

축하중을 고려한 스크롤 압축기 하부 프레임의 최적설계

김정환^a, 이종수^{b*}

Approximate Multi-Objective Optimization of Scroll Compressor Lower Frame Considering the Axial Load

JungHwan Kim^a, Jongsoo Lee^{b*}^a Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Yonsei University,
50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea^b School of Mechanical Engineering, Yonsei University,
50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	23	December	2014
Revised	31	March	2015
Accepted	3	April	2015

Keywords:

Scroll compressor
Response surface methodology
Parameter analysis
Central composite design
NSGA-II
D-optimal

ABSTRACT

In this research, a multi-objective optimal design of a scroll compressor lower frame was approximated, and the design parameters of the lower frame were selected. The sensitivity of the design parameters was induced through a parameter analysis, and the thickness was determined to be the most sensitive parameter to stress and deflection. All of the design parameters regarding the mass are sensitive factors. It was formulated for the problem about stress and deflection to be caused by the axial load. The sensitivity of the design variables was determined using an orthogonal array for the parameter analysis. Using the central composite and D-optimal designs, a second polynomial approximation of the objective and constraint functions was formulated and the accuracy was verified through an R-square. These functions were applied to the optimal design program (NSGA-II). Through a CAE analysis, the effectiveness of the central composite and D-optimal designs was determined.

1. 서론

1.1 스크롤 압축기 최적설계 연구 배경

최근 전세계적으로 환경문제에 관한 관심이 높아지고 에너지 효율에 대한 규제가 강화되고 있다. 이러한 분위기로 인해 냉동공조용 기기 또한 규제가 자유로울 수 없는 입장이다. 따라서, 냉동공조용 기기는 고효율화, 더 작은 사이즈, 좀 더 가벼운 공조용 기기를 목표로 진화되고 있는 실정이며 이런 규제 및 소비자의 요구로 인해 공조용 기기 중 스크롤 압축기(scroll compressor)의 사용이 증

대되고 있다^{1,2)}. 이러한 추세를 반영해 본 연구는 냉동공조용 기기 중 하나인 스크롤 압축기를 대상으로 하며 전장 축소 품 개발 시 발생 할 수 있는 경량화와 동시에 처짐(deflection)량을 고려한 최적설계를 하고자 한다.

경량화와 처짐 량을 고려한 설계 시 설계에 가장 큰 영향을 미치는 인자를 도출하고 이를 해석하여 적합한지를 검증하고자 한다. 본 연구에서는 중심합성계획법(central composite design)과 D-최적계획법(D-optimal) 으로 실험 계획을 세운 후, SAS 프로그램을 사용하여 2차 근사 다항식으로 표현되는 반응표면 모델(RSM)

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

Fax: +82-2-362-2736

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

을 생성한다. 또한 비 지배 분류 유전알고리즘(NSGA-II)를 사용하여 질량과 처짐 값을 최소화한 후, 유한 요소 해석을 통해 적절한 해를 도출하였는지에 대해 비교하여 검증을 진행한다.

2. 기초모델, 설계목표 및 제한조건

2.1 기초 모델

설계 파라미터는 Fig. 1과 같고, 제어할 수 있는 설계 변수는 3개이다. x_1, x_2 는 외형 사이즈, x_3 는 두께이다. 초기 파라미터는 다음과 같다.

$$[x_1, x_2, x_3] = [24, 33, 1.75] \text{ [mm]}$$

2.2 설계 목표 및 제한 조건

설계 목표 및 제한조건 그리고 설계 파라미터의 범위에 대해 정식화 하여 나타내면 아래와 같다^[2]. $F_{mass}, F_{deflection}$ 는 목적 함수로 유한 요소해석 프로그램을 통해 하부 프레임의 전체 질량과 처짐량을 측정된 값이다. 또한 G_{stress} 경계조건 함수로 알루미늄 합금의 항복응력을 넘지 않는 것을 제한 조건으로 하였다.

$$\text{Minimize } F_{mass}$$

$$\text{Minimize } F_{deflection}$$

$$\text{Subject to } G_{stress}(x_i) \leq 230 \text{ MPa } \quad i = 1, 2, 3$$

$$\text{(When } F_z = 2000 \text{ N)}$$

$$22 \leq x_1 \leq 26,$$

$$31 \leq x_2 \leq 35,$$

$$1.5 \leq x_3 \leq 2.0$$

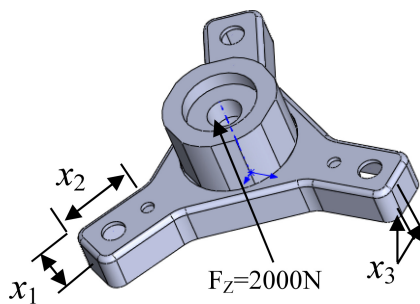


Fig. 1 Lower frame model

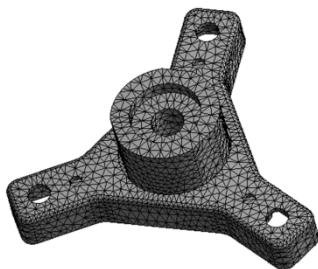


Fig. 2 Mesh structure of the lower frame

3. 파라미터 변화 분석

3.1 실험계획

직교 배열 표를 이용하여 실험계획을 수립한다^[3]. 각 설계 파라미터의 수준별 값은 설계 조건의 범위에 따라 Table 1과 같이 설정하였다. 실험 계획법에 따라 설정된 변수들을 변경해가면서 유한 요소해석 프로그램을 통해 전체 하부 프레임의 질량, 응력, 처짐량을 추출하였다.

3.2 파라미터 분석 결과

유효인자 확인을 위해 파라미터 분석을^[4,5] 하였다. 3개의 변수 중 2개의 변수는 동일, 1개의 변수를 변화 시키면서 질량, 응력, 처짐량을 확인 여 목적 함수에 대해 인자들의 민감도를 확인하는 분석이다. (a), (b) 그래프를 보면 응력과 처짐 량에 대해 x_1, x_2 는 0.01~0.03 수준으로 민감도가 낮았고 x_3 는 0.1수준으로 주요 인자라는 것을 확인할 수 있었다. 또한 (c) 그래프를 통해 질량에 대해서는 x_1, x_2, x_3 모두 민감한 경향을 가져 주요 인자라는 것을 확인하였고, x_2 에 대해 경향성이 반대인 이유는 길이가 길어질수록 하부 프레임 원통 부를 감싸는 직선 길이가 줄어들어 전체적인 프레임 질량이 감소하기 때문이다.

Table 1 Level of each design parameters

Lev.	x_1	x_2	x_3
1	22	31	1.5
2	24	33	1.75
3	26	35	2.0

Table 2 L11 Orthogonal array

Design variables [mm]			Mass [kg]	Stress [MPa]	Deflection [mm]
x_1	x_2	x_3			
22	33	1.75	0.179	222.8	0.160
24	33	1.75	0.186	226.3	0.161
26	33	1.75	0.191	228.3	0.161
24	31	1.75	0.191	220.6	0.149
24	33	1.75	0.186	226.3	0.161
24	35	1.75	0.179	231.9	0.173
24	33	1.50	0.181	332.7	0.224
24	33	1.75	0.179	222.8	0.160
24	33	2.00	0.186	226.3	0.161
22	33	1.75	0.191	228.3	0.161
24	33	1.75	0.191	220.6	0.149

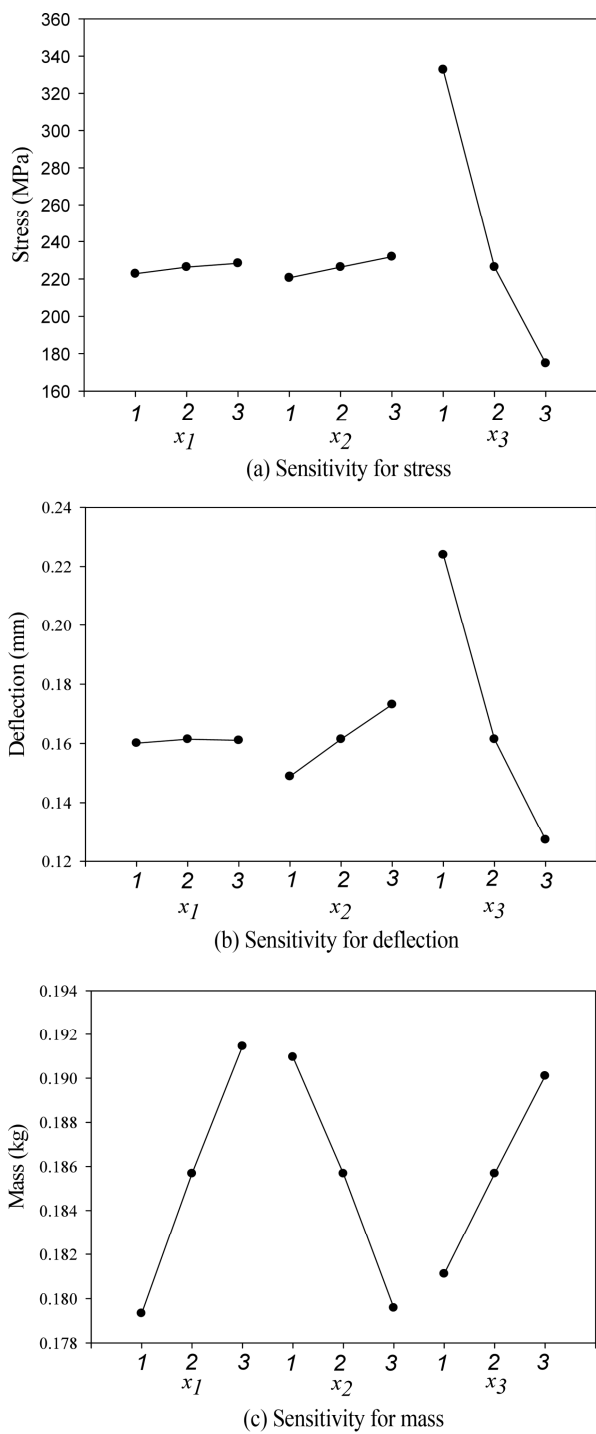


Fig. 3 Parameter analysis results

4. 최적화를 위한 근사모델

4.1 중심합성계획법(CCD)

중심합성계획법은^[6] 실험계획법의 하나로 Box & Wilson에 의해 제안된 방법이다. 총 실험 횟수는 설계변수가 k 개인 문제에 대하여 다음과 같다.

Table 3 CCD & results

Design variables [mm]			Mass [kg]	Stress [MPa]	Deflection [mm]
x_1	x_2	x_3			
23	32	1.625	0.183	272.7	0.181
25	32	1.625	0.189	277.0	0.181
23	34	1.625	0.178	278.7	0.193
25	34	1.625	0.184	284.5	0.195
23	32	1.875	0.188	193.4	0.137
25	32	1.875	0.193	194.6	0.136
23	34	1.875	0.181	197.2	0.146
25	34	1.875	0.188	199.9	0.146
22	33	1.750	0.179	222.7	0.160
26	33	1.750	0.191	279.4	0.161
24	31	1.750	0.191	220.6	0.149
24	34	1.750	0.183	229.5	0.167
24	33	1.500	0.181	332.7	0.224
24	33	2.000	0.190	174.8	0.127
24	33	1.750	0.186	226.4	0.161

Table 4 D-optimal & results

Design variables [mm]			Mass [kg]	Stress [MPa]	Deflection [mm]
x_1	x_2	x_3			
22.06	34.85	1.501	0.169	322.9	0.231
22.67	32.44	2.000	0.188	177.9	0.126
24.67	31.49	2.000	0.196	176.4	0.120
22.46	31.94	2.000	0.188	180.1	0.124
23.66	31.46	2.000	0.193	178.0	0.121
22.78	32.81	2.000	0.187	180.3	0.128
25.88	32.29	1.500	0.188	334.9	0.219
22.65	34.25	1.503	0.173	331.3	0.229
25.91	31.22	2.000	0.201	172.1	0.118
25.78	34.14	1.525	0.184	331.4	0.226
25.98	31.27	1.501	0.191	329.4	0.211
22.52	34.20	2.000	0.179	182.5	0.138
22.58	34.47	1.500	0.172	333.3	0.231
22.41	32.49	2.000	0.186	179.0	0.126
24.52	34.67	1.500	0.178	339.8	0.236

$$n = 2^k + 2k + n_0 \quad (1)$$

유한 요소해석은 ANSYS 프로그램을 이용 하였고 재료는 알루미늄 합금으로 진행 하였다. 경계 조건으로는 프레임의 끝 단 3면을 고정 한 후 FZ의 하중을 가해 해석 진행하였다. 격자생성 작업

후 하부 프레임 형상은 Fig. 2와 같으며, 절점의 개수는 31,056개, 요소의 개수는 16,650개, 격자요소의 형상은 Tetrahedron이며, 중심합성 계획법을 통해 도출된 해석결과는 하기 Table 3와 같다.

4.2 D-최적계획법

D-최적 계획법은 2차 회귀모델 계수를 산출하기 위해 $X^T X$ 행렬의 역 행렬을 구하여 $X^T X$ 의 행렬식(determinant)을 최대로 하는 실험 점의 조합 행렬X를 찾는 것이다. 행렬식을 최대로 하는 15개의 실험 조합을 추출하여 유한 요소해석(FEM)을 수행 하였고 Table 4에 나타내었다. 본 논문에서는 목적함수를 최적화 하기 위해 다양한 변수들이 존재 하는데 이를 중심합성계획법과 D-최적계획법의 비교를 통해 최적 값을 선정하고 비교 하고자 하였다.

4.3 반응표면모델(RSM)

반응표면 법은 반응변수와 두 개 이상의 요인들 간의 관계를 파악하는데 사용된다. 본 연구에선 이차 다항식 모델을 사용하였다^[7]. 중심합성계획법을 통해 얻은 무게, 응력, 변형에 관련된 데이터를 이용하여 반응 표면을 생성하여 얻은 결과는 다음과 같다^[8].

$$F_{mass} = 0.00085173 + 0.00784x_1 + 0.00365x_2 + 0.02799x_3 - 0.00009983x_1x_1 - 0.00009755x_2x_2 - 0.00295x_3x_3$$

$$(R^2 = 99.81\%)$$

$$F_{deflection} = 0.49769 + 0.0119x_1 + 0.02673x_2 - 0.97177x_3 - 0.00025x_1x_1 - 0.00032x_2x_2 + 0.22335x_3x_3$$

$$(R^2 = 99.85\%)$$

$$G_{stress} = 4988.53133 - 285.50468x_1 + 25.25351x_2 - 1841.32618x_3 + 6.11405x_1x_1 - 0.34275x_2x_2 + 434.17891x_3x_3$$

$$(R^2 = 97.76\%)$$

D-최적계획법을 통해 얻은 질량, 응력, 변형에 관련된 데이터를 이용하여 반응 표면을 생성하여 얻은 결과는 다음과 같다.

$$F_{mass} = -0.3545 + 0.01963x_1 + 0.00426x_2 + 0.27882x_3 - 0.00035x_1x_1 - 0.00011x_2x_2 - 0.07511x_3x_3$$

$$(R^2 = 99.63\%)$$

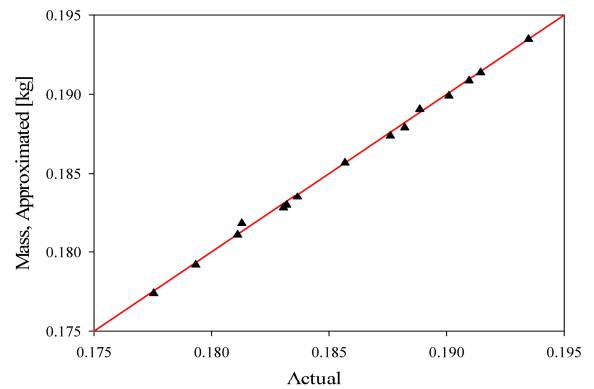
$$F_{deflection} = -0.44725 + 0.02758x_1 + 0.03289x_2 - 0.23654x_3 - 0.00056x_1x_1 - 0.0004x_2x_2 + 0.0148x_3x_3$$

$$(R^2 = 99.96\%)$$

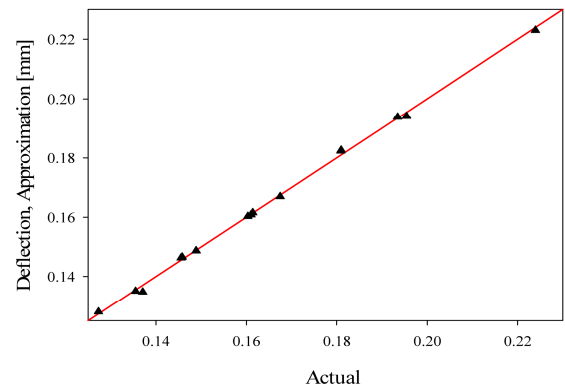
$$G_{stress} = -3165.37 + 80.56991x_1 + 161.4185x_2 + 23.00381x_3 - 1.64069x_1x_1 - 2.41666x_2x_2 - 94.3028x_3x_3$$

$$(R^2 = 99.92\%)$$

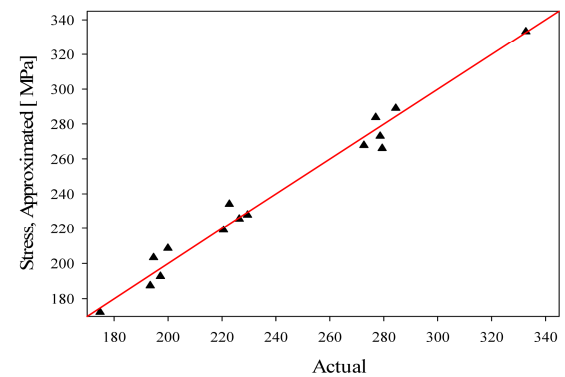
위의 근사 방정식의 정확도를 확인하기 위해 중심 합성 계획법 및 D-최적계획법에서 수행한 각 실험값, 즉 설계 파라미터를 위의 근사 방정식에 대입하여 실제 유한 요소해석 결과 값과 비교하였으며 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.



(a) Accuracy of RSM - Mass



(b) Accuracy of RSM - Deflection



(c) Accuracy of RSM - Stress

Fig. 4 Accuracy of RSM (CCD) about mass, deflection and stress

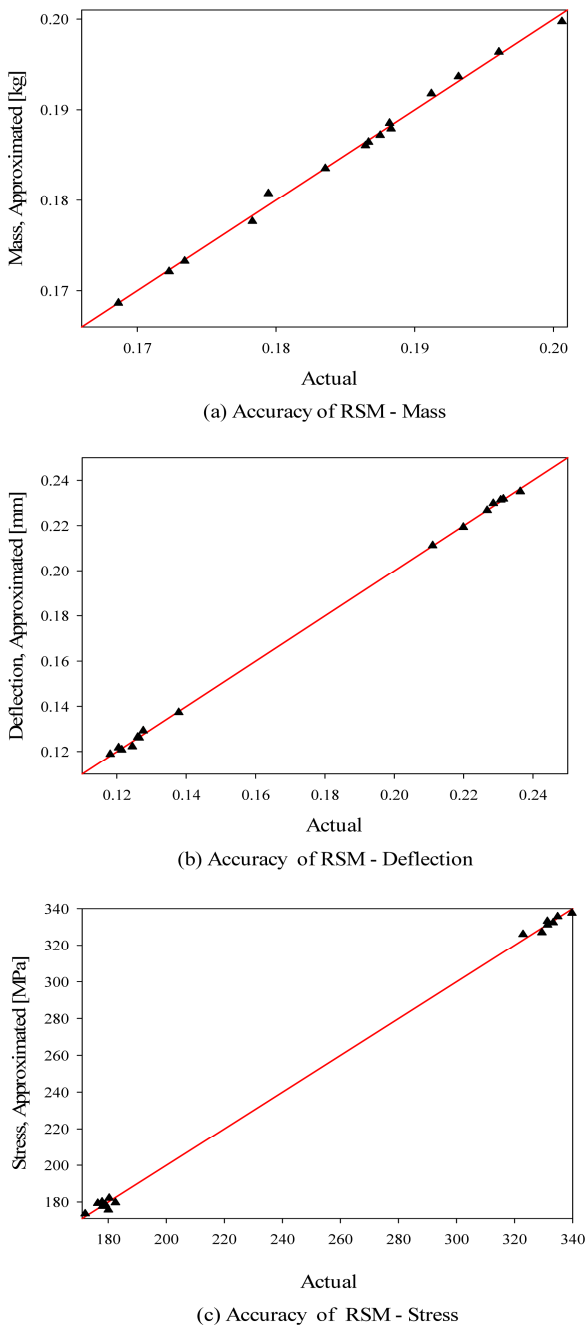


Fig. 5 Accuracy of RSM (D-optimal) about mass, deflection and stress

5. 최적 값 도출 및 검증

5.1 비 지배 분류 유전알고리즘(NSGA-II)

2개 이상의 목적 함수 최적화를 위해 비 지배 유전 알고리즘을 사용하여 최적화를 진행하였다⁹⁾. 인구수는 150, 세대 수는 300으로 진행 하여 Fig. 6와 같은 파레토 해의 집합을 도출하였다. 목적 함수 F_{mass} 를 최소화하는 설계변수는 x_1, x_2, x_3 는 24.01692, 35, 1.9474를 얻었으며, 이 값의 F_{mass} 는 0.179935이다. 이는 하부 프

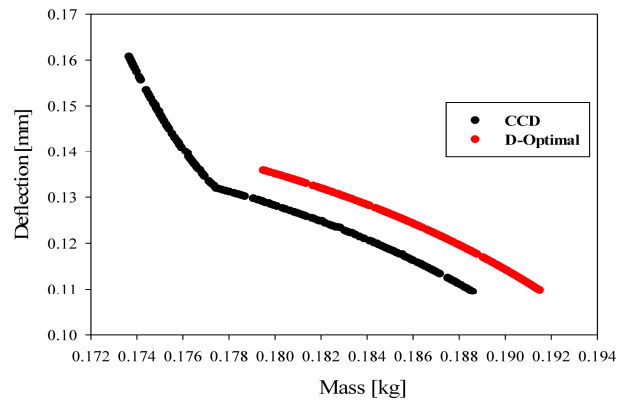


Fig. 6 The comparison of CCD and D-optimal

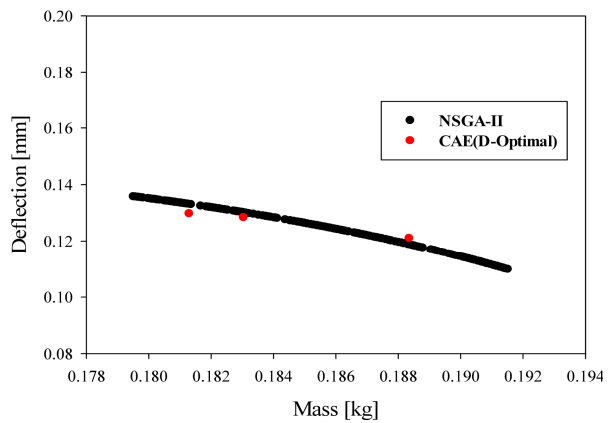
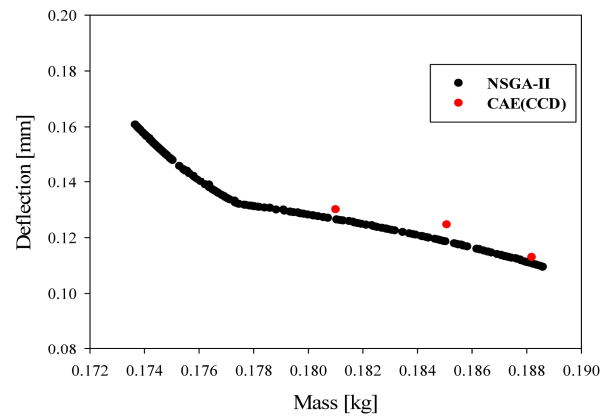


Fig. 7 Pareto solution of NSGA-II

래임의 질량을 경계조건 내에서 최소화하는 변수들 이다.

5.2 유한요소 해석 검증

중심합성계획 법과 비 지배 분류 유전알고리즘을 비교하였다. Table 5와 Table 6을 통해 검증은 오차율로 진행 하였고, 오차율 계산은 NSGA-II와 CAE값의 차를 CAE값으로 나눔으로써 계산 하였다. 결과를 살펴보면 D-최적계획법¹⁰⁾은 오차율 2%이며, 중심 합성계획법은 오차율 5%로 결과를 얻었다.

Table 5 Comparison of NSGA-II and CAE

	NSGA-II		CAE (CCD)	
	Mass [kg]	Deflection [mm]	Mass [kg]	Deflection [mm]
1	0.187	0.113	0.188	0.113
2	0.185	0.119	0.185	0.124
3	0.182	0.124	0.181	0.130

Table 6 Comparison of NSGA-II and CAE

	NSGA-II		CAE (D-optimal)	
	Mass [kg]	Deflection [mm]	Mass [kg]	Deflection [mm]
1	0.191	0.113	0.188	0.111
2	0.186	0.124	0.185	0.128
3	0.185	0.127	0.181	0.129

6. 결론

본 연구를 통해 다목적 함수를 가진 스크롤 컴프레서의 알루미늄 합금 하부 프레임을 설계하였다. 실험 계획법 과정의 중심합성계획법과 D-최적계획법을 바탕으로 반응표면을 생성하였고, 생성한 반응표면을 통해 비 지배 분류 유전알고리즘으로 최적화 설계를 하여 최종적으로 2가지 방법에 대해 비교해 보았다. 중심합성계획법의 경우 Fig. 4와 Fig. 5에서 보이듯 범위 전반적으로 해석 값이 나타나는 것을 확인 하였고 D-최적계획법의 경우 범위 하부위치와 상부위치에 해석 값이 분포해 있는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 최종 유한 요소해석을 통해 최적설계 값과 비교 해 본 결과 중심합성 계획법에 비해 D-최적계획법이 오차율 2%로 다소 더 적합하다는 것을 확인하였다.

References

- [1] Choi, K. Y., 2000, Dynamic Behavior of an Orbiting Scroll in a Scroll Compressor Considering Lubrication Characteristics of a Thrust Bearing, A Thesis for a Master, Yonsei University, Republic of Korea.
- [2] Kim, T. J., Ahn, Y. J., and Han, D. C. 1993, Dynamic Behavior Analysis of a Scroll Compressor Using a Radial Compliant Crank Mechanism, The Korean Society of Mechanical Engineers, 1:1 428-433.
- [3] Choi, H. Y., Lee, J. S., Park, J. O., 2012, Approximate Multi-objective Optimization of robot Casting Considering Deflection and Weight, The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 21:6 954-960.
- [4] Lee, J., Ahn, B., 2006, DOE Based Robust Optimization Considering Tolerance Bands of Design Parameters, JSME Series C, 49:4 1223-1231.
- [5] Fowlkes, William Y., 1995, Engineering Methods for Robust Product Design, Addison-Wesley, UK.
- [6] Park, S. H., 1995, Modern Design of Experiments, Minyongsa, Republic of Korea.
- [7] Hong, K. J., Jeon, K. K., Cho, Y. S., Choi, D. H., Lee, S. J., 2000, A Study on the Construction of Response Surface for Design Optimization, Trans. of the KSME(A), 24:6 1408-1418.
- [8] Helwig, J. T., Ouncil, K. A., 1979, SAS user's guide: 1979 edition, SAS Institute.
- [9] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., 2002, A Fast and Elitist Multi objective Genetic Algorithm: NSGA-II, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6:2 182-197.
- [10] Triefenbach, F., 2008, Design of Experiments: The D-optimal Approach and Its Implementation as a Computer Algorithm, A Thesis for a Bachelor Degree, Information and Communication Technology, Umea University, Sweden.