

# 국내 주요 다목적댐의 비퇴사량 산정을 위한 경험공식

## Empirical equation for estimating specific sediment of the multipurpose dams in Korea

이진욱\* / 백경록\*\* / 유철상\*\*\*

Lee, Jinwook / Paik, Kyungrock / Yoo, Chulsang

### 요 지

댐의 건설은 자연하천에서 퇴적과 침식의 유사 순환과정에 영향을 주고 저수지 퇴사(reservoir sedimentation)를 야기한다. 이러한 현상은 댐의 건설 이후 장기간 축적되면서 이수과 취수에 대한 영향을 가져오기 때문에 댐 관리와 설계를 위해 정확한 추정이 필요하다. 퇴사량을 산정하는 방법에는 실측자료를 방법과 실제 유사량 자료를 이용하는 방법 그리고 경험공식을 이용하는 방법 등이 있으나, 가용한 자료의 부족으로 주로 경험 공식에 의존하고 있다. 이에 본 연구에서는 국내 대규모 다목적댐에 적합한 비퇴사량 산정 경험 공식을 제안하고자 하였다. 이를 위해 먼저 기존의 공식을 조사 및 검토하여 비퇴사량에 영향을 미칠 만한 여러 인자들을 선정하였다. 총 8개 국내 대규모 다목적댐의 비퇴사량 자료와 제원을 이용하여 다중 회귀분석을 실시하여 최종적인 식을 제안하였다. 그 결과, 대규모 다목적댐의 비퇴사량에 영향을 미치는 인자로 연평균 강우량( $P$ , mm), 연평균 유입량( $I$ , cms), 유역 평균경사( $S$ , %), 저수지 길이( $L$ , km), 저수용량/유역면적( $C/A$ ,  $m^3/km^2$ )을 채택하였으며, 제안된 식을 이용하여 산정한 비퇴사량과 실측 비퇴사량의 상관계수와 결정계수는 각각 0.985, 0.970으로 확인되었다. 아울러, 다중 공선성 분석에서도 모두 일반적인 기준치를 범위 안에 존재함을 확인하면서, 선정된 독립변수들이 통계적으로 유의함을 확인하였다. 허나, 가용 자료의 부족과 불확실성으로 인해 여전히 한계점이 존재한다. 충분한 비퇴사량 실측 자료가 구축된다면, 보다 신뢰도 높고 발전된 형태의 경험 공식의 제안이 가능할 것이다.

**핵심용어** : Muskingum 하도추적, 선형하천, 선형저수지, 금강유역

\* 교신저자, 고려대학교 대학원 건축사회환경공학부 박사과정 (e-mail: jinwook213@gmail.com, Tel: 02-3290-3912)

*Corresponding Author*, Ph.D. Candidate., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

\*\* 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수 (e-mail: envchul@korea.ac.kr)

Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul, 02841, Republic of Korea (e-mail: envchul@korea.ac.kr, Tel: 02-3290-3321)

\*\*\* 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수 (e-mail: paik@korea.ac.kr)

Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea (e-mail: paik@korea.ac.kr, Tel: 02-3290-3321)

## 1. 서론

댐의 건설은 자연하천에서 퇴적과 침식의 유사 순환과정에 영향을 주고 유역에서 침식되어 발생하는 유사를 댐 저수지 내에 퇴적시키는 현상을 야기한다(Morris, G. L. and Fan, J., 2009; 황필선, 2001). 이러한 현상을 저수지 퇴사(reservoir sedimentation)라하며, 이는 저수지의 기능에 여러 가지 영향을 준다. 대용량의 저수지에서는 대부분의 유입 퇴사가 저수지 바닥에 퇴적되므로 이를 예측하여 설계에 반영함으로써 역효과를 최소화하여야 한다(한국수자원공사, 2004) 아울러 이러한 현상은 댐의 건설 이후 장기간 축적되면서 이수와 취수에 대한 영향을 가져오기 때문에 댐 관리와 설계를 위해 정확한 추정이 필요하다(장선우 등, 2012).

퇴사량을 산정하는 방법에는 실측자료를 이용한 유량-유사량 이용 방법과 저수지 내의 퇴사 자료를 이용하는 방법, 경험공식을 이용하는 방법 등이 있으며, 이들 방법 중에서 현지의 여건에 가장 적합하다고 판단되는 방법을 선정하여 퇴사량을 산정한다(한국수자원공사, 2004). 한국수자원공사에서는 댐 관리 측면에서 건설 이후 10년을 주기로 정밀 측량 조사 및 분석을 통해 댐의 퇴사량을 실제로 산정하고 향후 영향에 대해 분석을 시행하여 각 댐의 비퇴사량 등 다양한 자료를 제공하고 있다. 하지만 댐 설계 시에는 상류에서의 유사량 관측 자료가 미흡하여 비퇴사량 산정 시 일반적으로 타 유역의 유사량 관측 자료를 비퇴사량으로 환산하거나, 경험공식을 적용하고 있다. 이러한 비퇴사량 추정 방법은 각 산정 방법 별로 많은 차이를 보이고 있기 때문에 적용성 판단에 어려움이 있다(장선우 등, 2012)

가용 자료의 부족으로 인해 저수지 퇴사에 관한 연구는 주로 경험 공식의 개발 위주로 이루어져 왔다. 미국의 경우, Churchill (1948)이 침사지나, 소형 저수 시설의 자료를 이용하여 댐 유입 토사 중 저수지 바닥에 퇴적되는 비율로 포착률 곡선을 개발하였으며, Brune (1950)은 대형 저수지를 중심으로 유사와 댐 내에 퇴적되는 양에 대한 연구를 한 바 있다. 일본의 경우 토사유출이 심한 지질적 특성 때문에 일찍부터 저수지 퇴사에 관한 연구가 실시되었으며, 특히 에사끼(1966)의 연구에서는 저수지 퇴사에 영향을 미치는 인자를 홍수량, 하상 경사, 유역 내 경사지의 면적 등으로 고려하여 일본 내 백만  $m^3$ 이상의 저수지 40개에서 측정된 자료를 이용하여 퇴사량에 대한 경험식을 제안하였다.

국내의 경우도 마찬가지로 저수지 퇴사량을 추정하는 방법 위주의 연구가 진행되어 왔으며 대부분 통계적 방법에 의하여 경험공식을 산정하였다. 대표적인 퇴사량 추정 연구는 유지창과 민병형(1975)이 경남 진양군의 30개 소류지의 퇴사 자료를 이용하여 개발 한 공식과, 윤용남(1981)이 관개용 저수지 자료를 이용하여 초기 저수용량과 저수지포착률의 관계를 통하여 공식을 제안한 연구가 있으며, 서승덕 등(1988)이 전국의 122개 저수지 퇴사 자료를 이용하여 지역별, 표고별 공식을 제안한 바 있다. 건설교통부(1993)는 중소 규모 저수지에 대한 경험공식과 도표식 방법을 제안하였다. 그러나 기존 연구에서 사용된 저수지 퇴사량 자료가 대부분 소규모 관개용 저수지의 것으로 제한적이기 때문에 대규모 댐에 대한 적용을 위해서는 대규모 저수지의 조사 자료를 바탕으로 한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 먼저 기존의 비퇴사량 경험공식을 조사 및 검토하여 대규모 다목적댐의 비퇴사량에 영향을 미칠만한 여러 인자들을 선정하였다. 국내 대규모 다목적댐의 자료를 이용하여 다중 회귀분석을 실시하였다.

## 2. 연구 대상 지점 및 자료

### 2.1 연구 대상 댐 및 비퇴사량

한국수자원공사의 ‘다목적 댐 퇴사량 조사 지침(2001)’에 따르면 국내 다목적댐은 매 10년 마다 퇴사량 조사를 실시하며, 실측 퇴사량이 설계퇴사량을 초과할 경우는 매 5년 마다 실시하도록 명시하고 있다. 하지만 현재 국내 다목적 댐의 퇴사량 조사는 섬진강 댐의 경우에는 50년 이상의 담수 기간 중 단 1회만을 실시하는 등 다소 부족한 실정이다. 국내 16개 다목적댐 중 퇴사량 조사가 1회 이상 실시된 댐은 모두 10개 댐이다.

이들 중 총 3회 측정이 이루어진 안동댐의 비퇴사량은 201(1983년), 361(1996년), 109(2008년)  $m^3/km^2/yr$ 로 불확실성이 크다고 판단되어 분석에서 제외하였고, 주암(조)댐은 유역 면적이 134.6  $km^2$ 로 본 연구에서 고려하고자 하는 대규모 유역으로 보기에 부적합하다고 판단하여 제외하였다. 아울러, 자료가 2개 이상 존재하는 댐들에 대해서는 가장 최근의 자료를 사용하였다. 최종적으로 본 연구에서 사용된 다목적댐은 8개이며, 각 댐에 대한 비퇴사량과 조사년도는 다음과 같다.

표 1. 다목적댐 비퇴사량 조사 현황

구 분	충주댐	소양강댐	임하댐	합천댐	남강댐	대청댐	섬진강댐	주암(본)댐
비퇴사량 ( $m^3/km^2/yr$ )	853	914	680	639	350	616	459	469
조사년도	2007	2006	1997	2002	2004	2006	1983	2003

### 2.2 대상 댐의 제원

본 연구에서 고려한 댐들의 위치(그림 1)와 제원(표 2)은 다음과 같다. 대상 유역 댐들은 크게 한강, 낙동강, 금강 그리고 섬진강 4개 유역에 다양하게 존재하며, 모든 지점은 저수지의 총 저수용량이 모두 4 억  $m^3$ 을 상회하는 대규모 다목적댐이다.



그림 1. 연구대상 다목적댐의 위치

표 2. 연구대상 다목적댐의 제원

구 분	충주댐	소양강댐	임하댐	합천댐	남강댐	대청댐	섬진강댐	주암(본)댐
수계	한강	한강	낙동강	낙동강	낙동강	금강	섬진강	섬진강
담수년도	1985	1973	1993	1989	1970	1981	1965	1992
높이	97.5	123	73	96	34	72	64	99.9
길이	447	53	515	472	1,126	495	344.2	562.6
총 저수용량	2,750	2,900	595	790	309.2	1,490	466	457
유효 저수용량	1,789	1,900	424	560	299.7	790	370	352
홍수조절용량	616	500	80	80	269.8	250	32	60

### 3. 자료 분석

#### 3.1 비퇴사량 산정 방법

일반적으로 저수지 퇴사량 추정 방법으로는 실측에 의한 저수지 퇴사 자료를 이용하는 방법, 유량-유사량 곡선을 이용하는 방법 그리고 경험 공식을 이용하는 방법 등이 있다. 하지만 댐 설계 시에는 상류에서의 유사량 관측 자료가 미흡하여 일반적으로 타 유역의 유사량 관측 자료를 비퇴사량으로 환산하거나, 경험공식을 적용하여 활용하고 있다(장선우 등, 2012).

##### 3.1.1 실측에 의한 방법

실측에 의한 퇴사량 산정 방법은 저수지를 수심 측량해서 저수지의 내용적을 산정하고, 과거의 저수지 내용적과 비교하여 감소된 용량을 산정하는 것이다. 여기에는 유사의 공간적 분포 조사나 표고-저수량-수면적 곡선 작성 등이 포함된다. 현재 우리나라에서는 대형 댐을 위주로 10년마다 저수지 퇴사량 조사를 실시하고 있으나, 중소형 관개용 댐에 대해서는 주기적인 퇴사량 조사가 실시되지 않고 있다. 실측에 의한 방법은 가장 정확한 퇴사량 산정 방법이지만 과거 측량자료와 추후 실시된 내용간의 일관성이 없는 경우가 있어 신뢰성이 부족한 문제점이 있다(김광남, 2011). 이 방법은 측량을 통한 저수용량을 기초로 산정하기 때문에 정확한 저수용량 산정이 중요하며, 대부분 설계 시 보다는 댐 건설 이후 관리 측면에서 사용되는 방법이다.

##### 3.1.2 비유사량을 이용한 방법

비유사량을 이용하여 비퇴사량을 환산하는 방법은 댐 상류에서 유사량을 관측하여 비유사량을 산정하고 이를 비퇴사량으로 환산하는 방법이다. 이 방법은 상류에서 실제로 유량과 유사량을 관측하여 유량-유사량 관계식을 생성하고, 지속적인 유량 관측을 통해 유사량을 추정한 후 비유사량으로 산정한다. 산정된 비유사량은 비퇴사량으로 환산하기 위해 추정식을 통해 환산된다. 주로 댐 설계 시 사용되는 비퇴사량 추정은 다음과 같이 비유사량에 저수지 포착률(trap efficiency) 퇴적토의 단위중량을 나누어 환산할 수 있다

$$D = \frac{Y \times E}{100 W} \quad (1)$$

여기서,  $D$ 는 퇴사량( $m^3$ ),  $Y$ 유사량(ton),  $E_i$ 는 포착률(%),  $W$ 는 퇴적토의 단위중량( $ton/m^3$ )이다. 퇴적토에 관한 조사 자료가 없는 경우 우리나라에서는 일반적으로 1.6을 사용한다. 포착률은 저수지로 유입되는 유사량에 대한 퇴사량의 비이며 유출 유사량에 크게 영향을 받는다. 이는 저수지 내 평균 유속과 유사 입경에 의해 좌우된다. 대표적인 포착률 추정 방법으로는 Churchill(1948)과 Brune(1953)의 포착률 곡선을 들 수 있다. Churchill (1948)의 방법은 침사지나 소형 저수지, 홍수 조절 시설, 자주 바닥이 노출되는 저수지 등을 대상으로 조사된 것이며, Brune의 방법은 대형 저수지를 중심으로 조사된 것이다. 국내에서는 도표를 이용한 포착률 추정 이외에 김진택 등(1993)이 관개용 저수지 자료를 바탕으로 포착률을 추정하는 공식을 제안하였다. 하지만, 소규모 저수지 자료를 바탕으로 개발된 Churchill (1948)의 곡선이나 김진택 등(1993)의 추정식보

다는 대형 저수지 자료를 바탕으로 개발된 Brune(1953)의 포착률 곡선이 연구대상이 되는 댐들의 조건에 부합할 것이다. Salas와 Shin(1999)은 Brune의 포착률 계산을 위해 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$E_t = a + b \left( \log \frac{C}{31.536 \times 10^6 I} \right)^2 \quad (2)$$

여기서,  $E_t$ 는 포착률(%),  $C$ 는 초기 저수지 저수량( $m^3$ ),  $I$ 는 연평균유입유량( $m^3/s$ ),  $a$ 와  $b$ 는 상수로써 각각 99.508과 -13.547이다.

### 3.1.3 경험적 공식에 의한 방법

경험적 공식을 이용한 방법은 통계적 방법을 통해 기존자료를 분석하여 공식을 개발하여 사용하는 방법이다. 국내에서 개발된 비퇴사량 추정 공식으로는 유시창과 민병형 공식(1975), 류희정과 김치원 공식(1976), 건설부의 새마을 공식(1978), 윤용남 공식(1982), 안상진과 이종형 공식(1984), 서승덕 공식(1988) 등의 통계적 방법이 있으며 이중 새마을 공식과 윤용남 공식이 실무에 자주 이용되고 있다. 경험 공식에 대한 설명은 김광남 (2011)에 정리된 내용을 참고하여 기술하였다.

#### (1) 유시창과 민병형 공식(1975)

유시창과 민병형(1975)은 1974년 경남 진양군 내의 30개 소류지에 대한 퇴사 자료와 제반 특성인자를 조사하여 비퇴사량 자료를 정리하였다. 이 자료를 이용하여 단순 회귀 분석을 실시하였으며 결과는 식 (3)-(5)와 같다.

$$V_r = 1.27(C_d/A)^{0.6} \quad (3)$$

$$V_r = 21.9P^{10.5} \quad (4)$$

$$V_r = 39.6S^{0.75} \quad (5)$$

여기서  $V_r$ 은 비퇴사량( $m^3/km^2/yr$ ),  $A$ 는 유역면적( $km^2$ ),  $C_d$ 는 계획 저수량( $m^3$ ),  $P$ 는 연평균 강수량( $mm$ ),  $S$ 는 유역평균경사(%)이다. 아울러, 다중회귀분석을 실시하여 다음과 같은 비퇴사량 추정식을 제안하였다.

$$\log V_r = 0.179 + 0.108 \log A - 6.72 \log P + 2.20 \log S \quad (6)$$

해당 연구에서는 식 (6)에 가장 많은 인자들이 고려되었으므로 실측 퇴사량을 가장 잘 반영한다고 하였으며, 이 모형을 저수지나 소류지의 비퇴사량 추정 공식으로 제안하였다.

#### (2) 류희정과 김치원 공식(1976)

류희정과 김치원(1976)은 1974년 삼교천 내 9개소 저수지의 퇴사량과 제반 특성인자들을 조사

하고 이를 토대로 비퇴사량 자료를 정리하였다. 이 자료를 이용하여 단순 회귀분석을 실시하였으며, 그 결과는 식 (7)-(9)와 같다.

$$V_r = 1.43(C_d/A)^{0.531} \quad (7)$$

$$V_r = 672.61P^{0.024} \quad (8)$$

$$V_r = 267.21S^{0.587} \quad (9)$$

### (3) 새마을 공식(1978)

이 공식의 출처는 건설부(1978)의 '새마을 수문조사사업 최종기술보고서'이다. 본 서에서는 식 (10)와 같은 연평균 퇴사량 추정공식을 제안하였다.

$$V_s = 255.4A^{0.1816}C^{0.5774} \quad (10)$$

여기서,  $V_s$ 는 연평균 퇴사량( $m^3$ ),  $A$ 는 유역면적( $km^2$ ),  $C$ 는 초기 저수용량( $ha \cdot m$ )이다.

비퇴사량은 연평균 퇴사량을 유역면적으로 나눈 값이므로 도출된 식 (10)을 유역면적으로 나누면 다음 식 (11)와 같은 비퇴사량 공식으로 변환이 가능하다.

$$V_r = 255.4A^{-0.8184}C^{0.5774} \quad (11)$$

여기서  $V_r$ 은 비퇴사량( $m^3/km^2/yr$ ),  $A$ 는 유역면적( $km^2$ ),  $C$ 는 초기 저수용량( $ha \cdot m$ )이다.

### (4) 윤용남 공식(1982)

윤용남(1982)은 우리나라 관개용 저수지에 대한 저수용량의 감소와 퇴사량 추정에 관한 연구를 하는 과정에서 기존 저수지 퇴사량 자료를 이용하여 저수지의 연평균 퇴사량을 추정하는 공식을 제안하였다. 아울러 연평균 퇴사량에 영향을 미치는 인자로 유역면적, 초기 저수용량, 연평균 강우량을 제시하였으며, 회귀분석을 실시한 결과 식 (12)의 형태가 가장 높은 상관성을 보임을 밝혔다.

$$V_r = KA\alpha C/A^\beta \quad (12)$$

여기서,  $K$ 는 회귀계수,  $C$ 는 초기 저수용량( $ha \cdot m$ ),  $C/A$ 는 초기 저수용량/유역면적의 비로써 저수지 토사 포착률의 지표로 이용된다. 본 식에서는 지표와 함께 저수지 포착률을 고려하기 위하여 Brown(1943)이 제시한 식 (13)를 이용하였다.

$$E_t = \left[ 1 - \frac{1}{1+k(C/A)} \right] \quad (13)$$

여기서,  $k$ 는 0.046-1.0의 범위를 갖는 값이며 설계 입장에서  $acre-ft/m^2$  단위로 환산하면 =2.1이

된다. 식 (13)의  $C/A$  지표 대신에 식 (13)의  $E_t$ 를 대입하여 최종 회귀 모형식을 식 (14)와 같이 설정하였다.

$$V_s = KA \alpha E_t^\beta \quad (14)$$

113개소의 퇴사자료를 이용하여 다중 회귀 분석을 실시하여 식 (15)와 같은 결과를 얻었으며 다중 상관계수는 0.9223으로 확인되었다.

$$V_s = 1334.08A^{0.8}E_t^{6.2668} \quad (15)$$

비퇴사량은 연평균 퇴사량을 유역면적으로 나눈 값이므로 도출된 식 (15)를 유역면적으로 나누면 다음 식 (16)과 같은 비퇴사량 공식으로 변환이 가능하다.

$$V_r = 1334.08A^{-0.2}E_t^{6.2668} \quad (16)$$

여기서  $V_r$ 은 비퇴사량( $m^3/km^2/yr$ ),는  $A$ 유역면적( $km^2$ ),는  $E_t$ 는 저수지 포착률(%)이다.

#### (5) 안상진과 이중형 공식(1984)

안상진과 이중형(1984)은 윤용남 공식과 유사한 방법을 이용하여 저수지 연평균 퇴사량 공식을 유도하였다. 삼교천 유역의 13개소, 영산강 유역의 26개소, 남강 유역의 27개소 저수지 퇴사자료를 이용하였으며, 대상 유역면적은  $33 km^2$ 이하이다. 연평균 퇴사량이 유역면적, 저수지 포착률, 유역의 평균경사, 유역의 형상계수 등과 관계가 있다는 것을 전제로 각 인자들을 여러 가지 형태로 조합한 회귀모형식을 설정하였다. 설정된 회귀모형식을 이용하여 유역 별로 회귀분석을 실시하여 계수들을 결정하였다. 사용된 회귀모형은 식 (17)와 같다.

$$V_s = aA^{b1}E_t^{b2}S^{b3}S_f^{b4}A_g^{b5} \quad (17)$$

여기서,  $E_t$ 는 저수지 포착률(%),는  $S_f$ 유역 형상계수,  $S$ 는 유역 평균경사(%),는  $A_g$ 저수지 퇴적기간(yr),  $a$ ,  $b1$ ,  $b2$ ,  $b3$ ,  $b4$ ,  $b5$ 는 회귀계수이다. 저수지 포착률은 윤용남 공식과 동일한 방법을 이용하였다.

해당 연구에서는 먼저 유역면적만을 고려하여 단순 회귀분석을 실시하고 점차 저수지 포착률, 유역의 평균경사, 유역 형상계수 그리고 저수지 퇴적기간 순으로 종속변수를 추가하면서 다중 회귀분석을 실시하였다. 종속 변수가 모두 포함된 회귀식만을 표시하면 다음 식 (18)-(20)과 같다.

$$\text{삼교천 } V_s = 1744301.049A^{0.02}E_t^{17.017}S^{0.429}S_f^{0.684}A_g^{-1.157} \quad (18)$$

$$\text{영산강 } V_s = 66023.721A^{0.546}E_t^{11.061}S^{0.068}S_f^{0.353}A_g^{0.877} \quad (19)$$

$$\text{남강 } V_s = 1488.675A^{0.934}E_t^{4.985}A_g^{0.122} \quad (20)$$

퇴사자료를 저수지 포착률이 100%, 95%, 90%, 85%일 때의 비퇴사량으로 환산한 후, 유역의 구별 없이 회귀분석하면 식 (21)와 같다.

$$V_r = 1419.711A^{-0.174}E_t^{6.596} \quad (21)$$

여기서  $V_r$ 은 비퇴사량( $m^3/km^2/yr$ ),  $A$ 는 유역면적( $km^2$ ),  $E_t$ 는 저수지 포착률(%)이다.

### (6) 서승덕 공식(1988)

서승덕 등(1988)은 유역면적이 200 ha 이상인 전국(제주 제외) 122개 저수지의 퇴사자료를 이용하여 비퇴사량 자료와 관련 제반 특성 인자도 실측 및 지도 작업을 통해 정리하였다. 먼저 자료들을 이용하여 각 특성 인자 별로 단순 회귀분석을 실시하여 주 특성 인자로 유역면적, 유역경계의 총 연장, 유로연장을 선택하였다. 3 개의 특성 인자를 종속 변수로 하여 저수지 비퇴사량 추정 공식을 지역별, 저수지 제방 표고 별로 도출하였다. 해당 연구에서 설정한 다중 회귀모형식은 식 (22)와 같다.

$$V_r = aA^bCL^cL^d \quad (22)$$

여기서,  $CL$ 은 유역경계의 총 연장(km),  $L$ 은 유로연장(km),  $a, b, c, d$ 는 회귀계수이다. 경기, 강원, 충북, 충남, 전북, 전남, 경북, 경남으로 나누어 회귀계수를 결정하고, 저수지 표고를 세 구간으로 나누어 회귀계수를 결정하여 최종적으로 경험식을 제안한 바 있다.

본 연구에서는 가용한 자료가 없는 경우에 대규모 유역의 다목적댐에 적합한 경험 공식을 산정하고자 한다. 이를 위해 기 언급한 공식들을 참고하여, 인자들을 선정하고 다중회귀분석을 통해 최종적으로 새로운 회귀식을 제안할 것이다.

### (7) 분석 인자 선정

다중 회귀분석에 앞서 비퇴사량 추정을 위한 독립변수 들을 결정해야한다. 이를 위해, 비퇴사량에 영향을 미친다고 생각되는 인자들을 선정하였다. 기 제안된 경험식들의 인자들과 물리적인 의미를 고려한 인자들을 후보군으로 보았다. 최초로 고려한 인자들은 다음과 같다. 연평균 강우량( $P$ , mm), 연평균 유입량( $I$ , mm), 유역 평균경사( $S$ , %), 저수지 길이( $L$ , km), 저수용량/유역면적( $C/A$ , mm), 유역면적 ( $A$ ,  $km^2$ ), 총 저수용량( $C$ ,  $m^3$ ).

비퇴사량은 유역 면적과 밀접한 관계를 가지고 있으며 유역에서 침식된 유사가 저수지까지 도달하는 유사 전달률에 의해 결정되며(Burns and MacArthur, 1996), 유역면적이 작은 지역에서는 유역에서 침식된 유사가 저수지로 도달하는 유사 전달률이 커서 비퇴사량은 크게 산정되며, 이와 반대로 유역면적이 큰 지역에서는 저수지로 도달하는 유사 전달률이 작아 비퇴사량은 작게 산정되는 경향이 있다(Strand, R.I. and Pemberton, E.L., 1987)라고 알려져있다. 하지만 유역면적( $A$ ,  $km^2$ )과 밀접한 관련이 있는 연평균 유입량을 함께 고려한다면, 회귀분석의 기본 전제인 독립성에 어긋나게 된다. 실제로 본 연구에서 고려한 자료에서의 서로간 상관관계는 0.944에 달한다. 이는 다중 회귀분석에서 두 인자를 함께 고려하는 경우, 도출되는 결과를 신뢰할 수 없음을 의미한다.

이뿐만 아니라, 본 연구에서는 대형 저수지 자료를 바탕으로 개발된 Brune(1953)의 포착률 곡선식인 식 (2)를 참고하여, 유역면적 ( $A$ ,  $\text{km}^2$ )대신 연평균 유입량( $I$ ,  $\text{cms}$ )을 고려하고자 하였다. 즉, 대규모 저수지의 포착률과 관련이 있는 인자를 반영하고자 한 것이다. 저수용량/유역면적( $C/A$ ,  $\text{mm}$ )에도 유역면적이 반영되어 있다는 점도 이러한 인자 선정 을 뒷받침 해줄 수 있을 것이다. .

총 저수용량( $C$ ,  $\text{m}^3$ )의 경우, 최초 분석 시 다른 변수들로 설명할 수 없는 부분을 의미하는 공차한계의 값이  $2.83 \times 10^{-7}$ 로써 일반적인 상한계인 0.1보다 확연히 작은 값을 가지는 것으로 확인되었다. 이는 즉, 독립변수(입력변수)로서 큰 의미를 지니지 못하는 것이다.

앞선 이유들로 인해 최종적으로, 총 5개의 인자를 채택하였다. 국내 다목적댐의 비퇴사량 산정을 위해 최종적으로 채택된 인자들은 다음과 같다.

- 1) 연평균 강우량( $P$ ,  $\text{mm}$ )
- 2) 연평균 유입량( $I$ ,  $\text{cms}$ )
- 3) 유역 평균경사( $S$ ,  $\%$ )
- 4) 저수지 길이( $L$ ,  $\text{km}$ )
- 5) 저수용량/유역면적( $C/A$ ,  $\text{m}^3/\text{km}^2$ )

아울러, 분석을 위해 필요한 각 댐 별 인자들의 값들은 다음 표. 3과 같다.

**표 3. 다중 회귀분석을 위한 연구대상 댐들의 특성**

	연평균 강우량 ( $P$ , $\text{mm}$ )	연평균 유입량 ( $I$ , $\text{cms}$ )	유역 평균경사 ( $S$ , $\%$ )	저수지 길이 ( $L$ , $\text{km}$ )	저수용량 /유역면적 ( $C/A$ , $\text{m}^3/\text{km}^2$ )
소양강댐	1100.0	55.5	53.84	65.8	1072882
충주댐	1197.6	154.5	48.83	82.5	413658
대청댐	1230.0	102.0	39.07	80.0	360426
임하댐	987.1	17.3	47.36	37.0	437179
함천댐	1249.1	28.9	41.16	30.0	854054
남강댐	1416.8	64.4	40.39	16.5	135317
섬진강댐	1310.2	17.3	37.91	35.8	610747
주암댐	1530.0	25.0	36.93	55.0	452475

### 3.3 다중 회귀분석

현실적으로 종속변수에 영향을 미치는 독립변수를 두 개 이상 고려해야 되는 경우가 빈번하다. 다중회귀분석(multi regression analysis)은 두 개 이상의 독립변수들과 하나의 종속변수의 관계를 분석하는 기법으로써 단순회귀분석을 확장한 것이다.

다중회귀식을 추정하는 방식에는 여러 가지가 있다. 이들 중 가장 대표적인 것이 동시 입력방식과 단계선택 방식이다. 현실적으로 이 두 가지 방식 외에는 거의 사용되지 않는다. 동시입력방식(enter)은 연구자가 고려하는 모든 독립변수들을 한꺼번에 포함하여 분석하는 방법이다. 이 방식을 이용하면 다른 독립변수들이 통제된 상태에서 특정 독립변수의 영향력을 알 수 있으며, 또한 연구자가 고려하는 모든 독립변수들이 동시에 종속변수를 설명하는 정도를 알 수 있다.

이에 비해 단계선택방식(stepwise)은 다른 변수들이 회귀식에 존재할 때 종속변수에 영향력이 있는 변수들만을 회귀식에 포함시키는 방식이다. 이 때, 설명력이 높은 순서대로 변수가 회귀식에

포함된다. 하지만 그 전 단계에서 회귀식에 포함된 독립변수들도 나중에 들어오는 변수 때문에 설명력이 매우 낮아지면서 회귀식에서 제거가 될 수 있다. 이 방식은 종속변수를 설명하는 데 있어서 설명력이 어느 정도 이상 되는 변수들로만 구성된 회귀식을 발견하는 데 유용하다(이학식과 임지훈, 2011).

본 연구에서는 각 지점별 비퇴사량과 3.2에서 선정된 주요 인자들에 대해 대수값을 취한 후, 3.3에서 기술한 방법을 이용하여 다중 회귀분석을 실시하였다. 다중 공선성(multi-collinearity)과 물리적인 의미를 고려한 최종 인자들을 이용하여 동시입력방식(enter)을 통해 다중 회귀식을 산정하였다. 분석을 위해 IBM SPSS Statistics 22를 사용하였다. 이와 같은 방식을 통해, 최종적으로 산정된 식은 식 (23)과 같다.

$$\log V_r = -0.714 \log P + 0.1I + 0.662 \log S + 0.144 \log L + 0.205 \log(C/A) + 2.343 \quad (23)$$

여기서,  $P$ 는 연평균 강우량(mm),  $I$ 는 연평균 유입량(cms),  $S$ 는 유역 평균경사(%),  $L$ 은 저수지 길이(km),  $C/A$ 는 저수용량/유역면적( $m^3/km^2$ )을 말한다. 식 (23)를 거듭제곱 형태로 나타내면 아래 식 (24)와 같이 표현할 수도 있을 것이다.

$$V_r = 220.293 P^{-0.714} I^{0.1} S^{0.662} L^{0.144} (C/A)^{0.205} \quad (24)$$

기존에 구축했던 실측 비퇴사량과 산정된 식을 이용하여 계산한 국내 다목적댐들의 비퇴사량 값은 표. 4에서 확인할 수 있으며, 서로 간의 상관계수와 결정계수는 각각  $R = 0.985$ ,  $R^2 = 0.970$ 으로 매우 높은 상관성을 가짐을 확인할 수 있다(그림 2).

**표 4. 대상 댐 별 실측 비퇴사량과 제안된 공식으로 산정된 비퇴사량**

댐 명	비퇴사량	본 연구(제안 공식)
소양강댐	914	974.55
충주댐	853	809.84
대청댐	616	636.43
임하댐	680	659.08
합천댐	639	594.74
남강댐	357	366.08
섬진강댐	460	495.20
주암(본)	469	452.28

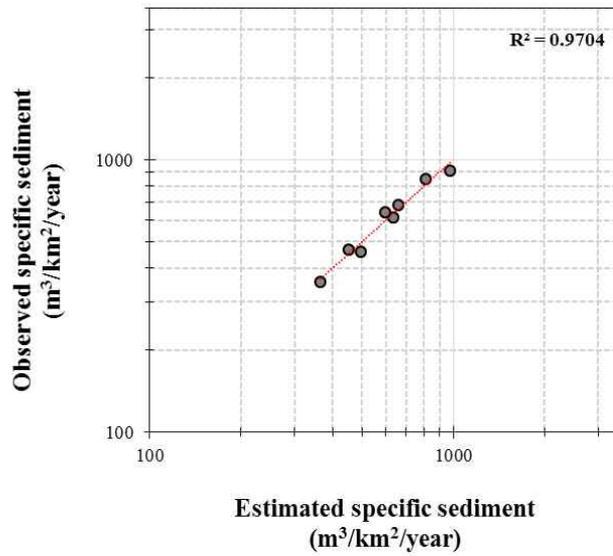


그림 2. 실측 비퇴사량과 제안된 공식으로 산정된 비퇴사량

### 3.4 검토

#### 3.4.1 다중 공선성

먼저, 공선성(collinearity)이란 두 개의 독립변수들 간의 관계를 의미하는데, 예를 들어 두 개의 독립변수간의 상관관계 계수가 1이면 완전한 공선성(complete collinearity)을 보인다고 하고, 계수가 0이면 전혀 공선성이 없음(complete lack of collinearity)을 의미한다. 특히, 세 개 이상 변수들 간의 관계를 다중공선성(multi-collinearity)이라 한다(Hair, 1998). 한 독립변수가 종속변수에 대한 설명력이 높더라도 (다중) 공선성이 높으면 설명력이 낮은 것처럼 나타난다.

다중공선성을 알아보기 위한 가장 간단한 방법은 독립변수들 간의 상관관계를 조사하는 것이다. 독립변수들 간의 높은 상관관계(일반적으로는 0.90 이상)는 공선성을 판단하는 지표가 된다. 본 연구에서 고려된 인자들 간의 상관관계 분석 결과는 표 5와 같다.

표 5. 공선성(collinearity) 확인을 위한 인자들간 상관 계수(Pearson correlation coefficient) 비교

	연평균 강우량 ( <i>P</i> )	연평균 유입량 ( <i>I</i> )	유역 평균경사 ( <i>S</i> )	저수지 길이 ( <i>L</i> )	저수용량 /유역면적 ( <i>C/A</i> )
연평균 강우량 ( <i>P</i> )	1.000	0.015	-0.764	-0.250	-0.381
연평균 유입량 ( <i>I</i> )		1.000	0.307	0.441	-0.298
유역 평균경사 ( <i>S</i> )			1.000	0.319	0.355
저수지 길이 ( <i>L</i> )				1.000	0.428
저수용량 /유역면적 ( <i>C/A</i> )					1.000

위 표에서 확인할 수 있듯이, 고려된 5개의 인자들 간 상관관계의 절대값은 모두 0.90 이하로 큰 공선성을 가지는 조합은 없는 것으로 확인되었다. 하지만 독립변수들 간의 상관관계를 조사하는 것은 단지 두 변수들 간의 공선성만을 고려한다는 점에서 한계점이 존재한다. 다시 말해, 상관관계의 제곱값은 한 독립변수가 다른 한 독립변수에 의해 설명되는 정도만을 알려주기 때문에 세 개 이상의 변수들 간의 상관관계를 파악할 수 없다. 공선성을 보다 엄격하게 점검하려면 공차한계와 분산팽창요인을 확인할 필요가 있다. 이 두 가지 지표들은 한 독립변수가 다른 모든 독립변수들에 의해서 설명되는 정도를 알려준다.

먼저, 공차한계(tolerance)는 공선성을 점검하기 위해 가장 많이 사용되는 지표이다. 변수 *i*의 공차한계( $TOL_i$ )는  $(1 - R_i^2)$ 로 표시되는데, 여기서  $R_i^2$ 는 독립변수 *i*가 다른 독립변수들에 의해서 설명되는 정도를 의미한다. 즉, 독립변수 *i*를 종속변수로 설정하고 다른 독립변수들을 이용하여 회귀분석한 경우의  $R^2$ 에 해당한다. 따라서 공차한계는 한 독립변수가 다른 독립변수들에 의해서 설명되지 않는 부분을 의미한다.

요약하면,  $R_i^2$  값이 클수록 공차한계 값이 작아지는데, 공차한계 값이 작을수록 그 독립변수가 다른 독립변수들에 의해 설명되는 정도가 크다는 의미이므로 (다중)공선성이 높다. 분산팽창요인 (variance inflation factor; VIF)은 공차한계의 역수로 표시되며 ( $VIF_i = 1/TOL_i$ ), VIF 값이 클수록 독립변수들 간의 공선성 정도가 높음을 의미한다.

공차한계의 최댓값은 1이며, 이는 한 독립변수가 다른 독립변수들에 의해 설명되는 정도가 0임을 의미한다. 공선성 판단을 위한 일반적인 기준은 공차한계 .10 이하, 분산팽창요인 10 이상이다. 즉, 공차한계가 0.10 이하이고 분산팽창요인이 10 이상일 경우 다중공선성을 가지는 것으로 판단하며 해당 인자를 다중회귀식에 포함시키기 부적절하다고 본다. 최종적으로 선정된 인자들의 공선성 통계량인 공차와 VIF는 아래의 표 6과 같다.

표 6. 다중 공선성(multi-collinearity) 확인을 위한 공선성 통계량 비교

인자	공선성 통계량	
	공차(tolerance)	VIF (variance inflation factor)
연평균 강우량 ( $P$ )	.325	3.081
연평균 유입량 ( $I$ )	.332	3.012
유역 평균경사 ( $S$ )	.258	3.883
저수지 길이 ( $L$ )	.420	2.381
저수용량/유역면적 ( $C/A$ )	.392	2.548

위 표에서 확인할 수 있듯이, 공차 0.1 이하 (즉, VIF 10 이상)인 인자들은 없는 것이 확인되었다. 이는 다중 회귀분석에 있어서 서로 간에 독립성이 보장되며, 각 인자들이 최종 식에 대해 충분한 설명력을 지님을 의미한다.

### 3.4.2 수정 결정계수( $R_{adj}^2$ )

$R^2$ 은 다중회귀분석의 결정계수(coefficient of determination)로써 종속변수의 분산 중 독립변수들(혹은 회귀식)에 의해 설명되는 비율을 나타내며 0과 1사이의 값을 가진다. 그런데  $R^2$ 은 회귀식에 독립변수가 추가됨으로써 점차 커진다. 예를 들어 독립변수가  $x_1$ 과  $x_2$ 인 경우의 회귀식의  $R^2$ 에 비하여 새로이  $x_3$ 가 추가된 회귀식의  $R^2$ 은  $x_3$ 가 무엇이든지 간에 반드시 더 크다. 일반적으로  $R^2$ 이 클수록 그 회귀식은 보다 높은 설명력을 가지나,  $R^2$ 을 약간 증가시키기 위해 독립변수가 추가되는 것은 여러 측면에서 낭비이다.  $R_{adj}^2$ 은 이러한 점을 고려한 것으로  $R^2$ 을 독립변수의 수와 표본의 크기로써 조정한 것이며,  $R^2$ 보다 작다. 그런데 새로이 추가되는 어떤 변수의 추가적 설명력이 매우 작은 경우  $R^2$ 는 조금이라도 증가하나  $R_{adj}^2$ 은 오히려 감소한다. 그러므로 이 변수를 독립변수에 포함시키는 것은 부적절하다고 할 수 있다. 수정  $R^2$ 을 구하기 위한 표는 아래와 같다.

표 7. 수정 결정계수를 구하기 위한 표

	제곱합(SS)	자유도
회귀 모형	$SSR$	$k$
잔차	$SSE$	$n - k - 1$
합계	$Total\ SS$	

여기서  $k$ 는 독립변수의 개수 이다.  $R^2$ 과  $R_{adj}^2$ 을 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$R^2 = \frac{SSR}{Total\ SS} = \frac{SSR}{SSR + SSE} \quad (25)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n - a}{n - k - 1} \quad (26)$$

새롭게 제안된 식의 수정 결정계수  $R_{adj}^2$ 은 0.894로 수정되기 전(0.970)과 비교하여도 크게 차이 없는 수준으로 매우 높은 상관성을 지님을 확인하였다.

#### 4. 토론

대규모 다목적댐의 비퇴사량에 영향을 미치는 인자는 연평균 강우량( $P$ , mm), 연평균 유입량( $I$ , cms), 유역 평균경사( $S$ , %), 저수지 길이( $L$ , km), 저수용량/유역면적( $C/A$ ,  $m^3/km^2$ )로 산정되었다. 통계적인 측면 뿐 아니라 이들의 물리적인 의미 또한 검토해 볼 필요가 있다.

연평균 강우량( $P$ , mm)이 많아지면 응당 많은 양의 유사가 내려올 것이고, 비퇴사량은 늘어날 것이다. 그리고 연평균 유입량( $I$ , cms)이 많아지면 비퇴사량은 많아지며, 유역 평균경사( $S$ , %)가 급해질수록 유사량이 늘어나면서, 같은 효과를 보일 것이다. 아울러 저수지 길이( $L$ , km)가 길수록 체류하는 시간이 길어지므로 댐 내 포착되는 유사가 많아질 것이다. 마지막으로, 저수용량/유역면적( $C/A$ ,  $m^3/km^2$ )이 커질수록 유역의 단위면적 당 존재하는 저수지의 부피이므로 이 또한 체류시간과 포착률의 개념으로 이해할 수 있을 것이다.

대부분 인자들을 최종식과 비교해보면 합리적인 결과로 나타난 것으로 보인다. 하지만 연평균 강우량( $P$ , mm)의 경우 공선성 분석과 같은 통계적인 분석에서는 별다른 문제를 보이지 않았지만, 최종식을 살펴보면 편회귀계수로 음의 값을 가짐을 확인할 수 있다. 상식적으로 또는 물리적으로 합리적이지 못한 결과라고 생각된다. 이에 대한 심도 있는 분석이 필요하다.

한국수자원공사에 따르면 국내 다목적댐은 매 10년 마다 퇴사량 조사를 실시하며, 실측 퇴사량이 설계퇴사량을 초과할 경우는 매 5년 마다 실시하도록 명시하고 있지만, 그렇게 되지 못하고 있는 것이 실정이다. 가용한 자료의 개수가 현저히 부족하다. 아울러 분석에서 제외한 안동댐 이외에도 충주댐, 소양강댐 그리고 대청댐의 자료 또한 크진 않지만 불확실성이 어느 정도 존재하는 것으로 보인다. 이러한 불확실성은 가용한 지점이 8개 밖에 되지 않으므로, 회귀분석에 있어 매우 큰 영향을 미칠 것이다. 추후 지속적인 측량을 통한 정확한 비퇴사량 자료를 구축할 필요성이 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 국내 대규모 다목적댐에 적합한 경험 공식을 제안하고자 하였다. 이를 위해 먼저 기존의 비퇴사량 경험공식을 조사하고, 물리적 그리고 통계적 의미 또한 검토하여 비퇴사량에 영향을 미칠만한 여러 인자들을 선정하였다. 총 8개 국내 대규모 다목적댐의 비퇴사량 자료와 제원을 이용하여 다중 회귀분석을 실시하여 최종적인 식을 산정하고 제안하였다. 위 과정을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 대규모 다목적댐의 비퇴사량에 영향을 미치는 인자로 연평균 강우량( $P$ , mm), 연평균 유입

량( $I$ , cms), 유역 평균경사( $S$ , %), 저수지 길이( $L$ , km), 저수용량/유역면적( $C/A$ , m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>)을 채택하였다. (2) 제안된 식을 이용하여 산정된 비퇴사량과 실측 비퇴사량의 상관계수와 결정계수는 각각 0.985, 0.970에 다다를 정도로 큰 값을 보여주었으며, 고려한 변수들의 개수를 고려한 수정 결정계수 또한 0.894로 매우 양호한 것을 확인할 수 있었다. (3) 아울러, 다중 공선성 분석에서도 모두 일반적인 기준치를 통과하면서, 독립변수로서 통계적으로 유의함을 확인할 수 있었다.

결론적으로, 본 연구는 대규모 댐의 비퇴사량 추정을 위한 경험 공식을 제안하였고 여러 가지 측면에서 어느 정도 합리성을 확인하였다. 하지만, 가용 자료의 부족과 불확실성으로 인해 여전히 한계점이 존재한다. 정확하고 충분한 비퇴사량 실측 자료가 구축된다면, 보다 신뢰도 높고 발전된 형태의 경험 공식의 제안이 가능할 것이다.

## 6. 참고문헌

- 김광남 (2011). 국내 다목적 댐의 저사댐 설치에 따른 퇴사저감 효과. 석사학위논문, 인천대학교.
- 류희정, 김시원 (1976). “저수지퇴사에 관한 연구.” 한국수문학회지, 한국수문학회, 제 9권, 제2호, pp. 67-75.
- 서승덕, 박홍익, 천만복, 윤경덕 (1998) 유역의 지상적 요인과 저수지 비퇴사량과의 관계분석, 한국농공학회지, 30.
- 안재현, 장수형, 최원석, 윤용남 (2006). “저수지 장기운영을 위한 퇴적토사의 효율적관리(1) - 저수지 퇴사량 산정.” 한국물환경학회지, 한국물환경학회, 제22권, 제6호, pp. 1088-1093.
- 우효섭 (2001). 하천수리학.
- 유시창, 민병형 (1975) “저수지의 퇴사에 대한 연구: 진양지구를 중심으로”한국농공학회, 제17권, 제3호, pp.46-53.
- 윤용남 (1981). “관개용 저수지의 연평균 퇴사량과 저수 용량 감소율의 산정.” 대한토목학회지, 대한토목학회, 제1권, 제1호, pp. 69-76.
- 이학식, 임지훈 (2011) SPSS 18.0 매뉴얼, 집현재
- 장선우, 황필선, 김경훈, 신영호 (2012). “저수지 비퇴사량 산정 방법에 관한 연구.” 한국수자원학회 학술대회논문집, 한국수자원학회, pp. 523-527.
- 한국수자원공사 (2004), 퇴사량 저감을 위한 저사댐 설치방안 연구.
- 황필선 (2001). “다목적댐 퇴사관리 현황” 제24회 한·일 하천 및 수자원 개발 기술협력회의, 한국건설교통부-일본 국토교통성.
- Brune, G.N. (1953), “Trap efficiency of reservoirs”, Transactions of American Geophysical Union, Vol.34, No.3.
- Churchill, M.A. (1948), “Discussion of analysis and use of reservoir sedimentation data”, by L. C. Gottschalk, Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, pp.139~140, Washington, D.C., Jan
- Hair, Joseph F., William C. Black, Barry J. Babin, and Rolph E. Anderson (2010), Multivariate Data Analysis, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Morris, G.L. and Fan, J. (2009) Reservoir Sedimentation Handbook.
- 江崎一博 (1966) 貯水池の堆砂にする研究, 土木研究所報告, 第129號