

디젤엔진용 캠의 형상 설계에 관한 연구

이완하*, 홍준희⁺, 송화섭⁺⁺

(논문접수일 2006. 2. 6, 심사완료일 2006. 3. 30)

A Study on the Design of Diesel Engine Cam Profile

Wan-Ha Lee*, Jun-Hee Hong⁺, Hwa Seop Song⁺⁺

Abstract

It is a study on the design of a cam profile for diesel engine SOHC. It is used a reverse engineering method without the usual copy processing. It draws up the contour data from an actual cam and processes by CNC. The profile of the cam is reappeared to be up to operational specifications that are the opening and shutting time, lift, speed and acceleration of the inhalation and escape valves. While the cam operating, the noise and vibration are occurred by the sudden change of speed. The new design of cam profile is suitable for the valve operations to be smooth. We propose the design method of a cam profile for the reappearance of an actual cam. It is proved to be the propriety about the design of the cam profile through the processing, measurement, and comparison of the cam profile.

Key Words : Cam(캠), Cam profile(캠 형상), reverse engineering(역 공학), Cam design(캠 설계)

1. 서론

내연기관의 밸브트레인에 사용되는 캠 형상은 크게 가솔린 엔진이나 소형 디젤엔진에 사용되는 DRRD(Dwell-Rise-Return-Dwell) 캠과 선박 엔진이나 대형 디젤 엔진에 사용되는 DRDR(Dwell-Rise-Dwell -Return) 캠으로 나눌 수 있으며 이 캠의 형상은 엔진의 열역학적 및 동역학적 성능에 중요한 영향을 미친다. 이런 이유로 지난 수십 년 동안 캠 형상설계에 관한 많은 연구가 있어 왔으며 단순히 캠

형상뿐만 아니라 밸브 트레인의 기구학적 및 동적 성능을 최대화시키는 최적의 캠 형상에 대한 연구도 계속되어져 왔다⁽¹⁻⁵⁾. 일반적으로 캠 형상은 엔진의 흡기와 배기 효율을 위해서 캠의 가속도가 큰 것이 좋으나 캠 가속도가 클 경우 관성력의 증대로 인해 밸브 트레인의 동적 성능이 나빠지는 결점도 생긴다. 또한 캠 형상이 밸브 스프링의 서지 현상에 직접적인 영향을 미치는 등 밸브 트레인계를 이루는 각 부품들의 내부 진동에도 직접 또는 간접적으로 영향을 미친다. 근래에는 엔진의 운전속도가 점점 고속화됨에 따라 단순히 기

* 충남대학교 대학원 기계공학과

+ 교신저자, 충남대학교 기계공학과 BK21 메카트로닉스 고급인력 양성 산학공동사업단 (hongjh@cnu.ac.kr)
주소: 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220

++ 충남대학교 공과대학 공업교육계열

구학적 캠 설계 뿐 아니라 캠의 형상이 밸브 트레인 전체의 동적 성능에 미치는 영향을 고려한 캠 형상의 최적 설계에 대한 중요성도 커지게 되었다⁽⁶⁾.

종래의 캠 설계 방법은 캠의 윤곽에 대해서 극좌표로 캠 곡선을 주는 방식 즉, 캠의 변위각을 몇 등분해서 반지름 방향으로 선을 긋고 각각의 반지름의 길이가 캠 곡선을 따라 변화하도록 캠 윤곽을 결정하는 것이다. 그러나 실제로 운동으로서 바라는 것은 중동절 작동단의 운동이다. 중동절 작동단에 올바른 운동을 주기 위해서는 우선 중동절 변위를 시간의 함수로서 정하고 캠의 회전에 따른 중동절 레버의 회전각을 구하고 이 회전각으로부터 중동절 구성을 풀어 중동절 작동단의 변위를 구해 캠의 형상을 결정한다. 이와 같은 운동으로부터 캠의 형상을 구하는 것이 합성 과정에 의한 캠 설계이다.

현재는 CAD/CAM 시스템으로 설계에서 가공에 이르기까지 캠의 데이터가 연속적으로 이동한다. 데이터는 CAD 파일로 설계되어야 한다. NC 코드를 이용하여 가공을 하는데 NC코드를 생성하기 위해 설계된 CAD데이터가 필요하다. 이를 위해 기존의 실물 제품과 도면에서 CAD데이터 확보를 위해 역공학(reverse engineering)의 개념을 도입하는 것이다.

역공학이란 CAD 데이터가 존재 하지 않는 사물로부터 제품개발 프로세스의 역방향으로 제품설계를 수행하는 것을 말한다. 이것은 일반적으로 일련의 세 단계를 거치게 되는데 첫 번째로 임의의 제품을 형상 스캐너 및 3차원 측정기 등으로 측정하여 3차원 포인트 데이터를 생성하고 두 번째로는 획득한 좌표 점을 이용하여 최적의 형상 모델링을 한다. 세 번째로는 완성된 형상 데이터와 처음 획득된 좌표 값들과의 오차를 분석하여 3D모델링 및 2D 도면을 생성한다. 이런 역공학의 주요 응용 분야는 설계도면이 존재하지 않는 제품의 단순 복제, 기존 제품의 해석 및 수정을 통한 새로운 제품의 개발 또는 제품 개발 단계에서의 모형(mock-up)이나 클레이 모델(clay model)로부터의 CAD모델 생성 등이다.

정보공유에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데 현대에 와서는 상당수의 제조환경이 점차 분산 이질화 되어 가고 있다. 이로 인하여 정보의 공유와 협동 작업의 중요성이 커지고 있으며 조직 및 지리적 제약을 극복할 필요성이 대두되고 있다. 이를 효과적으로 해결하기 위한 중요한 인프라(infra structure)가 인터넷 및 관련 기술인데 점차적으로 CAD 모델에 대한 엔지니어의 작업도 웹 기반으로 되어가고 있다. 이는 결국 인터넷을 통해 빠르고 쉽게 부품데이터에 접근할 수 있는 기반을 마련하고 실제 2차원 또는 3차원의 모델 데

이터를 공유함으로써 실무자들의 협업을 가능케 한다⁽⁷⁾.

본 연구에서는 디젤엔진용 SOHC(Single Over Head Camshaft)의 캠 형상에 대하여 역공학 방법을 이용하여 캠의 형상의 재현에 있어서 적합한 설계방법을 제시하고자 한다. 즉, 종래의 모방가공법을 탈피하고 CNC가공에 적합하도록 캠의 윤곽형상의 데이터를 작성하고 설계 시 요구되는 다양한 조건들이 능동적으로 대응될 수 있도록 설계에 대한 유연성을 부여하고자 모델 캠의 형상곡선에 대한 설계 방법을 고안하고 모델 캠 및 설계된 캠 형상의 데이터를 비교 분석하여 얻어진 결과를 통해 캠 형상 설계에 대한 타당성을 입증하였다.

2. 모델 캠의 형상 및 측정

2.1 모델 캠의 형상

Fig. 1은 모델 캠의 형상을 나타낸다. 모델 캠은 4행정 디젤기관용으로 SOHC형의 구조를 가지고 있다. SOHC는 한 개의 캠축에 의해서 흡배기 밸브를 작동하는 형식이다.

여기서 캠 형상의 설계 시 사용될 수 있는 정보는 기초원(base circle)의 반지름 $r_0 = 16\text{ mm}$, 기초원의 중심으로부터 꼭지원(nose circle)의 최장거리 $r_m = 22\text{ mm}$ 이며, 캠 형상은 흡기용과 배기용 캠은 같은 형상으로 볼록 캠의 형태로 되어있다. Fig. 2의 밸브의 개폐 선도에서 흡배기 밸브의 열림 각도는 252° 이므로 4사이클 엔진의 경우 크랭크축의 회전에 동기 시켜 크랭크축의 1/2의 회전속도로 캠축을 회전하여야 하므로 캠의 작동각도 ϕ 는 252° 의 1/2인 126° 이다.

2.2 모델 캠의 측정

Fig. 3은 모델형상의 측정과 가공 형상 측정에 사용된 장

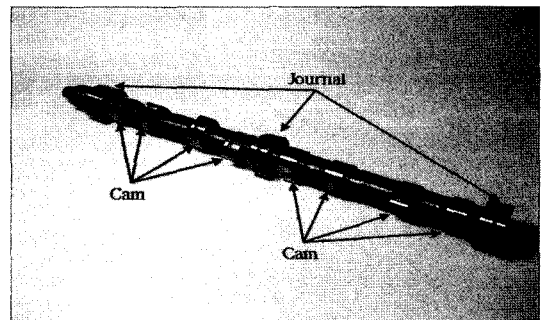


Fig. 1 Camshaft of diesel engine

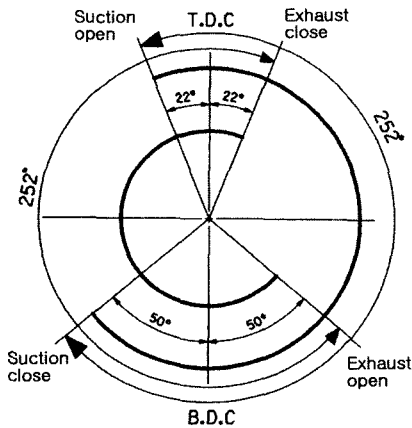


Fig. 2 Valve opening and shutting diagram of model cam

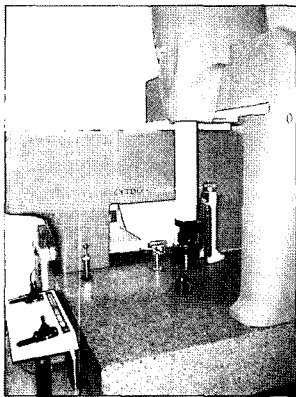


Fig. 3 TOP 665C CMM

비로 (주)덕인의 TOP 665C 접촉식 3차원측정기(CMM)이다. 접촉식 측정기는 데이터의 정밀도가 높으며 측정 데이터가 일반적으로 일정 간격의 평면상에 놓인 배열 형태를 가진다. 이러한 접촉식 측정기는 CMM과 관절형 디지털타이저 등이 있다. CMM의 경우 측정 데이터의 정밀도가 매우 높으나 고가이고 관절형 디지털타이저는 정밀도가 다소 떨어지나 저가이고 측정의 자유도가 높다는 장점이 있다⁽⁸⁾.

CMM의 측정범위는 $X = 600mm$, $Y = 600mm$, $Z = 500mm$ 이며, 정확도(Accuracy)는 ISO 10360-II의 규격이고 공간 정확도(E)는 $2.5\mu m + L/250\mu m$, 분해단위는 $0.5\mu m$, 반복정도는 $0.3\mu m$ 이다.

Table 1은 CMM으로 모델 캠의 형상을 측정한 좌표 데이터이다.

Table 1 CMM measurement data of model cam

NO.	X	Y	Z
1	15.9982	0.0000	-5.9880
2	15.9952	0.2792	-5.9880
3	15.9879	0.5583	-5.9880
4	15.9760	0.8373	-5.9880
...
358	15.9765	-0.8373	-5.9880
359	15.9893	-0.5584	-5.9880
360	15.9964	-0.2792	-5.9880
361	15.9982	0.0000	-5.9880

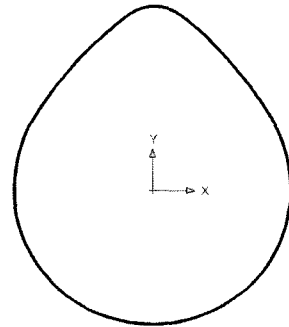


Fig. 4 CAD of model cam

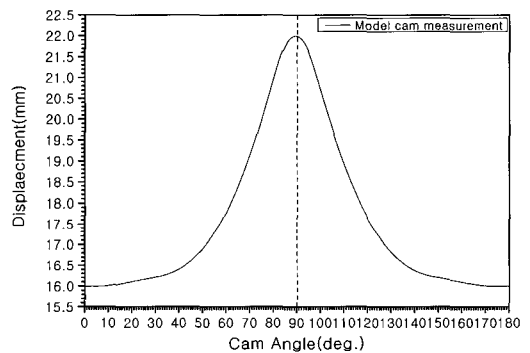


Fig. 5 Displacement diagram according to angle of the model cam

캠 형상에 대해서 CMM 프로브의 접촉점 마다 각각의 X, Y의 좌표데이터를 구하고 측정된 좌표데이터에 의해 Fig. 4와 같이 CAD 데이터인 DXF파일로 변환한다.

모델 캠의 CAD 모델로부터 기초원의 중심을 기준으로

각도(θ)에 따른 캠 형상의 윤곽까지의 거리(r)를 구한다.

Fig. 5는 모델 캠의 각도에 따른 변위 선도이다. 변위선도를 보면 기초원에 해당하는 $\theta=0^\circ$ ($r_0=16mm$)에서 꼭지원의 정상부에 해당하는 $\theta=90^\circ$ ($r_0=22mm$)까지의 변위차가 밸브의 최대 양정거리 $l_m=6mm$ 로 나타난다. 캠 각 $\theta=9^\circ$ 부근에서 변위가 증가하는 1차 변곡점이 나타나고, $\theta=82^\circ$ 에서 2차 변곡점이 나타난다.

3. 캠 형상 설계

기관의 설계상 밸브면적, 밸브양정 등이 결정되고 따라서 캠의 최대양정 l_m 와 함께 작동각도 ϕ 로 주워진다. Fig. 6에서 우선 O 를 중심으로 하는 반지름 r_0 인 기초원을 그린다. 이것은 $2r_0$ 가 l_m 의 4~6배가 되도록 정하는 것이 보통이다. 다음에 간극(gap)을 j 로 하여 $r_0+j=R_1$ 이 되는 간극원(gap circle)을 그린다. 이렇게 하여 중심 O 로부터 $b=R_1+l_0-r_1$ 인 거리 O_1 에 반지름 r_1 인 꼭지원을 그린다. 꼭지원의 반지름 r_1 은 나중에 서술되지만 필요한 조건에 따라서 1mm부터 8mm 정도의 범위로 한다. 간극원과 꼭지원에 접하는 측면원(flank circle)을 정한다.

3.1 측면곡선의 작도

측면원의 작도는 Fig. 6에서 O 로부터 $O \sim O_1$ 의 양측에 각각 $\frac{1}{2}\phi$ 의 각도로 직선을 그어 간극원과 꼭지원의 교점을 A, B 로 한다. 측면원은 A 또는 B 에서 간극원과 꼭지원에 접해야 한다. 따라서 그 중심 O_2 는 OA 혹은 OB 의 연장선상에 있고 측면원의 반지름 R 은 식 (1) 및 (2)와 같다.

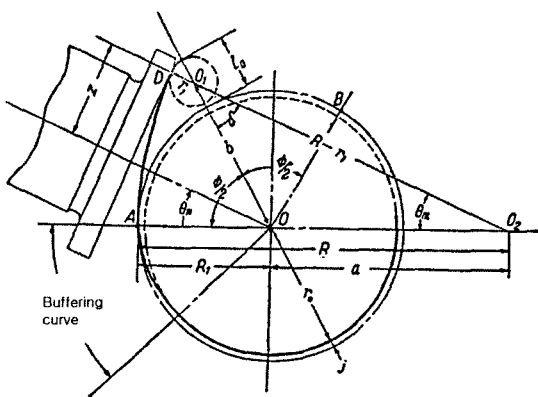


Fig. 6 The drawing of convex flank cam

$$(R-r_1)^2 = (b \sin \frac{\phi}{2})^2 + (R-R_1 + b \cos \frac{\phi}{2})^2 \quad (1)$$

$$R = \frac{b^2 - r_1^2 + R_1^2 - 2R_1 b \cos \frac{\phi}{2}}{2(R_1 - r_1 - b \cos \frac{\phi}{2})} \quad (2)$$

이 반경 R 은 양정의 시작과 끝부분에서 가속도가 지나치게 커질 수 있기 때문에 보통 양정의 15배 이내로 하는 것이 바람직하다. 따라서 캠과 태핏이 정확하게 측면원과 꼭지원의 접점 D 에서 만날 때까지 측면원의 최대회전각도 θ_m 은 식 (3) 및 (4)와 같다.

$$(R-r_1) \sin \theta_m = b \sin \frac{\phi}{2} \quad (3)$$

$$\sin \theta_m = \frac{b}{R-r_1} \sin \frac{\phi}{2} \quad (4)$$

3.2 캠 형상 설계

캠 형상 설계 조건은 기초원의 반지름 $r_0=16mm$, 꼭지원의 반지름 $r_1=5mm$, 캠의 최대양정 $l_m=6mm$ 그리고 캠의 작동 각도 $\phi=126^\circ$ 의 기본 정보를 이용하여 설계한다.

Fig. 7은 캠의 설계 과정이고 Fig. 8은 완성된 캠 형상이다.

설계된 캠의 형상에서 기초원을 제외한 나머지 불룩한 부분의 데이터는 기초원의 중심에서 일정한 각도 간격을 따라 거리 값으로 주어지고 설계된 캠의 변위선도는 Fig. 9이다.

양정곡선(lift curve)은 엔진의 성능을 정하는 중요한 요소일 뿐만 아니라 각 부의 내구성에도 큰 영향을 준다. 일반적으로 체적효율을 높이기 위해서는 밸브를 급격하게 개폐하는 것이 바람직 하지만 이것은 동시에 밸브나 리프터의 관성

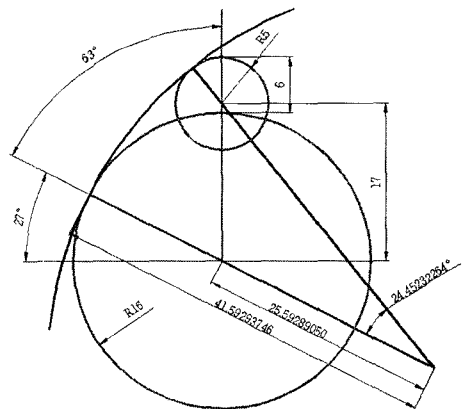


Fig. 7 Design process of cam

에 의한 충격력을 높여 각 부품의 내구성을 저하시키는 요인이 된다. 양정곡선은 측면원과 꼭지원의 반지름과 각도 조합으로 이루어지고 기초원의 중심을 기준으로 거리와 각도로 주어진다. Fig. 10은 설계된 캠의 양정곡선이다.

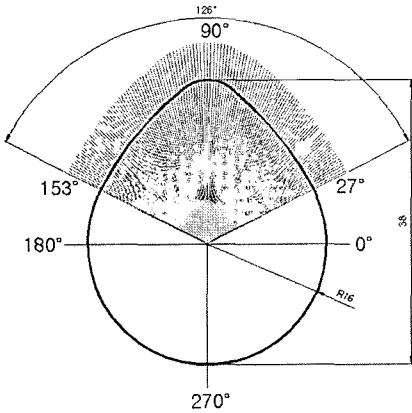


Fig. 8 Cam profile

캠의 운동은 캠의 작동 각도 구간 내에서 이루어진다. 속도(velocity), 가속도(acceleration)는 4사이클 기관에서 크랭크축의 각속도 즉 캠축의 각속도의 2배가 되어야 하므로 크랭크축이 2회전하면 캠축은 1회전을 한다. 디젤엔진의 최대 출력이 2800rpm일 때 각각의 속도, 가속도를 구하면 Fig. 11 및 Fig. 12와 같다.

이상의 운동 곡선으로부터 최대 양정은 6mm 이고, 최대 속도는 1.53m/s이다. 가속도의 최대값은 550.09m/s²이고, 최소값은 -365.4m/s²이다. 가속도의 최대값 및 최소값은 밸브 스프링의 설계, 캠 면 압, 밸브 축단응력 등에 영향을 준다. 최대 관성력을 결정하는 값으로 특히 주의할 필요가 있다.

4. 완충곡선부

밸브는 엔진의 작동 중에 기관의 본체보다도 온도가 높고 더욱 더 팽창한다. 따라서 밸브 닫힘 상태에 있어서 밸브의

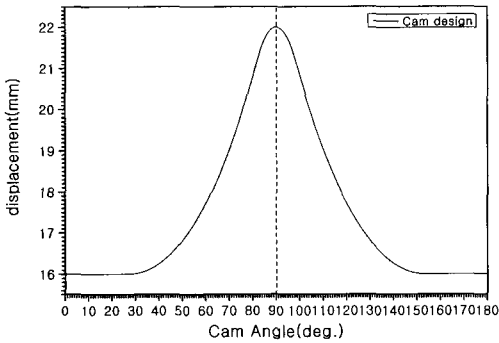


Fig. 9 Displacement diagram of cam design

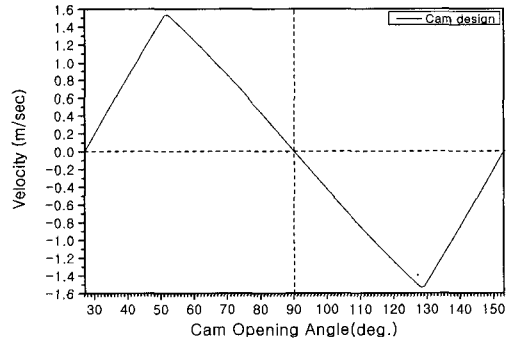


Fig. 11 Velocity curve of cam design

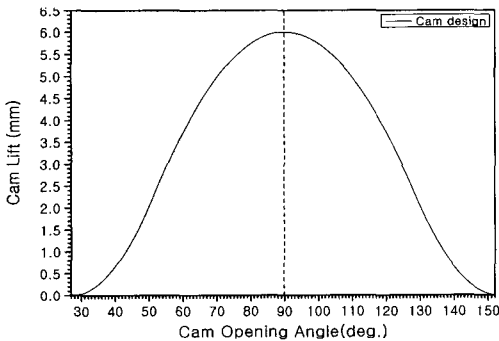


Fig. 10 Lift curve of cam design

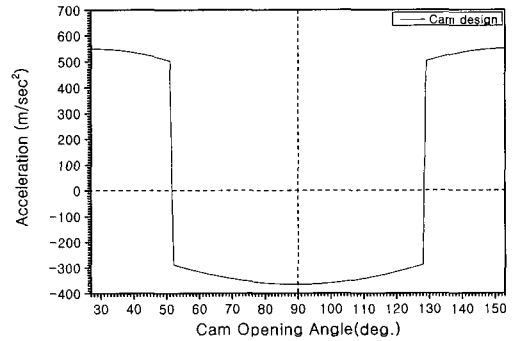


Fig. 12 Acceleration curve of cam design

끝면과 로커 암의 면과의 사이에서 발생하는 이 팽창을 고려하여 약간의 간극을 주지 않으면 기관이 작동운동에 도달할 때에 앞의 팽창 차에 상당하는 양만큼 밸브가 열리고 가스 누출이 생겨 밸브의 접촉부의 파손 등이 우려된다. 따라서 캠을 설계할 때에는 위의 팽창을 고려하여 간극을 주고 이 간극에 상당하는 양정만큼 캠이 움직이면 비로소 밸브가 열리도록 한다.

밸브가 열릴 때 밸브 작동장치와 밸브 끝에 충격을 주는 것을 완화시키기 위하여 캠의 기초원과 간극원 사이를 완충곡선(buffering curve)으로 연결한다. 완충곡선은 물론 캠의 폐쇄 측에도 설계한다. 캠 작동 중의 저속 운전 시 특히 소음 진동을 발생하므로 완충곡선부의 설계에는 특히 주의를 해야 한다. 완충곡선은 Fig. 13과 같이 측면원과 기초원의 사이를 완충곡선의 반지름 r_2 인 원호 AF 로 연결한 것이다. 기초원의 중심 O 에서 완충곡선의 중심 O_3 까지의 거리 a' 는 식 (5)와 같다.

$$a' = \frac{1}{2} \cdot \frac{2r_0 j + j^2}{r_0 - (r_0 + j) \cos \epsilon} \quad (5)$$

완충곡선부의 작동각도 ϵ 는 간극 j 의 크기에 따라 $10^\circ \sim 20^\circ$ 정도로 잡는다. 완충곡선부의 작동각도와 간극의 크기가 주어지면 식 (5)로부터 a' 를 구하게 되고 완충곡선의 반지름 r_2 이 구해진다.

완충곡선부가 있는 캠의 경우에는 F 와 A 에서 태핏의 상승속도는 0이 되며 태핏이 측면원과 접하는 A 에서 속도가 갑자기 0이 되기 때문에 소음과 진동이 발생한다.

근래에는 운전 시에 실린더 헤드와 밸브 작동기구의 열팽

창 또는 수축이 발생할 경우 혹은 밸브나 밸브 시트가 마멸된 경우에도 밸브가 반드시 좌착되도록 밸브 틈새를 밸브와 로커 암 사이에 설정한다⁹⁾. 알루미늄 합금제인 실린더 헤드인 경우에는 헤드와 밸브의 선폽창계수 차에 의해서 저온 시에 밸브 틈새가 적어지는 경향이 있다. 또 배기밸브에 관해서는 배기가스의 온도의 영향으로 밸브 틈새가 막힌다. 이 감소량에 밸브나 밸브 시트의 허용 마멸량을 더한 것이 최소한의 밸브 틈새로 밸브의 길이나 밸브 작동계의 형식에도 관계가 있지만 일반적으로 흡기 측의 틈새는 $0.1 \sim 0.2mm$, 배기 측에는 흡기 측의 틈새에 $0.05mm$ 정도 더한 양을 밸브와 로커암 사이에 설정하고⁹⁾ 있기 때문에 캠의 형상 설계 단계에서 완충곡선부의 설계단계를 배제하였다.

5. 모델캠 형상과 설계캠 형상의 비교

Fig. 14는 모델캠의 형상과 캠의 설계에 의해 가공된 설계캠의 형상을 CMM으로 측정하여 비교한 것이다.

모델캠 형상과 설계캠 형상의 변위를 비교해 보면 변위가 증가하기 시작하는 각도가 모델캠 형상에서는 약 9° 이고 설계캠 형상에서는 27° 에서부터 증가하기 시작한다. 두 형상의 변위가 증가하기 시작하는 각도는 약 18° 정도의 차이가 나고 설계캠 형상의 변위가 증가하기 시작하는 27° 에서의 두 형상의 변위차는 $0.187mm$ 이다. 모델캠 형상과 설계캠 형상의 변위가 다르게 변화하는 원인은 모델캠 형상에만 완충곡선의 구간이 있기 때문이다.

Fig. 15는 캠 형상의 각도별로 모델캠 형상과 설계캠 형상의 변위차를 나타낸다. 모델캠 형상과 설계캠 형상의 최대 변위차는 30° 에서 $0.226mm$ 로 나타났다. 이는 완충곡선부

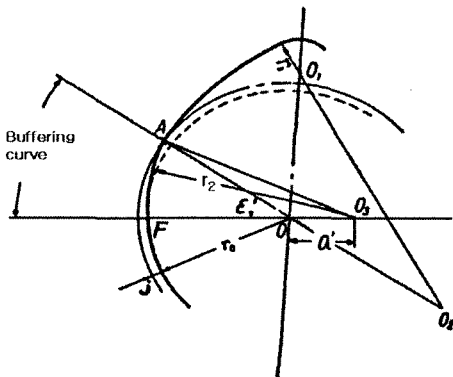


Fig. 13 The drawing of buffering curve

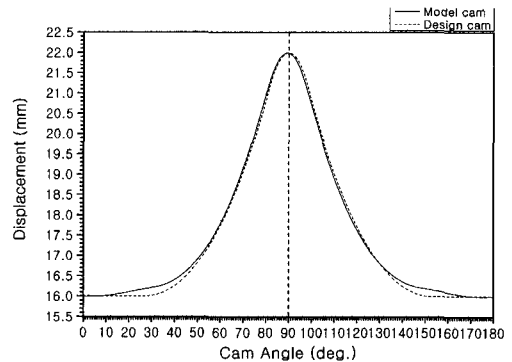


Fig. 14 Displacement diagram according to angle between model cam and design cam

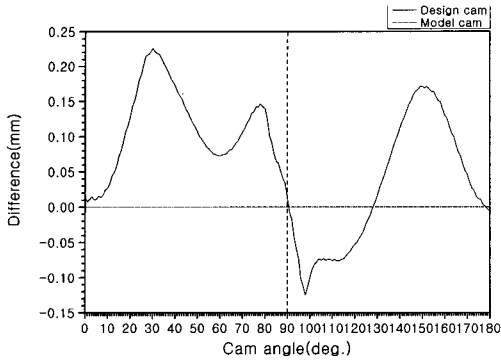


Fig. 15 Difference displacement between model cam and design cam

의 설계방법에 의한 것으로 보이며 꼭지원 중심의 위치와 반지름의 크기를 설정하는 것에 따라서 모델캠 형상과 설계캠 형상의 차이로 나타난다.

6. 결론

본 연구에서는 역공학 방법을 이용하여 실물의 캠을 모델로 하는 캠 형상의 재현을 목적으로 캠 형상의 설계 방법을 고안하고 이 방법에 의해 설계된 캠 형상의 가공 및 측정을 통하여 이에 대한 타당성을 증명하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 디젤 엔진용 SOHC의 캠 작동 특성인 흡배기 밸브의 개폐시기, 양정, 속도, 가속도 조건을 고려해서 캠의 형상 곡선을 설계할 수 있는 방법을 제안 하였다.
- (2) 캠 작동 중에 완충곡선이 측면원과 접하는 곳에서 속도의 급변에 의하여 소음과 진동이 발생하므로 소음과 진동을 억제하기 위해 설계 단계에서 완충곡선부를 배제하고 기초원을 연장하여 밸브의 동작을 원활하게 하였다.
- (3) 모델 캠 형상의 측정데이터와 설계된 캠 형상의 설계데

이터를 이용하여 각각의 NC데이터를 생성하였고 머시닝센터로 가공하여 모델캠의 형상과 설계캠의 형상을 비교한 결과 완충곡선부의 배제에 의하여 최대 0.226mm의 변위차가 발생하였다.

참고 문헌

- (1) Tesar, D. and Mathew G. K., 1976, *Modelled Cam System : Analysis, Design and Synthesis*, Lexington Book.
- (2) Chen, S. Y., 1977, *Mech Mach Theory*, Vol. 12, pp. 201~209.
- (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," *Mechanics and Machine*, Vol. 13, No. 6, pp. 631~641.
- (5) Dhande, S. G. and Chakraborty, J., 1975, *Mechanical Error Analysis of Cam Follower System - A Stochastic Approach*, pp. 957~962.
- (6) Kim, W. H., 1996, "A study on the Optimal Design of Cam Profile Using Hermite Curve," *Ulsan Univ.* pp. 1~2.
- (7) Park, J. H., 2002, "Internet & Principles of CAD/CAM/CAE system," *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 40, No. 6, pp. 34~37.
- (8) Lee, W. S., 2000, "Reverse Engineering System with Feature-Based Measurement," *CHUNG-ANG Univ.* pp. 32.
- (9) *The Korean Society of automobile Engineers.*, 1996, *Automobile technical hand north, <2nd volume> Design part*, pp. 68~71.