국내외 比流砂量 추정 방법의 검토 및 새로운 比流砂量 추정방법의 개발방향

김 창완* 유 권규* 우 효섭**

要 旨

국내외 비유사량 추정방법에 대하여 심도있게 조사하였다. 지금까지 우리나라 댐 계획시 이용된 비유사량 추정방법을 검토한 결과, 유사량 자료의 부족과 적절한 비유사량 추정방법의 결여로 각 댐의 비유사량 추정은 일관성이 없이 대부분 댐 설계자의 경험과 주관에 의하여 결정된 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 새로운 비유사량 추정에 관한 1단계 연구로서 국외의 비유사량 추정방법을 조사·분석하고 국내 가용자료의 한계를 고려하여 새로운 비유사량 추정방법의 개발방향과 방법을 제시한다.

1. 서론

比流砂量(sediment yield rate)이란 단위기간에 단위면적당 상류유역에서 유출되어 유역출구의 한 하천지점을 통과하는 **流砂量**(sediment yield)을 말하며 보통 tons/km²/yr, 혹은 m³/km²/yr로 표시된다. 이 지표는 하천에 댐을 계획하는 경우 그 계획댐의 저수지 堆砂관계를 설계하는데 필수요소이다. 즉, 계획댐의 장래 50년, 100년 등의 貯水位-貯水容量 관계곡선을 결정하고, 댐의 死水位를 결정하는데 필요한 지표이다.

현재 우리나라에서 이 비유사량 자료는 사실상 전무한 편이다. 따라서, 각종 댐의 계획 및 설계시에 유역의 비유사량 자료는 통상 과거 타유역의 비유사량 자료를 그대로 인용하거나, 일본 등 외국의 자료를 이용하여 추정되고 있으며 비유사량 추정방법의 적용에 있어서도 일관성이 결여되어 있다. 이는 무엇보다도 우리나라 유역 및 유사 특성에 적합한 비유사량 추정 방법이 없기 때문인 것으로 사료된다.

* 연구원, 한국건설기술연구원 수자원연구실

** 수석연구원, 한국건설기술연구원 수자원연구실

본 연구는 이러한 비유사량 추정방법 개발의 기초적 조사·연구로서, 지금까지 우리나라 하천 실무에서 유역 비유사량을 추정하기 위해 이용된 방법들의 문제점을 분석하고 외국의 비유사량 추정방법들을 검토하여 새로운 비유사량 추정방법의 개발방향과 방법 등을 제시한다.

2. 국내의 비유사량 추정

2.1 비유사량 추정방법

국내에서 실무에 사용되었던 비유사량 추정방법은 크게 유사량-유량 관계곡선 이용법, 유역내 저수지 퇴사자료 이용법, 경험공식 및 타유역의 비유사량 이용법 등으로 구분될 수 있다.

(1) 유사량-유량 관계곡선 이용방법

하천의 한 관측지점에 유량자료가 축적되어 있고 동일 지점에서 얻은 유사량-유량 관계 곡선이 작성되어 있다면, 유량 자료로부터 구한 유황곡선에 유사량-유량관계 곡선을 적용하여 분석대상기간 동안의 총유사량을 구할 수 있다. 이렇게 구한 총유사량을 단위 유역면적당, 단위기간(보통 일년기준)당 유사량으로 환산하면 바로 유역 비유사량이 된다. 분석대상 지점에 유사량 실측자료가 없는 경우에는 유사량공식을 이용할 수 있으나, 그 결과의 신뢰도는 실측 유사량을 이용한 것보다 상당히 떨어질 것이다.

(2) 유역내 저수지 퇴사자료 이용법

동일수계나 인근 수계에 위치한 저수지 퇴사 자료를 이용하여 비유사량을 산정하는 방법이다. 저수지내로 유입되는 유사량과 저수지내에 퇴적되는 유사량의 비는 捕促率로 정의되는데 대상 저수지의 포촉율만 알면 저수지 比堆砂量으로부터 쉽게 비유사량을 산정할 수 있다. 그러나 저수지 포촉율은 저수지 유입유량, 저수용량, 저수지 규모 및 조작, 유입유사 특성 등의 여러가지 수리학적 특성의 함수이므로 쉽게 결정하기 어렵다.

(3) 경험공식

경험공식은 유역의 유사유출량 자료 또는 저수지 퇴사자료를 유역특성 및 저수지 특성 변수와 상관시켜 통계처리하여 얻어진다. 국내에서 개발된 공식으로 '새마을 공식'과 '윤용남 공식'이 이용되고 있으며 외국에서 개발된 공식으로 '다나까 공식'과 '에사끼 공식'이 이용되고 있다.

ㅇ새마을 공식

$$ASR = 255.4\ A^{0.1816} IRC^{0.5774} \qquad (1)$$

여기서 ASR은 연평균 퇴사량(m^3), A는 유역면적(km^2), IRC는 초기의 저수용량(ha·m)이다. 이 공식은 건설부의 '새마을 수문조사사업 최종기술보고서(1978)'[1]에 기술되어 있으나, 공식의 개발 근거는 밝혀지지 않고 있다.

ㅇ윤용남 공식

윤(1982)[2]은 우리나라 관개용 저수지에 대한 저수용량 감소와 점토유사량 추정에 관한 연구에서 기존 저수지 퇴사자료를 이용하여 저수지로 유입되는 연평균 유사량 추정을 위한 경험공식을 제시한 바 있다.

$$S_y = 1334.08\ A^{-0.2}\ E_t^{6.2668} \qquad (2)$$

여기서, S_y는 비퇴사량($m^3/km^2/year$), A는 유역면적 (km^2), E_t는 포촉율 (%)로 Brown(1943)공식을 이용하였다.

ㅇ다나까(田中) 방법[3]

일본인 다나까에 의해서 제안된 공식으로 地質群別로 9개의 경험공식이 구성되어 있다. 이중에서 우리나라에서 자주 쓰이는 공식은 C지질군에 해당하는 공식이다.

ㅇ에사끼(江崎) 방법[3]

일본인 에사끼에 의해서 제안된 공식으로 일유량 자료가 있어야 계산이 가능하다.

(4) 타유역의 비유사량 이용법

유역특성이 유사한 타유역의 비유사량을 대상유역의 비유사량으로 이용하는 방법이다. 이 방법에서는 이미 결정되어 있는 타유역의 비유사량 값을 분석대상유역의 지질, 기후, 지형 특성을 고려하여 조정하기도 한다.

이외에도 건설부의 '하천시설기준(댐편)'에 유역면적이 100 km^2 이하인 경우에 적용가능한 비유사량 추정도표가 제시되어 있다. 이 방법에서는 저수지 퇴사량의 변동요인이 각 지역별로 상이하다는 것을 고려하여 지역별로 지형, 지질, 유역면적 등으로 구분하여 일본에서 사용하고 있는 퇴사량 추정 도표를 소개하고 있다. 이 방법을 실무에 직접 사용된 사례는 아직 확인되지 않는다. 또한, 농림수산부의 '농지개량사업계획 설계기준-콘크리트 댐편'에도 일본에서 개발된 여러가지 퇴사량 추정공식을 정리하여 소개하고 있으나, 이들 추정공식의 적용사례는 확인되지 않는다.

마지막으로, '60년대 말 - '70년대초에 수행되었던 낙동강 유역조사[4]에서는 몇 개의 유사량 실측자료와 유역의 강우, 지형(표고차), 침식범위, 토지이용 등 인자와의 관계를 이용하여 경험적으로 비유사량을 구하였다.

2.2 적용사례

국내에서 댐 설계에 사용된 비 유사량 추정방법을 다목적 댐과 수력댐에 대해서 조사하였으며, 그 결과 다목적 댐 및 수력댐에 대한 비유사량 추정치는 각각 표 1과 표 2와 같다.

2.3 국내의 비유사량 추정의 문제점

지금까지 우리나라에서 적용된 바 있는 비유사량(또는 비퇴사량) 추정방법을 검토한 바, 다음과 같은 문제점이 내포되어 있음을 알 수 있다.

표 1. 주요 다목적 댐의 계획 및 설계시 제시된 비퇴사량 추정치 (*:비유사량)

유역명	댐명	(방법):비퇴사량 $m^3/km^2/yr$	채택치	비 고
한 강	소양강	③: 281 ⑥: 550	500	⑥채택, ③:청평댐('43-'86)
	충주	③: 875	1,000*	③:화천댐('44-'56), E_r=90% 가정
	횡성	④: 657 ⑤: 430	550	평균치 채택
	홍천	⑥: 314 ⑦: 819	580	평균치 채택
낙동강	안동	②: 410*	800*	②:Ⓐ참조, 외국통계치 채택
	남강	①: 414*	414*	①:Ⓐ참조
	합천	①: 245*	700*	①:Ⓐ참조, 유역특성 반영
	임하	⑨: 246~348	350	제반상황을 고려하여 판단
	영천	⑥: 350	700	유역특성 반영(2배)
	밀양	①: 380	380	①:Ⓑ참조
	군위	①: 380 ④: 500	380	①채택, ①:Ⓑ참조
금 강	대청	①: 100	300	①:Ⓒ참조, 안전율 고려
	용담	①: 44 ③: 400	400	③채택, ①:Ⓓ참조, ③:화천댐(56-'85)
	금산	⑧: 350	350	대청댐의 추정치+50
섬진강	주암	⑨: 400	400	가정치
	적성	③: 459	459	③:섬진강댐('28-'83)
기 타	부안	⑤: 645 ⑥: 202	645	⑤ 채택
	탐진	④: 751	751	
	보령	⑧: 350	350	금산댐의 추정치 채택

① 유사량-유량관계곡선법(실측유사량 이용)
② 유사량-유량관계곡선법(계산유사량 이용)
③ 타 저수지 퇴사자료 이용법 ④ 새마을 공식 ⑤ 윤용남 공식 ⑥ 다나까 공식
⑦ 에사끼 공식 ⑧ 인근 저수지유역 비퇴사량 이용법 ⑨ 기타 방법

주) Ⓐ:ton 단위의 유사량과 유사의 단위중량이 제시되지 않음.
Ⓑ:UNDP/FAO 보고서에서 제시한 비유사량 420 tons/km^2/yr에 퇴사단위중량 1.1 tons/m^3을 적용하여 환산한 수치임.
Ⓒ:부유사의 (퇴적)단위중량을 1.8로 가정하고 이를 이용, 환산한 수치임.
Ⓓ:비유사량 70.5 tons/km^2/yr에 부유사의 (퇴적)단위중량 1.6 tons/m^3을 적용하여 환산한 수치임.

ㅇ저수지 계획 및 설계시 기준이 되는 양이 비유사량인지 비퇴사량인지 구분이 명확하지 않다. 구미에서는 비유사량과 포촉율을, 일본에서는 비퇴사량을 저수지 설계의 기준으로 사용하고 있다.

ㅇ유역 비유사량 자료의 부족과 적절한 비유사량 추정방법의 부재로 비유사량 추정의 일관성 없으며 댐설계시 채택한 비유사량 값에 대한 신뢰도 자체가 낮아 보인다.

ㅇ적용된 경험공식에 대한 타당성의 검토가 결여되어 있다.

ㅇ두 개 이상의 다른 방법을 적용하여 비유사량(또는 퇴사량)을 구한 후 각 값을 평균하여 결정

표 2. 수력댐 계획 및 설계시 제시된 비퇴사량 추정치 (*:비유사량)

유역명	댐명	(방법):비퇴사량 $m^3/km^2/yr$	채택치	비 고
한 강	도 암	②: 500 ③:1000	1,000	③채택, ③:Ⓐ참조
	평 창	②: 500 ③: 900	900	③채택, ③:Ⓐ참조
	화 의	③:1000	1,000	③:Ⓐ참조
	강 릉Ⅰ	①: 60*	60*	①:Ⓑ참조
	강 릉Ⅱ	①: 60*	60*	①:Ⓑ참조
	정 선	①: 175*	175*	①:Ⓑ참조
	도 곡	③: 900	900	③:Ⓐ참조
	수 주	②: 500	500	
	태 백	②: 300	300	
낙동강	봉 화	②: 450	450	
금 강	영 동	②: 500	500	
	수 통	④: 100	100	추정치의 최소량으로 가정
	옥 천	④: 400	400	일본의 일본의 통계적 수치 인용

① 유사량-유량 관계 곡선법(계산유사량 이용)
② 타 저수지 유역 비퇴사량 이용법
③ 연침식량(㎜) 추정
④ 기타 방법

주) Ⓐ:ton 단위의 유사량과 유사 단위중량이 제시되지 않음.
Ⓑ:토지이용, 식생, 지형, 토양 등의 조건을 고려하여 침식량을 가정하고, 하상물질의 구성비와 저수지 포촉율을 고려하여 비퇴사량을 산정함.

하기도 하는데 이는 그 타당성이 의심스럽다.

ㅇ우리나라 저수지 퇴사자료 역시 신뢰도상의 한계가 있어 정확한 비유사량의 추정이 더욱 어렵다.

3. 국외의 비유사량 추정방법

3.1 일본의 비유사량 추정방법[3,5]

일본에서는 댐설계에 촛점을 두고 비유사량 보다는 비퇴사량을 사용하고 있다. 추정방법을 요약하면 다음과 같다.

(1) 기존 저수지의 퇴사량 자료로부터 추정하는 방법

이 방법은 동일 수계 또는 인근의 수계 특성이 비슷한 수계에 기 건설되어 있는 저수지의 퇴사량 자료를 이용하는 방법이다. 양질의 퇴사량 자료가 있는 경우에는 신뢰성이 높은 추정 방법이다.

(2) 통계적 방법

이 방법은 유역의 地相 및 水文因子와 유역의 비유사량과의 관계를 통계적 방법으로 경험적으로 표시하는 것으로, 이 방법에는 다나까(田中) 방법, 무라노(村野) 방법 등 다수가 있다.

(3) 추계학적 방법

유사의 생성, 이송 및 퇴적 등의 과정을 확률과정으로 시계열 해석을 통해서 퇴사량을 계산하는 방법으로 무로따(室田)의 방법이 있다.

3.2 구미의 비유사량 추정방법 [6,7]

(1) 유사운송비 방법

이 방법은 그 유역의 침식량과 유사운송비를 알고 유역의 비유사량을 추정하는 방법이다. 流砂運送比(sediment delivery)는 總浸蝕量(gross soil erosion)과 유역에서 이송된 유사유출량의 비로 일반적으로 백분율로 표시된다. 유사운송비 추정공식으로는 Roehl(1962), Williams(1977) 등 다수의 공식이 알려져 있다. 이들의 결과를 종합하면 유사운송비는 일반적으로 하천 및 유역 형태와 관련되어 있음을 알 수 있다.

(2) 유사량-유량 관계 곡선법

유사량-유량 관계 곡선을 작성하기 위해서 보완된 유사량 공식이 이용될 수 있다. Rainwater(1962)는 이와 유사한 방법을 이용하여 미국 전역에 대해 하천유사의 농도분포지도를 작성한 바 있다.

(3) 통계분석법

Anderson(1949), Ferrel(1959) 등 다수의 추정식이 알려져 있다.

(4) 확정론적 모형

확정론적 모형들은 Wischmeier와 Smith(1978), Lane과 Hakonson*(1982)* 등 다수의 연구자들에 의해 개발된 바 있으며, 시간에 따른 변화를 예측할 수 있는 기타 확정론적 모형들은 Smith(1976), Bennett와 Nordin(1977) 등 다수에 의해 개발된 바 있다.

(5) 추계학적 모형

확정론적 모형개발과 병행하여 유사유출량 추정에 관한 추계학적 모형이 검토되기 시작했으며, Murota와 Hashino(1969), Woolhiser 및 Blinco(1975) 등 다수의 모형이 있다.

(6) 도표식 모형

도표식 모형으로 PSIAC(Pacific Southwest Interagency Committee)[6]에 의해서 1968년 미국에서 개발된 모형이 있다. PSIAC 모형은 지표면의 지질 특성, 토양, 기후, 유출, 지형, 식생, 토지이용, 상류침식 및 하천침식 특성 등 9개 유역 특성인자를 포함하고 있다. 이들 인자들은 유역의 현장조사를 통해서 조건별로 결정된 가중치가 할당되어 있다. 각 특성인자의 가중치를 합한 후, 합계값을 이용하여 기작성되어 있는 계급구간별 유사유출량표에서 유사유출량을 결정한다. Johnson과

Gebhart(1982)[8]에 의한 수정PSIAC 방법에서는 각 특성인자의 가중치를 정량화하였다.

최근 ICOLD[9]에서 제시한 9개 인자에는 수정PSIAC 방법에서 제시한 인자들과 비교할 때 PSIAC 방법상의 지질, 상류지역 침식 인자가 빠져 있고 대신 배수망의 평면 특성, 유사 특성에 관한 인자가 추가되었다.

4. 새로운 비유사량 추정방법의 개발방향

지금까지 검토된 비유사량 (또는 퇴사량) 추정공식들은 통계적 분석에 의한 경험공식 방법이 주종을 이루고 있다. 우리나라의 방법에는 초기저수용량, 포촉율 등 인자의 사용 특징이 있으며; 일본의 비퇴사량 추정 방법에는 지질구분에 따른 공식 개발, 저수용량 관련 변수 사용, 지형(표고차)인자 고려 등의 특징이 있으며; 구미 방법은 그밖에 유량, 식생밀도, 유사입자 크기 고려 등의 특징이 있다. 세계적으로 이러한 통계적 경험공식의 선호 경향은 그 방법 자체의 간단성뿐만 아니라 유사량 실측을 제외한 타 방법은 아직 그 신뢰도가 제한 되어 있기 때문일 것이다. 따라서, 본 연구에서도 새로운 비유사량 추정방법의 개발 방향은 통계적 경험공식의 개발에 촛점을 맞추었다.

이들을 종합하면 다음과 같은 경험적 비유사량 추정방법의 개발방향이 제시될 수 있다.

- 한 유역의 유사량은 침식에 의한 그 유역의 '총손실량 × 유사운송비' 라는 개념에서 유사량은 토양손실과 관련된 인자들 (강우, 토양, 지형, 토지이용 등)과 유사운송비와 관련된 인자들(하천 및 유역의 형태)의 조합으로 표시될 수 있을 것이다.
  - 이러한 인자들은 '수정PSIAC방법'이나 ICOLD에서 제시한 9개 요소로 표시될 수 있으며, 따라서 상기 9개 인자들은 유역 유사량에 가장 일반적인 관련 인자로 사료된다.
- 상기 9개 인자는 Burns(1979)[10]의 유사량 추정에 관한 일반론에 제시된 에너지(강우, 유출), 장소 (지질, 토양, 지형, 하천, 상류지역 침식), 노출(피복, 토지이용) 등의 3대 요소로 축약될 수 있다.
- 이중 (지질 및 토양인자), (강우 및 유출인자), (피복 및 토지이용 인자)는 각기 성격상 하나의 인자로 대표될 수 있으며, 지형인자는 지표의 고도 관계로 대표될 수 있다.
- 하천특성, 유사특성, 상류지역 침식 등 역시 중요한 인자이나 정량화기가 어렵고 구분하기 어려우므로, 이중 하천 특성만은 하천밀도를 이용하여 정량화 시킬 수 있다.

결론적으로, 유역의 유사량 관련인자로 선정될 수 있는 것들은 1) 강우, 2) 토양, 3) 피복 및 토지이용, 4) 지형, 5) 하천밀도 등이며, 비유사량 관련 인자의 경우 유역면적 인자가 고려되어야 할 것이다. 비유사량 추정방법은 통계적 방법과 PSIAC방법과 같은 도표식 방법을 병행하여 실시하여 이들중 우수한 결과를 제시하는 방법을 최종 채택할 수 있다.

상기 6개 요소의 정량화 방법으로는, 강우 요소는 USLE방법에서의 降雨 浸蝕度 (rainfall

erosivity)를, 토양 요소는 USLE방법에서의 浸蝕性 (soil erodibility)을, 피복 및 토지이용은 단위 유역면적(1×1 km^2)당 피복상태를, 지형은 단위면적(4x4 km^2)당 표고차를, 하천밀도는 단위 유역면적당 하천연장(km/km^2)를 이용할 수 있을 것이다.

이러한 방법의 개발에 이용될 유역 비유사량 자료로는 1) 기존 저수지퇴사 자료, 2) 하천유사량 실측 자료, 3) 본 연구를 위한 시험유역에서 실측될 하천유사량 자료 등이다. 본 연구에서는 가용자료의 제한성을 고려하여 상기 6개 인자의 통계분석시 'piecewise' 상관분석을 하여 수학적/물리적으로 보다 타당성 있는 인자들을 추출할 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. 건설부, 새마을 수문조사사업 최종기술보고서, 1978.
2. Yoon, Y. N., "Estimation of Silting Load and Capacity Loss Rate of Irrigation Reservoirs in Korea," Fourteenth International Congress on Large Dams, Rio de Janeiro, Brazil, pp 175-188, 1982.
3. 財團法人ダム技術 센타, 多目的ダムの 建設, 第 2卷 調査編, 1987.
4. 한국수자원개발공사 낙동강유역조사단, 낙동강 유역 토지 및 수자원 개발 계획, 제 5권, 토양, 식생 및 침식, 1971.
5. 社團法人 土木學會(일본), 水理公式集, 1985.
6. Hadley, R.E. and Walling, D.E., Erosion and Sediment Yield : Some method of Measurement and Modelling, 1984.
7. Vanoni, V.A. ed., Sedimentation Engineering, ASCE, 1975.
8. Johnson, C.W. and Gebhart, K. A., "Prediting Sediment Yields from Sagebrush Rangeland," Proceedings of the Workshop on Estimating Erosion and Sediment Yield on Rangelands, Tucson, Arizona, March, 1982.
9. ICOLD, Sedimentation Control of Reservoirs, Guidelines, 1989.
10. Burns, R.G., An Improved Sediment Delivery Model for Piedmont Forests, Technical Report ERC 03-79, Environmental Research Center, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 1979.