

디젤분무의 분열과정에 대한 수치해석 연구[§]

염 정 국* · 정 우 성*[†]

* 동아대학교 기계공학과

Numerical Study of Breakup Process of Diesel Spray

Jeong Kuk Yeom* and Woo Sung Jung*[†]

* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.

(Received April 8, 2013 ; Revised October 4, 2013 ; Accepted October 4, 2013)

Key Words: Breakup Model(분열모델), Common-Rail System(커먼레일 시스템), CFD(전산유체역학), Internal Combustion Engine(내연기관), Spray(분무)

초록: 유체의 고압유동은 여러 산업현장에 활용되고, 특히 그 중 내연기관의 연료분사 인젝터가 대표적이며 디젤엔진의 커먼레일 시스템의 경우 1000bar 이상의 압력이 사용된다. 이와 같이 고속으로 분출되는 유체유동의 경우, 노즐을 통해 분사되는 고속의 유체는 주위기체와의 상호작용으로 분열과정을 거치게 된다. 이 분열과정은 연소실 혼합기형성기과정에 영향을 주게 되며, 그 결과 엔진의 연소상태에 까지 영향을 미치게 된다. 따라서 연료분무의 분열과정에 대한 해석은 중요하며, 본 연구에서는 연료분무의 분열을 위한 수치해석 서브모델로 Reitz&Diwakar 및 CAB(Cascade atomization and breakup)모델을 사용하였다. 본 연구의 목적은 분사된 분무의 분열과정의 정확한 해석이며, 분사연료의 분열발생 형태의 빈도 등을 조사하였다. 결과로서 본 연구는 상용 CFD 프로그램(CFX)을 이용하여 디젤분무의 분열과정해석을 위한 적합한 분열모델을 제안한다.

Abstract: High-pressure flows are ubiquitous in many industrial fields. A representative application is fuel injection using a common-rail control system in diesel engines, where the injection pressure in the injector exceeds 1000 bar. In high-speed injection, the fluid injected through the nozzle undergoes breakup owing to the interaction with the ambient gas. The breakup process influences mixture formation, which in turn influences combustion in diesel engines. Therefore, it is very important to analyze the breakup process of fuel spray. The Reitz and Diwakar model and cascade atomization and breakup (CAB) model were used in this study as sub-models for the numerical analysis of the breakup process of fuel spray. This study aims to precisely analyze the breakup process of spray and to investigate the breakup frequency of the injected fuel. Consequently, it proposes a suitable sub-model for analyzing the breakup process of a diesel spray by using CFX, a commercial CFD program.

- 기호설명 -

C : 계수
 d : 지름, μm
 r : 반지름, μm
 n : 개수
 t : 시간, μs

U : 상대속도, m/s
 P : 압력, bar
 T : 온도, $^{\circ}\text{C}$

그리스문자

ρ : 밀도, kg/m^3
 σ : 표면장력, N/m
 ν : 동점도, m^2/s

하첨자

p : 입자

[§] 이 논문은 대한기계학회 신뢰성부문 2013년도 춘계학술대회 (2013. 3. 27.-29., 제주대) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, jws212@naver.com

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

D	: 항력
l	: 액상
g	: 기상
br	: 분열
inj	: 분사
a	: 분위기

1. 서론

내연기관의 급격한 수요증대에 따라 배기가스 및 매연에 의한 환경파괴 문제가 증가하면서 NO_x, HC 및 PM 등의 배출량을 제한하는 EURO 등과 같은 환경오염방지 규제가 강화되고 있다. 이러한 규제를 준수하기 위해 다양한 방법들이 시도되고 있으며 주를 이루는 것은 대체에너지의 사용 및 엔진의 최적화(Optimization)이다. 내연기관에 적용되는 대표적인 대체에너지는 DME(Dimethylether), 바이오디젤 등이 있으며 이에 관한 연구로 Lee 등⁽¹⁾은 기존의 디젤기관에 바이오디젤을 사용하여 분사시기 및 엔진부하에 따른 연소특성에 관한 연구를 진행하였고 Lee 등⁽²⁾은 MEL(Mobile emission laboratory)차량을 이용하여 실 도로주행조건에서 디젤, DME 및 바이오디젤을 적용한 차량에서 배출되는 미세입자를 추적 측정하였다. 엔진의 조건 설정에 관한 연구로 Jeong 등⁽³⁾은 엔진회전속도를 고정 후 저부하와 중부하 조건에서 바이오디젤을 적용하여 엔진성능특성에 대해 연구하였다. 내연기관은 일반적으로 점화플러그를 이용하여 공기와 연료의 혼합기를 연소시키는 불꽃점화기관인 가솔린기관과 실린더 내부에 공기만을 압축하고 연료를 분사-자착화 시킴으로써 동력을 얻는 압축착화기관인 디젤기관으로 나누어진다. 기존에 사용되던 직분사식 디젤엔진은 연료 분사 압력 약 120bar 정도로 비교적 저압을 사용하기 때문에 작동 환경 등에 따른 분사연료의 미립화 불량으로 인해 다량의 배기가스 및 매연 배출 등 환경파괴의 원인이 되어왔다. 하지만 최근 1,000bar 이상의 고압 적용이 가능한 커먼레일 시스템(Common-rail system)의 발달로 인해 연료 분무의 관통 및 미립화 등의 개선을 가능하게 했고 이러한 커먼레일 디젤엔진은 고효율의 엔진으로 주목받고 있다. 커먼레일 엔진은 엔진의 회전속도와 부하에 따라 분사압력을 세부적으로 제어하여 완전연소를 추구하는 엔진으로 배기가스의 감소, 연비향상, 엔진이 저속 상태 시 토크 및 출력의 향상 등 장점을 가지고 있다. 이러한 고압 커먼레일 디젤 엔진에서도 연료분무에 관한 중요성은 강조되고 있으며 아직 고온 고압의 연소실 내에서 일어나는 분무양상

에 대해 명확한 실험적 접근이 어렵다. 따라서 이러한 다상물질의 고속 분열 유동과정에 대해 자세한 이론적 접근은 아직 이루어 지지 않았으나 실험에 근거한 다양한 모델들이 개발되어 있다. 분열모델 검증에 관한 연구로 Park 등⁽⁴⁾은 상용 CFD(Computational fluid dynamics)에 사용되는 분열모델의 변화에 따른 분무선단도달거리 비교 및 엔진 연소에 관한 연구를 진행 하였다. 연료분무에 있어 가장 중요한 요구조건은 거시적인 측면에서 분무선단도달거리(Spray penetration), 분무원추각(Spray cone angle) 및 분무의 형상(Structure of spray) 등이 있고, 미시적인 측면에서 분사된 연료의 평균 입경(Average particle diameter) 및 입자들의 분포(Distribution of particles) 등이 있다. 이 인자들은 커먼레일에서 제어된 압력 및 연료의 유량에 의하여 크게 변화된다. 분무선단도달거리에 관해 Desantes 등⁽⁵⁾은 실험을 통하여 분무의 거시적 특성을 조사할 수 있는 새로운 모델을 도출하였으며, Park 등⁽⁶⁾은 바이오디젤과 디젤을 다단분사를 적용한 엔진에 분무선단도달거리의 비교를 통해 바이오디젤의 특성에 대하여 연구하였다. 분무의 거시적 측면에서의 연구는 실험을 통한 비교 및 검증이 충분히 이루어진 반면 미시적 측면에서의 연구는 아직 취약하다.

따라서 본 연구는 커먼레일 시스템 적용 이후 고압분사에서 발생하는 분열에 대하여 적합한 모델을 판별하고, 수치적인 방법으로 분열이 일어나는 정도에 대한 계산을 목적으로 하였다. 수치적 계산을 위해서 상용 프로그램인 ANSYS CFX 13.0을 이용하였으며 기초적인 실험을 바탕으로 수치 해석을 진행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

수치해석에 사용되는 분열모델 중 디젤분무해석에 적합한 분열모델을 선정하기 위하여 수치해석 결과를 근거할 수 있는 기초적인 실험을 상용노즐인 Bosch 사의 7 홀 노즐을 이용하여 실시하였다. Fig. 1은 ECU를 통하여 제어되는 커먼레일시스템과 분무선단도달거리측정을 위해 사용된 고속카메라 및 광원 등으로 구성된 실험장치의 개략도이다. 실험장치에 사용된 커먼레일 시스템은 Pride U-engine 순정품이며, ECU는 SmarTec Co.의 SCR-TDA8000이다. SCR-TDA8000은 연료분사 압력을 300bar에서 1,600bar까지 변경이 가능하고 연료 분사기간은 100 μ s에서 4,000 μ s까지 설정이

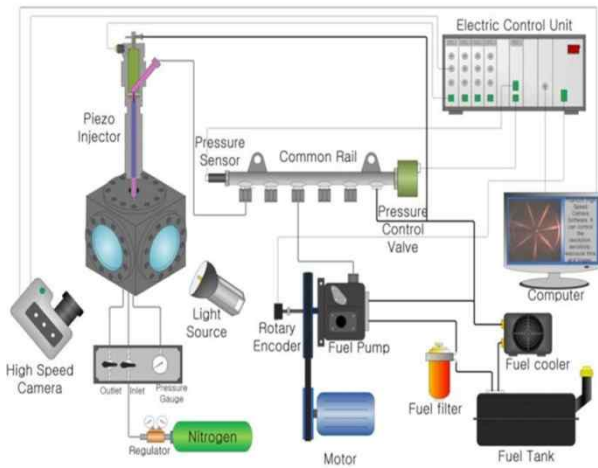


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus⁽⁷⁾

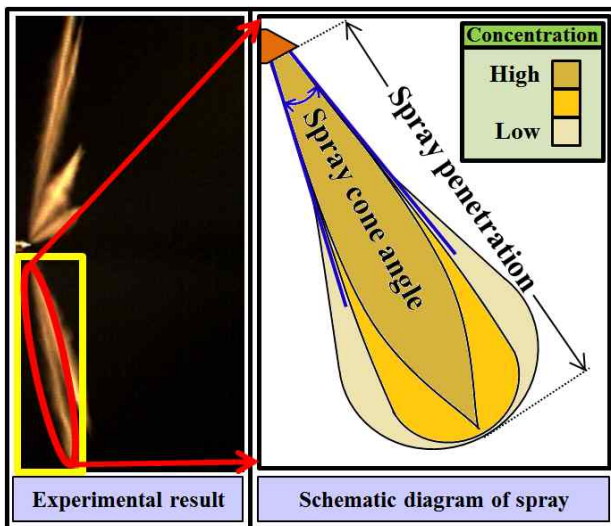


Fig. 2 Schematic diagram of a spray taken from experimental side image

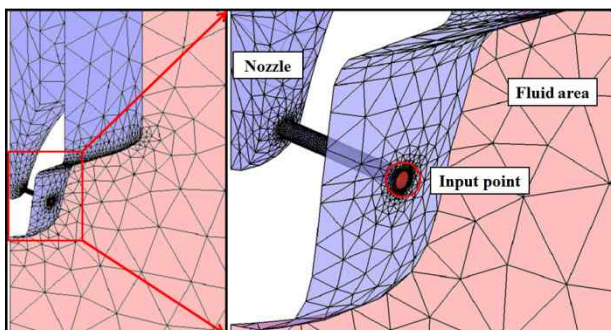


Fig. 3 Expanded mesh structure at the input point

가능하다. 분무선단도달거리측정을 위하여 사용된 고속카메라는 Phantom사의 Micro-4C이며 광원은 1kW 용량의 할로겐 조명이 사용되었다.

Table 1 Experimental conditions

Injection nozzle	Type : 7 holes nozzle Hole diameter : 0.12[mm]
Injection fuel	Diesel
1 hole fuel injection rate[g/inj]	0.0033
Injection duration t_{inj} [μ s]	500
Injection pressure P_{inj} [bar]	1,000
Fuel density[kg/m ³]	826.6
Surface tension coefficient[N/m]	0.031
Ambient gas	Air
Ambient temperature T_a [K]	298
Ambient pressure P_a [bar]	\approx 1.013

Table 2 Numerical conditions

Injection fuel	Diesel
Ambient gas	Air
Material property	Same value with experiment
Hole diameter[mm]	0.12
Initial particle diameter[mm]	Hole diameter(0.12)
Spray cone angle[Deg.]	6

2.2 실험방법

실험은 분무거동특성의 정확한 관찰을 위하여 상온 대기압(1bar, 298K) 하에서 실시하였으며 연료는 디젤을 사용하였다. 분사압력은 1,000bar, 연료분사기간을 100 μ s 간격으로 500 μ s 까지의 분무선단도달거리 및 분무원추각을 Fig. 2 와 같이 측면이미지를 사용하여 분무선단도달거리는 100 μ s 간격으로 측정을 실시하였고, 분무원추각은 분사 이후 500 μ s의 값을 측정하였다. 자세한 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

3. 수치해석방법

본 연구에서는 디젤을 이용한 분무거동의 해석을 위하여 범용 CFD 프로그램인 ANSYS-CFX 13.0을 사용하였다. CFX는 층류 및 난류 유동을 해석하기 위한 프로그램으로 뉴턴유체(Newton fluid)를 기본유체로 다루며 오일러 기술법(Euler description) 기반의 근사해석 기법인 유한체적법(Finite volume method) 사용을 기본으로 한다. 유한체적법은 유한개의 요소로 기하학적형상을 나누는 유한요소법(Finite element method)과 근사하게 유한개의 체적으로 기하학적 형상을 세분화하는 방법이다. Table 2는 수치해석을 위해 사용된 조건을 나타내며, 실험조건을 기초로 하여 설정되었다.

3.1 형상 및 격자

수치해석에 적용할 유한체적모델을 생성하기 위하여 실험에서 사용된 상용 7 홀 노즐의 팁 부분을 절삭 후 현미경 사진을 통해 내부의 치수를 측

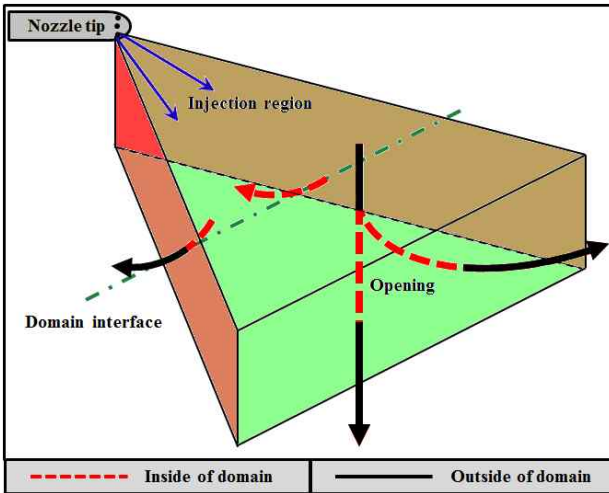


Fig. 4 Schematic diagram of boundary condition for numerical analysis

정하였다. 수치해석에 적용되는 유한체적모델 및 격자는 수치해석의 수렴성에 있어서 가장 중요하다. 특히 분무수치해석에서는 입자추적(Particle tracking)으로 인하여 일반적인 유동해석에 비하여 많은 격자를 필요로 하기 때문에 본 논문에서는 전체 7 홀의 형상 중 1/7 부분을 사용하여 1 홀의 분무거동특성을 계산하였다. Fig. 3은 1/7 노즐형상에 Tetrahedrons mesh method를 사용한 연료 토출부 유한체적모델의 확대 이미지이다. 격자의 최소 크기는 2.16×10^{-4} , 최대 크기는 1.5×10^{-3} 이며 모델의 절점 수는 약 2,300,000 개, 요소 수는 13,000,000 개이다.

3.2 경계조건

실험과 수치해석을 비교하기 위하여 기본적인 경계조건은 실험과 동일하게 하였다. 수치해석에 사용된 유한체적모델은 Fig. 4와 같이 노즐 및 유동장으로 나누어 제작하였고 실험과 같이 상온대기압으로 설정하기 위하여 분사진행방향에 대응하는 면을 개방계(Opening)로 설정하였으며, 1/7 모델 양 측면에 서로 영향을 주고 받는 조건으로 설정하였다. 난류모델은 전단수송방정식을 포함하며 유동박리에 대하여 정확도를 제공하는 SST(Shear stress transport)모델로 설정하였고 항력(Drag force) 모델은 고체입자 혹은 작은 액체입자에 적합하며 Re 수(Reynolds number)에 의해 변화되는 Schiller-Naumann 모델로 설정하였다. Schiller-Naumann 모델은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15Re_p^{0.687}) & \text{if } Re_p \leq 800 \\ 0.44 & \text{if } Re_p > 800 \end{cases} \quad (1)$$

여기서 C_D 는 항력계수, Re_p 는 입자의 Reynolds 수를 의미한다. Schiller-Naumann 모델은 Re 수에 따라 항력계수(Drag force coefficient)가 변경되며 Re 가 800을 초과 시 항력계수는 Newton 모델과 같은 0.44의 값을 가진다.

3.3 분열모델

분사에 적용되는 분열(Breakup)은 적용유체가 주위기체를 통과 시 항력으로 인하여 연료가 여러 개로 분리되어 개체가 늘어나는 현상을 말하며, 고압 유동해석에 있어서 적절한 분열모델의 설정은 중요하다. 본 연구에서는 실험결과를 기초로 하여 수치해석에서 사용되는 상용 분열모델 중 Reitz&Diwakar, CAB(Cascade atomization and breakup), ETAB(Enhanced TAB model) 및 TAB(Taylor analogy breakup)모델을 적용하여 분무거동특성을 비교하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 실험과 수치해석의 결과를 비교 고찰하고 최적화된 분열모델을 채택하기 위하여 분무선단도달거리, SMD(Sauter mean diameter)의 비교를 실시하였다. SMD는 입자 전체의 부피의 합을 전체의 표면적의 합으로 나누어 입자의 크기를 구하는 방법⁽⁸⁾으로 본 논문에서 SMD의 비교는 일정한 시간 간격으로 분무된 유체 전체의 입경을 측정하는 Global method와 시간을 고정시켜 유체의 토출부로부터 일정한 거리 간격으로 측정하는 Local method, 두 가지 방식 중 Local method의 방식으로 비교하였으며 최적화된 분열모델의 선정 이후 채택된 분열모델을 이용하여 분무거동특성 중 미시적인 부분에 대한 수치적 계산을 실시하였다.

4.1 분무선단도달거리에 관한 고찰

본 연구는 기본적인 실험을 통하여 네 가지 분열모델 중 적합한 분열모델을 선정하기 위하여 거시적인 분무거동특성인 분무선단도달거리를 Fig. 5와 같이 비교하였다. Fig. 5는 분사 이후 500 μ s까지 실험과 수치해석을 통해 측정된 분무선단도달거리 비교 그래프이다. Reitz&Diwakar, CAB 및 ETAB 모델은 실험측정치와 근사한 값을 가지는 반면 TAB 모델의 경우 실험측정치에 비하여 다소 짧은 분무선단도달거리를 가졌고, 실험과의 최대 오차는 분사 시작 후 300 μ s 시점에서 15.75mm로 나타났다. 이는 분열모델의 분열조건에 의해 분열

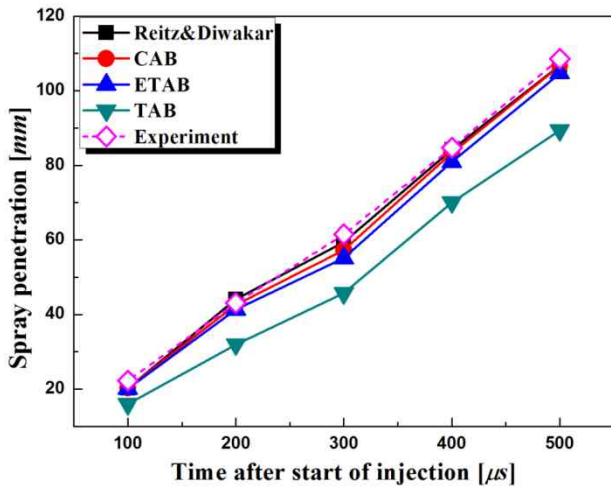


Fig. 5 Comparisons of spray penetration at injection pressure 1000bar

되는 정도가 달라지기 때문이다. 따라서 세 가지의 분열모델에 비하여 분무선단 도달거리가 짧은 TAB 모델은 본 실험과 적합하지 않다고 판단되어 아래 연구에서 제외하였다.

4.2 SMD 에 관한 고찰

본 논문에서는 분열모델의 정확한 비교를 위하여 SMD 에 대하여 Local method 로 비교 분석하였다. Fig. 6 은 Global SMD 및 Local SMD 측정 개략도이다. 이 중 본 연구에서 사용한 Local method 는 측정시간을 고정하고 토출부로부터 일정한 거리 간격으로 평면을 생성하여 평면에 접하는 입자들의 SMD 를 식 (2)로 계산하는 방식이다.

$$SMD = d_{32} = \frac{\sum d_i^3 \Delta n_i}{\sum d_i^2 \Delta n_i} \quad (2)$$

식에서 d 는 입자의 지름을 의미하며 n 은 입자의 수를 의미한다. Fig. 7 은 분열모델 변화에 따른 Local SMD 의 비교그래프이다. Local SMD 에서는 분열모델의 변화에 따른 SMD 감소경향을 확인할 수 있다. Fig. 7 의 실험결과 측정치는 Park 등⁽⁹⁾의 가솔린과 디젤의 혼합연료에 의한 분무의 미립화 특성 및 배기가스 특성연구에서 Local SMD 중 G0(Gasoline 0%)데이터를 참고하였다. 논문에서 실험조건은 상온대기압 하에서 실시되었고 본 실험과 동일한 노즐을 사용하였으며 동일한 압력과 측정시간을 적용하였다. 실험측정치와 모델 간 Local SMD 를 비교해보면 일정거리 이후의 d_{32} 는 ETAB 모델이 근사하며 감소경향은 Reitz&Diwakar 모델이 근사함을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 인젝터 내부 형상에 의해 초기입자지름이 감소하는

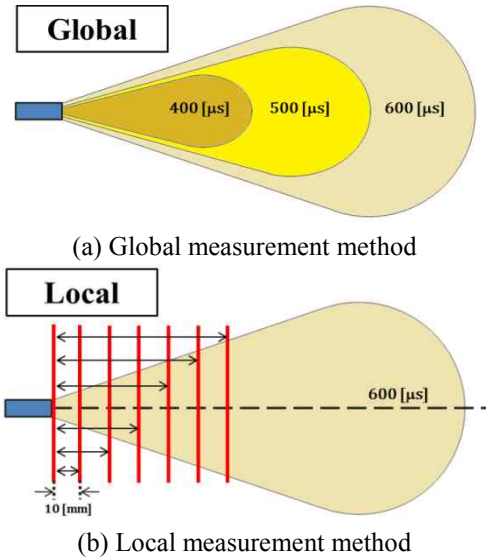


Fig. 6 Two types of measurement method of SMD

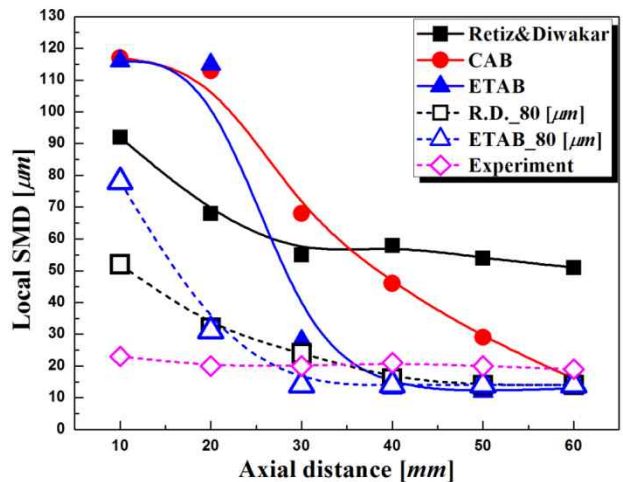


Fig. 7 Comparisons of Local SMD

수축계수(Coefficient of contraction)의 적용 없이 초기 입자지름을 홀 지름과 동일한 0.12mm 로 설정하여 해석을 진행하였기 때문에 실험 값과 수치해석을 통해 계산된 값은 차이를 보인다. 따라서 Reitz&Diwakar 과 ETAB 모델에 수축계수 적용을 고려한 임의의 감소한 초기입자지름을 0.08mm 로 설정하고 추가적인 해석을 진행하여 Fig. 7 에 제시하였다. 그 결과 Reitz&Diwakar 및 ETAB 모델을 적용한 SMD 는 홀 지름과 동일한 초기입자지름으로 설정한 해석과 근사한 감소경향을 가짐을 확인 하였으며 이를 통해 급격하게 입자크기가 감소되는 ETAB 및 CAB 모델에 비하여 입자지름의 감소 경향이 실험측정치와 가장 근사한 Reitz&Diwakar 모델이 본 연구에서의 실험 측정치와 가장 일치하여 본 연구와 같은 조건에서의 디젤분무 재현에 가장 적합하다 판단하였다.

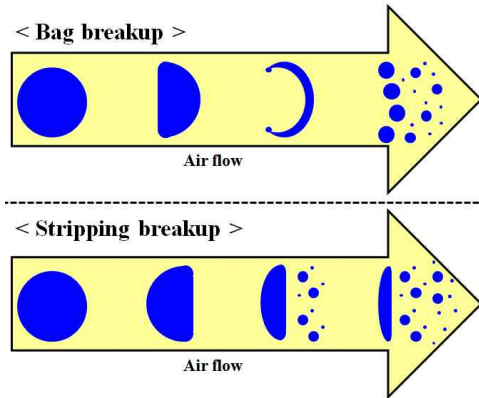


Fig. 8 Breakup-process about bag and stripping breakup⁽¹⁰⁾

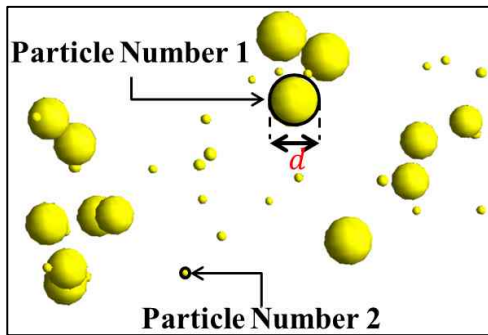


Fig. 9 Simulated injection fuel particle tracking to calculate breakup occurrence frequency

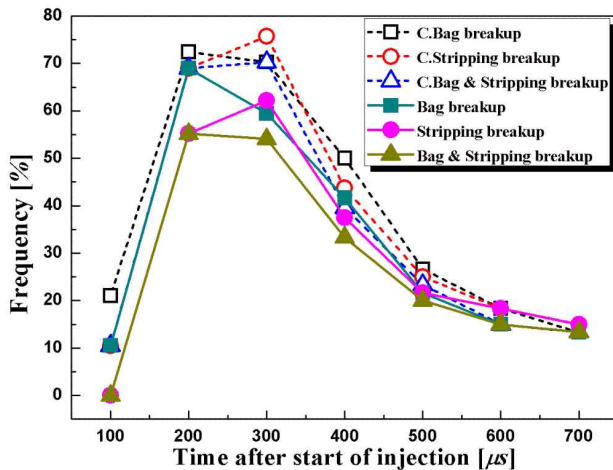


Fig. 10 Occurrence frequency of breakup according to the type of breakup such as bag and stripping

4.3 분열빈도(Breakup frequency)에 관한 고찰

Reitz&Diwakar 모델은 Reitz 와 Diwakar 에 의하여 고안된 모델로 공기의 항력에 의하여 분열되는 형태를 Bag 분열과 Stripping 분열 두 가지로 나누어 설명하였다. 또한 Bag 분열은 분사된 연료와 주위기체와의 상대속도가 저속에서 지배적이고 Stripping 분열은 고속에서 지배적이라 제시하였

다.⁽¹¹⁾ Fig. 8 는 Bag 및 Stripping 분열의 진행과정에 대한 개략도이며 각 분열은 식 (3)으로 계산된 일정한 시간 동안 식 (4)에 의해 계산된 임계 We 수 (Weber number)를 초과 시 분열이 발생한다. 여기서 r 은 입자의 반지름, U 는 분사되는 유체와 분위기 유체 사이의 상대속도를 의미한다. 또한 분열 이후 입자의 반지름은 식 (5)와 같이 변화 된다. 본 연구는 실험적인 방법으로 관측하기 어려운 Bag 과 Stripping 분열의 발생빈도 조사를 수치 해석을 이용하여 실시하였다. 분열종류의 빈도를 조사하기 위해 전체 입자 중 15,000 개의 입자를 Fig. 9 과 같이 추적하여 이 중 입자번호 250 간격으로 60 개 입자의 데이터를 100 μ s 의 시간간격에 따라 추출하였다. Fig. 10 은 60 개의 입자 중 Bag 과 Stripping 의 임계 We 수를 초과하는 조건을 만

Bag breakup	Stripping breakup
$t_{br} = \pi \sqrt{\frac{\rho_l r^3}{2\sigma}}$	$t_{br} = 20 \frac{r}{U} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}}$

(3)

Bag breakup	Stripping breakup
$W_{eg} = \frac{\rho_g U^2 r}{\sigma} > 6.0$	$W_{eg} > 0.5 \sqrt{Re_g}$
	$Re_g > \frac{2Ur}{v_g}$

(4)

$$\frac{dr}{dt} = \frac{-(r - r_{stable})}{t_{br}} \tag{5}$$

족하는 입자들의 빈도 결과와 그 조건을 일정시간 이상 만족시켜 실제 분열이 발생하는 결과를 수치 해석으로 도출한 그래프이다. 그래프에서 중공 도형은 분열이 발생할 수 있는 조건의 빈도를 나타내며 중실 도형은 일정 시간 동안 입자가 임계 We 수를 초과하여 Bag 및 Stripping 분열이 발생 빈도를 나타낸다. 분사가 시행된 이후 700 μ s 까지 분열은 계속 발생을 하지만 Bag 분열은 200 μ s, Stripping 분열은 300 μ s 일 때 최대가 되며 시간이 흐름에 따라 점차 줄어들어 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 이는 약 300 μ s 에서 분사된 연료에 의해 주위기체의 와류(Vortex)가 활발해져 연료와 주위기체 사이의 상대속도가 고속이 됨을 의미하며 고속의 상대속도 영향에 의해 Stripping 분열시간이 줄어들게 되어 발생빈도가 증가하는 것이다. 또한 100 μ s 에서는 연료와 주위기체의 상대속도가 낮아 Bag 분열이 발생하는 반면, Stripping 분열은 발생하지 않았다. 따라서 본 연구에서는

분열빈도의 계산으로 인해 100~200 μ s 에서 연료액적의 분열이 급격히 진행이 되며 주위기체가 디젤분무에 가장 영향을 주는 시간을 약 300 μ s 라 판단하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 분무시뮬레이션 해석에 사용되는 상용 분열모델 중 최적화된 분열모델을 선정하기 위하여 실험 및 수치해석의 분무거동특성을 비교 평가하였다. 비교를 통해 Reitz&Diwakar 모델이 본 연구에 가장 적합하다 판별하였고 Reitz&Diwakar 모델의 적용 이후 분무거동의 미시적 특성인 분열빈도에 관한 연구를 진행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 분열모델 변화에 따른 거시적인 분무거동특성 비교를 위하여 실험과 수치해석에 의한 분무선단도달거리를 비교하였고, 그 결과 네 개의 분열 모델 중 TAB 모델이 실험과 비교하여 최대오차가 300 μ s 에서 15.75mm 로 나타났으며, Reitz&Diwakar, CAB 및 ETAB 모델은 실험측정치와 근사한 값을 가졌다.

(2) 실험과 수치해석의 Local SMD 비교를 통해 본 연구에서 사용된 분열모델 중 SMD 감소경향이 가장 실험측정치와 근접한 Reitz&Diwakar 모델이 본 연구의 실험과 같은 조건에서 디젤분무의 수치적 재현에 가장 적합함을 확인하였다.

(3) 분사개시 후 Bag 과 Stripping 분열의 발생빈도 조사를 위해 임의의 입자를 추출하여 각 시간에 대하여 임계 We 수 및 분열조건에 대하여 해석을 진행하였고, 시간이 지남에 따라 분열빈도수치는 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 특히 분사 후 100 μ s 에서 Bag 분열이 발생하는 반면 Stripping 분열은 발생하지 않았다. 또한 분열 발생빈도의 최대 값은 Bag 분열의 경우 200 μ s 에서 68.97% 발생되었으며, Stripping 분열은 300 μ s 에서 62.16%로 계산되었다. 이것은 분무분열을 통한 액적 미립화가 100 μ s~200 μ s 사이에서 급격하게 진행되고, Stripping 분열이 가장 활발한 분사시작 후 시간 약 300 μ s 일 때 주위기체에 의한 영향을 가장 많이 받기 때문이라 판단하였다.

후 기

이 논문은 2013 년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된

것임(NRF-2013R1A1A2011842).

참고문헌

- (1) Lee, S. D. and Jung, S. H., 2013, "Comparison of Combustion Characteristics Between Esterified and Non-esterified Bio-diesel Oil on CRDI Diesel Engine with Turbocharger," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 37, No. 1, pp. 53~58.
- (2) Lee, S. H., Kim, H. S., Park, J. H. and Cho, P. B., 2012, "On-Road Investigation of PM Emissions According to Vehicle Fuels(Diesel, DME and Bio-Diesel)," *Transactions of KSAE*, Vol. 20, No. 3, pp. 88~97.
- (3) Jeong, K. S., Lee, D. G., Roh, H. G. and Lee, C. S., 2011, "Effect of Pilot Injection on Combustion and Exhaust Emissions Characteristics in a Biodiesel Fueled Diesel Engine," *Journal of the Korean Society of Combustion*, Vol. 16, No. 4, pp. 1~7.
- (4) Park, W. A., Lee, H. W. and Min, K. D., 2013, "Evaluation of Droplet Breakup Models and Application to the Diesel Engine Combustion Analysis," *Transactions of KSAE*, Vol. 21, No. 1, pp. 86~91.
- (5) Desantes, J. M., Payri, R., Salvador, F. J. and Gil, A., 2006, "Development and Validation of a Theoretical Model for Diesel Spray Penetration," *Fuel*, Vol. 85, Issues 7~8, pp. 910~917.
- (6) Park, S. H., Kim, H. J., Kim, S. H. and Lee, C. S., 2010, "Spray-Atomization Characteristics of Biodiesel Fuel with Multiple Injection," *Transactions of KSAE*, Vol. 18, No. 4, pp. 40~47.
- (7) Yeom, J. K., 2011, "Basic Experimental Study on the Application of Biofuel to a Diesel Engine," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 11, pp. 1163~1168.
- (8) Lee, S. R., 1994, "Internal Combustion Engine, BOSUNGKAK, Seoul, pp. 231~233.
- (9) Park, S. H., Youn, I. M., Lim, Y. S. and Lee, C. S., 2013, "Influence of the Mixture of Gasoline and Diesel Fuels on Droplet Atomization, Combustion and Exhaust Emission Characteristics in a Compression Ignition Engine," *ELSEVIER*, Vol. 106, pp. 392~401.
- (10) Liu, A. B. and Reitz, R. D., 1993, "Mechanisms of Air-assisted Liquid Atomization," *Atomization and Sprays*, Vol. 3, pp. 1~27.
- (11) Hossainpour, S. and Binesh, A. R., 2009, "Investigation of Fuel Spray Atomization in DI Heavy-Duty Diesel Engine and Comparison of Various Spray Breakup Models," *FUEL*, Vol. 88, pp. 799~805.