

단일 영역 모델 열발생율 계산 방법의 개선에 관한 연구

류승협† · 김기두* · 윤옥현* · 하지수*

(원고접수일 : 2004년 7월 28일, 심사완료일 : 2004년 9월 6일)

A Study on the Calculation of Heat Release Rate to Compensate the Error due to Single Zone Assumption in Diesel Engines

Seung-Hyup Ryu† · Ki-Doo Kim* · Wook-Hyeon Yoon* · Ji-Soo Ha*

Abstract : Accurate heat release analysis of cylinder pressure data is important for evaluating performance in the development of diesel engine. However, traditional single zone first law heat release model(SZM) has significant limitations due to the simplified assumption of uniform charge and neglecting local temperature inside cylinder during combustion process. In this study, heat release rate based on single zone heat release model has been evaluated by comparison with computational analysis results using Fire code which is based on multi-dimensional model(MDM). To overcome limitations due to simplicity of single zone assumption, especially the influence of specific heat ratio on gross heat release has been esteemed and newly suggested were the equation $\gamma = \gamma(T/T_{max})$ which describes the variations of gases thermodynamic properties with mean temperature and maximum mean temperature inside cylinder. Single zone heat release model applied with this equation is shown to give very good results over whole range of operating conditions when compared with computational analysis results based on multi-dimensional model.

Key words : Heat release rate(열발생율), Cylinder pressure(연소실 압력), Specific heat ratio(비열비), Single zone model(SZM, 단일 영역 모델), Multi-dimensional model(MDM, 다차원 모델)

1. 서 론

내연 기관에서의 연소 과정은 연료와 공기 혼합물의 화학 에너지가 연소실의 온도와 압력을 급격

히 상승시키고, 이것이 피스톤을 통해 이용 가능한 일로 전환되는 과정이다. 따라서 엔진의 연소실에서 일어나는 과정을 분석하기 위해서는 연소실 압력 및 온도의 데이터를 얻어야 한다. 일반적

† 책임저자(현대중공업 산업기술연구소 엔진연구실), E-mail : shryu2@hhi.co.kr, T : 052)230-3228

* 현대중공업 산업기술연구소 엔진연구실

으로 연소실의 압력은 거의 균일하여 데이터를 획득하기가 쉬우나, 온도는 국부적으로 많은 차이가 있어 계측하기가 어렵다. 따라서 연소 과정을 평가하기 위해서는 연소실 압력을 주로 사용한다. 연소실 압력을 크랭크 각도에 따라 측정하면 압축 및 연소 최대 압력과 압력 상승률을 얻을 수 있고, 또한 열역학 제 1법칙을 적용하여 열발생율을 얻을 수 있다. 대부분의 상용 연소분석기는 연소실 압력을 크랭크 각도에 따라 측정하여 이로부터 열발생율을 계산하여 나타낸다.

열역학 제 1법칙으로부터 계산되는 열발생율 계산 방법은 연소실 내를 균일한 조성과 온도를 가진 단일 영역으로 가정한다(Single zone model : SZM). 이러한 계산 방법은 계산하기 쉽다는 장점 때문에 많이 사용되고 있지만 실제 연소는 3차원의 현상으로 연소실 각 부분에서의 온도와 조성이 모두 다르다. 특히 디젤 엔진인 경우 연료의 분무, 증발, 공기의 유동 및 연소실 형상 등과 같은 공간적 변수에 따라 연소실의 국부적 온도차는 심하다. 이에 따라 단순화된 단일 영역에 의한 열발생율 계산 방법은 많은 오차를 포함한다. Cheng and Gentry⁽¹⁾는 공간적으로 균일하지 않은 조건을 고려한 모델의 열발생율 계산 결과가 균일하다고 가정한 단일 영역 모델을 적용한 결과보다 피크치가 30% 정도 높은 값을 가지는 것으로 발표하였다. 공간적인 조건의 평가를 위해 최근에는 질량, 운동량, 에너지 및 화학종 보존 방정식, 분무 모델, 난류 효과 등의 복잡한 수치 모델을 바탕으로 컴퓨터를 통한 계산에 의하여 연소 과정의 압력 변화와 열발생율등을 예측하는 3차원 계산 방법(Multi-dimensional model : MDM)이 많이 이용되는데, 이러한 연소 해석에 의한 결과는 실험 결과와의 비교를 통한 검증 단계가 필요하다. 그러나 검증의 기준이 되는 실험적 방법에 의한 열발생율 계산은 앞서 언급한 단일 영역 가정의 단순성에 기인한 오차를 내포하고 있어 3차원 연소 해석의 검증에 어려움이 있다.

단일 영역 가정의 단점을 극복하여 열발생율을 계산하는 방법으로 연소실 가스의 비열비를 보정하는 것이 유용하다. 이러한 상당 비열비에 대한

연구는 예전부터 많은 선행 연구자에 의해 수행되어 왔다. 이중 특히 연소실 온도에 대한 함수로 비열비를 적용한 Heywood (1988)의 식($\gamma = a + bT$)⁽²⁾과 엔진 시뮬레이션 소프트웨어의 결과와 비교하여 적절히 보정한 Brunt et al.(1999)의 식($\gamma = a + bT + cT^2$)⁽³⁾등이 주로 사용되고 있다.

본 연구에서는 단순화된 단일 영역 모델의 열발생율 계산 방법에 의한 한계를 극복하고 이를 간단하게 보완할 수 있는 상당 비열비 함수를 새롭게 제안하였다. 이를 위하여 3차원 연소 해석을 수행하여 실제 현상과 유사한 연소실 압력과 열발생율을 계산하였다. 계산된 연소실 압력을 이용하여 단일 영역 모델에 의한 열발생율을 계산하였으며 이를 3차원 연소 해석에 의한 열발생율과 비교하여 단일 영역 모델에 의한 열발생율의 문제점을 평가하여 상당 비열비 함수를 도출하였다. 상당 비열비 함수를 적용한 단일 영역 모델에 의한 열발생율 계산 방법은 엔진의 부하의 변화에 따라 평가되었으며, 형상이 다른 엔진에서도 그 타당성을 검토하였다.

2. 3차원 연소 해석

3차원 연소 해석 대상 엔진은 현대중공업에서 개발한 Hyundai HiMSEN H21/32이며, Table 1에 주요 사양을 나타내었다. 연소 해석을 위해 사용된 프로그램은 AVL사에서 개발한 Fire code이며 해석에 사용된 모델들은 Table 2에 요약하였다. 피스톤의 움직임을 모사하기 위한 이동 격자는 Fig. 1과 같으며, 실제의 공간적인 연소 특성을 충분히 모사하기 위해 20만개의 격자로 이루어져 있다. 해석 구간은 흡기밸브가 닫힌 후 (-180 deg. ATDC)부터 배기밸브가 열리기 전 (128 deg. ATDC)까지이다. 연소 해석 결과 얻어진 연소실 압력을 Fig. 2에 실험 결과와 함께 나타내었으며 전체 압력의 상승 및 하강 경향이 해석과 실험이 유사하여 해석 결과가 실제 현상을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

Table 1 Engine specification

Parameter	Value
Bore	210mm
Stroke	320mm
Connecting rod length	640mm
Swept volume	11.08 ℓ
Compression ratio	17.0:1

Table 2 Submodels of combustion analysis

Physical phenomena	Model
Spray breakup	Wave breakup
Spray-wall impingement	Senda et al.
Drop drag	Schiller & Naumann
Drop evaporation	Dukowicz
Drop coalescence & collision	Dukowicz
Ignition	Theobald & Cheng
Combustion	Eddy breakup
Turbulence dispersion	Gosman & Ioannides

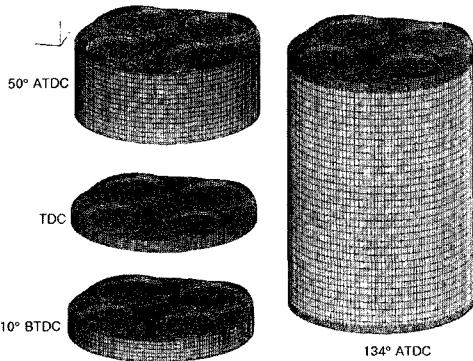


Fig. 1 Computational grids used in FIRE code with change of crank angle

3. 단일 영역 모델 열발생율 계산

3.1 연소 분석 시스템 구축

연소실 압력 데이터를 이용하여 단일 영역 모델을 이용한 열발생율을 계산하기 위해 연소 분석 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 엔진 실험시, 연소실 실린더 압력 및 엔코더 신호를 실시간으로

계측하고 이를 바탕으로 열발생율을 계산할 수 있도록 데이터 획득 장치(NI 6062E, max. sampling rates 500kHz, National Instruments)와 LabVIEW 프로그래밍 언어(ver.6.1)를 이용하여 구축하였다.

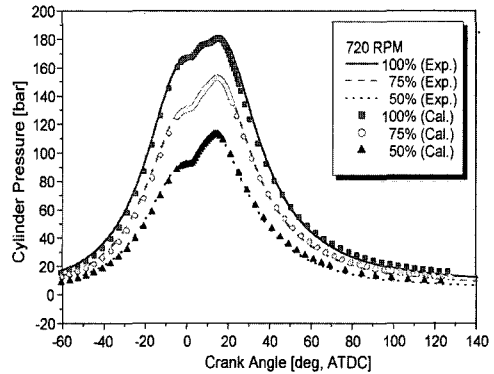


Fig. 2 Predicted and measured cylinder pressure at 50, 75, and 100% load

Fig. 3은 개발된 시스템의 출력 화면이며, 본 연구에서는 계측된 연소실 압력 데이터로부터 각각 열역학 제 1법칙과 이상기체 방정식을 적용하여 식(1)과 식(2)와 같이 연소실 평균 온도와 단일 영역 모델 열발생율을 계산하였다. 연소실 평균 온도 계산시 기준은 흡기밸브가 닫히는 시점(-180 deg, ATDC)으로 하였으며, 연소가 진행되는 동안 기체 상수와 질량의 변화는 없으므로 가정하였다. 또한 열발생율의 계산에는 엔진의 Bore 및 Stroke 등의 기본 제원과 연소실 압력, 온도 및 비열비 데이터, 그리고 이후 설명될 벽면과의 열손실을 계산하기 위한 열전달 모델이 사용되었다.

$$T_i = \frac{p_i \cdot V_i}{m \cdot R} = p_i \cdot V_i \frac{T_{ref}}{p_{ref} \cdot V_{ref}} \quad (1)$$

i : i 번째 크랭크 각도

ref : 계산 기준점

$$\begin{aligned} \delta Q_{hr} &= dU + \delta W + \delta Q_w \\ &= \frac{\gamma}{\gamma-1} p dV + \frac{1}{\gamma-1} V dp + \delta Q_w \end{aligned} \quad (2)$$

δQ_{hr} : 연소에 의한 열발생을
 dU : 내부에너지 변화
 δW : 피스톤으로 전해지는 일(= pdV)
 δQ_w : 벽면으로의 열전달
 γ : 비열비 (= c_p/c_v)

p_m : 모터링에 의한 실린더 압력 [Pa]
 u : 실린더 가스 평균 특성 속도 [m/s]
 B : 피스톤 지름 [m]
 \bar{v}_p : 피스톤 평균 속도 [m/s]
 \bar{v}_s : 스윙 속도 [m/s]

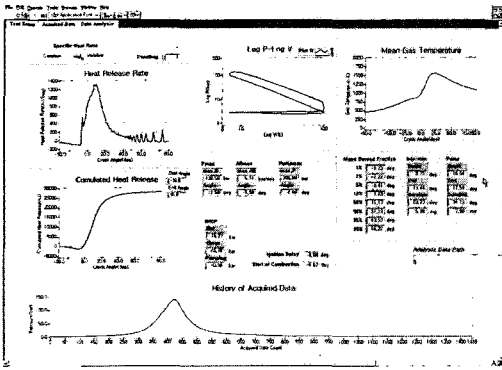


Fig. 3 Output screen of developed engine combustion analysis system

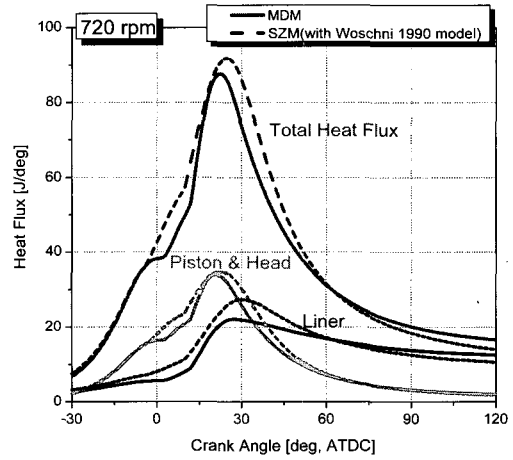


Fig. 4 Heat transfer prediction results each by MDM and SZM with Voschni 1990 model

3.2 열전달 모델

연소실 가스와 실린더 주위 벽면으로의 열전달량을 계산하기 위해서 Voschni⁽⁵⁾가 제안한 열전달 계수 모델 중 1990년에 발표된 부분부하 개선 모델을 적용하였다. 이때의 열전달 계수는 아래 식(3)과 같으며, 이때 특성속도(u)를 계산하기 위해 기준이 되는 온도와 압력은 흡기 밸브가 닫히는 시점으로 하였다.

$$h = 129.8 p^{0.8} u^{0.8} B^{-0.2} T^{-0.55} \tag{3}$$

$$u = \max \left[\left(C_1 \bar{v}_p + C_2 \frac{V_s T_{ref}}{p_{ref} V_{ref}} (p - p_m) \right), \left(C_1 \bar{v}_p \left(1 + 2 \left(\frac{V_c}{V} \right)^2 IMEP^{-0.2} \right) \right) \right]$$

$$C_1 = 2.28 + 0.308 \left(\frac{\bar{v}_s}{\bar{v}_p} \right)$$

$$C_2 = 3.24 \times 10^{-3} \quad ; \text{ 연소 과정}$$

$$= 0 \quad ; \text{ 흡배기 과정}$$

h : 열전달 계수 [W/m² · K]
 p : 실린더 평균 압력 [Pa]

Fig. 4는 3차원 연소 해석에 의해 도출된 열전달량과 식(3)의 열전달 모델을 적용하여 압력 데이터로부터 얻어진 열전달 계산 결과를 비교 평가한 것으로, 피스톤과 실린더 헤드, 그리고 크랭크각에 따라 면적이 변하게 되는 실린더 라이너 벽면에 대해 각각 계산한 뒤 그 합을 전체의 열전달량으로 하였다. 그림과 같이 3차원 연소 해석 결과와 Voschni 모델을 적용하여 얻어진 연소실 열전달량은 잘 일치하고 있다.

3.3 기존 단일 영역 열발생을 계산에 대한 평가

3차원 연소 해석에 의한 연소실 압력과 평균 온도를 이용하여 연소 분석 시스템에서 단일 영역 모델을 적용한 열발생율을 계산하였으며, 이 결과를 3차원 연소 해석 결과의 열발생율과 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 단일 영역 모델에 의한 계산은 기존 문헌을 통해 일반적으로 적용되어 오던 방법으로 비열비를 연소 과정동안 일정($k=1.34$)하다고 가정한 경우와 Brunt et al.에 의해 제시된

온도에 관한 2차 방정식의 형태 ($k = a + bT + cT^2$)로 각각 적용하여 계산하였다. 위 두 가지 비열비 함수로 계산한 단일 영역 모델의 열발생을 최대값은 3차원 연소 해석에 의한 열발생율의 최대값 보다 각각 30%, 17% 정도 작은 값을 보이고 있으며, 연소실내의 온도가 최대가 되는 크랭크 각도를 지나면서는 오히려 단일 영역 모델의 열발생율이 3차원 연소해석 결과보다 크게 나타난다. 이러한 차이의 원인은 단일 영역 모델의 열발생을 계산 방법이 연소실 내를 균일한 조성과 온도를 가진 것으로 가정되는 것에 기인한다.

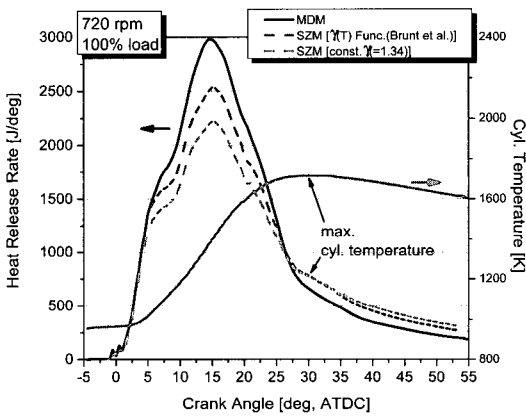


Fig. 5 The deviation of heat release rates calculation results by each assumption

3.4 연소 과정에서의 비열비 변화

기체의 비열비는 온도와 당량비에 영향을 받는다. 이때 온도 변화에 따라 비열비의 차이는 상대적으로 매우 크므로, 단일 영역 모델의 열발생을 계산시 기존의 Heywood (1988)나 Brunt et al.(1998)의 논문에서 적용한 바와 같이 온도만의 함수로 비열비를 적용하는 것은 쉽게 적용이 가능하면서도 적절한 방법이라고 할 수 있다. 그러나 이외에도 특히 고려가 되어야 할 사항은 연소 과정 동안 발생하는 연소 생성물에 의한 실린더 내의 조성 변화이다. 연소 과정 동안 크게 기연가스와 미연가스의 두 가지 성분만이 혼합되어 있는 상태로 조성변화를 구분하여 생각하면 이는 식(4)와 같이 표현할 수 있다. Fig. 6은 연소 과정 중 연

료의 조성 변화에 의한 상태량을 특정 연료에 대해 데이터베이스화하여 이를 엔진의 연소 성능 분석을 위해 적용한 상용 소프트웨어인 BOOST를 이용해 연소 과정중의 비열비 값을 추정한 것으로 그림에서 보여지는 것처럼 연소가 진행되는 동안 연소실 조성 변화에 의해 비열비는 연소 초기 미연가스의 비열비 곡선의 경로를 이탈하여 연소가 진행되어감에 따라 기연가스의 비열비 값에 근접해가는 경로를 가진다.

$$\gamma(T) = mfb \cdot \gamma_b(T) + [1 - mfb] \cdot \gamma_u(T) \quad (4)$$

mfb : 전체 가스중 기연가스의 질량분율

$\gamma_b(T)$: 기연가스의 비열비

$\gamma_u(T)$: 미연가스의 비열비

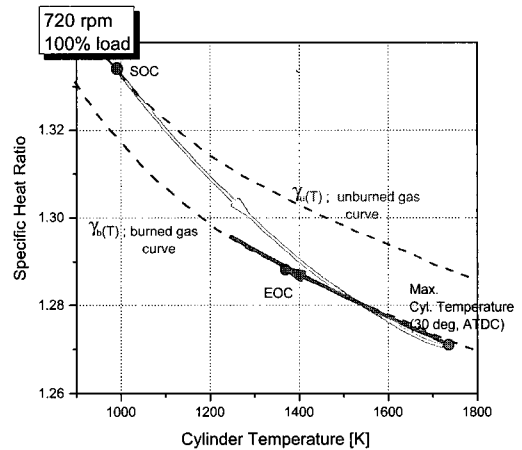


Fig. 6 Variation of specific heat ratio during combustion process (calculation result from BOOST software)

일반적으로 스파크 점화 엔진의 경우, 점화가 되면 점화점을 시작으로 화염면 및 연소 영역이 구형으로 커지면서 미연 및 기연 가스 영역이 확연히 구별되어 연소되는 특징을 가지고 있어 미연가스와 기연가스의 영역을 구분하여 식(4)와 같이 계산하는 방법이 유용하다. 하지만 디젤 엔진의 경우는 자발화에 의해 다발적으로 연소가 시작되고 연료가 액적 및 무화 상태인 영역, 공기만의 영역, 연소 가스 영역 등으로 복잡하게 이루어져 있다. 따라서 이러한 화학적 조성 변화를 고려하는

것이 상당히 복잡할 뿐만 아니라 결과의 정확성을 기하기 어려우므로, 열역학적으로 비열비를 예측하여 접근하기 보다는 오히려 복잡한 연소 현상을 단순화함으로써 발생하는 오차를 보정할 수 있는 일종의 상당 비열비 함수를 적용하는 것이 쉽게 적용이 가능하면서도 더 큰 실효를 거둘 수 있는 방법이 될 수 있다.

Fig. 6에서처럼 연소 과정이 진행되어 연소실 온도가 최대에 이르는 점을 기준으로 최대 온도에 도달하기 전과 후의 비열비는 동일한 온도라 해도 조성이 변함에 따라 달라지므로 이러한 상당 비열비 함수는 온도 최대점을 기준으로 기울기가 다른 두 개의 온도 함수 곡선으로 표현되는 것이 바람직하다. 이에 따라 본 연구에서는 실린더 내의 평균 온도가 최대인 점을 기준으로 기울기가 각기 다른 상당 비열비 함수를 도출하여 온도에 의한 영향뿐만 아니라 조성 변화의 효과도 반영할 수 있도록 제안한다. 하지만 엔진의 운전 조건이 변함에 따라 연소실 최대 온도는 달라지므로 일반화할 필요가 있으며, 이를 위하여 각 크랭크 각도에 대해 구해진 온도를 연소실 최대 온도로 나누어 나타낸 값을 변수로 하여 상당 비열비를 새롭게 함수화 하였고 이는 식(5)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \gamma &= f_1(T/T_{max}) ; SOC \sim T_{max} \\ &= f_2(T/T_{max}) ; T_{max} \sim EOC \end{aligned} \quad (5)$$

SOC : 연소 시작점(start of combustion)
EOC : 연소 완료점(end of combustion)

연소실 내의 온도가 최대에 이르는 점은 전체 연소 과정에서 조성물의 내부에너지가 최대인 점으로 연소실의 온도가 최대에 도달하기 이전에는 연소에 의해 발생한 열에너지가 조성물의 내부에너지를 상승시킴과 동시에 피스톤으로의 일로 전달된다 ($dU > 0, dW > 0$). 이러한 현상은 온도의 최대점을 지나면서 연소가 끝날 때까지 상승된 조성물의 내부에너지가 연료에 의해 발생한 열에너지와 함께 피스톤으로의 일로 전달되는 과정을 지나면서 ($dU < 0, dW > 0$) 연소과정을 마치게 된다.

4. 비열비 보정 열발생을 계산

4.1 상당 비열비 함수 도출

본 연구에서는 우선 3차원 연소 해석 프로그램을 이용하여 계산된 연소실 압력과 열발생을 이용하여 단일 영역 모델의 열발생을 계산 오차의 보정을 위한 새로운 상당 비열비 함수를 도출하였다. 3차원 연소 해석을 통해 얻어진 열발생을 계산값에서 열전달 효과를 고려하지 않은 순열발생 ($\delta Q_{net,i}$)에 대해 열역학 제 1법칙을 적용하여 단일 영역 가정을 보정하기 위한 각각의 크랭크 각도에 대한 상당 비열비는 아래 식(6)으로부터 얻어질 수 있다.

$$\gamma_i = \left(\frac{c_p}{c_v} \right)_i = \left(\frac{dh}{dU} \right)_i = \left(\frac{\delta Q_{net} + V dp}{\delta Q_{net} - p dV} \right)_i \quad (6)$$

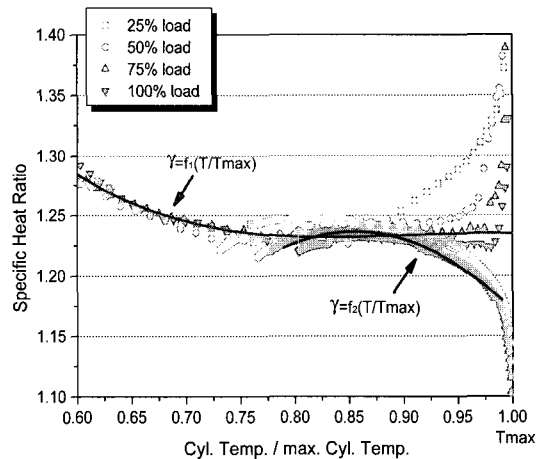


Fig. 7 Calculated specific heat ratio values at each load and two curve-fitted functions about T/T_{max}

Fig. 7은 대상 엔진에 대해 각 부하별로 3차원 연소 해석 결과를 바탕으로 식(6)을 이용하여 각 크랭크 각도에 해당하는 상당 비열비 값을 구한 것을 나타낸다. 이때 얻어진 상당 비열비 값들은 전체 부하에서 실린더 평균 온도가 최대에 근접함에 따라 각각 양의 값과 음의 값으로 발산하는데, 이것은 적용된 식(6)에 의한 계산상의 문제로 이

구간에서 온도의 변화가 없으므로 내부에너지의 변화량이 0에 근접하기 때문이며, 실제 비열비의 특성은 아니다. 하지만 이 구간은 연소 과정 전반에 대해 짧은 기간이므로 본 연구에서는 최대 온도점 부근의 오차는 크게 고려하지 않았다. 각 부하에 따라 계산된 상당 비열비를 연소 과정중의 온도 변화뿐만 아니라 조성의 변화를 고려할 수 있도록, 식(5)와 같이 실린더 최대 온도를 기준으로 두 개로 구분하여 구한 상당 비열비 함수 f_1, f_2 또한 Fig. 7에 나타나 있다.

4.2 열발생을 계산 비교 결과

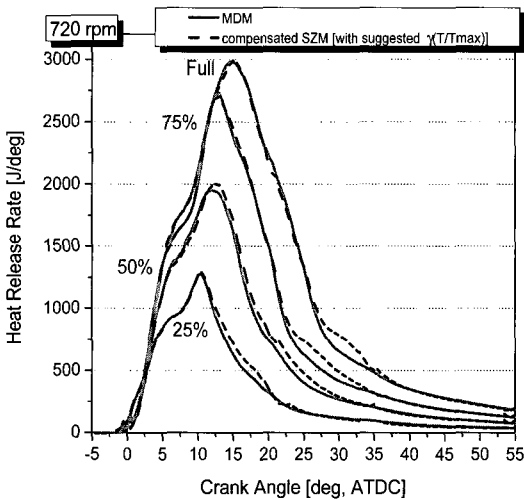


Fig. 8 Comparison of heat release rate at each load

앞서 도출된 상당 비열비 함수와 연소실 압력 데이터를 이용하여 단일 영역 모델을 통한 열발생을 계산하였으며, 이를 3차원 연소 해석에 의한 열발생을 계산 결과와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 운전 조건의 변화에 따른 영향을 파악하기 위하여 25%, 50%, 75% 및 100%의 엔진 부하에 대해 각각 계산되었으며 그림에 나타나듯이 전체 부하에 대해 실린더 내의 온도가 최대가 되는 점 근처의 일부만을 제외한 모든 영역에서 3%이내의 오차를 보이며 잘 일치하고 있다. 따라서 실린더 상태를 나타내는 많은 인자들은 부하 등의 운전조건에 따라 변화하지만 비열비는 온도만의

함수로 취급하여도 큰 오차가 없음을 알 수 있다. 또한 비열비를 실린더 최대 온도에 따라 두개의 온도의 함수로 적용한 결과, 기존의 계산 방법에 비해 연소 후기의 열발생을 또한 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4.3 다른 실험 결과와의 비교 검증

비열비가 보정된 단일 영역 열발생을 계산 결과의 검증을 위해서는 다른 엔진을 통한 실험 결과와 비교하였다. 대상 엔진은 상당 비열비 함수 도출에 사용된 엔진과는 다른 HiMSEN H25/33 엔진이다. 우선 측정된 연소실 압력의 데이터를 이용하여 본 연구에서 도출된 비열비 보정 단일 영역 열발생을 연소분석기를 통해 계산하였다. 그리고 동일 운전 조건에 대해 3차원 연소 해석을 수행하여 연소실 압력과 열발생을 계산하였다. 계산된 연소실 압력과 열발생은 비열비가 보정된 단일 영역 열발생과 측정된 연소실 압력과 함께 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 보여지는 것처럼 매우 유사한 연소실 압력 데이터에 대해 열발생율도 매우 유사한 경향을 가지며, 이에 따라 보정된 상당 비열비 함수를 이용한 단일 영역 가정의 열발생 계산 방법이 타당성이 있음을 검증할 수 있었다.

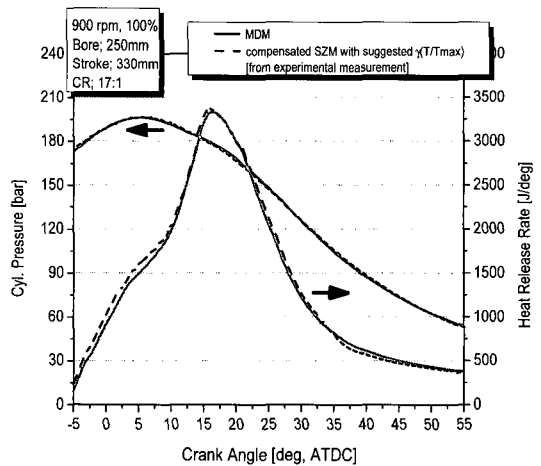


Fig. 9 Comparison results between MDM and compensated SZM calculated from experimental data

따라서 본 연구로부터 얻어진 결과는 컴퓨터를 이용한 수치적 해석 방법이 실험적 방법과 상호 보완적으로 엔진 형상의 개념 설계 단계에서 폭넓게 활용될 수 있도록 하는데 도움이 될 것이다.

5. 결 론

열역학 제 1법칙으로부터 유도되어 연소실 내를 균일한 조성과 온도를 가진 단일 영역으로 가정할 열발생을 계산 결과와 3차원 모델을 적용한 연소 해석의 열발생율 결과를 비교하여, 단순화된 단일 영역 모델의 한계점을 극복하기 위한 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 연소 과정에서 비열비가 1.34로 일정하다고 가정한 기존의 단일 영역 모델 열발생율 계산 결과는 동일 연소실 압력을 갖는 연소 해석의 열발생율에 비해 최대 값이 30% 정도 낮은 값을 보이며, 온도가 최대인 점을 지나면 오히려 단일 영역에 의해 도출된 값이 높게 나타난다.
2. 3차원 연소 해석 결과의 연소실 압력과 열발생율을 이용하여 단일 영역 모델의 열발생율의 오차를 보정하는 상당 비열비 함수를 도출할 수 있었다.
3. 본 연구에서 도출된 상당 비열비 함수를 적용한 결과 온도의 최대점을 제외한 모든 영역 및 모든 부하 조건에서 개선된 단일 영역 모델로 계산된 열발생율이 3차원 연소 해석 결과와 3% 이내의 오차를 보였다. 이에 따라 비열비 함수를 온도만의 함수로 적용하여도 충분하다.
4. 도출된 상당 비열비 함수와 단일 영역 모델을 이용하여 형상과 출력이 다른 엔진의 실험 결과에 적용하여 검증한 열발생율 계산 결과 또한 3차원 연소 해석 결과와 잘 일치하였다.
5. 본 연구에서 제안된 상당 비열비 함수가 공간적으로 온도와 조성이 균일하다고 가정하는 단일 영역 모델의 계산 방법의 오차를 보정할 수 있다.

참고문헌

- [1] Cheng, W., Gentry, R., "Effects on Charge Non-Uniformity on Diesel Heat Release Analysis", SAE Paper No. 861568, 1986.
- [2] Heywood, J. B., "Internal Combustion Engines Fundamentals", McGraw-Hill, New York, 1988
- [3] Brunt, M. F. J. and Platts, K. C. "Calculation of Heat Release in Direct Injection Diesel Engines", SAE Paper No. 1999-01-0187, 1999
- [4] Sastry, G.V.J. and Chandra, H., "A Three-zone Heat Release Model for DI Diesel Engines, SAE Paper No. 940671, 1994
- [5] Woschni, G. "A Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine", SAE Paper No. 670931, 1967

저 자 소 개



류승협 (柳昇協)

1972년 11월생. 1999년 경북대학교 기계공학과 졸업(학사). 2001년 경북대학교 기계공학과 졸업(석사). 2001년~현재 현대중공업 산업기술연구소 재직중



김기두 (金基斗)

1968년 1월생. 1990년 충북대학교 기계공학과 졸업(학사). 1992년 한양대학교 기계공학과 졸업(석사). 1992년~현재 현대중공업 산업기술연구소 재직 중.



윤옥현 (尹旭鉉)

1970년 8월생. 1997년 울산대학교 기계공학과 졸업(학사). 1999년 부산대학교 기계공학과 졸업(석사). 1999년~현재 현대중공업 산업기술연구소 재직 중.



하지수 (河芝洙)

1960년 6월생. 1983년 서울대학교 항공공학과 졸업(학사). 1985년 한국과학기술원 항공공학과 졸업(석사). 1991년 한국과학기술원 항공공학과 졸업(박사). 1991년~현재 현대중공업 산업기술연구소 재직 중.