

사출성형 해석을 이용한 게이트 위치 최적화

문종신*
¹LG 전자

Optimization of Gate Location Using Computer-Aided Injection Molding Analysis

Jong-Sin Moon*
¹LG Electronics

요약 게이트 위치는 제품 품질 및 생산성 등에 큰 영향을 미치기 때문에 사출성형에 있어서 게이트 위치를 결정하는 것은 대단히 중요하며 이를 위하여 사출성형 CAE가 적용되고 있다. 사출성형 해석의 증가와 3차원 유한요소 사용은 더 많은 계산 시간을 필요로 하게 되면서, 컴퓨터 자원을 적게 사용하면서도 빠른 시간 내에 게이트 위치 최적화를 수행하는 것은 중요한 이슈가 되었다. 본 논문에서는 유동 균형과 웰드라인을 고려하기 위하여 유동 거리에 기반한 최적화 기법을 제시하였다. 그리고 원판 형상의 모델에 적용하여 웰드라인이 응력집중이 예상되는 슬릿홀을 피하면서도 유동 균형을 유지하는 결과를 도출하였다.

Abstract The gate location in injection molding has a significant influence on the quality and productivity. Therefore, injection molding CAE is used to determine the gate location. With increasing injection molding CAE and the adoption of a 3D mesh, which takes more computation time for analysis, gate location optimization in the shortest time and least resources is the most challenging issue. In this paper, we propose a methodology for optimization based on the flow length to consider the flow balance and weld line. In addition, the flow balance is obtained in the disc-type plate while the weld lines exit the slit-holes to avoid a stress concentration.

Key Words : Injection molding, gate location optimization, flow balance, weld line

1. 서론

사출 성형 공법은 많은 제품을 생산할 때, 적은 비용으로 복잡한 형상의 제품을 생산할 수 있는 장점을 가지고 있어서 자동차나 전자제품에 많이 적용되고 있다. 그러나 사출 성형에 사용되는 플라스틱 재료는 성형 과정에서 점도가 큰 반면에 점도에 큰 영향을 미치는 온도의 편차가 커서 성형상의 불균일한 조건을 만들어 내거나 기타 여러 가지 문제점을 발생시킨다.

이러한 사출 성형 상의 문제점을 해결하기 위하여 사출 성형 해석이 적극적으로 적용되고 있어 설계 단계 또는 문제 해결 단계에서 큰 도움을 주고 있다. 최근에는

사출 성형 해석(Computer-Aided Injection Molding Analysis)을 이용하여 사출 성형 금형의 설계, 성형에 필요한 조건 및 변수들을 최적화하는 데에 사용되고 있다.

사출 성형 해석을 활용한 전통적인 최적화 방법은 해석을 수행하는 엔지니어가 본인의 직관으로 해석결과를 분석하여 변수값을 변경해주는 방식이 적용되었으나, 점차 이를 자동으로 수행하기 위한 방법이 제안되고 있는 실정이다.

현재까지 이러한 최적화에 대한 연구는 주로 쉽게 값을 설정할 수 있는 성형 조건(사출 속도 분포, 수지 온도, 금형 온도 등)에 대하여 가장 활발하게 진행되어 왔으며, 중요한 설계 변수의 하나인 게이트 위치에 대해서도 연

*Corresponding Author : Jong-Sin Moon(LG Electronics)

Tel: +82-32-723-0732 email: jongsin.moon@lge.com

Received June 23, 2014

Revised July 23, 2014

Accepted October 10, 2014

구가 진행되고 있다[1].

이미 기술한 바와 같이 최근에는 사출 성형 해석이 널리 적용되고 있어 이러한 최적화 연구는 해석 결과를 기반으로 진행되고 있으며, 이를 위하여 게이트 위치에 대한 최적화는 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

- 사출 성형 해석에 사용되는 유한 요소를 기반으로 적용이 가능하여야 한다.
- 실제로 많이 사용되고 있는 다점 게이트 (multi-gate)에 적용 가능해야 한다.
- 게이트의 형태 또는 금형 설계의 제약으로 인하여 게이트 위치의 제한이 수용될 수 있어야 한다.
- 게이트의 위치에 의하여 영향을 받는 웰드라인 (weld line)을 고려할 수 있는 방안이 마련되어야 한다.
- 전체 최적화에 소요되는 시간이 적용 가능한 수준으로 짧아야 한다.

Pandelidis 등[2,3]은 일련의 논문을 통하여 공정조건 및 게이트 위치를 최적화하는 방법을 제안하였다. 이들은 직접적으로 사출 제품의 품질에 영향을 미치는 유동 해석 후의 온도 차이, 과보압 요소 수, 마찰 과열된 요소 수 등의 인자들을 이용한 목적 함수를 구성하여 최적화를 수행하였다. 그러나 게이트 위치의 최적화는 각각의 경우들에 대하여 유동 해석을 수행하여 주어진 위치를 평가하게 됨에 따라 전체 최적화에 많은 시간이 소요된다는 문제점을 갖고 있다. 또한 최적화 과정에서 반복되는 횟수가 100회 이상이 소요될 정도가 되어 현실적으로 적용되기에는 어려운 수준이었다.

Sexana 등[4]은 게이트 위치를 형상 정보만으로 추출하기 위하여 기준으로 유동체적(flow volume)과 유동거리(flow length)를 제시하였다. 이러한 연구는 비다양체 기하형상(Non-manifold topology) 기반의 CAE 환경에 대한 연구였기 때문에 실제의 제품 형상에 적용되는 데에는 문제점을 갖고 있으며, 다점 게이트에 적용이 어렵다는 한계를 갖고 있다. 그러나 유동체적과 유동거리의 게이트 위치를 형상정보로 이용하여 최적화할 수 있는 기반을 마련하였다는 데서 큰 의미를 갖는다.

유동 거리를 기반으로 Ryim 등[5,6]은 실제의 모델에 다점 게이트의 적용이 가능한 기법을 제시하였다. 하지만 웰드라인을 고려하기 위한 자동 게이트 최적화 알고리즘을 구체화하지는 못하였다.

현재 모든 사출 성형 해석기법들이 게이트의 위치를

유한 요소(finite element)의 절점(node)에 지정하도록 되어 있기 때문에 본 연구에서도 최적의 위치를 절점 기준으로 선정할 수 있도록 하였다.

본 논문에서는 유한 요소를 기반으로 하는 기하학적 형상에 대한 게이트 위치 최적화 방안을 검토하고, 실제 모델에 대한 적용을 통하여 검증하였다.

2. 최적화의 목적 함수

2.1 최단 거리의 계산

사출 성형의 게이트 위치 선정을 위해서는 필연적으로 최단 거리의 계산이 이루어져야만 한다. 기존에 적용되었던 Sexana 등의 연구 결과나 Ryim 등의 연구결과에 사용된 유동체적 및 유동거리가 모두 각 절점간의 최단 거리를 기반으로 하고 있기 때문에 최단 거리의 계산은 중요하다.

최단 거리의 계산은 반복되는 계산을 통하여 산출되며, 최적화에 적용되는 절점에 대하여 모든 절점에 대하여 산출해야 되는 부분이기 때문에 중요하며 여기에서는 Saxana, Ryim 등이 적용하였던 Dijkstra 알고리즘을 이용하여 산출하도록 한다[7].

2.2 목적 함수

현재까지 기하학적 형상을 활용한 게이트 위치 최적화에 주로 적용하였던 목적함수는 다음과 같다.

Minimize

$$fl_vol(P_i) = \sum_{j=1}^{nnode} A_d(i,j)vol(j) \quad (1)$$

$$A_d(i,j) = 1 - \beta_d \frac{dist(i,j)}{d_{max}} \quad (2)$$

nnode : 유한 요소 모델의 전체 절점수

d_{max} : 모든 절점쌍에 대한 최단 거리의 최대값

P_i : 게이트 후보 절점

dist(i,j) : i절점과 j절점 사이의 최단거리

β_d : 게이트의 수를 고려한 factor

여기에서는 유동체적을 기준으로 최적화를 수행하였으며, 적용된 모델에 대하여 합리적인 결과가 나온 것으

로 밝히고 있다. 그러나 이러한 목적함수는 β_d 라는 게이트 수에 따른 변수가 특정적으로 정의되기 어렵다는 한계를 갖게 된다. β_d 가 정확한 물리적 의미를 통하여 확정될 수가 없기 때문에 이 값은 다양한 모델을 이용한 반복적인 검증을 통하여 특정될 수 밖에 없으나, 이런 방식으로 β_d 값을 정하더라도 이 값이 일반적인 값으로 적용될 수 없다는 문제점을 갖게 된다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위한 방법으로 유동거리를 활용하는 목적함수를 제시한다.

Minimize

$$fl_len(gSet) = Maximum(dist(gSet, i, i = 1, nnode)) \quad (3)$$

gSet : 게이트 후보 절점 중에서 지정된 게이트 수자만큼의 절점으로 구성된 게이트 위치 조합(set)

dist(gSet, i) i 절점에 가장 가까운 gSet의 소속된 절점까지의 거리

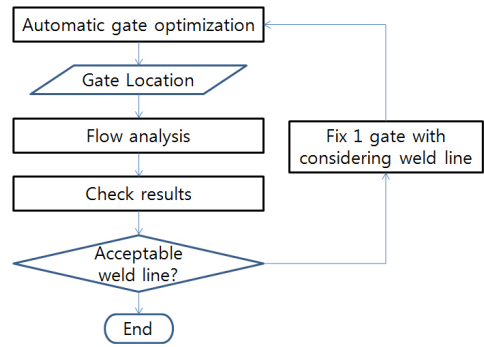
이러한 목적함수를 적용하게 됨에 따라 기존의 목적함수가 갖고 있는 β_d 의 불확실성이 제거되어 동일한 기준으로 다수 게이트에 대하여 일관성 있는 최적화를 수행할 수 있게 된다. 또한 이러한 접근은 기본적인 유동균형(flow balance)의 원리가 유동거리의 최소화라는 점에도 부합된다고 할 수 있다.

3. 웰드라인의 고려

웰드라인은 2개 이상의 유동선단(melt front)이 만나서 형성되며, 이 부분은 제품의 외관 품질상의 문제가 될 뿐 아니라, 구조적으로도 취약하여 사출 성형 상의 주요 불량 요인 중의 하나이다.

다점게이트를 사용하거나 금형에 인서트(insert) 또는 구멍(hole)이 존재하게 되면 웰드라인은 항상 발생한다. 이 때 게이트의 위치를 조절하게 되면 웰드라인의 위치를 이동시키거나 그 길이를 변화시킬 수 있다.

웰드라인은 기본적으로 게이트의 위치에 가장 큰 영향을 받게 되며, 제품의 살 두께 등으로 유동을 조절하여 제어하게 된다. 그러나 제품의 살 두께를 조절하는 것은



[Fig. 1] Flow of gate determination using automated gate location optimization with controlling weld line

제품 설계와 관련된 부분으로 금형의 수정을 쉽게 결정할 수 있는 것이 아니기 때문에 게이트의 위치 등을 통한 제어가 바람직하다.

Fig. 1에는 본 연구에서 제안하고 있는 웰드라인 제어를 위한 알고리즘의 흐름도(flow chart)가 도시되었다. 이 방식은 기본적으로 일점 게이트에는 적용될 수 없지만, 웰드라인이 다점 게이트에서 일반적으로 발생한다는 점을 고려할 때 유용성이 있다고 할 수 있다.

웰드라인을 고려하지 않고 게이트 위치를 선정 한 이후에 해석을 수행하고, 해석 결과에 나타난 웰드라인의 위치를 확인하여 선정된 다점 게이트 위치 중 하나의 위치를 사용자가 직접 이동하여 지정함으로써 웰드라인의 위치를 제어할 수 있게 된다.

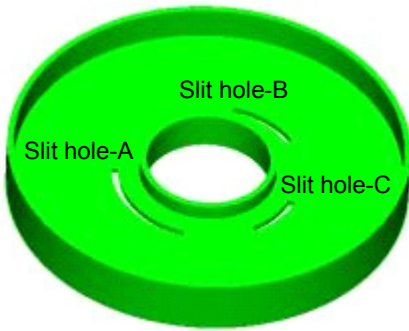
실제로 다점게이트를 사용할 때, 가로-세로 비율이 매우 큰 직사각형 형태의 경우가 아니어서 한 개의 게이트를 이동시키면 다른 게이트의 위치가 순환적으로 이동할 수 있는 제품 형상에 대해서는 이와 같은 알고리즘은 효율성을 가진다.

본 연구에서 제안한 웰드라인 조절 알고리즘을 적용하기 위해서는 많은 게이트 후보군 중에서 사용자가 원하는 절점에 게이트를 고정할 수 있도록 고안되어 있어야 한다.

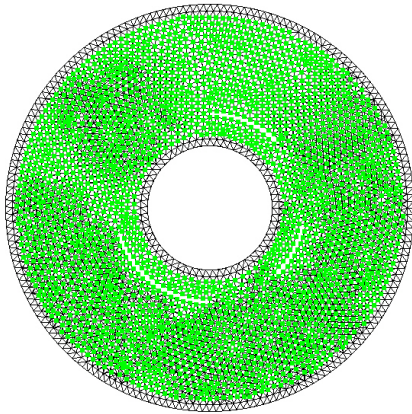
4. 적용사례

4.1 모델 및 개요

Fig. 2의 모델을 이용하여 본 연구에서 제안하고 있는 게이트 위치의 최적화 방식의 효율성을 확인하고자 한다.



[Fig. 2] Shape of the test model(Out diameter 180 mm, inner diameter 55 mm)



[Fig. 3] Gate candidates for the optimization

확인 모델은 두께 3 mm, 외경 180 mm 크기를 가지는 전형적인 원판형상(disk plate)으로 3점 핀포인트(pin-point) 게이트를 적용하여 평면에 게이트가 위치하도록 설계하였다. 또한 길이가 다른 세 개의 슬릿홀을 원판의 비대칭 위치에 도입함으로써 다점 게이트에 의하여 형성되는 웰드라인의 생성위치를 확인하고자 하였다. 해석을 위한 모델링은 95,981 개의 요소와 21,325 개의 절점으로 구성하였으며, 사출 성형 해석은 상용 해석 S/W인 Moldflow[8]를 이용하였다.

적용된 재료는 Dupont 사의 유리 섬유가 35% 보강된 PA66 Zytel 70G35L을 적용하였으며, 금형온도와 사출온도는 권장 사출 조건에 따라 95°C, 295°C로 설정하였다. 성형 해석은 Cross-WLF[9] 점도모델을 사용하였으며, 관련된 계수들은 Table 1에 나타내었다. 그리고 사출속도는 1초의 사출시간에 유동이 완료되도록 설정하였으

며, 99%지점에서 보압절환(v-p switchover)이 이루어지도록 하였다.

[Table 1] Viscosity model constants for Zytel 70G35L

Coefficients	Value
n	0.50182
τ^* (Pa)	19371
D_1 (Pa.s)	1.2695×10^{23}
D_2 (°K)	323.16
D_3 (°K/Pa)	0.0
A_1	55.014
A_2 (°K)	51.6

4.2 1차 최적화

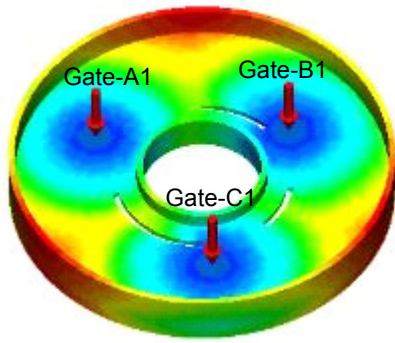
Fig. 4는 웰드라인의 생성형태를 파악하기 위하여 수행한 1차 최적 게이트에 대한 해석 결과를 나타내고 있다. (a) 충전시간(Fill time) 분포를 통하여 각각의 게이트(Gate-A1, B1, C1)를 기준으로 유동 균형이 잘 유지되었음을 확인할 수 있다. 각각의 게이트가 반경방향으로 일정한 각도를 이루며 위치하지 않는 것은 유동 흐름을 막고 있는 길이가 다른 슬릿홀(Slit hole-A, B, C)들이 원판 위에 비대칭으로 존재하기 때문이다.

(b)는 생성된 웰드라인을 나타내고 있는 것으로 다점 게이트에 의하여 각 슬릿홀에서 웰드라인이 생성된 것을 알 수 있다. 특히 슬릿홀-B에서는 모서리에서 웰드라인이 생성되고 있음을 확인할 수 있다. 슬릿홀의 모서리는 모델이 외력을 받을시 응력집중이 발생하는 부분이기 때문에 이러한 슬릿홀-B의 모서리에 생성된 웰드라인은 모델의 구조적인 안전성을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 웰드라인이 슬릿홀의 모서리에 생성되지 않도록 조절해야 할 필요성이 있다.

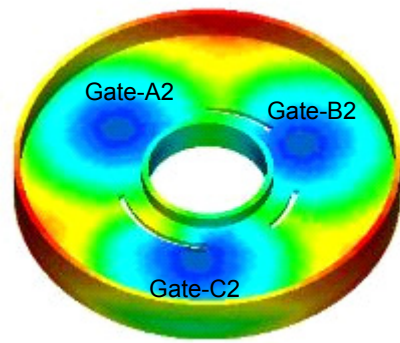
4.3 2차 최적화

1차 게이트 최적화 결과로부터 모델의 구조적 안정성을 저하시킬 수 있는 슬릿홀-B의 모서리에서 생성된 웰드라인의 위치를 조절하기 위하여 2차 게이트 최적화를 수행하였다.

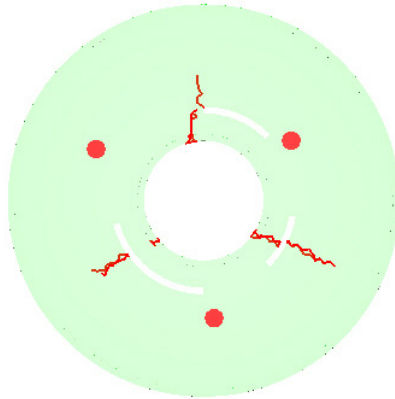
웰드라인의 위치를 제어하기 위하여 1차 최적화에 의한 게이트-B1의 위치를 시계방향으로 회전시켜서 게이트-B2를 고정한 후 나머지 게이트의 위치 최적화를 수행하였다. 게이트-B2의 위치가 게이트-B1으로부터 시계방



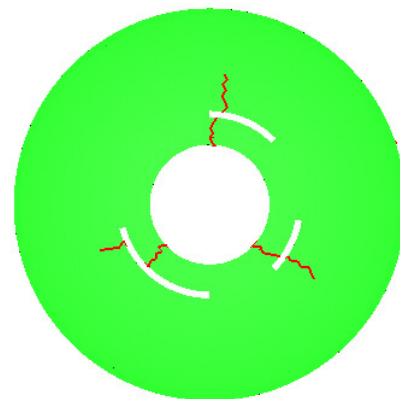
(a)



(a)



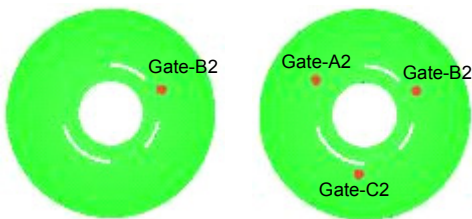
(b)



(b)

[Fig. 4] Analysis results of 1st step gate optimization. (a) Fill time, (b) Weld line

[Fig. 6] Analysis results of 2nd step gate optimization. (a) Fill time (b) Weld line



(a)

(b)

[Fig. 5] 2nd step gate location optimization (a) Fixed location of Gate-B2 (b) Gates(A2, C2) obtained with fixing Gate-B2

[Table 2] Analysis results of maximum pressure and maximum clamping force for the 1st and 2nd step gate optimization.

Optimization step	1st	2nd
Maximum pressure (MPa)	20.9	22.8
Maximum clamping force (ton)	20.8	24.2

향으로 회전되어 고정됨에 따라, 나머지 게이트들의 위치도 밸런스를 고려하여 시계방향으로 회전하게 된다. Fig. 5는 고정시킨 게이트-B2의 위치 및 이를 통해 최적화된 전체 게이트(A2, B2, C2)의 위치를 나타내고 있다.

Fig. 6은 Fig. 4의 게이트-B1을 이동시켜 게이트-B2에 고정시킨 조건의 최적 게이트에 대한 해석 결과를 나타내고 있다. 전체적으로 게이트의 위치가 1차 최적화 결과 대비하여 시계방향으로 회전하게 됨에 따라, Fig. 4와 같이 각 슬릿홀에서 생성된 웰드라인도 시계방향으로 이동하여 생성됨을 알 수 있다. 1차 게이트 최적화 결과 (Fig. 4 (b))에서 Slit hole-A의 모서리에 발생하던 웰드라인이 슬릿홀의 안쪽으로 이동하게 되어, 응력집중부인

슬릿홀 모서리에서 웰드라인이 제거되어 있음을 확인할 수 있다. 또한 1차 게이트 최적화(Fig. 4 (a))와 비교하여 유동 균형도 크게 악화되지 않은 것으로 보여 지고 있다.

Table 2는 1차 및 2차 최적화 결과에 대한 최대압력(maximum pressure) 및 최대 형체력(maximum clamping force)을 나타내고 있다. 제약조건이 없는 1차 최적화의 결과가 다소 낮은 최대압력, 최대 형체력 값을 나타내고 있으나, 강제로 게이트 1점의 위치를 고정한 2차 최적화의 결과도 최대 압력 및 형체력이 크게 증가하지는 않았다. 최대 압력 및 형체력이 충전 분포에 상당히 민감한 결과를 가져오기 때문에 약간의 유동 균형의 이상에도 쉽게 50%이상의 차이를 나타낸다는 것을 고려할 때, 2차 최적화의 결과는 1차와 같이 균일한 충전 분포를 나타내고 있음을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 다점 게이트 시스템에서의 게이트 위치 최적화를 위한 새로운 방안을 제시하였다. 또한, 최적화 과정에서 유동 균형 뿐 아니라 웰드라인도 고려할 수 있는 방법론을 제안하였고, 사례 연구를 통해 그 효과성을 확인하였다. 이러한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 다점 게이트에 대한 일관성 있는 최적화를 수행하기 위하여 유동거리를 활용한 목적함수를 제시하였다.
- (2) 사용자가 여러 게이트 중 한 개의 게이트 위치를 원하는 절점에 지정함으로써 최적화 과정에서 웰드라인을 조절할 수 있는 방안을 마련하였다.
- (3) 원관형상 제품에 대한 최적화 사례를 통해, 응력집중이 예상되는 슬릿홀 모서리에 웰드라인이 형성되지 않도록 하면서도 유동 균형을 유지한 결과를 도출하였다.

본 연구에서 개발된 최적화 기법은 응력집중 부위에 대한 웰드라인 회피설계가 반드시 필요한 복잡한 형상의 플라스틱 내구부품 개발에 많이 활용될 것으로 기대된다.

References

[1] R. K. Irani, B. H. Kim, J. R. Dixon, "Towards Automated Design of the Feed System of Injection Molds by

Integrating CAE, Iterative Redesign and Features," *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, Vol. 117, No. 1, pp. 72-77, 1995

DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2803281>

[2] I. Pandelidis, Q. Zou, "Optimization of Injection Molding Design. Part I : Gate Location Optimization," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 30, No. 15, pp. 873-882, 1990

DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760301503>

[3] I. Pandelidis, Q. Zou, "Optimization of Injection Molding Design. Part II : Molding Conditions Optimization," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 30, No. 15, pp. 883-892, 1990

DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760301503>

[4] M. Saxena, R. K. Irani, "An Integrated NMT-Based CAE Environment - Part II : Applications to Automated Gating Plan Synthesis for Injection Molding," *Engineering with Computers*, No.9, pp. 220-230, 1993

DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01201902>

[5] W. Ryim, Y. Kim, K. Seol, "Gate Optimization for Injection Molding Process", *Proceedings of the KSPE 1996 Spring Conference*, pp. 787-791, 1996

[6] W. Ryim and S. M. Yun, "Determination of Gate Locations in Computer-aided Injection Molding Analysis," *ANTEC 2007*, pp. 649-652, 2007

[7] A. V. Aho, J. E. Hopcroft and J. D. Ullman, *Data Structure and Algorithms*, Addison-Wesley, 1983

[8] P. Kennedy, *Flow Analysis Reference Manual*, pp. 59-90, Moldflow Pty. Ltd., Australia, 1993

[9] M. M. Cross, "Relation between viscoelasticity and shear-thinning behavior in liquids," *Rheologica Acta*, Vol. 18, No. 5, pp. 609-614, 1979

DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01520357>

문 중 신(Jong-Sin Moon)

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 기계설계과 (공학사)
- 1992년 2월 : 서울대학교 공과대학원 기계설계학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 서울대학교 공과대학원 기계설계학과 (공학박사)
- 2002년 5월 ~ 2014년 2월 : LG화학 부장

• 2014년 2월 ~ 현재 : LG전자 수석연구원

<관심분야>

사출성형, 컴퓨터응용설계