

FLOW-3D에 의한 파살플룸 흐름 해석 Flow Analysis of Parshall Flume Using FLOW-3D

오 병 동* / 김 경 호** / 이 환 기*** / 안 상 도****

Oh, Byoung Dong / Kim, Kyoung Ho / Lee, Whan Gi / An, Sang Do

Abstract

A water shortage is one of the most important factors for development and management of water resources. For reliable water shortage measurement in a stream, Korea Water Resources Corporation(KOWACO) founded five foot Parshall flume at Yong-dam experimental watershed in 2000. The Parshall flume has a specially designed shape to facilitate flow measurements by eliminating sediment deposition problem that could lead to an incorrect measurement. In this study, computational fluid dynamics(CFD) model was used to analyze flow behavior of Parshall Flume under free discharge of five headwater level cases. The flow rates computed by CFD model are compared with those by ISO's formula, USBR's formula and stage-discharge rating curves. Flow rates computed by ISO's and USBR's formula are mostly same, but flow rate by CFD model is larger than empirical value by 9% and flow rate by stage-discharge rating curves is less than empirical value by 16%.

Keywords : 3D modeling, Parshall Flume, CFD, Water measurement

요 지

갈수량은 수자원의 개발 및 관리에 매우 중요한 인자중의 하나이다. 신뢰성 높은 갈수량을 측정하기 위해 한국수자원공사는 2000년도에 용담댐 시험유역에 5피트 규격의 파살플룸을 설치하였다. 파살플룸은 유량측정을 하기 위해 독특한 모양을 가지고 있으며, 부정확한 유량관측을 유발하는 퇴사문제를 거의 해결한 시설물이다. 본 연구에서는 3차원 CFD (Computational Fluid Dynamics) 모형으로 5가지 수위에 대해서 완전유통류(free flow)시 파살플룸의 유동을 해석하였다. CFD 모형에 의해 산정된 결과와 ISO에 제시된 유량공식, USBR에 제시된 유량공식 및 수위-유량관계식으로 산정한 유량을 비교하였다. 그 결과 ISO와 USBR의 공식에 의해 산정된 유량은 거의 동일했으나, 3차원 CFD 모형에 의한 유량은 경험공식에 의한 유량보다 9%정도 크게 나타났고 수위-유량관계식에 의한 유량은 경험공식에 의한 유량보다 16%정도 작게 나타났다.

핵심용어 : 3차원 모형, 파살플룸, CFD, 유량측정

-
- * 한국수자원공사 조사기획처 대리
Civil Engineer, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 306-711, Korea
(E-mail : obdd@kowaco.or.kr)
 - ** 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수
Professor, Dept. of Civil Eng., Chungbuk National Univ., Cheongju 361-763, Korea
(E-mail : coastal@cbucc.chungbuk.ac.kr)
 - *** 한국수자원공사 기술본부장
Executive Director, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 306-711, Korea
(E-mail : hwanki@kowaco.or.kr)
 - **** 한국수자원공사 설계처 대리
Civil Engineer, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 306-711, Korea
(E-mail : sdan99@empal.com)

1. 서 론

갈수유량 측정시의 문제점은 수위관측소 일부가 설치후 하상의 급격한 변동으로 갈수기 수위 이하로 최저 수위가 형성되어 갈수기 유량측정이 불가능한 경우가 발생하고 있고, 기술적 측면에서도 갈수량 측정은 수문 기술자의 수준 및 인식에 따라 오차의 범위가 상당하며 또한, 갈수기(11월말~2월말)의 유속특성(≈0 m/sec)상 기존의 유속측정에 의한 수위-유량 관계식 이용방법은 신뢰성이 낮은 실정이다.

위어, 플룸 등 구조물을 이용한 방법을 적용함으로써 이러한 문제점을 해결할 수 있다. 특히, 측벽의 폭을 변화시키고 저면도 높게하여 사류를 발생시키기 쉽도록 고안된 파살플룸은 20세기 초 콜로라도 주립대(Colorado State University)의 Ralph Parshall에 의해 개발되어 보완되었으며, 유사를 그대로 통과시켜 유지 관리가 용이하고 유속토사가 많거나 하상변동이 큰 지점에서도 적용이 가능할 뿐만 아니라 구조물내에서 도수를 발생시키므로 하상경사가 급하지 않은 지점에서도 설치운영이 가능하다. 또한, 국제표준규격(ISO 9826)으로 검증과 유량규모별로 규격화 되어 있어 국제적인 신뢰도가 확보되어 있고 수두손실이 웨어의 약 25% 정도에 불과하며, 물고기의 통로를 막지 않기 때문에 어도를 별도로 고려하지 않아도 되는 친환경 시설물로서 선호되는 유량측정 시설물이다. 파살플룸은 미국의 주요 관개시설에 많은 수가 설치되어 있으며 국내에서도 정수장 등에서 정밀한 유량측정을 위해 종종 사용되고 있다. 하지만 국내에서는 초기 설치비용과 치수 우선정책에 따라 갈수기에 유용한 파살플룸이 하천에 적용되지 못하고 있다가 2000년에 용담댐 상류 2개소의 하천에 국내 최초로 시험적으로 설치·운영되고 있다.

파살플룸은 개발 이래 다른 구조물에 의한 유량측정 방법과 마찬가지로 연구성과가 거의 드물다. Peck(1988)은 1피트의 파살플룸에 대한 새로운 유량공식을 제시했고 Hirt 등(1994)은 3차원 모형으로 1피트의 파살플룸에 대해서 완전월류, 불완전잠류, 완전잠류로 구분하고 USBR에서 제시한 파살플룸의 유량과 3차원 모형결과를 비교·분석하여 두 가지 경우의 유량이 유사함을 보였다. FLOW-3D를 이용한 연구로는 이길성 등(1997)이 3차원 흐름해석을 위해 여수로 유입수로의 흐름을 2차원으로 해석하였고 김남일(2003)은 FLOW-3D를 이용하여 여수로 수리모형의 축척효과를 규명하였으며, 안창진(2003)은 정수처리공정에서 접촉조내의 분말활성탄의 유동을 해석하였다.

본 연구에서는 FLOW-3D를 이용하여 용담댐 시험

유역에 국내 최초로 설치된 동향 파살플룸의 흐름형상, 유속분포 및 유량을 산정하였다. 특히, 동향 파살플룸 직상류 200m 지점에는 동향 수위관측소가 있고 유량측정을 수행하고 있어서, 이 지점의 유량측정성과에 의한 수위-유량곡선식으로부터 산정된 유량, 동향 파살플룸의 FLOW-3D에 의해 산정된 유량, ISO 및 USBR의 WMM(Water Measurement Manual, 1997)의 유량공식에 의해 산정된 유량을 비교하였다.

2. FLOW-3D 모형

2.1 지배방정식

모형에 사용된 지배방정식은 연속방정식과 운동량 방정식이며, 식 (1) ~ (3)으로 각각 표현된다.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = 0 \quad (1)$$

여기서 V_F 는 유체의 요소체적, ρ 는 유체의 밀도, u, v, w 는 각 방향 유속이며, A_x, A_y, A_z 는 각 방향 요소면적이다. 운동량 방정식은 Navier-Stokes 방정식으로 아래 식과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \quad (2a)$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \quad (2b)$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \quad (2c)$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z$$

여기서, G 는 체적력이고 f 는 점성력을 나타낸다. 그리고 자유표면의 해석을 위한 한 격자 내의 단위체적당 유체의 체적은 VOF(Volume of Fluid) 함수, $F(x,y,z,t)$ 로 표현되며 다음의 연속방정식 식 (3)을 만족시킨다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (F u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (F v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (F w A_z) \right\} = 0 \quad (3)$$

또한, FLOW-3D에서 사용되는 난류모형으로는 Prandtl의 혼합거리 모형(Mixing-length Model), 1-방정식 모형(One-equation Model), $K-\epsilon$ 모형, RNG (Renormalized Group Theory)모형, LES(Large Eddy Simulation)모형 등이 있다.

2.2 수치해석기법

3차원 수치모형 FLOW-3D는 유한차분방식에 직육면체의 요소로 일반형상을 정의할 수 있는 FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method) 방법을 도입한 유한체적법(FVM)을 사용하고 있다. 또한 제트, 비산 등과 같은 복잡한 자유표면 운동 해석을 위하여 VOF(Volume of Fluid) 기법(Hirt and Nichols, 1981)을 이용한다. 일반적인 해석단계로는 해석영역을 작은 격자로 나누는 것으로 시작하여 각 격자에 대해 주어진 조건에 따른 속도, 압력 등의 인자를 계산하게 된다. 압력항은 SOR(Successive Over Relaxation) 방법이나 SADI(Special Alternating Direction line Implicit) 방법을 사용하여 계산한다. 계산과정은 식 (2a) ~ (2c)를 사용하여 유속과 압력을 구하고, 자유표면 흐름인 경우에는 식 (3)을 사용하여 유체 표면의 위치를 계산하게 된다.

2.2.1 FAVOR 방법

FAVOR 방법의 개념도는 그림 1과 같으며 이 방법은 직육면체 요소내에서 일반 형상을 기술하는 것으로서,

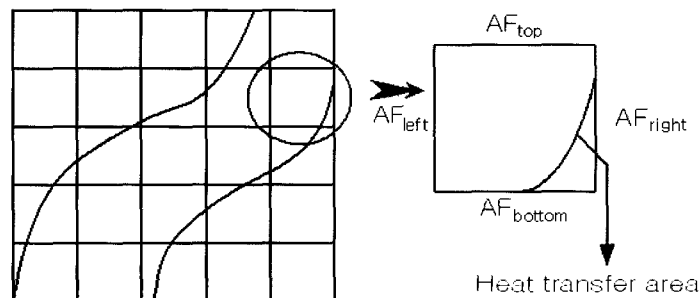


그림 1. FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 방법의 개념도

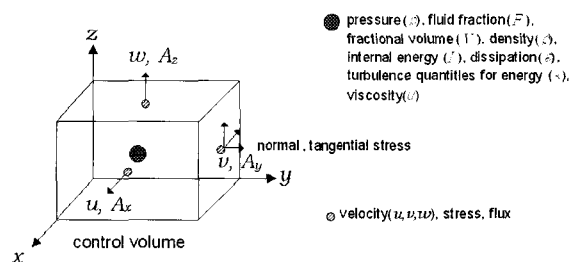


그림 2. FVM(Finite Volume Method) 개념도

직육면체 요소의 각 면을 통한 유체의 출입이 전체 또는 일부가 통제될 수 있다고 정의하는 것이다. 이로써 하나의 직육면체 요소에 유동물질이 차지하는 부피 및 이 매체가 통과하는 면적을 정의할 수 있으며, 이 요소내 통과면적에 대한 질량, 에너지 및 운동량 플럭스(Flux) 식을 유한체적 적분하여 물체주위의 유동을 기술할 수 있다. 따라서, BFC(Boundary Fitted Coordinate) 좌표변환을 하지 않는 FDM 사용시 가장 큰 문제의 하나인 계단형 격자로 인한 결과의 정확도 저하를 해결할 수 있다.

2.2.2 FVM(Finite Volume Method)

연속체로 정의된 방정식을 컴퓨터로 해석하기 위해서는 이산화가 필요하며 이산화하는 방식은 크게 FEM과 FDM으로 나눌 수 있으며, FEM방식에서 가중 함수를 1로 하면 그림 2와 같이 FVM방식이 된다. FLOW-3D는 FAVOR를 도입한 FVM 형식을 취하고 있다. 일반적으로 해석 영역을 작은 직육면체 요소로 나눈 후, 이 요소단위로 계산이 이루어지게 되는데 속도와 응력은 각 면에서 기타 스칼라 양은 격자 중심에서 정의되고 있다. 각 요소의 주어진 압력에서 시간에 따른 양해적 방법으로 다음 시간에서의 속도를 구하며 이 속도를 이용하여 포아송식 형태의 압력방정식의 해를 구한 다음 다시 속도를 검증해주고 그 후에 자유표면의 해석이 요구될 때는 VOF 방정식을 풀어나가는 방법을 이용하고 있다.

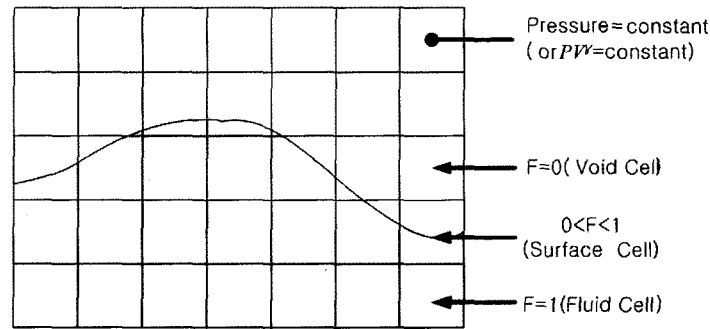


그림 3. VOF (Volume of Fluid)의 개념도

2.2.3 VOF (Volume of Fluid) 방법

비산 및 쇄파 같은 복잡한 자유표면 운동의 기술은 움직이는 요소를 사용하는 라그랑지 방법보다 고정 오일러 요소를 사용하는 VOF 방법을 이용하여 보다 간단히 이루어 질 수 있다. FLOW-3D에 사용되고 있는 VOF 방법은 다른 공용되고 있는 VOF 방법과는 달리 정확한 압력 및 운동학적 경계조건을 적용하고 있으며, 또한 유한차분식 경계면의 번짐을 방지하기 위해 특별 수치차분법을 사용함으로써 두 유체(유체와 공기일 경우는 보통 자유표면으로 가정함)사이의 운동을 기술할 수 있는 방법이다.

3. FLOW-3D에 의한 흐름 해석

3.1 파살플룸의 3차원 수치모의

3.1.1 파살플룸의 3차원 형상화

파살플룸 해석을 위한 3차원 수치모의의 경우는 반드시 지형 및 구조물의 형상이 실제 형상과 같이 모든 위치의 정확한 좌표(x,y,z)와 체적을 갖는 3차원 솔리드 형상으로 정의되어야 한다. 그림 4의 평면도 및 단면도를 3차원 캐드를 이용하여 그림 5과 같이 3차원 솔리드 형상을 만들었다. 솔리드 형상은 체적이 완전히 채워진 것으로서, 수치모의시 유체가 형상 내로 흐르지 못하도록 하여준다.

3.1.2 격자망 구성

파살플룸을 중심으로 더 길은 좌안 보의 길이를 우안 보의 길이와 같도록 해석영역을 한정함으로써 수치 해석 시간과 격자의 크기를 줄였다. 해석영역은 파살플룸으로부터 상류 10m, 하류 14.5m, 좌·우안 보의 길이 10.5m로 격자는 그림 6과 같이 흐름 방향(X) 60개, 흐름의 횡방향(Y) 59개, 높이 방향(Z) 15개로 분할하여 총 53,100개의 격자를 구성하였다.

3.1.3 경계 및 초기조건

대상영역은 상, 하(바닥), 좌안, 우안, 상류, 하류 등 6

개의 경계면이 형성되는데 모든 경계면에 대하여 경계조건이 주어져야 한다. 파살플룸 직상류의 준설로 인하여 상류에 큰 저수지가 있는 상태와 유사한 안정된 곳으로부터 경계조건이 시작하는 것으로 하여 상류면(X_{min})에는 상류의 고정수두를 하류면(X_{max})에는 하류의 고정수두를 입력하였으며 상(Z_{max}), 좌안(Y_{max}), 우안(Y_{min})은 마찰이 작용하지 않는 구조로 하였고 하(Z_{min})는 지형·지물의 경계로 발생하는 벽면(wall)로 하여 흐름이 없는 것으로 하였다. 또한, 초기조건은 모의시간에 영향을 미치는 가장 중요한 인자로서 모의시간을 최소화하기 위하여 상하류 수위가 정상상태에 해당하는 고정수위를 초기조건으로 하였다. 그림 7은 파살플룸의 수치모의에 적용한 경계조건을, 그림 8은 초기조건을 보여주고 있다.

3.1.3 난류모형 및 기본 물리량

파살플룸은 수로내에서 도수가 발생하는 시설물로서 난류가 발생되므로 난류모형을 적용했다. 난류의 가장 중요한 특징인 도수, 흐름분리 현상 등이 발생하는 수로의 감세흐름 및 혼합흐름을 모의하기 위해 RNG 모형을 사용했다. 이 난류모형은 거의 모든 흐름조건에 만족하는 크고 작은 레이놀즈 수를 제공한다.

유체는 비압축성으로 밀도를 물의 밀도($1,000\text{kg/m}^3$)를 사용하였고 점성계수는 $0.001\text{Pa}\cdot\text{s}$ 를 적용하였으며 중력가속도는 Z방향의 역방향으로 9.8% 을 사용하였다. 그리고 동향 파살플룸의 재질은 스테인레스로서 표면이 매우 매끄럽고 또한 흐름이 중력과 관성력에 의해 지배되기 때문에 조도계수는 적용하지 않았다.

3.1.4 수리학적 조건

본 연구에서는 파살플룸에서의 흐름양상을 파악하기 위하여 파살플룸 및 주변에서의 흐름형상 및 유속분포를 분석하였고 또한 유량을 산정하였다. 5피트의 동향 파살플룸을 해석대상으로 하였으며, 흐름 조건은 유출부의 수위에 영향을 받지 않는 완전유향류(free-flow) 상태로 하였다. 이를 위해, 하류 경계조건으로 사용한 수

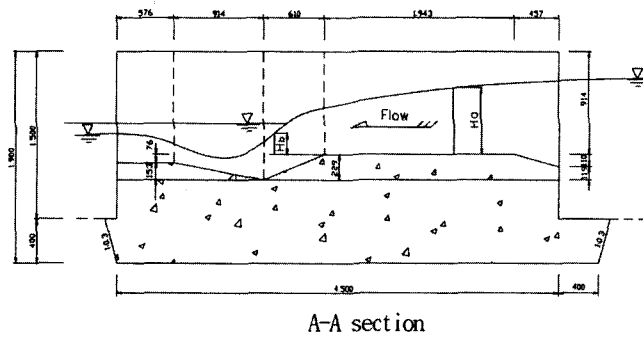
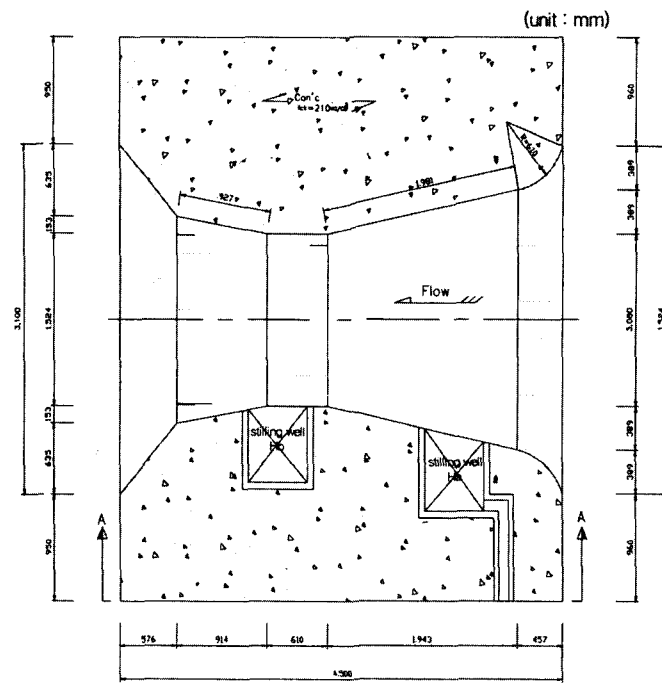


그림 4. 파살플룸 평면 및 단면도

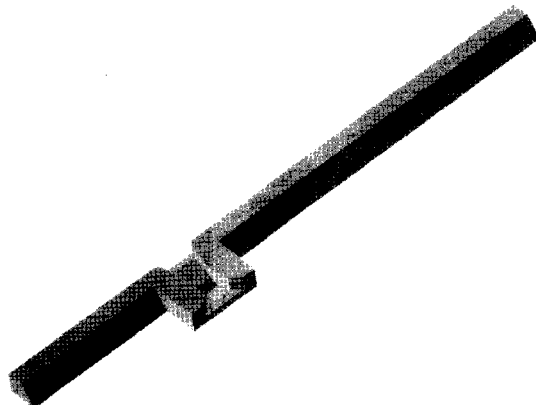


그림 5. 파살플룸의 3차원 슬리드 형상

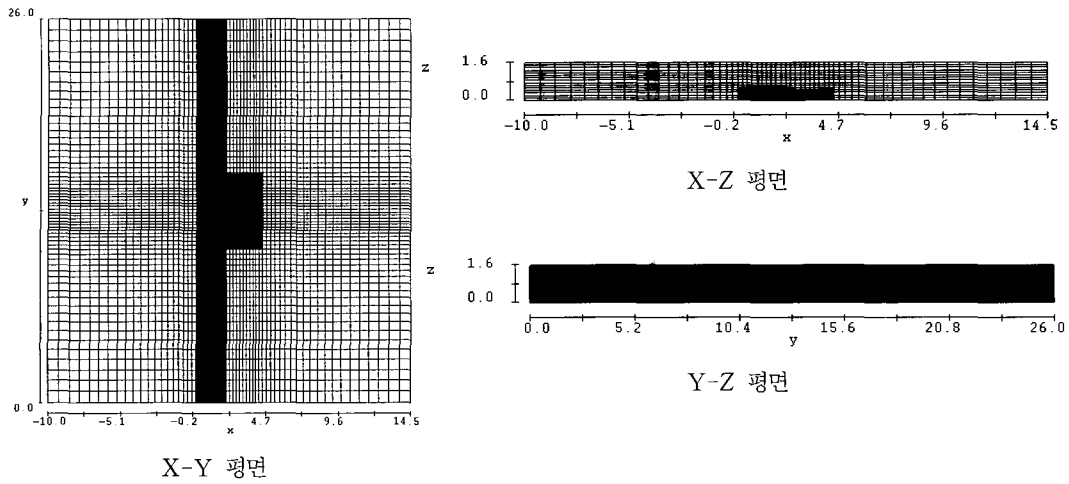


그림 6. 파살플룸의 격자망 구성

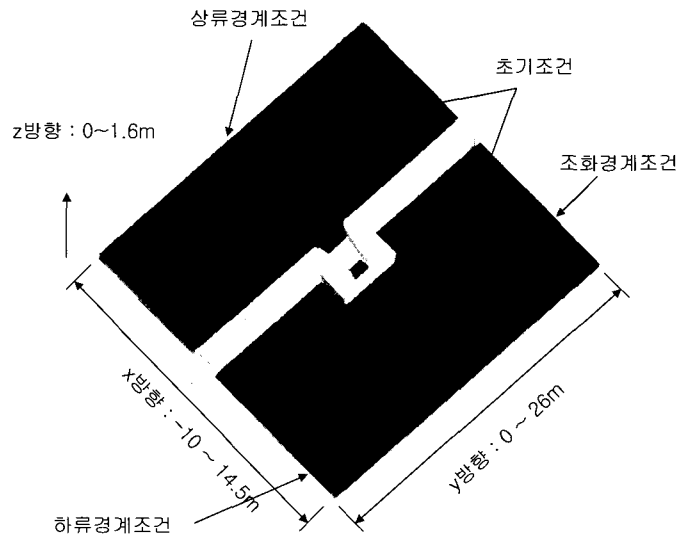


그림 7. 수치모형의 경계조건

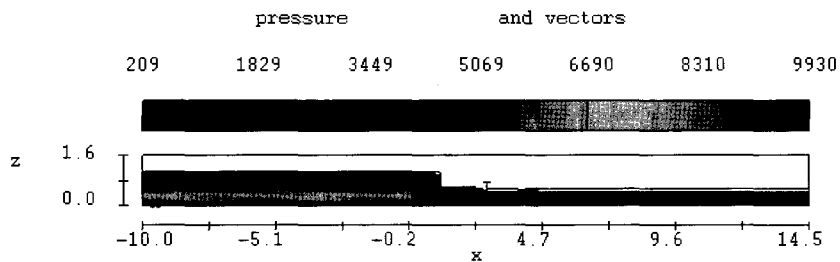


그림 8. 초기조건

위는 상류 경계조건 수위의 50%를 적용하였다. 한편, 파살플룸은 실험을 통하여 규격별로 완전월류가 발생하는 한계를 잠수도(submergence ratio, H_b/H_a)로서 제시하고 있는데 USBR은 5피트 파살플룸의 완전월류 한계를 잠수도 70%로 하고 있다.

표 1은 수치모의에 적용한 고정 수두 경계조건으로서, H_a 는 파살플룸의 관측정 수위로 실측한 수위이며, 상류 측정수위는 상류 경계조건으로 사용하기 위해 H_a 측정시 파살플룸 상류 수위를 측정된 값이다.

표 1. 수치모의 적용 조건

일시	상류 수위 (m)	상류 수위 측정수위 (m)	하류 수위 (상류수위 50%)
'03/11/14 14:50	0.460	0.557	0.279
'03/12/04 17:00	0.405	0.481	0.241
'03/12/08 16:40	0.540	0.639	0.320
'03/12/10 16:45	0.535	0.629	0.315
'03/12/24 11:40	0.370	0.399	0.200

3.2 흐름형상 및 유속분포

파살플룸의 흐름형상 및 유속분포를 분석하기 위하여 표 1의 경계조건을 FLOW-3D에 적용하였다. 경계조건으로 입력된 고정 수위는 표 1에서 관측된 수위에 파살플룸의 기초깊이 0.586m가 더해진 값이 사용되었다. 그림 9는 FLOW-3D에 의한 3차원 흐름분석 결과로서, 상·하류의 고정수위 조건으로 수위차에 의한 흐름이 발생하여 파살플룸의 유입부에서부터 유속이 발생

함과 흐름의 영향 구간을 명확하게 보여주고 있다. 또한 그림 10 ~ 14는 2차원 유속분포도로서, 최대유속이 발생하는 지점은 파살플룸의 말단부로 나타났고 최대유속은 3.12% ~ 3.63% 분포를 보였다. 이는 흐름조건이 완전월류 조건으로 하류 수위의 영향을 받지 않고 파살플룸의 말단부에서 비산하는 효과에 기인한 것으로 판단된다. 그리고 벽 마찰에 의하여 벽 주위의 유속이 작은 것을 명확히 보여 주는 등 FLOW-3D는 실제의 흐름형상과 유속분포를 잘 보여주고 있다.

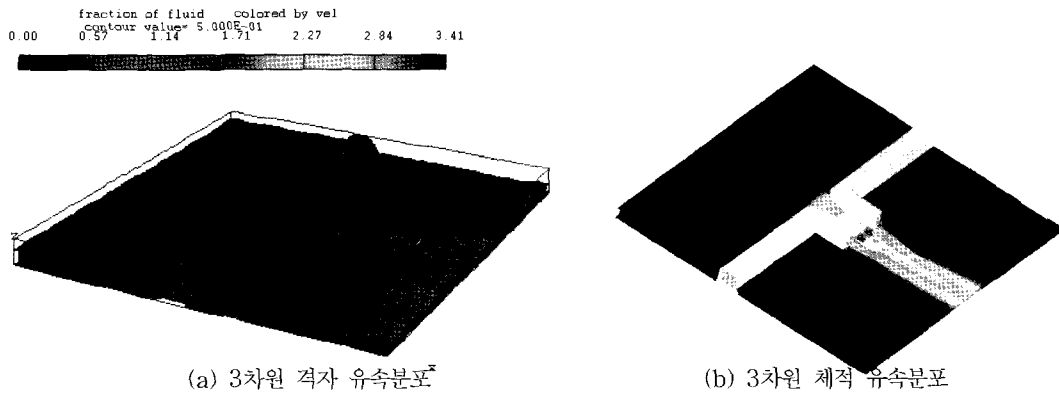


그림 9. 3차원 흐름형상 및 유속분포

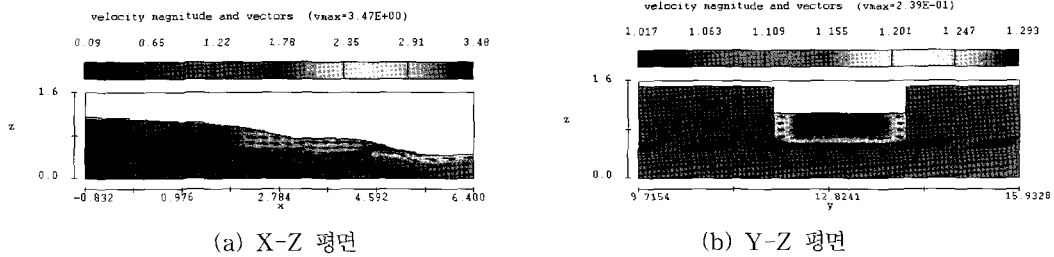


그림 10. 2차원 유속분포 (H_a : 0.460m 대응하는 상류 경계조건 : 0.557m)

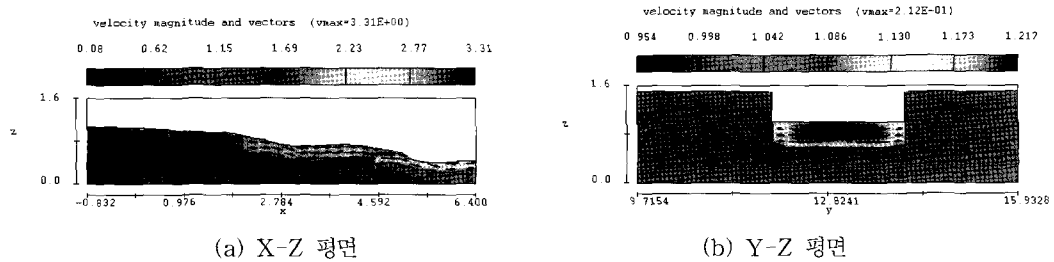
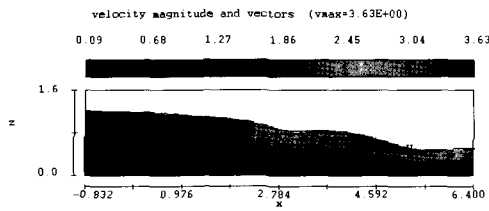
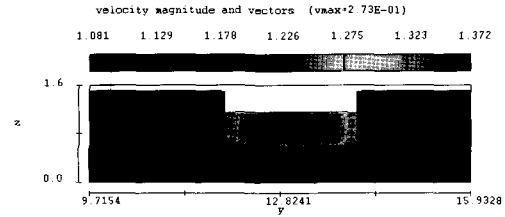


그림 11. 2차원 유속분포 (H_a : 0.405m 대응하는 상류 경계조건 : 0.416m)

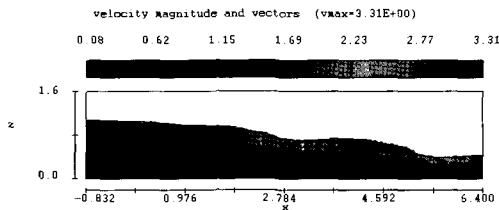


(a) X-Z 평면

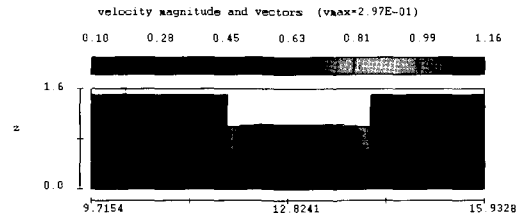


(b) Y-Z 평면

그림 12. 2차원 유속분포 (H_a : 0.540m 대응하는 상류 경계조건 : 0.634m)

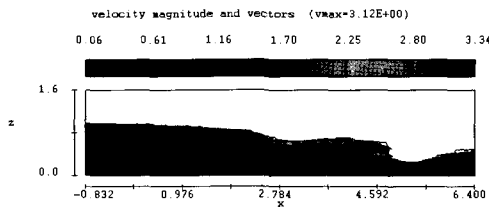


(a) X-Z 평면

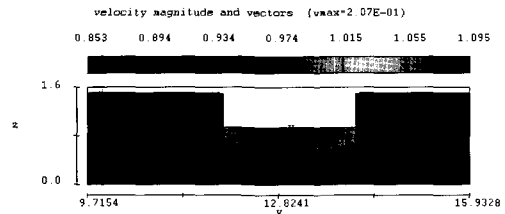


(b) Y-Z 평면

그림 13. 2차원 유속분포 (H_a : 0.535m 대응하는 상류 경계조건 : 0.624m)



(a) X-Z 평면



(b) Y-Z 평면

그림 14. 2차원 유속분포 (H_a : 0.370m 대응하는 상류 경계조건 : 0.394m)

3.3 유량산정 비교

3.3.1 FLOW-3D에 의한 유량산정

FLOW-3D는 수로의 원하는 단면에서 유량을 구할 수 있다. 본 연구에서는 파살플룸의 관측정이 위치하고 있는 지점인 파살플룸 상류측 끝에서 하류방향으로 1.2m 지점인 단면에서 유량을 산정하였다. 유량을 산정한 흐름 조건은 3.2절과 마찬가지로 표 1의 경계조건을 적용하였다. FLOW-3D는 압력, 속도, 유량, 수위 등의 수치모의 결과를 바로 보여주는데 이로부터 유량을 산정하였다.

3.3.2 파살플룸에 의한 유량산정

(1) 파살플룸 현황

용담댐 유역의 파살플룸은 2000년부터 2개소가 설치·운영되고 있고 현황은 표 2와 같으며 그림 15는 동향 파살플룸의 전경 사진이다. 2개소 모두 인후부 폭이 5피트로 동일규격의 플룸이 설치되어 있고 플룸의 유량 측정은 수로내의 수위를 관측함으로써 이루어지나 측정 지점이 자연 하천이고 관측시기가 주로 기온이 낮은 동절기에 해당되어 관측정내의 결빙으로 인한 수위측정이

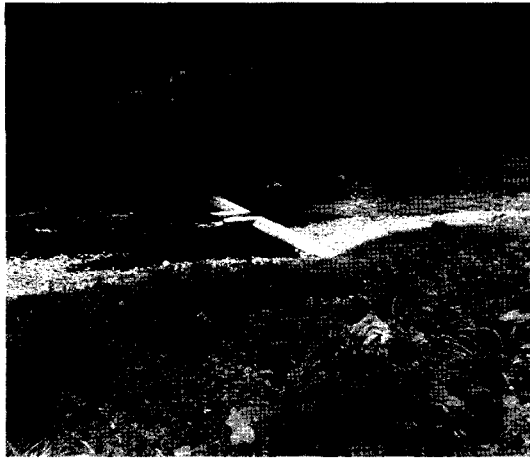
불가능하게 되는 점을 감안하여 동절기 결빙에도 영향이 없는 기포식 수위계가 설치되어 있다.

그리고, 그림 4와 같이 수로내의 축소부와 인후부 2개 지점에서 축소부 수위(H_a)와 인후부 수위(H_b)를 측정하는데 H_a 는 축소부 시점에서 측벽길이의 1/3 지점의 축소부 바닥면으로부터의 수위이고, H_b 는 인후부의 가장 낮은 지점으로부터 51mm 상류측에 위치하는 지점의 수위로서 H_a 수위와 마찬가지로 축소부 바닥면으로부터의 수위이다. H_b 수위가 높아 흐름에 영향을 미쳐 통수능이 감소하게 되면 유량을 보정해주어야 하는데 용담댐 유역에 설치된 파살플룸은 유량측정범위 0.2~2.5m/sec에 대해 H_a 가 0.63~0.70m 정도 발생하여 유량 보정 없이 저수·갈수량 측정이 가능한 것으로 나타나 H_a 만 관측하고 있다.

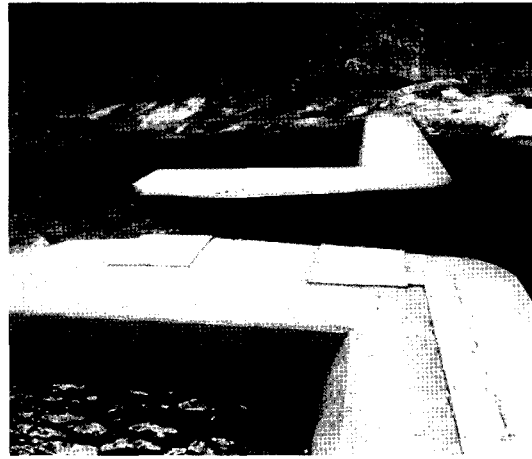
그러나, 설치·운영 이후 플룸의 부속구조물로 인해 플룸의 상류주변에 많은 퇴사의 발생, 태풍 루사, 매미 등 홍수시 기포관로의 유실, 기포관로의 연장이 매우 길어 이로 인한 기포식 수위계의 수위 오측, 하천공사로 인한 기포관로의 절단, 잦은 수위계의 고장 등 많은

표 2. 파살플룸 설치 현황

관측소명	하천	관측소 위치			유역면적 (km ²)	유역평균고도 (EL.m)
		주소	동경	북위		
동향 Parshall	구량천	전북 진안군 동향면 성산리	127-32-10	35-49-32	165.5	640.38
천천 Palshall	본류	전북 장수군 장계면 금곡리	127-30-56	35-47-56	289.8	549.13



(a) 동향 파살플룸 원경



(b) 파살플룸 근경

그림 15. 동향 파살플룸

문제점이 도출되고 있다. 이러한 문제점 때문에 기 측정된 관측자료의 신뢰도가 매우 낮은 실정이고 이를 해결하기 위해 홍수후 파살플룸 주변의 준설, 기포판로 이설 및 수위계의 유지보수, 수위계를 추가설치하여 수위계를 이중화 하는 등 많은 보완과 시행착오를 거쳐 2003년 12월말부터 신뢰도 높은 수위자료를 생산하고 있다.

(2) ISO(9826) 및 USBR의 파살플룸 유량공식

파살플룸의 규격은 인후부 크기로 분류되는데 미국에서 개발되었기 때문에 USBR에서는 피트 단위의 규격을 사용하고 있다. 반면 ISO는 SI 단위계를 사용하므로 인후부의 길이가 m로 규격화 되어 있어 파살플룸의 규격은 ISO와 USBR이 다르게 표시되어 있고 규격화된 인후부의 크기도 약간 다르다. 동향 파살플룸은 5피트이므로 인후부의 크기가 1.524m이나 ISO에서는 이 크기에 가장 근접하게 규격화 되어 있는 것이 1.5m이다. ISO에서는 식 (4a)와 같이 인후부 폭에 따라 유량공식을 구할 수 있으며, 이 식에 인후부 폭 1.524m를 적용하면 식 (4b)로 표현된다.

$$Q = C_D b \left(\frac{H_a}{0.305} \right)^n \quad (\text{m}^3/\text{sec}) \quad (4a)$$

$$Q = 3.7294 H_a^{1.5863} \quad (\text{m}^3/\text{sec}) \quad (4b)$$

여기서, C_D 는 유량계수로서 0.372, n 은 지수로서 $1.569b^{0.026}$ 이며, b 는 인후부 폭이다.

한편, USBR의 WMM(Water Measurement Manual, 1997)에서 제시하고 있는 경험적인 유량공식은 인후부 폭 5피트에 대하여 식 (5)로 표현된다.

$$Q = 20 H_a^{1.59} \quad (\text{ft}^3/\text{sec}) \quad (5)$$

3.3.3 수위-유량관계식에 의한 유량산정

매년 파살플룸 직상류 200m 지점에 위치해 있는 동향 수위관측소 지점에서 유량을 측정하고 있다. 유량측정은 수위가 낮은 평·갈수기는 물속을 도보로 이동하면서 실시하는 회전식 유속계를 사용하였고, 홍수기는 표면유속을 측정하는 전자파표면 유속계를 이용하였다. 2003년 회전식 유속계에 의한 측정은 23회 실시하였고 전자파표면 유속계에 의한 측정은 45회를 실시하여 총 68회의 유량측정을 실시하였다. 이 성과중 태풍 매미 등으로 하천단면이 크게 변화하여 홍수후의 성과만을 회귀분석하여 표 3의 수위-유량 관계식을 얻었다. 유량

표 3. 동향 관측소 수위-유량 관계식

연도	수위-유량관계식	적용 수위(m)	R2	적용횟수
2003년	$Q = 11.572 \times (H - 1.524)^{3.101}$	$H < 2.67$	0.989	16
	$Q = 26.592 \times (H - 1.816)^{2.597}$	$H \geq 2.67$	0.998	7

표 4. 수위-유량관계식 적용 수위

일시	관측된 수위 (m)	공정 수위관측소 수위 (m)
'03/11/14 14:50	0.460	1.980
'03/12/04 17:00	0.405	1.950
'03/12/08 16:40	0.540	2.000
'03/12/10 16:45	0.535	1.990
'03/12/24 11:40	0.370	1.920

은 표 1의 파살플룸 수위 관측시 동향 수위관측소의 수위자료를 수위-유량관계식에 적용하여 산정하였다. 적용한 동향 수위관측소의 수위자료는 표 4와 같다.

3.3.4 비교 분석

전술한 바와 같이 파살플룸의 유량공식에 실측수위 (H_a)를 적용하여 유량을 산정하였고, 파살플룸의 수위 측정시각과 동일한 시각의 동향 수위관측소의 수위를 수위-유량관계식에 대입하여 유량을 산정하였다. 수위-유량관계식은 2003년 홍수후의 측정성과만을 이용하여 작성된 식을 사용하여 유량을 산정하였다. 또한 FLOW-3D로 3차원 모의를 하여 각 경우에 대한 유량을 구하였다.

표 5와 같이 산정된 유량과 그림 16에서 보여지는 것처럼 2003년 홍수이후 평·갈수량 측정성과를 이용하여

작성된 수위-유량관계식에 의한 유량은 ISO공식에 의한 유량보다 약 16.6% 작은 값을 나타냈다. USBR 공식에 의한 유량은 ISO 공식에 의한 유량과 거의 동일한 유량값을 보였으나, FLOW-3D로 산정된 유량은 ISO공식에 의한 유량보다 약 9% 크게 나타났다.

그림 17은 2004년 1월 동향 수위관측소와 파살플룸에서 연속적으로 관측된 시간수위 자료를 이용하여 각 방법별 유량을 도시한 것으로서, 유량곡선식의 그림과 같이 자연하천의 수위관측 자료를 이용하여 유량을 산정할때 하폭이 넓은 경우에는 유량의 변화가 수위에 민감하게 반영되지 못함을 보여주고 있고 또한, 동결기에 수위관측소의 부자식 수위계의 동결로 수위의 변화가 없어 실제 유량을 반영하지 못하는 것을 보여주고 있다.

표 5. 유량산정 결과

관측 수위 (m)	동향 관측소 수위 (H_a) (m)	유량 (m ³ /sec)			
		수위-유량관계식	ISO 공식	USBR 공식	FLOW-3D
0.460m	1.980m	1.014	1.088	1.090	1.27
0.405m	1.950m	0.821	0.889	0.890	1.03
0.540m	2.000m	1.158	1.403	1.406	1.55
0.535m	1.990m	1.084	1.383	1.385	1.50
0.370m	1.920m	0.654	0.770	0.771	0.77

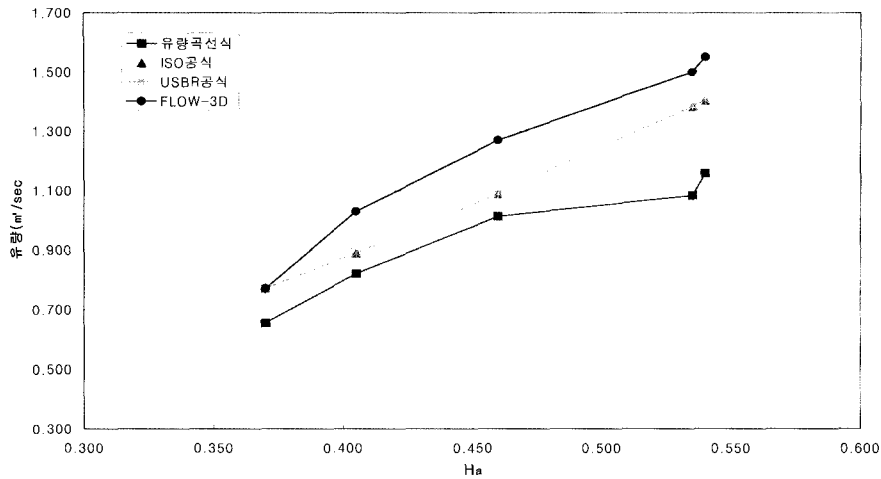


그림 16. 각 방법별 유량산정 비교

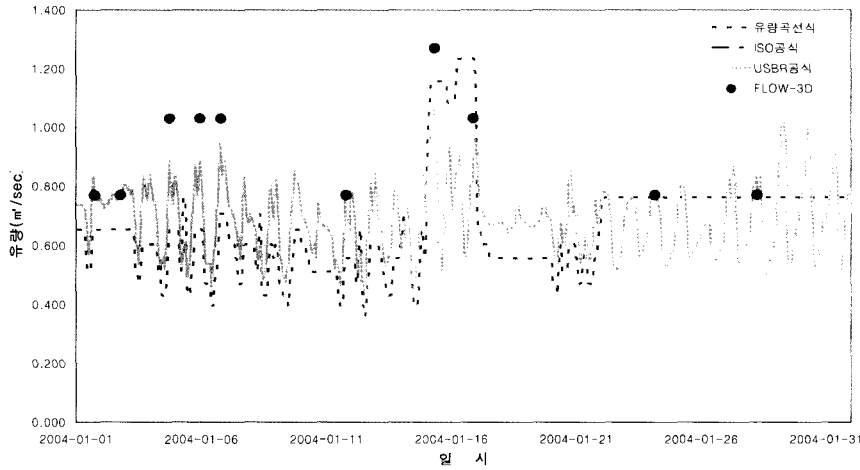


그림 17. 각 방법별 시간유량(2004년 1월) 비교

4. 결론

본 연구는 용담댐 유역에 설치된 파살플룸의 유량측정에 대한 신뢰성을 판단하기 위하여 3차원 유한차분 모형 FLOW-3D(Flow Science, 1996)를 이용하여 파살플룸내의 흐름을 해석하였다. 또한 2003년 유량측정성 과로 작성된 수위-유량관계식, ISO에서 제시한 공식 및 USBR의 WMM(Water Measurement Manual, 1997)에서 제시한 공식에 의한 유량을 산정하였다. 이렇게 3차원 모형에 의한 흐름해석과 각 방법별로 산정된 유량을 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) ISO 유량공식에 의해 산정된 유량은 USBR의 공식에 의한 유량과 거의 동일하였고, FLOW-3D 모형에 의한 유량보다는 9%정도 작게 나타났으

며, 수위-유량관계식에 의한 유량보다는 16% 정도 크게 나타나 당해연도의 많은 유량측정 성과와 홍수 이후 자료만으로 작성되었음에도 불구하고 가장 부정확한 값을 나타냈다.

(2) 수위-유량관계식에 의한 유량이 가장 부정확한 이유는 측정자, 측정방법 등에 따라 달라지는 유량측정 성과와 수위-유량관계식의 불확실성에 기인하는 것으로 판단된다.

(3) FLOW-3D 모형은 구조물 설계시 취약부분, 고려해야 하는 부분 등의 흐름형상 및 유속분포를 상세하게 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 본 연구에서는 파살플룸의 재질이 스테인레스로 매끈하여 조도(roughness height)를 고려하지 않았으나, 조도계수를 반영할 경우 ISO 공식에 의한 유량과 더 근접할 것으로 예상되며, 또한 수위

-유량관계식에 의한 유량과의 비교 보다 실측유량과의 비교가 더욱 정확한 평가가 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-1-1)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

노성진 (2001). CFD를 이용한 장방형 침전지내 흐름의 수치모의, 서울대학교, pp. 3-17.

안창진 (2003). 격벽식 분말활성탄 접촉조에 의한 이취미 제거 효율향상. 박사학위 논문, 충북대학교.

이길성, 김남일 (1997). "3차원 흐름해석을 위한 여수로 유입수로의 2차원 흐름해석." **대한토목학회 학술발표회 논문집(II)**, pp. 71-74.

한국수자원공사 (2003). 2003년 용담댐 일원 하천유량측정 등 수문조사 보고서, pp. 80-104.

한국수자원공사 (2003). 시험유역 운영(용담댐 상류 시험유역) - 수자원의 지속적 확보기술개발사업. 2차년도 연구보고서.

한국수자원공사 (2002). 2002년 용담댐 일원 하천유량측정 등 수문조사 보고서, pp. 108-109.

한국수자원공사 (1999). 갈수량측정 전용시설(Parshall flume) 구축사업 실시설계보고서, pp. 19-30.

Flow Science, Inc. (2000). *FLOW-3D User's Manuals*.

Hirt, C.W. and Amsden, A.A., and Cook, J.L. (1974). *An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for all Flow Speeds*. J. comp. phys. 14, 227.

Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). *Volume of*

Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. J. comp. phys. 39, No. 201.

Hirt, C.W. and Williams, K.A. (1994). *FLOW-3D Predictions for free discharge and submerged Parshall flumes*. USBR.

ISO 9826 (1992). *Measurement of liquid flow in open channels-Parshall and SANIIRI flumes*. pp. 1-10.

ISO 8368 (1985). *Liquid flow measurement in open channels - Guidelines for the selection of flow gauging structures*. pp. 1-5.

Kim, N. (2003). *Investigation of scale effects of hydraulic model for dam spillway using 3-D CFD model*. Ph.D. dissertation, Seoul National University.

Nichols, B.D. and Hirt, C.W. (1971). *Calculating Three-Dimensional Free Surface Flow in the Vicinity of Submerged and Exposed Structures*. J. comp. phys. 12, 234.

Peck, H. (1988). *Submerged Flows in Parshall Flumes*, Proceedings, National Conference, Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineers, American Society of Civil Engineers, Colorado Springs, Colorado.

USBR (1997). *Water measurement manual*. 3rd edition, pp. 8.40-8.60.

USBR (1984). *Water measurement manual*. Revised reprint, pp. 43-85.

Wu, W., Rodi, W., and Wenka, T. (2000). "Approximate Riemann Solvers in FVM for 2D Hydraulic Shock Wave Modeling." *Journal of hydraulics Engineering*, ASCE, Vol.122, No. 12

(논문번호:04-23/접수:2004.03.10/심사완료:2004.04.23)