

灌溉用 貯水池의 年平均堆砂量과 貯水容量 減少率의 算定

Estimation of Silting Load and Capacity Loss Rate
of Irrigation Reservoirs

尹 龍 男*
Yoon, Yong Nam

Abstract

The predictive equations for reservoir sedimentation rate now in use are extensively reviewed, and the equation of multiple regression type, in which the reservoir sedimentation rate is related with the watershed area and the trap-efficiency, is proposed based on the 113 irrigation reservoir resurvey data. The predictive relation so obtained proved to be a reasonable measure for the estimation of reservoir sedimentation rate. The relationship of sediment yield with the watershed area and with the reservoir trap efficiency is also analyzed.

The variations of sedimentation rate and of the annual reservoir capacity loss rate was shown to heavily depend on the trap-efficiency of a reservoir. Besides, the effect of sedimentation on stream channels is confirmed and quantified based on the predictive equation derived in the present study.

要 旨

現在 實務에 使用되고 있는 貯水池內에 堆砂量의 推定方法에 대하여 광범위하게 調査 比較하였으며 國內 113 個 灌溉用 貯水池의 堆砂實測資料를 사용하여 貯水池 堆砂量과 流域面積 및 貯水池의 土砂捕捉效率間의 相關關係를 맺는 多回歸模型을 提案하였다. 提案된 模型의 適合성을 實測資料로부터 증명하였으며 貯水池內로의 年比流砂量을 流域面積 및 貯水池의 土砂捕捉效率와 相關시켰다.

貯水池內로의 年平均堆砂率과 年平均貯水池內容積의 變動은 貯水池의 土砂捕捉效率에 의해 크게 左右됨이 증명되었으며 貯水池上流의 河川流路에 미치는 土砂流出的 影響을 量的으로 評價하기 위해서도 本 研究에서 提案된 堆砂量 推定模型을 適用할 수 있음을 벽곡貯水池 流域에 대하여 證明하였다.

1. 序 論

貯水池의 建設計劃 過程에 있어서 빼어 놓을

* 正會員 · 陸軍士官學校 教授

수 없는 한가지 考慮事項은 建設後 貯水池의 容量을 감소시키는 堆砂量을 비교적 精確하게 豫測하는 일이다. 지금까지의 貯水池內 堆砂問題에 관한 研究은 주로 歐美地域에서 많이 이루어

졌으며 대부분이 流域으로부터의 土砂流出量을 土砂流出過程에 관련되는 流域의 特性和 相關시키는 方向으로 전개되어 왔다^(1~8). 貯水池內 堆砂에 영향을 미치는 主要因子로는 土壤의 性質이라든지 植生被覆, 降水 및 流出, 流域의 地相, 土地利用狀態, 農耕方法 및 貯水池의 運營操作 方法等을 들 수 있으며, 급격한 森林의 황폐화라든지 都市化와 관련되는 道路 및 其他 建設工事的 種類等도 重要한 因子가 된다.

本 研究에서는 國內의 小規模 灌溉用 貯水池에 대한 堆砂調查資料를 사용하여 貯水池堆砂率을 算定할 수 있는 方法을 提案하고 이 方法을 特定貯水池에 適用하여 그 정확성을 評價코자 하였으며, 아울러 貯水池의 土砂捕捉效率(trap-efficiency)에 따른 堆砂率의 變化性向이라든지 貯水池의 容量減少率, 土砂堆積이 河川流路에 미치는 영향 等에 관해서도 分析하였다.

2. 貯水池堆砂量의 推定公式

前述한 바와 같이 貯水池內 堆砂에 영향을 미치는 因子에는 여러가지가 있으나 流域面積과 初期貯水池 容量, 流域의 地形 및 地質 等이 支配的인 因子인 것으로 알려져 있다. 우리나라 灌溉用 貯水池에 대한 몇가지 研究^(9~10)에서는 單位流域面積當 年平均貯水池堆砂率 S_y ($m^3/year/km^2$), 을 貯水容量-流域面積比라든가 流域平均 傾斜 또는 流域의 年平均 降雨量과 相關시켰으며 이를 式의 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$S_y = K_1 \left(\frac{C}{A}\right)^{n_1} \quad (1)$$

$$S_y = K_2 S^{n_2} \quad (2)$$

$$S_y = K_3 P^{n_3} \quad (3)$$

여기서 C 는 初期 貯水池容量($ha \cdot m = 10^4 m^3$)이며 A 는 流域面積(km^2), S 는 流域平均 傾斜, P 는 流域의 年平均 降雨量(mm)이고 $K_1, K_2, K_3, n_1, n_2, n_3$ 는 流域特性에 관계되는 常數이다. 이들 두 研究에서는 사용한 資料가 미흡하여 좋은 結果를 얻지 못하였다.

Malcolm 과 Small wood⁽⁴⁾는 東部美洲地域에 대한 貯水池 堆砂研究에서 流域의 開發程度別로 流域群을 分類하여 年堆砂率, Q_i ($m^3/year$)과 流域面積, A (km^2)間의 單純相關關係를 다음과 같이 設定하여 良好한 相關性을 얻은 바 있다. 即

$$Q_i = aA^b \quad (4)$$

여기서 a, b 는 常數이다.

以上과 같은 研究結果를 토대로 Q_i 와 앞에서 定義한 바 있는 A, C, P, S 等의 變數間의 最適 相關關係를 얻기 위해 多線型回歸分析(multiple linear regression)을 실시한 결과 다음 式과 같은 형태의 函數關係가 가장 높은 相關性을 나타내었다.

$$Q_i = KA^\alpha \left(\frac{C}{A}\right)^\beta \quad (6)$$

여기서 K, α, β 는 常數이며 C/A 는 初期貯水池容量-流域面積比로서 貯水池의 土砂捕捉效率의 指標이다.

Brown⁽¹¹⁾에 의하면 貯水池 土砂捕捉效率, E_i (%)는 C/A 와 다음과 같은 關係를 가진다.

$$E_i = 100 \left[1 - \frac{1}{1+k(C/A)} \right] \quad (7)$$

여기서 k 는 0.046~1.0의 값을 가지는 常數이며 通常設計條件下에서 $k=0.1$ 이 추천되어 있다. 式 7에서 C/A 의 單位는 acre-feet/ mi^2 이므로 이를 ha·m/ km^2 單位로 바꾸고 $k=0.1$ 의 값을 사용하여 式 7을 다시 쓰면

$$E_i = 100 \left[1 - \frac{1}{1+2.1(C/A)} \right] \quad (8)$$

따라서 本 研究에서 최종적으로 선택한 多線型回歸方程式의 형태는 다음과 같다.

$$Q_i = KA^\alpha E_i^\beta \quad (9)$$

3. 資 料

本 研究에 사용된 資料는 貯水池內 堆砂에 관한 지금까지의 研究^(9,10,12,13,14,15)와 農業振興公社⁽¹⁶⁾의 資料로서 表 1에는 全國의 8個 流域別로 貯水池 堆砂調查結果가 要約되어 있다.

表 1. 貯水池 堆砂調查 資料

流 域 名	調查貯水池數	流域面積範圍 (km^2)	資 料 源 (參考文獻)
洛 東 江	34	0.2~30.0	9, 16
錦 江	2	28.3~84.8	16
榮 山 江	38	0.2~33.0	13, 15
蟾 津 江	3	1.4~4.5	13
插橋 및 安城川	13	2.1~21.1	10, 12, 16
萬頃 및 東津江	11	1.7~15.7	13, 16
兄山 및 太和江	4	5.3~33.7	14, 16
南海岸 地域	8	0.8~17.8	13, 16
計	113	0.2~84.8	

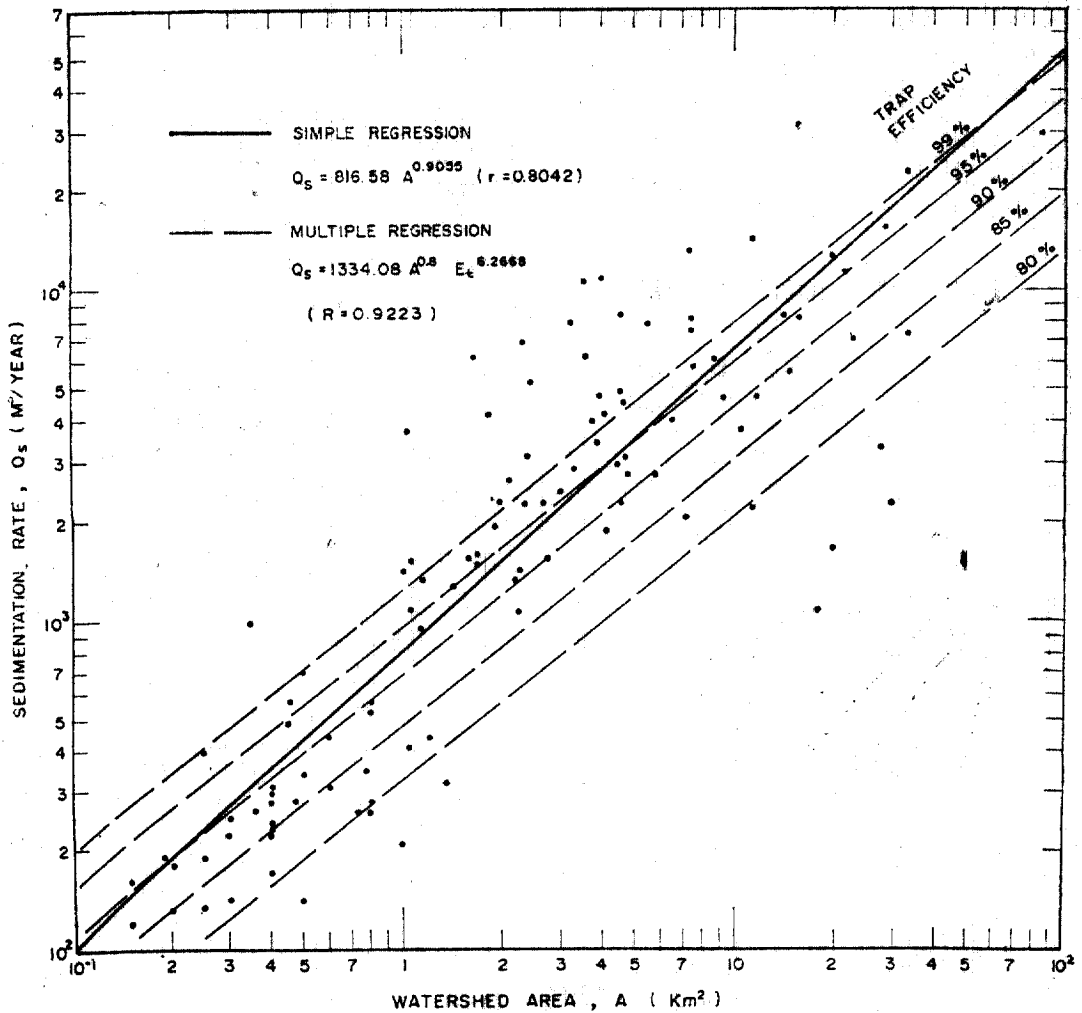


그림 1. Simple and Multiple Regression between Sedimentation Rate and Watershed Area

4. 資料分析 및 結果

4.1 年平均堆砂量 算定公式의 導出

表 1에 言及한 113個 貯水池 堆砂調査資料를 使用하여 年平均貯水池 堆砂量 Q_s 와 貯水池의 流域面積 A 間의 單純回歸分析 結果는 그림 1과 같으며 相關係數 $r=0.8042$ 로 나타났다. Q_s 와 A 間의 回歸直線式은

$$Q_s = 816.58 A^{0.9035} \quad (10)$$

그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 單純回歸直線 주위의 資料點의 分散程度는 너무나 크기 때문에 前述한 바 있는 A, C, P, S, E_t 와 Q_s 사이의 多線型回歸分析을 시도하였으며 그 結果 가장

만족스러운 結果는 式 9의 형태를 취했을 때 얻을 수 있었다. 即 Q_s 와 A 및 E_t 간의 回歸方程式은 다음과 같이 표시할 수 있었다.

$$Q_s = 1334.08 A^{0.8} E_t^{5.2668} \quad (11)$$

여기서 貯水池의 土砂捕捉效率 E_t 는 百分率이 아닌 小數點의 숫자를 사용하였으며 式 11의 관계는 $E_t=80\sim 99\%$ 에 대하여 그림 1에 直線으로 표시되어 있다. 式 11의 多線型回歸分析에서의 多相關係數 $R=0.9223$ 이었으며 A 와 E_t 以外에 P, S 등을 回歸分析에 포함시켜 보았으나 相關係數를 크게 改善하지 못하였다. 또한 表 1에 수록한 貯水池의 流域面積이 10 km^2 보다 큰 貯水池는 20個에 불과하였으므로 나머지 93個 貯水池는

池($A < 10 \text{ km}^2$)에 대해서 多線型回歸分析을 해보았으나 R 값은 거의 커지지 않았다($R=0.9265$). 뿐만 아니라 地域的 影響의 有無를 판단하기 위해 表 1의 洛東江과 榮山江流域의 69個 貯水池만 가지고 回歸分析을 실시한 결과 $R=0.8634$ 로 저조하였다. 以上の 分析結果 가장 적절한 回歸方程式은 式 11이라고 판단하였다.

4.2 年平均比流砂量과 流域面積間的 關係

單位流域面積當 年平均土砂流出率로 定義되는 年平均比流砂量 S_y ($\text{m}^3/\text{sec}/\text{km}^2$)는 式 11을 變形하면 다음과 같이 표시된다.

$$S_y = \frac{Q_s}{A} = 1334.08 A^{-0.2} E_t^{6.2668} \quad (12)$$

式 12의 關係는 貯水池의 土砂捕捉效率 E_t 를 第 3의 變數로 하여 그림 2에 표시되어 있다. 本 研究에 사용된 113個 貯水池의 E_t 의 中央值 (median)는 約 95.5%이었으며 이 값에 대한 S_y

~ A 關係는 다음 式과 같으며 이는 그림 2에 豫備設計曲線으로 표시되어 있다.

$$S_y = \frac{999.69}{A^{0.2}} \quad (13)$$

그림 2로부터 流域面積의 增加에 따라 年平均比流砂量은 점차적으로 減少함을 알 수 있으며 流域面積이 큰 경우에도 이러한 性向이 성립하는가를 밝히기 위해 表 2의 3個 대규모 貯水池에 대한 堆砂調查結果와 4大江 流域調查結果로 얻은 河川流砂量 實測資料도 그림 2에 표시해 보았다.

그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 10個의 큰 流域에 대한 資料는 豫備設計曲線 (preliminary design curve) 주위에 광범위하게 分散되어 있으나 資料가 不足한 現實情下에서는 큰 流域으로부터의 年平均比流砂量을 개략적으로 推定하는데 本 曲線은 크게 도움이 될 것으로 믿어지며 그림 2의 曲線群의 傾斜도 大流域에 대체로 合當한 것으로 판단된다.

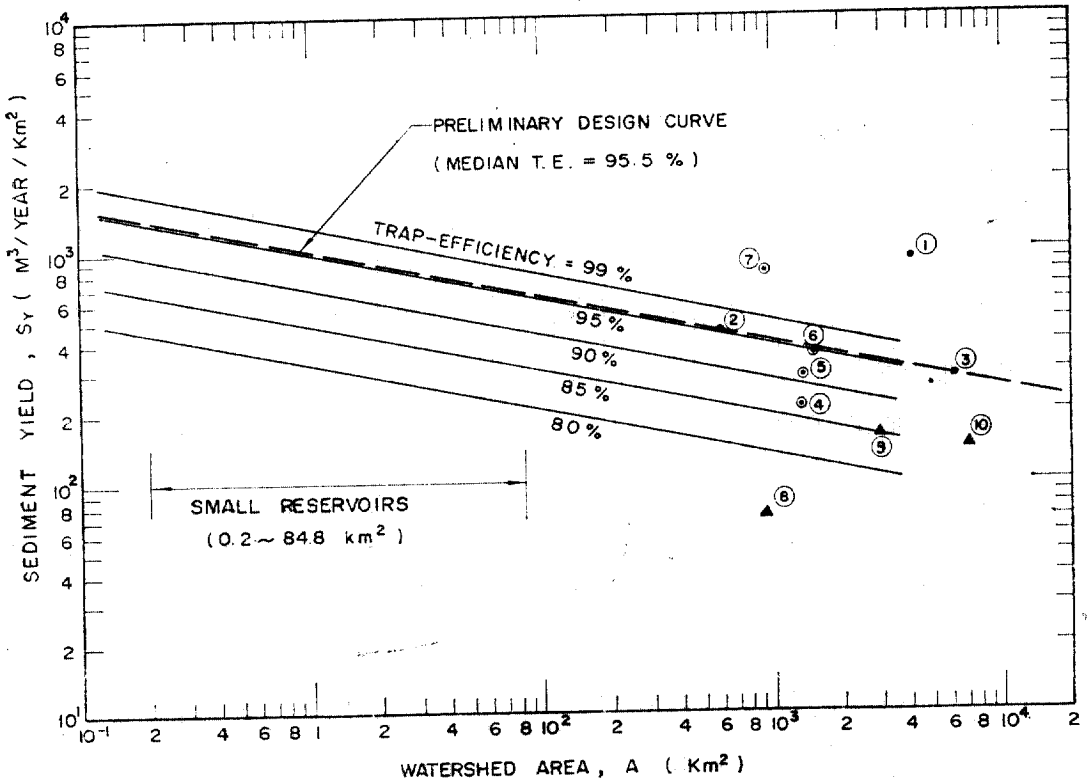


그림 2. Sediment Yield-Watershed Area Relation with Trap-Efficiency as a Third Parameter

表 2. 大規模流域의 年平均比流砂量 資料

流域名	地點名	資料番號	流域面積 (km ²)	比流砂量 (m ³ /year/km ²)	資料源	備考
漢江	화천 춘천 청평	1	4,060	913	17	貯水池 堆砂 調査
		2	591	457	17	
		3	6,020	282	17	
洛東江	예안 임하 동춘 창리	4	1,330	210	18	流砂實測 (2年間)
		5	1,360	282	18	
		6	1,540	356	18	
		7	925	798	18	
錦江	용담 옥천 공주	8	937	71	19	流砂實測 (7年間)
		9	2,940	159	19	
		10	7,130	140	19	

4.3 年平均貯水池堆砂率과 貯水池土砂捕捉 効率間的 關係

式 11의 $E_t=1.0(100\% \text{ trap-efficiency})$ 일 때의 年平均 堆砂量을 기준으로 하여 E_t 가 100% 以下일 때의 Q_s 의 百分率을 계산하였으며 이는 그림 3에 貯水池 土砂捕捉效率과 相對堆砂率의 關係로 표시되어 있다. 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 貯水池의 土砂捕捉效率, 即 初期貯水容量 對 流域面積比가 커질수록 相對的인 堆砂率은 增加한다. 바꾸어 말하면 貯水池 流域面積에 대한 貯水池 容量의 相對的인 크기가 클수록 流域으로부터의 土砂를 貯水池內에 捕捉할 수 있

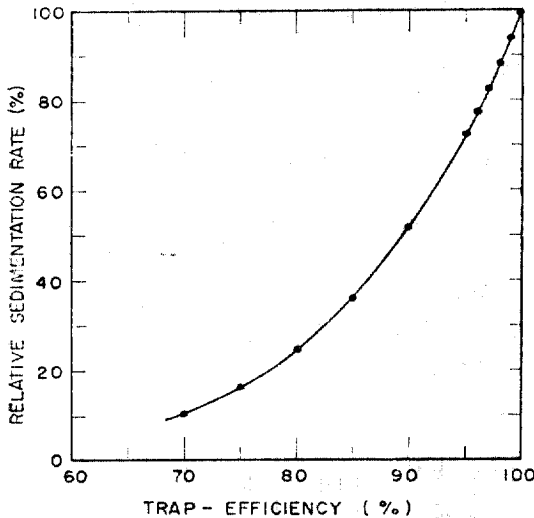


그림 8. Variation of Relative Sedimentation Rate with Trap-Efficiency

는 能力이 크므로 貯水池 下流로 土砂를 누출시키지 않아 相對적으로 많은 量의 土砂를 貯水池內에 堆積되게 하는 것이라 볼 수 있다.

4.4 貯水池土砂捕捉效率에 따른 年平均貯水池 容量減少率의 變化

貯水池의 年平均容量減少百分率은 그 貯水池의 土砂捕捉效率과 밀접한 相關을 가질 것이므로 本 研究에서 취급한 113個 貯水池를 土砂捕捉效率의 크기에 따라 몇개 群으로 분류하여 各群에 대한 貯水池容量의 平均減少率을 算定하였으며 이는 그림 4에 표시되어 있다.

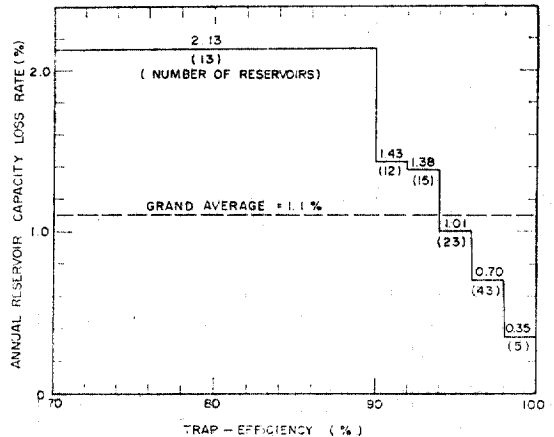


그림 4. Annual Reservoir Capacity Loss vs Trap-Efficiency

그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 貯水池의 年平均 容量減少率은 대체로 貯水池의 土砂捕捉效率에 比例하여 작아지는 것으로 나타났으며, 113個 貯水池의 年平均容量減少率의 平均値는 1.1%로 計算되어 그림 4에 표시되어 있다. 따라서 우리나라 灌溉用 貯水池의 物理的 平均壽命은 平均적으로 보아 대략 90年 정도라고 말할 수 있겠다. 또한 그림 4에 나타난 貯水池의 年平均容量減少率의 貯水池 土砂捕捉效率에 따른 減少性向을 보다 더 자세히 파악하기 위하여 그림 5에는 113個의 個個 貯水池의 容量-流域面積比와 年平均容量減少率間的 關係를 표시하였다. 그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이 年平均容量減少率은 容量-流域面積比(C/A)와 높은 相關性을 갖지는 못하나 대체로 C/A 값이 커짐에 따라서 容量減少率이 작아짐을 뚜렷이 보여주고 있으며

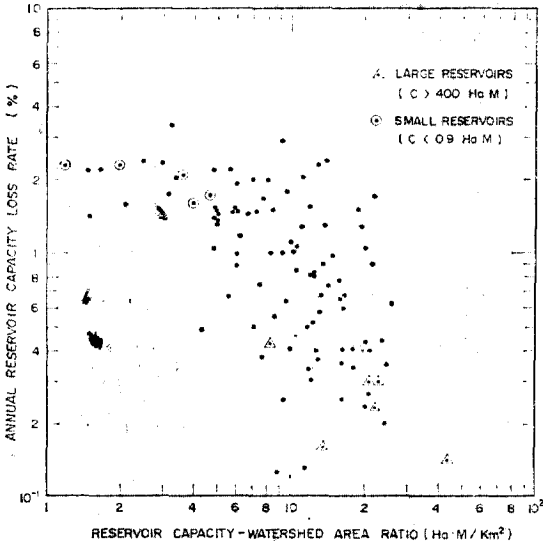


그림 5. Annual Reservoir Capacity Loss Rate VS Reservoir Capacity-Watershed Area Ratio

또한貯水容量이 작은貯水池의年平均容量減少率은貯水容量이 큰貯水池에 비해 상대적으로 훨씬 더 큼도 보여주고 있다.

5. 研究結果의 適用

本 研究에서 얻어진貯水池 堆砂量推定模型인單純回歸模型(式 10)과 多線型回歸模型(式 11)을 評價하기 위하여 錦江流域에 위치한 礮谷貯水池의 堆砂量 推定에 적용해 보았다. 礮谷貯水池의 流域圖는 그림 6과 같으며貯水池의 諸元은 表 3과 같다.

表 3. 礮谷貯水池의 諸元

流域面積 A(km ²)	堆砂期間 (years)	初期容積 C(ha·m)	堆砂量 Q.(m ³ /year)	土砂捕捉效率 E _t (%), E _t 8.8
84.8	26	694	29,620	94.5

5.1 年平均堆砂量 推定公式의 評價

礮谷貯水池의 土砂捕捉效率(式 8에 의거 計算) E_t=0.945를 사용하여 式 11에 의해 算定한 Q,

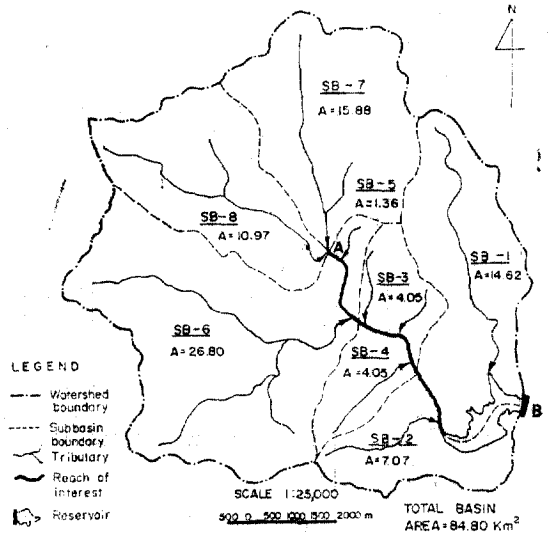


그림 6. Beaggog Reservoir Watershed and Sub-basin System

값과 式 10에 의해 산정한 값이 各各 表 4에 수록되어 있으며貯水池의 堆砂調査에서 얻은 값으로부터의 偏差 및 偏差의 百分率도 표시하였다.

表 4. 年平均堆砂量 推定値와 堆砂調査結果의 比較(礮谷貯水池)

推定方法	年平均堆砂量 (m ³ /year)	堆砂調査値 (m ³ /year)	偏差率 (%)
單純回歸模型 (式 10)	45,516	15,896	+53.7
多線型回歸模型 (式 11)	32,654	3,034	+10.2
堆砂調査値	29,620	-	-

表 4로부터 알 수 있듯이 多線型回歸模型에 의한 堆砂量 推定値는 單純回歸模型에 의한 것보다 實測値에 훨씬 더 근접하는 結果를 보여주고 있다.

5.2 流域의 土砂流出이 河川流路에 미치는 影響

앞에서의 分析에서는 流域으로 부터貯水池內

로 流出되는 土砂量만을 고려하였으나 실제로 流域으로부터 流出되는 土砂는 河川流路 및 洪水터(flood plain)에 그 一部가 堆積되고 나머지가 貯水池까지 到達하여 貯水池堆砂量을 형성하게 되는 것이라고 볼 수 있다. 따라서 벽곡貯水池의 경우에 대해서 河川流路上에 堆積되는 土砂量을 定量的으로 결정해 보기로 한다.

벽곡貯水池流域을 그림 6에서처럼 8個의 小流域으로 구분하고 河川流路 AB 사이에 堆積되는 土砂量을 구하기 위해 우선 8個 小流域으로부터 流路 AB에 流出되는 土砂量을 $E_i=0.955$ 를 사용하여 式 11에 의거 表 5에서 처럼 計算하였다.

表 5. 河川流路 AB로의 流域土砂流出量算定 (벽곡貯水池流域)

小流域名	流域面積 (km ²)	年平均土砂流出量 (m ³ /year)
SB-1	14.62	8,547
2	7.07	4,778
3	4.05	3,061
4	4.05	3,061
5	1.36	1,279
6	26.80	13,880
7	15.88	9,132
8	10.97	6,793
計	84.80	50,531

表 5로부터 區間距離가 8.51 km인 河川流路 AB에 걸쳐 流域으로부터 流出運搬되는 年平均土砂量은 50,531·m³/year임을 알 수 있다. 한편 벽곡貯水池의 全流域으로부터 貯水池內로 流入하는 年平均土砂量을 貯水池 流域面積 84.80 km²와 $E_i=0.955$ 를 사용하여 式 11에 의거 算定해 보면 34,880 m³/year가 된다. 따라서 流路區間 AB로 운반되는 年平均土砂量과 벽곡貯水池에 堆積되는 年平均土砂量의 差異인 15,651 m³/year는 河川流路 AB 및 인근 洪水터에 堆積되는 것임을 알 수 있으며 單位河川延長當 年平均堆砂量은 約 1.84 m³/m임을 짐작할 수 있다.

6. 結 論

國內의 113個 灌溉用 貯水池의 堆砂調查資料를 이용하여 年平均貯水池 堆砂量과 影響因子間

의 多線型回歸模型을 設定하여 堆砂量 算定公式를 유도하였다.

유도된 算定公式는 流域面積이 작은 貯水池에 대해서는 높은 算定值가 推定된 反面 流域面積이 큰 貯水池의 경우는 대체로 算定值가 堆砂實測值보다 작은 경향을 보여 주었다. 이는 流域面積이 작은 貯水池는 貯水池堆砂捕捉效率이 작고 流域面積이 큰 貯水池는 이와 反對이기 때문인 것으로 思慮된다.

本 研究에서 사용된 資料의 不充分한 點을 감안하면 유도된 堆砂量 算定公式(式 11)은 대체로 實務에 適當한 結果를 줄 것으로 판단되며 앞으로 이 方向의 研究에서는 貯水池 堆砂量을 流域面積과 貯水池의 土砂捕捉效率 뿐 아니라 流域의 浸蝕程度라든지 植生被覆, 土地利用狀態 등을 반영하는 變數도 量的으로 고려해야 할 것으로 생각된다.

本 研究結果 貯水池의 年平均比流砂量은 流域面積이 커짐에 따라 減少하고 貯水池의 土砂捕捉效率이 낮아짐에 따라 減少됨이 밝혀졌다. 또한 貯水池堆砂率은 土砂捕捉效率에 比例하여 커지며 貯水池의 年平均容量損失率은 貯水池土砂捕捉效率, 혹은 初期容量-流域面積比가 작을 수록 월등히 커짐을 알 수 있었다.

本 研究에서 얻어진 流砂量 算定公式는 流域으로부터의 土砂流出問題가 河川流路部에서의 堆積과 貯水池內 堆積의 두 領域으로 나누어서 量的으로 解析하는데 사용될 수 있음을 입증하였다.

參 考 文 獻

1. ANDERSON, H.W. - "Relating Sediment Yields to Watershed Variables". *Trans. AGU, Vol. 38, No. 6, 1957.*
2. ANDERSON, H.W. - "Sediment Deposition in Reservoirs Associated with Rural Roads, Forest Fires and Catchment Attributes". *IASH Paris Symposium, IASH Publication No. 113, 1973.*
3. GEIGER, A.F. - "Sediment Yield from Small Watersheds in the United States". *IASH Toronto General Assembly, Vol. 1, 1957.*

4. MALCOLM, H.R. and SMALLWOOD, C. "Sediment Prediction in the Eastern United States" *Jour. Water Resources Planning and Management Div., Proceeding, ASCE, Vol. 103, No. WR2, 1977.*
5. MEGAHAN, W.F.- "Volume Weight of Reservoir Sediment in Forested Areas". *Jour. Hydraulics Div., Proceeding, ASCE, Vol. 98, No. HY8, 1972.*
6. ONODERA, T.- "Studies on Erosion in Japan" *IASH Toronto General Assembly, Vol. 1, 1957.*
7. VANONI, V.A., ed.- "Sedimentation Engineering", *ASCE, New York, 1975.*
8. WILLIAMS, J.R.- "Sediment Delivery Ratios Determined with Sediment and Runoff Models". *Proceeding, IASH Paris Symposium, 1977.*
9. 柳時昶, 閔丙亨, 貯水池의 堆砂에 關한 研究. 韓國農工學會誌, 第17卷 3號, 1975.
10. 柳熙正, 金始源, 貯水池의 堆砂에 關한 研究. 韓國水文學會誌, 第9卷 2號 1976.
11. Brown, C.C.-Discussion of "Sedimentation in Reservoirs", by B.J. Witzig, *Proceeding, ASCE, Vol. 69, No. 6, 1943.*
12. 嚴泰營, 徐承德, 貯水池의 消失率調查研究, 韓國農工學會誌, 第10卷 1號, 1968.
13. 이창구, 유한렬, 고재근, 湖南地方의 貯水池 容量과 堆砂에 關한 研究, 韓國農工學會誌 第13卷 2號 1971.
14. 신일선, 김재곤, 김시원, 貯水池의 所要容量과 堆砂量間의 關係에 關한 研究. 韓國農工學會誌 第21卷 1號, 1979.
15. 尹在漢, 韓相昱, 堆砂로 因한 貯水池內容積 減少에 關한 調查研究, 韓國農工學會誌, 第14卷 3號, 1972.
16. 農業振興公社, "小規模 灌溉事業을 위한 計劃, 設計方式", 附錄 建設費用의 算定, 1978.
17. 韓國水文學會, 貯水容量의 經年變化, 水資源開發 調查年報 第8卷, 1976.
18. Food and Agricultural Organization and Korean Water Resources Development Corporation, "Pre-investment Survey of the Nakdong River Basin", *Vol. 5, Section 4, Sediment Transportation in Rivers of the Nakdong Basin, 1971.*
19. Nippon Koei Co., Ltd., "Report on the Geum River Basin Overall Development Project", 1972.
20. Ministry of Construction, "Final Technical Report Vol. 5, Technical Note No. 2, 'Sedimentation in small Reservoirs'", Hydrologic Services, Rural Infrastructure Project, Seoul, 1978.

(接受: 1981. 11. 21)