

## 선박 엔진용 캠 전용 측정기의 데이터 취득 및 해석

강재관\*, 이경희\*\*

### Data Acquisition and Analysis of a Measuring Machine for Marine Engine's Cams

Jae-Gwan Kang\*, Kyung-Hee Lee\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, data acquisition and analysis of a measuring machine for marine engine's cams is discussed. A rotary encoder and linear scale of the machine to measure angular and linear displacement respectively are interfaced to the PC via encoder board with 2 channels. 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 fit of ISO is employed to evaluate the geometric deviation. The developed system takes only 5 minutes to measure and analyze while the CMM takes over 1 hours even with a skilled operator.

**Key Words** : CAM(캠), Geometrical deviation(기하편차), Minimum zone fit(최소영역법), CMM(3차원측정기), Linear scale(리니어스케일), Rotary encoder(로터리엔코더)

#### 1. 서론

우리나라 선박 건조량은 현재 세계 제1위이며 이에 따라 선박 엔진의 수요가 매우 크다. 선박 엔진에서 캠은 엔진의 포켓 밸브를 열고 닫는 기능을 담당하며 Fig. 1과 같이 크게 배기용 캠과 흡기용 캠 두 종류로 구성된다. 특히 선박 엔진용 캠은 자동차 또는 산업용 기계에서 사용되는 캠에 비해 대형이지만 엔진의 효율과 성능에 직접적인 영향을 미치는 중요한 부품인 특성 때문에 높은 가공 정밀도를 요구한다.

캠 제조 공정은 외경 선삭 및 면삭 그리고 열처리를 거친 후 연삭 가공을 통하여 최종 형상을 얻게 된다. 가공을 마친 후에는 최종 형상에 대한 정

밀도를 측정하게 되는데 수동으로 측정하는 경우에는 각도분할대로 캠을 분할하면서 다이얼게이지의 지침을 읽는 방법을 사용하는 것이 보통이다<sup>[1]</sup>. 자동화된 방법으로는 3차원 측정기(Coordinate Measuring Machine)를 사용할 수 있지만 고가의 구입비와 측정기 사용에 전문화된 인력이 필요하고 측정시간이 많이 소요되는 문제점이 있다. 따라서 형상 측정 및 측정 데이터의 분석을 단축시키기 위하여 Fig. 2와 같이 캠을 회전시키면서 측정 프로브로 윤곽을 측정하는 전용 측정기를 사용하는 경우가 있다.

전용 측정기의 가장 큰 특징은 측정 프로브에 실제 엔진에서 사용하는 롤러와 동일한 사이즈의 원판을 부착하여 측정데이터를 취득하는데 있다.

\* 2002년 2월 22일 접수

\* 경남대학교 기계자동화공학부

\*\* 대전대학교 정보시스템공학부

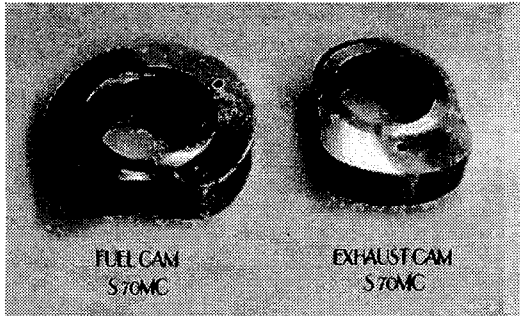


Fig. 1 Cams for a marine engine

캠 형상의 설계 데이터는 롤러 중심점의 궤적으로 주어지기 때문에 이와 같이 측정할 경우 측정데이터와 설계데이터의 비교가 매우 용이하게 된다. 삼차원 측정기는 프로브가 캠 형상을 직접 접촉하기 때문에 설계 데이터와 측정데이터를 비교하기 위해서는 여러 가지 조작이 필요하다.

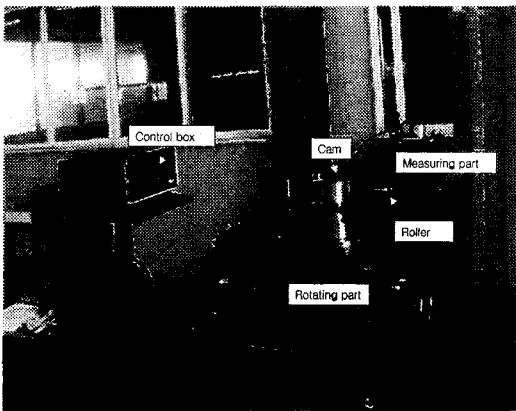


Fig. 2 Cam measuring machine

그러나 우리나라에서 사용되는 전용 측정기는 대부분 일본 제품이기 때문에 기계의 제어 방법이나 측정 데이터 해석 방법에 대하여는 잘 알려져 있지 않다. 특히 측정 데이터의 해석에서 일반적인 기하오차인 진직도, 진원도, 편평도 등과 달리 캠 형상에 대한 기하오차 정의도 널리 알려져 있지 않아 현장에서 측정 데이터를 해석하는데 많은 어려움을 겪고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 캠 전용 측정기의 구동 원리를 이용하여 측정기가 보유하고 있는 컨트롤 박스를 사용하지 않고 측정기를 PC와 직접 연결하여 데이터를 취득하는 방법과 기하편차에 관한 ISO 규정인 최소영역법에 따라 측정 데이터를 해석하여 정밀도를 계산하는 방법을 개발한다.

## 2. 측정데이터 취득 및 해석

### 2.1 캠 전용 측정기의 원리

본 연구에서의 선박엔진용 캠은 다양한 캠 형상의 유형 중에서 Fig. 3과 같은 롤러 종동철의 평판캠을 대상으로 한다. 캠 설계데이터는 상승 행정과 하강 행정을 위한 캠의 회전각과 양정(lift)으로 나타내는데 이는 롤러 중심점의 궤적인 피치 곡선과 동일하다. 대부분 1도 단위로 양정값이 주어지게 된다<sup>[2]</sup>.

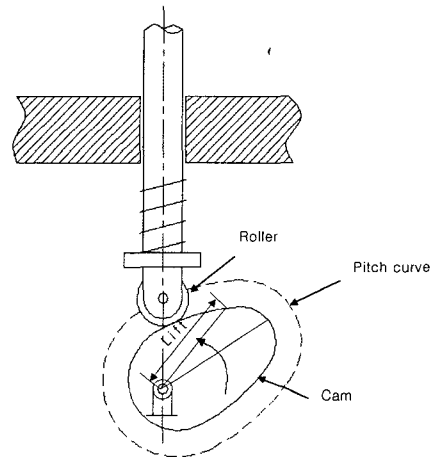
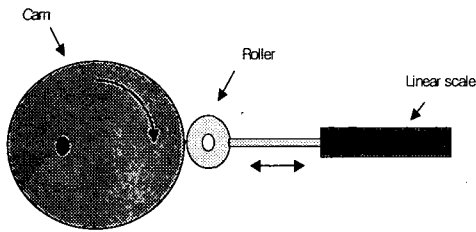


Fig. 3 Cam mechanism

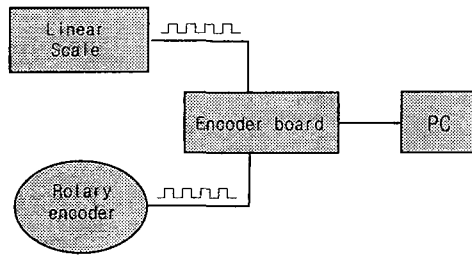
Fig. 2에서 보는 바와 같이 캠 전용 측정기는 캠을 회전시키는 구동부와 측정을 수행하는 측정부로 구성되며 측정부에는 측정기 끝단에 실제 엔진에서 사용하는 롤러와 동일한 사이즈의 원판을 부착하여 측정데이터를 취득한다. 그리고 전용 측정기에는 구동부의 회전량과 측정부의 변위량을 측정하기 위하여 구동 모터에는 로터리 엔코더가 측정부에는 리니어스케일이 장착되어 있다(Fig. 4(a)).

### 2.2 측정 데이터 취득

캠 전용 측정기를 PC에서 제어하기 위해서는 로터리 엔코더와 리니어스케일의 출력신호를 입력받는 것이 필요하다. 로터리 엔코더와 리니어스케일 출력신호는 펄스 형태이기 때문에 2채널 이상을 지원하는 전용 엔코드 보드를 사용하면 PC에서 회전량 및 변위량 데이터를 취득하는 것이 가능하다 (Fig. 4(b)). 측정 절차는 Fig. 5와 같이 시작점을 기준으로 로터리 엔코더의 펄스값으로부터 계산한 회전각도가 설정한 각도 값이 되면 리니어스케일의 값을 읽어 측정치를 저장한다.



(a) Mechanism of cam measuring machine



(b) Data acquisition

Fig. 4 Principles of cam measuring machine

### 2.3 측정데이터 해석

일반적으로 가공물과 설계 도면과의 오차를 표현하는 기하 편차를 계산하기 위한 측정데이터의 처리 방법에는 여러 가지가 있으나 ISO 및 KS B 0425 기하편차의 정의 및 표시에는 최소영역법으로 표시하도록 규정되어 있다<sup>[1]</sup>. 최소 영역법이란 기하학적으로 설계 형상으로부터 벗어난 크기를 가장 작게 되도록 한 상태로 평가하는 방법으로 측정을 어떻게 하였는가에 대한 규정을 하지 않으며 측정데이터만을 가지고 평가하는 방법이다.

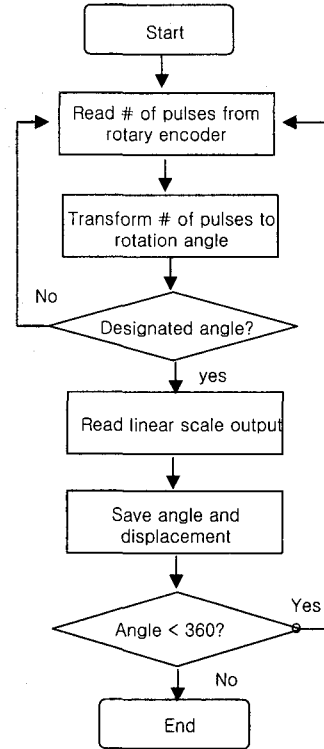


Fig. 5 Flow chart of data acquisition

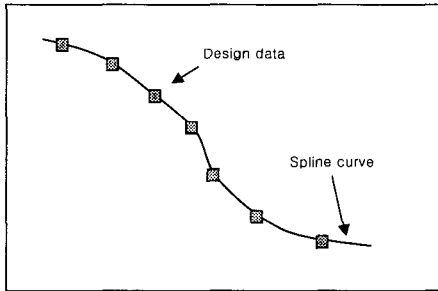
이를 캠 형상에 적용하면 모든 측정데이터를 포함하면서 동일한 중심과 일정한 읍셋 거리에 있으면서 그 거리값이 최소가 되는 두 개의 enclosing 캠 곡선을 찾아내는 것이 된다. 그러나 이를 위해서는 캠 형상의 중심위치 및 자세를 찾기 위하여 무수한 탐색을 수행하여야 하므로 본 연구에서는 탐색 공간을 줄이기 위하여 캠 형상의 중심 위치는 설계 형상의 중심과 일치한다고 가정한다.

먼저 측정데이터의 중심이 설계 데이터의 중심과 일치한다는 가정 하에서 측정데이터를 이용하여 측정데이터의 최대-최소오차를 계산하는 절차를 설명한다.

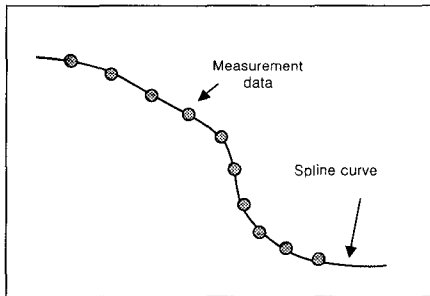
- ① 설계데이터를 스플라인 곡선보간한다(Fig. 6(a)).
- ② 측정데이터를 스플라인 곡선보간한다(Fig. 6(b)).
- ③ 임의의 설계점에서 법선벡터를 계산한다.
- ④ 법선벡터를 포함하는 직선과 측정데이터 스플라

인 곡선과의 교점을 찾아 오차( $\epsilon_i$ )를 계산한다 (Fig. 6(c)).

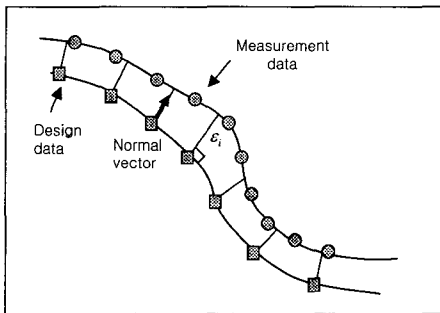
- ⑤ 이 과정을 전 설계점에 대하여 반복 수행하여 최대·최소오차 및 총오차를 계산한다.



(a) Spline curve of design data



(b) Spline curve of measurement data



(c) Computation of errors

Fig. 6 Procedures of error computation

(1) 스플라인 곡선식

$n$ 개의 측정점으로 정의되는 3차 스플라인 곡선 식에서 구간  $i$ 의 방정식은 식(1)과 같다<sup>[4]</sup>.

$$r_i(u) = UCS_i \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \quad (1)$$

$$\text{단 } U = [1 \ u \ u^2 \ u^3], \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 2 & -2 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$S_i = [P_i \ P_{i+1} \ w_i t_i \ t_{i+1}]$$

식(1)을 계산하기 위해서는 설계 데이터의 경우  $360 \times 360$ 의 정방행렬에 대한 역행렬을 구해야 하며 측정데이터의 경우에는 더 큰 사이즈의 역행렬이 주어진다. 이때 일반적인 역행렬 계산법을 이용할 경우 많은 계산 시간을 요하므로 3각 대각행렬 (tridiagonal matrix)의 특성을 이용한 tomas법<sup>[5]</sup>을 사용하면 해를 쉽게 계산할 수 있다.

(2) 법선벡터 계산

설계 데이터의 스플라인 식이 주어졌을 때 각 설계점에서의 법선벡터는 스플라인을 정의하는 점선벡터  $t_i$ 로부터 간단하게 계산할 수 있다.

단위 법선벡터를  $n_i$ 라고 할 때 측정데이터 스플라인 곡선과의 교점 계산을 위한 법선벡터를 포함하는 직선의 벡터 방정식은 다음과 같이 표현된다(Fig. 7).

$$l_i = p_i + t \cdot n_i \quad (2)$$

(3) 교점 계산

스플라인 곡선식은 각 측정점들 간의 세그먼트의 조합으로 표현되므로 식(2)의 직선과 스플라인과의 교점을 계산하기 위해서는 먼저 교점이 발생하는 스플라인 세그먼트를 찾는 것이 필요하다. 임의의 설계점( $p_i$ )을 원점으로 두 측정점( $m_j, m_{j+1}$ )과의 벡터를 각각  $a, b$ 라고 했을 때 다음의 식(3)을 만족할 경우 두 측정점으로 정의되는 스플라인 세그먼트와 식(2)의 직선간에는 교점이 발생한다.

$$(a \times n_i) \cdot (b \times n_i) < 0 \quad (3)$$

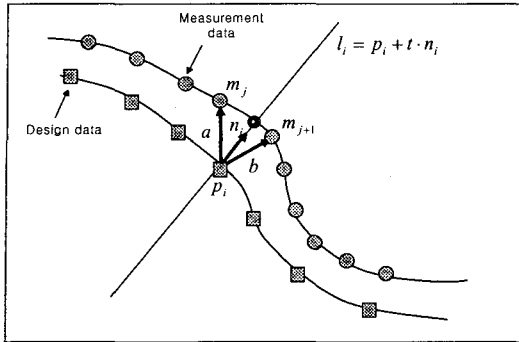


Fig. 7 Computation of intersection point

선택된 스플라인 세그먼트와 식(2)의 직선과의 교점은 Newton-Raphson방법<sup>[6]</sup>을 이용하여 계산한다. 그리고 오차  $\epsilon_i$ 는 설계점과 교점 사이의 거리로 정의하되 설계점 바깥 쪽일 때는 +, 안쪽일 경우에는 -값을 부여한다. Fig. 7에서는 측정데이터가 모두 설계 데이터 바깥에 위치하므로 각 오차값은 모두 +값을 가지게 된다.

(4) 최대·최소 오차 계산

각 설계점에서 계산된 오차  $\epsilon_i$ 로부터 정의구간 ( $R$ )내의 최대 및 최소 오차는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{\min} &= \text{Min}(\text{Minimum}(\epsilon_i), 0), \quad i \in R \\ \epsilon_{\max} &= \text{Max}(\text{Maximum}(\epsilon_i), 0), \quad i \in R \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 정의구간이란 최대 최소오차를 계산하는 설계데이터 상의 일정구간을 나타내는데 식(4)는 일정한 구역 내의 모든 오차값이 -일 경우 최대 오차는 0가 되며 반대로 모두 +값인 경우에는 최소 오차가 0이 됨을 의미한다. 최대 최소 오차값에 의하여 정의구간 내의 총 오차( $E$ )는 식(5)로 정의된다.

$$E = \epsilon_{\max} - \epsilon_{\min} \quad (5)$$

식(4)에서 구한 최대·최소값을 설계데이터로부터

더 읍셋시키면 측정데이터를 모두 포함하는 두 개의 enclosing 캠 곡선을 생성할 수 있다. 그러나 이 두 곡선간의 거리는 ISO가 규정하는 최소영역을 보장하지 않는다. 실제로 캠 형상을 측정할 때는 측정 원점과 설계 원점을 일치시키기가 어렵기 때문에 초기 측정데이터와 설계 데이터 사이에는 많은 오차가 포함되게 된다. 따라서 최소 영역이 되는 자세를 구하기 위하여 측정 데이터를 캠 중심을 기준으로 CW와 CCW 방향으로 미소 각도로 회전하면서 총 편차값이 최소가 되는 최적화 과정을 수행하는 것이 필요하다.

이와 더불어 고려하여야 할 사항은 캠 형상 정밀도는 설계 요구에 따라 달라질 수 있으나 측정데이터에 대하여 Table 1과 같이 구간별로 주어지게 된다. 본 연구 대상물의 경우 대형 선박용 캠 형상임을 고려하여 인근 측정점 간의 총오차는 0.05이하, 연속된 3개의 측정점의 경우 0.09, 15개의 측정점 사이는 0.35, 360개의 총 측정점 사이의 총오차는 0.4이하를 만족하여야 한다. 따라서 설명한 방법에 의하여 미소 회전시키면서 Table 1의 기준을 만족시키는 지를 체크하고 그 중 최소 영역이 되는 자세를 구하여야 한다.

Table 1 Permissible errors

Angle	360°	15°	3°	1°
Error	0.4	0.35	0.09	0.05
Unit	mm			

3. 구현 예

본 연구에서 개발된 방법론은 Pentium III PC에서 Visual Basic으로 구현되었으며 크게 데이터 취득 모듈과 정밀도 계산 모듈로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용된 전용 측정기의 로터리 엔코더와 리니어스케일의 사양은 Table 2와 같다.

Fig. 8은 구동모터의 로터리 엔코더와 리니어스케일의 출력 신호를 읽어 캠 형상 데이터를 측정하는 화면이다. 측정부 끝단에 부착하는 롤러의 반지름 값과 설계 원점의 반지름 값을 입력한 뒤 시작 버튼을 누르면 측정 위치의 각도와 길이 값이 화면에 표시되고 또 파일로 저장된다.

이 때 전용 측정기의 반복 정밀도를 알아보기

위해 동일한 캠 형상을 반복 측정한 결과 각 점에서의 반복 오차의 크기는 최대  $\pm 2\mu\text{m}$  정도였다. 이는 반복 오차의 크기가 Table 1의 허용 오차에 대비하여 크게 영향을 미치지 않는 것을 보여주나 측정의 신뢰성을 높일 필요가 있을 경우를 위하여 사용자가 측정횟수를 임의로 설정할 수 있도록 하였다.

Table 2 Spec. of linear scale and rotary encoder

Linear scale		Rotary encoder	
stroke	220mm	resolution	2048(P/R)
accuracy	$\pm 5\mu\text{m}$	output phases	A,B,Z
resolution	$1\mu\text{m}$	output type	totem pole

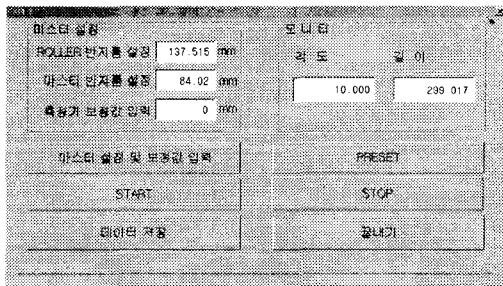


Fig. 8 Data acquisition module

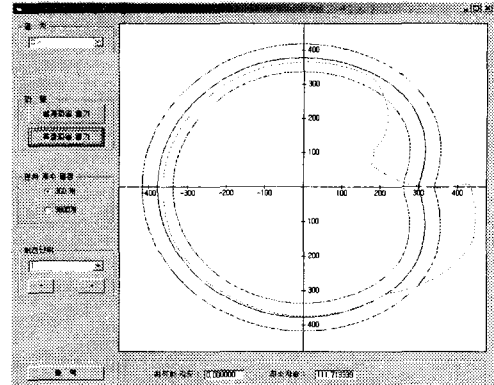
측정 데이터는 Fig. 9와 같이 설계데이터와 비교하여 표현된다. 그림에서 세 개의 캠 곡선 중 중앙의 캠 곡선이 설계 데이터이고 양쪽의 캠 곡선은 최대 허용오차만큼 읍셋된 캠 곡선이다.

Fig. 9(a)는 최적화 전의 모습이고 Fig. 9(b)는 최소영역을 찾기 위해 최적화 후의 모습이다. 최적화 전에는 총 오차가 1.26이었으나 최적화 후에는 0.12로 줄어 든 모습을 볼 수 있다. Fig. 10은 Table 1의 기준에 따라 정의구간 내에서 총 오차를 계산한 결과이다. 전체 측정데이터에 대하여  $1^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $360^\circ$  범위에 대하여 총 오차를 계산하여 허용오차를 넘어서는 경우 측정 위치에 표시를 하도록 하였다.

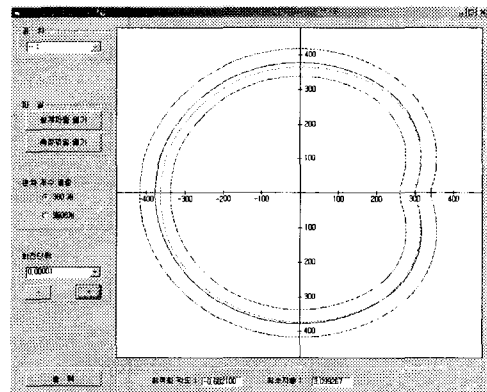
#### 4. 결론

본 연구에서는 선박 엔진용 캠 전용 측정기를 이용한 측정 데이터 취득 및 정밀도 해석 방법에

대하여 논의하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.



(a) Before optimization



(b) After optimization

Fig. 9 Display of design and measurement data

ANGLE	MEASURE	MEASURE	DEVIATION	1(0.85)	3(0.89)	15(0.35)	(0.4)
0	381.8880	381.8182	-0.0182	0.8878	0.8865	0.8845	0.1878
1	381.2170	381.2158	-0.0018	0.8812	0.8812	0.8845	0.1878
2	381.6880	381.6780	-0.0091	0.8811	0.8811	0.8838	0.1878
3	383.8806	383.8868	0.0068	0.8885	0.8886	0.8878	0.1878
4	386.5848	386.5795	-0.0055	0.8889	0.8889	0.8887	0.1878
5	388.8818	388.8826	0.0008	0.8884	0.8879	0.8886	0.1878
6	388.5188	388.4958	-0.0242	0.8842	0.8827	0.8886	0.1878
7	318.5558	318.5882	0.0327	0.8885	0.8882	0.8866	0.1878
8	312.5988	312.5883	-0.0107	0.8888	0.8888	0.8873	0.1878
9	314.6828	314.6519	-0.0181	0.8886	0.8886	0.8873	0.1878
10	316.6888	316.6788	-0.0092	0.8889	0.8885	0.8873	0.1878
11	318.7288	318.7138	-0.0142	0.8889	0.8889	0.8873	0.1878
12	328.7688	328.7588	-0.0104	0.8889	0.8882	0.8873	0.1878
13	322.8828	322.7878	-0.0948	0.8818	0.8863	0.8854	0.1878
14	324.8898	324.8228	-0.0167	0.8823	0.8833	0.8847	0.1878
15	328.8758	328.8645	-0.0105	0.8862	0.8862	0.8878	0.1878
16	328.9888	328.8955	-0.0895	0.8811	0.8872	0.8873	0.1878
17	328.7828	328.9236	0.0895	0.8881	0.8811	0.8869	0.1878
18	332.9788	332.9693	-0.0097	0.8827	0.8828	0.8818	0.1878
19	335.8828	335.8881	0.0051	0.8848	0.8875	0.8866	0.1878
20	337.8188	337.8897	0.0883	0.8816	0.8866	0.8866	0.1878
21	338.5828	338.9831	0.0811	0.8816	0.8838	0.8878	0.1878
22	348.9858	348.8833	-0.0817	0.8828	0.8828	0.8878	0.1878
23	342.7768	342.7719	-0.0041	0.8824	0.8852	0.8878	0.1878
24	348.5848	348.5866	0.0018	0.8812	0.8856	0.8878	0.1878
25	346.3598	346.3527	-0.0063	0.8889	0.8822	0.8878	0.1878
26	348.8718	348.8566	-0.0144	0.8881	0.8888	0.8878	0.1878

Fig. 10 Analysis result of measurement data

1) 구동모터의 로터리 엔코더와 변위 측정기구인 리니어스케일의 출력신호를 2 채널 엔코더 보드를 이용하여 PC로 직접 취득하는 것이 가능하였다.

2) 캠 형상의 측정 데이터에 대하여 기하편차에 관한 ISO 규정인 최소영역법을 적용하였으며 이를 위하여 설계 데이터로부터 각 측정점과의 오차를 계산한 뒤 총 오차가 최소가 되는 위치를 찾는 최적화 과정을 수행하였다.

3) 캠 형상의 측정 및 분석의 경우 수동으로 측정할 경우 7시간 이상<sup>6)</sup>, 3차원 측정기를 사용할 경우에도 1시간 이상 소요되지만 본 연구에서의 캠 전용 측정기를 사용할 경우 5분 이내로 단축되었다.

그러나 본 연구에서 ISO 규정의 최소영역법을 적용할 때 탐색 공간의 축소를 위하여 캠의 중심 위치는 측정점과 설계점이 일치하는 것으로 가정하였다. 이에 따라 향후 최소영역법에 의한 캠 형상의 기하 편차 계산에 대한 발전된 알고리즘의 개발이 요구된다.

## 후기

본 연구는 2002학년도 경남대학교 학술논문게제 연구비 지원으로 이루어졌음.

## 참고문헌

1. 이정구, 알기 쉬운 측정의 자동화, 기전연구사, pp. 14-20, 1997.
2. 주상윤, 조정만, “선박엔진용 캠의 연삭가공을 위한 CAM소프트웨어 개발,” 2001 춘계대한산업공학회/경영과학회 논문집, 2001.
3. 이종대, 정밀형상측정 이론과 실제, 성안당, pp. 1-2, 1994.
4. 최병규 외 4인, CAD/CAM 시스템과 CNC 절삭가공, Scitech, pp. 294-298, 2000.
5. <http://ynucc.yeungnam.ac.kr/~jysah/numerical/Chap25/강의노트5.html>.
6. 지영준외 2인, C로 구현한 수치해석, 높이깊이, pp. 20-23, 1996.
7. 이종대, 3차원 측정 이론과 실제, 성안당, pp. 8-9, 2000.