

직접 구동형 밸브 트레인 시스템의 태핏 회전에 관한 실험적 연구

조명래*·김형준**·문태선[†]·한동철***
(2002년 12월 26일 접수, 2003년 6월 9일 심사완료)

An Experimental Study on the Tappet Spin for a Direct Acting Valve Train System

Myung-Rae, Cho, Hyung-Jun, Kim, Tae-Seon, Moon and Dong-Chul, Han

Key Words: Valve Train(밸브 트레인), Tappet(태핏), Rotational Speed(회전 속도), Laser(레이저), Encoder(엔코더), Optic fiber(광섬유), Photo Transistor(포토 트랜지스터).

Abstract

The technique for measuring the rotational speed of tappet in direct acting type valve train system has been developed. The optic signal monitoring system with laser and optic fiber was designed to follow the signal of tappet rotation. The system was based on ON/OFF signal generation from the additional encoder teeth under the tappet with optic fibers attached photo transistor. The data showed that tappet rotation was affected by offset, oil temperature and cam shaft operating speed. Also it was found that tappet rotation increases with oil temperature. Tappet spin was delayed 10~s20° cam angle after valve opening. The instantaneous rotational speed of tappet was reciprocal to cam shaft speed and the tappet and the cam angle ratio was located in the range of 0.1~0.3.

1. 서론

밸브트레인 시스템은 엔진에서 흡배기를 제어하는 중요한 역할을 수행하는 부분으로, 최근 연비 향상의 요구가 증대됨에 따라 윤활·마모·마찰 등 트라이볼로지적 관점의 연구의 중요성이 더욱 확대되고 있다.

엔진에서 발생하는 마찰 손실 중 밸브트레인에서 발생하는 마찰 손실은 약 10~20%⁽¹⁾ 정도로 특히 저속 운전 영역에서 엔진의 마찰 손실 중 큰 부분을 차지한다. 최근 고효율 엔진에서 널리 사

용되고 있는 직동식 밸브 트레인 시스템에서 발생하는 마찰 손실의 대부분은 캠과 태핏의 접촉부에서 발생한다. 따라서 직동식 밸브트레인 시스템의 마찰 및 마모 특성에 대한 연구의 대부분은 캠과 태핏 사이의 마찰 특성에 집중되었으며⁽²⁻⁵⁾ 마찰 및 마모를 줄이기 위한 여러 방안이 연구되어 실제 차량에 적용되고 있다.

실제 직동식 OHC(OverHead Cam) 밸브트레인 시스템에서는 마모 및 마찰 저감을 위해 태핏이 회전할 수 있도록 캠 면의 중심과 태핏의 중심 사이에 편심을 주어 장착된다. 태핏의 회전은 실제 운전 시 태핏의 편마모를 감소시키는 효과가 있다. 또한 하중의 작용점이 태핏 면상에서 움직이고 있어 밸브 작동 시 밸브 끝단을 중심으로 태핏이 기울어지기도 하며 태핏 보어에 충격을 주기도 한다.

태핏의 회전이 유막 두께 및 캠과 태핏 사이의 마찰 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 미미하다. 태핏 회전 운동에 관한 연구는

[†] 책임저자, 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

E-mail : moon_sun@amed.snu.ac.kr

TEL : (02)880-1682 FAX : (02)885-8804

* 회원, 현대자동차 파워트레인 연구소

** 현대자동차 파워트레인 연구소

*** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

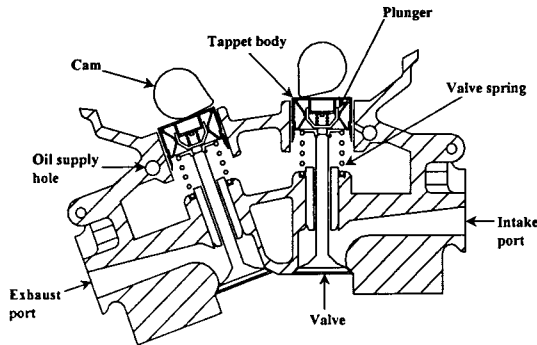


Fig. 1 Schematic diagram of OHC direct acting valve train system

Willemert과 Pieprzak⁽⁶⁻⁸⁾ 등에 의해 수행되었으며, 그들은 푸시 로드 타입의 밸브트레인 시스템에서 레이저 및 반사 장치를 이용한 실험 장치를 이용하여 태핏의 회전 속도를 측정함으로써 캠의 속도가 증가할수록 태핏의 회전 속도가 증가하며 태핏의 회전 속도가 증가할수록 마찰이 줄어들고 이러한 효과는 최대 캠 리프트 영역에서 두드러진다는 사실을 밝혔다. 그리고 마찰 저감의 요인은 유막 두께의 증가에 의한 것보다는 접촉 표면에서의 부분적인 구름 운동 때문이라고 설명하였다. 최근에는 태핏의 일부분에 방사능을 주사하여 태핏이 회전할 때 거리에 따른 방사능 수치가 변화하는 것을 이용한 태핏 회전 속도 측정법이 개발되어 그 결과가 보고 된바 있다.⁽⁹⁾

본 연구는 태핏의 회전 속도를 측정할 수 있는 장치를 개발하여 태핏의 회전 특성을 규명하는 것으로 그 목적으로 한다. 본 연구를 통해 제시된 결과들은 밸브 트레인계 마찰 저감에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 실험 장치의 구성 및 개요

Fig. 1은 직접 구동형 밸브 트레인 시스템의 개략도이다. 캠과 태핏의 장착 시 편심은 태핏의 회전을 유도하여 태핏 표면에 국부적으로 집중되는 마모를 막고 임의적인 접촉부 변화를 유도하여 유막에 영향을 주는 방향성 표면 형상을 방지할 수가 있으며 마찰력이 감소된다고 알려져 있다.

Fig. 2에는 본 연구에 사용된 실험 장치의 사진을 나타내었다. 실험 장치는 구동 모터와 캠 축을

Table 1 Specifications of valve train system

태핏 질량(Kg)	0.058
태핏 관성모멘트(m ² Kg)	1.6×10 ⁻⁶
기준 편심량(m)	0.002
태핏 보어 반지름(m)	0.01653
태핏 반지름(m)	0.0165
플런저 반지름(m)	0.0065
태핏 높이(m)	0.03
캠폭(m)	0.014
장착하중(N)	245
오일 공급 압력(bar)	2.0
작동 오일	7.5W30

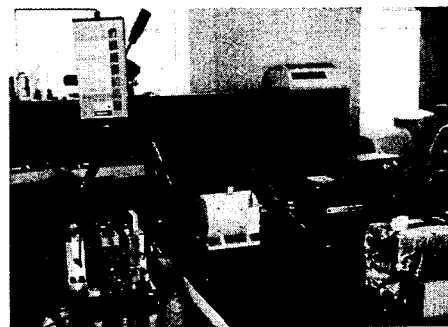


Fig. 2 Photography of the experimental system

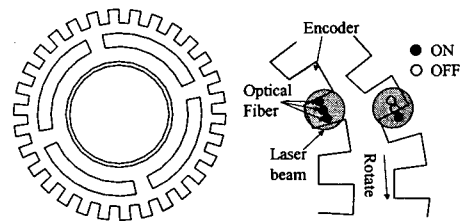


Fig. 3 Schematic view of additional tappet encoder

지지하는 두 개의 저널 베어링 하우징, 그리고 태핏 하우징으로 구성되어있으며, 2.0ℓ 엔진의 밸브트레인 구성 부품을 사용하였다. 구동 모터는 정격 출력 5.5kw의 DC 모터로, 최고 회전 속도는 10,000 RPM이다. Table 1에는 실험에 사용된 밸브 트레인 시스템의 주요 치수를 나타내었다.

태핏의 회전을 측정하기 위해서 Fig. 3과 같은 엔코더 치차를 태핏 하부에 장착하였으며 하중의 영향을 줄이기 위해 알루미늄 재질을 적용하였다. 각 이빨은 12°간격으로 배치되었으며

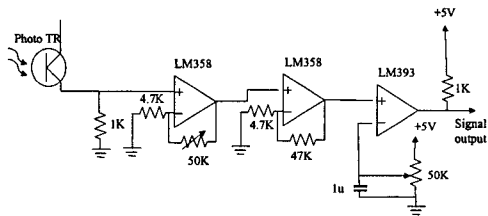


Fig. 4 Signal conditioning circuit

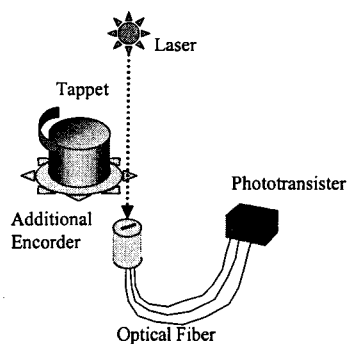


Fig. 5 Schematic diagram of tappet rotation measurement

회전의 속도를 정밀하게 측정하기 위해 각 이빨에 직경 1mm의 광파이버를 3개를 장착하여 광신호를 포토트랜지스터로 인출하여 2°간격의 해상도를 구현하였다. 광원으로 사용된 레이저는 Polytek 사의 He-Ne 레이저 5FV4000이며 광파이버로 들어오는 신호 처리를 위해 Fig. 4와 같은 회로를 사용하였다. 변동하는 속도 처리를 위해 캠 각도 2°간격으로 캠 2,000 회전 동안의 신호를 받아 저장한 후 처리하였다.

태핏 회전을 검출하는 개요는 Fig. 5와 같다. 태핏과 하부에 엔코더 치차, 수광부를 장착하고 지그 상부에서 레이저를 주사한다. 태핏이 회전하면 엔코더의 이빨에 의해 광원이 ON/OFF가 되며 세 가닥의 광섬유에서 나온 신호는 광섬유의 위치를 따라 Table 2와 같이 3비트의 2진수로 나타난다. 이 신호를 분석하면 태핏의 회전의 방향과 속도를 검출해 낼 수 있다. 광섬유의 신호를 십진수로 환산하면 순방향 회전에서는 2° 회전마다 0→1→3→7→6→4→0으로 변화한다. 역방향 회전은 반대로 0→4→6→7→3→1→0과 같은 순서가 된다. A/D Board에서 측정된 신호는 하드디스크에 저장해 둔 후 신호를 분석한다.

Fig. 6은 태핏을 정속으로 회전시키면서 측정한

Table 2 Fiber signal processing scheme

회전각도	Fiber#1	Fiber#2	Fiber#3	십진변환
0°	0	0	0	0
2°	0	0	1	1
4°	0	1	1	3
6°	1	1	1	7
8°	1	1	0	6
10°	1	0	0	4
12°	0	0	0	0

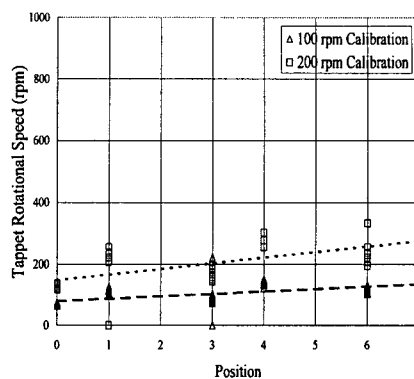


Fig. 6 Tappet rotational speed calibration

태핏 회전 신호를 분석하여 회전수로 환산한 그래프이다. 태핏의 회전 신호는 캠의 회전 위치와 같이 측정하였다. 보정 시험으로 본 시험 장치는 태핏 회전 1,000 rpm까지 신호의 손실 없이 읽어 낼 수 있었다.

3. 실험 결과 및 토의

Fig. 7에는 각 회전 속도에서 태핏 회전에 대한 측정 결과를 나타내었다. 태핏의 회전 거동을 나타내기 위해 캠 각도에 대한 태핏의 회전 각도의 비인 회전비(angle ratio)로 나타내었다. 이 회전비는 태핏의 회전 속도를 캠의 속도에 대해 무차원화한 변수로서 캠과 태핏간의 상관 관계를 나타낸다. 회전비에 캠의 속도를 곱하면 태핏의 회전 속도를 계산할 수가 있다.

태핏의 거동은 자전과 공전 그리고 병진 운동이 공존하며 거기에 밸브 끝단을 중심으로 태핏이 기울어지기도 하므로 매우 복잡한 운동 형태를 가지고 있을 것으로 생각된다. 시험 결과 태

핏의 회전은 130° 부근에서 시작한다. 실제 밸브의 열림은 캠 각도 120° 부근에서 시작한다. 밸브가 열리기 시작하는 약 10° 정도의 구간은 캠의 플랭크 구간으로 이 영역에서는 유입 속도가 상승하여 캠과 태핏 사이의 유막이 커지는 구간이다. 즉 유막이 커짐으로 인해 태핏을 회전시키는 마찰력이 감소한 상태이고, 캠과 태핏의 접촉점의 위치가 태핏의 끝단으로 이동함에 따라 태핏이 기울어져 보어와의 마찰력의 상승으로 태핏의 회전 저항이 증대되므로 태핏의 회전이 지연되는 것으로 생각된다.

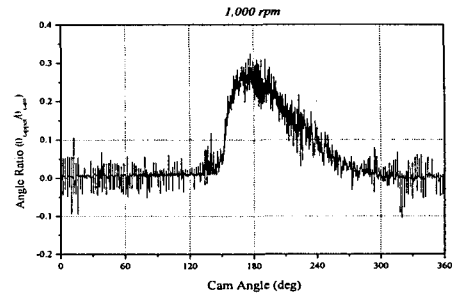
캠 각도 180° 부근에서 태핏의 회전은 증가가 둔화되고 감소하기 시작한다. 밸브가 열리는 구간 보다 최고 양정 구간에서 밸브의 회전 신호 변동이 큰 양상을 보인다. 밸브가 닫히기 시작하는 구간에서는 밸브가 열리기 시작하는 구간에서 보다 완만한 회전의 변화가 관측된다.

캠의 속도가 빨라짐에 따라 태핏의 회전비는 감소하는 경향을 나타낸다. 혼합 유티활 영역에서 작동하는 캠과 태핏의 접촉부의 경우 캠의 회전 속도가 증가하면 캠과 태핏사이의 마찰력이 감소하게 된다. 따라서 마찰력 감소에 따라 태핏의 회전 역시 감소하는 것으로 생각된다.

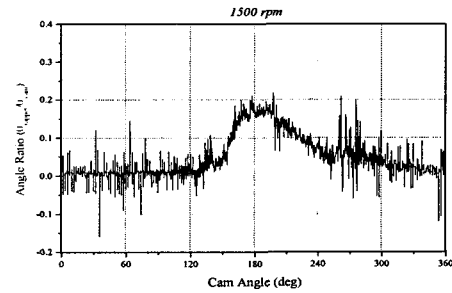
또한 밸브가 닫히고 캠이 기준원(base circle) 구간에 있을 때에도 회전이 발생하고 있음을 알 수 있다. 기준원 영역은 캠과 태핏 사이에 작용하는 하중이 거의 없으므로 마찰력 역시 미미하게 작용하는 구간이다. 따라서 기준원 영역에서 발생하는 태핏의 회전은 밸브 작동 구간에서 발생한 태핏의 회전 관성에 의해 발생하는 것으로 생각된다.

Fig. 8의 (a)~(c)에는 캠의 회전 속도, 오일 공급 온도 및 캠과 태핏 사이의 편심 거리에 따른 태핏 회전 속도 측정 결과를 나타내었다. 전반적으로 태핏의 최고 회전 속도는 1,000~2,000 rpm(엔진 회전수 2,000~4,000rpm) 영역에서 발생하고 있으며 약 200 rpm으로 엔진 회전수의 약 10% 수준임을 알 수 있다. 회전은 저속에서는 밸브 작동 구간에서 주로 발생하고 기준원에서도 태핏의 회전이 유지되고 있음을 알 수 있다.

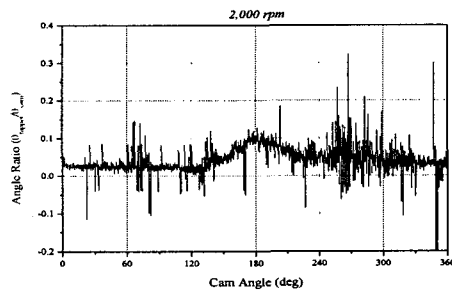
공급되는 오일의 온도가 높을 경우(80°C) 태핏의 회전 속도가 상온(30°C)에 비하여 급격히 증가



(a) 1,000 rpm



(b) 1,500 rpm



(c) 2,000rpm

Fig. 7 Averaged instantaneous angle ratio

하는 경향을 보인다. 오일 온도가 상승할 경우 오일의 점도 저하에 의해서 혼합 유티활 상태에서 작동하는 캠과 태핏 사이의 마찰력은 급격히 증가하게 되고 유체 유티활 영역인 태핏과 태핏 보어 사이의 마찰력은 감소하게 되므로 태핏의 회전 속도가 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 태핏의 하부에 장착된 엔코더 및 광섬유와 포토 트랜지스터를 이용하여 태핏의 회전 속도 변화를 측정할 수 있는 실험 장치를 개발하고 이를 이용하여 태핏의 회전 속도 변화를 측정하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 광섬유를 이용하여 태핏 회전 신호의 분해능을 향상시킨 결과, 태핏의 회전 속도 변화를 2° 간격으로 측정할 수 있었다.

(2) 태핏의 회전은 밸브가 열린 후 약 10~20° 이후에서 시작된다.

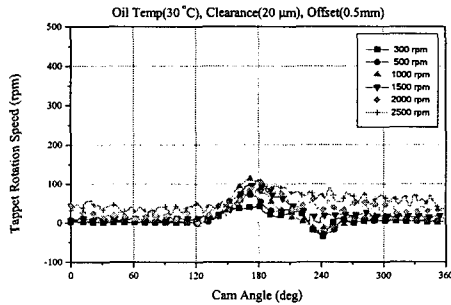
(3) 밸브가 열리기 전과 닫힌 후의 기준원 상태에서도 태핏의 회전은 지속되며 이는 태핏의 회전 관성에 의한 것으로 보인다.

(4) 태핏과 캠의 회전비는 0.1~0.3 정도이며, 태핏의 순간 최고 속도는 캠 회전 속도에 약 20% 정도임을 알 수 있었다. 회전비는 캠의 회전 속도와 반비례하는 경향을 가지며 이는 회전 속도의 증가에 따른 캠과 태핏 사이의 마찰력 감소에 기인하는 것으로 생각된다.

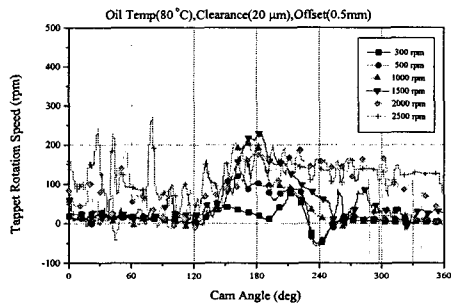
(5) 태핏의 회전은 엔진 오일 온도가 상승함에 따라 거의 2배정도 속도가 증가하였다. 이는 점도 저하에 따른 캠과 태핏 사이의 마찰력 증가 및 태핏 보어의 마찰력 감소에 기인하는 것으로 판단된다. 읍셋이 증가하면 태핏의 회전이 증가하나 과도한 읍셋은 태핏의 회전에 역효과를 유발한다.

참고문헌

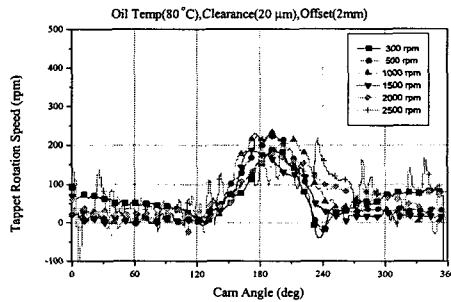
- (1) Taylor, C. M., 1993, "Engine Tribology," Tribology Series 26, Elsevier Science Publishers.
- (2) Staron, J. T. and Willermet, P. A., 1983, "An Analysis of Valve Train Friction in Terms of Lubrication Principles," SAE 830165.
- (3) Crane, M. E. and Meyer, R. C., 1990, "A Process to Predict Friction in an Automotive Valve Train," SAE 901728.
- (4) Han, D. C. and Cho, M. R., 1998, "The Characteristics of Friction in Direct Acting OHC Valve Train System," *J. of KSTLE*, Vol. 14, No. 1, pp, 23~27.



(a) general tendency of rotational speed



(b) variation due to oil temperature



(c) variation due to amount of offset

Fig. 8 Measured tappet rotational speed

캠과 태핏의 편심이 클 경우 태핏의 회전 속도가 상당히 증가할 것으로 예상되나 0.5mm 편심에 비해 2mm 편심을 준 경우 태핏의 회전 속도가 크게 증가하지는 않았다. 태핏은 회전 운동뿐 아니라 태핏 보어 내에서 상하 운동 역시 하므로 편심이 과도한 경우에는 태핏이 과도하게 기울어져 태핏과 태핏 보어 사이에서 접촉 저항이 발생하는 것으로 생각된다.

- (5) Pisano, A. P., 1984, "Coulomb Friction in High-Speed Cam System," *Transactions of ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, pp. 1~5.
- (6) Willermet, P. A. and Pieprzak, J. M., 1989, "Some Effects of Lubricant Composition and Tappet Rotation on Cam/Tappet Friction," *Transactions of ASME, J. of Tribology*, Vol. 111, No. 4, pp. 638~691.
- (7) Pieprzak, J. M., Willermet, P. A. and Klassen, D., 1989, "A Tappet Rotation Monitor Based on Light Reflectance - Development and Functional Testing," SAE 890722.
- (8) Willermet, P. A., Pieprzak, J. M. and Dailey, D. P., 1992, "Tappet Rotation and Friction Reduction in a Center Pivot Rocker Arm Contact," *Transactions of ASME, J. of Tribology*, Vol. 108, No. 3, pp. 478~488.
- (9) Monteil, G., Gallmann, A., Sioshansi, P. and Loges, P., 1996, "Contribution of Nuclear Physics to Engine Design: Application of Surface Layer Activation to Tappet Rotation Measurements," SAE960711, pp. 7~21.