

사출금형의 열접촉 저항을 고려한 성형과정의 열-유동 연계해석[§]

손동휘* · 김경민* · 박 근**†

* 서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원, ** 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부

Thermal-Fluid Coupled Analysis for Injection Molding Process by Considering Thermal Contact Resistance

Dong Hwi Sohn*, Kyung Min Kim* and Keun Park**†

* Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul Nat'l Univ. Sci. Tech.

** School of Mechanical and Automation Engineering, Seoul Nat'l Univ. Sci. Tech.

(Received June 21, 2011; Revised August 8, 2011; Accepted August 16, 2011)

Key Words : Injection Molding(사출성형), Numerical Analysis(수치해석), Thermal Contact Resistance(열접촉저항), Thermal-Fluid Coupled Analysis(열-유동 연계해석)

초록: 사출금형은 일반적으로 다수개의 부품을 조립하여 제작되며, 특히 성형부(Core/Cavity)가 금형 형판 내부에 조립되는 구조를 갖는다. 이러한 구조로 인해 금형 조립부 경계면에서는 열접촉 저항이 발생하여 금형 내부의 열전달 특성에 영향을 미치게 된다. 최근 금형의 열접촉 저항이 성형부의 온도분포에 미치는 영향을 수치적으로 예측하기 위한 선행연구가 수행되었으며, 본 연구에서는 이에 기반하여 열-유동 연계해석을 적용함으로써 금형 내부의 열접촉 저항이 사출성형시 유동특성에 미치는 영향을 분석하였다. 상기 해석결과와 실험결과와의 비교분석을 통해 금형의 열접촉 저항을 고려한 열-유동 연계해석이 기존의 해석방법과 비교할 때 사출성형 유동특성을 보다 향상된 신뢰성으로 예측할 수 있음을 확인하였다.

Abstract: Injection molds are generally fabricated by assembling a number of plates in which the core and cavity components are assembled. This assembled structure has a number of contact interfaces where the heat transfer characteristics are affected by thermal contact resistance. In previous studies, numerical approaches were investigated to predict the effect of thermal contact resistance on the temperature distribution of injection molds. In this study, thermal-fluid coupled numerical analyses are performed to take into account the thermal contact effect on the numerical evaluation of the mold filling characteristics. Comparisons with experimental results show that the proposed coupled analysis provides more reliable results than the conventional analyses in predicting the mold filling characteristics by taking into account the effect of thermal contact resistance inside the injection mold assembly.

1. 서 론

사출성형은 고분자 소재를 고온에서 가소화시켜 금형 내부에 고속, 고압으로 분사하여 캐비티 내부를 채워 제품을 성형하는 공정이다. 사출성형 제품의 품질 향상을 위해서는 유동안내부, 냉각부 등의 금형설계 변수와 사출압력 및 속도, 사출온

도 및 금형온도, 보압압력 및 속도 등의 성형공정 변수들에 대한 고찰이 필요하다.⁽¹⁾ 상기 공정변수 중 금형온도는 고분자 수지의 유동특성 및 충전완료 후 금형 내부의 열전달 특성에 영향을 미치는 중요한 변수로서 제품의 유동성, 기계적 특성 등에 영향을 미치고 있다.⁽²⁾

금형온도는 성형시에는 고분자 수지의 유동성 향상을 위하여 비교적 높은 온도로 유지시켜야 하는 반면, 성형 종료후 제품 취출을 위하여 금형 냉각을 통해 성형부의 온도를 낮춰야 하는 이중적인 특성을 지니고 있다. 상기 이유로 인해 일반적으로 고분자 수지별로 수지의 성형성과 금형의 냉

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계 학술대회(2011.6.30-7.1, 라마다프라자 제주호텔)발표논문임

† Corresponding Author, kpark@seoultech.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

각특성을 종합적으로 고려한 적정 금형온도가 제시되어 있으며, 이를 위한 일반적으로 냉각수로 통칭되는 온도조절용 유체(냉수, 온수, 오일 등)를 냉각회로(Cooling circuit)를 통해 금형 내부에 순환시키는 방법을 사용하고 있다.

금형의 냉각회로의 설계시 냉각속도의 향상을 통한 생산성 향상 및 금형 표면온도의 균일화를 통한 성형품의 품질향상 등의 2 가지 관점에서 설계가 수행되며, 이를 위해 수치해석을 사용한 금형의 온도분포 예측기술이 적용되고 있다. 금형의 냉각과정은 고온의 수지가 충전되는 캐비티부와 냉각회로간의 열교환(Heat exchange) 과정으로 볼 수 있는데, 이를 수치적으로 묘사하기 위해 캐비티부와 냉각회로만을 해석 대상으로 선정한 경계요소법(Boundary Element Method; BEM)이 일반적으로 사용되고 있다.⁽³⁾ 최근에는 금형 내부의 온도분포를 예측을 목적으로 유한요소법(Finite Element Method; FEM)을 적용하여 냉각회로를 포함한 금형 전체 영역에 대해 과도열전달 해석을 수행한 연구 결과가 발표되었으며,^(4,5) Moldex3D 등의 상용 사출성형 CAE 해석 S/W 에도 적용되고 있다.⁽⁶⁾

상기 금형 내부의 열전달 해석은 대부분 일체화된 금형을 대상으로 유한요소를 분할하여 해석을 수행하고 있다. 그러나 사출금형은 일반적으로 다수개의 부품으로 구성되어 있으며, 대부분의 경우 금형 형판에 성형부 형상을 포함한 코어/캐비티(Core/Cavity) 형상을 가공하여 조립한다.⁽⁷⁾ 냉각회로는 일반적으로 금형 형판상에 가공되며 따라서 형판과 코어부와의 열전달 발생시 조립경계면을 거치게 된다. 이때 경계면에서의 열접촉 저항(Thermal contact resistance)에 의해 온도강하가 발생되어 온도강하가 발생하는 현상이 본 연구자의 선행연구로 발표된 바 있으며,⁽⁸⁾ 본 연구에서는 열접촉이 사출성형시 유동특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 유한요소법을 사용한 사출성형 과정의 열-유동 연계해석을 수행하고자 한다.

2. 열접촉저항을 고려한 금형온도 고찰

2.1 금형 조립부 접촉면에서의 열접촉저항

사출금형은 일반적으로 금형 형판부에 사출성형물 형상이 가공된 금형 코어부가 삽입되는 형태로 제작된다. 그 이외에도 고정판, 가이드 핀, 이젝트 핀 등 다양한 부품이 결합되는데 금형의 원활한 조립을 위하여 수~수십 μm 의 공차를 부여해 준다.⁽⁷⁾ 상기 가공 공차로 인하여 금형 코어부와 형

판부 간의 접촉면에 열접촉 저항이 발생하게 된다.

Fig. 1에 접촉면에서 표면거칠기에 의한 열접촉 저항의 발생 메커니즘을 개념적으로 도시하였다. 그림과 같이 금형 형판과 코어부에서 접촉면 표면의 표면거칠기에 의해 부분적인 접촉이 발생하며, 접촉되지 않는 부분에 공기 유체층이 존재하게 된다. 공기의 열전도계수는 금속재료로 이루어진 금형의 열전달 계수보다 현저히 낮기 때문에 열전달 측면에서 저항 역할을 하게 된다.⁽⁹⁾ 결과적으로 접촉면 위치에서 열손실에 의한 급격한 온도 하강이 발생하게 된다.

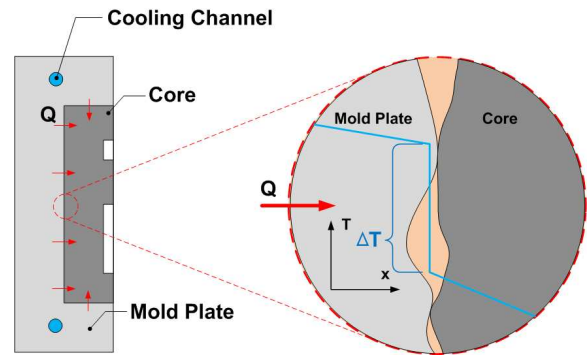


Fig. 1 Schematic description of thermal contact resistance between contact surfaces

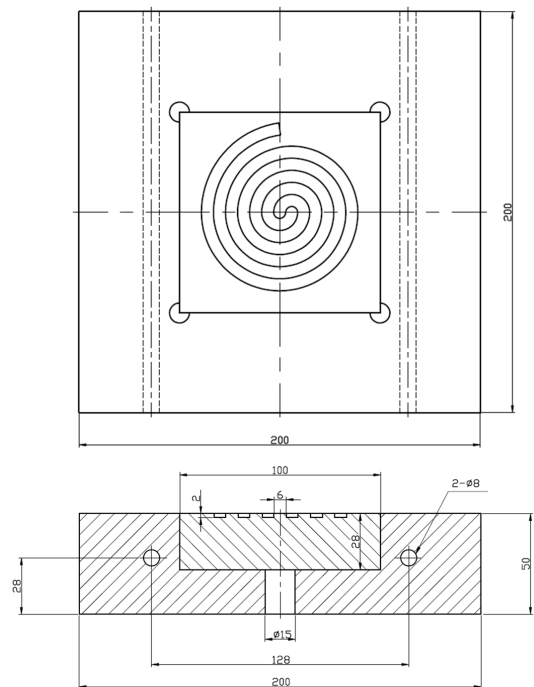


Fig. 2 Configuration of the test mold with spiral model

2.2 금형온도분포 측정실험 개요 및 결과

본 연구에서는 사각단면(6 x 2 mm)의 나선형 모델 형상이 존재하는 코어와 금형 형판과의 조립부 접촉면에서 열접촉 저항에 의한 온도분포 특성을 고찰하기 위해 Fig. 2 와 같은 사각 형판에 코어가 삽입되는 구조의 시험용 금형을 제작하였다. 시험용 금형에는 온수를 주입할 수 있는 냉각회로가 측면부에 하나씩 직선으로 구성되어 있다.

상기 금형의 측면부 냉각회로에 온수를 주입한 경우 금형표면의 온도분포를 측정하기 위한 실험을 실시하였다. 온수조절기는 (주)현대 FA 의 HF-60 모델(출력: 6.75kw)을 사용하였으며, 실험은 상온에서 진행되었고 온도 80℃의 온수를 300 초간 주입하였다. Fig. 3 에 가열 300 초 경과시 측정된 금형표면 온도분포를 도시하였다. 대칭성을 고려하여 1/4 영역을 대상으로 하였으며, 측정결과 형판부는 주입되는 온수로 인하여 온수주변에서 높은 온도를 보이거나 코어부와의 경계면에서 급격한 온도 하강을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

2.3 열접촉저항을 고려한 열전달해석 및 고찰

본 연구에서는 공기층으로 구성된 열접촉 요소를 적용한 3 차원 유한요소모델을 생성하여 열전달 해석을 수행하였다. 해석은 ANSYS™ 를 사용하여 수행하였으며, 대칭성을 고려하여 전체 금형의 1/4 형상에 대해 수행하였다. 해석에 사용된 금형재료는 형판의 경우 S45C, 코어부의 경우 NAK80 을 사용하였으며, Table 1 에 주요 물성을 요약하였다. 조립부 경계면에서 열접촉 요소층의 두께는 본 연구자의 선행 연구결과⁽⁸⁾를 토대로 50 μm 로 설정하였다. 또한 열접촉저항을 고려하지 않은 경우와의 결과비교를 위해 일체형 금형에 대한 해석을 병행하였다. 금형의 초기온도는 실제 실험과 동일한 20℃로 설정하였으며, 냉각회로에 온수를 주입한 경우에 대해 가열시간 300 초 동안 열전달 해석을 수행하였다.

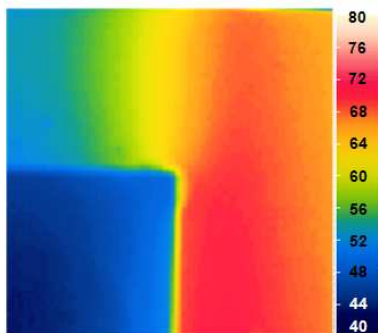


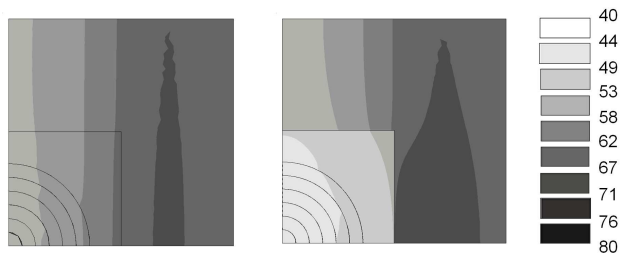
Fig. 3 Measured temperature distribution (unit: °C)

Fig. 4 에 온수주입후 300 초 경과시 열접촉저항 고려 여부에 따른 금형의 온도분포를 도시하였다. 두 경우 모두 온수주입구가 위치한 지점에서 금형 온도가 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 열접촉 저항을 고려하지 않는 경우(Fig. 4 (a) 참조) 에는 형판부와 코어부간 완만한 온도변화를 보이거나 열접촉 저항을 고려한 경우(Fig. 4 (b) 참조) 조립부 경계면에서 급격한 온도변화를 확인할 수 있다.

Fig. 5 에 금형표면의 온도분포를 그래프로 도시하였다. 열접촉저항이 고려되지 않은 경우 전반적으로 부드러운 온도변화를 보여 실험결과와 차이가 발생함을 알 수 있다. 반면 열접촉저항을 고려한 경우 코어부와 형판부사이 경계면(50 mm 부근)에서 급격한 온도변화를 보여 실험결과와 유사함을 확인할 수 있다. 이때 조립부 경계면에서의 온도강하(Temperature drop, ΔT)를 정량적으로 비교하면 열접촉저항이 고려된 해석의 경우 17.6℃, 실험의 경우 16.9℃로 0.7℃의 근소한 차이를 보였다.

Table 1 Thermal prosperities for the FE analysis

Material	S45C	NAK80	Air
Density (kg/m ³)	7850	7870	1.161
Specific heat (J/kg-K)	486	480	1007
Thermal conductivity (W/m-k)	49.8	41.33	0.0263



(a) w/o contact resistance (b) With contact resistance
Fig. 4 Mold temperature distributions according to the thermal contact elements (unit: °C)

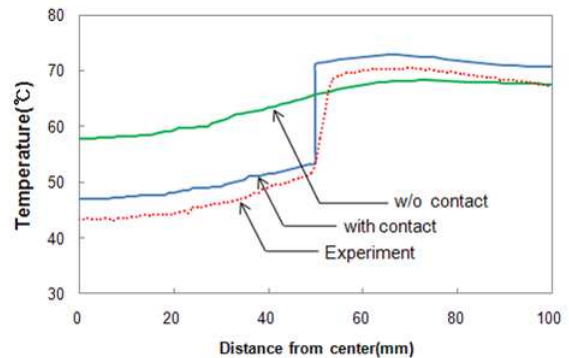


Fig. 5 Temperature profiles on the mold surface

3. 열접촉저항을 고려한 열-유동 연계해석

3.1 다중사이클 효과를 고려한 사출성형해석

사출성형시 충전단계에서는 고온의 수지로 인한 열전달이 발생하여 금형의 온도가 상승하고 냉각단계에서는 냉각수에 의해 금형의 온도가 하강하게 되는데 이런 금형온도의 주기적인 거동으로 인해 금형 온도가 과도적인 변화를 보인다. 따라서 사출성형 해석시는 고온의 수지와 금형, 냉각수간의 열전달 효과를 고려하여 금형의 온도분포를 계산하고, 이를 반영하여 고분자수지의 유동해석을 수행해주어야 한다.⁽¹⁰⁾

사출성형 해석시 금형온도는 통상적으로 냉각회로에 주입되는 온수의 온도로 가정하여 금형 전체에 일정한 온도를 적용하고 단일 사이클 해석만을 수행한다.⁽⁶⁾ 그러나 실제로 사출성형시 고온의 수지가 반복적으로 주입될수록 금형의 온도가 서서히 상승하게 되어 성형결과에 차이가 발생하는데, 본 연구에서는 이러한 효과를 고려하기 위한 다중사이클(Multy-cycle) 공정에 대한 열-유동 연계 사출성형 해석을 수행하였다.⁽¹¹⁾

Fig. 6 에 온도 70°C의 온수 주입시 반복되는 사이클에 따른 코어부 금형표면 온도변화 그래프를 도시하였다. 초기에는 사이클이 반복될수록 고온의 수지로 인하여 금형온도의 주기적 거동이 점차적으로 상승하는 과도적인 형태를 보이게 된다. 반복회수 10 회 이후에는 금형온도의 상승폭이 점차적으로 감소하게 되는데, 이때 충전시점에서의 금형온도는 62.9°C로 주입되는 온수의 온도보다 7.1°C정도 낮은 것으로 확인되었다. 따라서 열접촉 저항의 영향을 고려하기 위해서는 다중사이클에 의한 금형온도의 변화가 영향을 미칠 것으로 판단되며, 본 연구에서는 다중사이클 효과를 고려한 사출성형해석 결과를 비교해보도록 하겠다.

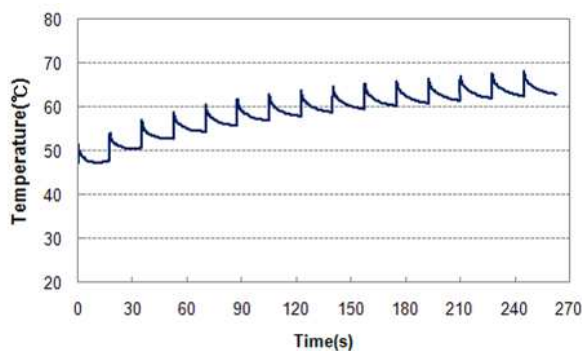


Fig. 6 Temperature variation profiles for the multi-cycle injection molding

3.2 열접촉 저항을 고려한 사출성형해석

본 연구에서는 나선형 형상의 사출성형 해석모델에 공기 물성의 열접촉 요소층을 생성하여 성형 해석을 수행하여 유동길이의 변화를 살펴보았다. 해석은 Moldex3D[®]10.0 을 사용하였으며 다중사이클 효과 및 열접촉 요소층 적용 유무에 따라 해석을 수행하였다. 사출성형 해석모델에서 코어부와 형판부의 조립부에 해당되는 위치에 열접촉 요소층을 생성하였고, 이때 요소층의 두께는 50 μm 로 설정하였다.⁽⁸⁾ 수지는 SK Chemical 社의 H360F(PP) 를 사용하였으며, Table 2 에 사출성형조건을 요약하였다.

해석은 다중사이클 효과와 열접촉저항 고려여부에 따라 Table 3 과 같이 3 개의 Case 로 구분하여 수행하였다. 다중사이클 해석이 적용된 Case 2, 3 의 경우에 대해 15 회의 반복회수를 적용하여 금형의 열전달 해석을 수행하였고, 이때 금형의 온도분포를 각각 Fig. 7(a)와 (b)에 도시하였다. 열접촉 요소층이 존재하지 않는 경우(Case 2) 최종 사이클 진행후 사출성형물이 위치한 코어부 온도분포가 62 ~ 64°C인 반면 열접촉 요소층이 존재하는 경우(Case 3)의 코어부 온도분포는 56 ~ 58°C로 나타나 Case 2 에 비해 온도가 6°C 정도 낮게 나타난 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 2.3 절에서 계산된 열접촉저항에 의한 온도강하가 17.6°C인 점과 많은 차이를 보이는데, 이는 사출성형시 고온의 수지의 주입으로 인해 코어부의 온도가 상승하였기 때문으로 분석된다.

Table 2 Injection molding conditions for a spiral model

Melt temperature (°C)	190
Water temperature (°C)	70
Injection pressure (MPa)	70
Injection time (s)	1.5
Packing time (s)	1.0
Cooling time (s)	10

Table 3 Comparison of analysis conditions and results for three analysis cases

Case	Cyclic effect	Contact resistance	Flow length (mm)
1	No	No	351.8
2	Yes	No	345.5
3	Yes	Yes	341.1

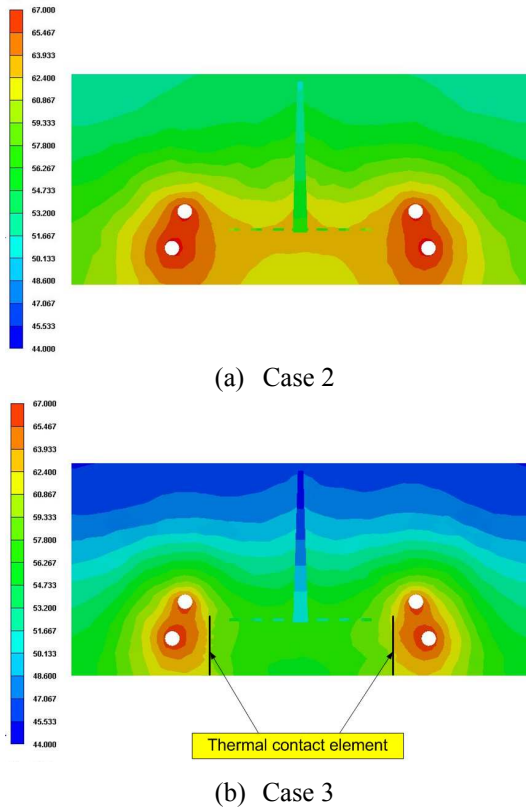


Fig. 7 Mold temperature distributions of the injection molding analysis model (unit: °C)

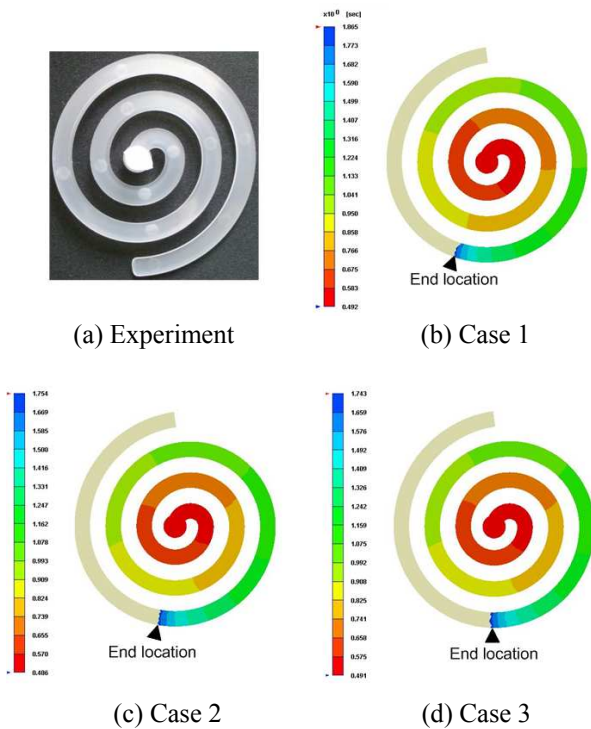


Fig. 8 Experiment results and filling analysis results according to analysis type (unit: seconds)

Table 4 Comparison of flow length of the spiral model

Water Temp. (°C)	Flow length (mm)			
	Experiment	Case 1	Case 2	Case 3
50	332.2	332.9	336.1	329.8
70	338.9	351.8	345.5	341.1
90	349.6	371.9	353.6	346.8

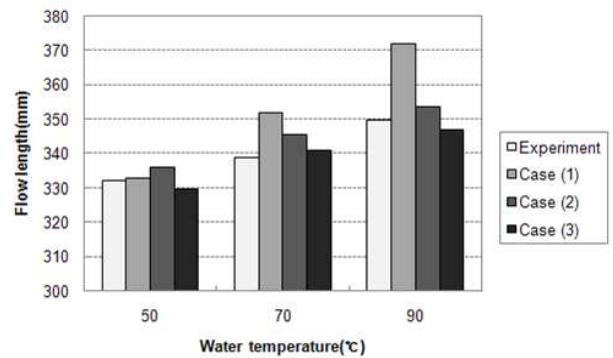


Fig. 9 Comparison of flow lengths of the spiral model

Fig. 8 에 실제 사출성형물 및 해석조건에 따른 사출성형해석 결과를 도시하였다. Fig. 8 (a)는 실제 사출성형물의 사진이며, Fig. 8 (b) ~ (d)에 Case 2 ~ 4 의 해석결과를 도시하였다. 또한 각각의 경우에 대한 유동길이를 Table 3 에 비교하였다. 이때 실험 결과는 10 개의 샘플에 대해 측정하였으며, 평균 유동길이가 338.9 mm 로 측정되었다. 해석 결과를 보면 Case 3 의 유동길이가 341.1 mm 로 예측되어 실험과 가장 유사한 결과를 보임을 알 수 있는데, 이는 다중사이클과 열접촉저항이 모두 고려되어 금형 캐비티의 온도강하가 적절히 반영되었기 때문으로 판단된다.

3.3 금형 온도에 따른 유동특성 고찰

앞절에서의 결과를 바탕으로 냉각회로에 주입되는 온수의 온도를 변화시키며 전술한 3 가지 방법으로 사출성형 해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다. Table 2 의 사출성형조건에서 온수의 온도를 50, 70, 90°C로 변경하면서 실험과 해석을 진행하였다. 각각의 경우에 대한 실험결과와 해석결과를 Fig. 9 에 그래프로 도시하였으며, Table 4 에 정량적으로 비교하였다.

온수 온도 50°C의 경우 실제 사출성형물 평균 유동길이는 332.2 mm 로 측정되었고 해석결과 중에서 Case 1 의 유동길이가 332.9 mm 로 실험결과에 비해서 0.7 mm 차이를 보였는데, 이는 Case 2 와 3 의 유동길이가 각각 336.1 mm, 329.8 mm 인

것을 감안하면 실험결과와의 오차가 상대적으로 작게 나타남을 확인할 수 있다.

반면에 온수온도가 70℃, 90℃인 경우 Case 1의 유동길이가 상대적으로 증가하여 실험결과와의 차이가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 온수온도 90℃의 경우 실험결과(349.6 mm)와 비교하면 Case 1의 유동길이는 371.9 mm로 22.3 mm의 유동길이 차이를 보인다. 다중 사출사이클 해석을 수행한 경우(Case 2)는 유동길이가 353.6 mm, 열접촉 요소층이 존재하는 경우(Case 3)는 346.8 mm로 측정되어 실제 실험과의 차이가 각각 4.0 mm, 2.8 mm로 감소함을 확인할 수 있었다.

상기 결과의 분석을 위해 각각의 경우에 대해 금형표면의 온도를 측정하였다. 금형온도는 온수를 주입한 상태에서 사출단계 직전에 측정하였으며, 금형 중심에서 좌측으로 21 mm 떨어진 지점에서 측정하였다. Fig. 10에 온수온도에 따른 금형표면의 온도를 도시하였다. 온수 온도가 50℃일 경우 측정된 금형 표면 온도가 48℃로 나타난 반면 Case 2의 경우 49~51℃의 분포를 보여 실제 금형온도보다 3~4℃ 정도 높기 때문에 실험치 보다 유동길이가 더 길게 나왔고, Case 3의 경우 실제 금형온도보다 4~5℃ 정도 낮기 때문에 유동길이가 더 짧게 예측된 것으로 확인되었다. 따라서 금형온도를 50℃로 적용한 Case 1의 경우가 Case 2와 3에 비해 상대적으로 실제 온도와 가장 근접한 관계로 유동길이가 실험결과와 가장 비슷하게 나타난 것으로 판단된다.

반면 온수온도가 증가할수록(70, 90℃) 금형표면의 온도가 설정된 온수온도보다 낮게 나타나며 그 감소폭 역시 커짐을 확인할 수 있었다. 즉 온수온도가 70℃인 경우 금형표면의 온도가 57℃로 13℃의 편차를 보이며, 온수온도가 90℃인 경우 금형표면의 온도가 67℃로 23℃의 편차를 보였다. 따라서 해석시 금형온도를 온수온도와 동일하게 설정한 Case 1의 경우 실제보다 높은 금형온도로 인

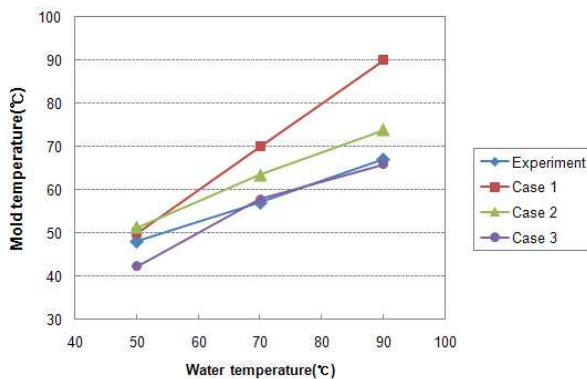


Fig. 10 Comparison of the applied mold temperatures

해 유동길이가 과도하게 예측된 것으로 판단된다. 반면에 다중사이클 효과와 열접촉 요소층이 고려된 해석(Case 3)의 경우 예측된 금형온도와 실제 온도와의 차이가 1.1℃로 감소되어 결과적으로 해석유동길이가 실험결과와 가장 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 다중사이클 해석을 기반으로 열접촉저항을 고려하여 열-유동 연계해석을 진행한 경우 전반적으로 실험결과와 가장 유사한 유동길이를 예측할 수 있어 높은 신뢰성을 보임을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 사출금형 내부에 열접촉 저항을 고려한 다중사이클 열-유동 연계해석 기법에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 형판에 코어가 조립된 형태의 금형에 온수가 주입될 경우 열접촉저항에 의한 온도강하가 존재함을 실험을 통해 확인하였고(16.9℃), 열접촉저항을 고려한 열전달해석을 통해 유사한 온도분포를 얻을 수 있음을 확인하였다(온도강하 17.6℃).

(2) 열접촉저항 효과와 사출성형 다중사이클 효과를 고려한 금형온도 해석을 수행하였고, 이를 통해 고온의 수지로 인한 금형온도 상승효과에 의해 열접촉 저항에 의한 코어/형판간의 온도차이가 6℃ 정도로 감소됨을 확인하였다.

(3) 제안된 열접촉저항을 고려한 다중사이클 성형해석 기법을 나선형 형태의 사출성형 문제에 적용한 결과 유동길이가 341.8 mm로 예측되어(오차 0.86%) 기존 해석기법의 결과(유동길이 351.8 mm, 오차 3.81%)에 비해 정확한 예측이 가능함을 확인할 수 있었다.

(4) 온수의 온도를 50, 70, 90℃로 변화시키며 해석결과와 실험결과를 비교하였고, 제안된 열접촉저항을 고려한 다중사이클 해석기법을 통해 금형온도 변화에 따른 유동특성을 효과적으로 예측할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Baek, S. B., Park, K., Youm, C. H. and Ra, S. W., 2010, "Study on Improvement of Dimensional Accuracy of a Precision Plastic Screw Under Various Injection-Molding Conditions," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 34, No. 10, pp. 1549~1554.
- (2) Park, K. and Kim, Y. S., 2009, "Effect of Mold

- Temperature on Mechanical Properties of an Injection-Molded Part with Microfeatures," *J. Polym. Engng.*, Vol. 29, No. 1-3, pp. 135~154.
- (3) Kwon, T. H., 1988, "Mold Cooling System Using Boundary Element Method," *Trans. ASME J. Engng. Indus.*, Vol. 110, No. 4, pp. 348~394.
- (4) Qiao, H., 2005, "Transient Mold Cooling Analysis Using BEM with the Time-Dependent Fundamental Solution," *Int. Comm. Heat Mass Transf.*, Vol. 32, No. 3-4, pp. 315~322.
- (5) Lin, Y. W., Li, H. M., Chen, S. C. and Shen, C. Y. 2005, "3D Numerical Simulation of Transient Temperature Field for Lens Mold Embedded with Heaters", *Int. Comm. Heat Mass Transf.*, Vol. 32, No. 9, pp. 1221~1230.
- (6) CoreTech System Co., 2008, *Moldex3D®: User's Manual*, Taiwan.
- (7) Menges, G. and Mohren, P., 1993, *How to make injection molds*, Hanser Publishers, New York.
- (8) Kim, K. M., Lee, K. Y. Sohn D. H. and Park, K., 2011, "Investigation into Heat Transfer Characteristics of an Injection Mold by Considering Thermal Contact Resistance," *Trans. Mater. Process.*, Vol. 20, No. 1, pp. 29~35.
- (9) Cooper, M. G., Mikic, B. B. and Yovanovich, M. M., 1969, "Thermal Contact Conductance," *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 12, No. 3, pp. 279~300.
- (10) Eom, H. J. and Park, K., 2010, "Integrated Numerical Analysis of Induction Heating Analysis of Induction Heating Aided Injection Molding Considering Interactive Temperature Boundary Conditions," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 34, No. 5, pp. 575~582.
- (11) Li, H. M., Chen, S. C., Shen, C. Y., Chau, S. W. and Lin, Y. W., 2009, "Numerical Simulations and Verifications of Cyclic and Transient Temperature Variations in Injection Molding Process," *Polym. Plast. Technol. Engng.*, Vol. 48, No. 1, pp. 1~9.