

유사차원해석을 이용한 균일혼합기 GDI 엔진에서의 배기 및 노킹 예측

이재서* · 허강열**

Prediction of Emissions and Knocking in a Homogeneous GDI Engine by Quasidimensional model

Jaeseo Lee*, Kang Y. Huh**

ABSTRACT

A quasidimensional model is developed with the surrogate mechanism of iso-octane and n-heptane to predict knock and emissions of a homogeneous GDI engine. It is composed of unburned and burned zone with the latter divided into multiple zones of equal mass to resolve temperature stratification. Validation is performed against measured pressure traces, NOx and CO emissions at different load and rpm conditions. Comparison is made between the empirical knock model and predictions by the chemistry model in this work.

Key Words : Homogeneous gasoline direct injection(GDI) engine, Quasidimensional analysis, Knocking, NOx and CO

최근 가솔린 엔진은 기존 PFI (Port Fuel Injection) 방식에서 효율과 배기 특성에서 강점을 갖고 있는 GDI (Gasoline Direct Injection) 엔진으로 진화하고 있다. 균일혼합기 GDI 엔진은 흡입 과정 때 연료가 연소기내로 분사되고 점화전까지 공기와 연료가 균일하게 혼합된다고 가정된다. 대부분의 가솔린 엔진 OD 모사는 Poulos [1]의 연소기의 형상을 반영할 수 있는 유사차원 해석 모델을 기초하고 있다. 혼합기를 화염면에 따라 기연/미연의 두 영역으로 나누고, 화염은 구형대로 전파된다고 가정한다. 이로부터 진전된 형태로서 성층화된 EGR (Exhaust Gas Recirculation)을 고려한 모델[2]과 일정한 크랭크 각 간격으로 복수의 기연영역을 나누는 multi-zone 모델을 적용한 연구[3]가 있다.

본 연구에서는 유사차원해석 모델을 기초로 하여 하나의 미연영역과 일정한 질량으로 나뉜 다수의 기연영역을 가진 multi-zone 모델을 적용하였으며, 배기가스와 노킹 예측을 위해 화학 반응 메커니즘을 적용하였다. NOx와 CO는 각각의 기연영역에서 독립적으로 계산하였으며, 노킹은 미연영역에서의 자발화 발생 여부로 예측하였다. 이러한 모델들의 검증에 위해 엔진의 부하, 속도에 따른 다양한 운전 조건에서 실험값과 비교하였으며, 노킹 검증에 위해 실험식에 바탕을 둔 IFP 모델 [4]과 비교 하였다.

실린더 내의 혼합기의 각 영역의 일반적인 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d(mh)}{dt} - \frac{d(PV)}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} + \sum_{\in, out} h_j \frac{dm_j}{dt} \quad (1)$$

이 때, Q 는 벽에 의한 열손실 \dot{Q}_w , 액체 연료와 열전달 \dot{Q}_{fg} , 미연영역에서의 노킹으로 인한 열방출 \dot{Q}_{chem} 의 합이다. \dot{Q}_w 는 Woschni 모델[5]로 모사되고, \dot{Q}_{fg} 는 각 분사 영역에서의 연료와의 열전달 합, $\dot{Q}_{fg} = \sum_{sprayzone} q_i$ 으로 구한다[6].

$$q_i = C_p (T_g - T_{i,i}) / (e^{z_i} - 1) \frac{dm_{fg}}{dt} \quad (2)$$

증발량, dm_{fg}/dt 은 Borman 식[7]에 의해 계산된다. \dot{Q}_{chem} 은 각 화학종의 생성 엔탈피와 질량변화량의 곱의 합으로 계산된다.

$$\frac{dQ_{chem}}{dt} = \sum_i h_{f,i} \frac{dm_{i,u}}{dt} \quad (3)$$

Figure 1은 유사차원해석코드의 구조를 나타낸다. 형상정보 테이블의 화염 부피, 면적 등을 통하여 화염전파속도를 구하고, CHEMKIN은 각 영역의 압력, 온도, 화학종의 질량 분율을 받아 NOx, CO와 knock을 예측한다.

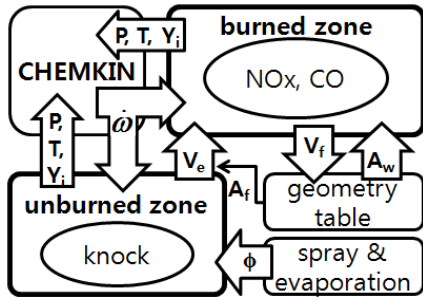


Fig. 1 Structure of the quasidimensional code

테스트엔진의 제원 및 운전조건은 표1에 나타내었다.

Table 1 Sub-models Engine specification and operating conditions

| | | |
|---------------------|---------------------|--------|
| Displacement volume | 590 cm ³ | |
| Bore | 88 mm | |
| Stroke | 97 mm | |
| Engine speed (RPM) | BMEP (kPa) | ϕ |
| 4000 | 200 | 1.0 |
| 4000 | 600 | 1.0 |
| 4000 | 1000 | 1.1 |
| 2000 | 600 | 1.0 |
| 3000 | 600 | 1.0 |

Figure 2는 부하와 RPM에 따른 압력을 측정값과 계산값을 비교하여 나타내었다. 모든 케이스에서 대체로 일치하는 결과를 얻었다.

Figure 3, 4에는 NOx와 CO를 측정된 값과 계산된 값을 비교하였다. NOx는 실험과 일치하는

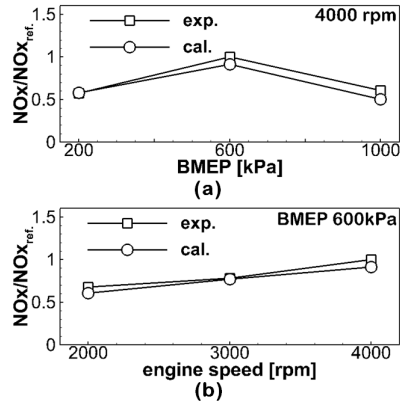


Fig. 3 Measured and calculated NOx concentrations at different (a) loads and (b) rpms

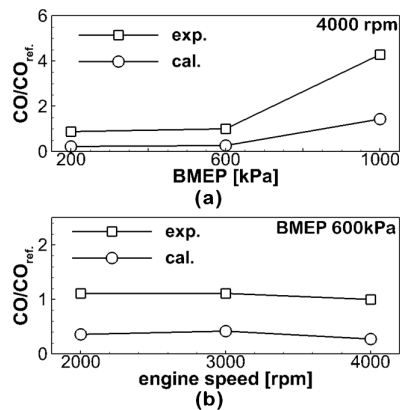


Fig. 4 Measured and calculated CO concentrations at different (a) loads and (b) rpms

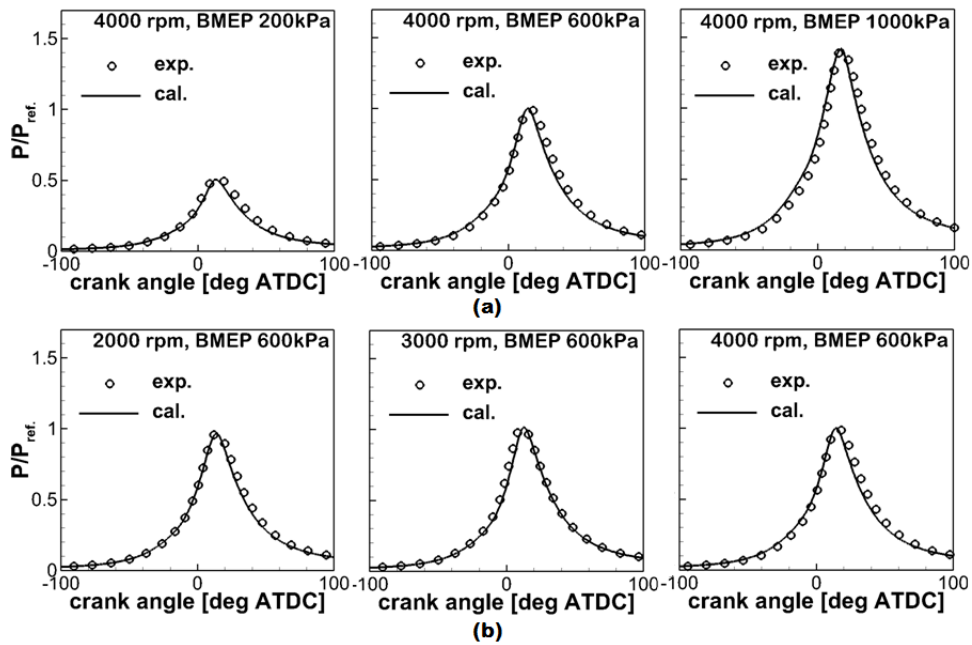


Fig. 2 Measured and calculated pressures trace at different (a) loads and (b) rpm

결과를 얻었지만 CO의 경우, 경향은 일치하지만 총량은 실험값 보다 작게 예측하였다. 이는 균일 혼합기를 가정하면 고려할 수 없는, 경계영역 등의 분균일성 때문으로 보인다.

Figure 5는 스파크 점화시기 변화에 따른 IFP 모델로부터 계산된 무차원화된 노킹 지연과 화학 반응 메커니즘으로부터 계산된 미연영역에서의 연료의 소비량, 열 방출량을 나타냈다. 노킹은 $\theta^* = Y_{fuel}^0 / Y_p = 1$, $Y_f^* = (Y_{f,u}^0 - Y_{f,u}) / Y_{f,u}^0 = 1$ 일 때 발생한다고 가정되어지고, IFP 모델과 화학반응 메커니즘을 이용하는 방법은 일치하는 결과를 보여준다.

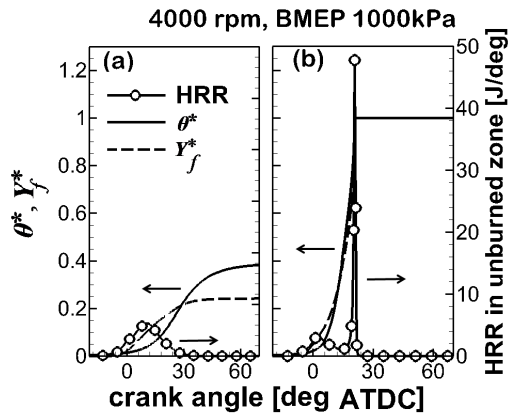


Fig. 5 Variation of θ^* , Y_f^* and heat release rate (HRR) in the unburned zone at 4000 rpm, BMEP 1000kPa (a) spark timing $+6^\circ$, (b) spark timing -6°

참고 문헌

- [1] S.G. Poulos, "The effect of chamber geometry on SI engine combustion rates—a modeling study", Master Thesis, MIT, Massachusetts, USA, 1982.
- [2] S. Han, "Design and demonstration of spark ignition engine operating in a stratified-EGR mode", Ph.D. Thesis, MIT, USA, 1997.
- [3] C.D. Rakopoulos and C.N. Michos, "Quasi-dimensional, multi-zone combustion modeling of turbulent entrainment and flame stretch for a spark ignition engine fuelled with hydrogen-enriched biogas", Int.J. Vehicle Design, Vol. 49, 2009, pp.3-51
- [4] S. Bougrine, S. Richard, D. Veynant, "Modelling and simulation of the combustion of

Ethanol blended fuels in a SI engine using a 0D Coherent Flame Model", SAE paper, 2009-24-0116, 2009.

[5] G. Woschni, "A Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine" SAE paper 670931, 1967.

[6] A. D. Gosman, R. J. R. Johns, "Computer Analysis of Fuel-Air Mixing in Direct-Injection Engines" SAE paper 800091, 1980.

[7] G. L. Borman, J. H. Johnson, "Unsteady Vaporization Histories and Trajectories of Fuel Drops Injected into Swirling Air" SAE paper 620271, 1962.