

댐 저수지의 퇴사대책

Countermeasures for Sedimentation at the Dam and Reservoirs

박종화*
Park, Jong-Hwa

1. 서론

최근 들어 토지이용의 고도화에 따라 토사이동이 활발한 장소에도 생활기반조성이 전개되면서 하천형태 등 수계의 형태도 수자원이용 및 치수의 안전도를 목적으로 큰 변화를 가져왔다. 또한, 수자원 활용이 다양화되면서 수계를 따라 연속되던 하천 흐름이 단절되고 토사 이동의 연속성을 분단하고 있다. 이와 같이 이수과 치수를 위한 사업의 전개에 따라 유역 토사의 생산과 이동을 저해하고 하상변화가 심해지면서 하천과 호소생태계의 변질 및 유역생태계의 변화를 초래하고 있다.

지구온난화에 의한 이상기온은 가뭄과 홍수를 국지적으로 발생시키며 전세계적으로 막대한 피해를 주고 있다. 특히, 2002년 8월과 같은 국지성 호우와 태풍 등은 산과 농경지의 토양을 포화시켜 산사태를 유발하고 유실된 토사는 하천으로 흘러들어 농경지의 침수는 물론 댐과 저수지에 퇴적되어 저수용량을 감소시키는 주요 원인이 되고 있다. 도시와 농촌에서 유사와 함께 배출된 오염원들은 댐과 저수지에 유입되어 호수의 탁수현상을 일으키며, 저수지나 저수지 하류에서 취수하는 상수원수의 정수처리비용 등에 많은 영향을 주고 있다(최중대, 2001). 또한 호소생태계에 많은 교란을 일으키기도 하며 호소식물과 동물의 생존에 미치는 영향도 막대하다. 험준한 지형과 복잡한 지질조건에 호우가 많거

나 집중호우가 반복되면 토사의 생산량과 토사 유출량이 증가하여 다량의 토사가 댐과 저수지에 유입되어 퇴적되며 이로 인해 사회자본인 저수용량의 감소로 치수와 이수기능을 떨어뜨리고 있다. 반면에 댐과 저수지 하류유역은 유출토사가 멈춤으로써 하상이 낮아지고 해안침식 및 영양분을 함유한 토사유입이 줄어들어 연안생태계에 미치는 영향이 커져가고 있는 실정이다.

저수지의 퇴사문제는 대부분의 댐과 저수지의 경우 기능상의 문제가 되지 않는 범위에서 퇴사가 진행되고 있으나, 일부의 댐과 저수지의 경우 계획을 넘는 속도로 퇴사가 진행되고 있다. 본 강좌에서는 계획 이상의 토사가 퇴적된 일부 댐과 저수지에서 퇴사량을 최소화할 수 있는 방법과 세계에서 이용되고 있는 배사대책과 저수지 퇴사의 제어방법을 제시하고자 한다.

2. 댐 퇴사 용량이란

현재 우리나라에서 계획된 저수지나 침사지로 유입하여 침전·퇴적하는 퇴사량의 산정은 상류 유역의 토양손실량, 유역과 침사지 간의 유사 전달률, 침사지 내에서의 유사포착률을 곱한 값으로 계산하고 있다. 이 때 유사전달률은 토성에 따라 유역면적과 유사전달률 상관관계도를 이용하여 산정할 수 있고, 퇴적토의 단위중량은 Lane과 Keolzer가 제시한 경험식을 적용하며, 포착대상 퇴적토사의 최소 입경은 0.25 mm로

*충북대학교 농과대학 (jhpak7@chungbuk.ac.kr)

하고 있다.

일본에서 퇴사(량)에 관한 최초의 기술은 농림 관련 기술사업으로 1954년에 제정한 「토지개량 사업계획 설계기준(농림수산성)」에서 「계획저수량의 결정」항에 「퇴사량에 의한 여유를 예상하여」라고 적고 있는 것을 도입하여 사용한 것으로 생각된다. 이 때 「퇴사용량」이란 개념은 아직 확립되지 못하였고 구체적으로 「퇴사량」을 어느 정도로 할 것인가 하는 기술도 없다. 우리나라에서는 일반적으로 저수지 퇴사용량에 관한 현시점에서의 설계기준은 건교부 하천 설계기준(안) 계획편(1996년 개정)에 의하면 「다목적댐의 퇴사용량은 원칙적으로 100년간 쌓이는 추정 퇴사량을 취한다」라고 되어 있다. 현재는 이 기준에 기초하여 인근 댐의 퇴사실적, 각종 추정식 등에 의해 산출된 퇴사량을 종합적으로 감안하여 100년간의 계획퇴사량을 결정하고 있다.

3. 우리나라 기왕의 배사대책

현재 우리나라 저수지에 퇴사된 토사의 일반적인 배사방법은 저수지의 물을 방수하여 육상굴착 및 준설에 의한 방법으로 저수지 기능을 회복시키는 예가 대부분이다. 한편, 최근에 만들어진 댐과 저수지에는 댐과 저수지 체체 밑부분에 설치한 배사관(구)을 이용하여 퇴적토사, 유목, 침목 등을 배출하기도 한다. 또한, 댐 건설 전이나 건설 후에 배사문(구)을 설치하여 홍수기에 퇴적토사를 배사문(구)이나 여수로로 배제하는 방법을 이용하고 있다.

4. 댐 저수지 토사 제어기술

댐 저수지의 퇴사문제는 퇴사기구, 퇴사분포, 퇴사량, 퇴사방제, 유지관리가 중요한 과제이다. 이 중 퇴사량과 퇴사분포를 정확하게 추정하는 것은 효율적인 배사대책을 가능하게 하나 이와 같은 자료는 매우 희소하다(예 표 1., L. R. Soler-Lopez1, 2001). 이러한 요인중의 하나는 퇴사의 계측에 많은 기간을 필요로 한다는 점에

표 1. Puerto Rico 14개 저수지에 대한 퇴사량조사 결과

저수지	댐 저수용량 (Mm ³)	축조 연도	조사 연도	연령	저수용량 (Mm ³)	총손실 (Mm ³)	장기계약 손실 (m ³ /yr)	손실률 (%)	배수면적 (km ²)	표면적 (km ²)	퇴적률 (m ³ /km ² /yr)	퇴사량 (m ³ /km ² /yr)	저수손실 (m ³ /km ³ /yr)
Caonillas	55.66	1948	2000	52	42.27	13.39	257,500	24	126.65	2.70	9.5	2,186	2,033
Carite	13.95	1913	1999	86	10.74	3.21	37,326	23	20.51	1.20	3.1	1,938	1,820
Cidra	6.54	1946	1997	51	5.76	0.78	15,294	12	21.39	1.08	1.4	768	715
Dos Bocas	37.50	1942	1999	57	18.04	19.46	341,404	52	310.00	1.78	19.2	1,299	1,103
Garzas	5.80	1943	1996	53	5.11	0.69	13,019	12	15.60	0.40	3.2	878	834
Guajataca	48.46	1928	1999	71	42.28	6.18	87,042	13	79.77	3.42	2.5	1,188	1,091
Guayo	19.20	1956	1997	41	16.57	2.63	64,146	14	24.86	1.09	5.9	2,660	2,580
La Plata	40.21	1974	1998	24	35.46	4.75	197,917	12	469.00	3.09	6.4	483	422
Loiza	26.81	1953	1994	41	14.20	12.61	307,561	47	538.00	2.67	11.5	750	572
Loco	2.40	1951	2000	49	0.87	1.53	31,224	64	21.76	0.29	10.8	1,774	1,435
Lucchetti	20.35	1952	2000	48	11.88	8.47	176,458	42	44.81	1.11	159	4,102	3,937
Patillas	17.64	1914	1997	83	13.84	3.80	102,703	22	65.27	1.35	7.6	1,739	1,617
Prieto	0.76	1955	1977	42	0.22 0.33	0.54	12,857	71	24.80	0.06	21.4	900	518
Yahecas	1.76	1956	1956	41		1.43	34,878		45.17	0.22	15.8	1,430	772
								81					
평균							119,952	35			9.6	1,578	1,389

도 기인한다.

배사대책은 유역과 댐의 특성에 따라 다르며, 설치 댐과 신규로 댐을 건설하는데 있어서도 대책은 서로 다를 것이다. 그러나 댐의 배사대책은 한 가지 방법으로 해결할 수 있는 문제가 아니라 퇴사에 관련된 많은 부하요인을 구명하고 그것에 대응할 수 있는 종합적인 배사대책을 수립하여 체계적으로 접근해 가야 될 것이다. 즉, 효과적인 배사대책을 구명하기 위해서는 먼저 댐과 저수지 유역에서 발생하는 문제를 각 구간별로 나누어 그 실태를 파악해야 할 것이다.

퇴사에 영향을 주는 요인을 크게 4개 구간으로 구분하면 (1) 토사공급유역, (2) 하도구간, (3) 저수지, (4) 저수지부터 댐 하류로 나눌 수 있을 것이다. 먼저, (1)의 토사공급원인 유역에서 관계되는 요인으로는 ① 유역규모, ② 지형, ③ 지질, ④ 토양 피복상태, ⑤ 강우, ⑥ 토지이용에 의한

생산토사량, ⑦ 상류유역의 개발정도 등이 있다. (2)의 하도구간에서는 ① 하상 기울기, ② 하천 폭의 변화, ③ 하도의 퇴적정도, ④ 홍수유량빈도, ⑤ 하천의 형상 및 구성재료, ⑥ 하천 횡단구조물의 유무 등의 요인이 관여한다. (3)의 저수지에서는 ① 유입토사량, ② 유입토사의 입경 및 구성, ③ 저수지의 수위변동, ④ 저수지의 규모, ⑤ 저수지의 이용목적, ⑥ 저수지의 수리특성, ⑦ 저수지의 형상 및 댐의 위치 등의 요인이 있다. (4)의 저수지부터 댐 하류에서는 하류 하천에 토사를 원활하게 공급할 수 있는지의 요인으로 ①토사 배출방법, ②댐하류 하천의 하상 기울기, ③하천단면, ④하천의 현상, ⑤ 수송류 감소, ⑥, 하천의 합류와 분기 등의 요인의 영향을 받는다. 이상과 같이 퇴사에 관련된 요인이 많기 때문에 배사대책은 댐 설계 및 건설시에 종합적인 퇴사대책의 입안과 퇴사가 진행되고 있는 댐의 경우 본래의 기능을 회복하기 위한 방안으로 토사관리에 관한 기술을 검토해야 한다. 이 때 그림 1과 같이 댐 퇴사의 실태, 영향의 실태조사, 배사지구 구분의 검토, 배사 부하요인의 검토 등을 실시하여 종합적인 퇴사와 배사대책의 검토가 필요하다.

일반적으로 상류하천을 통해 유입되는 토사의 유사경로는 그림 2와 같이 크게 두 가지로 분류된다. 하나는 유사가 제체를 통과하여 (sediment pass-through)배제되는 방법이며, 다른 하나는 유사를 우회 (sediment bypass, 조절댐을 이용한 유사조절방법 포함)시켜 배제하는 방법이다. 유사 통과에는 다음과 같은 4가지 방법이 이용되고 있다.

- ① 계절별 수위조정을 통한 유사통과 (seasonal drawdown)
- ② 홍수발생 수문곡선을 이용한 수위저하방법 (flood drawdown by hydrograph prediction)
- ③ 홍수발생 규칙곡선을 이용한 수위저하방법 (flood drawdown by rule curve)
- ④ 밀도류를 이용한 탁수배출 (venting)

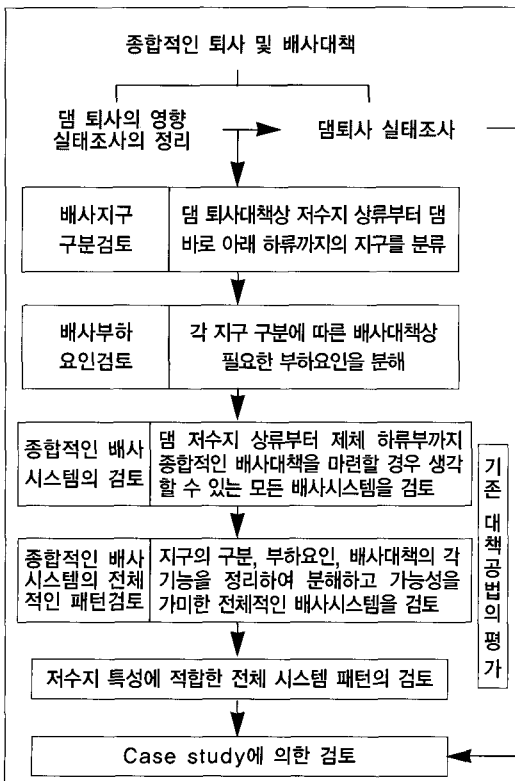


그림 1. 종합적인 배사 시스템의 흐름도

turbid density currents)

한편, 조절댐을 이용한 유사조절 방법을 포함한 유사 우회 방법에는 저수지 유입부에 다음과 같은 3 가지 저장방법을 이용하여 유사를 배제한다.

- ① 열림 수로 저장(On-channel storage)
- ② 닫힘 수로 저장(Off-channel storage)
- ③ 지표하 저수(Subsurface storage)

이와 같은 토사의 배제경로를 종합적인 퇴사 및 배사대책과 함께 댐과 저수지구역에서 발생 되는 문제를 각 구간별로 나누어 정리하면 표 2 와 같다. 댐과 저수지에서의 퇴사대책을 구역별 로 구분하여 나타내면 다음과 같다.

(1) 저수지 상류

저수지에 유입되는 토사경감을 위한 대책으로

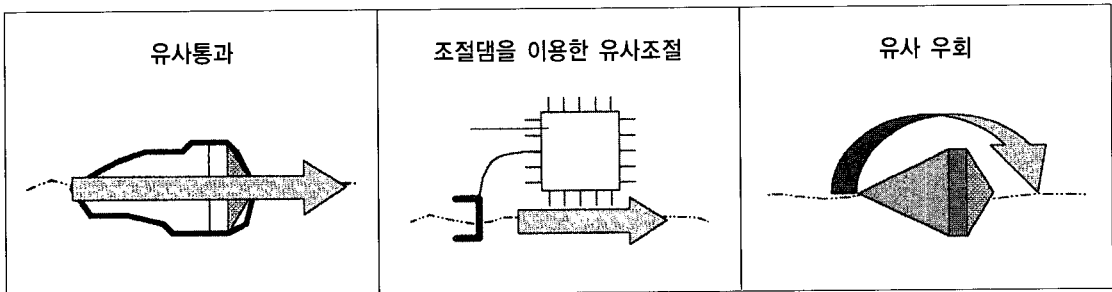


그림 2. 토사의 배제 경로

표 2. 댐 저수지의 퇴사대책

저수지내 유입 토사량의 경감	유역대책 저수지 상류	<ul style="list-style-type: none"> ◇저수지 상류부 눈발의 분포 및 경작형태 파악 및 관리 ◇사방사업, 치산사업에 의한 생산토사의 저장대책 ◇사방댐, 조절댐에 의한 저사 및 토사조절 ◇유로공에 의한 유출토사의 저장 및 하도안정 (사방댐, 저사댐, 조절댐, 유로공, 유사지 등) 	
	저수지 유입부에서의 대책	<ul style="list-style-type: none"> ◇댐 사업에 의한 그린벨트 및 상수원 보호구역 대책 (저수지 주변의 법면 안정공, 식재 등) ◇저사댐의 설치⇒저사댐에 의한 저사 (유입토사를 저사댐에 퇴적시킨 뒤 굴착 배제하는 방법) ◇배사 바이패스(bypass)의 설치 ⇒미세부유사 및 유입토사 배출 (홍수시 유입토사를 바이패스에 의해 우회시켜 댐하류로 흘려보내는 방법, bypass tunnel 설치) 	
저수지내 퇴적토사의 인위적 제거	저수지 안에서의 대책	<ul style="list-style-type: none"> ◇굴착, 준설과 수송처리 시스템에 의해 인위적으로 배제 (저수지의 준설) 	
댐 저수지로부터 배사강화	댐 제체 및 직상류에 서의 대책 (홍수시 유수의 힘을 이용 퇴적토사를 배출)	◇배사관, 배사문 (구)의 설치	저수위 저하에 의한 토사 flushing
		◇재부상에 의한 미세부유사 및 유입토사 방류	자연조절방식에 의한 토사배출
		◇홍수조절 수문에 의한 미세부유사 및 유입토사 방류	
		◇선택취수에 의한 부유사 방류	

저수지 상류의 산 능선과 계곡 등에서 발생할 수 있는 토사의 생산을 줄이는 것이 중요하다. 종래의 사방댐은 저사(貯砂)에 중점을 두었으나 최근의 사방댐은 토석류나 이상토석류에 대비하여 수문식이나 대형압거식 등을 이용하여 저사(貯砂)만이 아닌 토사조절을 중요시하는 방향으로 바뀌고 있다. 따라서 상류의 하천도 적당한 유수량을 보급하는 형태가 되어 이것이 저수지에 유입되게 된다.

(2) 저수지 말단

저수지 상류부 말단에 낮은 저사(貯砂)댐을 설치하여 부유사가 퇴적되게 하고 이것을 굴착하여 재이용하며 미세부유사는 배사 바이패스(또는 홍수 바이패스)로 배사하는 방법이다. 이 방법은 미세 부유사의 배출이 주가 되나 하류의 하상저하방지, 해안침식방지, 자갈 등에 이끼류를 생기게 하기 위해 소류토사도 배출할 필요가 있다. 배사(홍수) 바이패스에 따라서는 유입토사의 일부 또는 전부를 하류에 배출하는 방법이 있다. 예로 그림 3과 같이 스위스와 프랑스에 위치한 Verbois댐과 Genissiat댐에서 실시되고 있는 경우를 보면 다음과 같다. 스위스의 Verbois댐(H=34 m, V=12,000,000 m³)은 1942년에 완성

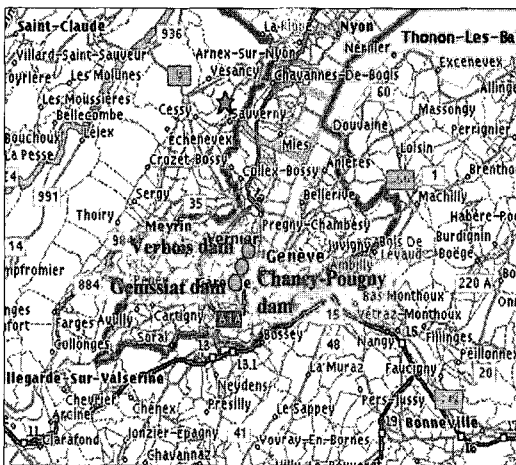


그림 3. 스위스의 Verbois댐과 프랑스의 Genissiat댐의 위치도

되었으며, Chancy-Pougny댐(H=10 m³)은 1948년 완성되었다. 프랑스의 Genissiat댐(H=104 m, V=18,000,000 m³)은 1948년 완성된

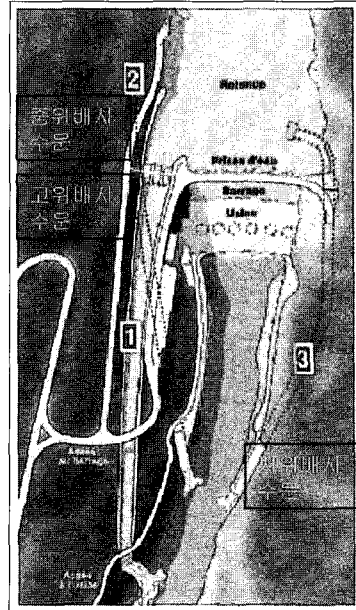


그림 4. 배사(홍수) 바이패스 (예, Genissiat댐 배사개념도)

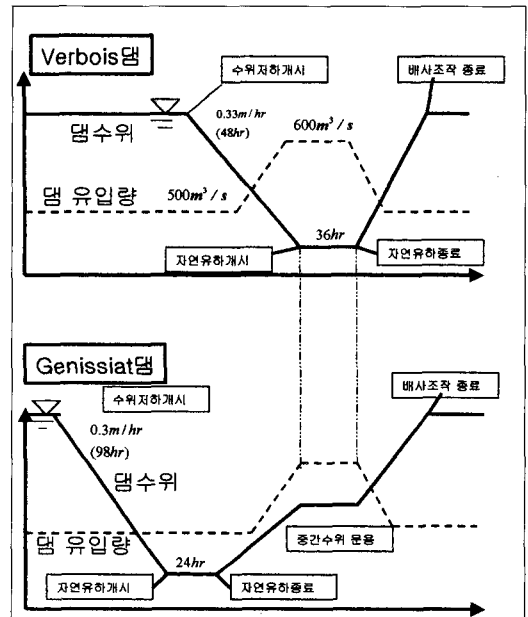


그림 5. 연대배사 운용방법 개념도

댐으로 배사(홍수) 바이패스를 채용하고 있는 방식이다. 아르브강의 토사생산량은 100만 m³/년이며 이 중 Verbois댐에 50만 m³/년, Genissiat댐에 40만 m³/년이 퇴적되고 10만 m³/년이 하류로 흘러가게 된다. 그림 4에는 프랑스의 Genissiat댐에서 실시되고 있는 배사시스템의 개념도를 나타내었다. 이렇게 퇴적된 토사는 그림 5와 같이 3년에

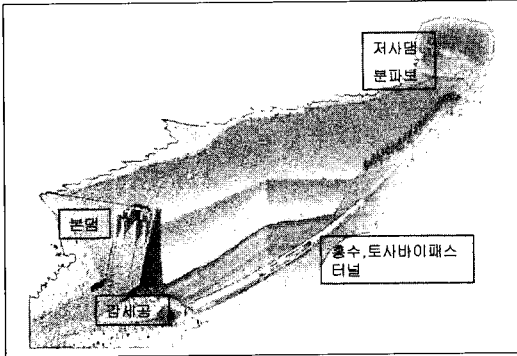


그림 6. 일본 美和댐 배사(홍수) 바이패스 개념도

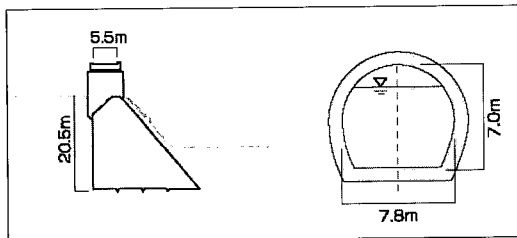


그림 7. 분파보의 표준단면도와 배사(홍수) 바이패스 단면도

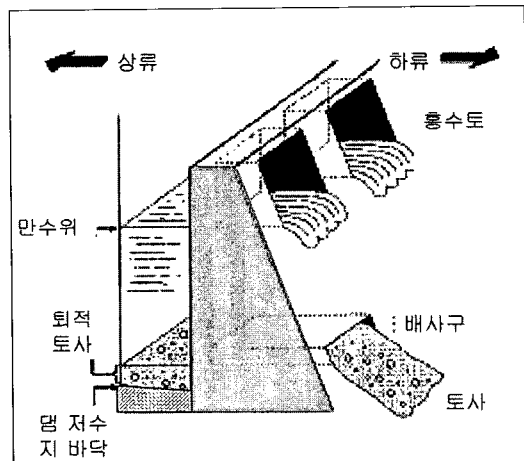


그림 8. 배사구를 통한 퇴사배출 과정

1회씩 연대 배사작업을 실시하여 배제하고 있다. 일본에서는 1998년에 Asahi댐에 배사 바이패스가 최초로 완성되어 현재는 여러 곳에서 채용되어 건설중에 있다(美和댐, 松川댐, 横山댐 등). 그림 6은 현재 일본 美和댐에 건설중인 배사(홍수) 바이패스와의 전경을 나타낸 그림이다. 그림 6의 저수지 상류부에는 저사댐과 분파보를 설치하여 저수지에 유입될 수 있는 토사를 저사하여 그림 7과 같은 분파보를 통해 배사(홍수)바이패스로 보내 토사를 배제하게 된다. 그림 7에는 저수지 유입부에 위치한 분파보의 표준단면도로 배사(홍수)바이패스의 단면도를 나타내었다.

(3) 저수지내

퇴적 토사량이 많은 저수지에서는 유효용량의 확보와 이용을 위해 오래 전부터 토사의 굴착과 준설이 실시되어 왔다. 저수지내에 퇴적된 토사가 많을 경우는 이와 같은 굴착과 준설에 의한 방법을 많은 댐에서 채택하여 실시하고 있다.

(4) 제체 및 직상류에서의 배사방법

① 배사문(구)에 의한 배사

특히 유출토사가 많은 하천에서 저수량이 적고 저수위 저하가 가능한 댐에서는 저수위를 낮추어 퇴사를 flushing하는 방법을 사용한다(그림 8). 이 방법은 다량의 퇴사가 배출되므로 어류 등

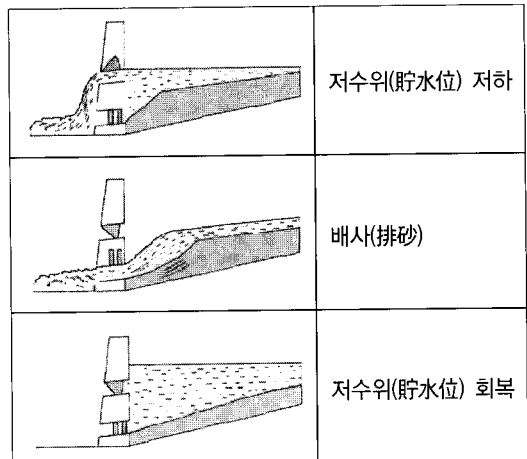


그림 9. 배사문으로 퇴사를 배출하는 과정

에 미치는 환경문제도 검토해야 된다. 또한, 배사문(구)의 자유조절 방식을 채용하여 홍수와 함께 유입토사도 조절하여 하류에 방류하는 방법도 외국에서는 실시하고 있다. 종래와 같이 계획된 사용량이 필요가 없고 댐높이가 낮을 경우에도 유효한 방법이다. 그림 9에는 배사문으로 퇴사를 배출하는 과정을 나타내었다. 그림과 같이 댐에 배사용 수문을 설치하여 흐름이 퇴사를 운반하는 힘(소류력)을 이용하여 저수지에 쌓인 퇴사를 하류에 배출하는 방법이다.

② 재부상방식 배사

댐에 설치한 재부상식 방류설비에 의해 세립토를 방류하는 방법이다. 이 방법은 퇴사가 많은 소규모 댐에 적합한 방식이다.

③ 홍수조절 수문

홍수조절 수문이 댐의 중간 높이 아래 부근에 있는 경우는 퇴사가 수문 높이 가깝게 쌓이기도 하고 밀도류 등에 의해 다량의 부유토사가 방류되기도 한다. 따라서, 유입토사의 대부분을 하류에 유출할 때 사용되는 방법이다.

④ 선택 취수시설

홍수시에 농도가 높은 탁수를 밀도류를 이용하여 선택 취수시설로 배출하는 방법이다.

5. 맺는말

저수지의 퇴사관리와 배제에 관한 문제는 국내 외를 막론하고 여러모로 조사·연구되고 있다. 이와 관련하여 본 강좌에서는 댐과 저수지 유역에서의 퇴사대책을 각 구간으로 구분하여 정리하였다. 이 중 유용한 방법으로 배사문을 사용한 연대배사와 토사(홍수) 바이패스 시설에 의한 배사에 대해 알아보았다. 앞으로 종합적인 퇴사의 관리측면에서 토사의 생산과 이동과정에서 유출을 저지 당한 토사를 하천을 따라 원활하게 순환할 수 있게 하는 토사관리 계획이 필요할 것이다. 그러기 위해서는 배사기술의 검토와 개발이 필요할 뿐만 아니라 다양하게 연구되어 자원의 효율적 활용에 유용하게 이용되었으면 한다.

참고문헌

1. 최중대, 2001, 침사지의 규모 산정방법, 한국관개배수, 8(2), p. 283.
2. Luis R. Soler-Lopez, 2001, Sedimentation Survey Results of the Principle Water-Supply Reservoirs of Puerto Rico, February 2000, U. S. Geological Survey Water-Resources Investigation Report 01-4043, 18 p. 1 pl.