

유신기술회보 24호 | 기술정보

## 청계천 물막이판 설치에 따른 수리특성 분석

### Study on Hydraulic Characteristics of the Cheonggyecheon after Installation of Breakwater

유창환<sup>1)</sup>노정수<sup>2)</sup>공소윤<sup>3)</sup>

1. 서론
2. 연구방법 및 이론적 배경
3. 2차원 흐름 분석
4. 3차원 흐름 분석
5. 결론

The Cheonggyecheon stream, which was restored in 2005, is one of the major urban streams in the Republic of Korea. Now 12 years later after the restoration, it is playing a crucial role under the spotlight of cultural and art activities.

The Cheonggyecheon was restored through a safety-oriented design based on the recent hydrological data to reduce inland inundation risk by excluding flood discharge into the pipelines at the main channel on both sides.

However, the risk frequently occurred such as the flow of pollutant caused by initial overflows from pipelines and fish injury during water gate operation under unexpected rainfall. To solve these issues, a breakwater wall was installed to keep initial sources of pollutants from flowing into each water gate.

It is true that it is difficult to predict flow change characteristics of the main channel and internal pipe since the hydraulic analysis for appropriate of scale and optimal location was not performed in case of breakwater wall currently installed at each water gate.

In this study, hydraulic characteristics such as the change of the flood level and regime in the channel after the breakwater wall installation will be analyzed. On the basis of this analysis, the problems caused by the installation of the breakwater wall will be identified and proper solution planning will be established.

1) 수자원부 차장(yugun@yooshin.com)  
2) 수자원부 차장(js7453@yooshin.com)

3) 수자원부 사원(gsy1326@yooshin.com)

## 1. 서론

하수도 설계기준(환경부, 2005)에서 제시하고 있는 도심지 관거의 설계기준은 통상 50년 빈도로 일 반적인 하천의 설계기준보다 작게 반영되어 있다. 청계천의 경우 주하도의 설계빈도는 200년으로 설 계되어 있지만 양안 관거의 경우 100년을 기준으로 설계되어 있어 최근 이상 홍수 및 집중호우에 따른 관거의 홍수배제능력이 부족한 것이 사실이다. 2005년 복원된 청계천은 이런 문제점을 개선하고 내수침수의 영향을 감소시키고자 관거 내 홍수량을 청계천 주하도에 배제하는 방식이 채택되었고, 일정 강우 시 수문개방을 통해 관거 홍수량을 배제하여 통수능 부족으로 인한 내수침수 영향을 최소화시 고자 노력하였다. 하지만 초기 월류수로 인한 오염 물질 유입 및 돌발강우 시 청계천 내부 어류 피해 등 수문 운영으로 인한 피해가 발생되었고, 이런 문제 를 해결하고자 각 수문에 초기 오염원 유입 감소를 위한 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 청 계천에 설치되어 있는 물막이판에 따른 관거의 홍수

위 및 청계천 주하도의 흐름장 변화를 상용 2·3차 원수치모형(RMA-2, FLOW-3D)을 통해 분석하 여 물막이판 설치로 인해 발생될 수 있는 문제점을 도출하고 해결방안에 도움을 주고자 한다.

## 2. 연구방법 및 이론적 배경

금회 청계천 내부 수리특성 분석은 수문 열림으로 인한 합류부 및 관거 내 수리학적 특성을 파악하고 자 2차원 흐름모형인 SMS(RMA-2) 모형을 적용 하였다. 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 풀기 위한 2차 원 수심평균, 자유표면 유한요소 프로그램으로 하 천, 하구 또는 항구와 같은 수역을 대표하는 유한요 소망의 각 격점에서 수위 및 유속을 계산할수 있으 며 정상류뿐만 아니라 부정류 상태까지 해석할 수 있다. 지배방정식으로는 연속방정식과 운동량 방정 식이 이용되며 각 방정식은 Galerkin의 가중잔차 법을 이용하여 풀고 개략해와 정해의 차이인 잔차는 보간·가중합수에 의해 최소화된다.

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

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

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

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

본 연구에서 적용한 3차원 모형인 FLOW-3D는 CFD를 이용한 범용 유체역학 프로그램으로, 로스 알라모스 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 보존 방정식을 이용하여 해석한다.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{RSOR}{\rho} \tag{3}$$

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uA_x \rho) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y \rho) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z \rho) = RSOR + RDIF$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_w \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x - \frac{RSOR}{\rho V_f} u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_w \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y - \frac{RSOR}{\rho V_f} v \tag{4}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_w \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + F_z - \frac{RSOR}{\rho V_f} w$$

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  $F$ 는 체적력 및 점성 가속도를 나타낸다.

### 3. 2차원 흐름 분석

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 경계 조건은 다음 표와 같다.

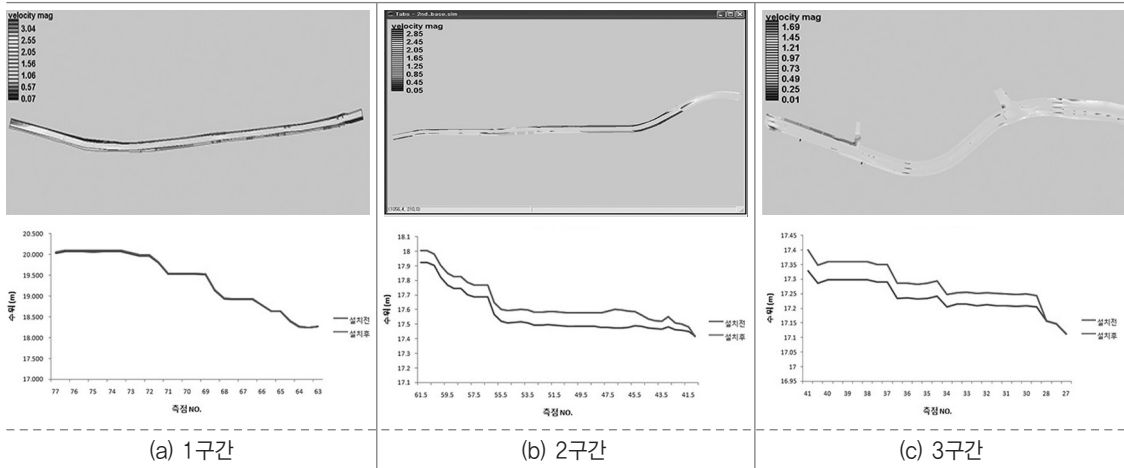
1구간의 경우 상류구간에서 사류가 발생되어 일부 단면을 제외하여 수행하였고, 2구간과 3구간은 전 단면에 걸쳐 청계천 내부수로와 관수로를 함께 수행하여 개수로 및 관수로 흐름의 교환을 유도하였다. 또한 물막이판 설치에 따른 영향을 검토하고자 각 수문의 물막이판 설치 전·후 해석을 통해 관거 내 수위 상승 및 유황변화를 분석하여 수리구조물 설치에 따른 흐름의 변화를 분석하였다.

Manning의 조도계수 값의 경우 청계천 내부 수로는 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.

기술정보

[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 : 0.020	본류 : 0.023 관거 : 0.020	본류 : 0.023 관거 : 0.020
난류확산계수	300 N · sec/m <sup>2</sup>	250 N · sec/m <sup>2</sup>	250 N · sec/m <sup>2</sup>



[그림 1] RMA-2 모형을 이용한 청계천 1~3구간 2차원 유황분석

RMA-2 모형을 이용한 물막이판 설치에 따른 청계천 관거 내 유황 및 배수위 영향 분석결과 1구간은 물막이판 설치에 따른 하도-관거의 흐름교환 능력 저하로 인해 0.003~0.023m의 관거 수위 상승 현상이 발생되었으며 2구간의 경우 하상경사 및 주수로 고유속 발생구간의 감소로 인해 관거 수위가 0.044~0.085m 상승하였다. 이는 2구간에 설치되어 있는 물막이판 구조물로 인해 수문의 방류능력

이 저하되었고 이에 따른 방류수의 흐름 간섭 현상이 발생되었기 때문에 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 물막

이판 설치에 따른 관거 흐름의 지체 및 흐름장 변화 등 구조물 설치에 의한 직접적인 유황 변화는 미미한 것으로 판단된다.

#### 4. 3차원 흐름 분석

청계천 중요지점의 국부적 3차원 유동특성을 파악하고자 청계천 설계자료 및 금회측량자료를 기초로 하여 아래 표와 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 입력 자료로 사용하였다.

격자생성의 경우 물막이판과 같은 중요지점의 경우 약 1m~2m 정도의 세밀한 격자를 사용하였으며 흐름이 단조로운 본류구간의 경우 성긴 격자를 구성하여 SOLID를 정확하게 인식하는 한편 불필요한 계산시간을 최대한 단축하려고 노력하였다.

입력 물성치는 밀도(=999.999kg/m), 동점도(=0.001Pa/s), 중력가속도(=9.80m/s<sup>2</sup>)를 사용하였고, 조도값은 OPEN-CHANNEL HYDRAULICS(CHOW)에서 제시된 0.100~3.000을 적용하였다.

[FLOW-3D 모형구성조건]

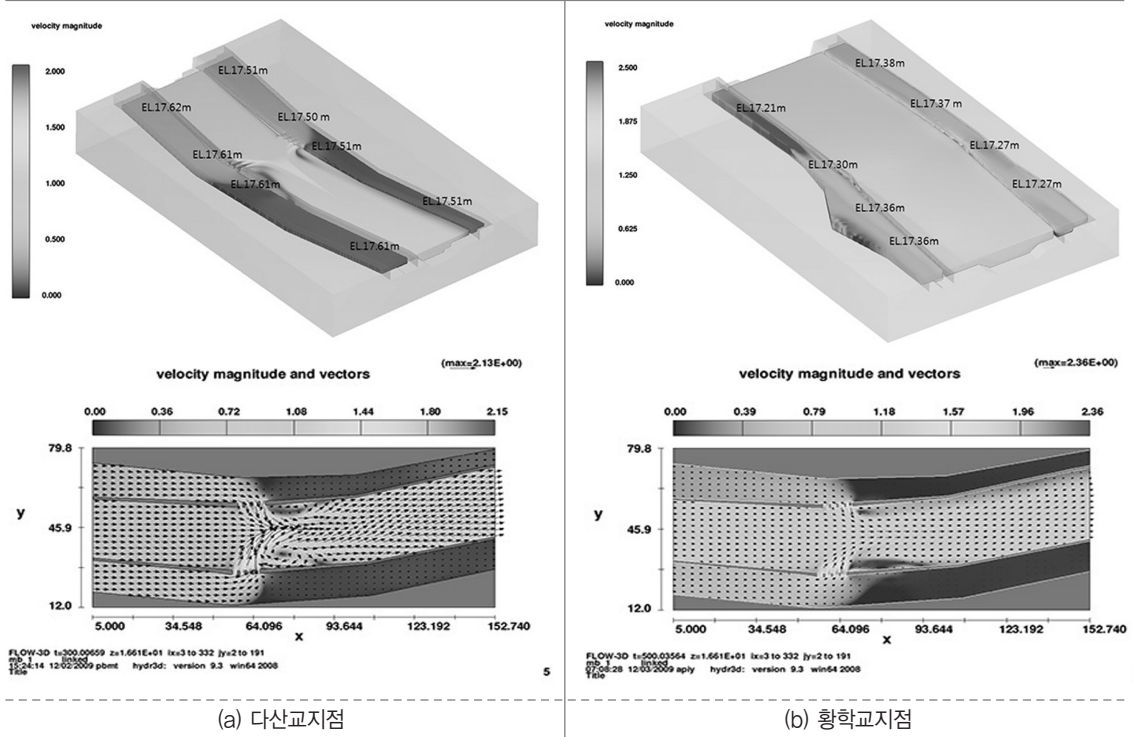
CASE	모형구성		
	경계범위	경계조건	수행 시간
다산교 지점	x:155m, y:80m, z:8m Total mesh : 2294250개	본류 ▶ 상류: EL.17.460m, 하류: EL.17.393m 좌안 ▶ 상류: EL.17.485m, 하류: EL.17.475m 우안 ▶ 상류: EL.17.588m, 하류: EL.17.579m	500s
황학교 지점	x:142m, y:86m, z:10m Total mesh : 1640280개	본류 ▶ 상류: EL.17.382m, 하류: EL.17.283m 좌안 ▶ 상류: EL.17.449m, 하류: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

3차원 유동해석 프로그램 FLOW-3D를 이용한 다산교·황학교 수문 설치지점의 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, 관거 내 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 교환흐름능력의 저하 및 구조물로 인한 지체 및 배수위 발생으로 인한 것으로 판단된다.

기술정보



[그림 2] FLOW-3D를 이용한 황학교·다산교 지점 3차원 유동해석 결과

## 5. 결론

본 연구에서는 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 방류 흐름이 분리되었고, 국부적인 와류현상이 발생되었다.
- 2) 관거의 폭이 증가할수록 물막이판의 영향은 줄

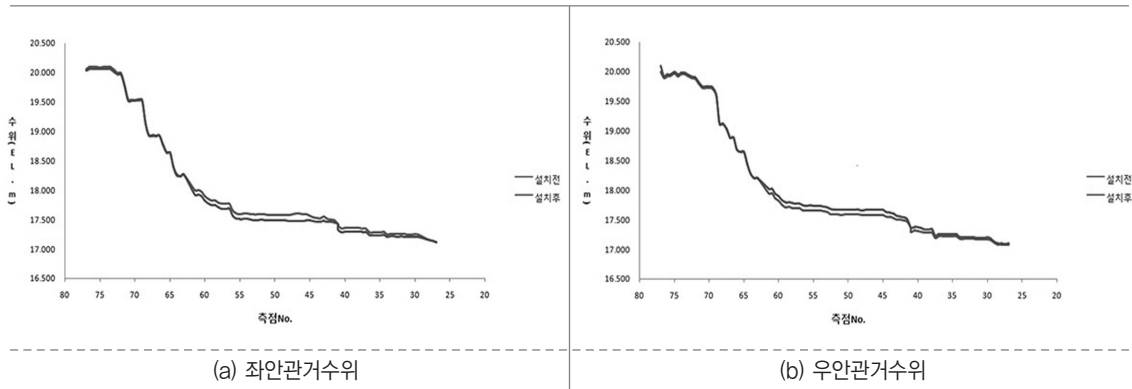
어드는 것으로 확인되었고, 월류량 및 홍수위의 변화 또한 감소하였다.

- 3) 물막이판 설치에 따른 월류수 통수단면적 저하로 인한 국부적인 지체현상이 발생하였으며, 관거 내부의 홍수위가 상승하는 것으로 확인되었다.
- 4) 각 구간별 물막이판 설치 전·후 홍수위의 표준편차를 분석한 결과 1구간 0.010~0.011, 2구간 0.016~0.022, 3구간 0.030~0.034로 확인되었고, 청계천 전구간의 경우 0.032로 분석되었다.

유신기술회보 제24호

[1~3구간 수위 표준편차]

표준편차	1구간		2구간		3구간		전공구		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	



[그림 3] 물막이판 설치 전·후 관거 내 수위비교

본 연구를 통해 분석된 결과는 우리 회사의 하천 정비 및 치수증대 사업 수행 시 도움이 될 것이며, 특히 지류하천 및 우수관거 합류부의 홍수 방어벽 및

비점오염원 방어벽 계획 시 설계방향 수립에 참고자료로 사용되기를 기대한다.