보다 정확하고 정량적인 자료 기반의 물리적 개념이 고려된 기법들이 연구되어 활용되고 있다.

RUSLE 모델은 기존의 농업지역에 일반적으로 적용했던 USLE 모델을 유역에 적용하기 위해 Renard *et al.*(1991)에 의해 개발된 모델로서 다양한 실험관측을 통해 각 인자들의 식들이 개선되고 있다. RUSLE 모델은 강우침식인자(R), 토양침식인자(K), 지형인자(LS), 식생피복인자(C), 경작인자(P) 그리고 토사유출량(A)로 구성되어 있다.

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

먼저, 강우침식인자는 강우량과 강우강도에 영향을 받는데, 강우량보다는 강우강도가 강우침식인자에 더 큰 영향을 미치며 일정 강우강도 이하에서는 상대적으로 비침식성 결과를 보이는 것으로 알려져 있다(Hudson, 1977). 강우침식인자는 모의 기간동안 강우에너지의 합과 30분 최대 강우강도의 곱으로 나타내며 강우에너지, E는 식 (2)로 표현된다(정필균 등, 1983).

$$E = 210 + 89 \log_{10} X \quad (2)$$

여기서 E는 주어진 강우강도 X에서의 운동에너지(mt/ha/cm), X는 강우강도(cm/hr)이다. 식 (2)를 에너지 단위로 환산하기 위해 강우량을 곱한 후 호우사상에 대해 구간별로 계산하여 식(3)을 이용하면 특정 호우사상에 대한 R값을 구할 수 있다.

$$R = \frac{(\sum E)I_{30} \max}{100} \quad (3)$$

여기서, R은 강우침식지수(J/m²)이며, I₃₀max는 30분 지속 최대 강우강도(cm/hr)이다.

토양침식인자는 토사유실에 영향을 주는 토양의 고유한 특성을 설명하는 인자로서, 토양층의 미사, 모래함량, 토양구조, 유기물함량 및 투수성 등과 관련되어진다. 특히 토양침식인자는 토양의 표토부분을 구성하는 토양의 입경분포에 가장 큰 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 표토에 대한 입경분포특성을 효과적으로 반영할 수 있는 Erickson(1997)의 삼각형 도표방법을 이용하여 토양침식인자를 인덱스화 하였다.

침식사면의 길이인자는 강우시 물에 흐름이 많아지는 지형에 더 많은 에너지가 전달된다는 개념을 반영한 인자로서, 식 (4)와 같이 물의 다중흐름 알고리즘이 포함되어 있는 Desmet and Govers(1996) 식을 GIS 상에

서 구현하였다.

$$L_{ij} = \frac{(A_{ij-jn} + D^2)^{m+1} - A_{ij-jn}^{m+1}}{D^{m+2} \times x_{ij}^m \times 22.13^m} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{(\sin\theta/0.0896)}{(2.96 \times \sin^{0.79}\theta + 0.56)}, \quad m = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

L_{ij} 는 격자에 대한 침식사면의 길이인자이며 A_{ij-jn} 는 격자에 유입되는 상류 기여면적이다. 또한 D 는 격자크기이고 m 은 침식사면 길이의 멱지수이고, θ 는 경사이며, x_{ij} 는 흐름 방향에 직교하는 등고선 길이로서 $(|\sin\alpha_{ij}| + |\cos\alpha_{ij}|)$ 로서 표시가 가능하다. 그리고 α_{ij} 는 격자방향이다.

사면의 경사인자는 토양침식에 대한 경사의 영향을 나타내는 인자로서 침식사면의 길이인자보다 더 민감한 특성을 보인다. 본 연구에서는 Nearing(1997)이 제안한 식 (5)를 활용하였다.

$$S = -1.5 + \frac{17}{1 + \exp(2.3 - 6.1 \sin\theta)} \quad (5)$$

여기서, θ 는 경사이다.

지표를 구성하는 식생의 종류 및 성장상태는 강우에너지를 차단하는 중요한 보호요소가 된다. 이러한 피복의 다양한 특성을 반영하기 위해 미국농무성 기준의 토지피복인자를 적용하였다(박경훈, 2003). RUSLE 모델은 분석 시기에 해당되는 식생의 성장상태까지를 고려해야 되나 본 연구에서는 자료수집의 어려움으로 인해 토지피복종류만을 고려하여 식생피복인자를 평가하였다.

토사유실 평가에서 주목할 점은 RUSLE 모델의 입력인자가 유역마다 가지고 있는 모든 특징들을 반영하기에는 한계를 갖고 있다는 것이다. 따라서 각 유역별로 가지고 있는 특징들을 파악하여 분석가가 적절히 반영하는 것이 매우 중요하며, 이러한 점에서 토사유실 평가에서는 고령지밭이 가지는 공간적 범위와

토사발생 민감도를 파악하여 적용해야 한다. 고랭지농업은 해발 400m 이상의 고지에서 이루어지는 농업으로서 해발 400~600m를 준고랭지, 600m 이상을 완전고랭지로 분류된다. 우리나라의 고랭지 논과 밭의 경지면적은 73,971ha이며, 이중 강원도는 36,941ha로서 전국고랭지 면적의 50%를 차지하고 있다 (한국농촌경제연구원, 2005).

고랭지밭은 일반밭과 비교하여 토사유실 발생시 식생피복인자가 크게 악화되는 특징을 갖는다. 박철수 등(2005)은 소양호유역에 위치하고 있는 강원도 홍천군 자운리의 토지이용자료를 분석하여 등고선, 상하경, 사경제배 방식의 영농형태별 분포를 제시하였으며, 고랭지농업연구소에서는 고랭지 경사지밭의 토양유실량 산정을 위한 적정모형 연구를 통해 강원도 고랭지밭의 영농형태별 식생피복인자를 제시하였다. 본 연구에서는 박철수 등(2005)의 연구에서 제시되어 있는 영농형태별 면적비율인 상하경(28%), 사경(16%), 등고선(43%), 비닐멀칭(13%)의 형태를 대표적인 식생피복 형태로 가정하여 식생피복인자를 평가한 이근상(2007)의 연구결과를 인용하여 고랭지밭의 식생피복인자를 0.89로 적용하였다.

경작인자는 경작형태와 지형경사에 의해 결정되는 인자로서, 일반적으로 밭은 등고선대상방식, 그리고 논은 테라스방식을 적용하게 된다.

TABLE 1. 경작형태와 경사에 따른 경작인자

경사(%)	등고선	등고선대상	테라스
0.0~7.0	0.55	0.27	0.10
7.0~11.3	0.60	0.30	0.12
11.3~17.6	0.80	0.40	0.16
17.6~26.8	0.90	0.45	0.18
> 26.8	1.00	0.50	0.20

적용 및 결과분석

1. 연구대상지

본 연구에서는 한국수자원공사에서 관리하고 있는 다목적댐 중 소양강댐유역 등 비교적 큰 규모를 가지는 10개 유역을 선정하였으며 각 댐유역별 제원과 위치는 그림 1 및 표 2와 같다(한국수자원공사, 2010).

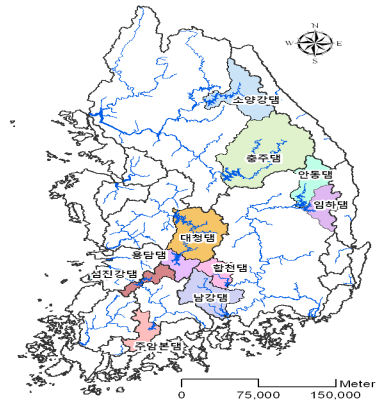


FIGURE 1. 연구대상지 위치도

TABLE 2. 연구대상지 주요 제원

댐유역명	수계	유역면적 (km ²)	연간용수공급량 (백만m ³)	저수지	
				저수면적 (km ²)	유효저수량(백만m ³)
소양강댐	한강	2,703	1,213	70.0	1,900
충주댐	한강	6,648	3,380	97.0	1,789
안동댐	낙동강	1,584	926	51.5	1,000
입하댐	낙동강	1,361	592	26.4	424
합천댐	낙동강	925	559	25.0	560
남강댐	낙동강	2,285	573	28.2	299
대청댐	금강	3,204	1,649	72.8	790
용담댐	금강	930	650	36.2	672
섬진강댐	섬진강	763	350	26.5	370
주암본댐	섬진강	510	270	33.0	352

2. GIS DB 구축

토사유실량 산정을 위해서는 강우자료를 비롯하여 수치표고모델(DEM: Digital Elevation Model), 토양도, 토지피복도와 같은 공간자료 구축이 필요하다. 본 연구에서는 국토지리정보원에서 구축한 1/5,000 수치지형도를 활용하여 10m 해상도의 DEM을 구축하였으며, 토양도는 농업과학기술원의 1/25,000 정밀토양도를

이용하였다. 식생인자와 경작인자를 계산하는데 활용되는 토지피복도는 환경부의 중분류 기준자료를 이용하였다(환경부, 2004). 그림 2는 대표적으로 충주댐 유역의 DEM, 토양도, 토지피복도를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 고랭지밭을 고려한 토사유실량 산정을 위해 DEM 자료와 토지피복도 자료를 공간중첩하여 농경지중 400m 이상인 농경

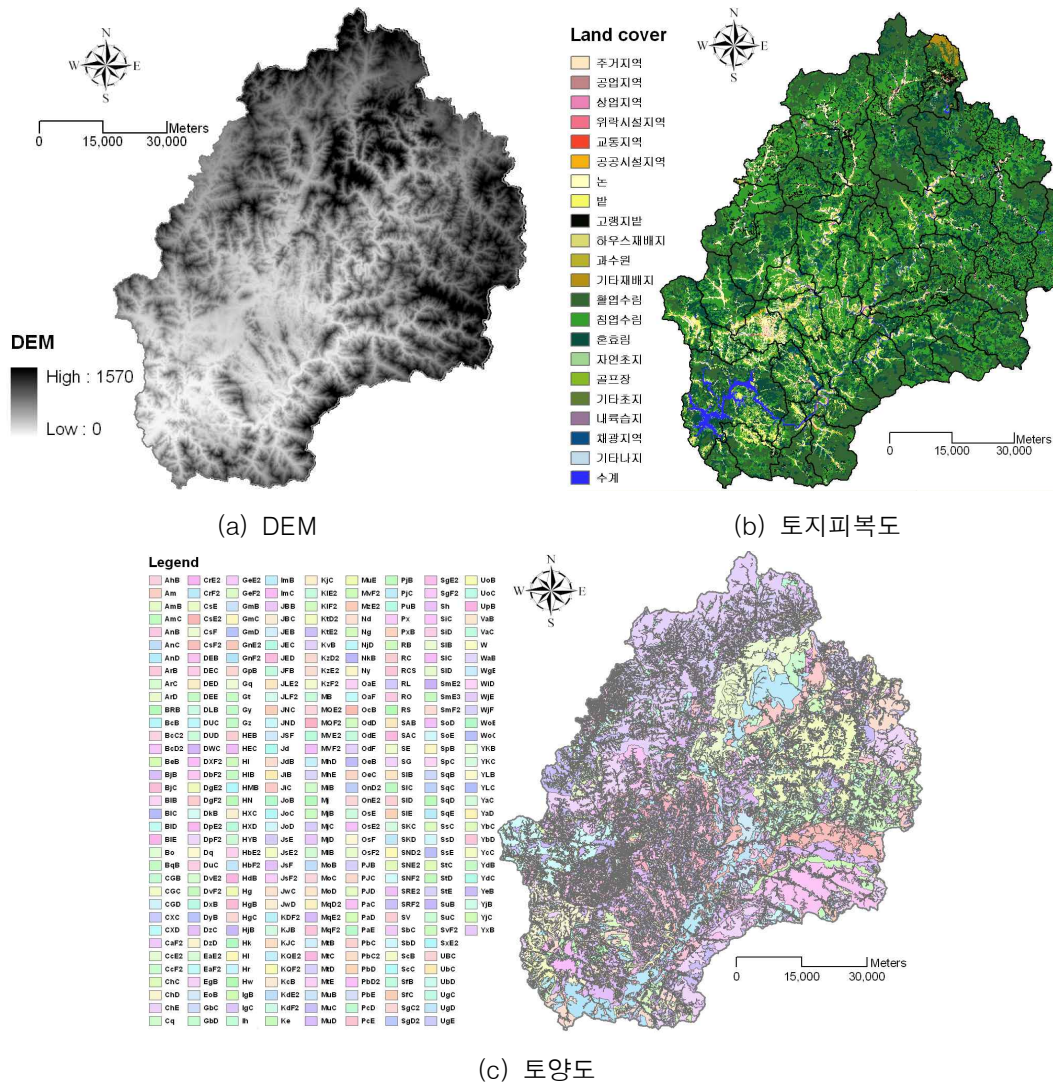


FIGURE 2. GIS DB

TABLE 3. 충주댐 토지피복 분석결과(고랭지밭 고려)

토지피복(대분류)			토지피복(중분류)		
분류항목	면적(km ²)	점유비율(%)	분류항목	면적(km ²)	점유비율(%)
시가화 건조지역	109.323	1.644	주거지역	55.029	0.828
			공업지역	4.934	0.074
			상업지역	3.893	0.059
			위락시설지역	0.362	0.005
			교통지역	39.303	0.591
			공공시설지역	5.802	0.087
농업지역	777.113	11.69	논	186.303	2.802
			밭	252.248	3.794
			고랭지밭	300.63	4.522
			하우스재배지	1.031	0.016
			과수원	12.09	0.182
			기타재배지	24.811	0.373
			활엽수림	1667.905	25.09
산림지역	5543.976	83.396	침엽수림	2501.365	37.627
			혼효림	1374.706	20.679
			자연초지	12.67	0.191
			골프장	1.219	0.018
초지	29.404	0.442	기타초지	15.515	0.233
습지	15.634	0.235	내륙습지	15.634	0.235
			채광지역	22.596	0.34
나지	69.264	1.042	기타나지	46.668	0.702
			수계	103.086	1.551
계	6647.8km ²	(100%)			

지 지역을 고랭지밭으로 분류하였으며, 토지피복을 분류하여 분석한 결과는 표 3과 같다.

3. 유사농도 분석

댐 저수지별 유사농도를 계산하기 위해서는 먼저 유역내 토사유실량을 계산해야 한다. 토사유실 평가를 위한 강우침식인자는 식 (3)과 같은 강우강도식을 적용하는 것이 바람직하다. 그러나 댐유역 차원에서 저수지로 유입 가능한 유사농도의 잠재 가능성을 분석하기 위해서는 인간에 의해 조절이 불가능한 강우부분은 동일하게 간주하고 토양, 지형, 식생, 경작상태의 취약성을 평가하는 것이 효과적이다. 따라서, 본 연구에서는 표 4와 같이 댐유역별 2000~2009년 동안의 10년간 평균 강우자료를 식 (6)에 적용하여 강우침식인자 517.3 (J/m²)를 얻었으며 이 값을 전체 댐유역에 동

일하게 적용함으로써 강우에 의한 영향은 동일하게 고려하였다.

$$R = 38.5 + 0.35 \times P_r \quad (6)$$

여기서, P_r 은 연강우량(mm/yr)이다.

토양침식인자는 농업과학기술원에서 구축한 1/25,000 정밀토양도를 기반으로 각 토양통별 표토부분의 모래(sand), 이토(silt), 점토(clay) 함량을 파악한 후 Erickson(1997)의 삼각형 도표에 적용하여 계산하였다. 지형인자는 1/5,000 수치지형도에서 구축한 10 m 해상도의 DEM 자료를 Desmet and Govers(1996) 식과 Nearing(1997) 식에 적용하여 침식사면의 길이인자와 경사인자를 각각 계산하였다. 특히 Desmet and Govers(1996) 식은 토립자가 강우발생시 경사에 따라 여러 방

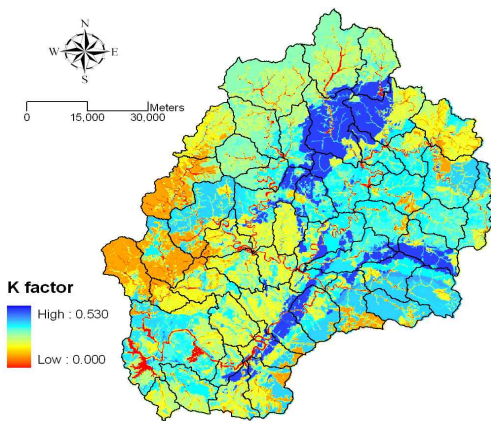
TABLE 4. 댐유역별 강우현황(2000~2009)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	평균
소양강댐	1,544	1,099	956	1,306	1,694	1,481	1,226	1,625	1,349	1,160	1,344
충주댐	1,442	1,212	797	1,455	1,684	1,431	1,349	1,566	1,476	951	1,336
안동댐	1,458	1,031	842	1,646	1,797	1,425	1,110	1,361	1,199	933	1,280
임하댐	1,236	885	725	1,419	1,559	1,200	911	1,148	1,012	668	1,076
합천댐	1,492	1,552	1,107	1,701	1,895	1,444	1,125	1,255	1,611	705	1,389
남강댐	-	1,709	1,301	1,898	2,179	1,840	1,224	1,568	1,787	844	1,594
대청댐	1,190	1,362	797	1,333	1,822	1,381	1,204	1,236	1,357	783	1,246
용담댐	-	-	-	1,662	2,045	1,373	1,471	1,378	1,536	854	1,474
섬진강댐	1,493	1,545	1,097	1,715	1,973	1,342	1,379	1,156	1,478	888	1,407
주암(본)댐	1,812	1,479	1,118	1,775	1,815	1,701	1,155	1,590	1,933	925	1,530
전체											1,368

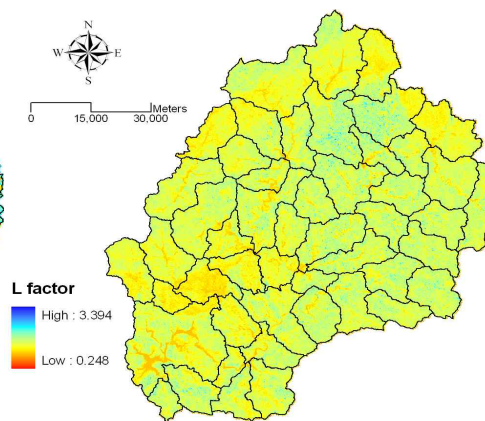
향으로 이동하는 특성을 반영하기 위한 다중흐름 알고리즘이 포함되어 있어 DEM 자료를 활용할 경우 매우 효과적으로 토립자의 이동특성을 파악할 수 있는 장점이 있다. 식생피복인자는 환경부의 중분류 토지피복도를 미국 농무성에서 제시한 인덱스에 적용하여 계산하였으며, 경작인자는 수치지형도에서 추출한 DEM 자료로부터 분석한 경사도와 중분류체계의 토지피복도에서 분석한 경작상태를 중첩 분석한 후 표 1의 경작인자 기준을 적용하여 평가하였다. 토사유실량은 격자기반으로 계산된 RUSLE 인자를 공간중첩하여 분석하였다. 그림 3은 대표적으로 충주댐유역에 대한 10m 해상도의

RUSLE 인자와 토사유실량 분포도를 나타내고 있으며, 각 다목적댐 유역별 RUSLE 인자의 통계특성은 표 5와 같다.

분석결과 평균 토양침식인자는 충주댐유역이 0.359로 가장 높게 나타났으며, 합천댐유역이 0.282로 가장 낮게 나타났다. 또한 평균 침식사면의 길이인자와 경사인자는 소양강댐과 충주댐유역이 각각 2.078과 7.864로 가장 높게 나타났으며, 합천댐과 섬진강댐유역이 각각 1.404와 5.050으로 가장 낮게 나타났다. 그리고 평균 식생피복인자와 경작인자는 용담댐과 소양강댐유역이 각각 0.105와 0.919로 가장 높게 나타났으며, 소양강댐과 합천댐유역이 각



(a) 토양침식인자(K)



(b) 침식사면 길이인자(L)

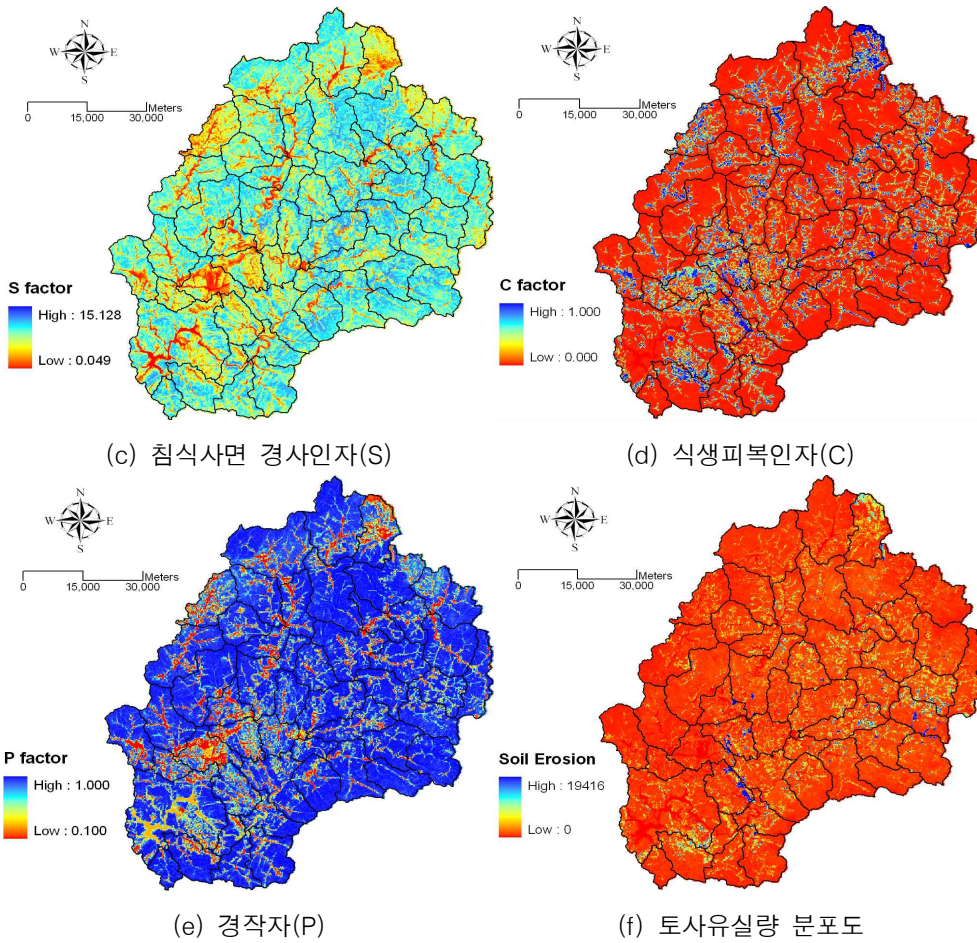


FIGURE 3. 충주댐유역의 RUSLE 인자와 토사유실량 분포도

각 0.036과 0.786으로 가장 낮게 나타났다. 따라서, 토양은 충주댐, 사면길이는 소양강댐, 사면경사는 충주댐, 식생피복은 용담댐 그리고 경작형태는 소양강댐유역이 토사유실 발생에 가장 취약한 것으로 분석되었으며, 향후 유역 대책 수립을 위한 BMP 활동시 각 취약항목을 중심으로 한 대책마련이 필요할 것으로 판단된다.

토사유실량 분석결과에서는 충주댐과 소양강댐유역이 각각 9,246,416 ton/yr과 3,032,225 ton/yr로 높게 나타났으며, 남강댐과 주암(본)댐유역이 각각 53,508 ton/yr과

471,944 ton/yr으로 낮게 평가되었다. 토사유실은 강우, 토양, 지형, 식생 그리고 경작형태 등에 따라 좌우되며, 유역내 토사유실 잠재가능성을 평가하기 위해서 단위면적당 토사유실량 분석이 필요하다. 10개 댐유역에 대한 평균 단위토사유실량은 990 ton/yr/km²으로 분석되었으며, 용담댐과 임하댐유역이 평균대비 1.96배(1,938 ton/yr/km²)와 1.52배(1,506 ton/yr/km²)로 높게 나타났으며 남강댐유역이 0.02배(23 ton/yr/km²)로 가장 낮게 나타났다. 이는 용담댐유역의 경우 식생피복인자가 다른 유역들에 비해 가장 큰 차이를 보였으며 임하

TABLE 5. 다목적댐 유역의 RUSLE 인자 분석결과

유역명	인자	최 소	최 대	평 균	표준편차	유역명	인자	최 소	최 대	평 균	표준편차
소양강댐	K	0.000	0.490	0.299	0.087	남강댐	K	0.000	0.505	0.322	0.092
	L	0.420	5.749	2.078	1.618		L	0.248	3.394	1.444	0.878
	S	0.049	15.128	7.540	5.296		S	0.049	15.128	6.509	4.116
	C	0.000	1.000	0.036	0.142		C	0.000	1.000	0.076	0.156
	P	0.100	1.000	0.919	0.187		P	0.100	1.000	0.800	0.315
충주댐	K	0.000	0.530	0.359	0.096	대청댐	K	0.000	0.600	0.328	0.110
	L	0.248	3.394	1.527	0.922		L	0.248	3.394	1.412	0.862
	S	0.049	15.128	7.864	4.044		S	0.490	15.128	6.585	4.412
	C	0.000	1.000	0.053	0.131		C	0.000	1.000	0.076	0.149
	P	0.100	1.000	0.880	0.231		P	0.100	1.000	0.796	0.305
안동댐	K	0.000	0.500	0.298	0.103	용담댐	K	0.000	0.600	0.343	0.094
	L	0.248	3.393	1.490	0.910		L	0.248	3.376	1.447	0.879
	S	0.049	15.120	7.799	4.094		S	0.049	15.123	6.922	4.265
	C	0.000	1.000	0.065	0.179		C	0.000	1.000	0.105	0.217
	P	0.100	1.000	0.852	0.249		P	0.550	1.000	0.910	0.155
임하댐	K	0.020	0.600	0.336	0.089	섬진강댐	K	0.000	0.600	0.355	0.102
	L	0.248	3.387	1.474	0.897		L	0.249	3.376	1.435	0.862
	S	0.049	15.116	7.552	4.162		S	0.049	15.106	6.060	4.157
	C	0.000	1.000	0.068	0.157		C	0.000	1.000	0.075	0.143
	P	0.550	1.000	0.910	0.155		P	0.100	1.000	0.885	0.170
합천댐	K	0.000	0.490	0.282	0.089	주암(본)댐	K	0.000	0.600	0.319	0.110
	L	0.248	3.394	1.404	0.873		L	0.250	3.380	1.426	0.872
	S	0.049	15.128	6.597	4.154		S	0.049	15.032	6.494	4.112
	C	0.000	1.000	0.094	0.188		C	0.000	1.000	0.060	0.126
	P	0.100	1.000	0.786	0.318		P	0.550	1.000	0.902	0.156

댐유역은 각 인자들이 전반적으로 높은 값을 나타내어 단위토사유실량이 높게 평가된 것으로 판단된다.

RUSLE는 강우에 의한 토양의 침식을 추정하는 공식이며 토사의 퇴적이나 이송을 고려하지 않은 모형이다. 따라서 본 연구에서 산정된 토양침식량은 실제 유역 출구에서의 유출량과는 큰 차이를 보일 수 있으며, 하천의 특정지점 혹은 저수지를 기준으로 토사유출량을 산정하기 위해서는 댐유역별로 계산한 토사유실량에 유사전달률을 고려해야 한다. 유사전달률은 유역면적, 경사, 식생성장 상태에 따라 다양하게 나타나며, 본 연구에서는 우리나라에서 주로 활용되고 있는 Boyce 식을 이용하여 유역면적에 따른 유사전달률을 계산하였다.

$$SDR = 0.41A^{-0.3} \quad (5)$$

SDR은 유사전달률이고, A는 유역면적(km²)이다(Da Ouyang, 2001).

표 6은 댐유역별로 계산한 토사유출량 및 유사농도로서 유사농도는 Boyce 식을 이용하여 산정한 토사유출량에 유효저수용량을 고려하여 계산하였다. 토사유출량 분석결과 충주댐과 소양강댐 저수지가 각각 270,365 ton/yr와 266,419 ton/yr로 가장 높게 나타났으며, 남강댐 저수지가 2,155 ton/yr로 가장 낮게 나타났다. 저수지의 유효저수용량을 고려한 유사농도 분석결과에서는 임하댐과 충주댐유역이 각각 0.227 kg/m³/yr와 0.151 kg/m³/yr로 높게 나타났으며 남강댐유역이 0.007 kg/m³/yr로 가장 낮게 나타났다.

TABLE 6. 다목적댐 유역별 토사유출량 및 유사농도 분석결과

유역명	면적 (km ²)	유효저수용량 (백만m ³)	토사유실량 (ton/yr)	단위토사유실량 (ton/yr/km ²)	SDR	토사유출량 (ton/yr)	유사농도 (kg/m ³ /yr)
소양강댐	2,703	1,900	3,032,225	1,121	0.038	266,419	0.140
충주댐	6,648	1,789	9,246,416	1,390	0.029	270,365	0.151
안동댐	1,584	1,000	1,364,609	861	0.045	61,357	0.061
임하댐	1,361	424	2,049,698	1,506	0.047	96,453	0.227
합천댐	925	560	672,137	726	0.053	35,514	0.063
남강댐	2,285	299	53,508	23	0.040	2,155	0.007
대청댐	3,204	790	2,468,812	771	0.036	89,860	0.114
용담댐	930	672	1,801,893	1,938	0.053	95,043	0.141
섬진강댐	763	370	492,907	646	0.056	27,593	0.075
주암(본)댐	510	352	471,944	925	0.063	28,944	0.087

소양강댐유역의 토사유출량이 266,419 ton/yr로 높게 나타났으나 저수지의 유효저수용량이 1,900 백만m³로 매우 커서 유사농도는 0.140 kg/m³/yr로 상대적으로 낮게 나타났다. 반면 임하댐유역의 토사유출량은 96,453 ton/yr로 소양강댐유역에 비해 약 2.76배 낮게 나타났으나 임하댐 저수지의 유효저수용량(424 백만m³)이 소양강댐 저수지에 비해 약 4.48배 작아 유사농도가 오히려 임하댐 저수지가 1.62배 높게 분석되었다.

본 연구에서 분석한 댐 저수지별 유사농도는 10년 평균 강우사상을 동일하게 적용한 결과로서 각 댐유역이 가지고 있는 토양, 지형, 식생, 경작상태 그리고 유효저수용량을 다각적으로 고려한 것이다. 따라서 집중호우시 저수지에 발생할 수 있는 흙탕물 발생 가능성을 예측할 수 있는 정량적 자료로 활용할 수 있다는 점에서 체계적인 저수지 관리를 위한 의사결정이 가능할 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 강우시 반복되는 흙탕물 발생원인으로 지적되고 있는 유역내 토사유실량을 평가하고 저수지 유효저수용량을 고려한 유사농도를 분석하고자 한국수자원공사에서

관리하고 있는 10개 다목적댐유역을 선정하여 분석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

첫째, 댐유역별 RUSLE 모형의 토양침식인자, 침식사면길이인자, 침식사면 경사인자, 식생피복인자 그리고 경작인자를 분석한 결과 각각 토양은 충주댐, 사면길이는 소양강댐, 사면경사는 충주댐, 식생피복은 용담댐 그리고 경작형태는 소양강댐유역이 토사유실 발생에 가장 취약한 것으로 분석되었으며, 향후 유역 대책 수립을 위한 BMP 활동시 각 취약항목을 중심으로 한 대책마련이 필요할 것으로 판단된다.

둘째, 고랭지밭을 고려한 토사유실량 분석 결과에서는 충주댐과 소양강댐유역이 각각 9,246,416 ton/yr과 3,032,225 ton/yr로 높게 나타났으며, 토사유실 잠재가능성을 판단할 수 있는 단위토사유실량 평가에서는 용담댐과 임하댐유역이 평균대비 1.96배와 1.52배로 가장 높게 평가되었다. 이러한 결과는 용담댐유역의 경우 식생피복인자가 다른 유역들에 비해 가장 큰 차이를 보였으며 임하댐유역은 각 인자들이 전반적으로 높은 값을 나타내어 단위토사유실량이 높게 평가된 것으로 판단된다.

셋째, 토사유실량에 유사전달률을 고려하여 저수지로 유입 가능한 토사유출량을 계산하였

으며, 분석결과 충주댐과 소양강댐 저수지가 각각 270,365 ton/yr와 266,419 ton/yr로 가장 높게 나타났다. 또한 저수지의 유효저수용량을 고려한 유사농도 분석결과에서는 임하댐과 충주댐유역이 각각 0.227 kg/m³/yr와 0.151 kg/m³/yr로 가장 높게 나타났다. 이는 토사유출량 분석에서 충주댐과 소양강댐유역이 가장 높은 값을 보였지만 소양강댐 저수지의 유효저수용량이 매우 커서 유사농도가 상대적으로 크게 나타나지는 않았다. 반면, 임하댐의 토사유출량은 소양강댐유역에 비해 약 2.76배 낮게 나타났으나 임하댐 저수지의 유효저수용량이 소양강댐에 비해 약 4.48배 작아 유사농도는 오히려 임하댐 저수지가 1.62배 높게 분석되었다.

넷째, 본 연구에서 분석한 댐 저수지별 유사농도는 10년 평균 강우사상을 동일하게 적용한 결과로서 각 댐유역이 가지고 있는 토양, 지형, 식생, 경작상태 그리고 유효저수용량을 다각적으로 고려한 것이다. 따라서 집중호우 시 저수지에 발생할 수 있는 흙탕물 발생 가능성을 예측할 수 있는 정량적 자료로 활용할 수 있다는 점에서 체계적인 저수지 관리를 위한 의사결정이 가능할 것으로 판단된다. **KAGIS**

참고문헌

- 강상혁. 2008. 집중호우에 따른 부유토사 유출 특징 및 주민 대응. 한국GIS학회지 16(1): 11-17.
- 국토해양부-한국수자원공사. 2009. 수계단위의 탁수예방 기본계획.
- 박경훈. 2003. GIS 및 RUSLE 기법을 활용한 금호강 유역의 토양침식 위험도 평가. 한국지리정보학회지 6(4):24-36.
- 박철수, 정영상, 주진호, 이정태. 2005. 고랭지 석비레 성토밭의 토양유실 저감을 위한 최적 영농관리방안. 한국토양비료학회지 38(3): 119-126.
- 서정일, 전근우, 김석우, 김민식. 2010. 산불피해지에 있어서 강우패턴에 따른 침식토사량의 변화. 한국임학회지 99(4):534-545.
- 신승숙, 박상덕, 조재웅, 이규송. 2008. 양양 산불지역 지표유출 및 토양침식에 대한 식생 회복의 영향. 대한토목학회논문집. 28(4B): 393-403.
- 우충식, 윤호중, 이창우, 정용호. 2008. 항공사진을 이용한 산지토사재해 영향인자 분석. 한국환경복원녹화기술학회지 11(1):14-22.
- 이근상. 2007. GIS 기반 고랭지밭의 토사유실 영향 분석. 대한토목학회논문집. 27(5D): 657-662.
- 이근상, 조기성. 2004. 탁수자료를 이용한 GIS 기반의 토사유실량 평가. 한국지형공간정보학회지 12(4):75-81.
- 이재일, 서세덕, 이규성, 하성룡. 2009. 댐 배수조작에 따른 저수지내 탁수변화 모의. 한국환경영향평가학회지 18(6):377-386.
- 전용익, 이정태, 이계준, 황선웅, 장용선, 박창영, 서명철, 류중수, 정진철, 정일민. 2009. 고랭지밭의 토양침식 저감을 위한 완충식생대의 효과. 한국토양비료학회지 42(4):231-238.
- 정필균, 고문환, 임정남, 임기태, 최대웅. 1983. 토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석. 한국토양비료학회지 16(2):112-118.
- 최용훈, 원철희, 서지연, 신민환, 양희정, 임경재, 최중대. 2009. 평지밭과 고랭지밭의 비점오염에 대한 분석과 비교. 수질보전 한국물환경학회지 25(5):682-688.
- 한국농촌경제연구원. 2005. 고랭지 농업의 환경친화적 재편을 위한 기초연구.
- 한국수자원공사. 2004. 임하댐 탁수저감방안 수립.
- 한국수자원공사. 2010. 댐운영실무편람.

- 현근우, 박한규, 이용식, 이석중, 박정희, 전상호, 최재완, 임경재. 2010. 그물망침사지를 이용한 고랭지밭 흙탕물 저감효과 연구. 수질보전 한국물환경학회지 26(2):215-224.
- 환경부. 2004. 고랭지밭 비점오염 저감을 위한 종합대책 보고서.
- Da Ouyang. 2001. Modeling sediment and phosphorus loading in a small agricultural watershed. Michigan State University Ph.D thesis. Department of Crop and Soil Science. pp.35-50.
- Desmet, P.J. and G. Govers. 1996. A GIS procedure for the automated calculation of the USLE LS factor on topographically complex landscape units. Journal of Soil and Water Conservation 51(5):427-433.
- Erickson, A.J. 1997. Aids for estimating soil erodibility - K value class and soil loss tolerance. U.S. Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Salt Lake City of Utah.
- Lee, G.S., K.H. Lee and G.C. Jeong. 2009. A strategy for quantifying turbid-water occurrence possibility based on geologic characteristics and soil erosion in hydrologic basins. Environmental Earth Sciences 59(4):821-835.
- Hudson, N. 1977. Soil Conservation, Ithaca : Cornell University Press.
- Nearing, M.A. 1997. A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss. Journal of Soil Science Society of America 61(3):917-919.
- Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies and P.J. Porter. 1991. RUSLE : Revised universal soil loss equation. Journal of Soil and Water Conservation 46(1): 30-33. **KAGIS**