

자수기용 로터리 훅 개발을 위한 금속분말 사출성형해석

김상윤*, 박보규*, 정재옥**, 조규상***, 정일섭****.#

* 한국섬유기계융합연구원, ** (주)한국피아이엠, *** 동양대학교 철도기계시스템학과,
**** 영남대학교 기계공학부

Metal Injection Molding Analysis for Developing Embroidering Machine Rotary Hooks

Sang-Yoon Kim*, Bo-Gyu Park*, Jae-Ok Jung**, Kyu-Sang Cho***, Ilsup Chung****.#

*Korea Textile Machinery Convergence Research Institute, **PIM Korea Co., LTD., ***Department of Train Mechanical System, Donoyang UNIV., ****School of Mechanical Engineering, Younghan UNIV.

(Received 14 June 2018; received in revised form 21 June 2018; accepted 27 June 2018)

ABSTRACT

Among the components of rotary hooks, a core component of an embroidery sewing system, a study was conducted to apply metal injection molding to the manufacture of a hook body and a housing that was very difficult to mechanical working. The correlation of feedstock, a mixture of binder and SCM 415 metal powder, and properties of the pressure-volume-temperature interrelationship, viscosity, specific heat, and thermal conductivity were measured. Injection molds for the hook body and the housing were developed through injection molding analysis using these properties and conducted injection tests. Optimal injection gate position and number, injection pressure, and injection time were obtained through a comparison of analysis results with the experiment results.

Key Words : Rotary Hook(로터리 훅), Metal Injection Molding(MIM; 금속분말 사출성형), Embroidering Machine(자수기), Feedstock(피드스탁)

1. 서 론

자수봉제시스템은 바늘 및 부가장치로 자수봉제사를 사용하여 직물과 기타 소재에 다양한 무늬를 나타내거나 여러 가지 장식을 부착할 수 있도록 하는 기계장치이다.^[1] 자수봉제시스템에서 실의 박음질 메커니즘을 완성시켜주는 핵심부품인 로터리 훅

은 형상이 복잡하여 여러 단계의 정밀가공을 통해 생산되는 제품인 만큼 높은 기술력을 필요로 하여 대부분 일본이나 유럽 등에서 생산되는 제품이 사용되고 있다.^[2-3]

금속분말 사출성형법은 플라스틱 산업의 사출성형기술과 금속분말 소결기술의 이점을 융합시킨 공법이다. 전체 공정은 금속분말 재료를 유기바인더(binder)와 혼합하여 피드스탁(feedstock)을 제조하는 혼련공정, 피드스탁을 용융된 상태에서 사출성형하

Corresponding Author : ilchung@yu.ac.kr
Tel: +82-53-810-3525, Fax: +82-53-810-4627

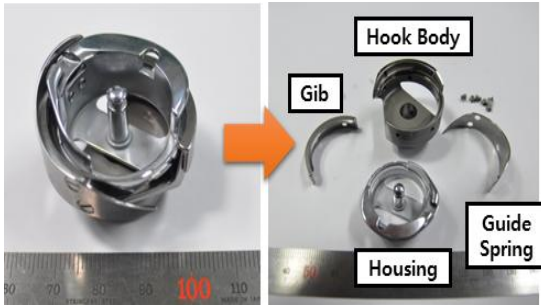


Fig. 1 Rotary hook assembly of embroidering machine

는 사출공정, 제조된 사출체에서 유기결합체를 제거하는 탈지공정 그리고 금속분말을 결합시켜 최종 물성을 부여하는 소결공정으로 구성되며, 높은 생산성과 치수 정밀도를 얻을 수 있어 복잡하고 정밀한 3차원 형상을 가지는 정밀 부품의 제조에 활용되고 있는 제조기술이다.^[4-5]

일반적으로 로터리 혹은 Fig. 1 과 같이 바깥복집(hook body)과 안복집(housing) 그리고, 기타 부속품으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 로터리 혹은 구성품 중 가장 비중이 큰 바깥복집과 안복집에 대하여 MIM 공법 적용을 위해 사출성형해석용 상용프로그래밍 ‘Moldflow’를 사용하여 금속분말 사출성형공정에 관한 해석을 실시하였으며, 해석결과를 실제 사출실험과 비교하여 정확성 검증을 통해 금속분말 사출금형의 최적설계를 위한 연구를 수행하였다.^[6]

2. 사출성형해석

2.1 충전 및 보압과정에 대한 지배방정식

금속분말 사출공정은 일반 사출공정과 동일하게 ‘금형단합 → 사출 → 보압 → 냉각 → 취출 공정’을 거친다.

본 연구에서는 충전과 보압과정에서 금형 캐비티 내의 3차원 시뮬레이션을 하기 위한 질량 보존, 운동량 보존 및 에너지 보존 방정식은 각각 식 (1)~(5) 과 같이 표현된다.^[7-8]

- 질량 보존 방정식

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

여기서, ρ 는 피드스타크의 밀도, V 는 속도벡터이고, ∇ 는 다음과 같고, $\nabla \cdot (\rho V)$ 는 ρV 의 발산이다.

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad (2)$$

- 운동량 보존 방정식

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + \rho g \quad (3)$$

여기서, τ 는 점성 응력텐서, g 는 중력가속도이다.

- 에너지 보존 방정식

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \tau : \nabla V + \beta T \frac{\partial P}{\partial t} \quad (4)$$

여기서, C_p 는 피드스타크의 비열, k 는 열전도도, $\tau : \nabla V$ 는 마찰열이고, β 는 피드스타크의 팽창을 나타낸 값으로 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta \rho}{\delta T} \quad (5)$$

2.2 피드스타크 물성 분석

피드스타크는 금속분말 사출성형 시 유동성을 부여하는 바인더와 금속분말의 결합체로서, 바인더는 고온에서 완전히 제거가 가능한 유기물질인 왁스(wax), 폴리머(polymer) 등을 사용하였고, 금속분말은 기계적 성질이 우수하며 다른 기계구조용강과 비교해 상대적으로 가격이 저렴한 SCM415를 주요 소재로 사용하였다.

위의 바인더와 SCM415 금속분말을 혼합한 SCM415 피드스타크에 대하여 유동 및 보압과정에서의 밀도 및 온도와 압력에 따른 밀도 변화를 예측하기 위하여 필요한 물성인 pvT(pressure-volume-temperature)는 온도와 압력 변화에 따른 부피 변화를 나타내는 것으로 ‘2-Domain Tait pvT 모델’을 사용하였으며,^[9] 식 (6)~(13) 으로 표현할 수 있다. $v(T, p)$ 는 온도 및 압력에서의 특정 체적이며, v_0 는

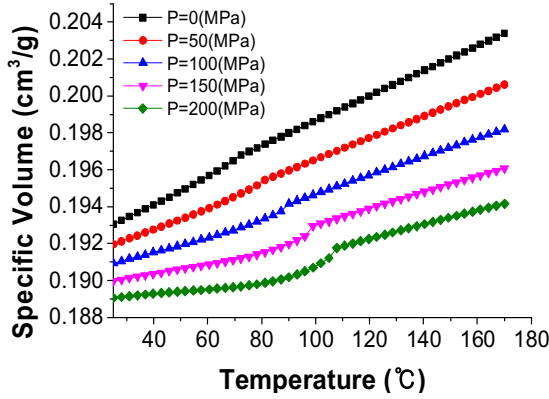


Fig. 2 pvT relationship of SCM415 feedstock

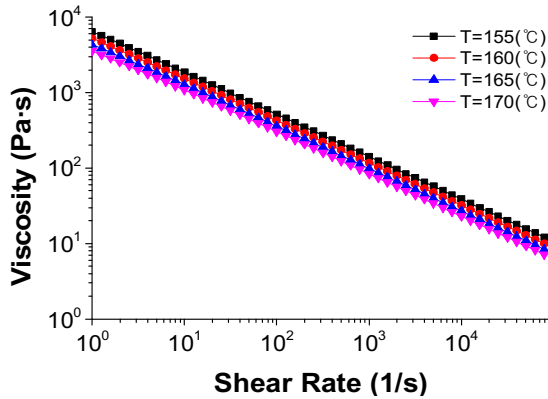


Fig. 3 Viscosity of SCM415 feedstock

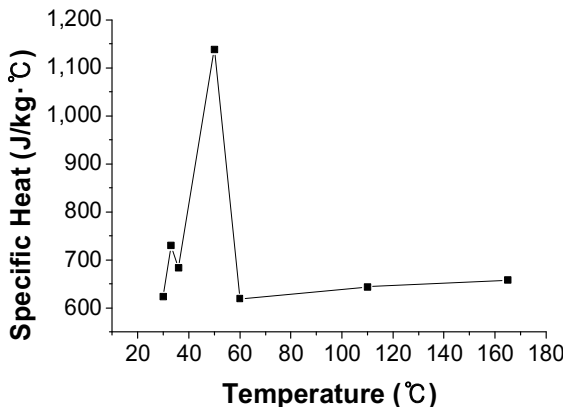


Fig. 4 Specific heat of SCM415 feedstock

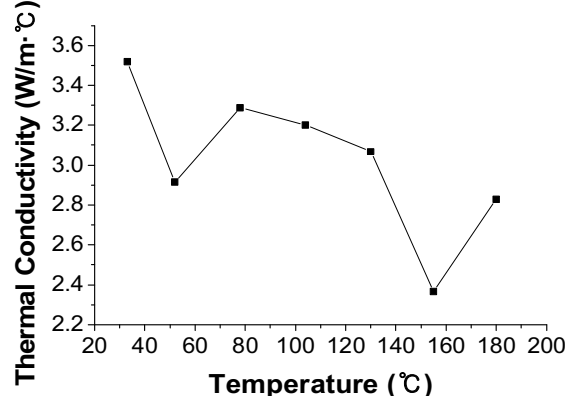


Fig. 5 Thermal conductivity of SCM415 feedstock

0 게이지 압력에서의 특정 체적이고, B 는 재료의 압력 민감도이다. Fig. 2는 pvT 데이터로서, 'Gnomix pvT 장치'를 이용하여 고압에서의 열팽창 계수를 측정하였다.^[10]

Fig. 2 와 같이 그래프의 기울기가 달라지는 지점인 T^* 는 피드스탁의 유리전이온도(glass transition temperature)로서, 이상의 온도에서는 고무상(rubbery state), 이하에서는 고체상(solid state)으로 상이 달라진다.

$$v(T,p) = v_0(T) \left[1 - C \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right] + v_t(T,p) \quad (6)$$

$$T^* = b_5 + b_6 p \quad (7)$$

여기서, $T > T^*$ 이면,

$$v_0(T) = b_{1m} + b_{2m}(T - b_5) \quad (8)$$

$$B(T) = b_{3m} \exp(-b_{4m}(T - b_5)) \quad (9)$$

$$v_t(T,p) = 0 \quad (10)$$

만약, $T \leq T^*$ 이면,

$$v_0(T) = b_{1s} + b_{2s}(T - b_5) \quad (11)$$

$$B(T) = b_{3s} \exp(-b_{4s}(T - b_5)) \quad (12)$$

$$v_t(T,p) = b_7 \exp(b_8(T - b_5) - b_9 p) \quad (13)$$

‘Goettfert Rheograph 장치’를 이용하여 SCM415 피드스탁의 용융온도를 고려하여 155℃에서 5℃씩 상승시켜 170℃까지의 전단율에 따른 점도를 측정하였으며, 측정된 데이터는 Fig. 3 과 같다.^[11] η 는 피드스탁의 용융점도이고, η_0 는 전단율 속도가 0인 경우의 점도이다.

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (14)$$

여기서,

$$\eta_0 = D_1 \exp\left[-\frac{A_1(T - T^*)}{A_2 + T - T^*}\right] \quad (15)$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 p \quad (16)$$

유동 및 보압 과정에서의 온도장 계산에 필요한 비열(specific heat)은 ‘Perkin Elmer DSC7’ 장치를 이용하여 시차 주사 열량법(DSC; differential scanning calorimetry)으로 측정하였고,^[12] 열전도도(thermal conductivity)는 ‘K-System II 열전도도 시스템’을 이용하여 액상에서 고상 상태까지를 측정하기 위해 ‘Transition Line-source 법’을 이용하여 측정하였다.^[13] 측정된 비열과 열전도도 데이터는 각각 Fig. 4~5 와 같다.

피드스탁에 사용되는 바인더는 왁스, 폴리머 등의 유기물질이 혼합된 것으로 왁스의 경우 에너지 절감과 고온에서 완전히 제거가 용이한 저융점 왁스를 사용하기 때문에 60℃~40℃ 사이의 저온에서 상변화가 일어나는 것으로 나타났다.

2.3 해석 모델 생성

로터리 혹의 바깥복집과 안복집에 대한 MIM 공법의 금형제작을 위해서는 최적의 게이트 위치를 선정해야 한다. 게이트 위치에 따른 충전양상(fill pattern)을 분석하기 위해 Table 2 와 같은 조건으로 사출성형해석을 수행하였으며, 해석에 사용된 바깥복집과 안복집의 유한요소모델은 Fig. 6~7 과 같다.^[14]

Table 1 Analysis condition of MIM rotary hook

Sortation	Hook Body	Housing
Element Type	Tetrahedron Element	
Number of Element(ea)	182,841	160,784
Fill Time(sec)	3	
Mold Temperature(℃)	35	
Injection Temperature(℃)	165	
Holding Pressure	Apply for 10sec at 80% of injection pressure	
Cooling	Natural cooling for 20sec	

제품 형상을 고려하여 바닥면 기준으로 사출 게이트를 바깥복집은 1~3개, 안복집은 1~2개 등 총 5 가지에 대하여 해석을 실시하였는데, Fig. 0,0 과 같이 바깥복집의 1 게이트는 ①번, 2 게이트는 ②번과 ③번, 3 게이트는 ①번에서 ③번까지 적용하였고, 안복집의 1 게이트는 ①번, 2 게이트는 ②번과 ③번을 적용하였다.

2.4 사출 게이트 위치에 따른 충전 양상

바깥복집의 경우 Fig. 8 과 같이 충전시간은 1 게이트는 3.511초, 2 게이트는 3.140초, 3 게이트는 3.621초로 2 게이트가 가장 짧은 것으로 나타났으며, 1 게이트와 2 게이트의 경우 충전이 정상적으로 완료되었으나, Fig. 9 와 같이 3 게이트의 경우 혹(hook) 끝부분에서 미충진 영역이 발생하여 사출시 미충진 위험이 있을 것으로 확인되었다.

일반적으로 미충진은 대부분 금형 내부의 얇은 부분이나 가장자리에서 주로 발생하는데, 바깥복집의 혹 끝부분은 마지막에 충전되는 부분으로 3 게이트를 적용하기에는 복잡한 형상과 제한적인 크기로 인해 유동 방해가 발생하여 사출 압력이 충분하지 못해 미충진 영역이 발생한 것으로 사료된다.

안복집의 경우 Fig. 10 과 같이 충전시간은 1 게이트는 2.153초, 2 게이트는 2.124초로 2 게이트가 짧은 것으로 나타났으며, 두 가지 모두 정상적이 충전 양상이 나타났다.

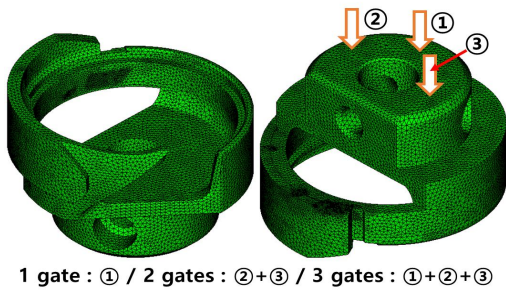


Fig. 6 The meshed analysis model and injection gate position of hook body

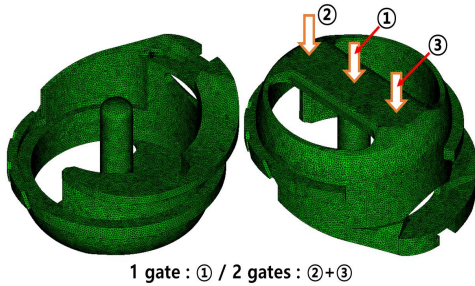


Fig. 7 The meshed analysis model and injection gate position of housing

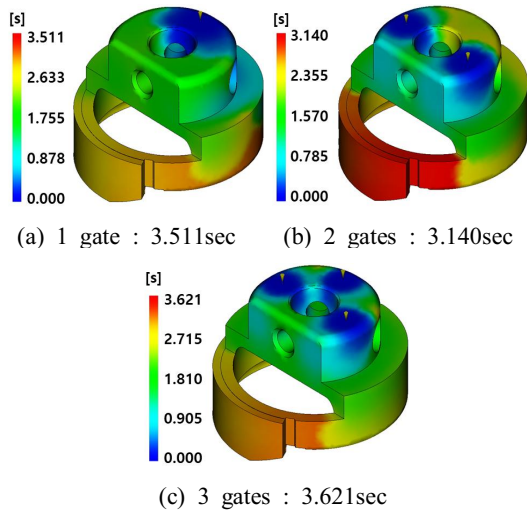


Fig. 8 Fill pattern and time of hook body according to gate type

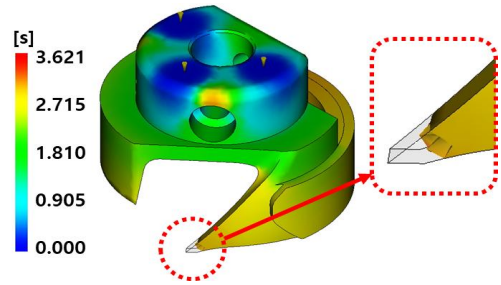


Fig. 9 3 gates unfill area of hook body

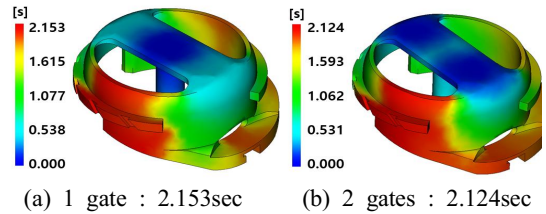


Fig. 10 Fill pattern and time of housing according to gate type

2.5 사출 게이트 위치에 따른 사출압력 비교

바깥복집은 3 게이트에서 미충진 양상을 보여 이를 제외한 1 게이트와 2 게이트에 대하여 사출압력을 비교하였다.^[15] Fig. 11 과 같이 각각 보압전환 직전의 최대 사출압력은 1 게이트는 152.7MPa, 2 게이트는 13.51MPa 로 분석되어 바깥복집에 대한 사출성형은 2 게이트가 적합한 것으로 나타났다.

안복집의 경우 Fig. 12 와 같이 각 게이트별 보압전환 직전의 최대 사출압력은 1 게이트는 22.84MPa, 2 게이트는 20.45MPa 로 분석되어 바깥복집과 동일하게 사출성형은 2 게이트를 적용하는 것이 유리할 것으로 나타났다.

2.6 에어트랩과 웰드라인

일반적인 사출공정에서 불량원인이 되는 에어트랩(air trap)과 웰드라인(weld line)에 대한 분석을 실시하였다. 에어트랩은 유동 선단의 수렴에 따라 고

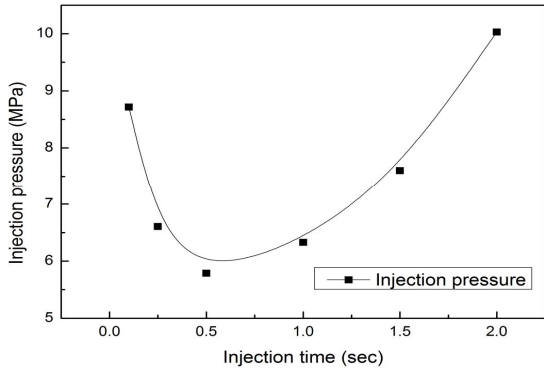


Fig. 11 Maximum injection pressure by injection time of hook body

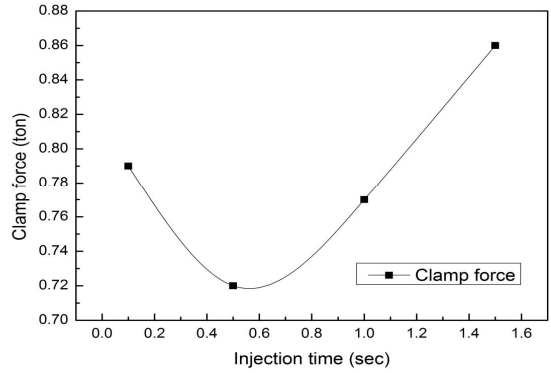


Fig. 14 Clamp force by injection time of housing

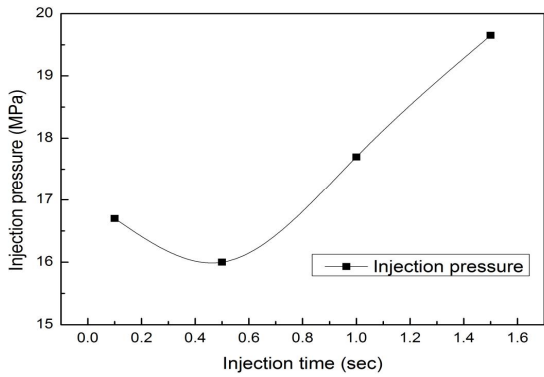


Fig. 12 Maximum injection pressure by injection time of housing

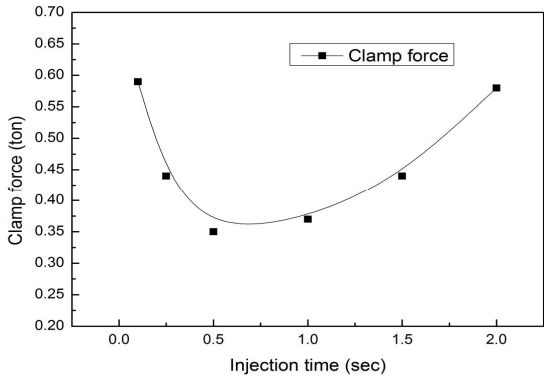
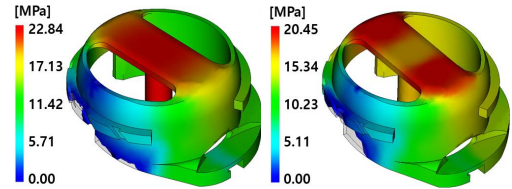
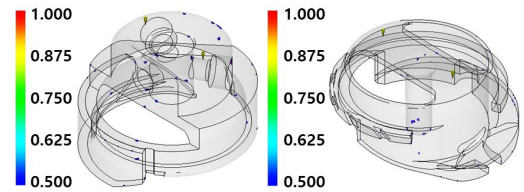


Fig. 13 Clamp force by injection time of hook body



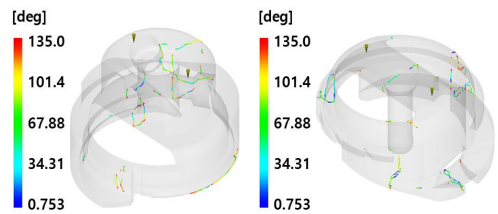
(a) 1 gate : 22.84MPa (b) 2 gates : 20.45MPa

Fig. 15 Injection pressure of housing according to gate type



(a) Hook body : 1.626sec (b) Housing : 1.052sec

Fig. 16 Air trap analysis



(a) Hook body

(b) Housing

Fig. 17 Weld line analysis

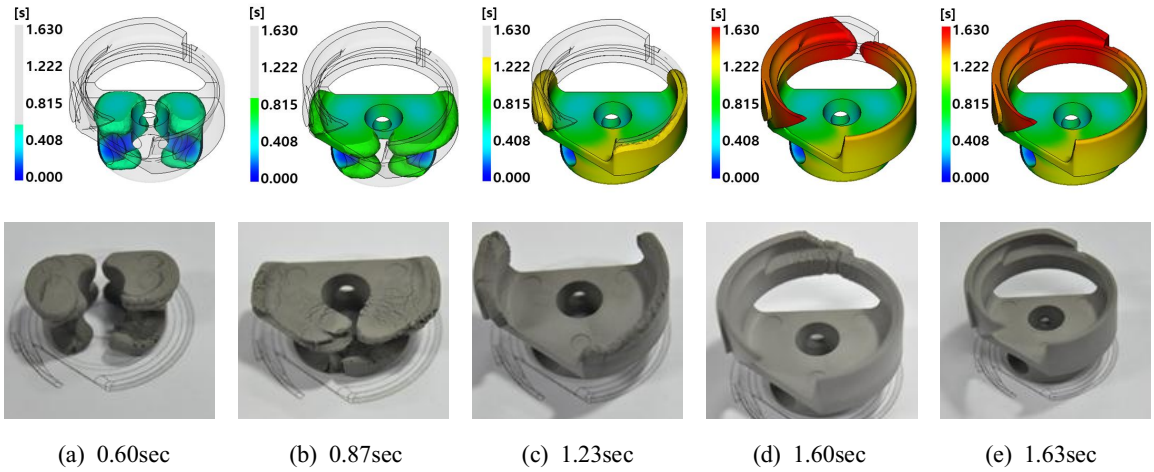


Fig. 18 Comparison of analysis results and short shot test by fill time of hook body

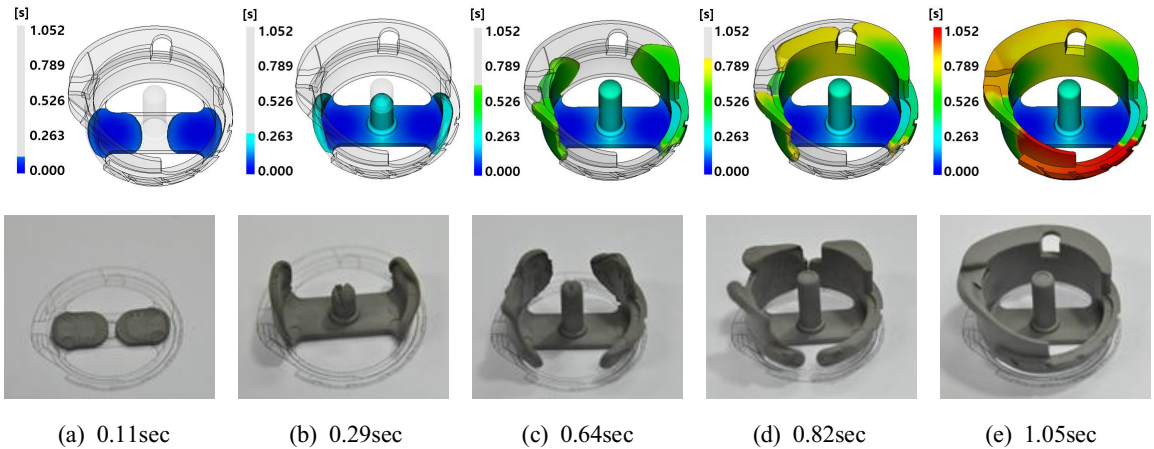


Fig. 19 Comparison of analysis results and short shot test by fill time of housing

이거나 캐비티 벽에 갇혀 고인 기포를 뜻하는 것으로, Fig. 13 과 같이 미세하게 분포할 것을 예상된다. 웰드라인은 용융된 수지가 캐비티 내에서 분기하여 흐르다가 합류한 부분에서 생기는 것으로, Fig. 14 와 같이 바깥복집과 안복집의 가장 마지막으로 충전이 되는 부분에서 발생할 것으로 예상된다.

일반 플라스틱과 같은 제품의 사출과는 달리 MIM 공법은 사출 후 탈지와 소결과정을 거치면서 미세한 에어트랩이나 웰드라인의 경우 매워지기 때

문에 바깥복집과 안복집의 사출공정에서는 크게 문제되지 않을 것으로 사료된다.

2.7 최적 사출 시간

바깥복집과 안복집의 최적 사출 시간 결정을 위해 최적으로 선정된 2 게이트를 바탕으로 충전시간을 각각 0.1초, 0.5초, 1초, 1.5초, 2초로 달리 설정하였으며, 이외의 조건은 동일하게 해석을 수행하였다.

Fig. 15~18 은 바깥복집과 안복집에 대한 충전시간별 최대 사출압(injection pressure)과 형체력(clamp force)에 대한 결과이며, 이를 비교하였을 때 최적 사출 시간은 바깥복집의 경우 0.5 ~ 1초, 안복집의 경우 0.5초 정도가 최적인 것으로 나타났다.

3. 사출성형해석 결과 검증

Moldflow는 일반적으로 플라스틱 사출성형 해석에 사용되는 프로그램으로 MIM 공법에 적용하기 위한 연구가 다양하게 진행 중이다. 상기 해석결과들을 바탕으로 실제의 금형을 설계 및 제작하여 Moldflow 해석결과를 검증하기 위한 시사출을 실시하여 충전양상에 관하여 해석결과와 비교하였다.

실제 충전양상과 해석에서의 충전양상을 비교하기 위하여 피드스탁의 수지 계량을 조정하여 미충진 실험(short shot test)를 수행하였다. Fig. 19 은 바깥복집, Fig. 20 은 안복집의 미충진 실험과 해석상의 충전양상을 비교한 결과를 나타낸 것으로서, 해석상의 충전양상이 실제 충전양상을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 자수봉제시스템의 핵심부품인 로터리 훅의 MIM 공법 적용을 위해 바깥복집과 안복집에 대한 사출성형해석을 수행하였다. 이를 통해 실제 사출성형에서 발생할 수 있는 문제점을 파악하고 금형설계 및 최적 사출조건에 반영하였으며, 실제 제작된 금형을 이용하여 실제 사출시험을 통해 해석결과와 비교함으로써 해석 정확성을 검증하였다.

1. MIM 공법은 유동성을 부여하는 바인더와 금속 분말의 결합체인 피드스탁을 이용하여 사출성형이 가능하기 때문에, 사출성형해석 수행에 필요한 물성치 분석을 위해 pvT, 점도, 비열, 열전도도 등에 대해 측정을 실시하였다.

2. 로터리 훅의 바깥복집과 안복집에 대한 사출 게이트 위치에 따른 충전 양상은 바깥복집의 경우 1 게이트와 2 게이트일 때 정상 충전되나, 3 게이트의 경우 훅 끝 부분이 미충진 영역이 발생할 것으로 예상되며, 안복집의 경우 1 게이트와 2 게이트 모두 정상 충전되는 것으로 확인되었다.
3. 보압전환 직전의 최대 사출압력의 경우 바깥복집의 1 게이트는 152.7MPa, 2 게이트는 13.51MPa 로 나타났고, 안복집의 1 게이트는 22.84MPa, 2 게이트는 20.45MPa 로 분석되어 바깥복집과 안복집 모두 2 게이트를 적용하는 것이 적합한 것으로 나타났다.
4. 최적 사출시간 설정을 위해 바깥복집과 안복집의 2 게이트 모델에 대해 충전시간별 최대 사출압과 형체력을 비교한 결과 바깥복집은 약 0.5~1초, 안복집은 약 0.5초 정도가 적합한 것으로 나타났다.
5. 해석결과를 바탕으로 제작한 금형을 이용하여 미충진실험을 통해 실제 충전양상과 해석 충전양상이 비교하였으며, 충전양상이 유사한 형태로 진행되는 것을 확인하였다.

REFERENCES

1. Ebata, Y., Ninomiya, M. and Murakami, E., "Embroidery sewing machine", U.S. Patent 6,470,813, 2002.
2. Hirose, T. and Nakamura, K., "Inner bobbin case holder of a fully rotating hook", U.S. Patent 5,413,058, 1995.
3. Kim, S. J. and Oh, A. K., "Mechanical properties and sewing technology of new synthetic fabrics", J. of KFS, No. 1, pp. 3-16, 1993.
4. Heaney, D. F., "Handbook of metal injection molding", Woodhead Publishing Ltd., pp. 1-23, 2012.
5. Nam, C. N., Han, M. B., Chun, B. S., Shin, J. I., Kim, J. H. and Min, D. S., "Thermal shock

- durability test of a gasoline turbocharger waste gate valve assembly manufactured by a metal injection molding”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 4, pp. 69-74, 2014.
6. Park, B. G., Kim, S. Y., Park, S. W. and Jung, J. O., “Metal injection molding analysis for development rotary hook”, Spring Conference of KFS, Vol. 47, No. 1, pp. 152, 2014.
 7. Chiang, H. H., Hieber, C. A., and Wang, K. K., “A unified simulation of the Fill and post Fill stages in injection molding. Part I: Formulation”, Polymer Engineering and Science, Vol. 31, No. 2, pp. 116-124, 1991.
 8. Park, J. C. and Kim, K. M., “Determination of gate position considering robustness in injection mold design”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 5, pp. 113-118, 2017.
 9. Greene, C. D. and Heaney, D. F., “The pVT effect on the final sintered dimensions of powder injection molded components”, Materials and Design, No. 28, pp. 95-100, 2007.
 10. ASTM D792, “Standard test methods for density and specific gravity of plastics by displacement”, 2008.
 11. ASTM D3835, “Standard test method for determination of properties of polymeric materials by means of capillary rheometer”, 2008.
 12. ASTM E1269-11, “Standard test method for determining specific heat capacity by differential scanning calorimetry”, 2011.
 13. ASTM D5930-09, “Standard test method for thermal conductivity of plastics by means of a transient line-source technique”, 2009.
 14. Kim, S. and Turng, L., “Developments of three-dimensional computer-aided engineering simulation for injection molding”, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, No. 12, pp. 151-173, 2004.
 15. Park, J. C. and Kim, K. M., “Optimization of design variable for injection molding using a modified golden section search method”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 1, pp. 63-69, 2017.