

자동 측정이 가능한 전용 캠 프로파일 측정 시스템 개발

정황영*, 이현석⁺, 홍준희⁺⁺, 박태민⁺⁺⁺, 신우철⁺⁺⁺⁺, 고준빈⁺⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2007. 6. 20, 심사완료일 2007. 10. 1)

Development of Automatic Cam Profile Measurement System

Hwang-Young Jeong*, Hyun-Seok Lee⁺, Jun-Hee Hong⁺⁺,
Tae-Min Park⁺⁺⁺, Woo-Cheol Shin⁺⁺⁺⁺, Jun-Bin Koh⁺⁺⁺⁺⁺

Abstract

In this paper, It does the profile measurement of the cam of diesel engine SOHC of the actual object. It uses the measurement of run-out method. This method is that the surface of the object is measured by the sensor when the object rotate, and calculated and displayed by the computer the signal which acquired by sensor. When we acquire the signals, we have two error because of motion and contacting between cam and probe. In this paper, we compensate the motion error while simply liner equation. And we have a solution that we change the figure of probe when we have a contacting error. We compared the data measuring on developed automatic cam profile measuring system with the data measured on CMM.

Key Words : Cam Profile(캠 프로파일), Error Compensation(오차 보정), Displacement Sensor(변위 센서), Radial Runout(회전 편이웃), Measuring Probe(측정 프로브), Cam Shaft(캠 축)

1. 서론

캠은 모양이 다양하고, 캠과 종동절체는 여러 가지 방식으로 결합될 수 있다는 특징 때문에 응용범위가 넓은 기계

요소이며, 두 링크의 직접 접촉에 의하여 운동을 전하는 기구로서 한쪽 링크에 적당한 윤곽을 주고 이것과 직접 접촉을 하는 링크로부터 필요한 주기 운동을 얻는 기구를 말한다. 이러한 캠은 구조의 단순성, 운동형태의 자유로운 선택,

* 충남대학교 기계공학과
+ 충남대학교 기계공학과
++ 교신저자, 충남대학교 기계공학과 BK21 메카트로닉스 사업단 (hongjh@cnu.ac.kr)
주소: 305-674 대전 유성구 궁동 충남대학교 기계공학과
+++ (주) 풍산금속
++++ 한국기계연구원
+++++ 한밭대학교 기계설계공학과

복합적인 운동묘사의 편이성 때문에 여러 기계 장치에서 사용되고 있다⁽¹⁾. 캠에 대한 연구는 Tesar와 Mathew가 모델 캠의 설계적인 관점에서의 합성(Synthesis)과 동특성을 분석하였고⁽¹⁾, 동적인 캠 시스템의 기술적 상태에 관한 연구도 진행하였다⁽²⁾. 또한 중동절에서 나타나는 각종 특성에 관해서는 Raghavacharyulu와 Rso가 캠의 중동절 시스템에서의 점프(Jump)특성을 연구⁽³⁾한 바 있고, Kim과 Newcombe는 캠의 중동절 변위, 속도, 가속도를 확률적(Stochastic) 기법을 이용하여 운동을 관찰⁽⁴⁾하였고, 이 확률적 모델은 Dhande와 Chakraborty⁽⁵⁾에 의해 발표된바 있다.

캠의 가공에 대해서는 Oshima는 직선 보간으로 NC Milling M/C에 의한 캠 형상 가공에 대한 연구⁽⁶⁾를 하였고, Papaiouannou 등은 캠의 운동과 가공을 고려하여 곡선의 다음 위치의 형상좌표를 선정하는 방법을 제시⁽⁷⁾하였으며, Gal과 Tuzr 등은 CNC연삭기로 캠의 최종형상을 연삭하는데 대한 연구⁽⁸⁾를 하였고, 김찬봉 등은 캠의 윤곽을 직선 보간에 의한 가공과 원호보간에 의한 가공에 대한 비교 연구 결과로 원호보간에 의한 가공이 훨씬 유용하다는 발표를 하였다. Lin 등은 각종 캠에 대한 CAD/CAM을 활용하여 설계 및 제조에 관한 연구를 한 바 있다⁽⁹⁾.

일반적으로 캠 축을 제작할 때 가장 중요한 부분은 제한된 시간 안에 얼마나 빠르게 벨브를 계폐시킬 수 있느냐, 얼마나 오랫동안 벨브의 열린 상태를 유지시킨 후 신속하게 닫히게 하느냐에 따른 형상 설계 부분이다. 캠의 제조과정은 외경선삭, 연삭, 열처리, 그리고 마무리 연삭가공을 통해 최종형상을 얻는다. 이런 가공 시 캠 프로파일이 설계된 대로 가공되는가 하는 가공 정도를 점검하는 것이 무엇보다 중요하다. 최종 캠 프로파일의 가공 정도를 측정하기 위해서 일반적으로 상용 측정기를 사용하는 검사 용역업체에 의뢰하여 측정 작업을 수행한다. 분광 분석기, 형상측정기, 캠 프로파일 측정기, 표면결함 자동 측정기 등 상용의 제품들이 나와 있으나 고가의 장비이며, 별도의 캠 측정에 대한 전문화된 인력이 필요하다. 더구나, 이 장비들은 캠 축 가공 후 측정에 초점을 맞추고 있기 때문에 가공 중의 정도를 알아보는 것은 용이하지 않다.

따라서 본 논문에서는 회전 런-아웃(Radial run-out) 측정 방식을 적용한 캠 프로파일 측정 시스템을 구성하고 그 특성 및 성능을 고찰하고자 한다. 특히, 측정대상으로서 디젤엔진용 SOHC(Single Over Head Camshaft)의 캠을 측정 대상으로 고려하여 수행하였다. 캠 축의 생산 최종단계에서의 캠 프로파일 측정 검사 뿐만 아니라 가공 중인 현장에서 용이하게 캠 프로파일을 측정 보정⁽¹²⁾하고, 자동 측정이

가능하도록 Labwindows를 활용하여 보다 쉽게 측정 결과를 얻을수 있도록 하여 가공품 정밀도 향상 및 측정 소요 시간 단축등 현장에서 저가로 활용 가능한 전용 캠 프로파일 측정시스템을 개발하는데 있다.

2. 측정원리 및 보정

2.1 캠 프로파일 측정 원리

회전 런-아웃 측정방식이란 측정 대상을 회전시킬 때 외부에 고정된 측정 기준으로부터 반경 방향 상대 변위를 측정하는 것을 의미한다. 직원 단면을 갖는 대상의 런-아웃 측정 결과는 회전 오차를 나타내고, 반대로 임의 단면을 갖는 대상에 대해 일정한 회전축으로 측정된 런-아웃 결과는 대상의 원주면 형상을 나타낸다. 본 연구는 후자의 경우에 해당하며, Fig. 1에 나타난 개념도와 같이 회전각 θ 에 대한 반경방향 변위 R로서 캠 프로파일 정보를 얻을 수 있다. 여기서 회전 런-아웃의 범위는 캠 형상의 기초원에서 꼭지원까지이다.

2.2 캠 프로파일 측정 오차 보정

2.2.1 시스템 운동 오차 보정

런-아웃 측정방식으로 캠 프로파일을 측정하기 위해서는 일정한 회전축이 유지되어야 한다. 그러나 실제 모터 자체의 회전오차, 커플링 및 베어링 특성 등으로 인하여 회전 운동 오차가 발생하게 된다. 모터의 회전축과 심압대축의 중심은 모터축 저널의 오차 e 만큼 더 큰 회전 궤적을 그리면서 원추운동을 한다. 회전 운동에서 생기는 오차를 보정하기 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 가정 1. 캠 축은 축 방향으로 직선을 이룬다.
- 가정 2. 캠 축의 저널부의 단면은 직원이다.

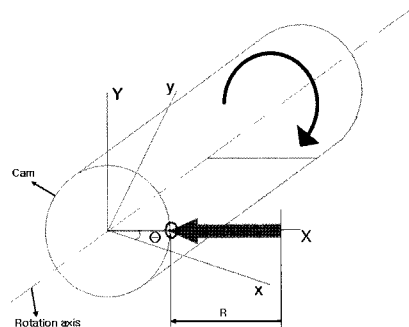


Fig. 1 The principle of cam profile measurement

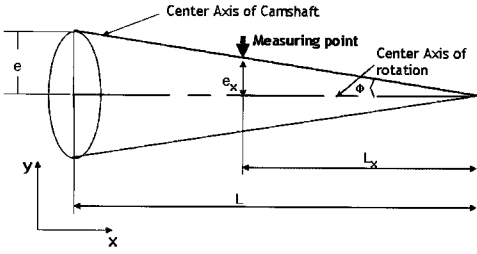


Fig. 2 Schematic of rotating camshaft

위 그림에서

$$\tan \theta = \frac{e}{L} \quad (1)$$

이며, L은 각 저널 사이의 변위, e는 캠 축의 회전오차 변위이다.

Fig. 2에서 심압대 끝에서 측정하려는 캠까지의 길이를 L_x , 그리고 그 오차를 e_x 라 한다면,

$$e_x = \tan \theta \times L_x \quad (2)$$

이다. 식 (1)과 (2)를 이용하여 L_x 위치에서의 보정값 e_x 를 구하고 보정을 하면,

$$R_{com} = R_m - e_x \quad (3)$$

이다. 여기서 R_{com} 은 운동오차가 보정된 캠의 반경, R_m 은 운동오차 보정되기 전 캠의 반경이다.

2.2.2 프로브의 캠 접촉 측정 오차

캠은 각각 서로 다른 반경과 중심을 갖는 원에 의해서 구성되고 있기 때문에 센서의 프로브가 고정되어 있고, 캠 축이 회전을 한다면, 프로브의 측정위치와 캠이 접촉하는 위치가 회전하는 각도 별로 달라진다. 그 결과 Fig. 3에서와 같이 e만큼의 오차가 존재하게 된다. 본 논문에서는 접촉식 센서를 사용하여 측정을 수행함으로써 필연적으로 발생하는 캠과 프로브의 접촉오차를 캠과 접촉하는 프로브의 형상 변화를 시킴으로써 오차를 최소화하고자 한다. 이를 설계 데이터를 이용하여 프로브 형상에 따른 오차값 e를 예측하고, 다음 식으로 측정값 R을 구할 수 있다.

$$R = (R_1 \cos \alpha) - e \quad (4)$$

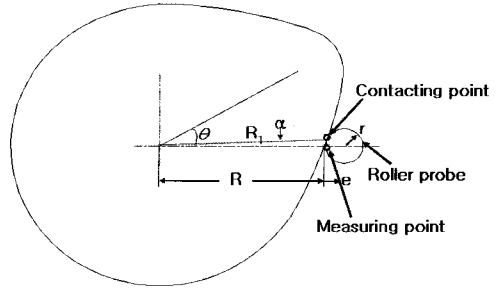


Fig. 3 Error of the type of roller probe

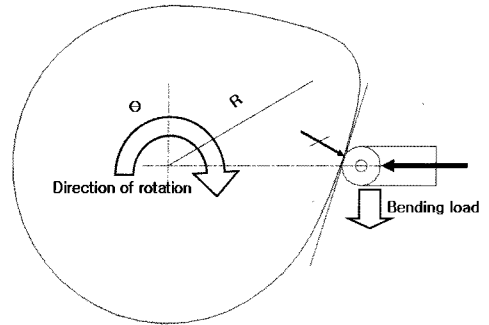


Fig. 4 The shape of the roller type probe ($0^\circ < \theta < 90^\circ$)

여기서, R은 측정하고자 하는 반경값, R_1 은 접촉점에 대한 반경값, α 는 접촉각이다.

2.2.3 캠 회전에 따른 프로브 굽힘 변형 오차

프로브는 캠 축의 회전에 의해서 변형을 일으킨다. Fig. 4와 같이 캠이 시계방향으로 회전하고 있다는 것을 가정하면, 프로브가 캠의 측면 아래 부분에 있을 경우, 캠의 측면 원 부분에 회전력으로 발생하는 힘에 의해서 프로브가 아래 방향으로 굽힘 변형이 일어나 정확한 측정이 이루어지지 않는다.

반대로 캠 축이 반 시계방향 회전을 가정한다면 위에서 언급한 현상이 반대로 발생하게 된다. 따라서 정확한 측정을 위해 캠 축을 시계방향과 반시계방향으로 각각 1회전씩 회전을 시켜 데이터를 획득하고 최종데이터는 각각의 측정값 중 프로브의 굽힘변형이 일어나지 않은 구간을 정확한 값으로 선택하여 캠 프로파일을 획득한다(여기서 캠 프로파일 측정점의 기준은 꼭지원의 최대점, 즉 획득한 캠 프로파일 데이터의 최대점을 회전각 $\theta=90^\circ$ 로 기준하였다).

3. 측정시스템 구성

3.1 시스템의 개요

측정 시스템은 Fig. 5와 같이 세 부분으로 구성 되어 있다. 캠 축의 회전과 측정부의 모션을 담당하는 구동부, 센서를 이용하여 캠 프로파일의 데이터를 수집하는 측정부, 구동 및 측정에 대하여 컴퓨터를 이용해서 제어 하는 제어부로 구성 되어 있다.

구동부는 다시 세 부분으로 나눌 수 있다. 캠 축의 길이방향으로 이송하는 Z축과 캠 축의 반경방향으로 이송하는 R 축 그리고 캠 축을 θ 만큼 회전시키는 θ 축으로 구성이 되어 있다. R축과 Z축은 측정부를 측정대상인 캠으로 이송하는 역할을 한다. θ 축은 캠 축을 일정한 속도로 회전을 하고 캠 프로파일을 런-아웃 방식으로 회전시키는 역할을 한다.

측정부는 LVDT를 이용하여 캠의 프로파일을 측정하는 기능을 담당한다. 이 측정부에서 측정된 결과는 A/D 컨버터를 통해 제어부로 전송된다. 구동부의 R축과 Z축을 이용하여 측정 대상인 캠으로 이송되어 진다.

제어부는 구동부의 세 축에 대한 이송 변위 및 회전 변위에 대한 지령을 하며 측정부에서 측정된 신호를 획득하고 필요한 오차에 대해 보정하는 연산 기능 그리고 측정 결과를 디스플레이 하는 기능을 담당하고 있다.

3.2 구동부

시스템의 구동계는 1개의 AC서보모터와 2개의 스테핑모터를 사용하고 있다. θ 축은 AC 서보모터로 구동되며 십압대(Tailstock)와 캠 축 사이에 돌리개(Dog)를 장착하여 캠 축을 확실하게 회전할 수 있도록 하였다. 캠 축 회전의 센싱은 광학엔코더를 이용하였다. AC 서보모터는 회전정보를 광학엔코더를 통해 획득하며 이 회전정보를 이용하여 제어부에서 제어하였다. 캠 축의 반경 방향 이송, 즉 R축에 관한 이송은 상용 이송계를 사용하였다.

이 R축의 이송은 캠 축과 수직으로 장착되어 측정부가 측정하고자 하는 캠의 반경을 측정할 수 있도록 하였다. 이송계는 스테핑모터가 장착된 LM시스템(Linear Motor system)을 이용하였다. LM 시스템의 방식은 볼스크류 방식이고 KR형 정밀(P)급이다.

캠 축의 길이 방향 즉, Z축의 이송은 타이밍 벨트, LM 가이드, 리미트(Limit)스위치를 이용하였다. Z축은 캠 축과 수평으로 구성되어 센서부가 측정하기 원하는 캠으로 이송할 수 있도록 하였다. R축과 마찬가지로 Oriental사의 스테핑 모터를 사용하였다.

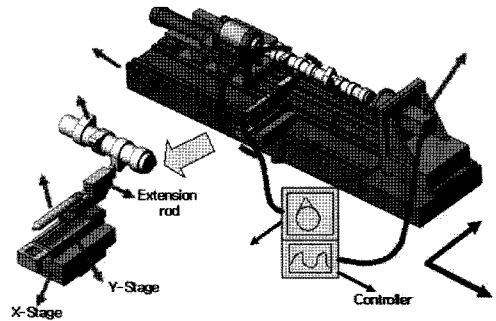
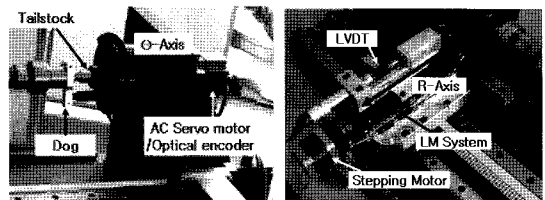
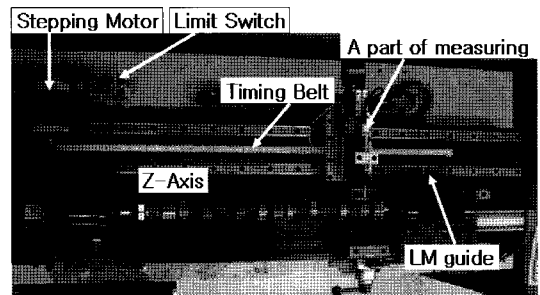


Fig. 5 Schematic diagram of the cam profile measuring system



(a) θ -axis

(b) R-axis



(c) Z-axis

Fig. 6 Motion system

3.3 측정부

측정부는 선형 가변 차동변압기(LVDT :Linear Variable Differential Transformer)를 이용하였다. 이 LVDT는 기계적인 변위를 전기 신호로 바꿔주는 센서이다. 코어(Core or Armature)의 이동으로 1차 코일에서 2차 코일에 유도되는 자속의 변화, 즉 상호 인덕턴스를 변화시키는 변환기(Transducer)로 기계적, 전기적으로 분리되어 움직일 수 있는 코어의 변위에 비례하여 전기적 출력이 발생하게 된다.

LVDT의 구성은 코일이 감기는 포머(Former), 코어(Core), 코어를 지지해 주는 지지봉 그리고 케이스(Case)로 구성되어 있다. Fig. 7은 본 연구에서 사용된 LVDT 센서의 기본

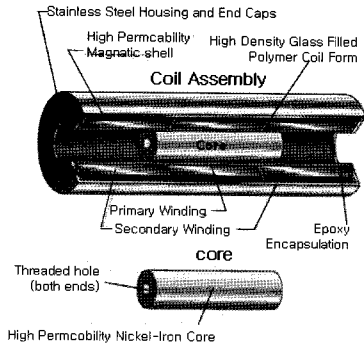


Fig. 7 Schematic diagram of the LVDT

구성 개략도를 나타낸다. 본 논문에서 사용된 LVDT 센서는 D5M-S10RB를 사용하였다. 본 실험에서 사용된 LVDT 센서 특성을 실험한 결과, 측정 범위는 0.5mm ~ 8mm 이며, 측정 구간은 7.5mm이다. 센서의 선형성은 0.13% FSO이었고, 분해능은 센서 감도와 노이즈의 크기를 적용하여 5 μ m로 평가되었다. 아울러 감도는 0.978mm/V, 노이즈는 2mV 임을 확인하였다.

3.4 제어부

모터의 제어와 변위측정 자기 센서로부터 수신되는 데이터는 LabWindows/CVI를 이용하였으며, 프로그램의 흐름도는 Fig. 9과 같다. 3개의 모터는 각각 비례-적분 제어기법을 적용하여 독립적으로 회전 및 변위 이송을 가능하게 하였다(14). 그리고 다양하고 정밀도 있는 실험을 수행하기 위해서 속도 및 이송거리, 이송방향 등을 임의의 조절 가능하도록 프로그램 하였으며, 실시간 회전각을 수치적으로 모니터링 가능토록 하였다. 또한 회전각에 따른 LVDT의 이송변위를 알 수 있도록 그래픽화 했으며, 각각의 데이터를 저장하여 분석할 수 있도록 하였다.

제어부분에서는 각 구동부에 해당되는 모터의 위치 및 속도 등을 임의의 조절가능 하도록 하였다. 그리고 LVDT에서 수신되는 데이터의 획득 및 보정 연산을 담당하도록 하였다.

마지막으로 획득한 데이터를 디스플레이 하고, 저장할 수 있도록 하였다. 이렇게 각 모터의 제어와 데이터를 획득함으로써 유연성 있는 측정을 가능토록 하였다. Fig. 10은 개발된 프로그램 화면의 모습을 보여주고 있다.

본 연구에서 직접 설계 제작한 캠 전용 프로파일 측정시스템은 Fig. 11과 같다.

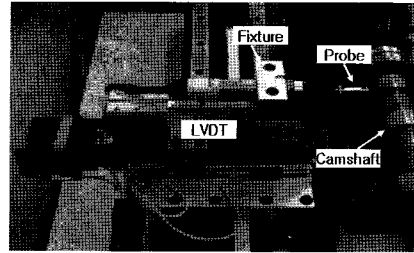


Fig. 8 A part of measurement in measuring system

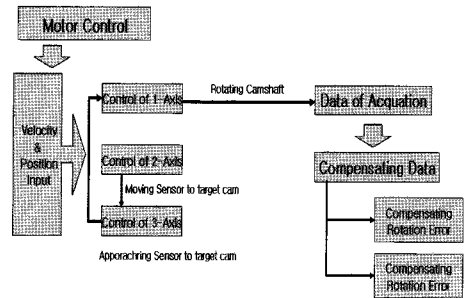


Fig. 9 Flow chart of the program

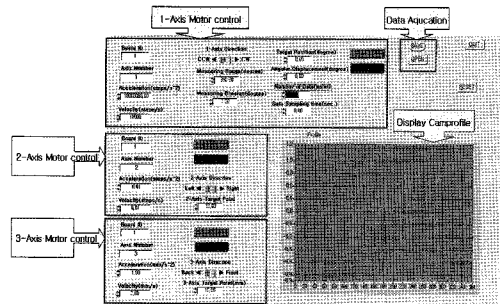


Fig. 10 Motion control & measurement program

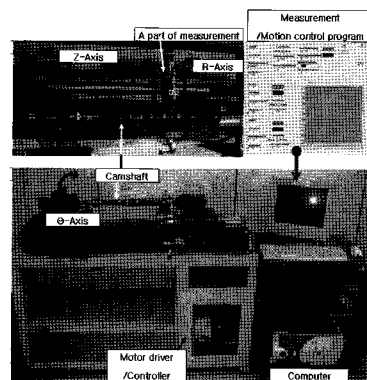


Fig. 11 Cam profile measuring system

4. 실험 및 결과 고찰

본 연구에서 실제 측정할 캠은 4행정 디젤기관용으로 SOHC형이다. SOHC는 한 개의 캠축에 의해서 흡배기 밸브를 작동하는 형식이다. 여기서 캠 형상의 설계 시 사용될 수 있는 정보는 기초원(Base circle)의 반지름 $r_0 = 16\text{mm}$, 기초원과 꼭지원(Nose circle)의 최장거리 $l_m = 6\text{mm}$ 이며, 캠 형상은 흡기용과 배기용 캠은 같은 형상으로 볼록 캠의 형태로 되어있다. 이에 밸브의 개폐 선도에서 흡배기 밸브의 열림 각도는 252° 이므로 4사이클 엔진의 경우 크랭크축의 회전에 동기시켜 크랭크축의 1/2의 회전속도로 캠축을 회전하여야 하므로 캠의 작동각도 ϕ 는 252° 의 1/2인 126° 이다.

제작된 캠 프로파일 측정 시스템과 오차를 고려한 측정방법에 대해 검증을 실시하였다. 우선 Fig. 12에 보인 캠 샤프트를 대상으로 3차원 측정기를 통해 신뢰할 수 있는 캠 프로파일 데이터를 확보하였다. 이 3차원 측정기의 측정데이터

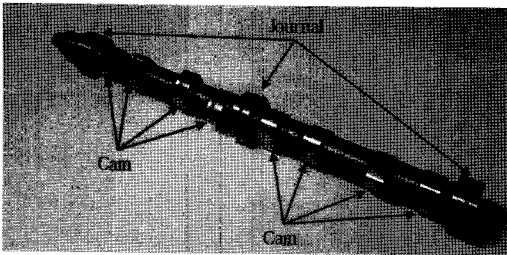


Fig. 12 Cam shaft of diesel engine for experiment

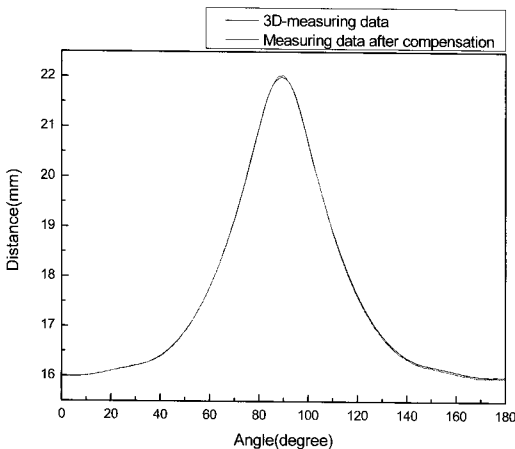


Fig. 13 A comparison of 3D-measuring data and developed system

와 본 연구에서 제작된 측정시스템을 활용하여 획득한 데이터를 보정후 상호 비교하였다. 그 결과는 Fig. 13과 같으며 구간 내 최대 오차크기는 $35\mu\text{m}$ 로 평가되었다. 따라서 캠축 허용공차가 $2/100\text{mm}$ 임을 고려한다면 본 연구에서 제작한 캠 전용 프로파일 측정시스템은 사용가능하리라 사료된다.

5. 결론

본 연구는 회전 런-아웃 측정 방법을 이용하여 실물의 캠을 모델로 하는 캠 프로파일의 측정에 목적이 있다. 캠 프로파일의 측정 보정 방법을 고안하고, 실제 캠 프로파일의 측정을 통하여 이에 대한 타당성을 증명하였다.

그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 캠 축의 회전으로 생길 수 있는 운동오차를 간단한 선형식을 사용하여 보정하였다.
- (2) 전용 캠 프로파일 측정 시스템에 대한 설계 및 시스템을 구성하였으며, 시스템의 3축에 대한 제어와 데이터 획득 및 연산에 관한 프로그램을 프로그래밍 하였다.
- (3) 캠 프로파일과 프로브의 크기의 변화를 통해 보다 나은 정밀도를 얻을 수 있는 프로브 크기에 대해 고찰하였으며, 최소 3mm 이하 반경의 상용 물리를 선택하여 측정을 했을 경우 정밀한 측정치를 얻을 수 있었다.
- (4) 캠의 회전에 따른 롤러 프로브 변형에 대하여 고찰하였으며, 정밀 측정을 하기 위한 방법으로 캠 축을 시계방향, 반시계방향 각 1회씩 회전하는 측정 방법을 제안하여 최대 오차 $35\mu\text{m}$ 를 구현하였다.
- (5) 항상 가공부터 캠 프로파일을 측정하여 최소한의 정삭 가공 여유를 두고 가공 마무리가 가능함에 따라 가장 많은 시간이 소요되는 정삭가공 시간을 단축시켜 생산성을 향상시킬 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) Tesar, D., and Mathew, G. K., 2003, *Modelled Cam System: Analysis, Design and Synthesis*, Lexington Book.
- (2) Papaioannou, S. G., 1988, "Computer-Aided Manufacture of High Precision Cams," *Trans. ASME, Journal of Engineers for Industry*, Vol. 110, pp. 352~359.

- (3) Ranghavacharyulu, E., and Rao, J.S., 1975, *On the Jump Characteristics of Cam-Follower System*, Procd. ISTAM Congress, pp. 156~210.
- (4) Kim, H. R. and Newcombe, E. R., 1978, "Stochastic Error Analysis in Cam Mechanisms," *Mechanisms and Machine*, Vol. 13, No. 6, pp. 631~641.
- (5) Dhande, S. G., and Chakroborty, J., 1975, *Mechanical Error Analysis of Cam Follower System-A Stochastic Approach*, Fourth World Cong. Theory Mach. Mechanisms, Mech. Engr. Publ. Ltd., London, pp. 957~962.
- (6) Oshima, T., 1970, "Cam Profile Machining by Numerically Controlled Milling Machine", *Review of the Electrical Communication laboratory*, Vol. 18, No. 3, pp. 226~295.
- (7) Papaioannou, S. G., and Kiritsis, D., 1988, "Computer-Aided Manufacture of High Precision Cams," *Trans. ASME, Journal of Engineers for Industry*, Vol. 110, No.18, pp. 352~366.
- (8) Gal-Tzur, Z., 1989, "Design and Manufacturing for Integrated CAD/CAM of Cam," *Trans. ASME, Journal of Engineers for Industry*, Vol. 111, No. 8, pp. 307~320.
- (9) Lin, A. C., 1988, "Computerized Design and Manufacturing of Plate Cams," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 26, No. 8, pp. 1395~1400.
- (10) Edward, E. H., 1972, *Handbook of Measurement and Control*, Schaevitz Engineering, pp. B1-4.
- (11) Ernest, O. D., 1983, *Measurement Systems Application and Design*, McGraw-Hill, pp. 211~246.
- (12) Cho, N. H., Lee, J. H., and Choi, M. Y., 1999, "Surface Roughness Stylus Profilometer Measurement Error Compensation," *J. of KSMTE*, Vol. 8, No. 1, pp. 126~134
- (13) Kim, S. C., Hong, D. S., and Chung, W. J., 2004, "PID Control Fuzzy Control Oil Cooler," *J. of KSMTE*, Vol. 13, No. 4, pp 87~94