

## 노즐내 난류유동 효과를 고려한 액주 분열 모델의 타당성 연구

김사엽\* · 한태훈\*\* · 김대식†

### On the Use of the Primary Breakup Model with Integration of Internal-nozzle Turbulence Impact

Sayop Kim, Taehoon Han, and Daesik Kim

**Key Words:** CFD(전산유체역학), Low-temperature combustion(저온연소), Primary breakup(1차분열), Internal-nozzle turbulence(노즐내 난류)

#### Abstract

Although the classic Kelvin-Helmholtz model of aerodynamically driven jet breakup(primary breakup) has been widely employed in engine CFD codes for the last three decades, the model is not generally predictive. This lack of predictive capability points to the likelihood of an incorrect physical basis for the model formulation. As such, there have been more recent spray-model development efforts that incorporate additional sources of jet instability and breakup, including nozzle-generated turbulence and cavitation but predictive capabilities have remained elusive. Meanwhile, it should be noted that modern combustors increasingly operate under low-temperature combustion(LTC) conditions, where ambient densities and aerodynamic forces are much lower than under classical operating conditions. Therefore, further consideration of physical model formulation is needed. The previous literature introduced a new primary atomization modeling approach premised on experimental measurements by the Faeth group, which demonstrate that breakup is governed by nozzle-generated turbulence under low ambient density conditions. In this new modeling approach, termed the KH-Faeth model, two different primary breakup models are combined to allow the hybrid breakup modeling approach, i.e. Kelvin-Helmholtz instability breakup mechanism and turbulence-induced breakup are competed via dominant breakup rate evaluation. In the current work, we implement this hybrid KH-Faeth model within the open-source CFD framework OpenFOAM and validate the model against detailed drop sizing measurements stemming from collaborative experiments between Georgia Tech and Argonne National Laboratory.

#### 기호설명

CFD : Computational Fluid Dynamics  
LTC : Low-Temperature Combustion  
USAXS : Ultra-Small Angle X-ray Scattering

SAMR : Scattering Absorption Measurement Ratio

#### 1. 서론

각종 산업 기반에서 활용되고 있는 연소기의 주요한 작동조건이 저온연소 기술(Low-Temperature Combustion: LTC)의 활용에 근거를 두고 있다. 특히, 배기가스 저감을 위한 압축 착화(Compression Ignition: CI)기술에 기반한 예혼합 압축 착화(Homogeneous Charge Compression Ignition: HCCI)<sup>(1)</sup> 및 부분 예혼합 압축 착화(Partially Premixed charge Compression Ignition: PPCI)<sup>(2)</sup>

(Received: 12 Jun 2024, Received in revised form: 9 Aug 2024, Accepted: 13 Aug 2024)

\*조지아공대(Georgia Institute of Technology)

\*\*수원대학교 산업 및 기계공학부 기계공학과

†책임저자, 회원, 강릉원주대학교 기계공학과

E-mail : dkim@gwnu.ac.kr

TEL : (033)760-8728 FAX : (033)760-8722

등은 더욱 강화된 저온연소 기술에 주요 바탕을 두고 있다. 한편, 이 것은 연료의 연소실내 분사 조건이 기존의 연소기의 작동조건에 대비되는 물리/화학적 특성의 변화를 요구하게 된다. 즉, 전통의 압축착화 연소기의 환경은 고온-고압의 분위기 조건을 조성하여 연소실내 분사된 액체상태의 연료가 분사와 동시에 분무 화염을 일으키게 되는 반면, 저온연소 조건의 경우 상대적으로 저온과 저압의 분위기 조건으로 인해 작동 유체의 연소실내 혼합체류시간이 길어지는 특성을 보이게 된다.

위와 같은 특성을 반영하여, Faeth<sup>(3)</sup>는 열물리적 평형(Thermophysical Equilibrium) 조건에 따라 연료 분무의 물질수송 모델을 국부적 균질유동(Locally Homogeneous Flow: LHF) 및 분리유동(Separated Flow: SF)으로 분류하여 이해할 수 있는 근거를 제시하였다. 즉, 국부적 균질유동 모델은 액체/기체의 서로 다른 두개의 상(phase)이 무시할 만큼 작은 혼합체류시간 특성으로 인해 열물리적 평형 조건에 도달하는 하나의 혼합유동 조건으로 이해할 수 있다. 반면, 분리유동 모델은 유한한 혼합체류시간을 허용함으로써 물리적 상변화의 특성이 연소실 스케일의 연료-산화제 혼합 조건의 영향을 받게 된다. 이와 같은 특성은 다수의 연구그룹에 의하여 이론 연구<sup>(3-5)</sup>, 실험<sup>(6,7)</sup> 혹은 수치적<sup>(8)</sup>으로 확인된 바가 있다.

위 연구의 결과에 기초하여, 저온연소 조건에 상응하는 분무의 특성은 액상과 기상 간의 질량/운동량/에너지 교환의 비평형 물리 법칙의 지배를 따른다. 따라서 인젝터 노즐로부터 유출된 연료 액주의 순차적인 분열 및 상변화 과정은 전체적인 연료 무화 특성에 지배적인 역할을 하게 된다.

가장 빈번하게 사용되는 액주의 순차 분열 과정을 모사하는 수치모델은 Kelvin-Helmholtz(KH) 파동 불안정성에 근거하며, KH 모델이라 불린다. KH 모델은 밀도가 다른 주변 기체장과 연료장간의 상경계면에서의 두 물질의 속도차에 의해 발생한 표면 불안정 파동을 모사하며, 공기역학적 작동 힘에 의해 발생하는 것으로 이해할 수 있다. 이러한 특성에 근거하여 기존의 고온, 고압 연소실 조건 및 고압 분무의 조건에서 뛰어난 예측 특성을 바탕으로 널리 활용되어왔다.

반면, Faeth 그룹에서 제시한 다른 연구들<sup>(9,10,11)</sup> 따르면, 저압 분무 및 저온/저압 조건의 연소실의 환경에서는 이 공기역학적 파동 불안정성에 의한 분열기제는 미약한 반면, 노즐내 내부 유동의 효과가 상대적으로 주요한 분열기제로 작용하게 된다. 따라서, 본 연구논문은 저온연소 조건에 상응하는 운전조건에 적합한 액주의

분열 거동을 반영하는 모델에 대한 평가를 제공한다. 동시에, 미국 아르곤국립연구소(Argonne National Laboratory: ANL)와 조지아공대(Georgia Tech: GT)에서 공동으로 수행한 X-레이 기술<sup>(12)</sup>을 활용한 진단기법을 활용하여 정량적인 모델의 정확도를 평가하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 KH-Faeth분열 모델

본 연구에서 평가하고자 하는 KH-Faeth 모델<sup>(12)</sup>은 복합분열모델로서, 공기역학적 파동 불안정성 기반의 KH 모델<sup>(13)</sup>과 함께 Faeth 그룹이 제시한 이론<sup>(9-11)</sup>에 근거한 노즐내 난류유동 특성을 스케일 분석한 내용을 담고있다. 즉, Faeth 그룹의 이론에 따르면, 노즐내 내부 난류유동이 분열 특성을 주도하는 액주분열시, 관성아영역(inertial subrange)의 길이 스케일이 발생하는 액적의 크기 스케일에 상응하는 것으로 보고하고 있다. 이것은 이전의 KH-ACT 모델<sup>(14)</sup>의 적분길이(integral length) 스케일 지배의 액적 크기 판별과는 구분되는 점이다. KH-ACT 복합 분열 모델에서 제시한 근거와 동일한 방법으로, KH-Faeth 복합 분열모델이 지배하는 분열율(breakup rate)은 특성길이( $L_{KH}$  및  $L_{Faeth}$ ) 및 특성타임 스케일( $\tau_{KH}$  및  $\tau_{Faeth}$ )을 공기역학적 분열 및 노즐 내부 난류유동 지배 분열 구간에 각각 특정하여 결정하며, 다음의 식과 같이 지배 분열율은 각 구간 분열의 특성 스케일을 비교하여 결정한다. KH 파동 불안정성 이론에 근거한  $L_{KH}$  및  $\tau_{KH}$ 는 Reitz<sup>(13)</sup>가 제시한 스케일분석에 따라 구하였다.

$$\frac{L_A}{\tau_A} = \max \left\{ \frac{L_{KH}}{\tau_{KH}}, \frac{L_{Faeth}}{\tau_{Faeth}} \right\} \quad (1)$$

$$L_{Faeth} = C_{sx} \Lambda \left( \frac{x}{\Lambda W e_{f\Lambda}^{1/2}} \right)^{2/3} \quad (2)$$

$$\tau_{Faeth} = C_{\tau f} \sqrt{\rho_f \frac{L_{Faeth}^3}{\sigma}} \quad (3)$$

여기서,  $x$ 는 노즐 출구로부터 액주의 축방향 거리를 나타내며, 노즐 유동의 특성 적분길이 스케일( $\Lambda$ )는 인젝터의 노즐 직경에 상응하는 것으로 가정하였다. 경험상수  $C_{sx}$ 와  $C_{\tau f}$ 는 길이와 시간 스케일에 해당하는 적용치를 나타내며, 각각 0.65 및 1.0을 적용하였다. 이 경험치는 KH-Faeth 모델을 처음 제시한 문헌<sup>(12)</sup>의 추천값에 근거한다.

2.2 라그랑지 입자 특성시간 스케일 적분

본 연구는 오픈소스 CFD 코드인 오픈폼(OpenFOAM)을 활용하여 제시된 분열 모델들을 적용하였다. 기존의 오픈폼 코드에서는 라그랑지 입자 모델의 질량/운동량/에너지 교환 과정을 시간적분할 때 오일러 공간의 대류 현상 시간 스케일에 근거한 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 기준을 적용한다. 이로 인해, 고속 분무의 경우 실험적으로 측정된 분무 발달 길이 등을 모사하는데 상당한 오차를 발생시키게 된다. 이 것은 지배적인 다상유동현상의 시간 스케일이 주변 유동장의 대류 시간 스케일 대비 매우 작기 때문이다. 이를 보정하기 위하여, 본 연구에서는 특성 시간 스케일을 라그랑지(Lagrange) 좌표계 입자의 증발/항력/열전달 현상에 재정의 하여 부차적인 시간적분 하는데 활용하였다. 각 현상에 특정하는 특성 시간 스케일을 순서대로 다음과 같다. 즉, 다음의 시간 스케일이 CFL 시간 스케일 보다 작을 경우, 부차적인 시간적분을 수행하였다.

$$\tau_{evap} = \frac{\rho_l D_p^2}{6DSh\rho_v \ln \frac{p-p_{v,\infty}}{p-p_{v,s}}} \quad (4)$$

$$\tau_{mom} = \frac{3\rho_l D_p}{4\rho_g C_D |u_i - u_{p,i}|} \quad (5)$$

$$\tau_{heat} = \frac{\rho_l D_p^2 c_p}{6k_g Nu} \quad (6)$$

2.3 해석 조건 및 수치해석 방법

본 연구의 해석 조건은 Engine Combustion Network (ECN)<sup>(15)</sup>에서 제시한 인젝터 구성을 활용하였다. 제시된 조건은 비공동유동(non-cavitating flow) 조건에 특화되었기에, 본 연구의 대상이 되는 공기역학적 분열 및

노즐 내부 난류유동 분열 조건을 시험하는데 적합하다. 한편, 이러한 특성에 근거하여 초기 액주의 직경은 인젝터의 노즐 직경과 동일하게 설정하였다. 시험 연료는 액상의 *n*-dodecane을 활용하였다. 증발장 및 비증발장을 포함한 상세 시험 조건은 Table 1에 제시되었다.

본 연구에서는, 오픈소스 CFD 소프트웨어인 OpenFOAM을 사용하였으며, 위에서 상술한 분무 입자의 시간적분과정이 개선된 코드를 사용하였다. 오일러 공간의 난류유동장은 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 이용하여 구현하였으며, Reynolds 응력항은 standard *k-ε* 모델을 이용하여 구하였다. 고속 분무의 형상을 수용할 수 있을 정도의 6각정면체(10 × 10 × 10 mm<sup>3</sup>) 도메인을 채택하였다. 기본 그리드의 스케일은 4 mm 육면체 정렬 격자에 기반을 두었으며, z-축을 따라 발달하는 분무 및 동반되는 난류유동의 혼합장을 정확하게 모사하기 위하여 4레벨의 Adaptive Mesh Refinement(AMR)을 적용하여 최소 격자의 길이 스케일은 0.25 mm에 설정하였다. 이러한 격자 크기의 구성은 사전의 격자의존성 시험으로부터 ECN Spray-A 비증발장 분무 길이 비교 테스트로 검증하였다.

2.4 해석 결과의 검증

본 연구에서 수행한 분무 수치해석 결과는 동일한 조건에서 수행된 X-레이 방사선 진단 기술로부터 얻어진 실험 데이터<sup>(16)</sup>와 비교하여 검증하였다. 이 진단 기법을 응용하여 분무발달 과정에서 발생하는 액적 무리들의 평균입경(Sauter Mean Diameter: SMD)를 측정하였다. 이 평균입경들은 다음의 두가지 기법을 통해 측정되었다. 먼저, 아르곤국립연구소에 의해 개발된 Ultra-Small Angle X-ray Scattering(USAXS) 기법과 Projected Mass Density(PMD) 측정을 통합하여 분무축(z-dir.)을 따라 평균입경을 측정할 수 있게 하였다<sup>(17)</sup>. 다음으로, 조지아공대에서는 Scattering Absorption Measurement Ratio (SAMR) 기법<sup>(10)</sup>을 응용하여 분무축의 횡방향 평균입경 분포를 측정할 수 있는 기술을 완성하였다. 본 연구에서는 위의 두 측정 기법을 통해 취득한 실험결과를 이용하여 수치해석 결과를 검증하였다.

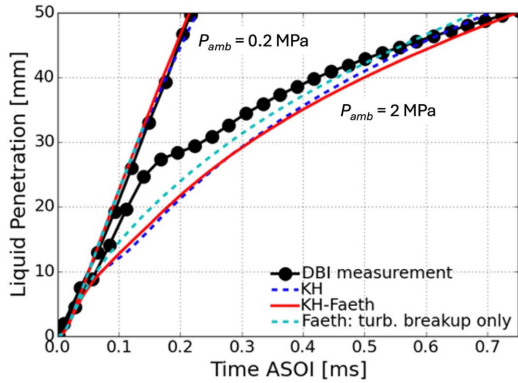
3. 결과 및 토의

3.1 ECN Spray-D분무 발달과정 검증

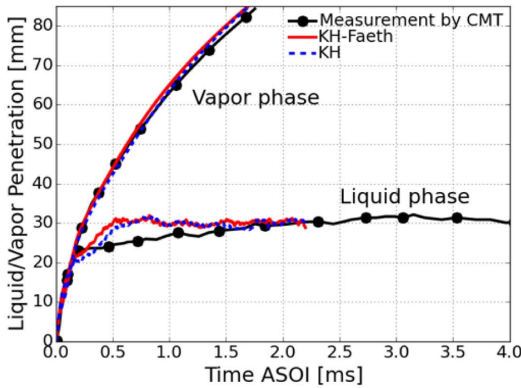
Figure 1에서는 ECN Spray-D 인젝터 구성에 대하여

Table 1 Specification of tested ECN injectors<sup>(15)</sup>

Injector type	Spray D
Nozzle diameter [μm]	186
Ambient gas temperature [K]	303 (non-vap.) 800 (vaporizing)
Ambient gas pressure [MPa]	0.1, 0.2, 2
Liquid-gas density ratio [-]	674, 337, 33.7
Ambient gas composition	N <sub>2</sub> 100%
Injection pressure [MPa]	50 / 150



(a) Liquid penetration at non-vaporizing condition



(b) Liquid/vapor penetration at vaporizing condition

Fig. 1 Liquid and vapor spray plume development under non-vaporizing and vaporizing conditions

중발장 및 비중발장에 대하여 분무의 액상 및 기상의 발달 과정 시뮬레이션 결과를 상응하는 실험결과에 비교하였다. 비중발장의 액상 분무의 발달과정은 조지아공대의 DBI계측결과에 기초하였으며, 중발장의 액상 및 연료증기의 발달과정은 ECN에서 제공된 CMT그룹<sup>(18)</sup>의 계측결과에 기초하였다. 대체로 KH모델과 KH-Faeth모델을 사용하였을 때 실험결과와 유사한 패턴을 얻을 수 있었다. 다만, 비중발장의 높은 주변압력의 경우( $P_{amb} = 2 \text{ MPa}$ ), 초기 분무 발달 과정에서 실험결과치에 못 미치는 분무발달길이를 예측하였다. 잠정적인 다양한 원인에 의한 결과일 수 있으나, 초기 분무 발달 과정인 점에 근거하여 액주분열 과정에서의 예측 부정확성에 기인하였을 가능성이 제시된다. 즉, 노즐내 내부 난류유동에 의한 효과가 실제로보다 미약하게 모델에 반영되었을 가능성이 있으며, 이 점은 Fig. 1(a)의 그림에서 초록색 점선에서 보이는 바와 같이 난류유동 효과만 적용하였

을 때 실험치에 더 근접하는 것으로 확인할 수 있다.

### 3.2 평균 액적 입경의 비교

본 장에서는 KH모델과 KH-Faeth모델을 이용하여 예측된 분무발달과정 중 액주분열 후 조성된 액적무리의 평균입경 예측 정확성을 USAXS계측결과에 근거하여 평가하였다. 2차 액적 분열의 과정은 무시하였으며, 분무발달 축을 따라 평균액적 입경의 분포를 재구성하여 Fig. 2에 도시하였다.

Figure 1에서 보여진 분무발달과정 예측상 두 모델의 유사성에도 불구하고, Fig. 2에서 보이는 것처럼 분무 입경의 예측에는 모델 간의 상당한 특이점이 관찰되었다. 대체로, KH모델 대비 KH-Faeth모델은 시험된 주변 압력조건 전반에 대하여 우수한 예측 정확성을 보이고 있다. 반면, KH모델은 특정 시험조건에 과대예측된 액적입경을 보이고 있는데, 이러한 부정확성은 낮은 주변 압력 및 낮은 분사압력의 조건에서 뚜렷하게 나타났다. 이러한 특성은 KH모델의 공기역학적 분무기체 특성조건에 기인할 수 있으며, 특히 낮은 압력 조건에서는 이러한 공기역학적 파동 불안정성은 미약한 효과를 나타내는 경향을 보인다. 결론적으로, 이러한 저온연소 운전 조건에 상응하는 분사조건에서는 공기역학적 분열기체 대비, 노즐내부에서 발생하는 난류유동에 의한 분열 메커니즘이 더 명확해지는 것으로 추측할 수 있으며, 이러한 이유로 KH-Faeth복합 분열 모델의 타당성을 평가할 수 있다.

한편, Fig. 2(c)와 (f)에서 보이는 것처럼, 높은 주변압력 조건에서 KH-Faeth모델의 경우 KH모델 대비 예측 정확성은 개선되었으나, 여전히 액주분열 효과는 과대 예측된 것으로 보인다. 이러한 높은 주변압력 조건에서 공기역학적 파동 불안정 효과의 분열 메커니즘이 더욱 빈번하게 효과를 나타내었을 것으로 예상되며, 이러한 논리에 근거하여, KH모델이 다소 액주분열 과정을 과대예측하여 더욱 미립화된 액적무리를 조성하는 것으로 이해할 수 있다.

Figure 3에 제시된 결과는 액적무리의 평균입경 예측에 미치는 분위기 압력의 효과와 이에 따른 분열모델의 타당성을 정량적으로 제시한다. 이를 위하여, 주변압력의 변화에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 여기서, 민감도 척도  $\bar{\sigma}_{P_{amb}}$  는 대기압 대비 시험된 주변압력에 대한 국부적 평균입경의 변화율을 나타낸다. 즉, 주변압력이 0.2 MPa인 시험조건인 경우 다음 식으로 민감도 척도가 결정된다.

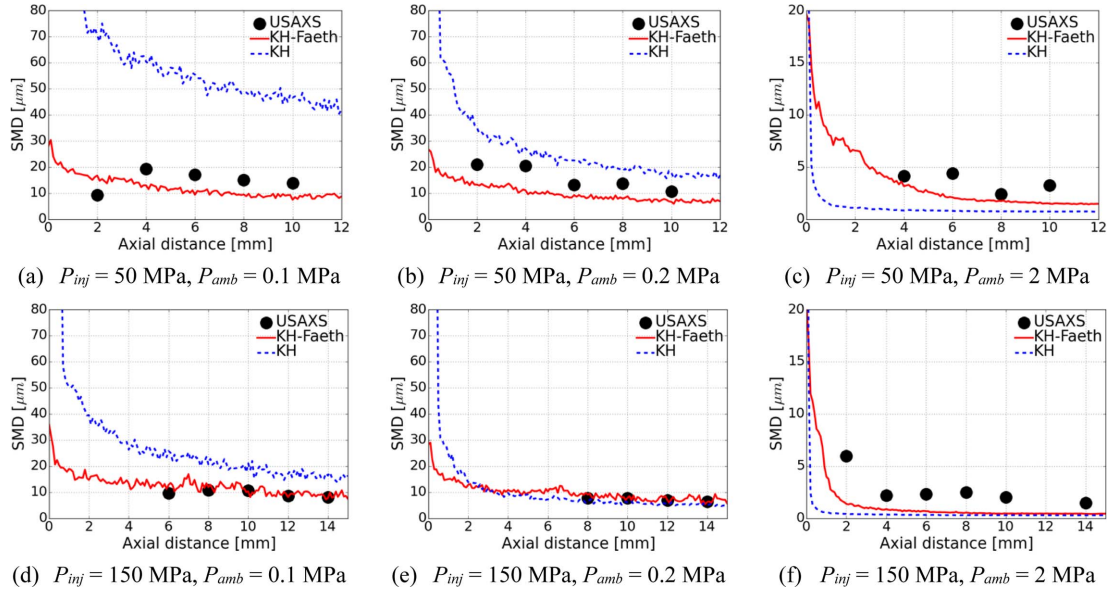


Fig. 2 Comparison between predicted and measured (USAXS) SMD distributions along the spray centerline

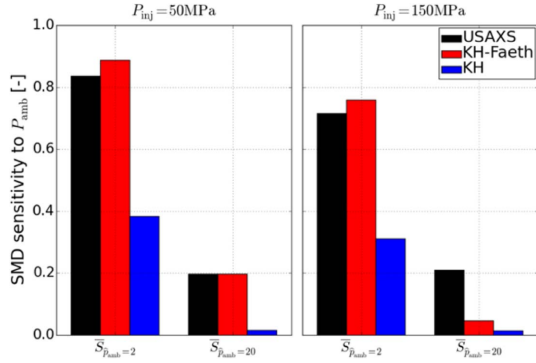


Fig. 3 Local SMD sensitivity to ambient pressure change (measured at 10 mm downstream of the injector)

$$\bar{S}_{P_{amb}=2} = \overline{SMD}_{P_{amb}=2bar} / \overline{SMD}_{P_{amb}=1bar} \quad (7)$$

한편, 이 민감도 분석은 노즐 출구로부터 10 mm 지점에서 수행하였다. 그림에서 제시된 것처럼 KH-Faeth 모델에 평균입경 민감도는 USAXS 측정결과와 민감도의 특성을 잘 따르는 것을 확인할 수 있다.

하지만, 높은 분위기 압력 조건(2 MPa)과 높은 분사 압력 조건(150 MPa)에서 KH-Faeth 모델의 평균입경 민감도는 USAXS 측정 결과 대비 매우 작은 수치를 나타낸다. 이것은, 앞서 언급한 것처럼, 이 조건에서는 모델의 공기역학적 분열 기제를 과도하게 예측한 결과로 판단된다.

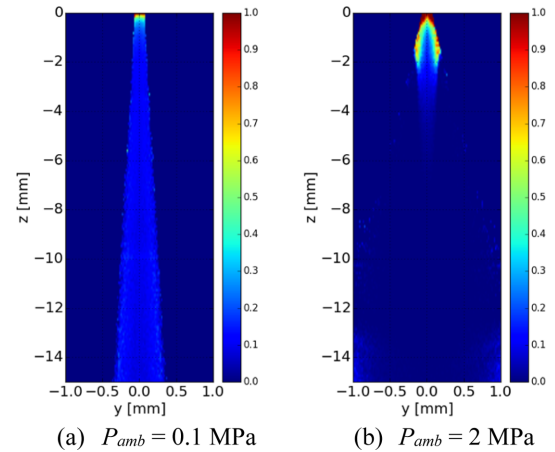


Fig. 4 Probability of finding turbulent breakup in KH-Faeth model

분위기 압력의 변화에 대한 특성을 더 정성적으로 평가하기 위하여 Fig. 4의 그림은 공기역학적 분열기제 대비 노즐 내부 난류유동에 의한 분열기제의 발생가능성의 분포를 나타낸다. 즉, 난류유동 분열의 확률밀도로 분석될 수 있으며, Eq. (1)에서 제시된 분열율 비(breakup rate ratio)로 정량화한 값을 시간 평균하였다. 따라서, “1”에 가까운 값을 보일 수록 난류유동에 의한 액주분열의 지배적 특성을 예측할 수 있다.

Figure 4보이는 결과와 같이, 대기압 조건의 분무 발달 구간에서 노즐내부의 난류유동 효과에 의한 액주분열

특성을 예측할 수 있다. 반면, 높은 분위기 압력 조건 (2 MPa)에서는 노즐 출구 근처에서 적은 확률로 난류 유동 분열 효과를 예측한다. 이것은 높은 분위기 압력의 조건에서도 유한한 정도의 난류유동 분열효과는 노즐 출구 근처에서 나타나기 때문이다. 하지만, 분무가 하단으로 발달하면서 연료 액주 표면에 가해지는 공기역학적 전단응력에 의한 분열효과가 따르게 되면서 더욱 지배적인 특성을 보이게 된다.

Figure 5의 그림들은 분무의 투사된 질량밀도 분포를 분무축 횡방향으로 묘사하였다. 실험결과는 아르곤극립 연구소의 X-ray방사선 진단으로부터 도출된 데이터이다. 본 시뮬레이션에서 도출된 결과물은 실험적으로 도출해낸 분무의 부피를 매우 정확하게 묘사하고 있다. 앞선, 분무 축방향 평균입경 분포에 있어서는 서로 다른 두 모델 간의 상이한 특성을 보인 반면, 횡방향 질량분포에 있어서는 특이 할만한 차이를 보이지 못하고 있다, 다만 이 결과는 질량의 분포를 나타낼 뿐이며, 액적 무리의 입경에 관한 정보를 담고 있지 않으므로, 투사된 질량분포의 결과는 다소 분열모델의 평균입경 예측 정확성을 분석하는데 한계를 지니고 있는 점을 유념할 필요가 있다.

Figure 6에서는 조지아공대의 연구자들이 개발한 SAMR 기법을 이용하여 계측한 평균입경의 분무 축 횡방향 분포를 보여주고 있다. 이 결과는 노즐의 출구로부터 10 mm의 지점에서 취득하였다. 분무 축방향 평균입경 분포를 다른 위의 분석에서는 2차 분열(Secondary breakup: 액적 분열)을 포함하지 않는 평균입경 분포 결과가 USAXS 실험 결과와 대체로 일치하는 특성을 보였다. 하지만, 횡방향 분포의 경우 다른 특이점을 확인할 수 있는데, 이것은 2차 액적분열의 결과에 좌우되는 결과이다. 이 시험에서, 2차 분열과정은 주변 유동장에 의해 액적에 작용하는 공기역학적 수직항력을 고려하는 Rayleigh-Taylor (RT) 모델<sup>(19)</sup>을 이용하여 계산하였다.

Figure 6(a)와 (b)의 그림에서 실선은 RT모델을 포함한 결과이며, 점선은 RT모델을 포함하지 않은 결과이다. 결과에서 보이듯이, 2차 분열 효과를 고려하지 않은 결과는 실험적으로 구현된 횡방향 평균입경 분포와 큰 차이를 두고 있다. 이 점은 액주 분열 (1차 분열) 이후 2차 분열에 의한 액적 무리의 분산효과가 매우 중요하게 나타남을 확인하는 결과이다. 특히, 2차 분열효과는 실선의 결과와 점선의 결과의 차이에서 보듯이, 분무 축방향(0 mm)에 의미있는 결과를 기여하지 못하고 있다. 한편, Fig. 6(c)에서 보는 바와 같이 분위기 압력이 매우 높은 경우 RT모델을 이용한 2차 분열의 경우 실험적으

로 구해진 수치대비 매우 과소예측 되는 경향을 확인할 수 있었다. 이 점은 1차 액주 분열 못지 않게 2차 분열의 과대예측이 영향을 주었을 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는, 새로 제시된 노즐내 난류유동 효과를 고려한 1차 분열(액주분열) 모델을 기존의 공기역학적 파동불안성 이론에 근거한 모델과 결합하였다. 다음에 주요 내용을 요약하였다.

(1) 새롭게 제시된 복합분열모델인 KH-Faeth모델은 KH파동불안성에 근거한 공기역학적 분열 모델과, Faeth 그룹에서 제시한 관성아영역(inertial subrange)의 길이 스케일에 근거한 분열을 공식을 결합하였다. 따라서, 액주분열 과정의 공기역학 및 내부 난류유동 간의 서로 다른 영향을 수치해석 결과에 반영할 수 있게 되었다.

(2) KH모델과 KH-Faeth모델을 적용한 시뮬레이션 결과는 거시적인 분무발달 특성, 즉, 액체분무의 발달길이 및 연료증기의 발달길이 등은 정확하게 묘사할 수 있는 반면, 상세한 분열과의 결과물인 분무 액적의 평균입경 분포예측에는 상당한 차이를 보였으며, 대체로 분무의 축방향 평균입경 분포에는 KH-Faeth모델이 전반적인 예측 우수성을 확보할 수 있었다.

(3) 특히, 저온연소 운전 조건에 상응하는 낮은 분위기 압력 및 낮은 분사압력 조건에서 KH-Faeth모델의 우수성을 확인할 수 있었으며, 이것은 노즐내 내부 난류 유동의 효과가 유효한 영역에서 적절한 물리적 특성을 묘사할 수 있었기 때문인 것으로 사료된다.

(4) 다만, 분무의 횡방향 특성은 액주분열 복합 모델의 특성에 덜 지배받는 경향을 보였다. 이것은 횡방향 평균입경 분포가 2차 액적 분열의 특성에 더욱 지배적인 영향을 받기 때문인 것으로 이해할 수 있다. 따라서, Rayleigh-Taylor(RT) 모델 등의 적절한 2차 분열 모델의 선택으로 개선될 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00270080, 수소터빈 연소기 시험평가 기술개발, 기여율 100%).

## 참고문헌

- (1) S. Kook, C. Bae, P. Miles, D. Choi and L. Pickett, "The influence of charge dilution and injection timing on low-temperature diesel combustion and emissions", SAE Paper 2005-01-3837, 2005.
- (2) W. Hardy and R. D. Reitz, "A study of the effects of high EGR, high equivalence ratio, and mixing time on emissions levels in a heavy-duty diesel engine for PCCI combustion", SAE Paper 2006-01-0026, 2006.
- (3) G. M. Faeth, "Evaporation and combustion of physics", Progress in Energy and Combustion Science, 1983, pp. 1~766.
- (4) D. L. Siebers, "Scaling liquid-phase fuel penetration in diesel sprays based on mixing-limited vaporization", SAE Paper 1999-01-0528, 1999.
- (5) J. D. Nabers, "Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays", SAE Paper 960034, 1996.
- (6) W. Mayer and A. Schik, "Atomization and breakup of cryogenic propellants under high-pressure subcritical and supercritical conditions", J. Prop. and Power, Vol. 14, No. 5, 1998.
- (7) W. Mayer and J. Smith, "Fundamentals of supercritical mixing and combustion of cryogenic propellants", Prog. Astronautics and Aeronautics, 2004, pp. 339~367.
- (8) R. Dahms and J. Oefelein, "On the transition between two-phase and single-phase interface dynamics in multicomponent fluids at supercritical pressures", Phy. Fluids, Vol. 25, 2013, p. 092103.
- (9) P.-K. Wu, L.-K. Tseng and G. Faeth, "Primary breakup in Gas/Liquid mixing layers for turbulent liquids", Atomization and Sprays, Vol. 2, 1992, pp. 295~317.
- (10) P.-K. Wu and F. Faeth, "Aerodynamic effects on primary breakup of turbulent liquids", Atomization and Sprays, Vol. 3, 1993, pp. 265~289.
- (11) P.-K. Wu, R. Miranda and G. Faeth, "Effects of initial flow conditions on primary breakup of non-turbulent and turbulent round liquid jets", Atomization and Sprays, Vol. 5, 1995, pp. 175~196.
- (12) G. Magnotti, "Modeling the influence of nozzle-generated turbulence on diesel sprays", PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, 2017.
- (13) R. D. Reitz, "Mechanisms of atomization processes in high-pressure vaporizing sprays", Atomization and Sprays, Vol. 3, 1987, pp. 309~337.
- (14) S. Som and S. Aggarwal, "Effects of primary breakup modeling on spray and combustion characteristics of compression ignition engines", Combustion and Flame, Vol. 157, 2010, pp. 1179~1193.
- (15) Engine Combustion Network (ECN), "Engine combustion network experimental data archive", <http://www.sandia.gov/ECN>
- (16) S. Kim, Advancing turbulent spray and combustion models for compression ignition engine simulations, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, 2019.
- (17) A. Kastengren, J. Ilavsky, J. Viera, R. Payri, D. Duke, A. Swantek, F. Tiloco, N. Sovis and C. Powell, "Measurements of droplet size in shear-driven atomization using ultra-small angle X-ray scattering", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 92, pp. 131~139, 2017.
- (18) J. Gimeno, G. Bracho, P. Marti-Aldaravi and J. Peraza, "Experimental study of the injection conditions influence over n-dodecane and diesel sprays with two ECN Single-Hole Nozzles. Part-I: Inert Atmosphere", Energy Conversion and Management, Vol. 126, 2016, pp. 1146~1156.
- (19) J. C. Beale and R. D. Reitz, "Modeling spray atomization with the kelvin-helmholtz/rayleigh-taylor hybrid model", Atomization and Sprays, Vol. 9, No. 6, 1999, pp. 623~650.