

밸브 트레인 시스템의 태핏 회전 측정 장치의 개발

김형준 · 조명래* · 신희주** · 한동철***

현대자동차 중앙연구소

*서울대학교 터보동력기계 연구센터

**서울대학교 대학원

***서울대학교 기계설계학과

Development of Measurement System for Tappet Rotation in the Valve Train System

Hyung-Joon Kim, Myung-Rae Cho*, Hung-Ju Shin** and Dong-Chul Han***

Central Research Center, Hyundai Motor Co.

*Turbo & Power Machinery Research Center, Seoul National Univ.

**Graduate Student, Dep. of Mech. Design & Production Eng., Seoul National Univ.

***Dep. of Mech. Design & Production Eng., Seoul National Univ.

Abstract—The purpose of this paper is to measure the rotational speed of tappet in OHC valve train system. Tappet has eccentricity about cam center, which induces the tappet rotation and prevents from wear. In this paper, the experimental test rig which composes of one cam system is developed to measure the tappet rotation by using the laser generating system, rotary encoder, optical fiber, and photo transistor. The direction of tappet rotation is judged from the order of optical signal. As results of experiment, average and instant rotational speed and average rotation angle per one cam revolution are presented. Measured results show that eccentricity ratio is dominant factor for the tappet rotation, and tappet is rotated at the base circle.

Key word—OHC valve train system, tappet rotation, optical fiber, base circle

1. 서 론

엔진에서 발생하는 동력 손실은 열적 비효율성에 기인하기도 하나, 이 중 운동하는 각 요소간의 마찰에 의해 발생하는 마찰 손실 역시 상당한 부분을 차지하고 있다. 엔진에서 발생하는 마찰 손실의 대부분은 피스톤 링과 실린더 라이너 그리고 밸브 트레인 시스템에서 발생하고 있다. 이 중 밸브 트레인 시스템의 마찰 손실은 엔진 전체 마찰 손실 중 약 7.5~21%에 해당하는 양으로[1] 밸브 트레인 시스템의 마찰 저감은 엔진의 효율 증대에 상당한 부분을 차지할 것으로 생각된다.

밸브 트레인 시스템은 캠과 태핏, 밸브와 밸브 스프링, 밸브 가이드 그리고 밸브 시트(seat)로 구성되어 있다. 이 중 캠과 태핏은 상대적으로 작은 유막을 유지

하면서 고속, 고하중하에서 작동하는 부품으로 밸브 트레인 시스템에서 발생하는 마찰 및 마모의 대부분을 차지하는 영역이다. 따라서 밸브 트레인 시스템의 마찰 특성에 대한 연구의 대부분은 캠과 태핏 사이의 마찰 특성에 집중되었으며[2-5], 마찰 및 마모를 줄이기 위한 여러 방안이 연구되어 실제 차량에 적용되고 있다. 그 중의 하나가 캠과 태핏 사이에 편심을 주어 태핏을 회전시킴으로서 태핏의 부분적인 마모를 예방하는 것이다. 태핏의 회전은 캠과 태핏 사이에 상대 속도에 변화를 주게되어 유막 두께 및 마찰 특성에 변화를 유발하게 된다. 그러나 이러한 태핏의 회전이 유막 두께 및 캠과 태핏 사이의 마찰 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 미미하다. 이는 실제 태핏의 회전 속도가 균일하지 않을 뿐 아니라 태핏 회전 속도의 측정 자체가 어렵다는데 있다. 따라서 캠과 태

핏 사이의 상대 회전 운동을 고려하지 않은 상태에서 마찰 특성으로 실제 밸브 트레인 시스템의 마찰 특성을 고찰하는 데는 한계가 있는 것으로 판단된다. 태핏 회전 운동에 관한 연구는 Willemert과 Pieprzak[6-8]에 의해 처음으로 시도되었다. 그들은 레이저 및 반사 장치를 이용한 실험을 통해 태핏의 회전 속도를 측정함으로써 태핏의 회전 속도가 증가할수록 마찰이 줄어 들며, 이러한 효과는 최대 캠 양정 영역에서 두드러진다는 사실을 밝혔다. 그리고 마찰 저감의 요인은 유막 두께의 증가에 의한 것보다는 접촉 표면에서의 부분적인 구름 운동 때문이라는 사실을 밝혔다. 또한 최근에는 방사능을 이용한 태핏 회전 속도 측정법이 개발되어 그 결과가 보고된 바도 있다[9]. 그러나 Willemert의 실험 방법의 경우 태핏의 회전 방향 및 태핏이 정지하는 경우 등 특별한 경우에 대한 관정이 어렵다는 단점을 가지고 있으며, 방사능을 이용한 측정법의 경우에는 방사능 자체를 쉽게 획득할 수 없을 뿐 아니라 태핏의 순간 속도 변화는 고찰할 수 없다는 단점이 있다.

따라서 본 연구는 태핏의 회전 속도와 마찰 특성과의 연관성을 밝히기 위한 연구의 일환으로 태핏의 회전 운동을 측정할 수 있는 측정 장치의 개발을 목적으로 한다.

2. 실험 장치의 구성

Fig. 1에는 직접 구동형 밸브 트레인 시스템의 개략도를 나타내었고 Fig. 2에는 캠과 태핏의 접촉 형상을 나타내었다. 본 연구에 사용된 태핏은 유압식 간극 조정 장치인 HLA(Hydraulic Lash Adjuster)가 장착되어

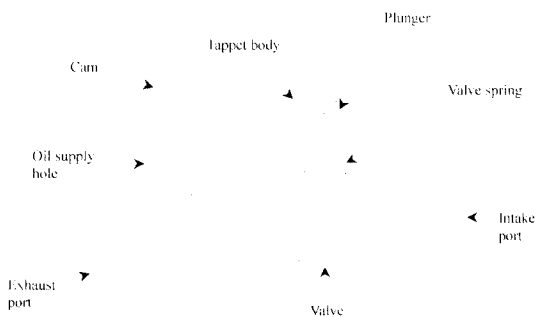


Fig. 1. Schematic diagram of OHC direct acting valve train system.

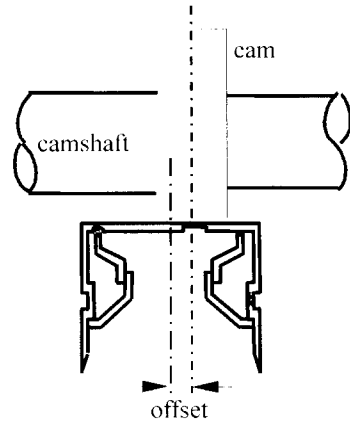


Fig. 2. Cam and tappet contact position.

있다.

Fig. 2와 같이 실제 엔진에서는 캠의 중심을 태핏의 회전축에서 약간 편심 되게 위치시켜 태핏이 회전하도록 장착한다. 이는 캠과 태핏의 접촉에서 태핏 표면에 국부적으로 집중되는 마모를 막고 임의적인 접촉부 변화를 유도하여 유막 감소에 영향을 주는 방향성 표면 형상을 방지하기 위해서이다.

Fig. 3에는 본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도 및 사진을 나타내었다. 실험 장치는 구동 모터와 두 개의 지지 하우징, 그리고 태핏 하우징으로 구성되어 있다. 구동 모터는 정격 출력 5.5 kw의 DC 모터로, 최고 회전 속도는 10000 RPM이다. 사용된 레이저는 Polytek 사의 He-Ne 레이저 5FV4000으로 일반 광원으로 사용하였다.

Table 1에는 실험에 사용된 밸브 트레인 시스템의 주요 치수를 나타내었다.

Fig. 4에는 밸브 하우징의 개략도를 나타내었다. 밸브 하우징은 밸브 가이드 하우징 및 태핏 보어 하우징의 이중 구조로 이루어져 있으며 수직 전달 하중에 의해 마찰력 측정용 로드 셀에 작용하는 하중을 최소화할 목적으로 태핏 보어 하우징을 지지할 지주(strut)를 설치하였다. 태핏 회전의 측정부는 레이저빔과 엔코더와 광섬유 및 포토 트랜지스터(Photo TR)를 이용하여 측정하는 구조로 되어있다.

Fig. 5에는 회전 측정용 엔코더의 개략도를 나타내었다. 로터리 엔코더에는 총 30개의 치형이 가공되어 있으며 세 개의 광섬유가 삽입될 수 있는 크기로 가공되어 있다.

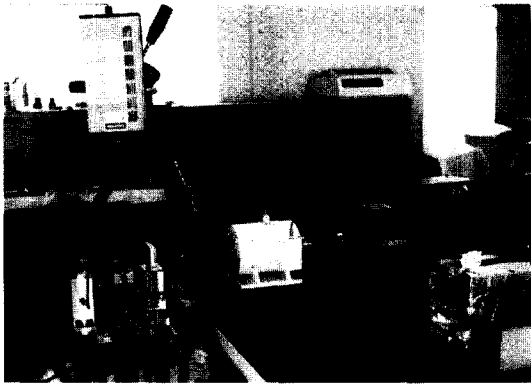
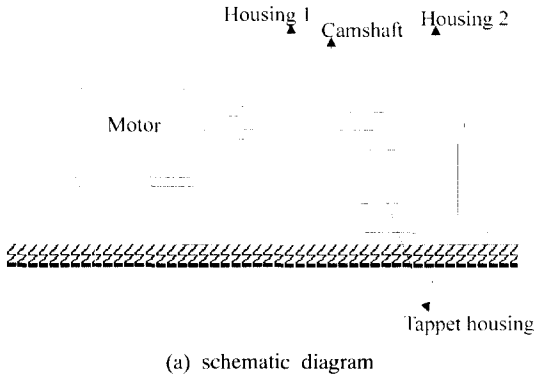


Fig. 3. Schematic diagram and photo of test rig.

Table 1. Specification of valve train system.

태핏 질량(kg)	0.058
태핏 회전	
관성모멘트(m^2kg)	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
오일 점성($Pa \cdot s$)	0.0595 (40°C)

태핏의 회전은 엔코더를 지나 광섬유에 감지되는 빛의 세기에 따라 회전 여부를 판정한다. 광섬유를 통해 감지된 빛은 증폭 회로를 통해 아날로그 신호로 바뀐다. 즉 빛이 감지되면 on 상태가 되고 빛이 감지되지 않을 때는 off 상태가 된다. 광섬유는 모두 세 개를

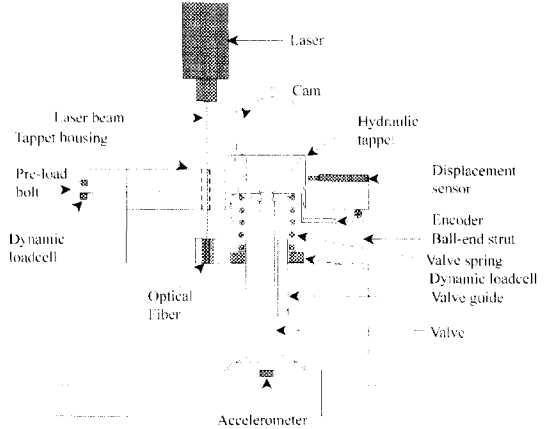


Fig. 4. Section view of tappet housing.



Fig. 5. Schematic diagram of rotary encoder.

사용하여 태핏의 정방향 및 역방향 회전 여부를 판정하게 된다. 즉 각 광섬유로부터 신호가 순차적으로 발생하면 정방향 회전을 하게 되는 것이고 만약 신호의 발생 순서가 바뀌면 역회전을 하게 되는 것이다.

Fig. 5에는 정방향과 역방향 회전을 구분하는 신호의 개략도를 나타내었다.

3. 결과 및 토의

Fig. 6에는 캠 축이 2000 RPM으로 회전하고 있을 때 광섬유를 통해 측정된 신호 및 통계 처리를 한 신호의 예를 나타내었다.

각 광섬유로부터 들어오는 증폭된 신호가 on/off 상태를 반복하고 있음을 알 수 있고, 각 신호별로 시간 간격을 가지고 on/off상태를 반복하고 있음을 알 수 있는데, 이는 태핏이 회전하고 있음을 나타낸다. Fig. 6에서 디지털 신호는 on된 상태를 1로 그리고 off된 상태를 0으로 처리한 신호를 나타낸다. 만약 태핏이

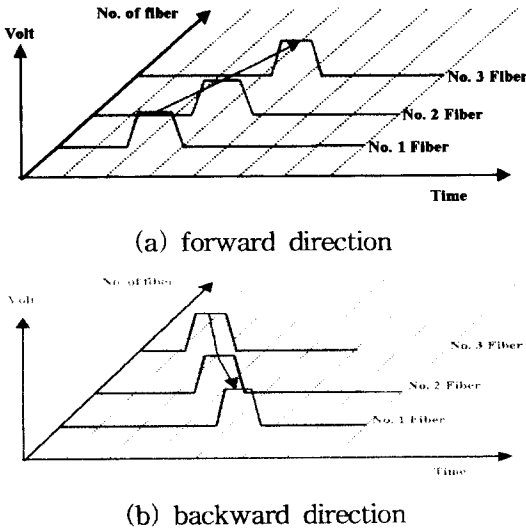


Fig. 6. Example of tappet rotation signal.

회전하지 않는다면 0 또는 1이 지속될 것이다. 그리고 on/off상태가 광섬유의 순서에 따라 반복되는 것을 볼 때 태핏이 정방향으로 회전하고 있다는 것을 나타낸다. 한편 캠의 기준원(base circle)을 나타내는 위치에서도 on/off 상태가 반복되는 현상이 관측되고 있음을 알 수 있다. 이는 캠의 기준원 영역에서도 태핏이 회전한다는 증거이다. 일반적으로 이론 해석시 캠의 기준원 지점은 마찰력이 없다고 가정하는 영역으로 태핏이 회전한다는 것은 이 영역에서의 마찰력이 존재한다는 것을 의미한다. 따라서 이 영역에서 마찰력 해석을 위한 새로운 모델이 개발되어야 할 것으로 생각된다. 실제로 캠과 태핏 사이의 마찰력을 측정 한 Han과 Cho[4]의 실험 결과를 보면 기준원 영역에서 마찰력이 존재하고 있음을 알 수 있다. 한편 Fig. 6에서 캠 1회전 동안 약 세 번의 on/off가 반복되는 것으로 보아 캠 1회전 동안 태핏의 회전 각도는 대략 36° 전 후가 될 것으로 추정된다.

Fig. 7에는 캠 1회전 동안의 순간 속도 변화를 나타내었다. 측정된 데이터의 개수가 제한된 관계로 캠 1회전 동안의 자세한 태핏 순간 속도 변화는 살펴볼 수 없으나 개략적인 태핏의 순간 속도 변화를 살펴볼 수가 있다. 기준원 영역에서도 태핏 회전이 발생함을 알 수 있고 특히 캠의 노우즈(nose)부분을 지날 때 속도 변화가 크게 발생함을 알 수 있다.

Fig. 8에는 캠과 태핏 사이의 각 편심위치에서 캠 회전 속도에 따른 캠 1회전 당 태핏의 회전 각도에 대

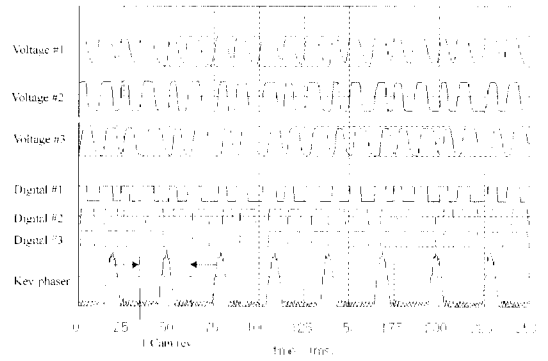


Fig. 7. Measured and modified signal for tappet rotation (2000 RPM).

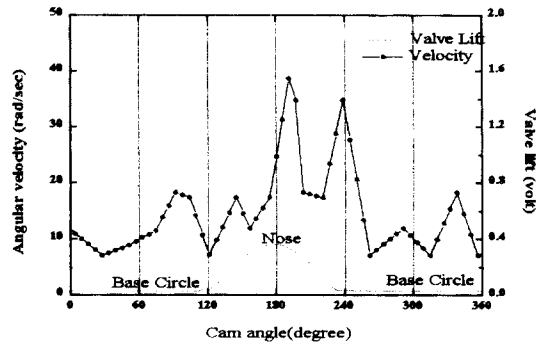


Fig. 8. Experimental results of instant velocity variation of tappet (2000 RPM).

한 측정 결과를 나타내었다. 편심 양은 1에서 3으로 갈수록 커진다. 회전 속도가 증가할수록, 편심 양이 커질수록 태핏의 캠 1회전당 태핏의 회전 각도는 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 9에는 각 편심 위치에서 캠 회전 속도에 대한 태핏의 평균 회전 속도 측정 결과를 나타내었다. 캠 회전 속도에 따른 태핏 회전 속도 변화는 거의 없으나 편심 양에 따라 회전 속도가 변화함을 알 수 있다. 작은 편심 양에서는 편심량에 따른 캠 1회전당 태핏의 회전 속도 변화는 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 그러나 태핏의 편심량이 비교적 큰 세 번째 경우에는 태핏의 회전 속도가 큰 폭으로 감소하고 있음을 볼 수 있는데 이는 편심 양이 커지면서 태핏이 태핏 보어 내에서 기울어지면서 벽면 마찰력이 증가하기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 경향은 편심양의 변화에 따라 회전각도 및 회전 속도를 나타낸 Fig. 10과 Fig. 11을 보면 명확해진다.

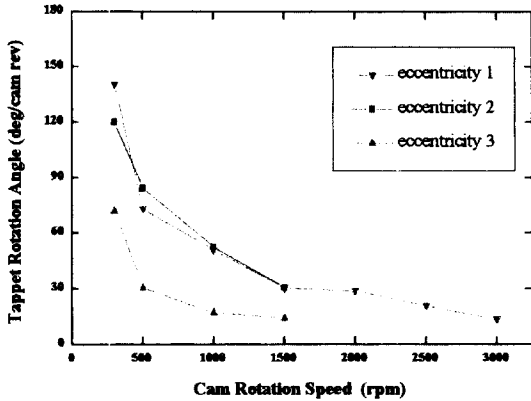


Fig. 9. Tappet rotation angle as a function of cam rotational speed for the various eccentricity.

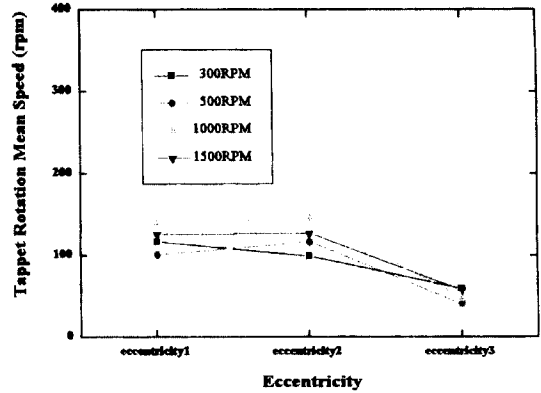


Fig. 12. Tappet mean rotational speed as a function of cam eccentricity for the various cam rotational speed.

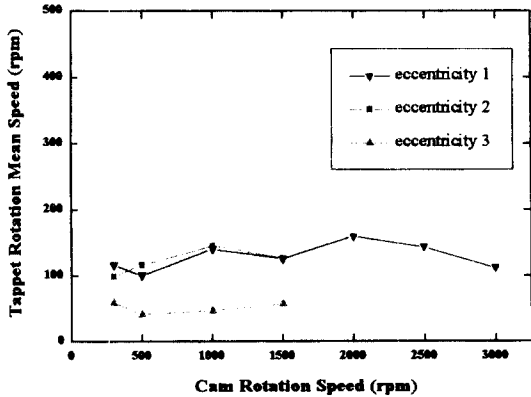


Fig. 10. Tappet mean rotation speed as a function of cam rotational speed for the various eccentricity.

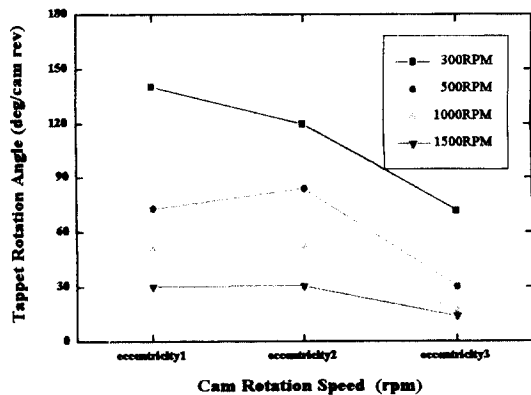


Fig. 11. Tappet rotation angle as a function of cam eccentricity for the various cam rotational speed.

Fig. 10과 Fig. 11에서 편심양의 증가에 따라 회전각도 및 회전 속도는 편심1과 편심2에는 거의 비슷한

수준을 유지하다 편심3의 경우에 급격히 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

광섬유 및 로터리 엔코더를 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. 로터리 엔코더 및 광섬유를 이용하여 태핏의 회전 속도 변화를 효과적으로 측정할 수 있었다.
2. 캠의 기준원 영역에서도 태핏의 회전이 발생함을 알 수 있었다.
3. 캠 노우즈 영역에서 순간 속도의 변화가 급격히 발생함을 알 수 있었다.
4. 캠 1회전당 태핏의 회전 각도는 캠 회전 속도 및 편심 양의 증가에 따라 감소함을 알 수 있었고, 특히 태핏의 회전 속도를 급격히 감소시키는 편심 위치가 존재함을 확인할 수 있었다.
5. 태핏의 회전 속도 변화에 영향을 미치는 지배적인 인자는 캠과 태핏 사이의 편심 양임을 알 수 있었다.
6. 태핏 회전 속도와 마찰력과의 상관 관계를 규명하기 위한 실험이 수행되어야 할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 'G7-유동 해석 기술 개발' 연구 과제의 일환으로 통상산업부 및 현대자동차의 연구비 지원에

의해 서울대학교 터보동력기계 연구센터에서 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. C. M. Taylor, "Engine Tribology," Tribology Series 26, Elsevier Science Publishers, 1993.
2. J. T. Staron, P. A. Willermet, "An Analysis of Valve Train Friction in Terms of Lubrication Principles," SAE 830165.
3. Michael E. Crane, Roy C. Meyer, "A Process to Predict Friction in an Automotive Valve Train," SAE 901728.
4. Han, D. C. and Cho, M. R., "The Characteristics of Friction in Direct Acting OHC Valve Train System," J. of KSTLE, Vol.14, No.1, pp.23-27, 1998.
5. A. P. Pisano, "Coulomb Friction in High-Speed Cam System," Transactions of ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, pp.1-5, 1984.
6. P. A. Willermet, J. M. Pieprzak, "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, 1989.
7. J. M. Pieprzak, P. A. Willermet, and D. Klassen, "A Tappet Rotation Monitor Based on Light Reflectance - Development and Functional Testing," SAE 890722.
8. P. A. Willermet, J. M. Pieprzak and D. P. Dailey, "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, 1992.
9. G. Monteil, A. Gallmann, P. Sioshansi, and P. Loges, "Contribution of Nuclear Physics to Engine Design: Application of Surface Layer Activation to Tappet Rotation Measurements," SAE960711, pp.7-21, 1996.