

처짐과 무게를 고려한 주물 프레임의 다중목적 근사최적설계

최하영⁺, 이종수⁺⁺, 박준오^{*}

(Manuscript received: Oct, 9, 2012 / Revised: Nov, 13, 2012 / Accepted: Nov, 14, 2012)

Approximate Multi-Objective Optimization of Robot Casting Considering Deflection and Weight

Ha-Young Choi⁺, Jongsoo Lee⁺⁺, Juno Park^{*}

Abstract

Nowadays, rapidly changing and unstable global economic environments request a lot of roles to engineers. In this situation, product should be designed to make more profit by cost down and to satisfy distinguished performance comparing to other competitive ones. In this research, the optimization design of the industrial robot casting will be done. The weight and deflection have to be reduced as objective functions and stress has to be constrained under some constant value. To reduce time cost, CCD (Central Composite Design) will be used to make experimental design. And RSM (Response Surface Methodology) will be taken to make regression model for objective functions and constraint function. Finally, optimization will be done with Genetic Algorithm. In this problem, the objective functions are multiple, so NSGA-II which is brilliant and efficient for such a problem will be used. For the solution quality check, the diversity between Pareto solutions will be also checked.

Key Words : RSM(Response Surface Methodology, 반응표면법), Parameter efect(파라미터 분석), Approximation model(근사모델), NSGA-II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, 다중목적 유전알고리즘), CCD(Central Composite Design, 중심합성계획)

1. 서론

본 연구 대상인 로봇 주물 프레임은 제조사간의 경쟁이 극심한 디스플레이 제조 라인에 사용되는 설비의 일부이다. LCD (Liquid Crystal Display) 유리 이송 로봇의 전형적인 예⁽¹⁾는 이 Fig. 1에서 보여주고 있다. 로봇은 이송, 회전, 팔과 수직 운동을 위한 많은 축들로 구성되어 있다. 본 연구에서 고려되고

있는 주조 프레임은 수직 구조물에 해당하고, 이는 선형 운동을 할 수 있도록 모터, 감속기, 직선 운동 가이드와 볼 나사로 구성 되어 있다. 많은 경우 구조물의 최적설계시 단일 목적함수를 고려하고 있지만^(2,3), 실제 설계에 있어서 2개 이상의 목적을 만족시켜야 하는 경우가 많이 존재한다. 제조 산업은 생산 성능 향상 뿐만 아니라 비용 절감이 필요하다. LCD 유리 이송 로봇의 제조에 사용하기 위한 주조 프레임은 비용 효율성을 위해

* 연세대학교 기계공학과 대학원
주소: 120-749 서울특별시 서대문구 연세로 50

+ 연세대학교 기계공학과 대학원

++ 연세대학교 기계공학과

✉ Corresponding Author E-mail: junopark@yonsei.ac.kr

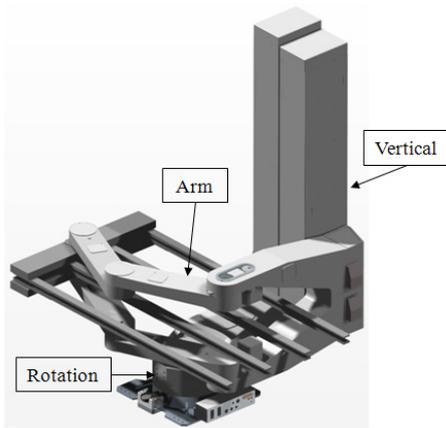


Fig. 1 LCD glass transfer robot

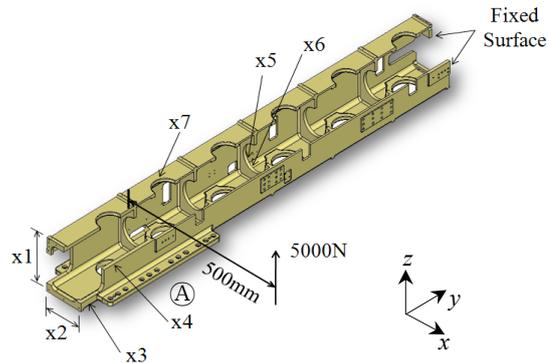


Fig. 2 Industrial robot casting model

가능한 가벼워야 하고 또한 응력과 처짐(deflection) 등의 강도 설계조건이 설계 허용공차(design tolerance)와 매개변수 변화(parameter variation)에 따라 만족해야 한다. 본 대상물은 원가 절감을 위해 무게는 최소화되어야 하며, 성능 사양을 만족하기 위해 처짐값 또한 최소화할 수 있도록 설계가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 CCD를 통해 실험계획을 세운 후, 2차 다항식으로 표현되는 반응표면을 생성한다. 또한 무게와 처짐을 동시에 최소화해야 하는 다중 목적함수의 문제이므로 다양한 다중목적함수 최적해 및 파레토 결과를 제공해주는 신뢰도 높은 다중목적 유전알고리즘 방법인 NSGA-II를 사용하여 최적해 집합을 얻은 후, 적절한 해를 선택하도록 한다. 대부분의 다중목적함수 최적화는 전통적인 가중치(weighting factor) 기반 다중목적 최적화 방법을 사용하고 있지만, 본 연구는 근사모델에 유전자알고리즘 기반의 NSGA-II를 사용함으로써 계산비용에 크게 영향을 미치지 않는 다중목적 최적화 방법을 사용한다. 유전자알고리즘 기반 방법은 함수계산 횟수를 많이 요구하나, 본 논문은 근사모델과 연계하므로 실제 CAE계산은 근사모델 구성을 위한 실험점 획득에만 적용되고 NSGA-II의 계산에 있어서는 시간이 많이 소요되지 않으면서 다양한 파레토 해를 제공하는 장점이 있다.

2. 기초모델, 설계목표 및 제한조건

2.1 기초 모델

Fig. 2는 초기 모델이며 제어할 수 있는 설계 파라미터는 7개이다. x_1, x_2, x_3, x_4 는 외곽 사이즈 및 두께, x_5, x_7 은 주물사 제거 및 경량화를 위한 홈, x_6 은 처짐 최소화를 위한 Rib의 두께이다. 초기 파라미터는 다음과 같다.

$$[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7] = [190, 190, 20, 20, 95, 20, 95] [\text{mm}]$$



Fig. 3 Mesh structure of robot casting

2.2 설계 목표 및 제한 조건

설계 목표 및 제한조건 그리고 설계 파라미터의 범위에 대해 정식화하여 나타내면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } F_{\text{weight}} \\ & \text{Minimize } F_{\text{deflection}} \\ & \text{Subject to } G_{\text{stress}}(x_i, p) \leq 50\text{MPa} \quad i = 1, 2, \dots, 7 \\ & 180 \leq x_1 \leq 200, \quad 180 \leq x_2 \leq 220 \\ & 15 \leq x_3 \leq 25, \quad 15 \leq x_4 \leq 25 \\ & 80 \leq x_5 \leq 110, \quad 15 \leq x_6 \leq 25 \\ & 80 \leq x_7 \leq 110 \end{aligned}$$

무게와 처짐은 목적함수로서 최소화시켜야 하며 응력은 50MPa이하로 설계되어야 하는 제한 조건을 갖는다.

CAE(computer aided engineering)는 ANSYS를 사용하였으며 격자 요소의 형상은 Tetrahedron이고, 요소의 개수는 69,536개, 절점개수는 124,076개가 사용되었다. Fig. 3은 격자 생성 후의 형상을 나타낸다. 이 모델에서 필요한 재료상수는 탄성계수 $69\text{E}3\text{N/mm}^2$, 프와송비 0.33, 밀도 2700kg/m^3 이다. 이 프레임은 Fig. 2의 연결부 A에서 다른 프레임과 연결되어 있으며, 하중 5000N을 연결부의 접촉면 중심으로부터 x방향으로 500mm 위치에서 remote force를 이용하여 가하였다. weight는 밀도와 부피의 곱으로 구하였으며, deflection은 프레임의 끝단에서 발생하는 처짐에 의해서 구하였다.

Table 1 Level of each design parameter

Lev.	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
1	180	180	15	15	80	15	80
2	200	200	20	20	100	20	100
3	-	220	25	25	110	25	110

Table 2 L18 orthogonal array

run	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	Weight [mm]	Stress [mm]	Deflection [mm]
1	1	1	1	1	1	1	1	41.96	80.28	3.53
2	1	1	2	2	2	2	2	50.33	63.39	3.36
3	1	1	3	3	3	3	3	57.62	61.78	3.23
4	1	2	1	1	2	2	3	43.79	76.70	3.84
5	1	2	2	2	3	3	1	56.96	60.83	2.58
6	1	2	3	3	1	1	2	63.03	48.61	2.58
7	1	3	1	2	1	3	3	54.74	60.62	3.13
8	1	3	2	3	2	1	1	63.68	47.78	2.24
9	1	3	3	1	3	2	2	59.31	67.92	2.49
10	2	1	1	3	3	2	1	57.05	48.93	2.29
11	2	1	2	1	1	3	2	51.17	62.43	2.77
12	2	1	3	2	2	1	3	55.88	52.75	2.61
13	2	2	1	2	3	1	2	51.85	52.26	2.53
14	2	2	2	3	1	2	3	63.67	45.16	2.26
15	2	2	3	1	2	3	1	61.54	56.93	1.91
16	2	3	1	3	2	3	2	64.27	43.05	2.11
17	2	3	2	1	3	1	3	53.68	59.15	2.30
18	2	3	3	2	1	2	1	70.80	45.04	1.63

3. 민감도 분석

설계 파라미터가 많으면 해석에 많은 시간과 비용이 발생하게 된다. 따라서 민감도 분석을 통하여 설계 파라미터를 최소화하는 작업을 일차적으로 수행한다.

3.1 실험계획

직교배열표를 이용하여 실험계획을 수립한다⁽⁴⁾. 각 설계 파라미터의 수준별 값은 설계조건 범위에 따라 Table 1과 같이 설정하였으며 실험에 대한 결과는 무게, 응력, 처짐으로 설정하였다. Table 2에 그 결과를 나타내었다.

3.2 평균분석

각 설계 파라미터의 민감도를 평가하기 위해 평균분석(ANOM, analysis of means)을 수행하였고⁽⁵⁾, 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 그래프에서 선의 기울기가 클수록 더욱 민감한 파라미터이며 수준의 증감에 따른 결과값의 증감을 확인하여 기본적인 설

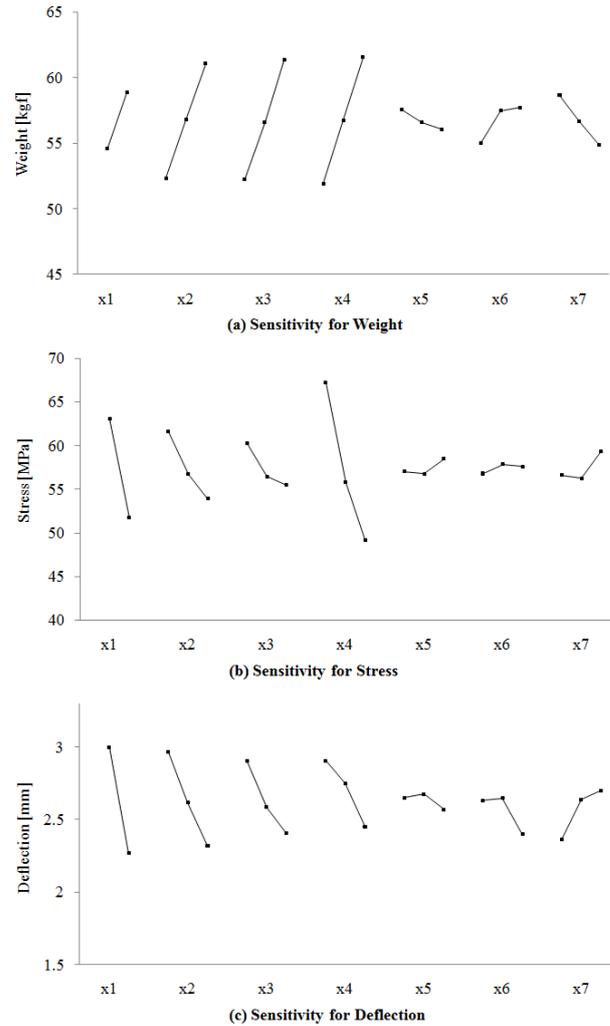


Fig. 4 ANOM of design parameters

계방향을 결정할 수 있다. 무게의 경우 x_1, x_2, x_3, x_4 4개의 파라미터에 대한 변동량은 다른 3개에 비해 크다. 이는 파라미터 (x_1, x_2, x_3, x_4)의 변화가 결과값에 민감하게 영향을 미치는 것을 나타낸다.

반면 x_5, x_6, x_7 의 경우는 무게에 미치는 영향이 미미하므로 설계 파라미터에서 배제할 수 있다. 응력과 처짐에 관련된 결과값들에 대해서도 확인하면 동일한 결과를 얻을 수 있다.

4. 근사 모델

4.1 중심합성계획법(CCD)

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

$$n = 2^k + 2k + n_0 \tag{1}$$

위 식에서 2^k 는 2^k 요인 배치법의 실험개수, $2k$ 는 축점의 실험개수, n_0 는 중심점의 수이다. Table 3은 중심합성계획법을 수립한 후 그에 따른 반응값, 즉 CAE로 해석한 결과값을 나타내었다.

4.2 반응표면모델

반응표면법은 반응변수와 두 개 이상의 요인들 간의 관계를 파악하는데 사용된다. 본 연구에서는 이차 다항식 모델을 사용하였다⁽⁷⁾.

CCD를 통해 얻은 무게, 응력, 처짐에 관련된 데이터를 이용하여 반응표면을 생성하여 얻은 결과는 다음과 같다.

$$F_{weight} = -0.3113 - 0.0004x_1 + 0.0054x_2 - 0.2276x_3 - 0.1201x_4 + 0.0003x_1x_2 + 0.0075x_1x_4 + 0.0075x_2x_3 - 0.0150x_3x_4$$

(R-Sq = 100.0% R-Sq(adj) = 100.0%)

Table 3 CCD & results

Design Variables [mm]				Weight	Stress	Deflection
x1	x2	x3	x4	[kgf]	[MPa]	[mm]
180	180	15	15	41.51	78.33	3.91
200	180	15	15	44.72	65.37	3.01
180	220	15	15	48.16	71.77	3.10
200	220	15	15	51.59	58.80	2.41
180	180	25	15	50.49	72.62	3.15
200	180	25	15	53.70	60.39	2.43
180	220	25	15	60.13	61.86	2.41
200	220	25	15	63.56	55.36	1.88
180	180	15	25	51.57	63.64	3.31
200	180	15	25	56.28	54.57	2.51
180	220	15	25	58.21	49.76	2.70
200	220	15	25	63.14	53.03	2.07
180	180	25	25	59.04	50.93	2.84
200	180	25	25	63.76	44.66	2.15
180	220	25	25	68.69	40.57	2.21
200	220	25	25	73.62	36.58	1.70
170	200	20	20	52.69	58.10	3.28
210	200	20	20	60.83	42.56	1.93
190	160	20	20	48.51	67.19	3.26
190	240	20	20	65.02	46.48	2.01
190	200	10	20	47.03	68.70	3.25
190	200	30	20	66.49	43.91	2.11
190	200	20	10	46.70	89.59	2.87
190	200	20	30	66.82	42.62	2.22
190	200	20	20	56.76	52.73	2.48

$$F_{def \leq ction} = 44.7634 - 0.2164x_1 + 0.1061x_2 - 0.3234x_3 - 0.2237x_4 + 0.0003x_1x_1 + 0.0020x_1x_3 + 0.0006x_4x_4 + 0.0002x_1x_2 + 0.0007x_1x_3 + 0.0003x_1x_4 + 0.0004x_2x_4 + 0.0022x_3x_4$$

(R-Sq = 99.9% R-Sq(adj) = 99.8%)

$$G_{stress} = 519.937 - 0.1575x_1 - 2.3177x_2 - 1.1708x_3 - 12.1839x_4 - 0.0060x_1x_1 + 0.0026x_2x_2 + 0.0357x_3x_3 + 0.1337x_4x_4 + 0.0064x_1x_2 + 0.0034x_1x_3 + 0.0358x_1x_4 - 0.0036x_2x_3 - 0.0031x_2x_4 - 0.0606x_3x_4$$

(R-Sq = 97.1% R-Sq(adj) = 94.5%)

위의 근사 방정식의 정확도를 확인하기 위해 CCD에서 수행한 각 실험값, 즉 설계 파라미터를 위의 근사 방정식에 재대입하여 실제 CAE 결과값과 비교하였으며 Fig. 5에 나타내었다.

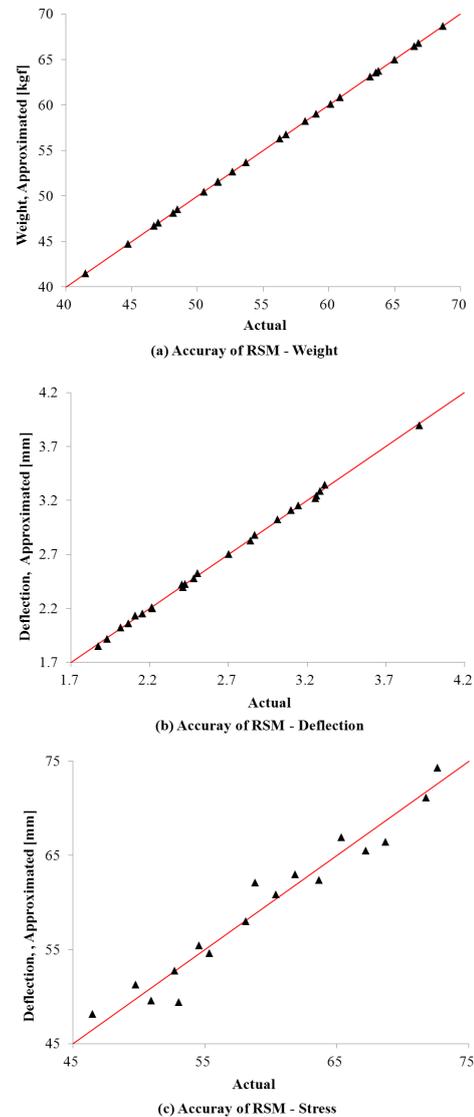


Fig. 5 Accuracy of RSM about weight, deflection, and stress

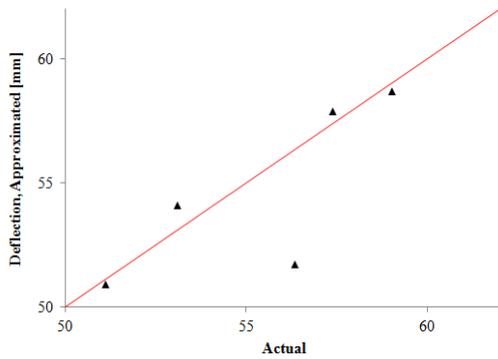


Fig. 6 Accuracy of RSM about new check points

Table 4 New check point for RSM accuracy

Design Variables			
x1	x2	x3	x4
182	212	22	17
185	205	18	23
188	216	24	18
192	184	15	24
198	198	22	17

CCD의 실험점에 포함되지 않은 경우에 대해서도 비교해 보기 위해 Table 4와 같은 실험점들에 대해 추가로 비교를 하였다. 무게와 처짐에 대해서 매우 정확한 결과를 볼 수 있었으며 Fig. 6에서와 같이 응력에 대해 세 번째 실험의 경우가 약간 벗어나는 것을 볼 수 있었다. 이 경우의 CAE 값은 56.35MPa, 반응표면 근사 방정식의 값은 51.71MPa로 CAE 값 대비 약 8.23%의 오차가 발생함을 볼 수 있었다.

5. 최적화 및 결과

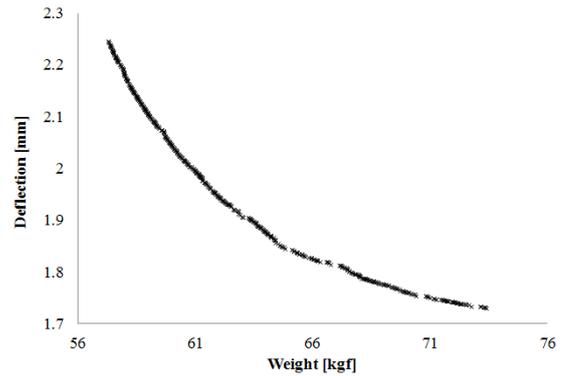
5.1 다중목적 유전알고리즘(NSGA-II)

다목적 함수의 최적화를 위해 NSGA-II를 적용하여 최적화를 수행한다⁽⁸⁾. 제한 조건인 응력에 대한 근사 방정식의 경우에는 Exterior Penalty Function을 사용하여 적용하였다. 인구수는 500, 세대수는 50, 100, 150으로 증가시키면서 수행하였다.

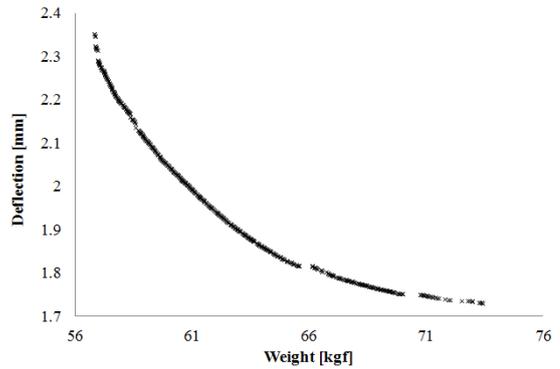
5.2 최적화 결과

Fig. 7은 NSGA-II를 적용하여 최적화를 수행한 결과로 나온 Pareto 해의 집합을 나타내는 그래프이다. 세대수가 50일 때는 불연속적으로 보이던 해의 집합이 인구수가 늘어나면서 연속적으로 변화하는 것을 확인할 수 있다.

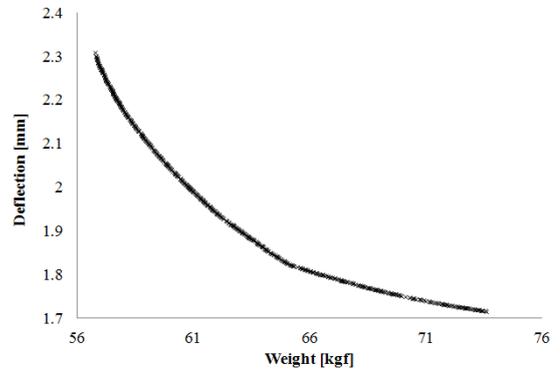
반응표면을 형성하기 위한 실험계획에 있어 D-Optimal Design(D-최적계획법)⁽⁹⁾ 방법을 사용하면 실험점을 더 줄일 수



(a) Pareto solution generation 50



(a) Pareto solution generation 100



(a) Pareto solution generation 150

Fig. 7 Pareto solution of NSGA-II

있다. Fig. 8은 CCD를 이용한 기존의 결과와 비교한 그래프이다. D-Optimal의 경우 실험 횟수를 더 줄여 효율적인 연구를 진행할 수 있으나 Fig. 8에서와 같이 세대수를 늘려도 불연속적인 부분이 줄지 않는 구간이 발생하게 된다. 이는 CCD에 비해 실험점의 개수가 충분치 않아 반응표면 모델이 제대로 생성되지 않은 결과로 볼 수 있다. D-Optimal의 경우 25개의 실험점을 사용하였으며, 실험점이 이와 같이 많지 않은 경우 D-Optimal에 의한 방법은 모델을 부정확하게 생성시키는 단점이 있음을 알 수 있다. 또한 세대수를 늘리게 되면 CCD로 생성한 모델과 일치하게 되는 부분이 더 늘어남을 확인할 수 있다.

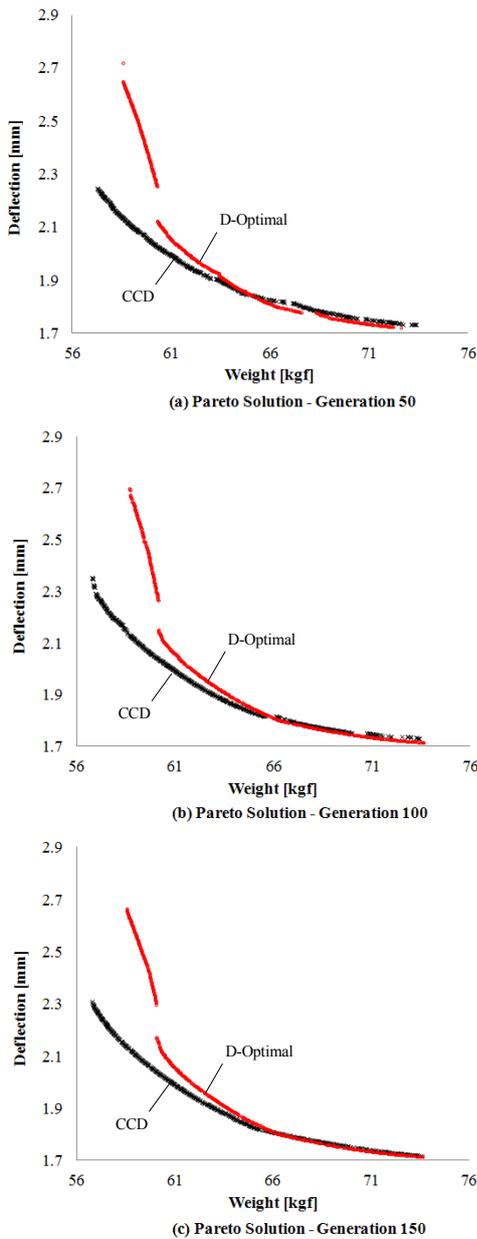


Fig. 8 Pareto solutions of NSGA-II

Table 5 Mean and variance of the diversity

Generation	Mean	Variance
50	0.69684	0.00171
100	0.61552	0.00289
150	0.57095	0.00067
300	0.52786	0.00059

5.3 최적해의 다양성

구해진 최적해들의 거리 밀집도를 확인하기 위해 Diversity (해 다양성)를 구한다⁽⁸⁾. 세대수의 변화에 대한 결과는 Table 5와 같다. 세대수가 증가할수록 평균과 분산이 작아지면서 더

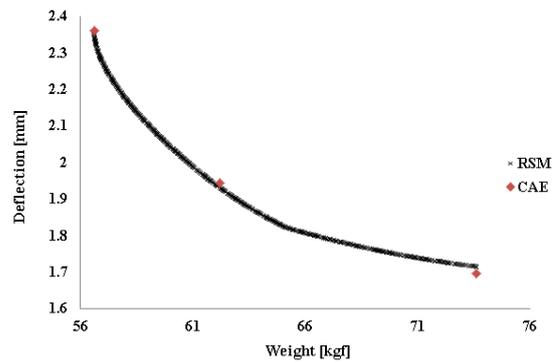


Fig. 9 Pareto Solution of NSGA-II

Table 6 Comparison of some case NSGA-II and CAE

	NSGA-II		CAE	
	Weight [kgf]	Deflection [mm]	Weight [kgf]	Deflection [mm]
1	73.62	1.72	73.62	1.70
2	62.07	1.94	62.22	1.94
3	56.61	2.36	56.65	2.36

좋은 밀집성을 가짐을 확인할 수 있었다.

5.4 CAE 검증

Pareto 해와 실제 CAE 결과를 비교해 보았으며, Pareto 해집합 중 처짐 기준으로 최고, 중간, 최하에 해당하는 경우의 설계 파라미터들을 취하여 CAE 해석을 수행하였다. Fig. 9와 Table 6은 그 결과를 나타낸다.

두 결과를 비교하였을 때 소수점 둘째 자리만 차이가 날 정도로 매우 유사한 결과를 도출할 수 있음을 확인하였다.

6. 결론

본 연구를 통해 다목적 함수를 가진 로봇 주물 프레임의 최적 설계를 수행하였다. CCD를 통해 수립한 실험계획을 기반으로 근사 반응표면을 생성하였으며 NSGA-II 알고리즘을 적용하여 최적화를 진행하여 많은 다중목적 해를 도출함으로써 설계자의 환경에 맞는 최적해를 적절히 선택할 수 있는 결과를 제공하였다. 많은 다중목적 해 가운데 대표적으로 3개의 주요 설계 해에 대한 CAE검증을 통해 근사최적설계 결과의 정확도가 99% 이상임을 확인하였다. 이러한 해의 집합은 주변 환경이나 필요 조건들에 따라 설계자가 원하는 해를 선택하여 사용할 수 있도록 한다. CCD와 D-Optimal에 의한 방법으로 생성된 근사 반응표면에 대한 비교도 함께 수행하였다. CCD와 D-Optimal 방법을 비교함으로써 본 주물프레임설계 문제에 적합한 근사모델을 위한 실험계획 방법을 제안하였으며, Pareto 해의 생성시

CCD 경우보다 D-Optimal 방법의 경우에 더 불연속한 부분이 생성되었다. 본 연구의 경우에는 CCD에 의한 방법을 이용한 근사최적화가 불연속점이 없는 Pareto 해를 생성할 수 있도록 더 정확한 반응표면을 만들어 내는 것을 확인하였다. 적절한 실험계획법의 선정을 통해 보다 정확한 Pareto 해의 도출을 얻었다. 즉, 본 설계문제에 있어 NSGA-II 환경에 적합한 실험계획 방법 및 반응표면 기법간의 조화를 도출하였다.

References

- (1) Nam, H., 2005, "Six Sigma Robust Design of Composite Hand for LCD Glass Transfer Robot," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 29, No. 3, pp. 455~451.
- (2) Park, H. S., Kim, J. H., and Dang, X. P., 2008, "Optimum Design of the Plastic Armrest Frame for Lightweight Automobiles," *Proceeding of the KSMTE Autumn Conference 2008*, pp. 172~178.
- (3) Han, S. Y., and Jin, K. W., 2000, "Optimal Design of Frame Structure Considering Buckling Load," *Journal of the KSMTE*, Vol. 9, No. 2, pp. 59~65.
- (4) Lee, J., and Ahn, B., 2006, "DOE based Robust Optimization Considering Tolerance Bands of Design Parameters," *JSME Series C*, Vol. 49, No. 4, pp. 1223~1231.
- (5) Fowlkes, W. Y., Creveling, C. M., and Derimiggio, J., 1995, *Engineering Methods for Robust Product Design*, Addison-Wesley, Reading, Mass., pp. 211~220.
- (6) Park, S. H., 1995, *Modern Design of Experiments*, Minyongsa, Korea.
- (7) Hong, K. J., Jeon, K. K., Cho, Y. S., Choi, D. H., and Lee, S. J., 2000, "A Study on the Construction of Response Surface for Design Optimization," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 24, No. 6, pp. 1408~1418.
- (8) Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T., 2002, "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, pp. 182~197.
- (9) Triefenbach, F., 2008, *Design of Experiments: The D-optimal Approach and Its Implementation As a Computer Algorithm*, A Thesis for a Bachelor, Umea University, Sweden.