

마이크로 유전알고리즘을 이용한 구조최적설계 및 응용에 관한 연구

Micro Genetic Algorithms in Structural Optimization and Their Applications

김종현* 이종수** 이형주*** 구분홍****
Jonghun Kim Jongsoo Lee Hyung-Joo Lee Bon-Heung Ku

ABSTRACT

Simple genetic algorithm(SGA) has been used to optimize a lot of structural optimization problems because it can optimize non-linear problems and obtain the global solution. But, because of large evolving populations during many generations, it takes a long time to calculate fitness. Therefore this paper applied micro-genetic algorithm(μ -GA) to structural optimization and compared results of μ -GA with results of SGA. Additionally, the paper applied μ -GA to gate optimization problem for injection molds by using simulation program CAPA.

1. 서 론

우주 개발의 경쟁이 진행된 1950년대 말부터 경량 구조물의 필요성으로 새로운 설계기법의 개발이 중요하게 여겨지면서 본격적으로 연구되기 시작한 구조최적화(structural optimization) 분야에 있어서, 최적설계의 응용은 유한 요소법과 최적화 알고리즘의 발달과 더불어 활발히 연구되고 있다.⁽¹⁾ 그러나 많은 최적화 알고리즘들이 개발되어 왔음에도 불구하고 각각의 방법들은 한계를 가지고 있게된다. 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 optimal)로 수렴하지 못하고 국부적인 최적값(local optimal)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 적자생존(survival of the fittest)과 유전 메커니즘을 바탕으로 하는 탐색 알고리즘으로 주어진 설계환경에 대한 각 개체(population)의 적합성 함수(fitness function)의 값이 큰 유전자를 선택하여 이들을 교배(crossover)하거나 재생산(reproduction) 하며, 때에 따라서는 돌연변이(mutation) 등을 수행하여 우수한 유전 형질이 다음

* 연세대학교 대학원 기계공학과
** 정희원 · 연세대학교 기계공학부 부교수
E-mail : jleej@yonsei.ac.kr
TEL : 02-2123-4474 FAX : 02-362-2736
*** 한국시물레이션기술(주)
**** (주)브이엠테크

세대에 전달되게 함으로써 진화(evolution)가 진행됨에 따라 주어진 설계환경에서 가장 적합한 개체만이 살아남게 된다.⁽²⁾ 하지만, 이러한 유전알고리즘은 전역 최적해를 얻을 수 있는 장점이 있는 반면, 많은 개체들이 여러 세대(generation)를 거쳐 진화하는 동안 적합도 함수를 계산하는데 오랜 시간을 필요로 하는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 이유로 적은 수의 개체로 진화 연산을 수행하는 마이크로 유전알고리즘을 이용하여 비교적 간단한 3-바 트러스 문제에 목적함수를 각각 다르게 하여 최적화를 실행하였고, 이보다 변수가 많은 10-바 트러스의 구조최적설계 문제에 적용하여 일반적인 유전알고리즘을 같은 문제에 적용한 결과들을 비교하였다. 그리고, 그 응용으로 복잡하고 많은 수의 변수를 가지는 사출성형 러너 시스템의 게이트 위치최적화 문제에 대하여 마이크로 유전알고리즘과 사출성형 해석 패키지를 이용하여 최적해를 구하였으며, 그 결과로써 기존의 러너 시스템보다 성능이 향상된 러너 시스템을 도출하였다.

2. 마이크로 유전알고리즘

마이크로 유전알고리즘은 1988년 D. E. Goldberg에 의해 기본적인 방법이 제시되었으며, 1989년 K. Krishakumar에 의해서 처음으로 실제적인 최적화 문제에 적용되었다. 기존의 유전알고리즘과 마이크로 유전알고리즘의 가장 큰 차이점은 개체군 수의 결정이다. 일반적인 유전알고리즘(SGA, simple genetic algorithm)의 경우 개체군의 크기 결정은 De Jong(1975)과 Grefenstette(1956)의 연구에 기초하여 매개변수에 따라 대부분 결정되어 진다.⁽³⁾⁽⁴⁾ 이렇게 많은 수의 개체군에 의한 진화과정에서 소요되는 시간적인 결점을 보완하기 위하여 마이크로 유전 알고리즘에서는 적은 수의 개체군과 유전알고리즘의 연산자(GA operator)를 이용한 연속적인 진화 수행을 통하여 전역 최적해를 찾아낸다. 이러한 마이크로 유전알고리즘은 매우 적은 수의 개체군을 사용하며, 교배연산비율(crossover rate)은 1.0으로 한다. 그리고, 각 세대의 초기 개체군 생성 시에 임의적인 개체 생성이 돌연변이 연산(mutation)의 역할을 대신하기 때문에 돌연변이 연산을 수행하지 않으며, 각 세대마다 유전형의 유사성이 일정 정도이상 수렴된다는 것이다. 마이크로 유전알고리즘과 일반 유전알고리즘의 차이점을 Table 1에 나타내었으며, 본 연구에서 사용된 마이크로 유전알고리즘의 구성도는 Fig. 1에 나타나 있다. 그리고, 그 특징과 진화 연산 과정은 다음과 같다.

마이크로 유전알고리즘을 시행하기 위한 초기 개체군을 무작위로 생성한다. 그리고 다양성을 유지하기 위하여 이들 개체들 중 임의의 개수만큼의 개체를 선택하고, 이들 선택되어진 개체들 사이에서 최고의 적합도를 갖는 개체 선발(tournament)을 통하여 새로운 개체군을 생성하고 교배(crossover) 연산을 실행한다. 위의 과정은 개체군들의 유전형의 유사성이 일정 수준 이상으로 수렴(local convergence)될 때까지 반복과정을 거치게 되고 한 세대를 이루게 된다. 그리고 각 세대에서 우수한 유전형질을 보존하고, 진화가 진행됨에 따라 적합도의 상승을 보장하기 위하여, 가장 높은 적합도(fitness)를 가지는 개체(elitism)를 새로운 세대를 시작하기 위한 초기 개체군에 재생산하고, 위의 과정을 주어진 세대만큼 반복 수행한다.

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	elitist, tournament
crossover rate	0.6 ~ 0.8	1.0
mutation	0.01 ~ 0.05	0.0
convergence	global convergence	local convergence

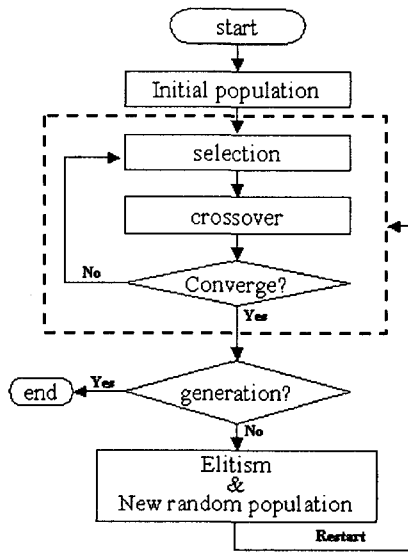


Fig. 1 Flow chart of μ -GA

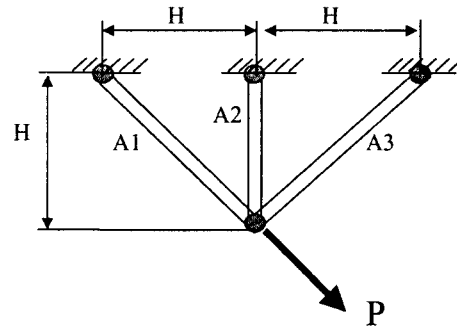


Fig. 2 Three-bar truss

3. 구조최적화 문제

3. 1 3-바 트러스(three bar truss)

앞 절에서 언급한 마이크로 유전알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 2와 같은 형태의 하중 P를 받는 3-바 트러스의 최적설계 문제에 적용하였다. 이 문제에서는 목적함수를 달리하여 두 가지의 최적화를 수행하였다. 첫번째 최적화 문제의 목적함수로 허용응력 내에서의 부재 무게 최소화를 선택하였고, 나머지 하나는 힘이 주어지는 힌지점(node)에서의 수직 변위(vertical deflection)를 최소화하는 문제에 대하여 최적화를 수행하였다. 이를 수식화 하였을 때 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize} && f_1(X) = \text{weight} = W(X) \\
 & && f_2(X) = \text{vertical deflection of loaded joint} = \delta(X) \\
 &\text{subject to} && \sigma_1(X) - \sigma^{(u)} \leq 0 \\
 & && \sigma_2(X) - \sigma^{(u)} \leq 0 \\
 & && \sigma_3(X) - \sigma^{(u)} \leq 0 \quad x_i^{(l)} \leq x_i \leq x_i^{(u)} \quad (i = 1, 2, 3)
 \end{aligned}$$

$$\sigma^{(u)} = 20, \quad \sigma^{(l)} = -15, \quad x_i^{(l)} = 0.1 \quad (i = 1, 2), \quad x_i^{(u)} = 5.0 \quad (i = 1, 2), \quad P = 20, \quad E = 1 \quad (1)$$

여기서 f_1 과 f_2 는 각각의 최적화 문제의 목적함수를 나타낸다. 그리고, σ_i 는 i 번째 부재에 발생하는 응력이고, $\sigma^{(u)}$ 는 최대 허용 인장 응력이며, $\sigma^{(l)}$ 는 최대 허용 압축 응력이다. x_i 의 상한치와 하한치는 $x_i^{(u)}$ 와 $x_i^{(l)}$ 로 표기된다.

3. 2 10-바 트러스(ten bar truss)

또 다른 하나의 검증으로써 P의 하중을 받는 10-바 트러스(ten bar truss)의 최적설계문제에 이를 적용시켜 보았다. 본 예제는 각 부재의 허용 응력을 구속조건으로 가지며, 목적함수로 전체적인 부재의 무게를 최소화 하는 문제이다. 이는 식 (2)와 같이 표현된다.⁽⁵⁾

$$\begin{aligned}
 \text{Minimize} \quad & f(X) = \text{weight} = \rho \sum_{i=1}^{10} l_i A_i \\
 \text{subject to} \quad & G_i = \sigma_i \leq b_i \quad (i=1,2,\dots,10) \\
 & A_i^l \leq A_i \leq A_i^u \quad (i=1,2,\dots,10) \\
 & \sigma_i^l \leq \sigma_i \leq \sigma_i^u \quad (i=1,2,\dots,10) \\
 & x_j^{(l)} \leq x_j \leq x_j^{(u)} \quad (i=1,2,\dots,10) \\
 \text{where} \quad & \sigma_i = \epsilon_i E_i \quad (i=1,2,\dots,10) \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서 ρ 는 트러스 부재의 밀도이고, σ_i ($i = 1, \dots, 10$)는 각 부재에 작용하는 응력을 나타내고, b_i 는 각 부재의 허용 응력으로 제약조건을 나타낸다. 만일 진화 과정에서 제약조건(constraint)을 벗어나게 되면(부재의 응력이 허용응력 보다 크게 되면), 적절한 형태의 벌칙(penalty)을 가하는 제약 조건식을 고려한다. 이를 통해 세대가 높아질수록 적절하지 않은 개체는 도태되도록 하였다. 본 연구에서 고려한 트러스의 형상은 Fig. 3과 같고, 초기조건과 하중조건 등은 Table 2에 나타난 바와 같다.

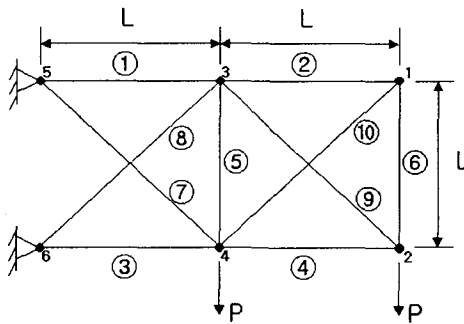


Fig. 3 Ten-bar truss

Table 2 Design parameters in ten bar truss

Density	0.1 lb/in ³
Allowable stress	25 ksi (for all members except member 9.)
	75 ksi (for member 9.)
Length of member	360 inches
Load	100 kips
Bounds of variables	$0.10 \leq x_i \leq 10.00$ ($i = 1, \dots, 10$)

3.3 설계 결과의 해석

마이크로 유전알고리즘의 성능 평가를 위하여 구조최적화 문제에 대하여 각각 3번씩 반복 적용하였다. 3-바 트러스 최적화 문제에 마이크로 유전알고리즘과 일반적인 유전알고리즘을 적용하여 나타난 결과를 Table 3과 Table 4. 에 나타내었다. 그리고 Fig. 4, 5, 6, 7에 각 알고리즘을 사용하여 수렴하는 과정을 도시하였다. 우선 Table 3과 Table 4에서 최적해를 살펴볼 때 약간의 오차가 있기는 하지만 두 가지의 다른 알고리즘을 적용하여 좋은 결과를 얻었음을 알 수 있으며, 차이점으로는 최적해에 수렴하기 위해 일반적인 유전알고리즘을 사용한 경우에 비하여 마이크로 유전 알고리즘을 최적화 문제에 적용하였을 때 진화를 위한 적합도 함수의 계산 횟수가 줄어들었음을 알 수 있다. 그리고, 그것은 계산 횟수가 증가함에 따라 목적함수 값의 변화를 보여주는 Fig. 4와 Fig. 5 그리고, Fig. 6과 Fig. 7을 각각 비교해 보았을 때 일반적인 유전알고리즘에서보다 마이크로 유전알고리즘을 적용한 경우에 그래프의 곡선이 가파르게 감소하는 것으로 쉽게 알 수 있다. 그리고, Table 5와 Fig. 8, 9에 나타낸 10-바 트러스 최적화 문제의 결과와 수렴 특징에서도 결과치는 유사하지만, 마이크로 유전알고리즘을 적용한 경우가 일반적인 유전알고리즘을 적용한 경우보다 조기 수렴하는 것을 볼 수 있다.

Table 3 Optimization results for three-bar truss (weight)

		μ -GA			SGA(EVOLVE)			exact
		case 1	case 2	case 3	case 1	case 2	case 3	
Optimal area (in ²)	X1	0.778	0.780	0.824	0.799	0.789	0.789	0.78706
	X2	0.440	0.433	0.317	0.384	0.407	0.409	0.40735
Optimal weight		2.64	2.64	2.65	2.64	2.64	2.64	2.6335
Number of function evaluation to convergence		325	95	240	753	760	574	

Table 4 Optimization results for three-bar truss (vertical deflection)

		μ -GA			SGA			exact
		case 1	case 2	case 3	case 1	case 2	case 3	
Optimal area (in ²)	X1	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	X2	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Optimal weight		1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.6569
Number of function evaluation to convergence		70	280	470	459	293	379	

Table 5 Optimization results for ten-bar truss

		μ -GA			SGA			exact
		case 1	case 2	case 3	case 1	case 2	case 3	
Optimal area (in ²)	X1	7.86	8.15	7.85	8.15	7.30	7.81	7.90
	X2	0.41	0.18	0.19	0.10	0.83	0.45	0.10
	X3	8.38	7.99	8.15	8.20	8.77	8.37	8.10
	X4	5.05	3.83	3.89	3.97	3.27	4.16	3.90
	X5	0.12	0.96	0.15	1.10	0.75	0.55	0.10
	X6	0.41	0.25	0.25	0.10	0.82	0.30	0.10
	X7	6.14	5.67	5.87	5.84	6.74	6.30	5.80
	X8	5.23	6.29	5.52	5.68	5.06	5.26	5.51
	X9	3.83	3.85	5.05	5.07	2.89	3.86	3.68
	X10	0.50	0.25	0.25	0.40	1.16	0.42	0.14
Optimal weight		1599	1587	1588	1593	1590	1585	1499
Number of function evaluation to convergence		57540	54230	25335	78894	69497	73533	

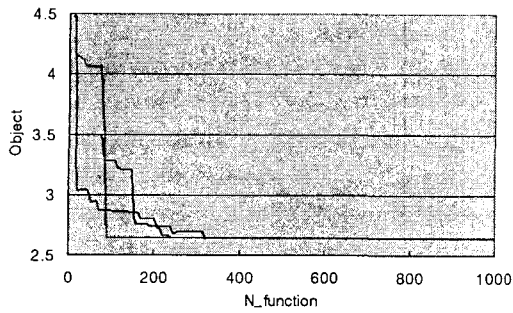


Fig. 4 Three bar truss for f_1 (μ -GA)

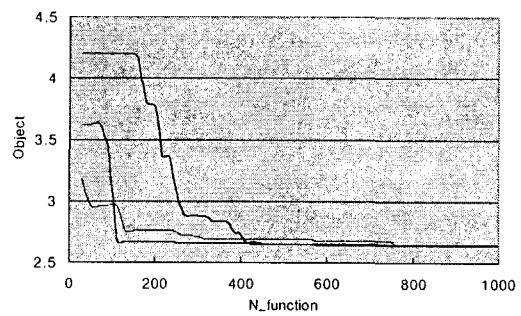


Fig. 5 Three bar truss for f_1 (SGA)

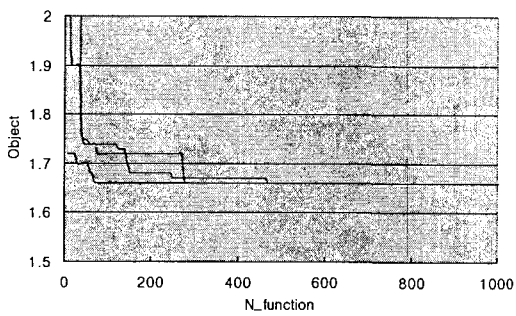


Fig. 6 Three bar truss for f_2 (μ -GA)

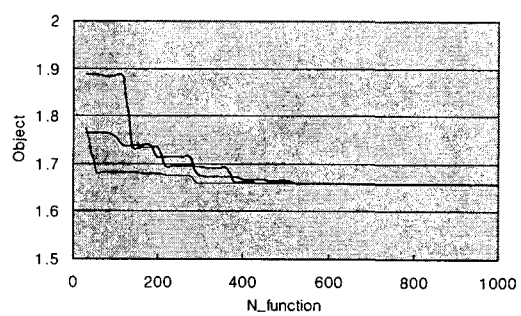


Fig. 7 Three bar truss for f_2 (SGA)

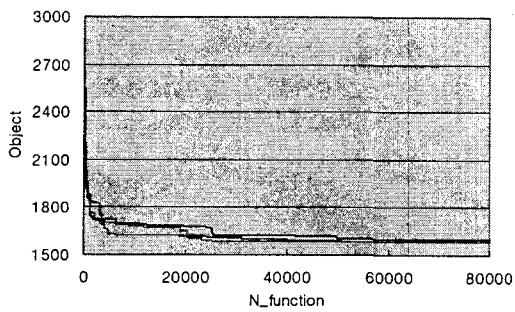


Fig. 8 Ten bar truss (μ -GA)

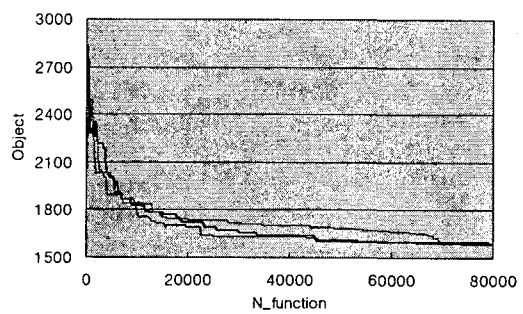


Fig. 9 Ten bar truss (SGA)

4. 사출성형 문제의 응용

사출성형 제품의 불량은 여러 가지 복합적인 요인에 의해 발생하지만 대부분의 불량이 유동 불균형에 의해 발생한다. 만일 동시 충전이 이루어지지 않으면 먼저 충전된 부위는 냉각되면서 과포압(over-packing) 상태에 놓이게 되어 다른 부위와의 수축률 차이에 의하여 변형이 일어나게 된다. 이러한 불량을 줄이기 위하여 유동 패턴 개선에 가장 많이 사용하는 방법이 게이트(gate)의 위치 조정이다. 이러한 게이트 위치 선정은 유동 해석과 유동 패턴 분석의 과정을 통하여 제품 전체가 동일하게 충전(filling)되도록 이루어진다.⁽⁶⁾⁽⁷⁾ 본 연구

에서는 마이크로 유전 알고리즘의 또 다른 응용으로써 7개의 게이트를 가지는 차량용 대시보드(dash-board)의 게이트 위치 최적화 문제를 사출성형의 수치 유동에 대한 시뮬레이션 프로그램 'CAPA'를 이용한 충전해석과 마이크로 유전알고리즘을 적용한 Fig. 10과 같은 과정을 통하여 진화 연산을 수행하였다.⁽⁸⁾ 최적화 문제의 목적함수로 최대 사출압력(maximum pressure)을 고려하였으며, 이 문제는 제한조건(constraint)이 없는 단일 목적함수를 갖는 최적화 문제이다. 최적화를 수행함에 있어서 탐색 영역은 캐비티(cavity)내의 용융수지의 흐르는 방향, 웰드라인(weld line) 생성, 게이트 처리 등을 고려하여 Table 6과 같이 선택하였으며, Fig. 11.에 도시하였다.

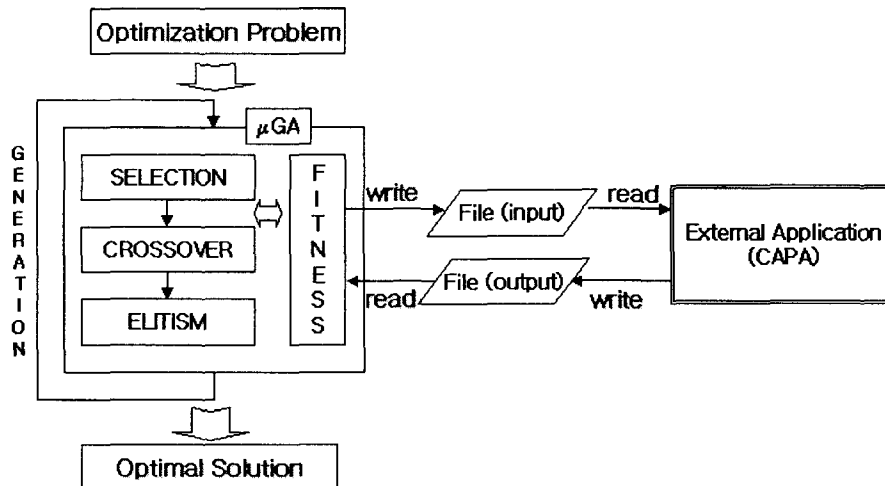


Fig. 10 Gate optimization by μ -GA

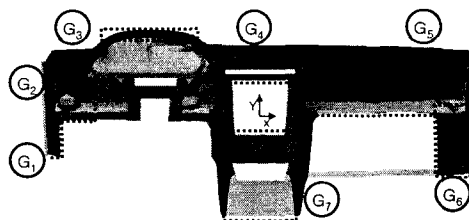


Fig. 11 Design space in gate optimization

Table 6 Design space in gate optimization

Coordinate		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

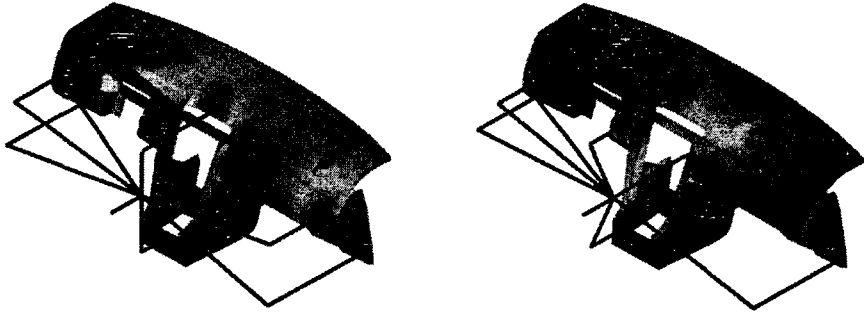


Fig. 12 Pressure distribution(initial runner system) Fig. 13 Pressure distribution(optimized runner system)

마이크로 유전알고리즘을 이용하여 러너 시스템의 최적화를 수행한 결과 Fig. 12에 나타난 기존 러너 시스템의 최대 사출 압력이 242.690 Mpa에서 23.69% 개선된 185.195 Mpa를 가지는 Fig. 13의 최적화 수행후의 러너 시스템을 도출하였다. 이는 사출 성형시에 마이크로 유전알고리즘을 이용한 최적화 작업을 통하여 수치 (polymer)의 유동 패턴을 향상시킴으로써 제품의 불량률이나 여러 가지 문제점들이 해결하였음을 뜻한다.

5. 결 론

본 연구에서는 구조최적화 문제를 통하여 일반적인 유전알고리즘과 마이크로 유전알고리즘의 성능을 비교 하였으며, 일반적인 유전알고리즘 비하여 마이크로 유전알고리즘이 적은 계산비용에서 수렴하는 것을 검증하였다. 이 밖에도 마이크로 유전알고리즘을 사출성형의 게이트 위치 최적화에 적용함으로써 기존의 러너 시스템과 비교하여 보았을 때 최대 사출압력이 242.690 Mpa에서 185.195 Mpa로 23.69% 감소하는 게이트 위치 들의 조합을 갖는 러너 시스템을 도출함으로써 냉각 과정중의 변형 등의 불량률을 줄이고, 최종 생산품의 품질 향상을 이룰 수 있음을 보였다. 그리고, 이로 인하여 전역 최적화 기법으로써 다양한 분야에 마이크로 유전알고리즘이 적용될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. 한상훈, "구조설계에서 수치최적화 기법 및 연구방향", 한국전산구조공학회 논문집. 제 5권 제 3호, 1992, pp. 44 ~ 47
2. David E. Goldberg, *Genetic Algorithms*, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1989, p. 412
3. K. Krishnakumar, "Micro-Genetic Algorithms for stationary and non-stationary function optimization", *Intelligent Control and Adaptive Systems*, Vol 1196, 1989, pp. 289 ~ 296
4. C. A. Coello, G. T. Pulido, "Multi-objective Optimization using a Micro-Genetic Algorithm", *GECCO 2001*, 2001, pp. 274 ~ 282
5. T. Yokota, T. Taguchi, M. Gen, "A Solution Method for Optimal Weight Design Problem of 10 Bar Truss Using Genetic Algorithms", *Computers ind. Engng*, Vol. 35, Nos 1-2, pp. 367 ~ 372
6. M. Saxena, R. K. Irani, "Automated gating plan synthesis for injection molds", *Computers in engineering*, Vol. 1, 1992, pp. 381 ~ 389
7. I. Pandelidis, Q. Zou, "Optimization of injection molding design. (Part 1 : Gate location optimization)", *Polymer engineering and science*, Vol. 30, No. 15, 1990, pp. 873 ~ 882
8. "사출성형 해석 시스템 CAPA tutorial", (주)브이엠테크.