

광역 유사관측

이삼희 (한국건설기술연구원 선임연구원)

이종인 (충청대학 토목공학과 교수)

1. 서론

하천에서 유사를 관측하는 일반적인 목적은 하상 혹은 수중에서 흐름에 따라 운반되는 토사의 양 및 입경분포를 측정함으로써 토사의 동태를 파악하는데 있다. 특히, 유역 전체에 대한 토사의 동태를 파악하기 위해 이루어지는 유사관측을 광역 유사관측이라 한다. 광역 유사관측에서는 ① 하도지형/지질과 공급 토사의 질과의 상관관계, ② 하천의 활성화(하상변동의 진폭크기, 하상형태의 변형 빈도, 유사량의 대소 등), ③ 소류사, 부유사, wash load별 토사 공급량, ④ 하류부 토사퇴적 현상 등을 보다 정확히 알아낼 수 있다.

이에 따라, 일본 국토교통성 토목연구소에서 유역 규모에서의 토사동태를 파악하는 방법, 입경별 토사 집단이 하도지형 형성에 미치는 영향에 대한 추정 방법, 그리고 수계 일관한 하도관리 기법을 확립하기 위해 히누마천을 대상으로 광역 유사관측을 지속적으로 실시하고 있다. 본고에서는 히누마천에서 1997년 6월 20일~21일에 발생한 중규모 홍수에 대해 광역 유사관측을 실시한 내용을 소개한다. 여기에서 지천 및 본천 유역마다 생산토사의 입도특성의 차이점을 파악하였다. 또한, 관측 결과에서 부유사 농도피크와 유량피크의 시간차에 대한 원인, wash load 생산원의 예측, 그리고 히누마천을 특징 지우는 하도내 테라스의 형성과정에서 입경별 토사의 역할에 대해서도 살펴보았다.

2. 관측의 개요

2.1 히누마천의 개황

히누마천은 그림-1에서 보는 바와 같이 관동지방에 위치한 이바라키현 중앙부를 유하해서 히누마를 사이에 끼고 나카천에 이르는 유역면적 459 km²의 1급 하천(한국에서 국가하천에 준함)이다. 히누마천유역의 현장조사 결과에 의하면, 관측지점보다 상류역에서 토사의 주된 공급원은 본천 및 지천인 이나다천과 카타니와천으로 추정된다. 본천에서의 주된 토사 공급원은 최상류 유역에 사암, 혼펠스화한 점판암 등으로 구성되어 있는 하안단구가 침식되면서 비롯되고 있다. 다만, 침식면의 경사는 완만하고, 주변의 하상에서 아마링(조립화) 현상이 진행되고 있으므로, 토사 생산량은 많지 않을 것으로 평가된다. 지천인 이나다천은 히누마천 합류점 부근에서 하천폭 약 7m, 최대수심 약 4m, 저수로 폭이 약 25m 정도로서 히누마천보다 소규모인 하천이며, 그 상류역에는 채

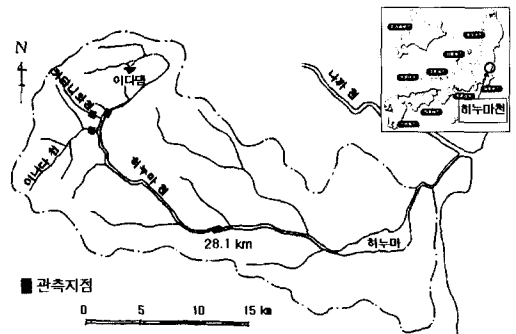


그림 1.

석장이 있고, 하상재료가 수 mm 오더의 마사토인 동시에 하상경사가 약 1/380로 급하기 때문에 히누마천으로 공급 토사량은 상당히 많을 것으로 추정된다. 지천인 카타니와천은 하폭 4 m, 최대수심 2 m 정도로 이나다천에 비해 한층 더 소규모이고, 역시 상류역에 채석장이 있으며, 미세사가 유출하기 쉬운 상황이기 때문에 홍수시 이에 상응하는 토사공급이 있을 것으로 판단된다.

2.2 유사관측의 개요

1997년 6월 20일~21일에 걸쳐 태풍 7호에 의해 야기된 홍수를 대상으로 관측을 실시하였다. 히누마천에서는 중규모의 홍수로서 히누마천 28.1 km 지점에서 고수부지 관수심이 최대로 약 1.5 m, 저수로 수심이 최대로 약 4.5 m였다. 히누마천 28.1 km 지점에서 유량수문곡선은 그림-2에서 나타나는 바와 같이, 강우가 일시 멎었기 때문에 증수기에 수위상승 속도가 떨어진 시간대가 있었으며, 홍수 계속시간이 평상시와 비교해 상당히 길었던 것이 관측 홍수의 특징이다. 이 홍수에 대해서 아래와 같은 내용으로 관측을 실시하였다. 히누마천 28.1 km 지점에서는 채수법에 의하여 wash load를 포함한 부유사 관측, 유량 및 수위 관측을 실시하였다. 또한, 소류사 관측, 유속 관측 및 수면 경사 관측도 실시하였으나, 본문의 범위에서는 직접 관계하지 않으므로 설명을 생략한다. 한편, 이나다천과 카타니와천에서는 히누마천

과의 합류점 부근으로 하되 본천 수위의 영향을 받지 않을 정도에 위치한 지점에서 부자에 의한 유량 관측 및 채수법에 의한 부유사를 관측하였다. 그리고, 두 지천의 합류점보다도 상류에서 히누마천 본천에 대한 부유사를 관측하였다.

3. 관측결과

히누마천 28.1 km 지점에서 관측되었던 유송형 태별(입경별) 부유사량 및 유량수문곡선은 그림-2에서 보는 바와 같다. wash load와 부유사의 판별은 라우스 분포를 참고로 마찰속도 u_* 와 입자의 침강속도 w_0 의 비, u_*/w_0 가 15~28 정도가 되는 입경 0.11mm를 경계로 하였다. 또한, 부유사 입경은 관측결과에 따라 0.1~0.8mm 이다. 또한, wash load는 0.014mm를 경계로 하여 wash load 대 (0.1~0.014mm), wash load 소 (0.014 ~ 0.10mm)로 구분하였다. 소류사량은 이나다천 합류직후의 히누마천 하상에서 대량으로 나타나는 소류사(그림-3 참조)의 대표입경이 3mm인 혼합사를 대상으로 토목연구소에 개발한 식으로 산출했으나, 관측한 중규모 홍수에서는 그다지 이동하지 않는다고 추정되었기 때문에 검토 대상에서 제외하였다.

카타니와천과 이나다천, 두 지천의 합류점 보다 상류에서의 히누마천에 대한 부유사량의 시간변화는 각각 그림-3, 4, 5에서 나타낸 바와 같다.

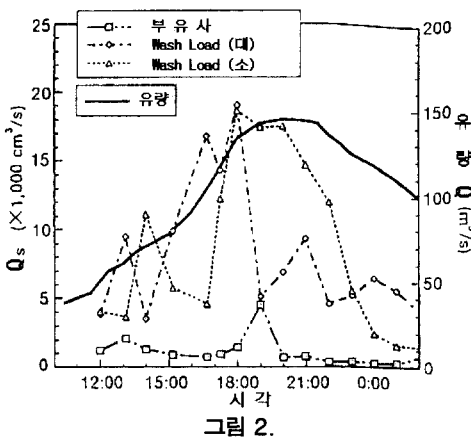


그림 2.

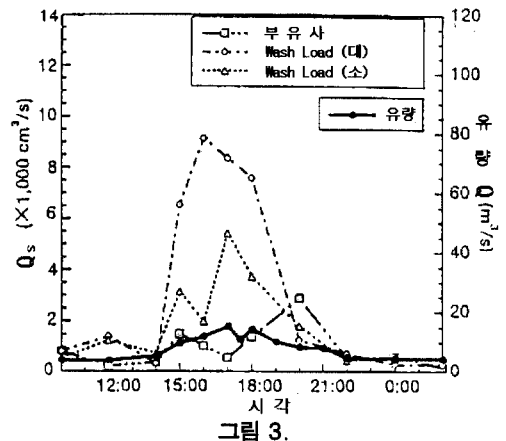


그림 3.

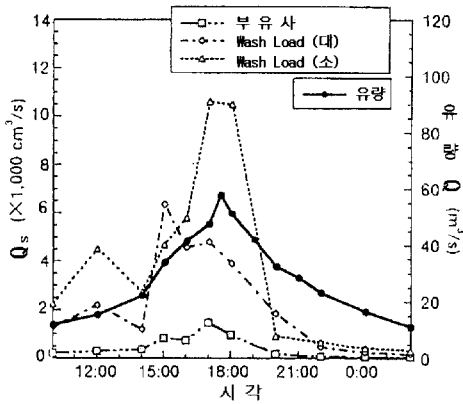


그림 4.

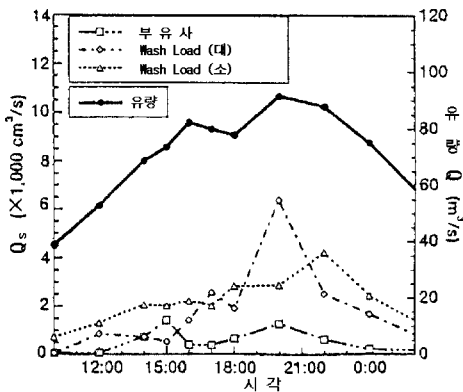


그림 5.

4. 관측결과에 대한 종합 평가

4.1 유역별 토사공급 특성

표 1.은 하누마천 상류, 커타니와천, 이나다천의 유역면적과 입경별 총토사이송량을 나타내고 있다. 히누마천 상류는 유역면적이 가장 넓음에도 불구하고 총토사이송량이 적은 반면, 카타니와천은 유역면적이 작는데 비해 상대적으로 토사이송량이 많다. 일본의 1급하천에서 실시한 부유사량 관측 결과를 토대로 살펴볼 때, 카타니와천의 토사이송량이 전국평균보다도 상당히 많고, 다음으로 이나다천이 비교적 많으며, 히누마천 상류도 전국하천의 평균에 해당한다. 두 지천에서의 토사이송량이 많은 것은 공히 상류부에 위치한 채석장의 영향과 특히 카타니와천 유

표 1. 유역면적과 입경별 토사 총 이송량

항목	관측지점	히누마천	카타니와천	이나다천
	상류			
유역면적(km ²)		48.6	8.2	39.4
wash load 소 (m ³)		249	94	204
wash load 대 (m ³)	(합계치)		159	123
부유사 (m ³)		31	54	24
소류사 (m ³)		0	0	145

역의 대부분이 산지 지역의 영향이 매우 크다는 것을 시사하고 있다.

그리고, 그림-3, 4, 5를 보면 소류사는 거의 이나다천에서 공급되며, 카타니와천에서는 wash load 대가, 이나다천에서는 wash load 소가 가장 많이 공급되고 있음을 알 수 있다. 이는 유역별 토사공급 특성이 상당히 다르다는 것을 가르킨다. 두 지천의 공급토사의 질적으로 다른 원인은 토사생산원의 다름, 유역의 토지이용 형태의 차이 등을 반영하는 것으로 추정되지만, 그 메카니즘에 대해서는 명확하지 않는 바가 적지 않다고 볼 수 있다.

4.2 지천의 wash load 생산원

카타니와천, 이나다천의 입경별 부유사 농도에 대한 시간변화는 각각 그림-6과 7에서 나타내는 바와 같다. 여기에서, 두 지천 공히 wash load 소가 홍수 증수기에 거의 일정한 농도를 유지하고, 18:00경 피크를 지나서 감수기와 더불어 농도가 낮아지지만, 다른 입경은 개략적으로 유량의 증감과 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 그림-6, 7에서 보는 바와 같이 두 지천의 근처에 위치한 우량관측소에서 얻어진 홍수 당일의 강우분포에 의하면, 17:00경에 비가 그치는데 wash load 소의 거동과 유사하다. 이에 따라, wash load 소의 동태의 한 원인으로서 다음과 같은 토사 생산과정을 추정할 수 있다. 즉, 두 지천의 규모가 작고, 특히 이나다천에서 유역 대부분이 전답용의 배수로망이 정비되어 있어, 유역으로부터의 표면유출은 짧은 시간에 하도에 도달한다고 볼 수 있다. 따라서, wash load 소가 유역에 떨어지는 빗방

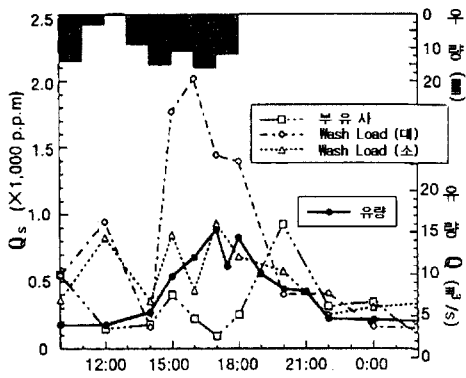


그림 6.

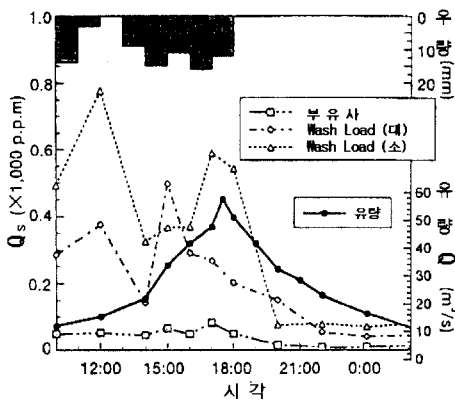


그림 7.

울의 물리적 작용에 의해 생산되어, 표면유출을 중심으로 비교적 단시간 안에 하도까지 운반되었다고 판단할 수 있다. 한편, wash load 대 이상의 입경은 수리량과의 상관성이 높으므로 하상이 그 근원임을 나타낸다.

4.3 토사수지

입경별 부유사량을 홍수 계속시간으로 적분해서 홍수시 입경별 총토사이송으로 환산한 토사수지는 그림-8과 같다. 여기에서, 히누마천 하류의 토사수지는 대부분 조화를 이루고 있고, 두 지천 합류점에서 28.1 km까지의 사이에서 눈에 띄는 토사의 유입과 토사 생산은 없다는 것을 알 수 있다. 그림-9는 히누마천 상류, 카타니와천, 이나다천에서 관측된 wash

load 대, 소의 이송량 합계치와 히누마천 28.1 km에서 관측결과를 나타낸다. 여기서, 급증하던 토사유출량이 13:00~15:00경에서 약간 둔해지는 약 2시간 시차를 두고 두 곡선의 형상은 어느 정도 일치한다는 것을 알 수 있다. 이는 두 지점의 거리(16.4 km)를 평균유속(2 m/s)에서 나누면 구간 유수의 도달시간(2.3 시간)과 거의 일치한다.

그리고, 유량피크가 22:00경에 발생하고 있는데 반해, wash load 대의 농도피크가 17:00~18:00경, wash load 소는 18:00~20:00경에 농도피크에 달하고 있다. 이는 wash load를 많이 공급하는 지천의 특성에 응답했을 가능성이 높다. 그림-3, 4에서 wash load 대, 소를 각각 합쳐 보면, wash load 대의 농도피크 시각은 15:00~16:00경, wash load 소의 농도피크 시각은 16:00~18:00경이라고 생각된다. 각 입경 공히 28.1 km지점의 관측지와의 시간차는 2시간 정도이고, 이것은 상기의 유수 도달시간과 거의 일치한다.

따라서, 많은 하천에서 유량피크와 부유사 농도피크에서 시간차가 발생하는 한 원인으로, 상류의 서브유역에서의 토사유출이 본천의 토사농도에 크게 기여하고 있다는 것을 들 수 있다. 결국, 이는 상류의 서브유역에서의 토사유출을 단순히 합침으로서 수문학적 방법으로 하류에서의 토사 동태가 어느 정도를 예측 가능하다는 것을 뜻한다.

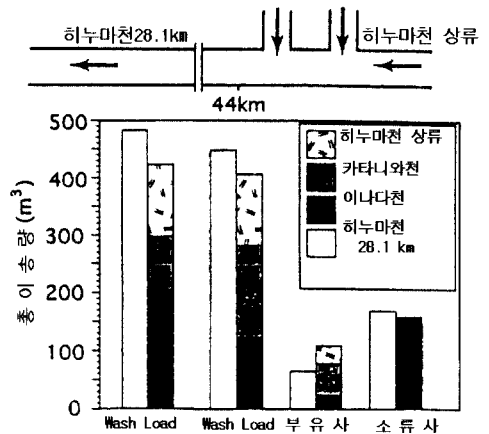


그림 8.

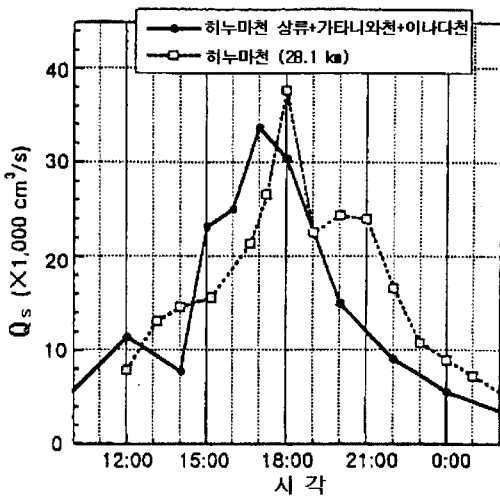


그림 9.

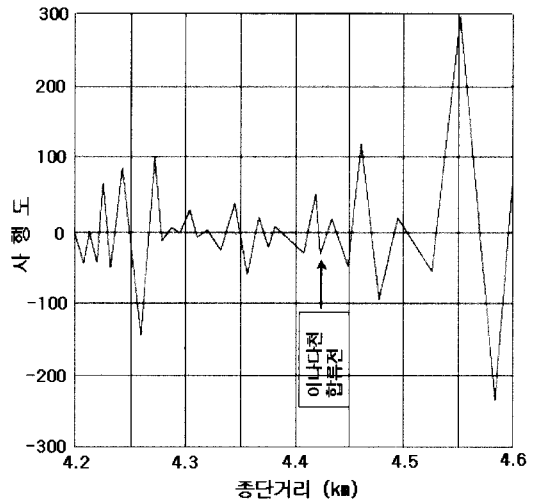


그림 10.

4.4 지천합류에 의한 시행도의 영향

그림-10은 지천의 합류점 사이에 둔 히누마천 상하류의 시행도(사행 반과장의 유로길이의 현의 길이의 비)의 변화를 나타낸 것이다. 그림-10에 의하면, 지천합류후에 시행도가 커진다는 것을 알 수 있다. 이 변화는 지천 합류후에 나타나는 테라스 지형의 증가로 인해 초래된 것이라 볼 수 있다. 테라스 지형은 비고가 사주보다 높고, 고수부지보다 낮으며, 하안으로부터 유로측으로 뺀 지형을 나타내고 있다. 이와 같은 지형의 형성과정은 다음과 같이 생각된다. 먼저, ① 홍수시 하안부근에 자갈, 굵은 모래가 사주상에 퇴적하고, ② 홍수의 규모와 빈도에 따라 서서히 발달해서 수면상으로 드러나게 되면서 식생이 번창하게 된다. 그런 다음, ③ 번창한 식생에 의해 홍수시 부유사를 차폐하기 쉽게 되므로 퇴적속도가 급증하고, 비고를 급속히 커지게 된다. 그림-11은 이나다천 합류점보다 하류의 전형적인 테라스 지형에서 채취한 모래의 입도분포를 나타낸 것이다. 이 입경은 부유사에 대응하는 것으로 히누마천의 경우, 테라스 지형의 형성에 주된 역할을 해왔음을 알 수 있다. wash load에 대해서는 테라스 지형이 한층 더 발달해서 고수부지화 하는 과정에서 중요한 역할을 하고 있는 것으로 추정된다. 전술한 토사수지를 감안

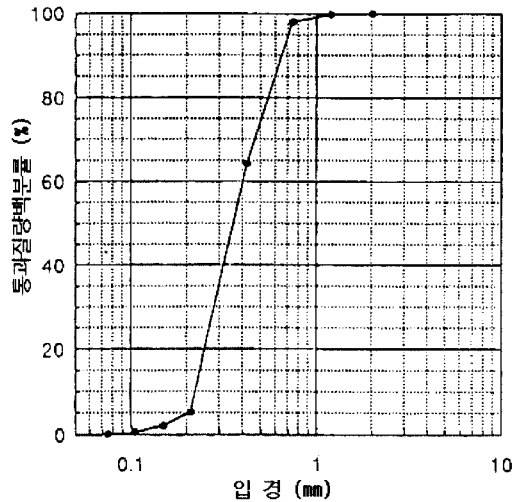


그림 11.

하면서 이 형성과정에 주목하면, 테라스 지형의 기층은 소류사인 굵은 모래로 구성되기 때문에 테라스의 초기 발달과정에서는 이나다천이 중요한 역할을 했다고 볼 수 있다.

5. 결론

히누마천을 대상으로 광역 유사관측을 통해 분명히 밝혀진 사항은 다음과 같다.

- 유역마다 토사유출 특성이 다르며, 같은 유역에서도 입경마다 유출시간이 서로 다른 경우가 있다.
- 부유사의 농도피크와 수위피크에서 시간차가 발생하는데, 본류와 유출시간이 다른 지천에서의 공급토사량이 본류의 토사농도에 크게 영향을 미치는 것도 한 원인이 된다.
- 히누마천 28.1km의 wash load 이송량은 히누마천 상류, 카타니와천 및 이나다천의 wash load 이송량을 합하므로써 예측이 가능하다. 이는 상류의 서브유역에서의 토사유출을 단순히 합침으로서 수문학적 방법으로 하류에서의 토사동태가 어느 정도를 예측 가능하다는 것을 뜻한다.
- 소류사에 의해 일단 형성된 테라스가 부유사와 식생의 작용에 의해 고수부지화가 가속될 수 있다.

이상의 결과에서 유역토사에 대한 동태를 파악하는 기법을 개발함에 있어, 하나의 큰 유역을 지질, 지형 및 토지이용의 관점 등에서 서브 유역으로 분할하여, 각각의 출구에서 토사동태를 관측 또는 예측하게 되면, 하류역의 임의의 점에서 유송토사의 예측할 수 있음을 시사하고는 것이다. 그리고, 최근에 활발히 전개되고 있는 자연하도계획에서 근간이 되고 있는 하도형성과정을 명확히 규명할 수 있음을 뜻한다.

감사의 글

필자는 일본 건설성토목연구소 하천연구실의 히누마천 유사조사팀에 합류하였으며, 이 때 현장 유사량 관측에 대해 많은 가르침을 준 후지타박사(당시 실장)와 히라바야氏(당시 주임연구원) 등 하천연구실 연구원들에게 감사드리고, 본고는 일본 토목학회에 발표한 자료를 토대로 작성하였음을 밝힙니다. ●