

분열모델 상수가 분무 및 연소특성에 미치는 영향

이승필* · 박준규* · 박성욱†

Effects of Spray Breakup Model Variables on Spray and Combustion Characteristics

Seungpil Lee, Junkyu Park and Sungwook Park

Key Words KIVA-3V code(KIVA-3V 코드), KH-RT breakup model(KH-RT 분열모델), Diesel combustion(디젤 연소), High pressure injection(고압분사)

Abstract

This paper describes the effects of spray breakup model constants on spray and combustion characteristics in single cylinder compression engine. KIVA-3V code coupled with a CHEMKIN chemistry solver was used for numerical analysis. In this study, spray simulations and combustion simulations are studied simultaneously. Spray simulation was conducted in constant volume to reduce the effects of air-flow as swirl or tumble. The model validation was conducted and there are little difference between experiments and simulation, this differences were reasonable. In spray simulation, the effects of model constants on spray tip penetration, spray patten and SMD were studied. Furthermore, the analysis of effects of breakup variables on combustion and emissions characteristics was conducted. The results show the KH-RT breakup model constants affects spray and combustion characteristics strongly. Increasing KH model variable (B1) and RT model constants (C_T , C_{RT}) induced slower breakup time.

1. 서 론

디젤 압축착화 엔진은 승용, 상용, 선박, 산업용등 다양한 분야에서 사용되는 내연기관으로서 가솔린 불꽃점화기간에 비해 높은 열효율 및 연비를 보이며 일산화탄소(CO) 배출이 적은 장점이 존재하지만 질소산화물(NO_x)과 입자상물질(PM)이 과다하게 배출되는 단점이 존재한다. 이를 해결하기 위해 질소산화물 저감장치인 SCR(Selective Catalytic Reduction)과 입자상물질 저감장치인 DPF(Diesel particulate filter)등의 후처리 장치가

보편적으로 사용된다. 후처리 장치의 저감효과는 높지만 배기의 배압을 높여 배기가스의 원활한 배출에 악영향을 미치며 추가적인 연료의 소모를 야기함으로써 효율의 저감을 발생시킨다. 따라서추가적인 후처리 장치를 이용하지 않고 근본적인 연소 기술 개선을 통한 연비 및 배기 가스 문제를 해결할 수 있는 방법이 필요하며 이를 위해 많은 연구기관에서 다양한 연구를 진행 중에 있으며 저온연소 및 예혼합 연소와 관련된 LTC(Low Temperature Combustion), HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition)등이 존재한다^{(1-3)}}.

디젤 직분사식 엔진의 연소기술 개발을 위해서는 연료의 분사로부터 연소 및 배기배출물이 생성에 이르는 과정을 이해하는 것이 중요하다. 특히 연료의 분사부터 증발 및 착화까지의 과정은 연소 및 배기 특성 변화에 주된 영향을 미친다. 고압으로 분사된 연료가 실린더 내부의 고온-고압의 공기 중으로 침투하게 되며 액주형태

(Received: 8 Feb 2017, Received in revised form: 10 Feb 2017, Accepted: 14 Feb 2017)

*한양대학교 융합기계공학과

†한양대학교 기계공학부

E-mail : parks@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0430 FAX : (02)2220-4588

의 연료가 주위와의 상호작용에 의해 작은 액적으로 분열되며 분열된 액적은 기화하여 자착화 시점에 도달하게 되면 연소가 시작된다⁽⁴⁾. 디젤 압축착화 기관의 정확한 예측을 위해서는 고압-직분사식 시스템에서의 신뢰성 높은 분무 모델의 확립이 필요하다. 특히 다양한 분무 모델 중 분열 모델은 분사된 연료의 분무 도달거리, 분무 패턴, SMD(Sauter Mean Diameter), 공기와의 혼합도 등에 영향을 미치는 중요한 모델이며 분열 모델 예측하는데 중요한 역할을 한다. 분열 모델에는 다양한 모델이 존재한다. TAB(Taylor Analogy Breakup), LISA(Linear Instability Sheet Atomization), KH(Kelvin-Helmholtz), RT(Rayleigh-Taylor) 모델 등이 존재하지만 분사 형태 및 분사압력에 따라 적절한 모델링 방법이 다르다. TAB모델의 경우 저압 분사시스템적절하며, LISA 모델의 경우 hollow cone형태의 분사 시스템에서 사용된다⁽⁵⁻⁷⁾.

김형준등은 고온, 고압하에서의 DME연료의 분무 및 증발특성에 대하여 KH-DDB모델과 KH-RT모델에 대하여 비교하였으며, 표면 장력이 낮은 DME의 경우 KH-DDB모델이 실험결과와 일치하나 KH-RT모델의 경우도 실험결과와 크게 다르지 않은 것을 확인하였다⁽⁸⁾. DME에 비해 표면장력이 높은 디젤에서는 KH-RT모델의 사용에 큰 무리가 없을 것으로 판단되어 본 연구에서 KH-RT 융합 분열모델을 선택하여 사용하였다.

본 연구에서는 엔진 연소 해석에 있어 분무 모델에 따른 영향을 분석하고자 하였으며, 이를 위해 고압 분사 시스템에서 사용되는 KH-RT분열 모델의 상수에 따라 정적 챔버 내에서의 분무 거동 및 분무 패턴을 분석하였으며 또한 엔진 운전조건하에서의 연소 및 배기특성 분석을 통하여 분열 상수 변화에 따른 해석결과의 차이를 비교하고자 하였다.

2. 해석 모델 및 실험 방법

2.1 연소 및 배기 모델

본 연구에서는 디젤 직분사식 압축착화 엔진의 연소 성능 및 배기배출물 예측을 통한 해석연구를 진행하기 위해 CHEMKIN chemistry solver가 연동된 KIVA-3V 코드를 이용하였다⁽⁹⁾. KIVA-3V 코드는 실린더 내부의 유동, 분무 거동 및 해석 격자 내부에서의 온도 및 압력 특성 등을 계산하며 CHEMKIN chemistry solver와의 연동을 통해 연소해석이 가능하다. 연소해석 시 디젤 연료

는 단일 화학종이 아닌 탄화수소 혼합물이므로 연료의 연소특성을 가장 잘 반영한 단일 화학종인 n-heptane을 대체 연료로 선정하여 화학반응기구를 사용하였다. LLNL에서 고안된 상세 화학반응기구는 2885개의 11754개의 화학반응식으로 이루어져 있어 정확성은 높으나 계산시간에 있어 효율성이 떨어지나, Patel등이 제안한 축소화학반응기구는 30개의 화학종과 65개의 화학반응식으로 이루어져있어 해석에 필요한 신뢰성을 확보함과 동시에 계산시간을 단축시킬 수 있어 본 연구에서 사용되었다⁽¹⁰⁾.

질소산화물은 GRI(Gas Research Institute)에서 개발한 GRI-Mech 미케니즘에서 추출된 12-step NOx 미케니즘을 이용하여 예측하였으며 본 미케니즘은 12개의 화학종과 12개의 화학반응으로 구성되어 있다. 입자상 물질의 예측은 2-step soot 모델을 사용하였다. 입자상 물질의 생성율은 Hiroyasu 생성 모델을 사용하여 예측하였으며 산화율은 NSC(Nagle-Strickland-Constable) 모델을 이용하여 예측하였다⁽¹¹⁾.

2.2 분무 모델

연료 액적이 인젝터로부터 고압으로 분사될 다양한 분무 관련 모델이 적용되며 이는 액적의 분열, 충돌, 증발 등의 분무 현상을 반영하여 연소실 내부의 분무 거동을 예측하게 된다. 본 연구에서 사용된 분열 모델은 KH(Kelvin-Helmholtz)-RT(Rayleigh-Taylor) 융합모델을 이며, 본 모델은 고압 분사 시스템에서 주로 사용되는 분열 모델로서 고압으로 분사되는 연료의 분열 과정을 2단계로 나누어 1차 분열과정은 KH 분열이 지배하며 2차분열 과정은 KH분열모델과 RT분열모델이 분열 조건에 따라 복합적으로 이루어진다. 우선 KH분열 모델은 인젝터에서 분사된 액주가 노즐주변의 비압축성인 대기와 액주와의 상대속도로 인한 전단력이 액주 표면에서 발생하는 불안정 파동에 의한 분열을 모사해 액주에서 큰 액적들로 분열되는 현상을 예측한다⁽¹²⁾. RT분열모델은 밀도가 서로 다른 두 유체간의 상호작용의 불안정성에 의해 액적들이 작은 액적들로 분열되는 과정을 모사한 것으로 2차 분열 모델로 널리 사용된다.

아래의 식 (1)~(4)는 각 KH분열 모델과 RT모델에서의 분열 시간 및 분열된 액적의 반경을 나타낸다.

1. KH 분열 모델

$$\tau = \frac{3.726B_1r}{\Omega_{KH}\Lambda_{KH}} \quad (1)$$

$$r_{d,c} = B_0 \Lambda_{KH} \quad (2)$$

2. RT 분열 모델

$$\tau = \frac{C_\tau}{\Omega_{RT}} \quad (3)$$

$$r_{d,c} = 2C_{RT} \Lambda_{RT} \quad (4)$$

과동은 액적의 표면에서 과장성장률 Ω 과 과장길이 Λ 에 따라 성장하며 $r_{d,c}$ 은 새롭게 생성된 액적의 반경을 나타낸다. 이때 B_0 , C_τ , C_{RT} 는 본 연구에서 분무 모델 상수의 영향을 비교하고자 사용한 상수이다. 분열 모델의 변수에는 위 3가지 이외에도 다른 변수가 존재하지만 위의 변수가 분열 모델의 특성 변화에 큰 영향을 미치며 타 변수의 경우 충분히 실험과의 검증을 통해 정형화 된 값이 존재하기 때문이다. 또한 KH모델과 RT모델의 변수를 독립적으로 변경함으로써 각 모델이 미치는 영향을 따로 분석하고자 하였다.

또한 기존의 충돌모델은 각 해석cell 내부의 액적들을 충돌 대상으로 고려하여 해석 격자 의존성이 존재하나, 액적의 유효반경 주변의 액적들을 충돌 대상으로 고려 가능한 ROI(Radius-of-influence) 충돌 모델을 적용해 해

Table 1 Constants for KH-RT breakup model

	Case #				
	1	2	3	4	5
B_0 (KH)	10	40	70	40	40
C_τ (RT)	0.1	0.1	0.1	0.02	0.5
C_{RT} (RT)	1	1	1	0.2	5

석격자 의존성을 저감시켰다.

2.3 해석 조건

본 연구는 KH-RT 분열 모델 상수 변경 시 분무거동 및 연소특성에 미치는 영향을 분석하고자 하였으며 이를 위해 변경한 KH 및 RT 분열 모델의 상수는 앞서 설명한 바와 같이 총 3 가지로 구분하였고 각 상수 별 설정 범위는 Table 1에 나타내었다. Case 1~3은 RT 분열 모델 상수를 고정한 후 KH분열 모델 상수를 변경하였을 때, case 4와 case 5는 KH 분열 모델 상수 고정 후 RT 분열 모델 상수를 변경하였다.

Table 2 Operating conditions for spray and engine simulation

Spray simulation	Injection pressure [MPa]	80		
	Ambient pressure [MPa]	1		
	Fuel quantity [mg]	30		
	# of nozzle holes	8		
Engine simulation	Engine speed [RPM]	2000		
	EGR rate [%]	32.2		
	Injection pressure [MPa]	69		
	SOI [aTDC deg.]	Pilot 1	Pilot 2	Main
		-27.11	-15.12	-2.3
Fuel quantity [mg]	1.1	1.2	6.2	

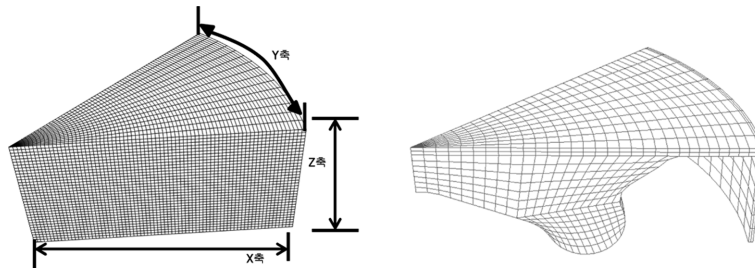


Fig. 1 Sector computational mesh for numerical analysis on spray and engine combustion

모델 상수가 분무도달거리, 분무 패턴 등 분무 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 정적 챔버를 모사하였고, 착화시기, 열발생율, 배기 배출물 등 연소 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 엔진 연소실 형상을 모사한 sector 해석 격자를 사용하였다. Fig. 1은 분무와 연소 해석에서 사용된 sector 해석격자를 나타낸다. 계산시간의 효율성 증가를 위해 sector 해석 격자를 사용하였다. 분무 및 연소 특성 분석을 위한 자세한 정적 챔버 및 엔진 운전 조건은 Table 2에 나타내었다. 엔진 실험 조건은 엔진 성능 분석을 위해 기초 실험을 위해 설정한 값이며, 본 실험 조건의 경우 저부하 영역에서의 분열 모델 변수가 엔진 연소 특성에 미치는 영향을 보고자 하였다.

2.4 실험 방법

디젤 분무의 거시적 발달과정을 모델링하기 위하여 모사챔버 내부에서 분사압력 및 분위기압력 변화에 대한 분무가시화 실험을 수행하였다. 분무거동 평가과정에서 Bosch solenoid 8홀 인젝터를 이용하였고, 이미지 촬영 시에는 고속카메라(Photron, FastcamAPX-RS)를 활용하여 10,000 fps의 속도로 이미지를 취득하였다. 분위기밀도조건 모사를 위하여 최대 20 bar까지 가압이 가능한 광학챔버에 인젝터를 수직으로 장착하였고, 두 개의 보조광원(Photron, HVC-SL)으로부터 산란되는 분무액적의 bottom-view 이미지를 취득하였다. 가시화를 통해 취득한 이미지로부터 분무도달거리 및 분무각을 측정하여 분사조건 및 분위기조건에 대한 분무거동을 평가하였으며, 측정시에는 MATLAB image processing tool을 이용하여 측정의 객관성을 높이고자 하였다. 각각의 조건 당 고속이미지촬영을 5회씩 반복하여 분사재현성을 확인한 후 분무모델 검증에 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분무 해석 결과

Fig. 2은 KH-RT 분열 모델 상수에 따른 분무 도달거리를 비교한 결과를 나타낸다. 실험 결과와 해석의 결과 차이는 보인다. 이는 실험에서의 분사를 파형을 측정하는데 있어 초기 기울기값이 낮게 측정되어 해석에서의 초기 분사속도가 낮게 예측되어 분사도달거리의 차이를 보이는 것으로 보이며, 또한 KIVA 코드의 격자 의존성에 의해 해석의 분무 도달거리가 짧아져서 나타나는 특

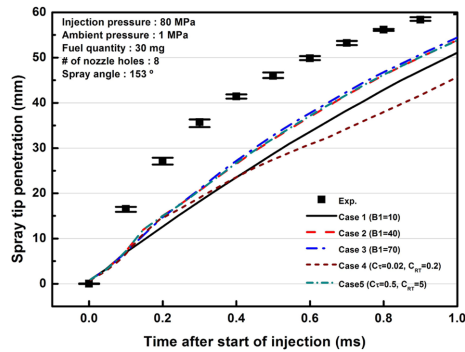


Fig. 2 Comparisons of spray tip penetration

성으로 보이나, 현재 격자 크기가 충분히 작아 격자를 줄이는 것은 계산의 효율성이 떨어지며, 결과의 오차 범위가 크지 않아 검증 결과를 사용하는 데 문제가 없을 것으로 판단된다. Case 1~3을 비교하였을 때 KH 분열 모델의 B1 상수가 증가함에 따라 분무 도달거리가 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, 이는 B1값이 증가함에 따라 불안정한 파동의 생성이 감소하며 이는 액주 및 액적의 표면으로부터 흩어지는 연료의 양이 감소해 새로 생성되는 액적의 생성률을 낮추고 높은모멘텀을 지니는 큰 액적이 오랫동안 유지됨에 따라 운동에너지의 분산이 적어 긴 분무 도달거리를 가지게 된다. 반면 case 2(B1=40)과 case3(B1=70)을 비교하였을 때 분열모델 상수가 특정 값 이상에서는 분무 도달거리의 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 액적과 주위공기와의 상대속도로 인해 액적이 받는 항력이 존재하며 이 항력으로 인해 분무 도달거리가 더 이상 증가하지 못하는 것으로 판단된다. Case 2, case 4, case 5를 비교하였을 때 RT 분열 모델상수 감소에 따라 분열 거리 이후에서 분무 도달거리가 감소하는 것을 확인하였다. RT 분열 모델상수가

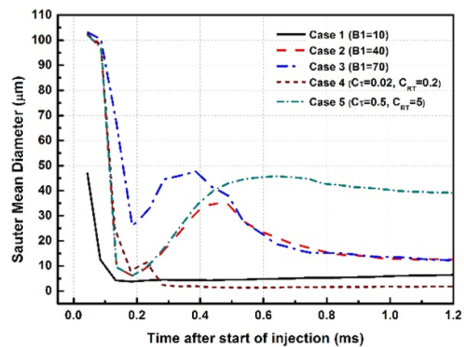


Fig. 3 Comparisons of SMD

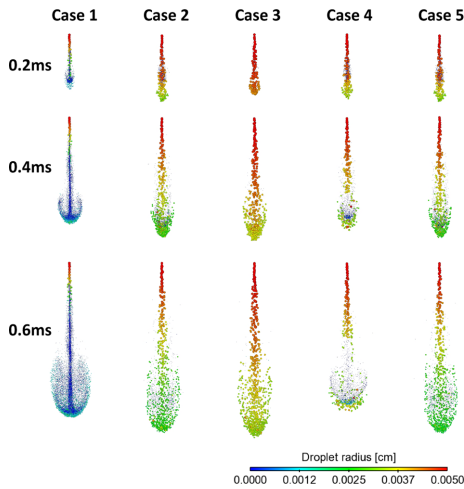


Fig. 4 Comparison of spray pattern

감소하면 KH 분열 모델 상수가 감소하는 것과 비슷한 효과를 가지며, 분열이 촉진되어 액적의 크기가 작아져 모멘텀이 감소하고 주위 공기와의 모멘텀 교환으로 인해 분무의 속도가 빠르게 감소해 분무 도달거리가 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 3는 분열 상수에 따른 SMD를 예측한 결과를 나타낸다. 앞서 말한 바와 같이 KH 분열 상수 B1이 증가함에 따라 분사와 동시에 급격한 분열이 이루어져 SMD가 확연히 감소하는 결과를 보인다. 분사 초기 SMD가 급격히 낮아진 후 다시 SMD가 증가하는 것은 분사된 액적 및 분열된 액적들간의 충돌/융합으로 인한 결과이다. RT 분열모델 상수에 따른 SMD를 확인해 보면 RT 분열 모델 상수가 감소함에 따라 분열 속도가 증가하고 분열된 액적의 크기가 빠르게 감소하는 것을 확인하였다. 또한 case 4와 같이 모델 상수가 충분히 낮아진 경우 SMD가 급격히 감소하여 매우 작은 값을 유지하는 비정상적인 형태를 보여 RT 분무 모델 상수사용에 어려움이 존재할 것으로 판단된다.

Fig. 4는 분사시간에 따른 각 케이스 별 분무 패턴을 나타낸다. KH-RT 분열 모델 상수에 따라 분무의 형태는 각각 상이한 모습을 보이며, KH 상수 및 RT 상수가 증가함에 따라 분무 도달거리는 증가하지만 분열속도가 느려져 전체적으로 큰 액적들이 다수 분포하는 것을 확인하였다.

3.2 연소 및 배기 해석 결과

Fig. 5는 KH-RT 분열 모델 상수에 따른 실린더 압력 및 열 발생률을 나타낸다. 분열 모델 상수 변화가 엔진

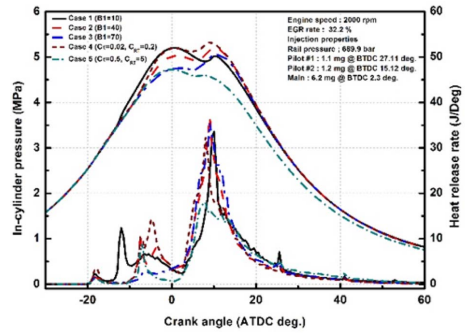


Fig. 5 Comparisons of in-cylinder pressure and heat release rate according to breakup model constants

내부에서의 혼합기 형성 및 연소 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 우선 case 1~3을 확인하면 KH 분열 모델 상수가 증가함에 따라 압력 및 열 발생률 결과에 큰 분무 도달거리에 비해 모델 상수에 따른 연소 특성의 변화가 착화시점이 지각되며 이로 인해 연소 압력이 큰 차이를 보인다. 동일한 분사시기에 착화 시점이 지각되므로 case 3(B1=70)은 급격한 열 발생률을 보이는 연소형태를 보이며 이는 분사된 연료가 분열 속도 감소로 인해 미립화 과정이 더디게 진행되어 증발 및 기화가 제대로 이루어지지 않아 실린더 내부의 공기-연료 혼합기 형성을 감소시킨다.

Case 2, case 4, case5를 통해 RT 분열 모델 상수 변화에 따른 연소 특성의 비교가 가능하며, RT 분열 모델 상수가 증가함에 따라 KH 분열 모델 상수가 감소하는 것과 비슷한 경향을 보인다. 하지만 KH 분열 모델 상수의 변화 보다 더 큰 변화폭을 보이며 특히 case 5의 경우 연소가 제대로 이루어지지 않은 것을 관찰 할 수 있었다. 이는 RT 분열 상수를 높게 설정하는 것은 실제 분무 및 연소 특성을 반영하지 못한다고 볼 수 있다.

또한 분열 상수 변화에 따른 해석 결과와 실험 결과와 비교를 해보았을 때 Case 3(B1=40, C1=1.0, C2=0.1)의 경우가 결과를 잘 추종하는 것으로 보이며, 다른 운전조건에서의 연소 해석 시 사용하는데 무리가 없을 것으로 판단된다.

Fig. 6(a)는 분열 모델 상수에 따라 배기 배출물(질소 산화물, 입자상 물질)의 농도를 나타낸다. KH 분열 상수가 증가함에 따라 질소 산화물과 입자상 물질이 동시에 증가하는 것을 확인 가능하며, 이는 앞선 말한 바와 같이 분열 상수가 증가하면 분열 속도가 증가하고 미립화가 촉진되어 연소의 축진을 야기시킨다. 이때 연소가

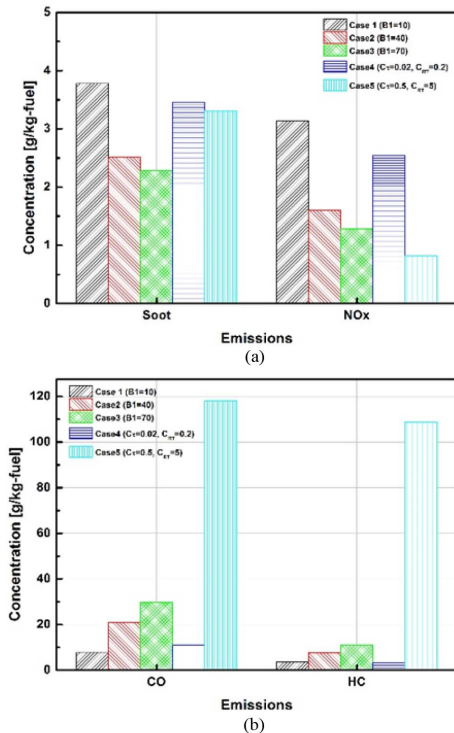


Fig. 6 Concentration of exhaust gas ((a) soot, NOx (top), (b) CO, HC (bottom))

활발하게 진행되면 연소실 내부의 온도가 증가해 질소산화물의 생성이 촉진된다. 또한 분무도달거리가 감소하므로 인젝터 노즐 부근에서 높은 당량비를 보이는 부분이 증가하여 농후한 영역에서 생성이 촉진되는 입자상 물질의 농도가 증가하게 된다. RT 분열 상수가 증가하면 연소가 제대로 이루어지지 않아 질소산화물의 생성이 급격하게 감소한다. Fig. 6(b)는 미연탄화수소와 일산화탄소의 농도를 나타내며, RT 분열 모델 상수 증가에 따라 미립화가 원활히 이루어지지 못해 연소가 정상적으로 발생하지 못해 실린더 내부의 미연탄화수소와 일산화탄소 농도의 급격한 증가를 야기시킨 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 KIVA-3V코드를 이용하여 디젤고압 분사 시스템에서 KH-RT 융합 분열 모델 상수에 따른 분무 및 연소특성 분석을 수행하였으며, 연구 결과는 다음과 같다.

(1) KH 및 RT 분열 모델 상수가 감소함에 따라 분열 속도가 증가하며 큰 모멘텀을 가지는 액적의 수가 감소해 분무 도달거리가 짧아지는 효과를 보이며 분사 초반 분열이 급격하게 이루어지며 SMD값이 낮게 형성된다.

(2) 또한 분열 상수 증가 시 분열 속도의 증가로 인한 액적의 미립화가 촉진되어 액적의 증발 및 기화가 빠르게 이루어지며 착화시점이 진각되며 연소 성능이 증가하는 결과를 보인다.

(3) 이는 배기 배출물의 농도에도 영향을 미치며 연소 성능이 증가하면 입자상물질과 질소산화물의 농도는 미약하게 증가하나 미연탄화수소 및 일산화탄소의 농도가 낮아지는 효과를 보인다.

(4) 상수 값에 따라 분무의 패턴이나 연소 성능이 크게 차이나는 것을 확인하였으며, 정확한 디젤 엔진 해석을 위해서는 기초가 되는 KH-RT 분열 모델 상수 값의 적절한 선택이 중요하다고 판단된다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 과학기술인력교류활성화지원사업 성과임(No. 2016H1D2A2916104).

참고문헌

- (1) P. Kimura, S. Aoki, O. Kitahara, Y. Aiyoshizawa, E., "Ultra-Clean Combustion Technology Combining a Low-Temperature and Premixed Combustion Concept for Meeting Future Emission Standards", SAE International, 2001.
- (2) Simescu, S., Fiveland, S. B., Dodge, L. G., "An Experimental Investigation of PCCI-DI Combustion and Emissions in a Heavy-Duty Diesel Engine", SAE International, 2003.
- (3) Kim, Y. J., Kim, K. B. and Lee, K. H., "Effect of a 2-stage injection strategy on the combustion and flame characteristics in a PCCI engine", Int J Automot Technol, Vol. 12, No. 5, 2011, pp. 639-644.
- (4) Heywood, J. B. "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, Inc., ISBN 0-07-028637-X, 1988.
- (5) Liu, A. B., Mather, D. and Reitz, R. D., "Modeling the

- Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel Sprays”, SAE International, 1993.
- (6) Tanner, F. X., “Liquid Jet Atomization and Droplet Breakup Modeling of Non-Evaporating Diesel Fuel Sprays”, SAE International, 1997.
- (7) Senecal, P. K., Schmidt, D. P., Nouar, I., Rutland, C. J., Reitz, R. D. and Corradini, M. L., “ Modeling High-Speed Viscous Liquid Sheet Atomization”, Int Journal of Multiphase Flow 25, 1999, pp. 1073~1097.
- (8) 김형준, 서현구, 이창식, “고온 고압하에서의 DME 연료 분무 및 증발 특성”, 한국액체미립화학회지, Vol. 12, No. 2, 2007, pp. 101~107.
- (9) Amsden, A. A., “KIVA-3V Release 2 : Improvement to KIVA-3V”, Los Alamos National Laboratory Report, No. LA-UR-99-915, 1999.
- (10) Patel, A., Kong, S.-C. and Reitz, R. D., “Development and Validation of a Reduced Reaction Mechanism for HCCI Engine Simulations”, SAE International, 2004.
- (11) Nishida, K. and Hiroyasu, H., “Simplified Three-Dimensional Modeling of Mixture Formation and Combustion in a D.I. Diesel Engine.” SAE International, 1989.
- (11) Reitz, R. D., “Modeling atomization processes in high-pressure vaporizing sprays.” Atomization and Spray Technology, Vol. 3, No. 4, 1987, pp. 309~337.