

가변 밸브개폐시기 기구 운전의 엔진 성능에의 영향

Effects of Variable Valve Timing Operation Modes on Engine Performance

구준모*, 배충식*
Junemo Koo, Choongsik Bae

ABSTRACT

Adaptive valve timing control is one of the promising techniques to accomplish the optimized mixture formation and combustion depending on the load and speed, which is needed to meet the future challenges in reducing fuel consumption and exhaust emissions. The behavior and the effect of adaptive valve timing control system has been investigated by computer simulation, which simulates the gas dynamics in engines.

Improved fuel economy can be achieved by reduction of pumping loss under low and mid load conditions. EIVC(Early Intake Valve Closing) strategy turns out to be superior to LIVC(Late Intake Valve Closing) strategy in reducing fuel consumption.

Deterioration of combustion quality can be overcome by introducing LIVO(Late Intake Valve Opening) strategy, which increases turbulent intensity in cylinders. Furthermore, LIVO can reduce HC emission by decreasing the required amount of fuel to be injected during cold start.

주요기술용어 : Pumping loss(펌핑 손실), VVT(가변밸브기구), PMEP(평균유효압력), EIVC(흡기밸브 조기폐쇄), LIVC(흡기밸브 늦은 폐쇄), Cold start(냉간 시동)

Nomenclature

IVO : intake valve opening crank angle
IVC : intake valve closing crank angle
EVO : exhaust valve opening crank angle
EVC : exhaust valve closing crank angle
EIVC : early intake valve closing
LIVC : late intake valve closing
LIVO : late intake valve opening
CA : crank angle
TC : top dead center
BC : bottom dead center
FCT : flux corrected transport

MOC : method of characteristics
 ρ : density
u : velocity
p : pressure
F : area of pipe
D : diameter of pipe
k : specific heat ratio
q : heat transfer
f : friction coefficient

1. 서론

미국의 도시 모드(urban mode)와 같이, 대부분의 운전 테스트 모드는 많은 시간을 펌핑손실이

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

크고 연료 경제성이 좋지 않은 부분부하에서 보인다. 이에 따라, 기존의 스파크 점화기관의 부분부하 효율을 개선하려는 여러 가지 노력이 강구되어왔다. 그 노력들 중 대부분이 엔진의 고정되어 있는 배기체적 혹은 피스톤의 스트로크를 변화시켜 엔진 부하를 조절하는 방법에 집중되었다.^{1,2)} 그 예로, 다기통 엔진의 주어진 엔진 부하를 내기 위해 운전을 필요로 하지 않는 실린더로의 혼합기 공급을 막는 방법과 피스톤의 스트로크를 조절하는 방법 등이 연구되어 왔다. 가변 밸브 기구 기술도 엔진 부하를 스로틀 밸브에서의 스로틀 손실 없이 가능하게 하고자 하는 방법의 하나로 대두되어 현재 활발한 연구가 진행중이다.³⁻⁵⁾

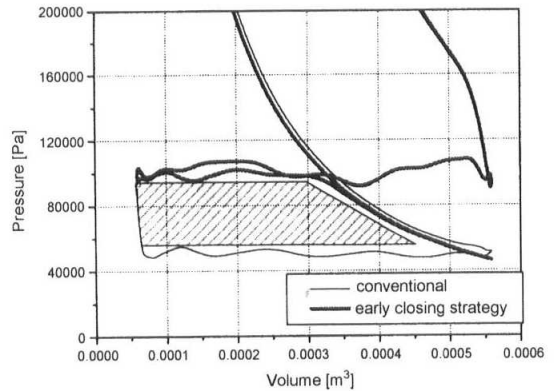
기존의 스파크 점화 엔진은 흡기계에 부착되어 있는 스로틀 밸브의 개도를 조절함으로써 엔진의 부하를 조절한다. 엔진의 흡기 행정 중 피스톤의 하강에 따라 실린더 내에 부압이 발생하여 흡기 선단으로부터 외기가 흡입되는 원동력이 되는데, 이 부압의 크기는 스로틀 밸브의 개도 및 엔진 회전 속도와 밀접한 관계를 갖는다. 이렇게 생긴 흡기 행정중의 부압은 배기 행정중의 배압과의 차이에 의해 엔진 출력상의 음의 일인 펌핑손실을 발생시키게 된다.⁶⁻⁹⁾

최근 개발 중인 직접 분사방식 가솔린 엔진은 앞서 설명한 펌핑손실을 제거하고 운전할 수 있는 스파크 점화기관의 하나로, 이론적으로 스로틀 밸브 없이 운전하도록 고안되었으나, 현재의 성층화 연소기술로는 아직 완전한 기술 구현이 어려워 스로틀 밸브를 이용하여 운전되고 있다. 또한, 린번 운전 및 EGR 기술 등을 이용하여 상당량의 펌핑손실 저감효과를 얻을 수 있으나, 이 역시 펌핑손실의 획기적인 저감을 이루지는 못하고 있는 실정이다.

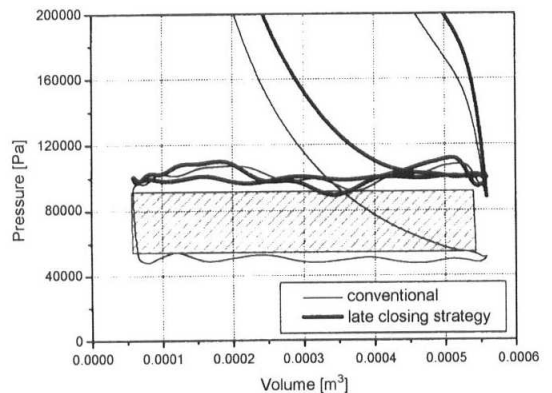
Fig. 1은 가변 밸브 기구의 작동 예를 전산모사를 통해 보이는 압력-체적선도로서 흡배기 구간에서의 실린더 내부 압력 변화를 나타내고 있다. (a)의 경우는 흡기밸브 개방 후, 해당부하에 적합한 양의 신기가 실린더에 도입되는 즉시 흡기

밸브를 폐쇄하는 방법인 EIVO(early intake valve opening) 전략을 나타내고 있으며, (b)는 흡기밸브 개방 후, 최대의 신기를 실린더로 도입하여 다시 피스톤 운동에 의해 신기를 흡기 측으로 밀어내다가 운전 부하에 알맞은 신기가 실린더 내에 남았을 때 흡기밸브를 닫는 LIVO(late intake valve opening) 전략을 나타내고 있다.

이로부터 펌핑손실이 기존의 엔진에 비하여 획기적으로 저감되어 있음을 확인할 수 있다. 펌핑손실 저감에 따라 같은 출력을 얻기 위해 필요한 최고 압력이 떨어지며, 이에 따라 실린더 내의 온도가 하강하여, 실린더 벽면으로의 열손실의 저감 및 질소 산화물의 배출량 감소가 기대될



(a) Early intake valve closing strategy



(b) Late intake valve closing strategy

Fig. 1 Reduction of pumping loss by adopting VVT strategies : Shaded area represents the amount of pumping loss reduction

수 있다.^{1,2)}

흡배기 밸브의 개폐 시기를 임의대로 조절할 수 있는 가변 밸브 기구를 채택한 경우, 흡배기 밸브의 오버랩 기간 및 흡배기 밸브 개폐 시기를 마음대로 조절할 수 있어, 실린더 내부에 남은 잔류가스량을 작동 조건에 따라 임의로 조절할 수 있다. 연소 안정성이 요구되는 시동, 난기운 전 및 공회전 시에는 흡배기 밸브의 개폐 시기를 조절하고 오버랩을 최소화하여 잔류가스량을 최소화하도록 조절하며, 엔진 부하가 커 배출되는 질소산화물을 줄이고자 할 경우는 반대로 오버랩을 조절하거나, 배기밸브를 일찍 닫아 많은 양의 연소생성물을 실린더 내에 남겨두어 외부 EGR 시스템 없이 밸브 개폐 시기 조절만으로 질소산화물 배출을 저감할 수 있다. 또한, 실린더 내부로 유입되는 유동의 속도를 밸브 개폐시기 및 최대 양정을 이용하여 조절함으로써, 유동의 난류강도를 높이고, 연료의 증발을 촉진하도록 설정할 수 있다. 이로부터, 냉시동 시 문제가 되는 연료의 벽면 점착량을 저감할 수 있어 엔진의 탄화수소 배출 성능을 획기적으로 개선할 수 있다.^{3,4)}

본 연구에서는 가변 밸브 개폐 시기 기구를 이용한 엔진 출력 조절의 연료 경제성, 출력성능, 체적효율에 대한 영향을 전산모사를 통하여 해석하였다. 가변 밸브 개폐 시기 기구 운전 방법에 따른 특성을 살펴보기 위하여, 엔진 출력을 조절하는 가장 기본적인 전략인 EIVC, LIVC 운전 전략을 비교하였다. 마지막으로, 냉시동시 배출되는 탄화수소를 저감하기 위하여, 실린더 내부의 난류강도 증가를 위한 전략으로 채택되는 LIVO 운전 전략에 대한 가능성을 점검하였다.

2. 해석 방법

2.1 해석 대상 엔진

전산 해석의 대상이 된 엔진은 Table 1과 같이, 네 개의 실린더, 흡배기계, 소음기로 구성되어 있다. 흡입되는 공기량은 기준 엔진의 경우 스로

Table 1 Specification of a model engine

Displacement volume [cc]	1996.8
Compression ratio	9.4
Connecting rod length [mm]	131.9
Piston stroke [mm]	79.5
Valve timing (Base system)	
IVO/IVC	340/608
EVO/EVC	118/398

틀 밸브를 이용한 흡기 밀도 조절방식으로 조절되며, 가변 밸브개폐시기 기구를 이용한 경우는 밸브 개폐시기에 의하여 조절된다. 가변 밸브개폐시기 기구를 채택한 엔진에서의 흡배기 밸브의 양정은 고정 밸브개폐시기 기구의 그것을 밸브 개폐시기 및 개방 기간에 맞추어 선형적으로 변화시키며 설정하였다.¹⁰⁾

2.2 해석방법 및 경계조건

본 논문에서는 유한차분법을 이용하여 2차의 정확도로 주어진 문제의 해를 구할 수 있는 Two-step Lax-Wendroff method에, 중앙차분에 의해 생길 수 있는 비물리적인 진동현상을 억제하기 위한 인공 점성항을 사용하였다.

엔진 흡배기 시스템 내의 유동을 해석하는데 적용된 연속, 운동량, 에너지 보존 방정식은 일반적인 3차원 Navier-Stokes 방정식을 간략화하여 유도된 1차원 지배방정식을 이용하였으며, 식(1)에 나타내었다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\begin{matrix} \rho \\ \frac{1}{2} \rho u^2 + \frac{p}{k-1} \end{matrix} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\begin{matrix} \rho u \\ \frac{1}{2} \rho u^3 + \frac{p}{k-1} u \end{matrix} \right) \quad (1)$$

$$= \begin{pmatrix} -\frac{\rho u}{F} \frac{dF}{dx} \\ -\left(\frac{\rho u^2}{F} \frac{dF}{dx} + \frac{2\rho f}{D} u \right) \\ \rho q - \frac{1}{F} \frac{dF}{dx} \left(\frac{1}{2} \rho u^3 + \frac{p}{k-1} u \right) \end{pmatrix}$$

경계조건은 Benson 등이 제시한 방법을 사용하였다.¹¹⁾

3. 해석 결과

3.1 펌핑손실 저감

앞서의 Fig. 1에서 설명한 바와 같이, 배기행정 중의 궤적과 흡기행정 중의 궤적 사이의 넓이가 펌핑손실을 의미한다. 다음의 Fig. 2는 일정 엔진회전수에서 부하조건 변화에 따른 펌핑손실량의 변화를 엔진 운전방법에 따라 도시한 것이다. LIVC를 제외한 EIVC 및 고정 밸브개폐시기 전략의 경우 부하가 작을수록 펌핑손실이 커지고 있음을 볼 수 있다.

또한, LIVC, EIVC 모두 기존의 밸브 개폐 방식에 비하여 펌핑손실을 감소시킬 수 있는 것을 알 수 있으며, LIVC의 경우, 저감량이 더 큰 것을 알 수 있다. 그 차이는 저부하로 갈수록 더욱 커지는 것을 관찰할 수 있다.

3.2 EVC, LIVC 운전 전략의 비교

전술한 바와 같이 LIVC 전략의 경우가 펌핑손실을 감소하는데 더 우수하지만, 연료 소비율의 면에서는 EIVC가 더 우수하다는 것을 Fig. 3 으로부터 알 수 있다. 다음에서 그 이유를 찾아 보고자 한다.

Fig. 4는 LIVC 전략 적용 시의 실린더 내 압력 상승에 대하여 나타낸 그림이다. 그림의 삼각형 ①, ②는 두 운전 전략간의 차이를 나타내는 일의

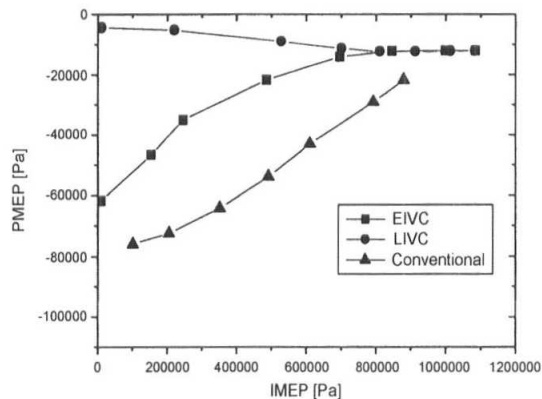
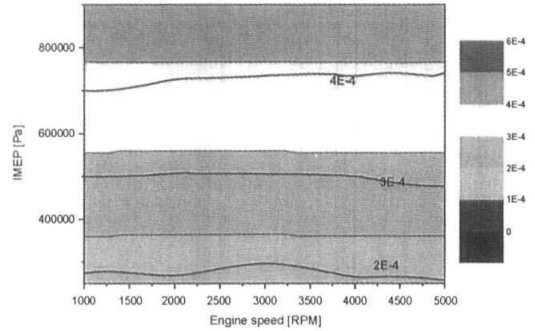
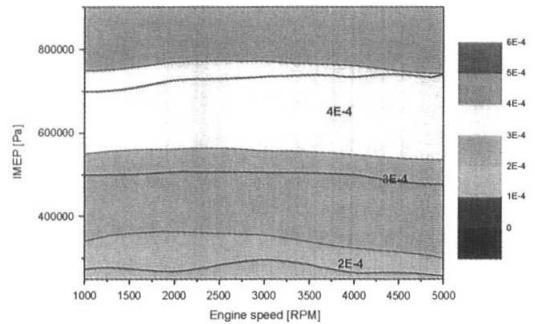


Fig. 2 Comparison of pumping loss in conventional and VVT system : engine speed = 1500RPM



(a) EIVC vs. conventional system



(b) LIVC vs. conventional system

Fig. 3 Comparison of fresh air consumption rate among EIVC, LIVC and conventional system : all the values are represented in [kg/cylinder/cycle]. Thick lines in graph represent air consumption rate of conventional system

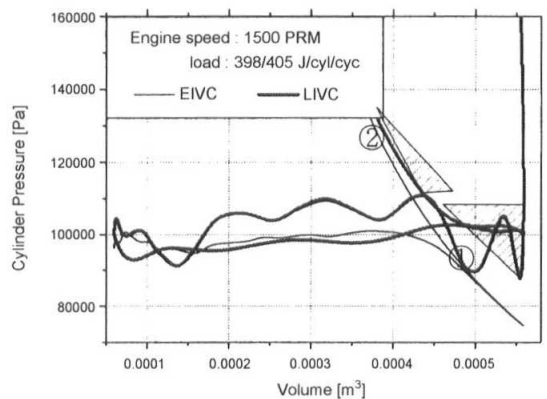


Fig. 4 Comparison of in-cylinder pressure between that of EIVC and that of LIVC

크기를 나타내는 부분이다. 엔진이 생산하는 일을 크게 펌핑손실부와 총 일(gross work) 부분으

로 나누어보자.

EIVC 전략에서는 삼각형 ①의 부분은 LIVC 전략에 비하여 더 커진 펌핑 손실로 작용한다. 반면에 gross work의 경우는 LIVC 전략에 비하여 삼각형 ①만큼 더 커지게 된다. 즉, 펌핑손실도 커지고, 일의 생성량도 커진다. 이로부터 EIVC 전략에서의 LIVC 전략에 비해 커진 펌핑 손실은 다시 EIVC에서 늘어난 gross work으로 작용함으로써, 전체 net work 생성량에서는 양 전략에 있어 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 삼각형 ②부분은 LIVC 전략 채용시, 흡기밸브가 닫히며 실린더 내부의 신기가 압축되는 부분이다.

이로부터 EIVC와 LIVC간의 펌핑손실량 저감의 차이는 실제 엔진의 출력 면에서는 중요한 차이가 아님을 알 수 있다. 또한, LIVC 전략의 경우, 실린더로 들어온 혼합기가 다시 흡기 매니폴드로 배출되어 역화의 위험이 있고, 점화 시기 등에 의해 부하조절 가능 구간이 한정되어 있어 스로틀 이용, 혹은 EIVC 전략과 병행해야 하는 단점이 있다.

3.3 실린더 내의 난류강도 저감

EIVC 전략을 적용하는 경우, 앞서 서술한 바와 같이 엔진 실린더내의 난류 강도가 떨어지는 것으로 보고되고 있으며, 이를 극복하기 위해 LIVO (Late Intake Valve Opening) 전략을 사용하기도 한다. 이는 흡기 밸브 열림 시기를 상사점보다 상당히 늦추어 실린더와 흡기 매니폴드 사이의 압력 차가 음속의 유동을 만들도록 하여 실린더 내로 유입되는 유동의 운동에너지를 최대화하여 연료의 미립화 및 증발 촉진, 실린더 내의 난류 강도를 높이기 위한 운전 전략이다. 이 전략을 채택함으로써 냉간 시동시의 실린더 벽면의 연료 점착량을 줄일 수 있다고 보고되고 있다.

본 연구에서는 실린더 내의 3차원적인 유동을 직접 모사할 수 없는 관계로 흡기 밸브를 통과하여 들어가는 유동의 운동에너지를 상대적인 비교를 통하여 실린더 내의 난류강도 비교를 대신 하도록 한다.

엔진의 부하를 밸브의 양정을 조절함으로써 행하고자 시도한 Stivender의 보고에 따르면, 밸브의 양정을 줄임으로써 저부하에서의 연소안정성 확보, lean limit 확장, 연비 개선이 가능했다고 한다.⁴⁾ 이는 줄어든 양정에 의하여 증가된 흡기 평균 속도가 TDC에서 더 높은 난류강도를 만들어 가능했다고 보고한다. 이로부터, 증가된 흡기의 운동에너지는 실린더의 난류강도를 대변할 수 있다는 가정을 할 수 있다.

실린더로 들어가는 유동의 운동에너지는 다음의 식(2)로부터 구해진다.

$$KE = \int \frac{1}{2} \int \dot{m} dt \cdot u^2 dt$$

where, \dot{m} = flowrate from manifold to cylinder (2)

u = flow velocity

Fig. 5는 각 운전 방식에 따른 밸브를 통과하는 흡기 유량의 크랭크 각도에 따른 변화를 보이고 있다. 부하가 서로 비슷한 데이터들을 도시하였다. LIVO의 경우 유량, 속도가 커 운동 에너지가 상당히 증가할 수 있을 것으로 보인다.

운동에너지를 계산하여 서로 비교하여 Fig. 6에 도시하였다. 각각, 고정 밸브 타이밍의 경우 0.0427[J], EIVC의 경우 0.0209[J], LIVO의 경우 1.323[J]로 나타났다. 앞서 서술한 바와 같이, EIVC를 이용하는 경우, 고정 밸브 타이밍의 경

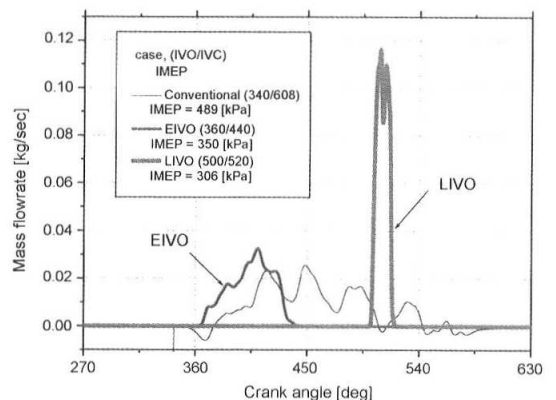


Fig. 5 Various flowrate profile for the same flow mass with various valve opening and closing strategies

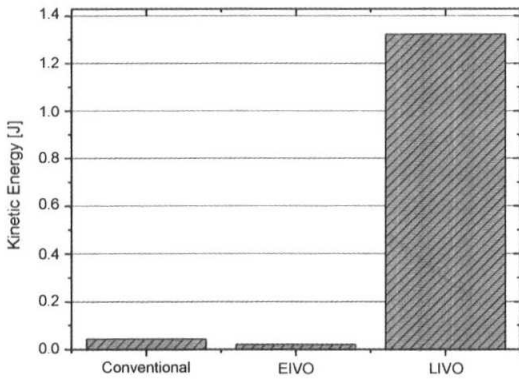


Fig. 6 Comparison of kinetic energy at the entrance of cylinder among conventional, EIVO, and LIVO strategies

우보다 운동에너지가 절반정도로 떨어지지만, LIVO를 채택함으로써 유동의 속도가 커서 월등히 큰 운동 에너지를 나타내는 것으로 판단된다.

4. 결론

스로틀 밸브 없이 엔진의 부하를 조절할 수 있는 가변 밸브를 사용한 엔진에 대하여, 엔진 흡배기관내의 압력맥동현상을 고려한 전산모사를 시행함으로써 얻은 결과는 다음과 같다.

VVT를 채용할 경우, 펌핑손실을 줄임으로써, 연료 소비율을 저감할 수 있음을 관찰하였다.

LIVC(Late Intake Valve Closing) 전략을 채택한 경우가, EIVC(Early Intake Valve Closing) 전략을 채택한 경우에 비하여 더욱 큰 연료 저감 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대하였으나, 계산을 통한 비교에서는 연료 경제성이 나쁘거나 비슷한 것으로 나타났다.

저부하 운전 시, EIVC 전략을 사용하는 경우, 실린더 내부 난류강도가 떨어질 것으로 예상되며, LIVO(Late Intake Valve Opening)를 사용함으로써 극복이 가능할 것으로 보인다.

결론적으로, 부하 조절은 EIVC의 방법으로 행하며, 이로부터 생기는 난류 강도 저하의 문제는 LIVO를 채택하여 해결하는 방안을 추천할 수 있다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업(NRL)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- 1) J. H. Tuttle, "Controlling Engine Load by Means of Late Intake-Valve Closing," SAE 800794, 1980.
- 2) J. H. Tuttle, "Controlling Engine Load by Means of Early Intake Valve Closing," SAE 820408, 1982.
- 3) M. Pischinger, W. Salber, F. V. D. Staay, H. Baumgarten, H. Kemper, "Low Fuel Consumption and Low Emissions - Electromechanical Valve Train in Vehicle Operation," FISITA, F2000A005, 2000.
- 4) T. Ahamd, M. A. Theobald, "A Survey of Variable-Valve-Actuation Technology", SAE 891674, 1989.
- 5) C. Gray, "A Review of Variable Engine Valve Timing," SAE 880386, 1988.
- 6) Y. Urata, H. Umiyama, K. Shimizu, Y. Fujiyoshi, H. Sono, K. Fukuo, "A Study of Vehicle Equipped with Non-Throttling S.I. Engine with Early Intake Valve Closing Mechanism," SAE 930820, 1993.
- 7) P. Kreuter, P. Heuser, M. Schebitz, "Strategies to Improve SI-Engine Performance by Means of Variable Intake Lift, Timing and Duration," SAE 920449, 1992.
- 8) M. M. Schechter, M. B. Levin, "Camless Engine," SAE 960581, 1996.
- 9) H. P. Lenz, B. Geringer, G. Smetana, A. Dachs, "Initial Test Results of an Electro-Hydraulic Variable-Valve Actuation System on a Firing Engine," SAE 890678, 1989.
- 10) J. Koo, C. Bae, "Effect of Breathing Characteristics on Performance in Spark Ignition Engines," FISITA, F2000A027, 2000.
- 11) J. H. Horlock, D. E. Winterbone, "The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal-Combustion Engines, Volume I, II," 1982.