수치모델과 고속 CCD 카메라를 이용한 세변기 표면 처리 효과 특성 해석

노지현, 도우리*, 양원균, 주정훈**

군산대학교 공과대학 신소재공학과, 플라즈마 소재 응용 센터

Surface Treatment Effect on the Toilet by Numerical Modeling and High Speed CCD Camera

Jihyun Roh, Woori Do*, Wonkyun Yang, Junghoon Joo**

Department of Materials Science and Engineering and Plasma Materials Research Center,
Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

(Received February 21, 2011 ; revised February 27, 2011 ; accepted February 27, 2011)

Abstract

Numerical analysis is done to investigate the effect of surface treatment of a toilet on the cleanness. The surface treatment using plasma for the super-hydrophobic surface expects the self-cleaning effect of the toilet seat cover for preventing the droplets with a great quantity of bacteria during the toilet flushing after evacuation. In this study, the fluid analysis in the toilet during the flushing was performed by an ultrahigh-speed CCD camera with 1,000 frame/sec and the numerical modeling. And the spattering phenomenon from the toilet surface during urine was analyzed quantitatively by CFD-ACE+ with a free surface model and a mixed model of two fluids. If the surface tension of the toilet surface is weak, many urine droplets after collision bounded in spite of considering the gravity. The turbulence generated by the change of angle and velocity of urine and the variation of the collision phenomenon from toilet surface were modeled numerically.

Keywords: Numerical modeling, Surface treatment, Toilet, Fluid simulation

1. 서 론

플라즈마 혹은 계면 활성제등으로 표면 처리 효과를 위하여 처리를 하는 경우 표면 에너지의 변화가 수반된다. 이에 의하여 액체가 표면에 접촉했을 때 표면 에너지의 차이에 의하여 더욱 액상의 면적을 넓힐 수도 있고 반대로 좁힐 수도 있다. 친수성이 전자이며 소수성이 후자에 속한다. 매 가정마다 1개 이상, 공공건물에는 최소 수 십 개에서 수 백 개가 넘는 세변기는 가장 중요한 위생 기기에 해당한다. 좌식 변기가 주로 보급되고 비데까지 학교를

비롯한 공공건물에 설치되어서 사용되고 있다. 그러나 구조상 특정한 발사 속도를 갖는 액체가 일정한 거리의 도기 표면에 부딪힐 경우 각도 및 표면 에너지에 따라서 인체로 다시 반발하여 오염을 유발할 우려가 있고 고상의 배설물의 경우에는 액상의 형상 변화와 이로 인한 튀어 오름 현상을 유발하여 위생상 문제를 야기할 수 있다. 도기로 만들어 지는 세변기의 경우 저렴한 가격(좌식의 경우 수 만 원부터 시작)의 한계 때문에 표면의 유약 처리가 완전한 소수성이나 친수성을 갖기는 어렵다¹⁾. 또한 일정 주기의 산세척(acid cleaning)에 견디어야 하고 기계적 연마에도 강한 내성을 요구하기 때문에 효과의 지속 주기가 짧은 계면 활성제 종류를 산포하는 것은 유지 관리 측면에서 유리한 방법이

*Current address : Hongik University, Department of Materials Science and Engineering.

**Corresponding author. E-mail : jhjoo@kunsan.ac.kr

라고 볼 수 없다. 본 연구에서는 세변기의 표면 특성을 계면 에너지로 정의하고 이의 변화에 의한 액상의 형상 변화를 수치 모사 및 고속 카메라 촬영으로 검증함으로써 차후에 완전한 3차원 모델을 이용해서 세변기 내부의 부분적인 표면 처리 전략(친수성, 소수성)을 세우는 것을 목표로 하였다. 현재 상용화 된 자유 표면 모델링 방법은 기상, 액상, 고상의 세 가지 상의 동시 존재를 고려하는데 한계가 있으므로 1차적으로 가장 실험과 검증이 용이한 물방울 자유 낙하 현상과 동일한 액상 표면에 충돌하여 액상의 표면에 파동이 발생하는 현상을 2차원으로 수치 모델링하고 이를 초당 1,000 프레임까지 촬영할 수 있는 고속 카메라 촬영 결과와 비교함으로써 수치 모델의 타당성을 검토하였다. 최종적으로 목표로 하고 있는 완전한 3차원 모델의 경우에는 인체가 좌변기에 착좌하고 있는 형상을 모델링하고 비데의 건조 기능을 작동시켰을 때 세변기 내부와 인체 하부 사이 공간의 유동 현상을 계산함으로써 자유 표면 계산과 더불어 건조 과정까지를 종합적으로 모델링할 수 있는 토대를 마련하였다. 지속성이 강한 이동식 플라즈마 표면처리 방법이 세변기의 특정한 부분을 원하는 성질(소수성, 친수성)로 개질할 수 있다면 3차원 수치 모델을 통하여 가장 적절한 분포를 설정할 수 있도록 하는 것이 본 연구의 목표이다²⁾.

2. 실험 및 계산 방법

일정한 부피의 물방울을 낙하시키면서 형상과 속도의 변화를 수치 모델링하기 위하여 마이크로 피펫을 1 l 비커에 수직으로 30 cm 떨어뜨려서 설치하였고 고속 CCD(charge coupled device) 카메라를 최근접 설치하여 촬영하였다. 메스실린더에 채운 물을 대상으로 실험을 하였으므로 3차원으로 모델링을 하여야 하지만 연산 시간이 많이 걸리는 점을 고려하여 일단 2D X-Y 모델을 기본으로 하여 수치 계산을 하였다. 수치 모델은 일반적인 유동 방정식과 자유 표면을 계산하기 위하여 유체 1과 2의 부피 분율을 F 라고 정의하고 F 가 0.5인 계면을 재구성하여 표시하는 방법을 사용하였다. 기상과 액상을 주로 다루며 비혼합 유동을 가정하였다. 기본 이론은 Hirt and Nichols³⁾, Rider and Kothe⁴⁾의 연구 결과를 이용하였다. 초기의 액상 분율 F 의 분포에서 아래의 기본적인 식과 보편적으로 사용되는 질량 보존과 운동량 보존식을 중력과 같이 이용하여 액상 분율의 변화를 식 (1)과 같이 추적하였다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{v} F = 0 \quad (1)$$

$\vec{v}$ = velocity

그리고 부피 평균 변수들은 액상 분율을 가중치로 구했다. 한 개의 셀 내에서의 액상 분율이 0과 1 사이의 값을 가질 때에는 몇 가지 방법이 가능한데 그 중 SLIC(single line interface construction)과 PLIC(piecewise linear interface construction) 방법 중 선택적으로 사용하였다. 실제 세변기의 구조상 좌우 대칭이므로 1/2만 계산을 하면 되지만 자유 표면 모델의 경우 대칭을 허용하지 않으므로 기초적인 가능성 확인을 위해서는 2차원 X-Y 모델을 이용하고 물방울 낙하 실험 결과와 맞추어 보는 경우에는 3차원 모델을 이용하였다. 3차원 모델의 경우 오랜 계산 시간이 소요되는데 병렬 하드웨어와 소프트웨어를 이용하는 경우 백 만 개의 셀을 사용한 3차원 문제를 4 노드에 나누어 병렬 계산 시 효율 52%, 8노드에서 45% 정도를 얻을 수 있었다. 소변 모사의 경우에는 일단 수직 방향과 경사 출사의 경우에 대해서 2차원 세변기 모델에서 얼마나 주변의 벽을 타고 상승하는지를 조사하였으며 완전한 3차원 모델에서 오염물의 튀김 현상을 모사하는 것은 병렬 모델의 효율 개선을 진행하고 난 다음에 진행할 계획이다. 수치해의 수렴성을 위해서는 Courant 조건을 만족할 수 있도록 시간 간격을 설정하여 진행하였다.

$$\frac{|\vec{v}| \Delta t}{d} < 1 \quad (2)$$

d : cell dimension

$\vec{v}$: average velocity in the cell

Δt : time step

Fig. 1. Blending strategy for interface-capturing schemes.

표면 장력의 경우 여러 가지 요인에 의해서 결정되는데 온도, 화학종의 농도, 전기장 세기, 계면의 국부적인 곡률 등이 중요한 인자가 된다. Marangoni 효과로 통칭되는 이러한 힘은 식 (3)을 이용해서 계산된다. 최종적으로는 소변에 포함된 요소의 농도가 세변기 내부에 어떻게 확산되는지를 계산하여야 하고 초기에 발생하는 세척수와의 혼합 현상을 정확히 모사하기 위하여 필요하다.

$$\int \Delta p ds = \int \tau |ds| \quad (3)$$

$$\tau = \sigma \vec{n} \times \frac{d\vec{x}}{|d\vec{x}|} \quad (4)$$

$$\int \Delta p ds = \int \sigma \vec{n} \times \sigma \vec{x} \quad (5)$$

$$\vec{n} = \nabla F$$

p : pressure

τ : tangential force

σ : surface tension

3. 결과 및 고찰

3.1 세변기와 인체를 결합한 3차원 모델

그림 2에는 본 연구에서 최종적으로 지향하고 있는 3차원 인체 모델을 좌식 변기, 비데와 결합한 수치 계산의 한 예를 보여 주고 있다. 세변 후 온풍 건조시킬 경우의 인체 각부에 도달하는 건조 공기의 부분적인 압력 차이를 보여 주고 있다. 이 계

Fig. 2. 3D numerical model for simulating drying after cleaning on a toilet.

산이 완전히 수행되면 소변, 대변, 배수, 비데 세척, 건조의 전 단계를 수치 모사할 수 있으며 여기에 미치는 세변기 내부의 표면 처리 효과에 대한 영향을 구체적으로 살펴 볼 수 있게 될 전망이다. 여기에 필요한 실제 측정 조건들은 한국인 인체에 대한 정보인데 현재 기술표준원에 의해서 추진되고 있는 신체 구조에 대한 자료 수집 결과가 일부 제공되고 있다⁵⁾. 보다 세밀한 모델링을 위해서는 비뇨기 관련 외부 치수에 대한 수치 정보가 필요하지만 이는 공개되고 있지 않으므로 본 연구에 사용하는 인체 수치 모델은 격자 크기를 수 cm^2 정도로 작성해서 수치 해의 정확성에 영향을 끼치지 않는 범위 내에서 최적의 크기로 하였다. 계산 결과를 보면 일반적인 비데에 설치되어 있는 송풍기의 바람 방향이 후면에서 전면으로 향하고 있으므로 이를 모사한 결과 두 다리 사이가 충분히 벌어지지 않은 경우 건조용 송풍 공기는 세변기 내부를 순환하게 되고 충분히 세정이 이루어지지 않은 상태에서는 오염된 물에서 올라오는 수증기를 오히려 인체의 요소요소에 공급하는 결과를 초래한다. 이 부분은 증발 모델링과 함께 추후에 진행할 예정이다.

3.2 자유 표면 모사의 정확도 검증을 위한 실험 비교

자유 낙하하는 물방울의 시간에 따른 형상과 정지 수면에 충돌할 때의 형상 변화를 마이크로 피펫과 고속 CCD 카메라를 이용하여 촬영하고 이를 수치 모델과 비교하였다. 그림 4(a)는 주사기로 변기

Fig. 3. Bottom view of the 3D model while drying air is blown from the back.

Fig. 4. (a) A photo of a water dropped by a syringe into a toilet, (b) 2D numerical modeled result of (a), a water drop fallen from a syringe.

에 물방울을 떨어뜨린 것을 찍은 사진이고, 이에 대한 모델링은 그림 4(b)에 나타내었다. 이 두 그림에서 물방울을 떨어뜨리고 그 다음에 물결이 생긴 것과 물방울이 떨어진 것에 의한 반동과 표면 에너지에 의한 복원력으로 수면이 다시 원래의 상태로 올라온 것을 확인할 수 있었다. 현상 자체는 축대칭으로 발생하고 있다고 볼 수 있으나 자유 표면 모델링 기능이 축대칭을 허락하지 않으므로(중심축선을 벗어나는 순간 수치 모델 상에서는 도넛 형태로 변하는 문제가 있음) 2D X-Y model로 계산하였다.

그림 5(a)에는 세변기에 종이컵으로 물을 부으며 소변 모사 실험을 한 사진이며 이 현상에 대한 수치 모델 결과는 Fig. 5(b)에 나타내었다. 2D X-Y 모델이며 소변과 세변기 내에 고여 있던 물은 동일한 성질을 갖는 것으로 모델링하였다. 추후에는 소변의 경우 요소의 농도를 일정값으로 주고 세변기 내에 고여 있던 물에 어떻게 퍼지면서 내려가지를 수치 모사하여 실제 오염정도를 예측하려고 한다. 실제 인체에서 배출되는 소변의 모사는 기계식 밸브와 같이 간단하지 않다. 즉, 일정한 압력이 방광에 고여 있는 소변에 가해지고 이 수압이 배뇨기의 좌우를 막고 있는 피부 조직을 이동시켜서 배출 공간이 만들어지는 원리이므로 배뇨 초기와 중기, 후기의 형상과 유속 조건이 다르게 된다. 또한 소변이 마지막 닿고 배출되는 부분의 형상에 따라서

Fig. 5. (a) A photo of water shedding to simulate urination by falling from a cup, (b) 2D numerical model for (a), (c) 2D numerical model for (a) showing the velocity vector field.

강한 난류성의 일정하지 않은 형상의 배뇨가 되기 쉽다. CFD-ACE+에서는 격자 변형 기능을 이용하여 일부 이 현상을 모사할 수 있을 것으로 예상하고 있지만 현재 단계의 연구에서는 일정한 직경의 배출구를 가정하고 배출 속도 등의 정보를 근거로 K-ε 모델을 적용하여 계산하였다. 수평에서 60°C의 각도로 76 mm 상부에서 발사되는 소변을 모사한 결과를 보면 수면 상에서 4 cm 깊이까지 소변이 들어가고 있는 것을 알 수 있으며 세변기의 앞면으로 3 cm까지 소변과 고인물이 섞여서 올라가고 있는 것으로 나타나고 있다. 이 때 소변과 물이 섞인 혼합액과 세변기의 표면 사이에 작용하는 표면 장력에 따라서 오염 면적이 늘어날 수 있는데 소변 후의 물 내림 때에는 친수성을 가져서 몇 군데에서 내려오는 세척수가 세변기 내의 전 면적에 걸쳐서 세척 효과를 원활히 하는 것이 필요하지만 소변 시에는 오염 면적의 최소화가 더 유리하므로 소수성 표면을 갖는 것이 좋다. 실제 소변 시에는 거품 발

생 현상이 관찰되는데 전산 모사에서도 거품을 의미하는 포획된 기체 공간이 그림 5(b)에 보면 나타나고 있다. 소변이 세변기 내에 고여 있던 물에 닿은 후 수면 위로 튀어 오르는 현상은 실제 촬영된 사진과 수치 모델이 근사하게 나타나고 있으나 모델링이 2차원이어서 더 심한 요동을 나타내고 있는 것으로 판단된다. 수치 모델에서는 소변이 고인 물의 표면을 충격한 다음 내부에서 0.8~1.7 m/s까지의 속도 분포를 보이는 것으로 나타나고 있다(그림 5(c)). 액상 내에서의 기포 생성과 성장, 소멸에 대한 부분은 정확한 3차원 모델을 이용해서 분석하는 것이 필요할 것으로 판단된다⁶⁾. 현재까지의 계산 결과는 기포와 액상 간의 표면 장력 효과인 Marangoni

효과를 고려하지 않은 채 이루어졌다. 중력과 소변의 입사 속도가 가장 큰 요인으로 작용하기 때문이다. 중력이 고려되지 않은 정지 상태의 액상 내에서 기포의 형성과 움직임에는 이 효과와 온도를 가장 중요하게 다루고 있다⁷⁾.

그림 6(a)는 세변기의 물 내림 시의 형상 변화를 촬영한 것이다. 이에 대한 모델링은 그림 6(b)에 나타났다. 현재는 고형의 배설물 없이 물만 내리는 것으로 모델링을 하였으나 추후 소변 내의 요소 농도를 추가적인 변수로 하여 오염된 물의 튀김 현상을 그림 1의 인체 모델에 적용하여 어떤 부위까지 물방울이 튀어 오르는지에 대한 보다 상세한 모델링을 진행할 예정이다. 실제로 세변기의 물 내림은 후면부의 저수조에서 저장된 물이 중력에 의한 압력으로 내려와서 변기의 둘레에 하방으로 설치된 32개의 분사구를 통해서 분출되므로 난류 모델의 고도화와 함께 저수조까지를 포함한 모델링이 수행되어야 한다.

물방울 튀어 오름에 대한 수치 모델링에 대한 검증은 위해 초고속 카메라를 이용해 비커에서 물방울 떨어지는 현상을 촬영하고 이와 3차원 수치 모델 결과를 서로 비교해 본 결과 상당히 잘 구현되고 있는 것을 알 수 있었다(그림 7). 계산 결과 수면 상에 충돌하기 직전의 속도는 1.25 m/s로 계산되었고 고속 CCD 카메라로 촬영한 것을 분석해보면 2.05 m/s로 분석된다. 이러한 차이는 물방울 낙하의 높이 차에서 기인하는 것으로 생각된다. 물방울의 움직임을 보기 위해 실험에서는 비커로부터 15 cm 수면으로부터 22.5 cm 위에서 물방울을 낙하시켰고, 모델링에서는 수면으로부터 7 cm 위에서 물방울을 떨어뜨렸다. 또한 수치 모델에서는 수면

Fig. 6. (a) A photo for flushing of a toilet, (b) 2D numerical modeling of flushing of a toilet.

Fig. 7. High speed camera shots (1000 frame per second) of a free falling water drop into a cup of water (the number on the photo is in milli seconds after hitting the water surface).

에 충돌 후 발생하는 표면 형상의 변화 추적에서 카메라 촬영 결과보다 수평한 결과를 보이고 있다. 촬영 결과에서는 물방울의 충돌 직전의 둥근 형상이 그대로 보존되는데 반해서 수치 모델의 결과에서는 끝 부분이 곧 평평해지는 결과를 보이고 있다. 물방울이 수면과 충돌하는 과정에서 생기는 공기의 유동장은 층류만 가정하고 계산한 본 수치 모델의 결과와는 차이가 있는 난류 형성이 그 원인의 하나일 것으로 추정하고 있고, 또 낙하 높이차에 의한 속도 차이로 인해 물의 표면에 충격을 적게 주어 이런 현상이 나온 것으로 추측하고 있다. 차후의 연구에서는 물방울 낙하 속도를 보다 정확하게 측정하고 주변 공기 유동장의 계산이 보다 정확하게 모사될 수 있는 수치적 방법을 모색할 계획이다.

4. 결 론

세변기의 표면 처리를 통해서 친수, 소수성을 조절하여 보다 위생적인 환경을 구축하기 위한 기초 연구로 세변기 내의 유동 현상을 자유 표면 모델을 이용하여 수치 계산하였고 이를 검증하기 위하여 실제 크기의 세변기에서 여러 가지 유동 현상을 고속 카메라를 이용하여 촬영하고 분석하였다. 세변기와 인체를 결합한 3차원 모델을 이용해서 세변 후 온풍 건조시킬 경우를 계산해 본 결과, 두 다리

사이가 많이 벌어지지 않은 경우 건조용 송풍 공기가 오염된 물에서 올라오는 수증기를 인체에 공급할 수 있다는 사실을 발견하였다. 자유 낙하하는 물방울의 시간에 따른 형상과 정지 수면에 충돌할 때의 형상 변화를 마이크로 피펫과 초고속 CCD 카메라를 이용하여 촬영하고 이를 수치 모델과 비교해 본 결과, 상당히 잘 구현되고 있음을 알 수 있어 앞으로 본격적으로 진행할 인체와 변기 조합 3차원 모델링에 사용할 수 있음을 파악하였다.

참고문헌

1. C. Wang, C. Piao, X. Zhai, F. N. Hickman, J. Li, Powder Tech., 200 (2010) 84.
2. D. Y. Uhm, J. J. Na, Kor. Vac. Soc. 36th Conference, 2009. Feb., Program, p.234.
3. C. W. Hirt, B. D. Nichols, J. Comp. Phys., 39 (1981) 201.
4. D. B. Kothe, W. J. Rider, S. J. Mosso, J. S. Brock, AIAA paper 96-0859 (1996).
5. http://sizekorea.kats.go.kr/01_sizekorea/outline.asp?OlapCode=SIZEU0101
6. R. Chen, W. Tian, G. H. Su, S. Qiu, Y. Ishiwatari, Y. Lka, Nucl. Eng. and Des., 240 (2010) 3830.
7. Y. Alhendal, A. Turan, W. I. A. Aly, Proc. Comp. Sci., 1 (2010) 673.