

## 1. 서론

우리나라는 경제성장과 더불어 수자원의 이용과 흥수방재 등을 목적으로 댐이 건설되어 왔다. 이러한 댐은 생활 및 공업용수의 안정적인 공급과 관개용수 공급, 수력발전을 통한 에너지 생산과 흥수조절에 따른 댐 하류지역의 흥수피해 경감 등을 하였다. 그러나 하천의 흐름을 저류하여 저수지로 변화시켜서 기상과 수질의 변화, 생태계의 변화 등을 야기하고 있다. 또한 유사이송과 흐름에 대한 연속성을 간섭하여 댐 하류하천의 지형변화, 식생의 변성 등 하천의 물리적인 변화와 생태계 서식처, 수운, 수질 등 생태환경적인 변화를 초래하여 왔다.

논단

2

River & Culture



장 창 래 | 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원  
(djang@kwater.or.kr)

# 증가방류에 의한 하천의 물리적 특성

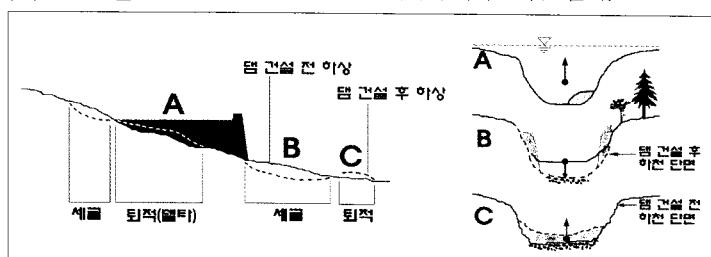
최근에 한국수자원공사는 갈수기에 댐 방류형식에 변화를 주어, 댐 하류하천의 물리적 생태계의 서식처 환경 기능 강화의 효율을 높이고, 향후에 댐 운영 개선을 위한 대책을 마련하기 위하여 주요 다목적댐에서 증가방류를 수행하였다. 본 연구에서는 대청댐 하류 구간에 대하여 하천의 물리적인 변화 및 적응과정을 조사하고 분석하였으며, 이를 소개하고자 한다.

## 2. 댐 하류 하천의 특성

댐은 용수공급, 흥수조절 및 수력발전을 목적으로 건설되어 운영되고 있으며, 유사를 포착하고 첨두홍수량과 하천 흐름의 계절적인 분포 및 하천 특성과 기능을 크게 변화시키고 있다. 댐은 유사이송과 흐름에 대한 연속성을 간섭한다. 댐 상류에서 하상고는 상승하고, 하상경사는 감소하며, 저수지에 물이 유입될 때 이송능력이 크게 감소된다. 또한 이것은 배수위

경계에서 델타의 발달을 촉진시키며, 저수지의 저류 용량을 감소시킨다. 저수지는 일반적으로 총 유사량의 90 % 이상을 저류하며, 특히, 거대한 저수지에서 유사의 차단 효율은 일반적으로 99% 이상이다(Williams and Wolman, 1984).

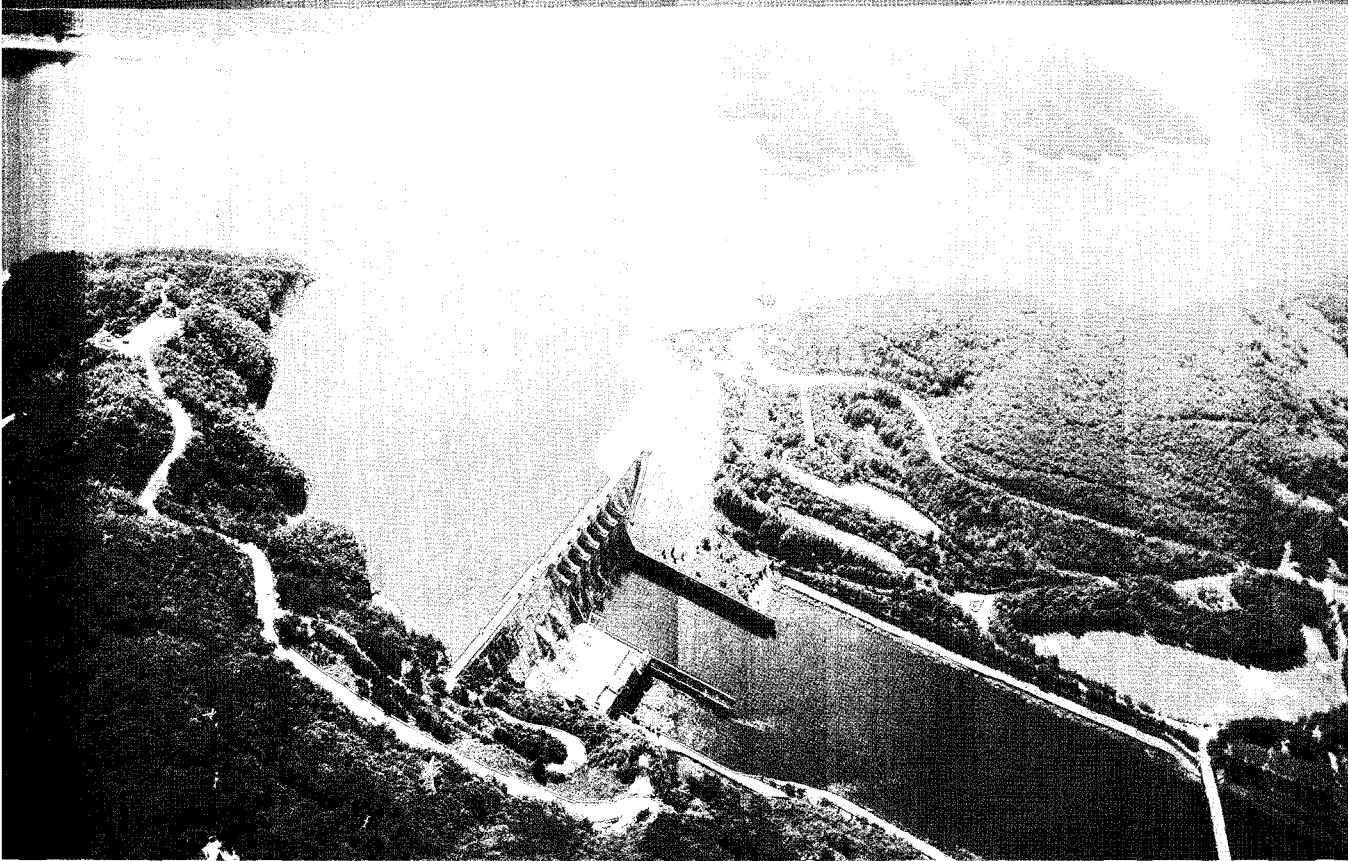
댐에서 방류된 유량은 유사량을 이송시킬 에너지를 갖고 있으나 유사량이 없다. 이러한 유량을 “빈수(貧水, hungry water)”라 한다. 이 빈수는 하상을 세굴시키고 강턱을 침식시키는데 에너지를 소산하며(Kondolf, 1997), 댐 건설 후에 수년 동안 하상 및 강턱침식에 소비되어 하상토가 굽어지고, 평형상태에 도달할 때까지 지속된다(그림 1).



(a) 댐 건설에 의한 하상교란(종단 변화)

(b) 댐 건설에 의한 하상교란(횡단 변화)

〈그림 1〉 댐 건설에 의한 하천의 종횡단 변화 (Brierley et al., 2005)



## 2-1 댐 하류 하천의 물리적 특성

댐 하류 하천에서는 유사의 공급이 없기 때문에 하상저하가 발생하며, 수리구조물의 기반을 세굴시켜 안전을 위협한다. 하상저하의 크기는 저수지 운영, 하천 특성, 하상토 크기, 그리고 댐 건설 후의 시계열 흥수 사상에 따라 결정된다.

댐 하류 하천의 하상저하는 하상에서 입경의 크기를 변화시키고, 자갈과 세립토사로 분리되어 굵은 골재, 조약돌 등으로 퇴적된 장갑화 층을 형성하게 되며 하류로 이동한다. 이러한 장갑화 층의 발달은 변화된 조건에 대한 하천의 새로운 적응이다. 하상저하가 발생하는 조건에서 하상경사가 점진적으로 감소하고 하상에서 조도가 증가하는 수리학적 조건을 변화시켜 하상 저하율이 감소된다(Williams and Wolman, 1984). 일반적으로 댐 하류 하천에서 하폭 축소와 하상저하는 하상의 장갑화가 발달하거나 에너지 경사가 감소되어 하상이 안정화될 때까지 지속된다. 하상토의 입도가 가는 사주 및 저수로 경계면에서 유사의 퇴적이 발생할 때 하

천의 유하능력은 감소된다. 만약 식생이 발달하게 되면, 하천은 안정성이 증가하게 되나, 조도의 증가에 의한 유속감소와 수위상승을 일으킨다.

소류사의 공급 감소는 하천의 형태를 변화시킨다. 일반적으로 망상하천은 사행하천(single-thread meandering pattern)으로 바뀌고 있으며, 하상저하 및 측방향 이동이 발생한다.

많은 저수지에서 첨두 흥수량이 감소하기 때문에 그 감소량은 저수지의 크기와 운영에 따라 결정된다. 하천의 흐름에 대하여 저수지 크기가 크고 주어진 흥수에 대하여 이용 가능한 흥수 용적이 클수록 첨두 흥수량은 크게 감소한다. 댐에 의해 감소된 흥수는 하상바닥을 깨끗하게 할 만큼 세류(fushing) 시키는데 적합하지 않기 때문에 지류에 의해 본류에 유입된 세립토사는 자갈하천에 퇴적된다. 댐 하류에서 식생은 유사가 퇴적된 저수로 일부에 침입하여 번성하게 된다.

교란된 하천이 회복되는 데에는 긴 구간과 시간이 필요하다. 왜냐하면 세균 및 지류에 의해 유입되는 유사량이 댐 건

설 전의 유사량과 평형을 이루어야 하기 때문이다(Galay, 1983; Williams and Wolman, 1984).

댐은 본류와 지류에 생태계 서식처와 생존능력에 충격을 주며 수온, 수질 등 변화를 초래한다. 또한 변화된 기저유출과 관련된 지하수위 적응은 고립된 웅덩이에서 피난처의 손실, 육상동물의 포식자 증가, 식생의 증가, 그리고 조류(algae)의 급격한 증가를 초래한다.

## 2-2 댐의 용도별 하천의 변화

댐은 하천에 다양한 영향을 주며, 그 범위와 영향은 댐의 목적과 규모에 따라 결정된다. 댐의 방류량 변화는 하류에 많은 영향을 미친다. 발전전용 댐의 방류량은 첨두발전의 필요에 따라서 시간 혹은 일 단위로 변하며, 댐하류 하천의 지형에 영향을 준다. 유량의 변화는 강턱침식 및 서식처의 지속적인 손실을 증가시키는 중요한 인자이다. 댐은 상류에서 유입되는 유량을 조절하여 하류로 방류하기 때문에, 댐 하류 하천에서 흐름은 느리고, 특히 웅덩이에서 흐름을 느리

게 변화시키며, 때로는 호소환경이 된다. 용수공급댐은 유지유량을 감소시켜 하천의 지형, 식생, 서식처를 변화시키거나, 반대로 흐름을 증가시켜 하천의 지형을 변화시키는 결과를 초래한다.

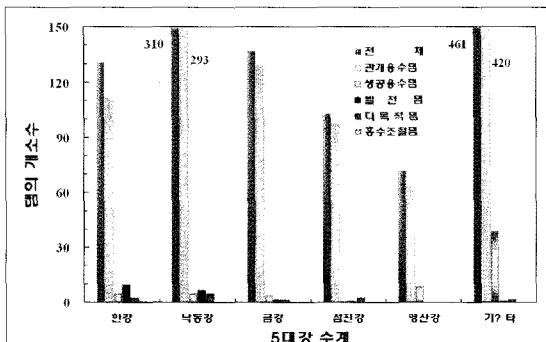
관개용수가 저장된 농업용 저수지에서는 인공적으로 저수위 흐름이 발생하며, 쉽게 데워지고, 용존산소가 결핍된다. 이것은 수중생물에게 스트레스를 주거나 심하면 죽음을 일으킨다. 마찬가지로, 많은 물을 저류하는 저수지는 수온을 저하시키고, 방류된 물에 의해 댐 하류 하천에서 수온이 낮아 고유 어종이 적응할 수 없다.

## 3. 국내 댐의 현황

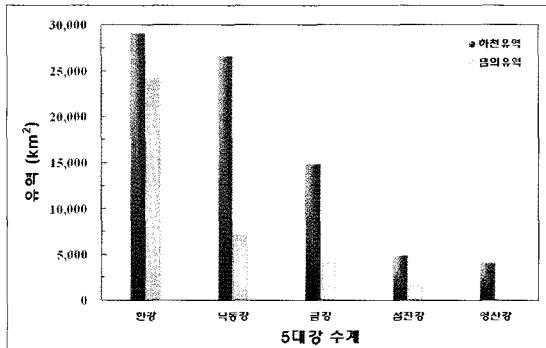
우리나라는 아시아 몬순지역의 다우지대에 속하면서 연간 강우의 70%가 하절기에 편재하는 특성을 가지고 있고 농경문화권에 속하여 벼농사를 위한 관개시설이 예로부터 발달하게 되었다.

국내의 댐은 약 18,000개소로, 그 중 대댐 기준에 속하는 댐(높이 15.0m 이상, 높이 10~15m로서 길이가 2,000m 이상과 저수용량이 300만 m<sup>3</sup> 이상)은 1,215개소로 조사되었다. 이 중에서 다목적댐이 15개소, 발전댐 21개소, 홍수조절용댐이 1개소가 촉조되어 있으며, 댐의 개소수로는 농업용수댐이 가장 많이 건설되었다(그림 2와 3).

유역별로는 낙동강 수계가 가장 많이 건설되었으며, 한강, 금강 수계 순이다. 또한 다목적댐은 낙동강 유역에 310개댐(25.5%)으로 가장 많이 보유하고 있으며, 금강 수계 131개소(10.8%), 한강 수계 127개소(10.5%), 섬진강 수계 98개소(8.1%), 영산강 수계 72개소(5.9%)의 순으로 나타나고 있다. 발전용 댐은 한강 유역에 가장 많이 건설되었다. 수계별 다목적댐과 발전용댐이 유역에 차지하는 비율로는 한강 수계가 83%로 가장 많이 차지하고 있으며, 섬진강, 금강, 낙동강 순으로 나타났다. 목적별로는 관개용수댐이 1,114개소(91.8%)로 가장 많으며, 댐형식별로는 코아형 필댐이 795개소(65.5%)로 가장 많이 건설되었다.



(그림 2) 수계별 댐의 개소수



(그림 3) 수계별 댐의 점유율

#### 4. 댐 하류 하천의 적응관리를 위한 증가방류

댐 하류 하천은 전형적으로 흥수 및 유사의 공급이 감소하고 있으며, 저수지에서 유역이 변경되어 다른 유역으로 유량이 방류될 때 전체 방류량은 감소된다. 유황이 평균수시에 일정한 유량으로 변경되기 때문에 흥수시에 침수되지 않은 저수로 부분은 수생태계의 서식처 기능이 상실된다. 자연 유량의 변화가 상실됨에 따라 하천에서 지형, 수심 그리고 유속의 변화가 크게 감소된다. 이러한 직접적인 수문학적 영향 이외에 댐의 조절방류에 의한 하류하천은 하천의 지형 및 유사량 변화에 의해 수생태계에 영향을 미칠 수 있다.

댐 하류 하천의 적응은 흥수의 크기, 유사의 이송능력, 그리고 댐 하류 하천에 유입되는 지류에서 비조절된 유량과 유사량에 의해 결정된다(Williams and Wolman, 1984). 저수지 저류량이 하천의 이송능력을 충분히 감소시킨다면 하류 하천의 지류로부터 유입되는 미세유사는 하상에 퇴적된다. 흥수의 규모 및 빈도가 감소됨에 따라 하천의 경계를 따라 퇴적되는 유사에 의해 하폭이 축소되고, 망상하천은 다지하천으로 변하며, 식생이 활착하여 번성하게 된다. 이러한 댐 하류 하천의 충격을 감소시키기 위하여 하상에 퇴적된 유사의 제거 및 하상저하를 일으킬 수 있는 조절된 증가방류(fushing flow)가 수행된다. 이러한 증가방류는 생태계의 서식처 유지를 위해 필요한 유지유량을 포함한다(Kondolf and Wilcock, 1996).

증가방류는 최소 증가방류와 최대 증가방류로 나눌 수 있다. 최소 증가방류는 하천의 유사(流砂)를 유지하는지 혹은 하천의 지형을 유지하는지에 따라 크게 두 가지 범주, 즉 유사의 유지 및 하천의 유지로 나눠진다. 최대 증가방류는 흥수조절 조건, 물값, 그리고 댐에 의해 유사의 공급이 차단된 구간부터 유사 혹은 골재의 손실에 의한 제약조건에 의해 결정된다. 증가방류는 발전 손실, 감소된 용수공급, 어류 서식을 위한 자갈손실과 같은 비용이 포함된다(Kondolf and Wilcock, 1996).

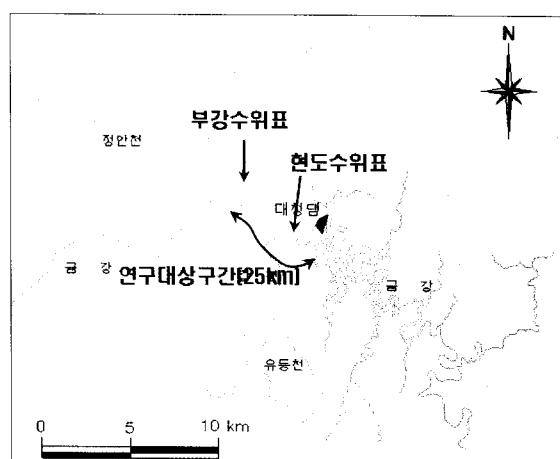
한국수자원공사는 최근에 갈수기에 댐 방류형식에 변화

를 주어 댐 하류하천의 물리적 생태계의 서식처 환경 기능 강화의 효율을 높이고, 향후에 댐 운영 개선을 위한 대책을 마련하기 위하여 주요 다목적댐에서 증가방류를 수행하였으며, 공통조사 구간인 대청댐 하류 구간에 대하여 하천의 물리적인 변화 및 적응과정을 조사하고 분석하였다.

##### 4-1 대상유역의 현황 및 지형변동

대청댐은 금강 종류의 대전광역시 북쪽에 위치하고 있으며, 1980년 12월에 준공되었다. 댐의 길이는 495m, 높이는 72m로 콘크리트 중력식과 석고댐의 복합식 댐이다. 유역면적은  $3,204\text{km}^2$ , 총 저수용량은  $1,490 \times 10^6\text{m}^3$ , 유효저수용량은  $790 \times 10^6\text{m}^3$ 이다. 댐 하류의 약 10km 지점에 역조정지댐이 있으며, 댐 하류의 하상 및 지형변동 등 다양한 변화는 역조정지댐에서 시작된다. 댐 건설 직후에 여수로 방류는 매년 실시되고 있으며, 댐 하류 하천에 많은 하상 및 지형변화가 발생하였다. 또한 댐 상류에는 용답댐이 2005년 12월에 준공되었으며, 댐의 길이는 498m, 높이는 70m로 콘크리트 중력식 댐이다. 유역면적은  $930\text{km}^2$ , 총 저수용량은  $815 \times 10^6\text{m}^3$ , 유효저수용량은  $672 \times 10^6\text{m}^3$ 이며, 역조정지댐은 없다.

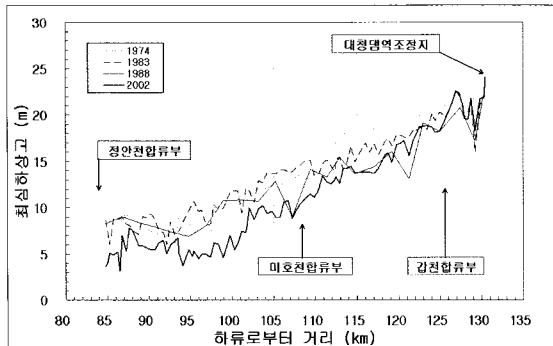
증가방류에 의한 조사지점은 하구로부터  $112.35\text{km}$  상류에 있는 부강수위표와  $127.89\text{km}$  떨어진 현도수위표 지점에서 수위변화 및 하상토의 변화를 분석하였다(그림 4).



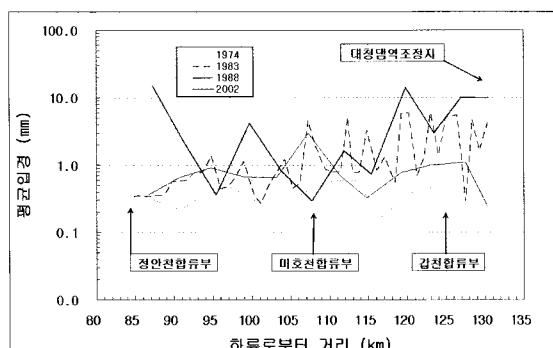
〈그림 4〉 연구 대상구간

일반적으로 하상은 강우로 인한 유출량의 변화, 하도 및 지형적 특성, 하상 구성재료, 유역내 토지피복상태 등의 자연적 요인과 댐, 제방, 하천횡단 시설물의 설치, 하상골재 채취, 유역내 개발로 인한 토지이용상태 변화 등의 인위적인 요인에 의해 지속적으로 변하고 있다.

대청댐 하류의 최심 하상고는 전 구간에 걸쳐 대체적으로 1974년부터 2002년까지 지속적으로 저하되고 있으며, 특히 미호천 합류부에서는 5m 이상 저하되었다. 대청댐 역조정 지댐에서 갑천 합류부에 이르는 구간은 1974년부터 1988년 까지 큰 폭으로 하상이 저하되었으나, 그 후부터는 하상변동이 거의 없으며, 이는 댐 직하류에서 하상이 안정화 되어가는 것을 의미한다(그림 5). 대체적으로 하상토의 평균입경은 전 구간에 걸쳐 댐 건설 전인 1974년보다 2002년도가 커지고 있다. 대청댐 직하류에는 댐 건설 전인 1974년에는 0.6mm인 모래하천에서 평균 입경이 10mm인 자갈하천으로 크게 바뀌었다(그림 6). 이는 댐에 의한 유입 유사량의 저감과 지속적인 하상 저하로 인하여 발생한 것이다.



〈그림 5〉 대청댐 하류의 최심 하상고 변화

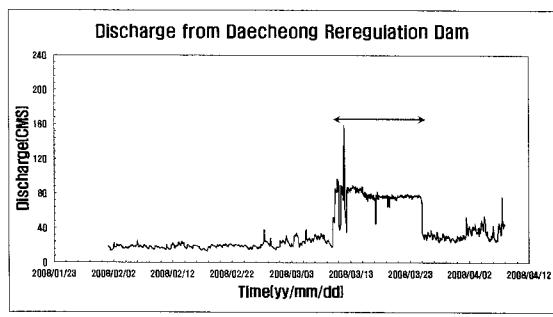


〈그림 6〉 하상토의 평균입경의 변화

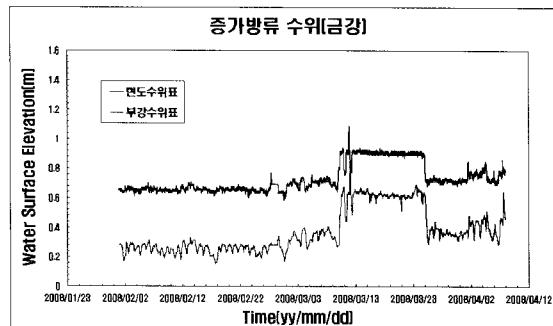
#### 4-2 증가방류에 따른 하천의 물리적 변화

대청댐은 방류량을 2008년 3월 10일부터 3월 24일까지 15일 동안  $40\text{m}^3/\text{s}$ 에서  $90\text{m}^3/\text{s}$ 로 동적 변화를 주어 증가방류를 수행하였다(그림 7(a)). 부강수위표에서 수위는 0.27m에서 0.6m로 상승하였으며, 현도수위표에서는 0.65m에서 0.9m로 수위가 상승하였다(그림 7(b)).

대청댐으로부터  $90\text{m}^3/\text{s}$ 의 증가방류에 의해 댐 하류 하천에서 하상토의 이동을 파악하기 위하여 지름이 35cm, 높이가

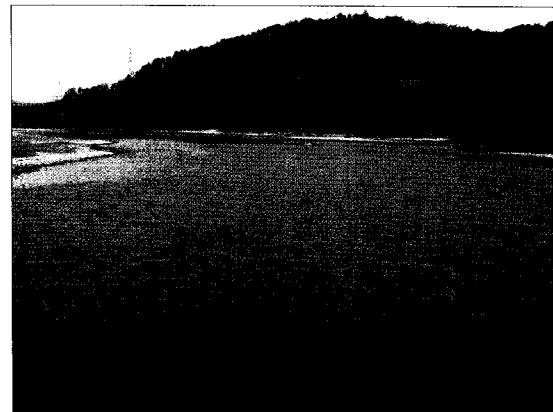


(a) 방류량



(b) 관측지점의 수위

〈그림 7〉 대청댐 역조정지댐의 방류량 및 관측지점의 수위 변동



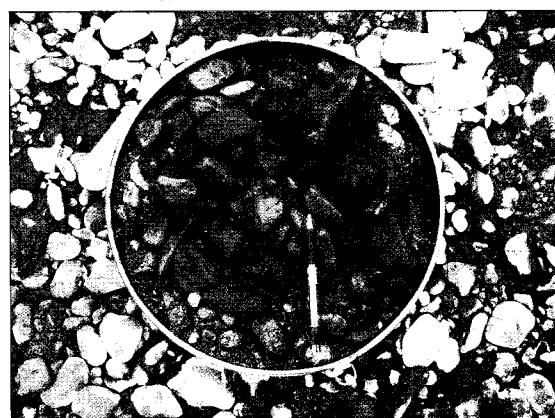
〈그림 8〉 조사지점의 흐름현황(부강수위표 지점)

7.5cm 인 유사 채집(sediment trap) 상자를 부강수위표와 현도수위표 지점에 설치하였다. 하천의 저수로에는 여울과 웅덩이가 있으며, 증가 방류에 의해 유사의 이동이 용이한 여울의 하류 부분에 설치하였다(그림 8). 설치된 유사 채집 상자는 증가 방류 후에 회수하여 증가방류 기간 동안 이동한 소류사의 특성을 분석하였다(그림 9).

하상토의 변화는 표층에서 증가방류 전후의 입도 변화와 유사 채집 상자에 채집된 유사의 특성을 입도분석을 통하여 분석하였다. 현도수위표는 대청댐 역조정지댐 직하류에 위치한 수위표로서, 하상토의 평균입경은 방류 전 평균 입경이 29.2mm에서 방류 후 36.8mm로 하상토의 표층입경이 증가하였다. 표준편차( $\sqrt{d_{s4}/d_{16}}$ )는 6.58에서 4.98로 약간 균일하게 변동되었다. 유사 채집 상자에 포착된 유사의 평균입경은 2.58mm이며, 표준편차는 1.72로서 입경의 분포가 매우

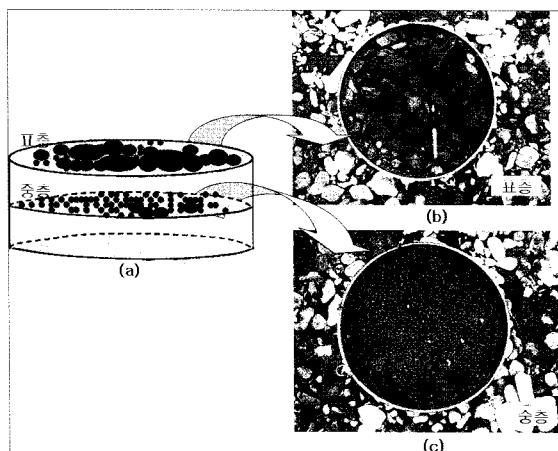


(a) 증가방류 후 소류사 채집상자 현황



(b) 증가방류 후 채집된 소류사

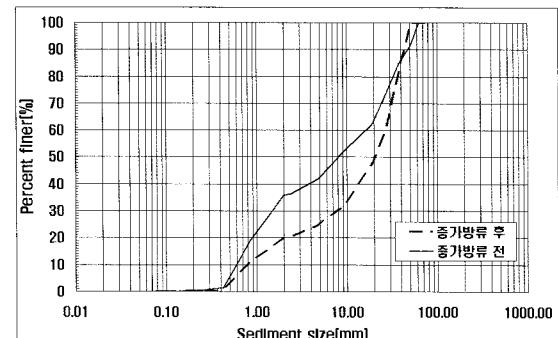
(그림 9) 채집상자에 포착된 소류사



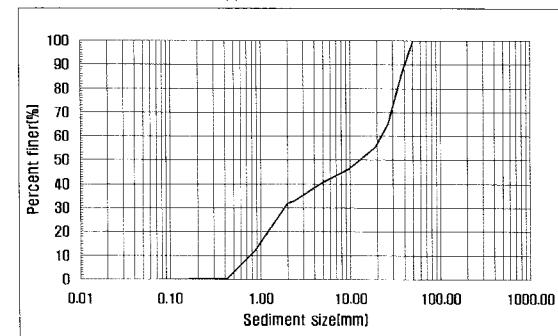
&lt;그림 10&gt; 하상토의 수직분급: (a) 모식도, (b) 표층, (c) 중층

균일하였다. 댐 직하류로서 하상이 장갑화가 진행되었으며, 저수로에서 하상변동의 거의 없고, 유사의 이동이 거의 없으며, 자갈과 자갈 사이에 끈 작은 모래가 주로 이동하였기 때문에 판단된다.

부강수위표는 대청댐 역조정지댐에서 약 20km 하류에 위치한 수위표로서, 하상토의 평균입경은 증가방류 전



(a) 하상토 입도분포



(b) 채집된 유사의 입도분포

&lt;그림 11&gt; 증가방류 전후의 하상토 입도분포(부강수위표)

22.9mm에서 방류 후 28.8mm로 하상토의 표층 입경이 약간 굽어졌으며(그림 11(a)), 표준편차는 7.26에서 5.55로 약간 균일하게 변동되었다. 유사 채집 상자에 포착된 유사의 특성으로 평균입경은 24.11mm이며, 표준편자는 5.92이었다(그림 11(b)). 유사 채집 상자의 표층은 굽은 자갈로 형성되었으며, 종층에는 입도가 균일한 모래로 구성되었다(그림 10).

표층에서 하상토가 굽은 것은 가는 입자가 하류 하천으로 이동하였기 때문이며, 이러한 현상은 자갈하천 혹은 댐 하류 하천에서 유사의 이동 및 장갑화가 진행되어 가는 메카니즘을 잘 보여주고 있다(그림 11(b)).

## 5. 결론 및 향후 과제

최근에 경제성장과 더불어 수자원의 이용과 홍수방재 등을 목적으로 댐이 건설되어 왔으나, 용수공급과 발전, 홍수 조절과 같은 순기능 이외에 유사이송과 흐름에 대한 연속성을 간섭하여, 댐 하류하천의 지형변화, 식생의 번성 등 하천의 물리적인 변화와 생태계 서식처, 수온, 수질 등 생태환경적인 변화를 초래하는 등 역기능이 나타나고 있다. 이를 개선하고자 한국수자원공사에서는 갈수기에 댐 방류형식에 변화를 주어 댐 하류하천의 물리적 생태계의 서식처 환경 기능 강화의 효율을 높이고, 향후에 댐 운영 개선을 위한 대책을 마련하기 위하여 주요 다목적댐에서 증가방류를 수행하였다.

이에 대하여 대청댐 하류 구간에 대하여 하천의 물리적인 변화 및 적응과정을 조사하고 분석한 결과, 댐 하류 하천에서 하상토는 여울 구간에서 미세지형의 변화에 따라 입도가 굽어지고 있으며, 입도분포가 균일하게 변하고 있다. 그러나

웅덩이에서는 하상의 지형변화가 거의 없었다. 금번 증가방류를 통하여 댐 하류 하천의 지형변화를 통한 생태계의 서식환경을 개선하기에는 한계점이 많다. 따라서 향후에는 방류량과 방류시간의 변화를 통하여 댐 하류하천의 변화를 조사하여 댐 하류 하천의 적응관리를 위한 관리방안을 수립해야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심B01) 및 한국수자원공사 물관리센터의 증가방류 효과개선에 대한 기술지원의 일환으로 수행되었습니다. ☺

## 참고문헌

1. 한국수자원공사 (2000), 한국의 댐.
2. Brierley, G., and Fryirs, k.A.(2005), Geomorphology and River Management, Applications of the river styles framework, Blackwell Publishing, pp. 100.
3. Galay, V.J. (1983), Causes of river bed degradation, Water Resources Research, 19(5), 1057-1090.
4. Kondolf, G.M. (1997), Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels, Environmental Management, 21(4), pp. 533-551.
5. Kondolf, G.M., and Wilcock, P.R. (1996), The flushing flow problem: Defining and evaluating objectives, Water Resources Research, 32(8), pp.2589-2599.
6. Williams, G.P., and Wolman, M.G. (1984), Downstream Effects of Dams on Alluvial Rivers, United States Geological Survey Professional Paper, 1286.