

세라믹 태핏심 표면 거칠기에 따른 엔진 밸브트레인계의 마찰 특성에 관한 연구

김승철 · 박형준 · 강경필 · 오대윤 · 최재권
현대자동차 중앙연구소

A Study of the Effects of Ceramic Tappet Shim Surface Roughness on the Friction Characteristics in the Valve Train System

Seoung-Cheol Kim, Hyoung-Joon Park,
Kyung-Phil Kang, Dae-Yoon Oh and Jae-Kwon Choi
Central Research Center, Hyundai Motor Company

Abstract

A Si₃N₄ tappet shim was developed in a direct OHC engine for the friction reduction of valve train system that contributes significantly to the engine friction in real driving condition. For commercializing Si₃N₄ tappet shim, it is important to reduce the machining cost. Therefore we analytically and experimentally figure out the optimum condition. Using ceramic tappet shims machined with different surface roughness, the effects of roughness on the friction loss were analyzed in view of the lubrication behavior. From this results it is shown that the friction torque of valve train system quickly drops at a certain surface roughness of ceramic tappet shim and its value remains constant despite further smoothing.

Key words - friction, valve train system, ceramic, tappet shim, film parameter, surface roughness, film thickness

1. 서 론

인류 문명의 이기로 각광받아온 자동차는 자원 한정 및 환경 악화의 문제와 부딪혀 새로운 국면에 직면하여 있다. 국제적으로는 배기 및 연비 규제가 더욱 강화되고 있으며, 각 자동차 생산업체는 저배기, 저연비 차량 개발에 총력을 기울이고 있다. 이러한 맥락에서 실차량 주행 영역인 저속에서의 엔진 마찰 기여율이 높은 밸브 트레인계 마찰 저감에 관한 연구는 상당히 의미있는 일로 여겨지고 있다.⁽¹⁾

엔진 밸브트레인계는 로올러 태핏 채용, 밸브 스프링 하중 감소, 캠과 태핏 접촉부의 거칠기 향상, 저마찰 윤활유 적용 등에 의해 마찰손실이 현저히 저감될 수 있음이 알려져 있다.⁽²⁾⁽³⁾ 최근에는 저마찰성 뿐만 아니라 내마모성과 내스커핑성이 동시에 만족될 수 있는 재질이 요구되면서 세라믹 재 적용 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 직동식 밸브 트레인계의 태핏심은 단순한 형태이면서 표면 가공성이 용이한 점으로 인하여 경표면 가공에 의한 마찰 저감용 세라믹 태핏심의 적용 연구가 활발히

진행되고 있다.

기 연구에 의하면 경면 표면을 갖는 질화규소 세라믹(Si_3N_4) 태핏심을 적용하면 엔진 밸브 트레인계의 마찰손실이 20% ~ 30% 저감되며, 차량 연비로는 2% ~ 3% 정도 저감되는 것으로 발표되고 있다.⁽⁴⁾ 그러나 세라믹재는 초경도 특성으로 인하여 표면 거칠기가 고와질수록 가공비가 기하급수적으로 상승하게 된다. 따라서 본 논문에서는 여러 거칠기의 세라믹 태핏심을 제작한 후, 거칠기에 따른 엔진 밸브 트레인계의 마찰 특성을 실험과 이론 계산을 통하여 고찰함으로써, 엔진 마찰 저감과 가공비 측면에서 가장 적절한 표면 거칠기를 찾고자 하였다.

실험으로는 태핏심 표면 거칠기 차이에 따른 엔진 모터링 토크와 리그에서의 밸브 트레인계 구동 토크를 측정하여, 태핏심 표면 거칠기 변화가 엔진 및 밸브 트레인계의 마찰 저항에 미치는 영향을 평가하였다. 그리고 이론 해석에서는 다우슨(Dowson)의 탄성유체윤활 실험식으로 캠과 태핏심 접촉부에서의 유막 두께를 계산하여 표면 거칠기와의 상관비인 유막 파라미터(film parameter)를 산출한 후, 엔진 밸브트레인계 마찰과의 관계를 고찰하였다.

2. 실험

2-1 질화규소 세라믹(Si_3N_4)

태핏심의 제조과정

고순도, $11.5\text{m}^2/\text{g}$ 의 높은 비표면적비 및 95%가 넘는 α/β 상의 비율 특성을 가지고 있는 우베사의 E-10 질화규소 세라믹(Si_3N_4) 분말을 원료로 사용하였다. 원료 분말은 24시간 동안 에탄올 용매 속에서 볼 밀링으로 혼합한 후, 스프레이 건조를 행하였다. 그 후 기계압으로 성형시키고 시편을 질소 가스 분위기에서 $1500\sim 1850^\circ\text{C}$

온도로 가스압소결 하였다. 가스압한 원통재로부터 지름 30 mm, 두께 2~2.6mm의 시험용 시편을 기계 가공하였다. 이러한 과정으로 제조된 질화규소 세라믹스 태핏심의 기계적 특성은 table 1과 같다.

Table 1. Mechanical properties of Si_3N_4 tappet shim

Density	3.3 g/cm ³
Hardness (Hv)	16.8 GPa
Bending strength (σ_{4b} , RT)	1000 MPa
Fracture toughness (K_{IC})	6.5 MPa $\sqrt{\text{m}}$
Young's modulus (E)	308 GPa
Weibull modulus (m)	19.5

본 시험을 진행하기 전에 핀온로터 (Pin-on-Rotor) 타입의 마찰, 마모 시험기에서 질화규소 세라믹스의 마찰 및 마모 특성을 기존의 금속 재질과 비교해 보았다. 여기서 원판(rotor)은 캠축과 동일한 재질로 제작하였다. 그 결과, 기존 금속재의 마찰 계수가 0.13인 반면에 세라믹스는 0.03으로 나타나, 극히 양호한 마찰 특성을 보여주었다. 그리고 세라믹스의 마모율도 기존재의 십분의 일 수준으로 마모 특성도 상당히 뛰어남을 보여 주었다. 시험용 세라믹 태핏심은 표면을 여러 등급(Ra 0.2, Ra 0.1, Ra 0.07, Ra 0.03, Ra 0.005)으로 연마하여 표면 거칠기가 엔진 밸브트레인계의 마찰에 미치는 영향이 평가되도록 하였다. 또한 Ra 0.005 세라믹 태핏심 표면은 특수 연마를 행함으로써 초경도 상태가 가능하도록 하였다. 이러한 초경도 표면 거칠기의 측정에 기존의 접촉식 조도 측정기로는 불가능하여 상 전이 간섭 및 백색광 스캐닝 간섭 효과 방식을 이용한 비접촉식 표면 조도 측정기(ACCURA 1500M, Intek Engineering Co. Ltd., Korea)를 이용하였다. 이 측정기의 분해능은 1 나노미터이고,

측정오차는 $\pm 3\%$ 이다.

2-2 모터링 리그(Motoring rig)

시험에 사용된 모터링 리그는 Fig. 1과 같이 구동 모터(30 kW), 토크 미터(100 N-m), 오일 및 냉각수 공급 장치, 데이터 처리 장치로 구성되어 있다. 이러한 모터링 리그에서의 시험은 먼저, 밸브트레인계가 장착된 실린더 헤드를 블록 대응 지그에 견고하게 고정시키고 캠축 끝단에 로터리식 토크 미터를 연결한 후, 모터로 캠축을 구동한다. 이 때 캠축 끝단과 토크 미터 사이에는 커플링을 설치하여 미소 편차에 의한 영향이 제거되도록 하였으며, 밸브 트레인계 구동에 필요한 윤활유는 오일 베스에 설치된 가열기와 냉각기에 의해 실차 조건과 유사한 온도로 조절되어 공급되도록 하였다.

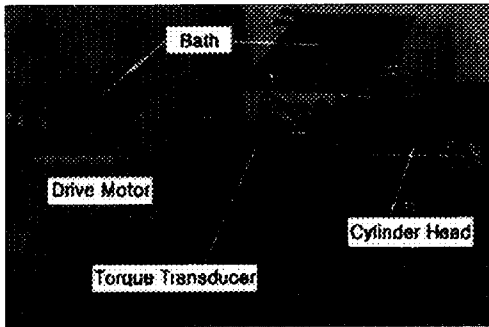


Fig. 1 Experimental apparatus

2-3 시험 과정

시험 전에 먼저 모터링 리그에서의 측정 오차를 최소화 하고자, 토크 미터에 대하여 무부하 상태에서의 영점 조정 및 정하중하의 토크 캘리브레이션(Calibration)을 실시하였고, 공급 냉각수온에 의한 실린더 헤드에서의 열팽창을 고려하여 시험 온도에서 축중심 맞춤 작업을 수행하였다. 그리고 공급유의 온도 변화에 의한 측정 오차를 최

소화하고자 공급 오일과 냉각수온은 $\pm 1^\circ\text{C}$ 내로 조절되도록 하였다. 이로써, 모터링 리그에서의 밸브 트레인계 구동 토크 측정은 $\pm 3\%$ 의 재현성을 가질 수 있었다. 본 시험에 사용된 엔진은 2.0L, DOHC, L-4, MPI 가솔린 엔진이며, 밸브 트레인계의 주요 사양은 Table 2와 같다.

Table 2. Specifications of Valve Train System

Type of valve train system	Solid Direct acting
Spring load(N), min, max	196, 470
Wid., base dia. of cam(mm)	13, 18
Valve Lift (mm) Int., Exh.	8.0, 8.4
Shim dia.(mm)	30
Used Oil	SH, SAE 7.5W30
Temp. of Oil, Coolant($^\circ\text{C}$)	90
Pressure of oil supply(kPa)	200
Materials of cam	FC25
Surface treatment of cam	Chill, Porco-Lub.
Hardness of cam(Hv)	500

시험 진행은 철강재(Steel) 태핏심이 장착된 본래의 실린더 헤드를 20시간 동안 운전하여 충분한 Break-in이 되도록 한 후, 마찰 토크를 측정하고, 이 후 여러 거칠기의 세라믹 태핏심만 교체하면서 측정을 계속 진행하였다. 이 때 세라믹 태핏심은 고운 것에서부터 거친 사양으로 교체하면서 시험을 수행함으로써, 태핏심 거칠기에 의한 캠 표면에서의 거칠기 변화가 최소화되도록 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2는 세라믹 태핏심 표면 거칠기 차이에 따른 캠축 1회전에 대한 구동 토크 측정값의 일례를 보여준다. 그림과 같이 밸브 여닫힘에 의해 캠축 구동 토크가 변동

되는데, 저속에서는 각 실린더마다 한번 변하지만, 고속에서는 그 횟수가 잦아짐을 볼 수 있다. 이는 저속에서는 밸브 행정에 비례하여 하중이 변하는 스프링력이 캠축 구동 토크 발생을 주도하고, 고속에서는 밸브 여닫힘시 가속 구간에서의 관성력이 지배적인 영향을 끼치고 있음을 보여준다. 또한 그림에서와 같이 저속인 800 RPM에서 캠축 구동 토크가 축회전 방향(-)으로는 작고, 반대 방향(+)으로는 크게 됨으로써, 캠축회전에 대한 마찰 저항이 구동 토크

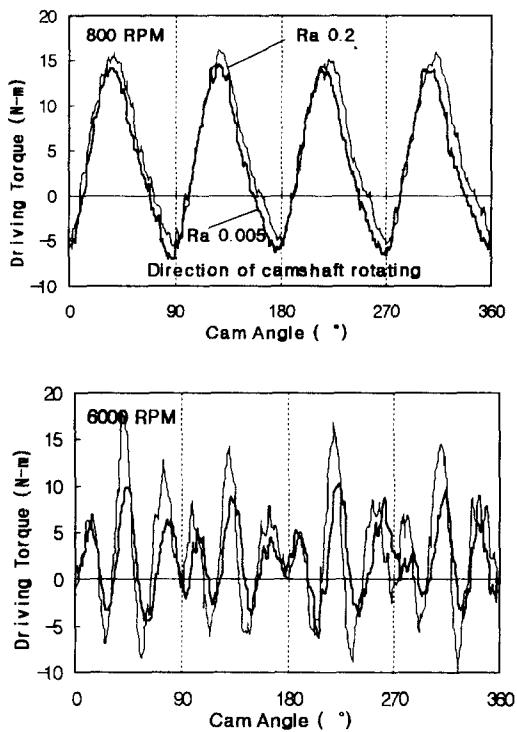


Fig. 2 The waveform of camshaft driving torque

에 회전에 대한 마찰 저항이 구동 토크에 상당히 기여하고 있음을 보여주었다. 그리고 태핏심 거칠기가 고운 경우, 캠축 구동 토크가 축회전 방향(-)으로는 커지고 반대 방향(+)으로는 더욱 작아지는 점으로

보아 거칠기 차이에 따른 캠축 마찰 저항에 변화가 있음도 보여주었다.

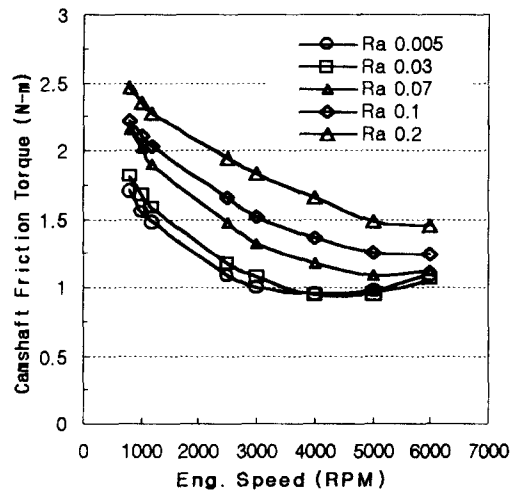


Fig. 3 Camshaft friction torque with tappet shims of various surface roughness

Fig. 3은 각 회전 속도에서 세라믹 태핏심 거칠기 차이에 따른 캠축 구동 토크를 Fig. 2와 같이 측정한 후, 캠축 1회전분에 대하여 각 각도별로 적분하고 그 평균치를 산출함으로써 구한 캠축 마찰 토크를 나타낸다. 그림에서와 같이 태핏심 거칠기 향상에 의해 캠축 마찰 토크는 전속도 구간에서 최대 절반 수준까지 작아지게 됨을 알 수 있었다. 그리고 Ra 0.2 세라믹 태핏심에서의 캠축 마찰 토크는 회전속도가 증가함에 따라 그 값이 감소되는 전형적인 밸브 트레인계의 마찰 특성을 보여 주지만, 태핏심 거칠기가 고와지면서 회전 속도 상승에 따른 캠축 마찰 토크가 오히려 증가하게 되는 경우도 발생하였다. 이는 고하중 저속 상대 운동으로 인해 혼합윤활 상태에서 작동되는 것으로 알려진 캠과 태핏심의 접촉 부가, 표면 거칠기가 향상되면서 유체 윤활 특성이 나타나게 됨을 시사한다.

따라서 이러한 현상의 메카니즘 (Mechanism)을 좀 더 명확히 밝혀보고자, 다우슨의 탄성유체윤활 이론식(2)을 이용하여 Fig. 4와 같은 캠과 태핏심 접촉부에서의 유막 두께를 계산한 후, 이를 식 (1)에 대입하여 유막 파라미터, Λ ,를 구하였다. 여기서 식 (1)에 이용된 캠축과 태핏심의 표면 거칠기는 시험 직후, 캠노우즈부와 심 표면에서 측정된 Table 3의 값을 사용하였고, 유막 두께는 Fig. 4의 캠노우즈부 값을 적용 하였는데, 재질에 따른 유막 차이는 보이지 않으나 회전속도에 의해서는 상당히 차이가 있음을 나타낸다. 이는 본 시험과 같이 동일한 윤활유를 사용할 때에는 Λ 가 태핏심 거칠기와 캠축 회전속도에 지배적인 영향을 받게 됨을 의미한다.

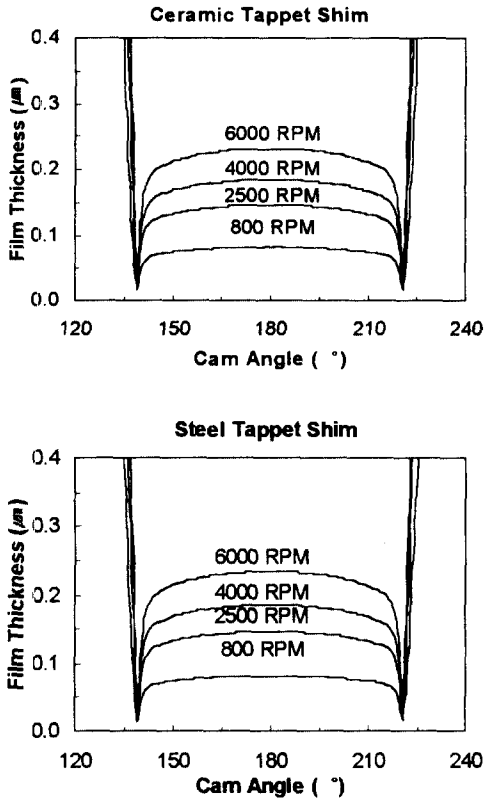


Fig. 4 Calculated oil film thickness

$$\Lambda = H_{cf} / \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} \dots \dots \dots (1)$$

$$H_{cf} = 3.06 \times U^{0.67} \times G^{0.56} \times W^{-0.1} \dots (2)$$

$$U = \eta_o u / E' R$$

$$u = (u_1 + u_2) / 2$$

$$E' = 2 / [(1 - \nu_1^2) / E_1 + (1 - \nu_2^2) / E_2]$$

$$R = r_1 r_2 / (r_1 + r_2)$$

$$G = a E'$$

$$W = w / (E' R)$$

Table 3. Surface roughness after and before test

	Before Test (μm)		After Test (μm)	
	Shim	Cam Nose	Shim	Cam Nose
Ra0.005	0.005	0.04	0.005	0.04
Ra0.03	0.03	0.04	0.03	0.04
Ra0.07	0.07	0.06	0.07	0.06
Ra0.1	0.1	0.06	0.1	0.14
Ra0.2	0.2	0.14	0.2	0.16
Steel	0.25	0.12	0.13	0.13

Fig. 5는 캠축 마찰 토크와 유막 파라미터, Λ ,와의 관계를 보여준다. 그림에서 그래프 (a)와 (b)는 태핏심 거칠기와 회전속도에 따른 영향을 구별하여 관찰하고자, 동일한 시험 결과를 다른 표기로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 캠축 마찰 토크는 Λ 가 커짐에 따라 지수함수적으로 감소하는 경향을 보이다가, Λ 가 3 이상이 되면 마찰 토크가 더 이상 저감되지 않게 된다. 이는 캠축 마찰 토크가 Λ 값에 지배적인 영향을 받고 있으며, 태핏심 거칠기나 회전 속도 변경으로 Λ 값을 증가시키면 현저한 마찰 저감이 가능하나, Λ 값이 3 이상이 되면 그 효과가 아주 미소해짐을 의미한다. 이 때, Λ 값의 증가에도 불구하고 캠축 마찰 변화가 미소해지는 영역이 일반적으로 혼합 윤활에서 유체윤활로의 천이점으로

알려진 $\lambda=3$ 지점과 일치함을 보였다. 따라서 태핏심 거칠기 향상에 따른 캠축 마찰이 현저히 저감되는 이유가 캠과 태핏심 접촉부에서의 표면 거칠기에 비해 유막이 상대적으로 두껍게 형성됨으로써 고체 접촉에 의한 마찰 발생이 저감 되기 때문인 것으로 판단할 수 있었다. 또한 태핏심 거칠기를 더욱 향상시켜 λ 값이 3 이상이 되면, 유체 점성에 의한 마찰 발생이 지배적으로 되어 λ 값에 따른 마찰 변화가 미소해지는 것으로 이해되었다. 본 시험에서 세라믹 태핏심의 거칠기가 Ra 0.03 이상인 경우에는 대부분의 회전 속도에서 λ 값이 3 이상인 영역에 분포되는 흥미로운 결과도 보여주었다.

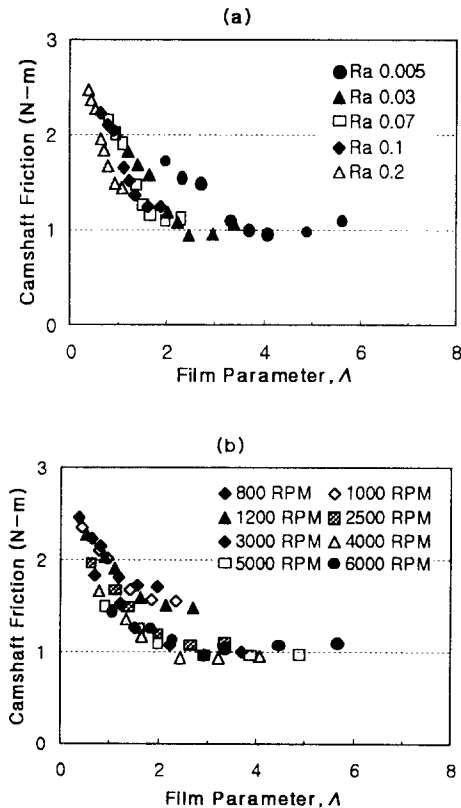


Fig. 5 Relationship between camshaft friction torque and oil film parameter

Fig. 6과 7은 Ra 0.2 세라믹 태핏심을 채용한 β -2.0 L DOHC 엔진 및 밸브트레인 계의 마찰 토크값과 태핏심 표면 거칠기 향상에 따른 엔진 마찰 저감율을 보여준다.

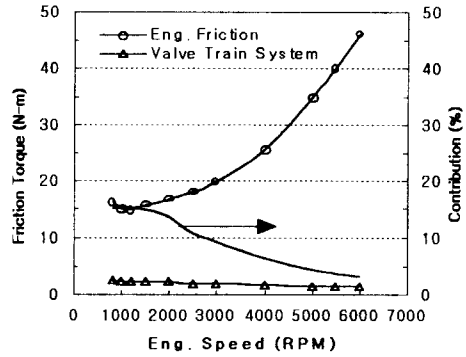


Fig. 6 Camshaft friction characteristics

Fig. 6에서와 같이 밸브트레인계의 마찰 수준은 엔진 전마찰 대비 저속에서 15%까지 차지한다. 이로써 실차량 주행 영역이 거의 저속인 점을 고려할 때, 연비 저감 측면에서 밸브트레인계 역할의 중요성이 재확인되었다. Fig. 7은 태핏심의 거칠기 향상에 따라 엔진 마찰이 전 속도 구간에서 작아지며, 특히 저속에서의 효과가 더욱 증가함을 보여 준다. 그림에서와 같이 Ra 0.2 세라믹 태핏심을 채용한 엔진에 비해 Ra 0.03인 경우, 실차량 운전 영역인 2000 ~ 3000 RPM 에서 엔진 마찰은 4 ~ 5 % 저감되었다.

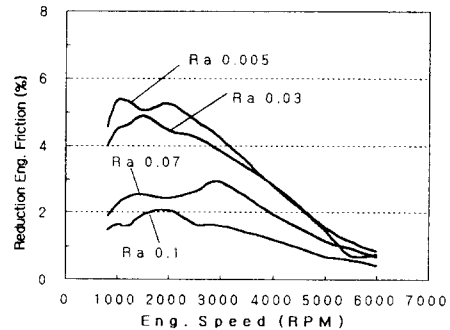


Fig. 7 Reduction of engine friction

위와같이 태핏심의 거칠기를 향상시킴으로써 엔진 전마찰 손실을 현저히 저감할 수 있음을 알게 되었다. 그러나 일반적인 태핏심재인 철강재는 Table 3에서 보는 바와 같이 재질 특성상 초기의 표면 상태가 운전 시간에 따라 변하게 되어 초기에 경표면으로 가공되더라도 그 효과를 충분히 살리지 못하게 된다. 따라서 초경재이면서 경표면 가공이 가능한 세라믹이 태핏심 재질로 적절한 것으로 판단되고 있다. 그러나 이러한 세라믹 태핏심은 표면거칠기 차이에 따른 가공비가 현격하게 달라진다. 따라서 세라믹 태핏심 표면 가공비와 엔진 마찰 저감 효과를 동시에 만족할 수 있는 최적의 거칠기가 요구된다. 이를 위하여 세라믹 태핏심 거칠기에 따른 엔진 마찰 저감율과 가공비를 Fig. 8에 함께 나타내 보았다. 그림에서 가공비는 Ra 0.2 세라믹 태핏심을 기준으로 연마 시간과 연마재 가격을 고려하여 무차원으로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 세라믹 태핏심의 거칠기가 향상됨에 따른 엔진 마찰 저감 효과는 앞에서 확인된 바와 같이 현저히 증가하다가

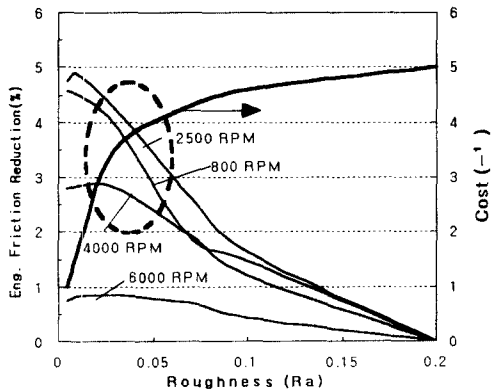


Fig. 8 Friction reduction rate and machining cost according to surface roughness

Ra 0.03 이하가 되면서 그 효과가 미약해

지지만, 가공비는 오히려 급격히 상승하게 됨을 보여준다. 따라서 그림의 타원으로 표시된 Ra 0.03 ~ 0.05 거칠기의 세라믹 태핏심이 가공비 상승분에 대한 엔진마찰 저감이 최대화되는 영역으로서, 마찰 저감과 가공비 측면에서 가장 최적의 표면거칠기인 것을 알 수 있다.

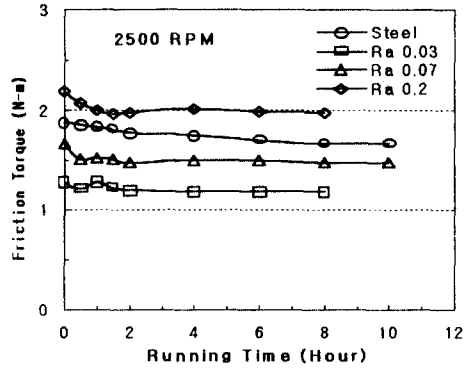


Fig. 9 Camshaft friction torque according running time

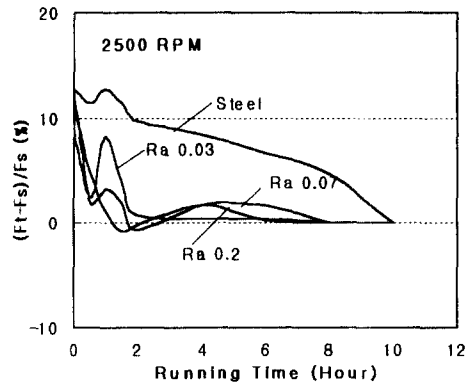


Fig. 10 Camshaft friction variation according to running time

Fig. 9와 10은 세라믹 태핏심의 길들이기 (Break-in) 특성을 관찰하고자, 운전 시간에 따른 캠축 구동 토크의 변화를 철강재 태핏심과 비교하여 본 것이다. Fig. 9는 운전 시간에 따른 캠축 구동 토크 값의 변화를 측정된 결과이고, Fig. 10은 Fig. 9에

서의 캠축 마찰 토크를 시간에 따른 변화율로 재구성하여 나타낸 것이다. Fig. 10에서 F_t 는 운전중 시간에 따라수시로 측정된 캠축 마찰 토크값이고, F_s 는 마찰 토크가 안정되었을 때의 값이다. 그림과 같이 철강재 태핏심은 운전 후 마찰 토크가 안정되기까지 10시간 정도 소요 되었지만, 세라믹 태핏심은 표면 거칠기에 상관없이 운전 직후 곧 마찰 토크가 안정되었다. 이는 Table 3의 시험 전·후 측정한 캠과 태핏심 표면 거칠기 차이에서도 확인 되듯이 철강재 태핏심은 운전 시간에 따라 표면 거칠기가 변하게 되어 마찰 수준이 달라지고 상당 시간의 길들이기가 진행되지만, 세라믹 태핏심은 운전 후 곧 마찰 수준이 안정화되며 초기 상태의 거칠기가 유지됨으로써 길들이기 시간이 현저히 저감됨을 의미한다. 따라서 세라믹 태핏심이 실엔진에 채용될 경우에 기존의 철강재 태핏심 엔진에 비해 초기 길들이기 특성 뿐만 아니라 내마모성에서도 상당히 뛰어날 것임을 보여주었다.

4. 결론

직동식 밸브트레인계에서 세라믹 태핏심 표면 거칠기 차이에 따른 마찰 특성을 파악하고자, 여러 거칠기의 심을 제작한 후, 엔진 및 밸브계의 마찰 토크를 측정하고 유막 파라미터 및 표면 가공비와의 관계를 고찰함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 직동식 밸브트레인계에서 Ra 0.03 세라믹 태핏심은, Ra 0.2 태핏심에 비해 마찰 토크가 전속도 구간에서 절반 수준까지 감소되며, 엔진 전체로는 2500 RPM 에서 5% 정도 저감된다.
- (2) 태핏심의 표면거칠기 향상에 의한 마찰 저감 이유는 유막 파라미터 값이

지수함수적으로 증가하는 점으로 보아, 캠과 태핏심 접촉부에서 표면 돌기보다 유막이 상대적으로 커지게 되기 때문으로 판단되었다.

- (3) 표면거칠기가 Ra 0.03 이상이 되면 유막 파라미터 값이 대부분의 속도 구간에서 3 이상이 되고 마찰수준도 안정된다.
- (4) 세라믹 태핏심의 표면 가공비가 거칠기에 따라 지수함수적으로 상승하지만, Ra 0.03 ~ 0.05 세라믹 태핏심은 엔진 마찰과 가공비 측면에서 가장 상품성이 있는 것으로 밝혀졌다.
- (5) 세라믹 태핏심은 초기 표면 상태에 관계없이 운전 후에도 본래의 표면거칠기를 유지함으로써, 초기 길들이기 특성과 내마모성에서도 상당히 뛰어남을 보여주었다.

기호 설명

- H_{cf} : 접촉부에서의 중심 유막두께
 σ_1, σ_2 : 접촉부의 표면 거칠기
 η_o : 대기압에서의 윤활유 점성계수
 u_1, u_2 : 접촉점에서의 상대속도
 ν_1, ν_2 : 프와송비
 E_1, E_2 : 탄성계수
 r_1, r_2 : 표면 곡률반경
 a : 압력 점성 계수
 w/l : 단위 축방향 길이당의 하중

참고 문헌

1. O. Pinkus and D. F. Wilcock, "Reduction of Tribological Energy Losses in Automotive Vehicles",

Proceedings of the JSLE International Tribology Conference July 8-10, 1985 Tokyo, Japan 289-294.

2. M. Masuda, M. Ujino, K. Shimoda, K. Nishida, I. Marumoto, and Y. Moriyama, "Development of Titanium Nitride Coated Shim for a Direct Action OHC Engine", SAE Paper No. 970002.
3. W. B. Armstrong and B. A. Buuck "Valve Gear Energy Consumption : Effect of Design and Operation Parameters", SAE Paper No. 810787.
4. H. Izumida, T. Nishiyoka, and M. Yamagiwa, "A Study of the Effects of Ceramic Valve Train Parts on Reduction of Engine Friction", SAE Paper No. 970003.
5. J. T. Staron, P. A. Willermet, "An Analysis of Valve Train Friction in Terms of Lubrication Principles", SAE Paper No. 830165.