

# 개량된 2차원 화염편 연소 모델을 이용한 고속 직분식 엔진에서의 다단 분사시 연소 현상 해석

임재만<sup>†</sup> · 민경덕<sup>\*</sup>

## Simulation of Combustion Phenomena at Multiple Injection in HSDI Diesel Engine Using Modified Two Dimensional Flamelet Combustion Model

Jaeman Lim, Kyoungdoug Min

**Key Words :** Two dimensional flamelet model(2차원 화염편 모델), Multiple injection(다단 분사),  
Three dimensional simulation (3차원 상사)

### Abstract

Ignition delay of second injection of HSDI diesel engine was usually much shorter than that of first injection. It is due to the interaction between radicals generated during the combustion process, and mixed gas of second injection. In this paper, To analyze combustion phenomena of multiple injection mode in HSDI diesel engine effectively, two-dimensional flamelet combustion model was modified. To reduce calculation time, two-dimensional flamelet equations were only applied near stoichiometric region. If this region was ignited, species and temperature of other region were changed to the steady-state solutions of one dimensional flamelet equations. By this method calculation time for solving flamelet equations was reduced to 20 percents, though the results were almost same. Modified flamelet combustion model was coupled to commercial CFD code interactively using user subroutine.

### 기호설명

BTDC : 상사점 전  
ATDC : 상사점 후  
Z : 혼합분율  
T : 온도  
 $Y_i$  : 화학종 농도  
 $\chi$  : 스칼라 소산율

### 1. 서론

고속 직분식 디젤 엔진에 전자식 분사장치가 도입됨에 따라 운전 속도와 부하에 따른 적절한 분사 시기의 조절이 가능하다. 이에 따라 성능 개선

과 배출물 저감을 동시에 가능케 하기 위해 한 사이클 동안 연료를 나누어 분사하는 다단분사 방식에 대한 많은 연구가 진행 중이다. 그러나 이러한 다단 분사 방식은 연소 상태를 결정하는 변수가 매우 많기 때문에 단순한 반복 실험 수행으로써 최적의 운전조건을 찾아내기 어렵다. 따라서 다단 분사 연소 현상을 해석할 수 있는 연소 모델을 개발하여, 화염의 구조 및 특성을 규명하고 효율 최적화 및 배출물 저감을 가능케 하는 조건을 찾는 연구가 널리 진행되고 있다.

Hasse 등<sup>1)</sup>은 기존의 화염편 방정식을 확장한 2차원 화염편 방정식을 유도하고, 이를 이용해 다단 분사시 연소현상을 해석한 바 있다. 그러나 이러한 2차원 화염편 연소 모델은 기존 화염편 모델과 달리 많은 계산 시간을 필요로 한다. 이에 본 연구에서 Hasse 등이 제안한 2차원 화염편 방정식을 보다 빠른 계산이 가능하도록 개선하고, 개선된 모델을 이용하여 정적 연소실 및 고속 직분식 디젤 엔진에서 다단 분사시의 연소 현상을

<sup>†</sup> 서울대학교 기계항공공학부 대학원

<sup>\*</sup> 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : kadmin@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1661 FAX : (02)874-2001

해석하였다.

## 2. 연소 모델

### 2.1 이차원 화염편 모델

Peters 는 확산 화염의 당량 영역에서 혼합 분율의 구배가 매우 크다는 점을 이용하여 층류 확산 화염편 (laminar diffusion flamelet) 개념을 도입하였다<sup>2)</sup>. 당량비가 1 인 영역으로 이루어진 표면과 직교하는 방향에 대해 혼합 분율 좌표계를 도입하면 연소장에서의 화학종과 에너지 방정식은 다음과 같은 식으로 좌표변환 될 수 있다.

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} = \frac{\rho \chi}{2} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} + \dot{m}_i \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{\rho \chi}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{\rho \chi}{2} \frac{1}{c_p} \frac{\partial c_p}{\partial Z} \frac{\partial T}{\partial Z} - \frac{\rho \chi}{2} \frac{\partial T}{\partial Z} \sum_{k=1}^N \frac{c_{p,k}}{c_p} \frac{\partial Y_k}{\partial Z} - \frac{1}{c_p} \left( \sum_{k=1}^N h_k \dot{m}_k - \frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (2)$$

위 두 식을 화염편 방정식 (flamelet equation) 이라고 부른다. Hasse 와 Peters 는 이러한 화염편 방정식을 그림과 같은 두 개의 혼합분율이 있는 연소장에서도 적용 가능하도록 확장하였다<sup>1)</sup>. 두 개의 혼합 분율(mixture fraction) 공간이 있는 연소장을 가정하고, 각각의 혼합 분율 공간을  $Z_1, Z_2$  이라고 하자. 이 때 혼합 분율이 하나인 경우와 마찬가지로 다음과 같은 보존식이 성립된다.

$$\rho \frac{\partial Z_j}{\partial t} + \rho v_\alpha \frac{\partial Z_j}{\partial x_\alpha} = \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left( \rho D_z \frac{\partial Z_j}{\partial x_\alpha} \right), j=1,2 \quad (3)$$

$Y$  와  $Z$  에 대해 새로운 좌표계를 다음과 같이 도입하면

$$Z = Z_1 + Z_2, y = Z_2 / (Z_1 + Z_2) \quad (4)$$

화염편 방정식은 다음과 같이 확장할 수 있다.

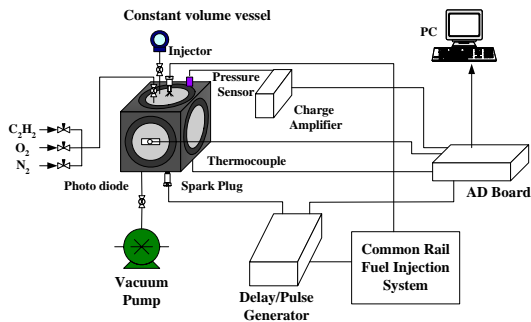
$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} - \frac{\rho \chi_1}{2} \left( \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} - 2 \frac{y}{Z} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z \partial y} \right. \\ \left. + 2 \frac{y}{Z^2} \frac{\partial Y_i}{\partial y} + \frac{y^2}{Z^2} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial y^2} \right) \\ - \frac{\rho \chi_2}{2} \left( \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} + 2 \frac{1-y}{Z} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z \partial y} \right. \\ \left. - 2 \frac{1-y}{Z^2} \frac{\partial Y_i}{\partial y} + \frac{(1-y)^2}{Z^2} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial y^2} \right) \\ - \dot{m}_i = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\rho \chi_1}{2} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} - 2 \frac{y}{Z} \frac{\partial^2 T}{\partial Z \partial y} \right. \\ \left. + 2 \frac{y}{Z^2} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{y^2}{Z^2} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \\ - \frac{\rho \chi_2}{2} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + 2 \frac{1-y}{Z} \frac{\partial^2 T}{\partial Z \partial y} \right. \\ \left. - 2 \frac{1-y}{Z^2} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{(1-y)^2}{Z^2} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \\ - \frac{\rho}{2c_p} \left( \frac{\partial T}{\partial Z} - \frac{y}{Z} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ \left( \sum_k c_{p,k} \frac{\chi_1}{2} \left( \frac{\partial Y_k}{\partial Z} - \frac{y}{Z} \frac{\partial Y_k}{\partial y} \right) \right. \\ \left. + \frac{\chi_1}{2} \left( \frac{\partial c_p}{\partial Z} - \frac{y}{Z} \frac{\partial c_p}{\partial y} \right) \right) \\ - \frac{\rho}{2c_p} \left( \frac{\partial T}{\partial Z} + \frac{1-y}{Z} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ \left( \sum_k c_{p,k} \frac{\chi_2}{2} \left( \frac{\partial Y_k}{\partial Z} + \frac{1-y}{Z} \frac{\partial Y_k}{\partial y} \right) \right. \\ \left. + \frac{\chi_2}{2} \left( \frac{\partial c_p}{\partial Z} + \frac{1-y}{Z} \frac{\partial c_p}{\partial y} \right) \right) \\ = \frac{1}{c_p} \left( \frac{\partial p}{\partial t} - \dot{q}_r - \sum_k h_k \dot{m}_i \right) \end{aligned} \quad (6)$$

### 2.2 이차원 화염편 모델의 간략화

이러한 2 차원 화염편 방정식을 계산하기 위해서는 기존의 화염편 방정식에 사용한 시간보다 몇 십배의 계산시간이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 상세 화학 반응 기구를 사용하면서도 연소 현상을 효율적으로 적용하기 위해서 2 차원 화염편 모델을 보다 효율적으로 적용하는 작업을 수행하였다. 지난 연구<sup>3)</sup>에서 식 (5), (6)에서  $y$  가 1 에 가까운 영역, 즉 다단 분사에서 후단 분사에 의해 형성되는 혼합기의 점화는 단발 분사와는 달리 화학 반응식의 자발화 현상에 의한 게 아니라 당량 영역에서의 화학종 및 에너지의 전파에 기인한다는 것을 밝힌 바 있다. 본 연구에서는 이러한 특성을 이용하여 당량 영역의 연소장은 식 (5), (6) 을 이용하여 해석하고, 나머지 영역에 대해서는 당량 영역이 연소가 된 이후에 1 차원 화염편 방정식의 정상해를 사용하는 방법을 사용하였다. 자세한 해석 방법은 다음과 같다.

- 1)  $0.0333 < Z < 0.08$  영역에 대해 식 (5), (6) 을 적용한다.
- 2)  $Z = 0.0333, Z = 0.08$  인 지점에 대해 식 (5), (6)



**Fig. 1** Schematic diagram of constant volume vessel experimental setup

에서  $Z$  에 대한 편미방 항들을 제외한 식을 사용한다. 이는 이 지점에서 편미방 항을 포함한 식과 제외한 식의 화학종 및 에너지의 전과 속도가 같기 때문이다.

- 나머지 영역에서는 식 (5), (6) 에서 화학종 생성항을 제외한 식을 사용한다. 만일  $Z=0.0333$  의 온도가 2,000 K 를 넘을 때  $Z<0.0333$  의 영역의 화학종과 온도는  $\chi = \chi_1 + \chi_2$  일 때, 1 차원 화염면 방정식의 정상해를 사용한다. 마찬가지로  $Z=0.08$  의 온도가 2,000 K 를 넘을 때  $Z>0.08$  인 영역에 대해 같은 방법을 적용한다.

이러한 방법을 사용하면 모든 영역에 대해 식 (5), (6) 을 적용하는 방법에 비해 화학종과 온도의 전과 속도를 빠른 계산 시간 내에 결정할 수 있다. 이러한 방법을 사용하면  $Z<0.0333$  과  $Z>0.08$  영역의 점화를 실제보다 빠르게 예측할 우려가 있다. 그러나 (5), (6) 식을 이용한 계산에서도 스칼라 소산율이 커서 당량 영역에서 생성된 화학종과 에너지가 농후하거나 희박한 영역으로 매우 빨리 전과되기 때문에 그 오차는 0.001 ms 정도로 작다.

### 3. 다단 분사의 연소 해석

#### 3.1 해석 모델

2 절에서 설명한 Flamelet 개념을 이용한 연소 모델을 사용하여 개발 대상 엔진의 성능 및 배출물 특성을 해석하였다.

삼차원 CFD 해석은 상용 코드인 STAR-CD 를 이용하여 수행하였고, 분무 및 연소 모델을 STAR-CD 의 사용자 서브루틴의 형태로 결합시켰다. 디젤 분무의 분열 및 증발 현상을 모사하기 위해 기존 연구에서 적용하였던 다양한 모델을 사용하였다<sup>3)</sup>.

#### 3.2 정적 연소실에서의 다단 분사 연소 해석

본 연구에서는 엔진에서의 다단 분사 연소 현상을 해석하기 앞서 고온 고압의 정적 연소실에 다단 분사와 같은 방식으로 연료를 분사하여 후단

**Table 1** Experimental Conditions

Fuel	n-heptane
Ambient Pressure	40 bar
Ambient Temperature	860 – 1000 K
Amount of Pilot Injection	1.5 mg
Amount of Main Injection	9 mg
Dwell time between Pilot and Main injections	2 ms

분사의 점화 지연 시간을 측정하고, 이를 동일한 조건에서 해석을 통해 예측된 결과와 비교하는 연구를 수행하였다.

#### 3.2.1 정적 연소실 실험 장치

실험 장치는 Fig. 1 과 같이 크게 고온 고압조건을 만들기 위한 정적 연소실 및 예연소 장치, 분무를 위한 인젝터와 연료 공급계인 연료 공급 장치, 연소실내 압력과 온도 및 자발광 신호 획득하기 위한 데이터 획득 장치로 구성된다.

디젤 연료가 자발화를 일으킬 수 있는 고온 고압의 상태를 만들기 위하여 본 실험에서는 정적 연소실에서 미리 아세틸렌과 산소, 질소를 주입한 뒤 점화플러그를 사용하여 연소시킴으로써 순간적으로 압력과 온도를 높이는 방식을 사용하였다. 정적 연소실 내의 예연소 시 압력을 측정하기 위해 압력센서를 부착하였고, 온도를 측정하기 위해 50  $\mu\text{m}$  의 접점크기를 갖는 R-type 열전대를 사용하였다. 연료를 분사하는 인젝터로는 전자식 커먼레일 인젝터를 사용하였다. 인젝터 시스템의 연료펌프를 전기 모터로 구동함으로써 연료를 최대 1350bar 로 공급이 가능하게 하였으며, 압력조절장치(PCV)를 조절하여 원하는 분사압력을 조정하였다.

실험은 예연소 시의 정적 연소실 내부의 압력과 온도가 원하는 순간이 되면 연료를 분사하여 자발화할 때 발생하는 빛을 측정함으로써 점화지연시간을 측정하게 된다. 디젤 연료 분사에 의한 자발화 시점을 결정하기 위하여 내부 압력 의 증가를 보고 자발화되는 순간을 판별하기에는 압력의 증가가 너무 미약하기 때문에 보다 정확한 자발화 시점을 측정하기 위해 포토 다이오드를 이용하였

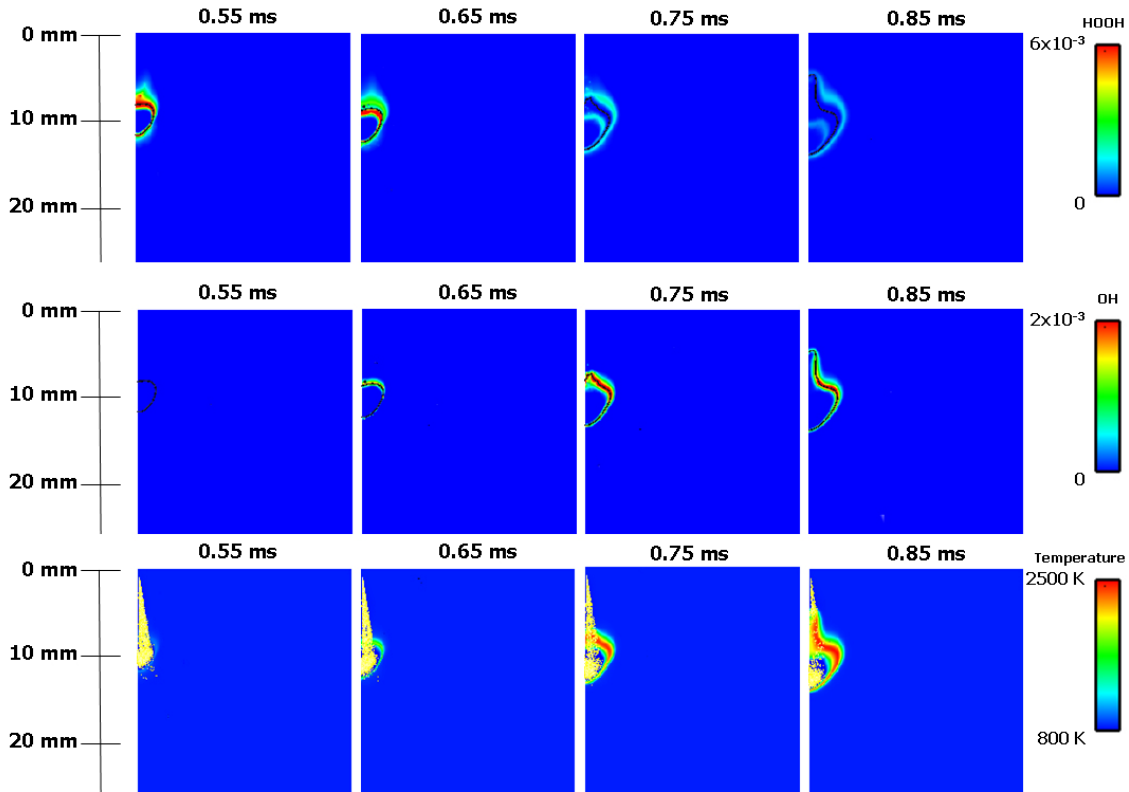


Fig. 2 Distribution of droplets, HOOH, OH radicals and temperature during pilot injection

다. 정적 연소실 내부의 온도, 압력 그리고 포토다이오드의 전압 신호는 PC의 DAQ 보드를 통해 100 kHz의 속도로 취득하였다. 실험에 사용한 연료와 분위기 압력, 온도 및 분사 조건을 Table 1에 표시하였다.

### 3.2.2 계산 조건

계산시간을 줄이기 위해 정적 연소실은 같은 크기의 2차원 계산 격자를 사용하여 모사하였다. 계산 격자는 9,200개로 구성하였다. 계산에 사용한 분사율은 실험에서 측정된 값을 사용하였다.

본 연구에서 제안한 해석 모델의 타당성을 검증하기 위해 다단 분사 중 후단 분사는 다음과 같은 본 연구에서 제시한 개선된 2차원 화염편 모델을 사용하여 후단 분사를 해석하였다.

### 3.2.3 전단 분사의 연소 현상

Fig. 2는 초기 온도가 860 K일 때 시간에 따른 액적, HOOH, OH 라디칼, 온도 분포의 변화를 나타내고 있다. HOOH 라디칼과 OH 라디칼의 분포도에 그려진 검은 선은 당량비가 1인 영역을 나타낸다. 분사 후 0.55 ms 시점에서는 저온 반응에 의해 HOOH 라디칼이 생성되며 냉염(Cool flame)이 발생하면서 온도가 서서히 상승한다. 이후 0.65 ms부터 HOOH 라디칼의 반응에 의해 당량

비가 1인 영역에 OH 라디칼이 생성되면서 온도가 급격하게 상승하게 된다. 이러한 고온 영역은 0.85 ms 이후부터는 주위의 농후하고 희박한 영역으로 확대되어 가며, 이러한 과정 중에 HOOH 라디칼들은 해리된다. 전단 분사 시 분사되는 연료의 양이 작기 때문에 화염은 인젝터에서 불과 10mm 떨어진 지점에서 발생하였다. 이러한 과정으로 보아 전단 분사에서는 연료의 분해 및 냉염 발생에 소모되는 시간이 점화 지연 시간의 대부분을 차지하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 사용

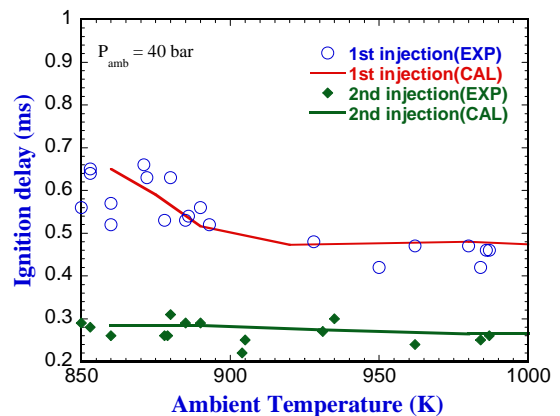


Fig. 3 Comparison of ignition delay between calculation results and experimental data for first and second injection

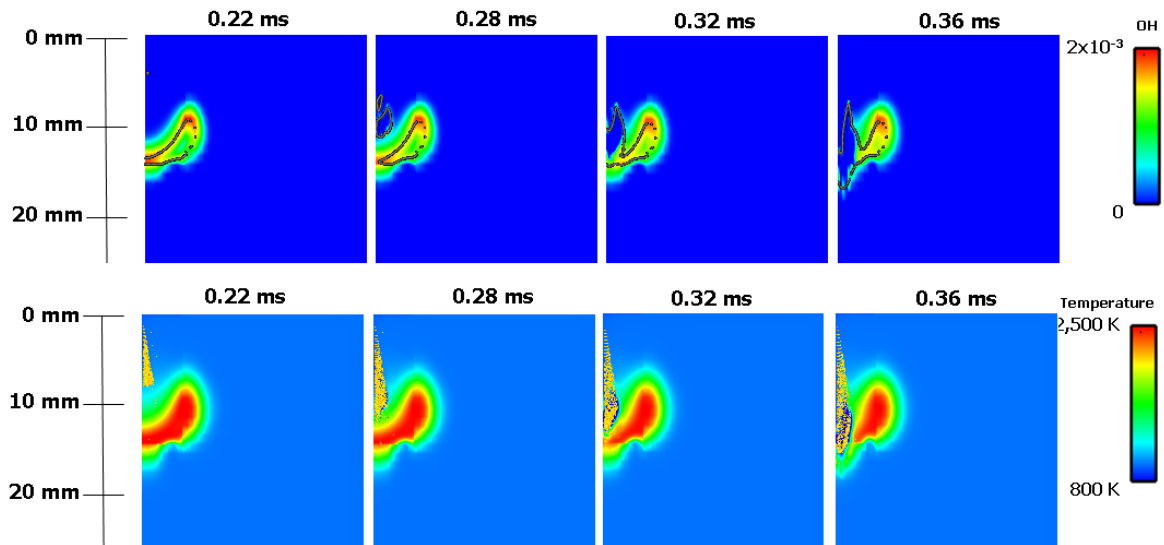


Fig. 4 Distribution of droplets, OH radicals and temperature during main injection

하는 화염편 모델은 화학 반응 기구를 사용하기 때문에 이러한 분무의 점화 과정을 잘 묘사할 수 있었다.

다양한 분위기 온도에 대한 전단 분사의 점화 지연 시간을 Fig. 3의 위쪽의 원들과 선으로 표현하였다. 점화 지연 시간은 측정된 점화지연시간에 인젝터 구동에 걸리는 시간은 제외한 것이다. 원들은 실험 결과를, 선은 계산 결과를 표현한 것이며 다양한 분위기 온도에 대해 실험값과 계산값이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

### 3.2.4 후단 분사의 연소 현상

후단 분사의 점화는 앞의 경우와 달리, 전단 분사에서 발생한 라디칼과 에너지가 후단 분사에 의해 생성된 혼합기에 전파되면서 발생한다. 따라서 점화 지연 시간은 연료의 화학 반응에 의해서가 아니라 연료의 미립화 및 증발에 의해 결정된다. 분위기 온도가 1,000 K인 경우 후단 분사시 OH 라디칼, 액적 및 온도의 분포를 Fig. 4에 표시하였다. OH 라디칼의 분포도에 표시한 검은 선 부분은 당량비가 1인 영역을 나타낸다. 후단 분사에 의한 혼합기가 전단 분사로 생성된 화염 영역에 접촉하자 당량비 영역에 있던 OH 라디칼이 후단 분사의 혼합기 쪽으로 옮겨 붙는 현상을 관찰할 수 있다. 이렇게 OH 라디칼이 옮겨 붙기 시작하는 시기는 분사 후 0.37 ms로, 전단 분사시의 점화 지연 시간보다 짧다. 이러한 점화 지연 시간의 감소로 인해 연료가 갑작스럽게 증발하여 농후한 혼합기가 형성되며, 이로 인해 Soot 배출물의 산화율이 저감될 것으로 예상된다.

Fig. 3의 아래 부분의 마름모들과 선은 후단 분사시 다양한 분위기 온도에 대하여 실험에 의해

측정되고 계산에 의해 예측된 점화 지연시간을 표시한 것이다. 전단 분사의 경우와 마찬가지로 마름모들은 실험치를 의미하고 선은 해석 결과를 의미한다. 후단 분사의 점화지연시간은 분위기 온도의 증가에 따라 그 변화량이 크지 않다. 또한 전단 분사의 점화지연시간과의 차가 분위기 온도가 감소함에 따라 더욱 커지는 것으로 관찰된다. 이는 후단 분사의 점화가 앞서 해석한대로 연료의 산소와의 화학 반응보다 라디칼과의 혼합에 의해 좌우되기 때문이다. 측정된 실험값과 계산에 의해 예측된 값은 전단 분사의 경우와 마찬가지로 거의 일치한다.

### 3.3 고속 직분식 엔진의 해석

고속 직분식 엔진에서 다단 분사의 연소 해석을 수행하고 이를 실험을 통해 검증하였다. 해석 대상 엔진은 단기통 엔진으로서, 피스톤 형상은 맥시칸 모자형이다. 엔진 사양과 운전 조건을 Table 2에 명시하였다. 해석에 사용한 엔진은 5홀 인젝터를 사용하므로 계산의 편의를 위하여 대칭 조건을 이용하여 연소실의 1/5만을 해석하였다. 계산 격자의 개수는 최대 15,000여개이며 STAR-CD의 event 명령에 의해 피스톤이 움직임에 따라 계산 격자를 줄이거나 늘릴 수 있게 하였다. 본 엔진은 본 연구실에서 발표한 바 있는 논문<sup>3)</sup>의 엔진에서 압축비만 변경된 경우이다.

다단 분사의 연소 과정은 지난 연구의 결과와 거의 같은 양상을 나타낸다. 본 연구에서 제안한 개선된 2차원 화염편 모델을 이용하여 계산에 사용되는 시간을 기존 대비 80% 절감을 하면서도 동일한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 5는 크랭크

각의 변화에 따른 연소실 압력의 변화를 나타낸 그림이다. 청색 선은 계산에서 예측된 값, 적색 선은 실험에서 측정한 값을 나타낸다. 최고 압력은 TDC 에서 70 bar 이다. 전단 분사 및 후단 분사의 연소 현상 모두 본 연구에서 제안한 연소 모델에 의해 잘 예측됨을 알 수 있다. 본 모델은 어떠한 실험적인 계수를 사용하지 않고서도 위와 같은 결과를 얻을 수 있기 때문에, 엔진 설계 단계에서의 연구에 요긴하게 사용될 수 있다. 해석 결과 NOx 의 경우 전단 분사 이후 연소실 온도가 감소하면서 그 생성량이 감소하다 후단 분사로 인한 온도 상승에 의해 다시 생성량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 반면 Soot 의 경우 전단 분사 시에는 공기와의 혼합율이 양호하기 때문에 거의 생성하지 않다 후단 분사시 급격하게 발생한다. 이는 3.2.4 절에서 예측한 대로 생성된 농후한 혼합기에 의해 Soot 의 산화율이 급격히 감소하기 때문이며, 이러한 농후한 혼합기에 의해 연소 효율 역시 좋지 않은 것으로 분석된다. 따라서 이를 개선하기 위해 인젝터의 분사 각도 및 엔진 형상의 적절한 조정이 필요하다.

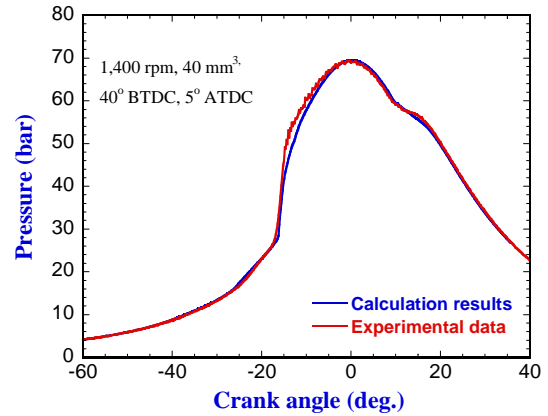


Fig. 5 Comparison of cylinder pressure between calculation results and experimental data

지연 시간에 의해 농후한 혼합기가 형성되며 이로 인해 Soot 배출물이 활발히 생성됨을 예측할 수 있었다. 이러한 현상을 방지 하기 위해서는 연소실의 분사각 및 분사량, 그리고 연소실 형상의 적절한 조정이 필요하며 본 연구에서 제안한 연소모델에 의해 이러한 작업에 엔진 설계 단계에서 가능하다.

Table 2 Engine specifications

Combustion chamber		Bowl-in-piston
Bore × Stroke		102 × 100 mm
Compression ratio		15.0
Engine Speed		1,400 rpm
Fuel		n-heptane
Injection pressure		1,000 bar
Injection amount	pilot	20 mm <sup>3</sup> /stroke
	main	20 mm <sup>3</sup> /stroke
Injection timing	pilot	40° BTDC
	main	5° ATDC

#### 4. 결론

본 연구에서는 Hasse 등이 제안한 이차원 화염편 모델을 엔진 해석에서 용이하게 사용할 수 있도록 2 차원 화염편 모델을 개선하는 연구를 수행하였다. 본 연구에서 제안한 모델은 정적 연소실 및 실제 고속 직분식 디젤엔진에서의 다단 분사 과정의 해석에 적용하여 그 타당성을 검증하였다. 연소 모델을 사용하여 정적 연소실의 점화 지연 시간 및 고속 직분식 엔진의 연소실 압력을 잘 예측할 수 있었다. 또한 후단 분사시 줄어드는 점화

#### 후 기

본 연구는 자동차 부품 연구원의 자동차 기반 사업의 지원으로 수행되었음을 알립니다.

#### 참고문헌

- (1) Hasse, C. and Peters, N., "A Two Mixture Fraction Flamelet Model Applied to Split Injections in a DI Diesel Engine", *Thirtieth Symposium (International) on Combustion*, pages 2755-2762, 2005
- (2) Peters, N., "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-Premixed Turbulent Combustion", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 10, pp. 319-339, 1984. Hasse, C. and Peters, N., "A Two Mixture Fraction Flamelet Model Applied to Split Injections in a DI Diesel Engine", *Thirtieth Symposium (International) on Combustion*, pages 2755-2762, 2005
- (3) Lim, J. and Min, K., "Analysis of Combustion Phenomena for Multiple Mode in Diesel Engine", *KSME Fall Conference 2006*, pp. 2268-2272