

리저버 탱크의 Die Turning Injection 적용을 위한 Multi-field CAE 해석

이성희[†]

한국생산기술연구원 형상제조연구부문[†]

A multi-field CAE analysis for die turning injection application of reservoir fluid tank

Sung-Hee Lee[†]

Department of Shape Manufacturing R&D, Korea Institute of Industrial Technology[†]

(Received March 21, 2021 / Revised March 29, 2021 / Accepted March 31, 2021)

Abstract: In this study, die turning injection(DTI) mold design for manufacturing reservoir fluid tanks used for cooling in-vehicle batteries, inverters, and motors was conducted based on multi-field CAE. Part design, performance evaluation, and mold design of the reservoir fluid tank was performed. The frequency response characteristics through modal and harmonic response analysis to satisfy the automotive performance test items for the designed part were examined. Analysis of re-melting characteristics and structural analysis of the driving part for designing the rotating die of the DTI mold were performed. Part design was possible when the natural frequency performance value of 32Hz or higher was satisfied through finite element analysis, and the temperature distribution and deformation characteristics of the part after injection molding were found through the first injection molding analysis. In addition, it can be seen that the temperature change of the primary part greatly influences the re-melting characteristics during the secondary injection. The minimum force for driving the turning die of the designed mold was calculated through structural analysis. Hydraulic system design was possible. Finally, a precise and efficient DTI mold design for the reservoir fluid tank was possible through presented multi-field CAE process.

Key Words: Die turning injection, Injection molding simulation, Modal and harmonic response analysis, Mold design, Multi-field CAE, Structural analysis, Re-melting, Reservoir fluid tank

1. 서 론

자동차 산업에서 플라스틱은 넓은 설계자유도, 경량화 및 재활용 가능 특성으로 인해 계속적으로 사용이 증가되고 있으며, 관련 산업은 지속적인 성장이 이루어지고 있다¹⁾. 메탈소재에 비해 플라스틱을 적용할 경우 부식되지 않고, 극히 강하고 용접이 필요하지 않으며, 저렴하여 자동차 탱크류 부품에 적용되고 있다²⁾. 차량 내 리저버 탱크(Reservoir Fluid Tank)는 배터리, 인버터, 모터 등의 냉각을 위해 사용되는 부품으로, 배터리 운영효율성을 높이는 역할을 수행한다. 초기에서는 블로우 성형 후 후가 공으로 제작되었으며, 이후 사출성형을 통해 정밀한

치수의 상하 부품 성형 후 열융착으로 완제품을 제작하였다. 그러나 전자의 경우 입출구 형상구현을 위한 후 공정에 따른 생산성 저하 및 후자의 경우는 열융착 불량에 따른 사용 중 누수 등의 문제들이 발생하였다. 사출성형 공정은 정밀치수의 복잡형상부품을 대량으로 생산가능한 방법이지만, 많은 사출성형공정조건의 변화에 따라 최종 성형품의 품질이 좌우된다. 즉, 금형온도, 용융수지온도, 사출속도, 보압조건 및 냉각조건 변화에 따라 리저버 탱크에 사용되는 PP수지의 경우 각 상하 부품의 사출성형시 결정화도 및 기계적 물성이 변할 수 있으며, 특히 금형온도는 가장 큰 영향을 미칠 수 있다³⁾. 이러한 캐비티내 공정조건의 모니터링을 위해서는 캐비티 센서의 적용이 중요하며, 각 측정값들이 최종 성형부품의 품질에 미치는 영향을 연구하는 것 또한 중

* 교신저자: 한국생산기술연구원 형상제조연구부문
E-mail: birdlee@kitech.re.kr

요하다⁴⁾. 보다 정밀한 사출성형을 위해서는 실제 캐비티 내부에서 일어나는 현상에 대한 모니터링도 중요하여, 시각화 금형 및 고속카메라를 장착한 금형을 개발하여 분수유동(fountain flow) 및 역압(counter pressure) 측정을 통해 사출성형에 미치는 영향에 대한 연구도 수행되었다⁵⁾. 그러나 정밀한 사출성형이 완성되었더라도 최종 부품 제조를 위해서는 열용착 후 공정을 거치게 되는데, 사출성형 후 변형⁶⁾ 및 이로 인한 열용착부의 완전한 접합이 발생하지 않아 결과적으로 사용 중 누수 등의 문제가 발생될 수 있다. 중공부품의 일체화 사출성형을 위해 DSI(Die Sliding Injection), DTI(Die Turning Injection) 등의 공법이 개발되었으며, 유한요소 및 최적화 기법 적용을 통해 양질의 부품 제작이 가능함을 보았다^{7,8)}. 두 공법 모두 1차 사출 후 제품을 인서트로 하여 2차 사출을 통해 최종 성형품을 성형하는 공법이다. 일반적으로 이종 사출의 경우 두 제품의 결합력은 공정조건에 크게 영향을 받으며⁹⁾, 본 연구에서와 같이 동일 재질의 1, 2차 사출을 통한 결합부품제조 또한 사출성형 공정조건 및 결합부 단면형상에 따라 크게 상하 부품의 결합 및 셀(Seal) 특성이 영향을 받을 수 있다.

따라서 본 연구에서는 생산성과 불량률을 동시에 해결할 수 있는 DTI 적용 리저버 탱크 개발을 위해 Multi-field CAE 활용 설계기술에 대해 연구를 수행하였다. 1) 설계제품의 자동차 성능검사 항목을 충족시키기 위한 모달(modal)과 하모닉(harmonic) 해석을 통한 주파수 응답특성을 살펴보았으며, 2) 사출성형해석을 통해 1차 사출성형제품의 충전특성 및 2차 사출시 공정조건의 변화에 따른 셀링부의 re-melting 특성 분석, 그리고 3) DTI 금형의 회전다이 설계를 위한 구동부에 대한 구조해석을 수행하였다.

2. Reservoir fluid tank & DTI

2.1. Reservoir fluid tank

차량내 리저버 탱크는 배터리, 인버터, 모터 등의 냉각을 위해 사용되는 부품으로, 배터리 운영효율성을 높이는 역할을 수행한다. 초기에서는 블로우 성형 후 후가공으로 제작되었으며, 이후 사출성형을 통해 정밀한 치수의 상하 부품 성형 후 열용착에 의해 완제품을 제작하였다. 그러나 전자의 경우 입출구 형상구현을 위한 후공정에 따른 생산성 저하 및 후자의 경우는 열

응착 불량에 따른 사용중 누수 등의 문제들이 발생하였다. 따라서 생산성향상과 불량률을 동시에 해결할 수 있는 DTI 적용 금형설계기술이 필요하게 되었다.

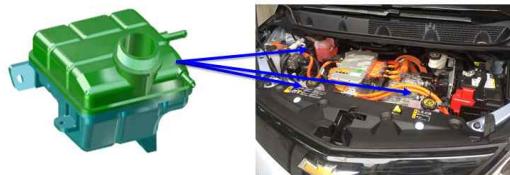


Fig. 1 Location and role of the reservoir fluid tank in the vehicle

2.2. DTI 공법 및 금형

DTI 공법은 일체형 중공부품 성형에 적합한 방법으로, 금형코어는 중공부품의 상하부분 1차 사출이 진행된 후 코어 자체가 회전을 하게 되어 상하 사출부품이 결합된 상태로 미리 설계된 셀 형상부에 동일소재로 2차 사출이 진행되어 금형 내에서 중공부품을 한 번에 사출 성형할 수 있는 방법이다.

Table 1 Comparison of reservoir fluid tank manufacturing methods

	DTI	IM/TB	BM
Part precision	◎	○	△
Leak	◎	○	◎
Pollution degree	◎	△	◎
Quality	◎	○	△
Process stage	2	5	3
Productivity	◎	○	◎
Manufacturing cost	◎	○	△
Investment	Low	High	Low

◎: excellent, ○: common, △: bad

Table 1에서는 DTI, IM/TB(Injection molding/Thermal bonding), BM(Blow molding)으로 부품 제작 시의 장단점 비교를 보여주고 있다.

3. Reservoir fluid tank analysis

본 연구에서는 리저버 탱크 성형을 위한 DTI 금형개발을 위해 Multi-field CAE 해석을 진행하였다. 일차적으로 제품의 성능목표치에서 가장 중요한 진동 특성치 만족을 위해 설계된 모델에 대한 모달 및 하모닉응답 해석을 수행하였다. 이때 내부에 유체가

있는 경우와 없는 경우에 대해 해석을 진행하여 주파수 응답특성을 구하였다. 또한 설계된 모델을 사출성형하기 위한 사출성형해석을 진행하였으며, 이 때 가장 중요한 포인트는 일체화 사출성을 위한 씰링부의 re-melting 특성이다. 마지막으로 DTI 금형의 원활한 구동을 위한 코어 턴테이블의 구조특성 분석을 수행하였다.

3.1. Reservoir fluid tank model

Fig. 2에서는 본 연구에 사용된 리저버 탱크의 형상 및 기하 정보를 보여주고 있다. 설계된 모델의 부피는 247cm^3 이고, 평균두께는 1.65mm이다.

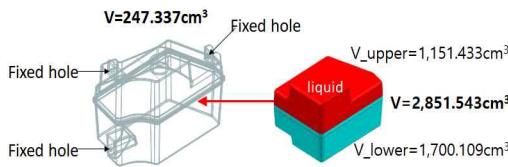


Fig. 2 Shape & geometry of reservoir fluid tank model

Table 2 Material properties of PP for reservoir fluid tank

PP BJ192(Hanwha total)	Value
Poisson's ratio	0.392
Young's modulus	1,340MPa
Density	0.928 g/cm ³
Yield strength	28.4MPa

또한 탱크 내부에 채워질 유체부 공간의 전체 부피는 $2,852\text{cm}^3$ 이며, 실제 채워지는 유체의 부피는 1.8리터이다. 설계된 리저버 탱크 모델의 자동차 적용을 위해서는 일차적으로 진동성능목표치를 만족하여야 한다. 이를 위해서는 모달과 하모닉응답 해석으로 탱크 내부에 유체가 있는 경우와 없는 경우에 대한 진동응답특성을 분석해야 한다. Table 2에 진동해석에 사용된 리저버 탱크 PP소재의 기계적 물성치를 제시하였다.

3.2. Modal & harmonic response analysis

모달과 하모닉응답 해석을 위한 유한요소 모델을 Fig. 3에서 보여주고 있다. 요소의 정밀도와 개수에 대해 구조해석결과는 변하게 되므로 초기 Coarse한 모델로 해석을 수행한 후 fine한 유한요소모델을 생성하였으며, 본 해석에서는 ANSYS™의 SOLID187 요소로 요소 수 228,270, 노드 수 754,850의 유한요

소 모델로 해석을 진행하였다. 해석을 위한 경계조건은 모델의 고정부 3곳을 고정경계조건으로 하였으며, 재질은 Table 2의 값을 사용하였다. 내부 유체를 고려하기 위해 균일분포질량(1.8kg) 조건을 부가하였다. 또한 하모닉응답 해석에서 외부하중조건은 xyz 각 방향으로 (5G, 5G, 10G)의 시험 규격 조건을 부여하였다.

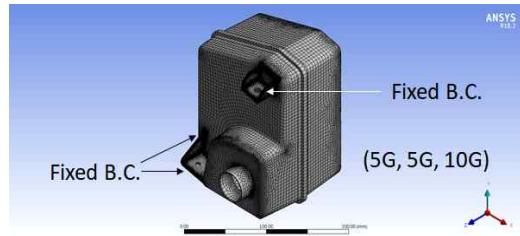


Fig. 3 FE model and boundary conditions for modal & harmonic response analysis

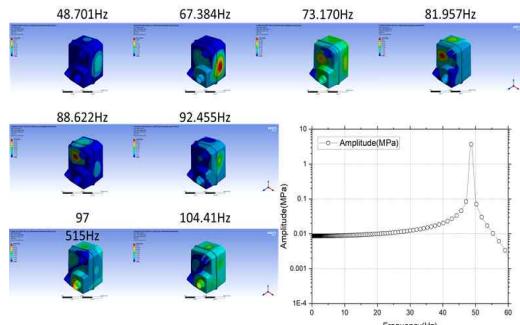


Fig. 4 Results of modal and harmonic response analysis for reservoir fluid tank with liquid

내부 유체가 없는 경우의 모달 해석결과 1차 주파수는 154.3Hz로 계산되었다. 내부 유체를 고려한 경우 질량 증가에 따른 고유진동수는 감소할 것이며, 1차 모드는 48.7Hz로 계산되어 성능목표치 32Hz 이상을 만족하였다. 또한 가속시험 조건을 고려한 하모닉응답 해석결과 피크 주파수 영역에서 PP소재의 허용강도내 응력이 발생됨을 확인 할 수 있었다. 따라서 모달과 하모닉 해석을 통해 리저버 탱크의 성능목표치를 만족하는 모델 설계가 가능하였으며, 하모닉 응답 해석을 통해 시험규격 하중에 대한 안정적인 응력 및 변위 값을 확인할 수 있었다(Fig. 4). 이러한 결과는 추후 시험 사출 성형을 통한 제품 성형 후 실험을 통해 검증가능하며, 일반적으로 진동 해석의 경우 정밀도는 다른 구조해석 보다 높으므로, 해석의 효율성을 높이게 된다.

3.3. Injection molding analysis

설계된 리저버 탱크 부품 성형을 위해 사출성형 해석(Moldflow™)을 수행하였다. 1, 2차 사출 성형 모두 핫리너 구조로 설계하였다(Fig. 5).

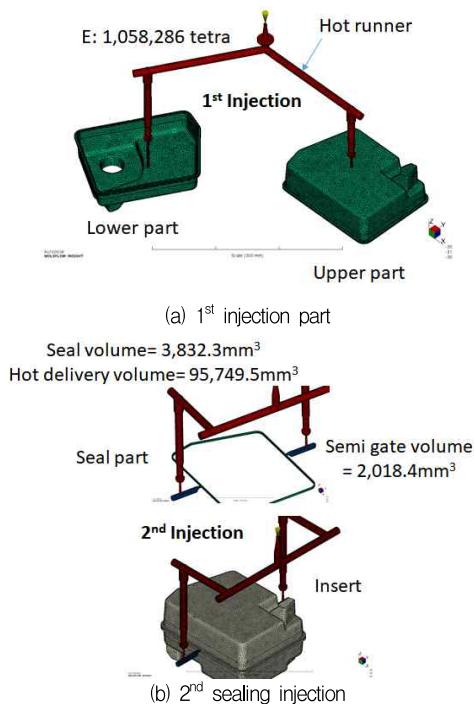


Fig. 5 FE model and processing conditions for injection molding analysis

DTI 금형내 1차 상하 부품에 사출성형에 대한 특성을 살펴보았으며, 보압 절환시 최대 사출압은 69 MPa이고, 최대 형체력은 240 ton_f로 계산되었다(Fig. 5(a)). 본 기술은 기존의 블로우 성형 및 후가공, 사출 및 열융착의 두 공정을 하나로 한 공법이므로, 2차 사출되는 PP 층의 성형특성 및 1차 PP 사출 성형품과의 결합력이 매우 중요하다. 1차 사출된 모델을 인서트로 가정한 2차 사출모델을 Fig. 5(b)에 제시하였다. 2차 사출시 공정조건은 사출시간, 보압 절환위치, 보압력 및 시간 그리고 냉각이다. 그러나 본 제품과 같이 1차 사출 후 완전히 고화되지 않은 상하 부품의 결합부 채널에 2차 사출을 통해 일체화를 위해서는 1차 사출 완료 후 각 부품의 온도 및 잠열이 매우 중요할 것으로 사료되어, 상 하 부품의 온도변화에 따른 2차 사출 후 Re-melting 영역에 대한 해석을 진행하였다. Fig. 6(a)에 1차 사출성형 후

상하 리저버 탱크의 온도 변화(25, 70, 100, 122°C)에 따른 2차 사출시 re-melting 영역 결과를 제시하였다. 결과에서 보듯이 1차 사출된 인서트 상하 부품의 온도 변화에 따라 re-melting 영역이 매우 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

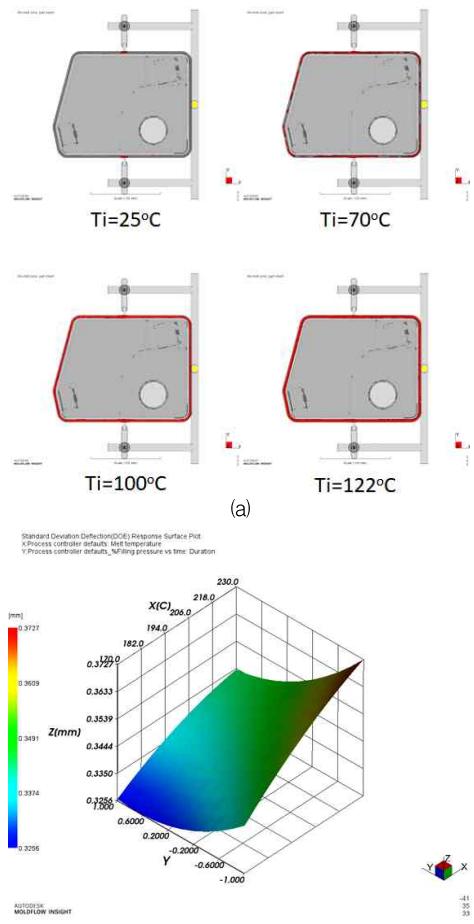


Fig. 6 Results of injection molding analysis for reservoir fluid tank (a) effect of insert part temperature, (b) warpage response plot

본 해석에 사용된 PP수지의 경우는 취출 가능한 온도는 122°C이며, 리저버 탱크의 셀링 및 결합력 측면에서는 취출 온도에 가까운 인서트의 온도가 유리함을 알 수 있다. 그러나 제품의 변형이 중요한 경우 인서트의 높은 온도는 변형을 증가시키게 된다. Fig. 6(b)에서는 수지온도와 보압 조건이 2차 사출 후 전체 제품의 변형에 미치는 영향을 보여주고 있으며, 수지온도 증가, 낮은 보압 조건은 변형을

증가시킴을 알 수 있다. 따라서 과도한 변형 및 수축은 최종 제품의 취출시 문제¹⁰⁾가 발생될 수 있어 제품이 허용하는 최대 변형내에서 인서트의 온도는 최대로 하는 것이 본 공정에서는 중요하다.

3.4. Turning table stress analysis

Fig. 7에 DTI 금형의 2차 사출을 위해 코어 회전을 위한 랙피니언 부의 구조해석결과를 제시하였다. 유한요소 모델링을 위해 랙과 피니언이 직접적으로 접촉하고 영향을 미치는 형상요소들만을 추출하고, 회전, 고정 및 접촉조건을 부여하여 해석을 수행하였다. 가장 큰 응력이 발생되는 부분은 fine한 메쉬를 생성하여 해석의 신뢰도를 향상시켰다. 유한요소 해석에 사용된 금형의 재질은 일반 구조용강을 사용하였다. 하측 회전코어의 중량은 300kg이며, 사출 성형기에 장착시 자중에 의한 영향이 발생되므로 이를 고려하여 해석을 진행하였다. 금형설계 및 제작을 위해 가장 중요한 정보인 하코어 회전에 필요한 힘이며, 이러한 힘은 회전시스템 구성에 매우 중요하였다. 해석결과 마찰을 무시한 경우 최대 힘은 약 3톤으로 계산되었고, 자중에 의한 코어의 축변형은 약 4 μ m으로 계산되었다. 따라서 마찰 및 안전율을 고려하여 코어 회전을 위한 시스템 구성을 완성할 수 있었다. 최종 3차원 설계된 리저버 탱크 DTI 금형 및 제작된 금형을 Fig. 8에 제시하였다. 각각의 해석 프로세스를 통해 금형의 제작기간 및 정밀도를 향상 시킬 수 있었다.

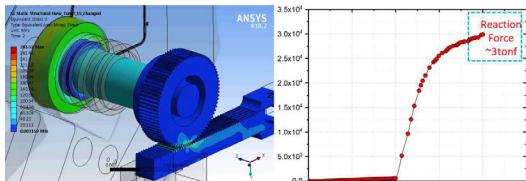


Fig. 7 Results of structural analysis of rack and pinion for turn table core rotation

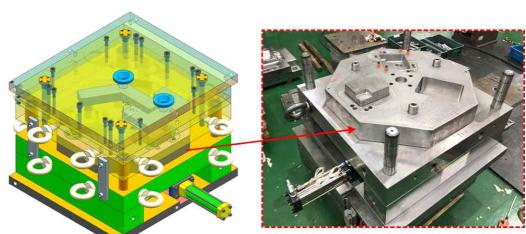


Fig. 8 Designed and manufactured DTI mold for reservoir fluid tank injection

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 생산성과 불량률을 동시에 해결할 수 있는 DTI 적용 리저버 탱크 개발을 위한 Multi-field CAE 활용 설계기술에 대해 연구를 수행하였다. 1) 설계제품의 자동차 성능검사 항목을 충족시키기 위한 모달(modal)과 하모닉(harmonic) 해석을 통한 주파수 응답특성을 살펴보았으며, 설계된 모델의 해석결과 유체를 포함한 리저버 탱크의 1차 고유진동수가 48.7Hz로 계산되어 32Hz이상의 목표치를 만족하였다. 또한 가속조건을 고려한 하모닉 해석결과 피크 주파수 영역에서 PP소재의 강도내 응력이 발생됨을 알 수 있었다. 2) 사출성형(Injection molding)해석을 통해 1차 사출성형제품의 충전특성 및 2차 사출시 공정조건의 변화에 따른 썰링부의 re-melting 특성 분석하였으며, 1차 사출 성형 후 2차 사출이 진행될 때 1차 사출모델의 온도 조건이 매우 중요함을 알 수 있었으며, 본 모델의 경우 취출 온도 122°C에 가까울수록 re-melting영역이 많이 발생됨을 확인하였다. 그러나 1차 사출 인서트의 온도 상승은 최종 2차 사출 성형 후 전 제품의 변형을 크게 발생시킬 수 있으므로, 정밀한 변형 제어가 필요한 부품 성형에서는 주의 깊게 고려되어야 하는 공정조건이다. 그리고 3) DTI 금형의 회전다이 설계를 위한 구동부에 대한 구조해석(stress analysis)을 수행하였다. 본 모델의 경우 마찰을 무시한 경우에 대해 코어의 회전을 위해서는 3톤 이상의 힘이 요구됨을 확인할 수 있었으며, 이러한 결과로부터 안전율과 효율성을 고려한 코어 회전을 위한 유압시스템 설계가 가능하였다. 1)~3)의 Multi-field CAE 프로세스를 통해 정밀하고, 효율적인 리저버 탱크의 DTI 금형설계 및 금형제작이 가능하였다. 본 리저버 탱크의 부품의 경우 가장 중요한 개발 포인트 중 하나는 자동차 장착 후 사용 중 리크 발생이 없어야 하므로, 개발된 금형을 통한 많은 사출 성형 실험 및 최적화를 통해 공정조건변화와 2차 사출 썰의 결합력의 상관관계 규명을 위한 보다 정밀한 추후 연구가 이루어져야 할 것이다.

후기

본 연구는 중소벤처기업부 기술혁신개발 시장 대응형기술개발사업(S2978687(SE200100))에 의해 수행되었으며, 연구에 도움을 주신 에스피엘(주) 관계자 여러분께도 감사드립니다.

참고문헌

- 1) A. Patila, A. Patela, and R. Purohit, "An overview of Polymeric Materials for Automotive Applications", Materialstoday: Proceedings, Vol. 4, Issue 2, Part A, pp. 3807-3815, 2017.
- 2) L. N. Shafigullin, G. F. Muhametzhanova, A. A. Muhamatdinova, A. M. Sotnikov, and G. R. Shafugullina, "Usage of polymeric fuel tanks in the automotive industry", IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 412, pp. 1-3, 2018.
- 3) S. J. A. Rizvi, "Effect of injection molding parameters on crystallinity and mechanical properties of isotactic polypropylene", International Journal of Plastics Technology, Vol. 21, pp. 404-426, 2017.
- 4) M. Kurt, O. S. Kamber, Y. Kaynak, G. Atakok, and O. Girit, "Experimental investigation of plastic injection molding: Assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products", Materials & Design, Vol. 30, No. 8, pp. 3217~3224, 2009.
- 5) W. R. Jong, S. S. Hwang, C. C. Wu, C. H. Kao, Y. M. Huang, and M.-C. Tsai, "Using a Visualization Mold to Discuss the Influence of Gas Counter Pressure and Mold Temperature on the Fountain Flow Effect", Intern. Polymer Processing Vol. 33, No. 2, pp. 255-267, 2018.
- 6) T. K. Nguyen, C. J. Hwang, and B. K. Lee, "Numerical investigation of warpage in insert injection-molded lightweight hybrid products", Int. J. of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 18, pp. 187-195, 2017.
- 7) S. J. Jeong, S. J. Moon, S. K. Jeoung, P. C. Lee, and J. H. Moon, "Optimization of process parameters of die slide injection by using Taguchi method", Korean Chem. Eng. Res. Vol. 50, No. 2, pp. 264-269, 2012.
- 8) H. J. Lee, B. D. Jooa, Y. B. Moon, C. J. Van Tyne, and Y. H. Moon, "The die turning injection (DTI) process for the fabrication of hollow parts", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212, pp. 808-816, 2012.
- 9) G. J. Bex, W. Six, B. Laing, J. D. Keyzer, F. Desplentere, and A. V. Bael, "Effect of process parameters on the adhesion strength in two component injection molding of thermoset rubbers and thermoplastics", Inc. J. Appl. Polym. Sci., Vol. 135, Issue 29, pp. 1-8, 2018.
- 10) Y. Murata, T. Nakanishi, N. Hirai, F. Kawanishi, and H. Ibuki, "Development of Mold for Demolding Resistance Measurement in Polymer Injection Molding", Sensors and Materials, Vol. 31, No. 10, pp. 3099 - 3110, 2019.

저자 소개

이 성 희(Sung-Hee Lee)

[정회원]



- 1998년 8월 : 호의대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2002년 7월 ~ 2006년 12월 : 한국생산기술연구원 선임연구원
- 2010년 12월 ~ 2014년 1월 : 한국생산기술연구원 부천금형센터 센터장
- 2014년 1월 ~ 2015년 3월 : 한국생산기술연구원 한국금형센터 그룹장
- 2007년 1월 ~ 현재: 한국생산기술연구원 금형기술그룹, 주식연구원

< 관심분야 >

고분자성형 및 금형, 급속가열, 복합재료, 전산모사/최적화