

합천댐 하류 하천지형 변화 예측 및 흐름파가 수리기하 변화에 미치는 영향

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

신 영 호* / Pierre Y. Julien**

Shin, Youngho / Julien, Pierre Y.

Abstract

Hwang River in South Korea, has experienced channel adjustments due to dam construction. Hapcheon main dam and re-regulation dam. The reach below the re-regulation dam (45 km long) changed in flow regime, channel width, bed material distribution, vegetation expansion, and island formation after dam construction. The re-regulation dam dramatically reduced annual peak flow from 654.7 m³/s to 126.3 m³/s and trapped the annual 591 thousand m³ of sediment load formerly delivered from the upper watershed since the completion of the dam in 1989. An analysis of a time series of aerial photographs taken in 1982, 1993, and 2004 showed that non-vegetated active channel width narrowed an average of 152 m (47% of 1982) and non-vegetated active channel area decreased an average of 6.6 km² (44% of 1982) between 1982 and 2004, with most narrowing and decreasing occurring after dam construction. The effects of daily pulses of water from peak hydropower generation and sudden sluice gate operations are investigated downstream of Hapcheon Dam in South Korea. The study reach is 45 km long from the Hapcheon re-regulation Dam to the confluence with the Nakdong River. An analysis of a time series of aerial photographs taken in 1982, 1993, and 2004 showed that the non-vegetated active channel width narrowed an average of 152 m (47 % reduction since 1982). The non-vegetated active channel area also decreased an average of 6.6 km² (44 % reduction since 1982) between 1982 and 2004, with most changes occurring after dam construction. The average median bed material size increased from 1.07 mm in 1983 to 5.72 mm in 2003, and the bed slope of the reach decreased from 0.000943 in 1983 to 0.000847 in 2003. The riverbed vertical degradation is approximately 2.6 m for a distance of 20 km below the re-regulation dam. It is expected from the result of the unsteady sediment transport numerical model (GSTAR-1D) steady simulations that the thalweg elevation will reach a stable condition around 2020. The model also confirms the theoretical prediction that sediment transport rates from daily pulses and flood peaks are 21 % and 15 % higher than their respective averages.

keywords: alluvial river, hydraulic geometry; dam; re-regulation dam; flow pulse; Hwang River

* 교신저자, 한국수자원공사 조사기획처 차장, 공학박사

Corresponding Author, Manager, Dept. of Water Resources Investigation and Planning, K-water, Daejeon 306-711, Korea
(e-mail: yhshin@kwater.or.kr)

** 미국 콜로라도주립대 토목환경공학과 교수

Professor, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Colorado State Univ., CO 80521, USA

요 지

황강은 1989년 합천 본댐 및 조정지댐의 건설후 하도폭, 하상재료, 식생 및 하천구간내 사주의 형성 등 많은 하천 지형학적 변화가 있었다. 이러한 변화는 댐 건설후 흐름 및 유사이송의 변화에 기인한다. 합천댐은 약 591천 m³/년의 유사를 차단한 것으로 파악되었다. 조정지댐 준공후 연최대피크 방류량은 654.7 m³/s에서 126.3 m³/s로 감소되었다 (댐건설전의 19.3%). 합천조정지댐 하류로부터 낙동강 합류점까지 45 km 구간의 1982, 1993 및 2004년의 항공사진을 분석한 결과 비식생하도폭(non-vegetated active channel width)은 평균 152m 감소되었다 (1982년의 약 47%). 비식생하도의 면적 역시 평균 6.6 km²(1982년의 44%)가 감소하였다. 평균 중앙입경(D50)의 크기는 1983년 및 2003년에 1.07mm에서 5.72 mm로 평균 하상구배는 0.000943에서 0.000847로 각각 변하였다. 하상 세굴깊이는 조정지댐으로 부터 하류 20 km 구간에서 평균 약 2.6 m였다. 1차원 유사모형인 GSTAR-1D를 이용하여 장기하상변동을 예측하였는데 최심하상고는 2013-2015년 사이에 안정된 상태에 도달하는 것으로 나타났다. 합천 조정지댐에 의해 홍수기에 발생하는 흐름파가 하류 하천 지형변화에 미치는 영향을 파악하기 위해 해석적인 방법을 개발하고 유사모의모형으로 예측한 값과 비교·검토한 결과, 일주기파(daily pulse)와 홍수피크(flood peak)는 각각의 평균값이 흐름 때와 비교하여 하천지형변화에 훨씬 큰 영향을 미치는 것으로 나타났는데 이는 각각의 평균일 경우 보다 21%와 15%의 유사이송량의 증가를 보여주었다.

핵심용어 : 총적하천, 수리기하; 댐; 조정지댐; 흐름파; 황강

1. 서 론

댐의 건설은 하류 하천의 하상표고, 하도폭, 수심, 하상재료의 크기, 장강화 및 제방의 식생 등의 변화로 인해 하류 하천의 수리기하(downstream hydraulic geometry)의 변화에 큰 영향을 미친다. 이러한 변화는 댐이 상류에서 들어오는 유사를 차단, 하류에 맑은 물만을 방류함으로써 하도의 변화를 가져온다(Downs and Gregory, 2004). 댐건설이 미치는 주요한 영향중의 하나는 홍수피크의 감소를 들 수 있는데 Williams and Wolman (1984)은 미국의 중부와 남서부의 21개 저수지를 조사하여 댐건설후 90% 정도의 홍수피크가 감소하였음을 보여주었다. 최근에 Page *et al.* (2005)은 호주의 Murrumbidgee강의 강턱유량(bankfull discharge)빈도와 지속기간이 변화되었음을 보여준바 있는데 홍수피크의 경우 1.25와 2년 빈도유량이 댐준공후 29%와 50%가 각각 감소되었음을 보여주었다.

우리나라는 대규모 다목적댐을 건설한지 20여년이 지난 상황에서 이러한 댐 하류에서의 하천지형 변화를 모니터링 하는 것이 하천관리 측면에서 중요하다고 생각된다. 1989년에 합천댐이 건설된 황강하류 45 km (합천조정지댐-낙동강 합류점) 구간도 중대한 하천지형의 변화를 보여주고 있다. 본 연구구간에 대하여 그 동안 몇몇 조사와 연구들이 수행된바 있는데 합천댐 건설전후에 세 번에 걸쳐 황강하천정비기본계획(건설교통부, 1983, 1993, 2003)이 수립되었다. 이 계획에서는 기상, 토지이용, 하천지형 및 하상재료의 변화 등을 포함하고

있다. 이 외에, 합천댐 하류의 물흐름의 변화로 인한 하천지형 및 식생의 변화를 조사한바 있다(Choi *et al.*, 2004a and b; Woo *et al.*, 2004).

합천댐은 본댐과 조정지댐으로 구성되어 있는데 평상시와 일반적인 홍수시 본댐발전소에서 3시간 침두발전을 통하여 하류에 물을 흘려보내면 조정지댐에서는 이를 24시간 조절하여 방류하고 있다. 그러나 조정지댐에서도 일반적인 홍수시 홍수조절을 위하여 본댐 발전소의 방류시간을 3시간 이상으로 늘리게 되면 조정지댐 저수지 용량의 한계로 조정지댐 발전소의 발전방류만으로는 필요수량을 방류할 수 없는 상황이 발생한다. 이 경우 조정지댐의 수문을 주기적으로 개폐하여 방류량을 조절하는데 이로 인하여 하류에 상당히 큰 흐름파(flow pulse)가 발생된다. 이는 하류하천의 하도변화를 가속화시키는 역할을 할 것으로 보여지며 이에 대한 효과 분석이 필요하다. 또한, 수리기하(hydraulic geometry)의 장래 변화와 어느 지점에서 새로운 평형 및 안정 상태에 도달할 것인지를 예측하는 것이 중요하다. 따라서, 본 연구의 목적은 댐 건설에 의하여 조절되는 하천에서 물 흐름과 유사이송의 변화로 인하여 하천에 발생하는 각종 변화에 대한 이해, 장기 하상변동 예측을 통한 평형상태 평가 및 흐름파가 합천댐 하류하천에 발생하는 수리지형학적 변화에 미치는 영향을 파악하는 것이다.

2. 대상유역 및 자료

합천댐이 위치한 황강은 유로연장이 107.6 km 이며 유역면적은 1,329 km² 이다. 파악구간은 합천조정지댐

부터 낙동강 본류 합류점까지 45 km 구간으로 유역면적은 372.4 km² 이다. 합천댐의 저수용량은 790×10⁶ m³이며, 본댐 발전소에서 하루 3시간 첨두 발전을 통해 방류되는 물을 하류로 조절 방류하기 위하여 본댐 하류 6.5 km 지점에 조정지댐을 건설하였다. 본댐 발전소는 조정지댐으로부터 상류 2 km 지점에 위치하고 있으며, 평상시 하루 3시간 첨두 발전을 통해 최대 119 m³/s를 방류한다. 조정지댐 발전소에서는 이를 일일 15 m³/s로 하류에 조절 방류하고 있다. 대부분의 분석에 필요한 자료는 1983년 이후에 관측된 자료로서 하천정비기본계획의 일환으로 건설교통부에서 수행한 자료를 활용하였다. 대상 구간은 1983년 이후 매 10년마다(1983, 1993, 2003) 조사가 이루어 졌는데 하천 중횡단측량, 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 수집, 수치화하여 이용하였다. 과업구간은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 분석의 효율성을 기하기 위하여 3개의 소구간으로 구분하였다.

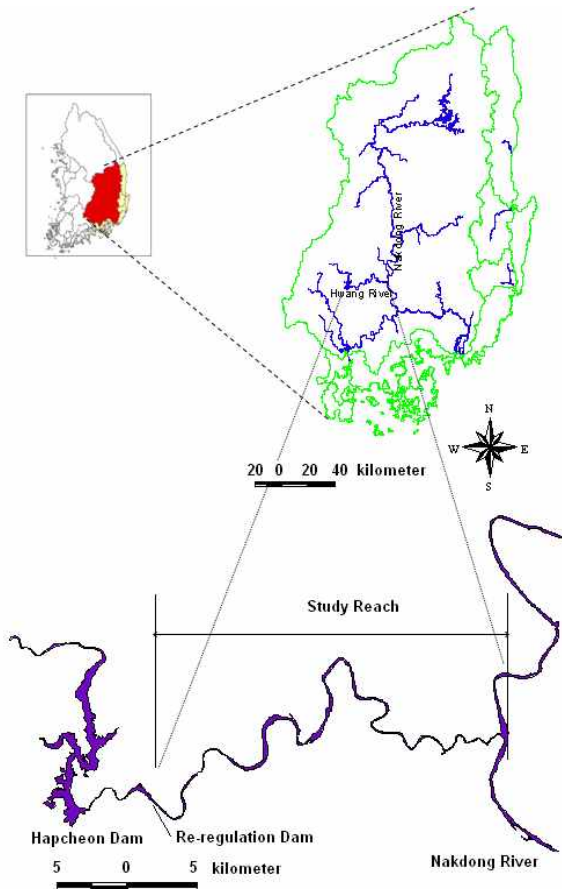


Fig. 1. Nakdong River Basin and the Study Reach in Hwang River

3. 댐건설에 따른 변화

3.1 유량의 변화

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 연 최고유량이 합천댐과 조정지댐 건설 후에 감소하는 것으로 나타났으며 이러한 흐름 양상의 변화는 다음과 같은 영향을 미쳤다. (1) 댐건설로 인하여 연평균최고유량(mean annual peak discharge)이 654.7 m³/sec에서 126.3 m³/sec로 감소하였다. 이는 댐건설후의 기간(1989-2005)동안 연평균최고유량이 댐건설전 기간(1969-1981) 동안의 유량의 16%에 불과한 것이다. (2) 강턱유량(bankfull discharge, 1.58년 빈도유량)은 댐건설후의 유량이 댐건설 전의 17%에 불과 하였다. Fig. 2의 합천댐지점 댐건설전후 유황곡선(flow duration curve)에 의하면 댐건설후 고유량 부분은 감소한 반면 저유량 부분은 증가한 것을 알 수 있다.

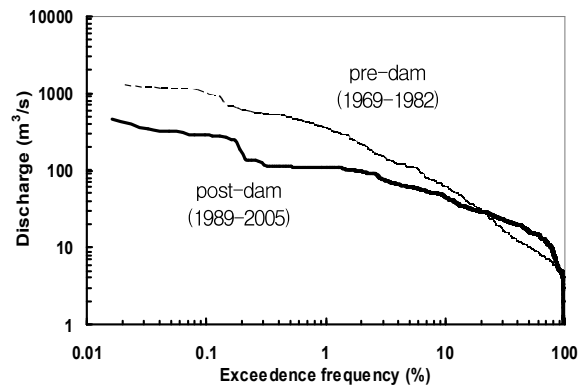


Fig 2. Flow Duration Curves at the Hapcheon Re-regulation Dam Site from 1969 to 2005

3.2 하도의 변화

항공사진은 Fig. 3에서 보는바와 같이 1982, 1993 및 2004년에 촬영한 자료가 있으며, 건설교통부산하 국립지리원으로 부터 구하였다. 이러한 사진촬영자료는 하

도폭 및 사주의 면적 등을 파악하는데 활용하였다. 항공사진은 수치표고모형(DEM)으로 부터 ERDAS IMAGINE 소프트웨어를 이용하여 위치, 길이 면적 등을 얻기 위해 X, Y 좌표를 결정할 수 있도록 수치화하였다. 이러한 과정을 거쳐 물이 흐르는 하천면적, 중횡단 측량선, 식생이 분포하는 지역의 면적 및 사주의 면적 등을 중첩하고 계산하기 위하여 ArcView3.2 소프트웨어를 이용하였다. 본 과업구간에서 활용 가능한 하천 중횡단 측량자료는 1983, 1993년 및 2003년 자료이며, 국가수자원정보시스템에서 구하였다. 1983년 자료는 500m 간격으로 100여개의 단면이 있고, 2003년 자료는 250m 간격으로 210여개의 단면으로 구성되어 있다. 항공사진으로부터 구해진 비식생 하도폭은 1982년 이래로 모든 구간에서 감소한 것으로 나타났다(Table 1). 과업 구간중 3번 소구간이 가장 변화가 큰 구간으로 나타났으며 2번 소구간이 가장 하도폭이 넓은 구간으로 나타

났다. 전구간에 대한 평균하도폭은 1982년 321 m에서 2004년 172 m로 감소하였다(1982년의 약 54%). 감소속도는 1993-2004년 기간이 1982-1993년 기간보다 더 빠르게 감소하는 경향을 보여주었다. 하도폭대 수심의 비(width/depth) 역시 3번 소구간을 제외하고 감소하는 경향을 보였는데 평균 1982년 279에서 2004년 258로 감소되었다(Table 2). 현지조사와 항공사진자료에 따르면 하도의 세굴과 하도폭의 감소가 대부분의 하천단면에서 나타나고 있다. 낙동강과의 합류점으로부터 45-40 km (조정지점으로 부터 하류 5 km) 구간에서 가장 세굴이 활발히 발생하였고 하도가 분할되고 사주가 발달하였으며 사주에 식생이 분포하고 있는 것을 볼 수 있었다. 중간구간(38 km-15 km 구간)에서는 비록 세굴과 하도폭의 감소가 나타나고 있기는 하지만 상대적으로 안정된 구간으로 보여졌다. 반면, 낙동강과의 합류점 부근에서는 댐건설후에 사주의 형성 및 식생의 발달을 볼 수

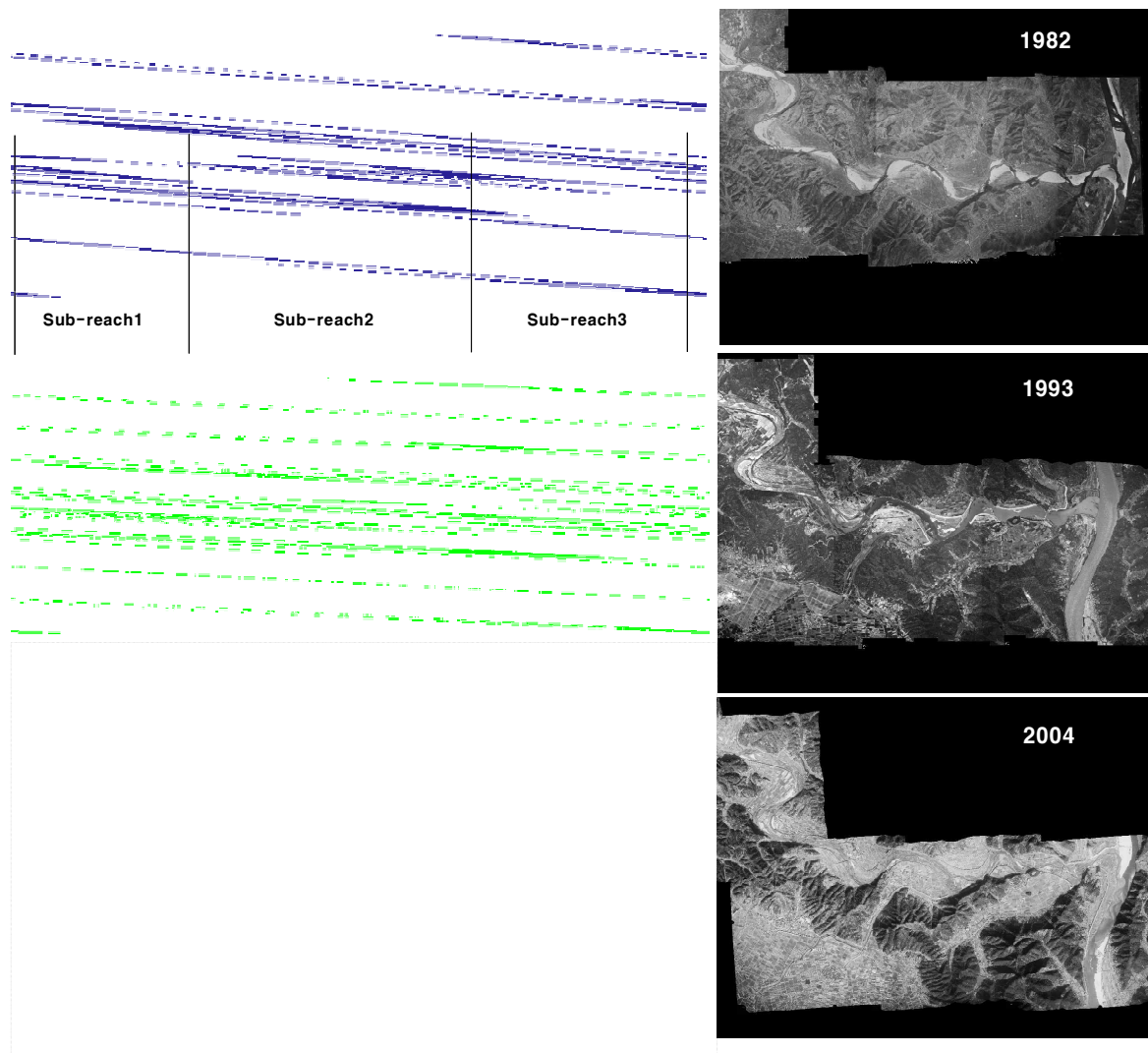


Fig. 3. Aerial Photos of the Study Reach 3 and Non-vegetated Active Channel Planform Maps from Aerial Photos Taken in 1982, 1993 and 2004

있었다. 지난 20년간 총 비식생하도의 면적은 감소하였고 하도폭도 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있는데 2004년의 비식생하도의 면적이 1982년의 56%에 불과한 것으로 나타났다(Table 3). 이와 반대로 식생 및 사주의 면적은 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다(Table 4 and 5). 소구간1에서의 하상 경사는 댐건설 후에 어느 정도 증가한 반면 다른 구간에서는 감소하였

다. 전구간에서의 하상경사는 1983년 0.000943에서 2003년 0.000847로 감소하였다. 댐건설후 기간동안 45-30 Km (합천조정지댐 하류 0-15 km) 구간에서 가장 큰 하상 세굴을 보여주고 있는데 평균 2.6m의 하상이 세굴되었다. 이러한 변화는 Choi *et al.*(2004a and b) 및 Woo *et al.*(2004)의 연구 결과와 유사한 결과를 보여주고 있다.

Table 1. Measured Non-vegetated Active Channel Width (m) by Digitized Aerial Photos

Reach	1982	1993	2004
Sub-reach 1	364.1	297.9 (82 %)	190.1 (52 %)
Sub-reach 2	365.5	285.7 (78 %)	210.8 (58 %)
Sub-reach 3	232.7	193.3 (83 %)	109.3 (47 %)
Entire	321.4	258.2 (80 %)	172.3 (54 %)

* () = % of 1982

Table 2. Width/Depth Ratio for the Each Sub-reach in 1983 and 2003

Reach	Width/depth ratio	
	1983	2003
Sub-reach 1	370.47	248.77
Sub-reach 2	353.46	328.87
Sub-reach 3	113.75	170.36
Entire	278.78	258.13

* The bankfull discharges of the pre and post-dam periods were applied for non-uniform flow simulation along the study reach. Applied bankfull discharges (1.58 yr discharge frequency) were 509.8 and 86.3 m³/s at the Hapcheon Re-regulation Dam for the pre-dam period and post-dam period respectively.

Table 3. Variation of the Active Channel Areas (km²) by Digitized Aerial Photos

Reach	1982	1993	2004
Sub-reach 1	3.92	3.13 (80 % of 1982)	1.95 (50 % of 1982)
Sub-reach 2	6.90	5.42 (79 % of 1982)	3.88 (56 % of 1982)
Sub-reach 3	4.11	3.42 (83 % of 1982)	2.51 (61 % of 1982)
Entire	14.93	11.97 (80 % of 1982)	8.34 (56 % of 1982)

Table 4. Variation of Island Area (km²) for Each Sub Reach from the Aerial Photos

Reach	1982	1993	2004
Sub-reach 1	-	0.32	0.73
Sub-reach 2	-	0.26	0.50
Sub-reach 3	-	0.22	0.25
Entire	-	0.80	1.48

Table 5. Variation of the Vegetated Area (km²) for Each Sub Reach by Digitized Aerial Photos

Reach	1982	1993	2004
Sub-reach 1	-	0.38	1.27
Sub-reach 2	-	0.40	2.09
Sub-reach 3	-	1.06	1.66
Entire	-	1.84	5.02

3.3 퇴사량 및 하상재료의 변화

하상재료 샘플링은 횡단면 측량이 이루어진 1983, 1993, 2003년에 이루어 졌다. 댐건설후에 하상재료의 크기가 변하였는데 하류 구간보다 조정지댐 직하류인 소 구간 1에서 하상재료의 크기가 증가하였다. 평균 중앙 입경(D50)은 1983년에 1.07 mm에서 2003년에 5.72 mm로 증가하였다. 조정지댐 직하류 (45-44 km)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 477천톤/년 이었다. 이후 본 과업구간에서 유사량 측정은 이루어 지지 않았고 합천댐 저수지 퇴사량 조사가 한국수자원공사 (2002)에 의하여 이루어 졌는데 14년간 (1989-2002) 8,279천 m³의(591 천 m³/년) 유사가 퇴적된 것으로 관측되었다. 이 값을 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 추정된 유사량을 비교하여 낙동강 합류점에서의 총유사량을 결정하였는데 가장 유사한 결과를 보여준 것은 Yang(1973)의 공식으로서 추정된 총유사량은 440천톤/년 이었다. 또한, 이를 통하여 추정된 유량-유사량 관계식은 $Q_s = 9.77Q^{1.49}$ 이었다.

4. 장단기 하도변화 예측

4.1 장기하상변화 예측

장래의 하도변화를 예측하기 위한 많은 수학적 모형이 개발되었는데 HEC-6 (U.S. Army Corps of Engineers, 1993), FLUVIAL-12 (Chang, 1998), CCHEID (Wu and Vieira, 2002), GSTARS (Yang and Simões, 2002), 및 GSTAR-1D (USBR, 2006) 등을 들 수 있다. 대부분의 모형은 유사한 모의 기능을 갖고 있으며 몇몇 모형은 완전동력학모의 기능을 갖고 있다. 이 중 GSTAR-1D모형도 이러한 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. 이 모형은 단일하도 뿐만아니라 수지상 하도 및 망상형 하

도에도 적용 가능하다. 또한, 정상 및 부정류에 대한 흐름해석이 가능하며, 정상점변류의 해석을 위한 에너지 방정식의 계산을 위해 표준축차계산법을 이용하며 부정급변류의 해석을 위하여는 St. Venant 방정식을 이용한다. 유사이송을 모의하기 위하여 GSTAR-1D모형은 두가지의 방법을 사용한다. 장기간의 모의를 위하여는 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. 또한, GSTAR-1D는 1차원 모형으로서 세부적인 모의가 필요한 2차원 및 3차원의 수리학적 상황에는 적용할 수가 없다(Huang and Greimann, 2006). 또한, 이차류 흐름(secondary current), 측면 발산(lateral diffusion) 등의 현상은 무시한다. GSTAR-1D모형은 여러 연구자들에 의하여 적용성이 검토된바 있는데 Huang and Griemann(2006)은 GSTAR-1D의 적용성을 검토하기 위하여 미국 New Mexico 주에 위치한 Rio Grande강의 Cochiti Dam부터 Isleta Diversion Dam 까지 약 100 km 구간에 1972~1992, 1992~2002년 기간 동안 적용하였다. 모의에 의하여 계산된 하상변동 및 총 유사변동량을 실제 관측된 자료와 비교하여 유사한 결과를 얻어 실제 상황에 적용성이 있음을 입증하였다. 또한 Griemann *et al.*(2006)은 댐제거(dam removal)에 따른 저수지 퇴적토의 침식과정을 수리모형실험을 통하여 얻은 자료와 수치모형으로 모의한 결과를 비교하여 적용성을 검증하였다.

GSTAR-1D모형의 입력자료는 횡단측량자료, 하천의 길이, 경사, 하천 네트워크의 구성, 이동 하상의 정의, Manning의 조도계수, 상하류단에서의 방류량, 수심 및 하상 구성물질의 크기 등이다. 출력자료는 수심, 침식 및 퇴적에 의한 하상 횡단면의 높이, 하상 구성물질 크기의 변화, 유사 농도 및 유사 이동 그리고 하상바닥의 마찰경사 등이다. 먼저, 하천정비기본계획(건설부, 1983)에서 조사한 종횡단 하도측량 자료, 하상재료의 구성 및 합천댐 지점에서 관측된 평균 일유량 자료를 적용하여 1983-2003년까지 20년간의 하상변동을 모의하고 하천정비기본계획(건설교통부, 2003)에서 관측한 값과의 비교를 통해 모형의 보정을 수행하였다(Fig. 4). 모의된 최심하상고는 2003년 관측된 값과 유사한 경향을 보여 주었다. 이후, 20년간(2003-2023)의 모의결과를 보면 최심하상고의 변화는 Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 2003년 이후 조정지댐으로부터 하류 12 km구간에서 대부분 발생하였다. 최대 세굴 깊이는 1983년 이후 4 m이

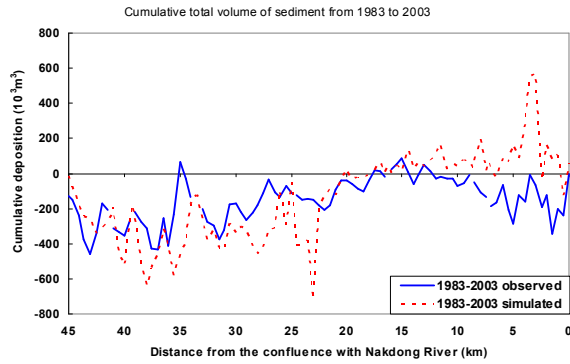


Fig 4. Measured and Predicted Cumulative Total Volume of Sediment from 1983 to 2003

었으며, 이러한 변화는 2003년으로부터 10년 후인 2013년경에 대체적으로 안정된 상태에 도달하는 것으로 예측되었다. 또한, 평균입경은 낙동강 합류점으로부터 43-35 km 구간에서 2003년에 1 mm에서 2023년에 9 mm로 증가하고 2023년 이후에는 별다른 변화가 없는 것으로 예측되었다.

4.2 흐름파가 유사이송에 미치는 영향

합천 본댐은 홍수조절, 용수공급 및 하루 3시간의 침투발전을 위하여 건설되었다. 따라서, 이 3시간 이외의 시간 동안에는 본댐 하류로 물이 흐르지 않는다는 것을 의미한다. 이에 따라, 본 댐 하류에 24시간 동안 조절방류 할 수 있도록 조정지댐을 건설하였다. 조정지댐은 본댐에서 방류되는 물을 조정지댐 발전소와 수문을 통하여 하류로 방류 하고 있으며 이로 인해 하류에 물을 일정하게 보내고 있으나 홍수기에는 조정지댐 발전소의 방류만으로 충분히 조절할 수 없어 조정지댐의 수문을 주기적으로 개폐하여 조정지 저수지의 수위를 적정하게 유지 한다. 이로 인해 홍수기 댐하류에는 흐름파(pulse)가 발생한다. Fig. 6은 합천 본댐과 조정지댐 지점에서의 홍수기(2005.7.1-2005.7.10) 전형적인 방류수문곡선을 보여주고 있다. 이러한 흐름파가 하류의 유사이송에 미치는 영향을 파악하기 위하여 해석적인 방법을 개발하고 적용하였다. 먼저 유량-유사량 곡선식이 적용 가능하다는 가정으로부터 다음 Eq. (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.

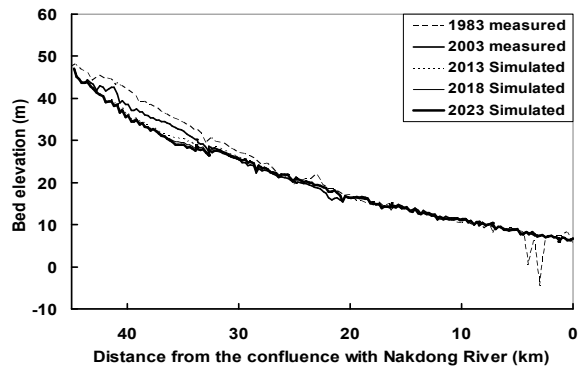


Fig. 5. Measured (1983 and 2003) and Predicted Thalweg Elevation Changes from 2003 to 2023

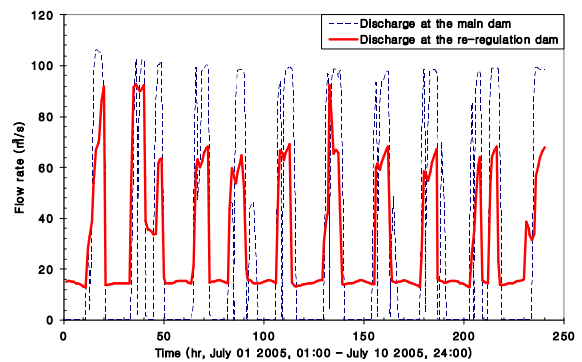


Fig. 6. Typical Discharge Hydrograph at the Hapcheon Main Dam and Re-regulation Dam during Flood Season from July 1, 2005 to July 10, 2005

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

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

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

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

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)

Fig. 7에서 보여주는 것과 같이 흐름파에 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, $V_{s\ pulse}$ = 흐름파에 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.

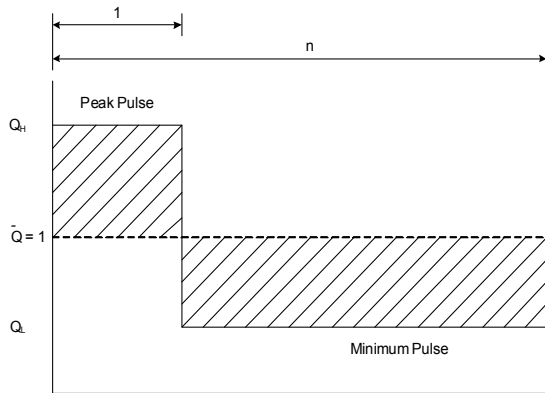
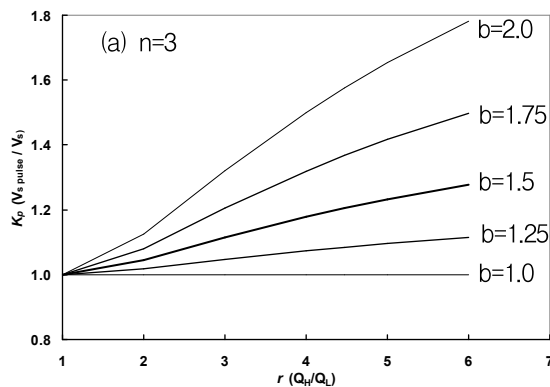


Fig. 7. Diagram of Flow Pulse



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

본 과업구간인 황강의 경우 앞에서 Yang(1973)의 유사량 공식으로 추정된 유사량 곡선식으로 부터 $b=1.49$ 이었고 $n=3$ (파의 주기는 하루 8시간), 그리고 흐름파의 최대 및 최소유량은 Fig. 5로부터 각각 $Q_H = 644 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_L = 14.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 이었으며, 이로부터 계산한 $r = Q_H/Q_L = 4.47$ 이었다. Eq. (7)로부터 계산된 값 $K_p \approx 1.20$ 는 흐름파에 의한 유사의 이송량이 평균 유량에 의한 경우보다 20% 더 크다는 것을 의미한다. Fig. 8은 b 와 n 의 함수로서 K_p 와 r 와의 변화관계를 보여주고 있다.

또한, 이러한 흐름파가 하류 하천에 미치는 영향을 파악하기 위하여 일주기파(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. 부정류 흐름에 의한 하류 하상의 변화를 알아보기 위하여 GSTAR-1D 모형에 합천조정지댐에서의 100 시간 동안의 방류 수문곡선을 과업구간에 적용하였다. Shin(2007)은 GSTAR-1D모형에 본 과업구간에서 1983년 측량한 횡단면을 초기 하상단면자료로 적용하여 2004년에 측량한 하천횡단 측량자료와 비교를 통해 모형의 보정작업을 수행한바 있다. 모의는 4개의 Case에 대하여 수행되었으며 흐름의 조건은 Table 6 및 Fig. 9에서 보여주는 것과 같다. 흐름파 및 홍수피크에

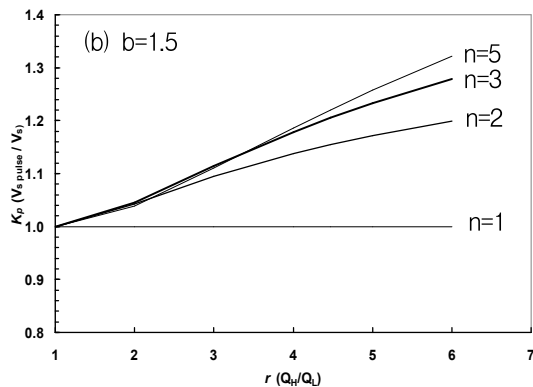


Fig. 8. Variation of K_p for (a) Different Values of b at $n=3$; and (b) Different n Values at $b=1.5$

Table 6. Cases of Unsteady Simulations by using the GSTAR-1D

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

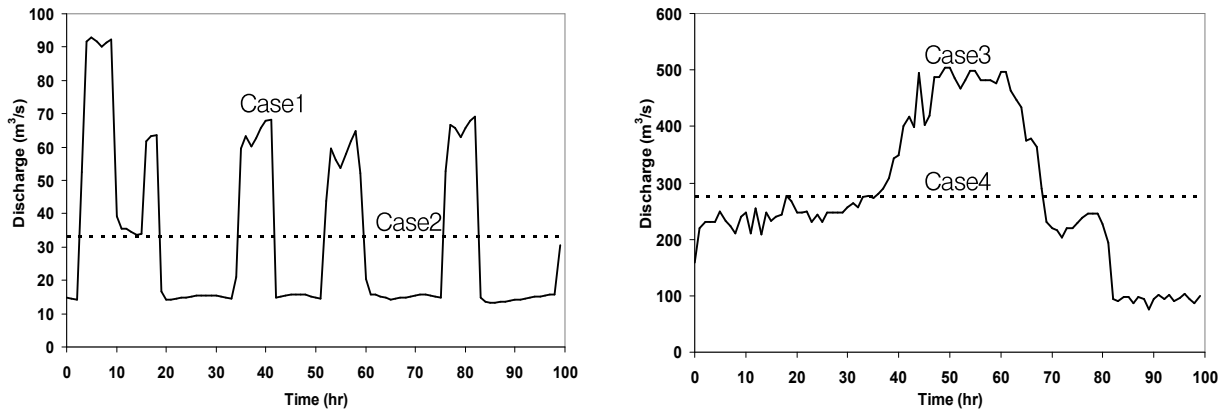


Fig. 9. Input Hourly Discharge Hydrographs for Four Unsteady Simulations

Table 7. Simulated and Measured Sediment Transport Rate (tons/day) for the Four Cases

	Sediment transport rate (tons/day)			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Simulated	1,594 (121 % of Case 2)	1,316	11,876 (115 % of Case 4)	10,331

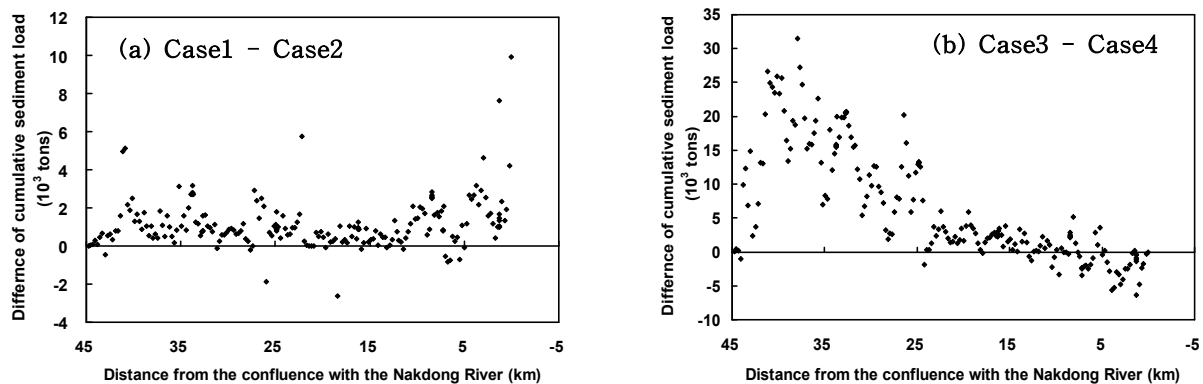


Fig. 10. Difference of the Cumulative Sediment Load (tons) of the Case 1 Minus Case 2 (a) and Case 3 Minus Case 4 (b)

의하여 계산된 수심의 최대 및 최소유량의 차이는 Case1의 경우 0.62 m이었고 Case3의 경우는 1.37 m였다. 또한, Table 7 및 Fig. 10에서 보여주는 것과 같이 일주기파(Case1)에 의한 유사이송율(톤/일)은 이 흐름의 평균값(Case2)에 의한 유사이송량보다 21%가 컸다. GSTAR-1D모델로 산정한 유사이송량의 증가량 21%는 해석적인 방법으로 계산한 20%와 비교하여 매우 유사한 결과를 보여주었다.

5. 댐에 의한 지형학적 변화에 대한 framework

댐에 의한 하류하천의 변화 양상을 단계별로 나타내기 위하여 상기에서 언급된 합천 조정지댐 하류 하천의 변화현상을 적용하여 변화 체계를 구성하여 보았다. 여

러 연구에서도 언급된 것과 같이 댐에 의한 영향은 유량과 유사(water and sediment)라는 두 가지의 주요한 요인에 의하여 이루어진다(Xu, 1990; Schumm, 1969; Petts and Gurnell, 2005). 본 연구 구간 역시, 댐 하류 하천의 변화는 합천 조정지댐의 운영에 의하여 발생하는 흐름파의 영향을 포함하여 유량과 유사량의 감소가 가장 중요한 요인 이었다. 이러한 입력 조건의 변화로 인하여 특히 조정지댐 직하류에서 하상의 세굴과 하상 재료의 조립화 또는 장갑화를 가져왔으며, 하상 경사의 감소, 만곡도(sinuosity)의 감소 및 하도폭대 수심의 비(Width/depth)의 감소를 가져왔다. 이 후, 비식생하도폭 및 면적이 감소하였고 반대로 사주 및 식생의 면적은 증가하였다. 이러한 과정은 최종적으로 하상경사, 하상 재료의 크기 및 비식생하도폭의 변화가 안정화되는

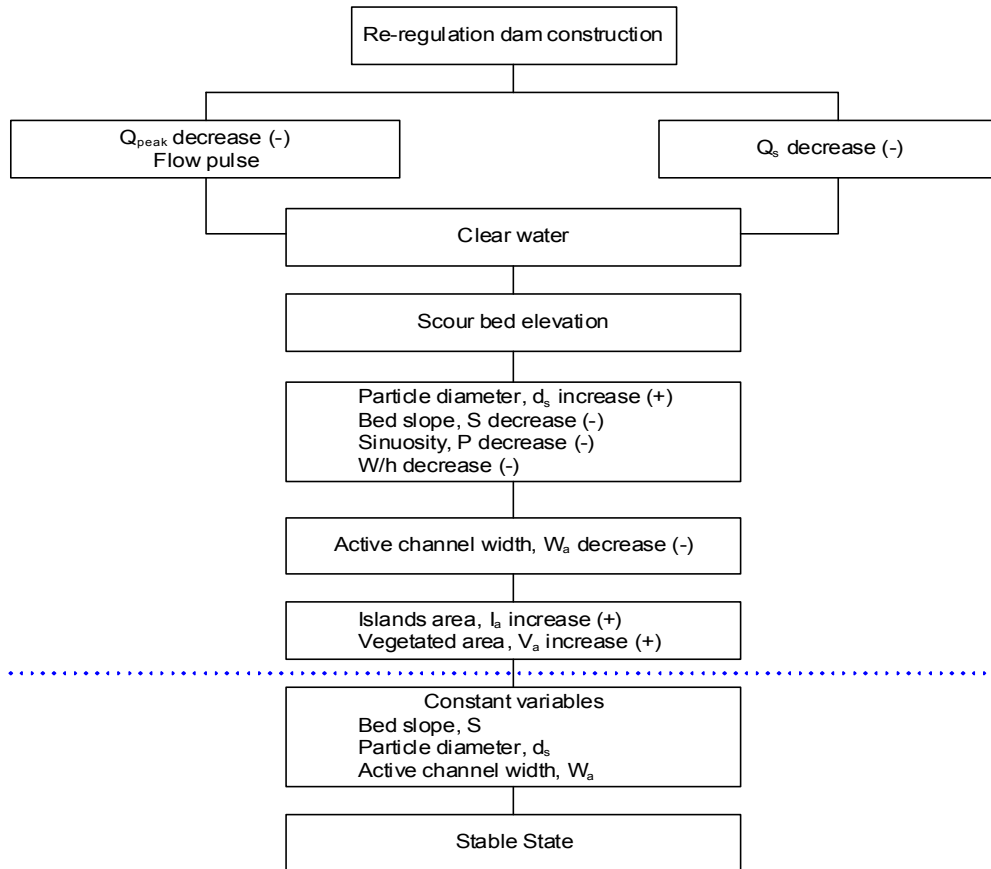


Fig. 11. Flow Diagram and Framework for the Downstream Channel Adjustment by Dam Construction

평형상태에 도달하게 될 것이다. 이는 Fig. 11에서 보여 주는 것과 같이 하도 시스템이 안정된 단계로 접어든다는 것을 의미한다.

6. 결 론

황강의 합천조정지댐과 낙동강 합류점사이 45 km 구간에 대하여 합천본댐과 조정지댐 건설로 인하여 수리 기하에 미치는 영향을 알아보았다. 이러한 분석에는 방류량, 항공사진, 하천중형단 측량, 유사이동 및 하상재료 등의 조사자료를 이용하였다. 분석결과를 통하여 다음과 같은 주요 결론을 얻었다. (1) 댐준공후 (1989-2005) 기간 동안 방류량은 댐준공전의 19.3%로 감소하였다. 유사이송은 댐건설로 인하여 인공적으로 차단이 되었고 이로 인하여 조정지댐 하류 5 km 구간의 하상재료는 모래에서 자갈 (2.16 → 44 mm)로 변화하였다. 조정지댐 하류로부터 20km 구간의 하상 바닥은 평균 2.6 m 세굴된 것으로 나타났으며, 하도폭 역시 상당히 감소한 것으로 나타났다. (2) 일반적인 홍수기에 조정지댐에 의하여 발생하는 흐름파가 유사이송량 증가에 미치는 영향을 알아보기 위하여 해석적인 방법을 개발하여 Eq. (7)에 보는 바와 같이 K_p 를 정의하여 계산

해 보았다. 계산 결과, 일주기파(Case1)에 의한 유사이송율(톤/일)이 이의 평균값에 의한 값보다 약 20% 크게 나타났다. 또한, 부정류 모의가 가능한 1차원 유사이송 모형인 GSTAR-1D모형을 이용하여 모의 한 결과 21%의 유사이송량의 증가가 예측되었는데 이는 해석적인 방법으로 계산한 값과 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. 홍수피크(Case3) 조건의 경우에도 이의 평균값에 의한 유사이송량 보다 15%이상의 증가를 보여주었다. (3) GSTAR-1D모형으로 2003년부터 20년간의 장기간의 하상변동을 모의한 결과 2003년 이후 약 10여년간 대부분의 하상변동이 이루어지고 2013년 이후에는 최심 하상고의 변화가 크지 않은 것으로 예측되었다. 최대 세굴심은 1983년 이후 약 4m 이었으며 하도의 세굴은 조정지댐 하류로부터 약 20km 지점까지 발생할 것으로 예측되었다.

참 고 문 헌

- 한국수자원공사 (2002). **합천다목적댐 저수지 퇴사량 조사 보고서**.
 건설교통부 (2003). **황강하천정비기본계획 보고서**.
 건설부 (1993). **황강하천정비기본계획 보고서**.

- 건설부 (1983). **황강하천정비기본계획 보고서**.
- Ackers, P. and White, W.R. (1973). "Sediment transport: New approach and analysis." *Hydraulics Division*, ASCE, Vol, 99, No. HY11, Proceeding paper 10167, pp. 2041-2060.
- Chang, H.C. (1998). "Fluvial-12 mathematical model for erodible channels, Users Manual."
- Choi, S.U., Yoon, B., Woo, H., and Cho, K. (2004a). 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*, Vol. 37, No. 1, pp. 55-66. (in Korean)
- Choi, S.U., Yoon, B., and Woo, H. (2004b). "Effect of dam-induced flow regime change on downstream river morphology and vegetation cover in the Hwang River, Korea." *River Research and Application*, Vol. 21, pp. 315-325.
- Downs, P.W. and Gregory, K.J. (2004). "River Channel management: Towards Sustainable Catchment Hydrosystems." *Oxford University Press Inc.*, p. 395
- Engelund, F. and Hansen, E. (1972). "A monograph on sediment transport in alluvial streams." Teknisk Forlag, Copenhagen.
- FAO/UNDP and KOWACO (1971). "Pre-investment Survey of the Nakdong River Basin, Korea: Volume 4-Sediment Transportation in Rivers of the Nakdong Basin." Daejeon, Korea
- Huang, J.V. and Greimann, B.P. (2006a). "DRAFT User's Manual for GSTAR-ID 1.1.4, Generalized Sediment Transport for Alluvial Rivers-One Dimension, Version 1.1.4." US Department of Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Sedimentation and River Hydraulics Group.
- Page, K., Read, A., Frazier, P., and Mount, N. (2005). "The effect of altered flow regime on the frequency and duration of bankfull discharge: Murrumbidgee river, Australia." *River Research and Applications*, Vol. 21, pp. 567-578.
- Petts, G.E. and Gurnell, A.M. 2005. "Dams and geomorphology: Research progress and future directions." *Geomorphology*, Vol. 71, pp.27-47.
- Schumm, S.A. 1969. "River metamorphosis." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, HY1: 255-63.
- 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.
- 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-ID 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, Vol. 110, No. 10, pp. 1431-1456.
- Williams, G.P. and 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 72nd Annual ICOLD meeting*, Seoul, Korea.
- Wu, W. and 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 Hydrosience and Engineering, The University of Mississippi.
- Xu, J. 1990. "An experimental study of complex response in river channel adjustment downstream from a reservoir." *Earth Surface Processes and Landforms* 15: pp. 53 - 53.
- Yang, C.T. (1973). "Incipient motion and Sediment transport." *Hydraulics Division*, ASCE, vol. 99, no. HY10, Proceeding Paper 10067, pp. 1679-1704.
- Yang, C.T. (1979). "Unit stream power equation for gravel." *Hydraulics Division*, vol. 40, pp. 123-138.
- Yang, C.T. and Simões, F.J.M. (2002). "User's manual for GSTAR3 (Generalized Stream Tube model for Alluvial River Simulation version 3.0)." USBR, Technical Service Center, Denver, Colorado.

(논문번호:08-80/접수:2008.07.10/심사완료:2009.06.16)