

## 1.1 저수지 퇴사량 및 퇴사위 결정

### 1.1.1 필요성 및 현황

- 저수지로 유입되는 유사(sediment)에 대한 정확한 예측은 계획댐의 퇴사관련 설계에 필수적인 요소이다.
- 예측된 유사량 및 퇴사량 자료는 계획댐으로 유입되는 유사의 퇴적분포 예측을 통한 50년, 100년후의 저수위-저수용량 관계곡선 결정, 퇴사위 및 사수위 결정을 통한 저수지 용량배분, 댐체 및 취수구 등의 각종 수리구조물 안정 검토, 저수지 상류 퇴사로 인한 홍수위 상승 검토 등에 사용된다.
- 한편, 이러한 유사의 양을 나타내는 방법에는 단위기간(1년)에 단위면적( $\text{km}^2$ )당 상류유역에서 유출되어 저수지로 유입되는 유사량(sediment yield)인 비유사량( $\text{tons}/\text{km}^2/\text{yr}$ )과 단위기간(1년)에 단위면적( $\text{km}^2$ )당 상류유역에서 유출되어 저수지 바닥에 퇴적되는 퇴사량(reservoir deposits)인 비퇴사량( $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ ) 등이 있다.
- 현재 우리나라는 해당 구역별로 이러한 비유사량, 혹은 비퇴사량의 실측자료가 매우 빈약한 형편이어서 다른 저수지의 퇴사량 자료를 이용하거나 경험공식 또는 유량-유사량곡선 등을 적용하고 있다. 하지만 이와 같이 실측자료가 뒷받침되지 않은 추정방법에는 많은 문제점을 내포되어 있어 신뢰성있는 결과를 도출하기 어려운 실정이다.

### 1.1.2 비퇴사량 추정

- 미계측유역의 비퇴사량을 추정하기 위해서는 다음과 같은 방법을 적용한다.
  - 국내외 기존 저수지의 실측 비퇴사량 자료를 수집
  - 기존 경험공식
  - 댐 설계시 비유사량 산정지침을 마련하기 위하여 수행된 「댐 설계를 위한 유역단위 비유사량 조사연구(건설부, 1992)」에 제시된 통계적 경험 방법 및 도표식 방법
- 이와 같은 여러 가지 방법의 결과들을 비교·검토한 후 합리적인 결과를 채택한다.

### 가. 기존 저수지 실측자료

- 국내외 기존 저수지의 비퇴사량(비유사량) 실측자료는 <표 11.1>와 같고 우리나라의 실측 비퇴사량은 약 230~1,000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/yr의 범위이다.

<표 11.1>                      기존 저수지 비퇴사량(비유사량) 실측자료

국명	수계(지명)	댐명	퇴적기간(년)	유역면적(km <sup>2</sup> )	비퇴사량(m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /yr)	비유사량(tons/km <sup>2</sup> /yr)	비고
한국	한강	화천	12	4,092	910		57년 측정, 초기불안정 유역
		"	41	4,092	500		86년 측정, 안정된 유역
		소양강	10	2,703	1,000	900	83년 측정, 측량 신뢰도 의심
	낙동강	안동	7	1,584	230	207	83년 측정, 자료양호
		남강	14	2,285	748		83년 측정
		"	19	2,285	357	436	87년 측정, 자료양호
섬진강	섬진강	54.5	763	460	414	83년 측정, 자료양호	
일본	和賀川	大荒澤		569	397		
	相模川	寫瀨		928	156		
	阿賀野川	鹿野瀨		1,277	25		
	壓川	祖山		729	911		
	耳川	塚原		547	78		
	大川	高岡		1,374	190		
미국	동부	Schoharie	23.8	808		84	
		Nolichucky	39.8	3,060		108	
		Norris	10.3	7,308		174	
	중서부	Clab Orchard	11.2	414		763	
		Springfield	14.6	668		255	
	중앙남부	Abilene	27.0	252		106	
		Spavinaw	11.0	1,028		136	
		Dallas	10.5	2,995		504	
	대평원북부	Sheridan	10.8	1,199		48	
		Buffalo Bill	31.0	3,780		178	
	서남부	Morena	38.3	282		944	
		Muddy Creek	20.0	394		339	
Hodges		29.5	779		205		

- 「댐 설계를 위한 유역단위 비유수량 조사연구(건설부, 1992)」의 우리나라 저수지 실측자료 중 신뢰성이 인정되는 비퇴수량의 범위는 약 250~500 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/yr 정도로 나타나고 있다.

## 나. 기존 경험공식

비유수량이나 비퇴수량을 산정하는 기존 경험공식에는 다음과 같은 공식들이 있다. 하지만 실제 적용시에는 다른 여러 경험공식 등도 함께 적용하여 해당 유역에 적절한 값을 주는 공식을 채택하여야 한다.

- 윤용남 공식

$$V_r = 1,334.08 A^{-0.2} E_t^{6.2668}$$

- 안상진과 이종형 공식

$$V_r = 1,419.71 A^{-0.174} E_t^{6.596}$$

- Dendy & Bolton 공식

$$Y_r = 1,776.27 e^{-0.0022H} (1.5375 - 0.26 \log A)$$

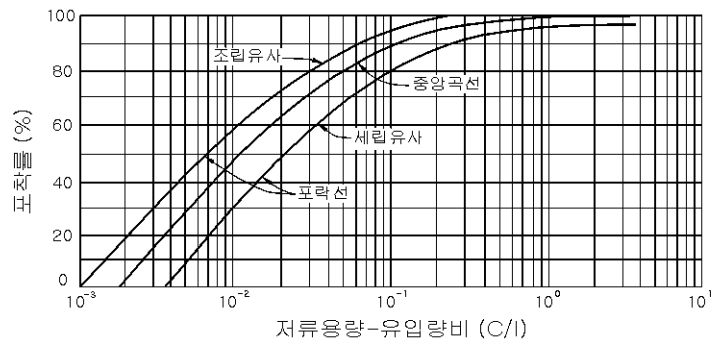
여기서  $V_r$ 은 비퇴수량(m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/년),  $Y_r$ 은 비유수량(tons/km<sup>2</sup>/년),  $A$ 는 유역면적(km<sup>2</sup>),  $E_t$ 는 Brown 공식의 포착률(%),  $H$ 는 연평균유출고(mm)이다.

## 다. 통계적 경험 방법 및 도표식 방법

「댐 설계를 위한 유역단위 비유수량 조사연구(건설부, 1992)」 따른 비유수량(비퇴수량) 산정 절차의 인자 산출 방법은 다음과 같다.

- 유역면적 인자(A)는 대상유역 전체 면적에 대하여 km<sup>2</sup> 단위로 고려
- 하천밀도 인자(D)는 1:250,000 지도상에서 해당유역의 하천 총연장을 구하여 유역면적으로 나누어 km/km<sup>2</sup> 단위로 결정
- 강우침식도 인자(R)는 전국 강우침식도 분포도에서 대상유역을 등우선법으로 가중평균하여 J/ha 단위로 추정
- 토양침식성 인자(K)는 1:250,000 개략 토양도상에서 토양통별로 구성비를 추정하여 각 토양통별 K 값을 곱해 tons/J 단위로 결정

- 지형 인자(H)는 1:250,000 지형도에서 4×4 km<sup>2</sup>의 격자망을 구성하고 각 격자내 지형의 최고점과 최저점과의 차이를 구해 유역평균하여 m 단위로 결정
- 하상재료 인자(M)는 댐 계획지점의 하상재료를 조사하여 모래(직경 2 mm 이하)와 자갈 및 호박돌(직경 2 mm 이상)의 구성비를 추정하여  $M=10$  (자갈 및 호박돌구성비)로 mm 단위로 산출
- 유사의 이송이 저수지 등에 의해 차단되는 비율 즉, 유입 유사량과 퇴적 유사량의 비율인 포착률(trap efficiency)은 Brune 포착률곡선의 중앙곡선에서 추정



<그림 11.2> Brune의 포착률곡선

### 1) 통계적 경험 방법

- 비유사량

$$Y_r = 17.6 \cdot D^{2.572} \cdot R^{0.847} \cdot M^{-0.938} \quad : \text{중규모 유역}$$

$$Y_r = 8.668A^{-0.896} \quad : \text{소규모 유역}$$

- 비퇴사량

$$V_r = Y_r \times (\text{포착률}) / (\text{퇴적토단위중량})$$

### 2) 도표식 방법

- 인자별 기여도

- 유역면적 인자 기여도(PA) :  $1,035 \times (1/A - 1/3000)$
- 하천밀도 인자 기여도(PD) :  $D \times 20$
- 강우침식도 인자 기여도(PR) :  $R/100$
- 토양침식성 인자 기여도(PK) :  $K/0.6 \times 10$
- 지형 인자 기여도(PH) :  $H/100$
- 하상재료 인자 기여도(PM) :  $44.4 \times (1/M - 1/10)$

계 : 총기여도

- 비유사량

$$Y_r = 0.794 \times (\text{총기여도})^{1.553}$$

- 비퇴사량

$$V_r = Y_r \times (\text{포착률}) / (\text{퇴적토 단위중량})$$

## 라. 비퇴사량 및 퇴사량의 결정

- 「댐 설계를 위한 유역단위 비유사량 조사연구(건설부, 1992)」에서는 우리나라 댐계획시 비퇴사량을 추정한 방법들을 검토하여 다음과 같은 문제점을 제시하였다.
  - 저수지 계획 및 설계시 기준이 되는 양이 비유사량인지 비퇴사량인지 구분이 명확하지 않고 또한 비유사량과 비퇴사량의 단위가 혼재
  - 유역 자료의 부족과 적절한 추정방법의 부재로 비유사량 추정에 일관성이 없으며 댐 설계시 채택한 비유사량(또는 비퇴사량) 값에 대한 신뢰도가 낮음
  - 적용된 경험공식에 대한 타당성 검토가 결여되어 있으며, 두 개 이상의 다른 방법을 적용하여 비유사량(또는 비퇴사량)을 구한 후 각 값을 평균하여 결정하기도 하는데 이는 타당성이 없음
  - 해당 유역의 충분한 실측자료가 없는 경우에는 비퇴사량의 결정에 많은 애로와 주관적인 판단에 따른 편차의 발생 가능성을 배제할 수 없음
  - 우리나라 저수지 퇴사자료 역시 신뢰도의 한계(대청댐, 소양강댐 등)가 있어 정확한 비유사량 추정이 더욱 곤란
- 따라서 미계측유역의 경우에는 많은 경험공식들을 해당 유역에 적용하여 얻은 결과와 신뢰성있는 다른 저수지의 실측자료를 기초로 타당한 비퇴사량의 채택범위를 설정한 다음, 그 범위내에서 여타 다른 조건 등을 고려하여 비퇴사량을 채택하는 방법이 적절할 것으로 판단된다.
- 미계측유역의 비퇴사량 결정시에는 다음과 같은 사항들을 고려하여야 한다.
  - 국내 댐 설계시 채택된 계획 비퇴사량은 약 300~800 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/yr 정도이며, 국내 저수지 실측 비퇴사량은 약 230~1,000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/yr 정도이며 비교적 신뢰성이 인정되는 비퇴사량은 약 250~500 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/yr 범위

- 따라서 댐 설계시 비퇴사량은 약  $500 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$  정도를 채택하는 것이 현재로서는 무난할 것으로 판단
- 각종 경험공식들에 의해 산출된 비퇴사량은 모두 100 % 이상의 오차를 가질 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 이들 결과 중의 하나를 바로 설계 비퇴사량으로 채택할 경우, 설계의 안전성 확보라는 측면에서 다소 불확실하며 향후 이에 따른 문제가 야기될 가능성을 배제하기 곤란하므로 신중하게 결정하여야 한다.

### 1.1.3 퇴사분포 및 퇴사위

- 저수지내 퇴사분포는 유사의 특성, 유사량과 저수용량의 비, 저수지의 형상, 운영방식 및 유입유량과 저수용량간의 관계 등의 여러 가지 혼합인자에 의하여 결정하여야 한다. 한편, 퇴사분포는 일반적인 상식과는 달리 저수지내의 하류부분 뿐만 아니라 저수지 바닥 전체에 걸쳐서 퇴적현상이 발생한다.
- 저수지의 유입토사는 여러 종류의 입경이 혼합되어 있는데, 큰 입경의 토사는 유속이 급격히 감소되는 상류단 부근에서 퇴적되어 삼각주(delta)를 형성하고 삼각주의 끝부분 상류하상은 차후에 배사(back sand) 현상이 발생한다. 정부퇴적층(top-set bed)은 대부분이 소류토사가 퇴적되고, 소입경의 부유토사는 정부퇴적층을 유하하고 대부분은 전부퇴적층(foreset bed)의 하류에서 원하상과 나란하게 퇴적되는 저부퇴적층(bottom-set bed)과 댐 직상류부에서 수평으로 퇴적되는 밀도류층(density current bed)을 형성하게 된다.
- 저수지로 유입되는 퇴사량이 예측되면 저수지내에서 공간적으로 어떤 형태로 분포될 것인가를 예측하여야 한다. 이와 같은 퇴사분포의 예측방법으로는 가장 간단한 방법인 수평퇴사법, Cristofano의 면적증분법(area increment method)과 Borland & Miller의 경험적면적감소법(empirical area reduction method) 등이 있다. 현재 비교적 가장 합리적인 경험적면적감소법을 주로 사용하고 있으며 소규모 댐에는 수평퇴사법을 적용하는 경우도 있다.

### 가. 수평퇴사법

- 수평퇴사법은 퇴사가 댐축 하상으로부터 차곡차곡 쌓인다고 보는 방법으로 현실적으로는 불가능한 가정이다.
- 하지만 소규모 댐의 경우에는 안정성 확보차원에서 이 방법을 채택하기도 한다.

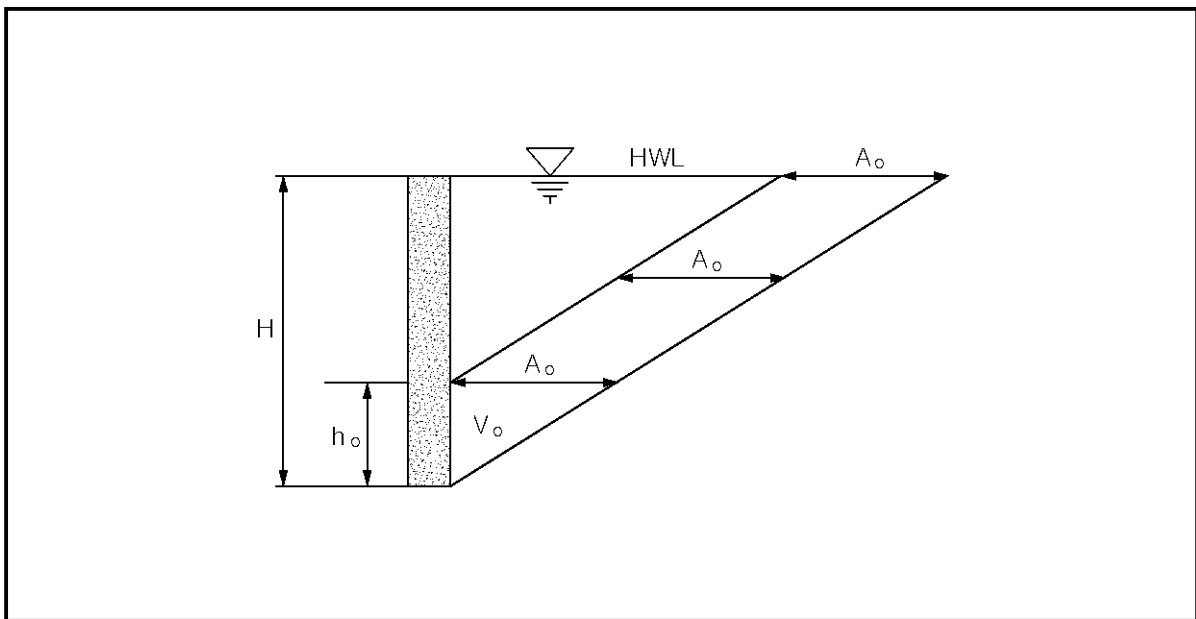
### 나. 면적증분법

- 면적증분법은 저수지내의 퇴사는 저수지의 각 표고에서 저수면적을 일정량만큼 감소시킴으로써 계산될 수 있다는 가정에 근거를 두고 있는 간략법이다.
- 댐지점의 퇴사심( $h_0$ )을 가정하여 총퇴사량과 일치되는 퇴사심을 다음과 같은 식을 이용하여 시행착오법으로 결정한다.

$$V_s = A_0(H - h_0) + V_0$$

여기서  $V_s$ 는 총퇴사량( $m^3$ ),  $h_0$ 는 댐지점의 퇴사심( $m$ ),  $A_0$ 는  $h_0$  표고에 대한 퇴사의 수평단면적( $m^2$ ),  $H$ 는 만수위의 수심,  $V_0$ 는  $h_0$  이하의 퇴사량이다.

- 유사는 일반적으로 모든 표고에서 동일량만큼의 저수면적을 감소시키는 않으므로 가정에 문제점을 지니고 있으며, 100년 퇴사량이 저수용량의 15%가 넘는 경우에는 적용 곤란한 방법이다.



<그림 11.3>

면적증분법에 의한 퇴사심 결정

## 다. 경험적면적감소법

### 1) 저수지 형태의 결정

- 저수지 형태는 전대수지에 횡축에는 저수용량을 표시하고 종축에는 저수지의 수심을 표시하여 수심-용량곡선을 그린 다음, 그 기울기(n)의 역수(m)에 따라 <표 11.2>와 같이 4가지 형태로 분류한다. 여기서, 수심의 상한선은 원칙적으로는 홍수기에 가장 발생빈도가 높은 수심을 채택하여야 하지만 일반적으로 만수위까지를 채택한다.
- 저수지 형태의 분류를 통해 정의된 저수지 형태의 명칭은 단지 30개 기존 저수지의 저수용량곡선으로부터 얻어진 분류일 뿐이므로 반드시 그 뜻과 동일한 특성을 가지는 것은 아니다. 따라서 호수형이라고 반드시 평야지대에 있다는 것도 아니며, 협곡에 위치한다고 협곡형으로 결정된다는 것도 아님에 유의하여야 한다.

<표 11.2> 저수지 형태 분류 및 퇴사분포에 관한 무차원 상수

형 태	형 태 지 수		퇴사분포의 무차원상수			비 고
	m	n	C	M	N	
Type-I	3.5~4.5	$0.28 \sim 0.2$ 2	5.047	1.85	0.36	호 수 형 (Lake Type)
Type-II	2.5~3.5	$0.40 \sim 0.2$ 8	2.487	0.57	0.41	평 지 형 (Foot-Hill Type)
Type-III	1.5~2.5	$0.67 \sim 0.4$ 0	16.967	1.15	2.32	구 릉 형 (Hill Type)
Type-IV	1.0~1.5	$1.00 \sim 0.6$ 7	1.486	-0.25	1.34	협 곡 형 (Gorge Type)

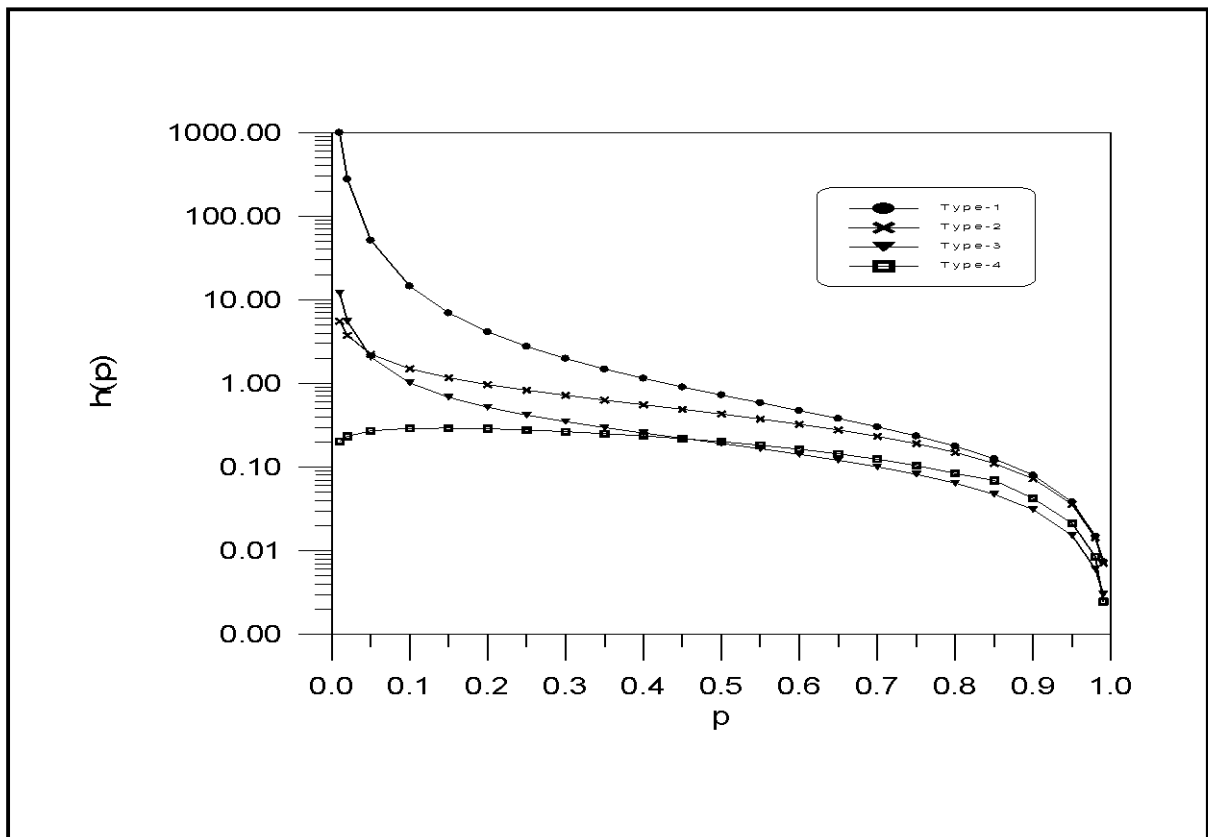
- Type-I에서 Type-IV로 갈수록 즉, m 값이 작아질수록 저수지의 상류단보다 하류단에 많은 퇴사가 발생하는 것이 저수지 형태에 따른 표준형곡선의 특징이다.
- 한편, 저수지 운영방식에 따라 저수지 형태를 <표 11.3>과 같이 조정하는 것을 추가로 검토하여야 한다.



② 저수지 형태에 따른 표준 퇴사분포함수  $h(p)$  곡선을 나타낸 <그림 11.4>와 다음과 같은 관계에 의한 해당 저수지 퇴사분포함수  $h'(p)$  곡선이 만나는 지점을 결정한다. 이 지점의 상대수심이 퇴사분포 후 댐지점의 상대퇴사심  $p_0$ 가 되며 여기에 최고수심(H)을 곱하여 댐지점의 퇴사심을 결정한다.

$$h'(p) = \frac{S - V(p)}{H \cdot A(p)}$$

여기서  $p$ 는 상대수심,  $S$ 는 총퇴사량( $m^3$ ),  $H$ 는 최고수심(m)으로 통상 만수위의 수심,  $V(p)$ ,  $A(p)$ 는 상대수심  $p$ 에 대한 저수용량( $m^3$ ), 저수면적( $m^2$ )이다.



<그림 11.4> 댐지점의 퇴사심 결정을 위한 곡선

③ 상대면적을 다음과 같은 공식으로 산출하여 (5)란에 기입한다.

$$a = C \cdot p^M (1 - p)^N$$

여기서,  $a$ 는 상대면적,  $p$ 는 상대수심,  $C$ ,  $M$ ,  $N$ 은 <표 11.2>에 나타낸 저수지 형태에 따른 무차원 상수이다.

- ④ 퇴사후 새로운 댐지점 바닥표고에서의 퇴사전 상태 면적을 새로운 댐지점의 바닥표고에서의 상대면적으로 나누어  $K_1$  값을 산출한다.

$$K_1 = \frac{A(p_0 \cdot H)}{a(p_0)}$$

- ⑤ (5)란에  $K_1$ 을 곱하여 (6)란을 작성한다.

- ⑥ (6)란과 평균단면적법을 이용하여 (7), (8)란을 작성한다.

- ⑦ 이와 같은 과정을 거쳐 계산된 (8)란의 누가 총퇴사량( $S_1$ )이 주어진 관측 총퇴사량( $S$ )과 일치하지 않을 경우에는 다음과 같이  $K_1$  값을  $K_2$  값으로 조정 후 ④~⑥의 과정을 반복한다.

$$K_2 = K_1 \left( \frac{S}{S_1} \right)$$

- ⑧ (2)란에서 (6)란을 빼어 (9)란을 작성하고, (3)란에서 (8)란을 빼어 (10)란을 작성하여 완료한다.

### 3) 퇴사분포의 적용

- 퇴사분포는 댐 구조물의 수명년한인 100년 퇴사량과 그의 절반인 50년 퇴사량에 대하여 각각 분석한다.
- 100년 퇴사량의 경우 중규모 이상 저수지의 퇴사위 결정에 주로 사용된다. 따라서 퇴사위를 고려하여 결정되는 방수로(outlets)와 수력발전용 송수관 턱(power penstock sills)의 위치 결정 등에 사용된다.
- 추가적으로 배수위계산과 저수지 홍수추적에도 사용되어야 하지만 배수위계산의 경우 하천종단에 따른 퇴사분포 결정이 곤란하고 홍수추적의 경우 영향이 미미하기 때문에 통상 무시하고 있는 실정이다.
- 50년 퇴사량의 경우 저수지 용수공급능력을 판단하기 위한 저수지 모의운영과 같은 이수목적상의 조작시 퇴사량의 공간적 분포에 따른 저류용량의 감소를 고려하는데 주로 사용된다. 또한, 소규모 저수지의 퇴사위 결정에 사용되기도 한다.