



사출성형의 2차원 및 3차원 해석의 비교에 관한 연구

박재웅 · 안지혜 · 박용민 · 류민영[†]

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

접수일(2012년 10월 15일), 수정일(2012년 10월 13일), 게재확정일(2012년 11월 27일)

A Study on the Comparison of two and Three Dimensional Computer Simulations in Injection Molding

Jae Woong Park, Ji Hye Ahn, Yong Min Park, and Min-Young Lyu[†]

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

(Received October 15, 2012, Revised October 13, 2012, Accepted November 27, 2012)

요약 : 사출성형에 CAE (Computer Aided Engineering)을 적용함으로써 사출 성형품 설계와 공정조절에 큰 도움이 된다. 또한 성형의 효율성을 최대화하고 개발기간의 단축, 그리고 고품질 제품을 확보하는데 도움이 크다. 특히 신제품 개발에 대한 설계방안을 제시하고 실패율을 감소시킬 수 있다. 현재 사출성형의 CAE는 2D는 물론 3D도 해석이 가능한데 이 두 가지 방식은 약간의 차이를 가짐에도 불구하고 해석 상 차이에 관한 비교 및 일반적인 가이드라인이 정해져 있지 않다. 본 연구에서는 제품의 두께, 형상 그리고 유한요소 수에 따른 2차원 해석과 3차원 해석을 비교하였다. 그리고 실험을 통해 얻은 캐비티 내의 압력과 온도를 해석결과와 비교하였다. 본 연구를 통하여 사출성형의 2D해석과 3D해석에 대한 가이드라인을 제시하고자 하였다.

ABSTRACT : There exist many merits in designing products and setting operational condition when computer aided engineering (CAE) is adopted in injection molding process. CAE also gives increasing efficient of molding, reducing developing time of product, and maintaining high quality products. Specially, it suggests design guidelines for new products and reducing wasting time to get steady state. Two and three dimensional computer simulations are available in injection molding and those results are somewhat different. However there are no guidelines for 2D and 3D computer simulations in using CAE in injection molding even though it is widely used in plastic industry. In this study, two and three dimensional computation results were compared for various part thickness, part shape, and number of finite element. Subsequently computational results were compared with experimental data such as pressure and temperature. The guidelines in two and three dimensional CAE analysis have been suggested through this study.

Keywords : Injection molding, CAE, part thickness, part shape, number of element

I. 서 론

사출성형은 이미 오래 전부터 고분자 성형공정 중 가장 많이 사용하는 공정이 되었다. 사출성형은 고분자 성형공정 중 가장 정밀도가 높고 생산성이 높기 때문에 기계나 자동차의 부속품, 그리고 전기 전자제품의 부품이나 커버 등에 쓰이는 제품을 성형하는데 많이 활용된다. 사출성형공정은 충전, 보압, 그리고 냉각 단계 등 일련의 과정으로 구성되어 있는데 정밀한 양품을 생산하기 위해서는 각 단계의 조절이 중요하다. 충전단계에서는 속도와 시간이 중요한 요소이고 보압에서는 압력의 크기와 시간이, 그리고 냉각에서는 온도와 시간이 중요하다. 이러한 공정변수 외에 기본적으로 금형의 구성이나

냉각관의 구성이 중요하지만 이미 제작된 금형을 이용하여 양품을 성형하기 위해서는 성형변수의 적절한 조절이 중요하다 하겠다.¹ 사출성형공정과 관련된 연구는 실험 및 해석적 연구를 포함하여 크게 성형공정연구²⁻⁶ 및 공정의 CAE (computer aided engineering)⁷⁻¹² 해석이 있다. 사출성형과 관련된 제품설계, 금형설계 그리고 성형조건 설정의 일관적인 작업에 있어서 시행착오를 줄이며 효과적으로 성형작업을 하기 위해 CAE가 활용되는데 컴퓨터의 급속한 발전과 프로그램의 정확성의 증대로 CAE의 응용은 급속히 발전하고 있다.¹³

컴퓨터 성능의 증대와 상용 CAE 코드의 발전으로 사출성형 공정들은 컴퓨터 모사 (computer simulation) 를 하고 있으며 이를 통하여 제품설계, 금형설계 그리고 최적의 공정조건을 찾는데 응용되고 있다. CAE 를 응용함으로써 경험에 의존되는 것들을 과학적인 방법으로 접근하여 시행착오를 줄이며

[†]Corresponding Author. E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

생산 공정에서 납기와 코스트를 낮추는 물론 물성의 예측과 품질의 척도를 조절할 수 있다. 2차원 및 3차원 사출성형해석에서 아주 작은 성형품은 길이에 비해 두께가 얇지 않기 때문에 3차원 해석이 효과적이라 하겠다. 또한 CAD (computer aided design)의 발전으로 모든 제품설계가 3차원으로 이루어지고 있기 때문에 CAD의 3차원 데이터를 그대로 이용하여 3차원으로 해석하는 것이 노고를 줄여준다. 이는 해석 시간은 길어지지만 모델링 하는데 시간이 절감되는 장점을 갖고 있다. 사출성형의 해석은 흐름해석, 보압해석과 냉각해석을 기본으로 하여 변형해석, 잔류응력해석, 분자배향과 파이버 배향의 예측, 결정화도의 예측 등 많은 정보를 제공하고 있다. 이러한 CAE의 활발한 활용이 이루어지고 있는데 여러 형상의 해석에서 2차원과 3차원 해석 사이에서 어느 방법이 효과적일지에 대한 연구는 많지 않다. CAE 해석의 올바른 적용과 응용성을 극대화하기 위해서는 2차원 및 3차원 해석의 비교는 물론 실험적 검증도 필요하다.

본 연구에서는 두께와 형상이 다양한 사출제품에 대해서 2차원 및 3차원 해석을 통하여 결과를 비교하였다. 또한 유한요소 크기에 따른 해석결과도 비교하였다. 그리고 실험으로 온도와 압력을 측정하여 해석결과와 비교 검토하였다. 본 연구에서 도출된 결과는 사출성형해석을 효과적으로 수행하기 위한 가이드라인을 줄 것으로 기대된다.

II. 컴퓨터 해석 및 결과분석

1. 해석모델

해석모델은 총 세가지 그룹으로 나누어 해석하였다. Figure 1은 가로×세로×높이가 40×40×10 mm인 상자에서 흐름의 복잡성을 주기 위해 칸막이를 가로와 세로로 같은 간격으로 3개를 설치한 모델이다.

이 형상에서 두께를 1.5 mm에서 8 mm까지 변화시키며 해석하여 두께에 따른 2차원과 3차원해석을 비교하였다. Figure 2는 성형품의 형상 변화에 따른 2차원과 3차원해석의 차이를

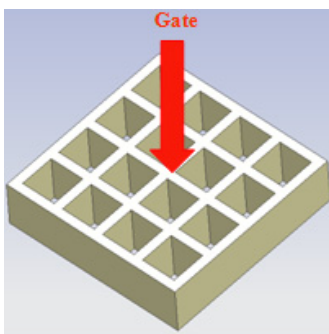
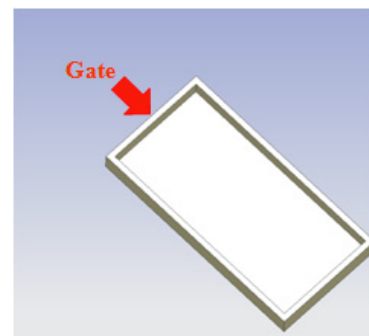


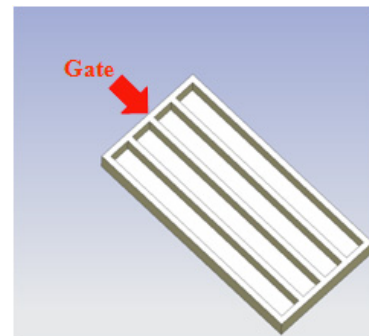
Figure 1. Simulation model for 2D and 3D injection molding for various thicknesses.

알아보기 위한 모델이다. Figure 2(a)는 가로×세로×높이가 80×40×8 mm인 상자를 보여주었고 있다. Figure 2(b)는 Figure 2(a)의 상자에 높이 8 mm의 리브가 가로방향으로 등 간격으로 세 줄 놓여있는 형상이고, Figure 2(c)는 Figure 2(b)에서 다섯 개의 리브가 세로방향으로 추가로 놓여있는 모델이다. Figure 2의 모델에서 두께는 모두 2 mm이다.

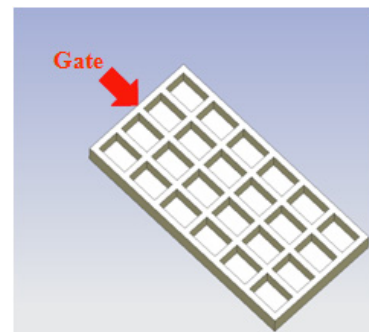
Figure 3은 가로×세로×높이가 50×50×50 mm이고 두께가 4 mm인 상자형상으로 유한요소 크기를 변화하여 2차원과 3차원 해석을 수행하여 유한요소 크기에 따른 영향을 분석하기 위한 모델이다.



(a) No ribs



(b) Ribs in flow direction



(c) Ribs in both directions

Figure 2. Simulation model for 2D and 3D injection molding for various shapes.

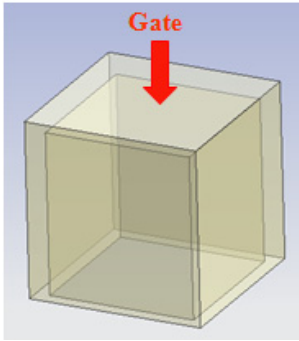


Figure 3. Simulation model for 2D and 3D injection molding for mesh size.

2. 두께변화에 따른 2차원 및 3차원해석결과 분석

해석을 위한 수지는 PS를 사용하였으며, 성형조건은 수지 온도와 금형온도는 각각 230 °C와 70 °C, 사출압은 120 MPa, 사출시간은 2초로 하였다. 충전 및 압력 해석을 계산하는 대표적인 식은 Conservation of Mass 식 (1)과 Conservation of Momentum 식 (2) 그리고 Conservation of Energy 식 (3) 이다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p - \nabla \cdot \tau + \rho g \tag{2}$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \tag{3a}$$

$$\Phi = \eta \dot{\gamma} + \Delta \dot{H} + \dots \tag{3b}$$

3차원 해석은 위의 식을 완전한 3차원 상태로 푸는 것이고 2차원 해석은 두께 방향의 변화도 무시한 해석이다. 즉 2차원 해석을 위해 Hele - Shaw 가정을 하게 되면 두께가 작은 cavity 내의 유동으로 가정이 되어지므로 이때 z 방향으로의 압력 및 유동은 무시하게 된다. 또한, 두께 방향으로의 온도 차이에 의한 대류도 무시되어 진다. 식 (4)는 식 (1)과 식 (2)로 부터 얻어진다. 이때, h 는 1/2 두께이다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \tag{4a}$$

$$S = \int_0^h \frac{z^2}{\eta} dz \tag{4b}$$

그리고 해석 시 사용되는 점도 모델은 식 (5) 와 같은 modified-Cross model 이며, 온도에 따른 점도 변화는 Arrhenius 타입으로 식 (6)과 같다.

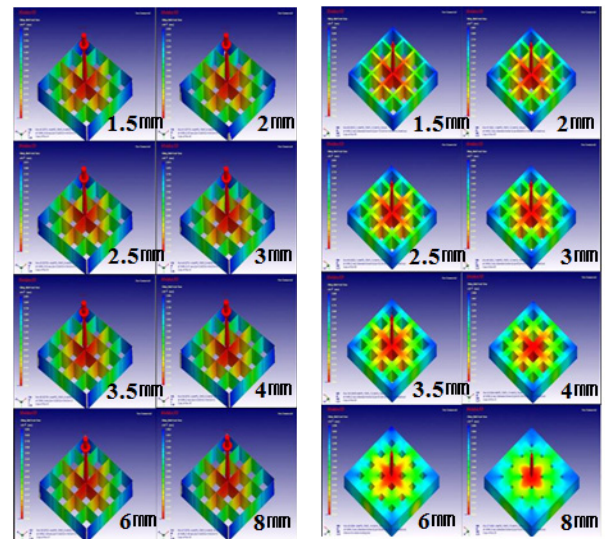
$$\eta(T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0(T)}{1 + (\eta_0 \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}} \tag{5}$$

$$\eta_0(T) = B \text{Exp} \left(\frac{T_b}{T} \right) \tag{6}$$

Figure 4는 Figure 1의 모델에 대한 2차원 및 3차원 해석의 충전패턴 결과를 보여주고 있다.

식 (4)에 나와있듯이 두께 방향으로의 흐름이 고려되지 않기 때문에 2차원 해석결과의 경우 두께가 1.5 mm에서 8 mm로 갈수록 두께에 관계없이 일정한 충전패턴을 보이고 있다. 반면, 두께방향의 3차원 해석의 경우 두께가 두꺼울수록 충전이 다소 더 균일하게 나타남을 알 수 있다. 이는 리브의 두께가 두꺼워지면서 수지가 흐르는 공간이 커지는데 이러한 현상이 잘 반영되었기 때문이다. Figure 5는 압력분포를 보여주고 있다. 2차원 해석 결과에서 두께가 증가 할수록 압력이 낮게 형성되고 압력분포도 보다 균일함을 알 수 있다.

2차원 해석에서는 흐름에서 보이는 분수유동과 두께방향의 흐름이나 압력변화가 고려되지 않았기 때문에 압력이 낮게 소요되었다고 판단된다. 또한 두께가 두꺼워질 수록 흐름이 쉬워 압력이 덜 필요하기 때문이라 판단된다. 두께에 따른 3차원해석의 압력 결과도 2차원 해석결과와 유사하나 3차원 해석 결과에서 압력분포가 다소 더 균일함을 관찰 할 수 있었다.



(a) 2D simulation

(b) 3D simulation

Figure 4. Comparison of filling pattern for two and three dimensional simulations according to part thickness.

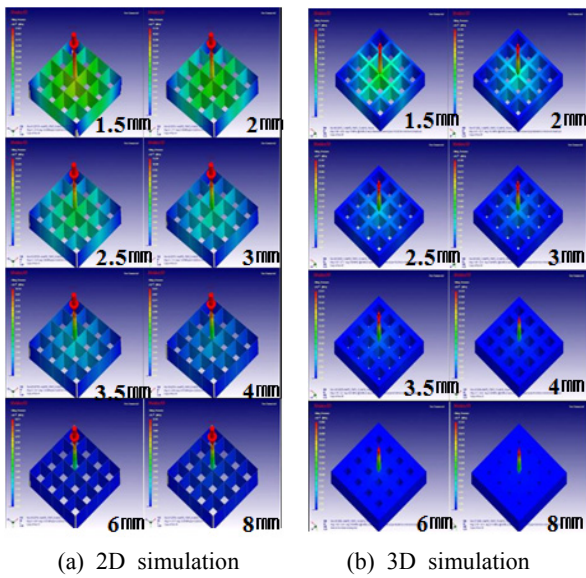


Figure 5. Comparison of pressure distribution for two and three dimensional simulations according to part thickness.

3차원 해석에서는 두께방향의 유동이나 압력을 고려하기 때문에 2차원 해석결과와 다소 차이가 있다. Figure 6 은 게이트에서 두께에 따른 압력의 변화를 보여주고 있는데 2차원과 3차원 해석결과는 큰 차이가 있다. 2차원 해석의 경우 두께가 두꺼울수록 유동 통로가 커서 압력이 적게 소요되었으며 약 4 mm 이상의 두께에서는 압력이 거의 일정하였다. 그러나 3차원 해석에서는 두께에 따라 다소 변동하는 압력을 보이거나 20~25 MPa 근처에서 유지됨을 볼 수 있다. 이러한 현상은 2차원 해석에서는 리브가 있는 부분에서 유동이 꺾일 때 발생하는 유동저항을 고려하지 못하기 때문이다. 또한 3차원 해석에서는 두께가 두꺼워져 유동이 좋아져도 리브에서 흐름이 꺾여 유동저항이 크게 존재하기 때문에 두께에 따른 압력은 큰 차이를 보이지 않고 있다.

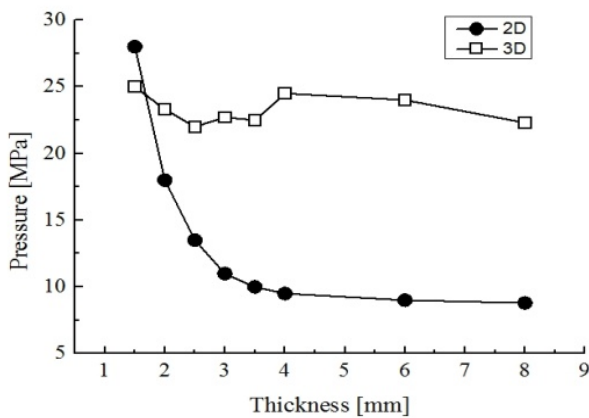


Figure 6. Comparison of pressure at gate for two and three dimensional simulations according to part thickness.

3. 형상변화에 따른 2차원 및 3차원해석결과 분석

형상변화에 따른 해석을 위해서는 PP 수지를 사용하였으며, 성형조건은 수지온도와 금형온도는 각각 230 °C 와 70 °C, 사출압은 105 MPa, 사출시간은 1초로 하였다. Figure 7에는 Figure 2의 해석모델에 대한 충전패턴이 나타나있는데, 2차원 및 3차원 해석에서 시편형상에 따라 충전패턴은 차이가 없다. Figure 8에는 압력분포가 나타나있다.

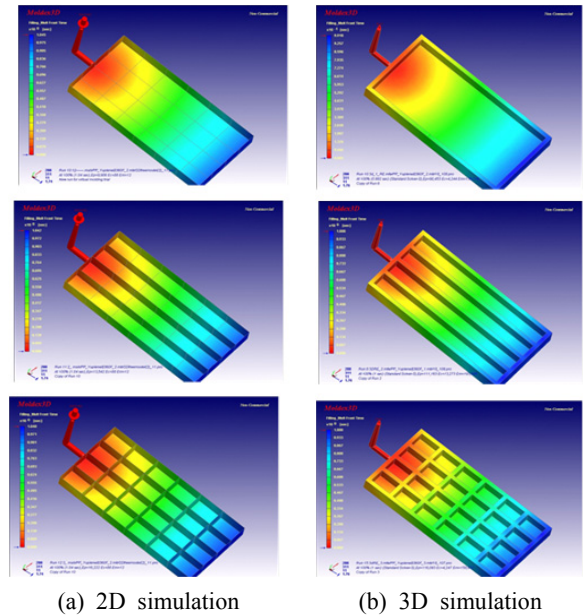


Figure 7. Comparison of filling pattern for two and three dimensional simulations according to part shape.

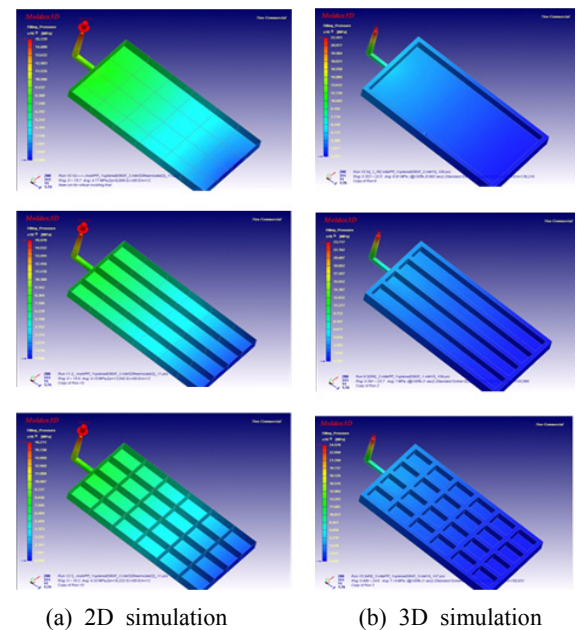
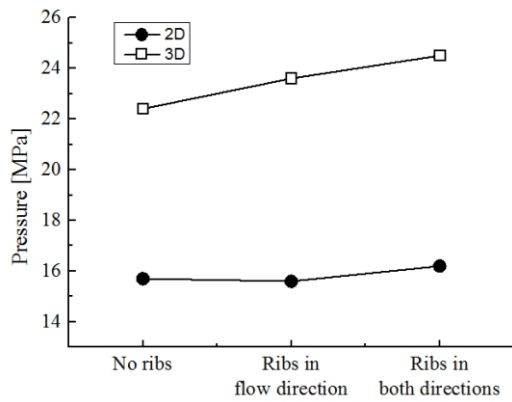
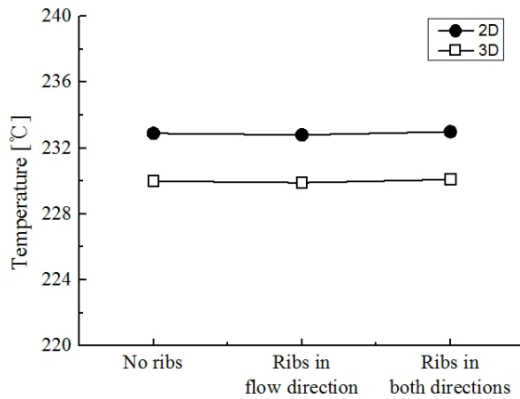


Figure 8. Comparison of pressure distribution for two and three dimensional simulations according to part shape.



(a) Pressure at gate



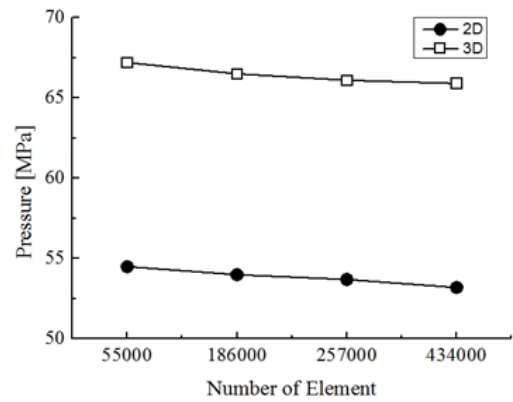
(b) Temperature at gate

Figure 9. Comparison of pressure and temperature at gate for two and three dimensional simulations according to part shape.

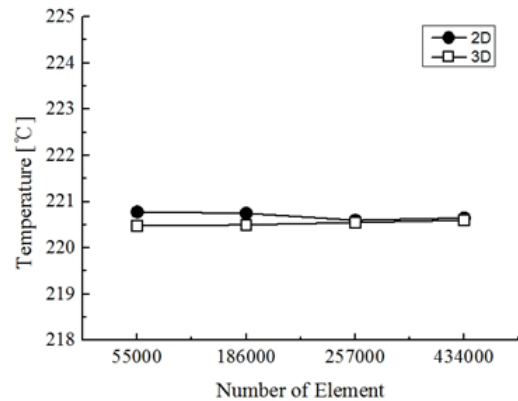
시편의 형상변화에 따라 2차원, 3차원 각각의 해석에서는 큰 차이가 나타나지 않았다. 그러나 3차원 해석결과가 2차원 해석결과에 비해 보다 균일한 압력분포를 보였다. Figure 9는 시편형상에 따른 게이트에서의 압력과 온도를 나타내고 있다. 압력 Figure 9(a)의 경우 2차원 해석에서는 압력이 낮게 예측이 되었고 형상에 따라 큰 변화가 없이 나타났다. 3차원 해석에서는 2차원 해석보다 압력이 높게 예측되었고 또한 형상이 복잡해질수록 압력이 높게 나타났다. 이는 2차원 해석에서는 형상이 복잡할 때 나타나는 흐름의 저항이 고려되지 않았기 때문이라 판단된다. 온도 (Figure 9(b))의 경우 큰 차이는 없지만 3차원 해석에서 약 3 °C 정도 낮게 나타났다.

4. 유한요소 수에 따른 2차원 및 3차원해석결과 분석

유한요소 수에 따른 해석을 위해서 PP수지를 사용하였으며, 성형조건은 수지온도와 금형온도는 각각 220 °C 와 70 °C, 사출압은 105 MPa, 사출시간은 1초로 하였다. Figure 10은 유한요소 수에 따른 게이트에서의 압력과 온도의 변화를 보여



(a) Pressure at gate



(b) Temperature at gate

Figure 10. Comparison of pressure and temperature at gate for two and three dimensional simulations according to number of finite elements.

주고 있다. 2차원 해석에서는 삼각형요소를 사용하였고, 3차원 해석에서는 사면체요소를 사용하였다.

일반적으로 요소수가 증가하면 계산의 정확도는 증가하나 계산 시간이 증가하기 때문에 이 두 가지 항목을 고려하여 최적조건에서 해석하는 것이 중요하다. Figure 10(a)에서 보면 2차원 및 3차원 해석결과 모두에서 요소 수가 증가함에 따라 압력은 다소 감소하는 경향이 있으나 큰 변화는 없다. Figure 10(b)의 온도 역시 미미하게 변화는 있으나 유의한 차이가 있다고 보기는 어렵다. 본 연구에서 사용한 요소 수 범위에서는 결과의 차이가 없다고 판단된다. Figure 11은 요소수의 증가에 따른 계산시간의 변화를 보여주고 있다. 2차원 해석에서는 요소수가 많이 요구되지 않지만, 요소수가 증가하여도 계산시간이 크게 증가하지 않았다. 3차원 해석에서는 근본적으로 요소수가 많이 필요하고 요소수가 증가 할수록 계산시간이 급격히 증가함을 알 수 있다. Figure 10에서 보듯 요소 수에 따른 계산 결과의 차이는 적으나 계산시간은 매우 크게 늘어날 수 있다. 그래서 2차원 해석이 3차원 해석에 비해 계산시간 면에서 매우 큰 장점이 있음을 보여주고 있다.

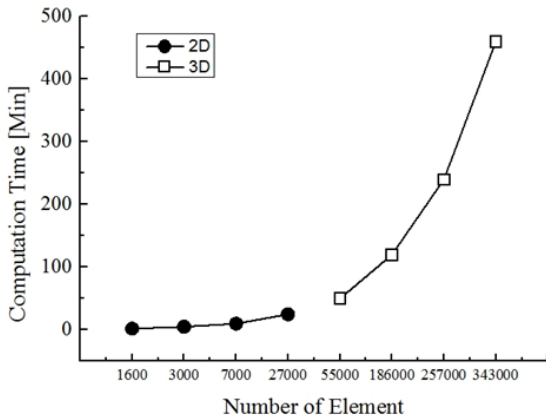
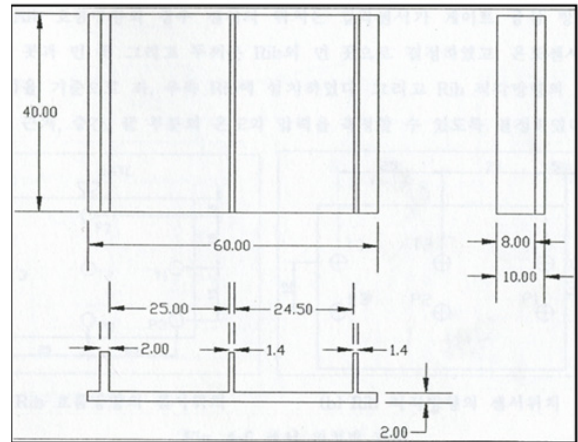


Figure 11. Comparison of computation time for two and three dimensional simulations according to number of finite elements.

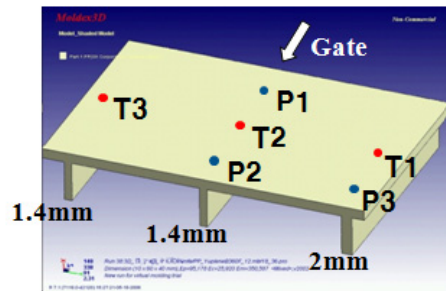


(a) 2D drawing of specimen

III. 컴퓨터해석과 실험의 비교

1. 실험모델 및 사출성형 실험

압력과 온도를 측정하고 해석결과와 비교하기 위한 모델이 Figure 12에 나타나 있다. 실험에서는 PP 수지를 사용하였으며, 성형조건은 수지온도 230 °C, 금형온도 30 °C, 충전시간 1초, 사출압 60 MPa, 보압 30 MPa, 보압시간 2초, 그리고 냉각 시간은 7초로 하였다. 압력과 온도를 측정하기 위한 센서의 위치가 Figure 12(b)에 나타나 있다. 중앙 쪽 리브위에서 게이트 쪽과 게이트에서 먼 쪽에 압력센서를 설치하였고, 가장자리의 두꺼운 리브 위에도 입력센서를 설치하였다. 온도센서는 중앙 리브의 길이 중앙에 설치하였고 양쪽 리브의 중앙에 각각 설치하였다. 압력센서는 키슬러의 Type6157B를 온도센서는 Type6192A를 사용하였다.



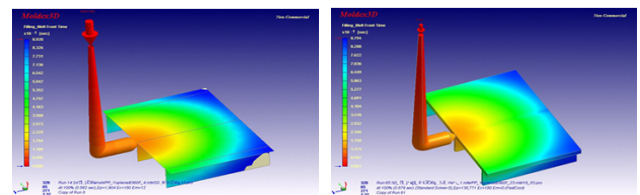
(b) 3D modeling of specimen and locations of sensors (T1, T2, T3: Temperature sensor, P1, P2, P3: Pressure sensor)

Figure 12. Specimen for experiment.

2. 압력비교

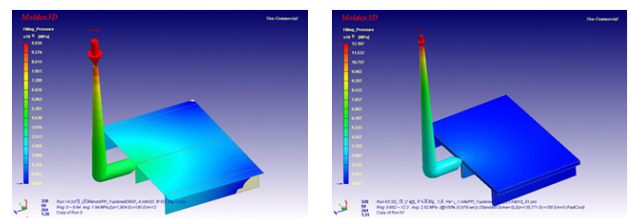
Figure 13 에 충전패턴이 나타나있다. 3차원 해석결과가 흐름의 직각방향으로 흐름이 잘 일어나 2차원 해석결과보다 균일한 충전이 되는 것을 볼 수 있다. Figure 14에는 2차원과 3차원으로 해석한 압력분포가 나타나있다. 3차원 해석의 압력분포가 2차원 해석의 압력보다 균일하게 분포하고 있다. 결과적으로 충전패턴과 압력분포가 3차원해석에서 다소 균일하게 예측되었다.

Figure 15 에는 Figure 12(b)의 시편에 표시된 압력측정 위치에서 측정된 압력과 2차원 및 3차원으로 해석한 압력이 나타나있다. P1은 게이트에 가까운 지점이어서 측정과 해석에서 압력이 가장 높게 측정되었다. P2와 P3는 게이트에서 먼 곳이 기 때문에 압력이 낮게 측정되었고, P3가 게이트에서 가장 멀기 때문에 압력이 가장 낮게 측정되었다. 그러나 해석에서



(a) 2D simulation (b) 3D simulation

Figure 13. Comparison of flow patterns of 2D and 3D simulations.



(a) 2D simulation (b) 3D simulation

Figure 14. Comparison of flow patterns of 2D and 3D simulations.

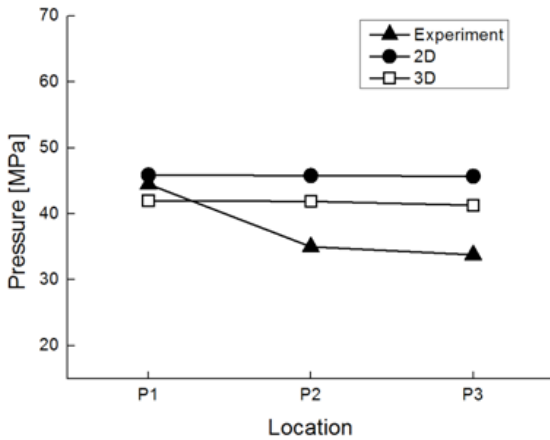


Figure 15. Comparison of pressures for 2D, 3D and measurement.

는 P2와 P3의 압력에 큰 차이가 없었다. 전체적으로 3차원 해석이 실험과 더 가까운 값을 보였고, 2차원 해석은 실측치보다 크게 예측하였으며 3차원 해석 보다 높았다. 이러한 압력 측정의 결과로 보아 3차원 해석이 실험에 가까운 압력을 예측한다고 볼 수 있다.

3. 온도비교

Figure 16에는 Figure 12(b)에 표시된 T1, T2, 그리고 T3 지점에서 측정된 온도와 해석으로 예측한 온도가 나타나있다.

측정 값과 2차원 해석, 그리고 3차원 해석에서 큰 차이를 보이고 있다. 실험으로 측정된 온도는 금형의 온도인 30 °C 근처 또는 다소 낮게 측정되었다. 실험에서 수지의 온도가 230 °C 이고 금형의 온도가 30 °C 이며, 수지가 캐비티에 채워지는 과정에서 수지의 흐름선단은 공기와 접촉되어 진행된다. 흐름선단은 분수유동을 보이며 진행하는데 금형표면에 접근하면서 온도센서에 접촉된다. 흐름선단의 온도는 공기와 접촉된

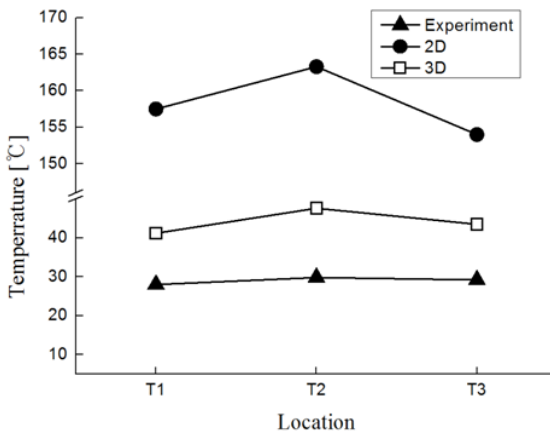


Figure 16. Comparison of temperatures for 2D, 3D and measurement.

부분이기 때문에 캐비티에 있는 공기의 온도와 유사하다고 볼 수 있다. 캐비티의 온도는 금형온도이기 때문에 캐비티 내의 공기의 온도는 금형의 온도와 유사하기 때문이다. 따라서 온도센서에 측정된 온도는 수지의 유동선단의 온도라고 볼 수 있고 유동선단의 온도는 캐비티내의 공기온도와 유사하기 때문에 금형의 온도와 유사한 30 °C 근처로 측정 되었다고 판단된다. 2 차원 해석에서의 온도는 두께방향의 온도 보다는 두께에서의 평균온도이기 때문에 수지와 금형의 온도 사이에서 측정되었다. 즉 금형의 온도보다 매우 높은 온도로 나타났고 또한 수지의 온도보다는 매우 낮은 온도로 나타났다. 3차원 해석의 온도는 측정치보다 10 °C 이상 높지만 2차원 해석보다는 훨씬 더 측정 값에 가깝다. 이러한 온도의 결과로 보아 3차원 해석이 2차원 해석보다 더 정확한 온도를 예측한다고 판단된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 사출성형의 컴퓨터 모사에 대한 2차원 및 3차원 해석을 비교하였다. 사출성형품의 다양한 두께와 형상에서 해석을 비교하였으며, 유한요소 수에 따른 해석결과의 차이와 계산시간을 비교하였다. 또한 실험을 통하여 압력과 온도를 측정하여 해석결과와 비교하였다.

2차원 해석과 3차원 해석을 비교한 결과 충전패턴은 큰 차이가 없었다. 그러나 압력분포는 차이를 보였다. 2차원 해석에서는 분수유동과 같은 두께 방향으로 유동을 고려하지 못하고 형상의 변화에 따른 유동의 저항을 고려하지 못한다. 그러나 3차원 해석은 분수유동과 형상에 따른 유동의 저항을 고려할 수 있기 때문에 예측하는 압력에는 차이가 있었다. 본 연구에서 사용한 유한요소 수의 범위에서 유한요소 수에 따른 해석에서는 2차원 해석과 3차원 해석결과의 차이는 관찰되지 않았다. 그러나 해석 시간에서는 2차원과 3차원 해석에서 큰 차이를 보였다. 2차원 해석은 근본적으로 많은 요소 수를 요구하지 않아 해석시간이 짧았고, 요소 수가 증가하여도 해석시간에는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 3차원 해석에서는 많은 요소 수를 요구하기 때문에 해석시간이 길 뿐만 아니라 요소 수가 증가 함에 따라 해석시간은 급격히 증가하였다.

실험으로 측정된 압력과 온도는 해석결과 차이가 있었다. 압력의 경우 2차원 및 3차원 해석에서 모두 실험보다 높게 예측하였다. 3차원 해석의 압력이 실험으로 측정된 압력과 더 가까웠다. 온도의 경우 2차원 해석은 실험에서 측정된 온도와 큰 차이를 보였으나 3차원 해석은 실험과 큰 차이가 없었다.

본 연구를 통하여 볼 때 3차원 해석이 2차원 해석보다 실험과 더 많이 일치함을 알 수 있었다. 그러나 유동패턴은 2차원이나 3차원 해석에서 큰 차이를 보이지 않았다. 해석시간의 관점에서는 2차원 해석이 확연히 짧았다. 그러나 모델링 시간 등을 고려한다면 제품이 3차원으로 모델링 되어있다면 그 모

텔링을 그대로 이용하여 3차원 해석이 유리 할 것으로 판단 된다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. M.-Y. Lyu, "Polymer shaping processes and application of CAE", *Polym. Sci. Technol.*, **14**, 6 (2003).
2. Pandelidis and Q. Zou, "Optimization of injection molding design. Part I: Gate location optimization", *Polym. Eng. Sci.*, **30**, 873 (1990).
3. N. Dontula, P. C. Sukanek, H. Devanathan, and G. A. Campbell, "An experimental and theoretical investigation of transient melt temperature during injection molding", *Polym. Eng. Sci.*, **31**, 1674 (1991).
4. K. Amellal, C. Tzoganakis, A. Penlidis, and G. L. Rempel, "Injection Molding of Medical Plastics: A Review", *Adv. Polym. Tech.*, **13**, 315 (1994).
5. G. Bateh, "Extension of 2 1/2 D Control Volume Methods for Transverse Flow at Sprues, Gates and Junctions", *Intern. Polym. Process.*, **12**, 257 (1997).
6. S. L. Wen, C. K. Jen, and K. T. Nguyen, "Advances in on-line monitoring of the injection molding process using ultrasonic techniques", *Intern. Polym. Process.*, **14**, 175 (1999).
7. J. L. Berger and C. G. Gogos, "A numerical simulation of the cavity filling process with PVC in injection molding", *Polym. Eng. Sci.*, **13**, 102 (1973).
8. H. H. Chiang, C. A. Hieber, and K. K. Wang, "A unified simulation of the filling and postfilling stages in injection molding. Part I: Formulation", *Polym. Eng. Sci.*, **31**, 116 (1991).
9. H. H. Chiang, C. A. Hieber, and K. K. Wang, "A unified simulation of the filling and postfilling stages in injection molding. Part I: Formulation", *Polym. Eng. Sci.*, **31**, 125 (1991).
10. G. Titomanlio and V. Speranza, V. Brucato, "On the simulation of thermoplastic injection moulding process .2. Relevance of interaction between flow and crystallization", *Intern. Polym. Process.*, **12**, 45 (1997).
11. M. Buchmann, R. Theriault, and T. A. Osswald, "Polymer flow length simulation during injection mold filling", *Polym. Eng. Sci.*, **37**, 667 (1997).
12. R. E. Hayes, H. H. Dannelongue, and P. A. Tanguy, "Numerical simulation of mold filling in reaction injection molding", *Polym. Eng. Sci.*, **31**, 842 (1991).
13. Hae-Yeon Kim and Min-Young Lyu, "Introduction to Polymer Shaping Processes and Their Principles", *Polym. Sci. Technol.*, **20**, 157 (2009).
14. Rong Zheng, Roger I. Tanner, and Xi-Jun Fan "Injection Molding: Integration of Theory and Modeling Methods", pp. 35-44, NY, Springer (2011).