

사출금형의 열팽창을 고려한 변형 분석[§]

김준형^{*†} · 이대은^{*} · 장정희^{**} · 이민석^{*}

* 삼성전자 DMC 연구소, ** 삼성전자 무선사업부

Deformation Analysis Considering Thermal Expansion of Injection Mold

Jun Hyung Kim^{*†}, Dae-Eun Yi^{*}, Jeong Hui Jang^{**} and Min Seok Lee^{*}

* DMC R&D Center, Samsung Electronics Co., LTD.

** IT & Mobile Comm. Samsung Electronics Co., LTD.

(Received April 15, 2015 ; Revised June 6, 2015 ; Accepted July 1, 2015)

Key Words: Injection Mold(사출 금형), Simulation(해석), Thermal Expansion(열팽창), Flash(플래시), Injection Analysis(사출 해석), Structural Analysis(구조해석), Thermal Contact(열접촉), Assembly(어셈블리)

초록: 사출 금형 설계에서 금형 온도 분포와 변형은 사출품의 플래시나 표면 단차에 주요한 영향 인자이다. 금형 온도 분포와 성형면의 압력분포를 예측하기 위하여 먼저 금형을 포함한 사출해석을 수행하였다. 계산된 온도분포와 압력분포는 금형 구조해석의 입력조건으로 사용하였다. 해석의 정확성을 위하여 금형 전체 세트에 대한 구조해석 조건을 도출하였다. 도출된 해석 모델로 성형면의 단차 및 벌어진 크기에 대하여 금형 열팽창, 성형 중 온도변화의 영향을 분석하였다. 해석 결과를 바탕으로 성형면의 단차 감소 방안을 도출하였다.

Abstract: In the design of injection molds, the temperature distribution and deformation of the mold is one of the most important parameters that affect the flow characteristics, flash generation, and surface appearance, etc. Plastic injection analyses have been carried out to predict the temperature distribution of the mold and the pressure distribution on the cavity surface. As the input loads, we transfer the temperature and pressure results to the structural analysis. We compare the structural analysis results with the thermal expansion effect using the actual flash and step size of a smartphone cover part. To reduce the flash problem, we proposed a new mold design, and verified the results by performing simulations.

- 기호설명 -

L_f : 사출물에 발생하는 플래시(Flash) 길이
 H : 금형부품간 벌어진 간격
 P_0 : 플래시 발생위치에서의 수지의 압력
 T : 플래시 발생위치에서의 수지의 온도
 C : 수지의 비열
 η : 수지의 점성
 T_c : 수지의 고화온도
 λ : 금형재료의 열전도계수
 T_w : 금형 성형면의 온도

Re_D : 내경 D인 파이프의 레이놀즈(Reynolds) 수
 Pr : 프란틀(Prantl) 수
 D : 파이프의 내경
 k : 유체의 열전도계수
 Nu_D : 내경 D인 파이프의 누셀트(Nusselt) 수
 Nu_L : 수직면의 누셀트(Nusselt) 수
 L : 수직면의 높이
 Ra_L : 레일리(Rayleigh) 수
 ε : 금형표면의 방사율(emissivity)
 σ : 스테판 볼츠만(Stefan-Boltzmann) 상수
 T_s : 금형 외부표면온도
 T_{sur} : 대기온도

[§] 이 논문은 2015년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2015. 4. 15-18., 휘닉스아일랜드) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, riak@naver.com

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

플래시와 단차는 휴대폰과 같은 플라스틱 사출

성형의 주요한 문제이다. 플래시는 성형면을 이루는 금형 부품 사이가 가공 공차나 성형압력 등에 의해 벌어져서 발생한 틈새로 수지가 빠져 나오는 불량을 말한다. 단차는 성형면을 이루는 금형 부품 사이가 매끄럽게 연결되지 못하여 사출품의 표면에 원하지 않는 계단형상이 나타나는 것을 말한다. 이 문제를 해결하기 위해서는 현장에서 사출 압력을 조절하거나 금형 구조를 개선하는 활동을 하지만 시행착오를 통해 해결하는 데는 시간적이나 비용적으로 어려움이 존재한다.

Hiroyuki 등⁽¹⁾은 사출물에 발생하는 플래시 길이 (L_f)를 계산하는 수식 (1)을 도출하였다. (Fig.1)

$$L_f \propto H^2 \left[\frac{P_0}{\eta(T)} \frac{C(T-T_C)}{\lambda(T_C-T_W)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

식 (1)에서 플래시 길이에 가장 중요한 인자가 부품간 간격임을 알 수 있다. 부품간 간격은 보통 가스빼기를 위해 의도적으로 만든 벤트나 가공 및 조립 공차에 의해서 발생하지만 이 경우 20 μm 내 정도로 관리하여 플래시를 방지한다. 그러나 금형이 사출압력 및 열팽창에 의해 변형되어 벌어지는 경우 수십 μm 를 넘는 크기로 나타날 수 있기 때문에 문제가 된다.

최재혁⁽²⁾은 플래시 발생을 예측하기 위해 분할면 사이의 압력을 측정하고 2 차원으로 해석하여 개념을 검증하였으나 정량적으로 판단하지는 못하였다. 금형의 변형을 예측하기 위해서 사출해석 소프트웨어 MoldflowTM의 Core-Shift 기능을 이용한 사례도 있었다.⁽³⁾ 그러나 이 방법은 형체력이나 금형원판의 변형을 계산하기는 불가능한 한계가 있다.

금형 열팽창을 계산하기 위해서는 먼저 열전달 해석이 필요하다. 김경민⁽⁴⁾은 열접촉 저항을 고려한 사출금형의 온도 분포를 ANSYSTM로 해석하였으며 접촉면의 전도 요소층 두께를 50 μm 로 추정하였다.

본 연구에서는 금형 변형을 정확히 예측하기 위하여 전체 금형에서 구조 및 열전달 해석에 필요한 부품을 선정하여 금형 세트 구조해석을 수행하였다.

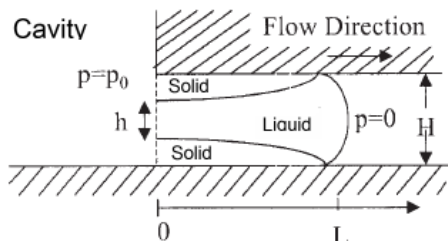


Fig. 1 A schematic flow model in the core gap during flash generation⁽¹⁾

구성된 해석 모델을 이용하여 온도를 무시하고 일정한 사출압만 고려한 구조해석, 열전달 해석 후 온도 분포를 입력한 구조해석, 사출해석 후 온도 및 사출 압력 분포를 입력한 구조해석 결과를 비교하였다.

2. 사출 금형 및 실험

본 연구에서는 600×500×540 mm 크기의 핫러너(hot-runner) 휴대폰 부품 금형을 사용하였다. 4면이 슬라이드 부품으로 구성되어 있고 이 슬라이드 사이가 벌어지거나 단차를 형성하여 문제가 되는 금형이다.

구조해석에 사용된 부품들은 Fig. 2 와 같다. 열전달 오차를 줄이기 위해 볼트와 같은 작은 부품은 제외하고 큰 부피를 차지하는 부품들을 모두 포함시켰다. 구체적으로는 Fig. 2 에서 변형에 중요한 부품으로 받침봉(Support pillar), 좌우고정판(Parting Fixing Block), 사출기 고정판(Injection Machine Plate)을 포함시켰다. Fig. 3 에서는 성형물체의 표면을 구성하는 코어(Core), 캐비티

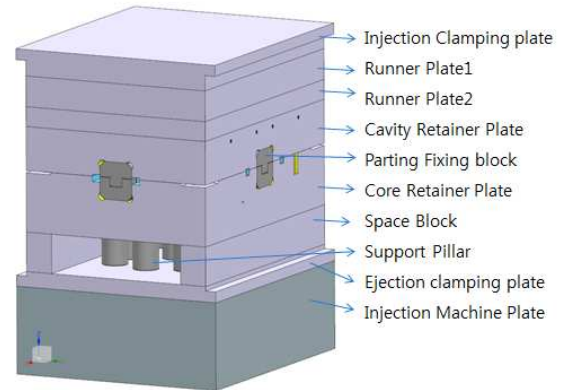


Fig. 2 Mold parts used in the simulation

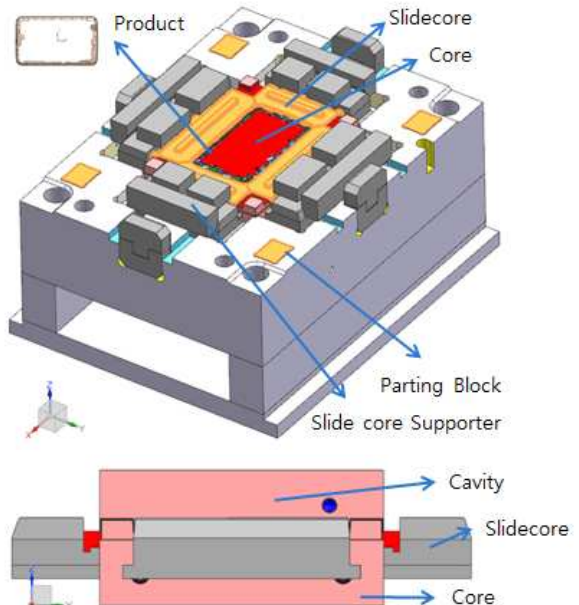


Fig. 3 Injection product and core parts used in the simulation



Fig. 4 Surface measuring machine and definition of the flash and step

(Cavity), 슬라이드(Slide), 슬라이드 받침판을 포함시켰다. 고정판(Cavity Retainer Plate)과 이동판(Core Retainer Plate) 사이에는 0.5mm 의 간격이 있으며 분할조정판(Parting block)으로 두 판사이의 접촉을 조절한다.

금형 온도는 접촉식 온도측정기 Anritsu HL-300 (Type K)로 금형 옆면과 코어, 캐비티 파팅면의 중심 위치에서 측정하였다. 사출된 제품의 플래시와 단차는 접촉식 3 차원 표면 측정기 ACCRETECH 1600DH 를 사용하여 측정하였다. (Fig.4)

3. 금형 열전달 해석과 사출 해석

휴대폰 금형에서는 PC 수지를 사용하기 때문에 사출을 시작하기 전에 60~100 도 정도의 냉각수를 1 시간 이상 통과시켜서 금형 온도를 높이고 나서 사출을 하게 된다. 이 정상상태 금형온도는 금형 외부면의 대류와 냉각채널에서의 대류 조건에 따라 결정된다.

냉각 채널에서는 보통 Reynold 수 20000 이상의 속도로 냉각수를 동작시켜서 완전난류상태로 만드는데, Prantl 수 0.7 에서 120 사이 일 때 원형 파이프 내에서의 대류계수는 Dittus-Boelter 의 실험식 (2)로 계산할 수 있다.⁽⁵⁾

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = 0.023Re_D^{0.8}Pr^{0.4} \quad (2)$$

금형 외벽에서의 공기와의 대류는 지면에 수직 한 면의 경우 Churchill 과 Chu⁽⁶⁾의 식 (3)에서 계산하면 5.36 W/m²K 정도가 된다. 또한 복사에 의한 등가 대류계수는 식 (4)로부터 약 1.58 W/m²K 정도이므로 금형 주변 공기의 흐름을 고려하여 전체적으로 10 W/m²K 의 값을 사용하였다.⁽⁷⁾

$$Nu_L = \frac{hL}{K} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3)$$

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2) \quad (4)$$

Fig. 5 와 Table 1 은 열전달 해석에 사용된 경계 조건을 나타내고 있다. 부품과 부품간의 접촉 저항 계수 H_contact 값은 접촉압력, 재질, 표면상태

Table 1 Conditions for heat transfer analysis

Duct	Temp. [C]	Radius [mm]	Q [L/min]	H [W/m ² C]
Cavity Plate	100	4	2.35	6351
Cavity	100	5	2.66	4695
Slide Core	90	2.5	1.47	9650
Core	90	4	2.35	6020

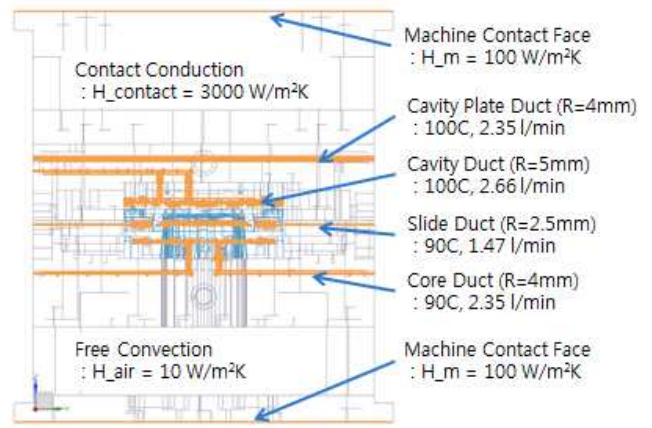


Fig. 5 Boundary conditions for heat transfer analysis

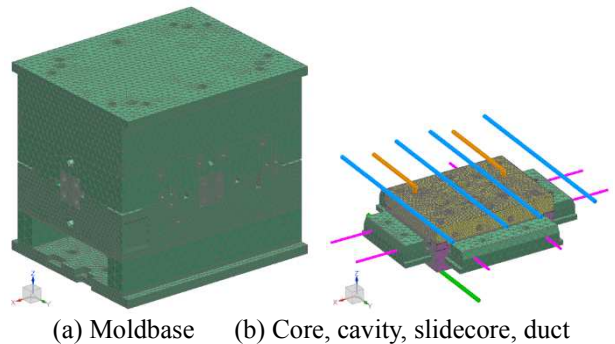


Fig. 6 Finite element model for heat transfer analysis

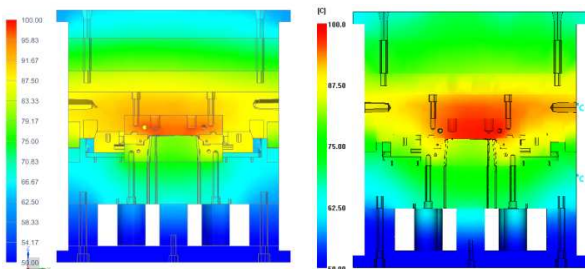
에 따라 정해지는데⁽⁸⁾ 본 연구에서는 두 접촉면 사이의 온도차이 측정 결과와 비교하여 3000 W/m²K 를 적용하였다.

Fig. 6 은 NX NASTRANTM CTETRA4 요소와 Beam 요소를 사용한 열전달 해석용 유한요소모델 (815659 요소 197177 절점) 이다. 냉각채널의 입출구 온도차이를 반영하기 위해 냉각채널을 Beam 요소로 모델링하고 1-D duct flow network 기술을 적용하였다.

Fig. 7은 NX NASTRANTM정상상태 온도해석 결과를 MoldflowTM 사출해석에서 금형온도를 계산한

Table 2 Conditions for injection analysis

Material	Infino EH-1050	
Manufacturer	Cheil Industries Inc.	
Melt temperature	320℃	
Injection time	0.73s	
Packing time and pressure	Duration	Pressure
	1s	140MPa
	0.6s	120MPa
Cooling time	8s	
Mold open time	3.68s	



(a) NX thermal analysis (b) Moldflow analysis

Fig. 7 Steady-state temperature distribution of the mold

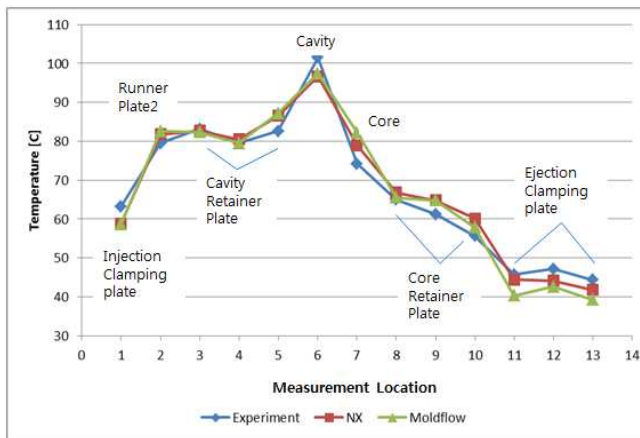


Fig. 8 Steady-state temperature results compared with experimental results

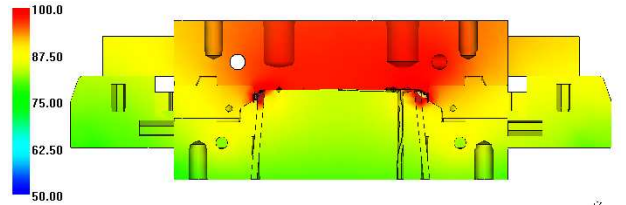
결과와 비교한 것이다. 사출해석은 Cool + flow + pack 으로 하였고, 금형온도 해석은 “Transient within cycle analysis” 방식을 사용하였다.

사출해석에 사용된 사출조건은 Table 2 와 같다.

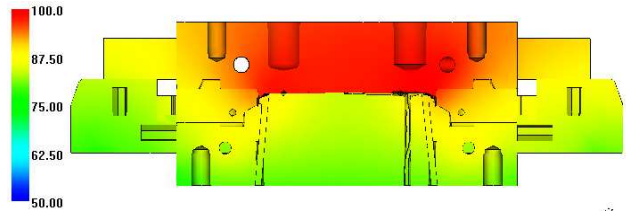
Moldflow 결과가 사출물에 의한 금형온도 상승을 고려하여 성형면 부근이 2~5 도 높게 나타나고 있다.

Fig. 8 은 실제 금형의 여러 위치에서 측정한 온도와 해석결과를 비교한 것으로 온도차이가 5 도 이내로 나타나고 있다.

Fig. 9 는 사출해석에서 계산된 성형 중 성형면 주위의 온도분포의 변화이고 Fig.10 은 시간에 따



(a) At maximum clamping force (t = 1.226)



(b) After cooling (t = 10.33)

Fig. 9 Distribution of mold temperature

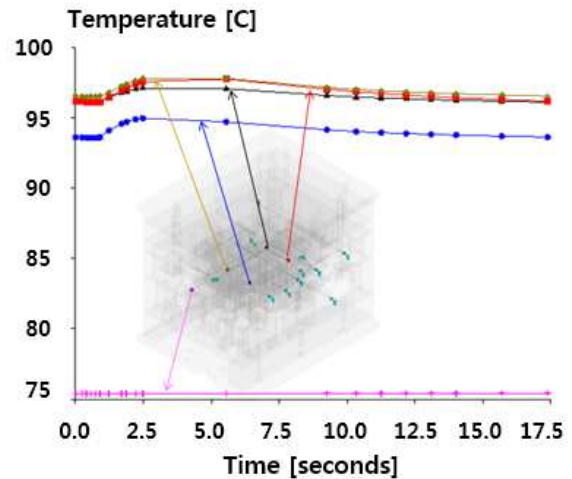


Fig. 10 Change of mold temperature during injection

른 금형 온도 변화이다. 성형면에서 가까운 금형부위에 경우 온도가 고온의 수지에 의해 순간적으로 2~3도 높아지고 있고 이외의 부분은 변화가 없음을 알 수 있다.

Fig. 11은 성형면에서의 수지에 의한 압력분포와 이로 인해 필요한 형체력을 나타낸 그림이다. 형체력이 최대일 때 성형면의 압력은 평균 117MPa이며 최소 80MPa에서 최대 133MPa까지 나타나고 있다.

Fig. 7 의 금형의 온도분포와 Fig.11 의 성형면의 압력분포는 금형 구조해석에 입력으로 사용하였다. 이때 열전달 해석 모델과 사출해석 모델의 유한요소모델이 구조해석 모델과 상이하기 때문에 해석결과를 구조해석 유한요소와 맞도록 온도는 Delaunay, 압력은 근접법(nearest neighbor method)을 사용하여 데이터 변환(mapping)하여 입력하였다.

4. 금형 구조해석

금형 구조해석은 상용 해석 소프트웨어 NX NASTRAN™을 사용하였다. Xiping Li[9]의 경우 단순화를 위해 금형공간을 구성하는 내부 부품만 사용하여 구조 및 피로해석을 하였으나 이 경우 받침봉이나 분할면을 지지하는 분할조정판의 효과가 무시되어 변형의 크기는 실제와 다르게 계산된다.

본 연구에서는 Fig. 12 와 같이 금형 전체를 탄성체로 모델링 하였으며 CTETRA10, CHEXA8, Wedge6 요소를 사용하여 256530 요소, 392322 절점의 유한요소모델을 구성하였다.

재질은 SM55C(Plate, Block, Pillar)와 STAVAX (슬라이드, 캐비티), NIMAX(코어)을 사용하였다. 성형면 주위의 형

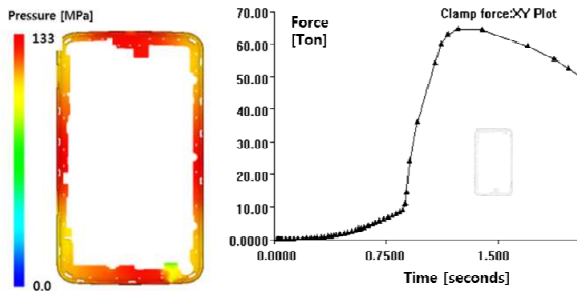
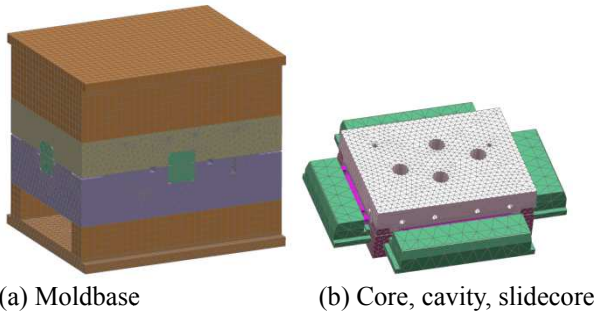


Fig. 11 Clamping force and distribution of cavity pressure at the maximum clamping force(average 117MPa, maximum 133MPa, minimum 80MPa)



(a) Moldbase (b) Core, cavity, slidecore
Fig. 12 Finite element model for structural analysis

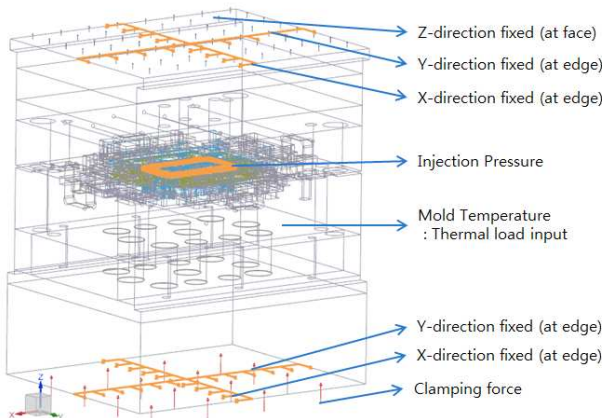


Fig. 13 Structural boundary conditions

상(코어, 캐비티, 슬라이드)과 냉각채널은 실제와 동일하게 하였고 기타 부위는 단순화하였다.

경계조건으로는 부품간에는 접촉(contact), 볼트 연결면에는 접촉(glue)조건을 사용하였고, 성형면에서의 압력은 평균값 117MPa 로 입력하거나 사출해석결과를 사용하였다. 형체력은 금형을 고정하는 사출기 고정판의 두께를 모델에 반영하여 고정판 아래쪽에서 180 ton 으로 입력하였다. 또한 금형 열팽창을 반영하기 위해 열전달 해석 또는 사출해석에서 계산된 금형온도를 열부하(thermal load)로 입력하였다. (Fig.13)

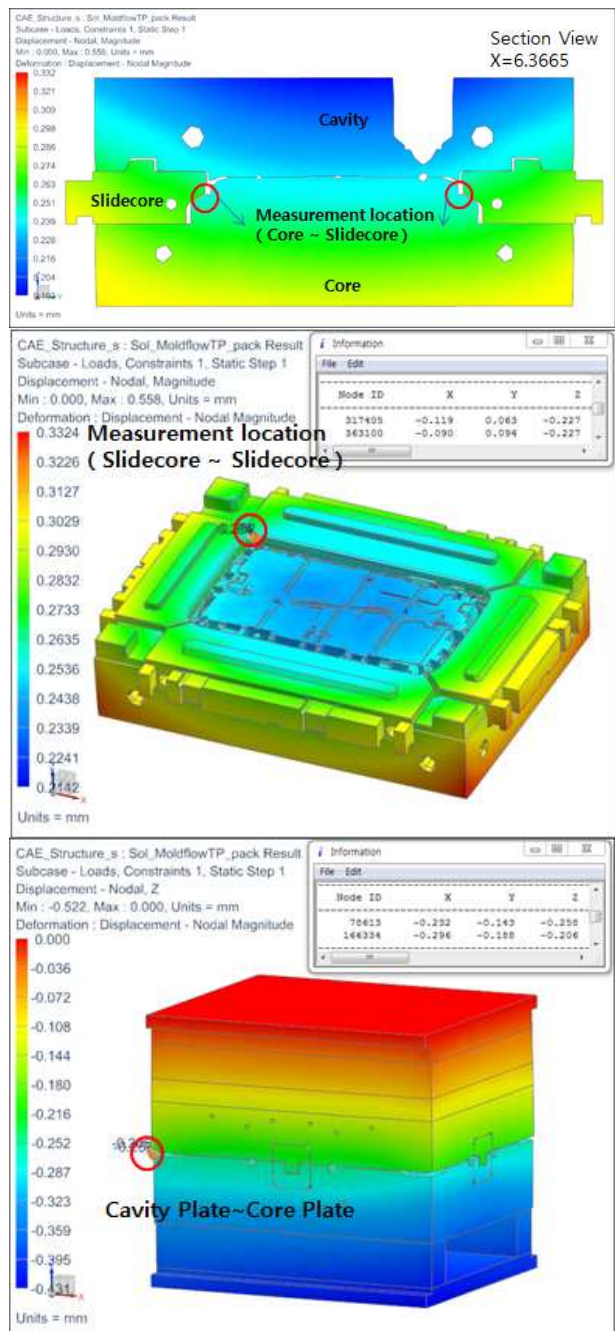


Fig. 14 Deformation results of the mold assembly

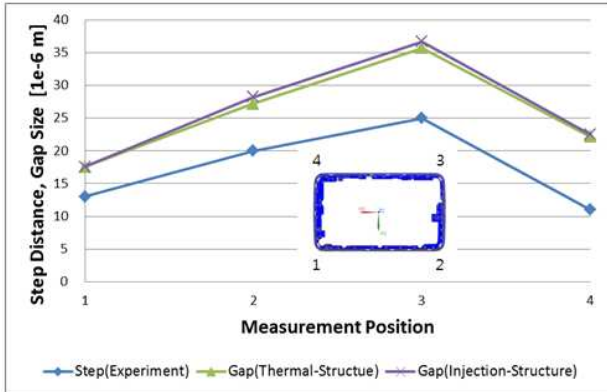


Fig. 15 Step and gap result at 4 corner positions

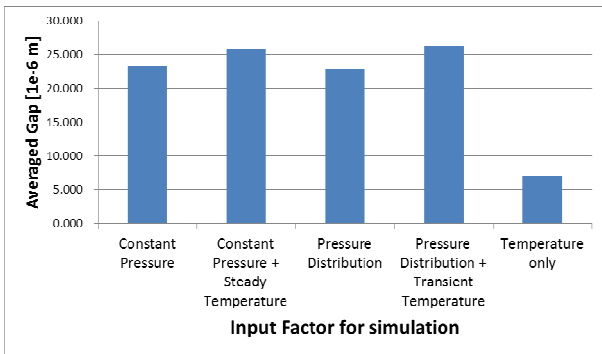


Fig. 16 Effect of simulation input for mold deformation

Fig. 14 는 해석된 금형 각 부위의 변형 결과이며 상하 Plate 사이는 형체력에 의해 0.094mm 좁아지고 슬라이드와 슬라이드 사이는 약 0.042mm 벌어지고 있다. Fig. 15 는 4 개 슬라이드 사이의 모서리에서의 단차를 측정된 결과와 해석한 결과를 비교한 그림이다. 열전달-구조해석과 사출-구조해석 결과는 큰 차이가 없으므로 사출 중 간격변화는 작음을 알 수 있다. 또한 사출물의 단차로 측정된 실험결과의 경우 약 10µm 정도 해석보다 크게 나타나는데, 이것은 금형 부품 가공 및 조립 공차에 의한 것으로 생각된다.

Fig. 15 는 4 모서리의 벌어짐 크기에 대한 실험과 해석결과를 비교하고 있다. 실험결과는 사출된 제품의 단차를 측정된 것이고 해석은 부품간 가공 및 조립 공차를 무시하고 슬라이드 사이의 벌어짐 크기를 계산했기 때문에 정확히 일치하지는 않지만 위치 별 경향성은 유사하다.

Fig. 16 은 구조해석에서 압력만 성형면에 일정하게 준 경우, 일정압력과 정상상태 온도를 준 경우, 압력분포를 입력한 경우, 압력분포와 사출에 의한 온도분포를 입력한 경우, 온도분포만 입력한 경우에 대해 슬라이드간의 벌어짐 평균을 비교한 것이다. 열팽창의 효과는 사출압의 효과의 25%수준이며 사출에 의한 온도분포와 정상상태 온도분

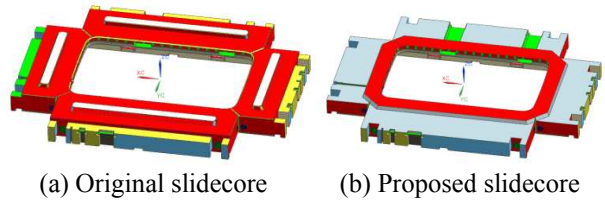


Fig. 17 Shape of the proposed slidecore

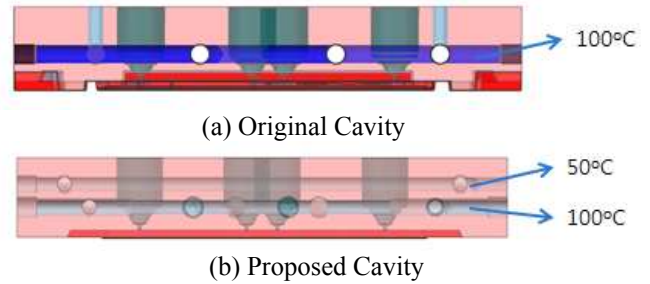


Fig. 18 Shape of the proposed cooling channel

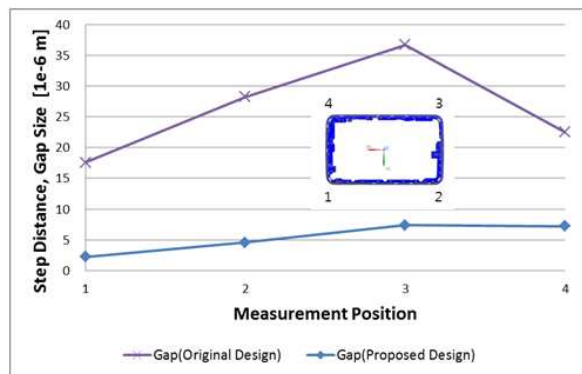


Fig. 19 Simulation result at 4 corner positions for the proposed design

포의 차이는 5% 이내로 나타났다. 그러나 제품의 크기가 커질 경우 열팽창의 효과는 더 증가할 것으로 예상된다.

5. 금형 구조 개선

코어와 슬라이드 간의 벌어짐을 줄이기 위해서는 Fig. 17 과 같은 신구조의 형상을 도출하였다. 신구조의 경우 슬라이드가 상단코어(Cavity)에 의해 지지되어 뒤로 밀리는 양이 줄어들 것을 기대할 수 있다. 또한 Fig. 18 과 같이 냉각로 설정도 개선하였는데 기존 채널의 경우 캐비티 및 고정판에 100 도의 물을 사용하였으나, 가급적 상단 금형의 열팽창을 줄이기 위해 캐비티의 기존 채널 위쪽에 더 낮은 온도(50 도)의 물을 넣은 냉각채널을 추가하고 고정판 냉각채널은 사용하지 않았다.

Fig. 19 는 이러한 개선을 통해 슬라이드 간 벌어짐 크기가 10µm 이내로 줄어들었음을 보여준다.

6. 결 론

휴대폰 사출 금형 온도는 열접촉 저항, 냉각채널, 외부대류에 대한 적절한 대류 계수 사용을 통해 5도 이내로 예측이 가능하였다. 금형의 내부 변형은 수십 μm 수준이며 조립 및 가공 공차에 의해 10 μm 내외의 오차수준으로 예측할 수 있었다. 금형 변형예측에서 열팽창의 효과는 제품크기가 커질수록 무시할 수 없으며 Cycle 중의 내부 성형면의 변형차이는 5 μm 이내로 나타난다.

금형 변형에 의한 플래시는 보통 20 μm 이상 벌어지는 경우 발생할 수 있으며, 플래시 크기는 똑같은 벌어짐 크기에도 사출조건과 수지 특성에 따라 달라지므로 변형만으로 예측하기는 어렵다.

참고문헌

(References)

- (1) Higuchi, H., Goto, H. and Koyama, K., 2005, "Effect of Processing Conditions on Flash Generation," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 45, No. 2, pp. 238~247
- (2) Choi, J. H., Choi, S. H., Tae, J. S., Park, H. P. and Rhee, B. O., 2011, "Study on the Pressure Measurement at Parting Surface to Prevent Flashing in Injection Molds," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 20, No. 1, pp. 73~78
- (3) Part, H. P., Cha, B. S. and Rhee, B. O., 2010, "Prediction of Flash Generation in Two-Color Injection Molding Using The Rapid Heat Cycle Molding Technology," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 19, No. 3, pp. 145~151
- (4) 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," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 20, No. 1, pp. 29~35
- (5) Saifullah, A. B. M., Masood, S. H. and Sbarski, I., 2010, "Thermal-Structural Finite Element Analysis of Injection Moulding Dies with Optimized Cooling Channels," *Materials Science Forum*, Vol.654~656, pp. 1646~1649
- (6) Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E. and Rorrer, G. L., 2007, *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass transfer (5th edition)*, John Wiley and Sons.
- (7) American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1981, *ASHRAE Handbook of Fundamentals*, ASHRAE, New York
- (8) Sohn, D. H., Kim, K. M. and Park, K., 2011, "Thermal-Fluid Coupled Analysis for Injection Molding Process by Considering Thermal Contact Resistance," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 12, pp. 1627~1633
- (9) Li, X., Zhao, G., Guan, Y. and Li, H., 2009, "Research on Thermal Stress, Deformation, and Fatigue Lifetime of the Rapid Heating Cycle Injection Mold," *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 45, pp. 261~275