



# 연료 활성화를 위한 디젤 미립화 장치의 수치해석 연구

## Numerical Study of Diesel Atomization Device for Fuel Activation

최상인 · Jia Ping Feng · 서호석<sup>1)</sup> · 김상범<sup>2)</sup> · 조영민\*  
 경희대학교 환경응용과학과, <sup>1)</sup>(주)이지파워텍, <sup>2)</sup>한국생산기술연구원  
 (2017년 6월 15일 접수, 2017년 8월 5일 수정, 2017년 8월 9일 채택)

Sang In Choi, Jia Ping Feng, Ho Seok Seo<sup>1)</sup>, Sang Bum Kim<sup>2)</sup> and Young Min Jo\*

*Department of Applied Environmental Science, Kyung Hee University*

<sup>1)</sup>*EG Power Tech Co., Ltd*

<sup>2)</sup>*Green Process and Material R&D Gr., KITECH*

(Received 15 June 2017, revised 5 August 2017, accepted 9 August 2017)

### Abstract

Heavy diesel vehicles are one of major sources of urban fine dust in Korea and other developing countries. In this study, an auxiliary device assisting fuel atomization, which is called FAD (Fuel Activation Device), was closely reviewed through numerical simulation. As calculated, the diesel flow velocity passing across FAD increased up to 1.68 times, and it enhanced the cavitation effect which could improve the injected fuel atomization. Super cavitation phenomenon, which is the most important effect on nozzle injection, has occurred until the cavitation number ( $\sigma$ ) decreased from 1.15 to 1.09, and atomized droplets via a nozzle of which opening was 500  $\mu\text{m}$  distributed less than 200  $\mu\text{m}$  in sauter mean diameter (SMD).

**Key words** : Diesel, Fuel Activation Device, Cavitation, CFD, SMD

### 1. 서 론

대도시 대기오염의 주요 발생원인 대형자동차에 사용되는 디젤엔진은 100가지 이상의 가스상 오염물질들과 매연을 비롯한 직경 2.5  $\mu\text{m}$  이하의 미세입자를 다량 배출함으로써 국제암연구센터 (IARC; International Agency for Research on Cancer)에서는 디젤에서 배출되는 오염물질을 1급 발암물질로 구분하고 있다 (Park

*et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2016; IARC, 2012).

수도권에서 운행되는 경유자동차의 수는 매년 증가하고, 노후 경유자동차의 비율도 계속적으로 증가됨에 따라 대도시 대기오염물질의 주된 요인인 도로이동오염원의 배출을 가중시키고 있다 (Park *et al.*, 2010). 차량의 노후화가 진행됨에 따라 매연 발생량도 증가하는 바, 노후 부품교체뿐만 아니라 DPF (Diesel Particulate Filter) 장착 등의 개선사업이 포괄적으로 진행되고 있다. 그러나 DPF의 내부에 축적되는 스케일이나 입자상 물질로 인해 압력손실이 발생하여 주기적인 탈착 및 세척이 필요하다 (Chen *et al.*, 2011). 유사한 문제점들이

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-201-2485, E-mail : ymjo@khu.ac.kr

몽골, 베트남 등과 같은 아시아권 국가에서도 문제점으로 대두되고 있는 실정으로서 한국철도기술연구원은 유사한 기구적 장치를 몽골의 디젤열차에 장착하여 운행하면서 출력과 연료소비량 및 매연 발생량을 측정하는 실험을 진행하였다(Park *et al.*, 2017). 실험결과 동일한 출력을 유지하면서 PM<sub>10</sub>의 경우 58.0, 69.7, 34.2% (등속도시, 정지시, 가속시)의 감소량을 보여주었고, BC (Black Carbon)의 경우, 29.5, 52.8, 27.4% (등속도시, 정지시, 가속시) 감소하는 것을 확인하였다.

한편, 디젤연료 연소로부터 발생하는 오염물질을 최소화시키기 위하여 연소성능을 개선하기 위한 다양한 노력이 있었으며, 그 가운데 연료분사 노즐의 유동흐름 연구가 꾸준히 진행되고 있다(Suh and Lee, 2008). 노즐 내에서의 cavitation (공동화) 현상은 분사압력이 해당 유체의 고유한 증기압보다 낮아지면 액체와 기체(증기)로 이루어진 혼합물에서 기포가 형성되는 현상이다(Som *et al.*, 2010). 노즐 내부에 cavitation 효과로 생성된 기포들은 노즐 끝의 분사되는 지점에서 깨짐현상이 발생하여 연료의 미립화를 향상시키는 것으로 알려져 있다(Yin *et al.*, 2016). 이러한 현상을 이해하기 위해 실험 및 CFD (Computational Fluid Dynamic)를 이용한 수치해석 연구가 폭넓게 이루어지고 있다(Qiu *et al.*, 2016a, b; Sun *et al.*, 2015; Molina *et al.*, 2014). 최근 액체가 노즐의 오리피스스를 통과하면서 주변 공기를 흡입하는 물질전달 과정에 대한 유체역학적 시뮬레이션의 기술적 향상이 다양하게 이루어지면서 cavitation 효과를 보다 정확하게 해석할 수 있게 되었다(He *et al.*, 2016; Yin *et al.*, 2016).

따라서 본 연구는 기존의 실험적 선행연구가 현장 운행차량에 대한 주행성과 환경성을 평가하였는바, 이에 대한 작동원리와 이론적 근거를 심층적으로 추적해

보고자 수치해석적 기법을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 수치해석 상용코드는 CFD (Fluent, ANSYS Work Bench 17.2)로서 연료탱크에서 노즐을 거쳐 연소실로 분사되는 과정에 대한 유동현상과 액체연료의 cavitation 효과를 계산해보았다. Cavitation 효과는 액체연료의 유입압력에 따른 장치 내부에서의 흐름 상태와 유속변화 및 분포, 그리고 cavitation number ( $\sigma$ ) 개념을 도입하여 간접적으로 추정하였다.

## 2. 수치해석 설정조건

### 2.1 FAD 구조 및 원리

그림 1은 본 연구의 시험 대상인 FAD (PATENT-2015-0021792)의 외관과 수치해석에 사용한 형상을 3-D로 구현한 그림이다. 길이는 총 110 mm로서, 디젤 연료가 FAD 내부로 유입되면서 서로 다른 방향의 나선 홈을 지닌 두 개의 gear를 따라 흐른 뒤, 이동통로가 1/2로 감소된 small ring을 통과하게 된다. Small ring을 통과한 디젤 연료는 유입구와 같은 크기의 통로를 지나고 옆면에 6개의 구멍을 통해 배출구를 지낸 후, 노즐로 유입하게 된다. Park *et al.* (2017)은 lab-scale test를 통해 FAD를 통과한 디젤이 노즐을 통해 분사될 때 상대적으로 크기가 큰 4, 5, 7.5, 10  $\mu\text{m}$  액적 입자가 기존 대비 각각 21.0, 33.8, 76.1, 93.4% 감소하는 것을 확인하였다. 연료 미립화는 단위부피당 표면적을 증가시킴에 따라 연소효율을 증가시키고, 연비를 절약할 수 있는 효과를 발생시킬 뿐만 아니라 궁극적으로 연소시 발생하는 PM (Particulate matter)을 감소시키는 효과가 있다(Park *et al.*, 2016; Salvador *et al.*, 2016).

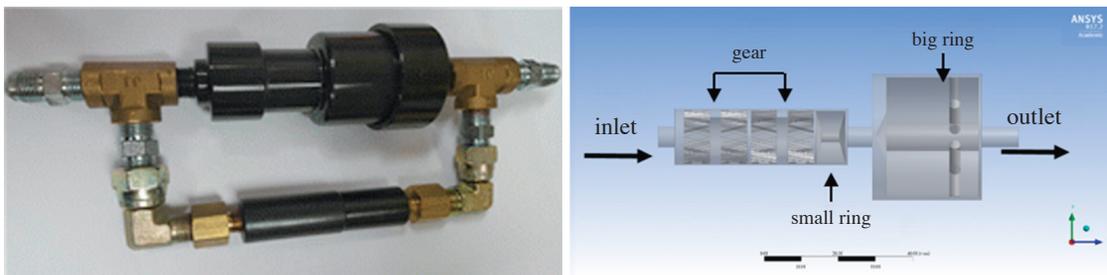


Fig. 1. Pictures of test FAD (left) and schematic structure in 3-D geometry (right).

**Table 1. Specification of diesel fuel used in this study.**

Liquid phase		Vapor phase		Saturation pressure (pa)
Density (kg/m <sup>3</sup> )	Dynamic viscosity (kg/m·s)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Dynamic viscosity (kg/m·s)	
830	3 × 10 <sup>-3</sup>	9.4	7 × 10 <sup>-6</sup>	1250

## 2.2 운전조건 및 시험변수

액상의 디젤연료가 FAD 내부로 유입되어 단계별 구조를 통과하는 동안의 유속변화를 관찰함으로써 FAD의 원리를 구체적으로 이해하고자 하였다. 수치해석에서 사용된 디젤연료는 실제 실험에서도 사용한 시중품으로서 밀도와 점도는 표 1과 같다. 본 연구에서 사용한 노즐은 길이가 2 mm이고, 노즐직경은 0.5 mm로 설정하였으며, 이는 실제 디젤엔진에서 사용중인 노즐 길이/직경의 비 (=4)와 일치하였다(Sou *et al.*, 2010). FAD를 거치면서 미립화된 액체 연료유는 일정한 부피의 연소실에 분사되는 유로를 형성하고 있었다. Inlet과 outlet의 설정조건은 pressure boundary condition을 적용하였고, 중력은 무시하였다. 장치에 대한 설명과 주요 운전조건은 표 2에 요약하였다.

## 3. 수치해석 계산

본 연구에서는 수치해석을 수행하는 데에 있어 CFD 프로그램 중 ANSYS사의 상용코드인 Fluent 17.2를 사용하였다. 모든 계산은 Fluent에 내장되어 있는 pressure-based solver를 사용하였다. 액상과 기체상이 항상 균일하게 혼합되는 mixture 모델을 사용하여 다상흐름을 파악하고자 하였다(Yin *et al.*, 2016).

### 3.1 LES (Large Eddy Simulation) modeling

수치해석에 있어서 LES 모델을 이용한 유체분사 노즐에 대한 유동해석연구는 다양하게 진행되어 왔다(Egerer *et al.*, 2014; Salvador *et al.*, 2013). 특히 Sou *et al.* (2014)은 연료를 분사하는 인젝터 내에서의 cavitation 형성 과정을 다른 모델 식과 함께 비교하며 고찰하기도 하였다. LES 모델은 다른 난류모델에 비해 계산이 간단하여 복잡한 형상을 처리하는 데 유리하고, 심한 난류조건 하에서도 다양한 정보를 획득할 수 있는 장점이 있다(Yin *et al.*, 2016; Apte *et al.*, 2003).

**Table 2. Operation condition for numerical setup.**

Parameter	Value
Injection pressure	~150 bar
Back pressure	1 bar, 30 bar
Nozzle length	2 mm
Nozzle diameter	0.5 mm
Cylinder length	100 mm
Cylinder diameter	20 mm

LES 모델에서 유동장 계산을 위한 지배 방정식은 식 (1)과 (2)에서와 같이 연속성 및 운동량 방정식을 기초로 구성된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

본 연구에서는 LES 모델 가운데 FAD와 노즐을 관통하며 흐르는 내부 유동을 해석하는 데 가장 적합한 Smagorinsky-Lilly 모델을 사용하였다(Yin *et al.*, 2016; Payri *et al.*, 2013). 식 (2)에서 SGS (subgrid-scale) stress는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

그리고, Smagorinsky-Lilly 모델에서 eddy viscosity의 계산은 다음의 접근방법을 따른다.

$$\mu_t = \rho L_s^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (5)$$

$$L_s = \min(\kappa d, C_s V^{1/3}) \quad (6)$$

식 (6)에서  $L_s$ 는 sub grid scales의 혼합비율이고,  $\kappa$ 는 von Karman constant,  $C_s$ 는 Smagorinsky 상수,  $V$ 는 전산 cell들의 부피 그리고  $d$ 는 가장 가까운 벽과의 거리

를 나타낸다.

### 3.2 Cavitation modeling

Cavitation 효과는 Schnerr and Sauer 모델 (Schnerr and Sauer, 2001)을 사용하여 계산하였다. Schnerr and Sauer 모델은 LES turbulence 모델과 호환이 잘될 뿐만 아니라, 복잡한 오리피스 조건에 적합하다 (He *et al.*, 2016; Yin *et al.*, 2016; Yuan *et al.*, 2001). 이 모델은 액체와 증기상의 물질 전달에 대한 정확한 표현을 도출하기 위해 다음의 two-phase 연속 방정식을 사용한다.

Vapor Transport Equation:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho_v) + \nabla \cdot (\alpha\rho_v \vec{V}) = R_e - R_c \quad (7)$$

$\rho_v$ 는 증기의 밀도를 나타내고,  $R_e$ 와  $R_c$ 는 bubble의 발생률과 bubble의 붕괴율을 나타낸다. 또한,  $\alpha$ 는 증기의 부피분율을 나타내고, 다음의 식 (8)에 의하여 도출해낸다.

$$\alpha = \frac{n \cdot 4\pi R_B^3 / 3}{1 + n \cdot 4\pi R_B^3 / 3} \quad (8)$$

Rayleigh Plesset 식을 기반으로 한 Schnerr and Sauer 모델 (Yuan *et al.*, 2001)은 cavitation 효과시 발생하는 기포의 발생과 붕괴를 식 (9)와 식 (10)을 이용해 계산하도록 구성되어 있다.

$$R_e = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{R_B \sqrt{3}} \sqrt{\frac{2}{\rho_l} (p_v - p)} \quad (p_v \geq p) \quad (9)$$

$$R_c = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{R_B \sqrt{3}} \sqrt{\frac{2}{\rho_l} (p - p_v)} \quad (p_v \leq p) \quad (10)$$

여기서  $p_v$ 와  $p$ 는 각각 포화증기압 및 정압을 나타내고,  $R_B$ 는 기포의 직경을 뜻한다.

### 3.3 Spray break up modeling

기체-액체 간의 계면 변동 분석을 기초로 한 Wave (Liu *et al.*, 1993; Reitz, 1987) 모델을 사용하여 secondary breakup 모델을 계산하였다. 가장 큰 성장 교란에서  $\omega_{max} = \Omega$ 와 파장  $\Lambda$ 는 다음 식과 같다.

$$\frac{\Lambda}{a} = 9.02 \frac{(1 + 0.45Z^{0.5})(1 + 0.47T^{0.7})}{(1 + 0.87We_2^{1.67})^{0.6}} \quad (11)$$

$$\Omega \left( \frac{\rho_1 a^3}{\sigma_l} \right)^{0.5} = \frac{0.34 + 0.38 We_2^{1.5}}{(1 + Z)(1 + 1.47T^{0.6})} \quad (12)$$

위의 매개 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$Z = \frac{We_2^{1.5}}{Re_1}, T = Z We_2^{0.5}, We_1 = \frac{\rho_1 U^2 a}{\sigma_l},$$

$$Re_1 = \frac{Ua}{\nu_1}, We_2 = \frac{\rho_2 U^2 a}{\sigma_l} \quad (13)$$

여기서  $Z$ 는 Ohnesorge number이고,  $T$ 는 Taylor number이다.  $We_1$ 과  $We_2$ 는 각각 액체와 가스의 Weber number를 뜻하고,  $Re_1$ 는 Reynolds number이다. 액적 크기가 파장  $\Lambda$ 에 비례한다고 가정하면, 다음의 결과는 액적의 직경을 계산하는 데 사용할 수 있다.

$$r = B_2 \pi \sigma_l / \rho_2 U^2 \quad (14)$$

여기서 상수  $B_2$ 는 1로 정의하였고, 큰 직경을 지닌 액적의 파괴 정도는 Wave 모델에서 새롭게 형성된 액적의 반경이 기존 액적에서 가장 빠르게 성장하는 불안정한 표면파의 파장에 비례한다고 가정하여 계산된다. 이때 사용하는 식은 다음과 같다.

$$r = B_o \Lambda \quad \text{if } B_o \Lambda \leq a \quad (15)$$

$$r = \min \left\{ \begin{array}{l} (3\pi a^2 U / 2\Omega)^{0.33} \\ (3a^2 \Lambda / 4)^{0.33} \end{array} \right\} \quad \text{if } B_o \Lambda > a \quad (16)$$

여기서  $B_o$ 는 상수이고, 그 값은 0.61이다.

### 3.4 Spray modeling

FAD 장착 유·무에 따라 노즐에서 분사되는 연료유 액적의 입경크기 (particle diameter)를 고찰하기 위하여 Euler-Lagrange method가 적용된 Discrete Phase Model (DPM)을 사용하여 연료와 공기의 상호작용을 계산하였다 (Bekdemir, 2008). Injection 모델의 경우, 실제 디젤 노즐에서 분사될 때와 가장 비슷한 solid cone 모델을 사용하였다 (Yin *et al.*, 2016). 본 연구에서는 선행연구를 기반으로 노즐에서 분사되는 액적의 초기 크기는 노즐 출구 부분의 직경과 동일하다고 가정하여 계산하는 Blob method를 적용하였다 (Yu *et al.*, 2017; Yin *et al.*, 2016; Huh and Gosman, 1991). 또한 O'rouke collision 모델 및 Dynamic drag 모델 (Schmidt and Rutland, 2000)을 사용하여 분사된 액적 입자들 간의 상호

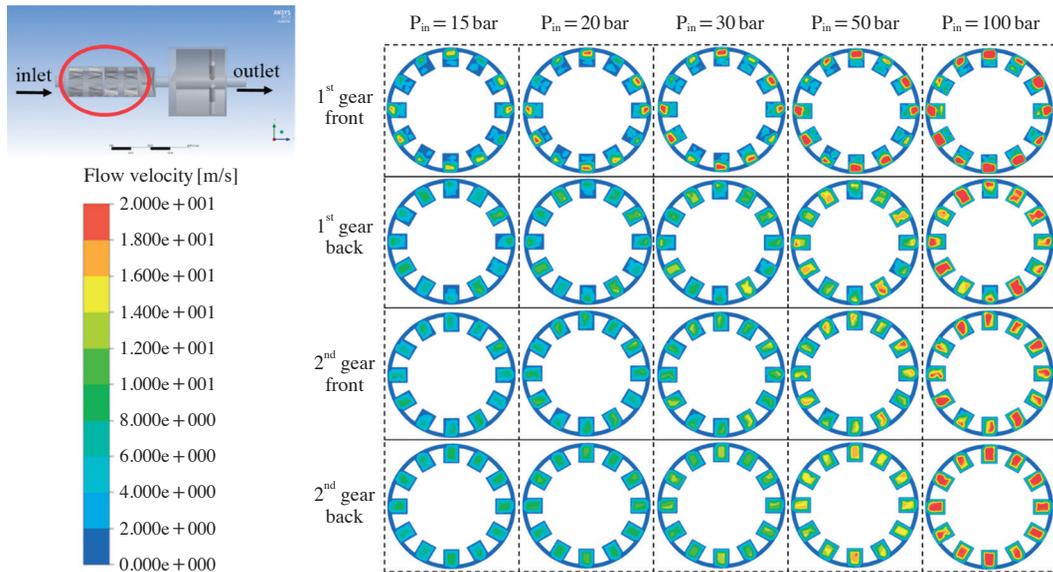


Fig. 2. Velocity profiles of diesel flow with the position of vortex flow path.

간섭현상을 해석하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 FAD 내에서의 유동 특성

디젤연료가 장치 내부를 흐를 때 FAD를 구성하는 각각의 요소들이 유체 유동에 끼치는 영향과 그 원리를 파악하기 위해 FAD를 두 부분으로 나누어 분석하였다. 전반 부분은 두 개의 기어와 작은 고리 (small ring)로 구성하였고, 후반 부분은 큰 고리 (big ring)로 구성하였다. 최종적으로 FAD와 노즐을 결합시켜 전체 lay-out을 구성하여 유입 전과 후를 비교함으로써 FAD에 의한 액체의 미립화 정도를 비교하였다.

#### 4.1.1 전반부 구조의 내부 유동해석

FAD 장치 내부에 구성되어 있는 기어 조합들은 액체분사 시의 미립화를 향상시키기 위한 pressure swirl nozzle의 형태와 유사한 구조이다 (Nonnenmacher and Piesche, 2000; Schmidt *et al.*, 1999). 즉, 오리피스 부분으로 액체가 유입되기 전에 비스듬한 나선형 기어 표면의 유로 구조가 유체를 회전흐름으로 변화시켜 줌으로써 분사각도를 증가시키고, 액적 크기를 감소시켜주

는 효과를 발생시킨다. 이때, 기어에 구성되어 있는 나선 형태의 미세한 유로가 서로 반대 방향으로 배치되어 있음으로써 유입되는 액체의 흐름 방향과 유속이 상승하게 된다. 한 개의 기어에는 두 세트의 12개의 나선 홈 형태의 유로가 있으므로, 총 네 곳의 유로에서 유속 분포를 관찰하였다.

그림 2는 유입압력에 따라 기어에 흐르는 디젤 연료의 유속변화를 관찰한 결과이다. 장치 입구에 가까운 순으로 1<sup>st</sup> gear front, 1<sup>st</sup> gear back, 2<sup>nd</sup> gear front, 2<sup>nd</sup> gear back으로 명명하였다. FAD 내부로 유입되는 연료는 1<sup>st</sup> gear front를 통과할 때, 12개의 나선 홈에서 서로 다른 속도 분포가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 15 bar의 압력으로 주입되는 유체는 1<sup>st</sup> gear front에서 2 m/s 이하에서부터 20 m/s까지 부분적으로 큰 차이를 보이면서 지나지만 2<sup>nd</sup> gear back 부분에서는 평균 6 m/s 이하의 일정한 유속으로 유출되는 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 현상은 100 bar의 유입압력에서는 다소 차별화가 되는 것으로 나타났다. 100 bar 이상의 고압에서는 driving force로 작용하는 유입압력이 짧은 거리의 기어 유로를 가로질러 지속적으로 유지하며, 유체의 유속을 증가시킬 수 있는 것으로 추정된다. 다만, 모든 압력에서 동일하게 관찰할 수 있었던 점은 2<sup>nd</sup> gear back을 통과할 때 연료유의 수직방향 유속이 고르

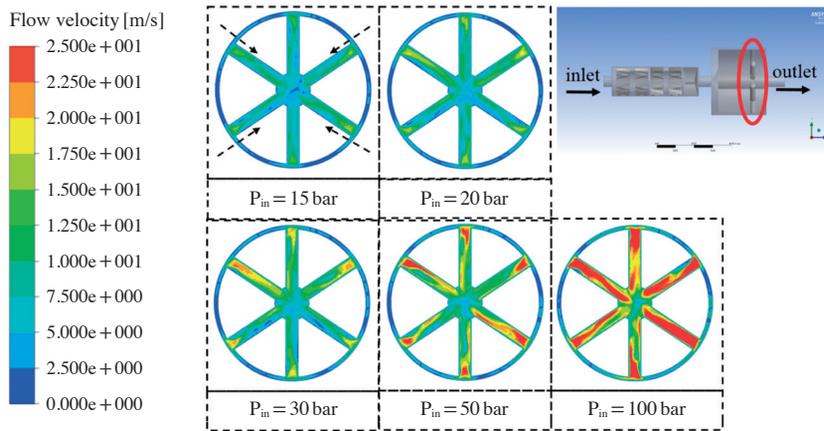


Fig. 3. Variation of diesel flow velocity according to position of big ring.

게 분포하는 결과이었다. 이러한 현상은 현재 FAD를 통과하는 디젤 유동의 흐름이 층류가 아닌 난류이기 때문에 이론적인 난류효과의 속도 분포와 일치하는 것으로 사료된다.

#### 4.1.2 후반부 구조에서의 내부 유동 특성

두 개의 기어와 작은 고리를 통과한 연료유는 노즐로 이동하기 전에 장치 후반에 구성되어 있는 큰 고리 부분을 거치도록 되어 있다. 대부분의 연료가 큰 고리를 통과할 때, 고리의 옆면에 위치한 2 mm 이하의 작은 틈으로 유입된 후, 동일한 직경의 방사형 유로를 거쳐 중앙 축방향 유로(직경 8 mm)에 모아진 후, 유출부(outlet)를 통해 노즐로 이송된다. 그림 3에서 자세히 살펴보면 20에서 50 bar 압력이 가해질 때 유로를 통과하면서 유속변화가 부분적으로 발생하지만, 상대적으로 낮은 압력인 15 bar와 매우 높은 100 bar 유입 압력에 대해서는 유속 분포가 거의 균일하게 나타났다. 이때, 유동의 흐름이 급격하게 변하기 때문에 처음 열린 틈으로 들어가는 부분에서 유속이 증가하는 곳이 보이지만, 난류효과로 인해 급격히 혼합되면서 다시 감소하는 현상이 보이고 전체적으로는 속도 분포가 균일해지는 현상을 확인할 수 있다. 이러한 장치 내 유로를 통한 이송 간의 유속 분포 변화는 연료유의 잦은 압력 변화로 인함이고, 궁극적으로는 액체 흐름의 내부에너지가 증가한다. 따라서 최종적으로 노즐을 거쳐 분사되는 액상의 연료유는 강한 에너지에 의해 초미립화 현상을 유발하는 것으로 판단된다.

#### 4.1.3 FAD 내부 유동 특성

그림 4는 압력에 따른 전체 FAD 구조를 가로지르는 단면에서의 속도 분포를 나타낸 결과이다. 모든 압력 조건에 대하여 FAD를 통과하면서 유속이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 연료유는 FAD의 복잡한 내부구조를 지나면서 팽창과 축소를 반복하고, 강한 추진압력의 부분적인 손실이 발생함에도 불구하고, 내부에너지 증가에 따라 장치 배출속도는 증가하는 것으로 판단된다.

FAD를 장착한 연료유 주입공정에서 FAD의 효과는 최대 1.68배까지 증가하는 유속이며, 노즐을 통하여 분사될 때 미립화(atomization) 현상이 크게 나타날 수 있다(Mohan *et al.*, 2017). 즉, 식 (17)의 Reynolds(Re) 값 정의에 따라 유속의 증가는 난류효과를 증가시키고, 식 (18)에서와 같이 궁극적으로는 cavitation number( $\sigma$ )를 감소시켜 동일한 유입압력 조건에서 상대적으로 낮은 압력에서부터 cavitation 효과가 발생할 수 있음을 의미한다. 여기서  $V_n$ 은 액체의 평균 속도,  $D_n$ 은 노즐의 직경,  $\mu_l$ 은 점도를 뜻한다.

$$Re = \frac{V_n \cdot D_n \rho_l}{\mu_l} \tag{17}$$

$$\sigma = \frac{P_{in} - P_v}{0.5 \cdot \rho_l \cdot V_n^2} \tag{18}$$

FAD를 가로지르는 유체에서 Re수의 변화를 축방향 유속과 압력에 따라 계산하여 표 3에 요약하였다. 고압에서 높게 나타나는 유속 현상은 유입압력이 100 bar 일

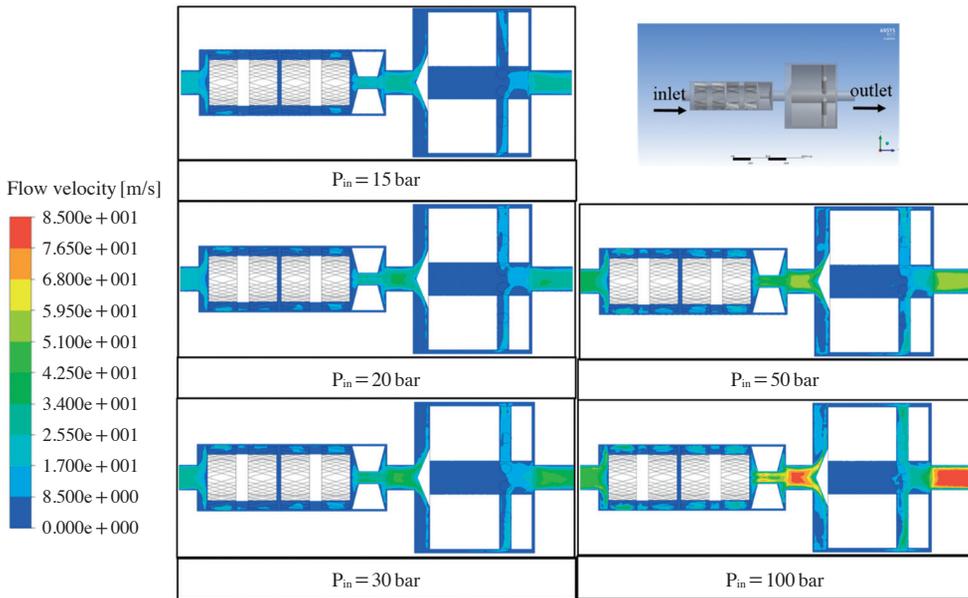


Fig. 4. Velocity profiles across FAD with inlet pressure.

때, 최대 1.68배까지 증가되는 것을 확인하였다. 가장 낮은 시험압력인 15 bar에서도 유출부 Re수는 42,750 으로서 강한 난류상태임으로 예측할 수 있다. 결국 FAD는 본 연구에서 설정한 시험압력(15~100 bar)의 범위에서 42.5%~68%의 난류항상을 유도하고 있음을 알 수 있다. 이러한 연료의 난류흐름은 분사노즐의 출구에서 cavitation 효과를 증가시키고, 연료 미립화에 잠재적으로 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

4.2 FAD에 의한 연료유 공동화 현상 고찰

연료유의 분사노즐에서 발생하는 공동화 현상(cavitation)은 연료의 미립화를 향상시키고, 그에 따라 연소실인 엔진실린더 내에서의 연료분사 효과를 증대시킨다(Wang et al., 2015). 본 연구에서는 수치해석을 통하여 연료의 액체상 및 증기상의 부피 비율로 정의되는 공동화지수( $\sigma$ )를 산출함으로써 cavitation 현상을 평가하는 방법을 선택하였다.

실제로 디젤 연소공정은 가솔린 엔진과는 달리 먼저 공기를 압축시킨 후, 연료와 혼합하고, 연소실로 분사하는 구조이다. 그러므로 본 연구에서 설정한 연료분사압의 조건에 대하여 연소실 내부에 가해지는 압력(back pressure)을 무시할 수 없다. 실제로, Qui et al.

Table 3. Re number for inlet and outlet of FAD depending on axial flow velocity.

Pressure (bar)	Inlet		Outlet	
	Velocity (m/s)	Re	Velocity (m/s)	Re
15	20	30,000	28	42,750
20	23	34,500	34	51,000
30	28	42,000	43	64,500
50	36	54,000	59	88,500
100	50	75,000	84	126,000

(2016a)는 수치해석을 통해 엔진실린더의 압력이 클수록 cavitation 현상이 감소되는 것을 규명하였다. 따라서 본 연구에서도 연소실 내부 압력을 30 bar로 설정한 후, 각각의 유입압력에 대하여 노즐에서 발생하는 cavitation 효과를 확인하였다.

Cavitation 효과는 크게 세 가지로 구분된다. 노즐로 유입되는 액체 연료유의 속도가 계속적으로 증가함에 따라 난류현상의 발생과 함께 노즐 유입구에서부터 cavitation 효과가 발생하는 단계(cavitation inception)가 존재한다. 이후 압력이 증가하면서 노즐 내부 유로에서 cavitation 영역이 확대되는 단계(developing cavitation)가 있고, cavitation 영역이 총 노즐 길이의 0.8~0.9 비율까지 차지하게 되는 초공동화 현상(super cavi-

tation)이 발생한다. 실제로 super cavitation 영역이 노즐 전체에서 형성되어 분사각도가 넓어지고 미립화가 향상되는 것을 실험한 결과도 보고되었다(Sou *et al.*, 2007). 그러나 계속적인 유입압력의 증가는 cavitation 영역이 노즐 출구까지 확장되면서 노즐 출구 주변에 존재하는 공기가 노즐로 역흡입되는 수력학적 난분사(hydraulic flip) 현상이 발생하여 분사각의 축소와 미립화가 저해된다는 주장도 있다(He *et al.*, 2015).

표 4와 5는 FAD의 사용 여부에 따른 노즐 내부에서 유체흐름의 Re수 및 cavitation number를 정리한 것이고, 그림 5와 6은 유입압력에 따라 노즐에서 발생하는 cavitation 효과를 계산한 결과이다. 연료유가 64 bar의 압력으로 유입되어 FAD를 통과할 때,  $\sigma=1.88$  이하에서부터 cavitation inception 현상을 보였고, 1.88~1.15로  $\sigma$ 가 감소하는 범위에서 cavitation이 확대되었으며  $\sigma=1.15$ 일 때 super cavitation 현상을 확인하였다. 그 이후  $\sigma$ 가 1.09까지 감소되었을 때 hydraulic flip 현상이 나타나는 것을 보였다. 그러나 FAD를 설치하지 않은 경우에는 cavitation inception이  $\sigma=1.32$ 일 때부터 발생하는 것이 보였고, 그 이후  $\sigma$ 가 감소함에 따라 조금씩 cavitation 영역이 증가되기는 하였으나, 디젤 증기의 부피분율이 FAD를 장착했을 경우와는 달리 매우 적은 것으로 확인되었다.

고찰결과, 연료유 공급유로에 FAD를 장착함으로써 보다 더 낮은 압력에서부터 cavitation 효과가 발생하는 것으로 판단할 수 있었다. 연료유의 증기상 부피분율

을 산출하는 계산식 (10)으로부터 FAD가 있을 경우, 노즐 내측 벽면에 단위부피당 발생하는 기포의 개수가 많은 것을 예상할 수 있다. 생성된 많은 기포들은 압력이 다시 높아짐에 따라 붕괴 현상을 일으키고, 이때 발생하는 에너지로 인해 노즐 내부의 연료유 액체 표면에서 다시 붕괴되면서 큰 액적 방울을 형성(primary breakup)하게 된다. 이는 추후 연료유의 미립화 효과를 향상시키는데 중요한 역할을 한다(Baumgarten *et al.*, 2002).

### 4.3 연료유 분사 특성

FAD를 거쳐 유입되는 액상의 연료유가 노즐을 통하여 분사될 때 발생하는 미립자의 크기를 DPM 모델을 적용하여 계산해보았다. DPM 모델에서 초기입력 조건은 사전에 진행하였던 노즐에서의 cavitation 수치해석 결과값을 기반으로 적용하였다. 즉, 노즐의 경우 직경 0.5 mm, 길이 2 mm인 실린더 형태로 설계하여 계산하였다.

#### 4.3.1 축 방향 평균 액적 직경 고찰

그림 7은 연료유가 노즐 끝에서 분사될 때, 진행하는 방향(z축)의 거리에 따른 액적 크기를 비교한 그래프이다. 초기 분사압력을 100 bar, 분사시간은 0.2 ms로 설정하였으며, 축으로부터 5 mm 간격으로 각각의 지점에 대한 액적의 평균직경(Sauter Mean diameter; SMD)을 개수 누적 농도의 값으로 비교하였다. 계산은 Blob

**Table 4. Flow condition in the nozzle with FAD.**

Injection pressure (bar)	Mean liquid velocity, $V_n$ (m/s)	Reynolds number, Re	Cavitation number, $\sigma$	Cavitation regime
50	69	8,625	2.50	No cavitation
64	78	9,750	1.88	Cavitation inception
75	118	14,750	1.30	Developing cavitation
100	145	18,125	1.15	Super cavitation
150	182	22,750	1.09	Hydraulic flip

**Table 5. Flow condition in the nozzle without FAD.**

Injection pressure (bar)	Mean liquid velocity, $V_n$ (m/s)	Reynolds number, Re	Cavitation number, $\sigma$	Cavitation regime
50	70	8,750	2.46	No cavitation
75	99	12,375	1.84	No cavitation
100	135	16,875	1.32	Cavitation inception
150	176	22,000	1.16	Developing cavitation

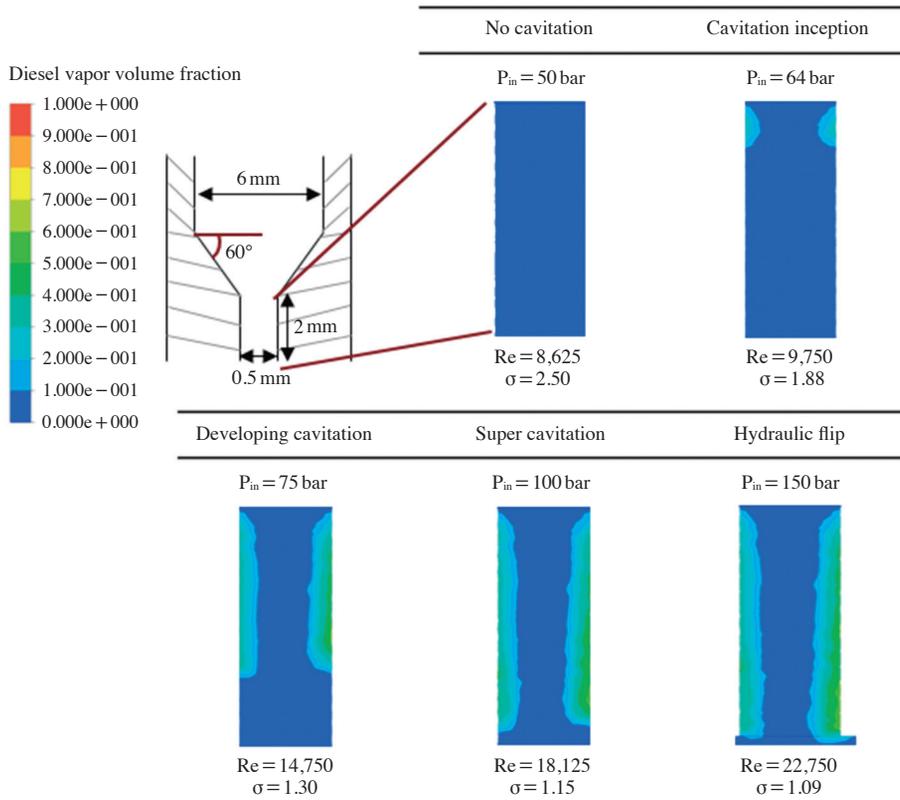


Fig. 5. Cavitation development steps in the nozzle with FAD.

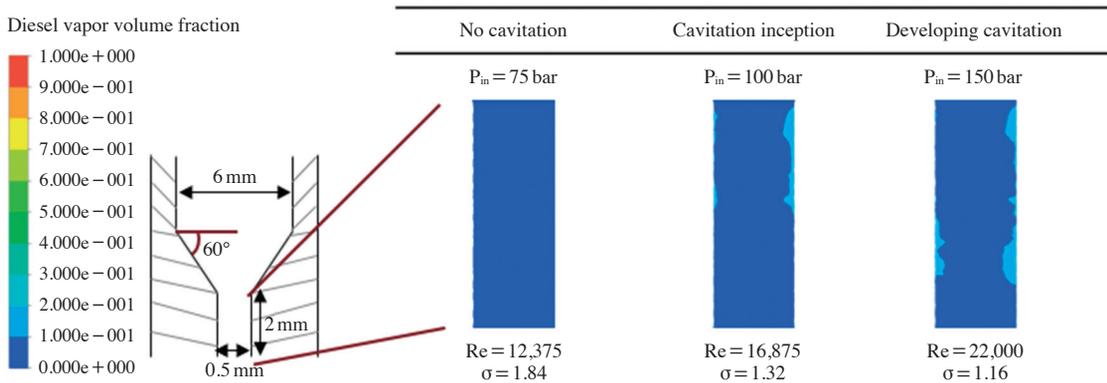


Fig. 6. Cavitation development steps in the nozzle without FAD.

method 방식을 적용하였기 때문에 최대 액적의 크기는 노즐의 직경과 동일한 500  $\mu\text{m}$  부근인 것을 확인할 수 있었다. 관찰 결과, 노즐 끝 분사지점으로부터 거리가

멀어질수록 최대 입자크기가 감소함을 보였다. 액적이 분사되는 챔버 내의 3차원적 공간의 한 단면에서의 입경크기 분포를 고찰함으로써 일정하게 정형화된 변화

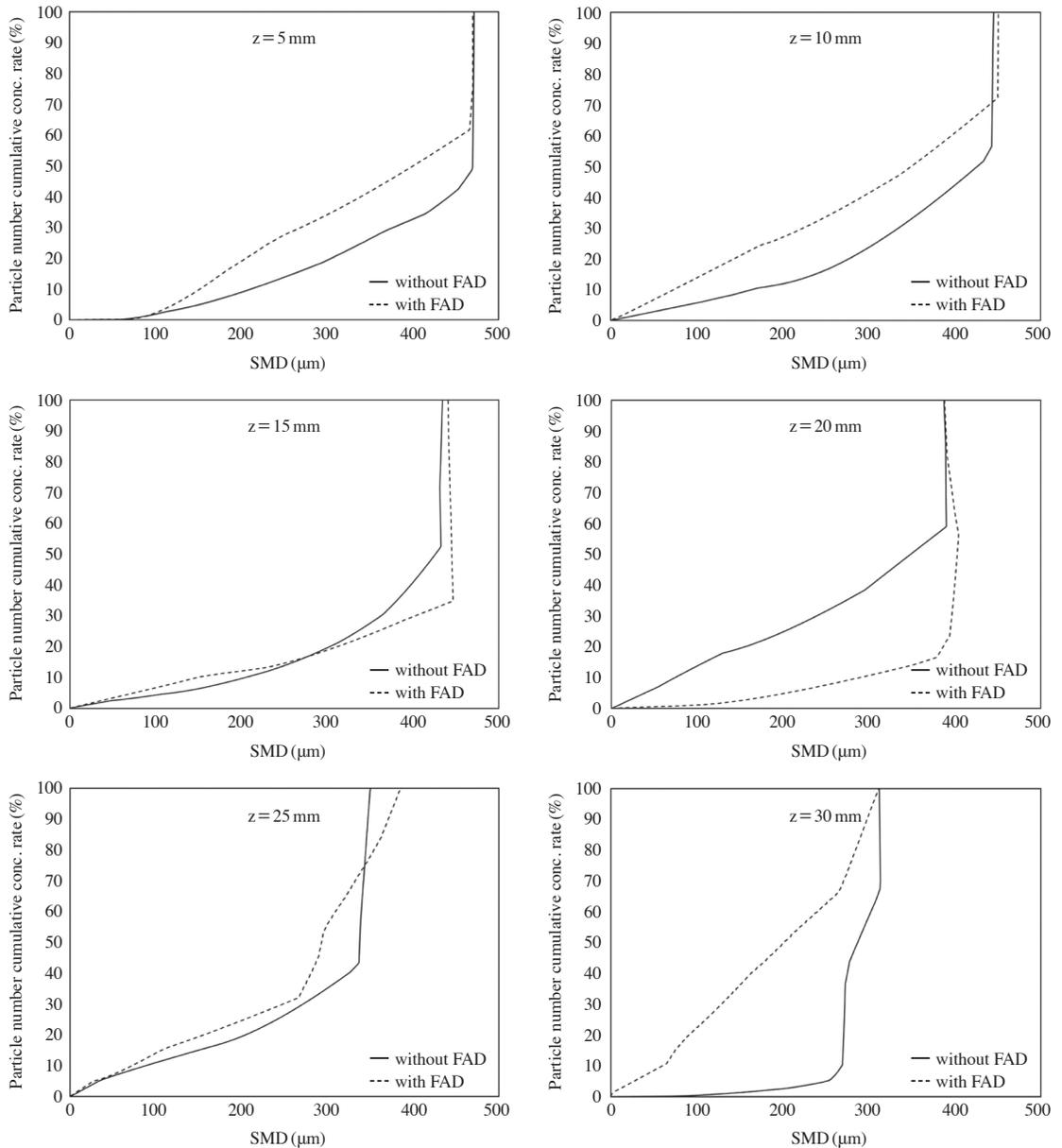


Fig. 7. SMD distribution according to axial distance at the injection with 100 bar.

을 보이지 않고, 예외적인 결과가 도출되기도 한다. 즉,  $z=20\text{ mm}$ 인 부근에서는 FAD에 의한 영향이 역으로 나타났지만, 대부분의 구간에서 FAD를 설치하였을 때가 상대적으로 작은 크기의 액적이 분포하는 것을 확인할 수 있었다.

분사된 후, 초기 단계 부분인 5 mm에서 개수 누적분율 50%가 되는 액적의 중간 크기는 FAD 사용 시 400  $\mu\text{m}$ , FAD를 사용하지 않을 경우는 470  $\mu\text{m}$ 로 확인되었고, 10 mm 지점은 FAD 사용 시 350  $\mu\text{m}$ , FAD를 사용하지 않을 경우는 430  $\mu\text{m}$ 로 관찰되었다. 축으로부터

15 mm 지점에서는 평균 액적 크기가 260  $\mu\text{m}$ 를 분기점으로 교차하고 있었다. 즉, FAD를 장착하였을 때, 더 많은 미세 액적의 함량이 많았으나 260  $\mu\text{m}$  이상의 부분에서는 오히려 FAD가 없을 때 액적이 미립화되고 있는 현상이 나타났다. 축 방향 거리, 20 mm 부근에서는 FAD를 사용하지 않을 경우가 더 미립화된 것처럼 보일 수가 있으나, 25 mm부터 더 작은 크기로 분사되는 것을 확인할 수 있었는데, 전체적으로 고찰해보면 FAD를 사용했을 때가 사용하지 않았던 경우보다 분사되는 액적이 작게 분포함으로써 궁극적으로는 연소실 내에서의 연료 연소효율을 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

최근 노후화된 경유차량의 배출가스를 개선하기 위하여 후단처리 방법이 아닌 연소실로 분사되는 경유연료가 노즐로 유입되기 전에 연료를 활성화시킴으로써 연소효율을 향상시키고자 하는 장치(FAD)가 개발되었다. 본 장치에 대한 현장 운행 시험결과, 일정한 유해배출가스 저감성능이 확인되었고, 본 연구에서는 FAD의 원리와 연료유 미립화 과정을 수치해석을 통하여 고찰하였다. 관찰 결과, 본 장치가 물리적인 방법으로 공급연료의 난류효과 및 cavitation 효과를 증대시킬 수 있음을 확인하였다.

- 1) 차량용 디젤연료의 미립화 성능을 향상시키기 위해 고안된 FAD를 장착 시, 연료의 분사유속은 유입압력이 100 bar일 때, 최대 1.68배까지 증가하여 노즐을 비롯한 유로 내에서의 난류효과가 증가하는 것을 확인하였다.
- 2) FAD를 통과하여 노즐로 유입될 때, 기존에 비해 cavitation 효과가 활발한 것으로 보였다. FAD를 사용하지 않을 경우,  $\sigma=1.32$ 일 때부터 효과가 나타났으나, FAD를 적용하면  $\sigma=1.88$ 일 때부터 cavitation inception 현상을 보였고, 1.88~1.15로 감소하기까지 developing cavitation을 보였으며,  $\sigma=1.15$ 일 때 super cavitation 현상이 발생하는 것을 확인하였다. 그 이후,  $\sigma=1.09$ 로 감소하면, hydraulic flip 현상이 발생하는 것을 확인하였다.

- 3) Spray injection model을 통해 분사되는 디젤 연료의 액적 크기를 비교하였을 때, 노즐로부터 20 mm 떨어진 지점을 제외하고는 FAD 사용 시 모든 영역에서 작은 크기의 액적 함유량이 높은 것을 확인하였고, 특히 <200  $\mu\text{m}$  이내의 액적 크기에서 많은 양의 미세 액적을 형성시킬 수 있는 것을 입증하였다. 이러한 원리를 통해 FAD를 장착한 디젤엔진에서 기존보다 연소효율이 증가할 수 있을 것으로 판단되었다.

## 감사의 글

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2016년도 산학연협력 기술개발사업(NO. 20160951)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

## Nomenclature

$B_0$	경험상수, =0.61
$B_2$	경험상수, =1
$C_s$	Smagorinsky 상수
$D_n$	노즐직경, mm
$k$	카르만 상수
$L_s$	세주 격자 규모 혼합비율
$P_{in}$	유입압력
$p_v$	포화증기압
$p$	정압
$R_c$	기포 발생률
$R_c$	기포 붕괴율
$Re_1$	레이놀즈 수
$R_B$	기포의 직경
$T$	테일러 수
$We_1$	액체의 웨버 수
$We_2$	기체의 웨버 수
$V_n$	액체의 평균속도
$V$	전산 격자들의 부피
$Z$	오네조르게 수

## Greeks letters

$\alpha$	증기의 부피분율
$\rho_v$	증기의 밀도, $\text{kg/m}^3$

- $\rho_l$  액체의 밀도,  $\text{kg/m}^3$   
 $\Omega$  가장 큰 성장 교란  
 $\Lambda$  파장  
 $\mu_l$  점도,  $\text{kg/m}\cdot\text{s}$   
 $\sigma$  캐비테이션 수  
 $\sigma_f$  액체의 표면장력

## References

- Apte, S.V., M. Gorokhovski, and P. Moin (2003) LES of atomizing spray with stochastic modeling of secondary breakup, *International Journal of Multiphase Flow*, 29, 1503-1522.
- Baumgarten, C., J. Stegeman, and G.P. Merker (2002) A NEW MODEL FOR CAVITATION INDUCED PRIMARY BREAK-UP OF DIESEL SPRAYS, *ILASS-Europe*, 9-11.
- Bekdemir, C. (2008) Numerical Modeling of Diesel Spray Formation and Combustion.
- Chen, K., K.S. Martirosyan, and D. Luss (2011) Transient temperature rise during regeneration of diesel particulate filter, *Chemical Engineering Journal*, 176-177, 144-150.
- Egerer, C.P., H. Stefan, J.S. Steffen, and A.A. Nikolaus (2014) Large-eddy simulation of turbulent cavitating flow in a micro channel, *Physics of Fluids*, 26, 085102.
- He, Z., C. Yuhang, L. Xianyin, W. Qian, and G. Genmiao (2016) Experimental visualization and LES investigations on cloud cavitation shedding in a rectangular nozzle orifice, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 108-116.
- He, Z., S. Zhuang, W. Qian, Z. Wenjun, and T. Xicheng (2015) Experimental study of cavitating flow inside vertical multi-hole nozzles with different length-diameter ratios using diesel and biodiesel, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 60, 252-262.
- Huh, K. and A. Gosman (1991) A phenomenological model of diesel spray atomization, In: *Proceedings of the international conference on multiphase flows*.
- IARC (2012) Diesel Engine Exhaust Carcinogenic, International Agency of Research on Cancer.
- Lee, Y.J., D.H. Kim, S.H. Kim, J.S. Kim, D.C. Shin, and Y.W. Lim (2016) Diesel Exhaust Particle Exposure and its Pulmonary Function Effects, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(5), 457-468.
- Liu, A.B., D. Mather, and R.D. Reitz (1993) Modeling the effects of drop drag and breakup on fuel sprays. DTIC Document.
- Mohan, B., W. Yang, W. Yu, and K.L. Tay (2017) Numerical analysis of spray characteristics of dimethyl ether and diethylether fuel, *Applied Energy*, 185, 1403-1410.
- Molina, S., F.J. Salvador, M. Carreres, and D. Jaramillo (2014) A computational investigation on the influence of the use of elliptical orifices on the inner flow and cavitation development in diesel injector nozzles, *Energy Conversion and Management*, 79, 114-127.
- Nonnenmacher, S. and M. Piesche (2000) Design of hollow cone pressure swirl nozzles to atomize Newtonian Fluids, *Chemical Engineering Science*, 55, 4339-4348.
- Park, D.S., T.J. Lee, Y.I. Lee, W.S. Jeong, S.B. Kwon, D.S. Kim, and K.Y. Lee (2017) Effect of a fuel activation device (FAD) on particulate matter and black carbon emissions from diesel locomotive engine, *Science of the Total Environment*, 575, 97-102.
- Park, J.H., J.C. Park, and S.J. Uhm (2010) Development of the method estimating sections occurring intensive  $\text{PM}_{10}$  in a subway tunnel, *Journal of Korean society of transportation*, 28(6), 121-131.
- Park, S.K., S.C. Woo, H.G. Kim, and K.Y. Lee (2016) The characteristics of spray using diesel water emulsified fuel in a diesel engine, *Applied Energy*, 176, 209-220.
- Payri, R., F.J. Salvador, J. Gimeno, and O. Venegas (2013) Study of cavitation phenomenon using different fuels in a transparent nozzle by hydraulic characterization and visualization, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 235-244.
- Qiu, T., X. Song, Y. Lei, H. Dai, C. Cao, H. Xu, and X. Feng (2016a) Effect of back pressure on nozzle inner flow in fuel injector, *Fuel*, 173, 79-89.
- Qiu, T., X. Song, Y. Lei, X. Liu, X. An, and M. Lai (2016b) Influence of inlet pressure on cavitation flow in diesel nozzle, *Applied Thermal Engineering*, 109, 364-372.
- Reitz, R.D. (1987) Modeling atomization processes in high-pressure vaporizing sprays, *Atomisation spray Technol*, 3, 309-337.
- Salvadora, F.J., J. Martínez-López, J.-V. Romero, and M.-D. Roselló (2013) Computational study of the cavitation phenomenon and its interaction with the turbu-

- lence developed in diesel injector nozzles by Large Eddy Simulation (LES), *Mathematical and Computer Modelling*, 57, 1656-1662.
- Salvadora, F.J., J.-V. Romero, M.-D. Roselló, and D. Jaramillo (2016) Numerical simulation of primary atomization in diesel spray at low injection pressure, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 291, 94-102.
- Schmidt, D., I. Nouar, P. Senecal, C.J. Rutland, J.K. Martin, R.D. Reitz, and J.A. Hoffman (1999) Pressure-Swirl Atomization in the Near Field, SAE Technical Paper, doi:10.4271/1999-01-0496.
- Schmidt, D.P. and C. Rutland (2000) A new droplet collision algorithm, *Journal of Computational Physics*, 164, 62-80.
- Schnerr, G.H. and J. Sauer (2001) Physical and numerical modeling of unsteady cavitation of unsteady cavitation dynamics, Fourth international conference on Multiphase Flow, New Orleans, USA, P.1.
- Som, S., S.K. Aggarwal, E.M. El-Hannouny, and D.E. Longman (2010) Investigation of Nozzle Flow and Cavitation Characteristics in a Diesel Injector, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 132, 042802.
- Sou, A., B. Biçer, and A. Tomiyama (2014) Numerical simulation of incipient cavitation flow in a nozzle of fuel injector, *Computers & Fluids*, 103, 42-48.
- Sou, A., S. Hosokawa, and A. Tomiyama (2007) Effects of cavitation in a nozzle on liquid jet atomization, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 3575-3582.
- Sou, A., S. Hosokawa, and A. Tomiyama (2010) Cavitation in nozzles of plain orifice atomizers with various length-to-diameter ratios, *Atomization and Sprays*, 20(6), 513-524.
- Suh, H.K. and C.S. Lee (2008) Effect of cavitation in nozzle orifice on the diesel fuel atomization characteristics, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2, 1001-1009.
- Sun, Z.Y., G.X. Li, C. Chen, Y.S. Yu, and G.X. Gao (2015) Numerical investigation on effects of nozzle's geometric parameters on the flow and the cavitation characteristics within injector's nozzle for a high-pressure common-rail DI diesel engine, *Energy Conversion and Management*, 89, 843-861.
- Wang, F., Z. He, J. Liu, and Q. Wang (2015) Diesel nozzle geometries on spray characteristics with a spray model coupled with nozzle cavitating flow, *International Journal of Automotive Technology*, 16(4), 539-549.
- Yin, B., S. Yu, H. Jia, and J. Yu (2016) Numerical research of diesel spray and atomization coupled cavitation by Large Eddy Simulation (LES) under high injection pressure, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 59, 1-9.
- Yu, S., B. Yin, H. Jia, and J. Yu (2017) Numerical research on micro diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure by Large Eddy Simulation (LES), *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 64, 129-136.
- Yuan, W., J. Sauer, and G.H. Schnerr (2001) Modeling and computation of unsteady cavitation flows in injection nozzles, *Mecanique Et Industries*, 2, 383-394.