

# 공학공차설계와 6시그마 공차설계를 통합한 공차설계 적용 사례 - 광학 디스크 드라이브 스피들 모터 -

김용태 \* · 이상복 \*\*†

\* LG이노텍 전장부품사업 개발팀

\*\* 서경대학교 산업공학과

## Case of Integrated tolerance design process by Engineering tolerance design and 6 Sigma Tolerance Design - Spindle Motor For Optical Disc Drive -

Yongtae Kim \* · Sangbok Ree \*\*†

\* LG Innotek Automotive Components & Electronics Business Unit Development Team

\*\* Dept. of Industrial Managemant System Engineering, Seokyeong University

### ABSTRACT

**Purpose:** The purpose of this paper is integrated tolerance design process by advantages of engineering design and 6 sigma statistical tolerances design.

**Methods:** Integrated tolerance design process can determine the goals by using engineer's experience and clarify tolerance by 6 Sigma statistical methods. Integrated design process can be applied by using non-linear simulations.

**Results:** We applied integrated design process to the optical disc drive spindle motor and get good result.

**Conclusion:** If this method is applied test method in the early stages of development, then Design can be reduced development time and cost.

**Key Words:** Integrated Tolerance Design Process, Engineering Design, 6 Sigma Statistical Tolerances Design, Optical Disc Drive Spindle Motor

● Received 31 July 2014, 1st revised 14 October 2014, accepted 15 October 2014

† Corresponding Author(sbree@skuniv.ac.kr)

© 2014, The Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

\* 본 연구는 2012학년도 서경대학교 교내연구비 지원에 의하여 이루어졌음

# 1. 서론

기계 가공시 모든 부품은 기준 치수로 가공을 할 수 없기 때문에 허용 가능한 최대 치수와 최소 치수를 설정한다. 공차는 부품의 가공(혹은 조립) 시 목표 값으로부터 벗어나는 것을 허용할 수 있는 값이다. 2개 이상의 부품이 조립되어서 요구된 기능을 수행 할 때 허용되는 수치이다.

공차설계란 설계자가 목표로 하는 기준치수와 공차의 최대 치수와 최소 치수를 설계하는 것이다. 제조 현장에서 공차설계는 엔지니어의 경험과 기술에 의존하여 개별 부품의 기본치수와 허용 값을 설정해서 기하공차로 나타낸다. 6시그마 기법의 공차설계는 부품이 갖는 산포를 통계적으로 해석하여 제품의 품질을 높이기 위한 공차를 할당하는 통계적인 기법이다.

다구찌 기법은 현장의 잡음을 공차 설계시에 반영할 수 있는 이론을 제시하였다. 이러한 기법을 적용하는 문제는 이번 연구에선 반영하지 않았다(Ree, 2001, 2003, 2009, 2013).

본 연구에서 엔지니어링 분야의 공차설계와 6시그마 통계적 공차설계 기법의 장점을 통합한 공차설계 방법론을 제시하였다.

제시한 통합 공차설계 방법 순서는 상위레벨인 시스템과 하위 레벨인 부품과의 관계를 정의하고, 평가 방법을 사전에 준비한다. 이를 기반으로 최적 공차설계를 수행한다. 마지막 단계에서 환경을 고려한 공차를 최적화하여 현장 적용여부를 검토한다.

본 논문에서 제시한 통합 공차설계 방법론은 발표된 사례가 없다. 본 연구에서 제시한 통합 공차설계 방법을 광학 디스크 드라이브용 스피들 모터 공차설계에 적용하여 좋은 결과를 얻었다.

## 2. 공학설계와 공차설계

### 2.1 공학설계

미국 공학교육 인증원과 한국 공학교육 인증원은 공학설계는 명시된 목적을 달성하기 위하여 현실적 제한조건을 반영해서 시스템과 공정을 설계하는 것이라고 정의하였다(Accreditation Board for Engineering Education of Korea, 2005).

딤(Dym, C. L, 1994)은 이전의 설계프로세스가 가지고 있는 단순성과 추상적인 한계를 극복하기 위하여 5단계의 설계 프로세스 모형을 제안하였다. 각 단계에서 실행해야 할 활동과 출력물은 다음단계의 입력물이 된다<Fig. 1>.

① 문제정의 단계(Problem Definition)는 기능, 형태, 법적 요구 사항 등의 입력물로 목적을 명확히 하고 사용자의 요구사항을 기록한다.

② 개념설계 단계(Concept Design)는 후보 대안설계 개념을 도출하고 기획한다. 고객의 요구사항과 기술적 배경을 바탕으로 제품의 세부기능과 설계자의 업무 범위를 결정할 수 있게 한다.

③ 예비설계 단계(Preliminary Design)는 설계개념과 기획의 주요 속성을 인지하는 단계로 설계 모형 및 분석과 개념설계, 시험 및 평가활동을 하면서 제조 가능성과 고객 요구에 대한 만족도를 평가하고 시제품을 통해 목표의 충족 여부를 확인한다.

④ 상세 설계 단계(Detail Design)는 최종설계를 선택하여 최적화한다.

⑤ 설계의사소통 단계(Design Communication)는 제조명세와 타당성을 기록하고 완성된 설계의 문서화 작업을 한다. 고객용 최종보고서도 작성한다.

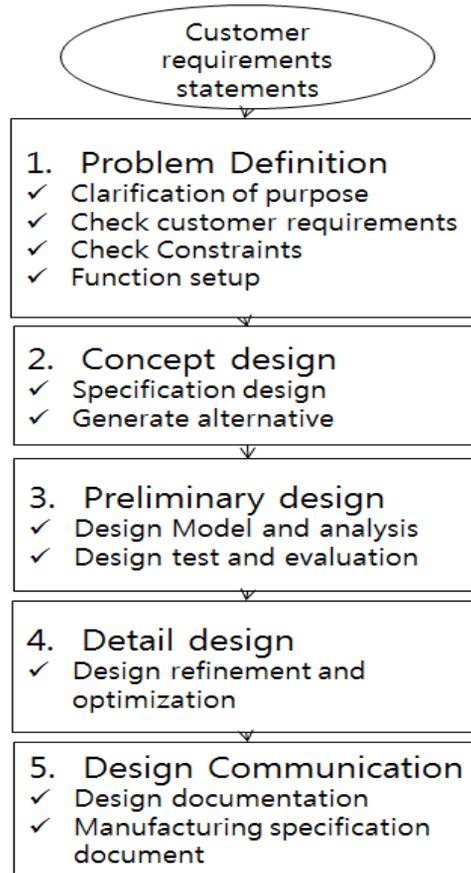


Figure 1. Step 5 of Dym's Design Process

## 2.2 엔지니어링 공차설계

엔지니어링 공차설계는 공학설계의 예비설계 단계에서 확인된 설계요소를 기반으로 부품 또는 제품이 허용할 수 있는 최적의 한계를 찾아가는 과정이다.

<Table 1> 은 공학분야에서 사용하는 공차의 종류와 설명이다. 치수공차는 부품의 기준치수에서 기능과 제작의 용이성 그리고 경제성을 고려한 허용 가능한 오차 범위이다.

Table 1. Kind of Tolerance

Tolerance	Description	Remarks
Dimensional Tolerance	- 2-dimensional regulation - Length, Thickness, Height, Diameter	Dimensional Tolerance, Fit Tolerance
Shape Tolerance	- 3-dimensional regulation - Straightness, Flatness, Roundness, Cylindricity, Profile of a line - Applied to a single shape	Geometric tolerance

Orientation Tolerance	- 3-dimensional regulation - Perpendicularity, Parallelism, Angularity - Applied to relation shape
Locational Tolerance	- 3-dimensional regulation - True position, Symmetry, Concentricity - Applied to Axial-Line, Center Area
Run-out Tolerance	- Shape Tolerance와 Locational Tolerance composed parts shape circumference Run-out

(Human Resource Development Service of Korea. 2012)

기하공차는 형체가 이론적으로 정확한 형상에서 벗어난 정도를 허용하는 값이다. 이는 도면에서 규정된 치수공차와 주기항목의 해석 불일치로 발생하는 과소·과잉공차로 인한 설계원가를 줄이기 위한 국제 표준규격이다.

현재 사용하고 있는 기하공차 기호는 2차 대전 전 영국에서 사용하기 시작하였고 1956년 미국 표준협회(ANSI)의 전신인 미국 표준연합(ASA)에서 최초로 기하학적 형상과 위치공차 적용의 표준을 제정하였다.

기하공차의 역사는 다음과 같다.

- (a) 1956년 ASA에서 기하학적 형상과 위치공차 적용예에 대한 표준 발행.
- (b) 1966년 ANSI Y 14.5 치수 및 공차표준 발행
- (c) 1969년 ISO R 1101 형상과 위치공차 파트1 제정(ANSI Y 14.5기반)
- (d) 1973년 ANSI Y 14.5 길이 표준규격에 인치(Inch) 사용
- (e) 1982년 ANSI Y 14.5 길이 표준규격에 미터(Metric) 사용
- (f) 1986년 한국도 KS 규격으로 채택

KS B 0425-1986 : 기하편차의 정의 및 표시

KS B 0242-1986 : 최대 공차 실체 방식

KS B 0608-1987 : 기하공차의 표시방법

KS B 0243-1987 : 기하공차를 위한 데이터

KS B 0146-1992 : 개별적 공차의 지시가 없는 형체에 대한 기하공차

KS B 0147-1992 : 제도-공차 표시방식의 기본원칙

KS B 0418-1992 : 제도-기하공차 표시방식(위치도 공차방식)

기하공차는 대부분의 국가에서 표준으로 채택 했으며 규제와 표기방법은 각 규격별로 상이하나 우리나라는 1986년 ISO 규격을 국가 표준규격으로 채택하여 산업계에 통용되고 있다.

엔지니어링 공차설계를 끼워맞춤 공차에 적용하면 <Fig. 2>과 같다. 부품기능을 정의하고, IT등급(ISO Tolerance Class)에 따른 부품 정밀도, 축/구멍에 기준한 허용공차를 부여한다. 허용공차는 KS 규격에 있는 허용공차를 이용한다. 마지막으로 결합 방법에 맞는 적절한 치수공차를 선정한다.

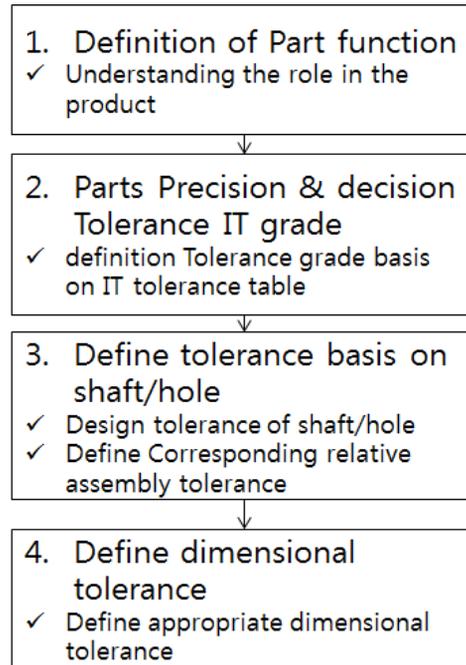


Figure 2. Engineering Tolerance Design Process of Fit

### 2.3 6시그마 공차 설계 개요

6시그마는 제품 및 서비스 개발에 통계적 공차해석 방법을 사용한다(Design For Six Sigma). 엔지니어링 공차설계가 단순히 비용 중심의 제품설계 방법인 반면 6시그마 공차 설계는 통계적 기법으로 최종 품질을 예측하고 핵심인자를 파악하여 최적화를 통해 설계목표를 달성하는 방법이다.

<Table 2>는 6시그마에서 활용하는 공차 설계 방법들 이다.

Table 2. Kind of 6 Sigma Tolerance Design

Large classification	Middle classification	detail classification	description
Worst Case	Min/Max		Using the limit tolerance of parts.
Statistical Tolerance Analysis	Linear Tolerance Analysis	RSS (Root Sum of Square)	Using the standard deviation of parts.
		DRSS (Dynamic Root Sum of Square)	Using the standard deviation of parts and the process fluctuation.
	Nonlinear Tolerance Analysis	Monte Carlo Simulation	Can be used in the continuous distribution, which cab ve use normal and non-normal.
		Delta Method	sensibility analysis method

최악(Worst Case) 방법은 기여부품들의 극한 공차를 이용한 공차설계 방법으로 초기 설계단계에서 추정 값을 분석할 때 주로 사용한다. 이 방법은 모든 부품의 한계 치수를 고려하기 때문에 허용차를 최대한 작게 가져감으로 비용이 증가하는 요인이 될 수 있다. Evans(1975)는 기능적으로 작동되지 않을 확률이 ‘영’인 상태에서 제품이나 기계의 구성 부품들에 공차를 할당해야 한다고 주장하였다. n개의 부품으로 이루어진 Worst Case 공차분석 방법은 일반적인 공차해석 모델  $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 의 함수식에서 테일러급수 전개를 통해 조립품의 치수공차  $T_y$ 와 기준치수  $N_y$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_y = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| t_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| t_2 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_3} \right| t_3 + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| t_n \tag{Equation 1}$$

$$N_y \simeq \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| x_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| x_2 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_3} \right| x_3 + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| x_n \tag{Equation 2}$$

통계적 공차분석은 표준편차를 사용하는 선형공차분석과 비정규분포 경우에 사용하는 비선형 공차분석이 있다. RSS(Root Sum of Square)방법은 최악 공차분석에 비해 합리적인 공차설계 방법이다. 이 방법은 예비적 설계 행위를 통해 얻은 기여부품들의 독립적이며 표준편차를 이용한 통계적 공차분석 방법이며, 모든 부품은 정규분포를 따른다는 전제를 갖는다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad -\infty < x < \infty, \quad \sigma > 0 \tag{Equation 3}$$

또한, 이를 전제로 부품들이 독립 한다는 조건에서 조립공차  $T_y$ 는 다음과 같다.

$$T_y = \sqrt{\left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| t_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| t_2 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_3} \right| t_3 + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| t_n} \tag{Equation 4}$$

여기서 조립품의 편차( $\sigma_y$ )는 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 B_i^2} \quad (B_i : i\text{번째 항의 계수}) \tag{Equation 5}$$

DRSS(Dynamic Root Sum of Square)방법은 안정된 공정에서 설비의 마모 부품의 변화요인을 고려하여 중심의 자연적 이동을 고려한 공차설계 방법이다. 이와 관련된 연구는 Bender(1962년), Gilson(1951년)의 평균치 이동을 설명 하였고, Chase와 Greenwood (1987년)은 평균 이동 모델의 추정에서 중심의 이동을 고려한 모델을 제시하였으며, Harry와 Stewart(1988년)는 공정이 관리 상태에 있다고 해도 공정의 평균치는 자연적인 변화에 의해 목표치로부터 좌우로  $1.5\sigma$ 만큼 이동하여 치우침이 발생된다고 주장하였다.

DRSS 공차분석 방법은  $\bar{X}$ 를 공정의 평균치, M을 규격의 중심치 라고 했을 때 6시그마 관련 장기공정능력은 다음과 같이 정리된다.

$$C_{pk} = (1 - k)C_p \quad (k \text{는 규격의 중심에서 치우침 정도}) \tag{Equation 6}$$

$$k = \frac{|\bar{X} - M|}{(USL - LSL)/2}, C_{pk} = \min[C_{PU}, C_{PL}] \quad \text{Equation 7}$$

$$C_{pk} = \min\left[\frac{USL - \bar{X}}{3\sigma}, \frac{\bar{X} - LSL}{3\sigma}\right] \quad \text{Equation 8}$$

$$T_{ol} = USL - M, M - LSL \quad (\text{한쪽 규격})$$

이를 기준으로 단기 공정능력은 한쪽 규격에서  $3\sigma_{ST}$ 를 나눈 값이 된다.

$$C_p = \frac{T_{ol}}{3\sigma_{st}} \rightarrow \sigma_{st} = \frac{T_{ol}}{3C_p} \quad \text{Equation 9}$$

$$C_{pk} = \frac{T_{ol} - 1.5\sigma}{3\sigma_{lt}} \quad \text{Equation 10}$$

또한 평균치가 한쪽으로 치우침을 고려하면 다음과 같다.

$$C_{pk} = \frac{T_{ol}}{\sigma_{adj}} \quad \text{Equation 11}$$

$$\sigma_{adj} = \frac{T_{ol}}{3(1-k)C_p} = \frac{T_{ol}}{3(1-k)\left(\frac{T_{ol}}{3\sigma_{st}}\right)} = \frac{\sigma_{st}}{(1-k)} \quad \text{Equation 12}$$

### 3. 통합 공차설계 프로세스 제안

#### 3.1 기존 공차설계의 한계

엔지니어링 공차설계는 기술 데이터와 설계자의 경험 그리고 설계 규격의 활용도에 따라 설계품질이 결정되며, 설계 단계에서 최종 제품의 품질을 예측하지 못해 제품설계 후 개선을 위해 시간과 비용이 발생 되는 문제가 있다.

6시그마의 통계적 공차분석 방법은 개발단계에서 공차해석과 공차할당을 통해 제품 품질을 확보할 수 있는 장점은 있으나 모든 부품이 정규분포를 따르고 독립적이어야 하는 제약이 있고 통계적 방법을 활용해야 하는 어려움이 있다.

#### 3.2 통합 공차설계 프로세스 제시

본 연구에서는 엔지니어링 공차설계와 6시그마 공차설계의 장점을 취하여 <Fig. 3>와 같은 통합 공차설계 프로세스를 제시한다. 기존 공차설계를 체계화하고, 단계 3과 단계 4에 통계적 기법을 적용하고, 평가를 세밀히 한 것이다.

새로운 통합 공차설계 프로세스의 특징은 설계시스템의 목표기능을 명확히 정의하고 평가 기준을 설정하는 제품의 기능정의를 시작으로 최종단계에서 설계 목표 달성여부를 평가하는 6단계로 구성하였으며 각 단계별 공차설계 활동을 구체화하였다.

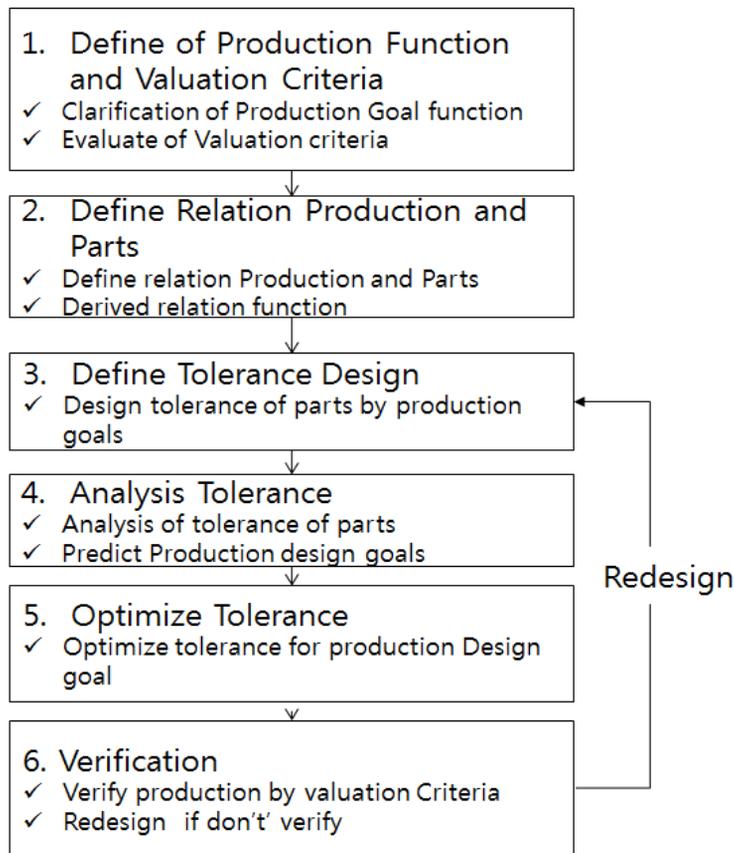


Figure 3. Integrated Tolerance Design Process

- 1) 1단계: 제품기능 정의 및 평가기준 작성(Define of Production Function and Valuation Criteria)  
제품이 수행하는 기능적인 역할을 정확히 정의하여, 환경/안전/법규를 만족하는 최종제품의 설계목표 달성여부를 확인하는 평가 기준을 결정한다.  
평가기준에는 5W1H 원칙에 맞추어 시험계획을 수립하고 구체적인 시험 평가 일정을 명시한다.
- 2) 2단계: 제품과 부품의 관계 정의(Define Relation Production and Parts)  
제품과 부품의 관계는 이전의 데이터를 활용하여 수치적으로 상호 관계를 파악하고 부품의 설계 공차가 제품에 미치는 영향을 수식으로 정의한다. 경험있는 설계자의 참여가 중요하다.
- 3) 3단계: 공차설계(Define Tolerance Design)  
각 부품의 기준치수와 허용공차는 기술규격 또는 설계 편람을 활용하여 부품의 공차를 초기 설정한다. 엔지니어링 공차설계의 기하공차 또는 끼워맞춤 공차의 범위를 결정하며 이전 단계에서 도출된 수식을 기준으로 각 단위 부품의

공차를 잠정적으로 결정한다.

#### 4) 4단계: 공차분석(Analysis Tolerance)

이전 단계에서 잠정 결정된 부품의 허용공차를 통해 제품의 목표품질 달성가능성을 예측한다. 통계적 공차해석 방법(몬테카를로 기법)을 이용하여 제품의 성능을 예측하고, 현 수준의 문제점을 정확히 파악한다.

#### 5) 5단계: 공차 최적화 (Optimize Tolerance)

전 단계에서 부품의 허용공차를 좁게 설정하면 개발비용이 증가하고 기술적으로 어려움에 봉착할 수 있다. 본 단계에서는 현실적으로 요구하는 제품이 되게 공차를 조정한다. 때로는 재설계를 통해 근본적인 해결책을 찾아야 한다.

#### 6) 6단계: 평가 검증(Verification)

이전 단계에서 도출된 설계 결과를 도면화하고 시제품을 만들어서 1단계에서 수립한 평가 기준으로 제품의 성능과 요구 규격의 만족 여부를 확인하는 단계이며 최종 부품의 규격을 확정한다.

시험 결과에 따라 조립 구조의 재설계, 부품 공차의 조정들이 이루어진다.

본 설계는 설계에 참여한 인원이 모두 진과정에 참석하여 결과를 공유하고 관련 자료는 문서화하여 기술 데이터로 확보한다.

## 4. 스피들 모터에 통합 공차설계 적용 사례

### 4.1 광학 디스크용 스피들 모터 개요

컴퓨터에 장착하는 광학 디스크 장치(Optical Disc Drive)는 <Fig 4> 와 같이 픽업 부품과 스피들 모터로 구성되며 픽업에서 발생하는 레이저를 이용하여 CD, DVD등의 디스크에 자료를 기록하고 읽으며 스피들 모터는 디스크를 회전시켜주는 역할을 한다.



Figure 4. Internal Structure of Optical Disc Drive

스핀들 모터에서 디스크를 고정하는 부품 구성은 <Fig 5>와 같이 ㉠클램프 플레이트, ㉡마그네트, ㉢클램프, ㉣턴테이블 그리고 전기에너지를 받아 기계적 회전 동작으로 변환되는 모터로 구성되어 있다.

부품의 동작은 디스크가 턴테이블에 안착이 되면 광학 디스크 저장장치의 기구적 조합에 의해 상단의 클램프가 내려오고 마그네트와 거리가 좁아지면 지면 마그네트에 발생하는 자력에 의해 잡아 당겨주면서 디스크를 고정하게 된다.

클램프 플레이트는 마그네트에서 발생하는 자력의 누설을 방지하고 집중 시켜주는 역할을 한다.

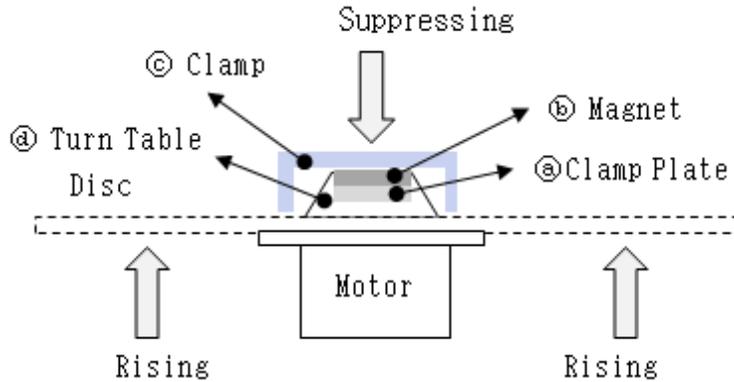


Figure 5. Motion and Parts of Spindle Motor

#### 4.2 문제점 및 공차설계 범위

이전의 스핀들 모터에서, 디스크 장착을 위한 고정부의 결합구조는 사출성형부품의 턴테이블에 세 개의 돌기가 형성되고 클램프 플레이트를 결합한 후 초음파로 돌기를 용착하여 고정하는 방식이었다.

<Fig. 6>은 턴테이블과 클램프 플레이트 조립구조로 초음파 용착 톨의 마모와 돌기의 높이 차이로 인해 품질이 불균일 하고 가장 높은 돌기에서 파손되거나 균열이 생기는 신뢰성 문제가 유발될 가능성이 높다.

또한 변화를 지속적으로 점검하고 용착 형상을 확인해야 하는 관리적인 손실로 품질 비용이 증가하였다.

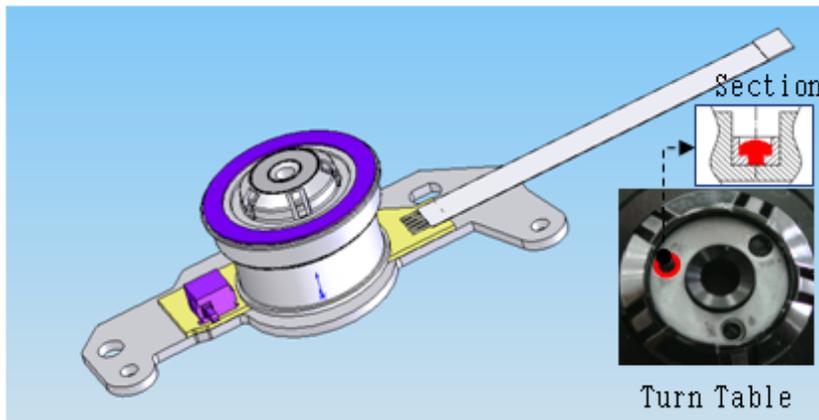


Figure 6. Turn Table and Clamp Plate Assemble Structure

이 문제점을 근본적으로 개선하기 위해 초음파 용착 방법을 사용하지 않고 부품을 조립하는 구조 설계가 필요하여 <Fig. 7>과 같이 클립 체결식 조립 구조를 채택하기로 결정하였다.

이 구조의 원리는 턴테이블에 클립을 형성하고 클램프 플레이트에는 클립에 고정 될 수 있는 크로우라는 형상을 넣어 클램프 플레이트를 턴테이블에 끼워 넣고 회전시키면 크로우가 클립의 하단에 끼워져 고정되는 구조이다.

설계구조의 장점은 별도의 조립 장비가 필요 없어 투자 및 유지비용을 줄일 수 있고 균일한 품질을 제공할 수 있다.

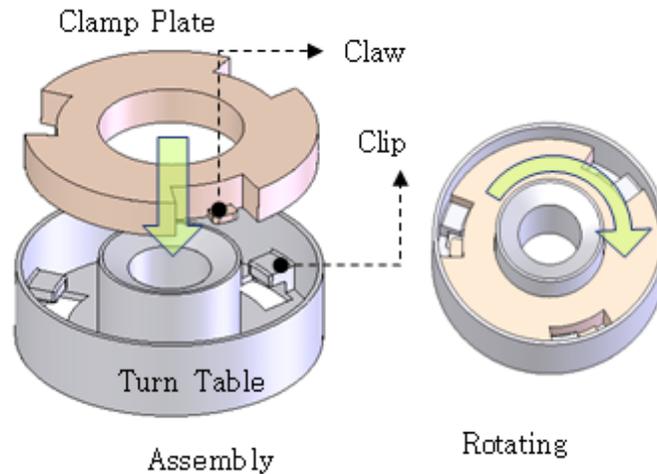


Figure 7. New Design Structure

턴테이블의 클립과 클램프 플레이트의 크로우의 조립 공차설계에 대해 본 연구에서 제시한 통합 공차설계 프로세스를 적용하여 프로세스의 유효성을 확인하고 공차설계 프로세스로 적용하였다.

### 4.3 스피들 모터의 통합 공차설계 적용

#### 단계 1: 제품 기능전개

스피들 모터 구조에서 새롭게 설계되는 클립과 크로우의 기능정의와 평가 기준에 대해서는 다음과 같이 정의하였다.

- 기능 정의: 고속 회전 시 클립과 크로우가 풀림이 없어야 하며 마그네트의 자력이 누설되지 않는 구조일 것.
- 평가 기준: 디스크의 이탈 방지력 Min 360gf  
(설계 규격 기준)

신뢰성시험은 탈착 내구성 시험 30,000회 이상 만족 할 것.

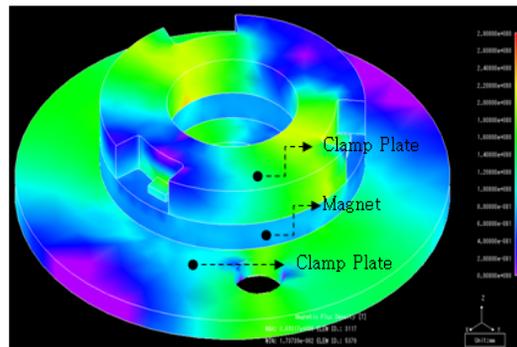
조립구조 변경에 따른 부품 공차설계 후 평가를 위해 <Table 3>과 같이 시험평가 방법과 기준을 설정하여 시험을 위한 측정 장비를 일정에 맞추어 준비하였다.

**Table 3.** Test and Evaluation Methods

classification	contents	test purpose and methods	criteria
Reliability Test	On-Off Test	Purpose: Product Warranty Method :300,000회 On-Off Test (30,000 Cycle)	satisfy standard
	Environment Test	Purpose : Coherence Decline By Component Stress Method :High Temperature & Humidity Test	satisfy standard
		Purpose : Coherence Decline By Component Stress Method: On-Off Test After High Temperature & Humidity Test (72Hr)	satisfy standard
Set Test	Installation Test	Purpose : Coherence Decline By High Speed Method :Drive Condition 30,000 Cycle (Start-10.500RPM-Stop)/1Cycle	satisfy standard
Performance Test	Breaking Test	Purpose: Clip Strength	satisfy standard

단계 2: 제품과 부품의 관계정의

제품과 부품의 상호 관계 정의에서 먼저 변경된 형상의 클램프 플레이트에서 최종 제품의 요구 성능인 마그네트 자속의 누설에 의한 손실 여부를 <Fig. 8>과 같이 자속밀도 분포(Flux Density Distribution) 해석을 통해 기존구조와 차이가 없음을 확인하였다.



**Figure 8.** Flux Density Distribution

턴테이블 내부 공간의 제약으로 최대 조립공간은 기준면에서 마그네트가 조립되는 부분까지 1.4mm이내이며 크로우의 두께는 기술적 제작 가능 치수 0.3mm, 클립두께는 원재료의 특성을 고려하여 0.8mm로 잠정 결정하고 다음과 같이 상호 관계를 정의하였다.

- 클립 두께(㉑)+돌기 두께(㉒)+ 최대 간섭량 < 1.4mm
- 최대 간섭량=1.4-㉑(0.8)-㉒(0.3) = 0.3mm 이내일 것.

단계 3: 공차설계

제품과 부품과의 관계정의를 통해 <Fig. 9>과 같이 조립구조의 제약조건 관계를 설정하여 공차설계를 진행하였다. 간섭량 관리를 위해서 기준면에서 클립의 안착높이인 A부의 공차설계가 중요하고 치수가 너무 낮게 설계 될 경우에는 상대 부품인 크로우 체결 후에 사출재료인 클립부가 탄성 한계를 벗어나 파괴 될 수 있기 때문에 다음과 같이 초기설계를 실시하였다.

- 안착 높이(A) = 클립의 높이 - 클립의 두께(0.8mm)
- 돌기의 최소 두께 (기술적 제약) : Min 0.3mm
- 간섭량 = 돌기(B) - 안착높이 (A) : 0.3mm (최대간섭량 이하로 설정)
- 풀림방지 턱 : 최소 0.05mm

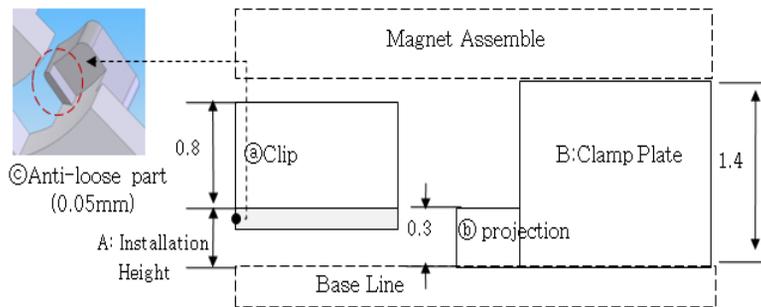


Figure 9. Constraints Condition of Assemble Structure

안착 높이(A)에 대한 공차설계 시 기준치수를 설정하기 위해 클립과 동일한 재료로 두께 0.8mm 시편을 만들어 변위에 따른 클립에 걸리는 힘은 실험을 통해 확인하고, 이 특성 데이터를 기준으로 안착부 높이 기준치수를 설계에 반영함으로써 간섭량이 이 범위를 초과하지 않도록 설정하기 위하여 실험을 실시하였다.

실험 결과 <Fig. 10>과 같은 클립의 변위량 특성 결과 그래프를 도출 하였고 0.8mm 두께의 클립은 간섭량 0.32mm에서 8.3kg의 힘으로 파괴 되어 최대 간섭량은 이보다 작은 0.3mm이하로 설계하여야 함을 알 수 있었다. 잠정적으로 설정한 것이다.

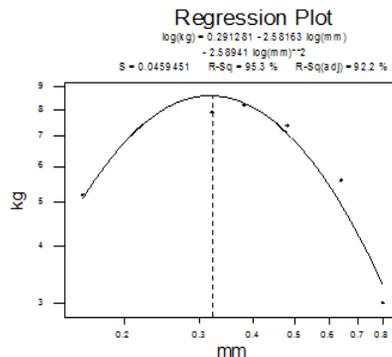


Figure 10. Clip Displacement Curve

단계 4: 공차분석

공차설계 된 내용을 바탕으로 클립과 크로우의 간섭량에 영향을 주는 안착 높이와 간섭량의 함수식, 그리고 제약 조건을 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 <Fig. 11>과 같이 공차해석을 진행하였으며 다음과 같은 분석 결과를 얻을 수 있었다.

- 간섭량: Max0.3mm을 만족하기 위해 0.1 ~ 0.3mm.
- 클램프 플레이트 돌기 두께(ⓐ) : 0.3± 0.05 mm
- 클립 안착높이(A):0.2± 0.03 mm (회전방지 턱 감안)



Figure 11. Tolerance Analysis

상기와 조건에서 공차분석을 실시한 결과 클립 최종 설계 규격인 안착 높이는  $Z_{ST.Bench} = 5.2$ , 또한 조립에 의한 간섭량은  $Z_{ST.Bench} = 0.04$ 로 6시그마 수준의 설계 목표를 달성할 수 없었다.

단계 5: 최적화

공차분석 결과로 공학적 설계 제약조건을 고려하여 클립 안착높이와 간섭량에 영향을 주는 클램프 플레이트 돌기 두께의 공차 및 간섭량의 규격을 통계적으로 조정하는 최적화 단계를 <Fig. 12>과 같이 수행하였다.

- 간섭량: Max0.3mm을 만족하기 위해 0.05 ~ 0.2mm.
- 클램프 플레이트 돌기 두께(ⓐ) : 0.3± 0.02 mm
- 클립 안착높이(A):0.2± 0.03 mm



Figure 12. Tolerance Optimization

상기와 여러 조건들을 조정하여 공차최적화를 실시한 결과 클립 최종 설계 규격인 안착 높이는  $Z_{ST.Bench} = 6.19$ , 또한 조립에 의한 간섭량은 6시그마 품질 수준인  $Z_{ST.Bench} = 6.0$ 이상의 6시그마 수준의 설계 목표를 달성하였다.

#### 단계 6: 평가 검증

평가 단계는 공차설계를 통해 얻어진 부품의 기준치수와 허용공차를 도면화 하여 시작 금형으로 부품을 만들어 시험평가를 진행 하였고 평가 기준으로 시험한 결과 착탈 시험 300,000회와 환경 보존 시험 그리고 실장 시험에서 설정된 규격을 만족하였다.

<Fig. 13>와 같이 시제품의 클립의 변위 곡선은 공차설계 과정의 특성 그래프와 유사한 결과를 확인하였다..

클립의 간섭량은 평균 0.1mm로 설정 공차인 0.05~0.2mm를 만족하고, 변위량 0.26mm에서 7.2kg 힘으로 파괴되어 시편으로 확인한 수치보다 낮지만 최대 허용 간섭량 0.2mm이상을 만족함을 알 수 있다.

단, 시편 시험 대비 클립의 강도 저하 원인은 사출과정에서 수지 흐름성의 저하로 강도가 낮아 질 수 있음을 알 수 있었다.

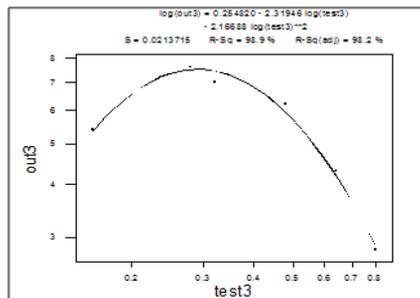


Figure 13. Clip Displacement Curve of Tooling Sample

## 5. 결 론

본 연구에서는 엔지니어링 공차설계와 6시그마 통계적 공차설계 방법의 장점을 묶어 통합 공차설계 프로세스를 제시하고, 스피들 모터 공차설계에 적용하였다. 통합 공차설계 프로세스를 적용한 스피들 모터 공차설계에서 6시그마 수준의 설계목표 품질을 달성하였다.

본 통합 공차설계 프로세스의 장점은 경험있는 엔지니어의 노하우를 이용하여 공차설계 목표와 방향을 결정 하고, 이를 6시그마 통계적 방법으로 공차를 명확히 정하는 것이다. 또한 이 방법은 개발 초기단계에서 시험 평가 방법을 확정하고 준비함으로써 개발 기간 단축은 물론 개발 비용 절감을 가져왔다.

통합 공차설계 프로세스는 체계적인 공차설계 프로세스가 없는 제품설계에도 시뮬레이션을 활용하여 적용할 수 있다. 본 프로세스가 다양한 분야의 공차설계에 적용되어 많은 효과가 있기를 기대한다.

## REFERENCES

- Accreditation Board for Engineering Education of Korea. 2005. Guide of Engineering Accreditation Standards 2005.
- Bender, A., 1962. "Benderizing Tolerances – A Simple Practical Probability Method of Handling Tolerances for Limit Stack Ups." *Graphic Science*, December 17–18.
- Chase, K. W., and Greenwood, W. H., 1987. "Design Issue in Mechanical Tolerance Analysis." ADCATS Report 87:5–6.
- Dym, C. L., and Littele, P., 2007. *Introduction of Engineering Design*. Translated by Cho, Mounsu. Seoul: IT Publishing.
- Evans, D. H., 1975. "Statistical Tolerancing." *Journal of Quality Technology* 7(2):72–76.
- Gilson, J. A., 1951. *New Approach to Engineering Tolerances*, London, UK: Machinery Publishing Co. Ltd.
- Harry, M. J., and Stewart, R. 1988, *Six Sigma Mechanical Design Tolerancing*. Motorola University.
- Human Resource Development Service of Korea. 2012. *Teachingskillsin a standard module 2D machining data generation*.
- Ree, Sangbok. 2001. "A Comparative analysis of three Signal-to-Noise ratios of dynamic characteristics Parameter design." *Journal of Quality Management* 29(4):82–91.
- Ree, Sangbok. 2003. *Easy Taguchi technique from foundation to the field application*, the 3th edition. Sangjosa.
- Ree, Sangbok. 2009. "Method determining level of Noise Factor of Taguchi Method under various probability distribution." *Journal of Quality Management* 37(4):10–15.
- Ree, Sangbok. 2013. "Study on the Result changes with the Size of the Variance in Taguchi Method and Factor Experimental." *Journal of Quality Management* 41(1):1–14.