



## Multiphase Simulation of Rubber and Air in the Cavity of Mold

Jeong Woo Woo\*, Kyung Mi Yang\*\*, and Min-Young Lyu\*\*\*,†

\*Hankook Tire Central R & D Center, Jang-dong, Yusung-gu, Daejeon, S. Korea

\*\*Design and Engineering Program, Graduate School of Nano IT Design Fusion, Seoul Tech.

\*\*\*Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,  
172 Gongneung 2-Dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, S. Korea

(Received October 4, 2016, Revised October 17, 2016, Accepted October 21, 2016)

**Abstract:** In the polymer shaping process that uses molds, the quality of the molded products is determined not only by the flow of the (molten) polymer but also by the air venting in the cavity. Inadequate air venting in the cavity can cause defects in the product, such as voids, short shot, or black streaks. As it is critical to consider the location and size of the vents for proper venting of the air in the cavity, a method that predicts the flow of air and material is required. The venting of air by the flow of rubber inside the cavity was simulated by using a multi-phase computational fluid dynamics method. Through computer simulation, the interface of rubber and air over time was predicted. Then, the velocity and pressure distribution of the venting air were observed. Our research proposes a fundamental method for analyzing the multi-phase flow of polymer materials and air inside the cavity of a mold.

**Keywords:** air venting, multiphase flow, volume of fluid, computer simulation, molding

### Introduction

고무, 플라스틱과 같은 고분자를 사용한 제품이 늘어나면서 제품의 품질을 높일 수 있는 성형 방법에 관한 연구가 활발하다. 대부분의 고분자 성형공정은 고분자 재료가 캐비티 형상에 맞게 채워지면서 성형되게 된다. 이때 금형 내에 있던 공기가 캐비티 밖으로 빠져나가는 벤팅 현상은 제품의 품질에 영향을 미친다. 특히 공기가 캐비티 밖으로 빠져나가지 못하고 캐비티 내에 갇혀 있는 Air trap 현상은 미성형과 탄화과 같은 불량을 나타낸다. 따라서 캐비티 형상과 재료의 흐름을 고려한 공기의 벤팅 현상을 예측하고 공기가 적절히 벤팅될 수 있는 위치 및 크기를 결정해야 한다.<sup>1</sup>

성형하고자 하는 제품의 형상이 점점 복잡해지면서 캐비티 내에서 고분자 재료의 흐름 역시 예측하기 힘들어지고 있다. 이에 따라서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 이러한 흐름을 모사하고 성형공정중에 발생할 수 있는 불량을 예측하는 연구가 많이 진행되고 있다.<sup>2-9</sup> 하지만 대부분의 연구는 고분자 재료의 흐름만을 모사하고 공기의 거동을 컴퓨터 모사하는 연구는 없는 상황이다.

본 연구에서는 공기의 벤팅 현상을 모사할 수 있는 다상유동해석 방법 중 Volume of Fluid (VOF)를 사용하였다.<sup>10</sup> VOF 방법은 고정된 격자계의 체적 분율을 고려하여 경계면을 해

석하는 방법이다. 공기와 고분자 재료와 같이 두 재료의 밀도 차이가 큰 경계면을 유추하는 경우 수치해석상의 어려움이 발생할 수 있기 때문에 수렴도가 높은 장점을 갖고 있는 VOF 방법을 사용하여 해석했다. 그리고 고분자 재료의 흐름에 따라 캐비티 내의 공기가 빠져나가는 속도와 압력분포를 관찰하였다. 이러한 방법을 통해 고분자 가공분야에서 재료의 흐름에 따라 공기가 벤팅되는 메커니즘을 이해하는데에 도움이 될 것으로 기대된다. 또한 고분자 재료를 사용한 성형방법들의 적절한 벤팅 방법을 설계하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

### Experimental

#### 1. 해석 모델

해석 모델은 Figure 1과 같이 캐비티 내에 공기를 고려한 고분자 재료의 흐름을 간략하게 컴퓨터 모사할 수 있도록 모델링 하였다. 고분자 재료는 타이어에 사용되는 고무를 사용하였다. 캐비티는 Figure 1과 같이  $15 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$  크기의 직사각형 형상을 모델링 하였고, -Z 방향으로 공기가 빠져나갈 수 있는 벤팅 영역을  $\varnothing 3$  원통 형상으로 모델링 하였다. 본 해석 모델은 시간이 지남에 따라 직사각형 영역의 윗면에 -Z 방향으로 고무가 흘러 내려오고 직사각형 내에 있던 고무와 공기가 빠져나가는 현상을 관찰하고자 했다.

†Corresponding author E-mail: [mylyu@seoultech.ac.kr](mailto:mylyu@seoultech.ac.kr)

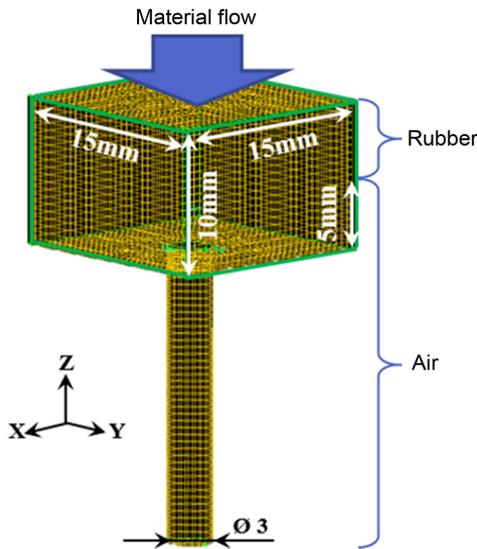


Figure 1. Geometry and mesh for multiphase flow simulation.

두 가지 상의 경계면을 계산하는VOF 방법의 계산과 해석 모델의 격자 재생성에 의해 발생하는 낮은 해석 수렴도를 높이기 위해 해석 모델의 격자는 육면체로만 형성하였고 총 격자 수는 20420개 이다.

2. 해석 방법

고분자 재료와 공기와 같이 밀도 차이가 큰 두 재료의 컴퓨터 모사는 경계면을 기준으로 국소 물성 값이 급격하게 변하게 되어 수치해석상의 어려움이 발생할 수 있다.<sup>11,12</sup> 재료들 간의 경계면을 컴퓨터 모사하기 위해서는 경계면의 변화를 수치적으로 계산해야 하며 이를 위해 Figure 2와 같이 Interface

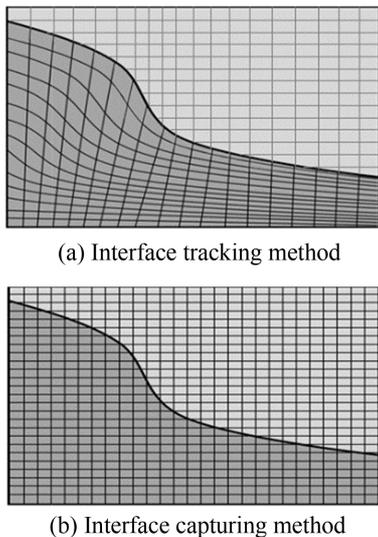


Figure 2. Geometry of mesh according to calculation method for interface.

Tracking과 Interface Capturing 방법이 쓰인다.<sup>13</sup> Interface Tracking의 경우 격자의 Node가 변해가는 경계면을 따라서 이동하여 계산하는 방법이며 정확한 위치를 추적해내는 장점이 있지만, 적용범위가 제한되는 단점이 있으며 계속되는 격자 재생성으로 계산 비용이 많이 든다. Interface Capturing 방법은 격자의 Node는 고정되고 격자단위내에 물리량의 변화를 계산하는 방법이다. 상경계면의 곡률이나 법선 벡터를 정확하게 계산하기 어렵다는 단점이 있지만, 적은 계산 비용과 경계면의 변화가 큰 문제를 풀 수 있다는 장점이 있다.<sup>14,15</sup>

상경계면을 포착하는 Interface capturing 방법은 Volume of Fluid Model (VOF)과 Level-set 방법이 대표적으로 많이 쓰이고 있다.<sup>10,16-18</sup> 그 중 VOF는 셀 또는 검사 체적 내에 체적 비의 개념으로 정의된 값을 사용하여 상경계면을 계산하고 각 상의 체적의 보존이 용이하다는 물리적인 장점이 있어 많이 사용된다. 주로 비압축성 재료의 다상유동의 모사에 광범위하게 사용되어 왔으며 식 (1)에 나타난 유체의 체적분율 (Volume Fraction,  $f$ )로 정의된 함수에 의해 0과 1사이의 값을 갖게 된다.<sup>10,19</sup>

$$f = \frac{\text{Volume (area) of Fluid}}{\text{Volume (area) of Cell}} \tag{1}$$

Figure 3같이 경계면을 포착하는 과정은 각 셀에서의 체적분율  $f$ 를 통해 계산하게 된다. 특정 시간과 공간에 대하여 스칼라함수  $f$ 를 이용하여 계면을 형성하는 과정을 재구성 (Reconstruction)이라고 한다. 즉, 두 물질 사이의 실제 경계면은 체적분율인  $f$ 의 값을 통해 계산되고 각 cell은 0과 1 사이의 값을 통해 경계면과의 관계를 수치적으로 재구성하는 과정이다. 사용자는 0과 1 사이의 Volume Fraction을 통해 경계면을 유추하게 된다. 하지만 계산과정에 의해 번짐 (Smearing) 현상과 같이 경계면의 수치적인 확산의 문제를 해결하기 위해 HRIC (High Resolution Interface Capturing) 도식과 CICSAM (Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes) 등과 같은 방법들로 발전해 나가고 있다.<sup>20,21</sup>

본 연구에서는 상용 CFD (Computational Fluid Dynamics)

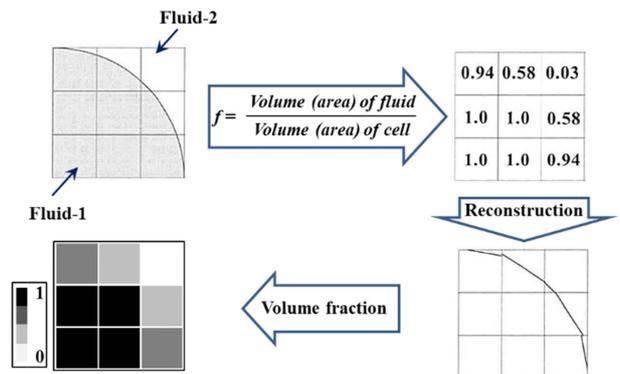


Figure 3. Schematic diagram of volume of fluid (VOF) method.

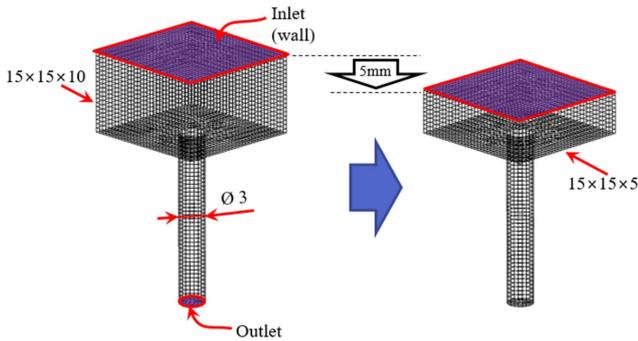


Figure 4. Mesh and boundary conditions for simulation.

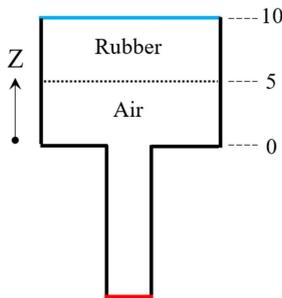


Figure 5. Schematic drawing of volume fraction of initial phase.

프로그램인 Fluent (ANSYS사)를 사용하여 캐비티 내의 고무와 공기의 다상유동 해석을 시간에 따른 비정상상태로 계산하였다. 본 해석에서는 VOF 방법으로 다상유동 해석 조건을 설정하고 상은 각각 고무와 공기로 2가지 상을 고려하였다.

경계조건이 적용된 해석 모델이 시간이 지나서 변한 형상을 Figure 4에 나타냈다. 해석 모델의 가장 윗 면인 Inlet부는 고무를 압축하는 벽면 형상을 모사하기 위해 Wall 조건과 시간에 따라 위치를 정의하는 Profile 구문을 적용했다. 해석 모델의 가장 아래에 있는 Outlet부에는 대기압 조건을 적용하고 그 외의 면은 Wall 조건을 적용하였다. 그리고 Figure 5와 같이 해석모델 일부분에 고무가 가득 차있는 초기조건은 Adapt 기능을 사용하여 Z좌표계 5~10영역에서 고무의 부피체적율을 100%로 정의하였으며 이외의 영역은 공기영역으로 정의했다.

Figure 6에 Inlet부에 적용한 시간에 따른 위치 Profile구문을 나타냈다. 시간이 지남에 따라 초기 위치에서 -Z방향으로 내려오면서 고무를 누르는 현상을 의미하고 있다. Inlet 부의 위치가 시간에 따라 움직이기 때문에 Dynamic Mesh 조건으로 주변 벽면의 격자를 재생성 하였다. 격자 재생성은 Layering Method를 사용하고 Collapse Factor 0.2로 적용하여 격자 비율의 20% 수준에서 주변 격자와 합쳐질 수 있게 설정했다.

해석에 사용된 공기와 고무의 물성조건은 Table 1에 나타나 있다. 공기의 경우 표준대기에서의 조건에서 밀도와 점도를 적용했다. 해석에 사용된 고무는 타이어에 사용되는 고무

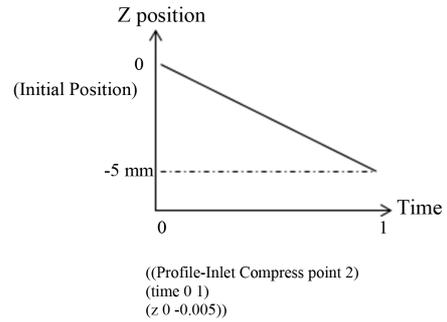


Figure 6. Inlet position profile according to time.

Table 1. Material Properties Used in Simulation

	Air	Rubber
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1.225	1500
Zero Shear Viscosity (Pa·s)	1.789×10 <sup>-5</sup>	Cross law

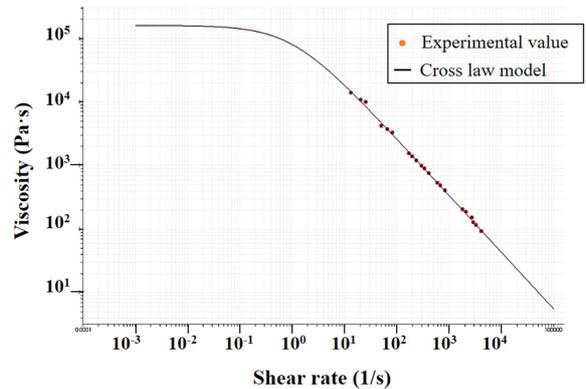


Figure 7. Measured shear viscosity curve and curve fitting with Cross law model.

의 물성을 측정하여 적용했으며, 점도의 경우 Figure 7과 같이 Cross Law Model을 사용하여 Curve Fitting하여 해석에 적용했다.

다상유동 해석에서 완전하게 섞이지 않는 두 액체들에 의해 형성되는 계면장력을 고려하기 위해 Antonoff's Rule을 사용하였다. 두 액체간의 계면장력( $\gamma_{AB}$ )은 각각의 표면장력의 차 ( $\gamma_A - \gamma_B$ )의 절대량과 같으며 식 (2)와 같이 계산된다.<sup>22</sup> 따라서 고무의 표면장력이 고무와 공기의 계면장력이라고 할 수 있다.

$$\gamma_{AB} = |\gamma_A - \gamma_B| \quad (2)$$

본 연구에서 적용한 고무의 표면장력은 10 kN/m을 적용했다.<sup>23,24</sup>

## Results and Discussion

Figure 8은 금형 내에 고분자 재료인 고무가 시간에 따라 유

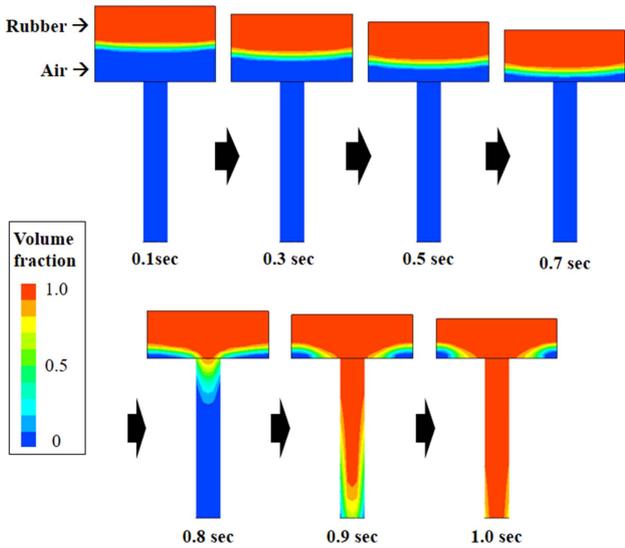


Figure 8. Interface between rubber and air using volume fraction of phase according to time.

입 되면서 해석모델에서 공기와의 체적분율을 나타내고 있다. 체적 분율이 1에 가까울수록 고무가 가득 차있는 상태를 나타내며 0에 가까울수록 공기가 차있는 상태를 의미한다. 고무가 흘러 들어 오면서 공기와의 경계면이 0.7 sec까지 시간에 지남에 따라 내려가고 있다. 0.8 sec 이후에는 벤팅 영역으로 고무가 유입되는 현상이 관찰되었다. 그리고 캐비티 내에 모서리 부분에서 공기가 간헐 빠져 나가지 못하는 현상이 0.9 sec 이후에 관찰 된다. 약 0.7 sec 이후에는 고무가 벤팅 영역으로 흐르면서 공기와의 체적분율이 확산되어 나타나고 경계면의 구분이 정밀하게 나타나지 않고 있다. 이는 좁은 벤팅 영역으로의 고무가 흐르면서 주변 격자의 급격한 물성 변화로 인해 수치해석적으로 안정하지 못하고 번짐현상이 나타난 것으로 판단된다.

Figure 9는 고무의 체적분율이 0.5수준일 때의 경계면과 해석모델의 속도 벡터를 시간에 따라 나타냈다. 경계면의 위 부분은 고무의 체적분율이 0.5~1 수준이므로 고무가 가득 차있는 영역이라고 판단할 수 있으며 반대로 경계면의 아래 부분은 공기의 영역으로 판단할 수 있다. 시간이 지남에 따른 경계면은 고무의 흐름에 의해서 벤팅영역으로 유입되고 있는 모습을 나타내고 있다. 고무의 영역에서 속도 벡터의 크기는 상대적으로 작고 공기의 영역에서는 크게 관찰된다. 상대적으로 단면적이 작은 벤팅 영역에서는 속도 벡터의 크기가 크게 나타나고 있다.

시간이 지남에 따라 공기의 벤팅 속도가 벤팅 영역에서 빠르게 나타나고 있다. 0.1 sec와 0.5 sec에서 0~0.179 m/s의 속도 분포가 관찰되고, 특히 벤팅 영역에서 속도가 크게 분포하고 있다. 0.7 sec에서 벤팅 영역이 시작되는 부분에서 벤팅 속도가 크게 나타났는데 이는 급격한 속도 편차에 의한 수치 해석적 오류로 판단되며 추후 속도 변화가 큰 영역의 격자 추

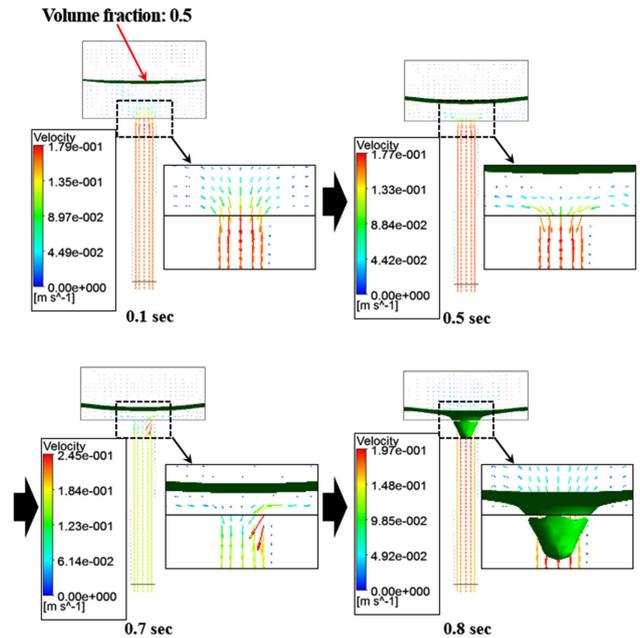


Figure 9. Velocity vector of phase according to time.

가 생성 및 해석 안정화 방법이 필요하다. 이후 0.8 sec에서는 고무가 벤팅 영역으로 유입되고 있는 상태를 나타내고 있으며 해석 모델에 관찰되는 속도의 크기도 0~0.197 m/s로 높게 나타났다. 이는 고무가 벤팅 영역으로 유입되면서 공기가 벤팅될 수 있는 영역이 작아지면서 공기의 벤팅 속도가 빨라짐을 의미한다.

Figure 10은 해석모델의 벽면에서 압력분포를 시간에 따라 나타냈다. 해석 초기 0.2 sec에서는 압력분포가  $-3.9 \times 10^4$ ~

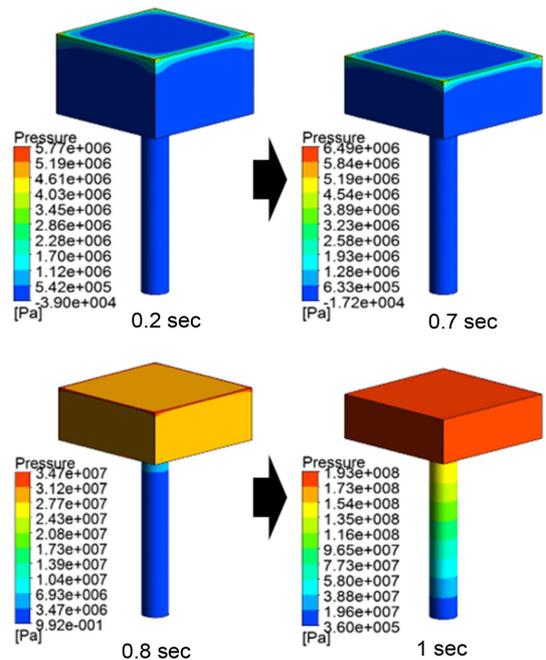


Figure 10. Pressure distribution according to time at wall.

$5.77 \times 10^6$  Pa으로 나타났으며 주로 윗면의 모서리 부분에서 높게 관찰되었다. 고무가 계속 유입되면서 전체적인 압력은 증가하며 0.7 sec에서는  $-1.72 \times 10^4 \sim 6.49 \times 10^6$  Pa, 0.8 sec에서는  $9.92 \times 10^{-1} \sim 3.47 \times 10^7$  Pa 그리고 해석이 완료된 1 sec에서는  $3.60 \times 10^5 \sim 1.93 \times 10^8$  Pa으로 관찰되었다. 시간이 지날수록 해석모델의 윗쪽에서 고무가 유입되면서 벽면에서의 압력이 크게 나타난 것으로 판단된다. 또한 고무가 벤팅영역에 유입되기 전까진 공기와 고무가 Outlet으로 몰리는 현상에 의해 해석모델 일부영역에서 음의 압력이 나타난 것으로 판단된다. 고무가 벤팅영역으로 흐르는 0.8 sec 이후에는 캐비티 영역 대부분에서 높은 압력 분포를 보이며 1 sec에서는 벤팅영역에서의 압력도 높게 분포하고 있다. 고무가 벤팅영역으로 유입되면서 압력이 크게 증가됨을 보여주고 있다.

## Conclusion

본 연구에서는 캐비티 내에서 고분자 재료인 고무의 흐름에 따른 공기의 벤팅 현상을 컴퓨터 모사하는 방법에 대해 연구 하였다. 본 연구에서 구축한 다상유동의 해석 방법을 통하여 공기와 고무와 같이 밀도 차이가 큰 두 재료의 경계면을 시간에 따라 예측할 수 있었다. 그리고 벤팅영역을 지나는 공기영역의 속도 분포와 압력 분포를 관찰 할 수 있었다. 추후 캐비티의 형상과 벤팅의 위치, 개수의 변경에 따라 캐비티 내의 공기의 적합한 벤팅을 위해 필요하다고 판단된다. 또한 물리적인 변화가 크게 일어나는 시점에서 경계면이 확산되어 나타나는데 이러한 현상은 향후 격자 크기 및 해석 시간을 세밀화 하고, 수치해석적인 안정을 높이는 방법을 통해 극복할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 금형의 캐비티를 통해 제품을 성형하는 공정에서 공기의 벤팅을 모사할 수 있는 방법을 제시하였다. 이를 통해 벤팅을 설계하거나 검증하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## Acknowledgments

본 연구는 한국고무학회의 신양장학금의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

## References

1. D. V. Rosato and M. G. Rosato, "Injection Molding Handbook", 3rd Ed., p. 307, Springer Science & Business Media, New York, 2012.
2. C. P. Chen, M. T. Chuang, Y. H. Hsiao, and Y. K. Yang, "Simulation and Experimental Study in Determining Injection Molding Process Parameters for Thin-Shell Plastic Parts via Design of Experiments Analysis", *Expert Systems with Applications*, **36**, 10752 (2009).
3. C. Lotti, M. M. Ueki, and R. E. S. Bretas, "Prediction of the Shrinkage of Injection Molded Ipp Plaques Using Artificial Neural Networks", *Journal of Injection Molding Technology*, **6**, 157 (2002).
4. J. H. Mo, H. J. Kim, and M.-Y. Lyu, "Shrinkage in Injection Molded Part for Operational Conditions and Resins", *Elastomers and Composites*, **38**, 295 (2003).
5. S. T. Joo, Y. H. Kim, and M.-Y. Lyu, "Analysis of Forming Processes of PET Bottle Using a Finite Element Method", *Transactions of Materials Processing*, **10**, 525 (2001).
6. T.-J. Lho and K.-S. Kim, "An Analysis of Plastic Injection Molding Process for Automobile Gearbox Cover by Mold-flow", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **9**, 1494 (2008).
7. K.-H. Lim, "Optimum Design of Rubber Injection Molding Process for the Preparation of Anti-vibration Rubber", *Korean Chemical Engineering Research*, **48**, 490 (2010).
8. M. Vishnuvarthanan, R. Panda, and S. Ilangoan, "Optimization of Injection Molding Cycle Time Using Moldflow Analysis", *Middle-East Journal of Scientific Research*, **13**, 944 (2013).
9. B.-C. Song, S.-R. Kim, Y.-G. Kang, and M.-H. Ham, "A Study on the Comparison of Approximation Models for Multi-Objective Design Optimization of a Tire", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, **10**, 117 (2011).
10. C. W. Hirt and B. D. Nichols, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", *Journal of Computational Physics*, **39**, 201 (1981).
11. H. K. Myong, "Numerical Simulation of Multiphase Flows with Material Interface due to Density Difference by Interface Capturing Method", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, **33**, 443 (2009).
12. K.-J. Lee, K.-S. Yang, and C.-W. Kang, "Fractional Step Method Combined with Volume-Of-Fluid Method for Efficient Simulation of Unsteady Multiphase Flow", *Journal of Computational Fluids Engineering*, **15**, 99 (2010).
13. J. E. Kim and H. K. Myong, "A Study on an Interface Capturing Method Applicable to Unstructured Meshes for the Analysis of Free Surface Flow", *Journal of Computational Fluids Engineering*, **11**, 14 (2006).
14. W. J. Rider and D. B. Kothe, "Reconstructing Volume Tracking", *Journal of Computational Physics*, **141**, 112 (1998).
15. T. E. Tezduyar, "Interface-Tracking and Interface-Capturing Techniques for Finite Element Computation of Moving Boundaries and Interfaces", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **195**, 2983 (2006).

16. M. Sussman, P. Smereka, and S. Osher, "A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow", *Journal of Computational Physics*, **114**, 146 (1994).
17. Y. C. Chang, T. Y. Hou, B. Merriman, and S. Osher, "A Level Set Formulation of Eulerian Interface Capturing Methods for Incompressible Fluid Flows", *Journal of Computational Physics*, **124**, 449 (1996).
18. M. H. Cho, H.-G. Choi, and J.-Y. Yoo, "Study on the Solution of Reinitialization Equation for Level Set Method in the Simulation of Incompressible Two-Phase Flows", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, **32**, 754 (2008).
19. L. Zhou, D. Y. Liu, and C.-Q. Ou, "Simulation of Flow Transients in a Water Filling Pipe Containing Entrapped Air Pocket with VOF Model", *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, **5**, 127 (2011).
20. M. S. Kim, J. P. and W. I. Lee, "A New VOF-based Numerical Scheme for the Simulation of Fluid Flow with Free Surface (II)-Application to the Cavity Filling and Sloshing Problems", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers B*, **24**, 1570 (2000).
21. S. Muzaferija and M. Peric, "Computation of Free-Surface Flows using Interface Tracking and Interface-Capturing Methods", *Advances in Fluid Mechanics*, **24**, 59 (1999).
22. S. Ghosh and H. B. Bull, "Adsorbed Films of Bovine Serum Albumin: Tensions at Air-Water Surfaces and Paraffin-Water Interfaces", *Biochimica et Biophysica Acta*, **66**, 150 (1963).
23. V. Broje and A. A. Keller, "Interfacial Interactions between Hydrocarbon Liquids and Solid Surfaces used in Mechanical Oil Spill Recovery", *Journal of Colloid and Interface Science*, **305**, 286 (2007).
24. J. E. Mark, "Polymer Data Handbook", Oxford University Press, New York, 1999.