

근사 모델과 NSGA-II를 이용한 진공청소기 손잡이 근사최적설계

윤민노^a, 이종수^{b*}Optimization of Vacuum Cleaner Handle
Using Approximate Model and NSGA-IIMinro Yun^a, Jongsoo Lee^{b*}^a Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Yonsei University, 50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea^b School of Mechanical Engineering, Yonsei University, 50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	16	August	2016
Revised	20	November	2016
Accepted	9	January	2017

Keywords:

Multi-objective optimization
Multi-disciplinary optimization
Approximate optimization
Injection molding
Vacuum cleaner

ABSTRACT

The major parts of a vacuum cleaner are molded. The vacuum cleaner works in multi-load conditions. Therefore, the designer needs to optimize the structure and injection molding conditions simultaneously. Here, the main factor of design is the rib shape and thickness. The greater the rib thickness, the greater the stiffness of the structure. However, it causes an increase in weight. On the other hand, the lower the rib thickness, the greater the increase in the injection pressure. However, the weight will be reduced. Therefore, the designer needs to optimize the rib shape and thickness for structure stiffness and injection molding. In order to solve this problem, we propose an optimization method using D.O.E and a response surface model, which is a multi-objective optimization method using the multi-objective genetic algorithm.

1. 서론

진공청소기는 대다수의 부품이 사출성형 부품으로 구성되어 있으며 가전제품 중 유일하게 사용자가 이동하면서 사용하며 동시에 다양한 하중 조건이 부여되는 제품이다. 이로 인해 일반적인 구조 및 강도 최적화 뿐 아니라 사출 성형 조건의 최적화도 동시에 필요하다. 또한 진공청소기를 구성하는 부품은 대다수가 외관이면서 그 자체로 강성을 지녀야 하기 때문에 디자인 제약이 따르는 외관 부분보다는 내측 보강 rib의 설계가 중요한 설계 요소가 된다.

이러한 보강 rib는 제품 강성을 위해서는 두께가 두껍고 수량이 많을수록 좋으나 이와 동시에 제품의 중량이 증가하게 되므로 설계 조건을 위배하지 않는 범위 내에서의 경량화를 위한 최적 설계가

필요하다.

또 한편으론 보강 rib의 두께가 늘어날 수록 사출 성형 시 사출 압력이 낮아져 제조 생산성이 개선되나 제품 표면에 수축 등의 불량 발생하고 중량이 증가하므로 역시 설계 조건을 위배하지 않는 범위 내에서의 최적 설계가 필요해진다. 즉 제품을 경량화하기 위해 보강 rib의 두께를 얇게 하면 무게는 줄어드나 사출압력이 올라가 제조 생산성이 낮아지게 된다.

본 연구에서는 경량화와 사출성형 조건을 동시에 고려하는 구조 최적화를 진행하고자 한다. 이를 위해 실험계획법을 통해 구조해석과 사출성형해석을 진행하고 여기에서 얻어진 data를 바탕으로 근사 모델을 생성한다. 이후 이를 다목적 함수 최적화 문제로 정의하여 경량화와 사출압력을 동시에 고려한 최적 구조를 찾고자 한다.

* Corresponding author. Tel.: +82-2-2123-4474

Fax: +82-2-362-2736

E-mail address: jleej@yonsei.ac.kr (Jongsoo Lee).

2. 본 론

2.1 기초모델

최적화를 위한 기초모델은 진공청소기의 부품 중에서 하중에 의한 파손이 자주 발생하는 손잡이 부분을 대상으로 하였다.

Fig. 1에 전체 제품 형상과 최적화 대상인 손잡이의 형상이 표현되어 있다.

손잡이 부분은 2개의 부품(handle up, handle low)으로 구성되며 screw 고정은 Fig. 2와 같이 3개소로 설정하였고 100 N의 하중을 pipe와 연결되는 부위에 적용하였다.

구조해석은 개별로 진행하지 않고 2개의 parts가 조립된 상태로 진행하였고 이때 screw 고정부 3개소는 mesh mating을 진행하여 상/하 부품이 연결된 것으로 설정하였다. 이 상태로 디자인된 제품의 전체 무게 및 von mises stress를 측정하기로 하였다. 이를 위한 FEM 모델 및 해석은 상용코드인 NX NASTRAN을 이용하였으며 약 280,000 ea의 tetra 4 요소를 사용하였다.

사출해석에서는 각각의 부품을 개별 해석하였으며 매 실험마다의 Pressure at V/P Switchover를 측정하기로 하였다. Pressure at V/P Switchover는 사출성형 진행 중 가장 높은 금형 내부 압력이 발생하는 지점이다. 사출압력이 재질별/금형 사양별 적정치를 넘기게 되면 flash와 같은 사출 불량, 과도한 잔류 압력으로 인한 후 변형, 사출시 추출 불량 등이 발생하므로 이를 낮춤으로 인해 사출성형 공정에서의 생산성을 높이고 불량 발생률을 낮출 수 있다.

사출성형 조건으로는 gate는 side gate 1개소를 적용하였고 sprue, runner 등은 1 cavity로 모델을 생성하였다. CAE 해석을 위한 모델링은 상용코드인 moldflow를 이용하였고 dual domain method, 3 mm 크기의 global edge length로 FEM 모델을 생성하였다.

Fig. 3에 각 해석 모델의 구성, 하중 조건과 해석 형상이 표현되어 있다.

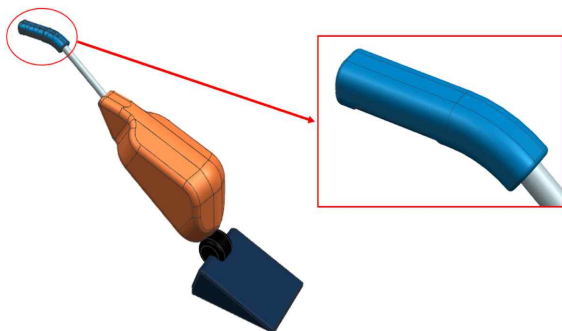


Fig. 1 Handle of upright vacuum cleaner

2.2 설계변수 및 실험계획

일반적으로 외관을 형성하는 사출 성형품에 있어서 제품의 외관에 관련된 부분은 설계의 대상이 될 수 없는 경우가 대부분이다. 따라서 제품 내벽에 설치된 보강 rib의 형상, 위치, 개수 등을 설계 변수로 정의할 수 있다.

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 제품 내벽에 위치한 보강 rib의 두께(x_1) 및 X 형태로 교차하는 보강 rib의 원점에서의 거리를 설계 변수($x_2 \sim x_5$)로 지정하였고 각 변수의 상/하한은 Table 1과 같이 rib

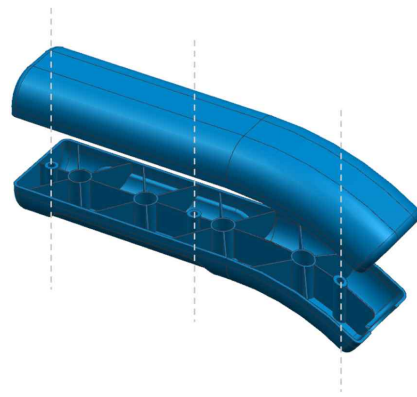
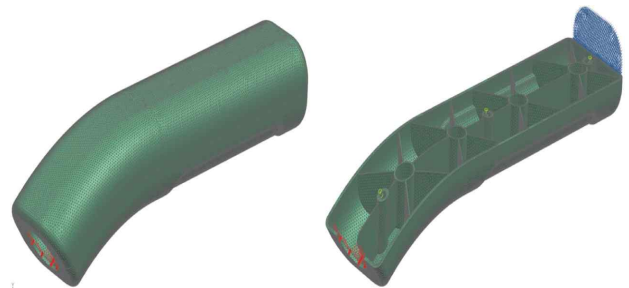
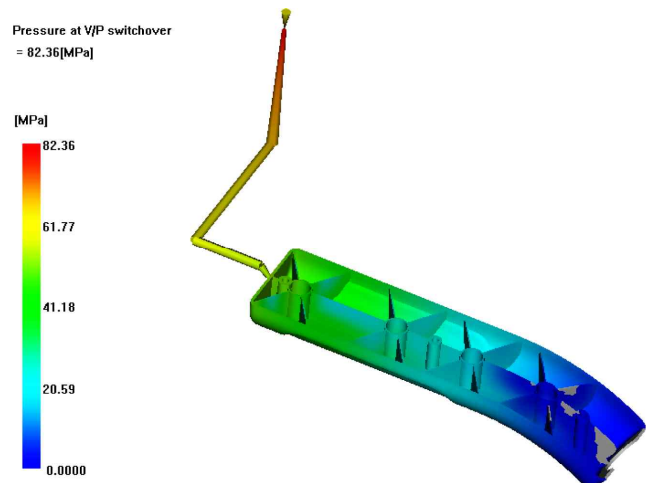


Fig. 2 Screw points



(a) NX NASTRAN analysis model



(b) Moldflow analysis model

Fig. 3 CAE analysis model

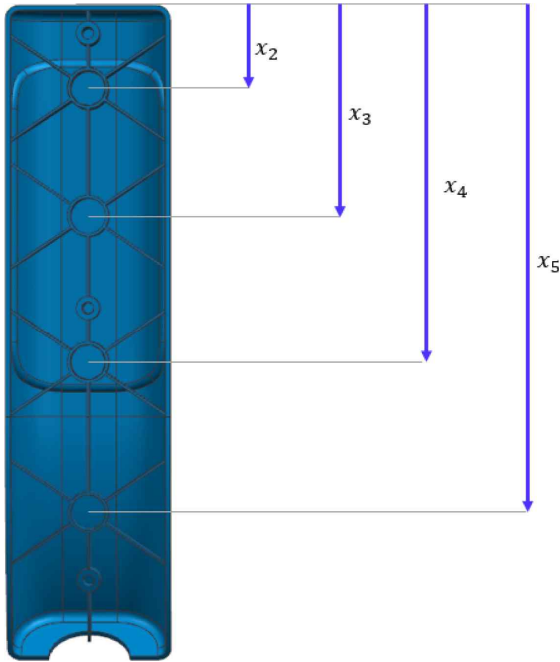


Fig. 4 Design variables

Table 1 Level of each design variables

Lev.	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (mm)	x_4 (mm)	x_5 (mm)
-1	0.8	20	75	130	185
0	1.0	25	80	135	190
1	1.2	30	85	140	195

의 두께는 0.8~1.2 mm, rib의 위치는 기준점 ± 5 mm로 제한하였다. Handle-up, handle-low 두 개의 부품은 동일한 수량의 rib를 가지는 것으로 하였고 각 4개의 교차점을 가지며 각 교차점의 원점에서의 거리를 설계 변수로 지정 한 후 실험 계획을 실시하였다.

각 부품의 최적화 진행 시 설계 변수가 5개인 문제가 되므로 인자의 숫자가 많아 실험점이 과다해지는 문제가 있다.

Table 1과 같이 각각의 인자에 대해 3수준을 적용하였고 실험점을 줄이기 위해 Table 2와 같은 직교 배열표를 적용하였으며 이때의 실험 횟수는 총 18회이다. 이를 각각의 부품에 적용하였고 총 32회의 CAE 해석이 필요하다.

2.3 설계 목표 및 제한 조건

본 연구에서는 가전제품에 많이 사용되고 있는 수지인 ABS HG-0760D Grade를 적용하여 구조물에 대한 질량 및 사출 압력 최소화를 진행하였다.

2개의 Part의 중량과 사출 압력을 동시에 최적화하기 위해 다음과 같이 정식화 하였다.

Table 2 Design of experiments

Run	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (mm)	x_4 (mm)	x_5 (mm)
1	0.8	20	75	130	185
2	1	25	80	135	190
3	1.2	30	85	140	195
4	0.8	20	80	140	190
5	1	25	85	130	195
6	1.2	30	75	135	185
7	0.8	25	75	140	195
8	1	30	80	130	185
9	1.2	20	85	135	190
10	0.8	30	85	130	190
11	1	20	75	135	195
12	1.2	25	80	140	185
13	0.8	25	85	135	185
14	1	30	75	140	190
15	1.2	20	80	130	195
16	0.8	30	80	135	195
17	1	20	85	140	185
18	1.2	25	75	130	190

Minimize F_{weight}

Minimize $F_{Pressure at V/P Switchover}$

Subject to

$$g_{Stress} \leq 50MPa$$

$$g_{Displacement} \leq 5.0mm$$

$$0.8 \leq x_1 \leq 1.2$$

$$20 \leq x_2 \leq 30$$

$$75 \leq x_3 \leq 85$$

$$130 \leq x_4 \leq 140$$

$$185 \leq x_5 \leq 195$$

$$(x_1 \sim x_5, unit : mm)$$

(1)

구조물의 질량 및 최고 사출압력은 목적함수로서 최소화 시켜야 하며 응력은 50 MPa 이하, 변위는 5.0 mm 이하가 되도록 하였다. 또한 사출 성형성을 고려하여 rib의 두께는 0.8 mm~1.2 mm 사이가 되도록 하였고 설계에 따라 rib간의 중첩이 발생하지 않도록 각각의 rib가 교차하는 지점의 위치를 기준점 ± 5 mm 이내로 하도록 각 설계 변수의 범위를 제한하였다. 구조물을 구성하는 부품이 2개이므로 각 부품별로 위의 최적화 문제를 설정하였다. 두 부품은 동일하게 5개의 설계변수를 가지고 구속조건도 동일하게 부여하였다.

3. 실험

3.1 실험 결과

실험계획법을 통해 NX NASTRAN과 MoldFlow를 이용하여 CAE 해석을 진행하였다. 구조해석에서는 구조물의 중량, von-mises stress, max displacement를 측정하였고 사출성형 해석에서는 각 부품의 Pressure at V/P Switchover를 측정하였다.

이를 통해 Table 3과 같은 실험 결과를 얻을 수 있었다.

3.2 근사 모델

구조물을 구성하는 부품이 2개이므로 이와 같은 최적화 문제도 2개가 된다. 따라서 각 부품의 사출압력을 별개의 근사모델로 생성하였다.

목적함수와 제한조건을 근사화하기 위하여 상용 통계 S/W인 Minitab 17 Version을 사용하였으며 적합 회귀 모형을 이용하여 2nd Order Multivariate Polynomial Regression으로 근사 모델을 구성하였다. 여기서 F_{weight} 는 조립 구조물의 중량, $F_{Pressure-Up}$ 은 handle-up 부품의 최대 사출압력, $F_{Pressure-Low}$ 는 handle-low 부품의 최대 사출압력이다.

Table 3 Test result

Run	Weight [g]	Von mises stress (MPa)	Max disp. [mm]	Pressure at V/P Switchover [MPa]	
				Handle-up	Handle-low
1	122.11	46.55	4.92	87.62	82.03
2	125.81	46.50	4.93	87.14	81.88
3	129.20	54.59	4.93	87.52	82.00
4	122.21	49.19	4.93	87.52	82.43
5	125.84	45.98	4.97	87.26	81.97
6	129.04	50.30	4.89	87.36	82.02
7	122.55	51.53	5.00	87.61	82.46
8	125.68	46.40	4.92	87.16	82.28
9	128.82	46.25	4.85	87.37	82.06
10	122.41	45.93	4.99	87.70	82.42
11	125.57	45.36	4.92	87.08	81.96
12	129.10	52.36	4.87	87.40	82.05
13	122.43	45.21	4.94	87.71	82.23
14	125.79	54.69	4.94	87.19	81.90
15	128.85	47.32	4.89	87.51	84.06
16	122.50	54.21	5.01	87.63	82.53
17	125.47	50.70	4.86	87.03	82.02
18	129.10	48.60	4.91	87.51	81.94

$$F_{weight} = 102.9 + 13.98x_1 + 0.2485x_2 + 0.004772x_3 + 0.09591x_4 - 0.04782x_5 + 0.9826x_1^2 - 0.006736x_2^2 - 0.000028x_3^2 - 0.000352x_4^2 + 0.000137x_5^2 + 0.09133x_1x_2 - 0.006444x_1x_3 + 0.004778x_1x_4 + 0.001889x_1x_5 + 0.00024x_2x_3 + 0.000244x_2x_5 - 0.04167x_1^2x_2 \quad (2)$$

$$F_{Pressure-Up} = 171.7 - 45.068x_1 - 0.2335x_2 - 0.064x_3 - 0.2512x_4 - 0.4630x_5 + 17.33x_1^2 - 0.0023x_2^2 + 0.000667x_3^2 + 0.000833x_4^2 + 0.001067x_5^2 + 0.5833x_1x_2 - 0.03667x_1x_3 + 0.02333x_1x_4 + 0.05333x_1x_5 - 0.000267x_2x_3 + 0.000533x_2x_5 - 0.3x_1^2x_2 \quad (3)$$

$$F_{Pressure-Low} = 352.1 + 32.95x_1 + 12.41x_2 + 5.45x_3 - 6.994x_4 - 1.252x_5 - 115.8x_1^2 - 0.003367x_2^2 - 0.03083x_3^2 + 0.02470x_4^2 + 0.0029x_5^2 - 10.91x_1x_2 + 0.2767x_1x_3 + 0.29x_1x_4 + 0.74x_1x_5 - 0.034x_2x_3 - 0.0216x_2x_5 + 5.35x_1^2x_2 \quad (4)$$

구속조건인 von mises stress와 displacement의 근사모델은 다음과 같다.

$$g_{stress} = 3360 - 224.9x_1 - 26.08x_2 + 6.896x_3 - 12.48x_4 - 25.67x_5 + 172.5x_1^2 + 0.049x_2^2 - 0.032x_3^2 + 0.047x_4^2 + 0.0616x_5^2 + 12.25x_1x_2 - 1.227x_1x_3 + 0.247x_1x_4 - 0.213x_1x_5 - 0.032x_2x_3 + 0.109x_2x_5 - 6.313x_1^2x_2 \quad (5)$$

$$g_{Disp.} = 8.189 + 1.15x_1 + 0.071x_2 + 0.00956x_3 - 0.05858x_4 - 0.01158x_5 - 0.7146x_1^2 - 0.00063x_2^2 - 0.000033x_3^2 + 0.000197x_4^2 + 0.00005x_5^2 - 0.063x_1x_2 - 0.001667x_1x_3 + 0.003667x_1x_4 - 0.002x_1x_5 - 0.000127x_2x_3 + 0.00002x_2x_5 + 0.03375x_1^2x_2 \quad (6)$$

이때 생성된 근사모델의 R²값을 구하여 적합성을 검증하였고 그 결과 값은 Table 4와 같다.

Table 4 R² of approximate models

	Weight	Von-mises stress	Disp.	Pressure (handle-up)	Pressure (handle-low)
R ²	1	0.99	0.99	1.0	0.99

Table 5 Solution of NSGA-II

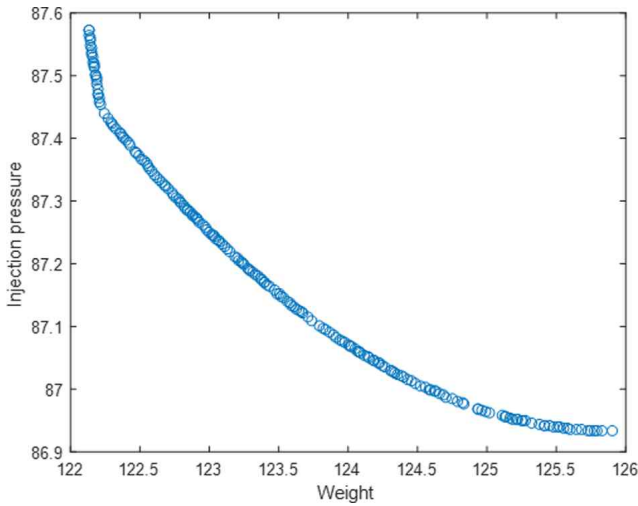
	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (mm)	x_4 (mm)	x_5 (mm)
Handle-up	1.0	20.0	80.1	136.4	186.3
Handle-low	1.0	30.0	85.0	135.9	195.0

Table 6 Analysis result

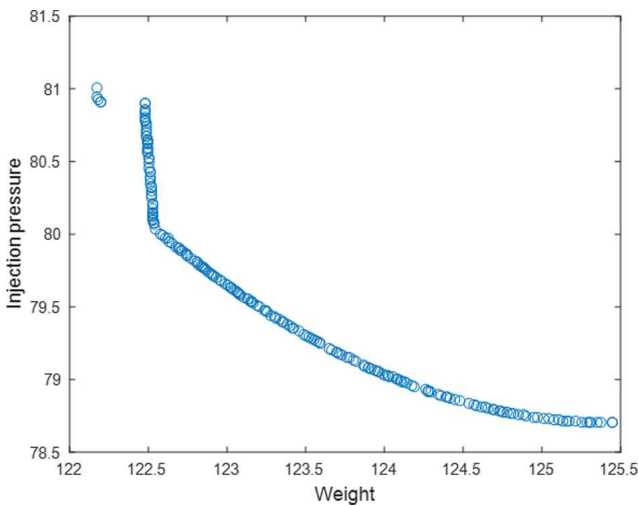
Structural analysis			Injection analysis	
Weight [g]	Von mises stress [MPa]	Max disp. [mm]	Pressure at V/P Switchover [MPa]	
			Handle-up	Handle-low
125.6	46.7	4.9	82.9	78.6

Table 7 Change of objective functions

	Weight [g]	Pressure at V/P Switchover [MPa]	
		Handle-up	Handle-low
Initial design	129.3	88.1	81.9
Optimized design	125.6	82.9	78.6
% Change	-2.9%	-5.9%	-4.0%



(a) Handle up



(b) Handle low

Fig. 5 Obtained pareto front of NSGA-II

4. NSGA-II를 이용한 근사 최적화

다목적 함수의 최적화를 위해 비 지배 분류 유전알고리즘(NSGA-II)을 이용하여 최적화를 진행하였다. 목적함수에 제한 조건인 stress, displacement에 대하여는 exterior penalty function을 사용하여 constraints function을 적용하였다. 충분히 균일하고 밀도 있는 solution을 구하기 위해 인구수와 세대를 조정하면서 최적화를 진행하였고 인구수 200, 세대 300 이상에서 유의미한 차이가 없음을 확인하고 해당 값을 적용하였다.

이때 구해진 최적해의 pareto front는 Fig. 5와 같이 나타난다. 이중 하나의 해를 선정하기 위해 각 목적함수의 정규화된 값의 합이 최소가 되는 해를 선정하였고 그 값은 Table 5와 같다. 각각의 값은 실제 설계에서의 정밀도를 반영하여 소수점 첫째 자리로 반올림 하여 정리하였다.

선정된 해를 이용하여 해석 모델을 갱신하여 최종 설계 형상을 얻었다. 이 모델을 이용하여 구조해석과 사출성형해석을 진행하여 목적함수와 구속조건의 값을 확인 하였다. 얻어진 해석 결과는 Table 6과 같다. 이 최적화 결과 값을 초기 설계와 비교 하여 최적화 결과의 적합성을 검토하였다. 여기서 초기 설계란 각 설계인자의 중심 level 값을 설계 인자로 채택한 설계이다.

Table 7에서 나타나듯이 각각의 목적함수인 중량과 각 부품의 최대 사출 압력이 초기 설계 대비 떨어진 것을 확인 할 수 있어 최적화를 통해 설계가 개선되었음을 확인 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 플라스틱 사출물의 최적 설계를 목적으로 기존의 구조 최적화를 위해 널리 사용되는 실험계획법 기반의 근사모델 생성과 이를 통한 중량 최소화라는 최적화 방법에 플라스틱 사출성형품이라는 제조 조건에 의해 부여되는 사출성형 압력을 또 하나의 목적함수로 부여하여 다목적 함수 문제로 설정하였고 이를 비 지배 분류 유전알고리즘인 NSGA-II를 이용하여 최적화를 진행하는 방법론을 제시하였다.

플라스틱 사출성형품의 특성 때문에 각 형상 설계 변수는 부품의 중량 뿐 아니라 사출압력에도 영향력 미치지 되는 것을 실험계획법을 이용한 실험을 통해 확인하였고 형상설계변수를 이용하여 사출성형압력의 근사모델을 구하고 더 나아가 중량과 사출성형압력을

동시에 고려하는 설계를 위한 다목적 함수 최적화를 진행하였다.

그 결과 초기 설계 대비 목적함수인 중량과 최대사출압력이 모두 절감되어 초기 설계 대비 개선됨을 확인 할 수 있었다. 중량은 2.9%, 사출 압력은 각각 5.9%, 4% 줄어 유의미한 결과를 얻었다. 본 연구에서는 소형의 제품을 대상으로 하였기에 변화량이 작게 나타났지만 대형 구조물에 적용할 경우 최적화를 통해 개선 총량이 크게 나타날 것으로 예상된다.

이 결과를 통해 설계 완료 이후에 제조 조건의 문제로 인해 설계를 수정하여야 하는 문제점을 사출성형해석과 구조해석을 결합한 최적화를 제품설계 단계에서 진행하여 설계 및 개발의 효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 더 나아가 사출성형해석에서 확인되는 다른 제조 조건도 형상 설계변수를 이용하여 근사모델로 만들 수 있다면 구조 최적화와 동시에 최적화가 가능 할 것으로 판단된다.

References

- [1] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., 2002, A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, *Evolutionary Computation*, 6:2 182-197.
- [2] Park, C. H., Pyo, B. G., Koo, M. S., Choi, D. H., 2009, Design Optimization of Injection Molding Parts for Minimizing Injection Pressure and Preventing Weldlines, *KSAE*, 19:1 66-72.
- [3] Park, J. C., Kim, K. H., Kim, K. M., Koo, B. H., 2008, Injection-Molded Parts By Optimal Design of U-type Ribs, *KSMPE*, 7:1 53-61.
- [4] Hong, G. J., Jeon, G. G., Jo, Y. S., Choe, D. H., Lee, S. J., 2000, A Study on the Construction of Response Surface for Design Optimization, *KSME*, 24:6 1408-1418.
- [5] Park, S. H., 2003, *Modern Design of Experiments*, Minyongsa, Korea.