네 개의 수로가 비대칭으로 연결된 수로 합류부에서의 홍수흐름 특성에 관한 연구

A Study on Characteristics of Flood Flow at a Channel Confluence Connected Asymmetrically with Four Channels

정 우 창*

Jeong, Woo Chang

Abstract

In this study, the hydraulic model experiments and numerical simulations are carried out to analyze the flood flow characteristics in and around a channel confluence connected asymmetrically with four channels. The numerical model applied in this study is ANSYS CFX (ver. 14) which is the commercial three-dimensional CFD model. As results of comparison between the measured and simulated water depth distributions in and around a channel confluence, the agreement is relatively well satisfied. It can be shown in this study that the water surface profiles in and around a channel confluence are significant different with the two channel directions in which the water are entering and increased inflow.

Keywords : channel confluence, asymmetry, ANSYS CFX, flood flow characteristics

요 지

본 연구에서는 수로가 비대칭으로 연결되어 있는 합류부 및 합류부 주위에서의 홍수흐름특성에 대해 수리모형실험 및 수치모의를 통해 분석을 수행하였다. 본 연구에서 적용된 수치모형은 상업용 3차원 CFD 모형인 ANSYS CFX (ver. 14)이다. 수로 내로 유입되는 유량 변화에 따른 수리모형실험과 수치모의에 의한 합류부 및 합류부 주위에서의 수심분포에 대한 측정된 결과와 모의된 결과를 비교한 결과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 합류부와 연결된 네 개의 수로 중 물이 유입되는 두 개 수로 방향에 따라 합류부 및 합류부 주위에서의 수심분포의 양상은 달라지며, 수로 내로 유입되는 유량의 증가에 따라서도 많은 차이가 발생된다는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 수로 합류부, 비대칭, 수리모형실험, ANSYS CFX, 홍수흐름특성

1. 서 론

도시지역 내에서 홍수로 인한 피해를 저감하기 위해서는 도로와 도로가 서로 연결된 합류부에서의 홍수 흐름의 특성을 분석하는 것은 중요하다. 대부분의 도시에서 도로 합류부(이하 합류부)는 Fig. 1(a)와 같이 세 개 또는 네 개의 도로가 대칭 또는 비대칭으로 연결되어 있으며, 일반적

으로 합류부에서의 흐름은 유입되는 유량이 상대적으로 적고 도로의 경사가 비교적 완만한 경우 상류(subcritical flow) 특성을 나타내나 이와 반대일 경우에는 Fig. 1(b)와 같이 상류 및 사류(supercritical flow)가 공존하는 복잡한 수면형을 나타낸다.

기존의 국·내외 연구 대부분은 도시지역 내에 분포되어 있는 실제 도로에서의 홍수흐름 보다는 주로 도로를

* 경남대학교 공과대학 토목공학과 조교수 (e-mail: jeongwc@kyungnam.ac.kr)
Assistant Professor, Dept. of Civil Engrg., Kyungnam University, Changwon 631-701, Korea

(a)

(b)

Fig. 1. (a) Road Network in a Urban Area and (b) an Example of Complex Flood Flow at a Crossroad

수로로 간주하여 실험적 및 수치적으로 수행되었다. 상류조건에서 세 개의 수로가 서로 연결된 합류부 근처에서의 흐름 특성에 관한 실험적 연구는 Best and Reid (1984), Weber et al. (2001) 그리고 Neary et al. (1999)에 의해 수행되었으며, 주로 합류부에서의 재순환 흐름, 2차 순환흐름, 흐름 박리 및 수축과 같은 흐름구조에 대해 분석하였다. 사류조건에 대해 Bowers (1966)는 도수가 합류부의 유입 수로 내에서 발달하며, 합류부의 기하학적 형상과 유입 유량에 의존한다는 결과를 제시하였다. Schwalt and Hager (1995)는 세 개의 수로가 서로 연결된 합류부에서 사류가 발생하였을 때 형성되는 수면파의 주요 특성에 대한 연구를 수행하였다. Rivière and Perkins (2004)는 세 개의 수로가 90°로 연결된 합류부에서의 사류 특성에 대한 연구를 수행하였다. Nania et al. (2004)은 직각으로 연결된 두 개의 유입 수로와 두 개의 유출 수로를 가진 합류부에서의 사류 특성에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, 도수의 발생 위치에 따라 두 가지 형태(Type I과 II)의 흐름으로 분류하였다(Type I은 두 개의 유입 수로 각각에 정상도수(normal hydraulic jump)가 발생한 경우이며, Type II는 두 개의 유입 수로 중 하나에 정상도수가 발생하고 합류부 내에서는 경사도수(oblique hydraulic jump)가 발생한 경우). 최근 Mignot et al. (2008)은 경사진 네 개의 수로가 서로 직각으로 연결된 합류부 근처 및 내에서의 사류 특성에 대한 실험적 및 수치적 연구를 수행하였으며, 유입 수로에서 발생하는 정상도수 그리고 교차로 내에 발생하는 경사도수의 위치에 따라 흐름형태를 다섯 가지(Type

I, II-1, II-2, II-3 그리고 III)로 구분하였다. 또한 천수방정식과 2차 정확도를 가진 MUSCL 기법에 근거한 2차원 유한체적모형인 Rubar 20 (Paquier, 1995; Mignot, 2005)에 의한 수로 합류부 근처 및 내에서의 모의결과를 실험 결과와의 비교를 통해 그 적용성을 검증하였다.

Shetter and Murthy (1996)는 $k-\epsilon$ 난류기법과 천수방정식에 근거한 2차원 수치모형을 이용하여 상류조건에서 세 개의 수로가 연결된 합류부에서의 흐름특성을 수치적으로 분석하였으며, Khan et al. (2000)은 상류조건에서 세 개의 수로로 구성된 분기(bifurcation)영역 및 합류(confluence)영역에서의 흐름특성에 대한 수치적 분석을 위해 혼합거리 공식에 근거한 단순한 난류모형과 천수방정식에 근거한 2차원 모형을 적용하였다. 합류부에서의 상류조건에 대한 적용성 검증을 위하여 Huang et al. (2002)은 $k-\epsilon$ 난류기법이 적용된 3차원 모형을 이용하여 Shumate (1998)의 실험결과와 비교분석을 실시하였다. Ghostine et al. (2009)은 Mignot et al. (2008)에 의한 실험적 결과를 이용하여 RKDG (Runge-Kutta Discontinuous Galerkin) 기법이 적용된 2차원 유한요소모형의 적용성을 Rubar 20과 3차원 유동해석모형인 FLUENT로부터의 모의결과와의 비교를 통해 검증하였다. 국내에서는 최근 Jeong et al. (2010)이 네 개의 수로가 대칭으로 연결된 합류부에서 2차원 well-balanced HLLC 유한체적모형을 이용하여 홍수흐름특성에 대한 수치적 분석을 수행하였다. 이상과 같이 수로 합류부에서의 홍수흐름 특성에 관한 국·내외 연구는 대부분 대칭 또는 직각으로 연결된 경우에 대해 수행되었으며, 비

대칭 경우에 대한 연구는 아직 미비한 실정이다.

본 연구에서는 네 개의 수로가 비대칭으로 연결된 합류부 내 및 주위에서의 홍수흐름 특성에 대해 수리모형실험과 3차원 유동해석모형인 ANSYS CFX (ver. 14)를 이용하여 수치모의를 수행하였다. 모의된 결과는 수리실험결과와 비교를 통해 적용성을 검증하였으며, 다양한 유입유량조건에 따른 수로 합류부에서의 흐름특성에 대한 분석을 수행하였다.

2. 수리모형실험

2.1 실험 방법 및 조건

수로 및 합류부에서의 홍수흐름특성을 분석하기 위한 모형을 제작하였으며, 물의 흐름을 관측하기 위해 Fig. 2(a)에서처럼 수로와 합류부는 아크릴로 제작하였다. Fig. 2(b)는 모형에서의 전반적인 물 순환과정을 나타낸 것으로 각각의 수로 끝단에 연결된 수조와 수조 사이에 유량공급을 위한 펌프와 유량조절을 위한 전자유량계를 설치하였다. 또한 유입수로와 연결된 각각의 수조 내에 흐름

의 교란을 최소화하기 위해 다공판을 설치하였다.

수로 및 합류부의 높이는 조절나사를 이용하여 수로를 경사가 없는 수평상태를 유지할 수 있도록 하였으며, 유량조절밸브와 전자유량계를 이용하여 유량을 조절한 후 수로 내에 물을 유입시킨다. 이후 흐름이 안정화가 될 때부터(약 50초 이후) Fig. 3(a)와 같은 초음파수위계를 이용하여 격자 내 수심을 측정하였다. 적용된 격자망은 Fig. 3(b)에서처럼 3×3 cm의 마름모 형태로 합류부를 중심으로 1,447개로 구성하였다.

합류부와 연결된 네 개의 수로 폭은 각각 0.3m로 동일하며, 수평으로 연결된 두 개의 수로 길이는 2.0m이며, 수평 수로를 기준으로 45° 로 비대칭으로 연결된 두 개의 수로 길이는 각각 2.3m이다. 두 개의 유입수로를 통해 유입된 물은 합류부를 통과하여 두 개의 유출수로를 따라 이동된다. 본 실험에서는 유입수로에 대해 두 가지 Case를 고려하였다. Case I은 Fig. 4(a)에서처럼 수로 ①과 ②가 유입수로이며, 수로 ③과 ④는 유출수로이다. Case II는 Fig. 4(b)에서처럼 수로 ①과 ④가 유입수로이며, 수로 ②와 ③은 유출수로이다. Q_{ex} 와 Q_{ey} 는 각각 유입수로로 유입되는

Fig. 2. (a) Set-up of Hydraulic Experimental Model and (b) Schematic Diagram of Flow Circulation (Q_{ex} and Q_{ey} : inflows and Q_{sx} & Q_{sy} : outflows)

Fig. 3. (a) Ultrasound Water Level Meter and (b) Grid System Around a Channel Confluence

유량이며, h_{ex} 와 h_{ey} 는 각각 유입유량에 해당되는 등류수심이다. 또한 Q_{sx} 와 Q_{sy} 는 유출수로 유출되는 유량이며, h_{sx} 와 h_{sy} 는 각각 유출유량에 해당되는 수심이다.

Table 1은 본 수리모형실험에서 각각의 Case에 대해 두 개의 유입수로 유입되는 유량 및 해당되는 등류수심을 요약한 것이다. 본 연구에서 두 개의 유입수로 유입되는 유량 차이를 1배(유량비 1), 2배(유량비 2) 그리고 3배(유량비 3)로 하여 수리모형실험을 수행하였으나 유량비 1과 2에 대해 수심측정 결과를 비교하였을 때 명확하

게 뚜렷한 차이가 발생하지 않아 본 논문에서는 유량비 1과 3에 대한 결과를 비교·분석하였다.

2.2 실험결과 및 분석

Fig. 5는 흐름이 안정화가 된 이후 Case I에 대해 합류부 주위에서 측정된 수심의 공간적 분포를 나타낸 것이다. Case I-1은 두 개의 수로 ①과 ②에 유입되는 유량이 각각 100 l/min (=1.67 l/sec)로 동일한 경우로 두 개의 유입수로를 통해 이동하는 물은 약 3.1 cm의 수심으로 합류부에 접근한다. 물이 합류부 내로 유입되면서 수심은 감소하며, 합류부와 연결되어 있는 수로 ③과 ④의 입구부 근에서는 수심이 평균적으로 약 1.0 cm까지 감소한다. 그러나 이후부터 물은 경사도수(oblique hydraulic jump)의 형태를 나타내며 이동한다. 이러한 결과는 합류부 내로 유입된 물은 수로 ③과 ④가 접하는 지점(●)에 도달될 때 흐름이 분리되어 흘러가기 때문인 것으로 판단된다. Case I-2는 수로 ①에는 100 l/min 그리고 ②에는 300 l/min (=5.00 l/sec)로 유입유량이 3배 차이 나는 경우이다. 수로 ①을 따라서는 약 5.0 cm의 수심으로 그리고 수로 ②를 따라서는 약 3.2 cm의 수심으로 이동한 물은 합류부 내로 유입된 후 수심이 급격히 감소하며, 수로 ③과 ④의 출구부에서는 각각 약 1.0 cm와 1.4 cm까지 감소한다. 그러나 흐름이 안정화가 되고 난 후 수로 ①과 ②에서의 수심분포(평균적으로 약 5.0 cm)가 거의 동일함을 알 수 있다. 이러한 결과는 상대적으로 큰 유량이 유입되는 수로 ②에서의 물은 수로 ①에서보다 빠르게 이동하며, 이로 인해 수로 ①을 따라 이동하는 물은 합류부를 제대로 통과하지 못하고 흐름과 반대방향으로 이동하는 배수위 효과 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6은 Case II에 대해 합류부 주위에서 측정된 수심의 공간적 분포를 나타낸 것이다. Case II-1은 두 개의 수로 ①과 ④에 유입되는 유량이 각각 100 l/min로 동일한 경우로 두 개의 유입수로를 통해 이동하는 물은 약 3.1 cm의 수심으로 합류부에 접근한다. 그러나 합류부에서의 수심분포는 Case I-1과는 매우 다른 양상을 나타내었다. 두 수로

Fig. 4. Experimental Conditions: (a) Case I, (b) Case II

Table 1. Inflow Conditions for Cases I and II (①, ② and ④: channel number)

Case I	Q_{ex} (①) (ℓ/min)	Q_{ey} (②) (ℓ/min)	Q_{ey}/Q_{ex}
1	100	100	1.0
2	100	300	3.0
Case II	Q_{ex} (①) (ℓ/min)	Q_{ey} (④) (ℓ/min)	Q_{ey}/Q_{ex}
1	100	100	1.0
2	100	300	3.0

I-1

I-2

Fig. 5. Spatial Variation of Water Depth Around a Channel Confluence: Case I

II-1

II-2

Fig. 6. Spatial Variation of Water Depth Around a Channel Confluence: Case II

를 통해 물이 합류부 내로 유입된 이후 수심은 감소되지 않고 유입 전 수심을 유지하는 것으로 나타났다. 합류부에 유입된 물은 수로 ②와 ③이 접하는 지점(●)에 도달될 때 분리되어 각각의 수로로 이동한다. 합류부를 통과한 후 수로 ②와 ③에서 수심의 급격한 감소(약 3.1cm에서 약 1.7cm)는 경사진 형태로 나타나며, 이는 흐름이 분리되는 지점을 통해 우선적으로 물이 지속적으로 공급되기 때문인 것으로 판단된다. Case II-2는 수로 ①에는 100l/min 그리고 ④에는 300l/min로 유입유량이 3배 차이 나는 경우이다. 수로 ④에서 상대적으로 큰 유량으로 이동하는 물이 합류부 방향으로 빠르게 이동하며, 이로 인해 수로 ①로 유입된 물은 합류부를 통과하지 못하고 Case I-2의 경우와 마찬가지로 흐름의 방향으로 물이 이동하는 배수위 효과가 나타난다. 그러나 Case I-2와의 차이점은 초기에 유량이 큰 수로 ④에 비해 유량이 작은 수로 ①에서 수심분포가 크게 나타

난다는 것이다. 이러한 현상은 Case I-2의 경우 수로 ①과 ②에서 물이 유입되는 방향이 45°로 거의 비슷하나 Case II-2의 경우 수로 ①과 ④의 각도가 135°로 서로 거의 반대 방향으로 물이 유입됨으로 인해 합류부에서 보다 큰 흐름의 교란이 발생하며, 이에 따라 보다 큰 수심분포가 발생된다. 이로 인해 합류부에서는 상대적으로 유량이 작은 수로 ① 방향으로 물이 유입되어 수심이 큰 현상이 발생된 것으로 판단된다. 또한 Case I-2의 경우에서는 나타나지 않은 현상은 합류부 바로 근처 수로 ③에서 수심이 급격히 상승하는 영역(타원으로 표시된 영역)이 발생하는 것이다.

이러한 현상을 비디오 촬영 등을 통해 합류부 내 및 주변에서의 흐름이 시간에 따라 변화되는 양상을 실제로 확인하려고 하였으나 장비의 부재로 인해 흐름이 안정화된 이후 목측(目測)으로만 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 Case I과 II에 대한 수리모형실험을 결과를 비정상 수

치모의를 통해 확인하였으며, 이에 대한 결과는 3절에 기술하였다.

Table 2는 Case I과 II에 대한 수치실험결과 유입유량에 대한 유출유량을 나타낸 것으로 모든 경우에 대해 유입유량과 유출유량이 거의 일치하므로 수치실험에서의 질량 보존은 성립되는 것으로 판단된다.

3. 수치모의실험

본 연구에서 적용된 수치모형은 1990년대 초반 영국원자력공사(UKAEA)와 캐나다의 ASC (Advance Science Computing)의 TASCflow로부터 개발되어 CFX-4와 CFX-TASCflow를 기반으로 발전된 3차원 유동 모의 및 해석 모형인 ANSYS CFX 모형이다. 본 모형은 뛰어난 유동 해석 기능과 사용자 편의 위주의 Workbench 환경이 결합되어 GUI 환경에서 작업하기 편리한 강력한 수치모형으로 빠르고 정확한 해석결과를 제공하는 것으로 알려져 있다.

3.1 유동모의를 위한 지배방정식

ANSYS CFX 모형에 적용된 수치기법은 유한체적법이며, 이 기법은 계산영역을 작은 셀(cell)로 분할하여 각각의 경계조건을 부여하여 해를 구하는 기법이다. 직교좌표시스템에서 공기와 물이 혼재된 개수로 흐름과 같은 다상흐름(multiphase flow)의 균질 혼합(homogeneous mixture)에 대해 ANSYS CFX 모형에서 적용되는 지배방정식을 다음과 같다(ANSYS Inc., 2010).

- 연속방정식

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m) = 0 \quad (1)$$

- 운동량 방정식

$$\frac{\partial (\rho_m \vec{V}_m)}{\partial t} + \rho_m (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_m = -\nabla p_m + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}} + \bar{\bar{\tau}}_t) + \vec{f} \quad (2)$$

- Volume fraction 운송방정식(transport equation)

$$\frac{\partial (\alpha_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{V}_m) = 0 \quad (3)$$

여기서, ρ_m 는 유체의 혼합밀도(mixture density), $\vec{V}_m = [u, v, w]$ 는 속도벡터(u, v, w 는 각각 x, y, z 방향으로의 속도이다), t 는 시간, p_m 은 압력, $\bar{\bar{\tau}}$ 는 점성응력텐서(viscous stress tensor), $\bar{\bar{\tau}}_t$ 는 난류점성응력텐서, $\vec{f}$ 는 부력과 같은 외력, ρ_l 은 혼재된 유체 각각의 밀도, α_l 은 liquid phase volume fraction이며, 각각의 liquid phase에 대해 $0 \leq \alpha_l \leq 1$ 이다. 만약 물과 공기가 혼재되어 있는 경우 두 유체 사이의 경계에서 α_l 은 0.5이다. 물과 공기와 같이 두 가지 유체가 혼재되어 있는 경우 혼합밀도 $\rho_m = \sum_{n=1}^2 \alpha_n \rho_n$ 이 된다.

3.2 난류모형

유동상에서 발생하는 난류성분을 해석하기 위해 ANSYS CFX 모형에서 제공되는 수치해석 기법은 크게 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) Eddy-Viscosity 기법, RANS Reynolds-Stress 기법 그리고 Eddy Simulation 기법과 같이 3가지이다(ANSYS Inc., 2010). Table 3은 각 기법에 따라 적용되는 다양한 난류모형의 종류를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 다양한 난류모형 중 standard $k-\epsilon$ 모형을 적용하여 모의를 수행하였다. $k-\epsilon$ 모형은 난류운동 에너지인 k 로부터 특성속도를 얻으며, 점성소산을 나타내는 ϵ 으로부터 간접적으로 특성길이를 구하는 모형이다. $k-\epsilon$ 모형에서 k 와 ϵ 에 대한 식은 다음과 같이 표현된다(ANSYS Inc., 2010).

Table 2. Comparison of Absolute Error for Inflow and Outflow

Case I	Inflow (ℓ/min)			Outflow (ℓ/min)			Absolute error (ℓ/min) (①-②)
	Q_{ex} (①)	Q_{ey} (②)	Total (①)	Q_{sx} (③)	Q_{sy} (④)	Total (②)	
1	100	100	200	99.6	100.2	199.8	0.2
2	100	300	400	189.0	211.2	400.2	0.2
Case II	Inflow (ℓ/min)			Outflow (ℓ/min)			Absolute error (ℓ/min) (①-②)
	Q_{ex} (①)	Q_{ey} (④)	Total (①)	Q_{sx} (③)	Q_{sy} (②)	Total (②)	
1	100	100	200	99.6	100.2	199.8	0.2
2	100	300	400	161.4	237.6	399.0	1.0

Table 3. Turbulence Models Available in ANSYS CFX

RANS Eddy-Viscosity	RANS Reynolds-Stress	Eddy Simulation
- Zero Equation model	- LRR Reynolds Stress	- Large Eddy Simulation (Transient)
- Standard $k-\epsilon$ model	- QI Reynolds Stress	
- RNG $k-\epsilon$ model	- Spezial, Sarkar and Gatski Reynolds Stress	
- Standard $k-\omega$ mode	- SMC- ω model	
- Baseline zonal $k-\omega$ based model	- Baseline Reynolds' Stress model	
- SST zonal $k-\omega$ based model		
- $(k-\epsilon)$ 1E model		

$$\frac{\partial(\rho_m k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m k \vec{V}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_{m,t}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho_m \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_m \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \epsilon \vec{V}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_{m,t}}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} P_k - C_{2\epsilon} \rho_m \epsilon) \quad (5)$$

여기서, k 는 난류운동에너지(turbulent kinetic energy), ϵ 은 난류소산율(turbulent dissipation rate), μ_m 은 혼합점성계수(mixture viscosity)이며, 물과 공기와 같이 두 가지 유체가 혼합되어 있는 경우 $\mu_m = \sum_{n=1}^2 \alpha_n \mu_n$ 이 된다. 또한 $\mu_{m,t}$ 은 혼합 와점성계수(mixture turbulent viscosity)이며, 다음과 같은 식에 의해 계산된다.

$$\mu_{m,t} = \frac{\rho_m C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

Eqs. (3), (4) and (6)에 나타나 있는 C_μ , σ_k , σ_ϵ , $C_{1\epsilon}$ 그리고 $C_{2\epsilon}$ 은 경험상수이며, 광범위한 난류 실험을 통해 결정된 각 상수의 값은 다음과 같다.

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.00, \sigma_\epsilon = 1.30, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92$$

또한, Eqs. (4) and (5)에서 P_k 는 점성력에 의해 발생되는 것으로 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$P_k = \mu_{m,t} \nabla \vec{V} \cdot (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} (3\mu_{m,t} \nabla \cdot \vec{V} + \rho_m k) + P_{kb} \quad (7)$$

여기서, P_{kb} 는 부력항이다.

3.3 적용된 수치모형에 대한 검증

본 연구에서 적용된 모형의 검증을 위해 수리모형실험의 Case I과 II에서 적용된 4가지 유입유량에 대해 비정상 상태 조건으로 모의를 수행하였다. 구축된 수로는 수리모형실험에서와 마찬가지로 경사가 없는 평탄한 수로로 가정하였으며, 격자시스템은 153,304개의 절점과 621,634개의 셀로 이루어져 있으며, 경계조건으로 두 개의 유입수로(Fig. 4에서 Case I에 대해서는 수로 ①과 ② 그리고 Case II에 대해서는 ①과 ④)의 상부경계에는 유입경계조건을 부여하였으며, 두 개의 유출수로(Fig. 4에서 Case I에 대해서는 수로 ①과 ④ 그리고 Case II에 대해서는 ②과 ③)의 하부경계에는 수위나 유량조건에 관계없이 흐름상태에 따라 유출상태를 반영하는 개경계조건(open boundary condition)을 부여하였다. 또한, 수로바닥과 벽면에서의 조건은 smooth wall로 가정하였다. 총 모의시간은 정상상태에 도달되기 위해 충분한 시간으로 60초로 하였으며, 모의 시간간격은 0.01초로 하였다.

Fig. 7은 Case I-1과 2에 대해 시간에 따라 변화되는 수심분포의 공간적 변화를 나타낸 것이다. Case I-1의 경우 두 수로에서 동일한 유량으로 이동하는 물은 합류부에 거의 동시에 유입된다. 유입된 이후 수심은 감소하며, 다른 두 수로를 통해 물은 이동한다. 또한 수로 및 합류부에서의 흐름은 A-A' 축을 따라 대칭인 양상을 나타낸다. Case I-2의 경우 상대적으로 큰 유량의 수로에서 보다 빠르게 물이 합류부에 도달한 후 연결된 수로로 계속 이동하는 것을 확인할 수 있으며, 10초 이후부터 작은 유량의 수로에서 배수위 현상이 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 시간이 지남에 따라 수로 ③에서보다 수로 ④에서 수심이 점차적으로 증가하는 양상을 볼 수 있다.

Fig. 8은 Case II-1과 2에 대해 시간에 따라 변화되는 수심분포의 공간적 변화를 나타낸 것이다. Case II-1의 경

Fig. 7. Spatial Variation of Water Depth with Time: Case I

Fig. 8. Spatial Variation of Water Depth with Time: Case II

우 Case I-1과 마찬가지로 두 수로에서 동일한 유량으로 이동하는 물은 합류부에 거의 동시에 유입된다. 합류부에 유입된 이후 물은 합류 전 각각의 수로에서의 수심을 유지하면서 이동하다가 다른 두 수로를 통해 이동한다. 또한 수로 및 합류부에서의 흐름은 B-B' 축을 따라 대칭인 양상을 나타내며, Case I-2의 경우 상대적으로 큰 유량의 수로에서 보다 빠르게 물이 합류부에 도달한 후 연결된 수로로 계속 이동하는 것을 확인할 수 있으며, 10초 이후부터 작은 유량의 수로에서 배수위 현상이 발생하는 것을 볼 수 있다.

전반적으로 Case I과 II에 대한 수리모형실험 결과와 수치모의실험 결과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Table 4는 Case I과 II에 대해 수로의 하류경계에서 측정된 유량 Q_{Msx} (Case I의 경우 수로 ③과 Case II의 경우 수로 ②)와 Q_{Msy} (Case I의 경우 수로 ④와 Case II의 경우 수로 ③) 그리고 모의된 유량 Q_{Ssx} 와 Q_{Ssy} 를 비교한 것이다. 비교결과 각각의 유입유량조건에서 본 연구에서 모의된 유량과 측정된 유량은 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Figs. 9 and 10은 Case I과 II에 대해 합류부를 중심으로 네 개의 수로 중심선을 따라 공간적으로 변화되는 수심의 측정된 결과와 모의된 결과를 비교한 것이다(모의시간 60 초일 때). 비교결과 전반적으로 모의된 수심의 공간적 분포는 측정된 수심의 공간적 분포와 비교적 잘 일치

Table 4. Comparison of Outflows Measured and Simulated at Two Downstream Boundaries of Channels.
(): Number of Channel

Case I	Measured (ℓ/min)		Simulated (ℓ/min)	
	Q_{Msx} (③)	Q_{Msy} (④)	Q_{Ssx} (③)	Q_{Ssy} (④)
1	99.6	100.2	99.6	99.6
2	189.0	211.2	189.6	209.4
Case II	Measured (ℓ/min)		Simulated (ℓ/min)	
	Q_{Msx} (②)	Q_{Msy} (③)	Q_{Ssx} (②)	Q_{Ssy} (③)
1	99.6	100.2	100.2	100.2
2	161.4	237.6	163.8	240.6

Fig. 9. Water Surface Profiles Along Channels for Case I

하는 것으로 나타났다. Case I의 경우와 Case II의 경우에 있어 수심분포의 큰 차이점은 수로 ①에서 수로 ③으로 흐름이 진행해 갈 때 Case I에서는 합류부 내에서 수심이 급격히 감소하다가 합류부를 통과한 후 도수형태와 같이 급격한 수심상승이 발생된다. 그러나 Case II에서는 합류부 내에서 수심은 합류 전 수심을 유지하다가 합류부를 통과한 후 수심이 급격히 감소하다가 다소 완만하게 수심이 상승된다.

측정된 수심과 모의된 수심에 대해 보다 정량적인 비교를 위해 Eq. (8)에서 (10)과 같은 L_1 (절대평균오차), L_2 (평균제곱근오차) 그리고 L_∞ (최대오차)의 세 가지 오차공식을 이용하여 산정하였으며, 산정된 결과는 Table 5에 제시되어있다. 산정결과 세 가지 오차공식 모두에서 매우 작은 값을 나타내므로 본 연구에서 적용된 수치모형은 측

정결과에 비교적 잘 일치하는 것으로 볼 수 있다.

$$\|e\|_{L_1} = \frac{1}{n} \left(\frac{1}{h_{\max}} \sum_{i=1}^n |\epsilon_{i,j}| \right) \quad (8)$$

$$\|e\|_{L_2} = \left[\frac{1}{n} \left(\frac{1}{h_{\max}^2} \sum_{i=1}^n |\epsilon_{i,j}|^2 \right) \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$\|e\|_{L_\infty} = \frac{1}{h_{\max}} \max |\epsilon_{i,j}| \quad (10)$$

3.4 유입유량 증가에 따른 합류부에서의 수심변화

유입유량의 증가에 따른 합류부 및 주위에서의 수심변화 양상을 분석하기 위해 수로 내로 유입되는 유량의 차이를 6배(유량비 6)로 설정하여(Case I-3과 Case II-3) 수

Fig. 10. Water Surface Profiles Along Channels for Case II

Table 5. Comparison of L_1 , L_2 and L_∞ Errors for Cases I and II

Case	along channels ①-③			along channels ②-④		
	L_1	L_2	L_∞	L_1	L_2	L_∞
I-1	0.04293	0.00221	0.07745	0.04719	0.00306	0.12954
I-2	0.01306	0.00260	0.04340	0.02678	0.00130	0.11947
II-1	0.02520	0.00060	0.08472	0.04117	0.00214	0.07703
II-2	0.02613	0.00085	0.07004	0.05752	0.00352	0.09026

치적으로 모의된 결과에 대해 Case I-1, 2와 II-1, 2의 결과와 비교·분석을 수행하였다. 수치적 모의결과만을 이용하여 비교·분석을 한 이유는 수리모형실험에 사용된 전자 유량계의 유량조절능력이 최대 450 l/min로 인해 유량비 6에 대해 실험을 수행하지 못했기 때문이다. Table 6은 Case I-3과 II-3에 대한 유입유량 조건을 나타낸 것이다.

Fig. 11은 Case I-3과 II-3에 대해 60초일 때 공간적 수심분포의 모의 결과를 Case I-1, 2 그리고 Case II-1, 2의 모의 결과와 비교한 것이다. 유입유량이 증가함에 따라 수로 ①에서의 배수위 효과는 커지는 양상을 나타내었으며, 또한 Case I의 경우 수심이 수로 ③에서보다 수로 ④에서 더욱 크게 증가되는 것을 볼 수 있다. Case II-3의 경우도 마찬가지로 유입유량이 증가함에 따라 수로 ①에서의 배수위 효과는 커지며, 수로 ②에서의 수심도 커지는 결과는 나타내었다. 그러나 수로 ③에서는 수심의 증가는 상대적으로 미비하다.

Fig. 12는 Fig. 11의 결과를 바탕으로 Case I과 II에 대해 합류부를 중심으로 네 개의 수로 중심선을 따라 공간적으로 변화되는 수심을 비교한 것이다. Case I의 경우 수로 ①과 ③을 따라 물은 유입유량의 증가에 따라 증가된 수심 (Case I-1의 경우 약 3.10 cm, Case I-2의 경우 약 4.85 cm, Case I-3의 경우 약 6.35 cm)으로 합류부로 유입되며, 합류부 내에서의 수심의 급격한 감소는 Case I 모두에서 발

생한다. 합류부를 통과한 이후 도수현상은 Case I-2 경우가 Case I-1의 경우 보다 합류부로부터 좀 더 떨어진 지점 (Case I-1의 경우 약 1.93 m 그리고 Case I-2의 경우 약 1.63 m)에서 발생하고 규모(Case I-1의 경우 약 1.0 cm 그리고 Case I-2의 경우 약 1.5 cm)도 증가한다. 그러나 Case I-3의 경우 도수의 발생지점은 Case I-2와 거의 동일하며, 규모는 보다 작은 것으로 나타났으나 0.6 m 이하에서는 수심이 점차적으로 증가하는 양상을 나타내었다. 수로 ②와 ④를 따라서는 유입유량이 증가함에 따라 수심의 증가되는 양상이 뚜렷하게 구별되는 것으로 나타났다. 합류 전과 합류부 내에서는 수로 ①과 ③에서 거의 동일한 수심으로 증가된다. 그러나 합류부 내에서는 수심이 감소하는 양상이 달려지며, 본 연구에서 Case I-1의 경우 약 3.10 cm에서 약 1.00 cm까지, Case I-2의 경우 약 4.85 cm에서 약 1.50 cm까지 그리고 Case I-3의 경우 약 6.35 cm에서 약 2.35 cm까지 감소하며 유입유량이 증가할수록 감소폭은 증가한다. 합류부를 통과한 이후 유입유량이 증가함에 따라 도수현상은 합류부로부터 점차적으로 떨어진 지점에서 발생하며 규모 (Case I-1의 경우 약 1.0 cm, Case I-2의 경우 약 1.5 cm 그리고 Case I-3의 경우 약 2.0 cm)도 증가한다. Case I-3의 경우 두 번의 도수현상이 발생하며, 이러한 현상은 수로 ①과 ③에서 도수의 크기가 Case I-1과 I-2보다 작게 나타나는 것에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Table 6. Inflow Conditions for Cases I-3 and II-3 (①, ② and ④: channel number)

Case I	Q_{ex} (①) (ℓ/min)	Q_{ey} (②) (ℓ/min)	Q_{ey}/Q_{ex}
3	100.0	600.0	6.0
Case II	Q_{ex} (①) (ℓ/min)	Q_{ey} (④) (ℓ/min)	Q_{ey}/Q_{ex}
3	100.0	600.0	6.0

Fig. 11. Comparison of Water Surface Profiles along Channels with Increased Inflow for Case I and II

Case II의 경우 수로 ①과 ③을 따라 물은 유입유량의 증가에 따라 증가된 수심(Case I의 경우와 동일함.)으로 합류부로 유입되며, Case II-1과 II-2의 경우 합류부 내에서의 수심은 합류 전과 거의 동일하게 유지하다가 합류부를 통과하기 직전 급격하게 감소한다. 이후 수심이 약 1.1 cm까지 감소하다가 증가되기 시작한다. Case I의 경우보다 작은 규모의 도수가 발생(Case II-1의 경우 약 1.5 cm 그리고 Case II-2의 경우 약 3.25 cm)되며 발생지점은 유량이 증가할수록 합류부로부터 멀어진다(Case II-1의 경우 1.35 m 그리고 Case II-2의 경우 1.15 m). 그러나 Case II-3의 경우 합류부 중간지점에서 수심이 상승하다가 급격히 감소하며 합류부를 통과한 이후 Case II-1과 II-2의

경우와 거의 동일한 정도로 감소한다. Case I-3에서는 수로 ②와 ④에서 합류부 통과 이후 두 번의 도수현상이 발생되었으나 Case II-3에서는 수로 ①과 ③에서 규모면에서는 작지만 두 번의 도수현상이 발생되었다. 수로 ②와 ④에서는 유량이 증가함에 따라 Case II-1의 경우 합류부 내 수심은 합류 전 수심이 거의 그대로 유지하면서 거의 합류부 통과 직전 급격히 감소하나 Case II-2와 II-3에서는 합류 전에 수심이 감소되는 경향을 나타내며 합류부에서는 볼록렌즈 형태의 수면형이 형성된다. 이와 같은 현상은 유량이 증가할수록 더욱 뚜렷해진다. 합류부를 통과한 이후 거의 일정한 수심분포를 나타내었다(Case II-1의 경우 약 1.5 cm, Case II-2의 경우 약 3 cm 그리고 Case

Table 7. Comparison of Maximum and Minimum Water Depths for Case I and II

Case I	along channels ①-③		along channels ②-④	
	Maximum water depth (m)	Minimum water depth (m)	Maximum water depth (m)	Minimum water depth (m)
1	0.032	0.009	0.033	0.010
2	0.049	0.010	0.050	0.015
3	0.063	0.013	0.066	0.021
Case II	along channels ①-③		along channels ②-④	
	Maximum water depth (m)	Minimum water depth (m)	Maximum water depth (m)	Minimum water depth (m)
1	0.029	0.013	0.029	0.013
2	0.047	0.013	0.046	0.028
3	0.062	0.012	0.059	0.049

Fig. 12. Comparison of Water Surface Profiles along Channels with Increased Inflow for Case I and II

II-3의 경우 4.3 cm).

Table 7은 Case I과 II에 대해 수로 ①과 ③ 그리고 수로 ④와 ②에서의 최대수심과 최소수심을 비교한 것이다. 비교결과 수로 ①과 ③에 대해 최대수심은 Case I-2와 I-3의 경우 Case I-1에 비해 각각 약 2배 그리고 3배 증가되었으며, Case II의 경우도 거의 동일한 비율로 증가하였다. 수로 ④와 ②에 대해 최대수심은 Case I-2와 I-3의 경우 Case I-1에 비해 각각 약 1.5배 그리고 약 2배 증가되었으며, Case II의 경우도 거의 동일한 비율로 증가하였다. 수로 ①과 ③에 대해 최소수심은 Case I-2와 I-3의 경우 Case I-1에 비해 각각 약 1.1배 그리고 1.4배 증가되었으나 Case II의 경우 거의 변화가 없다. 수로 ②와 ④에 대해 최대수심은 Case I-2와 I-3의 경우 Case I-1에 비해 각각 약 1.5배 그리고 약 2.1배 증가되었으며, Case II-2와 II-3의 경우 Case II-1에 비해 각각 약 2.2배 그리고 약 3.8배 증가되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 수로가 비대칭으로 연결된 합류부 및 주위에서의 유입유량의 변화에 따른 홍수흐름 특성에 대한 수리모형실험 그리고 수치모의 및 비교분석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유입유량 변화에 따른 합류부와 합류부와 연결된 수로에서의 수심분포에 대한 수리모형실험 결과와 수치모의 결과는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.
- 2) 합류부와 연결된 네 개의 수로 중 물이 유입되는 두 개 수로 방향(Case I과 II)에 따라 합류부에서의 수심분포의 양상은 달라진다. 두 개의 수로에 동일한 유량이 유입될 경우 수평방향의 수로 즉 수로 ①과 ③에서는 합류부로 유입되는 즉시 수심이 감소되는 경향을 나타내었으나(Case I) 두 개의 수로 중 하나의 수로에서 유입유량이 증가됨에 따라 합류 전 수심이 그대로 유지되며, 합류부 통과 직전 수심이 급격히 감소하는 경향을 나타내었다(Case II). Case I의 경우 합류부를 통과한 직후 수심이 급격히 상승하는 도수현상이 뚜렷하게 발생하였으나 Case II의 경우 점차적으로 수심이 증가하면서 상대적으로 작은 규모의 도수가 발생되었다.
- 3) 수로 ②와 ④에서는 두 개의 수로에 동일한 유량이 유입될 경우 합류부에 유입 직후부터 수심이 급격히 감소되며, 합류부 통과 직후부터 유입유량의 증가에 따라 수심이 급격히 증가되어 상대적으로 점차적으

로 규모가 큰 도수현상이 발생되었다(Case I). 특히 Case I-3의 경우 도수가 두 번 발생하는 것으로 나타났다. Case II에서는 합류 전에 수심이 감소되는 경향을 나타내며 합류부에서는 볼록렌즈 형태의 수면형이 형성된다. 이와 같은 현상은 유량이 증가할수록 더욱 뚜렷해지며, 합류부를 통과한 이후 거의 일정한 수심분포를 나타내었다.

본 연구에서 제시된 45°로 비대칭 연결구조의 수로 합류부에서의 홍수흐름에 대한 수리모형실험 및 수치모의 결과는 도시지역 홍수방재대책 수립과 같은 활용성 측면에서 매우 제한된 경우에 해당되는 것으로 이를 보완하기 위해서는 보다 다양한 각도로 연결되어 있을 경우에 대해서도 수리모형실험 및 수치적 분석이 필요하다. 현재 연결 각도 22.5°와 67.5°에 대해 수리모형실험이 진행 중에 있다.

또한 실제 도시지역 내 도로망과 같이 대칭 및 비대칭 연결이 혼재된 경우에 대해 홍수흐름에 대한 결과를 도출할 필요가 있다. 이를 위해 향후 본 논문의 서론에 제시된 Fig. 1(a)와 같은 도시지역을 선정하여 대칭과 비대칭 연결구조를 가진 도로망에서의 홍수흐름에 대한 모의 및 분석을 수행할 예정이다.

References

- ANSYS Inc. (2010) ANSYS CFX-solver theory guide. Release 13.0, pp. 1-390.
- Best, J.L., and Reid, I. (1984). "Separation zone at open-channel junctions." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, No. 11, pp. 1588-1594.
- Bowers, C.E. (1966). "Study of open channel junctions. Technical paper." *Part V of Hydraulic model studies for Whiting Field Naval Air Station*, Vol. 6(B), pp. 1-250.
- Ghostine, R., Kesserwani, G., Vazquez, J., Riviere, N., and Chenaim, A. (2009). "Simulation of supercritical flow in crossroads: Confrontation of a 2D and 3D numerical approaches to experimental results." *Computer & Fluids*, Vol. 38, pp. 425-432.
- Huang, J.C., Weber, L.J., and Lai, Y.G. (2002). "Three-dimensional numerical study of flows in open-channel junctions." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 3, pp. 268-280.
- Jeong, W.C., Lee, J.W., and Cho, Y.S. (2010) "A Numerical Study on Characteristics of Flow in a Crossroad:

- Case of Crossroad Connected Symmetrically with Inclined Four Roads.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 6, pp. 99–108.
- Khan, A.A., Cadavid, R., and Wang, S.S.Y. (2000). “Simulation of channel confluence and bifurcation using the CCHE2D model.” *Water and Maritime Engineering*, Vol. 142, pp. 97–102.
- Mignot, E. (2005). Etude experimentale et numerique de l’inondation d’une zone urbanisee: cas des ecoulements dans les carrefours en croix. Ph.D. thesis, Ecole Centrale de Lyon, Lyon, France.
- Mignot, E., Paquier, A., and Riviere, N. (2008). “Experimental and numerical modeling of symmetrical four-branch supercritical cross junction flow.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 46, No. 6, pp. 723–738.
- Nania, L.S., Gomez, M., and Dolz, J. (2004). “Experimental study of the dividing flow in steep street crossings.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, No. 4, pp. 406–412.
- Neary, V.S., Sotiropoulos, F., and Odgaard, A.J. (1999). “Three-dimensional numerical model of lateral-intake inflows.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 2, pp. 126–140.
- Paquier, A. (1995). Modelisation et simulation de la propagation de l’onde de rupture de barrage. Ph.D. thesis, Universite de Jean Monnet de Saint Etienne, Saint Etienne, France.
- Riviere, N., and Perkins, R.J. (2004). “Supercritical flow in channel intersections.” Proceedings of the 2nd International Conference on Fluvial hydraulics, Grecco, Carravetta and Della Morte Eds, River Flow 2004, Napoli, Italy, 23–25 June 2004, pp. 1073–1077.
- Schwalt, M., and Hager, W.H. (1995). “Experiments to supercritical junction flow.” *Experiments in Fluids*, Vol. 18, pp. 429–437.
- Shetter, A.S., and Murthy, K.K. (1996). “A numerical study of division of flow in open channels.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 34, No. 5, pp. 651–675.
- Shumate, E.D. (1998). *Experimental description of combining flows at an open channel junction*. Master thesis, University of Iowa, Iowa, USA.
- Weber, L.J., Schumate, E.D., and Mawer, N. (2001). “Experiment on flow at a 90° open-channel junction.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 5, pp. 340–350.

논문번호: 13-030	접수: 2013.03.06
수정일자: 2013.04.17/04.30	심사완료: 2013.04.30