

계단형 배수구를 가진 원통 용기에서의 배수 과정에 관한 수치해석 연구[§]

손 종 현* · 박 일 석*[†]

* 경북대학교 기계공학부

Numerical Study on Draining from Cylindrical Tank Using Stepped Drain Port

Jong Hyeon Son* and Il Seouk Park*[†]

* School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received May 21, 2014 ; Revised August 8, 2014 ; Accepted August 17, 2014)

Key Words: Aircore Vortex(공기기둥), Draining(배수), Stepped Drain Port(계단형 배수구)

초록: 물이 채워진 원통 용기를 회전시킨 후 배수하면 일정시간이 지난 후 공기기둥이 발생한다. 용기의 크기, 초기 회전 속도나 교반 속도, 배수구 모양 등의 배수조건에 따라 공기기둥의 발생 여부나 발생 시간이 달라진다. 본 연구에서는 2 단으로 구성된 계단형 배수구를 가진 원통 용기에서 물이 배수되는 과정을 수치해석적으로 연구하였다. 하부에 위치한 배수구 1 단은 길이와 반경이 고정되어 있고, 상부에 위치한 2 단은 길이와 반경을 변화시켰다. 2 차원 격자계에 축대칭 조건을 적용하여 원통 용기 내부의 배수유동을 해석하였다. 물과 공기의 자유표면 모양을 추적하여 수위 변화를 관찰하였으며, 배수구 2 단의 형상이 공기기둥 발생시간과 내부 유동구조 변화에 미치는 영향을 확인하였다.

Abstract: An air-core vortex is generated during draining after stirring a rotating cylindrical tank or after filling it with water. The formation of the air-core vortex and the time of its formation are dependent on drain conditions such as the dimensions of the tank, the initial rotation or stirring speed, and the shape of the drain port. In this study, a draining process using a two-stage drain port was numerically investigated. The length and radius of the first drain stage located in the lower part of the drain port were kept constant, whereas the radius of the second drain stage was varied for simulating the draining process. The simulation was conducted by considering an axisymmetric swirling flow for all cases. The declining water level was monitored by an interface capturing method. Further, the effects of the radius of the second drain stage on the time of formation of the air-core vortex and the internal flow structure were investigated.

- 기호설명 -

g : 중력 가속도(gravitational acceleration)
 H : 배수구 길이(drain port length)
 H_{ini} : 초기 수위(initial water level)
 p : 압력(pressure)
 r : 반경방향 좌표(radial coordinate)
 t : 시간(time)
 u_i : 속도 벡터(velocity vector)
 x_i : 위치 벡터(position vector)

W : 배수구 반경(drain port radius)
 z : 축방향 좌표(axial coordinate)

그리스문자

α : 체적분율
 δ : 하강수위
 ρ : 밀도
 μ : 점성 계수
 ν : 동점성 계수

하첨자

a : 공기
 θ : 원주방향
 r : 반경방향

[§] 이 논문은 2014년도 대한기계학회 유체공학부문 춘계학술대회(2014. 5. 15.-16., 부산 해운대 한화콘도) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, einstein@knu.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

w : 물
z : 축방향

1. 서 론

액체 배수 과정은 제철공정(steel making process) 중 연속주조(continuous casting) 공정, 발사체의 액체연료 공급 과정, 일반 하수관에서의 배수 과정 등 다양한 상황에 나타나며, 배수 과정에서 발생할 수 있는 공기기둥(aircore vortex)은 각 공정의 기능에 심각한 역효과를 일으키는 경우가 많다.

Lubin 과 Springer⁽¹⁾는 원통 용기에 서로 섞이지 않는 두 가지 이상의 액체를 채우고 정지상태로부터 배수하는 실험을 통해 작동유체의 종류에 따른 자유표면 덩플 발생 수위에 대하여 연구하였다. Zhou 와 Graebel⁽²⁾은 배수 과정 중의 자유표면 형상 변화를 수치해석 연구를 통해 제시하였으며, Ramamurthi 등⁽³⁾은 용기 내부에 그물망 다발을 설치하고 배수 과정 중 그물망의 움직임을 관찰하여 용기 내부의 유동구조를 분석하였다. Sohn 등⁽⁴⁾은 원통 용기를 회전시킨 후 배수를 시작함으로써 공기기둥 발생이 가속화된 조건에서 액체 배수 과정을 전산유체역학 해석을 통하여 모사하였다. 용기와 배수구의 크기, 초기 용기의 회전속도에 따라 용기 내부 유동구조를 분석하여 공기기둥의 발생 원인을 제시하고, 배수조건에 따른 공기기둥 발생 시점에 관한 관계식을 제시하였다.

배수 과정 중 발생하는 공기기둥은 배수량 변화 뿐만 아니라, 펌프 급수 과정의 경우에는 공기유입에 의한 펌프 손상, 연속주조 공정의 경우 자유표면 계재물의 국소 과잉 유입에 의한 주조물의 불량을 유발한다. 따라서 배수 과정 중 공기기둥의 발생을 억제하기 위한 다양한 방법이 연구되고 있으며, 용기 내부에 와류 억제기를 설치하거나⁽⁵⁻⁷⁾ 배수구의 모양,⁽⁸⁾ 위치⁽⁹⁾ 등을 조정함으로써 공기기둥 발생을 효과적으로 제어할 수 있음이 보고되고 있다.

본 연구에서는 계단형으로 만들어진 2 단 (two step) 원통형 배수구를 통해 용기로부터 액체를 배수하는 과정을 연구하였다. VOF(Volume OF Fluid) 방법⁽¹⁰⁾을 적용하여 배수 과정 중 변화하는 자유표면의 형상을 추적하고, 상부에 위치한 2 단으로 구성된 배수구의 형상변화에 따른 용기 내부 액체의 수위 변화를 관찰하였다. 유선과 선회속도 분포를 분석하여 배수구 2 단의 형상 변화가 내부 유동구조에 미치는 영향과 그에 따른 공기기둥 발생 시점의 변화에 대해 고찰하였다.

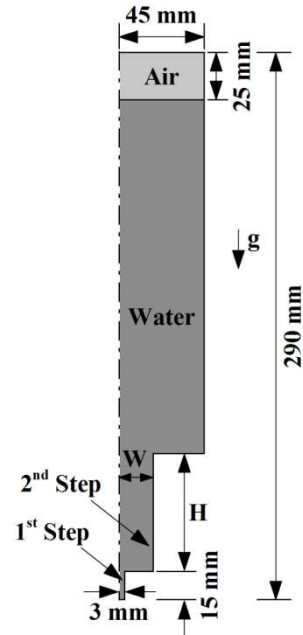


Fig. 1 Schematic diagram of cylinder tank.

2. 수치해석

계단형 배수구를 가진 원통 용기의 계산 영역은 Fig. 1 과 같다. 원통 용기의 반경은 45 mm, 배출구로부터 원통 용기의 전체 높이는 290 mm 이다. 초기에 물은 용기 상부 경계의 25 mm 아래까지 채워져 있다. 배수구는 Fig. 1 과 같이 2 단의 계단형이며, 하단 배수구 (1st step)는 길이가 15 mm, 반경은 3 mm 로 일정한 크기로 고정되어 있는 반면, 상단 배수구(2nd step)의 반경, W 는 3 ~ 45 mm, 길이, H 는 0 ~ 125 mm 범위에서 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 배수 개시 전, 용기는 180 RPM 의 일정한 각속도로 회전하고 있으며 원심력에 의해 자유표면의 모양은 오목하게 된다. 충분한 시간 동안 용기를 회전시켜 용기 내부 물이 강제 회전 (rigid body rotation)의 상태에 이르면 회전을 멈추고 3 초가 지난 후에 배수구를 열어 물을 배수한다.

물이 배수되는 과정을 해석하기 위해서 비정상, 층류, 비압축성 유동에 관한 아래의 질량, 운동량 보존식을 지배방정식으로 사용하였다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \tag{2}$$

여기서 u_i 는 속도벡터, x_i 는 위치벡터, t 는 시간, ρ 는 밀도, p 는 압력, ν 는 동점성 계수, g_i 는 중력가속도이다.

본 연구에서는 3 차원 해석 대신 유동변수의 원주방향 변화가 없는 2 차원 축대칭 해석을 수행하였다. 유동변수들의 원주방향 변화는 없지만 원주방향 속도성분인 선회속도는 존재하고 시간에 따라 그 크기가 변화하므로 이를 해석에 반영하기 위하여 아래와 같은 원주방향 운동량 보존식을 추가로 해석하고 있다.

$$\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(ru_r u_\theta)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(ru_z u_\theta)}{\partial z} + \frac{u_r u_\theta}{r} = \frac{\nu}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) \right] + \frac{\nu}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left[r \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right] \quad (3)$$

여기서 r 는 반경방향 좌표, z 는 축방향 좌표, 하첨자 r, θ, z 는 각각 반경방향, 선회방향, 축방향을 나타낸다.

물과 공기 사이의 자유표면 형상을 추적하기 위해서 VOF 방법을 사용하였고 아래와 같은 체적분을 보존식을 사용하였다.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

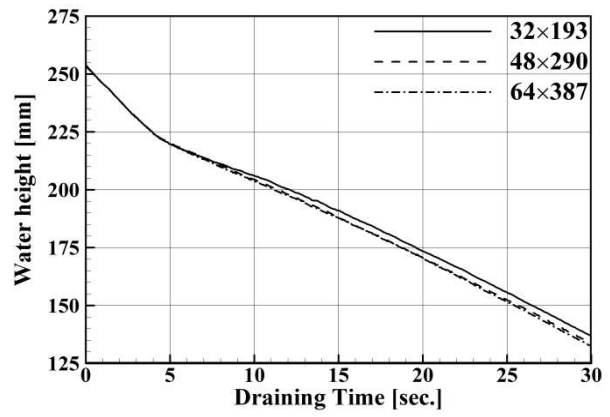
여기서, α 는 각 유체의 체적분율을 나타낸다. 한 격자셀에서 모든 유체의 체적분율 합은 1이 되고, 유체의 점성계수와 밀도 값은 아래와 같이 격자셀의 체적분율을 고려한 가중평균값을 사용한다.

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_a \alpha_a + \mu_w \alpha_w \\ \rho &= \rho_a \alpha_a + \rho_w \alpha_w \end{aligned} \quad (5)$$

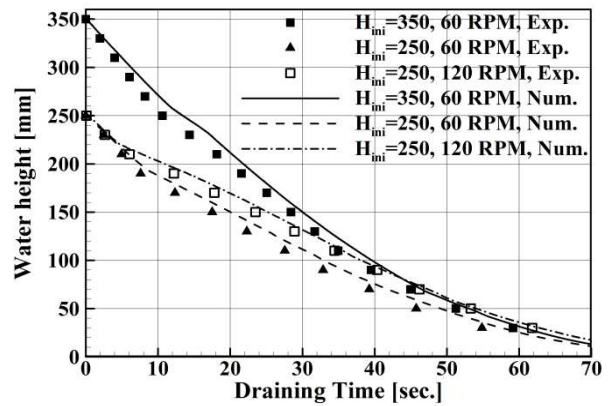
여기서, μ 는 점성계수, 하첨자 a 는 공기, w 는 물을 나타낸다.

속도-압력 연계를 위해서 SIMPLE 알고리즘⁽¹¹⁾이 사용되었고, 식 (2)~(3)의 대류항은 QUICK 도식, 확산항은 2 차 정확도를 가지는 중앙차분 도식을 사용하여 차분되었다. 체적분을 보존식의 대류항은 Modified HRIC 방법⁽¹²⁾이 적용되었으며, 지배방정식의 시간 차분은 1 차 정확도의 암시적 방법(implicit scheme)을 적용하였고 10^{-4} s의 일정한 시간 간격을 사용하여 해석하였다.

원통 용기의 윗면은 일정 압력 조건을 적용하여 공기의 자유로운 유출입이 가능하고, 용기의 모든 벽에는 점착조건(no-slip condition)을 적용하였다. 물이 배수되는 동안 배수구 출구에는 원통 용기 윗면과 같은 압력의 일정 압력조건을 적용하여 중력에 의해서만 물이 배수되도록 하였다. 그리고 해석 상 배수구 출구에서 역류가 발생할 경우 공기만 유입되는 것으로 설정하였다. 표면 장력은



(a)



(b)

Fig. 2 Comparison of water height for validation: (a) grid dependency test, and (b) experimental results

Brackbill 등⁽¹³⁾이 제안한 CSF(Continuum Surface Force) 모델을 적용하여 계산하였다.

공기와 물의 밀도는 각각 998.2 kg/m^3 , 1.225 kg/m^3 이고 점성계수는 $0.001003 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$, $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 로 일정하다. 물과 공기 간의 표면장력 계수도 0.0712 N/m 로 일정한 값으로 설정하였다. 이상의 지배방정식과 경계조건을 만족하는 유동장을 수치해석적으로 얻기 위하여 유한체적법(FVM, Finite Volume Method)에 근거한 상용 CFD 해석코드인 Fluent 6.3이 적용되었다.

3. 해석결과

3.1 격자계 테스트 및 검증

본격적인 해석에 앞서 우선 해석 결과의 격자의존도 테스트를 진행하였다. 상단 배수구의 반경이 45 mm로 실제로는 한 단짜리 배수구를 가지는 원통 용기에 대하여 배수 중 내부 수위 변화를 여러 가지 격자계에 대하여 비교하였다.

Fig. 2(a)는 사용 격자계에 따른 수위 변화를 나

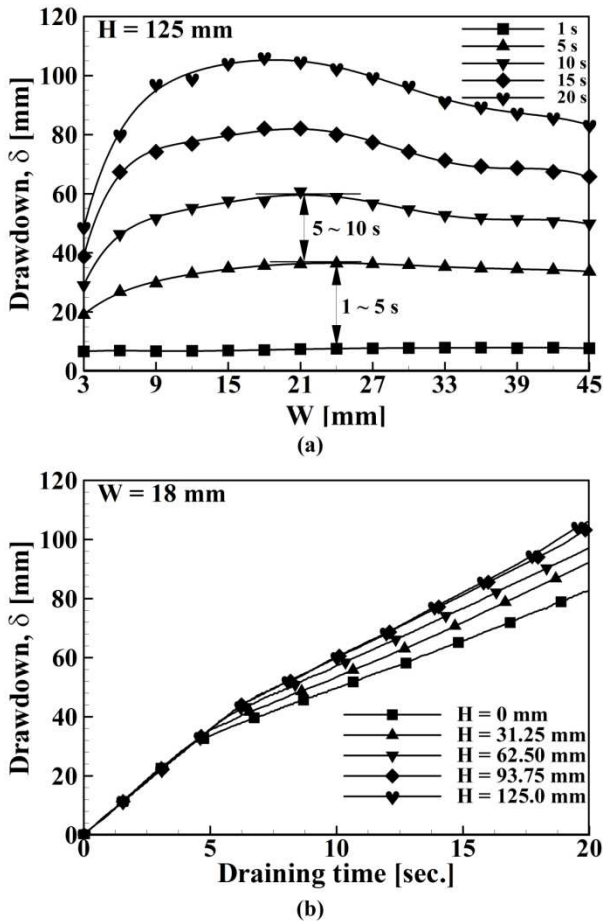


Fig. 3 Drawdown for various (a) radius, W, and (b) height, H, of upper drain port

타낸 그림으로, 32×183, 48×275, 64×366의 세 가지 격자계 모두 비슷한 수위 하강 패턴을 예측하는 것을 확인할 수 있다. 배수 개시 후 5 초 정도에 수위하강 속도가 갑자기 느려지고 배수량이 감소하게 되는데 세가지 격자계가 모두 같은 현상을 재현하고 있다. 전체 배수 과정에서 가장 성긴 격자계인 32×183 격자계는 다른 두 격자계에 비해 최대 5 mm 정도 큰 수위 값을 예측하는 반면, 48×275, 64×366의 조밀한 격자계 결과들은 서로 1% 미만의 차이를 나타내고 있다. 본 논문의 이후 모든 해석 결과들은 48×275 격자계를 이용하여 계산되었다.

수치해석 결과의 검증을 위해 배수 실험을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 2(b)에 나타내었다. 구체적인 실험 방법 및 장치는 Park and Sohn⁽¹⁴⁾에 자세히 언급되어 있다. 초기 수위가 250 mm 이고 초기 회전 속도를 120 RPM 으로 하였을 때 실험 결과와 수치해석 결과가 5% 이내로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 초기 회전 속도와 초기 수위를 변화시켜 배수를 한 경우에도 해석결과가 실험 결과와 유사

한 것을 확인할 수 있다.

3.2 하강수위

Fig. 3 은 상단 배수구의 반경(W), 길이(H)와 배수 경과 시간에 따른 하강수위 변화를 나타내고 있다. 여기서 하강수위는 배수직전 최대 수위에서 배수가 진행되는 동안 감소한 수위를 의미한다. Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 배수 개시 후 1 초까지는 상단 배수구 반경의 변화에 따른 하강수위 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다. 배수 시작 5 초 후에는 상단 배수구 반경이 증가함에 따라 하강수위가 점차적으로 커지나, 상단 배수구 반경(W) 18 mm 이상부터는 반경의 크기에 대한 의존도가 사라짐을 확인할 수 있다. 이는 상단 배수구 반경이 18 mm 보다 작은 경우에는 Fig. 2 에서 언급된 배수 초기 배수량 감소 현상이 배수 개시 후 5 초 이전에 나타남을 의미하며, 상단 배수구 반경(W)이 작아질수록 배수량 감소 현상이 더 빨리 발생하는 것으로 이해할 수 있다. 배수 개시 후 10 초에는 W = 21 mm 일 때 수위가 가장 많이 하강하였으며 모든 반경 경우에서 배수량 감소 현상이 이미 나타나 배수 개시 5 초부터 10 초까지 하강한 수위가 배수 직후 5 초간 하강한 수위에 비해 감소한 것을 확인할 수 있다. 배수가 계속 진행될수록 상단 배수구 반경에 따른 하강수위의 편차가 더욱 커지기 시작하며 동일한 배수시간에 하강수위 크기가 최대가 되는 상단 배수구 반경 (W ≈ 18 mm)이 존재함을 확인할 수 있다. 이는 상단 배수구가 특정 크기의 반경을 가질 때 공기기동의 발생이 지연되어 배수 개시 직후의 큰 배수량을 가장 오랫동안 유지하는 것으로 이해할 수 있다. 본 연구의 해석 케이스들에서는 상단 배수구 반경에 따라 배수 개시 20 초 시점에서 하강 수위가 최대 2 배 이상 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3(b)는 상단 배수구 반경이 18 mm 인 경우 여러 가지 상단 배수구 길이(H)에 대해 시간에 따른 하강수위의 변화를 나타내고 있다. 배수 개시 후 약 4 초까지는 상단 배수구 길이와 관계없이 유사한 수위 변화가 나타났다. 약 5 초 근처에서 수위 하강속도의 변화가 나타나며, 배수구의 길이가 증가할수록 하강속도의 변화 시점이 느려짐을 확인할 수 있다. 실제로 상단 배수구가 없는 것과 마찬가지로 H = 0 일 때 배수량 감소 현상이 가장 먼저 발생하여 동일시간에 하강수위가 가장 작게 나타났다. 시간이 지날수록 동일시간에서의 하강수위는 배수구 길이가 길어질수록 커지며, 동일수위에 도달하는데 소요되는 시간도 크게 차이가 나

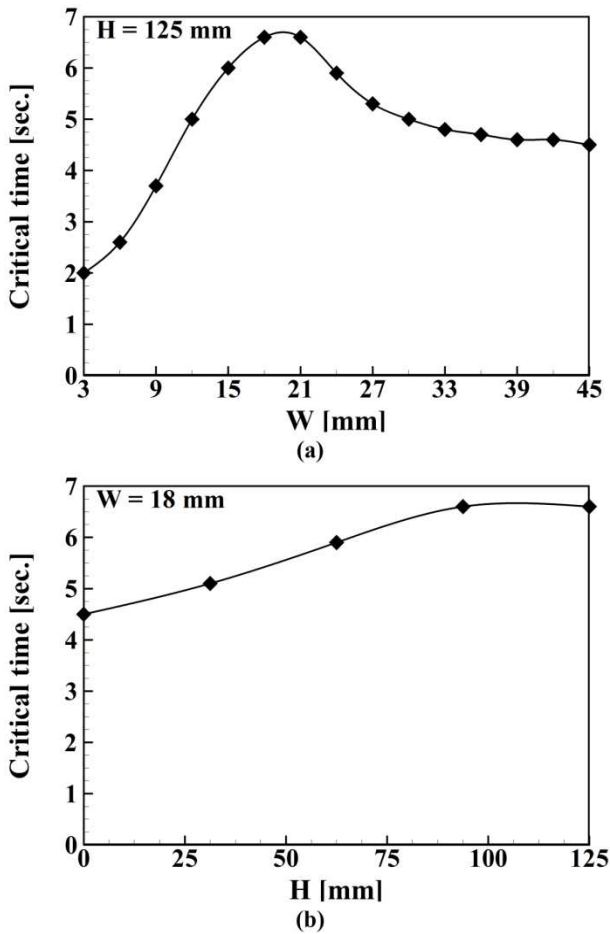


Fig. 4 The occurrence time of aircore for various (a) radius, W , and (b) height, H , of upper drain port

는 것을 확인할 수 있다.

상단 배수구의 길이가 93.75 mm 이상이 되면 길이 변화에 따른 하강수위의 차이가 거의 없어지며 유량 감소 현상이 나타나는 시점도 변하지 않음을 알 수 있다. 유량 감소 현상이 나타난 이후부터는 수위하강 속도가 거의 일정하게 유지됨을 확인할 수 있으며, 2 단으로 구성된 계단형 배수구가 1 단 배수구에 비해 배수 속도가 빠름을 확인할 수 있다.

3.3 공기기둥 발생시간

원통 용기를 회전시킨 후 물을 배수하기 때문에 회전 유동으로 인해 공기기둥 발생 시점이 빨라지며 회전속도가 빠를수록 발생 시점이 빨라진다.⁽⁹⁾ 공기기둥이 발생하면 자유표면이 배수구까지 연결되면서 배수구를 통해 공기가 통과하게 되며 이는 곧 배수유량의 감소로 이어진다.

Fig. 4 는 상단 배수구의 반경(W) 변화에 따라 공기기둥의 발생 시점이 달라지는 것을 나타내고 있다. 상단 배수구의 반경이 3 mm 로 하단 배수구 의 반경

과 같은 경우는 길이가 긴 한 단짜리 배수구가 있는 경우가 되며 배수 개시 후 2 초 정도에 공기기둥이 발생하였다. 상단 배수구 반경을 증가시켜 2 단 배수구를 구성하면 상단 배수구 반경(W)의 증가에 따라 공기기둥 발생 시점이 최대 3 배 이상 지연됨을 확인할 수 있다. 또 공기기둥 발생이 최대로 지연되게 하는 상단 배수구 반경($W = 21$ mm)이 존재함을 확인할 수 있으며, 상단 배수구 반경이 더 커질 경우 공기기둥 발생 시점이 일정한 값으로 수렴함을 확인할 수 있다.

Fig. 4(b)는 상단 배수구 반경이 18 mm 로 일정할 때 상단 배수구 길이(H)의 변화에 따른 공기기둥 발생 시점의 변화를 나타내고 있다. 상단 배수구의 길이가 길어질수록 공기기둥 발생 시점이 늦춰지는 것을 확인할 수 있다.

3.4 선회속도 및 유선 분포

Fig. 5(a)는 상단 배수구 반경이 9 mm 인 경우에 용기 내부의 선회속도 및 유선 분포, 자유표면 형상 변화를 배수 시간 경과에 따라 나타내고 있다. 용기가 강체회전 상태일 때에는 반경에 비례하는 선회속도 분포를 가지지만 용기가 정지한 후에는 벽으로부터 선회속도 경계층이 만들어지며, 선회속도의 반경방향 구배로 인해 용기 내부에는 Fig. 5(a)의 유선분포와 같이 측벽을 따라 Taylor 와류가 발생한다. Taylor 와류는 그림과 같이 시간이 지남에 따라 여러 개의 작은 셀이 주변 와류셀과 합쳐지면서 점차 크기가 커지게 되고, Taylor 와류의 팽창으로 배수구로 빠져나가는 하강 흐름의 영역이 좁아진다. 배수구로 향하는 하강 흐름이 용기 중심부의 좁은 영역에 집중됨에 따라 자유표면 덩플의 중심부가 배수구를 향해 더 깊이 빨려 들어가 공기기둥이 만들어지게 된다.

또한 하단 배수구의 직경이 용기에 비해 매우 작기 때문에 배수되는 물은 각운동량 보존 효과에 의해 매우 큰 선회속도를 가지며, 배수구 부근의 강한 선회속도는 시간이 지남에 따라 용기 상부로 확산되는 것을 볼 수 있다. 또한 각운동량 보존 효과로 자유표면 상의 덩플 중심부에 형성되는 큰 선회속도 영역의 면적이 덩플 중심부의 하강으로 인해 확장되는 효과를 나타내므로 선회속도의 연직방향 확산이 상부와 하부에서 동시에 용기 내부로 진행되어 중심부 전체가 빠르게 선회속도가 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

결과적으로 시간이 지남에 따라 큰 선회속도 영역이 용기 측벽에서부터 용기 중심으로 이동하여

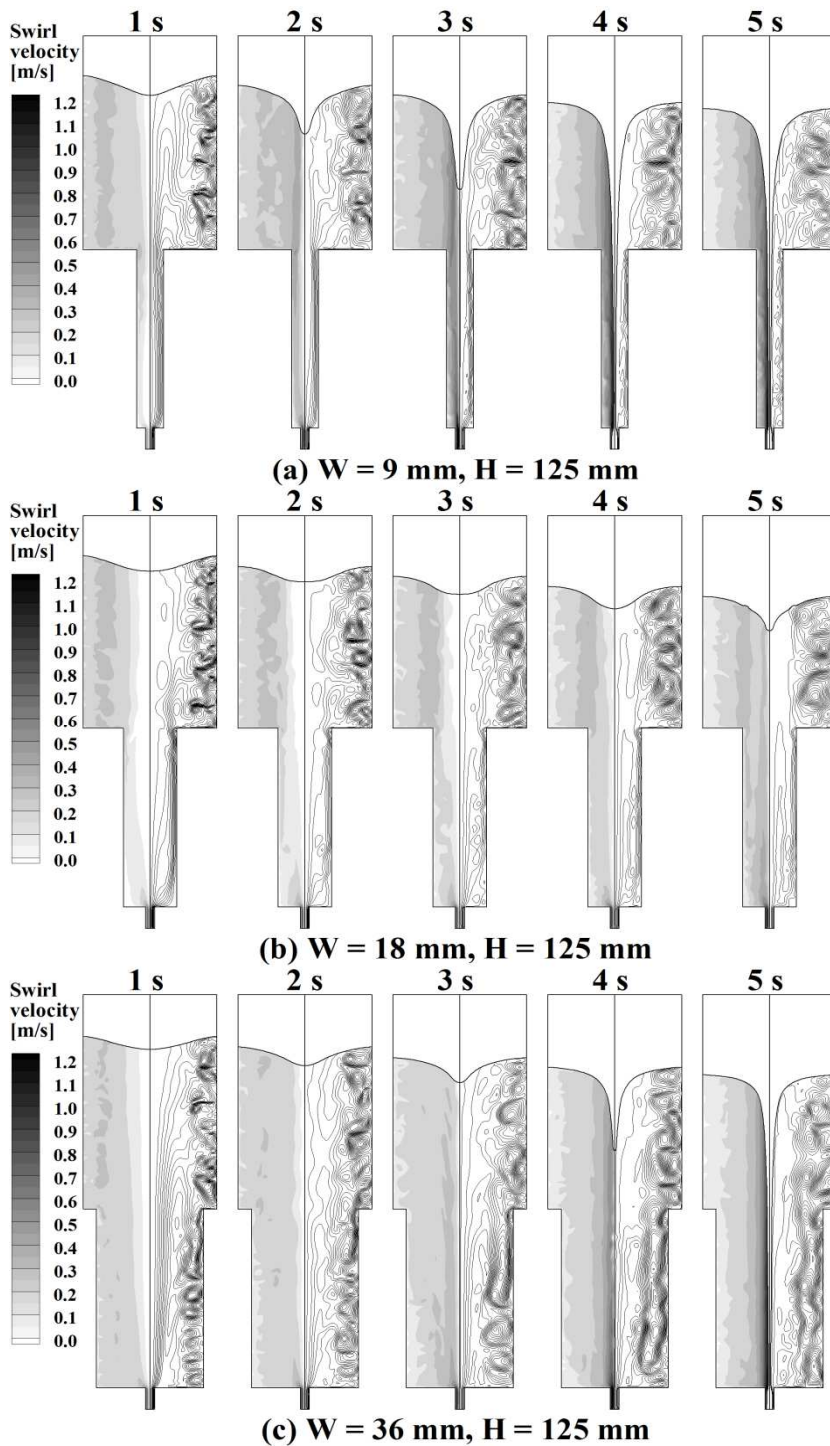


Fig. 5 Swirl velocity (left-half) and streamline (right-half) distributions for draining time on $H = 125$ mm : (a) $W = 9$ mm, (b) $W = 18$ mm, and (c) $W = 36$ mm

형성되고 있다. 상단 배수구 반경이 9 mm 인 경우는 배수 개시 후 3~4 초 사이에 덩플이 완전히 배수구를 관통하여 공기기둥 생성이 완료되고 이후 배수량이 감소하게 된다. 또 공기기둥이 생성된 이후에는 하단 배수구 측벽에서도 Taylor 와류가 나

타나는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 5(b)는 상단 배수구 반경이 18 mm 인 경우를 나타내고 있다. Fig. 5(a)의 상단 배수구 반경이 9 mm 인 경우와 마찬가지로 시간에 따른 Taylor 와류의 팽창을 확인할 수 있으나 $W = 9$ mm 인 경우에 비해 Taylor 와

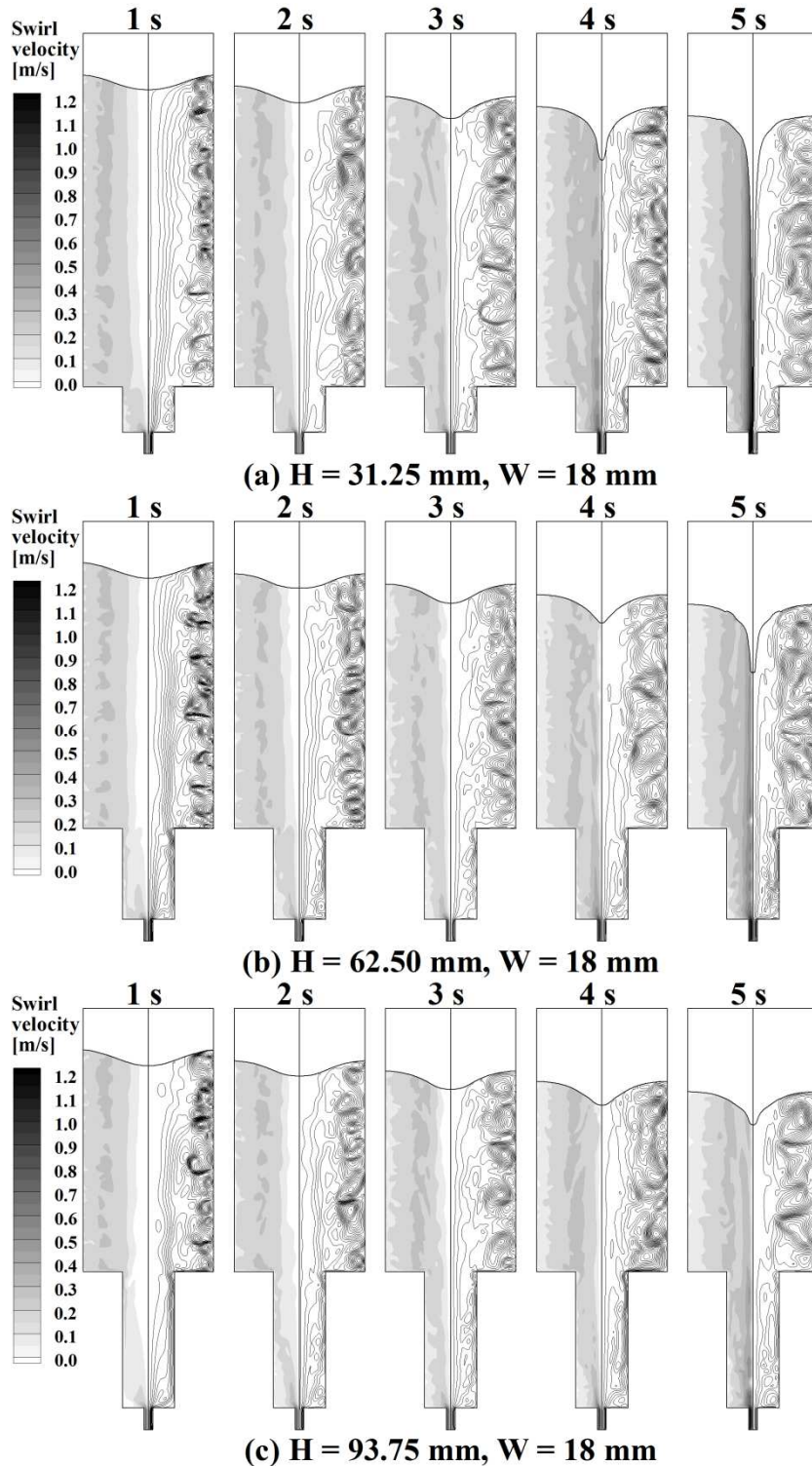


Fig. 6 Swirl velocity (left-half) and streamline (right-half) distribution for draining time on $W = 18 \text{ mm}$: (a) $H = 31.25 \text{ mm}$, (b) $H = 62.50 \text{ mm}$, and (c) $H = 93.75 \text{ mm}$

류의 팽창이 느리게 진행되고 있고, 이로 인하여 배수구를 향하는 하강 흐름이 넓은 영역으로 확산되며 덩플 중심부의 깊은 하강움직임이 지연되고 있다. 따라서 $W=9 \text{ mm}$ 의 경우에 나타났던 덩플 중심부의 깊

은 하강으로 인한 상부로부터의 선회속도 연직방향 확산이 나타나지 않게 되므로 용기 중심부의 선회속도 발달이 지연되고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같이 중심부의 선회속도 발달 지연은 용기 내부 Taylor

와류의 성장에 불리하게 작용하여 덩플 중심부의 깊은 하강이 생기지 않도록 작용한다. 중심부의 선회속도가 측벽 부근에 비해 전체적으로 큰 값이 형성되는 5 초 부근에 덩플 중심부의 깊은 하강이 시작되고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5(c)의 상단 배수구 반경이 36 mm 인 경우 상단 배수구에서도 선회속도가 충분히 크게 형성되기 때문에 상단 배수구 벽면 근처에서도 Taylor 와류가 만들어진다. 배수 개시 후 4 초에 중심부에 측벽 부근 보다 큰 선회속도가 형성된 것을 볼 수 있다. 시간이 경과하면서 용기와 상단 배수구 측벽 근처에 생성된 Taylor 와류 셀이 용기의 중심 방향으로 점차 확장되고 셀들이 벽을 따라 길게 연결되고 있다. 경계면은 배수 개시 후 4~5 초에서 빠르게 하강하여 배수구를 관통하고 공기기둥이 만들어진다.

Fig. 6은 상단 배수구 반경이 18 mm 일 때 상단 배수구의 길이에 따른 선회속도와 유선, 자유표면 형상 변화를 나타내고 있다. 상단 배수구의 길이가 증가함에 따라 배수구 출구에 형성되는 강한 선회속도의 용기 내부 확산이 지연되는 것을 볼 수 있다. 그러나 상단 배수구 반경을 변화시키는 경우에 비해 공기기둥 발생 시점에 미치는 영향이 적음을 알 수 있다.

4. 결 론

계단형 배수구를 통해 원통 용기에서 물을 배수할 때 나타나는 수위 변화 및 내부 유동구조를 수치해석적으로 연구하였다. 상단 배수구의 길이와 반경에 따라 공기기둥 발생시간이 달라지며 이에 따라 수위 하강속도의 차이가 나타난다. 원통 용기 직경의 0.3 ~ 0.5 배 정도의 상부 배수구를 가지는 계단형 배수 시스템을 사용할 경우 선회속도의 측방향 확산을 지연시키고 공기기둥 발생 시점을 지연시키는 효과를 얻을 수 있고 내부의 유체를 배수시키는 데 소요되는 시간을 줄일 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2013R1A1A2A10059593)

참고문헌 (References)

(1) Lubin, B. T. and Springer, G. S., 1967, "The

- Formation of a Dip on the Surface of a Liquid Draining from a Tank," *J. Fluid Mech.*, Vol. 29, No. 2, pp. 385~390.
- (2) Zhou, Q.-N. and Graebel, W. P., 1990, "Axisymmetric Draining of a Cylindrical Tank with a Free Surface," *J. Fluid Mech.*, Vol. 221, pp. 511~532.
- (3) Ramamurthi, K. and Tharakan, T. J., 1996, "Flow Visualization Experiments on Free Draining of a Rotating Column of Liquid Using Nets and Tufts," *Exp. Fluids.*, Vol. 32, No. 2, pp.139~142.
- (4) Sohn, C. H., Son, J. H. and Park, I. S., 2013, "Numerical Analysis of Vortex Core Phenomenon During Draining from Cylinder Tank for Various Initial Swirling Speeds and Various Tank and Drain Port Sizes," *J. Hydrodyn. Ser. B*, Vol. 25, No. 2, pp. 183~195.
- (5) Gowda, B. H. L., Joshy, P. J. and Swamamani, S., 1996, "Device to Suppress Vortexing During Draining from Cylindrical Tanks," *J. Spacecr. Rockets.*, Vol. 33, No. 2, pp. 598~600.
- (6) Gowda, B. H. L., Udhayakumar, H., 2005, "Vane-type suppressor to prevent vortexing during draining from cylindrical tanks," *J. Spacecr. Rockets.*, Vol. 42, No. 2, pp.3881~3883.
- (7) Sohn, C. H., Ju, M. G. and Gowda, B. H. L., 2009, "Draining from Cylindrical Tanks with Vane-type Suppressors – A PIV Study," *J. Vis.*, Vol. 12, No. 4, pp. 347~360.
- (8) Ramamurthi, K., Tharakan, T. J., 1992, "Shaped Discharge Ports for Draining Liquids," *J. Spacecr. Rockets.*, Vol. 30, No. 6, pp.786~788.
- (9) Sohn, C.H., Ju, M.G. and Gowda, B.H.L., 2008, "Eccentric Drain Port to Prevent Vortexing During Draining from Cylindrical Tanks," *J. Spacecr. Rockets.*, Vol. 45, No. 3, pp. 638~640.
- (10) Hirt, C. W. and Nichols, B. D., 1981, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *J. Comput. Phys.*, Vol. 29, pp. 201~225.
- (11) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York.
- (12) *Fluent 6.3 Users guide*, 2006, Fluent Inc., Canonsburg.
- (13) Brackbill, J.U., Kothe, D.B. and Zemach, C., 1992, "A Continuum Method for Modeling Surface Tension," *J. Comput. Phys.*, Vol. 100, No. 2, pp.335~354.
- (14) Park, I.S., Sohn, C.H., 2011, "Experimental and Numerical Study on Air Cores for Cylindrical Tank Draining," *Int. Commun. Heat. Mass.*, Vol. 38, pp.1044~1049.