

해설논문

(Special issue)

엔진 성능 향상을 위한 가변밸브 기구 전략 VVT(Variable Valve Timing) Control Technology in Internal Combustion Engine Area



윤 소 남
 So-Nam Yun
 · 한국기계연구원, 연구원
 · ysn688@kimm.re.kr

1. 서 론

지구의 환경변화로 인하여, 폭설과 한파가 집중되는 곳이 있는가 하면, 다른 지역에서는 폭염으로 인하여 정상적인 활동을 할 수 없으며, 또한 폭풍 및 폭우로 인한 피해 또한 상상을 초월할 정도로 우리 주위에서 발생하고 있다. 이 원인을 과학자들의 연구 결과를 인용하여 서술하면, 대기중의 오염으로 인하여 상층권의 오존층이 파괴되고, 이로 인하여 북극의 얼음이 녹게 되고, 결국에는 지구 전체의 환경을 변화시키는 원인이 되고 있다고 한다. 때문에 대기 오염을 발생시킬 수 있는 아주 기본적인 대책에서부터, 현재 인간이 사용하는 모든 기계에 대해서 적은 사용 및 친환경적인 사용을 강조하고 있다. 아마도 인간이 사용하고 있는 연료중에서 석탄 및 석유계는 대기를 오염시키는 주범중의 손꼽힐 정도이지 않을까 싶다. 이런 연유로 인하여 전세계적으로 석유계 연료 사용에 대한 경각심을 일깨우는 보도가 많이 나오고 있으

며, 친환경적인 사용에 대한 연구들도 무수히 쏟아지고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 1은 엔진성능 향상의 필요성 및 이와 관련된 연구인자들은 무엇인지를 보여주는 개념도로서, 기본적으로 운전자의 승차감 향상, 에너지 절약과 친환경 지향 운전은 지구환경보호 차원에서 매우 필요한 인자라 할 수 있다.¹⁻⁶⁾

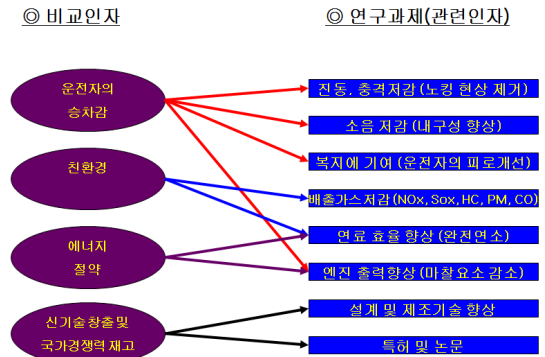


Fig. 1 엔진 성능 향상의 필요성

친환경 관련 규제의 일례로 Fig. 2에 보이는 바와 같이 친환경관련 규제 “USA 2010”에 의하면 $NO_x=0.25(g/kW-hr)$, $PM=0.01(g/kW-hr)$ 의 제로에 미션 차량을 요구하고 있으며, 제시하는 요구사항을 만족하기 위해서는 새로운 연료의 개발, Multiple Injection, Dual Turbocharger 개발 및 VVT 장착이 필수적이라고 예견하고 있다. 또한, 이들을 위해서는 차량가격이 상승할 수밖에 없다는 의견까지 내놓고 있다. 연료개발, Multiple Injection 및 Dual Turbocharger 개발 외에도 내연기관 성능향상관련 인자로서 연구의 대상이 되고 있는 것들을 흡·배기관 길이, 엔진회전속도, 흡·배기 밸브 타이밍, 밸브 오버랩 기간, 흡·배기 시스템 형상, 밸브기구면적, 파동이다.⁷⁻¹²⁾

본 해설에서는 흡·배기밸브 타이밍 및 밸브 오버랩 기간을 제어하여 엔진성능을 향상시키는 기술인 VVT(Variable Valve Timing)기술에 한정하여 서술하기로 한다.

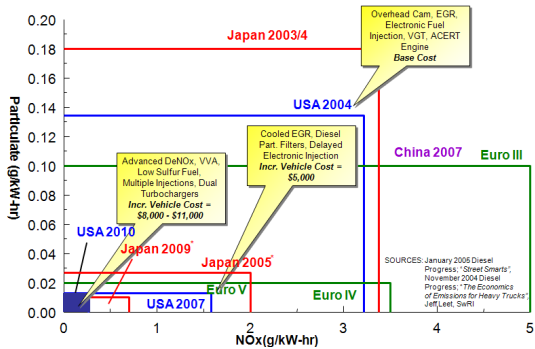


Fig. 2 차량 환경 규제 변천

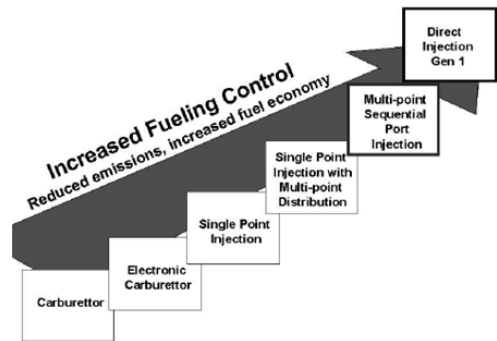
2. 가변밸브 기구 동향

VVT는 엔진 내부의 연소상황을 직접제어 할 수 있기 때문에 엔진 회전수 변동, 운전환경 변화에 매우 효과적으로 대응할 수 있는 기술로 평가되고 있으며, VVT라는 용어 외에 VCM(Variable Cam Timing), VVA(Variable Valve Actuation), CVVL(Continuous Variable Valve Lift), AVT(Active Valve Train), FVVT(Fully Variable Valve Train)와 같이 기업 혹은 연구자의 명명에 의하여 여러 가

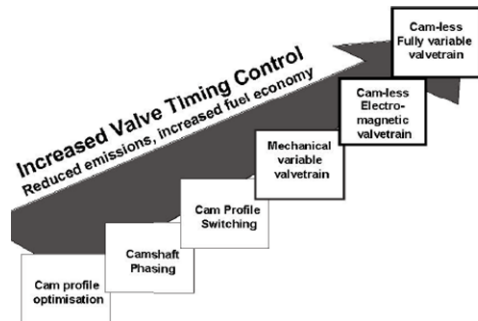
지로 사용되고 있다.

Fig. 3과 4는 VVT의 변천사를 요약한 것으로, VVT가 적용되지 않는 캠 방식에서부터 캠이 없는 전자기 방식, 캠이 없는 순유압 방식이 연구개발되었으며, 차세대 소자로 알려져 있는 압전액추에이터 방식까지 현재 연구되고 있는 것으로 보고되고 있다.¹³⁻¹⁵⁾ 이 결과는 궁극적으로 대기 오염을 줄이는 방식으로 순유압방식이 반드시 필요하다는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 5는 캠 방식 기계식 VVT의 구조를 보이는 것으로, VVT 유닛에 장착된 순수기계식 캠 구동장치 혹은 유압식 비례제어밸브방식에 의하여 흡·배기밸브의 개폐시기를 조절하는 방식이다. Fig. 6은 캠 방식 유압식 VVT의 구조를 보이는 것으로 캠에 의하여 작동되는 Master piston의 체적변화를 이용하여 흡·배기밸브를 구동하는 방식으로 흡·배기밸브의 제어는 고속 솔레노이드 밸브에 의해서 이루어진다.



a) Injection 방식의 변화



b) Cam profile 변화

Fig. 3 VVT 변화 예측도

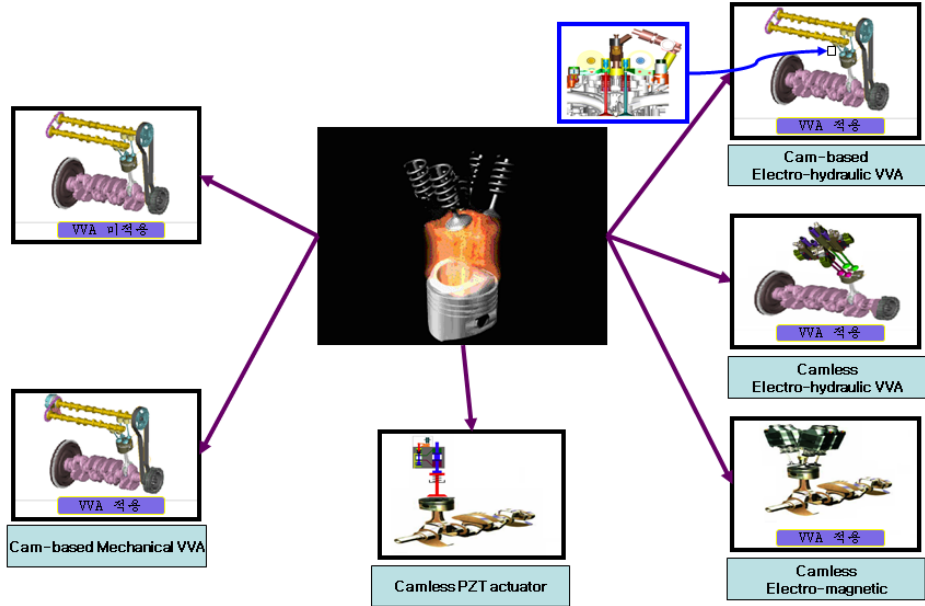


Fig. 4 VVT 변천 요약

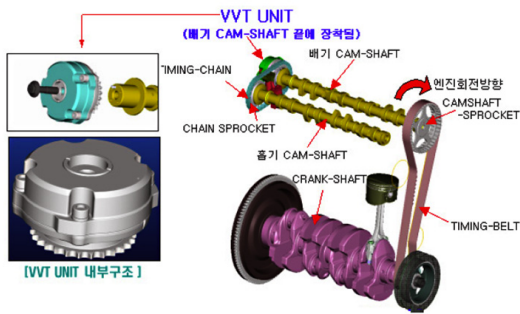


Fig. 5 캠 방식 기계식 VVT 구조

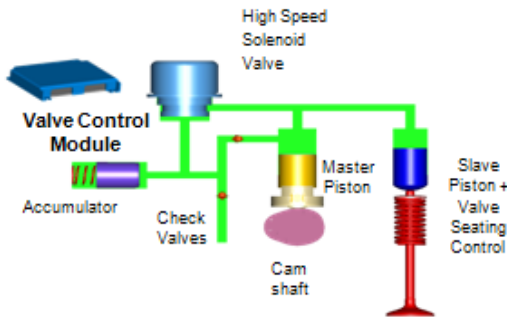


Fig. 6 캠 방식 유압식 VVT 구조

Fig. 7은 흡·배기밸브를 가동자 형식으로 구성된 전자기 방식 VVT를 보이는 것으로 상·하부에 설치되어 있는 코일에 교번으로 여자시켜 흡·배기밸브를 구동하는 방식이다. Fig. 8은 순유압식 VVT의 구조를 보이는 것으로, 고속서보밸브와 흡·배기밸브 후단에 설치되어있는 변위센서의 조합에 의하여, 밸브의 개폐시간과 개폐범위를 제어하는 매우 고속이면서 고가의 VVT 시스템이다.

Fig. 9는 가장 최근의 기술로서 차세대 액추에이터로 흥미가 있는 압전액추에이터를 이용한 고속 흡·배기밸브 개폐시스템을 보이는 것으로, 미국의 대학 및 유럽의 연구소에서 현재 연구가 이루어지고 있는 구조로서, 최적 변위 및 고속 동작을 위하여 적층형 압전액추에이터 및 변위확대 기구를 내장하고 있다.

일반적으로 알려진 압전소자는 압전효과와 역압전효과를 이용하는 재료로서, Fig. 9에서는 역압전효과를 이용하고 있다. Fig. 9와 같이 역압전효과를 이용할 경우, 액추에이터의 변위는 압전액추에이터의 전체 길이에 약 0.1% 정도이기 때문에 정상적인 밸브의 역할을 하기 위해서는 변위 확대 기구가 필요하게 된다.¹³⁻¹⁶⁾

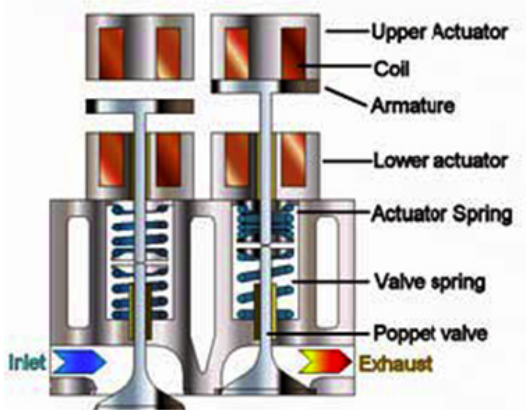


Fig. 7 캠리스 방식 전자기식 VVT 구조

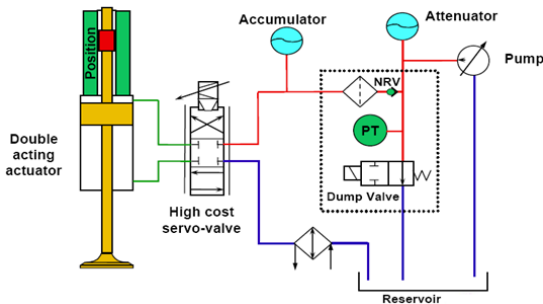


Fig. 8 캠리스 방식 순유압식 VVT 구조

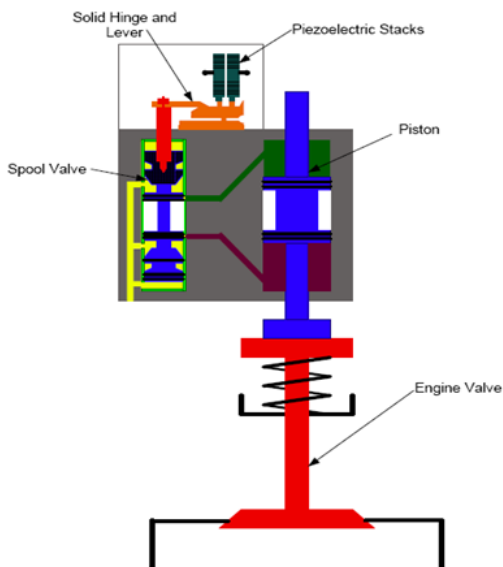


Fig. 9 압전액추에이터 방식 VVT 구조

2.1 국내의 연구동향

국내에서는 G7 차세대 자동차 기술과제로 EMV(Electro-Mechanical Valve)를 VVT에 장착하는 연구와 제어기술에 관한 연구가 현대자동차를 중심으로 2000년대 초기에 시작되었다. 현재까지 캠리스 방식 유압식 VVT 관련 연구실적은 없으나, 캠-기계식을 이용하여 엔진성능이 향상된 차량을 출시하고 있으며 최근에는 흡·배기밸브의 변위를 가변하는 기술을 상용화하는 연구가 한창인 것으로 보고되고 있다.¹⁷⁻¹⁹⁾

VVT와 관련하여 여러 기업과 연구소, 대학들 간에 연계 시스템을 구축하여 많은 연구가 진행되고 있으며, 현대자동차 및 기아자동차와 같은 대기업을 중심으로 개발되어 적용되고 있는 실정이다. 대학별로는 아주대학교, 연세대학교, 목포해양대학교, 한국과학기술원, 국민대학교, 울산대학, 충남대학교 등이 자동차 생산기업과 공동 혹은 위탁으로 연구가 수행되고 있는 실정이며, 한국기계연구원에서는 차세대 그린엔진 개발 프로그램의 하나로 순유압방식 VVT 연구 기획이 이루어지고 있다.

국내 연구동향을 살펴보면 Fig. 10에 보이는 바와 같이 현대자동차에서 개발된 연속가변밸브리프트로 불리는 CVVL이 대표적인 예인데, CVVL은 밸브 리프트의 높이와 타이밍의 연속 제어로 가솔린 엔진에 공급되는 흡입 공기량을 최적화시켜 엔진 성능을 극대화시키는 기술로 현대차의 독자적인 기술로 보고되고 있다. 2.0 리터급 엔진에 적용될 CVVL 독자기구는 밸브 트레인 시스템의 움직임을 최소화시켜 콤팩트하고 최적화된 디자인으로 개발되었으며, 흡기 밸브 리프트와 열림 구간의 연속적 제어가 가능하며, 주요 부품이 구름접촉 구조로 되어있어 기계 마찰을 최소화할 수 있는 장점이 있는 것으로 알려지고 있다.

전술한 바와 같이 엔진의 성능을 향상시키면서 오염도를 낮추는 방안으로, 많은 연구들이 이루어지고 있지만 엔진이 제작되고 난 후의 처리방안으로 쉽게 제어가 가능한 분야는 흡·배기 밸브 타이밍, 밸브 오버랩 기간으로 이 인자들은 외부적인 기구들을 이용하여 할 수 있기 때문에 최종적

으로 연구자들이 직접 조작할 수 있는 부분이기도 하며, 많은 연구 결과들이 보고되고 있다.



Fig. 10 현대자동차에서 개발된 CVVL

아주대학교에서는 전자석을 이용한 가변밸브 시스템인 EMV 시스템의 설계 및 동특성 해석을 수행한 후 실험을 통하여 해석결과의 타당성을 확인하는 연구와 EMV 시스템의 엔진 적용을 위하여 액추에이터 제어인자에 대한 연구를 동특성 모델을 이용하여 연구를 수행하였으며, 동특성 모델을 적용한 리그장치와 단기통 엔진을 이용하여 실험을 수행하여 모델의 타당성과 시스템의 신뢰성, 적용 가능성을 검증하는 연구를 수행하였다.

또한 울산대학교에서는 단기간, 저비용의 개발을 필요로 하는 현대 R&D에는 적합하지 않으므로 RICARDO사의 WAVE프로그램을 이용하여 기존 상용화 되어있는 2.0 DOHC SI 엔진에 VVT를 가상 적용하여 출력향상에 대한 효과를 확인하고 실제 개발에 활용 가능여부를 확인하는 연구를 수행하였다.

2.2 국외의 연구동향

국외에서는 지구 온난화에 대응하기 위한 기후 변화협약의 이행에 따라 예고되고 있는 이산화탄소 배출 가스 규제에 대응하기 위한 방법 중 자동차에서 배출되는 이산화탄소를 줄일 수 있는 VVT에 대한 연구가 기업, 연구소, 대학에서 이루어지

고 있으며, 특히 미국과 일본, 독일에서 많은 연구 성과 및 판매되고 있는 거의 모든 차종에 적용하고 있다.

VVT는 19세기부터 증기 기관에 사용되었던 기술이며, 1960년대 말에 Giovanni Torazza에 의해 발전이 되었으며, Fiat가 이 분야 첫 특허를 보유한 기록을 가지고 있다. 1975년도에 General Motors(GM)에서 VVL(vary valve lift)로 특허를 등록하였으며, Alfa Romeo사에서 VVT를 적용한 차가 1980년도에 출시된 이후로 지금까지 개발되어 적용되고 있다. 닛산은 1986년, 혼다는 1989년에 차량에 VVT 고유 모델을 장착한 실적을 가지고 있다. 기술별로 상세히 분석을 하면, FEV Motorentchnik GmbH사에서는 차량 운행에 낮은 연료 소비량과 저발산 전기기계 밸브구동장치에 관한 연구를 수행하였고, Purdue University에서는 하나의 연소 사이클에서 다음의 연소 사이클까지의 엔진 성능을 추적할 수 있는 최초의 전산 모델을 개발하는데 성공하였다. 또한, 도요타 자동차에서는 밸브매틱이라는 기구를 적용하여 유입하는 공기의 양을 스톱틀 밸브의 개폐량으로 바꾸어 흡기 밸브의 리프트량의 변화에 의해 공기량을 조정하는 방식을 제안하였으며, 흡기 밸브의 리프트량과 개폐시기를 무단계로 연속 제어하는 기구를 개발하였다.

또한, Jacobs, Sturman, Eaton/Lotus, AVL/Bosch, Mechandyne, BMW, Delphi, CAT, Hilite, INA등에서도 여러 가지의 액추에이터를 이용한 FVVT 적용연구 활발히 이루어지고 있는 상태이고, 이중에서도 Lotus & Eaton, Lotus & Renault는 기술 제휴를 통하여 2008년 이후부터 FVVT장착 차량 출시를 예정으로 연구가 수행되었으며, 2009년도에 일부 차량에 장착되고 있는 것으로 보고되는 사례가 있다. 특히, 여기에서 주목할 만한 사건은 Lotus는 VVT를 순유압방식으로 서보밸브를 사용하는 방법을 제안하고 있으며, 많은 연구 실적을 확보하고 있는 것으로 보고되고 있다.

일본에서는 요코하마대학에서 고속 PWM밸브를 FVVT용으로 사용하려는 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 최근에는 VVL 관련 연구도 이루어지

고 있는 것으로 보고되고 있다.

5. 결 론

서론에서도 언급했듯이, 환경규제 USA 2010에 대응하기 위해서는 새로운 연소전략, 가변밸브(밸브 속도 및 변위) 시스템 개발, 최적 캠 프로파일 설계가 매우 중요하다.

자동차는 FVVT를 실현함으로써 더욱 정교하고 고성능, 저연비, 저공해 차량의 개발이 가능할 것으로 생각된다. 선박용 대형 중속, 저속 엔진들은 자동차보다 비교적 낮은 회전수에서 운전되기 때문에 고속에서 운전되는 자동차보다 개발하기가 훨씬 유리하다. 특히 산업용 엔진 및 내륙 수운에 적합한 평저선에 탑재되는 중속 엔진들에 분사율 패턴을 비롯한 전자연료분사시스템 제어와 FVVT를 접목시킨 최적 연소시스템을 개발하여 적용하게 되면 엔진 성능 향상과 연료소비율 개선은 물론 배기가스에 관한 법적 규제로부터 훨씬 자유로워질 수 있게 될 것이다. 따라서 수운이 발달할 경우 물류 수송비용의 획기적 절감과 트럭에 의한 고속도로의 화물 집중 현상을 해소할 경우 이전보다 고속도로 소통이 훨씬 더 원활하게 될 것이 기대되며 결과적으로 총체적인 수송 시간과 비용 모두의 절감이 이루어지면서 국가 경쟁력이 훨씬 더 신장될 것으로 예상된다.

또한, 현재는 매우 고가의 시스템이기 때문에 대중화에 다소 문제점이 예상되기는 하나, 차후 가격이 낮은 고성능 서보밸브 개발 및 신뢰성이 향상된 압전액추에이터의 개발이 이루어지게 되면, 국내에서도 순유압방식 FVVT에 대한 연구가 더욱 활성화 될 것이라 기대한다.

References

1. S. H. Park, 2001, "The Analysis and Experiments for the Design of Electro-mechanical Variable Valve Train System", Transaction of KSAE, Vol. 9, No. 3, pp. 60-67.
2. Jeonggil Nam, 2003, "A Study on the Residual Gas Fraction in Cylinder by the Adjustment of Variable Valve Timing with Volumetric Efficiency", Transaction of KSAE, Vol. 9, No. 5, pp. 82-88.
3. Seunghyun Park, 2002, "The Analysis and Experimental Research on Dynamic Characteristics of EMV System", Transaction of KSAE, Vol. 10, No. 3, pp. 85-92.
4. M. Pischinger, 2000, "Low Fuel Consumption and Low Emissions Electromechanical Valve Train in Vehicle Operation", International Journal of Automotive Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 17-25.
5. PAFFRATH Holger, ALEX Matthias and HUMMEL Karl-Ernst, 1999, "Technology for Future Air Intake System", Society of Automotive Engineers, Vol. 108(1), No. 6, pp. 579-587.
6. Liguang Li and Jianwu Tao, 2001, "Effect of Intake Valve Closing Timing on Gasoline Engine Performance and Emissions", SAE International Fall Fuel and Lubricants Meeting and Exposition, 2001-01-3564
7. J. Allen and D. Law, 2002, "Production electro-hydraulic Variable Valve-Train for a New Generation of I.C. Engines", SAE 2002 World Congress, 2002-01-1109.
8. G. B. Partvate-Patil, H. Hong and B. Gordon, 2003, "An Assesment of Intake and Exhaust Philophies for Variable Valve Timing", 2003 SAE/ISAE Small Engine Technology Conference & Exhibition, SAE paper No. 2003-32-00784.
9. N. Milovanovic and R. Chen, 2004, "Influence of the Variable Valve Timing Strategy on the Control of a Homogeneous Charge Compression(HCCI) Engine", SAE paper No. 2004-01-1899.
10. J. W. G. Turner et al, 2004, "New Operating Strategies Afforded by Fully Variable Valve Trains", 2004 SAE World Congress, SAE paper No. 2004-01-1386.
11. J. R. Liu et al, 2009, "Rearch on the electro-hydraulic variable valve actuation system based on a three-way proportional reducing valve",

International Journal of Automotive Technology,
Vol. 10, No. 1, pp. 27-36.

12. R. Wislati and H. Haase, 2008, "Design and Simulation of an Electromagnetic Valve Actuator Using COMSOL Multiphysics", Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2008 Hannover.
13. P. K. Wong, L. M. Tam and K. Li, 2008, "Modeling and simulation of a dual-mode electrohydraulic fully variable valve train for four-stroke engines", International Journal of Automotive Technology, Vol. 9, No. 5, pp. 509-521.
14. C. L. Genzale, S. C. Kong and R. D. Reitz, 2008, "Modeling the Effects of Variable Intake Valve Timing on Diesel HCCI Combustion at Varying Load, Speed and Boost Pressures", ASME J. Engng Gas Turbines Power Vol. 130, No. 5, pp. 052806-1-8.
15. J. Turner, S. Kenchington and D. Stretch, 2004, "Production AVT development: Lotus and Eaton's electrohydraulic closed-loop fully variable valve train system", In Proceedings of the 25th Vienna Motor Symposium, Vienna Austria, pp. 333-346.
16. B. Walter, P. Pacaud and B. Gatellier, 2008, "Variable Valve Actuation Systems for Homogeneous Diesel Combustion: How Interesting are They?", Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 63, No. 4, pp. 517-534
17. G. Fontana and E. Galloni, 2009, "Variable valve timing for fuel economy improvement in a small spark-ignition engine", Applied Energy, Vol. 86, Issue 1, pp. 96-105.
18. http://viswiki.com/en/Variable_valve_timing
19. http://www.autotropolis.com/wiki/index.php?title=Variable_valve_timing