

# 댐 건설로 인한 해안 유입 토사 감소율의 산정

## Estimation of Reduction Rate in Coastal Sediment Discharge by Dam Construction

이사홍\*, 배선한\*\*, 이정렬\*\*\*

Sahong Lee, Soen Han Bae, Jung Lyul Lee

---

### 요 지

본 연구에서는 하천부터 하구까지의 댐 구조물 건설로 인해 해안으로의 표사 공급원이 감소하는 것을 정량적으로 검토하였다. 내륙과 해양의 전이역인 연안은 농수산업, 임해산업단지, 발전소 및 항만과 같은 산업인프라, 관광 및 레크리에이션 등의 다양한 편익을 제공하여 높은 경제·사회·환경적 가치가 있다. 그러나 80년대 이후 무분별하게 추진되어온 각종 연안 개발은 직·간접적인 해안의 침식문제를 발생시켰다. 우리나라 서해의 경우 하천으로부터의 토사 유입 차단은 심각한 수준이다. 아직 그 영향이 해안으로 완전히 과급되지 못하여 그로 인한 장기 해안 침식이 두드러지지 않고 있으나 고파랑에 의한 빈번한 침식과 저질의 세립화 현상을 통하여 현재 진행형임을 알 수 있다. 그러나 일단 피해가 심각해지기 시작하면 돌이킬 수 없는 재앙이 될 측면도 많다. 따라서 우리나라 유역의 개발과 수리구조물 건설 현황을 살펴 이로 인한 해안 침식 결과가 얼마나 심각할 수 있는지를 살펴본다. 본 연구에서는 수리구조물로 인한 토사량 감소 중 가장 주요한 토사 공급원 감소 원인인 댐으로 인한 토사량 감소율에 대한 연구를 진행한다. 먼저 각 댐의 건설 전, 유역면적당 토사량과 댐 건설 후, 해안 유입 토사량 사이에 감소율을 계산하고, cascade 방법에 의하여 댐군에 의한 토사감소율을 산정한다. 유입 토사량 감소율을 산정하고 토사 공급원 감소로 인한 표사 수지 분석을 통해 해안 침식 폭의 위험도 평가를 실시한다.

**핵심용어 :** 하천 토사량, 유역 개발, 표사수지, 해안 침식

### 1. 서론

최근 내륙과 해양의 전이역인 연안은 농수산업, 임해산업단지, 발전소 및 항만과 같은 산업인프라, 관광 및 레크리에이션 등의 다양한 편익을 제공하여 높은 경제·사회·환경적 가치가 있다. 그러나 80년대 이후 무분별하게 추진되어온 각종 연안 개발은 직·간접적인 해안의 침식문제를 발생시켰다. 우리나라 서해의 경우 하천으로부터의 토사 유입 차단은 심각한 수준이다. 특히 인천지역의 연안침식 속도가 우려될 만큼 빨라지고 있는 것으로 나타났다. 국토해양부에 따르면 지난해 연안침식 모니터링을 분석한 결과, 인천지역 연안의 백사장 폭이 전반적으로 좁아지고 있어 침식피해가 우려되는 상황이다. 지난해 연안침식 모니터링 대상인 인천지역 연안 4곳 중 강화군 동막해수욕장의 침식등급이 B등급(안정)에서 C등급(침식우려)으로 하락했다. 이로써 현재 연안침식 모니터링 대상지역인 옹진군 장골해수욕장, 용담리해변, 노가리해변, 강화군 동막해수욕장 등 연안 4곳이 모두 C등급이다. C등급은 침식으로 인해 백사장 또는 배후지의 재해발생이 우려되는

---

\* 학생회원 · 성균관대학교 방재안전공학협동과정 석사과정 · E-mail : sahong88@nate.com

\*\* 학생회원 · 성균관대학교 방재안전공학협동과정 석사과정 · E-mail : bsh6823@naver.com

\*\*\* 정회원 · 성균관대학교 수자원전문대학원 교수 · E-mail : jllee@skku.edu

지역을 뜻한다. (해수부, 2012) 이러한 해안 침식을 막기 위한 세부적인 수리·표사현상에 대한 과학적 이해도가 아직 불충분함에 따라 침식제어공법 효과에 불확실성이 있으며, 그 동안 대부분의 해안선 변화 예측은 하천이나 해안선을 따라 이동되는 토사 유입 또는 유출량에 대한 정보가 부족하여 이를 고려하지 못하고 단기간의 이벤트성 예측으로 근본적인 문제 해결의 묘책을 제시하지 못하는 경우가 많았다. 유역의 개발로 유역 면적이 줄어들면 토사 발생량도 줄어들므로 그로 인한 표사 수지 감소 영향을 살펴보는 것이 중요하다. 일단 피해가 심각해지기 시작하면 돌이킬 수 없는 재앙이 될 측면도 많다. 따라서 우리나라 유역의 개발과 수리구조물 건설 현황을 살펴 이로 인한 해안 침식 결과가 얼마나 심각할 수 있는 지를 살펴본다.

표 1. 인천광역시 침식등급 기본 모니터링 결과

광역시도	대상지역	침식등급									
		'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11	'12	
인천광역시	강화군 동막해수욕장	B	B	B	A	B	B	B	B	C	
인천광역시	옹진군 장골해수욕장	D	C	C	C	C	C	C	C	C	
인천광역시	옹진군 노가리	-	-	-	-	-	-	D	C	C	
인천광역시	옹진군 용담리	-	-	-	-	-	-	C	C	C	

## 2. 전국 표사계 수립 및 토사 감소 현황

하천 수리 구조물의 설치로 인해 하천에서 하구로 공급되는 토사가 차단되고, 무분별한 해사 채굴 및 항만 준설 등에 의해 공급 토사량이 감소하고 있는 실정이다. 특히 하천의 댐 건설로 인해 해안 모래의 공급원이 차단되어, 해안 침식의 원인으로 대두되고 있다. 전국 침식 현황 및 분석을 위해 국가수자원관리종합시스템 지도정보통합서비스(WAMIS)를 통해 유역별 대·중권역을 기준으로 전국 표사계를 수립하였다. 또한 하천 수리 구조물 현황조사를 통해 구조물로 인한 토사 공급이 차단된 면적을 시각화하여 표시하였다. 표사계에는 국가 및 지방 1급 하천까지 표시하게 되고, 댐의 위치와 항의 위치도 표시하게 된다. 세부 표사계에는 각 지역의 침식 피해 해수욕장 및 댐 구조물 현황을 표시를 하게 된다. 전국 표사계 현황의 Matlab 기반 GUI 개발로 표사수지 database를 구축하였다.

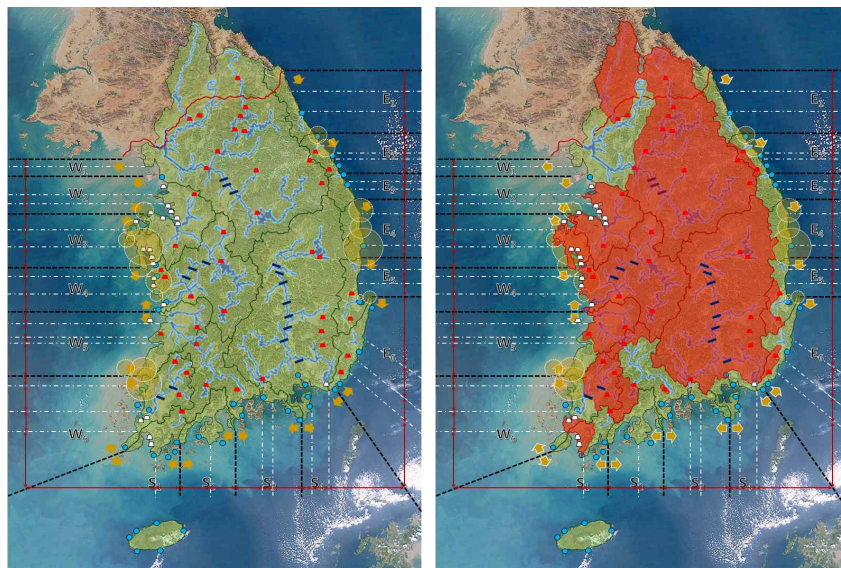


그림 1. 전국 표사계 수립 (좌), 토사공급 차단면적 (우)



그림 2. 전국 표사계 현황 Matlab 기반 GUI 개발

### 3. 토사량 산정

우리나라 서해의 경우 하천으로부터의 토사 유입 차단은 그림 2에 도시된 바와 같이 심각한 수준이다. 그러나 아직 그 영향이 해안으로 완전히 파급되지 못하여 그로 인한 장기 해안 침식이 두드러지지 않고 있으나 고파랑에 의한 빈번한 침식과 저질의 세립화 현상을 통하여 현재 진행형임을 알 수 있다. 그러나 일단 피해가 심각해지기 시작하면 돌이킬 수 없는 재앙이 될 측면도 많다. 따라서 우리나라 유역의 개발과 댐 건설 현황을 살펴 이로 인한 해안 침식 결과가 얼마나 심각할 수 있는지를 살펴본다.

#### 3.1 유역면적별 생산 토사량

유역의 개발로 유역 면적이 줄어들면 토사 발생량도 줄어들므로 그로 인한 표사 수치 감소 영향을 살펴보는 것도 중요하다. 하천 유역면적의 함수로 주어지는 다양한 토사발생량 산정식이 있다. 현재 사용되고 있는 대표적인 유역 토사량 산정식은 토사량 지배인자와 유출에너지를 나타내는 인자를 이용하여 토사량  $Q_p$ 를 예측하는 수정범용토양손실공식(MUSLE; Modified Universal Soil Loss Equation)이 Williams(1975, 1978)에 의하여 발표되었다.

$$Q_p = 0.0001662 \times q_p \times P_{eff} = 0.0001662 \times \frac{C \times A \times P_{eff}}{T_p} \quad (1)$$

여기서  $q_p$ 는 단위 유효강우량에 의한 유역 침투유출량( $m^3/s/mm$ ),  $P_{eff}$ 는 유효우량( $mm$ ),  $T_p$ 는 침투 시간( $hr$ ),  $C$ 는 지형에 따른 계수,  $A(km^2)$ 는 유역 면적이다. 따라서 토사량을 산정하기 위해 유효강우 지속시간, 유효우량, 침투 유출량 등 많은 인자가 필요하다. 그러나 본 연구에서는 댐의 저수용량에 따른 토사 감소 영향을 살펴보기 위하여 Cape and Gary (2003)의 방법을 적용한다. Cape and Gary (2003)는 California 지역 18개 하천의 토사량을 조사하여 생산 토사량을 다음과 같이 유역 면적의 함수만으로 제시하였다.

$$Q_N = 49.013a_r + 35762 \quad (2)$$

여기서  $Q_N$ 은 유역면적당 연간 생산되는 토사량( $m^3/yr$ )이고,  $a_r$ 은 하천의 유역 면적이다. 비록 California 유역과 우리나라 한강 유역의 토사 생산 특성이 다르지만 댐 건설로 인한 토사 유출의 감소율을 추정하는 데 일관성 있게 적용한다.

표 2. 하천 유역면적당 토사량

River Name	Drainage Area ( $km^2$ )	Natural Sediment ( $m^3/yr$ )	Reduction (%)
Mlibu Creek	285	40600	55.17
Arroyo Grande	396	85500	66.62
Carmel River	808	59500	58.54
San Dieguito River	896	45000	78.75
San Diego River	1111	55000	90.85
San Luis Rey River	1450	100000	69.49
San Gabriel	1837	139000	67.41
Santa Ana River	4381	290000	66.96
Salinas River	10952	555000	32.67
L.A. River	2163	178000	66.85

### 3.2 댐 저수용량별 감소 토사량

댐 건설로 인한 토사 유입 감소량은 댐의 저수용량으로 추정할 수 있다. Cape and Gary (2003)은 또한 댐 건설로 인한 California 해안의 누적 토사량 감소 연구 결과를 제시하여 댐 저수용량의 함수로 아래와 같이 주어지는 토사감소량 산정식을 제시하였다.

$$Q_R = 5101.4 \ln(a_D) - 69138 \quad (2)$$

여기서  $Q_R$ 은 댐 저수용량별 토사감소량이며,  $a_D$ 는 댐 저수용량이다.

## 4. 한강유역 토사량

### 4.1 Cascade 분석

본 논문에서 하구까지 도달하는 누적 토사량을 산정하기 위해 cascade 분석 방법을 사용하였다. cascade 분석 방법은 그림3과 같이 간단하게 나타낼 수 있다. 본류에 각 유역은 독립적 구간이 아니라 지류를 따라 상류의 토사량이 하류의 토사량에 영향을 주는 종속적 형태이기 때문에 하류의 토사량을 산출할 때에는 상류에서의 유출되는 토사량까지 함께 고려하여 판단한다.

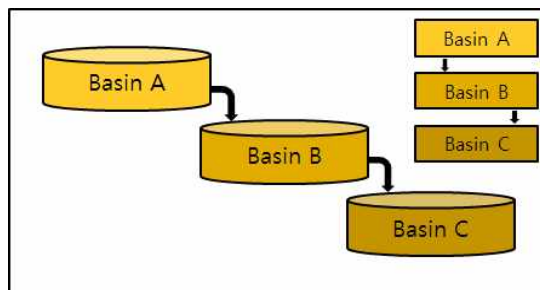


그림 3. Cascade 분석 방법

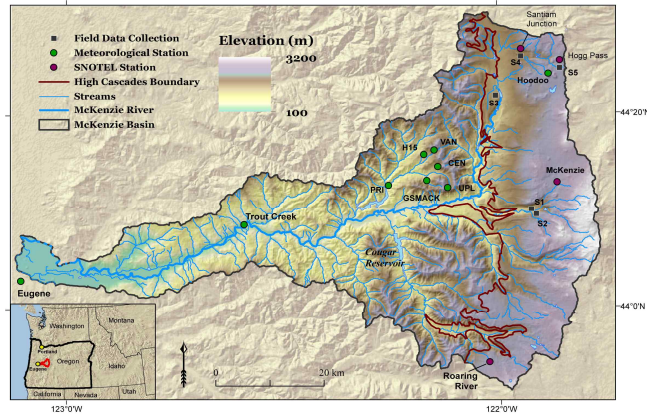


그림 4. Cascade 분석 방법을 사용한 The McKenzie 강 유역 모식도

#### 4.2 한강유역 댐별 토사량 감소율 산정

앞에서 제시한 생산 토사량 식과 댐 저수용량별 감소 토사량 식을 cascade 분석 방법에 적용하여 한강 유역을 분석한다. 한강 본류에 각 유역은 독립적 구간이 아니라 지류를 따라 상류댐의 토사량이 하류댐의 토사량에 영향을 주는 종속적 형태이기 때문에 하류댐의 토사량을 산출할 때에는 상류댐에서의 유출되는 토사량까지 함께 고려하여 판단한다. cascade 분석 방법을 사용하여 서해 하구까지 도달하는 누적 토사량을 구하였다.

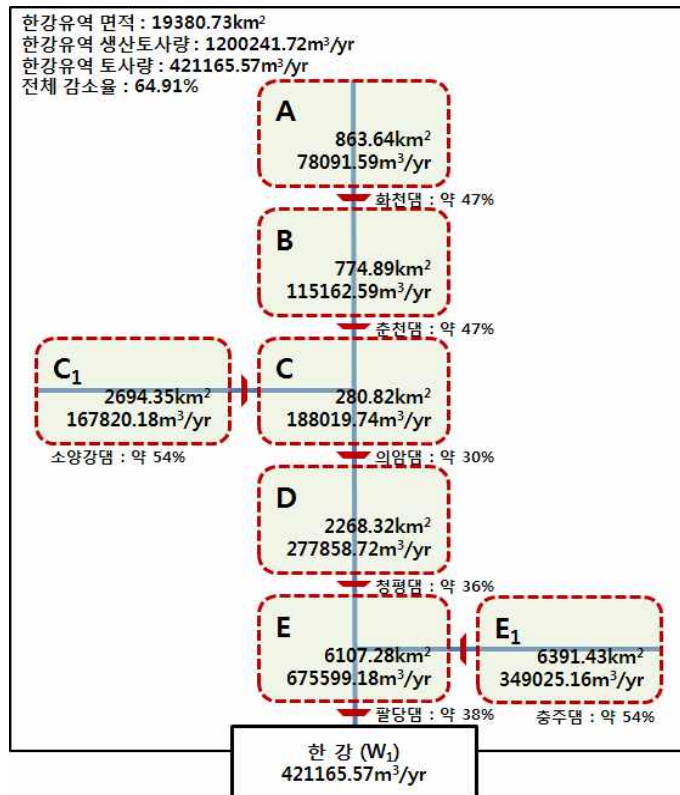


그림 5. 한강유역 댐 현황 및 저수용량별 토사 감소율

표 3. 한강유역 댐 현황 및 저수용량별 토사 감소율

한강유역	완공 일자	저수용량 ( $m^3$ )	댐 유역면적 ( $km^2$ )	생산 토사량 ( $m^3/yr$ )	감소 토사량 ( $m^3/yr$ )	토사량 ( $m^3/yr$ )	감소율 (%)
화천댐(A)	1937년	1018000000	863.64	78091.59	36670.68	78091.59	46.96
춘천댐(B)	1965년	1018000000	774.89	73741.68	36670.68	115162.59	47.00
소양강댐(C <sub>1</sub> )	1973년	2900000000	2694.35	167820.18	42011.18	167820.18	30.37
의암댐(C)	1967년	800000000	280.82	49525.83	23694.92	188019.74	53.84
청평댐(D)	1943년	1855000000	2268.32	146939.17	27985.34	277858.72	35.87
충주댐(E <sub>1</sub> )	1985년	2750000000	6391.43	349025.16	41740.25	349025.16	37.66
팔당댐(E)	1973년	2440000000	6107.28	335098.11	29383.70	675599.18	53.50
합 계				1200241.72	238156.74	421165.57	64.91

5. 결과

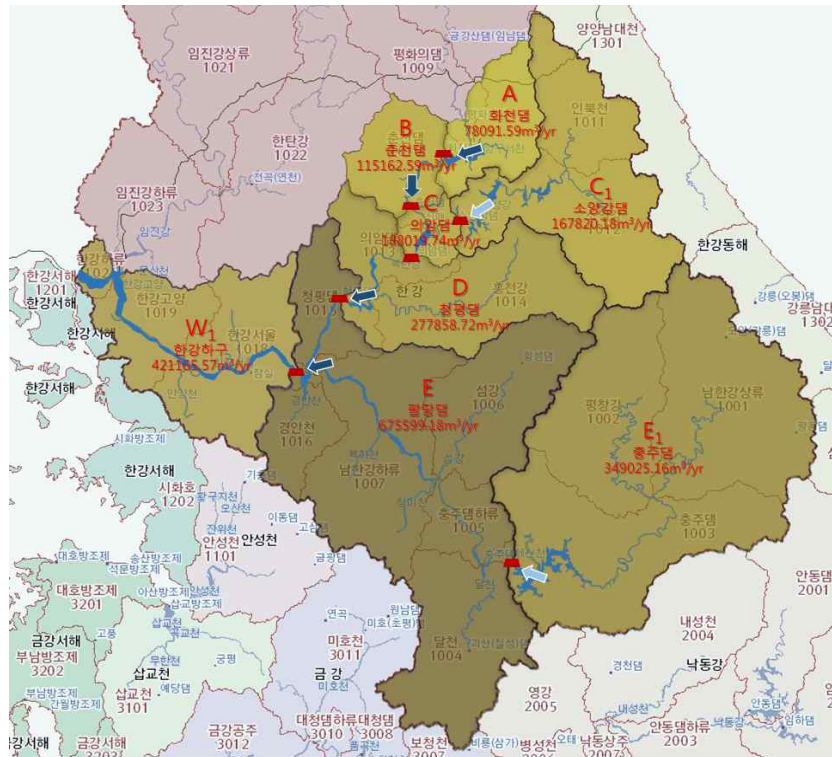


그림 6. 한강유역 토사 이동 현황

우리나라 한강 유역 댐의 저수용량을 적용하여 토사감소량을 계산한 결과가 표 3과 그림5에 제시되었다. 한강 유역에 생산되는 토사량은 매년  $1200241.72m^3$ 으로 추정되었으며, 한강 유역의 7개 댐으로 인한 토사량 감소는 댐이 건설되기 전에 비하여 64.91% 감소하여 한강 하구에 도달하는 토사량은 매년  $421165.57m^3$ 인 것으로 계산되었다. 그림6은 한강 유역에 도달하는 토사 이동을 유역별 토사 농도로 나타내었다. 비록 Cape and Gary (2003)가 제시한 생산 토사량 및 감소 토사량 식이 우리나라 하천에 적합한지는 검증되지 않았지만 한강 유역에 건설된 7개 댐에 의한 토사 감소율은 해안의 표사 수지에 얼마만큼의 영향을 미치는 지 시사하는 바가 크다.

본 연구는 해안침식의 방지 및 관리를 위해 댐 건설로 인한 토사량 감소율에 대한 연구로서 유

역 개발이 해안의 표사수지에 미치는 영향 분석과 이에 따른 기준 제시에 도움이 되기를 기대한다. 또한 토사량 감소율을 산정하고 토사 공급원 감소로 인한 미래 침식 위험 지역의 판단과 침식 위험도 평가 도입시 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감 사 의 글

본 연구는 국민안전처장관의 방재안전분야 전문인력 양성사업으로 지원되었습니다.

본 연구는 한국해양과학기술진흥원의 [연안침식 대응기술 개발] 연구과제 (KIMST Proj. NO: 2013023)의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. 국토해양부 (2010). 연안정비 사업 침식관리 가이드북.
2. 국토해양부 (2010). 연안침식 방지기술 개발 연구 최종년도 보고서.
3. 안경모, 천제호, 천세현, 이재용 (2010). 연안표사량 산정식을 이용한 해변침식원인 규명, 대한토목학회 정기학술대회 pp. 544-547.
4. 해양수산부 (2012), 전국 연안침식 현황.
5. Willis, C. M. and Griggs, G. B. (2003). Reductions in fluvial sediment discharge by coastal dams in California and implications for beach sustainability, *The Journal of Geology*, 111, pp. 167-182.
6. Yang S. L., Zhang J., Zhu J., Smith J. P., Dai S. B., Gao A., Li P. (2005). Impact of dams on Yangtze River sediment supply to the sea and delta intertidal wetland response, *Journal of Geophysical Research*, 110, F03006, pp. 1-12.