

공정능력을 고려한 체결구 부품의 위치공차 최적화 방법 연구

이상현* · 이태근** · 장성호***

*동우화인캠 · **LG. Philips Displays · ***금오공과대학교 산업시스템공학과

A Study on the Optimization of Position Tolerance of Fasteners Considering Process Capability

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

*Dong Woo Fine-Chem · **LG. Philips Displays

***Department of Industrial and Systems Engineering,
Graduate SchoolKumoh National Institute of Technology

Abstract

Designers have to consider voice of customer, process capability, manufacturing standards & condition, manufacturing method and 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. 서론

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. 공차로 인한 기계 시스템의 치수 편차는 예상되는 성능의 저하를 가져오며 그 시스템 출력의 기계적인 오차를 발생시킨다.

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 줄

어지게 된다. 따라서 이러한 공차와 가격 사이의 관계를 고려한다면, 제품 설계에 있어서 시스템의 성능과 생산경제성을 최적으로 만족시킬 최적의 공차를 얼마로 정할 것인가는 중요한 과제로 제기된다.

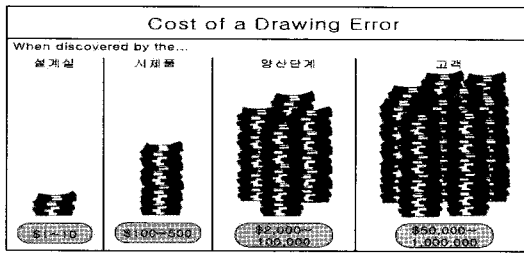
아래 [그림 1]은 도면 Error로 인한 전형적인 Cost 결과를 나타낸 것이다. 만약 설계가 잘못 되었다는 것을 설계 시에 알고 고치게 되면 \$1~10의 비용이 들 것이고 시제품을 만들고 난 후에 알게 되면 \$100~500가 들고, 양산단계에서 알게 되면 2,000~100,000가 고객에게 판매하고 나서 알게 될 경우 \$50,000~1,000,000의 비용을 감수해만 한다. 이는 얼마나 설계가 중요하다는 것을 단적으로 보여주는 예이다.

* 본 연구는 금오공과대학교 연구년 지원에 의한 연구결과임.

† 교신 저자: 장성호, 경북 구미시 양호동 1번지 금오공과대학교 산업시스템공학과

M · P: 011-535-7319, E-mail: changsh@kumoh.ac.kr

2009년 1월 접수; 2009년 2월 수정본 접수; 2009년 2월 게재확정



[그림 1] 도면 Error로 인한 비용

도면의 잘못으로 인한 결과를 보자면 다음과 같다.[3][7][9]

- 첫째, 비용의 손해
- 둘째, 시간적 손해
- 셋째, 재료의 낭비
- 넷째, 고객의 불만

이처럼 제품개발단계에서 제품의 치수와 공차배분 (tolerance allocation)문제는 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 특히 공차 설정은 설계과정에서 과학적인 방법이 아닌 설계자의 경험과 지식에 의해서 결정되는 수가 많다. 이러한 경우 최종 제품의 품질 및 성능이 목표치보다 떨어지거나 제품자체가 불량품으로 처리되어지는 경우가 발생하기도 한다. 이러한 관점에서 각 부품의 공차는 최종 제품의 품질과 제조비용에 밀접한 관계가 있다.

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

2. 이론적 배경

2.1 공차(Tolerance)

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 정의할 수 있다. 설계변수의 하나인 치수공차(dimension tolerance)는 특정한 형상면에 허용되는 치수의 변동량을 의미한다. 이것은 가능한 0에 가까워야 하지만 실제 가공에 있어서 가공조건, 하드웨어 / 소프트웨어 정확도, 작업자의 숙련도, 재질의 특성, 기계오차, 클램핑 오차, 계측오차, 지그나 고정구 오차 등 가공공정의 물리적 한계들로 기준치수를 얻기가 불가능하기 때문에 기준치수보다 큰 범위를 부여하게 된다.

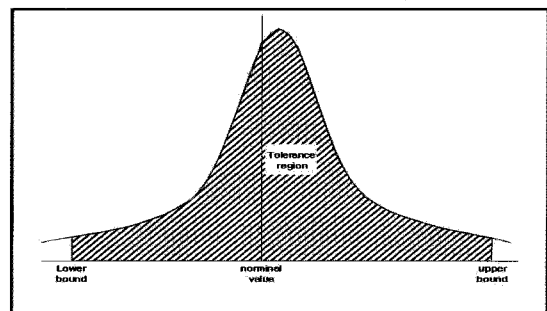
이 공차의 크기에 따라 제작 시 발생하는 비용(cost)이 달라지는데 이것은 제품의 설계에 있어서 각종 치수에 최적의 공차를 부여하는 것이 비용 절감을 위해서 중요한 문제임을 인식할 수 있게 한다. [2]

2.2 위치도 공차(Position Tolerance)

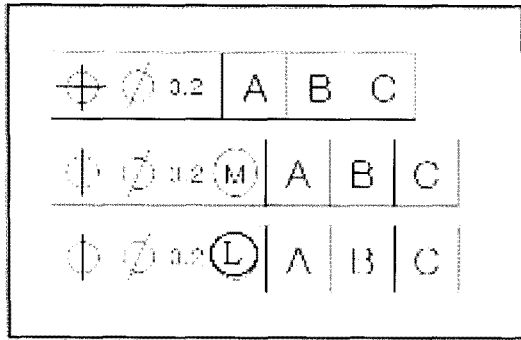
규제된 형체가 다른 형체나 데이텀으로 사용된 형체에서 축심 또는 중간면이 벗어난 변위량을 위치도 공차(position tolerance)라 한다. 이 공차는 복합공차로써 형체의 진직도, 평행도, 진원도 및 직각도 오차와 이론상의 위치에서 축심 또는 중간면이 이동한 값을 의미하는 것으로 기하학적 특성 중 가장 다양하고 가장 널리 사용되고 있다.

위치도에 대한 공차역은 규제형체의 형상에 따라 원형의 축심을 기준으로 한 직경공차역(\varnothing)이나 아니면 비원형의 중간면을 기준으로 한 폭 공차역이나에 따라 공차영역이 달라진다. 원형형상의 구멍이나 보스에 적용되는 위치도 공차역은 직경(\varnothing)으로 그 중심은 규제된 직경 공차역 내에 있어야 한다.

위치도 공차는 원형형상과 비원형형상의 구멍과 원형형상의 축이나 비원형형상의 돌출형상 또는 슬롯(slot), 노치(notch) 및 보스(boss)등과 같은 형체의 위치를 규제하는 공차 방식으로 재료(material)의 상태에 따라 아래와 같이 다른 범위의 공차를 부여할 수 있다.



[그림 2-1] 공차영역



[그림 2-2] Feature Control Frame안에서의 공차관리

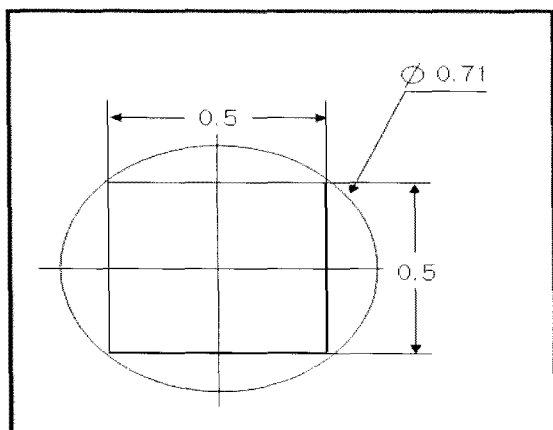
공차관리는 [그림 2-2]에서 표현한 형체 규제 테두리 (feature control frame)안에 기재하게 되는데 이 테두리 안에는 기하학적 특성 기호와 공차의 크기, 재료의 상태, 데이텀 형체 등을 설명하고 있다.

[그림 2-3]는 위치공차의 영역을 나타내고 있다. 일반적으로 사용하는 치수공차를 이용하여 위치를 지정할 때 발생하는 오류를 막기 위해 \varnothing 라는 치수로 지정한다.

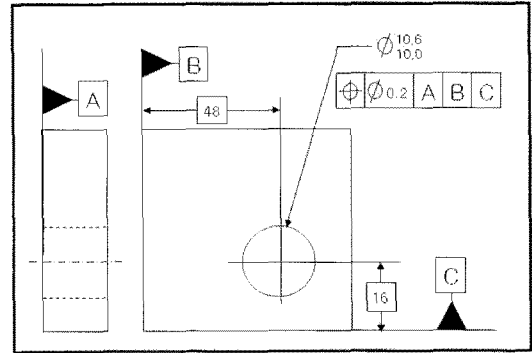
[그림 2-4]와 같이 0.5×0.5 인 정사각형 범위 내에 있다면 공차역의 범위를 벗어나지 않으나 대각선의 길이 0.71 내에 있다면 공차역을 벗어나게 된다.

따라서, 위치공차를 적용할 때는 좌표공차를 사용하지 않고 \varnothing 의 원형태로 적용하게 된다. 그러면 [그림 2-4]와 같은 위치공차 적용 모형에서 합격될 영역이 $\varnothing 0.71$ 인 넓이에서 0.5 의 정사각형을 제외한 만큼의 영역이 넓어지는 장점을 얻을 수 있다.

[그림 2-4]에서 위치공차가 적용된 모형을 소개하고 있다. $\varnothing \frac{10.6}{10.0}$ 을 갖는 홀은 A, B, C Datum을 기준으로 $\varnothing 0.2$ 의 위치공차를 갖는다. 다시 말해 크기 $\varnothing \frac{10.6}{10.0}$ 인 홀 중심은 $\varnothing 0.2$ 의 위치공차 이동범위 안에서 움직일 수 있다는 것이다. [2][8][10][11][12]



[그림 2-3] 공차 지정 방식



[그림 2-4] 위치공차 적용 모형

2.3 진위치도(True Position) 이론

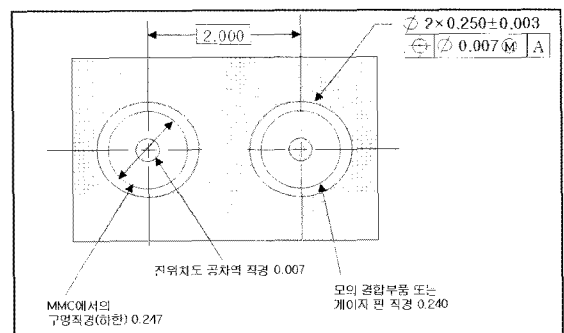
[그림 2-5]의 두개의 구멍은 MMC 치수가 0.247 인 0.250 ± 0.003 의 구멍이며 구멍중심은 지름 0.007 의 진위치도 공차역 중심에 정확히 위치한다. 도면에는 기능핀 또는 고정핀으로 대표되는 결합부품을 나타내고 있다.

그림의 게이지 핀은 진위치도 공차역 0.007 만큼 적은 값, 즉 직경 0.240 으로 되어있다. 진위치도공차 0.007 은 구멍이 0.247 이라는 MMC 치수인 경우, 명시된 진위치도 공차 내에서 구멍이 벗어날 수 있는 최대허용오차를 나타내는 것이다.

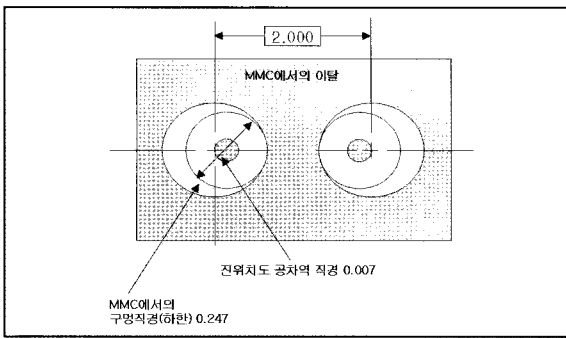
[그림 2-6]에 보인 두개의 0.250 MMC 구멍은 위치공차역 0.007 의 최대허용한계에서 서로 반대되는 방향으로 위치를 이탈하고 있다. 구멍의 끝부분이 모의 결합부품 또는 게이지핀과 접하고 있다.

두개의 구멍은 명시된 오차 내에 있으며 동시에, 그림에서 볼 수 있듯이, 모의 결합부품을 만족할 만큼 잘 통과시키고 있다. [그림 2-6]의 0.250 ± 0.003 구멍은 치수공차의 상한값(또는 최소실체조건)으로 만들어 졌다.

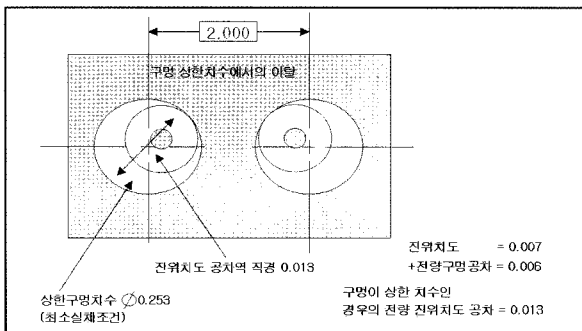
이때 [그림 2-7]에서처럼 결합부품의 게이지핀과 구멍이 접하도록 하는 경우, 구멍중심의 공차역은 원래 주어진 0.007 에서 벗어나 0.013 이 되어도 양품이 되는 것을 쉽게 알 수 있다.



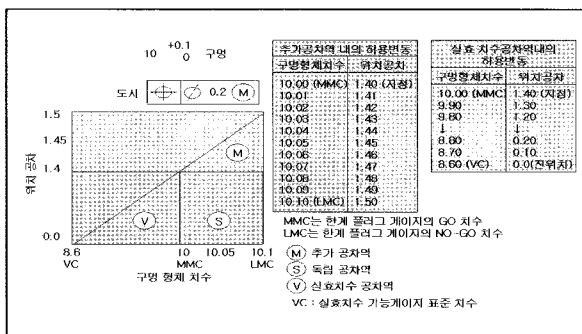
[그림 2-5] 진위치도 1



[그림 2-6] 진위치도 2



[그림 2-7] 진위치도 3



[그림 2-8] 동적 공차 선도 해설도

앞의 예는 진위치도 치수법 및 공차법을 사용할 때, 치수와 진위치도공차의 상호관계를 보여준다. 비록 두 개의 구멍만으로 설명을 했지만, 패턴 내의 모든 구멍들에 동일한 논리가 적용된다. 또한 개개의 구멍들은 자신의 공차역 내에 서는 360° 중 어떠한 방향으로도 이탈이 가능하다.

진위치도에 관한 이론을 설명하기 위해 여기서 사용한 것과 같은 기능 또는 고정핀 게이지는 단지 구멍의 진위치도를 점검하는 데에만 사용되는 것에 유의하여야 한다.

진위치도공차는, 구멍의 크기가 치수공차 내에서 MMC 크기를 벗어나는 양만큼 증가될 수 있다. 구멍의 치수공차는 도면에 명시된 값 내에 있어야 하며 진위치도 공차와는 별개로 따로 점검되어야 한다.[1][3][4][13][14]

2.4 동적 공차 선도

도시된 선도는 관련 부품에 있어서 공차불이 형체 크기와 대응하는 기하공차(도시된 것은 위치 공차)와의 관계를 디지털적, 또 아날로그적으로 나타내며, 대상으로 하는 형체가 최대실체를 필요조건으로 하는 원리의 개념을 이해하는데 유효한 툴(Tool)이다. 이 선도에 있어서 실효조건(VC)는 기능 게이지의 표준 사이즈, MMC는 한계 플러그 게이지의 GO 사이즈, 그리고 LMC는 한계 플러그 게이지의 NO-GO 사이즈를 나타내고 있다. 또는 (M)의 영역은 추가 공차역, (S)의 영역은 독립 공차역, (V)의 영역은 실효치수 공차역을 각각 나타내고 있다.

(M)은 허용 치수 내의 형체 크기의 변동에 대응하여 기하공차(여기서는 위치 공차)의 추가가 허용되는 영역이며, 형체의 마무리 크기에 관계 없이 기하공차는 그 규정치에 한정된다. (이 그림에서는 위치공차도 Ø1.4 이내가 허용된다.)

(V)는 형체의 끼워맞춤 조립 기능상으로서의 허용되는 형체 크기의 공차의 영역이다.

이 영역의 한계를 넘으면 조립은 불가능하다. 이유는 진위치(위치 공차 제로)에 있는 구멍형체사이즈 8.6(VC)은 조립 상대 축형체 크기와와의 끼워맞춤에 있어서 틈새 제로, 끼워맞춤 제로의 극한 상태를 나타내고 있기 때문이다.

따라서 위치도의 조립 기능을 검증하기 위한 기능 게이지는 이 극한 상태를 구체화하여 설계하게 되는 것이다.

동적공차선도는 이가라시씨가 고안했으며, ISO에는 1977년, KS에는 1986년 채택되었다. (KS B 0242)

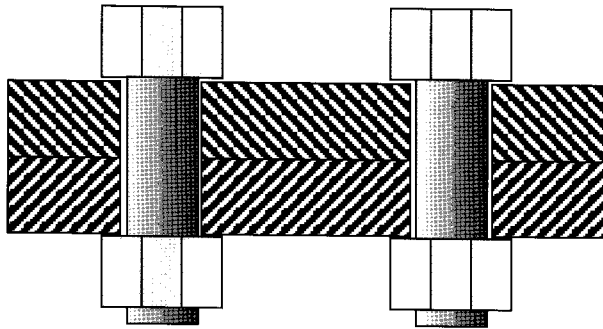
동적 공차 선도에서 각 영역 및 기호의 의미는 아래와 같다.

- VC (실효조건) : 기능 게이지의 표준 사이즈
- MMC : 한계 게이지의 통과측 사이즈 (GO Size)
- LMC : 한계 게이지의 비통과측 사이즈 (No-GO Size)
- V 영역 : 실효 치수 공차역 (호환성은 확보되나 치수 공차 불만족)
- M 영역 : 추가 공차역 (MMC 적용으로 추가된 합격 영역)
- S 영역 : RFS 영역 (형체치수 무관계 적용시 합격 영역) [5]

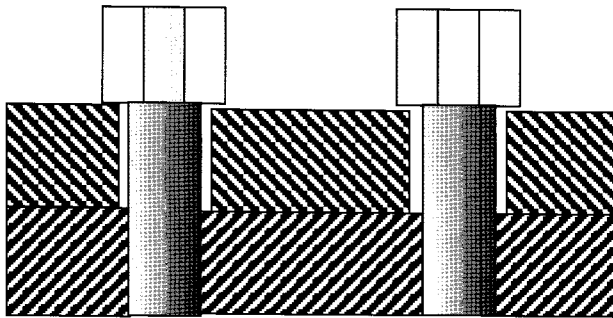
2.5 체결구 부품

2.5.1 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 2-9] 부동체결구



[그림 2-10] 고정체결구

부동 체결구 부품의 위치공차 도출 식은 아래와 같다.

$$T = H - F$$

T : 위치공차

H : hole의 최소직경 (MMC)

F : pin의 최대직경 (MMC)

2.5.2 고정체결구(Fixed Fastener)

2개의 결합 부품 중 하나가 고정된 상태로 결합되는 형태를 말한다.

고정 체결구 부품의 위치공차 도출 식은 아래와 같다.

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

T : 위치공차

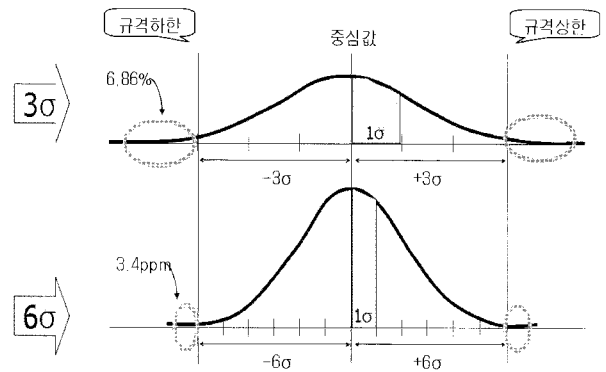
H : hole의 최소직경 (MMC)

F : pin의 최대직경 (MMC)

2.6 공정능력

2.6.1 σ 와 σ level

가장 일반적인 의미에서 σ 는 그리스 문자로서, 통계학에서 변동을 나타내는 여러 측도 가운데 하나인 표준편차(Standard Deviation)를 나타낸다. 그러나 6시그마에서는 σ 가 품질의 변동을 의미하는 표준편차로 사용될 때도 있으나, 보통 '몇 σ 수준'이라고 할 때는 '프로세스의 질을 나타내는 척도'를 뜻한다.



[그림 2-11] 3시그마 level과 6시그마 level

어떤 프로세스의 시그마 값이 높으면 높을수록 프로세스에서 결함의 발생은 더욱 줄어들게 된다. 시그마 값이 증가하면 비용이 감소하게 되고 사이클 타임이 줄어들며 고객의 만족도는 증가하게 된다. 6 σ level이란 data의 중심값에서 규격 상, 하한 까지의 거리가 각각 표준편차의 6개가 되는 수준을 의미한다. [13]

2.6.2 공정능력지수

공정능력을 측정하기 위한 지수들은 여러 가지가 소개되고 있으며, 이 중 가장 많이 사용되고 있는 것이 공정능력지수 Cp이다.

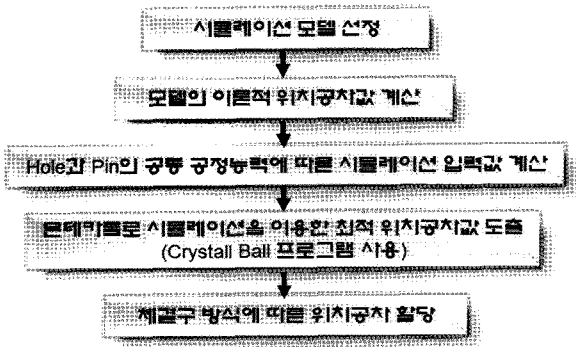
공정능력을 정의함에 있어, 안정성 즉, 정밀도만을 고려할 수도 있고, 정확도 즉 공정의 세팅까지 고려할 수 있겠다. 후자의 경우는 결국 공정능력이 불량률을 반영할 수 있도록 하는 것이다. 이에 따라, 공정능력지수의 종류로는 규격, 치우침, 목표치 등과의 관계에 따라 Cp, Cpk, Cpm 등이 있다.

공정능력지수란 공정 능력(6 σ)과 규격의 폭과의 비율로서 공정이 규격에 맞는 제품을 생산할 수 있는 능력이 충분한지를 나타내는 지수이다. 이 공정능력 지수는 공정에서 생산되는 제품의 품질을 평가하는데 사용한다.[6]

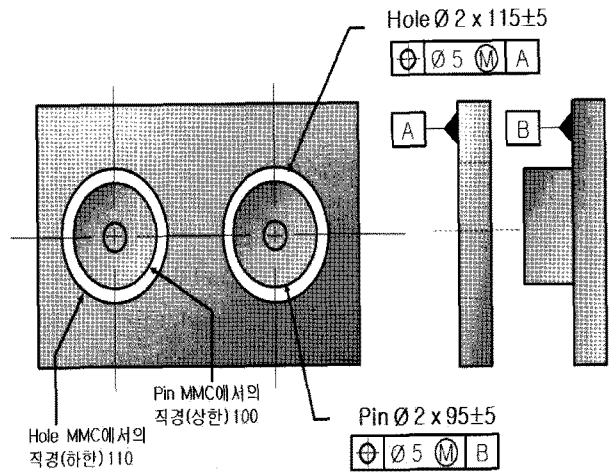
3. 연구내용 및 방법

3.1 연구수행 방법

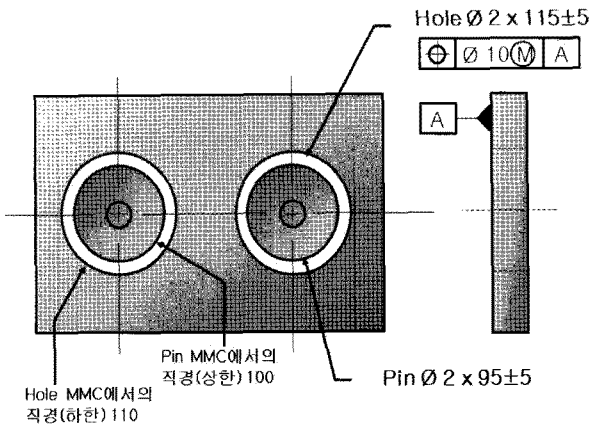
우선 시뮬레이션을 실시할 모델을 선정 한 후, 모델의 이론적 위치공차값을 계산해 본다. Hole과 Pin의 공정능력이 동일하다고 가정 후 공정능력의 변화에 따라 변하는 표준편차를 계산하여 시뮬레이션 입력값을 준비한다. 사전에 준비된 시뮬레이션 입력값을 분포로서 입력한 후 몬테카를로 시뮬레이션을 실시한다. 이렇게 해서 나온 결과값을 체결구 방식에 따른 위치공차값으로 할당하였다.



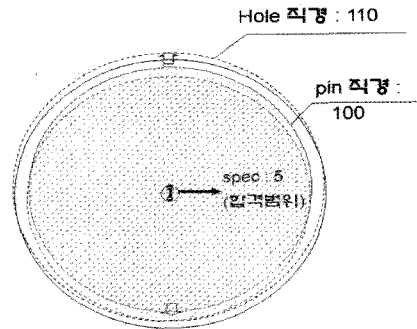
[그림 3-1] 연구수행 방법



[그림 3-3] 고정체결구 모델



[그림 3-2] 부동체결구 모델



고정체결구 부품의 위치공차 도출 식은 2.5.2에서 언급한 바와 같다.

3.3 아이디어 도출을 위한 공차할당 방법의 연구

3.3.1 기존의 전통적인 위치공차 할당방법 (이론적인 위치공차)

3.2 시뮬레이션 분석 모델 선정

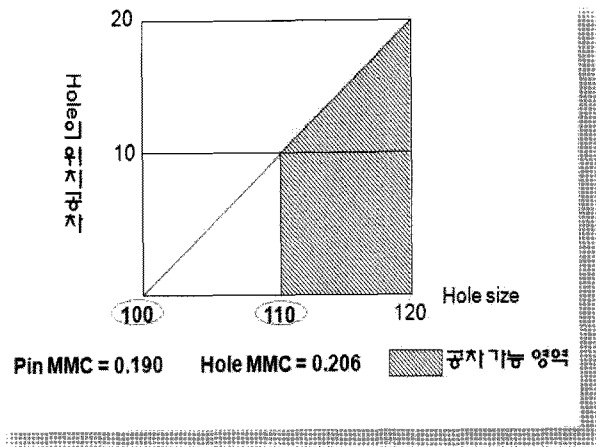
3.2.1 부동 체결구 방식

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

부동체결구 부품의 위치공차 도출 식은 2.5.1에서 언급한 바와 같다.

3.2.2 고정 체결구 방식

2개의 결합부품 중 하나가 고정된 상태로 결합되는 형태일 때의 체결구 방식을 말한다.



[그림 3-4] 이론적인 위치공차

[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 사이즈 공차는 도면에 명시된 값 내에 있어야 하며 진위치도 공차와는 별개로 점검되어야 한다. 결합부품간의 설계상 간격이 바로 도면에 명시되고 제조 시에 적용되는 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. 이를 보면 도대체 위치공차를 어떻게 설정해야 할지 모호한 점이 발생하게 된다. 개개의 부품마다 위치공차를 할당하여서 MMC를 벗어난 만큼 위치공차를 할당해 줄 수는 없을 것이다. 여기서 기존의 이론적인 위치공차 할당방법은 위치공차의 확실한 기준이 모호한 점을 발견하였다.

3.3.2 Zero Tolerance 위치공차 할당방법

[그림 3-5]을 보면 Hole의 위치공차는 Hole의 MMC size - Pin의 MMC size = 100 - 100 = 0이라는 것을 알 수 있다.

Zero Tolerance 방법에서도 동일한 원리가 적용되는데 다만 사이즈 치수에 적용된 모든 위치공차가 항상 "0"으로 고정된다는 점만 다르다. 이것은 물론, 실제로 제작된 형체는 MMC로부터 약간은 이탈되리라는 점을 가정하고 있는 것으로, 그렇게 이탈된 양만큼 "영" 위치공차에 가산되면 그것이 바로 실제 적용되는 위치공차가 된다.

여기에서 도면에 명시된 진위치도공차가 방위 및 진위치도 변화에만 사용될 수 있음에 반하여, 전통적인 진위치도공차방식에서는, 형체사이즈가 MMC를 이탈함에 따라 명시된 사이즈공차가 사이즈, 형상, 방위 및 진위도 변화에 사용될 수 있음을 강조한다. 즉, 형체사이즈가 MMC로부터 이탈하게 되면, 이 때의 사이즈공차 변화가 진위치도 공차에 가산될 수 있다는 것이다.

그러나 표준실행법에 의하면, 진위치도 변화의 미 사용분이 사이즈공차에 가산될 수는 없다.

3.3.3 공정능력을 고려한 위치공차할당 방법 (새롭게 제안한 방법)

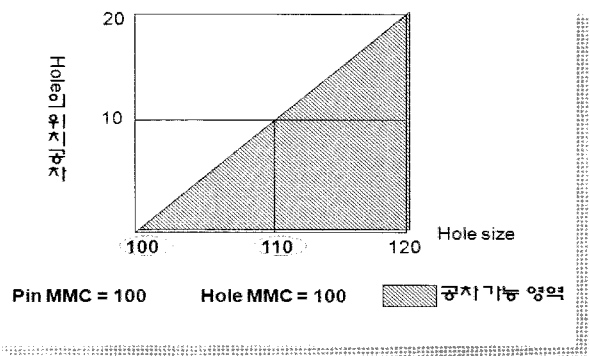
[그림 3-6]을 보면 Hole의 위치공차는 공정능력에 따라 변할 수 있다는 것을 알 수 있다. 공정능력에 따라 위치공차는 이론적인 가장 작은값을 가질 수 있고 반대로 더 증가할 수 있다. 즉, hole과 Pin의 공정능력이 높아질수록 위치공차를 증가시키는 것이 가능하다.

3.4 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 최적 위치공차값 도출

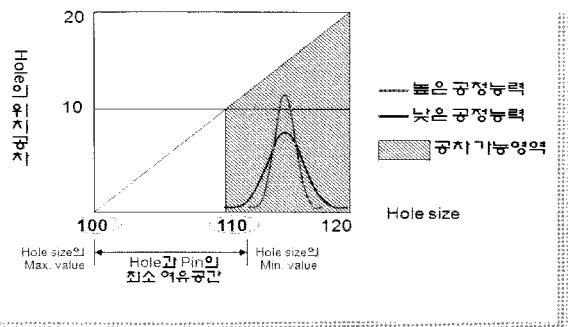
Hole과 Pin의 공정능력에 따라 위치공차는 달라진다.

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 사이즈 데이터를 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 생성시킬 수 있다. 이 때, 보다 효율적으로 데이터를 생성할 수 있도록 몬테카를로 시뮬레이션 프로그램의 하나인 Crystall Ball을 사용하였다.



[그림 3-5] Zero Tolerance 위치공차



[그림 3-6] 공정능력을 고려한 위치공차

3.4.1 선정 모델의 동적공차선도

위치공차를 분석하기 위한 모델로서 부동체결구와 고정체결구를 선정하였는데, 체결구의 공차선도는 아래의 [그림3-7], [그림3-8]과 같다.

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 가정 한 후 실험을 실시하였다.

많은 공차 문제들에서, 개개의 치수들은 정규분포를 가지는 것으로 가정한다. 이 가정은 공차들로 하여금 만족도에 부합하는 방법을 제공한다. 치수 x의 평균값 μ 는 설계공정에서 공칭치수(nominal demension)로써 주어진다. 그러나 표준편차(standard deviation) σ 는 각각의 제조공정에서 얻어진 정밀도에 따라 선택된다. 결론적으로, 표준편차 σ 는 공차들 t의 함수이다. 대량 생산에서, 단일 치수의 공차는 만약 치수들의 99.73%가 정밀도 안에 있다면 충분히 크게 고려되어진다. 정규분포된 임의 변수들에서, 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 입력값의 계산

Hole과 Pin의 공정능력은 동일하고, 사이즈는 정규분포를 따른다고 가정하고 입력값들을 계산하였다.

Hole size: 110 ~120 (Range = 10)

Pin size: 90 ~100 (Range = 10)

Hole과 Pin은 정규분포를 따른다고 가정하였기 때문에 size의 평균은 각각 115, 95이다. 그리고 1시그마수준에서 6시그마수준까지의 공정능력에 해당하는 표준편차를 계산하였다. 본 논문에서는 특정 공정을 대상으로 실험을 한 것이 아니라 임의의 모델을 선정하여 공정능력에 따른 최적 위치공차를 할당하지는 취지이기 때문에 공정능력을 통하여 각 생산공정의 표준편차를 계산하였다. 만약 해당 공정의 표준편차를 알고 있다면 그 표준편차를 직접 입력값으로 사용하면 될 것이다.

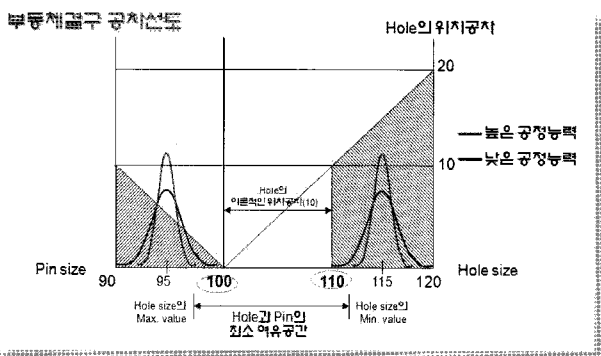
각 공정능력에 따른 표준편차를 구한 방법은 아래와 같다.

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

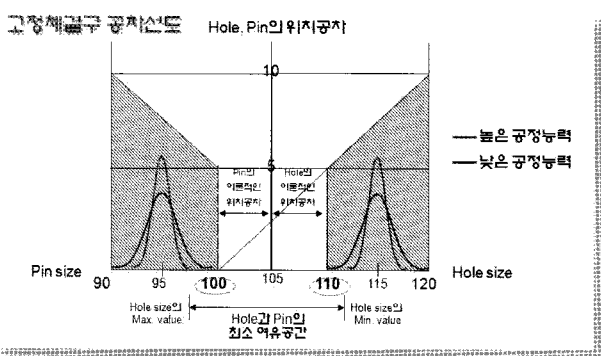
<표 3-1> 공정능력에 해당하는 표준편차의 계산

시그마수준	Cp	Hole, Pin의 size 범위 (USL - LSL)	표준편차
1.0	0.33	10	5.01
2.0	0.67	10	2.49
3.0	1.00	10	1.67
4.0	1.33	10	1.25
5.0	1.67	10	1
6.0	2.00	10	0.83

여기서 보통 Cp(공정능력)은 1.33이상이 되어야 공정이 안정적이라고 할 수 있다.

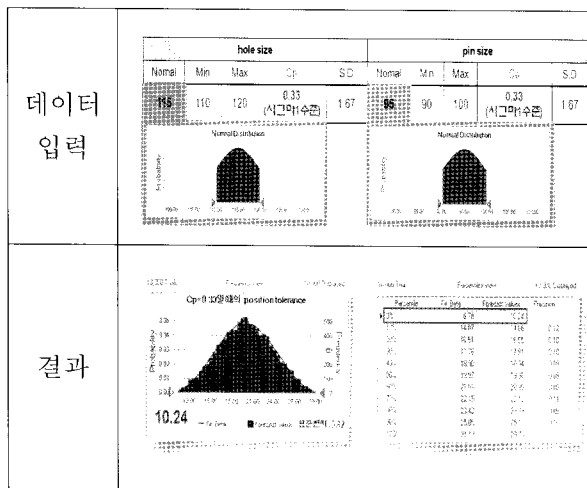


[그림 3-7] 부동체결구 공차선도



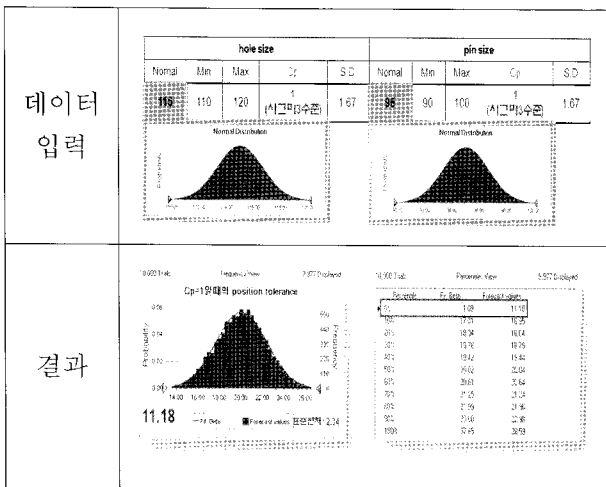
[그림 3-8] 고정체결구 공차선도

▲ 시그마1수준, Cp=0.33



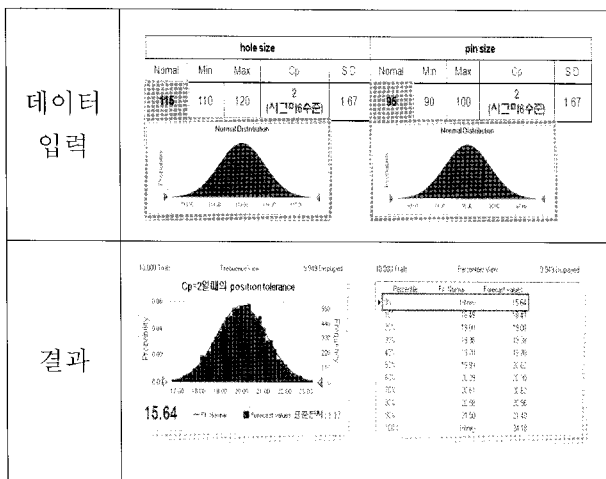
Hole과 Pin사이 여유의 최소값 : 10.24

▲ 시그마3수준, Cp=1



Hole과 Pin사이 여유의 최소값 : 11.18

▲ 시그마6수준, Cp=2



Hole과 Pin사이 여유의 최소값 : 15.64

3.4.3 데이터 입력 / 예비실험

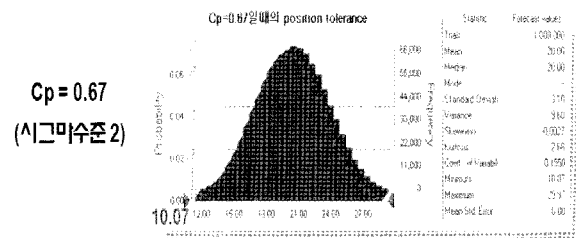
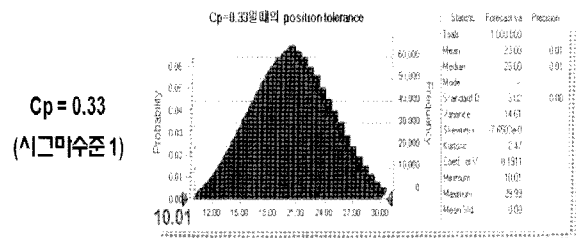
우선 시그마수준1, 시그마수준3, 시그마수준6에서의 Hole과 Pin사이 변화로 Hole과 Pin사이의 여유를 계산해 보았다. 이렇게 Hole과 Pin의 여유도 정규분포로 나타나게 되는데 이렇게 계산된 여유중 하나의 값을 위치공차로 설정한다고 한다면, 실제 그보다 작은 여유제품이 생산되었을 때에는 조립이 불가능할 경우가 생길 수 있을 것이다. 따라서 시뮬레이션 결과값(Hole size - Pin size)중 최소값을 위치공차로 사용하게 되면 위치공차로 인한 불량은 없을 것이다. 이 결과 값들을 볼 때, 공정능력이 높아질수록 불량없이 이론적인 위치공차값보다 더욱 많은 공차를 위치공차로 할당할 수 있을 것이라는 것을 입증하였다. 이에 공정능력을 세분화 하고 실행횟수도 증가시켜 시뮬레이션을 실행하였다.

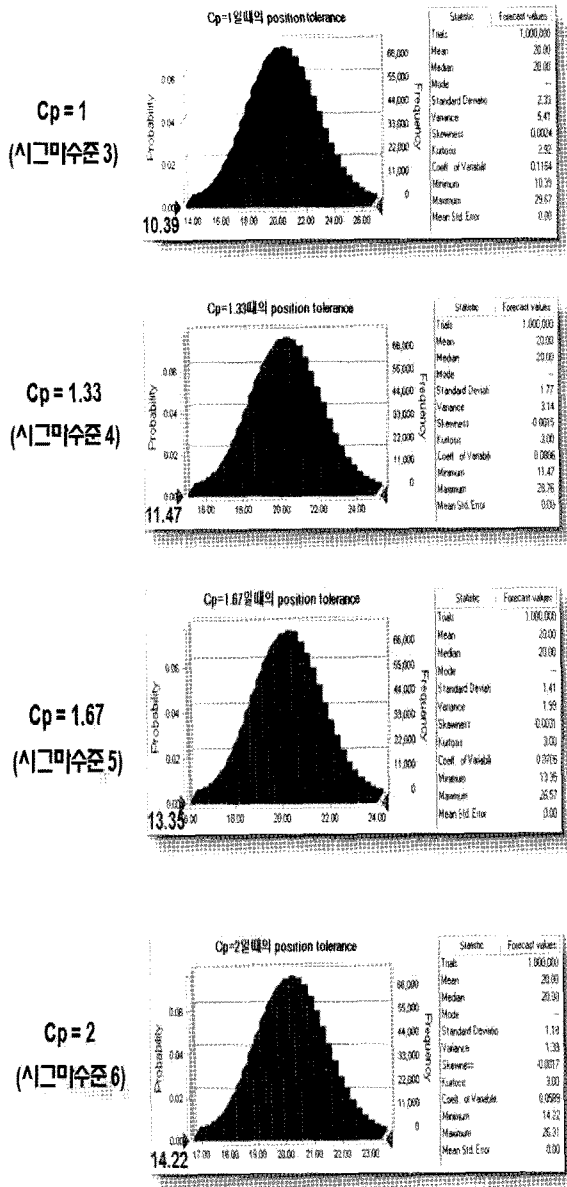
4. 결과 및 분석

4.1 공정능력에 따른 최적 위치공차 도출

각 시그마수준 1 ~ 6 까지의 Pin과 Hole사이의 여유를 계산 후 가장 작은 값을 위치공차로 할당한다면 위치공차로 인해 불량이 발생하지 않는 최적의 위치공차를 도출하였다. 이 때 각 조건마다의 시행횟수는 백만 번으로 하였다.

몬테카를로 시뮬레이션 결과를 보면 Hole과 Pin사이의 여유값들 또한 정규분포로 나타나는데, 실제 생산한 부품의 위치공차가 시뮬레이션 결과의 분포 내에 있다는 것은 불량확률이 존재한다는 것을 의미한다.





[그림 3-9] 몬테카를로 시뮬레이션 결과

[그림 3-9]을 보면 공정능력(Cp)이 0.33 ~1에서는 공정능력이 좋아질수록 위치공차의 증가가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 그 이유는, 보통 공정능력은 1.33 이상이 되어야 안정되었다고 할 수 있다. 공정능력이 1일 때까지는 공정능력이 안정화되지 못하여 산포가 크기 때문에 Hole과 Pin의 size가 균일하지 못한 이유로 인해 위치공차가 크게 증가하지 못하는 것이다. 하지만 공정능력이 1.33이상이 되면 위치공차의 증가는 두드러지게 되며 “6시그마 수준”인 공정능력(Cp)이 2가 되었을 때에는 위치공차가 10에서 14.22로 42%이상 증가한 것을 확인할 수 있다. 여기서, 생산능력을 고려한 최적의 위치공차를 도출하는 과정에서 6시그마 품질관리의 중요성 또한 확인할 수 있다.

<표 3-2> 시뮬레이션 최종 결과(Trial = 백만번)

Hole과 Pin의 시그마수준	Hole과 Pin의 공정능력	부동체결구 Hole의 위치공차	고정체결구 Hole, Pin의 위치공차	비고
1	0.3	10.01	5.005	시뮬레이션으로 도출된 위치공차는 위치공차로 인해 만개의 제품 한 개도 불량이었을 만큼의 공차할당량임
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	

위치공차 결정 시, 시뮬레이션 결과값(Hole과 Pin의 차이)의 평균값을 할당하는 것이 아니라 최소값을 최적 위치공차값으로 결정하여야 한다. 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.

위치공차는 이상적인 값이 “0”이다. 실제 공정에서 위치공차를 측정해보면 위치공차는 Target에서 떨어진 거리를 표현한 것이기 때문에 음수값은 나오지 않는다.

그리고 Target을 중심으로 입체적인 정규분포형태를 띠는 것이다. 실제 공정에서 Pin과 Hole Size의 공정능력에 따라 공정능력이 높은 만큼 위치공차 Spec을 높여준다면 Hole과 Pin의 위치공차로 인한 불량은 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 식스시그마 활동에 대한 근거 또한 확인 할 수 있었다.

5. 결 론

설계자는 공차 설정 시 고객의 요구, 제조자의 프로세스 능력, 가공기준 및 가공조건, 가공방법, 제품의 용도 및 특성을 고려해야 한다. 특히 Hole과 Pin의 경우 공정능력을 고려하여 위치공차를 설정해야 할 것이다.

현재 도면에 사용하고 있는 전통적인 이론적 위치공차값은 Hole과 Pin이 모두 MMC인 조립이 최악의 상태일 경우의 여유를 위치공차로 할당한 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 위치

공차를 이론적인 위치공차보다 더욱 큰 위치공차 할당을 통하여 수율을 증가시킬 수 있다.

본 연구의 결과로써, 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.

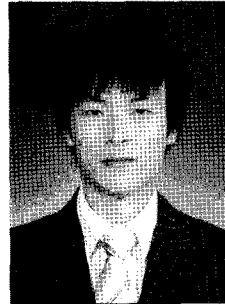
6. 참 고 문 헌

- [1] 강현장, MMC에서의 생산을 고려한 공차의 최적화, 금오공과대학교, 2003
- [2] 김영남, Virtual Method를 사용한 Stack Analysis 연구, 금오공과대학교, 2001
- [3] 박경호, "기구설계에서 공차 할당에 관한 연구", 아주대학교, 1996
- [4] 송지복 외 1명, 정밀 기계설계 제도법(GEOMETRICS II), 성안당, 1999
- [5] 신홍갑, "品質頸管을 위한 6시그마와 小集團 活動 適用事例 研究", 금오공과대학교, 2002년, pp.7~8
- [6] 이도경, "공정능력지수 개발", 금오공과대학교, 1999년, KNU T Research Journal pp.153~154
- [7] 최호선, "신공차론", 성안당, 2001
- [8] 최호선, ANSI, ISO, KS 규격에 의한 기하공차론, 성안당, 2000
- [9] Alex krulikowski, A. "Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing", Effective Training inc, 1998
- [10] Alex Krulikowski, A. Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing, video Training workbook, 1998, Effective Training Inc.
- [11] Alex Krulikowski, A Geometric Tolerancing Application Workbook-student version, pp6-16 ~ 6-21, 1994, Effective Training Inc.

- [12] Alex Krulikowski, A. Advanced Concept of GD&T, 1999, Effective Training Inc,
- [13] Lowell W.Foster, GEO_METRICS II The Application of Geometric Tolerance Techniques, 1983
- [14] Lowell W.Foster, GEO_METRICS III The Application of Geometric Tolerance Techniques, 1994

저 자 소 개

이 상 현



금오공과대학교 산업시스템공학과 졸업, 금오공과대학교 산업시스템공학과 대학원 졸업, 현재 동우화인켐 재직 중.

주소:경북 구미시 도량1동 536-1번지 화목 빌라 402호

이 태 근



경북대 물리학과, 경북대학교 물리학과 대학원 졸업, 국립 금오공과대학 산업시스템공학과 박사 과정 수료, 현재 LG.Philips Displays 신사업부문 개발 그룹장(부장) 재직 중.

주소: 경북 구미시 형곡2동 170-1 삼우타운 904호

장 성 호



현재 금오공과대학교 산업시스템 전공 교수로 재직, 한양대학교-정밀기계공학, Univ. of Michigan(공학석사-기계공학,산업공학), Univ. of Michigan(공학박사-산업공학)

주소: 구미시 도량동 파크맨션 104/1203