

공정능력을 고려한 체결구 부품의 위치공차
최적화 방법 연구
- A Study on the Optimization of Position Tolerance
of Fasteners Considering Process Capability -

이 상 현* · 이 태 근* · 장 성 호**

Sang Hyun Lee* · Tae Gun Lee* · Sung Ho Chang**

Abstract

Designers have to consider voice of customer, process capability, manufacturing standards & condition, manufacturing method, characteristics of products to decide tolerances. Especially, in case of position of hole and pin, designers have to consider process capability to decide tolerances. The traditional position tolerances used in a drawing are theoretical values which are allocated to position under the worst case assembling condition that both hole and pin are the maximum material condition(MMC). However, When the process capability is high, more exact product size can be produced under stable manufacturing condition. larger clearance of hole and pin can be allocated. In this point of view, manufacturer could increase the yield by allocating larger position tolerance than theoretical position tolerance of hole and pin considering process capability.

Keywords : Process Capability, Position Tolerance, Fastener

1. 서 론

제품을 제작하기 위한 설계도의 치수는 설계물의 크기나 위치, 형상에 대한 이상적인 치수를 지정해 준다. 실제 치수는 제작 도중에 필연적으로 발생하는 편차의 지배를 받게 되므로 공차(Tolerance)를 주게 된다.

† 본 연구는 금오공과대학교 연구년 지원에 의한 연구결과임.

* 금오공과대학교 산업시스템공학과

** 금오공과대학교 산업시스템공학과 교수

설계변수로써 이상적인 공차는 "0"에 가까울수록 좋다. 그러나 실제적인 상황에서는 공차가 줄어들면 제조의 어려움으로 인해 가격이 증가하게 되고, 반대로 공차가 늘면 제조가 쉬워져 수율이 상승하고 가격은 줄어들게 된다. 따라서 이러한 공차와 가격 사이의 관계를 고려한다면, 제품 설계에 있어서 시스템의 성능과 생산경제성을 최고로 만족시킬 최적의 공차를 얼마로 정할 것인가는 중요한 과제로 제기된다. [1][2][3]

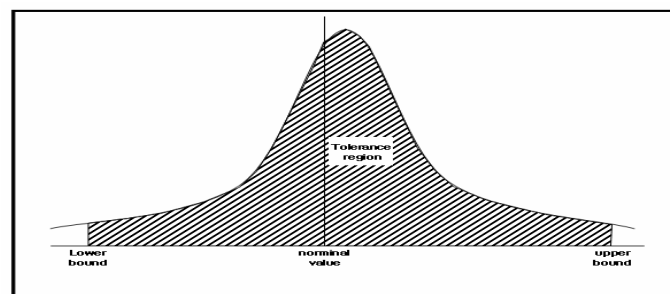
본 연구에서는 설계자가 공정능력을 감안하여 공차를 설정하는데 도움을 주기위한 것으로 공차해석방법 중 하나인 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 설계되어진 공차보다 더 큰 공차를 할당하여 수율을 향상시킬 수 있는 최적의 공차를 찾아내는 방법을 제시하고자 한다. 이를 통하여 공차로 인해 발생하는 제품의 불량률을 감소시키고, 제조비용의 절감과 제품의 품질을 개선시키는데 본 연구의 목적이 있다. 다양한 조립방식 중 체결구부품의 Hole과 Pin이 조립될 때, 최적 위치공차를 도출하기 위한 방법 제안에 초점을 맞추었다. 제조기업의 생산조건을 고려하여 부품이 요구 성능을 갖추기 위한 최적의 공차를 할당함으로써, 제조기업의 비용을 최적화하였다.

2. 이론적 배경

2.1 공차(Tolerance)

공차(tolerance)는 부품의 치수(dimension)에 허용하는 변동의 크기를 나타낸다. 미국 ASME Y14.5M-1994에서 치수(dimension)는 “측정의 적절한 단위로 표현되고, 크기(size), 위치(location), 회전(orientation), 형태(form) 또는 부품의 다른 기하학적 특성을 정의하는데 사용되는 수치적 값이다”라고 정의한다. 공차(tolerance)는 “지정된 치수로부터 변동하도록 허용된 부품 형체(feature)의 총 양이다. 즉, 최대한계와 최소한계 사이의 차이”등으로 정의할 수 있다.

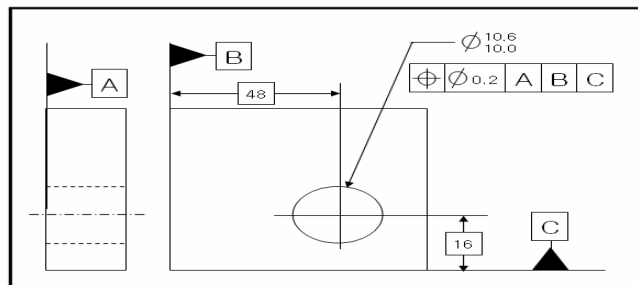
이렇듯 설계도면에서 공차는 [그림 2-1]과 같이 공칭치수(nominal value)의 상하단에 상한값과 하한값의 차이로 정의 할 수 있다. 설계변수의 하나인 치수공차(dimension tolerance)는 특정한 형상면에 허용되는 치수의 변동량을 의미한다.[4]



[그림 2-1] 공차영역

2.2 위치도 공차(Position Tolerance)

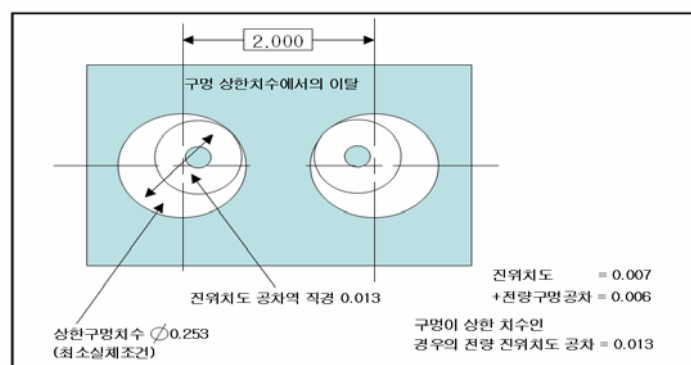
규제된 형체가 다른 형체나 데이텀으로 사용된 형체에서 축심 또는 중간면이 벗어난 변위량을 위치도 공차(position tolerance)라 한다. 이 공차는 복합공차로써 형체의 진직도, 평행도, 진원도 및 직각도 오차와 이론상의 위치에서 축심 또는 중간면이 이동한 값을 의미하는 것으로 기하학적 특성 중 가장 다양하고 가장 널리 사용되고 있다.



[그림 2-2] 위치공차 적용 모형

[그림 2-2]에서 위치공차가 적용된 모형을 소개하고 있다. $\phi_{10.0}^{10.6}$ 을 갖는 홀은 A, B, C Datum을 기준으로 $\phi 0.2$ 의 위치공차를 갖는다. 다시 말해 크기 $\phi_{10.0}^{10.6}$ 인 홀 중심은 $\phi 0.2$ 의 위치공차 이동범위 안에서 움직일 수 있다는 것이다. [4][5][6][7][8]

[그림 2-3]에서 알 수 있듯이, Hole이 치수공차의 상한값(또는 최소실체조건)으로 만들어 졌다면 이때 결합부품의 게이지핀과 구멍이 접하도록 하는 경우, 구멍중심의 공차역은 원래 주어진 0.007에서 벗어나 0.013이 되어도 양품이 되는 것을 알 수 있다. [2][9][10][11][12]

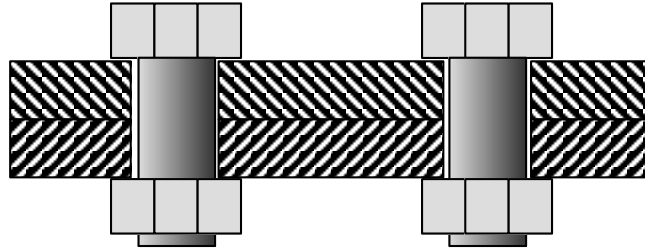


[그림 2-3] 진위치도

2.3 체결구 부품

2.3.1 부동체결구(Floating Fastener)

구멍이 있는 두개의 부품을 볼트와 너트에 의해 결합할 때 볼트가 틈새를 가지는 구멍 내에서 자유롭게 움직이며 결합될 수 있는 방식을 말한다.



[그림 2-4] 부동체결구

부동 체결구 부품의 위치공차 도출 식은 아래와 같다.

$$T = H - F$$

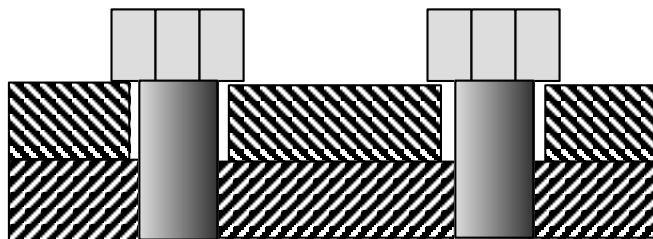
T : 위치공차

H : hole의 최소직경 (MMC)

F : pin의 최대직경 (MMC)

2.3.2 고정체결구(Fixed Fastener)

2개의 결합 부품 중 하나가 고정된 상태로 결합되는 형체를 말한다.



[그림 2-5] 고정체결구

고정 체결구 부품의 위치공차 도출 식은 아래와 같다.

$$T = \frac{H - F}{2}$$

T : 위치공차

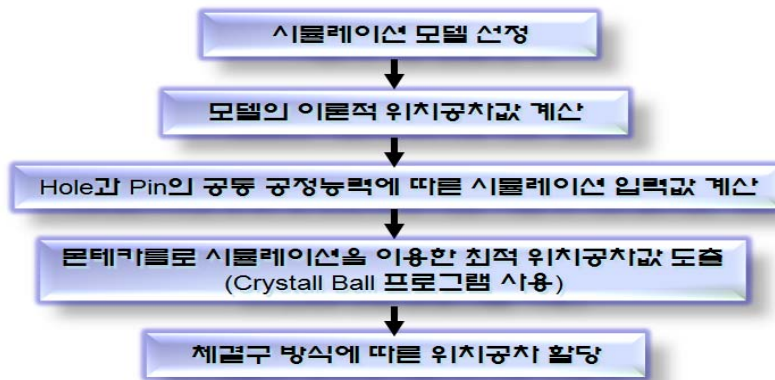
H : hole의 최소직경 (MMC)

F : pin의 최대직경 (MMC)

3. 연구내용 및 방법

3.1 연구수행 방법

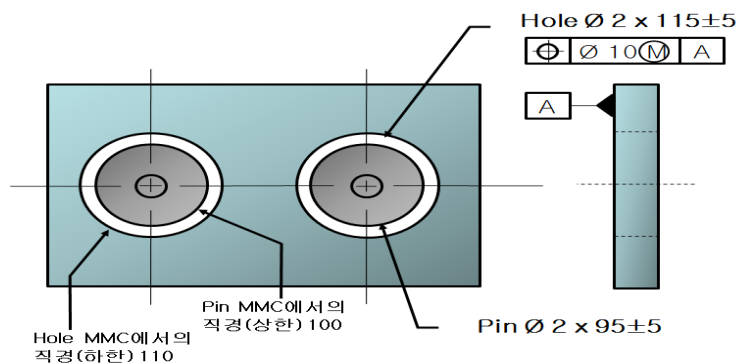
우선 시뮬레이션을 실시할 모델 선정 후, 모델의 이론적 위치공차값을 계산해 본다. Hole과 Pin의 공정능력이 동일하다고 가정 후 공정능력의 변화에 따라 변하는 표준편차를 계산하여 시뮬레이션 입력값을 준비한다. 사전에 준비된 시뮬레이션 입력값을 분포로서 입력한 후 몬테카를로 시뮬레이션을 실시한다. 이렇게 해서 나온 결과값을 체결구 방식에 따른 위치공차값으로 할당하였다.



[그림 3-1] 연구수행 방법

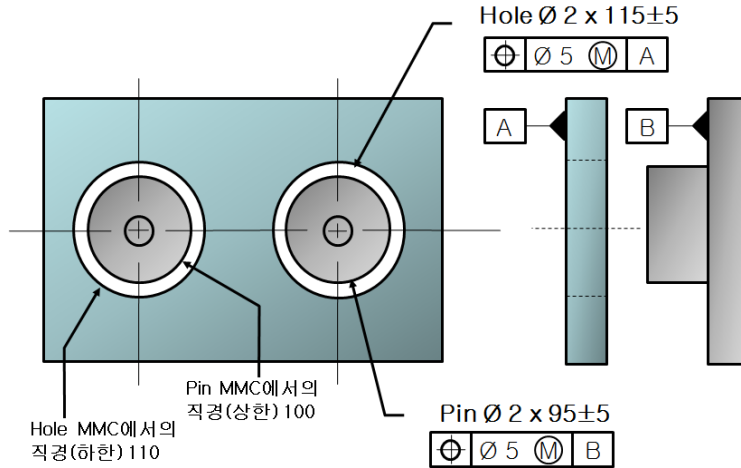
3.2 시뮬레이션 분석 모델

3.2.1 부동 체결구 방식



[그림 3-2] 부동체결구 모델

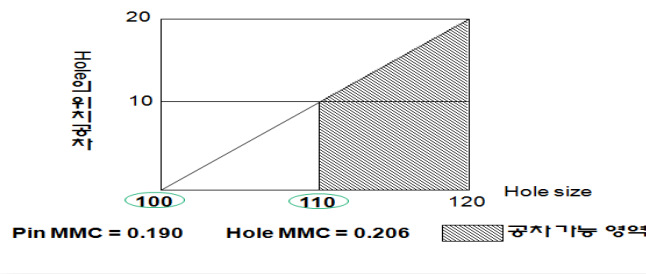
3.2.2 고정 체결구 방식



[그림 3-3] 고정체결구 모델

3.3 공차할당 방법의 연구

3.3.1 기존의 전통적인 위치공차 할당방법(이론적인 위치공차)



[그림 3-4] 이론적인 위치공차 공차선도

[그림 3-4]을 보면 Hole의 위치공차는 Hole의 MMC size - Pin의 MMC size = 110 - 100 = 10으로 할당할 수 있다.

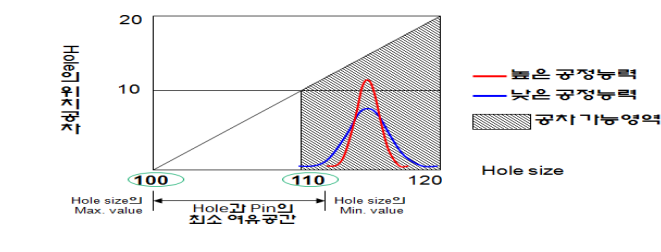
일반적으로 위치공차는 결합부품 형체의 MMC사이즈 관계를 기초로 하여 결정된다. 다른 말로, 구멍 및 볼트의 MMC 사이즈에 준하여 공차할당이 이루어진다는 것이다. 따라서 형체사이즈야말로 진위치도공차를 전개하여 나아가는 시작이 되는 것이다.

Hole의 사이즈공차는 도면에 명시된 값 내에 있어야 하며 진위치도 공차와는 별개로 점검되어야 한다. 결합부품간의 설계상 간격이 바로 도면에 명시되고 제조 시에 적

용되는 위치공차의 기준이 된다. 위치도공차가 명시된 형체가 실제로 제작된 경우, 그 형체가 MMC 사이즈로부터 이탈한 만큼 기존의 위치공차에 가산되어 위치공차는 증가하게 된다. 이 말은 위치공차를 Hole의 MMC 사이즈 - Pin의 MMC 사이즈로 계산된 이론적인 위치공차보다 더 크게 되는 상황도 발생한다는 의미이다.

3.3.2 공정능력을 고려한 위치공차할당 방법(새롭게 제안한 방법)

이론적 위치공차를 보면 도대체 위치공차를 어떻게 설정해야 할지 모호한 점이 발생하게 된다. 개개의 부품마다 위치공차를 할당하여서 MMC를 벗어난 만큼 위치공차를 할당해 줄 수는 없을 것이다. 공차 설정의 확실한 기준이 없는 전통적인 이론적 위치공차의 모호한 점을 없애고 수율 향상을 위해 다음과 같은 공정능력을 고려한 위치공차 할당방법을 제안한다.



[그림 3-5] 공정능력을 고려한 위치공차

[그림 3-5]을 보면 Hole의 위치공차는 공정능력에 따라 변할 수 있다는 것을 알 수 있다. Hole의 하한값이 가장 작을 경우는 110이고 공정능력에 따라 110이상이 될 수 있다는 것이다. 따라서, 공정능력에 따라 위치공차는 이론적인 가장 작은값을 가질 수 있고 반대로 더 증가할 수 있다. 즉, hole과 Pin의 공정능력이 높아질수록 위치공차를 증가시키는 것이 가능하다.

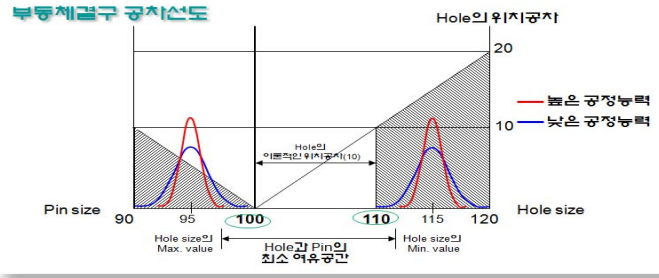
3.4 몬테카를로 시뮬레이션

Hole과 Pin의 공정능력에 따라 위치공차는 달라진다. 공정능력이 좋다면 위치공차를 이론적인 공차값보다 증가시키는 것이 가능하다. 따라서 Hole과 Pin의 공정능력에 따라 생산될 수 있는 size의 데이터를 뽑아내는 것이 가능하다.

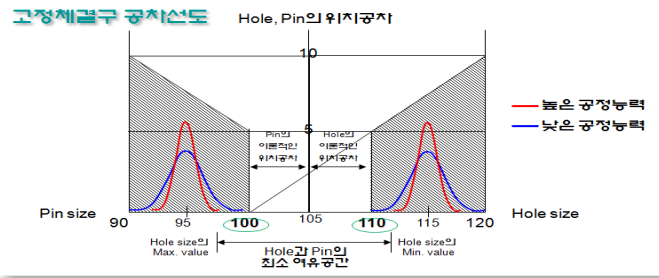
앞서 제안한 공정능력을 고려한 위치공차할당 방법을 통하여 위치공차를 설정하기 위해 Hole과 Pin이 생산되는 size 데이터를 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 생성시킬 수 있다. 이 때, 보다 효율적으로 데이터를 생성할 수 있도록 몬테카를로 시뮬레이션 프로그램의 하나인 Crystall Ball을 사용하였다.

3.4.1 선정 모델의 동적공차선도

위치공차를 분석하기 위한 모델로서 부동체결구와 고정체결구를 선정하였는데, 체결구의 공차선도는 아래의 [그림3-6][그림3-7]과 같다.



[그림 3-6] 부동체결구 공차선도



[그림 3-7] 고정체결구 공차선도

부동체결구는 Hole과 Pin사이의 여유를 모두 Hole의 위치공차로 할당해야하고 고정체결구는 Hole과 Pin사이의 여유를 Hole, Pin에 각각 나누어 할당해주어야 한다. 부동체결구와 고정체결구의 공차선도는 할당방법으로 인해 차이가 생기지만 시뮬레이션 방법은 동일하다. Pin과 Hole의 치수들은 정규분포를 따른다고 가정한 후 실험을 실시하였다.

많은 공차 문제들에서, 개개의 치수들은 정규분포를 가지는 것으로 가정한다. 이 가정은 공차들로 하여금 만족도에 부합하는 방법을 제공한다. 치수 x 의 평균값 μ 는 설계 공정에서 공칭치수(nominal dimension)로써 주어진다. 그러나 표준편차(standard deviation) σ 는 각각의 제조공정에서 얻어진 정밀도에 따라 선택된다. 결론적으로, 표준편차 σ 는 공차들 t 의 함수이다. 대량 생산에서, 단일 치수의 공차는 만약 치수들의 99.73%가 정밀도 안에 있다면 충분히 크게 고려되어진다. 정규분포된 임의의 변수들에 서, 변수는 $\pm 3\sigma$ 의 공칭값 안에 값이 선택되어질 99.73%의 확률이 있다.

부동체결구, 고정체결구 모두 시뮬레이션 방법은 동일하지만, 마지막 위치공차의 값을 할당할 때, 부동체결구는 시뮬레이션 결과값 모두를 Hole에 할당하지만 고정체결구는 결과값을 2로 나누어 Hole과 Pin에 나누어서 할당해 준다.

3.4.2 시뮬레이션 실행

Hole과 Pin의 공정능력은 동일한 것으로 가정하고, 사이즈는 정규분포를 따른다고 가정하고 입력값들을 계산하였다.

Hole size: 110 ~120 (Range = 10)

Pin size: 90 ~100 (Range = 10)

[표 3-1] 공정능력에 해당하는 표준편차의 계산

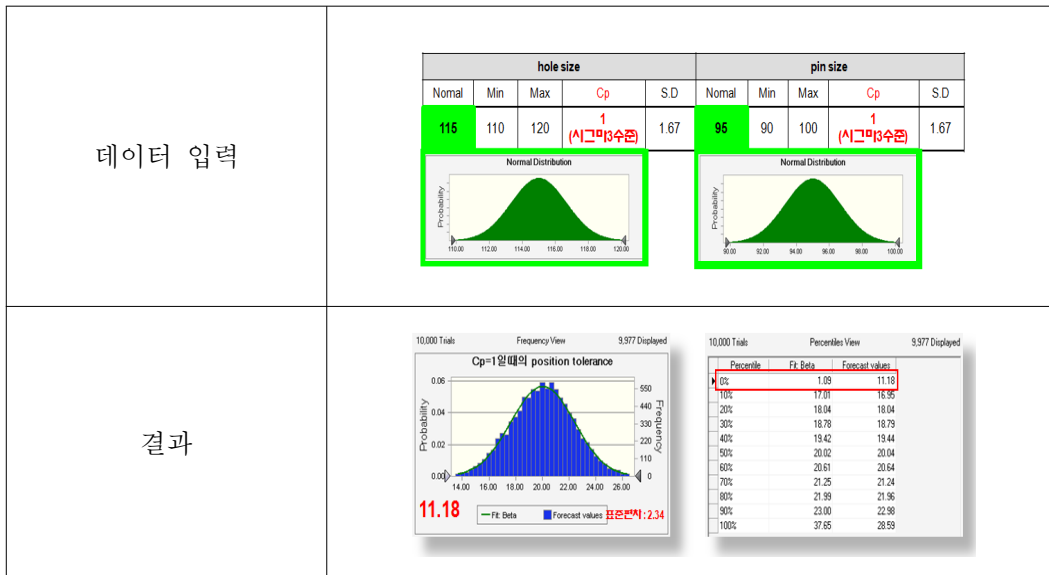
시그마수준	Cp	Hole, Pin의 size 범위 (USL - LSL)	표준편차
1	0.33	10	5.01
2	0.67	10	2.49
3	1.00	10	1.67
4	1.33	10	1.25
5	1.67	10	1
6	2.00	10	0.83

여기서, 보통 Cp(공정능력)은 1.33이상 이 되어야 공정이 안정적이라고 할 수 있다. 몬테카를로 시뮬레이션에서는 Hole과 Pin의 size는 각 공칭치수를 중심으로 각 시그마 수준에 따라 정규분포 내에서 random하게 선택되어진 후 계산된다.

시그마 수준에 따른 Hole과 Pin사이즈 변화로 Hole과 Pin사이의 여유를 계산하였다.

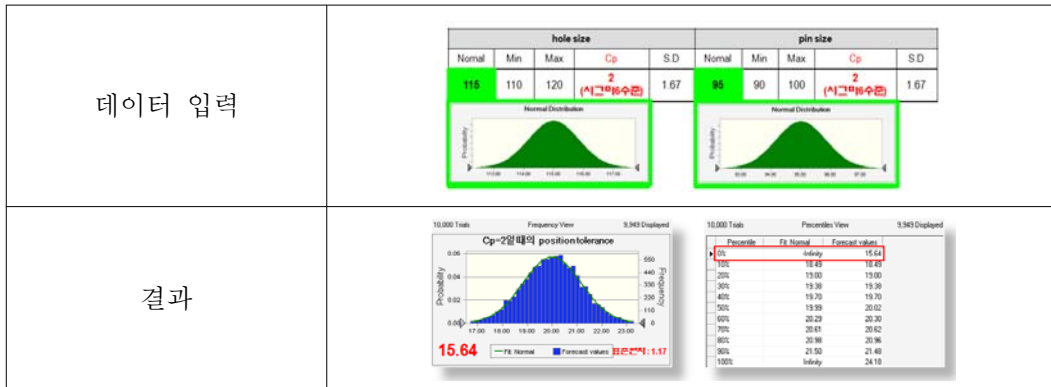
아래와 같이 Hole과 Pin의 여유(차이)는 정규분포로 나타나게 되는데, 시뮬레이션 결과값(Hole size - Pin size)중 최소값을 위치공차로 사용하게 된다면 위치공차로 인한 불량은 존재하지 않게 된다.

▲ 시그마3수준, Cp=1



Hole과 Pin사이 여유(Hole size-Pin size)의 최소값 : 11.18

▲ 시그마6수준, Cp=2



Hole과 Pin사이 여유(Hole size-Pin size)의 최소값 : 15.64

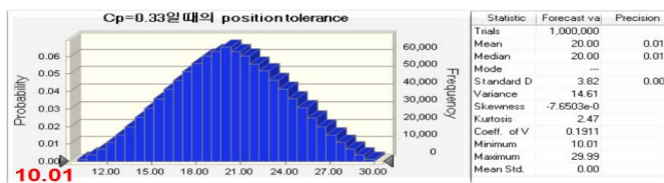
이 결과 값들을 볼 때, 공정능력이 높아질수록 불량없이 이론적인 위치공차값보다 더욱 많은 공차를 위치공차로 할당할 수 있을 것이라는 것을 입증하였다. 이에 공정능력을 세분화 하고 실행횟수도 증가시켜 시뮬레이션을 실시하였다.

4. 결과 및 분석

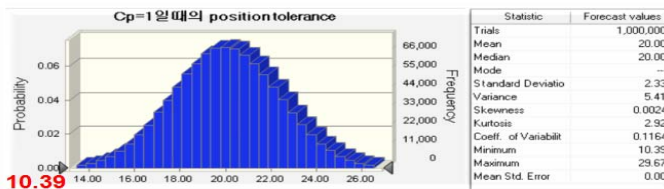
4.1 공정능력에 따른 최적 위치공차 도출

각 시그마수준 1 ~ 6 까지의 Pin과 Hole사이의 여유를 계산 후 가장 작은 값을 위치공차로 할당해 위치공차로 인한 불량이 발생하지 않는 최적의 위치공차를 도출하였다. 이 때 각 조건마다의 실행횟수는 백만번으로 하였다.

Cp = 0.33
(시그마수준 1)



Cp = 1
(시그마수준 3)





Cp = 2
(시그마수준 6)

[그림 4-1] 몬테카를로 시뮬레이션 결과

[그림 4-1]을 보면 공정능력(Cp)이 0.33 ~1에서는 공정능력이 좋아질수록 위치공차의 증가가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 그 이유는, 보통 공정능력은 1.33이상이어야 안정되었다고 할 수 있다. 공정능력이 1일 때까지는 공정능력이 안정화되지 못하여 산포가 크기 때문에 Hole과 Pin의 size가 정밀하지 못한 이유로 인해 위치공차가 크게 증가하지 못하는 것이다. 하지만 공정능력이 1.33이상이면 위치공차의 증가는 두드러지게 되며 “6시그마 수준”인 공정능력(Cp)이 2가 되었을 때에는 위치공차가 10에서 14.22로 42%이상 증가한 것을 확인할 수 있다.

[표 4-1] 시뮬레이션 최종 결과(Trial = 백만번)

Hole과 Pin의 시그마수준	Hole과 Pin의 공정능력	부동체결구 Hole의 위치공차	고정체결구 Hole, Pin의 위치공차
1	0.3	10.01	5.005
2	0.67	10.07	5.035
3	1	10.39	5.195
4	1.33	11.47	5.735
5	1.67	13.35	6.675
6	2	14.22	7.110

※시뮬레이션으로 도출된 위치공차는 위치공차로 인해 만개의 제품 중 불량률 존재하지 않는 공차할당량임

위치공차 결정 시, 시뮬레이션 결과값(Hole과 Pin의 차이)의 평균값을 할당하는 것이 아니라 최소값을 최적 위치공차값으로 결정하여야한다. 또한, 앞서 설명했듯이 부동체결구는 Pin의 위치공차 개념이 없기 때문에 최적 위치공차 결과값을 모두 Hole에 할당하고, 고정체결구의 경우는 Pin도 위치공차를 가져야 하기 때문에 Hole과 Pin에 최적 위치공차값을 반반씩 할당하도록 한다.

실제 공정에서 Pin과 Hole Size의 공정능력에 따라 공정능력이 높은 만큼 위치공차 Spec을 높여준다면 Hole과 Pin의 위치공차로 인한 불량률은 줄어들게 되어 수율이 증가할 것이고 증가된 수율로 인해 생산자의 이익을 증대시킬 수 있을 것으로 기대한다.

그리고 수율증가와 품질향상을 위해 공정능력을 높이는 활동에 힘을 기울여야 한다는 식스시그마의 기본적 이론에 대한 근거 또한 확인 할 수 있었다.

5. 결 론

현재 도면에 사용하고 있는 전통적인 이론적 위치공차값은 Hole과 Pin이 모두 MMC인 조립이 최악의 상태일 경우의 여유를 위치공차로 할당된 이론적인 값이다.

하지만, 우리는 본 연구를 통하여 공정능력이 높을수록 안정된 생산으로 인해 제품의 Size공차는 목표값에 가깝게 생산될 수 있고, Hole과 Pin사이의 여유가 더욱 증가할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 이것으로 인해, 생산자는 공정능력을 고려하여 Hole과 Pin의 위치공차를 이론적인 위치공차보다 더욱 큰 위치공차 할당을 통하여 수율을 증가시킬 수 있다.

본 연구의 결과로, 실제 Hole과 Pin의 공정능력을 고려하여 Hole과 Pin의 위치공차를 할당한다면, 이론적인 위치공차보다 더 큰 위치공차를 사용할 수 있기 때문에 조립 상 문제가 없지만 위치공차의 Spec을 벗어나 불합격 판정된 제품을 양품으로 합격시킬 수 있기 때문에 수율을 증가시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

또한, 생산조건 및 생산성의 변동에 있어서 유연한 위치공차 설계변경이 가능할 것이다. 이는, 생산조건이 나쁘다면 위치공차를 이론적인 값에 가깝게 가져갈 수 있을 것이고, 생산조건이 좋다고 한다면 이론적인 위치공차 값보다 더 큰 값으로 가지고 감으로써, 유연한 위치공차 설계변경이 가능하다는 의미이다.

6. 참 고 문 헌

- [1] Alex krulikowski, "Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing", Effective training inc, 1998
- [2] 박경호, "기구설계에서 공차 할당에 관한 연구", 아주대학교, 1996
- [3] 최호선, "신공차론", 성안당, 2001
- [4] 김영남, Virtual Method를 사용한 Stack Analysis 연구, 금오공과대학교, 2001
- [5] Krulikowski, A. Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing, video Training workbook, 1998, Effective Training Inc.
- [6] Krulikowski, A. Geometric Tolerancing Application Workbook-student version, pp.6-16 ~ 6-21, 1994, Effective Training Inc
- [7] Krulikowski, A. Advanced Concept of GD&T, 1999, Effective Training Inc,
- [8] 최호선, ANSI, ISO, KS 규격에 의한 기하공차론, 성안당, 2000
- [9] 강현장, MMC에서의 생산을 고려한 공차의 최적화, 금오공과대학교, 2003
- [10] 송지복 외 1명, 정밀 기계설계 제도법(GEOMETRICS II), 성안당, 1999
- [11] Lowell W.Foster, GEO_METRICS II The Application of Geometric Tolerance Techniques, 1983
- [12] Lowell W.Foster, GEO_METRICS III The Application of Geometric Tolerance Techniques, 1994
- [13] 장현수, 유전 알고리즘과 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 최적공차, 명지대학교, 1998