

밸브 스템계의 누유특성에 관한 실험적 연구

이일권 · 김청균*[†]

대림대학 자동차과, *홍익대학교 트라이볼로지연구소

Experimental Study on the Oil Leakage Characteristics of Valve Stem System

Il Kwon Lee and Chung Kyun Kim*[†]

Department of Automotive Engineering, Daelim College, *Tribology Research Center, Hongik University

Abstract – This paper presents the oil leakage characteristics of the valve stem system in gasoline engines. For the oil leakage investigation, four study models have been prepared as functions of used poppet valve and used valve stem seal, used poppet valve and unused valve stem seal, unused poppet valve and used valve stem seal, and unused poppet valve and unused valve stem seal. With four models, the experimental study on the oil leakage has been investigated for the oil temperature, intake pressure, and camshaft speed. The experimental results show that the sealing performance of the valve stem seal plays an important role on the leakage of the valve stem system. And the appropriate replacement of a stem seal with used poppet valve shows good sealing performance in oil leakage in compared with a new valve system.

Key words – oil leakage, valve stem seal, oil temperature, intake pressure.

1. 서 론

자동차에 동력원을 제공하는 엔진에서 오일은 엔진 구동부의 원활한 작동을 보장하기 위하여 윤활성, 저마찰 및 내마멸성, 밀봉성, 냉각성, 하중 분산성 등 대단히 중요한 트라이볼로지 기능을 제공한다[1,2]. 결국, 엔진오일의 기능은 엔진의 출력과 내구성, 심지어 배기가스 유해성[3]까지도 컨트롤할 정도로 밀접하게 연계되어 있다.

이렇게 중요한 역할을 하는 엔진오일(engine oil)의 윤활 목적을 수행하는 과정에서 구동부를 중심으로 불가피하게 발생하는 오일 누설에 따른 윤활유 소모 현상은 엔진의 동력발생 기능을 순식간에 무력화시키는 단계로 발전할 수도 있다. 즉, 엔진 블록에 설치된 오일 시일의 고장으로 엔진오일이 외부로 누유되거나 또는 캠축과 연결된 밸브 스템계를 통하여 연소실로 유입되면서 오일이 연소되어 외부로 방출하는 경우는 윤활유

부족으로 엔진 구동부의 원활한 작동을 보장할 수 없다.

또한, 포핏 밸브(poppet valve)와 밸브스팀 시일(valve stem seal)을 통과한 오일이 연소실로 유입되면서 오일은 연료와 함께 연소되어 탄화물질 형태로 밸브나 피스톤 표면에 퇴적되는 현상이 일어난다. 이러한 퇴적물은 연소과정에서 조기점화와 노킹발생의 점화원으로 작용하면서 또 다른 문제점으로 연결된다. 연소실로 유입된 오일은 보통 불안전 연소되어 배기가스와 함께 배기가스 정화장치로 유입되고, 이것은 촉매 변환장치에 독성을 유발함으로써 엔진의 유해 배기가스 정화기능을 심각하게 파손하는 경우가 발생하기도 한다[4-6]. 결국 엔진에서 윤활유의 누설로 인한 부작용은 너무 크기 때문에 자동차 메이커에서는 엔진개발 단계에서 가장 중요하게 다루는 체크 포인트가 된다.

따라서 본 실험적 연구에서는 4실린더 가솔린 엔진을 개조하여 포핏 밸브와 밸브스팀 시일을 통과하여 연소실로 유입되는 오일 누설량을 실제의 작동상태에서 측정하였다. 이 때에 밸브 시스템계의 누유특성을 실험적으로 고찰하기 위하여 포핏 밸브와 밸브스팀 시일

[†]주저자 · 책임저자 : cckim@wow.hongik.ac.kr

을 사용한 실험조건은 사용 제품과 신품을 여러 가지로 조합하여 합리적인 실험결과를 획득하도록 하였다.

2. 실험적 연구

2-1. 실험장치

가솔린 엔진의 포펫트 밸브와 밸브스템 시일을 통과하여 엔진의 연소실로 유입되는 오일 누설량을 측정하기 위한 4실린더 실험장치의 전체도를 Fig. 1에서 보여 주고 있다. 1500 cc 용량의 가솔린 엔진을 개조한 실험 장치에서 실린더 헤드를 열어서 포펫트 밸브와 밸브스템 시일을 실험조건에 적합한 상태로 매번 조합·설치하여 오일의 누설량을 측정할 수 있도록 제작하였다.

실험에서 중요한 변수에 해당하는 엔진오일의 작동 온도는 다양한 실험조건에 안정된 온도조건을 맞추기 위하여 오일을 일단 외부에서 설정온도에 적합하게 가열한 다음 오버헤드 캠축(OHC)에 공급한 상황에서 오일의 온도를 정확하게 다시 측정하고, 포펫트 밸브와

밸브스템 시일을 통과하는 누설된 유량은 엔진을 구동한 상태에서 측정하였다.

2-2. 시험편 및 실험방법

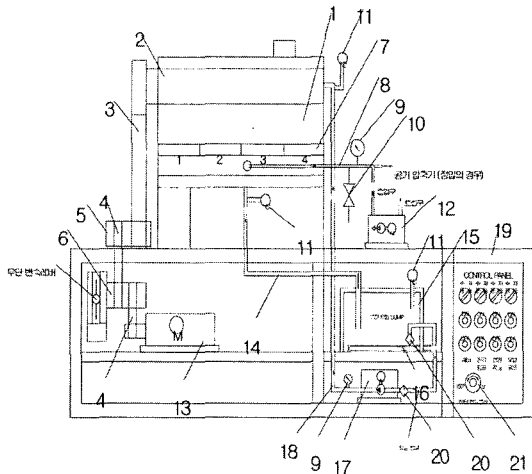
본 실험에서 사용한 가솔린 엔진은 4개의 실린더에 8개의 포펫트 밸브와 밸브스템 시일 모두를 실험대상으로 선정하였다. 즉, 1번 실린더에는 96,000 km를 주행한 포펫트 밸브와 밸브스템 시일을 설치하고, 2번 실린더에는 96,000 km를 주행한 포펫트 밸브에 신품 밸브스템 시일을, 3번 실린더에는 신품 포펫트 밸브와 96,000 km를 주행한 밸브스템 시일을, 4번 실린더에는 모두 신품인 포펫트 밸브와 밸브스템 시일을 각각 장착하고 윤활유 작동조건을 동일하게 설정한 상태에서 누유시험을 수행하였다.

실험과정에서 누설된 실제의 엔진오일은 미량이기 때문에 본 실험에서는 누설된 엔진오일이 연소되기 전에 일정시간 동안 한곳으로 모아서 시간당 중량을 측정하는 계량 방법을 사용하였다. 따라서, 누유량에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 여러번의 반복실험을 수행하였다.

2-3. 사용 엔진오일

엔진오일은 가솔린 엔진에서 널리 사용하는 SAE 5W/30와 PCMO SAE 30 엔진오일을 선정하였다. 실험을 통하여 얻고자 하는 오일의 누설특성은 엔진오일의 유동성에 연관된 점도와 점도지수 등에 의해 많은 영향을 받게된다. 이것은 엔진의 작동조건과 유관한 사항이지만, 결국 밸브스템 시일의 누유차단 기능에 의해 누유량이 조절되어야 한다.

Table 1은 본 실험에서 사용한 PCMO SAE 30 엔진오일의 물리적 특성을 제시하고 있다.



3. 실험결과 및 고찰

포펫트 밸브와 밸브시트를 따라서 연소실로 유입되는

번호	명칭	번호	명칭	번호	명칭
1	실린더 헤드	8	에어라인	15	엔진오일탱크
2	캠축	9	압력계	16	히터
3	타이밍 벨트	10	온도계	17	오일 펌프
4	V-벨트	11	압력조절밸브	18	오일공급라인
5	크랭크축	12	진공 펌프	19	제어패널
6	무단 변속기	13	구동 모터	20	필터
7	연소실	14	오일리턴라인	21	히터컨트롤러

Fig. 1. General view of an oil leakage testing equipment for 4-cylinder gasoline engines.

Table 1. Properties of the oil, PCMO SAE 30

항 목	시험규격	시험결과
밀도(@15°C, kg/L)	ASTM D1298	0.8853
동점도(@40°C, mm ² /s)	ASTM D445	11.15
동점도(@100°C, mm ² /s)	ASTM D445	93.65
점도지수(VI)	ASTM D2270	105
유동점(°C)	ASTM D97	-37

엔진오일의 누설특성은 오일의 작동온도와 연소실에 걸리는 흡기압력과 같은 작동조건에 의해 큰 영향을 받는다. 그러나, 엔진오일의 누설은 실제로 누유를 차단하는 역할을 담당하고 있는 밸브스택 시일의 기능이 가장 중요하지만, 시일과 접촉운동을 하는 포켓트 밸브스택의 트라이볼로지 특성에 의해서도 많은 영향을 받는다.

따라서 본 실험에서는 엔진오일의 누유문제를 오일의 온도, 흡기압력, 캠축의 회전수에 의존하는 실험적 고찰을 수행하였다. 특히, 사용된 포켓트 밸브의 스텝과 스텝시일의 사용조건에 따라 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있기 때문에 다음과 같은 4가지 실험모델을 수행하기 위해 준비한 시험편을 요약하면 다음과 같다.

- 시험편 실험조건 1 : 96,000 km를 주행한 포켓트 밸브와 밸브스택 시일
- 시험편 실험조건 2 : 96,000 km를 주행한 포켓트 밸브와 신품 밸브스택 시일
- 시험편 실험조건 3 : 96,000 km를 주행한 밸브스택 시일과 신품 포켓트 밸브
- 시험편 실험조건 4 : 신품 포켓트 밸브와 신품 밸브스택 시일

엔진오일의 누설 실험에서는 밸브 스텝계의 누유특성에 중요한 영향을 미치는 인자로 포켓트 밸브와 밸브스택 시일의 상대적 접촉조건, 즉 마멸과 탄성 거동력에 크게 의존한 누유가 진행될 것이라는 실험적 데이터를 제시하고 한다. 여기에 엔진오일의 점도와 유동성 등의 성질도 중요한 변수가 된다.

3-1. 오일온도의 영향

Fig. 2는 엔진오일의 작동온도가 증가하면 누유량이 전반적으로 증가하는 패턴을 보여주고 있다. 이것은 엔진오일의 온도가 상승하면서 오일의 점도저하에 따른 유동성이 좋아지기 때문에 일어나는 현상이다. Fig. 2에서 96,000 km를 주행한 포켓트 밸브와 밸브스택 시일은 가장 높은 누설이 발생하지만, 신품의 포켓트 밸브와 밸브스택 시일을 모두 사용한 sample 4는 오일의 사용온도에 관계없이 누유가 잘 안되는 안정적인 최저의 누유특성을 보여준다. 그러나, 96,000 km를 주행한 포켓트 밸브와 신품 스텝시일을 사용한 sample 2의 경우가 96,000 km를 주행한 밸브스택 시일과 신품 포켓트 밸브를 사용한 sample 3에 비하여 누유량이 작게 발생하였다. 이것은 밸브 스텝계의 누유가 포켓트 밸브보다 밸브스택 시일의 밀봉 성능에 더 크게 의존한다는 사실을 제공하는 중요한 실험 데이터이다.

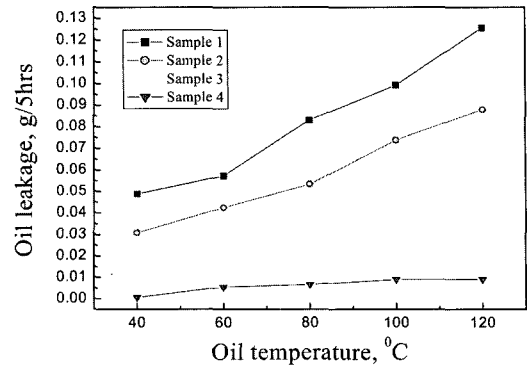


Fig. 2. Oil leakage as a function of engine oil temperature for 4 test cases.

특히, 최근에는 마찰력 감소를 위한 저점도 엔진오일의 사용과 연소효율 향상을 위한 엔진오일 온도의 고온화 연구가 성공적으로 진행하기 위해서는 누유량 상승으로 인해 발생하는 연소실의 카본 퇴적과 오일 소모량 감소 문제를 동시에 해결해야 한다. 이것을 위해서 결국은 밸브스택 시일의 밀봉성능을 강화시켜야 한다는 실험적 결과를 Fig. 2에서 제시하고 있다.

3-2. 흡기압력의 영향

Fig. 3은 연소실로 유입되는 흡기압이 정압일 때 엔진오일의 누설량은 압력이 상승함에 따라 완만하게 증가하고 있다. 자동차가 96,000 km 정도를 주행하게 되면, 흡기압에 의한 누유량은 크게 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 오랫동안 엔진을 사용하여도, sample 2의 결과처럼 신품인 밸브스택 시일로 교환한 경우는 정상적인 누유 억제성능을 충분히 확보할 수 있다는 실험 데이터를 Fig. 3에서 제시하였다.

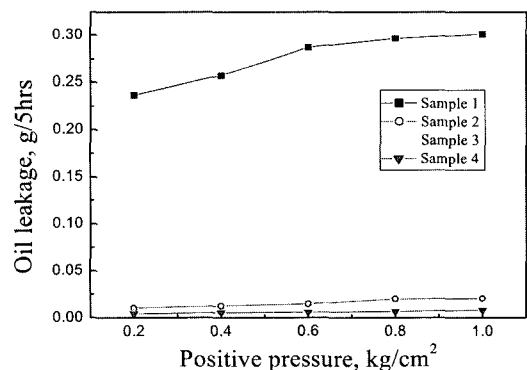


Fig. 3. Oil leakage as a function of positive pressure for 4 test cases.

밸브 스템계의 누유는 신품의 밸브스템 시일을 사용하는 경우, 오일의 작동온도에 의한 영향이 흡기압으로 정압이 작용하는 경우보다 더 크지만, 밸브스템 시일을 사용한 시간이 길수록 흡기압의 영향을 더 많이 받는다는 사실이다. 따라서, 엔진오일의 소모량이 증가하게 되면, 밸브스템 시일을 적기에 교환하는 것이 대단히 중요한 밸브 스템계의 정비 지침이다.

3.3. 캠축 회전수의 영향

Fig. 4는 오버헤드 캠축(OHC)의 회전수 증가에 따라 밸브스템 시일을 통하여 연소실로 유입된 오일 누설량을 측정 한 실험결과이다. 밸브 스템계는 사용기간이 길수록 포펫트 밸브스템에는 시일과의 미끄럼 마찰면에서 완만한 마멸이 진행되고, 스템시일의 탄성 거동력 저하로 인해 누유량이 증가되는 것은 현재의 기술로는 불가피하게 일어나는 현상이라 할 수 있다. 그러나 포펫트 밸브와 시일제품이 새것일 경우는 누유량 발생이 작다는 사실에는 Figs. 2와 3의 실험 결과에서 확인되었다. 밸브 스템계의 또 다른 경향은 캠축의 회전수가 증가하면 엔진오일 온도의 상승을 초래하고, 동시에 점도 저하에 따른 유동성 상승으로 누유량은 완만하게 증가한다는 실험결과를 Fig. 4에서 제시하고 있다.

실제로 고속도로를 운행하는 자동차는 정상 주행을 하는 차량에 비하여 엔진오일 누설량이 증가한다는 사실이다. 또한 차량을 운행할 때 엔진에 부하를 많이 걸게되는 급출발, 급제동과 같은 불안정한 운전조건에서 엔진오일의 누설량도 일반적으로 증가한다는 사실과 일치한다.

3.4. 오일 점도의 영향

엔진오일의 점도조건에 따른 밸브 스템계의 누설특

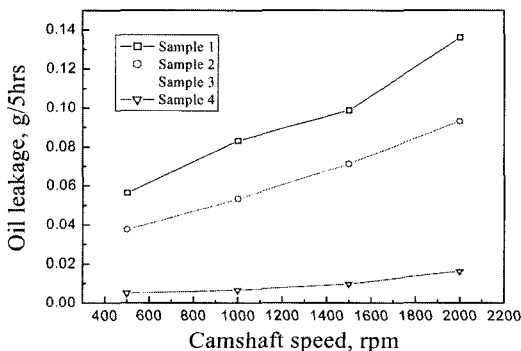


Fig. 4. Oil leakage as a function of camshaft speed for 4 test cases.

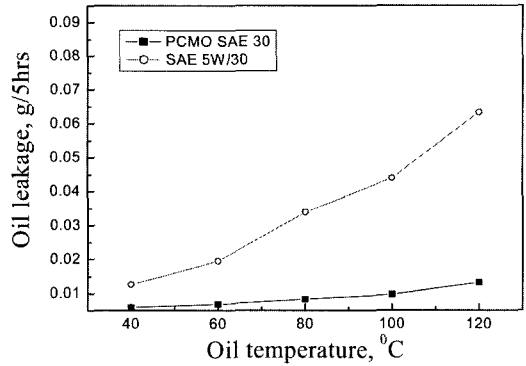


Fig. 5. Oil leakage as a function of oil temperature for PCMO SAE 30 and SAE 5W/30 cases.

성에 대한 실험을 수행하였다. 즉, 가솔린 자동차 엔진 오일로 널리 사용하는 PCMO SAE 30과 SAE 5W/30의 두가지 유휴유에 대하여 누유특성을 실험하였다.

밸브 스템계의 오일 누설특성을 고찰하기 위해서 포펫트 밸브와 밸브스템 시일 모두를 신품으로 사용하였고, 흡기압력은 대기압, 캠축의 회전수는 1,500 rpm에서 5시간 동안의 오일누설 실험을 반복적으로 수행하였다.

Fig. 5에서 엔진오일의 온도가 상승하면 누유량이 증가되는 현상은 기존의 실험 데이터와 유사하다. 오일의 작동온도가 100°C인 조건에서는 상대적으로 유동성이 우수한 SAE 5W/30의 경우가 4.5배나 더 많은 누유량이 발생되고 있음을 보여준다. 이것은 오일의 작동온도가 높아질수록 더 벌어지는 누유 패턴을 보여준다. 따라서 엔진의 작동온도가 증가하는 추세에서 오일의 유동성과 누유문제를 동시에 해결해야 오일 소모량을 줄일 수 있다.

Fig. 6은 엔진오일의 작동온도를 100°C로 유지한 상

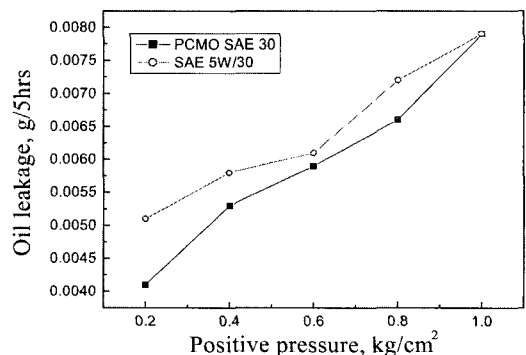


Fig. 6. Oil leakage as a function of positive pressure for PCMO SAE 30 and SAE 5W/30 cases.

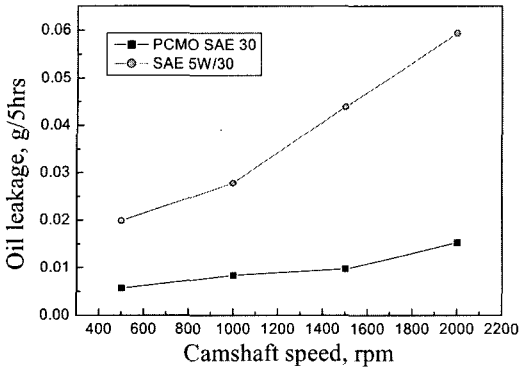


Fig. 7. Oil leakage as a function of camshaft speed for PCMO SAE 30 and SAE 5W/30 cases.

태에서 흡기과정에서 압력을 증가할 경우에 누유량이 급격하게 증가하는 패턴을 보여준다. Fig. 6의 실험적 결과에서 저압 작동조건보다는 고압 조건으로 올라갈수록 두 엔진오일의 누유특성은 같아진다는 사실이다. 이것은 Fig. 5에서 제시한 온도에 의해 확대되는 누유특성과 크게 달라진 경향으로 엔진의 흡기과정에서 흡기압을 높은 정압으로 유지하는 것은 결코 바람직하지 않다는 사실이다.

Fig. 7은 엔진의 캠축 회전수를 증가함에 따라서 오일의 누설량이 증가하는 경향을 제시한 결과이다. 이 때에 사용한 엔진오일의 실제 작동온도는 80°C를 유지하였다. 여기서 보여준 누유특성은 오일의 작동온도에 따라 실험한 Fig. 5의 누설 패턴과 대단히 유사하다. 즉, 캠축의 회전수가 1500 rpm인 경우에 발생된 누설량은 SAE 5W/30의 경우가 PCMO SAE 30에 비하여 약 4.5배 더 크며, 캠축 회전수가 증가할수록 그 격차는 벌어지는 경향을 그대로 유지하고 있다. 이것은 엔진의 회전수가 엔진오일의 온도 상승과 밀접한 관련성이 있기 때문이다.

가솔린 엔진에서 오일의 특성이 약간 다른 오일을 사용하는 경우 일반적으로 문제는 없으나, 오일의 누유특성 측면에서 보면 큰 영향을 미칠 수 있다는 사실을 본 연구에서는 제시하고 있다. 즉, 오일의 유동성이 양호한 제품을 사용하는 경우(SAE 5W/30)는 온도가 상승하거나 또는 캠축의 회전수가 증가할수록 누설량 발생 격차는 더 벌어지는 반면에 흡기 압력의 상승은 두 오일간의 누유 발생량 격차가 오히려 줄어드는 경향을 보여주고 있다. 이것은 사용 오일의 유동성에 관련된 특성이 다를 경우 누유특성이 크게 달라질 수 있다는 데이터를 제공한다.

4. 결 론

엔진의 밸브 스템계를 통하여 누설되는 오일의 양을 측정하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 실험적 연구결과에 의하면, 포켓 밸브보다는 밸브스템 시일의 밀봉 성능에 크게 의존하고 있음을 보여준다. 이것은 밸브스템 시일이 일정한 누유수명에 도달하면, 즉시 스템시일을 교체하여 엔진의 연소실로 유입되어 소모되는 오일량을 줄이고, 엔진오일의 카본 퇴적에 의한 노킹 발생을 억제해야 한다.

엔진오일의 작동온도와 회전수에 의한 영향을 받으며, 특히 고온에서 흡기압력이 증가하면 밸브스템을 통한 누설량은 급격하게 증가하는 현상이 발생한다. 그러나, 최근의 엔진은 마찰 저항력을 줄이기 위해 저점도 오일을 사용하고, 연소효율을 올리기 위한 고온 엔진을 개발하는 추세에 있기 때문에 포켓 밸브와 밸브스템 시일을 통한 누유를 적극 차단하고 오랫동안 사용할 수 있는 새로운 밸브스템 시일을 개발해야 엔진오일 소모량을 줄일 수 있다.

또한 엔진오일의 특성을 검토하기 위해 사용한 SAE 5W/30와 PCMO SAE 30의 경우를 상대적으로 비교하면, 점도와 유동성 측면에서 우수한 특성을 갖는 SAE 5W/30은 오일의 누설 안정성 측면에서 약간 불리한 결과를 보여주고 있다.

참고 문헌

- Carey, L.R., Roberts, D.C. and Shaub, H., "Factors Influencing Engine Oil Consumption in Today's Automotive Engines," SAE paper 892159.
- Hill, S.H. and Sytsma, S.J., "A Systems Approach to Oil Consumption," SAE paper 910743.
- Dempster, N.M. and Shore, P.R., "An Investigation into the Production of Hydrocarbon Emissions from a Gasoline Engine Tested on Chemically Defined Fuels," SAE paper 900354.
- Netzer, J. and Maus, K.H., "Improvements of Valve Stem Seals to Meet Future Emission Requirements," SAE paper 980581.
- 전윤수, 이일권, "엔진오일의 역할과 고장 사례 연구," KSAE paper 199851.
- Merkisz, J., "About Relationship Between the Oil Consumption and the Toxic Compounds Emissions from IC-engines," SAE paper 960319.