

공리적 개념을 적용한 사출성형 시스템의 최적설계

김종현^{*} · 이종수[†] · 차성운^{**}

(2002년 12월 16일 접수, 2003년 4월 7일 심사완료)

The Optimization of Injection Molding System Using Axiomatic Approach

Jonghun Kim, Jongsoo Lee and Sung Woon Cha

Key Words : Micro Genetic Algorithm(마이크로 유전알고리즘), Evolutionary Computing(진화연산), Injection Molding(사출성형), Runner System(러너 시스템), Axiomatic Approach(공리적 접근), Functional Requirement(기능적 요구사항), Design Parameter(설계 요소)

Abstract

A traditional mold design has been conducted by an experience-based trial and error, whereby the mold designer would decide the gate locations and processing conditions based on the caring characteristics and its functional requirements. The paper suggests an optimal gate location and processing conditions in the injection molding using a global search method referred to as micro genetic algorithm(μ GA). μ GA yields the optimal solution with a small size of population without respect to design variables for saving time that is needed to calculate the fitness of many individuals. Due to the reason, the paper uses a commercial analysis package of injection molding(CAPA) to analysis a state of flux. In addition to that, axiomatic approach is applied in the beginning of design. It is a useful method to draw a well-organized and reasonable idea to handle a problem.

1. 서론

최근 산업의 발달이 급속도로 이루어지고 있으며, 소비자들의 요구가 증가됨에 따라 많은 제품들이 시간과 생산비를 줄이기 위하여 사출성형에 의하여 생산되어지고 있다. 이러한 필요성에 따라 사출금형의 설계와 사출성형 공정조건에 관한 많은 연구들이 있어왔다.⁽¹⁻⁴⁾ 이러한 연구들은 경비 절감과 더불어 최종 생산품의 품질의 향상을 주된 목적으로 한다. 경비 절감을 위해서는 재료의 선택이나 용융된 수지의 주입 속도와 같은 공정조건을 변화시켜 문제를 해결을 하고 있다. 그리고 최종 제품의 불량률을 줄이기 위해서는 불량률의 원

인을 찾아 그것을 제거하는 과정을 거쳐 문제가 해결된다. 사출성형 제품의 불량률은 여러 가지 복합적인 요인에 의해 발생하지만 대부분의 불량률은 유동 불균형에 의해 발생한다. 만일 동시 충전이 이루어지지 않으면 먼저 충전된 부위는 냉각되면서 과포압(over-packing) 상태에 놓이게 되고, 이는 다른 부위와의 수축률 차이를 일으키며, 최종적으로 최종제품의 형상 변형의 직접적인 원인이 된다. 이러한 불량률을 줄이기 위하여 유동 패턴 개선에 가장 많이 사용하는 방법이 게이트(gate)의 위치 조정이다. 이러한 적절한 게이트 위치 선정은 유동해석과 유동 패턴 분석의 과정을 통하여 이루어지며, 이를 통해 제품 전체가 동일하게 충전(filling)된다. 이 밖에도 용융 수지를 금형에 주입할 때 발생하는 잔류응력이나 각 부분의 압력차에 의한 강도 저하나 휨 같은 최종품의 기계적 성질 변화 등의 불량률이 있다. 그러므로, 사출성형 시스템의 설계 시에 잔류응력이나 각 부분의 압력차를 최소화할 필요가 있다.

본 연구에서는 사출성형의 성능 향상을 위한 시스템의 설계를 위하여 단순한 최적화를 통한 설계

[†] 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : jleej@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-4474 FAX : (02)362-2736

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 연세대학교 기계공학부

를 벗어나 설계 도입부에 공리적인 개념을 적용한다. 공리적 개념을 도입함으로써 시스템의 설계시에 빈번하게 발생하는 설계오류의 가능성을 배제하고, 문제 해결 방안의 요소들을 설계초기 단계에서부터 고려하여 문제 해결을 위해 체계적이고, 합리적인 접근 방법을 도출한다. 이로 인하여 시간과 경제적인 측면에서 효율적으로 문제를 해결할 수 있다.⁽⁵⁾ 또한, 사출성형에 있어서 게이트 위치의 최적화 같은 경우 비선형성이 강하여 일반적인 목적함수의 구배 정보를 이용하는 방법으로는 최적화를 수행하는데 한계가 있다. 이와 같은 이유로 제약 조건이 많으며, 비선형적인 문제와 해결에 있어서 많이 사용되는 전역 탐색 기법으로 많은 진화 연산으로 인한 시간적인 제약이 일반적인 유전 알고리즘 보다 개선된 마이크로 유전 알고리즘을 이용하였다.

2. 공리적 접근

2.1 공리설계

실패한 설계의 많은 경우는 불명확한 목표 또는 기능적 요구사항, 부적절한 조직 구조, 잘못된 의사 반영 과정(feedback loop) 등에 기인하며, 이는 문제해결에 있어서 접근 방법의 오류라고 볼 수 있다.⁽⁶⁾ 일반적으로 설계는 오랜 시행착오를 거쳐 축적된 기술을 기반으로 많은 의사 결정 과정을 거쳐서 이루어진다. 이러한 설계를 위하여 설계초기 단계부터 어떠한 문제의 해결을 위한 아이디어를 구체화하여 체계적이고, 합리적인 접근 방법을 도출하기 위한 방법을 제시하기 위해 고안된 설계 기법이 공리설계이다. 공리설계는 1990년 Nam P. Suh 에 의해서 제안되었다.⁽⁵⁾ 좋은 설계의 여부를 판단하는 기준으로 기능과 물리적 변수 사이의 관계를 나타내는 독립공리와 설계의 복잡성에 대한 정보공리가 있다. 공리설계는 이러한 독립공리와 정보공리에 근거하여 설계 목적에 부합하는 기능적 요구 조건(functional requirements, FRs) 들을 정의하고, 이를 만족시키기 위한 적절한 설계파라미터(design parameters, DPs)를 결정하는 것으로 시작되어진다. 이때 주의해야 할 점은 FRs 와 제약조건의 수를 최소화 하여야 한다는 정보공리를 만족시키는 것이다. 과도한 FRs 와 제약조건은 수용될 수 없거나 불필요하게 복잡한 해를 초래하며, 이로 인해 신뢰성이 감소할 수 있기 때문이다. 공리설계를 위한 다음 과정으로 정의된 기능적 영역의 FRs 와 물리적 영역의 DPs 서로간의 관계를 연결시키는 과정(mapping)을 거쳐서 이를

아래의 식 (1)과 같이 행렬형태로 구성한다.

$$\{FR\}=[A]\{DP\} \quad (1)$$

여기서 {FR}는 기능요구사항 벡터이고, {DP}는 설계파라미터 벡터, [A]는 설계행렬(design matrix)를 나타낸다. 이 설계행렬이 대각 행렬일 경우 즉, 하나의 FR 이 하나의 DP 에 의해서만 만족되어지는 경우 이를 비연성설계(uncoupled design)라고 하고, 역삼각 행렬일 경우 비연성화설계(decoupled design), 그리고, 각각의 FR 들이 모든 DP 의 변화에 지배를 받으면 연성설계(coupled design)라 한다.

이렇게 구성된 행렬들을 연성 되지 않게 재배치하여 문제해결 순서와 문제해결 방향을 결정하게 된다. 연성설계의 경우 어떤 기능요구사항의 일부를 다른 기능에 중속 되도록 하기 때문에 정보 FRs 는 독립성을 유지해야 한다는 독립공리를 위반하게 된다. 만일, 연성현상이 FRs 의 개수에 비해 DPs 의 개수가 적어서 발생하는 경우라면 새로운 DPs 를 추가 시키거나 DP 로 고려할 요소를 재 선정 함으로써 비연성화 할 수 있다. 설계행렬이 비연성설계나 비연성화설계의 형태로 구성되면, 이를 통하여 FRs 를 만족 시키기 위한 효과적인 방안을 제시 하게 된다.

2.2 공리적 접근을 통한 시스템 설계

본 연구에서는 사출성형의 성능 개선을 위하여 시스템을 최적화 하고자 한다. 이 문제의 경우, 소비자의 요구사항(customer attributes, CAs)은 최종 생산품의 기계적 성능을 향상시켜, 궁극적으로 불량률을 줄이는 것이다. 이 때, FRs 는 냉각과정에서 수축에 의해 발생하는 치수 변화에 대해 제품의 치수 정밀도를 높이는 것과 부분별 수축률의 차이에 의한 최종 생산품의 휨이 평가 기준을 만족할 것 그리고, 열화에 의한 수지의 기계적 성질의 변화가 없어야 한다는 것이다. 그러나 이들은 유동해석만으로 측정이 불가능하며, 이들을 평가할 수 있는 다른 요소들을 도입하여야 한다. 이에 본 논문에서는 용융수지를 금형에 주입할 때 발생하는 최대사출압력을 줄이고, 뒤튕림 방지를 위하여 금형 내부에서 압력이 고르게 분포되어야 하며 용융 수지가 금형에 주입된 후 발생하는 잔류응력이 작아야 한다는 세 가지의 조건을 FRs 로 결정하였다.

기존의 설계 방식은 용융수지를 금형 내부로 주입하기 위한 게이트의 위치를 수정함으로써 이러한 문제들을 해결하였다. 이를 수학적으로 표현하

면 식 (2)와 같다.

$$\begin{cases} \max_pressure \\ \text{diff_pressure} \\ \max_stress \end{cases} = \begin{bmatrix} X \\ X \\ X \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} \text{location of gates} \end{array} \right\} \quad (2)$$

여기서, 설계행렬 내부의 X 표시는 게이트의 위치 변화에 따른 각각의 FR 들의 변화량을 나타낸다. 식 (2)에서와 같이 게이트의 위치변화 만을 DP 로 고려하여 최대 사출압력, 압력분포, 잔류응력 세 가지의 FRs 를 만족시키는 것은 공리설계의 측면에서 볼 때 연성설계가 되므로, 좋지 않은 설계가 된다. 즉, FRs 의 개수에 비해 DPs 의 개수가 너무 적어서, 연성설계가 되었다는 것을 뜻한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 새로운 DPs 로 최대 사출압력에 영향을 많이 주는 용융수지의 주입 시간과 잔류 응력과 관련이 있는 용융수지의 온도를 추가하기로 한다. 그러므로 FRs 와 DPs 는 아래와 같이 구성된다.

FR₁ = maximum pressure

FR₂ = difference of pressure in the cavity

FR₃ = maximum residual stress

DP₁ = injection time

DP₂ = location of each gate

DP₃ = temperature of melt polymer

사출성형의 특성으로 인하여 위의 FRs 와 DPs 들은 서로 연성 되어 있지만, 시스템 설계 시에 공리적인 개념을 추가하기 위해 어떠한 DP 가 각각의 FR 에 주는 영향이 다른 영향들에 비하여 극히 작다고 판단되면, 이를 무시하기로 한다. 새로운 DPs 를 추가하여 FRs 와 DPs 간의 관계를 다시 결정하여 행렬형태로 나타내면 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} \max_pressure \\ \text{diff_pressure} \\ \max_stress \end{cases} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ 0 & X & 0 \\ 0 & X & X \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} \text{injection time} \\ \text{location of gates} \\ \text{melt temperature} \end{array} \right\} \quad (3)$$

여기서, 설계행렬 내의 X 는 각각에 FR 에 해당하는 DP 가 영향을 준다는 뜻이고, 0 은 영향을 주지 않는다는 것을 나타낸다. 즉, 최대 사출압력은 사출 시간, 게이트들의 위치 조합, 용융 수지의 온도 변화 모두의 영향을 받으며, 금형 내에서의 압력 분포는 게이트들의 위치에만 영향을 받는다. 그리고, 잔류 응력은 사출 시간의 변화에 둔감하

며, 게이트들의 위치 변화와 용융 수지의 온도 변화에 민감하다는 것을 표현하고 있다. 식 (3)에 나타난 설계행렬을 비연성화설계의 형태로 나타내기 위해 FRs 와 DPs 의 순서를 재배치 하면 아래의 식 (4)와 같이 설계행렬의 형태가 역삼각형으로 나타난다.

$$\begin{cases} \text{diff_pressure} \\ \max_stress \\ \max_pressure \end{cases} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} \text{location of gates} \\ \text{melt temperature} \\ \text{injection time} \end{array} \right\} \quad (4)$$

이렇게 구성된 설계행렬을 기준으로, 기능적 요구사항을 만족 시키기 위한 설계순서를 결정한다. 우선, 게이트의 위치 선정을 통하여, 금형내의 압력이 고르게 분포하도록 하고, 잔류 응력을 줄이기 위해 용융 수지의 온도를 조절한다. 이때 금형 내부의 압력차는 수지의 온도 변화에 영향을 받지 않기 때문에 변화가 없다. 그리고, 최대 사출 압력에만 영향을 주는 파라미터인 수치 주입 시간을 결정하여 각각의 FR 들을 모두 만족 시키는 설계를 할 수 있다.

3. 마이크로 유전알고리즘

최근 수치해석 기법과 컴퓨터 기술의 발달을 통하여 다양한 설계 기법들이 연구되어지고 있으며, 실제로 이러한 최적화 기법들을 공학적 문제에 적용하여 최적설계가 이루어지고 있다. 그러나 많은 최적화 알고리즘들이 개발되어 왔음에도 불구하고 각각의 방법들은 한계를 가지고 있게 된다. 예를 들어, 목적 함수의 구배 정보를 이용한 일반적인 최적화 방법은 빠른 시간 내에 최적해를 구할 수 있는 장점이 있는 반면, 초기치에 매우 민감하여 전역 최적해(global optimum)로 수렴하지 못하고 국부적인 최적값(local optimum)으로 수렴할 가능성을 배제할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 제약 조건이 많으며, 비선형적인 문제 해결에 있어서 유전 알고리즘과 같은 전역 탐색 기법이 많이 사용되고 있다. 유전 알고리즘은 적자 생존(survival of the fittest)과 유전 메커니즘을 바탕으로 하는 탐색 알고리즘으로 주어진 설계 환경에 대한 각 개체의 적합성 함수의 값이 큰 유전자를 선택하여 이들을 교배(crossover)하거나 재생산(reproduction) 하며, 때에 따라서는 돌연변이(mutation) 등을 수행하여 우수한 유전 형질이 다음 세대에 전달되게 한다. 이러한 과정을 통하여 진화(evolution)가 진행됨에 따라 주어진 설계환

Table 1 Comparison between SGA and μ GA

	Simple genetic algorithm (SGA)	Micro-genetic algorithm (μ GA)
Population size	dependent upon string length	3 ~ 7
Selection	roulette wheel selection, expected-value selection, ranking selection, elitist, tournament, etc.	elitist, tournament
Crossover	0.6 ~ 0.8	1.0
Mutation	0.01 ~ 0.05	0.0
Convergence	global convergence	nominal convergence

에서 가장 적합한 개체만이 살아 남게 된다.^(7,8) 하지만, 이러한 유전알고리즘은 전역 최적해를 얻을 수 있는 장점이 있는 반면, 많은 개체들이 여러 세대(generation)를 거쳐 진화하는 동안 적합도 함수의 계산에 오랜 시간을 필요로 하는 단점이 있다. 이러한 문제점은 최적화 문제해결에 있어서 유전알고리즘을 사용하는데 많은 제약을 가져 왔다. 이러한 이유로 최근에는 적은 수의 개체로 진화 연산을 수행하는 마이크로 유전알고리즘에 관한 많은 연구들이 활발히 진행되어지고 있다.^(9,10)

마이크로 유전알고리즘은 1988년 D. E. Goldberg에 의해 기본적인 방법이 제시되어 연구되기 시작하였으며, 1989년 K. Krishakumar에 의해서 처음으로 실제적인 최적화 문제에 적용되었다. 기존의 유전알고리즘과 마이크로 유전알고리즘의 가장 큰 차이점은 개체군의 크기 결정이다. 일반적인 유전알고리즘(simple genetic algorithm, SGA)의 경우 개체군의 크기 결정은 De Jong (1975)과 Grefenstette (1956)의 연구에 기초하여 매개변수에 따라 대부분 결정되어 진다. 이렇게 많은 수의 개체들에 의한 진화 과정에서 소요되는 시간적인 결점을 보완하기 위하여 마이크로 유전알고리즘에서는 변수에 관계없이 적은 수의 개체와 유전알고리즘의 연산자(GA operator)를 이용한 연속적인 진화 수행을 통하여 전역 최적해를 찾아낸다.

유전알고리즘의 진화연산을 위한 계산 비용이 높은 단점으로 인하여 이를 보완하기 위해 '적합도 함수의 계산 비용을 줄이기 위해서는 3 개의 개체만으로 진화 연산이 가능하다'는 Goldberg의 개념에 기초하여 최근 연구되어지기 시작한 마이크로 유전알고리즘은 매개변수의 크기나 복잡함에 관계없이 매우 적은 수의 개체군을 사용하여 진화연산을 수행하고, 각 세대의 초기 개체군 생성 시에 임의적으로 개체를 생성하는 특징이 있으며, 이러한 작업이 돌연변이 연산(mutation)의 역할을 대신하기 때문에 돌연변이 연산을 수행하지 않는다. 돌연변이 연산자를 사용하지 않으므로, 교배연산 비율(crossover rate)은 1.0으로 하고, 적은 수의 개체로 진화 연산을 수행하기 위하여 유전알고리즘의 연산자를 통하여 진화를 수행한 이후 유전형의

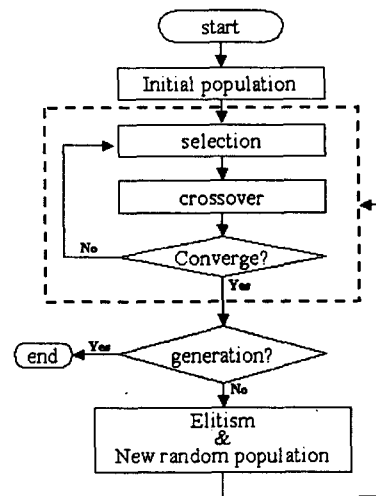


Fig. 1 Flow chart of μ GA

유사성이 일정 정도 이상 수렴되어야 다음 세대로 넘어가는 특징이 있다.

마이크로 유전알고리즘과 일반 유전알고리즘의 차이점을 Table 1에 나타내었으며, 본 연구에서 사용된 마이크로 유전알고리즘의 구성도는 Fig. 1에 나타나 있으며, 그 특징과 진화 연산 과정은 다음과 같다.

마이크로 유전알고리즘을 시행하기 위한 초기 개체들을 난수 발생기를 통하여 설계 변수들로 이어진 이진 코드를 무작위로 생성한다. 그리고 이들 개체들 중 임의의 개수만큼의 개체를 선택하고 이들 선택된 개체들 사이에서 최고의 적합도를 갖는 개체 선발(tournament selection)을 통하여 새로운 개체군을 생성하고 교배 연산을 실행한다. 이러한 개체 선택작업은 다른 선택 방법에 비하여 다양성을 보장한다. 위의 과정은 개체들의 유전형의 유사성이 일정 수준 이상으로 수렴(nominal convergence) 될 때까지 반복과정을 거치게 되고 한 세대를 이루게 된다. 그리고, 각 세대에서의 우수한 유전 형질을 보존하고, 진화가 진행됨에 따라 적합도의 상승을 보장하기 위하여, 가장 높은 적합도를 가지는 개체(elitism)를 새로운 세대를

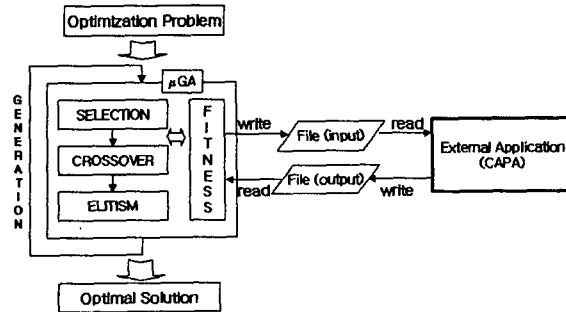


Fig. 2 Gate optimization by μ GA

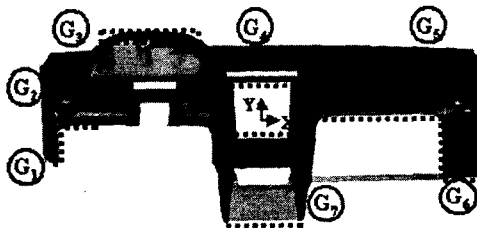


Fig. 3 Design space in the gate optimization

Table 2 Design space in the gate optimization

		G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
x	Upper	-670	-670	-510	-115	160	580	-115
	Low	-650	-430	-235	105	675	690	115
y	Upper	-140	-10	250	110	5	-200	-340
	Low	-130	160	260	195	190	-190	-210
z	Upper	-280	-200	-150	-260	-220	-300	-10
	Low	-120	-125	-140	-200	-140	-125	0

시작하기 위한 초기 개체군에 재생산하고, 위의 과정을 주어진 세대만큼 반복 수행한다. 본 연구에서 사용되어진 마이크로 유전알고리즘의 개체군은 5 개의 개체로 구성되어지며, 이들 중 2 개의 개체를 임의로 선택하여 우수한 개체들을 선택하여 교배한다. 그리고, 유전형의 유사성이 95% 이상 수렴되었을 경우 한 세대를 이루며 진화연산을 수행한다.

4. 최적설계

4.1 게이트의 위치 결정

본 연구에서는 7 개의 게이트를 가지는 차량용 데시보드(dash-board)의 게이트 위치 최적화 문제를 사출성형의 수치 유동에 대한 시뮬레이션 프로그램 'CAPA'를 이용한 충전해석과 마이크로 유전 알고리즘을 적용한 Fig. 2 과 같은 과정을 통하여 진화 연산을 수행하였다.⁽¹¹⁾ 마이크로 유전알고리

즘과 해석 프로그램간의 정보 교환은 파일의 입출력에 의해 이루어진다. 최적화 문제의 목적함수로 압력의 분포(difference of pressure)를 고려하였으며, 이 문제는 제한조건(constraint)이 없는 단일 목적함수를 갖는 최적화 문제이다. 이를 수식으로 표현하면 식 (5)과 같다.

$$\text{Minimize } P_{\max} - P_{\min} \quad (5)$$

여기서, P_{\max} 는 용융 수지가 금형을 완전히 채웠을 때 7 개의 게이트 중 가장 큰 압력을 받는 게이트에서의 압력을 나타내고, P_{\min} 은 가장 적은 압력을 받는 게이트에서의 압력을 나타낸다.

최적화를 수행함에 있어서 탐색영역은 금형(cavity)내의 용융수지의 흐르는 방향, 웰드라인(weld line) 생성, 게이트 처리 등을 고려하여 Table 2 과 같이 선택하였으며, 이를 Fig. 3 에 도시하였다. 각각의 게이트는 점선으로 정의된 구역 내부의 한 점에 위치하게 된다.

4.2 용융수지의 온도 결정

용융수지의 온도 결정은 잔류 응력에 많은 영향을 준다. 주입되는 용융수지의 온도가 높으면 금형 내부에서 수지의 유동(fluidity)이 좋아지기 때문에 잔류 응력은 적게 생기지만, 온도가 너무 낮게 되면 유동성이 나빠져서 수지에 큰 잔류응력이 발생한다. 이에 반해 용융수지의 온도를 너무 높게 하면, 제조 비용의 상승을 초래할 뿐만 아니라 수지의 변질을 가져와 향후 최종 생산품의 기계적 성질을 저하시키는 불량률의 원인이 된다. 그러므로, 용융수지의 온도는 수지가 변질 되지 않는 범위 내에서 수지의 유동성을 고려하여 결정하여야 한다. 본 제품은 피피에스레진 (Poly Phenylene Sulfide, PPS)와 피에스레진(Poly Styrene, PS)가 혼합된 수지를 사용하여 생산되어지며, 이 수지의 열화온도와 용융온도를 고려하여 용융수지 온도는 결정된다. 본 연구에서는 용융수지의 온도는 최대 잔류응력을 최소화하는 온도로 결정한다. 이는 아래의 식 (6)과 같이 나타내어진다.

$$\begin{array}{ll} \text{Minimize} & \max[\text{stress}(T)] \\ \text{Subject to} & 290 \leq T \leq 310 \end{array} \quad (6)$$

여기서, 변수 T 는 용융수지의 온도를 나타내며, 잔류 응력 중 가장 큰 값의 최소화를 목적함수로 한다. 그리고, 탐색 범위는 수지의 특성을 고려하여 290 ~ 310 [°C]로 설정하였다.

4.3 용융수지의 주입시간(filling time) 결정

금형 내부로 용융수지를 주입하는 시간을 결정하는 것은 최대 사출압력에 많은 영향을 준다. 일반적으로 사출시간은 수 초 내에 이루어지며, 주입구에서의 최대 사출압력에 의해 유량이 결정되고 사출시간도 이에 따라 변하게 된다. 주입 시간을 너무 짧게 잡으면, 요구되는 금형 내부를 다 채워주지 못해 미성형 되는 불량률의 원인이 되기도 하고, 단위 시간당 금형 내부로 주입되는 수지의 양이 많아야 하므로 사출기에서 가해주는 압력은 커지게 되고, 이는 향후 최종생산품의 기계적인 성질의 저하를 가져오게 된다. 이와 반대로 주입 시간을 너무 길게 결정하면, 최대 사출압력은 줄일 수는 있으나 제품의 생산 사이클이 너무 길어져서 제품의 생산 비용을 높이는 원인이 된다. 또한, 최대 사출압력이 너무 작은 경우에는 미성형 될 가능성과 함께 냉각과정에서 수지의 수축량이 커서 제품의 요구 치수에 벗어나는 불량률의 원인이 되기도 한다. 그리고, 충전 시간이 필요 이상으로 길어

지면 금형으로의 열손실이 커지게 되어 수지의 온도는 낮아지고 수지의 점도는 높아져서 충전 압력이 높아지게 된다. 일반적으로 충전 시간의 변화에 따른 충전 압력은 최소가 되는 점을 포함한 U자 형태의 그래프가 되며 충전 시간 주위가 최적 충전 시간이 되도록 결정한다. 식 (4)의 FRs와 DP's의 관계에서 용융수지의 주입시간은 단지 최대 사출압력에만 영향을 준다고 고려되었다. 그러므로, 여기서는 최대 사출압력을 최소화할 수 있는 용융수지의 주입 시간을 결정한다. 이는 수식으로 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{array}{ll} \text{Minimize} & \max[\text{pressure}(t)] \\ \text{Subject to} & 4.3 \leq T \leq 4.7 \end{array} \quad (7)$$

식 (7)에서 t 는 용융 수지의 주입 시간을 나타내며, 주입 시간은 제품의 크기와 부피, 용융 수지의 유동성 등을 고려하여 4.3 ~ 4.7 [sec]로 설정하였다. 그리고, 용융 수지는 압력이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르게 되므로, 최대 사출압력은 수지 주입구에서 발생하게 된다.

4.4 최적설계 결과 분석

우선 금형 내부에서의 압력 차이를 최소화 하는 것을 목적함수로 하여 각 게이트의 위치를 최적화한 결과 Fig. 5와 같은 러너 시스템을 도출하였다. 결과적으로 Fig. 5에 나타난 러너 시스템은 각 게이트에서의 압력 차이가 12.58[Mpa]로 Fig. 4에 나타난 기존의 러너 시스템에서의 압력차인 20.26[Mpa]에 비하여 37.9% 성능 향상 되었다. 그리고, 최대 사출압력 또한 242.69[Mpa]에서 229.92[Mpa]로 줄어들고, 최대 잔류응력 또한 1.812[Mpa]에서 1.67[Mpa]로 줄어든 효과를 가져왔다. 이는 금형 내부의 압력차가 줄어들면서 수지의 흐름이 좋아지고 이로 인하여 최대 사출압력과 최대 잔류응력의 수치가 개선된 것으로 볼 수 있다. Table 3에 초기 모델의 결과와 게이트 위치 최적화 과정 후의 모델의 결과를 비교하여 나타내었다. 다음 단계로 게이트 위치가 최적화된 모델에서 최대 잔류응력을 최소화를 위한 용융수지의 최적화를 수행하여 Table 4와 같은 결과를 도출하였다. 용융수지의 온도는 기존에 사용하던 온도 300[°C]에서 306[°C]로 최적화 되었다. 단지 게이트 위치만이 최적화 된 모델의 결과와 비교하여 용융수지의 최적화까지 이루어진 후의 모델의 결과에서는 잔류응력이 1.67[Mpa]에서 1.60[Mpa]로

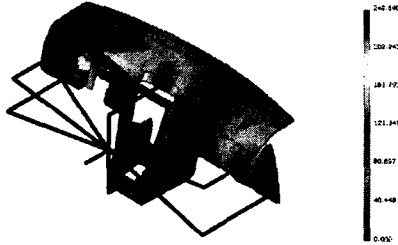


Fig. 4 Initial gate location

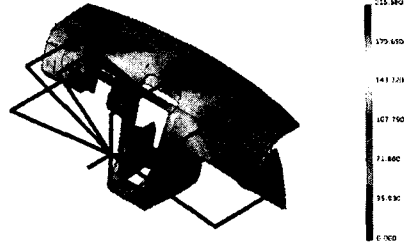


Fig. 5 Optimized gate location

Table 3 Comparison between initial system and optimized system (location of gates)

		Initial system	Optimized system
DPs	Location of gates	shown in Fig.4	shown in Fig.5
FRs	Difference of pressure [Mpa]	20.26	12.58
	Maximum stress [Mpa]	1.812	1.67
	Maximum pressure [Mpa]	242.69	229.92

Table 4 Comparison between initial system and optimized system (melt temperature)

		Initial system	Optimized system
DPs	Melt temperature [°C]	300	306
FRs	Difference of pressure [Mpa]	12.58	12.5
	Maximum stress [Mpa]	1.67	1.600
	Maximum pressure [Mpa]	229.92	215.58

줄어들었음을 확인하였고, 최대 사출 압력은 229.92[Mpa]에서 215.58[Mpa]로 개선되었다. 그리고, 식 (4)에서는 용융수지의 온도의 변화에 따라 압력차 변동은 다른 인자의 변동화에 비하여 극히 적어, 영향을 주지 않는 것으로 고려하였으나 12.58[Mpa]에서 12.5[Mpa]로 약간의 성능개선을 가져온 것으로 나타났다. 그리고, 마지막으로 고려할 사출 시간의 변화를 고려하여 최적화를 수행하였으나, 이는 이미 기존의 시스템에서와 동일한 사출 시간인 4.5[sec]로 최적화 되는 것을 확인하였다. 그러므로, 사출 시간은 기존 시스템과 동일하게 설계하였다.

는 수축의 불균일과 치수불량 같은 문제를 해결하였고, 잔류응력의 개선으로 최종제품의 강도 증가와 최대 사출압력의 개선을 통하여 제품의 강도 증가 및 생산비의 절감 효과를 얻을 수 있음을 나타낸다. 최적화를 수행함에 있어서, 공리적 개념을 최적화 과정에 추가함으로써 기능적 요구사항과 설계 변수들간의 관계를 객관적인 관점에서 평가하였고, 새로운 설계 변수들을 추가하였으며, 이러한 과정을 거쳐 기능적 요구사항을 만족 시키기 위한 합리적인 접근 방법을 찾을 수 있었다. 그 결과 단순 최적화의 결과보다 개선된 최적해를 도출할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

기존의 최적화 기법과 달리 본 논문에서는 설계 도입 단계에서 공리적인 개념을 추가하여, 설계 변수들간의 우선 순위를 결정하고, 최적화를 수행하였다. 결과로서, 금형내의 압력차가 38.3%, 잔류응력 11.7% 그리고, 최대 사출압력이 11.2% 개선된 최적화된 시스템을 도출하였다. 이는 금형 내부의 압력차를 개선함으로써 과보압 및 아보압 때문에 발생하는 뒤틀림이나 냉각과정에서 발생하

참고문헌

(1) Sang Hun Lee, Kunwoo Lee, Chun Jin Go, 1988, "An Integrated CAD System for Mold Design in Injection Molding Process," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 12 No. 6, pp. 1227~1237.
 (2) Heon Young Kim, Joong Jae Kim, Young Joo Kim, 1997, "The Injection Molding Analysis and The Mold Design for Automotive Plastic Fender," *J. of the Korean Society for Technology of Plasticity*, Vol. 6 No. 6, pp. 489~499.

- (3) Seong Jin Park, Tai Hun Kwon, 1997, "Optimum Design of Injection Molding Cooling System via Boundary Element Method," *The Korean Society of Mechanical Engineers(A)*, Vol. 21 No. 11, pp. 1773 ~ 1785.
- (4) Y. M. Jo, O. J. Kwon, Y. J. Yoo, J. D. Kim, 1995, "A study estimation of filling phase condition in injection molding process," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 12 No. 3, pp. 110 ~ 118.
- (5) Yun Dong Hwang and Sung Woon Cha, 2001, "Aximatic Design of Mold System for Advance of Foaming Magnitude," *The Korean Society of Mechanical Engineers(A)*, Vol. 25 No. 4, pp. 637~644.
- (6) Nam Pyo Suh, 2002, *Axiomatic Design*, Dongmyung Publish Company, Korea, p. 480.
- (7) David E. Goldberg, 1989, *Genetic Algorithms*, Addison-Wesley Publishing Company, USA, p. 412.
- (8) N. Chaiyaratana, A. M. S. Zalzal, 1997, "Recent Developments in Evolutionary and Genetic Algorithms: Theory and Applications," *Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications*, 2-4 September, Conference Publication NO. 446, pp. 270 ~ 277.
- (9) K. Krishnakumar, 1989, "Micro-Genetic Algorithms for stationary and non-stationary function optimization," *Intelligent Control and Adaptive Systems*, Vol. 1196, pp. 289 ~ 296.
- (10) C. A. Coello, G. T. Pulido, 2001, "Multi-objective Optimization using a Micro-Genetic Algorithm", *GECCO 2001*, pp. 274 ~ 282.
- (11) "Computer Aided Plastics Application-CAPA tutorial," VM-Tech.