< 기술 논문 >

엔진내구시험을 통한 Valve Train 수명예측에 관한 연구 (2)

김 재 진* · 이 환 회 · 명 광 회 · 민 병 두

쌍용자동차 엔진구동시험개발팀

A Study of Valve-train Life Time Estimate in Engine Durability Test (2)

Jaejin Kim* · Hwanhui Lee · Kwanghee Myung · Byengdu Min

Powertrain Test Development Team, Ssangyong Motor Co., 455-12 Dongsak-ro, Pyeongtaek-si,
Gyeonggi 459-711, Korea

(Received 31 October 2013 / Revised 4 March 2014 / Accepted 7 March 2014)

Abstract : In previous study, make an attempt to estimate exhaust valve seat and seat-ring wear acceleration factor for engine durability test with measuring and consideration of wear mechanism. But found abnormal initial wear rate in exhaust valve seat-ring. And have to improve exhaust valve seat-ring wear rate for reliability reason, because next GDI /Turbo engine is based on this engine and GDI /Turbo engine have higher combustion pressure and higher thermal load. In this study, Trying to find the cause of abnormal wear factor, improve valve-train durability by change specification & design of parts and verify variant parts for improving durability of valve-train. And then I would like to propose a design guide line of valve-train system in a reliability point of view, besides make a complement of previous study.

Key words : Exhaust valve(배기밸브), Seat-ring(시트링), Durability test(내구시험), Wear(마모), Reliability(신뢰성)

1. 서 론

엔진의 경우 시장의 요구조건에 따라서 보증기간이 점차 길어짐에 따라 더욱 높은 신뢰성이 요구된다. 그러나 신엔진 내구성 개발의 입장에서는 동일 배기량 기준으로 더욱 높은 출력과 가격경쟁력을 고려해야 하는 실정이라서 신뢰성 측면에서는 이전 프로젝트보다 불리한 조건에서 더 좋은 성과를 달성해야 하는 어려움에 직면하게 된다.

또한, 엔진의 운행조건이 사용자와 지역에 따라서 다르며, 엔진을 구성하는 system의 열화 메커니즘도 system 별로 다르고, 그 메커니즘 자체도 열, 열 충격, 힘, 진동, 공차, 품질 등의 복합적인 요소의 영향인 이유로 내구성 개발은 어려운 영역이며, 내구성 평가시험 모드의 지속적인 개발 및 개정이 필요하다.

지난 연구에서 valve-train system의 배기밸브 seat-ring의 마모 특성에 관한 엔진내구시험 결과와 열화 메커니즘의 고찰을 통한 가속/가혹계수 모델을 제시했었다.¹⁾ 그러나 주행거리/시간 별 배기밸브의 seat-ring 마모량 관측결과 분석 시 초기 마모경향이 뚜렷하게 나타났으며, 마모 메커니즘 측면에서는 논리적이지 못하므로 가공/조립측면의 누적공차에 의한 현상이거나 valve의 동 특성에 weak point를 가지고 있는 것으로 판단했었다.

따라서 배기밸브 seat-ring의 마모 개선을 위한 후속 연구로 ① weak point 발굴 및 개선점 파악, ② 개선품 투입 내구시험 진행, ③ seat-ring 마모량 분석 및 비교를 통한 개선품 검증의 순서로 추가 연구를 진행하였다.

2. Valve-train System Weak Point 발굴 및 개선사항 도출

Table 1의 엔진을 대상으로 엔진동력계 조건에서

*A part of this paper was presented at the KSAE 2013 Annual Conference and Exhibition

*Corresponding author, E-mail: jaejin.kim@smotor.com

Table 1 Test engine specification

Item	Specification
Bore (mm)	86
Stroke (mm)	86
Swept volume (cc)	1998
Timing system	Intake-cvvt
Timing drive	Silent chain
Valve type	DOHC, 16valve
Valve Actuation	RFF with HLA
Vis	Yes
Catalyst	CCC + UCC

Table 2 High speed camera specification

Item	Specification
Camera	Photron SA3 (Max 2,000 fps @ 1024*1024)
Lens	25-70mm / F2.8
S/W	FAST CAM Viewer, FAST CAM Analyser

Table 3 Video microscope specification

Item	Specification
Microscope	FOCUS ON FO-H10
Lens	150 ×
Measuring S/W	SCOPE EYE - VM

의 내구시험을 수행 하였으며, valve-train의 동특성을 평가하기 위하여 Table 2의 고속카메라 system을 seat-ring의 마모를 판단하기 위하여 Table 3의 비접촉 현미경을 사용하였다.

2.1 Valve-train System

Fig. 1은 본 연구의 valve-train system의 layout으로 DOHC 방식의 RFF (Roller Finger Follower)와 HLA (Hydraulic Lash Adjuster)를 통한 valve 구동 방식을 사용한다. valve-train은 작동 메커니즘 상 valve 작동 방향으로 valve seat부와 cyl. head seat-ring 부에 작동 force가 작용하고, 작동방향의 직각방향으로는 lateral force가 작용하며, 이러한 force는 exhaust valve system의 높은 온도조건에서 재질의 강성저하 발생이 고려되어야 한다. 특히 friction 저감을 위하여 RFF를 적용하는 경우 valve 작동방향과 수직의 force가 존재하게 되어, Uwe Toden, Oliver Herbst등에 의해서 100(N) 이상의 lateral force도 작용할 수 있음이 보고된 바 있다.²⁾

Fig. 1 Valve-train system layout

Valve-train 자체의 운동 메커니즘 외에도 cyl. head는 engine 조립 시 발생하는 변형을 지탱할 수 있는 강성을 지니고 있어야 하며, valve 재질에 합당하면서 균일한 열전달 계수, 적절한 valve의 회전을 통한 valve head부의 균일한 온도 및 exhaust port 형상, 적절한 연소 matching을 통한 배기온도, valve stem과 guide의 적절한 공차, stem-seal의 적절한 oil leakage rate 등이 확보되어야 비로소 엔진에서 요구되는 내구/신뢰성을 확보할 수 있다.³⁻⁶⁾

상기의 언급한 조건이 갖추어진 조건에서도 배기 valve는 연소가스의 출구라는 특성상 고온 조건에 노출되어 있으므로 마모 측면에서 불리한 조건이며, valve의 주기능인 sealing을 담당하는 seat부는 연소기간 동안 combustion pressure에 의한 force, valve closing 순간의 impact force, valve closing 기간 동안의 spring의 pre-load의 3가지 force에 의하여 국부적 micro-welding에 의한 adhesion wear, 접촉 시 grinding에 의한 abrasion wear, oxidation wear, corrosion wear의 메커니즘에 의하여 마모가 발생 한다.⁷⁾ 또한 이러한 마모에 가장 큰 영향을 주는 force는 combustion force로 Fig. 2와 같이 앞선 연구에서 제시한 바 있다.¹⁾

Fig. 2 Seat-ring stress force

2.2 Valve-train 동특성 Test

기 수행하였던 valve 동특성 해석 및 rig test 결과에서 특이점을 찾을 수 없었으나, 고속카메라를 이용하여 valve-train rig test 장치에서 2,000 (fps) 속도로 valve motion을 촬영 하여 valve 동특성을 재 평가한 결과 Photo. 1 및 Photo. 2의 valve 상/하부의 motion에서 lateral force에 의한 영향으로 판단되는 미세변위를 확인하였다.

또한, Photo. 2의 lower view의 motion 촬영영상을 대상으로 valve head face 중심부 점A를 tracking하여 변위 signal을 추출한 결과를 Fig. 3과 같이 X축 motion을 Point A(X), Y축 motion을 Point A(Y)로 하

Photo. 1 Upper view of valve-train @ 6000rpm

Photo. 2 Lower view of valve-train @ 6000rpm

Fig. 3 Valve head 'Point A' displacement

여 나타내었다.

Fig. 3은 40(ms) 동안의 변위 측정 data로 valve 2회 작동조건을 나타내고 있으며, cam profile을 고려하면 20(ms)당 open/closing이 약 7(ms) 동안 발생한다. 따라서 Point A(X)는 13~19(ms) 시점의 변위는 카메라와 valve head를 정확히 직각으로 setting하지 못한 데서 기인하는 변위로 valve 작동 시에 발생하는 lateral force의 영향성을 정량적으로 판단하기에는 부적절하다.

그러나 valve open/closing 시간영역에서 2번의 Peak를 가지는 Point A(Y)의 변위를 통하여 정성적

Table 4 Variant sample for rig test

Sample	Improving point	Design change
B	Valve fitting	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Contact profile of cotter & valve ▶ Dia increasing of lower retainer spring contact point
C	Restrain valve	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Dia increasing of valve stem

으로 비정상적인 valve 거동을 감지할 수 있으며, valve close 시점의 0~13(ms) 시점에 발생하는 PointA(X), PointA(Y)의 미세 변위는 설계상 valve의 작동 변위가 zero 이므로 고속카메라의 setting 조건에 상관없이 lateral force에 의한 valve의 떨림으로 판단된다. 변위의 수준은 약 0.12(mm)이다.

따라서 lateral force에 의한 valve의 side motion을 개선하기 위한 접근으로 ① motion 자체를 개선하기 위해 valve-train system의 구성품인 valve, cotter, upper retainer, spring과 lower retainer의 fitting을 개선하는 방안과 ② motion 발생시 valve를 구속하여 motion을 억제하기 위해 valve stem과 valve guide clearance를 축소하는 방안의 두 가지 측면에서 개선을 시도하였으며, 각 구성품의 측정 및 설계검토를 통하여 하기의 강건설계 인자를 발굴한 후, 발굴된 개선 인자를 바탕으로 Table 4와 같이 variant sample을 제작하여 rig test를 재 수행하였다.

2.3 Valve-train 개선사항 Rig Test

Fig. 4는 valve motion 자체를 개선하기 위한 sample B 투입 system의 변위특성 결과로 Photo. 2의 Point A와 동일지점을 Point B로 하여 X/Y축의 변위를 나타내며, Fig. 5는 valve의 구속을 통한 valve motion 개선을 위한 Sample C 투입 system의 동일 지점 변위 특성결과를 Point C(X), Point C(Y)로 나타내었다.

카메라의 valve head 촬영 각도의 setting에 따라서 valve opening/closing시 발생하는 변위의 횟수를 확인 하였으며, valve close 조건에서 변위량을 분석하여 lateral force에 의한 motion을 판정하였다.

Point B의 경우 valve open/closing 시간영역에서 1회의 peak를 가지며 valve close 상태에서 0.06(mm) 수준의 변위를 가지고 있는 바, Base 0.12(mm) 변위 대비 lateral force에 의한 변위량은 50(%) 수준으로 판단된다.

Fig. 4 Valve head 'Point B' displacement

Fig. 5 Valve head 'Point C' displacement

Point C의 경우 valve open/closing 시간영역에서 1회의 peak를 가지며, valve close 상태에서 0.04(mm) 수준의 변위를 가지고 있는 바, Base 대비 lateral force에 의한 변위량은 33(%) 수준으로 판단된다.

따라서 rig test 결과로는 valve의 stem clearance를 축소하여 valve를 구속하는 방법이 더욱 효과적인 방법으로 판단할 수 있으나, 내구성 측면에서 valve-train system 작동 메커니즘을 고려한다면, 지속적인 lateral motion의 영향 하에서는 valve stem부와 stem guide부의 마모발생에 의하여 clearance가 증대 될

것으로 판단된다. 따라서 강건설계를 위하여 최종 개선 사양으로는 Sample B와 C를 동시 적용해야 할 것으로 판단하였다.

3. 엔진 내구시험 결과

3.1 Engine 내구시험 결과

2절에서 결정한 강건설계 사양을 투입하여 엔진의 내구성 평가를 위하여 동일 lot의 cyl. head 및 동일 EMS S/W 조건에서 Base 조건의 valve-train과 개선 Sample B+C 조건의 valve-train 사양에 대한 엔진 내구 시험 500(hr)을 수행하였으며, 완료 후 엔진의 분해검사를 수행하였다. Cyl. head 배기밸브 seat-

Photo. 3 Seat-ring width measuring

Fig. 6 Ex seat-ring wear depth

Fig. 7 Ex seat-ring wear depth average

Fig. 8 Ex seat-ring wear depth standard deviation

ring width를 Photo. 3과 같이 비접촉 현미경을 이용하여 측정하여 seat-ring wear depth를 상호 비교하였다.

Base 조건과 5회의 개선사양 조건의 500hr 엔진 내구 시험 종료 후 seat-ring wear depth 결과는 Fig. 6과 같으며, 개선품 투입결과는 Base valve-train 사양 대비 wear depth는 Fig. 7과 같이 평균은 30% 수준의 결과를 보이며, Fig. 8과 같이 표준편차는 90% 수준의 결과를 보였다.

따라서 30% 수준의 평균 wear depth 결과는 seat-ring 마모발생 인자 중 valve의 lateral moving의 기여도가 높음을 알 수 있으며, wear depth 편차의 저감은 낮은 것으로 보아 lateral force의 저감이 기통 간(valve 간) wear depth의 편차에는 둔감한 영향을 주는 것으로 판단할 수 있다.

3.2 Exhaust Seat-ring 내구/신뢰성

3.1절의 결과를 Table 5의 기 진행하였던 valve-train 가속/가속계수 factor1)에 적용하여 개선사양의 valve-train system의 “C” 엔진내구 500(hr) 결과로부터 일반 field 주행조건 30만 km 주행 시의 seat-ring wear depth 결과를 예측하면 394(μm)수준이 되며, 내구/신뢰성 측면에서 매우 우수한 결과를 보이고 있다.

Table 5 Summary of acceleration factor

Test Mode		A	B	C	D
Item					
Total acceleration factor by calculation		1.0	2.6	3.7	7.0
	Fatigue factor	1.0	1.7	2.29	3.16
	PFP factor	1.0	1.6	1.1	1.5
	Coolant T factor	1.0	1.0	1.48	1.48
Acceleration factor by seat-ring measuring		1.0	1.9	3.0	6.5

4. 결 론

- 1) Valve-train의 exhaust valve seat-ring 마모 개선을 위하여, 고속카메라 system을 이용한 valve 동 특성 관찰을 통해 weak point를 발굴하고, 개선 방향을 제시/유효성을 확인하였다.
- 2) 그 결과 lateral forced 대한 system 강건 설계인자를 ① valve stem과 valve guide의 clearance의 축소와 ②valve와 cotter / cotter와 upper retainer / upper retainer와 spring / valve spring과 lower retainer의 Fitting 강화로 발굴하였으며, Rig Test 조건에서 valve stem과 valve guide의 clearance 축소 항목의 기여도가 높음을 확인 하였다.
- 3) Rig Test 결과를 바탕으로 강건 설계사양을 투입한 엔진 내구시험 500(hr) 수행을 통하여 Base 사양 대비 lateral force 개선 사양의 seat-ring wear depth를 비접촉 현미경 관찰을 통하여 비교하고 Base 사양 대비 약 70% 개선을 확인하였다.
- 4) 개선 결과는 Base 사양대비 내구성 측면에서 약 3배의 개선효과를 가질 것으로 판단되며, 가속, 가속 factor를 적용하여 일반 field 주행 패턴으로 30만(km) 주행 시 exhaust valve seat-ring wear depth

로 환산 시 약 0.4(mm) 수준으로 높은 내구/신뢰성을 가질 것으로 판단하였다.

- 5) 본 engine을 base로 GDI/Turbo Engine 개발 시, seat-ring wear 관점에서 우수한 내구/신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
- 6) 본 연구를 통하여 seat-ring 마모 관점에서 강건설계 인자를 발굴/검증하고, 가속계수를 적용하여 내구시험 종료시점의 field 주행거리를 예측함으로써, 내구/신뢰성 목표 대비 내구성능의 판정을 통한 설계 최적화 판단을 위한 guide를 제시하고자 하였다.

후 기

본 연구의 내구시험은 「친환경 자동차 기술 개발 사업단」의 “초회박 과급 GDI 엔진 CO₂저감 기술 개발” 국책과제의 지원 하에 GDI Base Engine 내구개발의 일환으로 수행 되었습니다.

References

- 1) J. Kim and M. Um, “A Study of Valve Train Life Time Estimate in Engine Durability Test,” KSAE Annual Conference Proceedings, KSAE12-A0034, 2012.
- 2) U. Todsén, O. Herbst, G. Krüger and E. Biallas, “Optical Ways to Improve the Tribology of Valve Guide,” SAE 2005-01-0586, 2005.
- 3) H. Oketani, “Trends in Engine Valve Development for Automobiles and Motor-cycles,” SAE 2000-01-0907, 2000.
- 4) W. S. Giles, “Fundamental of Valve Design and Material Selection,” SAE 660471, 1966.
- 5) D. Kim, J. Youn, J. Kim and J. Song, “An Analytic Study on the Valve Rotation Behavior of an Internal Combustion Engine,” Transactions of KSAE, Vol.14, No.2, pp.184-193, 2006.
- 6) N. Nishimura, K. Takeno and I. Yamane, “Functional Improvement on Valve Stem Seal,” SAE 2002-01-0660, 2002.
- 7) G. Krüger, Valve Seat Inserts State of the Art End of 2001, Bleistahl Prod. GmbH & Co. KG, 2002.