하구폐색저감을 위한 도류제 제원에 관한 연구

최창진 · 추연문* · 김성범** · 지홍기+

영남대학교 건설시스템공학과

* 영남대학교 방재연구소

* (주)이산 수자원부

Study on Training levee Dimension for Reduction of River Mouth Occlusion

Chang Jin, Choi · Yean Moon, Choo* · Sung Bum, Kim** · Hong Kee, Jee⁺

Department of Civil & Environmental Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan City, Korea

* Prevention of Disaster Research Center, Yeungnam University, Gyeongsan City, Korea

** ISAN, Kwanyangdong, Dongangu, Anyangshi, Kyeonggido, Korea

요 약

본 연구에서는 환경사 하천에 유입하는 지류 하구부 하도폐색현상을 규명하기 위하여 분류하도로 유입하는 합류각이 30°, 45°, 60°, 75° 형태의 가상하도 합류부의 구조를 설정한 후, 수제의 길이가 분류하도 하폭의 4%, 6%, 8%, 10%에 해당하는 도류제에 대해서 각각의 수리학적 특성을 SMS의 RMA-2와 SED2D 모형을 이용하여 수치해석을 실시하였다. 수치해석 결과에서 설정된 적정 도류제를 낙동강 본류에 유입하는 합류각이 큰 감천 합류부와 합류각이 작은 위천 합류부에 적용하여 유속, 수위, 하상변동 등 수리학적 특성 분석을 통한 하구폐색저감을 위한 도류제 제원을 제시하였다.

핵심용어 : 도류제, 하구폐색, 합류각, 합류부, RMA-2D, SED2D

Abstract

In this study, virtual confluence of 30°, 45°, 60°, 75° type flowing into main channel was designed to comprehend occlusion phenomenon of the mouth of river, then performed numerical analysis using the RMA-2 and SED2D model of SMS according to application of 40m, 60m, 80m, 100m Training levee corresponding to main channel width ratio. Results of simulations analysis are summarized as follows. Applying appropriate Training levee length determined by numerical analysis results, Training levee dimension for occlusion reduction was studied through the analysis of velocity, water level, bed variation at the Gamchen confluence and Wichen confluence.

Keywords : Angles of Confluence, Confluence Section, River Mouth Occlusion, RMA-2D, SED2D, Training levee

1. 서 론

연속된 수계로 이루어진 하천은 본류와 지류가 만나는 연속과정을 통해서 하류로 유하하면서 지류로부터 유입되는 유수의 영향으로 인해서 유량, 유속, 수위, 합류각 등에 따라 하천에서 나타나는 수리학적 특성은 다양하게 변화한다. 각 지점에서 나타나는 하천의 수리·수문학적 변화는 특히 서로 다른 특성이 가지는 본류와 지류하천이 만나는 하천 합류부에서 더욱 복잡한 특성이 나타나므로 유속이나 수위 등의 흐름특성 분석 뿐만 아니라, 유사이송으로 인한 침식이나 퇴적 같은 하상변동도 중요하게 고려해야 한다. 따라서 본류와 지류가 만나는 하천 합류부에서의 흐름

특성을 파악하고 본류·지류의 하도폐색현상을 방지하는 것은 하천계획 및 관리에 매우 중요하다.

우리나라의 강우 형태는 장마와 태풍으로 인한 강우형태가 대부분이며, 최근에는 지구온난화로 인하여 집중호우의 형태가 점차 증가하고 있다. 이러한 홍수시 하천 합류부의 원활하지 못한 배수는 합류부 뿐만 아니라 본류와 지류의 상·하류에도 영향을 주어 홍수에 의한 침수피해를 가중시키게 되므로 본류와 지류가 만나는 하천 합류부에 대한 정확한 수리·수문학적 특성 파악은 안정적인 하천상태를 유지하기 위해 매우 중요하지만, 본류와 지류가 만나는 하천 합류부의 폐색현상에 관한 하천계획 및 관리에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

+ Corresponding author :

수치모형을 이용한 하상변동에 대한 연구는 최근에도 활발히 진행되고 있으며 미공병단 수리실험국(U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station)과 미국 연방도로국(U.S. Federal Highway Administration)이 연계하여 Brigham Young University의 EMRL(Environmental Modeling Research Laboratory)에서 개발한 2차원 모형인 SMS(Surface-water Modeling System)에서 SED2D를 포함한 하상변동 해석이 가능하게 되었지만 국내의 하천 합류부의 하도폐색에 관한 연구는 외국에 비해 아직 부족한 실정이다.

2000년대 들어서면서 수리학적 특성 및 하상변동에 관한 연구가 활발히 진행되었다. 박용섭(2003)은 합류부에서 유량 및 접근각도 변화에 따른 유속 및 수위의 변화 관계를 도출하였으며, 최동규(2003)는 한강 주요 만곡부와 지천 합류부에서의 SED2D 모형의 적용성에 관한 연구를 수행하였으며, 손광익(2005)은 GIS를 이용한 유역의 토사유출량 산정 및 유역내 토사침식과 퇴적분포를 예측할 수 있는 알고리즘을 개발한 바 있다.

전도석(2008)은 RMA-2를 이용한 수치해석을 통해 합류부에서 도류제에 의한 지류하천의 배수효과에 대해 연구한 바 있으며, 송범(2008)은 수치해석을 이용한 금강유역의 공주대교 상·하류구간에 대한 흐름특성 분석을 통하여 하상변동 모의를 실시하였으며, 안선복(2009)은 만곡수로에서 수제 주변의 2차원 흐름특성을 수치해석을 실시하였다. 김병주(2009)는 낙동강과 금호강 합류부에서 대표입경별 수치모의를 통한 합류부의 하상변동을 연구하였고, 이정용(2009)는 평창강 유역의 지류하천 합류부를 대상으로 합류부의 흐름개선에 관한 방안을 연구하였다. 또한 최계운(2009)은 사행하천의 합류부에서의 도류제 적용에 따른 흐름특성을 분석을 수리모형 실험을 통해 실시한 바 있다. 황영만(2009)은 투수성을 고려한 도류제의 합류부 흐름개선에 대한 효과를 수리실험을 통한 연구를 수행하였으며, 장심(2010)은 4대강 사업후 설치

된 수공구조물로 인한 하상변동 해석을 연구하였다.

지흥기 등(2011)은 하도 유지관리방안 연구를 통하여 하상안정화를 통한 안정적인 하도유지관리 방안의 연구한 바 있으며, 한진영(2011)은 안성천유역의 지류 유입형태가 다른 두 합류부의 하상변동 특성을 연구하였고, 하진(2012)은 낙동강 왜관지점에서 월류형 수제설치에 따른 하상변동 해석에 관한 연구를 이어오고 있다.

따라서 본 연구에서는 홍수시 환경사 하천에 유입하는 하천 합류부에 대한 유속 및 수위변화를 분석한 후, 하상변동 모의를 통하여 지류하천 하구부의 하도 폐색저감을 위한 도류제 제원에 관한 연구를 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 하천합류부의 매커니즘

본류와 지류가 만나는 하천 합류부에서는 합류하천의 유량, 유속 및 유사량의 영향으로 인하여 흐름특성과 하천형태가 변화하게 된다. 따라서 합류하천에서 나타나는 수리·수문 현상과 흐름에 관한 특성을 살펴보면 유사이송이 많은 급류와 비교적 적은 완류에서는 차이점이 나타난다. 일반적으로 급류하천에서 유사이송이 많은 지류가 합류하는 경우에는 합류점에 소규모 선상지 위로 퇴적현상이 발생하므로 본류를 압박하게 되고 지류는 선상지 상류 측을 유하하여 본류로 합류하는 경향이 발생한다. 본류 및 지류의 유량에 따라 퇴적형상은 변화하지만 대체적으로 본류 유수는 대안으로 밀리고 상류 수위상승을 일으키며 하류 유수가 변화하게 된다. 완류하천의 합류부에서는 하폭이 넓어지므로 합류점 부근에서 기생사주가 발생하고 유심방향이 한쪽으로 치우치는 경우가 많아 결과적으로 국부세굴을 일으키는 현상이 발생하는 특성이 있다. 따라서 하천 합류부의 흐름 개념도를 도시하면 다음과 같다.

Fig. 1. The flow concept of river confluence section (Biron (1996))

2.2 하천변동 이론

유사 입자들이 하상을 따라 구르거나(顛倒, Rolling), 미끄러지거나(滑動, Sliding), 뛰는(跳躍, Jumping) 운동을 하면서 이동하는 것을 유사이송이라 정의할 수 있으며, 그 이송 특성에 따라 소류사와 부유사로 나뉜다. 소류사는 하상 위에서 비교적 큰 입자들의 이송을 말하며, 부유사는 비교적 작은 입자들이 유수의 수직 방향의 불규칙한 운동에 의해서 부유하는 현상으로서 이러한 유사이송은 하도내 하상변동을 일으키게 된다. 하상변동에 관한 이론은 하천유사의 연속방정식으로 설명할 수 있다.

Fig. 2. Conceptual diagram of bed variation

ΔX 의 구간에서 유수와 유사는 단면 ①로 유입되어 단면 ②로 유출되며, 유수와 유사의 횡방향 유입과 유출은 없다고 가정하면 1차원 흐름에서 t 시간에서 z 인 하상이 Δt 시간 후에 z 가 $z + \Delta z$ 로 변할 때 단면 ①과 단면 ②사이의 단위폭당 검사체적(Control Volume)에 유입되는 유사량과 유출되는 유사량의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$\gamma_b \frac{dv_s}{dt} = q_{si} - q_{so} \quad (1)$$

여기서, γ_b : 유사 단위중량, V_s : 단면 ①~② 사이의 부피, q_{si} : 유입 유사량, q_{so} : 유출 유사량

식 (1)에서 유입 유사량이 유출 유사량보다 많으면 구간내의 유사의 부피는 시간에 따라서 증가하고 반대의 경우 시간에 따라 구간 내 유사의 부피가 감소함을 알 수 있다.

식 (1)에서 $q_{si} - q_{so}$ 는 Δq_s 이며, $\frac{dv_s}{dt}$ 는 $\Delta z \cdot \Delta x$ 이므로 Δz 는 $\frac{dz}{dt}$ 으로 정리되므로 식 (1)은 식 (2)와 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\gamma_b \frac{dz}{dt} = \Delta q_s / \Delta x \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{\gamma_b} \frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (3)$$

하상재료의 공극률 λ 와 하상토 입자의 단위중량 γ_s 와의 관계를 고려하면, $\gamma_b = (1 - \lambda)\gamma_s$ 가 되므로 식 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{\gamma_s(1 - \lambda)} \frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (4)$$

따라서 식 (4)을 Exner 방정식이라 하며, 하상변동이나 하상형태를 해석하는데 기본적으로 사용되는 유사의 연속방정식이다. 위 식의 물리적인 의미는 단위 시간당 하상의 상승이나 저감은 검사체적으로 들어오고 나가는 유사량의 차이에 해당하는 것이다. 또한 하상변동의 예측은 제한된 범위내에서 해석이 가능하며, 수치해석 방법을 이용하여 연속방정식과 운동량 방정식을 연립하여 일반해를 산정할 수 있다.

3. 가상하도 합류부의 모형 적용 및 분석

3.1 가상하도 합류부의 조건 설정

하구폐색저감을 위한 적정 도류제 제원을 제안하기 위하여 가상하도 합류부의 본류와 지류의 유입 합류각도(30, 45, 60, 75°)별 기하학적 조건과 경계 및 초기조건을 Fig. 3과 같이 설정하였다.

Fig. 3. Schematic diagram showing the geometric conditions of virtual channel confluence section

(1) 기하학적 조건 설정

연구를 수행하기 위하여 가상하도 합류부에 도류제 적용 전과 40, 60, 80, 100m에 해당하는 도류제 적용 후에 유입하는 합류각 30, 45, 60, 75°로 가정하여 총 20개의 CASE로 설정하였으며, 가상하도 합류부의 기하학적 조건은 다음 Table 1 과 같다.

Table 1. The geometric conditions of virtual channel confluence section

	Virtual channel of mainstream	Virtual channel of tributary
Channel width	$B_0 = 1,000\text{m}$	$B_1 = 200\text{m}$
Channel length	$L_0 = 1,600\text{m}$	$L_1 = 600\text{m}$
Channel Slope	$S=1/1,000$	
training levee application length	$L = 40, 60, 80, 100\text{m}$ $L = \text{Mainstream channel river width } 4\%, 6\%, 8\%, 10\% \text{ of the length}$	

(2) 경계조건 및 초기조건

가상하도 합류부의 본류 및 지류 홍수량을 설정하기 위하여 하천설계기준·해설(2009)의 하도계획편에서 제시한 대하천 공식과 남부지방 중소하천공식을 역산하여 본류 및 지류하천의 홍수량을 산정하였으

며, 가상하도 합류부의 기점홍수위 산정을 위하여 미공병단에서 개발한 HEC-RAS 4.1을 이용하였다. 따라서 가상하도 합류부의 경계조건 및 초기조건은 다음 Table 2와 같다.

Table 2. Boundary conditions and initial conditions of virtual channel confluence section

	Virtual channel of mainstream	Virtual channel of tributary
Flood discharge	$Q_0=11,500\text{m}^3/\text{s}$	$Q_1=2,000\text{m}^3/\text{s}$
Cardinal point Flood level	El. 6.31m	
Coefficient of roughness	0.025	
Turbulence exchange coefficient	$1,000\text{N}\cdot\text{sec}/\text{m}^2$	
Sediment diffusion coefficient	$100\text{m}^2/\text{sec}$	
Sediment specific gravity	2.65	
Sedimentation length element	1	
Characteristic Erosion length	10	

3.2 도류제 적용 전·후의 결과 및 고찰

가상하도 합류부의 본류 유입유량 $11,500\text{m}^3/\text{s}$, 지류 유입유량 $2,000\text{m}^3/\text{s}$, 하류 수위를 6.31m로 각각 적용하였으며, 본류하도 하쪽에 대한 4%, 6%, 8%, 10%에 해당하는 도류제 길이별($L=40, 60, 80, 100\text{m}$)로 구축된 모형에 대한 유속, 수위, 하상변동에 대한 수치해석을 수행하였으며, 산정하도의 모식도는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4. Analysis of RMA-2 & SED2D
(Schematic diagram of Channel)

(1) 유속분포

지류하도 좌·우안의 유속분포와 본류하도 좌안 상·하류의 유속분포를 요약하면 다음과 같다.

① 도류제 적용 전 가상하도 합류부의 합류각도 별 유속 비교

지류하도 좌안부에서는 합류로 인하여 상대적으로 빠른 유속분포($1.64\sim 2.30\text{m/s}$) 나타났으며, 지류하천 우안부에서는 본류하도 배수영향으로 인하여 느린 유속($1.01\sim 1.40\text{m/s}$) 분포를 보였다. 이는 가상하도 합류부에서 지류하도의 흐름이 원활하지 못하다는 것을 알 수 있다. 또한 합류각이 커질수록 지류 좌안부의 유속은 더 빨라지고 지류 우안부의 유속은 더 느려지는 경향이 나타나고 있으므로 유입 합류각이 커질수록 지류하도의 유입흐름에 부정적인 영향을 미치는 사실을 확인할 수 있었다.

② 도류제 적용 후 지류하도 좌·우안별 횡단 유속 비교

도류제 적용전 합류부 횡단면의 좌·우안에서 나타나는 상이한 흐름특성이 도류제 적용에 따라 같은 횡단지점에서 유사한 유속분포로 나타났으며, 이는 도류제 적용에 따른 영향으로 합류부의 유속이 완화되어 지류하도가 수리학적으로 안정화되는 것으로 판단된다.

③ 도류제 적용 후 지류하도 좌·우안별 종단 유속 비교

지류하도 좌안의 종단유속은 합류부로부터 감소하는 경향이 나타났으며, 우안의 경우 반대로 증가하는 경향을 보이고 합류부로부터 본류하도 하폭의 20%에 해당하는 200m 지점 이후에서 일정한 유속분포가 나타났다. 따라서 가상하도 합류부에서 도류제 적용으로 인한 유속이 미치는 수리학적 영향은 합류부로부터

200m 지점으로 판단된다.

④ 합류각도별 도류제 길이에 따른 유속 비교

가상하도 합류부 지류하도의 유속을 도류제 적용전과 비교했을 때 수리학적으로는 안정화되는 것으로 나타났으며, 도류제 길이가 길어짐에 따라 지류하도의 유속분포는 수리학적 영향이 미치는 지점 이후부터 1.5~1.6m/s로 일정하게 유지되는 효과가 나타났다. 그러나 가상하도 합류부의 도류제 적용 길이의 증가로 인하여 본류하천 흐름의 정체구간이 발생하여 유속이 느려지는 현상이 나타났으며, 하류 좌안에서는 지류하도의 유입으로 인해서 불안정한 유수의 흐름 형태가 나타났다. 따라서 합류부에서 적정 도류제 길이는 지류하천의 유수의 흐름뿐만 아니라 본류하도에서 발생하는 수리학적 특성을 면밀히 고려해 주어야 할 것으로 사료된다.

Fig. 5. Compare tributary channel flow velocity of apply before or after training wall

Fig. 6. Compare mainstream channel(Left bank) flow velocity of apply before or after training wall

(2) 수위분포

지류하천 좌·우안과 본류하천 좌안 상·하류의 수위분포를 요약하면 다음과 같다.

① 도류제 적용 전 가상하도 합류부의 합류각도별 수위 비교

지류하도 좌안부에서는 합류로 인하여 상대적

으로 낮은 수위(El. 6.62~6.66m)가 나타났으며, 지류하천 우안부에서는 본류하도의 배수 영향으로 인해서 높은 수위(El. 6.69~6.80m) 분포를 보였다. 이는 가상하도 합류부에서 앞에서 언급한 바와 같이 가상하도 합류부의 유속분포 특성과 일치하는 것으로 지류하도의 흐름이 원활하지 못하다는 것을 알 수 있다.

② 도류제 적용 후 지류하천 좌·우안별 횡단 수위 비교

도류제 적용전 합류부 횡단면의 좌·우안에서 상이하게 나타나는 수위분포가 도류제 적용에 따른 영향으로 양안 수위차가 완화되는 것으로 나타났다. 이는 가상하도 합류부에서 도류제를 적용했을 때 수위를 저감할 수 있을 뿐만 아니라 좌·우안에서 나타나는 상이한 수위분포를 안정화하는 효과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

③ 도류제 적용 후 지류하천 좌·우안별 종단 수위 비교

가상하도 합류부로부터 증가 경향을 보이는 지류하도 좌안 종단수위와 감소 경향을 보이는 우안 종단수위는 도류제 적용에 따라 수위저감 효과가 있었으며, 합류각이 클수록 수위 변화폭이 큰 것으로 나타났다. 또한 합류부로부터 150m 지점 이후에서 좌·우안 일정하게 증가하는 수위분포를 보였다.

④ 합류각도별 도류제 길이에 따른 수위 비교

도류제 적용길이가 길어질수록 지류하도의 수위는 저감효과를 얻을 수 있었으나, 도류제 적용으로 인한 본류하도 상류 좌안의 통수면적 감소로 인해서 높은 수위분포가 나타났으며, 하류 좌안에서는 지류하도의 유입으로 인한 불안정한 수위분포 패턴을 보였다.

Fig. 7. Compare tributary channel water level of apply before or after training wall

Fig. 8. Compare mainstream channel(Left bank) water level of apply before or after training wall

(3) 하상변동

지류하도 좌·우안의 하상변동과 본류하도 좌안 상·하류의 하상변동을 요약하면 다음과 같다.

① 도류제 적용 전 합류각도별 가상하도 합류부의 하상변동 비교

상대적으로 빠른 유속분포를 보이는 좌안부와 달리 지류하도 우안부에서는 배수의 영향으로

인하여 퇴적되는 경향이 큰 것으로 나타났다. 이는 가상하도 합류부에서 유속인자가 지류하도의 하상변동에 영향을 큰 것으로 판단된다. 또한 합류각이 클수록 지류 좌안부의 하상변동($\Delta h=0.0328\sim 0.0734m$)은 작아지고, 지류 우안부는 퇴적으로 인하여 하상변동($\Delta h=0.0824\sim 0.0908m$)이 큰 것으로 분석되었으므로 합류각이 커질수록 좌·우안별로 하상변동이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

② 도류제 적용 후 지류하도 좌·우안별 횡단 하상변동 비교

도류제 적용전 합류부의 횡단면 좌·우에서 상이하게 나타나는 하상변동이 도류제 길이가 길어짐에 따라 같은 횡단지점에서 하상변동량차가 완화되는 것으로 나타났으며, 이는 합류부에서의 도류제 적용은 지류하도 좌·우안의 하상변동량 저감효과가 있는 것으로 판단된다.

③ 도류제 적용 후 지류하천 좌·우안별 종단 하상변동 비교

지류하도 합류각도별로 좌안의 하상변동은 $\Delta h=0.07m$ 에서 증가하는 경향이 나타났으며, 우안의 경우는 반대로 감소하여 합류각도별로 수리학적 영향이 미치는 합류부로부터 본류하도 하폭의 20%에 해당하는 200m 지점 이후에는 일정한 패턴을 보이는 것으로 분석되었다.

④ 합류각도별 도류제 길이에 따른 하상변동 비교

합류각도별 도류제 적용 길이가 길어지면 지류하도의 흐름이 개선되어 하도내 퇴적현상은 감소하였으며, 합류부 거리에 따른 일정한 경향을 가진 하상변동 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 도류제 길이가 길어질수록 본류하천 상류 좌안의 흐름 정체구역에서 사수역이 발생했으며, 하류좌안의 흐름분리구역 발생에 따른 유속 감소로 인해서 퇴적현상이 심해지는 것으로 나타났다.

Fig. 9. Compare tributary channel bed variation of apply before or after training wall

Fig. 10. Compare mainstream channel(Left bank) bed variation of apply before or after training wall

3.3 가상하도 합류부 분석결과와 정리

RMA-2 모형을 통한 가상하도 합류부의 유속 및 수위분포와 SED2D 모형을 이용한 본류 및 지류하도

의 하상변동 모의 결과, 본류와 지류가 만나는 본류 하천 합류부에 도류제를 적용하는 것은 유수의 흐름을 개선하고 지류하도 하구부의 하도폐색현상을 저감하기 위한 적정 방안 중 하나로 판단되었다. 그러나

하천 합류부에 도류제 길이가 길어질수록 지류하천에는 유리한 영향을 주었지만 본류하천 상·하류에는 흐름정체 구역과 흐름분리 구역이 발생하는 등 본류하천에는 불리한 영향이 크게 나타났다. 따라서 분석

결과를 바탕으로 합류부에서 적정 도류제길이 결정방법으로 도류제 적용 길이에 대한 수위증감량을 비교하는 방법과 평균 하상변동량을 비교하는 방법으로 접근해 보았다.

Fig. 11. Training wall length by tributary and mainstream compared to water level variation

Fig. 12. Training wall length by tributary and mainstream compared to bed variation the amount

tributary Bed reduction / mainstream Bed increase

도류제 적용으로 인한 지류하도의 수위 저감량에 대한 본류하도 수위 증가량에 대한 비와 지류하도의 하상변동 저감량과 본류하도의 하상변동 증가량에 대한 무차원 비를 도류제 적용 길이 40, 60, 80, 100m에 대하여 살펴본 결과 본류하도 하폭의 6%에 해당하는 60m에서 합류각도별 적용에 따라 최대 수위저감과 최대 하상변동 효과를 보이는 것으로 분석되었다.

따라서 실제하도 합류부에 적용할 적정 도류제 길이를 RMA-2 분석결과인 유속, 수위분포와 SED-2D를 이용한 하상변동 분석결과를 종합적으로 판단해 본 결과, 도류제 적용에 따라 최대 효율을 보이는 도류제 길이는 본류하천 하폭의 6%인 60m로 분석되었다.

4. 실제하천 합류부의 모형 적용 및 분석

4.1 실제하천 합류부의 선정 및 입력자료

본 연구에서 RMA-2 모형과 SED2D 모형을 실제 하천에 적용하기 위하여 낙동강 본류와 지류의 유입 합류각 및 지형요소가 다소 상이한 감천 합류부와 위천 합류부를 실제 적용하천으로 채택하였다. 선정된 하천 합류부의 4대강사업 준설 전·후 지형 단면에 모형을 구축한 후 도류제 적용 따른 하천 합류부 하도폐색현상을 각각 살펴보았으며, 선정된 합류부의 입력자료 및 위성사진 현황은 다음과 같다.

Gamcheon confluence section
(When the angle is greater confluence)

Wichun confluence section
(When the angle is smaller confluence)

Fig. 13. River confluence section satellite picture present condition of Confluence angle the other target

Table 3. Boundary conditions and initial conditions of confluence section a virtual Channel

	Gamchun confluence section	Wichun confluence section
Flood discharge	Mainstream : 12,500m ³ /s, Tributary : 3,180m ³ /s	Mainstream : 11,300m ³ /s, Tributary : 4,350m ³ /s
Flood level	Business before : El. 35.99m, After the business : El. 33.42m	Business before : El. 45.49m, After the business : El. 43.91m
Coefficient of roughness	0.025	0.025
Turbulence exchange coefficient	1,000N·sec/m ²	1,000N·sec/m ²

4.2 수치해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 합류각이 상이한 낙동강 본류의 감천 합류부와 위천 합류부를 선정하여 4대강 사업전 · 후 단면에 대한 도류제 적용에 따른 수치해석을 실시하였다.

(1) 감천 합류부 분석결과 및 고찰

① 감천 합류부의 유속 비교

합류각이 큰 감천 합류부의 4대강 사업전 유속분포는 가상하도 합류부와 같이 좌안의 유속은 0.2m/s, 우안의 유속은 2.5m/s로 분석되었으며, 가상하도의 분석결과와 유사한 좌 · 우안 별 큰 유속차를 보였다. 도류제 적용에 따라

좌 · 우안의 유속의 흐름이 다소 개선되었으나, 감천 합류부의 지형적인 요인으로 인하여 큰 효과는 나타나지 않았다. 4대강 사업후 유속패턴은 사업전과 유사하였으며, 준설로 인한 하상경사로 인하여 0.8~1.0m/s 정도 좌 · 우안에서 유속이 빨라지는 것으로 나타났다. 본류하천인 낙동강 상류부에서 2.0m/s, 하류에서 0.25m/s 정도로 나타났다. 도류제 적용 전 · 후 유속분포는 지류하천의 유입으로 인하여 느린 유속분포나 나타났으며, 하류부에서는 합류로 인하여 빠른 유속분포를 보였다. 또한 합류부로부터 200m 지점 이후 상 · 하류에서 일정한 흐름 형태를 보였다.

Fig. 14. Comparison analysis flow velocity of Gamchun confluence section

② 감천 합류부의 수위 비교

감천 합류부에서 수위변화는 좌안의 경우 우안에 비해 상대적으로 높은 수위분포가 나타났으며, 도류제 적용으로 인해서 수위저감 효과가 나타나는 것으로 분석되었으므로 가상하도 분석결과와 유사한 것으로 판단된다. 낙동

강 본류의 수위변화는 크게 나타나지 않았으나, 도류제 적용으로 인하여 상류부에서 다소 상승하는 것으로 분석되었으며, 또한 4대강 사업의 하도준설에 의한 영향은 1.8m 정도의 수위 차가 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 15. Comparison analysis water level of Gamchun confluence section

③ 감천합류부의 하상변동 비교

4대강 사업전 감천 합류부의 평균 하상변동은 좌안 $\Delta h=0.060\text{m}$, 우안 $\Delta h=0.070\text{m}$ 로 나타났으며, 도류제 적용시 좌안 $\Delta h=0.025\text{m}$, 우안 $\Delta h=0.026\text{m}$ 로 하상변동이 감소되면서 평형하상이 유지되는 것으로 분석되었다. 4대강 사업후 감천 좌·우안별 하상변동량은 $-0.020\sim-0.010\text{m}$ 로 분석되었으며, 일부구간에서 4대강 사업으

로 인하여 하상침식이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 낙동강 본류의 하상변동은 도류제 적용으로 인하여 상류부에서 최대 $\Delta h=0.059\text{m}$, 하류에서 최대 $\Delta h=0.078\text{m}$ 퇴적되었으나, 감천 합류부와 같이 합류각이 큰 경우 도류제 적용시는 지류하천의 하도폐색현상에 대한 저감 효과가 있는 것으로 나타났다.

Fig. 16. Comparison analysis bed variation of Gamchon confluence section

(2) 위천 합류부 분석결과 및 고찰

① 위천 합류부의 유속 비교

위천 합류부의 4대강 사업전·후 대하여 합류 각도별로 좌안의 유속은 $0.60\sim1.06\text{m/s}$ 에서 일정하게 증가하였으나, 우안은 유속이 $0.19\sim0.68\text{m/s}$ 에서 감소하는 경향이 나타났다. 또한 도류제 적용에 따른 영향에서도 좌안 유속이 $0.67\sim1.14\text{m/s}$ 증가하였으며, 우안 유속은 $0.03\sim0.83\text{m/s}$ 감소하는 유사한 패턴을 보였다. 이는 감천 합류부와 다른 결과로서 위천 합류부는 낙동강 본류로 유입하는 합류각이 작으며, 합

류부에서 좁아지는 지형적인 특성에 기인한 것으로 판단된다. 또한 위천 합류부에서 도류제 적용으로 인해서 영향이 미치는 거리는 합류부로부터 $250\sim300\text{m}$ 지점으로 나타났다. 낙동강 본류 위천 합류부의 4대강 사업 전·후에 대한 유속변화는 합류부로부터 증가하는 경향을 보였으나, 합류부로부터 250m 지점에서 상·하류에서 일정한 유속분포를 보였다. 도류제 적용에 따른 유속변화는 적용전과 비교했을 때 상류 1.0m/s , 하류 0.25m/s 정도가 지점별로 일정하게 감소하는 경향이 분석되었다.

Fig. 17. Comparison analysis flow velocity of Wichun confluence section

② 위천 합류부의 수위 비교

도류제 적용에 따른 낙동강 본류의 수위는 도류제 적용 전·후에 따라 상류에서 $0.1\sim0.2\text{m}$ 상승하는 것으로 분석되었으며, 하류에서 $\Delta h=0.1\text{m}$ 상승하는 것으로 분석되었으나, 일정구

간 이후로는 큰 변화가 나타나지 않았다. 또한 4대강 사업의 하도준설로 인하여 위천 합류부에서는 $1.5\sim2.0\text{m}$ 정도 수위차가 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 18. Comparison analysis water level of Wichun confluence section

③ 위천 합류부의 하상변동 비교

4대강 사업전 위천 좌·우안의 하상변동량은 합류부로부터 300m 지점까지 감소하면서 하상이 침식되는 경향을 보였으며, 도류제 적용시 유사한 패턴을 보이며 하상변동량은 감소하였다. 4대강 사업후 좌안의 경우 사업전과 유사한 경향으로 나타났으나, 침식되는 하상변동량이 최대 $\Delta h=0.5\sim 0.6\text{m}$ 로 분석되었다. 우안의 경우 일정한 하상변동이 나타났으나, 본류하천인 낙동강 상·하류에서의 하상변동량은 도류제

적용으로 인하여 적용전과 비교하여 퇴적량이 증가한 것으로 나타났다.

따라서 본류하천으로 유입되는 합류각이 작은 경우에는 도류제 적용으로 인한 유수의 흐름 개선으로 하상침식을 유발할 수 있는 것으로 나타났다, 또한 4대강 사업 등과 같은 하도정비 사업은 하천 합류부에 단락을 형성하게 되어 특정구간에서 과도한 하상침식 현상을 발생할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 19. Comparison analysis bed variation of Wichun confluence section

4.3 실제하천 합류부 분석결과 정리

앞서 가상하도 합류부의 분석결과 도류제는 유수의 흐름을 개선하고 지류 하류구의 하도폐색현상을 저감시킬 수 있는 적정 방안 중 하나로 판단되었으며, 분석결과를 종합적으로 판단하여 적정 도류제 길이를 결정하였다.

지류하천 합류각이 큰 감천 합류부와 합류각이 작은 위천 합류부를 실제 적용하천 합류부로 선정하여 RMA-2 모형과 SED2D 모형을 이용하여 유속, 수위 하상변동 분석을 실시하였으며, 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 지류하천의 좌안에서는 상대적으로 빠른 유속과 낮은 수위분포가 나타났으며, 우안에서는 느린 유속과 높은 수위분포 현상이 나타났다. 도류제를 적용시 좌안의 유속은 느려지고 우안의 유속은 빨라졌으며 양안의 유속 및 수위차가 완

화되는 것으로 분석되었다. 이는 실제하천에서 도류제 적용에 따른 유수의 흐름이 개선된 것으로 판단되며, 가상하도 분석결과와 유사하였다.

② 합류각이 상이한 감천 합류부와 위천 합류부에 도류제 적용에 따른 하상변동 분석결과, 지류하천이 본류하천으로 유입되는 합류각이 작은 위천 합류부의 특정구간에서 하상침식현상이 발생하는 것으로 나타났으며, 합류각이 큰 감천 합류부에 도류제를 적용했을 때 평형하상이 유지되는 것으로 분석되었다. 따라서 감천 합류부와 같이 지류하천의 합류각이 큰 경우 도류제 적용은 하도폐색현상을 저감시키는 효과가 있는 것으로 분석되었다.

③ 4대강 사업 전·후에 대한 분석결과를 통해 볼 때 하도정비 사업 등을 통한 인위적 정비방법은 하천 합류부의 단락을 형성하게 되어 지류하천 하류부의 특정구간에서 과도한 하상침식 현상을 유발시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 환경사 하천에 유입하는 지류 하구부 하도폐색현상을 파악하기 위하여 본류하도로 유입하는 30°, 45°, 60°, 75° 형태의 가상하도 합류부를 설정한 후, 본류하도 하폭의 4%, 6%, 8%, 10%에 해당하는 40m, 60m, 80m, 100m 도류제 적용에 따른 수리학적 특성을 SMS의 RMA-2와 SED2D 모형을 이용한 수치해석을 실시하였다. 지금까지의 분석에서 수치해석 결과로부터 결정된 적정 도류제를 낙동강 본류에 유입하는 감천 합류부와 위천 합류부에 모의한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 가상하도 합류부의 지류하도 좌안에서는 상대적으로 빠른 유속과 낮은 수위분포가 나타났으며, 우안에서는 느린 유속과 높은 수위분포가 나타났다. 지류하도의 합류각이 커질수록 지류 좌안부의 유속은 더 빨라지고 지류 우안부의 유속은 더 느려지는 현상을 통해 볼 때, 합류각이 커질수록 지류하천의 유입 흐름에 부정적인 영향을 미치는 사실을 확인할 수 있었다.
- 2) 도류제 적용에 따른 가상하도에서 수리학적 영향이 미치는 본류하도 하폭의 20%인 200m 지점까지 좌안의 유속은 감소하였으며, 우안의 경우는 증가하는 상반된 경향을 보였으나 일정거리 이후에서는 좌·우안별 일정한 유속분포를 보였다. 또한 도류제 적용으로 인한 지류하도의 수위 저감효과를 얻을 수 있었으며, 본류하도에서는 흐름정체 구간과 흐름분리 구간에서 통수단면적 감소와 사수역 발생으로 인하여 유수의 흐름이 원활하지 못한 것으로 나타났다.
- 3) 가상하도 합류부의 수리학적 특성과 하상변동을 파악하기 위하여 RMA-2 모형 및 SED2D 모형을 이용한 수치해석 결과 도류제는 지류하도의 유수의 흐름을 개선하고 하도폐색현상을 저감할 수 있는 적정 방안 중 하나로 판단되었으며, 도류제 적용 길이가 길어질수록 지류하도의 폐색현상이 완화되었지만 본류하도 흐름에 방해요인이 되는 것으로 나타났다. 따라서 적정 도류제 길이를 유속, 수위, 하상변동 등을 통하여 종합적으로 판단해 본 결과, 지류하도의 수위저감량과 본류하도의 수위증가량 비, 지류하도 하상변동 저감량과 본류하도 하상변동 증가량 비에서 높은 효과를 보이는 최적 도류제의 길이는 본류하도 하폭의 6%에 해당하는 60m로 분석되었다.

- 4) 유입되는 합류각이 큰 감천 합류부와 작은 위천 합류부를 선정하여 가상하도 분석결과 결정된 도류제를 4대강 사업 전·후 단면에 적용한 결과 감천 합류부에서는 유수의 흐름이 개선되고 하상변동 분석결과 하상이 평형상태를 나타나는 것으로 분석되었다. 그러나 위천 합류부와 같이 합류각이 작고 지류하천의 유입에 유리한 하천 합류부에서는 지류하천 하구부의 하상침식을 유발할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 4대강 사업 전·후에 따른 분석결과를 통해 볼 때, 하도 정비 및 하상경사개선 사업 등을 통한 인위적 정비방법은 하천 합류부의 단락을 형성하게 되어 지류하천 하구부의 특정구간에서 과도한 하상침식 현상을 유발시킬 수 있는 것으로 나타났다.
- 5) 따라서 감천 합류부와 같이 지류하천과 본류하천의 합류각이 큰 경우에 적정 도류제를 적용하여 지류하천의 유입흐름을 수리학적으로 유리하게 개선한다면 지류 하구부의 하도폐색현상을 완화할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 수치해석을 통해 환경사 하천에 유입하는 지류 하구부의 하도폐색현상을 연구한 결과, 하천 합류부는 수리·수문학적 특성이 상이한 본류와 지류의 영향으로 유량, 유속, 수위 및 하상변동 등이 복잡한 관계를 가지고 나타나는 하천합류부의 특성을 정확히 파악하기 위해서 향후 수리모형실험과 수치해석 방법을 병행한다면 보다 신뢰성 있는 연구 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

사 사 문

본 연구는 “2012~2013년 영남대학교 산학연구처의 교비 연구비 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 감사한다.”

References

- An, SB (2008). Analysis on Characteristics of Two-Dimensional Flow around Groynes in Curvature Channel, 2008 Korean Society of Civil Engineers Conference Water Resources, pp. 702-705. [Korean Literature]
- Bhalla and Chaudhry (1991). Numerical Modeling of Aggradation and Degradations in Alluvial Channels,

- J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 117(9).
- Choi, DK (2003). *Applicability of SED-2D model in curved channel*, Master Thesis, Kyonggi University, Kyonggi, Korea. [Korean Literature]
- Choi, GW (2009). Flow Characteristics Depending upon Installing Training levee in Channel Junction, 2009 Korean Society of Civil Engineers Conference Water Resources Section, pp. 2607-2610. [Korean Literature]
- Han, JY (2011). *Characteristics of River Bed Change at River Junction According to the Type of Tributary Inflow*, Master Thesis, Suwon University, Suwon, Korea. [Korean Literature]
- Jang, S (2010). *Analysis of River Bed Change caused by River Cross Structures*, Master Thesis, Yeungnam University, Kyongsan, Korea. [Korean Literature]
- Jee, HK (2010). Drainage Effect of Tributary Channel with Jetty at Channel Junctions, 2010 Korean Society of Civil Engineers Conference Water Resources Section, pp. 1610-1613. [Korean Literature]
- Jun, DS (2008). Drainage Effect of Tributary Channel with Jetty at Channel Junctions, 2008 Korean Society of Civil Engineers Conference Water Resources Section, pp. 702-705. [Korean Literature]
- Kim, WS (2011). *The Curved Channel's River-bed Change Characteristic Study using 2-D Numeric Analysis Model*, Master Thesis, Kangwon University, Kangwon, Korea. [Korean Literature]
- Lee, JW (2009). *A study on the Improve a plan of flow at the Junction of Two Rivers*, Master Thesis, Kyungil University, Kyongsan, Korea. [Korean Literature]
- Park, YH (2008). Sediment Transport Changes by Modified Jetties, 2008 Korean Society of Civil Engineers Conference Water Resources Section, pp. 1132-1135. [Korean Literature]
- Park, YS (2003). *The analysis of hydraulic characteristics depending upon the variation of discharge and approaching angle at channel junctions*, Ph.D Thesis, Inchun University, Inchun, Korea. [Korean Literature]
- Son, GI (2005). Modelling of Sediment Transportation and Deposition in GIS, *J. of Korea Water Resources Association*, 38(5), pp. 223-233. [Korean Literature]
- Song, B (2008). *Flow Characteristics and Riverbed Changes Simulation for the Upstream and Downstream Sections of Gongju Bridge*, Master Thesis, Kongju University, Kongju, Korea. [Korean Literature]
- Song, SH (2010). *Hydrological Properties Depending on Inflow Angle and River Bed Elevation Gap at Confluence*, Master Thesis, Suwon University, Suwon, Korea. [Korean Literature]
- 논문접수일 : 2014년 01월 06일
- 심사의뢰일 : 2014년 02월 05일
- 심사완료일 : 2014년 02월 13일