

밸브 간극에 따른 밸브트레인 거동 연구

민선기

아주자동차대학 자동차계열

Study of Valve Train Motion According to Valve Clearance

Sunki Min

Division of Automotive Engineering, Ajou Motor College

요약 기계적 태핏은 유압 태핏과 비교하여 원가와 마찰 손실을 줄일 수 있어 사용된다. 그러나 기계적 태핏은 캠과 밸브 사이의 간극을 조절하는 기능이 없으므로 밸브의 열팽창을 고려하여 캠과 밸브 사이의 거리를 측정하여 선정된다. 그러므로 충분한 워밍 업 후에는 밸브 간극이 거의 없지만 그 전에는 밸브 간극이 존재한다. 특히 냉간 작동 조건에서는 비교적 큰 편이고 소음과 진동 같은 문제를 발생시킬 수 있다. 본 논문에서는 밸브 간극을 변경시켜 가며 각각의 조건에서의 밸브 리프트, 속도, 가속도, 시팅 속도, 바운싱 높이 등에 대하여 시험과 해석을 통하여 연구되었다. 밸브 간극이 증가할수록 램프 구간이 감소하게 되어 밸브의 거동에 좋지 않은 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

• 주제어 : 밸브 간극, 기계적 태핏, 밸브 리프트, 밸브 속도, 시팅 속도, 바운싱 높이

Abstract Mechanical tappet is used to reduce the cost and friction loss compared with hydraulic tappet. But the mechanical tappet doesn't have the ability to control the clearance between cams and valves and is selected by measuring the distance between valves and cams in order to minimize the clearance of valves by considering thermal expansion of valves. So, the valve clearance is nearly zero after fully warming-up periods, but there is valve clearance before warming-up. Especially at cold condition, the clearance is relatively large and can bring about some problems. In this study, the valve motions like lift, velocity, seating velocity and bouncing height were studied at various valve clearance conditions by experiment and analysis. As the valve clearance increases, the ramp area becomes shorten and it causes the valve train motion to have bad effects.

• Key Words : Valve clearance, Mechanical tappet, Valve lift, Valve velocity, Seating velocity, Bouncing height

1. 서론

엔진의 실린더 헤드에서 캠과 흡배기 밸브 사이에서 힘을 전달하는 태핏의 역할 중 하나는 밸브와 캠 사이의

간극 (valve clearance)을 줄여서 소음과 진동을 감소시키는 것이다.[1,2,3,4] 태핏은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 하나는 유압을 사용하여 간극을 없애는 유압 태핏 (hydraulic tappet)이고, 다른 하나는 다양한 심 두께

*Corresponding Author : 민선기(skmin@motor.ac.kr)

Received August 21, 2017

Accepted October 20, 2017

Revised September 24, 2017

Published October 28, 2017

로 간극을 조정하는 기계적 태핏 (mechanical tappet)이다. 유압 태핏의 경우 간극이 유압으로 조정되므로 헤드의 오일 갤러리내에 적당한 오일압만 유지하면 간극 조정에 대한 필요성을 없앨 수 있으나, 고가이고 태핏의 구조가 복잡하고 무게가 증가하여 출력의 손실을 가져오는 단점이 있다[5,6,7,8,9]. 반면에 구조가 간단하고 저렴하여 소형 엔진 등에서 널리 사용되는 기계적 태핏의 경우는 헤드 조립시 캠과 밸브와의 간극을 측정하여 적당한 심두께의 기계적 태핏을 선정하여 장착하게 되어 있다. 그러나 이 경우 조립시 사용되는 기계적 태핏은 엔진이 완전히 가열되어 밸브가 팽창한 후를 예측하여 선정되므로 냉간 시동시와 같이 엔진이 냉각된 상태에서는 캠과 밸브 사이에 간극이 존재하게 된다. 특히 배기밸브의 경우는 흡기밸브에 비해 고온이므로 기계적 태핏 조립시 이를 고려하여 흡기에 비해 상대적으로 밸브와 캠 사이의 간극이 크도록 기계적 태핏을 선정하여 조립한다 [10,11,12]. 이럴 경우 문제가 되는 것은 엔진이 장기간 저속 저부하 조건에서 운행을 하는 경우이다. 이 경우 엔진은 충분히 가열되지 않은 상태로 운행되기 때문에 배기 밸브와 캠 사이의 간극이 상대적으로 큰 상태에서 운행하게 되어 밸브나 캠에 여러가지 좋지 않은 결과를 유발시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기계적 태핏을 조절하여, 밸브 간극을 0 ~ 0.3mm까지 0.1mm 단위로 증가시키며 밸브의 거동을 측정하고 이와 관련된 해석을 진행하였다.

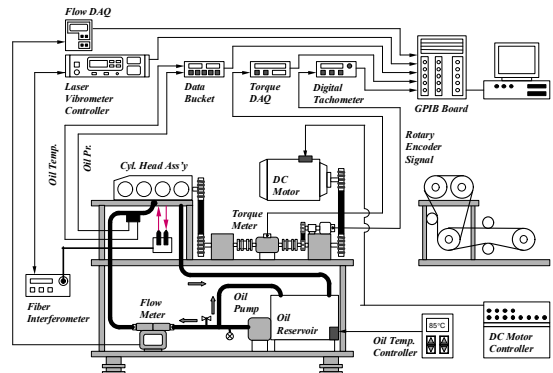
2. 시험장치 및 방법

밸브의 거동을 측정하기 위한 연구는 많이 진행되었는데, [13,14,15] 본 연구에서 사용한 시험 장치와 시험 방법은 아래와 같다.

2.1 시험장치

[Fig. 1]은 밸브의 속도와 리프트를 측정하기 위한 시험 장치의 개략도이다. 밸브트레인 이 조립된 헤드가 시험 장치 지그에 장착되어 있고 캠축은 모터를 사용하여 원하는 속도로 회전시킨다. 모터와 캠축을 회전시키기 위한 크랭크 기어 사이에는 엔코더와 토크 미터가 연결되어 있어 회전 속도와 구동 토크를 측정한다. 또한 오일 순환을 위해 오일 저장소에 오일 펌프와 오일 히터가 설치되어 있어 오일의 온도와 헤드의 오일 갤러리내의 오

일 압력을 조절할 수 있다. 밸브의 속도와 리프트는 레이저를 사용하여 측정한다. [Fig. 1]에서와 같이 2개의 레이저가 헤드를 향하여 비추어 지는데 하나는 기준값을 위하여 고정된 부위를 향하고 다른 하나는 밸브를 향하여 각각에서 반사되는 신호의 위상차를 계산하여 밸브의 속도와 리프트를 구한다.



[Fig. 1] Schematic diagram of valve train test rig

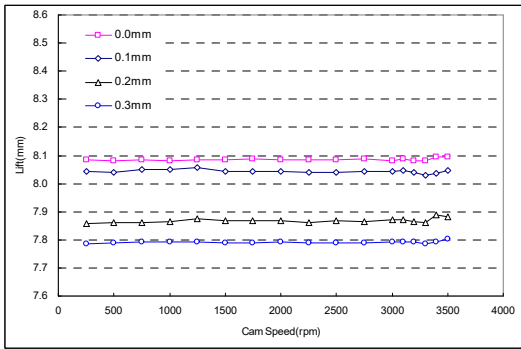
2.2 시험방법

밸브의 속도와 리프트는 다양한 심두께의 기계적 태핏을 교환하여 밸브 간극을 0.0mm ~ 0.3mm까지 0.1mm 단위로 증가시키며 그 때의 측정되었고, 이때 캠축의 회전 속도는 250rpm에서 3000rpm까지는 250rpm 단위로 3000rpm에서 3500rpm까지는 100rpm 단위로 증가시키며 데이터를 측정하였다. 3500rpm까지 측정 한 이유는 캠축은 크랭크축 2회전당 1회전씩 회전하므로 캠축 회전속도 (crpm) 3500rpm은 크랭크축 회전속도 7000rpm에 해당하는 속도이기 때문이다.

3. 시험결과

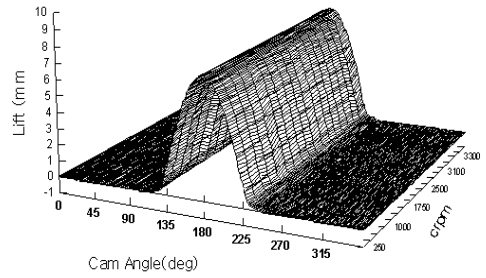
3.1 밸브 리프트 및 속도

[Fig. 2]는 밸브 간극 증가에 따른 밸브의 최고 리프트 값을 나타낸 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 밸브 간극이 증가하면 최대 리프트는 감소하였고, 이는 결국 밸브의 개도량의 감소로 이어져 엔진의 출력과 연비의 저하로 이어지게 된다.

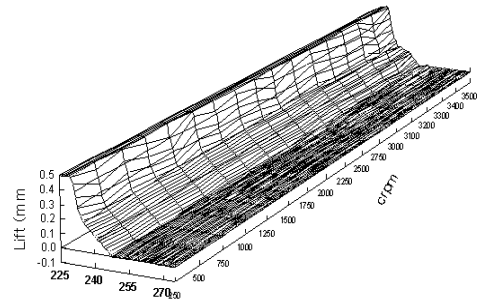


[Fig. 2] Maximum valve lift

[Fig. 3]과 [Fig. 4]는 밸브 간극에 따른 밸브의 거동 차이를 나타낸 것이다. [Fig. 3]은 밸브 간극 0.0mm 조건에서 캠 회전 속도에 따른 밸브 리프트를 3차원적으로 나타낸 것이다. 여기서 (a)는 리프트 전체의 그래프이고 (b)는 밸브트레인 (캠축, 태핏, 밸브 및 스프링으로 이루어진 시스템) 설계시 중요한, 밸브가 닫히는 영역만 확대하여 나타낸 것이다. [Fig. 4]은 밸브 간극 0.3mm 조건에서의 시험 결과이다. [Fig. 3]과 [Fig. 4]를 비교해 보면 밸브가 닫히는 영역에서의 형태가 차이남을 알 수 있다. 밸브 간극이 0.0mm인 조건에서는 밸브가 캠의 램프(ramp) 구간을 따라서 완만하게 닫히는 것을 알 수 있다. 반면에 밸브 간극 0.3mm 조건에서는 밸브가 급격하게 닫히는 것을 알 수 있고, 고회전 영역에서는 밸브가 닫힌 후 리프트가 다시 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 밸브 바운싱 (valve bouncing)으로, 밸브의 닫히는 속도가 너무 빠르거나 스프링의 장력이 충분하지 않은 경우 밸브가 시트링(seat ring)과 충돌하게 되면서 반작용으로 다시 열리는 것을 의미한다. 이러한 현상이 발생하면 흡기밸브의 경우에는 연소실 내의 압축된 공기가 빠져 나가면서 압력이 하강한다든지, 배기밸브의 경우에는 배기 매너폴드 내의 배기가스가 다시 연소실 내로 유입되는 현상을 발생시킬 수 있으므로 출력과 연비를 나쁘게 하는 원인이 된다.

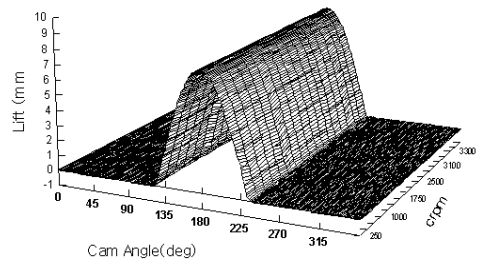


(a) Valve lift diagram

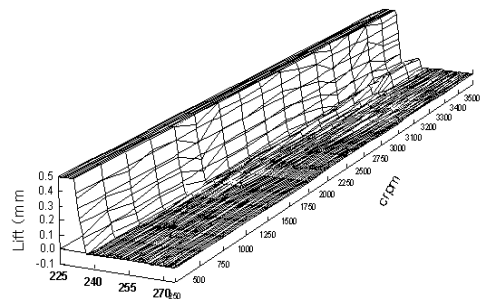


(b) Valve lift diagram of closing period

[Fig. 3] Valve lift diagram at valve clearance 0.0mm condition

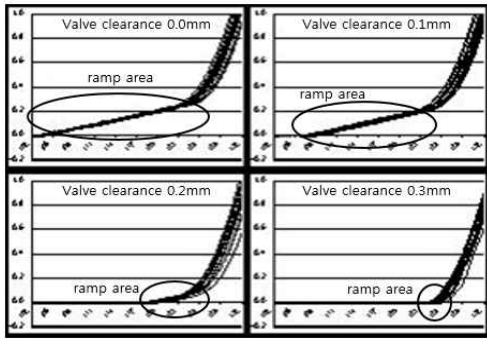


(a) Valve lift diagram

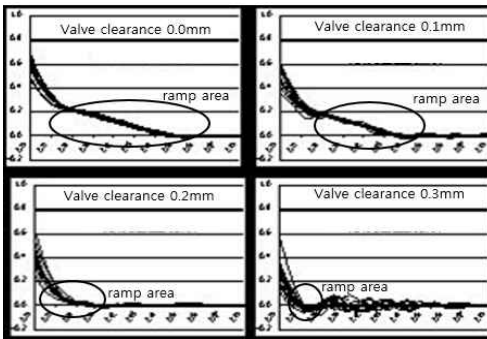


(b) Valve lift diagram of closing period

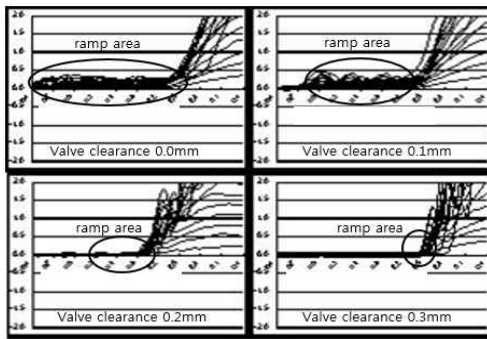
[Fig. 4] Valve lift diagram at valve clearance 0.3mm condition



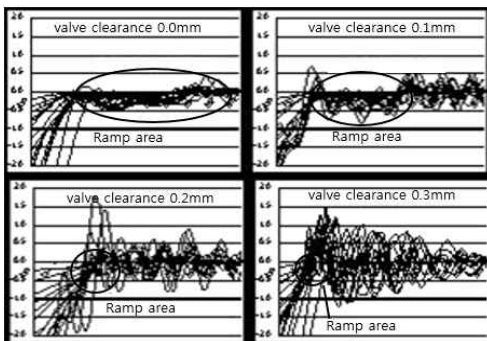
(a) Valve lift at opening area



(b) Valve lift at closing area



(c) Valve velocity at opening area

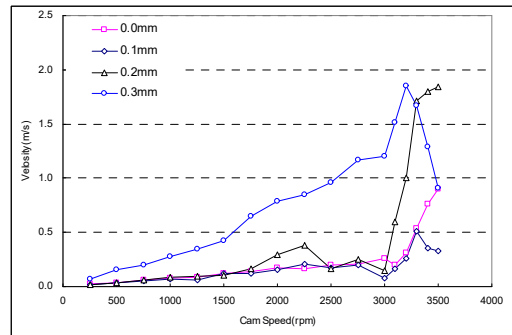


(d) Valve velocity at closing area

[Fig. 5]는 밸브 간극에 따라 밸브가 열리는 영역과 닫히는 영역에서의 회전속도별 밸브 리프트와 속도를 종합하여 나타낸 것이다. 그래프에서 보면 밸브 간극이 증가할수록 램프 구간이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 간극이 증가할수록 밸브가 열리는 시점은 점점 늦춰지고 닫히는 시점은 점점 빨라짐을 알 수 있다. 이는 밸브의 속도 그래프에서도 나타나 있다. 밸브가 본격적으로 열리기 전에 충격 완화를 위해서 거의 일정한 속도가 유지되는 램프 구간이 밸브 간극이 증가할수록 사라지고 어느 순간에 급격히 속도가 증가함을 알 수 있다. 또한 램프 구간에서도 밸브 간극이 증가하면서 속도가 일정하게 유지되지 못하고 속도의 변동이 증가함을 알 수 있다. 특히 닫히는 구간을 보면 밸브 간극이 증가할수록 밸브가 시트링과 접촉한 후에도 계속해서 움직이고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 앞에서 설명한 바와 같이 엔진의 출력을 저하시키는 원인이 된다.

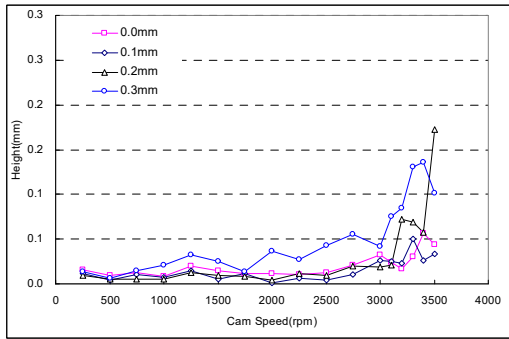
3.2 Valve Seating Velocity 및 Bouncing height

[Fig. 6]은 밸브가 닫히는 영역에서 밸브의 시팅 속도(seating velocity) 및 바운싱 높이(bouncing height)를 나타낸 것으로, 여기서 시팅 속도는 밸브가 시트링에 접촉하기 직전의 속도를 의미하는 것이고, 바운싱 높이는 밸브가 시트링과 접촉한 후, 닫힌 상태를 유지하지 못하고 다시 튀어 오르는 높이를 나타낸 것이다. 시팅 속도가 증가하게 되면 밸브에 가해지는 충격량이 증가하게 되어 소음이나 심한 경우 밸브의 파손을 유발할 수 있다. 그래프에서 보면 밸브 간극이 증가함에 따라 시팅 속도가 증가함을 알 수 있고 또한 바운싱 높이도 증가함을 알 수 있다.



(a) Seating velocity

[Fig. 5] Valve lift and Velocity



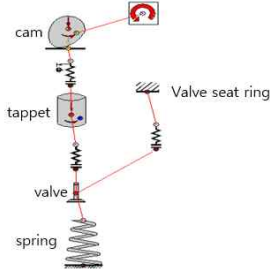
(b) Bouncing height

[Fig. 6] Valve seating velocity & bouncing height

3. 밸브트레인 해석

3.1 해석 모델

해석은 Ricardo의 Valdyn 프로그램을 이용하여 진행되었다. 실제 밸브트레인인 캠, 태핏, 밸브, 밸브 스프링 및 시트링으로 1D 모델을 구성하여 해석을 진행하였다. [Fig. 7]에 해석에 사용한 모델이 나타나 있다. 해석은 밸브 간극이 증가함에 따라 발생하는 기계적 태핏의 거동과 시트링의 마모 등을 발생시킬 수 있는 밸브가 시트에 부딪히는 힘 (seat force)에 대해 연구하기 위해 진행되었다.

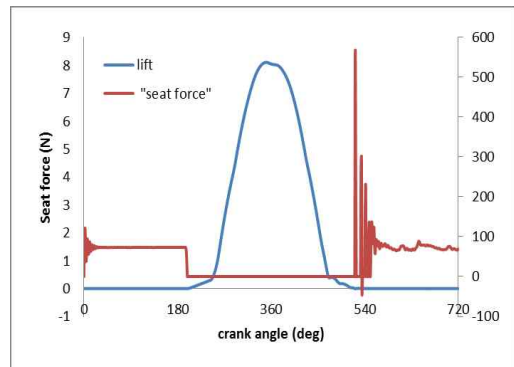


[Fig. 7] Valve train analysis 1D model

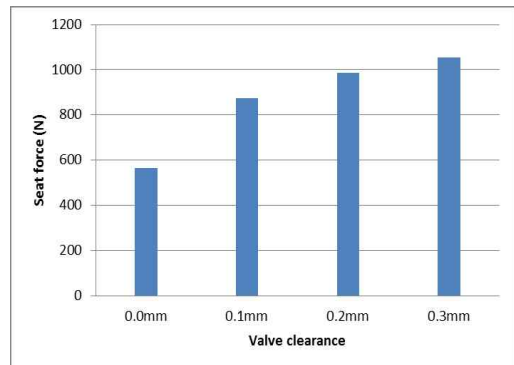
3.2 해석 결과

[Fig. 8]에 밸브 간극 0.0m 및 캠 회전속도 3500rpm 조건에서의 seat force가 나와 있다. 그래프를 보면 밸브가 닫혀 있는 구간에서는 일정한 힘을 받다가 밸브가 열리기 시작하면 시트에 작용하는 힘이 0이 되는 것을 알 수 있다. 그러다가 다시 닫히는 구간에서 급격히 받는 힘이 변화함을 알 수 있다. 닫히는 구간에서 힘이 변화하는 것

이 밸브가 닫힌 후에도 움직임이 정지하지 않고 어느 정도의 기간 동안 밸브가 위아래로 진동함을 의미한다. [Fig. 9]에는 캠축 회전속도 3500rpm에서 밸브 간극별 시트에 가해지는 힘의 최대치가 나타나 있다. 그래프를 보면 밸브 간극이 커질수록 시트에 가해지는 힘이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 밸브 간극이 증가할수록 밸브가 닫힐 때 램프 구간을 지나며 속도가 감소하는 것이 아니라 밸브 스프링에 의해 자유롭게 밸브가 닫히는 구간이 증가하기 때문이다.



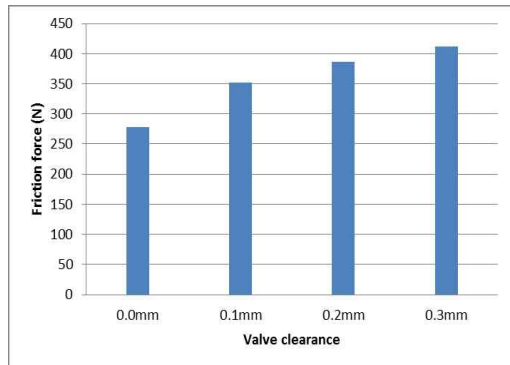
[Fig. 8] Valve seat force & valve lift at 0.0mm valve clearance condition



[Fig. 9] Maximum valve seat force

[Fig. 10]에는 캠축 회전속도 3500rpm 조건에서의 기계적 태핏과 태핏 보어 사이의 마찰력이 나타나 있다. 밸브 간극이 증가할수록 마찰력이 증가함을 알 수 있다. 이는 태핏과 태핏 보어 사이의 마찰이 유체윤활영역이 되어 속도가 증가할수록 마찰계수가 증가하여 마찰력이 증가하기 때문이다. 밸브 간극이 클수록 태핏의 속도가 증가하는 이유는 밸브가 닫히는 영역에서 램프 구간이 없

어지기 때문이다. 즉 밸브와 태핏이 램프 구간에서 속도를 서서히 줄이면서 밸브와 시트가 접촉을 해야 하는데, 밸브 간극이 증가하면 밸브가 시트에 접촉하여 움직임을 멈춘 후, 태핏은 밸브와 상관없이 캠을 향하여 상승 운동을 하게 되어 속도가 증가하기 때문으로 생각된다.



[Fig. 10] Maximum friction force between tappet & tappet bore

4. 결론

기계적 태핏을 사용하여 시키며 밸브의 속도, 리프트 및 회전을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 최대 밸브 리프트 (maximum valve lift)는 밸브 간극이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있었다. 또한 밸브 간극이 증가할수록 밸브가 열리고 닫히는 구간에서 램프 (ramp) 영역이 감소함을 알 수 있었다.
- 2) 램프 영역이 감소함에 따라 닫히는 구간에서 시팅 속도 (seating velocity)가 증가하게 된다. 또한 이에 따라 바운싱높이(bouncing height)도 증가함을 알 수 있었다.
- 3) 밸브 간극이 증가할수록 밸브가 닫힐 때 시트에 가해지는 힘의 크기 (seat force)가 증가함을 알 수 있었다.
- 4) 밸브 간극이 증가함에 따라 밸브가 닫힐 때 태핏과 태핏 보어간의 마찰력(friction force)이 증가함을 알 수 있었다.
- 5) 본 연구를 통하여 밸브 간극에 따라 발생하는 현상을 이해하고 발생할 수 있는 문제점에 대해 알 수 있었다.

REFERENCES

- [1] J. Cho, S. Jang, "A Study of the Engine Valve Train Noise in the Lubricating Contact", KSAE 2016, pp. 1424-14226, 2016.
- [2] S.Y.Hwang, K.T.Kang, B.S.Lim, Y.S.Lim, "Noise Reduction and Sound Quality Improvement of Valve Train in V6 Gasoline Engine", SAE, SAE 2005-01-1834, 2005.
- [3] J.Seo, B. Na, J. Kim, S. Park, Y. Lee, D. Lim, "A Study of Cam&Tappet by Low Friction/Wear Coating", KSAE 2007, pp. 47-52, 2007.
- [4] C. Lee, H. Kim, J. Rhee, "Improvement of the Camshaft Chattering Noise and Application to Engine Development", KSAE 2014, pp.40-413, 2014
- [5] H. Shin, M. Cho, D. Han, "Mixed Lubrication Analysis of Cam/Tappet Interface on the Direct Acting Type Valvetrain System", KSAE pp.200-207, 2000.
- [6] P. D. Fleischauer, "Tribology in the Space Environment" New Directions in Tribology-Plenary and invited papers from the first World Tribology Congress, pp. 217-227, 1997
- [7] R. L. Fusaro, "Lubrication of Space System" J. of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 51, pp 182-194, 1995
- [8] Barry, H. F. "Factors Relating to the Performance of MoS₂ as a Lubricant," Lubrication engineering, Vol. 33, pp 475-480, 1997
- [9] C.D.Yeo, D.E.Kim, J.E.Yun, "Torque Characteristics of Cam/Tappet System", SAE NO. 98370100, KSAE vol. 5, pp66-74, 1998
- [10] H.Kong, H. G. Han, E. S. Yoon, O. K. Kwon and N. K. Myshkin, "Evaluation of the Wear Life of MoS₂-bonded-films in Tribo-testers with Different Contact Configuration" Wear, Vol. 215, pp. 25-33, 1998
- [11] C. Donnet, J. M. Martin, T.L. Mogné and M. Belin, "Super-low Friction of MoS₂ Coating in Various Environments" Tribology International, Vol. 29. pp. 123-128, 1996

- [12] R. S. Paranjpe, "Dynamic Analysis of a Valve Spring with a Coulomb Friction Damper", Journal of Mechanical Design, Vol. 112, pp509-513, December 1990
- [13] Jeff G. Sczepanski, "New Equipment and Methodology to Perform High Speed Valve Train Dynamics Testing and Analysis" SAE, SAE 2004-01-1720, 2004.
- [14] J. Seo, J. Park, T. Park, J. Kim, "Study on Valvetrain Dynamic Characteristics Analysis by Using Vibrometer and High Speed Camera", KSAE 2016, pp. 158-159, 2016
- [15] R. Kerres, D. Schwarz, M. Bach, A. Eichenberg, J. Wust, "Overview of Measurement Technology for Valve Lift and Rotation on Motored and Fired Engines", SAE, 2012-01-0159, 2012

저자소개

민 선 기(Sunki Min)

[정회원]



- 1992년 2월 : 연세대학교 공과대학원 기계공학과 (기계공학석사)
- 1999년 8월 : 연세대학교 공과대학원 기계공학과 (기계공학박사)
- 1999년 9월 ~ 2012년 2월 : 한국지엠 부장

- 2012년 3월 ~ 현재 : 아주자동차대학 자동차계열 교수 <관심분야> : 내연기관, 열유체공학, 엔진 관련 해석, 엔진 관련 시험