

대청댐에서 증가방류에 의한 하상토의 변화 분석

Analysis of Bed Material Changes by Flushing Flow from Daecheong Dam

장 창 래* / 우 효 섭**

Jang, Chang Lae / Woo, Hyoseop

Abstract

In this study, changing characteristics of bed materials downstream of Daecheong Dam by flushing flow was investigated. Flushing flow affected the downstream environment in such a way that the mean diameter of bed material was increased and the standard deviation was decreased. The vertical sorting of bed materials composed of mixed sediment in the sediment box was observed. The surface layer was composed of gravels, and uniform sand material was buried below it. Relative fractions (D_i/D_{50}) of the bed material trapped in the box was nearly 1.0 for the bed material coarser than D_{50} at Hyundo gauging station, and was between two values on the bed surface before and after the flushing flow at Bugang gauging station. Ratio of driving force to resisting force for each fraction (τ_i^*) with the fraction size maintained constant for the bed material coarser than D_{50} at Hyundo station. At Bugang station, however, it was rapidly decreased. It means that pavement of the surface layer of bed material at Bugang station was developed, with the sediment particles moving downstream uniformly by flushing flow.

Keywords : Flushing flow, mixed sediment, vertical sorting, armoring/pavement

요 지

본 연구에서는 대청댐 하류 구간에서 증가방류에 의한 유사의 이송 및 하상토의 변화 특성을 분석하였다. 증가방류에 의해 하상토의 평균입경은 증가하고, 표준편차는 작아지며, 입경분포는 균등하게 변화하였다. 혼합사로 구성된 하상토의 표층은 굵은 자갈로 형성되었고, 저층은 모래로 구성되었으며, 유사의 수직분급이 발생하였다. 유사의 거동은 소류사 형태로 이동하였다. 혼합사의 거동을 파악하기 위해서 유사 채집상자에 포착된 유사의 통과중량 백분율에 대한 상대입경비(D_i/D_{50})를 분석한 결과, 현도지점에서 상대입경비는 D_{50} 보다 큰 경우에 약 1.0으로 거의 일정하게 유지되고 있으며, 부강 지점에서 상대입경비는 증가방류 전과 후의 중간에 있었다. 현도수위표에서 하상토의 입경에 대하여 개별입자에 대한 작용력과 저항력의 비(τ_i^*)는 D_{50} 보다 큰 경우에 일정하게 유지되었으며, 부강수위표에서는 크게 감소하였다. 이것은 댐 직하류에서 장갑화 현상이 부강수위표보다 크게 되었다는 것을 의미하며, 증가방류에 의해 입경이 균일하게 이송하는 것을 알 수 있다.

핵심용어 : 증가방류, 혼합사, 수직분급, 장갑화

* 교신저자, 충주대학교 공과대학 토목공학과 조교수

Corresponding Author, Assistant Prof. Dept. of Civil Engineering, Chungju National University, Chungju, 380-702, Korea (e-mail: cljang@cjnu.ac.kr)

** 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 연구위원

Senior Research Fellow, River, Coastal and Harbor Research Division, KICT, 2311 Daehwa-dong, Ilsan-gu, Gyeonggi-do, 411-712, Korea

1. 서론

댐의 조절 방류에 의한 하류하천에 미치는 영향에 대하여 많은 연구가 수행되어 왔다. 특히, 댐 하류 하천은 전형적으로 홍수 및 유사의 공급이 감소하고 있다. 평갈수시에는 일정한 유량으로 변경되기 때문에 홍수시에도 침수되지 않는 저수로 부분은 수생태계의 서식처 기능이 상실된다. 댐의 조절방류에 의하여 댐 건설 전보다 하천에서 지형, 수심 그리고 유속의 변화가 크게 감소한다. 이러한 직접적인 영향 이외에 하천의 지형 및 유사량 변화에 의하여 수생태계에 영향을 미칠 수 있다(Kondolf and Wilcock, 1996).

댐 하류 하천의 적응은 홍수의 크기, 유사의 이송능력, 그리고 댐 하류 하천에 유입되는 지류의 유량과 유사량에 의해 결정된다(Williams and Wolman, 1984). 홍수의 규모 및 빈도가 감소되기 때문에 흐름의 경계를 따라 퇴적되는 유사에 의해 하폭이 축소되고, 망상하천은 다지하천으로 변하고, 하천이 분열되며, 식생이 활착하여 번성하게 된다(Kondolf, 1997; Erskine *et al.*, 1999; Steiger *et al.*, 2001; 최성욱 등, 2004; 박봉진 등, 2008). 댐 하류 하천의 하상저하에 의하여 하상토의 크기가 변하며, 자갈과 세립토사로 분리되어 굵은 골재, 조약돌 등으로 퇴적된 장갑층이 형성되며 하류로 전파된다(Williams and Wolman, 1984).

인위적인 충격에 의해 교란된 댐 하류 하천은 새로운 환경에 적응하여 새로운 평형이 유지되기 위해서는 긴 구간과 시간이 필요하다(Galay, 1983; Williams and Wolman, 1984). 이러한 댐 하류 하천의 충격을 감소시키기 위하여, 댐 하류 하천에 인공홍수를 일으켜 사주 및 생태계의 서식처를 복원하거나(우효섭, 박성재, 1999), 하상에 퇴적된 유사를 제거하고(Milhou, 1982), 하천의 수질환경을 개선하기 위하여 댐의 방류형식에 변화를 주어 증가방류(flushing flow)를 한다.

증가방류는 최소 증가방류와 최대 증가방류로 나눌 수 있다. 최소 증가방류는 하천의 유사(流砂) 및 하천의 지형을 유지하는 조건에 의해 결정하며, 최대 증가방류는 홍수조절 및 용수공급 조건, 발전손실, 물값 등의 조건에 의해 결정한다(Kondolf and Wilcock, 1996).

그 동안 우리나라에서는 수질 사고에 의한 대처방안으로 오염물질의 농도를 희석하기 위하여 증가방류를 시행하였다(정세웅, 2004). 그러나 이로 인한 하도의 물리적인 특성에 대한 조사 및 분석은 거의 없는 실정이다. 최근에 갈수기에 댐의 방류형식에 변화를 주어, 댐 하류 하천의 수질을 개선하고 물리적 생태계의 서식처 환경기능을 강화하기 위하여 주요 다목적댐에서 증가방

류가 수행되었다. 따라서 본 연구에서는 대청댐 하류 하천에서 증가방류에 의한 유사의 이송 및 하상토의 변화 특성을 조사하고 분석하였다.

2. 연구대상유역의 현황 및 하도특성의 변화

본 연구의 대상지점은 Fig. 1에서 보여주는 것처럼, 대청댐 역조정지댐으로부터 하류로 약 3 km 지점에 위치한 현도수위표와 약 18 km 지점에 위치한 부강수위표 지점이다. 본 연구에서 증가방류의 효과를 분석하기 위하여 댐으로부터 거리가 멀지 않으며, 지류의 유입에 의한 본류의 간섭이 가능한 한 적고, 수위관측소가 있어서 수리특성을 분석하기 용이한 지점을 선택하였다.

대청댐은 금강 중류의 대전광역시 북쪽에 위치하고 있으며, 1980년 12월에 준공되었다. 댐의 길이는 495 m, 높이는 72 m 로 콘크리트 중력식과 석괴댐의 복합식 댐이다. 유역면적은 3,204 km², 총 저수용량은 1,490×106 m³, 유효저수용량은 790×106 m³ 이다. 댐 하류의 약 10 km 지점에 역조정지댐이 있으며, 댐 하류의 하상 및 지형변동 등 다양한 변화는 역조정지 댐에서 시작된다. 댐 건설 직후에 여수로 방류는 매년 실시되고 있으며, 댐 하류 하천에 하상 및 지형변화가 발생하였다. 대청댐은 건설 후 약 25년 이상이 지났으며, 댐 하류 하천의 적응이 이루어진 것으로 생각된다.

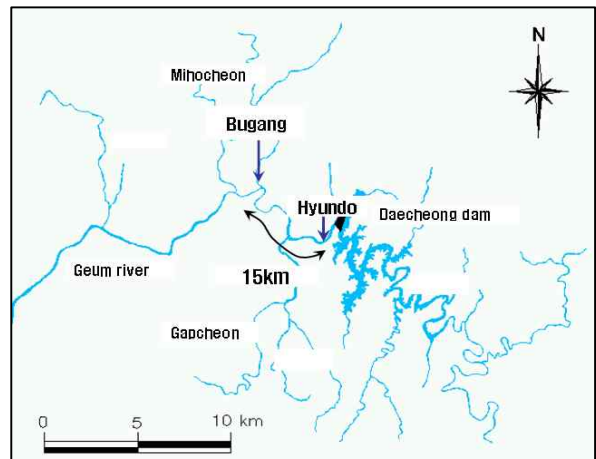


Fig. 1. Location map of study reach

대청댐에 의한 하류 하천에 미치는 영향을 파악하기 위하여 하천정비기본계획(건설부, 1974; 건설부, 1983; 건설부, 1988; 건설교통부, 2002) 자료를 이용하여 하상 변동, 저수로 하폭의 변화, 그리고 하상토의 변화를 분석하였다. 최심하상고는 1974년부터 2002년까지 지속적으로 감소하고 있다(Fig. 2). 더욱이, 미호천 합류부에서 최고 5 m 정도까지 하상이 저하되었다. 댐 직하류의 하도구간은 댐 건설 직후에 하상이 저하되었으나, 1988년

이후에는 하상의 변화가 거의 없이 안정화 되었다. 하구로부터 85 km에서 120 km 사이 구간에서는 현재까지 하상저하가 진행되고 있다. Fig. 3은 1974년과 2002년 사이에 저수로의 변화를 보여주고 있다. 저수로 폭은 1983년까지 100 km에서 130 km 구간에서 대청댐 건설 직후인 1983년까지 지속적으로 증가하였으나, 그 이후에는 큰 변화 없이 안정적으로 유지되고 있다. Fig.

4는 1974년과 2002년 사이에 하상토의 변화를 보여주고 있다. 대체적으로 댐 건설 후에 하상토의 입경이 증가하고 있다. 댐 직하류에서 하상토의 입경은 1974년에 0.6 mm에서 2002년에는 10 mm로 크게 증가하였으며, 이것은 댐에 의한 유사의 포착으로 인하여 하류 하천에 유사 공급이 차단되고 지속적으로 수행된 골재채취(장창래 등, 2008)에 의한 것으로 판단된다.

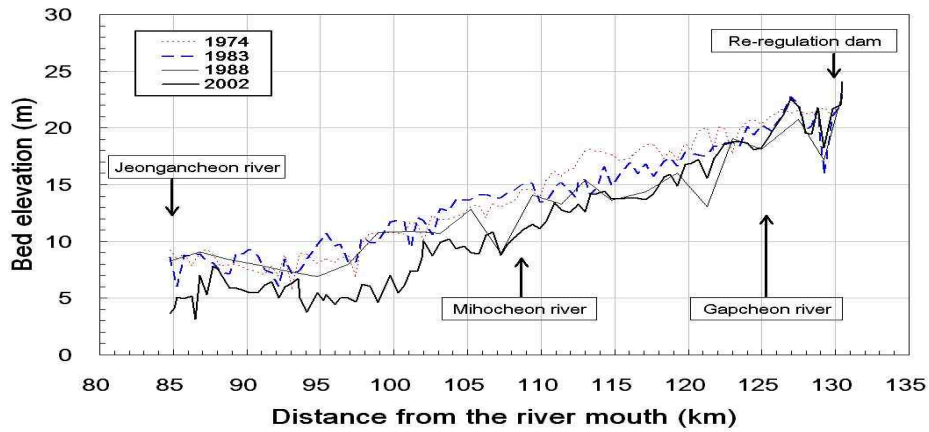


Fig. 2. Longitudinal bed profiles from 1974 to 2002

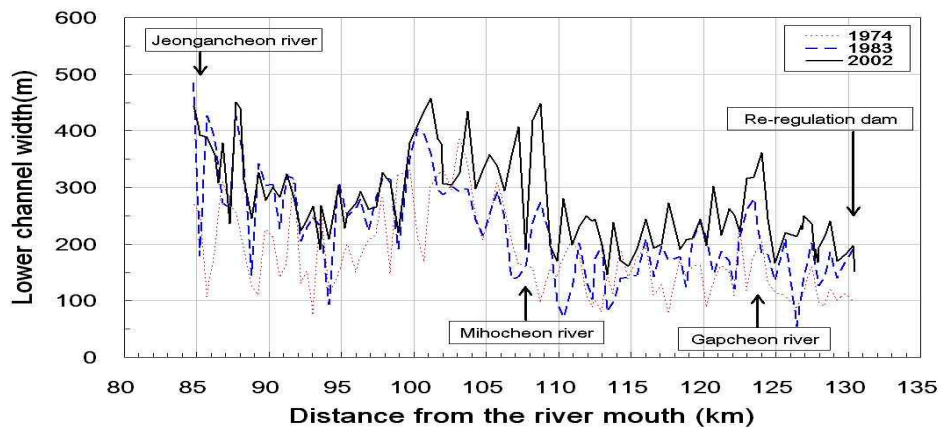


Fig. 3. Lower channel widths from 1974 to 2002

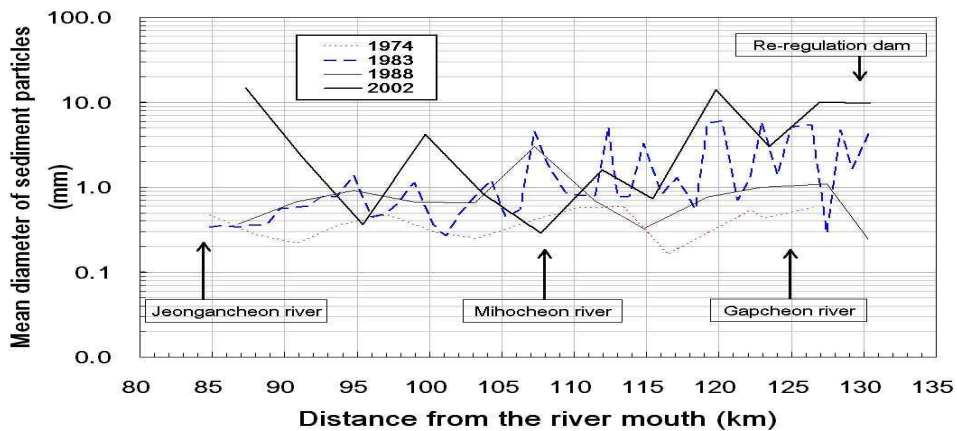
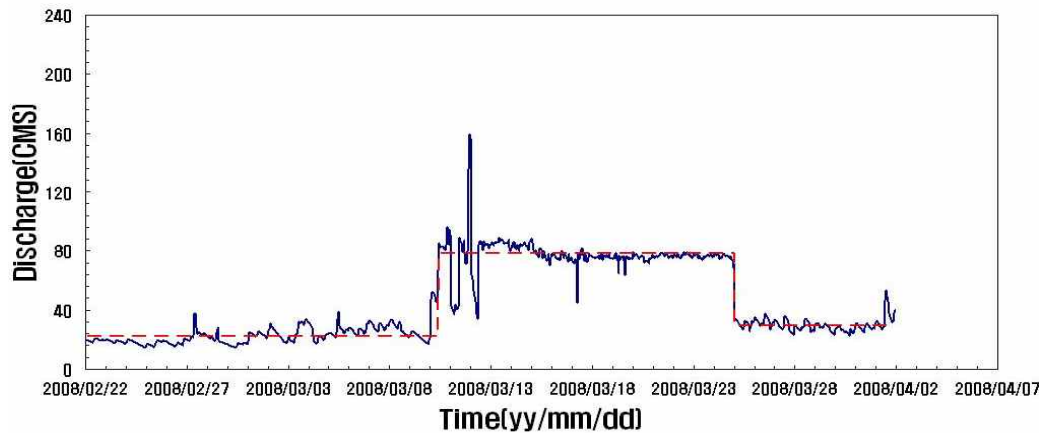
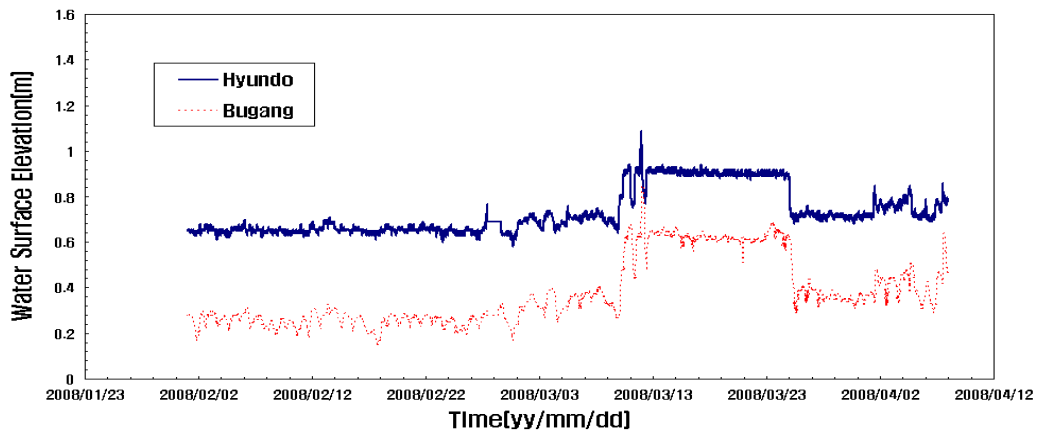


Fig. 4. Mean diameters of sediment particles from 1974 to 2002



(a) Discharge from Daecheong Dam



(b) Water surface elevation at Hyundo and Bugang gauging station

Fig. 5. Observed discharge and water surface elevation by flushing flow from Daecheong dam

3. 하도의 물리적 특성 변화

대청댐에서 증가방류(flushing flow)는 2008년 3월 10일부터 3월 24일 까지 15일 동안 방류량을 $40 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서 $90 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 동적 변화를 주어 시행하였으며, 유량변화는 Fig. 5(a)에 나타나 있다. 본 증가방류량은 현도수위표 지점에서 1981년부터 2007년까지 대청댐 역조정지댐에서 방류되는 유량을 이용하여 유황을 분석한 결과, 연간 95일 이상 유지되는 풍수량($90.3 \text{ m}^3/\text{s}$)에 해당된다. Fig. 5(b)는 부강수위표와 현도수위표에서 증가방류에 의한 수위변화를 보여주고 있다. 부강수위표에서 수위는 0.27 m 에서 0.6 m 로 상승하였으며, 현도수위표에서는 0.65 m 에서 0.9 m 로 수위가 상승하였다.

3.1 하상토의 이동특성

대청댐으로부터 15일 동안 $90 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 증가방류에 의해 댐 하류 하천에서 하상토의 이동을 파악하기 위하여 지름이 35 cm , 높이가 7.5 cm 인 유사 채집상자

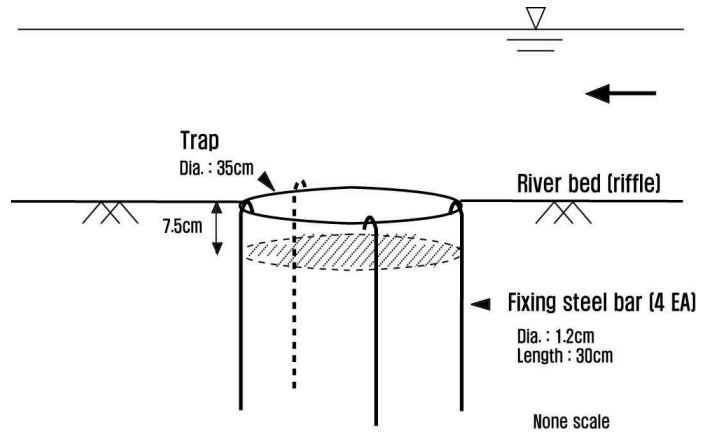
(sediment trap box)를 부강수위표와 현도수위표 지점 저수로 하상에 각각 2개씩 설치하였다(Fig. 6(a)). 유사 채집상자는 증가방류에 의해 유사의 이동이 용이한 저수로의 여울구간에 길이 30 cm 이고, 지름 약 1.2 cm 인 철근으로 만든 4개의 말뚝으로 흐름에 유실되지 않도록 하상바닥에 고정시켰다(Fig. 6(b)). 설치된 유사 채집상자는 증가 방류 후에 회수하여, 증가방류 기간 동안 이동한 소류사의 이동특성을 분석하였다(Fig. 7).

Table 1은 증가방류 전후의 입도 변화와 유사 채집상자에 채집된 유사의 입도분포를 보여주고 있다. 표층에서 하상토는 저수로의 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 구역에 깊이 0.05 m 정도까지 증가방류 전과 후에 동일한 지점에서 채취하였으며, 채취된 하상토를 48시간 정도 오븐에서 건조시킨 후에 체분석을 통하여 분석하였다. 유사 채집상자에 포착된 유사도 마찬가지로 방법으로 체분석을 수행하였다.

현도수위표는 대청댐 역조정지댐 직하류에 위치한 수위표로서, 하상토의 표층 평균입경은 방류 전 하상토



(a) Sediment trap



(b) Schematic diagram of installing the trap

Fig. 6. Sediment trap and schematic diagram of installing it to investigate the variation of bed materials at each gauging station

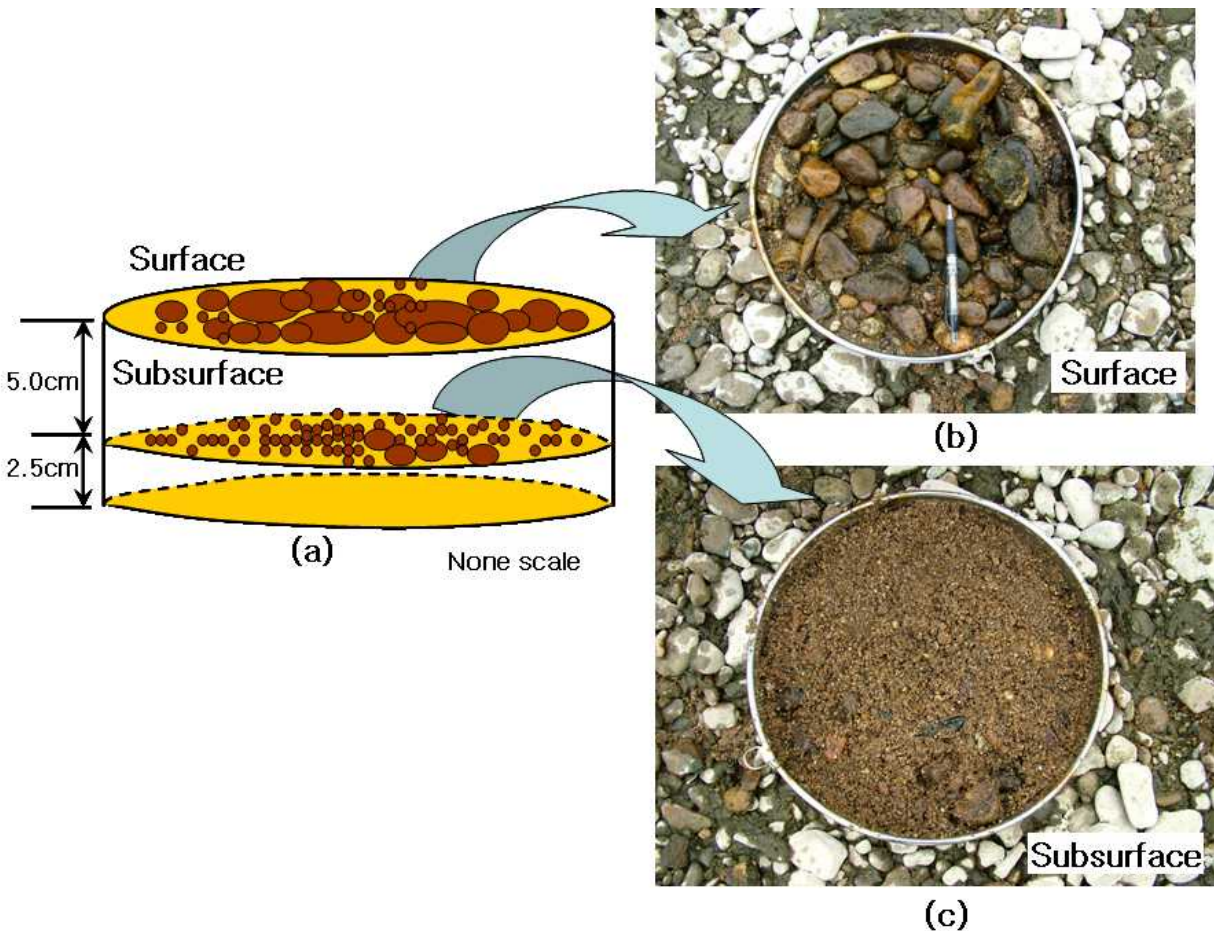


Fig. 7. Bed materials (a) schematic diagram (b) surface (c) subsurface in sediment trap box at Bugang gauging station

의 평균 입경이 29.2 mm 에서 방류 후 36.8 mm 로 증가하였다. 표준편차($\sqrt{d_{84}/d_{16}}$)는 6.58에서 4.98로 감소하여 하상토의 입도가 약간 균일하게 변화하였다(Fig. 8(a)). 유사 채집상자에 포착된 유사의 특성으로 평균입

경은 2.58 mm이며, 표준편차는 1.72로서, 입경의 분포가 거의 균일하였다.

부강수위표는 대청댐 조정지댐에서 약 20 km 하류에 위치한 수위표로서, 하상토의 표층 평균입경은 증가방

Table 1. Bed material characteristics and armoring ratio at Hyundo and Bugang gauging station

Station	D10 (mm)	D50 (mm)	D80 (mm)	Dm (mm)	σ_g	Ar	Remarks
Hyundo	0.8	14	46	29.2	6.58	-	Before flushing
	1.2	26	50	36.8	4.98	1.86	After flushing
	0.6	1.9	2.2	2.58	1.72	-	Sediment trap
Bugang	0.6	8.0	33	22.9	7.26	-	Before flushing
	0.8	20	35	28.8	5.55	2.50	After flushing
	0.8	13	34	24.1	5.92	-	Sediment trap

Dm = mean diameter

σ_g = geometric standard deviation(= $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$)

Ar = armoring ratio(= $D_{50-after}/D_{50-before}$, where $D_{50-after}$ is median diameter at surface after flushing flow and $D_{50-before}$ is median diameter at surface before flushing flow)

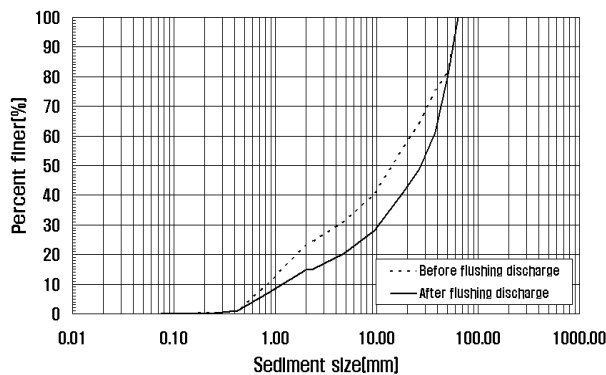
류 전 22.9 mm 에서 방류 후 28.8 mm 로 약간 굵어졌다. 하상토의 표준편차는 7.26에서 5.55로서 하상토의 입도가 균일하게 변하였다(Fig. 8(b)). 유사 채집상자에 포착된 유사의 평균입경은 24.11 mm 이고, 표준편차는 5.92이며, 혼합사의 특성을 나타내고 있다. 유사 채집상자의 표층은 굵은 자갈로 형성되었으며, 저층은 입도가 상대적으로 균일한 모래로 구성되었다(Figs. 7 and 9). 여기서 표층의 깊이는 하상토의 최대입경에 해당되는 0.05 m이다. 하상 표층이 조립화 되는 것은 미세한 입자가 하류로 이동하였기 때문이며, 이러한 현상은 자갈하천 혹은 댐 하류 하천에서 장갑화가 진행되어 가는 기구(mechanism)를 잘 보여주고 있다.

댐 하류 하천에서 평균 하상 전단응력이 하상 표면의 가장 큰 입자를 이송시키는데 필요한 한계 전단응력보다 작고 미세한 입자를 이송시키는데 충분하다면, 표층은 조립화되고 장갑층이 발달한다(Parker and Sutherland, 1990; Gomez, 1994; 장창래 등, 2004). 하상

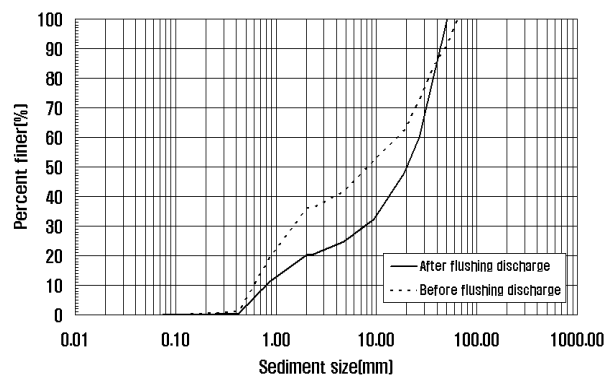
의 장갑화 정도는 소류사의 입도분포와 유사량에 영향을 미친다(Parker and Sutherland, 1990).

일반적으로, 하상 표층에서 장갑층은 수평분급과 수직분급의 결과이다(Parker and Klingeman, 1982). 특히, 하류 하천의 유사 분급 과정은 댐 하류 하천에서 활발한 현상의 하나로써, 유사공급의 감소에 대한 단기간의 반응으로 나타낼 수 있다(Dietrich *et al.*, 1989). 장갑화의 정도는 일반적으로 표층의 평균입경과 저층의 평균입경의 비로 나타낸다(Vericat *et al.*, 2006). 그러나 본 연구에서는 표층과 저층의 두께를 정확하게 결정하는데 한계가 있으므로, 장갑화의 비(A_s)는 증가방류 후 하상 표층의 중앙입경(D_{50})과 증가방류 전 하상 표층의 중앙입경의 비로 나타내었다.

현도수위표에서 장갑화의 비는 1.86이고, 부강수위표에서 장갑화의 비는 2.5로 분석되었으며(Table 1), 증가방류 기간 동안에 표층에서 유사의 이동량은 현도수위표에서 보다 부강 수위표에서 활발하게 이동한 것의 의



(a) Hyundo gauging station



(b) Bugang gauging station

Fig. 8. Grain size distribution of bed materials Before and after flushing discharge at (a) Hyundo and (b) Bugang gauging station

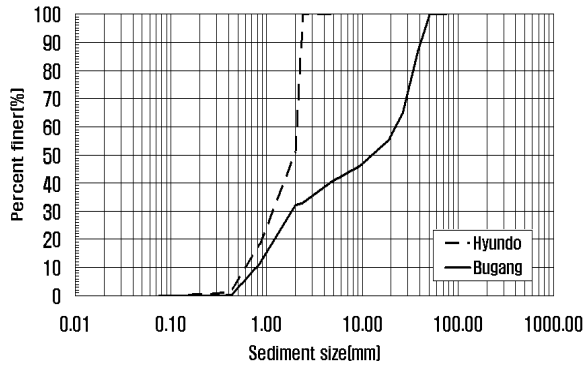
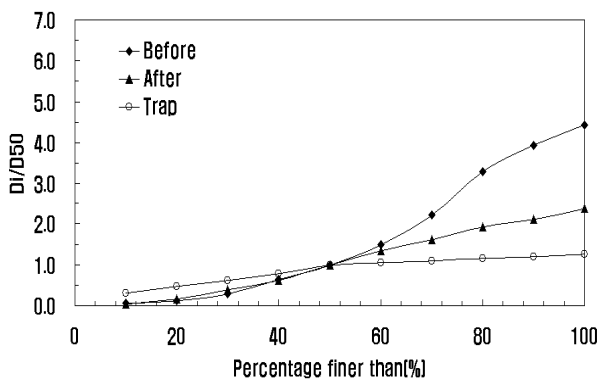


Fig. 9. Grain size distribution of bed materials in sediment trap box at Hyundo and Bugang gauging station

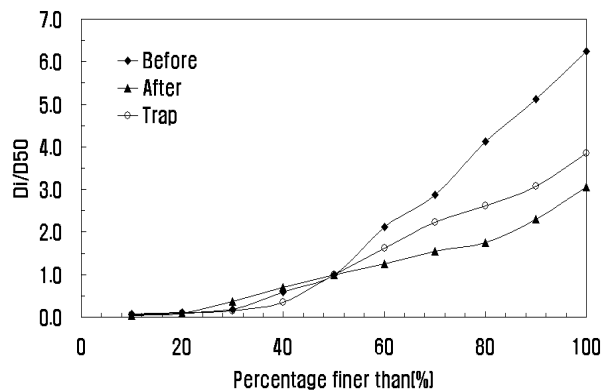
미한다. 대청댐 직하류에 위치한 현도수위표 지점에서는 하상이 안정화되고 표층에서 장갑화가 거의 완료되었으나, 댐으로부터 상대적으로 멀리 떨어진 부강수위표 지점에서는 갑천 등 지류에서 유입되는 유사에 의하여 유사의 이동이 상대적으로 활발하기 때문으로 판단된다.

혼합사의 거동을 파악하기 위해서는 유사의 입경 분포를 파악하는 것이 중요하다. 혼합사로 구성된 하상에서 작은 입경은 흐름에 대하여 상대적으로 큰 입경에 의하여 차폐되어 있으므로, 유사의 이동에 방해받기 때문에, 입경이 작은 유사의 이동은 감소하고 입경이 굵은 유사의 이동은 증가한다.

혼합사의 이송을 파악하기 위해서는 개개 유사 입자에 대한 차폐효과(hiding effect) 때문에, 각 입경의 상대적인 크기를 정확하게 나타내야 한다. 일반적으로 상대적인 입경의 크기는 상대입경비(D_i/D_{50}), 통과중량 백분율, 혼합사의 표준편차 등 3가지 매개변수로 나타낼 수 있다(Wilcock and Southard, 1988).



a) Hyundo gauging station



b) Bugang gauging station

Fig. 10. Size ratio of the fraction plotted against percentage finer than at Hyundo and Bugang gauging station

Fig. 10은 각 지점에 대하여 통과중량 백분율에 대한 상대입경비를 보여주고 있다. 현도 및 부강 지점에서 표층은 증가방류 전보다 증가방류 후에서 상대입경이 작아지게 되었으며, 이것은 통과중량 백분율이 50 % 보다 작은 유사가 작아진 것을 의미한다.

유사 채집상자에 포착된 유사에 대하여 현도 지점에서 상대입경비는 통과 중량 백분율이 50 % (D_{50}) 보다 작은 경우에 증가방류 전과 후의 상대입경보다 크게 나타나고 있으나, D_{50} 보다 큰 경우에는 약 1.0으로 거의 일정하게 유지되고 있다. 이것은 유사 채집상자에 포착된 유사는 상대적으로 가늘고 작으며 균일한 특성을 나타낸다. 부강 지점에서 상대입경비는 D_{50} 보다 작은 경우에 증가방류 전과 후의 상대입경보다 작게 나타나고 있으나, D_{50} 보다 큰 경우에는 증가방류 전과 후의 중간에 위치하고 있다. 이것은 증가방류 기간 동안 상대적으로 입경분포가 다양한 입자들이 이동하는 특성을 나타낸다. 따라서 현도 지점은 댐 직하류에서 장갑화의 진행이 거의 완료되어서 이동되는 유사가 거의 없는 것을 의미하고, 부강 지점은 상대적으로 장갑화가 진행되고 있거나 유사의 이동이 활발한 상태를 의미한다.

3.2 유사의 거동특성 분석

증가방류에 의한 효과를 분석하기 위하여 1차원 부등류 모형인 미 육군 공병단 수문연구소(U. S. Army Corps of Engineers, HEC)에서 개발한 HEC-RAS 모형을 이용하여 대청댐 역조정지점부터 미호천과 합류되기 전 하구로부터 102 km 지점까지 부등류 계산을 수행하여 수리특성을 파악하였다.

Fig. 11은 하구로부터 상류 거리에 따른 증가방류에 대한 하폭(수면폭) 대 수심의 비를 나타낸다. 하폭 대

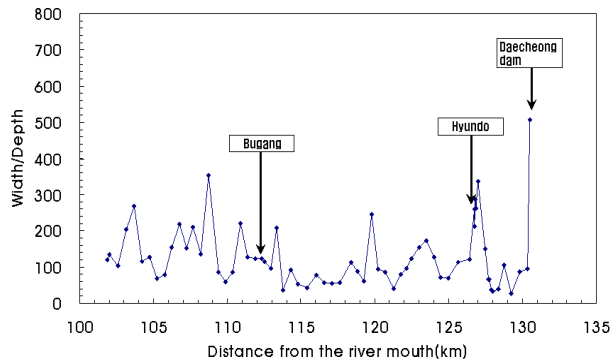


Fig. 11. Width to depth ratio

수심의 비는 사주의 이동 및 변화 등 하천의 지형변화와 이동상의 흐름을 파악하고, 저수로의 안정성을 판단하는데 중요한 지표가 된다. 하폭 대 수심의 비가 큰 경우, 즉 하폭이 넓고 수심이 얇은 경우에는 복렬사주가 발달하며, 저수로의 변동이 심하고 불안정한 특성을 나타낸다. 하폭 대 수심의 비가 작은 경우, 즉 하폭이 상대적으로 좁고 수심이 깊은 경우에는 단열사주가 발달하고, 저수로의 변동이 상대적으로 적다. 현도수위표 지점은 260이며, 부강수위표 지점은 123이다. 현도 및 부강수위표 지점은 하폭 대 수심의 비가 상대적으로 크고, 국부적으로 저수로의 여울에 위치하여 하상경사가 크므로, 하상 및 지형변동이 발생하기 쉬운 지점에 위치해 있다.

Fig. 12는 거리에 따른 소류력(tractive force)을 보여주고 있다. 소류력은 하천의 하상 바닥 경계면에서 전단응력을 힘으로 표시하며, 하천에서 흐름이 하상 바닥을 쓸면서 내려간다(우효섭, 2004)는 의미로서, 소류사의 이동을 해석하는데 많이 사용하며, 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_o = \gamma h S \quad (1)$$

여기서, τ_o = 소류력, γ = 단위중량, h = 수심, S = 하상경사 이다.

현도수위표 지점에서는 $18.5(kg/m^2)$ 이고, 부강수위표 지점에서는 $17.4(kg/m^2)$ 이며, 두 지점에서 거의 비슷하다.

Fig. 13은 입경 레이놀즈수(particle Reynolds number)에 대한 무차원 소류력(dimensionless tractive force)을 나타내고 있으며 Shield 곡선이라고 한다. 사립자에 대한 입경 레이놀즈수는 마찰속도($u_* = \sqrt{ghi}$)를 이용하여 유사의 입경에 대한 레이놀즈수로서 다음과 같다.

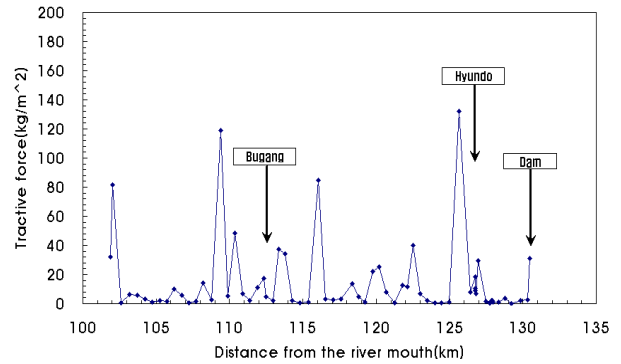


Fig. 12. Tractive force

$$Re_* = u_* D / \nu \quad (2)$$

여기서, u_* = 사립자에 대한 마찰속도, D = 유사의 입경, ν = 유체의 동점성계수이다.

유사이송 현상을 지배하는 중요한 요소로는 유체, 하상재료, 흐름의 성질이 있으나, 그에 작용하는 무차원량 중에서, 마찰속도를 무차원화하여 나타낸 무차원 소류력이다.

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{sgD} = \frac{hi}{sD} \quad (3)$$

여기서, s = 수중에서 유사의 비중(=1.65), h = 수심, D = 유사의 입경, i = 에너지 경사이며, 본 연구에서는 조사지점의 저수로 하상경사를 이용하였다.

이 곡선은 유사의 이동 한계를 나타내고 있으며, 이동하는 유사의 평균입경에 대하여 소류사 형태인지 혹은 부유사 형태인지를 판단할 수 있다(Garcia, 2008). 현도수위표 지점과 부강수위표 지점에서 증가방류에 대한 유사의 거동은 두 지점 모두 소류사 형태로 이동하는 것을 나타내었다.

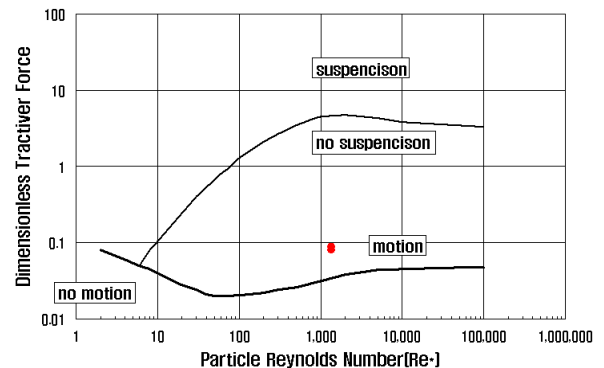


Fig. 13. Shields diagram of showing the prevailing mode of sediment transport by flushing flow

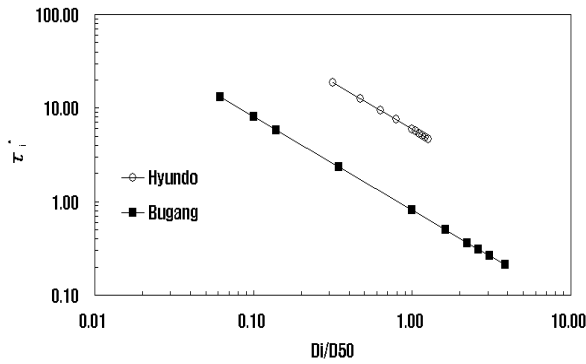


Fig. 14. The τ_i^* against D_i/D_{50} for bed materials at Hyundo and Bugang gauging station

3.3 유사의 개별입자에 대한 상대적 이동 특성

혼합사에서 개별 입자의 이동특성을 파악하는 것은 유사 수직분급 및 장갑화의 기구를 파악하는데 매우 중요하다. 개별입자에 대한 저항력과 작용력의 비는 Shield 매개변수에 의해 다음과 같다(Parker and Klingeman, 1982).

$$\tau_i^* = \frac{\tau_o}{(s-1)\rho g D_i} \quad (4)$$

여기서, τ_o = 하상에 작용하는 소류력, ρ = 물의 밀도, s = 수중에서 유사 입자의 비중, g = 중력가속도, $D_i = i$ 번째 통과중량 백분율에 해당하는 입경의 크기이다.

Fig. 14는 상대입경비(D_i/D_{50})에 대하여 개개 입자의 저항력과 작용력의 비(τ_i^*)를 보여주고 있다. 현도수위표 및 부강수위표에서 유사 채집상자에 포착된 유사는 상대입경비가 증가할수록 τ_i^* 값이 감소하고 있다. 이것은 개개 입자의 초기 운동에 대하여 하상토의 상대크기 영향이 지배적이며, 흐름 및 유사에 대하여 일관성이 있음을 의미한다. 또한 개개 입자에 대한 한계 전단응력과 유사하다면, 모든 입경은 적어도 같은 전단응력에서 움직이기 시작하는 것을 의미한다(Wilcock and Southard, 1988). 현도수위표에서 τ_i^* 의 값이 부강수위표 지점에서 보다 크며, 상대입경비의 범위가 0.2에서 1.0에 위치하고 있다.

Fig. 15는 통과중량 백분율에 대한 개별입자의 저항력과 작용력의 비(τ_i^*)를 보여주고 있다. 현도수위표 및 부강수위표에서 유사 채집상자에 포착된 유사는 상대입경비가 증가할수록 τ_i^* 값이 감소하고 있다. 혼합사가 균

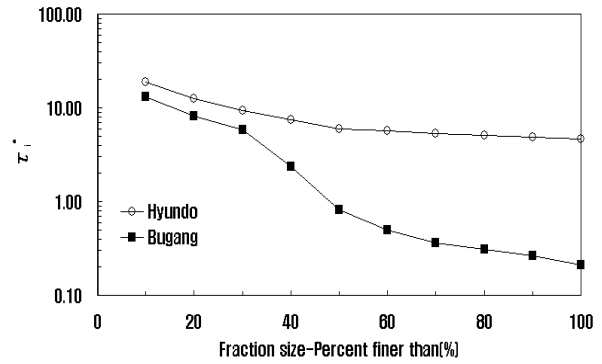


Fig. 15. The τ_i^* against fraction size-percent finer than at Hyundo and Bugang gauging station

일사에 가까워질수록 하상토 입경의 크기가 같아지기 때문에 τ_i^* 는 통과중량 백분율에 증속되지 않는다. Fig. 15에서 기울기가 0에 가까워질수록 균일사에 가깝다(Wilcock and Southard, 1988). 혼합사의 분급함수로서 도시된 기울기는 분급의 전체 범위에서 상당히 일치하는 경향을 보여주고 있으며, 균일사에서는 0에 가깝게 접근한다(Parker and Klingeman, 1982; Wilcock and Southard, 1988).

대청댐 직하류인 현도수위표에서 하상토의 입경에 대한 τ_i^* 의 기울기는 D_{50} 보다 클 경우에 일정하게 유지되며, 부강수위표에서는 기울기가 크게 감소하고 있다. 이것은 댐 직하류에 위치한 현도지점에서 증가방류에 의해 입경이 균일하게 이송하는 것을 의미한다.

Fig. 16은 입경 Reynolds를 대신하여 $S^* (= (D_i^3/(s-1)g)/\nu)$ 에 대하여 모든 입경에 대한 τ_i^* 를 보여주고 있다. 혼합사가 전체적으로 폭넓게 분포하고, 거친 난류의 범위까지 확대된다 할지라도, $D_i^{3/2}$ 의 함수로써, τ_i^* 의 형태는 상당히 일관성이 있는 것을 보여주고 있다.

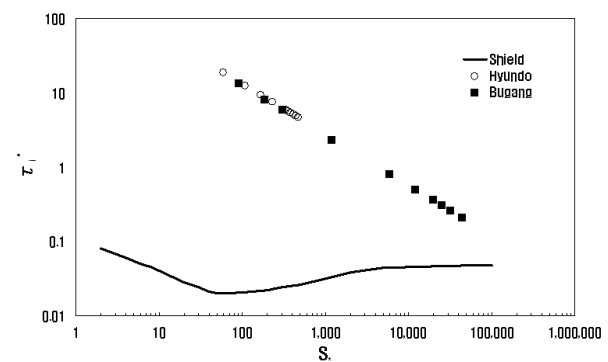


Fig. 16. The τ_i^* against S^* for bed materials at Hyundo and Bugang gauging station

4. 결 론

최근 갈수기에 댐 하류 하천의 수질을 개선하고 생태계의 서식처 환경기능을 강화하기 위하여 주요 다목적댐에서 댐의 방류형식에 변화를 주어 증가방류가 시행되었다. 본 연구에서는 대청댐 하류에서 증가방류에 의하여 하도의 물리적 특성인 유사의 이송 및 하상토 변화를 조사하고 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 증가방류에 의해 하상토의 평균입경은 증가하고, 표준편차는 작아지며, 입경분포는 균등하게 변화하였다. 유사 채집상자에 포착된 하상토를 분석한 결과, 표층은 굵은 자갈로 형성되었고, 저층은 입도가 상대적으로 균일한 모래로 구성되었으며, 유사 수직분급이 발생하였다.
- 2) 혼합사의 거동을 파악하기 위해서 유사 채집상자에 포착된 유사의 통과중량 백분율에 대한 상대입경비(D_i/D_{50})를 분석한 결과, 현도 지점에서 상대입경비는 D_{50} 보다 큰 경우에 약 1.0으로 거의 일정하게 유지되었다. 부강 지점에서 상대입경비는 증가방류 전과 후의 중간에 위치하고 있으며, 증가방류 기간 동안 상대적으로 다양한 크기의 유사 입자들이 이동하는 것을 나타낸다.
- 3) 조사 지점은 증가방류에 대하여 무차원 수심(하폭대 수심)과 소류력이 크고, 하상 및 지형변동이 발생하기 쉬우며, 유사의 거동은 소류사 형태로 이동한다.
- 4) 상대입경비에 대하여 개개 입자의 저항력과 작용력의 비(τ_i^*)를 분석한 결과, 현도수위표 및 부강수위표에서 유사 채집상자에 포착된 유사는 상대입경비가 증가할수록 τ_i^* 값이 감소하였다. 현도수위표에서 τ_i^* 의 값은 부강수위표에서 보다 크고, 상대입경비의 범위가 0.2에서 1.0에 위치하고 있다.
- 5) 현도수위표에서 하상토의 입경에 대한 τ_i^* 의 기울기가 D_{50} 보다 클 경우에는 일정하게 유지되었으나, 부강수위표에서는 기울기가 크게 감소하고 있다. 이것은 댐 직하류에서 장갑화 현상이 부강수위표보다 크게 되었다는 것을 의미하며, 증가방류에 의해 입경이 균일하게 이송하는 것을 알 수 있다.

본 연구 결과는 하천의 물리적 특성 및 하천환경을 고려한 댐 하류 하천의 적응관리 및 댐의 탄력적 운영에 기여할 것으로 판단된다. 그러나 향후에 증가방류 기간 동안 하상토의 변화뿐만 아니라, 소류사 및 부유

사를 관측하여 유량 및 유사량의 변화에 의한 하도의 변화 특성을 파악해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업(06건설핵심B01-ECORIVER21)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2002). 금강수계 하천정비기본계획, pp. 401-429.
- 건설부 (1974). 금강하천정비기본계획.
- 건설부 (1983). 금강 하상변동 조사보고서(1).
- 건설부 (1988). 금강수계종합정비계획(II), pp. 3-101-3-140.
- 박봉진, 장창래, 이삼희, 정관수 (2008). “댐 하류하천의 사주와 식생 면적 변화에 관한 연구.” **한국수자원학회 논문집**, 제41권, 제12호, pp. 1163-1172.
- 장창래, 김기홍, 정수동, 조강현, 이승휘, 배연재 (2008). 하천교란백서, 자연과 함께하는 하천복원 기술개발 연구단(ECORIVER21), pp. 110-111.
- 장창래, 정관수, 김재한 (2004). “혼합사로 구성된 하천에서 하상변동 및 유사의 입도분포 계산을 위한 수치모형 개발.” **한국수자원학회논문집**, 제37권, 제5호, pp. 387-395.
- 정세웅 (2004). “저수지 플리싱 방류 효과분석을 위한 비정상상태 하천수질모의 적용.” **한국수자원학회 논문집**, 제37권, 제10호, pp. 857-868.
- 우효섭 (2004). 하천수리학, 청문각, pp. 93-94.
- 우효섭, 박성제 (1999). “그랜드캐년 인공홍수-배경 및 효과.” **대한토목학회지**, 제47권, 제5호, pp. 84-96.
- 최성욱, 윤병만, 우효섭, 조강현 (2004). “댐 건설에 의한 유황변화에 따른 하류 하도에서 하천지형학적 변화 및 식생피복의 변화: 황강 합천댐 사례.” **한국수자원학회논문집**, 제27권, 제1호, pp. 55-66.
- Dietrich, W.E., Kirchner, J.W., Ikeda, H., and Iseya, F. (1989). “Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bedded rivers.” *Nature*, Vol. 340, pp. 215-217.
- Erskine, W.D., Terrazolo, N., and Warner, R.F. (1999). “River rehabilitation from the hydrogeomorphic impacts of a large hydro-electric power project: Snowy River, Australia.” *Regulated Rivers: Research and Management*, Vol. 15, pp. 3-24.

- Galay, V.J. (1983). "Causes of river bed degradation." *Water Resources Research*, Vol. 19, No. 5, pp. 1057-1090.
- Garcia, M.H. (2008). "Sediment transport and morphodynamics." in *Sedimentation Engineering: processes, management, modeling and practice*, edited by M.H. Garcia, pp. 21-163, ASCE.
- Gomez, B. (1994). "Effects of particle shape and mobility on stable armor development." *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 7, pp. 2229-2239.
- Kondolf, G.M. (1997). "Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels." *Environmental Management*, Vol. 21, No. 4, pp. 533-551.
- Kondolf, G.M. and Wilcock, P.R. (1996). "The flushing flow problem: Defining and evaluating objectives." *Water Resources Research*, Vol. 32, pp. 2589-2599.
- Milhous, R.T. (1982). "Effect of sediment transport and flow regulation on the ecology of gravel-bed rivers." *Gravel-bed Rivers* edited by R.D. Hey, J.C. Bathurst and C.R. Thorne, John Wiley & Sons Ltd., pp. 819-842.
- Parker, G., and Klingeman, P. (1982). "On why gravel bed streams are paved." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 5, pp. 1409-1423.
- Parker, G. and Sutherland, A.J. (1990). "Fuvial armor." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 28, No. 5, pp. 529-544.
- Steiger, J., Gurnell, A.M., and Petts, G.E. (2001). "Sediment deposition along the channel margins of a reach of the middle River Severn, U.K. Regulated Rivers." *Research and Management*, Vol. 17, pp. 443-495.
- Vericat, D., Batalla R., and Garci, C. (2006). "Breakup and reestablishment of the armour layer in a large gravel-bed river below dams: The lower Ebro." *Geomorphology*, Vol. 76, pp. 122-136.
- Wilcock, P., and Southard, J. (1988). "Experimental study of incipient motion in mixed-size sediment." *Water Resources Research*, Vol. 24, No. 7, pp. 1137-1151.
- Williams, G.P. and Wolman, M.G. (1984). *Downstream Effects of Dams on Alluvial Rivers*. United States Geological Survey Professional Paper, 1286.

논문번호: 09-086	접수: 2009.07.21
수정일자: 2009.08.13/08.28	심사완료: 2009.08.28