



2008년 하천유사량조사 사업 현황 및 방향



이 연 길

유량조사사업단 유량조사실 그룹장
sugawon@kict.re.kr



이 진 원

유량조사사업단 유량조사실 실장
jwlee@kict.re.kr



이 재 형

국토해양부 하천운영과 시설사무관
jh2000@mltm.go.kr

1. 서론

하천은 강우에 의한 유역의 응답으로 발생한 유출수를 이송시키는 기구인 동시에, 한 유역에서 침식된 토사를 하류로 이송시키는 기구가 된다. 일반적으로 토사의 이송은 침식, 유송, 퇴적의 3단계 과정으로 발생하며, 이와 같은 과정에서 다양한 유사문제가 발생된다.

이와 같은 유사 관련 재해를 최소화하기 위해서는 과다한 토사생산과 유사유출을 억제하고, 조절할 수 있는 바람직한 유사조절 대책이 필요하며, 이를 통해 하천의 고유 기능이 지속적으로 유지되도록 해야 한다.

다. 이는 유역에서 발생 가능한 토사량은 물론, 하천 유사량, 하상변동량, 저수지 퇴사량 등과 같은 수문자료가 지속적으로 모니터링될 때 가능한 일이다.

유량자료는 국토해양부의 노력으로 유량조사사업단과 같은 전문기관이 설립되고 이로 인해 측정장비 및 측정기준 등이 개선되어져 자료의 품질도 많이 향상되고 있다. 그러나 유사량측정은 그동안 각각의 기관에서 연구 목적에 따라 간헐적으로 수행되어진 관계로 측정자료는 물론 측정장비 및 측정기준 향상에 필요한 연구자료도 부족한 실정이다. 유사량자료는 저수지 퇴적, 댐 하류 하상의 저하, 하도의 침식과 퇴적, 준설 모의 등 장기적인 하상의 변동 상황을 모의할 수 있는 중요한 자료이다. 2006년부터 여주 등 6개 지점에서 유사량자료가 유량조사사업단에 의해 생산되고 있지만 관측 지점수는 WMO 기준에 상당히 미달된다.

본 고에서는 국토해양부의 수문조사선진화5개년 계획의 일환으로 수행되고 있는 유사량조사사업의 현황 및 성과에 대해서 소개하고, 향후 하천유사량조사사업의 방향 및 전망에 대해 언급하고자 한다.

2. 하천유사량조사 사업

2.1 유사량조사 지점

국토해양부의 2008년 유사량조사사업은 여주, 적성, 낙동, 왜관, 공주, 구례2 등 6개 지점에서 수행되었다. 이들 모든 지점은 홍수 예·경보 지점이면서 동시에 댐 상·하류에 위치하고 있어 유사량측정 지

표 1. 유사량 조사 지점

권역	하천	지점	비고
한강	한강 본류	여주	여주대교
	임진강 본류	적성	비룡대교
낙동강	낙동강 본류	낙동	낙 단 교
	낙동강 본류	왜관	(구)왜관철교
금강	금강 본류	공주	금강대교
섬진강	섬진강 본류	구례2	구 례 교

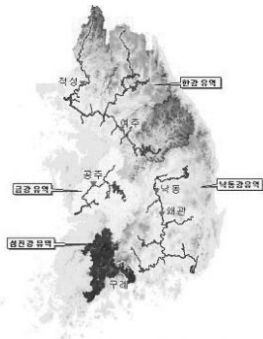


그림 1. 유사량 조사 지점

점으로서 의의가 크다. 하상재료의 특성을 보면 여주, 낙동, 왜관 지점의 경우는 모래가 주를 이루고 나머지 지점의 경우는 각각 자갈과 호박돌(적성), 자갈과 모래(공주, 구례2)로 구성되어 있다.

2.2 유사량측정 계획

여주, 적성, 낙동, 왜관, 공주, 구례2 수위관측소 지점에서 하천유사량과 유량의 관계를 파악하기 위해 표 2와 같이 유사량 측정을 계획하였다. 강우에 의한

유역의 유출량이 지배적인 경우에 유사의 거동이 활발하기 때문에 이와 같은 상황을 홍수기로 구분하여 6개의 지점에 대해 각각 13회의 유사측정을 계획하였다. 또한 홍수기 전·후의 하천에서 발생하는 유사의 특성과 변동성을 파악하기 위하여 홍수기 전·후 각각 유사측정을 2회 계획하였다. 본 사업단에서는 유사량측정계획에 의거하여 평·저수기 12개, 홍수기 82개, 총 94개의 유사량측정자료를 확보하였다.

2.3 유사량측정방법

하천 유사량 자료는 부유사 이외에도 소류사, 하상토, 기본 수리량 등이 측정되어야 총유사량을 산정할 수 있으므로 하천의 하상특성, 인근 및 측정구조물, 수리 특성(유속 및 수심) 등을 고려할 수 있는 각각의 적절한 관측방법이 적용되어야 한다. 적절한 관측방법의 선정은 유사량 자료의 적정성을 좌우하는 만큼 매우 중요하다.

관측방법 선정에 관한 기준이 수문관측매뉴얼(2004)과 USGS 등에 제시되어 있어 본 사업단에서는 위의 기준을 준수하여 표 3과 같이 지점별로 유사량측정방법을 계획하였다. 대부분 등간격법에 의한 수심적분법을 적용하였으며, 관측장비는 이와 같은 방법을 적용할 수 있는 D-74 수심적분채취기를 이용하였다. 하상토조사는 지점의 하상재료 특성에 따라 BM-54, Grab sampler(60L), 격자틀방법(선격자)을 이용하여 홍수기 전·후에 실시(15개 측선)하였다.

표 2. 유사량 측정성과

관측소	평·저수위			홍수위			합 계		
	계획	실적	비율(%)	계획	실적	비율(%)	계획	실적	비율(%)
여 주	2	2	100	13	11	85	15	13	87
적 성	2	2	100	13	13	100	15	15	100
낙 동	2	2	100	13	20	154	15	22	147
왜 관	2	2	100	13	17	131	15	19	127
공 주	2	2	100	13	16	123	15	18	120
구 례2	2	2	100	13	5	39	15	7	47
계	12	12	100	78	82	105	90	94	105

표 3. 유사량 측정방법

지 점	측정장비	노즐 직경 (in)	측선 수 (개)	측선배치	측정방법	채취시간	수면경사	수온 (°C)
여 주	D-74	3/16	5	등간격	왕복수심적분 표면법	측정	측정	측정
적 성	D-74	3/16	5	등간격	왕복수심적분 표면법	측정	측정	측정
낙 동	D-74	3/16	5	등간격	왕복수심적분 표면법	측정	측정	측정
왜 관	D-74	3/16	5	등간격	왕복수심적분	측정	측정	측정
공 주	D-74	3/16	5	등간격	왕복수심적분	측정	간접측정	측정
구 레2	D-74 P-61A	3/16	5	등간격	편도수심적분 왕복수심적분	측정	측정	측정

2.4 시료분석

하천의 횡단면상 각각의 측선에서 채취된 시료는 실험실에서 분석되며, 유사량을 산정하기 위해서는 농도, 입도분포 등의 분석이 필요하다. 시료의 농도를 분석하는 방법에는 증발법(evaporation)과 여과법(filtration)이 있으나 저농도 시료는 여과법이 효과적이다. 수문관측매뉴얼(2004) 등에서는 현장에서 채취된 시료가 1ℓ 당 10g 이하의 토사를 함유하면 여과법을 적용하도록 권고하고 있다. 따라서 본 사업단에서는 여주 등 6개 지점에서 채취된 모든 시료에 대해 표 4에 제시된 분석기준을 준수하여 부유사농도를 분석하였으며, 부유사 입경은 1979년 Dendy가 제시한 분석기준을 준용하여 BW관으로 분석하였다. 또한 하상토는 체분석에 의해 분석하였으며, 분석된 결과는 그림 2~그림 3과 같다.

표 4. 부유사농도 분석 기준

구 분	고려사항
수문관측 매뉴얼 (2004)	<ul style="list-style-type: none"> 부유사농도 분석 <ul style="list-style-type: none"> 증발법(evaporation)과 여과법(filtration) 등을 이용 10 g/ℓ 이하의 저농도 시료는 여과법을 이용함. 10 g/ℓ 이상의 고농도 시료는 증발법을 이용함. 용질물의 양이 많으면 이에 대한 보정 실시 여과법 <ul style="list-style-type: none"> Gooch 도가니를 이용시 필요한 도구 여과지 : 유리섬유와 셀룰로오즈 여과지 진공장치, 건조로, 냉각기 중류수, 응집제, 0.1 g 정밀도의 저울, 0.1 mg 정밀도의 200 g 용량의 저울, 비이커, 증발접시 증발법 <ul style="list-style-type: none"> 부유사 시료를 담은 채취병(1 pt 또는 1qt 들이) 증발접시 또는 다양한 크기의 비이커 건조로, 1 gal(3.8 ℓ) 이상의 용기, 100 ml 피펫 냉각기, 응집제(flocculating agent), 0.1 g 정밀도의 저울 0.1 mg 정밀도의 200 g 용량의 저울

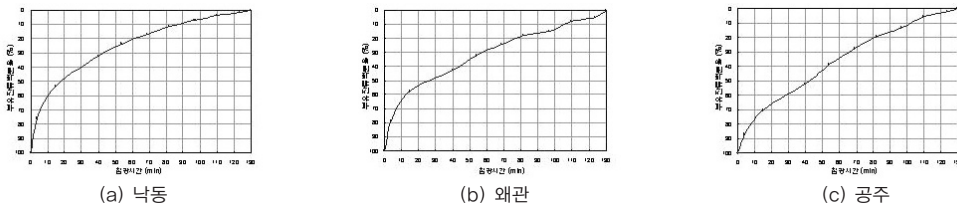


그림 2. Odén Curve

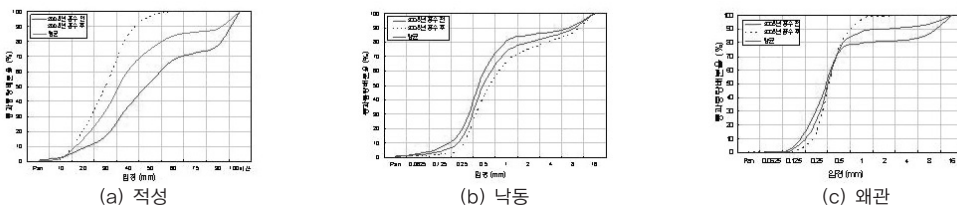


그림 3. 하상토 입도분포곡선

2.5 유사량산정

총유사량은 부유사 및 소류사 채취기로 실측하여 직접 산정될 수 있고, 수리량 및 하상토 특성 자료를 유사량 공식에 대입하여 간접적인 방법으로도 계산할 수 있다. 또한 부유사 실측자료를 이용하여 미측정 구간간의 유사량을 추정하여 직·간접적으로 산정할 수 있다. 총유사량은 이와 같이 3가지 방법에 의해 산정 및 추정될 수 있는데 직접 실측에 의한 방법은 자료의 신뢰도가 높은 반면에 비용 및 시간과 노력 등이 요구되는 단점이 있다. 간접적인 방법에 의해 총유사량을 산정하는 경우는 이와 반대로 비용 및 시간과 노력 등이 적게 드는 반면 자료의 신뢰도가 낮아 자료의 가치가 떨어지게 된다. 간접적인 방법으로 총유사량을 산정하는 방법은 국내 및 국외 기준에 비교적 자세히 제시되어 있는 반면에 직접적인 방법으로 총유사량을 산정하는 기준은 ISO/KS(2004)와 USGS에서만 제시하고 있다.

USGS는 단순히 부유사와 소류사량의 합이 아닌 측정된 부유사량과 소류사량으로부터 주어진 입경 범위별로 총유사량을 산정할 수 있는 공식을 제시한 바 있다. 그러나 본 공식은 부유사와 소류사량 이외에도 여러 수리특성 인자들을 요구하고 있기 때문에 실제로 적용하기에는 어렵다.

가. 유사량산정시스템(SDCS) 개발

본 사업단에서는 유사량측정의 적합성과 산정결과에 대한 적합성을 도모하고자 총유사량과 하상토유사량을 일관적으로 계산하고 분석 및 관리할 수 있는 유사량산정시스템(Sediment Discharge Computation System; SDCS)을 개발하였다. 유사량산정시스템(SDCS)은 Microsoft사의 Excel VBA(Visual Basic for Applications)로 개발되어져 실행 및 분석이 간단·용이하고, 또한 유사량 산정결과를 저장하고 관리할 수 있는 DBFPAD를 포함하고 있다. 본 시스템은 크게 총유사량과 하상토유사량 산정 모듈로 구성되어 있어 각각의 모듈에서 유량규모에 대응하는 유사량과 농도를 산정할 수 있다. 총유사량 산정 모듈은 대표적인 확산-이송형 모형이라 할 수 있는 Modified Einstein 공식을 토대로 하였으며, 하상토유사량 산정 모듈은 Einstein, Ackers & White, Engelund & Hansen, Yang의 유사량 공식을 근간으로 작성하였다. 본 시스템은 크게 총 5개의 모듈을 가지며, 총 20개의 부프로그램(Subroutine Program)과 23개의 사용자정의함수 구문으로 개발되었다. 또한 단면의 특성변화 분석모듈과 DBFPAD 저장 및 관리모듈이 포함되어 있어 산정된 결과를 용이하게 비교·분석할 수 있고, 기존 자료와의 비교도 쉽게 수행할 수 있도록 구성하였다. 그림 4~그림 7에 유사량산정시스템의 흐름도와 산정시스템, 통합관리시스템을 나타내었다.

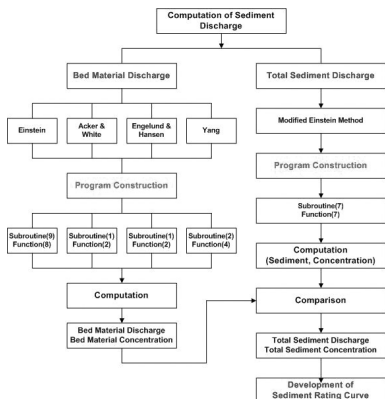


그림 4. SDSC 흐름

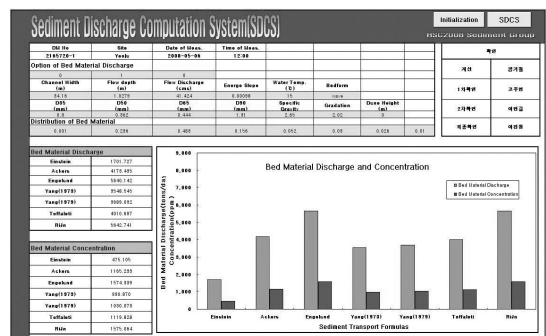


그림 5. 하상토 유사량산정시스템(SDCS)

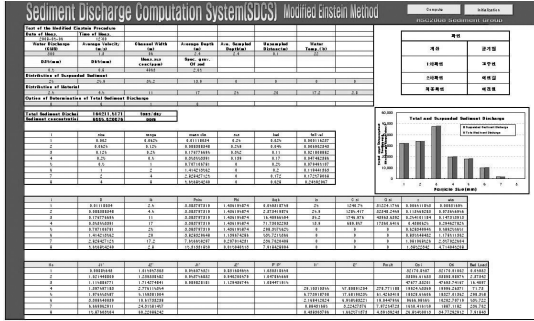


그림 6. Modified Einstein Model

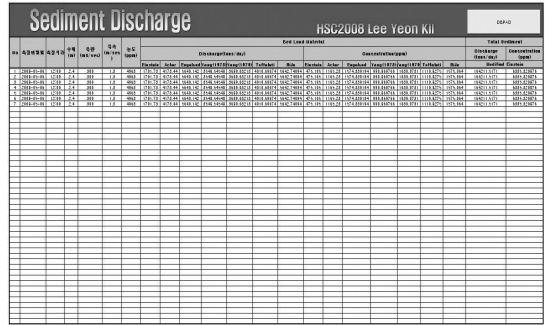


그림 7. 자료 통합관리시스템

나. 부유사량산정 및 특성분석

각 지점별로 산정된 부유사농도와 2008년 수위-유량관계곡선식의 유량으로 부유사량을 산정하여 유량규모별 그 특성을 분석하였다. 그 결과, 유량규모별 부유사량은 전체적으로 변동폭이 크고 경향성과 일관성이 낮게 나타났다. 비슷한 유량규모에서 이와 같이 변동폭이 크고 경향성과 일관성이 낮은 이유는 다양한 호우사상에서 유사채취가 이루어진 데 있는 것으로 판단된다. 또한 강수량, 유량뿐만 아니라 계절에 따른 토양과 식생의 변화, 하상재료의 변동, 댐의 방류 유무, 상류의 골재채취 유무, 강우의 강도, 강우의 빈도, 강우의 지역적 분포 등의 복합적인 영향으로 발생된 것으로 판단된다.

수위의 상승과 하강에 따라 발생하는 부유사량의 경향성과 사상별 특성의 정도를 파악하기 위해서 강우사상별로 부유사량 특성을 분석하였다. 부유사량 특성 분석 결과, 강우에 의한 유출의 영향으로 하도

구간에서 이송되는 유사량은 유량과 단일관계를 나타내지 않고 루프를 형성하였다.

다. 총유사량산정 및 특성분석

국내 하천의 특성에 적합한 총유사량 공식이 아직까지 개발되지 않고 이에 따른 연구 또한 미진한 관계로 기존의 총유사량 산정공식들 중에 국내에서 비교적 널리 적용되고 있는 Modified Einstein 공식을 선정하여 대상 지점에 적용하였다. 또한 Modified Einstein 공식의 추정치와 그 특성을 비교·분석하기 위해 부가적인 수단으로 Engelund & Hansen(1967년), Yang(1973년, 1979년), Ackers & White(1973년) 공식들을 이용하였다. 그 결과, 일반적으로 모든 지점에서 Modified Einstein 방법으로 추정된 총유사량이 부유사량과 유사한 거동을 하였으며, 그 외의 방법으로 추정된 결과는 유량의 증가에 따라 유사량도 일정하게 증가하는 경향을 나타내었다.

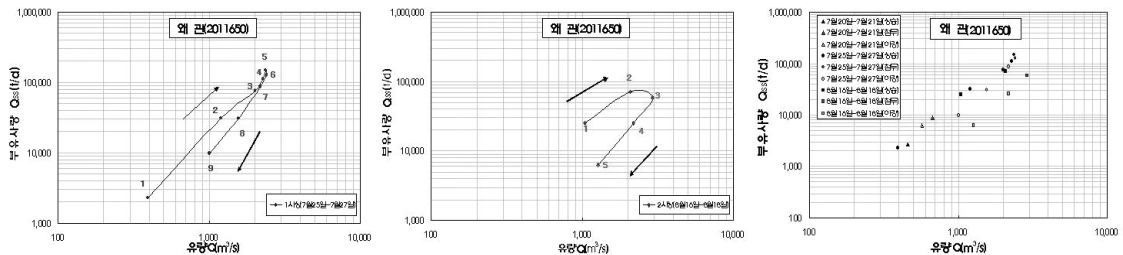


그림 8. 부유사량 특성분석(왜관)

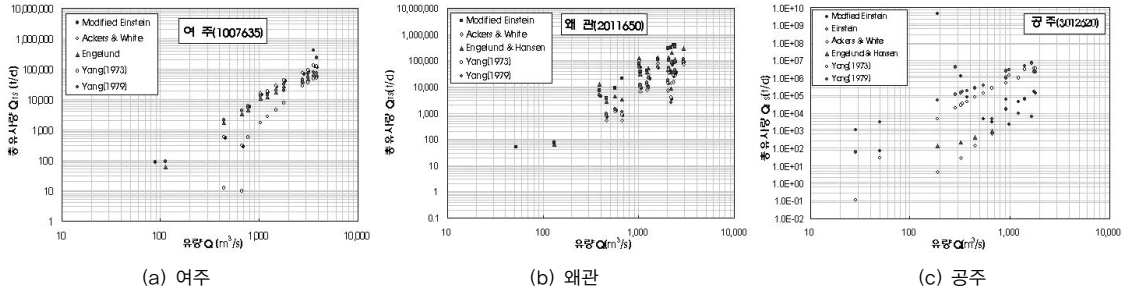


그림 9. 추정방법별 총유사량 비교

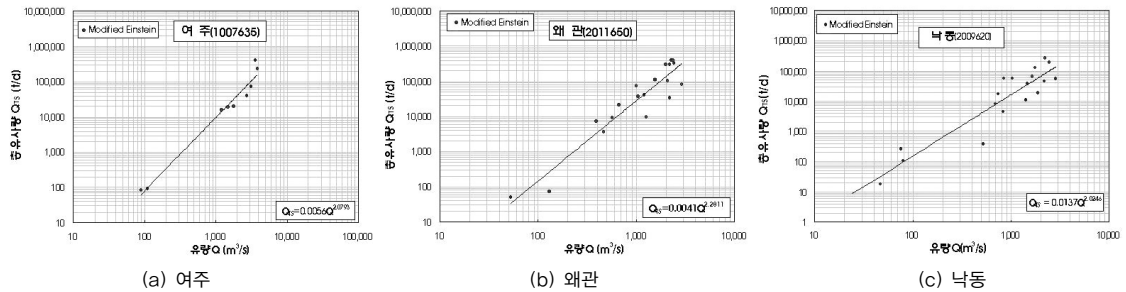


그림 10. 유량-총유사량관계식

2.6 유량-유사량관계식 개발

본 사업단에서는 현장에서 직접 측정된 부유사량에 방법별로 추정된 미측정 구간의 유사량을 포함하여 유량-총유사량관계식을 개발하였다. 유량-총유사량관계식에 이용된 총유사량은 Modified Einstein 방법에 의한 추정치이며, 결과는 다음 표 5 및 그림 10과 같다.

2.7 비유사량 추정

각 지점별 유사유출량과 비유사량을 산정하기 위해서 유량-유사량관계식을 이용하였으며, 유량 수문곡선으로부터 유사유출량 수문곡선을 생성하였다. 유사유출량 산정에 이용된 수위자료의 기간은 2008년 1월 1일~2008년 12월 31일이며, 각 지점별로 산정된 유사유출량과 비유사량은 표 6과 같다. 표 6에 나타

표 5. 지점별 유량-총유사량관계식

지 점	유량-총유사량관계식	결정계수(R ²)
여 주	$Q_{TS} = 0.0056Q^{2.0793}$	0.9683
적 성	$Q_{SS} = 0.0269Q^{1.8485}$	0.9266
낙 동	$Q_{TS} = 0.0137Q^{2.0246}$	0.8528
왜 관	$Q_{TS} = 0.0041Q^{2.2811}$	0.8896
공 주	$Q_{TS} = 0.1755Q^{1.6979}$	0.7178
구 레2	$Q_{TS} = 0.0277Q^{2.0406}$	0.9486

표 6. 비유사량 추정

지 점	유사 유출량 (t/yr)	비유사량 (전체유역면적) (t/km ² /yr)	비유사량 (순유역면적) (t/km ² /yr)	자료이용기간
여 주	300,052.10	27.02	117.44	2008.01.01~2008.12.31
적 성	1,128,616.76	167.20	-	2008.01.01~2008.12.31
낙 동	400,308.28	42.73	62.97	2008.01.01~2008.12.31
왜 관	331,683.89	29.95	41.14	2008.01.01~2008.12.31
공 주	161,876.26	22.64	53.68	2008.06.17~2008.12.31
구 레2	32,158.10	8.42	15.71	2008.01.01~2008.12.31

나 있는 바와 같이 임진강 수계에 위치한 적성 지점에서 유사유출량이 1,128,616.76 t/yr으로 대상 지점 중에서 가장 크게 산정되었으며, 구례2 지점에서는 32,158.10 t/yr으로 가장 적은 값을 가졌다.

3. 유사량조사사업의 방향

하천유사량자료는 저수지 퇴적, 댐 하류 하상의 저하, 하도의 침식과 퇴적, 준설 모의 등 장기적인 하상의 변동 상황을 모의하는데 필수적인 자료로 이용된다. 4대강 하천정비사업과 연관되어 유사량자료의 중요성이 점차적으로 증대되고 있는 국내 현실을 감안할 때, 간접적인 방법보다는 직접적인 방법에 의한 신뢰성 있는 총유사량 산정이 요구된다. 그러나 국내의 경우는 직접적인 방법이 아닌 부유사측정에 의한 직·간접적인 방법으로 총유사량을 산정하고 있고, 소류사량측정은 수행되고 있지 않다.

자료의 품질향상을 위해서는 부유사량뿐만 아니라 소류사량측정도 향후에는 지속적으로 수행되어야 할 것으로 보이며, 유사량조사사업의 방향을 제시하면 다음과 같다.

첫째, 국내 특성에 맞는 적합한 유사량측정방법과 기준이 개발되어야 한다. 하천의 횡단면상에서 유출되는 유량과 유사량의 관계는 유량에 대응하는 유사농도가 적절하게 산정될 때 그 신뢰성이 담보될 수 있기 때문에 대상 지점의 특성에 맞는 적합한 측정방법이 현장에 적용되어야 한다. 그러나 국내의 경우는 유사량조사사업의 역사가 극히 짧고 극히 일부지점에서만 한정적으로 시행되기 때문에 이를 개발하기 위해 필요한 기본 자료가 거의 없는 실정이다. 이러한 국내 현실을 감안했을 때는 다양한 하천(모래 및 자갈)에서 지속적인 유사량측정이 요구되며, 이를 통해 자료의 특성과 문제점 등을 분석하여 적합한 측정방법을 개발해야 한다.

둘째, 해당 연도를 대표할 수 있는 유사량자료를 생산해야 한다. 하천유사량은 시간에 따라 변화하는 유역 및 하도, 수리량 등으로 인해 그 특성이 변화되

기 때문에, 시기별로 고르게 유사량을 측정하여 해당 연도를 대표해야 한다. 또한 강우로 인한 유역의 반응으로 발생하는 유출량에 따라 유사의 특성이 변화되기 때문에 이와 같은 특성을 반영할 수 있도록 다수의 호우사상에서 유사량측정이 수행되어야 한다.

셋째, 측선수 및 측선배치는 횡단면적인 평균 유사량을 산정하는 데 중요한 요소이다. 하천의 규모와 특성에 따라 측선배치를 할 수 있는 방법은 정립되어져 있지만 측선수에 대한 규정은 아직까지 명확하지 않다. 본 사업단에서는 ISO/KS에서 수면폭에 따라 유사 측선수를 5개~7개 이상을 규정하고 있어 본 기준에 준하여 등간격법의 5개 측선수를 적용하였지만, 이 또한 부족한 측선수로 보인다. 고품질의 유사량측정성과를 확보하기 위해서는 측선수에 관한 기준이 정립되어야 할 것으로 판단된다.

넷째, 국내 하천의 특성에 적합한 총유사량 추정방법의 개발이 필요하다. 국내에서 비교적 널리 적용되고 있는 Modified Einstein, Einstein(1942), Ackers & White(1973), Engelund & Hansen(1967), Yang(1973, 1979) 공식 등은 국내 하천 특성에 적합하지 않다. 지점별로 추정된 결과만 보더라도 그 값이 서로 상이하고, 경향성과 변동성이 매우 크다. 향후에는 총유사량추정 방법들에 대한 충분한 연구로 대상 지점의 특성에 적합한 방법을 개발해야 한다.

마지막으로, 유사량측정 지점수의 증대가 필요하다. 현재 여주 등 6개 지점에서 수행되고 있는 유사량관측지점수는 WMO에서 제시하고 있는 기준에 비해 상당히 적은 수치이다. 위에 언급된 내용도 시급한 사항이겠지만 유사량관측지점수를 대폭적으로 늘리는 것도 현시점에서 간과할 수 없는 중요한 문제이다. 국토해양부가 2005년에 수립한 수문조사선진화 5개년 계획에 의한 점차적인 관측지점 증대가 요구된다.

4. 맺음말

고품질의 유사량측정자료는 하천특성에 적합한 측



정기법 및 장비 등이 개발될 때 생산될 수 있으나 아직까지는 이에 대한 연구성과가 미진하다. 유사량 자료는 유량과 더불어 효율적인 유역종합치수계획을 수립할 때 귀중하게 이용되는 기본자료가 된다. 그러나 아직까지 이를 측정할 수 있는 방법과 자료처리 과정 등이 체계화되지 않은 상태에 있다. 따라서 향후에는

유사량측정자료의 중요성을 인식하고 조사에서 가공에 이르기까지 분석방법을 체계화하여 다양한 연구가 진행될 수 있는 기틀이 마련돼야 한다. 또한 이러한 일련의 과정은 전문 측정장비와 측정 및 분석 기술을 갖춘 전문인력이 확보될 때 가능한 일이므로 이에 대한 지속적인 노력이 요구된다. ☞

● 참고문헌

1. 건설교통부 (1990). 수정아인쉬타인방법의 한국 하천에의 적용. 한국건설기술연구원.
2. 건설교통부 (1991). 하상변동 예측모형의 비교분석. 한국건설기술연구원.
3. 건설교통부 (2004). 수문관측매뉴얼.
4. 건설교통부 (2005). 수문조사선진화5개년계획.
5. World Meterological Organization(1981), Measurement of River Sediments, Operational Hydrology, Report No. 16.