

## 캠 형상 전용 측정기 제어 및 해석 S/W 개발

최동우(경남대학교 대학원 컴퓨터공학과), 강재관(경남대학교 기계자동화공학부)

### Control and data analysis of a measuring machine for cams

D. W. Choi(Com. Sci. Eng. Dept., Kyungnam Univ.), J. G. Kang(Mech. Eng. Dept., Kyungnam Univ.)

#### ABSTRACT

In this paper, a control and data analysis S/W of a dedicated measuring machine for cams is developed. A rotary encoder is employed to measure the angular displacement of the motor, and a linear scale does the linear displacement of the probe. The design and measuring data are interpolated by cubic spline curves respectively to compute the error which is defined by the maximum distance between two curves. Further, optimization module to find the exact error is also developed to remove the error occurred due initial measuring position. The developed system takes only 6 minutes to measure the cam and to analyze the measuring data while the CMM takes about 1 hours even with a skilled operator.

**Key Words :** Cam(캠), Measurement(측정), CMM(3차원 측정기)

#### 1. 서론

우리나라 선박 건조량은 현재 세계 제1위이며 이에 따라 선박 엔진의 수요가 매우 크다. 선박 엔진에서 캠은 엔진의 포켓 밸브를 열고 닫는 기능을

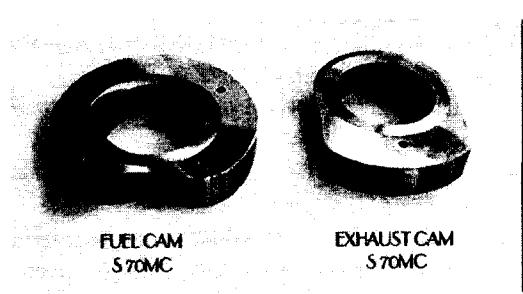


Fig. 1 선박엔진용 캠의 종류

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 정밀도를 측정하게 되는데 일반적으로 3차원 측정기(Coordinate Measuring Machine)를 사용하여 측정한다. 그러나 3차원 측정기는 범용 장비이기 때문에 고가이며 전문화된 인력이 필요하고 측정시간이 많이 소요되는 문제점이 있다. 따라서 형상 측정 및 측정 데이터의 분석을 단축시키기 위하여 Fig. 2와 같은 간단한 구조의 캠 형상 전용 측정기를 사용하기도 한다.

전용 측정기는 캠을 회전시키는 구동부와 롤러를 장착한 리니어 스케일로 구성되는데 캠이 1회전 되는 동안 캠 프로파일 치수를 측정하게 된다. 캠 설계 데이터가 캠의 외곽 형상 치수가 아닌 캠 상을 구동하는 롤러 중심 값으로 정의되기 때문에 롤러 사이즈와 같은 크기의 롤러를 측정기 선단에 부착하여 중심 값을 읽으면 캠의 설계 데이터와의 비교가 가능해진다. 이와 같은 원리로 캠 전용 측정기는 3차원 측정기에 비해 측정 시간 및 분석이 매우 빠르다. 이에 따라 본 연구에서는 회전 구동 모터와 리니어 스케일로 구성되는 캠 전용 측정기를

제어하는 S/W와 측정데이터로부터 가공 정밀도를  
계산하는 S/W를 개발한다.



Fig.2 캠 전용 측정기

## 2. 제어 및 측정데이터 해석

### 2.1 측정기 제어

캠 전용 측정기의 제어를 위해서는 캠을 회전시키는 구동 모터에 로터리 엔코더를 부착하여 회전각도를 측정한다. 리니어 스케일 역시 일종의 엔코더이기 때문에 전용 엔코드 보드를 사용하여 동일한 방법으로 펄스를 카운트하여 변위량을 측정한다. 시작점을 기준으로 129,600의 분해능을 가진 로터리 엔코더로부터 계산된 회전각도가 설정한 각도 값이 되면 리니어 스케일 값을 읽어 측정치를 저장한다.

Fig.3은 측정시스템의 구성도를 나타내고 Fig.4는 구동모터의 엔코더와 리니어스케일로부터 데이터를 읽어 각도에 따른 측정값을 저장하는 흐름도이다.

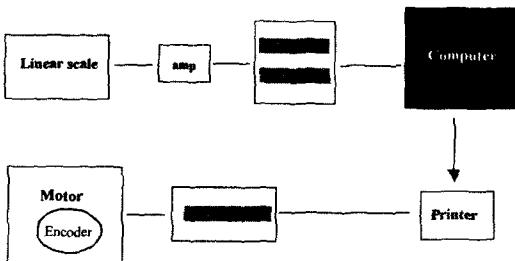


Fig.3 측정시스템 구성도

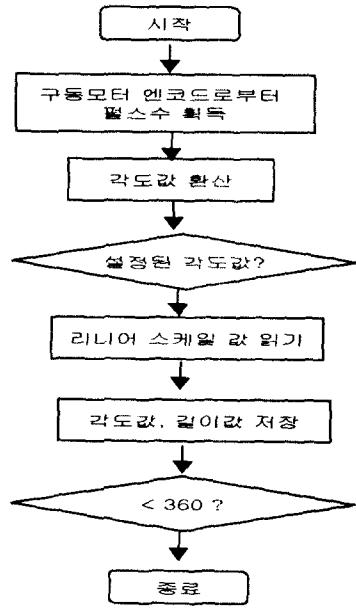


Fig.4 측정데이터 수집 흐름도

### 2.2 측정 데이터 해석

캠 형상에서 오차는 Fig.5와 같이 캠 형상의 법선 방향으로 정의된다[2]. 즉 캠 형상의 경우 오차는 설계점에서의 측정값과 설계점과의 거리가 아닌 점에 유의하여야 한다. 따라서 샘플링을 통하여 를러 중심점으로 얻어진 측정값으로부터 각 설계점에서의 오차는 설계점에서의 법선벡터와 측정점을 연결하는 스파라인 곡선과의 교점의 거리로 계산된다. 이를 위해서는 설계데이터 및 측정 데이터를 보간하는 스파라인 곡선을 먼저 정의하여야 한다. 이를 정리하면 다음과 같다.

- ① 설계 데이터를 스파라인 곡선보간한다.
- ② 측정데이터를 스파라인 곡선보간한다.
- ③ 임의의 설계점에서 법선벡터를 계산한다.
- ④ 법선벡터를 포함하는 직선과 측정데이터 스파라인 곡선과의 교점을 찾아 오차를 계산한다.
- ⑤ 이 과정을 전 설계점에 대하여 반복 수행하여 최대 최소오차를 계산한다.

#### (1) 스파라인 곡선식

$n$ 개의 측정점으로 정의되는 3차 스파라인 곡선식에서 구간  $i$ 의 곡선의 방정식은 식(1)과 같다 [1].

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

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

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

이 때 chord length spline을 구하기 위해서는 스플라인 식을 정의하는  $360 \times 360$ 의 정방행렬에 대한 역행렬을 구하여야 한다. 그러나 이 행렬은 3각 대각행렬(tridiagonal matrix)이므로 토마스법[3]을 이용하면 빠르게 해를 계산할 수 있다.

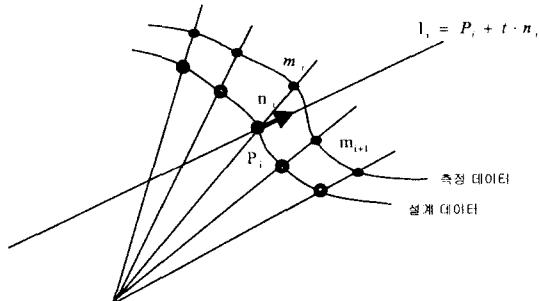


Fig.5 설계데이터와 측정데이터

## (2) 법선벡터 계산

스플라인 식으로 주어졌을 때 각 점에서의 법선벡터는 스플라인을 정의하는 접선벡터  $t_i$ 로부터 계산한다. 단위 법선벡터를  $n_i$ 라고 할 때 법선벡터를 포함하는 직선의 벡터 방정식은 다음과 같이 계산된다.

$$l_i = P_i + n_i \quad (2)$$

## (3) 교점이 발생하는 세그먼트의 선택

스플라인 식은 각 측정점들 간의 세그먼트 식으로 표현되므로 직선(2)과 스플라인과의 교점을 계산하기 위해서는 먼저 교점이 발생하는 스플라인 세그먼트를 찾는 것이 필요하다. 임의의 설계점을 원점으로 두 측정점( $m_i, m_{i+1}$ )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.

$$(a \cdot n)(b \cdot n) < 0 \quad (3)$$

선택된 스플라인 세그먼트와 식(2)의 직선과의 교점은 3차 방정식 근의 해를 이용하여 계산한다.

## (4) 정밀도 계산

캠 형상 정밀도는 표1과 같이 각 측정점 사이에 다음의 조건을 만족하여야 한다.

표 1. 허용오차 범위

Permissible errors				
Angle	$360^\circ$	$15^\circ$	$3^\circ$	$1^\circ$
Error	0.4	0.35	0.09	0.05
Unit	mm			

즉 각 측정점 간의 최대 최소 오차는 0.05이하, 3점 간의 최대 최소 오차는 0.09, 임의의 15점사이의 최대 최소 오차는 0.35, 360개의 측정점 사이의 최대 최소 오차 크기는 0.4이하이어야 한다.

## (5) 최적화

그런데 전용 측정기는 그 구동 원리 특성상 초기 원점을 정확히 맞추기가 어렵기 때문에 측정된 값에 초기 설정 오차가 포함되어 있다. 따라서 정밀도를 계산하기 위해서는 측정 데이터와 설계 데이터와의 오차가 최소가 될 수 있도록 측정데이터를 최적화시키는 과정이 요구된다.

이는 초기 측정 데이터를 CW, CCW 방향으로 일정한 각도 회전하면서 앞서 설명한 방법으로 전체 오차를 계산하는 과정을 반복하면서 최소오차 값을 갖는 위치를 찾아낸다. 최적화는 사용자가 최소 회전 각도를 입력하도록 하는 것과 병행하여 수동으로 1도, 0.1도, 0.01도 간격의 CW, CCW 방향으로 탐색할 수 있는 기능도 삽입하도록 한다.

## 3. 구현 예

Fig.6은 구동모터의 엔코더와 리니어스케일을 제어하여 캠 형상 데이터를 측정하는 화면이다. Fig.7은 표1의 기준에 따라 측정점 간의 허용오차를 만족하는지를 체크한 결과이다. 즉  $1^\circ, 3^\circ, 15^\circ, 360^\circ$  간격으로 최대 오차를 계산하고 표1의 허용오차를 넘어서는 경우 표시를 하도록 하였다. Fig.8은 측정치를 설계데이터와 비교하여 표시한 모습이다. 특히 최적화 전의 최대 오차는 1.26이었으나 최적화 후에는 0.12로 줄어드는 경우도 있었다.

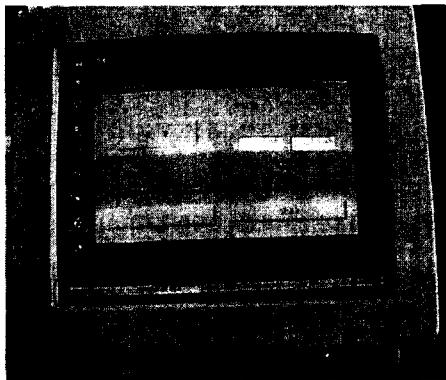


Fig.6 측정기 제어 S/W 화면

ANGLE	MEASURED	DESIGN	DEVIATION	±(±.05)	±(±.09)	±(±.15)
0	301.0000	301.0100	-0.0010	0.0045	0.0085	0.1075
1	301.0172	301.0190	-0.0018	0.0115	0.0155	0.1875
2	301.0340	301.0370	-0.0030	0.0065	0.0115	0.1675
3	301.0508	301.0504	-0.0012	0.0065	0.0095	0.1675
4	301.0676	301.0670	-0.0006	0.0065	0.0095	0.1675
5	301.0844	301.0850	-0.0006	0.0065	0.0095	0.1675
6	301.1012	301.1020	-0.0008	0.0075	0.0105	0.1675
7	301.1179	301.1175	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
8	301.1347	301.1350	-0.0003	0.0075	0.0105	0.1675
9	301.1515	301.1520	-0.0005	0.0075	0.0105	0.1675
10	301.1683	301.1670	-0.0013	0.0075	0.0105	0.1675
11	301.1850	301.1850	0.0000	0.0075	0.0105	0.1675
12	301.1978	301.1970	-0.0008	0.0075	0.0105	0.1675
13	301.2146	301.2150	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
14	301.2314	301.2310	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
15	301.2482	301.2480	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
16	301.2650	301.2645	-0.0005	0.0075	0.0105	0.1675
17	301.2818	301.2820	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
18	301.2986	301.2980	-0.0006	0.0075	0.0105	0.1675
19	301.3154	301.3150	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
20	301.3322	301.3320	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
21	301.3489	301.3490	-0.0001	0.0075	0.0105	0.1675
22	301.3657	301.3650	-0.0007	0.0075	0.0105	0.1675
23	301.3825	301.3820	-0.0005	0.0075	0.0105	0.1675
24	301.3993	301.3990	-0.0003	0.0075	0.0105	0.1675
25	301.4160	301.4160	0.0000	0.0075	0.0105	0.1675
26	301.4328	301.4320	-0.0008	0.0075	0.0105	0.1675
27	301.4496	301.4490	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
28	301.4664	301.4660	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
29	301.4832	301.4830	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
30	301.5000	301.5000	0.0000	0.0075	0.0105	0.1675
31	301.5168	301.5160	-0.0008	0.0075	0.0105	0.1675
32	301.5336	301.5330	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
33	301.5504	301.5500	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
34	301.5672	301.5670	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
35	301.5840	301.5840	0.0000	0.0075	0.0105	0.1675
36	301.6008	301.6000	-0.0008	0.0075	0.0105	0.1675
37	301.6176	301.6170	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
38	301.6344	301.6340	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
39	301.6512	301.6510	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
40	301.6680	301.6680	0.0000	0.0075	0.0105	0.1675
41	301.6848	301.6840	-0.0007	0.0075	0.0105	0.1675
42	301.7016	301.7010	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
43	301.7184	301.7180	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
44	301.7352	301.7350	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
45	301.7520	301.7520	0.0000	0.0075	0.0105	0.1675
46	301.7688	301.7680	-0.0006	0.0075	0.0105	0.1675
47	301.7856	301.7850	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
48	301.8024	301.8020	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
49	301.8192	301.8190	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
50	301.8360	301.8360	0.0000	0.0075	0.0105	0.1675
51	301.8528	301.8520	-0.0006	0.0075	0.0105	0.1675
52	301.8696	301.8690	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
53	301.8864	301.8860	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
54	301.9032	301.9030	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
55	301.9199	301.9190	-0.0006	0.0075	0.0105	0.1675
56	301.9367	301.9360	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
57	301.9535	301.9530	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
58	301.9703	301.9700	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
59	301.9871	301.9870	-0.0006	0.0075	0.0105	0.1675
60	302.0039	302.0030	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
61	302.0207	302.0200	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
62	302.0375	302.0370	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
63	302.0543	302.0540	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
64	302.0711	302.0710	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
65	302.0879	302.0870	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
66	302.1047	302.1040	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
67	302.1215	302.1210	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
68	302.1383	302.1380	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
69	302.1551	302.1550	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
70	302.1719	302.1710	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
71	302.1887	302.1880	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
72	302.2055	302.2050	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
73	302.2223	302.2220	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
74	302.2391	302.2390	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
75	302.2559	302.2550	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
76	302.2727	302.2720	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
77	302.2895	302.2890	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
78	302.3063	302.3060	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
79	302.3231	302.3230	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
80	302.3399	302.3390	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
81	302.3567	302.3560	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
82	302.3735	302.3730	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
83	302.3903	302.3900	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
84	302.4071	302.4070	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
85	302.4239	302.4230	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
86	302.4407	302.4400	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
87	302.4575	302.4570	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
88	302.4743	302.4740	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
89	302.4911	302.4910	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
90	302.5079	302.5070	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
91	302.5247	302.5240	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
92	302.5415	302.5410	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
93	302.5583	302.5580	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
94	302.5751	302.5750	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
95	302.5919	302.5910	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
96	302.6087	302.6080	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
97	302.6255	302.6250	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
98	302.6423	302.6420	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
99	302.6591	302.6590	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
100	302.6759	302.6750	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
101	302.6927	302.6920	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
102	302.7095	302.7090	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
103	302.7263	302.7260	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
104	302.7431	302.7430	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
105	302.7599	302.7590	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
106	302.7767	302.7760	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
107	302.7935	302.7930	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
108	302.8103	302.8100	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
109	302.8271	302.8270	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
110	302.8439	302.8430	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
111	302.8607	302.8600	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
112	302.8775	302.8770	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
113	302.8943	302.8940	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
114	302.9111	302.9110	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
115	302.9279	302.9270	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
116	302.9447	302.9440	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
117	302.9615	302.9610	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
118	302.9783	302.9780	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
119	302.9951	302.9950	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
120	303.0119	303.0110	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
121	303.0287	303.0280	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
122	303.0455	303.0450	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
123	303.0623	303.0620	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
124	303.0791	303.0790	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
125	303.0959	303.0950	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
126	303.1127	303.1120	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
127	303.1295	303.1290	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
128	303.1463	303.1460	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
129	303.1631	303.1630	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675
130	303.1799	303.1790	-0.0004	0.0075	0.0105	0.1675
131	303.1967	303.1960	-0.0002	0.0075	0.0105	0.1675