

연구논문

3차원 수치모형에 의한 횡월류위어의 수리학적 평가

남기영* · 한건연* · 박홍성** · 김극수*** · 최승용*

경북대학교 건축·토목공학부*, 한국수자원공사**, 한국건설기술연구원 하천해안항만 연구실***
(2009년 10월 29일 접수, 2010년 4월 14일 승인)

The Hydraulic Assessment of Side Weir using 3D Computational Fluid Dynamics Program

Nam, Ki Young* · Han, Kun Yeun* · Park, Hong Sung** ·
Kim, Keuk Soo*** · Choi, Seung Yong*

School of Architecture & Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea*
Korea Water Resources Corporation, Daejeon, 306-711, Korea**
River, Coastal and Harbor Research Division, Korea Institute of Construction Technology,
Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea***

(Manuscript received 29 October 2009; accepted 14 April 2010)

Abstract

The objectives of this study are to analyze flow characteristics for a side weir, which is an inlet structure for flow discharge reduction in the main channel through 3 dimensional numerical analysis and to understand the efficiency of the overflow effect at the side weir. In this study over 40 simulations using FLOW-3D, a computational fluid dynamics program were conducted, and the results were analyzed to find the influence of the flow hydraulics, geometry, channel and weir shapes on the coefficient. It is especially considered the relatively high stage in downstream that may cause flow within channel to be backed up along the channel. Additionally by setting up the scale of simulations much larger than the existing test equipment designed by other researchers, it is intended to analyze more accurate hydraulic behavior along with the realistic hydraulic features such as structures and volumes of flow. The results show that for design with subcritical flow only if the Froude number of upstream is sustained below 0.5 and the length of weir is 33-100% of the width of channel, it is expected to improve the efficiency of the overflow over a side weir.

Keywords : overflow effect, side weir, FLOW-3D

1. 서론

최근의 기상변화에 의한 이상홍수와 유역의 도시화로 인한 불투수면적의 증가는 홍수시 유출량을 증가시켜 기존의 하도의 적정 소통량을 초과하는 홍수를 발생시키고 있다. 토지의 고도 이용으로 하도의 하폭이 제한된 도시유역에서 초과 홍수에 대비할 수 있는 구조적 홍수관리 방안은 제방增高, 저류지 설치, 방수로 설치 등이 대표적이다. 저류지는 하천에 유입되는 홍수를 일시적으로 조절하여 하도의 적정한 홍수 소통능력을 초과하는 유출을 억제하는 구조물로 국내외에서 널리 이용되는 구조적 홍수대책의 하나이다.

최근의 국내 도시 홍수 발생 양상은 몇 가지 특징을 나타내고 있다. 인구 및 시설이 밀집된 도심의 수해 발생이 빈발하고 있으며, 홍수량 증가 및 도시화로 인하여 피해액이 급증하고 있다. 또한 제방위주의 구조적 치수대책에 지나치게 의존하여 홍수 피해 잠재능은 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 상황에도 불구하고 하천변의 집중개발로 하도의 홍수 소통 능력은 감소하고 있는 것이 현실이다. 특히 2002년 태풍 루사 및 집중호우, 2003년 태풍 매미 등으로 인한 피해에서 볼 수 있듯이, 홍수피해가 급격하게 대형화 되어가고 있다. 이러한 피해의 규모는 당분간 증가하거나 최근의 추세를 유지할 것으로 예상되어 홍수피해에 대한 예방적 투자가 절실하고 보다 효율적인 수자원 관리 및 방재 대책이 요구되는 실정이다.

오래전부터 댐은 홍수조절을 위한 최대의 효과를 발휘할 수 있는 구조물로 치수를 위해 그 역할을 충분히 수행하여왔다. 그러나 최근에는 환경문제와 안전성의 문제 등으로 인하여 대규모 다목적댐의 건설이 난관에 부딪히고 있다. 따라서 그 대안으로 강우 유출수를 일시 저류하여 유출량을 조절하는 우수유출 억제시설인 천변저류지와 소규모의 홍수 조절용 댐을 함께 건설하는 방안이 제시되고 있다. 일반 저류지와 다목적 지하저류지의 구체적인 형태는 다양하나 구조적 형식을 크게 유입부, 저류부, 유출부의 세 가지로 나눌 수 있다. 저류부는 단순히

게 물을 저류시키는 공간으로 용량만 결정되면 설계 및 시공에서 큰 문제는 없으며, 유출부 또한 홍수가 지난 이후 유출되는 형식에 따른 공학적인 문제는 크지 않다. 그러나 유입부의 경우 명확한 해석이 불가능한 경우가 많은데 특히 오프라인 저류지 타입의 유입형태인 횡월류위어의 경우는 정확한 유입량 산정이 어려운 실정이다. 저류지의 유입부에 설치되는 횡월류위어는 유량관리, 에너지 소실, 유량 전환, 수심규제, 홍수통제 등의 수단으로서 많은 나라에서 사용되는 가장 오래되고 단순한 수공구조물이다. 많은 종류의 위어의 정의는 매우 단순하고 유사하지만 각각의 수리학적 거동과 적용성은 상당한 차이를 보인다. 측면으로의 유량전환을 위해 하도의 측면에 위치하는 횡월류위어는 수리학적 계획에서 중요 구조물로서 빈번하게 사용된다. 횡월류위어의 다양한 기하학적, 수리학적 형상의 사용과 횡월류위어가 설치되는 하도단면의 변화로 인해 횡월류위어에 대한 다양한 관점에서의 연구가 수행되어져 왔다. 횡월류위어는 상류 또는 사류 흐름을 가지는 하도에 사용될 수 있으며 각각의 흐름은 특정한 수리학적 거동을 갖는다. 그러나 상류흐름은 공학적인 계획에서 더욱 실용적이며 본 연구에서의 관심이 된다.

횡월류위어의 흐름 특성에 관한 연구에서 De Marchi(1934)에 의해 수행된 이론적 연구에서는 흐름의 비에너지가 일정하다는 가정하에서 횡월류위어 마루부의 수면형 변화를 제시하였으며, 이에 따른 유량계수식을 제안하였다. Ackers(1957)는 대략적인 유량계수의 값을 상수로 가정할 수 있다고 주장한데 반해, Collinge(1957)는 유량계수는 하도의 평균 유속에 의해 변화한다고 제안하였다. Subramanya and Awasthy(1972)는 실험을 의해 유량계수가 결정될 수 있음을 주장하면서 하도로부터 월류하는 흐름에 베르누이 방정식을 적용하여, 유량계수는 프루드수의 항으로 결정된다고 밝히고, 상류와 사류에서의 유량계수를 프루드수의 항으로 제시하였다. Ranga Raju(1975)는 예연횡월류위어와 광정 횡월류위어를 분류하여 유량계수를 제시하기도 하

였다. Hager and Volkart(1986)은 횡월류위어의 수와 위어고의 변화에 따른 흐름 특성을 연구하였으며, Hager(1987)는 하도형상, 위어유입부의 각도 변화에 따른 위어월류의 강도를 제시하였다. Singh *et al.*(1994)은 위어고에 따른 유량계수식을 산정하였으며, Borghei(1999)는 유량계수 영향인자에 대한 민감도 분석을 실시하고 위어길리와 하도폭의 비를 고려한 유량계수산정식을 제시하였다.

국내 연구의 경우 이세범(1983)은 De Marchi산정식과 이도오산정식(수리학연습, 1979)을 실험결과와 비교하였으며, 박태선(2002)은 구형 수로내의 횡월류 흐름에 대한 2차원 천수방정식을 이용한 수치모의를 통해 흐름특성을 분석하였다. 최근 이두한 등(2005, SSAD 건기연)은 3차원 수치모형인 FLOW-3D에 의한 모의결과를 Hager(1982)의 실험결과와 비교하고, 흐름특성을 분석하기도 하였다.

본 연구에서는 저류지의 유입부 구조물인 횡월류위어에 대해 3차원 수치해석을 통해서 그 흐름특성을 분석하고자 한다. 일반적으로 수치해석은 흐름 특성 분석을 위한 경제적인 방법이지만 신뢰도에 있어서 수리모형실험에 비해 다소 약한 것으로 평가된다. 이는 주로 흐름 특성의 복잡한 3차원 흐름에 대한 모의의 한계와 경계조건 설정의 문제에서 기인하는 바가 크다. 그러나 본 연구에서 다루게 되는 횡월류위어의 경우 일반적인 하천과는 달리 경계가 명확하여 수치해석을 통한 접근방법이 상당히 유효한 문제에 속한다. 그리고 최근의 수치모의는 컴퓨터 연산 능력의 발달로 복잡한 흐름구조를 LES(Large Eddy Simulation) 등의 난류모형을 이용하여 실제에 가깝게 모의할 수 있는 수준에 이르렀다고 판단된다. 최근 국내에서도 몇 년 사이에 수리구조물 해석에 3차원 모형이 이용되는 사례가 증가하고 있으며 그 결과는 수리모형실험과 비교하였을 때 비교적 우수하게 평가받고 있다(도시홍수사업단, 2005). 그리고 수리모형실험에서는 측정할 수 없는 다양한 자료를 수치모의를 통해 경제적으로 확보할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 저류지와 횡월류위

어의 크기를 반영하여 홍수조건에 가까운 유량이 발생하는 조건에서의 주하도내 유량감소 목적의 횡월류위어의 거동을 해석하였으며 이를 통하여 월류효과와 효율성을 파악하였다.

II. 횡월류위어의 이론 및 흐름특성

1. 횡월류위어 기본 이론

횡월류위어는 저류지의 측면에서 일정 수심 이상의 유량이 수로에서 유입되도록 유도하는 시설로서 수리학적으로 공간에 따라 유량이 변하는 점변류에 해당된다. 횡월류위어에 의한 유량의 변화는 수로로 유량이 공급되는 경우(유량증가)와 위어에 의해 수로로의 유량이 감소하는 경우(유량감소)로 나눌 수 있으며, 이에 따라 수리학적 해석방법이 달라진다. 가장 큰 차이는 수로의 유량이 증가하는 경우에는 수로에 공급되는 유량에 의해 에너지 감소를 해석해야 하며, 반대로 유량이 감소하는 경우에는 에너지 감소를 고려하지 않으므로 해석이 간단해진다. 즉 유량이 증가하는 경우에는 에너지 감소를 계산하기 위해서 운동량 방정식의 적용이 필요하나, 유량이 감소하는 경우에는 에너지 방정식으로 충분히 해석할 수 있다. 본 연구에서는 횡월류위어를 대상으로 하므로 유량 감소에 해당한다.

1) 횡월류위어 기본개념

횡월류위어의 수면 형상은 Henderson(1996)에 의하면 그림 1과 같이 네 가지 형태로 나눌 수 있다. 먼저 상류부의 흐름이 상류인 경우에 횡월류위어에서 도수가 일어나는 경우와 일어나지 않는 경우가 있으며, 상류부의 흐름이 하류인 경우에도 도수가 일어나는 경우와 일어나지 않는 경우로 나눌 수 있다. 흐름이 상류상태이고 도수가 일어나지 않는 경우 (a)에는 일반적으로 하류의 수위가 증가하는 양상을 보인다. 또한 그림 (b)와 같이 상류부의 흐름이 상류 상태임에도 위어에 의한 유량유출로 도수가 발생할 수 있다. 즉, 도수의 여부는 흐름상태와 관계없이 위어 유출에 지배적인 영향을 받을 수 있다.

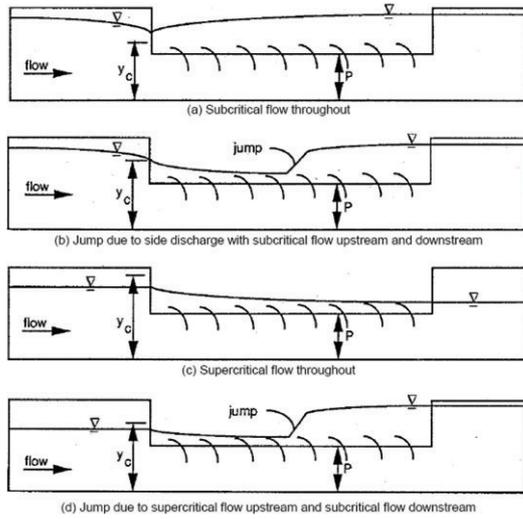


그림 1. 횡월류위어의 수면형상

이와 같은 도수는 주수로의 하도경사가 완경사라 하더라도 충분히 발생할 수 있음을 고려하여야 한다. 흐름이 상류 상태임에도 도수가 발생할 수 있다는 것은 수위계산시에 충분히 고려하여야 하며, 이것은 횡월류에 의한 유출의 변화와 수면형변화에 대한 고려 없이는 주수로의 합리적인 수위계산을 수행할 수 없다는 것을 의미한다.

2. 횡월류위어의 유량계수에 영향을 주는 인자

횡월류위어의 월류량은 유량계수(C_M)와 월류수심(y)의 함수이며 유량계수(C_M)는 본류 직상류부의 프루드수, 위어길이, 본류하도폭, 위어고, 본류수심, 하도경사의 함수이며 월류수심(y)은 본류의 흐름특성과 관련되어 다양한 거동양상을 보인다.

1) 프루드수(Froude number)

기존의 많은 연구자들이 유량계수를 상류부 프루드수의 함수로서 제안하고 있다. Subramanya and Awasthy(1972), Ranga raju *et al.*(1972), Hager(1987), Cheong(1991)은 유량계수를 제안함에 있어 프루드수의 함수로 나타내었으며, 그 이후 Sinah *et al.*(1994), jalil and Borghei(1999) 역시 프루드수와 본류수심과 위어고의 비의 함수로서 유량계수를 제안하였으며 이후 Borghei and Ghodsian

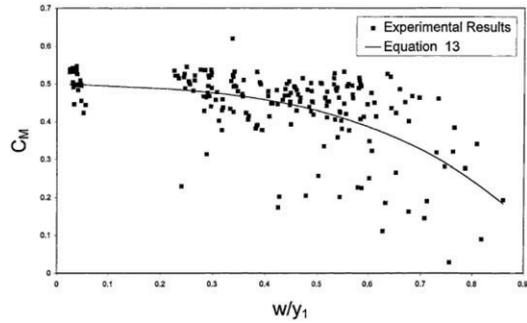


그림 2. C_M 과 h/y_1 의 상관관계(Borghei, 1999)

(1999)는 프루드수, 본류수심과 위어고의 비, 위어 길이와 본류폭의 비의 함수로서 표현하였다. 이러한 기존 연구자들의 연구에서 프루드수가 증가함에 따라 유량계수는 작아지는 경향을 일반적으로 보여 주고 있다.

2) 위어의 기하학적 특성

위어길이와 본류폭의 비(L/B)와 위어고와 본류수심의 비(h/y_1)으로 대표되는 위어의 기하학적 특성 또한 기존의 연구자들에 의해 다양한 연구가 이루어져 왔다. Ramamurthy and Carballada(1980)은 위어길이와 본류폭의 비가 유량계수에 영향을 주는 것을 보고하였으며, Singh *et al.*(1994)은 위어고와 본류수심의 비가 위어길이와 본류폭의 비보다 더 큰 영향을 준다고 보고하였다. 또한 Jalili and Borghei(1996)은 위어고와 본류수심의 비가 증가할수록 유량계수는 감소한다고 밝힌 바 있다. 또한 Borghei and Ghodsain(1999)의 연구에서는 그림 2와 같이 C_M 과 h/y_1 의 상관관계를 보고하기도 하였다.

III. FLOW-3D 모형의 개요 및 기본 이론

1. 개요

FLOW-3D는 Flow Science, Inc에서 개발한 범용 유체역학 프로그램이다. 로스알라모스 국립연구소의 Harlow and Nichols 및 Hirt에 의해 개발된 MAC(Marker and Cell) 방법과 SOLA-

VOF(Volume of Fluid)방식을 기초로 구동되며 Hirt에 의해 발전되었으며 1985년부터 FLOW-3D로 명명하였다. 그 후 난류, Shallow Water, 응고 등 다수의 기능이 포함되어 현재의 상용 프로그램이 되었으며 수리학뿐만 아니라 일반 산업공정 해석에도 널리 사용되고 있다. 해석모듈과 전·후처리기로 구성되어 있고, 해석모듈은 포트란, 전·후처리기는 C언어를 주로 사용하고 있으며 거의 모든 컴퓨터 기종에서 사용이 가능하다. 해석방법은 기본적으로 비정상 유동 상태이며, 연속방정식, 3차원 운동량 보존 방정식 및 에너지 방정식을 유체 및 열 유동 해석 그리고 유체로부터 또는 유체로의 열전달에 의한 고체 내의 온도는 열전도에 의한 에너지 교환을 에너지 방정식 생성항으로 사용하여 해석하고 있다.

2. 기본 이론

1) 지배방정식

연속방정식(Continuity Equation)은 흐름의 특성에 따라 다음과 같다.

① Simplest Case

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

② Incompressible Flow

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{RSOR}{\rho} \quad (2)$$

③ Compressible Flow

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uA_x \rho) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y \rho) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z \rho) = RSOR + RDIF \quad (3)$$

여기서, A_x, A_y, A_z : 유체 흐름을 위해 확보된 면적의 비(area fraction),

V_f : 체적비(volume fraction)

ρ : 밀도(density)

$RSOR$: 질량 생성/소멸(mass source/sink)항

$RDIF$: 난류 확산항

운동량방정식(Momentum Equations)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_x \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \quad (4)$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x - \frac{RSOR}{\rho V_f} u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_x \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \quad (5)$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y - \frac{RSOR}{\rho V_f} v$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_x \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \quad (6)$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + F_z - \frac{RSOR}{\rho V_f} w$$

여기서, F : Forces (Gravity, Non-Inertial Body Acceleration, etc.)

$RSOR$: Accelerations Caused by Mass Injection at Zero Velocity

기체와 접하고 있는 액체 표면의 형상은 VOF (Volume Of Fluid) 함수, $F(x, y, z, t)$ 를 통해 얻을 수 있다.

2) 수치기법

연속체로 정의된 방정식을 컴퓨터로 해석하기 위해서는 이의 차분화가 필요하며 차분화하는 방식은 크게 유한요소법과 유한차분법으로 나눌 수 있다. FLOW-3D는 기본 유한차분방식에 FAVOR를 도입한 유한체적법을 사용하고 있다. 일반적으로 해석을 하게 되면 해석 영역을 작은 격자로 나눈 후, 이 격자 단위로 계산이 이루어지게 된다. FAVOR (Fractional Area/Volume Representation)은 직각형 격자 안에 들어있는 일반 형상을 기술하는 방법으로 각 직각형 격자의 각 면들이 전체 또는 일부가 유체가 출입할 수 없는 물체에 의해 막혀있을 수 있다고 정의하는 것이다. 그러므로 한 직각형 격자에서 유동물질이 차지하는 부피 및 이 매체가 통과하는 면적이 정의되며 이 격자 안에서의 질량, 에너지, 운동량들에 대한 통과 면적에 대한 유입량을 고려한 방정식들의 유한 체적 적분을 통해 일반 물체 주위의 유동에 대한 영향을 기술하게 된다. 따라서, 경계밀착좌표계의 좌표변환을 하지 않는 유한차분법 사용시 가장 큰 문제의 하나인 계단형 격자

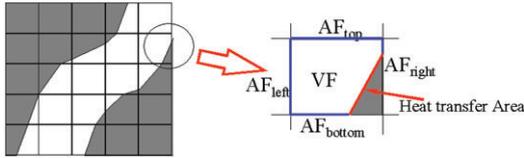


그림 3. FAVOR (Fractional Area/Volume Representation)의 개념

에 의한 결과의 정확도 저하를 해결하였다.

FLOW-3D는 앞서 기술된 지배방정식을 유한 차분과 유한 체적 근사를 통하여 푼다. 흐름 영역은 고정 직사각형 격자로 세분되고, 유속을 제외한 모든 변수들은 격자의 중심에 위치하고 유속에 관한 변수는 격자의 표면에 위치하게 된다. 지배방정식의 이산화된 수치적 근사를 위해 각 종속변수의 위치들로 둘러싸인 검사체적이 정의된다. 각각의 검사체적, 표면 흐름율, 표면 응력, 체적력이 둘러싸고 있는 변수값들의 향으로 계산되며, 이러한 계산량들은 운동방정식으로 표현되는 질량 보존의 법칙을 위한 근사 형태로 결합된다.

IV. 모의 및 결과

1. 모의 조건

형일류위의 합리적인 유량계수를 결정하기 위해서 표 1과 같은 모의 조건에 대해서 모의를 수행하였다. 주요 모의 변수는 상류경계의 수위조건과 하도폭이며, 흐름조건은 상류흐름으로 제한하였으며, 특히 실제 하도흐름에서 발생할 가능성이 있는 하류수위조건에 따른 월류량의 변화정도를 예측하

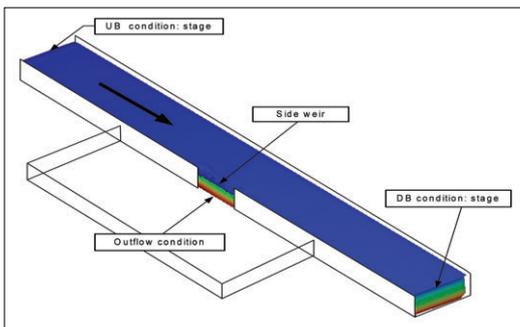


그림 4. 수치모형의 경계 조건 설정

표 1. 모의조건

Case name	U/B condition (m)	D/B condition (m)	weir height (m)	weir width (m)	channel length (m)	channel width (m)	channel slope
B20L20_UB12.5	12.5						
B20L20_UB13.0	13.0						
B20L20_UB13.5	13.5						
B20L20_UB14.0	14.0	12	10	20	200	20	-
B20L20_UB14.5	14.5						
B20L20_UB15.0	15.0						
B20L20_UB15.5	15.5						
B20L20_UB16.0	16.0						
B40L20_UB12.5	12.5						
B40L20_UB13.0	13.0						
B40L20_UB13.5	13.5						
B40L20_UB14.0	14.0	12	10	20	200	40	-
B40L20_UB14.5	14.5						
B40L20_UB15.0	15.0						
B40L20_UB15.5	15.5						
B40L20_UB16.0	16.0						
B60L20_UB12.5	12.5						
B60L20_UB13.0	13.0						
B60L20_UB13.5	13.5						
B60L20_UB14.0	14.0	12	10	20	200	60	-
B60L20_UB14.5	14.5						
B60L20_UB15.0	15.0						
B60L20_UB15.5	15.5						
B60L20_UB16.0	16.0						
B80L20_UB12.5	12.5						
B80L20_UB13.0	13.0						
B80L20_UB13.5	13.5						
B80L20_UB14.0	14.0	12	10	20	200	80	-
B80L20_UB14.5	14.5						
B80L20_UB15.0	15.0						
B80L20_UB15.5	15.5						
B80L20_UB16.0	16.0						
B100L20_UB12.5	12.5						
B100L20_UB13.0	13.0						
B100L20_UB13.5	13.5						
B100L20_UB14.0	14.0	12	10	20	200	100	-
B100L20_UB14.5	14.5						
B100L20_UB15.0	15.0						
B100L20_UB15.5	15.5						
B100L20_UB16.0	16.0						

기 위해 하류수위조건을 유지시켜 모의를 수행하였다. 모의의 사용된 격자수는 95,680개에서 262,080개로서 격자간격은 흐름의 중요도에 따라

0.5m에서 5m범위의 정사각형 격자를 사용하였다.

2. 상류단 수위 변화의 영향

횡월류위의 제원은 표 1과 같으며 동일한 위어 고와 위어폭에 대해 상류경계조건을 변경하며 모의를 수행하였다. 각 모의조건에 대한 위어부 수위변화와 하도부 수위변화결과를 그림 5와 6에 나타내었다. 일반적으로 횡월류부의 수위는 위어시작부(90m지점)에서 94m까지 다소 감소하며 96m지점부터 106m지점까지 완만하게 상승하며 106m지점부터 위어종단부(110m)까지는 다소 급격하게 상승

함을 보여주고 있다. 이러한 경향은 하도 중앙 지점에서의 수위와 위어부 수위에서 모두 나타나지만 위어부에서의 수위변화는 위어부에서의 점축효과로 인하여 위어시작부에서 4~6m 정도 떨어진 지점에서 수위의 최저점이 나타나는 것을 확인할 수 있으며 이후 다시 수위는 증가한다. 이는 횡월류위에 의한 수위저감효과는 상류단의 유입유량 및 접근유속에 의해 영향을 받는다는 것을 의미한다. 위어의 종단부에서의 급격한 위어부수위의 증가는 하도하류수위의 통제현상과 함께 위어부근에서 나타나는 와류, 그리고 하류부수위의 증가양상에 따른

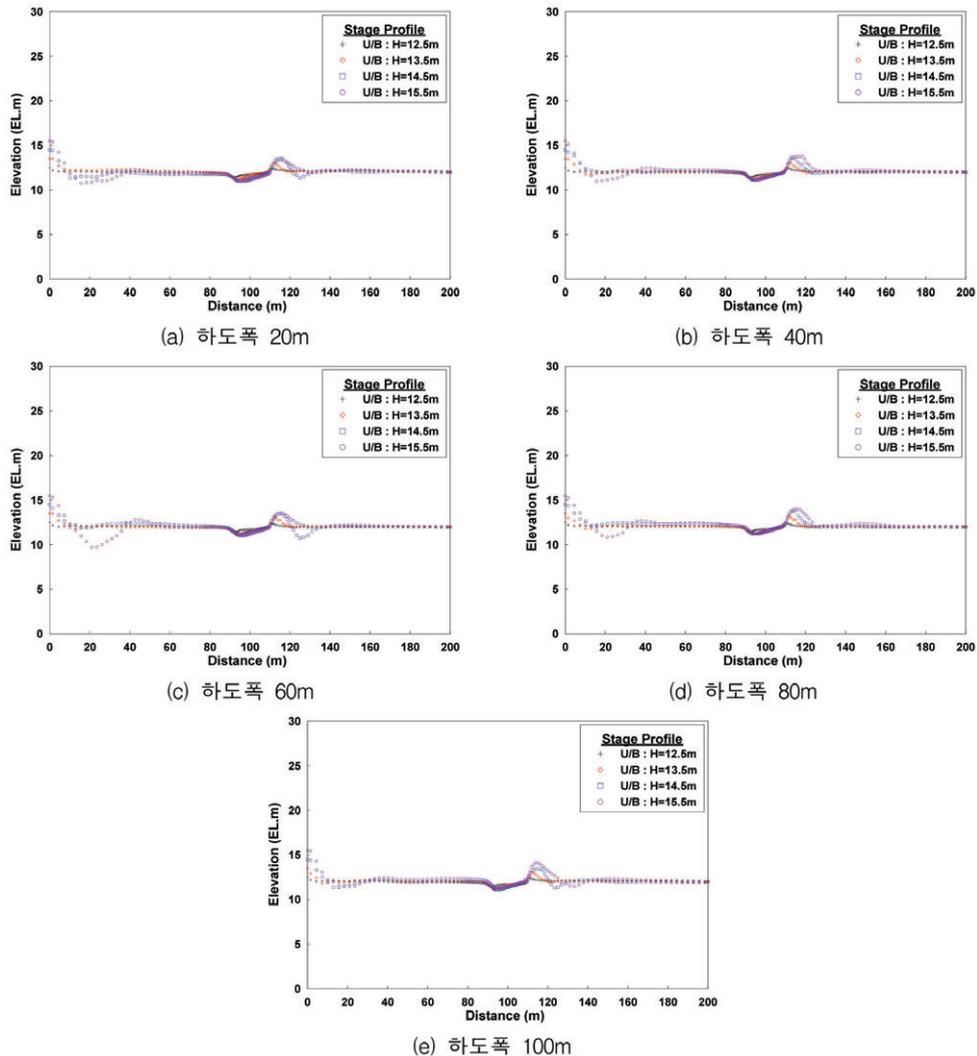
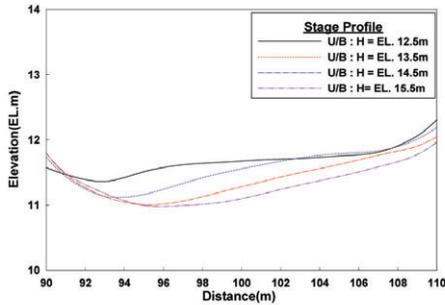
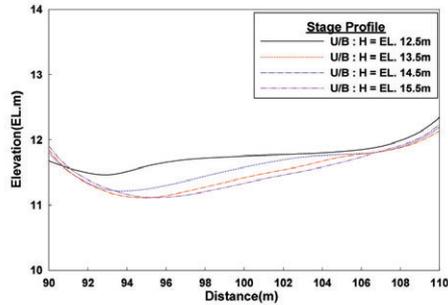


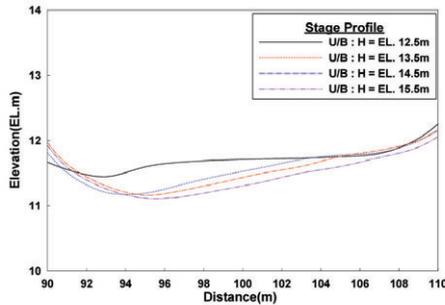
그림 5. 하도 내 수위변화



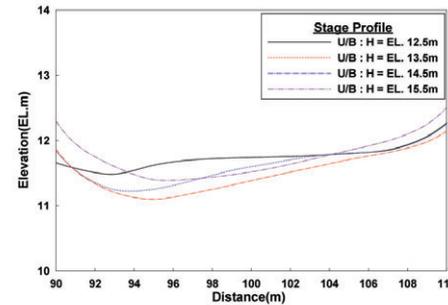
(a) 하도폭 20m



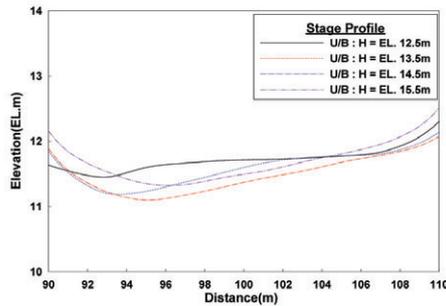
(b) 하도폭 40m



(c) 하도폭 60m



(d) 하도폭 80m



(e) 하도폭 100m

그림 6. 위어부 수위변화

유속감소와 관련되어진다.

동일한 하도폭에 대해 상류단 경계수위의 증가에 따라 위어부 수위는 최대 0.5m 정도로 다소 감소하는 경향을 보이며 위어부 수위차는 하도폭이 증가함에 따라서 위어부의 최대수위차는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 상류수위의 증가에 따른 하도내의 접근유속의 증가로 인한 효과로 볼 수 있다. 하도부수위에 있어서 하도폭이 비교적 좁을 경우에 있어서 상류단 경계수위의 증가에 따라 하도수위는 감소하는 경향을 가지며 이는 하도부유속과 관련된다. 위어길이에 비해 하도폭이 상대적

으로 커지는 경우에 있어서는 위어의 하도부 흐름에 대한 영향효과가 적어지면서 하도수위의 변화에는 영향을 미치지 못하는 것으로 추정할 수 있다.

그림 7은 위어지점별 월류량을 도시한 것이다. 위어총길이는 20m이며 2m간격으로 10개의 구간에서 구간별 월류량을 표시하였다. 위어월류량은 유량계수와 관련되며 유량계수는 하도수위와 위어고, 하도유속, 위어길이와 하도폭의 비, 하도경사 등의 요소에 관련된다. 일반적으로 유량계수의 가장 큰 영향인자는 프루드수이며 유량계수와 프루드수는 반비례관계에 있다. 전반적인 위어월류양상은

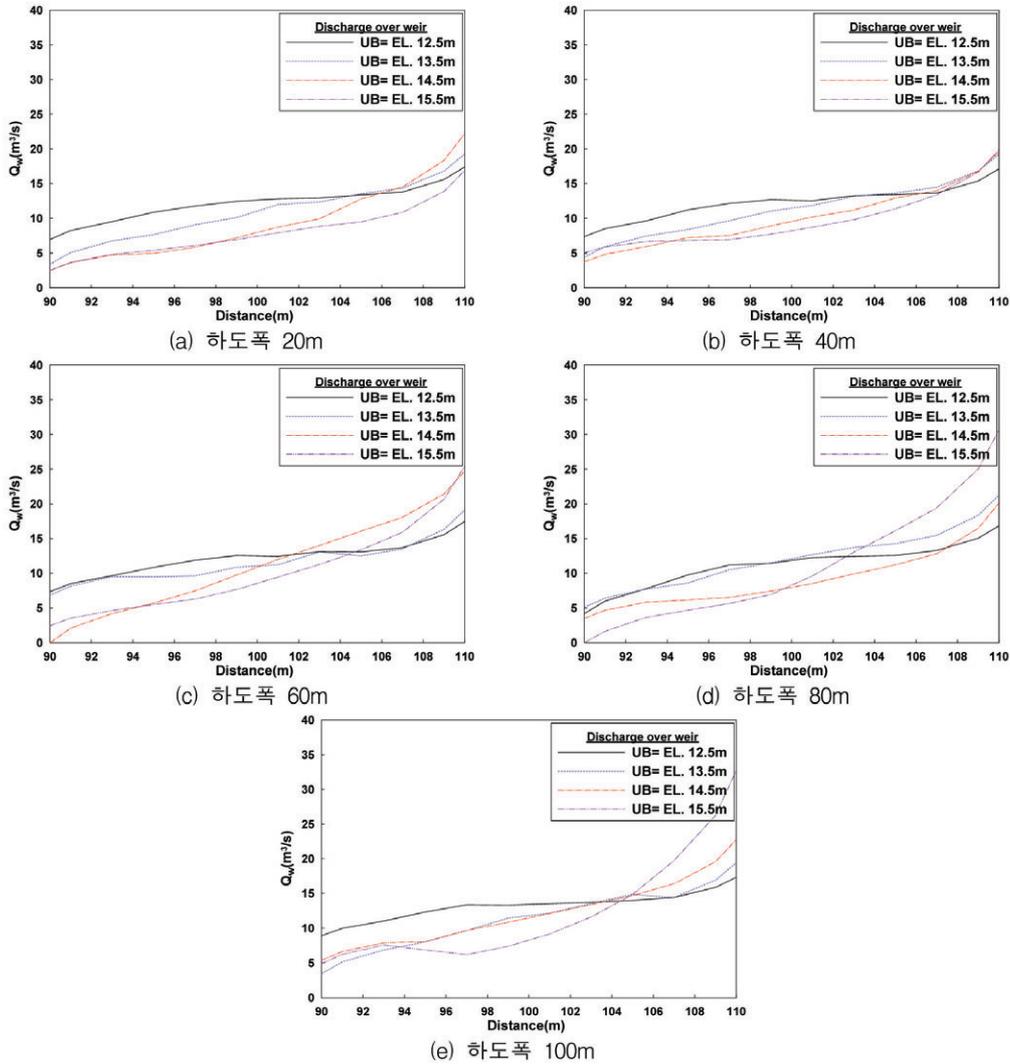


그림 7. 위어월류량

위어시작부에서는 최소월류량이 나타나며 이후 서서히 증가하여 위어중단부에서 최고월류량을 나타낸다. 특히 위어중단부(106m~110m)의 월류량의 증가는 매우 크게 나타나는 경향을 보인다. 위어시작부에서의 월류량의 감소는 하도흐름방향의 유속의 영향으로 인한 단수축효과로 볼 수 있으며 이후의 월류량의 지속적인 증가는 위에서 이미 기술된 하도부의 수심과 유속의 변화양상에 기인한다. 하도부의 수위는 위어직상류에서부터 하류로 진행할수록 증가하는 양상을 보였으며 유속은 비교적 감소하는 양상을 보였다. 하도수위의 증가와 하도유

속의 감소는 프루드수의 증가를 가져오며 그에 따른 유량계수의 증가를 야기한다. 동일한 하도폭에 대한 상류단 경계조건의 영향을 보면, 일반적으로 상류단 경계수위가 낮을수록 위어월류량은 다소 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 상류단 경계수위에 따른 하도유속변화양상과 관련된다. 상류경계수위가 높을수록 하도평균유속은 증가하며 이에 따라 프루드수는 증가하므로 유량계수는 감소하기 때문이다.

3. 하도폭 변화의 영향

그림 8은 위어부의 수위변화를 보여준다. 하도흐름방향에 대한 전반적인 위어부의 수위변화는 위어

시작부근처에서 최저수위를 보이며 위어중양부로 갈수록 점차 상승하며 위어중점근처에서 급격히 상승하는 양상을 보인다. 위어시작부의 수위감소는

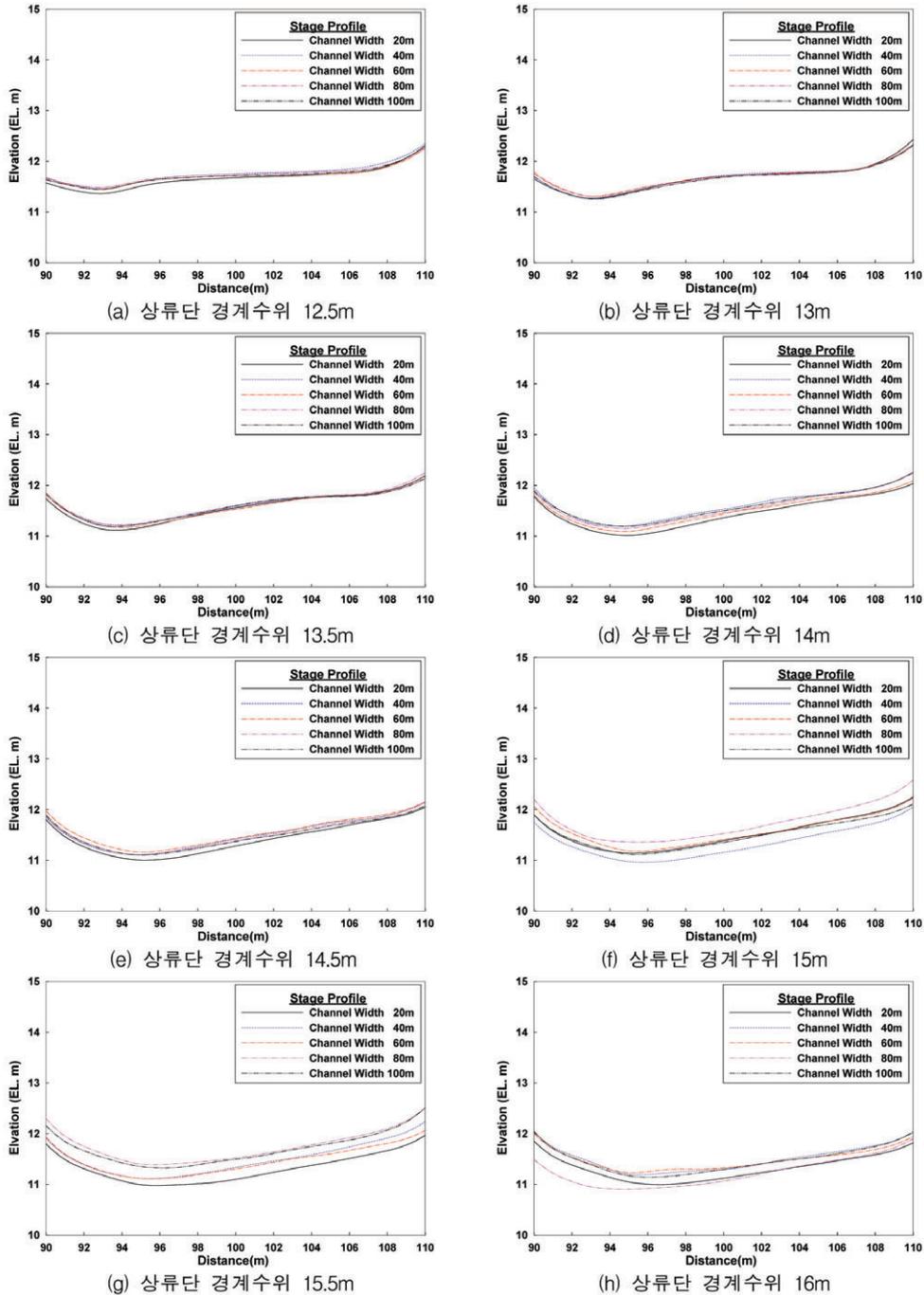
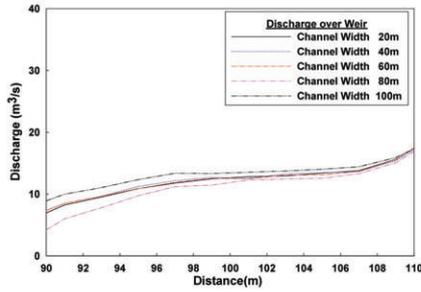


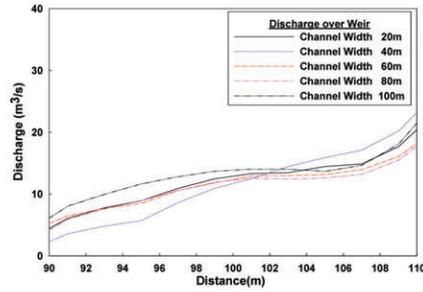
그림 8. 위어부 수위변화

위어부의 점축효과와 관련되며 위어중단부의 수위 상승은 하류수위의 통제효과와 위어부의 와류현상, 그리고 하도수위의 상승과 관련된다고 기술한 바

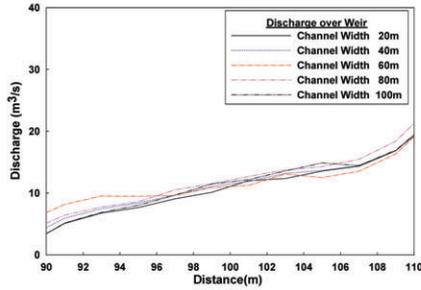
있다. 동일한 상류단경계수위를 가지는 흐름에 대해 하도폭의 영향을 살펴보면 상류단 경계수위가 비교적 낮은 경우에 있어서 위어부수위의 변화정도



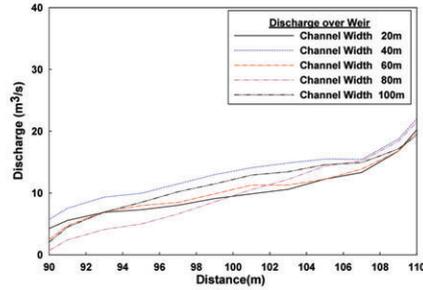
(a) 상류단 경계수위 12.5m



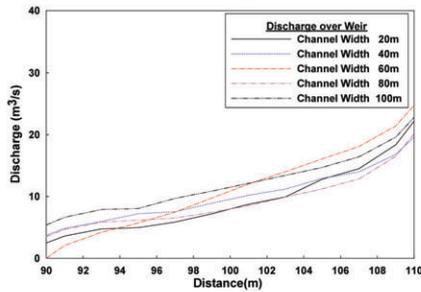
(b) 상류단 경계수위 13m



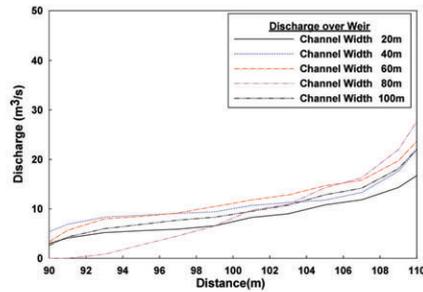
(c) 상류단 경계수위 13.5m



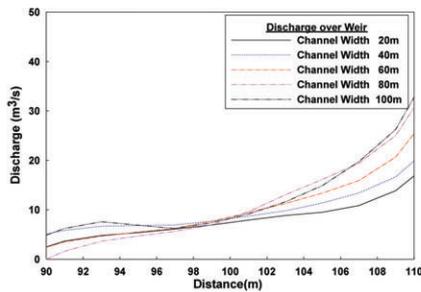
(d) 상류단 경계수위 14m



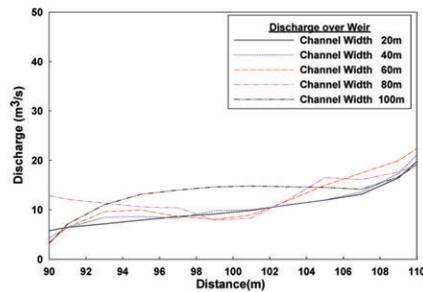
(e) 상류단 경계수위 14.5m



(f) 상류단 경계수위 15m



(g) 상류단 경계수위 15.5m



(h) 상류단 경계수위 16m

그림 9. 위어월류량

는 최대 0.2m 정도로 작은 경향을 보이지만 상류단 경계수위가 높을 경우 하도폭이 증가함에 따라 0.6~0.8m 정도의 위어부수위변동을 보이므로 상류단 수위조건에 따라 위어길이와 하도폭의 비를 사용자의 목적에 적합하게 고려할 필요가 있을 것으로 파악된다.

그림 9는 상류단 경계수위별로 위어월류량을 도시한 것이다. 상류단 수위가 비교적 작을 경우 하도폭의 변화에 따른 위어월류량의 변화는 크게 나타나지 않았으나 상류단 수위가 높아질수록 위어월류량은 하도폭의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다.

4. 모의 결과 분석

위어를 월류하는 흐름의 수면형은 상류일 때 그림 1에서 Henderson이 설명한 바와 같이 위어시작부에서 점차 증가하여 위어중단부에서 최고수위에 이르는 것으로 나타났다. 횡월류위어의 유량계수에 가장 민감한 영향을 주는 하도부의 평균유속의 변화에 있어서는 위어직상류부에서 위어부로 진행할수록 유속이 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 하도폭이 동일한 경우에 있어서, 상류단 경계의 수위 증가에 따라 일반적으로 위어부의 수위와 하도내의 수위는 감소하며, 위어직상류부의 하도 내 유속은 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 위어직상류부의 프루드수는 상류단 수위 증가에 따라 증가한다. 그러므로 월류량은 상류단 경계의 수위증가에 의해 감소하는 경향을 보이고 있다.

유입량과 월류량의 비는 상류단 수위 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 상류단 수위증가에 따라 증가하는 프루드수가 약 0.5이하인 경우 유입량과 월류량의 비는 상류단 수위 증가에 따라 20~30% 정도를 감소를 보였으나 프루드수가 0.5이상인 경우에는 상류단 수위증가에 따른 유입량과 월류량 비의 변화가 거의 없었다. 상류단 경계 수위가 동일한 경우에 있어서, 하도폭의 증가로 인한 위어부의 수위와 하도내의 하도수위의 변화, 그리고 유속에 있어서의 상관관계는 찾을 수 없다. 유입량과 월류

량의 비는 위어길이와 하도폭의 비가 0.33이상인 경우 약 30~40%의 감소경향을 보였으나, 위어길이와 하도폭의 비가 0.33이하인 경우에는 유입량과 월류량의 비의 변화는 거의 없었다. 그러므로 횡월류위어의 설계시에 상류수위에 따른 프루드수는 0.5이하를 유지하고, 위어길이는 하도폭의 33~100%의 제원을 가질 경우 횡월류위어의 월류효과의 효율성을 증가시킬 수 있을 것이라 예측된다.

5. 유량계수의 산정

본 연구결과에서 산정된 유량계수에 영향을 주는 인자를 찾기 위하여 기존 연구자들에 의해 중요 영향인자로 언급된 프루드수에 따른 변화를 분석해 보았다. 그림 10은 모든 모의 결과에 대한 프루드수에 대한 유량계수를 도시한 것이다.

그림 10에서 보는 바와 같이 위어 전구간에 대한 프루드수와 유량계수의 관계에서는 일정한 경향을 찾기 힘들다. 그러므로 월류수면형의 변화에 근거하여 그림 11은 횡월류위어를 월류하는 흐름의 수면곡선을 고려하여 위어의 시작부와 중간부, 그리고 중단부에 대해 구간별로 유량계수를 산정했다. 위어시작부의 경우 프루드수가 증가함에 따라 유량계수가 감소하는 경향을 보이며 유량계수의 수치는 비교적 낮게 분포한다. 위어중간부의 경우 프루드수가 증가함에 따른 유량계수의 감소경향이 나타나며 유량계수의 수치는 위어시작부에 비해 다소 증가된 경향을 보인다. 위어중단부의 경우 프루드수

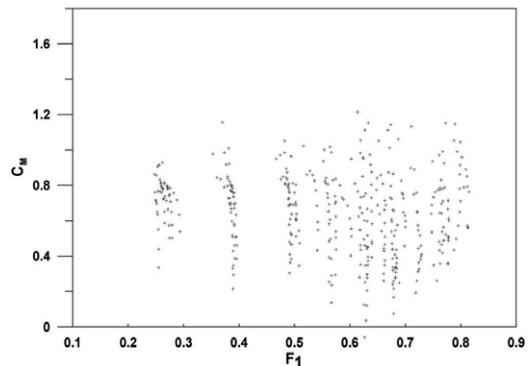


그림 10. 전체 모의 결과에 대한 유량계수비교

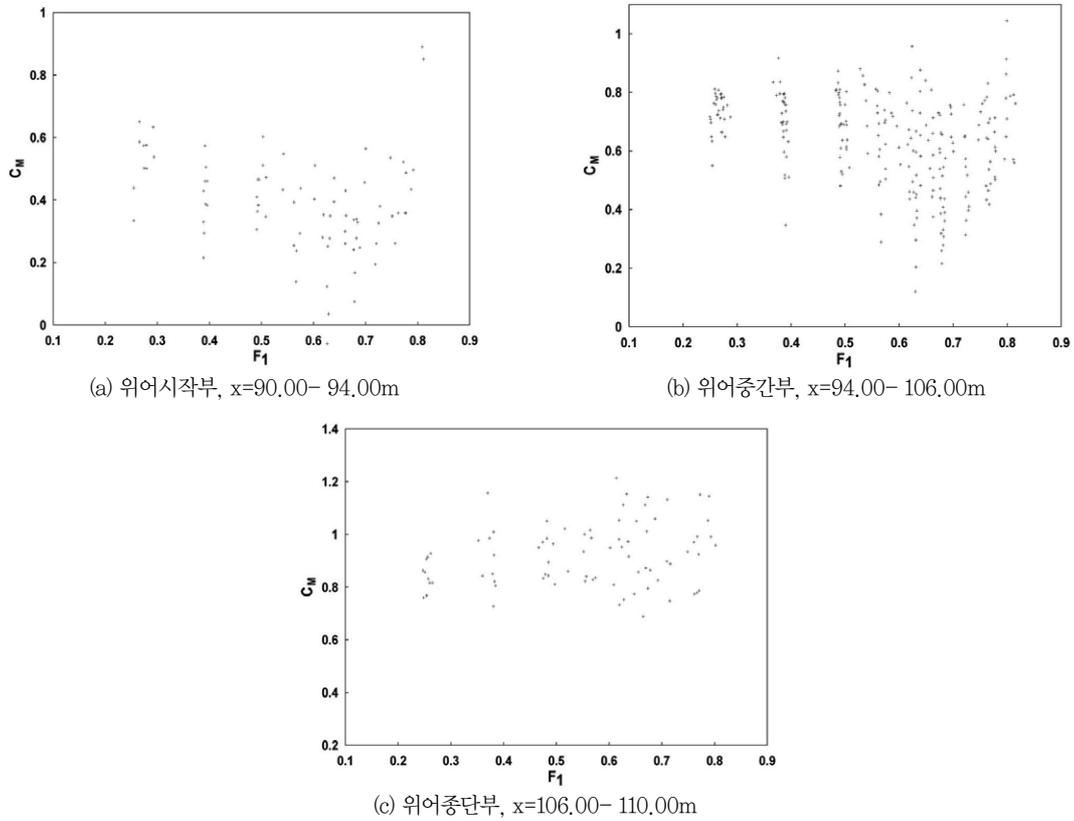


그림 11. 유량계수 비교

의 증가에 따른 유량계수의 변동이 거의 없었으며 유량계수의 수치에 있어서 가장 증가된 값으로 분포하고 있다.

그림 12는 기존유량계수식과 본 연구에서의 모의 결과를 비교한 것이다. 대부분의 산정식보다 모의 치가 다소 높게 나타나고 있으며, Singh *et al.*의

유량계수 산정식과는 거의 동일한 수치를 보이고 있다. 이러한 결과는 기존 산정식의 실험 조건에 비해 본 모의 조건이 보다 실제적인 규모를 가지며, 또한 하도내의 흐름이 하류경계의 수위조건의 영향에 의해 받음으로 인하여 야기된 위어월류량의 증가에 따른 것으로 추측된다.

다음은 위어공식의 관점에서 월류수심에 따른 유량계수, 월류량의 관계를 분석하였다. 위어의 길이 방향에 따라 나타나는 월류흐름의 특성을 고려하기 위해 총위어길이(20m)에 대해 2m 간격의 요소를 갖는 10개의 구간으로 나누어 각 구간에 대해 흐름의 특성을 결과로 나타내었다. 횡월류위어의 월류량에 대한 월류수심의 영향을 파악하기 위해 그림 13에서 월류수심과 월류량의 상관관계를 확인해 보았다. 기존 위어 공식이 $(y-h)^{1.5}$ 에 비례하기 때문에 역시 거듭제곱 방식으로 상관관계를 분석하였다. 그 결과 월류량은 월류수심 $(y-h)$ 의 1.57 거듭

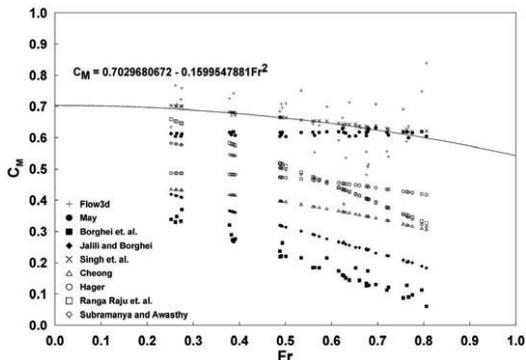


그림 12. 기존 유량계수식과의 비교

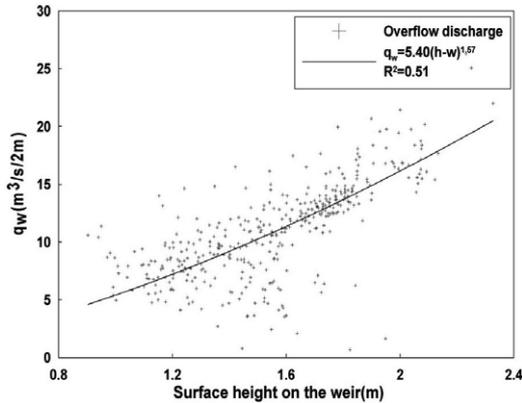


그림 13. 월류량과 월류수심과의 관계

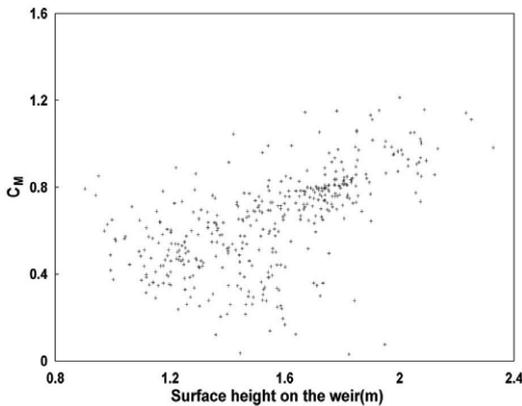


그림 14. 월류량과 유량계수와의 관계

제곱에 비례하는 것으로 나타났다. 이는 기존의 위어식과 비교했을 때 다소 증가한 수치이다. 그러므로 위어의 월류량은 본류의 프루드수보다는 위어자체의 월류수심과 더 강한 상관관계가 나타나므로 위어자체의 제원과 수위를 고려하여 유량계수를 결정하는 것이 더 타당하다고 보여진다.

V. 결론

본 연구에서는 3차원 범용 유동해석 프로그램인 FLOW-3D를 이용하여 저류지의 유입부 구조물인 횡월류위어에 대한 모의를 실시함으로써 위어 주변부 및 하도부의 흐름특성을 분석하고자 하였다. 특히, 하도부의 흐름정체를 유발할 수 있는 하류부 수위에 따른 보다 실제적인 횡월류위어의 거동양상 및

하도의 흐름특성을 파악하기 위해 기존의 실험제원에 비해 실제적인 규모의 흐름에 대한 거동에 적용하였으며, 하류부의 수위조건을 유지시켜 모의를 실시하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 위어를 월류하는 흐름의 수면형은 위어시작부 부근에서 최저수위를 형성하며 위어를 지나면서 서서히 증가하여 위어종단부에서 최고수위에 이르는 것으로 나타났다. 이것은 위어로 인한 시작부에서의 수축효과와 종단부의 하류수위의 통제 및 와류에 의한 것으로 분석된다.
- (2) 전반적인 월류양상은 위어시작부에서는 최소 월류량이 나타나며 이후 서서히 증가하여 위어종단부에서 최고월류량을 나타낸다. 특히 위어종단부의 월류량의 증가는 매우 크게 나타나는 경향을 보인다. 위어시작부에서의 월류량의 감소는 하도흐름방향의 유속의 영향으로 인한 단수축효과로 볼 수 있었으며 이후 월류량의 지속적인 증가는 하도부의 수위증가와 유속감소에 기인하는 것으로 판단되었다. 하도 수위 증가와 하도 유속 감소는 프루드수의 감소를 가져오며 그에 따른 유량계수의 증가를 야기한다.
- (3) 일반적으로 상류단 경계에서 수위증가에 따라 위어부의 수위와 하도부수위는 감소하며, 위어직상류부의 하도 내 유속은 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉, 위어 직상류부의 프루드수는 상류단 경계에 따라 매우 민감하게 변화되었으며 월류량은 상류단 경계의 수위증가에 의해 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 위어 직상류부 유량과 월류량의 비는 상류단 수위 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 상류단 수위증가에 따라 증가하는 프루드수가 약 0.5이하인 경우 유입량과 월류량의 비는 상류단 수위 증가에 따라 20~30%정도 감소를 보였으나 프루드수가 0.5상인 경우에는 상류단 수위증가에 따른 유입량과 월류량의 비의 변화가 거의 없었다.
- (4) 하도폭의 변화에 따른 위어 직상류부 유량과

월류량의 비는 위어길이와 하도폭의 비가 0.33이상인 경우 약 30~40%의 감소경향을 보였으나, 위어길이와 하도폭의 비가 0.33이하인 경우에는 유입량과 월류량의 비의 변화는 거의 없었다. 횡월류위어의 설계시에 상류 수위에 따른 프루드수는 0.5이하를 유지하고, 위어길이는 하도폭의 33~100%의 제원을 가질 경우 횡월류위어의 월류효과의 효율성을 증가시킬 수 있을 것이라 예측된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 출연하고 수자원의 지속적 확보기술개발사업단에서 위탁 시행한 21세기 프론티어 연구개발사업중 “RAM2 모형의 확장개발 및 상용화”(과제번호2-3-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 박태선, 2002, 구형 수로내 횡월류 흐름의 특성, 한국수자원학회논문집, 35(3), 251-259.
- 이두한, 2005, FLOW-3D 모형을 이용한 횡월류위어 흐름 특성 검토, 2005 대한토목학회 정기학술대회논문집, 245-248.
- 한국건설기술연구원, 2004, 방수로(지하) 분수로 설계기술 현황조사 및 개발방향 수립.
- Ackers, P., 1957, A theoretical consideration of side weir as storm water flows, Proc. Institution of Civil Engineers, London, England, 6, 250-269.
- Ackers, P., Coleman, Smith, and Bernoulli, 1957, A Theoretical Consideration of Side Weirs as Stormwater Overflows, Hydraulics Paper No 11. Symposium of Four Papers on Side Spillways.
- Borghai, S. M, Jalili, M. R., and Ghodsian, M., 1999, Discharge coefficient for sharp-crested side weir in subcritical flow, Journal of Hydraulic Engineering, 125(10), 1051-1056.
- Cheong, H. F., 1991, Discharge coefficient of lateral diversion from trapezoidal channel, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 117(4), 461-475.
- Collinge, V. K., 1957, The Discharge Capacity of Side Weirs, Hydraulics Paper No 13. Symposium of Four Papers on Side Spillways.
- De March, G., 1934, Saggio Di Teoria Di Funzionamento Degi Stramazzi Laterali. L'Energia Elettrica, Milano, Italy, 11, 849-860.
- Flow Science, 2000, FLOW-3D (Theory Manual). Los Alamos, NM.
- Hager, W. H., 1987, Lateral outflow over side weirs, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 113(4), 491-504.
- Hager, W. H., and Volkart, P. U., 1986, Distribution Channels, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 112(10), 935-952.
- Henderson, F. M., 1996, Open channel flow, Macmillan Publishing Co., Inc., New York.
- Jalili, M. R., and Borghei, S. M., 1996, Discussion of discharge coefficient of rectangular side weir, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 122(2), 132.
- Lee, K. L., and Holly, E. R., 2002, Physical modeling for side-channel weirs, CRWR Online Report 02-2, Houston, TX, USA.
- May, R. W. P., Bromwich, B. C., Gasowski, Y., and Rickard, C. E., 2003, Hydraulic Design of Side Weirs, HR Wallingford.
- Ranga Raju, K. G., Prasad, B., and Gupta, S.

- K, 1979, Side weir in rectangular channel, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 105(5), 547-554.
- Ramamurthy, A. S., and Carballada, L., 1980, Lateral Weir Flow Model, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 106(1), 9-25.
- Singh, R., Manivannan, D., and Satyanarayana, T., 1994, Discharge coefficient of rectangular side weirs, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 122(2), 132.
- Subramanya, K. and Awasthy, S.C., 1972, Spatially varied flow over side-weirs, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 98(HY1), 1-10.

최종원고채택 10. 04. 16