

횡월류 위어 유입각 변화에 따른 유량계수 추정 기초 연구

피원섭¹ · 장형준² · 건계원^{3*}

¹(주)유신 수자원부 전문, ²강원도립대학교 건설지적토목과 강사, ³강원대학교 방재전문대학원 교수

A Study on the Estimation of Discharge Coefficients with Variations of Side Weir Angle

Wan-Seop Pi¹, Hyung-Joon Chang², and Kye-Won Jun^{3*}

¹Senior Managing Director & CFO, Ministry of Water Resources, Yooshin Engineering Corporation

²Lecture, Department of Cadastral & Engineering, Gangwon State University

³Professor, Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University

요약

최근 이상기후의 영향으로 전 지구적 온난화 및 도시화로 인해 세계적으로 기상이변이 늘어나고 있다. 도시화 및 난개발로 인한 불투수 면적의 증가 같은 문제로 홍수량이 증가함에 따라 홍수피해를 줄이기 위한 다양한 방안이 제시되고 있다. 본 연구에서는 사행하천 구간에 설치되는 횡월류 위어 유입각의 변화에 따라 3차원 CFD 모형인 FLOW-3D를 이용하여 흐름 특성과 월류량을 분석하여 횡월류 위어 유입각에 대한 수공구조물의 월류능력 평가 및 유량계수 산정을 위한 기초 연구를 수행하였다. 분석 결과, 횡월류 위어 유입각이 작을수록 횡월류부 통과 후 주수로 흐름의 수위가 감소하고 유속이 증가하였으며, 유입각이 증가할수록 수위가 상승하였고, 유속이 감소하는 경향을 보였다. 또한, 횡월류 위어 유입각이 40° 이상인 경우 직하류 유속이 상류 유속과 비교하여 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 횡월류, 위어 유입각, 유량계수, 월류능력, 수공구조물

ABSTRACT

Recently, due to global warming and urbanization due to the influence of abnormal weather, weather changes are increasing worldwide. Various measures have been proposed to reduce flood damage as flood volume increases due to problems such as an increase in impermeable area due to urbanization and reckless development. In this study, flow characteristics and overflow volume were analyzed using FLOW-3D, a three-dimensional CFD model, in accordance with changes in the cross-flow weir inlet angle installed in the meandering river section, and a basic study was conducted to evaluate the overflow capacity and calculate the flow coefficient. As a result of the analysis, the smaller the inflow angle of the transverse overflow, the lower the water level and flow rate of the main water flow after passing the transverse overflow, and the higher the inflow angle, the higher the water level and the flow rate. In addition, it was confirmed that the direct downstream flow rate decreased compared to the upstream flow rate when the inflow angle of the transverse overflow was 40° or higher.

Keywords: Cross-flow, Discharge coefficients, Weir angle, Overflow capacity, Hydraulic structure

*Corresponding author: Kye-Won Jun, kwjun@kangwon.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0399-1412>

Received: 13 March, 2023, Revised: 25 March, 2023, Accepted: 26 March, 2023



1. 서론

최근 이상기후의 영향으로 전 지구적 온난화 및 도시화로 인해 세계적으로 기상이변이 늘어나고 있으며, 도시화 및 난개발로 인한 불투수면적의 증가 같은 문제로 홍수량이 증가함에 따라 홍수피해를 줄이기 위한 다양한 방안이 제시되고 있다. 최근에는 하천 등 수로에 의한 관리에 한계점을 인식하고 유역 내 홍수량을 분담시키고자 하는 연구가 다양하게 진행되고 있으며, 수로의 유출량을 일시적으로 저류하여 수로 내 홍수유출량을 조절하는 강변저류지의 건설 방안 또한 제시되고 있다.

횡월류 위어는 강변 저류지의 유입부에 설치되는 수공구조물로 유수의 흐름방향과 평행하게 설치되어 유량관리 및 전화, 홍수저감, 에너지 감쇄, 수위조절, 유량의 취수 및 배분, 초과 홍수량의 전환 등을 목적으로 이용된다.

우리나라의 경우 도시개발이나 단지 개발사업의 경우 제한된 토지이용을 극대화하기 위한 경제적인 방안의 일환으로 침투홍수량 조절용 off-line저류지가 설치되고 있으며, 이와 같은 off-line저류지에 홍수량의 일정량을 흘려보내기 위한 방안으로 횡월류 위어를 설치하고 있다.

현재 국내에 설치되어 있는 대대수의 횡월류 위어는 유수의 흐름방향과 평행하게 설치되어 있으나 저류지의 설치 위치 특성에 따라 횡월류 위어 유입각을 수로의 흐름방향과 평행하게 설치 못하는 경우가 자주 발생하고 있다. 또한 사행하천에 설치되는 횡월류 위어는 하도의 흐름 특성을 고려하지 못하는 경우가 대다수이며, 횡월류 위어의 설치위치 및 특성에 따른 구조물의 능력 검토가 필요하다는 요구가 높아지고 있는 실정이다.

국내에서는 2000년대 들어서 횡월류 위어에 대한 연구가 시작되었으며, 여러 가지 조건을 감안한 연구가 수행되고 있으나 아직까지는 부족한 실정이다. 국내 최초의 연구자인 Park(2002)은 구형 수로의 횡월류 흐름에 대한 2차원 방정식을 적용한 수치모의 수행을 통하여 횡월류 위어의 흐름을 분석하였으며, Rhee et al.(2006)은 실험 연구를 통해 예연위어 형태의 횡월류 위어에 대하여 기존의 유량계수 산정공식에 대한 분석과 위어부의 유속벡터를 분석하였다.

최근에는 횡월류 위어의 흐름특성을 모의하고 유량계수를 산정하기 위하여 3차원 상용프로그램인 FLOW-3D 모형(Flow Science, Inc., 2003)을 이용한 연구가 많이 수행되고 있다. Lee and Rhee(2004)는 FLOW-3D 모형을 이용한 횡월류 위어의 흐름특성에 대하여 수치모의를 수행하여 유량계수를 산정하였고, Kim and Kim(2007) 또한 FLOW-3D 모형을 사용하여 Lee and Holley(2002)의 실험결과 내용과 비교하고, 광정 횡월류 위어에서의 흐름특성에 대하여 분석하였다.

기존 연구는 대부분 직선 형태의 수로에 평행하게 설치되어 있는 횡월류 위어의 유량계수 산정에 집중되고 있는 한계점이 있으므로 본 연구에서는 사행 하천 수로에서 형성되는 흐름을 분석하고 횡월류 위어 유입각에 대한 수공구조물의 월류능력 평가 및 유량계수 산정을 위한 기초 연구를 수행하였다.

2. 기본이론

2.1 횡월류 위어의 기본개념

위어는 하천에 설치하여 수로를 가로막고 일부분 흐름을 발생시켜 유량을 측정하는 장치로 수위저감, 유량배분과 유량조절 등의 목적으로 사용된다. 횡월류 위어는 본류수로의 수심이 수로의 측면부에 설치된 위어 월류부 마루보다 높아지면 위어를 통해 물을 월류시키는 구조물로서 에너지 감소, 수위의 감소, 일부 유량의 취수와 배분, 홍수저감 등의 목적으로 사용되는 수리구조물이다. 횡월류 위어는 Dam의 측수로식 여수로나 off-line저류지, 관개를 위한 배수로, 상하수도 설비 등에서 많이 사용되고 있다.

아래 Fig. 1은 횡월류 위어의 흐름을 표현한 개념도이다. 여서서 B 는 본류폭, S_0 는 본류수로의 하상경사, L 은 위어의 폭, w 는 위어의 높이, Q 는 본류의 유량, Q_w 는 횡월류량, y_u 는 상류 월류수심, y_d 는 하류 월류수심이다.

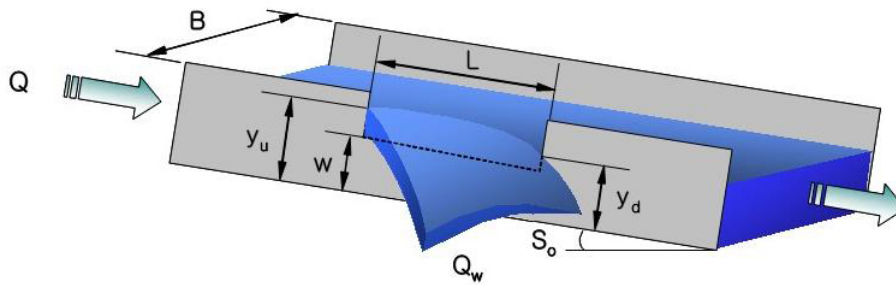


Fig. 1. Conceptual diagram of side weir flow

2.2 모형이론

FLOW-3D 모형은 비정상 유동상태를 해석할 수 있으며, 연속방정식과 3차원 Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식 사용하여 유체 및 열 유동 해석을 수행한다. 또한 구조물과 같은 복잡한 경계를 표현하기 위해 유한차분법에 직육면체의 요소로 일반 형상을 정의할 수 있는 FAVOR 방법을 도입한 유한체적법(FVM) 형식을 취하고 있다. FLOW-3D 모형에서 사용하는 난류모형으로는 Prandtl의 혼합길이 모형, 1-방정식 모형과 2-방정식 모형인 모형, RNG 모형, LES 모형 등 5가지가 있다.

2.3 수치모형 구성

사행하천에 횡류 위어 유입각 변화에 대한 수치모형 실험을 위해 수로 길이 450 m, 수로 폭 20 m, 수로높이 15 m, 곡률 반지름 15 m의 구형 사행수로를 3D AUTO CAD 프로그램을 이용하여 구성하였다.

사행하천의 흐름특성을 고려하여 상류에서 225 m 구간에 횡류 위어를 설치하였고, 위어폭과 본류폭 비 L/B 는 1.33으로 유입량은 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 고정하였다. 횡류 위어의 유량계수의 중요한 결정인자인 Froude 수에 따른 횡류량 측정을 위해 수로경사를 0.1~0.5%로 변환시키면서 모형을 수행하였고, 횡류 위어의 유입각을 Fig. 2와 같이 $0\sim 50^\circ$ 변화시키며 모형을 수행하였으며, 수치모형 실험 조건은 Table 1과 같이 나타내었다.

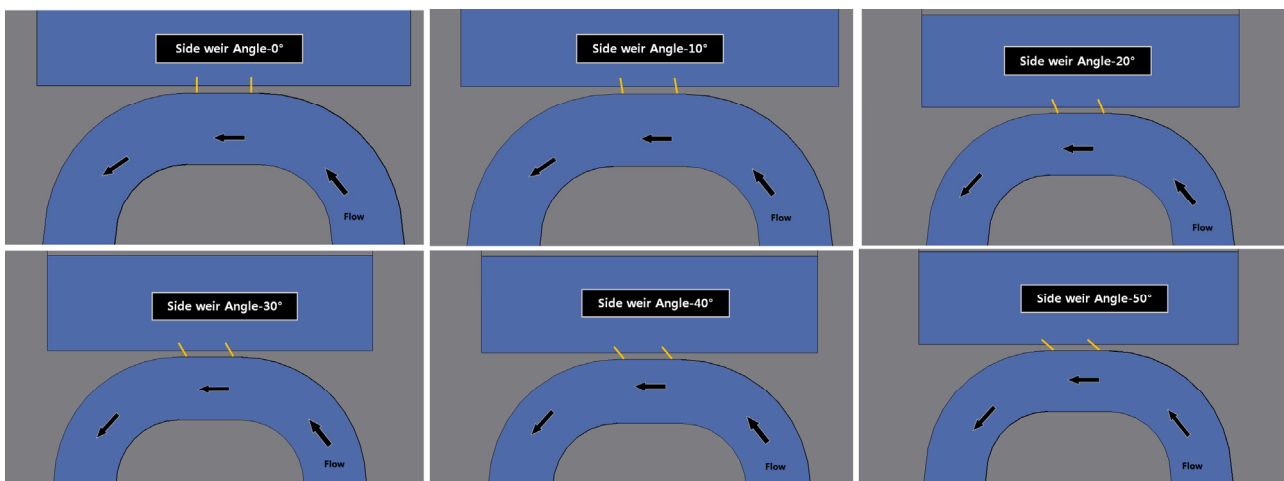


Fig. 2. Side weir installation shape by angle of inflow

Table 1. Experimental conditions for side weir 3D numerical model experiment

| Weir shape | Crest shape | Weir height (m) | L (m) | S0 (%) | Q (m ³ /s) | Angle of inflow (°) |
|----------------|-------------|-----------------|-------|--------|-----------------------|---------------------|
| Rectangle weir | Flat top | 3.0 | 15 | 0.1 | 300 | 0° |
| | | | | 0.2 | | 10° |
| | | 5.0 | | 0.3 | | 20° |
| | | | | 0.4 | | 30° |
| | | | | 0.5 | | 40° |
| | | | | | | 50° |

격자망 구성은 FLOW-3D 모형 내부의 격자생성 기능을 사용하였으며, 해석시간과 해석의 정밀도를 고려하여 결정하였다. 격자의 크기는 횡월류 위어 부근의 흐름이 급변하는 곳은 격자를 세밀하게 구성하였다. 사용된 격자의 수 및 크기는 Table 2에 나타내었으며, 격자망은 Fig. 3에 도시하였다.

Table 2. Outline of grid networks in numerical model

| Direction | Section (m) | Grid number | Cell size (m) |
|-------------------|-------------|-------------|--|
| X | 170 | 260 | Minimum cell size = 0.375 Maximum cell size = 1.016 |
| Y | 30 | 60 | Minimum cell size = 0.267 Maximum cell size = 0.751 |
| Z | 13 | 35 | Minimum cell size = 0.149 Maximum cell size = 0.751 |
| Total grid number | | 546,000 | |

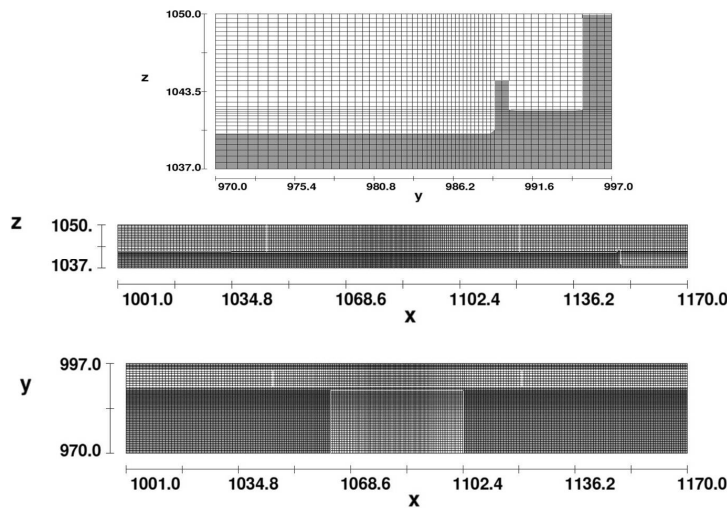


Fig. 3. Composition of numerical model grid

횡월류 위어 설치 유입각에 따른 3차원 수치모형의 경계조건으로 유입부는 유량조건(Volume flow rate), 유출부는 수위 조건(Specified pressure)을 적용하였다. 유입부 경계는 모형의 안정성 및 원활한 흐름을 위해 수심을 7.0 m 유지하였고, 유출부의 경우 특별한 조건 없이 수로경사에 따른 흐름을 유도하고자 경계조건을 입력하였다. 각 방향에서의 경계조건은 Zmin과 Ymax는 벽(Wall) 경계조건을 입력하여 비활동조건(no slip condition)을 입력하였으며, Zmax의 경계조건은 흐름이 존재하지 않는 면으로 조화(Symmetry), 횡월류 위어가 설치되는 Xmin의 경우 안정적인 월류수 배제를 위해 수위(Specified

pressure) 조건을 적용하여 모형의 안정화를 도모 하였다.

3. 수치모형 분석 결과

3.1 흐름특성 분석

사행하천 횡월류 위어 유입각에 따른 흐름특성 및 월류능력 검토를 위해 3차원 CFD 모형인 FLOW-3D를 이용하여 횡월류 위어 유입각에 유동변화를 분석하였고, 분석결과 Table 3과 같이 수행 CASE별 흐름특성 및 월류능력에 대하여 결과가 도출되었다.

Table 3. Results of numerical model experiment

| No. | Waterway slope (%) | Width (m) | Weir width (m) | Weir high (m) | L/B | Side weir Q (m ³ /s) | Fr_u | h (m) | w/y_u | Angle of inflow (°) |
|-----|--------------------|-----------|----------------|---------------|------|---------------------------------|--------|-------|---------|---------------------|
| 1 | 0.1 | 20 | 15 | 3.0 | 1.33 | 232.45 | 0.312 | 7.416 | 0.405 | 0 |
| 2 | 0.2 | 20 | 15 | 3.0 | 1.33 | 239.04 | 0.299 | 7.476 | 0.401 | 0 |
| 3 | 0.3 | 20 | 15 | 3.0 | 1.33 | 243.38 | 0.278 | 7.724 | 0.388 | 0 |
| 4 | 0.4 | 20 | 15 | 3.0 | 1.33 | 247.37 | 0.289 | 7.625 | 0.393 | 0 |
| 5 | 0.5 | 20 | 15 | 3.0 | 1.33 | 262.73 | 0.287 | 7.940 | 0.378 | 0 |
| 6 | 0.1 | 20 | 15 | 5.0 | 1.33 | 140.23 | 0.211 | 7.850 | 0.637 | 0 |
| 7 | 0.2 | 20 | 15 | 5.0 | 1.33 | 146.09 | 0.217 | 7.790 | 0.642 | 0 |
| 8 | 0.3 | 20 | 15 | 5.0 | 1.33 | 151.51 | 0.208 | 7.990 | 0.626 | 0 |
| 9 | 0.4 | 20 | 15 | 5.0 | 1.33 | 157.23 | 0.191 | 8.220 | 0.608 | 0 |
| 10 | 0.5 | 20 | 15 | 5.0 | 1.33 | 180.87 | 0.201 | 8.640 | 0.579 | 0 |
| 11 | 0.1 | 20 | 15 | 3.0 | 1.33 | 240.76 | 0.331 | 7.646 | 0.392 | 10 |
| 12 | 0.2 | 20 | 15 | 3.0 | 1.33 | 242.43 | 0.332 | 7.634 | 0.393 | 10 |
| 13 | 0.3 | 20 | 15 | 3.0 | 1.33 | 248.45 | 0.348 | 7.701 | 0.390 | 10 |
| 14 | 0.4 | 20 | 15 | 3.0 | 1.33 | 253.40 | 0.364 | 7.697 | 0.390 | 10 |
| 15 | 0.5 | 20 | 15 | 3.0 | 1.33 | 263.83 | 0.378 | 8.320 | 0.361 | 10 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

3.2 횡월류 위어 유입각 변화에 따른 수면형 변화

횡월류 위어 유입각에 따른 주수로 수면형 변화의 예시를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 횡월류 위어 유입각이 0°인 경우 Frazer(1954)의 실험에서 확인된 횡월류 위어 수면형 중 (a)의 형태를 보이고 있으며, 횡월류 위어 통과 후 수심은 증가하고, 유속은 감소하는 경향을 보인다. 횡월류 위어 유입각이 10°, 20°, 30°의 경우 Frazer(1954)의 수면형 중 (c), (d), (e)의 형태를 보이며, 횡월류 위어부를 통과한 흐름의 수위가 상승하고 유속이 감소되는 경향을 보였다.

횡월류 위어의 높이가 3.0 m인 경우 40°, 50°에서 횡월류 위어를 통과한 흐름이 도수와 같은 형상으로 상류보다 높은 수위를 순간적으로 발생하며 하류로 가면서 안정되는 현상을 보이는데 이는 횡월류 위어로 유입되는 흐름이 지체되어 주수로 흐름의 단절현상을 발생시키는 이유로 판단된다.

모든 CASE의 수면형 및 유속변화를 분석한 결과, 횡월류 위어를 통과하는 지점에서 최대유속이 발생되며 최소 2.43 m/s, 최대 5.00 m/s까지 고유속이 형성되는 것으로 확인되었다. 이는 횡월류 위어부 상류 유속과 비교하여 평균 2.0~3.5 m/s 유속이 증가하는 것으로, 횡월류 위어 구조물 설치 시 고유속 및 소류력에 대한 적절한 대책이 필요할 것으로 판단되는 결과이다.

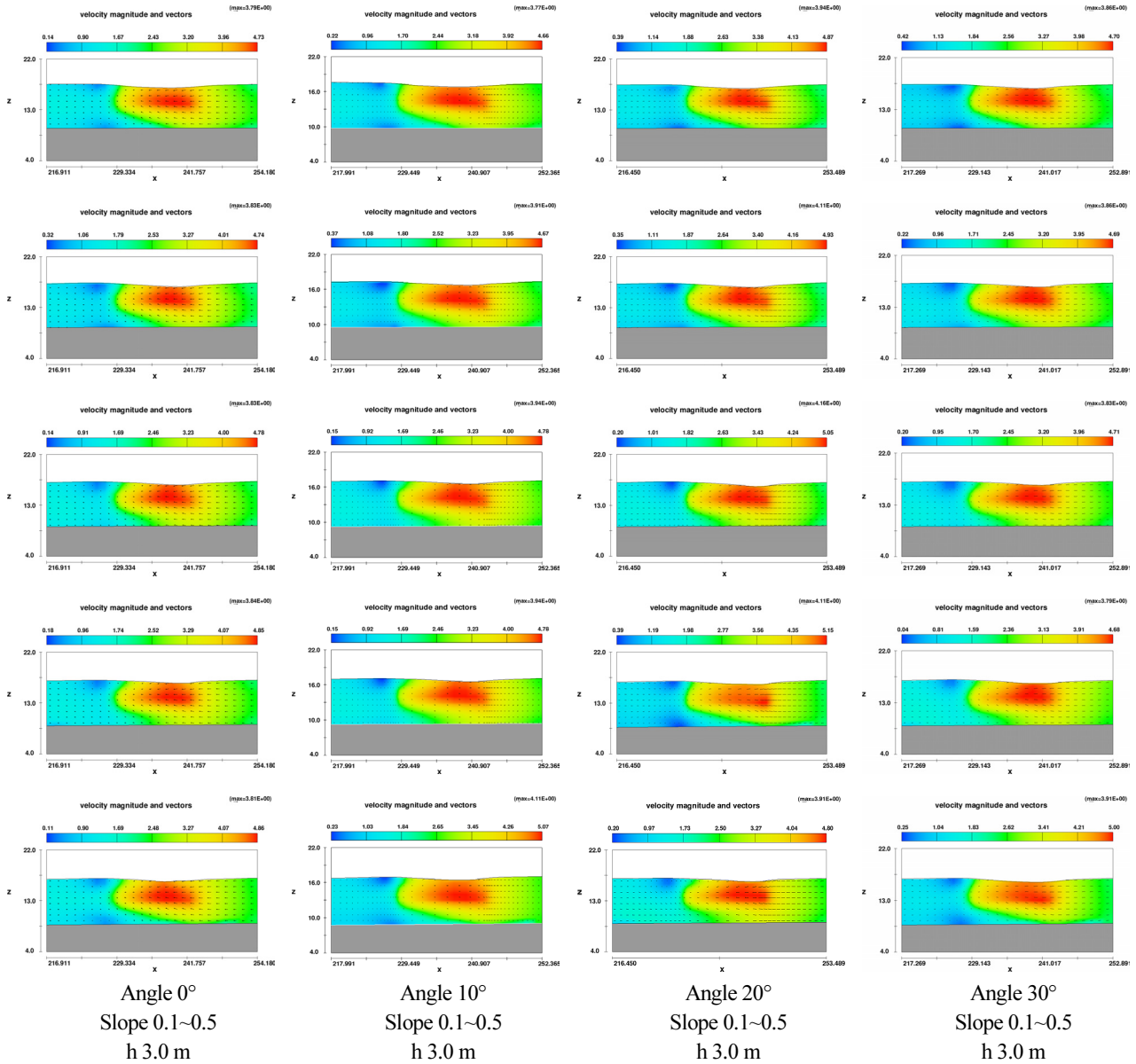


Fig. 4. Change in water surface type

3.3 사행하천 횡월류 위어 유입각 변화에 따른 유속변화

사행하천 횡월류 위어 유입각에 따른 유속변화 양상을 분석하기 위해 횡월류 위어 설치 직상·하류지점에 수심별 유속을 측정하여 Fig. 5와 같이 그래프로 표시하였다. 분석결과 횡월류 위어 유입각이 0°인 경우 상류에서 유입되는 흐름이 횡월류 위어 지점을 통과하면서 Fig. 5와 같이 수위는 증가하고 수로에서 발생하는 유속이 감소하는 것으로 확인되었다. 10°, 20°, 30°의 경우 0°의 흐름과 비슷한 양상을 보이고 있으나 유속감소 폭이 0°의 경우보다 적은 것으로 확인되었다.

10°, 20°, 30°의 경우 횡월류 위어 통과 후 주수로 유속이 직상류와 비교하여 동일 수심 지점 평균 2.53 m/s 감소하는 것으로 확인되었다. 이는 횡월류 위어의 월류능력 저하 및 수공구조물로 인한 주수로 흐름의 지체현상에서 발생하는 것으로 판단된다.

상대적으로 수로의 경사가 급경사인 경우 상·하류 유속 변화는 미미하였고, 완경사수로의 경우 상·하류 유속차이가 크게 증가하는 것으로 확인되었다.

수치모형 실험결과 횡월류 위어 직하류 수위가 감소하면 유속은 증가하였고, 수위가 상승하면 상류와 비교하여 주수로의 유속이 감소하는 것으로 확인되었다. 또한, 주수로 경사가 급경사인 경우 상·하류 유속의 차이는 미미한 반면 완경사수로의 경우 상·하류 유속의 차이가 크게 발생하는 것으로 확인되었다.

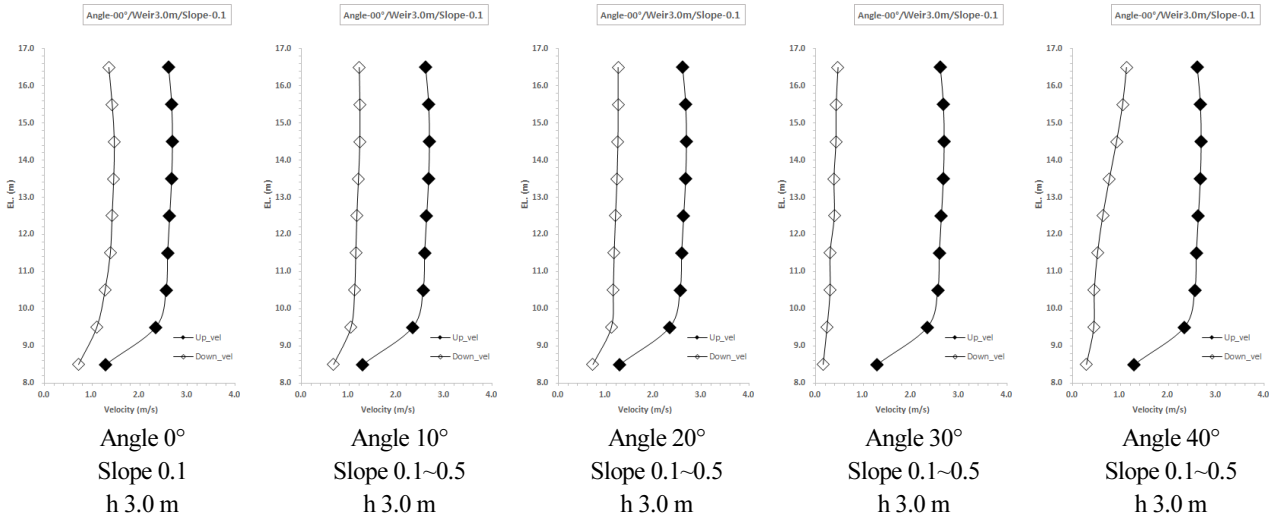


Fig. 5. Up·down stream velocity

3.4 횡월류 위어 유입각 변화에 따른 Fr_u 변화

Froude 수는 횡월류 위어의 유량계수에 가장 밀접하게 관련되어 있는 인자로 대부분의 기존 연구자들의 대부분은 유량계수와 Fr_u 의 관계를 해석하였다.

본 연구에서는 횡월류 위어 유입각에 따른 월류위어부 상·하류지점의 Fr_u 변화를 측정하여 Fr_u 의 변화를 Fig. 6과 같이 도시하였다.

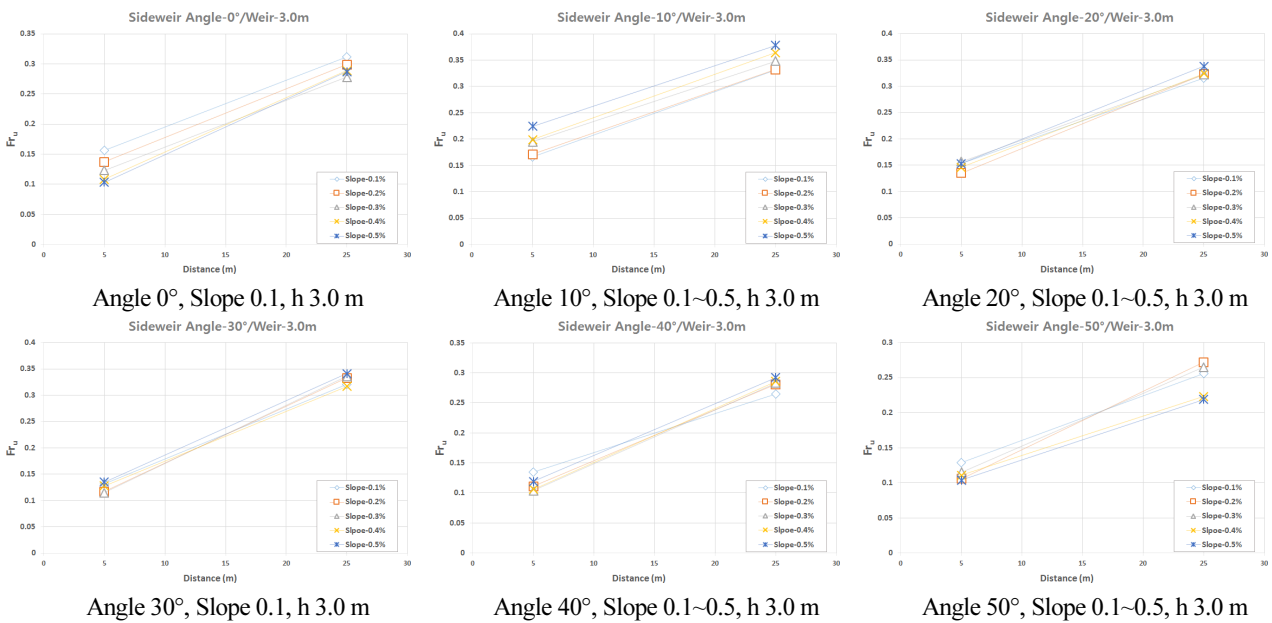


Fig. 6. Up·down stream Froude number

Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 횡월류 위어 유입각이 0°, 10°, 20°, 30°인 경우 횡월류 위어 상류와 비교하여 하류의 Fr_u 가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 횡월류 위어 유입각이 40°, 50°인 경우 횡월류 위어 지점을 통과하는 흐름의 Fr_u 가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 지점 통과 후 형성되는 주수로 흐름의 수위와 유속에 대한 상관관계로 이해할 수 있다. 횡월류 위어 유입각 변화에 대한 주수로 흐름의 변화를 분석한 결과 횡월류 위어 유입각이 증가하면서 통과 후 주수로 흐름의 수위가 상승하며, 유속은 감소되는 경향을 확인할 수 있었고, Fr_u 가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 횡월류 위어 유입각이 0°에 가까울수록 통과 흐름의 수위와 유속은 감소하였고, Fr_u 는 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 사행하천구간에 설치되는 횡월류 위어 유입각의 변화에 따라 3차원 CFD 모형인 FLOW-3D를 이용하여 흐름 특성과 월류량을 분석하여 횡월류 위어 유입각에 대한 수공구조물의 월류능력 평가 및 유량계수 산정을 위한 기초 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 횡월류 위어 유입각이 작을수록 횡월류부 통과 후 주수로 흐름의 수위가 감소하고 유속이 증가하였으며, 유입각이 증가할수록 수위가 상승하였고, 유속이 감소하는 경향을 보였다. 또한 횡월류부를 통과하는 흐름에서 평균 38% 유속이 증가하였다. 이러한 결과로, 횡월류 위어 구조물 설치지점에 고유속 및 소류력에 대한 대책이 필요할 것으로 사료된다.
- (2) 횡월류 위어 유입각 및 수로경사에 따른 횡월류부 직상·하류 수심 별 유속 측정결과 유입각이 0°, 10°, 20°, 30°인 경우 직하류 지점에서 유속이 증가하였으며, 유입각이 클수록 유속증가 폭은 감소하는 것으로 확인되었다. 또한, 횡월류 위어 유입각이 40° 이상인 경우 직하류 유속이 상류 유속과 비교하여 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구의 결과를 바탕으로 향후 유량계수를 산정하고자 하며, 산정된 유량계수를 통하여 유량계수식을 산정하고자 하며, 추후 수리실험 등 더 많은 연구와 실험을 통하여 유량계수식의 보완과 검증이 필요할 것으로 판단된다.

References

- Flow Science, Inc. (2003). FLOW-3D User's Manual. Los Alamos, New Mexico.
- Frazer, W. (1954). The Behaviour of Side Weirs in Prismatic Rectangular Channels. Ph.D. Thesis. University of Glasgow (United Kingdom).
- Kim, Dae Geun and Yong Geun Kim. (2007). Analysis of the Flow over Broad Crested Side Weir by Using Three-Dimensional Numerical Simulation. Journal of Korea Water Resources Association. 40(3): 277-286.
- Lee, Du Han and Dong Sop Rhee. (2004). Transverse Weir Flow Coefficient Review and Research Direction Setting. Water for Future. 37(6): 82-90.
- Lee, K.-L. and E. R. Holley. (2002). Physical Modeling for Side-Channel Weirs. Center for Research in Water Resources. University of Texas at Austin. 115-120.
- Park, Tae Sun. (2002). Flow Characteristics of a Side-Weir in Rectangular Channel. Journal of Korea Water Resources Association. 35(3): 251-259.
- Rhee, Dong Sop, Chang Wan Kim, and Dong Kee Lee. (2006). Experimental and Comparative Analysis about Discharge Coefficient of Sharp-Crested Side Weir. Proceedings of the Korean Water Resources Society Academic Presentation. 1295-1299.

Korean References Translated from the English

- 김대근, 김용근 (2007). 3차원 수치모의를 이용한 광정횡월류 위어의 흐름특성 해석. 한국수자원학회 논문집. 40(3): 277-286.
- 박태선 (2002). 구형 수로내 횡월류 흐름의 특성. 한국수자원학회 논문집. 35(3): 251-259.

이동섭, 김창완, 이동기 (2006). 횡월류예연위어 유량계수에 관한 실험 비교 연구. 한국수자원학회 2006년도 학술발표회 논문집. 1295-1299.

이두한, 이동섭 (2004). 횡월류위어 유량계수 검토 및 연구방향 설정. 물과 미래(한국수자원학회 학회지). 37(6): 82-90.