

# ISO 최소영역법에 기준한 캠 디스크의 형상 오차 해석

강재관<sup>#</sup>, 김원일<sup>\*</sup>

## Form Error Analysis of a Cam Disk Profile Based on ISO Minimum Zone Criterion

Jae-Gwan Kang<sup>#</sup>, Won-Il Kim<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

In an effort to reduce the evaluation time of the precision of manufactured disk cams, an effective measuring method with an exclusively built profile-measuring machine and subsequent data analysis procedure is proposed. The design and measuring data are interpolated by cubic spline curves to compute the precision error which is defined by the maximum and minimum distances between two curves. The minimum zone criterion of ISO is employed to evaluate the form error, and genetic algorithm is used to search the orientation and location of design data for the measured data which minimizes the form error. The proposed system was applied to marine engine cams, and it shows that the form error is reduced to 30% down compared with the method which minimizes the form error with the assumption that the centers of measured data design cam curve are identical.

**Key Words** : Cam(캠), Form Error(형상오차), Minimum Zone Criterion(최소영역법), Genetic Algorithm(유전자 알고리즘), CMM(3차원 측정기), Profile Measuring Machine(형상 측정기)

### 1. 서 론

캠은 자동차 또는 산업용 기계에서 사용되는 캠에 비해 대형이며 엔진의 효율과 성능에 직접적인 영향을 미치는 중요한 부품인 특성 때문에 높은 가공정밀도를 요구한다<sup>[1-2]</sup>. 따라서 캠을 제조한 후에 가공정밀도를 정확하게 측정하고 해석할 수 있는 방법이 요구된다.

현장에서 캠 측정에 사용되고 있는 방법으로는 각

도분할대로 캠을 분할하면서 다이얼게이지의 지침을 읽는방법, 3차원 측정기(Coordinate Measuring Machine)로 측정하는 방법<sup>[3]</sup>, 그리고 전용 측정기를 사용하여 측정하는 방법<sup>[4]</sup>등이 있다.

다이얼게이지를 이용하는 방법은 가공 정밀도를 해석하기 위해 설계데이터의 각도에 따른 중심축에서 캠 형상까지의 길이 값을 다이얼게이지의 지침과 대조해 보면서 가공정밀도를 해석하는 방법으로서 측정시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 측정의 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다.

3차원 측정기를 사용하는 방법은 측정기의 프로브가 캠 형상을 직접 접촉하면서 측정을 하게 되므로 정확한 가공정밀도를 구할 수 있지만 설계 데이터와

\* 경남대학교 기계자동화공학부

# 교신저자 : 경남대학교 기계자동화공학과

E-mail : jkkang@kyungnam.ac.kr

측정 데이터를 비교하기 위해 프로브 반경 보정(Probe radius compensation)등의 후 작업이 필요하며 고가의 구입비는 물론 캠 형상의 경우 윤곽 상에 여러 개의 점을 측정해야 하므로 시간이 많이 소요되는 문제점이 있다.

캠 전용 측정기를 이용하여 측정을 하는 방식은 Fig. 1과 같이 캠을 회전시키면서 측정 프로브로 윤곽을 측정하므로, 위에서 언급한 측정방식들 보다 측정시간을 크게 단축시킬 수 있고, 또한 캠 형상의 설계 데이터는 롤러 중심점의 궤적으로 주어지기 때문에 측정데이터와 설계데이터의 비교가 용이한 장점이 있다.

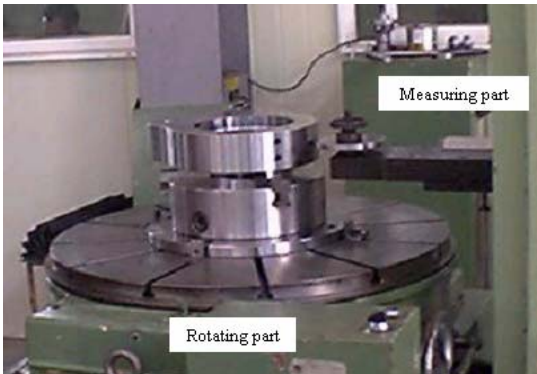


Fig. 1 Cam profile measuring machine

캠 형상의 측정이 끝나고 나면 형상 오차(Form deviation)를 계산하는 과정이 필요하다. 일반적으로 현장에서 많이 사용하는 형상 오차인 진직도(Straightness), 진원도(Circularity), 편평도(Flatness) 등의 경우에 여러 가지 평가 방법이 사용된다<sup>5)</sup>. 진직도의 경우에는 Terminal Based Method와 최소자승법이 있으며 진원도의 경우에는 최소외접원법, 최대내접원법, 최소자승법 등이 많이 사용되어져 왔다. 그러나 이러한 여러 가지 방법과 달리 국제표준인 ISO에서는 최소영역법(Mimum Zone Criterion, 이하 MZC로 표시)를 제시하고 있다<sup>6-8)</sup>. MZC란 기하학적으로 설계 형상으로부터 벗어난 크기를 가장 작게 되도록 한 상태로 평가하는 방법으로 측정을 어떻게 하였는가에 대한 규정을 하지 않으며 측정데이터만을 가지고 평가하는 방법이다.

예를 들어 진직도의 경우 MZC를 적용하면 측정데이터를 둘러싸는 두개의 enclosing line의 집합 중에서 라인간의 거리가 최소인 값으로 정의되며<sup>6)</sup>, 진원도의 경우에는 Fig. 2와 같이 동일한 중심을 가지는 측정데이터의 내접원과 외접원의 조합 중 두 원 사이의 면적이 최소가 될 때 두 원 사이의 거리값으로 정의된다<sup>7)</sup>. 즉 이 때의 내접원과 외접원이 각각 enclosing circle에 해당된다.

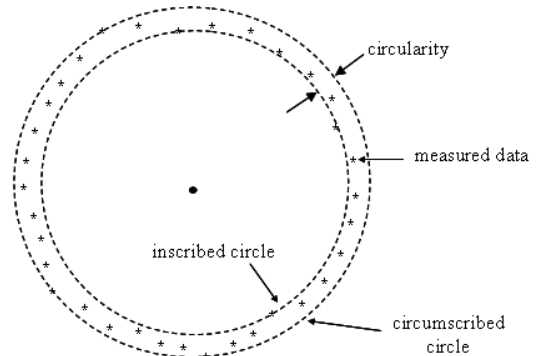


Fig. 2 Circularity based on MZC

그러나 진직도나 진원도와 달리 캠 형상에 대한 ISO의 MZC에 기준한 형상오차는 명시적으로 정의되어 있지 않으며 따라서 형상오차를 계산하는 방법도 알려져 있지 않다. 이에 따라 본 연구에서는 캠 형상에 대하여 MZC를 정의하고 이를 구현할 수 있는 방법론을 개발한다.

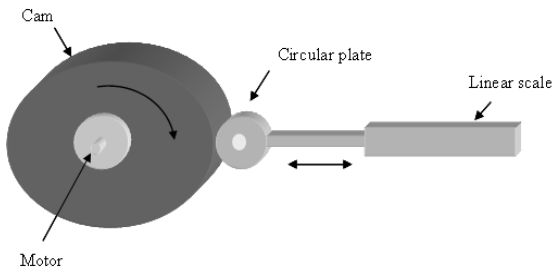
## 2. 측정데이터 취득 및 오차 계산

### 2.1 측정데이터 취득

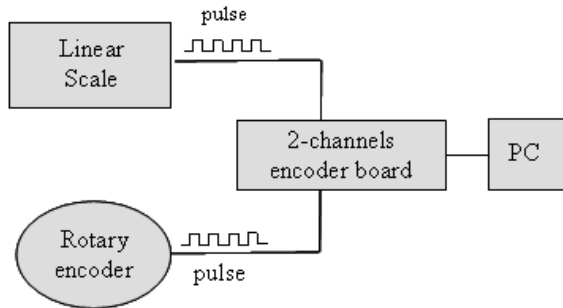
1장에서 언급한 바와 같이 캠 전용 측정기의 원리는 캠을 회전 시킬 때 캠 외곽 면에 접촉하고 있는 롤러 타입의 프로브의 변위값을 읽어 들인다. 이 때 캠을 회전시키는 구동기는 스테핑 모터를 사용하고 변위 측정 센서로는 리니어 스케일(linear scale)을 사용한다.

그리고 측정 데이터의 취득은 Fig. 3와 같이 캠의 회전 각도를 구동 모터에 부착되어 있는 로터리 엔코

터를 통하여 획득하고 리니어 스케일을 통하여 캠의 중심에서 형상까지의 길이 값을 읽어 들인다. 이들 값은 펄스 값으로 입력되어 두 채널의 엔코더 보드(encoder board)에 의해 컴퓨터와 인터페이스하여 측정데이터를 저장하게 된다. 측정데이터는 Fig. 3과 같이 소수점 3자리까지 측정 가능하며 1도 단위로 360도까지의 길이 값이다



(a) Working mechanism of the sensing devices



(b) Data acquisition principle of the measuring machine

0.000	270.000	.	.
1.000	269.031	.	.
2.000	268.098	.	.
.	.	358.000	267.125
.	.	359.000	269.081
.	.	360.000	270.120

(c) Data format of the measured data

Fig. 3 Cam profile measuring machine

## 2.2 오차의 정의

오차는 설계 치수와 측정 데이터간의 거리로 정의된다. 그러므로 캠 측정데이터의 오차를 계산하기 위

해서는 먼저 설계 데이터로부터 설계 캠 곡선을 그리고 측정데이터로부터는 측정 캠 곡선을 구하는 것으로 시작한다. 설계 및 측정 캠 곡선은 각각의 데이터를 3차 스플라인 보간 곡선(Cubic-Spline Interpolation Curve)<sup>[9]</sup>을 사용한다.

설계 캠 곡선을 Fig. 4와 같이 일정하게 분할한 후 각 점에서의 접선 벡터를 이용하여 법선벡터를 계산하고, 이 법선벡터와 측정 곡선과의 교점을 구한다<sup>[4]</sup>. 이 교점까지의 거리가 설계 점에서의 오차가 된다. 각 점에서 구한 오차들로부터 식(1)과 같이 전체 캠 곡선의 최대오차( $\epsilon_{max}$ ) 및 최소 오차( $\epsilon_{min}$ )를 구한다.  $\epsilon_{max}$  및  $\epsilon_{min}$ 은 식 (1)과 같이  $(0, 2\pi)$ 사이에서 정의된다. 유의할 것은 오차의 최소값이 + 값이거나 오차의 최대값이 -값인 경우에는 최소값과 최대값을 0로 한다.

$$\epsilon_{min} = \text{Min}(\text{Minimum}(\epsilon_i), 0), i \in (0, 2\pi) \quad (1)$$

$$\epsilon_{max} = \text{Max}(\text{Maximum}(\epsilon_i), 0), i \in (0, 2\pi)$$

계산된 최대 오차 및 최소 오차로부터 총 형상 오차( $E_f$ )를 계산한다.

$$E_f = \epsilon_{max} - \epsilon_{min} \quad (2)$$

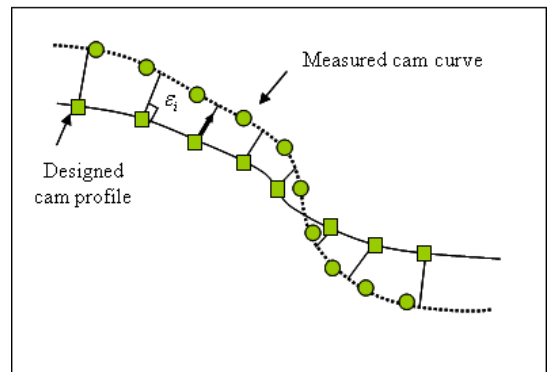


Fig. 4 Error of measured data

## 2.3 MZC에 기반한 캠 형상 오차

진직도와 진원도에서의 MZC 정의를 캠 형상에 적용하면 측정데이터를 둘러싸는 두개의 enclosing 캠

곡선 집합 중 두 곡선간의 거리가 가장 짧은 것으로 정의할 수 있으며 이 때의 거리 값이다. 즉 측정 캠 데이터에 대하여 식 (4)를 이용하여 최대 최소 오차를 구하고 이 점까지 움직인 캠 곡선이 enclosing 캠 곡선이 되며 식(5)의 총 오차는 두 enclosing 곡선간의 거리를 나타낸다. 이 때 Fig. 5와 같이 측정데이터에 대하여 설계 캠 곡선을 어디에 설정하느냐에 따라 enclosing 곡선간의 거리값이 달라지게 된다. Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)에 비해 설계 캠 곡선의 상대적인 위치 및 자세의 변화에 의해 총 형상오차( $E_f$ )가 줄어든 것을 볼 수 있다. 그러므로 MZC를 만족시키기 위해서는 이 총 에러 값이 최소가 되도록 설계 캠 곡선에 대한 상대적인 측정데이터의 위치와 자세를 찾아내는 과정이 필요하다.

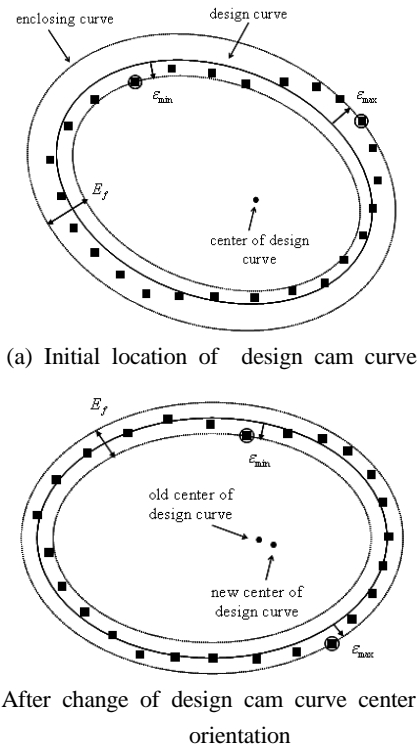


Fig. 5 Form error of cam profile based on MZC

기존의 연구<sup>[4]</sup>에서는 측정데이터의 중심이 설계 데이터의 중심과 일치한다는 가정 하에서 설계 캠 곡선의 회전을 통하여 최적의 자세를 탐색하는 과정만을

적용하였기 때문에 MZC가 충분히 적용되었다고 볼 수 없다. 따라서 본 연구에서는 최적화 알고리즘 중의 하나인 유전자 알고리즘을 사용하여 설계 캠 형상의 자세 뿐만 아니라 중심 위치까지 변화시키면서 형상 오차를 최소화하는 방법론을 개발한다.

### 3. 유전자 알고리즘을 이용한 측정 데이터 최적화

#### 3.1 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)은 적자 생존과 유전의 메카니즘을 바탕으로 하는 탐색 알고리즘이다. 즉 주어진 환경에 잘 적응하는 유전자만을 선택(selection)하여 교배(crossover)하고 때에 따라서는 돌연변이(mutation)도 하며 다음 세대에 우수한 유전형질이 재생(reproduction)되게 된다. 따라서 진화(evolution)가 거듭될수록 주어진 환경에 더 적합한 유전자들만이 남아있게 된다<sup>[10]</sup>. 유전자 알고리즘은 이러한 적자 생존 법칙을 응용한 탐색 알고리즘으로서 초기에 생성된 모집단이 여러 세대를 거치면서 우수한 개체의 교배와 돌연변이가 출현 등을 통해 원하는 최적해를 가지는 개체를 찾아가는 방식이다.

#### 3.2 유전자 알고리즘 적용

본 연구에서는 유전자 알고리즘의 초기 모집단을 생성함에 있어 각 개체의 특성을 나타내는 파라미터는 Fig. 6과 같이 캠의 중심 좌표 X, Y 와 회전각도  $\theta$ 로 한다. 파라미터 값이 다양한 개체들이 여러 세대를 거쳐 복제, 교배, 돌연변이가 생성을 반복하면서 측정 캠 곡선과 가장 일치하는(총편차가 최소가 되는) 최적 개체를 찾아 나간다. 이를 위해선 먼저 3개의 파라미터를 다음과 같이 2진 문자열로 부호화하여 표현한다.

X										Y										$\theta$												
1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1

Fig. 6 Expression of genetic individual

초기 모집단은 유전자 개체의 모든 문자열을 랜덤하게 발생시켜 200개체를 생성하여 형성하였으며, 평가함수(evaluation function)는 캠의 최대, 최소 오차로부터 구해진 형상 총오차( $E_f$ )를 사용하였다.

유전 파라미터로는 교차율을 60%, 돌연변이 발생률은 5%, 그리고 200세대에서 종료되도록 설정하였다. 유전자 알고리즘을 적용하는 절차들을 정리하면 Fig. 7과 같다.

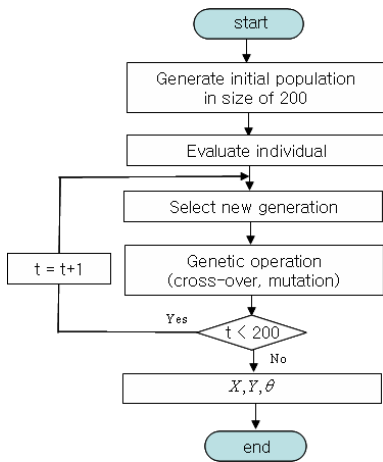


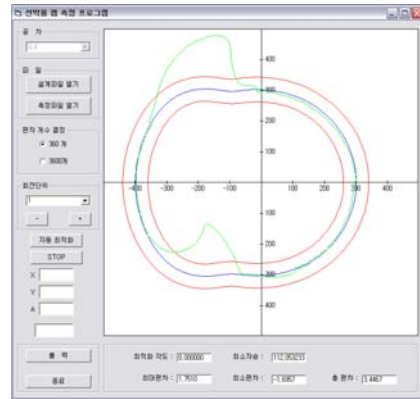
Fig. 7 Procedure of genetic algorithm

#### 4. 구현 예

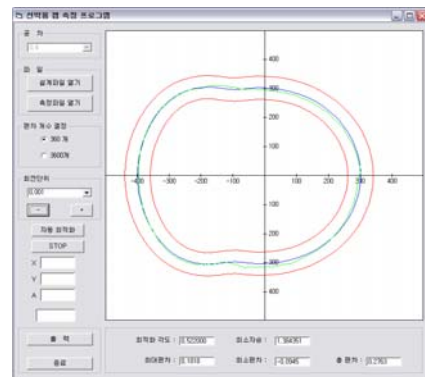
본 연구에서 개발된 방법론은 Fig. 8의 선박용 캠에 대하여 적용되었으며 Pentium IV PC에서 Visual Basic으로 데이터 해석 모듈이 구현되었으며 기존에 [2] 개발되었던 데이터 취득 모듈과 정밀도 계산 모듈에 최적화 모듈을 추가한 형태로 구현되었다.



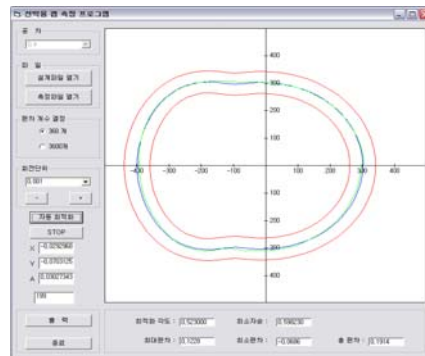
Fig. 8 Cam for marine engine



(a) Initial measurement



(b) After rotational optimization



(c) After central and rotational optimization

Fig. 9 Comparison of each methodology

Fig. 9(a)는 수동으로 측정 원점을 설계 원점에 맞춘 후 측정된 결과에 대하여 어떠한 최적화 과정을 적용하지 않고 총 오차를 계산한 결과 모습이다. 총

오차는 3.45mm로 계산되었다.

Fig. 9(b)는 기존의 연구에서 사용한 방법인 측정 캠 곡선의 중심과 설계 캠 곡선의 중심이 일치하다는 가정 하에 측정 캠 곡선을 회전시키면서 총 오차가 최소가 되는 자세를 찾은 결과이다. 이 경우 총 오차는 0.28mm로 계산되었으며 앞 결과와 비교해 볼 때 총 오차가 크게 줄어들었음을 알 수 있다.

Fig. 9(c)는 본 연구의 결과로서 유전자 알고리즘을 적용하여 캠 중심 및 위치를 변화시키면서 최적화된 결과로서 총 오차가 0.19mm로 계산되었다. 기존의 방법<sup>[4]</sup>과 비교하여 오차가 30% 이상 줄어든 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 ISO에서 제시하는 MZC에 기준하여 캠 디스크의 형상오차를 계산하는 방법을 논의하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 캠 디스크 측정 데이터의 편차는 측정 데이터와 설계 캠 곡선과의 수직 거리로 정의 되고, 그 최대 값과 최소값의 차이가 총 오차가 된다.
- 2) MZC에 기반한 캠 디스크 형상의 형상 오차는 측정 데이터를 둘러싸고 동일한 중심을 갖는 두개의 enclosing 캠 곡선 중 총 오차 값이 최소인 것으로 정의할 수 있다.
- 3) 총 오차 값이 최소인 두 개의 enclosing 캠 곡선을 찾기 위해서 최적화 알고리즘 중 하나인 유전자 알고리즘을 사용하여 설계 캠 곡선에 대한 측정 캠 곡선의 중심과 자세를 탐색하였다.
- 4) 본 연구의 결과는 최적화를 적용하지 않은 경우는 물론 설계 캠 곡선의 중심과 측정 캠 곡선의 중심 좌표가 일치한다는 가정 하에 총 오차를 계산한 기존의 방법보다 총 오차 값이 30% 이상 작아지는 결과를 보여 주었다.

## 후 기

이 논문은 2006년도 경남대학교 학술연구진흥비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. Chen, F. Y., Mechanics and Design of Cam Mechanisms, Pergamon, 1982.
2. Nishioka, M., "High-speed Machines and Cam Mechanism Design," Mechanical Design, Vol. 42 No. 1, pp. 58-64, 1998.
3. 이징구, 알기 쉬운 측정의 자동화, 기전연구사, pp. 14-20, 1997.
4. 강재관, 이경휘, "선박 엔진용 캠 전용 측정기의 데이터 취득 및 해석," 한국정밀공학회지, Vol. 19, No. 11, pp. 160-166, 2002.
5. Feng, S. C. and Hopp, T. H. "A Review of Current Geometric Tolerancing Theories and Inspection Data Analysis Algorithms," MD 20899-0001, National Institute of Standard and Technology, 1991.
6. Huang, S. T. and Fan, K. C., Wu J. H. "New Minimum Zone Method for Evaluating Straightness Errors," Precision Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 158-164, 1993.
7. Lai, J. Y. and Chen, I. H. "Minimum Zone Evaluation of Circles and Cylinders," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 36, No. 4, pp. 435 - 451, 1996.
8. Qiu, H., Li, Y. B., Cheng, K., Li Y. and Wang, J. A., "Study on an Evaluation Method for Form Deviations of 2D Contours from Coordinate Measurement," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 16, No. 6, pp. 413-423, 2000.
9. Rogers, D. F., Adams, J. A.. Mathematical Elements for Computer Graphics, 2nd Edition, McGraw Hill, 1989.
10. Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.