

# 물막이판 설치에 따른 청계천 수리특성 분석

## Study on hydraulic characteristics of Cheonggyecheon as constructed breakwater

유창환\*, 임성빈\*\*, 배덕효\*\*\*

Chang Hwan Yu, Sung Bin Lim, Deg Hyo Bae

### 요 지

2005년에 복원된 청계천은 6년의 시간이 지난 지금 우리나라를 대표하는 도심하천으로 문화·예술의 중심지로 각광을 받고 있다. 청계천 복원 당시 최근 수문자료를 이용한 안정적 설계가 이루어졌고, 양안관거 특성을 고려하여 내수침수의 영향을 감소시키고자 관거내 홍수량을 청계천 주하도에 배제하는 방식이 채택되었다. 하지만 관거에서 발생하는 초기 월류수로 인한 오염물질의 유입 및 돌발강우 시 청계천 내부의 어류 피해 등 수문 운영으로 인한 피해가 빈번하게 발생되었고, 이런 문제를 해결하고자 각 수문에 초기오염원 유입의 저감 방안으로 물막이판이 설치되었다. 현재 각 수문에 설치되어 있는 물막이판의 경우 규모의 적정성 및 최적위치에 대한 수리분석이 수행되지 않았고 그에 따른 청계천 주수로 및 관거내부 흐름특성변화를 예측하기 어려운 것이 사실이다. 이에 본 연구에서는 현재 청계천에 설치되어 있는 물막이판에 따른 관거 내부 홍수위 및 흐름장 변화 등 수리특성을 분석하여 물막이판 설치로 인해 발생할 수 있는 문제점을 파악하고 해결방안을 수립하고자 한다.

**핵심용어** : 물막이판, RMA-2, FLOW-3D

## 1. 서 론

하수도 설계기준(환경부, 2005)에서 제시하고 있는 도심지 관거의 설계기준은 통상 50년빈도로 일반적인 하천의 설계기준 보다 작게 반영되어 있다. 청계천의 경우 주하도의 설계빈도는 200년으로 설계되어 있지만 양안 관거의 경우 100년을 기준으로 설계되어 있어 최근 이상홍수 및 집중호우에 따른 관거의 홍수배제능력이 부족한 것이 사실이다. 2005년 복원된 청계천은 이런 문제점을 개선하고 내수침수의 영향을 감소시키고자 관거내 홍수량을 청계천 주하도에 배제하는 방식이 채택되었고, 일정 강우 시 수문개방을 통해 관거 홍수량을 배제하여 통수능 부족으로 인한 내수침수 영향을 최소화 시키고자 노력하였다. 하지만 초기월류수로 인한 오염물질 유입 및 돌발강우 시 청계천 내부 어류피해 등 수문 운영으로 인한 피해가 발생되었고, 이런 문제를 해결하고자 각 수문에 초기오염원 유입을 저감시키고자 물막이판을 설치하였다. 하지만 현재 청계천에 설치되어 있는 물막이판의 경우 규모의 적정성 및 최적위치에 대한 분석이 수행되지 않아 수리구조물 설치에 따른 관거 내부 흐름특성 변화를 예측하기 어려운 것이 사실이다 이에 본 연구에서는 현재 청계천에 설치되어 있는 물막이판에 따른 관거의 홍수위 및 청계천 주하도의 흐름장 변화를 상용 2·3차원수치모형(RMA-2, FLOW-3D)을 통해 분석하여 물막이판 설치로 인해 발생할 수 있는 문제점을 도출하고 해결방안에 도움을 주고자 한다.

\* 정회원 · 핵코리아 수자원환경부 본부장 · E-mail : changhwan77@hanmail.net  
\*\* 정회원 · 핵코리아 수자원부환경부 과장 · E-mail : lsb@hecorea.co.kr  
\*\*\* 정회원 · 세종대학교 물자원연구소 토목환경공학과 교수 · E-mail : dhbae@sejong.ac.kr

## 2. 연구방법 및 이론적 배경

금회 청계천 내부 수리특성 분석은 수문열림으로 인한 합류부 및 관거내 수리학적 특성을 파악하고자 2차원 흐름모형인 SMS(RMA-2) 모형을 적용하였다. 또한, 2차원 흐름모형으로 정확한 해석이 불가능한 방류흐름의 유동특성을 파악하고자 3차원 CFD 모형인 FLOW-3D를 국부적으로 적용하여 2차원 모형의 한계점을 보완하고자 노력하였다.

RMA-2 모형은 동수역학 문제를 풀기위한 2차원 수심평균, 자유표면 유한요소 프로그램으로 하천, 하구 또는 항구와 같은 수역을 대표하는 유한요소망의 각 격점에서 수위 및 유속을 계산할수 있으며 정상류뿐만 아니라 부정류 상태까지 해석할 수 있다. 지배방정식으로는 연속방정식과 운동량 방정식이 이용되며 각 방정식은 Galerkin의 가중잔차법을 이용하여 풀고 개략해와 정해의 차이인 잔차는 보간·가중함수에 의해 최소화된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left( \epsilon_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial a}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + \tau_y = 0 \quad (2)$$

여기서  $u, v$ :  $x, y$  방향의 유속성분,  $h$ : 수심,  $t$ : 시간,  $g$ : 중력가속도,  $a$ : 하상표고,  $\epsilon$ : 확산계수  $\tau_x, \tau_y$ :  $x, y$  방향으로 작용하는 마찰응력항이다.

본 연구에서 적용한 3차원 모형인 FLOW-3D는 CFD를 이용한 범용 유체역학 프로그램으로, 로스알라모스 국립연구소의 수치유체역학 연구실에서 F. Harlow, B. Nichols 및 T. Hirt 등에 의해 개발된 MAC(Marker and Cell) 방법과 SOLA-VOF (Volume of Fluid)방식을 기초로 하고 있으며 비정상 유동상태에서의 연속방정식과 3차원 운동량 보전 방정식을 이용하여 해석한다.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{v} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial x}(u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(w A_z) &= \frac{RSOR}{\rho} \\ V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u A_x \rho) + \frac{\partial}{\partial y}(v A_y \rho) + \frac{\partial}{\partial z}(w A_z \rho) &= RSOR + RDIF \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x - \frac{RSOR}{\rho V_f} u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y - \frac{RSOR}{\rho V_f} v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + F_z - \frac{RSOR}{\rho V_f} w \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $V_f$ 는 유로의 요소체적,  $A_x, A_y, A_z$ 는 흐름면적의 비,  $\rho$ 는 밀도  $RSOR$ 는 원천질량(mass source) 항,  $RDIF$ 는 난류확산 항이며 는 체적력 및 점성 가속도를 나타낸다

### 3. 2차원 흐름분석

청계천 수리해석을 위해 청계천 실시설계 시 계산되었던 1차원 HEC-RAS 자료를 경계조건으로 적용하여 모형을 수행하였다. 해석범위는 RMA-2 모형의 격자 한계로 인해 3구간으로 분할하여 구성하였고, 과업 대상구간에 대한 입력자료 및 주요 경계조건은 Table1과 같다.

1구간의 경우 상류구간에서 사류가 발생되어 일부단면을 제외하여 수행하였고, 2구간과 3구간은 전단면에 걸쳐 청계천 내부수로와 관수를 함께 수행하여 개수로 및 관수로 흐름의 교환을 유도하였다. 또한 물막이판 설치에 따른 영향을 검토하고자 각 수문의 물막이판 설치 전·후 해석을 통해 관거내 수위 상승 및 유행변화를 분석하여 수리구조물 설치에 따른 흐름의 변화를 분석하였다.

Manning의 조도계수 값의 경우 청계천 내부수로는 대상구간의 하상재료 특성을 판단하여 0.023~0.027으로 적용하였으며, 난류확산계수는 1차원 분석자료를 바탕으로 유속에 따라 250~300N·sec/m<sup>2</sup>를 각각의 구간에 대해 적용하였다.

Table 1. RMA-2 모형구성조건

Case	1구간	2구간	3구간
설계빈도	200년	200년	200년
적용홍수량	본류: 242.1m <sup>3</sup> /s 우안관거: 30.18m <sup>3</sup> /s 좌안관거: 3.668m <sup>3</sup> /s	본류: 242.1m <sup>3</sup> /s 우안관거: 30.18m <sup>3</sup> /s 좌안관거: 3.668m <sup>3</sup> /s	본류: 299.42m <sup>3</sup> /s 우안관거: 24.28m <sup>3</sup> /s 좌안관거: 14.3m <sup>3</sup> /s
적용구간	No.77~No.62(750m)	No.62~No.41(1050m)	No.41~No.23(900m)
모형구성	요소: 4130개 절점: 13790개	요소: 8890개 절점: 26731개	요소: 6358개 절점: 21158개
조도계수	본류:0.027, 관거: 0.02	본류:0.023, 관거: 0.02	본류:0.023, 관거: 0.02
난류확산계수	300 N·sec/m <sup>2</sup>	250 N·sec/m <sup>2</sup>	250 N·sec/m <sup>2</sup>

RMA-2모형을 이용한 물막이판 설치에 따른 청계천 관거 내 유행 및 배수위 영향 분석결과 1구간은 물막이판 설치에 따른 하도-관거의 흐름교환 능력저하로 인해 0.003~0.023m의 관거 수위 상승 현상이 발생되었으며 2구간의 경우 하상경사 및 주수로 고유속 발생구간의 감소로 인해 0.044~0.085m 관거수위가 상승하였다. 이는 2구간에 설치되어있는 물막이판 구조물로 인해 수문의 방류능력 저하되었고 이에따른 방류수 흐름 간섭현상 발생으로 인한 이유로 판단된다. 중랑천 배수위를 고려해야 하는 3구간의 경우 물막이판 설치에 따른 하도 및 관거의 유속변화는 없는 것으로 분석되었고, 홍수위 또한 물막이판 설치 후 0.01m 상승하는 것으로 분석되었다. 3구간의 경우 1·2구간과 비교하여 수문의 설치 개소가 적고 성북천과 정릉천에서 유입되는 합류부 흐름에 의한 배수위 영향으로 물막이판 설치에 따른 관거흐름의 지체 및 흐름장 변화 등 구조물 설치에 따른 직접적인 유행 변화는 미미한 것으로 판단된다.

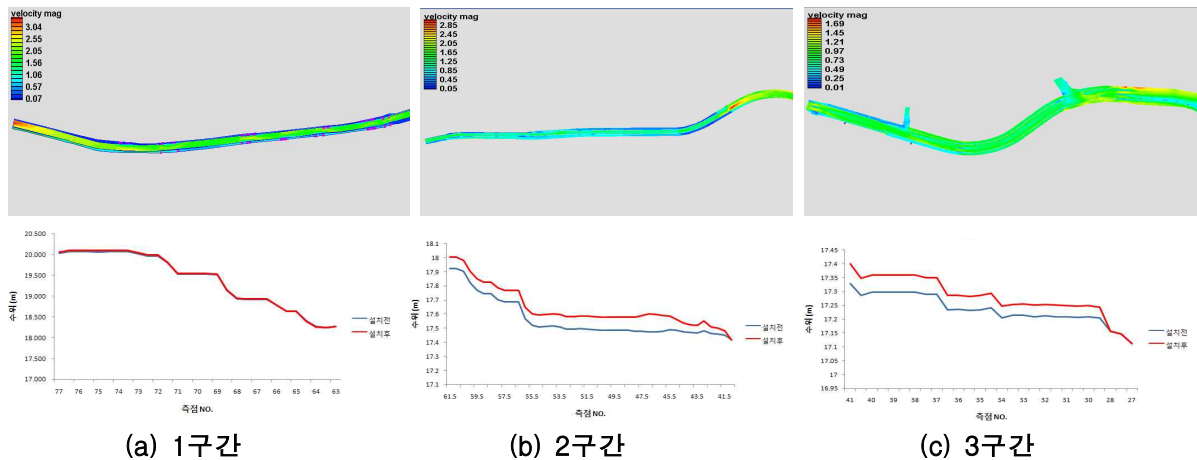


Fig. 1. RMA-2 모형을 이용한 청계천 1~3구간 2차원 유행분석

### 3. 3차원 흐름분석

청계천 중요지점의 국부적 3차원 유동특성을 파악하고자 청계천 설계자료 및 금회측량자료를 기초로 하여 Table2와 같이 2개 중요지점에 대한 3차원 유동해석을 수행하였다.

금회 과업에서 수행되는 청계천 내부 수리해석의 경우 관거와 본류의 경계조건이 다르고 유동특성 또한 상이하기 때문에 FLOW-3D 모형의 수치기법 중 Multi Block기법을 사용하였으며 3D AUTO-CAD에서 구성된 SOLID 파일을 변환하여 입력자료로 사용하였다.

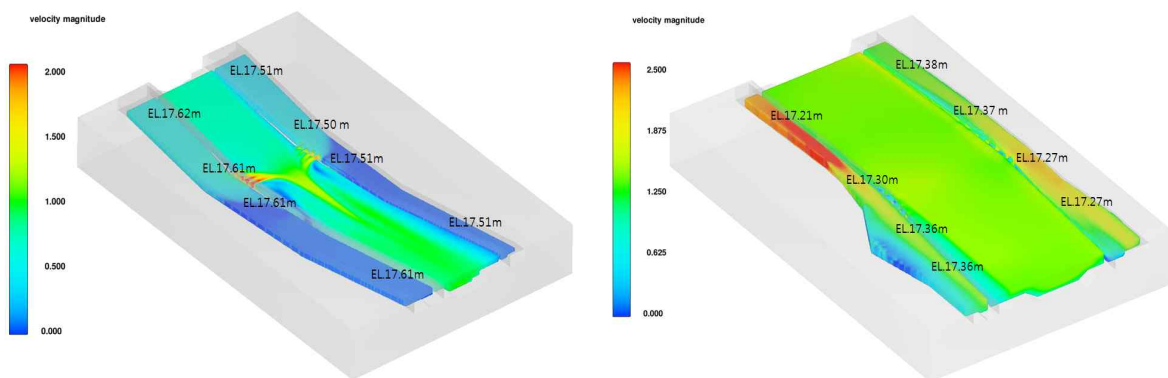
격자생성의 경우 물막이판과 같은 중요지점의 경우 약1m~2m 정도의 세밀한 격자를 사용하였으며 흐름이 단조로운 본류구간의 경우 성긴격자를 구성하여 SOLD를 정확하게 인식하는 한편 불필요한 계산시간을 최대한 단축하려고 노력하였다.

입력 물성치는 밀도( $\rho=999.999\text{kg/m}^3$ ), 동점도( $\nu=0.001\text{Pa}\cdot\text{s}$ ), 중력가속도( $g=980\text{m/s}^2$ )를 사용하였고, 조고값은 OPEN-CHANNEL HYDRULICS(CHOW)에서 제시된 0.1000~3.000을 적용하였다.

Table 2. FLOW-3D 모형구성조건

CASE	모형구성		
	경계범위	경계조건	수행 시간
다산교 지점	x:155m, y:80m, z:8m Total mesh: 2294250 개	본류 ▶ 상류:EL.17.460m, 하류:EL.17.393m 좌안 ▶ 상류:EL.17.485m, 하류:EL.17.475m 우안 ▶ 상류:EL.17.588m, 하류: EL.17.579m	500sec
황학교 지점	x:142m, y:86m, z:10m Total mesh: 1640280 개	본류 ▶ 상류:EL.17.382m, 하류:EL.17.283m 좌안 ▶ 상류:EL.17.449m, 하류:EL.17.298m 우안 ▶ 상류:EL.17.458m, 하류: EL.17.307m	500sec

3차원 유동해석 프로그램 FLOW-3D를 이용한 다산교·황학교 수문 설치지점 3차원 유동해석 결과 다산교 지점의 경우 물막이판 설치로 인해 수문방류량이 좌안 4.65m<sup>3</sup>/sec (-23.8%), 우안 3.46m<sup>3</sup>/sec(28.6%) 감소하였고, 관거내 수위는 전체적으로 0.03m~0.06m 정도 상승하는 것으로 확인되었다. 황학교 지점의 경우 물막이판 설치로 인해 수문방류능력이 좌안 수문의 경우 17.7%(1.44m<sup>3</sup>/sec) 감소하였고, 우안 설치 수문은 21.7%(1.00m<sup>3</sup>/sec) 감소하는 것으로 확인되었다. 이렇게 수문방류량이 감소하고 관거의 수위가 상승하는 이유는 물막이판 구조물 설치로 인한 하도-관거 교환흐름능력이 저하 및 구조물로 인한 지체 및 배수위 발생으로 인한 이유로 판단된다.



(a) 다산교지점 (c) 황학교지점  
Fig. 2. FLOW-3D를 이용한 황학교·다산교 지점 3차원 유동해석 결과

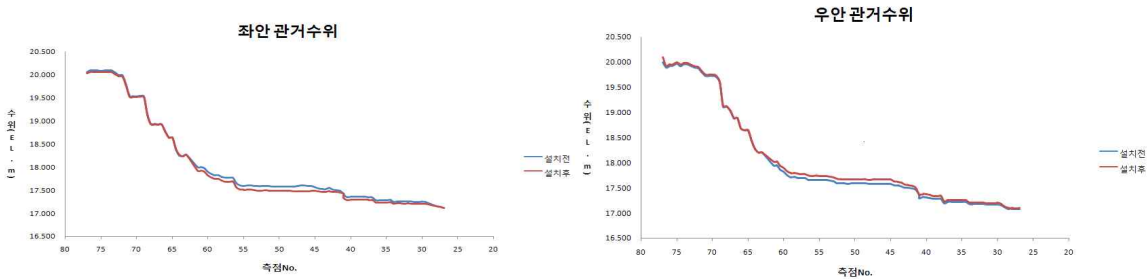
#### 4. 결론

본 연구는 청계천 설계빈도(200년) 적용에 따른 물막이판 설치 전·후 관거의 흐름장 분석 및 홍수위 분석을 수행하였으며, 검토결과는 아래와 같다.

- 1) 물막이판 설치로 인해 관거에서 배출되는 방류흐름이 분리되었고, 국부적인 와류현상이 발생되었다.
- 2) 관거의 폭이 증가할수록 물막이판의 영향은 줄어드는 것으로 확인되었고, 월류량 및 홍수위의 변화 또한 감소하였다.
- 3) 물막이판 설치에 따른 월류수 통수단면적 저하로 인한 국부적인 지체현상이 발생 하였으며, 관거 내부의 홍수위가 상승하는 것으로 확인되었다.
- 4) 각 구간별 물막이판 설치 전·후 홍수위의 표준편차를 분석한 결과 1구간 0.01~0.011, 2구간 0.016~0.022, 3구간 0.030~0.034로 확인되었고, 청계천 전구간의 경우 0.032로 분석 되었다.

Table 3. 1~3구간 수위 표준편차

표준편차	1구간		2구간		3구간		전 공구		통합
	좌안	우안	좌안	우안	좌안	우안	좌안	우안	
	0.010	0.011	0.022	0.016	0.022	0.015	0.034	0.030	0.032



#### 참 고 문 헌

서울시정개발연구원(2003). 청계천복원 타당성 조사 및 기본계획보고서  
 최홍석, 신철식, 박세훈, 류근준(2005) FLOW-3D를 이용한 측수로형 여수로의 방류능력 평가, 대한토목학회 학술발표회.  
 오병동, 김경호, 이환기, 안상도(2004) FLOW-3D에 의한 파살플룸 흐름해석, 한국수자원학회 Flow Since(2003). FLOW-3D User's Manual. Los Alamos, NM, USA.  
 Environmental Modeling Research Laboratory(2000). SMS RMA-2ES ver 4.5 User's Manual. Brigham Young University  
 Hirt,C.W and Nichols(1981). Volume of Fluid(VOF) Method for Dynamics of Free Boundaries. J.Comp.Physics 39,201.