

# 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 휴대용 의료기기 누적공차분석에 대한 사례연구

이영훈 · 문덕희\*

## Case Study of Accumulated Tolerance Analysis Using Monte Carlo Simulation for a Portable Medical Appliance

Young Hoon Lee · Dug Hee Moon\*

### ABSTRACT

Tolerances are defined as the allowable variations in the geometry and positioning of parts in a mechanical assembly for assuring its proper functionality. Tolerance analysis is the activity related to estimating the potential accumulated variation in assemblies. If the estimated variances go out of the specified ranges, it causes the quality problem. Thus, we should adjust the tolerances and this activity is called as tolerance design. In this paper, a case study on the accumulated tolerance analysis and design using Monte Carlo simulation is introduced, which is applied for developing a portable medical device. Using the simulation study, we can improve the assemblability and functionality of the product.

**Key words** : Tolerance analysis, Tolerance design, Monte Carlo simulation, Medical appliance

### 요약

공차란 각 부품들이 기구적으로 조립되었을 때 원하는 수준의 기능성을 확보할 수 있도록 각 부품의 기하학적 형상이나 위치에 대해 허용하는 치수의 변동량을 의미한다. 또한 공차해석이란 부품들이 조립되었을 때, 각 부품의 공차가 조립품에서 어떻게 누적되어 미치는 영향을 분석하는 일련의 절차를 의미한다. 만일 누적된 공차의 분산이 규정된 일정 수준의 범위를 벗어나면 조립품의 품질에 문제가 발생하기 때문에 당초 설정한 부품의 공차를 수정해야 하며, 이러한 과정을 공차설계라고 한다. 이 논문에서는 휴대용 의료기기의 설계단계에서 공차해석과 공차설계를 위해 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 활용한 사례를 소개한다. 이러한 시뮬레이션 연구를 통하여 제품의 조립성과 기능성을 개선시킬 수 있다.

**주요어** : 공차해석, 공차설계, 몬테카를로 시뮬레이션, 의료기기

## 1. 서론

공차란 적절한 기능을 보장하기 위하여 기계적 조립의 구조와 부품의 위치 결정을 위한 허용편차를 정의하는 것이다(Nigam and Turner, 1995). 실질적으로 제품을 제작할 때, 설계 치수대로 한 치의 오차도 없이 정확히 가

공하여 조립하는 것은 불가능하다. 더 나아가 각 조립체의 3차원 공간상 위치는 위치공차, 치수공차, 각도공차, 편심 등 여러 요인에 의해 누적되어 나타나기 때문에 당초 설계상 요구했던 위치에서 벗어나는 경우가 많다(Choi et al., 1995). 따라서 각 부품의 치수에 대해 공차를 할당해 주게 되는데, 이는 생산과정에서 불가피하게 발생하는 오차를 공차 이내로 유지해야 함을 의미한다.

조립품의 치수품질(Dimensional Quality)을 확보하기 위해서는 두 가지 조건이 필요하다. 먼저 설계단계에서 각 부품의 공차(Tolerance)를 잘 설계한 후 실제 조립과정에서 불량률이 나지 않도록 잘 관리해야 한다. 하지만 조립 공정에서 아무리 잘 관리를 한다고 해도 설계단계에

Received: 16 March 2016, Revised: 17 May 2016,  
Accepted: 20 June 2016

\* Corresponding Author: Dug Hee Moon  
E-mail: dhmoon@changwon.ac.kr  
Changwon National University  
School of Industrial Engineering and Naval Architecture

서 적절한 공차가 주어지지 않는다면 관리에 한계가 있다. 따라서 설계단계에서의 공차설계(Tolerance Design)가 매우 중요하다.

만일 공차를 너무 작게 설계하면 그 공차를 만족하는 제품을 생산하기 위해서는 공정도 복잡해지고, 생산비용도 증가한다. 반대로 공차를 너무 크게 설계하면 제품의 기능에 문제가 발생하게 된다. 따라서 각 부품의 공차를 합리적이고 적절하게 설계하기 위해서는, 부품의 치수 오차들이 최종 조립품에 미치는 영향을 사전에 예측하는 공차해석(Tolerance Analysis)이 선행되어야 한다. 즉, 부품의 공차를 어떤 값으로 부여했을 때 조립품의 치수가 어떤 변화를 보일지 예측할 수 있어야 하며, 역으로 조립품의 치수가 원하는 범위 내에 있도록 하기 위해서는 부품의 공차를 얼마로 해야 하는지를 결정할 수 있기 때문이다(Lee et al., 2012).

결론적으로 공차는 최종 제품의 품질과 공정방법에 직접적인 영향을 미치며, 제작비용과 상관관계를 가지고 있다(Chang et al., 1999). 따라서 최적 공차 할당을 통해 비용과 성능 사이에서 적절한 절충점을 찾아야 한다(Kim et al., 2015). 이를 위해 공차 설정에 있어 최적이라는 개념을 부여해야 한다. 최적 공차 설계를 위해서는 부품들의 공차 누적으로 인한 제품의 품질 오차를 과학적으로 분석하고, 그 결과를 확률적으로 예측할 수 있는 해석 방법이 필요하며, 이 결과를 토대로 각 부품의 설계 공차를 적절하게 배분할 수 있는 최적의 공차 배분방법이 제품 개발 단계에 적용되어야 한다(Chang et al., 1999; Choi et al., 1995).

이와 같은 공차해석을 위해서는 일반적으로 Worst Case방법과 통계적인 방법(Roots Sum of Square) 그리고 몬테카를로 (Monte Carlo) 시뮬레이션 등이 사용된다(Yoo et al., 2004). 현실적으로 복잡한 실제 문제의 공차 해석이나 공차설계를 수작업으로 할 수는 없다. 이러한 어려움을 해결하기 위해 다양한 상용 소프트웨어가 개발되어 있는데, VisVSA<sup>®</sup>, 3DCS<sup>®</sup>, Tolmate<sup>®</sup> 등이 대표적이며 주로 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 사용하고 있다(Lee et al., 2012).

다양한 산업의 제품 설계단계에서 공차해석 및 공차설계를 수행한 연구들은 많이 있다. 공차해석의 이론적 연구는 Nigam and Turner(1995)의 논문에 잘 정리되어 있다. Yoo et al.(2004)은 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용하여 공초점 주사현미경의 오차 분석과 정렬공차 할당에 대한 연구를 수행한 바가 있으며, Lee et al.(2012)은 슬라이드형 휴대전화기 측면 갭(Gap)의 품질개선을

위한 부품공차 설계를 수행한 바가 있고, Lee(2010)는 자동차의 유니버설 조인트 어셈블리에 대한 공차해석을 수행하였다. 또한 Kim et al.(2015)은 에어컨 실내기의 조립과정에서 부품간 간섭이 발생하는 위치와 원인 분석을 위해, 3차원 공차해석을 수행하고 부품공차 및 조립 갭을 최적화시킨 연구결과를 발표하였으며, Kim et al. (2014)은 냉장고 도어시스템에 대해 연구를 수행하는 등 다양한 분야의 연구결과들이 발표되었다.

본 논문에서는 휴대용 의료기기 개발 과정에서 기기가 그 기능성 및 심미성 요건을 만족하도록 공차설계를 수행하는 방법을 제시하고자 한다. 심미성이란 제품이 기능적으로 문제가 있지는 않지만 사용자들이 감성적으로 제품의 외관에 대해 만족하는가에 대한 특성을 의미한다. 예를 들어 제품의 곡면이 얼마나 매끄러운가 하는 것이 심미성의 대상이 되기도 한다. 하지만 제품의 조립과정에서 대표적으로 발생하는 심미성의 문제는 부품 간 갭(gap) 및 단차(flush)이다. 이 중에서 특히 갭은 시임(Seam)을 정면에서 보았을 때 눈에 띄는 심미 품질의 척도로 모바일 기기는 물론 자동차, 냉장고 등 대부분의 조립품에서 중요하게 인식되고 있다(Kim et al., 2014). 단차란 연결된 두 면의 높이가 다른 것으로서 제품의 기능에 문제가 생기는 것은 아니지만 소비자들이 제품 품질에 불만을 많이 가지는 항목이기 때문에 심미성과 관련성이 깊은 항목이다.

따라서 본 연구에서는 휴대용 의료기기의 3D CAD 모델을 이용하여 공차해석과 공차설계 과정을 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하여 수행한다. 2장에서는 공차해석 기법에 대한 소개를 하고, 3장에서 연구 대상이 되는 의료기기의 모델과 부품에 대해 설명하고, 이 부품들 사이의 조립관계 및 조립순서를 설명한다. 4장에서는 공차해석에 입력되는 조립특징형상(Assembly feature), 공차의 종류, 공차 값, 측정치를 정의한다. 5장에서는 공차해석 결과와 그에 따라 공차를 반복적으로 지정하는 공차설계 과정을 수행하고 6장에서 앞의 결과를 정리하여 본 논문의 결론을 도출한다.

## 2. 공차해석 기법

공차해석의 첫 번째 과정은 해석 대상인 조립(Assembly) 구성부품들의 누적공차 계산을 통해 조립품이 의도한 기능을 제대로 수행할 수 있는지에 대한 여부와 주어진 기하학적 구속조건을 만족하는지를 파악하는 것이다. 만약 만족하지 못하면 공차해석을 통해 얻어진

결과를 토대로 요소 부품의 공차를 수정한다.

앞서 언급한 바와 같이 누적공차를 계산하는 방법은 크게 세 가지로 구분한다. Worst Case분석법은 누적공차로 각 공차들의 합을 더하여 전체 공차를 구하는 방법이다(Chang et al., 1999; Dantan and Qureshi, 1995). 이 방법은 계산이 간단하다는 장점이 있지만 누적공차는 다른 방법에 비해 가장 큰 값을 갖게 된다.

두 번째 기법은 RSS(Roots Sum of Square) 기법이다. 생산되는 제품의 품질이 안정되면 각 부품의 치수는 기준치수(Normal Dimension)를 평균값으로 하는 정규분포의 형태를 갖게 된다. 누적공차는 해당 부품들 치수의 산술적 합으로 계산되기 때문에 누적공차 역시 정규분포를 따른다.

부품이 임의성(Random)을 가지고 조립될 때 조립품의 표준편차는 부품의 표준편차의 단순한 합으로 되지 않는다. 이를 표준편차의 가성성(加成性) 법칙이라 한다(Lee, 2010). 부품 A의 표준편차가  $\sigma_A$ 이고 부품 B의 공차 표준편차가  $\sigma_B$ 라고 할 때 조립품 AB의 공차 표준편차는 식(1)과 같이 계산한다.

$$\sigma_{AB} = \sqrt{(\sigma_A)^2 + (\sigma_B)^2} \dots\dots\dots (1)$$

따라서 가공 정밀도가 높아질수록 부품의 생산비용이 기하급수적으로 증가한다는 점을 고려한다면 단순한 확률공식의 적용을 통해 누적공차량을 얻을 수 있는 이 방법은 생산현장에서 쉽게 적용할 수 있는 방법이다(Tahk, 2005).

세 번째 기법은 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하는 방법이다. 앞서 설명한 RSS방법은 모든 부품의 공차를 포함한 치수가 정규분포를 이룬다는 가정을 하였지만 실제로 각 부품 치수들이 이상적인 정규분포 형태를 따른다고 보기는 어렵다. 따라서 몬테카를로 시뮬레이션 기법에 기반을 둔 컴퓨터 프로그램을 이용해 누적공차량을 계산하는 방식이 보다 현실적인 분석결과를 제공한다. 몬테카를로 시뮬레이션에서 1만회 이상 가상적 값을 산출하면 실제상황에 대한 정밀도가 99%까지 근접한다고 알려져 있다(Tahk, 2005)..

어떤 방법을 사용하든지간에 누적공차가 일정한 수준 이하가 되려면 각 부품의 공차가 상대적으로 매우 작아져야 하며, 그 결과로 개별 부품의 공차를 엄격히 관리하기 위해서는 높은 생산비용이 필연적으로 유발되게 된다.

### 3. 대상 모델

#### 3.1 제품의 CAD모델

Fig. 1은 본 논문에서 고려하는 휴대용 의료기기의 CAD모델로 기기를 구성하는 전체 부품이 포함되어 있다. Fig. 2와 같이 각 부품들은 기능단위에 따라서 4개의 모듈로 부분 조립(Sub-assembly)된 후 최종 조립을 거치게 된다. 4개의 모듈은 각 기능에 따라 레이저를 발생시켜 환자의 손가락 피부를 천공하는 레이저 모듈(Laser Module), 레이저 모듈을 고정하고 휴대 편의를 위한 클립이 부착되는 배면 커버(Bottom Cover), 레이저 오발방지를 위한 신체접촉점과 레이저 조작 버튼, 배터리 잔량을 보여주는 디스플레이가 부착된 정면 커버(Top Cover), 레이저 작동 논리가 포함된 PCB 모듈(PCB Module)로 구성된다.

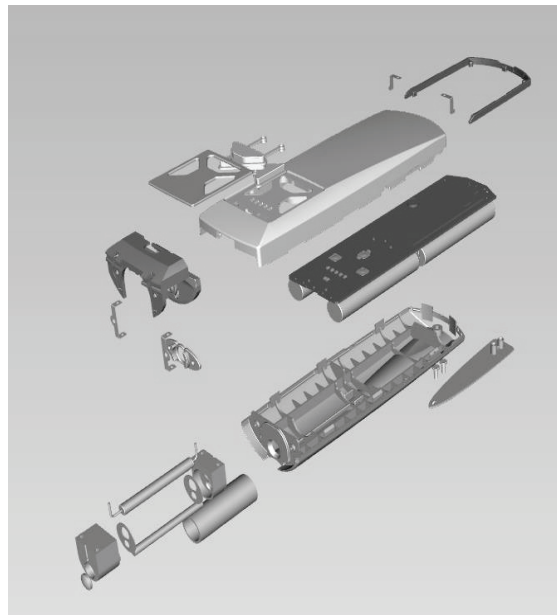


Fig. 1. CAD model of medical appliance

#### 3.2 조립 순서

Fig. 2에서는 모듈 사이의 조립관계를 직선으로 연결하여 표시하였지만, 공차해석에 있어서 조립공정의 순서도 중요하다. 본 논문에서는 부품들 사이의 조립 순서를 Table 1과 같이 가정하였다. Table 1에서 각 행은 대상(Object) 부품이 표적(Target) 부품에 조립되는 공정을 의미하는데, 실제 제품 조립공정보다 축소시켜 9개의 공정으로 구성하였다.

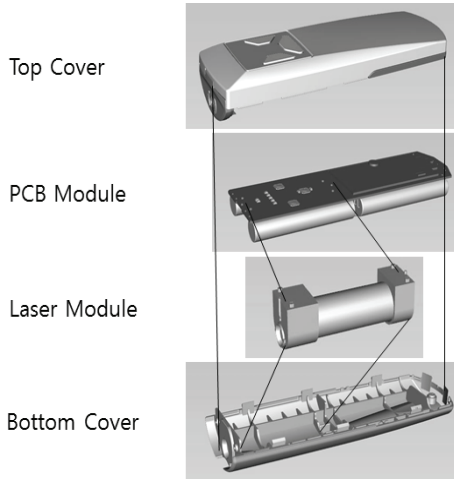


Fig. 2. Modules of medical appliance

Table 1. Assembly sequence assumed

Sequence	Object	Target
1	Belt Clip Belt Clip Screw	Bottom Cover
2	-, +, S Button	Top Cover
3	Button Deco	Top Cover
4	Rear Contact Plate Rear Contact	Top Cover
5	Front Bracket Front Contact Plate	Top Cover
6	Front Cover Front Cover Pin Front Contact Magnet	Top Cover
7	Laser Holder ER:YAG Xenon Lamp Reflector Tap	Laser Reflector
8	Focusing Lens Lens Cap	Laser Holder
9	Laser Module Top Cover	Bottom Cover

## 4. 공차해석 모델링

### 4.1 조립특징형상 및 공차 입력

모든 부품은 조립관계에 따라 공차해석 프로그램에 입력되며, 부품 간의 조립에 관여하는 특징 형상(Feature), 즉 조립특징형상(Assembly feature)들을 정의해야 한다 (Kim et al. 2014). 부품들이 조립되는 과정을 각 부품의

자유도가 구속되는 일련의 과정으로 볼 때, 조립 공정을 통해 어느 부품이 특정 부품의 자유도를 구속하는 지 결정할 수 있다. 3차원 상에서 부품의 자유도를 구속하기 위해 조립특징형상과 공차를 할당하였는데, 본 연구의 대상제품에 대해서 Table 2와 같이 조립특징형상에 대해 공차를 입력하였다.

Table 2에서 Pos는 위치도(Position), Spf는 면의 윤곽도(Surface profile)를 의미한다. 또한 3차원 상에서 형체를 구속하기 위해서는 해당 형체의 특성에 따라서 하나 이상의 기준면(Datum)이 필요한데, Pin이나 Hole의 경우는 A, B, C 세 가지 기준면이 필요하므로 A|B|C로 표현하였다. 공차 값은 플라스틱 사출제품의 경우 제품 검사 성적서를 통해 확인할 수 있는 값을 부여하였고, 나머지 부품에 대해서는 경험적으로 적절하다고 생각되는 값을 부여하였다.

### 4.2 조립 공정 모델링

앞서 설명한 바와 같이 제품은 4개의 모듈로 부분 조립된 후 최종 조립이 되는데, 각 조립공정은 각 부품별로 설정된 조립특징형상이 특정부품의 조립특징형상과 결합됨으로써 완성된다. 본 연구에서는 지멘스(Siemens)사의 공차해석 프로그램인 VisVSA<sup>®</sup>를 사용하여 조립공정 모델링을 하였다. 조립공정을 모델링 하려면 특정 조립특징형상간의 구속조건을 설정해야 한다. 프로그램에서는 핀(Pin)과 구멍(Hole), 점(Point)와 면(Plane), 탭(Tab)과 슬롯(Slot)등을 지원하고 있다. 이와 같이 각 부품의 특성에 맞게 해당하는 조립특징형상을 설정하여 구속하는 방법으로 모든 조립공정을 모델링 하였다.

### 4.3 측정치 정의

공차해석 전에 마지막으로 하는 작업은 측정값을 정의하는 것인데, 본 논문에서는 의료기기의 기능과 품질을 보장하기 위한 목적을 가지고 측정값들을 할당하였다. 레이저 오발 방지를 위한 안전장치의 작동에 관련된 치수와 의료기기 외관의 심미성에 관련된 측정대상 부품들과 측정치수들을 Table 3과 같이 설정하였다. Table 3에서 1,2 항목은 기능과는 관계없지만 사용자의 감성 만족도를 높이기 위한 심미성에 관련된 항목으로 의료기기 외관에 위치한 벨트클립의 대칭성과 제품 측면의 단차에 대한 측정치이다. 3,4 항목은 의료기기의 레이저 오발 방지장치가 정상적으로 작동하기 위한 기능성 조건을 만족시키기 위한 항목이다. 나머지 항목들은 제품이 설계치수대로 조립이 이루어지는지 조립성에 대한 측정치이다.

**Table 2.** Tolerances imposed on selected features

Part	Feature	Tolerance type	Tolerance value (mm)	Datum
Belt Clip	2 Holes	Size	-0.02	
		Pos	±0.02	A B C
Belt Clip Screw	2 Pins	Size	-0.02	
		Pos	±0.02	A B C
-, +, S Button	2 Holes	Size	-0.02	
		Pos	±0.02	A B C
Button Deco	3 Planes	Spf	±0.02	A
Rear Contact Plate	1 Hole	Size	-0.02	
		Pos	±0.02	A B C
	1 Plane	Spf	±0.02	A
Rear Contact	3 Taps	Size	-0.02	
		Pos	±0.02	A B C
Front Bracket	2 Holes	Size	-0.02	
		Pos	±0.02	A B C
Front Contact Plate	2 Holes	Size	±0.1	
		Pos	±0.1	A B C
Front Cover	2 Pins 1 Hole	Size	-0.02	
		Pos	±0.02	A B C
	1 Plane	Spf	±0.02	A
Front Cover Pin	2 Pins	Size	±0.1	
		Pos	±0.1	A B C
Front Contact	2 Holes	Size	±0.1	
		Pos	±0.1	A B C
Magnet	2 Pins	Size	±0.1	
		Pos	±0.1	A B C
Laser Holder	3 Pins	Size	-0.02	
		Pos	±0.02	A B C
	1 Plane	Spf	±0.02	A
ER:YAG	1 Pin	Size	±0.1	
		Pos	±0.1	A B C
Xenon Lamp	1 Pin	Size	±0.1	
		Pos	±0.1	A B C
Reflector Tap	1 Pin	Size	±0.1	
		Pos	±0.1	A B C
Focusing Lens	1 Pin	Size	-0.02	
		Pos	±0.02	A B C
Lens Cap	3 point	Spf	±0.02	A
Top Cover	2 Taps 3 Slots 2 Pins 1 Hole	Size	-0.02	
		Pos	±0.02	A B C
	3 Planes	Spf	±0.02	A
Bottom Cover	2 Slots 1 Hole	Size	-0.02	
		Pos	±0.02	A B C

측정치 구분의 종류에서 거리(Distance)는 면, 점, 선과 같은 조립특징형상 사이의 직선거리를 측정한다. 겹과

단차(Gap/Flush)는 측정하고자 하는 부분에 대해 조립 특징형상을 점의 형태로 설정하여 겹이나 단차를 측정하며, 간격(Clearance)은 두 부품이 결합하는 부분에 대한 면 사이의 거리를 측정하게 된다. 최대/최소 가상간격(Max/Min Virt Clearance)은 핀과 구멍의 결합에서 핀의 외경과 구멍의 내경사이의 간격을 핀의 기울어짐까지 고려하여 측정한다.

Table 3은 모든 측정치에 대한 내용이며 이후 실험결과에 따라 중요한 측정치를 선택하여 개선하는 과정을 거치게 된다. 또한 측정치의 관리 범위에 대한 값을 할당하기 위해서 일반적으로 적용되는 값을 사용하였다. 측정치에 대한 정의를 마친 후 시뮬레이션 횟수는 10000회, 작업공정의 수준은 3σ로 하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행했다.

## 5. 공차해석 결과 및 공차설계

### 5.1 공정능력(Process capability)

공차설계에서 꼭 고려되어야 하는 것이 공정능력(Process capability) Cp/Cpk이다. 공정능력 지수란 공정이 적정한 관리상태에 있을 때 제품 각각의 변동이 어느 정도인가를 표시하는 지수로 식 (2), (3), (4)와 같이 계산하는데, Cp 지수와 품질수준과의 관계는 Table 4와 같다.

**Table 3.** Assembly sequence assumed

No	Related Parts	Measurement	Purpose
1	Bottom Cover Belt Clip	Distance Difference	Aesthetic
2	Top Cover Bottom Cover	Flush	
3	Top Cover Rear Contact	Gap/Flush	Functionality
4	ER:YAG Laser Holder	Max/Min Virt Clearance	
5	Laser Holder Laser Reflector	Max/Min Virt Clearance	Assemblability
6	Lens Cap Front Laser Holder	Clearance	
7	Front Cover Front Contact	Max/Min Virt Clearance	
8	Front Cover Button	Max/Min Virt Clearance	
9	Top Cover PCB Module	Point Distance	

**Table 4.** Relationship between Cp and quality level

Cp Range	Level	Percent in Spec.	Quality Level
Cp > 1.33	1	99.99%≥	High
1.33 ≥ Cp > 1	2	99.73%≥	Moderate
1 ≥ Cp > 0.67	3	95.45%≥	Poor
0.67 ≥ Cp	4	≥ 95.45%	Unacceptable

즉 제품을 개발할 때 각 부품과 주요 공정의 조립품을 측정하고 표준편차와 공정능력지수를 계산한 후, 계산된 공정능력 지수가 안정화 되었을 경우의 표준편차를 기준으로 하여 역으로 부품과 조립품의 공차를 재조정한다 (Lee, 2010).

$$Cp = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \dots\dots\dots (2)$$

이 때 USL(Upper Specification Limits) 과 LSL(Lower Specification Limits)은 상한과 하한을 의미한다.

$$Cpk = (1 - k) * Cp \dots\dots\dots (3)$$

$$k = \frac{\frac{(USL - LSL)}{2} - \mu}{\frac{(USL - LSL)}{2}} \dots\dots\dots (4)$$

**5.2 공차해석 시뮬레이션 결과**

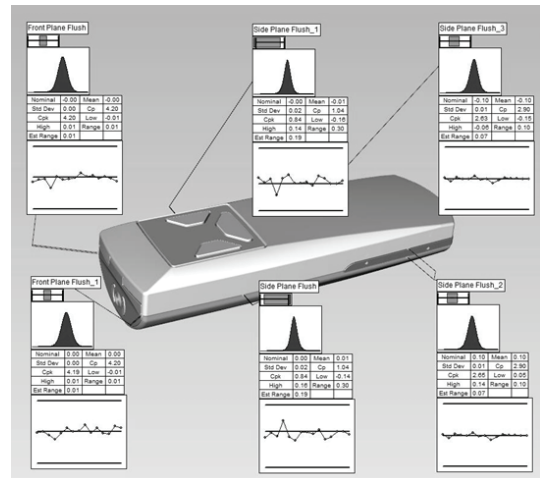
3절의 과정을 통해 완성된 공차해석 모델을 사용하여 VisVSA<sup>®</sup>로 공차해석을 수행하면 그 결과는 Fig. 3과 같이 된다. 최초 공차해석에서 모든 측정치에 대한 결과를 확인하면서 공정능력지수(Cpk)를 관리기준으로 하였다. 본 제품의 여러 측정치에 대해서도 각각 적절한 Cpk 기준에 따라 만족할 경우 적용된 공차를 유지하지만 기준에 Cpk가 만족하지 못할 경우에는 추가로 공차조절을 통해서 공차설계의 과정을 수행했다.

최초 시뮬레이션에 의해 얻어진 주요 측정치에 대한 결과와 적정하다고 판단되는 관리기준(Specify limit)은 Table 5에 정리되어 있다. Fig. 4와 Fig. 5는 시뮬레이션을 통해 생성한 측정치의 분포 결과다. 이 때, 관리기준의 범위를 만족하고 있는지 여부는 Cpk를 확인함으로써 판단할 수 있는데, 배면커버와 클립의 결합공정에서 클립의

대칭성에 대해 문제가 발생했다고 할 수 있다. 해당 측정치는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 대칭을 이루는 것이 고객의 관점에서 심미성을 만족하는 제품이라고 할 수 있다.

벨트클립은 배면커버에 두 개의 나사에 의해 조여짐으로써 고정된다. 이 과정에서 위치도의 변화에 따라 벨트클립이 비틀리게 된다. 대칭성을 확인하기 위해서는 Fig. 6에서 보이는 Distance\_1과 Distance\_2의 차가 0일 경우는 대칭이라고 가정하였다. 관리범위는 0.1mm이내의 차이를 보이도록 관리하였고 최초 시뮬레이션에서는 기준을 만족하지 못했으므로 공차설계 과정의 대상이 되었다.

렌즈 캡이 레이저홀더에 끼워지는 공정은 Fig. 7에 제시되어 있다. 측정치의 오차범위를 0.02mm로 설정하고 시뮬레이션을 한 결과 공정능력지수가 관리범위를 벗어나므로 공차설계과정에 포함되었다. 기준을 만족하는 측정치에 대한 추가실험은 하지 않았다.



**Fig. 3.** Results of tolerance analysis in VisVSA

**Table 5.** Standard of measurements

Measurements	Specify limit	Cpk	Standard
Belt Clip Symmetry	0.1	0.54	0.67
Rear Contact Flush	0.1	1.27	1
Lens Cap Fix	0.02	0.82	1
Front Contact Flush	0.1	4.20	1
Side Flush	0.1	2.90	1
Laser Reflector Fix	0.02	2.37	1.33

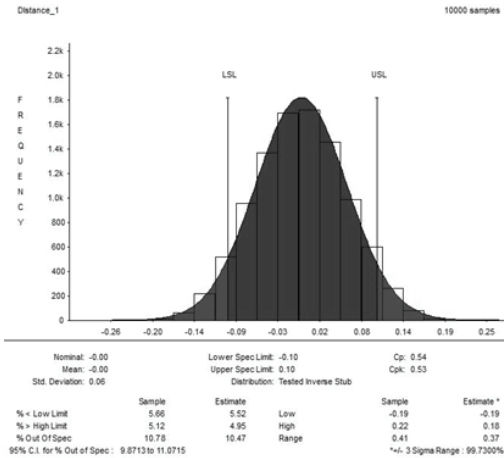


Fig. 4. MCS results of Belt Clip Symmetry

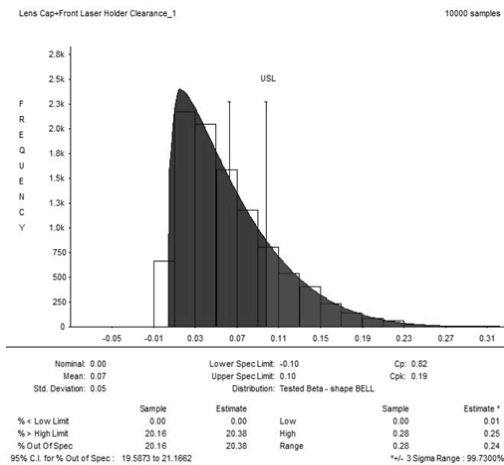


Fig. 5. MCS results of Lens Cap Fix

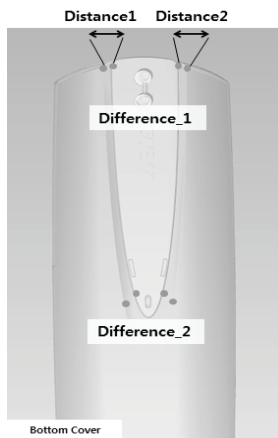


Fig. 6. Process of checking the Belt Clip Symmetry

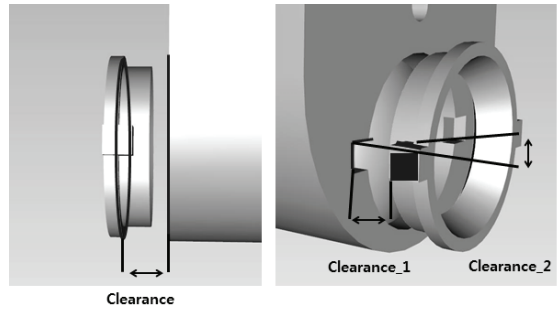


Fig. 7. Process of Fixing Lens Cap

### 5.3 공차설계 과정

공차해석의 다음단계는 공차설계단계로서 공차의 조정에 따라 발생하는 그 영향에 대해 확인하기 위해 What-if 시나리오를 통해서 모델을 수정하고 시뮬레이션 하게 된다. 따라서 시뮬레이션을 다시 실행하면서 하나 혹은 그 이상의 측정치에 대한 공차변경 결과를 비교하는 과정을 거친다.

분석 결과 벨트클립의 대칭성과 렌즈 캡의 고정에 대한 측정치가 허용범위를 벗어나므로, 부품의 공차를 조정하여 이들이 허용범위 내에 들어오도록 하여야 한다. 이를 위해서는 수많은 공차 중에서 어느 공차를 조정하는 것이 효과적인지를 알아야 하는데, 이에 관해 유용한 정보를 제공해 주는 것이 VisVSA<sup>®</sup>의 HLM 해석 결과이다. HLM 해석을 수행하면 각 측정치의 분산에 기여한 공차들을 기여도(%) 순서로 알려준다. 따라서 어떤 측정치의 분산을 줄이고 싶으면, 그 측정치에 대한 HLM 해석 결과에서 기여도가 큰 공차부터 조정하면 된다(Lee, 2010).

본 연구에서는 벨트클립의 대칭성과 렌즈 캡의 고정에 대한 측정치의 분산을 줄이기 위해 공차 조정을 시도하였다. 우선 측정치에 대한 HLM 결과는 Table 6, Table 7과 같은데, 기여도가 높은 부품의 조립특징형상에 대한 공차 할당 값과 기여도(%)를 보여준다.

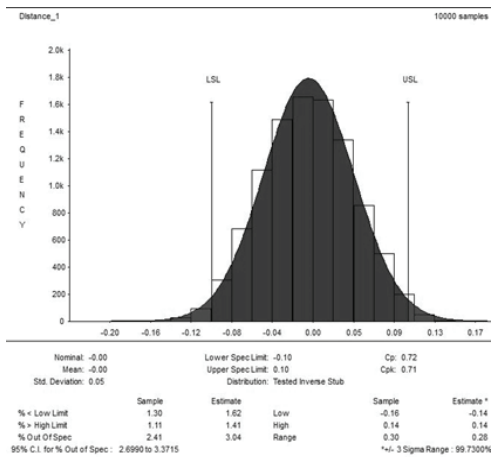
벨트클립의 대칭성 측정치의 분산에 기여도가 높은 부품은 배면커버가 해당한다. 배면커버에 생성된 조립특징형상 Belt Clip Hole\_1과 Belt Clip Hole\_2의 기여도가 높은 것이 눈에 띈다. 따라서 위 두 조립 특징형상의 공차 값을 Pos 0.02에서 Pos 0.01로 조정한다.

**Table 6.** Tolerance contributing to variance of Belt Clip Symmetry

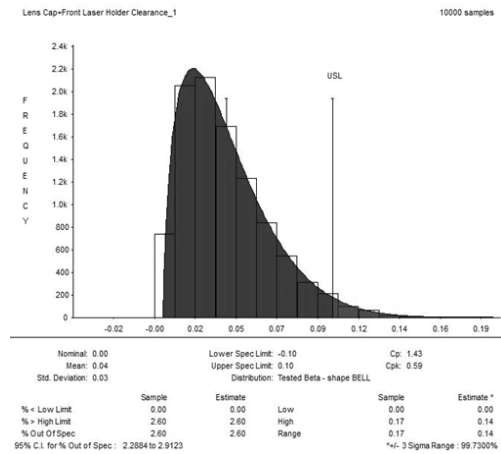
Part	Feature	Tolerance	% Contribution
Bottom Cover	Belt Clip Hole_1	Pos 0.02	37.1
	Belt Clip Hole_2	Pos 0.02	29.0
Belt Clip	Pin_1	Pos 0.02	9.3
	Pin_2	Pos 0.02	7.4
	Plane_1	Spf 0.02	4.6
	Plane_2	Spf 0.02	4.6

**Table 7.** Tolerance contributing to variance of Fixing Lens Cap

Part	Feature	Tolerance	% Contribution
Laser Holder	Reflector Hole	Pos 0.02	62.5
	Reflector Tap	Pos 0.02	11.7
	Hole_2	Pos 0.02	7
	Lens Cap Slot	Pos 0.02	6.7



**Fig. 8.** MCS results of Belt Clip Symmetry(modified)



**Fig. 9.** MCS results of Belt Clip Symmetry(modified)

렌즈 캡의 고정성을 확인하기 위한 측정치의 분산에 기여도가 높은 부품은 레이저홀더이며 조립특징형상은 Reflector Hole이다. 따라서 해당 형상의 공차 값을 Pos 0.02에서 Pos 0.01로 조정하였다. 수정한 모델로 다시 시뮬레이션을 한 결과는 Fig. 8과 Fig. 9에 제시되어 있다. 이를 통해 측정치들이 기준을 만족하는 것을 확인할 수 있었고, 추가적인 공차설계 과정이 불필요함을 알 수 있었다. 최종적으로 조립특징형상에 할당된 공차 값과 공정 능력지수의 개선결과에 대한 내용은 Table 8에서 확인할 수 있다.

**Table 8.** Results of What-if scenario

Measurements	Initial Cpk	Tol Changed	New Cpk	% Change(+/-)
Belt Clip Symmetry	0.54	Pos 0.01	0.72	+133%
Rear Contact Flush	1.27	-	1.27	-
Lens Cap Fix	0.82	Pos 0.01	1.43	+175%
Front Contact Flush	4.20	-	4.20	-
Side Flush	2.90	-	2.90	-
Laser Reflector Fix	2.37	-	2.37	-



## 6. 결 론

본 논문에서는 4개의 모듈이 조립되어 만들어지는 휴대용 의료기기에 대해서 그 기능과 심미성을 보장하기 위한 공차설계를 한 사례를 소개하였다. 공차설계를 위해서는 반복적인 공차해석이 필요하므로, 우선 공차해석을 위해 주요 부품들의 상호관계를 정의하는 것이 중요하다. 다음으로는 상용 공차해석 프로그램 중 지멘스(Siemens)의 VisVSA<sup>®</sup>를 사용하여 각 부품의 조립특징형상(Assembly feature) 및 공차 값을 입력하여 공차해석을 수행하였다.

공차해석의 수행한 결과 의료기기 외관에 부착되는 벨트클립의 고정성 문제가 대두되었고, 레이저 홀더에 고정되는 렌즈 캡의 고정 여부에 대한 측정치의 분산이 관리 범위를 벗어났다. 나머지 측정치들은 관리 범위 내에 포함되었기 때문에 추가 실험은 하지 않았지만 관리범위를 벗어난 측정치에 대해서 기능과 심미성 문제가 발생할 여지가 있기 때문에 공차를 일부 조정한 후 공차해석을 다수 수행하는 반복적인 공차설계 과정을 사용하였다. Table 8에서 확인할 수 있듯이 더 정밀한 공차 관리를 하게 되면 측정치의 분산이 줄고 측정치는 관리범위에 더욱 가까워지거나 또는 향상된다. 따라서 공차해석을 통한 공차 설계과정과 함께 공차의 관리 또한 중요하게 생각해야 할 것이다.

## References

1. Chang, H.S., B.G. Lee and S.H. Kim, "Optimal Tolerance Design within Limited Costs using Genetic Algorithm", *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, Vol. 22, No. 49, 1999, 33-42.  
(장현수, 이병기, 김선호, "유전 알고리즘을 이용한 한계비용내의 최적 공차 설계", 한국산업경영시스템 학회지, 제22권, 제49호, 1999, 33-42)
2. Choi, D.J., B.C. Son, W.H. Sung and H.S. Chang, "Analysis of Geometric Dimensioning & Tolerancing Propagation using Monte Carlo simulation", *Proceedings of 1995 Autumn Conference of Korean Society of Mechanical Engineers*, Seoul, Korea, 1995, 850-855.  
(최덕준, 손병진, 성원호, 장희석, "Monte Carlo 시뮬레이션을 이용한 기하학적 치수공차의 누적에 관한 연구", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, 서울, 대한민국, 1995, 850-855)
3. Dantan, J.Y. and A.J. Qureshi, "Worst-case and Statistical Tolerance Analysis Based on Quantified Constraint Satisfaction Problems and Monte Carlo Simulation", *Computer-Aided Design*, Vol. 41, No. 1, 2009, 1-12.
4. Kim, C.G., J.H. Hwang, H.J. Seo, J.Y. Mo, D.H. Jung and S.M. Hong, "Study of the Assembly of Indoor Air-conditioner Unit Using Tolerance Analysis", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (A)*, Vol. 39, No. 4, 2015, 423-428.  
(김철곤, 황지훈, 서형준, 모진용, 정두한, 홍석무, "공차해석을 이용한 에어컨 실내기의 조립성에 관한 연구", 대한기계학회지(A), 제39권, 제4호, 2015, 423-428)
5. Kim, J.S., J.S. Kim and H.J. Yim, "Tolerance Analysis and Design of Refrigerator Door System for Functional and Aesthetic Quality of Gap and Flush", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 31, No. 1, 2014, 59-66.  
(김진수, 김재성, 임현준, "갭과 단차의 기능 및 심미적 품질을 고려한 냉장고 도어 시스템의 공차해석 및 설계", 한국정밀공학회지, 제31권, 제1호, 2014, 59-66)
6. Lee, J.Y., "Quality Control with Tolerance Analysis", *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol. 36, No. 4, 2010, 243-247.  
(이장용, "공차해석에 기반 한 U-joint 어셈블리 품질관리", 대한산업공학회지, 제36권, 제4호, 2010, 243-247)
7. Lee, R.W., H.S. Chung, H.S. Jee and H.J. Yim, "Tolerance Design for Parts of a Sliding-Type Mobile Phone to Improve Variational Quality of Its Side Gap", *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 17, No. 6, 2012, 398-408.  
(이래우, 정하승, 지해성, 임현준, "슬라이드형 휴대전화기 측면 갭의 품질개선을 위한 부품 공차설계", 한국 CAD/CAM학회 논문집, 제17권, 제6호, 2012, 398-408)

8. Nigam, S.D. and J.U. Turner, "Review of Statistical Approaches to Tolerance Analysis", *Computer-Aided Design*, Vol. 27, No. 1, 1995, 6-10.
9. Tahk, J.K., "Accumulated Tolerance Analysis for Optimal Tolerance Design", *Proceedings of 2005 Autumn Conference of the Korean Society of Automotive Engineers*, Ansong, Korea,, 2005, 1743-1752.  
(탁정기, "제품개발 단계에서 최적공차 설계를 위한 누적공차 해석 적용", 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, 안성, 대한민국, 2005, 1743-1752)
10. Yoo, H.K., D.K. Kang, S.W. Lee and D.G. Gweon, "Error Analysis and Alignment Tolerancing for Confocal Scanning Microscope using Monte Carlo Method", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 21, No. 2, 2004, 92-99.  
(유홍기, 강동균, 이승우, 권대갑, "Monte Carlo 방법을 이용한 공초점 주사 현미경의 오차 분석과 정렬 공차 할당에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제21권, 제2호, 2004, 92-99)



**이 영 훈** (lyh12160@naver.com)  
2011~현재 창원대학교 산업시스템공학 전공  
관심분야 : 생산시스템 분석, 시뮬레이션 응용



**문 덕 희** (dhmoon@changwon.ac.kr)  
1984 한양대학교 산업공학과 공학사  
1986 한국과학기술원 산업공학과 공학석사  
1991 한국과학기술원 산업공학과 공학박사  
1990~현재 창원대학교 산업시스템공학과 교수  
관심분야 : Facilities Planning, 시뮬레이션 응용, Scheduling