

디젤 기관 단일 영역 모델 열발생을 계산의 오차 보상에 관한 연구

류승협† · 김기두* · 윤옥현** · 하지수***

(원고접수일 : 2006년 2월 7일, 심사완료일 : 2006년 7월 21일)

A Study on the Heat Release Analysis to Compensate the Error due to Assumption of Single Zone in Diesel Engine

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

Abstract : Accurate heat release analysis based on the cylinder pressure trace is important for evaluating combustion process of diesel engines. However, traditional single-zone heat release models (*SZM*) have significant limitations due mainly to their simplified assumptions of uniform charge and homogeneity while neglecting local temperature distribution inside cylinder during combustion process. In this study, a heat release analysis based on single-zone model has been evaluated by comparison with computational simulation result using Fire-code, which is based on multi-dimensional model (*MDM*). The limitations of the single-zone assumption have been estimated. To overcome these limitations, an improved model that includes the effects of spatial non-uniformity has been applied. From this improved single-zone heat release model (*Improved-SZM*), two effective values of specific heat ratios, denoted by γ_v and γ_H in this study, have been introduced. These values are formulated as the function of charge temperature changing rate and overall equivalence ratio. Also, it is applied that each equation of γ_v and γ_H has respectively different slopes according to several meaningful periods during combustion progress. The heat release analysis results based on improved single-zone model gives a good agreement with FIRE-code results over the whole range of operating conditions of target engine, Hyundai HiMSEN H21/32.

Key words : Heat release rate(열발생율), Single zone model(SZM, 단일 영역 모델), Multi-dimensional model(MDM, 다차원 모델), Effective specific heat ratio(상당 비열비), Spatial non-uniformity (공간적 불균일성)

† 책임저자(현대중공업 엔진연구소), E-mail:shryu2@hhi.co.kr , Tel: 052)230-3223

* 김기두, 현대중공업 엔진연구소

** 윤옥현, 현대중공업 엔진연구소

*** 하지수, 현대중공업 엔진연구소

기호설명

- f : Volume fraction of the gaseous species, -
- Δh : Net enthalpy change per unit volume and unit time, J/m^3s
- M : Average molar concentration, mole/ m^3
- $\Delta \dot{M}$: Net change of molar concentration per unit volume and unit time, mole/ m^3s
- p : Cylinder pressure, bar
- Q_{hr} : Gross heat release, J
- Q_{net} : Net heat release, J
- Q_w : Heat transfer from charge to cylinder wall, J
- \bar{T} : Mean charge temperature, K
- δT : Change rate of mean charge temperature, -
- V : Cylinder volume, m^3
- dV : Volume element containing a reacting mixture, m^3
- ϕ : Overall equivalence ratio, -
- γ : specific heat ratio of a volume element, -
- $\bar{\gamma}$: mean effective specific heat ratio, -
- γ_H : effective value of specific heat ratio, -
- γ_V : effective value of specific heat ratio, -

1. 서 론

실린더 내 압력의 변화는 연소에 의해 발생되는 연료의 에너지 발생량과 직접적으로 관계하기 때문에, 시간에 따른 압력 변화로부터 열발생량을 추정하는 방법은 내연기관의 연소 진행을 정량화하기 위한 매우 유용한 방법으로 이용되어 왔다.

열역학 제 1법칙에 기본을 둔 기존의 열발생을 계산 방법은 실린더 내를 균일한 조성과 온도를 가진 단일 영역(single zone model, 이후 *SZM*)으로 가정하고 있다(때로는 two zone model을 적용하기도 한다. Kammimoto의⁽¹⁾). 하지만, 디젤 기

관에서의 연소는 분사 기간, 분무 형상, 증발, 공기 유동, 연소실 형태 등의 다양한 인자에 의해 영향을 받아 복잡한 화염 구조를 가지며, 같은 시간 내에서도 공간적으로 불균일(non-uniform)한 조성 분포와 온도 분포를 가진다. 따라서 단일 영역, 균일한 조성이라는 단순화된 가정에 의한 기존의 열발생량 예측은 심각한 오차를 내포하고 있다.

최근에는 이러한 공간적인 조건의 평가를 위해 질량, 운동량, 에너지 및 화학종 보존 방정식, 분무 모델, 난류 효과 등의 복잡한 수치 모델을 바탕으로 컴퓨터를 통한 계산에 의하여 연소 과정의 압력 변화와 열발생을 등을 예측하기 위해 다차원 모델(Multi-dimensional model, 이후 *MDM*)이 많이 이용되는데, 이러한 연소 해석 결과는 가정상의 차이로 인해 단일 영역 모델을 적용하는 실험 결과와 일치하지 않게 된다. Cheng과 Gentry⁽²⁾는 단일 영역 모델을 적용한 순 열발생량(cumulative net heat release)의 계산 결과가 KIVA 코드를 적용한 다차원 모델에 의한 결과에 비해 17% 정도 낮은 값을 보이며, 이 차이는 때로 열손실로 잘못 적용되고 있음을 지적한 바 있다.

본 연구에서는 공간적 불균일성에 의한 효과를 평가하여 쉽고 적합한 방법으로 단일 영역 모델 열발생을 계산에서의 오차를 보상하는 방법을 제안한다. 이를 위해 다차원 모델에 기반을 둔 전산에 의한 연소 해석을 통하여 실린더 압력과 열발생율을 획득하였다. 전산 해석으로부터 얻어진 실린더 압력은 실제 엔진 테스트와 비교하여 신뢰성을 검증한 후 단일 영역 모델의 열발생을 계산에 적용하여 이를 다차원 모델의 열발생을 해석 결과와 상호 비교하였다. 두 개의 서로 다른 모델 간의 결과 차이의 보상을 위해서는 공간적 불균일성의 영향이 고려된 개선된 단일 영역 모델(*improved-SZM*)을 이용하였다.

개선된 단일 영역 모델에서는 공간적 불균일성의 영향을 보상하기 위한 두 개의 상당 비열비 γ_V 와 γ_H 가 제안된다. 여기서 γ_V 는 주어진 시간에서의 연소실내 연료 조성의 공간적 불균일성에 의한 비열비 값을 보상하며, γ_H 는 분무 혼합 연소 특성에 따른 국지적인 엔탈피 전달(net enthalpy change)

에 기인하는 오차를 보상한다. 두 개의 상당 비열비는 각각 실린더 내 평균 온도의 변화율과 전체 당량비에 관계하는 수학적 함수로 정의되며, 연소가 진행되는 동안 분사 시작, 연소실 최대 평균 온도, 분사 종료와 같은 중요한 시기에 대해 각기 다른 함수로 근사화하여 적용하였다. 본 상당 비열비 함수들을 적용한 개선된 단일 영역 모델 열발생을 계산 결과는 엔진 부하의 변화에 따라 평가하여 타당성을 검증하였다.

2. 다차원 모델 연소해석

다차원 모델(MDM)이 적용된 실린더 압력 변화와 열발생을 얻기 위해 본 연구에서는 상용 코드인 AVL사의 FIRE v8.3을 이용하여 디젤 기관의 분무 연소 현상을 시뮬레이션 하였다. 대상 엔진은 박용 중속 디젤 기관인 Hyundai HiMSEN H21/32이며, 사양과 운전 조건은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Engine specifications and operating conditions for simulation

Engine type	direct-injected, non-swirled, turbocharged diesel engine
Bore x Stroke	210mm x 320mm
Rated power	200kW/cyl.
Comp. Ratio	17 : 1
Speed	720rpm
Equivalence Ratio	0.406, 0.476, 0.50, 0.519 at each 25, 50, 75, 100% load

연소 해석을 통해 예측된 결과는 실제 엔진 테스트로부터 측정된 실린더 압력 변화와 비교하여 Fig. 1과 같이 검증하였으며, 결과적으로 각 운전 부하에 대해 압축 압력, 점화 지연, 압력 상승률, 압력 최대치와 시기, 압력 감소율 등 전반에 걸쳐 연소 해석이 실제 현상을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

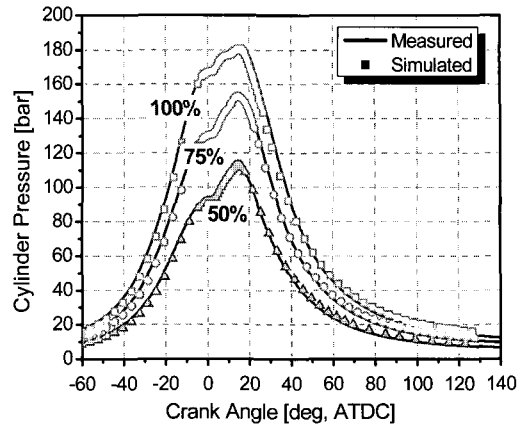


Fig. 1 Predicted and measured cylinder pressure at each 50, 75, and 100% load

3. 단일 영역 모델

3.1 기존 모델의 평가

실린더 체적 내에서 균일한 조성을 가진 단일 혼합물이 연소에 참여한다고 가정하고, 또한 연소 과정 동안 이상 기체 거동 및 분자량이 일정하다고 가정하면 열역학 제 1법칙에 의해 열발생율은 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{hr} &= \dot{Q}_{net} + \dot{Q}_w \quad (1) \\ &= \frac{\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}-1} p\dot{V} + \frac{1}{\bar{\gamma}-1} V\dot{p} + \dot{Q}_w \end{aligned}$$

기존 단일 영역 모델 열발생을 계산 결과는 (1)에서 보여 지듯이 상당 비열비 $\bar{\gamma}$ 값의 선정에 크게 관계한다. 일반적으로 연소 과정동안 일정한 값으로 정의하거나 $\bar{\gamma} = a + b\bar{T}$ (Gatwoski와⁽³⁾), $\bar{\gamma} = a + b\bar{T} + c\bar{T}^2$ (Brunt와⁽⁴⁾)와 같이 연소실 평균 온도에 관한 함수로 적용되고 있다.

하지만 가정의 단순화에 기인하여 기존 단일 영역 모델 계산 결과는 불균일성이 고려된 다차원 모델의 결과와 상당한 차이를 보인다. HiMSEN H21/32 엔진의 720rpm, 100% 부하 운전 시, Fig. 2와 같이 단일 영역 모델에 의한 열발생을 최대값은 상당 비열비가 일정하게 1.32로 적용된 경우와 Brunt가 제안한 평균 온도의 함수로 정의된

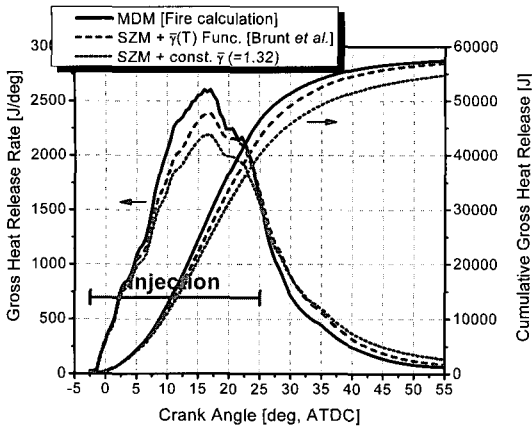


Fig. 2 Comparison of calculation results on each heat release model(at 100% load)

경우, 전산 해석 결과에 대해 각각 16.2%와 8.9% 낮은 값을 보인다. 하지만 반대로 연료 분사가 끝나는 시점인 ATDC 25도 이후에는 다차원 모델의 해석 결과에 비해 큰 값으로 계산된다. 이것은 단순화된 기존 단일 영역 모델 열발생을 계산 방법이 실제 디젤 연소에서의 공간적 불균일성을 포함하지 못해 나타나는 결과이며, 특히 조성의 변화가 상대적으로 큰 연료 분사 기간 동안 두드러지게 나타난다. 이러한 공간적 불균일성에 의한 오차는 자동차용 엔진에 비해 상대적으로 연소실의 크기가 크고 스월 공기 유동이 크지 않은 박용 기관의 경우 더욱 심각하므로 반드시 고려되어야 한다.

3.2 공간적 불균일성 보상 모델

Cheng과 Gentry^[2]는 공간적 불균일성을 보상하기 위한 모델로 (2)와 같이 제안한 바 있다. 본 식은 기존의 단일 영역 모델과 유사한 형태를 가지고 있으며, 질량 보존과 에너지 보존 방정식으로부터 유도된다.

$$\dot{Q}_{net} = \frac{\gamma_H}{\gamma_H - 1} p(\dot{V} - \int \frac{\Delta M}{M} dV) + \frac{\gamma_H}{\gamma_V(\gamma_H - 1)} V \dot{p} \quad (2)$$

본 식을 (1)과 비교하면 상당 비열비 값으로 γ_V 와 γ_H 두 개를 가지고 있으며 이의 정의는 각각 (3), (4)와 같다. 여기에서, γ_V 는 공간에 따라 다른

값을 가지는 비열비 값의 공간적 불균일성을 보상하며, γ_H 는 기체 간의 열유동(heat flux), 연료 액적으로서의 열전달, 연소 과정동안 발생하는 화학반응과 확산 등의 국부적인 엔탈피 교환에 비중을 두고 있다. 이때 순 열발생을 \dot{Q}_{net} 은 주어진 시간에서 단위 체적의 순 엔탈피 변화율을 전체 체적에 대해 적분한 값으로 (5)와 같이 다시 정의될 수 있다.

$$\frac{1}{\gamma_V} = \left(\int \frac{1}{\gamma} dV \right) / V \quad (3)$$

$$\frac{1}{\gamma_H} = \left(\int \frac{1}{\gamma} \frac{(-\Delta h)}{f} dV \right) / \left(\int \frac{(-\Delta h)}{f} dV \right) \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{net} = \int \frac{1}{f} (-\Delta h) dV \quad (5)$$

(2)에서 나타나는 분자량 변화에 관한 항은 화학반응에 의한 변화, 상이한 가스상 간의 확산, 증발, 체적 분율의 변화 등에 의한 것으로 앞서 언급한 (1)에서는 나타나지 않는 항이다. 하지만 Cheng과 Gentry는 이 항이 다른 항에 대해 2% 이내의 오차 범위에 있을 만큼 크게 작용하지 않는다고 밝힌 바 있고, 모델 적용 시 계산의 단순화를 위해 본 연구에서는 고려하지 않았다. 따라서 (2)에서 만약 연소실내 가스의 조성이 공간적으로 균일하다고 가정한다면, 이 두 상당 비열비는 같은 값을 가지게 되며 결과적으로 (2)는 (1)과 같이 간략화 할 수 있다.

4. 상당 비열비 함수

4.1 다차원 모델을 통한 접근

대상 엔진의 공간적 불균일성을 보상하기 위해 우선 다차원 모델을 기반으로 하는 FIRE의 결과로부터 연소 진행에 따른 γ_V 와 γ_H 의 변화를 얻어내었다. Fig. 3은 720rpm, 100% 부하에서 도출된 결과이다.

열역학적 상태량으로서 비열비 γ 는 온도, 당량비, 그리고 때때로 고온 영역에서는 해리에 의해 압력에도 영향을 받는 함수지만, 이 중 온도의 영향이 특히 지배적이다. 따라서 γ_V 는 Fig. 3과 같이 연소실 온도 상승에 따라 값이 낮아지다가 실린더 평균

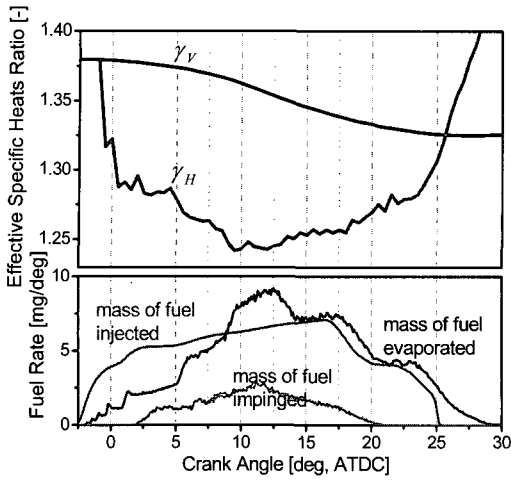


Fig. 3 Variation of effective specific heat ratios related with injection characteristics(at 100% load)

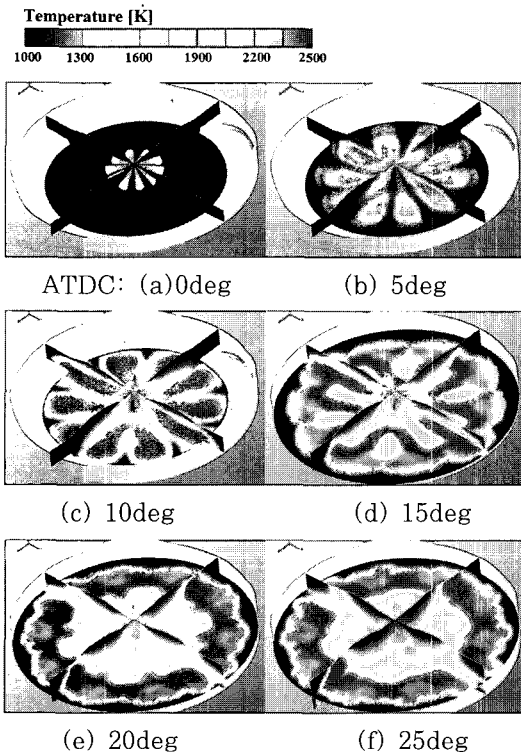


Fig. 4 Section view of local temperature distribution in cylinder simulated by FIRE-code

온도 최대점인 ATDC 27도 부근에서 가장 낮은 값을 가지게 되며, 이후 온도 감소에 따라 다시 상승

하는 패턴을 갖는다. 여기서는 공간적 불균일성이 고려되므로 일반적으로 해리에 의한 영향과 기연 가스의 밀도가 미연 가스의 밀도보다 낮다는 차이 등으로 단일 조성으로 고려된 평균 온도의 비열비에 비해 낮은 값을 갖는다.

국지적인 영역에서의 엔탈피 전달을 포함하는 상당 비열비 γ_H 의 경우, 연소 진행에 따라 더 복잡한 불연속점을 가진다. 이는 기연 가스와 미연 가스간의 엔탈피 전달이 가장 활발한 연료 분사 기간과 밀접하게 관계한다. 이것은 또한 Fig. 4의 고정된 시간에서의 연소실내 온도 구배로부터 쉽게 알 수 있다.

일단 연소가 시작(여기서는 ATDC -2.5도)되면 γ_H 는 화염이 존재하는 영역과 미연 가스의 국지적인 엔탈피 교환이 활성화되어 급격하게 감소한다. 이때는 Fig. 4(a)에서처럼 분무 화염이 존재하는 영역과 그렇지 않은 영역간의 온도차가 극심한 시기이다. 이후 활성화된 엔탈피 교환은 분사된 연료 팀이 연소실 벽에 닿을 때(여기서는 ATDC 11.2도)까지 지속되며, 벽면 충돌 후 연료가 연소실 전체로 확산되면서 Fig. 4(d)와 같이 연소실 내의 온도 구배가 작아져 γ_H 는 어느 정도 일정한 값으로 유지된다. 하지만 연소실 팽창으로 인한 엔탈피 전달이 계속적으로 이루어지므로 γ_H 는 조금씩 상승한다. 연료 분사가 끝난 후(ATDC 25도) 연료로부터 공급되는 에너지가 차단되면 γ_H 값은 다시 급격하게 상승되며, 이후 지속적인 연소실의 팽창에 의한 공간으로의 엔탈피 전달만이 계속된다.

4.2 상당 비열비 함수의 도출

앞선 절에서 보인 것처럼 상당 비열비 함수는 연소가 진행되는 동안 특정 시기에 대해 기울기가 변하게 된다. 대표적으로 분사 시작(start of injection, SOI), 벽면 충돌(wall impingement), 연소실 최대 온도(maximum cylinder temperature, Max.T), 분사 종료(end of injection, EOI), 배기 밸브 열림(exhaust valve open, EVO)으로 구분할 수 있다.

Fig. 5는 연소가 진행되는 동안 실린더 평균 온도 변화에 따른 γ 값의 변화를 각각 50% 부하와

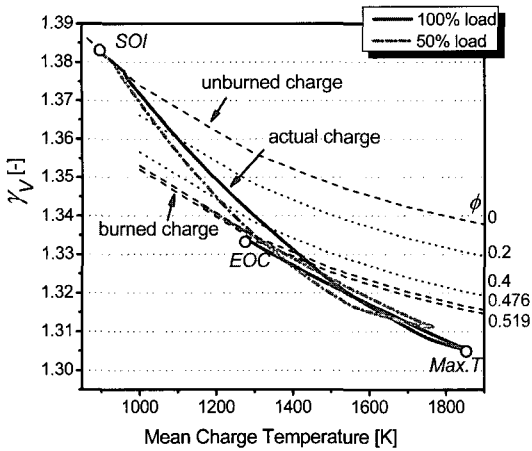


Fig. 5 Traces of γ_v as a function of mean temperature change and equivalence ratio

100% 부하에 대해 나타낸 것이다. γ_v 는 연소가 시작되면 평균 온도 상승과 연료 분사에 의한 당량비 증가로 각 부하에 대해 다른 기울기를 가지면서 감소하다가, 대부분의 연료 액적이 연소를 마치는 연소실 최대 온도를 지난 후에는 조성(당량비)의 변화가 거의 없으므로 주로 온도 변화에 대해서만 영향을 받는다. 따라서 연소실 최대 온도를 기준으로 두 시기를 분리하여, (8)과 같이 정의된 평균 온도의 변화율과 전체 당량비의 함수로 각각의 시기에 대해 (6), (7)과 같이 함수화 하였다. 이때 연소실 평균 온도는 이상 기체 방정식을 이용하여 압력 데이터로부터 계산 가능하다.

- 1st period : SOI ~ Max.T (6)

$$\gamma_v = f(\delta T_{[SOI \sim Max.T]}, \phi) = 1.381 - 0.082 \cdot \delta T + (0.081 + 0.11 \cdot \phi) \cdot \delta T^2$$

- 2nd period : Max.T ~ EVO (7)

$$\gamma_v = f(\delta T_{[Max.T \sim EVO]}, \phi) = (1.415 - 0.122 \cdot \phi) - 0.0282 \cdot \delta T$$

각 시기의 시작점과 끝점 1,2에 대해 실린더 평균 온도 변화율은 다음과 같이 정의하였다.

$$\delta T_{[1 \sim 2]} = \frac{\bar{T}_2 - \bar{T}_1}{T_2 - T_1} \quad (8)$$

γ_H 곡선의 변화는 앞선 Fig. 3과 같이 연료 분사 시간과 관계하여 분사 시작(SOI), 벽면 충돌(jet impingement), 분사 종료(EOI), 최대 연소실 온도(Max.T), 배기 밸브 열림(EVO)으로 구분할 수 있다. 하지만 벽면 충돌 시기는 통상적으로 실제 엔진 테스트에서는 정확한 시기의 예측이 어려우므로 단일 영역 모델에의 적용은 곤란하다. 따라서 본 논문에서는 첫 번째 영역을 분사 기간 전체에 대해 정하고, 이 기간을 3차 방정식으로 근사하였다. Fig. 6는 각각 γ_v 와 γ_H 의 첫 번째 영역의 값을 FIRE 해석 결과로부터 정의된 평균 온도 변화율에 대해 플롯한 결과이다.

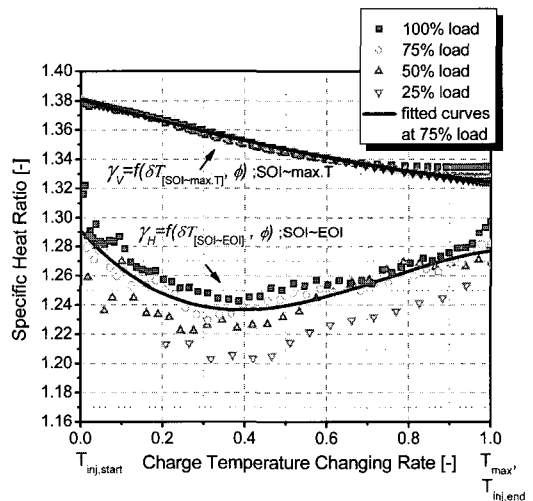


Fig. 6 Traces of effective specific heat ratios and fitted curves at 75% load on each 1st region

Fig. 6에서 보여지는 것처럼 각 부하에서의 벽면 충돌 시기에 해당하는 γ_H 곡선의 변곡점들은 전체 분사 기간에 대한 실린더 평균 온도 변화율(δT)이 약 0.35~0.40의 값을 가질 때로 대체로 일치하므로, 운전 조건에 대해 같은 기울기를 갖는 3차 방정식으로 근사하여도 타당하다.

여기에서 γ_H 는 운전 부하의 변화, 다시 말해서 전체 당량비의 변화에 의한 차이가 γ_v 에 비해 상당히 큼을 볼 수 있다. 이것은 단일 영역 모델에 의한 오차가 실린더 내 국지적인 지역 간의 엔탈피 전달량에 관계하는 γ_H 의 적합한 예측에 보다 크게 의존하고 있음을 말해 준다. 하지만 이것은 디젤 기관의

특징인 복잡한 화염 구조에 따라 달라질 수 있으므로, 대상 엔진과 연소실 형태, 구조나 분사 시스템 등에서 다른 특징을 갖는 엔진에서의 추가적인 시스템적 평가가 필요할 것으로 보인다. 본 연구에서는 HiMSEN H21/32 엔진에 대한 γ_H 값을 세 경우의 구분되는 시기로 크게 나누어 아래 (9), (10), (11)과 같이 근사하였다.

- 1st period : SOI ~ EOI (9)

$$\gamma_H = f(\delta T_{[SOI \sim EOI]}, \phi) = (1.082 + 0.426 \cdot \phi) - 0.082 \cdot \delta T + 0.5508 \cdot \delta T^2 - 0.2487 \cdot \delta T^3$$

- 2nd period : EOI ~ Max.T (10)

$$\gamma_H = f(\delta T_{[EOI \sim Max.T]}, \phi) = 1.32 - 0.1 \cdot \delta T + 0.23 \cdot \delta T^2$$

- 3rd period : Max.T ~ EVO (10)

$$\gamma_H = f(\delta T_{[Max.T \sim EVO]}, \phi) = 27.295 - 51.553 \cdot \delta T + 25.775 \cdot \delta T^2$$

4.3 개선된 단일 영역 모델 적용 결과

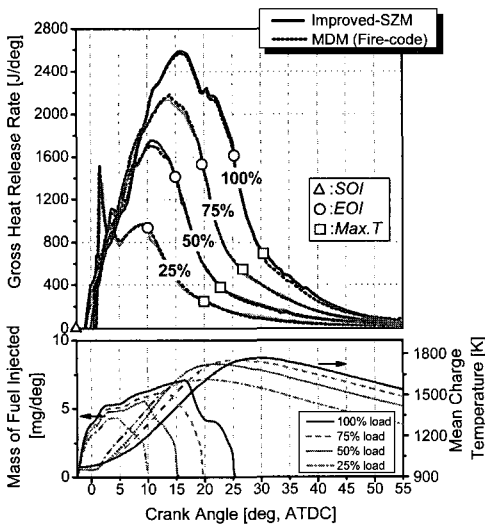


Fig. 7 Comparison of gross heat release rate between improved single zone model and multi-dimensional model at various engine loads

Fig. 7은 본 연구를 통해 개선된 단일 영역 모델과 두 개의 비열비 함수를 적용한 열발생을 계산 결

과를 각 부하별로 FIRE 코드로부터 시뮬레이션한 결과와 비교한 것이다. 개선된 단일 영역 모델은 대상 엔진의 전 부하에 대하여 2.5% 이내의 차이를 보이면서 잘 일치하고 있다. 결론적으로 본 모델은 기존의 공간적 불균일성이 무시된 단순화한 단일 영역 모델에서 나타나는 오차를 보상하는 합리적인 방법일 뿐만 아니라 엔진의 실제 테스트 시에도 어렵지 않게 적용할 수 있는 대안이 될 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 공간적 불균일성에 대한 영향을 고려한 개선된 단일 영역 모델을 제안하고, HiMSEN H21/32 엔진을 대상으로 적용하여 다차원 모델을 기본으로 하는 FIRE 코드의 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

1. 가정적으로 공간적 불균일성을 무시한 기존 단일 영역 모델 열발생을 계산은 상당 비열비 $\bar{\gamma}$ 값의 선정에 크게 의존하며, 불균일성이 고려된 다차원 모델 전산 해석 결과와 차이를 보인다.
2. 지역 간의 물질 전달과 엔탈피 전달의 보상을 고려한 개선 모델과 두 개의 상당 비열비, γ_V 와 γ_H 에 대한 근사 함수를 연소 진행 동안 중요한 시기에 대해 구분 적용한 결과, 다차원 모델을 기본으로 한 전산 해석 결과와 비교하여 전 운전 영역에서 2.5% 이내의 오차만을 보였다.
3. 본 연구 결과는 실제 엔진 테스트에서 적용되고 있는 단일 영역 모델과 전산 해석에 적용되는 다차원 모델의 가정의 차이에서 나타나는 공간적 불균일성에 의한 오차를 보상하는 매개 역할을 하여 엔진 개발이나 성능 평가 시 효과적으로 적용 가능하다.

참고문헌

[1] Kammimoto, T., Minagawa, T. and Kobori, S., "A two-zone model analysis of heat release rate in diesel engines",

SAE paper 972759, 1997

- [2] Cheng,W. and Gentry,R., "Effects on Charge non-uniformity on diesel heat release analysis", SAE paper 861568, 1986
- [3] Gatwoski,J.A., Balles,E.N., Chun,K.M., Nelson, F.E., Ekchian,J.A. and Heywood J.B., "Heat release analysis of engine pressure data". SAE paper 841349, 1984
- [4] Brunt,M.F.J.,Rai,H. and Ematage, A.L., 1999, "Calculation of heat release in direct injection diesel engines, SAE 1999-01-0187, 1999

저 자 소 개



류승협 (柳昇協)

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



김기두 (金基斗)

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



윤옥현 (尹旭鉉)

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