

☒ 연구논문

유전 알고리즘을 이용한 한계비용내의 최적 공차 설계* - Optimal Tolerance Design within Limited Costs using Genetic Algorithm -

장 현 수 **
Chang, Hyun Su
이 병 기**
Lee, Byoung Ki
김 선 호**
Kim, Sunn Ho

Abstract

The original tolerances, which are assigned by designers on the basis of handbooks and experience, cannot always be expected to be optimal or feasible, because they may yield an unacceptable manufacturing costs. So the systematic tolerance design considering manufacturing costs should be done. Therefore, this research analyzes the tolerance within the tolerance design using Monte-Carlo simulation method and sensitivity analysis and using genetic algorithm by tolerance allocation method. The genetic algorithm was developed for allocation of the optimal tolerance under the manufacturing limitation cost.

1. 서론

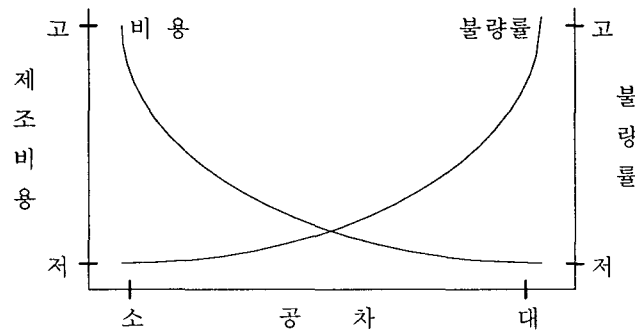
동시공학은 오늘날 지구촌 시장에서 제품의 경쟁력을 높이기 위하여 기업에 요구되는 중요한 개념으로써, 기획·디자인·상세설계·제조기술등 각 분야의 전문가들이 설계에서부터 제조, 검사과정까지 링크되어 제품을 만드는 방식이다. 실제로 많은 CAD회사들이 폭넓은 제품 정보를 유지하기 위하여, 이 개념이 적용된 시스템을 구성하는데 중점을 두고 있다. 이러한 잠재적인 동시공학을 현실화하기 위해서는 제품개발과정과 품질개선정보의 연결 구축이 필요하다. 특히 제품개발단계에서 제품의 치수(dimension)와 공차배분(tolerance allocation) 문제는 매우 중요한 부분을 차지하고 있다.

공차의 설정은 설계과정에서 과학적인 방법이 아닌 설계자의 경험과 지식에 의해서 결정되는 수가 많다. 이러한 경우 최종 제품의 품질 및 성능이 목표치보다 떨어지거나 제품 자체가 불량품으로 처리되어 지는 경우가 발생하기도 한다. 이러한 관점에서 각 부품의 공차는 최종 제품의 품질과 제조비용에 밀접한 관계가 있다.

* 본 연구는 한국학술진흥재단의 '96 대학부설연구소 과제지원으로 수행되었음.

** 명지대학교 산업공학과

제품의 고품질 문제는 “작은 것이 좋다(less is better)”라는 개념하에 공차의 범위를 축소하는 것과 연관되어지며, 이는 고비용을 발생시키는 원인이 된다. 즉, 제품의 품질을 높이기 위해서, 각 부품의 공차를 작게 설정하면 제조비용의 상승을 초래하게 되고, 제품의 공차를 크게 설정하면 제조비용은 줄어들지만 불량률은 상승하여 결국 제품의 품질을 저하시키게 된다. 이러한 공차에 따른 품질과 비용 그리고 불량률의 관계를 [그림 1]에 나타내었다. 따라서 공차를 설정하는데 있어, 이들간의 관계에 “최적(optimal)”이라는 의미를 부여하여야 한다.



[그림 1] 공차-비용과 공차-불량률 관계

최적 공차에 관한 접근방법으로는 선형 또는 비선형 계획법의 문제로 공식화하는 방법등이 있다 [8,15]. 이때 설계변수는 부품이나 조립품의 공차범위로, 목적함수는 제조비용으로 설정함으로써 이를 최소화하는 방법이다. 특히 몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo simulation)방법을 적용하여 작은 규모의 문제들에 대한 공차설계 방법등이 제안되었다[10,11,12].

공차설계시 각 부품들의 공차 누적으로 인한 제품의 품질 오차에 대하여 보다 과학적인 해석방법과 각 부품들의 공차에 따른 제조비용을 고려한 최적의 배분방법이 제품설계과정에서 적용되어야 한다.

이에 따라 본 연구에서는 공차해석방법인 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 설계되어진 공차에 의해 발생하는 제품의 불량률을 체크하고, 불량률의 만족여부(만족스럽지 못한 경우)에 따라 민감도분석(sensitivity analysis)을 실시하여 제품의 품질에 가장 영향을 많이 미치는 주요소공차를 선정하였다. 이 결과를 토대로 비용공차함수를 평가함수로 적용한 유전 알고리즘(genetic algorithms)을 이용하여 제조한계비용내에서 새로운 공차배분방법을 제시하였다. 이를 통하여 공차로 인해 발생하는 제품의 불량률을 감소시키고, 제조비용의 절감과 제품의 품질을 개선시키는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 공차 설계

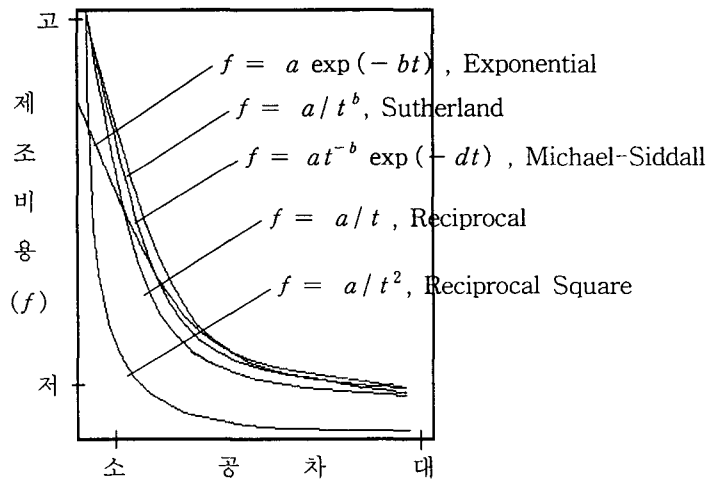
2.1 공차해석방법과 공차배분방법

제품의 공차설계시 다음의 두 가지 방법, 공차해석방법과 공차배분방법이 적용되어야 한다. 공차해석방법은 요소(component)들의 공차가 모두 알려져 있거나 설계되어져 있는 경우에 이 요소공차를 가지고 조립공차를 계산하여, 이것이 제품의 품질에 어떻게 영향을 미치는지 분석하는 방법이다. 일반적으로 사용되어지는 공차해석방법으로는 worst case 방법, 통계적 방법, 몬테카를로 시뮬레이션 방법등이 있다[7].

Worst case 방법은 아주 간단하고, 어떤 경우에도 모든 공차에 대하여 만족한다. 그러나 누적조립공차가 너무 큰 값을 가진다는 것이 단점이다. 통계적 방법은 다른 해석방법과 비교해

불 때 가장 작은 조립공차를 가진다는 것이 장점이다. 그러나, 각각의 요소공차 분포가 비대칭 할 경우에는 조립공차가 작아짐으로써 요소공차가 작아진다. 이는 결국 제조비용을 증가시키는 요인이 되기도 한다. 몬테카를로 시뮬레이션 방법은 컴퓨터를 이용하여 공차를 해석하는 방법으로서, 설계변수들과 조립제품의 특성치와의 관계가 비선형(non-linear)일 때 더욱 효과적이다. 또한 적용 절차가 정확할 뿐만 아니라, 실제 조립과정에서 1D, 2D 뿐만 아니라 3D인 배우 형태의 모델을 다루는데 유용하다.

공차배분방법은 공차를 해석하여 얻어진 값을 토대로 요소공차를 최대로 배분해 주는 방법이다. 이 때 요소공차를 최대로 배분하는데 기준이 되는 것이 비용이다. 따라서 공차배분의 목적은 제품설계시 조립공차를 감안한 즉, 품질을 고려한 제조비용을 최소로 하는 요소공차를 배분하는 것으로써, 이를 최적화문제로 공식화하여 해결할 수 있다. 이 때 목적함수는 비용공차함수(cost-tolerance function)를 사용한다. 일반적으로 Sutherland함수, Reciprocal Square함수, Reciprocal함수, Exponential함수, Michael-Siddall함수등이 비용공차함수로 사용되고 있다. 이들 함수들의 형태와 비용-공차간의 관계를 [그림 2]에 나타내었다[18].



[그림 2] 공차와 제조비용의 관계

여기서 f 는 비용공차함수이고, a 와 b 는 제조비용계수를 의미한다. 이들 함수들은 단조감소(monotonic decreasing)형태로써, 비용면에서 약간의 차이는 있지만 의미하는 바는 같다. 즉, 공차가 작으면 작을수록 제조비용은 증가하고, 공차가 크면 클수록 제조비용은 감소한다는 것이다.

최적의 공차배분 문제는 제조 비용을 최소화하면서 최적의 공차를 배분하는 최소-비용 공차배분(least-cost tolerance allocation)방법으로 조립품의 품질을 만족시킬 수 있다[14,15]. 각 부품을 제조하는데 여러 제조공정들 중에서 한 공정을 선택할 수 있을 경우, 이 문제는 이산 최적화(discrete optimization)문제가 되며[14]. 제조공정을 이산적으로 선택할 수 없을 경우, 연속 최적화(continuous optimization)방법으로 해결해야 한다[15]. 이에 대하여 Chase[6]는 이산 최적화방법에서 0-1 정수계획법(zero-one integer programming)을 이용하였으나, 변수가 기하급수적으로 증가하는 문제가 나타났다.

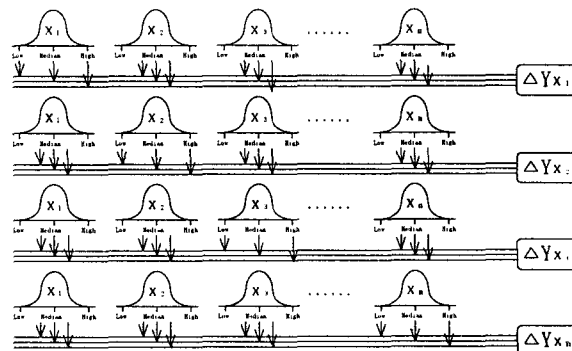
연속 최적화방법에서는 Lee and Woo[13]가 라그랑지 승수법(lagrange multiplier)과 같은 비선형(nonlinear)기법을 이용하였으나, 조건이 복잡해질 경우 해를 구하기가 어려워지는 단점이 있다. 또한 비용공차함수들을 사용하여 공차를 결정할 경우, 비용이 최소가 되는 공차를 결정하게 된다. 따라서 공차가 크게 결정되는 단점이 있다[17].

이를 보완하기 위하여 본 연구에서는 한계비용의 개념을 적용한 유전 알고리즘을 최적화 기법으로 사용하였다.

2.2 민감도분석

공차설계시 공차해석방법인 몬테카를로 시뮬레이션 방법만으로는 효과적인 분석을 이루기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 효과적인 분석을 위하여 민감도분석을 적용하였다. 민감도분석은 제품의 품질 특성치에 대한 각 부품의 요소공차의 기여도를 계산하여 기존에 설계된 공차를 해석하는 분석방법으로서, 요소공차의 변화에 따라 품질 특성치의 편차가 얼마만큼 변하는가를 알기 위한 분석이다[2].

민감도분석방법으로는 분산분석방법과 회귀분석방법 그리고 OFT(one-factor-at-a-time)분석 방법등이 있다[7]. 본 연구에서는 민감도분석방법으로 OFT분석방법을 사용하였다. 이 분석방법은 요소공차를 각각의 허용차내에서 고수준(high level), 중수준(median level) 그리고 저수준(low level)으로 변동시켰을 때 나타나는 품질 특성치의 변화량의 크기에 따라 요소공차의 기여도를 계산하는 방법으로써, 이 방법을 HLM(High-Low-Median) 알고리즘이라고도 한다. 이 과정을 통하여 품질 특성치에 대한 요소공차의 효과를 파악할 수 있다. OFT분석방법의 과정을 [그림 3]에 나타내었다.



[그림 3] OFT분석방법

2.3 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 생물진화(선택, 도태, 돌연변이)에 대한 다윈의 이론에 기초하여 정립된 확률적 탐색 알고리즘이다. 유전 알고리즘은 전체 탐색법(global search technique)으로 동시에 여러 점의 해를 찾아가는 특징을 갖고 있으며, 기존의 다른 방법들에 비해 부분 최적점(local optima)에 빠질 확률이 적은 특징을 가지고 있다. 또한 기존의 최적화 방법들은 효율적인 해의 탐색을 위해 대상 문제에 대한 추가적인 정보를 필요로 하지만, 유전 알고리즘은 각 개체(string)에 대한 목적함수만을 필요로하고 다른 정보를 요구하지 않으므로 광범위한 적용이 가능하다. 특히 조합최적화문제를 해결하는데 많이 적용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 최적화 기법으로 유전 알고리즘을 사용하였다.

유전 알고리즘은 여러 개의 개체로 이루어진 모집단을 운영하는 일종의 반복적인 탐색기법이다. 이 알고리즘은 먼저 주어진 문제의 여러 잠재해를 랜덤으로 발생하여 초기 모집단을 생성한다. 생성된 모집단에서 평가함수에 의해 각 개체의 적합도를 평가하고, 이에 기초하여 모집단에 생존할 개체들을 선별한다. 선별된 개체로 이루어진 모집단에 교차와 돌연변이의 유전 연산에 의해 개체를 재생산하여 다음세대의 모집단을 구성한다. 이 과정을 종료조건이 만족될 때까지 반복한다[3].

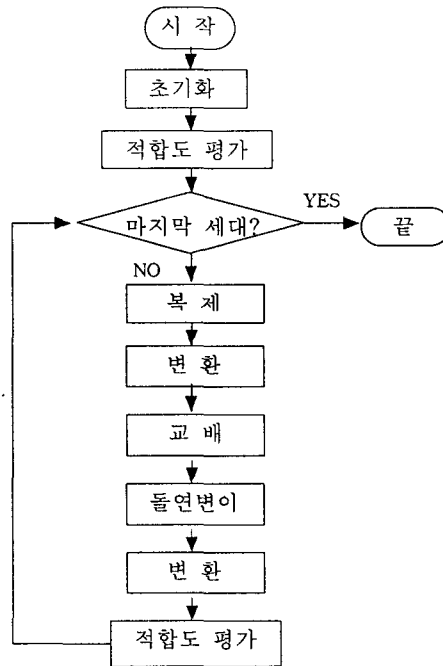
일반적인 유전 알고리즘의 단계는 다음과 같다.

- 단계 1. 초기 모집단 생성
- 단계 2. 평가함수에 의한 모집단의 각 개체 평가
- 단계 3. 평가함수에 의해 새로운 개체 복제
- 단계 4. 교배와 돌연변이 연산
- 단계 5. 새로운 세대 생성
- 단계 6. 종결조건이 만족할 때까지 새로운 모집단 가지고 단계 2~5를 반복

3. 새로운 공차 설계

3.1 유전 알고리즘의 적용

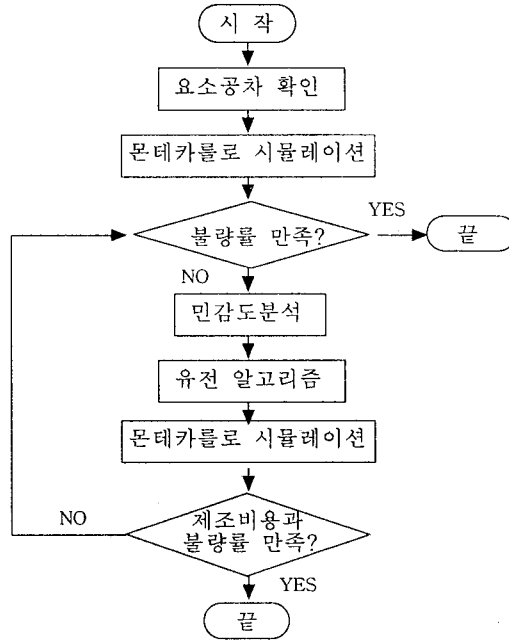
유전 알고리즘의 평가함수는 공차설계시 이 알고리즘과 요소공차의 최적 배분문제간에 중요한 연결고리이다. 따라서 요소공차를 최적으로 배분하는데 있어 평가함수는 그 요소공차가 최적 배분시킨 환경에 얼마나 적합한가를 평가하는 기준이 된다. 공차배분문제는 목적함수로 선정된 비용공차함수를 평가함수로 적용하여 한계비용 내에서의 최적 공차를 설정하였다. 본 연구에서는 비용공차함수들 가운데 공차와 제조비용간에 기울기가 가장 완만한 Sutherland 함수를 사용하였다. 공차 설계에 적용된 유전 알고리즘의 절차를 [그림 4]에 나타내었다.



[그림 4] 공차설계에 적용된 유전 알고리즘

3.2 공차설계과정

유전 알고리즘을 적용하여 제품의 제조한계비용을 만족시키는 최적의 요소공차를 배분한 후 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용하여 제품의 불량률을 체크하여 만약 만족치 못한 경우 피드백하여 다시 공차를 재분배한다. 이 과정은 한계비용과 불량률이 만족될 때까지 반복된다. 이러한 공차설계 과정을 [그림 5]에 나타내었다



[그림 5] 공차설계절차

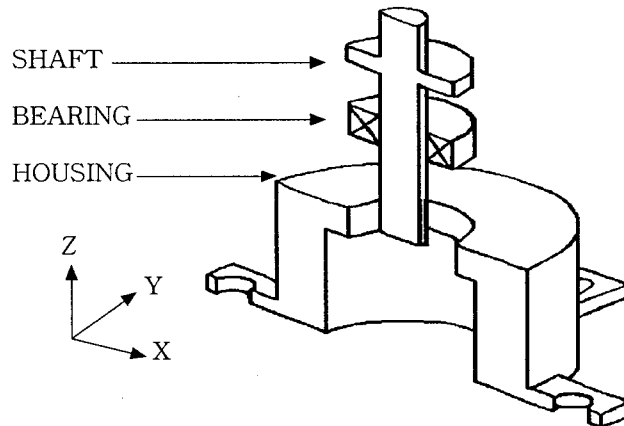
4. 사례 및 분석

4.1 적용사례

사례는 HOUSING/BEARING/SHAFT 조립제품으로서 [그림 6]에 나타내었다. 이 제품은 HOUSING에 BEARING을 결합한 후 그 위에 SHAFT를 조립하는 순서로 조립된다. 이 때 HOUSING에 BEARING이 일치선 상태로 결합되어야 한다. 만약 그렇지 않은 상태로 조립되었을 경우, 이들 사이에 떨림이 발생하여 노화가 빨리 진행되며 초기 고장이 많이 발생된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 제품설계단계에서 HOUSING과 SHAFT간의 기울기에 대하여 새로운 공차설계해야 한다.

본 사례를 분석하는데 있어 두 가지 가정을 둔다.

1. 모든 공차는 정규분포를 따르며 $\pm 3\sigma$ 의 분포를 가진다.
2. BEARING의 중심선은 HOUSING 구멍의 중심선과 동일 직선 상에 있다.



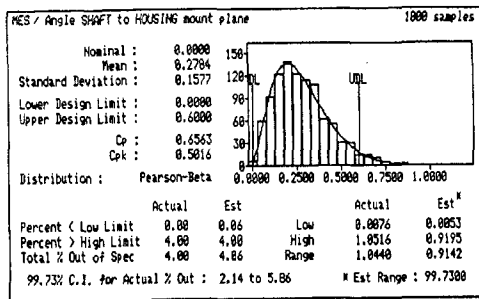
[그림 6] HOUSING/BEARING/SHAFT

4.2 공차해석방법 적용

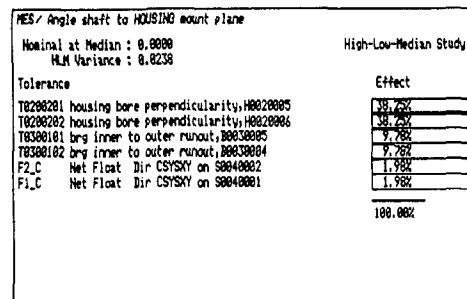
HOUSING/BEARING/SHAFT 조립제품의 설계에 있어 HOUSING과 SHAFT간의 기울기에 대한 공차를 새롭게 설계하였다. 먼저, 공차해석방법으로 몬테카를로 시뮬레이션을 실시한다. 이때 사용된 소프트웨어는 VSA(Variation Simulation Analysis)로서, VSA는 몬테카를로 시뮬레이션이 적용된 소프트웨어이다. 따라서 기존에 설계된 공차에 의해 제품의 불량률이 얼마나 발생하는지를 파악하기 위해 시뮬레이션을 실시한 결과, [그림 7]과 같은 결과를 얻었다. 여기서 기존에 설계된 요소공차를 살펴보면, HOUSING 구멍의 직각도공차 T0200201, T0200202는 각각 0.20mm이고 BEARING의 내경, 외경의 원주 흔들림(run out)공차 T0300101, T0300102는 0.10mm, 그리고 SHAFT의 끝점과 중심점의 치수공차 F1_C, F2_C는 0.20mm이다.

[그림 7]의 결과를 살펴보면, 기존에 설계된 공차에서 발생하는 제품의 불량률이 4.0%가 나타났다. 따라서 민감도분석 기법 가운데 OFT분석방법을 이용하여, 기존에 설계된 요소공차 가운데 조립제품의 편차에 가장 영향을 많이 미치는 요소공차를 조사한 결과 [그림 8]와 같이 나타났다. 여기서 HOUSING의 T0200201, T0200202를 t_1, t_2 로 표기하고 BEARING의 T0300101, T0300102는 t_3, t_4 로, SHAFT의 F1_C, F2_C는 t_5, t_6 로 표기하기로 한다.

OFT분석방법 결과, HOUSING에 대한 SHAFT의 기울기에 영향을 미치는 요소공차의 기여도를 살펴보면 HOUSING의 직각도공차 t_1, t_2 가 각각 38.25%로 가장 기여도가 높게 나타났고, 다음으로 BEARING의 편향공차 t_3, t_4 가 각각 9.78%, SHAFT의 치수공차 t_5, t_6 가 각각 1.98%의 기여도를 나타냈다. 따라서 기여도가 가장 큰 HOUSING의 직각도 공차를 주요공차로 선정한 후 유전 알고리즘을 이용하여 새롭게 공차 설계를 한다.



[그림 7] 몬테카를로 시뮬레이션을 한 결과



[그림 8] OFT 분석방법 결과

4.3 유전 알고리즘에 의한 공차배분방법

비용공차함수 가운데 Sutherland 함수를 유전 알고리즘의 평가함수로 설정하였다. 이 함수를 사용하여 각각의 요소공차의 비용을 계산한 후, 이들의 합을 조립제품의 제조비용으로 하였다. 여기서 제조비용계수의 선정은 OFT분석방법의 결과를 기초로하여, 다음과 같이 차등을 두어 설정하였다.

$$a_1 = a_2 = 2.5, a_3 = a_4 = a_5 = a_6 = 1.5, b_1 = b_2 = 3.0, b_3 = b_4 = 1.2, b_5 = b_6 = 1.0$$

한계비용내에서 최적의 공차를 배분하기 위해, 유전 알고리즘에 적용되는 매개변수를 다음과 같이 개체수 = 100, 교배연산 확률 = 0.70, 돌연변이 확률 = 0.05, 최대세대수 = 100으로 설정하였다. 또한 유전 알고리즘은 Borland사의 C++ 3.0 언어를 사용하여 프로그래밍하였으며, 이 프로그램은 CPU 120MHz, RAM 16MB의 PC시스템 환경에서 실행하였다.

이러한 환경에서 유전 알고리즘을 실행한 결과, 한계비용내에서 불량률을 고려한 최적의 요소공차를 선정하였다. 이 결과 데이터를 [표 1]에 나타내었다.

[표 1] 유전자 알고리즘에 의한 공차설계

개 체	한 계 비 용	요 소 공 차						불량률	제 조 비 용
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6		
개 체 #1	700	0.1992	0.1999	0.0933	0.0989	0.1944	0.1937	4.0%	695
개 체 #2	1600	0.1495	0.1500	0.0870	0.0975	0.1947	0.1376	0.9%	1561
개 체 #3	2500	0.1281	0.1295	0.0658	0.0802	0.1498	0.1442	0.2%	2430
개 체 #4	7000	0.0898	0.0900	0.0972	0.0903	0.1969	0.1890	0.0%	6947

이 결과를 살펴보면 개체 1은 제조한계비용 700내에서 요소공차를 배분한 결과로써 불량률이 4.0%가 발생하였고, 개체 2는 1600의 제조한계비용내에서 불량률이 0.9% 발생하는 요소공차를 배분하였다. 또 개체 3과 4는 각각 2500과 7000의 제조한계비용내에서 불량률이 각각 0.2%, 0.0% 발생하는 요소공차를 배분하였다. 결국 한계비용을 크게 할수록, 불량률은 줄어들게 된다. 이로써 제조한계비용과 불량률을 만족시키는 요소공차를 새롭게 배분하였다.

5. 결론

본 연구는 제품설계단계에서 비용을 고려한 최적의 공차배분을 위해 공차해석단계에서 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 기존에 설계된 공차에 의한 제품의 불량률을 체크하고, 민감도 분석의 한 방법인 OFT분석방법을 이용하여 제품의 품질 특성치에 대한 각 부품의 요소공차의 기여도를 계산하여 기존에 설계된 공차를 분석하였다. 분석 결과를 토대로 공차배분을 위한 유전 알고리즘을 프로그래밍하였다. 이를 이용하여 제조한계비용내에서 불량률을 만족시키는 최적의 공차배분을 이루었으며, 이를 통하여 제품의 품질을 개선하고, 제조비용을 절감시켰다.

참고문헌

- [1] 장동현, 장현수, 이병기, "유전알고리즘을 이용한 최적공차설계", 대한산업공학회/한국경영과학회, '98춘계발표집, C 05.6, 1998.
- [2] 장현수, 이병기, "민감도분석을 이용한 품질의 편차 감소에 관한 연구", 품질경영 학회, 25권 2호, 1997.
- [3] 기타노 히토아키, "GA의 기초이론, 공학응용 및 인공생명 유전자 알고리즘",대청컴퓨터 월드, 1996.
- [4] Chase, K. W., Gao, J., Magleby, S. P. and Sorensen, C. D., "Including geometric feature variations in tolerance analysis of mechanical assemblies", IIE Trans., 28, pp795-807, 1996.
- [5] Chase, K. W. and Greenwood, W. H., "Design Issues in Mechanical Tolerance Analysis", Manufacturing Review, ASME, vol. 1, no. 1, pp.50-58, 1988.
- [6] Chase, K. W., Greenwood, W. H., Loosli, Bruce G. and Hauglund, L. F., "Least Cost Tolerance Allocation for Mechanical Assemblies with Automated Process Selection", Journal of Engineering for Industry, ASME , pp.49-59, 1990.
- [7] Creveling, C. M., Tolerance Design, Addison Wesley, 1997.
- [8] Feng, C. X. and Kusiak, A., "Robust Tolerance Design with the Integer Programming Approach", Trans. of ASME J. of Manufacturing Science and Engineering, Vol.119.

November, pp 603-610, 1997.

- [9] Gao, J., Chase K. W. and Magleby S. P., "Generalized 3-D tolerance analysis of mechanical assemblies with small kinematic adjustments", IIE Transactions, 30, pp 367-377, 1998.
- [10] Iannuzzi, M. P. and Sandgren, E., "Tolerance Optimization Using Genetic Algorithms : Benchmarking with Manual Analysis", Proc. of 4th CIRP Design seminars on Computer Aided Tolerancing, pp 219-234, 1995.
- [11] Kanai, S., Onozuka, M. and Takahashi, H., "Optimal Tolerance Synthesis by Genetic Algorithm under the Machining and Assembling Constraints", Proc. of 4th CIRP Design Seminars on Computer Aided Tolerancing, pp 235-250, 1995.
- [12] Lee, J., "Tolerance Optimization Using Genetic Algorithm and Approximated Simulation," Ph.D. dissertation, Department of Mechanical Engineering, The University Michigan, 1992.
- [13] Lee, W. J., Woo, T. C. and Chou, S. Y., "Tolerance Synthesis for Nonlinear Systems Based on Sensitivity Analysis", Technical Report No.89-18, Department of Industrial and Operations Engineering, The University of Michigan, 1989.
- [14] Ostwald, P. F., Huang, J., "A Method for Optimal Tolerance Selection", Trans ASME Journal of Engineering for Industry, pp.558-565, 1977.
- [15] Spotts, M. F., "Allocation of Tolerances to Minimize Cost of Assembly", Journal of Engineering for Industry, ASME, pp.762-764, 1973.
- [16] Roy, U. and Fang, Y. C., "Optimal Tolerance Re-Allocation for the Generative Process Sequence", IIE Transaction, 29, pp37-44, 1997.
- [17] Taguchi, G., Introduction to Quality Engineering-Designing Quality into Products and Processes-, Asian Productivity Organization, 1986.
- [18] Wu, Z., Eimaraghy, W. H., Eimaraghy, H. A., "Evaluation of Cost-Tolerance Algorithms for Design Tolerance Analysis and Synthesis", Journal of Engineering for Industry, ASME, pp.168-179, 1988.
- [19] Zhang C. and Wang H. P., "Robust Design of Assembly and Machining Tolerance Allocations", IIE Transactions, 30, pp 17-29, 1998.