

고절수형 위생도기 개발을 위한 이상유동 수치해석 연구

안일용¹, 이영림^{2*}

¹공주대학교 대학원 기계공학과, ²공주대학교 기계자동차공학부

A Numerical Analysis Study on Two-phase Flow for the Development of High-efficiency Toilet

Il-Yong An¹ and Young Lim Lee^{2*}

¹Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Kongju National University

²Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

요 약 물 부족 시대에 양변기 절수는 물을 절약하는데 가장 효과적인 방법 중 하나이다. 본 연구에서는 고절수형 양변기 개발을 위한 이상유동 해석을 위해 VOF 기법을 이용하였다. VOF를 이용한 전체 모델의 해석은 많은 시간이 요구되므로 전체모델의 일부분만 고려하는 부분모델도 해석시간 단축을 위해 사용하였다. 유량배분 해석을 위해 4개의 서로 다른 림 모델을 고려하였는데 림 홀의 위치나 개수보다는 림 홀의 크기가 유량배분을 효과적으로 달성하기 위한 인자임이 본 연구를 통해 밝혀졌다. 또한, 전체모델 해석을 통해 사이펀 현상에 따른 이상유동의 속도 및 압력도 분석하였다. 따라서 본 연구는 고절수형 양변기 모델 개발을 위한 다양한 기초 데이터를 제공한다.

Abstract In the era of water scarcity, saving toilet water is one of the most effective ways to save water. In this study, two-phase flow for the development of highly-efficient toilet has been analysed with VOF(Volume Of Fluid) method. Since the whole model requires extensive computing time, part of the whole model has also been adopted to reduce the analysis time. Four different rim models were considered for flow distribution analysis and sizes of rim holes were found to become more important rather than locations or numbers of rim holes in achieving flow distribution effectively. In addition, velocity and pressure of two-phase flow due to siphon phenomenon have been studied through the analysis of whole model. Therefore, this study provides a variety of fundamental data for the development of highly-efficient toilet.

Key Words : CFD, Toilet, VOF, Water saving

1. 서론

공기와 더불어 물은 인간을 비롯한 모든 생명이 살아가는데 꼭 필요한 자원이다. 하지만 지구의 물중 97%는 염분으로 이루어진 바닷물이며, 실제로 사용할 수 있는 물은 0.0087%밖에 되지 않고 그것마저도 지구 온난화로 인한 급격한 기후변화와 환경오염으로 사용할 수 있는 물의 양은 점점 더 부족해지고 있는 실정이다. 이는 향후

미래에 물 부족으로 인한 많은 문제들을 야기 시킬 수 있다. 물 부족을 해결하기 위한 방법 중 하나는 댐을 건설하는 것이지만 이것은 효과적인 방법이 아니다. 댐을 건설하기 위해서는 많은 비용과 시간이 들며, 댐을 건설하는 과정에 있어서는 산림 등 자연을 파괴해야 하므로 이것은 곧 지구 온난화를 가속화한다고 표현해도 과언이 아니다. 물 부족을 해결할 수 있는 가장 효과적인 방법은 물 낭비를 줄이는 동시에 물 절약을 할 수 있는 기술적인

본 논문은 한국세라믹기술원 정부출연연구개발사업 지원에 의하여 수행되었음.

*Corresponding Author : Young Lim Lee (Kongju National University)

Tel: +82-41-521-9261 email: ylee@kongju.ac.kr

Received September 10, 2012 Revised (1st October 29, 2012, 2nd November 12, 2012) Accepted December 6, 2012

측면과 제도적인 측면을 갖추는 것이다. 국내 물 사용량을 용도에 따라 구분했을 때 변기는 25%, 싱크대는 21%, 세탁은 20%, 목욕은 16%, 세면은 11%, 기타는 7%로 변기에서 사용되는 물의 양이 가장 많다.[1] 곧 양변기의 절수는 물 절약을 위해서 필수적이다.

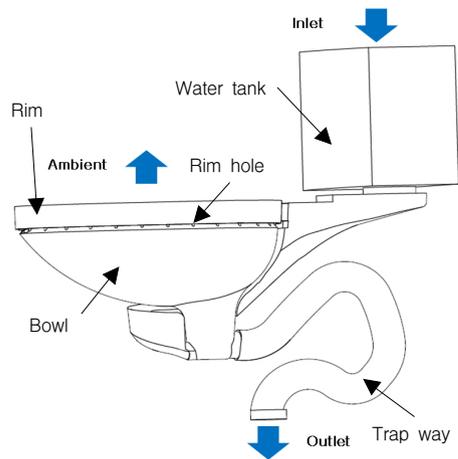
양변기는 보통 Fig. 1과 같이 물탱크(water tank), 림(rim), 림홀(rim hole), 보울(bowl), 트랩웨이(trap way)로 구성되어 있다.

양변기의 절수를 위해 많은 연구가 진행되어 왔는데, Lim 등[2]은 세면대의 세면수를 양변기 세정수로 재활용할 수 있는 양변기에 대한 기술을 분석하였고, Suh 등[3]은 S트랩을 갖고 있는 양변기에서 직선 트랩과 커버를 통한 가변식 직선 트랩 양변기 시스템에 관한 연구하였다. Wang 등[4]은 VOF 모델을 이용한 수치해석을 통하여 보울 및 트랩웨이에서 시간에 따른 속도와 압력 변화를 살펴보았다. 또한 Hu 등[5]은 양변기 내에서 시간에 따른 물의 속도변화를 VOF(Volume of Fluid) 모델을 이용한 수치해석결과와 실험결과를 비교분석하였고, Zhao 등[6]은 VOF 모델을 이용한 수치해석을 통해 트랩웨이의 형상을 최적화 시키는 연구를 하였다.

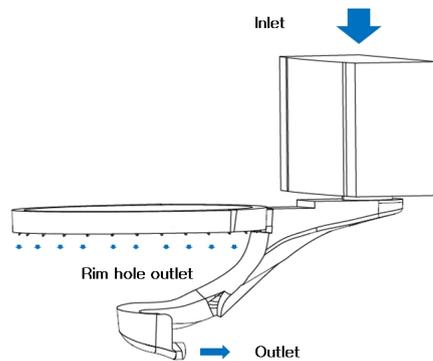
양변기 내에는 크게 2개의 유로를 가지고 있는데, 림을 통해 림홀로 물을 배출시키는 유로와 역 U 튜브 형상을 지나 트랩웨이로 바로 물을 공급해주는 유로이다. 이 두 개의 유로를 통한 유량배분은 보울의 세정력과 사이펀(Siphon)을 결정짓는 매우 중요한 인자이다. 림을 통해 보울로 배출되는 유량이 적거나, 물의 속도가 느릴 경우에는 보울의 세척력이 떨어지고, 반면에 림을 통해 보울로 배출되는 유량이 많아지면 트랩웨이에서 사이펀을 발생시키는 조건을 충족시키기 어렵다. 따라서 양변기 두 개 유로간의 적절한 유량배분은 양변기의 성능을 최적화 하는데 중요하다.

일반적으로 유동설계에는 Park과 Lee[7]의 연구와 같이 CFD(Computational Fluid Dynamics)가 활발히 사용되고 있다. 하지만 양변기를 수치해석하려면 자유표면(free surface)이 존재하는 비정상 이상유동(unsteady two-phase flow)이므로 해석시간이 과도하게 걸리는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 비정상유동의 전체모델 뿐만 아니라 정상유동(steady flow)으로 가정한 양변기 부분모델도 고려하였다. 부분모델은 양변기의 림을 형성하는 림홀의 크기 및 위치를 변화시켜 4개의 부분모델로 나누었고 배수속도 및 출구 압력변화에 따른 유량배분 변화를 살펴보았다. 또한, VOF[8]를 활용한 전체모델을 해석하고 시간에 따른 속도, 압력 및 유량 변화를 고찰하였고 부분모델과의 비교도 수행하였다.



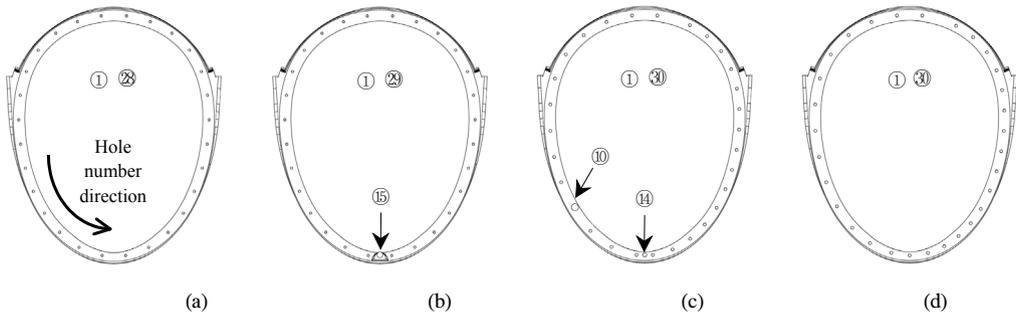
[Fig. 1] Schematic and boundary conditions for the whole model



[Fig. 2] Schematic and boundary conditions for part of the whole model

[Table 1] Boundary conditions for numerical analysis of steady flows

Model number	Outlet pressure(Pa)	Inlet velocity(m/s)
Model 1	0	0.01
Model 2		0.03
Model 3		0.05
Model 4		0.07
Model 1	600	0.09
Model 2		0.1
Model 3		0.05
Model 4		0.05
Model 1	1000	0.05
Model 2		0.05
Model 3		0.05
Model 4		0.05
Model 1	1400	0.05
Model 2		0.05
Model 3		0.05
Model 4		0.05



[Fig. 3] Changes in the size and number of rim hole with model
 (a) Model 1 (b) Model 2 (c) Model 3 (d) Model 4

2. 수치해석

2.1 해석방법

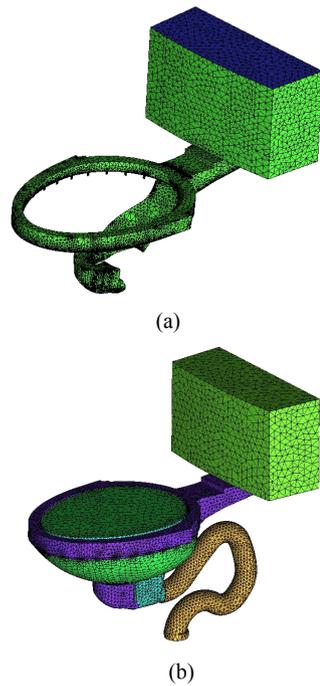
양변기 유동을 해석하기 위하여 3차원, 난류 및 이상 유동으로 가정하였다. 먼저 난류모델은 k-ε Realizable 모델[9]을 사용하였다. 비정상유동에는 PISO(Pressur-Implicit with Splitting of Operators) 알고리즘[10]을 활용하였고 이상유동은 VOF 방법을 사용하였다.

2.2 해석모델

본 연구에서는 전체모델과 부분모델 두 가지로 구분하여 수치해석을 진행하였는데, 양변기 전체모델 및 해석에 사용한 경계조건은 Fig. 1과 같다. 물탱크 뒷개 Inlet은 대기압 조건, 트랩웨이 끝부분 Outlet은 압력조건, 보울뒷개에 해당되는 Ambient는 대기압 조건으로 가정하였다.

Fig. 2에 부분모델 수치해석에서 사용된 경계조건을 나타내었다. 물탱크 상부 Inlet은 속도조건, 림홀을 통해 물이 배출되는 부분은 Rim hole은 압력조건, 물이 보울을 거치지 않고 트랩웨이로 직수되는 Outlet은 압력조건을 가정하였다.

먼저 부분모델을 사용하여 모델에 따른 출구압력과 배수속도가 두 개의 유로를 통한 유량배분 및 림 홀 각각의 유량분포에 미치는 영향을 살펴보았다. 이 때 배수속도와 출구압력은 Table 1과 같고, 림 홀의 번호는 Fig. 3과 같이 각 모델의 왼쪽상단에 있는 1번을 시작으로 시계반대 방향으로 부여하였다. 모델 1은 직경 4 mm인 28개의 림 홀을 갖고 있고, 모델 2는 직경 12 mm인 림 홀 15번과 직경 4 mm인 28개의 림 홀을 갖고 있다. 모델 3은 직경 12 mm인 림홀 10번과 직경 7 mm인 림 홀 14번과 직경 5 mm인 28개의 림홀을 갖고 있다. 모델 4는 직경 5mm인 30개의 림 홀을 갖고 있다.



[Fig. 4] Mesh systems for part of the whole model and the whole model (a) Part of the whole model (b) Whole model

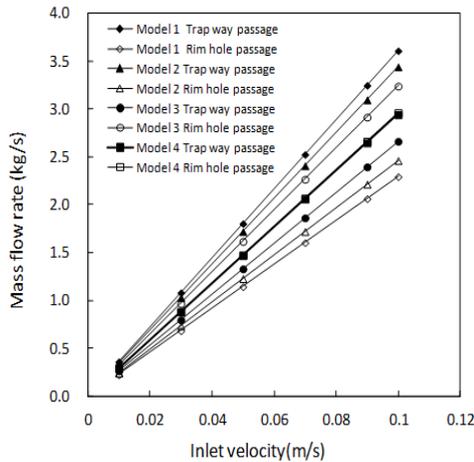
Fig. 4는 전체모델과 부분모델의 격자 시스템을 나타내었는데, 부분 모델 격자수는 약 60만개이고, 전체모델 격자수는 약 19만개이다. 수치해석에서는 Fluent[11]를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

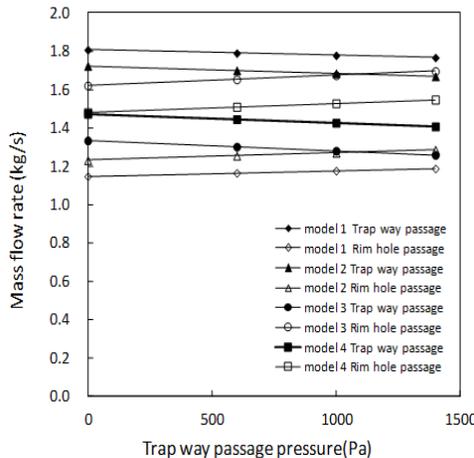
3.1 부분모델 정상유동 해석

출구압력을 대기압으로 가정하면서 물탱크 수위 하강

속도가 유량배분에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 5에서와 같이 특정 모델에서 수위 하강속도가 증가하면 전체유량은 거의 선형적으로 비례하지만 유량배분 비율은 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 하지만 각각의 모델은 서로 다른 유량배분 비율을 갖고 있다. 즉, 모델 1은 림홀 유로 62%, 트랩웨이 유로 38%이고, 모델 2는 림홀 유로 59% 트랩웨이 유로 41%이다. 모델 3의 유량배분은 림홀 유로 46%, 트랩웨이 유로 54%이고, 모델 4의 유량배분은 림홀 유로 50%, 트랩웨이 유로 50%임을 알 수 있다. 따라서 이러한 유량 배분 비율을 효율적으로 조절하기 위해서는 수위 하강속도보다는 림 홀의 위치나 형상 변화가 필요함을 알 수 있다.



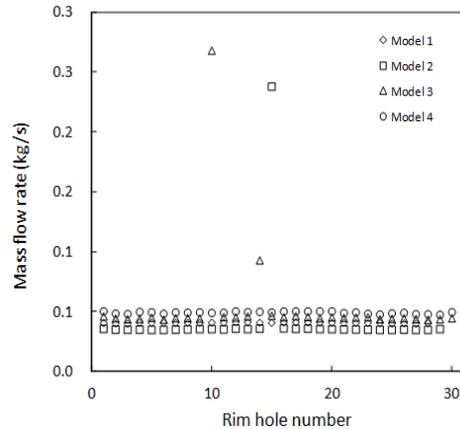
[Fig. 5] Variations of mass flow rate with level descent velocity for outlet pressure 0 Pa



[Fig. 6] Variations of mass flow rate with outlet pressure for level descent velocity 0.05 m/s

Fig. 6은 수위 하강속도 0.05 m/s 일 때 출구압력에 따른 유량배분 변화를 나타낸다. 출구압력이 증가할수록 트랩웨이 쪽으로 배출되는 유량은 거의 선형적으로 감소하고, 림 홀로 배출되는 유량은 트랩웨이 쪽 유량이 감소하는 만큼 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 출구압력에 따른 유량배분 변화는 림의 형상에 따라 다소 차이가 있다. 예로써, 출구압력 1400Pa과 대기압인 경우를 비교하면 모델 1은 림홀과 트랩웨이 유량배분이 1.4%, 모델 2는 1.8%, 모델 3은 2.5%, 모델 4는 2.2% 변화하여 출구압력의 영향은 모델에 따라 상이하다. 하지만 그 변화량은 크지 않아 림 홀의 형상, 개수 등에 비해 상대적으로 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

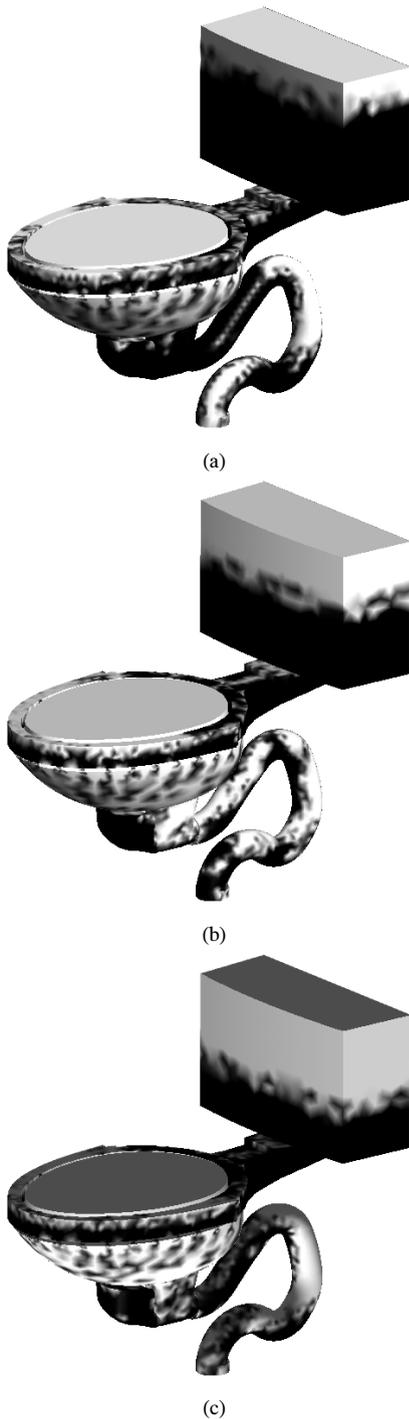
Fig. 7은 출구압력 0Pa, 수위 하강속도 0.05m/s일 때 부분모델에 따른 림 홀로 배출되는 유량을 보여준다. 모델 1과 모델 4는 각각의 림 홀 유량이 거의 동일하나 모델 2와 모델 3은 림 홀 직경이 클수록 비례적으로 림 홀 유량이 증가한다. 이는 림 홀로 배출되는 유량과 트랩웨이로 공급되는 유량배분은 림홀의 위치보다는 크기에 민감하다는 것을 의미한다.



[Fig. 7] Variations of mass flow rate with rim holes for outlet pressure 0 Pa and level descent velocity 0.05 m/s

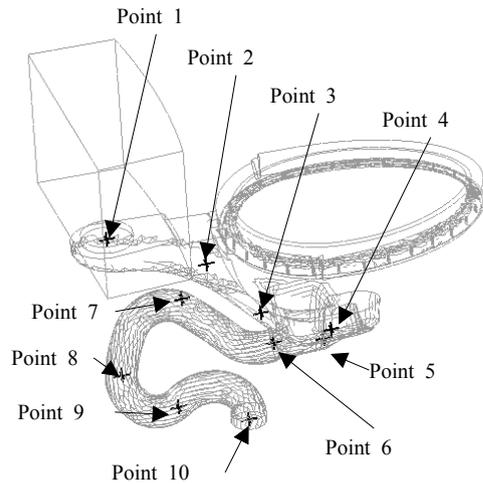
3.2 전체모델 비정상유동 해석

Fig. 8은 비정상유동 전체모델의 시간에 따른 물 체적분율(volume fraction)을 보여준다. 물탱크 내의 물은 배출 시작 약 1초 만에 림 유로를 채우고, 약 2초에 사이펀 현상이 발생하기 시작하여 보울에 차있던 잔수면의 높이가 낮아지는 것을 알 수 있다. 사이펀현상은 약 4초까지 지속되고, 약 5초에 사이펀현상이 종료되어 다시 보울 내로 물이 차올라 잔수면이 형성된다.

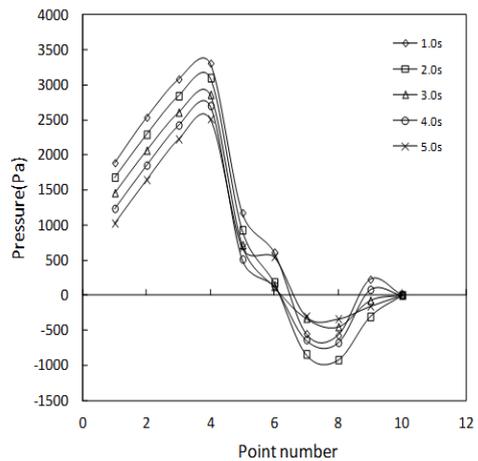


[Fig. 8] Variations of water volume fraction with time for unsteady flows (a) 1s (b) 3s (c) 5s

Fig. 9는 위치에 따른 압력과 속도 변화를 알아 보기 위하여 유로를 따라 10개의 지점을 나타내었다.



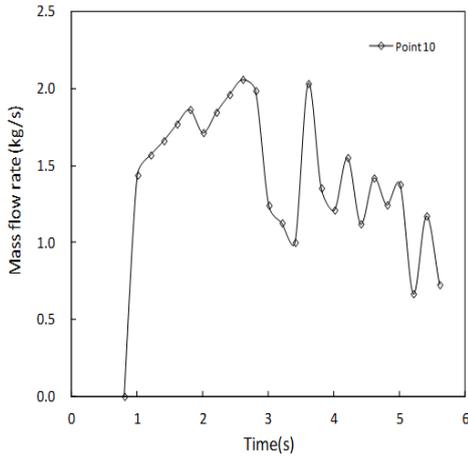
[Fig. 9] Schematic of Point positions for the whole model



[Fig. 10] Variations of pressure with point at each time for unsteady flows of the whole model

Fig. 10은 전체모델의 위치에 따른 시간별 압력변화를 보여준다. 포인트 1에서 포인트 4까지는 물탱크에서 배출된 후 보울 내의 잔수로 인한 저항으로 인해 아직

본격적인 가속이 이루어지지 않고 있어 정수압의 영향이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 하지만 포인트 4를 지나면서부터 본격적으로 가속되어 압력이 급격히 낮아져 부압이 발생한다. 사이펀이 본격적으로 발생하는 1초에서 3초 사이는 비교적 강한 부압을 나타내고 그 외의 구간은 상대적으로 약한 부압을 보여 준다. 따라서, 보울의 잔수를 지난 포인트 5이후, 즉 트랩웨이의 형상 및 크기가 양변기 사이펀 현상을 결정짓는 중요한 인자임을 알 수 있다.

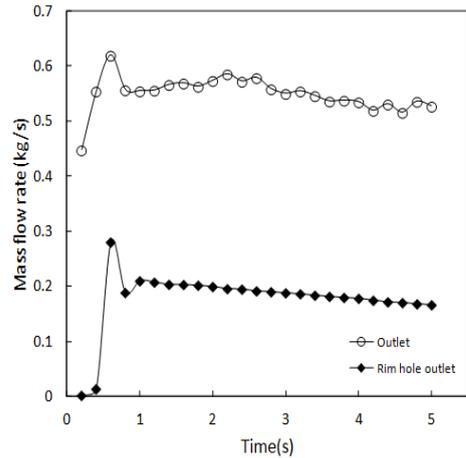


[Fig. 11] Variations of mass flow rate with time at point 10 for unsteady flows of the whole model

Fig. 11은 전체모델의 시간에 따른 배출유량 변화를 보여준다. 배출유량은 트랩웨이를 벗어나는 지점인 포인트 10을 기준으로 하였다. 사이펀이 발생하면 보울에 강한 부압이 형성되어 유량이 급격히 증가하는데 약 2.8초 만에 최고유량에 도달한다. 이후 보울에 존재하던 잔수의 대부분이 트랩웨이로 배출되어 사이펀을 유지하기 위한 유량이 부족하여 배출유량이 급격히 떨어진다. 이때부터 사이펀의 강도가 불규칙하게 변하면서 배출유량도 따라서 급격한 증가와 감소를 반복하게 된다.

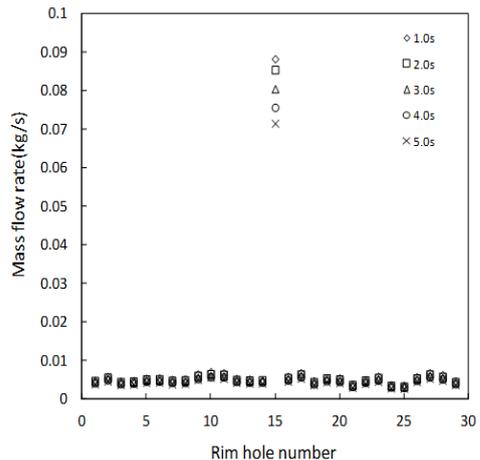
3.3 전체모델과 부분모델 유동 해석 비교

Fig. 12는 전체모델의 경우 시간에 따른 림 홀 유량과 트랩웨이 공급 유량 변화를 보여준다. 세척수가 물탱크부터 배출되기 시작한 순간부터 0.6초까지는 양쪽 유로에 가속으로 인한 급격한 유량 상승을 초래한다. 하지만 이후에는 서로 다른 양상을 보이는데 림 홀 배출수는 시간에 따라 선형적으로 감소하는 반면 트랩웨이 공급 수는 사이펀으로 인해 약 3초 가까이 유량을 증가 혹은 유지시키다 감소하는 것을 알 수 있다. 이로 인해 비 정상 유동에서 각 유로의 유량 배분 비율은 일정하지 않고 시간에 따라 변화한다. 따라서 정상유동으로 가정한 부분모델과의 오차는 최대 약 14%에 달해 부분 모델은 정성적인 분석에만 빠른 해석 모델로 고려되어야 할 것이다.



[Fig. 12] Variations of mass flow rate of each water passage with time

Fig. 13은 전체모델의 경우 시간별 림홀에 따른 림홀 유량 변화를 나타낸다. 림홀의 배치는 부분모델의 모델 2를 사용하였으므로 홀 직경이 가장 큰 림홀 15에서 가장 많은 유량이 배출된다. 림홀 유량은 시간에 따라 물탱크 수위가 낮아짐에 따라 감소하고 이러한 현상은 가장 유량이 많은 림홀 15번에서 두드러진다. 정상상태로 가정한 부분모델과의 유량을 비교해 보면 림홀 위치에 따라 최대 약 2배 까지 유량 차이를 보여준다. 따라서 부분모델을 통한 림홀 유량 배분 해석은 림홀 유량 변화에 대한 경향은 제공하나 정확한 결과 값을 얻기에는 다소 부족한 점이 있다.



[Fig. 13] Variations of mass flow rate of each rim hole with time

4. 결론

본 연구에서는 양변기의 림을 구성하는 림홀의 위치 및 크기를 변화시켜 4개의 부분모델로 구분한 후 정상유동으로 가정하여 해석하였고, 또한 비정상상태의 전체모델 해석도 수행하여 두 모델간의 비교분석도 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 부분모델 해석을 통하여 두 유로를 통한 유량배분 비율은 배수속도와는 무관하지만 트랩웨이 출구압력에는 다소 영향을 받는 것으로 밝혀졌다. 높은 출구압력은 트랩웨이 공급수를 제한하여 림홀 배출유량을 증가시키는데 그 증가량은 림 홀의 위치 및 크기에 따라 달라진다.
- (2) 림 홀의 위치보다는 림 홀 크기를 조절함으로써 림 홀 배출유량과 트랩웨이 공급 유량배분 비율을 효과적으로 조절할 수 있다.
- (3) 정상유동으로 가정한 부분모델의 유량배분 비율이 비정상상태 전체모델과 비교할 때 최대 약14%의 차이를 보여 부분모델의 활용은 정성적인 해석에 국한해야 한다.
- (4) 신속히 보울내의 잔수를 배출시키기 위한 효율적 사이펀을 얻기 위한 트랩웨이 해석은 비정상상태, 이상유동 해석으로 수행하여야 한다.

향후, 고절수형 양변기를 개발하기 위하여 최소의 세척수로 쉽게 사이펀을 발생시킬 수 있는 트랩웨이 최적화 연구를 수행할 예정이다.

References

[1] J. B. Kim, "Domestic Water Demand Model", Korea Water Resources Corporation, Vol. 41, pp. 31-37, 2007

[2] S. H. Lim, B. J. Choi and S. K. Kim, "A Technical Patent Study on Recycled Water of Face Washing in Toilet Seat", Proceedings of the KAIS Fall Conference, pp. 735-738, 2009

[3] K. W. Suh, Y. J. Won and Y. H. Lee, "A study on the water saving device using a variable position straight trap in water closet system", The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, pp. 0465-0470, 2009

[4] Y. H. Wang, G. J. Xiu and H. S. Tan, "CAD and

CAE Analysis for Siphon Jet Toilet", Physics Procedia, Vol. 19, pp. 472-476, 2011, [Article\(CrossRefLink\)](#)

[5] J. G. Hu, Y. S. Sun and M.J. Liu, "Numerical Simulation of Two-phase Flow in Wash-down Toilet Flush Process", Journal of System Simulation, Vol. 20, No. 6, pp. 1599-1602

[6] S. Y. Zhao, Z. J. Liu and Z. W. Peng, "Optimized Design of Toilet Siphon Pipeline Based on Fluent and Its Validated Test", Journal of System Simulation, Vol. 20, No. 16, pp. 4412-4416, 2008

[7] S. J. Park and Y. L. Lee, "A Study on the Thermal Performance of an Oil Cooler with Dual-cell Model", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 12, No. 3, pp. 1111-1116, 2011

[8] C. W. Hirt and B. D. Nichols, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", J. Computational Physics, Vol. 39, pp. 201-225, 1981, [Article\(CrossRefLink\)](#)

[9] T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir and Z. Yang and J. Zhu, "A New k-ε Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows", Computers and Fluids, Vol. 24, No. 3, pp. 227-238, 1995, [Article\(CrossRefLink\)](#)

[10] R. I. Issa, "Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting", J. Computational Physics, Vol.62. pp.40-65, 1985, [Article\(CrossRefLink\)](#)

[11] Ansys Fluent V14, Ansys Inc., 2012

안 일 용(An Yong An)

[준회원]



- 2012년 2월 : 공주대학교 기계설계공학전공 (공학학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 대학원 석사과정

<관심분야>
열유체공학, 에너지공학

이 영 림(Young Lim Lee)

[정회원]



- 1995년 5월 : U of Texas at Austin 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 2000년 2월 : 삼성전자자동차삼성전자 책임연구원
- 2000년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

열유체공학, 에너지공학, 자동차공학