

합천댐 하류에서의 하천지형 변화 및 흐름의 파동이 하천 수리지형에 미치는 영향 연구

Channel Changes and Effect of Flow Pulses on Hydraulic Geometry Downstream of the Hapcheon Dam

신영호*, Pierre Y. Julien**, 최홍규***, 나상진****

Young Ho Shin, Pierre Y. Julien, Hong Gyu Choi, Sang Jin Na

요 지

황강에는 1989년 합천다목적댐과 본댐 하류 6.5km 지점에 조정지댐이 건설되었는데 조정지댐의 건설 목적은 본댐에서 피크 발전에 의해 방류되는 유량을 하류로 조절방류하기 위한것이다. 황강은 두댐의 건설후 하천폭, 하상재료, 식생 및 하천구간내 사주의 형성 등 많은 하천 지형학적 변화가 있었다. 이러한 변화는 댐 건설후 흐름 및 유사이송의 변화에 기인한다. 2002년 합천댐 저수지 퇴사량 조사에 의하면 합천댐은 연간 약 600천m³의 유사를 차단한 것으로 파악되었다. 조정지댐은 연최대피크 방류량을 654.7m³/s에서 126.3m³/s로 감소시켰는데 이는 댐건설전의 19.3%에 해당하는 양이다. 댐건설로 인한 하류 하천의 지형적인 변화를 파악하기 위하여 합천조정지댐 하류로부터 낙동강 합류점까지 45 km에 대하여 조사하였다. 1982, 1993 및 2004년의 항공사진을 분석한 결과 비식생하도폭(non-vegetated active channel width)은 평균 152m 감소되었는데 이는 1982년의 약 53%에 해당한다. 비식생하도의 면적 역시 평균 6.6km²가 감소하였다. 평균 중앙하상재료(D50)의 크기는 1983년 1.07mm에서 2003년 5.72mm로 증가한 반면 평균 하상구배는 1983년 0.000943에서 2003년 0.000847로 감소하였다. 총 하상 세굴깊이는 조정지댐 하류 20km 구간에서 평균 약 2.6m였다. 1차원 유사모형인 GSTAR-1D를 이용하여 예측된 최심하상고는 2013-2015년 사이 (댐건설후 약 25년 후)에 안정된 상태에 도달하는 것으로 나타났다. 합천 조정지댐이 본 댐에서의 피크 방류량을 상당히 감소시키고 있지만 홍수기에 조정지댐 수문의 급격하고 주기적인 개폐로 인하여 하류에 흐름의 펄스를 발생시키고 있다. 이러한 펄스가 하류 하천 지형변화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 유사모형과 해석적인 방법을 개발·적용하여 구한 값과 비교·검토 하였다. 결과에 따르면, 일 흐름의 펄스(daily pulse)와 홍수피크(flood peak)는 각각의 평균값이 흐름 때와 비교하여 하천지형변화에 훨씬 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 일 흐름 펄스와 홍수피크는 각각의 평균값의 21%와 15%의 토사 이송량 (tons/day) 증가를 보여주었다.

핵심용어 : 총적하천, 수리지형; 댐; 조정지댐; 흐름 파동; 황강¹⁾

1. 서 론

댐의 건설은 하류 하천의 하상표고, 하천폭, 수심, 하상재료의 크기, 장갑화 및 제방의 식생 등의 변화로 인해 하류 하천 수리지형 (downstream hydraulic geometry)의 변화에 많은 영향을 미친다.

* 정회원 · 한국수자원공사 조사기획처 차장 · E-mail : yhshin@kwater.or.kr

** 미국 Colorado State University 토목환경공학과 교수 · E-mail : pierre@engr.colostate.edu

*** 정회원 · 한국수자원공사 조사기획처장 · E-mail : hgchoi@kwater.or.kr

**** 정회원 · 한국수자원공사 조사기획처 조사기획팀장 · E-mail : sangjin@kwater.or.kr

물과 유사흐름의 변화에 의한 일반적인 하도의 반응은 많은 텍스트북과 수리지형 및 regime theory와 관련한 논문들에서 거론된 바 있다(Ferguson 1986; Hey 1979; Huang and Nanson 2000; Lamberti 1992; Miller 1991a, 1991b; Simon and Thorne 1996; Yang 1992). 이러한 댐건설에 의한 하류 하천수리지형의 변화는 댐에 의하여 상류에서 들어오는 유사(유사)가 차단됨으로서 댐하류에 유사(유사)가 없는 맑은 물만을 방류함으로서 하도의 변화를 가져온다(Downs 및 Gregory, 2004). 댐건설의 주요한 영향중의 하나는 홍수피크의 감소를 들 수 있다. Williams와 Wolman (1984)은 미국의 중부와 남서부의 21개 저수지를 조사하여 90% 정도의 홍수피크가 감소하였음을 보여주었다. 최근에 Page 등 (2005)은 호주의 Murrumbidgee강의 하도형성유량(bankfull discharge)의 빈도와 지속기간이 변화되었음을 보여준바 있는데 홍수피크의 경우 1.25와 2년 빈도 하도형성유량(bankfull discharge)이 댐준공후 29%와 50%가 감소되었다. 일반적으로 댐으로 부터 유사(유사)가 제거된 맑은물의 방류로 하상의 세굴율은 자연하천보다 크다(Knight 1998).

우리나라는 대규모 다목적댐을 건설한지 20여년이 지난 상황에서 이러한 댐 하류에서의 하천지형 변화를 모니터링 하는 것이 하천관리 측면에서 중요하다고 생각된다. 1989년에 합천다목적댐이 건설된 황강하류 45km (합천조정지댐-낙동강 합류점) 구간도 중대한 하천지형의 변화를 보여주고 있는데 이러한 이유로 본 연구의 대상지로서 선정하였다. 본 연구구간에 대하여 그 동안 많은 조사와 연구들이 수행된바 있는데 합천댐 건설전후에 세 번에 걸쳐 황강하천정비기본계획 (1983, 1993, 2003, 건설교통부)이 수립되었다. 이 계획에서는 기상변화, 토지이용의 변화, 하천지형 측량 및 하상재료의 크기변화 등을 포함하고 있는데 댐준공후 13년간 하상 세굴 및 하상재료의 조립화 현상을 보여주고 있다. 이 외에, 몇몇 연구자들이 합천댐 하류의 물흐름의 변화로 인한 하천지형 및 식생의 변화를 조사한바 있다(Choi 등, 2004; Woo 등 2004). 합천댐은 본댐과 조정지댐으로 구성되어 있는데 평상시와 일반적인 홍수시 본댐발전소에서 3시간 침투발전을 통하여 하류에 물을 흘려보내며 조정지댐에서는 이를 하류에 24시간 조절하여 방류하고 있다. 하지만 조정지댐에서도 일반적인 홍수시 홍수조절을 위하여 본댐 발전소의 방류시간을 3시간 이상으로 늘리게 되면 조정지댐 저수지 용량 제한으로 조정지댐 발전소의 발전방류만으로는 필요방류량을 방류할 수 없는 상황이 발생한다. 이 경우 조정지댐의 수문을 주기적으로 개폐하여 방류량을 조절하는데 이로 인하여 하류에 상당히 큰 흐름의 펄스(flow pulse)가 발생된다. 이러한 흐름의 펄스는 하류하천의 하도변화를 가속화 시키는 역할을 할 것으로 보여지며 이에 대한 효과 분석이 필요하다. 또한, 수리지형(hydraulic geometry)의 장래 변화와 어느 지점에서 새로운 평형 및 안정 상태에 도달할 것인지를 예측하는 것이 중요하다. 본 연구의 목적은 댐 건설에 의하여 조절되는 하천에서 물 흐름과 유사유입의 변화로 인하여 하천에 발생하는 각종 변화에 대한 이해와 흐름의 펄스가 합천댐 하류 증적 하천에 발생하는 수평 및 수직적인 수리지형학적 변화에 미치는 영향을 파악하는 것이다. 연구내용은 과업구간에 대한 설명, 댐건설전후의 하천지형변화를 분석 및 향후 변화양상을 예측하고 조정지댐에 의하여 발생하는 흐름의 펄스로 인한 영향을 분석하였다.

2. 대상구역, 관련자료 및 하도의 변화

1970년 이후 낙동강 유역에는 홍수조절, 용수공급 및 전력생산을 위하여 6개의 다목적댐이 건설되었다. 1989년 완공된 합천다목적댐이 그 중 하나이며, 과업대상인 황강은 그림 1에서 보는바와 같이 서쪽에서 발원하여 동쪽으로 흐르며 합천다목적댐을 거쳐 낙동강 본류와 합류한다.

항강의 길이는 107.6 km 이며 이의 유역면적은 1,329 km² 이다. 과업구간은 합천조정지댐부터 낙동강 본류 합류점까지 45 km 구간으로 유역면적은 372.4 km² 이다. 합천댐은 합천시에서 서쪽으로 16 km 지점에 위치하고 있으며, 홍수피해 경감, 용수공급 및 수력발전을 위하여 건설되었다. 댐의 저수용량은 790x10⁶ m³으로 본댐 발전소에서 하루 3시간 첨두 발전을 통해 방류되는 물을 하류로 조절 방류하기 위하여 본댐 하류 6.5km 지점에 조정지댐을 건설하였다.

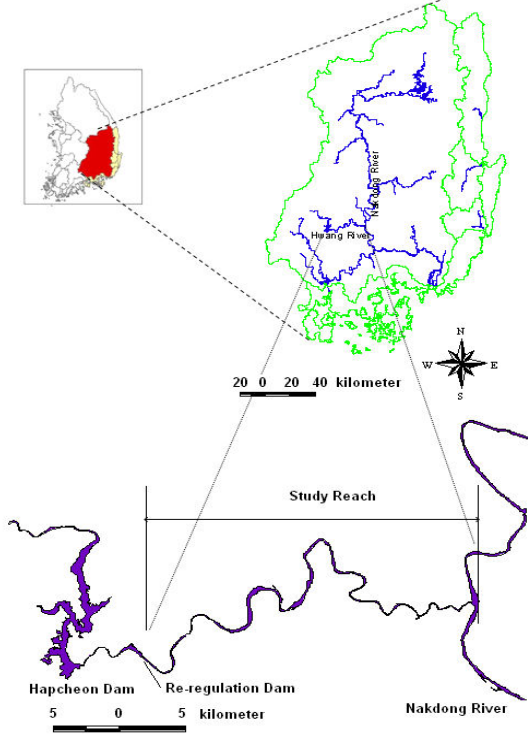


그림 1. 합천댐 하류 과업구간

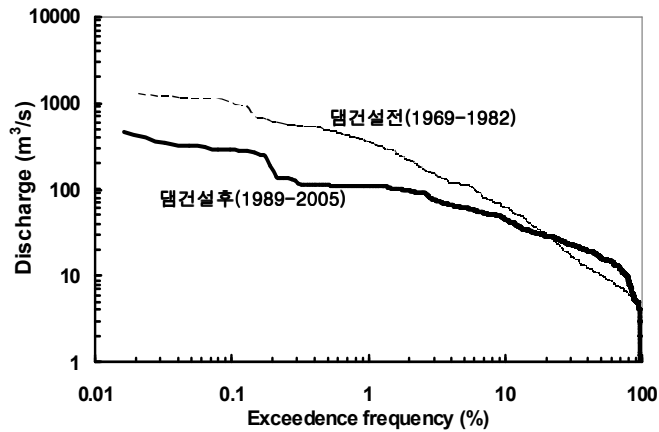
본댐 발전소는 조정지댐으로부터 상류 2km 지점에 위치하고 있으며, 평상시에는 하루 3시간 첨두 발전으로 최대 방류량은 119 m³/s (1,285,200 m³/day)로서, 조정지댐 발전소에서는 이를 일일 15 m³/s를 하류로 조절 방류하고 있다. 대부분의 자료는 1983년 이후에 관측된 자료로서 하천정비기본계획의 일환으로 건설교통부에서 수행한 자료를 활용하였다. 대상 구간은 1983년 이후 매 10년마다 (1983, 1993, 2003) 조사가 이루어 졌는데 하천 중형단측량, 하상재료 크기, 유량, 기상, 수질 및 동식물조사 등 환경관련 자료를 포함하고 있다. 댐 준공전후의 평면적인 하천의 변화 양상을 파악하기 위하여 필요한 항공사진자료는 국립지리원에서 1982, 1993 및 2004년에 촬영한 자료를 수집하여 이용하였다. 과업구간은 그림 3에서 보는 바와 같이 분석의 효율성을 기하기 위하여 3개의 소구간으로 구분하였다.

2.1 유량

본 과업구간에는 한국수자원공사에서 관리하는 합천댐 및 조정지댐 (1989년 이후)의 시간 및 일 방류량자료와 조정지댐 하류부터 낙동강 합류점 사이에 건설교통부에서 관리하는 합천 및 죽고 수위관측소 (1962년 이후)가 있다. 그러나 두 관측소 자료는 결측치가 많고 자료의 신뢰도가 떨어져 본 과업에서는 제외하였다. 따라서 댐건설전의 일유량자료는 1969-1983년 기간 동안 댐건설 지점에 설치되어 있던 창리 수위관측소 자료를 사용하였고 댐건설후의 유량자료는 1989년 이후 본댐 및 조정지댐의 방류량 자료를 이용하였다. 이들 자료는 1996년 이후부터는 시간 및 30분당 자료도 보유하고 있다. 합천조정지댐에서의 1969년 이후 유량자료를 보면 년 최고유량이 합천다목적댐과 조정지댐 건설 후에 감소하는 것으로 나타났으며 이러한 흐름 양상의 변화는 다음과 같은 영향을 미쳤다.

(1) 댐건설로 인하여 연평균최고유량(mean annual peak discharge)은 654.7 m³/sec에서 126.3 m³/sec로 감소하였다. 이는 댐건설 후 기간(1989-2005)동안 연평균최고유량은 댐건설전 기간(1969-1981) 동안의 유량의 16%에 불과한 것이다.

(2) 하도형성유량 (bankfull discharge, 1.58년 빈도유량)은 댐건설후의 유량이 댐건설 전의 17%에



불과 하였다. 그림2의 합천댐지점 댐건설전후 유황곡선 (flow duration curve)에 의하면 댐건설후 고유량 부분은 감소한 반면 저유량 부분은 증가한 것을 알 수 있다.

그림 2. 합천댐 지점에서의 댐건설전후 유황곡선 (1969-2005)

2.2 항공사진 및 하천중형단 자료

항공사진은 그림3에서 보는바와 같이 1982, 1993 및 2004년에 촬영한 자료가 있는데 건설교통부산하 국립지리원으로부터 구하였다. 이러한 사진촬영자료는 하천폭 및 사주의 면적 등을 파악하는데 활용하였다. 항공사진은 Digital Elevation Model (DEM)로 부터 ERDAS IMAGINE 소프트웨어를 이용하여 위치, 길이 면적 등을 얻기 위해 X, Y 좌표를 결정할 수 있도록 수치화하였다. 이러한 과정을 거쳐 물이 흐르는 하천면적, 중형단측량선, 식생이 분포하는 지역의 면적 및 사주의 면적 등을 중첩하고 계산하기 위하여 ArcView3.2 소프트웨어를 이용하였다.

본 과업구간에서 활용 가능한 하천중형단 측량자료는 1983, 1993년 및 2003년 자료이며, 국가수자원정보시스템(National Water Management Information System, WAMIS)에서 구하였으며 엑셀로 구성되어 있는 자료를 HEC-RAS에서 흐름 해석에 사용할 수 있도록 데이터를 재구성하였다. 1983 및 1993년 자료는 500m 간격으로 약 100개의 단면이 있고, 2003년 자료는 250m 간격으로 약 210개의 단면으로 구성되어 있다. 항공사진으로부터 구해진 비식생 하도폭은 1982년 이래로 모든 구간에서 감소하는 것으로 나타났다. 과업구간중 3번 소구간이 가장 변화가 큰 구간으로 나타났으며 2번 소구간이 가장 하천폭이 넓은 구간으로 나타났다. 전구간에 대한 하천폭은 1982년의 약 54%에 해당되는 것으로 평균하폭은 1982년 321m에서 2004년 172m로 감소하였다. 감소속도는 1993년과 2004년 기간 동안이 1982년과 1993년 기간 동안보다 더 빠르게 감소하는 경향을 보여주었다. 하천폭과 수심의 비(width/depth) 역시 소구간3을 제외하고 감소하는 경향을 보였는데 전 구간에 대하여 평균 1982년 279에서 2004년 258로 감소되었다.

현지조사와 항공사진자료에 따르면 하도의 쇄굴과 하천폭의 감소가 대부분의 하천단면에서 나타나고 있다. 낙동강과의 합류점으로부터 45-40km (조정지댐으로부터 하류 5km) 구간에서 가장 쇄굴이 활발히 발생하였고 하도가 분할되고 사주가 발달하였으며 사주에 식생이 자라고 있는 것을 볼 수 있었다. 중간구간(38km-15km 구간)에서는 비록 쇄굴과 하천폭의 감소가 나타나고 있기는 하지만 상대적으로 안정된 구간으로 보여졌다. 반면, 낙동강과의 합류점 부근에서는 댐건설후에

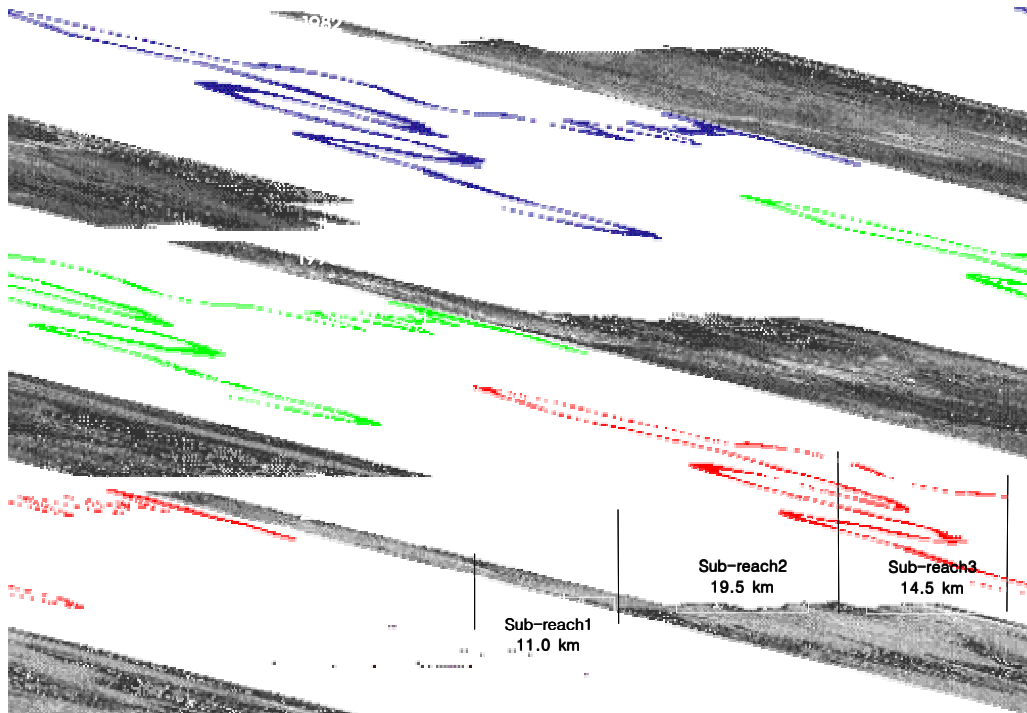


그림 3. 과업구간의 소구간 구분, 소구간 3의 항공사진 및 하도의 평면도(1982-2004)

사주발달로 인한 섬의 형성 및 식생의 발달을 볼 수 있었다. 지난 20년간 총 비식생하도의 면적은 감소하였고 하도폭도 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 2004년의 하도면적이 1982년 면적의 56%에 불과한 것으로 나타났다. 이와 반대로 식생 및 사주(섬)의 면적은 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 소구간1에서의 하상 경사는 댐건설후에 어느 정도 증가한 반면 다른 구간에서는 감소하였다. 전구간에서의 하상경사는 1983년 0.000943에서 2003년 0.000847로 감소하였다. 댐건설후 기간동안 45-30Km (합천조정지댐 하류 0-15km) 구간에서 가장 큰 하상 쇄굴을 보여주고 있는데 이 구간에서 평균 2.6m의 하상이 쇄굴되었다.

2.3 퇴사량 및 하상재료

하상재료 샘플링은 횡단면 측량이 이루어진 1983, 1993, 2003년에 이루어 졌다. 댐건설후에 하상재료의 크기가 변하였는데 하류 구간보다 조정지댐 직하류인 소구간 1에서 하상재료의 크기가 증가하였다. 평균 중앙하상재료크기(D50) 1983년에 1.07mm에서 2003년에 5.72mm로 증가하였다. 조정지댐 직하류 (45-44km)에서 하상은 댐건설후에 모래에서 자갈로 바뀌었는데 이는 이미 하상이 장갑화 되었음을 의미한다. 부유사에 대한 샘플링이 1969, 1970년에 FAO/UNDP and KOWACO (1971)에 의하여 합천댐 타당성조사시 창리관측소(현재의 합천댐 지점) 지점에서 이루어 졌는데 총유사량은 1969년과 1970년에 1,478 및 477 천톤/년 이었다. 이후 본 과업구간에서 유사량 측정은 이루어 지지 않았고 합천댐 저수지 퇴사량 조사가 2002년에 한국수자원공사 (2002)에 의하여 이루어 졌다. 본 조사결과에 의하면 1989-2002년 기간의 14년간 8,279천m³의 토사가 퇴적된 것으로 관측되었다. 이를 연간 퇴사량으로 환산하면 합천댐 지점에서

946 천톤/년이었다. 이 값은 실측 유사량 자료가 없는 합천조정지댐 하류에서 유사량 공식으로 산정한 총퇴사량값과 비교하였다. 적용된 유사량 공식은 Engelund Hansen (1972), Ackers and White (1973), Yang (1973 and 1979) 및 Van Rijn (1984) 공식이었다. 유사량 공식으로 산정한 값과 저수지 퇴사량으로부터 도출한 유사량을 비교하여 낙동강과의 합류점에서의 총유사량을 결정하였는데 가장 유사한 결과를 보여준 공식은 Yang(1973)의 공식이었으며, 이로부터 추정된 총유사량은 440천톤/년 이었다. 또한, 이를 통하여 추정된 유량-유사량 관계식은 $Q_s = 9.77Q^{1.49}$ 이었다.

3. 장단기 하도변화 예측

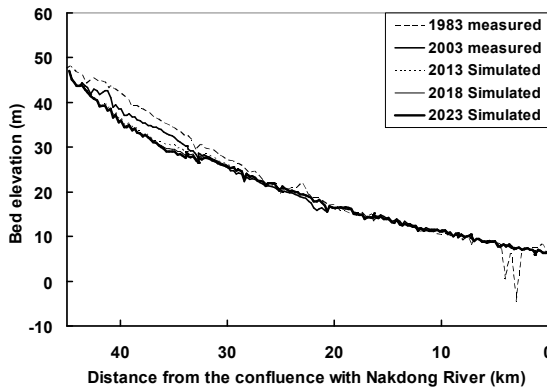
3.1 장기하상변화 예측

장래의 하도변화를 예측하기 위한 많은 수학적 모형이 개발되었는데 HEC-6 (U.S. Army Corps of Engineers 1993), FLUVIAL-12 (Chang 1998), CONCEPTS (Langendoen 2000), EFDIC1D (Tetra Tech 2001), CCHE1D (Wu and Vieira 2002), GSTARS (Molinas and Yang 1986; Yang and Simões 2000; Yang and Simões 2002), 및 GSTAR-1D (USBR 2006) 등을 들 수 있다. 대부분의 모형은 유사한 모의 기능을 갖고 있으며 몇몇 모형은 완전동력학모의(full dynamic simulation) 기능을 갖고 있다. 이 중 GSTAR-1D모형은 완전동력학적모의 기능을 갖고 있으며, 미개척국에 의하여 개발된 정상류 유사이송모형인 GSTAR시리즈 중 가장 최근에 개발된 모형으로 댐 건설로 인한 하상변동 모의에 적용하여 적용성이 입증되어 본 연구에 적용하기 위한 모형으로 선정하였다.

GSTAR-1D모형은 미개척국(USBR, 2006)에서 수리와 유사이송을 모의하기 위하여 개발된 모형으로 이동경계에 대한 모의도 가능하다. 이 모델은 단일하도 뿐만아니라 수지상 하도 및 망상형 하도에도 적용 가능하다. 또한, 정상 및 부정류에 대한 흐름해석이 가능하며, 정상점변류의 해석을 위한 에너지방정식의 계산을 위해 표준축차계산법을 이용한다. 부정 급변류의 해석을 위하여는 St. Venant 방정식을 이용한다. 유사이송을 모의하기 위하여 GSTAR-1D모형은 두가지의 방법을 사용한다. 장기간의 모의를 위하여 유사이송 연속방정식의 부정류 항목을 무시하고 부등평형 유사이송방법(non-equilibrium sediment transport method)이 이용된다. 단기모의를 위하여는 유사이송을 위한 지배방정식은 유사 침식/퇴적을 발생시키는 소스항으로 대류·발산방정식(convection diffusion equation)이다(Huang 등 2006). GSTAR-1D모델은 1차원 모형으로서 몇 가지 한계를 갖고 있는데 지역적으로 세부적인 모의가 필요한 2차원 및 3차원의 수리학적 상황에는 적용할 수가 없다(Huang and Greimann, 2006). 또한, 이차류 흐름(secondary current), 측면 발산(lateral diffusion) 및 극고도(super elevation) 현상은 무시한다. GSTAR-1D모형에서 사용하는 많은 유사이송모듈과 개념은 실제현상을 간략화하여 근사치를 찾는 것으로 모형의 입력자료는 횡단측량자료, 하천의 길이, 경사, 하천 네트워크의 구성, 이동 하상의 정의, Manning의 조도계수, 상하류단에서의 방류량 및 수심 및 하상 구성물질의 크기 등이다. GSTAR-1D의 출력자료는 수심, 침식 및 퇴적에 의한 하상 횡단면의 높이, 하상 구성물질 크기의 변화, 유사 농도 및 유사 이동 그리고 하상바닥의 마찰경사 등이다.

먼저 1983년 하천정비기본계획(건설부, 1983)에서 조사한 중횡단 하도측량 자료, 하상재료의 구성 및 합천댐 지점에서 관측된 평균 일유량 자료를 적용하여 1983-2003년까지 20년간의 하상변동을 모의하고 2003년 하천정비기본계획(건설교통부, 2003)에서 관측한 값과의 비교를 통해

모형의 보정을 수행하였다. 모형에 의하여 모의된 최심하상고의 값은 2003년 관측된 값과 유사한 경향을 보여주었다. 이후에 모형을 이용하여 20년간(2003-2023)의 하상변화, 하상재료 크기의 변화 등을 모의 하였다. 최심하상고의 변화는 그림4에서 보여주는 바와 같이 2003년 이후



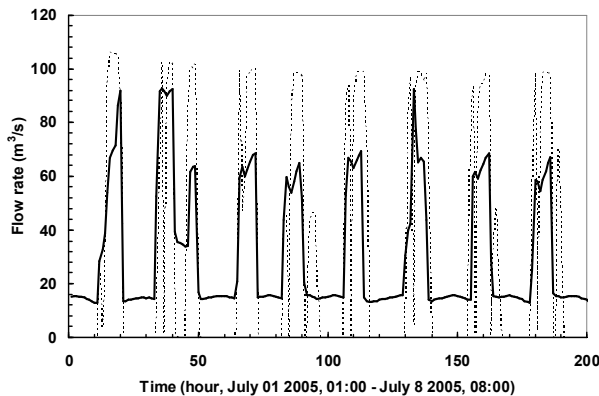
조정지대로부터 하류 12km구간 (낙동강 합류점 상류 45-33km 구간)에서 대부분이 일어났다.

최대 쇄굴 깊이는 1983년 이후 4m이었으며, 이러한 최심하상고의 변화는 2003년으로부터 10년 후인 2013년경에 대체적으로 안정된(stable) 상태에 도달하는 것으로 예측되었다. 또한, 예측된 평균하상재료의 크기는 낙동강과의 합류점으로부터 43-35km 구간에서 2003년에 1mm에서 2023년에 9mm로 증가하고 2023년 이후에는 별다른 변화가 없는 것으로 예측되었다.

그림 4. 관측 및 예측된 최심하상고 (1983-2023)

3.2 흐름의 펄스가 유사이송에 미치는 영향

합천 본댐은 홍수조절, 용수공급 및 하루 3시간의 침투발전을 위하여 건설되었다. 따라서, 이 3시간 이외의 20시간 이상 동안에는 본댐 하류로 물이 흐르지 않는다는 것을 의미한다. 이에 따라, 본 댐 하류에 침투발전에 의하여 3시간 동안만 흘러가는 물을 가두어 하루 24시간 동안 조절방류 할 수 있도록 조정지댐을 건설하였다. 조정지댐은 본댐에서 방류되는 물을 조정지댐 발전소와 수문을 통하여 하류로 방류 하고 있는데 이로 인해 하류에 물을 일정하게 보내고 있긴



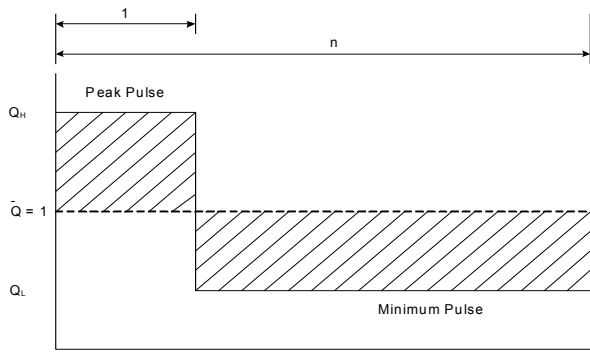
하나 홍수기에는 본 댐 발전소의 방류량 증가로 조정지댐 발전소의 방류만으로 충분히 조절할 수 없어 조정지댐의 수문을 주기적으로 개폐하여 저수지의 수위를 유지 한다. 이로인해 홍수기에 댐하류에 흐름에 의한 펄스를 발생시킨다. 그림5는 조정지댐 지점에서의 2005년 7월 1일부터 2005년 7월 8일까지 홍수기 동안의 전형적인 방류수문곡선을 보여주고 있다.

그림 5. 홍수기 전형적인 방류수문곡선(조정지댐, 2005. 7. 1-8)

이러한 흐름의 펄스가 하류의 토사이송에 미치는 영향을 파악하기 위하여 해석적인 방법을 개발하고 적용하였다. 먼저 유량-유사량 곡선식이 적용 가능하다는 가정에서 부터 시작한다. 다음 식(1)은 유사량 곡선식을 나타낸다.

$$Q_s = aQ^b \quad (1)$$

본 과업구간에서 $a = 9.77$ 이고 $b = 1.49$ 이며, Q 및 Q_s 의 단위는 m^3/s 이다.



$$V_s = \int_0^T Q_s dt \quad (2)$$

$$r = \frac{Q_H}{Q_L} \quad (3)$$

$$\bar{Q} = Q_L \frac{(r+n-1)}{n} \quad (4)$$

여기서 Q_s =유사량(sediment discharge), Q =방류량(discharge), V_s =유사이송체적(sediment volume), Q_H =피크 펄스흐름(peak pulse flow), Q_L = 최소 펄스흐름(minimum pulse flow), and \bar{Q} =평균 펄스흐름(average pulse flow).

그림 6. 흐름 펄스의 묘사

일정한(평균) 방류의 경우 유사이송체적은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{V}_s = a \bar{Q}^b T \quad (5)$$

여기서, T = 유사이송을 위한 시간의 주기(Period of time for the sediment load)

그림6에서 보여주는 것과 같이 펄스에 의한 유사이송체적은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_{s\ pulse} = \frac{a[(rQ_L)^b + (n-1)Q_L^b]T}{n} = \frac{a(r^b + n-1)Q_L^b T}{n} \quad (6)$$

여기서, $V_{s\ pulse}$ =흐름의 펄스에 의한 유사이송체적(sediment volume of flow pulse), \bar{V}_s =평균흐름에 의한 유사이송체적(sediment volume for average flow)

그러면 이 두 경우에 의한 유사이송체적의 비인 K_p 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_p = \frac{V_{s\ pulse}}{\bar{V}_s} = \frac{(r^b + n-1)^{b-1}}{(r+n-1)^b} \quad (7)$$

본 과업구간인 황강의 경우 앞에서 Yang(1973)의 유사량 공식으로 추정된 유사량 곡선식으로부터 $b=1.49$ 이었고 $n=3$ (펄스의 주기는 하루 8시간), 그리고 흐름펄스의 최대 및 최소유량은 그림5로부터 각각 $Q_H=64.4m^3/s$, $Q_L=14.4m^3/s$ 이었으며, 이로부터 계산한 $r = Q_H/Q_L=4.47$ 이었다. 식(7)로부터 계산된 값 $K_p \approx 1.20$ 는 흐름의 펄스에 의한 유사의 이송량이 평균 유량에 의한 경우보다 20% 더 크다는 것을 보여주는 것이다. 그림7은 b 와 n 의 함수로서 K_p 와 r 과의 관계를 보여주고 있다.

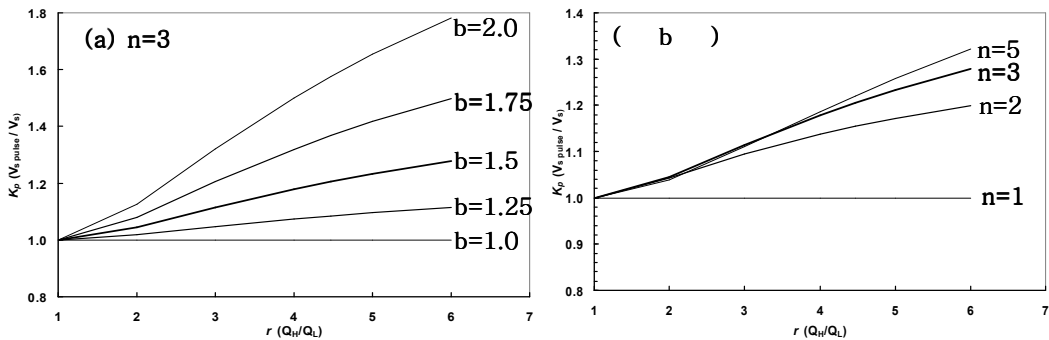


그림 7. K_p 와 r 과의 관계곡선: (a) $n=3$ 일 경우 b 값에 따른; (b) $b=1.5$ 일 경우 n 값에 따른

또한, 이러한 흐름의 펄스와 홍수피크 방류량에 의한 하류 하천에의 영향을 파악하기 위하여 일일펄스(daily pulse, Case1) 및 이의 평균값인 일일평균(daily average, Case2), 홍수피크(flood peak, Case3) 및 이의 평균값인 홍수평균(flood average, Case4)의 4가지 경우에 대하여 분석을 실시하였다. 본 분석을 위하여 미개척국(USBR, 2006)에서 개발한 1차원 유사이송모형인 GSTAR-1D를 적용하였다.

부정류 흐름에 의한 하류 하상의 변화를 알아보기 위하여 GSTAR-1D 모형에 합천조정지댐에서의 100시간의 방류량 수문곡선을 과업구간에 적용하였다. Shin(2007)은 GSTAR-1D모형에 본 과업구간에서 1983년 측량한 횡단면을 초기 하상단면자료로 적용하여 2004년에 측량한 하천횡단 측량자료와 비교를 통해 모형의 보정작업을 하였다. 모의는 4개의 Case에 대하여 수행되었으며 흐름의 조건은 표1 및 그림8에서 보여주는 것과 같다.

표 1. 부정류 유사이송 모의를 위한 Case

Case	Flood type	Period	Type of inflow hydrograph	Maximum discharge(m ³ /s)	Minimum discharge(m ³ /s)
1	Typical	7/2/2005 07:00 - 7/6/2005 10:00	Daily pulse	92.9	13.2
2			Daily average	33.0	33.0
3	Extreme	8/30/2002 01:00 - 9/3/2002 04:00	Flood peak	504.0	74.9
4			Flood average	275.1	275.1

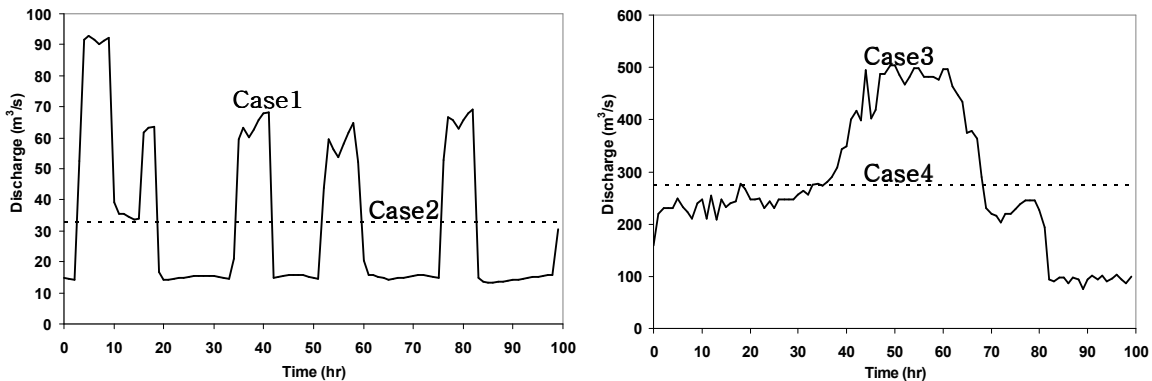


그림 8. 부정류 유사이송 모의를 위한 각 Case별 유입수문곡선

흐름의 펄스 및 홍수피크에 의하여 계산된 수심의 최대 및 최소유량의 차이는 Case1의 경우 0.62m이었고 Case3의 경우는 1.37m였다. 또한, 표2 및 그림9에서 보여주는 것과 같이 일일흐름의 펄스(Case1)에 의한 유사이송율(톤/일)은 이 흐름의 평균값(Case2)에 의한 유사이송량보다 21%가 컸다. GSTAR-1D모형으로 산정한 유사이송량의 증가량 21%는 해석적인 방법으로 계산한 20%와 비교하여 매우 유사한 결과를 보여주었다.

표 2. 각 Case별 유사이송량(톤/일)의 모의 결과

	유사이송율 (톤/일)			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
모의결과	1,594	1,316	11,876	10,331

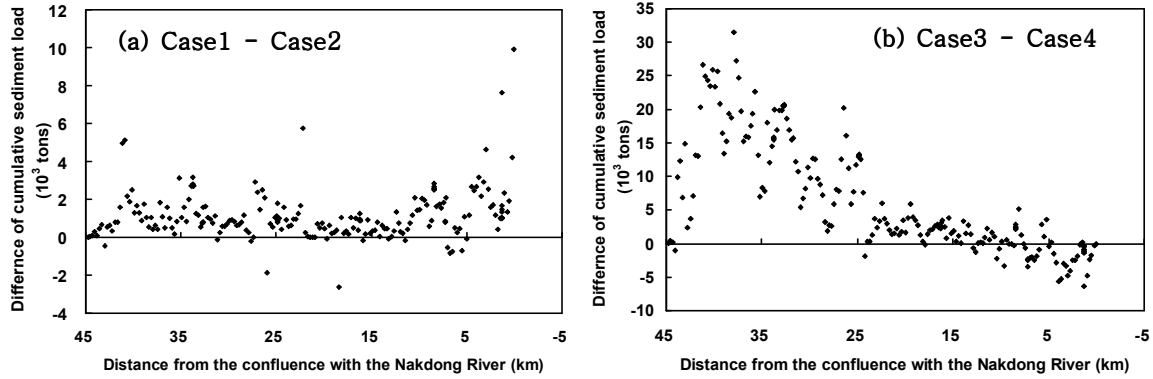


그림 9. 누가 유사이송량(10^3 톤)의 차이: (a) Case1-Case2;(b) Case3-Case4

4. 결론

황강의 합천조정지댐과 낙동강과의 합류점사이 45km 구간에 대하여 합천본댐과 조정지댐 건설로 인하여 수리지형(hydraulic geometry)에 미치는 영향을 알아보았다. 이러한 분석에는 방류량, 항공사진, 하천중획단 측량, 유사이동 및 하상재료 등의 조사자료를 이용하였다. 다음과 같은 주요 결론을 얻었다.

- (1) 댐준공후(1989-2005) 기간동안 방류량은 댐준공전의 19.3%로 감소하였다. 유사이송은 댐건설로 인하여 인공적으로 차단이 되었고 이로 인하여 조정지댐 하류 5km 구간의 하상재료는 모래에서 자갈 (2.16 mm \rightarrow 44 mm)로 변화하였다. 조정지댐 하류로부터 20km 구간의 하상 바닥은 평균 2.6m 쇄굴된 것으로 나타났으며, 하천폭 역시 상당히 감소한 것으로 나타났다.
- (2) 일반적인 홍수기에 조정지댐의 주기적인 수문방류에 의하여 발생하는 흐름의 펄스가 얼마만큼의 유사이송량 증가를 가져오는지 알아보기 위하여 해석적인 방법을 개발하여 식(7)에 보는 바와 같이 K_b 를 정의하여 계산해 보았다. 계산 결과, 일일 펄스(Case 1, daily pulse)에 의한 유사이송율(톤/일)이 이의 평균값에 의한 유사이송율보다 약 20% 크게 나타났다. 또한, 부정류 모의가 가능한 1차원 유사이송모형인 GSTAR-1D모형을 이용하여 해석적인 방법에서 적용했던 것과 같은 조건으로 모의를 한 결과 21%의 유사이송량의 증가가 예측되었는데 이는 해석적인 방법으로 계산한 값과 거의 유사한 결과를 보여주었다. 홍수피크(Case 3, flood peak) 조건의 경우에도 해석적인 방법을 이용하여 계산한 결과, 이의 평균값에 의한 유사이송율보다 15%이상의 증가량을 보여주었다.
- (3) GSTAR-1D 1차원 유사이송모형으로 2003년부터 20년간의 장기간의 하상변동을 모의한 결과 2003년 이후 약 10여년간 대부분의 하상변동이 이루어지고 2013-2015년 후에는 최심하상고의 변화가 크지 않은 것으로 예측되었다. 최대 쇄굴심은 1983년 이후 약 4m 이었으며 하도의 쇄굴은 조정지댐 하류로부터 약 20km 지점까지 발생할 것으로 예측되었다.

참 고 문 헌

- 한국수자원공사., 2002. 합천다목적댐 저수지 퇴사량조사 보고서.
- 건설교통부 (MOCT)., 2003. 황강하천정비기본계획 보고서.
- 건설부 (MOCT)., 1993. 황강하천정비기본계획 보고서.
- 건설부 (MOCT)., 1983. 황강하천정비기본계획 보고서.
- Ackers, P., White, W.R., 1973. Sediment transport: New approach and analysis. *Hydraulics Division*, ASCE, vol, 99, no. HY11, Proceeding paper 10167, 2041-2060.
- Chang, H.C., 1998. Fluvial-12 mathematical model for erodible channels, Users Manual.
- Choi, S.U., Yoon, B., Woo, H., Cho, K.,2004. Effect of flow regime changes due to damming on the river morphology and vegetation cover in the downstream river reach: a case of Hapcheon Dam on the Hwang River. *Korea Water Resources Association* 37(1) 55-66. (in Korean)
- Downs, P.W., Gregory, K.J.,2004. River Channel management: Towards Sustainable Catchment Hydrosystems. *Oxford University Press Inc.*, 395 p.
- Engelund, F., Hansen, E., 1972. A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Forlag, Copenhagen."
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), KOWACO (Korea Water Resources Development Corporation).,1971. Pre-investment Survey of the Nakdong River Basin, Korea: Volume 4-Sediment Transportation in Rivers of the Nakdong Basin.
- Ferguson, R.I.,1986. Hydraulics and hydraulic geometry. *Prog. Phys. Geogr.* 10, 1-31.
- Grant, G.E., Schmidt, J.C., Lewis, S.L.,2003. A Geological Framework for Interpreting Downstream Effects of Dams on Rivers. *Water Science and Application* 7.
- Hey, R.D., 1979. Dynamic process-response model of river channel development. *Earth Surface Processes and Landforms* 4, 59-72.
- Huang H.Q., Nanson G.C.,2000. Hydraulic geometry and maximum flow efficiency as products of the principle of least action. *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 1-16.
- Knighton, A.D., 1998. Fluvial Forms and Processes: A New Perspective. *Oxford University Press Inc., New York.* 383 p.
- Lamberti A., 1992.,Dynamic and variational approaches to the river regime relation. In *Entropy and Energy Dissipation in Water Resources*, Singh VP, Fiorentino M (eds). Kluwer: Dordrecht; pp.507-525.
- Langendoen, E.J., 2000., *CONCEPTS - Conservational Channel Evolution and Pollutant Transport System*, USDA-ARS National Sedimentation Laboratory, Research Report No. 16, December.
- Miller, T.K., 1991a., A model of stream channel adjustment: assessment of Rubey's hypothesis. *Journal of Geology* 99, 699-710.
- Miller, T.K.,1991b.,An assessment of the equable change principle in at-a-station hydraulic geometry. *Water Resources Research* 27, 2751-2758.
- Molinas, A., Yang, C.T., 1986. Computer Program User's manual for GSTARS (Generalized Stream Tube model for Alluvial River Simulation).U.S. Bureau of Reclamation, Technical

Service Center, Denver, Colorado.

- Page, K., Read, A., Frazier, P., Mount, N., 2005. The effect of altered flow regime on the frequency and duration of bankfull discharge: Murrumbidgee river, Australia. *River Research and Applications*, 21, 567–578.
- Shin, Y.H., 2007. Channel changes downstream of the Hapcheon Re-regulation Dam in South Korea. Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Simon, A., Thorne C.R., 1996. Channel adjustment of an unstable coarse-grained stream: opposing trends of boundary and critical shear stress, and the applicability to extremal hypotheses. *Earth Surface Processes and Landforms* 21, 155–180.
- Tetra Tech, Inc., 2001. EFDC1D, a one dimensional hydrodynamic and sediment transport model for river and stream networks, model theory and users guide. prepared for US Environmental Protection Agency, Office of Science and Technology, Washington, DC.
- U.S. Army Corps of Engineers., 1993. The Hydraulic Engineering Center, HEC-6 Scour and Deposition in Rivers and Reservoirs, User's Manual. Mar. 1977 (revised 1993).
- USBR., 2006. DRAFT User's Manual for GSTAR-1D 1.1.3. US Department of Interior Bureau of Reclamation Technical Service Center Sedimentation and River Hydraulic Group.
- Van Rijn, L. C., 1984. Sediment transport, Part I: Bed load transport. *Hydraulic Engineering ASCE*, 110(10), 1431–1456.
- Williams, G.P., Wolman, M.G., 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers. *US Geological Survey, Professional Paper*, 1286, Washington DC.
- Woo, H., Choi, S.U., Yoon, B., 2004. Downstream effect of dam on river morphology and sandbar vegetation. *Proceedings of the Symposium of the 72nd Annual ICOLD meeting*, Seoul, Korea.
- Wu, W., Vieira, D.A., 2002. One-Dimensional Channel Network Model CCHE1D Version 3.0 –Technical Manual. *Technical Report No. NCCHE-TR-2002-1*, National Center for Computational Hydroscience and Engineering, The University of Mississippi.
- Yang, C.T., 1973. Incipient motion and Sediment transport. *Hydraulics Division*, ASCE, vol. 99, no. HY10, Proceeding Paper 10067, 1679–1704.
- Yang, C.T., 1979. Unit stream power equation for gravel. *Hydraulics Division*, vol. 40, 123–138.
- Yang, C.T., 1992. Force, energy, entropy, and energy dissipation rate. In *Entropy and Energy Dissipation in Water Resources*, Singh VP, Fiorentino M (eds). Kluwer: Dordrecht, 63–89.
- Yang, C.T., Simões, F.J.M., 2000. *User's manual for GSTARs 2.1 (Generalized Stream Tube model for Alluvial River Simulation version 2.1)*. U.S. Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado.
- Yang, C.T., Simões, F.J.M., 2002. *User's manual for GSTAR3 (Generalized Stream Tube model for Alluvial River Simulation version 3.0)*. U.S. Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado.